

令和3年度 修士論文

打音・微動解析による建築物の検査技術の
高度化に関する研究

広島大学大学院先進理工系科学研究科
先進理工系科学専攻
建築材料学研究室

M200026 北村 成寿

目次

序論	1
<u>研究対象について</u>	2
<u>論文の構成について</u>	3
第 I 編	4
第 II 編	6

第 I 編

第 1 章 序論	10
----------------	----

10

1.2 既往研究と研究背景、及び研究目的	11
1.2.1 常時微動計測を用いた研究の現状	11
1.2.2 現状用いられている解析指標	12
1.2.3 モニタリングの現状	13
1.3 大きな研究目的	14
1.4 第I編の構成	15

第 2 章 振動計測システム及び解析指標の概要	19
-------------------------------	----

2.1 本研究で使用する無線加速度センサ	19
2.2 本研究で使用する解析ソフト	20
2.3 本章で使用する加速度の解析手法	21

第3章 広島旧陸軍被覆支蔽倉庫の常時微動計測 25

3.1	はじめに.....	25
3.2	建物概要.....	27
3.3	計測目的と計測概要.....	29
3.3.1	計測目的.....	29
3.3.2	計測概要.....	30
3.4	固有振動数の確認.....	31
3.4.1	各階床+小屋梁の4点計測による建物としての振動性状の把握.....	32
3.4.2	1号棟側廊部の振動性状の把握.....	51
3.5	床壁一体性の確認.....	57
3.5.1	1号棟3階の床壁一体性及び南北壁のはらみ具合の把握.....	58
3.6	壁の剥離確認.....	63
3.6.1	1F東壁柱の剥離確認.....	64
3.6.2	1号棟1階北壁の内側モルタルと外側レンガの一体性の確認.....	77
3.7	不同沈下の確認.....	83
3.7.1	南北での比較.....	84
3.7.2	東西での比較.....	91
3.7.3	1F北側平面での比較.....	98
3.8	不同沈下の建物への影響の確認.....	105
3.8.1	不同沈下による各柱の振動性状の比較.....	107
3.8.2	不同沈下による各階壁の振動性状の比較.....	113
3.9	陸軍被服支蔽倉庫の常時微動計測の総括.....	127

第4章 石垣市新市役所の常時微動計測 132

4.1	はじめに.....	132
4.2	建物概要及び計測概要.....	133
4.2.1	建物概要.....	133
4.2.2	計測目的.....	134
4.3	固有振動数の確認.....	136
4.3.1	FFT 及びリサージュを用いた考察.....	137
4.3.2	伝達関数を用いた考察.....	145
4.3.3	相対変位を用いた考察.....	149
4.3.4	固有振動数の確認でのまとめ.....	151
4.4	屋上(RF)を使った建物全体の動きの確認.....	152
4.4.1	伝達関数を用いた考察.....	153
4.4.2	リサージュを用いた考察.....	156
4.4.3	RF を用いた建物全体の動きの確認 まとめ.....	159
4.5	2F を使った建物東西半分ずつの動きの確認.....	160
4.5.1	西半分(黄色)での考察.....	161
4.5.2	東側半分(青)を用いた考察.....	167
4.5.3	2F 西、東での計測のまとめ.....	172
4.6	本計測でのまとめ.....	173

第5章 トールゲートの振動モニタリング 175

5.1	はじめに.....	175
5.2	過去のトールゲートの被害状況.....	176
5.3	現在の診断手法.....	176
5.4	計測概要と研究目的.....	177
5.4.1	計測概要.....	177
5.4.2	研究目的.....	179
5.5	PC 鋼線破断実験を用いた柱頭-屋根スラブ破断の検討.....	180
5.5.1	計測箇所概要.....	180
5.5.2	破断実験概要.....	180
5.5.3	柱脚(N1)を基準とした伝達関数での考察.....	181
5.5.4	柱頭(N2)を基準とした伝達関数での考察.....	184
5.5.5	クロススペクトルを用いた検討.....	187
5.5.6	角度波形を用いた検討.....	193
5.5.7	PC 鋼線破断実験 まとめ.....	199
5.6	千葉地震を用いた検討.....	200
5.6.1	計測箇所概要.....	200
5.6.2	FFT を用いた固有振動数での考察.....	201
5.6.3	柱脚(N1)を基準とした伝達関数での考察.....	207
5.6.4	クロススペクトルを用いた検討.....	210
5.6.5	角度波形を用いた検討.....	216
5.6.6	層間変形角を用いた検討.....	217
5.6.7	リサーチを用いた検討.....	218
5.6.8	千葉地震 まとめ.....	219

第6章 結論 221

第Ⅱ編

第1章 序論 229

1.1	はじめに.....	229
1.2	研究背景.....	230
1.2.1	建築におけるリフォーム市場の変遷.....	230
1.2.2	住宅における劣化要因及び劣化箇所.....	231
1.2.3	外装タイルの剥離事故.....	232
1.2.4	建築物の検査技術の現状.....	233
1.3	本研究の目的.....	235
1.4	第Ⅱ編の構成.....	236

第2章 振動計測システム及び解析指標の概要..... 240

2.1	本研究で使用するセンサ.....	240
2.1.1	無線加速度センサ.....	240
2.1.2	マイクロフォン.....	241
2.2	本研究で使用するソフト.....	242
2.2.1	本研究で使用する録音ソフト.....	242
2.2.2	本研究で使用する解析ソフト.....	243
2.3	本章で使用する解析指標.....	244

第3章 サイディング外壁を対象とした打診検査技術の向上

.....	246
3.1 はじめに.....	246
3.2 サイディングボードについて.....	247
3.2.1 戸建て建築における外壁材料の使用率.....	247
3.2.2 サイディング材の劣化要因と劣化事象.....	248
3.2.3 サイディング材の主な点検項目, 方法.....	249
3.3 研究目的.....	250
3.4 試験体、計測概要及び解析概要.....	252
3.4.1 試験体及び計測概要.....	252
3.4.2 解析概要.....	252
3.5 各 case, センサの貼り方, 打診箇所の番号の説明.....	253
3.6 各指標の有効性の確認.....	254
3.6.1 減衰率の有効性確認.....	254
3.6.2 卓越振動数の有効性確認.....	256
3.7 センサ配置の合理化.....	258
3.7.1 貼り方1の考察.....	259
3.7.2 貼り方2の考察.....	270
3.7.3 センサ配置のまとめ.....	280
3.8 加振位置の合理化.....	281
3.8.1 ピーク振動数を用いた劣化検知.....	282
3.8.2 減衰率(指数)を用いた劣化検知.....	289
3.8.3 加振位置の合理化 まとめ.....	296
3.9 サイディングの劣化検知手法の高度化 まとめ.....	297

第4章 打音解析による仕上げモルタルの剥離検知手法の

高度化 299

4.1	はじめに.....	299
4.2	部分熱負荷試験を用いた実験.....	300
4.2.1	試験体概要.....	300
4.2.2	ピーク周波数を用いた剥離評価.....	301
4.2.3	図心周波数を用いた剥離評価.....	303
4.2.4	減衰率を用いた剥離評価.....	307
4.2.5	打診から最大音圧までの時間を用いた考察.....	312
4.2.6	熱負荷実験のまとめ.....	317
4.3	模擬剥離試験体を用いた実験.....	318
4.3.1	試験体概要.....	318
4.3.2	ピーク周波数を用いた剥離評価.....	320
4.3.3	図心周波数を用いた剥離評価.....	322
4.3.4	減衰率を用いた剥離評価.....	323
4.3.5	打診から最大音圧までの時間を用いた考察.....	325
4.3.6	擬剥離実験のまとめ.....	326
4.4	仕上げモルタルのまとめ.....	327

第 5 章 打音解析による外装タイルの剥離検知手法の高度化	328
.....	328
5.1 はじめに.....	328
5.2 既往論文.....	329
5.2.1 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究 ¹⁾	329
5.2.2 ウェーブレット解析を用いた建築用外装タイルの定量的剥離診断 ²⁾	332
5.3 模擬剥離試験体を用いた実験.....	335
5.3.1 試験体概要.....	335
5.3.2 打診方法及び録音方法.....	337
5.3.3 ピーク周波数を用いた検討.....	338
5.3.4 関心周波数を用いた検討.....	342
5.3.5 減衰率を用いた剥離評価.....	343
5.3.6 減衰率の変化.....	346
5.3.7 加振からピークまでの時間を用いた検討.....	348
5.3.8 4410Hz 以下の振動を用いた検討.....	351
5.4 本章のまとめ.....	357
第 6 章 結論	359

序論

近年、日本の建築業界では「スクラップアンドビルド」の考え方から、「ストックアンドリノベーション」という既存資源を有効活用する考え方に移行している。

建築物は竣工後、日射や雨などの天候要因や地盤の微動による長期の日常要因に加え、台風や地震などの短期の非日常要因によって、時間が経つほど各部材に劣化が蓄積されていく。この劣化が建物の許容性能を超えたとき、各部材にひび割れや剥離が起こり、建物の倒壊、最悪の場合、建物の使用者や近隣住民への人的な被害を起こしてしまう。そのため、建物の長期利用を目指す「ストックアンドリノベーション」型の社会の形成には、被害が起こる前に劣化を検知し、適切な箇所を適切に補修する技術の革新がなくてはならない。その中でも自分は検査技術に興味と疑問を持ち、研究を行うこととした。

近年検査技術の高度化に関する研究は多く行われている。しかし、実際の現場では未だに検査員が足場を組み、一つ一つ目視や打診を行うというコスト面でも、正確性の面でも疑問が残る方法で検査が行われている。本研究では建築業界に起こっている考え方の変化と、現実とのギャップを埋めるべく、他分野では積極的に用いられているセンサを用い、検査技術の高度化、次に実用化に向けた検査内容に即した指標を定めることによる定量的な検査手法の提案を行うことに主眼をおいている。最終的には本研究をドローンなどの検査器械に発展させ、効率やコストの面の問題を解決することを目指して実施した。

研究対象について

建物の劣化は多岐にわたっている。構造物としての大きく見た時の耐震性能の低下や、各部材で見た時の各部での劣化である。この中で、構造物としてみた劣化と、図1に示すように多くの劣化が起り、相談件数が最も多い外壁という二つを対象とし、それぞれの検査方法や劣化検知技術の高度化を目指し、研究を行うこととした。

主な不具合事象	割合**13	件数	当該事象が多くみられる部位
雨漏り	17.4%	546	屋根、外壁
はがれ	13.9%	436	外壁、屋根
ひび割れ	11.2%	351	外壁、屋根
汚れ	10.5%	330	外壁、床
性能不足**11	10.0%	315	外壁、屋根
変形	7.9%	249	床、外壁
きず	5.3%	165	外壁、床、開口部・建具
漏水	4.6%	144	給水・給湯配管、設備機器
排水不良	3.4%	108	排水配管
作動不良	3.0%	93	開口部・建具、設備機器
傾斜	2.1%	67	床
腐食・腐朽	1.6%	50	屋根、外壁、柱
床鳴り	1.1%	36	床
異常音	1.0%	30	屋根、排水配管、開口部・建具
異臭	0.7%	21	内装
結露	0.4%	13	開口部・建具
沈下	0.3%	8	床、地盤
遮音不良	0.2%	6	開口部・建具

**13 リフォーム相談のうち戸建住宅において不具合が生じている相談3,135件に対する割合

図1 相談が多い不具合事象と不具合部位

論文の構成について

本論文は、二つの検査対象から成り立っている。そのため、全体をまとめる大きな目的を「建築におけるセンサを用いた検査技術の高度化及び実用化に向けた各種劣化に有効な解析指標の確立」とし、「建物全体の構造診断技術の高度化」、「建築外装材の剥離検知技術の高度化」という二部構成で成り立っている。

「建物全体の構造診断技術の高度化」については、広島県で今多くの議論を生んでいる陸軍被服支蔽倉庫の計測、石垣市に新しく作られた石垣市役所の計測、解析結果をもとにした「定期検査技術」の向上と、高速道路の料金所であるトールゲートを対象とした「長期モニタリング技術」の向上の2つの視点から研究を行った。

「建築外装材の剥離検知技術の高度化」に関しては、戸建住宅での使用率が高い「乾式のサイディング材」を対象とした検査技術の向上と、ビルやマンションで多く使われている「湿式の仕上げモルタルやタイル」を対象とした剥離検知技術の高度化という2つの視点で研究を行った。

論文構成については図2において、まとめる。

全体の序論

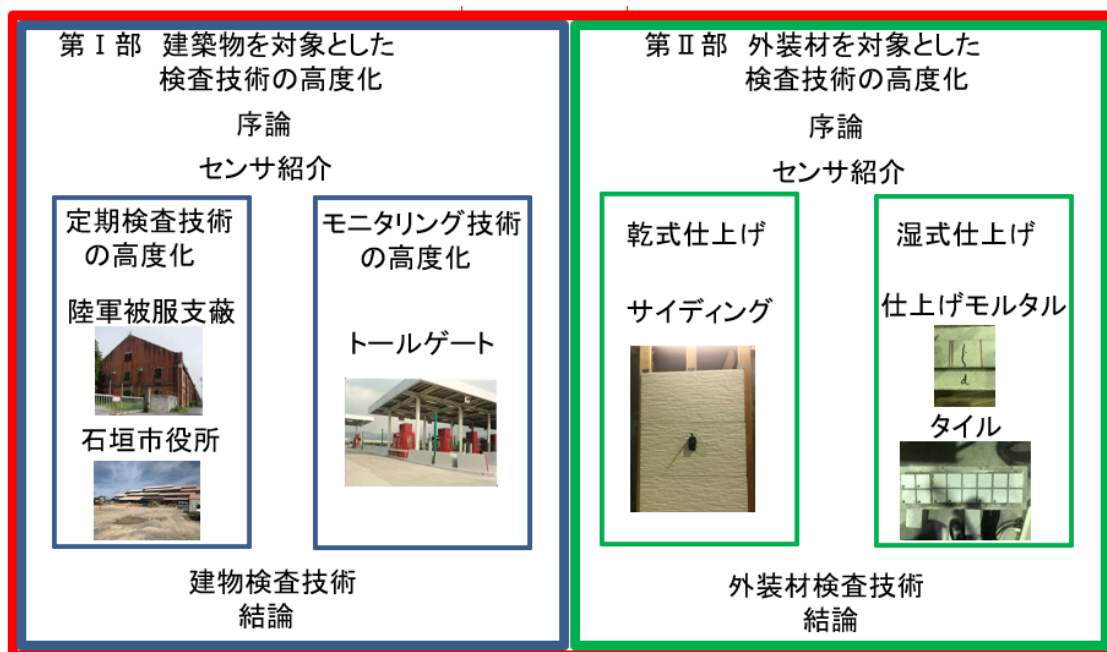


図2 本論文の構成

また、それぞれの部の詳細を、図入りの目次として示す。用いた解析指標も載せているため、各部でどのようなことを検討しているのか把握していただけると幸いです。

第 I 編

第 I 部 建築物を対象とした
検査技術の高度化

○定期検査技術の高度化

陸軍被服支蔽 石垣市役所



○モニタリング技術の高度化

トールゲート



検査対象

陸軍被服支蔽

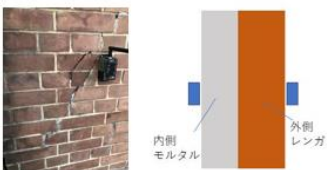


○検討事項

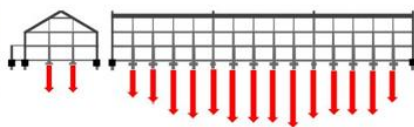
○固有振動数の確認

○床壁一体性の確認

○壁の剥離確認



○地盤沈下の確認



○地盤沈下の建物への影響



検討指標

- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 位相
- ・ リサージ

- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 相対変位
- ・ 位相
- ・ リサージ
- ・ 打音解析

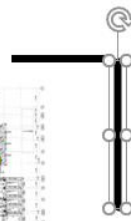
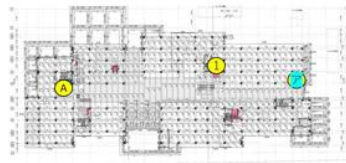
- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 相対変位
- ・ クロススペクトル
- ・ リサージ

検査対象

○検討事項

検討指標

○固有振動数の確認



- FFT
- 伝達関数
- 絶対変位

石垣市役所

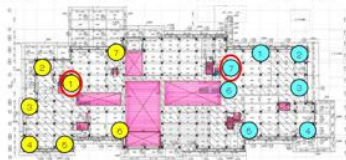


○RFを使った
建物全体の動きの確認



- 伝達関数
- リサージュ

○2Fを使った
東西半分ずつの動きの確認



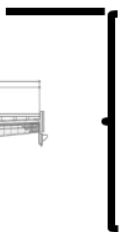
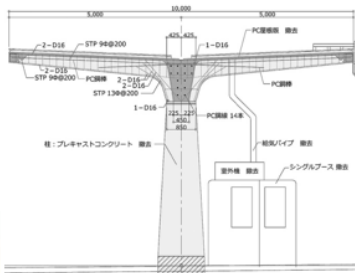
- 伝達関数
- リサージュ

検査対象

○検討事項

検討指標

○屋根のPC鋼線
破断実験



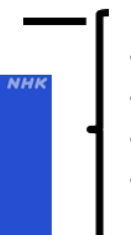
- 伝達関数(柱元基準)
- 伝達関数(柱頭基準)
- クロススペクトル
- 角度波形

トールゲート



<https://www.konoike.co.jp/et/detail/002287.html>

○千葉地震による
劣化確認



- 伝達関数(柱元基準)
- 伝達関数(柱頭基準)
- クロススペクトル
- 角度波形

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20211007/k10013297051000.html>

第Ⅱ編

第Ⅱ部 外装材を対象とした検査技術の高度化

○乾式仕上げ
サイディング



○湿式仕上げ
仕上げモルタル タイル

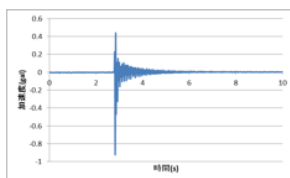


検査対象

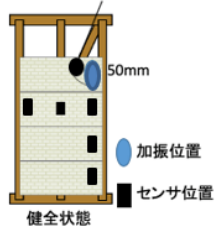
○検討事項

検討指標

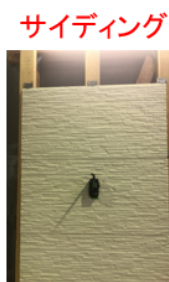
○減衰率の有効性確認



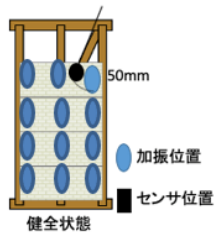
○センサは位置箇所の合理化



- FFT
- 減衰率



○打診位置の合理化



- FFT
- 減衰率

検査対象

○検討事項

検討指標

仕上げモルタル

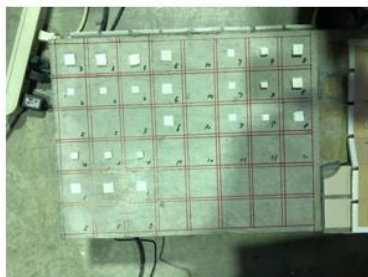


○熱負荷実験による劣化進行確認



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間

○模擬剥離試験体を用いた剥離診断技術の向上



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間

検査対象

○検討事項

検討指標

タイル



○模擬剥離試験体を用いた剥離診断技術の向上



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間
- 4410HZ以下の波の割合

参考文献

- 1) 住宅相談統計年報 2021

https://www.chord.or.jp/documents/tokei/pdf/soudan_web2021.p

第 I 編

第1章 序論

1.1 はじめに

第I編は各種建物の状態検査およびモニタリング技術について検討した結果をまとめている。

研究の主目的として常時微動計測の有効性を示すこととしている。従来振動計測は地震波をトリガーとするものが多い。しかし、地震をトリガーとすると、「地震はいつ起きるかわからず、検査を行えるタイミングが選べない。」という欠点が生まれる。

そこで本研究では常時微動に着目した。常時微動を用いると上記二つの問題を改善でき、検査者の予定で建物の現地計測が行え、大地震発生前に劣化箇所を補修して備えることができる。

近年では各構造の計測を常時微動を用いている研究も多くなってきた。しかし、まだ一般的に使われる域には至っていないため、本研究では常時微動計測を用いて計測、解析を行い、その有用性を示すこととし、特に注力した点は常時微動計測の可能性を広げることを目標とした。

また、各状態を適切にとらえることができる解析指標を選別することも目的としている。これに関しては、モニタリング指標の選別や、プレゼン時に有効な指標の確立等、少し発展させた内容も含んでいる。

計測対象としては広島県で現在話題の旧陸軍被覆支蔽倉庫、石垣市の新市役所、高速道路の顔であるトールゲートである。

陸軍被覆支蔽は最近保存が決まった被爆建物である。本計測は、保存のために現在の振動性状や劣化箇所を把握することが検査の目的である。陸軍を対象とし、上で述べた常時微動計測の有用性確認を行った。

続いて石垣市新市役所である。本建物は竣工時の建物計測を行い、以後行われるモニタリングの基盤計測とした。これまでは劣化した建物を主に常時微動で計測してきたため、竣工直後の建物でも使うことができるのかの確認にもなっている。

最後にトールゲートのモニタリングである。トールゲートに関しては長期モニタリングおよび2021年に千葉で発生した地震をもとに、屋根スラブ、柱の劣化を追うことができる指標を確認し、モニタリング指標の選別を行うことを目的としている。

1.2 既往研究と研究背景、及び研究目的

1.2.1 常時微動計測を用いた研究の現状

常時微動計測は、元々地盤の分野では用いられてきた計測手法である。建物への応用例としては、山田らの「常時微動計測を活用した擬洋風建築物の耐震性能評価」¹⁾という2019年の論文で、常時微動計測の現状を以下のように述べている。

“日本では文化価値を有する建物が多く、これらを保存活用するため、耐震診断と耐震補強に対する社会的要求は非常に高い。

耐震補強における意思決定時、構造設計者が現場に足を運ぶとともに様々な可能性について検討であるがしかし、文化財建築物の多くでは安易な解体・復旧や調査のための点検口設置は困難であり、改修の機会に詳細調査が実施される場合が多い。したがって、改修すべきかを検討する段階では、建物全体にわたっての詳細な構造調査は困難である場合が多い。構造設計者としては不明な点は仮定せざるを得ず、新築設計時以上に配慮と労力を伴うのである。

ここで注目されたのが非破壊検査である常時微動計測である。木造の伝統建築物や住宅において、着々と常時微動を用いた計測、データの蓄積は進んできている。

しかし、筆者は既往事例の多くが振動特性や振動モードの同定、構造耐力との相関や地震応答の推定に主眼を置いたものであり、構造設計の観点から耐震診断上の不明点を推定し、計算過程の信頼性を高める材料に用いる手法について検討された事例がない。“

対象建物の構造種別は異なるが、私の研究動機と似たものを感じた。研究対象である陸軍被覆支蔽も文化的価値のある建物であり、非破壊検査である常時微動計測に着目して計測を行っている。また、自分とは角度が違うが常時微動計測を用いた計測の可能性を広げるという点でも同じ目的となっている。この論文でも述べられている通り、振動特性や振動モードの同定などは常時微動計測が有効であることが示されている。しかし、その先はまだ研究がされていない。

建物全体の振動特性ではなく、各部材の検査や劣化原因特定に常時微動は用いることができるのか。という視点で私は常時微動の可能性を広げることとした。

1.2.2 現状用いられている解析指標

現在、入手した建物の振動は時間領域及び周波数領域の各指標で解析が行われている。Adam B Noel らによるレビュー論文「Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks : A Comprehensive Survey」²⁾ で以下のようにまとめられている。

“損傷の検出方法としては、時間領域と周波数領域どちらでも行える。時間領域の解析手法としては、最小二乗法である自己回帰移動平均モデル法やITD法、インパルス応答関数駆動法や共分散行列を上げている。こちらの利点は、安定した結果が得られることだが、減衰率が大きいとよい結果が得られないという欠点が存在する。周波数領域の方法としてはFFTやウェーブレット変換、ピークピッキング法や複素モード同定関数法などが挙がる。利点としてはノイズが少ないことだが、窓関数処理を行わないといけないという欠点がある。

損傷個所の特定方法としては、周波数ベース、モードシェイプベース、柔軟性マトリクスベースや剛性マトリクスベースなどがある。

このように損傷検出方法や損傷個所特定方法は確立しているが、十分なセンサを配置しないとイケないことから、やはりデータ数という点に問題がある。“

構造物の劣化検知で主流の解析指標が示されている。このように多数の指標で解析は可能であるが、どの指標がどの劣化の検知に適しているかについては研究が進んでいない。

また、これらの指標は建築技術者では理解できるものが多いが、大抵の場合、検査を依頼する人は建築の知識を持ち合わせていない。そのような建築の知識がない人にどの指標を用いると現状を的確に伝えられるのか。解析の側面ではなく、説明に適した解析指標は何かという角度でも各指標を検討することとした。

1.2.3 モニタリングの現状

第I編で行っているトールゲートの長期モニタリングは、本研究室で行っている継続的な研究である。現在のモニタリングの様子を図1-1に示す。

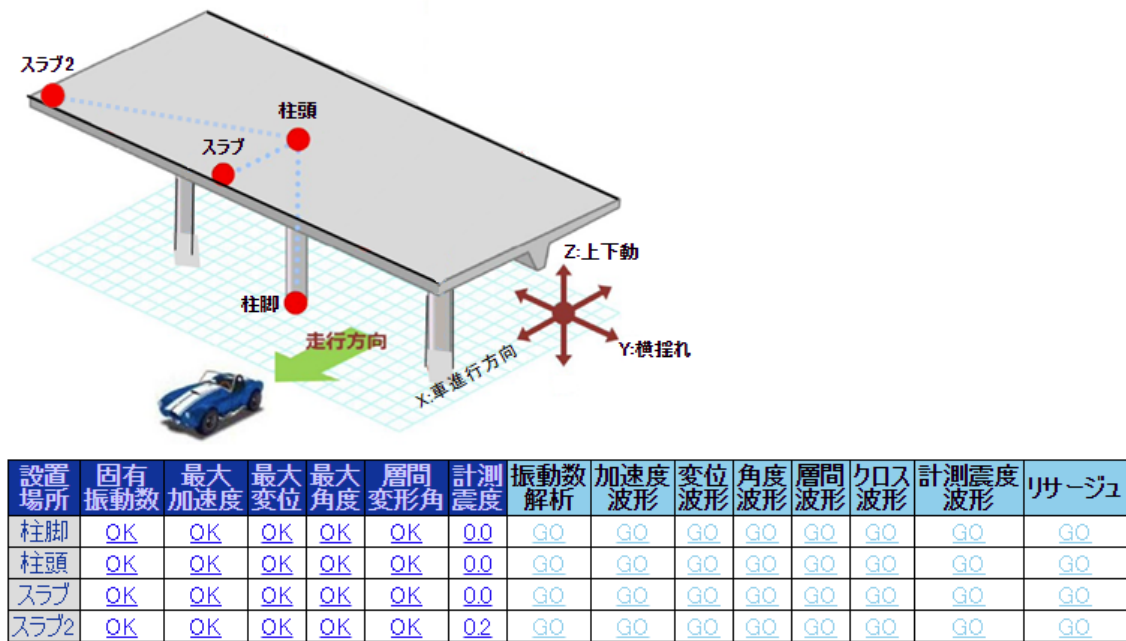


図 1-1 モニタリング画面

図1-1に示すように、計測箇所は柱脚、柱頭、屋根スラブ2点の4箇所で行っている。また、表に各解析指標の説明を示す。

表 1 各計測指標の説明

長期にわたる経時変化の表示	共振（固有）周波数	各計測データをFFT解析してピーク値を共振周波数とし、その値を長期的に表示する。構造物に物理的な変化が生じた場合に、この共振周波数が変化することを想定して、経時変化を監視する。
	最大加速度	各計測データごとに各部位に生じた最大加速度を長期的に表示し、構造物が過度な動的荷重を受けることを監視する。
	最大変位	各計測データごとに各部位に生じた最大変位を長期的に表示し、構造物に過度な変形が生じることを監視する。
	最大部位角	各計測データごとに各部位に生じた最大部位角を長期的に表示し、構造物に過度な変形が生じることを監視する。
	計測震度（相当値）	気象庁の震度算定アルゴリズムに準じて、各計測データから各部位の震度（相当値）を算定して表示する。地震が発生したときに、監視員が直感的に地震規模を判断する指標とする。
各計測データごとに表示	加速度波形	加速度の最大値や継続時間を監視に活用することを目的とし、監視員が選定することにより、各計測データごとに、加速度波形を表示する。
	振動数解析（フーリエ振幅）	FFT解析結果を監視に活用することを目的とし、監視員が選定することにより、各計測データごとにフーリエ振幅と振動数の関係を表示する。
	計測震度（相当値）波形	地震が発生した場合に、監視員が選定することにより、地震の規模や継続時間、余震の発生状況等を確認する。
	変位波形	各計測データごとに、変位の変化を表示し、監視員は特に地震が発生した場合の変形の大きさの判断を支援する。
	柱の層間変形角	柱の相間変形角は地震発生時に構造物の損傷発生を判断するための重要な指標であるという認識のもと、地震が発生した場合に、監視員はこの層間変形角の大きさを基準として損傷発生の有無を判断する。
	角度波形	各計測データごとに、各部位の角度変化を表示し、特に地震が発生した場合に地震発生の前後の角度変化を比較して、監視員が地震による損傷発生の有無を判断することを支援する。
	クロススペクトル	既往の計測により、柱頭部の加速度とスラブとのクロススペクトルは、構造物を構成する各部位の剛性低下をモニタリングできる可能性があるという結果を得ている。鉄骨部材の高力ボルトの締め付けやプレースの緊張度のモニタリング支援を想定している。
	リサージュ	8箇所の加速度センサを結んだリサージュであり、地震が発生した場合に構造物全体の振動変位の挙動を動画で再生して、監視員が損傷の可能性を把握することを支援する。

表 1 に示す通り、多数の解析指標でモニタリングを行っている。しかし、ツールゲートを管理している人間は建築の人間に限らないため、これほど多くの指標が羅列されているとどれを確認すべきか迷うこと間違いがない。

私は誰でも簡単に適切にモニタリングを行うためには指標を選別する必要があると考え、破壊箇所に適した指標を見つけることで有効な指標を確認することとした。破壊が起こる場所は柱脚破壊、もしくは屋根スラブの破壊であるため、これらの破壊現象を捉えることができる指標の検討を行う。

1.3 大きな研究目的

第1編は建物の検査を行う技術の向上が第一の目的である。

また、研究的な側面として第I編1.2節で検討する事項の現状、課題、及びその課題に対するアプローチを示した。研究的側面まとめた大きな目的は、検査技術を高度化し、普及させる基盤を作ることにある。少しでも現技術を発展させ、センサを用いた維持管理の普及に貢献したいと考えている。

1.4 第I編の構成

I部は全6章で構成される。以下に各章の概要を示す。

第2章 I部で用いるセンサ概要、解析概要

1部で用いるセンサ、各解析指標について記す。

第3章 陸軍被覆支蔽倉庫を対象とした計測

保存が決まった陸軍被覆支蔽の計測結果をまとめる。多種劣化の様子が見られ、検査、研究の甲斐が有る建物である。本章では検査や常時微動計測の可能性、各解析指標の検討を行う。

第4章 石垣市新市役所を対象とした計測

竣工直後の石垣市新市役所を対象とした常時微動での検査結果をまとめる。本章は計測結果をもとに、今後のモニタリングの方法を考察するという検査とモニタリングの懸け橋となる部分を行った。

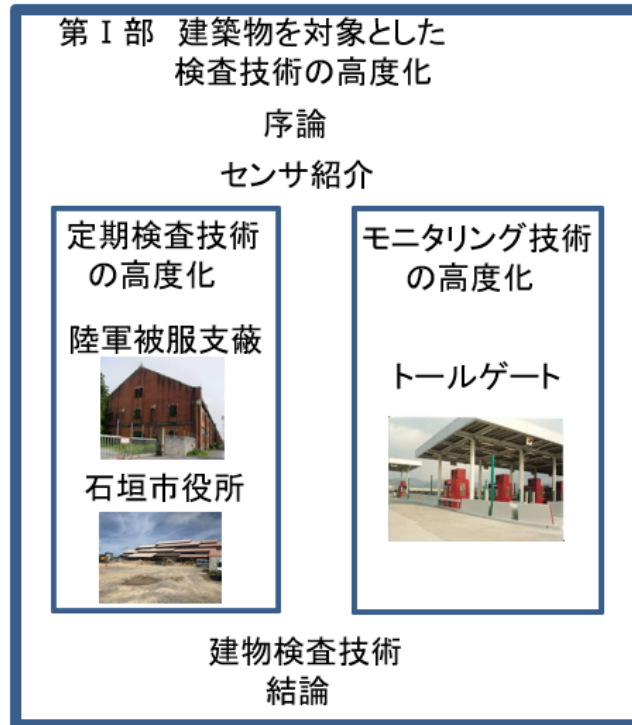
第5章 トールゲートを対象としたモニタリング

本章ではトールゲートを対象としたモニタリング技術の向上を目指した。屋根スラブ PC 鋼線の破断実験および、千葉地震の計測データを用いて、屋根スラブ破壊、柱脚破壊を検知可能な指標の検討を行う。

第6章 建物検査技術の結論

第3章から5章で得られた知見を要約し、第I編のまとめとする。

第I編の流れを以下に示す。



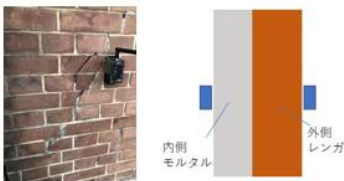
検査対象

陸軍被服支蔽

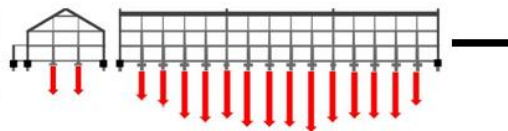


○検討事項

- 固有振動数の確認
- 床壁一体性の確認
- 壁の剥離確認



○地盤沈下の確認



○地盤沈下の建物への影響



検討指標

- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 位相
- ・ リサージュ

- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 相対変位
- ・ 位相
- ・ リサージュ
- ・ 打音解析

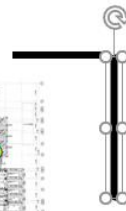
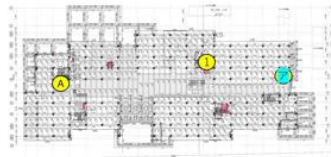
- ・ FFT
- ・ 伝達関数
- ・ 相対変位
- ・ クロススペクトル
- ・ リサージュ

検査対象

○検討事項

検討指標

○固有振動数の確認



- FFT
- 伝達関数
- 絶対変位

石垣市役所

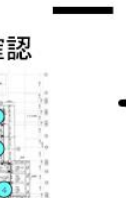
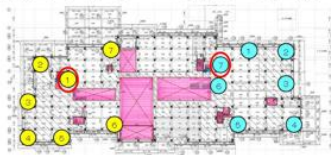


○ORFを使った
建物全体の動きの確認



- 伝達関数
- リサーチ

○2Fを使った
東西半分ずつの動きの確認



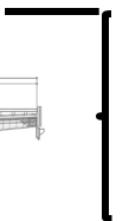
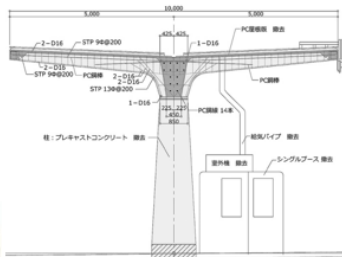
- 伝達関数
- リサーチ

検査対象

○検討事項

検討指標

○屋根のPC鋼線
破断実験

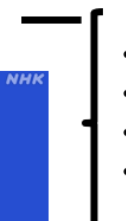


- 伝達関数(柱元基準)
- 伝達関数(柱頭基準)
- クロススペクトル
- 角度波形

トールゲート



○千葉地震による
劣化確認



- 伝達関数(柱元基準)
- 伝達関数(柱頭基準)
- クロススペクトル
- 角度波形

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20211007/k10013297051000.html>

図 1-2 I 部の図入り目次

1) 山田明 金野章子:

常時微動計測を活用した擬洋風建築物の耐震性能評価,
日本建築学会 代 25 卷 代 61 号 1079-1084 2019 年 10 月

2) Adam B Noel ら:

Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks : A Comprehensive Survey,
IEEE Communications Surveys & Tutorials Volume19 Issue3 ,thirdquarter2017

第2章 振動計測システム及び解析指標の概要

2.1 本研究で使用する無線加速度センサ

本研究では広島大学が産学連携センターにおいて民間企業と共同開発した無線加速度センサを用いて計測を行う。センサは、Bluetooth により通信を行う。通信可能距離は 100m 程度であるが、障害物がると計測が不可能となる。しかし、アンテナを接続することにより通信可能範囲が広がり、より遠距離での通信や、障害物を避けての計測が可能となる。本センサは 3 軸の加速度を計測度センサを内蔵しており、振動や傾きなど多種の計測を行うことが可能である。センサ本体はサーボ機構を搭載しており、微細な振動も高精度で計測できるため、建築物の常時微動計測に適している。図 2-1 に無線加速度センサとその使用を示す。



無線加速度センサ仕様	
外形寸法	58(W)×111(L)×39(H)mm
重量	300g
測定可能範囲	±3000gal
サンプリング	100sps, 200sps,
周波数	500sps, 1ksps
分解能	24bit (100, 200sps時)
検出軸	3軸, 同時AD交換 AD/DCサンプリング
電源	本体充電式, 又は, USBアダプタ
記憶容量	制御pcに保存
無線通信	Bluetooth Class1, USB
振動トリガー	不可
時間同期	可

図 2-1 無線加速度センサ

2.2 本研究で使用する解析ソフト

本研究では、広島大学が産学連携センターにおいて民間企業と共同開発した解析ソフト RS-network を用いる。RS-network はリアルタイムで加速度波形を確認することが可能で、FFT 解析やリサージュ等の設定もできるため、計測結果を画面上で確認しながら振動計測を行うことができる。表 2、図 2-2 にソフトの仕様と操作画面を示す。

表 2 RS-network 仕様

項目	解析ソフト	
通信方式	Bluetooth, USB (2.0推奨), WiFi, LAN, RS232C	
サンプリング周波数	100, 200, 1ksps	
同時接続数	Bluetooth接続最大7台, 自動測定モード時(データロガー機能時)台数制限なし 21 (AC加速度) + 21 (DC加速度) 同時同期信号波形表示 (1000SPS)	
機能	解析機能	加速度, 速度, 変位, FFT, リサージュ, ウェーブレット, ピークホールド, パーグラフ, スムージング, 振動レベル, 計測震度等
	フィルター機能	FIRフィルター, FFTフィルター
	ビデオ録画機能	同時録画・再生, 再生スピード可変, カーソル追従再生機能, PCのWEBカメラで撮影可能
	トリガー機能	オート, ノーマル, シングル, プリトリガー, 測定時間自動延長機能(測定終了時の加速度レベルにより測定)
	GPS機能	GPSによるPCの時刻合わせが可能
	音源再生機能	波形の音による再生, リアルタイム音源再生(振動聴診器)が可能
	メール機能	遠隔操作, データ取得メッセージの自動配信
	サーバシステム	データを自動取得しインターネットサーバへアップロード, データの共有が可能
	3D表示機能	360° 全方位視認可能
	データベース	プロジェクトファイルをデータベースごとに管理
	データコピー	画面上のデータをそのままエクセルへ貼り付け可能
	グラフコピー	画像をワード等へ貼り付け可能
演算	FFT波形スムージング, FFTピーク検出(最大5点), フーリエスペクトル, パワースペクトル, 振幅, 位相, 伝達関数等	
表示範囲	最大±10000gal (±100m/s)	
その他	ターゲットは温湿度センサを内蔵しており, 温湿度表示も可能	

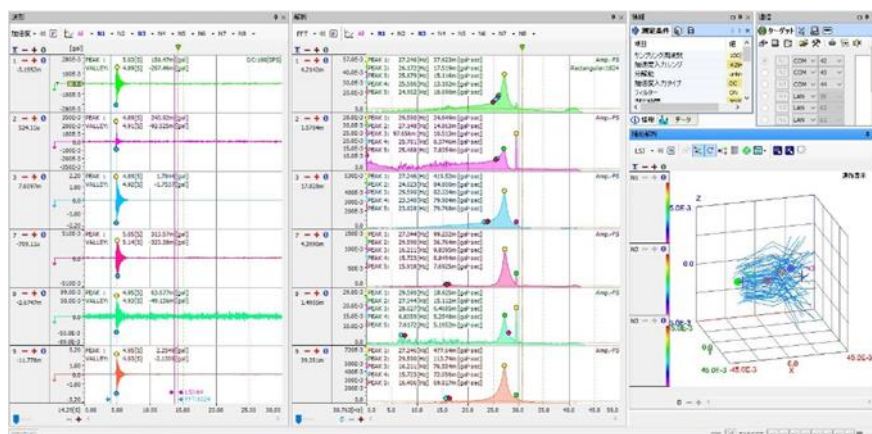


図 2-2 RS-network 操作画面

2.3 本章で使用する加速度の解析手法

周波数領域

(1)FFT 解析によるフーリエスペクトル図、及び固有振動数

無線加速度センサより得られた計測値を用いて、RS-network によりフーリエ解析を行い、卓越振動数を見つける。本実験ではフレームサイズを 8192、窓関数を矩形窓としてオーバーラップさせずに計測時間すべてを用いて算出した。

(2)伝達関数

各振動数において、(調べるセンサのフーリエ振幅の大きさ)/(基準となるセンサのフーリエ振幅の大きさ)によって求める。基準とする箇所は、地盤やモニタリング箇所を用いることが多い。基準センサと比べて、どの振動数が揺れやすいか、どの程度揺れやすいかを算出する。言い換えると、基準とする箇所の振動の影響を取り除いた、調べたい箇所の振動特性である。

(3)クロススペクトル

各振動数において、(調べるセンサのフーリエ振幅の大きさ)*(基準となるセンサのフーリエ振幅の大きさ)によって求める。調べる箇所と基準となる箇所ともに揺れやすい振動数を算出することができる。伝達関数では調べたい箇所、基準箇所ともに揺れやすい場合、ピークを持たないが、伝達関数の場合、掛け算であるため大きなピークが表れる。

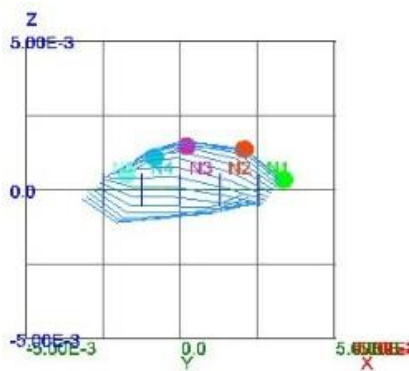
時間領域

(3)位相

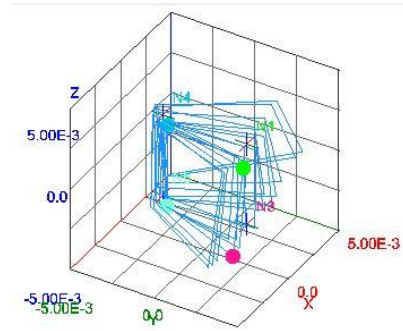
センサにより入手した波形をそのまま用いる。固有振動数の確認や一体性評価に用いる。

(4)リサーチ

位相では各方向の変化の様子を見ることが可能であるが、3次元での評価は不可能である。その問題を解決すべくできたものがリサーチである。リサーチは位相をもとに動きを3D化し、動画として表示することができる。論文では動画を掲載することができないため、最も動きを表現できている箇所を抽出して掲載している。一例として図2-3にリサーチによる動きの表現の様子を示す。



YZ平面でのリサーチ



三次元でのリサーチ

図2-3 リサーチによる動きの可視化

(5) 相対変位

変位の入手波形において、ピーク間の大きさを相対変位という指標として用いることとした。図 2-4 に相対変位の算定方法を示す。

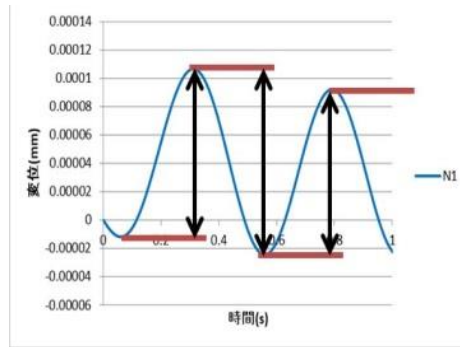


図 2-4 相対変位の算定方法

また、この方法によって得られた相対変位を箱ひげ図にまとめ、比較検討を行う。箱ひげ図にまとめた様子を図 2-5 に示す。

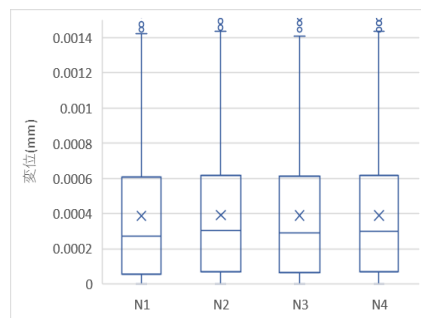


図 2-5 相対変位の箱ひげ図による評価

(5) 角度波形

本加速度センサは、センサ概要にも示した通り三軸を計測することができる。この各方向と、重力方向との角度の変化を表したものが角度波形である。この指標は構造物の地震による損傷発生の判断指標にすることを想定している。

地震時の角度波形の変化を図 2-6 に示す。

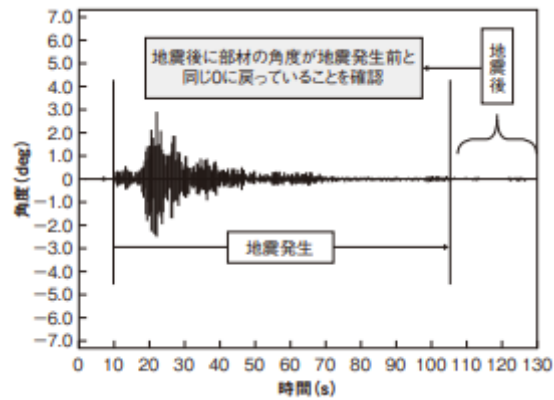


図 2-6 角度波形の様子

第3章 広島旧陸軍被覆支蔽倉庫の常時微動計測

3.1 はじめに

本章では、今、社会の注目を集めている広島旧陸軍被服支蔽倉庫(以下被覆支蔽と略す)の計測結果を示す。本建物は戦前に竣工した建物であり、数多くの劣化が見られる。付近には住宅があり、外壁レンガの剥離の可能性もあってとても危険な状態である。また被覆支蔽は本研究中に保存が決定したため、補修改修のために現在の建物性能の確認は必須となった。

本章でまとめる検査結果を、管理者が実施する今後の補強・補修改修に活用していただくことが本研究の目的である。

本計測は被覆支蔽の現状の性能検査に加え、常時微動計測の有用性の確認も含まれている。こちらは検査ではなく研究の側面が強く、常時微動を用いた検査の有効範囲の確認、また入手したデータをどのような指標で解析すべきかを考察する。

本章での検査箇所、検討した解析指標は図 3-1 に示す。

以降、検査箇所ごとに考察を進めていく。

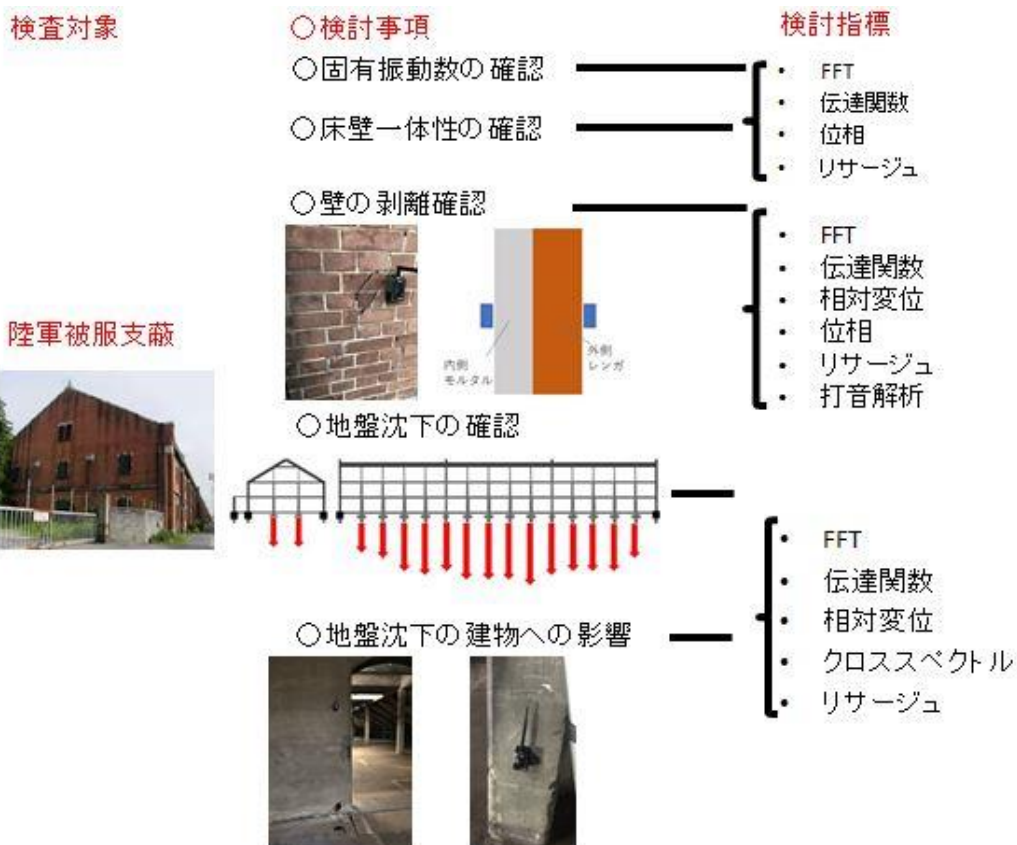


図 3-1 計測事項及び検討指標

3.2 建物概要

広島陸軍被服支蔵は、大正二年(1913年)に竣工した、軍事用の製造工場である。所在地は広島県広島市南区出汐で、爆心地より約2.7kmの位置に建っている。図3-2に平面図を示す。また図3-2に示すように各方向を設定する。X正方向が北、Y正方向が西、Z正方向が鉛直上向きである。この方向は固定するため、各計測で剥離方向はどの方向か明記する。外観は図3-3のように煉瓦組積であり、建物の柱梁はRCラーメン造、壁面は煉瓦積みで内部には厚さ20mm程度のもルタル塗りが施されている。竣工より110年程度経ち、ほとんど補修改修が行われていなかったこともあり、外観の煉瓦には大小無数のひび割れが生じており、内部への漏水も見られる。また過去の調査では平面中央部に近づくほど沈下量が大きくなる不同沈下が確認された。妻壁では外壁煉瓦壁のはらみ出しも観察されている。

保存が確定したため、早急な建物の現状分析や補強を行うことが必須である。本敷地には県所有の倉庫が3棟、国所有のものが1棟建っている。本計測では最も北側に存在する1号棟の結果をまとめる。

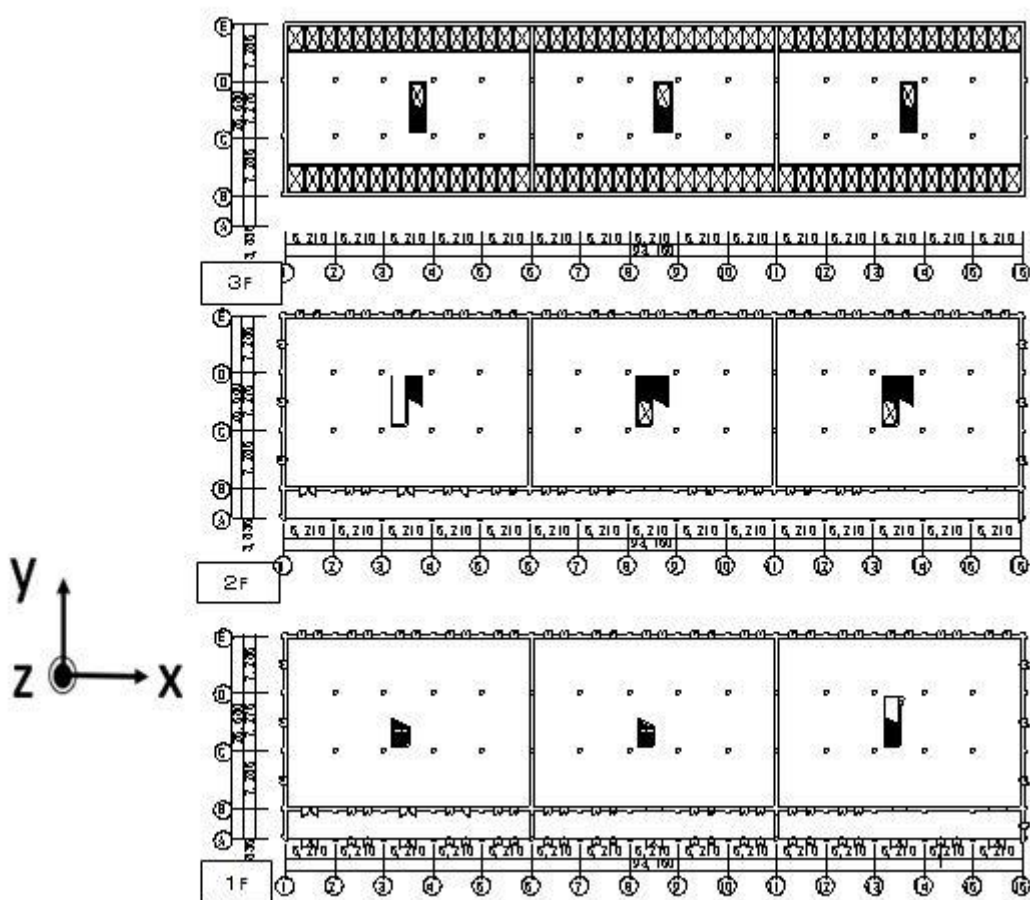


図 3-2 平面図



外観



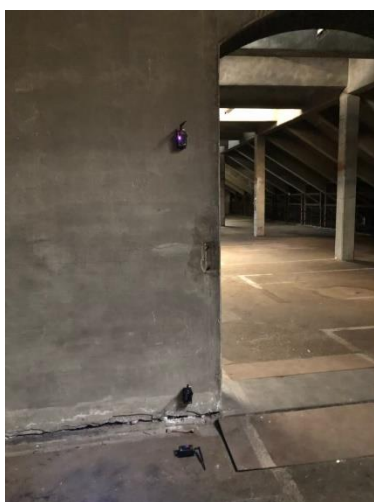
北東部入口付近

図 3-3 外観写真

建物に見られる劣化を図 3-4、図 3-5 に示す。



図 3-4 3F 柱の輪切り上ひび割れ



3F 内壁



2F 内壁

図 3-5 内壁のひび割れ

3.3 計測目的と計測概要

3.3.1 計測目的

本計測の主な目的は被服支蔽の各部の検査である。

「はじめに」や「建物概要」に書いたとおり、本建物は竣工後、戦争を経験し、また長年日常、非日常の劣化を受けている。さらに、今まで主だった補修改修は施されていない。そのため、外壁のレンガにはひび割れが多く入り、漏水しているものも存在する。また、広島という地盤の悪い箇所であるため、不同沈下も確認されている。

このように劣化の宝庫である本建物であるが、最近県が保存する意思を示した。しかし、現状の劣化状態ではいつ外観レンガの剥離や、倒壊をおこしてもおかしくない。そのため、耐震改修のための現状の各部分の性能確認や、危険箇所の確認を行うことになった。

また被覆支蔽の現状の性能検査に加え、常時微動計測の有用性の確認も研究内容となっている。通常、動的な検査としては、建物はセンサを設置してモニタリングを行い、地震前後で振動性状の違いを確認し、構造物に損傷や劣化が生じたら補強を行うという方法が取られる。また、静的な方法として、図面より各材料特性、寸法を入手し、解析で現状の性能を確認する方法が取られる。しかし、モニタリングでは地震をトリガーとしているため、地震を待たないといけない、その地震で倒壊してしまえば元も子もないという問題がある。構造解析は、あくまで理論上であり、細かい部分まです的確に再現できているかは怪しいところである。

そこで、自分たちは常時微動という日常常に起こっている振動に着目し、各部材や建物全体を計測できるのか確認することとした。「この方法であれば、地震を待たないため、いつでも検査することができ、

調べたい部材、部分の現状を的確に確認することができる。」

という利点がある。

この利点を活かすため、本建物計測を用いて、

「常時微動で建物や部材を検査することは可能か」

「検査はどの指標を用いるべきか」

を確認することとした。

3.3.2 計測概要

それぞれの計測データは、無線加速度センサ(各水平方向2成分、鉛直方向1成分)を用いて、サンプリング周波数を100Hzとし、常時微動計測を行った。方向はX方向正が北、Y方向正が西向きで固定している。そのため、剥離検知のものに関しては剥離方向が計測によって異なる。各節で方向は明記する。またセンサ台数や計測時間は、計測箇所によって異なるため、計測ごとに示す。

計測波形のフーリエ変換は、計測時間をフレームサイズ8192の少区間に区切り、オーバーラップさせずに、窓関数を矩形窓として計算した。

打音検査は各箇所3回ずつ行い、サンプリング周波数を44100Hzとして打診音をマイクロフォンで集音し、解析を行った。

打音波形のフーリエ変換は、フレームサイズ1024とし、各打診音の最大音圧付近のみ解析を行った。

3.4 固有振動数の確認

本節では、建物の振動計測の基本である、固有振動数の算出を行う。
計測箇所、解析指標は図 3-6 に示す。

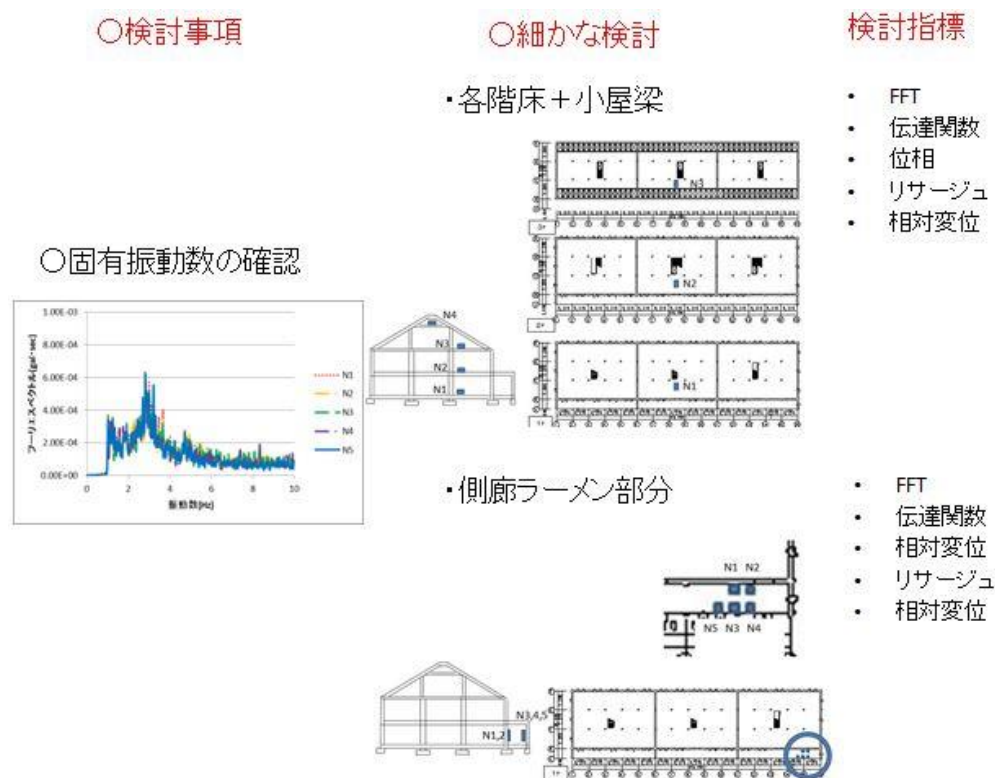


図 3-6 計測箇所

図 3-6 に示すとおり、まず各階床+小屋梁での計測を行い、建物本体の振動性状を把握し、その後、建物東側にある側廊部の振動性状の確認を行う。建物本体と側廊部で固有振動数など振動性状が異なれば、境目や、弱い方の部分に劣化が蓄積している可能性が高い。

解析指標としては FFT を用いた固有振動数の算出、伝達関数、位相、リサージ、相対変位を用いる。

3.4.1 各階床+小屋梁の4点計測による建物としての振動性状の把握

本節では、図3-7に示すように建物高さ方向(N1:1F床,N2:2F床,N3:3F床,N4:小屋梁)計測の結果を示す。計測目的としては、まず建物全体の振動性状を把握することが耐震改修をする上で重要であるからである。過去の計測により6Hz付近に固有振動数があるという結果と、3Hz付近に固有振動数があるという結果が存在している。本節ではこのどちらの結果が正しいのか、またなぜ固有振動数が3Hzも違う結果を示しているのかを考察したいと考えている。計測方法としては、無線加速度センサをそれぞれ対象としている箇所に両面テープで貼り付け、20min,1F柱加振の2パターンで計測を行った。以下に入手したデータの各解析手法による結果をまとめる。

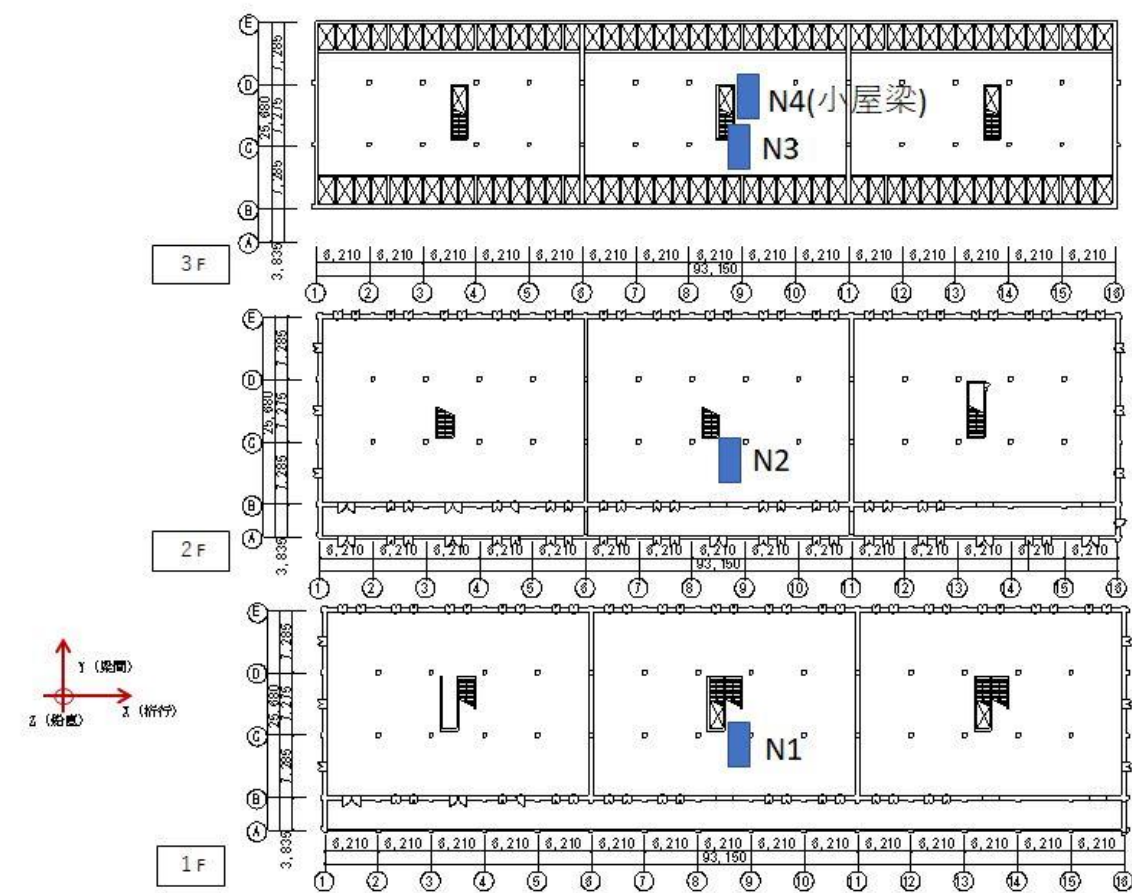


図 3-7 建物高さ方向計測平

FFT による結果

計測データに FFT 解析を行った。FFT にかけると簡単に固有振動数の確認が取れ、また結果を一つのグラフにまとめると他のセンサ箇所との振動数特性の違いを見ることができ、ため工学的に有効な指標となる。過去の解析でも主に FFT と次節で用いる伝達関数を用いて考察を行っているため、当時の結果と比較することも可能である。

以下図 3-8,図 3-9 に 20min 計測、加振計測のそれぞれの計測データを FFT にかけた結果を示す。実振動としてみても 3 次以降の高次固有振動数はあまり影響を与えないため、10Hz 以下の低次の固有振動数に焦点を当てた結果を示す。また、表 3 に固有振動数と疑われる振動数を示す。

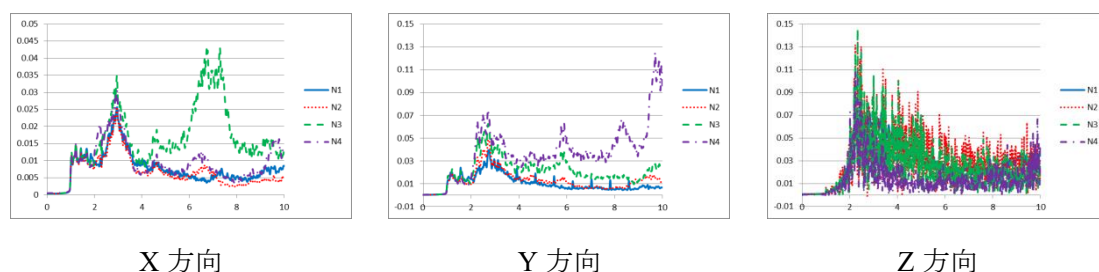


図 3-8 20min 計測 FFT

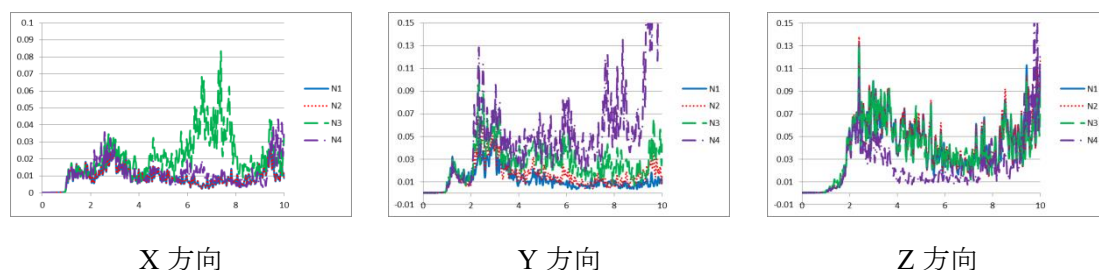


図 3-9 加振計測 FFT

表 3 各計測による固有振動数と考えられる振動数

		X 方向(桁行方向)	Y 方向(梁間方向)	Z 方向(高さ方向)
20min	一次	2.88	2.49	2.44
	一次?	4.83	4.64	
	二次?	6.72	5.9	
加振	一次	2.59	2.32	2.4
	一次?	4.6	4.61	
	二次?	6.6	6.08	

図 3-8、図 3-9、表 3 より、X 方向において、常時微動では 2.88Hz に全箇所がピークを持っていることから、この値が固有振動数であることがわかる。また 6Hz 付近のピークについては、センサ N3 である 3F 床の結果が大きく目立つ。本来であれば一次固有振動数であれば一次モードの形より建物上階に行くにつれてフーリエスペクトルが大きくなるはずである。また二次固有振動数であるならば二次モードの形より、建物中層である 2 層目、もしくは 2 層目と 3 層目のフーリエスペクトルが大きくなるはずである。しかし、この結果はどちらのパターンにも即しておらず 3 層目のみフーリエスペクトルが大きくなっている。そのため、この振動数は 3F のみが動きやすい振動数ということがわかる。原因としては 3F 平面の東西にある吹き抜けが考えられる。

Y 方向においては、常時微動では 2.5Hz 付近が固有振動数ということがわかる。吹き抜けの場所より、Y 方向のほうが固有振動数が増えそうだと考えたが、Y 方向では X 方向のように明らかに N3 が大きくなる振動数は確認できなかった。20min 計測と加振計測を比べると、加振計測のほうが X,Y 方向において固有振動数が低下する傾向が見られた。人力程度の加振で固有振動数が低下するのはよほど柱が弱っているのではないかと考える。なお、

Z 方向は 2.4Hz 付近にピークを持つため、固有振動数は 2.44Hz であることがわかる。

伝達関数による計測結果

本節では前節で求めたフーリエスペクトルの、一つのセンサのフーリエ振幅に対する倍率である伝達関数を用いた結果を示す。基本的に前節と似た考察になるが、グラフにまとめると、各振動数において、基準としたセンサの何倍の振動成分を持っているかがわかるため、固有振動数で倍率が大きくなるのがわかっている。本節で対象としている建物高さ方向の解析では一階の結果を基準とすることで、建物の振動特性をわかりやすく見ることができる。

図 3-10、図 3-11 に各方向の結果を示す。FFT と同じく 0 から 10Hz までのものと、一次固有振動数として考えられる 2Hz から 4Hz に焦点を当てたものの 2 つを示す。

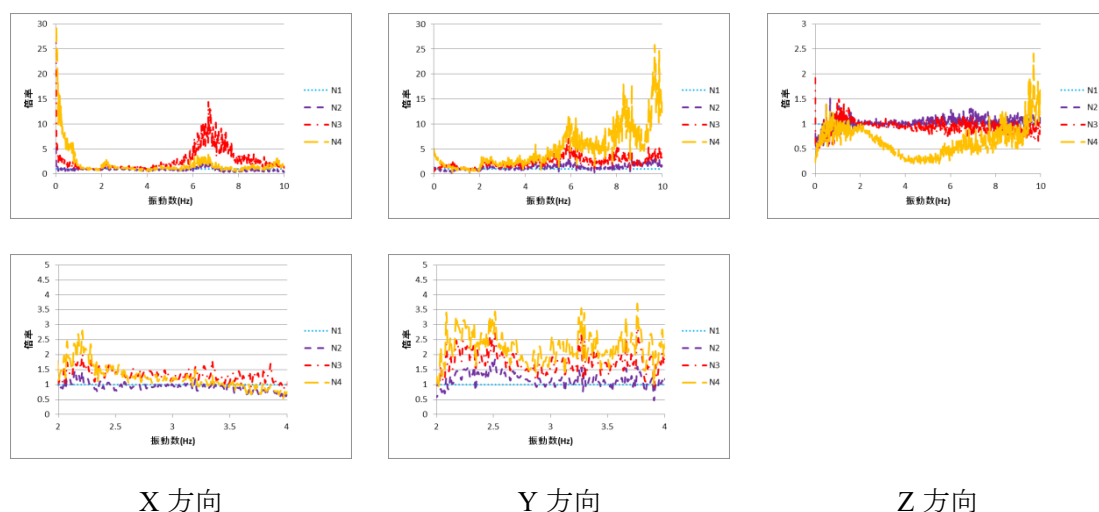


図 3-10 20min 計測 N1 基準 伝達関数

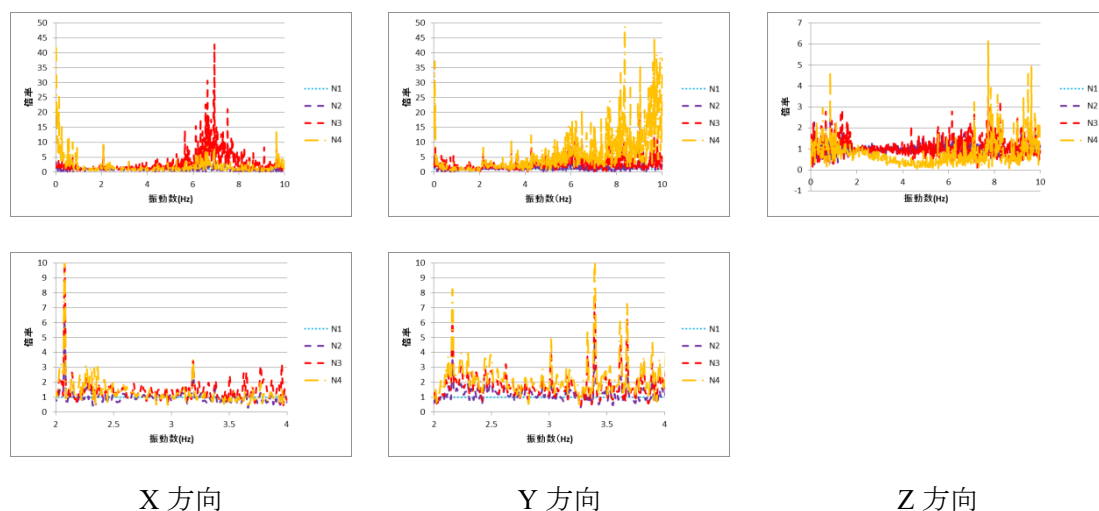


図 3-11 加振計測 N1 基準 伝達関数

表4 伝達関数による固有振動数と考えられる振動数

	X方向(桁行方向)	Y方向(梁間方向)	Z方向(高さ方向)
低次	2.1~2.2	2.3~2.5	
高次	6.45~6.6	5.9~6.0	
		8.15~8.3	

表5 FFTによる固有振動数と考えられる振動数

	X方向(桁行方向)	Y方向(梁間方向)	Z方向(高さ方向)
20min 一次	2.88	2.49	2.44
一次?	4.83	4.64	
二次?	6.72	5.9	
加振 一次	2.59	2.32	2.4
一次?	4.6	4.61	
二次?	6.6	6.08	

表4に、図3-10と図3-11で考えられる固有振動数をまとめる。また表5は前節のFFTによって考えられる固有振動数である。

図3-10、図3-11、表4、表5より、X方向において、FFTでは低次のものとして2.9Hz付近にピークが見られたが伝達関数では2.1~2.2Hz付近にピークが見られた。2.9Hzのものは地盤の振動しやすい振動数で、建物全体が地盤の影響を強く受けている可能性も考えられる。以降の解析手法でどちらが正しい固有振動数かを確認することとした。

高次のものとして、FFTの結果とあまり変わらない6.6Hz付近に伝達関数もピークを持っている。しかし、こちらも3階の倍率が他より圧倒的に大きくなっているため二次固有振動数ではなく、3F固有の振動数である可能性が高い。

Y方向において、FFTの結果と低次のもの、高次のものともに似た傾向を示している。

Z方向において、大半の振動数において倍率が2倍以下で1付近となっているため、各階あまり高さ方向の振動特性の違いはないことが伺える。FFTの結果と照らし合わせると、2.4Hz付近にピークがあることが確実である事がわかる。また、N4のみ4~6Hz付近の倍率が小さくなっている。N4は小屋梁なので、他との違いとして、床の有無による拘束の違いが影響を与えているのではないかと考える。

位相，リサージュによる解析

FFT，伝達関数で固有振動数を X 方向一次の固有振動数を特定するに至れなかった。本節では，固有振動数である可能性がある振動数付近にバンドパスフィルター(BPF)をかけた，時間と変位の関係を見て位相差を求め，固有振動数を見つける。今までは加速度データを FFT にかけたり，伝達関数を求めたりしたが，今回は変位を用いている。理由として，加速度も変位も同じ方向に移動していること，また値として加速度より変位のほうが想像しやすいためである。一次固有振動数であれば N2, N3 および N4 が一次モードの動き，すなわち位相差が 0 となり，また上階のセンサほど変位が大きくなるはずである。二次固有振動数であれば二次モードの動き，すなわち中間層が一階，上階より変位が大きくなるはずである。

また，本節ではリサージュ図も同時に図示する。リサージュ図は位相を三次元化したものである。

ここでは位相とリサージュ，どちらのほうが建物の振動性状を見やすいかを比較する。前節までで各方向の固有振動数の可能性があるものを表 6 に示す。

表 6 固有振動数と考えられる振動数

	X 方向(桁行方向)	Y 方向(梁間方向)	Z 方向(高さ方向)
伝達	2.1~2.2		
	2.88	2.49	2.44
	4.83	4.64	
伝達	6.45~6.6		
		5.9	
伝達		8.15~8.3	

以下図 3-12 から図 3-27 に、表 6 に示したそれぞれの振動数帯にバンドパスフィルターをかけたものの時間-変位関係図およびリサージュ図を示す。

BPF2.15±0.05Hz の振動

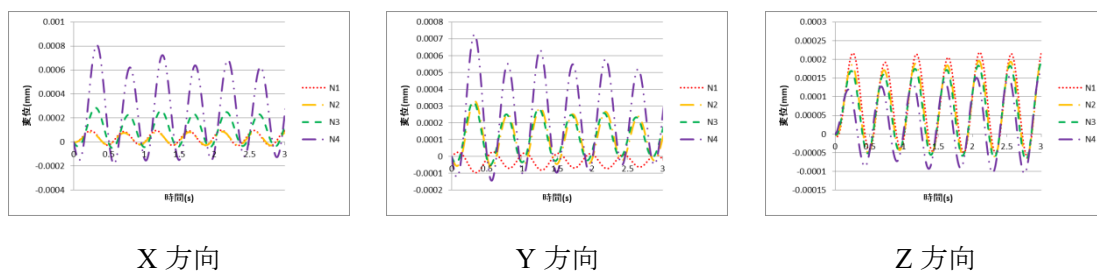


図 3-12 BPF2.15±0.05 の時間-変位関係 20min 計測

図 3-12 より、
 X,方向において、全箇所同位相とはなっていない。
 Y 方向において、N2,N3,N4 が同位相となっている。FFT、伝達関数ともに固有振動数らしくないが、一次モードのように動く可能性がある。
 Z 方向については、全箇所同位相かつ同程度の変位量である。そのため、建物が地盤と同程度上下動していることとなる。

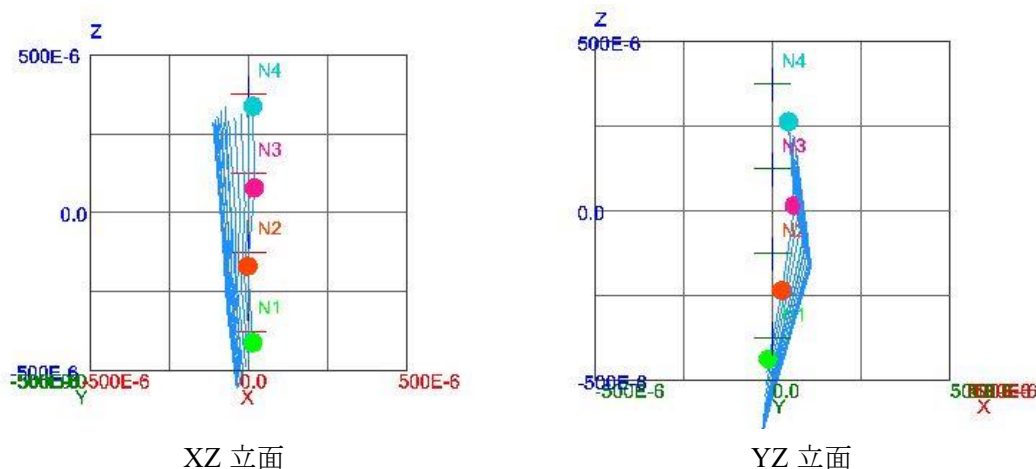


図 3-13 BPF2.15±0.05 のリサージュ

図 3-13 は BPF2.15±0.05Hz でのリサージュ図である。同図より、X, Y 方向リサージュより上下動が激しいことが見て取れる。また、どちらの方向も一次モードのようには見えない。そのため、2.15Hz 付近は Z 方向に揺れやすい振動数であることがわかる。

BPF 2.45 ± 0.05 Hz

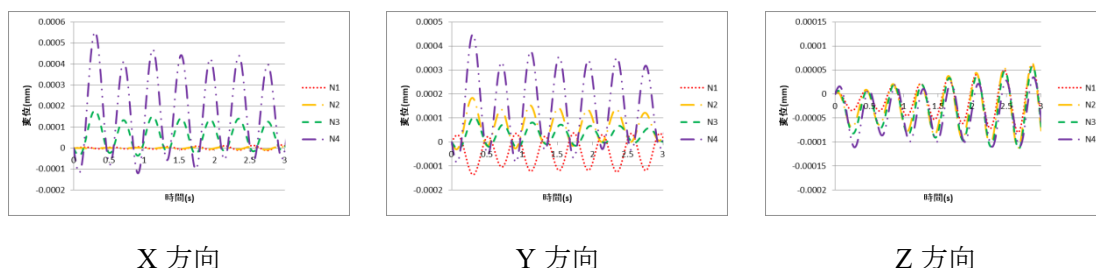


図 3-14 BPF 2.45 ± 0.05 の時間-変位関係 20min 計測

図 3-14 より、以下のことがわかる。

- ・ X 方向においても、4つの計測全てに共通する同位相のものが見つからない。
- ・ Y 方向において、N2,N3,N4 が同位相となっている。FFT の値からも一次モードの可能性が高い。

なお、Z 方向について、やはり FFT よりこの振動数帯に固有振動数があることがわかっていたとおり、4計測すべて同位相の振動をしている。

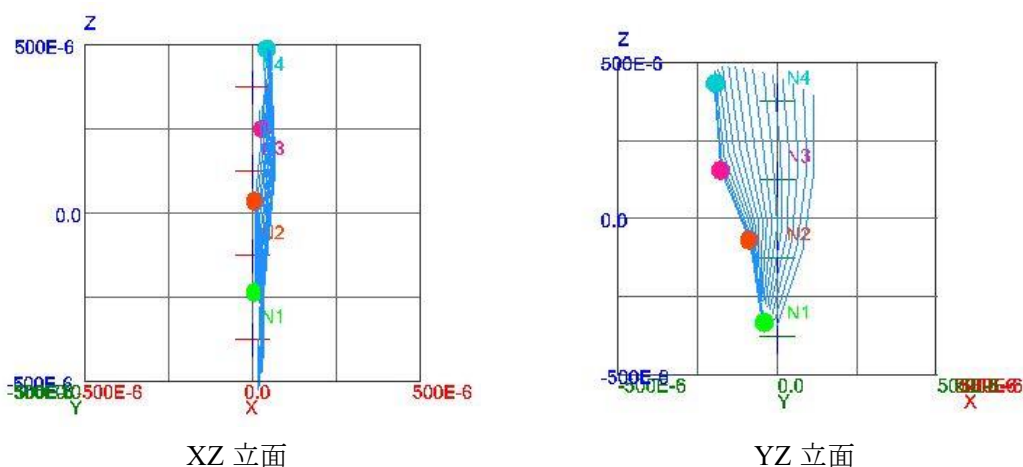


図 3-15 BPF 2.45 ± 0.05 のリサージュ

図 3-15 より、以下のことがわかる。

- ・ X 方向リサージュより、大きく上下動している。
- ・ Y 方向リサージュより上階ほど大きく動く。

そのため、Y 方向及び Z 方向の固有振動数であることが考えられる。

BPF2.88±0.05Hz

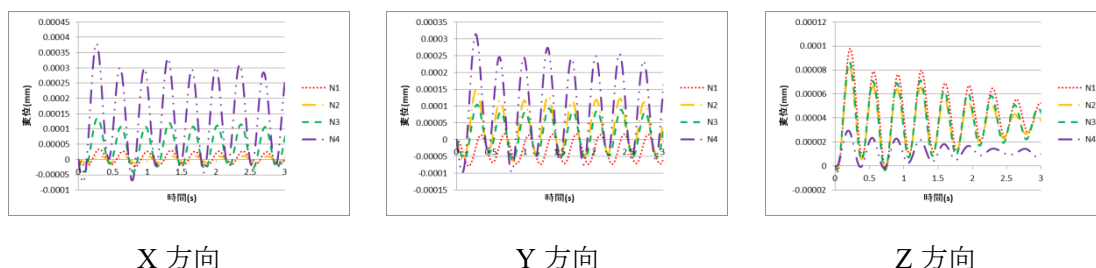


図 3-16 BPF2.88±0.05 の時間-変位関係 20min 計測

図 3-16 より明らかなように、X 方向、Y 方向ともにおおよそ同位相となっている。しかし、どちらも上階ほど変位が大きくなっていないため、きれいな一次モードではないと考えられる。また、Z 高さ方向においても同位相の関係が見られる。

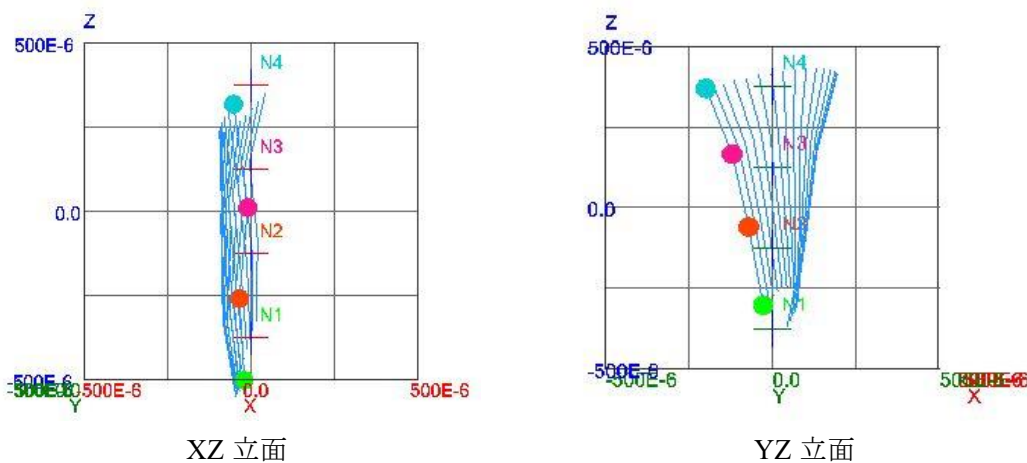
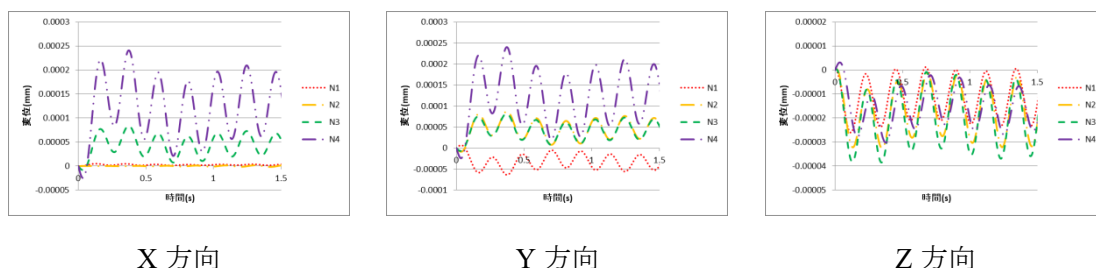


図 3-17 BPF2.88±0.05 のリサージュ

図 3-17 より、X 方向ではなく、Y 方向できれいな一次モードが認められた。そのため、Y 方向の一次固有振動数は 2.45Hz ではなく 2.88Hz である事がわかる。X 方向 FFT でもピークが出ていたが、リサージュを見る限り一次固有振動数ではなさそうである。

BPF 4.6 ± 0.1 Hz



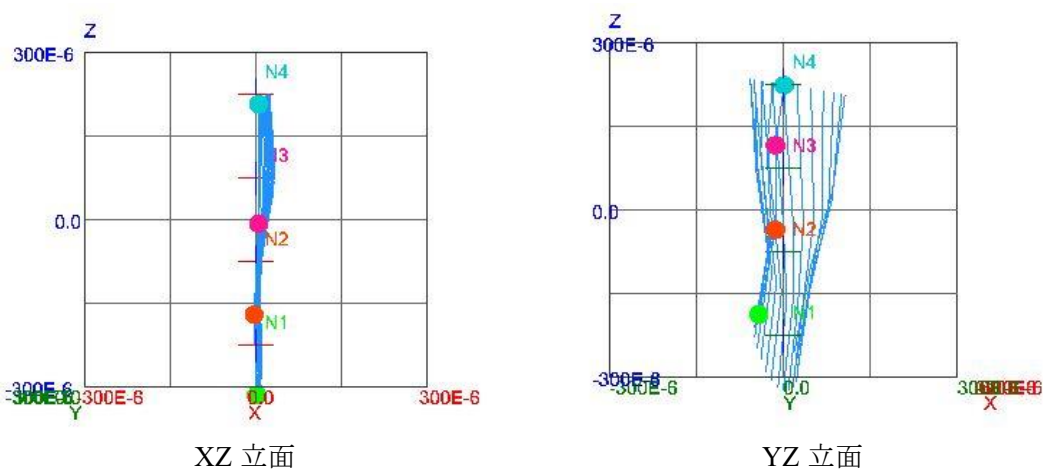
X 方向

Y 方向

Z 方向

図 3-18 BPF 4.6 ± 0.1 の時間-変位関係 20min 計測

図 3-18 より、X 方向において、N3 と N4 が同位相となっている。しかし、N1,N2 があまりにも小さい変位であるため、上階のみが揺れやすい振動数であることがわかる。Y 方向においては、N2,N3,N4 が同位相である。またも一次モードに近い動きをする可能性が高い。Z 方向においては、すべての箇所が同位相、同程度の変位となっている。この振動数でも建物全体が同程度上下動していることが考えられる。



XZ 立面

YZ 立面

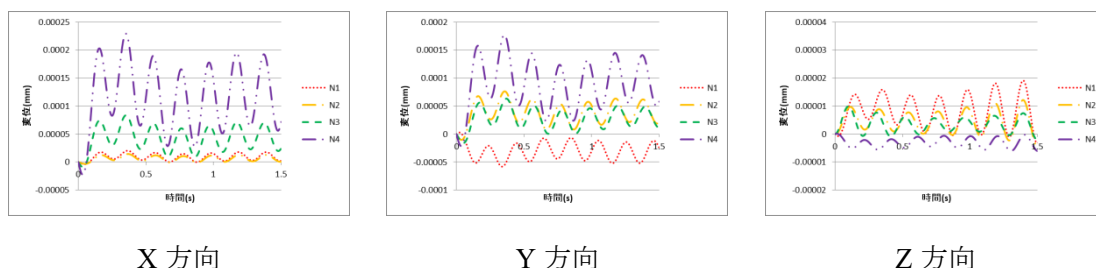
図 3-19 BPF 4.6 ± 0.1 のリサージュ

図 3-19 より、X 方向のリサージュにおいて、やはり上階のみ動きやすくなっていることがわかる。

Y 方向リサージュより、モード図に例えることができない動きをしている。

どちらを見ても、上下動はやはり激しいため Z 方向に揺れやすい振動数である。

BPF4.9±0.1Hz



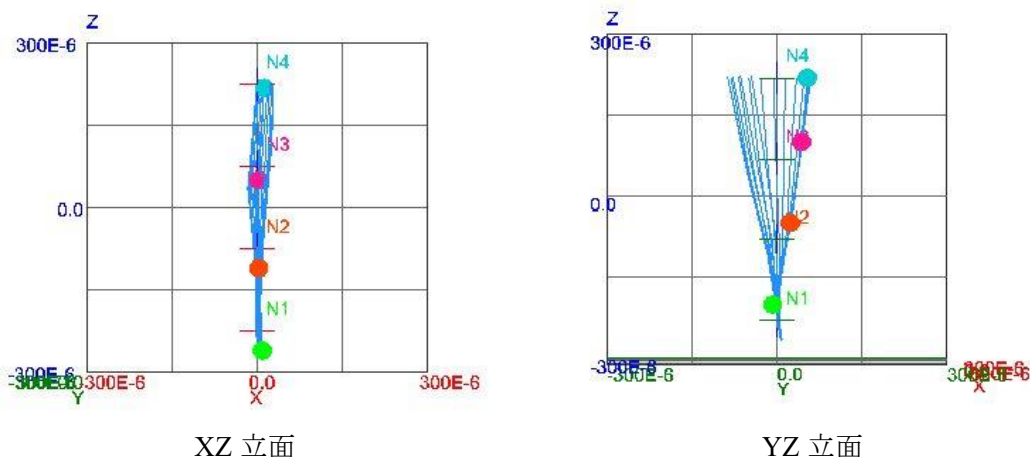
X 方向

Y 方向

Z 方向

図 3-20 BPF4.9±0.1 の時間-変位関係 20min 計測

図 3-20 より、X 方向において、同位相が確認される。上階の変位が大きくなる傾向から、一次モードの動きをする可能性があることがわかる。Y 方向において、N2,N3,N4 が同位相となっている。そのため、この振動数でも一次モードのような動きをする可能性が高い。Z 方向においては、はじめて位相がずれていることが分かる。



XZ 立面

YZ 立面

図 3-21 BPF4.9±0.1 のリサージュ

図 3-21 より、X 方向リサージュより、一次モードではないことがわかる。しかし、位相の通り、上階の方が揺れやすいことが確認できる。なお、Y 方向リサージュより、これまで同様、きれいな一次モードを描いている。一次モードのように動く振動数が多いことから、建物としての性能がかなり低下していることがわかる。

BPF6.0±0.1Hz

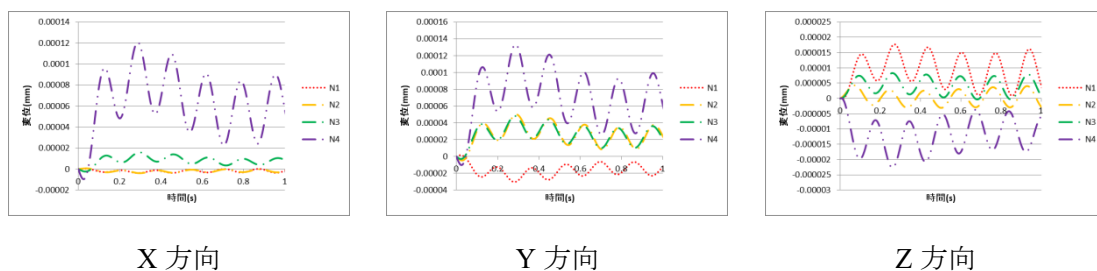


図 3-22 BPF6.0±0.1 の時間-変位関係 20min 計測

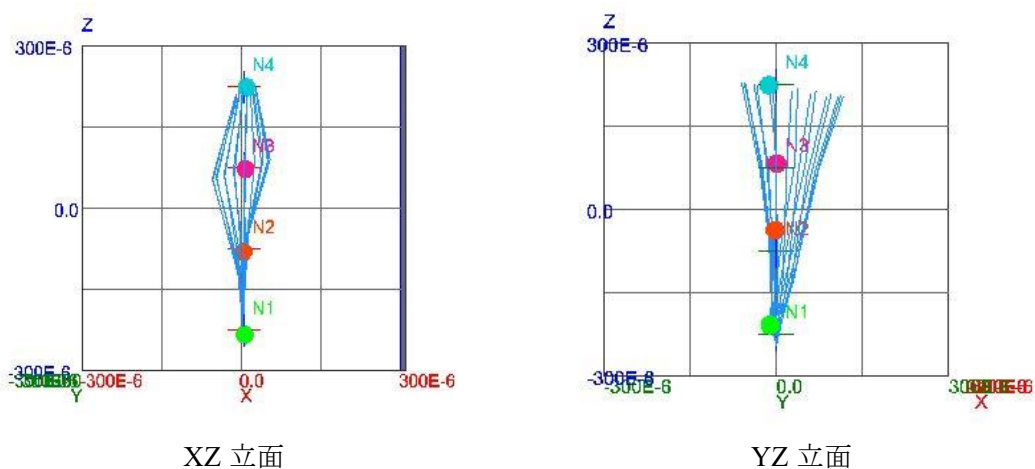


図 3-23 BPF6.0±0.1 のリサージュ

図 3-23 より、X 方向リサージュの 3 階に当たる N3 が大きく動いている。そのため、3 階のみ動きやすい振動数であることがわかる。これは本建物 3 階東西にある吹き抜けの影響であると考えられる。位相では N4 が大きく動くことになっているが、実際は N3 の方が大きい。

Y 方向リサージュより、この振動数付近でも一次モードのように上階ほど大きく動く様子がわかる。

BPF6.6±0.1Hz

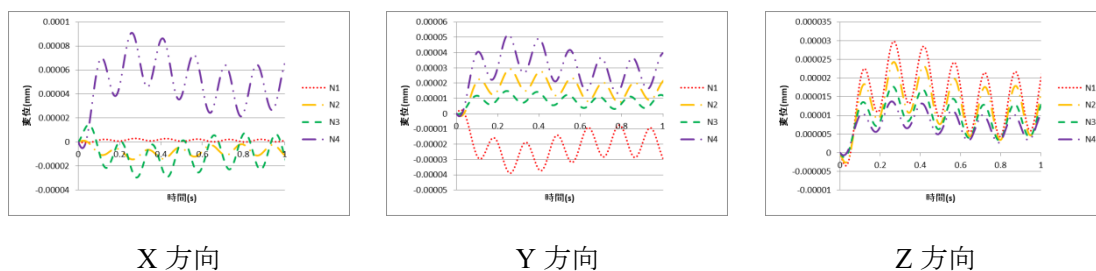


図 3-24 BPF6.6±0.1 の時間-変位関係 20min 計測

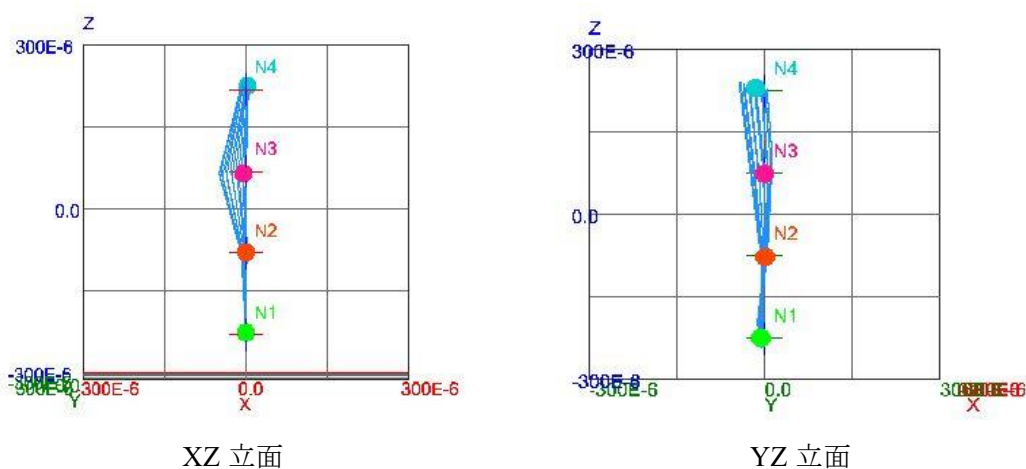
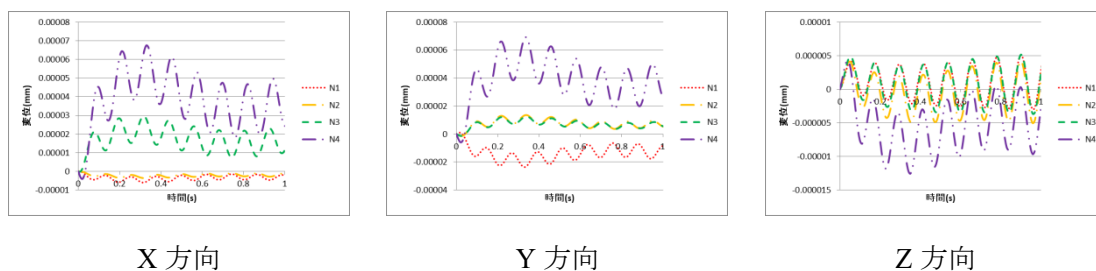


図 3-25 BPF6.6±0.1 のリサージュ

図 3-25 において、X 方向リサージュより、6Hz 付近と同じく、3 階が大きく動きやすいことがわかる。他の階では全然動いていないことから、2 階柱、3 階柱が大きく損傷していることがわかる。

Y 方向リサージュより N2 を起点とし、上階と下階が動いている。リサージュを見る限り高次モードでもないため、この振動数は X 方向のみ揺れやすい振動数である。

BPF8.2±0.1Hz

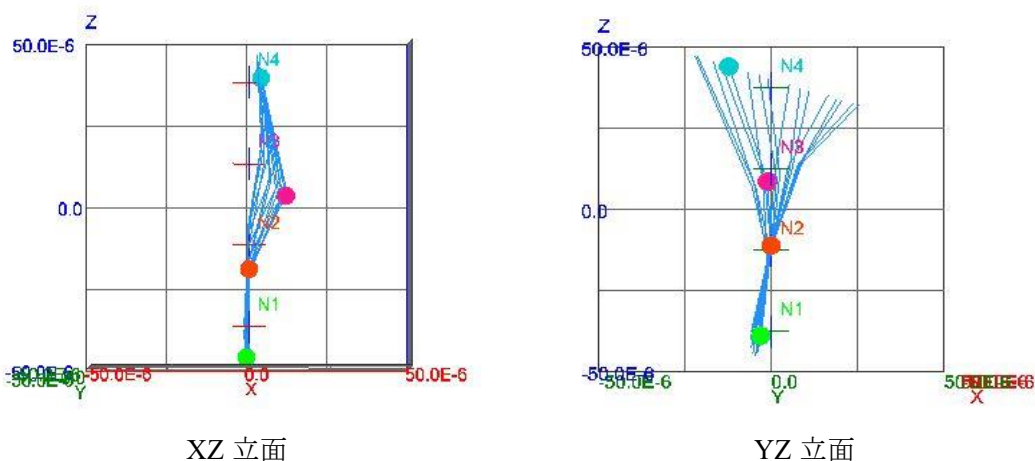


X 方向

Y 方向

Z 方向

図 3-26 BPF8.2±0.1 の時間-変位関係 20min 計測



XZ 立面

YZ 立面

図 3-27 BPF8.2±0.1 のリサージュ

図 3-27 より、
 X 方向、Y 方向リサージュともに 6.6Hz のものと似た動きをしていることがわかる。
 FFT のグラフより、N4 のみ Y 方向で大きなピークを持っていることから、小屋梁が Y 方向
 に揺れやすい振動数であることがわかる。

検討結果

X方向についてはきれいな一次モードを描くものはなかった。FFTのグラフをみてもN1からN4すべてが同程度のスペクトルを持っていることから揺れやすい振動数であるが、一次モードではないと考える。地盤の揺れやすい振動数がそのまま建物に伝わっていることが考えられる。また、4Hz以降で上階が揺れやすくなり、6から8Hzで3階が大きく揺れやすくなっている。3階の吹き抜けの影響が振動性状に大きく影響を与えていることがわかった。

Y方向においては多くの振動数で一次モードのような動きをしていることがわかった。X方向の結果とあわせ、通常の建物と大きく異なった振動性状を持っていることがわかる。

Z方向において、大きく上下動する振動数が多くあった。おそらく基礎が仕事をしておらず、地盤の動きをそのまま建物に伝えているものと考えられる。このことは、不同沈下が起きているためと考える。

検査指標としての技術的考察

位相を三次元可視化したものがリサーチであるが、結果に相違があった。これは、位相がグラフの大きさの関係上、数秒をピックアップして切り抜いたためであると考えられる。そのため、見る箇所を間違えば全く異なった考察をしてしまう可能性がある。また、位相や変位を見れば固有振動数を特定できるはずであるが、位相よりきれいなモードを描いているものがわからず、固有振動数を特定することができなかった。

それに対し、リサーチでは建物の実挙動を動画として追うことができ、的確に特徴的な動きをしている箇所を切り取ることができ、またBPFをかけて見たい振動数帯を切り取ることで固有振動数を確認することができる。

既往の研究においては、固有振動数の推定はFFTや位相を用いたものが多かった。しかし、圧倒的に位相を用いるよりリサーチを用いたほうが想像にたやすく、また的確な判断を下すことができると考える。

相対変位による評価

本節は補正をかけない変位の中でも、それぞれの波のピーク値の差を見る相対変位を用いて考察を行う。相対位変位の求め方は以下の図 3-28 のように行う。

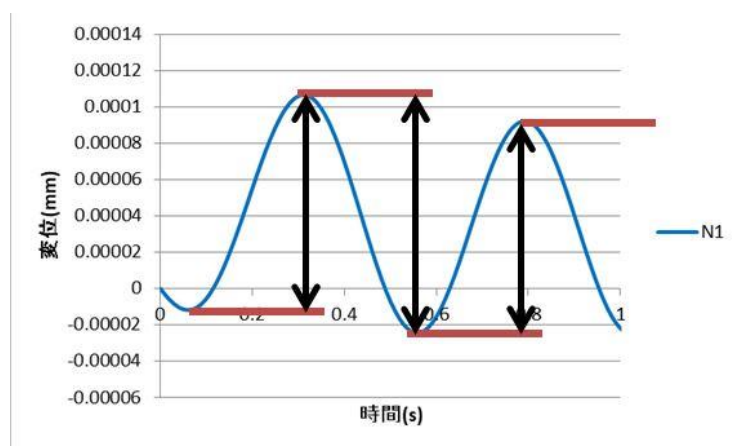


図 3-28 相対変位の求め方

振動のピーク値を 0 とし、次の逆側の山のピークまでの変位を算出する。これを計測時間全範囲で行い、数値を並び替えた。箱ひげ図を書き、統計的にはなるが計測範囲内の振動でどの程度揺れているのかを見ることができる。

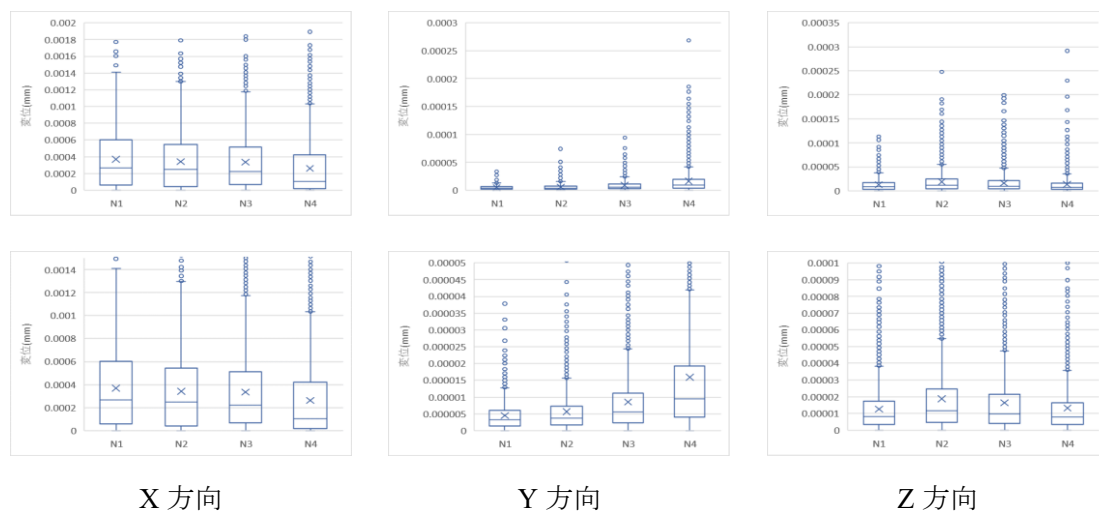


図 3-29 20min 計測での各方向箱ひげ図

表 7 対象とした波数

	N1 (1階床)	N2 (2階床)	N3 (3階床)	N4 (小屋梁)
X	7008	6829	9907	11175
Y	6473	7632	8333	11429
Z	9499	11316	10729	12526

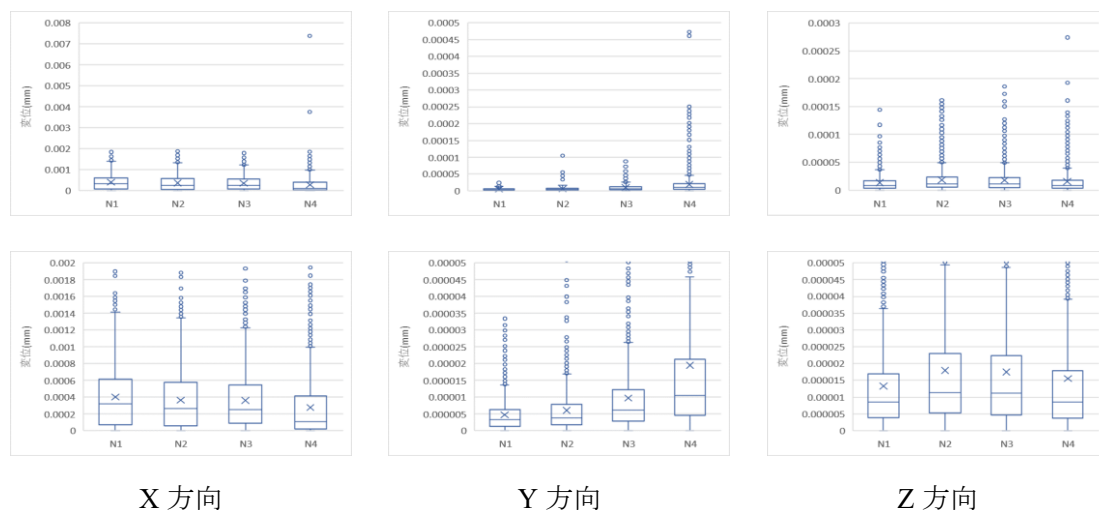


図 3-30 加振計測での各方向箱ひげ図

表 8 対象とした波数

	N1 (1階床)	N2 (2階床)	N3 (3階床)	N4 (小屋梁)
X	997	1035	1460	1723
Y	978	1106	1178	1705
Z	1409	1671	1676	1898

表 7, 表 8 より、加振計測は 180s であるため、おおよそ、各計測における 1s 間の波数が各方向とも近い数となっている。そのため、2 計測はどちらも似た振動状態での計測データと見ることができる。また、どちらの計測を見ても N2 のみ他のセンサと違い、Y 方向の振動回数が X 方向の振動回数を超えている。すなわち N2 (二階床) のみ Y 方向への振動が起りやすい=壁による床の拘束が弱い=劣化が進行していることが考えられる。二階床は側廊部分の屋根部分と同じラインであるため、その振動性状の違いによる影響が考えられる。

図 3-29 図 3-30 を見ると、方向ごと四分位数、平均値とも同じ傾向を示している。以下において各方向で分析していく。

X 方向において、上階に行くほど相対変位は小さくなる傾向が見られた。これは第一から第三四分位数、平均値全てに見られる傾向であるため、下階の方が揺れが大きくなっていることを示す。通常上の階ほど大きく動くため、逆の傾向となっている。不同沈下や地盤の影響を大きく受けていることがわかる。地震時の計測データがないため断定はできないが、下階柱の方がせん断が大きくかかることになるため、先行破壊による層崩壊が起こる可能性がある。一層目の柱の寸法拡大など強度増強で対策をする必要があると考える。

Y 方向において、X 方向とは異なり、上階ほど相対変位が大きくなる事がわかる。そのため、一次モードに似た動きをしていることがわかる。

Z 方向において相対変位が 2 層目>=3 層目>4 層目>=1 層目となっている。柱の輪切り上ひび割れは 3 層目柱にあるため 3 層目が一番大きく上下動すると思えたが、それ以上に 2 層目が大きく動いている。そのため 2 層目を支えている 1F,およびひび割れの多い 3F の柱は優先的に補強を行う必要があると考える

各階床+小屋梁の4点計測による建物としての振動性状の把握まとめ

FFT や位相, リサージュとまとめると, 本建物はかなり一般的な建物と動き方が違うことがわかった。

X 方向において, 典型的な一次モードを描くものはなかった。また, 相対変位より, 一階の変位が大きくなる傾向がわかった。可能性としては地盤の揺れやすさがそのまま建物に伝わっていることが考えられる。普通の建物は一次モードの刺激係数が大きいいため, おおよそ一次モードのような動きで動くこととなる。しかし, 一階は地盤の影響で動きやすく, 二階, 三階も吹き抜けによる柱の劣化で動きやすくなっており, 一番高い箇所が存在する小屋梁が一番変位が小さい。X 方向においてはかなり劣化が進行していることがわかる。また, FFT やリサージュの結果を見ると, 4Hz 以降で上階が揺れやすくなり, 6 から 8Hz で 3 階が大きく揺れやすくなっている。3 階の吹き抜けの影響が振動性状に大きく影響を与えていることがわかる。

Y 方向において, 多くの振動数で一次モードのような動きをしていることがわかった。そのため, 相対変位を見ても上階ほど大きく動く一次モードのような動きをすることがわかった。Y 方向に関しては X 方向に比べて劣化は少ない事がわかる。

Z 方向において, 大きく上下動する振動数が多くあった。おそらく基礎が仕事をしておらず, 地盤の動きを直接建物に伝えているのだろう。相対変位をみても Y 方向より Z 方向の方が変位が大きく出ている。通常の建物は XY 方向に比べ, Z 方向の変位はかなり小さくなる。しかし, Z 方向の変位が大きくなっていることから, 基礎が仕事していない可能性が高いことがわかった。

3.4.2 1号棟側廊部の振動性状の把握

本節では、図 3-31 のように側廊部 (N1 , N2 : 本建物側内壁 , N3 , N4 , N5 : 側廊部内壁) 計測の結果を示す。N1, N3 の箇所は柱部分に当たる。本計測では、建物本体と側廊部での振動性状の違いを確認する。

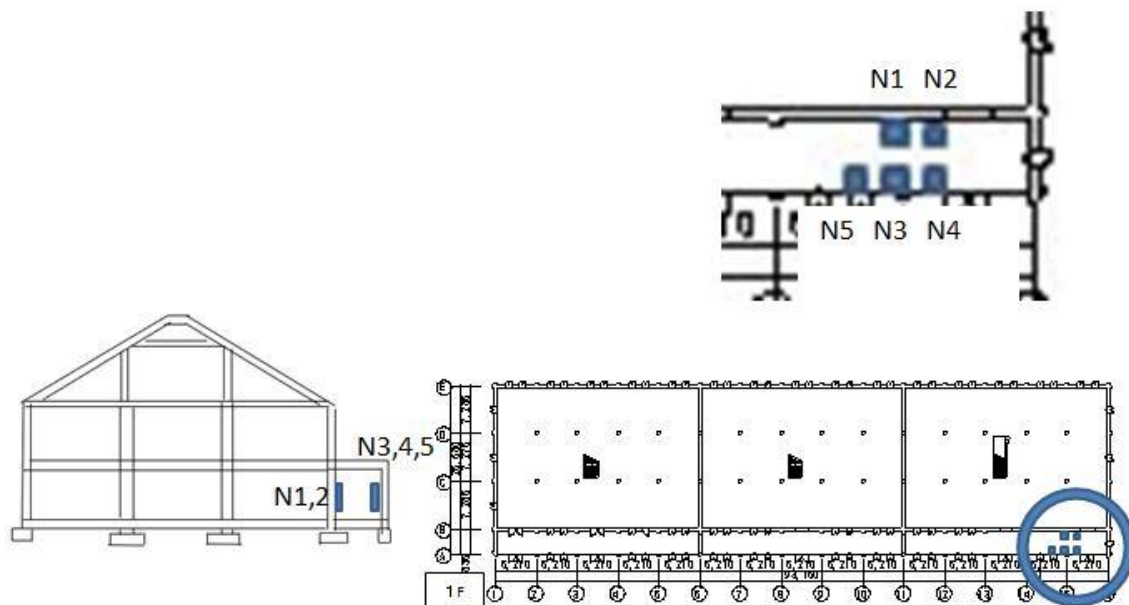


図 3-31 建物高さ方向計測平面図

FFT による結果

図 3-32 に側廊部各方向の FFT の結果を示す。

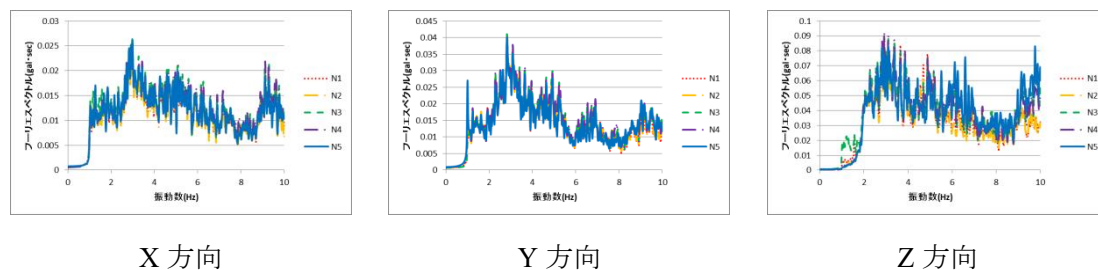


図 3-32 1号棟側廊 FFT

図 3-32 をみると、N1 から N5 どの方向でも固有振動数、スペクトルが一致している。そのため、側廊部の本建物側(N1,N2)、外側(N3,N4,N5)での振動性状の違いは見られない。本建物側と外側ではスペクトルが違おうだろうと考えていたが、同じであった。

表9 FFTによる側廊部の固有振動数

	X方向(桁行方向)	Y方向(梁間方向)	Z方向(高さ方向)
	2.98	2.82	2.28
	5.1	4.93	
		6.9	

表10 FFTによる本建物の固有振動数と考えられる振動数

	X方向(桁行方向)	Y方向(梁間方向)	Z方向(高さ方向)
20min 一次	2.88	2.49	2.44
一次?	4.83	4.64	
二次?	6.72	5.9	

表9, 表10は側廊部と本建物の固有振動数をまとめた表である。同表をみると, X,Y方向については側廊部のほうが, Z方向については本建物のほうが固有振動数が高くなっている。

このことから, 建物全体で考えると本建物と側廊部で固有振動数は異なっている。しかし, 上で述べたとおり境界面の壁では違いが見られなかったため, 他の箇所でも両方の特性を持つ境界面ができているはずである。

側廊部の上部の梁接合部, 及び側廊部屋上及び本建物2Fのベランダに当たる屋根スラブが両方の影響を受けているのではないかと考える。前節の相対変位で2F床のY方向への振動数が多いと述べた。これは, 本建物の固有振動数と側廊部の固有振動数それぞれでこの箇所が揺れているためである可能性があるためである。

今後, 可能であれば今後2F床平面(本建物と側廊部屋上)の同時計測を行って確認してもらいたい。

伝達関数による考察

本節では前節で求めたフーリエスペクトルの一つのセンサのフーリエスペクトルを 1 としたときの倍率である伝達関数を用いた結果を図 3-33, 図 3-34 に示す。基準とする箇所は本建物側柱の N1 と側廊部外側柱の N3 とする。

