

令和3年度 修士論文

RC 構造物のひび割れ補修選定のための
ひび割れ挙動予測に関する研究

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

M203088 横山 右京

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.1.1 建設工事から観る維持・修繕の必要性.....	1
1.1.2 公的機関の公表資料に基づくリフォームに関するユーザーの要望の実態.....	2
1.1.3 消費者を擁護する法律・制度の現状.....	4
1.1.4 外壁のひび割れ補修の必要性.....	6
1.2 研究の目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	7
参考文献.....	8
第2章 外壁のひび割れ補修技術の現状と課題.....	9
2.1 緒言.....	9
2.2 外壁ひび割れの劣化原因と種類.....	9
2.3 ひび割れ診断技術.....	13
2.3.1 ひび割れ調査.....	14
2.3.2 ひび割れ深さ.....	15
2.4 ひび割れ補修工法.....	18
2.4.1 ひび割れ被覆工法（シール工法）.....	19
2.4.2 ひび割れ注入工法.....	20
2.4.3 充填工法.....	22
2.4.4 防水塗膜工法.....	24
2.5 ひび割れ補修剤の種類.....	24
2.5.1 セメント系.....	24
2.5.2 樹脂系.....	25
2.6 既往の研究.....	28
2.6.1 ひび割れ挙動測定結果.....	28
2.7 結言.....	32
参考文献.....	32
第3章.....	33

外壁簡易モデルでの熱応力パターン解析	33
3.1 はじめに	33
3.2 解析の目的	33
3.3 解析の概要	33
3.3.1 外壁モデルの概要	33
3.3.2 モデル固定条件	35
3.3.3 温度負荷条件	36
3.4 解析結果および考察	36
3.3.1 拘束の影響に関して	36
3.3.2 ひび割れ発生方向の影響に関して	37
3.3.3 壁の厚みの影響に関して	39
3.3.4 壁の長さの影響に関して	40
3.3.5 柱の太さの影響に関して	41
3.3.6 梁の幅の影響に関して	42
3.3.7 ひび割れ幅の影響に関して	43
3.3.8 ひび割れ深さの影響に関して	44
3.3.9 昇温速度の影響に関して	46
3.4 まとめ	47
第4章	49
4.1 はじめに	49
4.2 実構造物に発生したひび割れ挙動の計測について	49
4.3 沖縄の構造物に発生した貫通と非貫通のひび割れに関して	49
4.3.1 計測の概要	50
4.3.2 計測の結果および考察	53
4.3.3 簡易モデルを用いたひび割れ挙動解析	56
4.4 東エネルギーセンターに発生した拘束度の違うひび割れに関して	63
4.4.1 計測の概要	65
4.4.3 計測の結果および考察	67
4.4.4 簡易モデルによる解析	70
4.4.5 拘束度の違う二つのひび割れのまとめ	76
4.5 東エネルギーセンターに発生したひび割れ発生方向の違うひび割れに関して	76
4.5.1 計測の概要	77
4.5.3 計測の結果および考察	78

4.5.4 簡易モデルによる解析	83
4.5.5 ひび割れ発生方向の異なるひび割れのまとめ	86
• 第5章 結論	87
謝辞	89

第1章

序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 建設工事から観る維持・修繕の必要性

第二次世界大戦後の日本は、1951年の朝鮮特需をきっかけに奇跡的に景気が回復する。高度経済成長期には建築産業も盛り上がり、古く使われなくなった建築物は取り壊して、新しい建物にというスクラップアンドビルドを繰り返し、住宅地の開発や都市圏の開発を進めていた。しかし、バブル経済の崩壊で大きく経済が変わる。建物の解体による産業廃棄物の産出や新築による大量の建築資材の消費の影響から、地球環境や生活環境が悪化していた。一方で、欧米の方では建物のオーナー自身のリフォームやメンテナンスを行う慣習が強いため、古い建物が数多く残っている。そこで、建築市場は既存建物の新たな価値を見出すことで解体せずに空間の再利用ができるストックアンドリノベーションの考え方にシフトしている。図1-1には、元請完成工事高の年度推移と元請完成工事高における維持修繕工事高の割合¹⁾を示す。

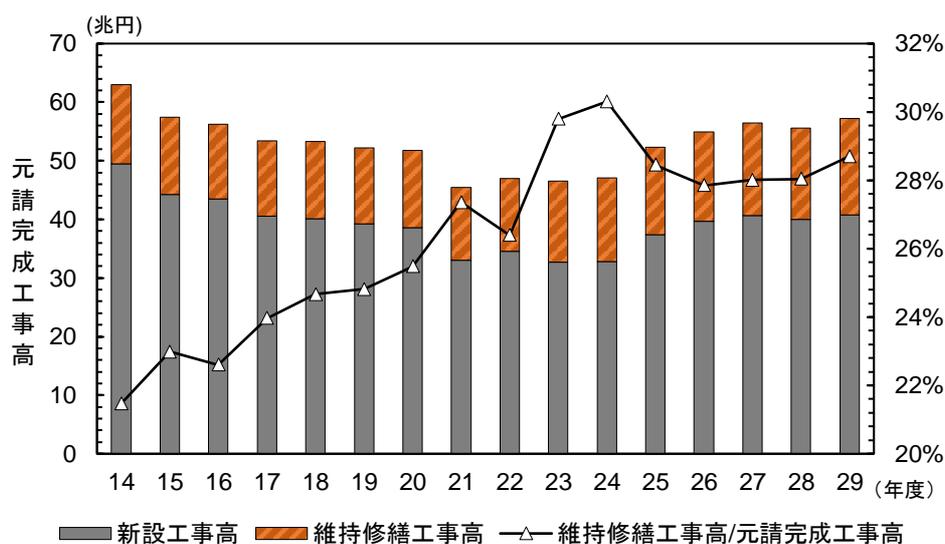


図1-1 元請完成工事高とそれに占める維持修繕率の推移¹⁾

図1-1を見ると、建築市場は平成24年度まで減少傾向だったが、オリンピックの開催地が東京に決まったことで、平成25年度から建築市場は右肩上がりである。しかし、オリンピックが終わったら、建築市場はまた減少傾向になると考えられる。維持修繕工事だけに注目すると、工事の規模は毎年ほぼ同程度であるので、元請完成工事高に占める維持修繕工事の割合は徐々に増えていることが読み取れる。前回1964年の東京オリンピックに急ピッチで建設された建物などの老朽化も問題になっている現在、維持管理のニーズがこれからは増えていくと予想される。

1.1.2 公的機関の公表資料に基づくリフォームに関するユーザーの要望の実態

建築物の持ち主はリフォームしたいとき、多くの人は家の近くにある工務店やリフォーム業者に工事を依頼し、工事内容や見積もり金額などの打ち合わせを重ねたあとに、工事を委託し、施工してもらう。しかし、建設業法ではリフォームの契約金額が500万円に満たない工事は建設工事として許可を取る必要がなく、構造計算も要らない。最近では、オーナー自身が家の内装を変えたり、家具を作ったりするといったDIYをする家も少なくはない。一方で、この制度を悪用し、訪問販売で家に詳しくない消費者に対して不適切な金額の請求や不必要な契約などをさせられ、契約後の工事も粗雑に行い、住居者を騙すというリフォーム詐欺を行う悪徳な業者がいるのも事実である。住宅リフォーム・紛争処理支援センターに寄せられた住宅に関する相談件数と相談件数に占めるリフォームの相談割合の年度推移²⁾を図1-2に示す。

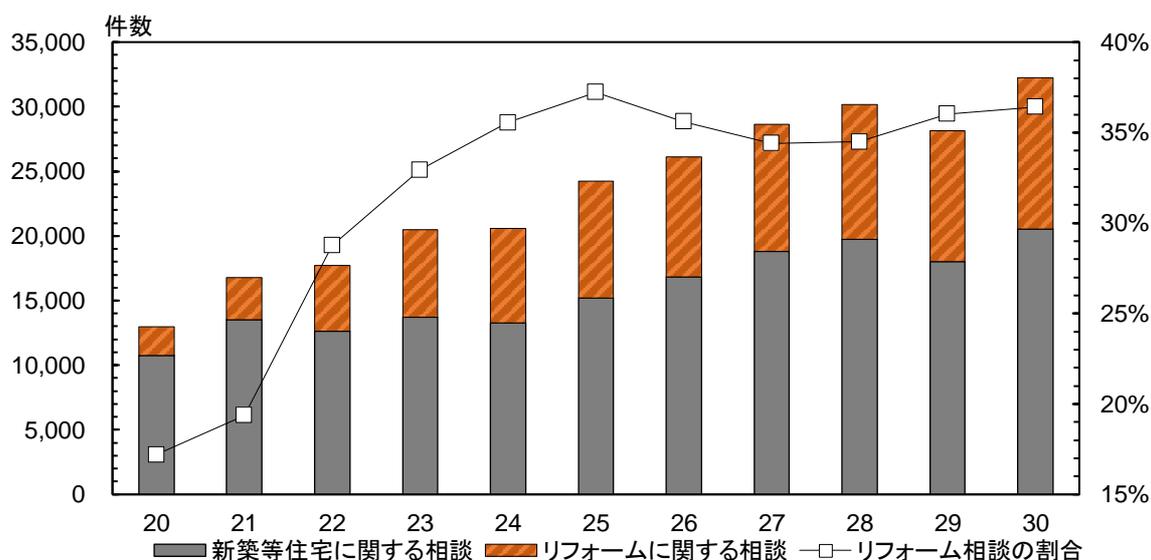


図1-2 住宅に関する相談件数とそれに占めるリフォーム相談率の推移²⁾

前節で述べたように維持管理のニーズが増加するため、リフォームの市場規模は拡大し、ユーザーのニーズが多様化していくと考えられる。それに伴い、多くのユーザーの要求に合わせた補修方法の提案をすることが補修業者側には必要になる。しかし、ユーザーの要求とは異なるが、各業者が得意とする補修工法や独自の補修剤を押し付けてリフォームするケースがある。この場合、ユーザーにとっては意図していないリフォームとなり、リフォーム後に業者とユーザー側のトラブルが起きやすい。また、図1-2に示すように、年々リフォームに関する相談件数や相談全部に対するリフォーム相談の割合が増加しているため、業者側がユーザーに寄りそった形で補修方法を提案し、リフォーム後はユーザーに納得いってもらえるようにするべきであり、業者側の技術力と対応力が要求されている。

住宅リフォームの不足情報の内容については住宅リフォーム推進協議会が戸建ての住居者とマンションの住居者の合計 1000 人に対して平成 30 年度にアンケートをとったものを図1-3³⁾に示す。

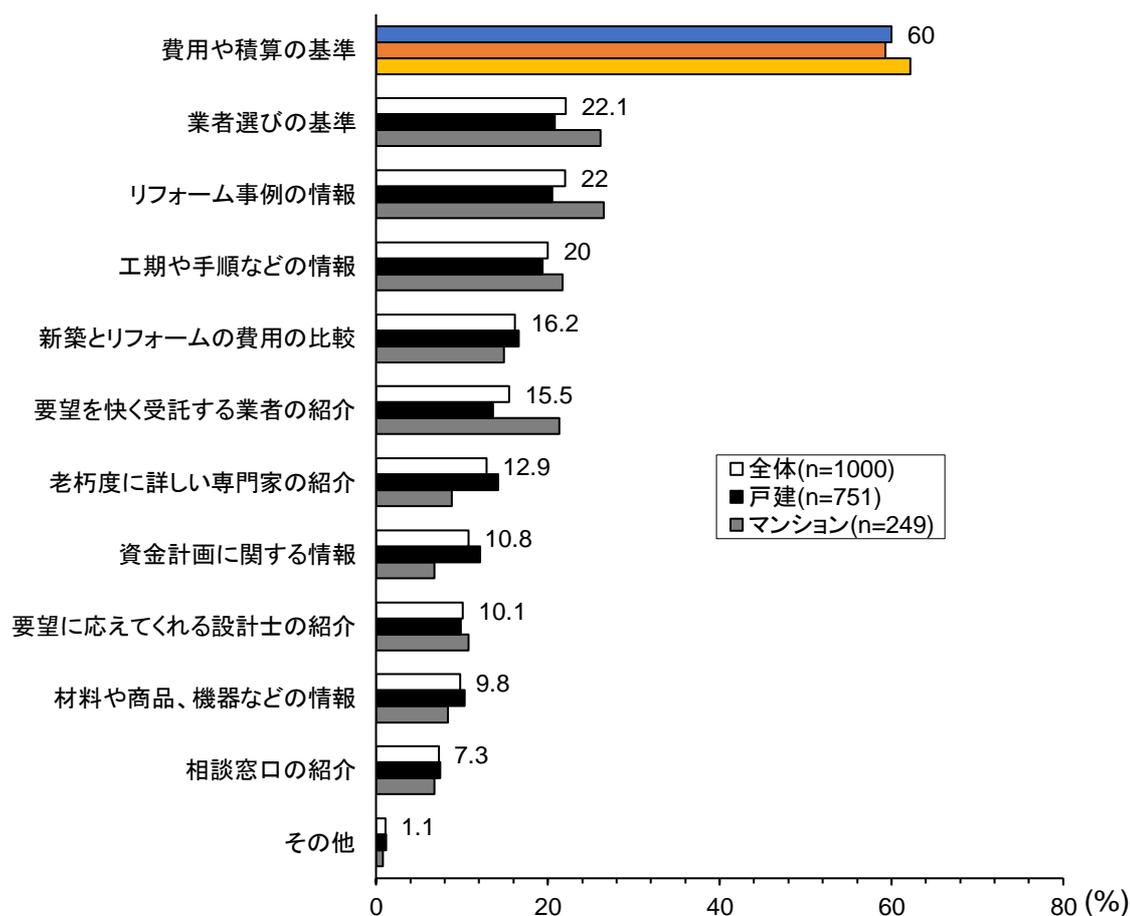


図1-3 リフォームに関する不足情報³⁾

全体的に見ても、リフォームの「費用や積算の基準」の割合が飛び抜けて多く、次に多いのが「業者選びの基準」であり、費用や業者に関して一番不安に思っている。曖昧でより明確にしてほしいという意見が多い。また、要望通りにリフォームしてくれる設計士や業者の紹介を希望するユーザは合計すると3割弱となり、2番目に多くなる。これはユーザーのニーズの多様性を表していて、これらのニーズに対して忠実に対応できるかがこれからの課題になってくる。

1.1.3 消費者を擁護する法律・制度の現状

住宅市場の拡大に伴い、ユーザーを保護する制度が必要である。そこで、平成12年4月に施行された「住宅の品質確保に促進等に関する法律」は住宅に関する2つの制度と1つの体制についてまとめられたものである。図1-4は住宅の品質確保の促進等に関する法律の概念図⁴⁾である。この法律は「住宅性能表示制度」、「10年間の瑕疵担保責任」、「住宅専門の紛争処理システム」という3つの柱から成り立っている。この法律内の住宅性能表示制度により、耐震性・耐火性、居住環境、防犯や高齢者・設備維持への配慮等の住宅関連の性能評価を客観的に行える第三者機関が設けられたことで、ユーザーが安心して住宅を取得し居住できる体制が整備された。

この法律の中で、住宅の資産価値と大きく関係しているのが「住宅性能表示制度」である。施行当初は新築住宅を対象とした制度だったが施行前に建てられた住宅の性能評価ができないことから平成14年に既存住宅に係る住宅性能表示制度が追加された。既存住宅の性能表示のイメージを図1-5⁴⁾に示す。この制度は住宅に関する構造耐力や居住環境、省エネルギー性などの住宅の性能を表示するための共通ルールを定めることで住宅性能を相互比較して、ユーザーにも分かりやすいように数値で評価するといったものである。数値として住宅の性能を表示することにより、どこが劣化し、補修しなければいけないのかがユーザーにとっても明確になりユーザー自身が家の修繕に関心を持ち、補修を効率的に行うことで欧米のように資産価値を維持できる住宅が増加していくと予測できる。

また、平成21年度には「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」が施行された。この法律は良好な住宅の建設及び良好な状態で使用されることで住生活の向上と環境負荷への低減を鑑みて、最終的には豊かな生活の実現を目的としている。長期優良住宅建築とは、構造及び設備が長期使用可能で、ユーザー自ら維持保全を行う意思があれば認定の申請が可能である。それに加えて、「住宅借入金等特別控除」という制度がある。ユーザーが住宅ローン等を利用して、新築やリフォームをしたときに一定の金額を所得税から控除してくれる。制度の観点からみても今後、補修や改修に対するニーズは増加していく見込みがある。

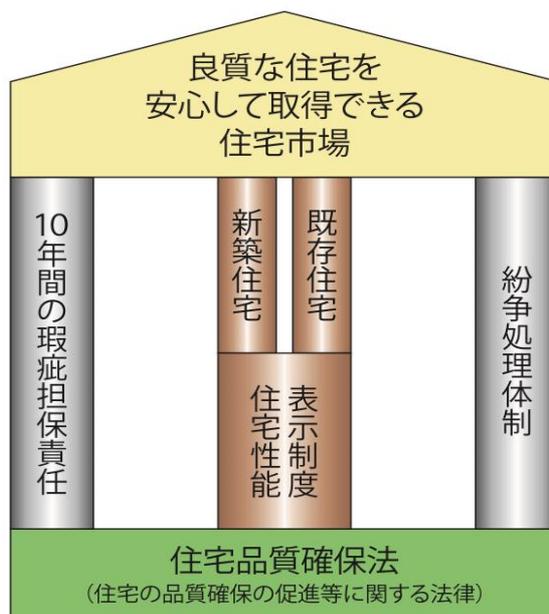


図 1-4 住宅品質確保法の概念図⁴⁾

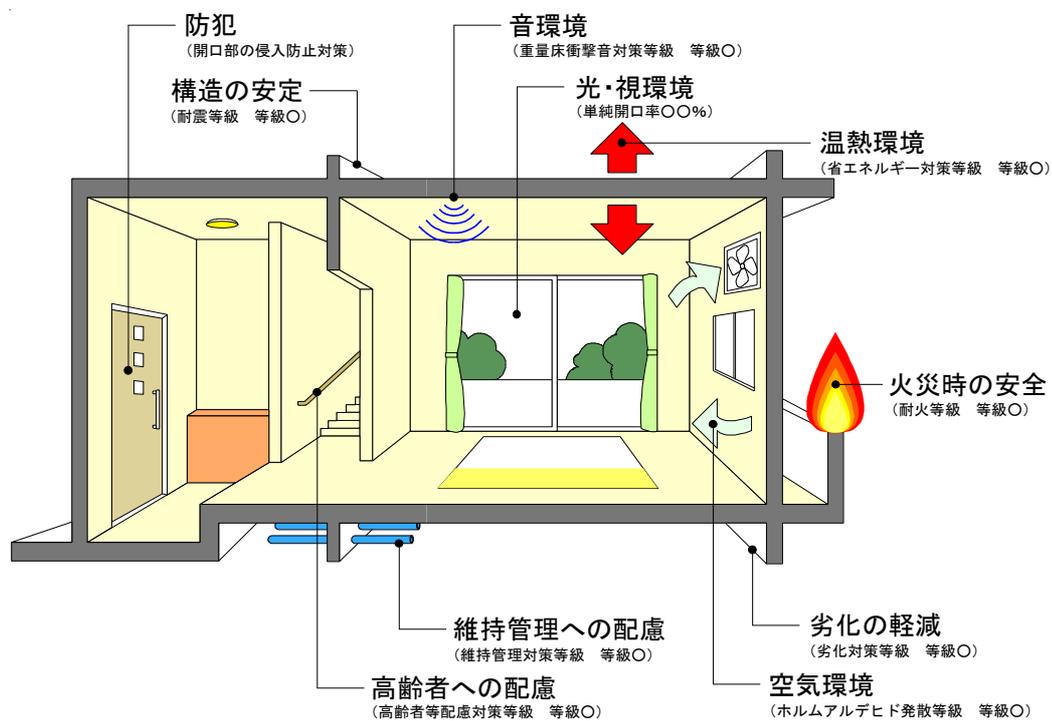


図 1-5 既存住宅の性能表示の概念図⁴⁾

1.1.4 外壁のひび割れ補修の必要性

住宅リフォーム・紛争処理支援センターに寄せられた過去5年間の不具合事象別の相談件数と合計件数を図1-6²⁾に示す。「雨漏り」は「ひび割れ」により引き起こされる場合が多い。「ひび割れ」によって起きる不具合は図1-6を見ると、一番多いことが読み取れる。建物における不具合の中でひび割れは重大な要因であり、ひび割れに対する補修の必要不可欠である。

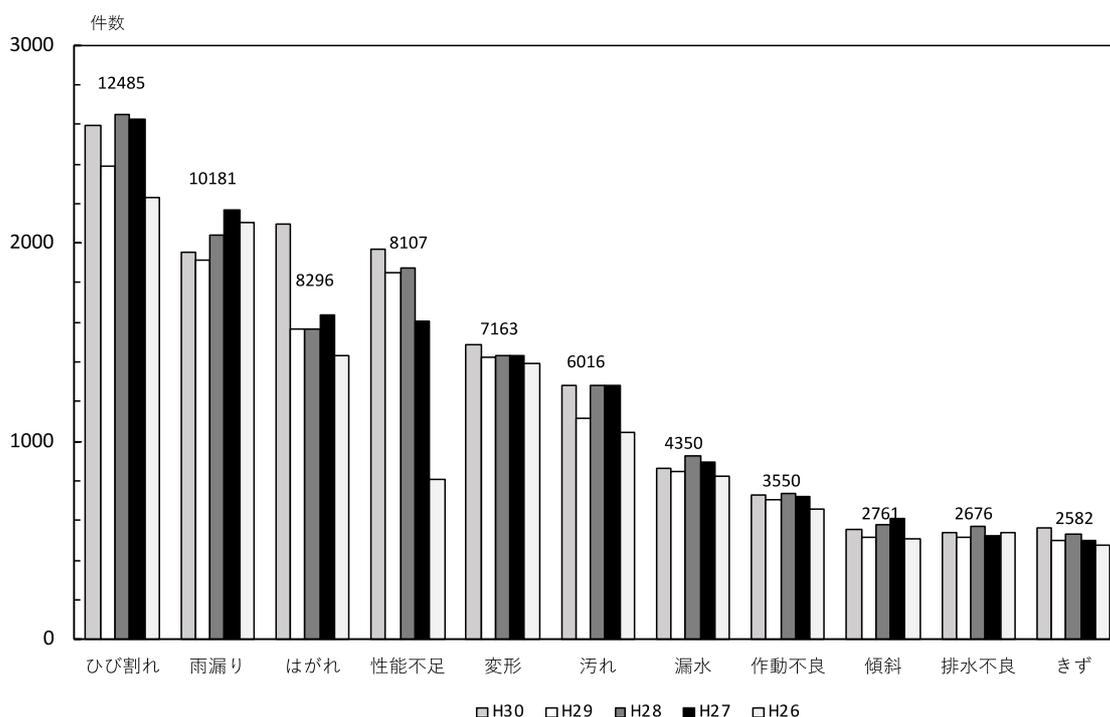
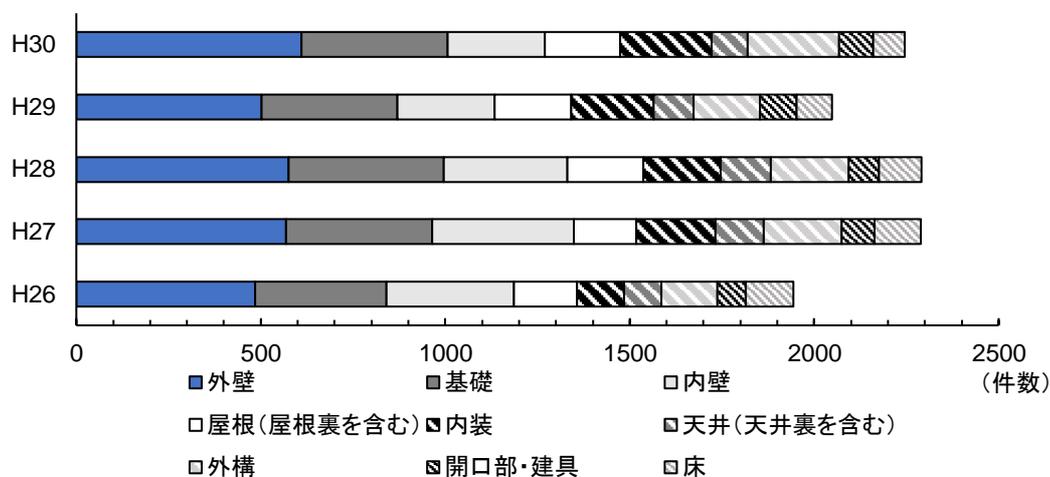


図1-6 過去5年間の不具合事象別の相談件数と合計件数²⁾

次に、住宅リフォーム・紛争処理支援センターに寄せられた過去5年間のひび割れの部位別の内訳を図1-7²⁾に示す。図1-7を見ると、ひび割れの相談の中で、外壁の割合が多い。外壁は屋内外での温湿度の変化を受けやすく、建物の構造を支えているなどの点を考えると外壁は劣化しやすい。そのため、ユーザーからの相談も多く、外壁のひび割れに対する補修の必要性が高いといえる。

図 1-7 過去5年間のひび割れの部位別の内訳²⁾

1.2 研究の目的

前節では、リフォーム需要の増加に伴い、一番多い外壁のひび割れ補修方法の確立が早急に求められていることを述べた。したがって、本研究では消費者のニーズに沿った補修工事を実現できる体制を確立することを大きな目的とする。その中でも、ひび割れ補修部の温度分布やひび割れ挙動を考慮した補修効果を検証した研究は少ないため、温度負荷試験による実験室レベルでの外壁のひび割れの劣化現象を再現し、ひび割れ補修材の評価するための実験を行った。最終的に外壁のひび割れごとに最適な補修工法を行い、ひび割れ挙動と温度負荷の低減を目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含め5章の構成となっており、以下に本章を含めた概要を示す。また、図1-8には本章の流れを示す。

第1章 序論

本研究の背景にある補修に関する現状や、研究の最終的な目的を示した。

第2章 外壁のひび割れ補修技術の現状と課題

ひび割れの基礎知識や現行の補修工法およびひび割れの実測結果を示す。

第3章 有限要素法によるひび割れ挙動の解析

ひび割れ挙動が解析でも再現できるのかを検討する。また、反り挙動の影響要因を明らかにする。その結果と考察を示す。

第4章 実験によるRC外壁のひび割れ挙動の再現

第3章で明らかにした影響要因をもとに試験条件を提案するために再現性を高める実験

を行う。その結果と考察を示す。

第5章 結論

本論文のまとめとして、本研究での成果を示したのち今後の研究展開および課題を示す。

付録 デジタル画像相関法による外壁補修方法の評価

第2章に示す塗膜防水材料に関連した下地緩衝材の効果を画像相関法(DIC)で評価する。その結果と考察を示す。

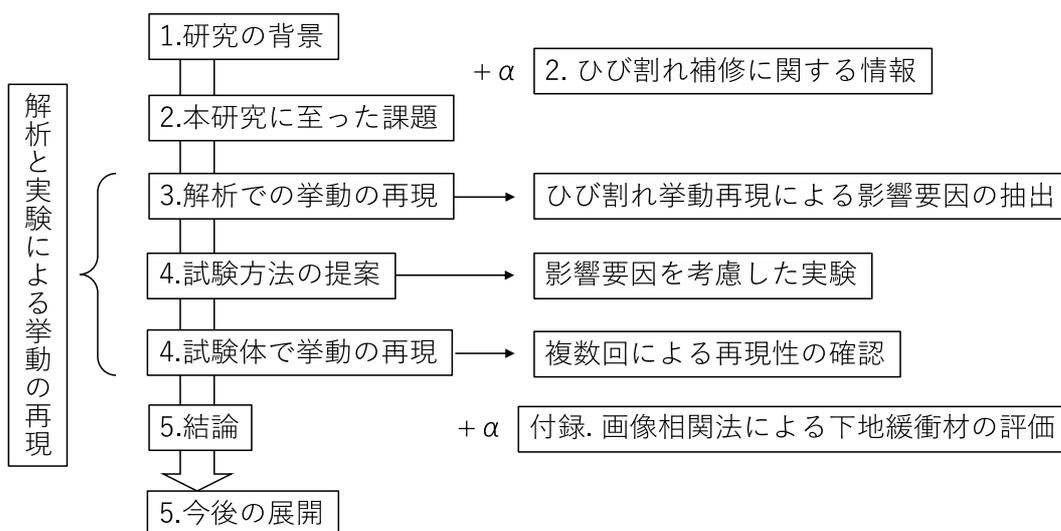


図 1-8 本論文の構成

参考文献

- 1) 国土交通省. “報道発表資料”. 建築工事施工統計調査報告書 (平成 29 年度)
<https://www.mlit.go.jp/common/001283200.pdf>
- 2) 財団法人 住宅リフォーム・紛争処理支援センター. “統計・資料等”.
 住宅相談統計年報 2019 (資料編)
http://www.chord.or.jp/tokei/soudan_siryu_web2019.html
- 3) 一般社団法人 住宅リフォーム推進協議会. “住宅リフォーム潜在需要者の意識と行動に関する調査”. 第 11 回調査報告書 (平成 31 年 2 月)
<http://www.j-reform.com/publish/pdf/internet-H30-houkoku.pdf>
- 4) 国土交通省. “「住宅の品質確保の促進等に関する法律」のページ”.
 既存住宅の性能示制度の解説.
<https://www.mlit.go.jp/common/001125341.pdf>

第2章

外壁のひび割れ補修技術の現状と課題

2.1 緒言

コンクリートは耐火性や経済性、デザイン性などに優れていて、現代には必要不可欠な建築材料である。鉄筋と一緒に使われることが多く、相互の欠点を補完して、RC造の建物がつくられている。しかし、たとえ丁寧な施工を行い初期状態が良かったとしても、コンクリート内部要因や外部の環境要因の影響でひび割れが生じてしまう。ひび割れの進捗により、構造や防水に対する耐久性や美観を損なうなど多大な影響を住環境に及ぼす。

本章では、RC構造物に生じるひび割れに関する劣化要因や種類について整理すると共に、RC外壁のひび割れ補修技術に関する現状の問題点や検討すべき点を記す。それにより、本研究の位置づけを明確にする。

2.2 外壁ひび割れの劣化原因と種類

ひび割れの発生原因は、コンクリートの材料や調合、施行などのいろいろな要因が考えられる。ひび割れは構造上や美観上における耐久性の影響を把握する際にひび割れの程度と原因を明らかにすることは重要である。実際のRC造の構造物においてひび割れの原因は複雑であり、複数の原因によって発生する場合が多い。そのため、特徴的なひび割れのパターンを見逃さないことが重要である。ひび割れの発生要因は様々で、代表的な要因について以下に示す。表2-1は日本コンクリート工学会がひび割れの発生原因¹⁾についてまとめたものである。表2-2にひび割れパターンの分類²⁾を示す。

(1)セメント水和熱

セメントは水と反応する水硬性の性質をもち、反応の際に発熱する。発熱源は化学反応熱や吸着熱、溶解熱などであるがその総和をセメントの水和熱という³⁾。この水和熱に伴いコンクリートが温度上昇し膨張するが、反応後は温度低下するためコンクリートは収縮しようとする。しかし、内部や外部からの拘束応力が生じるとき、コンクリートは引張応力を受

けひび割れを生じる。内部拘束型は部材厚が極めて大きい場合に、中心の温度と表面の温度の差が大きくなり、中心の膨張圧により、表面が引っ張られて表面に浅いひび割れが発生する。外部拘束型は打設後、最高温度に達したコンクリートは徐々に冷やされ収縮するが岩盤や既設のコンクリートと接している場合は自由な収縮ができず、貫通ひび割れが発生する⁴⁾。

(2) アルカリ骨材反応

コンクリートは水酸化アルカリ (NaOH 及び KOH) を主成分とする強アルカリ水溶液を含む。シリカ鉱物もしくはガラス鉱物を含有する骨材は水酸化物イオン(OH⁻)によってシロキサン結合 (Si-O-Si) が切断され骨材周囲にアルカリシリカゲルを生成し膨張する。それにより、膨張圧がコンクリート内部から作用しひび割れが発生する⁵⁾。コンクリート表面に多くの不規則な網目状のひび割れが発生する。ひび割れ部分には内部から白いゲル状の物質が析出することが多い。

