



力積を用いた時刻歴応答解析による免震建物の衝突 時応答評価

福井, 弘久

藤谷, 秀雄

向井, 洋一

伊藤, 麻衣

Mosqueda, Gilberto

(Citation)

構造工学論文集 B, 66B:295-304

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007828>



力積を用いた時刻歴応答解析による免震建物の衝突時応答評価

RESPONSE EVALUATION OF BASE-ISOLATED BUILDINGS DURING A COLLISION BY TIME HISTORY RESPONSE ANALYSIS USING IMPULSE

福井 弘久*, 藤谷 秀雄**, 向井 洋一***, 伊藤 麻衣****, Gilberto Mosqueda*****
Hirohisa FUKUI, Hideo FUJITANI, Yoichi MUKAI, Mai ITO, and Gilberto MOSQUEDA

The objective of this study is to examine the impact response of the base-isolated buildings during a collision with retaining wall using a shaking table and to evaluate it by impulse input analysis. In this paper, the impulse which was input to the first floor during a collision was focused. First, the collision test results showed that the increase of the response of the superstructure during a collision was affected by the impulse input to the first floor. Second, the numerical simulation using as the impulse was carried out. The results of impulse analysis showed good agreement with the test results. Finally, response composite wave was investigated by superimposing the time histories of the impact response wave (damped free vibration wave) and seismic response wave in a case without collision. The response composite waves could give the high reproducibility of the experimental results, and the maximum value of floor accelerations and relative story displacement could also accurately estimate. The usefulness of this analytical method can be emphasized in the possibility to predict the response of the superstructure during a collision without using collision analysis.

Keywords : Collision, Retaining Wall, Base Isolated Structure, Shaking Table Test, Impulse input analysis

衝突, 擁壁, 免震構造, 振動台実験, 力積入力解析

1. はじめに

免震技術は、地震時における建物の損傷低減のみでなく、建物の機能保持においてももっとも効果的な手法の一つと考えられており、その性能が注目されている。免震建物は、免震層で地震動のエネルギーを吸収することで上部構造の応答を大きく低減することが可能であるが、免震層の変形が過大になると、周囲の擁壁に衝突する可能性が危惧される。国内では2003年十勝沖地震時に釧路市内の免震建物で300 mm程度¹⁾の免震層変位が観測され、近年では2016年熊本地震時に阿蘇にある免震病院で460 mm²⁾の免震層変位が観測された報告はあるが、いずれの場合も設計クリアランス内の最大変位であり、現在までに擁壁への衝突事例の報告はない。国外においては1994年ノースリッジ地震でのロサンゼルス市の免震建物での衝突事例の報告があるが、この衝突はエントランスの可動部の施工不具合に起因するものであり^{3) 4)}、世界的に見ても免震建物が擁壁に衝突した事例は、今のところ発生していない。しかし、今後、速度振幅の大きなパルス状の波形を含む断層近傍のパルス性地震動や免震周期に近い周期を持つ長周期地震動などが作用した場合は、免

震建物が擁壁に衝突する可能性は十分に考えられるため、衝突が上部構造や免震装置へ及ぼす影響が懸念されている。

このような地震動下において免震建物が擁壁に衝突した際に、上部構造がどのように応答し損傷するかなどを理解することは、建物の安全性を見極めるうえで非常に重要であり、近年ではE-Defenseを用いた実大RC造免震構造の擁壁衝突実験⁵⁾などが行われている。三輪田らは、過去に実大免震建物の擁壁衝突実験を行い、衝突時の応答を計測し、その後、衝突ばねを用いた質点系モデルや三次元立体モデルを用いた数値解析により実験の追跡を行った⁶⁾。また、海外でもMasroorらによって振動台を用いた擁壁衝突実験⁷⁾が行われ、実験結果を基に、局所的な変形と固体の振動を考慮した擁壁モデルを用いて比較を行った⁸⁾。

筆者らはこれまでに、振動台を用いた免震試験体の擁壁衝突実験を行い、衝突が上部構造の層せん断力や床応答加速度の応答増加に与える影響や、衝突の際の擁壁の剛性や免震層の衝突速度などの要因が上部構造の応答増加にどのように影響するかについて検証を行ってきた。さらに、数値解析により衝突時の挙動を再現するために、

*神戸大学大学院工学研究科 大学院生 博士課程後期
課程・修士(工学) 日本学術振興会 特別研究員(DC2)

**神戸大学大学院工学研究科 教授・工博

***神戸大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

****建築研究所 主任研究員・博士(工学)

*****カリフォルニア大学サンディエゴ校 教授・Ph.D.

Ph.D. Student, Graduate School of Engineering, Kobe University,
M.Eng. JSPS Research Fellow (DC2)

Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Structural Engineering, University of California, San Diego, Ph.D.