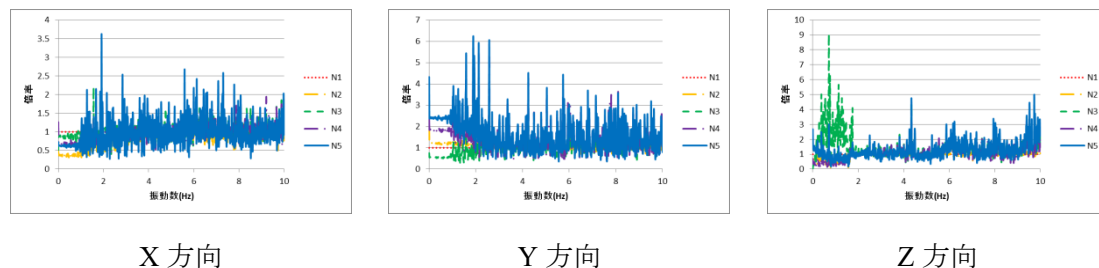


図 3-33 1号棟側廊 N1 基準 伝達関数

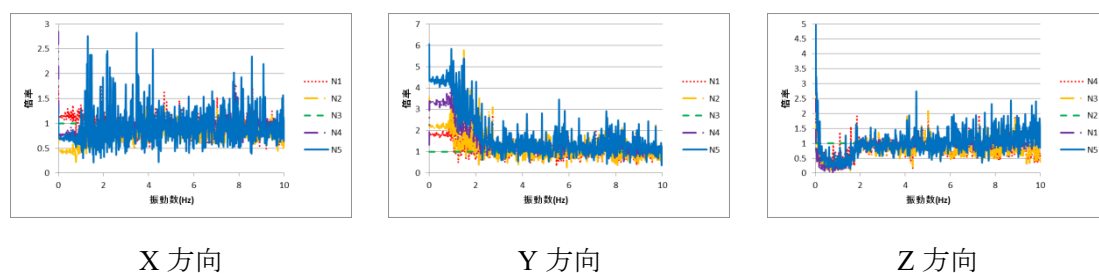


図 3-34 1号棟側廊 N3 基準 伝達関数

図 3-33 図 3-34 より、図 3-34 1号棟側廊 N3 基準 伝達関数 1Hz 以下は HPF1Hz の影響を受けるため、無視して考える。

主だったピークは見られないため、計測箇所での振動性状の違いは見られなかった。

FFT を用いた考察と同じく、やはり計測した壁の高さレベルでは振動性状の違いは確認できないことが明らかとなった。

リサーチを用いた検討

図 3-36 に俯瞰と YZ 立面でみた計測箇所のリサーチを示す。

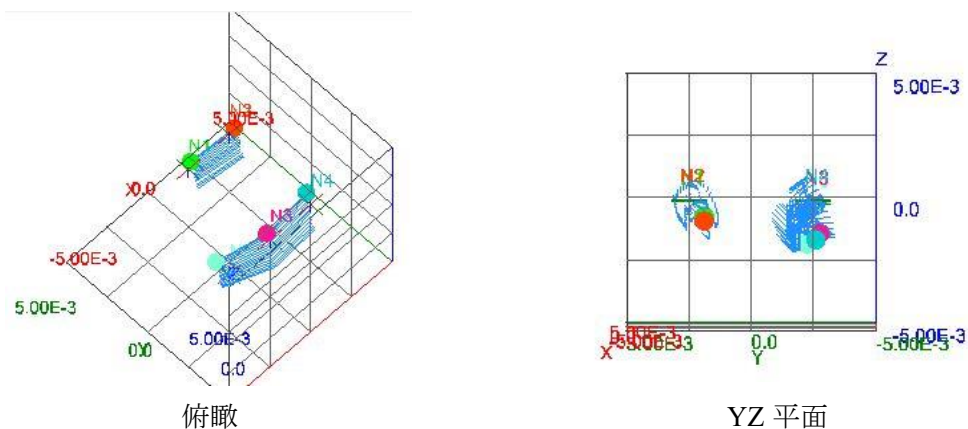


図 3-35 自由振動(BPF なし)での YZ 立面のリサーチ

図 3-35 俯瞰のものより、N1,N2 の本体側と N3,N4,N5 の外壁側ともに平行移動していることがわかる。図 3-35YZ 立面より、少し N3,N4,N5 の外壁側のほうが大きく動いている。外壁側のほうが拘束が少ない、また日射などの劣化が蓄積されていることから、外壁側の動きが大きくなることは理解できる。

相対変位を用いた考察

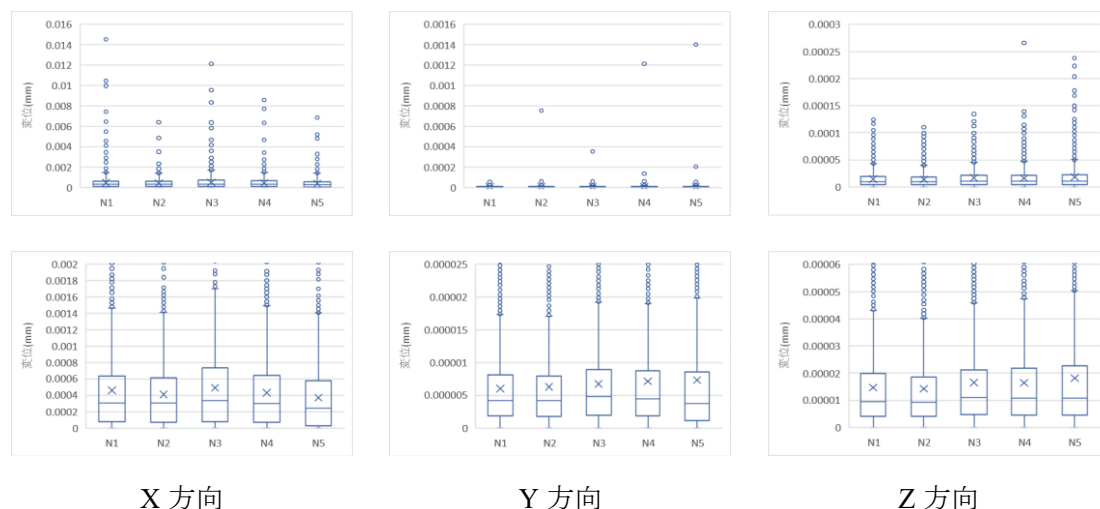


図 3-36 1号棟 側廊

表 11 対象とした波数

	N1	N2	N3	N4	N5
X	1865	1917	1895	2015	1958
Y	1870	1841	1961	1930	2071
Z	2274	2265	2320	2432	2474

図 3-36、表 11 より、X 方向においては N3 である外側の柱が少し動きやすくなっていることがわかる。

内側にはひび割れが見られなかったため、外壁側にひび割れができてそれが原因になっているのかもしれない。Y 方向においては、外壁側である N3,N4,N5 の方が大きく動いている。これはリサージュの結果とも合致し、外壁のほうが拘束は少ないため、妥当である。

1号棟側廊部 まとめ

FFT や伝達関数より、側廊部の建物本体側、外壁側での振動数的な違いは見られなかった。

また固有振動数より、建物本体より少し側廊部の方が固有振動数が高いことがわかった。建物本体と側廊部の結合点である 2F ベランダで、両方の固有振動数が見られる危険箇所がある可能性が高い。

リサージュや相対変位より、外壁側のほうが少し動きやすいことがわかった。これは梁による拘束量の違いで、拘束が少なく、また日射を受ける外壁側のほうが動きやすくなっているのだろうと考える。

3.5 床壁一体性の確認

本節では、3F 北側外壁のはらみ、及び3F 床壁間の一体性を確認する。
計測箇所、解析指標は図 3-37 に示す。

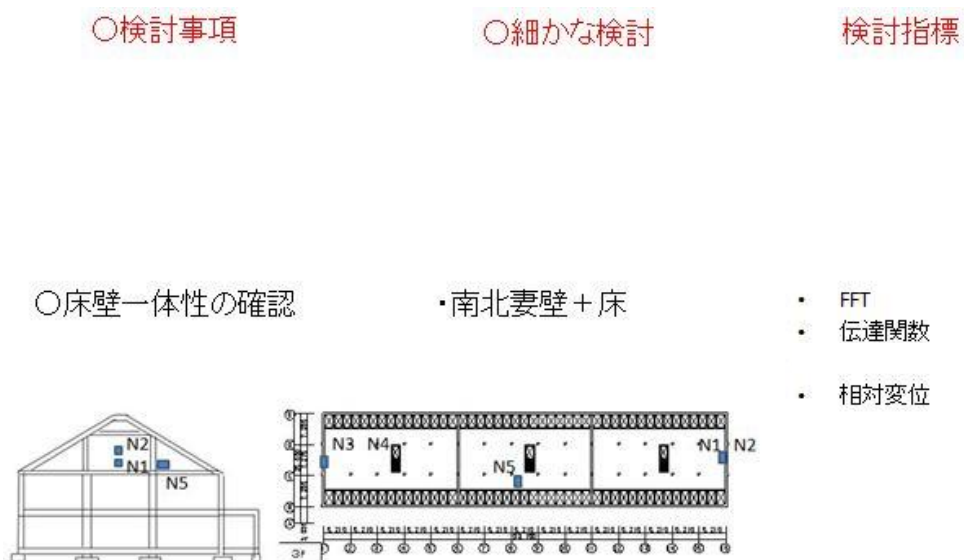


図 3-37 計測箇所

図 3-37 に示すとおり、1号棟 3F の南北方向で計測を行った。N5 である床に対し、壁に貼った N1,N2 及び N3,N4 の揺れ方を見て、一体性確認を行う。

解析指標としては FFT を用いた固有振動数の算出、伝達関数、相対変位を用いる。

3.5.1 1号棟3階の床壁一体性及び南北壁のはらみ具合の把握

図 3-38 に示す、1号棟3階の床壁(N1:3F北壁下部, N2:3F北壁上部, N3:3F南壁下部, N4:3F南壁上部, N5:3F床)の結果を示す。計測目的としては、北壁側が爆心地に近く、また爆風を受けているため南壁より劣化が激しいという情報の確認である。また壁だけでなく同時に3Fの床も計測することで、東西が吹き抜けになっているため、壁と床とでどのように振動性状が異なっているかも検討することができる。前節でX方向(南北方向)のFFTの結果3Fでは6.6Hz付近に大きなピークを持っていたため、その振動特性が壁にどのような影響を与えているのかを確認できると大いに意味があると考えられる。以下に各解析手法による結果をまとめる。

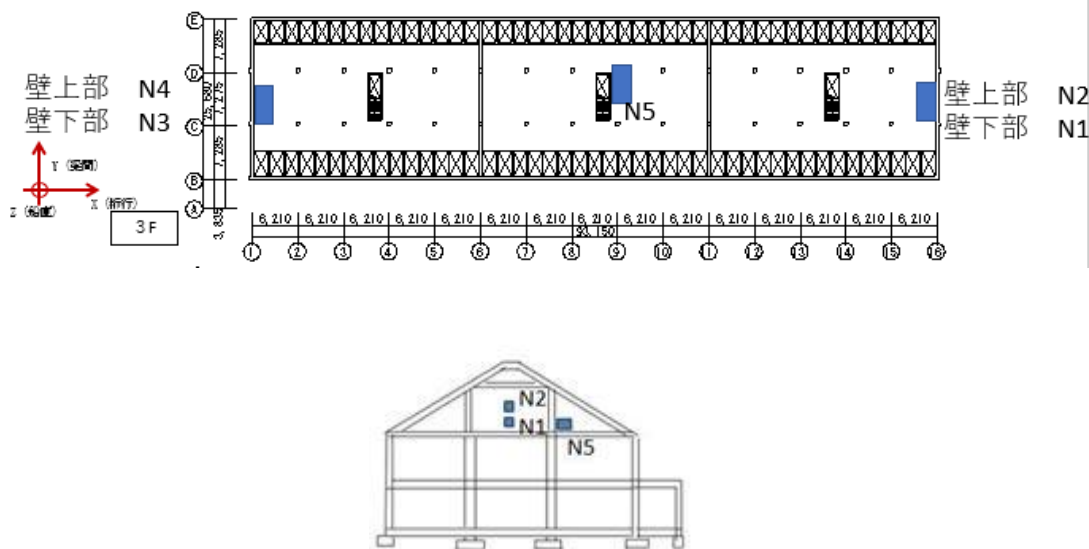


図 3-38 計測図面

FFT による考察

図 3-39 に各方向の FFT 結果を示す。上段は N1-N5 のもの、下段は N1-N4 のものである。

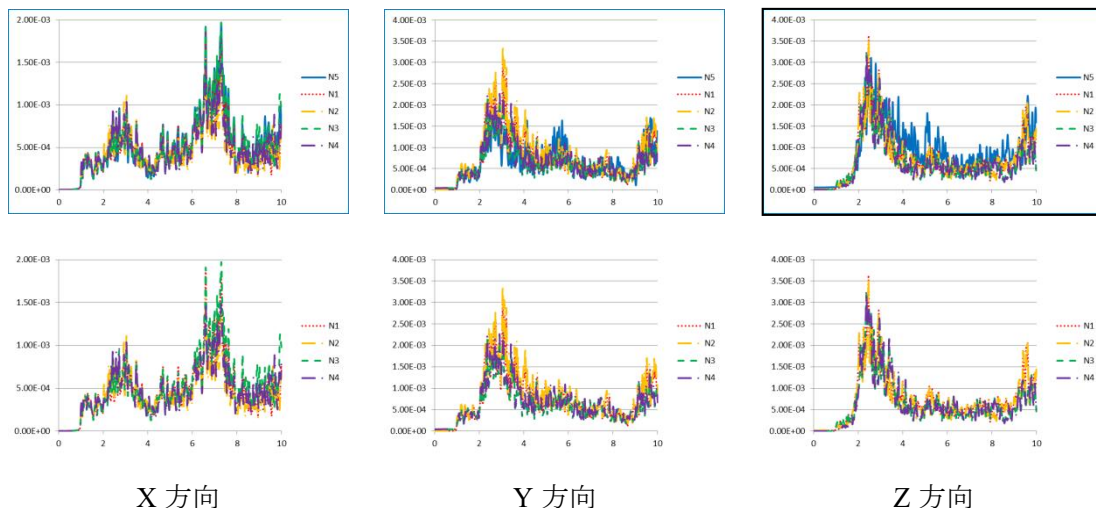


図 3-39 床壁一体性 FFT

表 12 固有振動数

	X 方向(桁行方向)	Y 方向(梁間方向)	Z 方向(高さ方向)
	2.7	2.7	2.44
	3.0	3.0	
	4.6	5.7	
	6.6		
	7.2		

図 3-39、表 12 に示すとおり、X 方向において、固有振動数と考えられる 6.6Hz,7.2Hz 付近のピークだが,N1 から N5 まですべてにピークを持っている。すなわち 3 階については床壁一体となって 6 から 7Hz 付近の振動をしやすいことがわかった。

Y 方向においては、N5 を含めたほうと含めていないものを見比べると、N5 を含めたもののみ 5.7Hz 付近に大きくピークが見られる。逆に 3Hz 付近のフーリエスペクトルは N5 である床部分が壁部分より小さくなっている。以上より Y 方向に関しては床部分、壁部分で多少振動の具合が異なる事がわかる。これは 3 階床の東西吹き抜けによる Y 方向への拘束力の違いが影響しているのではないかと考える。

z 方向の固有振動数は 2.44Hz のみピークとなっており前節の結果からもこの値が固有振動数であることがわかる。

伝達関数による計測結果の評価

図 3-40, 図 3-41 に伝達関数を示す。各方向において、FFT と同じく 0 から 10Hz までのものである。また、基準とするセンサを N1 (3 階北側壁下部) と N5 (3 階床) とした 2 つの結果を示している。

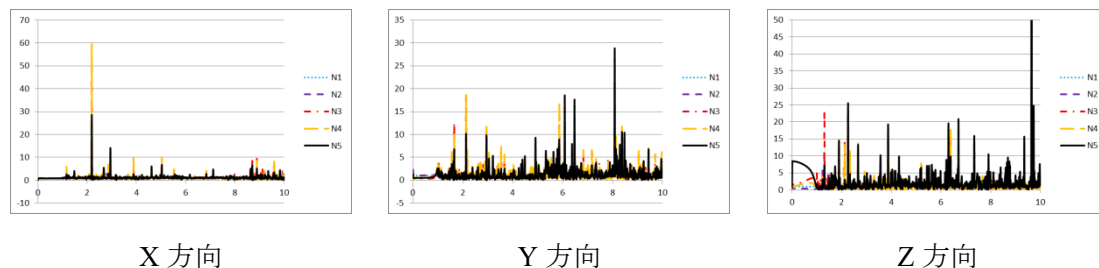


図 3-40 床壁一体性 N1 基準 伝達関数

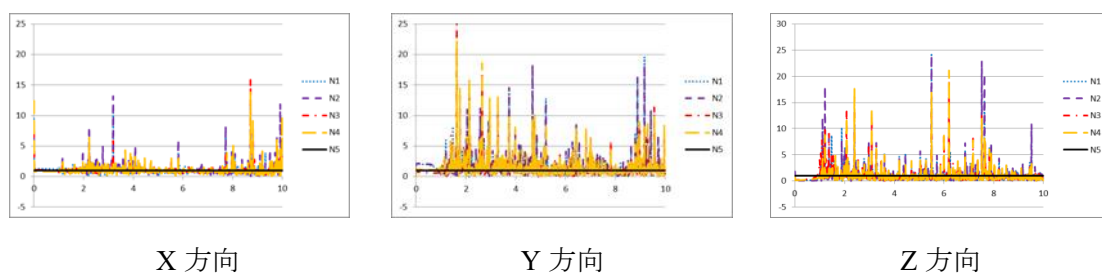


図 3-41 床壁一体性 N5 基準 伝達関数

図 3-40 からわかるように、N1 基準のものより、X 方向においてピークは見られない。Y 方向において、FFT で述べたように 6Hz 付近で N5(床)がピークを持っている。床のほうが揺れやすい振動数である。Z 方向においてはピークは見られないが倍率が高くなっているものが大きいことから、壁より床のほうが揺れやすいことを示している。

図 3-41 に示す N3 基準とした伝達関数でも、X 方向はピークも見られず、倍率も大きくなっていないことがわかる。Y 方向においては 6Hz 付近以外の倍率が高くなっていることから、床より壁のほうが動きやすくなっていることがわかる。

相対変位による評価

前節と同じく、それぞれの箇所の相対変位の箱ひげ図を図 3-42 に示す。

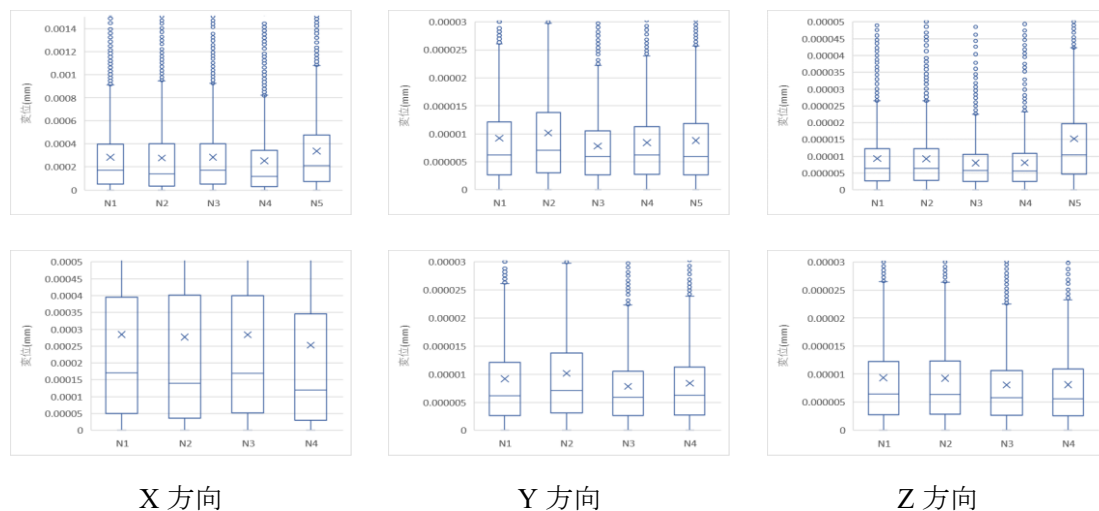


図 3-42 1号棟3階壁床計測

表 13 1号棟3階壁床計測 対象とした波数

	N1 (北壁下)	N2 (北壁上)	N3 (南壁下)	N4 (南壁上)	N5 (床)
X	3154	3247	3271	3723	2566
Y	1928	1940	1975	2004	2262
z	1901	1923	1687	1880	2748

図 3-42、表 13 より、壁下部より上部の方が振動回数が多いことがわかる。やはり床による拘束の強さが影響すると考える。X 方向の振動回数が他方向の 1.5 倍程度となっている。壁の計測箇所は X 方向に自由に運動できるためこのような結果となっている。また、床と壁を比べると大きく傾向が違う。壁は x 方向に対して振動しやすいが、床は y 方向に壁より振動している。これも 3 階の東西吹き抜けによる影響であると考えている。また、z 方向(高さ方向)の振動回数も大きく異なっている。壁は一体となっており上下に振動しにくい、床は上下拘束が柱のみなので振動しやすいものと判断している。

以下、壁の南北それぞれを各方向について分析していく。

X:北壁(N1,N2)の方が大きく動いていることがわかる。また北壁はおおよそ x 方向への相対変位は上部、下部で変わらないのに対し、南壁(N3,N4)では大きく異なっている。この差は壁内側のモルタルと外側レンガの一体性によるものが疑われる。本計測は内壁部分にセンサを貼っているため 断定はできないが、劣化していないと思われる南側の一部のみの振幅が違うため、原因であると考ええる。

Y:X 方向と同じく、北壁のほうが大きく動いている。しかし、X 方向と異なり、上部ほど振幅が大きい動きをしている。これはモード図からもわかるように北壁、南壁は一次モードに近い振動をしている裏付けであると考ええる。

Z:他方向と同じく北壁のほうが変位が大きい。また高さの違いによる差は見られない。そのため、壁はきちんと一体となって上下に動いている。地盤の動きやすさ、もしくは北壁のどこかで大きく横向きのひび割れが入っていることが原因と考える。

1号棟3階の床壁一体性及び南北壁のはらみ具合の把握 まとめ

X 方向において、振動数領域の解析では各箇所ピーク振動数が同じであったため、同一状態であることがわかった。しかし、相対変位を見ると、北壁のほうが少し変位が大きくなる傾向が見られた。

Y 方向において、明確に北壁のほうが変位が大きくなっている。

XY 方向の時間領域の解析より、北壁の方が動きやすいことがわかった。

Z 方向に関しては、振動数領域、時間領域ともに壁よりか床のほうが動きやすいことがわかった。

3.6 壁の剥離確認

本節では建物概要でも書いたとおり、この建物に無数に存在している外壁のひび割れ、またそれによる外壁レンガ-内壁モルタルの剥離検査の結果を示す。計測目的としては、竣工から約 110 年、原爆の爆風や雨風にさらされてきた外壁部はどの程度劣化しているのかを知ることである。陸軍被服支廠の外壁は外側がレンガ、内側がモルタルでできており、劣化がひどければこの境界面で剥離が起きる。剥離が起きていると、地震での煉瓦壁の崩壊が容易に起こることになるため、即座に補強する必要があるといえることができる。

計測箇所、解析指標は図 3-43 に示す。

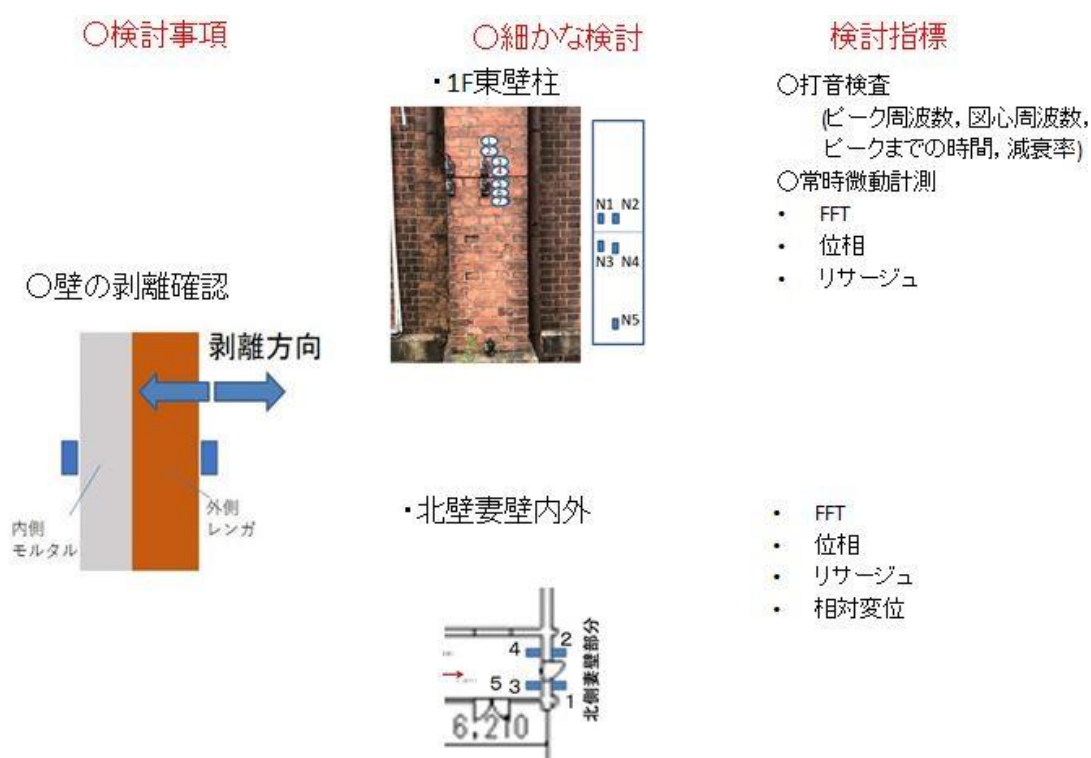


図 3-43 計測箇所

図 3-43 に示すとおり、まず明らかなひび割れの見られた箇所を対象に、打音検査、常時微動を用いた振動計測を行った。その後、打診音から剥離と疑われる場所で、外壁の外側内側両方にセンサを貼ることのできる 2 箇所で常時微動計測のみで外壁の剥離検知が行えるのかを確認することとした。

3.6.1 1F 東壁柱の剥離確認

本節では図 3-44 の青丸に示す 1 階側廊部東壁で大きなひび割れの入った柱の検査結果を示す。

打音検査の箇所として、図 3-45 に示すようにひび割れの上下 7 個のレンガを対象とした。

常時微動計測は図 3-45 に示すようにひび割れ上下に 2 つずつ、健全状態と思われかつ基盤部分である柱脚に 1 つ加速度センサを貼り、計測を行った (N1: ひび割れ上部端側, N2: ひび割れ上部中央側, N3: ひび割れ下部端側, N4: ひび割れ下部中央側, N5: 柱脚)。

図 3-45 に示すように誰が見てもわかる大きなひび割れが入っていたため、このひび割れ上下は剥離診断されると予測し、計測を行った。

本節では、剥離の検査に加え、打音検査はモルタル、タイルの剥離検知だけでなく、レンガの剥離まで検査することができるのか、及び常時微動を用いた計測でもレンガの剥離検知は可能かという、既存技術の応用範囲の確認も含まれている。可能であれば、センサを用いた剥離検知技術の価値が上がるため、より研究内容である検査技術の高度化に寄与でき、価値のある結果として示すことができると考えている。

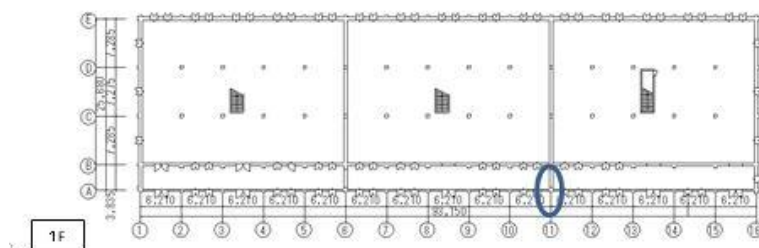


図 3-44 計測箇所

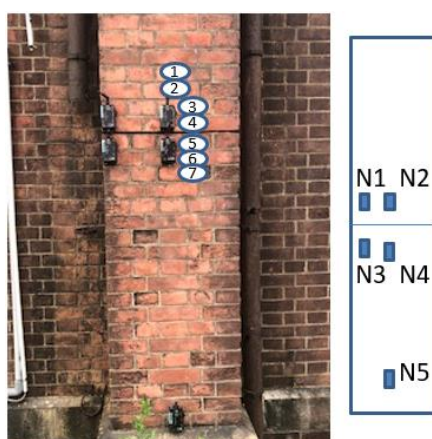


図 3-45 打診箇所及び計測箇所

打音検査による考察

まず、剥離検知できる可能性が高いと感じた打音検査の解析結果を示す。
打診箇所は図 3-46 に示すように、ひび割れの上4点、ひび割れの下3点の敬7点で、上から1,2,・・・7と計測番号を振っている。
また、打診検査は各箇所3回ずつ行った。3打は a,b,c と略称を与える。



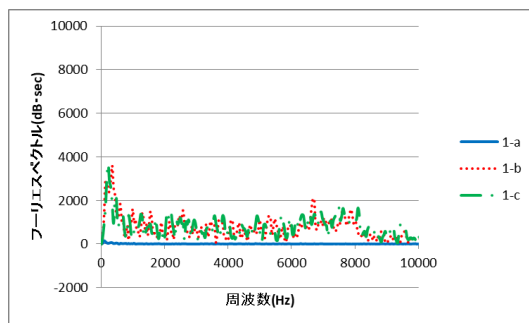
図 3-46 計測箇所の拡大写真

図 3-46 を見れば分かる通り、確実に4,5は剥離している。

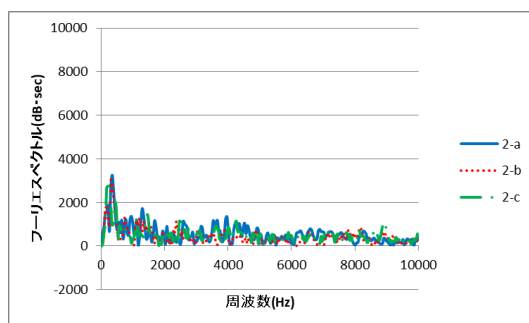
以下に打診音を各指標で解析した結果を示す。

ピーク周波数を用いた考察

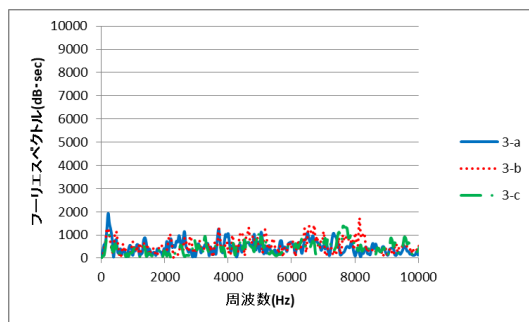
各打診箇所での打音のFFT結果を図3-47に示す。



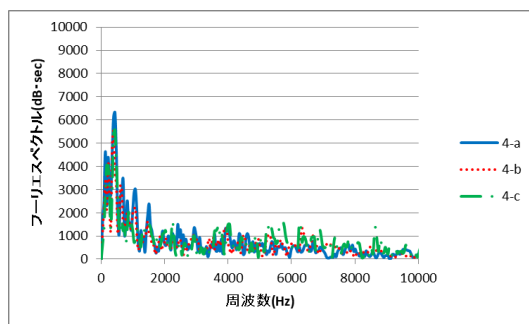
打診箇所1のスペクトル



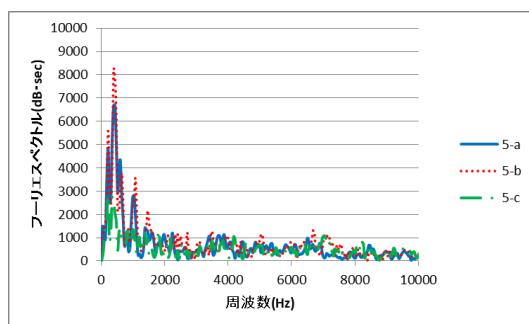
打診箇所2のスペクトル



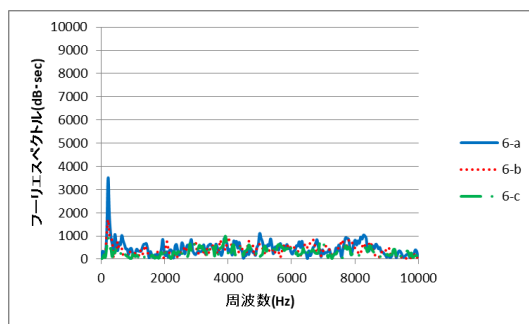
打診箇所3のスペクトル



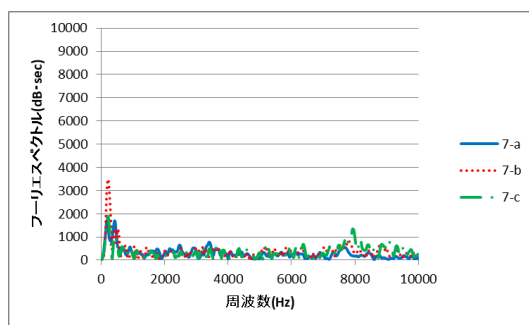
打診箇所4のスペクトル



打診箇所5のスペクトル



打診箇所6のスペクトル



打診箇所7のスペクトル

図 3-47 各打診箇所のフーリエスペクトル図

加振は同一人物が同程度の力で打診棒を用いて行っている。図 3-47 の打診箇所 4,5 の 1000Hz 以下のピークが大きく出ているため、剥離を疑うことができる。しかし、他の計測箇所でも 1000Hz 以下のピークが一番大きいため、1000Hz 以下を除いた 1000~10000Hz の範囲でピークの周波数をみつけた。打診箇所とピーク周波数の関係を図 3-48 に示す。

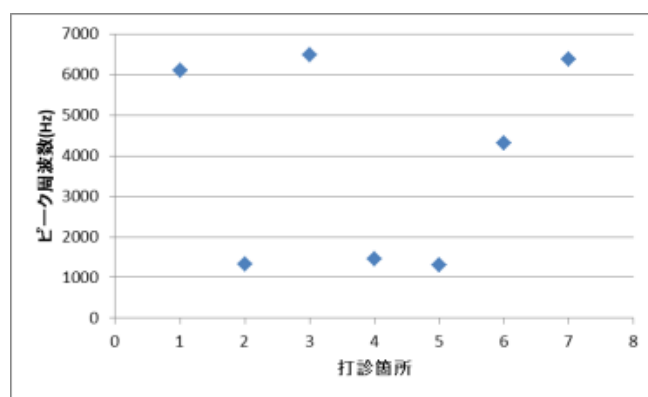


図 3-48 打診箇所とピーク周波数

図 3-48 に示す通り、打音箇所 2,4,5 のピーク周波数と 1,3,6,7,のピーク周波数では大きく異なる結果となった。他の湿式仕上げの剥離箇所はピーク周波数が小さくなる点、打診箇所 4,5 の間にひび割れが走っている点からモルタル-レンガ間の剥離においてもピーク周波数を用いることは有効である可能性が高いと考えている。

打診箇所 2 に関しては見た目では剥離とわからないが、内部で剥離している可能性が考えられる。

図心周波数を用いた考察

図 3-47 に示したスペクトル図をみると、健全なものは 6000～8000Hz 付近にもピークを持っており、図心周波数を見ると確実に剥離箇所より高くなるだろうと考えた。そこで図 3-47 に示した 0～10000Hz の範囲で図心周波数を計算した。

打診箇所と図心周波数の関係を図 3-49 に示す。

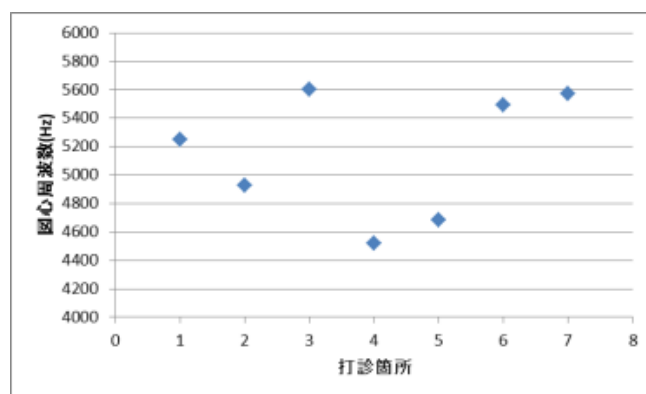


図 3-49 診箇所と図心周波数

図 3-49 の通り、図心周波数を用いてもピーク周波数と同じく 2,4,5 の値が他より小さくなっている。確実に剥離が生じている 4,5 の値が特に小さくなっている点も進行度評価まで行える可能性があると考えられる。また、差も 1000Hz 程度あるため、閾値を設けやすい。ピーク周波数では 1000Hz 以下に大きなピークを持っており、ピークが見つかりにくい可能性がある。

以上の理由より、図心周波数を検査指標に使ったほうが確実性が高いと考えている。

加振から最大音圧までの時間を用いた考察

図 3-50 のように加振時を±1000dB を超えた時刻とし、そこから最大音圧になるまでの時間を各々算出した。各打診箇所での最大音圧までの時間を図 3-51 に示す

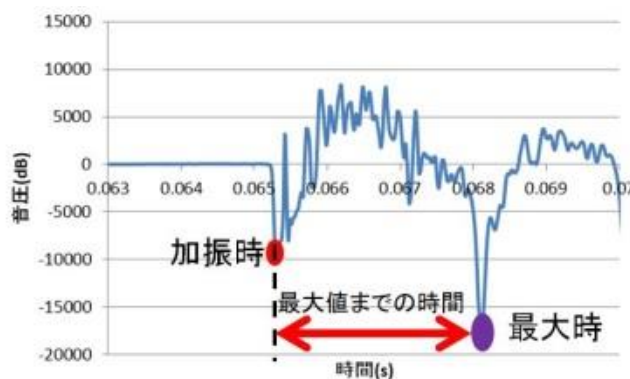


図 3-50 加振時と最大音圧までの時間の算出方法

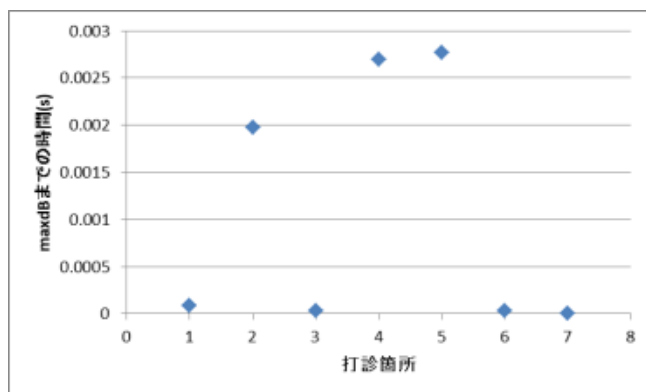
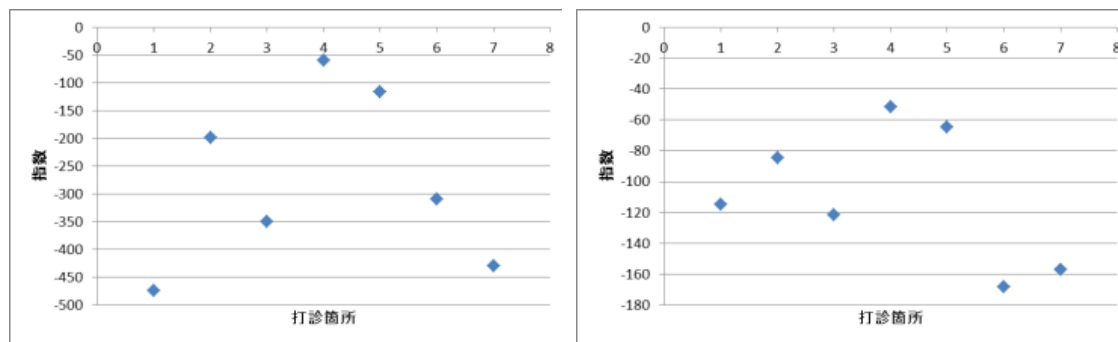


図 3-51 打診箇所と最大音圧までの時間

図 3-51 に示すように、打音箇所 2,4,5 では加振から最大音圧までに時間がかかるのに対し、それ以外の箇所ではおおよそ加振時＝最大音圧となっていることがわかる。剥離部では空気層ができ、物体-空気層の界面で反射音がおこることによる影響と考えている。この結果は前節と同じ傾向を示すことから加振時から最大音圧までの時間という指標も剥離検知には有効であることと考えている

減衰率を用いた検討

最大音圧から音圧が 1/2, 及び 1/5 になるまでの減衰率を算出した。各打診箇所での減衰率(指数)を図 3-52 に示す。



1/2 までの減衰率

1/5 までの減衰率

図 3-52 診箇所と減衰率

図 3-52 より、どちらも減衰率が大きく異なっているが、特に最大音圧の 1/2 までのほうが顕著にその差が見られる。健全部では一体となって振動し、振動が発散されるのに対し、剥離部では空気層ができ、その部分に自由振動が残るため減衰率が小さくなっているのではないかと推定している。この結果からも加振箇所 2,4,5 の値が大きく他と異なるため、閾値を定めることで剥離評価の指標に使えるのではないかと考えている。

1F 東壁柱の打音検査による剥離確認のまとめ

打音検査によって得られた音を多くの指標で解析し、分析を行った。すべての指標が剥離部分である打診箇所 4,5 を他と違う値で評価することができた。このことから今回用いた指標はどれもモルタル-レンガ間の剥離検知には有効であると考えられる。また目視では健全に見える打診箇所 2 も 4,5 と同じように他と異なる値で評価できた。見えない剥離も検知できている可能性が高いと考えている。

閾値を定めるにはデータ数が少ないため、今後はデータ数を増やすことで、より実用的な検査方法にできるのではないかと考えている。

常時微動計測による考察

続いて常時微動を用いた解析結果を示す。

常時微動計測は図 3-53 に示すようにひび割れ上下に 2 つずつ、健全状態と思われかつ基盤部分である柱脚に 1 つ加速度センサを貼り、計測を行った。(N1: ひび割れ上部端側,N2: ひび割れ上部中央側,N3: ひび割れ下部端側,N4: ひび割れ下部中央側,N5:柱脚)



図 3-53 計測箇所

図 3-53 より、N1,2 と N3,4 間には大きなひび割れが走っているため、確実に上と下で挙動が違うだろうと考え解析を行った。

前節、打音検査では確実に剥離を検知できたため、本節でも同じ結果を示すことができれば、モルタル-レンガ間の剥離検査は多くのやり方で行うことができる事がわかる。また、常時微動計測で外壁の剥離検知という新しい検査方法を提案できるため、面白い計測であると考えた。

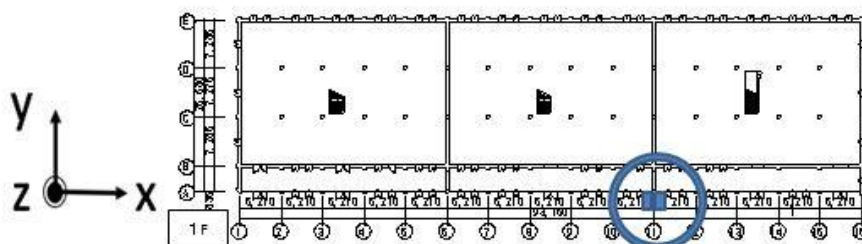


図 3-54 計測箇所

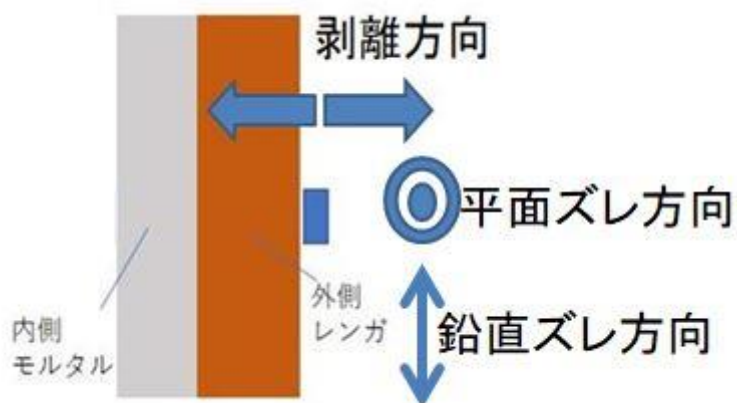


図 3-55 方向設定

図 3-55 に計測箇所，方向設定を示している。本計測であると X 方向が平面ズレ方向，Y 方向が剥離方向，Z 方向が鉛直ズレ方向にあたる。両方の表記で書くため，わかりやすい表記で見てもらえると幸いである。

以下に常時微動計測を各指標で解析した結果を示す。

FFT による考察

図 3-56 に各方向の FFT 結果を示す。

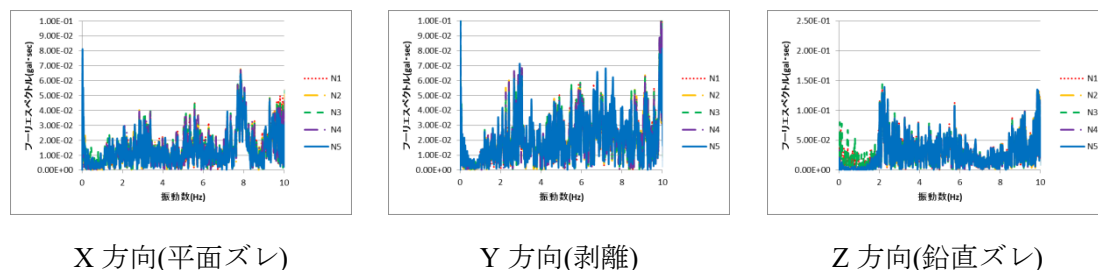


図 3-56 壁柱剥離 FFT

図 3-56 より、X：平面ズレ方向およびY：剥離方向のフーリエスペクトルはN1からN5すべての箇所が2.95Hzにピークを持つ同様のスペクトルとなった。また、Z：鉛直ズレ方向のフーリエスペクトルはN1からN5すべての箇所が2.3Hzにピークを持つ同様のスペクトルとなった。

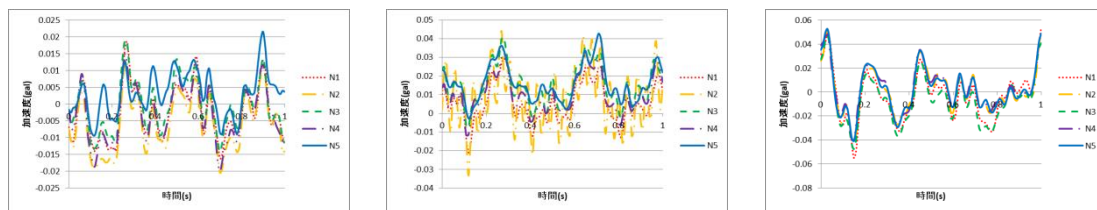
この結果は建物の固有振動数の節で述べた各方向の固有振動数と近い値である。そのため、壁面に貼ったとしても、建物の固有振動数を計測してしまうことがわかった。

N1,N2 は打診箇所の 4,N3,N4 は打診箇所の 5 に相当する。前節の打診結果を加味すれば N1,N2 と N3,N4 は剥離方向、鉛直ズレ方向に異なるスペクトルを持っていても良いと考えていたが、図 3-56 のようにほぼ同じスペクトルを示すため、加速度センサを用いた計測では、FFT のような振動数領域での解析での剥離検知は難しいことがわかった。

位相，リサーチによる解析

位相を用いた考察

図 3-57 に各センサ各方向での位相を示す。



X 方向(平面ズレ)

Y 方向(剥離)

Z 方向(鉛直ズレ)

図 3-57 壁柱剥離 FFT

図 3-57 に示すように，すべての箇所が同じ位相をしていることがわかった。N1,N2 と N3,N4 の間には大きなひび割れが入っているため，剥離方向，鉛直ズレ方向に上(N1,N2)と下(N3,N4)で挙動が変わるだろうと考えていたが，実際は同じであった。常時微動計測結果は，時間領域での解析でも打音解析とは大きく異なり，剥離を検知することはできないと考える。

リサージュを用いた検討

図 3-58 に XZ 立面と YZ 立面でみた計測箇所のリサージュを示す。

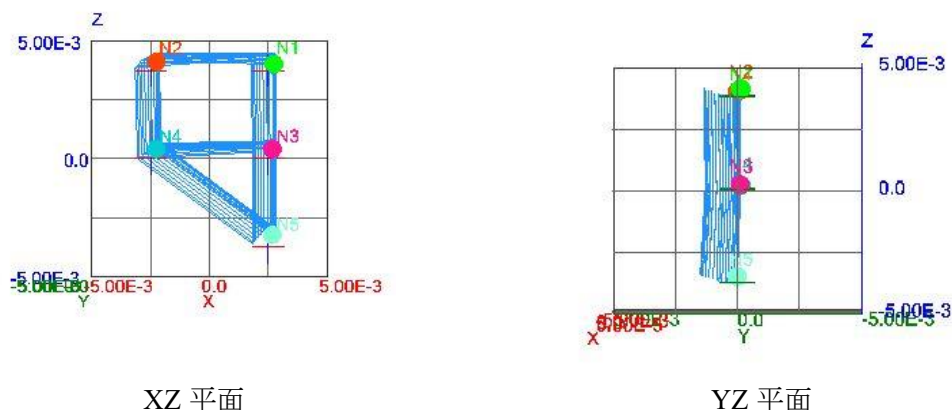


図 3-58 由振動(BPF なし)での YZ 平面のリサージュ

図 3-58 より、XZ 立面、YZ 立面ともに各箇所が平行移動していることがわかる。ひび割れ上部 N1,N2 とひび割れ下部 N3,N4 で、剥離方向である Y 方向に違う挙動をするだろうと予測したが、常時微動計測では同じ振動をしていた。リサージュは実挙動の様子であるため、この指標を使っても変化が見られないのでは、常時微動計測によるモルタルレンガ間剥離の検査は難しいことがわかった。

1F 東壁柱の常時微動計測による剥離確認のまとめ

本計測の範囲では、外壁表面のみの常時微動計測では明らかな剥離が起こっていても検知することが難しいという結論に達した。しかし本研究は劣化検査に加え、無線加速度センサの有用性、適応範囲を調べることに主眼をおいているため、失敗も一つの価値ある結果だと考える。

3.6.2 1号棟1階北壁の内側モルタルと外側レンガの一体性の確認

本節では図 3-59 に示す 1号棟1階側廊部の北壁 (N1: 北壁外側レンガ部東, N2: 北壁外壁レンガ部西, N3: 内側モルタル部東(N1 に対応), N4: 内側モルタル部西(N2 に対応), N5: 1F床) の計測結果を示す。本来は建物自体の北壁モルタルレンガ一体性を確認したかったが、内壁に鉄板がはられていたため、この側廊部分のみ確認した。計測の理由としては、前節のように、表面のみのセンサ配置だと剥離を診断できなかったため、両面計測を行うと検知は可能かを試すためである。

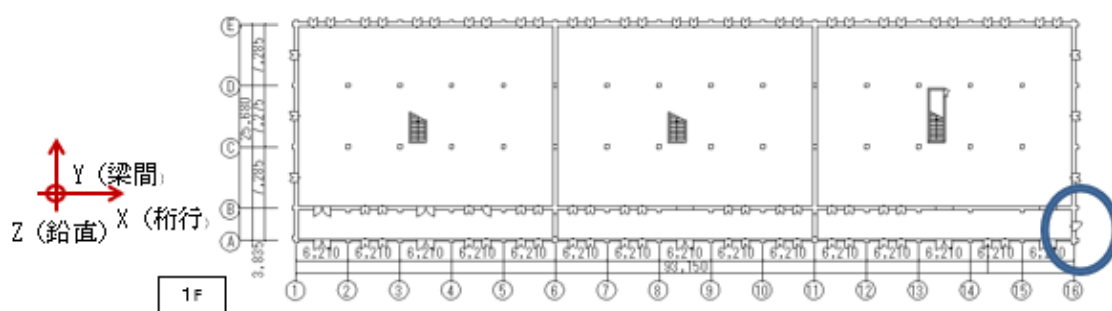


図 3-59 計測箇所

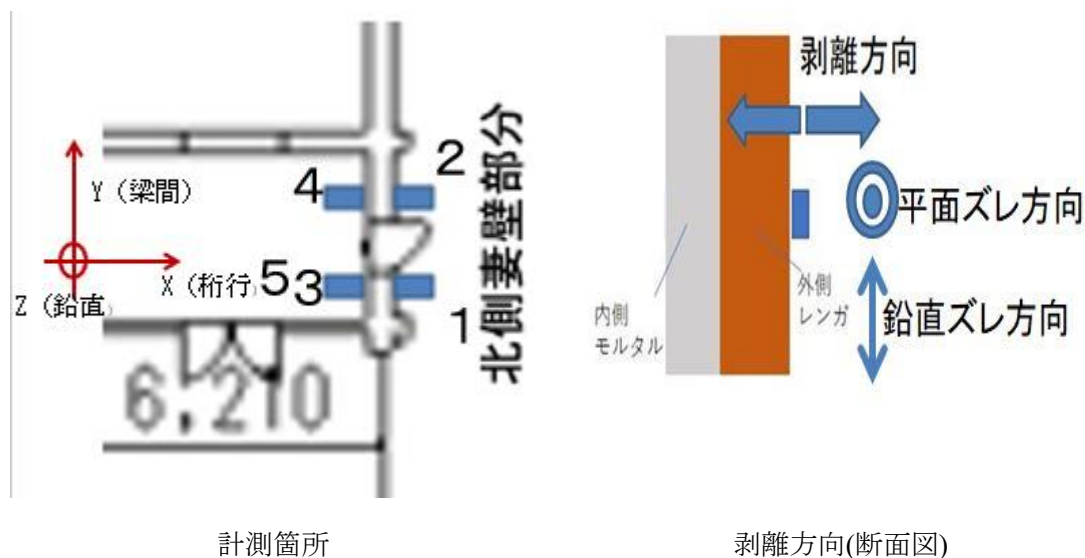


図 3-60 計測箇所と剥離方向

図 3-59 図 3-60 より、本計測では X 方向が剥離方向、Y 方向が平面ズレ方向、Z 方向が鉛直ズレ方向となる。

FFTによる考察

図 3-61 に各方向での FFT の結果を示す。

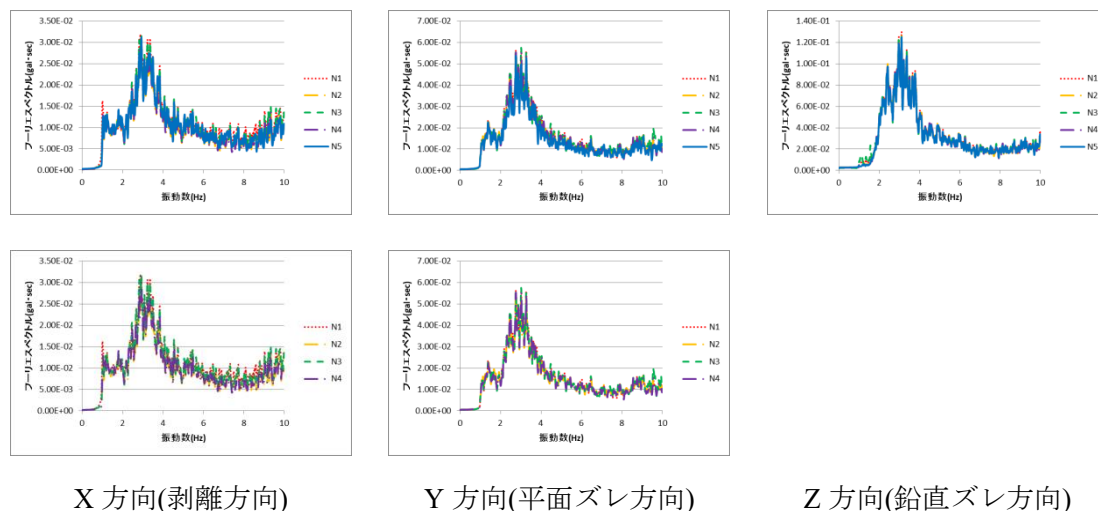


図 3-61 1号棟北壁モルタルレンガ一体性

表 14 固有振動数

	X 方向(桁行方向)	Y 方向(梁間方向)	Z 方向(高さ方向)
	2.93	3.0	2.43

図 3-61、表 14 より、外壁内外に貼ったとしても、表面に貼ったものと同じ結果となった。そのため、外壁内外に貼ったとしても、振動数の領域では剥離検知は難しい。

また建物高さ方向計測の 1F の振動計測結果とおおよそ同じ位置にピークがある。よって 1 次固有振動数は 3Hz 付近が妥当であるという裏付けを行うことができた。

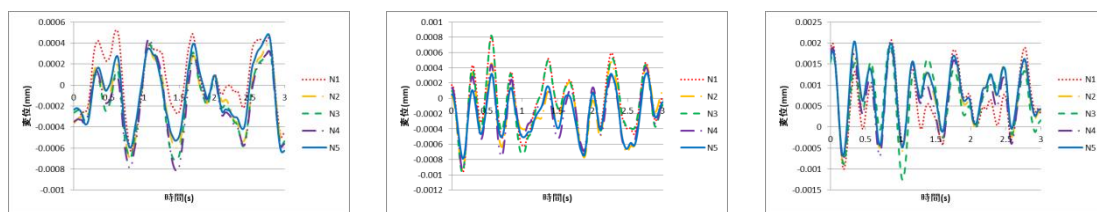
床の計測結果である N5 と壁の計測結果である N1~N4 まではおおよそ同じフーリエスペクトルを持っているため、この箇所の壁と床は一体となっていることが見て取れる。

タイルのように薄いものでは常時微動による 0-10Hz のような振動数帯での検知は難しいことがわかっていたが、レンガのように厚みがあるものでもこの振動数帯での検知が難しいことがわかった。

位相による解析

続いて時間と変位の関係である位相を見ることで外壁内外での振動の違いを検討した。

図 3-62 に時間-変位関係図を示す。



X 方向(剥離方向)

Y 方向(平面ズレ)

Z 方向(鉛直ズレ)

図 3-62 1号棟北壁モルタルレンガ一体性

図 3-62 を見ると、おおよそ同じ方向に振動していることがわかった。そのため、位相をもちいても剥離検知は難しいと判断した。

リサーチを用いた検討

図 3-63 に XZ 立面と YZ 立面でみた計測箇所のリサーチを示す。

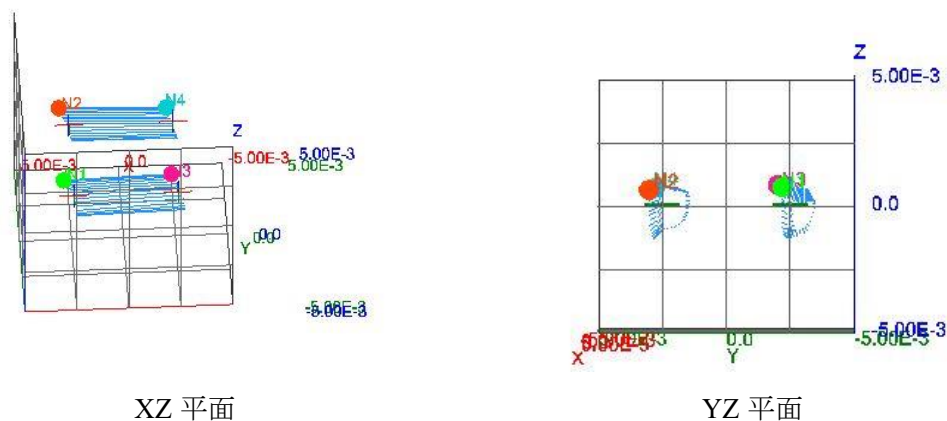


図 3-63 自由振動(BPF なし)での YZ 平面のリサーチ

図 3-63 より、XZ 立面、YZ 立面ともに対応する N1-N3,N2-N4 が直線となって平行移動していることがわかる。剥離方向である X 方向において、モルタル-レンガの剥離が計測できれば N1-N3 の距離が伸び縮みするはずである。しかし、同一距離を保ったまま動いているため、リサーチを用いても常時微動計測では剥離検知をすることが難しいことがわかった。

続いて剥離が起こっていると、位相が大きく異なる、または変位量が大きく異なる可能性があるため、相対変位の箱ひげ図を用いて考察を進める。

相対変位による評価

それぞれの箇所の相対変位の箱ひげ図を図 3-64 に示す。上段に床壁の計測の結果、下段に壁のみの計測の結果、それぞれについての結果を示す。

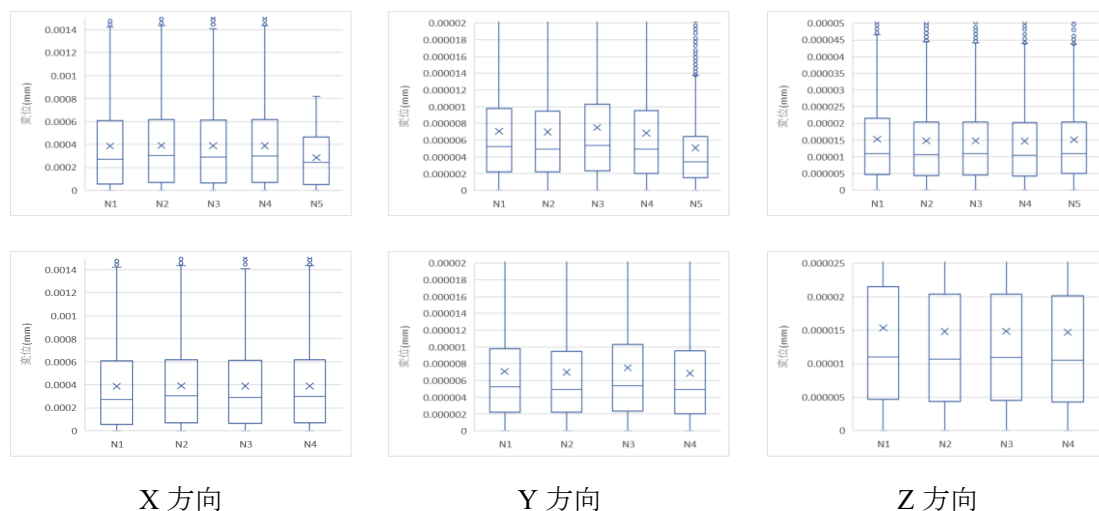


図 3-64 1号棟北壁モルタルレンガ一体性

表 15 計測された波数

	N1 (外側 1)	N2 (外側 2)	N3 (内側 1)	N4 (内側 2)	N5 (床)
X	2200	1986	2146	2028	1982
Y	1797	1800	1842	1806	1784
Z	2051	2003	2027	1998	2032

図 3-64、表 15 より、各箇所第一から第三四分位数、及び中央値が一致した。N1 と N3、N2 と N4 がそれぞれ対応するため、内外ともに同じ程度の振幅で動いていることがわかる。また、振動回数自体も同程度であるため、剥離を検知できていない。

図 3-62 から図 3-64 に示すように位相も変位量も違いが見られなかったため、時間領域の波形を解析しても剥離を検知することはできないと判断した。

1号棟1階北壁の内側モルタルと外側レンガの一体性の確認のまとめ

本節では、前節で表面のみの常時微動計測ではモルタル-レンガ間の剥離が検知できなかったため、壁の内側、外側にセンサを貼り付け、計測を行った。計測箇所は打音を聞く限り確実に音が違う剥離箇所を選んだ。しかし、振動数領域、時間領域どちらの解析を行っても、モルタル-レンガ間の剥離は検知できなかった。剥離が起きていると、内外で位相や、空隙によって変位量が変わるだろうと考えていたが、変わらなかった。位相に関しては完全に剥離しない限り接着面によって、全体で同じ動きをするのだろう。変位に関しても、接着面のせいでモルタル、レンガお互いが引っ張り合い、結果が出ないのだろうと考える。

外壁レンガの剥離検知のまとめ

本節では外壁レンガを対象に、打音検査、常時微動計測を行い、剥離検査や、検査技術の高度化を目指した研究を行った。

まず、打音検査についてであるが、ピーク数端数、図心周波数、加振から最大音圧までの時間、減衰率(指数)すべての指標で剥離を検知することができた。そのため、レンガの剥離にも外装タイルの剥離検知技術が活用できることがわかった。

常時微動計測だが、計測波形を振動数領域、時間領域どちらで解析しても剥離箇所を剥離と判断できる指標が発見できなかった。そのため、常時微動計測による計測では、湿式仕上げであるレンガの剥離検知は厳しいと判断した。

本研究は常時微動計測の有効性確認も含まれているため、湿式仕上げには応用ができないという結果が示された。

3.7 不同沈下の確認

本建物は過去の計測より不同沈下が起きていることがわかっている。計測目的としては1F平面を用いて、不同沈下の振動性状への影響を常時微動計測を用いて確認することである。不同沈下を常時微動計測で確認することができれば、従来の大変な計測方法を用いる必要がなくなるため、より簡易的な検査方法として常時微動計測をすすめることができるようになる。

本節では図 3-65 に示すように1つの検討の中に2計測含まれるものが存在する。これは別々に考えるより、並行してみたほうが違いがわかりやすいためである。

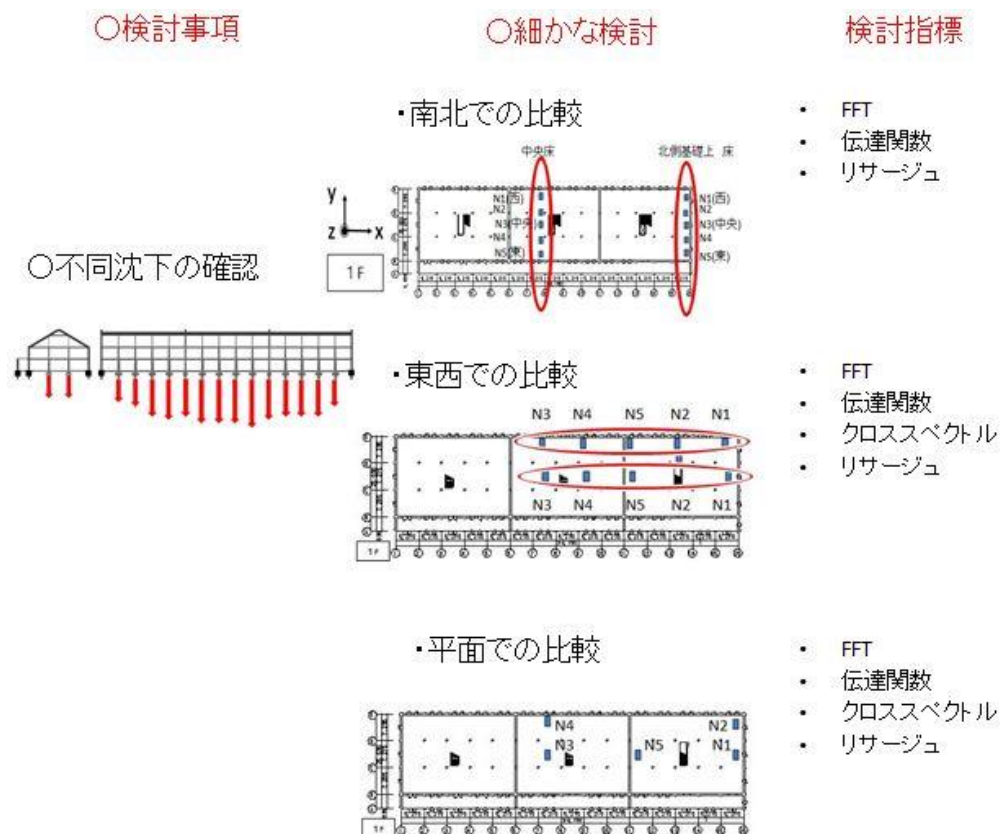


図 3-65 不同沈下 3つの比較計測

3.7.1 南北での比較

図 3-66 に計測箇所を示す。不同沈下による平面の常時微動への影響を考察するため、沈下量の大きい中央部の床と、沈下量の小さい北側基礎梁上近くの床を計測対象とした。便宜上中央部と北側基礎梁上という名前で各計測を呼ぶ。

また、この建物は外周部のみ基礎梁があり、中央部は独立基礎となっており、基礎ごとの比較を行うため、東西方向に5箇所センサを配置し、計測を行った。両計測とも西側から N1, N2 と置き、中央部が N3, 東側が N5 としている。

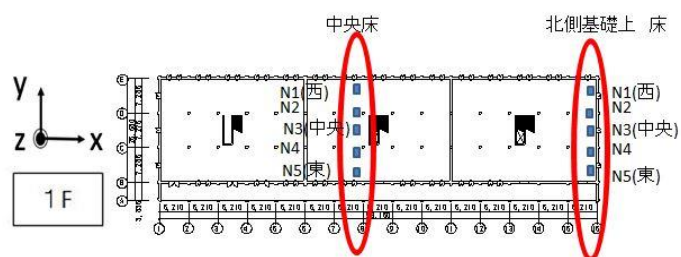


図 3-66 中央部北側基礎梁上の比較

FFT を用いた考察

図 3-67 から図 3-69 に計測方向ごとにフーリエ変換の結果を示す。図は左側に中央部、右側に北側基礎上の結果を示す。表 16 から表 18 にはフーリエスペクトルから推定した各方向の固有振動数を示した。

X 方向

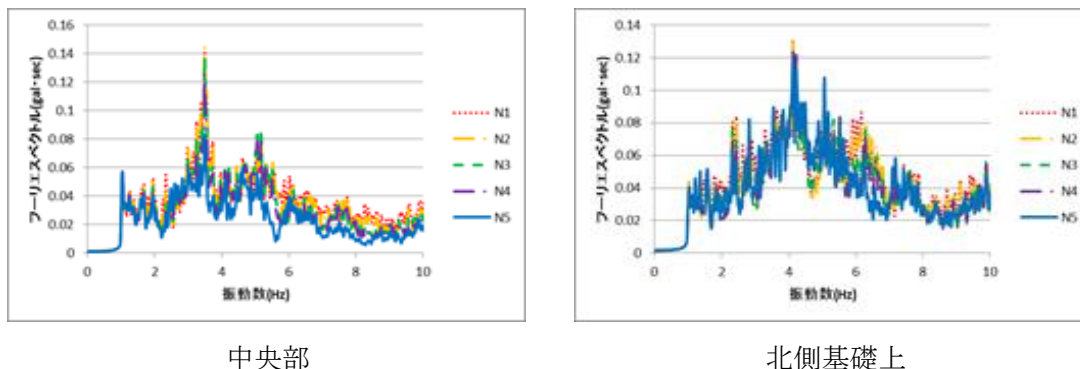


図 3-67 各箇所 X 方向のフーリエ変換の結果

表 16 各箇所の x 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	北側基礎上
一次固有振動数	3.48	4.13
二次固有振動数	5.04	7.42

Y 方向

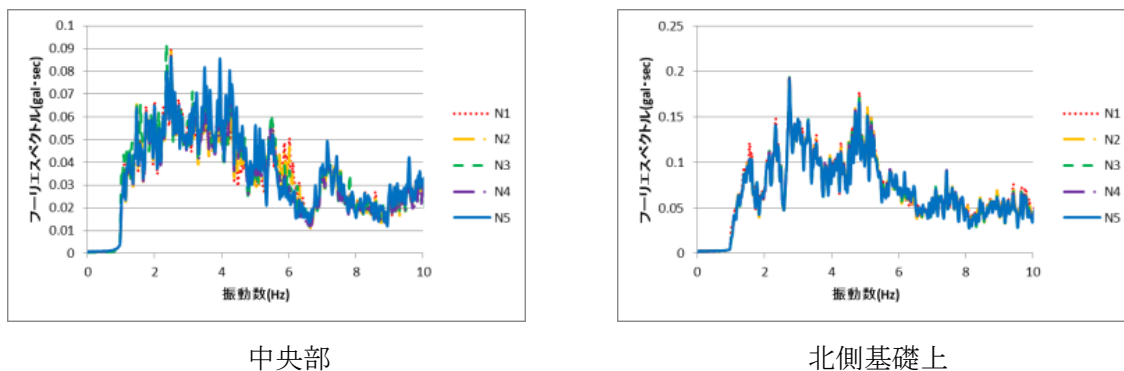
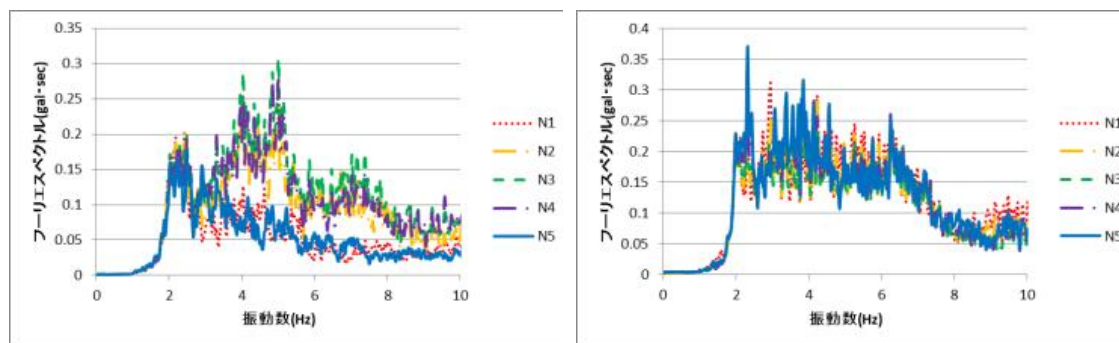


図 3-68 各箇所の Y 方向のフーリエ変換の結果

表 17 各箇所の Y 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	北側基礎上
一時固有振動数	2.34	2.73
虹固有振動数	4.24	4.82

Z 方向



中央部

北側基礎上

図 3-69 各箇所の Z 方向のフーリエ変換の結果

表 18 各箇所の Z 方向での固有振動数(Hz)

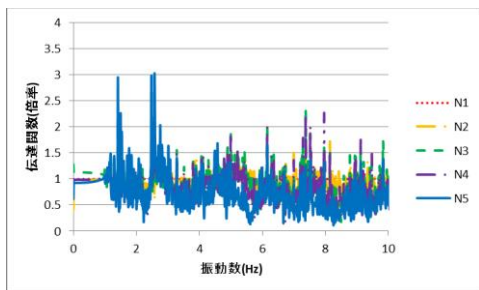
X 方向 (Hz)	中央部	北側基礎上
一次固有振動数	2.3	2.32
	4.0-5.0	

図 3-67 から 図 3-69、表 16 から表 18 より、中央部、北側基礎上それぞれの計測箇所において、X,Y 方向の計測箇所での違いによるフーリエスペクトルの違いは見られない。そのため、中央部、基礎梁上共に計測箇所の水平方向の振動性状に関して不同沈下の影響は認められない。ただし図に示す Z 方向の常時微動については、中央部と北側基礎上でのフーリエスペクトルの比較をすると、3Hz 以降の振動特性が大きく異なっていることがわかる。即ち、不同沈下による鉛直方向の振動成分の違いが常時微動計測でも現れていることになる。また本計測対象である陸軍被服支廠は外周部には基礎梁が通っているが、中央部の柱は独立基礎となっており、梁による拘束の有無も高さ方向での上下動の振動特性に違いに影響を与えていると考えられる。

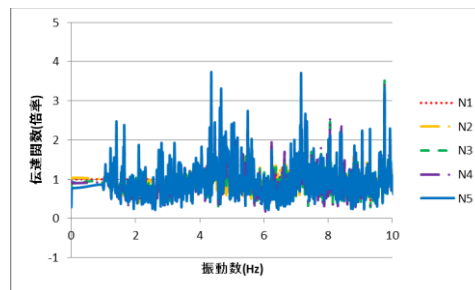
一方、表に示すように、卓越振動数から推定した固有振動数は、北側基礎梁上のほうが中央部 X,Y 方向での固有振動数が高い値を示している。同じ階の床で、南北方向で固有振動数の違いが生まれていることは水平方向のねじれ振動が生じやすいことを示唆しているが、これが不同沈下の影響であるかは判断することはできない。

伝達関数を用いた検討

X 方向



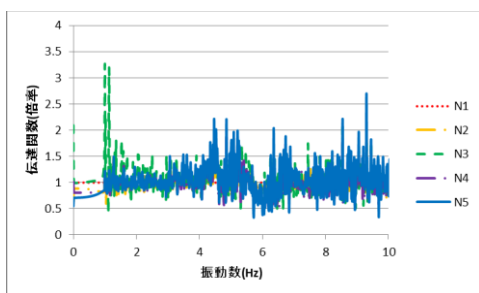
中央部



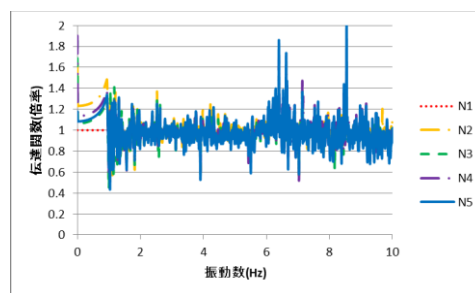
北側基礎上

各箇所 X 方向の伝達関数

Y 方向



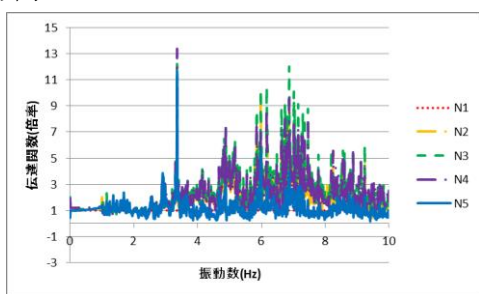
中央部



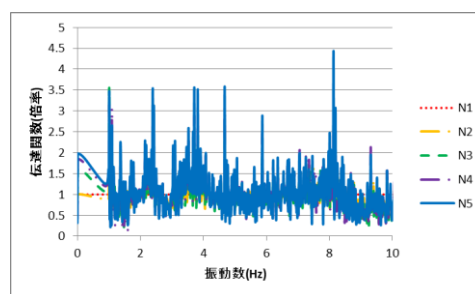
北側基礎上

各箇所 Y 方向の伝達関数

Z 方向



中央部



北側基礎上

各箇所 Z 方向の伝達関数

図 3-70 各方向での伝達関数

図 3-70 より、X、Y 方向は倍率がほぼ 3 倍以下に落ち着いている 1 階床中央部は平面的なズレが少なく一体となって動いていることが伺える。しかし、Z 方向の中央部の倍率が大きく異なる。やはり、南北方向中央部の中央は他の箇所と振動が異なっている、すなわち不同沈下が起こっていることがわかる。

リサージュを用いた考察

前節で述べたように、鉛直方向（z方向）の振動が計測箇所により大きく異なることがわかったため、Z方向の変位の振動について、YZ平面でのリサージュで可視化した。図の矢印の方向（北側）から見たリサージュを図 3-71 に示す。各図において、左側に中央部の、右側に北側基礎上の結果を示しており、下記でそれぞれを考察した。

自由振動(BPFなし)でのYZ立面のリサージュ

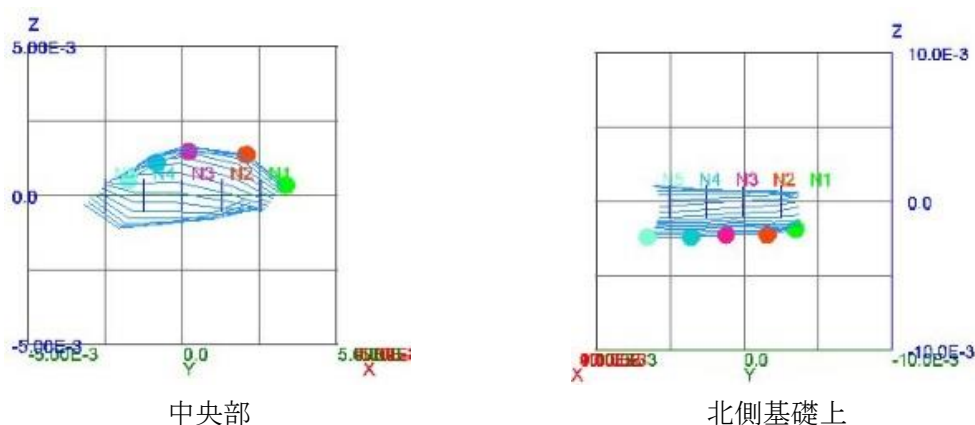


図 3-71 自由振動(BPFなし)でのYZ立面のリサージュ

図 3-71 は計測システム（DC～100Hz）で測定された常時微動計測値をフィルタ処理せずに示したリサージュである（ここでは自由振動と呼ぶ）。図 3-71 より、常時微動の状態をリサージュで見ると、中央部のなかでも東西の中央部である N3 が大きく上下動をしており、端部である N1,N5 は振動が小さくなっている。それに比べて北側基礎梁上では各箇所がほぼ同様に上下動していることがわかる。筆者らは、基礎（梁）の有無による各計測箇所の拘束の違い及び不同沈下によって中央部と北側基礎梁上で振動の違いが生じているものと推定している。

BPF をかけた YZ 立面のリサージュ

鉛直方向の常時微動計測値について、バンドパスフィルター(BPF 4.5 ± 0.5 Hz)をかけて 4Hz ~5Hz の振動を取り出したリサージュを図 3-72 に示す。

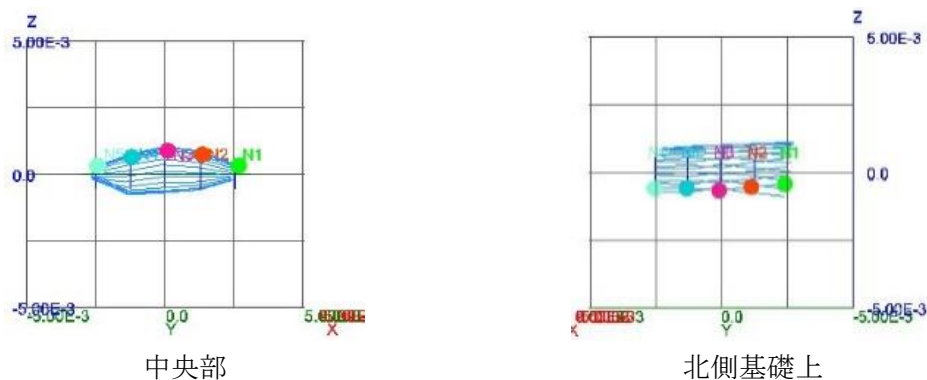


図 3-72 各箇所の z 方向, リサージュ BPF 4.5 ± 0.5

図 3-72 中央部より、計測箇所のフーリエスペクトルが異なる振動数帯では、自由振動と同じ特徴の微動が生じている。この振動数帯でも、フーリエスペクトルの差が小さい北側基礎上では、自由振動時と同じく一体となって上下動をしている。ここでは示していないが、4.0~8.0Hz の間で BPF をかけても中央部での N3 が大きく上下動をする同じ結果となった。

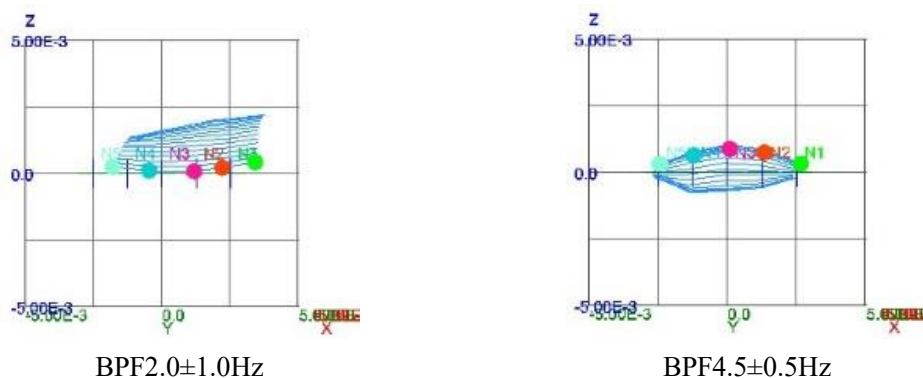


図 3-73 中央部各 BPF でのリサージュ図

中央部の計測位置において、1.0Hz~3.0Hz(BPF 2.0 ± 1.0 Hz)、および 4.0Hz~5.0Hz (BPF 4.5 ± 0.5 Hz) の振動を取り出したリサージュを図 3-73 で比較した。図 3-73 より、BPF 2.0 ± 1.0 Hz では自由振動時の北側基礎梁上と同様に、各箇所が一直線となって上下動をしている結果となった。すなわち本建物では、中央部での上下動の違いは、4Hz 以上の東西方向各計測箇所での振動性状の違いが原因であることと考えられる。

不同沈下 南北での比較のまとめ

FFT や伝達関数より Z 方向の振動性状が大きく異なることがわかった。即ち、不同沈下による鉛直方向の振動成分の違いが常時微動計測でも現れていることになる。また本計測対象である陸軍被服支廠は外周部には基礎梁が通っているが、中央部の柱は独立基礎となっており、梁による拘束の有無も高さ方向での上下動の振動特性に違いに影響を与えていると考えられる。

リサーチでわかりやすく中央の沈下の様子が見られた。無補正の自由振動であっても、中央部東西方向中央ほど沈下が大きくなる様子が伺えたため、常に不同沈下の影響で中央部が大きく振動していることがわかる。北側基礎上においては平行に上下振動をしていたため、やはり中央部の不同沈下が見て取れる。

また、FFT より各箇所のスペクトルが一致する振動数および異なる振動数付近で BPF をかけ、リサーチを描いた。結果、スペクトルが異なる 4.0-5.0Hz のリサーチでは中央部のものが、東西中央の変位が大きくなる縄跳びのような動きをしていることがわかった。逆に N1 から N5 のスペクトルが一致する 1.0-3.0Hz の振動は北側基礎上のような平行での上下動だった。このことから、不同沈下による建物への影響は 4.0-5.0Hz のようにスペクトルが大きく異なる振動数域であることがわかった。

本計測のように、リサーチは実挙動を確認できるため、建物の検査に有効な手段である。本計測ソフトでは BPF もかけることができ、そのおかげで不同沈下の影響も考察することができた。本内容は日本建築学会の全国大会にも投稿した内容だが、視聴者からは動画のおかげで振動の様子がわかりやすかったと言われた。

このようにリサーチは、簡単に、革新的な部分まで検討することができ、人に伝えるときにも役立つため、今後の建物の検査には使うべき指標であると考えられる。

3.7.2 東西での比較

前節では北側と中央部での比較を行い、中央部での不同沈下を確認することができた。本節では東西での違いである、西側基礎上と中央部で計測、比較を行った。

不同沈下による常時微動への影響を考察するため、沈下量の大きい中央部の床と、沈下量の小さい西側側基礎梁上近くの床を計測対象とした。本節では便宜上中央部と西側基礎上という名前で各計測を呼ぶ。

図 3-74 に計測箇所を示す。

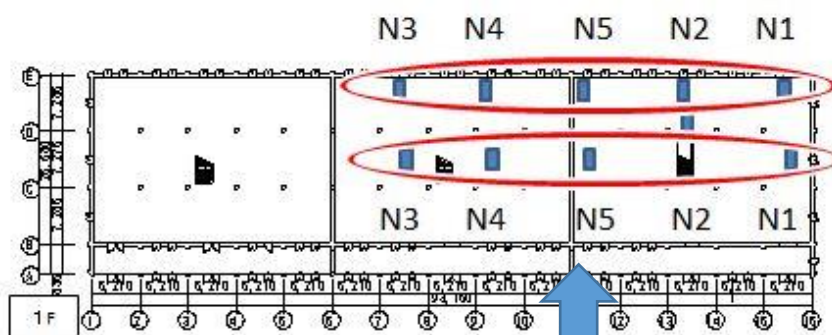
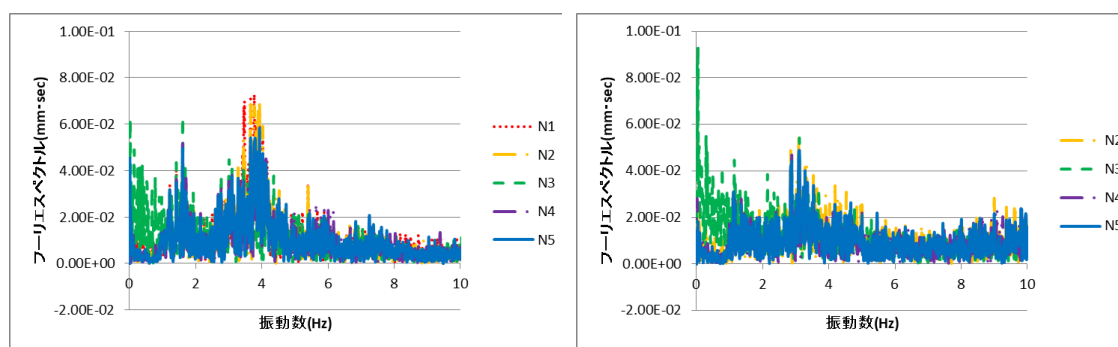


図 3-74 中央部北側基礎上の比較

FFT を用いた考察

図 3-75 から図 3-77 に計測方向ごとにフーリエ変換の結果を示す。図は左側に中央部、右側に西側基礎上の結果を示す。表 19 から表 21 にはフーリエスペクトルから推定した各方向の固有振動数を示した。

X 方向



中央部

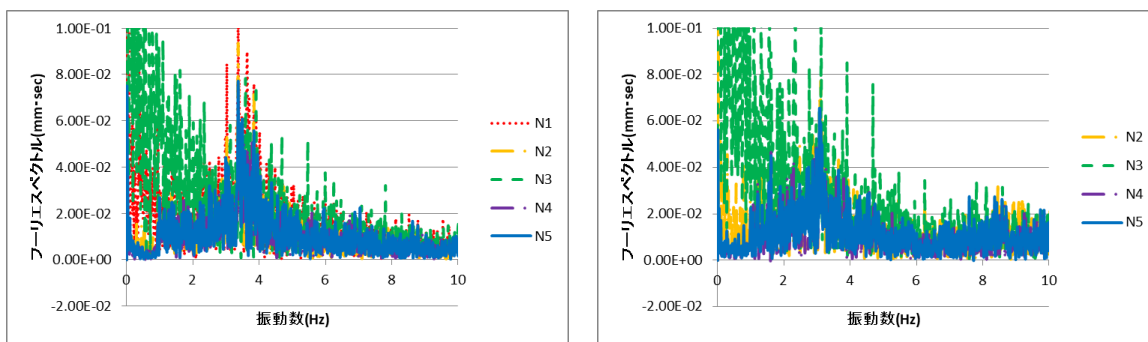
西側基礎上

図 3-75 各箇所 X 方向のフーリエ変換の結果

表 19 各箇所の x 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	西側基礎上
一時固有振動数	1.61	3.28
	3.77	

Y 方向



中央部

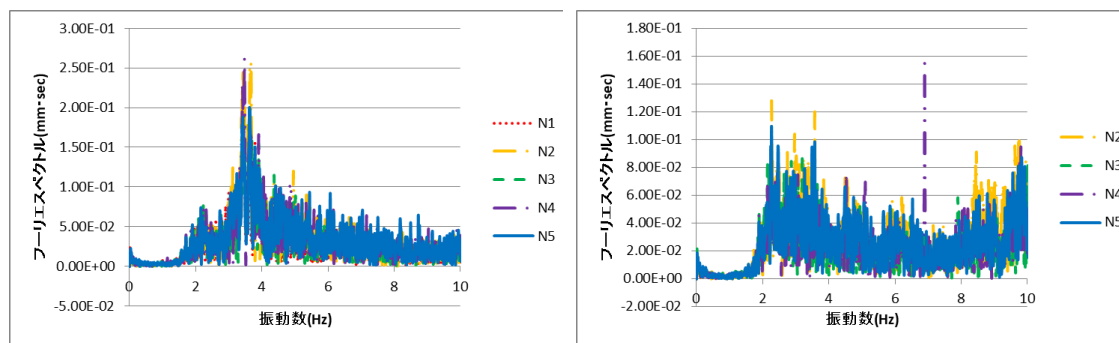
西側基礎上

図 3-76 各箇所の Y 方向のフーリエ変換の結果

表 20 各箇所の Y 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	西側基礎上
一時固有振動数	3.37	3.12

Z 方向



中央部

西側基礎上

図 3-77 各箇所の Z 方向のフーリエ変換の結果

表 21 各箇所の Z 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	西側基礎上
一次固有振動数	2.16	2.27
	3.48	

図 3-75 から図 3-77、表 19 から表 21 より、中央部、西側基礎上それぞれの計測箇所において、X,Y 方向の計測箇所の違いによるフーリエスペクトルの違いは見られない。そのため、前節の南北での計測と同じく、各計測箇所の水平方向の振動性状に関して不同沈下の影響は認められない。

また、Z 方向においても全箇所スペクトルが一致した。そのため、前節の南北方向と異なり、不同沈下の影響をフーリエスペクトルで見ることができなかった。南北方向と異なり、計測範囲の問題で北側半分でしか計測できていないが、N1 は基礎の箇所である。しかし、その N1 も他の箇所と同じようなスペクトルとなっている。他の指標では影響が見られるか確かめることとした。

Z 方向のスペクトルの大きさが他の方向より大きくなっている。通常の建物では Z 方向のスペクトルはここまで大きくはならない。やはり本建物の地盤が弱いためだろう。

伝達関数を用いた検討

N1 を基準とした伝達関数を以下図 3-78 から図 3-80 に示す。

X 方向

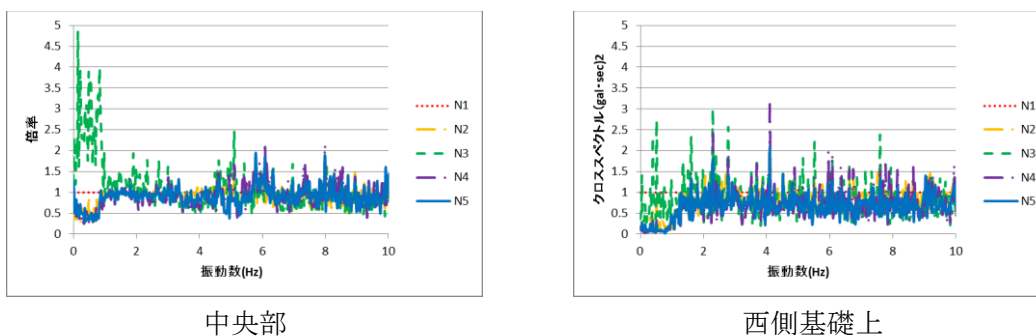


図 3-78 各箇所 X 方向の伝達関数

Y 方向

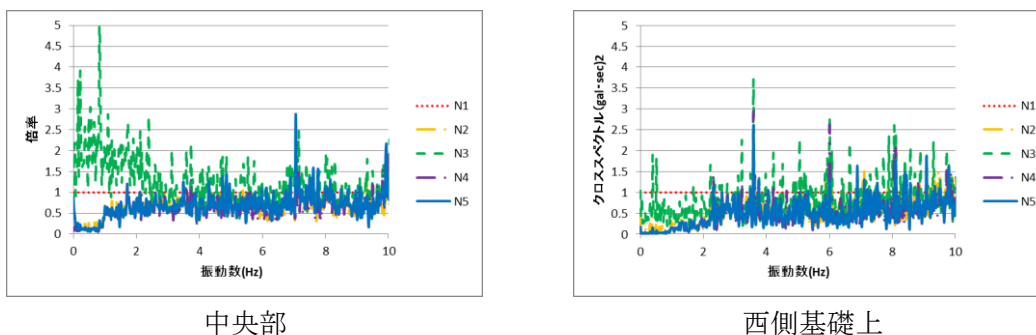


図 3-79 各箇所 Y 方向の伝達関数

Z 方向

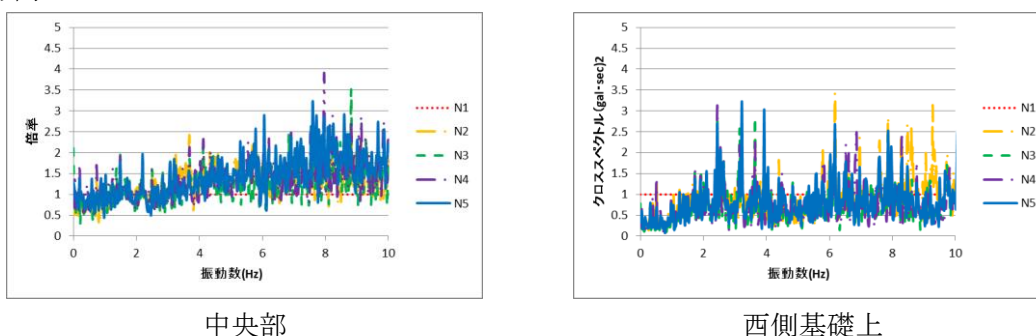


図 3-80 各箇所 Z 方向の伝達関数

図 3-78 から図 3-80 より、やはり、すべてのものの倍率が3倍以下に落ち着いている。また、Z 方向の中央部が前節の中央とことなり、平面中央部に近い箇所であっても他と同じような動きをしていることがわかる。

リサージュを用いた考察

Z方向の変位の振動について、XZ平面でのリサージュで可視化した。図の矢印の方向（東側）から見たリサージュを図 3-81 に示す。各図において、左側に中央部の、右側に西側基礎上の結果を示しており、下記でそれぞれを考察した。

自由振動(BPFなし)でのYZ平面のリサージュ

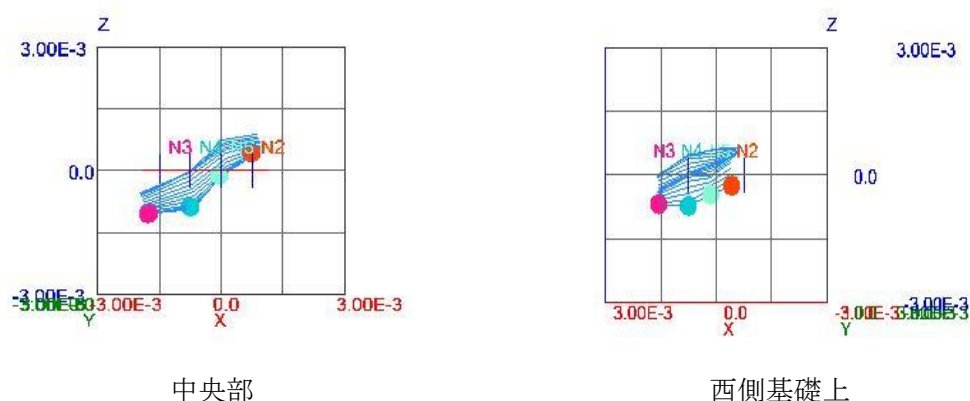


図 3-81 自由振動(BPFなし)でのYZ平面のリサージュ

図 3-81 より中央部、西側基礎上ともにおおよそ平行移動していることがわかった。しかし、中央部では南北での中心である N3,N4 が常にマイナスの位置で上下動していた。本節の中央部は長手方向で計測しており、前節短辺方向の中央部より沈下が起こりやすい。過去の計測でも長手方向で大きく不同沈下を起こしていることがわかっている。このことより、本計測箇所中央部は、通常時からかなり地盤が傾いている可能性がある。十分中央部が沈下してしまっているため、前節のように縄跳びをとぶような振動をするのではなく、各計測箇所が平行移動してしまい、振動数領域では変化が見られなかった可能性が考えられる。

また北側半分でしか計測できなかったため、差が見にくかった可能性も考えられる。南北方向に直線でセンサを貼れば、もう少しきれいに中央部の沈下が見られた可能性も考えられる。

BPF をかけた YZ 平面のリサージュ

鉛直方向の常時微動計測値について、バンドパスフィルター(BPF $3.5\pm 0.1\text{Hz}$)をかけて中央部でピークの見られた $3.4\text{Hz}\sim 3.6\text{Hz}$ の振動を取り出したリサージュを図 3-82 に示す。

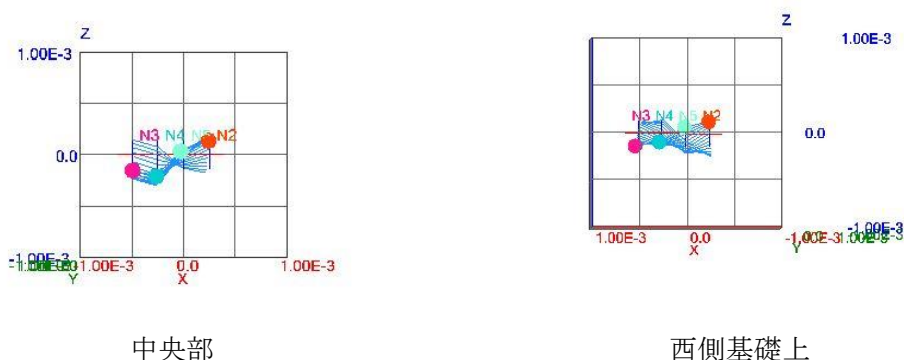


図 3-82 各箇所の z 方向, リサージュ BPF 3.5 ± 0.1

図 3-82 より中央部, 西側基礎上ともに N5 を対象とした上下動を行っていた。西側基礎上にもこの振動数帯のピークは見られるため、長手方向では基礎梁に関係なく不同沈下の影響が現れている可能性がある。



図 3-83 中央部各 BPF でのリサージュ図

中央部の計測位置において、 $2.1\text{Hz}\sim 2.3\text{Hz}$ (BPF $2.2\pm 0.1\text{Hz}$)、および $3.4\text{Hz}\sim 3.6\text{Hz}$ (BPF $3.5\pm 0.1\text{Hz}$) の振動を取り出したリサージュを図 3-83 で比較した。図 3-83 より、BPF $2.2\pm 0.1\text{Hz}$ では各箇所が傾きを持ちつつも、一直線となって上下動をしている結果となった。そのため、この振動数帯でも中央部沈下の動きを行っていることとなる。長辺方向においては多くの振動数が中央部沈下を行っていることがわかった。

不同沈下 東西方向での比較のまとめ

FFT, 伝達関数において, 中央部, 西側基礎上それぞれの計測箇所において, X,Y 方向の計測箇所での違いによるフーリエスペクトルの違いは見られなかった。そのため, 前節の南北での計測と同じく, 各計測箇所の水平方向の振動性状に関して不同沈下の影響は認められない。また, Z 方向においても全箇所スペクトルが一致した。そのため, 前節の南北方向と異なり, 中央部付近のスペクトルが起訴状と異なる不同沈下の影響をフーリエスペクトルで見ることができなかった。

自由振動のリサーチをみると, 中央部, 西側基礎上ともにおおよそ平行移動していることがわかった。しかし, 中央部では南北での中心である N3,N4 が常にマイナスの位置で上下動していた。過去の計測でも長手方向で大きく不同沈下を起こしていることがわかっていて。そのため, 常に長辺方向は地盤が傾いており, 水平状態に戻れないために, 傾きを持ったまま平行移動している可能性が高い。

本計測においても, FFT のみでは見えなかったことが, リサーチを見ることで発見できたため, やはりこの技術はとても有効であると考ええる。

3.7.3 1F 北側平面での比較

本節までに北側と中央部での比較(南北での違い), 及び西側と中央部での比較(東西での比較)を行い, 不同沈下の各方向での影響の違いを確かめた。本節ではそれらをまとめ, 1F 北側平面での不同沈下の影響を考察する。

図 3-84 に計測箇所を示す。

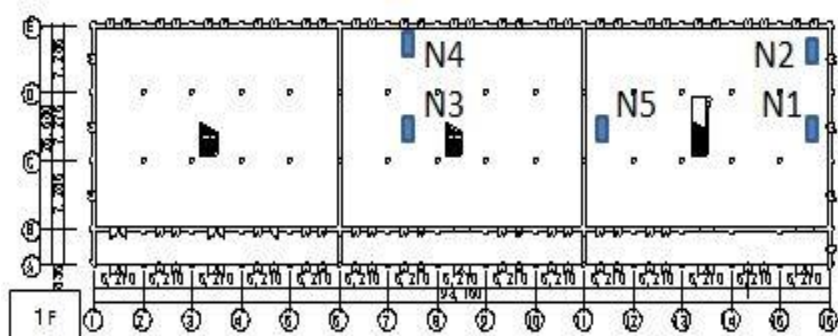


図 3-84 1F 北側平面での比較

FFT を用いた考察

図 3-85 から図 3-87 に計測方向ごとにフーリエ変換の結果を示す。スペクトルの特徴が異なるものは分けて示している。表 22 から表 24 にはフーリエスペクトルから推定した各方向の固有振動数を示した。

X 方向

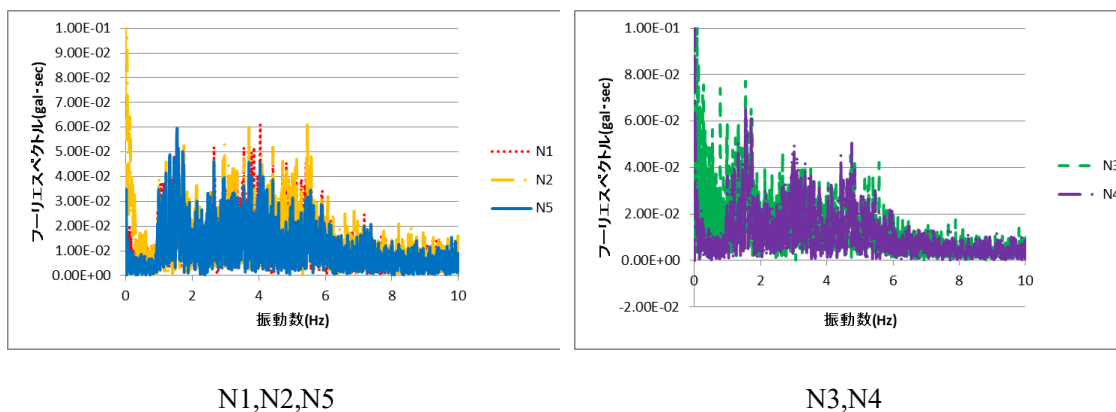
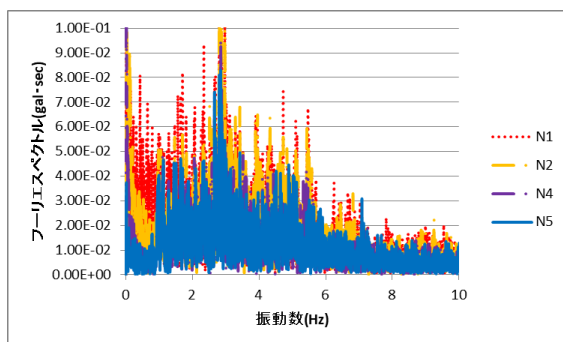


図 3-85 各箇所 X 方向のフーリエ変換の結果

表 22 各箇所の x 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	N1,N2,N5	N3,N4
一次固有振動数	3.7	3.1
	5.55	4.75

Y 方向



全箇所

図 3-86 各箇所の Y 方向のフーリエ変換の結果

表 23 各箇所の Y 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	全箇所	
一次固有振動数	2.85	

Z 方向

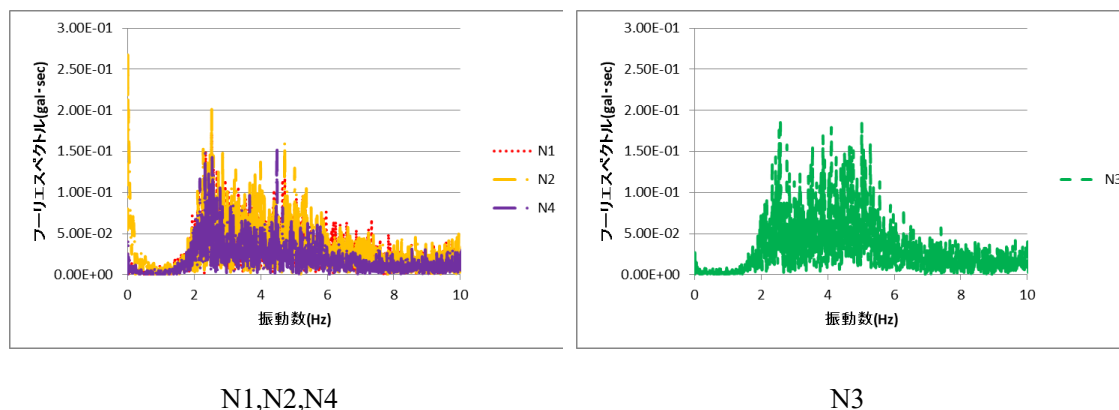


図 3-87 各箇所の Z 方向のフーリエ変換の結果

表 24 各箇所の Z 方向での固有振動数 (Hz)

X 方向 (Hz)	N1,N2,N4	N3
一次固有振動数	2.33	2.33
		5.0

図 3-85 から図 3-87、表 22 から表 24 より、X 方向の特徴は、南北方向で違いがあるということがわかった。N1,N2,N5 のグループと N3,N4 のグループに分かれていることから、おそらくこの境界の壁で振動性状が変わっている可能性が考えられる。表を見ても、北側である N1,N2,N5 の固有振動数が N3,N4 より高いことから、やはり、基礎付近のほうが強いということがわかった。

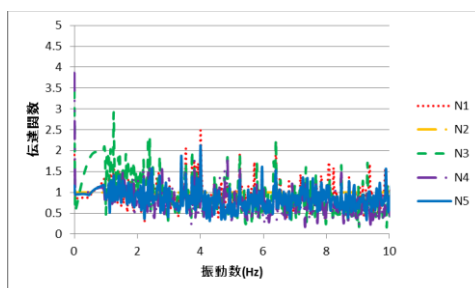
Y 方向において N3 はピークは同じであったが、スペクトルが大きく出ていたためで省いている。各計測箇所ほぼ同じスペクトルを持っているため、一様に動いていることがわかる。

Z 方向において、N5 はスペクトルが大きくなっていったため省いた。
外周部の基礎付近である N1,N2,N4 と平面中央部の N3 で大きくスペクトルが異なっている。N3 の 2 つ目のピークが 5Hz で、南北方向での不同沈下の結果と整合性が取れるため、やはり中央部付近は 5Hz 付近で上下動を起こしやすくなっている事がわかる。

伝達関数を用いた検討

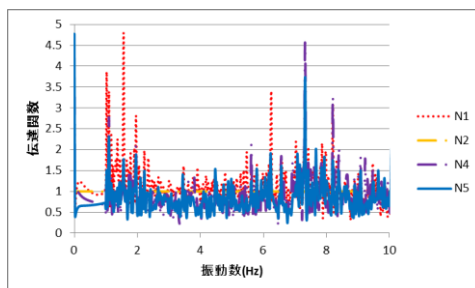
建物角である N2 を基準とした伝達関数を以下図 3-88 に示す。

X 方向



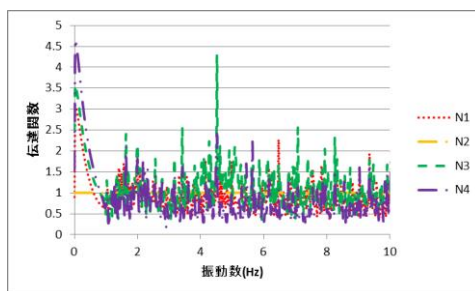
X 方向の伝達関数

Y 方向



Y 方向の伝達関数

Z 方向



Z 方向の伝達関数

図 3-88 各方向の伝達関数

図 3-88 より、Z 方向において、1F 平面の中央部である N3 が、4.5Hz で大きな倍率を持っている。

今回基準とした N2 は角であり、一番不同沈下の影響を受けない箇所である。

南北の比較でも同じ特徴であったため、やはり不同沈下の影響は 4.5~5Hz 付近であることがわかる。

リサーチを用いた考察

Z方向の変位の振動について、XZ平面でのリサーチで可視化した。

自由振動(BPFなし)でのYZ平面のリサーチ

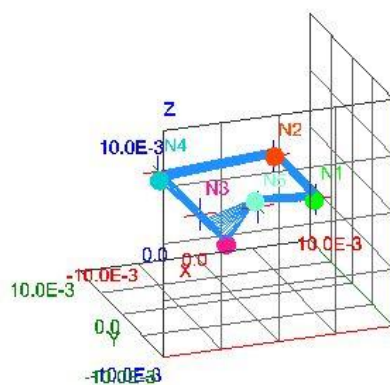


図 3-89 自由振動(BPFなし)でのリサーチ

図 3-89 は自由振動での 1F 平面北側半分でのリサーチである。静止画であるため、少し伝わりにくいですが、自由振動時から 1F の中央部である N3 が大きく上下に振動している。また、N1 と N3 の間である N5 が N3 と逆方向に動くため、更に大きく N3 が大きく動いているように感じる。

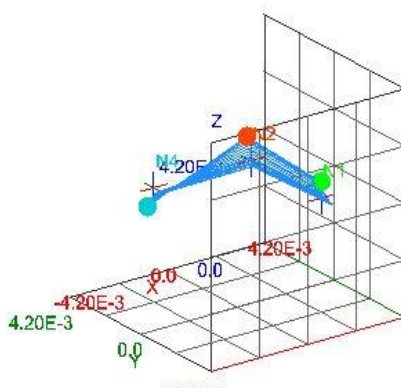


図 3-90 自由振動(BPFなし)での基礎部分のリサーチ

図 3-90 は N2 を角とした N2-N1 の北側基礎と N2-N4 の西側基礎の自由振動時のリサーチである。このように N2-N1 の北側基礎は常に平行移動しているのに対し、N2-N4 の西側基礎は大きく傾いて動いていた。やはり、短辺方向より長辺方向である西側基礎のほうが不同沈下の影響を受けている。

BPF をかけた YZ 平面のリサージュ

常時微動計測値について、全計測箇所のピークである $BPF2.2\pm0.1\text{Hz}$ 、平面中央部 N3 に見られる $BPF4.75\pm0.25\text{Hz}$ の振動を取り出したリサージュを図 3-91 に示す。

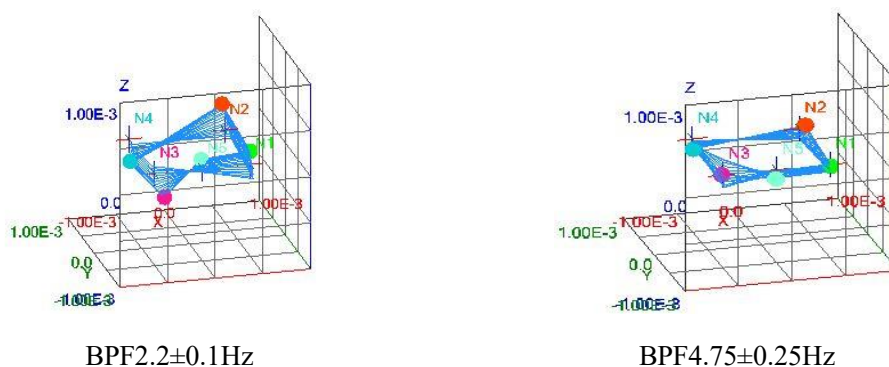


図 3-91 各 BPF でのリサージュ図

図 3-91、 $BPF2.2\pm0.1\text{Hz}$ のグラフより、全計測箇所の一次ピークでは自由振動時と同じく、N2-N1 の北側基礎は平行移動、N2-N4 の西側基礎は傾きを持って上下運動をしている。一次固有振動数は自由運動を支配する割合が高いため、自由振動時と同じ動きをするのは納得がいく。本計測は平面北側半分であるため、南側半分は N4-N3 ラインを対称に振動していることになる。そのため、西側基礎中央部は上下動によってかなり疲労を蓄積している可能性が高い。

図 3-91、 $BPF4.75\pm0.25\text{Hz}$ のグラフより、平面中央 N3 が大きく上下動していることがわかる。

また、自由振動はこのような振動の足し合わせであるため、N3 が大きく動くこととなる。

平面で振動を確認すると、北側基礎(短辺基礎)より西側基礎(長辺基礎)の方が中央部で沈下を起こしており、劣化が促進されている可能性がある。建物平面中央部は不同沈下の影響で 4.5-5Hz が特に揺れやすくなっており、建物平面中央部が一番沈下量大きいことがわかった。

不同沈下 北側平面のまとめ

本節は前節2つの比較を一つの平面にまとめたものである。

FFT や伝達関数の結果, Z 方向において, 外周部の基礎付近である N1,N2,N4 と平面中央部の N3 で大きくスペクトルが異なっている。N3 の2つ目のピークが 5Hz で, 南北方向での不同沈下の結果と整合性も取れるため, やはり中央部付近は 5Hz 付近で上下動を起しやすくなっている事がわかる。

リサージュでは, 自由振動のものからやはり, 平面中央 M3 が大きく動く様子が見られた。

また, 西側基礎および北側基礎を比べて結果, 北側基礎は水平に上下移動を行っているのに対し, 北側基礎は傾きを持って動いていることが確認された。東西での比較で述べたとおり, 長辺方向では中央部に行くほど大きな沈下が起こっていることがわかった。

また N3 のみ動きやすい 4.5-5.0Hz の振動を取り出してリサージュを描くと, やはり N3 のみが大きく上下動をしていた。

このことから平面中央部が一番沈下がひどく, 4.0-5.0Hz 付近に影響を及ぼすことが再度示された。

3.8 不同沈下の建物への影響の確認

本節では、前節までで述べた不同沈下による建物の振動性状への影響を考察する。本節は、不同沈下による中央部柱と外周部柱を対象とした、振動性状の違いの確認、及び沈下の激しい各階中央部壁の挙動の確認を行う。本節においても別々に考えるより、同時にみたほうが違いがわかりやすいため、2計測及び3計測を並行して試みていく。

計測箇所、解析指標は図 3-92,図 3-93 に示す。

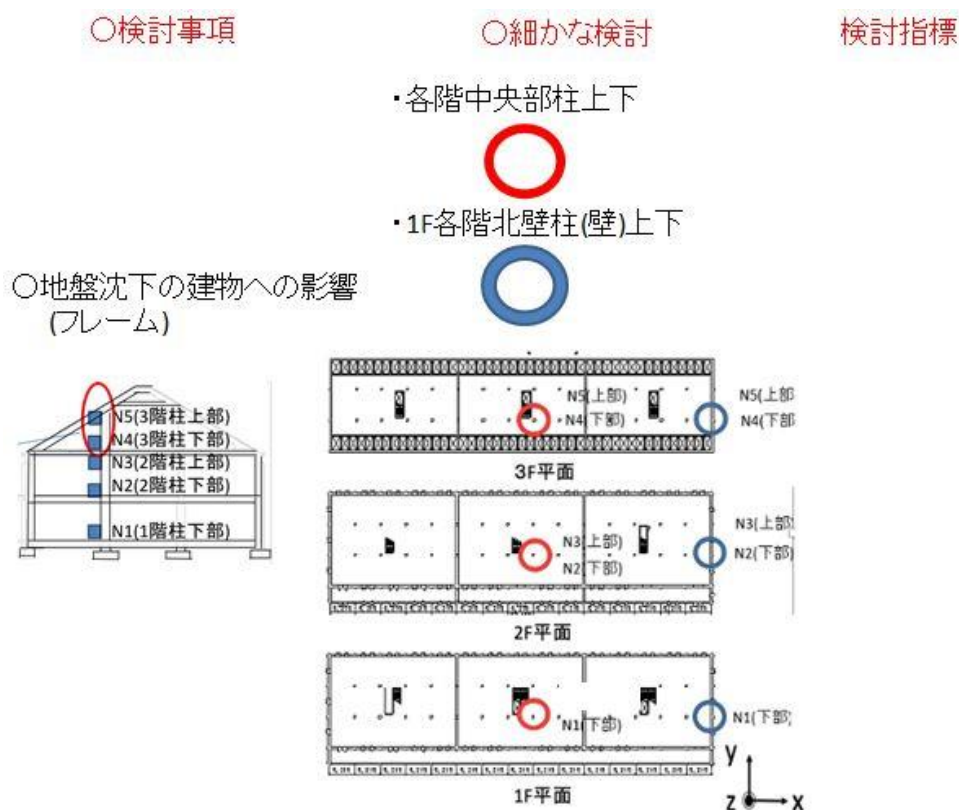


図 3-92 不同沈下による各部の振動性状の確認

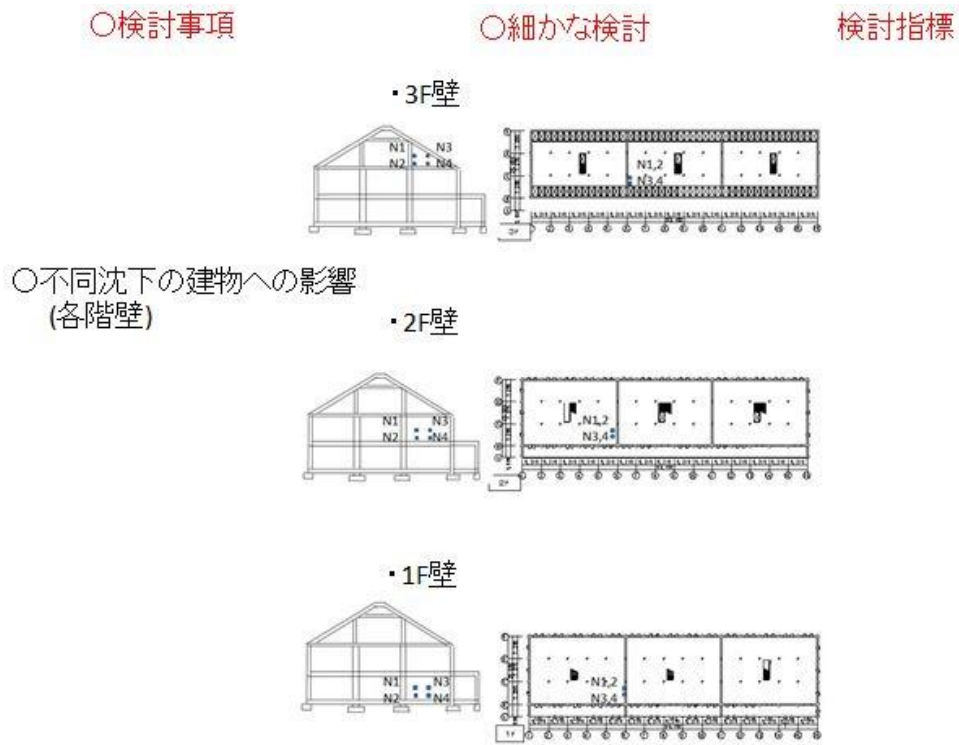


図 3-93 各階壁の振動性状の確認

3.8.1 不同沈下による各柱の振動性状の比較

図 3-94 に計測箇所を示す。

図 3-95 に示すように、高さ方向に 5 箇所センサを配置し、1F 柱下部を N1,2F 柱下部を N2,柱上部を N3,3F 柱下部を N4,柱上部を N5 とした。