(3) 乾燥収縮

コンクリートは打設から硬化するまでに多くの水分を含んでいる。しかし、コンクリート表面から水分が逸散し、経時的に乾燥することで収縮しコンクリートの体積が減少する。拘束力がなければコンクリートにひび割れは発生しないが、内部拘束か外部拘束が生じるときにひび割れる。乾燥は水が表面へと移動しながら表面から逸散するので表面ほど早く乾燥しやすい。従って、表面の乾燥収縮量と内部の乾燥収縮量に差異が生まれ、内部が表面部を拘束し、初期段階で表面に浅いひび割れが発生する。また、コンクリート内部の乾燥収縮しない鉄筋や鉄骨によって内部拘束が発生することもある。外部拘束の典型的な例としては柱梁に拘束された壁や床スラブである。柱や梁は比較的断面を大きく設計されているが、断面の大きくない壁や床スラブは乾燥収縮が早く進行するため、乾燥収縮ひずみの差により引張応力が生じ、引張耐力を超えるとひび割れが発生する⁵⁾。

(4) 鉄筋腐食

最初に、中性化による内部鉄筋の腐食について説明する。中性化とはコンクリートの本来持つアルカリ性が低下し中性に近づく現象である。原因としては、炭酸ガス、酸性雨や酸性の土壌などが挙げられる。この中で代表的な中性化は大気中の二酸化炭素がコンクリート内部へ浸透・拡散し、中性化が内部へ進行する。この場合の中性化の反応式は以下の式(1)で示される。



コンクリートが中性化することで物理的性質が変化することはない。コンクリート自体の劣化ではなく内部鉄筋が発錆する。コンクリート内部は強アルカリ性で鉄はその環境下では表面に不動態皮膜を形成する。しかし、中性化により pH11 より低くなると鉄は表面に腐食生成物を生じ、体積がおおよそ 2.5 倍にも膨張する⁵⁾。それより膨張圧が生じ、かぶりコンクリートへのひび割れやかぶりコンクリートの剥離を生じる。

次に、塩害による内部鉄筋の腐食について説明する。塩害とは、コンクリート中の鉄筋が塩化物イオンによって腐食する劣化現象である。塩化物イオンの侵入には、骨材や混和剤などの材料要因と海辺や凍結防止剤などの環境要因の二つが考えられる。日本は海砂の使用や季節風の影響で昭和 50 年代に塩害が社会的問題となり、昭和 61 年から生コン中の塩化物イオン濃度が規制され、材料による塩害の影響は少なくなったものの、打設後に侵入する塩化物イオンによる塩害の被害は今でも起きている⁵⁾。塩化物イオンの浸透・拡散後は中性化と同じ原理でひび割れに至る。

(5)凍害

コンクリートにおける凍害とはコンクリート中の水が凍結融解を繰り返すことでコンクリート表層部分に劣化が生じる現象である。氷の直接的な膨張圧によるものではなく、水から氷になる時の体積膨張によって生じる水の移動圧力によるものである。零度以下になると水が凍結するが、氷に凝結する際に約 9%の体積が膨張する。凍結は温度の低いコンクリート表面から進行するため、表面に最も近い毛細管空隙中で水の凍結が起こる。しかし、氷の体積膨張圧に耐え切れる空隙でなければ、まだ凍結していない水が内部の空隙へと移動する。その際に水の移動距離や移動速度に比例した圧力が発生し⁵⁾、この発生した圧力が引張強度を超えるとコンクリート表層部に亀甲状のひび割れや剥離、ポップアウトなどが発生する。

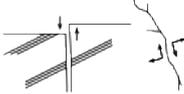
(6)荷重作用

荷重作用時の変状は初期欠陥と損傷、劣化に分類できる。初期欠陥とは打設後に発生するひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂すじなどの変状である。損傷とは地震などの偶発的に起きた荷重によるひび割れや剥離で時間経過に伴い進行しない変状である。劣化とは経時的に進行する変状のことである。また、変状は長期荷重と偶発的荷重、繰り返し荷重ごとにも分類できる⁵⁾。

表 2-1 ひび割れの発生原因¹⁾

大分類	中分類	小分類	番号	原因	
A 材料	使用材料	セメント	A1	セメントの異常凝結	
		骨材	A2	セメントの水和熱	
A3	セメントの異常膨張				
A4	骨材に含まれている泥分				
A5	低品質な骨材				
A6	反応性骨材（アルカリ骨材反応）				
A10	コンクリートの自己収縮				
	コンクリート		A7	コンクリート中の塩化物	
			A8	コンクリートの沈下・ブリーディング	
			A9	コンクリートの乾燥収縮	
B 施工	コンクリート	練混ぜ	B1	混和材料の不均一な分散	
			B2	長時間の練混ぜ	
		運搬 打込み	B3	ポンプ圧送時の配合の不適當な変更	
			B4	不適當な打込み順序	
		締固め 養生	B5	急速な打込み	
			B6	不適當な締固め	
		打継ぎ	B7	硬化前の振動や載荷	
			B8	初期養生中の急激な乾燥	
		鋼材	鋼材配置	B9	初期凍害
				B10	不適當な打継ぎ処理
型枠	型枠	B11	鋼材の乱れ		
		B12	かぶり（厚さ）の不足		
その他	コールドジョイント PCグラウト	B13	型枠のはらみ		
		B14	型枠からの漏水		
		B15	型枠の早期除去		
		B16	支保工の沈下		
C 使用環境	熱・水分作用	温度・湿度	B17	不適當な打重ね	
			B18	グラウト充てん不良	
			C1	環境温度・湿度の変化	
			C2	部材両面の温度・湿度の差	
			C3	凍結融解の繰返し	
	化学作用	C4	火災		
C5		表面化熱			
C6		酸・塩類の化学作用			
D 構造・外力	荷重	長期的な荷重	C7	中性化による内部鋼材のさび	
			C8	塩化物の浸透による内部鋼材のさび	
		短期的な荷重	D1	設計荷重以内の長期的な荷重	
			D2	設計荷重を超える長期的な荷重	
	構造設計	D3	設計荷重以内の短期的な荷重		
		D4	設計荷重を超える短期的な荷重		
		D5	断面・鋼材量の不足		
支持条件	D6	構造物の不同沈下			
	D7	凍上			
E その他				その他	

表 2-2 ひび割れパターンの分類²⁾

名称	形状	特徴	例
一般型 (一次元引張型)		<ul style="list-style-type: none"> 主として一次元的拘束に原因する引張応力によるひび割れ 枝ひび割れがない ひび割れ両側のコンクリートのずれがない 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮 セメント水和熱 コールドジョイント ブリーディング 鉄筋腐食
稲妻型 (せん断型)		<ul style="list-style-type: none"> 主としてせん断応力によるひび割れ 枝ひび割れがある 枝ひび割れと主ひび割れとのなす角が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> せん断ひび割れ 不同沈下
網目型 (二次元引張型)		<ul style="list-style-type: none"> 主として二次元拘束に原因する引張応力によるひび割れ 枝ひび割れがある 枝ひび割れと主ひび割れのなす角は90°に近い ひび割れの分岐点で三方向に分岐している (ひび割れとひび割れのなす角の平均値120°) 	<ul style="list-style-type: none"> アルカリ骨材反応 マスコンクリート プラスチック収縮
放射型 (膨張型)		<ul style="list-style-type: none"> 局部的膨張部分の周囲のコンクリートのひび割れ 放射状 枝ひび割れが三分岐とは限らない 	<ul style="list-style-type: none"> 凍結融解作用

2.3 ひび割れ診断技術

ひび割れ診断ではひび割れ幅やずれ、貫通の有無、長さ、発生箇所、発生パターン、発生原因などを調査する。表 2-3 に示すようにひび割れ幅の測定器具²⁾も様々であり、ひび割れに応じて適した測定を行う必要がある。本節ではひび割れ調査とひび割れ深さを測定する方法を紹介する。

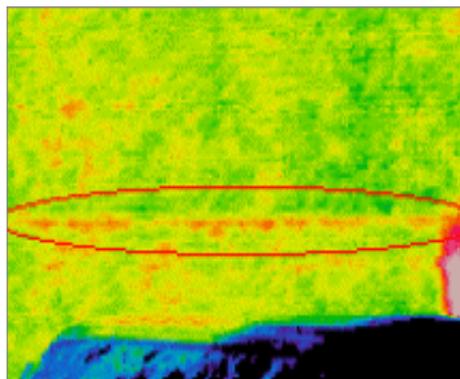
表 2-3 ひび割れ幅の測定器具と特徴²⁾

種類	測定可能な最小のひび割れ幅 (mm)	実用的な測定範囲 (mm)	測定の迅速性	備考
ペーパー型クラックスケール	0.04	0.40~1.0	◎	小さいものから大きなものまで測定できるが、不連続性としての測定に適する。
拡大鏡付きクラックスケール	0.02	0.02~3.0	○	小さいものから大きなものまで精度よく測定できる。
マイクロメーター	(0.01)*	1.0~	△	大きなひび割れ幅の精度のよい測定に適する。
ノギス	(0.05)*	2.0~	○	大きなひび割れ幅の精度のよい測定に適する。
スティーテープ	0.2	2.0~	◎	大きなひび割れ幅の測定に適する。
コンタクトゲージ	(0.001)*	0.02~	△	ひび割れ幅の変化の測定に適する。
シックネスゲージ	(0.04)*	0.04~3.0	○	大きなひび割れ幅の測定に適する。

2.3.1 ひび割れ調査

(a) 赤外線法

コンクリートの表層にひび割れが生じるとひび割れ部に空気層ができる。空気は熱を通しにくいので、壁面に日射が当たることで外壁の表面温度は上昇するが、ひび割れ部の温度は低くなる。赤外線法は健全部と欠損部の表面温度差を利用し、赤外線カメラを使用することで目には見えない微細なひび割れまでも可視化する手法である。

図 2-1 赤外線カメラ⁶⁾図 2-2 赤外線画像⁶⁾(b) メッシュ分割法⁷⁾

メッシュ分割法とは材料の表面を一定間隔のメッシュで分割しメッシュの数でひび割れを定量化する方法である。ひび割れを定量化する尺度としてひび割れ率 P を式(2)のように定義する。

$$\text{ひび割れ率 } P = \frac{\text{ひび割れを生じたメッシュの数}}{\text{メッシュの総数}} \quad \dots(2)$$

また、ひび割れ密度 D は $A[\text{cm}] \times A[\text{cm}]$ のメッシュを使用すると、ひび割れ率 P を用いて式(3)で表される。

$$D = \frac{P}{\sqrt{2}A \sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} \quad \dots(3)$$

このとき、 θ はひび割れと水平線とのなす角であり、次の仮定に基づく。

仮定1: ひび割れは一定の傾きを有する直線

仮定2: ひび割れのメッシュ間隔はメッシュ間隔より大きい

仮定3: ひび割れの位置はランダム

以上の過程を踏まえて、ひび割れの状態を評価し補修の判断基準の一つとして使用されている。

2.3.2 ひび割れ深さ

(1) クラック深さゲージ

図 2-3 に示すような測定器具を使用する。注射器のような形でひび割れに針を入れ、針を徐々に押し込む。針が折れないように注意しながら、止まった時のメモリの数値でひび割れ深さを判断する。

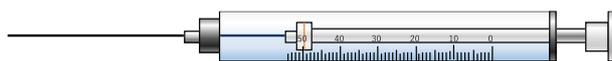


図 2-3 クラック深さゲージ

(2) はつり法

はじめにひび割れ部分に赤インクなどの目立つ着色剤を注入する。ひび割れ部分のコンクリートを削った後、着色された部分までの深さをスケールやノギスを用いて直接的に測定する方法である⁵⁾。

(3) コアボーリング法

ひび割れ面から採取したコア側面からひび割れ深さを測定するが、ひび割れが表面から垂直に発生していない場合や得られたコアより深い場合は一本のコアでは測定できず追加のコアを採取するといったトライアンドエラーを繰り返して実施する測定方法である⁵⁾。

(4) 超音波法

超音波が空気中では見かけ上速度が遅くなるという性質を持つ。空気に触れるひび割れ部分と健全な部分との超音波の伝搬速度を測定する。その二つの伝搬速度の違いから、ひび割れ深さを求める。この方法は安全かつ簡便に測定できるためひび割れ深さの検査で一番多く用いられている。ひび割れ深さを測定する際は超音波機器の送信プローブと受信プローブは図 2-4 のいずれかの設置の仕方になる。

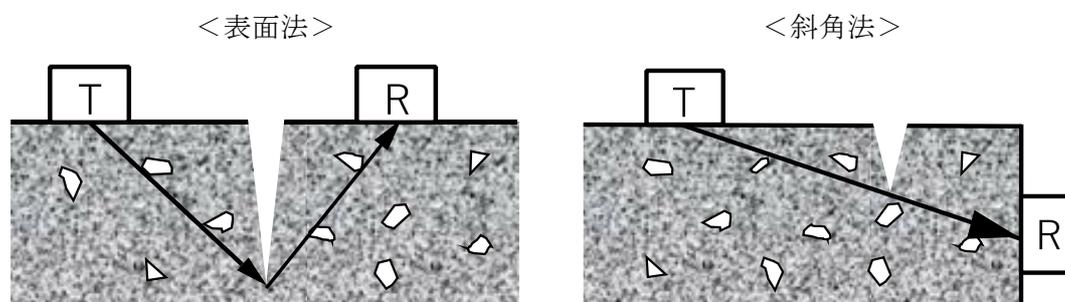


図 2-4 送受信プローブの設置方法

表面法が一般的に用いられていてその中でも代表的な T_c - T_0 法と BS 法について説明する⁸⁾。

・ T_c - T_0 法

図2-5に示すように、コンクリートの健全な部分での表面距離 $2a$ のときの伝搬時間 T_0 と、ひび割れ部から距離 a 離れた場所に送受信プローブを設置したときの伝搬時間 T_c から式(4)を用いてひび割れ深さ d を算定する。また、測定前にコンクリートの健全部分での超音波伝搬速度 V_c が自明な場合は、健全部を測らずに式(5)を用いてひび割れ深さ d を算定する。

$$d = a \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_0}\right)^2 - 1} \quad \dots (4)$$

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{T_c \cdot V_c - 4a^2} \quad \dots (5)$$

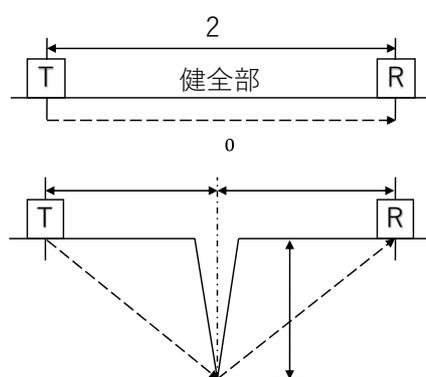


図 2-5 T_c - T_0 法⁸⁾

・ BS 法

図2-6に示すように、ひび割れ部分のみを測定する。それぞれのプローブをひび割れ部から 150mm に設置したときの伝搬時間 t_1 と、 300mm に設置したときの伝搬時間 t_2 から式(6)を用いてひび割れ深さ d を算定する。

$$d = 150 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_1^2 - t_2^2}} \quad \dots (6)$$

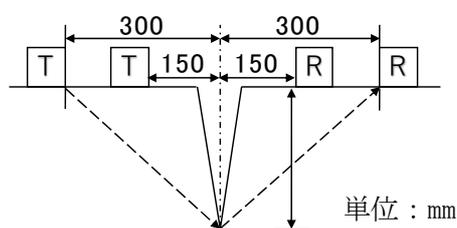


図 2-6 BS 法⁸⁾

(5) 衝撃弾性波法

コンクリート表面を叩くと表面が歪み、その歪みにより複数のモードの異なる弾性波が生じる。衝撃弾性波法は弾性波の中の縦波を利用し距離や音速の測定を行う方法で、ひび割れ深さ測定のほかにも内部欠陥の探査や版厚測定にも利用されている。ひび割れ深さでは伝搬速度の大きいP波を利用する。図2-7に示すように、ひび割れをまたぐように2つの受信プローブを配置する⁸⁾。インパクト（鋼球）で打撃し、ひび割れを回折したP波がプローブ1に到達する時間 t_1 から、プローブ2に到達する時間 t_2 の差 Δt を算出する。P波は予め測定された音速 C_p を使用し、式(7)を用いてひび割れ深さ d を算定する。実際の測定ではインパクトとプローブは専用の治具を使用し固定配置にする。

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{C_p \cdot \Delta t - 4L^2} \quad \dots (7)$$

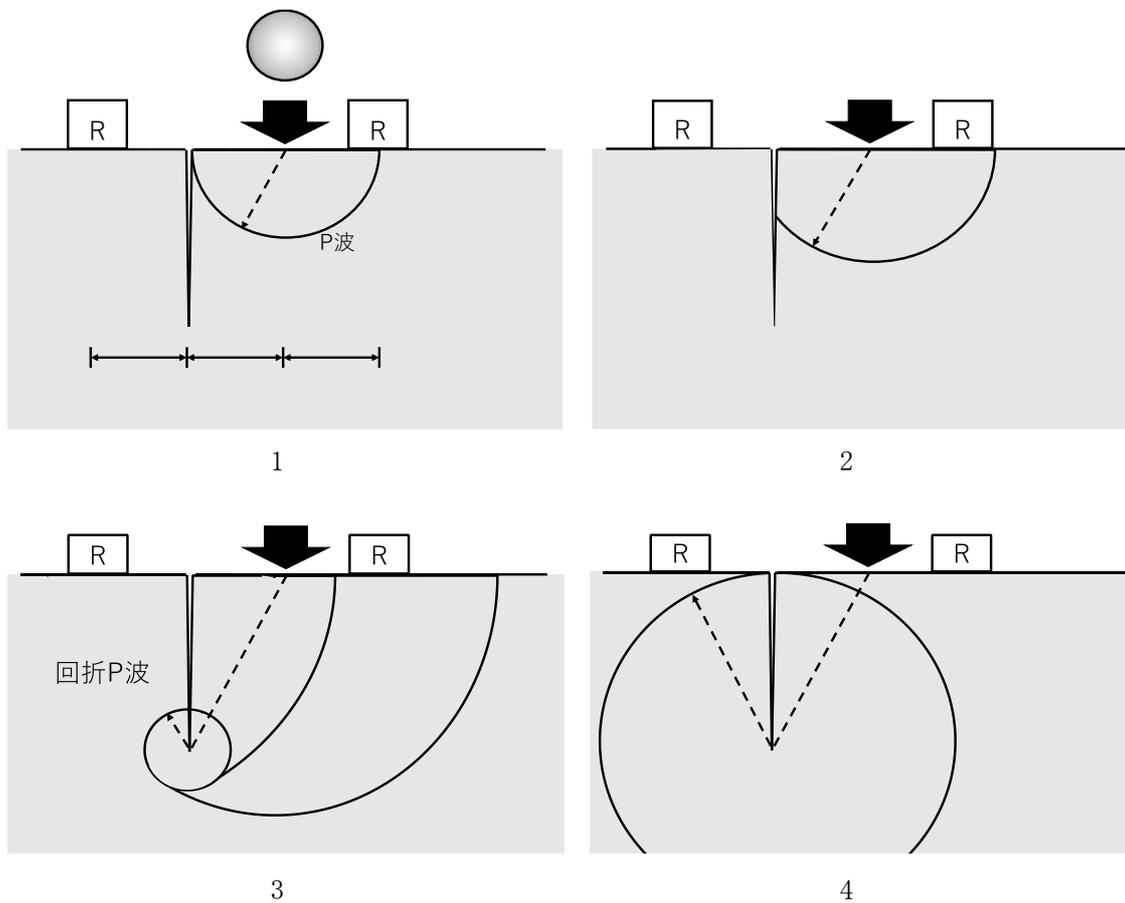


図 2-7 ひび割れ深さの測定原理⁸⁾

2.4 ひび割れ補修工法

ひび割れ補修工法は、防水や構造、美観に対する耐久性を向上させる目的で行われる工法である。ひび割れ被覆工法やひび割れ注入工法、ひび割れ充填工法などの種類があり、ひび割れの発生原因、発生状況、ひび割れ幅の大小、ひび割れ幅の変動の有無、鉄筋腐食の有無、作業足場の確保や雨がかりの有無などにより単体もしくは複数を組み合わせて使い分ける必要がある。日本コンクリート工学協会による工法の使い分けの判断目安を表 2-4⁹⁾に示す。また、建築・設備維持保全推進協会では、図 2-8 に示すようなひび割れの補修工法の選定の流れを提案している²⁾。工法の特徴や使用材料、施工手順、注意事項などを以下に述べる。

表 2-4 ひび割れに応ずる補修工法の判断目安⁹⁾

補修目的	ひび割れの現象・原因		ひび割れ幅 ^{*1} (mm)	補修工法 ^{*2}		
				ひび割れ被覆工法	注入工法	充填工法
防水性	ひび割れ幅の変動 ^{*3} 小		0.2以下	○	△	
			0.2~1.0	△	○	○
	ひび割れ幅の変動大		0.2以下	△	△	
			0.2~1.0	△		
耐久性	鉄筋が腐食していない場合	ひび割れ幅の変動小	0.2以下	○	△	△
			0.2~1.0	△	○	○
			1.0以上		△	○
		ひび割れ幅の変動大	0.2以下	△	△	△
			0.2~1.0	△	○	○
			1.0以上		△	○
	鉄筋腐食			-		○

*1 補修時のひび割れ幅を示している。

*2 ○印：適当と考えられる工法 △印：条件によっては適当と考えられる工法

*3 ひび割れ幅の変動とは、劣化に伴うひび割れの進展や温度変化などによる変動を意味しており、交通荷重などに伴うひび割れの開閉は対象外とする。なお、ひび割れ幅の変動は100%以上の場合を「大」、100%に満たない場合を「小」とする。

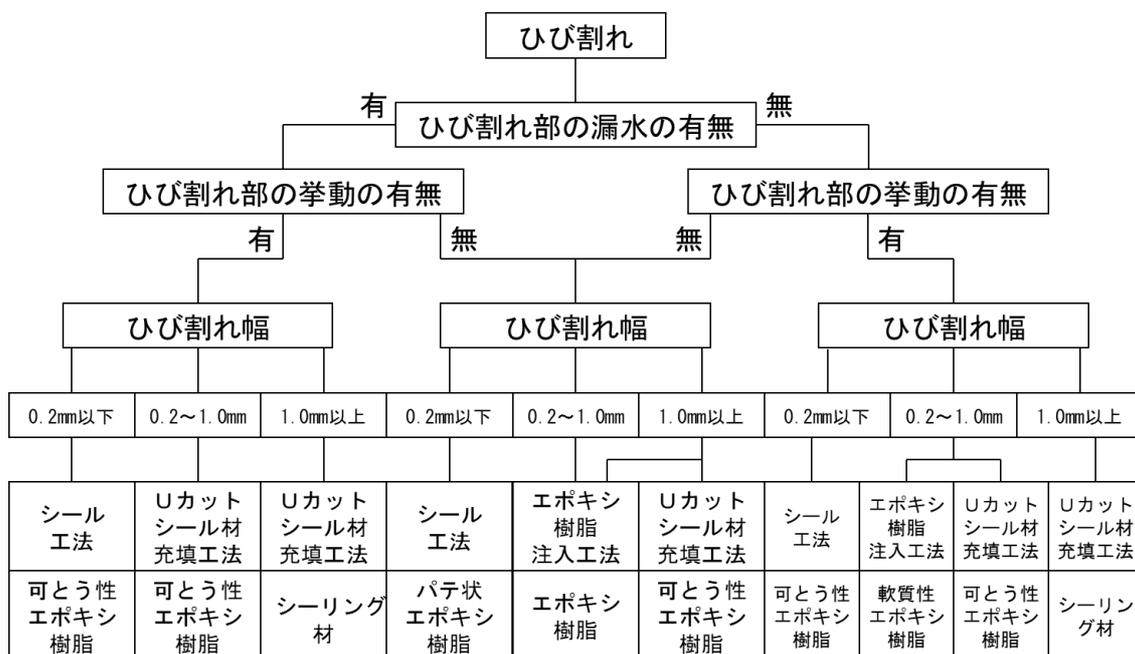


図 2-8 ひび割れ補修工法選定フロー²⁾

2.4.1 ひび割れ被覆工法(シール工法)

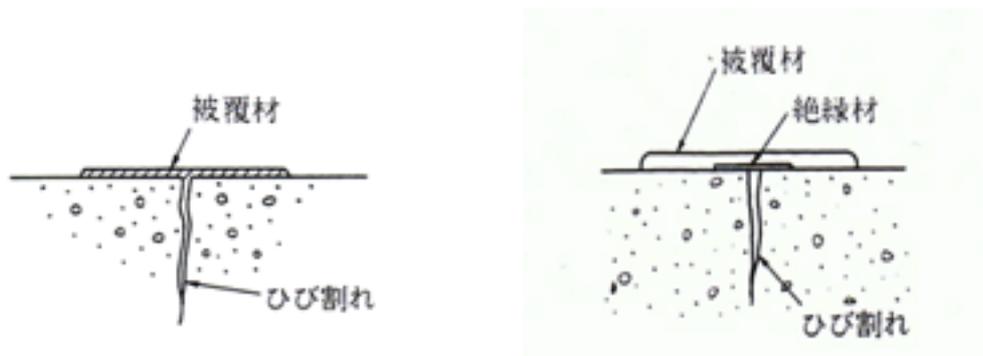
ひび割れ幅が 0.2mm 以下の微細なひび割れに適している。ひび割れ幅の変動に追従しやすい表面被覆材や目地材などを塗布し防水性や鉄筋腐食に対する耐久性を向上させる目的で行う方法である。ひび割れ周辺のみを被覆する方法で、補修後の例を図 2-9 に示す¹⁾。

施工方法は簡易的だが、ひび割れ内部が補修されていないことや、ひび割れ幅の変動の大きい場合や進行途中のひび割れなどの場合は補修したとしてもシールの剥離や剥落といった更なる劣化現象が発生する。被覆材としては一般的には塗膜弾性防水材、ポリマーセメントペーストやセメントフィラーなど用いられている。

補修する手順としては以下の順番で行う。

- 1) コンクリート表面をワイヤーブラシなどで目荒らしする
- 2) 表面の埃や塵などの付着物を取り除き、水洗いした後に十分に乾燥させる
- 3) コンクリート表面の空隙などをパテ状の樹脂
- 4) 適切な補修材料でひび割れを被覆する

この方法はひび割れ面の補修であり、被覆材の厚みが小さいので、特に経年劣化に対する注意が必要である。また、補修する材料によっては付着強度が小さいものや色の違い、色むら等が生じやすいので、補修する材料の選定は慎重に行う必要がある。

図 2-9 ひび割れ被覆工法¹⁾

2.4.2 ひび割れ注入工法

従来の注入方式は手動や足踏み式で注入量の管理が難しく、注入の精度が作業スタッフの熟練度合に左右されることや注入圧が高いとひび割れの奥まで樹脂が注入される前にひび割れ面に沿う樹脂の広がりやシール材の割裂といった問題が起きた。そこで現在では、図 2-10 に示すような補修剤の注入圧力が低く低速で注入できる注入器具を用いた低圧低速注入工法が主流となっている¹⁾。低圧低速注入工法の特徴を以下に示す。

- 1) 注入量のチェックが容易
 - 2) 注入精度が作業員の熟練度に左右されずに一定
 - 3) ひび割れ深部のひび割れ幅が 0.05mm 程度の狭い場合でも、ほぼ確実に注入可能
- 注入剤としてはエポキシ樹脂やアクリル樹脂などの有機系、セメント系、ポリマーセメント系がある。

エポキシ樹脂系注入剤の品質は産業標準化法に基づき、JIS A 6024(建築補修用注入エポキシ樹脂)として規定されている。日本産業規格 (JIS) では、引張破壊、伸縮性、粘性及び施工時期の要因でエポキシ樹脂を 12 種類に分けている。建築用のエポキシ樹脂の品質規格を表 2-5 及び表 2-6 に示す。一方、アクリル樹脂の品質規格については明確に示された基準等はないが、エポキシ樹脂の品質規格を準用し品質を企業独自で管理している。また、日本建築仕上材工業会ではひび割れ部の浮きに用いるポリマーセメントの品質を NSKS-0003 とし提案している。表 2-7 にポリマーセメントスラリーの品質基準(案)を示す。

従来、雨や結露などによってひび割れ部が湿潤な場合は水によって補修効果阻害が生じ接着強度が低減する問題点があった。昨今では、補修効果低減のない湿潤面用の注入材の開発により改善された。ひび割れ部が乾燥している場合は注入剤が含む水分がコンクリートに吸収されドライアウトする危険性があるため、注入前に補修部を水で湿潤にする必要がある。セメント系やポリマーセメント系注入材においては、より微粒子なセメントをベース

とした注入材が開発され、従来までは困難であった微細なひび割れへの注入も可能となった。

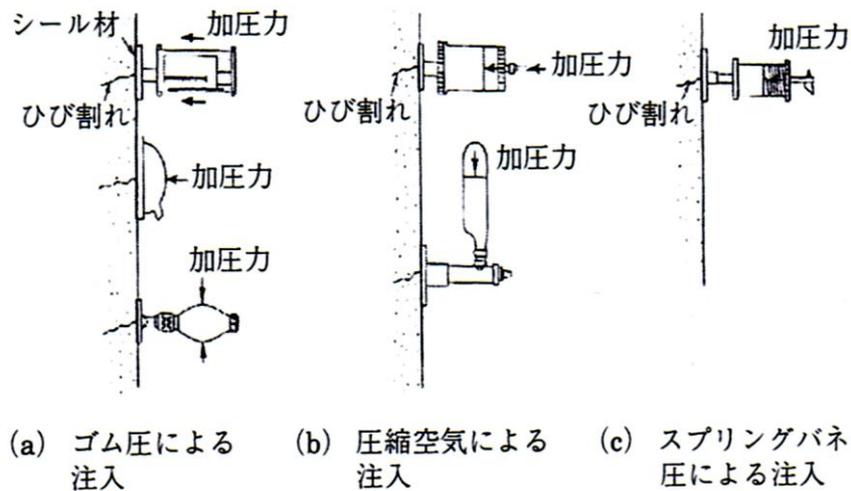


図 2-10 ひび割れ注入工法¹⁾

表 2-5 JIS A6024 (建築補修用注入エポキシ樹脂) 硬質形エポキシ樹脂の品質

試験項目		試験条件	低粘度形		中粘度形		高粘度形	
			一般用	冬用	一般用	冬用	一般用	冬用
粘度	粘度 (mPa·s)	23±0.5℃	100~1000		5000~20000		—	
	チキントロピックインデックス	23±0.5℃	—		5±1		—	
	スランプ性 (mm)	15±2℃	—		—		—	5以下
30±2℃		—		—		5以下	—	
接着強さ (N/mm ²)		標準条件	6.0以上		6.0以上		6.0以上	
		低温時	—	3.0以上	—	3.0以上	—	3.0以上
		湿潤時	3.0以上		3.0以上		3.0以上	
		乾燥繰返し時	3.0以上		3.0以上		3.0以上	
硬化収縮率 (%)		標準条件	3以下		3以下		3以下	
加熱変化	質量変化率 (%)	—	5以下		5以下		5以下	
	体積変化率 (%)	—	5以下		5以下		5以下	
引張強さ (N/mm ²)		標準条件	15.0以上		15.0以上		15.0以上	
引張破壊伸び (%)		標準条件	10以下		10以下		10以下	
圧縮強さ (N/mm ²)		標準条件	—		—		50.0以上	

表 2-6 JIS A6024 (建築補修用注入エポキシ樹脂) 軟質形エポキシ樹脂の品質

試験項目		試験条件	低粘度形		中粘度形		高粘度形	
			一般用	冬用	一般用	冬用	一般用	冬用
粘度	粘度(mPa·s)	23±0.5°C	100~1000		5000~20000		—	
	チキソトロピックインデックス	23±0.5°C	—		5±1		—	
	スランプ性(mm)	15±2°C	—		—		—	
30±2°C		—		—		5以下	5以下	
接着強さ(N/mm ²)		標準条件	3.0以上		3.0以上		3.0以上	
		低温時	—	1.5以上	—	1.5以上	—	1.5以上
		湿潤時	1.5以上		1.5以上		1.5以上	
		乾燥繰返し時	1.5以上		1.5以上		1.5以上	
硬化収縮率(%)		標準条件	3以下		3以下		3以下	
加熱変化	質量変化率(%)	—	5以下		5以下		5以下	
	体積変化率(%)	—	5以下		5以下		5以下	
引張強さ(N/mm ²)		標準条件	1.0以上		1.0以上		1.0以上	
		低温時	1.0以上		1.0以上		10以上	
		加熱劣化時	1.0以上		1.0以上		1.0以上	
引張破壊伸び(%)		標準条件	50.0以上		50.0以上		50.0以上	
		低温時	50.0以上		50.0以上		50.0以上	
		加熱劣化時	50.0以上		50.0以上		50.0以上	

