

# 論文の要旨

題目 大型振動台実験に基づく建築構造物の振動特性評価法に関する研究  
(A Study on Evaluation Method for Vibration Characteristics of Building Structures Based on Large Shaking Table Tests)

氏名 東城 峻樹

本研究では、動的解析時における応答安全性の評価精度の向上を目的に、建築構造物の耐震設計モデルに用いられる固有周期と減衰定数について、Eーディフェンスで行われた大型振動台実験に基づきそれらの振動特性を分析した。はじめに、現行の設計規準に基づく鉄筋コンクリート (RC) 造および鉄骨 (S) 造の試験体について、弾性応答範囲から終局状態に至るまでの各振動特性を同定し、上部構造における健全性の変化に伴う各推定値の変動傾向について評価した。次に一部の RC 造の試験体を対象に、振動台の回転により生じる振動台と上部構造との相互作用が振動特性に及ぼす影響について検討した。さらに、その影響を補正することで、上部構造の振動特性を推定できることを併せて確認した。最後に、上記の回転に関する補正法を地盤上の建物における回転応答に応用することで、地盤—建物連成系の RC 造の試験体について、水平だけでなく回転方向における相互作用の影響について推定する方法を提案した。

本研究の摘要および得られた主な知見を各章ごとに以下に示す。

1章では、研究の背景、目的及び本論文の構成を示した。ここでは、現行の耐震設計時における動的解析時の固有周期および減衰定数に関する設計基準あるいは慣用値 (以下、基準値) を示すとともに、近年の知見より得られた振動特性の評価式とそれらを比較した。これらの比較より、現行設計における各振動特性の基準値は、基礎固定の解析モデルに適用することを想定した地盤、基礎と上部構造の相互作用の影響を含む場合の振動特性の評価式と概ね対応することがわかった。一方、近年一般的になりつつある、上部構造と相互作用の影響をそれぞれに別々にモデル化する場合 (SR モデル等) においては、それらの基準値を上部構造のパラメータに採用することが必ずしも適切でない可能性があることを併せて確認した。また、こうした現状を踏まえて、上部構造の振動特性を把握するとともに、相互作用を含む場合の振動特性を対比して分析する方法を提案することが有効である点を述べた。

2章では、上部構造の振動特性の分析対象として、Eーディフェンスに着目し、実測データおよび実験施設としての長所ないし短所を踏まえてその特徴を整理した。さらに、国外における大型振動台施設で行われた代表的な振動台実験を調査し、1章で示した既往の研究において指摘される振幅依存性等について検討した。さらに、Eーディフェンス実験における実測データとしての特性を考慮したうえで、本論で用いる振動特性の推定に用いるシステム同定手法について検討し、その概要を示した。

上記の検討から、Eーディフェンス実験で得られる実測データについては、相互作用の影響を極力除外したうえで、実建物大の試験体の弾性範囲から終局状態に至るまでの応答を取

得可能であること等が大きな利点の一つであることを確認した。また、前述の国外の振動台実験の調査結果では、耐震設計で用いられる減衰定数の基準値（RC造3%、S造2%）は各実験の値に包絡される範囲であること、振動台上の試験体においても振幅依存性が認められることがわかった。一方で、振動台の規模の制約等から、そのほとんどが縮小あるいは部分的な試験体の実験に限られており、実大規模の振動台実験に対する知見が不十分であることを併せて確認した。

3章では、Eーディフェンスで過去に行われた加振実験のうちRC造建物を模擬した実大の試験体（一部縮小を含む）3体に関するものを取り上げて検討を行った。ARXモデルを用いて各試験体の固有周期や減衰定数などの基本的な振動特性とその変化について、1次モードに加え、比較的検討事例の少ない2次モードまでを含めて分析した。特に、経験した最大変形と振動特性に対する影響に着目した点は本研究の特徴であるといえる。

その結果、弾性時の1次固有周期が0.2~0.6s程度の異なる周期特性を持つ試験体において、1次減衰定数はそれぞれ1~10%とややばらつく一方、2次の減衰定数はそれぞれ1~3%と概ね現行設計の基準値と同等あるいはそれ以下の値の含む結果を得た。さらに、耐震設計上は概ね弾性応答範囲と考えられる振幅レベルの小さい加振を繰り返し受ける場合に、上部構造の固有周期および減衰定数が漸増する結果を得た。加えて、振幅レベルの大きな加振を繰り返し経験する毎に、振幅依存性の変動自体にも増大傾向がみられることがわかった。これより、主要架構の比較的軽微な損傷が、RCやSRC造の実建物における経年あるいは経時に伴う各振動特性の振幅依存性による変動傾向の一因となりうることを明らかにした。