不同沈下による各階柱への常時微動への影響を考察するため、沈下量の大きい中央部の柱(図の赤丸)と、沈下量の小さい北側基礎梁上の柱(図の青丸)を計測対象とし、比較を行った。

前節で大きく中央部と北側基礎上のスペクトルが異なったため、建物への影響は確実にあると考え、解析、考察を行った。

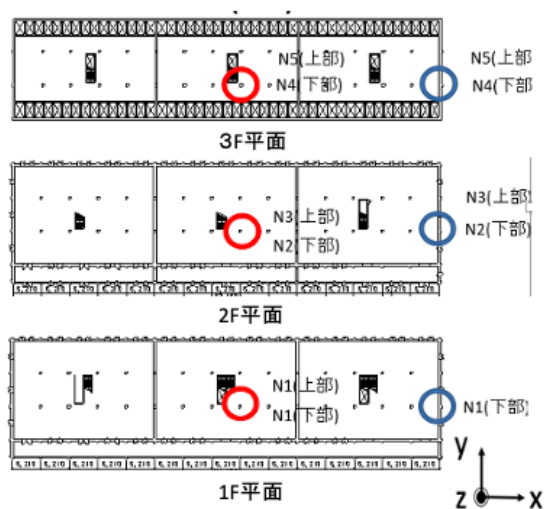


図 3-94 中央部北側基礎上の比較

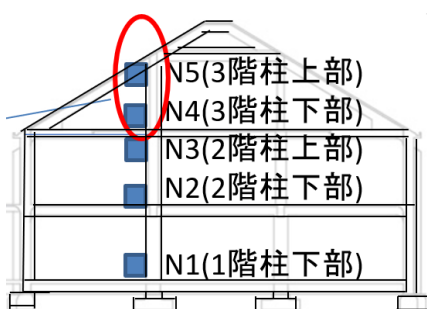
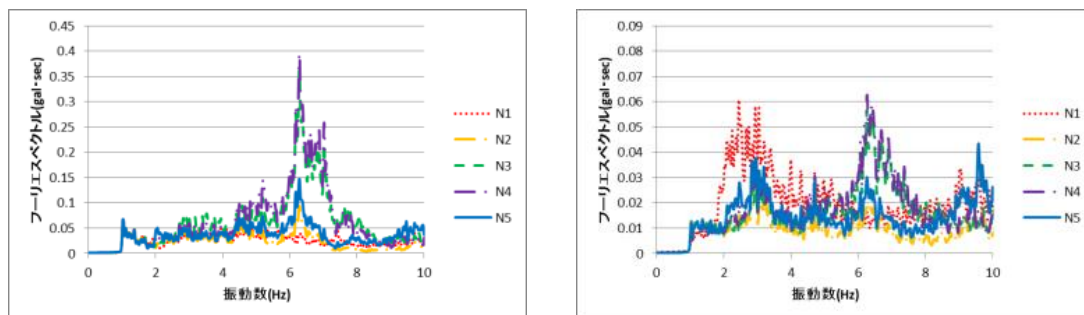


図 3-95 立面図 センサの貼り方

FFT を用いた考察

図 3-96 から図 3-98、表 25 から表 27 に計測方向ごとにフーリエ変換の結果を示す。図は左側に中央部柱、右側に北側基礎柱の結果を示す。表にはフーリエスペクトルから推定した各方向の固有振動数を示した。

X 方向



中央部柱

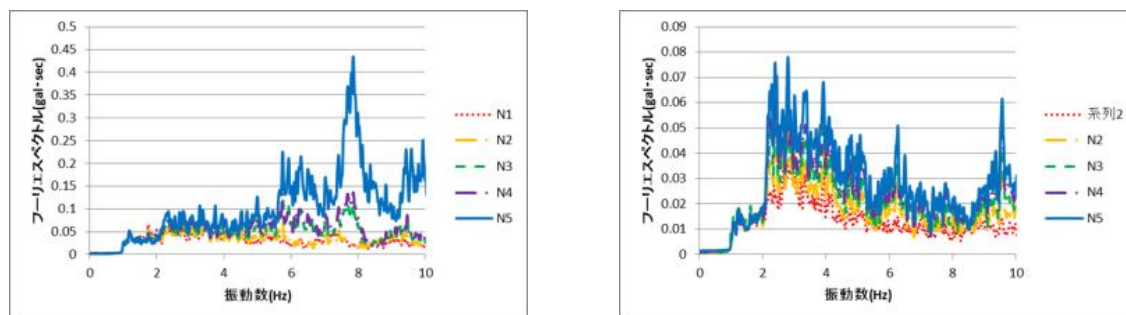
北側基礎柱

図 3-96 各箇所 X 方向のフーリエ変換の結果

表 25 各箇所の x 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	北側基礎柱
一次固有振動数	2.89	3.04
二次固有振動数	4.50	4.70
	6.27	6.25

Y 方向



中央部

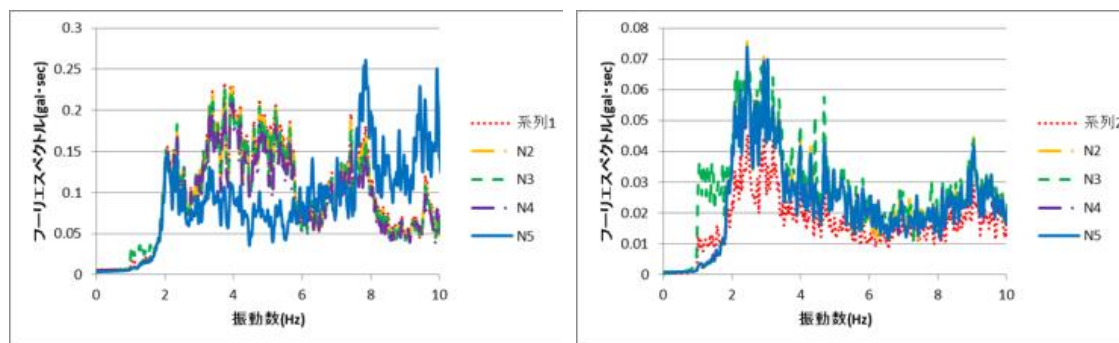
北側基礎柱

図 3-97 各箇所の Y 方向のフーリエ変換の結果

表 26 各箇所の Y 方向での固有振動数(Hz)

X 方向(Hz)	中央部	北側基礎柱
一次固有振動数	2.81	2.8
固有振動数	7.85	

Z 方向



中央部

北側基礎上

図 3-98 各箇所の Z 方向のフーリエ変換の結果

表 27 各箇所の Z 方向での固有振動数(Hz)

X 方向 (Hz)	中央部	北側基礎上
一次固有振動数	2.35	2.44

図 3-96 から図 3-98、表 25 から表 27 より、x 方向の微動については、中央部、北側基礎上ともに 3F 床の上下である N3,N4 のスペクトルが 6.3Hz にピークを持っている。やはり、建物の固有振動数のところでも述べたとおり、3F のみがこの振動数帯で揺れやすいことがわかる。しかし、中央部と北側基礎上でピークとなる振動数におけるフーリエ振幅が大きく異なっていることが分かる。中央部のほうがかなり 6.3Hz 付近で X 方向に揺れやすい。これは 3F 床各部の拘束度の違いが影響を与えているものと考えている。

Y 方向の微動を示す図 3-97 では、中央部と北側壁で大きく振動特性が異なっている。北側基礎上の壁計測ではセンサ間でのスペクトルの違いがほとんどないが、中央部の柱計測では 6Hz 以降で計測箇所のスペクトルのピークが認められる。このスペクトルの違いは X 方向と同じ理由であると考えられる。

3F 床のみ、このように 6.3Hz 付近で大きく動きやすくなっており、2F,3F の柱、壁はこの振動によりかなりダメージを受けていることとなる。3F 中央部柱や 3F 中央部壁には、この影響と考えられるひび割れが多く存在する。その様子を図 3-99 図 3-100 に示す。

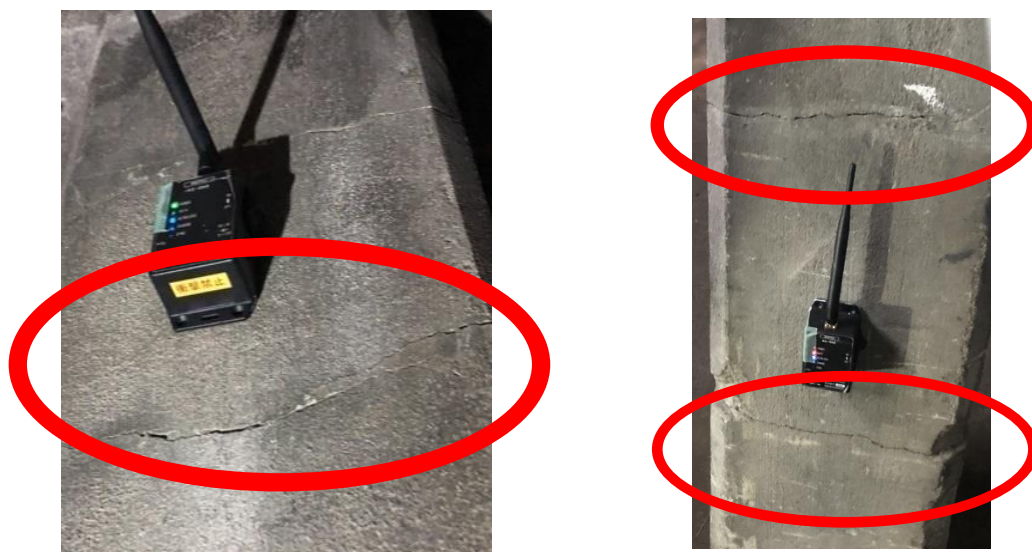


図 3-99 3F 柱の輪切り状ひび割れ

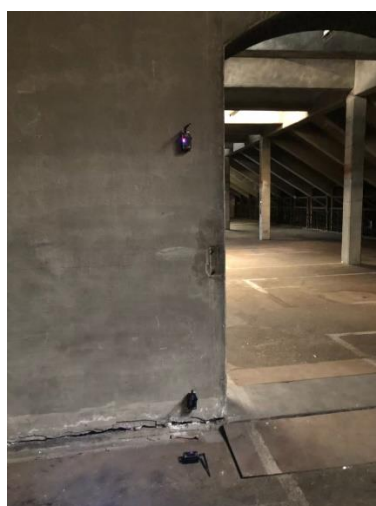


図 3-100 3F 壁のひび割れ

Z方向の微動を表す図 3-98 より、N1 から N4 で 4.0~6.0Hz にピークがあることから、不同沈下と同じピークであるため、地盤の揺れやすさが建物に伝達していることが見て取れる。また N5(3F 柱上部)のスペクトルが他の位置のものと大きく異なっている。これは 3F 柱上部は小屋梁とつながっており、フレームの振動特性を示しているのだと考える。N5において 4Hz から 6Hz のピークが見られないことから、図 3-99 に示したひび割れによって振動性状が異なっている。もしくはフレームの振動特性のほうが不同沈下の影響より強いということが考えられる。また、中央部のみ全箇所にて 7.8Hz_{no} ピークがあり、これも不同沈下の影響と考えている。

リサージュを用いた考察

図 3-94 の矢印の方向（北側）から見たリサージュを図 3-101 に示す。各図において、左側に中央部の、右側に北側基礎上の結果を示しており、下記でそれぞれを考察した。

自由振動(BPF なし)での YZ 平面のリサージュ

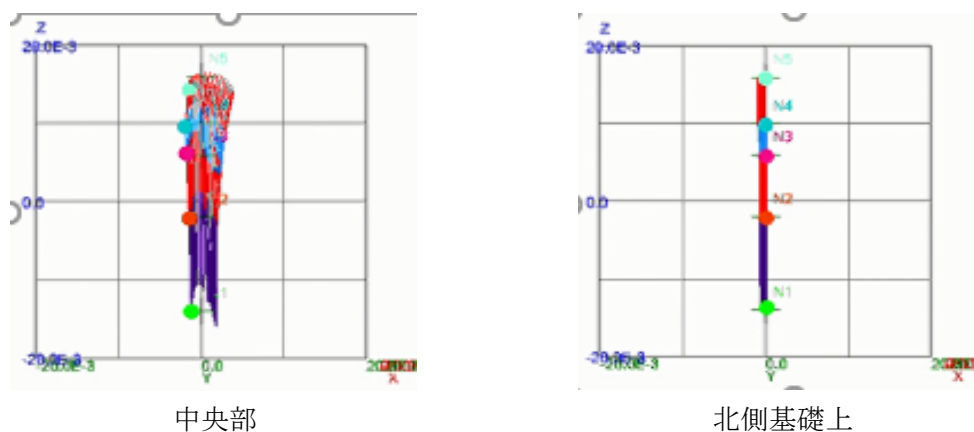


図 3-101 自由振動(BPF なし)での YZ 平面のリサージュ

図 3-101 のリサージュはスケールをあわせているため、建物高さ方向の計測でも南北方向での不同沈下の確認と同様に、中央部柱の方が北側基礎梁上より大きく振動していることがわかる。上階部分である N3,N4,N5 の微動を拡大したリサージュを図 3-102 に示す。



図 3-102 自由振動(BPF なし)での YZ 平面のリサージュ

図 3-102 より、中央部では最も上部の N5(3F 柱上部)の箇所が小刻みに首を振るように揺れていることが分かる。北側壁では N5、N4 間はほぼ一定であるが、N3 (2F 柱上部) の上下動振幅が大きくなっている。中央部での異常振動の原因は、現時点では、輪切り状ひび割れの実挙動への影響と考えている。

不同沈下による各柱の振動性状の比較のまとめ

FFT より、x 方向の微動については、中央部、北側基礎上ともに 3F 床の上下で 6.3Hz にピークを持っている。やはり、建物の固有振動数の節でも述べたとおり、3F のみがこの振動数帯で揺れやすいことがわかった。しかし、中央部と北側基礎上でピークとなる振動数におけるフーリエ振幅が大きく異なっていることが分かる。中央部のほうがかなり 6.3Hz 付近で X 方向に揺れやすい。これは 3F 床各部の拘束度の違いが影響を与えているのだと考えている。

Y 方向では、中央部と北側壁で大きく振動特性が異なっている。北側基礎上の壁計測ではセンサ間でのスペクトルの違いがほとんどないが、中央部の柱計測では 6Hz 以降で計測箇所でのスペクトルのピークが見られた。このスペクトルの違いは X 方向と同じく吹き抜けの影響が中央部の方が大きいためであると考えられる。

Z 方向では、中央部柱において、1 階柱から 3 階柱下部まで 4.0~6.0Hz にピークがある。不同沈下と同じピークであるため、地盤の揺れやすさが建物に伝達していることが見て取れる。また N5(3F 柱上部)のスペクトルが他の位置のものと大きく異なっている。これは 3F 柱上部は小屋梁とつながっており、フレームの振動特性を示しているのだと考える。このように 3 階柱上部と下部で振動性状が大きく異なるため、ダメージが蓄積され、3 階柱には輪切りひび割れが多く見られた。

リサージュより、変位量、動きやすい箇所が違うということがわかった。中央部においては、Z 方向で述べたとおり、3F 柱が大きく動くことが確認された。また変位量も北側基礎上に比べるとすごく大きくなっている。北側基礎上の柱(壁)では変位量も小さく、動きやすい箇所も 2F 柱上部、3F 柱下部間であったことから、3F の床が動きやすくなっていることを示している。

3.8.2 不同沈下による各階壁の振動性状の比較

図 3-103 に計測箇所を示す。図 3-103 に示すように、壁の 4 箇所にセンサを配置し、内側上部を N1,内側下部を N2,外側上部を N3, 外側下部を N4 とした。前節に示したとおり、不同沈下の影響で上階の柱や壁にはひび割れが多く入っている。柱は前節で取り扱ったため、本節では図に示す各階中央部の壁の振動特性の違いを考察する。各箇所は常時微動と人力による加振を行ったため、それぞれの結果を示す。図 3-104 図 3-106 に各計測壁の様子を示す。

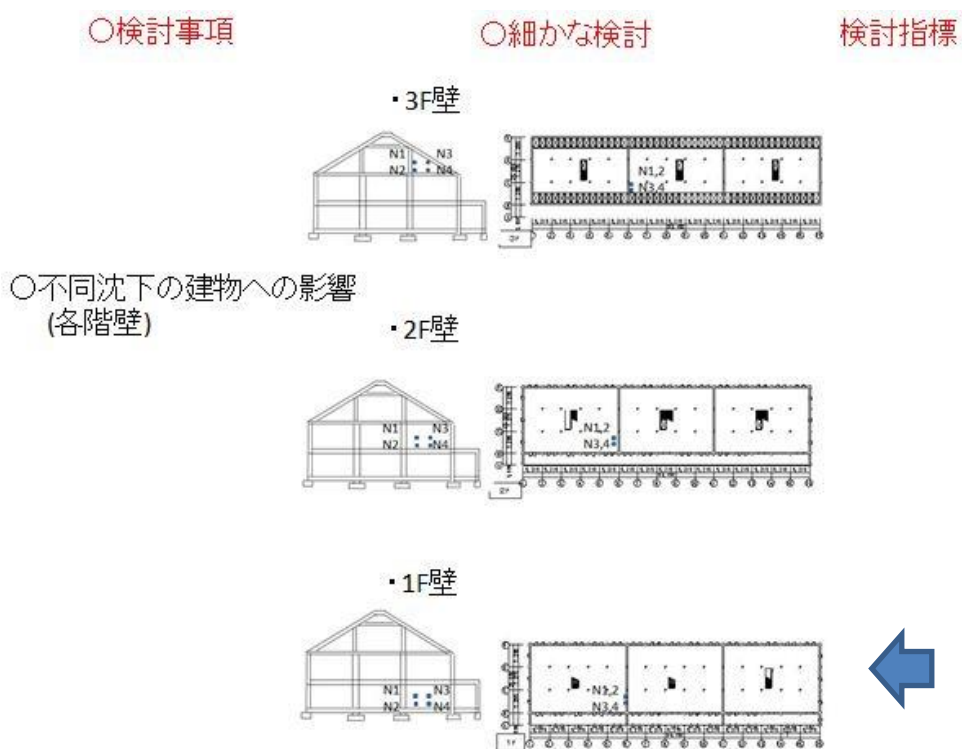


図 3-103 各階壁の比較

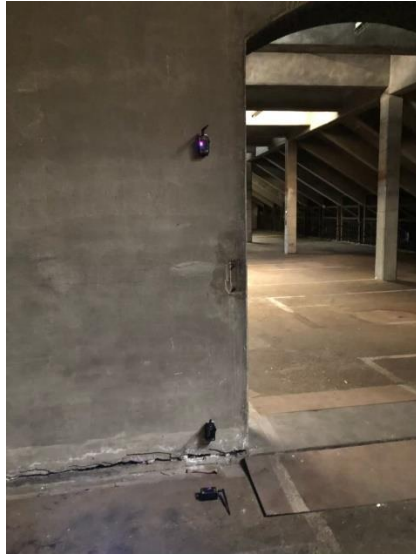


図 3-104 3F 壁の様子



図 3-105 2F 壁の様子



図 3-106 1F 壁の様子

伝達関数を用いた考察

図 3-107 から図 3-124 に計測方向ごとに各階の伝達関数の結果を示す。伝達関数は各階劣化を一番受けず、床壁一体と見られる N4 を基準として計算した。図は左側に常時微動、右側に加振の結果を示す。表には伝達関数から推定した各方向の固有振動数を示す。

X 方向

面外方向であり、ひび割れによって拘束がとかれて一番動きやすくなる方向である。

3F 壁

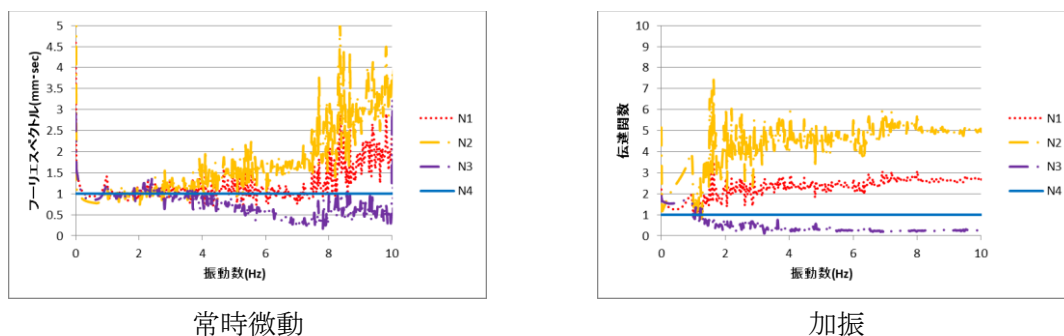


図 3-107 3F 壁 X 方向の伝達関数

2F 壁

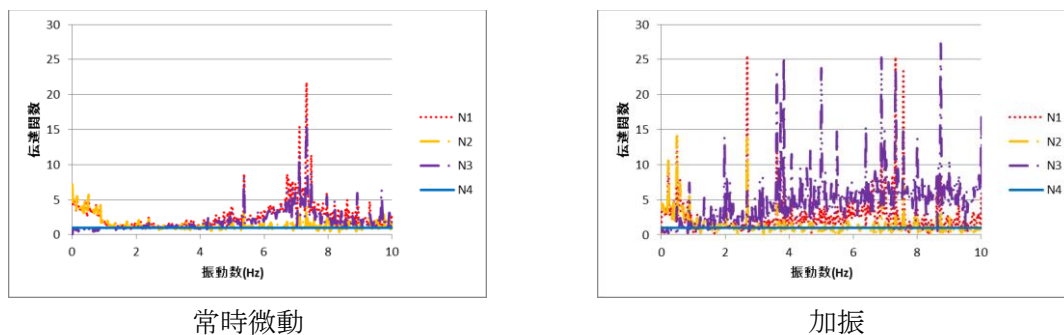


図 3-108 2F 壁 X 方向の伝達関数の結果

1F 壁

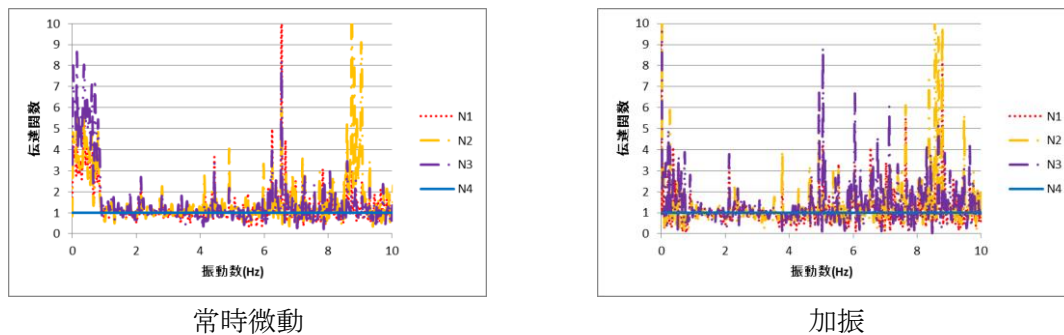


図 3-109 1F 壁 X 方向の伝達関数の結果

図 3-107 から図 3-109 に示すように、3FX 方向において、大きく振動性状が変わっていることがわかる。常時微動では 8Hz 付近で中央部が揺れやすくなっているが、加振を行うと、どの振動数でも、中央部のほうが大きく揺れる結果となっている。そのため、3F 壁は X 方向において部分的な劣化ではなく、全体として劣化していることとなる。

2FX 方向においては常時微動では 7Hz 付近で揺れやすいが、加振のものでは 7Hz に加え、4Hz, 5Hz 付近でも揺れやすくなっている。2F 壁の付け根部分にひび割れが入っていたため、その影響であると考えられる。

1F の X 方向において、常時微動では 6.5Hz 付近で揺れやすいが、加振では 5Hz 付近で揺れやすくなっている。1F 壁には付け根のひび割れなどは見られなかったため、壁面外周部が固定されているときの、加振による面外方向への揺れやすさが 5Hz 付近の可能性が考えられる。ひび割れによって一番動きが変わる X 方向では、一番劣化のひどい 3F と 2, 1F で伝達関数の傾向が異なっていた。

Y 方向

ひび割れができてもおそらく一番変化の起きない方向である。

3F 壁

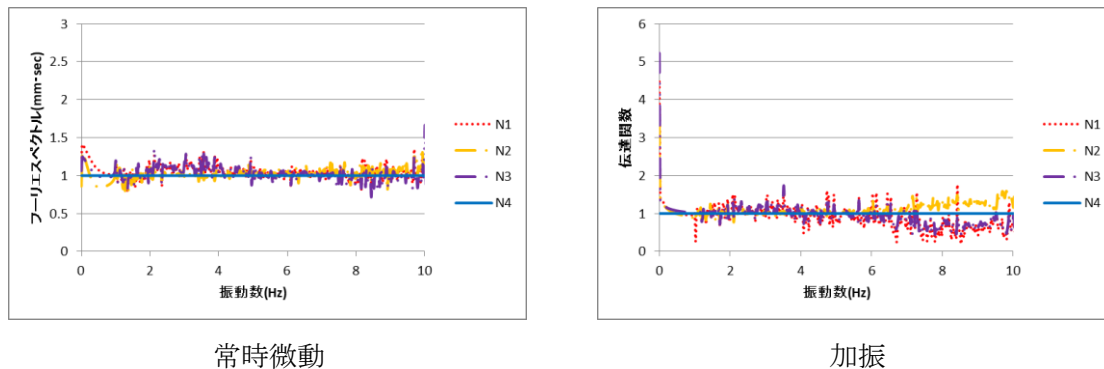


図 3-110 3F 壁 Y 方向の伝達関数の結果

2F 壁

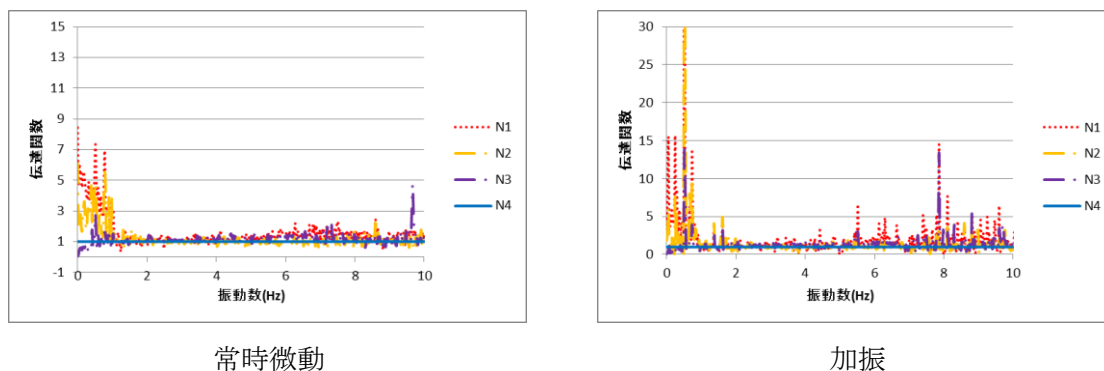


図 3-111 2F 壁 Y 方向の伝達関数の結果

1F 壁

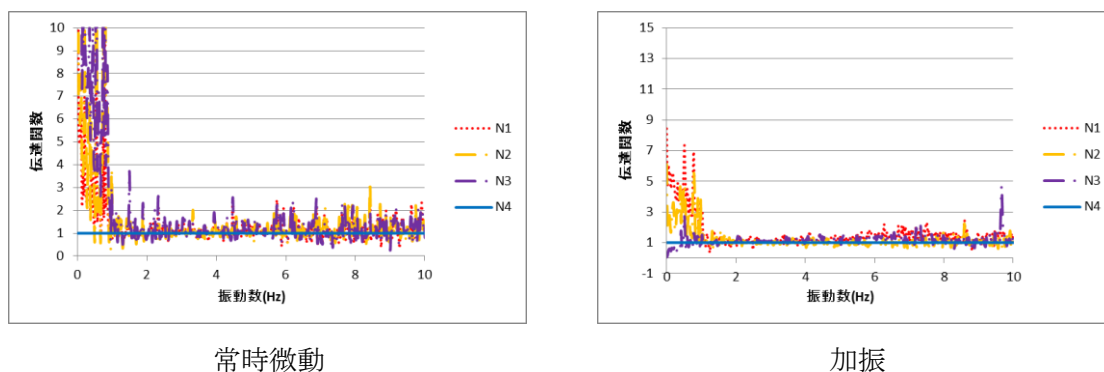


図 3-112 1F 壁 Y 方向の伝達関数の結果

図 3-110 から図 3-112 に示すとおり、2F の加振時で 8Hz が少し揺れやすくなっているが、概ね伝達関数は 1 倍に近い。Y 方向へ振動しやすいということは、完全に床と壁が剥離している状態なので、大きくは劣化していないということがわかる。

Z 方向

ひび割れにより、空間ができるため、Y 方向よりは違いが出ると考える方向である。

3F 壁

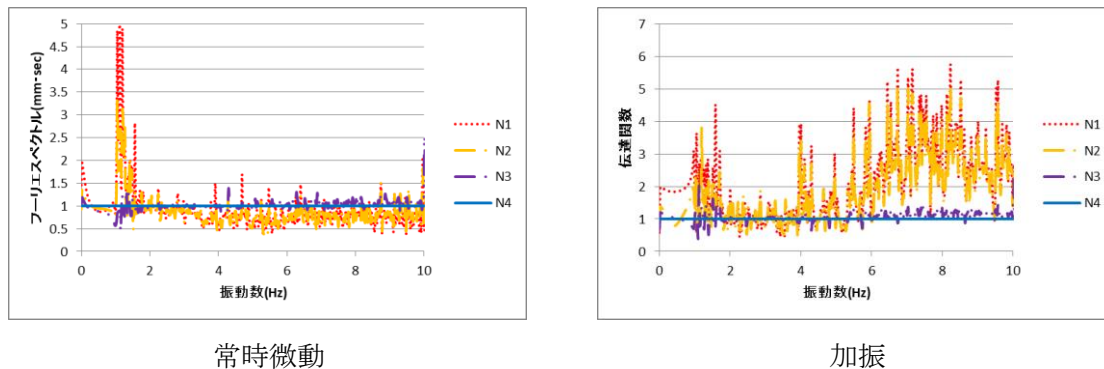


図 3-113 3F 壁 Z 方向の伝達関数の結果

2F 壁

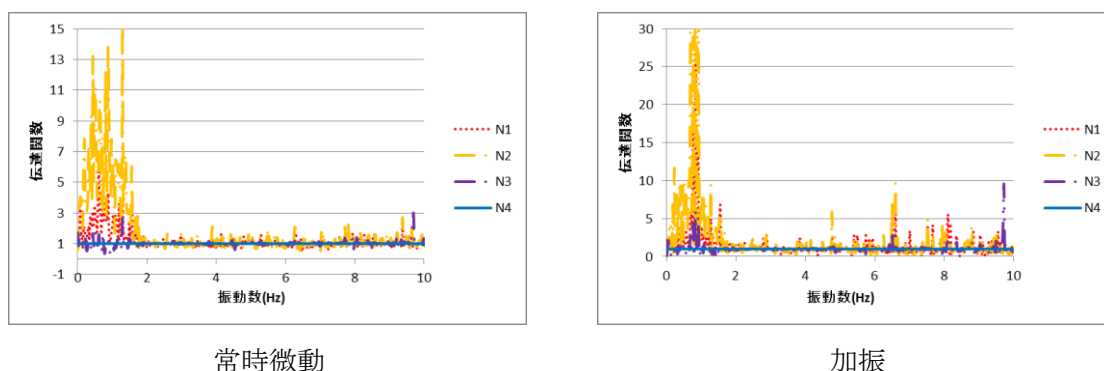


図 3-114 2F 壁 Z 方向の伝達関数の結果

1F 壁

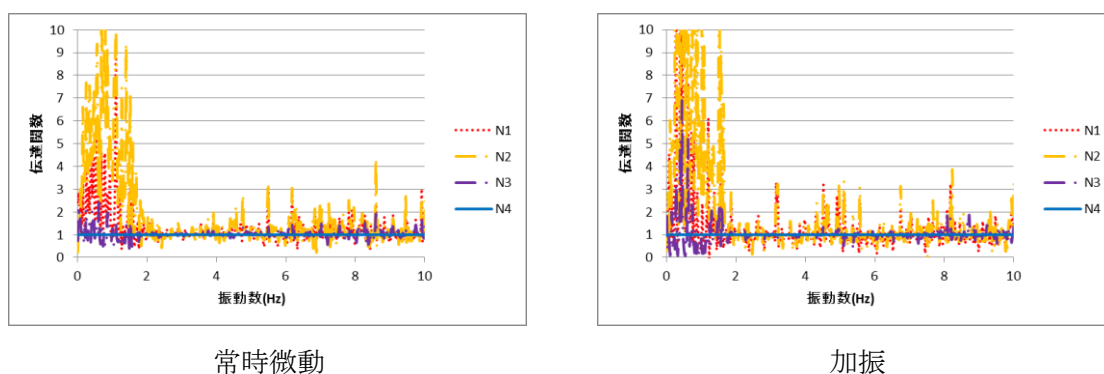


図 3-115 1F 壁 Z 方向の伝達関数の結果

図 3-113 から図 3-115 に示すとおり、3F のみ、加振時に大きく伝達関数が異なっている。3F 壁付け根には図で示したように大きなひび割れが入っており、空間があるため、上下に動きやすくなっていることが原因であると考えられる。

クロススペクトルを用いた考察

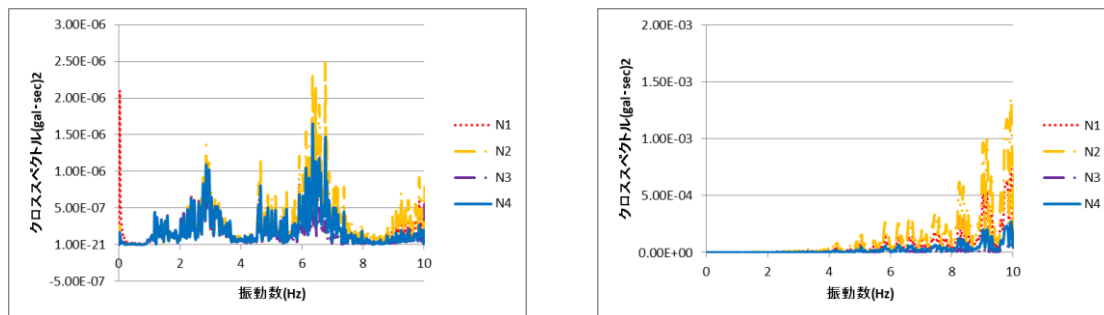
本計測箇所は同一平面内であるため、伝達関数に加えてクロススペクトルによっても劣化を検知できるか試してみることにした。同一平面に着目した理由としては、クロススペクトルの特徴にある。伝達関数は対象センサの各スペクトル/基準としたセンサの各スペクトルであり、分子、分母どちらかの変化は追えるが、両方が同じ劣化を起こした場合、劣化前と劣化後の伝達関数は変化しない。そのため、同一平面全体で劣化している場合は劣化検知できないのである。しかし、クロススペクトルは対象センサの各スペクトル*基準としたセンサの各スペクトルで算出されるため、分子、分母どちらかの変化に加え、両方劣化した場合もスペクトルが変わる。そのため、本計測 3F 壁のように全体として劣化しているものを見るにはクロススペクトルのほうが違いを示せるのではないかと考え、この指標を使い検討することとした。

図 3-116 から図 3-124 に計測方向ごとに各階のクロススペクトルの結果を示す。クロススペクトルは各階劣化を一番受けず、床壁一体と見られる N4 を基準として計算した。図は左側に常時微動、右側に加振の結果を示す。

X 方向

面外方向であり、ひび割れによって拘束がとかれて一番動きやすくなる方向である。

3F 壁

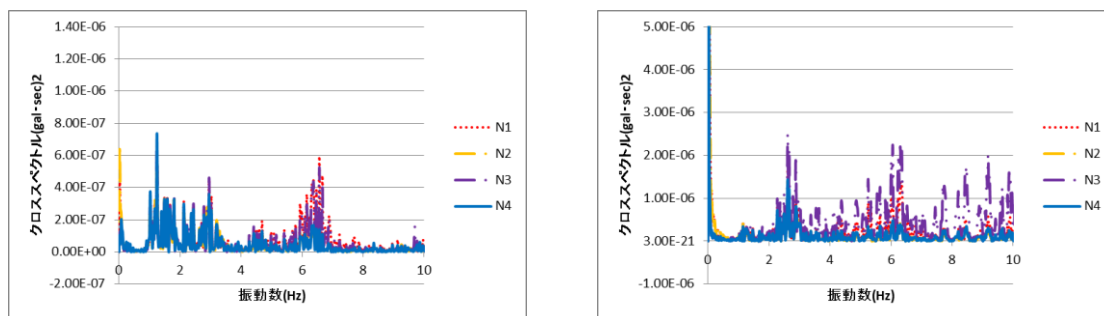


常時微動

加振

図 3-116 3F 壁 X 方向のクロススペクトルの結果

2F 壁

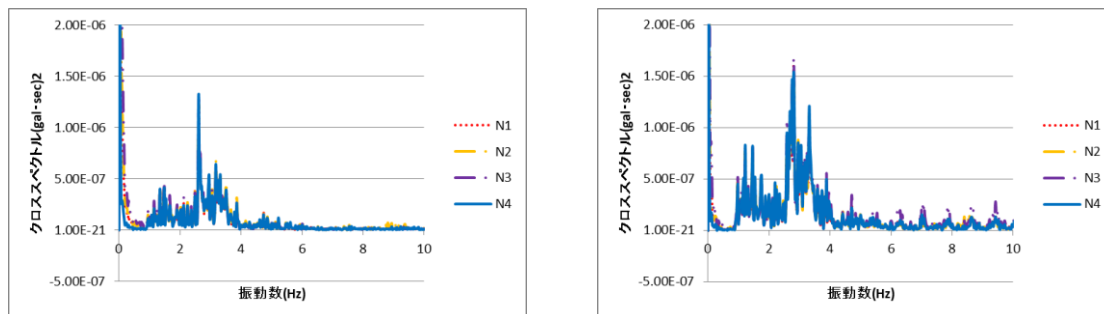


常時微動

加振

図 3-117 2F 壁 X 方向のクロススペクトルの結果

1F 壁



常時微動

加振

図 3-118 1F 壁 X 方向のクロススペクトルの結果

図 3-116 に示す 3F のみ、加振時に大きくスペクトルが異なっている。8Hz 以降で急激にスペクトルが大きくなっているため、基準とした N4 含め、全箇所でも 8Hz 以降の振動数で揺れやすくなっていることとなる。そのため、3F 壁は一体となって劣化している可能性が高い。

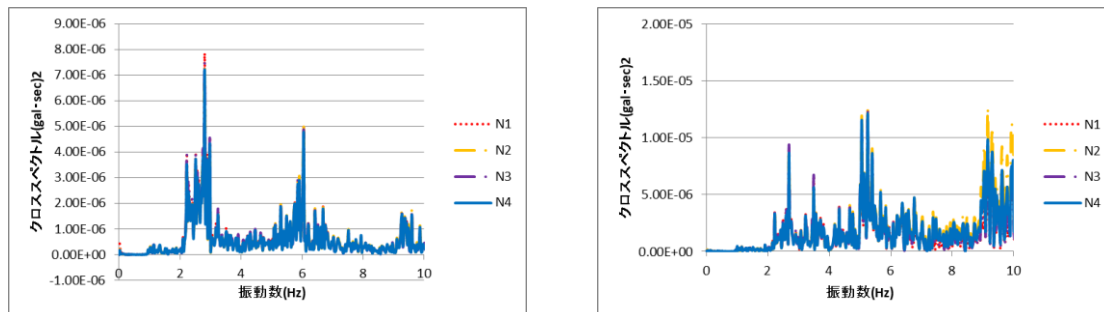
3F, 2F, 1F 壁の常時微動の方を見ると、全てに 3Hz 付近でピークを持っている。これは建物の X 方向への固有振動数が 3Hz 付近であるため、その影響だと考える。

3F, 2F には 6.5Hz 付近にピークがあるのに対し、1F にはそのピークがない。3F, 2F と 1F の違いは壁付け根のひび割れであるため、ひび割れによって X 方向に揺れやすくなる振動数は 6.5Hz 付近ということがわかる。

Y 方向

ひび割れができてもおそらく一番変化の起きない方向である。

3F 壁

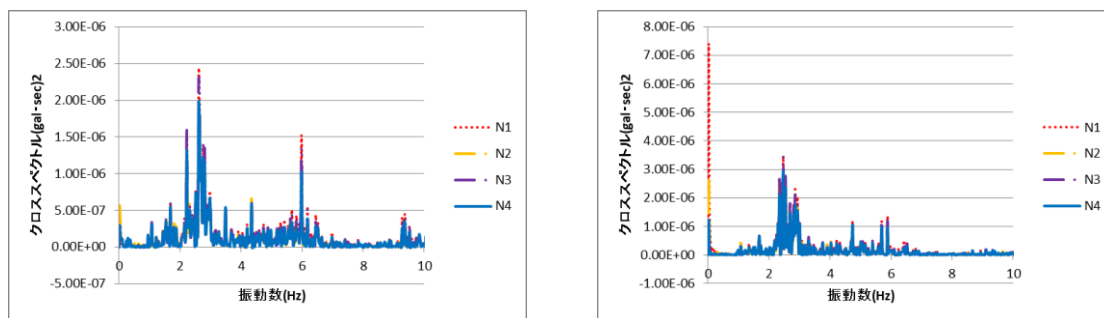


常時微動

加振

図 3-119 3F 壁 Y 方向のクロススペクトルの結果

2F 壁

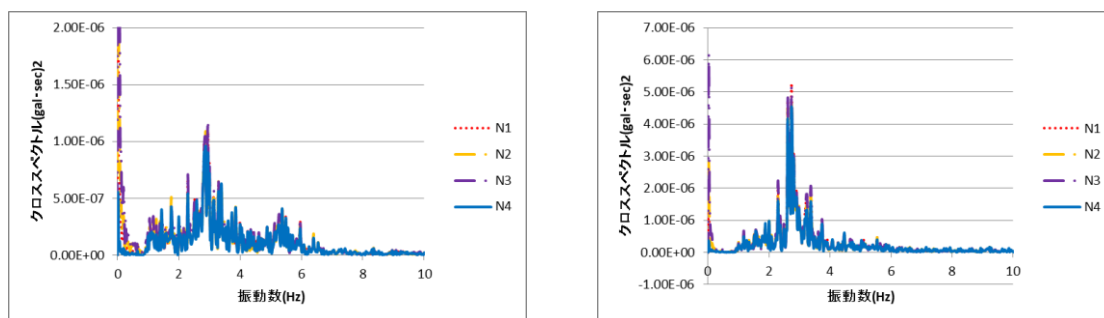


常時微動

加振

図 3-120 2F 壁 Y 方向のクロススペクトルの結果

1F 壁



常時微動

加振

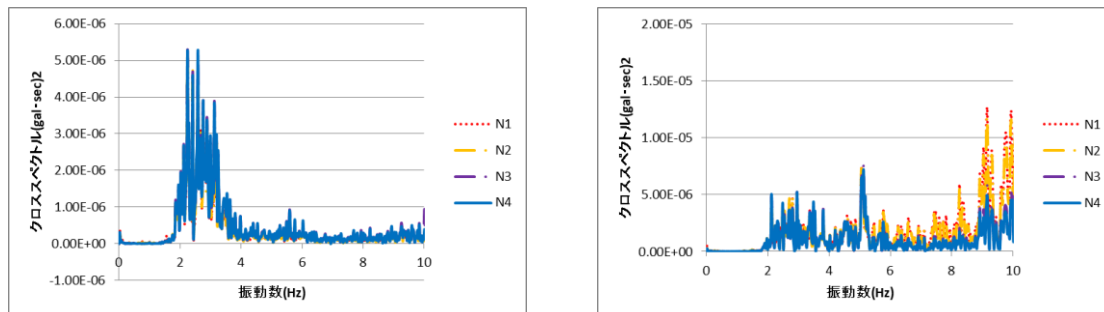
図 3-121 1F 壁 X 方向のクロススペクトルの結果

図 3-119 から図 3-121 より、Y 方向は伝達関数と同じく、あまり変化が見られない。しかし、3F の加振時に 9Hz 以降でスペクトルが大きくなっているため、X 方向での影響が Y 方向にも出ているのだと考える。

Z 方向

ひび割れにより、空間ができるため、Y 方向よりは違いが出ると考える方向である。

3F 壁

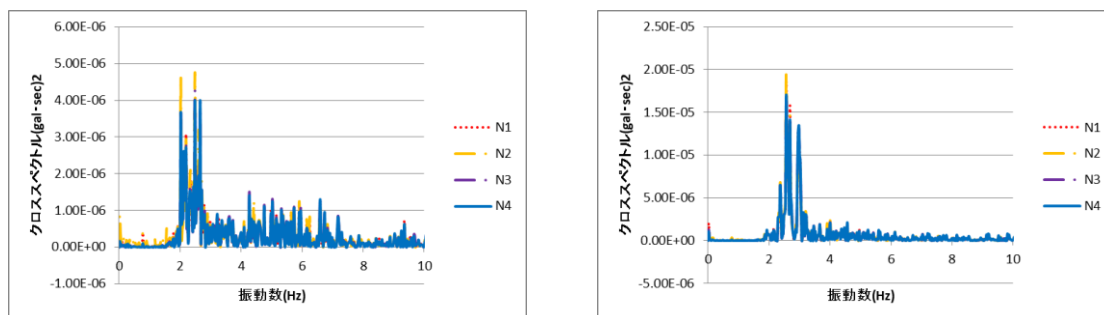


常時微動

加振

図 3-122 3F 壁 Z 方向のクロススペクトルの結果

2F 壁

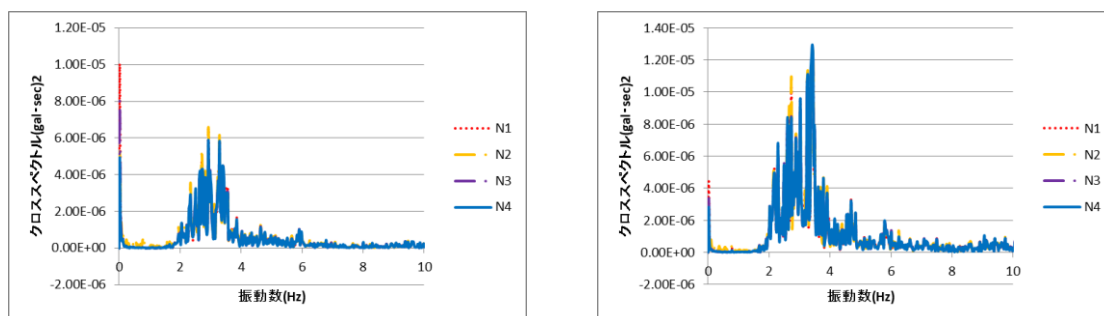


常時微動

加振

図 3-123 2F 壁 Z 方向のクロススペクトルの結果

1F 壁



常時微動

加振

図 3-124 1F 壁 Z 方向のクロススペクトルの結果

図 3-122 から図 3-124 に示すとおり、やはり、3F 壁の加振時のみ 9Hz 以降でスペクトルが大きくなっている。伝達関数と合わせて考えると、クロススペクトルの計算方法より、ひび割れの上は 6Hz 以降で揺れやすくなり、ひび割れのない N4 のような箇所は 9Hz 以降で揺れやすくなっていることがわかる。

リサージュを用いた考察

図 3-125 から図 3-127 にリサージュを示す。各図において、左側に常時微動、右側に加振の結果を示しており、下記でそれぞれを考察した。

自由振動(BPF なし)でのリサージュ

3F 壁

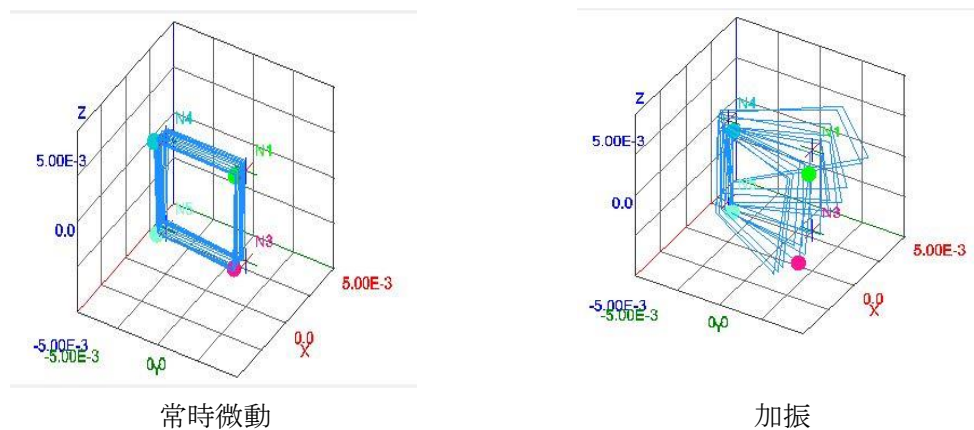


図 3-125 自由振動(BPF なし)での YZ 立面のリサージュ

2F 壁

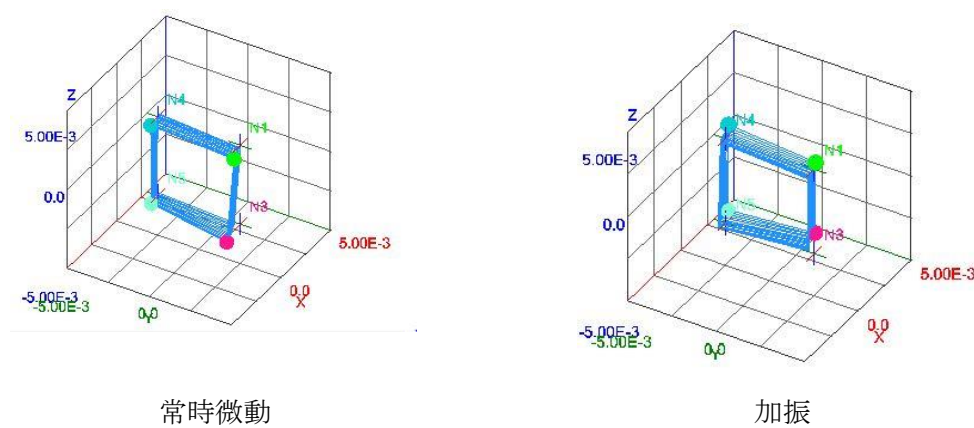


図 3-126 自由振動(BPF なし)での YZ 立面のリサージュ

1F 壁

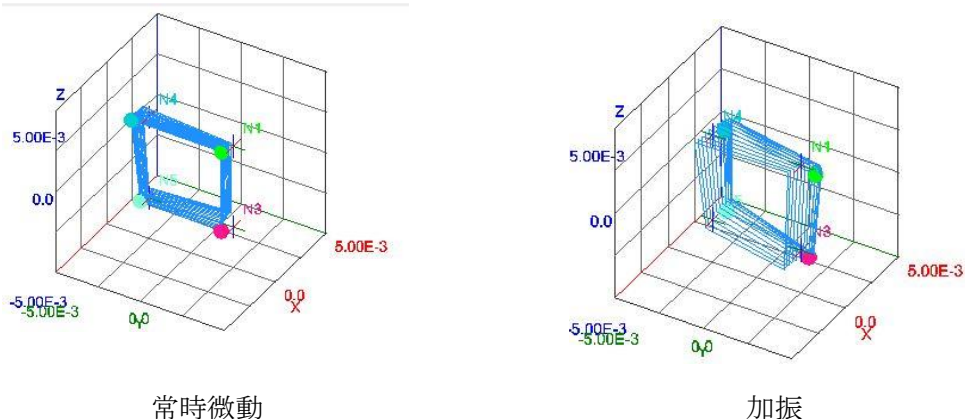


図 3-127 自由振動(BPFなし)でのYZ立面のリサージュ

図 3-125 に示す 3F のみ加振時に中央よりの N1,N2 が大きく振れるように動いている。N4 より外側の柱-壁接合部を支点に大きく扇形に動いているため、床-壁間の接合は確実にひび割れで切れていることがリサージュより見て取れる。やはり、リサージュは実挙動の確認には有効な指標であることが示すことができた。

図 3-126 に示す 2F の壁においては、壁の付け根にひび割れが入っていたが、加振時も壁が平行移動している。そのため、3F 壁ほど劣化が進んでいるわけではない。

図 3-127 に示す 1F 壁についてはひび割れが確認されなかったため、加振を行っても壁が一体となって動いていることがリサージュで確認できた。

3F の加振時の動きが顕著すぎるため、早急な補修が必要であると考えられる。

不同沈下による各階壁の振動性状の比較のまとめ

伝達関数より、ひび割れによって動きやすい X 方向において、どの階でも常時微動、加振でスペクトルが変わることがわかった。Y 方向に関しては一番動きにくい方向なのでどの階も常時微動、加振で変化が見られなかった。二番目に動きやすい Z 方向において、3F のみ大きくスペクトルが変わった。3F 壁下部はひび割れが大きかったため、加振によって上下動が大きく出たのだろう。

クロススペクトルを用いると

X 方向において、3F のみ加振で大きくスペクトルが変わった。Y 方向においては伝達関数と同じく、動きにくい方向であるため加振前後で差は出なかった。

Z 方向において、X 方向と同じく 3F のみスペクトルが異なった。X 方向、Z 方向において、加振によって 8Hz 以降に大きなピークを持っていることから、この振動数帯がひび割れによる壁の揺れやすい振動数であることがわかる。

伝達関数と異なり、動きやすい X, Z 方向で 3F のみスペクトルが異なっていることから、重度の劣化に関してはクロススペクトルを用いると明確に劣化を示す事ができることがわかった。

リサージュによって、実挙動を確認すると、やはり 3F 壁のみ加振時に大きく振れるような動きをしていることがわかった。2F 壁下部にもひび割れはあったが、3F のようとうごきがかわるほどの劣化ではなかったことがクロススペクトル、リサージュによってわかった。

3F 壁に関してはクロススペクトル、リサージュよりかなり劣化が進行していることが見て取れる。やはり、中央部不同沈下の影響が柱だけでなく壁にも影響を与えているのだろう。壁の補修に関しては確実に上階から行っていくべきである。

3.9 陸軍被服支蔽倉庫の常時微動計測の総括

本章では陸軍被服支蔽を対象とした検査を行い、並行して常時微動計測の計測可能範囲の確認やどの指標や方法を用いるべきかを検討した。

以下に本章で得られた検査の側面の知見、および技術的、研究的側面からの知見をまとめる。

1)固有振動数の確認

建物本体は X 方向については、きれいな一次モードを描くものではなく、また、相対変位より、一階の変位が大きくなる傾向がわかった。Y 方向においては多くの振動数で一次モードのような動きをしていることがわかった。Z 方向において全階同じ位相で上下動する振動数が多くあった。また、通常では Z 方向の振動は XY 方向に比べて小さくなる傾向があるが、本建物は Z 方向変位が大きく出ている。そのことから本建物はかなり一般的な建物と動き方が違うことがわかった。

また、X 方向において、FFT やリサージュをみると、6 から 8Hz で 3 階が大きく揺れやすくなっている。3 階には吹き抜けがあり、その影響が振動性状に大きく影響を与えていることがわかった。

側廊部は、固有振動数より、建物本体より少し側廊部の方が固有振動数が高いことがわかった。側廊部と本体両方の振動特性を持つ箇所ができるはずなので、接合部である 2F ベランダが共振振動数の多い危険箇所がある可能性が高い。

リサージュや相対変位より、外壁側のほうが少し動きやすいことがわかった。これは梁による拘束量の違いで、拘束が少なく、また日射を受ける外壁側のほうが動きやすくなっているのだろうと考える。

2)壁床一体性の確認

北側妻壁のはらみの可能性があったため、北壁、南壁を比較することとした。剥離方向である X 方向において、振動数領域の解析では各箇所ピーク振動数が同じであったが、相対変位を見ると、北壁のほうが少し変位が大きくなる傾向が見られた。

Y 方向においても、明確に北壁のほうが変位が大きくなっていることから、北壁の方が動きやすいことがわかった。

Z 方向に関しては、振動数領域、時間領域ともに壁よりか床のほうが動きやすいことがわかった。そのため、壁よりかは床のほうが動きやすいことがわかる。

3)壁の剥離確認

1F 東柱と北壁モルタルレンガを対象に計測を行った。

1F 柱より、打音検査によって明確に剥離が起こっている箇所、目視では検査できない剥離箇所を検知することができた。また、レンガ表面のみにセンサを貼り、常時微動計測を行ったが、そちらでは明確な剥離であっても検知はできなかった。

北壁内外の内側モルタル-外側レンガにセンサを配置し、常時微動計測を行った。しかし、こちらも表面のみにセンサを貼った場合と同じく劣化を検知することはできなかった。

4)不同沈下の確認

過去の計測より、不同沈下が確認されていたため、北側基礎と中央部、西側基礎と中央部、北側平面の3パターンで計測を行い、不同沈下の振動性状への影響を考察した。

北側基礎と中央部、西側基礎と中央部の特徴がそのまま北側平面にあらわれていたため、北側平面をもとにまとめる。

XY 方向では計測箇所による違いは見られなかった。

FFT や伝達関数の結果、Z 方向において、外周部の基礎箇所と平面中央部で大きくスペクトルが異なっていた。中央部付近のみ 5Hz 付近でスペクトルが大きくなっており、上下動を起しやすくなっていることがわかる。

リサーチでは、自由振動のものからやはり、平面中央が大きく動く様子が見られた。また、西側基礎および北側基礎を比べて結果、北側基礎は水平に上下移動を行っているのに対し、北側基礎は傾きを持って動いていることが確認された。長辺方向である西側基礎は中央部に行くほど大きな沈下が起こっていることがわかった。

また平面中央部のみ動きやすい 4.5-5.0Hz の振動を取り出してリサーチを描くと、やはり中央部のみが大きく上下動をしていた。このことから平面中央部が一番沈下がひどく、4.0-5.0Hz 付近がでていたことが再度示された。

5) 不同沈下の各階柱への影響

FFT より、x 方向の微動については、中央部、北側基礎上ともに 3F 床の上下で 6.3Hz にピークを持っている。建物の固有振動数のところでも述べたとおり、3F のみがこの振動数帯で揺れやすいことがわかった。

しかし、中央部と北側基礎上でピークとなる振動数におけるフーリエ振幅が大きく異なっていることから、中央部のほうがかなり 6.3Hz 付近で X 方向に揺れやすい。これは 3F 床各部の拘束度の違いが影響を与えているのだと考えている。

Y 方向では中央部の柱計測のみ 6Hz 以降で計測箇所のスペクトルのピークが見られた。X 方向と同じく吹き抜けの影響が中央部の方が大きいためであると考ええる。

Z 方向では、中央部柱において、1 階柱から 3 階柱下部まで 4.0~6.0Hz にピークがある。不同沈下と同じピークであるため、地盤の揺れやすさが建物に伝達していることが見て取れる。

また 3F 柱上部のスペクトルが他の位置のものとは大きく異なっている。これは 3F 柱上部は小屋梁とつながっており、フレームの振動特性を示しているのだと考える。このように 3 階柱上部と下部で振動性状が大きく異なるため、ダメージが蓄積され、3 階柱には輪切りひび割れが多く見られた。リサーチをみても中央部は 3F 柱下部、上部で挙動が異なっており、3F 柱へのダメージの蓄積が確認できた。

6) 不同沈下の各階壁への影響

クロススペクトル、リサーチを用いると 3F 壁のみひび割れによって動きやすくなる X 方向、Z 方向で、加振前後での違いが現れた。リサーチより、外側端部固定でひび割れのある中央部が大きく振れるように動いていたため、3F 中央部柱とおなじくかなり劣化が進行していることがわかった。

2F 壁の付け根部分にもひび割れは入っていたが、3F 壁のように違いが見られなかったことから、貫通するほどのひび割れでなく、3F 壁に比べるとまだ劣化が進行しきっていないことがわかった。不同沈下の各階柱への影響の結果と合わせて、まずは不同沈下を対策し、補修する場合は上階中央部より行っていく必要がある。

診断指標に関する私見

1)常時微動計測の有効性

本章の計測目的でも述べたとおり、従来はセンサを用いた建物の検査は地震をトリガーとしている。そのため、地震後の検査が主であるが、本章の計測事項はすべて検査に行き、その時時の常時微動を用いて計測を行っている。外壁の剥離に関しては常時微動では検知できなかったが、建物の振動性状の検査はすべて結果が出た。

よって、常時微動を用いても建物各部の検査は可能であるということを示せたと考える。常時微動を用いた計測の利点は、いつでも検査できることに加え、地震前に計測することで対策を取れることにもある。地震をトリガーとしていると、その地震で倒壊する可能性もある。そのような危険性を犯す必要もなくなるため、この検査方法は利点が多く、広めるべき方法であると考えている。

2)リサーチの有効性

固有振動数の節をはじめに、多くの節でリサーチを用いて考察を行った。リサーチによって実挙動を可視化することで考察がはかどったものがあるため、やはりこの解析方法は有効活用すべきである。

利点として、動画で動きを確認できるため、見たい箇所の動きを瞬時に確認できる点、バンドパスフィルターをかけることにより見た振動数の波のみを切り出し、不同沈下の節のように振動の原因を探れるなどが挙がる。

また、学会など発表の場で、建物を全く知らない人に簡単に振動の様子を示せることも挙がる。数秒の動画として動きを先に見せるだけで動きを把握してもらうことができ、その後の内容理解が捗る。

このように利点が多くある解析方法であるため、本研究を基盤に普及すべきであると考えている。

3)外壁レンガの剥離検知技術について

本章では外壁レンガを対象に、打音検査、常時微動計測を行い、剥離検査や、検査技術の高度化を目指した研究も行った。

まず、打音検査についてであるが、ピーク数端数、図心周波数、加振から最大音圧までの時間、減衰率(指数)すべての指標で剥離を検知することができた。そのため、レンガの剥離にも外装タイルの剥離検知技術が活用できることがわかった。

常時微動計測だが、計測波形を振動数領域、時間領域どちらで解析しても剥離箇所を剥離と判断できる指標が発見できなかった。そのため、常時微動計測による計測では、湿式仕上げであるレンガの剥離検知は厳しい。

常時微動計測は湿式仕上げの剥離検知には用いることができないという、常時微動計測の限界も示すことができた。

第4章 石垣市新市役所の常時微動計測

4.1 はじめに

本章では前章に続き、常時微動を用いた建物計測の結果を示す。本章では新しく建て替えた石垣市の市役所の解析結果を示している。

本建物にはモニタリングを行うことが確定している。しかし、センサ設置個所の制約から、構造設計者が最も地震時の振動が大きいと想定している箇所でモニタリングができない。そこで、振動が大きいと想定される箇所とモニタリング箇所との相違を把握しておくことで、モニタリング箇所を基準とした各箇所の振動倍率を求め、今後の維持管理に活用していくこととした。

本計測も前章と同じく、常時微動を用いた検査である。前章は劣化がかなり進行した建物を対象としたが、本章の対称建物は竣工直後のものである。劣化建築物だけでなく、本計測では新築の建物も常時微動計測は有効性を示すことができると考える。

4.2 建物概要及び計測概要

4.2.1 建物概要

本建物は隈研吾氏が設計を行った、地上3階、地下1階建て、RC造一部S造の建物である。建築計画の基本方針として、下記が公表されている。¹⁾

- ・石垣の風景を継承するみんなが集う市役所
(八重山地方の集落形式を継承、赤瓦屋根使用)
- ・あらゆる災害を想定した地域防災の中核拠点
(精神構造採用、耐風圧強度を確保した赤瓦屋根や窓)
- ・石垣の環境ポテンシャルを活かしたLCC低減
- ・石垣の伝統と風土に根差した環境建築
- ・地場素材がつくる新しい石垣の顔

建築物は隈研吾氏監修の設計であり、実際外観を見てみるとかなり赤瓦の主張が強い、沖縄らしさのある建物である。

構造計画としては、8.0m*5.4mを基本グリッドとし、RCのラーメン架構としている。吹き抜け等10mを超えるロングスパンの箇所はSの梁を用いている、

外観の写真を図4-1に示す。



北側外観



西側外観

図 4-1 外観写真

4.2.2 計測目的

図 4-2 は、本建物 1 階の平面図である。下記平面図の黄色の箇所ではモニタリングを行う予定であるが、構造設計者の想定では、モニタリング箇所ではない青色の部分の方が大きく揺れる可能性がある。そこでモニタリング箇所に対する青丸箇所の伝達関数や揺れの倍率を計測しておくことで、今後のモニタリングにおける安全ラインを検討する。また、竣工時の建物の動き方を把握し、今後どの箇所が危険になりそうかを推測しておく。

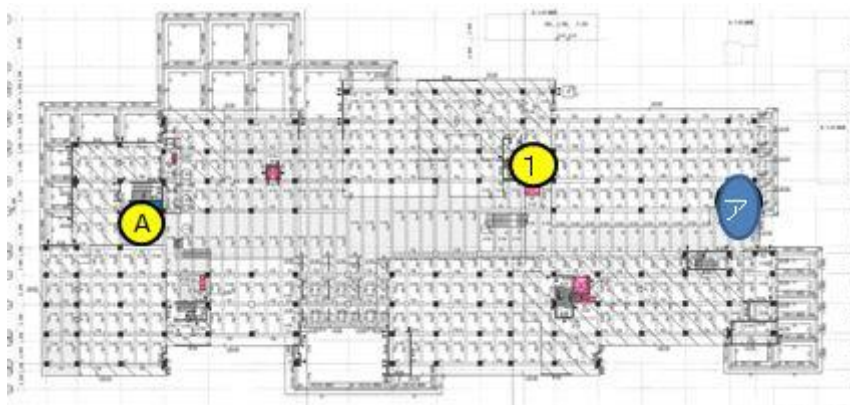


図 4-2 計測箇所

図 4-3 に計測目的, 及び解析指標を示す。

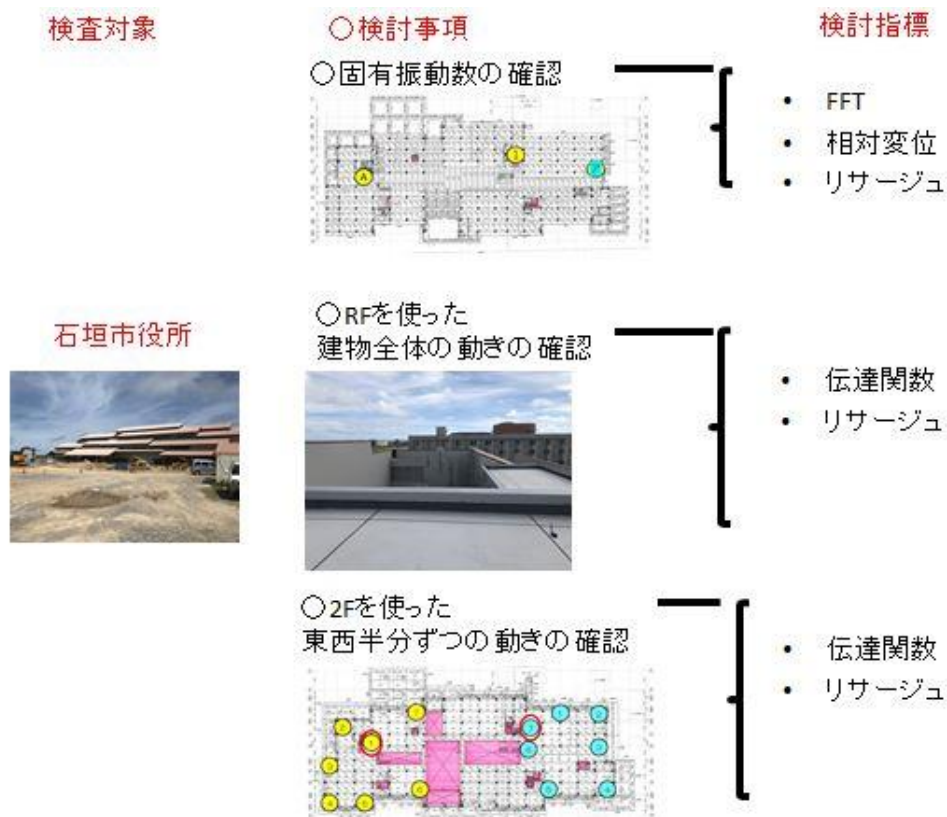


図 4-3 計測目的、解析指標

図 4-3 に示す通り、まず、モニタリング箇所、危険箇所の高さ方向計測を行い、固有振動数の確認を行う。この計測で建物の大まかな振動性状を把握する。続いて、屋上 RF の直線計測を行い、建物全体での振動の様子を把握する。また、モニタリング箇所に対する各部の揺れやすさを把握する。最後に 2F 平面を東西に分け、それぞれの範囲でモニタリング箇所に対する各部の揺れやすさを把握する。

4.3 固有振動数の確認

図 4-4 に 1F の計測箇所を示す。スペクトル図を表示する際に、A ライン(ABC)は赤△，1 ライン(1,2,3)は緑△，アライン(アイウ)は青△でピーク振動数を示す。



図 4-4 計測箇所

4.3.1 FFT 及びリサージュを用いた考察

X 方向での考察

FFT を用いた検討

図 4-5 に X 方向でのフーリエスペクトル図を示す。

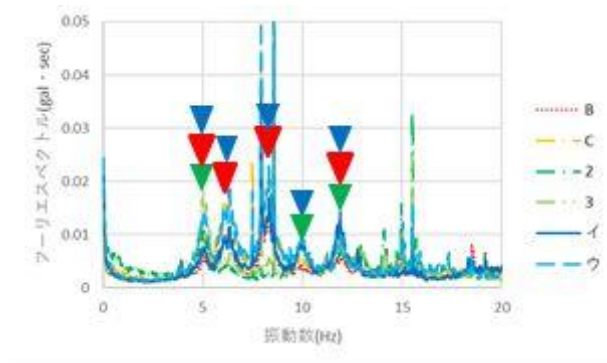


図 4-5 計測箇所

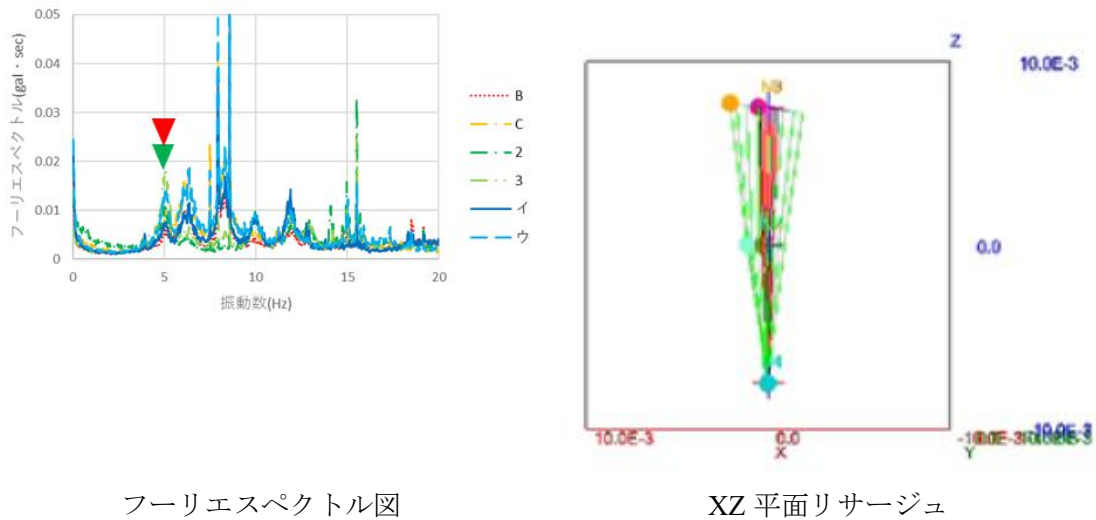
図 4-5 にはピークと思われる振動数に各色をつけた△をつけているが、下記のことが考察できる

- ・建物東西方向中央部である 2,3 のみピークの数が少ない。
- ・東西端部である A,アのラインのみ 6.4Hz,8.0Hz のピークを持っている。
- ・中央部 2,3 と東端部イ, ウのみ 10Hz でピークを持っている。

以上のことから、共振振動数が多く、端部のほうが揺れやすく、危険であることがわかる。さらに、アのラインは 10Hz のピークを持っているため、より振動が大きいと考えられる。アのラインは X 方向において、共振振動数が多く危険であることがわかった。なお、15Hz 以降はスペクトルの違いが見られにくい。

リサージュを用いた検討

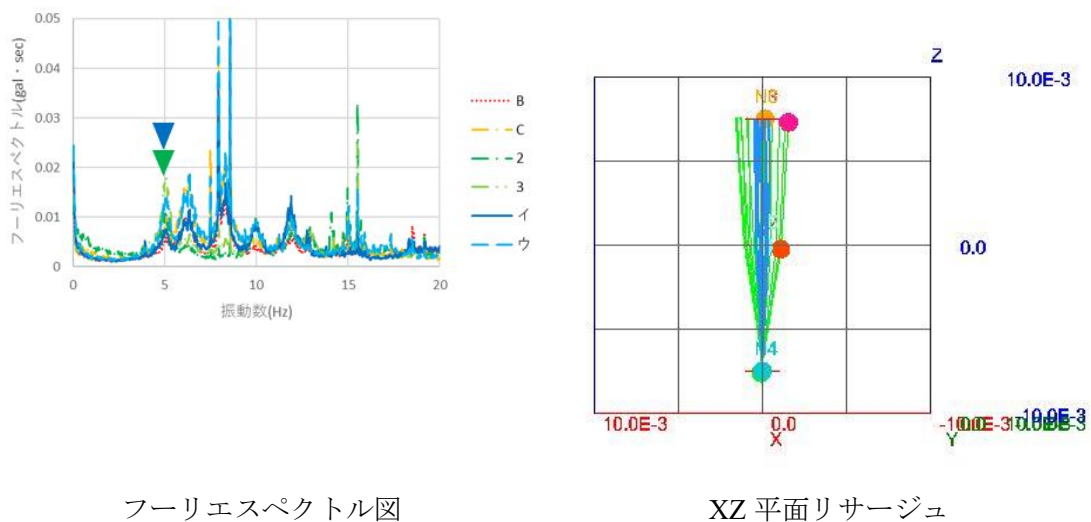
5.1-5.2Hz の振動



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-6 A,1 ラインのリサージュ図



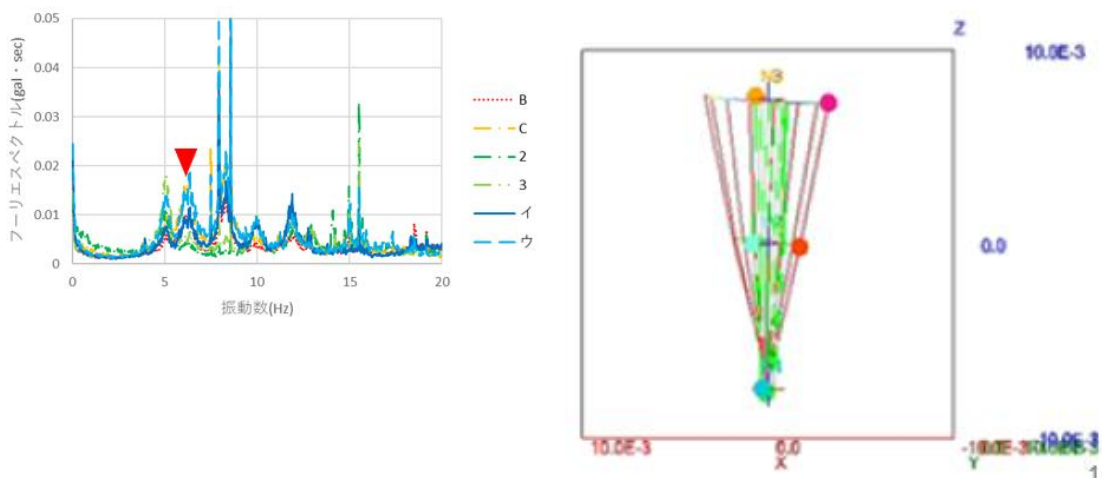
フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-7 1,Aラインのリサージュ図

図 4-6 図 4-7 より、中央部と西側、中央部と東側それぞれのリサージュを示していることがわかる。一次固有振動数と思われる 5.1-5.2Hz では、中央部が一番動きやすく、端部は中央部より動きにくいことが分かった。同一建物であっても、このように大きな建物で、構造種別も組み合わせられているため、それぞれの箇所での揺れやすさが異なっている。

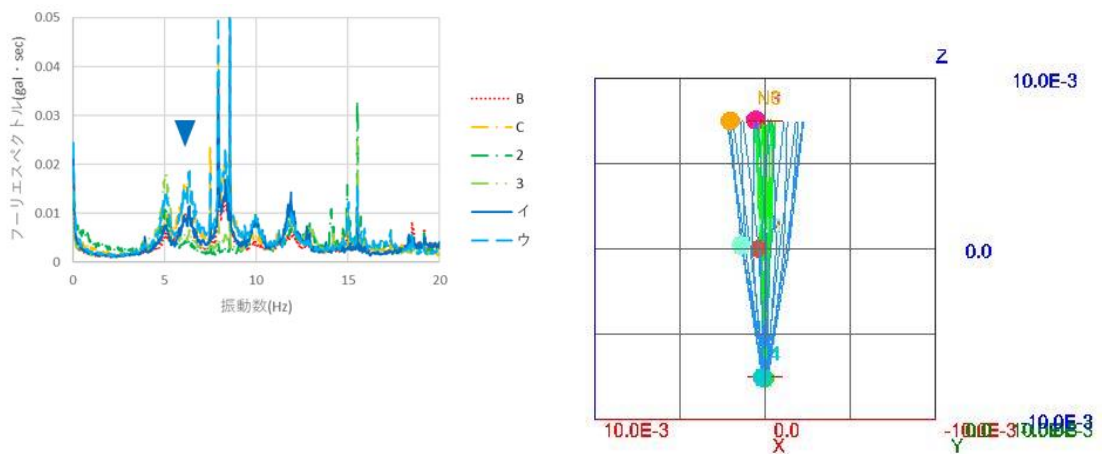
6.3-6.5Hz の振動



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-8 A,1 ラインのリサージュ図



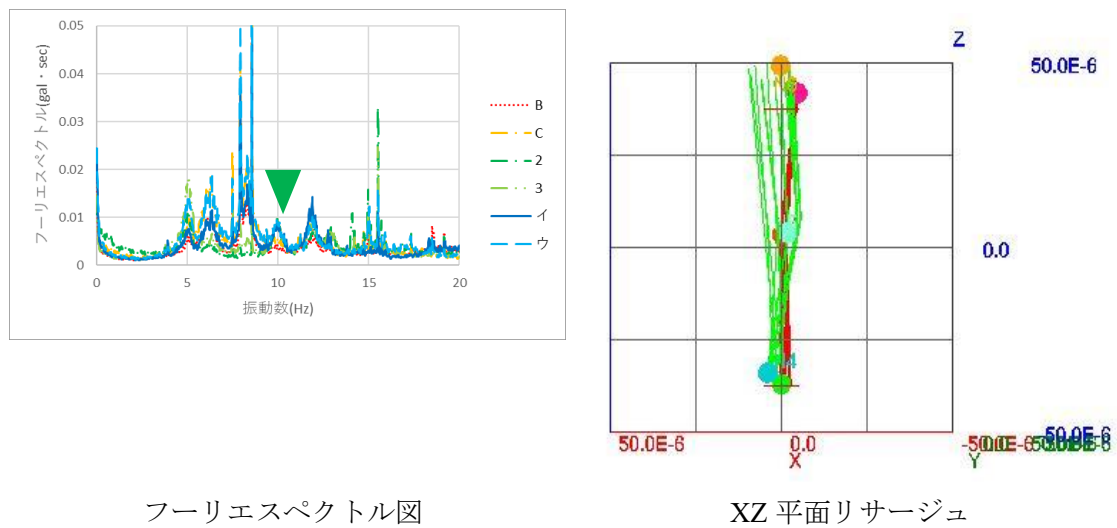
フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-9 1,Aラインのリサージュ図

図 4-8 図 4-9 に示す通り、6.3-6.5Hz では外側が動きやすくなっている。この振動数では、中央部でピークを持っていないため、外側のみ大きく振動することが推察される。すなわち、中央部と外周部で動きやすい振動数が違うこと、また外側 A ライン、アラインは固有振動数が同じところに来ることが分かった。

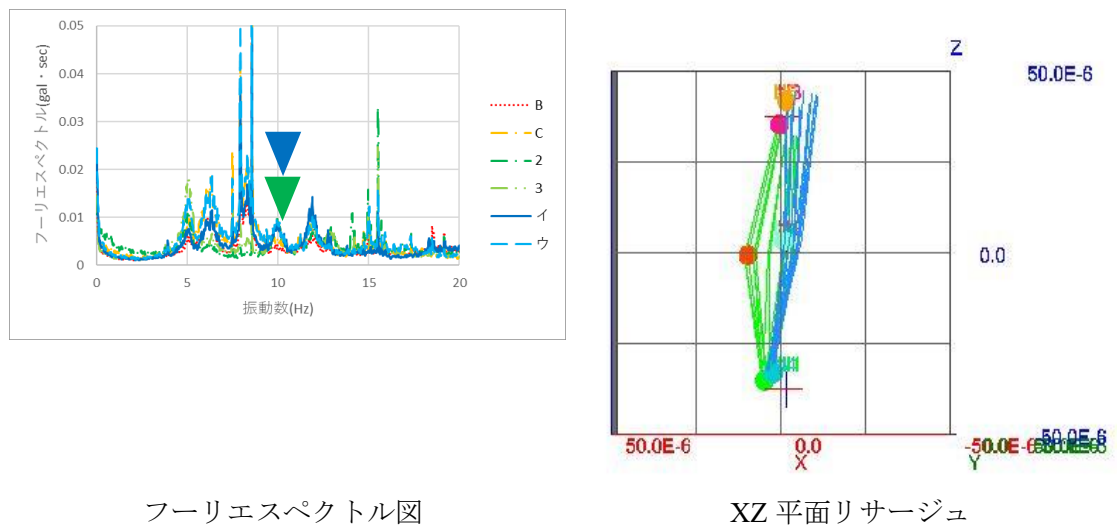
9.5-10.5Hz の振動



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-10 A,1 ラインのリサージュ図



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-11 1,アラインのリサージュ図

1, ア-ラインのみ顕著なピークが見られる 9.5Hz から 10.5Hz の振動のリサージュを図 4-10 図 4-11 に示した。A1 の結果を見ると、中央部 1(緑)のほうが大きく動いていることがわかる。

1 ア-ラインのものを見ると、どちらも大きく動いており、A(赤)よりア(青)のほうが大きく動いている様子から、やはり 10Hz 付近は中央から東側が動きやすい振動数であることがわかった。

Y 方向での考察

FFT を用いた検討

Y 方向での FFT の結果を図 4-12 に示す。

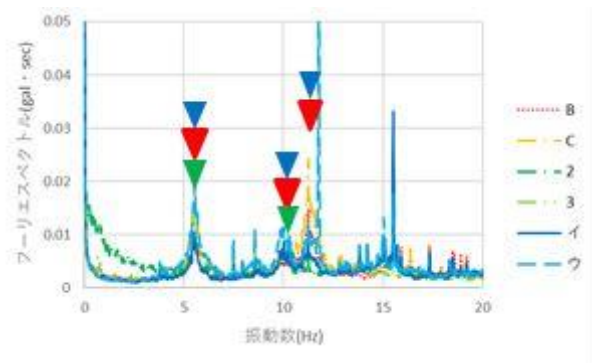


図 4-12 計測箇所

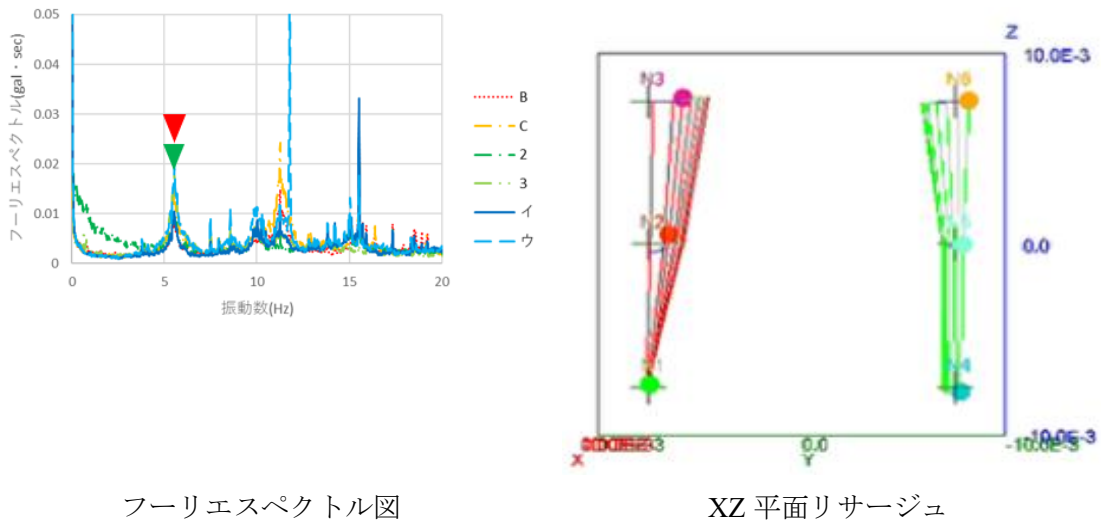
図 4-12 より、5.6Hz のスペクトルは A,1,アラインともに、B,2,イより、C,3,ウの方が大きくなっていることがわかる。上階の方が大きくなっているため、5.6Hz が一次固有振動数である。

11Hz は東西端の A,アラインのみピークを持っているため、東西端での揺れやすい振動数であることがわかる。

X 方向に比べてピークの数が少ないのは建物の形状、すなわち本建物は東西方向(Y 方向)に長く、南北方向(X 方向)に短い建物であるため、X 方向への振動は大きくなりがちだが、Y 方向への振動は抑えられるためである。

リサージュを用いた検討

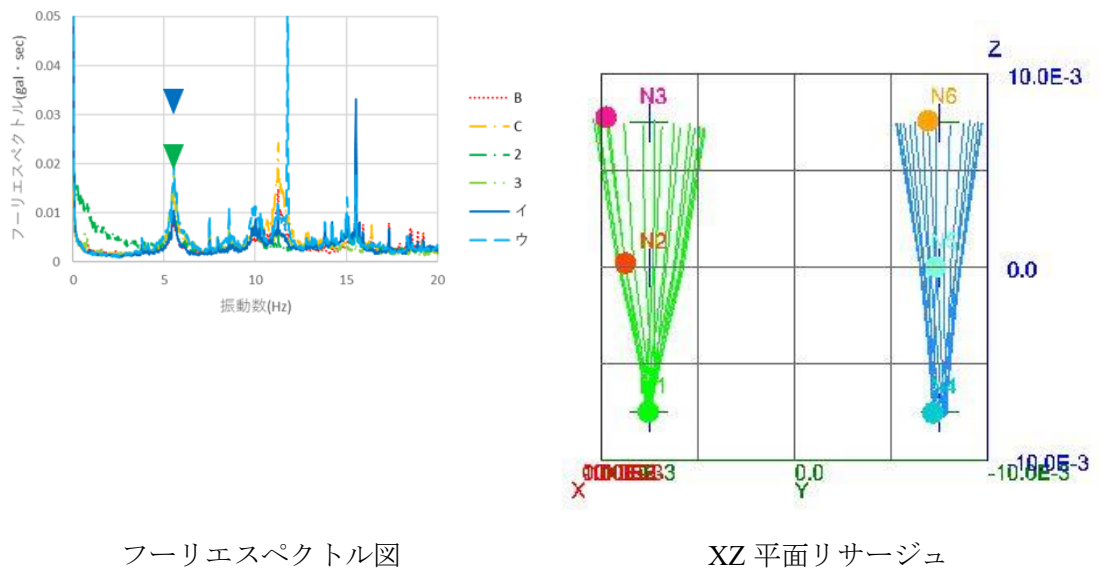
5.5-5.7Hz の振動



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-13 A,1 ラインのリサージュ図



フーリエスペクトル図

XZ 平面リサージュ

図 4-14 1, A ラインのリサージュ図

図 4-13 図 4-14 に示す通り、どちらのグラフを見ても、上階ほど大きく動く一次モードである。そのため、本建物 Y 方向の固有振動数は 5.6Hz であることがリサージュより明らかとなった。

10.5-11.5Hz の振動

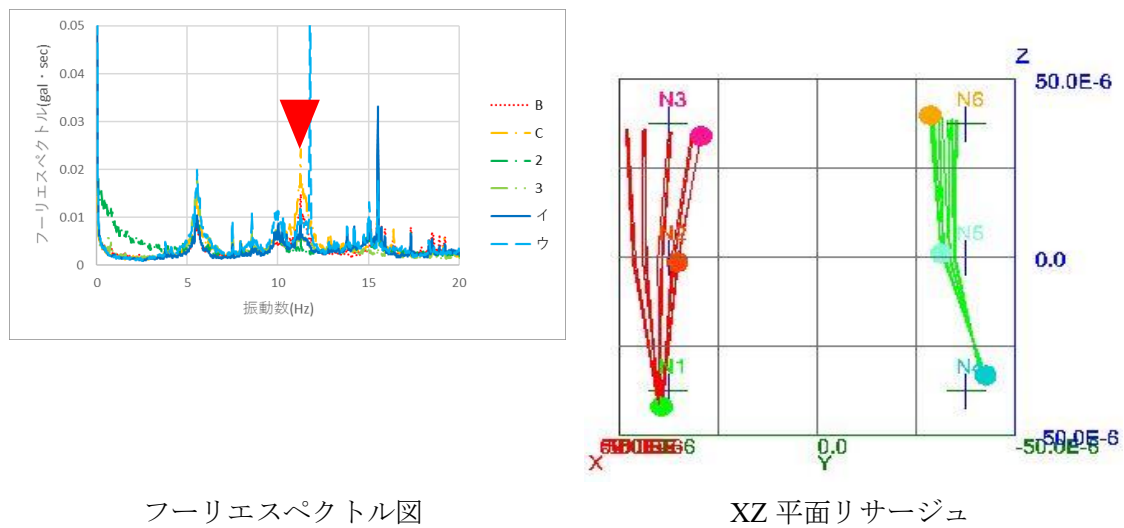


図 4-15 A,1 ラインのリサージュ図

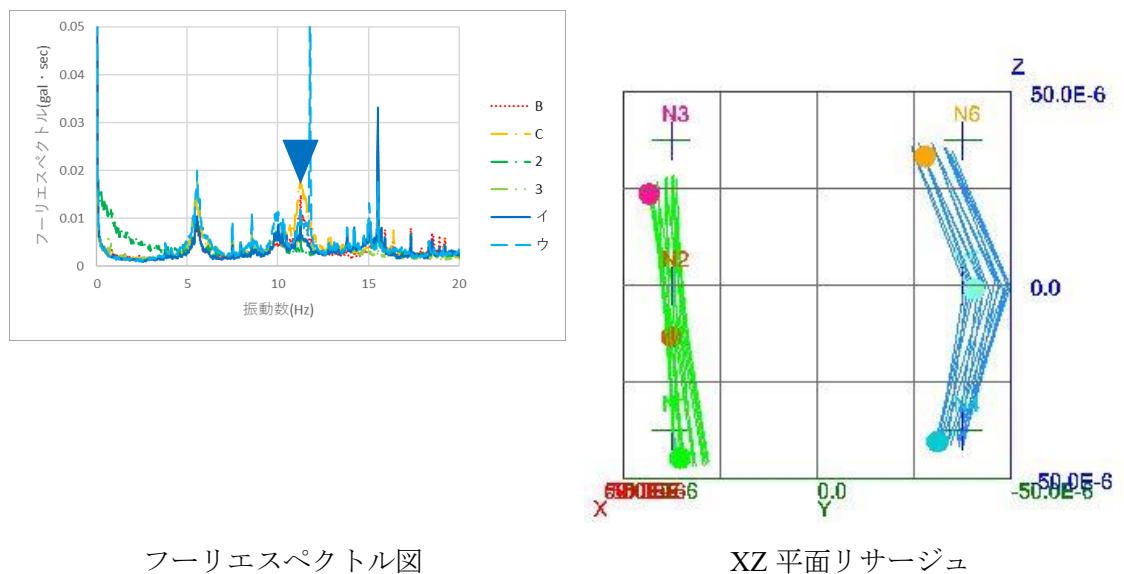


図 4-16 1, A ラインのリサージュ図

A,ア-ラインのみ顕著なピークが見られる 10.5Hz から 11.5Hz の振動のリサージュを図 4-15 図 4-16 に示した。A1 を見ると、西端部(赤)のほうが大きく動いていることがわかる。1 ア-ラインのものを見ると、東端部(青)のほうが大きく動いていることがわかる。どちらも端部のほうが大きく動くことから、11Hz 付近は建物端部の動きやすい振動数であることが明らかである。

Z方向での考察

FFTを用いた検討

Z方向でのFFTの結果を図4-17に示す。

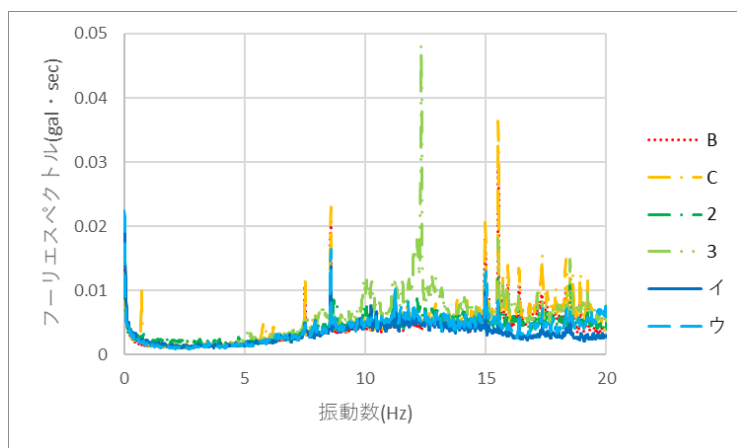


図 4-17 計測箇所

図4-17より、B,C およびI, Uのスペクトルはおおよそ一致している。しかし、3のみ12Hzに大きなピークを持っていることがわかる。3は3階の中央部であるため、その箇所のみ上下に揺れやすくなっていることがわかる。

この箇所はモニタリング箇所であるため、要注意する必要がある。

4.3.2 伝達関数を用いた考察

実際のモニタリングではAライン、1ラインのみでしか行わないため、アラインをAライン、1ラインで管理しないといけない。そのため、A,1ラインを基準としたアラインの伝達関数を求めた。

Aラインを基準とした伝達関数

X方向

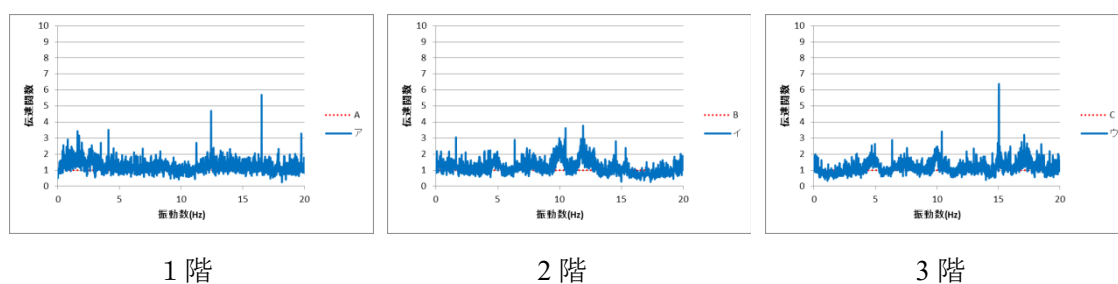


図 4-18 各階 X 方向の伝達関数

図 4-18 に示す通り、1F ではピークが見られない。2F では 10Hz,12Hz でピークが立ち、3F では 5Hz,10Hz でピークを持っている。

Y方向

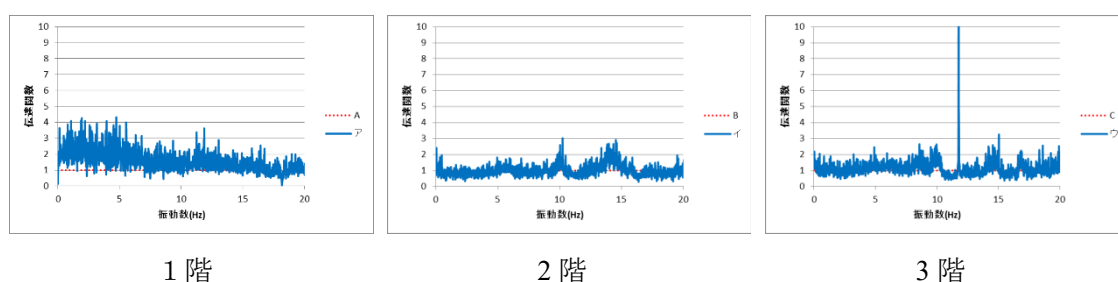


図 4-19 各階 Y 方向の伝達関数

図 4-19 より、Y方向でも 1F はピークが見られない。2F,3F で 10Hz, 15Hz にピークを持っている。リサーチの箇所で 9.5Hz から 10.5Hz のものを載せたが、その時も A ラインの方が動きが小さかったため、やはりアラインのほうがこの振動数では動きやすい。

Z 方向

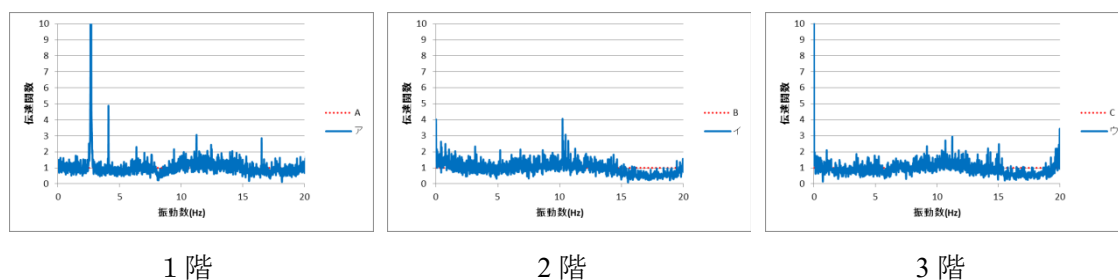


図 4-20 各階 Z 方向の伝達関数

図 4-20 より明確なピークは見られない。そのため、東西端部は Z 方向に関してはおおよそ同じ振動特性を持っていることがわかる。

そのため、A ラインを用いてアラインを管理するのであれば、振動数領域では X 方向で 5,10,12Hz を、Y 方向では 10,15Hz を注目すれば良い。具体的に言えば A ラインのモニタリングで上で述べた 5,10,12,15Hz のスペクトルが大きくなれば、アラインではその振動数で 2 ~3 倍揺れやすくなっているため、定期検査をすべきということを提案する。

1 ラインを基準とした伝達関数

X 方向

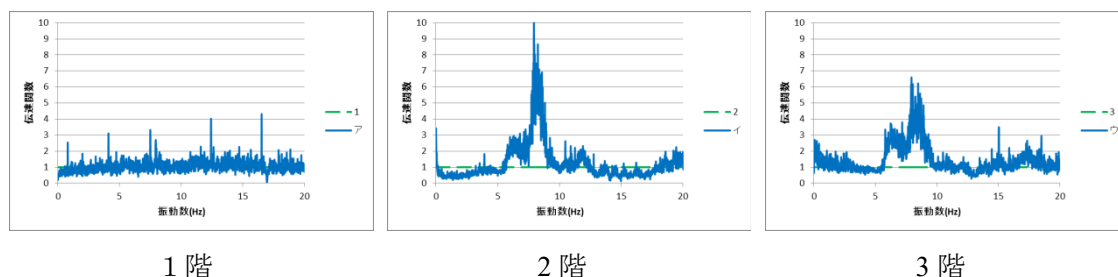


図 4-21 各階 X 方向の伝達関数

図 4-21 に示す通り、1F ではピークが見られない。2F,3F では 6.3Hz,8.0Hz でピークが大きく立っている。A を基準としたときは、ピークでも 3 倍程度だったが、1 を基準とすると 10 倍程度揺れやすくなっているため、中央部である 1 ラインと東端部であるアラインは大きく振動の特徴が違うことがわかる。

Y 方向

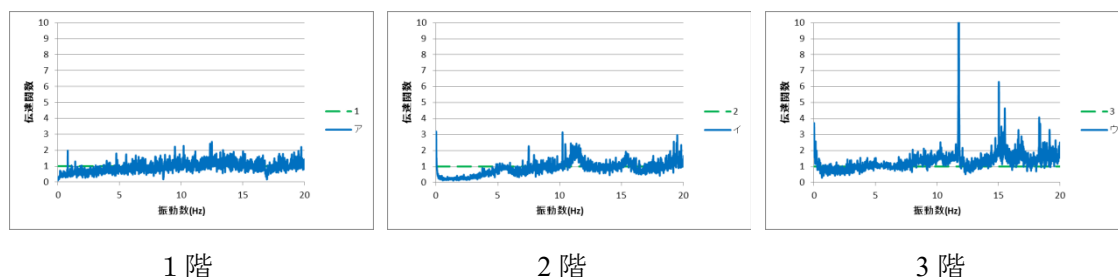
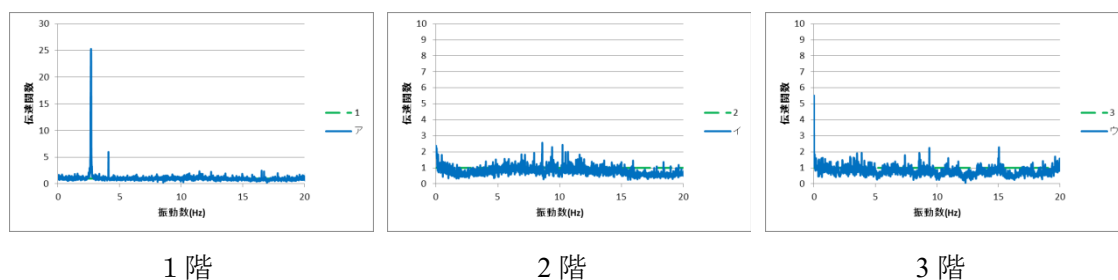


図 4-22 各階 Y 方向の伝達関数

図 4-22 から、Y 方向でも 1F はピークが見られない。2F,3F で 11.5Hz, 15Hz にピークを持っている。リサーチの節で 11.5Hz 付近のものを載せたが、その時も 1 ラインの方が動きが小さかったため、やはりアラインのほうがこの振動数では動きやすいことがわかる。

Z 方向



1 階

2 階

3 階

図 4-23 各階 Z 方向の伝達関数

図 4-23 において、3F の 12Hz 付近で大きく伝達関数が小さくなっていることがわかる。これは FFT の節で述べたとおり、3F 中央部が 12Hz で揺れやすくなっているためである。

1 を基準としたものは A を基準としたものより、ピーク振動数での伝達関数が大きくなっていることから、アラインと近い振動をしているのは A ラインということになる。そのため、アラインの管理は A ラインを用いて行ったほうが良いと考える。

4.3.3 相対変位を用いた考察

各箇所の変位量を見比べる。相対変位の算出方法は先に示したものである。第一、式、三、四分位数に中央値を載せているため、同時計測での各箇所の動きやすさを比べることができる。

X方向での考察

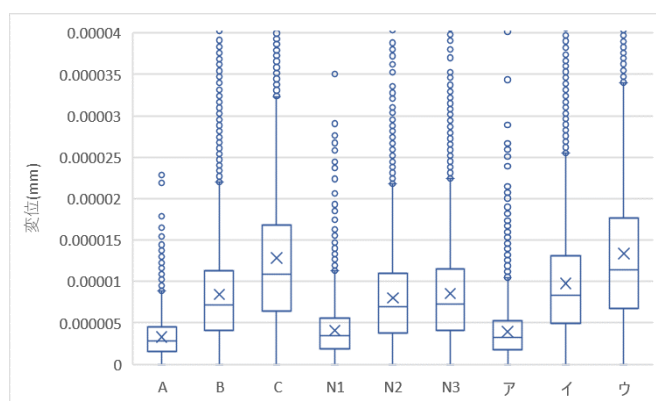


図 4-24 箱ひげ図

図 4-24 より A, アラインは 1,2F をみると多少東側の方が揺れやすく、1 列のみ 3F の変位が C,ウに比べて小さくなっていることがわかる。このことから本建物は中央部(1 ライン)を軸として X 方向にねじれ回転運動を行っている可能性が高いと考える。

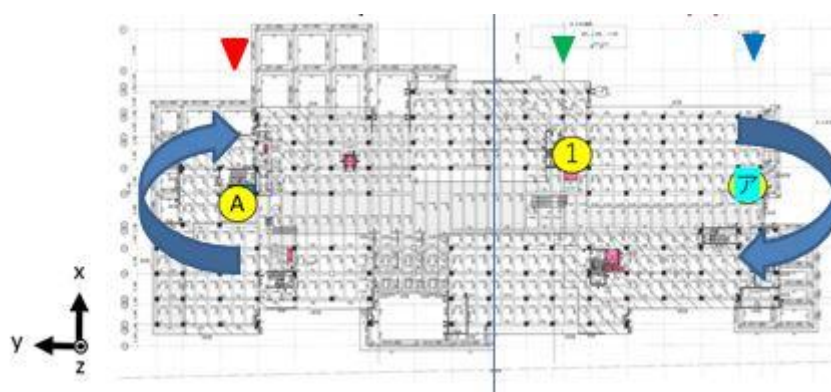


図 4-25 回転運動の様子

Y 方向での考察

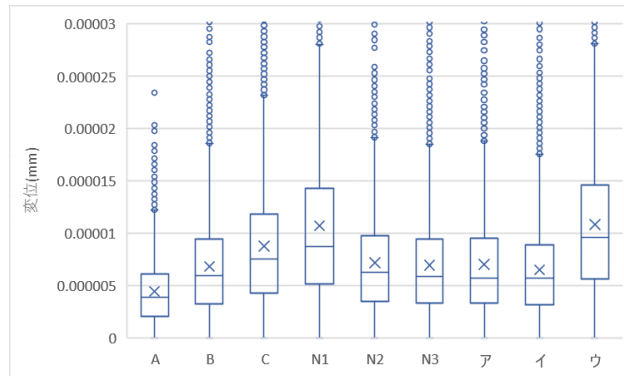


図 4-26 箱ひげ図

図 4-25 において、N1 が大きく動いているが、これはエラーだと考える。(計測時に施工業者が多くいたこと、ドアの開閉方向が Y 方向であったために、近場のドアの開閉が影響を与えた可能性がある。)

それを除くと、X 方向と同じく 3F の東西端部に当たる C,ウは大きく動いているのに対し、中央部である 3 の変位は小さくなっている。そのため、やはり 3F がねじれ運動をしている可能性が高い。

Z 方向での考察

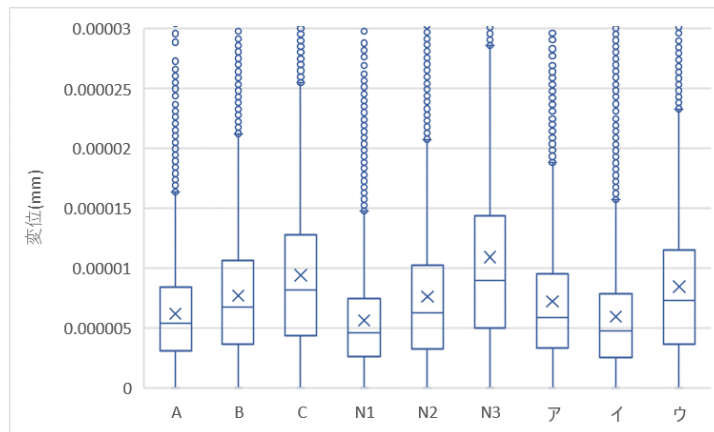


図 4-27 箱ひげ図

図 4-26 よりア-ラインのみ、イ,ウの変位が小さくなっている。理由としては、イ,ウは建物外部のベランダ外周部に設置したため、フレームよる拘束力が強く、上下には振動しにくかったことが考えられる。

4.3.4 固有振動数の確認でのまとめ

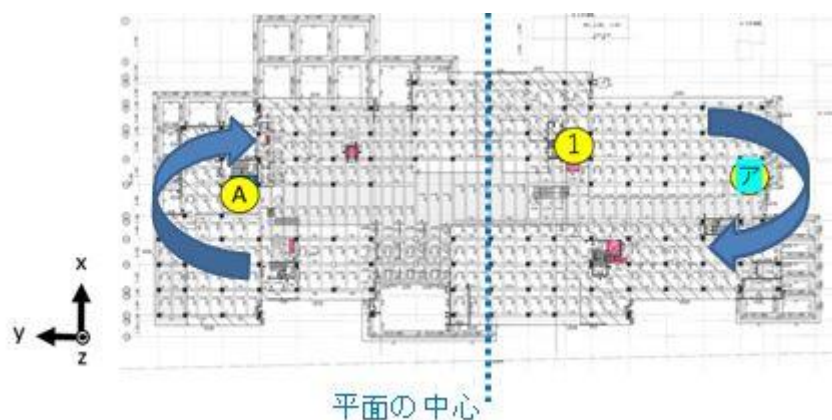


図 4-28 回転運動の様子

フーリエスペクトルより、Y 方向より X 方向の方が固有振動数が多く共振リスクが高いことが推察される。ア-ラインが一番固有振動数が多いため、共振リスクの面から危険度が一番高く、1 列 3F の 3 の箇所のみ 12Hz で揺れやすいことがわかった。

フーリエスペクトルより固有振動数の違いを見つけ、それぞれのリサージュを描いた。X 方向において、中央部が揺れやすい振動数、東西端部が揺れやすい振動数が確認された。幸いモニタリング箇所が西端と中央部であるため、両方を用いて監視することができる。相対変位の分析より、3F の XY 平面でのねじれ運動の危険性が見られる。こちらもモニタリング箇所が西端と中央部であるため、監視することはできる。中央を支点とした回転運動の可能性から、今後の定期検査では東西端部の柱、柱梁接合部を確認すべきであると考えている。

本計測では、各箇所の高さ方向の計測を下のみであるため、次節以降で平面での振動の一体性を確認する。

4.4 屋上(RF)を使った建物全体の動きの確認

図 4-29 に RF, 1F の計測箇所を示す。縮尺の問題から、少しわかりにくいですが、図 4-29 図 4-30 より RF 計測箇所の 1 が 1F 計測の A のライン、5 が 1 のラインの屋上の箇所に対応する。

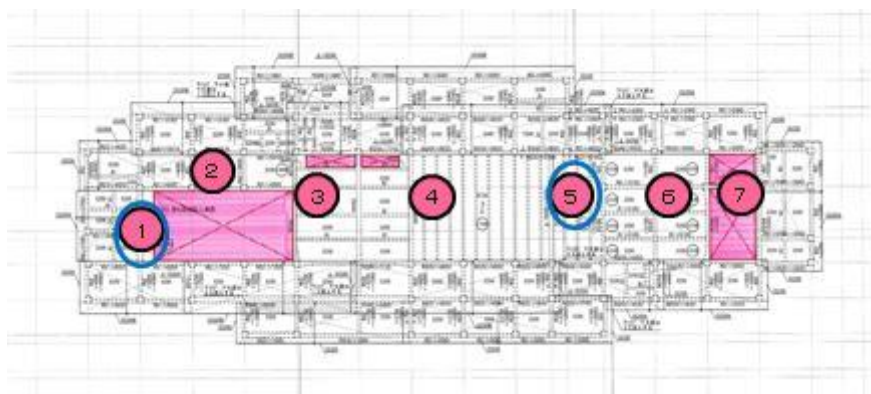


図 4-29 RF 計測箇所



図 4-30 1F 計測箇所

計測目的は、モニタリング箇所に対する各部の揺れやすさの確認であり、建築物全体の東西方向での揺れやすさを同時計測によって大きな視野で確認することである。

4.4.1 伝達関数を用いた考察

先程，図 4-29 で示したとおり，モニタリング箇所は 1,5 である。この 2 つを基準とした伝達関数を各方向で算出した。以降，各節に示す。

X 方向での考察

1 基準

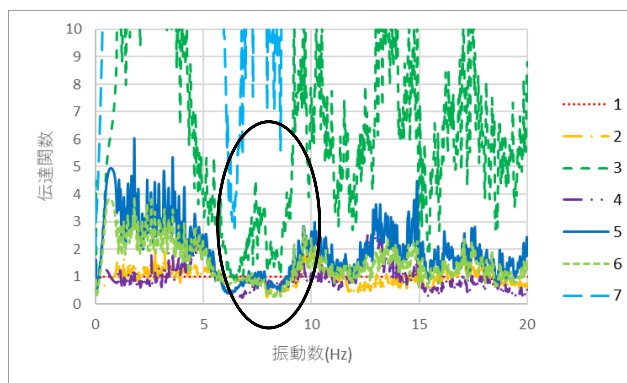


図 4-31 X 方向の伝達関数

図 4-31 において，3 の箇所は常時微動計測時の両面テープの貼り忘れで値が大きくなっている。7 の箇所は室外ファンの上に位置する梁にはったため，他の箇所より振動しやすかったことがわかる。中央部である 5 の箇所(高さ方向での計測で 1 ラインに当たる箇所)の倍率が 6，8Hz 付近で低下している。これは固有振動数の確認の結果とあっており，端部である 1 が大きく揺れやすいということである。

5 基準

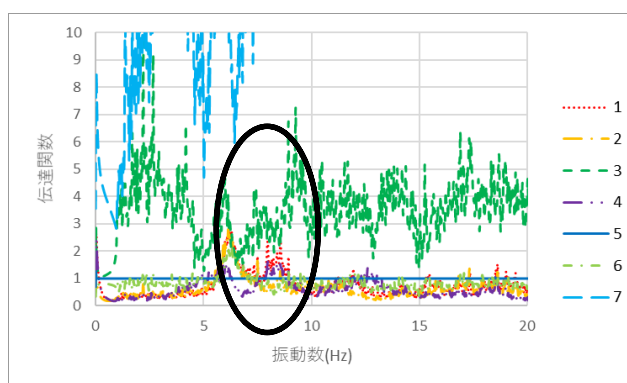


図 4-32 X 方向の伝達関数

図 4-32 より，固有振動数や先程の 1 基準の結果と同じで，5 以外の箇所が 6Hz,8Hz にピークを持っていることがわかる。やはり，東西方向端部はこの振動数で動きやすくなっている。

Y 方向での考察

1 基準

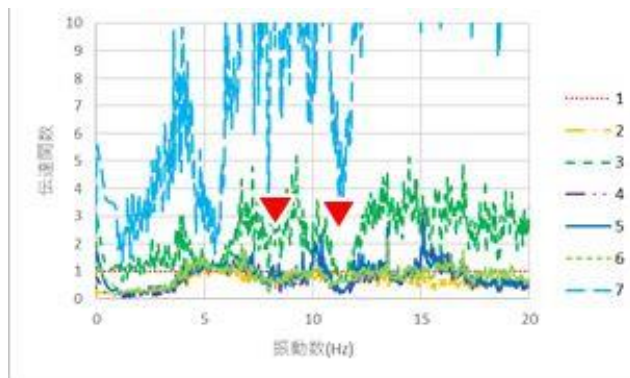


図 4-33 Y 方向の伝達関数

図 4-33 より，中央部である 4,5 の箇所(高さ方向での計測で 1 ラインに当たる箇所)の倍率が 8, 11.5Hz 付近で低下していることがわかる。これは固有振動数の確認の結果とあっており，端部である 1 がこの振動数で大きく揺れやすいということである。逆に 4,5 の伝達関数が大きくなっていることから，中央部は 10Hz で揺れやすい。

5 基準

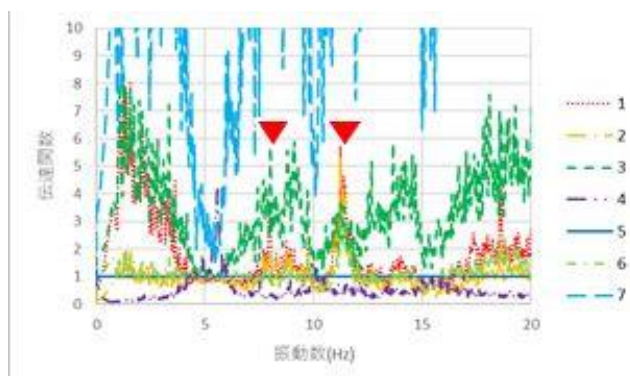


図 4-34 Y 方向の伝達関数

図 4-34 に示すように，当然のことではあるが，1 を基準とした伝達関数と山，谷が逆となっている。また，同じレベルである 4 の箇所の方が伝達関数が小さいことから，5 の箇所の方が揺れやすいことがわかる。

Z 方向での考察

1 基準

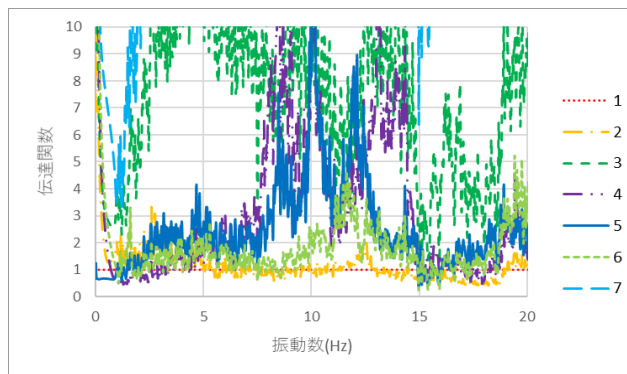


図 4-35 Z 方向の伝達関数

図 4-35 に Z 方向の伝達関数を示す。4,5,6 の箇所は 10,12Hz 付近で揺れやすいことがわかる。このことは高さ方向での固有振動数の確認の結果と一致しており、やはり中央部では 12Hz で揺れやすいことがわかる。

5 基準

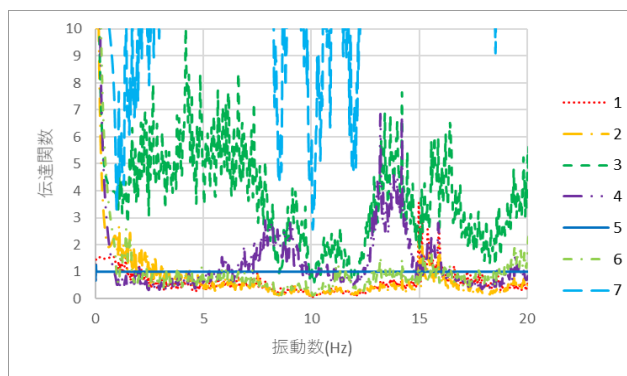


図 4-36 Z 方向の伝達関数

図 4-36 に示すように、中央部付近でも 4 の箇所が 13Hz 付近で揺れやすいことがわかる。また、4 の箇所の方が、より建物の中央部に近いため、本建物中央部は多くの振動数で高さ方向に振動しやすいこともわかる。

4.4.2 リサージュを用いた考察

本計測箇所である屋上は、東西方向に高さが異なっている。平面図と対応する箇所立面図を図 4-37 に示す。立面でのリサージュはこの高さに合わせて初期の高さを与えている。N3,N7 は先程も述べたとおり、大きく動きすぎるため、割愛した。