表 2-7 日本建築仕上げ材工業企画 NSKS-3003 ポリマーセメントスラリーの品質基準(案)

項目		規格値
流下時間 (s)		1回目：30分以内, 2回目：45分
保水係数 (%)		0.35~0.65
収縮率 (%)		3以内
接着強さ (N/mm ²)		4.0 以上
曲げ強さ	標準養生時 (N/mm ²)	4.0 以上
	温冷繰返し後(N/mm ²)	4.0 以上
吸水率		15 以下

2.4.3 充填工法

ひび割れ面に沿ってコンクリートを U 字形または V 字形にカットし、その部分に補修剤を充填する方法である。ひび割れ表面の幅が 0.5~1.0mm という比較的大きなひび割れでかつ鉄筋が腐食していない場合に適する。カットした部分には可とう性エポキシ樹脂やポリマーセメントモルタルなどの充填剤を充填し、その上からシーリング材で被覆補修する。

補修材料によっては低温や高湿の環境下では硬化しないので注意が必要である。また、水圧や空気圧などにより高気圧かつ活荷重によりひび割れが開閉している場合は補修剤の接着力が低減する可能性がある。

充填剤に関してはひび割れが変動している場合はウレタン樹脂やシリコン樹脂を使用し、変動が小さい場合は可とう性エポキシ樹脂を用いることもある。ひび割れが変動しない場合はポリマーセメントモルタル を用いる。シーリング材に関する品質規格として JIS A 57589(建築用シーリング材)があり、同規格には表 2-12 に示すようにシーリング材の主成分による耐久性の区分が設けられている。建築改修工事監理指針「ひび割れ U カット充填用

シーリング材の品質基準(案)」には、充填工法で使用するシーリング材は、耐久性による区分の 8020 と同等以上とし、シリコン系および 9030G を除くと規定されている。また、同指針には「ひび割れ部 Uカット充填工用可とう性エポキシ樹脂の品質基準(案)」も記載されており、材料選定の参考にすることができる。

Uカットによる充填工法の一例を図 2-11 と図 2-12 に示す¹⁾。鋼材が腐食している場合は腐食原因となる因子をはつり取る断面の修復も併せて行う。

表 2-1 JIS A 5758 (建築用シーリング材)

主成分による区分	耐久性による区分					
	10030	9030	8020	7020	7010	9030G
シリコン系	○	○				○
ポリイソブチレン系	○	○				
変性シリコン系		○	○			
ポリサルファイド系		○	○			
アクリルウレタン系		○	○			
ポリウレタン系		○	○	○		
アクリル系				○	○	

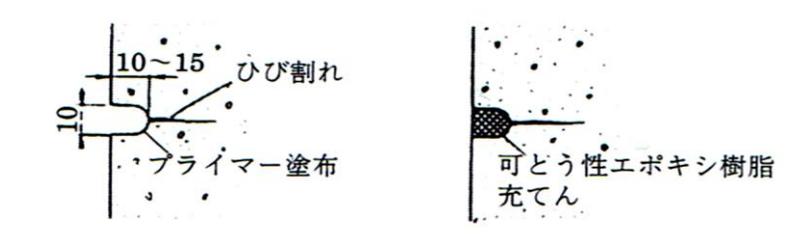


図 2-11 可とう性エポキシ樹脂の充填方法¹⁾

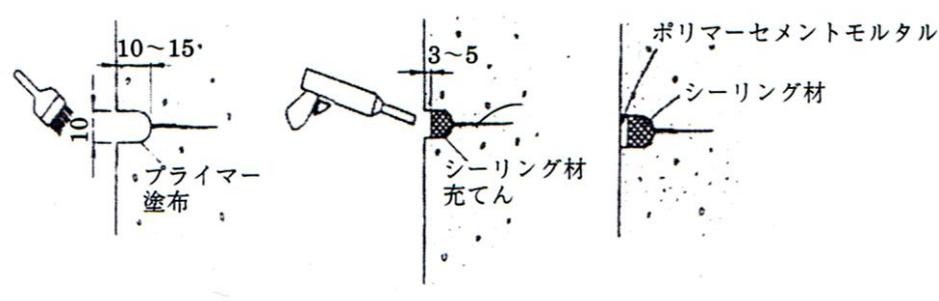


図 2-12 シーリング材の充填方法¹⁾

2.4.4 防水塗膜工法

手すりやパラペットあるいは庇の天端に発生したひび割れ部分は雨水が入り込む場所などに使用し、ウレタンやアクリルが主原料の防水剤をひび割れ部に何重にも塗り重ねる防水塗布工法である。密着性があり、割れづらい性質を持つ¹⁰⁾。この補修工法に関連する研究を付録p～に示す

2.5 ひび割れ補修剤の種類

2.5.1 セメント系

セメント系補修材の種類や特徴については、日本構造物診断技術協会「アメリカにおける構造物の劣化診断と補修に関する技術調査報告書」に表 2-7 に示すようなセメント系補修材が報告されている。

表 2-7 セメント系補修材の特徴

材料名	長所	短所、限界	適用
マイクロシカ (シリカフェューム)	①超高強度 ②水密性向上 ③耐久性向上	①コスト高 ②粘性が大 ③単位水量増加	①高品質吹き付けコンクリート ②耐摩耗性が必要
吹き付けコンクリート	①付着性大 ②収縮小 ③施工が容易	①技能工必要 ②品質が技能工に依存	限界なし
ポリマー	①付着性大 ②透水・透気性小 ③養生日数1日以内 ④耐化学抵抗性大	①可使時間が短い ②技能工が必要 ③練り混ぜ・取り扱いが特殊	①舗装 ②充填 ③化学的侵食を防止する箇所
膨張性・ノンシュリンクグラウト (膨張セメント系)	①取り扱いが容易 ②凍結融解抵抗性が増加	①配合がセメント成分や練り 混ぜ温度に影響される ②硬化するまで型枠が必要	①空隙充填 ②ひび割れ充填 ③ベースプレート充填
膨張性・ノンシュリンクグラウト (ジブサム系)	①取り扱いが容易 ②硬化が早い ③空気養生	①湿潤状態では安定しない ②硬化が早すぎる ③水に溶解しやすい	①乾燥条件下での ボルト・パイプの固定
膨張性・ノンシュリンクグラウト (膨張セメント系)	①取り扱いが容易 ②型枠がいらない ③フリージングが小さい	①湿潤養生が必要	①ボルトの固定 ②小さい空隙の充填 ③ポストテンションの tendon の充填
膨張性・ノンシュリンクグラウト (酸化金属系)	①高強度 ②疲労性状良 ③耐衝撃抵抗性良	①乾湿条件下で不安定 ②錆汚れがある	①ボルトの固定 ②クレーンレールのセット ③重量物が必要な場合
膨張性・ノンシュリンクグラウト (カルシウム・アルミネート系)	①硬化が非常に早い ②耐酸・耐硫酸塩 ③耐熱	①可使時間が短い ②硬化中の温度が高い ③強度低下を起こす場合がある	①止水用の充填
マグネシウム磷酸塩	①硬化が早い ②付着性大 ③凍結温度下で使用可 ④取り扱いが容易	①可使時間が短い ②表面に仕上げが必要 ③アンモニアの臭いがきつい	①低温度下での補修
プレバックドラテックス モルタル	①取り扱いが容易 ②付着性大 ③耐摩耗性 ④耐化学抵抗性	①可使時間が短い ②収縮する ③比較的高い	①薄い仕上げ ②不透水仕上げ ③化粧仕上げ
プレバックド・セルフ レベリング仕上げ材	①取り扱いが容易 ②ポンプ圧送可 ③仕上げ不要 ④付着性大	①屋外で使用できない ②凍結融解抵抗性なし	①床の仕上げ
プレバックド・改良ポルトランド セメント混合物	①取り扱いが容易 ②特性はポルトランドセメントに 近い	①硬化が遅い ②低温度下では使用不可	①舗装の補修 ②構造物の局所的な補修
ウルトラファインセメント	①高浸透性 ②フリージングが少ない	①ポルトランドセメントではない ②多量の水が必要 ③取り扱いが汚い	①構造物のグラウチング ②地盤や岩盤のグラウチング

2.5.2 樹脂系

ひび割れ補修において、樹脂系補修材は、注入材、シーリング材、接着剤など様々な用途で使用されている。そのため、樹脂の種類も様々で代表的な樹脂における特徴を以下に示す。

(1) エポキシ樹脂

表 2-8 にエポキシ樹脂の長所・短所を示す。エポキシ樹脂は、ひび割れ補修材の中で最も多く活用されており、その理由は表 2-15 の長所に示すような、優れた物性があるからである。これらの物性の多くは他の高分子材料にもあるが、エポキシ樹脂のようにすべてを持っている高分子は他に見当たらない。多くの長所を生かして、注入材、接着剤、シーリング材、複合材の結合等、多種多様に用いられている。

表 2-8 エポキシ樹脂の特徴

長所	高分子材料の中で、硬化収縮が小さい
	金属、プラスチック、木材、ガラス、コンクリート、セラミック等、広範囲の材料に対して接着性に優れる
	柔軟なものから硬質なものまで、比較的自由に変性ができる (機械的強度に優れる)
	耐水性、耐アルカリ性、耐弱酸性、耐溶剤性に優れる
	電気特性（電気絶縁性）に優れる
	硬化中に放出される揮発物質がない
短所	低温中（5℃以下）での硬化が遅い
	紫外線によって劣化しやすい

(2) ウレタン樹脂

表 2-9 にウレタン樹脂の長所・短所を示す。ウレタン樹脂は、ゴムのように柔らかい硬化物からプラスチックのように硬質なものまで得ることができる樹脂である。ひび割れ補修では、挙動や漏水のあるひび割れの注入材、表面被覆材やシーリング材に使用される。また、ウレタン樹脂の硬化剤である、ポリイソシアネートは水との反応性が非常に高いため、開封後に保管する際は窒素ガスを封入し、密閉する必要がある。また、降雨時には作業を中止しなければならない。

表 2-10 ウレタン樹脂の特徴

長所	低弾性から高弾性まで幅広い物性が得られる
	耐摩耗性に優れる
	耐油性に優れる
	低温特性に優れる
	耐候性に優れる
短所	硬化時に湿度（水）の影響を受けやすい
	耐アルカリ性が弱い

(3) 不飽和ポリエステル樹脂

不飽和ポリエステル樹脂の長所・短所を表 2-11 に示す。これらの特徴から、不飽和ポリエステル樹脂は、工場加工から現場施工まで多種多様に利用される。

表 2-12 不飽和ポリエステル樹脂の特徴

長所	粘度が低く取り扱いやすい
	硬化が早い
	低温でも硬化性がよい
	良好な機械的物性を持つ
	耐水性、耐酸性に優れる
短所	エポキシ樹脂と比較して硬化収縮が大きい
	恒温時の使用可能時間が短い
	空気中の酸素によって硬化阻害が生じる
	硬化が水分に影響される

(4) シリコーン樹脂

シリコーン樹脂の長所・短所を表 2-13 に示す。これらの特徴からシリコーン樹脂は、ひび割れのシーリング材として用いられている。様々な樹脂系のシーリング材の中でも、最も耐久性があり、特に過酷な環境下で使用される。

表 2-13 シリコーン樹脂の特徴

長所	耐熱性、耐寒性、耐候性に優れる
	電気絶縁性に優れる
	表面張力が小さいため、撥水性、消泡性、離型性を有する
短所	表面に仕上げ材が付着しにくい
	表面にほこりが付着しやすい

(5) フッ素樹脂

フッ素樹脂の長所・短所を表 2-14 に示す。フッ素樹脂は、ひび割れ補修において、耐久性向上のための上塗り塗量や、摩擦係数が小さいことから剥離剤として用いられる。

表 2-14 フッ素樹脂の特徴

長所	耐薬品性，耐候性，耐熱性に優れる
	撥水性がある
	電気特性に優れ，絶縁性に優れる
短所	価格が高い
	表面摩擦が小さく，接着しにくい

(6) ポリウレア樹脂

ポリウレア樹脂の長所・短所を表 2-15 に示す。ポリウレア樹脂は生成法がウレタンとよく似た樹脂である。

表 2-15 ポリウレア樹脂の特徴

長所	硬化が速く，空気中の湿気や水分の影響を受けにくい
	低温でも速く硬化し，かつ良好な硬化塗膜を得ることができる
	耐薬品性，耐酸性に優れる
短所	硬化塗膜がウレタン樹脂より硬い
	価格が高い
	主剤と硬化剤の粘度差があるため，使用時には加熱し，粘度差を少なくする必要がある

(7) ポリサルファイド

ポリサルファイドの長所・短所を表 2-16 に示す。ポリサルファイドはシーリング材として使用される。また、エポキシ樹脂や固形ゴムの原料に柔軟性，寸法安定性，湿潤面接着性を付与する変形材として用いられる。

表 2-16 ポリサルファイドの特徴

長所	汚れにくい
	透湿性に優れる
	耐油性に優れる
	柔軟性がある
短所	初期硬化が若干劣る

2.6 既往の研究

2.6.1 ひび割れ挙動測定結果

外壁の貫通ひび割れは外気温の変動に伴い様々な挙動を示している。このひび割れ挙動が幾重にも繰り返されるとひび割れが進行しひび割れ深さが大きくなる。補修工法や補修材料を選定する上でも大事な要因である。そこで、既往の研究からひび割れ挙動の測定事例を示す。

本節では、RC外壁に関する既往の研究を検証し解明された点及び検討すべき点を整理し、本研究の位置づけを明確にすることにした。

【ひび割れ挙動の測定①】

既往の研究で、森濱ら¹¹⁾鉄筋コンクリート造建物に発生した貫通ひび割れの挙動測定を実施した。測定にはパイゲージを使用し、熱電対を用いた壁面温度の測定も併用した。南面および西面も壁面に生じた貫通ひび割れについて計測を行い、ひび割れの概要は表 2-17 に示し、測定結果を図 2-13、図 2-14 に示す。

表 2-17 測定対象の概要

ひび割れ名	ひび割れ幅 (mm)	貫通の有無	発生個所と方向
3-南-開口 (外)	0.1	貫通	南面開口部出隅, 縦方向
3-南-開口 (内)	0.45	貫通	南面開口部出隅, 縦方向
2-西-廊下 (外)	0.15	貫通	西面渡り廊下壁面, 縦方向
2-西-廊下 (内)	0.45	貫通	西面渡り廊下壁面, 縦方向

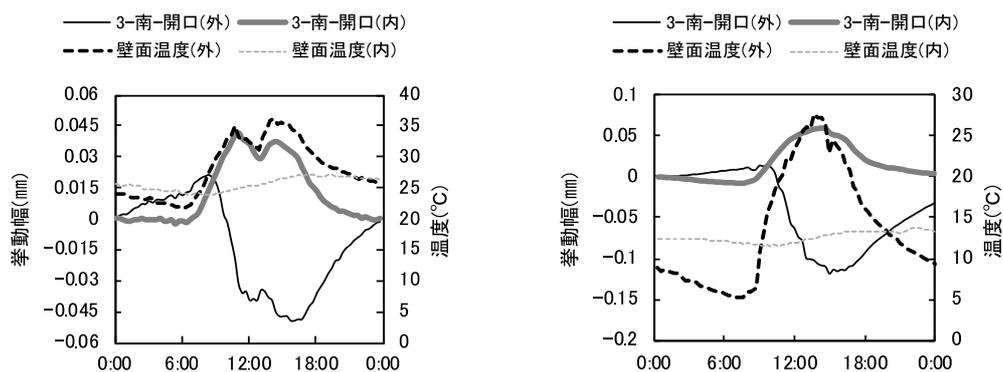


図 2-13 南側のひび割れ挙動 (左：夏季、右：冬季)

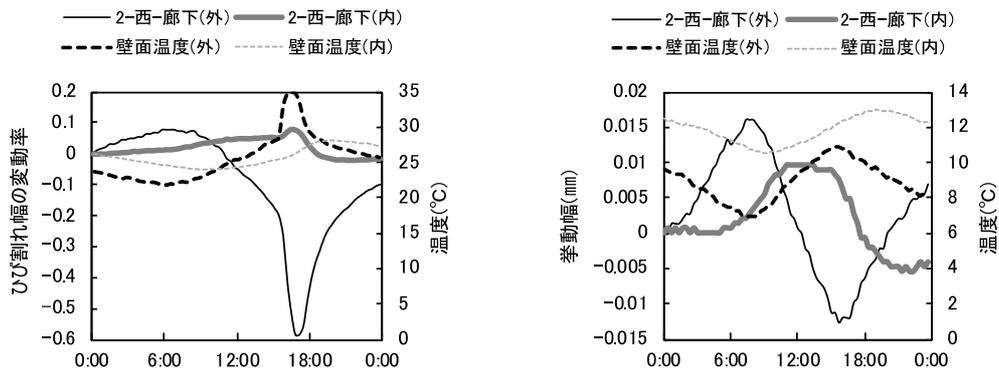


図 2-14 西側のひび割れ挙動 (左：夏季、右：冬季)

測定結果より、貫通ひび割れの外側は部材温度の上昇時に閉じ、部材温度の低下時は開く。反対に貫通ひび割れの内側は部材温度の上昇時に開き、部材温度の低下時は閉じる。このことより、森濱らは貫通ひび割れの挙動は反り挙動であると発表した。また、ひび割れの挙動は壁面の温度変化により齎される。反り挙動の概念を図 2-15 に示す。

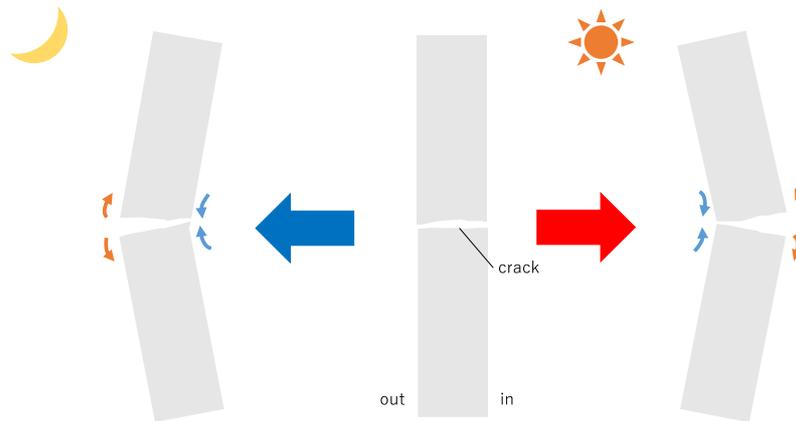


図 2-15 反り挙動の概念図

【ひび割れ挙動の測定②】

田中ら¹²⁾は鉄筋コンクリート造の建物に発生したひび割れの挙動測定を行った。ひび割れの挙動だけではなく、低粘度エポキシ樹脂(エポキシ樹脂硬質形)を用いた注入工法でのひび割れ補修後の測定も行っている。挙動の測定には、補修前は携帯型顕微鏡(×100)、補修後は高倍率デジタル顕微鏡(×800)を用いた。

表 2-18 にはひび割れの概要を示し、図 2-16 には測定結果を示す。田中らの調査においても日中気温の上昇時はひび割れ幅は大きくなり、気温の下降時はひび割れが開くことが報告されている。また、補修剤の注入後、ひび割れの挙動は樹脂の注入により大きく減少するが、非常にわずかであるが動き続けていることが確認されている。

表 2-18 測定対象の概要

ひび割れの名	ひび割れ幅(mm)	貫通の有無	発生箇所と方向
腰壁	0.45	貫通	南西面の腰壁中央,縦方向
梁	0.22	貫通	南西面の梁中央,縦方向

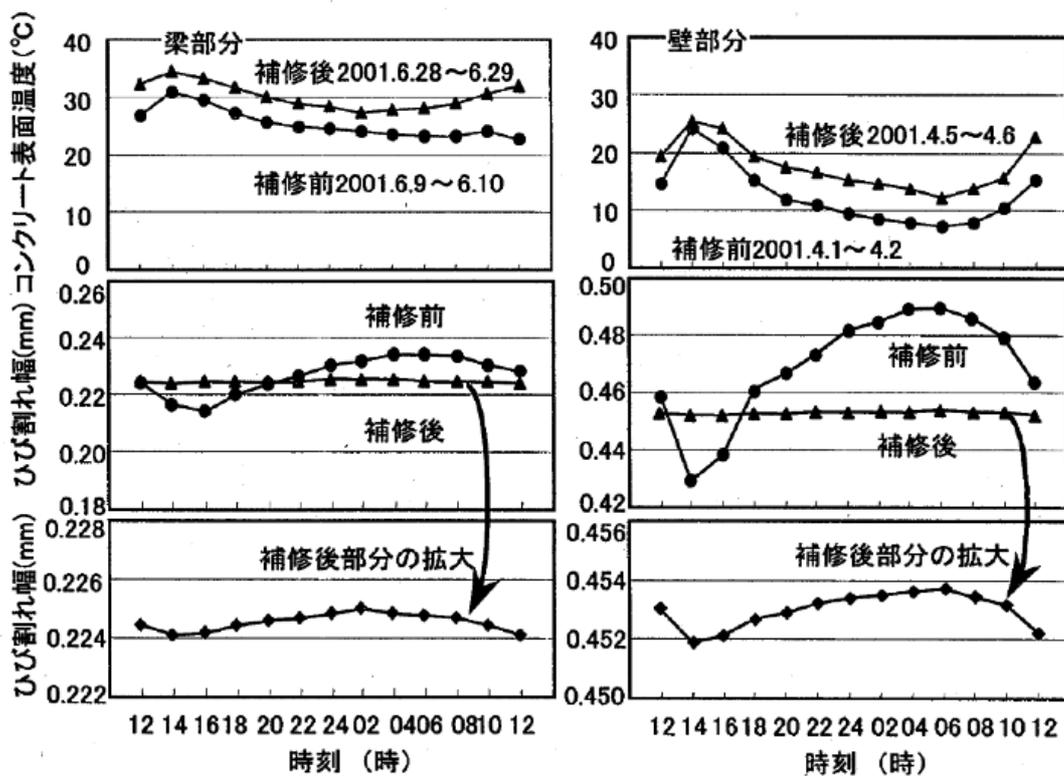


図 2-16 補修前後のひび割れ挙動

【ひび割れ挙動の測定③】

長谷川ら¹³⁾は札幌市にある平家の鉄筋コンクリート造建物の壁面に発生していたひび割れを対象にひび割れ挙動の測定を行った。挙動の測定には亀裂変位計(変位±2mm)を用いた。

表2-19に測定対象のひび割れの概要を示し、図2-17には測定結果を示す。

ひび割れ挙動における変位の日最大値の変化は気温が高いときは大きく、低いときは小さいことが確認されており、

図2-19 測定対象の概要

ひび割れの名	最大ひび割れ幅(mm)	発生箇所と方向	考えられる発生原因
ひび割れ1	0.2	開口部上部中央、縦方向	乾燥収縮、温度ひび割れ
ひび割れ2	0.3	開口部右隅角部、斜め方向	乾燥収縮
ひび割れ3	0.1	柱の中央付近、水平方向	骨材剥離→凍害

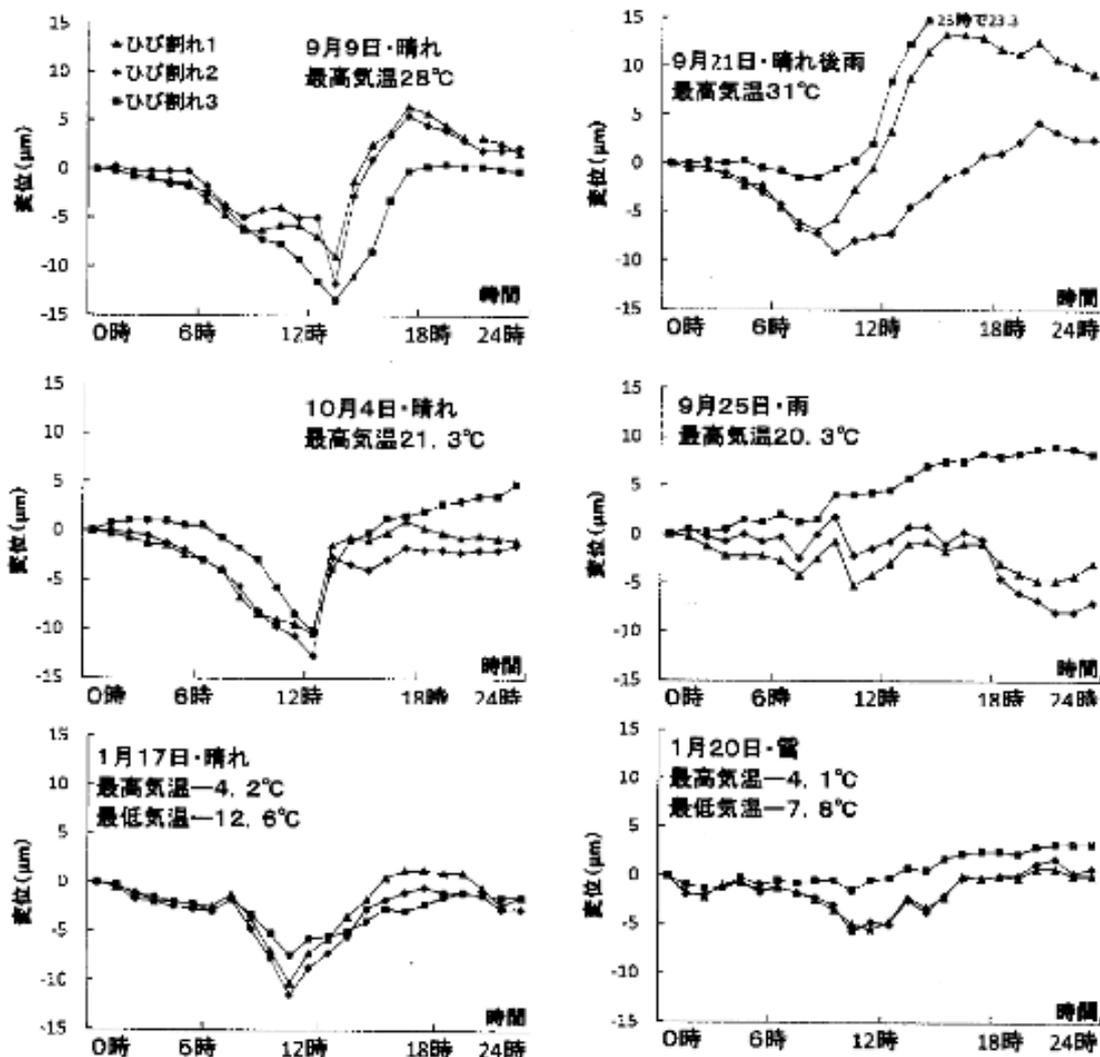


図2-17 夏季と冬季によるひび割れ挙動

2.7 結言

本章では、外壁に生じるひび割れの劣化原因とメカニズムを説明するとともに、診断技術、補修工法および既往の研究を整理した。

【劣化の原因およびメカニズム】

実際の RC 外壁に生じるひび割れは 2 つ以上の原因が複合して発生する場合が多い。

【診断手法、補修工法】

現在、行われている診断手法や補修工法を整理した。様々なひび割れに対して適切な診断や工法を選択する必要がある。

【既往の研究：ひび割れ挙動の測定】

外壁に生じたひび割れは反り挙動を行っていることやひび割れ補修後も僅かに挙動することがわかった。ひび割れ挙動は日射量による影響が強い。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会. “コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針”
p41, 6.3 節. 2013
- 2) 建築・設備維持保全推進協会. “建築仕上診断技術者 講習テキスト第 10 版” p208, 238
- 3) 峯岸敬一. “セメントの水和と熱” コンクリート工学会ジャーナル 22 巻 3 号 p5. 1984
- 4) 鳥取県. “コンクリート構造物ひび割れ抑制対策マニュアル (案)” p6. 2016
- 5) 和泉意登志. “コンクリートの劣化と補修がわかる本”
p40, p63, p12, p25-26, p52-53, p103, p69, p70
- 6) 神田憲二. “建築外壁ひび割れの補修技術の評価と工法選定手法の確立に関する研究”
広島大学学位論文. 2005
- 7) 高瀬勇紀. “ひび割れ注入工法における補修技術の向上に関する研究”
広島大学修士論文. 2013
- 8) 魚本健人. “コンクリート構造物の非破壊検査技術” p70-71, p83. 2008
- 9) 日本コンクリート工学会. “コンクリート診断技術 基礎編” p244. 2009
- 10) 宮川豊章. “コンクリート補修補強ハンドブック” p411. 2011
- 11) 森濱直之. “建築物のひび割れ補修技術の評価と最適な補修工法選定に関する研究” 広島大学修士論文. 2008
- 12) 田中淳二, 申洪徹, 安藤紀明. エポキシ樹脂注入によるコンクリート・モルタルのひび割れ補修部の疲労試験方法. 日本建築学会構造系論文集 第 544 号 p21-27. 2007
- 13) 長谷川拓哉, 大久保孝昭. “札幌市におけるコンクリート・モルタル壁のひび割れ挙動の実測” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) p447~448. 2009

第3章

外壁簡易モデルでの熱応力パターン解析

3.1 はじめに

建築物を長寿命化させるためには、コンクリート構造物の長期供用のための補修が大きく寄与する。実際のひび割れ補修はひび割れ補修フローがあるにも関わらず、「ひび割れ挙動の有無や大小」に関しては多くの労力と費用がかかることから施工者がひび割れの挙動の有無を判断している。施工者の経験は補修現場ごとに異なるため、同じひび割れであっても補修に違いが生じてしまう。コンクリートのひび割れ補修技術を早期に確立する必要がある。

本章では、ひび割れ挙動に影響していると判断した温度やひび割れ、外壁の形状等の要因に関して、解析を行う。解析プログラムには、ANSYS workbench 2020 R1 の伝熱応力解析を用いた。

3.2 解析の目的

RC 外壁の柱梁に囲まれた簡易的なモデルを作成し、昇温速度やひび割れ形状等に関するパターン解析を行う。解析を行った要因が外壁モデルに対してどのくらい影響するかを検討する。

3.3 解析の概要

3.3.1 外壁モデルの概要

本解析では自ら考案した柱梁に囲まれた耐震壁モデルを使用した。外壁の形状等の要因に関してはモデルの形は異なるが、代表的な一例と解析ごとに変数とした寸法を図 1 および図 2 に示す。図 1 に示すように壁の高さ 2400mm で壁の厚みが 200mm, 壁の幅が 6000mm である。また、柱のサイズは 600×600 で高さが 3000mm, 基礎梁は 600×1000 で長さが 7200mm, 梁は 400×600 長さは 6000mm である。ひび割れは壁の高さ方向にあり、ひび割れ幅は 1mm とした。材料物性値はエラー! 参照元が見つかりません。に示す。