衝突ばねを取り入れた質点系モデルを用いて衝突解析を行い、実験結果との比較・検証を行うことで解析結果の妥当性を確認した⁹⁾。しかし、以上に述べた先行研究のように、衝突解析を用いて上部構造の応答評価を行う場合、擁壁の剛性などを適切にモデル化する必要がある、また、実務レベルでの使用を考えた場合、背後地盤の影響など、その他にも考慮すべき課題が挙げられる¹⁰⁾。

本論では、衝突時に 1FL 床 (Figure 1 参照、実験用試験体の免震階) に加わる力積に着目し、力積の大きさが上部構造の応答増加に与える影響に対して検証を行った。また、1FL 床に加わる力積を外力として、質点系モデルの 1FL 部分に入力した時刻歴応答解析を行い、実験結果との比較を行うことで擁壁衝突時の上部構造の挙動を追跡できることを確認した。さらに、質点系モデルの 1FL 床部分に力積を三角波外力として三角波パルス入力し、得られた衝突応答波形 (減衰自由振動波形) と非衝突時の時刻歴応答波形を重ね合わせることで、より簡易に衝突時の上部構造の最大応答を評価できる手法を提案した。これらの解析法を用いることで、衝突ばねなどを含んだモデルによる衝突解析を用いることなく、簡易な時刻歴応答解析のみで衝突時の上部構造の応答を推定できる可能性を示した。

2. 擁壁衝突実験

2.1 免震試験体

試験体図を Figure 1 に、試験体諸元を Table 1 に示す。各階は転がり支承 (THK 製フラットローラー) で支持され、復元力はコイルばねで与えられている。上部構造は押しばねであり、その素材は SWOSC (シリコンクロム鋼オイルテンパー線: JIS G 3560; 1994)、免震層は引きばねであり、その素材は SWP-A (ピアノ線 A 種: JIS G 3522; 1991) である。Figure 2 に 1 層ずつ、その層のみを可動にし、他の層を固定して自由振動実験を行い、得られた計測結果より、変形を横軸に、上部の質量と絶対加速度の積 (= 慣性力) を縦軸にプロットしたものを示す。Figure 2 より、本実験での可動範囲内では、各層のばねには線形特性があると判断している。免震層の減衰定数 (h) は自由振動実験で得られた波形から対数減衰率を用いて算出し、十分な波数が得られなかった上部層は RD 法¹¹⁾で評価 (重ねあわせ個数 200 個) した。減衰係数 (C) は、上部の総質量 (M) と可動層の水平剛性 (K) と同定した減衰定数 (h) を用いて、 $C=2h\sqrt{MK}$ より算出した。尚、今回は衝突時の衝撃応答評価における免震層でのエネルギー吸収の影響を除くためにダンパーは取り付けしていない。計測に用いた加速度計はリオン製サーボ型加速度計 LS-10C (最大計測値 約 30 m/s²) と、リオン製圧電式加速度 PV-87 (最大計測値 約 400 m/s²) を、変位計は免震層のみ SANTEST 製磁歪リニアセンサ GYKMR プローブを、1, 2, 3 層では共和電業製インダクタンス式変位計 DLT-AS シリーズを使用している。加速度応答評価に関して、基本はサーボ型加速度計の値を使用し、最大計測値を超えるケースのみ圧電式加速度計での値を使用するものとしている。計測の際には 100Hz のローパスフィルタ処理 (LPF) を行っている。今回、フラットローラーの摩擦に関しては、静止摩擦係数 (μ) で約 0.0037 程度であり、十分に小さいものとして考慮していない。

