

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560560

研究課題名（和文） 波動干渉法による実建物の耐震安全性診断技術の開発に関する研究

研究課題名（英文） A study on developing technology for evaluating seismic capacity of actual structures using seismic interferometry

研究代表者

松島 信一（MATSUSHIMA SHINICHI）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：30393565

研究成果の概要（和文）：本研究は、現有の地震計を有効活用して IT 計測技術を用いた収録システムを新たに構築し、観測された波形から建物のモデルパラメータ（質量、剛性、減衰）を逆同定することにより、建物の正確な耐震安全性診断システムを開発することを主眼とした。実大鉄骨骨組み架構で長期間・多地点において同時に連続データを収録した結果、振動特性は季節、気温、降雨の影響が少ないが風邪の影響が強いこと、付加質量を設置した実験により実際の建物の図面から得られた値と比べ階によっては剛性が約 50%、質量が約 65%であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to develop a system for evaluating seismic capacity of actual structures accurately by identifying the model parameter (mass, rigidity, damping) of structures from the observed waveforms which we obtained by constructing a new observation system using the information technology combined with existing sensors. As a result of consecutive recording of simultaneous, long-term, multi-station observation for a real-size steel frame structure, we found that the effect of the season, temperature or rain is small to the dynamic properties, compared to the effect of wind. Also, after experiments of putting additional mass on one story at a time and observing the change of the properties each time, we found that the actual rigidity and mass was about 50 and 65 %, respectively, of the value obtained from the plan for some stories.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：耐震、防災、構造工学・地震工学、波動干渉法、実建物、耐震安全性診断、モデルパラメータ

1. 研究開始当初の背景

既存の建物の耐震安全性を的確に診断するためには、設計で確保されている額面上の

耐力ではなく、実際に建っている建築物が持つ実耐震性能を精度良く評価する必要がある。現状では建物の耐震診断・耐震補強は設

計図面や実際の間取りによる壁の量や部材のサイズをもとに、建物のモデルパラメータを概略で推定した上で行われている。実際の建物の有している、設計図面や見た目だけでは判別できない接合部の施工方法や部材強度のばらつき等を一切考慮せずに推定されているが、個別にその妥当性を検証しているわけではないため、必ずしも実態に即したモデルパラメータが用いられているとは限らない。このことは過去の被害地震での建物被害を設計図面から構築した建物モデルによる応答解析では再現できないことがあることから明白である。また、常時微動記録により耐震診断を行う研究があるが、どの方法も建物全体の固有振動数を常時微動記録の卓越振動数から求め、それに基づいて建物の耐震性能を推定している。この方法では建物全体の耐震性能が推定できたとしても、柱梁などの部材レベルの特性まではわからないため、実建物内の部材ごとの耐震性能を把握することはできない。一方、部材レベルでの強度を測定することは行われているが、その結果を建物全体のモデルに組み上げて耐震性能を評価することは行われていない。従って、現在の耐震性能診断では既存の建物が実際に持っている耐震性能を的確に評価できているとはいえない。

2. 研究の目的

既存の建物の耐震安全性を的確に診断するためには、実際に建っている建物が持つ実耐震性能を精度良く評価する必要がある。本研究では建物内の2点間（建物全体だけではなく柱端部など）の波動伝播（常時微動および微小地震）の観測波形に波動干渉法（Seismic Interferometry）（Schuster, 2009）を適用し自己相関関数・相互相関関数からグリーン関数（点加振による応答の伝達関数）を抽出し、それを説明できるモデルパラメータ（剛性、質量、減衰）を精度よく同定する方法を開発する。得られたモデルパラメータから建物全体系の地震応答解析モデルを構築し、想定地震発生時の予測地震動に対する応答シミュレーションにより、既存の建物の耐震安全性を精度よく診断できる方法を開発する。この方法が確立されれば、特殊で高価な機材を用いずに波動伝播を長時間連続観測するだけで耐震診断が出来るようになり、さらに建物以外の構造物の耐震診断も可能となる。本研究で得られるモデルパラメータは線形の場合に限られるため、別途企業との共同研究により実建物を模擬した試験体で微小振動時と大振幅加振時の特性の対応関係を把握し、最終的に性能評価モデルに組み込む。