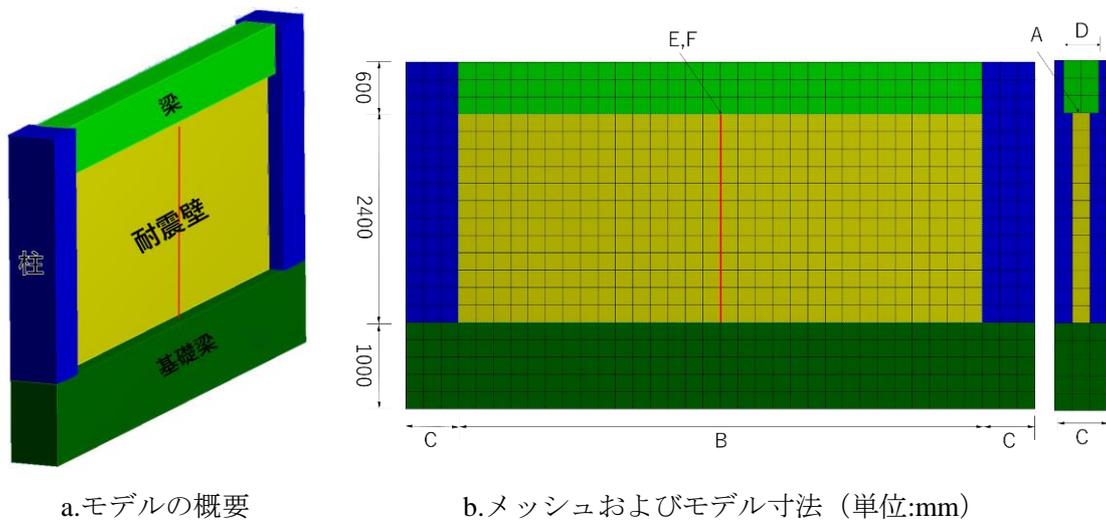


図1 解析モデルの概要

図2 基本の解析モデルの概要

表2 解析条件

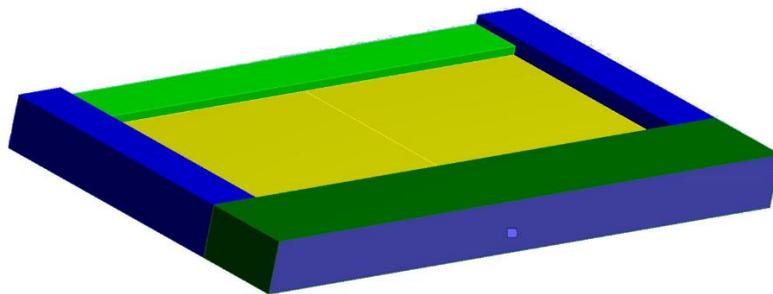
記号	解析条件	項目
ア	拘束の影響	中央と端部のひび割れ
イ	発生方向	縦方向, 横方向
A	壁の厚み	100mm,150mm,200mm,250mm,300mm
B	壁の長さ	4m,5m,6m,7m,8m
C	柱の太さ	400mm×400mm,500mm×500mm,600mm×600mm,700mm×700mm
D	梁の太さ	200mm,300mm,400mm,500mm,600mm
E	ひび割れ幅	0.01mm,0.02mm,0.03mm,0.04mm,0.05mm,0.1mm,0.3mm,0.5mm,1mm
F	ひび割れ深さ	貫通ひび割れ,20mm,40mm,60mm,80mm,100mm,120mm,140mm,160mm,180mm
i	昇温速度	10°C/h,15°C/h,20°C/h,25°C/h,30°C/h

表3 材料物性

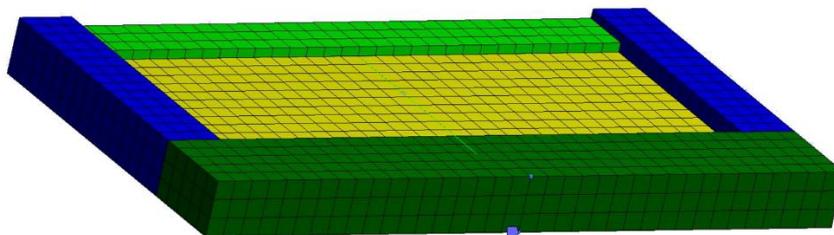
	コンクリート
熱伝達率(W/m・°C)	1.6
比熱(kJ/kg・°C)	1.02
線膨張係数(1/°C)	8.0E-6
密度(kg/m³)	2300
ヤング係数(Gpa)	22
ポアソン比	0.2

3.3.2 モデル固定条件

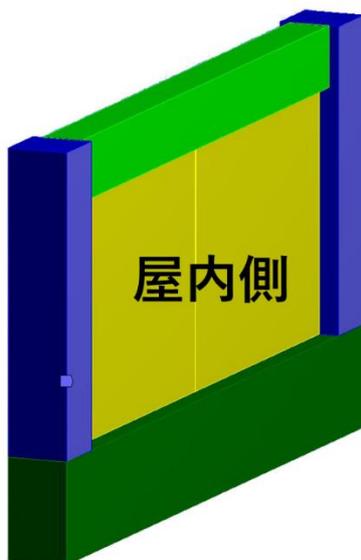
今回の解析では、解析モデルの基礎梁の底辺を摩擦なしの支持および基礎梁下部の表裏の両面の下部をそれぞれ固定し、擬似的なローラー支持とした。外壁の屋外面の温度上昇時に柱が屋内側に反ることは考えにくいいため、二つ柱の裏面に当たる部分を摩擦なし支持とした。また、実際の外壁には重力加速度が加わっているため、本解析モデルにも外壁面内下方向の向きに $9.8066m/s^2$ の重力加速度を加えた。



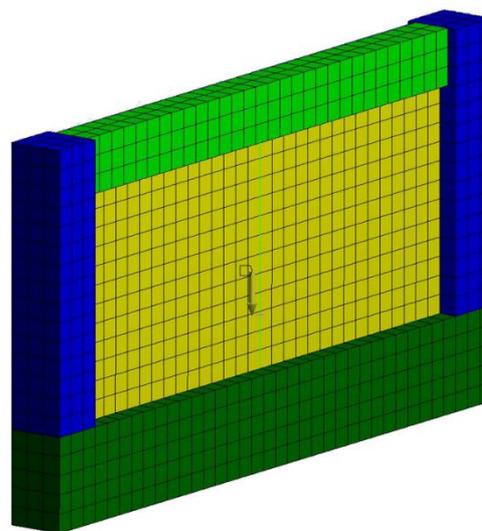
基礎下面ローラー支持



基礎梁下屋内外中央2点固定



柱屋内側ローラー支持



重力加速度

3.3.3 温度負荷条件

温度負荷条件は基本的に定常伝熱とし、部材内の温度分布が一定になるように設定した。屋外面を 20 度から 50 度まで上昇させる負荷条件とした。屋内側は 20℃一定を保つように温度負荷を与えた。熱伝達係数は屋外側は $2.5 \times 10^{-5} \text{W}/\text{mm}^2 \cdot \text{C}$ とし、屋内面は $9.09 \times 10^{-6} \text{W}/\text{mm}^2 \cdot \text{C}$ とした。

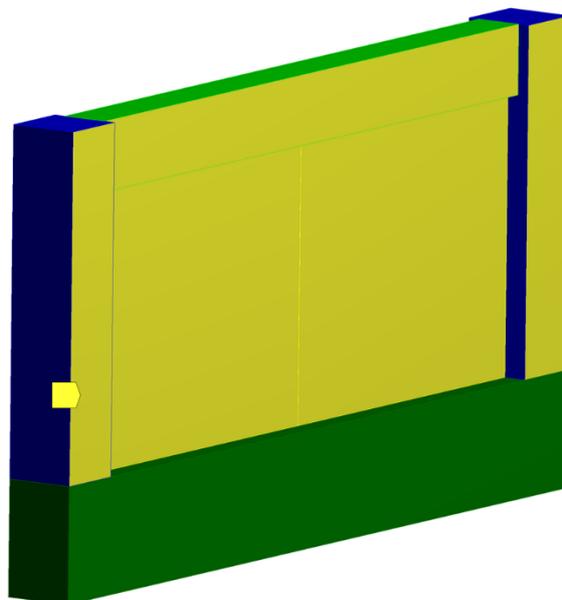
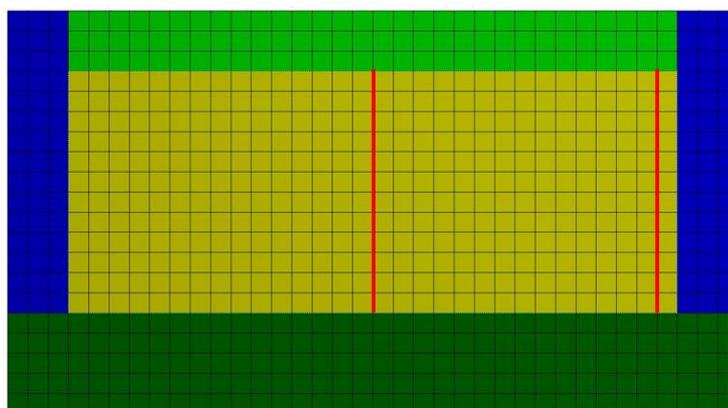


図4 温度と熱伝達係数の負荷面（屋外側）

3.4 解析結果および考察

3.3.1 拘束の影響に関して

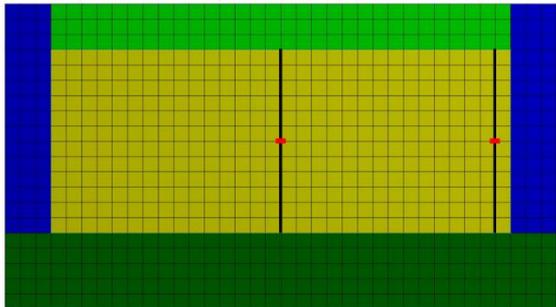


図：解析モデル（赤線部はひび割れ）

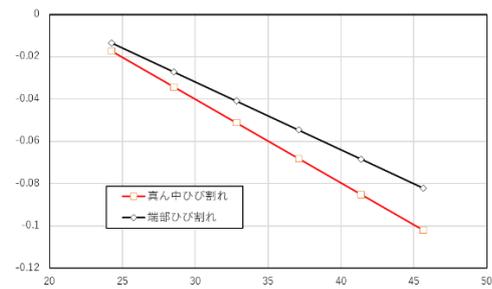
耐震壁の1つのモデルに拘束度の低い中央部（柱からの距離：1200mm）と拘束度の高い端部（柱からの距離：200mm）の場所に貫通ひび割れを1本ずつ作成し、それぞれのひび

割れ開閉量の結果を図に示す。

拘束度の低い中央のひび割れが拘束度の高い端部のひび割れよりもひび割れの開閉量が大きいという結果になった。中央のひび割れは柱からの距離が遠いため、ひび割れが横方向に動きやすいためひび割れ開閉量が端部より大きくなったと考えられる。反対に端部のひび割れは柱からの拘束が高く、ひび割れ開閉が柱によって抑えられひび割れ開閉量が中央のひび割れより小さくなったと考えられる。

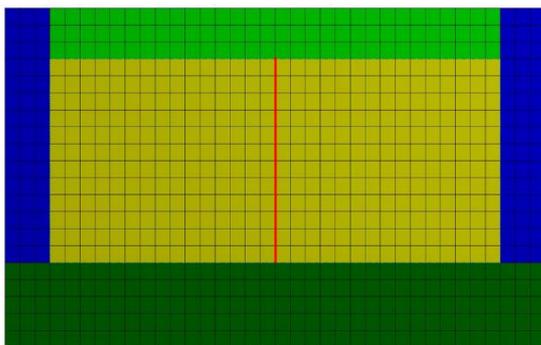


結果抽出点

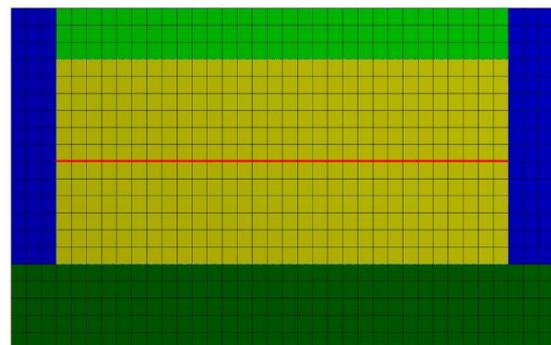


解析結果

3.3.2 ひび割れ発生方向の影響に関して



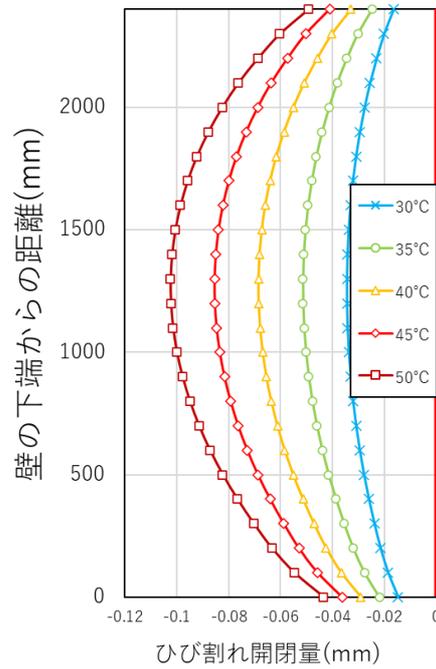
縦方向に発生した解析モデル
(赤線部はひび割れ)



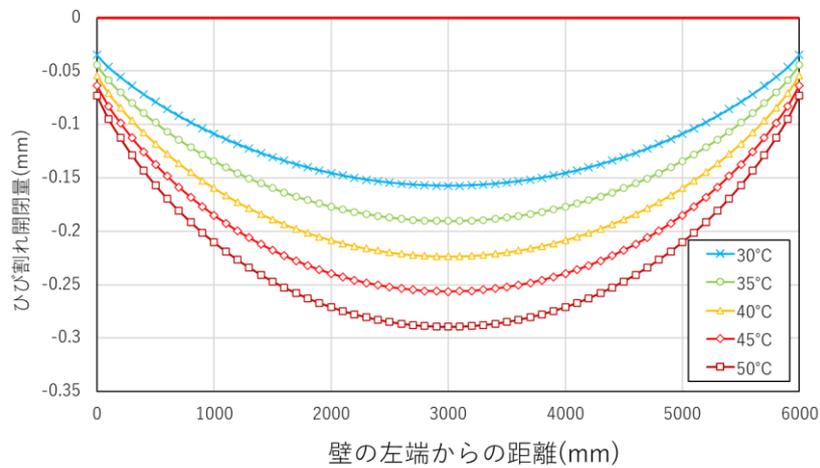
横方向に発生した解析モデル
(赤線部はひび割れ)

横方向に貫通した模擬ひび割れが発生したモデルと縦方向に貫通の模擬ひび割れが発生したモデル二つを用いて解析を行った。

屋外側の面を 20°C から 40°C に温めた時のひび割れ開閉量の推移を下図に示す。どちらのひび割れも外壁の温度分布が大きくなると、ひび割れの開閉量が大きくなる。また、ひび割れ開閉量はひび割れ中心に向かうにつれて大きくなる。

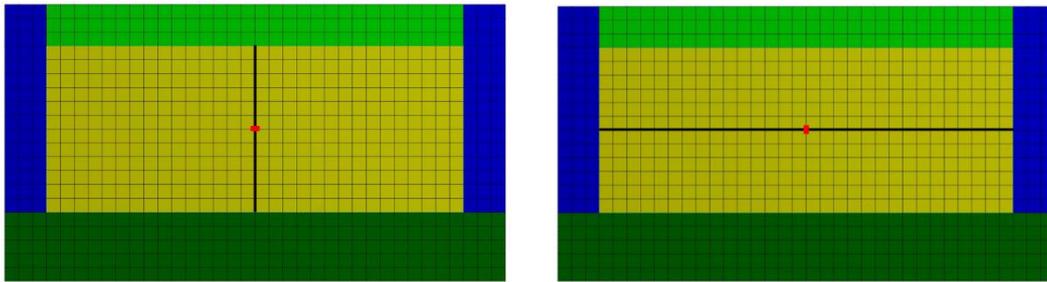


縦方向ひび割れの解析結果



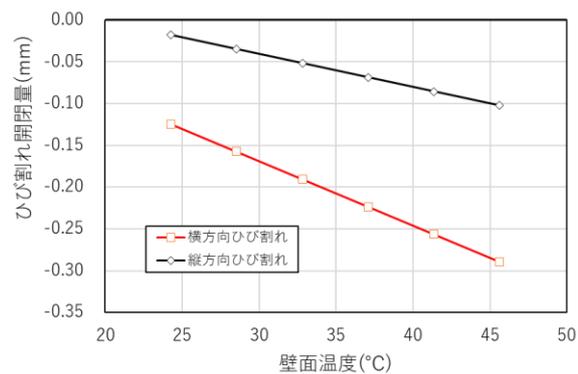
横方向ひび割れの解析結果

次に、縦方向と横方向に発生したひび割れ中央部の結果のみを取り出して比較を行う。下の図に示すように、縦方向に発生したひび割れよりも横方向に発生したひび割れの方が開閉量が約3倍大きいという結果になった。ひび割れの長さの影響も考えられるが、主な要因は上からの静荷重および温度荷重が影響している可能性が高い。



結果抽出点（縦方向）

結果抽出点（横方向）



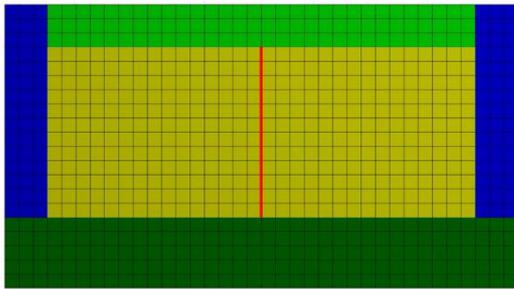
壁面温度とひび割れ開閉量の解析結果

3.3.3 壁の厚みの影響に関して

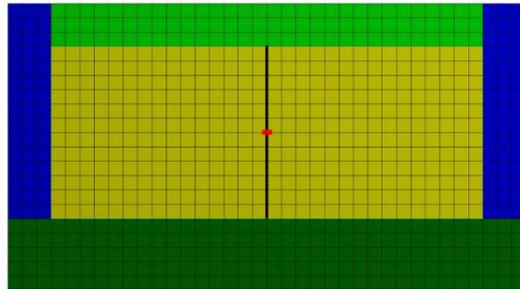
壁の厚みを 100mm から 50mm ごとに増やしていき 300mm まで変えたモデル 5 つを用意した。左下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 40°C に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 5°C ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

左の結果に関して、温度分布が同じ時壁の厚みが大きくなると開閉量も大きくなる。拘束部材に近いひび割れの開閉量は小さくなることもわかる。

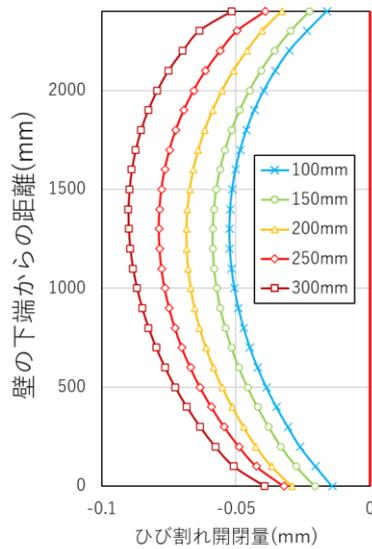
右の解析結果に関して、屋外側の温度を上昇させ、温度分布を大きくすると壁の厚みに関係なく開閉量が大きくなる。また、壁の厚みを大きくすると、開閉量が大きくなることもわかる。



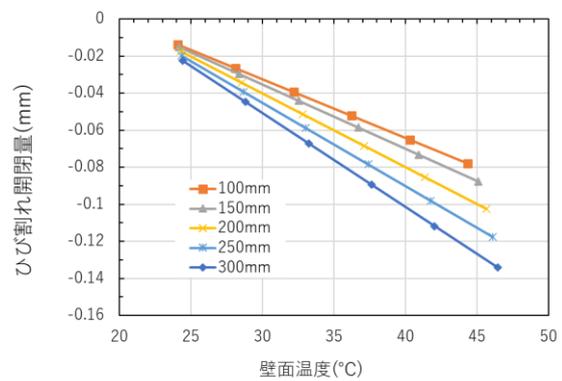
結果表示場所



結果表示場所



厚みとひび割れ開閉量

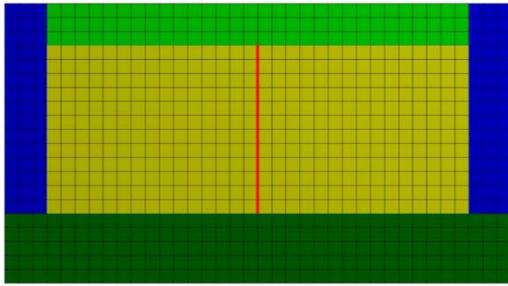


壁面温度とひび割れ開閉量

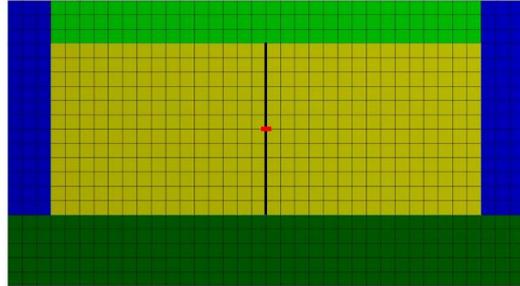
3.3.4 壁の長さの影響に関して

解析結果は屋外側の面を 20°C から 40°C に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 5°C ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

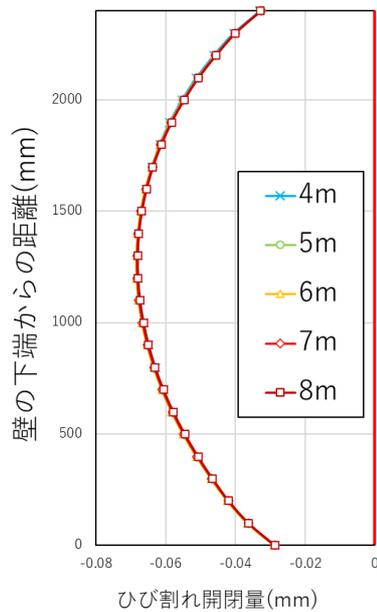
温度分布によってひび割れ開閉量は大きくなり、温度分布によりひび割れ開閉量は変化する。一方、壁の長さに関わらず、ひび割れ開閉量はほぼほぼ変わらないということがわかる。



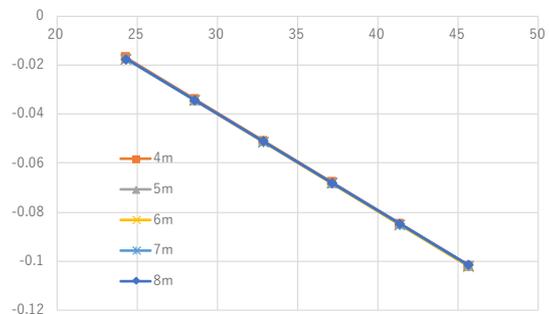
結果表示場所



結果表示場所



壁の長さといび割れ開閉量

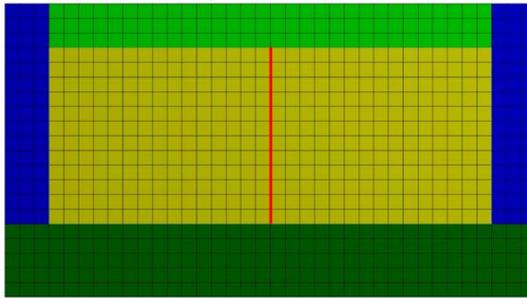


壁面温度といび割れ開閉量

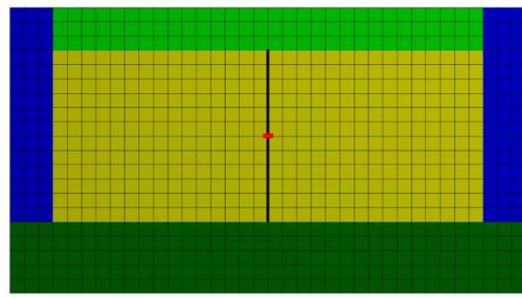
3.3.5 柱の太さの影響に関して

柱の太さを $400 \times 400 \text{ mm}^2$ から 100 mm ごとに増やしていき $800 \times 800 \text{ mm}^2$ まで変えたモデル 5 つを用意した。このときに柱のモデルが基礎梁からはみ出さないように、基礎梁の幅も変化させた。左下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 40°C に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 5°C ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

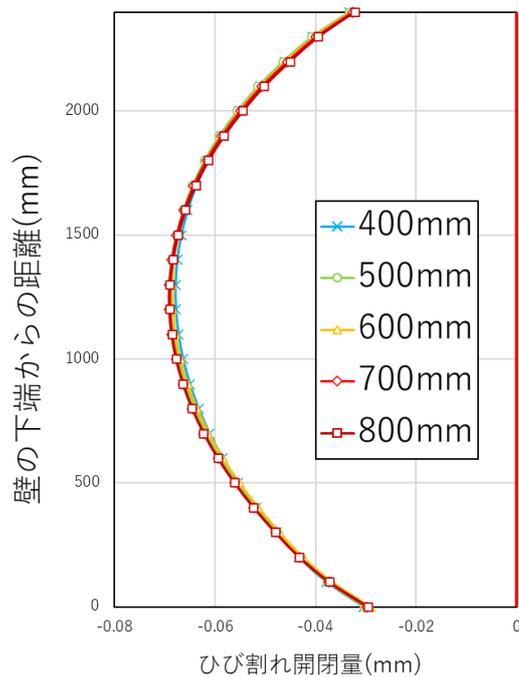
温度分布によってひび割れ開閉量は大きくなり、温度分布によりひび割れ開閉量は変化する。一方、柱の太さに関わらず、ひび割れ開閉量はあまり変わらないということがわかる。



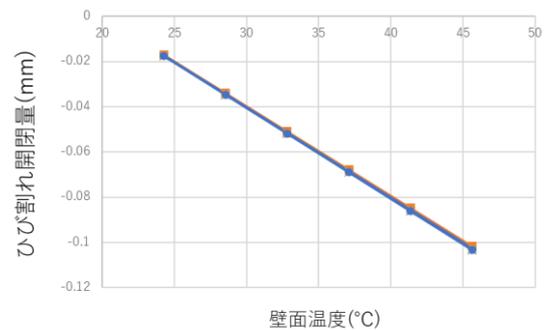
結果表示場所



結果表示場所



柱の太さとひび割れ開閉量

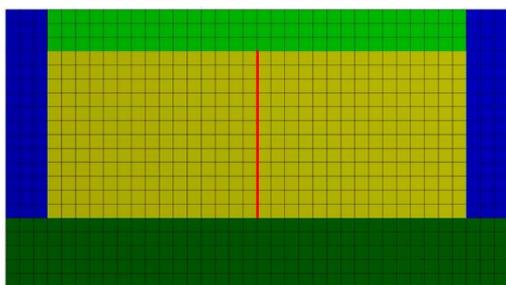


壁面温度とひび割れ開閉量

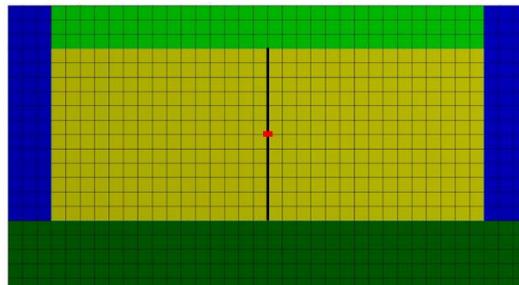
3.3.6 梁の幅の影響に関して

梁の幅を 200mm から 100mm ごとに増やしていき 600mm まで変えたモデル 5 つを用意した。左下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 40°C に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を 20°C から 5°C ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

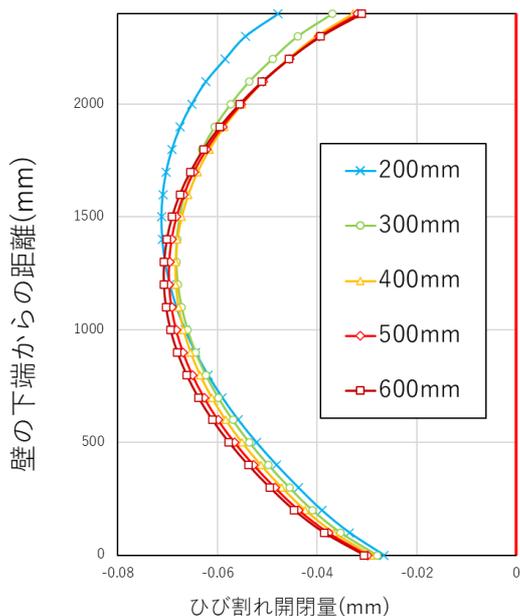
温度分布によってひび割れ開閉量は大きくなり、温度分布によりひび割れ開閉量は変化する。梁の太さに関わらず、ひび割れ開閉量はあまり変わらないということがわかる。ひび割れ上部は梁からの拘束度が大きいため、梁の幅が大きくなるとひび割れ上部の開閉量は小さくなる。



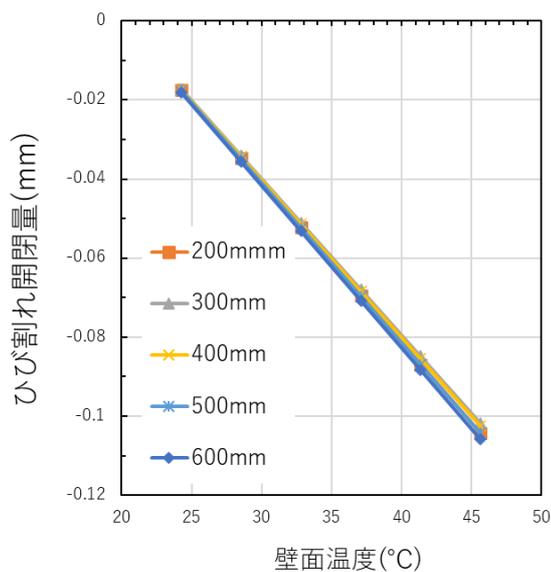
結果表示場所



結果表示場所



梁の幅とひび割れ開閉量



壁面温度とひび割れ開閉量

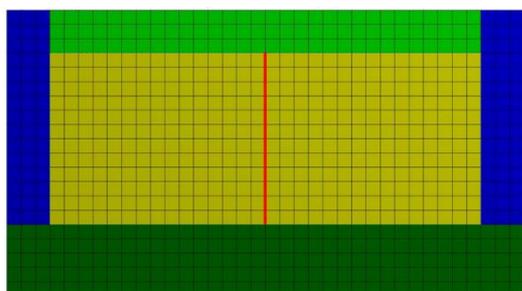
3.3.7 ひび割れ幅の影響に関して

ひび割れ幅を 0.01mm から 1mm まで変えたモデル 9 つを用意した。左下の解析結果は屋外側の面を 20℃から 40℃に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を 20℃から 5℃ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

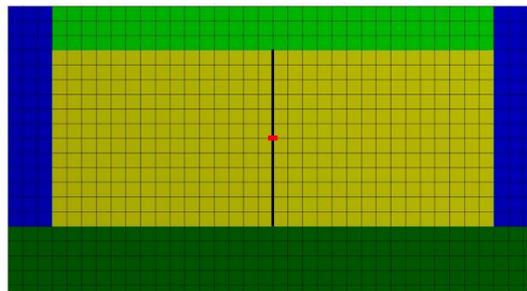
図の屋外と屋内の温度差を 20℃にさせた解析結果では、ひび割れ幅が 0.01mm から 0.04mm まではひび割れ開閉量が大きくなっているが、0.04mm から 1mm までのひび割れ開閉量はほとんど変わらず、グラフの線がほとんど重なっている。

次に壁面温度とひび割れ開閉量の関係をグラフ化した図を見るとひび割れ幅 0.01mm のひび割れ開閉量はその他ひび割れ開閉量より挙動が小さいことがわかる。ひび割れ幅 0.02mm では屋外側の壁面温度が約 25℃までは 0.01mm の開閉量を除く開閉量と同じような挙動をしていることがわかるが、25℃以降になるとひび割れ開閉量が 0.01mm の開閉量

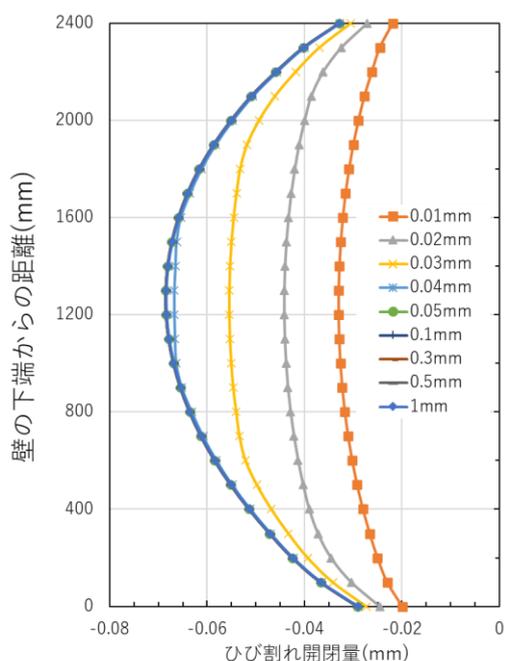
を除く開閉量より小さくなる。同じようなことがひび割れ幅 **0.05mm** まで起きている。屋内面と屋外面の温度差が大きくなると、ひび割れ幅が **0.05mm** 以降のひび割れに関してもひび割れ開閉量の差が開く可能性もあるが、本解析では取り扱わないこととする。



