

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630234

研究課題名(和文)パルス波建物内伝播実験に基づく免震建物の最大応答簡易予測式の構築

研究課題名(英文) Approximate Maximum Deformation Evaluation of Base-Isolated Buildings Considering Collision against Retaining Wall Based on Experimental Study

研究代表者

林 康裕 (HAYASHI, YASUHIRO)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70324704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、想定を超えた内陸地殻内地震時における、免震建物の擁壁への衝突を考慮した合理的な設計法を構築することを目的とする。まず、パルス性地震動に対する基礎免震建物の擁壁衝突時応答を把握するため、模型を用いた振動台実験をおこない、衝突による高次モード振動成分の励起を確認した。次に、パルス性地震動に対する非線形1自由度系の最大応答変形を簡易に予測する方法を構築し、擁壁衝突可能性を簡易に評価可能とした。最後に、多自由度系せん断型モデルを用いてパルス性地震動に対する免震建物の応答特性を把握し、その知見を基に、衝突によって励起された高次モードを考慮可能な、免震層の簡易最大応答変形予測手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The objective of our study is to develop a rational seismic design method of base-isolated buildings considering the collision against retaining walls during unexpected large inland shallow earthquakes. First, we grasp the dynamic response behavior of base-isolated buildings after the collision based on shaking table tests. Next, it is demonstrated that the maximum deformation of the isolator is efficiently estimated from a theoretical solution of a nonlinear single-degree-of-freedom system subjected to sinusoidal pulse. Finally, an approximate method to estimate the maximum deformation of a building modeled by the multi-degree-of-freedom system considering the effect of the collision against retaining walls and induced higher mode response of the superstructure.

研究分野：建築耐震構造

キーワード：免震建物 パルス性地震動 擁壁衝突 建物内伝播 振動台実験 最大応答変形 最大応答加速度 簡易評価

### 1. 研究開始当初の背景

南海トラフの巨大地震の発生や、その前後には内陸直下地震が多発し、通常の設計で想定しているよりも大振幅の地震動が大都市を襲うことが懸念されている。想定を超えるような地震動に対しては、建物の終局状態を把握し、それに至るまでの安全余裕度などを確認しておくことが重要である。免震建物の場合には、免震層の変形が大きくなり、建物・擁壁間のクリアランスを超過して、免震建物が擁壁に衝突する可能性がある。クリアランスの大きさを検討する際には、アイソレータ(免震装置)の水平変形能力(破断限界)よりも大きくするのか、破断するより前に衝突させるのかといった設計判断が必要となる。また、擁壁へ衝突した場合には、上部構造へ衝撃力が伝播し応答が増幅する。そしてその衝撃力により、免震層のせん断力が増大し、上部構造の塑性化が大きく進展する可能性もある。

このような背景の下、申請者らは解体予定の5階建て免震建物を対象とした世界で初めての擁壁への衝突実験を行い、衝突時における擁壁・地盤の抵抗特性や免震建物への影響など、貴重な実験データを取得している。想定を超える大振幅地震動に対して最悪の事態に備えるためには、免震建物と擁壁の衝突挙動に対する設計検討が求められる。一つの検討方法としては、建物・擁壁の衝突を考慮した非線形時刻歴応答解析が挙げられる。時刻歴応答解析は、詳細な解析結果が得られる一方、上部構造や免震層の終局状態に及ぼす影響がどの程度であるかの見通しを得るにも詳細な検討を必要とし、通常の実務設計には適していない。これに対して、衝突を考慮しない時刻歴応答解析の結果を基にして、衝突直前と最大応答発生時刻の2つの時刻におけるエネルギーの釣合から、擁壁衝突を考慮した免震建物の簡易応答予測法が提案されている。ただし、擁壁剛性が大きな場合には、建物内を衝撃的な波動が伝搬するため、建物の各層は同時に最大応答が発生せず、エネルギーの釣合から最大応答予測を行う方法では推定精度が十分でなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、(a) パルス波が建物内を伝播する性状(高次モードの励起性状)を実証的に把握した後、(b) 免震層の簡易最大応答予測し擁壁への可能性評価を行う手法を構築するとともに、(c) パルス波の建物内伝播特性を考慮した建物応答予測法の構築を行い、想定を超える地震動に対する建物の終局状態における安全性検証法を合理化し、来るべき大地震に対する免震建物の安全性向上に資する成果へと繋げる。