かねてより、建物の実耐震性能の把握をするために応募者らも建物の微動観測や地震

観測を行ってきた。しかし、微動観測に関しては背景に述べたように、建物全体の固有振動数およびそれから同定できるパラメータは限られており、建物の細かい耐震性能を把握することが難しかった。また、地震観測に至っては、地震計を設置してもいつ観測記録が得られるかわからない状況で待たざるを得ないために、十分なデータを収集するのが難しい。そこで近年、2点で同時に観測された波形の自己相関関数・相互相関関数を十分な量をスタックすることにより、2点間のグリーン関数（点加振による応答の伝達関数）を抽出できるとされる波動干渉法によりグリーン関数が得られることが理論的にも裏付けられ観測でも実証されてきたので、そのグリーン関数を対象として、これまで得るのが困難であった建物のモデルパラメータを逆同定することが出来る状況となった。本研究の手法は多くの地震計を必要とするが、応募者らは現在67台の地震計を有しており、これらを有効活用することにより、多点同時連続観測が実現可能な状況にある。

3. 研究の方法

本研究ではまず、現有の地震計を活用したIT計測技術を用いた波動伝播の長時間連続多点同時収録システムを開発する。並行して、試験的に単純な骨組み架構で別の地震計を用いて長時間・広周期帯域観測を行う。観測記録から波動干渉法によりグリーン関数を計算するプログラムの開発を行い、得られたグリーン関数を対象にモデルパラメータの同定プログラムを開発する。同定されたモデルパラメータは架構全体もしくは部材レベルで他の手法や実験により得られるものと比較し、検証を行う。次に、開発した収録システムにより、実建物において長時間連続・多点・広周期帯域観測を行い、モデルパラメータの同定を行う。同定されたモデルパラメータを用いて地震応答解析モデルを構築し、予測地震動に対する応答シミュレーションにより耐震安全性診断を行う。この際、設計図面から推定したモデルパラメータによる地震応答解析モデルも構築し、モデルパラメータの差が耐震診断結果にどのような影響を与えるかについて検討する。

4. 研究成果

本研究は、実建物の耐震安全性診断のために建物のモデルパラメータを精度よく同定する方法を開発することを目的とした。その目的を達成するため、現有の地震計を有効活用してIT計測技術を用いた収録システムを新たに構築し、観測された波形から建物のモデルパラメータ（質量、剛性、減衰）を逆同定することにより、建物の正確な耐震安全性診断が出来るシステムの開発に向けた研究

を主眼として行った。

まず、現有の地震計と組み合わせて、長期間に渡り連続して多点においてデータ収録を行い、IT計測技術を駆使してデータ収録をするシステムを開発した。開発した収録システムにより連続・多点・広周期帯域について安定的にデータ収集を行うことが可能となった。収録したデータはリアルタイムでウェブブラウザにより確認することが出来る(図1)。



図1 連続・多点データ収録システムでの収録データのリアルタイム表示画面

京都大学宇治キャンパスに在る単純な実大鉄骨骨組み架構に設置した新収録システムにより長期間・多地点において同時に安定的にデータを収録した。

この観測を行うことにより、収録データに見られる実建物の時間変化について把握することができた。上階の各階と1階のフーリエスペクトル比に着目して検討を行った結果、フーリエスペクトル比の卓越振動数は季節や日夜の気温および降雨による影響少ない一方、風による影響が大きいことがわかった。例えば、図2に示す平成24年9月28日15時は気温が30度に達していたが平均風速は2m/s前後と小さくスペクトル比は安定しており他の時間帯と差がないのに対して、図3に示す9月30日15時は気温が20度だが平均風速が9m/sと大きくスペクトル比が安定しない。