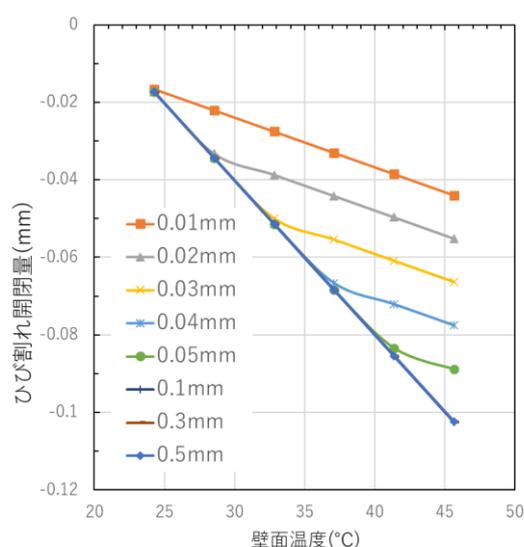
結果表示場所



結果表示場所



ひび割れ幅とひび割れ開閉量



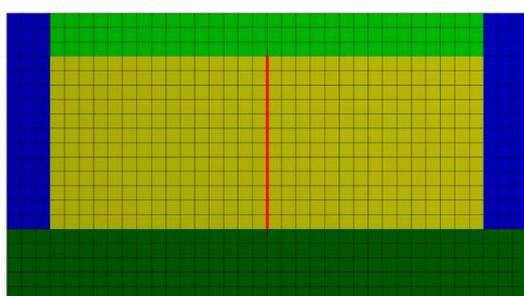
壁面温度とひび割れ開閉量

3.3.8 ひび割れ深さの影響に関して

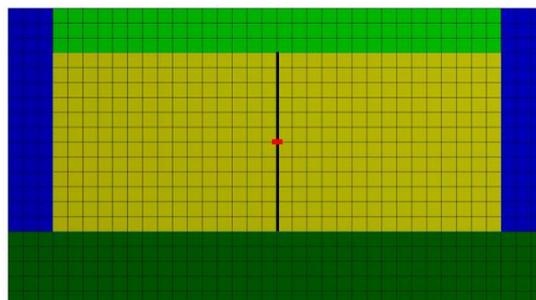
ひび割れ深さを **20mm** から **180mm** まで変えたモデル **8** つと加えてひび割れが屋外から屋内に貫通したモデルを合わせた **9** つを用意した。左下の解析結果は屋外側の面を **20°C** から **40°C** に温めた時のひび割れ部の開閉量推移を示し、右下の解析結果は屋外側の面を **20°C** から **5°C** ずつ上昇させた時のひび割れ中央部の温度と開閉量の関係を示す。

ひび割れ深さが **25mm** まではひび割れ挙動が開く挙動となり、ひび割れ深さが **27mm** 以降と貫通ひび割れは閉じる挙動となった。ひび割れ深さが **27mm** より大きくなるにつれてひび割れ開閉量は大きくなる。他の解析同様に温度分布が大きくなるにつれてひび割れ開

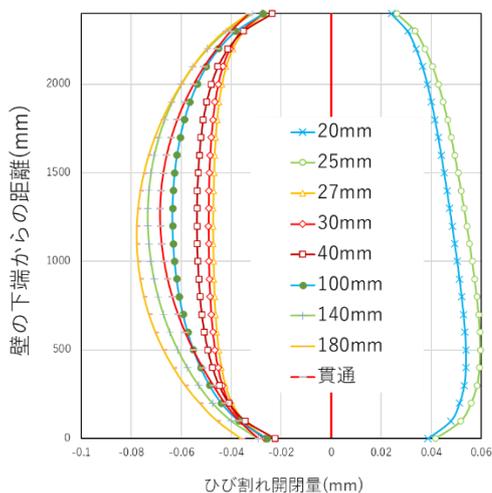
閉量が大きくなることもわかった。貫通ひび割れのひび割れ開閉量は 100mm より大きいのが 140mm より小さくなっている。ひび割れ深さ 180mm が一番大きいひび割れ開閉量となった。しかし、ひび割れ深さが壁の厚みの半分まで行くことは考えにくく、凍結融解や ASR 反応などの部材を貫通しない非貫通ひび割れと呼ばれるひび割れの深さはコンクリートの表面でのみ起こるのでひび割れ深さは深くないと考えるのが妥当である。また、ひび割れ深さが 30mm のときの外壁屋内面の応力状態を図に示すが、中央の部分のみ応力が高いことがわかる。ひび割れ深さ 30mm では、屋外側のひび割れが閉じる挙動を示すため屋内側の面はその挙動に影響され引っ張られる。コンクリートは引張強度が低いため、非貫通ひび割れ深さが約 30mm に達すると屋内側にひび割れが発生し、そのひび割れと屋外側のひび割れがつながり貫通ひび割れになると推測した。



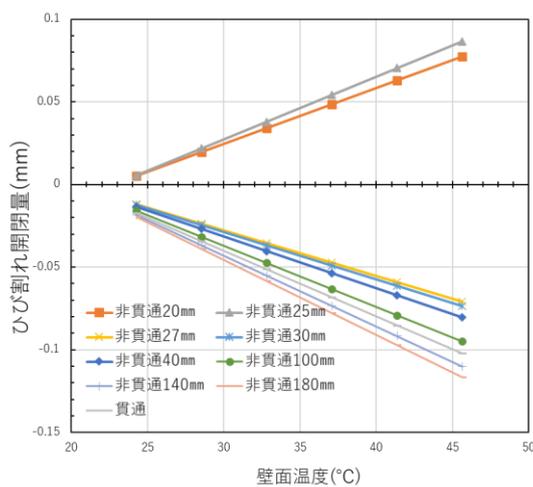
結果表示場所



結果表示場所



ひび割れ深さとひび割れ開閉量



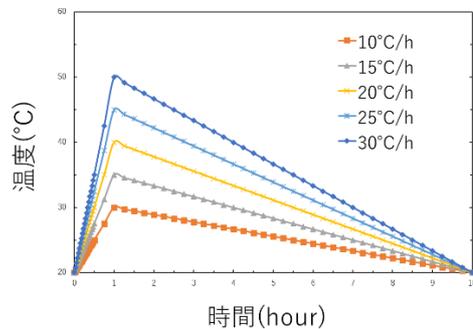
壁面温度とひび割れ開閉量

屋内側の壁の応力状態

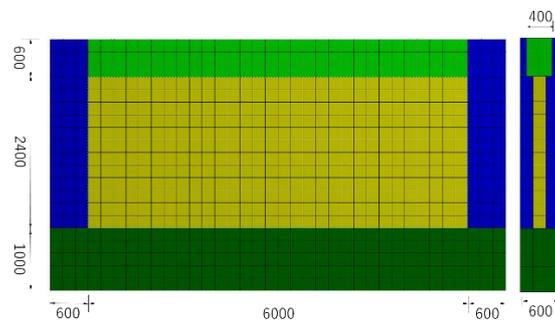
3.3.9 昇温速度の影響に関して

本解析では部材寸法がそれぞれ柱 $400 \times 400 \text{ mm}^2$ 、梁 $400 \times 600 \text{ mm}^2$ 、基礎梁 $600 \times 1000 \text{ mm}^2$ 、壁の厚み 200 mm 、壁の長さ 6 m 、壁の高さ 2400 mm である解析モデルを使用する。耐震壁の中央には縦方向に屋内外に貫通したひび割れ幅 1 mm のひび割れを用意する。本解析は非定常伝熱解析のため、定常伝熱プログラムではなく、過渡伝熱プログラムを使用する。昇温速度の影響を見るため外壁の初期温度は 20°C と一定として 1 時間で昇温させる温度を 30°C から 5°C おきに 50°C までの5つの解析パターンを設けた。その後 9 時間で外壁を 20°C まで温度を下げる温度負荷条件とし、その温度負荷過程グラフを図のに示す。

材料物性値は今まで通り表と同じ値を使用する。



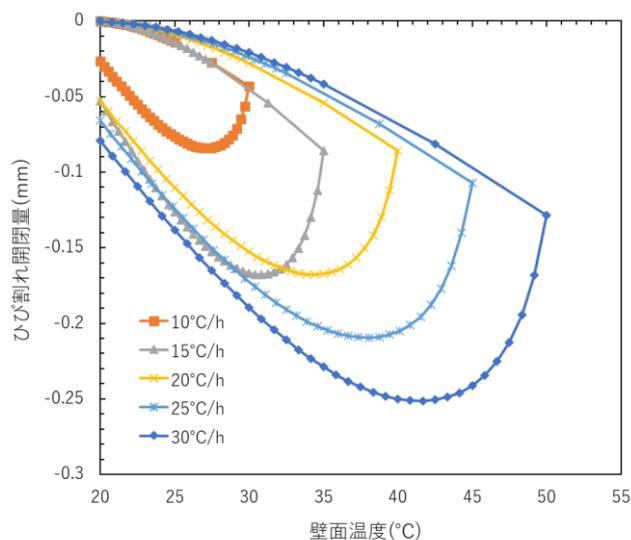
屋外側の温度負荷条件



解析モデル (赤線部はひび割れ)

解析結果は壁面温度とひび割れ開閉量を2軸としたグラフで表す。

昇温速度に関わらず、ひび割れ挙動は閉じる方向に推移するが、昇温速度が低いとひび割れ開閉量が小さく、昇温速度が大きいとひび割れ開閉量が大きくなることがわかった。また、降温過程では、閉じる挙動から開く挙動に直ちにはならず、一旦閉じる方向に推移した後、開く方向に徐々に推移している。外壁屋外面の降温過程の初期段階では外壁内部に温度分布が残っておりその温度部の影響で開く挙動が遅れて発現していると考えられる。降温速度が大きいとひび割れ開閉が大きくなり、降温速度が小さいとひび割れ開閉量は小さくなる。昇温速度の差が大きい $10^\circ\text{C}/\text{h}$ と $30^\circ\text{C}/\text{h}$ ではひび割れ開閉挙動が約3倍もの差が開くこととなった。降温過程の最終段階では初期のひび割れ幅には戻らず、閉じたままとなっている。これも外壁屋外面の降温過程の初期段階と同様に屋外面が 20°C になった時点では外壁内部の温度が一定とはなっておらず、温度分布が存在しているためひび割れ幅が閉じたまま解析が終わっている。この解析プログラムの後も外壁の屋外面を 20°C に数時間保つとひび割れ幅が初期値に戻ると推測される。



昇温速度の影響による解析結果

3.4 まとめ

本章では、ひび割れ開閉挙動において、影響要因と考えられる条件に関してパターン解析を行った。本解析で得られたひび割れ開閉量に及ぼす各要因の影響を下記に示す。

1. 柱梁からの拘束の影響に関して中央部のひび割れと柱に近い端部のひび割れではひび割れ開閉量に差が生じ、拘束の大きい方はひび割れ開閉量が小さくなった。
2. ひび割れの発生方向に関して、縦方向と横方向に発生したひび割れの開閉量を比べると、静荷重の影響が大きい横方向に発生したひび割れの開閉量が大きいという結果となった。
3. 壁厚の影響に関しては、壁の厚みによりひび割れ開閉挙動が異なり、壁の厚みの大きい方がひび割れの開閉量が大きいことがわかった。
4. 壁の長さに関してはあまり影響がないことがわかった。
5. 壁を拘束する部材の寸法の影響に関しては、柱の太さや基礎梁のサイズの影響はほとんどなかった。梁の寸法サイズに関しては大きい方がひび割れ上部の開閉量が小さくなることがわかった。
6. ひび割れ幅に関しては外壁の部材の温度分布が大きくなるとひび割れ幅の影響が大きくなること、**0.04mm**以上のひび割れ幅を有するひび割れの開閉挙動はほとんど変化しないことがわかった。
7. ひび割れ深さに関して、本解析モデルでは、約 **25mm** の非貫通ひび割れまでは貫通ひび割れと反対の挙動を示すが、**30mm**以降のひび割れになると、貫通ひび割れと同じ方向に

挙動することがわかった。

8. 外壁の昇温速度に関しては外壁の1時間を昇温し、その後9時間で初期温度にするという温度負荷条件を5パターン解析を行った。昇温速度の大きい方がひび割れ開閉量が大きくなった。その後の降温の初期段階は開く方向に挙動することなく、外壁内に存在する温度分布の影響で数時間は閉じる方向に挙動した。その後は徐々に開く方向に挙動した。

今回のひび割れ開閉挙動の解析に関して、壁の長さや柱の太さ、梁の幅を変えてもひび割れ開閉量はほとんど影響しないという結論を示した。本解析のひび割れはひび割れが壁の中央に発生しているため、拘束度があまり変化しなかったと考えられるため、今後は壁の中央では位置にひび割れを発生させた場合の条件を考える必要がある。

第4章

実構造物に発生したひび割れ開閉挙動の計測 および簡易モデルでの解析

4.1 はじめに

実構造物のひび割れはコンクリートの材料的要因や、温湿度や施工などの外的要因などにより発生する。その中でも、屋内と屋外との環境を隔てる外壁はひび割れが発生するとひび割れ部からの漏水などにより、屋内に水が侵入による屋内環境の悪化や、水による鉄筋の腐食などで構造的な耐久性が損なわれてしまう危険性がある。ひび割れの発生時期や場所などを予測する研究もされているが、実構造物のひび割れは様々な要因が重複しており、現状では、正確に実構造物のひび割れの発生を予測するに至っていない。そこでひび割れが発生した後の補修が重要となるため、外壁にひび割れが発生すると適切に補修する必要がある。ひび割れを適切に補修するとなると、ひび割れ補修部の再劣化がないようにするためにひび割れ挙動を測定し、ひび割れの挙動を把握しないとイケない。しかし、実際のひび割れ補修の施工現場では施工者の経験により、ひび割れ挙動を判断している。本章では、実構造物に発生したひび割れを測定することでひび割れ挙動に影響する要因や挙動の大小、挙動の方向などを明らかにする。

4.2 実構造物に発生したひび割れ挙動の計測について

本章では、沖縄にある構造物に発生した貫通と非貫通のひび割れと広島大学の東エネルギーセンターの外壁に発生したひび割れと広島大学の A2 棟屋上に張り出した北側の壁に関してひび割れ挙動の計測および解析を行った。

4.3 沖縄の構造物に発生した貫通と非貫通のひび割れに関して

沖縄という地域は日本で唯一、亜熱帯気候に属しており高温多湿である。もう一つの特徴として台風が多いことが挙げられる。そのため沖縄の建物は台風からの被害を最小限にするため屋根を平にしている。コンクリートは他の材料に比べて安価に手に入るので沖縄の住宅にも多く用いられている。しかし、沖縄は日本列島から離れた南下した場所に位置し、日本列島から材料を運ぶことは不効率なため、沖縄産の材料を使用することが多い。また、海に囲まれているため、海砂を使用する機会が多い。沖縄で打設されたコンクリートは海砂を多く含むため、ASR 反応が起きやすいことで知られている。ASR により発生したコンク

リートのひび割れは表面でのみ発生し、亀甲状の形として発現することが知られている。表面でのみ発生するという事は部材を貫通しないひび割れとなるため、貫通ひび割れとは対照的な非貫通ひび割れとなる。非貫通ひび割れと貫通ひび割れの違いのイメージを図3-1に示す。亜熱帯気候は日本では特有の気候で沖縄しかそのお気候はない。亜熱帯気候のもとに建設された構造物の計測データは貴重なものである。構造物のひび割れで非貫通ひび割れを研究して事例は少なく、橋脚¹⁾などに発生したひび割れを測定しており、建築物においては非常に少ない。そのため、沖縄の構造物に発生したひび割れの開閉挙動を計測することでひび割れ補修の研究において有意義なものとなる。

そこで、本節では沖縄の構造物に発生した貫通と非貫通の両方のひび割れ挙動のデータを取得し、貫通の有無による挙動の違いを確認するとともに、それぞれのひび割れ補修工法に関して言及する。また、簡易的なモデルにより解析したデータとの比較を行う。

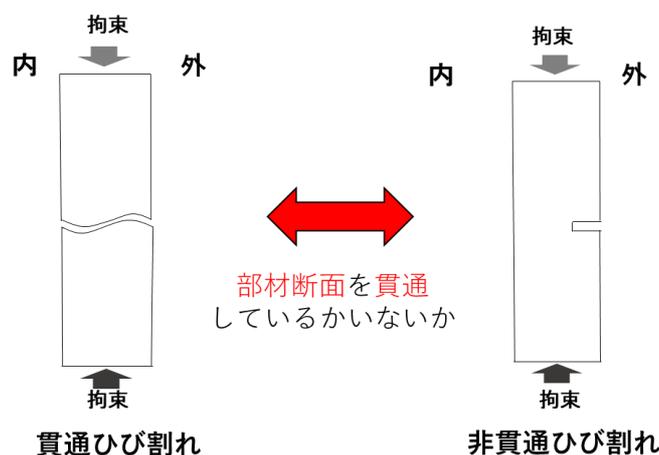


図 3-1 貫通と非貫通の違いの概要

4.3.1 計測の概要

沖縄の中頭郡にある近接する構造物において、乾燥収縮により発生した貫通ひび割れと ASR が原因と推測される亀甲状の非貫通ひび割れに関して計測モニタリングを行った。

ひび割れが発生していた構造物の平面位置は図3-2に示すように、どちらのひび割れも西側の外壁に生じていた。



図 3-2 測定対象物の平面位置

貫通ひび割れの計測の概要を表 3-1 に示す。

計測期間は 2019 年 9 月 25 日～2020 年 3 月 3 日の約半年の期間の測定を行い、建物の構造は RC 造 1 階建てで、計測対象部材は恒温室の西側にあたる外壁である。この外壁は写真 3-に示すように、柱梁に囲まれているため、壁の面内方向に拘束されることが予測される。測定箇所は外壁屋外側の貫通ひび割れとそのひび割れに対応した、屋内側のひび割れを測定する。亀裂変位計によりひび割れ幅の開閉挙動を測定し、熱電対によりひび割れ近傍の壁面温度を測定した。

表 3-1 貫通ひび割れ計測の概要

貫通ひび割れ（乾燥収縮）	
構造	RC造 1 階建て
対象部材	恒温室に接する耐震壁
測定期間	2019年9月～2020年3月
測定箇所	西側(屋外), 東側(屋内)
測定項目	ひび割れ開閉挙動幅(亀裂変位計), 壁面温度(熱電対)



屋内側の恒温室の測定場所

屋外側の測定場所

亀裂変位計と熱電対

写真 3-1 貫通ひび割れの測定の様子

表 3-2 非貫通ひび割れ計測の概要

非貫通ひび割れ (ASR)	
構造	RC造5階建て
対象部材	階段室に接する西側外壁, 通し柱
測定期間	2019年9月～2020年3月
測定箇所	外壁の西側(屋外), 柱の北側と東側(屋外)
測定項目	ひび割れ開閉挙動幅(亀裂変位計), 壁面温度(熱電対)



壁1,壁2の測定場所

柱西側の測定場所

柱北側の測定場所

写真 3-2 非貫通ひび割れの測定の様子

非貫通ひび割れの構造物モニタリングの概要を表 3-2 に示す。

計測期間は貫通ひび割れと同じ 2019 年 9 月 25 日～2020 年 3 月 3 日で、建物の構造は RC 造 5 階建てとなっており、計測の対象部材は階段室に接する 2 階の西側外壁とその外壁に近接した通し柱である。外壁に発生したひび割れの屋内側はひび割れが視認できなかった。測定を行った箇所は外壁屋外側と柱の北側と東側である。測定の項目は貫通ひび割れ同様に、ひび割れ挙動を亀裂変位計で測定しひび割れ近傍の温度を熱電対で測定した。

4.3.2 計測の結果および考察

非貫通と貫通に関して、全期間の測定データを図 3-3a,3b に示す。非貫通ひび割れの測定データに関して壁 1 のひび割れ挙動のに関して不自然な挙動を示したため、壁 1 の挙動は除いている。

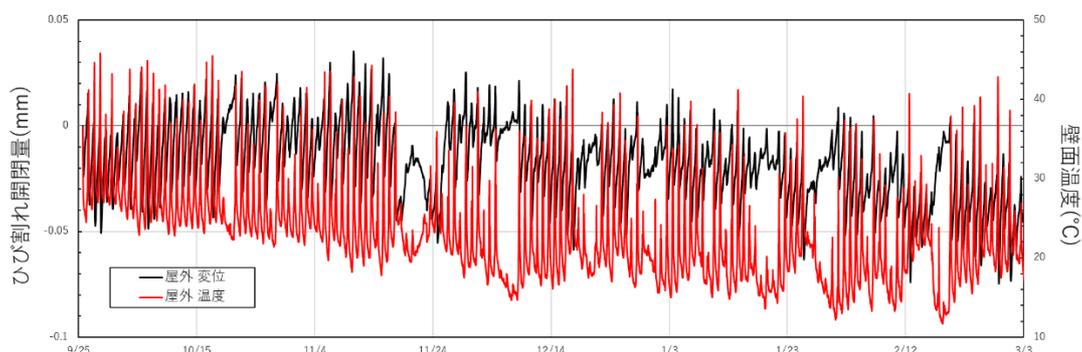


図 3-3a 貫通ひび割れ屋外側のひび割れ開閉量と温度の全期間の計測データ

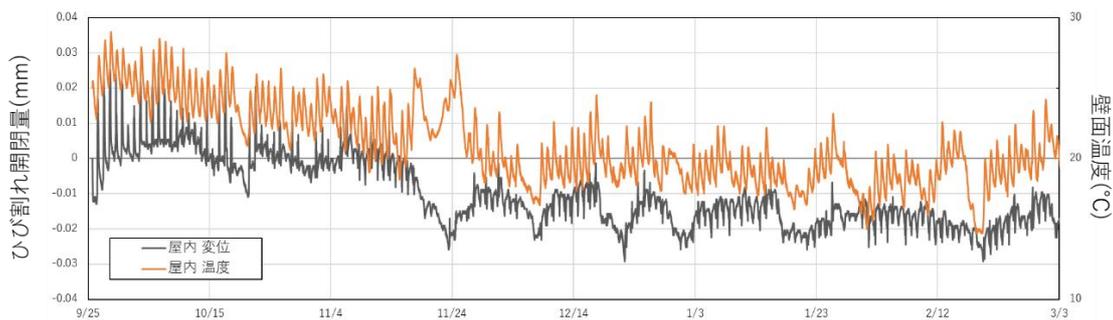


図 3-3b 貫通ひび割れ屋内側のひび割れ開閉量と温度の全期間の計測データ

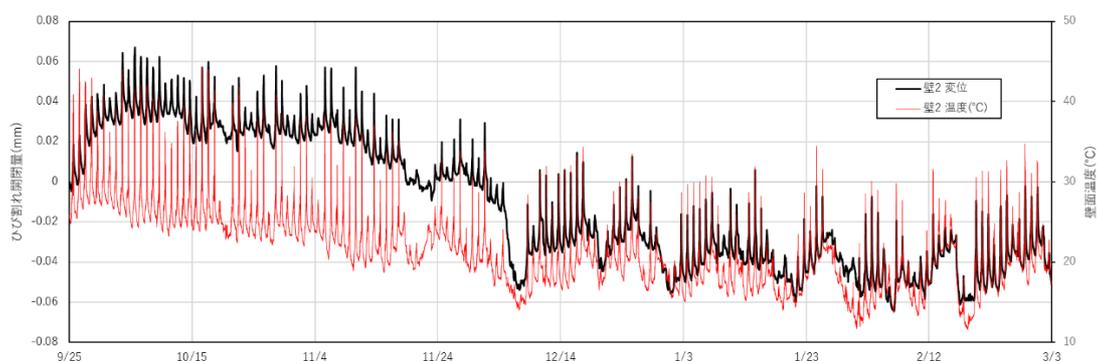


図 3-4 非貫通ひび割れのひび割れ開閉量と温度の全期間の計測データ

全測定期間の中から雨や日射の影響が少ない9月26日から10月3日の計測データを図3-5に示す。一週間のひび割れ開閉挙動の計測データよりひび割れ挙動の傾向を把握する。

貫通ひび割れは外壁の温度の上昇により、屋外側のひび割れ幅が閉じる方向に挙動して、屋内側は温度の上昇とともに開く挙動を示し、既往の研究と同様の“そり挙動”示すことがわかった。非貫通ひび割れでは、貫通ひび割れとは対照的に屋外側の壁面温度の上昇に伴い、ひび割れ幅が開く方向に挙動していることがわかった。貫通ひび割れの日開閉量は非貫通ひび割れの日開閉量より大きい。

図3-5の測定期間の中から一日だけ取り出した結果を図3-6に示す。また、その一日の壁面温度とひび割れ開閉量を図3-7に示す。壁面温度とひび割れ開閉量には相関があり、壁の温度分布が重要であることがわかる。

最後に、貫通ひび割れと非貫通ひび割れの開閉挙動機構を図3-8のように考えた。貫通ひび割れは外壁内の温度分布により、“そり挙動”するが、非貫通ひび割れの開閉挙動はひび割れ非貫通部が拘束部材となり、貫通ひび割れとは異なる挙動を示すと考えられる。

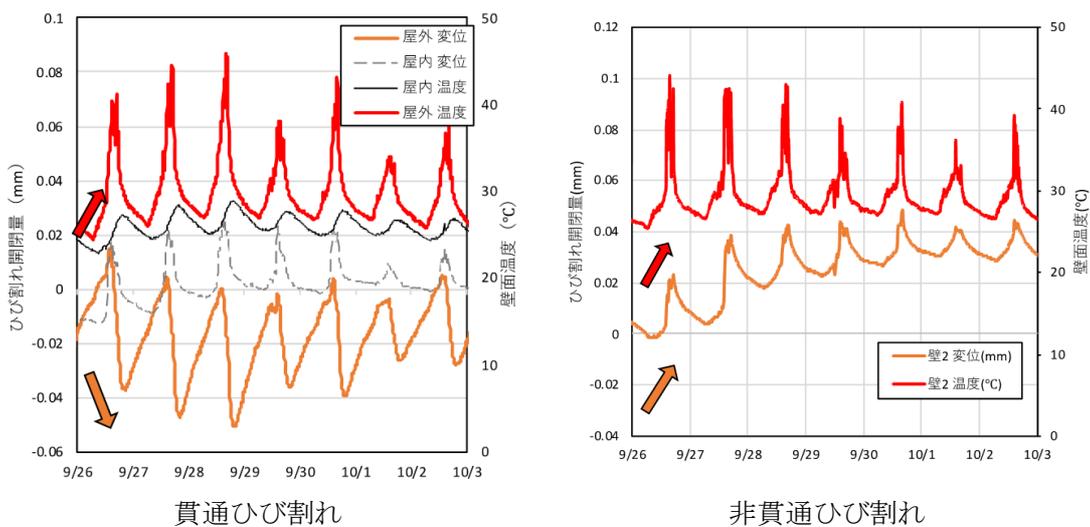


図 3-5 ひび割れ開閉量と温度の一週間の計測データ

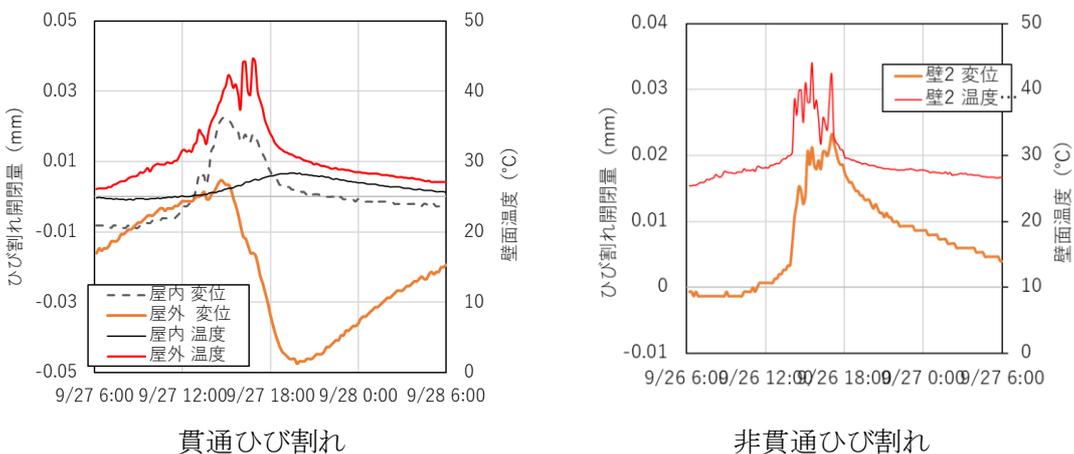


図 3-6 ひび割れ開閉量と温度のある 1 日の計測データ (9 月 26 日)

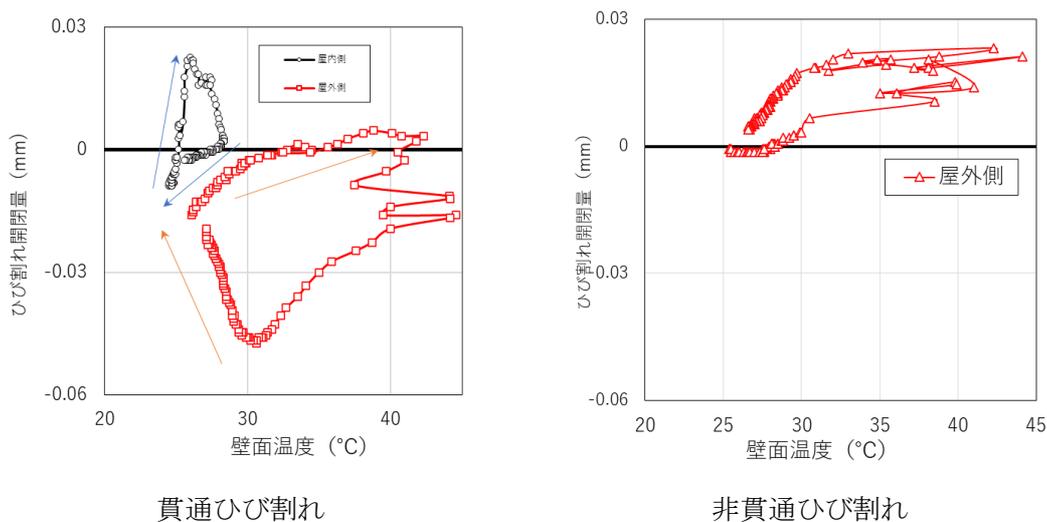


図 3-7 貫通ひび割れのひび割れ開閉量と壁面温度の関係

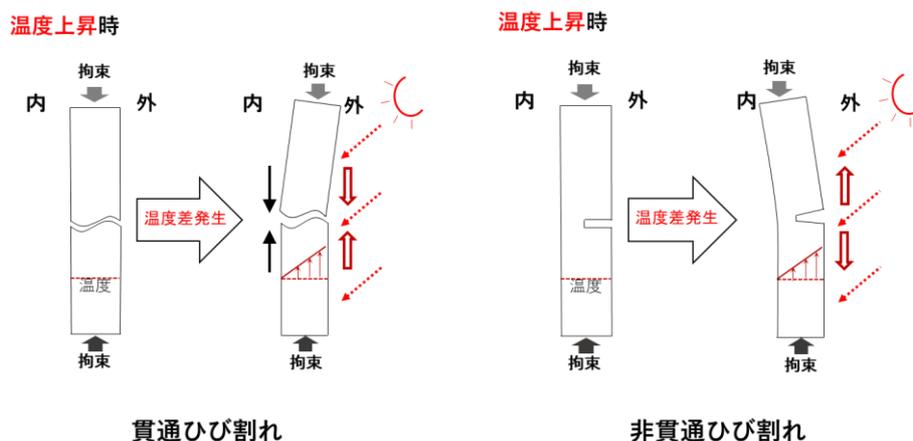


図 3-8 貫通の有無によるひび割れ開閉挙動機構

4.3.3 簡易モデルを用いたひび割れ挙動解析

図 3-8 に示すように貫通の有無によりひび割れ開閉挙動が異なることが実構造物の計測モニタリングよりわかったため、その挙動の違いを定性的にするために解析を行った。また、非貫通ひび割れのひび割れ深さが深くなると、貫通ひび割れとなり、挙動が逆転する。ひび割れ開閉挙動が逆転するひび割れ深さを見つけるためにひび割れ深さの異なる解析モデルを複数体用意した。