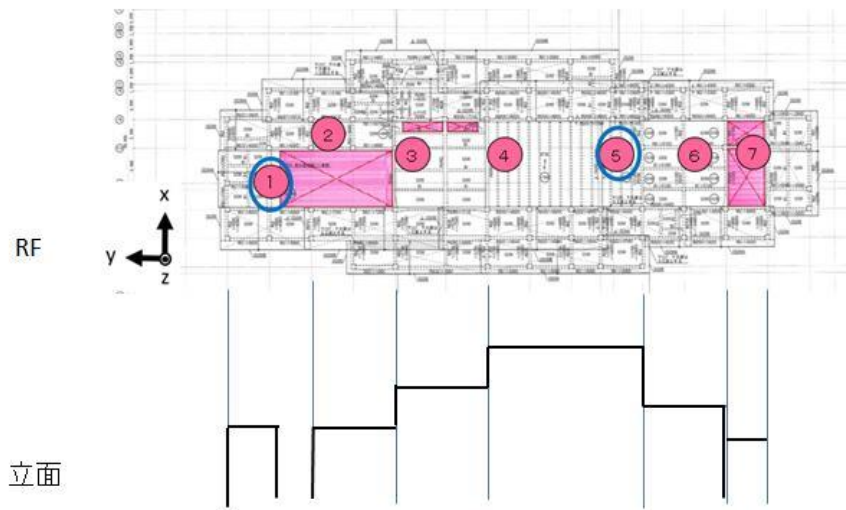
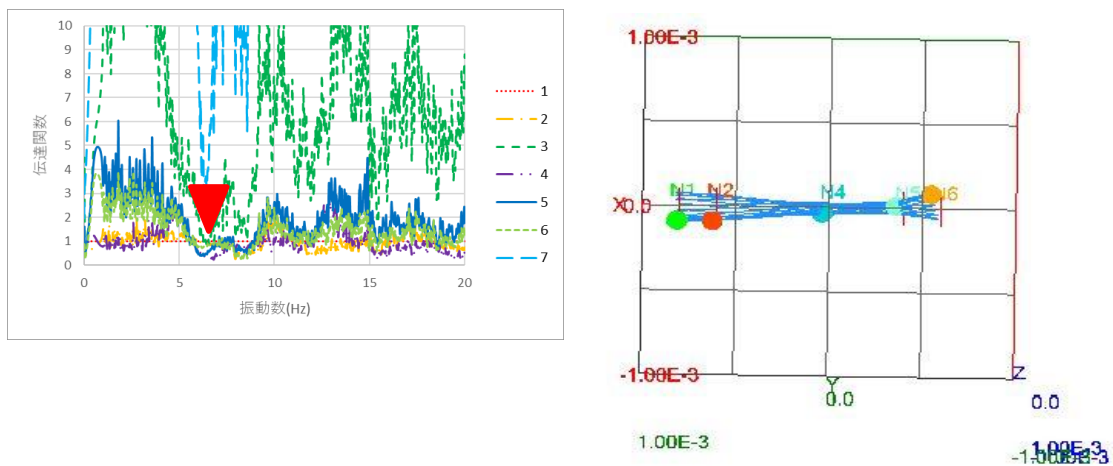


図 4-37 計測箇所の立面

6.0-7.0Hz



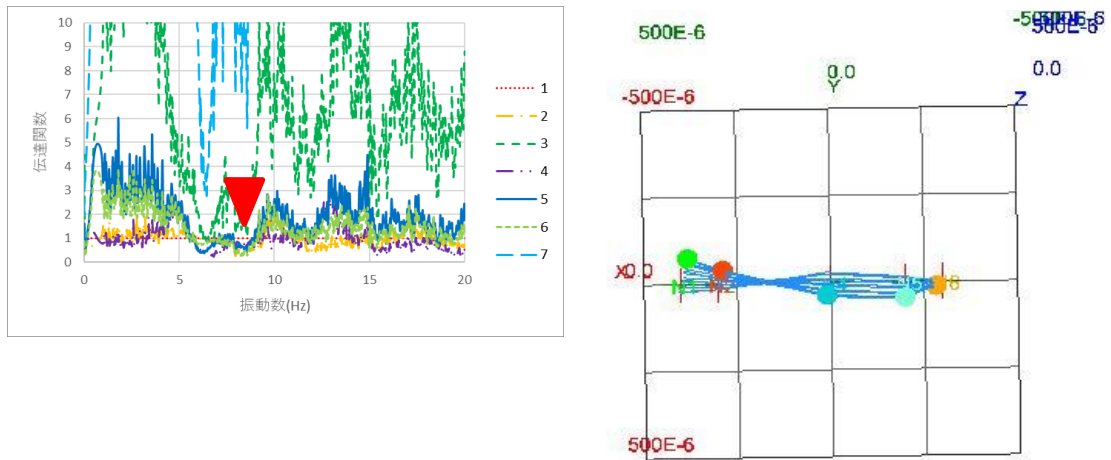
フーリエスペクトル図

XY 平面リサージュ

図 4-38 リサージュ図

図 4-38 に示すように、やはり西端である N1,N2 が大きく動いている。

8.0-9.0Hz



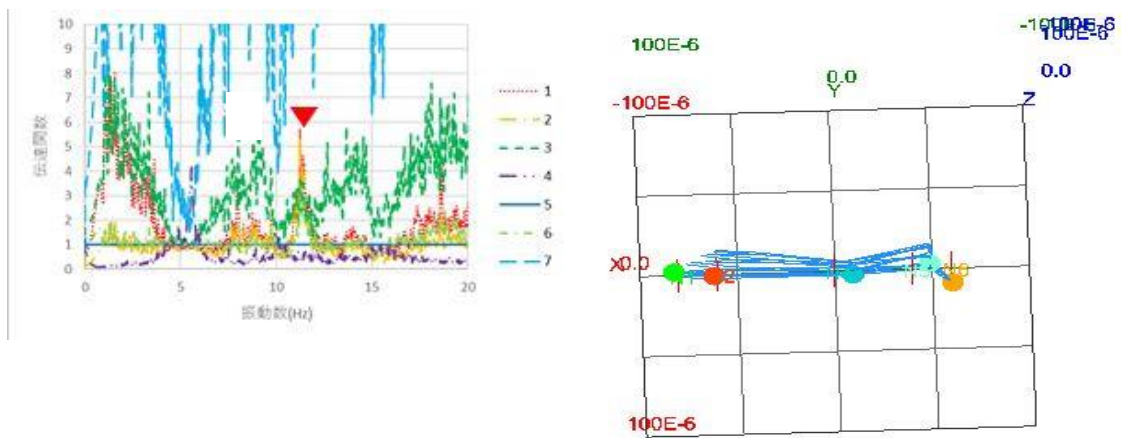
フーリエスペクトル図

XY 平面リサージュ

図 4-39 リサージュ図

図 4-39 に示すように、西側と中央部でも動いていることが見て取れる。しかし、N2 と N4 で逆方向に動いていることから、中央部と端部で動きが違うことが見て取れる。

11.0-12.0Hz



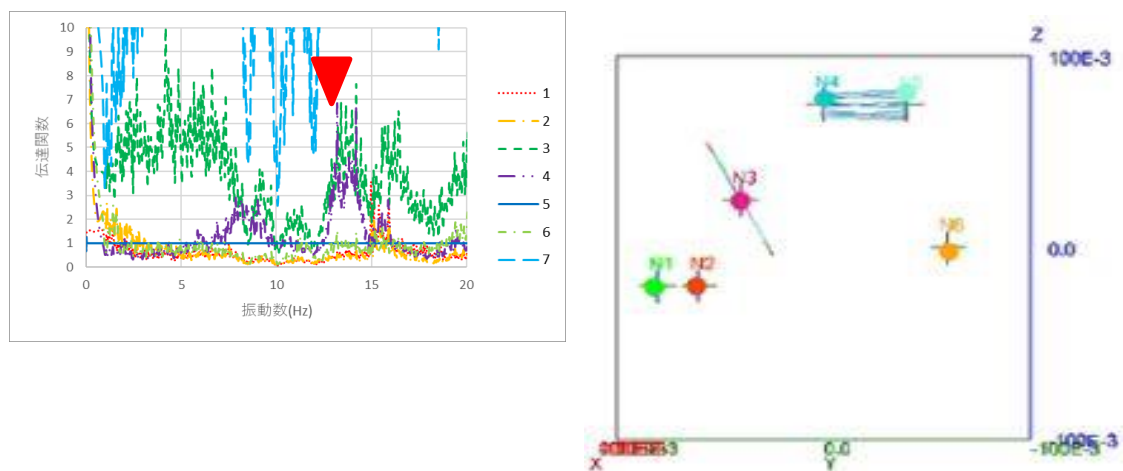
フーリエスペクトル図

XY 平面リサージュ

図 4-40 リサージュ図

図 4-40 に示すように中央部 N4,N5 に対し、西端 N1,N2 が動きやすくなっていることがわかる。

12.0-13.0Hz



フーリエスペクトル図

YZ 立面リサージュ

図 4-41 リサージュ図

図 4-41 は、中央部のみ揺れやすい可能性がある 12 から 13Hz の振動を取り出し、YZ 立面でリサージュを描いたものが図である。N3 はエラーなので無視すると、中央部のみ大きく上下動していることがわかった。固有振動数とまとめると、本建物中央部は 3F,RF で 12Hz で揺れやすいことがわかった。

4.4.3 RFを用いた建物全体の動きの確認 まとめ

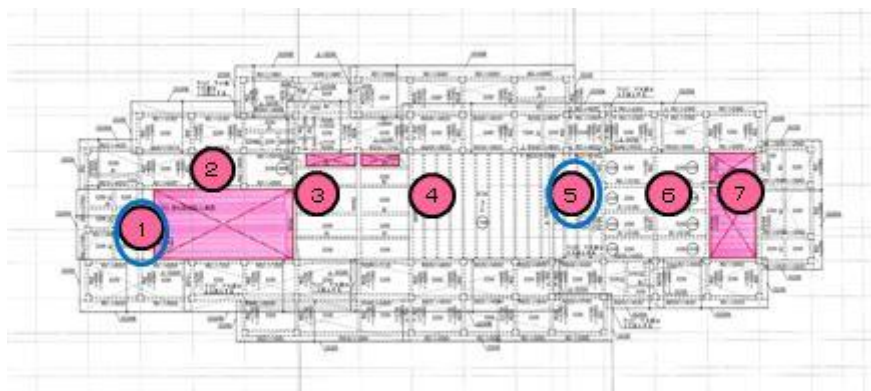


図 4-42 計測箇所

伝達関数より、固有振動数の確認と同じく XY 平面において、6,8,12Hz で端部が揺れやすいということがわかった。逆に中央部は 8, 12Hz で鉛直 Z 方向に振動しやすいことも明らかにした。

図 4-42 に示すように、本計測では、1,5 の箇所でモニタリングを行うため、1 の箇所で回転運動を、5 の箇所で鉛直運動を管理することで、建物全体を管理できると考える。次節の 2F の西半分、東半分での結果を比較することで、構造設計者の言う東側の揺れやすさを、西側での管理箇所 1 を元にした管理方法を提案する。

4.5 2F を使った建物東西半分ずつの動きの確認

図 4-43 に 2F, 図 4-44 固有振動数の確認を行った 1F の計測箇所を示す。2F 計測箇所の西側(黄色の○)の 1 が 1F 計測箇所の A の 2F の箇所に当たる。また, 東側(青色の○)の 7 が 1F 計測箇所の 1 の 2F の箇所に当たる。

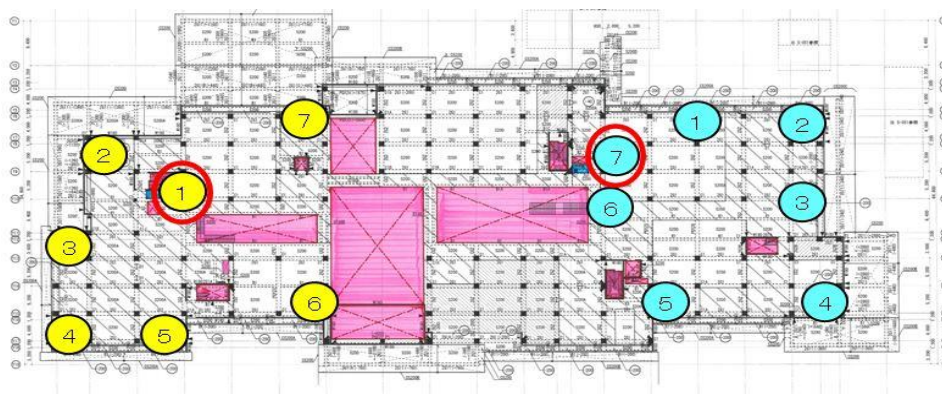


図 4-43 RF 計測箇所



図 4-44 1F 計測箇所

計測目的としては, モニタリング箇所に対する各部の揺れやすさの確認が挙げられる。構造設計者の言う東側の揺れやすさを, RF のものより少し細かい平面での計測を用いて確認する。

先の図 4-43 で示したとおり, モニタリング箇所は西半分が黄色の 1, 東半分が青色の 7 である。この 2 つを基準とした伝達関数を各方向で算出した。以降, 西半分, 東半分に分けて結果を示す。

4.5.1 西半分(黄色)での考察

伝達関数を用いた考察

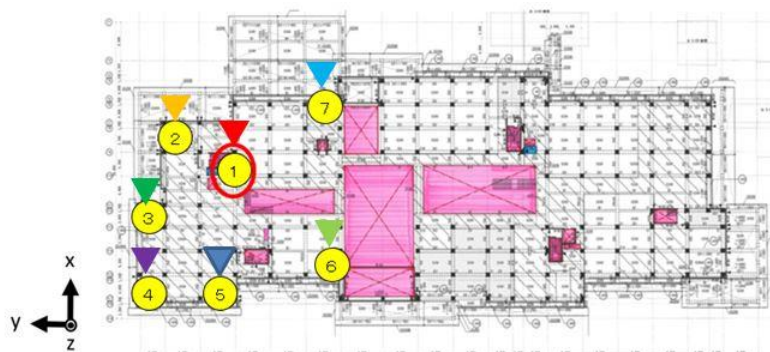


図 4-45 計測箇所

X 方向での考察

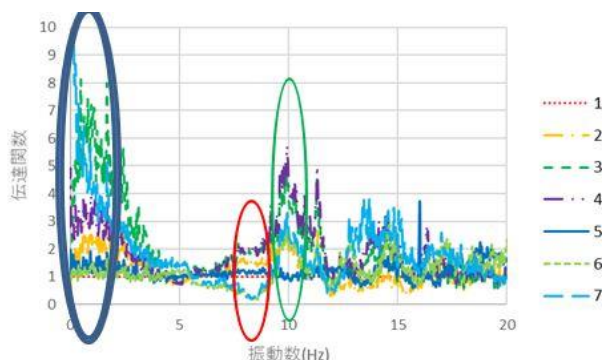


図 4-46 X 方向の伝達関数

図 4-46 に示すように、1Hz 付近の倍率はセンサのご計測の影響が大きいため無視できる。

赤丸で示した 8Hz 付近は、6,7 の組、1,5 の組、2,3,4 の組で大きさが異なっている。6,7 は建物中央部、1,5 は西側半分での中央部、2,3,4 は西端であるため、西側端に行くほど揺れやすいことがわかる。2F は吹き抜けによって西側と東側に大きく別れており、その西側半分の中の端である 2,3,4(西端)と 6,7(西半分の中での東端)が、緑丸で示すように 10Hz で揺れやすくなっている。そのため、西の端である 2,3,4 は 8Hz と 10Hz で大きく揺れやすくなっている。

Y 方向での考察

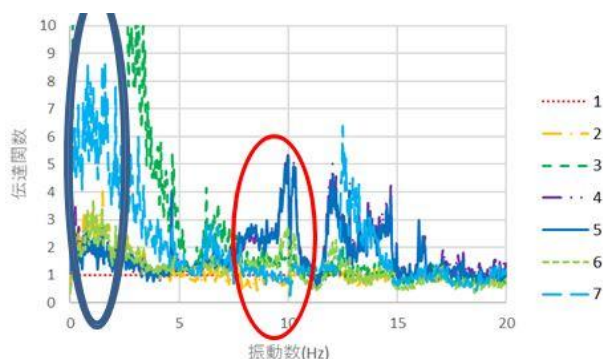


図 4-47 X 方向の伝達関数

図 4-47 に示すように、2Hz 以下は X 方向と同じく誤計測の影響である。南側に位置する 4,5,6 が赤丸で示すように 10Hz で揺れやすくなっている。しかし、北側である 2,7 はおよそ倍率が 1 である。この計測は 15 分の平均をとっているため、南側のほうが揺れやすくなっていることがわかった。

Z 方向での考察

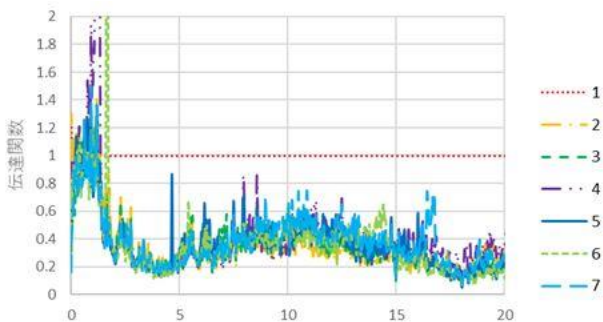


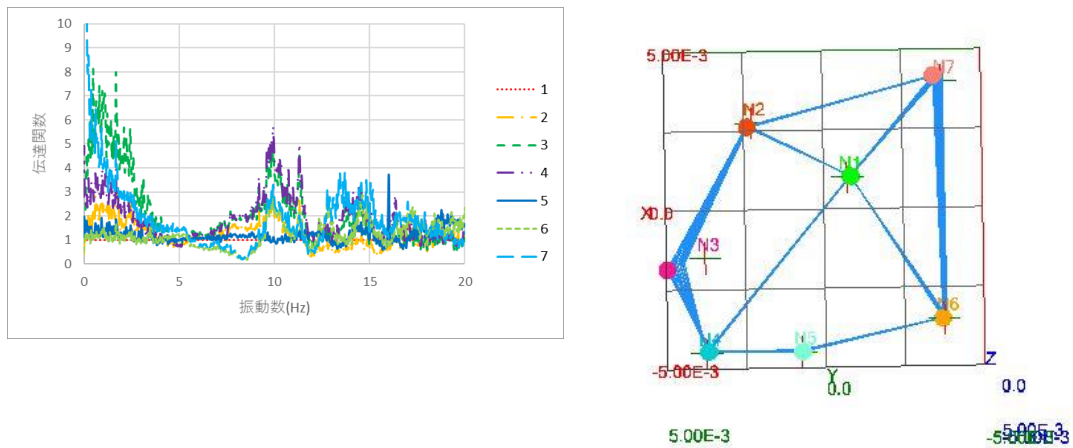
図 4-48 X 方向の伝達関数

図 4-48 に X 方向の伝達関数を示す。モニタリング箇所である 1 は吹き抜けや階段の近くということもあり、上下動を起こしやすいため、このように他の伝達関数が小さくなったと考える。この結果から、一番 1 の箇所が上下動しやすいことがわかるため、上下動のモニタリング箇所としては正しい場所であると言える。

西側リサージュを用いた検討

2F 西側半分の平面において、各伝達関数で確認されたピーク振動数付近の振動を取り出し、リサージュを描いた。以下に各方向、各振動数のリサージュを示す。

X 方向

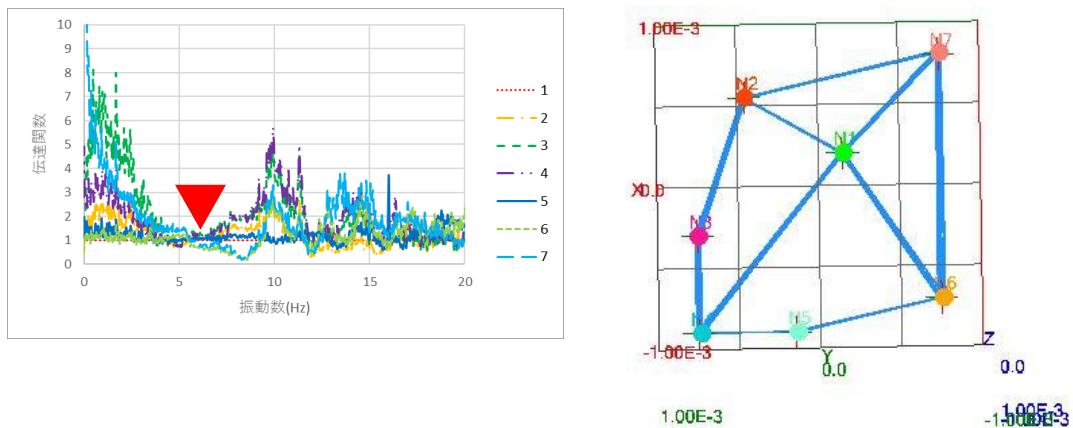


X 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-49 無補正でのリサージュ

図 4-49 に示すように、自由振動の時点で西側端の N3 や、北側端の N7 が大きく動いている。そのため、南側を支点に、北側及び西側で大きく回転していることが分かる。

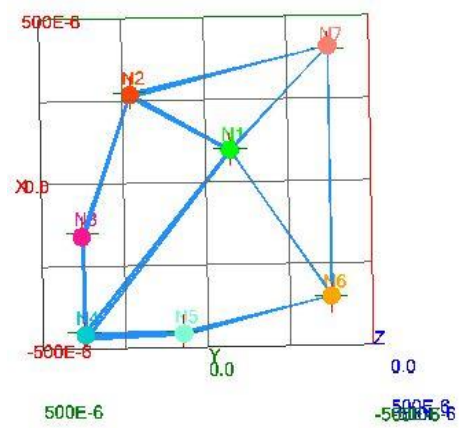
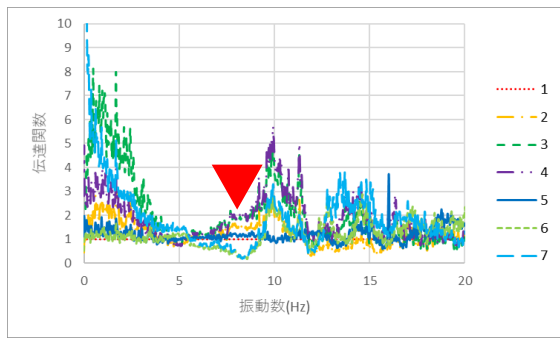


X 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-50 BPF5.5±0.1Hz のリサージュ図

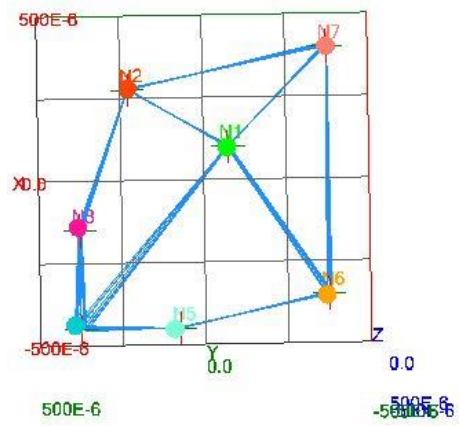
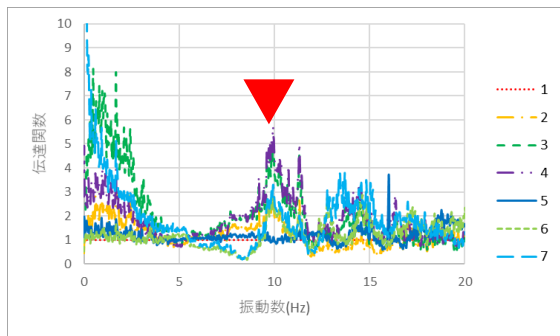
図 4-50 に示すように、各箇所のスペクトルがおおよそ一致する 5.5Hz 付近では、リサージュ図より各箇所平行移動していることがわかった。



X 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-51 BPF8.4±0.1Hz のリサージュ図



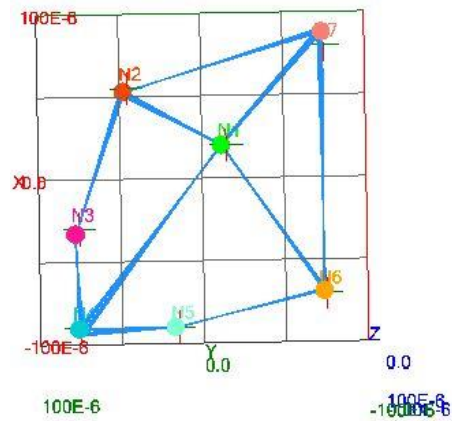
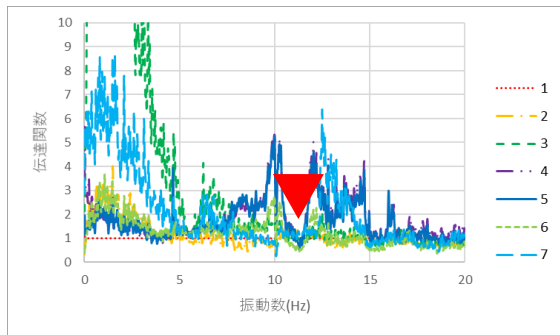
X 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-52 BPF9.8±0.1Hz のリサージュ図

図 4-51, 図 4-52 は, スペクトルが大きく異なる 8.4Hz 付近, 9.8Hz 付近の振動を取り出した図である。同図より, どちらも南西端の N4 が他の箇所と比べて大きく動いていることがわかる。自由振動時のものと合わせて考えると, 南側中央部の N6 を支点に回転運動していることがわかった。リサージュのスケールをみると, 8.4Hz, 9.8Hz 付近の振動は自由振動時の 1/10 程しかないが, スペクトルの異なる振動数全てで回転運動を示し, その足し合わせとして自由振動時に回転運動が起こっている。

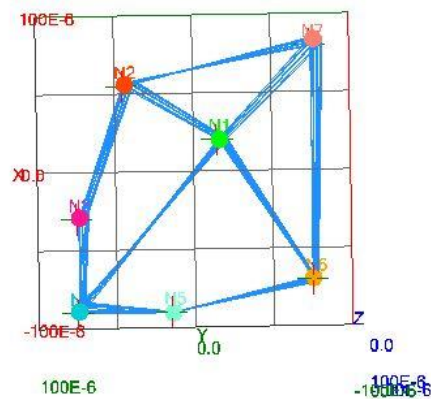
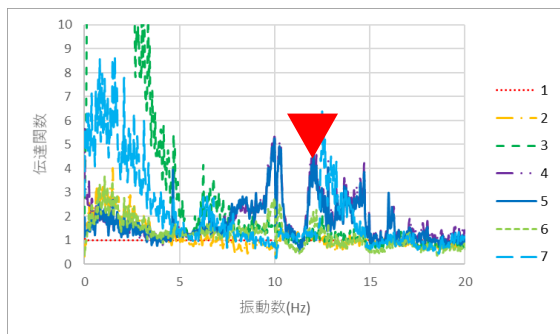
Y 方向



Y 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-53 BPF10.5±0.1Hz のリサージュ図



Y 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-54 BPF11.3±0.1Hz のリサージュ図

図 4-53, 図 4-54 に示すように, Y 方向においても, 伝達関数の異なる振動数付近のリサージュを描くと, 西側や北側が振れる回転運動が確認された。

現状 XY 方向での伝達関数は 0 から 10Hz の範囲において 5 倍程度である。劣化が進み, 回転運動が激しくなれば倍率が大きくなるはずである。閾値をどの程度に定めるかは難しいが, 伝達関数による管理はできると判断している。

Z 方向

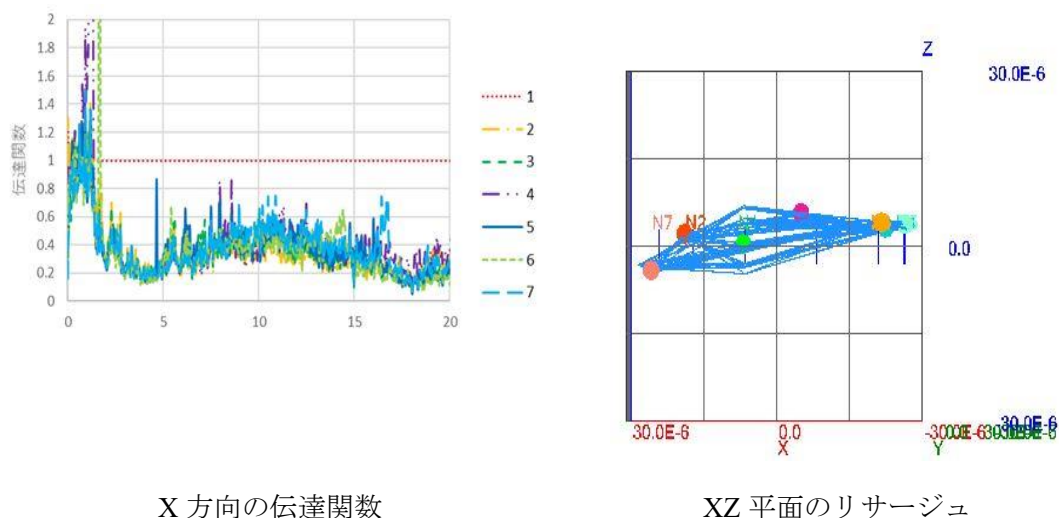


図 4-55 Z 方向 無補正

図 4-55 に示すように、Z 方向においてはモニタリング箇所 N1 が、他の箇所より圧倒的に動きやすいことを伝達関数が示した。リサージュをみてもそのとおりで中央部付近の N1 が大きく上下動をしている。そのため、Z 方向のモニタリングは、モニタリング箇所をそのまま監視するだけで良いと考える。

西側半分のまとめ

2F 平面の西側半分で計測してみても、回転運動の様子が見られた。特にモニタリング箇所を基準とした伝達関数の倍率が 1 から大きく離れる振動数で回転運動が見られることがリサージュよりわかった。XY 平面では特に 8.5, 10, 11.5Hz 辺りにピークが来るため、振動数領域で監視する場合はこの振動数である。

Z 方向においては、モニタリング箇所が一番大きく動いているため、モニタリングに適した箇所にセンサを置けていると考える。

4.5.2 東側半分(青)を用いた考察

計測箇所を図 4-56 に示す。

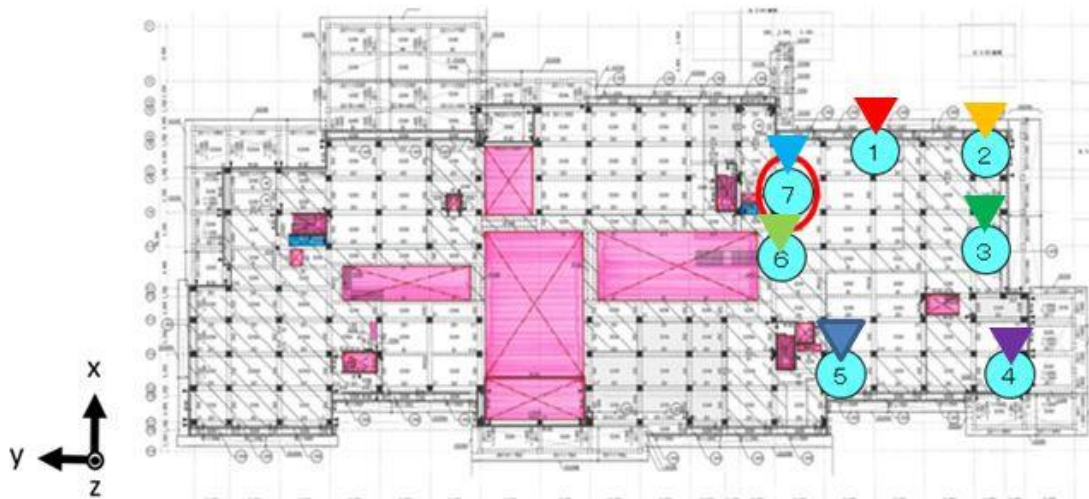


図 4-56 計測箇所

X 方向での考察

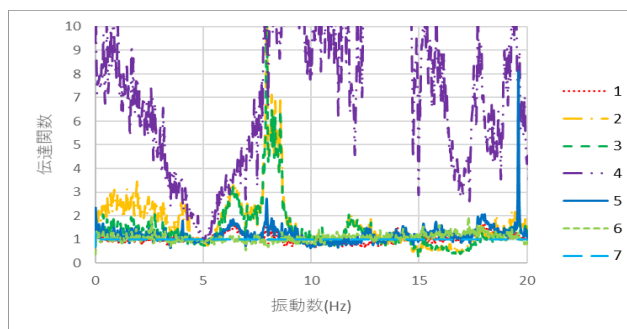


図 4-57 X 方向での伝達関数

図 4-57 に X 方向の伝達関数を示す。なお、4 の箇所はサーバールームのため、機械振動を拾い大きなスペクトルを持ってしまっている。スペクトルが大きくなっている部分では、東端である 2,3>東半分の中央部 1,5>建物中央部の 2,3 の順であるため、やはり建物全体として外側の動きやすい回転運動がわかる。西側では 10Hz 付近にピークがあったが、本計測箇所である東側は 8Hz 付近にピークが見られる。東西で固有振動数が違うことも問題ではあるが、更に東側のほうが固有振動数が低くなっているため、やはり東側のほうが振動が大きいことは確かである。

Y 方向での考察

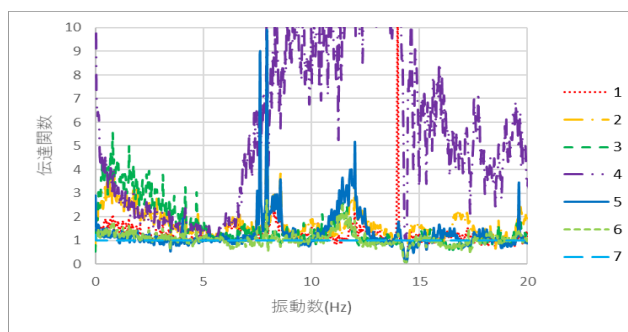


図 4-58 Y 方向での伝達関数

図 4-58 に示すように、西側と異なり、10Hz 付近のピークが、8.5Hz 付近に下がっている。X 方向でも固有振動数が低下していたため、平面として、東側半分が弱いということがわかった。

Z 方向での考察

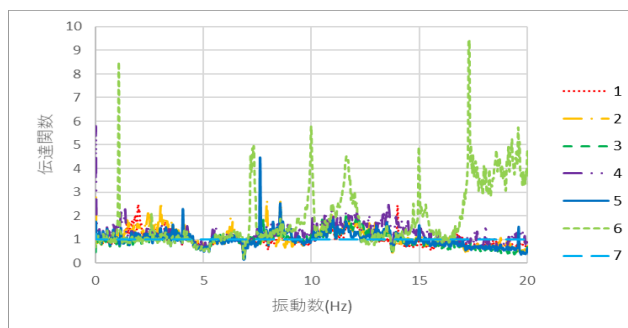


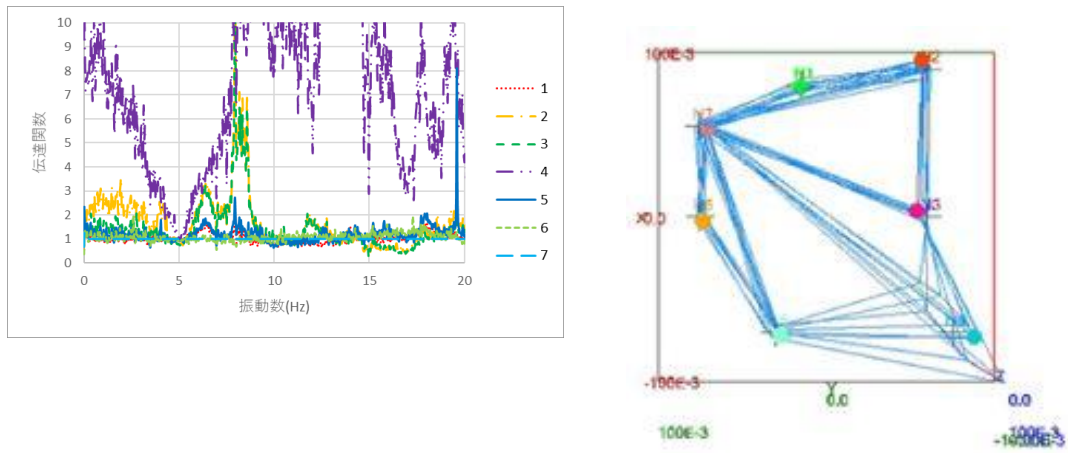
図 4-59 Z 方向での伝達関数

図 4-59 に示すように、概ね 2 倍以下に落ち着いており、ピークも見つけにくい。全体的に上下動は同程度であることがわかる。6 の箇所が大きくなっているのは、吹き抜けの隣で計測したためである。この 6 の箇所で 12Hz にピークを持っていることから、吹き抜け近くは 12Hz が大きくなる傾向が見て取れる。

東側半分のリサーチを用いた検討

2F 東側半分の平面において、各伝達関数で確認されたピーク振動数付近の振動を取り出し、リサーチを描いた。以下に各方向、各振動数のリサーチを示す。

X 方向

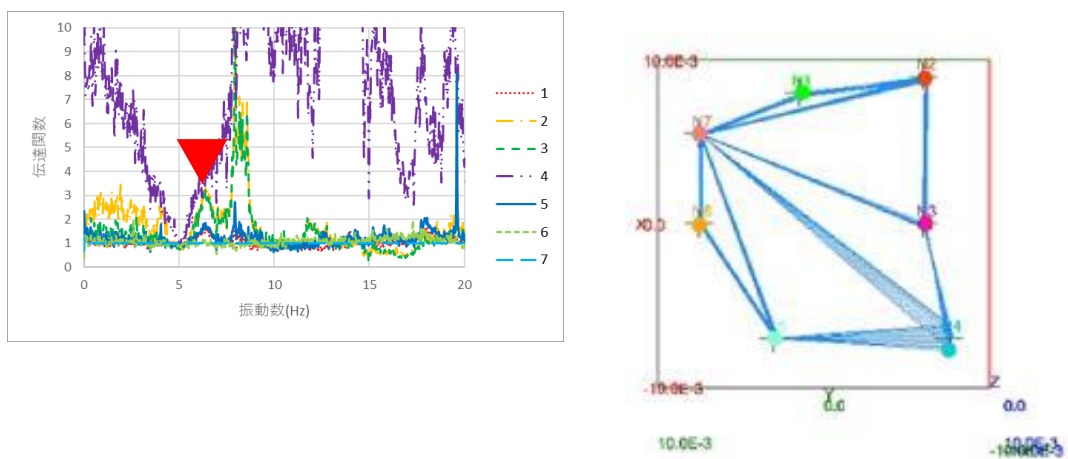


X 方向の伝達関数

XY 平面のリサーチ

図 4-60 無補正のリサーチ図

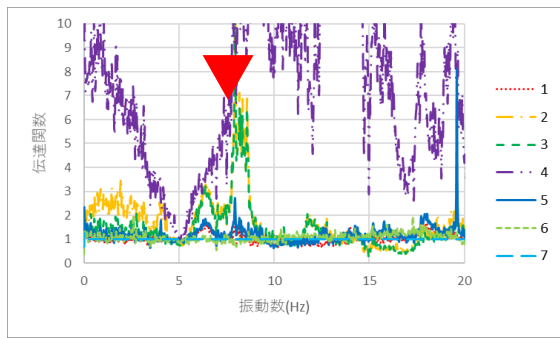
図 4-60 に示すように、N4 が機械室ということもあり、少し過剰に出ているが、モニターリング箇所 N7 を支点として、東端が南方向に振れる回転運動が見られた。



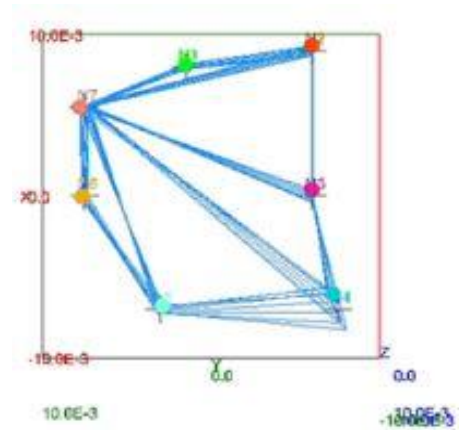
X 方向の伝達関数

XY 平面のリサーチ

図 4-61 BPF5.5±0.1Hz のリサーチ図

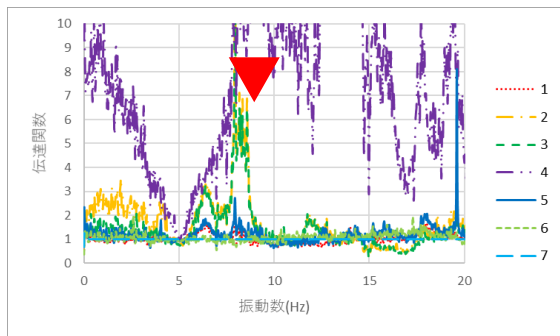


X方向の伝達関数

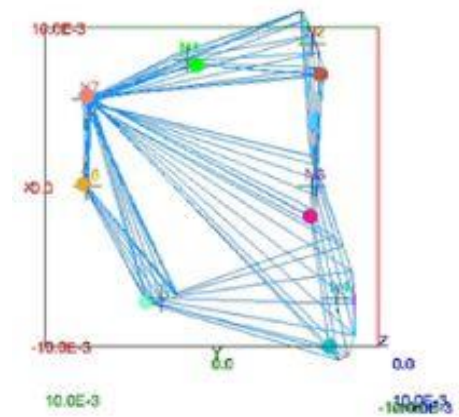


XY平面のリサージュ

図 4-62 BPF8.0±0.1Hz のリサージュ図



X方向の伝達関数

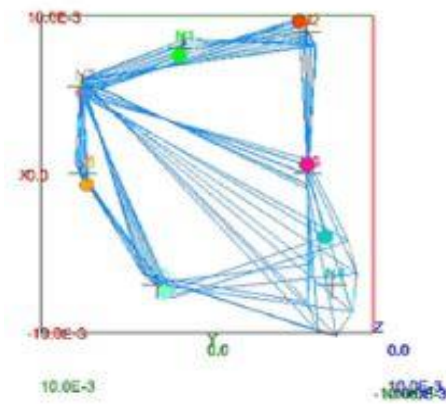
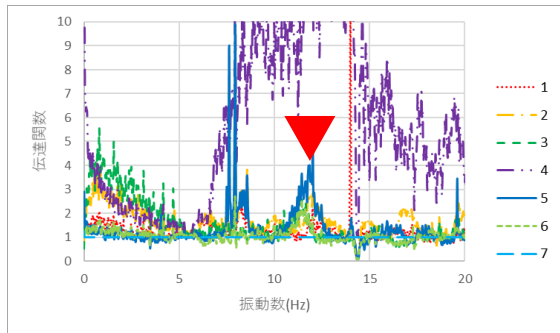


XY平面のリサージュ

図 4-63 BPF8.4±0.1Hz のリサージュ図

図 4-61, 図 4-62 および図 4-63 に示すように, 5.5Hz,8.0Hz,8.4Hz すべて伝達関数が大きくなっているものが N2,N3,N4 と東端の箇所ばかりであったため, リサージュでも東端が回転運動をしていた。

Y 方向



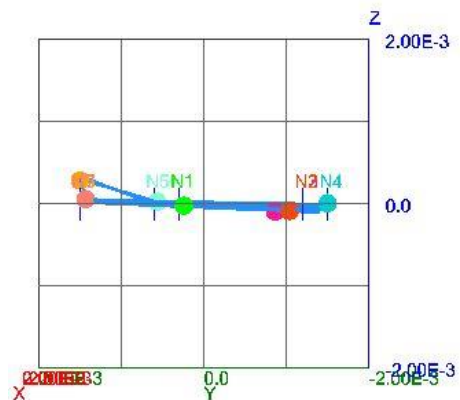
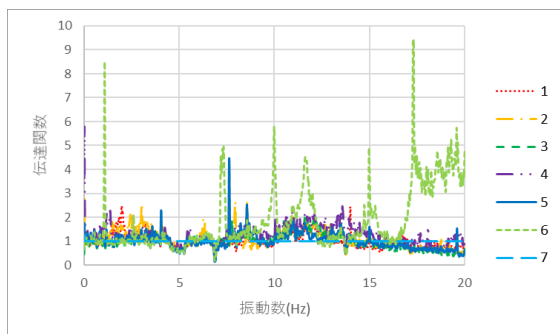
Y 方向の伝達関数

XY 平面のリサージュ

図 4-64 BPF12.1±0.1Hz のリサージュ図

図 4-64 に示すように、Y 方向の伝達関数においても、X 方向と同様にモニタリング箇所を支点として回転運動をしていることがわかった。

Z 方向



Z 方向の伝達関数

YZ 立面のリサージュ

図 4-65 Z 方向 無補正

図 4-65 に示すように、リサージュを見ると大きく動き方が異なる箇所はなかった。

2F 東側まとめ

2F 東側の平面計測でも西側と同じく、外側が大きく振られる回転運動が確認された。東側も同じくモニタリング箇所を基準とした伝達関数の倍率が 1 から大きく離れる振動数で回転運動が見られることがリサージュよりわかった。XY 平面では特に 8.1, 8.6, 12Hz 辺りにピークが来るため、振動数領域で監視する場合はこの振動数である。

4.5.3 2F 西、東での計測のまとめ

西側も東側も回転運動をしている様子が見られた。そのため、2F 以上の階はすべて東西中心を支点に回転運動をしていることとなる。

西側 XY 平面では 8.5, 10, 11.5Hz 辺りにピークが来るが、東側 XY 平面では特に 8.1, 8.6, 12Hz 辺りにピークが来る。

西側では 9.8Hz にピークがあったが、東側では 8.6Hz となっている。一見東側の方が弱く見えるが実は違う。

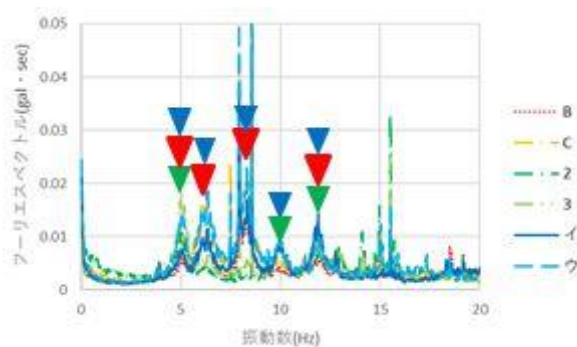


図 4-66 X 方向 A1 アラインのフーリエスペクトル図

図 4-66 は固有振動数確認の節の X 方向のフーリエスペクトルである。西側は B(赤)を分母として各センサ箇所を分子とした。それに対し、東側は 2(緑)を分母としている。図を見ると 10Hz 付近は緑と青のスペクトルがおおよそ一致するため、倍率が出なかった。逆に 8.5Hz 付近は分母である緑が小さく、分子の青が大きなスペクトルを持っているため、倍率が大きくなった。そのため、東側が単純に弱いと考えてはいけない。

しかし、今後のモニタリングでは A ライン(赤)と 1 ライン(緑)のみを用いて管理を行うため、1 ラインを用いたアラインの竣工時の伝達関数を求めたことは価値があると考えられる。

4.6 本計測でのまとめ

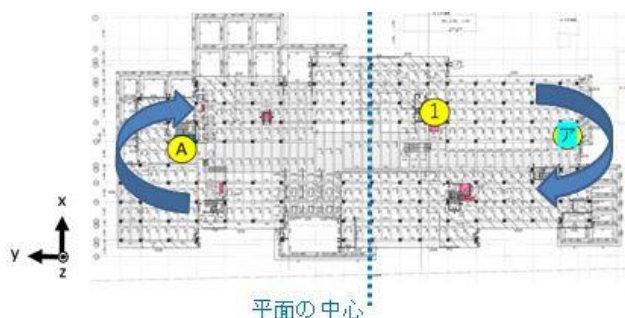


図 4-67 回転運動

以下に本計測で得られた知見をまとめる。本章では建物竣工時の検査と、今後のモニタリングの方法の提案を行うことが目的であるため、それぞれに分けてまとめる。

建物検査のまとめ

1) 3 箇所高さ方向計測

フーリエスペクトルより、Y 方向より X 方向の方が固有振動数が多く共振リスクが高いことがわかった。ア-ラインが一番固有振動数が多いため、共振リスクの面からやはり危険度が一番高く、

1 列 3F の 3 の箇所のみ 12Hz で揺れやすいことも明かにした。相対変位の分析より、3F の XY 平面でのねじれ回転運動の危険性が見られた。

2) RF を用いた建物全体の動きの確認

XY 平面において、6,8,12Hz で東端部が揺れやすく、また中央部は 8, 12Hz で鉛直 Z 方向に振動しやすい。

3) 2F 東西半分ずつの動きの確認

西側も東側もリサージュより回転運動をしている様子が見られた。そのため、2F 以上の階はすべて東西中心を支点に回転運動をしていることとなる。

3 計測全てで 2F より上の階の東西端の回転運動が確認されたため、大きな地震が発生した場合には、1 階柱梁が大きくダメージを受ける可能性が高い。今後の定期検査では 1 階柱梁を検査対象にしたほうが良いと考える。

モニタリングの提案

1) 3 箇所高さ方向計測

3 箇所高さ方向計測の伝達関数を用いた分析より、1 を基準としたものは A を基準としたものより、ピーク振動数での伝達関数が大きくなっていることから、アラインと近い振動をしているのは A ラインということになる。そのため、アラインの管理は A ラインを用いて行ったほうが良いと考える。

2) RF を用いた建物全体の動きの確認

建物全体の動きを確認しても、東西端の回転運動が確認されたため、やはり西端のモニタリング箇所での回転運動を、中央のモニタリング箇所での鉛直運動を管理することで、建物全体を管理できると考える。

3) 2F 東西半分ずつの動きの確認

西側 XY 平面では A を基準とした伝達関数で、モニタリング箇所より西側で 8.5, 10, 11.5Hz にピークを持つ。東側 XY 平面では 1 を基準とした伝達関数で、モニタリング箇所より東側の箇所が 8.1, 8.6, 12Hz 辺りにピークがある。モニタリング箇所での計測された FFT の各振動数を、本計測で得られた伝達関数倍することで東西端の実挙動を推測できると考えている。

まとめ

本計測も陸軍被服支蔵と同じく常時微動計測を用いている。陸軍は劣化がかなり進行した建物であり、本章の石垣新市庁舎は竣工直後の新築である。対極の状態の建物で常時微動を用いた検査ができたことから、常時微動計測はあらゆる状態の建物で計測を行えることを確認した。

参考文献

- 1) 石垣市 HP 石垣市新庁舎建設工事設計業務 基本設計意図説明書
ishigaki_kihonsekkei_gaiyou.pdf (city.ishigaki.okinawa.jp)

第5章 トールゲートの振動モニタリング

5.1 はじめに

現在、高速道路は人の移動や物の運搬に多く利用され、我々の生活のQOLを高めるためになくなくてはならない物となっている。日常に必要なことに加え、災害など非日常的な現象が起こったときにも避難や救助、物資供給などを行う陸路として有効に活用されている。このように非常に重要な構造物である高速道路であるが、図 5-1 のように 2015 年の段階で約 4 割 2030 年には約 8 割が 30 年以上に建てられたものとなる。高速道路の入口であるトールゲート(料金所)も同様に、大型車両通行や地震などで多くの劣化を受けている。そのため、いつ使用不可能になるかわからず、定期的に検査を行い、維持管理を行う必要性は高い。現状 NEXCO では定期検査、災害後の臨時検査として目視での検査や打診検査を行っている。しかし、この方法では莫大な時間やコストが掛かり、また劣化直後に判定できないため、しばらくは危険な状態でトールゲートを使うことになってしまう。

本章では、加速度センサを用いたトールゲートのモニタリング手法、モニタリングすべき指標を提案し、維持管理の合理化、省力化を図ることを目的として研究を行った。

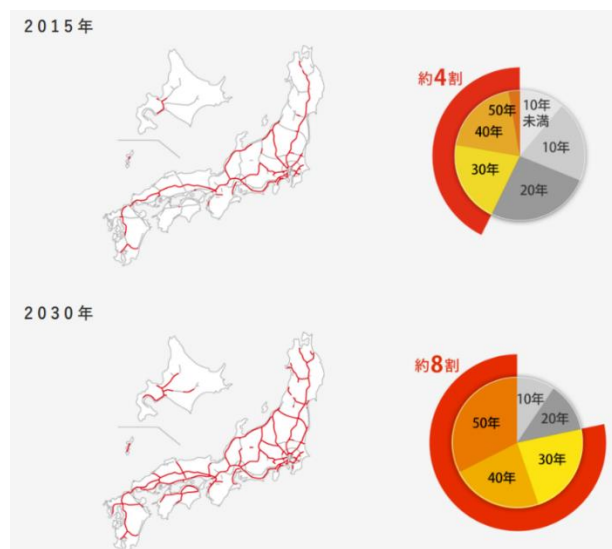


図 5-1 トールゲートの供用年数割合¹⁾

5.2 過去のトールゲートの被害状況

近年災害の数は増える一方である。その中でも地震はトールゲートへ与える損傷が大きく過去にはいくつかの大きな劣化を引き起こしている。図 5-2 は平成 28 年の熊本地震での被害である。熊本 IC のトールゲートの柱脚部分のコンクリートが破損し、柱が座屈した。はじめにでも書いたとおり、震災時には高速道路は避難や救助、物資搬入に重要な役割を果たしている。せっきく運べてもトールゲートが使えなければ下道に出ることもできない。このような状況になることを防ぐべく、トールゲートのモニタリング技術を高めることは非常に重要な課題であると考えられる。



図 5-2 柱脚破壊²⁾

5.3 現在の診断手法

現在は以下図 5-3 に示す方法で診断が行われている

- 1)高所作業車を用いて目視や打診
- 2)柱脚のアンカーボルトはテストハンマーによるたたき点検 破断については超音波探傷機器
- 3)床下はビデオスコープを用いた目視

このように時間と手間がかかることは明白である。また、技術者の技術に影響され、誤診の可能性も高い。この点を解消するべく、モニタリングシステムの構築は重要である。



高所作業の様子



テストハンマー



ビデオスコープ

図 5-3 各種検査の様子³⁾

5.4 計測概要と研究目的

5.4.1 計測概要

本研究室は前節で示したとおり、モニタリングの重要性を述べ、NEXCO 東日本が所有する数カ所のトールゲートの柱脚、柱頭、屋根スラブに加速度センサを貼り付けモニタリングを行っている。図 5-4 に計測場所、図 5-5 に計測箇所を示す。

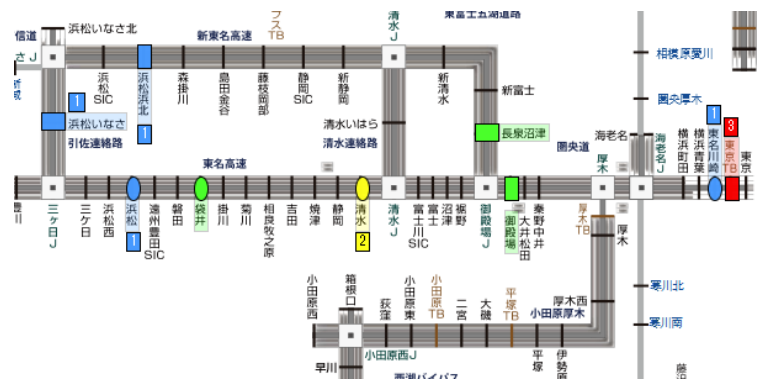
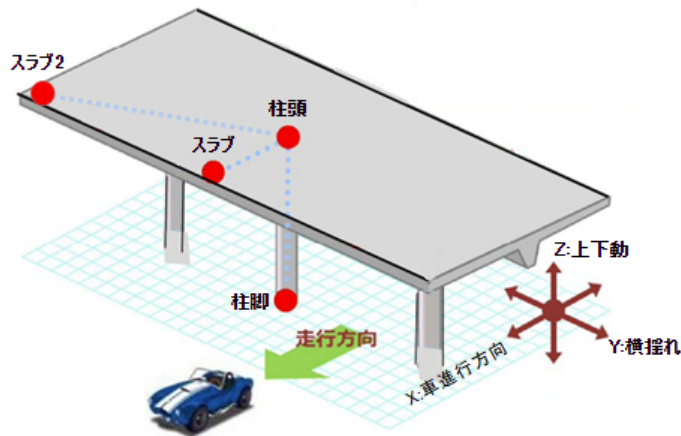


図 5-4 計測場所



設置場所	固有振動数	最大加速度	最大変位	最大角度	層間変形角	計測震度	振動数解析	加速度波形	変位波形	角度波形	層間波形	クロス波形	計測震度波形	リサーチ
柱脚	OK	OK	OK	OK	OK	0.0	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO
柱頭	OK	OK	OK	OK	OK	0.0	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO
スラブ	OK	OK	OK	OK	OK	0.0	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO
スラブ2	OK	OK	OK	OK	OK	0.2	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO	GO

図 5-5 計測箇所及びモニタリング画面

振動計測は図 5-6 に示す加速度センサと信号処理ユニットによって行う。計測における加速度センサの方向は、屋根スラブの短辺方向（車の進行方向）を X 軸，スラブの長辺方向を Y 軸，鉛直方向を Z 軸とした。すなわち，柱部材の破壊は X 方向，Y 方向が重要になり，屋根スラブの PC 鋼線破断による劣化を管理する対象は Z 方向が重要でとなる。

長期モニタリングシステムの構成を図 5-7 に示す。加速度センサと信号処理ユニットを防水・防塵のボックス内に設置し，LAN ケーブルでハブを介して，データ保存と計測制御を行う PC に接続する計測システムである。この PC からインターネットを介して，施設管理者が遠隔地で計測データを取得し，対象建築物に発生した振動をリモートで監視できる。

データの採取は，柱頭部に位置する N2 のセンサの Y 方向の加速度が 1.5 gal を越えた時に各センサで計測された加速度の履歴データが自動保存されるトリガ計測とした。また，計測のサンプリング周波数は 100 Hz とし，プリトリガ時間は 10 秒，計測時間は 600 秒として合計 70 秒間の加速度データが自動で保存される。なお，データ記録の途中に別の振動入力が生じ，N2 のセンサの Y 方向の応答加速度が再びトリガレベル (1.5 gal) に至った場合は，計測システムがその時点から再度 600 秒間を延長して加速度の履歴データを記録する手法としていた。

高速フーリエ変換 (FFT) を行って固有振動数を求めるためには，計測された 1 件の全加速度データ (70 秒またはそれ以上) を対象として，Hamming 窓関数 (窓長：8192 点) を使用し，81.92 秒の小区間を切り出して，オーバーラップさせずに全計測時間長で解析した。

また，長期モニタリングにおいて，計測された加速度データから速度および変位を算定するには，予備計測と同様で，時刻歴波形の基線補正を行い，1.0 Hz のハイパスフィルタを積分時に適用することとした。



図 5-6 センサユニット

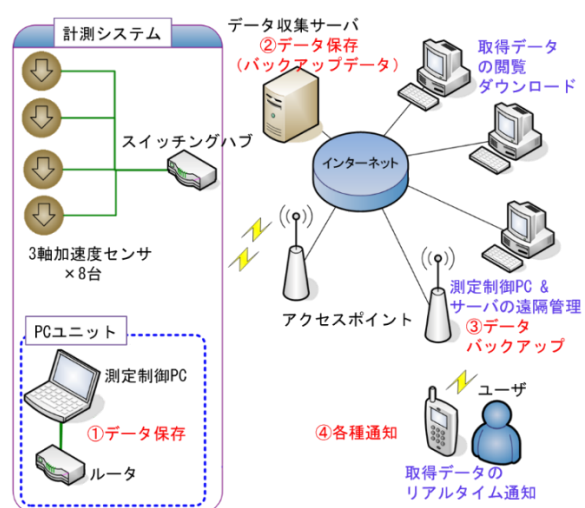


図 5-7 モニタリングシステム

5.4.2 研究目的

前年度までにモニタリングを行うという基礎的な部分は完了している。現在図 5-5 に示すとおり多くの指標でモニタリングデータを管理している。この管理方法では以下の問題が生じる。

- 1) 建築関係者でもどの指標を用いるべきかわからない。
- 2) 基本的に管理は建築の知識がない人間が行うため、更にどれを見ればよいかわからない。
- 3) 現状莫大な数のデータが保存されているが、これ全てを解析することなど不可能である。

そこで本研究でははトールゲートの破壊パターン及び地震前後のデータを用いて、解析するデータ、指標を絞ることとした。

まず、破壊パターンについて、下記2パターンがトールゲートの大きな劣化現象と考えた。

- 1) トールゲートは柱頭部に PC 鋼線を用いて屋根をプレストレス梁で支持しており、この PC 鋼線の破断、すなわち柱と屋根の結合部での破断
- 2) 過去の事例で紹介した柱脚の破壊

- 1) 屋根スラブの破断に関しては、幸い旧東京トールゲートの解体があったため、そのデータを用いて検討を行う
- 2) 柱脚及び柱の劣化に関しては、破壊実験は行えていない。そこで、2021年10月に起きた千葉地震時でのデータを元に、震源に近い東名川崎のトールゲートの検討を行った。熊本地震のように柱脚部分の破壊は見られていないが、各箇所にもどの程度の力が加わっているの、どの指標を見ると状態がわかりやすいかを検討する。

5.5 PC 鋼線破断実験を用いた柱頭-屋根スラブ破断の検討

5.5.1 計測箇所概要

PC 鋼線破断実験は旧東京トールゲートを用いて行った。本トールゲートは劣化により解体が決まっていたため、実験に使うこととした。計測箇所は図 5-8 に示す。

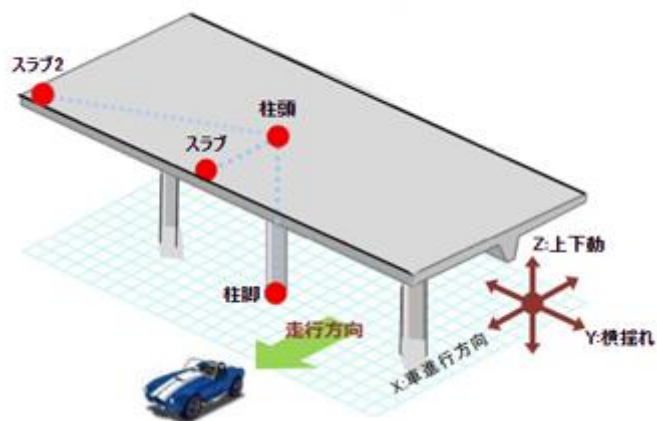


図 5-8 計測箇所

5.5.2 破断実験概要

中央の一系列の柱の柱頭を繋ぐ大梁にはプレストレスが導入されており、解体工事において内部の PC 鋼線を順次破断していった。以下は最初の PC 鋼線を破断する際に加速度センサの計測値の変化を検討したものである。すなわち、長期モニタリングにおいて、PC 構成の破断を常時微動から検知する指標抽出することを目的としている。

5.5.3 柱脚(N1)を基準とした伝達関数での考察

図 5-9 から図 5-12 に N1 を基準とした伝達関数を示す。N1 である柱脚は破断の影響を全く受けないため、地盤の影響を覗いた、柱頭、屋根スラブの固有振動数がわかる。スペクトルの違いを見やすくするために、横方向に計測箇所の違い、縦方向に経時変化のグラフを載せる。

X 方向での検討

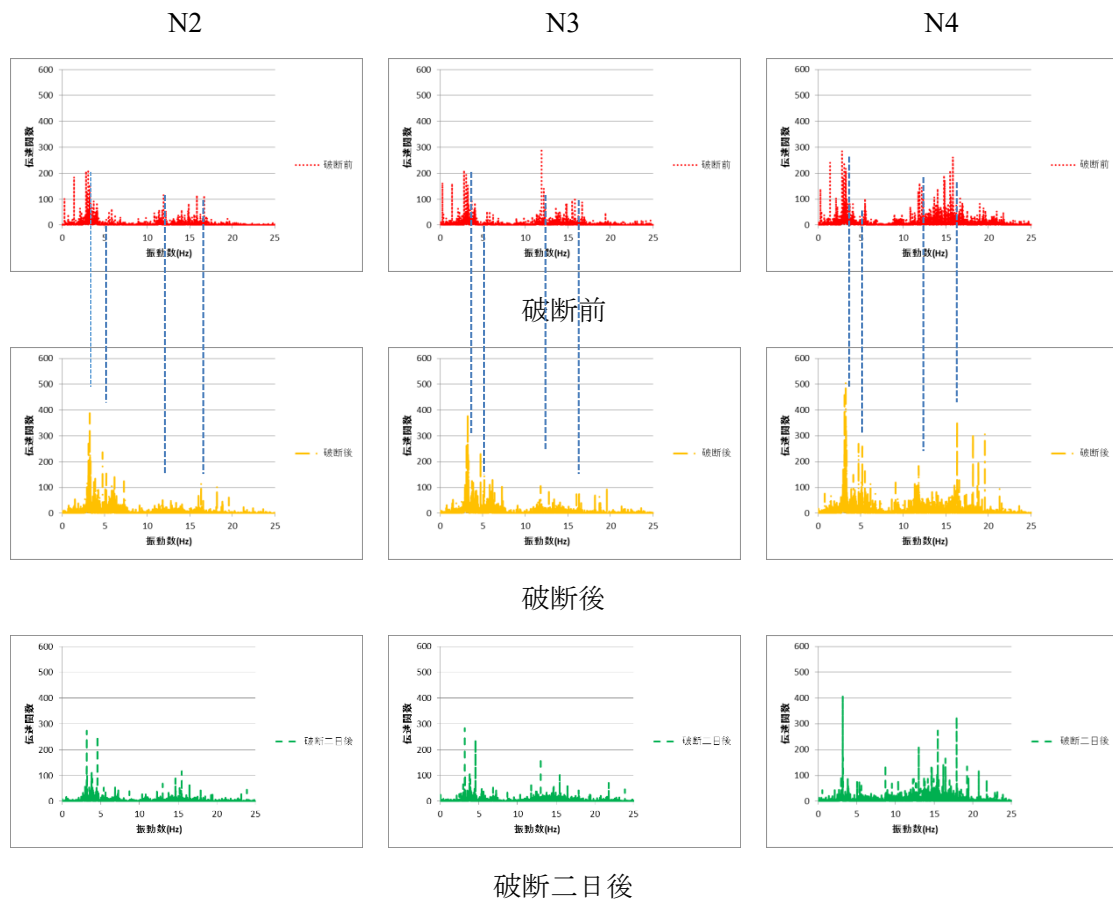


図 5-9 X 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-9 より、破断後すべての結果で 5Hz 付近に新しいピークができています。N1 を基準としている結果であるため、柱頭、屋根スラブともに新しいピークができたことが確認できました。よって、破断によって新しくピーク周波数が生じたこととなる。

Y 方向での検討

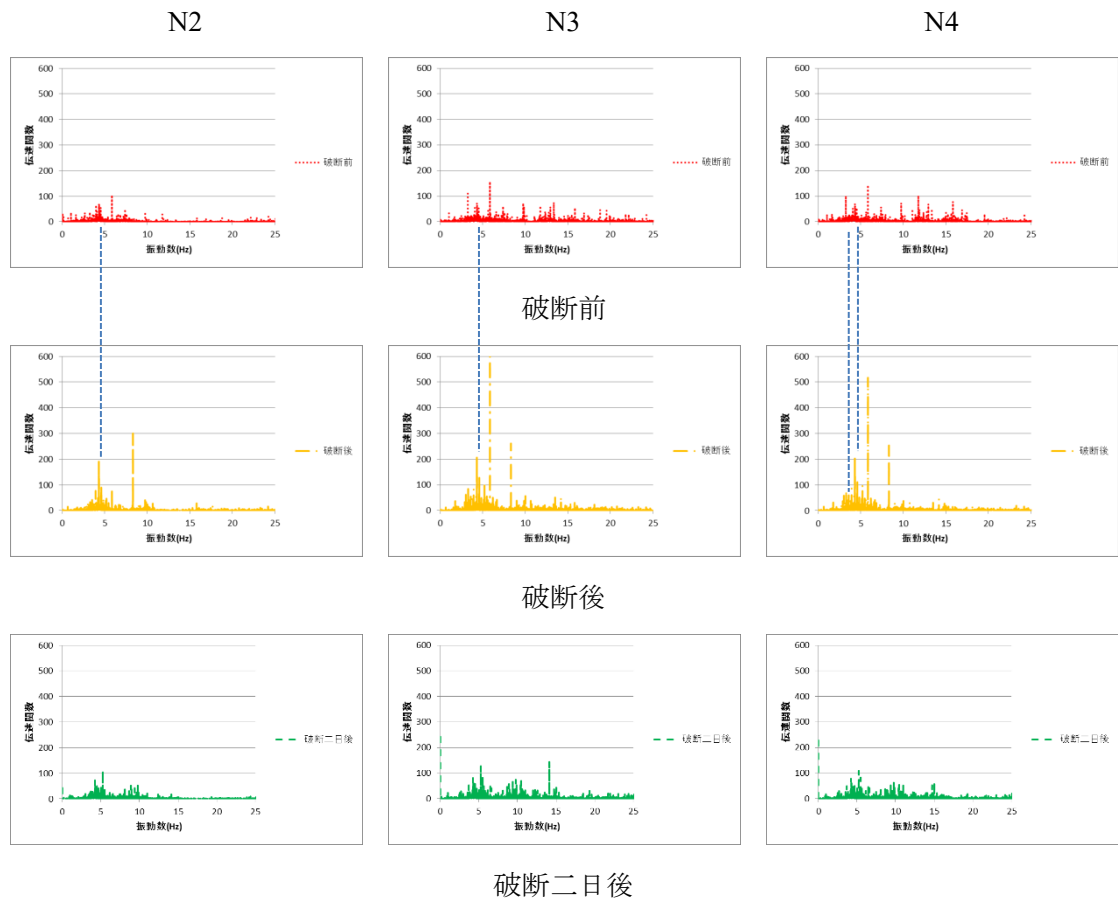


図 5-10 Y 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-10 に示す Y 方向 N1 基準の伝達関数より，X 方向と異なり，あまり破断後に違いが見られない。しかし，破断二日後にすべての箇所で 10Hz のピークが大きくなっていることがわかる。

Z 方向での検討

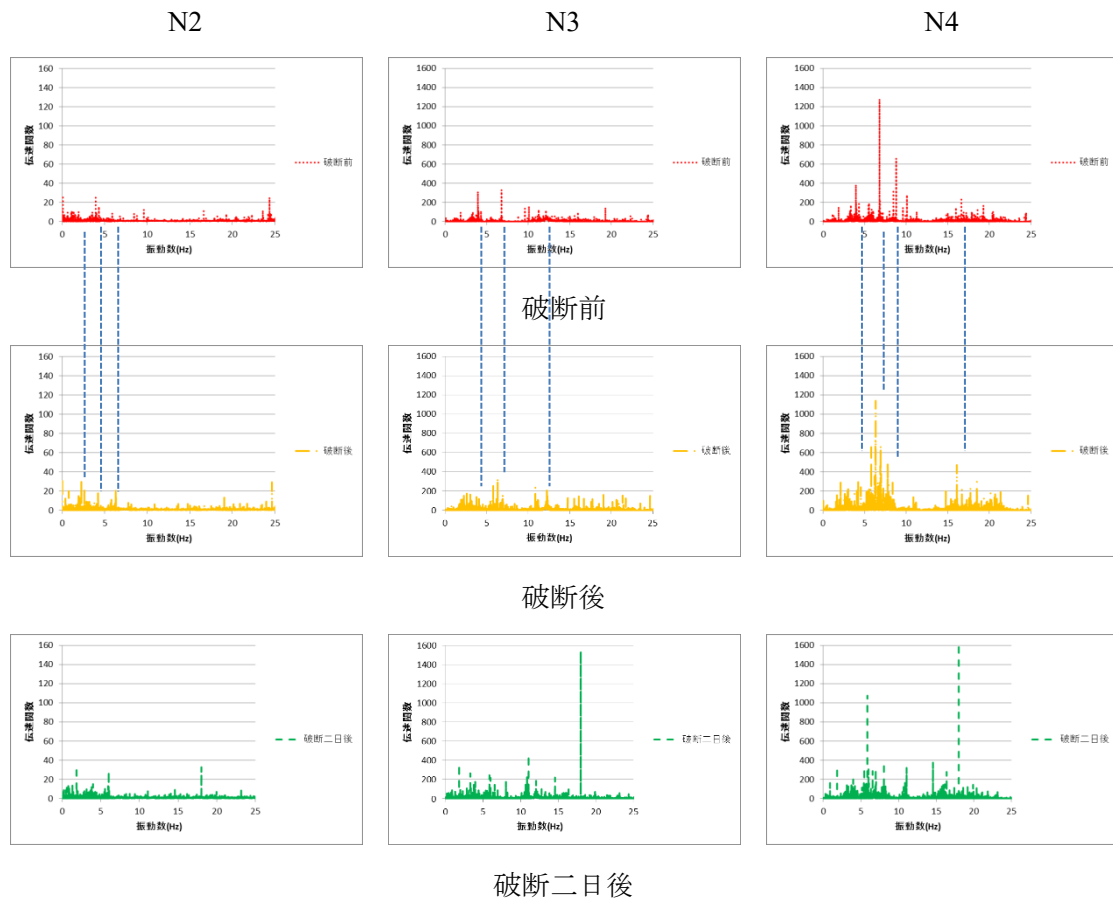


図 5-11 Z 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-11 に示す通り、破断後、X 方向のように新しいピークは見られなかった。しかし、屋根スラブの固有振動数が少し下がっていることがわかった。そのため、単純な構造物の劣化現象を表すのみである。

すなわち、現象としては X 方向のみ新しいピークができていることから、柱の上に乗っている屋根スラブが平行移動しやすくなったことが考えられる。また Z 方向のピーク周波数が低下しているため、単純に剛性が低下している。そのため、更に負荷がかかると、屋根を支えきれなくなり、落下の可能性も考えられる。

5.5.4 柱頭(N2)を基準とした伝達関数での考察

図 5-12 から図 5-14 に N2 を基準とした伝達関数を示す。N2 柱頭は破断の影響を受けるため、それを基準とした場合どの様に変化するかを確認する。前節と同じくスペクトルの違いを見やすくするために、横方向に計測箇所の違い、縦方向に経時変化のグラフを載せる。

X 方向での検討

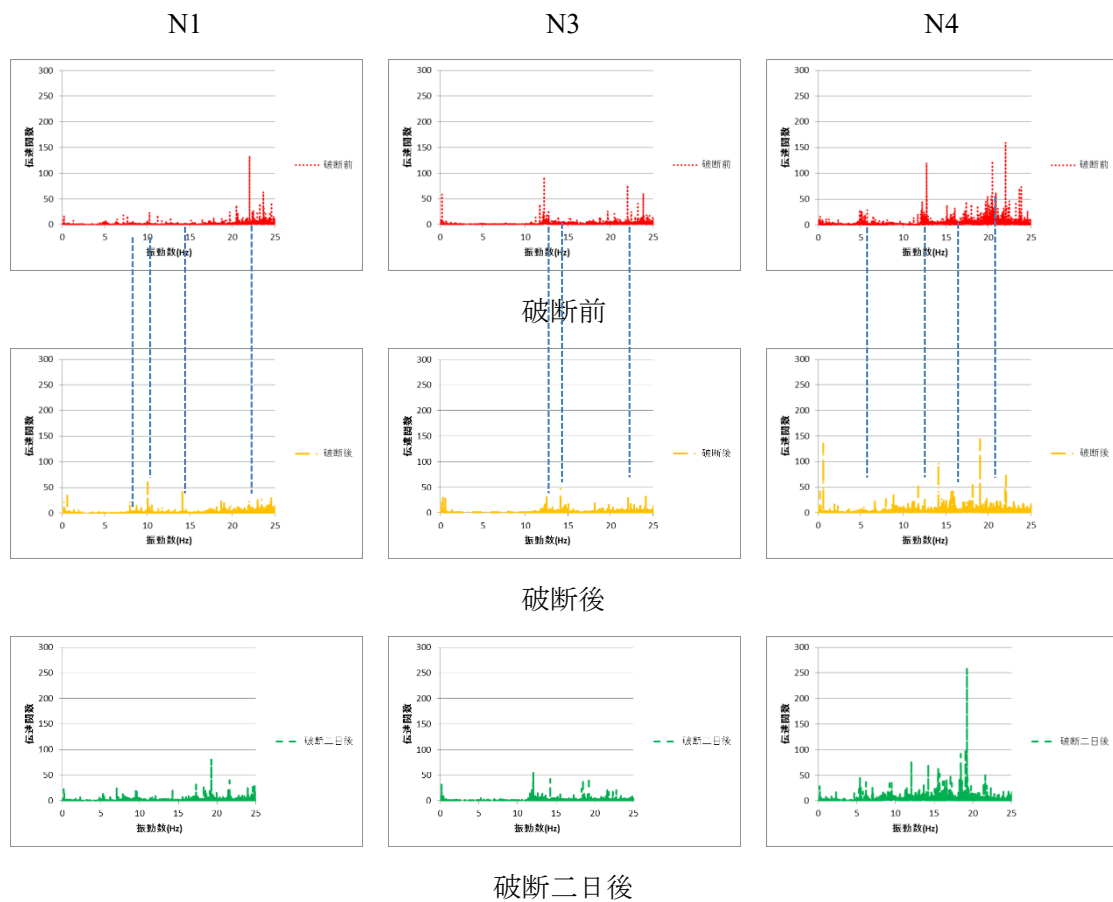


図 5-12 X 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-12 に示す X 方向伝達関数より、破断後、柱脚部分(N1)ではこのスケールでは変化を観察できない。しかし、前節の解析結果及び前節解析事項と本解析事項が逆数の関係から、おそらく 8Hz 付近の倍率が大きく小さくなっていることが予測される。屋根スラブ(N3,N4)では,N3 はあまり変わらないのに対し、N4 の 20Hz のピークが低下していることが確認できる。このことから、柱頭 N2 と屋根スラブ N3 は同程度の劣化をしており、屋根スラブ端の N4 は X 方向に関しては、更にひどく劣化しているということとなる。

Y 方向での検討

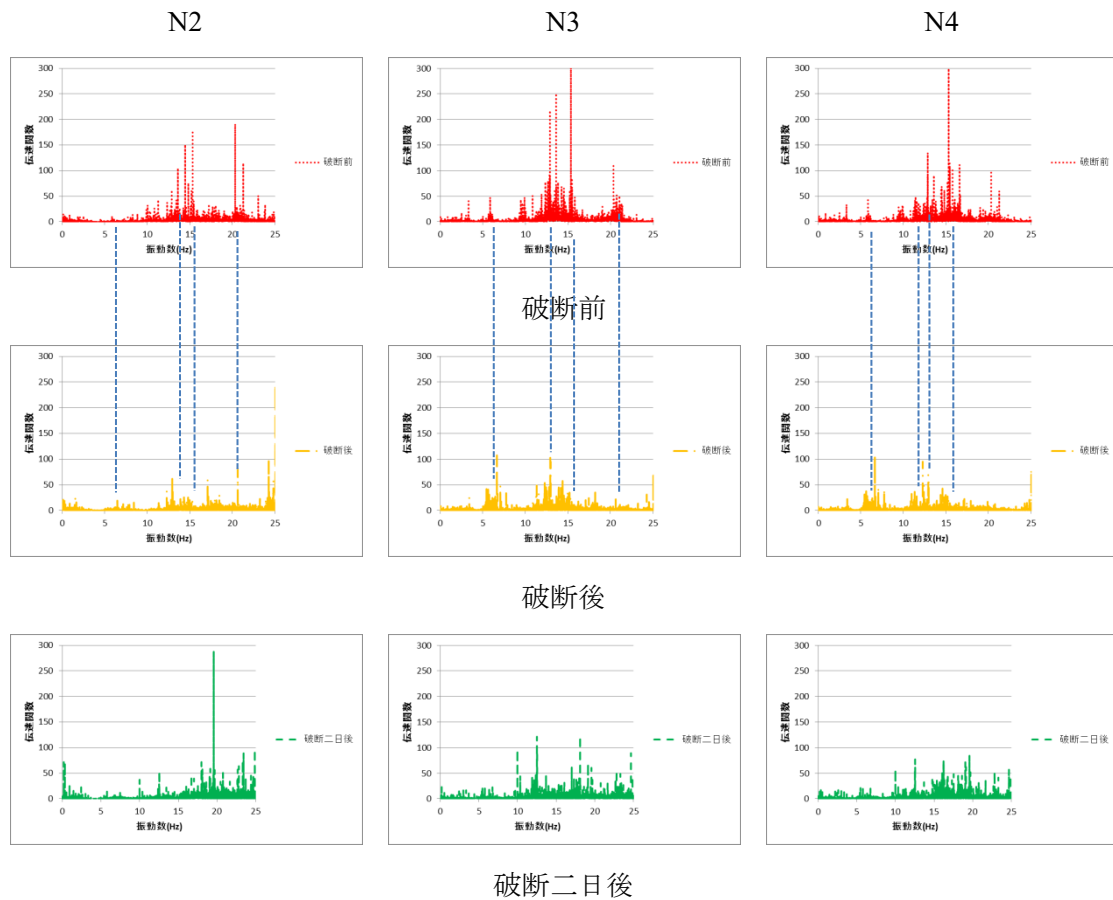


図 5-13 Y 方向の N2(柱頭)を基準とした伝達関数

図 5-13 より破断後すべての結果で 7Hz 付近に新しいピークができています。また、破断二日後に 15Hz 以上の振動数の伝達関数が大きくなっています。そのため、PC 鋼線の破断は大きい振動数帯に影響を与える可能性が考えられる。

Z方向での検討

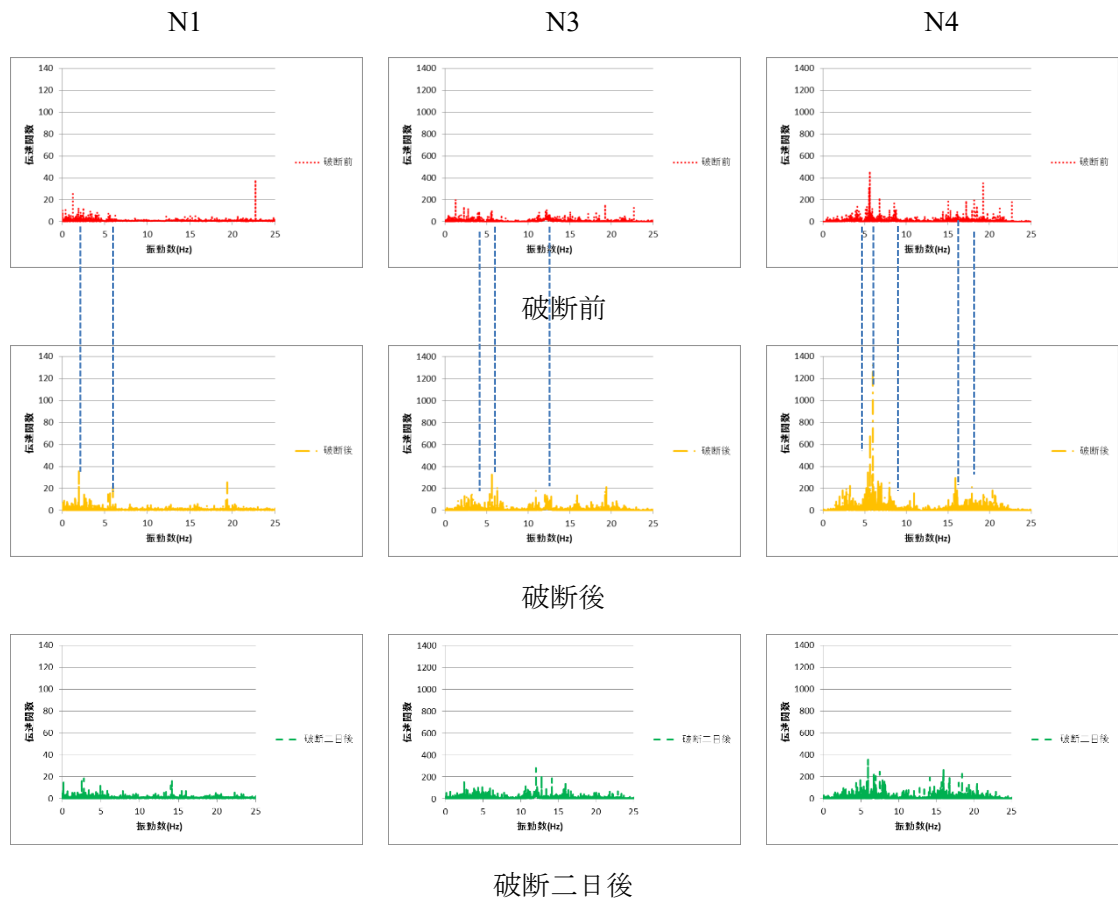


図 5-14 Z方向のN2(柱頭)を基準とした伝達関数

図 5-14 に示す通り、破断後、Y 方向のように新しいピークは見られなかった。しかし、N3,N4 である屋根スラブの 4Hz 付近のピークが少し下がっていることがわかった。Z 方向においては、N1 はほぼ変化がないため、柱自体は影響を受けておらず、屋根スラブのみ固有振動数が低下していることがわかる。やはり PC 鋼線を切断して張力がなくなったため、屋根スラブの剛性が下がっているのだろうと考える。

5.5.5 クロススペクトルを用いた検討

伝達関数は割り算であるが、掛け算であるクロススペクトルの変化を図 5-15 から図 5-20 に示す。切断箇所に近い N2(柱頭)を基準に、それぞれのクロススペクトルを算出した。

X 方向, 柱とのクロススペクトル

N1(柱脚)とのクロススペクトル

N2(柱頭)とのクロススペクトル

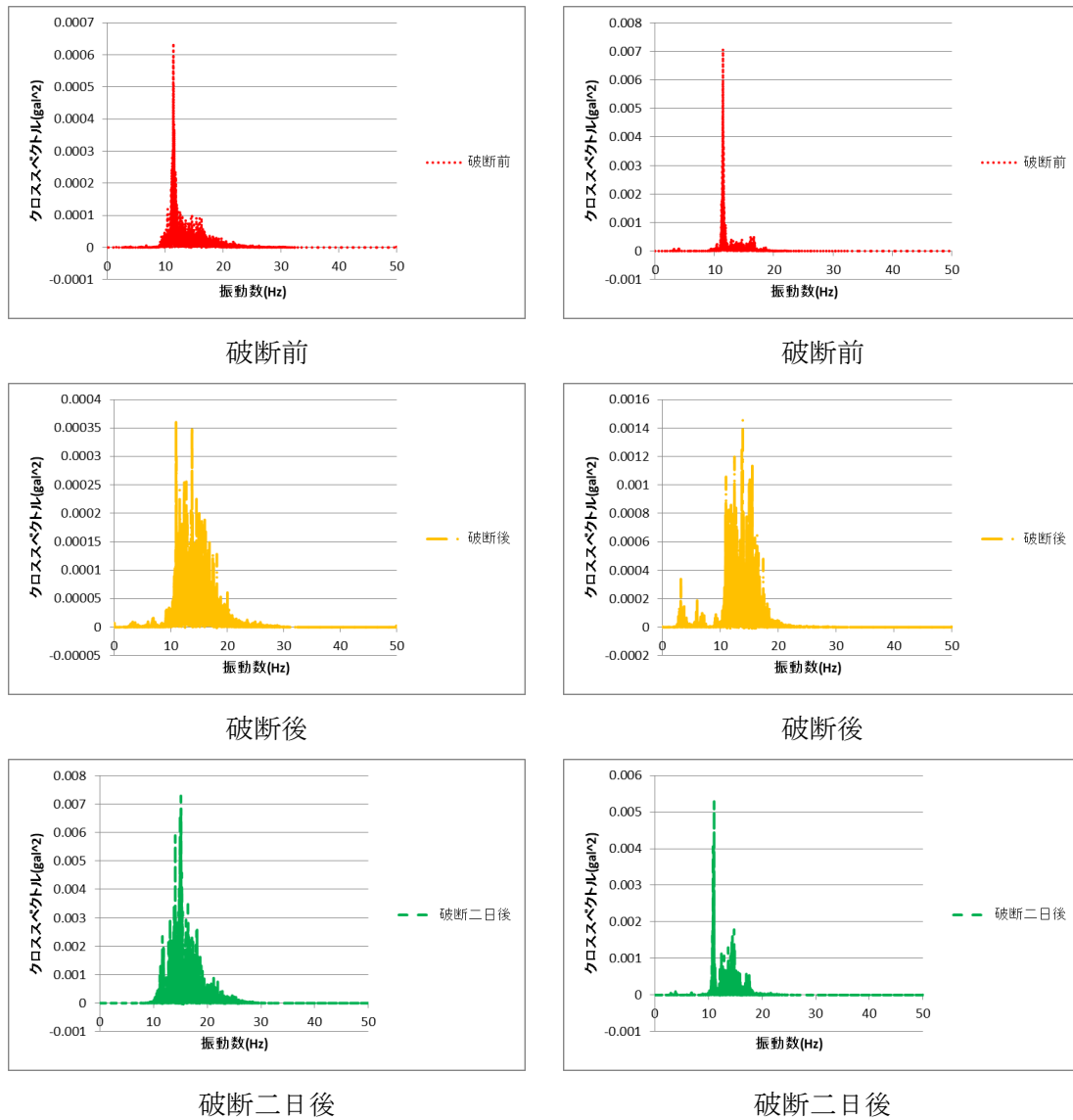


図 5-15 柱の X 方向でのクロススペクトル

図 5-15 より、N1,N2 とも時間とともにクロススペクトルが変化している。N2 は自身とのパワースペクトルでもあるため、柱頭部の固有振動数は PC 鋼線の破断で変化することが見られる。N1, N2 の違いから、破断によって N2 柱頭部は 10, 15Hz で新しく揺れやすくなることわかる。

X 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

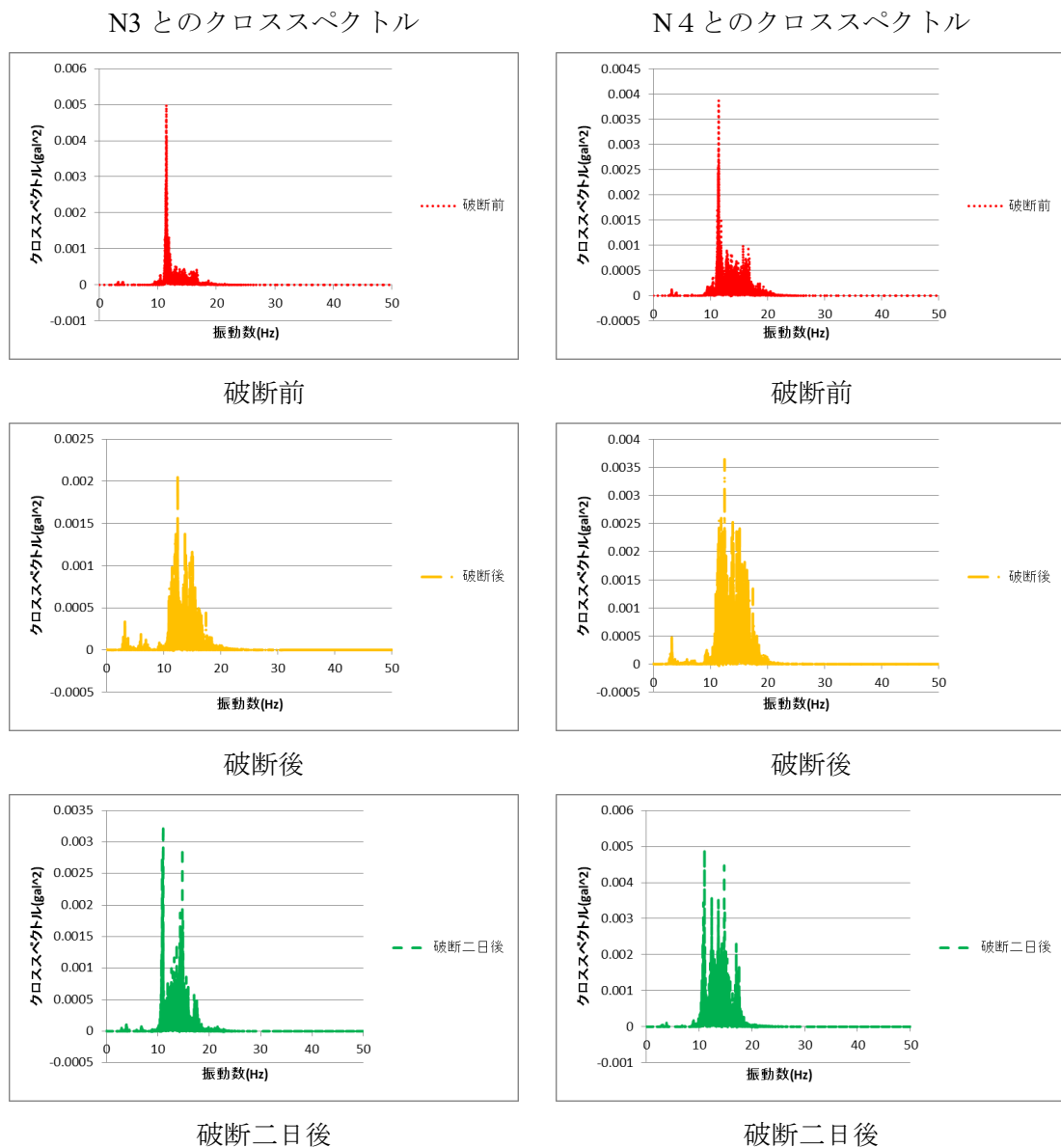


図 5-16 屋根スラブとの X 方向でのクロススペクトル

図 5-16 より, 屋根スラブにおいても時間とともにクロススペクトルが変化している。破断二日後の結果は N3,N4 とも N2 のものと近くなっているため, 柱頭部と屋根スラブは同じような動きをすることがわかる。

Y 方向, 柱とのクロススペクトル

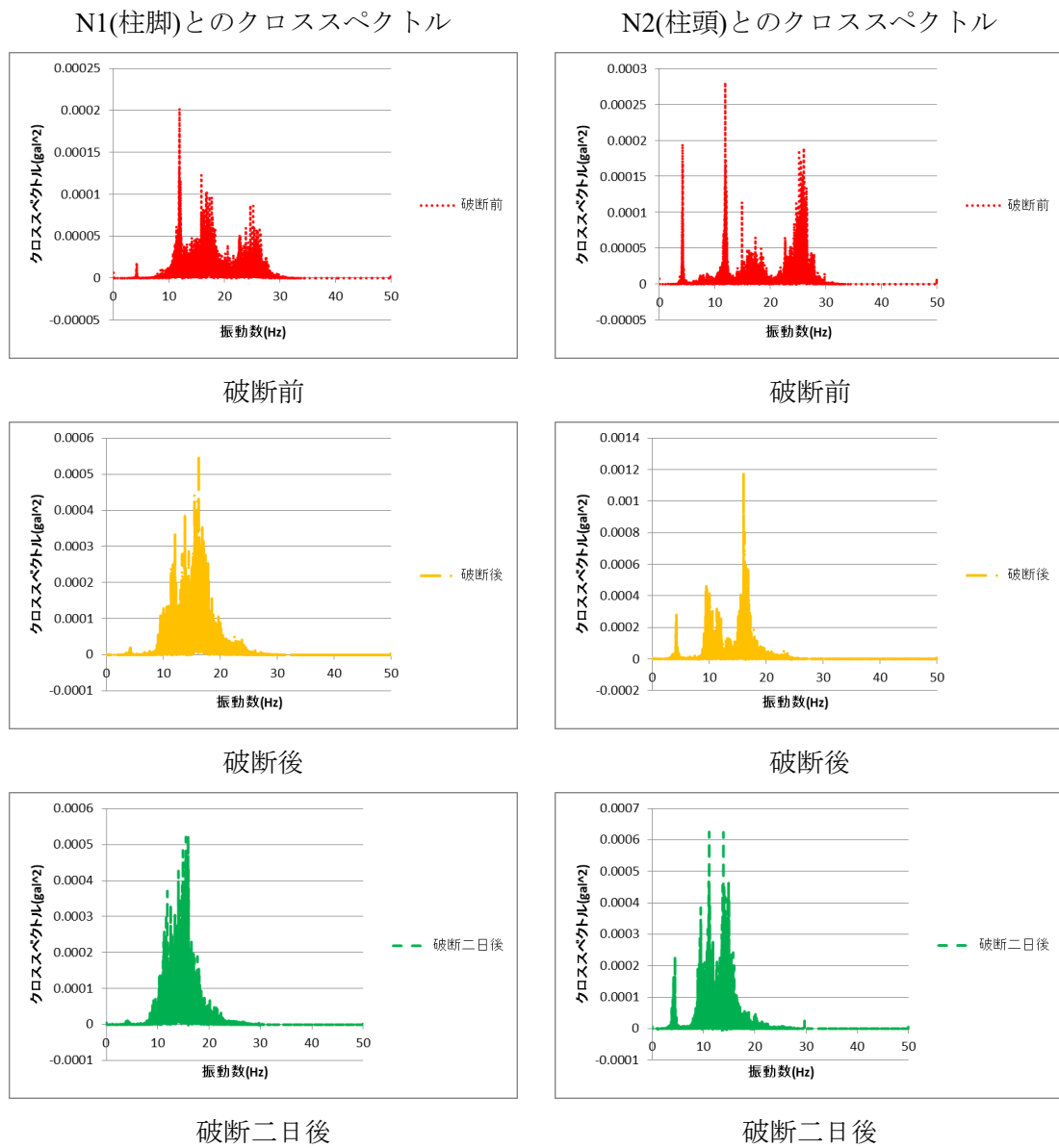


図 5-17 柱の Y 方向でのクロススペクトル

図 5-17 に示す通り, N1,N2 とも時間とともにクロススペクトルが変化している。X 方向と同じであるが, 破断前は N1,N2 のスペクトルが同じであるのに対し, 破断後は違うスペクトルをとっている。また Y 方向でも, 明確に PC 鋼線破断によって柱頭部の固有振動数に変化することがわかる。PC 鋼線の破断で柱頭部は 25Hz のピークがなくなることがわかった。

Y 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

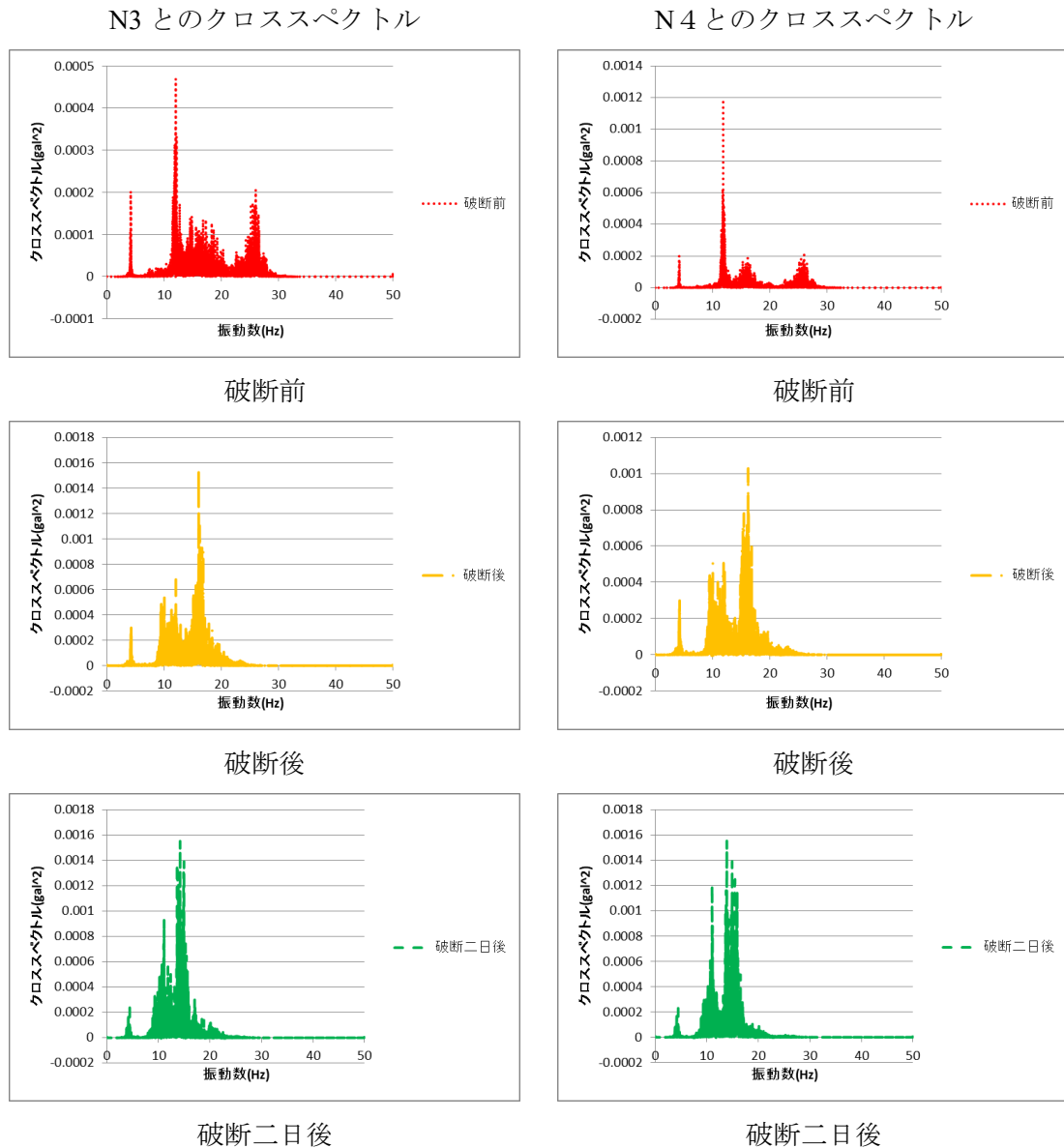


図 5-18 屋根スラブとの Y 方向でのクロススペクトル

図 5-18 より, X 方向と同じく, 同時刻の屋根スラブ内での特徴の違いは見られないため, スラブは一体となっていることがわかる。

また, 経時的に 11Hz から 10Hz にピークが移ってきていることから, 時間をかけて少しずつ剛性が低下していることがわかる。

Z方向, 柱とのクロススペクトル

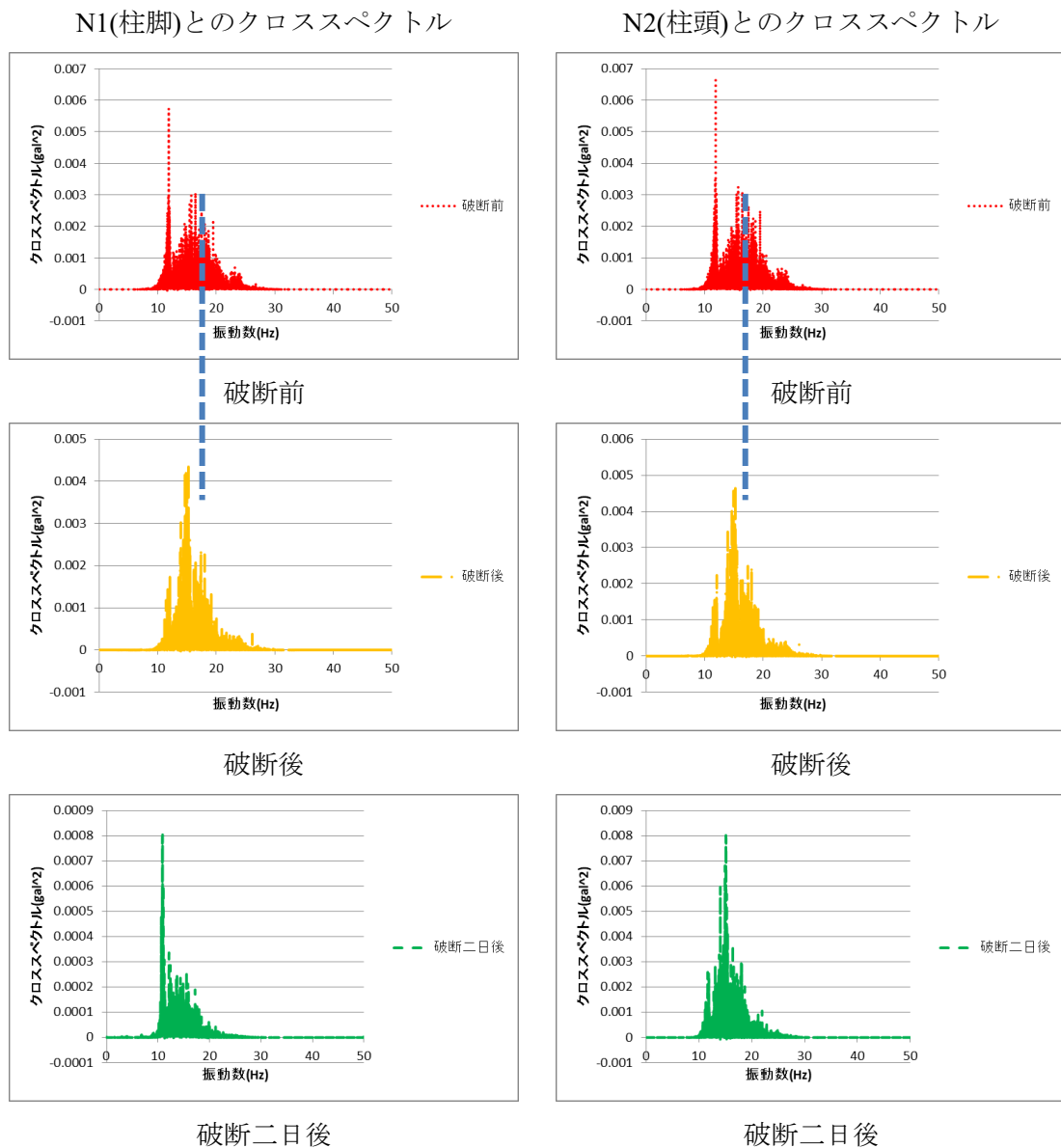


図 5-19 柱の Z 方向でのクロススペクトル

図 5-19 より, XY 方向に比べて変化が見えにくい。10Hz のピークに比べ, 15Hz のピークが大きくなっていることから, PC 鋼線の破断は 15Hz 付近に影響を与えることがわかる。しかし, XY 方向と比べると変化は小さい方向である。

Z 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

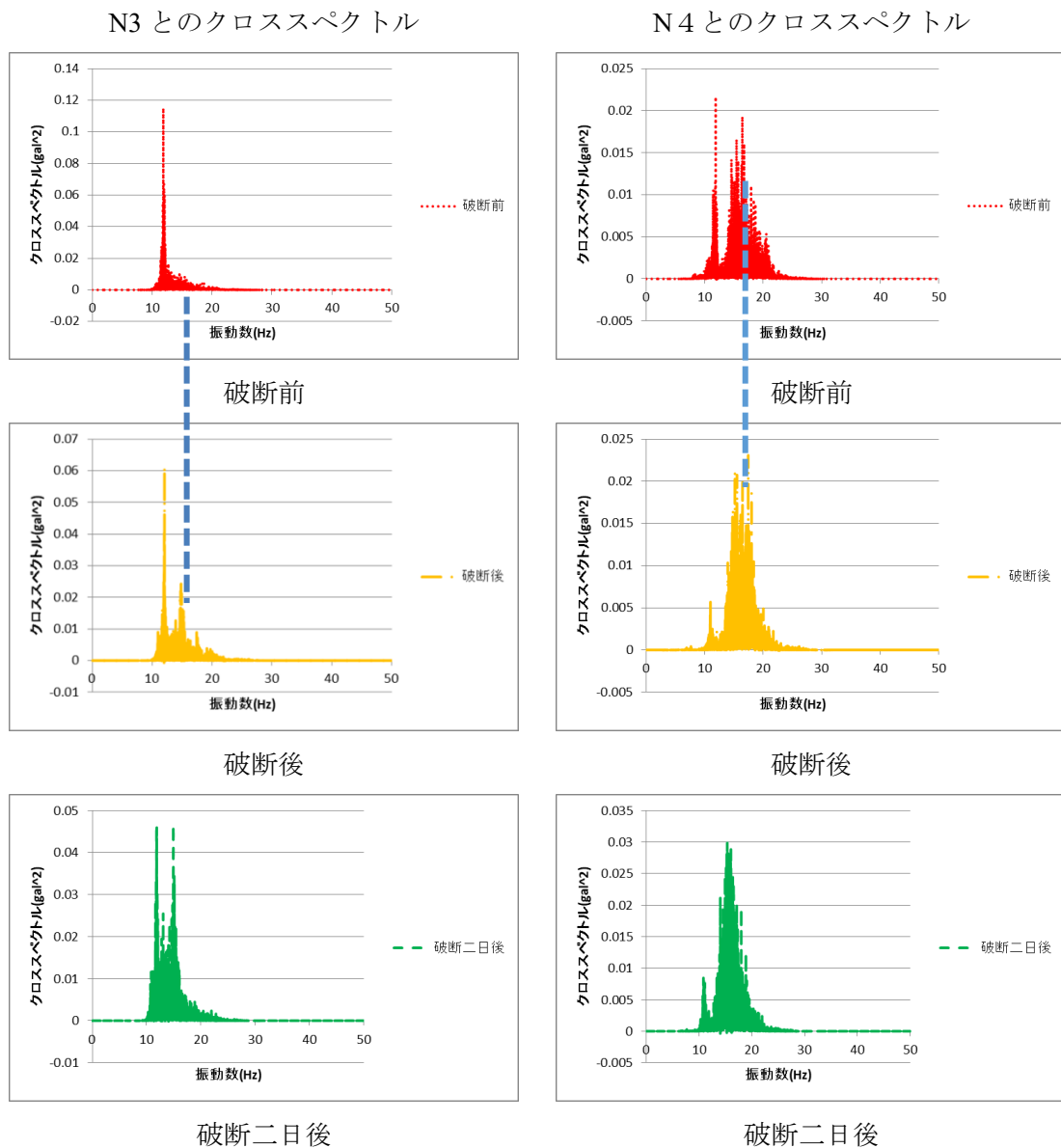


図 5-20 屋根スラブとの Z 方向でのクロススペクトル

図 5-20 のとおり, N3 のクロススペクトルで 15Hz 付近に新しくピークができています。これは N2 の 15Hz のスペクトルが大きくなったことに加え, N3 の箇所でも 15Hz で揺れやすくなったためであると考えます。屋根を縛り上げていた PC 鋼線を破断することで柱頭, N3, N4 が同じように上下に振動しやすい状態になったことがわかります。

5.5.6 角度波形を用いた検討

センサと重力方向との角度の変化を見た。破断が起こっている場合、揺れやすくなっているため、角度波形のオーダーが大きくなると予測しての検討である。図 5-21 から図 5-26 に各方向、各箇所、の角度波形を示す。

X 方向、柱の角度波形

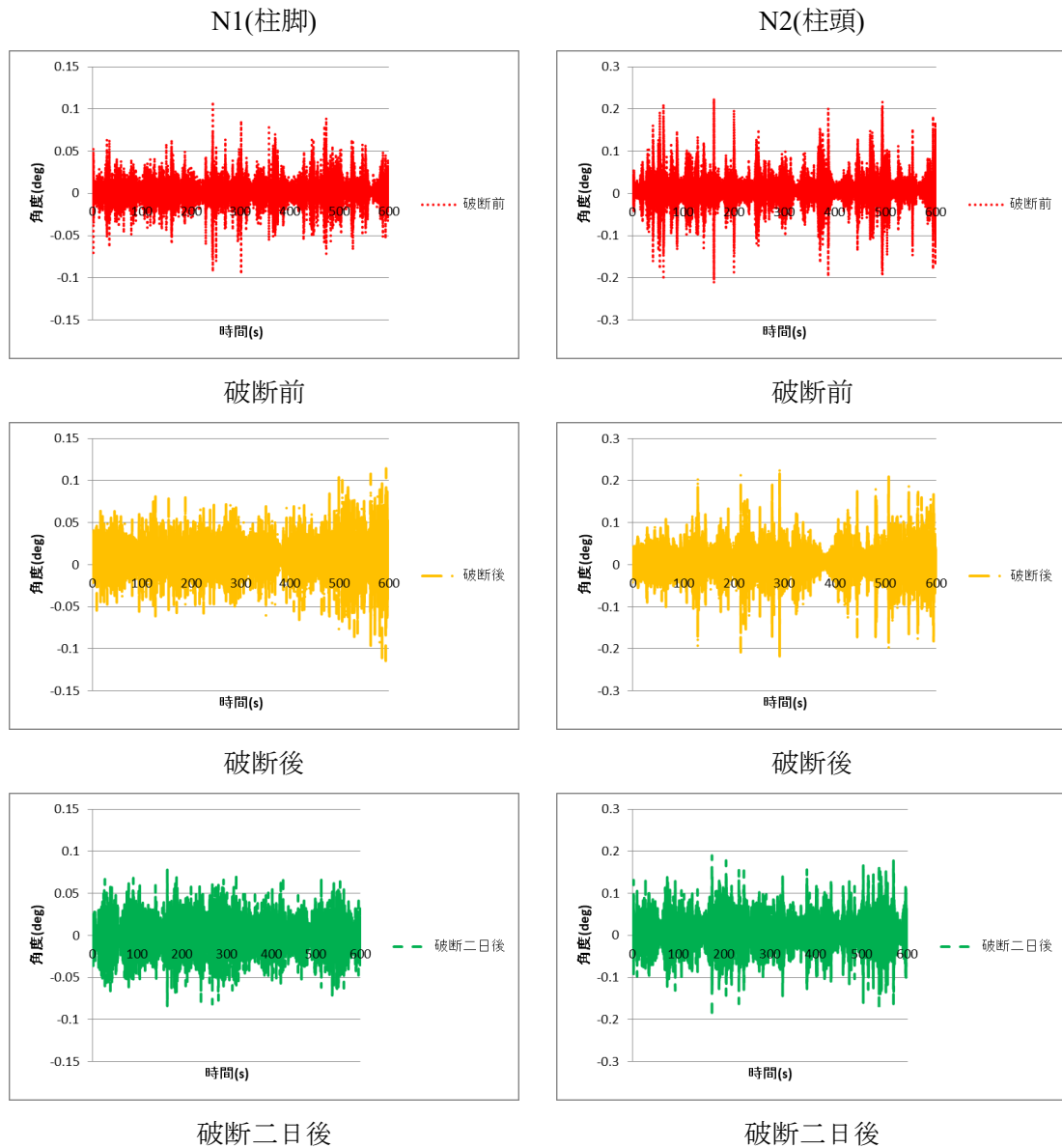


図 5-21 柱の X 方向との角度波形

図 5-21 に示す X 方向柱部材の角度波形は、それぞれ 10 分の結果を示しているが、大きく変化しているとは認められない。

X 方向, 屋根スラブの角度波形

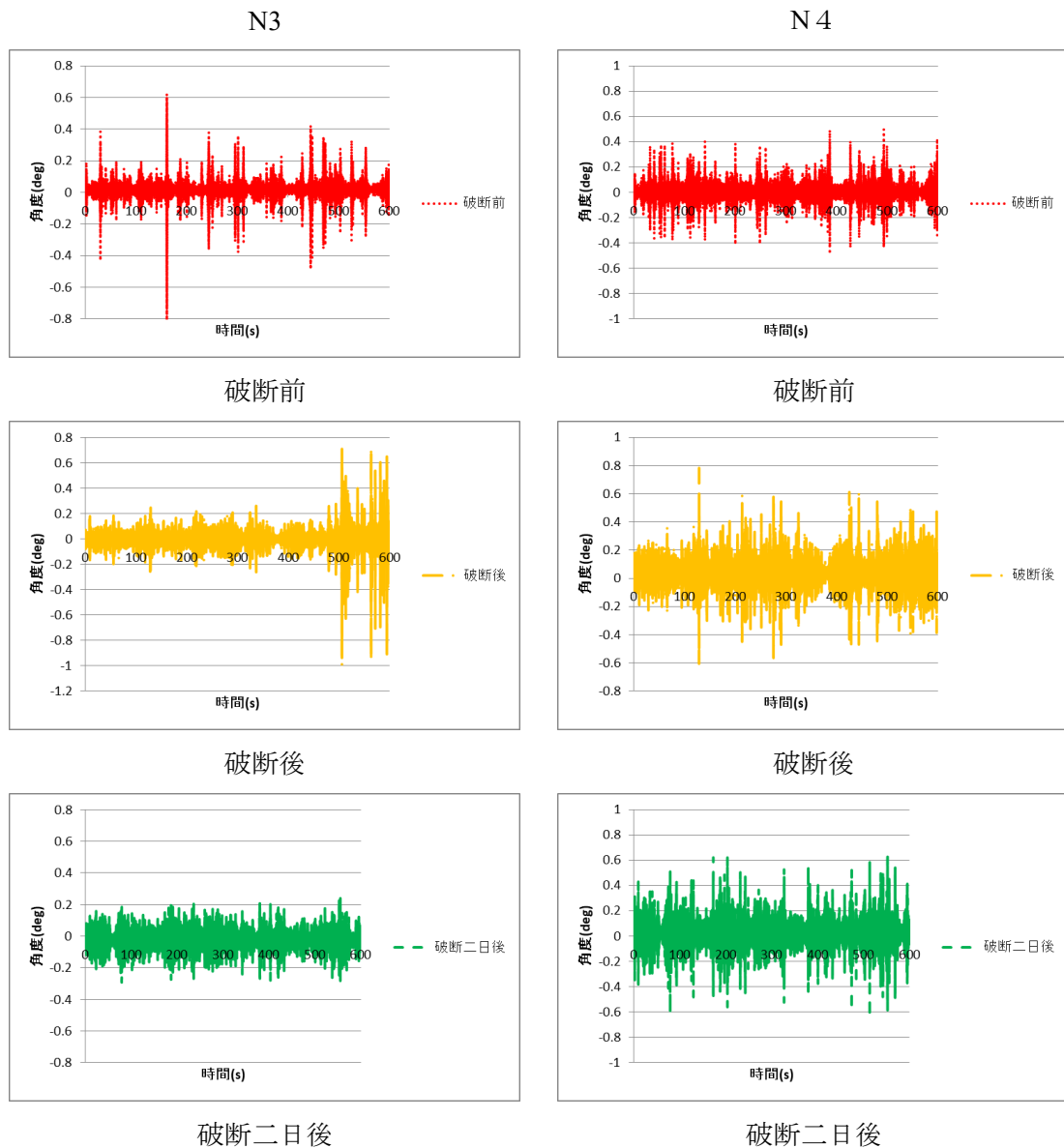


図 5-22 屋根スラブの X 方向との角度波形

図 5-22 に示す通り, N3 の 500s-600s の間は少し大きく動いている。しかし, 計測時間全体の 1/6 に過ぎず, 二日後のデータではそのような傾向が見られないため, 評価指標として使うには難しいと考える。