フーリエスペクトル比から得られる固有振動数の変化は、時間変化、日変化、月変化ともに0.5%未満であるが、季節による変化は10月と12月で比較すると、やや大きいものの0.5~2%程度である

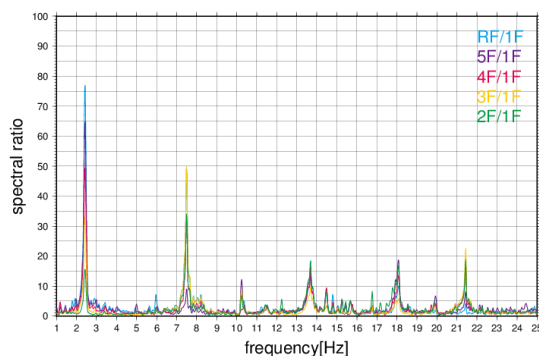


図2 平成24年9月28日15時の上階の各階と1階のフーリエスペクトル比(NS方向)

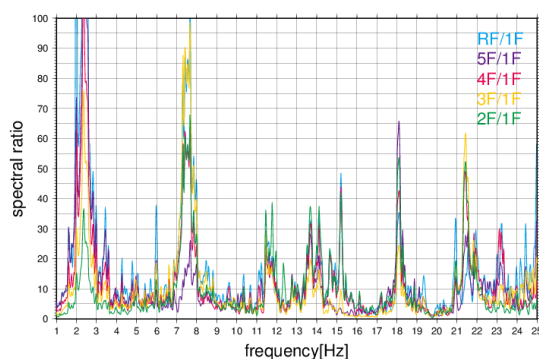


図3 平成24年9月30日15時の上階の各階と1階のフーリエスペクトル比(NS方向)

フーリエスペクトル比から読み取れる固有振動数からは質量と剛性の比しか得られない。このため固有振動数をターゲットとした同定では、各階の質量などは設計図面から算定した値を使い剛性のみを対象とするのが一般的である。しかしながら、この手法では相対的な剛性しか得られない。本研究では、実際の質量と剛性を得るために建物全体の3%弱の付加質量を各階に設置する計測を一定期間継続して行い、付加質量を設置した際の一次と二次の固有振動数の変化を説明できる剛性のみならず質量をも同定した。その結果、図4に示すように付加質量を各階に設置した場合(図の横軸の1~5は付加質量の設置階を示す)と付加質量がない場合(図の横軸0)にも固有振動数を説明出来るモデルを同定することができた。同定したモデルパラメータは、表1に示す値となった。表2に示す初期モデルの値と比べると実際の建物の図面から推定された値と比べ階によっては剛性が約50%、質量が約65%であることがわかった。

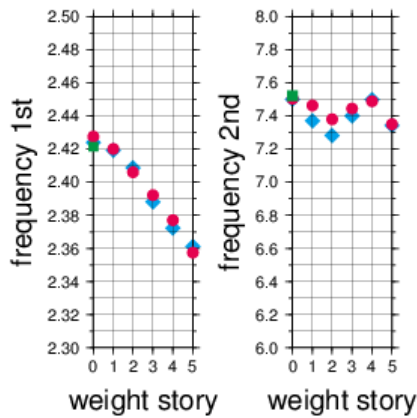


図4 一次および二次共振振動数同定後の共振振動数の比較 (NS 方向)

表1 同定モデルのモデルパラメータ

NS	K[N/m]	M[kg]	EW	K[N/m]	M[kg]
5	5.49E+07	22273	5	3.58E+07	21926
4	6.19E+07	21347	4	4.09E+07	21216
3	4.97E+07	20545	3	2.98E+07	20603
2	6.98E+07	15162	2	5.34E+07	16267
1	5.90E+07	16144	1	3.86E+07	17206