2.2 実験概要

振動台を用いて免震試験体を加振し、クリアランス約 150mm (反対側 200mm) に設置している擁壁 (Figure 3(a)) に、1FL 部分に

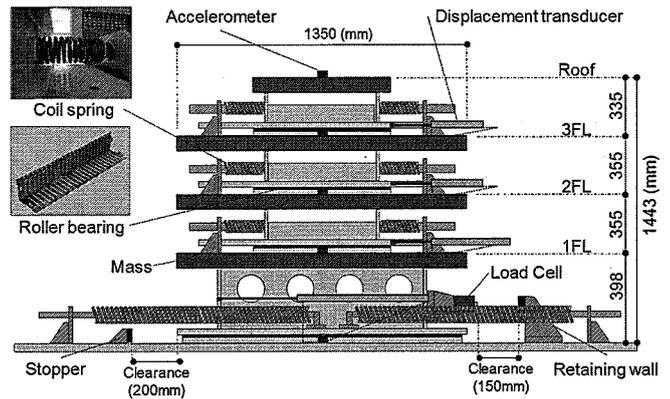


Fig.1 Configuration of base-isolated testing model

Table1 Structural properties of testing model

Floor	Mass (kg)	Story	Stiffness (N/mm)	Damping coefficient (N·s/m)
Roof	611.3 (=m ₄)	Third	138.1 (=K ₃)	1145.2 (=C ₃)
3FL	611.3 (=m ₃)	Second	221.5 (=K ₂)	1622.4 (=C ₂)
2FL	611.3 (=m ₂)	First	213.4 (=K ₁)	1539.5 (=C ₁)
1FL	713.2 (=m ₁)	Base-isolated	11.7 (=K _b)	430.6 (=C _b)

Natural frequency (Hz)	Mode			
	1st	2nd	3rd	4th
Base-isolated	0.33	2.11	3.70	5.32
Base-fixed	1.29	3.24	5.14	—

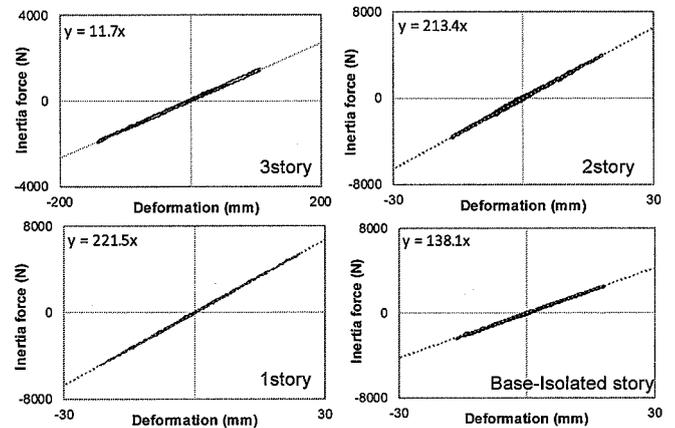
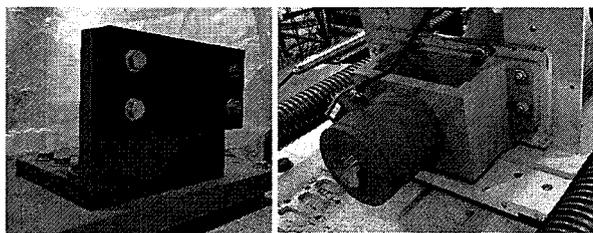