### 3. 研究の方法

- 1) 震動台実験
- a) 実験方法

試験体は基礎免震で、上部構造は4層の模型である。上部構造は、床板は12mm×390mm×390mmの鉄板、柱は1.6mm×200mm×28mmの鉄板で、柱はL字金具とボルトにより固定して構成する。上部構造質量は80.0kgである。また、比較のために、非衝突の場合(CI-N)と免震層を基礎4隅をボルトで固定した基礎免

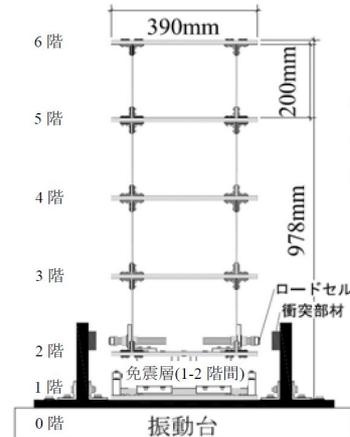


図1 衝突実験の試験体

震試験体(CF)も使用している。

基礎免震試験体の固有振動数は、フーリエスペクトル比を基に推定し、1次モードが0.47Hz、最高次の5次モードが17.1Hzである。

擁壁剛性の影響を調べるため、擁壁を模した衝突部材を種々変化させる。用いた衝突部材は厚さ30mmの鋼板(CI-S)、厚さ8mmの天然ゴムシート(CI-R)、厚さ8mmのポリプロピレン衝突(CI-T)とする。衝突部材の初期剛性は振動台実験における最大衝突荷重以上の範囲を含めて評価している。衝突部材の初期剛性は上部構造層剛性44.4N/mmの1.17倍~318倍である。衝突荷重を測定するため、上部構造にロードセルを設けて、ロードセルを介して擁壁材料に衝突させている。

衝突部材を設けない非衝突実験と各衝突部材を設置した衝突実験をおこなった。入力波はいずれも正弦波パルスとした。ここで、パルス波の特性値を $D_p$ (mm)、 $T_p$ (s)のように表し、 $D_p$ 、 $T_p$ を変えて入力を行い応答の変化を分析する。振幅は $D_p=55$ mmで固定し、 $T_p$ を0.6~1.8sに変化させた。衝突実験では、最も応答変位の小さい実験ケースでも衝突が発生するようクリアランスを5mm程度とした。

パルス周期 $T_p=0.8$ sの衝突・非衝突実験における2階・6階の加速度波形を見ると、2階では衝突に伴う瞬間的な加速度増大し、特に剛性の高い鋼板に衝突した場合の増大傾向が顕著である。しかし、2階で現れたスパイク状波形が6階では現れず、高振動数の波が上層階に伝達していない。同波形のFFT分析結果より、試験体5次モード以上の高振動数領域において、6階では2階と比較して振幅が約2オーダー低下しており、衝突により

下層階で生じた固有モード以上の高振動数の波は上層階への振動伝達率が非常に小さいと判断される。一方、衝突時には2階・6階ともに試験体の2~5次モード振幅が1次モード振幅と同程度に増大しており、衝突により高次モードが励起されたと判断される。また、各次固有振動数における試験体のゴム衝突時と鋼板衝突時のフーリエ振幅は、試験体5次モード以上の高振動数領域の振幅と比較して差が非常に小さい。