Y 方向, 柱の角度波形

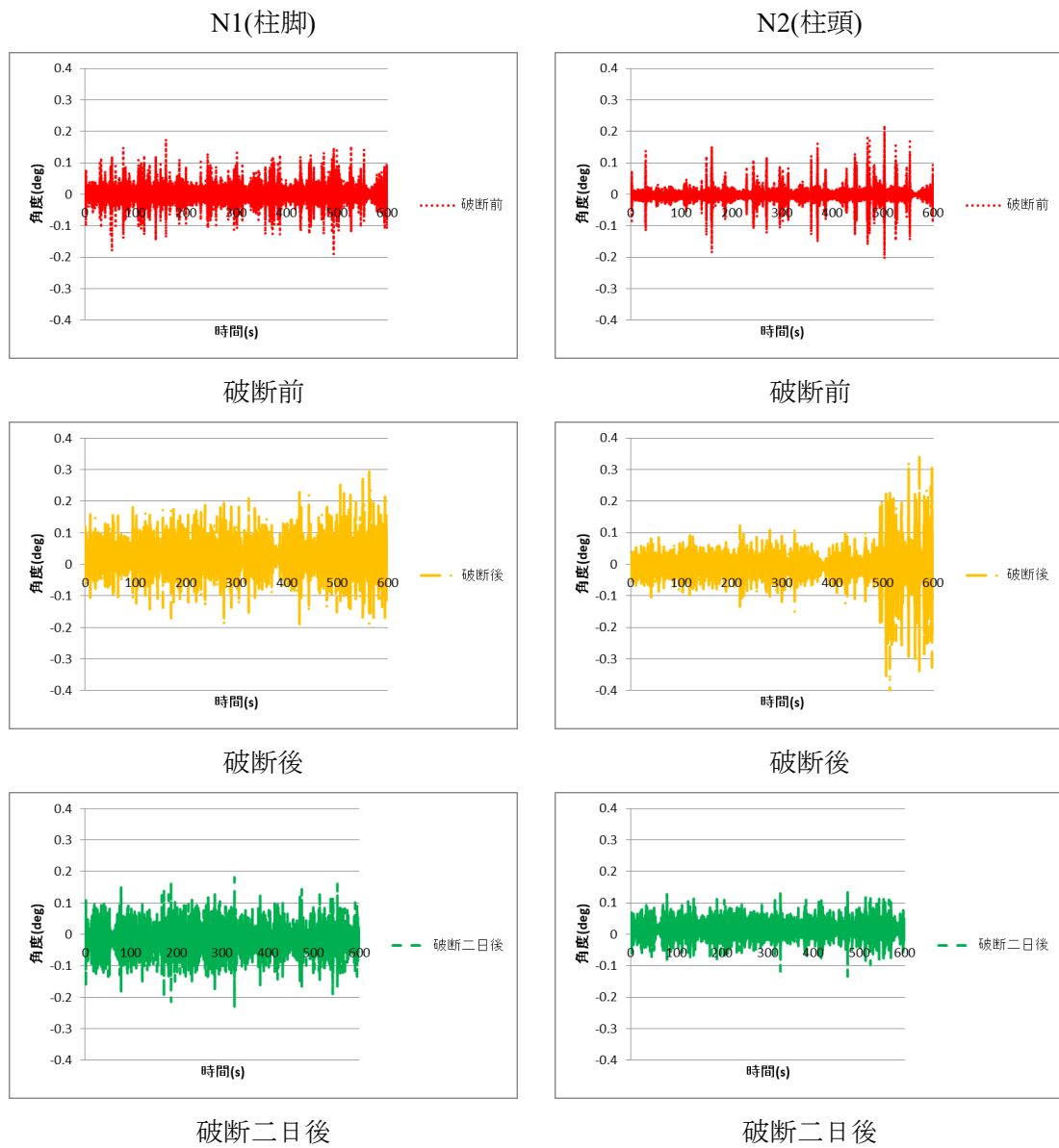


図 5-23 柱の Y 方向との角度波形

図 5-23 の N2 を見ると, 500-600s で少し大きく動いているが二日後にはその傾向が見られない。そのため, この指標は違いがでにくいことがわかる。

Y 方向, 屋根スラブの角度波形

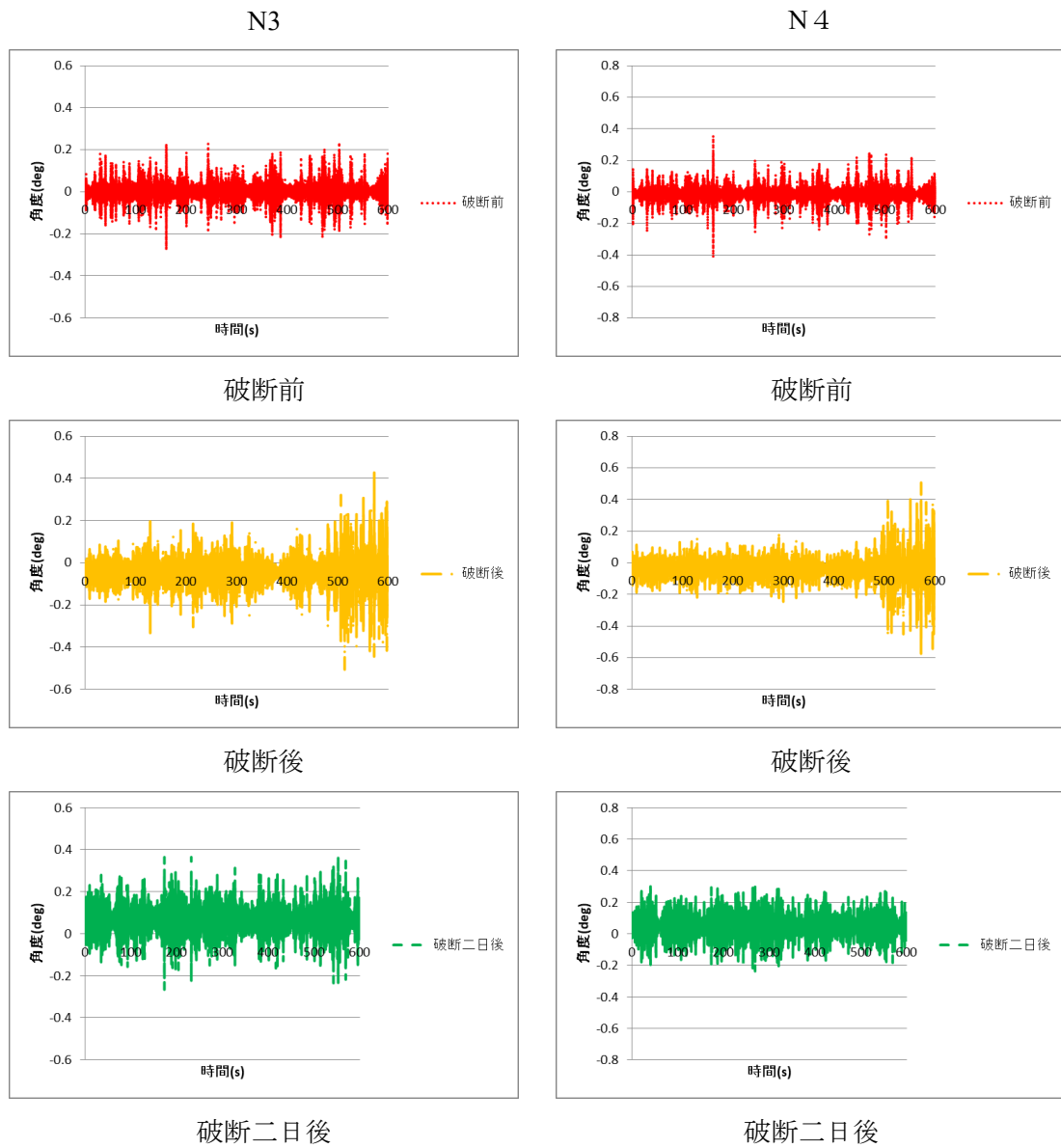


図 5-24 屋根スラブの Y 方向との角度波形

図 5-24 より, 屋根スラブ Y 方向でも大きな変化は見られない。

Z方向, 柱の角度波形

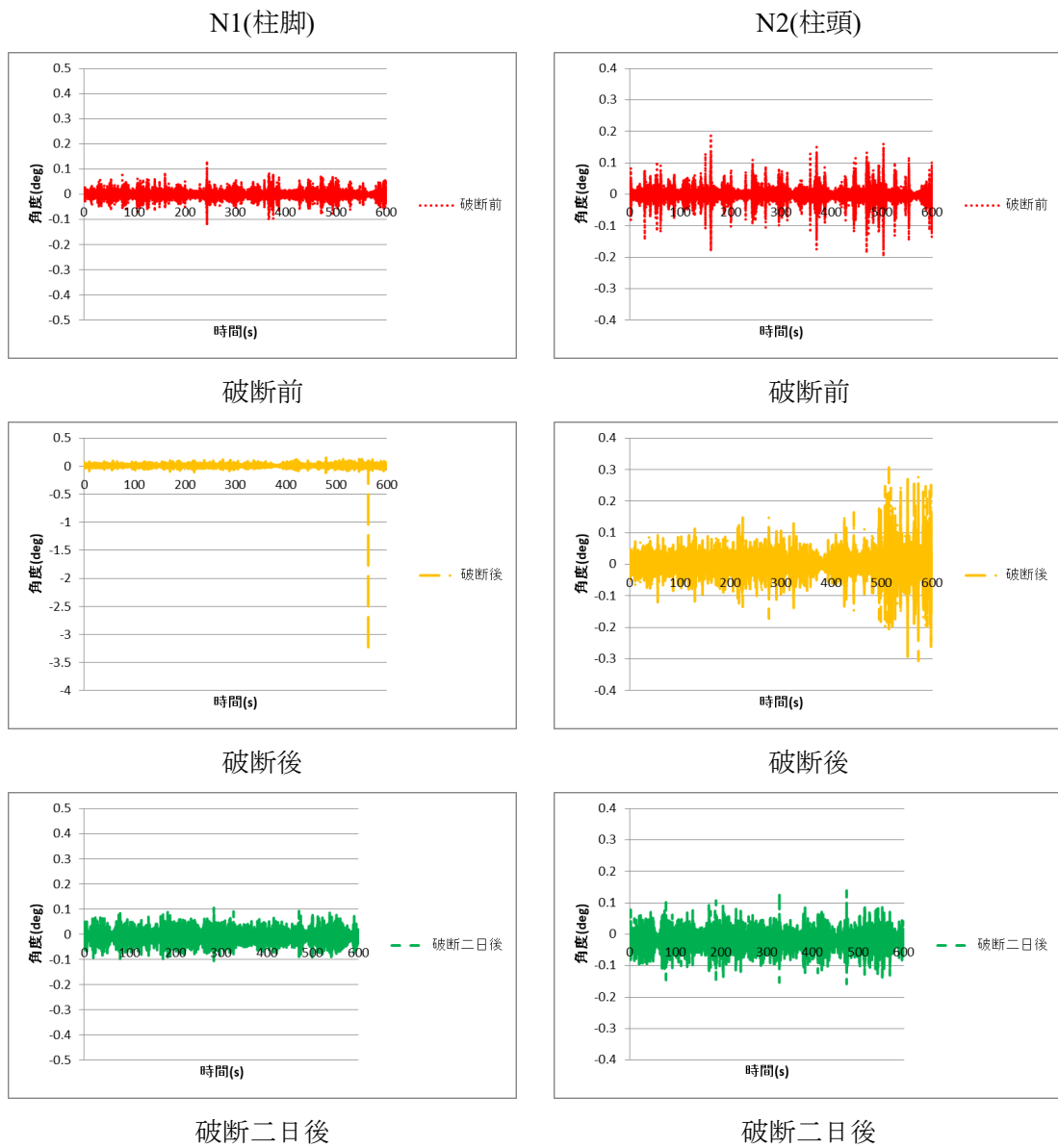


図 5-25 柱の Z 方向との角度波形

Z 方向, 屋根スラブの角度波形

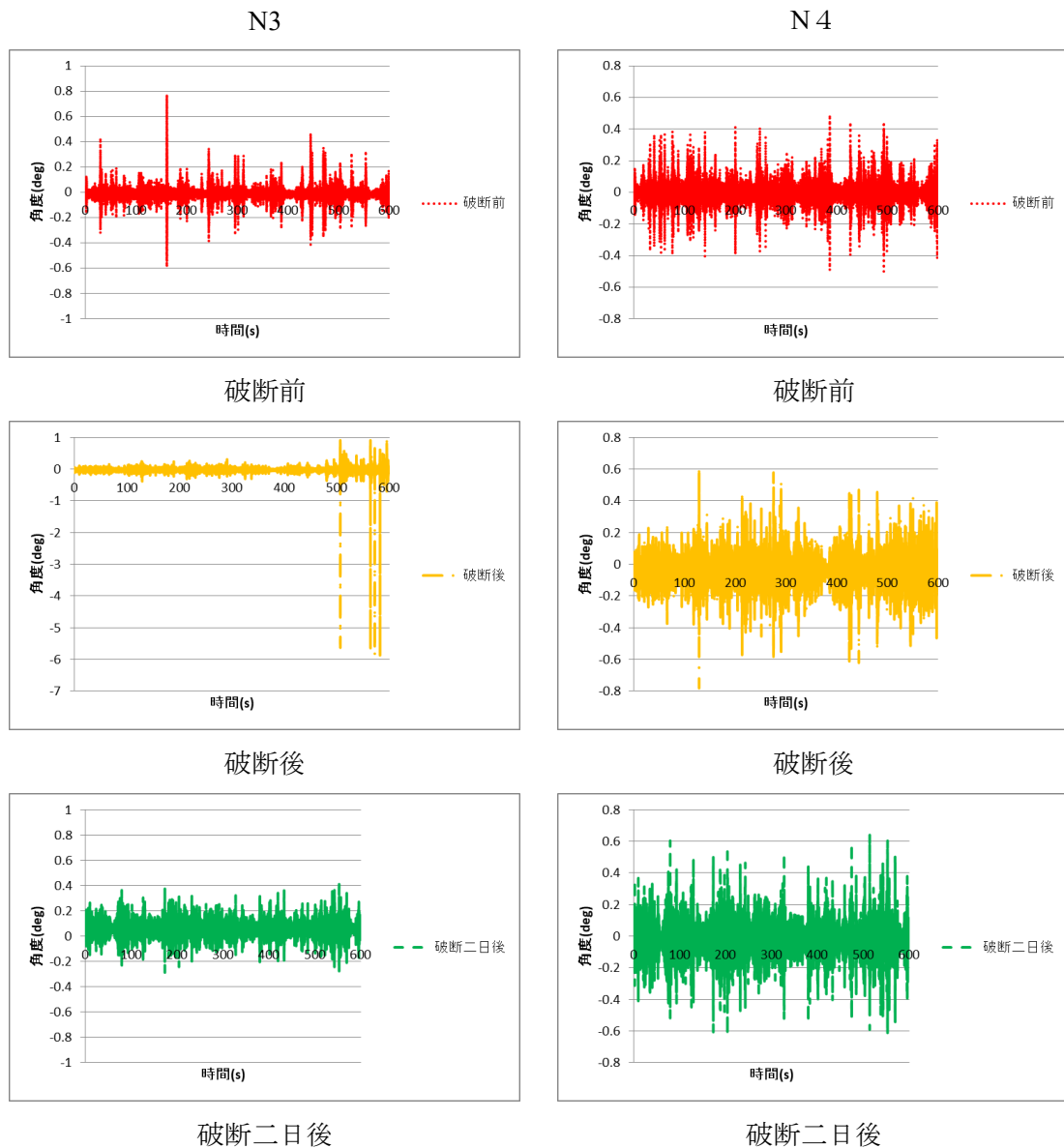


図 5-26 屋根スラブの Z 方向との角度波形

図 5-25, 図 5-26 に示す Z 方向でも, 一時的に大きく動いているものの, 基本は角度波形の大きさが変化していないため, 検知指標とするには難しいと考える。(計測時間 600s は計測としては十分だと考えるため)

また, 角度波形は加速度や変位の方向でもあるため, それらの指標も用いることが難しいことが考えられる。

5.5.7 PC 鋼線破断実験 まとめ

本節では旧東京トールゲートの PC 鋼線破断実験によって得られた各指標の解析結果を示した。得られた知見を以下にまとめる。

1)伝達関数を用いた考察

柱脚基準より、X 方向のみ 5Hz に新しいピークができていることから、屋根スラブが平行移動しやすくなったことが考えられる。柱脚は PC 鋼線を破断しても影響が出ないことから、柱頭、屋根スラブが 5Hz で揺れやすくなったことを示している。また z 方向のピーク周波数が低下しているため、単純に剛性が低下している。

柱頭基準の結果より、屋根スラブでは、柱頭よりの箇所はあまり変わらないのに対し、外側の箇所のピークが低下していることが確認できた。このことから、柱頭と屋根スラブの柱頭よりの箇所は同程度の劣化をしており、屋根スラブ端は X 方向に関しては、更にひどく劣化しているということになる。

2)クロススペクトルを用いた考察

破断後、全箇所のスペクトルが変化していることが分かった。そのため、基準としている柱頭部のスペクトルは確実に変化しているとわかる。また、XY 方向において、柱頭部 N2 と屋根スラブ N3,N4 のスペクトルが一致することから、屋根スラブは一体となって平行移動しやすくなったと考える。

3)角度波形を用いた考察

各方向、各箇所の変化を見たが、劣化を検知できていなかった。

4)まとめ

上記 1)から 3)で用いた指標の中でも、クロススペクトルが一番変化が確認しやすく、検知に有効であると考えられる。伝達関数は分母とする箇所と分子とする箇所が同じ劣化を起こした場合、劣化を検知できない。それに対し、クロススペクトルは分子分母両方の劣化でもスペクトルに変化が出るため、劣化の検知漏れを回避することができる。と考える。

5.6.2 FFT を用いた固有振動数での考察

図 5-28 から図 5-33 に各方向, 各箇所, 各箇所のフーリエスペクトルの変化を示す。

X 方向

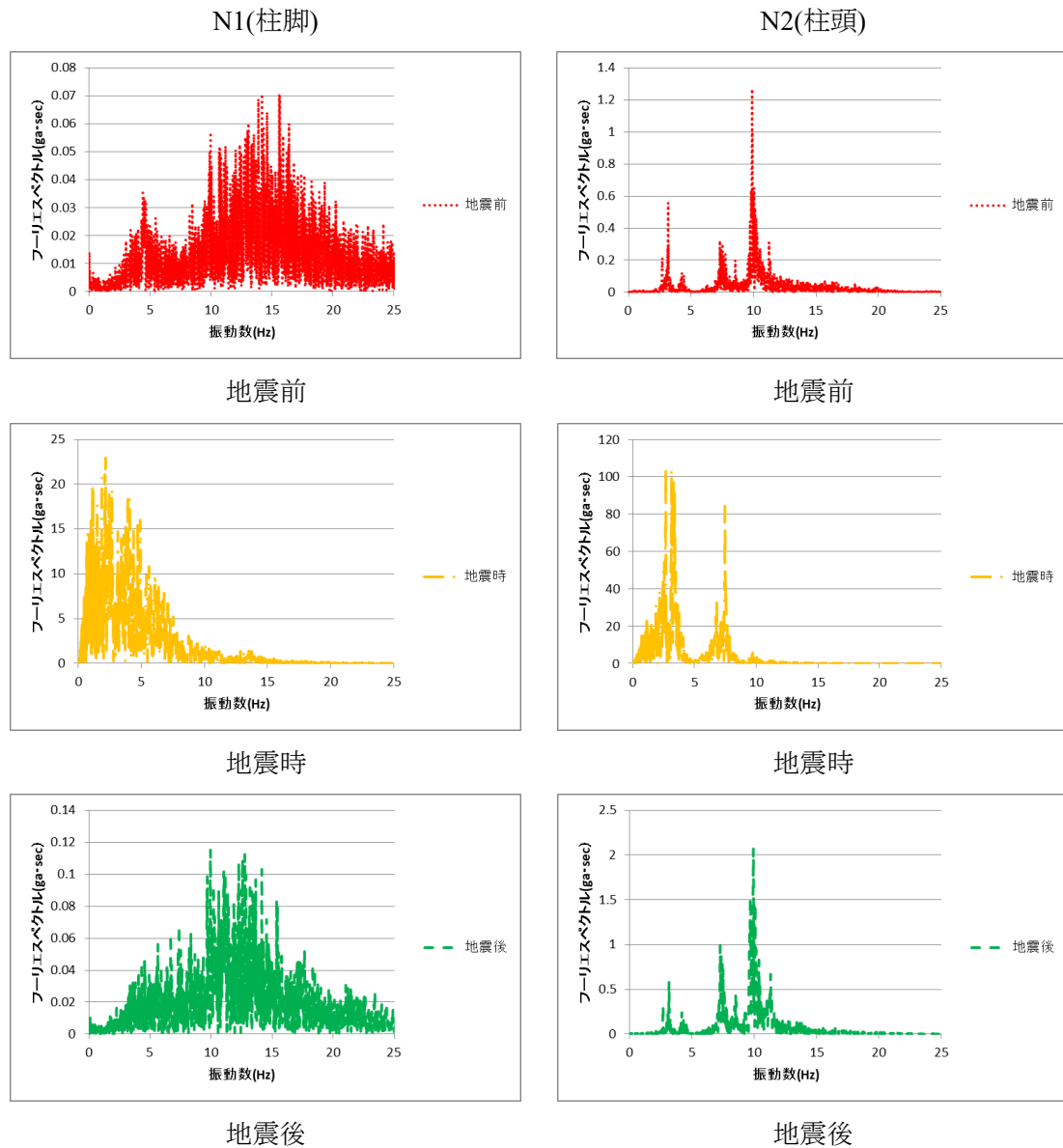


図 5-28 X 方向 N1,N2 のフーリエスペクトル

図 5-28 は柱脚, 柱頭のスペクトルの変化を表している。同図より, 地震時は固有振動数が低くなるが, 地震後には地震前に戻っている。その為, 劣化は確認できない。また, 柱脚と柱頭では大きくスペクトルが異なっていることがわかる。

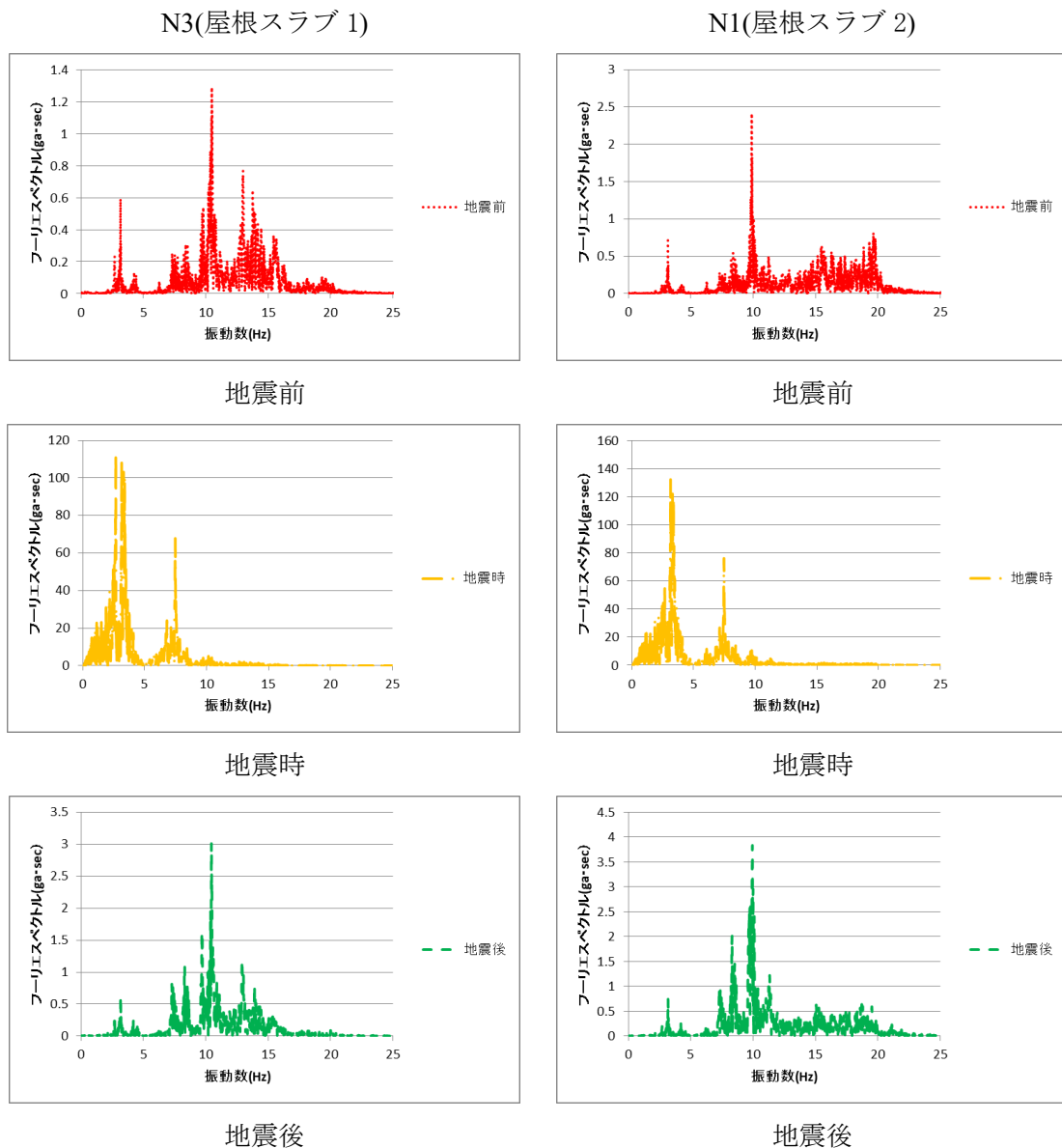


図 5-29 X 方向 N3,N4 のフーリエスペクトル

図 5-29 は屋根スラブ N3,N4 の X 方向でのスペクトルの変化である。同図においても図 5-28 と同じく、地震時のピークの低下がみられる。しかし、地震前、地震後での変化は見られないため、X 方向においては劣化が見られなかった。屋根スラブ N3,N4 の X 方向において、スラブ端部である N4 のほうが 20Hz 付近で少し動きやすいことがわかる。

Y 方向

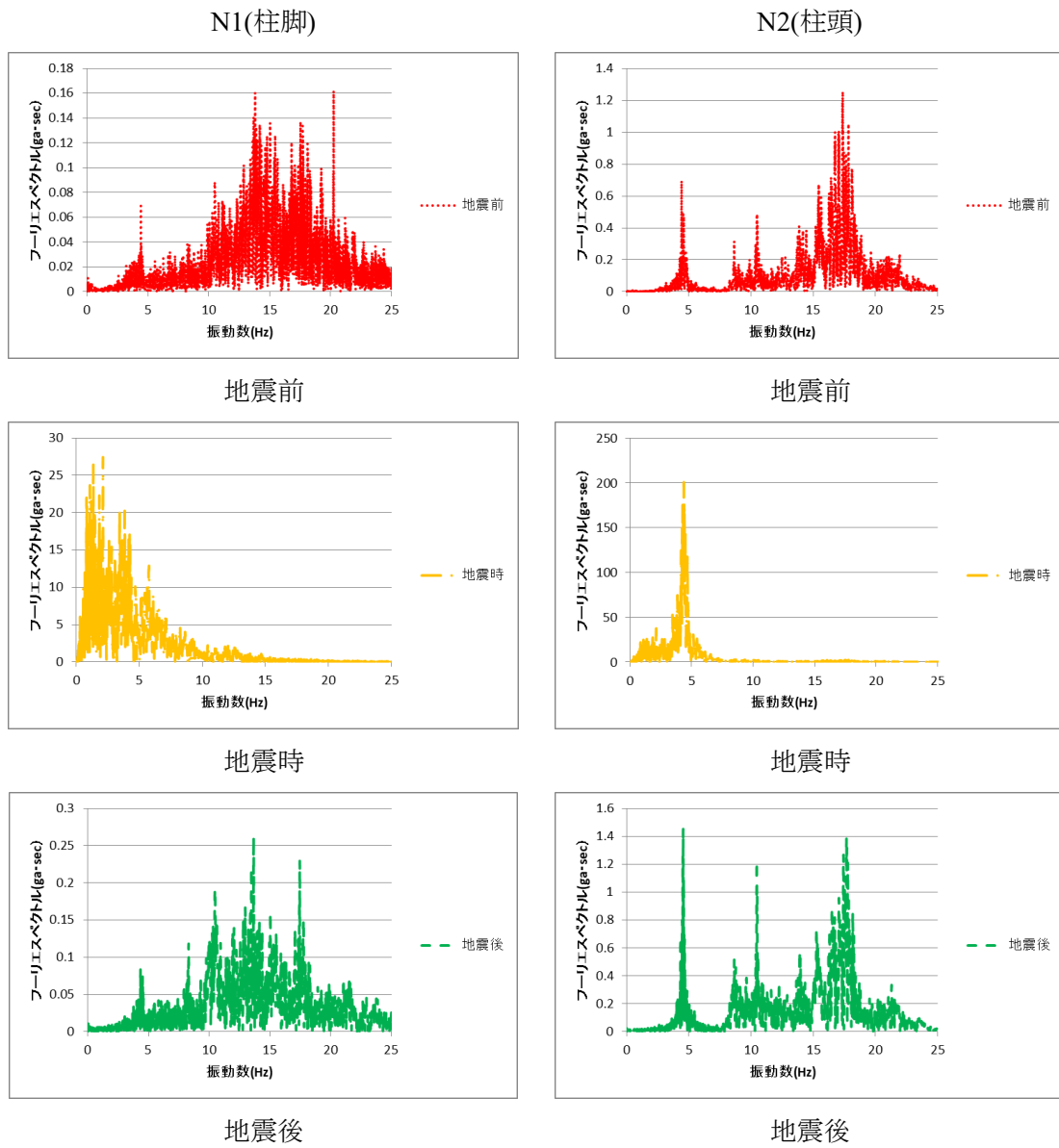


図 5-30 Y 方向 N1,N2 のフーリエスペクトル

図 5-30 は柱脚，柱頭の Y 方向でのスペクトルの変化を表している。同図より X 方向の結果と同じく，地震時は固有振動数が低くなるが，地震後には地震前に戻っており，劣化は確認できない。

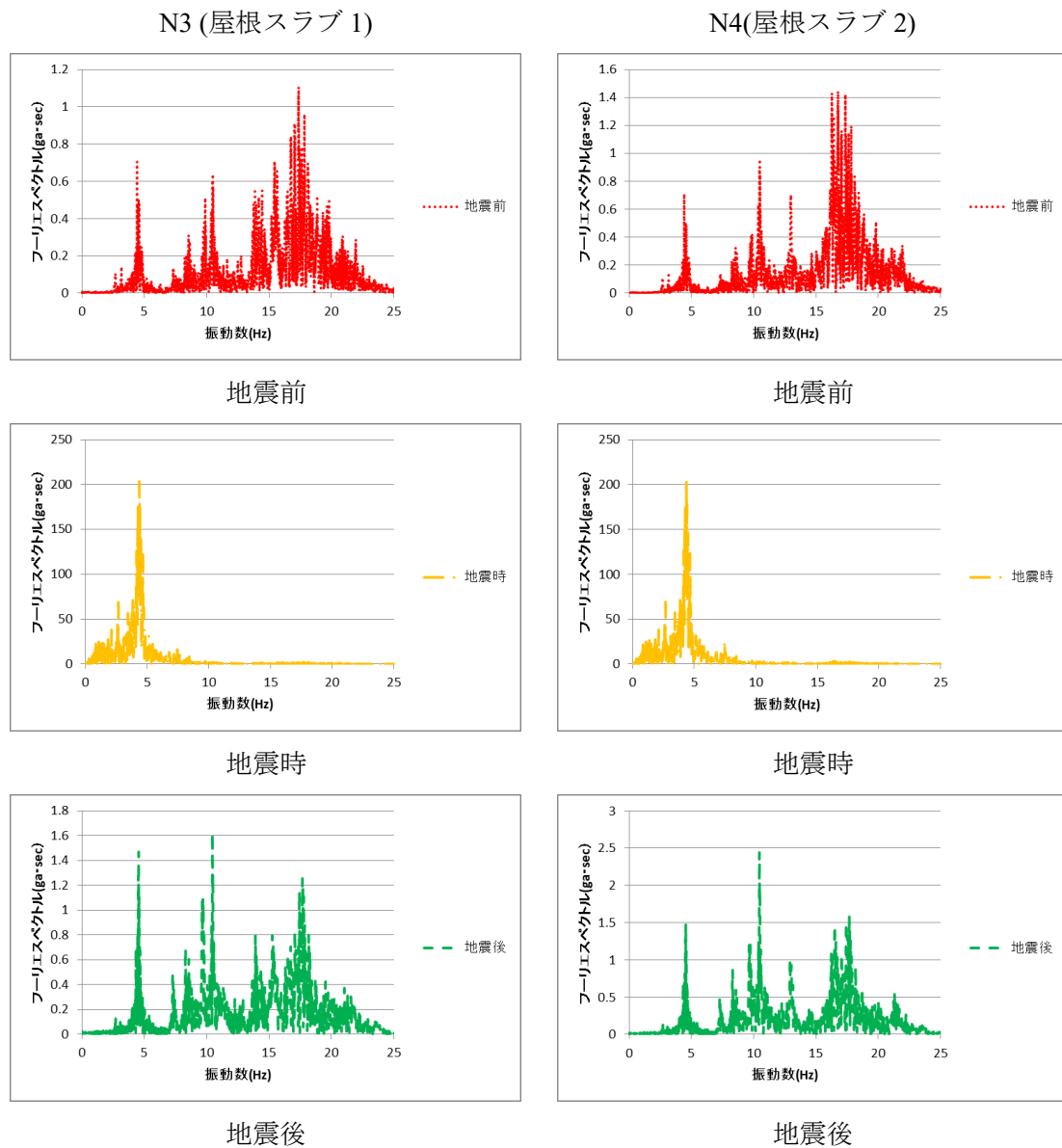


図 5-31 Y 方向 N3,N4 のフーリエスペクトル

図 5-31 は屋根スラブ N3,N4 の Y 方向でのスペクトルの変化である。同図においても、地震時のピークの低下がみられる。しかし、地震前、地震後での変化は見られないため、Y 方向においては劣化が見られなかった。X 方向では、屋根スラブ N3,N4 で少しスペクトルが異なったが、Y 方向では屋根スラブは同じ振動性状であることがわかる。

Z方向

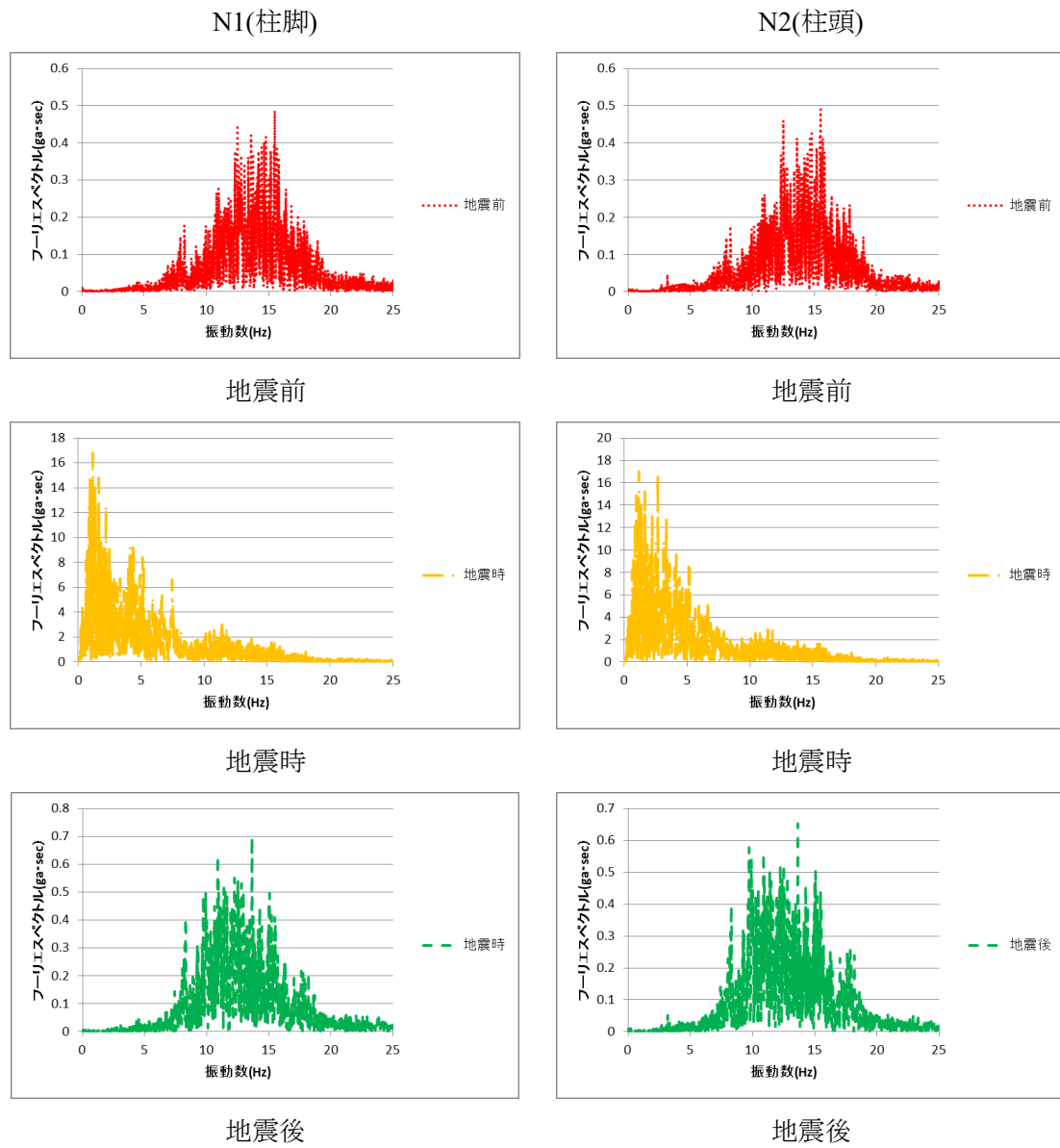


図 5-32 Z方向 N1,N2 のフーリエスペクトル

図 5-32 は柱脚、柱頭の Z 方向のスペクトルである。同図より Z 方向においては XY 方向と異なり、柱部材一体となって上下に振動していることがわかる。地震前後で N1,N2 とも 15Hz から 13Hz あたりまで低下しているように見える。柱脚柱頭ともに低下しているため、地盤から柱脚部分に疲労が蓄積し、劣化を起こしたと考える。

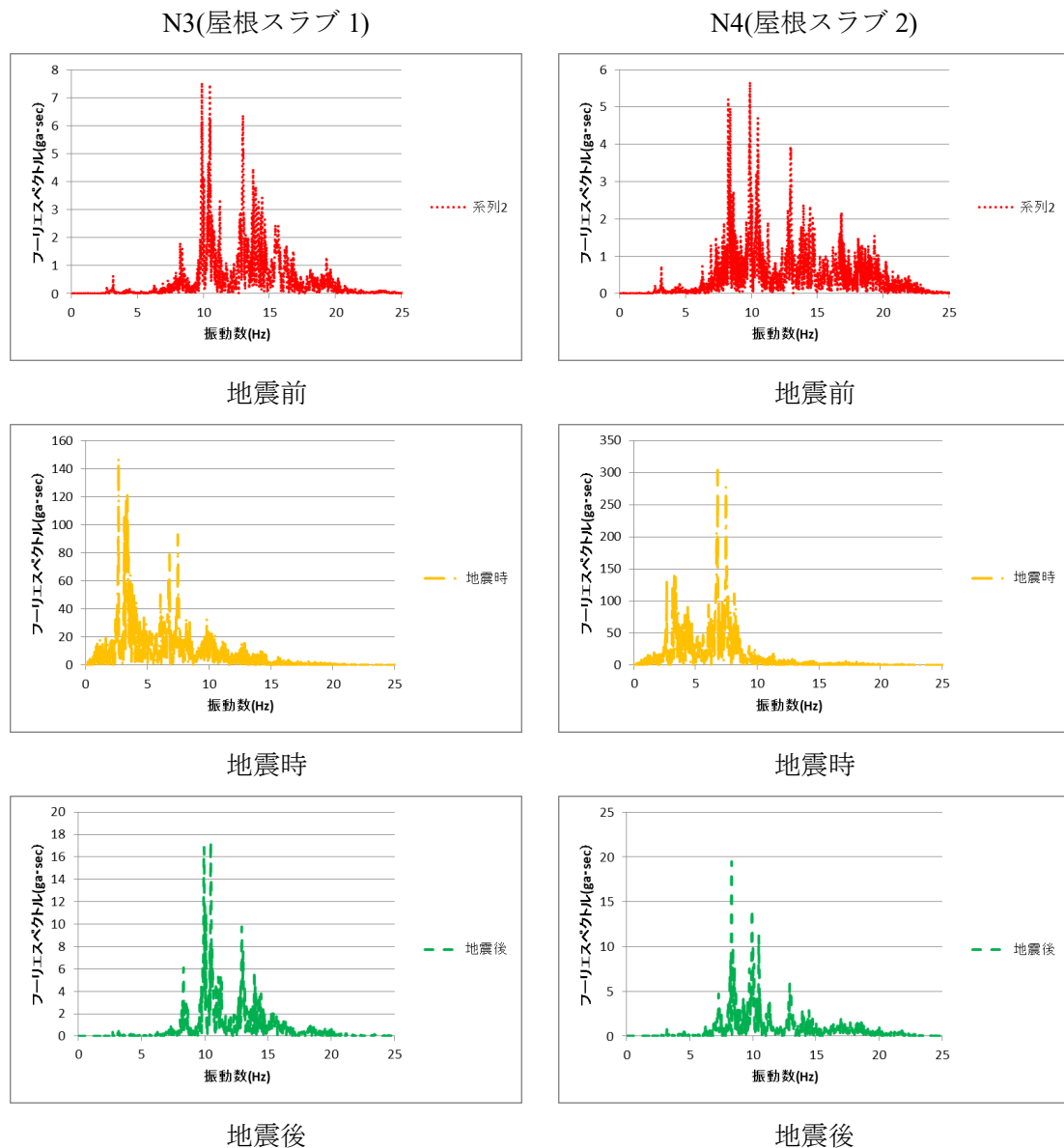


図 5-33 Z方向 N3,N4 のフーリエスペクトル

図 5-33 は屋根スラブ N3,N4 の Z 方向でのスペクトルの変化である。同図においても、地震時のピークの低下がみられる。しかし、地震前、地震後での変化は見られないため、Z 方向においても劣化が見られなかった。FFT による固有振動数を用いて各方向の地震前後の変化を検討した。どの箇所も地震時は大きくスペクトルが異なるが、地震前後では同じスペクトルとなっていたため、劣化は確認されなかった。固有振動数は明確に違いが出るため、地震時の変化を追うには管理しやすい指標であると考えられる。

5.6.3 柱脚(N1)を基準とした伝達関数での考察

図 5-34 から図 5-36 に N1 を基準とした伝達関数を示す。N1 である柱脚は破断の影響を全く受けないため、単純に地盤の影響を覗いた、柱頭、屋根スラブの固有振動数が見える。スペクトルの違いを見やすくするために、横方向に計測箇所の違い、縦方向に経時変化を示す。

X 方向での検討

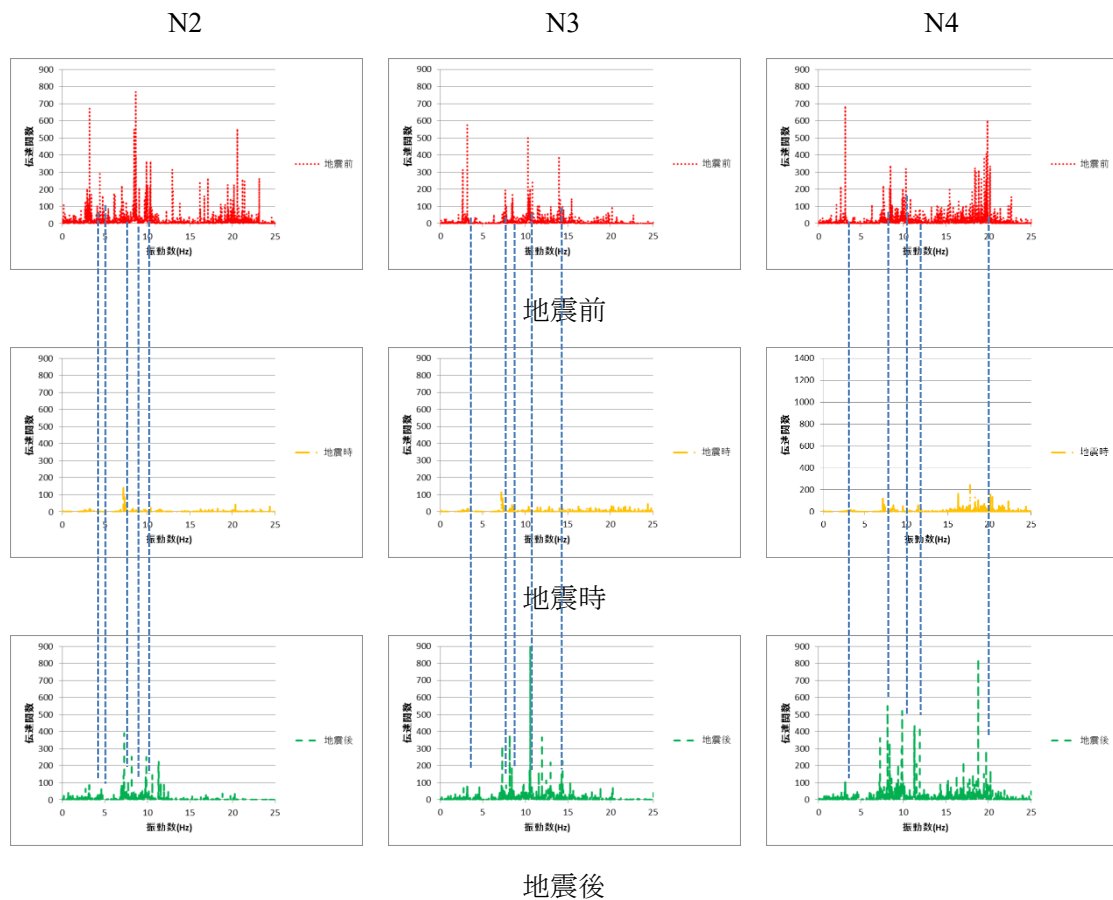


図 5-34 X 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-34 に示す通り、地震時が一番伝達関数が小さくなっている。おそらく地震時は基準としている柱脚のスペクトルが大きくなるため、伝達関数が小さくなるのだと考える。しかし、地震後には元のスペクトルに戻っているために問題は起こっていないことが確認される。

Y 方向での検討

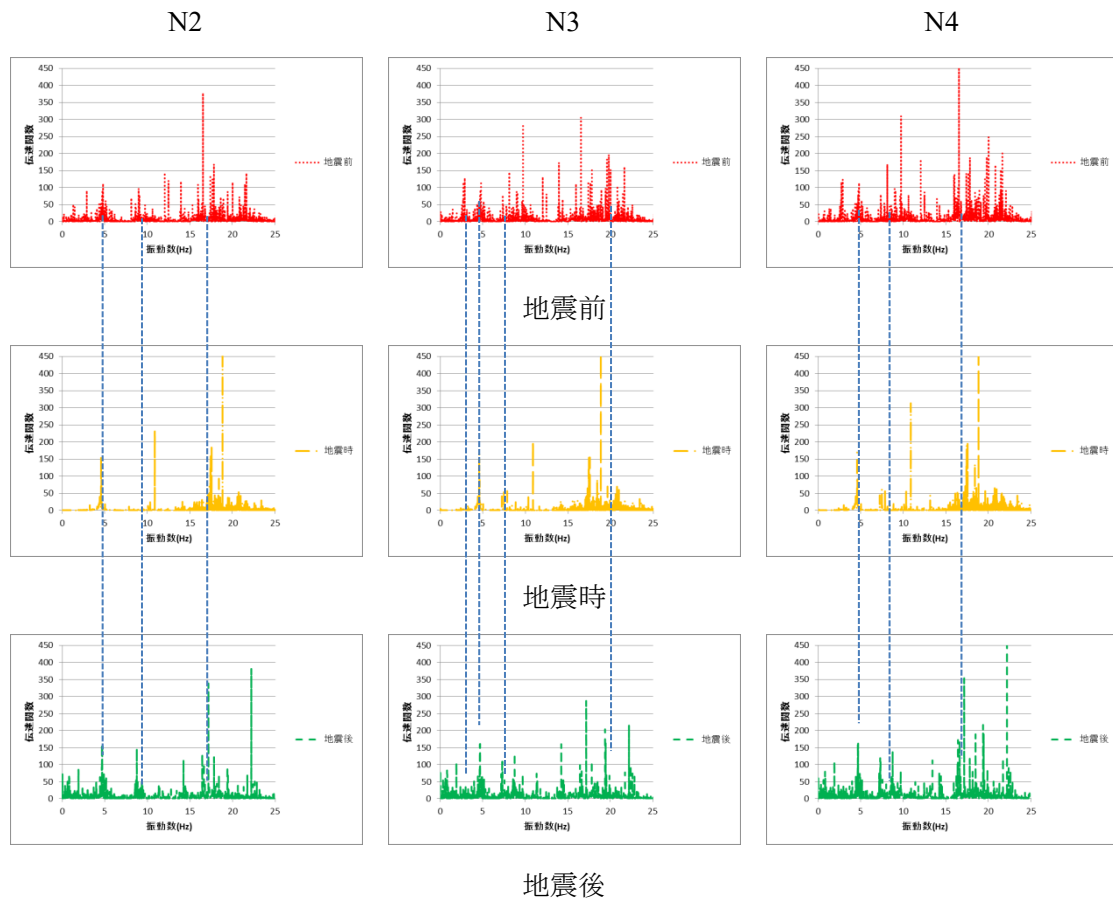


図 5-35 Y 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-35 は Y 方向での伝達関数の変化である。地震時は変化するものの、地震前後では変化が見られない。しかし、伝達関数は多く倍率が高くなる振動数があり、ピークが探しにくい為、固有振動数を用いる方が比較がしやすいのではないかと考えている、

Z 方向での検討

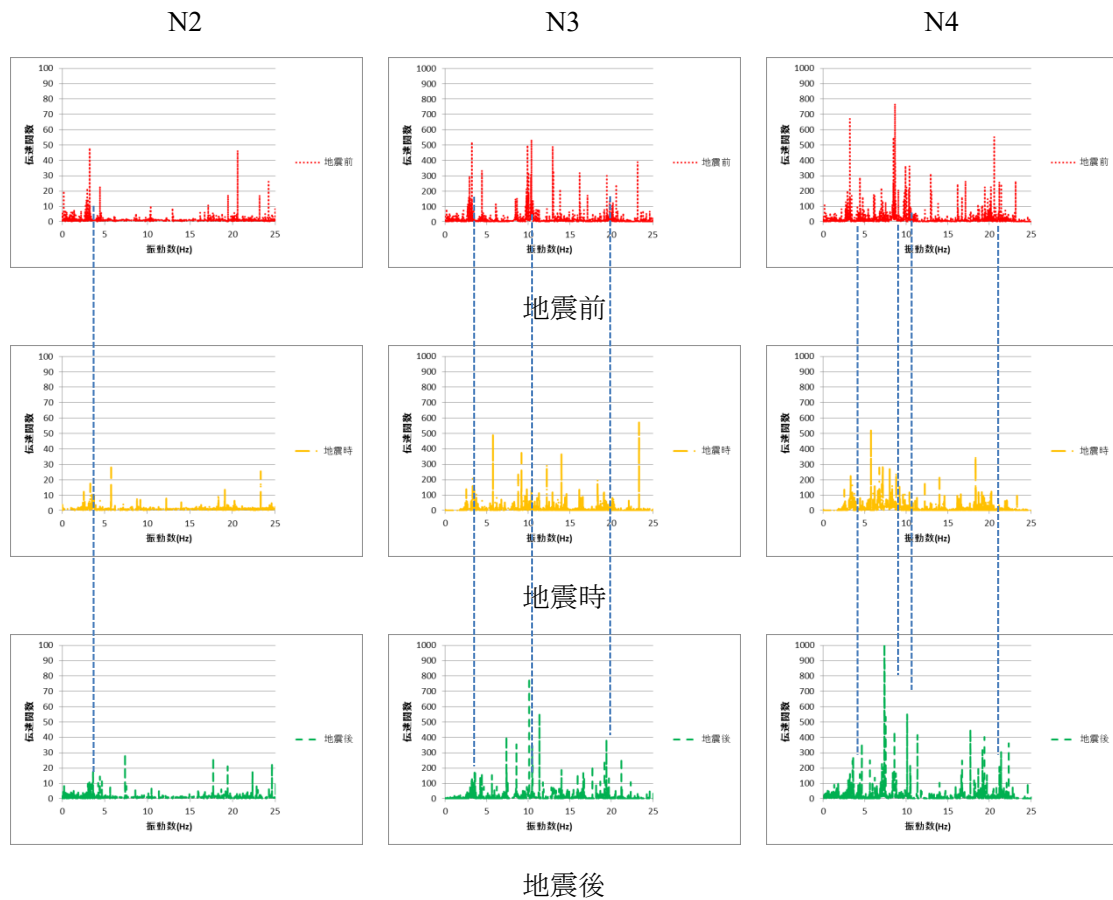


図 5-36 Z 方向の N1(柱脚)を基準とした伝達関数

図 5-36 を見ると、Y 方向と同じく一部の倍率が大きくなる振動数が多い。その為、周波数領域での管理では伝達関数より固有振動数を用いたほうがわかりやすい。同図より、屋根スラブ N4 で少しピークが低下しているように見える。しかし、上述の理由より変化が見えにくい。

5.6.4 クロススペクトルを用いた検討

伝達関数は割り算であるが、掛け算であるクロススペクトルの変化を図 5-37 から図 5-42 に示す。屋根スラブの変化を見たいため、N2(柱頭)を基準に、それぞれのクロススペクトルを算出した。

X 方向、柱とのクロススペクトル

N1(柱脚)とのクロススペクトル

N2(柱頭)とのクロススペクトル

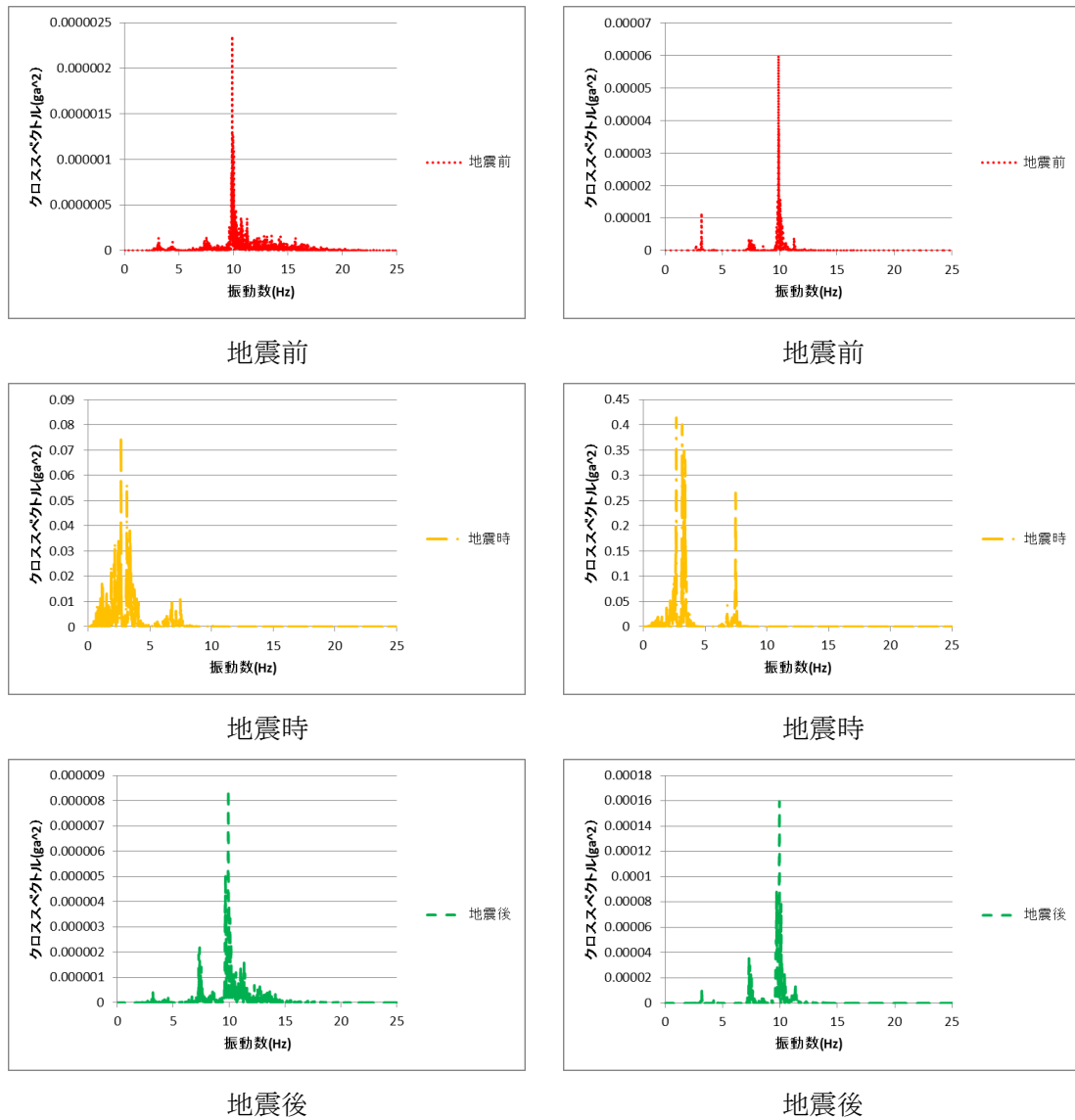


図 5-37 柱の X 方向でのクロススペクトル

図 5-37 より、N1,N2 とともに、地震時のスペクトルは似ているため、柱部材としては一体となって動いていることがわかる。また N1,N2 とともに地震前と後では変わっていないため、柱は損傷を受けていないことがわかる。

X 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

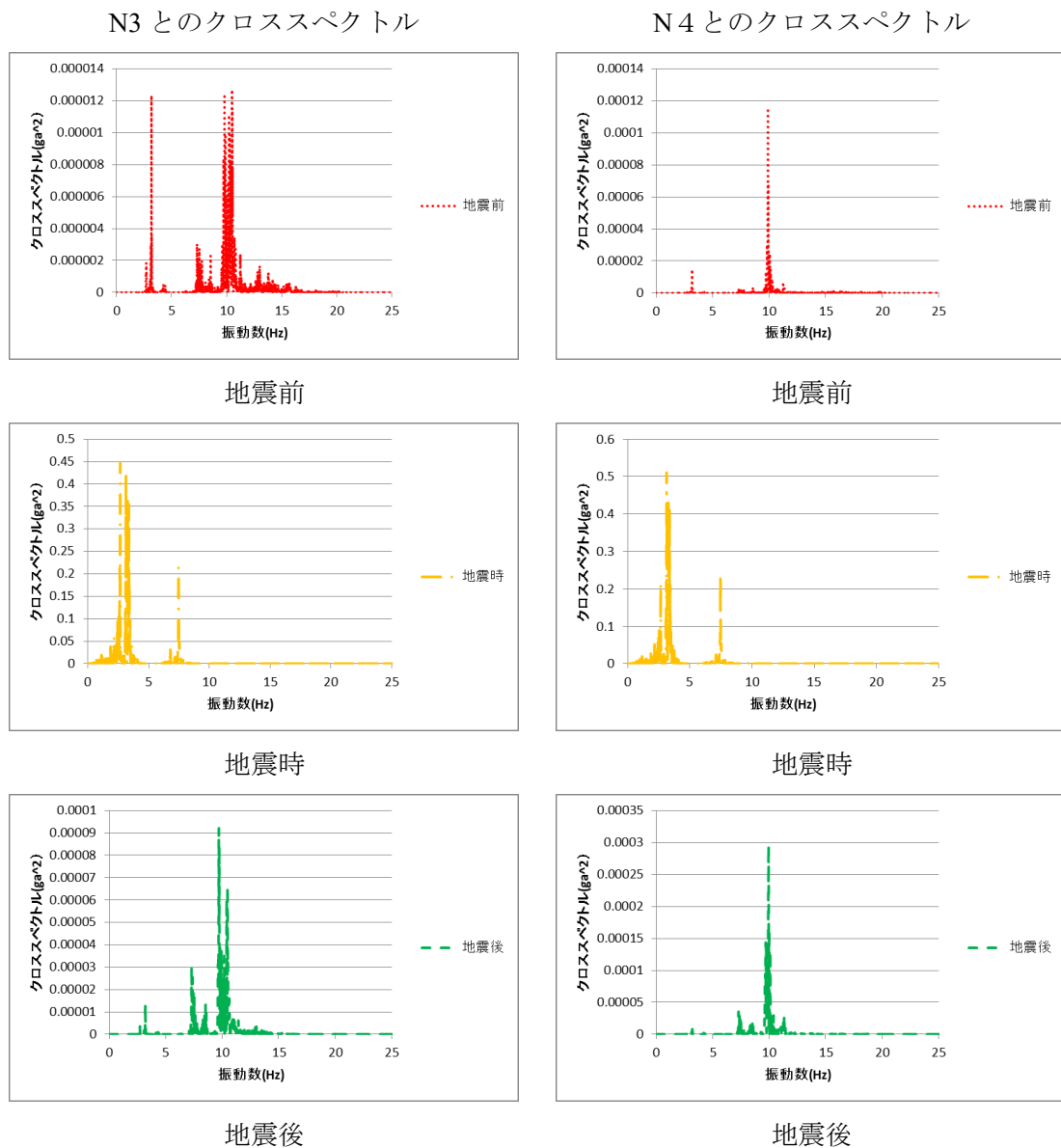


図 5-38 屋根スラブとの X 方向でのクロススペクトル

図 5-38 より柱部材と同じく, 地震時は 3Hz 付近で動きやすくなっているため, 柱頭部と屋根スラブは同じような振動特性を持っていることがわかる。N3, N4 ともピーク周波数は変化しておらず, N2 の結果と同じであるため, 地震後の劣化は見られない。

Y 方向, 柱とのクロススペクトル

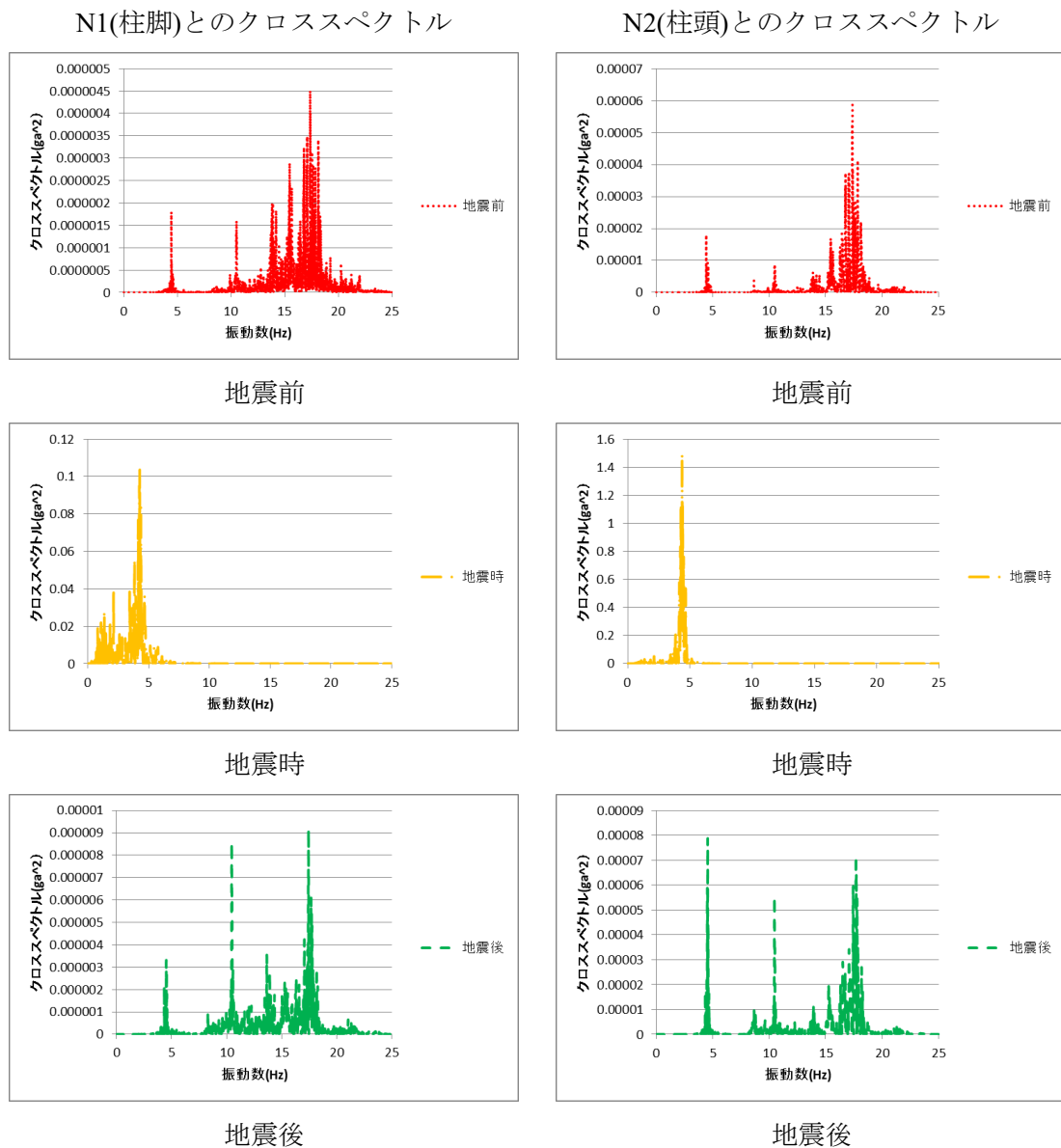


図 5-39 柱の Y 方向でのクロススペクトル

図 5-39 より, Y 方向においては, 4.5Hz のピークは変わらずに地震時にもピークを持っている。また, このときのクロススペクトルの大きさが他よりかなり大きくなっているため, 地震時に柱部材として 4.5Hz で揺れやすいことがわかる。しかし, 地震後のピークは戻っていることから, 柱の損傷は確認できない。

Y 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

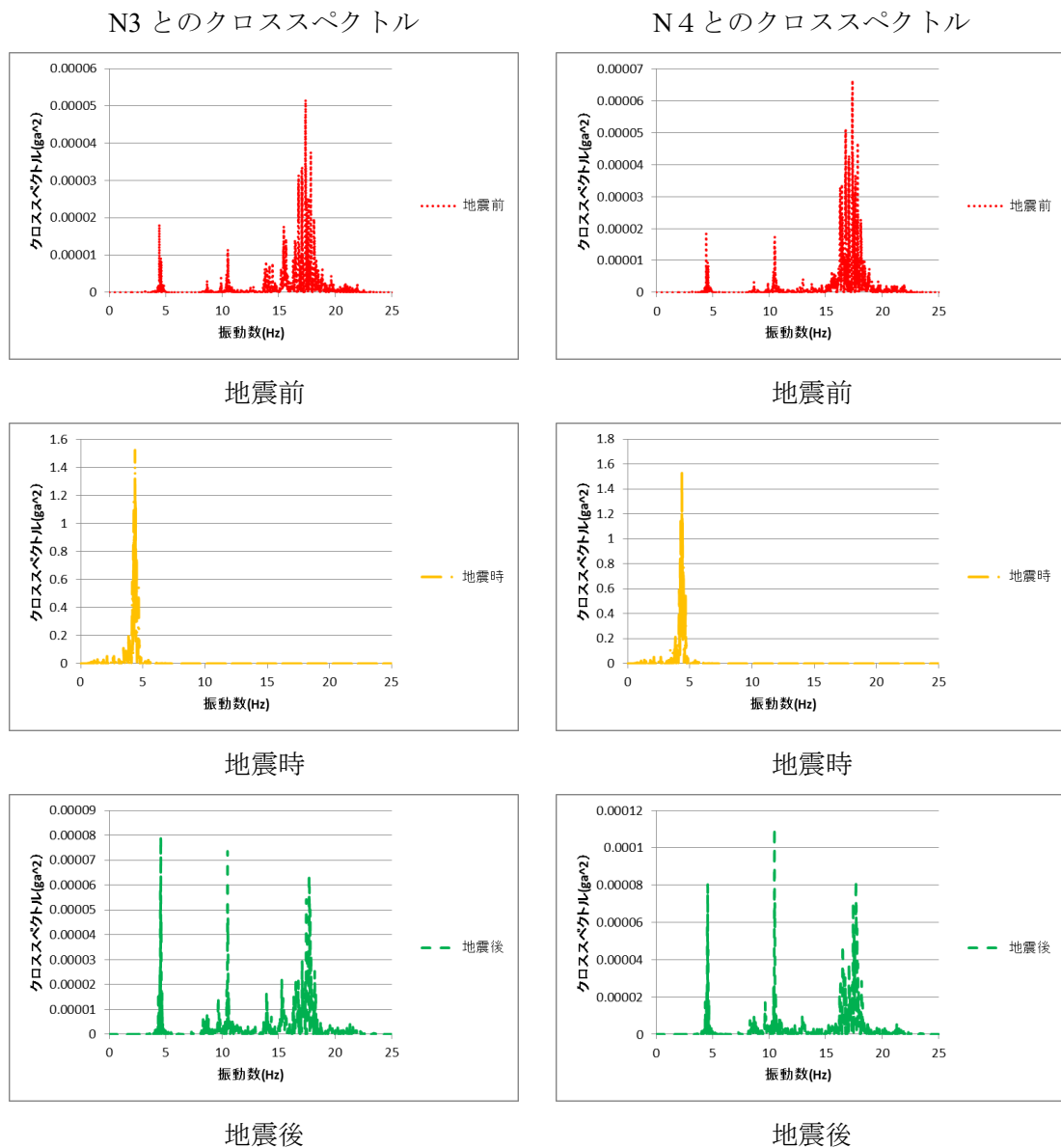


図 5-40 屋根スラブとの Y 方向でのクロススペクトル

図 5-40 に示す通り, 柱と同じく 4.5Hz で揺れやすいことがわかる。柱頭部の結果と変わりがないため, 屋根スラブ Y 方向にも問題は起こっておらず, 一体となって動いていることが確認できる。

Z方向、柱とのクロススペクトル

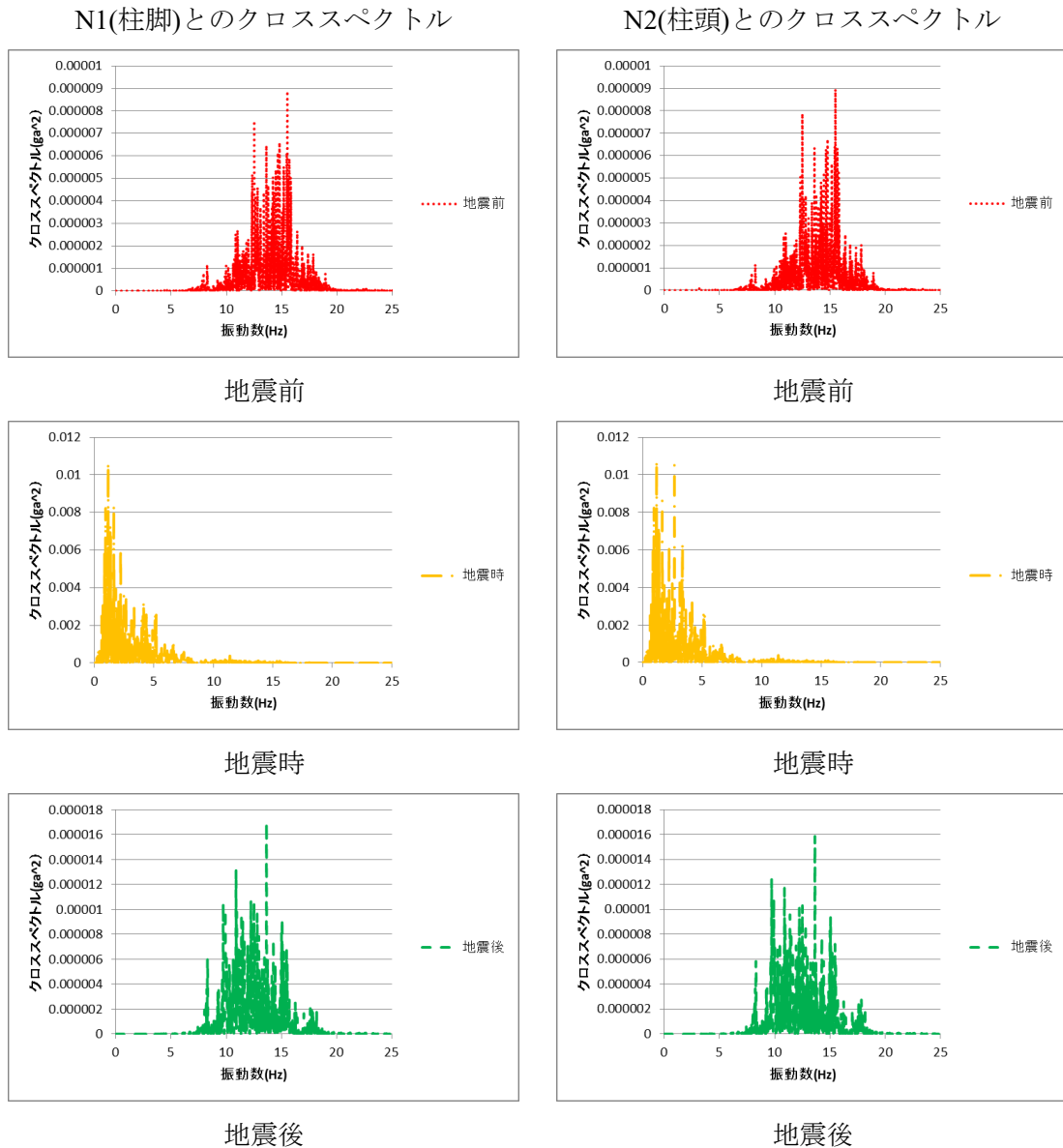


図 5-41 柱の Z 方向でのクロススペクトル

図 5-41 より、地震時は 1Hz 付近の低振動数域でピークを持っている。また、地震後ピークが 15Hz から 13Hz 程度に落ちている。しかし、N1,N2 の結果は同じことから、柱が損傷を受けているのではなく、高速道路自体の地盤面が弱った可能性が考えられる。

Z 方向, 屋根スラブとのクロススペクトル

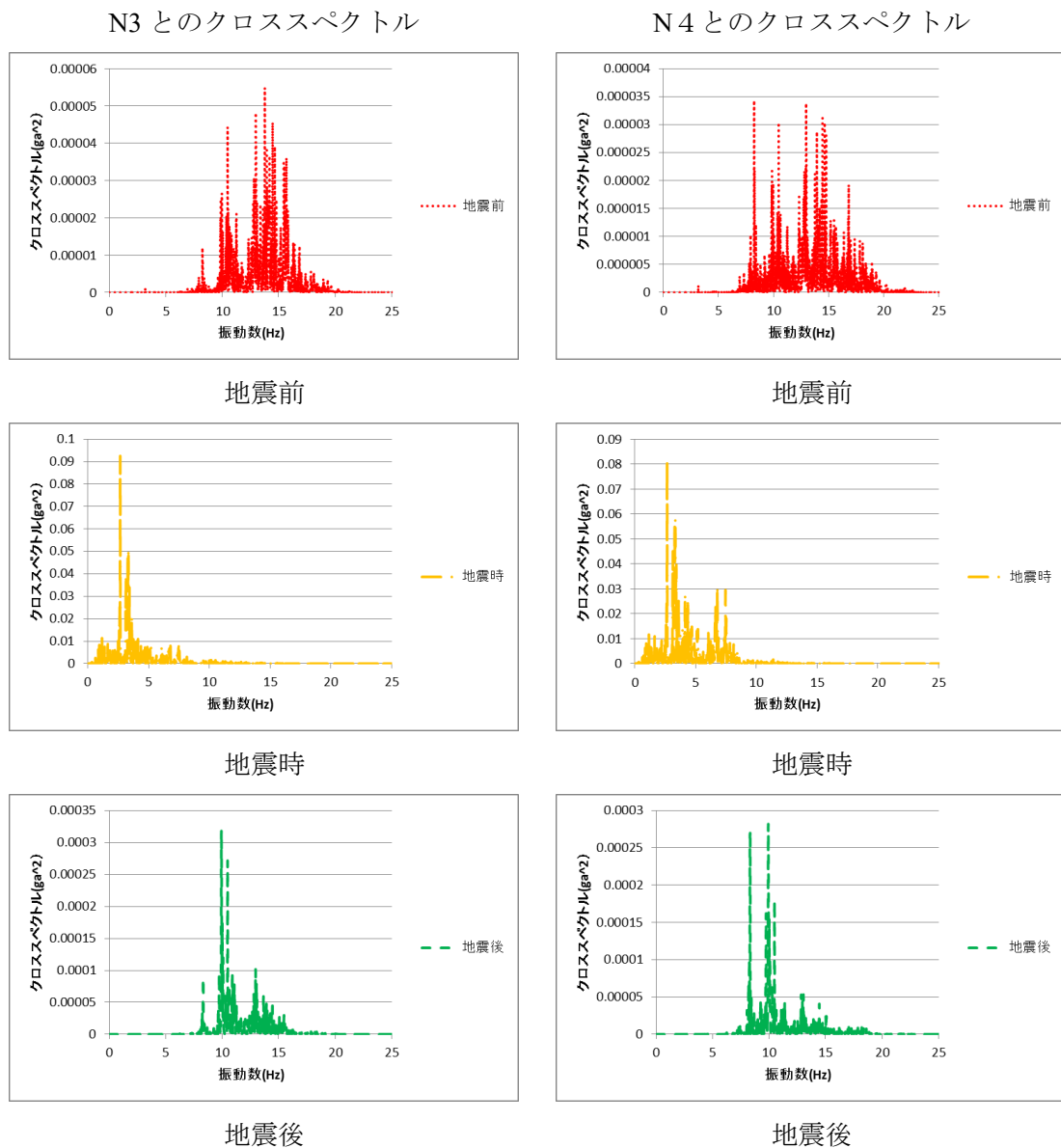


図 5-42 屋根スラブとの Z 方向でのクロススペクトル

図 5-42 より, 屋根スラブも地震後のピークが 15Hz から 13Hz に低下している。やはり, 地震により, Z 方向の性能が低下したと考えられる。

5.6.5 角度波形を用いた検討

各箇所の地震時の角度波形を図 5-43 から図 5-45 に示す。

X 方向

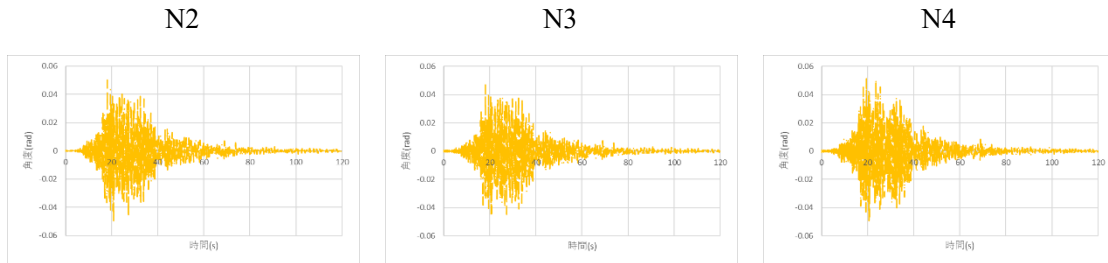


図 5-43 X 方向地震時の角度波形

Y 方向

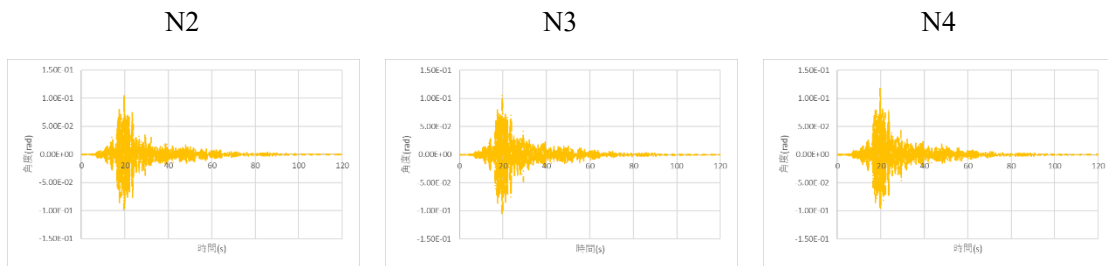


図 5-44 Y 方向地震時の角度波形

Z 方向

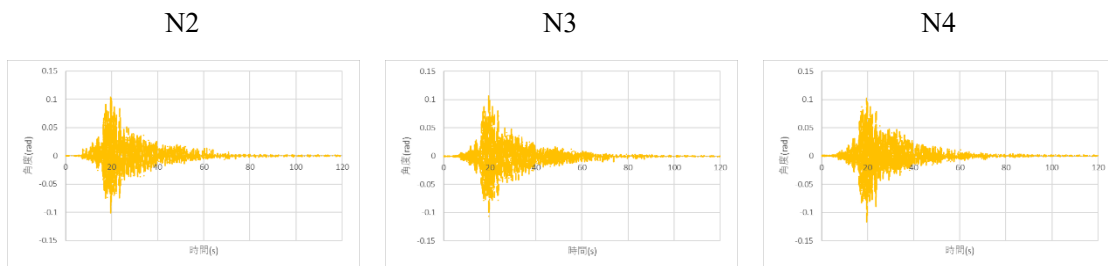


図 5-45 Z 方向地震時の角度波形

図 5-43 から図 5-45 より、各箇所地震発生前と後で角度は同程度に落ち着いている。そのため、損傷による部材の劣化また、それに伴う挙動の変化はないと考える。また、各方向 N2,N3,N4 はおおそ同じ角度で動いているため、一体となって動いていることがわかる。

5.6.6 層間変形角を用いた検討

図 5-46 に柱脚-柱頭間の層間変形角の変動を示す。

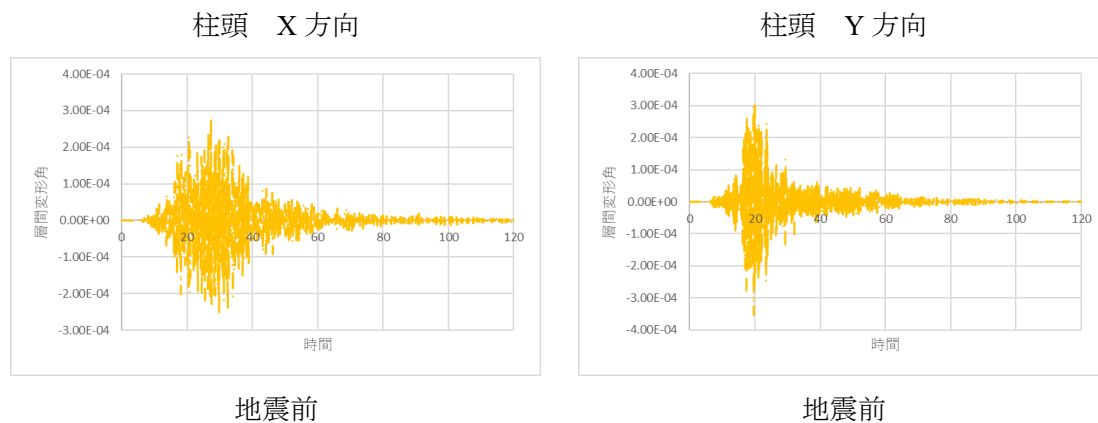


図 5-46 地震前後での層間変形角

同図より、層間変形角も地震前後で同じ値に戻っている。その為、柱の劣化は認められない。また、層間変形角の最大値が約 3000 分の 1 であるため、許容範囲内である。

5.6.7 リサージュを用いた検討

図 5-47 に地震時と地震後の各箇所リサージュ図を示す。

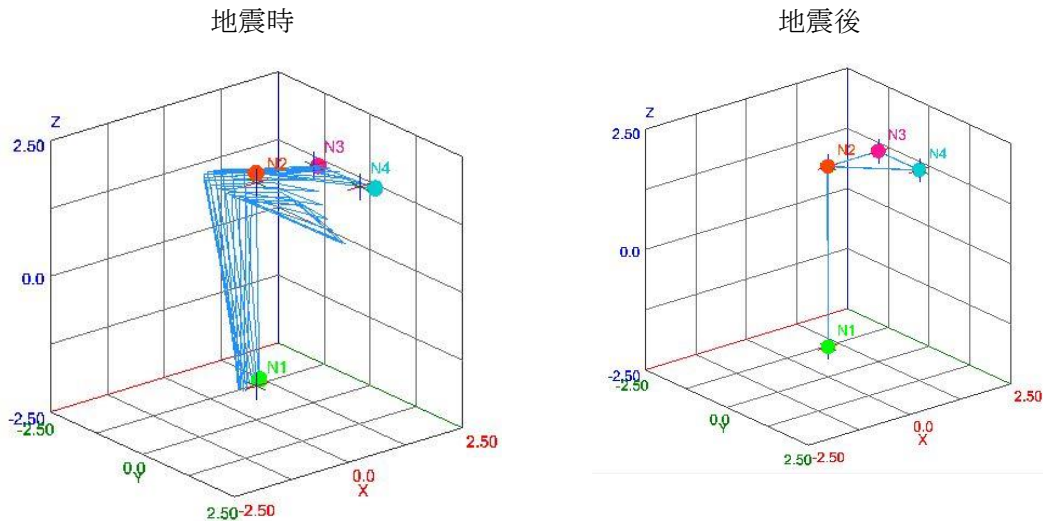


図 5-47 地震前後のリサージュ

図 5-47 より、地震時は各部が大きく動いていることがわかる。また、地震後のリサージュも同じスケールで載せている。この比較より、どの程度地震時が動きやすいかがわかる。視覚として動きを確認できることはやはり、建築の知識がない人間でも劣化検知ができるため有効な指標であると考ええる。

この指標の改良点として、リサージュ画面に閾値となる線を引いておくことを提案する。その線を超えると色が変わって表示されると、知識がない人間でも直感的に危険であると視覚で認識できるため、管理しやすいと考える。

5.6.8 千葉地震 まとめ

本節では東名川崎トールゲートの千葉地震時での計測波形を各指標で解析した結果を示した。得られた知見を以下にまとめる。

1)固有振動数を用いた考察

XY 方向、各箇所において、地震時には大きくピークが下がるが、地震後には元に戻るため、損傷は起こっていないと考える。しかし、Z 方向においてピークが 15Hz から 13Hz に低下している。柱脚部もピークが落ちていることから、地盤もしくは柱脚部の劣化であることが分かった。ピークが明確に見れるため、劣化検知指標として使いやすい。

2)伝達関数を用いた考察

上記の 1)固有振動数と同じく、Z 方向のみ少しピークが低下していた。解析指標としては、伝達関数は多くの振動数で倍率が大きくなるため、ピークが検知しづらく、固有振動数を用いたほうがわかりやすいと考える。

3)クロススペクトルを用いた考察

上記の 1),2)と同じく、Z 方向でのピークが 15Hz から 13Hz に落ちている。伝達関数より明確にピークがたつことから、伝達関数よりは劣化検知が行いやすいと考える。

4)角度波形を用いた考察

地震前後で角度波形の変化は見られなかったため、各箇所地震による劣化は起こっていないと考える。

5)層間変形角を用いた検討

上記 4)角度波形と同じく、地震前後での変化は見られなかった。また、上記 4),5)の指標は、おおよそ同じ視点からの考察である。角度波形はセンサー一つで変化がわかり、劣化が起これると目で動く角度が大きくなるため検知ができる。層間変形角は法律で定められた閾値があるため管理がしやすいが、建物の階高がわからなければ用いることができない。計測対象建物によってこの二つの指標は使い分けてよいと考える。層間変形角は箱ものの建物であれば各階一つずつ計測するのみでよいため問題がないが、トールゲートのように屋根スラブが大きい建物だと屋根スラブの傾きも管理したいことから角度波形を用いたほうが詳細まで管理できるのではないかと考える。

6)リサージュ

この指標は対象建物の状態把握が視覚的に行えるため、必ず残しておくべきと考える。許容できる範囲を定め、それ以上大きく動けばリサージュの色が変わるようにすれば、なおのこと建築の知識がない人間でも簡単に管理が行えるのではないかと考える。

参考文献

1)NEXCO 東日本

<https://www.e-nexco.co.jp/renewal/status/>

2)国土交通省九州地方整備局

http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/bousai_joho/tecforce/pdf/kensei08.pdf

3)首都高技術株式会社

<https://www.shutoko-eng.jp/business/architecture.php>

第6章 結論

第 I 編では各種建物の状態検査およびモニタリング技術について検討した結果をまとめた。本編では建物の検査を行いながら、検査における常時微動計測の有効性確認、各劣化状態を適切に評価する指標の確立を目標に解析、検討を進めた。

各章にて得られた知見を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的を示し、本論文の構成を示した。

第2章 振動計測システム及び解析指標の概要

II 編で用いるセンサ概要、解析概要を述べた。

第3章 広島旧陸軍被覆支蔵倉庫の常時微動計測

1号棟を対象に検査を行った。①本建物及び側廊部の固有振動数の確認、②はらみが確認された3F壁と床の一体性確認、③外壁レンガの剥離確認、④不同沈下の確認、⑤不同沈下による各階柱への影響、⑥不同沈下による各階壁への影響を検査した。

①本建物及び側廊部の固有振動数の確認において、本建物は南北方向においてきれいな一次モードをする振動数がなかった。また、鉛直方向でのフーリエスペクトルが他方向より大きくなることから、基礎が仕事をしておらず、地盤に乗っているだけの状態であると推測した。また、本建物3Fの東西には吹き抜けがあるため、3Fのみ6~8Hzで大きく揺れやすくなっている。

側廊部は、本建物より少し固有振動数が高いことから、接合部である2Fのベランダ部分で両方の振動数をもち、共振リスクが高くなっている可能性を示した。

②はらみが確認された3F壁と床の一体性確認において、壁と床の固有振動数は同じであった。そのため、3Fの北壁、南壁と床は一体となっていることが分かった。しかし、相対変位を用いると、南壁と比べて北壁の方が変位量が大きくなっていることが分かった。北壁には大きなひび割れが多く入っていたので、それが原因だと考える。

③外壁レンガの剥離確認については、打音検査と常時微動計測2つの方法を用いて検査を行った。打音検査によって明確に剥離が起こっている箇所、目視では検査できない剥離箇所を検知することができた。

④過去の計測より不同沈下が確認されていたため、北側基礎と中央部、西側基礎と中央部、北側平面の3パターンで計測を行い、不同沈下の振動性状への影響を考察した。

北側平面計測でのFFTや伝達関数の結果、鉛直方向において、外周部の基礎箇所と平面中央部で大きくフーリエスペクトルが異なっていた。中央部付近のみ5Hz付近でスペクトルが大きくなっており、上下動を起しやすくなっていることがわかった。

リサージュでは、自由振動のものからやはり、平面中央が大きく動く様子が見られた。また、西側基礎および北側基礎を比べて結果、北側基礎は水平に上下移動を行っているのに対し、北側基礎は傾きを持って動いていることが確認された。長辺方向である西側基礎は中央部に行くほど大きな沈下が起こっていることがわかった。

また平面中央部のみ動きやすい4.5-5.0Hzの振動を取り出してリサージュを描くと、やはり中央部のみが大きく上下動をしていることが確認できた。

⑤不同沈下による各階柱への影響として、中央部の柱と基礎梁上の柱の比較を行った。FFTより南北方向の微動については、中央部、北側基礎とともに3F床の上下で6.3Hzにピークを持っていることがわかった。しかし、中央部と北側基礎上でピークとなる振動数におけるフーリエ振幅が大きく異なっていることから、中央部のほうがかなり6.3Hz付近で揺れやすい。これは3F床各部の拘束度の違いが影響を与えているのだと考えている。

東西方向では中央部の柱計測のみ6Hz以降で計測箇所のスペクトルのピークが見られた。南北方向と同じく吹き抜けの影響が中央部の方が大きいためであると考えている。

鉛直方向では中央部柱において、1階柱から3階柱下部まで4.0~6.0Hzにピークが見られた。不同沈下と同じピークであるため、地盤の揺れやすさが建物に伝達していることが理由だと考える。

また3F柱上部のスペクトルが他の計測箇所のものとは大きく異なっている。これは3F柱上部は小屋梁とつながっており、フレームの振動特性を示しているのだと考える。3階柱上部と下部で振動性状が大きく異なるため、ダメージが蓄積され、3階柱には輪切りひび割れが多く見られた。リサージュをみても中央部は3F柱下部、上部で挙動が異なっており、3F柱へのダメージの蓄積が確認できた。

⑥不同沈下の各階壁への影響の検査として、1,2,3Fの壁を対象に常時微動計測、加振計測を行った。クロススペクトル、リサージュを用いると3F壁のみひび割れによって動きやすくなる南北方向、鉛直方向で、加振前後での違いが現れた。リサージュより、外側端部固定でひび割れのある中央部が大きく振れるように動いていたため、3F中央部柱とおなじくかなり劣化が進行していることがわかった。

2F壁の付け根部分にもひび割れは入っていたが、3F壁のように違いが見られなかったことから、貫通するほどのひび割れでなく、3F壁に比べるとまだ劣化が進行しきっていないことがわかった。不同沈下の各階柱への影響の結果と合わせて、まずは不同沈下を対策し、補修する場合は上階中央部より行っていく必要があると考える。

次に、診断指標に対する私見である。

まず①常時微動の有効性について、従来はセンサを用いた建物の検査は地震をトリガーとしているため、地震後の検査が主である。しかし、本章の計測事項はすべて検査に行き、その時時の常時微動を用いて計測を行っている。外壁の剥離に関しては常時微動では検知できなかったが、建物の振動性状の検査はすべて結果が出た。

よって、常時微動を用いても建物各部の検査は可能であるということを示せたと考える。常時微動を用いた計測の利点は、いつでも検査できることに加え、地震前に計測することで対策を取れることにもある。地震をトリガーとしていると、その地震で倒壊する可能性もある。そのような危険性を犯す必要もなくなるため、この検査方法は利点が多く、広めるべき方法であると考ええる。

次に解析指標としての②リサーチの有効性確認である。3章では多くの節でリサーチを用いて考察を行った。リサーチによって実挙動を可視化することで考察がはかどったものがあるため、やはりこの解析方法は有効活用すべきであると考ええる。

利点として、動画で動きを確認できるため、見たい箇所の動きを瞬時に確認できる点、バンドパスフィルターをかけることにより見た振動数の波のみを切り出し、不同沈下の節のように振動の原因を探れるなどが挙がる。

また、学会など発表の場で、建物を全く知らない人に簡単に振動の様子を示せることも挙がる。数秒の動画として動きを先に見せるだけで動きを把握してもらうことができ、その後の内容理解が捗る。

このように利点が多くある解析方法であるため、本研究を基盤に普及すべきであると考ええる。

最後に③外壁レンガの剥離検知技術についてである。本章では外壁レンガを対象に、打音検査、常時微動計測を行い、剥離検査や、検査技術の高度化を目指した研究も行った。

まず、打音検査についてであるが、ピーク数端数、図心周波数、加振から最大音圧までの時間、減衰率(指数)すべての指標で剥離を検知することができた。そのため、レンガの剥離にも外装タイルの剥離検知技術が活用できることがわかった。

常時微動計測だが、計測波形を振動数領域、時間領域どちらで解析しても剥離箇所を剥離と判断できる指標が発見できなかった。そのため、常時微動計測による計測では、湿式仕上げであるレンガの剥離検知は厳しい。

常時微動計測は湿式仕上げの剥離検知には用いることができないという、常時微動計測の限界も示すことができた。

第4章 石垣新市役所の常時微動計測

4章では石垣新市役所で今後行うモニタリングのための事前検査を常時微動計測を用いて行った。センサ設置箇所の制約から、構造設計者が最も地震時の振動が大きいと想定している箇所(東側)でモニタリングができないため、振動が大きいと想定される東側とモニタリング箇所である西側及び中央部との相違を把握しておくことで、モニタリング箇所を基準とした各箇所の振動倍率を求め、今後の維持管理に活用することを目標としている。

検査として①モニタリング箇所2箇所と危険箇所1箇所計3箇所の高さ方向計測を行った。フーリエスペクトルより、東西方向より南北方向の方が固有振動数が多く共振リスクが高いことがわかった。危険と想定される東側計測箇所が一番固有振動数が多いため、共振リスクの面からやはり危険度が一番高く、モニタリング箇所である中央部3Fのみ12Hzで揺れやすいことも明かにした。相対変位の分析より、3Fの平面でのねじれ回転運動の危険性が見られた。

次に②屋上を用いた建物全体の動きの確認である。①と同じ傾向が見られ、危険箇所である東側では平面で6,8,12Hzで揺れやすくなっており、中央部では8,12Hzで鉛直方向に揺れやすいことが分かった。

最後に③2Fを東西に分けて半分ずつの動きを確認した。西側も東側もリサージュより回転運動をしている様子が見られた。そのため、2F以上の階はすべて東西中心を支点に回転運動をしていることが確認できた。

3計測全てで2Fより上の階の東西端の回転運動が確認されたため、大きな地震が発生した場合には、1階柱梁が大きくダメージを受ける可能性が高い。今後の定期検査では1階柱梁を検査対象にしたほうが良いと考える。

モニタリングの提案として、①3箇所高さ方向計測の伝達関数を用いた分析より、中央部を基準としたものは西側を基準としたものより、ピーク振動数での伝達関数が大きくなっていることから、東側と近い振動をしているのは西側ということになる。そのため、危険箇所の管理は西側のモニタリングデータを用いて行ったほうが良いと考える。

②屋上を用いた建物全体の動きの確認より、建物の東西端は回転運動をすることから、や西側モニタリング箇所で回転運動を管理、中央部は鉛直方向に揺れやすいことから中央部のモニタリングで鉛直方向を管理することが合理的であると考ええる。

③2Fを東西に分けて半分ずつの動きより、それぞれのモニタリング箇所を基準とした端部の伝達関数を求め、揺れの倍率を算出したため、今後のモニタリング時には計測されたフーリエスペクトルを伝達関数倍することで実挙動を推測することができると述べた。

第5章 トールゲートの振動モニタリング

5章ではトールゲートを対象とした、長期モニタリング時に監視すべき指標の選別を行った。本章では、まずPC鋼線破断実験の結果を用いて屋根スラブの劣化を検知できる指標を確認した。次に2021年10月に起こった千葉地震時の東名川崎トールゲートでの計測波形を解析した。この計測では、地震による劣化有無の確認と、各指標の有効性確認を行った。

まずPC鋼線破断実験において、①伝達関数、②クロススペクトル、③角度波形を用いて解析を行った。

①伝達関数を用いた考察より、屋根スラブXY方向で新たに5Hzにピークができたことから、屋根スラブが平行移動しやすくなったことがわかる。また屋根スラブ鉛直方向であるZ方向のピーク振動数が低下していることから、剛性が低下していることが分かった。

②クロススペクトルを用いた考察より、破断前後で大きくスペクトルが変化することが分かった。伝達関数と比べ、明確にスペクトルが変化するため、クロススペクトルを用いたほうが劣化を検知しやすいと考える。

③角度波形を用いた考察では、各計測箇所、各方向変化が出なかったため劣化検知指標として用いることは難しいということが分かった。

伝達関数は分母とする計測箇所と分子とする計測箇所が同じ劣化を起こした場合、劣化を検知できない。それに対し、クロススペクトルは分子分母両方の劣化でもスペクトルに変化が出るため、劣化の検知漏れを回避することができると考える。

次に千葉地震時の東名川崎トールゲートでの計測波形の解析である。本解析は①固有振動数、②伝達関数、③クロススペクトル、④角度波形、⑤層間変形角、⑥リサージュを解析指標として考察を行った。

①固有振動数を用いた考察より、XY方向、各計測箇所において、地震時には大きくピークが下がるが、地震後には元に戻るため、損傷は起こっていないと考える。しかし、鉛直方向であるZ方向においてピークが15Hzから13Hzに低下した。柱脚部もピークが落ちていることから、地盤もしくは柱脚部の劣化であることが分かった。ピークが明確に見れるため、劣化検知指標として使いやすいと考える。

②伝達関数を用いた考察では、①固有振動数の結果と同じく、Z方向のみ少しピークが低下していた。解析指標としては、伝達関数は多くの振動数で倍率が大きくなるため、ピークが検知しづらく、固有振動数を用いたほうがわかりやすいと考える。

③クロススペクトルを用いた考察においても、上記の①、②と同じく、Z方向でのピークが15Hzから13Hzに落ちている。伝達関数より明確にピークがたつことから、伝達関数よりは劣化検知が行いやすいと考える。

④角度波形を用いた考察より、地震前後で角度波形の変化は見られなかったため、各箇所地震による劣化は起こっていないと考える。

⑤層間変形角を用いた検討では、上記④の角度波形と同じく、地震前後での変化は見られなかった。角度波形、層間変形角という指標は、おおよそ同じ視点からの考察である。角度

波形はセンサー一つで変化がわかり、劣化が起こると一目で動く角度が大きくなるため検知ができる。層間変形角は法律で定められた閾値があるため管理がしやすいが、建物の階高がわからなければ用いることができない。計測対象建物によってこの二つの指標は使い分けてよいと考える。層間変形角は箱ものの建物であれば各階一つずつ計測するのみでよいため問題がないが、トールゲートのように屋根スラブが大きい建物だと屋根スラブの傾きも管理したいことから角度波形を用いたほうが詳細まで管理できるのではないかと考える。

⑥リサーチをもちいた考察より、この指標は対象建物の状態把握が視覚的に行えるため、必ず残しておくべきと考える。許容できる範囲を定め、それ以上大きく動けばリサーチの色が変わるようにすれば、なおのこと建築の知識がない人間でも簡単に管理が行えるのではないかと考える。

以上をまとめ、固有振動数、クロススペクトル、角度波形、リサーチは状態の変化をとらえやすいことから残すべき指標であると考え。

以上、建物の診断技術の向上を図り、常時微動計測の有効性確認、各種解析指標の利点や活用方法を提案した。

次頁よりⅡ編、建築部材の診断技術向上を目指した研究成果を示す。

第Ⅱ編

第1章 序論

1.1 はじめに

日本の建築に対する考え方は「スクラップ&ビルド」から「ストック&リノベーション」に変化してきている。ストック&リノベーションの世界の実現には建物の長寿命化が重要になり、長寿命化をなすためには定期検査を行い、弱い箇所を適切に補修する必要がある。その中で、外装材は不具合箇所として最も相談が多く、一番劣化が起りやすい建築部材である。本章ではその外装材を対象とし、検査技術という視点から研究を行う。

外装材の劣化は進行すると、構造躯体の劣化を引き起こし耐震性能の低下につながる可能性がある。また、剥離、剥落が起こると人命にかかわる大きな事故になる場合がある。このように外装材の劣化は多くの危険性を秘めているため、早期に確実に劣化を見つける必要がある。しかし、現在の検査の主流は技術者が一つ一つ打診するという方法であり、これには検査の不確定性とコスト面での問題がある。

この二つの問題を解決する方法が検査の機械化である。各種センサを積んだ機械が自動で壁面を検査し、剥離検知ができると上記の問題を二つとも解決することができる。現在多くの大学、会社が検査の機械化を目指し、研究を行っているが、基礎部分である剥離検知に有効な指標が定まっていない。

本章では、戸建て住宅で多く用いられている乾式仕上げのサイディング材、RC建物で多く用いられている仕上げモルタル、タイル仕上げを対象とし、検査の機械化の基礎的部分である剥離検知及び剥離箇所を特定できる指標の確立を目指し検討を行った。

1.2 研究背景

1.2.1 建築におけるリフォーム市場の変遷

図 1-1 に新築住宅着工数の推移と、住宅リフォーム市場の変遷を示す。

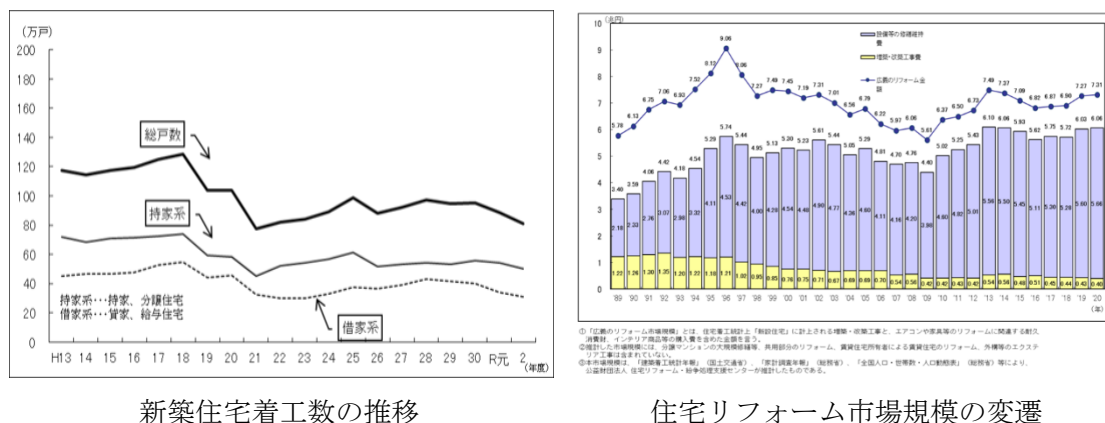


図 1-1 住宅関係の変遷¹⁾

図 1-1 左側の新築着工数は縦軸が戸数で、右側リフォーム市場規模は縦軸が円である。単位は異なるが、戸数と金額には関係があるため、本節では比較して述べる。右図を見ると、新築着工数は消費税増税前は増える傾向があるが、基本的に横ばいから低下の傾向を示している。今後も少子高齢化の観点から、着工数は減少し続けることが簡単に予測することができる。それに対し、リフォーム市場は近年着々と規模を大きくしている。

ここから見える関係として、新築を持ちたいと思う人が減少し、持家をきちんとリフォームして、長期間使いたいと考える人が増加しているということがわかる。はじめに述べた通り、スクラップアンドビルドの考えからストックアンドリノベーションに世の中でも考え方が変わってきていることがわかる。

維持管理技術の向上は、世の中のニーズに沿い、これからさらに期待される分野であるため、研究を続ける価値があると考えられる。

1.2.2 住宅における劣化要因及び劣化箇所

図 1-2 に戸建て住宅と集合住宅それぞれの主な不具合事象、不具合部位として相談が多いものを示す。

主な不具合事象	割合 ^{*13}	件数	当該事象が多くみられる部位
雨漏り	17.4%	546	屋根、外壁
はがれ	13.9%	436	外壁、屋根
ひび割れ	11.2%	351	外壁、屋根
汚れ	10.5%	330	外壁、床
性能不足 ^{**11}	10.0%	315	外壁、屋根
変形	7.9%	249	床、外壁
きず	5.3%	165	外壁、床、開口部・建具
漏水	4.6%	144	給水・給湯配管、設備機器
排水不良	3.4%	108	排水配管
作動不良	3.0%	93	開口部・建具、設備機器
傾斜	2.1%	67	床
腐食・腐朽	1.6%	50	屋根、外壁、柱
床鳴り	1.1%	36	床
異常音	1.0%	30	屋根、排水配管、開口部・建具
異臭	0.7%	21	内装
結露	0.4%	13	開口部・建具
沈下	0.3%	8	床、地盤
遮音不良	0.2%	6	開口部・建具

*13 ソフトーム相談のうち戸建て住宅において不具合が生じている相談3,135件に対する割合

図 1-2 相談が多い不具合事象と不具合部位²⁾

図 1-2 より、戸建て住宅において、上位7つの不具合事象すべてが外壁に起こる劣化である。合計割合も76%ほどあり、戸建て住宅において外壁は劣化が大変起こりやすく、使用者が気になる部位であることがわかる。

外壁は常に外気にさらされ、昼夜の温度差や日射、風雨と多くの環境要因を受け劣化しやすいこと、家の表面を覆う部材であるため、目視で簡単に見つけることができ、また人目に付くため気になる。ということが理由であると考えられる。

表面のひび割れだけであれば、構造躯体まで劣化が進行していないため、建物自体の安全性は確保される(外壁剥離による落下事故は起こる可能性があるため、完全に安全であるわけではなく補修はきちんと行わないといけない)。

しかし、相談件数一位の事象が雨漏りという点が気になる。木造の場合、雨漏りが起こると構造躯体である柱も雨水が浸水しており腐朽している可能性が出てくる。柱の腐朽は構造性能の低下を引き起こし耐震性能も低下する。使用者の目に見えない劣化を検知する技術の確立、及びその技術を知ってもらい安全に気持ちよく生活ができるよう、定期的に検査を行うという意志の改善が必要となってくると考える。

1.2.3 外装タイルの剥離事故

表1、表2は、近年起きた外装タイルの剥離事故の例である。

表1 平成初期の外壁タイル剥落による事故の例³⁾

場所	建物名称	建物概要	事故概要
北九州市小倉北区昭和町	住宅・都市整備公団昭和町住宅	RC造 地上10階、地下1階、地盤2階 延面積 15,216.54m ² 用途 共同住宅 建築年 昭後、約17年	塔屋部分のタイルが幅約8.5m×高さ約5mにわたり、約31m下に落下した。 死者2名、重傷1名
名古屋市中区栄 4-16-23	オフィス栄	SRC造 9階建 延面積 3,460m ² 用途 学校 建築年 昭和47年	8、9階部分のタイル張り外壁が、躯体とタイル下地より剥離し(縦6m、横4m)、16m下の洋館に落下し、同建物の屋根を突き破った。
富津市青島2丁目	青島シエルホテル	RC造 一部5階 5階建 用途 ホテル 建築年 昭和42年(RC造) 昭和45年(S造) (落下部分)	道路に面した5階2階(玄関上部)の外壁タイルが下地モルタルとともに縦1m、横15mにわたり落下した。 死者無し
東大阪市馬場 3-85-1	松村工業	RC造 6階建 延面積 773m ² 用途 事務所、店舗、住宅 建築年 昭和44年頃	3階部分のタイル張り外壁の小口タイル一部剥離し、約9m下の道路に落下 通行中の女性が負傷
北九州市小倉北区	九州造科大学	RC造 4階建 延面積 3,304m ² 用途 学校 建築年 昭和57年	学校棟4階の(ラベト部)のモルタル下地タイル張り外壁(縦1.5m、横4m、厚さ5cm)が躯体コンクリート面から剥離し、16m下の駐車場に落下 オートバイ4台が破損
北九州市八幡西区筑原 3-5	市立筑原小学校	RC造 4階建 用途 学校 建築年 昭後 約9年	校舎庇のモルタル層の一部(約50cm×30cm×5cm)が約2.5m落下 死者無し
北九州市	市営住宅美川団地	RC造 4階建 用途 共同住宅 建築年 昭後 約20年	屋根上庇の一部が落下 死者無し
北九州小倉北区砂津 1-5-26	葵園ビル 昭和町住宅	SRC造 9階建 延面積 2,372m ² 用途 事務所 建築年 昭和52年頃	8、9階部分モルタル下地吹付けタイル外壁(縦4m、横1m、厚さ5cm)が剥離し、約25m下の道路上に落下 死者無し
名古屋市東区東桜 1-6-5	ユニール栄マンション	SRC造 11階建 延面積 2,141m ² 用途 共同住宅 建築年 昭和53年	8、9階の階段手摺(パネルと外壁部分の階間の吹付けタイルが下地モルタルとともに3cm角、長さ50cmにわたり、約2.5m下の路上に落下 死者無し

表2 平成後期の外壁タイル剥落による事故例⁴⁾

No.	発生年月日	発生場所	建築物用途	状況	被害の程度	調査の状況・事故原因
1	H30/10/01	神奈川県内	店舗・事務所	地上9階建てビルの屋上から、金属性のパネル(屋上の化粧壁の一部)が落下し、歩行者に当たった。	死亡1名	○国土交通省及び特定行政庁において調査を実施。 ○当該部分は、屋上側から点検することが困難な場所であり、かつ、被害を受ける風雨に長年露され、金属製パネルを止める釘が腐蝕し、強風により落下したと考えられる。
2	H31/04/20	香川県内	体育館	トイレ個室の人造大理石製の仕切板に、個室内の利用者が荷物を持ち上げたところ、仕切板が外側に倒れ、別の利用者に当たった。	重傷1名	○施設管理者において調査を実施し、特定行政庁において確認を実施。 ○個室を構成している仕切板の腐食量の調査及び接着剤の経年劣化等が原因と考えられる。
3	R01/06/04	兵庫県内	公共浴場	公共浴場の洗い場カラン袖壁が倒壊して利用者が負傷した。	重傷1名	○特定行政庁において調査を実施。 ○建築後15年経過し、また、水張り部位であるため、接着材が経年劣化したと考えられる。 ○平成30年大阪北部地震の影響もあると推測される。
4	H31/04/17	熊本県内	共同住宅	マンション11階の外壁タイル(約40cm×40cm)が走行中の乗用車の窓ガラスに落下し、運転者及び同乗者が負傷した。	軽傷2名	○特定行政庁において調査を実施。 ○熊本地震によるタイルの浮きやひび割れ部分に雨水が浸透し、膨張と収縮を繰り返したことにより壁とタイルの間に生じた隙間に、強風が吹き込んでタイルが剥離し落下したものと考えられる。

表1が平成初期の事故例で、表2が平成後期から令和元年での事故である。平成の期間を経ても剥落事故が起り続けていることから、剥離検知技術や検査の実施状況があまり進歩していないということが感じられる。

どちらの表にも載っているが、ビルやマンションなど高層の建物での外装材の剥落は人命をも奪う。このような事故を無くすべく、外装材の剥離検知技術の向上は早急な課題であることがわかる。

1.2.4 建築物の検査技術の現状

表3に現状、一般的に行われている検査箇所-検査方法を示す。

表3 各箇所の検査方法⁵⁾

検査の観点	対象部位等		検査対象とする劣化事象等	検査方法
(1) 構造耐力上の安全性に問題がある可能性が高いもの	小屋組、柱・梁、床、土台・床組等の構造耐力上主要な部分		<ul style="list-style-type: none"> 構造方式に応じ、木造にあっては蟻害・腐朽が、鉄構造にあっては腐食が、鉄筋コンクリート造にあっては基礎において検査対象とする劣化事象等が生じている状態 著しい欠損や接合不良等が生じている状態 	目視、触診、打診、計測
	床、壁、柱		<ul style="list-style-type: none"> 6/1,000以上の傾斜が生じている状態（鉄筋コンクリート造その他これに類する構造を除く） 	計測
	基礎		<ul style="list-style-type: none"> コンクリートに幅0.5mm以上のひび割れ又は深さ20mm以上の欠損が生じている状態 鉄筋コンクリート造で鉄筋が腐食している可能性が高い状態（錆汁の発生）や腐食する可能性が高い状態（鉄筋の露出） 	目視、計測
(2) 雨漏り・水漏れが発生している、又は発生する可能性が高いもの	外部	屋根、外壁	<ul style="list-style-type: none"> 屋根葺き材や外壁材に雨漏りが生じる可能性が高い欠損やずれが生じている状態 シーリング材や防水層に雨漏りが生じる可能性が高い破断・欠損が生じている状態 	目視
		屋外に面したサッシ等	<ul style="list-style-type: none"> 建具や建具まわりに雨漏りが生じる可能性が高い隙間や破損が生じている状態 シーリング材や防水層に雨漏りが生じる可能性が高い破断・欠損が生じている状態 	目視
	内部	小屋組、天井、内壁	<ul style="list-style-type: none"> 雨漏り又は水漏れが生じている状態（雨漏り・漏水跡を確認） 	目視
(3) 設備配管に日常生活上支障のある劣化等が生じているもの	給排水	給水管、給湯管	<ul style="list-style-type: none"> 給水管の発錆による赤水が生じている状態 水漏れが生じている状態 	目視、触診（通水）
		排水管	<ul style="list-style-type: none"> 排水管が詰まっている状態（排水の滞留を確認） 水漏れが生じている状態 	目視、触診（通水）
	換気	換気ダクト	<ul style="list-style-type: none"> 換気ダクトが脱落し、又は接続不良により、換気不良となっている状態 	目視

同表に示す通り、大半が目視検査である。目視や少しの接触などで内部の劣化など検知できるはずもない。また、点検者の技術や計測環境による不確定性も残る。

表3にさらに具体的な外装タイルの検査方法を示す。

表4 外装タイルの点検方法

診断方法	基本原理	特色	限界
1 外観目視法	肉眼及び高倍率の双眼鏡、望遠鏡やトランザットを使用して、剥離、白華現象、ふくけ等を発見する。	1) 比較的簡単で、経費も比較的少ない。 2) 広範囲調査が可能である。	1) 外形上の異常の発見が可能であるが、外形上異常が発生していない浮き等については発見できない。 2) 外形上異常が存在しても、尤の具合や障害物等により見落とす恐れがある。 3) 測定結果を客観的な数値として表すことができない。
2 打診法	テストハンマーによりタイル等表面を打撃し、打音の差異(清音-鈍音、濁音-鈍音)を聞き取り、タイル等の浮きの有無と程度を判定する。	1) 音熟技術者による精度はかなり高い。 2) 打診に用いる道具が簡便である。 3) 剥離界面が深い場合に精度が高い。	1) 測定結果を客観的な数値として表すことができない。 2) 測定者の経験に頼る面が多く、熟練度により判定に差異が出る。 3) 定場ないしはゴンドラを必要とする。 4) 型枠先付け工法によるタイル表側に生じたコンクリートの豆板部についての精度が低い。
3 反発法(衝撃振動応答法) (1) 衝撃応答加速度法(G法) (2) 衝撃応答振幅法(T法)	シミュレーションを用いてタイル層等に一定エネルギーの打撃を与え、その打撃により生じたはね返りの大きさを自動記録し、反発量の違いによってタイル等の浮きの有無と程度を判定する。	1) 判定値を自動的に記録でき、判定者による判定結果の差異がない。また、特別高度な音熟技術者を要しない。 2) 打撃法よりも一般的には、精度が高い。 3) ロボット化により、定場、ゴンドラが不要である。 4) 天候、気温等の影響が殆どない。 5) 短時間で作業が可能である。	1) 調査対象物の裏側の状態や周囲の拘束状態の違いなどから誤診する可能性がある。 2) モルタル厚が40mm以上の剥離を検出できない。 3) ロボットの場合、窓回り、凹凸部周辺で一部検知ができない。 4) ロボットの場合、適用できる建物の高さに限界がある。
4 赤外線装置法(表面温度測定法)	タイル等の剥離部と健全部とは熱伝導の違いがあるが、これによりタイル等の表面部に温度差が生じる。この温度差を利用して、タイル等の浮きの有無と程度を判定する。	1) 非接触型の場合、検査足場や吊り装置を要せず、安全かつ簡便である。 2) 構造物の大きな一面を短時間に一挙に欠陥判定でき、最も効率的である。 3) 晴天日の午前中(気温の上昇時)における検知精度が最も高い。 4) 熱画像の記録、再生ができ、視覚に訴えることができる。 5) 熱画像をさらに処理すると識別しやすく、かつ精度が向上する。	1) 季節、天候、時刻、気温、壁面の向き、カメラ距離、仕上材の色調や、建物の冷熱貯蔵・機械熱の発熱等の影響を受けやすい。 2) 上記の結果、映像の解析には、相当高度の熟練を要する。 3) 雨や風の強い日の測定が困難である。 4) 壁面と赤外線カメラの間に障害物があると測定できない。 5) 映像装置も含む測定機器の取得価格が比較的高額である。 6) 機器、画像の処理方法による結果の差異が大きい。
5 超音波法 (1) 反射法 (2) 透過法	超音波の伝播速度、反射、減衰が剥離部と健全部とは相違することを利用して、タイル等の浮きの有無と程度を判定する。	1) 検査足場や吊り装置(検査者用)を要せず、安全かつ簡便である。 2) 天候、気温等の影響が少ない。	1) センサーの当て方の上手、下手で結果に差異がある。 2) 外壁のような広い面には適用しにくい。 3) 各種の部材から構成されている壁面(タイル張り等)では、電波速度の設定が困難である。 4) 表面が粗いものには適用しにくい。 5) 装置価格が比較的高額である。
6 AE(Acoustic Emission)法	固体中に亀裂が伝播するとき、または固体が変形するとき発生する音の放出を捕捉して変形等を判断する。	1) 亀裂の発生を判断には適している。 2) 亀裂を停止しなくても診断できる。	1) 外壁のように面積が大きく、かつ劣化が長いスパンで生じるものについては適用しにくく、またコストも高い。
7 電気抵抗法	電気抵抗の変化を読み取り、劣化を判断する。		1) 外壁のように、電気抵抗が大きく、電気的條件が自然条件に左右されるようなものには適用が困難である。

文字が小さくて見えにくいですが、技術者の検査という不確定性を取り除くために、近年ではセンサを用いた計測も行われるようになってきた。例として赤外線装置を用いた表面温度測定法や、超音波を用いた反射法、透過法、AEセンサを用いた方法などが挙がる。また、大手の会社では自社で打診ロボットを製作するようにもなっている。

しかし、このようなセンサが開発されているにもかかわらず、結局は技術者が足場を組み、一つ一つ打診するという原初的な方法が大半である。

コスト面からも、正確性の面からもどう考えてもロボットにセンサを積み、検査を自動化することが合理的である。

ではなぜ行えないのか。原因は確実に剥離に有効と言い切れる指標が確立していないことだと考える。

また、外装材の中でも、タイルや近い仕上げのモルタルに関してはこのように研究が行われているが、戸建て住宅で多く用いられているサイディング材に関しては、研究もおこなわれておらず、大半は目視検査である。

この現状に課題があると感じ、研究目的を設定した。

1.3 本研究の目的

1.2節において、世の中がストックアンドリノベーションの考え方に進んでいる中、劣化箇所として相談の多い外壁に的を絞り、外壁剥離による事故の事例や、現状の検査方法の問題について述べた。特に、

外装タイルにおいては剥離検査手法の研究が進んでいる中、実用化に至っていないのが現状である。サイディングボードに関しては、剥離検知についての研究が本大学以外で進んでいない。実用化されない原因は明確に劣化を検知できる指標が定まっていないことだと考え、的確に状態を検知できる指標の確立し、検査の高度化を目指すこととした。

サイディングについては、検査に有効な指標については研究が進んできている。その為、本年度は実際の検査への橋渡しとなる検査時のセンサ配置や、打診箇所の提案を行うこととした。サイディングの検査方法については、外部の論文が少ないため、実用化に向けて重要な基礎研究であると考えている。

仕上げモルタル、タイルについては多くの研究機関でいろいろな手法を提案しているが、劣化検知は可能であっても剥離面積や剥離箇所まで特定できる指標は確立されていない。本研究では、剥離面積や剥離箇所まで特定できる指標の確立を目指し、より劣化状態を的確に検知できる指標の確立を目指す。