Fig.2 Restoring-force characteristic of springs

設置したロードセル (Figure 3 (b)) を衝突させることで免震建物の擁壁衝突を模擬し、その際の各階の床応答加速度、各層層間変位、衝突力をサンプリング周波数 1kHz ($dt=0.001$ s) で計測した。また、衝突の際の擁壁剛性の差が上部構造に与える影響を検討するため、擁壁の衝突部分に取り付けているゴム部材に硬度 50°, 70°, 80°, 90°のニトリルゴム (NBR) と、鋼材 (SS400) をそれぞれ使用した。ゴム部材については JIS K6254; 2010 の 5.1 圧縮試験の A 法に基づき圧縮試験を行い、圧縮力-変形曲線から各硬度のゴムのヤング率を算出した。測定結果を Table 2 に示す。入力波には、衝突速度 100 mm/s から 450 mm/s 程度 (試験体の免震層の浮き上がりが生じない上限) の応答速度を発生させるため、100 % 入力時に最大加速度振幅 3 m/s²、周波数 1.6 Hz の半周期正弦波パルスを 23 % から 35 % の範囲で 1% 刻み (Steel は 22.6 % から 24.4 % まで 0.2 % 刻み) に振幅を変化させて衝突実験を行った。以降、入力地震波の後に記載しているパーセンテージは 100 % 入力に対する振幅倍率としてい

る。(尚、振動台での正弦波加振時に最大加速度 (10 m/s²), 最大速度 (1 m/s) の上限スペックまで加振可能な周波数が 1.6 Hz であることから、半周期正弦波パルスの周波数は 1.6 Hz と決定している。)



(a) Retaining wall (b) Load cell
Fig.3 Photo of devices at colliding position

Table2 Young's modulus of rubber member

	Young's modulus: E (MPa)
Hardness 50°	3.69
Hardness 70°	6.82
Hardness 80°	18.53
Hardness 90°	25.99

3. 実験結果

本実験では、計測により得られた各層層間変位や各階床応答加速度、衝突力の値を用いて、衝突速度や擁壁剛性の違いによる上部構造の応答の変化を検証した。

3.1 衝突速度の算出方法

Figure 4 に示す時刻歴波形のように、免震層の層間変位がクリアランス変位に達して、加速度が急激に上昇する瞬間を「衝突時刻 (t_c)」とし、衝突時刻の直前 ($t = t_c - dt$) の速度を「衝突速度 (v)」と定義した。免震層の層間速度については、磁歪リニアセンサで計測された変位からアンプに内蔵された微分機能によって求めている。

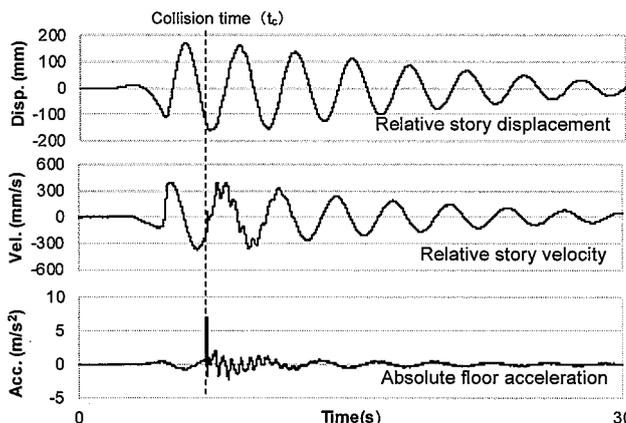


Fig.4 Time history of responses of base-isolated story and first floor (Half-sine 25%; Hardness 70°; With collision)

3.2 衝突速度—上部構造応答関係

3.2.1 衝突速度—最大層せん断力

各層の最大層せん断力と衝突速度の関係を Figure 5 に示す。「非衝突時の衝突速度」は、衝突時のクリアランスに達した際の速度としている。各層の層せん断力は、層間変位に層剛性を乗じた値 (式1) として算出し、衝突時については、衝突後の最大層せん断力を、非衝突時については、衝突時のクリアランスを越えた直後の最大層せん断力をプロットしている。

$$F_{d,n} = K_n \cdot x_n \quad (n = 1,2,3) \quad (1)$$

$$K_n = n \text{層層剛性} \quad x_n = n \text{層層間変位}$$

Figure 5 より、上部構造の最大層せん断力は衝突速度の増加に伴って概ね線形に増加することが確認できた。また、擁壁部材の剛性の大小にはほとんど依存せず、いずれの剛性の擁壁に衝突した場合でも生じた最大層せん断力は近い結果になった。