今回の解析では、柱と梁に囲まれた簡易モデルを使用する。壁の中央にひび割れ幅 1mm の貫通ひび割れのモデルとひび割れ幅 1mm の非貫通のひび割れが発生した壁の 2 つのパターンについて解析および考察を行う。

4.3.3.1 解析の概要について

まず図 3-9 に解析モデルの概要を示す。解析の部材寸法及びメッシュのサイズは図 3-10 に示す。解析に使用したコンクリートの物性値は表 3-3 に示す。温度負荷は屋外面は 50 度まで上昇させ、屋内面は 20℃一定となる温度履歴を組んだ。その温度履歴を図 3-11 に示す。次に、解析の静的負荷条件に関しては、重力加速度と柱屋内側面のローラー支持、基礎下面のローラー支持、基礎梁屋外側中央下の一点の固定を行った。静的負荷条件を図 3-12 に示す。重力加速度は解析プログラムに組み込まれていた 9.8606m/s^2 の一定の値とした。

非貫通ひび割れのひび割れ深さは 20mm,25mm,30mm の 3 体を準備した。

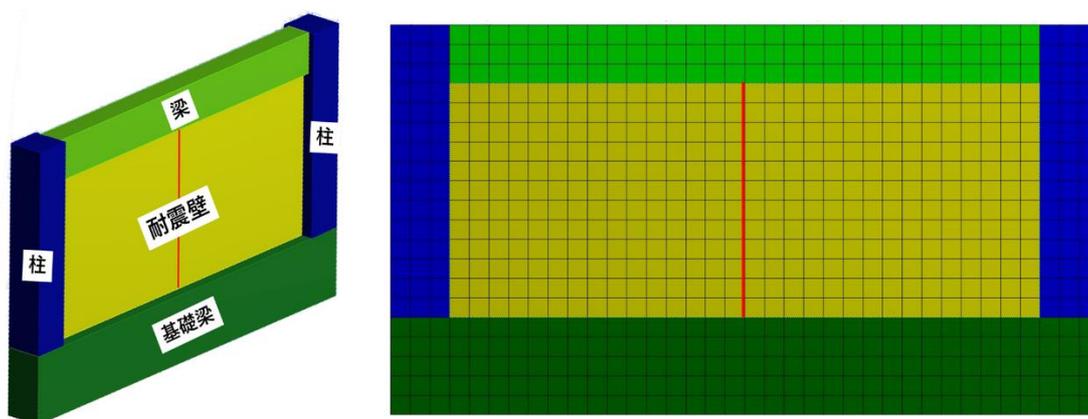


図 3-9 解析モデルの概要

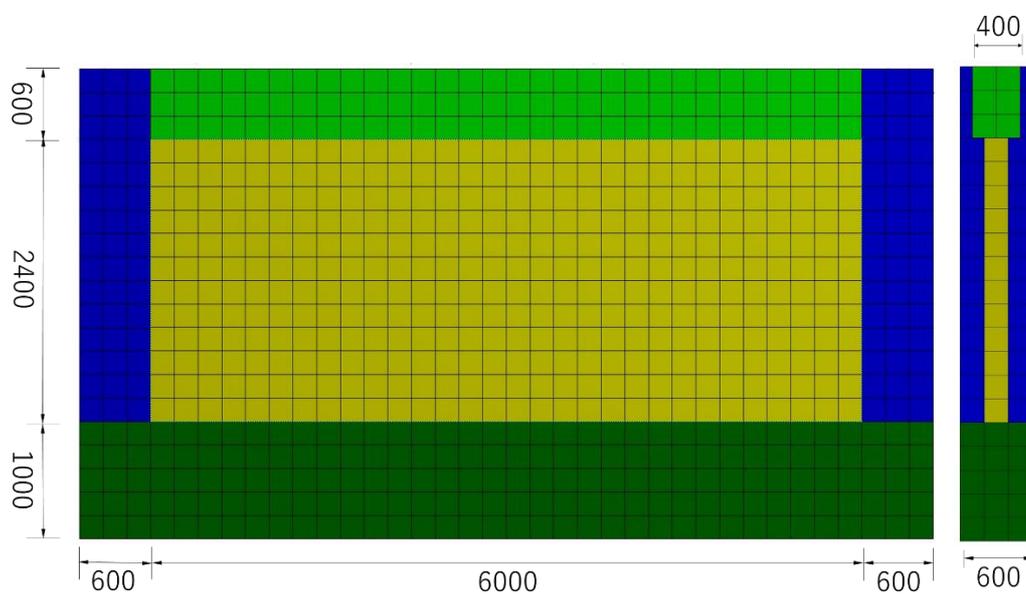


図 3-10 部材の寸法および解析メッシュ

表 3-3 解析用物性値

	耐震壁	梁	基礎梁	柱
熱伝達率(W/m ² ・°C)	1.6	1.6	1.6	1.6
比熱(kJ/kg・°C)	1.02	1.02	1.02	1.02
密度(kg/m ³)	2300	2300	2300	2300
ヤング係数(Gpa)	22	22	22	22
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.2

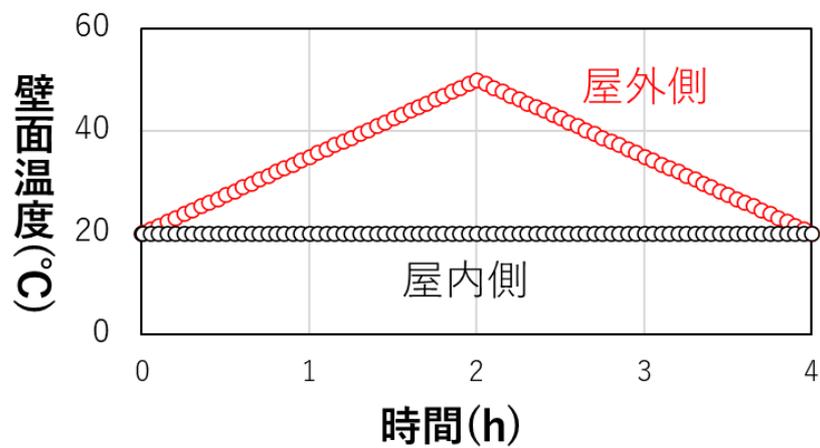


図 3-11 温度負荷条件

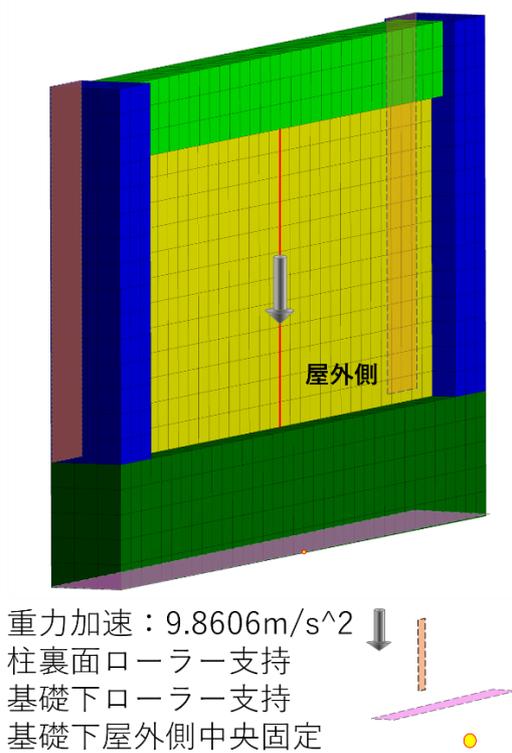


図 3-12 静的負荷条件

4.3.3.2 解析結果および考察

貫通ひび割れと非貫通ひび割れに関して、外壁最大温度 50 度における解析結果を 500 倍スケールで図 3-13 に示している。非貫通ひび割れ深さは 25mm のモデルの解析結果を表示している。図 3-13 に示すように、貫通ひび割れは外壁の上昇により、ひび割れ幅が閉じる方向に挙動している。非貫通ひび割れではひび割れが開くように挙動していることがわかる。

また、壁面温度とひび割れ開閉量の関係を図 3-15 に示す。この結果はひび割れの中央の挙動を取り出したもので、結果の抽出点は図 3-14 に示す。図 3-15 に示すように非貫通のひび割れ深さによって挙動が異なり、ひび割れ深さが小さいとひび割れ挙動が小さくなることがわかる。そして、ひび割れ深さが 25mm から 30mm になると、貫通ひび割れのような“そり挙動”を示すことがわかった。この解析結果は壁厚が 200mm で解析しているため、この解析モデルでは、ひび割れ深さが 25mm までは貫通ひび割れとは異なる挙動を示すことがわかった。

ひび割れ深さ率が挙動に影響を与えると推測し、ひび割れ深さ率（ひび割れ深さ/壁厚）のみを変え解析を行った。まずは壁厚 200mm でひび割れ深さ 20mm とひび割れ深さが同じである壁厚 300mm でひび割れ深さが 30mm の解析モデルに関して解析を行った。その解析結果を図 3-16 に示す。同じひび割れ深さ率でも、壁厚が異なると異なる挙動になることがわかった。壁厚 300mm でひび割れ深さが 10mm,20mm,30mm の解析を行った。その解析の壁面温度とひび割れ開閉量の関係を図 3-17 に示す。図 3-17 に示すように、ひび割れ深さが 10 mm のときでも貫通ひび割れと同じ挙動を示した。ひび割れ深さが同じでも壁厚が異なると挙動が異なることも今回の解析で判明した。

壁厚 200mm の貫通ひび割れとひび割れ深さが 30mm である非貫通ひび割れの解析結果を図 3-18 に示す。ひび割れ深さ 30mm では貫通ひび割れと同じ挙動をしていることが解析によりわかったが、結果の図より、壁上部の梁が内側に凹むように反ることで同じ挙動を示している可能性がある。図 3-13 のひび割れ深さが 25mm の結果の図では壁上部の梁が外側に反るように挙動している。したがって、ひび割れ挙動を計測しなくても、壁上部の梁が反る方向によりひび割れ挙動の方向を判別できる可能性がある。

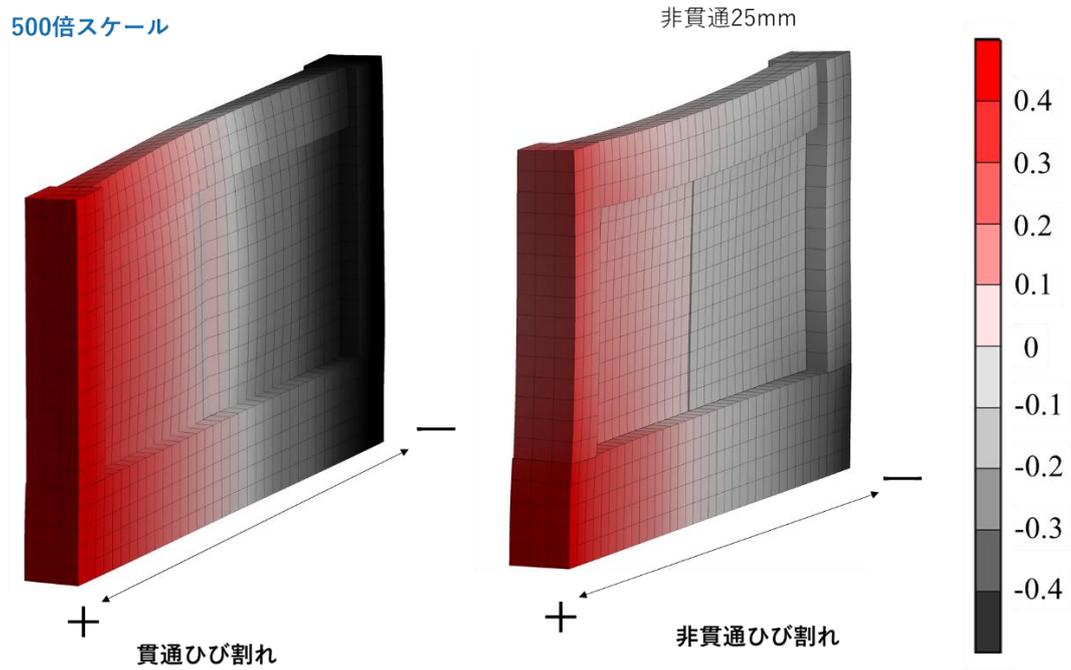


図 3-13 貫通と非貫通(深さ:20mm)の解析結果

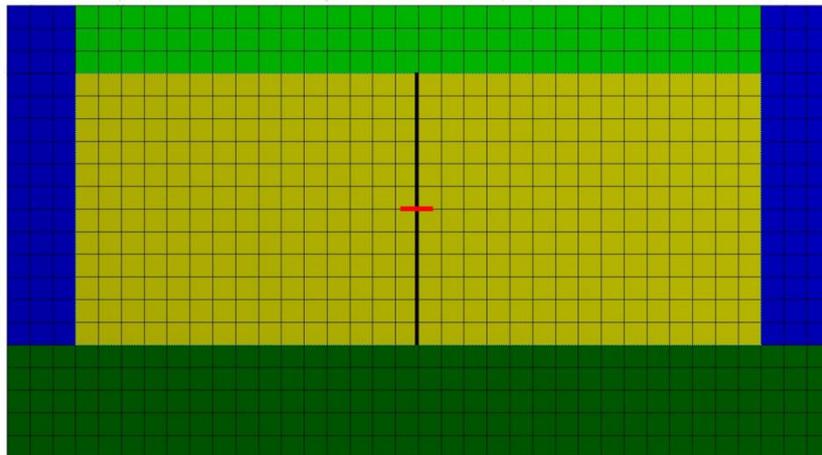


図 3-14 結果抽出場所

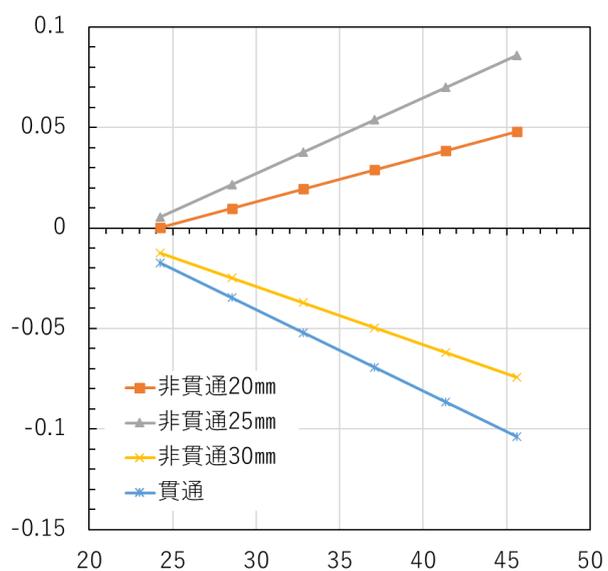


図 3-15 解析での壁面温度とひび割れ開閉量の関係

500 倍スケール

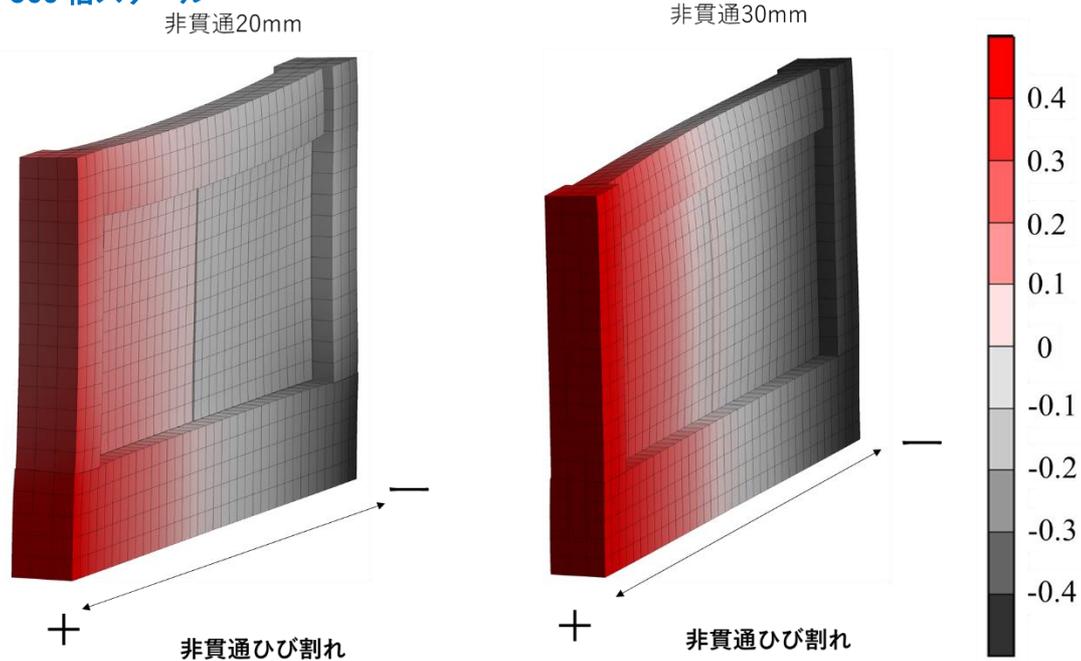


図 3-16 ひび割れ深さ率 10%での解析結果

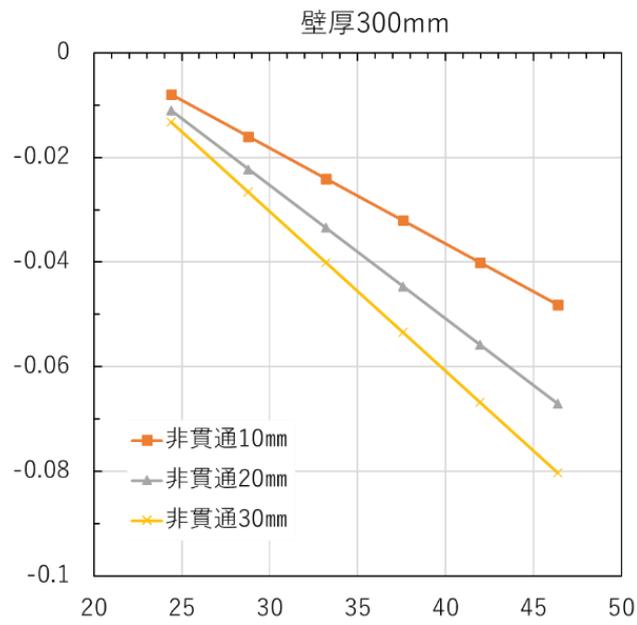


図 3-17 壁面温度とひび割れ開閉量の関係(壁厚 300m)

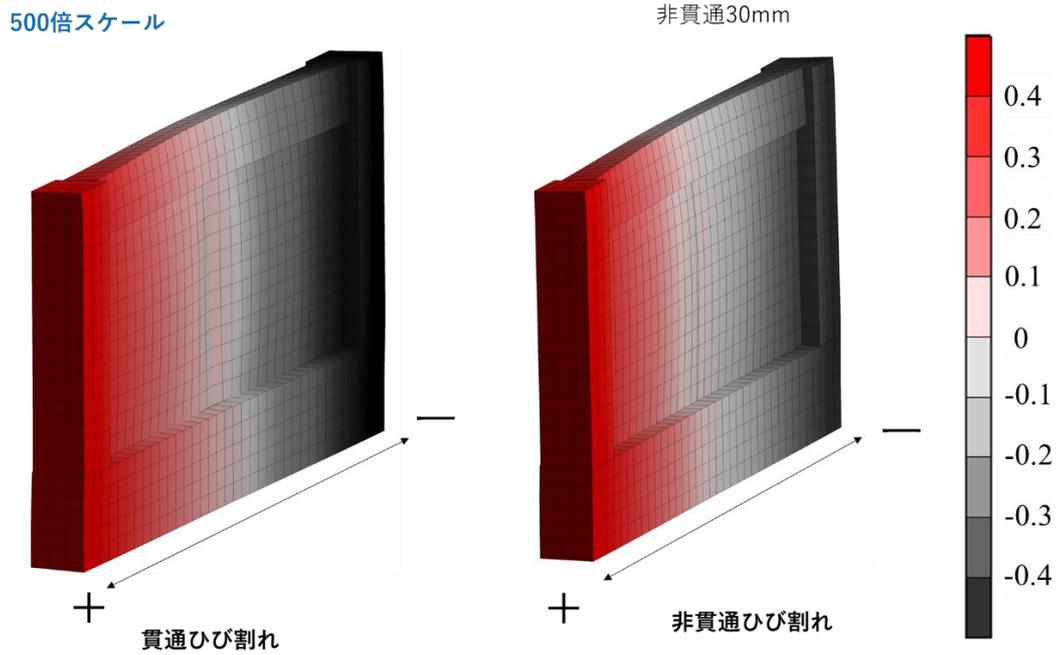


図 3-18 貫通ひび割れとひび割れ深さ 30mm の非貫通ひび割れの解析結果の比較

4.3.4 沖縄でのひび割れ計測のまとめ

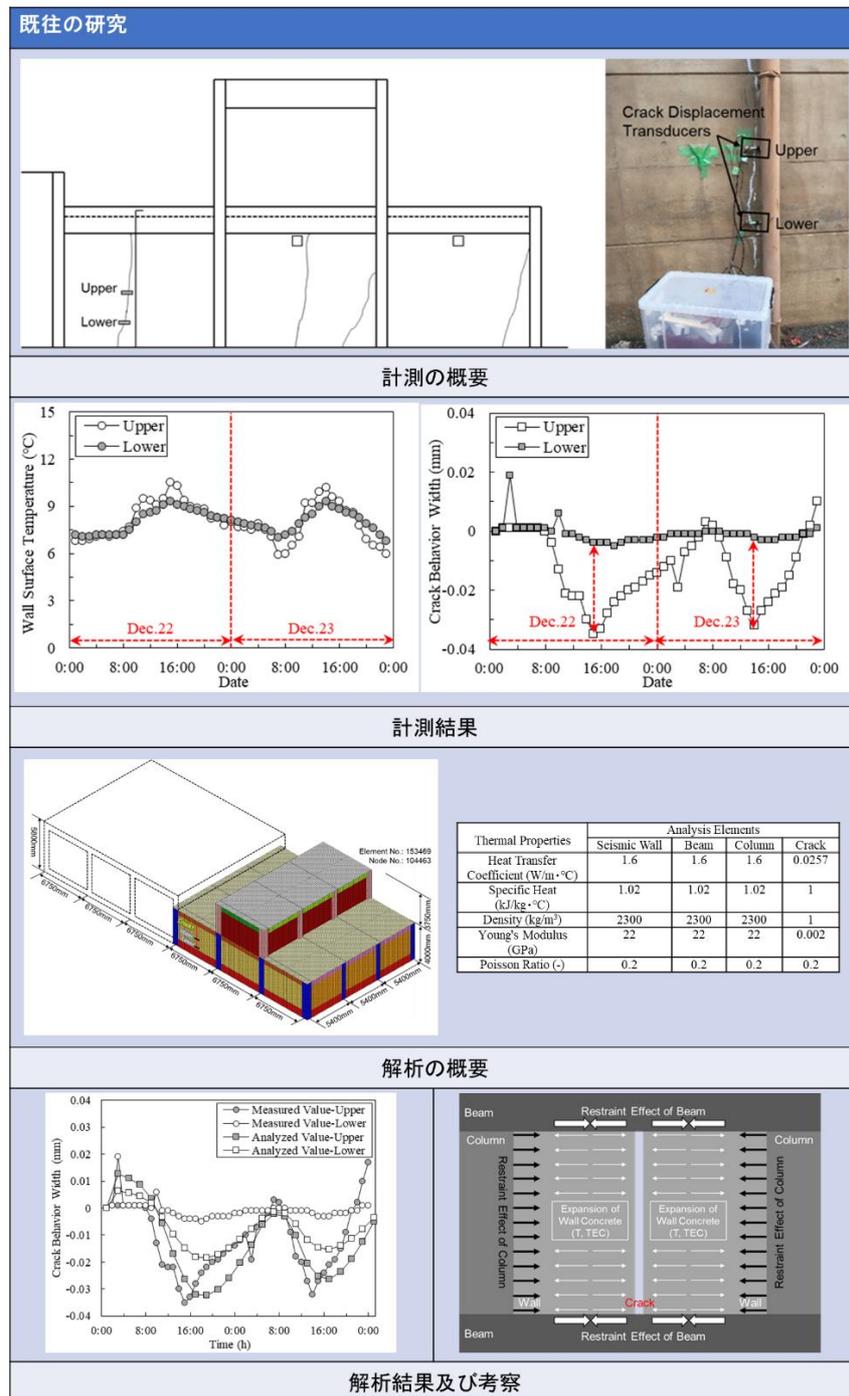
- 貫通ひび割れは既往の研究と同様にそり挙動を示すが、同じ環境下で非貫通のひび割れは反対の挙動を示す。
- 非貫通ひび割れは壁面温度上昇(下降)ともに開く(閉じる)傾向を示す
- ひび割れ深さや対象部材の周辺部材からの拘束状態によってもひび割れ開閉挙動は異なる
- 壁厚を変え、ひび割れ深さ率を変数に解析を行ったが、ひび割れ開閉挙動と相関のある結果は見られなかった。
- ひび割れが“そり挙動”をするときは上部の梁が内側に反ることがわかり、ひび割れ挙動を測定しなくても梁の伸縮を計測することでひび割れ幅の挙動方向を推測できる可能性がある。

4.4 東エネルギーセンターに発生した拘束度の違うひび割れに関して

前節の沖縄の亜熱帯気候とは違い広島は温暖湿潤気候区分である。気候区分により気温や湿度などの外敵環境要因が違うためひび割れ挙動への影響度も異なる可能性も示唆される。

広島大学構内にある東エネルギーセンターでは 2019 年の冬にひび割れ挙動の計測が行われている。その計測では、乾燥収縮により発生した貫通ひび割れが柱梁に囲まれた壁の中央付近に垂直方向に発生していた。そのひび割れ上部と下部 2 箇所のひび割れ幅の開閉量とひび割れ近傍の壁面温度を測定した。上部ひび割れの開閉量が下部のひび割れより大きい結果となった。図に示すように、上部測定部は下部測定部に比べ、中央付近を測定しているため、柱梁からの拘束度が小さくなっていると考え、解析モデルにより考察の検証を行った。解析結果でも上部ひび割れ部が下部ひび割れ部より大きくなり、柱梁からの拘束により同じひび割れでもひび割れ開閉量が異なることを示した。表 4-1 に既往の研究に関してまとめた。拘束度の影響が大きい柱梁に近い測定部は柱梁からの拘束の影響でひび割れ開閉挙動が小さくなると言及している。

表 4-1^{1,2)} 既往の研究成果のまとめ



本節では、既往の研究と同じ施設のひび割れとそのひび割れ付近に生じていたもう一つの拘束度の違うひび割れに関して計測を行った。柱梁からの拘束度が違うため、異なる挙動を示すことが予測される。計測に加えて、簡易的な解析モデルを使用した解析により計測結果の妥当性を検証する。

4.4.1 計測の概要

広島大学の構内にある東エネルギーセンターの北側外壁にひび割れが発生していた。乾燥収縮により発生した貫通ひび割れで、外壁の中央と端部に2つひび割れが生じていた。1つのひび割れに対し、基礎梁からの強いと考えられる下部と拘束部材からの拘束が弱いと考えられる上部をそれぞれのひび割れで測定を行った。中央に発生していたひび割れが既往の研究で測定されていたひび割れである。表4-2に計測の概要を示し、写真4-2には貫通ひび割れの屋内外の様子を載せている。

計測対象とした建物の構造はRC造2階建てで、計測は9月2日から9月17日の約2週間の期間行った。既往の研究と同様に、ひび割れ幅の開閉挙動は亀裂変位計を使用し、ひび割れ近傍の壁面温度は熱電対を使用した。

表 4-2 拘束度の違うひび割れの計測の概要

貫通ひび割れ	
構造	RC造2階建て（地下配管ピットあり）
対象部材	北側外壁
測定期間	2021年9月2日～2021年9月17日
測定箇所	外壁の北側(屋外)の2つのひび割れ
測定項目	ひび割れ開閉挙動幅(亀裂変位計), 壁面温度(熱電対)



中央ひび割れ（屋外側）



端部ひび割れ（屋外側）



中央ひび割れ（屋内側）



端部ひび割れ（屋内側）

写真 4-1 ひび割れ発生の様子



中央ひび割れ

端部ひび割れ

写真 4-2 ひび割れ挙動測定の様子

4.4.3 計測の結果および考察

中央の貫通ひび割れと端部のひび割れに分けて、全期間の計測のデータを図 4-1a,1b に示す。どちらのひび割れに関しても上部のひび割れ開閉挙動が大きい。中央に発生したひび割れの挙動はほとんど同じであった。図 4-2 に計測全期間の壁面温度のデータを載せている。外壁壁面の温度差はほとんどないことがわかる。気象庁の東広島市の降水量と日射時間のデータを図 4-3 に示す。9月12日と13日は降水量と日射時間が少なく、ひび割れ挙動への影響が少ない。したがって、12日と13日の計測結果より考察を行う。

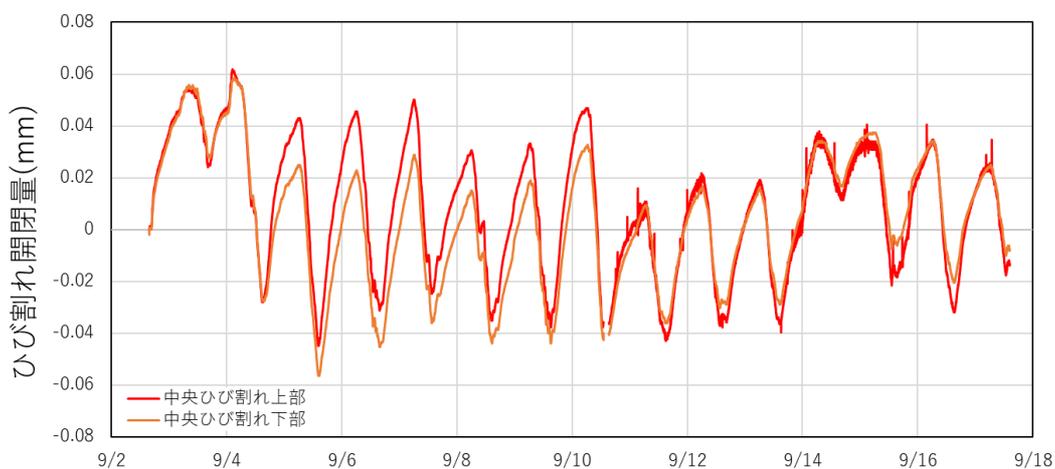


図 4-1a 中央ひび割れのひび割れ開閉挙動の全期間の計測データ

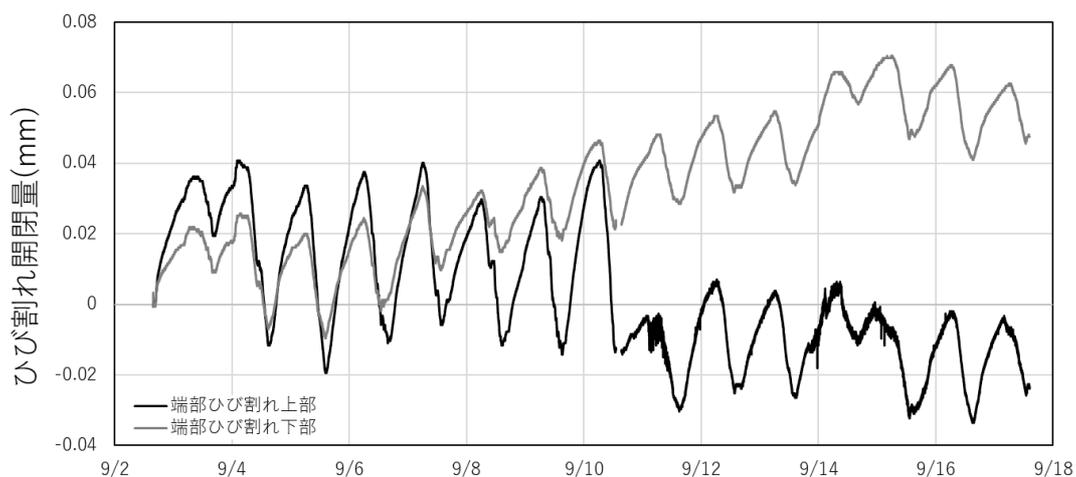


図 4-1b 端部ひび割れのひび割れ開閉挙動の全期間の計測データ

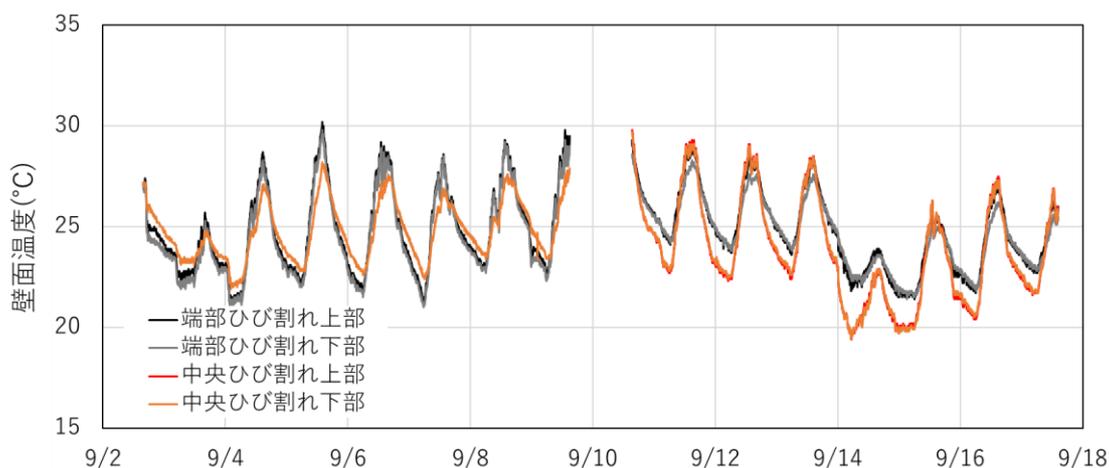


図 4-2 中央と端部のひび割れ付近の壁面温度の全期間の計測データ

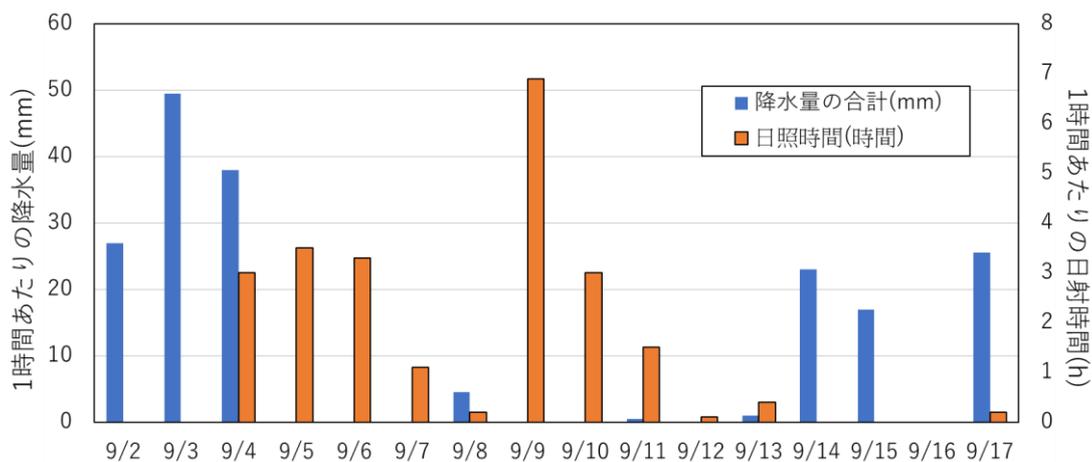


図 4-3 計測期間中の東広島の降水量と日照時間のデータ (気象庁参照)