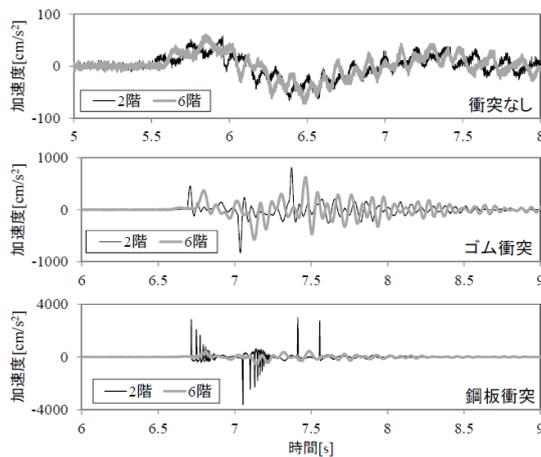


図2  $T_p=0.8s$  の場合の応答加速度波形

衝突・非衝突試験体に各周期の正弦波パルスを入力した実験ケースの最大加速度、最大層間変位を調べている。 $T_p$  が短いほど、また衝突部材剛性が高いほど最大加速度は大きい。上述のように、衝突時に生じる固有モード以上の高振動数の波は上層階への振動伝達率が小さいため、衝突実験ケースでは2階のみ最大加速度が増加し、3階より上層の最大加速度は2階よりも大きく低減しており、3~6階の最大加速度はほぼ一定である。最大層間変位については、非衝突実験では $T_p$ によらず免震層層間変位と比較して上部構造の層間変位が大きく低減しており、免震効果が発揮されている。これに対し、衝突実験では $T_p$ が短周期になるほど上部構造の最大層間変位が増加し、免震効果が失われている。

一方、衝突部材に着目すると、2階の最大加速度は鋼板が他2部材衝突時の3倍以上の値であるのに対し、6階では各部材衝突時の値はほぼ同等であった。最大層間変位については2階・6階ともに衝突部材による顕著な差は無かった。

## 2) 免震層の簡易最大予測 (衝突可能性評価)

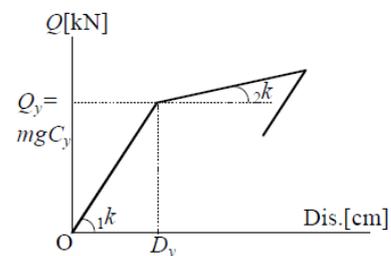
本研究では、内陸地殻内地震の震源近傍で発生するパルス性地震動に対して、基礎免震建物の擁壁衝突可能性を簡易に評価することを目的として、免震建物の最大応答変位の簡易評価法を提案している。

まず、提案法構築において、パルス性地震

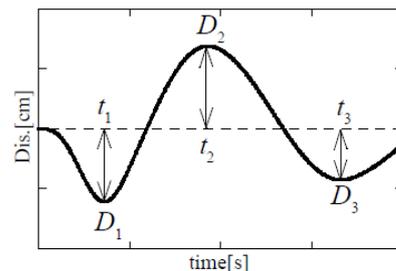
動を正弦波1波からなる正弦波パルスで近似することで、パイリニア型の復元力特性を有する非減衰1自由度系でモデル化された免震建物の最大応答変位予測式を、理論的に導出している点に独創性を有する。

また、正弦波パルス入力の場合には、変位応答波形の1つめの極値 $D_1$ で最大値が生じる場合に、時刻歴応答解析に比べて応答スペクトル法では小さめの評価となるが、提案法では大幅に精度が向上している。

さらに、観測波や予測地震動などのパルス性地震動に適用する場合には、免震周期(2次剛性に基づく周期)における変位応答スペクトルを、パルス性地震動と正弦波パルスとで一致させることで、実用的な精度で応答予測が行えることを示した。



(a) 1自由度系の復元力モデル



(b) 変位応答波形の極大値

図3 免震建物のモデル化と正弦波パルスに対する変位応答

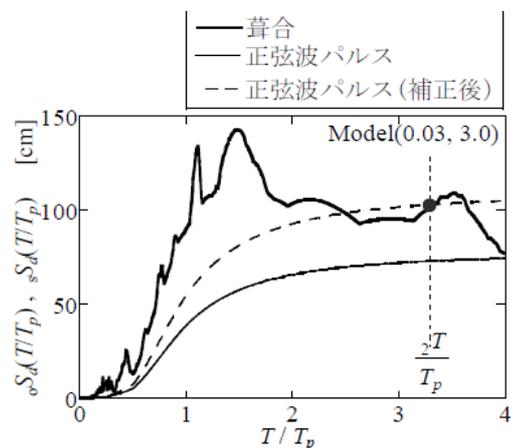


図4 観測波(葺合波)に対する精度検証

### 3) 擁壁衝突時の最大応答評価

本研究はパルス性地震動下における、免震建物の擁壁衝突時の簡易最大応答予測法の提案を目的としたものである。最大応答予測法を構築するにあたり、まず、せん断多質点系モデルを用いた時刻歴応答解析により、免震建物の擁壁衝突時の挙動を明らかにした。そして、その知見を基に、最大応答予測法を提案を行い、精度検証を行った。

