

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05027

研究課題名（和文）微動と地震時の振動計測に基づく大規模低層建物の地震応答予測法の確立

研究課題名（英文）Earthquake Response Prediction for Large-scale Low-rise Buildings Based on Microtremor and Earthquake Measurements

研究代表者

池田 芳樹 (Yoshiki, IKEDA)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70416866

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：低層建物の地震時の揺れを予測するために、微動計測情報のみで建物の地震応答解析モデルを構築する方法を提案し、その妥当性を数値解析と振動台実験で検証した。はじめに、大規模低層建物の振動特性を一日程度の微動計測で評価する方法を確立すると同時に、このような建物に固有の振動特性を抽出して整理した。次に、微動計測から得られた振動特性を用いて、地震応答解析モデルを構築する基礎理論を展開し、設計図面や構造計算書がなくても微動計測点の地震時の揺れを推定する方法を提案した。これらは数値解析と防災科学技術研究所が実施した実大建物の振動台実験の計測を利用して検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動計測記録に基づいて建物の地震被災度を即時判定する方法は、高層建物ではほぼ確立されている一方、不特定多数が利用する大規模低層商業建物では確立されていない。本研究の成果は、大規模低層建物の地震時の揺れを予測するために、微動計測情報のみで建物の地震応答解析モデルを構築する方法を提案し、その妥当性を検証したことである。大規模低層商業建物の地震被災度が即時判定できれば、建物が安全と判断された場合に建物を避難所として提供したり、店舗に残された商品を救援物資に役立てたりすることが可能になる。

研究成果の概要（英文）：To evaluate seismic responses of a low-rise building, this research proposes how to make a multi-degree-of-freedom linear model based on microtremor measurement. The method is verified through numerical simulations and shaking table tests of a 4-story steel specimen. Multi-sets of accelerometers is established to obtain global modal shapes of the structure with a limited number of sensors. Six buildings were selected to extract general dynamic properties of large-scale low-rise commercial buildings that have different characteristics individually. Even if microtremor sensors are removed from a building, the method can estimate the seismic responses at microtremor sensors' locations without structural design documents. This method will promote to provide building users with useful information about structural damage after an earthquake, because it considers the limited number of installed sensors and requires no design documents in practical applications.

研究分野：建築構造

キーワード：低層建物 地震被災度即時判定法 微動計測 モード同定 振動解析モデル 地震応答解析 振動台実験 並進ねじれ振動の連成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、建物には地震時の人命保護だけではなく、地震後の迅速な機能回復と機能維持も期待されている。この期待に応えるために、地震直後に建物からの避難の必要性和当面の使用性を判断する手段として、振動計測と振動解析を統合した地震被災度即時判定法の開発が期待されていた。

研究開始当初、鉄骨造の中高層建物ならば、加速度計を3~5の階に適切に設置することにより、建物被害と相関性が高い各階の揺れを地震直後に高い精度で推定できる技術が提案されていた。一方、本研究が対象とした大規模低層建物は、形が不整形である、平面的な広がりがある、吹抜空間をもつ、といった構造的特徴があるため、中高層建物に適用されている地震被災度判定法をそのまま適用できなかった。不特定多数が利用する大半の建物が大規模で低層である点を考えれば、その地震被災度即時判定法の確立は建築構造分野が取り組むべき課題の一つであった。特に大規模低層商業建物は全国に多数点在しており、施設の広さ、生活物質を常に多く備えている貯蔵機能、さらには周辺地域との結びつきを考えれば、地震直後に安全性を確認した上での有効活用は、災害後の都市機能の回復に多大に貢献できるであろう。これは、防災・減災の視点からの研究の背景である。

建築構造の視点からは、建築基準法が低層建物の設計時に振動解析を求めておらず、その振動計測もほとんど実施されていないため、特に大規模低層建物の振動特性には不明な点が多い。たとえ振動解析モデルが存在しても、その妥当性は計測に基づいて把握されているとは言い難い状況であった。また、情報技術の普及で振動計測は手軽になりつつあるが、大規模低層建物の多くの場所に振動計測器を常時備える経済的負担は大きい。そこで、設計図面や構造計算書なしに一日程度の微動計測で地震応答解析モデルが作成できれば、低層建物の地震応答予測に貢献できると考えられた。

2. 研究の目的

本研究は、大規模低層建物に一時的に振動計測器を設置して微動計測を行い、その分析結果から、一時的でも計測器を設置した建物内の多くの場所で、地震時の揺れを推定する手法を確立することを目的とした。不特定多数が利用する大規模低層建物の地震応答予測のために、振動計測の情報だけで地震応答解析モデルを構築し、その妥当性を検証することが目的であった。具体的には、