図4-4に、12日と13日の壁面温度とひび割れ開閉量を示す。端部と中央で温度差はあるがほとんどない。ひび割れ開閉量は中央上部のひび割れが大きく、順に中央下部、端部上部、端部下部となった。柱梁などからの拘束の影響によりひび割れ開閉量に差が生じたと考えられる。測定部ごとの壁面温度とひび割れ開閉量の関係を図4-5に示す。線形の近似曲線も図に加えているが、その傾きでも拘束度の違いを見ることができる。

また、図4-6に2日間の日最大温度差と日最大開閉量を示す。この図4-6からも拘束度の違いが分かる。

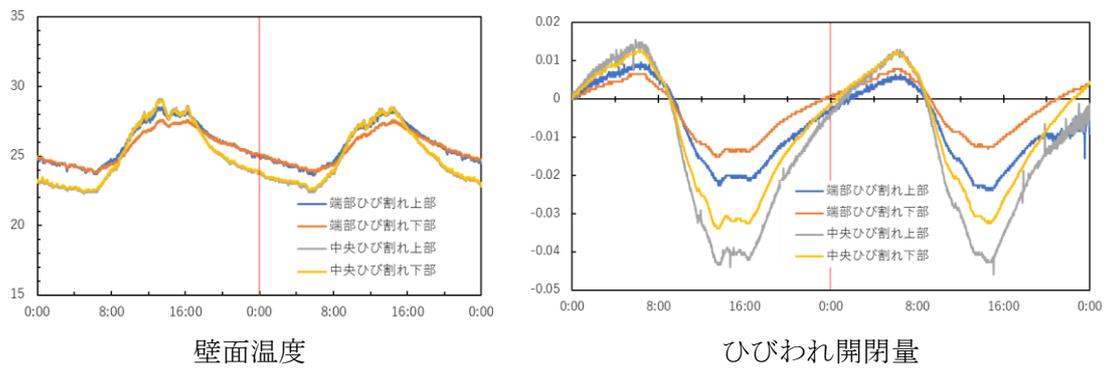


図4-4 12日と13日の二日間の計測結果

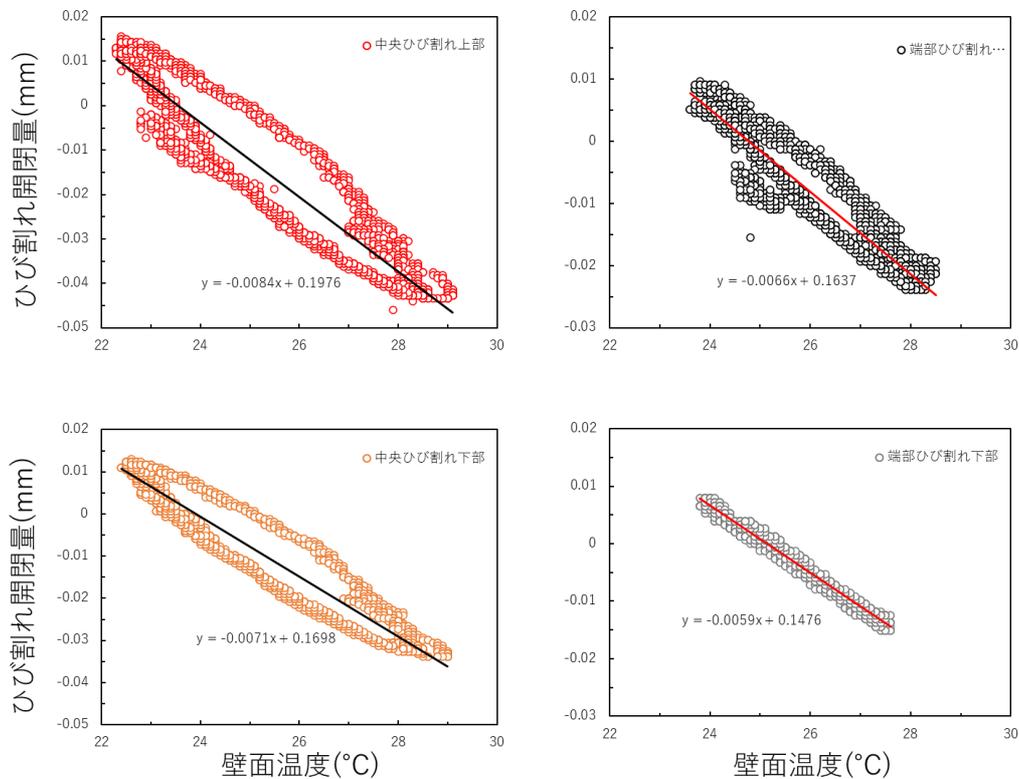


図4-5 12日と13日の壁面温度とひび割れ開閉量の関係

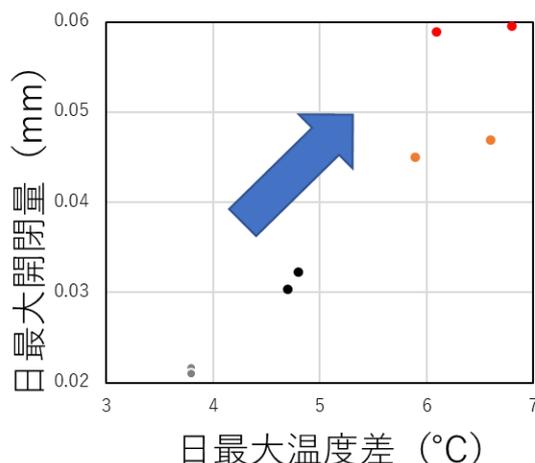


図 4-6 2 日間の日最大温度差と日最大開閉量の関係

4.4.4 簡易モデルによる解析

拘束度の違う 2 つのひび割れに関して計測を行ったが、柱付近に発生した端部のひび割れが柱からの拘束を受け、ひび割れ開閉量が小さくなることがわかった。また、図 4-6 より端部上部より中央下部の測定部の方がひび割れ開閉量が大きいことがわかるため、柱からの拘束より梁からの拘束が弱いことも計測によりわかった。

4.4.4.2 解析の概要

今回の解析でも柱梁に囲まれた簡易的な解析モデルを使用する。解析モデルには壁中央と壁の端部に垂直に生じた 2 つのひび割れに対して、解析を行う。解析の寸法及びメッシュのサイズは図 4-8 に示す。解析に用いた物性値をまとめたものを表 4-3 に示す

温度負荷条件は計測の時に考察に対象とした 12 日と 13 日の壁面温度を参照し、平均温度となるような温度履歴グラフを作成した。

次に、解析の静的負荷条件に関しては、重力加速度と柱屋内側面のローラー支持、基礎下面のローラー支持、基礎梁屋外側中央下の一点の固定を行った。静的負荷条件を図 3-12 に示す。重力加速度は解析プログラムに組み込まれていた 9.8606m/s^2 の一定の値とした。

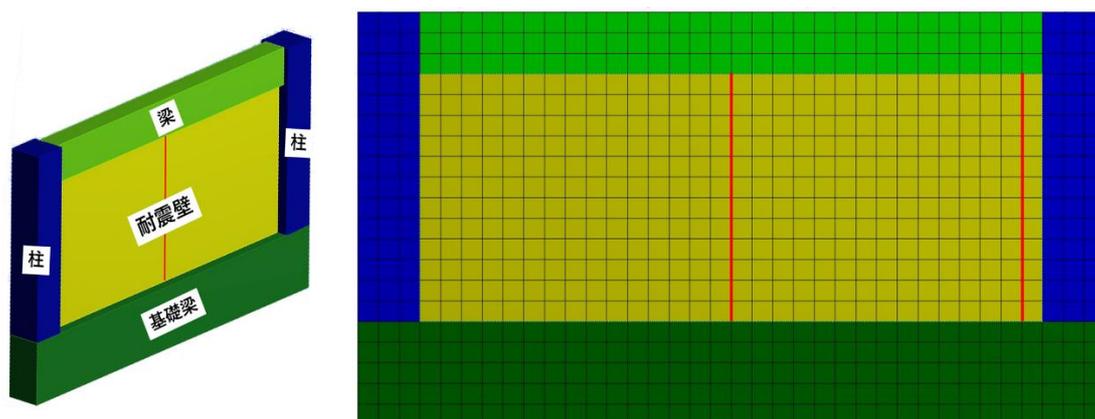


図 4-7 解析モデルの概要

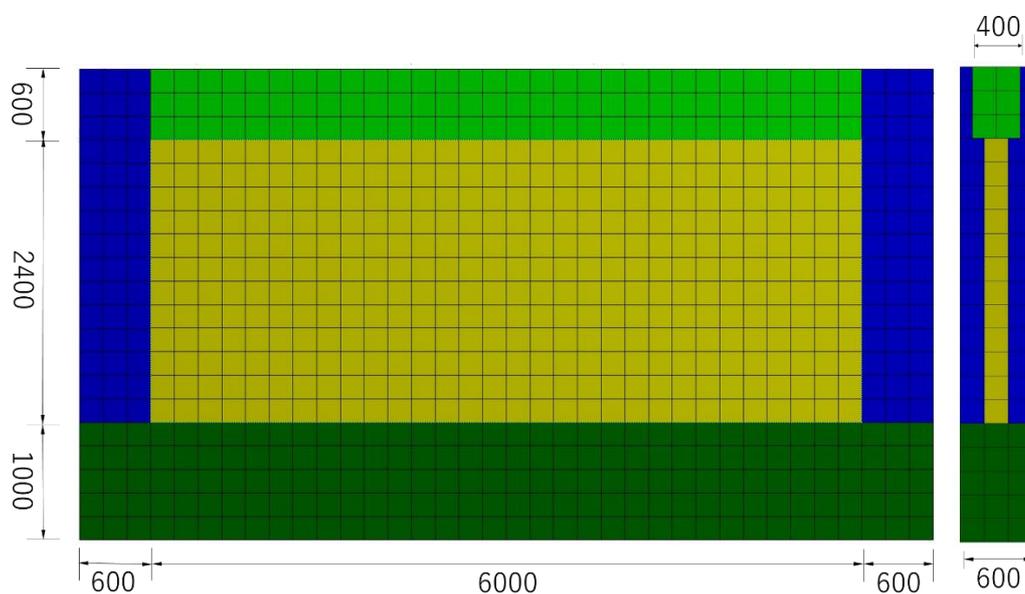


図 4-8 部材の寸法および解析メッシュ

表 4-3 解析用物性値

Thermal Properties	Analysis Elements		
	Seismic Wall	Beam	Column
Heat Transfer Coefficient (W/m·°C)	1.6	1.6	1.6
Specific Heat (kJ/kg·°C)	1.02	1.02	1.02
Density (kg/m ³)	2300	2300	2300
Young's Modulus (GPa)	22	22	22
Poisson Ratio (-)	0.2	0.2	0.2

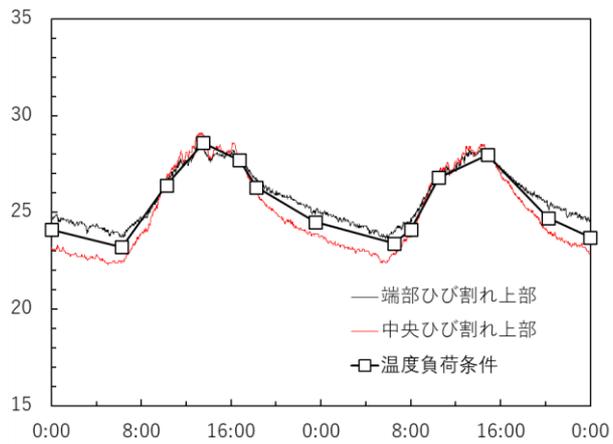


図 4-9 温度負荷条件（12 日と 13 日の壁面温度を参照）

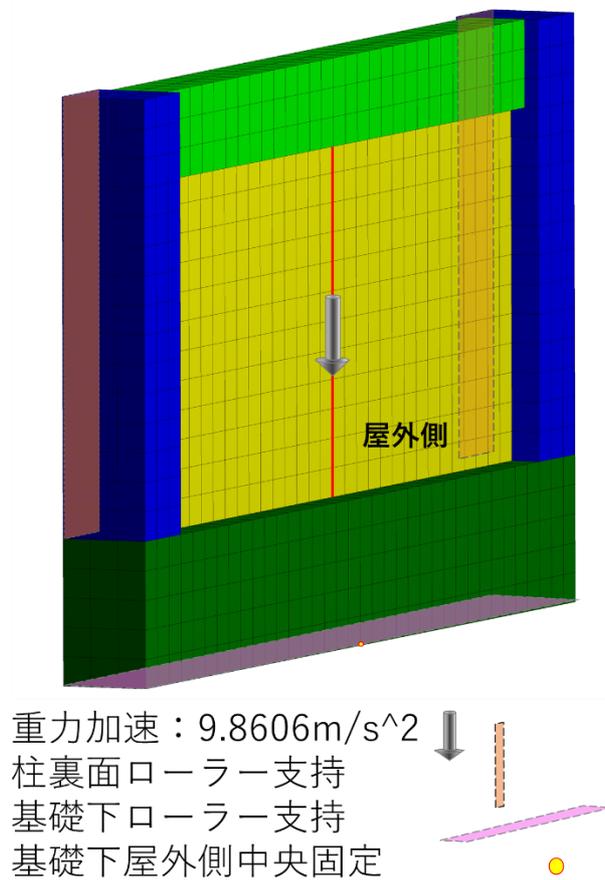


図 4-10 静的負荷条件

4.4.4.2 解析の結果および考察

最初にひび割れ挙動の結果の抽出場所は図 4-11 に示すように中央ひび割れでは壁の高さ 1200mm の位置と壁の高さ 200mm の位置とした。端部のひび割れも同様の高さの結果から考察を行う。

外壁屋外面による温度負荷によるひび割れ開閉挙動の解析結果は図 4-12 に示す。中央と端部ひび割れでは端部ひび割れの挙動が小さく、柱からの拘束が強いことがわかる。測定データと解析結果を図 4-13 に示すように重ねた。解析結果と測定データが重なり、見にくくなるため、図 4-14 と 4-15 には中央と端部ひび割れに分けて表示している。解析側の開閉量が大きいと測定結果と同様の結果が得られていることがわかる。

また、ひびわれ開閉量と壁面温度の関係を図 4-16 に示す。それぞれの結果をまとめたものを図 4-17 に示す。図に表示した近似曲線などにより、測定データと同様に中央上部のひび割れ開閉量が大きく、順に中央下部、端部上部、端部下部となっていることがわかる。

拘束度が異なる二つのひび割れに関して解析を行ったが、計測されたひび割れ開閉挙動に近い解析ができた、したがって、実構造物のコンクリートの物性値や部材寸法が事前にわからなくても簡易モデルでのひび割れ挙動解析により予測ができる可能性があることがわかった。

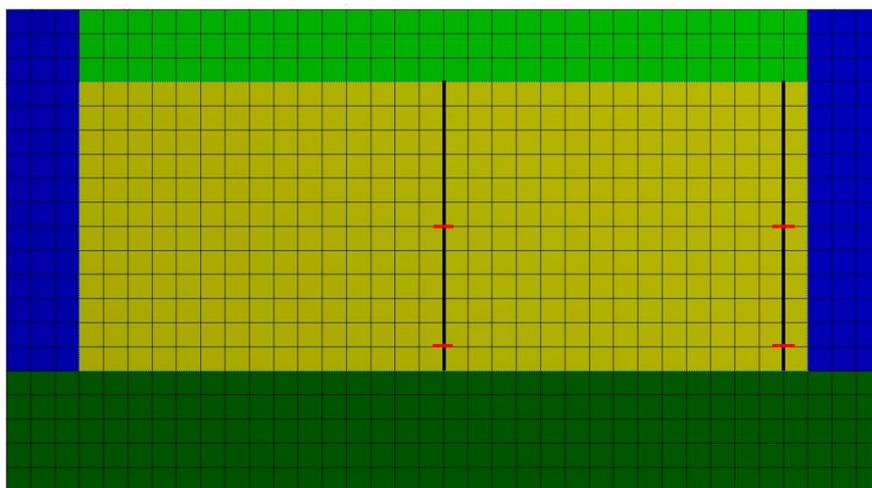


図 4-11 解析結果の抽出場所

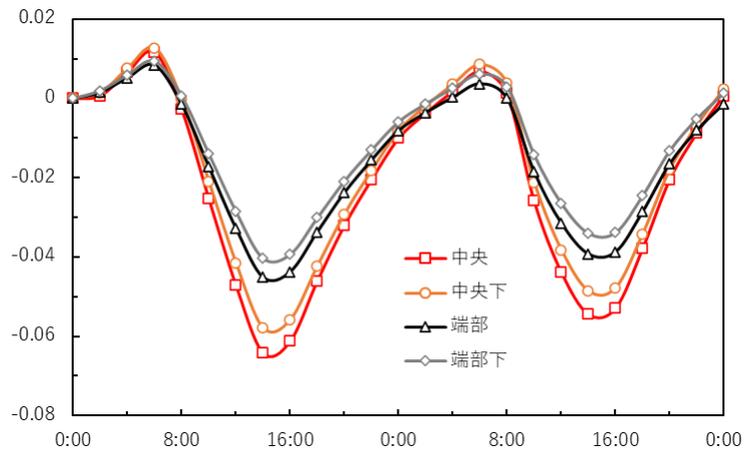


図 4-12 中央と端部のひび割れの解析結果

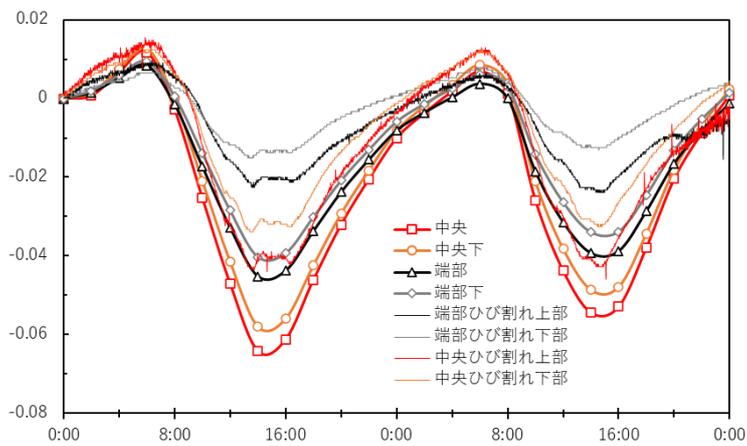


図 4-13 両方のひび割れの解析結果と測定データの比較

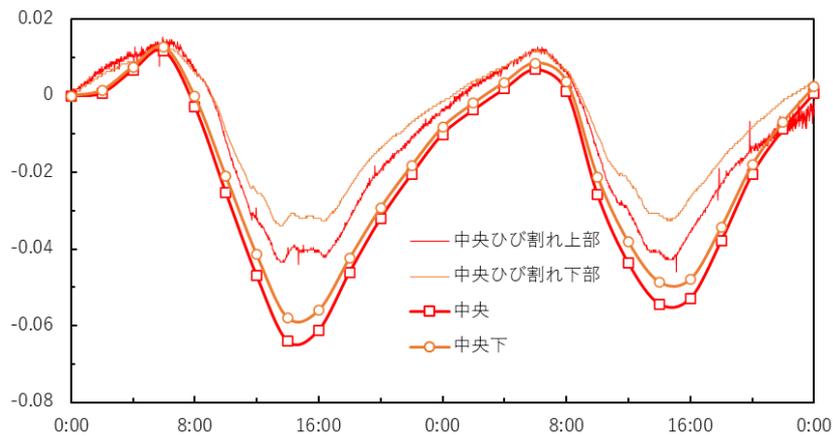


図 4-14 中央ひび割れの解析結果と測定データの比較

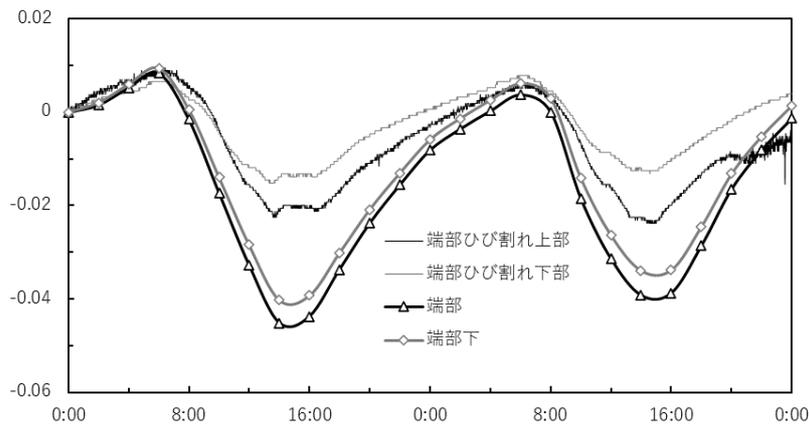


図 4-15 端部ひび割れの解析結果と測定データの比較

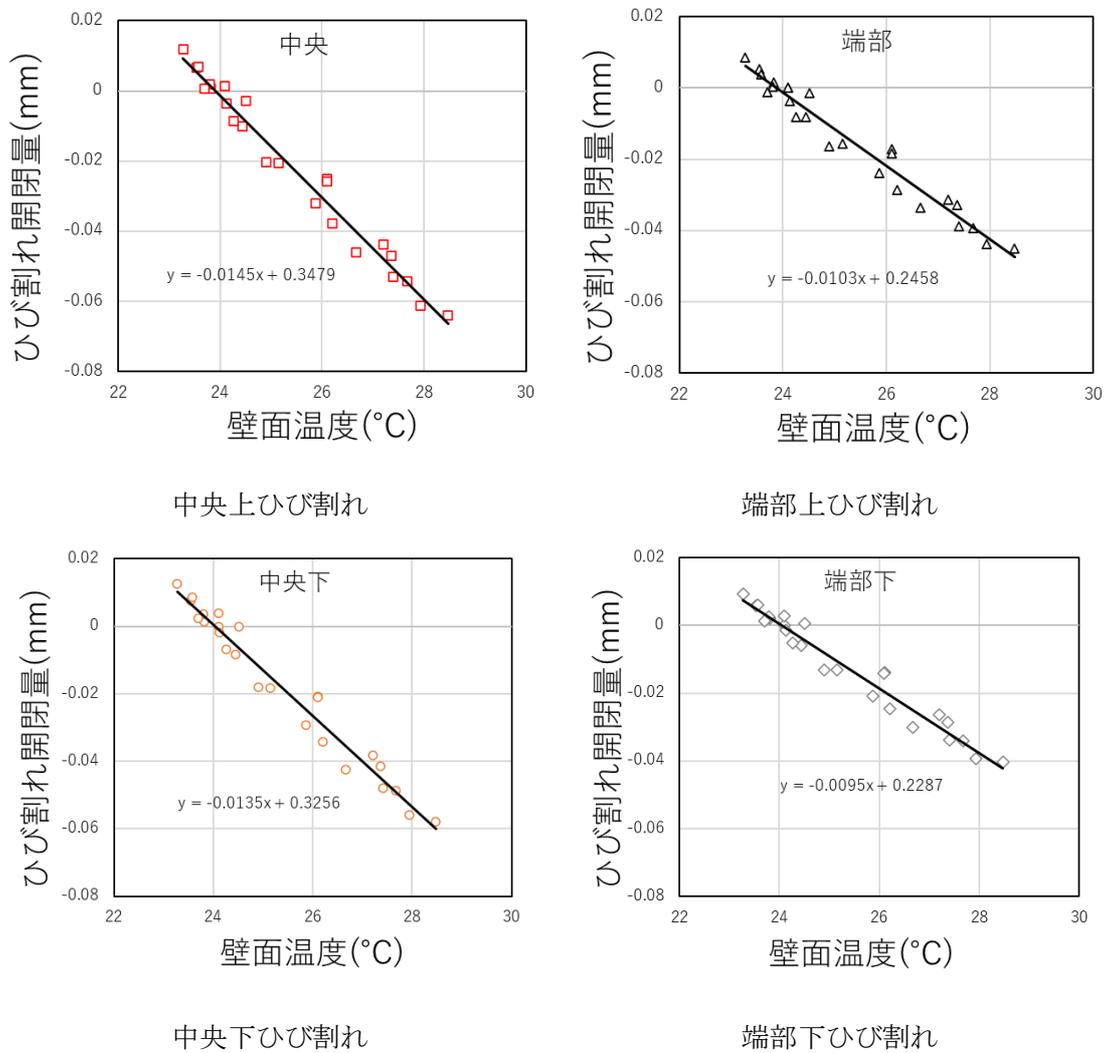


図 4-16 測定部ごとのひび割れ開閉量と壁面温度

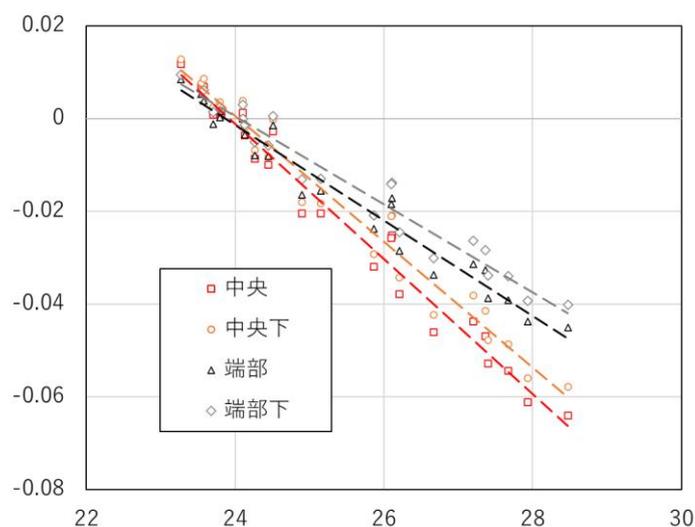


図 4-17 ひび割れ開閉量と壁面温度

4.4.5 拘束度の違う二つのひび割れのまとめ

- 中央ひび割れと端部ひび割れでは端部のひび割れ開閉挙動が小さい。
- 梁からの拘束度より柱からの拘束度が大きい。
- 部材寸法や材料物性値がわからなくてもひび割れ開閉挙動を再現できる。
- 解析結果が計測データより大きかったのでひび割れ補修工法を安全側に設計できる可能性がある。

4.5 東エネルギーセンターに発生したひび割れ発生方向の違うひび割れに関して

前節では、同一の壁に発生した拘束度の異なる二つの貫通ひび割れに関して計測および解析を行った。壁の中央に発生したひび割れと柱付近に発生したひび割れでは、拘束度の影響が小さい中央のひび割れがひび割れ開閉量が大きいことがわかった。乾燥収縮が原因で発生した部材を貫通したひび割れを測定した。二つのひび割れも地面に垂直に発生した貫通ひび割れであった。地面に垂直方向のひび割れと地面に平行に発生したひび割れでは方向が異なるため、ひび割れ幅の開閉量も異なることが予測される。

本節では、同一の壁に生じていた乾燥収縮により発生した垂直方向のひび割れと打設不良により発生した平行方向のひび割れを計測した。また、そのひび割れ付近に壁に斜め方向に発生したひび割れと柱を平行に分断するように発生したひび割れも発生していたため、それらのひび割れに関しても、計測を行った。計測結果を定性的なものにするために簡易的な柱梁に囲まれたモデルを使用し、解析を行った。

4.5.1 計測の概要

表 5-1 に示すように、1つの壁にひび割れ方向が横と縦と斜めのひび割れが生じていた。横方向のひび割れは打設不良によるひび割れで縦方向に発したひび割れは乾燥収縮により発生したひび割れである。南目方向に発生したひび割れも乾燥収縮により生じたひび割れであると考えられる。打設不良に関するひび割れ柱にも発生していたため、柱のひび割れも測定を行った。

計測対象とした建物の構造はRC造2階建てで、計測は9月10日から9月17日の約1週間の期間行った。既往の研究と同様に、ひび割れ幅の開閉挙動は亀裂変位計を使用し、ひび割れ近傍の壁面温度は熱電対を使用した。

表 5-1 計測の概要

貫通ひび割れ	
構造	RC造2階建て（地下配管ピットあり）
対象部材	北側外壁
測定期間	2021年9月10日～2021年9月17日
測定箇所	打設不良のひび割れ(壁横,柱横),乾燥収縮(縦,斜上,斜下)
測定項目	ひび割れ開閉挙動幅(亀裂変位計), 壁面温度(熱電対)

4.5.3 計測の結果および考察

全期間のひび割れ開閉挙動と部材温度の計測データを図 5-1 と図 5-2 に示す。打設不良によるひび割れ 2 つに関して、ひび割れ開閉量を見ると、9月14日の昼頃に急激に開く方向に挙動している。2020年9月14日は日本に台風が上陸しており、台風の影響により急激な開閉挙動が起こったと考えられる。部材温度に関しては測定部ごとの差はあるものの壁部材で見るとほとんど差はないものと考えられる。