4章では、S造建物を模擬した実大振動台実験について、3章のRC造に対する検討と同様のアプローチで各試験体の弾性応答範囲から終局状態に至るまで、現行の設計規準による建物の健全性と1次、2次モードの固有周期と減衰定数に関する変化の関係について検討した。さらに、RC造とS造に関する経験した平均変形角（建物の水平変形を高さで除した場合の変形角）に対する振動特性の変化の違いについて分析した。

その結果、弾性時の1次固有周期が0.6~0.8s程度のS造の試験体において、初期の減衰定数は、1次が1~4%程度、2次が1~3%程度であり、1次と2次の差は各試験体とも比較的小さい傾向が得られた。3章で示したRC造および4章のS造の初期減衰定数については、相互作用の影響を含む国内外における耐震設計時の推奨値と概ね同程度かそれ以下の値を含むものとなっていた。これより、近年の高層建物に関する知見を反映させた上部構造の減衰定数として提案された減衰定数の参考値（安全側確率50~70%に対して、それぞれRC造2%~1.5%、S造1.5~1%）は一定の合理性を示すものと考えられる。また、S造の試験体に関する固有周期および減衰定数の経験した変形角に応じた振幅依存性は、主要架構が塑性化した場合であっても比較的小さいこと、RC造のそれに比べて変化が緩慢であることがわかった。これらの傾向は、実建物において2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震等で得られた振幅依存性の変動傾向の差異と概ね対応する。

5章では、一部のRC造の試験体を対象に、3章で確認された1次の減衰定数が大きい傾向について、振動台の回転が試験体の振動特性に及ぼす影響に着目して検討を実施した。はじめに、質点系モデルを用いた水平1方向および水平・回転2方向の入力を考慮した実験のシミュレーション解析を実施し、さらに振動台の回転の影響を補正した場合の振動特性の推定方法をARXモデルに準用してシステム同定を行いその影響を分析した。

その結果、弾性範囲、塑性化以降の双方において、シミュレーション解析では振動台の回転入力の有無が建物の応答性状に影響を及ぼした可能性が高いことが確認された。特に弾性範囲においては、回転入力を無視し、水平方向の加振波のみを入力した場合には、振動台による入力が過大評価され、建物応答が実験に比べ大きくなることがわかった。すなわち、実際には回転入力が生じて得られた応答結果に対して、回転入力がないものとして振動特性を推定した場合、弾性範囲においては、見かけ上減衰効果を過大に評価するといえる。さらに、振動台の回転入力を補正したシステム同定法を実験に適用した場合、回転の影響を補正しない場合の1次減衰定数が10%以上となっていたのに対して、回転の影響を補正することでこれらの値が3~4%程度まで低下する結果を得た。

6章では、5章において振動台の回転が試験体の振動特性に影響を及ぼす点を踏まえて、地盤、基礎および上部構造の相互作用による影響を受ける連成系の試験体を対象に、水平方向だけでなく回転方向の相互作用が振動特性に及ぼす影響に着目した検討を実施した。検討対象は、剛土槽上に立つRC造の杭基礎建物の試験体とした。ここでは、相互作用の影響を推定するため、水平および回転の相互作用を含むSSI系、または回転のみの相互作用を考慮するRB系と上部構造のみを考慮したFIX系に分けたそれぞれの多質点系における振動特性を、部分空間法により同定し、各系を対比することで相互作用の影響を評価する方法を提案した。

その結果、当該実験では、水平および回転の相互作用を含むSSI系に対して、その影響を分離して得られたFIX系（上部構造）の減衰定数は、1~3%程度であり、前章までのRC耐震試験体の同定結果と概ね対応した。また、地盤のひずみ依存性の影響が大きいSSI系の固有周期および減衰定数の振幅依存性が、水平方向の相互作用を含まないRB、FIX系に比較して大きくなる傾向、各系とも1次に対して高次の減衰定数の比率が低下し、一般には逸散減衰の影響によりそれらの比率が増加または同程度となる実地盤上の建物とは反する傾向を確認した。さらに、SSI系に対してRB、FIX系の各振動特性の比率を取ることで、回転の相互作用を考慮しない場合と本提案法のように3つの系に分離した場合では差異が生じることがわかった。その影響は1次の固有周期と減衰定数で最も大きく、回転の相互作用による影響から、基礎固定時に比べて各値が最大2割程度大きくなる結果であった。

以上より、本研究では、大型振動台実験における建物の振動特性を分析し、実建物の地震観測に基づき提案された耐震設計時の各パラメータの評価式の妥当性、水平および回転方向の相互作用が振動特性に及ぼす影響のモデル化方法に資する基礎資料が得られた。一方、対

象とした実験の目的や条件の制約から，実建物に比べて形状や規模に関する条件設定等が限定的な場合の知見となる。実地盤上の各種建物を対象に相互作用の影響等を評価することで，分析結果の信頼性を高めていく必要がある。これについては，今後の課題としたい。