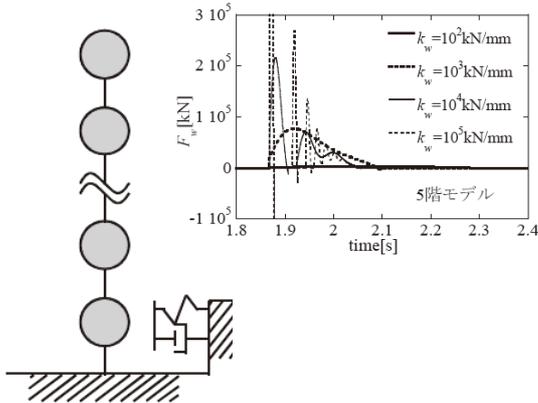


図5 擁壁衝突を考慮したせん断多質点系モデルと衝突時の衝突力  $F_w$  の例

- a) 衝突中に、建物が受ける力（衝突力）は、擁壁部剛性・建物規模などにより著しく変化する。その原因は免震層と上部構造における卓越周期の違い・減衰定数の変化から説明できる。
- b) 擁壁部剛性に関わらず、擁壁への衝突時間は、擁壁に接触している時の1次固有周期の概ね0.5倍になる。

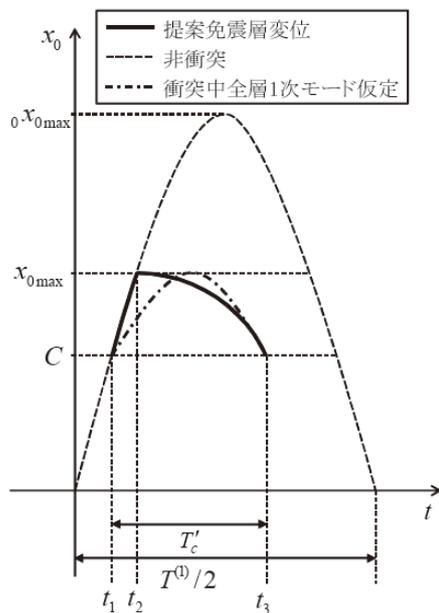


図6 擁壁衝突時間  $T_c$  のモデル化

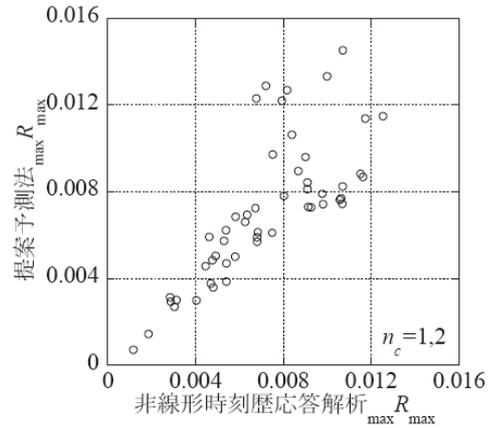


図7 提案法の精度検証

c) 擁壁部剛性を増大させると、擁壁に接触している時の最高次の固有周期は、免震層上部基礎の質量  $m_0$  と擁壁部剛性  $k_w$  を用いて表される値  $T_0 = 2\pi(k_w/m_0)$  に漸近する。衝突力にもこの周期  $T_0$  が励起されるため、 $k_w$  が大きい場合の解析では  $T_0$  が追えるような時間刻みを設定すべきである。

d) 衝突と等価な外力（提案波□を擁壁衝突部に作用させ、時刻歴応答解析をする手法を提案予測法として提案した。提案予測法は本研究で用いた5階・15階・45階モデルいずれにおいても、各層の最大応答を概ね予測できた。ただし、階数が多くなると精度が悪くなる傾向が見られた。また、提案波は、単純明快であり、擁壁部剛性が変化した時の応答変位への影響の理解を促進するものとして、簡便な計算により得ることができる。また、提案予測法は、時間刻みによる影響が小さいという利点がある。