1.4 第Ⅱ編の構成

第Ⅱ編は全6章で構成される。以下に概要を示す。

第2章 第Ⅱ編で用いるセンサ概要、解析概要

第Ⅱ編で用いるセンサ、各解析指標について記す。

第3章 サイディング

乾式仕上げであるサイディング材を対象とした、検査技術の高度化を目指す。本章ではまず各検査指標の有効性を確認する。その後、有効指標を用いて実際の検査へ向けたセンサ配置、打診位置を検討する。

第4章 仕上げモルタル

湿式仕上げであるモルタル仕上げを対象とした、剥離検知技術の高度化を目指す。本章では劣化を時系列で追う部分的熱負荷実験の試験体と、各剥離状態を模擬した模擬剥離試験体を用いて、各指標が剥離検知に有効かを検討する。

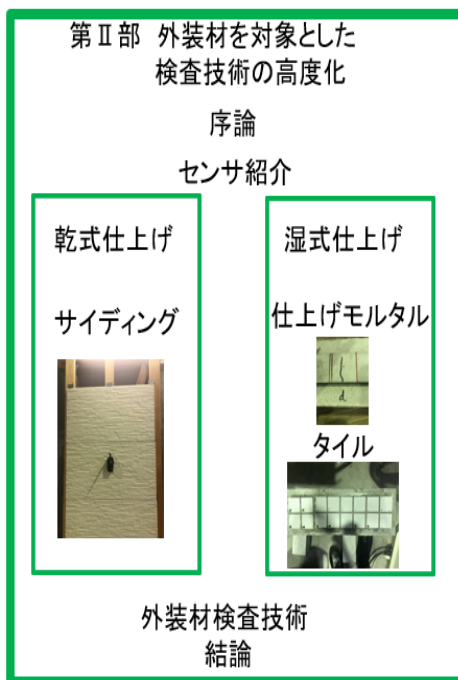
第5章 外装タイル

湿式仕上げであるタイル仕上げを対象とした、剥離検知技術の高度化を目指す。本章では下地剥離、張り付けモルタル剥離状態を模擬した試験体を用いて、各指標が剥離検知や剥離箇所の特定に有効かを検討する。

第6章 外装材検査技術の結論

第3章から5章で得られた知見を要約し、第Ⅱ編のまとめとする。

第II編の流れを以下に示す。

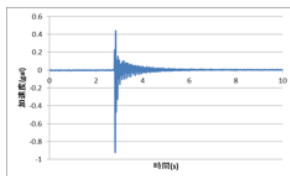


検査対象

○検討事項

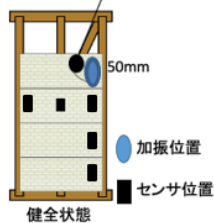
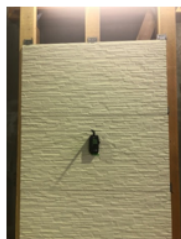
検討指標

○減衰率の有効性確認



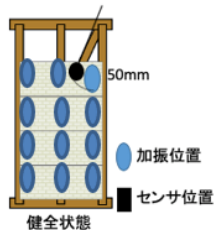
○センサは位置箇所の
合理化

サイディング



- FFT
- 減衰率

○打診位置の合理化



- FFT
- 減衰率

検査対象

○検討事項

検討指標

仕上げモルタル

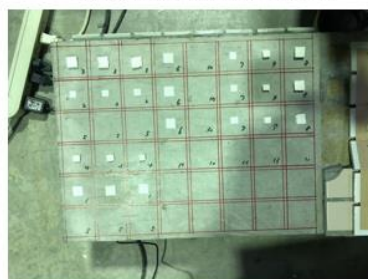


○熱負荷実験による劣化進行確認



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間

○模擬剥離試験体を用いた剥離診断技術の向上



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間

検査対象

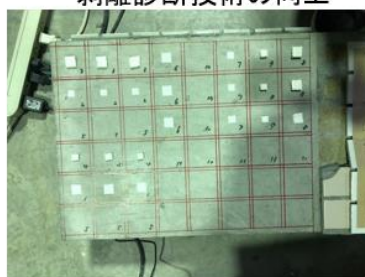
○検討事項

検討指標

タイル



○模擬剥離試験体を用いた剥離診断技術の向上



- ピーク周波数
- 図心周波数
- 減衰率
- 加振からピークまでの時間
- 4410HZ以下の波の割合

参考文献

- 1)国土交通省 令和3年度 住宅経済関連データ
https://www.mlit.go.jp/statistics/details/t-jutaku-2_tk_000002.html
- 2) 住宅相談統計年報 2021
https://www.chord.or.jp/documents/tokei/pdf/soudan_web2021.pdf
- 3)国土交通省
<https://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/sgml/102/81000188/81000188.html>
- 4)国土交通省社会資本整備審議会 第27回建築物等事故・災害対策部会 配布資料 参考資料2 特定行政庁より報告を受けた建築物の事故の概要(補足資料)
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001354005.pdf>
- 5) 全日本不動産協会 不動産保証協会 兵庫県本部
<http://www.hyogo.zennichi.or.jp/inspection/consumers/result.php>

第2章 振動計測システム及び解析指標の概要

2.1 本研究で使用するセンサ

2.1.1 無線加速度センサ

本研究では広島大学が産学連携センターにおいて民間企業と共同開発した無線加速度センサを用いて計測を行う。センサは、Bluetooth により通信を行う。通信可能距離は 100m 程度であるが、障害物がると計測が不可能となる。しかし、アンテナを接続することにより通信可能範囲が広がり、より遠距離での通信や、障害物を避けての計測が可能となる。本センサは 3 軸の加速度を計測度センサを内蔵しており、振動や傾きなど多種の計測を行うことが可能である。センサ本体はサーボ機構を搭載しており、微細な振動も高精度で計測できるため、建築物の常時微動計測に適している。



無線加速度センサ仕様	
外形寸法	58(W) × 111(L) × 39(H)mm
重量	300g
測定可能範囲	± 3000gal
サンプリング	100sps, 200sps,
周波数	500sps, 1ksps
分解能	24bit (100, 200sps時)
検出軸	3軸, 同時AD交換 AD/DCサンプリング
電源	本体充電式, 又は, USBアダプタ
記憶容量	制御pcに保存
無線通信	Bluetooth Class1, USB
振動トリガー	不可
時間同期	可

図 2-1 無線加速度センサの概要

2.1.2 マイクロフォン

図 2-2 に本章で用いたマイクロフォンを示す。本センサのサンプリングサイクルは 44100Hz である。

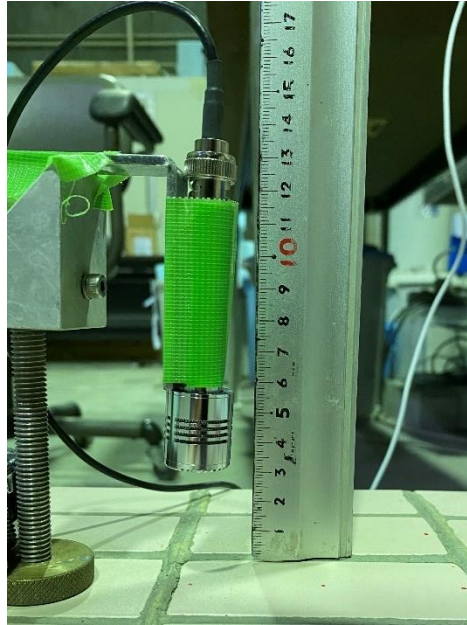


図 2-2 マイクロフォン

2.2 本研究で使用するソフト

2.2.1 本研究で使用する録音ソフト

本実験の録音は、音声編集ソフト WavePad を用いて行う。WavePad は、プロのサウンドエンジニアリングにも用いられている高性能の音声・音楽編集ソフトである。表 2-1 に WavePad の機能、図 2-3 に WavePad の操作画面を示す。

機能	編集機能	切り取り、コピー、貼り付け、削除、挿入、トリミングなど
	音声効果 録音機能	増幅、正規化、イコライザ、エコー、ノイズ除去など 録音、一時停止、リテイク、音声起動など
	MDI	1つの画面に複数のファイルをすべて表示する
	CD リッピング	CD-ROM から音声を直接読み込む

表 2-1 WavePad の主な機能

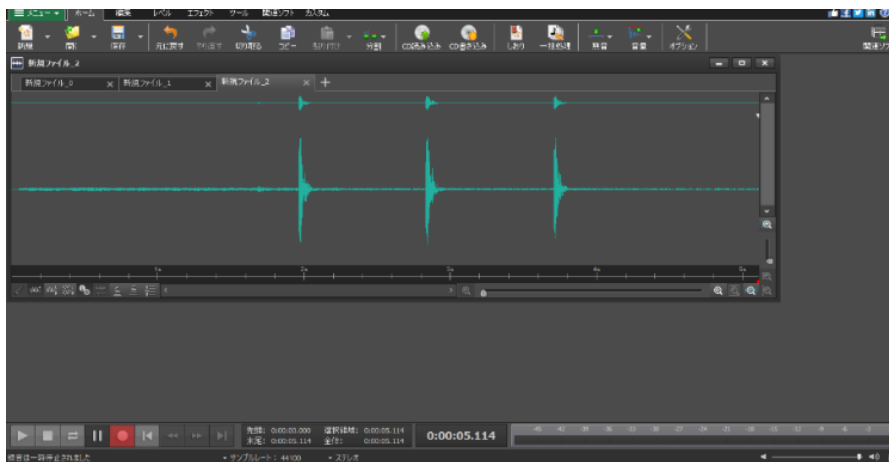


図 2-3 WavePad の操作画面

2.2.2 本研究で使用する解析ソフト

本研究では、広島大学が産学連携センターにおいて民間企業と共同開発した解析ソフト RS-network を用いる。RS-network はリアルタイムで加速度波形を確認することが可能で、FFT 解析やリサージュ等の設定もできるため、計測結果を画面上で確認しながら振動計測を行うことができる。

表 2-2 RS-network 仕様

項目	解析ソフト	
通信方式	Bluetooth, USB (2.0推奨), WiFi, LAN, RS232C	
サンプリング周波数	100, 200, 1ksps	
同時接続数	Bluetooth接続最大7台, 自動測定モード時(データロガー機能時)台数制限なし 21 (AC加速度) + 21 (DC加速度) 同時同期信号波形表示 (1000SPS)	
機能	解析機能	加速度, 速度, 変位, FFT, リサージュ, ウェーブレット, ピークホールド, バググラフ, スムージング, 振動レベル, 計測震度等
	フィルター機能	FIRフィルター, FFTフィルター
	ビデオ録画機能	同時録画・再生, 再生スピード可変, カーソル追従再生機能, PCのWEBカメラで撮影可能
	トリガー機能	オート, ノーマル, シングル, プリトリガー, 測定時間自動延長機能(測定終了時の加速度レベルにより測定)
	GPS機能	GPSによるPCの時刻合わせが可能
	音源再生機能	波形の音による再生, リアルタイム音源再生(振動聴診器)が可能
	メール機能	遠隔操作, データ取得メッセージの自動配信
	サーバシステム	データを自動取得しインターネットサーバへアップロード, データの共有が可能
	3D表示機能	360° 全方位視認可能
	データベース	プロジェクトファイルをデータベースごとに管理
	データコピー	画面上のデータをそのままエクセルへ貼り付け可能
グラフコピー	画像をワード等へ貼り付け可能	
演算	FFT波形スムージング, FFTピーク検出(最大5点), フーリエスペクトル, パワースペクトル, 振幅, 位相, 伝達関数等	
表示範囲	最大±10000gal (±100m/s)	
その他	ターゲットは温湿度センサを内蔵しており, 温湿度表示も可能	

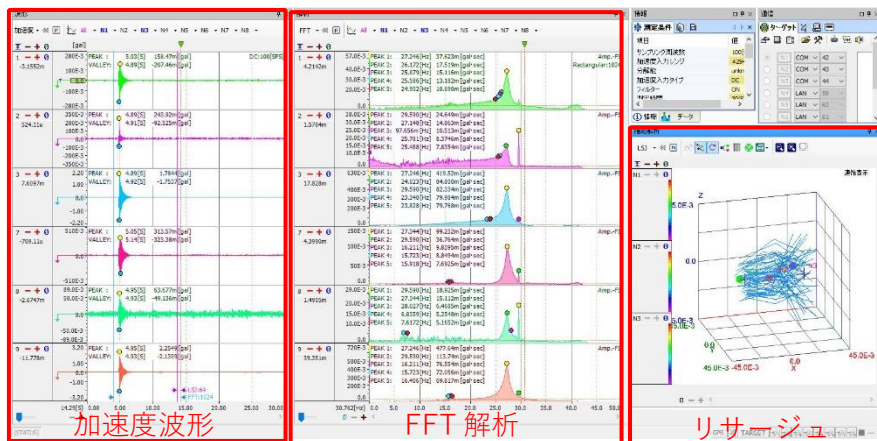


図 2-4 RS-network 操作画 2.2

2.3 本章で使用する解析指標

(1) FFT 解析によるフーリエスペクトル図、及び卓越(ピーク)振動数

無線加速度センサより得られた計測値を用いて、RS-network によりフーリエ解析を行い、卓越振動数を見つける。本実験ではフレームサイズを 1024, 窓関数を矩形窓として算出した。サイディングの解析においては、振動数の幅を 0 から 50Hz とする。仕上げモルタルやタイルに関しては 0Hz から 10000Hz までを範囲とする。

(2) 図心周波数

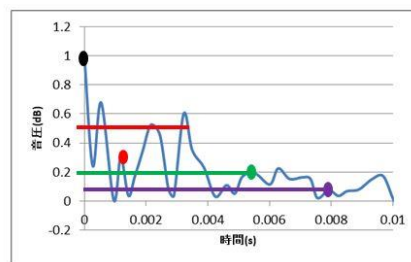
仕上げモルタル、タイルの章で使う。FFT によって得られたフーリエスペクトル図の図心を解析指標として用いる。範囲は 0 ~ 10000Hz までの図心及び 0 ~ 5000Hz までの図心を求める。

(3) 減衰率(指数)

サイディングでは加速度波形、モルタルやタイルでは音圧の波形を用いて、減衰率を計算する。用いる指標は減衰曲線の e の次数である。

計測によって得られた波形ではデータ数が多い為、各波の極致を求めることで減衰の近似曲線の精度を上げている。

サイディングの章では最大加速度以降の時間(1秒から5秒まで1秒刻み)での減衰率を求め、一番近似率(決定係数)の高いものを指標として用いている。モルタルやタイルに関しては、最大音圧から音圧が $1/2$, $1/5$, $1/10$ となるまでの減衰率を求めている。図 2-5 に計算の方法を示す。



1/2(0.5), 1/5(0.2), 1/10(0.1)を下回る初めての極値と最大音圧2点の減衰率を算出
 例として、1/2(0.5)までの減衰率は黒丸と赤丸
 1/5(0.2)までの減衰率は黒丸と緑丸
 1/10(0.1)までの減衰率は黒丸と紫丸
 を用いて算出した。

図 2-5 減衰率の算出方法

(4) 加振からピークまでの時間

仕上げモルタル、タイルの章で用いる。打音検査において、打診を行うと当然だが音圧が大きくなる。加振時を音圧のオーダーが大きく変わる±1000dB の時点とし、そこから最大音圧(絶対値)となるまでの時間を加振からピークまでの時間という指標とした。図 2-6 に算出方法を示す。

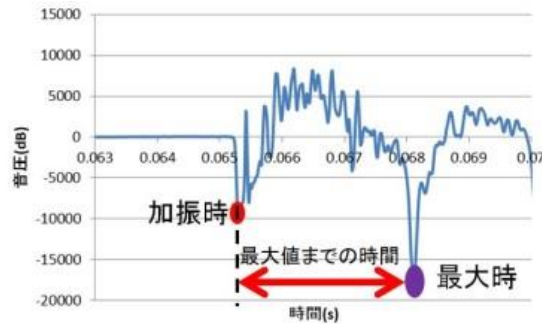
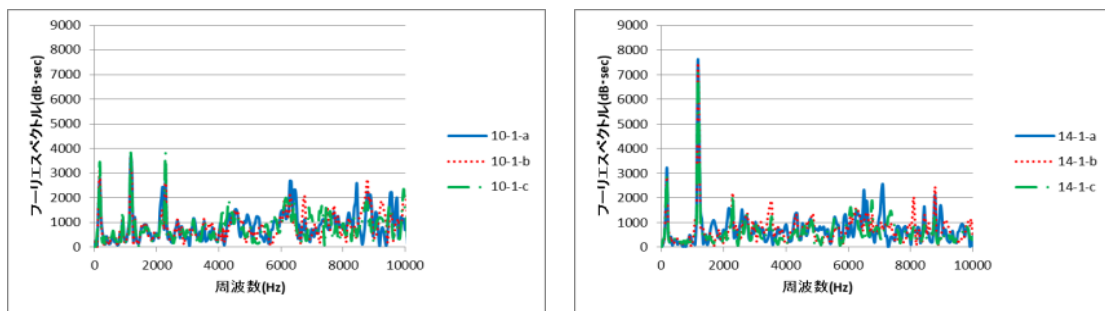


図 2-6 加振時と最大音圧までの時間

(5) 4410Hz 以下の波の割合

仕上げモルタル、タイルの章で用いる。図 2-7 に示す通り、剥離のものほど低周波数域で、大きなピークを持つ。フーリエスペクトルが大きくなる＝現実の波の大きさ(音圧)も大きくなるため、それぞれの打音データより 4410Hz 以下の振動を取り出し、波の大きさの経時変化を確認した。4410Hz とした理由は、本計測のサンプリング数が 44100 であり、取り扱い数であったこと、4000Hz 付近までで明確なピークが見られたためである。解析指標として、4410Hz 以下の波形の無補正の波形に対する割合の変化を見る。



健全部スペクトル

剥離部のスペクトル

図 2-7 各状態のスペクトル

第3章 サイディング外壁を対象とした打診 検査技術の向上

3.1 はじめに

住宅の劣化要因、および劣化箇所を述べた。住宅建築では外壁材が多くの劣化を受け、相談の要因となっている。本章では、戸建住宅の外壁に多く用いられる乾式仕上げで、使用率の高い窯業系サイディング材の検査技術を研究対象とした。取り付け金具の劣化を模擬し、外壁材の劣化検知に有効な検査指標、検査方法を提案する。検査は無線加速度センサを用いた加振計測を行い、各種指標で解析を行う。有効な指標の選定後、効率的なセンサの配置、及び有効な加振方法の提案を行う。

3.2 サイディングボードについて

3.2.1 戸建て建築における外壁材料の使用率

新築戸建住宅の外壁材として使用されている各材料の使用率を図 3-1 に示す。

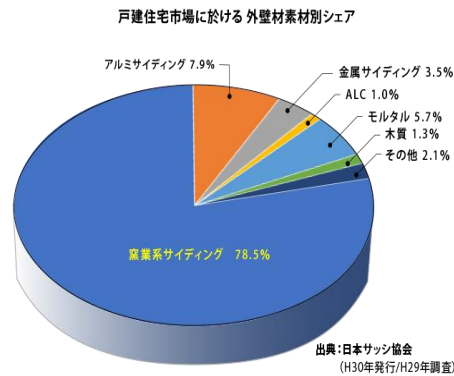


図 3-1 戸建住宅における外壁材の使用率¹⁾

図 3-1 からわかるように、窯業系サイディング材の使用率が全体の約 8 割、サイディング材を含めたパネル系の使用率が 9 割を超えている。そのため、維持保全の観点で、乾式仕上げ外壁の検査方法高度化の重要性が伺える。

サイディングボードがこれほど多く使われている理由としては、意匠性の高さや、施工の簡易さ、耐久性の高さが挙げられる。今後もこれらの理由から使用率の増加が考えられるため、早急に劣化検知手法を高度化し、定期検査、メンテナンスを行って、長く使ってもらえるように尽力すべきと考える。

3.2.2 サイディング材の劣化要因と劣化事象

表 3-1 に主な劣化・不具合事象とその要因について示す。

表 3-1 窯業系サイディング材の劣化・不具合事象と要因²⁾

要因	劣化・不具合事象
紫外線	白化現象
	シーリング表面のひび割れ
日射熱	結露水による金属部分の錆び
	結露水による木質下地等の劣化
雨水	劣化部から侵入した雨水等によるサイディングの割れや凍結融解の誘発
雪	劣化部の融雪水の侵入
湿度	藻・カビの発生
	結露による木質材料の劣化
凍結融解	サイディング基材の崩壊
地震荷重	シーリングの剥離
風荷重	シーリングの剥離
塩害	金属部分の腐食

表 3-1 より、サイディング材の劣化要因として、紫外線、日射、雨雪、温湿度等、環境要因が多いことがわかる。劣化事象をみると、白化現象やシーリングのひび割れなど目視で点検可能なものもあれば、結露による木質下地の腐朽、劣化というボードを外さないと確認できない劣化も存在する。総じて劣化に変わりはないため、建物の長寿命化のためには定期的に検査を行い、的確に劣化箇所、原因を抑えて補修を行っていく必要がある。

3.2.3 サイディング材の主な点検項目、方法

前節で述べた通り、定期的に検査をし、適切な補修を行うことが、サイディング材を長期にわたり使用していく上で重要である。表2に現在の点検項目について示す。

表 3-2 窯業系サイディング材の点検項目

点検内容	点検項目
塗装表面の状態	褪色・藻・汚れ・塗膜の亀裂・塗膜の剥離等
シーリング部の状態	シーリング材自体の劣化によるひび割れ・剥離等
サイディングの状態	サイディングの破損・地震などによって発生した亀裂等 経年劣化による反り・うねり等

(1) 塗装表面の状態

塗装表面は日射等による劣化を特に大きく受ける。目視のみでなく、手で表面をこすった際に、塗装の色や白い粉がつくのであれば確実に表面より劣化が進行していることとなる。このような場合、塗装を塗り替える必要がある。

(2) シーリング部の劣化

シーリング材も経年劣化を起こす。目視でシーリングが剥離、ひび割れしているか点検する。このような症状が見られた場合、不具合部分を取り除き、新たに充填する必要がある。

(3) サイディング材の状態

地震や台風などの自然災害により、サイディング材も経年劣化していく。目視によりサイディング材の反りやうねり、ひび割れを点検する。大きな亀裂や著しい欠損がある場合は、パネルを新しいものに取り替える必要がある。

以上のように現在ではサイディング材の劣化点検手法は、目視に依存しており、目視で検査できる範囲を主に検査していることとなる。しかし、前節で述べたとおりサイディング仕上げの劣化は下地の普及や取り付け金物の劣化も存在するため、この検査だけでは不十分である。下地の劣化検知のために打診検査も行っているが、点検者の耳で評価をしているために、適切に評価できているかわからず、劣化検知のもれの可能性も高い。また、正確に検査しようと思えば、ボード類を全部外すという方法もあるが時間、労力および費用がかかる。低コストで合理的に下地の劣化を検査する方法の提案が重要となっているのである。

3.3 研究目的

表 3-4 に既往の論文によって得られた知見をまとめる。

表 3-4 過去の各劣化検知指標の有用性

1次卓越振動数	応答倍率	剛性相当値	最大加速度	最大速度
○	○	×	△	△
最大変位	リサージュ	対数減衰率	○	不具合の検知が可能
△	×	-(○)	△	一部の不具合で検知が可能
			×	不具合の検知ができない

前節までにサイディングの使用率や劣化原因、検査の現状を示した。検査の現状より、早急に簡易でかつ正確な検査の重要性を述べた。本研究室では長年、加速度センサを用いて劣化を数値化し、定量的に検査を行う技術の開発に尽力してきた。

表 3 のように、本研究室では多種にわたって劣化検知手法の提案を行い、その有用性について検討してきた。しかし、応答倍率は下地にもセンサを貼っておかないといけないため、コストの面や検査のしやすさから使い勝手が悪い。ということがわかっている。そのため、現状、本検査の有効指標としては卓越振動数、及び減衰率の2つとなっている。しかし、減衰率の有効性は可能性がある程度で明確に示されていないため、本年度はまず劣化検査における減衰率の有効性を示すこととした。

また、既往の研究では、検査時のセンサ配置の提案および、加振位置の提案(剥離箇所と加振位置の関係)が行われていなかった。実際にこの指標を用いて検査を行う際、より効率よく、より正確に検査を行うためにはこの2つの情報が確実に重要になると考え、データを蓄積、考察することとした。

指標に関しては十分厳選されてきているため、本年度はその指標を応用し、実際の検査時に必要となるセンサ配置及び加振位置の合理化を行い、適切な検査方法を提案することを目的に研究する。

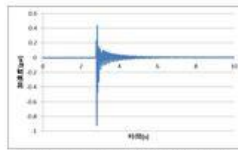
図 3-2 に本章の検討事項、進め方を示す。

検査対象



○検討事項

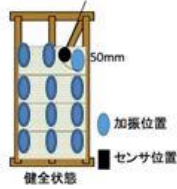
○減衰率の有効性確認



○センサ配置箇所の合理化



○打診位置の合理化



検討指標

- FFT
- 減衰率

- FFT
- 減衰率

図 3-2 本章の検討事項

3.4 試験体、計測概要及び解析概要

3.4.1 試験体及び計測概要

本研究では、実際のサイディング外壁を模擬した試験体を対象に、無線加速度センサによる振動計測を行った。試験体はヒノキの下地を実験室のコンクリート壁にアンカーボルトで固定し、サイディング材を4枚縦方向に金具で取り付けたものである。無線加速度センサは、両面テープによりサイディング材の表面に固定した。加振方法は、緩衝材であるゴムを巻いた鉄球を用い、表面から約500mmの位置からのZ軸方向への強制加振を行った。サイディング表面のみに加振を行う。図3-3に試験体概要図及び加振方法を示す。

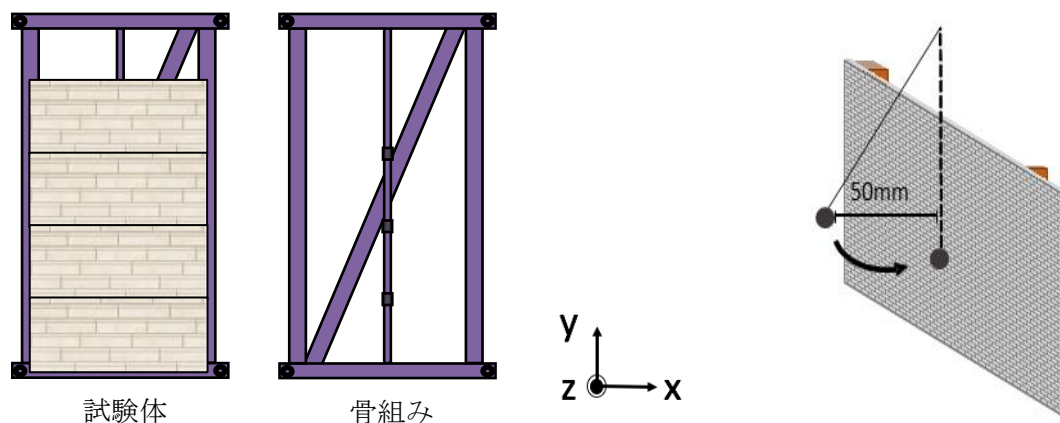


図 3-3 試験体概要図及び加振方法

計測には、サンプリング周波数 100Hz、重力による影響を計測値から除く加速度入力タイプ AC を用いた。

3.4.2 解析概要

(1)FFT を用いた卓越振動数

本章では卓越振動数は、加振方向である Z 方向のみを取り扱う。

(2)減衰率

Z 方向の加速度波形を、打診直後より、1 秒、2 秒・・・5 秒までの範囲で減衰率を計算。その中で一番近似率が高いものを用いる。

3.5 各 case, センサの貼り方, 打診箇所番号の説明

図 3-4 に各 case, センサの貼り方の呼称, 打診箇所を示す番号を示す。

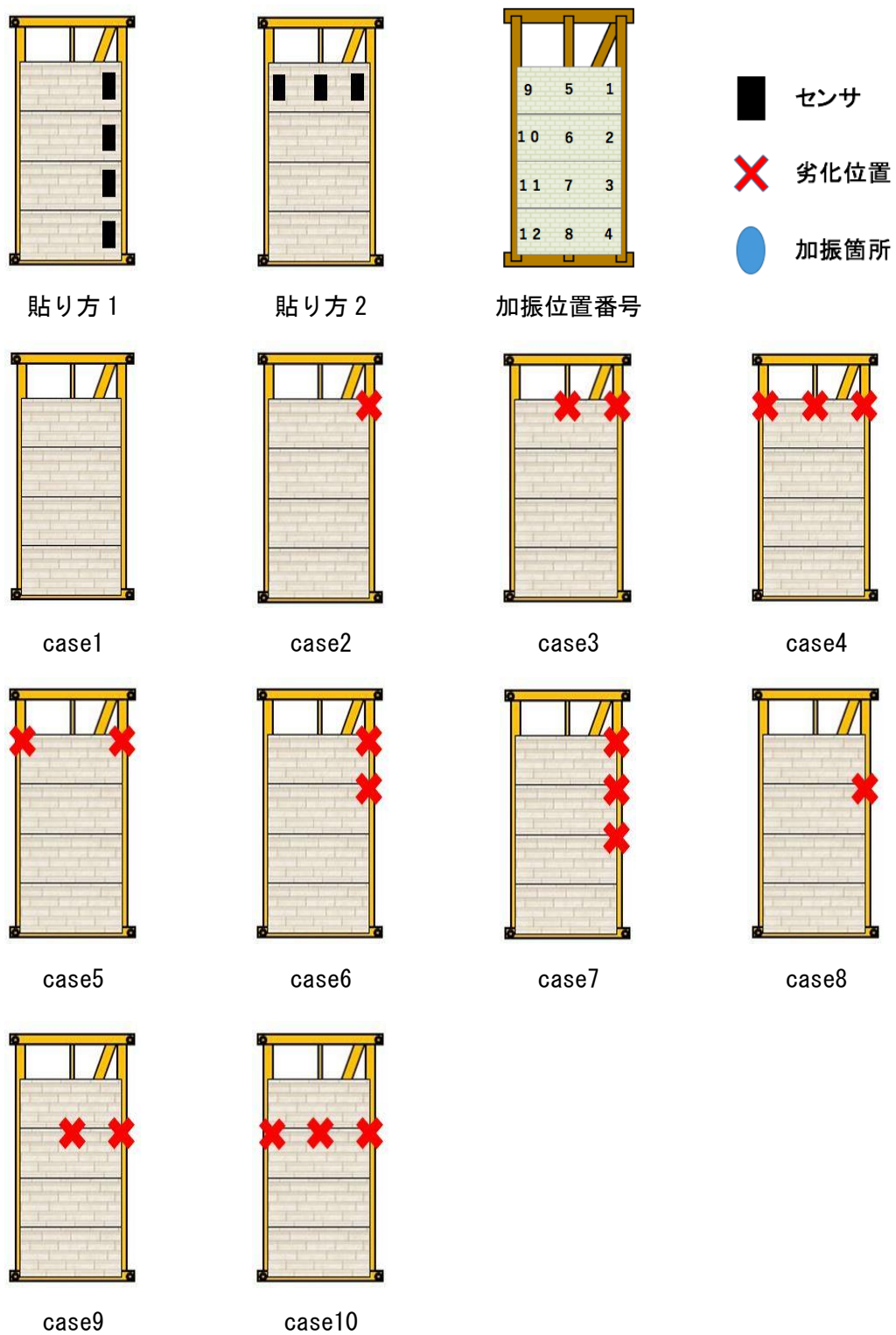


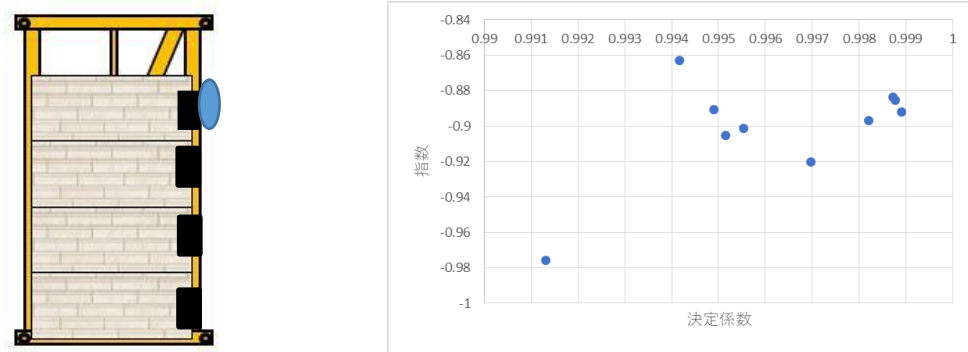
図 3-4 計測を行った各 case

3.6 各指標の有効性の確認

3.6.1 減衰率の有効性確認

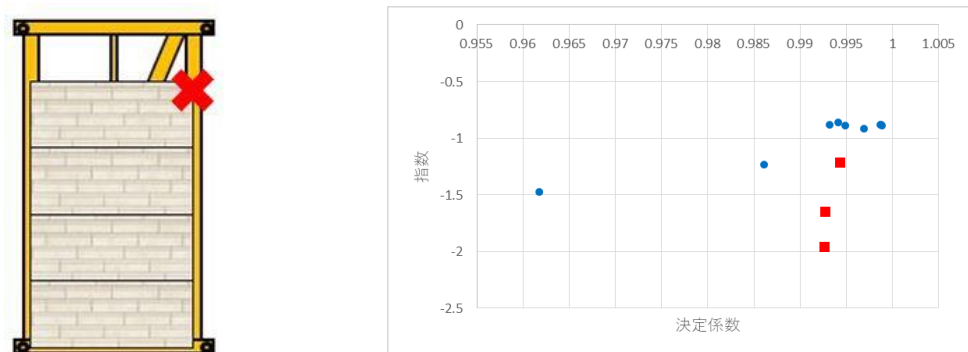
既往の研究では減衰率というものに着目し、有用性を確認していたが、同じ状態の結果であっても、バラツキが大きかった。しかし、劣化状態によって、目で見えてわかるほど明確に減衰が異なっていたため、この指標を諦めるのは惜しいと考え、減衰率のバラツキの原因を考えた。ここで着目したのが近似率である決定係数 R^2 である。卒業論文時は決定係数を無視して減衰率のみを使っていたため、バラツキが大きかったと考えた。そこで、本研究では加振から1秒、2秒・5秒での減衰率を算出、その中で一番決定係数が1に近いもの(一番実減衰に近いもの)のeの次数を減衰率として使用することとした。

以下、図 3-5 から図 3-9 に打診位置を1, センサ貼り方1に固定した case1 から case5 の減衰率を示す。



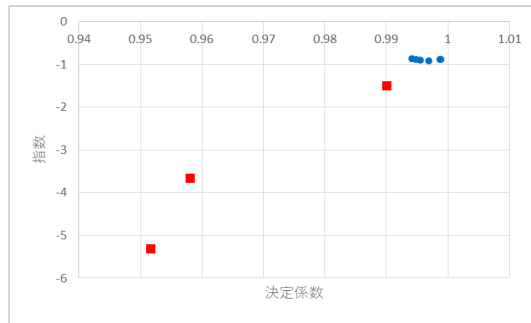
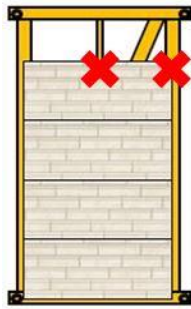
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-5 Case1



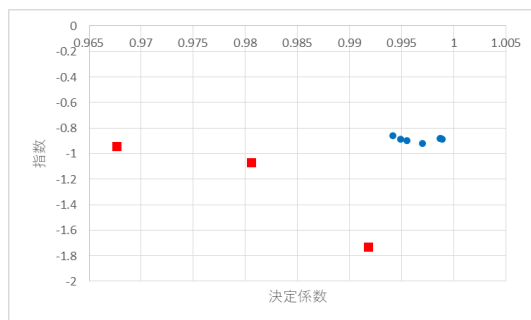
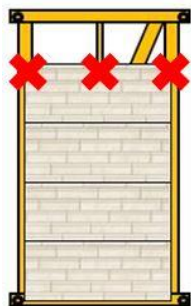
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-6 Case2



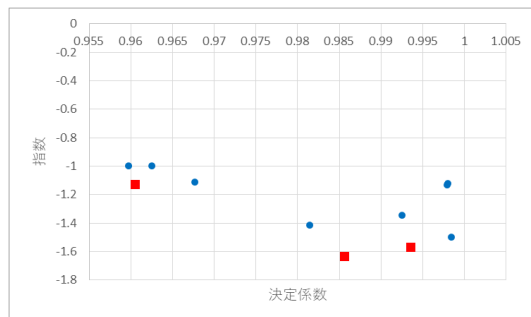
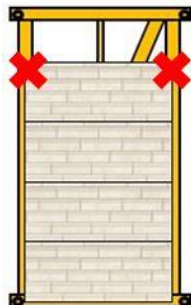
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-7 Case3



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-8 Case4



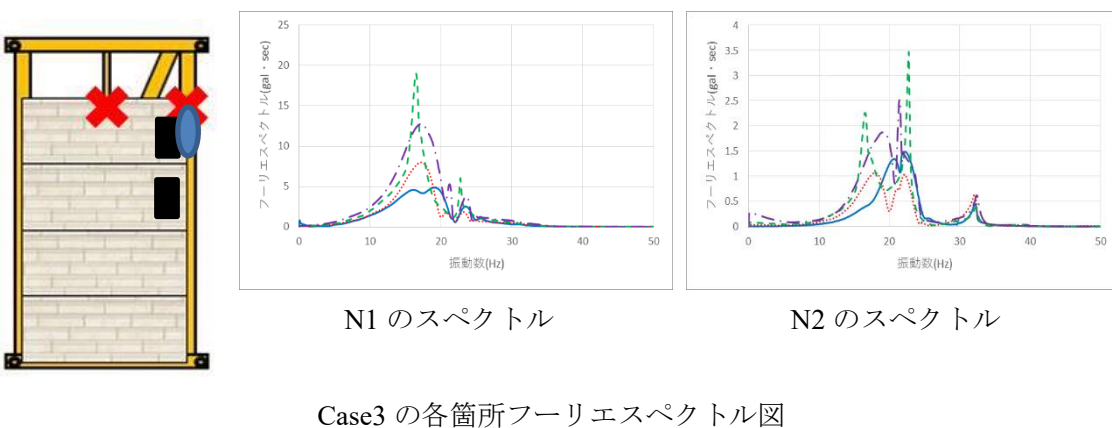
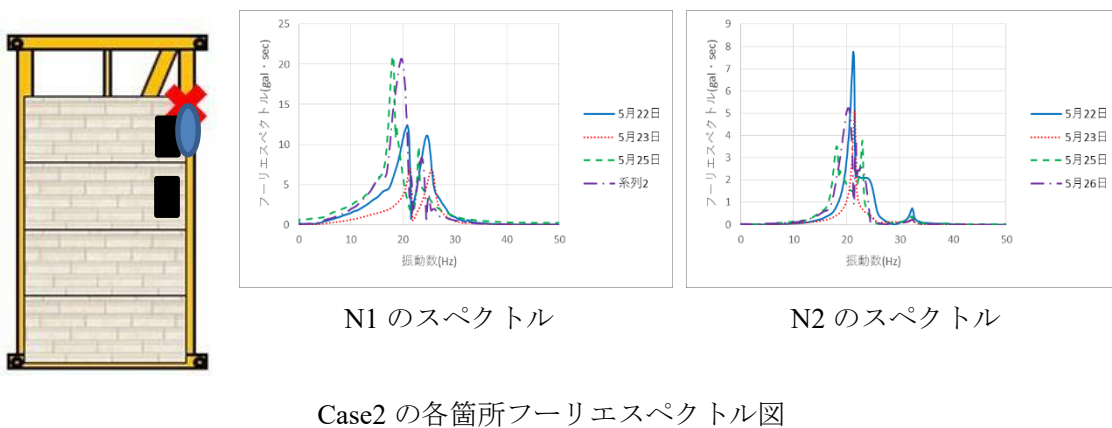
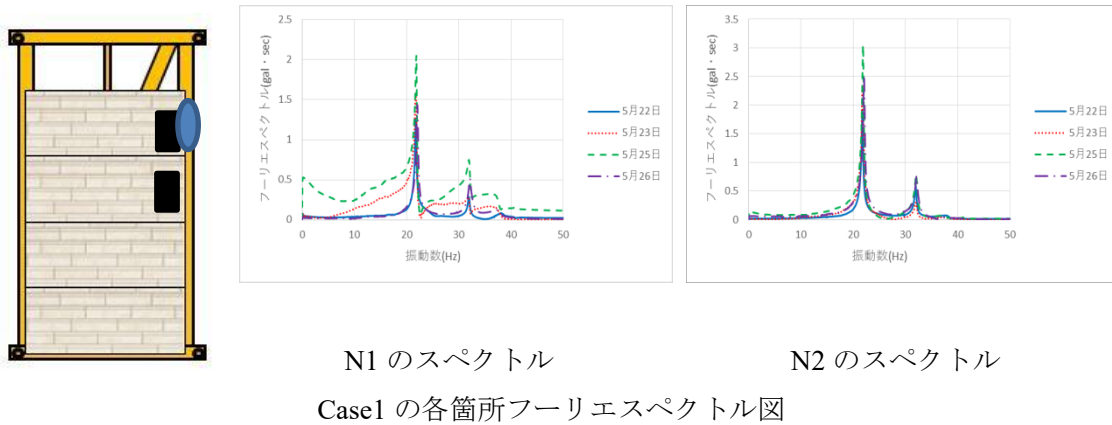
決定係数と減衰の指数の関係

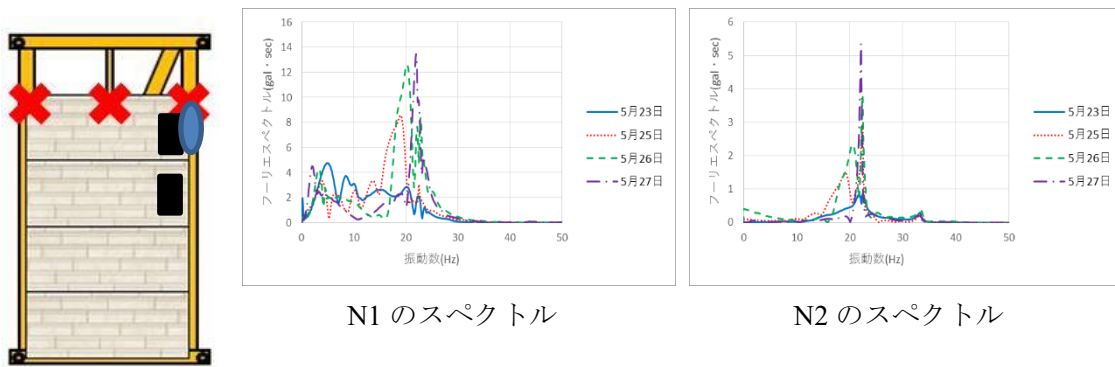
図 3-9 Case5

図 3-5 から図 3-9 において、劣化箇所（劣化箇所）のセンサの色は赤色としている。Case1 から Case4 をみると、健全箇所は指数-0.9 付近に収束するのに対し、劣化箇所は-1 を下回る。そのため、指数-1 を下回るものは剥離と検知できる。Case5 においては剥離箇所があるせいで健全部でも指数が-1 以下となっている。これはボード 4 枚が一体となって動いていることを示している。そのため、健全箇所、剥離箇所の把握まではできないが剥離の有無は検知はできることを示している。この判断は安全側であるため、やはり減衰率(指数)は剥離検知に使えることがわかる。

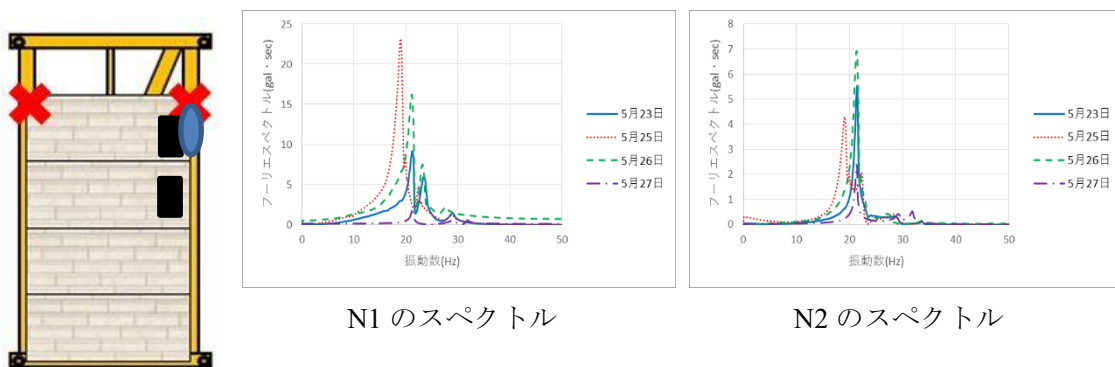
3.6.2 卓越振動数の有効性確認

既往の研究より卓越周波数の有効性は示されているが、次節以降に使うために再度本節で有用性を示す。センサ箇所等は前節と同様に、打診位置を 1,センサ貼り方 1 に固定した case1 から case5 を例とする。図 3-10 の左に試験体、中央に N1 のスペクトル、右に N2 のスペクトルを示す。





Case4 の各箇所フーリエスペクトル図



Case5 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-10 劣化状態と卓越振動数

図 3-10 において Case1 以外のすべての case において、N1 が劣化箇所、N2 が健全箇所である。同図において、劣化状態である case2 から case5 のスペクトルは、健全箇所劣化箇所関わらず、日変動が見られる。また、健全状態では 21Hz と 31Hz 付近のみにピークが生まれるが、劣化が生じると 21Hz のピークの低下、25Hz、15Hz 付近の新しいピーク、10Hz 以下の新しいピークが生まれる。そのため、有効指標として一次卓越周波数ではなくピーク周波数とし、ピーク周波数が 21,31Hz 以外にできたものを劣化とすることが正しいと考える。

健全状態の一次ピークが 21Hz であることから、まず起こる劣化が 21Hz ピークの低下、25Hz～15Hz にできる新しいピークである。これはおそらく劣化箇所(拘束箇所)の違いと、同状態であっても日によってピークが異なることから、加振の仕方が影響を与えていると考える。

3.7 センサ配置の合理化

前節までで減衰率(指数)と卓越振動数によって劣化を検知することは可能ということを示した。

本節では減衰率、卓越振動数を用いて、効率よく検査を行うセンサ配置について検討を行う。検査を行うときのセンサの貼り方としては図 3-11 に示すように下記を検討した。

- ・縦方向にセンサを貼ることで、劣化の有無，劣化箇所を検知できるか。
- ・横方向にセンサを貼ることで、劣化の箇所を検知できるのか。

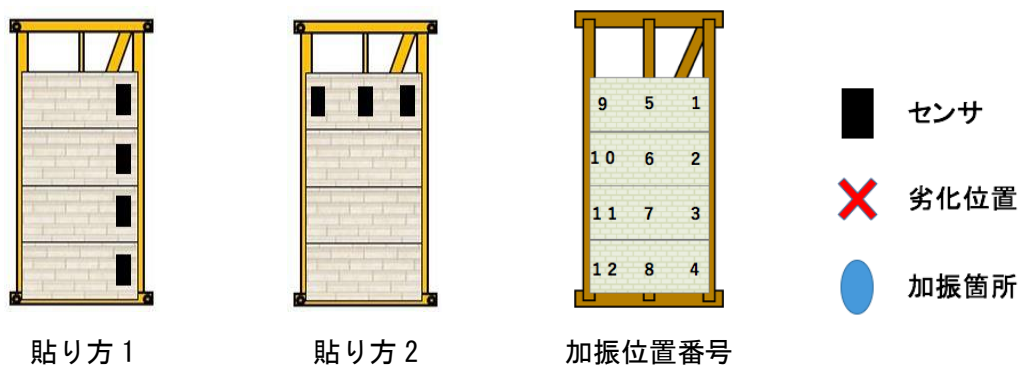


図 3-11 センサの貼り方

図 3-11 に示す、貼り方 1 で剥離の検知，剥離ボードの位置まで計測できれば，実際に検査を行うとき，一回の検査で高さ方向すべての状態を確認することができる。そのため，効率よく検査を行えることを示すことができる。

貼り方 2 では剥離ボードの中でも，どの箇所の留め付け金具が剥離しているかまで検査できるのかを確認する。貼り方 2 のみでは一つ一つのボードを検査しないといけないため，効率は悪いが，貼り方 1 と合わせることで，壁の劣化状態を事細かに説明できることとなる。

本節の検査は加振箇所は 1 に固定し，加速度センサで計測を行った。
次節以降に貼り方 1, 貼り方 2 の解析結果をピーク振動数，減衰率を用いて考察する。

3.7.1 貼り方1の考察

本節では、広い範囲を一度に検査できる貼り方1のセンサ配置について、各劣化状態を的確に検査できるのかを確認する。

(1)ピーク振動数を用いた劣化検知

センサ配置を貼り方1,加振箇所を1に固定した打診波形のフーリエスペクトル図を図3-12から図3-21に示す。

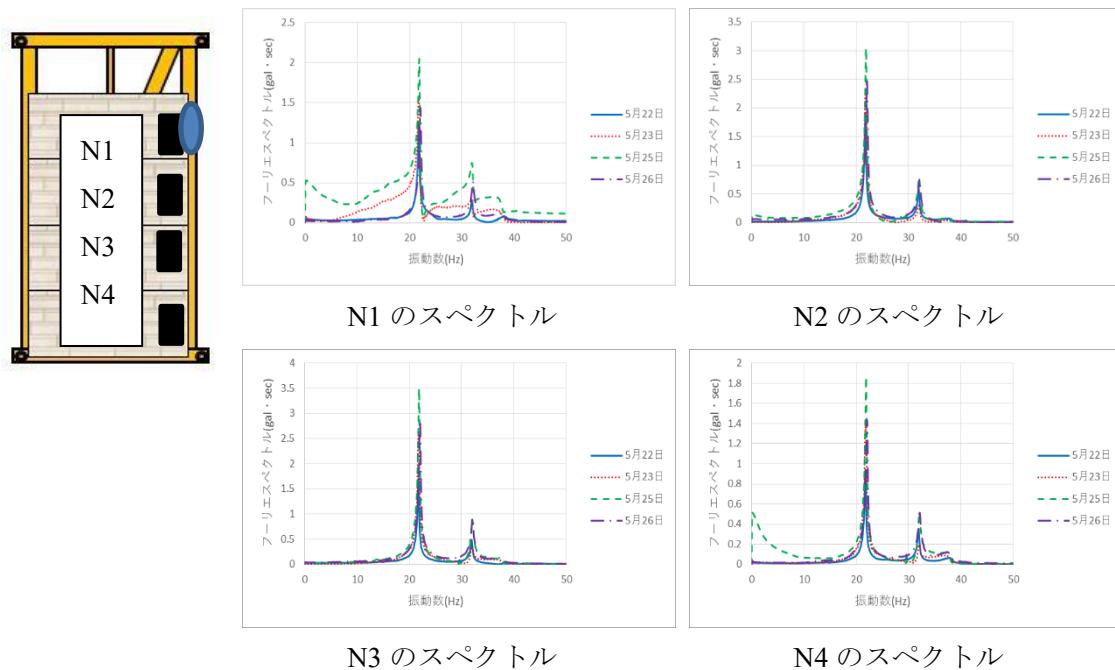


図 3-12 Case1 の各箇所フーリエスペクトル図

図3-12は全箇所健全であるため、スペクトルのセンサ間の違いは見られない。また、健全状態の藻に関しては、全箇所固定であるため、スペクトルの日変動も見られない。

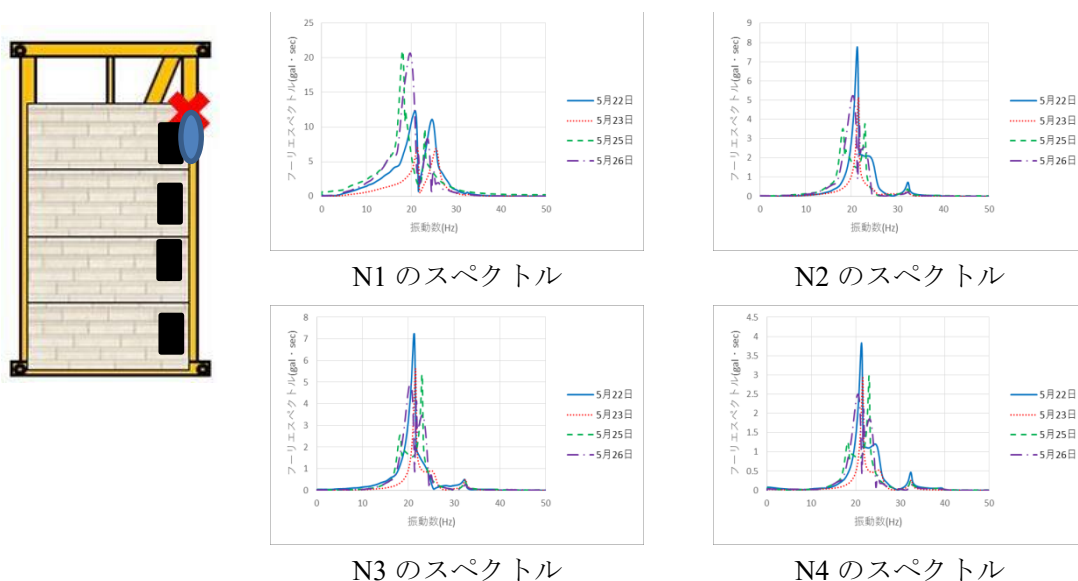


図 3-13 Case2 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-13 において劣化箇所 N1 でピーク振動数の低下, 0~30Hz 間の新しいピークが見られるため, 劣化は検知できると考えられる。健全箇所 N2,N3,N4 のスペクトルも case1 健全時と異なっている。そのため, 劣化箇所が 1 つでもあると系全体に影響が出て, 劣化ボードの特定までは行えない可能性があることがわかる。

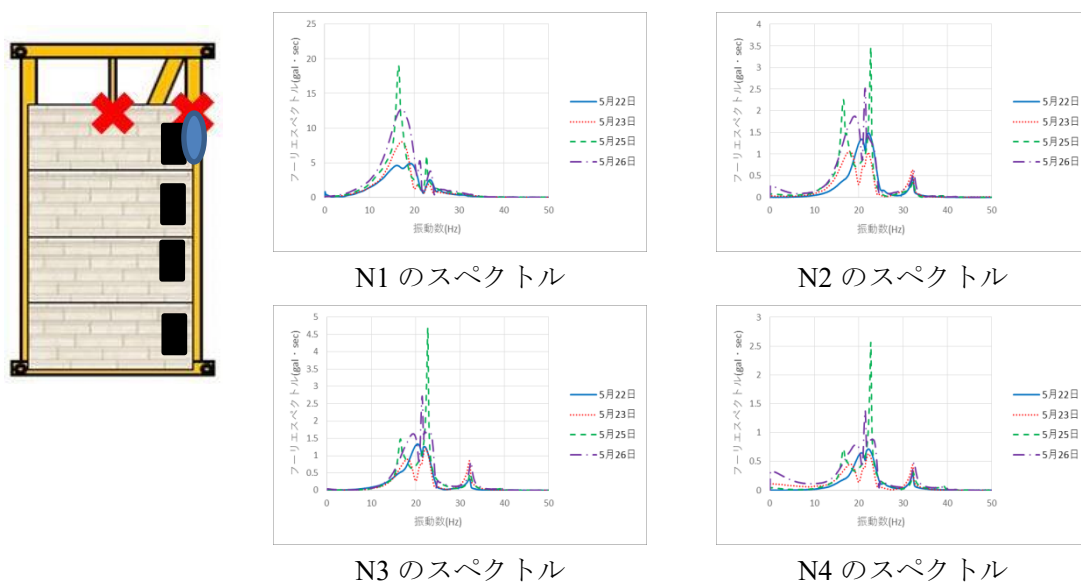


図 3-14 Case3 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-14 より健全箇所 N2,N3,N4 のスペクトルは一致しているが, やはり, 劣化の影響を受け, ピークの個数の増加が見られる。そのため, 劣化箇所の特定までは困難であった。劣化箇所 N1 は case2 以上に卓越振動数が低下している。

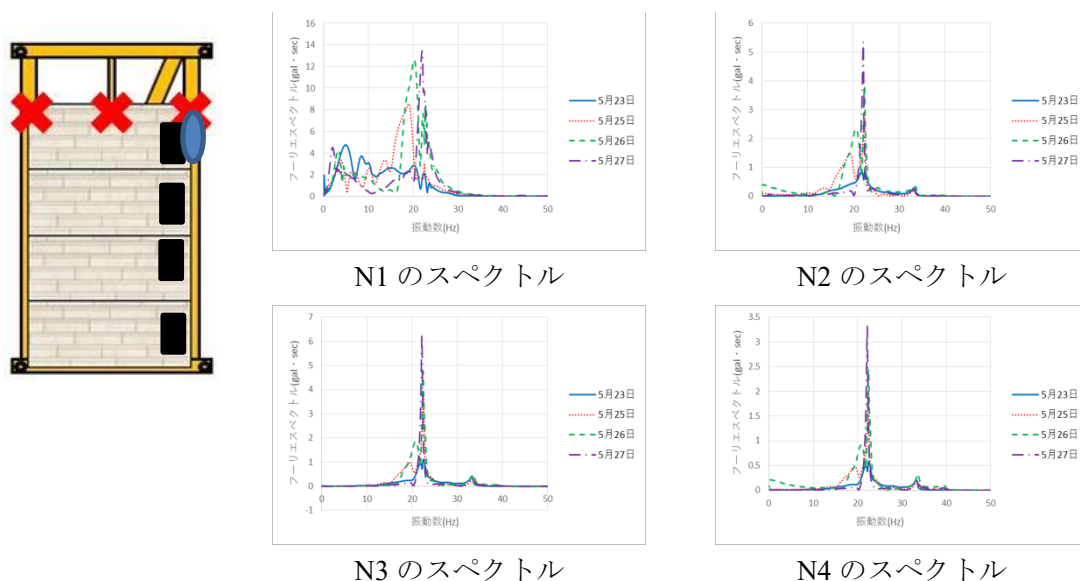


図 3-15 Case4 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-15 において劣化箇所 N1 は 10Hz 以下にピーク振動数ができる。また健全箇所 N2,N3,N4 は少しピーク周波数の低下は見られるものの、健全状態に近いスペクトルとなっている。原因として、case4 は一番上のボードが完全に載っているだけ状態であり、縁が切れたことによって劣化箇所の振動が伝わらないことが考えられる。

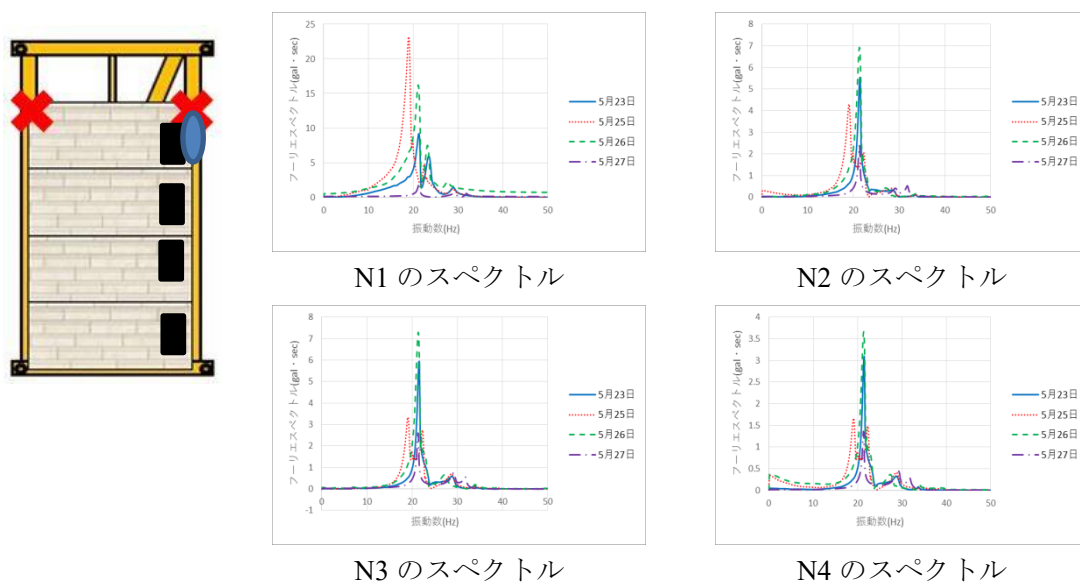


図 3-16 Case5 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-16 において劣化箇所 N1 はピークの低下、卓越振動数の増加が確認される。N2,N3,N4 のスペクトルは健全に近くなっている。Case3 と比較すると外柱の固定の有無が関係している可能性があると考えられる。(外が両方外れると別物縁が切れる)

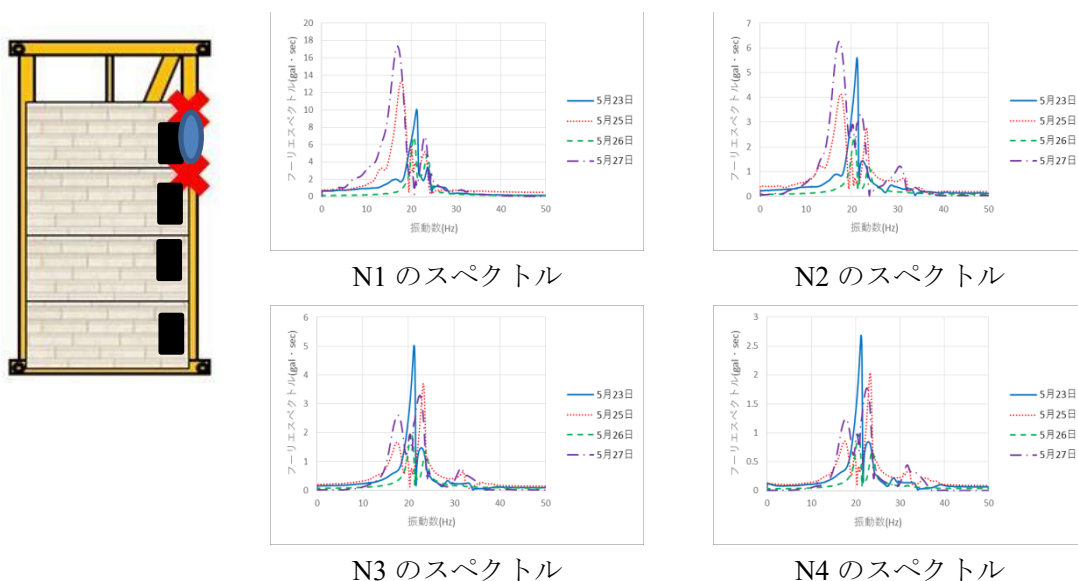


図 3-17 Case6 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-17 に示す通り、すべての箇所が 0~30Hz 間に 2 つ以上卓越振動数を持っている。そのため、劣化は検知できるが、劣化箇所までの検知は難しいことがわかる。

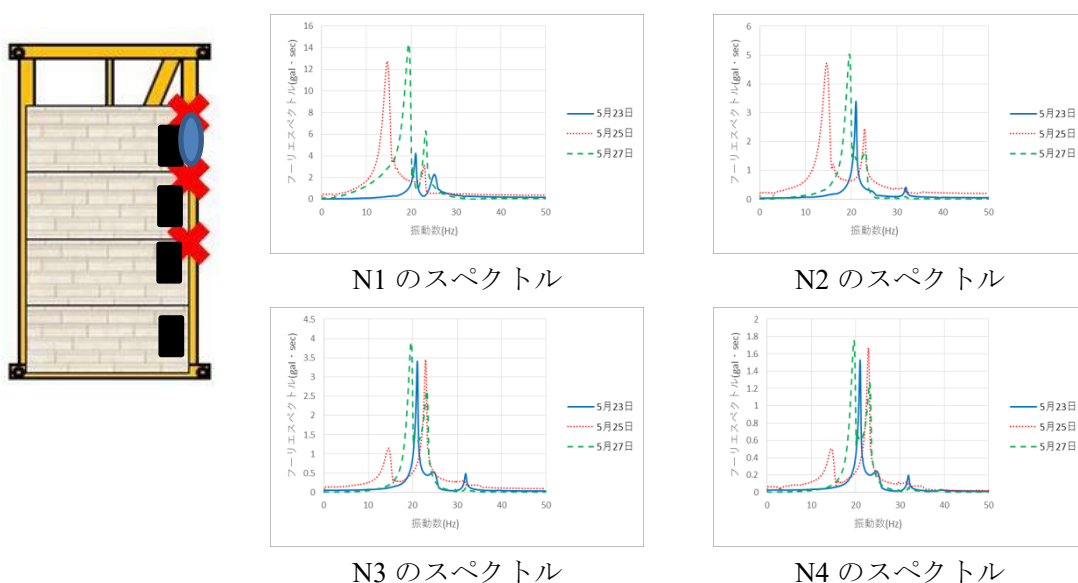


図 3-18 Case7 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-18 より、すべての箇所のスペクトルが変化していることがわかる。劣化箇所 N1,N2,N3 と健全箇所 N4 のスペクトルが似ていることから、外柱片側だけの剥離では縁が切れず、劣化の振動が系の振動を支配している。片側の外柱の高さ方向劣化はについて、ピーク振動数で劣化は検知できるが、劣化箇所までは検知できない。

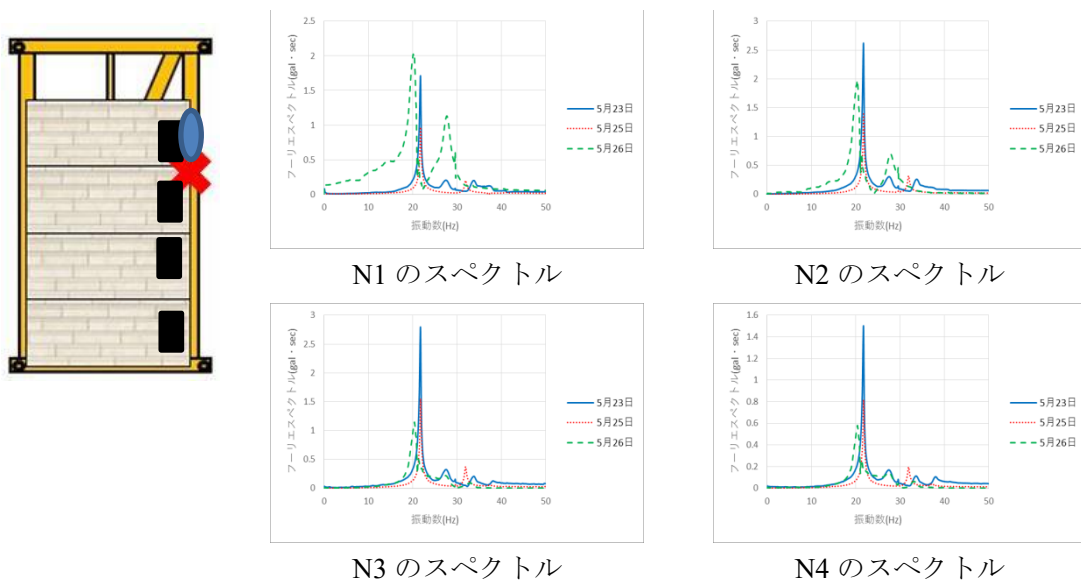


図 3-19 Case8 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-19 において、全ての計測箇所で 27Hz~28Hz 間に新たなピークができています。そのため劣化検知は可能である。しかし、どの箇所も同じピークを持っているため、劣化箇所までは特定できない。

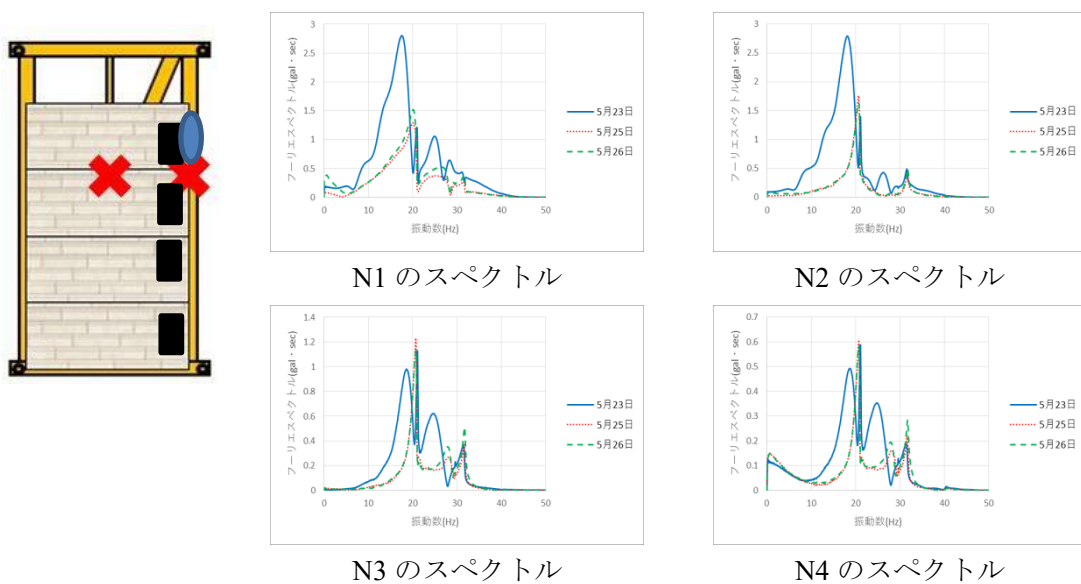


図 3-20 Case9 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-20 より、第一ピークが 21.7Hz から 20.6Hz 以下に低下する、もしくは 28Hz 付近に新たなピークができています。そのため、この case でも劣化は検知できるが、劣化箇所まではやはりわからない。

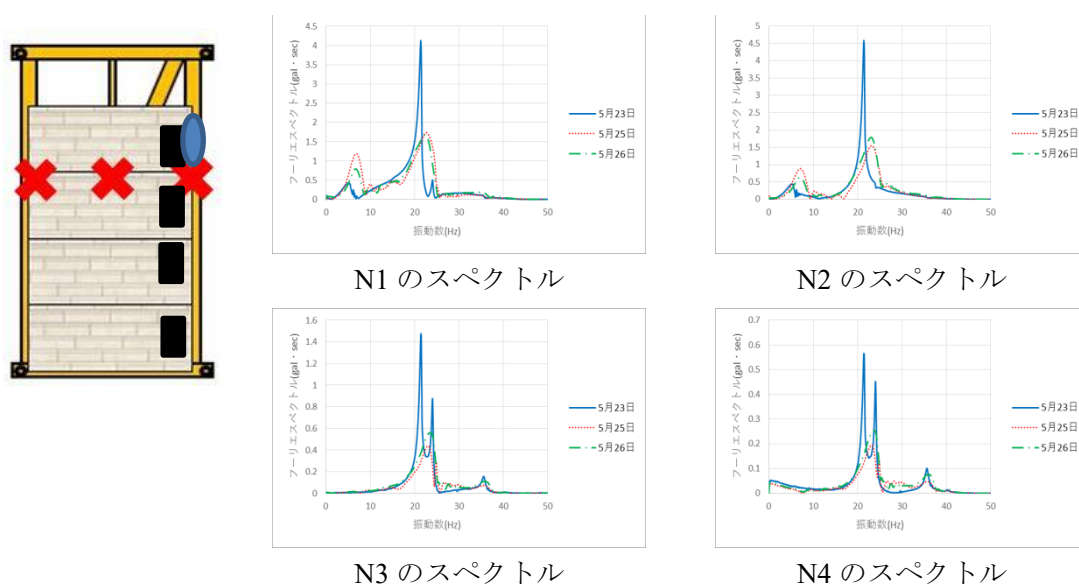


図 3-21 Case10 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-21 に示す通り、劣化箇所 N2 及び、その上部 N1 に 10Hz 以下のピークが確認できる。Case4 と合わせて考えると、10Hz 以下にピークを持てば、完全にボードが剥離している箇所及びその上部のボードであることは確定である。ボードは下から上に張っていくため、補修時は逆順で上から外さなくてはならない。そのため、上部すべてで 10Hz 以下のピークを持つことは完全剥離箇所までの確認にもなり、無駄な点検をする必要はない。

以下、ピーク振動数を用いた劣化検知によって得られた知見をまとめる。

① Case2 から case5 で上段の劣化を模擬した。

中柱が固定されているか、されていないかで健全箇所のスペクトルが変化することがわかった。そのため、外柱の劣化状態によって剥離ボードのみ劣化検知ができ、中柱も劣化が起こっている場合は、すべてボードが劣化を示す。すべてのボード劣化を示すが、やはり劣化箇所が一番スペクトルの変化が大きいため、上段の場合は劣化箇所まで検知ができる。

② Case6,7,8 で外柱高さ方向の劣化を模擬比較した。

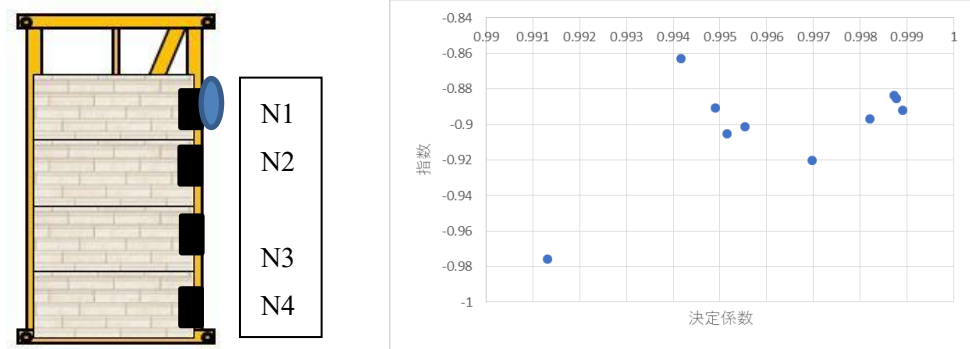
健全箇所、劣化箇所に関わらず、新たに 28Hz 付近にピークができるものが多く、劣化は検知できた。しかし、劣化箇所まで検知することは難しい。

③ Case8,9,10 で上段 2 段目の剥離を模擬した。この劣化も主にピーク振動数の個数の増加によって劣化検知はできるが、劣化箇所まではわからなかった。

④ Case4,10 より、ボードが確実に剥離している箇所より上段は、10Hz 以下にピークを持つことがわかった。

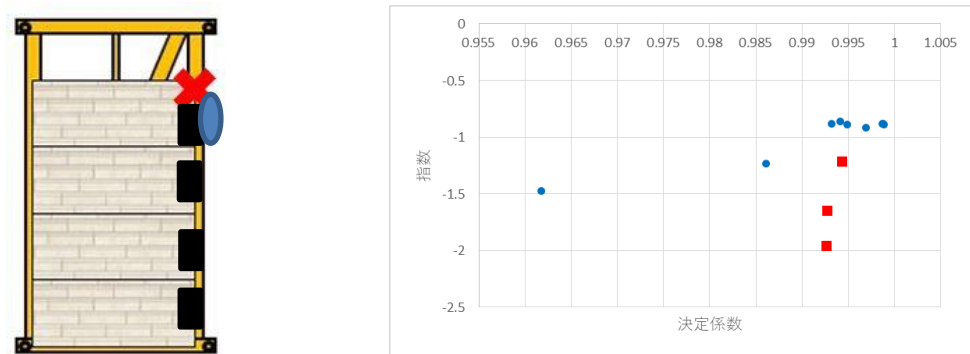
(2)減衰率(指数)を用いた劣化検知

センサ配置を貼り方 1,加振箇所を 1 に固定した打診波形の減衰率と決定係数の関係を図 3-22 から図 3-32 に示す。劣化箇所当たるセンサの結果は赤で示している。



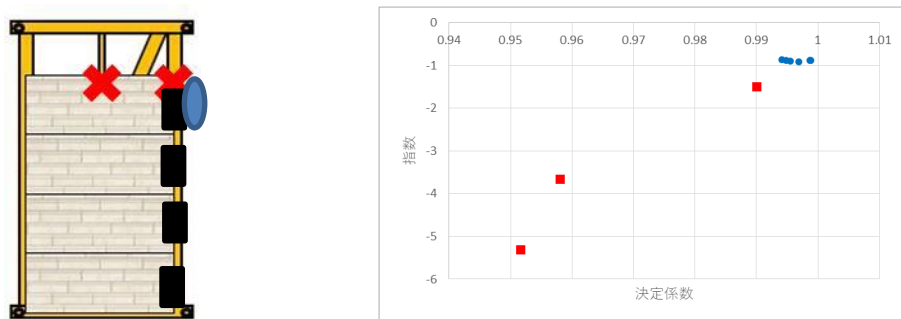
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-22 Case1 の減衰率



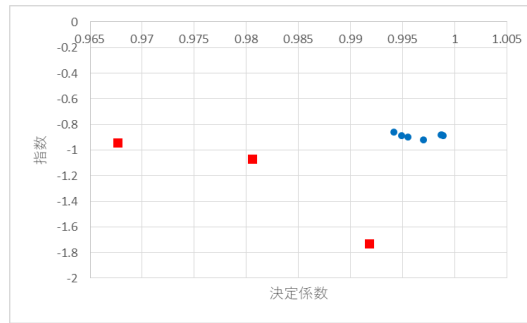
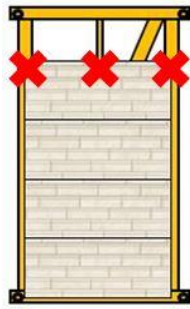
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-23 Case2 の減衰率



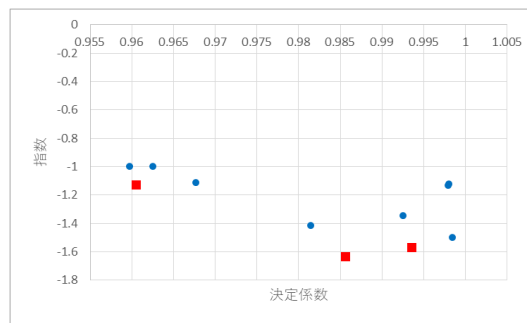
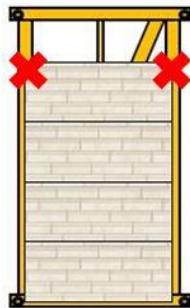
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-24 Case3 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-25 Case4 の減衰率

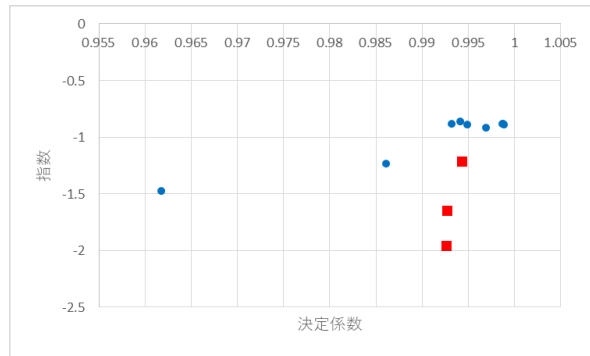
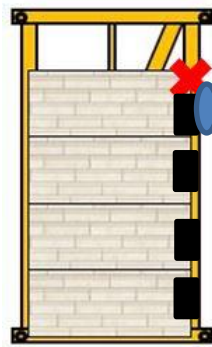


決定係数と減衰の指数の関係

図 3-26 Case5 の減衰率

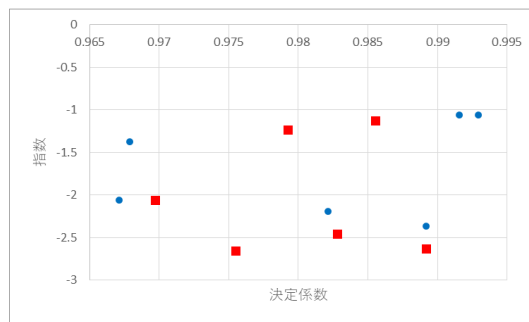
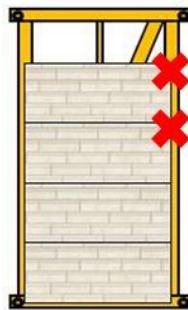
減衰率の有用性確認でも示したとおり、上段劣化である Case1 から case4 の減衰率を示す図 3-22 から図 3-25 をみると、健全箇所は指数-0.9 付近に収束するのにに対し、劣化箇所は-1 を下回る。そのため、指数-1 を下回るものは剥離と検知できる。

Case5 の結果を示す図 3-26 においては、剥離箇所があるせいで健全部でも指数が-1 以下となっている。これはボード4枚が一体となって動いていることを示している。そのため、健全箇所、剥離箇所の把握まではできないが剥離の有無の検知はできることを示している。



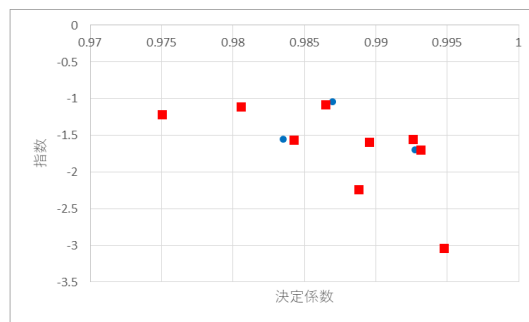
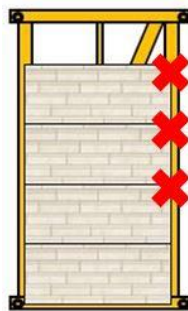
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-27 Case2 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

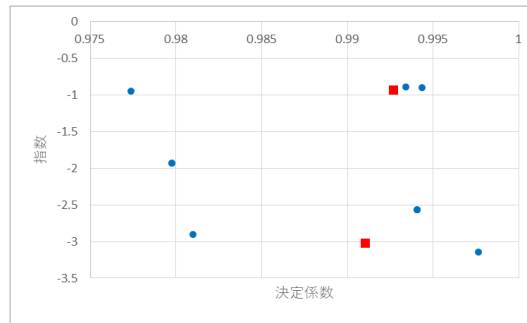
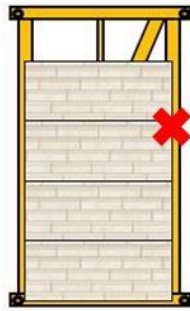
図 3-28 Case6 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

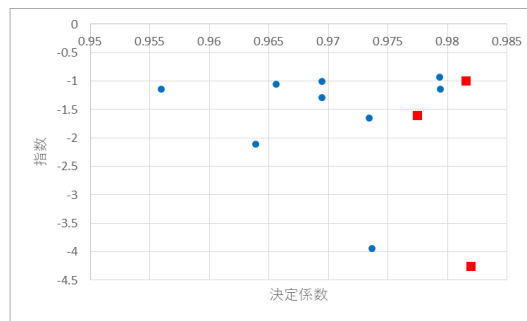
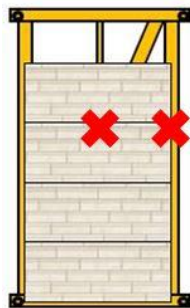
図 3-29 Case7 の減衰率

図 3-27 から図 3-29 は右側の外柱を対象とした高さ方向劣化模擬である。case2, case6, case7 をくらべると、case2 は剥離箇所まで検知できるが case6, 7 は全箇所が同じような減衰率を取るため、剥離検知までしか行えない。しかし、劣化数が増えるほど減衰率の指数が小さくなっている(case2:-2 まで、case6:-2.5 まで、case7:-3 まで)ため、減衰率によって劣化数は特定できる可能性がある。



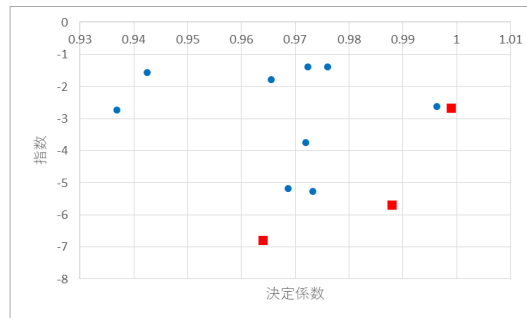
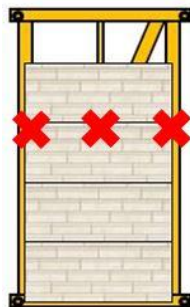
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-30 Case8 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-31 Case9 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-32 Case10 の減衰率

Case8,9,10 では上段 2 段目の横方向の劣化を模擬した。図 3-30 から図 3-32 よりわかる通り、上段 2 段目になると、case1~case5 の最上段の場合と異なり、健全箇所でも減衰率の指数が小さくなる。このことから、中段での劣化では周辺のボード全体に劣化の影響を及ぼしていることがわかる。そのため、剥離箇所まではわからないが、減衰の指数が-1 を超える箇所があれば劣化ありと判定することができる。

(3)貼り方1のまとめ

ピーク周波数を用いた検討より、以下が明らかとなった。

- ・最上段のみの劣化では固定箇所によっては上段のみスペクトルが変化するため、剥離箇所まで検知することができる場合がある。
- ・外柱の高さ方向劣化模擬より、新たに 28Hz 付近にピークができるため、剥離検知はできる。しかし、健全箇所含めスペクトルが変化するため、剥離箇所の特定までは難しい。
- ・中段横方向の劣化模擬においても、新しいピークができるため、劣化判断はできるが、劣化箇所までは特定できない。
- ・とめつけ金具 3 つが劣化し、完全に剥離したボードがあると、10Hz 以下に新しいピークを持つ

減衰率を用いた検討より、以下が明らかとなった。

- ・健全なものは減衰の指数が-0.9 に収束する。
- ・劣化が一箇所でもあれば減衰の指数が-1 を下回る(減衰は大きくなっている)ため、剥離検知ができる。
- ・最上段のみの劣化であっても健全箇所まで劣化箇所の減衰が影響を与えているため、劣化箇所の検知を行うのは難しい。
- ・外柱高さ方向劣化模擬より、劣化は検知できるが、劣化箇所までは検知できない。しかし、劣化箇所の数が増えるほど減衰の指数が小さくなる(減衰としては大きく、早くなっている)ため、データを蓄積すれば減衰率より何箇所劣化しているかの予測はできるようになる可能性がある。
- ・中段の劣化模擬では、劣化数に関わらず、全体に劣化の影響を与えている。そのため、劣化は検知できるが、劣化箇所まではわからない。

ピーク周波数、減衰率総じて、お互いに劣化があれば変化が見られるため、劣化検知は可能であることがわかった。しかし、どちらの指標とも劣化箇所の検知までは行うことが難しい。高さ方向にセンサを貼り、劣化検知は行えるということがわかったため、実際の検査においても、高さ方向に一気に検査を行うことができる。そのため、大きくみた劣化の有無の検査に関しては、この貼り方が効率よく検査できる方法であると考えられる。

次節でセンサを横に貼る貼り方2を検討し、1枚ずつの検査だと書く指標に違いが出るのかを確認する。

3.7.2 貼り方2の考察

本節では、ボード1枚1枚を検査する詳細検査の可能性を検討する。前節で大きい目で見えた劣化有無の確認は行えることがわかったため、本節の貼り方2で剥離箇所まで特定できるのであれば、貼り方1(危険箇所の推測)→貼り方2(劣化箇所の確認)ができるため、検査工程を確立することができることとなる。

(1)卓越振動数を用いた劣化検知

センサ配置を貼り方1,加振箇所を1に固定した打診波形のフーリエスペクトル図を図3-33から図3-42に示す。

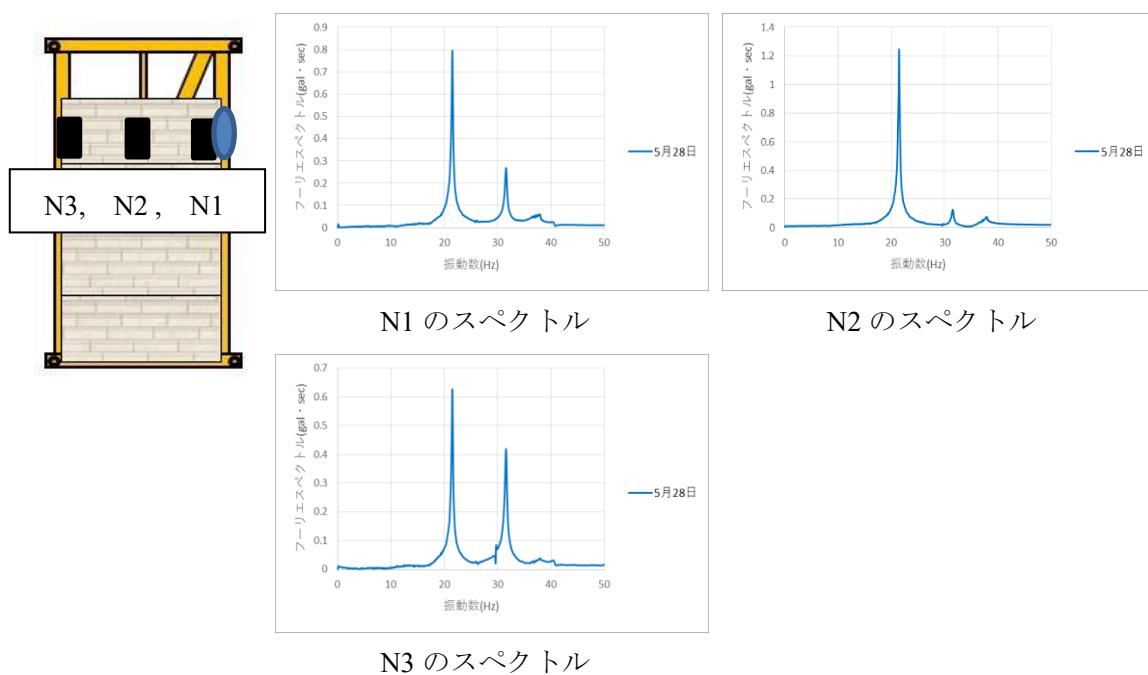


図 3-33 Case1 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-33 に示す Case1 は全箇所健全であるため、卓越振動数のセンサ間の違いは見られない。

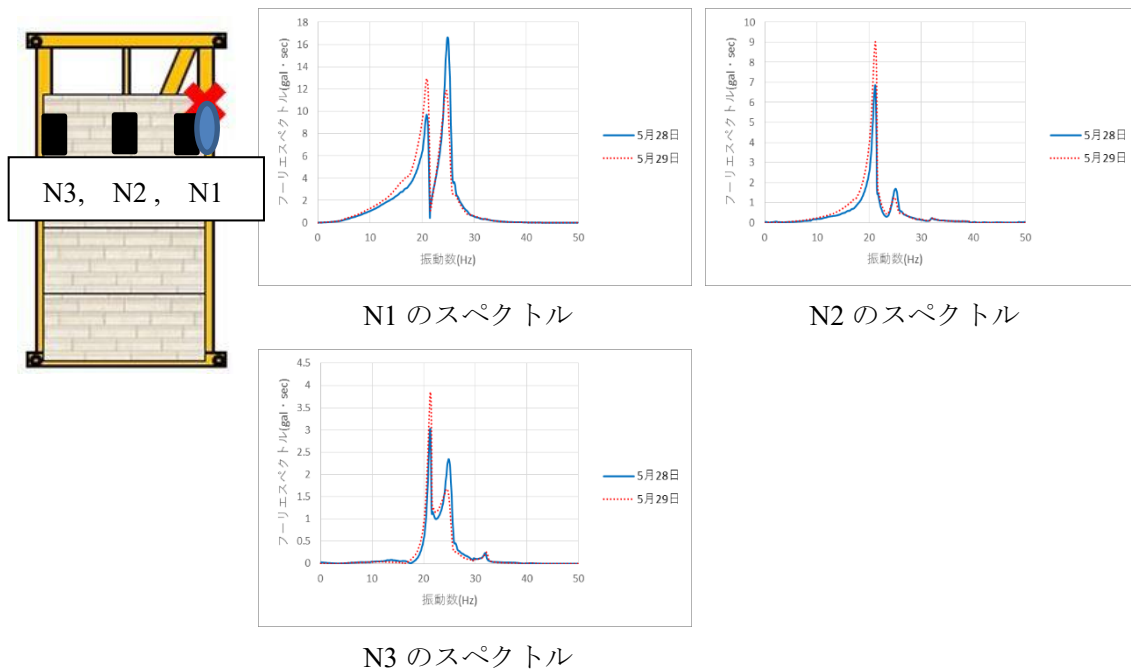


図 3-34 Case2 の各箇所フーリエスペクトル図

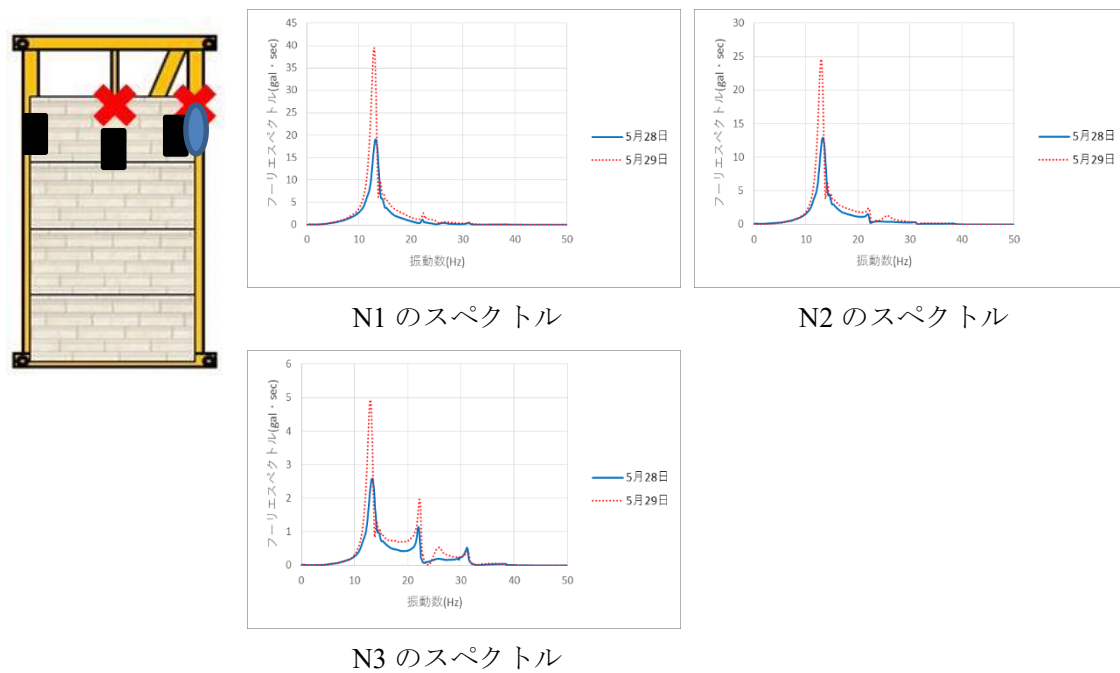


図 3-35 Case3 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-34、図 3-35 に示す Case2,3 は、ともに健全箇所である N3 も劣化箇所と似たスペクトルを持っている。その為、最上段であっても剥離箇所の検知は不可能である可能性が高い。

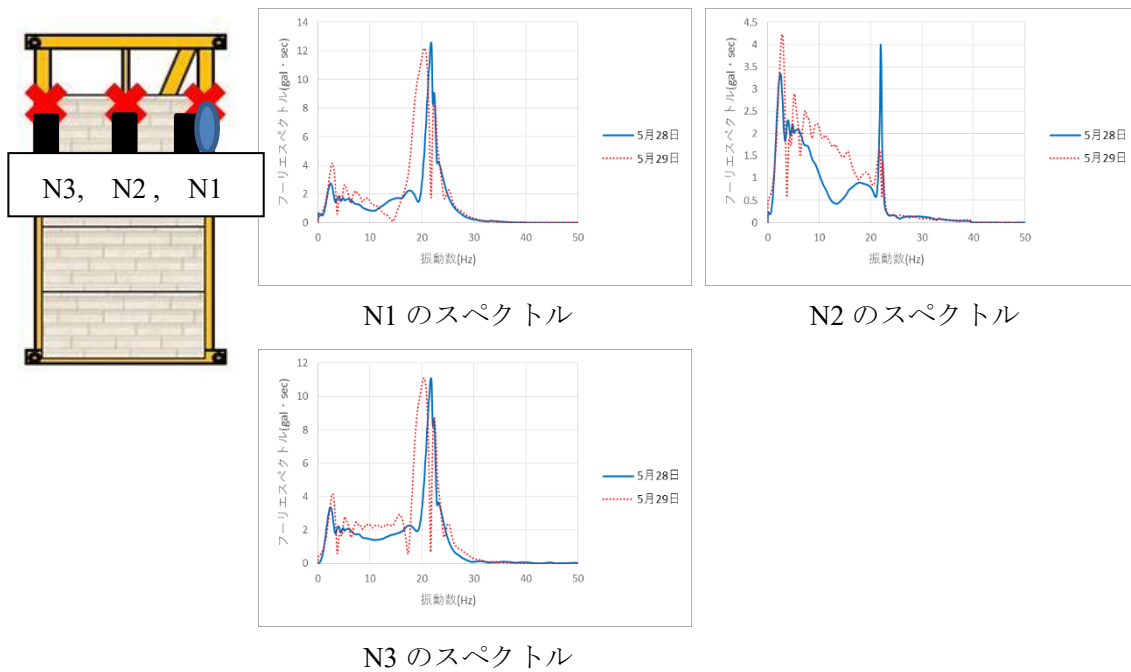


図 3-36 Case4 の各箇所フーリエスペクトル図

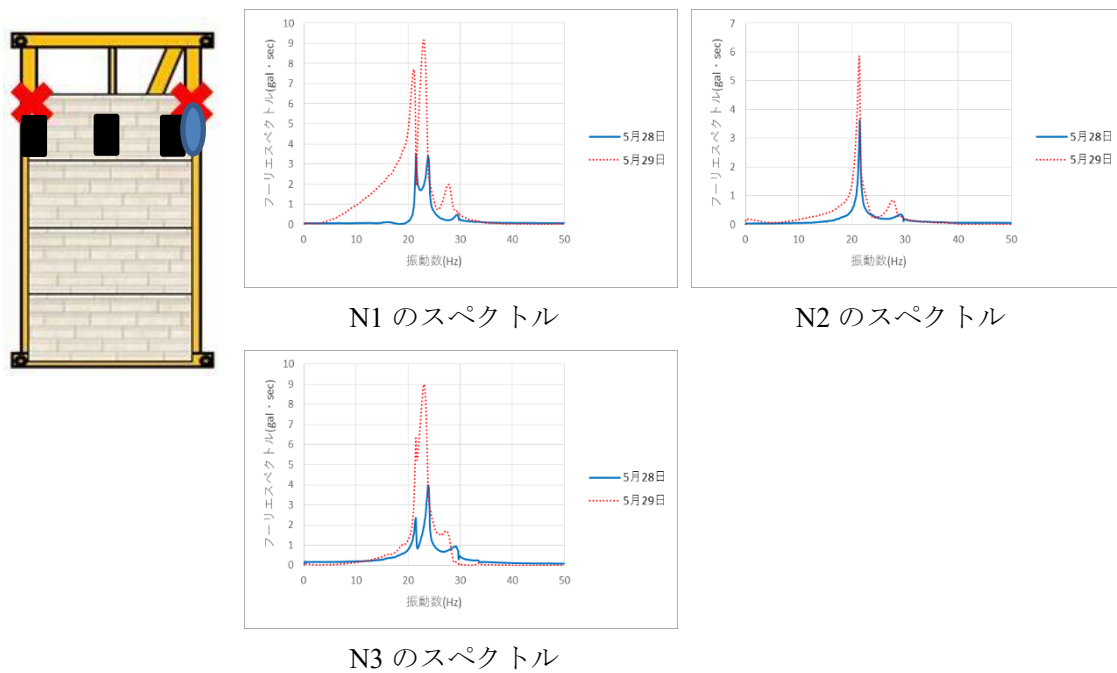


図 3-37 Case5 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-36 図 3-37 に示す、Case4,case5 の結果でも健全、剥離箇所関係なくスペクトルの変化が見られる。

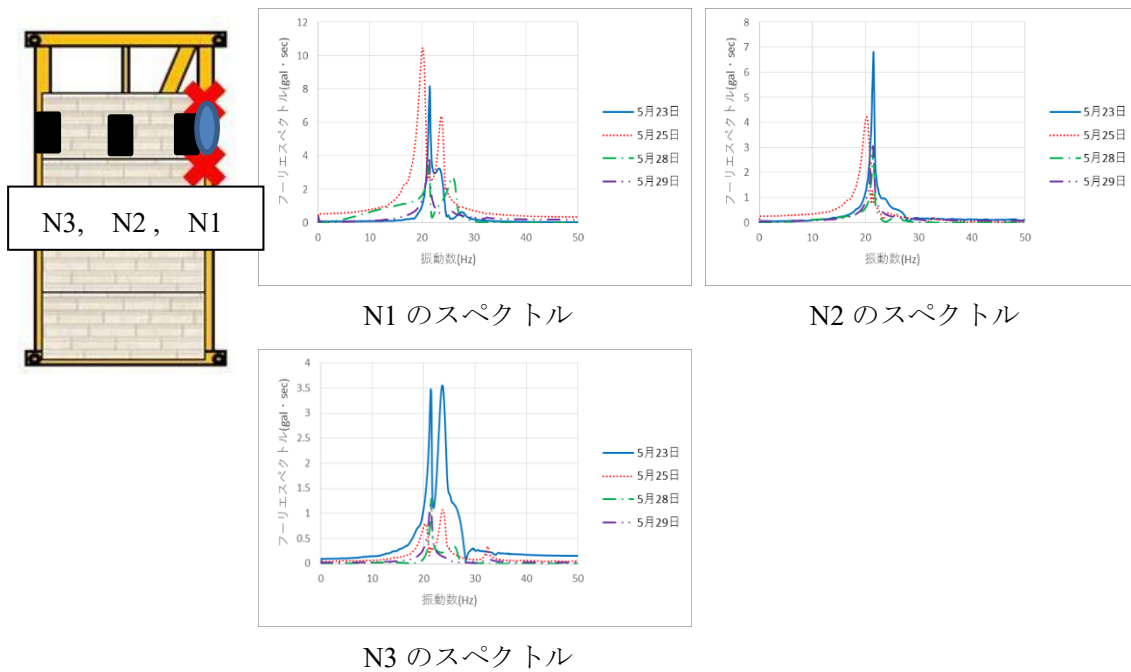


図 3-38 Case6 の各箇所フーリエスペクトル図

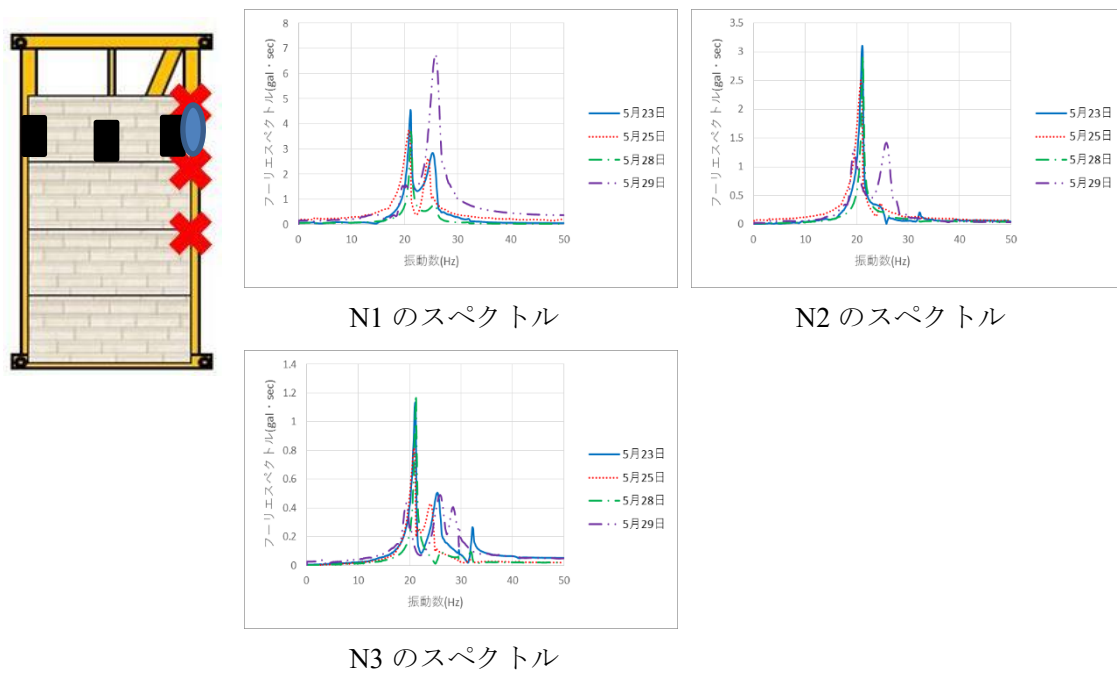
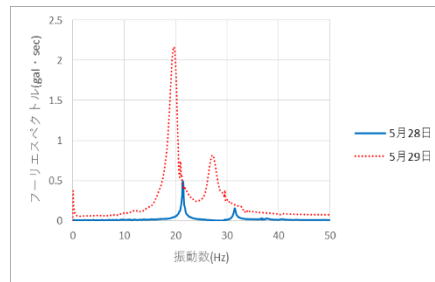
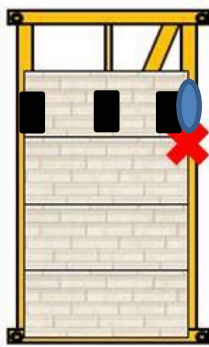
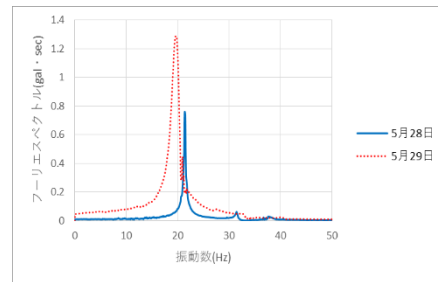


図 3-39 Case7 の各箇所フーリエスペクトル図

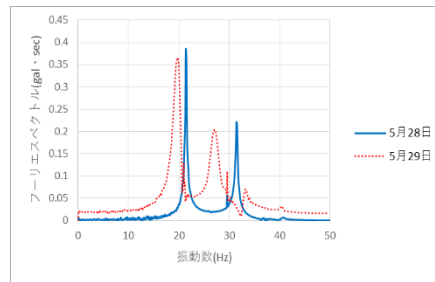
図 3-38、図 3-39 から、外柱高さ方向劣化の case6,7 においても、健全箇所 N2,N3 で劣化の影響を受けていることが推測される。



N1 のスペクトル

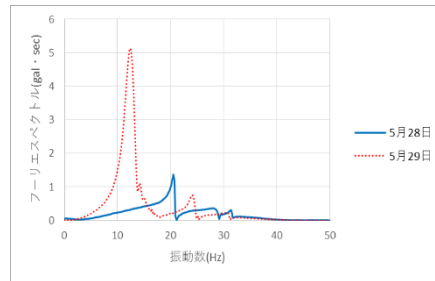
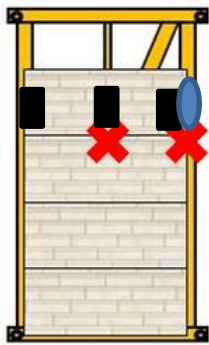


N2 のスペクトル

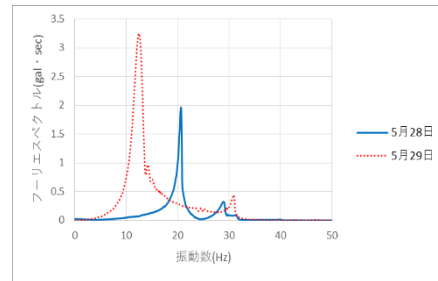


N3 のスペクトル

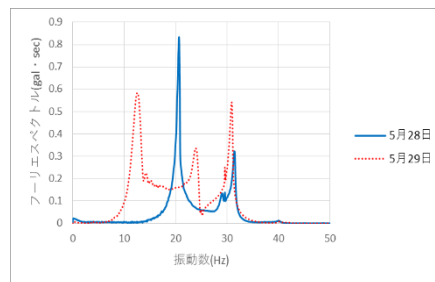
図 3-40 Case8 の各箇所フーリエスペクトル図



N1 のスペクトル



N2 のスペクトル



N3 のスペクトル

図 3-41 Case9 の各箇所フーリエスペクトル図

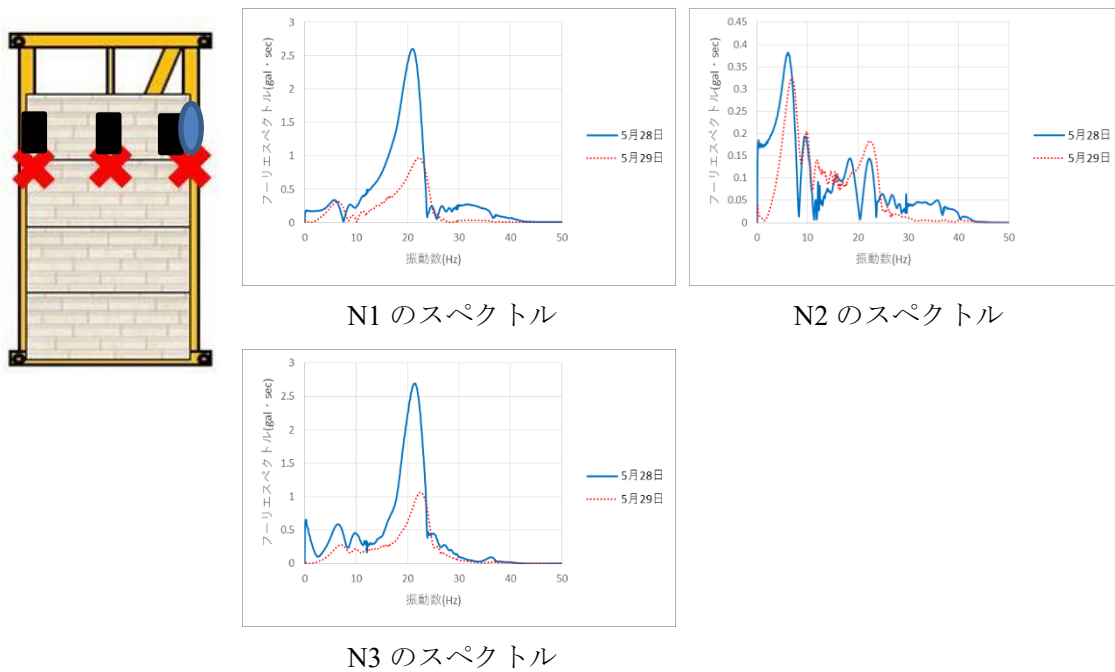


図 3-42 Case10 の各箇所フーリエスペクトル図

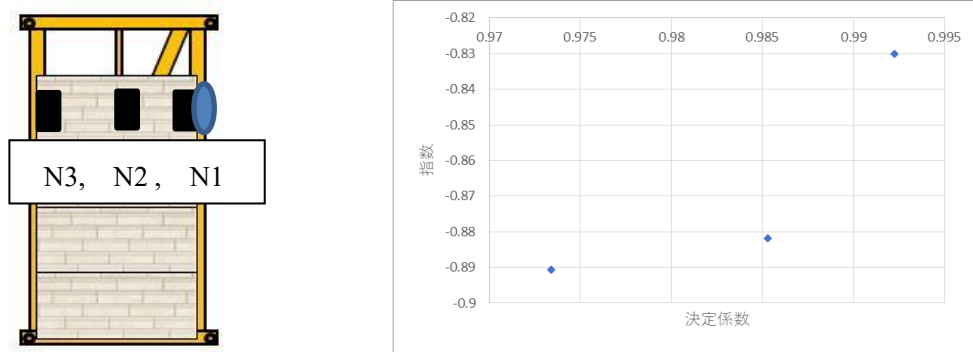
図 3-40 から図 3-42 は中段劣化模擬の case8,9,10 であるが、case8 の 5/28 の結果のみ、健全を示している。健全箇所にセンサを貼っているため、健全の結果が出ることは大丈夫である。しかし、5/29 にはピーク振動数の低下が見られる。打診の条件は全て揃えているため、原因追求が難しい。Case9,10 においてはピーク振動数の低下や、新しいピークが見られるため、健全箇所であるにも関わらず劣化判定されている。

ピーク振動数を用いた考察総じて、

- ・最上段劣化模擬の case2~5, 外柱高さ方向劣化の case6,7, 中段劣化模擬の case8~case10 どれにおいても健全箇所まで劣化判定となったため、この指標を用いて劣化箇所までは判断できない。

(2)減衰率(指数)を用いた劣化検知

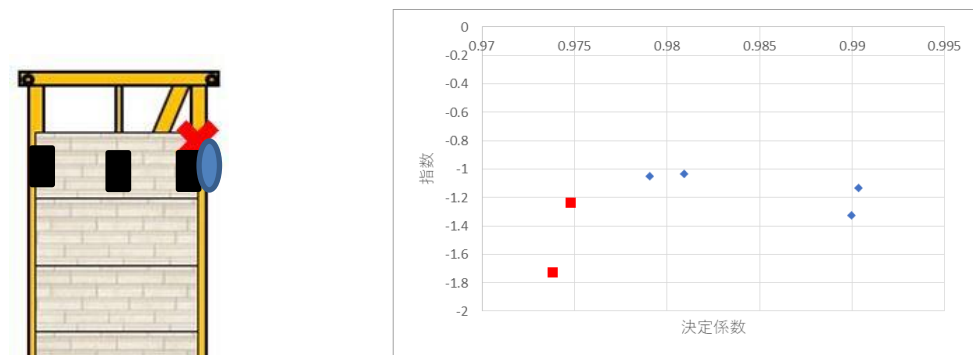
センサ配置を貼り方 2,加振箇所を 1 に固定した打診波形の減衰率と決定係数の関係を図 3-43 から図 3-52 に示す。本貼り方は剥離箇所ピンポイントの検知であるため、劣化模擬とセンサが一致した箇所のみ赤色で示す。



決定係数と減衰の指数の関係

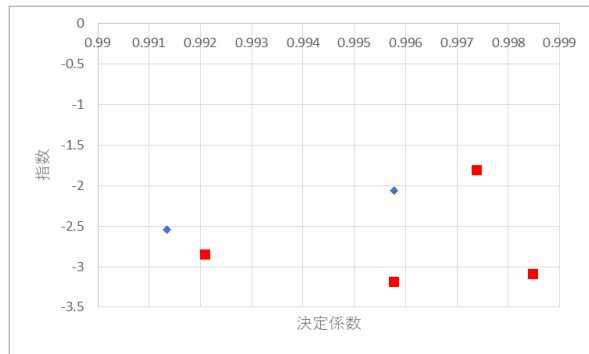
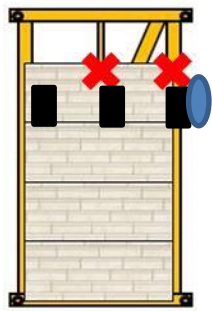
図 3-43 Case1 の減衰率

図 3-43 より、やはり健全の箇所は減衰率の指数が-0.9 付近に収束することがわかる。



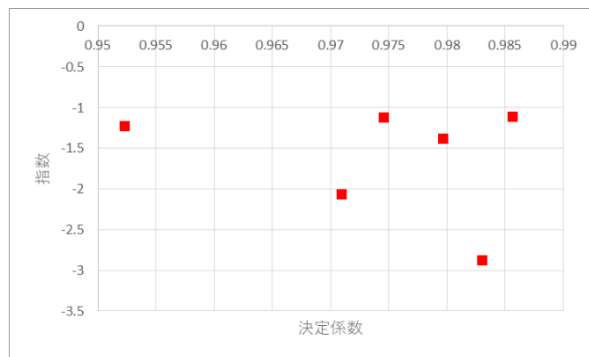
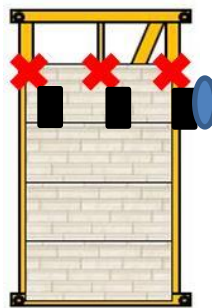
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-44 Case2 の減衰率



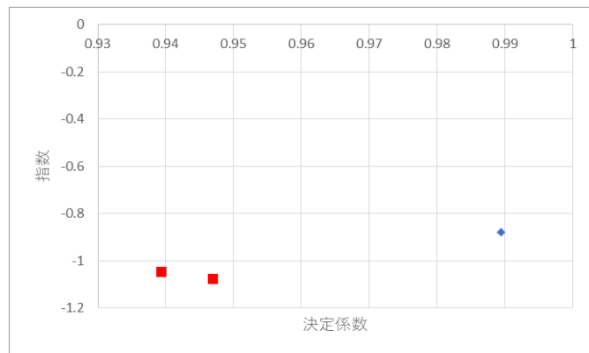
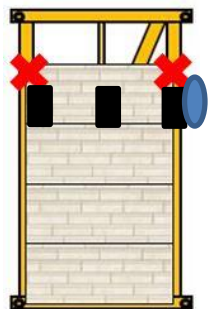
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-45 Case3 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

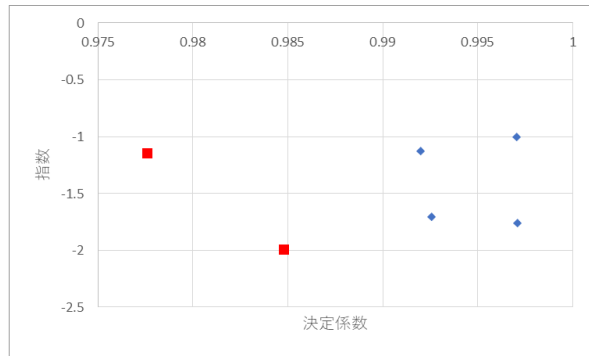
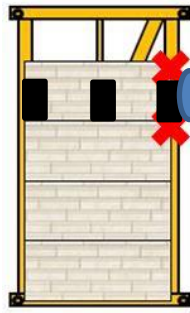
図 3-46 Case4 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

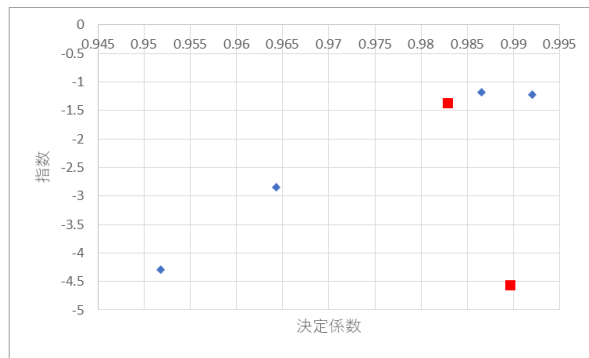
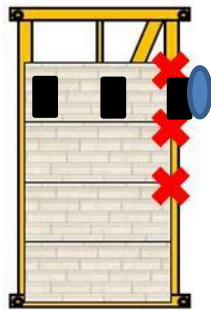
図 3-47 Case5 の減衰率

図 3-44 から図 3-47 に示す通り、最上段劣化模擬の case2~case5 を見ると case2,3,4 では劣化箇所、健全箇所関係なく減衰の指数が-1 を下回っているため、劣化箇所の把握までは行えない。Case5 はデータ数が少ないため、正確なことは言えないが、健全箇所のみ減衰指数が-0.9 より大きい。両端劣化時は中央部 N2 が支点となり、あまり振動しないため、このような結果になる可能性が考えられる。



決定係数と減衰の指数の関係

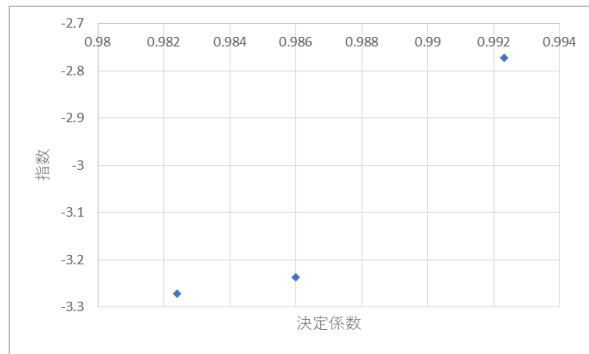
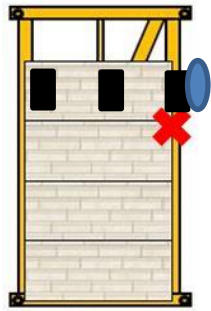
図 3-48 Case6 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