表2 初期モデルのモデルパラメータ

NS	K[N/m]	M[kg]	EW	K[N/m]	M[kg]
5	9.11E+07	20831	5	3.04E+07	20831
4	8.87E+07	21847	4	2.96E+07	21847
3	8.87E+07	21847	3	2.96E+07	21847
2	1.38E+08	23056	2	4.60E+07	23056
1	1.22E+08	23633	1	4.10E+07	23633

一方、東北地方太平洋沖地震の際に大阪湾岸の超高層建物で観測された地震動についての建物応答シミュレーションにより、実建物の減衰定数についての検討を行った。その結果、減衰定数が短辺方向で0.1~1.5%、長辺方向で0.5~2.0%と設計値よりもかなり小さかったことを確認した。

平成23年3月に平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震により東日本大震災が発生したため、本震時に大加速度が記録された地域や震動被害のあった地域を調査し、実建物の耐震安全性の診断を行うための情報を収集した。

今後は、これまでに蓄積されてきた計測データを用いて、波動干渉法により抽出される2地点間のグリーン関数の精度の確認をした

上で、モデルパラメータの同定手法を確立する。さらに、得られたモデルパラメータから建物全体系の地震応答解析モデルを構築し、想定地震発生時の予測地震動に対する応答シミュレーションにより、既存の建物の耐震安全性を精度よく診断できる方法を開発する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計8件)

- ① 宝音図、川瀬博、松島信一、2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能、東日本大震災2周年シンポジウム、2013年03月29日、東京都港区 建築会館
- ② Yuta Akizuki, Hiroshi Kawase, Shinichi Matsushima, A Study on the Response Characteristics of a High-Rise Building Built on the Reclaimed Land along the Osaka Bay, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012年09月27日, Centro de Congressos de Lisboa, Lisbon, Portugal
- ③ 宝音図、川瀬博、松島信一、2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能、平成23年度京都大学防災研究所研究発表講演会、2012年2月22日、京都府宇治市 京都大学防災研究所
- ④ Hiroshi Kawase, Baoyintu, Shinichi Matsushima, Strong Motion Characteristics of Tohoku, Japan Earthquake of March 11, 2011 in Terms of Damage Potential to Buildings with Different Construction Types, Seismological Society of America 2011 Annual Meeting, 2011年4月15日, Memphis, Tennessee, USA
- ⑤ 長嶋史明、前野敏元、松島信一、川瀬博、微動観測による建設中の免震建物の振動特性評価、第13回日本地震工学シンポジウム、2010年11月19日、茨城県つくば市 つくば国際会議場
- ⑥ 宝音図、川瀬博、松島信一、観測データに基づいた耐震補強効果の定量的評価手法に関する研究—京都大学宇治地区研究所本館を対象に、第13回日本地震工学シンポジウム、2010年11月19日、茨城県つくば市 つくば国際会議場
- ⑦ 長嶋史明、前野敏元、松島信一、川瀬博、微動観測による建設中の免震建物の振動特性評価、日本建築学会2010年度大会(北陸)、2010年9月10日、富山県富山市 富山大学

- ⑧ 宝音図、川瀬博、松島信一、微動観測による構造物の耐震補強前後の振動特性とその耐震性評価—京都大学宇治キャンパス本館を対象に、日本建築学会 2010 年度大会（北陸）、2010 年 9 月 10 日、富山県富山市 富山大学

〔図書〕（計 1 件）

- ① 島山直己、観測記録に基づく実大鉄骨架構の物理パラメタ同定に関する研究、京都大学卒業論文、2013、83

〔その他〕

ホームページ等

収録データリアルタイム表示システム

<http://quake00.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 信一 (MATSUSHIMA SHINICHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：30393565

(2) 研究分担者

川瀬 博 (KAWASE HIROSHI)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：30311856

(3) 連携研究者

浅野 公之 (ASANO KIMIYUKI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：80452324

赤澤 隆士 (AKAZAWA TAKASHI)

(財) 地域地盤環境研究所・地球科学研究

部門地震防災グループ・主任研究員

研究者番号：80452324