- (1) 大規模低層建物の振動特性が、複雑な形、面的広がり、吹抜空間、複合用途などに起因してきわめて複雑であることから、設計時に振動解析が要求されていない大規模低層建物で振動計測を行い、その固有の振動特性を明らかにする。このような建物の振動計測がほとんど実施されていなかった点を考えれば、振動特性の把握は研究の第一段階として重要である。
- (2) 一時的にせよ、大規模低層建物に同時に多数の振動計測器を設置することは経済的に困難である。そこで、少数の計測器の配置換えにより、建物全体の振動特性を一日程度の微動計測で評価できる計測法の理論的枠組を確立する。
- (3) 振動計測で得た大規模低層建物の固有の振動特性を踏まえて、微動計測だけで振動解析モデルを構築する理論を提案し、設計図面や構造計算書に基づいて行われてきた解析モデル構築の労力を大幅に低減する。

3. 研究の方法

はじめに、不明な点が多い大規模低層商業建物の振動特性を、一日程度の微動計測のみで評価する方法を提案した。過去の研究から、モード同定法が高い精度で建物の固有振動数、モード減衰比およびモード形を評価できることが明らかになっていた。そこで、建物のある場所に一台の振動計測器を固定し、その他の計測器は順次移動していくという配置換えにより、建物全体の振動特性を把握する方法を提案した。そして、同定した振動モード特性から、大規模低層建物に共通かつ固有の振動特性を微動計測記録から抽出して整理した。

次に、微動計測から得たモード特性を用いて、地震応答解析モデルを構築する基礎理論を展開し、設計図面や構造計算書がなくても建物の地震応答解析を可能とする方法を提案した。一日程度の微動計測で解析モデルを構築できる提案手法により、モデル作成の労力を大幅に低減し、大規模低層建物の地震応答予測の実用性を、モデル作成の観点から飛躍的に向上させることができた。

この方法により、設計情報がない建物でも地震応答解析モデルの構築が可能となり、モデル作

成が設計情報から解放されることになった。地震時に建物基礎部で加速度さえ計測すれば、一時的でも微動計測した全点で、加速度、速度および変位の地震応答を推定することを可能にした。

大規模低層建物に常に振動計測器を設置して地震時の振動計測をすることを、研究期間内で実現することは難しい。そこで、防災科学技術研究所が実施した実大建物の振動台実験の計測を利用して、提案手法の検証を行った。また、微動時と地震時では建物の固有振動数が異なるため、特に大中地震時に建物の固有振動数を調整する方法を実験により検討した。

4. 研究成果

平面形状や構造的特徴が異なる大規模低層商業建物を 6 棟選び、その微動計測を通して振動特性をモード特性として評価した。固有振動数およびそれに対応するモード形と減衰比を建物ごとに報告し、次に 6 棟の同定結果を整理することで、この種の建物の一般的振動特性を抽出した。6 棟で統一した設計情報を得ておらず、計測位置の確保にも制約があったが、限られた数の計測器の配置換えを繰り返すことで、この種の建物の振動性状を明らかにすることができた。特に固有振動数とモード形は詳細に把握可能であった。抽出した特性は以下の 6 項目に整理できる。

- (1) 建築基準法の設計用 1 次固有周期から得られる 1 次固有振動数に比較して、微動時の 1 次固有振動数は 1.2~1.5 倍高い傾向にあった。ただし、その大小関係が逆転している建物もあった。
- (2) L 型平面をもつ建物では、1 次並進モードがねじれ回転を伴って生じ、平面の端部でモード振幅が大きくなっていた。L 型でない建物でも、並進とねじれ回転が連成して、同一階でも場所により揺れはかなり異なっていた。
- (3) 吹抜や天窓の周りでは局所的なモード形が見られ、それらを境にしてモード振幅が反転する現象や大きく異なる現象が認められた。吹抜周りでは他の場所よりも局所的に揺れが大きくなっていた。吹抜の影響があまり見られない建物もあったが、剛床仮定は必ずしも成立しなかった。
- (4) 建物の振動特性を単純にするためのエキスパンションジョイントを有する建物では、それを挟んでモード振幅の方向が反転する現象が見られ、その効果が微動時でも確認された。ただし、完全にエキスパンションジョイントで建物の複数部分が独立しているのではなく、特にエキスパンションジョイントによる境界の直交方向では、隣接する棟は連成していた。
- (5) フードコート、映画館および間仕切のない大空間では、他の領域に比較して振幅が大きくなる振動モードが認められた。
- (6) 建物全体系の 3 次までのモード減衰比はほぼ 1.0~2.5% の範囲にあり、鉄骨造や鉄骨鉄筋コンクリート造による減衰の違いは見られなかった。

微動計測から同定した固有振動数、モード減衰比および計測点のモード振幅の情報を用いて、建物の簡易な多自由度系等価線形モデルを作成し、その地震応答を推定する方法を提案した。複雑な形状の建物に地震被災度即時判定法を適用するための、一つの提案となっている。その結論は以下の 4 項目に整理できる。