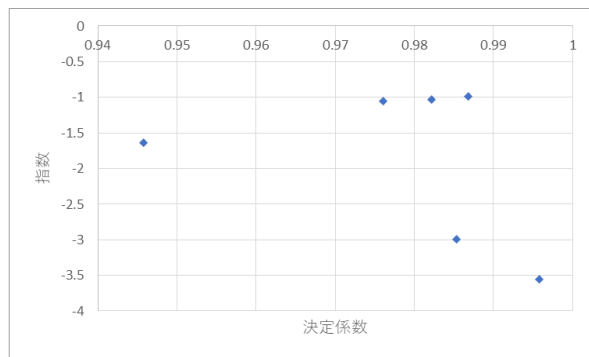
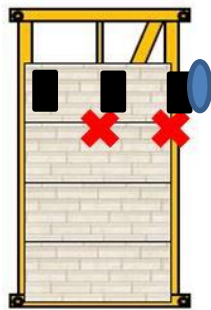
図 3-49 Case7 の減衰率

図 3-48、図 3-49 は外柱高さ方向模擬の case6,case7 の結果であるが、健全箇所であっても劣化箇所と同程度の減衰指数になっている。劣化箇所からの距離とも関係性はなさそうであるため、詳細検査を行っても劣化箇所の断定は行えない。



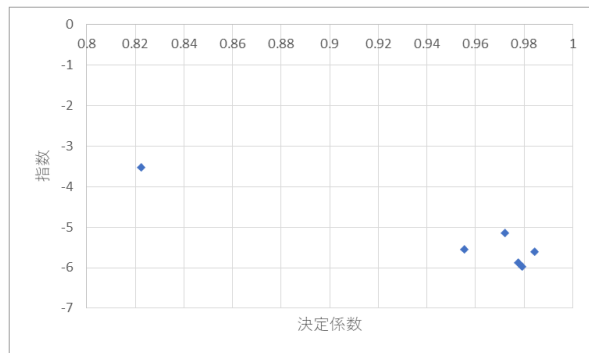
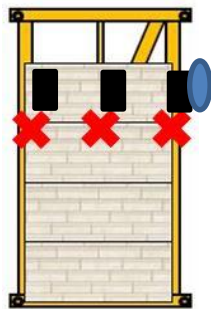
決定係数と減衰の指数の関係

図 3-50 Case8 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-51 Case9 の減衰率



決定係数と減衰の指数の関係

図 3-52 Case10 の減衰率

図 3-50 から図 3-52 に示す中段劣化模擬の case8,9,10 では全センサが健全箇所にはられているが、減衰の指数が大きく-1を下回っている。劣化箇所の上部のみ指数が小さくなっているわけでもないため、劣化箇所の検知は行えない。また、本 case は劣化位置と加振位置が異なる。このような条件でも剥離箇所の検知は行えなかった。

減衰率を用いた考察総じて、

中柱が健全時のみ、条件によっては健全時判断となるが、基本 case2～case10 まで健全箇所も劣化判断となる。

(3)貼り方2のまとめ

ピーク振動数、減衰率どちらにおいても健全箇所であっても剥離と同じ傾向が見られたため、剥離箇所まで特定することは難しいことがわかった。

3.7.3 センサ配置のまとめ

貼り方1で劣化の有無、どのボードが劣化しているか検知できるかを確認し、貼り方2でボード内のどの箇所が劣化しているかを検知できるか確認した。

高さ方向において、どのボードが剥離しているかは特定できると全ボード外す必要がなく、効率よく補修が行えるため検知できてほしかったが、難しいことが分かった。そのため、本節では貼り方1のように各ボード高さ方向にセンサを貼り、一度に劣化の検知を行う。という検査方法が一番効率よく検査できる。ということがわかった。貼り方2に関してはセンサ位置、劣化位置、加振位置関係なく健全位置でも劣化と似た結果になったため、この方法の検査は意味がないということがわかった。

本節では加振位置を1に固定していたため、次節では加振位置を替えて検討を行う。センサの貼り方は1に固定し、打診位置を変えた場合には劣化箇所を特定できるかの検討である。

3.8 加振位置の合理化

前節では加振位置を1に固定し、検討を行った結果、加振箇所と劣化箇所に関係なく、一箇所の加振で劣化の有無は検知可能ということがわかった。

本節では、劣化の有無を効率よく検知できる貼り方1において、加振位置を変えて検査を行えば劣化箇所の特定まで行えるかを検討することとした。加振箇所を変えるだけで劣化箇所の特定まで行えるのであれば、センサの貼り方を1とし、高さ方向に各箇所1回ずつ打診を行うことで剥離ボードの箇所まで特定できてしまうため、検査後の補修まで考えると、効率の良い検査方法であることを示すことができる。

図 3-53 にセンサの貼り方、加振位置の番号を示す。

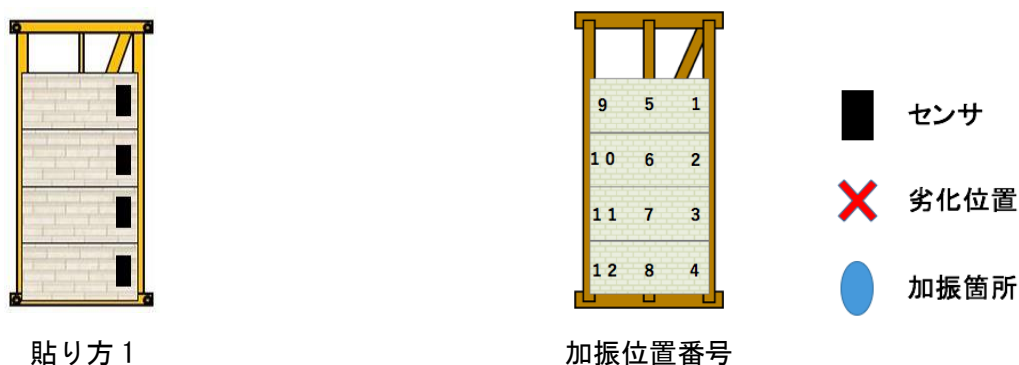


図 3-53 センサの貼り方、加振位置の番号

次節以降に貼り方1,加振箇所を変数とした結果を、ピーク振動数, 減衰率を用いて考察する。加振箇所は劣化ボードの位置さえわかれば良いので1,2,3,4とする。

3.8.1 ピーク振動数を用いた劣化検知

センサ配置を貼り方 1,加振箇所を 1 に固定した打診波形のフーリエスペクトル図を図 3-54 から図 3-63 に示す。

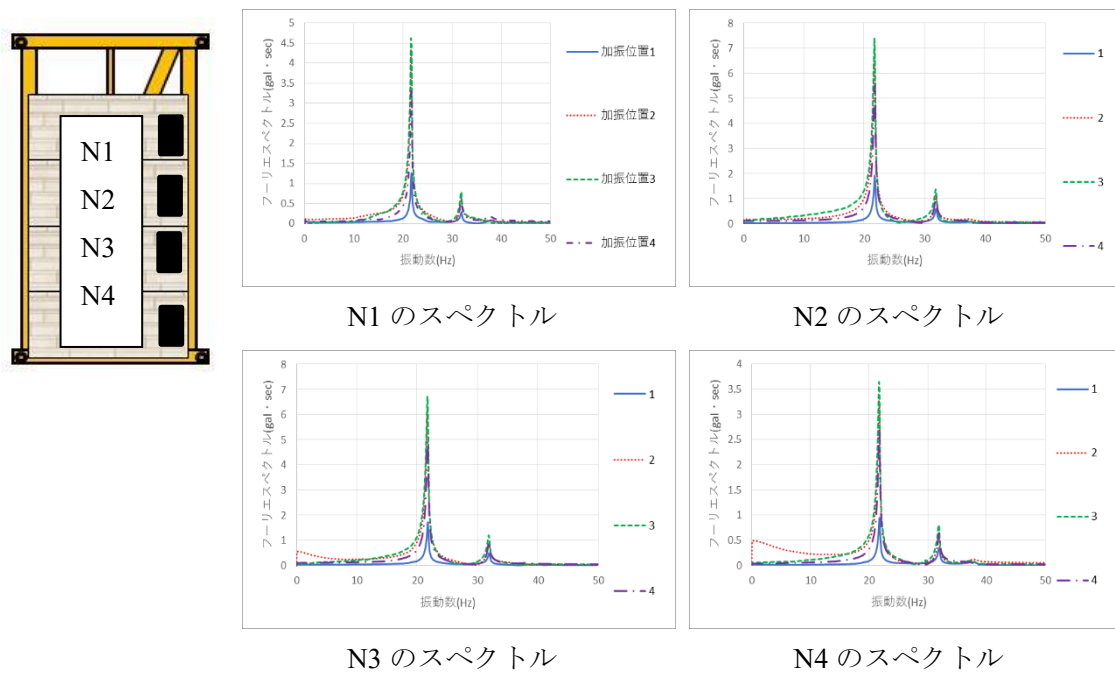


図 3-54 Case1 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-54 に示す Case1 は全箇所健全であるため、スペクトルのセンサ間の違いは見られない。

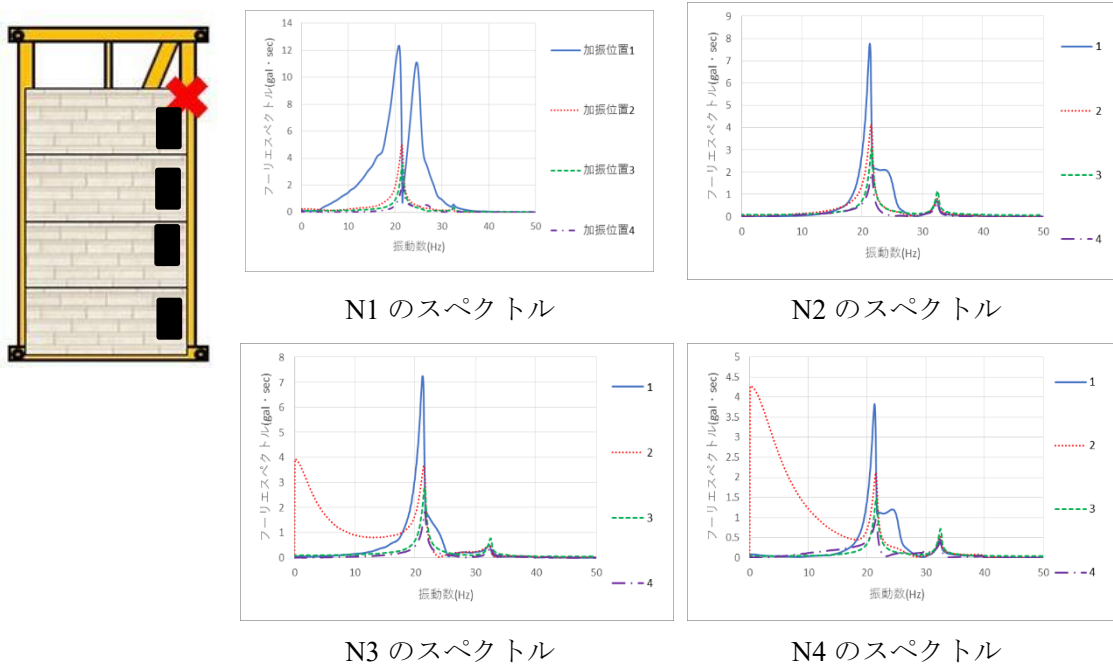


図 3-55 Case2 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-55 において、加振箇所と劣化箇所が重なっている 1 加振時には劣化箇所 N1 で見やすくスペクトルが変わっている。しかし、健全箇所 N2,3,4 でも劣化時と同じスペクトルとなっている。加振箇所と劣化箇所が一致していない加振位置 2,3,4 においては劣化箇所、健全箇所ともに健全と同じ結果となっている。そのことから、加振箇所=検査箇所の結果(N1 の検査は加振箇所 1,N2 の検査は加振箇所 2 の結果)を見ると、ボードの状態を把握できる可能性が高い。

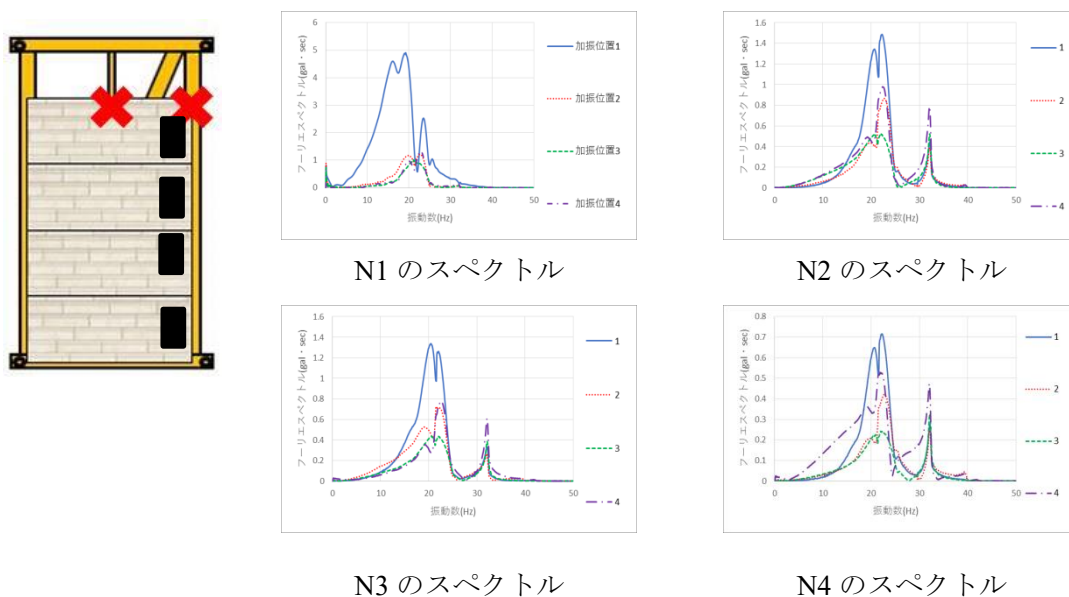


図 3-56 Case3 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-56 に示す通り、N2,N3,N4 において、Case2 で述べた加振箇所=検査箇所の予測が成り立っていない。しかし、N1 の加振位置 1 の結果のみ、スペクトルが他より大きくなっている。このことから、加振位置=劣化位置の場合は他のものよりスペクトルが大きくなり、それによって劣化位置の検知が可能である可能性が認められた。

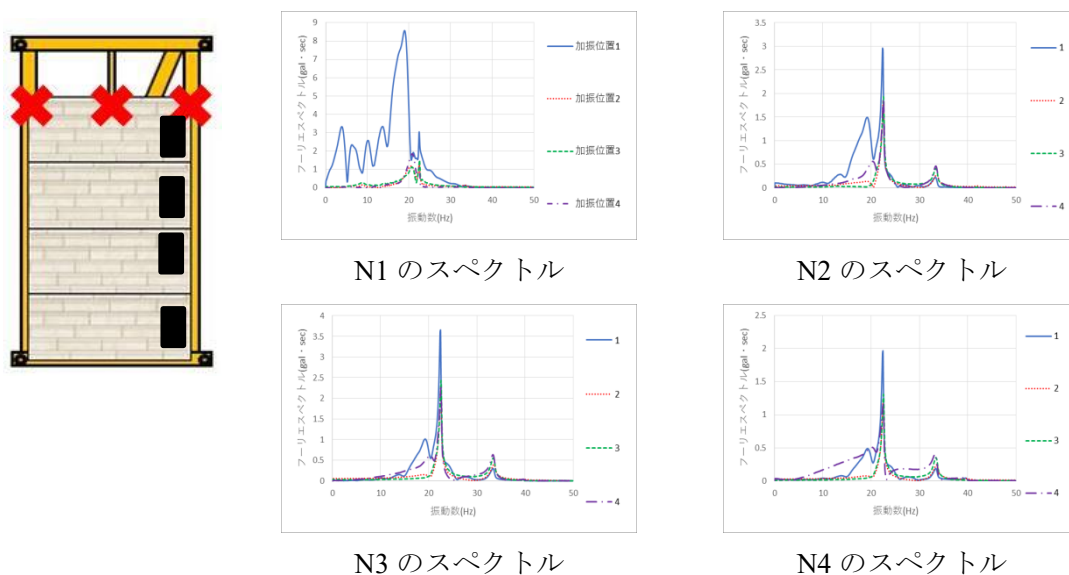


図 3-57 Case4 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-57 の N1 の加振位置 1 の結果より加振位置=劣化位置の場合は他のものよりスペクトルが大きくなり、それによって劣化位置の検知ができています。また、N1,1 加振のみ 10Hz 以下にピークが見られる。

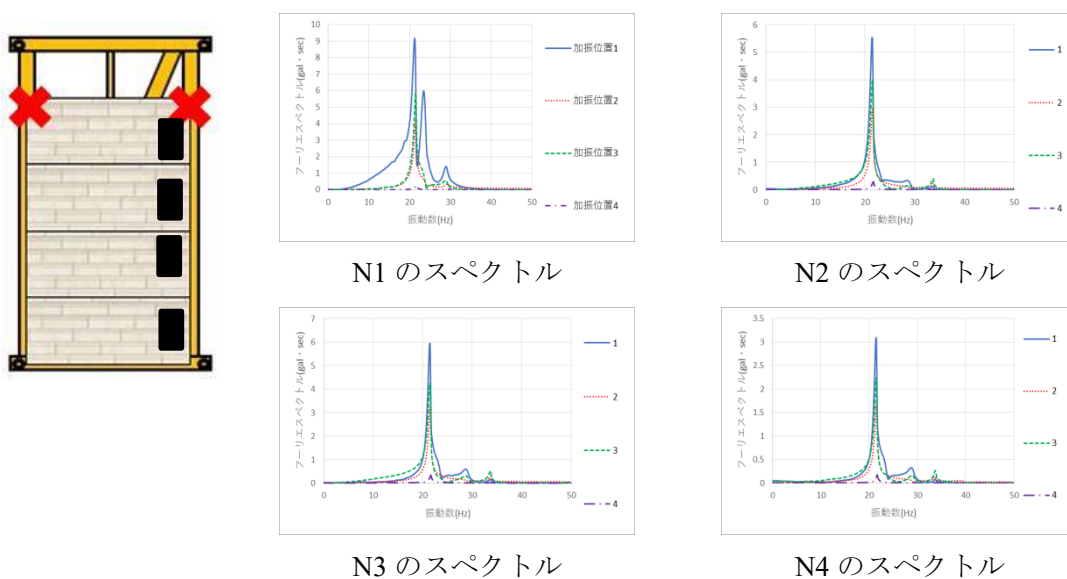


図 3-58 Case5 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-58 における N1 の加振位置 1 の結果より加振位置=劣化位置の場合は他のものよりスペクトルが大きくなり、それによって劣化位置の検知ができています。

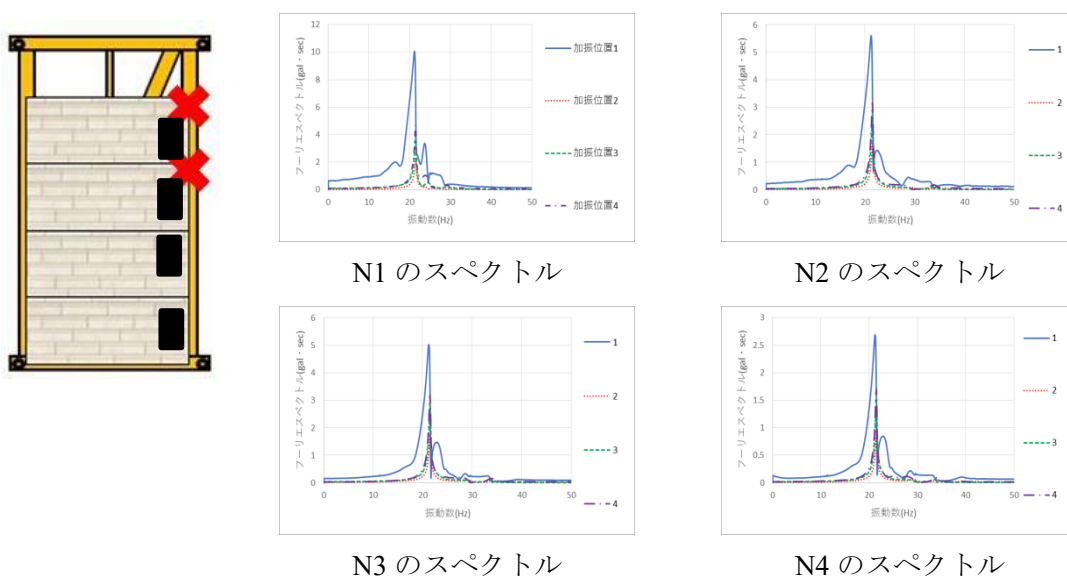


図 3-59 Case6 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-59 に示される外柱高さ方向の劣化においては、最上段である N1 の加振位置 1 の結果より加振位置=劣化位置の場合は他のものよりスペクトルが大きくなり、それによって劣化位置の検知ができています。しかし、N2 の検知ができていない。理由としては最上段のボードによって上から抑えられているためだと考える。そのため、高さ方向での中段での劣化位置検知は難しい可能性が高い。

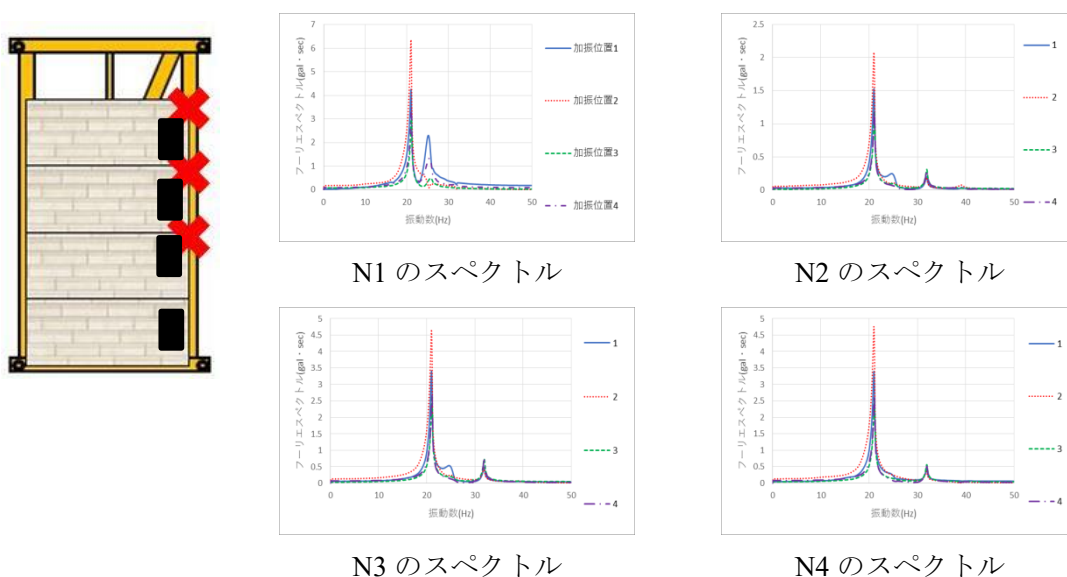


図 3-60 Case7 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-60 より、加振位置 1 のもののみ劣化箇所 N1,N2,N3 で劣化を示している。N2,N3 の加振箇所=検査箇所の結果を見ても、劣化箇所であるにもかかわらず健全と同じスペクトルを持っている。高さ方向での劣化の場合は劣化位置検知はやはり難しい。

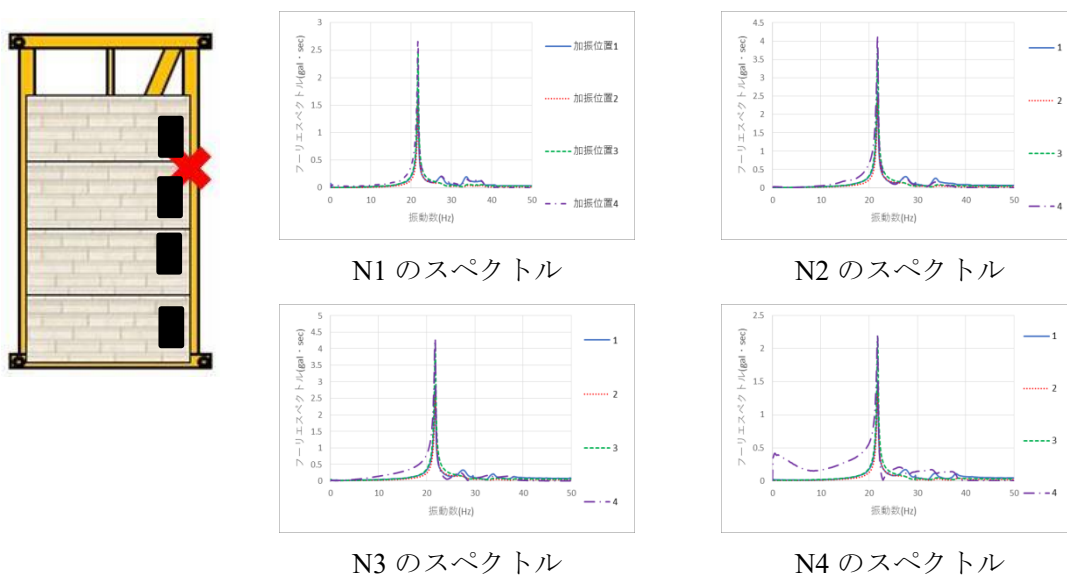


図 3-61 Case8 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-61 の加振箇所 1,4 の結果を見るとすべての箇所で 28Hz 付近の新しいピークが見られる。劣化の有無はわかるが、劣化箇所まではわからない。また、加振箇所=劣化箇所である N2,2 加振を見ても健全と同じスペクトルとなっている。Case6,7 と合わせると外柱中段の劣化検知が難しいことがわかった。

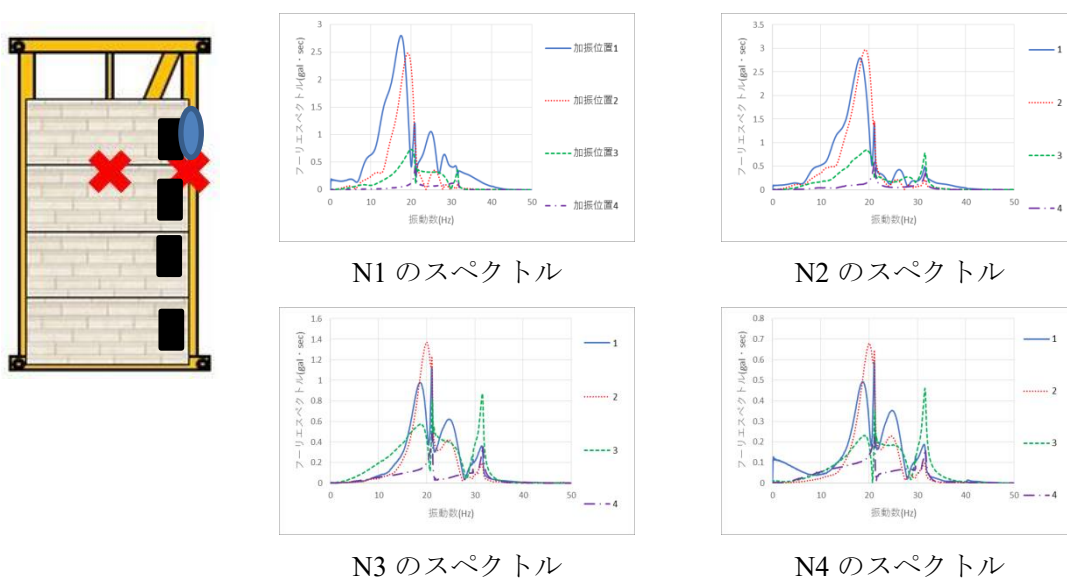


図 3-62 Case9 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-62 である中段 2 箇所の劣化は case8 とうって変わり、どこを加振してもすべての箇所で劣化の特徴が見られるため、位置の特定は難しい。

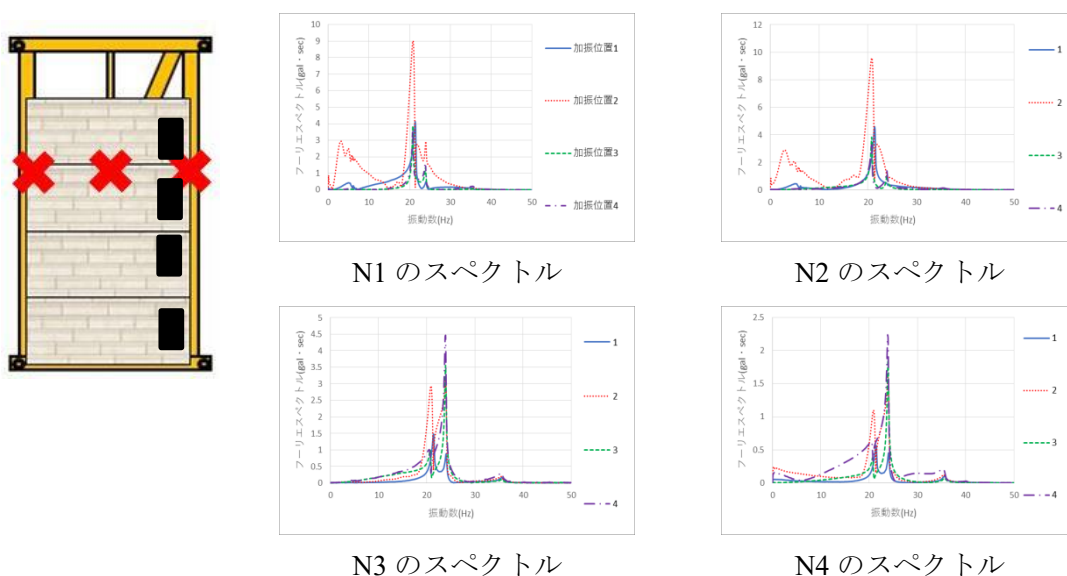


図 3-63 Case10 の各箇所フーリエスペクトル図

図 3-63 に示される中段ボード完全剥離の case10 においては、case4 と同じく、劣化箇所及びその上のボードで 10Hz 以下のピークが見られる。また、そのピークは加振箇所=劣化箇所である 2 を叩いたもので明確に見ることができる。ボード完全剥離は 10Hz 以下のピークで位置特定まで行えることがわかった。

ピーク振動数を用いた劣化箇所検知 まとめ

①Case2 から case5 で上段の劣化を模擬した。

最上段の劣化は加振位置=検査位置(N1 は 1 加振, N2 は 2 加振)を見ることで, スペクトルの変化, もしくは他のものよりスペクトルが大きくなることから, 劣化箇所を検知することができる。このことは case6,7 の外柱高さ方向にも通じており, 最上段の劣化は同方法で確認することができる。

②Case6,7,8 で外柱高さ方向の劣化を模擬比較した。

加振位置 1 のもののみ, 劣化の有無が確認できた。しかし, 外柱中段の劣化箇所の検知は検知できないことがわかった。

③Case8,9,10 で上段 2 段目の剥離を模擬した。

劣化箇所が 1 箇所の case8 は, 先程述べたとおり, 加振位置 1 のもののみ劣化の有無がわかった。逆に劣化箇所が 2 箇所以上の case9,10 はどこを叩いても, すべての箇所で劣化の特徴が見られた。そのため, 中段の劣化箇所検知は難しいことがわかった。

④Case4,10 より, ボードが確実に剥離している箇所より上段は, 10Hz 以下にピークを持つことがわかった。そのため, ボードの完全剥離は, 剥離位置まで検知することが可能である。

3.8.2 減衰率(指数)を用いた劣化検知

センサ配置を貼り方 1,加振箇所を変えたに固定した打診波形の減衰率と決定係数の関係を図 3-64 から図 3-73 に示す。劣化箇所に当たるセンサの結果は赤で示している。また, 下段に, 健全部, 劣化部に分けた各加振箇所と減衰率の関係を示している。

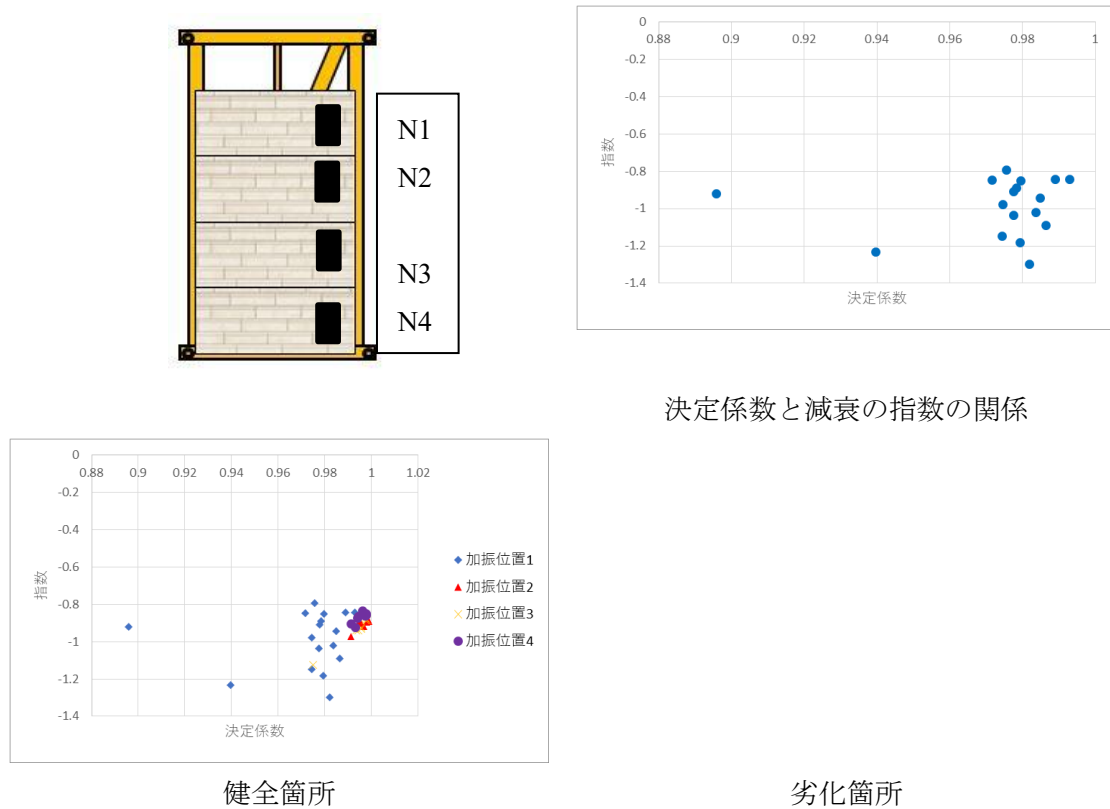


図 3-64 Case1 の減衰率

図 3-64 より、減衰指数が-0.9 付近に収束していることが見られる。また、加振位置を 1 としたときのばらつきが大きい。原因として、減衰の指数が小さくなっている(減衰が早くなっている)ことから、最上段であるためサイディング上部が揺れやすくなっていることが考える。

健全箇所なので加振位置をかえても、同じ値に収束している。

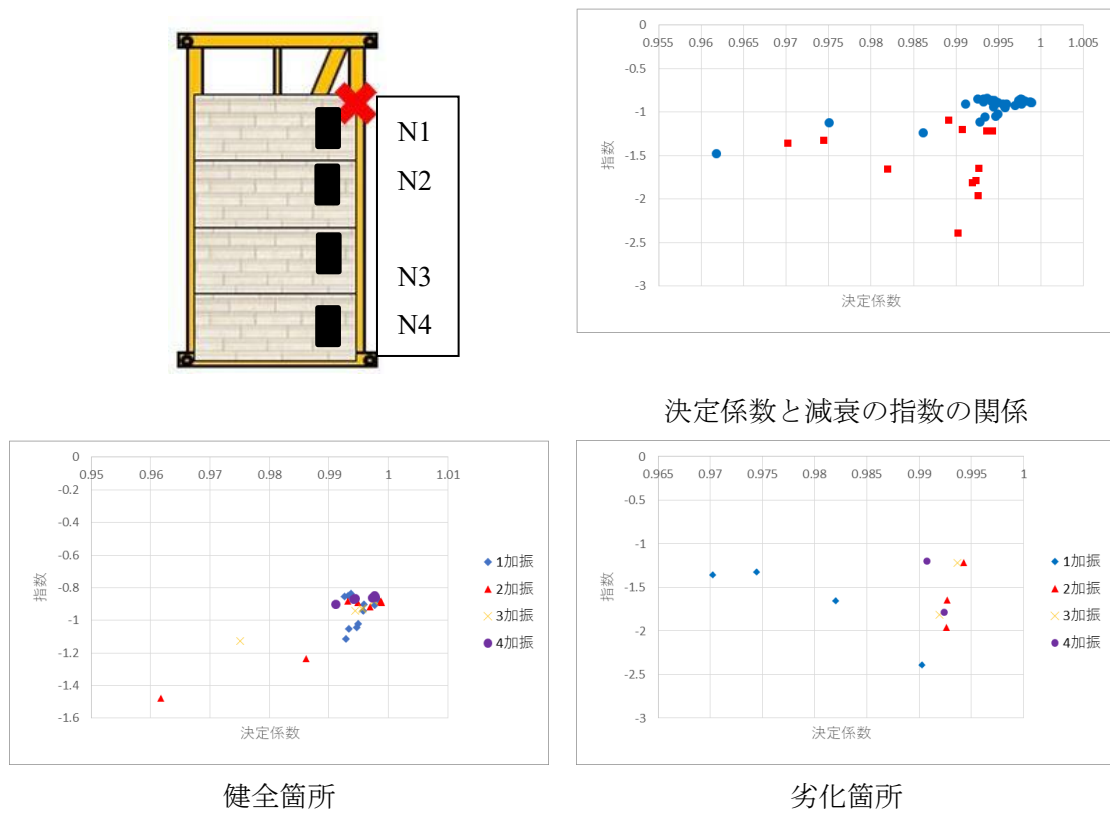


図 3-65 Case2 の減衰率

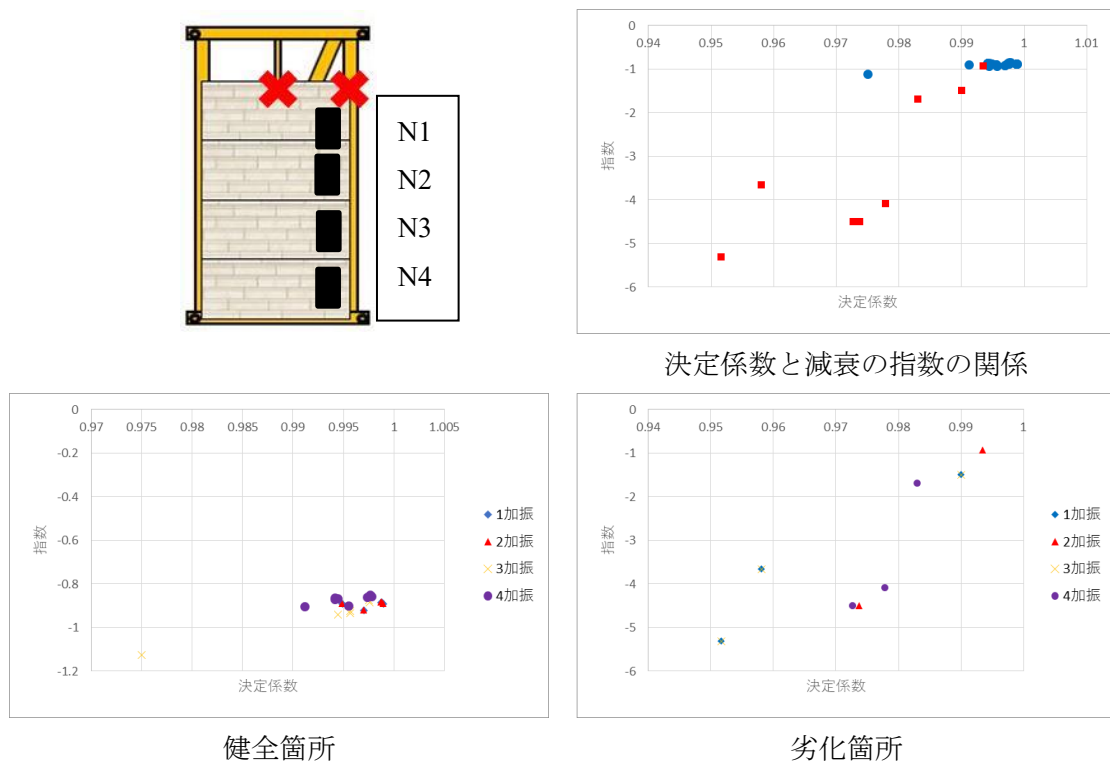


図 3-66 Case3 の減衰率

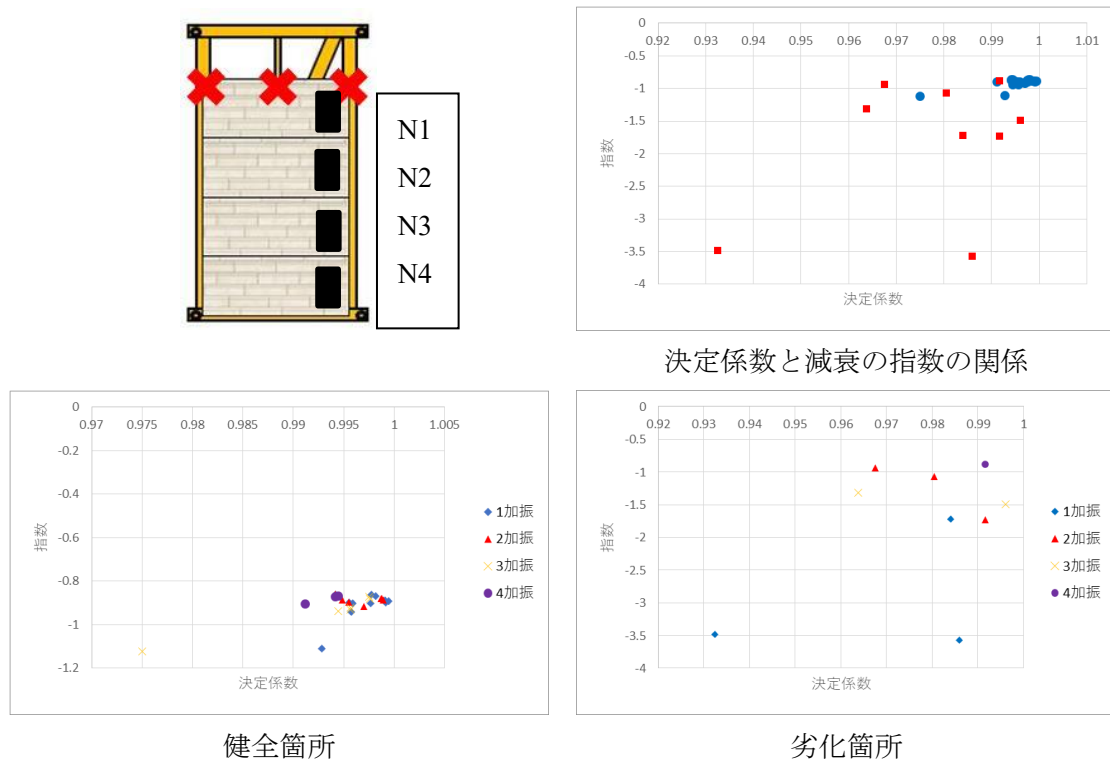


図 3-67 Case4 の減衰率

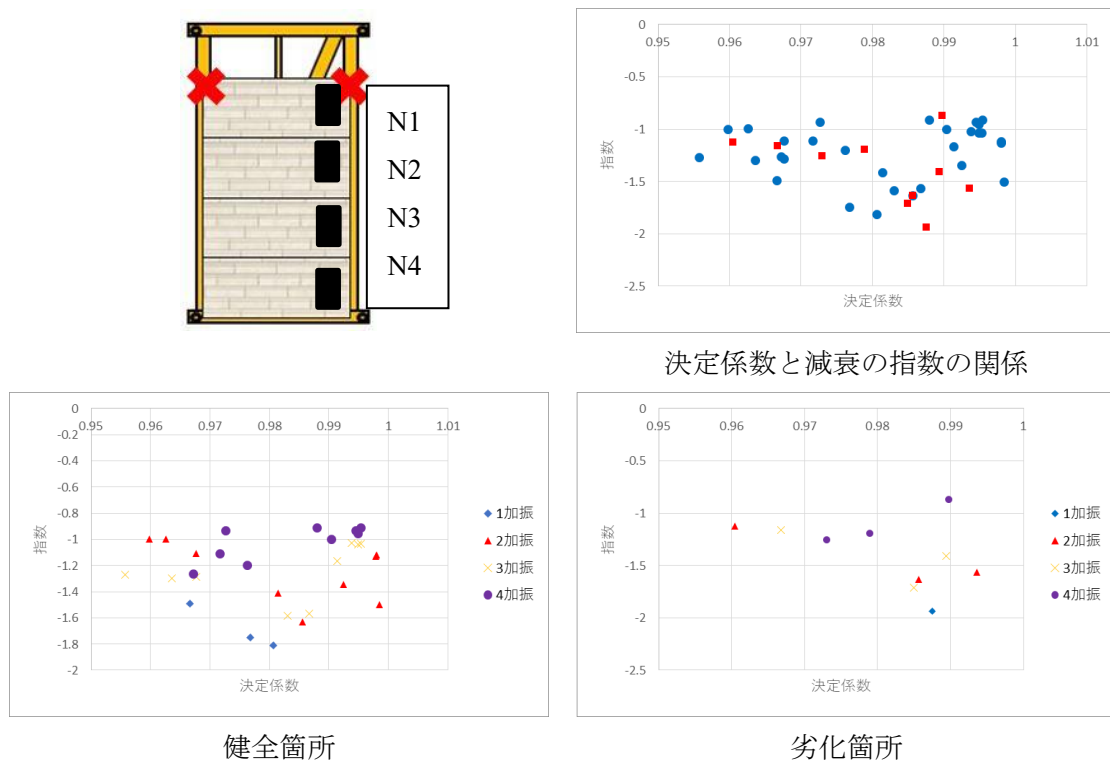


図 3-68 Case5 の減衰率

図 3-65 から図 3-68 に示される Case2 から case4 をみると、健全箇所は打診箇所に関わらず減衰指数-0.9 付近に収束している。Case5 においても打診箇所 3,4 では-0.9 に収束している。しかし、打診箇所 1,2 では減衰指数が小さくなっていることから、中央部健全、両端劣化の場合は、劣化箇所付近を叩くと、健全部でも劣化の振動を拾ってしまう事がわかる。

Case2,3,4,5 はどれも最上段の劣化であるため、劣化箇所のグラフにおいて、加振位置=検査位置=劣化箇所となる加振位置 1 のものをみる。劣化箇所の方の図をみると、すべて加振位置 1 のものの減衰指数が小さい傾向が見られる。そのため、減衰指数を指標として使う場合、打診箇所=検査箇所において、決定係数 0.98 以上で減衰指数-1.5 を下回る箇所は劣化箇所と判断することができる。

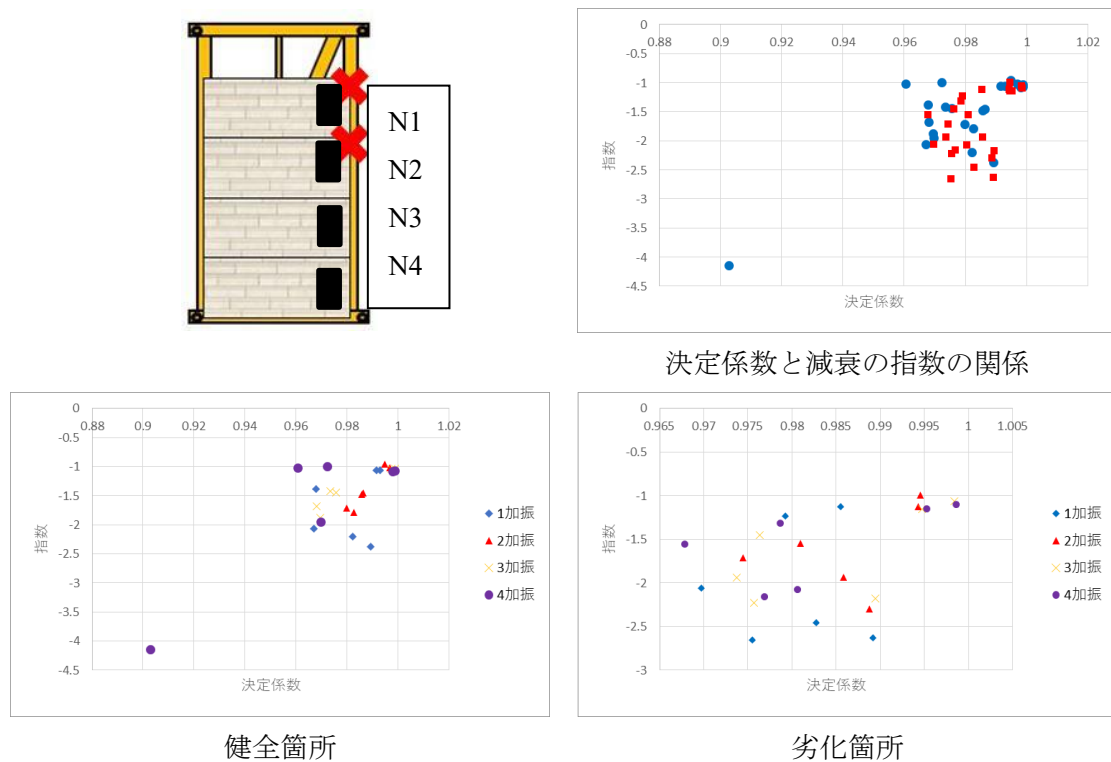


図 3-69 Case6 の減衰率

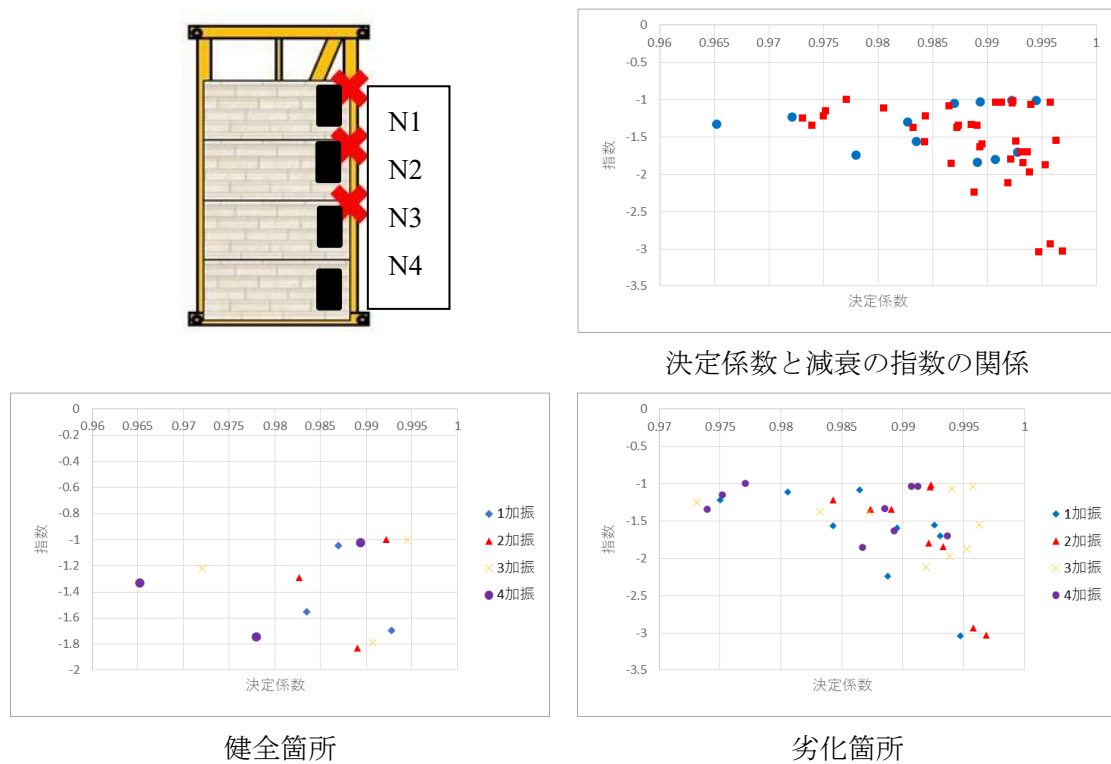


図 3-70 Case7 の減衰率

図 3-69、図 3-70 は外柱高さ方向劣化模擬 case6,7 の結果であるが、健全箇所であっても減衰指数-1 付近に収束しているため、最上段の劣化と異なり、健全時であっても減衰が早くなる傾向が見て取れる。劣化箇所の方をみると、おおよそ加振箇所=劣化箇所(case6 では 1,2 加振,case7 では 1,2,3 加振)のものの方が、減衰指数が小さくなる傾向が見て取れる。データを蓄積すれば、減衰指数の収束値により、劣化箇所の推定は可能になる可能性が高い。

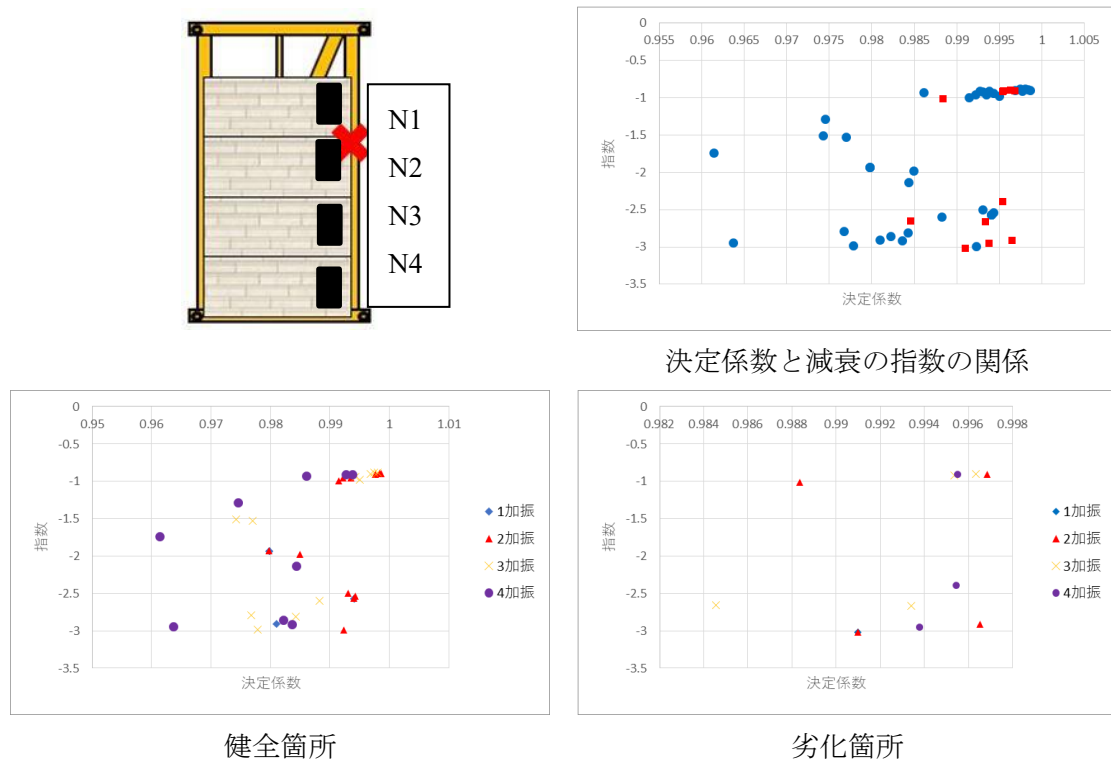


図 3-71 Case8 の減衰率

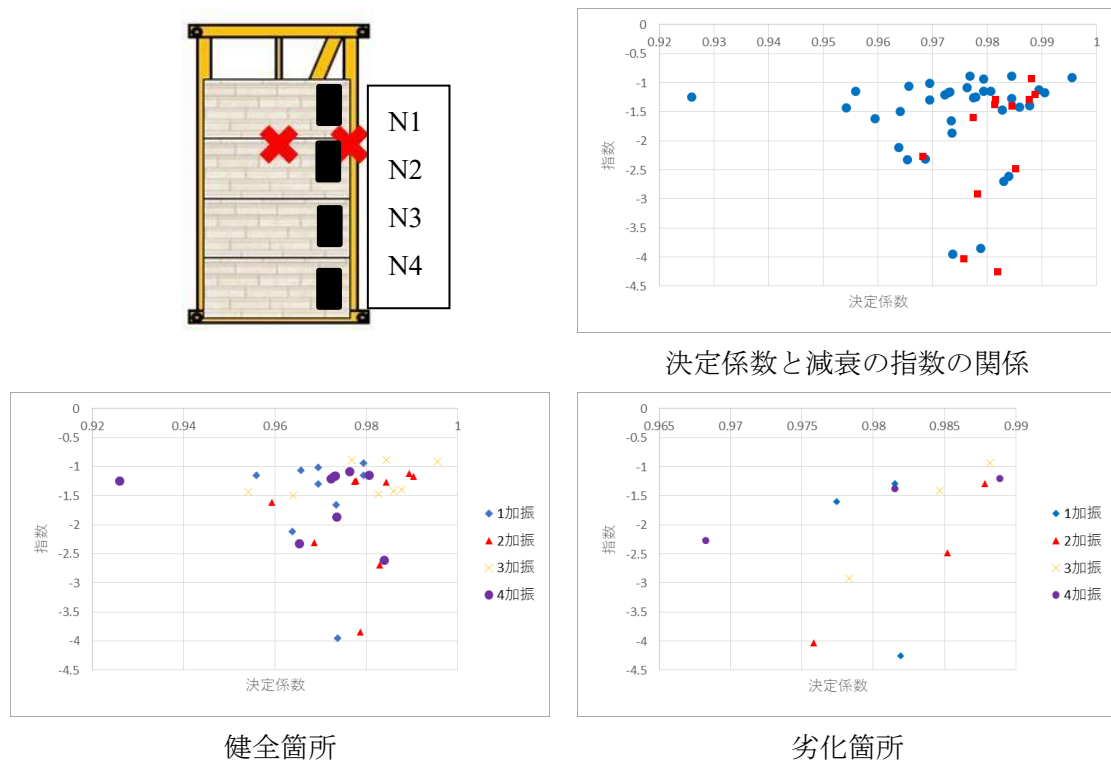


図 3-72 Case9 の減衰率

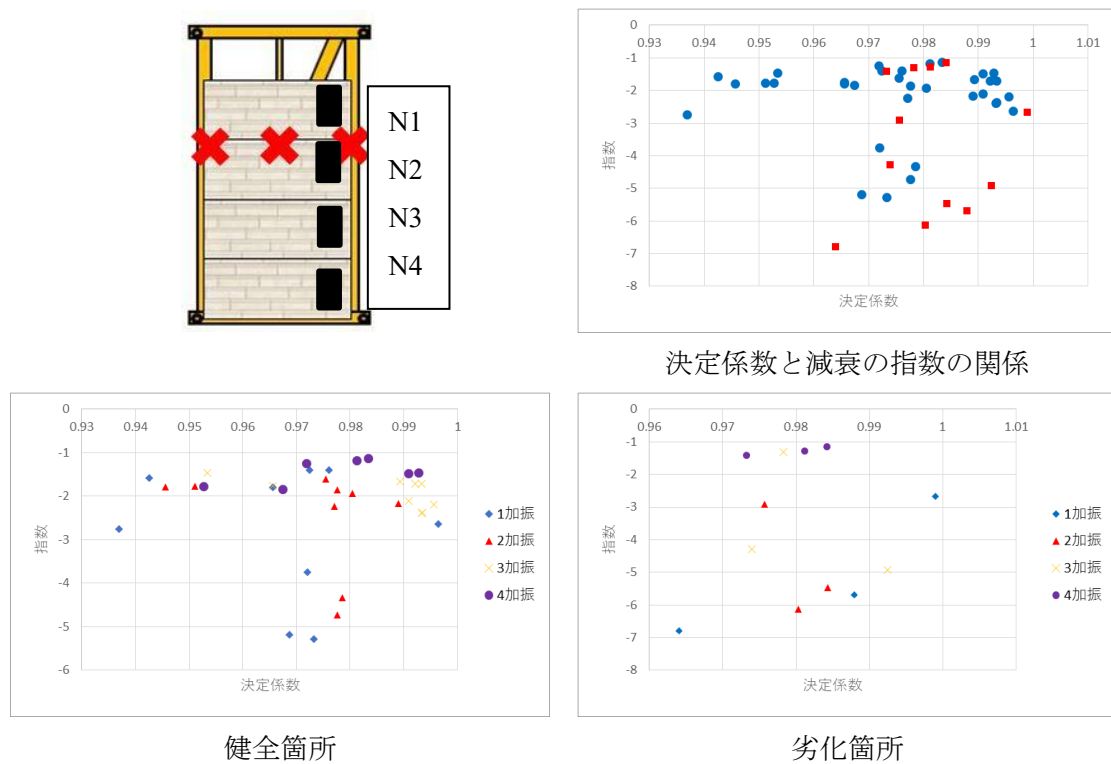


図 3-73 Case10 の減衰率

Case8,9,10 では上段 2 段目の横方向の劣化を模擬した。図 3-71 から図 3-73 より、劣化箇所及び、その上のボードを加振したものの減衰指数が小さくなる傾向が見られる。そのため、高さ方向に加振を行えば、減衰指数が大きく変わる節目が劣化箇所であると特定することができる。

減衰率を用いた劣化位置検知 まとめ

Case2 から case4 をみると、健全箇所は打診箇所に関わらず減衰指数-0.9 付近に収束する。Case5 のように中央部健全、両端劣化の場合は、劣化箇所付近を叩くと、健全部でも劣化の振動を拾ってしまう可能性が高い。また、加振位置=劣化位置である加振位置 1 のものの減衰指数が小さい傾向が見られる。外柱高さ方向劣化模擬の case6,7 であるが、健全箇所であっても減衰指数-1 付近に収束しているため、最上段の劣化とことなり、健全時であっても減衰が早くなる傾向が見て取れる。

おおよそ加振箇所=劣化箇所のほうが、減衰指数が小さくなる傾向が見て取れる。データを蓄積すれば、減衰指数の収束値により、劣化箇所の推定は可能になる可能性が高い。Case8,9,10 では上段 2 段目の横方向の劣化を模擬した。劣化箇所及び、その上のボードを加振したものの減衰指数が小さくなる傾向が見られる。そのため、高さ方向に加振を行えば、減衰指数が大きく変わる節目が劣化箇所であると特定することができる。

以上の結果から、加振位置=劣化位置を叩くと減衰指数が小さくなる(減衰は大きくなる)傾向が見て取れたため、データを蓄積すれば劣化箇所の検知まで行える可能性が高いと考えている。

3.8.3 加振位置の合理化 まとめ

ピーク周波数を用いた劣化位置検知は、最上段では加振位置=劣化位置の場合、検知可能であるが、外柱高さ方向劣化や、中段劣化時には劣化位置までは検知できなかった。また、ボードの完全剥離時は、劣化位置及びその上部を加振すれば、10Hz 以下のピークが見られるため、完全剥離箇所の検知は簡単にできそうである。

減衰指数を用いた劣化位置検知は、最上段のみの劣化の場合は健全部で-0.9、最上段以外に劣化がある場合は減衰指数が-1 以下に収束する。そのため、この収束値より中段以下での劣化を検知できる。また、劣化位置及びその上部を叩くと他の箇所より減衰指数が小さくなることから、劣化箇所の特定まで行える可能性が高いことがわかった。

3.9 サイディングの劣化検知手法の高度化 まとめ

本章では、サイディングボードを対象とし、加速度センサを用いて加振波形を計測、指標やセンサ配置、打診箇所を検討することで検査手法の高度化を目指し、検討を行った。以下、得られた知見を示す。

1)減衰率(減衰指数)の有効性確認

最上段の劣化模擬より、健全箇所の減衰指数が-0.9,劣化箇所の減衰指数が-1を下回ることで、減衰指数によって劣化検知は可能であることがわかった。

2)ピーク振動数の有効性確認

過去には一次卓越振動数と示されていたが、劣化によって新しいピーク振動数が増えることがわかったため、ピーク振動数に変える必要がある。健全時は21Hz,31Hz付近のみにピークを持つが、劣化のものは新しいピークの追加、21Hzからピークが低下する傾向が見られたため、この指標も劣化検知には有効であることがわかった。

3)センサ配置の合理化

加振箇所を固定したとき、センサ高さ方向配置により、劣化の有無まではわかることがわかった。センサを同一ボード横方向に配置し、劣化箇所を検知できるか試したが、ピーク振動数、減衰率ともに検知できなかったため、横配置の検査は必要ない。

高さ方向に一度に検査が可能であることがわかったため、検査時の効率は良くなったと考える。

4)加振位置の合理化

センサを高さ方向に配置し、加振箇所を変えて検討を行った。ピーク振動数では最上段劣化以外は劣化箇所まで検知できなかった。しかし、減衰指数を用いれば、加振箇所=劣化箇所(及びその上部)のときに減衰指数が小さくなる傾向が示せたため、減衰指数を用いれば劣化箇所の検知まで行える可能性が高いことがわかった。

以上より、実際の検査時は高さ方向にセンサを配置、ボードを一枚ずつ叩いていくことが一番効率よく、劣化の有無、劣化箇所の検知まで行えることがわかった。また、検査指標としては、減衰指数を用いたほうが検知しやすいということもわかった。本検査方法を用いて、検査の機械化、自動化にまで発展できる可能性ができたため、検査の高度化に寄与できたと考える。

参考文献

- 1) 日本窯業系外装材協会
<http://www.nyg.gr.jp/toha/tuuki.html>
- 2) 日本窯業系外装材協会, メンテナンスについて
<http://www.nyg.gr.jp/meinte/nichijyo.html>

第4章 打音解析による仕上げモルタルの剥離 検知手法の高度化

4.1 はじめに

建築外壁の点検手法として、現状打診が主流である。しかし、打診は、点検者が打診棒を用いて外壁を叩いてまわり、その人が聞いた音で剥離の有無を判断している。この方法では、①壁全体位を検査するためには足場を組む必要があり、時間やコストが多くかかってしまう。②現在の少子高齢化を考えると今後点検者の高齢化、人員不足は明白である。③点検者の耳を基準としているため、人によって剥離判断は異なり、見落としの可能性が高い。など多くの問題点がある。

この点を解消するべく、近年、多くの研究機関で打診検査によって打診音をマイクロフォンで録音し、解析にかける打音解析の研究を進めている。しかし、これまで多くの評価手法が提案されてきたものの、どの指標が有効であるか定かではなく、数社が自社の定めた指標で打音検査を行っているにとどまっている。そのため、この分野に関してはまだまだ研究を進め、上記問題を解決すべく、世の中で使える技術に消化させる必要があると考えている。

また、この研究は主なものはタイルの剥離検査であり、仕上げモルタルの剥離検知手法に関するものはあまり行われていない。

本章では既往のタイルの論文も参考に、仕上げモルタルの劣化検知手法の高度化を目指し、2つの試験体、多くの打音解析を用いて研究を行った。

4.2 部分熱負荷試験を用いた実験

本実験では熱負荷をかける回数を増やしていき、そのサイクル数と仕上げモルタルの接着強度及び打診音の関係を検討した。部分熱負荷実験は建物外壁の実挙動を模擬した試験であるため、本実験での成果はそのまま現実の検査にも活かせる成果と考えている。

4.2.1 試験体概要

図4-1のような100*100*400mmの角柱試験体を用い、表面に仕上げモルタルを施した試験体の一部(d,e,f,g)のみをラバーヒーターによって加熱した。

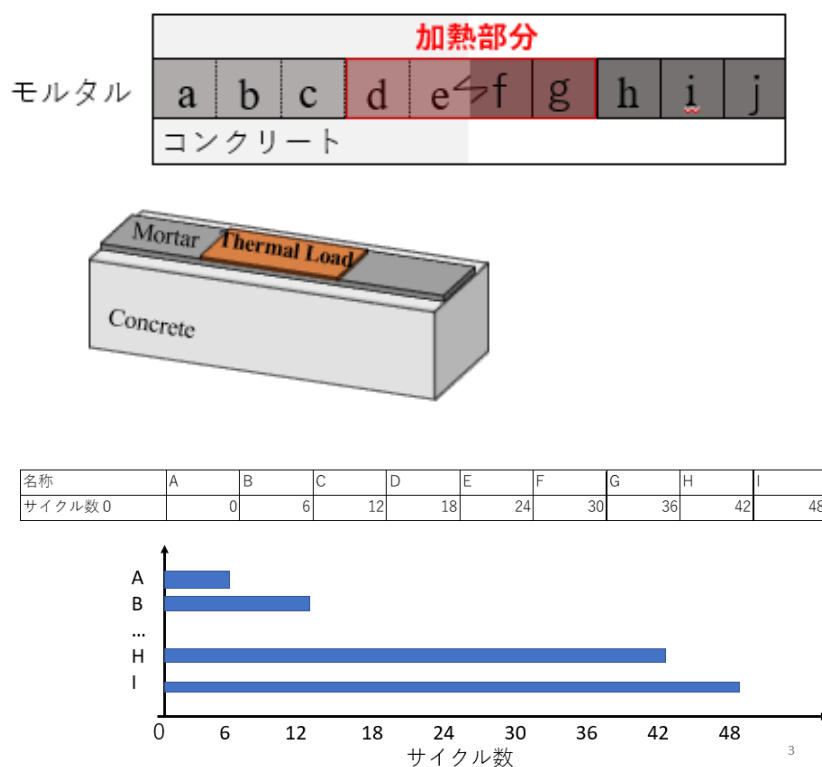


図4-1 試験体概要

試験体名はサイクル数に応じ、大文字のアルファベットで表した。

打音の録音はマイクロフォンを用いて行い、1点検箇所につき3回、打診棒を用いて行った。マイクロフォンのサンプリングレートは44100Hzとした。全打診とも同一人物が同程度の力で打診棒で叩いた。

4.2.2 ピーク周波数を用いた剥離評価

打診音に FFT 解析を行い、フーリエスペクトル図を描いた。図 4-2 のように本試験体は箇所 e-f 間で対象になっているため、半分の a から e それぞれの結果を以降図 4-3 から図 4-7 に示す。

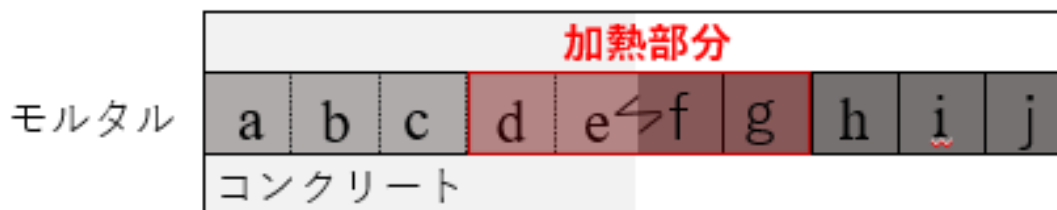
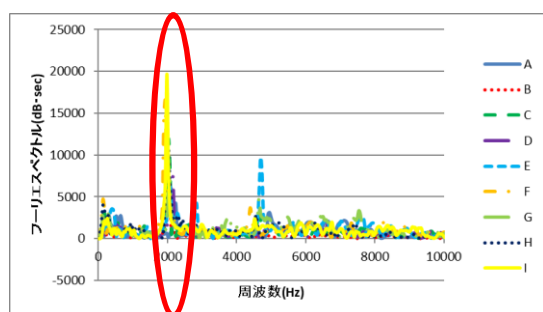
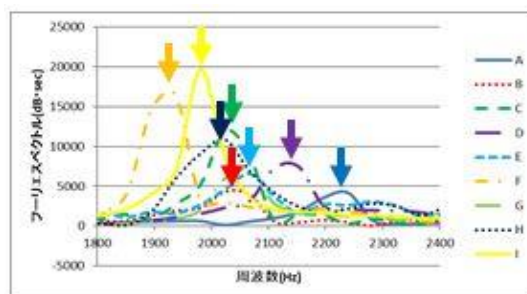


図 4-2 試験体格箇所の名称

試験各箇所 a~e のピーク周波数の変化を図 4-3 から図 4-7 に示す。図は左側が 0~10000Hz までのもので、右側が 1800~2400Hz までのものである。

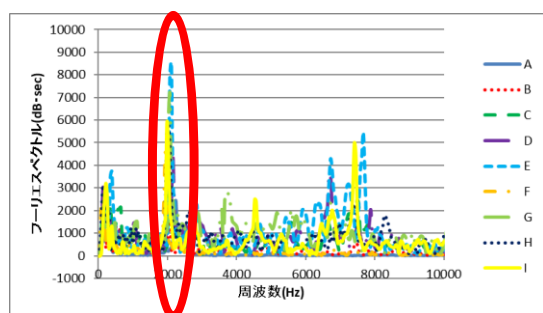


0-10000Hz でのスペクトル図

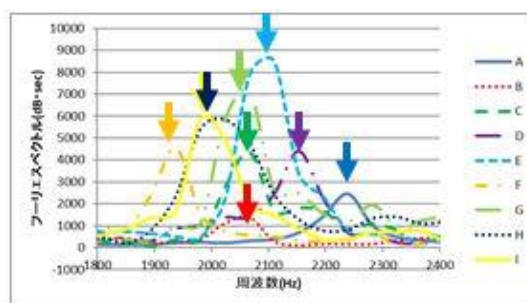


ピーク箇所のスペクトル図

図 4-3 箇所 a での各試験体フーリエスペクトル図

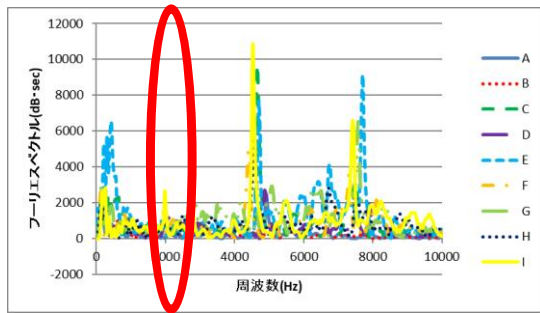


0-10000Hz でのスペクトル図

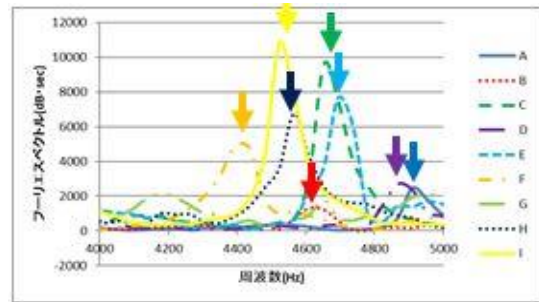


ピーク箇所のスペクトル図

図 4-4 箇所 b での各試験体フーリエスペクトル図

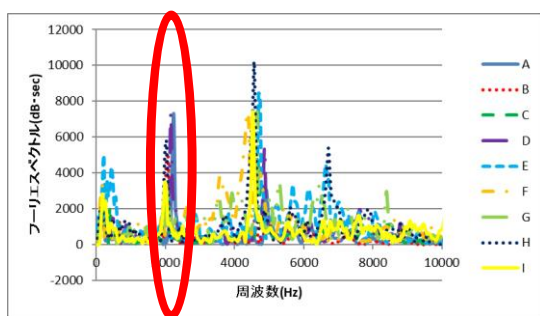


0-10000Hz でのスペクトル図

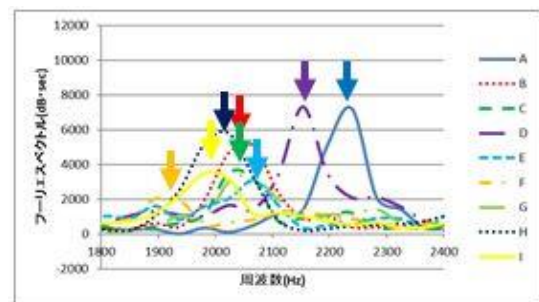


ピーク箇所のスペクトル図

図 4-5 箇所 c での各試験体フーリエスペクトル図

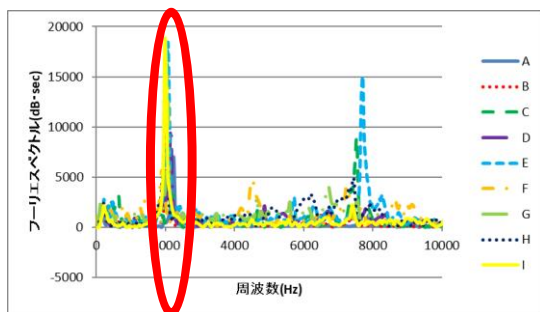


0-10000Hz でのスペクトル図

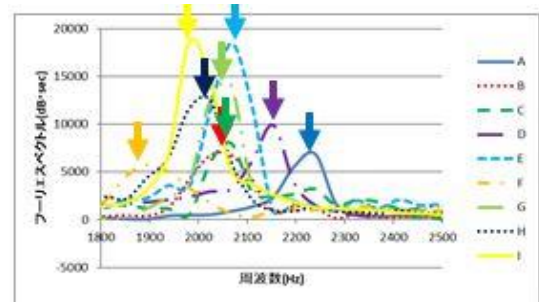


ピーク箇所のスペクトル図

図 4-6 箇所 d での各試験体フーリエスペクトル図



0-10000Hz でのスペクトル図



ピーク箇所のスペクトル図

図 4-7 箇所 e での各試験体フーリエスペクトル図

図 4-3 から図 4-7 全てにおいて、ピークが A→D→E→B→C→G→H→I→F の順に小さくなっているため、箇所 a から e まで箇所に関わらず同じ順番で劣化していることがわかる。

全箇所が同じように劣化しているため、ピーク周波数は劣化を受けていない箇所でも、他の部分が負荷を受けると低下していくことがわかった。

D,E が少し高い値でピークを持っているが、これを除けば熱負荷サイクル数とピーク周波数の関係性が見られる。この結果を見ると F が最小値でピークをとっているため E-F 間で剥離が起こったのではないかと考えられる。

4.2.3 図心周波数を用いた剥離評価

前節で描いたグラフの周波数の 1000-10000Hz で図心周波数を計算した。それぞれの値は同一試験体の 3 打の平均値を用いることとした。試験体は 3 本あるため、それぞれの箇所のデータは 3 個ずつ存在することとなる。それぞれの箇所の図心周波数と接着強度の関係を図 4-9 から図 4-18 に示す。

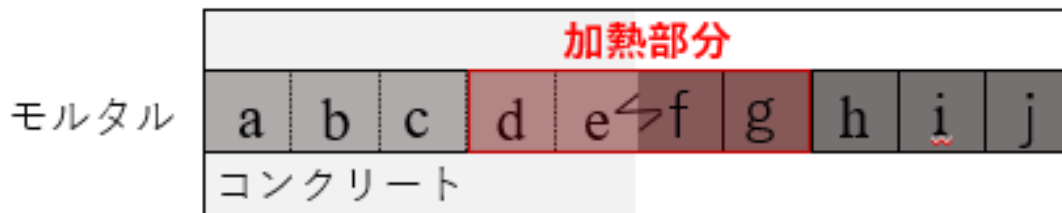
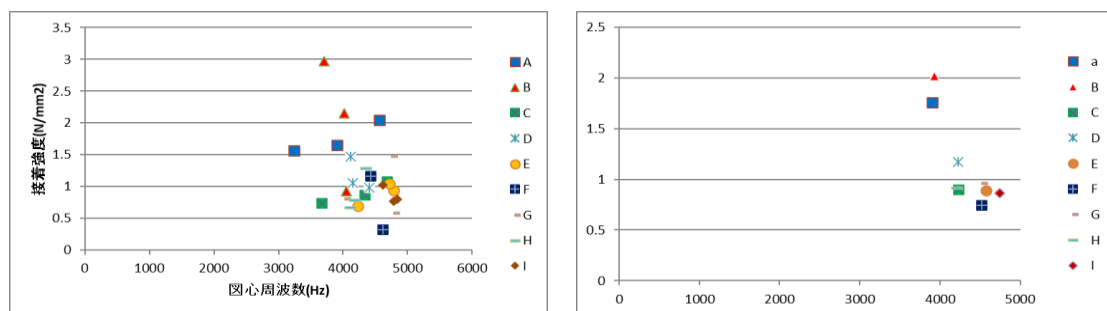


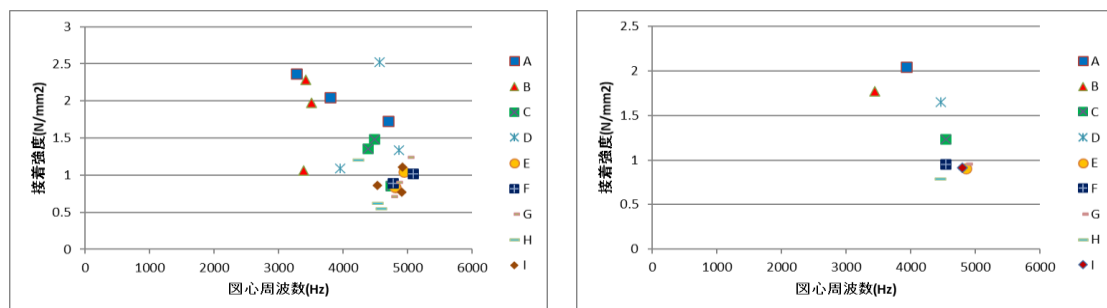
図 4-8 試験体各箇所



図心周波数-接着強度関係

3 試験体平均値での関係

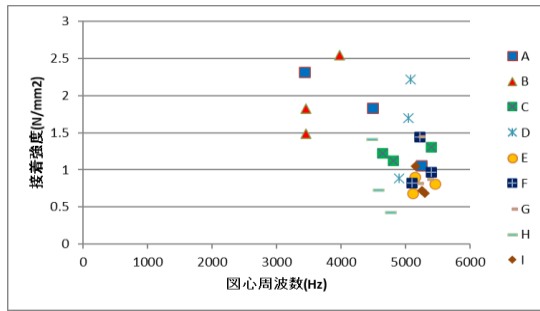
図 4-9 箇所 a での図心周波数-接着強度関係



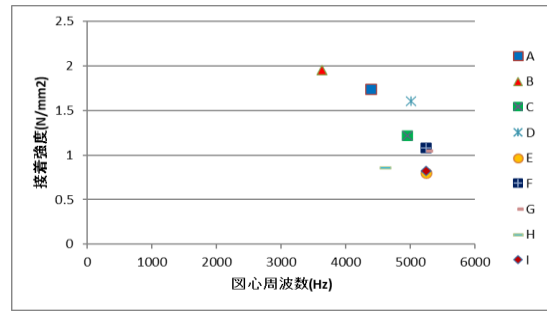
図心周波数-接着強度関係

3 試験体平均値での関係

図 4-10 箇所 b での図心周波数-接着強度関係

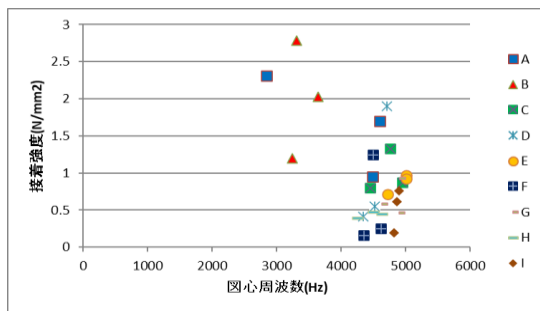


図心周波数-接着強度関係

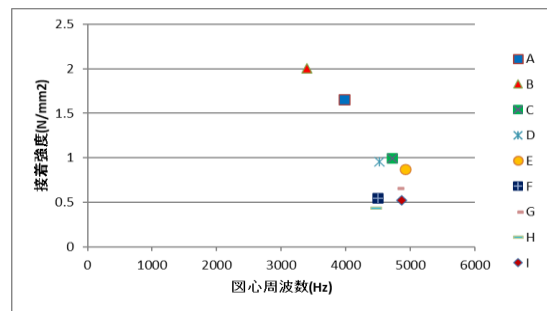


3 試験体平均値での関係

図 4-11 箇所 c での図心周波数-接着強度関係

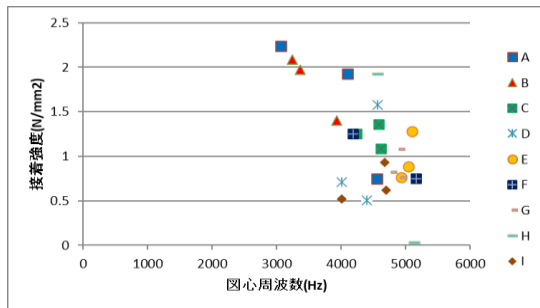


図心周波数-接着強度関係

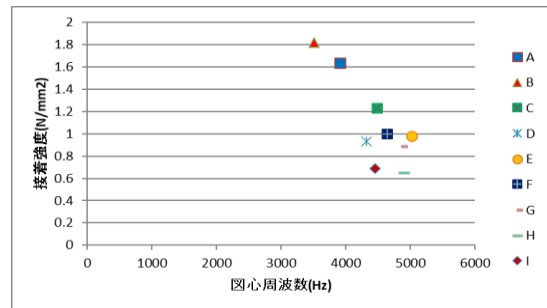


3 試験体平均値での関係

図 4-12 箇所 d での図心周波数-接着強度関係

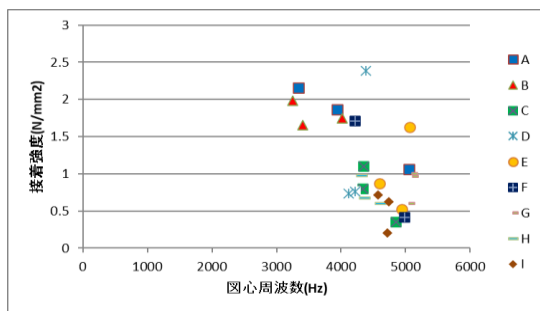


図心周波数-接着強度関係

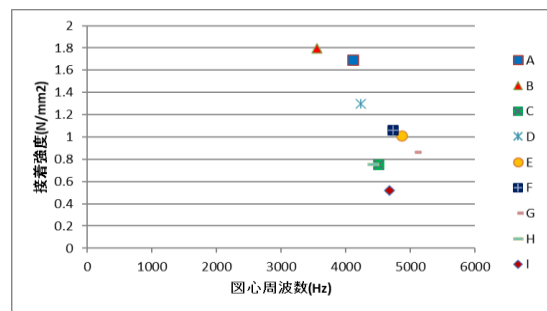


3 試験体平均値での関係

図 4-13 箇所 e での図心周波数-接着強度関係

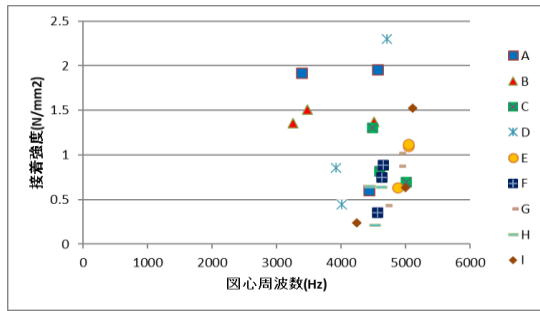


図心周波数-接着強度関係

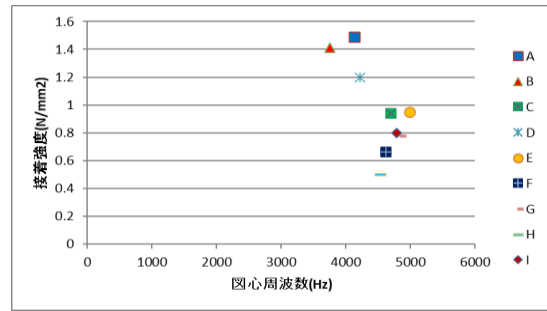


3 試験体平均値での関係

図 4-14 箇所 f での図心周波数-接着強度関係

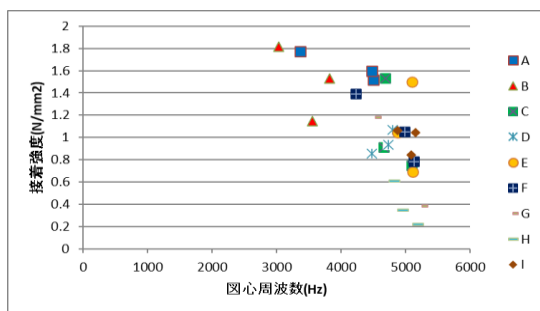


図心周波数-接着強度関係

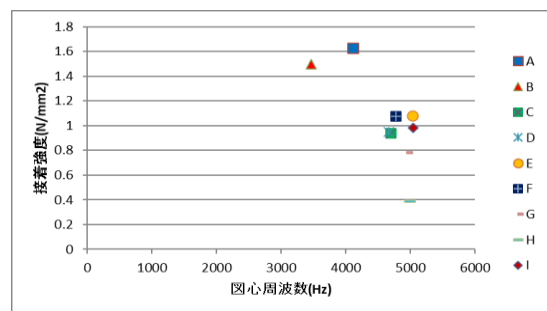


3 試験体平均値での関係

図 4-15 箇所 g での図心周波数-接着強度関係

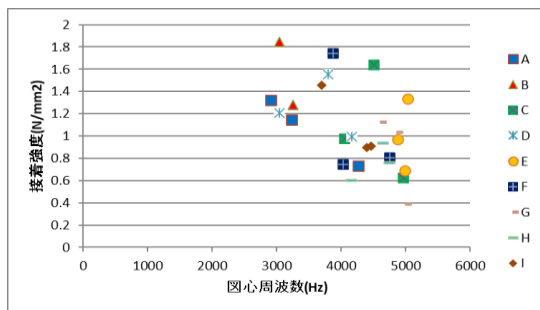


図心周波数-接着強度関係

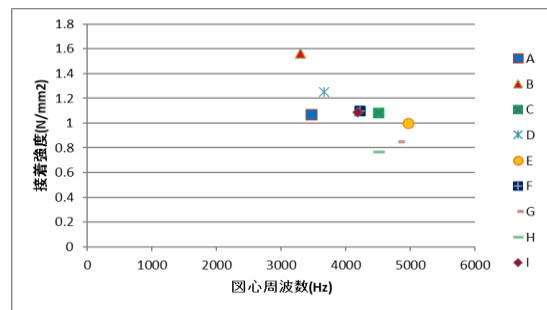


3 試験体平均値での関係

図 4-16 箇所 h での図心周波数-接着強度関係

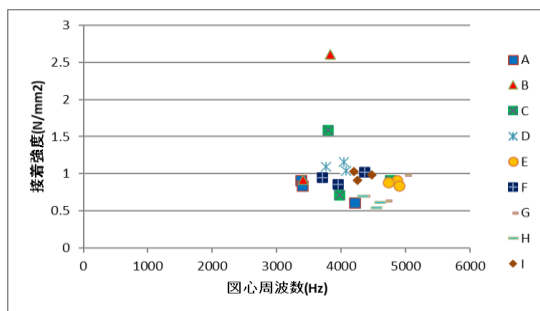


全打の図心周波数-接着強度関係

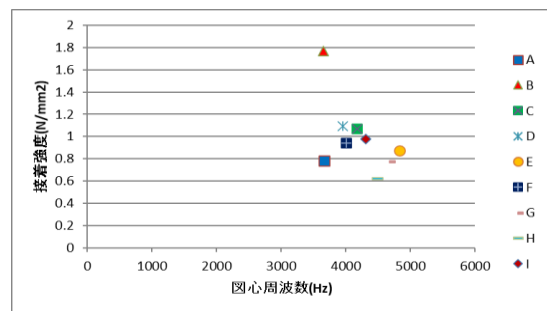


3 打平均値での関係

図 4-17 箇所 i での図心周波数-接着強度関係



全打の図心周波数-接着強度関係



3 打平均値での関係

図 4-18 箇所 j での図心周波数-接着強度関係

表 4-1 それぞれの箇所の図心周波数-接着強度の傾きと相関係数

加振箇所	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
傾き	-0.0012	-0.0008	-0.0006	-0.0009	-0.0007	-0.0007	-0.0006	-0.0005	-0.0003	-0.0004
相関係数	0.671	0.613	0.576	0.707	0.703	0.576	0.517	0.565	0.573	0.311

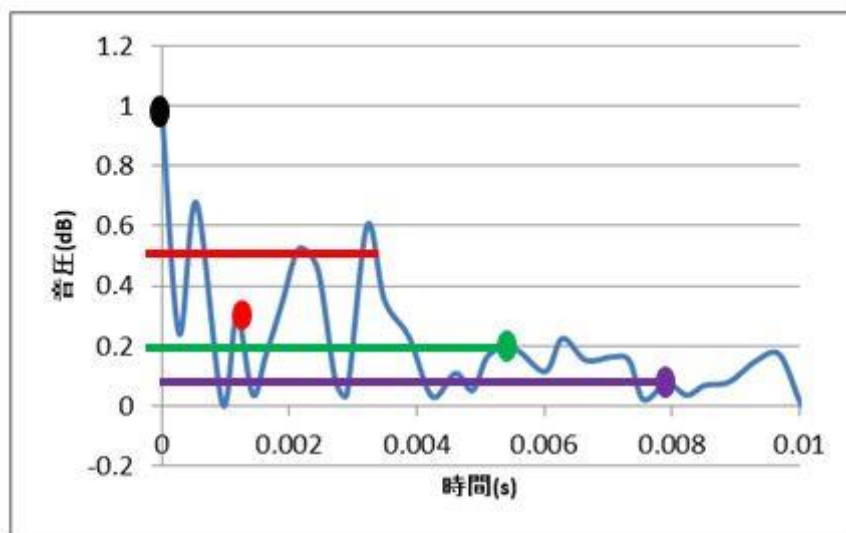
図 4-9 から図 4-18 をみると i,j は少し異なるが、概ねせん断強度が低下するほど、図心周波数が大きくなっていることが確認できた。そのため、非破壊での剥離検知ができていように思える。しかし健全状態の試験体のほうが、高周波数域にピークを持ち、低周波数域でのピークスペクトルが低下するため、図心周波数が高くなるはずである。そのため本実験の結果は、健全ほど低い図心周波数をとっている。原因としては、2000Hz での大きなピークと考える。通常、健全状態のものでは 2000Hz 付近にピークが来ないのに対し、本試験体はすべて 2000Hz 付近に大きなピークを持っている。10*10*40cm の試験体なので、どの試験箇所も端から近い位置となり、このような音の特徴を示したと考える。

また、表 4-1 をみると e,f を中心に傾きが対称となっていない。加熱箇所は中央の d,e,f,,g 固定であるため、施工不良及びせん断試験の不確実性が原因であると考えられる。

下地コンクリートの影響で健全状態ほど図心周波数が低くなる傾向が得られたため、下地コンクリートを次節で示すような大きなものとすれば、健全ほど図心周波数が高くなり、非破壊でせん断強度まで確認できる指標になり得ると考える。

4.2.4 減衰率を用いた剥離評価

同一箇所を3回打診し、減衰率(指数)をそれぞれ算出、3回の平均を使用することとした。減衰率の算定方法は示しているが、**図 4-19**に再掲する。



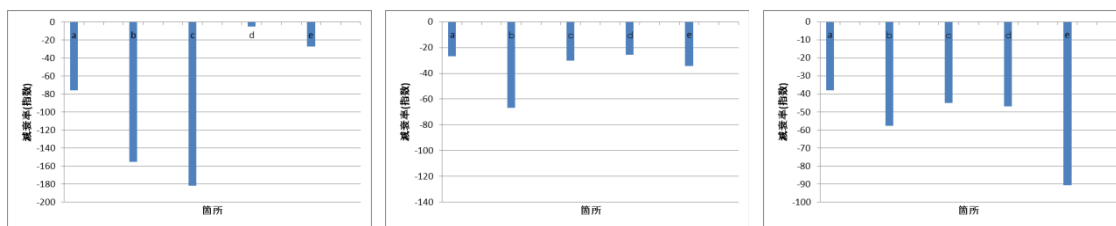
1/2(0.5), 1/5(0.2), 1/10(0.1)を下回る初めての極値と最大音圧2点の減衰率を算出
 例として、1/2(0.5)までの減衰率は黒丸と赤丸
 1/5(0.2)までの減衰率は黒丸と緑丸
 1/10(0.1)までの減衰率は黒丸と紫丸
 を用いて算出した。

図 4-19 減衰率の算定方法

本章では同一サイクル数試験体内での打診箇所の比較、および同一打診箇所のサイクル数での比較をそれぞれ行う。

(1)同一サイクル数(大文字ローマ字)での打診箇所ごとの比較

各サイクル数ごとの試験体箇所 a~e の減衰率を図 4-20 から図 4-25 に示す。

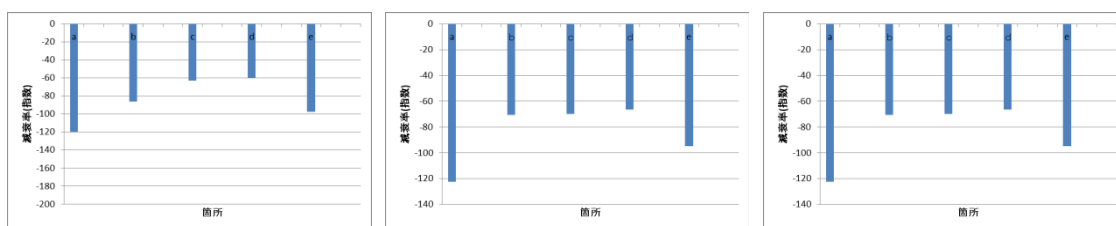


1/2 までの減衰率

1/5 までの減衰率

1/10 までの減衰率

図 4-20 熱負荷 0 サイクル(A)での各打診箇所の比較

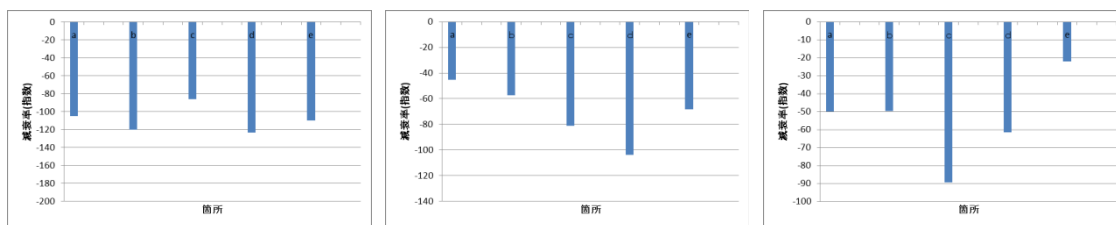


1/2 までの減衰率

1/5 までの減衰率

1/10 までの減衰率

図 4-21 熱負荷 3 サイクル(B)での各打診箇所の比較

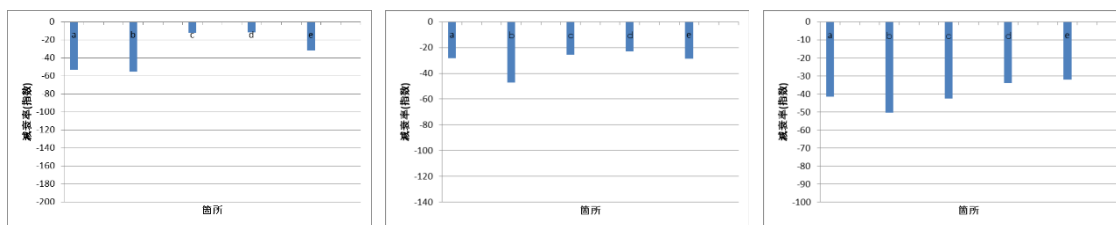


1/2 までの減衰率

1/5 までの減衰率

1/10 までの減衰率

図 4-22 熱負荷 6 サイクル(C)での各打診箇所の比較



1/2 までの減衰率

1/5 までの減衰率

1/10 までの減衰率

図 4-23 熱負荷 9 サイクル(D)での各打診箇所の比較

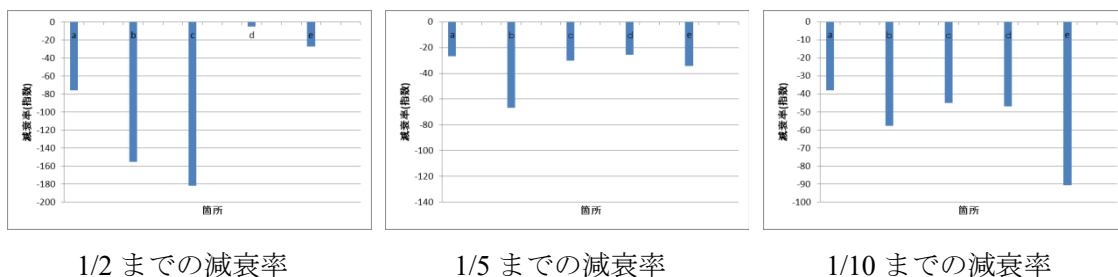


図 4-24 熱負荷 12 サイクル(E)での各打診箇所の比較

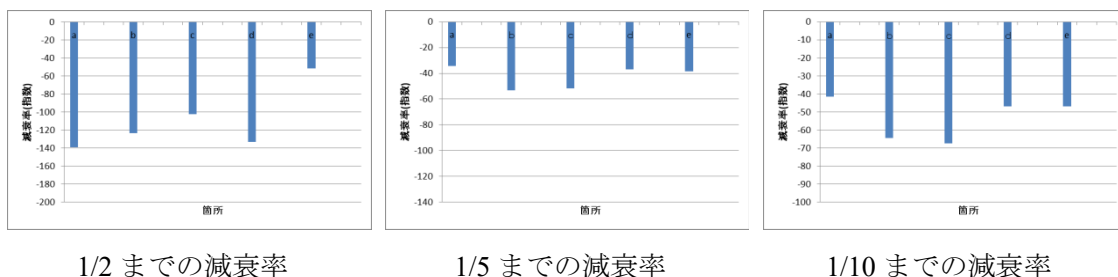
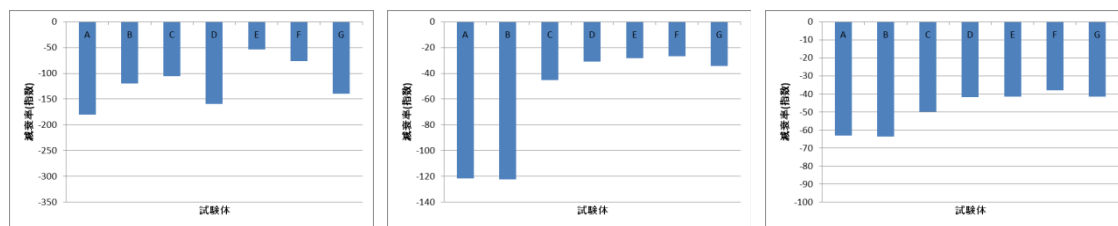


図 4-25 熱負荷 15 サイクル(F)での各打診箇所の比較

熱負荷 0 サイクル(A)(健全)から熱負荷 15 サイクル(F)までのそれぞれの箇所の減衰率を図 4-20 から図 4-25 に示した。モルタル剥離は中心部のみ空気層ができ、外周部は接着状態のままなので、その界面での振動が残り続け、剥離部分ほど減衰率は小さくなると予想していた。しかし、同一サイクル内を見ても、その傾向が見られるものは少なく、また 1/2,1/5,1/10 で同じ傾向になっているものも少なかった。また A から F 同一減衰率で (図の縦ラインでの比較) を比べても法則性は見られなかった。

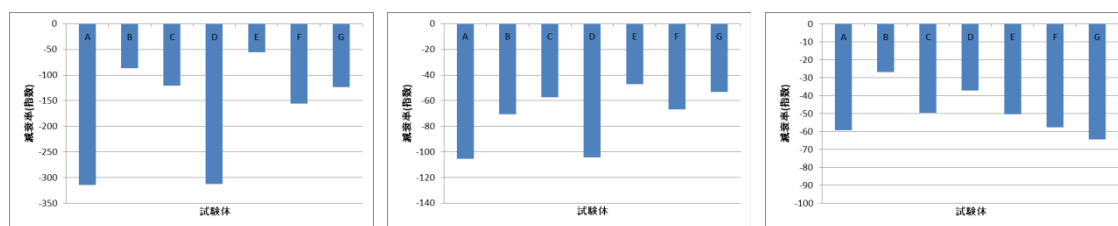
(2)打診箇所(小文字ローマ字)固定での熱負荷サイクル数を変数とした比較

前節では、同一サイクル内でのそれぞれの音圧までの減衰率の比較、及び同一の割合までのサイクルごとの減衰率比較を行ったが関係性は見られなかった。そこで本節は打診箇所を固定し、熱負荷サイクルごとでの変化を見ることとした。図 4-26 から図 4-30 にそれぞれの打診箇所での減衰率の推移を示す。



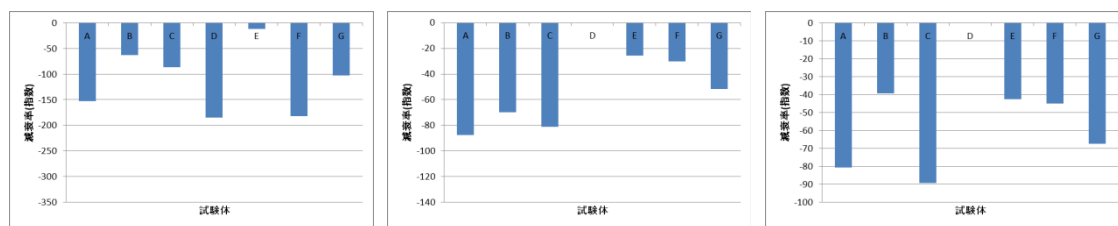
1/2 までの減衰率 1/5 までの減衰率 1/10 までの減衰率

図 4-26 打診箇所 a でのサイクル数ごとの比較



1/2 までの減衰率 1/5 までの減衰率 1/10 までの減衰率

図 4-27 打診箇所 b でのサイクル数ごとの比較



1/2 までの減衰率 1/5 までの減衰率 1/10 までの減衰率

図 4-28 打診箇所 c でのサイクル数ごとの比較

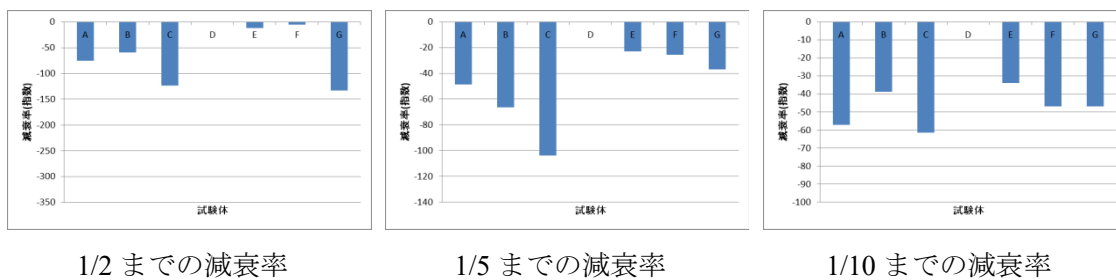


図 4-29 打診箇所 d でのサイクル数ごとの比較

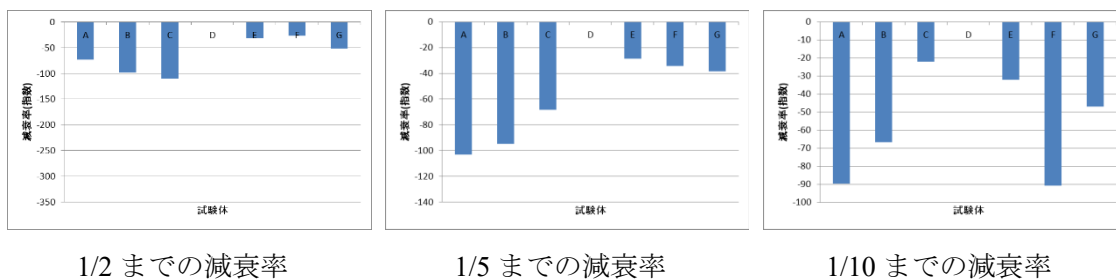


図 4-30 打診箇所 e でのサイクル数ごとの比較

図 4-26 から図 4-30 において、B もしくは C を境に減衰率が変化しているものが多いため、せん断強度の低下と同じタイミングで減衰率も変化する可能性は高い。しかし、どの箇所、どの値までのグラフをみても同一の傾向は見られないため、減衰率はモルタル仕上げの劣化検知には不向きと判断した。

4.2.5 打診から最大音圧までの時間を用いた考察

音波の波形を見ていると、加振時(音圧が大きく跳ね上がる時)と最大音圧が同じものと、この間に時間がかかるものがあった。そのため、この間の時間も指標として使えるのではないかと考え、本節にまとめることとした。加振時を定常状態から大きく音圧が変わる±1000Hz と設定。そこから最大音圧までの時間をピークまでの時間とした。図 4-31 にこの算定方法を示す。

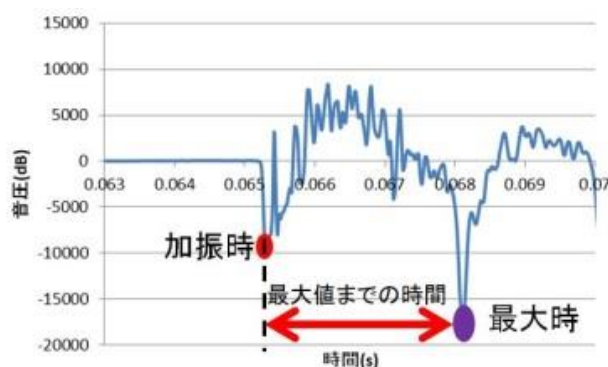


図 4-31 ピークまでの時間 算定方法

前節の減衰率と同じく、同一箇所を3回打診しそれぞれ算出、3回の平均を使用することとした。

またピークまでの時間においても、同一サイクルの試験体での打診箇所ごとの比較、及び打診箇所固定の熱負荷サイクル数を変数とした比較それぞれを行うこととした。

(1) 同一サイクル数(大文字ローマ字)での打診箇所ごとの比較

各サイクル数での、試験体箇所 a~e のピークまでの時間を図 4-32 から図 4-36 に示す。

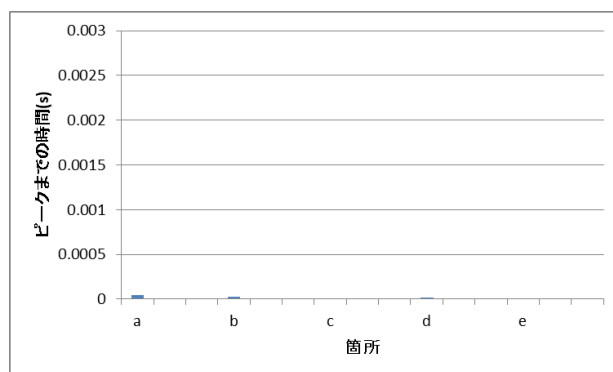


図 4-32 熱負荷 0 サイクル(A)での各打診箇所の比較

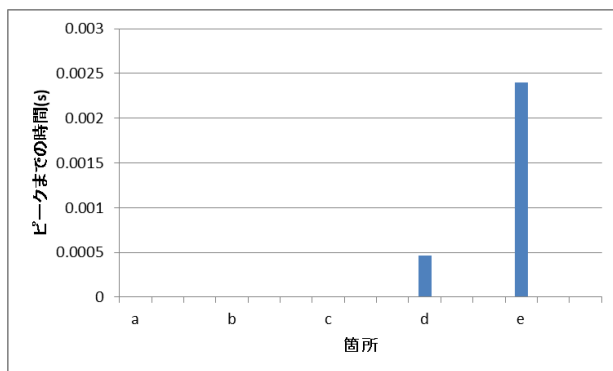


図 4-33 熱負荷 3 サイクル(B)での各打診箇所の比較

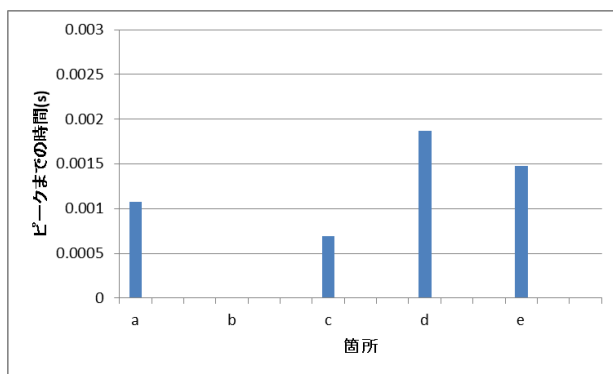


図 4-34 熱負荷 6 サイクル(C)での各打診箇所の比較

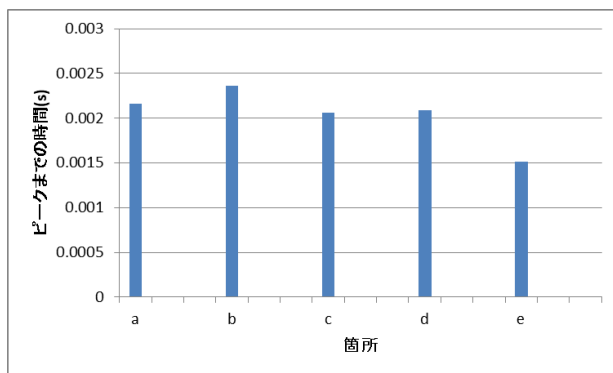


図 4-35 熱負荷 12 サイクル(E)での各打診箇所の比較

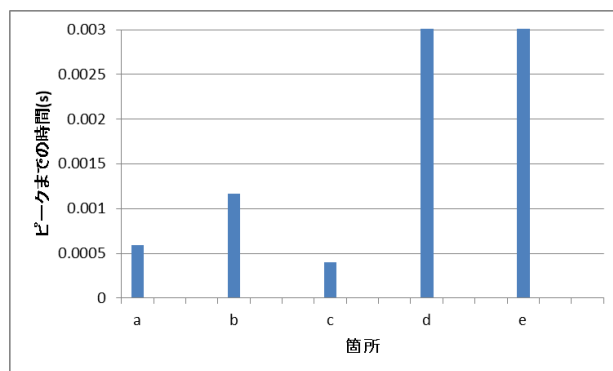


図 4-36 熱負荷 15 サイクル(F)での各打診箇所の比較

同図をみると 3 サイクル熱負荷をかけた図 4-33 に示す B の時点で打診からピークまでの時間が大きくなっている。またピークまでの時間が熱負荷箇所である d,e のみで大きくなっていることから、的確に剥離を捉えているのではないかと考える。この現象の理由は、健全状態であればコンクリート-仕上げモルタルの界面が接着されているため、一体となって振動が伝わり、打診直後に最大音圧を示したのではないかと考える。逆に剥離が起こると空気層ができ、コンクリート-仕上げモルタル界面で反射音ができるためにこのように最大音圧までの時間差が起こるのではないかと考えた。健全箇所では打診=最大音圧=ピークまでの時間がほぼ 0 となるため、閾値が設定しやすく、使いやすい指標なのではと考える。

今後はデータ数を増やして、実用化に向けた検討が必要である。

(2)打診箇所(小文字ローマ字)固定での熱負荷サイクル数を変数とした比較

本節は打診箇所を固定し、熱負荷サイクルごとでの変化を見る。図4-37から図4-41にそれぞれの打診箇所でのピークまでの時間の推移を示す。

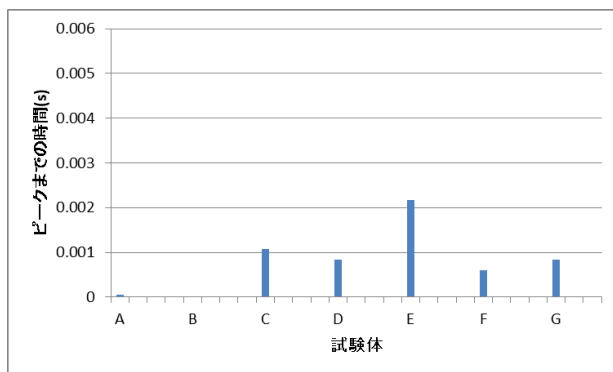


図4-37 打診箇所 a でのサイクル数ごとの比較

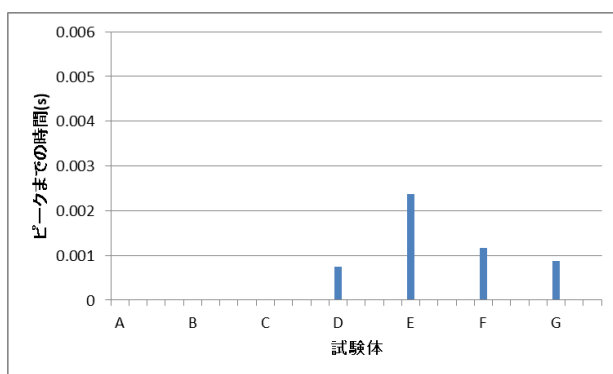


図4-38 打診箇所 b でのサイクル数ごとの比較

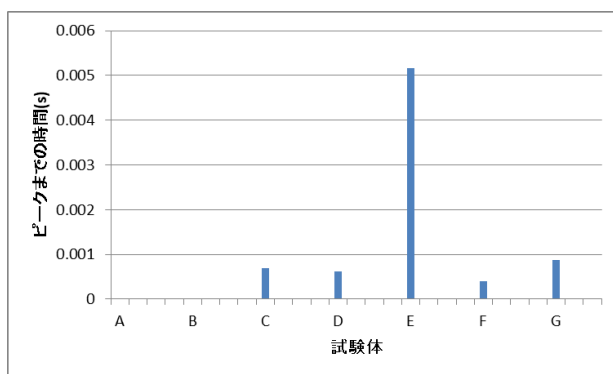


図4-39 打診箇所 c でのサイクル数ごとの比較

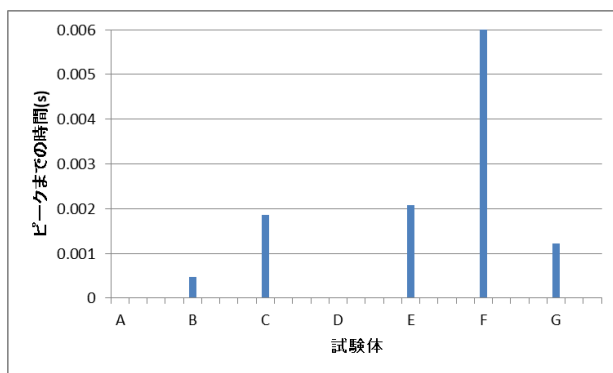


図 4-40 打診箇所 d でのサイクル数ごとの比較

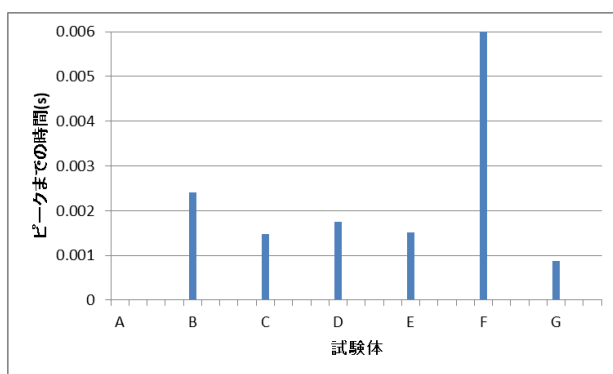


図 4-41 打診箇所 e でのサイクル数ごとの比較

図 4-37 から図 4-41 において、図 4-37 から図 4-39 に示す打診箇所 a~c を見ると 6 サイクル目である C からピークまでの時間が現れる。図 4-40、図 4-41 に示す図打診箇所 d,e を見ると熱負荷サイクル 3 の B からピークまでの時間が現れる。この違いは熱負荷をかけていないか(a,b,c)とかけているか(d,e)であるため、明確に区別できている。熱負荷をかけるとすぐに剥離が生じ、ピークまでの時間がかかるためである。

図 4-37 から図 4-41 を縦方向にみると、熱負荷サイクル数 0 の A が a-e どの箇所を見ても他のサイクル数より圧倒的に小さい値となっている。やはり熱負荷をかけていない健全状態では打診=最大音圧担っていることが示されている。

熱負荷サイクル数 3 の B に関しても d,e のみピークまでの時間が大きくなっている。加熱箇所が d,e であるため早々に剥離が起きていることは納得がいき、そのためピークまでの時間が長くなっているものと推察される。全箇所剥離の傾向が出るのがサイクル数 6 の C からなので、接着強度と図心周波数の関係がこちらにも示されている。