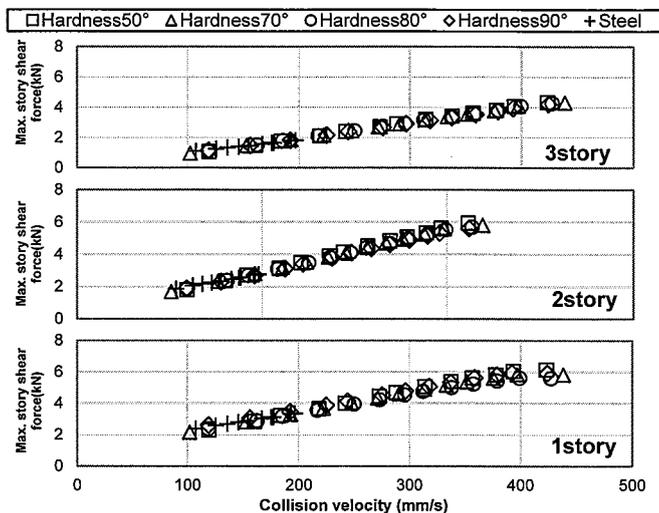


Fig.5 Collision velocity vs. story shear force relationship

3.2.2 衝突速度—最大床応答加速度

各階の最大床応答加速度と衝突速度の関係を Figure 6 に示す。衝突速度は 3.1 で述べた方法で算出し、床応答加速度は衝突の際に生じている最大床応答加速度を、非衝突時については、クリアランスを越えた直後に生じた最大床応答加速度をプロットしている。Figure 6 より、最大床応答加速度は衝突速度の増加と概ね線形の関係が確認できた。また、衝突階である 1 FL 床では、擁壁部材の剛性が高くなるに連れて、生じた最大床応答加速度が大きな値となることが確認でき、擁壁剛性の違いによる上部構造の応答の変化は主に衝突階において確認できた。

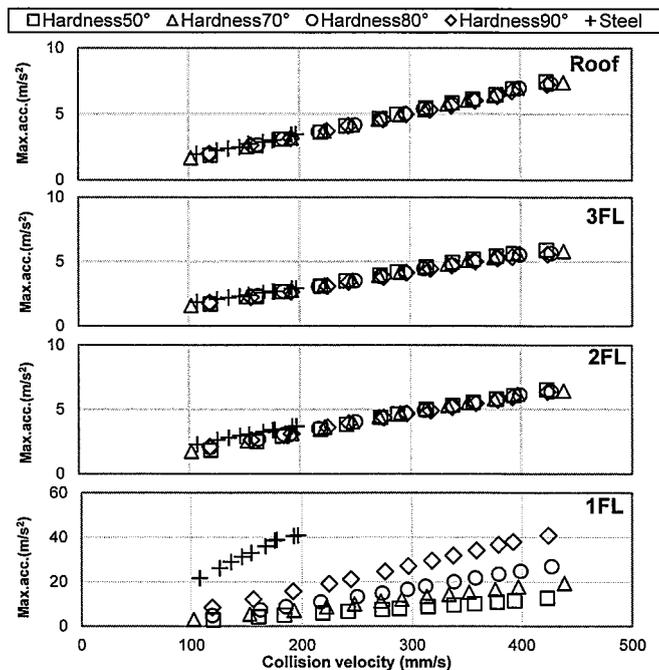


Fig.6 Collision velocity vs. floor acceleration relationship

3.2.3 衝突速度—最大衝突力

衝突速度と最大衝突力の関係を Figure 7 に示す。衝突力はロードセルにより計測された時刻歴波形より、衝突の際に生じている最大値をプロットしている。Figure 7 より、衝突時に生じた最大衝突力も衝突速度と概ね線形の関係が確認でき、衝突速度と最大床応答加速度の関係と同様に擁壁部材の剛性が高くなるに連れて最大衝突力も大きな値になった。

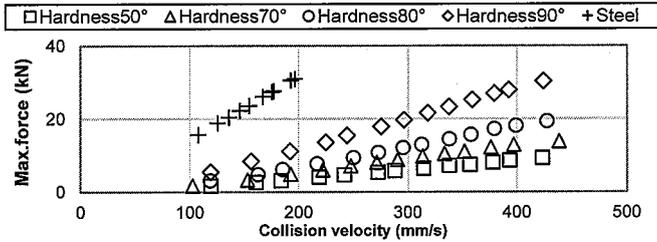


Fig.7 Collision velocity vs. impact force relationship

3.2.4 衝突速度—上部構造応答関係まとめ

本節の結果より、衝突による上部構造の応答は衝突速度の増加と概ね線形の関係に増加する傾向にあり、擁壁の剛性が高くなるにつれて衝突時最大床応答加速度、最大衝突力は増加する一方、最大層せん断力は擁壁剛性の変化に依存しないことが確認できた。