- (1) 提案する地震応答予測法では、設計図面や構造計算書がなくても、微動計測から振動解析モデルが得られる。高層や低層、事務所や商業施設などといった制約を対象建物に課しておらず、不整形な形状、平面的広がり、吹抜空間といった特徴があり、剛床仮定が成立し難い建物にも適用できる。モデル化では、解析モデルが 1 本棒モデルなのか、多本棒モデルなのかも問われない。
- (2) モデルの総自由度数は微動計測点数に一致する。微動計測点を増やすほど自由度数が増えて、モデルは詳細になるので、微動計測の労力は報われる方法になっている。
- (3) 5 質点 5 自由度系 1 本棒モデルを用いた応答予測法の基本的性質の把握からは、2~3 のモードを考慮できれば、刺激係数の近似と地震応答の予測に良い精度が得られていることが確認できた。また 5 層で平面的に広がりを有する大規模低層商業建物の微動計測に適用し、建物内の 60 点で応答予測が可能なることを示した。しかしながら、より複雑なモデルや実建物の計測を通じて、予測精度を検証していく必要がある。
- (4) 提案する応答予測法は、モード座標系で応答解析を行うため、運動方程式を質量と剛性の行列を使って立てる必要はない。その結果、設計情報が不要となり、計測による同定結果から応答推定が可能になる。一方、モード情報を用いているため、等価線形化が前提となっており、これは適用限界でもある。

最後に、防災科学技術研究所が実施した実大建物の振動台実験の計測を利用して、提案手法の検証を行った。他の研究プロジェクトで実施された振動台実験であったため、その実験建物は大規模ではなく形状も単純であったが、実大建物で手法の検討を行って提案手法の特徴を理解で

きた成果は大きい。その成果は次の2項目に整理できる。

- (1) 振動台実験による地震時の建物の固有振動数は、微動計測時よりも低く、それは地震の大きさに依存していた。そのため、地震の応答予測では、微動で評価した建物の固有振動数を補正する必要があった。建物に1入力1出力系を構成できる振動計測器があれば、その計測により固有振動数の調整が可能で、応答予測精度は飛躍的に向上した。
- (2) 地震時には、微動時よりもモード減衰比が大きくなる傾向が見られた。一方、損傷が著しくない地震では、微動時のモード形を補正する必要はなく、そのままモデルで利用できることが確認された。本手法は、モード同定法とモード毎の地震応答解析を行うため、等価線形的に建物動特性を評価できる振動レベルが適用範囲である。大地震で特定の階の損傷が進み、モード形に変化が生じた場合には、地震応答の予測精度は低下した。本手法が有効である状況は、地震直後に建物に著しい損傷がなく、見た目は被害が分かり難い場合である。そのため、中地震での応答予測に提案手法は有効であると考えられる。

最終年度は、地震観測システムがある病院と大規模商業施設からの要望を受け、提案手法の有効性を地震記録で調べた。建物の水平2方向で固有周期の振幅依存性が異なる場合があり、最初の2年間で把握できなかった実建物の振動特性が理解できた。これら2棟の地震記録が少ないことから、地震記録による手法の検証を継続していくことが決まっており、モニタリング分野の学術成果の適用例として公表することを予定している。

本研究を進める中で、建物の耐震、免震および制振を統一的に表現する数式があることに気づき、副次的成果として学術論文3編も発表することもできた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 松本祐輝、池田芳樹	4. 巻 69B
2. 論文標題 極配置法に基づく多質点1本棒せん断振動型建物モデルの支配方程式	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijse.69B.0_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiki IKEDA, Yuki MATSUMOTO	4. 巻 29
2. 論文標題 Unified description of passive vibration control for buildings based on pole allocation applied to three-degree-of-freedom model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/stc.2995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiki IKEDA, Masahiro KURATA, Jinzhe XIE	4. 巻 51
2. 論文標題 Verification of multi-degree-of-freedom building modelling for seismic response prediction based on microtremor measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/eqe.3630	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 松本祐輝、池田芳樹	4. 巻 68B
2. 論文標題 建物の基礎免震、中間層免震および同調型マスダンバによる制振の統一的理解	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 367-375
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijse.68B.0_367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jinzhe XIE, Yoshiki IKEDA	4. 巻 61構造系
2. 論文標題 Seismic response prediction of large-scale low-rise buildings based on microtremor measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究発表報告集	6. 最初と最後の頁 273-276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 謝金哲、池田芳樹、倉田真宏	4. 巻 67B
2. 論文標題 微動計測に基づく大規模低層商業建物の振動特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 495-507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 謝金哲、池田芳樹、倉田真宏	4. 巻 67B
2. 論文標題 微動計測に基づく地震応答解析のための多自由度系線形建物モデルの構築	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 509-518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------