### 4. 研究成果

1) パルス波に対する基礎免震建物の擁壁衝突時応答を把握するため、模型を用いた振動台実験をおこない、衝突による高次モード振動成分の励起を確認した。また、パルス振幅  $D_p$  一定の条件下ではパルス周期  $T_p$  が短いほど最大応答が増加することを確認した。

2) パルス性地震動を簡単な数学的モデル(正弦波パルス)で考え、免震建物を想定した非減衰1自由度系の応答特性を分析した。さらに、運動方程式に基づく理論解とエネルギー釣合から最大応答変位を定式化し、簡易に評価できる手法を構築し、擁壁衝突可能性を簡易に評価可能とした。最後に、本手法と時刻歴応答解析、応答スペクトル法を比較することで、本手法の有効性について検討を行った。

3) 多自由度系せん断型モデルを用いてパルス性地震動に対する免震建物の応答特性を把握し、その知見を基に、高次モード（建物内の波動伝播）を考慮可能で、どのような擁壁部剛性・建物規模にも適用可能な簡易な最大応答変形予測手法を提案した。

提案予測法においては、衝突を考慮しない場合の時刻歴応答解析結果より得られた最大免震層変位と衝突直前の情報に基づき、免震建物が擁壁部から受ける反力を簡単な波形で近似的に再現可能とする点に新規性がある。反力を近似することで、擁壁への衝突を考慮した複雑な応答解析を実施することなく、擁壁部剛性が変化した際の建物応答への影響の理解を促進することができる。近似した反力を衝突位置に作用させて、数値積分による時刻歴応答解析を行う手法が提案予測法となっている。

#### 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)

[雑誌論文](計2件)

- 1) 安本 宏, 岡沢理映, 多幾山法子, 大西良広, 林 康裕: パルス性地震動に対する免震建物の擁壁衝突時の最大応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, No.697, pp.385-392, 2014.3.
- 2) 岩崎光博, 杉野未奈, 林 康裕: パルス性地震動に対する免震建物の簡易最大応答評価, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, 517-520, 2015.6. (掲載予定).

[学会発表](計6件)

- 1) Y.Hayashi, R.Okazawa, H.Yasumoto, H.Minami: Dynamic Response Characteristics of Buildings Subjected to Pulse-like Ground Motions, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, August 24-29, 2014.
- 2) 三輪田吾郎, 安本宏, 多幾山法子, 大西良広, 林 康裕: 免震建物の擁壁衝突時の挙動と最大応答の評価, シンポジウム「想定を超える地震・地震動に対する建築物の応答と今後の耐震設計」, 日本建築学会近畿支部 耐震構造部会, pp.29-38, 2013.7.2.
- 3) 林 康裕, 竹本直紀, 横山亮, 三輪田吾郎, 杉野未奈: パルス波に対する模型振動台実験: その1.実験概要, 日本建築学会大会梗概集, pp.897-898, 2014.9.
- 4) 三輪田吾郎, 竹本直紀, 横山亮, 杉野未奈, 林 康裕: パルス波に対する模型振動台実験: その4.基礎免震建物模型の擁壁衝突実験, 日本建築学会大会梗概集, pp.903-904, 2014.9.
- 5) 岩崎光博, 杉野未奈, 山本大翔, 林 康裕: 免震建物の正弦波パルスに対する簡易最大応答評価, 日本建築学会大会梗概集, pp.903-904, 2014.9.
- 6) 林康裕, 岡沢理映: 予測される建物応答と懸念される被害, シンポジウム「兵庫研南部地震から20年 何を学び、どう耐震設計に反映するか?」, 日本建築学会近畿支部 耐震構造部会, pp.29-38, 2014.7.8.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

林 康裕 (HAYASHI YASUHIRO)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70324704