図 5-3,5-4 にはひび割れ開閉量に加えて、日射時間及び降水量の天候データを載せている。また、天候の影響を確認するため、日最大開閉量と日最大温度を計測データより求めて、考察を行う。日最大開閉量と日最大温度差の全期間のデータと大雨の日を除いた日のデータを図 5-5 に示す。全期間のデータでは 2 つのデータがほかのデータに比べて非常に大きい。大雨の日を除いた方では、日最大開閉量と日最大温度差には相関がみられた。よって、9月14日以外の計測データでは、開閉量と日最大温度差について関係があることがわかった。日最大開閉量と日降水量の関係を図 5-6 に示す。全期間に対し、降水量が 0 の日の計測データを除くと降水量が多くなるとひび割れ開閉量が小さくなることがわかった。日射時間と日最大開閉量の関係を図 5-7 に示す。全期間に対し、日照りのない日を除いても日射時間と日最大開閉量に相関があるとはいえなかった。原因として測定した場所が北側の外壁で日射が当たりにくく、相関があるデータを得られなかったと考えられる。

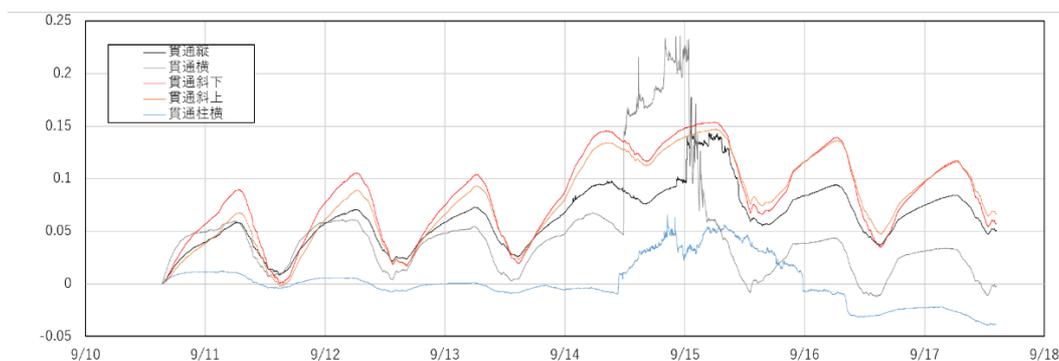


図 5-1 ひび割れ開閉挙動の全期間の計測データ

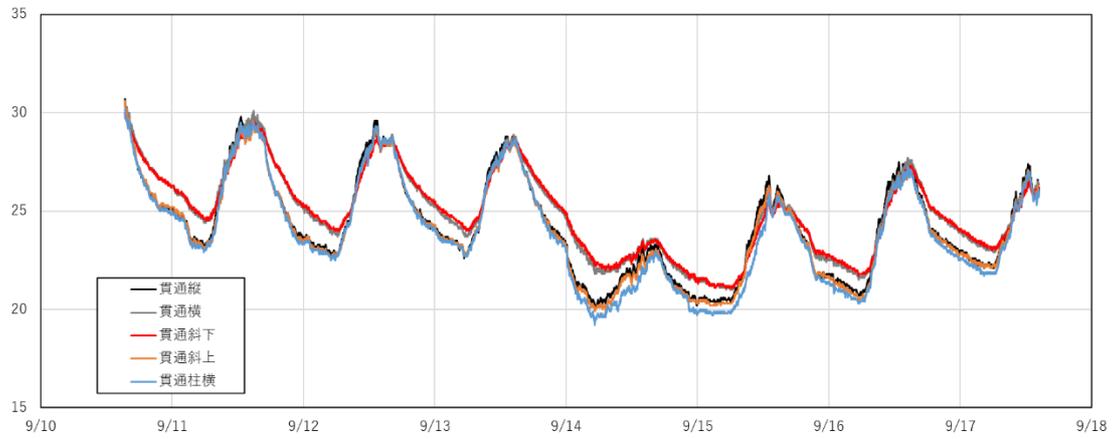


図 5-2 壁面と柱面温度の全期間の計測データ

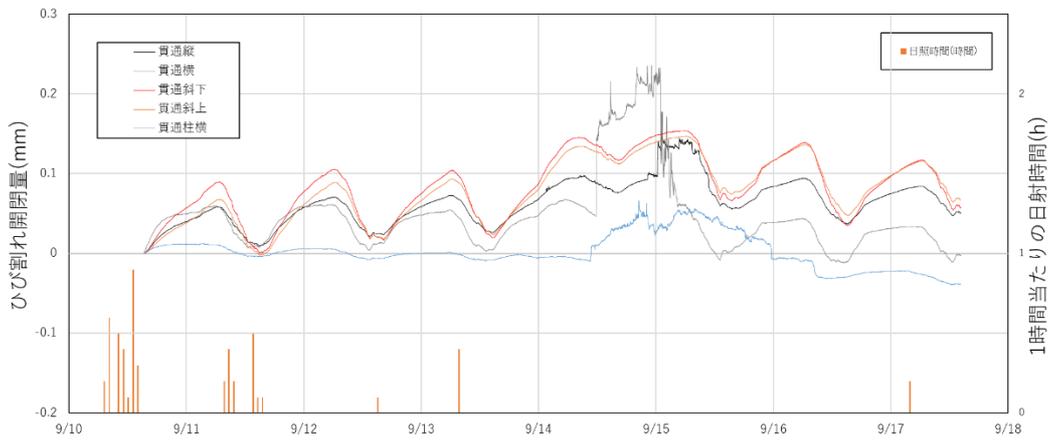


図 5-3 日射時間とひび割れ開閉量の計測データ

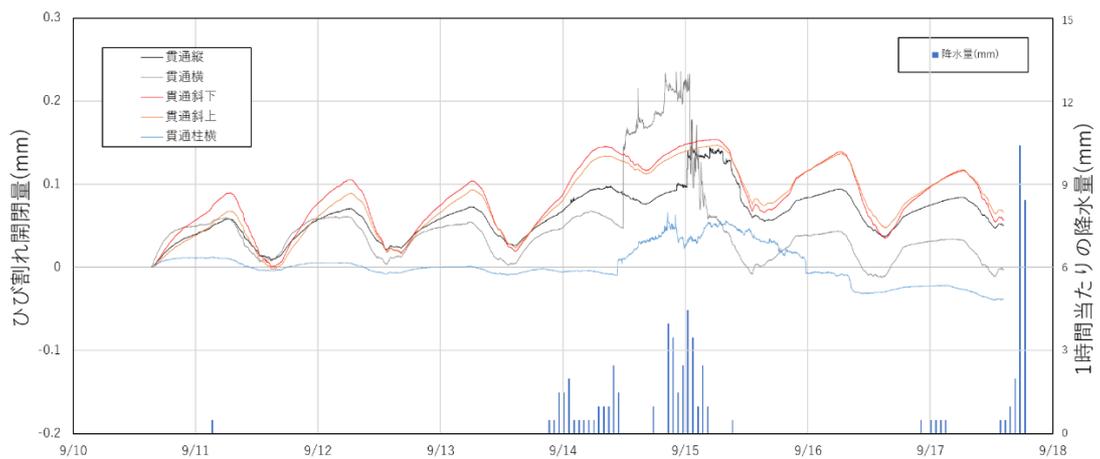


図 5-4 降水量とひび割れ開閉量の計測データ

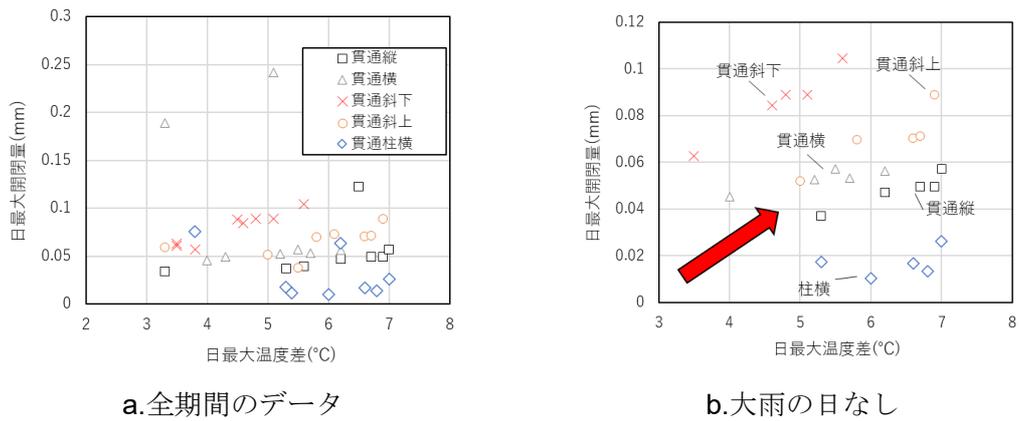


図 5-5 日最大開閉量と日最大温度差の関係

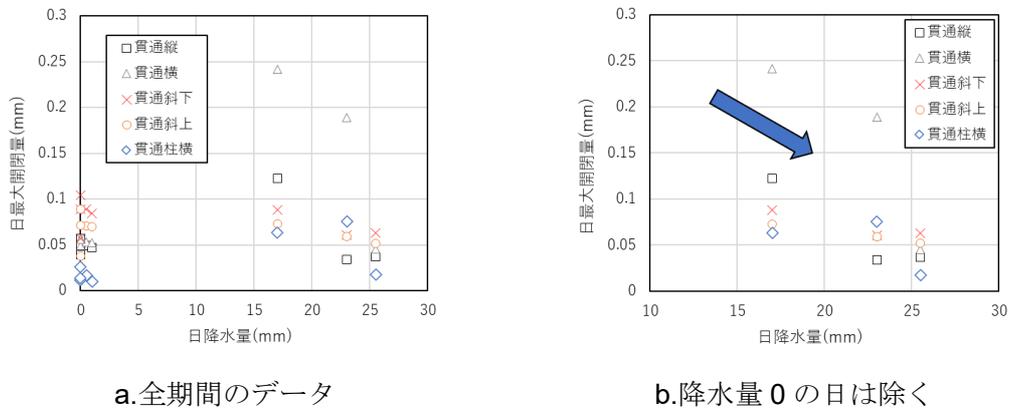


図 5-6 降水量と日最大開閉量の関係

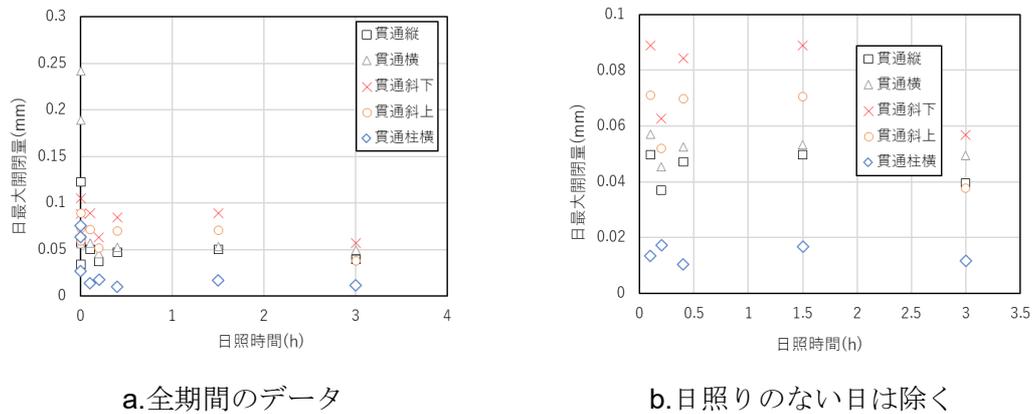


図 5-7 日射時間と日最大開閉量の関係

計測した壁面温度の最大量を表 5-2 に示す。この結果より、13 日の結果が壁面の温度差が最も少ないため、12 日も含めた二日間の計測データを考察対象とする。図 5-8 に二日間の計測データを示す。また、壁面温度とひび割れ開閉量の関係を図 5-9 に示すが、近似曲線の傾きにより開閉量の大きさを判断すると、最も大きいのが斜下、順に斜上、貫通縦、貫通横、柱横という結果となった。

表 5-2 計測した壁面温度の最大温度差

日付	壁の最大温度差(°C)	補足
9月10日	1.7	昼頃から計測開始
9月11日	2	
9月12日	2	
9月13日	1.6	
9月14日	3.1	大雨
9月15日	1.8	大雨
9月16日	1.7	
9月17日	1.6	昼頃に計測終了

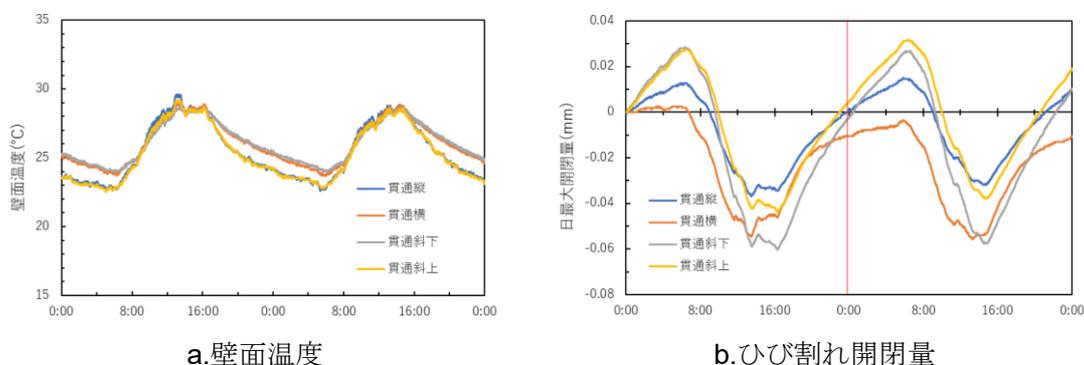
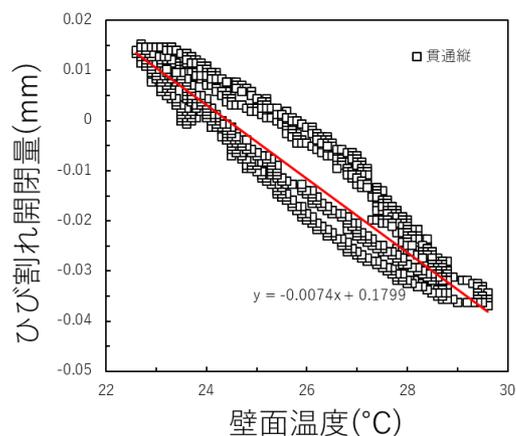
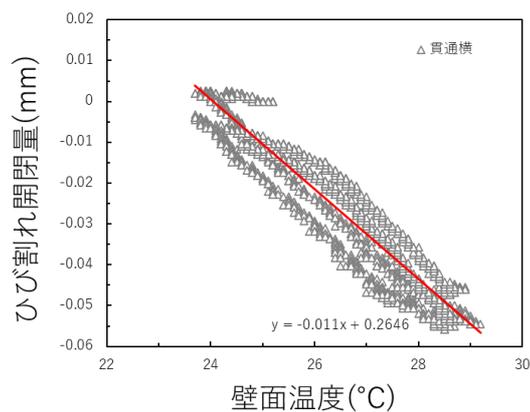


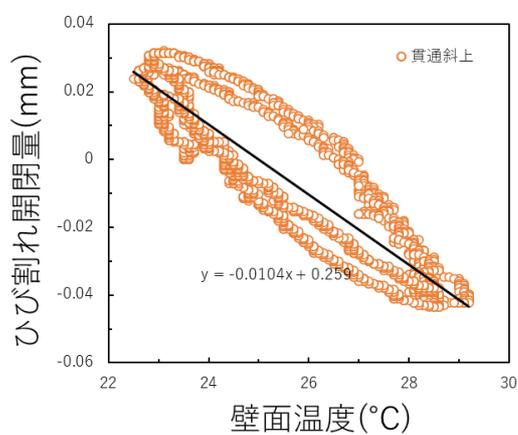
図 5-8 12 日と 13 日の二日間の計測結果



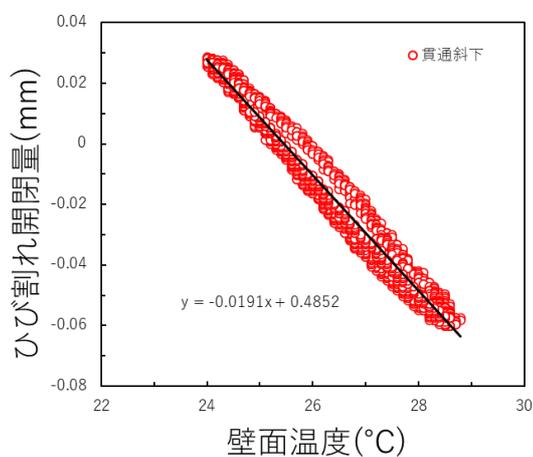
a. 貫通縦のひび割れ



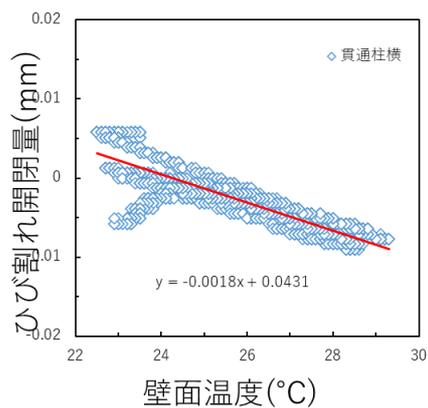
b. 貫通横のひび割れ



c. 斜上のひび割れ



d. 斜下のひび割れ



e. 柱横のひび割れ

図 5-9 12 日と 13 日の壁面温度とひび割れ開閉量の関係

4.5.4 簡易モデルによる解析

今回のひび割れ挙動解析では、斜めに生じたひび割れと柱に生じたひび割れはメッシュ数とノード数が大きすぎたため、本研究に用いた解析プロジェクトでは解析できなかった。そのため、縦方向と横方向に関してひび割れ挙動解析を行う。

4.5.4.1 解析の概要

十字ひび割れが発生した解析モデルを作成した。図 5-12 には部材の寸法及び解析のメッシュ概要を示す。表 5-3 には解析に用いた材料の物性値を示す。12 日と 13 日の壁面の温度差が少ない計測データを参考にして、計測データの平均温度から解析のための温度負荷条件を作成した。図 5-14 には静的構造の解析条件を示した。

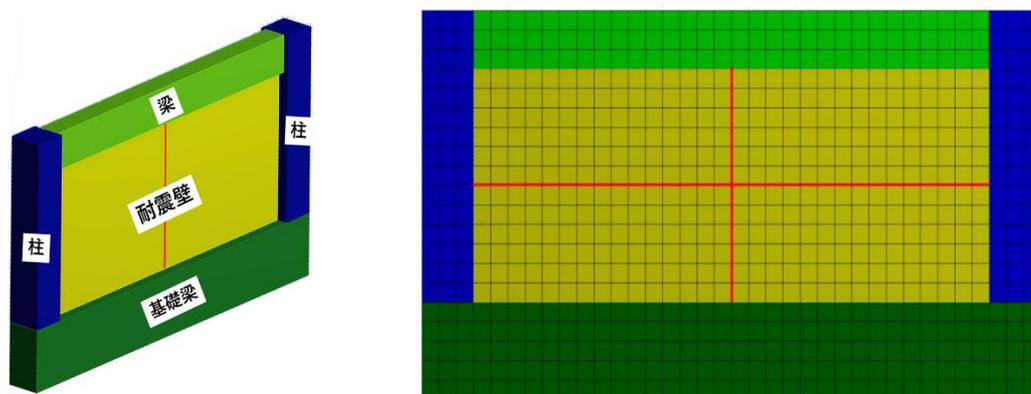


図 5-10 解析モデルの概要

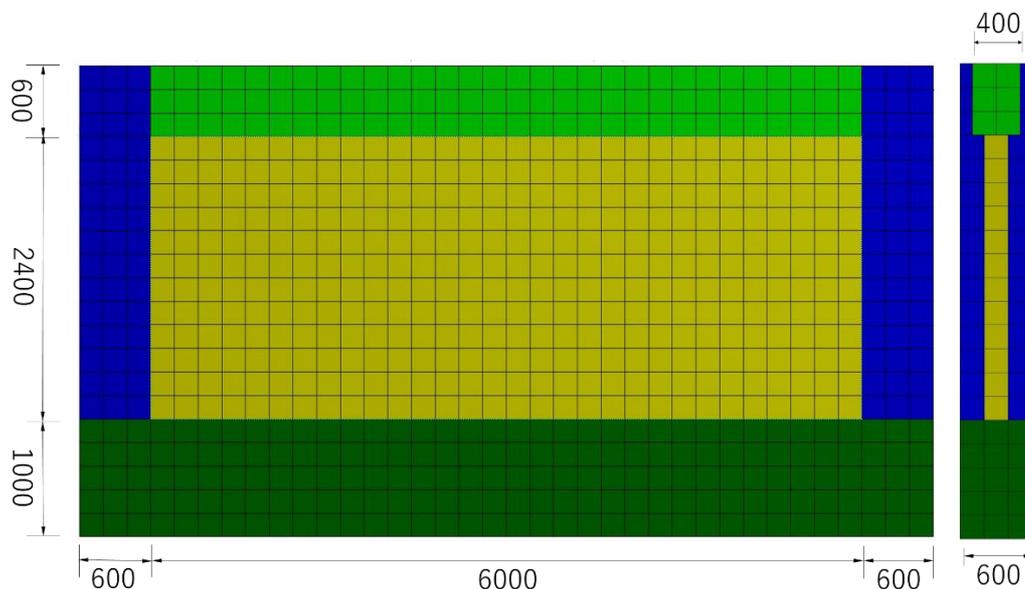


図 5-12 部材の寸法および解析メッシュ

表 5-3 解析用物性値

Thermal Properties	Analysis Elements		
	Seismic Wall	Beam	Column
Heat Transfer Coefficient (W/m·°C)	1.6	1.6	1.6
Specific Heat (kJ/kg·°C)	1.02	1.02	1.02
Density (kg/m ³)	2300	2300	2300
Young's Modulus (GPa)	22	22	22
Poisson Ratio (-)	0.2	0.2	0.2

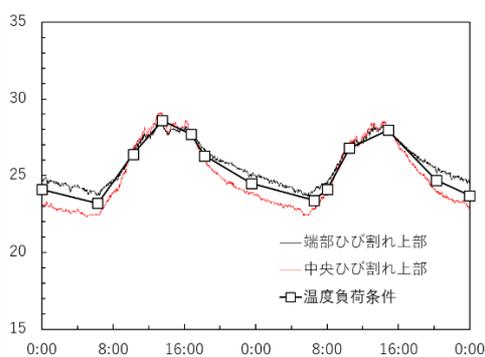
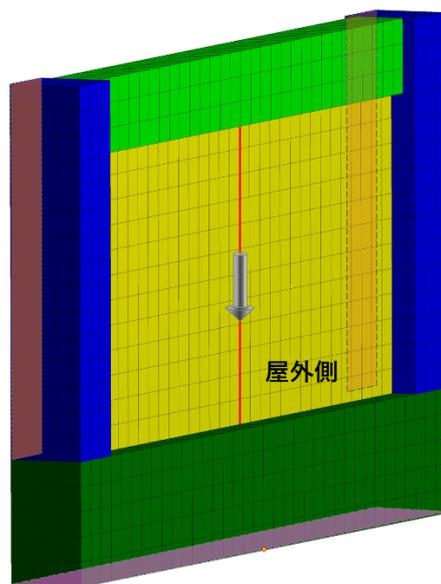


図 5-13 温度負荷条件 (12日と13日の壁面温度を参照)



重力加速：9.8606m/s² ↓
 柱裏面ローラー支持
 基礎下ローラー支持
 基礎下屋外側中央固定

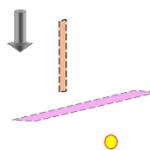


図 5-14 静的負荷条件

4.5.4.2 解析結果および考察

ひび割れの結果の抽出場所は縦と横方向に関して最も挙動すると推測される中央部の結果を選択した。図 5-15 には十字ひび割れ中央の拡大映像を載せている。

横方向と縦方向のひび割れ開閉量の結果を図 5-16 に示す。縦方向と横方向に関して計測データと解析結果を重ねて図 5-17 に示す。横方向と縦方向のひび割れでは縦方向に発生したひび割れの開閉量が大きいことが解析によりわかった。

縦方向と横方向の壁面温度とひび割れ開閉量の関係を図 5-19 に示す。グラフの傾きの大きさから開閉量を判断すると、若干ではあるが縦方向ひび割れの開閉量が大きいことがわかり、計測結果とも整合性が取れた。

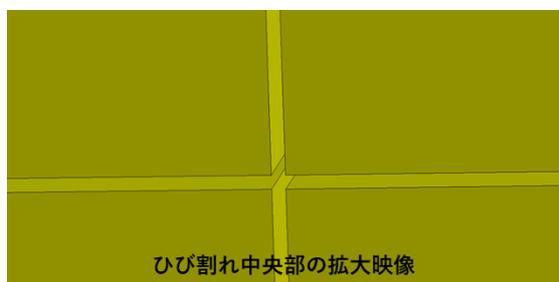


図 5-15 十字ひび割れの解析結果の抽出場所

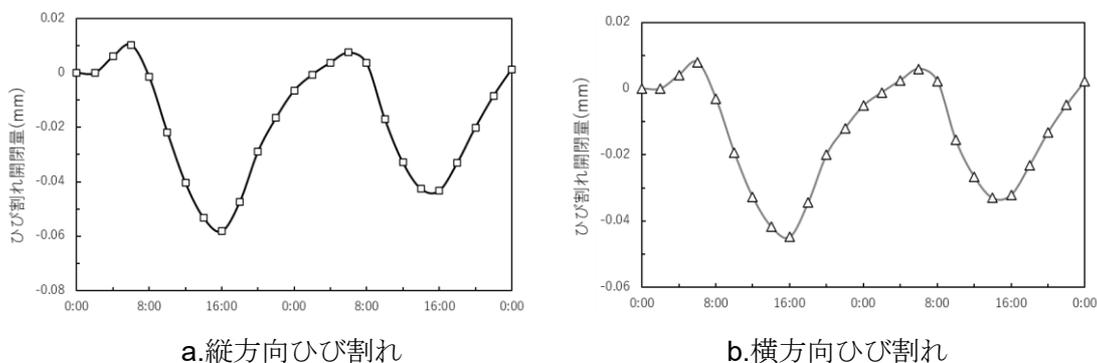
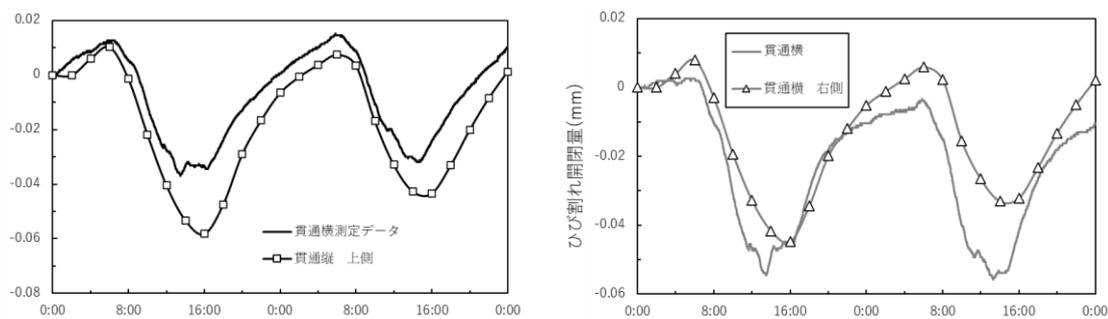


図 5-16 十字ひび割れの解析結果



• 第5章 結論

本論文では、ひび割れ補修のためにひび割れ挙動を予測することを目的とした基礎研究である。簡易モデルによるひび割れ挙動予測解析の提案を行うためのデータを収集し、実構造物の計測から簡易モデルに適用し、開閉挙動解析を行った。

各章の内容及び得られた知見を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景，目的について示した。

第2章 外壁のひび割れ補修技術の現状と課題

ひび割れの原因やひび割れ補修工法などについてまとめ，既往の研究では外壁に発生した貫通ひび割れは”そり挙動“という特有のひび割れ挙動をしていることをまとめた

第3章 外壁簡易モデルでの熱応力パターン解析

柱梁に囲まれた壁の簡易的なモデルで表1の解析条件に示すパターン解析を行った。この解析により，部材の寸法や物理的なひび割れ性状，壁面の温度がどのようにひび割れ挙動に影響するかを定量的に明らかにすることができた。

表1 解析条件

記号	解析条件	項目
ア	拘束の影響	中央と端部のひび割れ
イ	発生方向	縦方向，横方向
A	壁の厚み	100mm,150mm,200mm,250mm,300mm
B	壁の長さ	4m,5m,6m,7m,8m
C	柱の太さ	400mm×400mm,500mm×500mm,600mm×600mm,700mm×700mm
D	梁の太さ	200mm,300mm,400mm,500mm,600mm
E	ひび割れ幅	0.01mm,0.02mm,0.03mm,0.04mm,0.05mm,0.1mm,0.3mm,0.5mm,1mm
F	ひび割れ深さ	貫通ひび割れ,20mm,40mm,60mm,80mm,100mm,120mm,140mm,160mm,180mm
i	昇温速度	10°C/h,15°C/h,20°C/h,25°C/h,30°C/h

第4章 実構造物に発生したひび割れ開閉挙動の計測および簡易モデルでの解析

実構造物に発生したひび割れ挙動の測定データが現状少ない。そこで実構造物のひび割れの挙動を測定することで，ひび割れ挙動の影響する要因を明らかにした。本研究では，貫通と非貫通のひび割れ，拘束度の異なるひび割れ，ひび割れ発生方向の異なる複数のひび割

れに関して、測定を行い計測結果から得られたデータより簡易モデルで解析下結果、計測データと比較的同様の挙動を示し、部材寸法や材料物性値が異なる簡易モデルでもひび割れ挙動を予測することができた。また、計測データより、解析結果のひび割れ開閉量が大きいことがわかった。したがって、簡易モデルでの解析により、ひび割れ開閉挙動を予測でき、ひび割れ補修工法を安全側に選択することに役立つ成果が得られたと考えている。

謝辞

本研究を行い、本論文をまとめるにあたって、大変多くの方々にお世話になり支えていただきました。ここに深く感謝の意を表します。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金の助成を受けております。ありがとうございました。

大久保孝昭教授には、修士論文前にご迷惑をかけてしまい、本当に申し訳ございませんでした。体調を崩してしまい、その後に社会人として大事な『ほうれんそう』をしていませんでした。社会では失敗するときがあるので、そのときは覚悟して怒られることを怖がらず、『ほうれんそう』を実行します。ここに記して契りといたします。また就職活動の際は会社をいろいろと紹介していただきありがとうございました。大久保先生のおかげで鉄建建設に就職できたといっても過言ではありません。本当に感謝しております。

寺本篤史准教授には、帰り際に研究室に寄っていただき、研究の話などしていただき、今では本当に感謝しております。寺本先生の言っていることが理解できず、何度も聞きなおしてしまい、時間をとらせてしまいましたことお詫び申し上げます。私たちの研究室のみんながうるさく、苦情を受けていたにも関わらず、目を瞑って頂きありがとうございました。

張さんや李さんにも色々とお世話になりました。李さんには個別ゼミを積極的に催してもらい、本当に助かりました。遅刻をしてしまい、李さん含め補修班の方に迷惑をかけたこと本当に申し訳ございませんでした。社会人になったら、このようなことは許されないのです。早寝早起きを心がけて生活していきます。

同期のとのやなる、戸田くん等と一緒に研究室で過ごせてほんとに楽しかったし、三年間色々助けてもらったと思う。変な話題でもりあがったり、深夜までゲームやったり、ここ研究室かなと思った。隣の研究室からうるさいと言われるぐらい騒がしかったが、研究室に来たらよしという大久保研のいい(かなり悪い)風潮がでてたなと思った。変なことしか後輩に教えてない気がするが、またそれも俺らのいいところなのかもね。

後輩のみんなへ今年度、研究室が二つに分かれ狭い部屋で2つの研究室総勢14人が文句は言ってたが、研究は一所懸命頑張ってたなと思う。来年からは研究室が移り広くなるらしいから、遊びも大切だが、研究も頑張って！俺みたいにはならないように笑

最後に母へシングルマザーなのにも関わらず、大学院まで通わせていただきありがとうございます。家事は全くと言っていいほど面倒くさくてしなかったもので、晩御飯含め家事全般してくれて本当にありがとうございます。社会人になって存分に苦しみたいと思います。学費はほとんど免除だったから許してください。

令和4年 2月28日

横山右京