以上のことからピークまでの時間は剥離と関係性が深いと考える。

4.2.6 熱負荷実験のまとめ

本節では、打音解析という視点から仕上げモルタルの剥離に関する熱負荷実験の分析を行った。以下に本節で得られた知見をまとめる。

1)ピーク周波数について

全箇所が同じように劣化しているため、ピーク周波数は劣化を受けていない箇所でも、他の部分が負荷を受けると低下していくことがわかった。

おおよそ熱負荷サイクル数とピーク周波数の関係性が見られるため、モルタル仕上げの劣化もピーク周波数で追うことはできる。

2)図心周波数と接着強度の関係について

通常、健全状態のほうが高周波数域にピークを持ち、低周波数域でのピークスペクトルが低下するため、図心周波数が高くなるはずである。しかし、本実験の結果は、逆で健全ほど低い図心周波数を示した。原因としては下地コンクリートの体積が考えられ、大きな下地コンクリートを用いると、健全ほど図心周波数が高い結果になると考えている。せん断強度は熱負荷をかけるほど低下していく傾向が見られたため、図心周波数が正しく出ていれば、非破壊でせん断強度までわかる良い検査指標になり得るものと考ええる。

3)減衰率

本実験の結果からは剥離箇所や劣化サイクル数など条件を変えても関係性が見えにくかったため、モルタル仕上げの劣化検知には減衰率は使いにくい指標であると考ええる。

4)ピークまでの時間

サイクル数を固定した試験体の各箇所の比較、各箇所を固定したサイクル数を変えた比較のどちらとも、熱負荷のかけ方やせん断強度の推移と合致した変化が認められたため、有効な指標であるということがわかった。また健全箇所では打診=最大音圧=ピークまでの時間がほぼ0となるため、閾値が設定しやすいといえる。

4.3 模擬剥離試験体を用いた実験

本実験では熱負荷実験とことなり、あらかじめ剥離を模擬した試験体を作製し、各模擬剥離と打音検査の解析結果の関係を検討した。本実験は前章の結果と合わせて、剥離状態と各種解析指標の結果を照らし合わせ、より実用的な指標を確立することを目指している。

4.3.1 試験体概要

図 4-42 に試験体概要を示す。剥離状態の模擬に関しては、0.2mm の厚さに関してはテフロンシートを、4mm の厚さに関してはすべりどめマットを加工し使用した。すべりどめマットの概要については図 4-43 に示す。このようにメッシュ状になっているため、空隙を作ることができた。各模擬劣化は3箇所ずつ作り、端部と中央部の違いの比較も可能にしている。模擬剥離は、面積及び厚さを変えて作った。

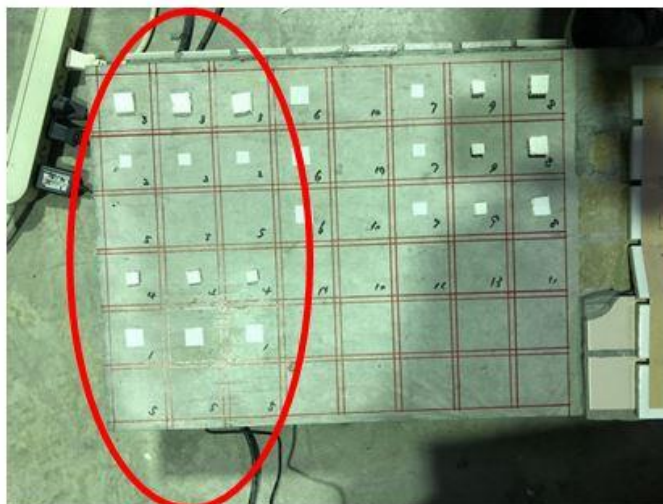


図 4-42 試験体概要

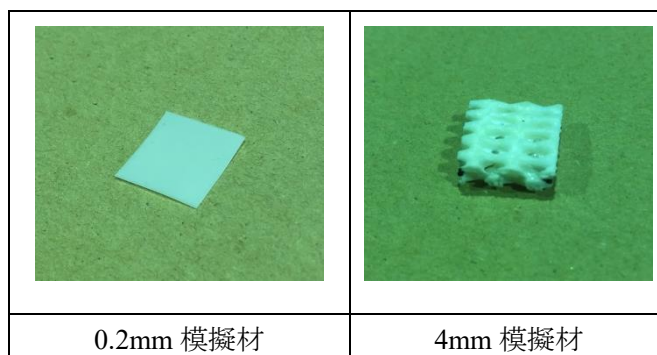


図 4-43 剥離模擬材

また，データを扱う上で，各箇所を図4-44のように番号をふった。

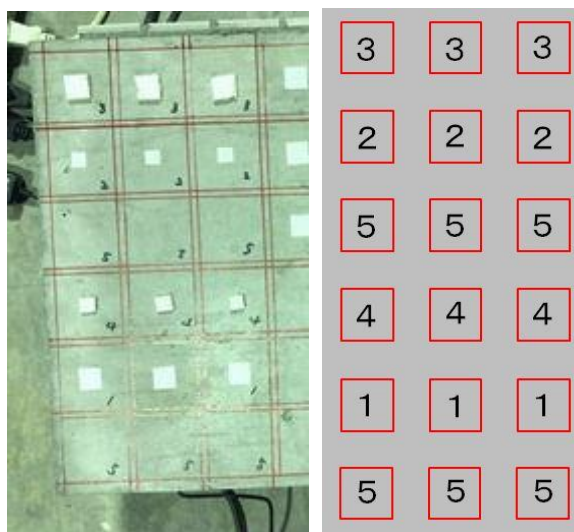
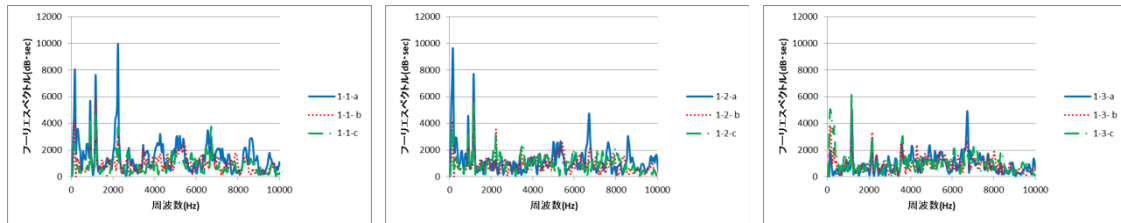


図4-44 各箇所の呼び番号

打音の録音は前章と同じく，マイクロフォンを用いて行い，1点検箇所につき3打診を打診棒を用いて行った。マイクロフォンのサンプリングレートは44100Hzとした。全打診同一人物が同程度の力で打診棒で打撃した。

4.3.2 ピーク周波数を用いた剥離評価

打診音にFFT解析を行い、フーリエスペクトル図を描いた。各図の表記○-△-□は○が劣化状況を示す前節でふった番号, △が外側を1とし, 中央側に2,3となるようにふった。□のアルファベットはaが1打目, bが2打目, cが3打目を示している。以降図4-45から図4-50に各箇所でのスペクトル図を示す。

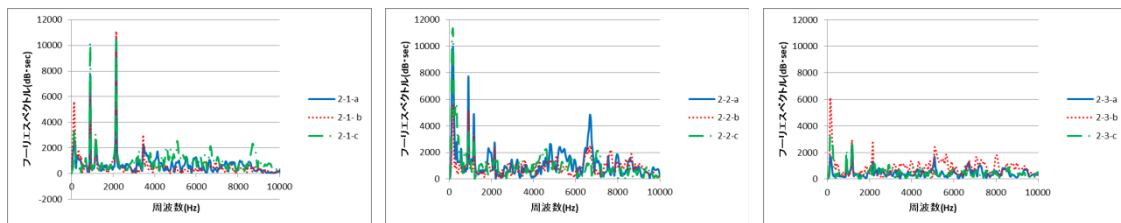


1-1-□のスペクトル

1-2-□のスペクトル

1-3-□のスペクトル

図 4-45 劣化状態 1(1.5cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

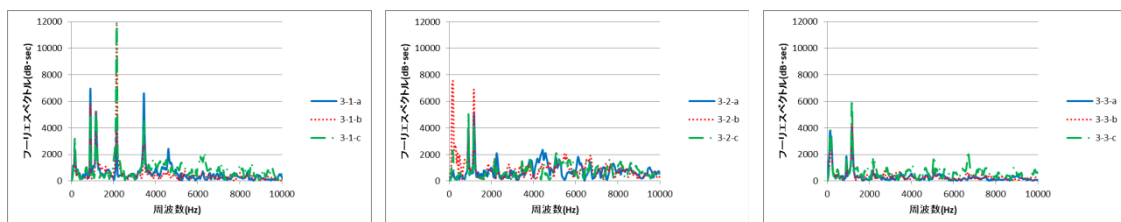


2-1-□のスペクトル

2-2-□のスペクトル

2-3-□のスペクトル

図 4-46 劣化状態 2(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

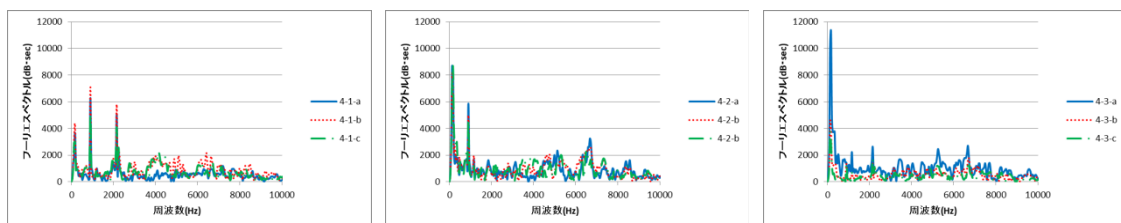


3-1-□のスペクトル

3-2-□のスペクトル

3-3-□のスペクトル

図 4-47 劣化状態 3(1.5cm 角, 厚さ 4mm の模擬剥離)のスペクトル

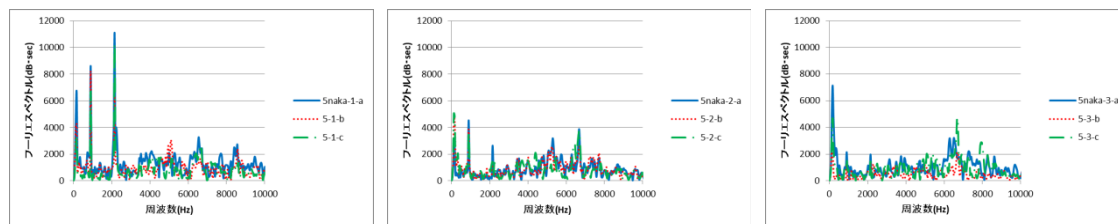


4-1-□のスペクトル

4-2-□のスペクトル

4-3-□のスペクトル

図 4-48 劣化状態 4(1cm 角, 厚さ 4mm の模擬剥離)のスペクトル

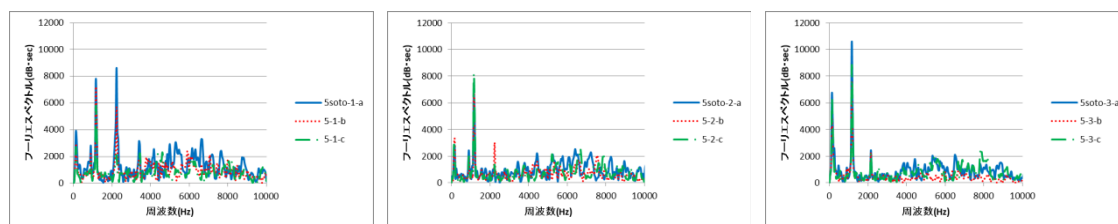


5 中-1-□のスペクトル

5 中-2-□のスペクトル

5 中-3-□のスペクトル

図 4-49 状態 5 中(健全)のスペクトル



5 外-1-□のスペクトル

5 外-2-□のスペクトル

5 外-3-□のスペクトル

図 4-50 状態 5 外(健全)のスペクトル

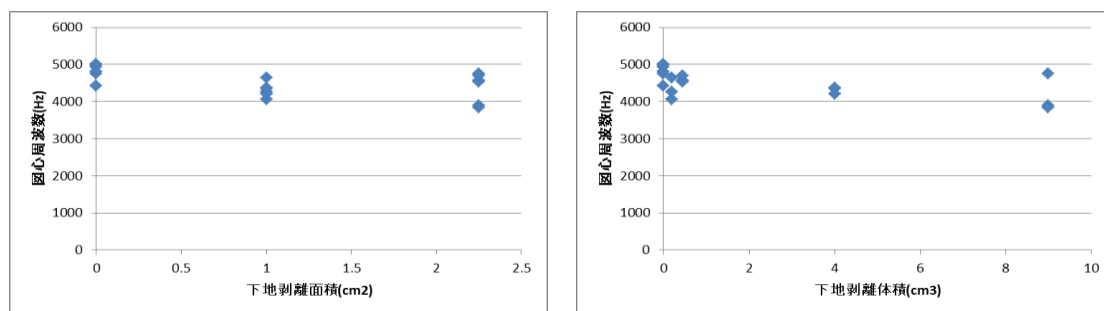
図 4-45 から図 4-50 を見ると、各箇所 3 打(グラフ内の a,b,c)のスペクトルはほぼ一致するため、加振方法は同様であるということがわかった。しかし同じ劣化状態である○-1,○-2,○-3 のスペクトルは大きく異なる。試験体概要で示したようにかなり大きく重たいものを用いたため、あまり外周部、内部で音に違いは出ないだろうと考えていたが、影響が出た。健全のものを見るとわかりやすいが、外側ほど 2000Hz 以下で大きなピークを持つことがわかる。

図 4-45 から図 4-50 を縦方向に比較すると、ピークの立ち方が似ていることから、劣化度合いではなく、打診箇所の構造物に対する位置のほうに影響を与えていることがわかる。熱負荷実験では細い試験体で各劣化状況を一つの試験体内に作ることはできなかったため、この影響が見られなかったものとする。そのため、ピーク周波数を指標に用いる場合は打音箇所の試験体に対する箇所が多少は影響する可能性があるため、補正を考える必要があり、実用化には多くのデータが必要になるものとする。

4.3.3 図心周波数を用いた剥離評価

前節で描いたスペクトル図の範囲(0-10000Hz)で図心周波数を計算した。それぞれの値は同一試験体の3打の平均値を用いることとした。打診箇所は3箇所あるため、それぞれ模擬剥離状態のデータは3個ずつ存在することとなる。

本節では剥離状態を剥離面積、及び剥離体積として表し、剥離状態と図心周波数の関係を図4-51に示す。



剥離面積と図心周波数の関係

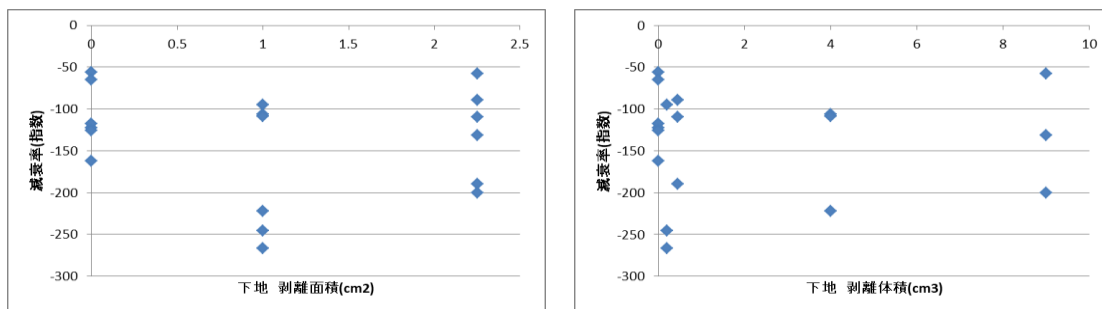
剥離体積と図心周波数の関係

図 4-51 剥離状態と図心周波数の関係

図4-51をみると、少し外値をとっているものもあるが、おおよそ劣化部分大きいものほど図心周波数が小さいという関係が見られる。すなわち健全に近い試験体のほうが図心周波数が大きくなる傾向がある。この結果は熱負荷の結果と逆となっている。しかし、次章のタイルでも示すように、健全に近いほど図心周波数が高くなる方が正しいと判断している。

4.3.4 減衰率を用いた剥離評価

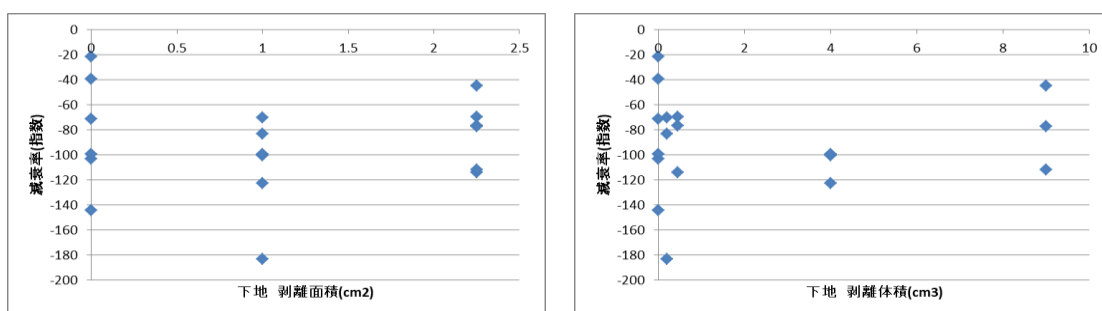
同一箇所を3回打診し、減衰率(指数)をそれぞれ算出、3回の平均を使用することとした。前節と同じく、最大音圧から音圧が1/2,1/5,1/10になるまでの減衰率を計算し、その値と剥離面積、剥離体積との関係を図4-52から図4-54に示す。



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

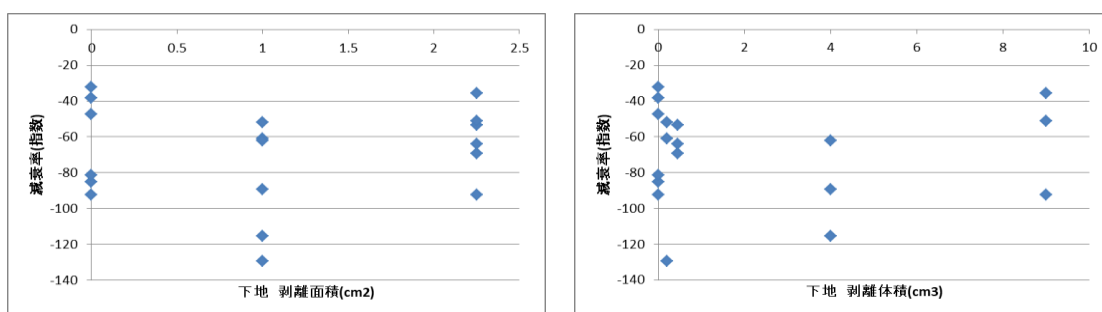
図 4-52 剥離状態と最大音圧 1/2 までの減衰率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 4-53 剥離状態と最大音圧 1/5 までの減衰率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 4-54 剥離状態と最大音圧 1/10 までの減衰率の関係

図 4-52 から図 4-54 に示すように、減衰率と剥離体積の関係は見られなかった。ここで健全状態でも明らかに減衰率が大きく異なっているため、この原因は打診箇所(内側と外側)ではないかと考え、5 の中側と 5 の外側での結果を比較してみた。結果を図 4-55 から図 4-57 に示す。

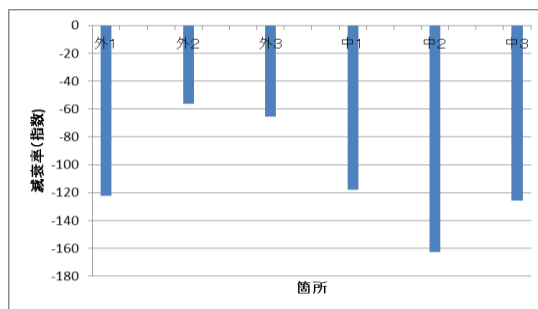


図 4-55 5(健全)中側, 外側の最大音圧 1/2 までの減衰率

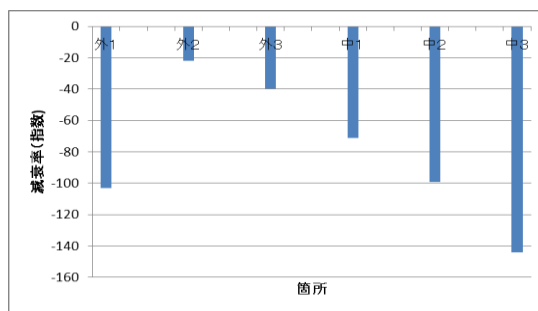


図 4-56 5(健全)中側, 外側の最大音圧 1/5 までの減衰率

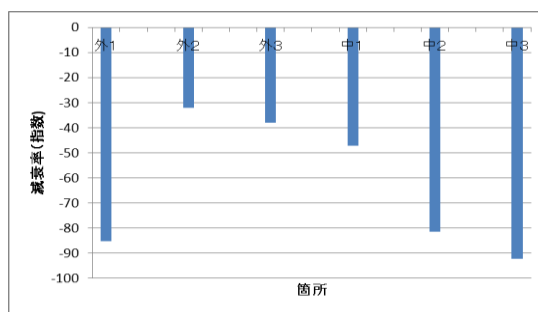


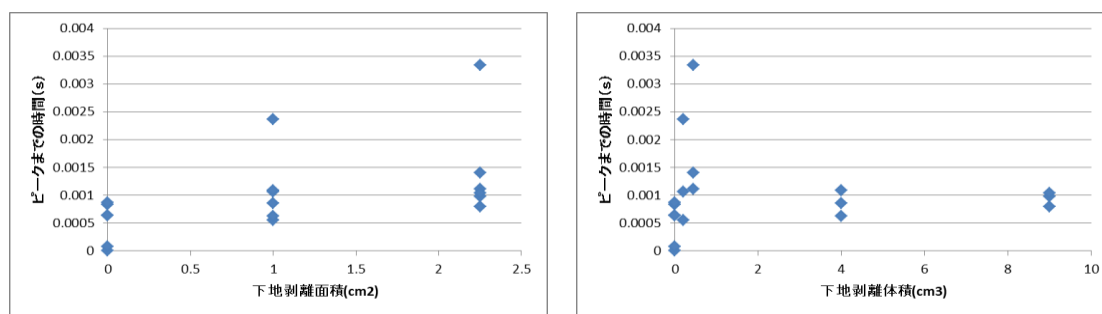
図 4-57 5(健全)中側, 外側の最大音圧 1/10 までの減衰率

図 4-55 から図 4-57 をみると、健全状態は同じであっても、外側が明らかに低くなっている。ピーク周波数でも述べたとおり、外側は健全であっても剥離部に近い小さい減衰率をとっているため、減衰率を用いる場合には打診箇所の影響を考慮する必要がある。

4.3.5 打診から最大音圧までの時間を用いた考察

前節と同じく加振時を定常状態から大きく音圧が変わる±1000Hzと設定，そこから最大音圧までの時間をピークまでの時間とした。また，同一箇所を3回打診しそれぞれ算出し，その値の平均を使用することとした。

前節でも述べたとおり，健全状態のものはピークまでの時間が短く，剥離が起こっているものはピークまでの時間が長くなると予測した。図4-58に剥離部分の大きさとピークまでの時間の関係を示す。



剥離面積とピークまでの時間の関係

剥離体積とピークまでの時間の関係

図4-58 剥離状態とピークまでの時間の関係

図4-58に示すとおり，健全，剥離を見極める明確な閾値の断定は難しいが，剥離面積，剥離体積が大きくなるほど，ピークまでの時間が長くなる傾向が見られた。このことは熱負荷実験の結果とも整合性が取れるため，仕上げモルタルにおいて剥離部分が大きくなるほど打診から最大音圧までの時間が長くなるという考えは正しいと考える。

この指標は，閾値を0.0001sとすれば，健全なものも剥離と判定してしまうが，安全側の判断を下せるため，周波数や減衰率のように他要因を考慮せずに剥離判定を行うことができる。と考える。

4.3.6 擬剥離実験のまとめ

本節では、打音解析というアプローチから仕上げモルタルの剥離に関する熱負荷実験の分析を行った。以下にここで得られた知見をまとめる。

1) ピーク周波数のこと

本試験体のように大きなコンクリートを下地としても、劣化状態が同じであるにも関わらず、外周部と中央部など、箇所によってピークの立ち上がり方が変わった。前節では試験体すべてが端部のような形であったため、同一条件で比較できたが、本試験体や実構造物では端部と中央部は存在するため、位置による補正をおこなう必要がある。そのため、実用化には多くのデータが必要になり、補正など手間がかかるため使いづらい指標であると判断した。

2) 図心周波数と接着強度の関係

剥離部分が大きいものほど図心周波数が低下する傾向が認められた。本試験体のように大きなコンクリートを下地として使用すると、これまでと同様の傾向があることがわかった。そのため、図心周波数は仕上げモルタル剥離の検知に有効な指標であると考えられる。

3) 減衰率

剥離状態と減衰率の関係はどのような条件であっても認められなかった。そのため、モルタル仕上げの場合、減衰率は劣化検知指標に使うことはできない。

4) ピークまでの時間

健全、剥離を見極める明確な閾値の断定は難しいが、剥離面積、剥離体積が大きくなるほど、ピークまでの時間が長くなる傾向が見られた。データ数が少ないため、今後作成する試験体でもこの指標で解析を行い、データを蓄積して閾値を定めることでより有効性の検討が必要である。

4.4 仕上げモルタルのまとめ

熱負荷実験による劣化の進行を追い、模擬剥離実験によって劣化状態の打音データを入手した。本章ではこれら2つの実験によって得られた打音波形を各指標で解析し、剥離検知に有効な指標の確立を目指し考察を行った。以下に本章での知見をまとめる。

1)ピーク周波数

熱負荷実験のように各箇所が同じ場所であれば使うことができるが、模擬剥離実験のように、端部と中央部があるものでは劣化状態より位置の方がスペクトルに影響を与えるため、指標として用いるには補正が必要である可能性が高い。

2)図心周波数と接着強度の関係

通常、模擬剥離実験のように実際の外壁でも健全部は図心周波数が高く、劣化に伴って低下する関係となる。図心周波数に関してはFFT結果をもとに図心を出すだけであるため、とても簡単である。そのため、実用的な指標であると考えられる。ただし、熱負荷実験では異なる傾向の結果が得られたため、今後、試験体の数を増やして検討する必要がある。

3)減衰率

熱負荷実験及び模擬剥離実験ともに劣化状態と減衰率には関係性が見られなかった。そのため、モルタル仕上げに関しては、減衰率は剥離発生の指標として使うことが困難である。

4)ピークまでの時間

熱負荷実験及び模擬剥離実験ともに劣化が進行するほど、加振から最大音圧までの時間が長くなる傾向が見られた。熱負荷実験におけるせん断強度とも関係がありそうなので、今後、湿式仕上げの非破壊検査の発展に寄与する可能性は高いと考えている。

5)まとめ

モルタル仕上げに関しては4つの指標で解析を行った。図心周波数は周波数領域、ピークまでの時間は時間領域での解析であるため、どちらの領域でも仕上げモルタルの剥離検知はできることがわかる。剥離検知ができる指標のなかでも、ピークまでの時間に関しては今まで他の研究者が着目していない視点である。そのため、今後はこの指標についても検討していただけると幸いである。

第5章 打音解析による外装タイルの剥離検知手法の高度化

5.1 はじめに

近年、多くの研究機関では検査の確実性を高め、コストを低減するべく、外壁タイルの機械検査化を目指し、研究を行っている。その基礎段階として、打診検査によって外壁タイルの打診音をマイクロフォンで録音し、より正確に剥離を検知できる指標を模索している段階である。しかし現実には、研究者ごとに定めた指標で打音検査を行っているにとどまっており、この分野に関してはまだまだ研究を進める必要があると考えている。本研究は、機械化の基礎段階として検査の高度化を目指す必要があると考え、各種検査指標の有効性の確認を行うことを目的とした。

5.2 既往論文

5.2.1 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究¹⁾

タイル剥離診断のニーズは高まっているが、実際の検査は検査員が打音検査用ハンマーを用いての検査であるため、技量や検査環境によって差が生まれている。精度や、検査の手間など効率などの問題解決のため、検査の定量化、効率化を目指している。

機械を用いた検査方法として、マイクにより打撃音を收音し解析する方法、タイル面を加振した際の振動特性を解析する方法、赤外線カメラを用いて温度差を計測する方法などが挙げられるが、その中でも筆者らは打撃応答音の解析による診断方法を採用して検討を行っている。

基礎的研究ということで、本論文では模擬剥離試験体を作成し、打診検査を行っている。本論文は

- ①タイル種類、張り付け材料、剥離海面、剥離深さを変えた模擬剥離試験体を作成
 - ②検査員や既存の診断装置により剥離診断を行い、現状の課題を抽出
 - ③効率よくタイル壁面を打撃できる装置を試作し、打撃音を收音
 - ④収録した音をそれぞれの条件の違いをもとに考察し、適した解析方法、剥離判定基準、剥離深さの予測方法を提案
- という流れで進めている。

試験体概要

試験体概要を図 5-1、表 5-1 に示す。

模擬剥離は厚さ 0.1mm の高密度ポリエチレンフィルムの両面に不織布を一体形成させた 1.1mm の特殊シートを用いている。張り付け方は両面テープを用いている。

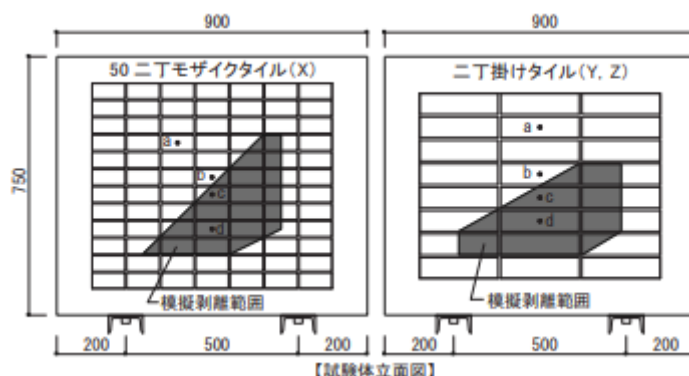


図 5-1 試験体概要

表 5-1 試験体概要

試験体名	タイル種類・寸法(mm)	張付け材料(張代)	下地モルタル	剥離界面*1	剥離深さ(mm)	
XDH	50 二丁モザイクタイル [X] 95×45×7	モルタル (2mm)	なし[D]	張付け材裏[H]	9	
XMH				張付け材裏[H]	9	
XMS				下地モルタル裏[S]	19	
XMSw			10mm [M]	下地モルタル裏[S]	下地モルタル裏[S] (剥離厚 2 倍)*2[w]	19
YDH				なし[D]		
YMH				10mm [M]	張付け材裏[H]	15
YMS	227×60×13	有機系接着剤 (1mm)	10mm [M]	下地モルタル裏[S]	25	
ZMS	二丁掛タイル [Z] 227×60×11			下地モルタル裏[S]	22	
壁体	・鉄筋コンクリート造, サイズ: 900×750×150mm ・使用コンクリート: W/C:51.8%, 圧縮強度(4 週):33.8N/mm ² (封かん) ・設置方法: 硬質ゴムシート(厚 3mm)を介して 2 本の溝型鋼(C-100×50×5×7.5)上にボルト(M16)で固定し, 自立させた					
備考	*1 特殊シートを埋め込むことで剥離再現 *2 特殊シートを二重にして埋め込み [] 内は仕様を表わす記号					

検査員及び既存剥離診断装置による検査結果

表 5-2 検査結果

箇所	試験体記号	評価点数	検査員 i		検査員 ii		検査員 iii		既存装置 I		既存装置 II	
			正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率
健全部	XDH	204	203	99.5	204	100.0	199	97.5	204	100.0	204	100.0
	XMH	204	204	100.0	202	99.0	202	99.0	194	95.1	204	100.0
	XMS	204	199	97.5	204	100.0	203	99.5	204	100.0	204	100.0
	XMSw	204	200	98.0	194	95.1	200	98.0	204	100.0	204	100.0
	YDH	91	90	98.9	91	100.0	91	100.0	91	100.0	91	100.0
	YMH	91	91	100.0	91	100.0	91	100.0	91	100.0	90	98.9
	YMS	91	90	98.9	91	100.0	90	98.9	91	100.0	91	100.0
	ZMS	91	89	97.8	89	97.8	91	100.0	82	90.1	88	96.7
剥離部	XDH	41	29	70.7	24	58.5	19	46.3	32	78.0	37	90.2
	XMH	41	36	87.8	33	80.5	32	78.0	39	95.1	37	90.2
	XMS	41	37	90.2	36	87.8	28	68.3	37	90.2	32	78.0
	XMSw	41	36	87.8	38	92.7	31	75.6	36	87.8	37	90.2
	YDH	25	19	76.0	19	76.0	19	76.0	18	72.0	23	92.0
	YMH	25	12	48.0	13	52.0	12	48.0	23	92.0	22	88.0
	YMS	25	20	80.0	23	92.0	21	84.0	21	84.0	21	84.0
	ZMS	25	24	96.0	23	92.0	19	76.0	25	100.0	22	88.0

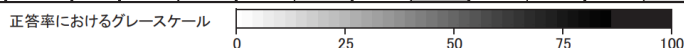


表 5-2 に検査結果を示す。いずれの試験体も健全部は、検査員、既存装置ともに高い正答率である。剥離部分は健全部と比べ大幅に正答率が落ちている。特に張り付けモルタルの剥離に関しては正答率が落ちているため、検知が難しい。剥離部分の正答率が落ちている原因は、検査員診断装置ともに剥離箇所を小さく見積もっているためであり、客観的で高精度な剥離診断を行う上で、新しい装置を開発することが重要だと述べている。

打撃装置の開発に関しては省略する。

剥離判定方法の検討として、健全部と剥離部では第一波後半に応答音が大きくなる傾向が見られたため、これに着目することとした。健全時の第一波後半最大振幅の平均値を分母とし、健全時、剥離時の相対最大振幅を求めたものが図 5-2 相対最大振幅である。

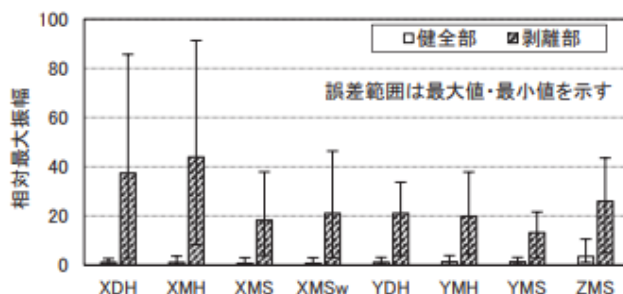


図 5-2 相対最大振幅

同図を見ると、剥離部が大きな振幅となっている。よって相対最大振幅を剥離検知指標とできると述べている。

続けて、第一波前半ピークから後半ピークまでの波長をピーク間波長とし、新しい指標として検討している。図にピーク間波長の求め方を示す。

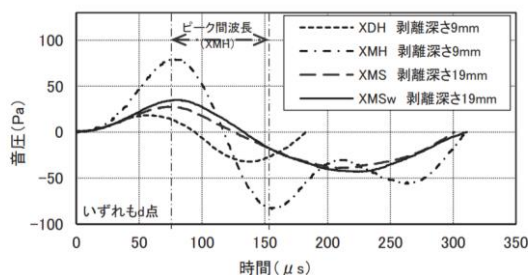


図 5-3 ピーク間波長の求め方

それぞれの模擬剥離試験体のピーク間波長と剥離深さの関係を図 5-4 に示す。

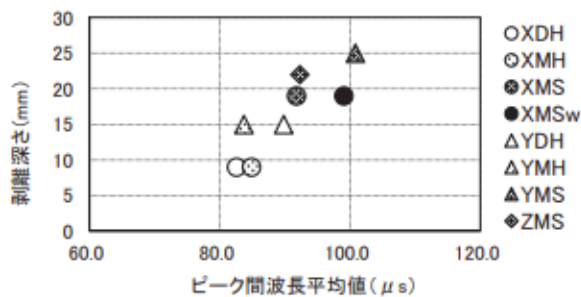


図 5-4 ピーク間波長と剥離深さの関係

図 5-4 を見ると、ピーク間波長と剥離深さには相関性が見られる。そのため、添田らはピーク間波長を剥離深さ検知の検知指標に使えるのではないかと述べている。

5.2.2 ウェーブレット解析を用いた建築用外装タイルの定量的剥離診断²⁾

本論文ではウェーブレット解析を用いた外装タイルの剥離検知方法を提案している。

外装タイルの状態としては図に示すように4パターンがあるとし、図5-5、図5-6、表5-3に示す模擬剥離試験体を作成した。

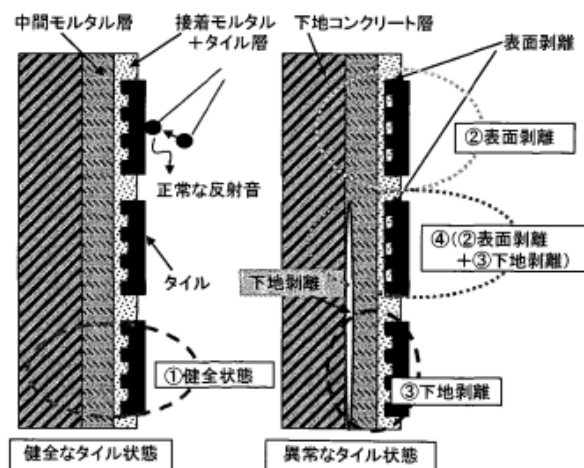


図 5-5 剥離のパターン

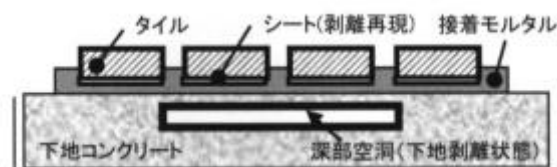


図 5-6 模擬剥離試験体

表 5-3 剥離状態の呼称

剥離状態	表面剥離	下地剥離
Type A	無	無
Type B	有	無
Type C	無	有
Type D	有	有

解析に用いるウェーブレット変換にはマザーウェーブレットという基底が重要となる。このマザーウェーブレットは

- ①打音波形の絶対値の最大値及び終了点を検出
- ②波形データを時間的順序が逆になるようにし、符号を反転、その後元の波形を足し合わせる。
- ③作成した波形のノルム値を計算し、波形全体をノルム値で割り正規化という手順で設計している。

各状態のウェーブレット変換の特徴を図に示す。

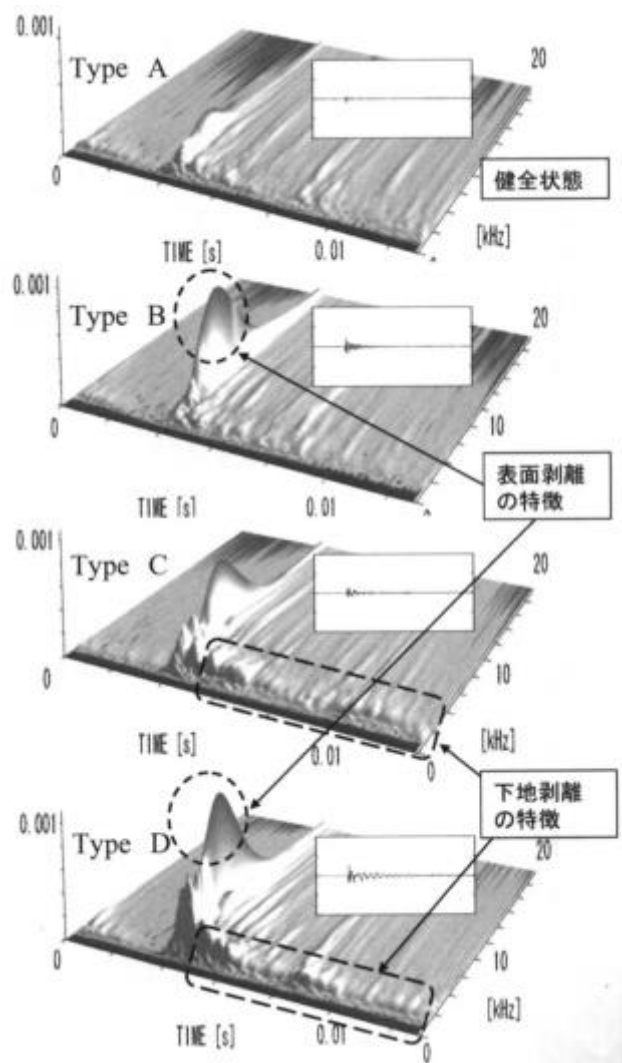


図 5-7 ウェーブレット変換の特徴

図 5-7 に示す通り、表面剥離ではピークが明確に表れ、下地剥離のものでは永続的に低周波数域で小さなピークを持つことが分かった。

この図を上から見たものが図 5-8 である。

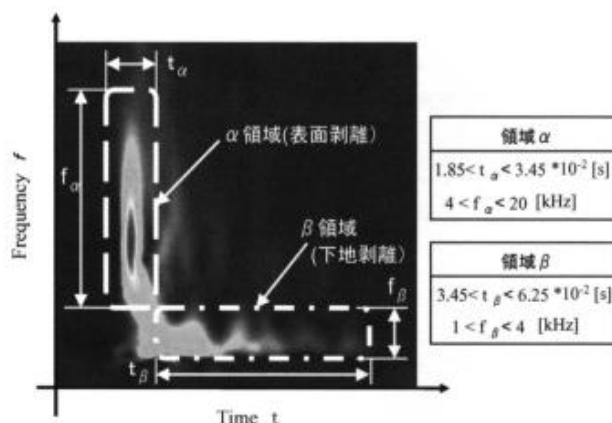


図 5-8 ウェーブレット変換

図 5-8 のように、表面剥離を検知できる領域を α 、下地剥離を検知できる領域を β とし、閾値を定めている。それぞれの領域でウェーブレット係数の総和(近似体積)を算出し、グラフにまとめたものが図 5-9 である。

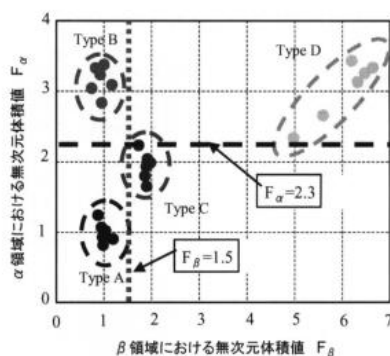


図 5-9 各状態でのウェーブレット係数の総和

図 5-9 を見ると、それぞれの状態により特徴が異なっていることがわかる。この図をもとに定められた閾値を表 5-4 に示す。

表 5-4 閾値設定

閾値	タイル状態
$F_\alpha < 2.3, F_\beta < 1.5$	健全
$F_\alpha > 2.3, F_\beta < 1.5$	表面剥離
$F_\alpha < 2.3, F_\beta > 1.5$	下地剥離
$F_\alpha > 2.3, F_\beta > 1.5$	表面剥離, 下地剥離

表 5-4 に示した閾値を用いることで、ウェーブレット変換を用いた剥離の検知及び剥離箇所の推定が行えると筆者らは述べている。

5.3 模擬剥離試験体を用いた実験

本実験では前章で使った試験体と同じコンクリート板に下地モルタルを貼り、その上に貼り付けモルタルを用いてタイルを貼り付けた。こちらも剥離を模擬した試験体であり、各模擬剥離と打音検査の解析結果の関係性を見た。

5.3.1 試験体概要

図 5-10 に試験体概要を示す。剥離状態の模擬に関しては、0.2mm の厚さに関してはテフロンシートを、1mm, 4mm の厚さに関してはすべりどめマットを加工し使用した。すべりどめマットの概要については図 5-11 に示す。このようにメッシュ状になっているため、空隙を作ることができた。各模擬劣化は3箇所ずつ作り、端部と中央部の違いの比較も可能にしている。模擬剥離は、面積及び厚さを変えて作った。



図 5-10 試験体

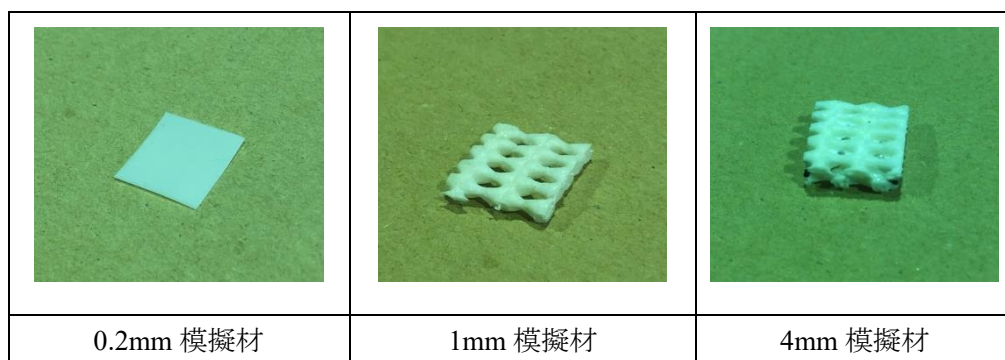


図 5-11 模擬剥離材

剥離が生じる位置として想定されるのは、コンクリート躯体—下地モルタル間(以後下地剥離と呼ぶ)、そして下地モルタル—張り付けモルタル剥離の2種類がある。図5-12, 図5-13に下地剥離, 表面剥離それぞれの概略を示す。赤枠部が剥離箇所を表している。

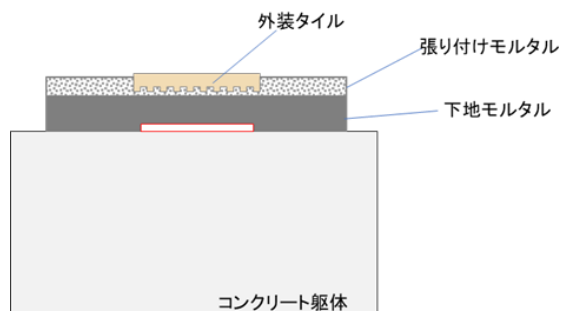


図 5-12 下地剥離

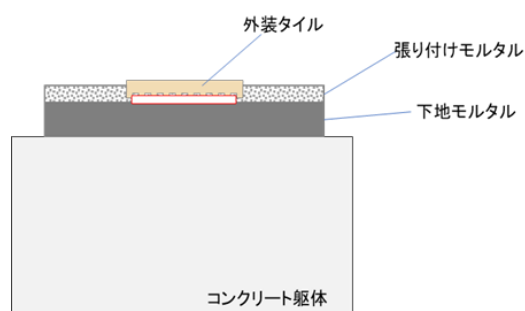


図 5-13 貼り付けモルタル剥離

この2つの剥離位置に対して様々な厚さや面積の剥離を模擬していく。データを扱う上で、各箇所を図5-14のように番号を振った。また、表5-6表5-5に各番号での剥離厚さ, 剥離面積を示す。

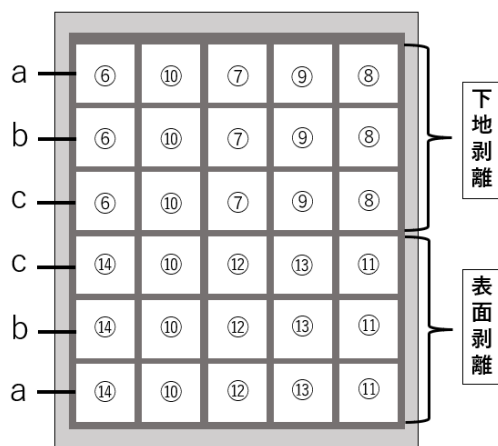


図 5-14 打診番号

表 5-6 下地模擬剥離パターン

下地剥離		
試験体番号	剥離厚さ (mm)	剥離面積 (cm ²)
⑥	0.2	2.25
⑦	0.2	1
⑧	4	2.25
⑨	4	1
⑩	0	0

表 5-5 表面模擬剥離パターン

表面剥離		
試験体番号	剥離厚さ (mm)	剥離面積 (cm ²)
⑩	0	0
⑪	0.2	2.25
⑫	0.2	1
⑬	1	2.25
⑭	1	1

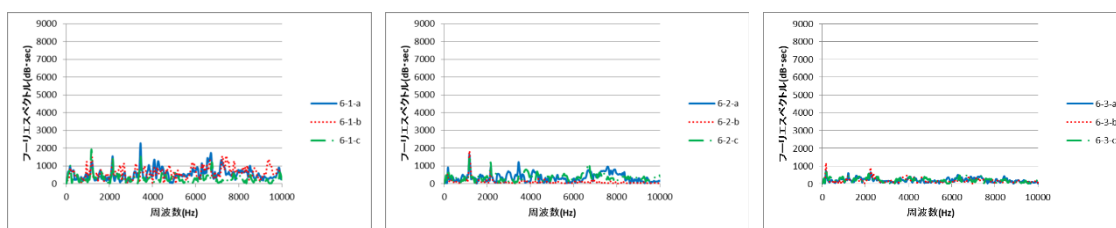
5.3.2 打診方法及び録音方法

打音の録音は前章と同じく、マイクロフォンを用いて行い、1点検箇所につき3打診を打診棒を用いて行った。マイクロフォンのサンプリングレートは44100Hzとした。全打診同一人物が同程度の力で検査を行った。

5.3.3 ピーク周波数を用いた検討

前節で述べたとおり、本試験体は下地コンクリートと下地モルタル間に剥離を模擬した試験体と、下地モルタルと貼り付けモルタル間に剥離を模擬した試験体がある。既往の論文から、この2つは打診音の特徴が違うため、別々に分けて考えることとした。分け方としては番号 6-10(簡略して下地剥離と呼ぶ)と 10-14(貼り付けモルタル剥離と呼ぶ)である。

(1)下地剥離の打診音のピーク周波数解析

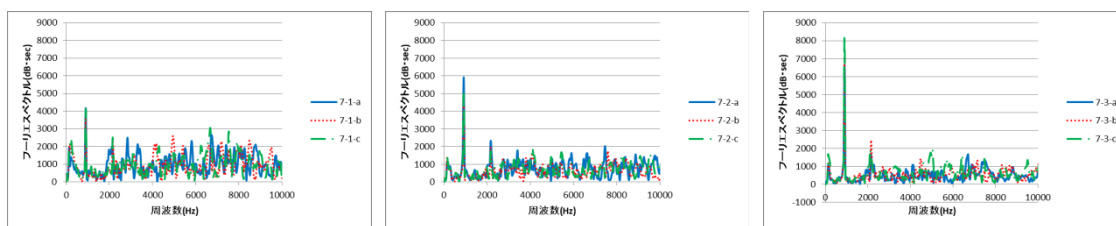


6-1-□のスペクトル

6-2-□のスペクトル

6-3-□のスペクトル

図 5-15 劣化状態 6(1.5cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

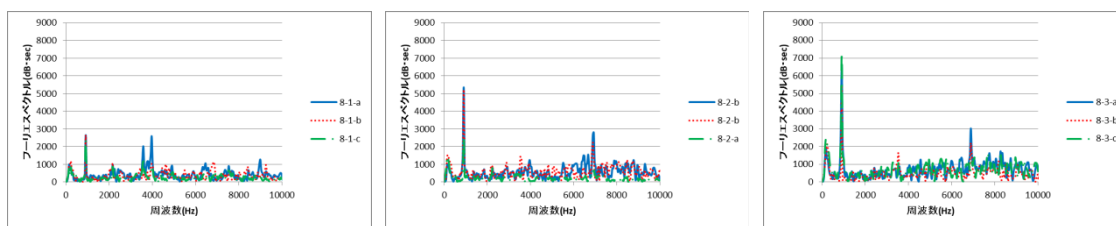


7-1-□のスペクトル

7-2-□のスペクトル

7-3-□のスペクトル

図 5-16 劣化状態 7(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

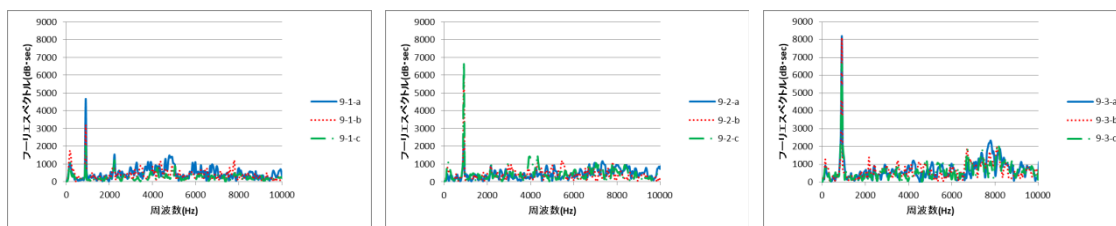


8-1-□のスペクトル

8-2-□のスペクトル

8-3-□のスペクトル

図 5-17 劣化状態 8(1.5cm 角, 厚さ 4mm の模擬剥離)のスペクトル

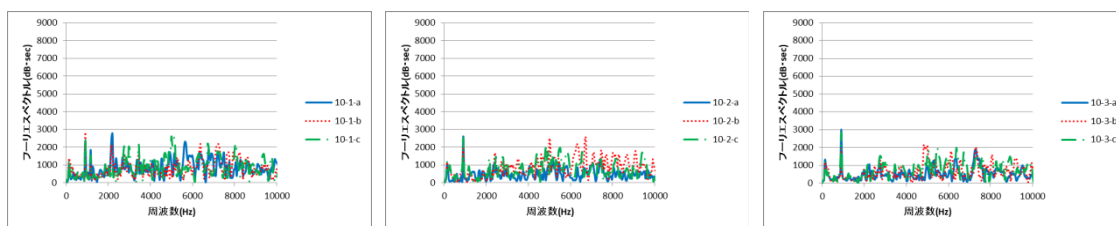


9-1-□のスペクトル

9-2-□のスペクトル

9-3-□のスペクトル

図 5-18 劣化状態 9(1.5cm 角, 厚さ 4mm の模擬剥離)のスペクトル



10-1-□のスペクトル

10-2-□のスペクトル

10-3-□のスペクトル

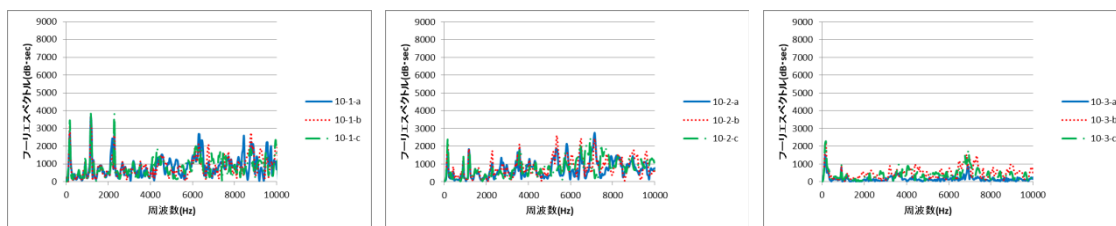
図 5-19 状態 10(健全状態)のスペクトル

図 5-15 から図 5-19 に下地剥離を模擬した試験体の各フーリエスペクトルを示した。

図 5-19 に示す健全状態である 10 において、2000Hz 以下の低周波数でのピークが小さく、また、4000Hz 以上の大きな周波数帯でのスペクトルが大きくなっている。健全でも 2000Hz 以下のピークが一番大きくなっている可能性が高いため、タイルにおいてピーク周波数ではなく、スペクトルの経常を剥離検知に利用することはできると考える。

しかし、最も大きなスペクトルのピークは 2000Hz 以下に出ることが大きく、健全と劣化を見分けるには 2000Hz 以下のピークとそれの全体のスペクトルに対する大きさも判断指標に加える必要がある。

(2) 貼り付けモルタル剥離の打診音のピーク周波数解析

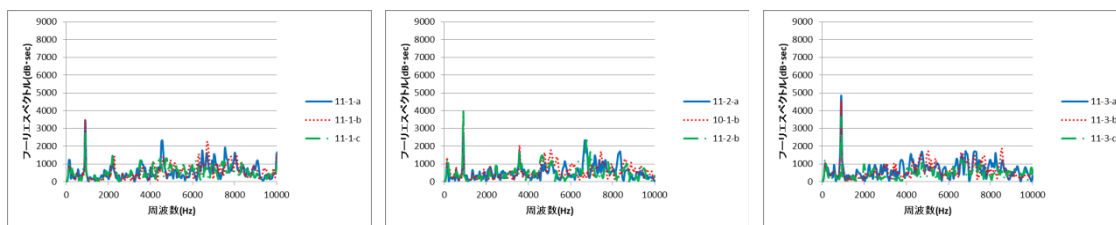


10-1-□のスペクトル

10-2-□のスペクトル

10-3-□のスペクトル

図 5-20 劣化状態 10(健全状態)のスペクトル

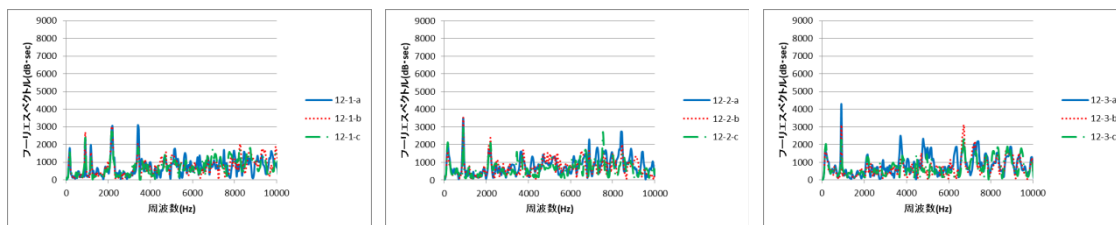


11-1-□のスペクトル

11-2-□のスペクトル

11-3-□のスペクトル

図 5-21 劣化状態 11(1.5cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

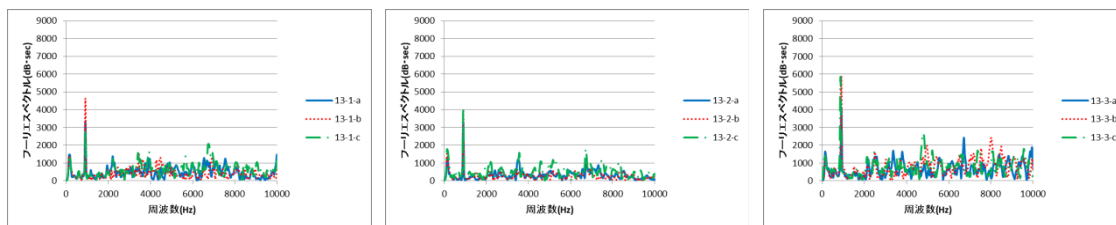


12-1-□のスペクトル

12-2-□のスペクトル

12-3-□のスペクトル

図 5-22 劣化状態 12(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

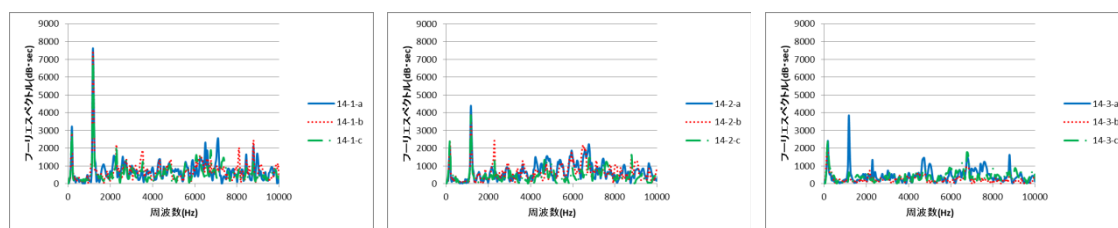


13-1-□のスペクトル

13-2-□のスペクトル

13-3-□のスペクトル

図 5-23 劣化状態 13(1.5mm 角, 厚さ 1mm の模擬剥離)のスペクトル



14-1-□のスペクトル

14-2-□のスペクトル

14-3-□のスペクトル

図 5-24 劣化状態 14(1.5m 角, 厚さ 1mm の模擬剥離)のスペクトル

図 5-20 から図 5-24 に貼り付けモルタル剥離のフーリエスペクトル図を示す。

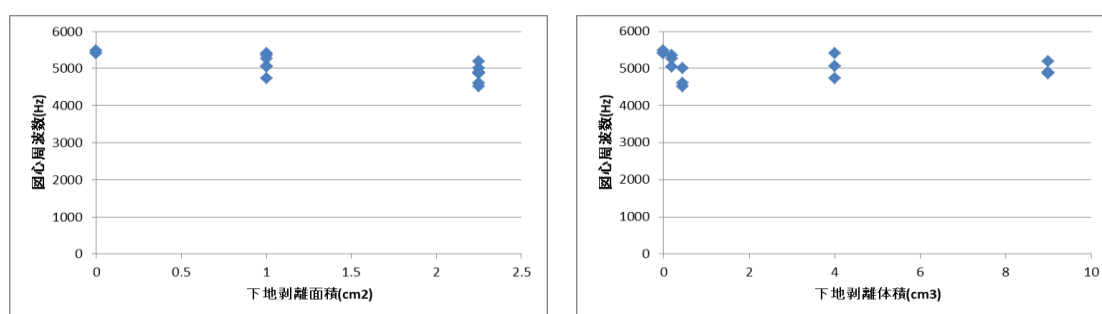
同図より、下地モルタル剥離と同じく、健全状態である 10 において、2000Hz 以下の低周波数でのピークが小さく、また、4000Hz 以上の大きな周波数帯でのスペクトルが大きくなっている。また、少しでも剥離があるものは 1000Hz 付近で大きなピークがある。すなわち、1000Hz のピークと、2000-10000Hz のピークの比率を用いると剥離検知を行うことは可能であると考える。

5.3.4 図心周波数を用いた検討

前節で描いたグラフの周波数の範囲(0-10000Hz), 及び 0-5000Hz の範囲で図心周波数を計算した。それぞれの値は同一試験体の 3 打の平均値を用いることとした。打診箇所は 3 箇所あるため、それぞれ模擬剥離状態のデータは 3 個ずつ存在することとなる。

本節では剥離状態を剥離面積, 及び剥離体積として表し, 剥離状態と図心周波数の関係を 図 5-25 から 図 5-28 に示す。

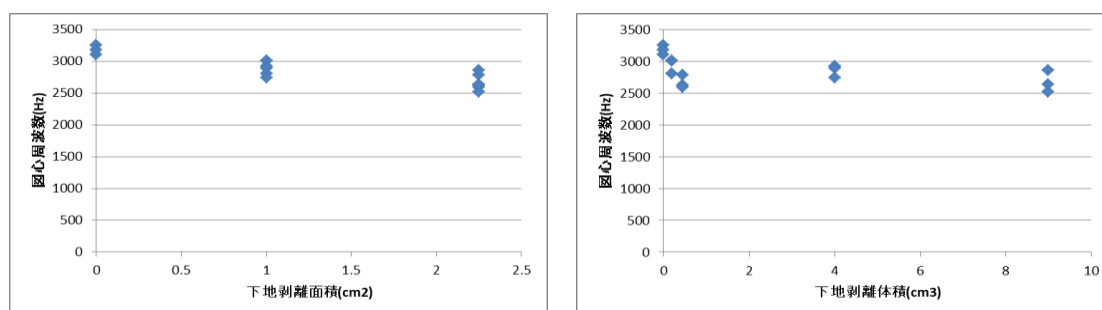
(1) 下地剥離の打診音のピーク周波数解析



剥離面積と図心周波数の関係

剥離体積と図心周波数の関係

図 5-25 剥離状態と図心周波数の関係(0-10000Hz)



剥離面積と図心周波数の関係

剥離体積と図心周波数の関係

図 5-26 剥離状態と図心周波数の関係(0-5000Hz)

図 5-25, 図 5-26 に示すように, どちらの範囲でも剥離部分が大きいかほど図心周波数が低下している。また, 0-5000Hz の方が明確に差が認められる。0-10000Hz の変化量と 0-5000Hz の変化量に違いがないことから, 下地モルタルの剥離は 5000Hz 以下の周波数域で起こるものと考えることができる。

(2) 貼り付けモルタル剥離の打診音のピーク周波数解析

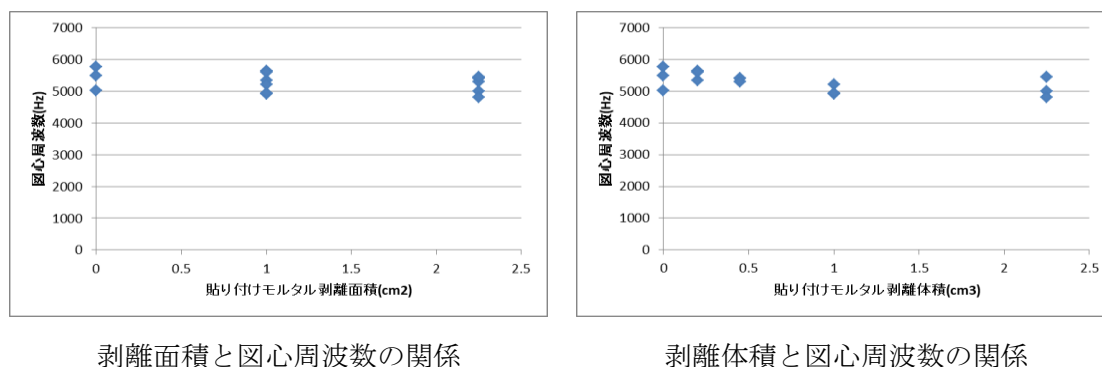


図 5-27 剥離状態と図心周波数の関係(0-10000Hz)

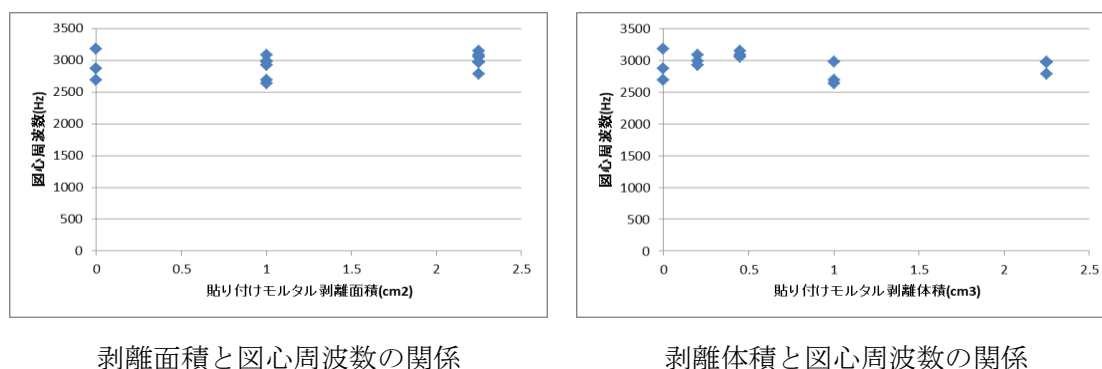


図 5-28 剥離状態と図心周波数の関係(0-5000Hz)

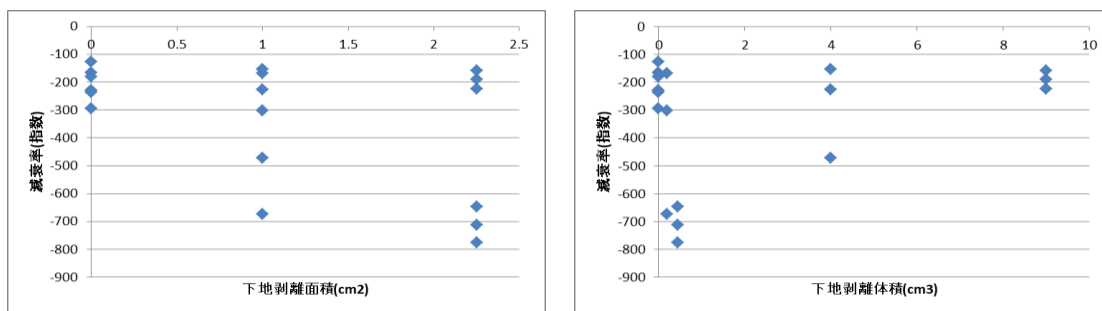
図 5-27, 図 5-28 は貼り付けモルタル剥離の剥離部分と図心周波数との関係を示している。下地モルタルほど明確ではないものの、0-10000Hz までの図心周波数の方は剥離部分の増加に伴い、図心周波数の低下が見られる。0-5000Hz のほうでは健全(横軸 0 の点)のものばらつきが大きく、また明確な関係は見られない。そのため、貼り付けモルタルの剥離は、下地モルタルの剥離と異なって 0-5000Hz の範囲ではなく、5000-10000Hz の範囲での変化のほうが大きいということがわかる。図 5-20 から図 5-24 をみても 6000-7000Hz のスペクトルの山の有無が明確に見られるのは貼り付けモルタル剥離の 10-14 であるため、そのことが影響しているものとする。

ピーク周波数と異なり、単純に範囲内の図心を求めているだけなので、この指標のほうが実務では有効と考えている。

5.3.5 減衰率を用いた剥離評価

同一箇所を3回打診し、減衰率(指数)をそれぞれ算出、3回の平均を使用することとした。前節と同じく、最大音圧から音圧が1/2,1/5,1/10になるまでの減衰率を計算し、その値と剥離面積、剥離体積との関係を図5-29から図5-34に示す。

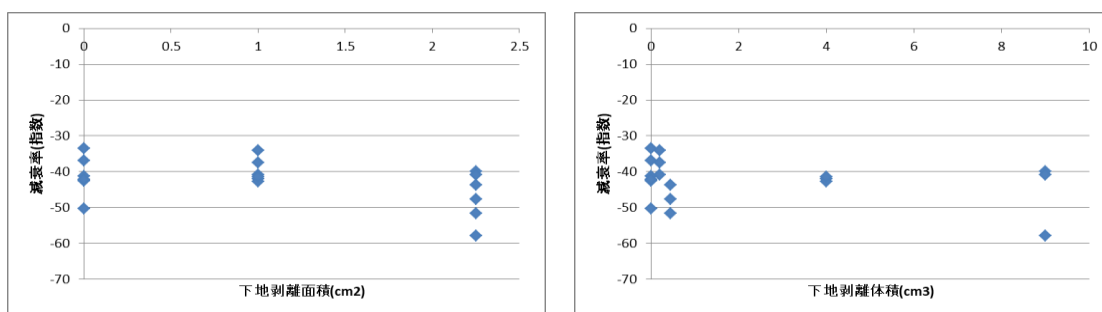
(1)下地モルタル剥離



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

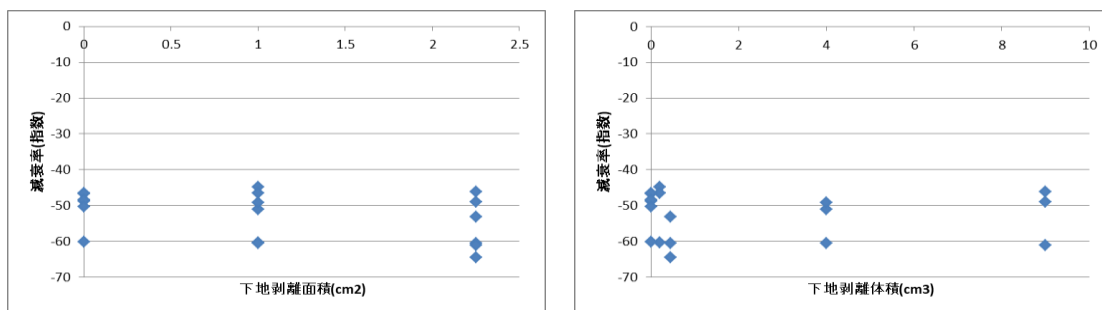
図 5-29 剥離状態と最大音圧 1/2 までの減衰率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-30 剥離状態と最大音圧 1/5 までの減衰率の関係



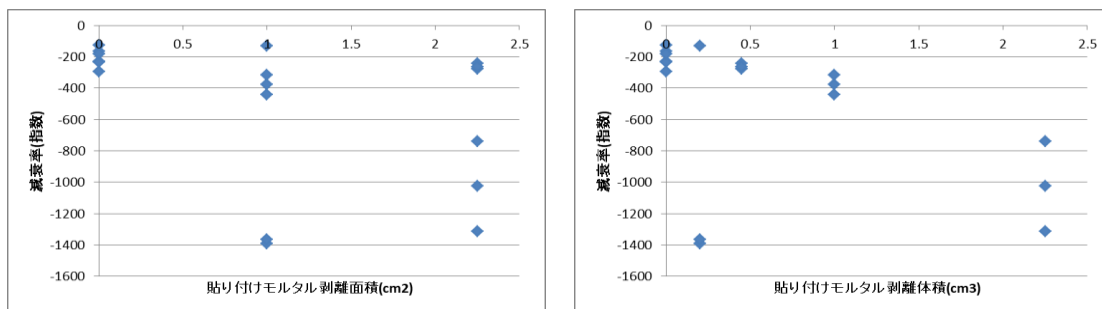
剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-31 剥離状態と最大音圧 1/10 までの減衰率の関係

図 5-29 に示すように、減衰率を最大音圧 1/2 までの値で算定すると、剥離面積が大きいものほど減衰率が大きく、またばらつきが大きくなっていることがわかる。図 5-30, 図 5-31 に示す最大音圧 1/5 までの値や、1/10 までの値で算定すると、剥離部分の大きさに関わらず、ほぼ同じような値となっている。

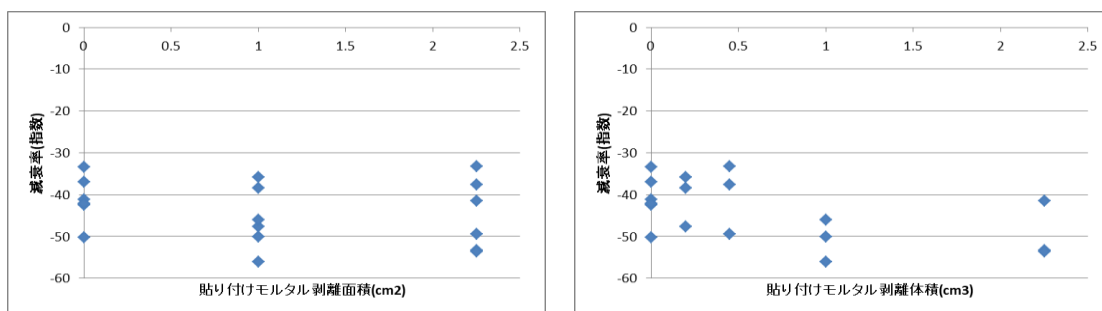
(2) 貼り付けモルタル剥離



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

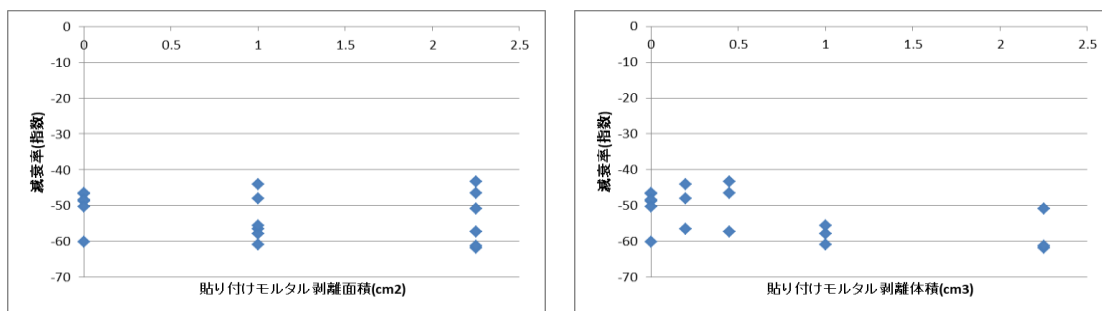
図 5-32 剥離状態と最大音圧 1/2 までの減衰率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-33 剥離状態と最大音圧 1/5 までの減衰率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

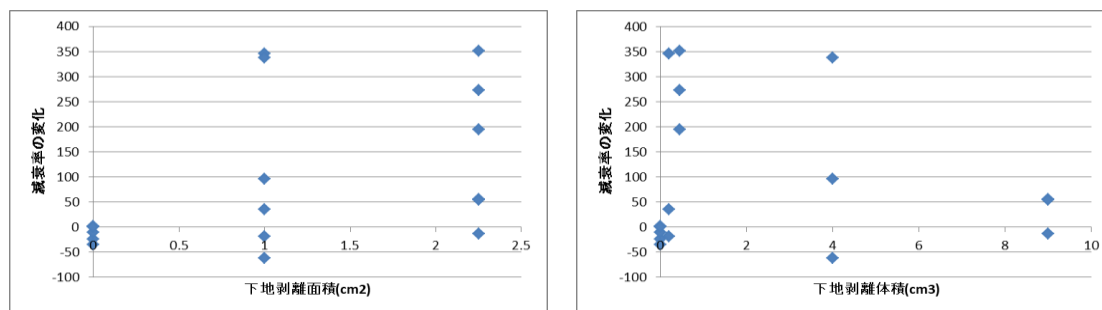
図 5-34 剥離状態と最大音圧 1/10 までの減衰率の関係

図 5-32 に示すとおり、下地剥離と比べて、明確に 1/2 までのもので減衰率と剥離面積の関係が見られる。1/2 までのものは縦軸のオーダーが大きいため、貼り付けモルタルの剥離は劣化度によって大きく減衰率が異なることがわかる。また、下地剥離と同じく、図 5-33、図 5-34 に示す 1/5 までのものや、1/10 までのものは剥離部分の大きさに関わらず、ある程度同じような値となっている。

5.3.6 減衰率の変化

前節では、音圧が一定値を下るまでの減衰率を算出した。図 5-29 から図 5-34 をみると 1/2 までのものは各剥離状態によって大きく減衰率が変わるのに対し、1/5 や 1/10 までのものは剥離状態に関わらずあまり減衰率が変わらない結果となった。このことから、減衰率は初めの方は大きく、時間とともに小さくなっていくことがわかる。そのため、減衰率の変化を指標として用いることができるのではないかと考えた。本節では最大音圧の 1/2 までの減衰率と、最大音圧の 1/3 までの減衰率の差を計算し、剥離部分の大きさとの関係を見た。結果を図 5-35、図 5-36 に示す。

(1) 下地モルタル剥離



剥離面積と減衰率の変化の関係

剥離体積と減衰率の変化の関係

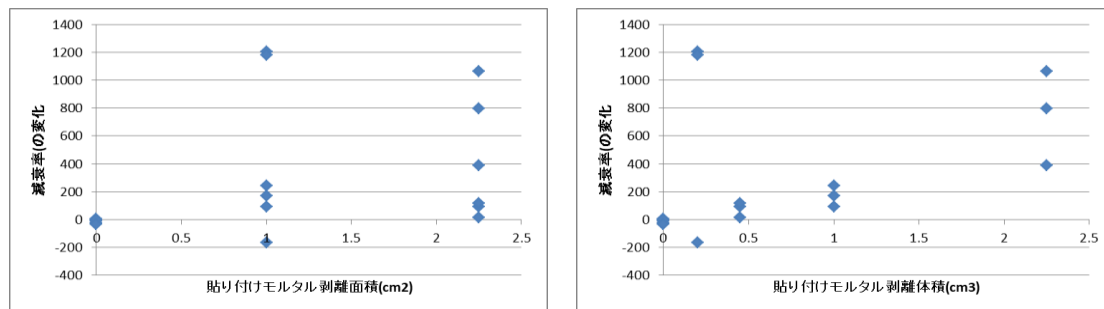
図 5-35 剥離状態と減衰率の変化の関係

図 5-35 より剥離面積のものに関しては前節の減衰率以上に顕著に差が出ている。

また、剥離面積 0 の健全のものは減衰率にあまり変化がない。すなわちある程度同じ指数曲に乗って減衰するということがわかる。逆に剥離があるものは、前節でも述べたとおり、はじめは早く減衰するが、一定を超えると健全と同じ程度の減衰に戻るといことである。

図 5-35 剥離面積との関係を見ると、健全と剥離の閾値を決めるには範囲がかぶっているため難しいが、データ数を増やすと更に関係性は見えやすくなると思われる。剥離体積との関係は剥離面積とのものより見えにくい。しかし、剥離したものの減衰率の変化が大きくなることは確認できる。

(2) 貼り付けモルタル剥離



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-36 剥離状態と減衰率の変化の関係

図 5-35 に示す下地モルタルの結果よりも明確に図 5-36 では減衰率の差が見られる。原因としては前節でも述べた縦軸のオーダーの違いである。剥離面積、剥離体積ともに増加するほど、減衰率の変化が大きくなることがわかる。そのため、この指標は貼り付けモルタルの剥離検知という、剥離場所の特定まで行える指標になりうると考える。この指標に関しては、来年度以降もデータ数を増やして、有効性を示してもらいたい。

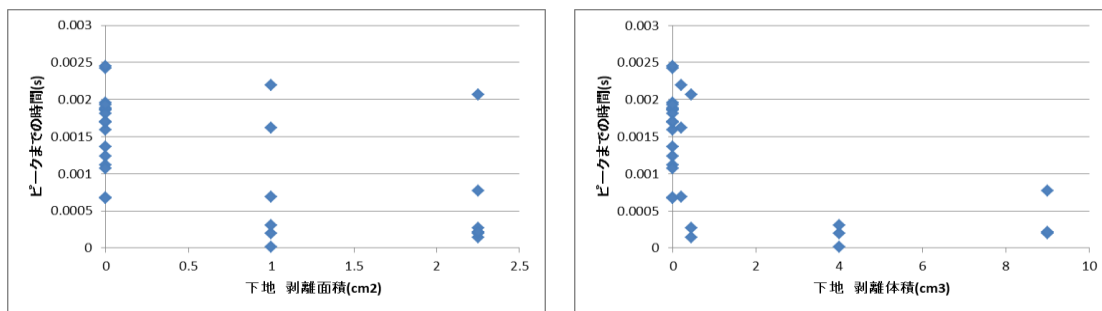
5.3.7 加振からピークまでの時間を用いた検討

前章と同じく加振時を定常状態から大きく音圧が変わる $\pm 1000\text{Hz}$ と設定した。そこから最大音圧までの時間をピークまでの時間とした。また、同一箇所を3回打診しそれぞれ算出、その値の平均を使用することとした。

仕上げモルタルでは、健全状態のものはピークまでの時間が短く、剥離が起こっているものはピークまでの時間が長くなるため、タイルを張っても同じ傾向が出るだろうと予測を行った。

また、下地モルタル、貼り付けモルタル両方の剥離が影響を与えるのかの確認にもなると考えている。図 5-37 から図 5-40 に劣化状態とピークまでの時間の関係を示す。

(1)下地モルタル剥離



剥離面積とピークまでの時間の関係

剥離体積とピークまでの時間の関係

図 5-37 剥離状態とピークまでの時間の関係

図 5-37 剥離面積との関係では、外れ値を省けば剥離部分が大きいかほどピークまでの時間が短くなる関係が見られる。また、図 5-37 剥離体積とは明確にピークまでの時間との関係が見られる。

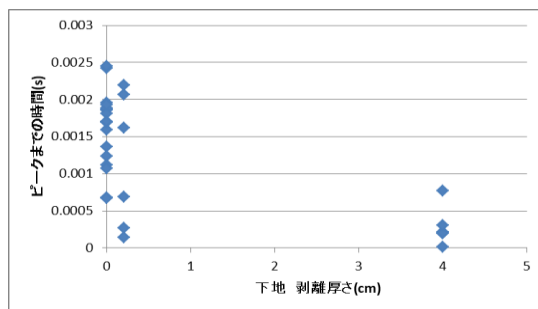
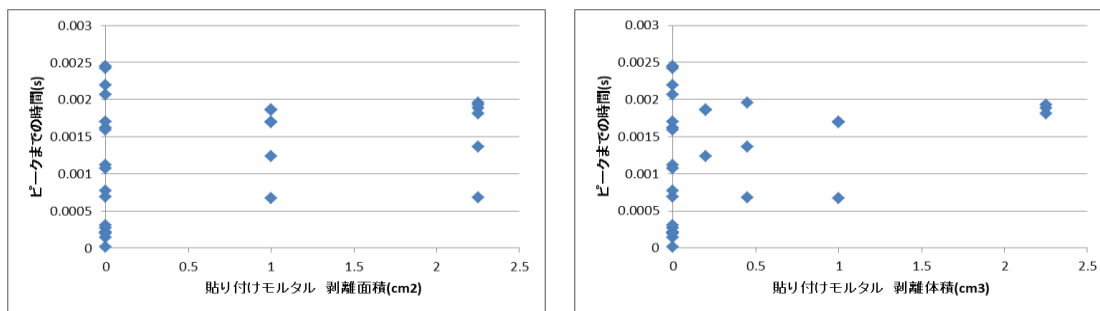


図 5-38 剥離厚さとピークまでの時間の関係

下地剥離の模擬は 0.2mm と 4 mm である。図 5-38 に示すとおり、0.2mm の方は健全状態と大きく変わっていないものもあるが、4mm のものは明らかにピークまでの時間が短くなっている。そのため、剥離厚さというものもピークまでの時間に影響を与えている事がわかる。しかし、予測と異なり、健全のものほどピークまでの時間が長く、劣化しているものほど短くなる結果となった。原因としては加振箇所がタイルであることが考える。加振箇所の材質によってピークまでの時間が変わる可能性が高いため、この指標を使う場合には、基礎段階としていろいろな湿式仕上げを叩き、分類分けをする必要があると考える。

(2) 貼り付けモルタル剥離



剥離面積とピークまでの時間の関係

剥離体積とピークまでの時間の関係

図 5-39 剥離状態とピークまでの時間の関係

図 5-39 に示すとおり、剥離面積、剥離体積ともに健全状態の結果の範囲が大きいいため、貼り付けモルタルのみの剥離ではピークまでの時間に影響はないと考える。

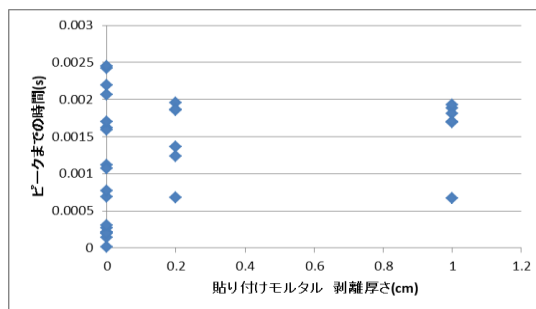


図 5-40 剥離厚さとピークまでの時間の関係

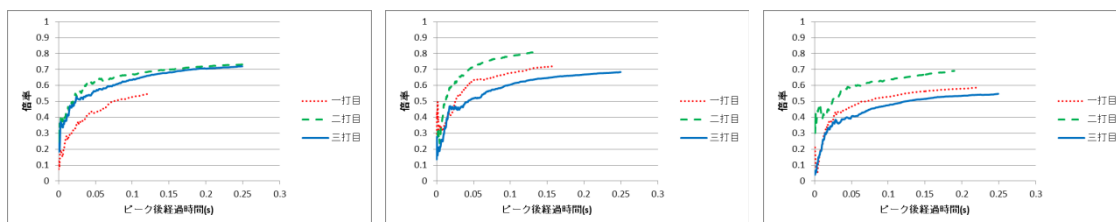
図 5-40 に示すとおり、剥離厚さとピークまでの時間の関係も見られなかった。

図 5-37 から図 5-40 で分かる通り、ピークまでの時間という指標は、ある程度の厚さがあるモルタル(下地モルタル)と下地コンクリートとの間の剥離のみを捉えることができる指標であることがわかった。

5.3.8 4410Hz 以下の振動を用いた検討

卓越振動数の節で、剥離の試験体ほど低周波数域で、大きなピークを持っていた。フーリエスペクトルが大きくなる＝現実の波の大きさ(音圧)も大きくなるため、それぞれの打音データより 4410Hz 以下の振動を取り出し、波の大きさの経時変化を確認した。4410Hz とした理由は、本計測のサンプリング数が 44100 であり、扱いやすい数であったこと、4000Hz 付近までで明確なピークが見られたためである。本節では解析指標の章で説明したように、4410Hz 以下の振動の無補正のものに対する割合の変化を見ている。図 5-41 から図 5-50 に各打診箇所での最大音圧後の 4410Hz 以下の音の割合を示す。

(1)下地剥離の打診音のピーク周波数解析

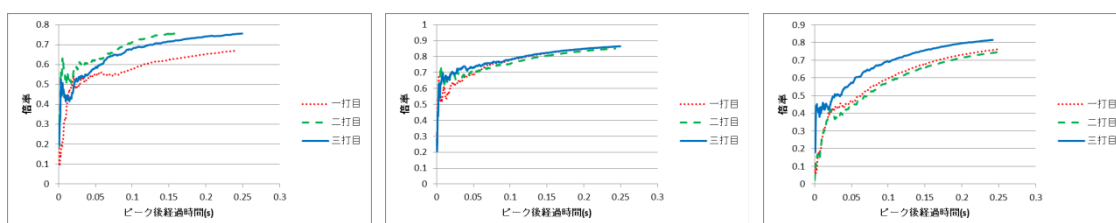


6-1-□のスペクトル

6-2-□のスペクトル

6-3-□のスペクトル

図 5-41 劣化状態 6(1.5cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

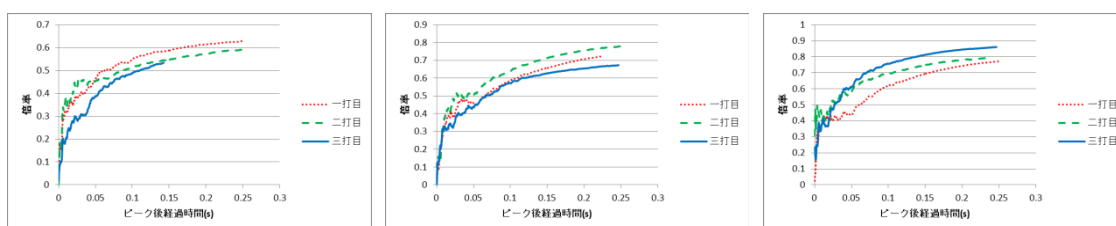


7-1-□のスペクトル

7-2-□のスペクトル

7-3-□のスペクトル

図 5-42 劣化状態 7(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

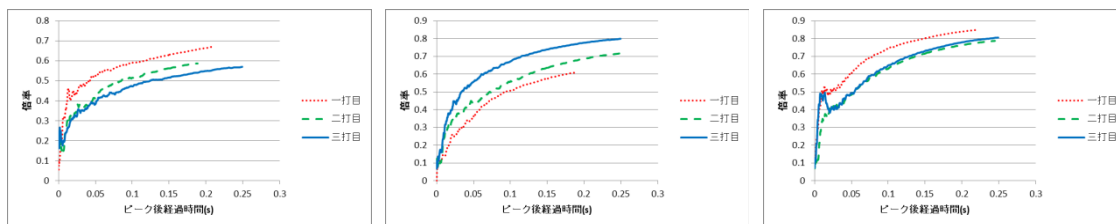


8-1-□のスペクトル

8-2-□のスペクトル

8-3-□のスペクトル

図 5-43 劣化状態 8(1.5cm 角, 厚さ 4mm の模擬剥離)のスペクトル

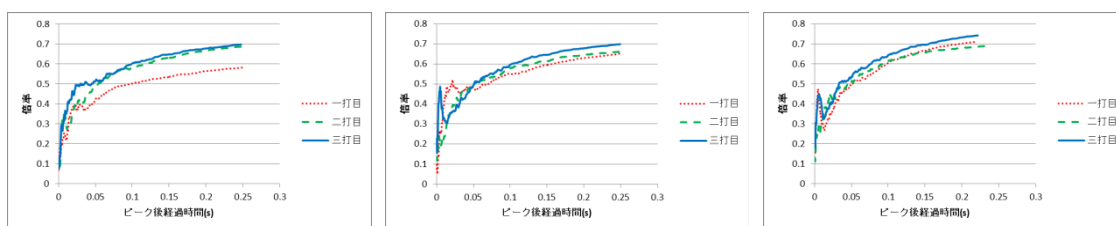


9-1-□のスペクトル

9-2-□のスペクトル

9-3-□のスペクトル

図 5-44 劣化状態 9(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル



10-1-□のスペクトル

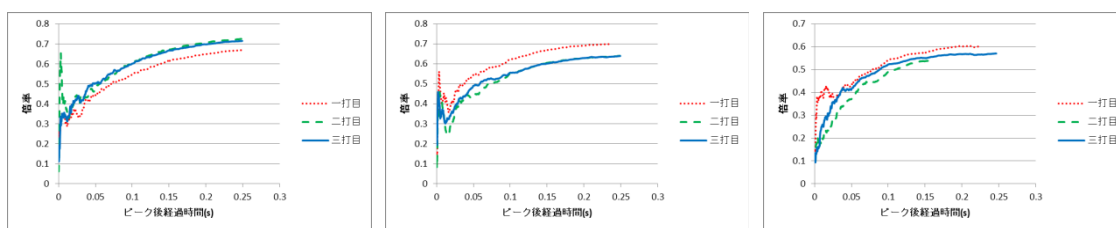
10-2-□のスペクトル

10-3-□のスペクトル

図 5-45 劣化状態 10(健全状態)のスペクトル

図 5-41 から図 5-45 を見ると、安定して同じ割合に落ち着くものもあれば、そうでないものも存在する。また、図 5-45 に示す健全状態のもの以外、同じ劣化状態であっても、一番内側に当たる○-3 の箇所の値が○-1,○-2 に比べて小さくなる傾向が見られる。そのため、この指標も場所の影響を受けるものの可能性が高いと考える。

(2) 貼り付けモルタル剥離の打診音のピーク周波数解析

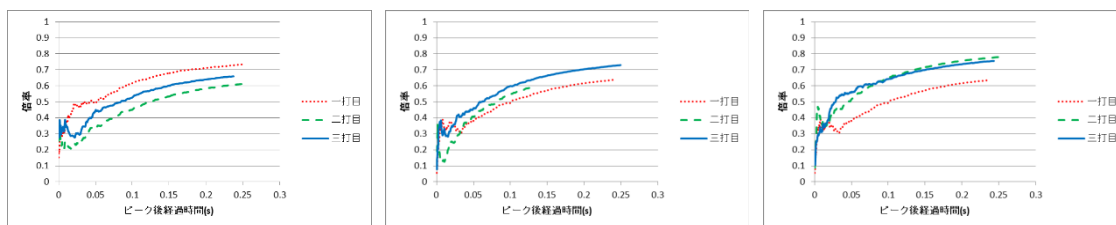


10-1-□のスペクトル

10-2-□のスペクトル

10-3-□のスペクトル

図 5-46 劣化状態 10(健全状態)のスペクトル

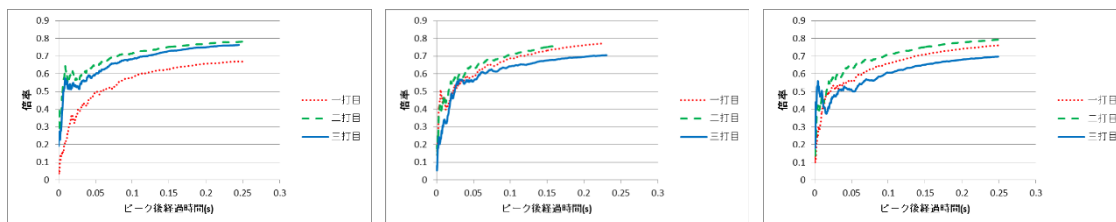


11-1-□のスペクトル

11-2-□のスペクトル

11-3-□のスペクトル

図 5-47 劣化状態 11(1.5cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

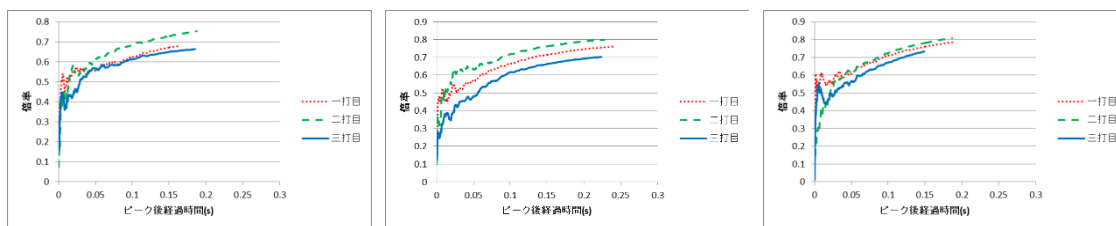


12-1-□のスペクトル

12-2-□のスペクトル

12-3-□のスペクトル

図 5-48 劣化状態 12(1cm 角, 厚さ 0.2mm の模擬剥離)のスペクトル

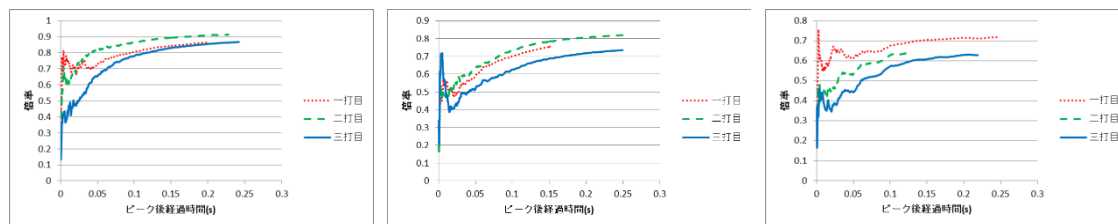


13-1-□のスペクトル

13-2-□のスペクトル

13-3-□のスペクトル

図 5-49 劣化状態 13(1.5cm 角, 厚さ 1mm の模擬剥離)のスペクトル



14-1-□のスペクトル

14-2-□のスペクトル

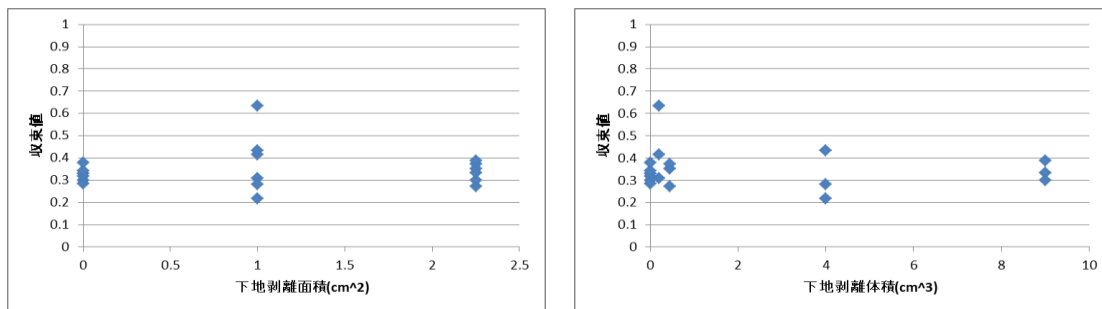
14-3-□のスペクトル

図 5-50 劣化状態 14(1cm 角, 厚さ 1mm の模擬剥離)のスペクトル

図 5-46 から図 5-50 に示すとおり，貼り付けモルタル剥離においても 3 打のばらつきは大きい。図 5-46 である健全状態 10 のものはばらつきが小さく見えるため，この 3 打のばらつきというものも指標にできるかもしれない。健全のものはばらつきが小さいことは，健全状態は界面がしっかり接着されており，下地モルタル-貼り付けモルタル-タイルが一体となって動くためであると考ええる。逆に剥離が起こっているものは，界面のどこかに空気層ができているので，その空間での残存振動が加振力などの影響で変動するためにはばらつきが生まれると考えている。

次に，それぞれの剥離状態との最大音圧から，0.01 秒,0.05 秒，0.1 秒後の倍率との関係を図 5-51 から図 5-56 示す。

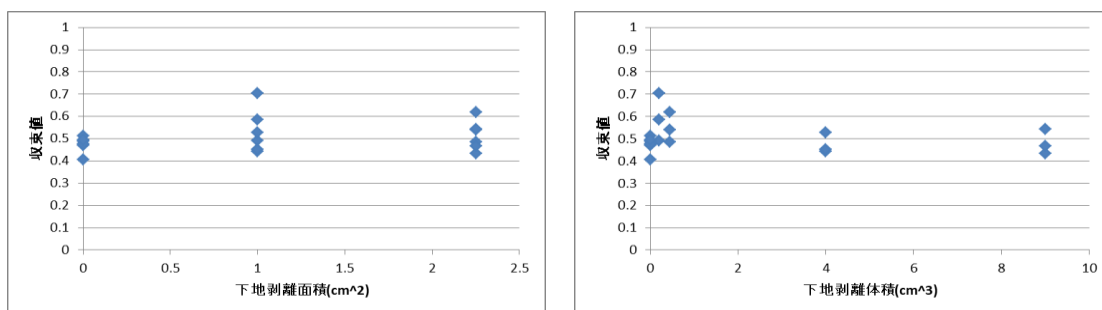
(1)下地モルタル剥離



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

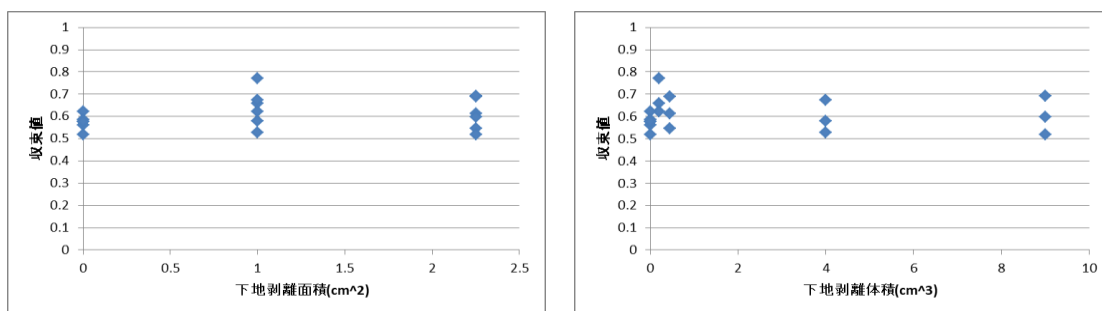
図 5-51 剥離状態と最大音圧から 0.01 秒後の倍率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-52 剥離状態と最大音圧から 0.05 秒後の倍率の関係



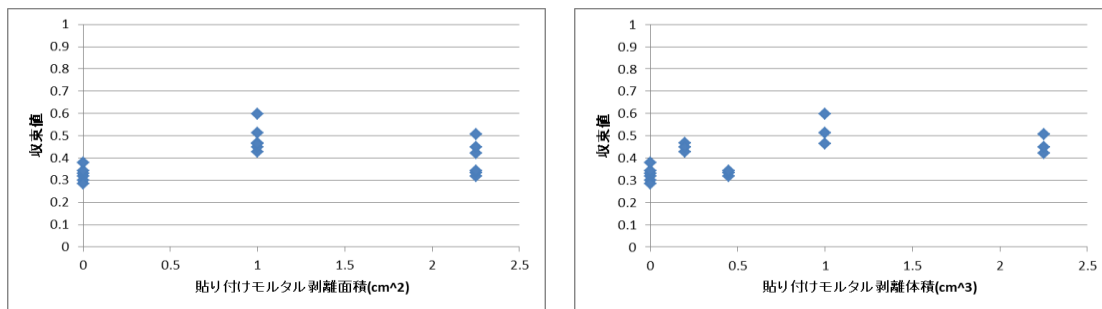
剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-53 剥離状態と最大音圧から 0.1 秒後の倍率の関係

図 5-51 から図 5-53 より，下地剥離のものに関しては剥離状態や最大音圧からの時間に関わらず，ある程度一定の倍率に落ち着くことがわかった。剥離状態との関係性は見られないため，下地モルタルの剥離検知にこの指標は使うことができない。

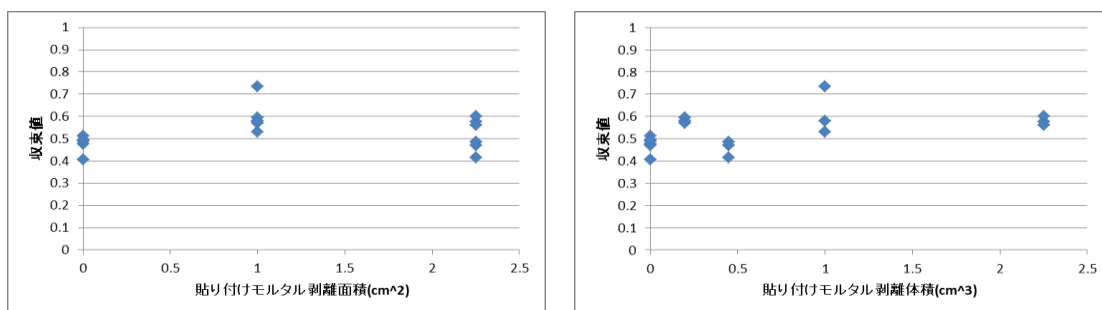
(2)貼り付けモルタル剥離



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

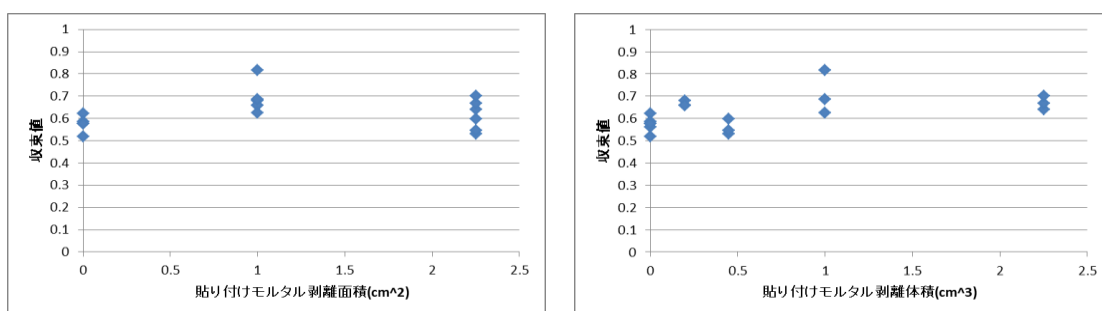
図 5-54 剥離状態と最大音圧から 0.01 秒後の倍率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-55 剥離状態と最大音圧から 0.05 秒後の倍率の関係



剥離面積と減衰率の関係

剥離体積と減衰率の関係

図 5-56 剥離状態と最大音圧から 0.1 秒後の倍率の関係

図 5-54 から図 5-56 より、貼り付けモルタルの剥離に関しては、一つの試験体が外れ値をとっているが、最大値からの時間に関係なく、剥離部分が大きくなるほど収束する倍率が大きくなる結果となった。そのため、貼り付けモルタルの剥離に関しては、剥離検知できる可能性があると考えられる。

5.4 本章のまとめ

本章では、外装タイルを対象とし、打音検査によって得られた波形を各種指標で解析し、劣化状態を把握できる指標の確立を目指し、検討を行った。

以下、得られた知見を示す。

1)ピーク周波数

剥離状態のものは下地剥離，貼り付けモルタル剥離に関わらず，2000Hz 以下に大きなピークを持つが，健全状態のもの2000Hz 以下のピークは小さく，代わりに6000～8000Hz にまたがる広いピークを持つことがわかった。そのため，ピーク周波数による剥離検知は可能であるが，健全でも2000Hz 以下にピークを持つことから，ピーク周波数というよりはスペクトルを見て判断するという手法が必要である。

2)図心周波数

0 から10000Hz，0 から5000Hz で図心を求めると，下地剥離，貼り付けモルタル剥離ともに，剥離状態が大きいほど図心周波数が低下することがわかった。また下地剥離では0-5000Hz，貼り付けモルタル剥離では5000-10000Hz の範囲で変化が起こることがわかった。ピーク周波数と異なり，単純に範囲内の図心を求めているだけなので，こちらの指標のほうが簡単に比較することができる。そのため，ピーク周波数より図心周波数を用いるほうが良いと考える。

3)減衰率(指数)及び減衰率の変化

下地剥離，貼り付けモルタル剥離に関わらず，1/2 までの減衰指数は剥離面積が大きいものほど減衰率が大きく，またばらつきが大きくなるが，1/5 までや，1/10 までの減衰指数は剥離部分の大きさに関わらず，ある程度同じような値となっていることがわかった。

下地剥離と比べて貼り付けモルタル剥離は明確に1/2 までのもので減衰率と剥離面積の関係が見られる。そのため，減衰指数を指標とし，明確に剥離が検知されたものは貼り付けモルタル剥離の可能性が高いといえる。

また，1/2 までの減衰指数は剥離状態によって大きく異なるのに対し，1/5 や1/10 までの減衰指数は劣化状態によって差が小さかったことから，減衰率の変化も指標になると考え，1/2 までの減衰指数と1/3 までの減衰指数の差を指標とした。健全のものは減衰率にあまり変化がないが，逆に剥離があるものは，はじめは早く減衰するが，一定を超えると健全と同じ程度の減衰になるため，差が大きくなることがわかった。

下地モルタルでも剥離状態によって差が見られるため，劣化と検知できるが，貼り付けモルタルのものの方が明確に差が見られる。

この指標に関しては，剥離位置まで特定できる可能性が高いため，今後もデータを増やし，

検討する価値があると考える。

4)加振から最大音圧までの時間

下地剥離は、剥離厚さが大きいものは明らかにピークまでの時間が短くなっている。貼り付けモルタルの剥離に関してはこの指標では関係性が見られなかった。そのため、この指標は下地剥離の検知に有効な指標である可能性が高い。下地剥離のみ検知可能なことから、ある程度のモルタル厚さがないと差がでない、もしくはコンクリートと下地モルタル間という条件のもと成り立つ指標である可能性がある。

事前の予測では劣化のものほどピークまでの時間が長くなると考えていたが、結果は逆となり、健全のものほどピークまでの時間が長く、劣化しているものほど短くなった。原因としては加振箇所がタイルであることが考える。加振箇所の材質によってピークまでの時間が変わる可能性が高いため、この指標を使う場合には、基礎段階としていろいろな湿式仕上げでデータを収集し、分類分けをする必要があると考える。

5)4410Hz 以下の波の割合

下地剥離のものに関しては剥離状態や最大音圧からの時間に関わらず、ある程度一定の倍率に落ち着くことがわかった。しかし、貼り付けモルタルの剥離に関しては、剥離部分とくに体積が大きくなるほど収束する倍率が大きくなる結果となった。そのため、貼り付けモルタルの剥離に関しては、剥離検知できる可能性がある。

6)まとめ

本章では様々な指標を用いて、外装タイルの下地剥離、貼り付けモルタル剥離の打診音を解析した。結果として、多くの指標で劣化検知を行えることがわかった。その中でもまず4)で述べた加振から最大音圧までの時間で下地剥離か否かを検知、その後3)で述べた減衰率の変化を用いることで貼り付けモルタルの剥離か否かを検知する二段階の検査を用いる検査が剥離箇所の検知まで行えるため実用化の可能性が高いと考える。

参考文献

- 1) 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究 添田智美、三上貴正
日本建築学会構造系論文集 代 81 巻 代 728 号 1779-1787 2016 年 11 月
- 2) ウェーブレット解析を用いた建築用外装タイルの定量的剥離診断
可視化情報 Vol26 suppl. No.2 2006 年 9 月

第6章 結論

Ⅱ編では、戸建て住宅で多く用いられている乾式仕上げのサイディング材、RC建物で多く用いられているモルタル仕上げ、タイル仕上げを対象とし、検査の機械化の基礎的部分である剥離検知及び剥離箇所を特定できる指標の確立を目指し検討を行った。

各章についてまとめたものを以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的を示し、外壁検査技術向上の必要性を述べて、最後に本論文の構成を示した。

第2章 振動計測システム及び解析指標の概要

Ⅱ編で用いるセンサ概要、解析概要を述べた。

第3章 サイディング外壁を対象とした打診検査技術の向上

劣化を模擬したサイディング材を対象に、加速度センサ設置箇所、打診箇所を変えて計測を行った。本章では解析指標として減衰率、ピーク振動数を用い、この指標が劣化検知に有効かを確認、その後センサ設置箇所、打診箇所を変えることで合理的な実務検査を行うための検査方法の確立を目指し考察を行った。

まず解析指標について、打診箇所を固定して検査を行った。減衰率は健全時におおよそ減衰指数が-0.9に収束し、劣化時には-1を下回ることから劣化の有無の検知に有効であることが分かった。また、ピーク周波数は健全時には0~30Hzの範囲内に一つピークが表れるが、劣化が起これるとピーク周波数の低下、また同範囲に新たなピークが表れることより劣化の有無の検知が行えることが分かった。しかし、どちらの指標も健全箇所でも劣化と同じ傾向が見られたことから劣化箇所の推定までは行えないことが分かった。

次に計測時のセンサ設置箇所だが、サイディング材1枚につき1つのセンサを高さ方向に配置し、打診箇所を固定して検査を行った。減衰率、ピーク周波数を用いてこの計測波形を解析すると、劣化箇所までは特定できなかったが、劣化の有無は検知することができた。

最後にセンサを高さ方向に配置し、加振箇所を変えて検査を行った。ピーク振動数では劣化箇所まで検知できなかった。しかし、減衰指数を用いれば、加振箇所=劣化箇所(及びその上部)のときに減衰指数が小さくなる傾向が示せたため、減衰指数を用いれば劣化箇所の検知まで行える可能性が高いことがわかった。

以上より、実際の検査時は高さ方向にセンサを配置、ボードを一枚ずつ叩いていくことが一番効率よく、劣化の有無、劣化箇所の検知まで行えることがわかった。また、検査指標としては、減衰指数を用いたほうが検知しやすいということもわかった。

第4章 打音解析による仕上げモルタルの剥離検知手法の高度化

4章では仕上げモルタルの劣化検知手法の高度化を目指し、熱負荷実験および模擬剥離試験体を用いた打音検査を行い劣化検知に有効な解析指標の特定を行った。

検査箇所の下地に対する位置の影響がでることから、ピーク周波数を指標として用いる場合には補正を与える必要がある。

0~10000Hz の範囲で図心周波数を求めると、健全状態の方が劣化状態よりも大きな値になることから、劣化検知手法として使える可能性が高い。

減衰率は両実験ともに劣化状態との関係性が見られなかったことから、検査指標に使うことはできないと考える。

加振から最大音圧までの時間は、劣化が進行するほど長くなる傾向が見られたため検査指標として用いることができると考える。

剥離検知ができる指標のなかでも、加振から最大音圧までの時間に関しては今まで他の研究者が着目していない視点であるため、今後はこの指標についても検討していただくと幸いである。

第5章 打音解析による外装タイルの剥離検知手法の高度化

本章では外装タイルの剥離検知手法の高度化を目指し、模擬剥離試験体を用いた打音検査を行い劣化検知に有効な解析指標の特定を行った。試験体は実際に起こりうる下地コンクリート-下地モルタル間剥離(下地剥離)と下地モルタル-張り付けモルタル間剥離(表面剥離)の2種類の剥離を模擬した。

まず、ピーク周波数である。剥離状態のものは下地剥離、貼り付けモルタル剥離に関わらず、2000Hz 以下に大きなピークを持つが、健全状態のもの2000Hz 以下のピークは小さく、代わりに6000~8000Hz にまたがる広いピークを持つことがわかった。そのため、ピーク周波数による剥離検知は可能であるが、健全でも2000Hz 以下にピークを持つことから、ピーク周波数というよりかはスペクトルを見て判断する方法が剥離検知に有効である。

次に図心周波数を検討した。0 から10000Hz, 0 から5000Hz で図心周波数を求めると、下地剥離、貼り付けモルタル剥離ともに、剥離状態が大きいほど図心周波数が低下することがわかった。また下地剥離では0-5000Hz, 貼り付けモルタル剥離では5000-10000Hz の範囲で変化が起こるということがわかった。ピーク周波数と異なり、単純に範囲内の図心を求めているだけなので、こちらの指標のほうが簡単に比較することができる。そのため、ピーク周波数より図心周波数を用いるほうが良いと考える。

減衰率にも着目した。下地剥離、貼り付けモルタル剥離に関わらず、最大音圧から1/2ま

での減衰指数は剥離面積が大きいものほど減衰率が大きく、1/5までや1/10までの減衰指数は剥離部分の大きさに関わらず、ある程度同じような値となっていることがわかった。下地剥離と比べて貼り付けモルタル剥離は明確に1/2までのもので減衰率と剥離面積の関係が見られる。そのため、減衰指数を指標とし、明確に剥離が検知されたものは貼り付けモルタル剥離の可能性が高いといえる。

また、1/2までの減衰指数は剥離状態によって大きく異なるのに対し、1/5や1/10までの減衰指数は劣化状態によって差が小さかったことから、減衰率の変化も指標になると考え、1/2までの減衰指数と1/3までの減衰指数の差を指標とした。健全のものは減衰率にあまり変化がないが、逆に剥離があるものは、はじめは早く減衰するが、一定を超えると健全と同じ程度の減衰になるため、差が大きくなることがわかった。

下地モルタルでも剥離状態によって差が見られるため、劣化と検知できるが、貼り付けモルタルのものの方が明確に差が見られる。そのため、この指標に関しては、剥離位置まで特定できる可能性が高いため、今後もデータを増やし、検討する価値があると考ええる。

そして、加振から最大音圧までの時間について検討した。下地剥離は、剥離厚さが大きいものは明らかに加振から最大音圧までの時間が短くなることが分かった。貼り付けモルタルの剥離に関してはこの指標では関係性が見られなかった。そのため、この指標は下地剥離の検知に有効な指標である可能性が高い。下地剥離のみ検知可能なことから、ある程度のモルタル厚さがないと差がでない、もしくはコンクリートと下地モルタル間という条件のもと成り立つ指標である可能性がある。

4章の結果から、事前の予測では劣化のものほどピークまでの時間が長くなると考えていたが、結果は逆となり、健全のものほどピークまでの時間が長く、劣化しているものほど短くなった。原因としては加振箇所がタイルであることが考えられる。加振箇所の材質によってピークまでの時間が変わる可能性が高いため、この指標を使う場合には、基礎段階としていろいろな湿式仕上げでデータを収集し、分類分けをする必要があると考ええる。

最後に低周波数の音圧の割合である。劣化が進行しているものほど低い周波数のピークが大きくなることから4410Hz以下の音の全体に対する割合を指標として用いることができるのではないかと考えた。下地剥離のものに関しては剥離状態や最大音圧からの時間に関わらず、ある程度一定の倍率に落ち着くことがわかった。しかし、貼り付けモルタルの剥離に関しては、剥離部分とくに体積が大きくなるほど収束する倍率が大きくなる結果となった。そのため、貼り付けモルタルの剥離に関しては、剥離検知できる可能性がある。

5章では様々な指標を用いて、外装タイルの下地剥離、貼り付けモルタル剥離の打診音を解析した。結果として、多くの指標で劣化検知を行えることがわかった。その中でもまず加振から最大音圧までの時間で下地剥離か否かを検知、その後、減衰率の変化を用いることで貼り付けモルタルの剥離か否かを検知する二段階の検査を用いる検査が剥離箇所の検知まで行えるため実用化の可能性が高いと考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にお世話になりました。心より感謝申し上げます。

大久保教授、寺本准教授には研究内容から社会人予備軍として養うべき能力まで、幅広くご指導していただき、大変成長できたと思います。研究室生活を経て得た能力は、社会に出てしっかり活用していきたいです。

また、広島旧陸軍被覆支蔽倉庫の計測、解析結果を実際の耐震改修に活かすことができたことは自分にとってものすごく胸を張れる研究成果です。このような価値のある機会を与えていただき、本当にありがとうございました。

研究室同期のみんな、いつもしょうもないことでバカ騒ぎできてめっちゃ楽しかったわ。パソコンとかわからなくて聞いたらしっかり教えてくれてありがとう。ほんまに苦がなく楽しく3年間研究室生活が過ごせて、メンバーに恵まれてたなーと思います。酒嫌いな奴もおるけど卒業後たまには思い出話や仕事のこと肴に酒のもや。

研究室の先輩方。特に二つ上のわっぴーさんと松原さんには良くしてもらい、そのおかげで自分も後輩たちにいろいろ教えることができました。二つ上の先輩って偉大ですね。川口さんはいつも殿にいじられてるのを見て面白がらせてもらいました。ノリ的には先輩というか同期に近かったですが、自分たちの知らないところでしっかり先輩として色々やってくれていたんだなとM2になって感じました。先輩方には頭が上がりません。本当にお世話になりました。

研究室の後輩たち。一つ下はコロナ直撃ということもあり、あんまり関わることはできなかったのが惜しいです。山成君、来年は俺のやってたことを引き継ぐと思うけど頑張る。量多いからできることから着々と進めていきや。蔵富さん、今後も体調気を付けつつ研究頑張るね。二人で来年の研究室盛り上げてください。

そして二つ下のみんな。おまえらのおかげでM2の生活めっちゃ楽しめたわ。ポケカ、遊戯王、スマブラ、(自粛)とほぼ全員と関わったかな？院行く人が大半やから残り二年研究しつつもしっかり学生生活楽しめよ。もしかしたらOB訪問で会うかもしれんからその時はよろしく。

最後に、大学生生活6年間学費や生活費を文句もなしに支援してくれた両親、祖父母に感謝を述べて締めくくりたいと思います。