また、本検討では半周期正弦波パルスを入力したケースでの結果であるが、入力に地震動を用いた擁壁衝突実験結果より、衝突速度 - 上部構造応答関係は入力地震動の違いにほとんど影響を受けず、上部構造の応答増加は衝突の際の免震層の衝突の速度が支配的であることも確認できている¹²⁾。

4. 1FL 床に作用する力積

衝撃応答について、これまでの既往研究^{13),14)}より、構造物に瞬間的に力が作用する場合は、その力積によって破壊が生じるといった知見が確認されている。本章ではこれらの知見を基に、免震建物が擁壁に衝突した際に、1FL 床に加わった力積が上部構造の応答増加に対して影響を与えているものと推定し、ロードセルで計測した衝突力の値から、1FL 床に加わる力積を算出し、上部構造の応答増加との関係について検証した。

1FL 床に加わる力積値は、Figure 8 に示した衝突力の時刻歴波形（地動入力 Half-sine 35%）を基に、衝突により衝突力の値が上昇する時刻（衝突時刻 t_c ）から、擁壁との接触が終わり、再び衝突力の値がゼロに戻るまでの衝突時間内 (Δt) で積分すること（Figure 8 の斜線部分面積）で算出している。

Figure 9 に衝突速度—力積の関係を示す。Figure 9 より、1FL 床に加わる力積の値は、いずれの擁壁部材に衝突したケースでも衝突速度が増加するにつれて概ね線形に増加することが確認でき、衝突速度が同程度の場合では、1FL 床に加わる力積は擁壁部材の剛性にはほとんど依存しないことが確認できた。

このように、1FL 床に加わる力積が擁壁剛性の変化に依存せずほぼ同程度の値となることについて、Figure 10 に、一例として、各擁壁剛性に同程度（約 150 mm/s 程度）の衝突速度で衝突した際の、ロードセルで計測した衝突力の時刻歴波形の比較を示す。Figure 10 より、衝突する擁壁部材の剛性が高くなるに伴って最大衝突力は増加するが、反対に衝突時間 (Δt) が減少することがわか

る。これにより、それぞれ 1FL 床に加わる力積（Figure 10 各斜線部分面積）が同程度の値になっていることが説明できる。

以上より、3.2 節での実験結果に見られた、衝突時に上部構造の層せん断力の増加は擁壁剛性の違いにはほとんど依存しないといった事実については、衝突時の層せん断力の増加が 1FL 床に加わる力積の値に主に依存しており、この力積が擁壁剛性にほとんど依存せず、衝突速度に近い衝突では、力積が同程度の値となることが原因であると推測される。

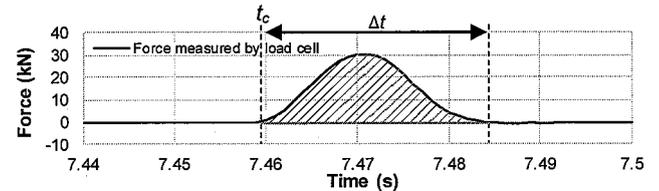


Fig.8 Time history of impact force measured by load cell (Half-sine 35%, With collision, Hardness 90°)

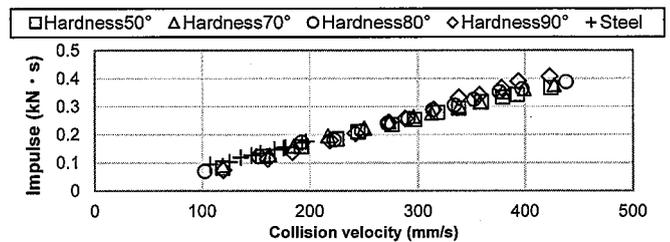


Fig.9 Collision velocity vs. impulse relationship

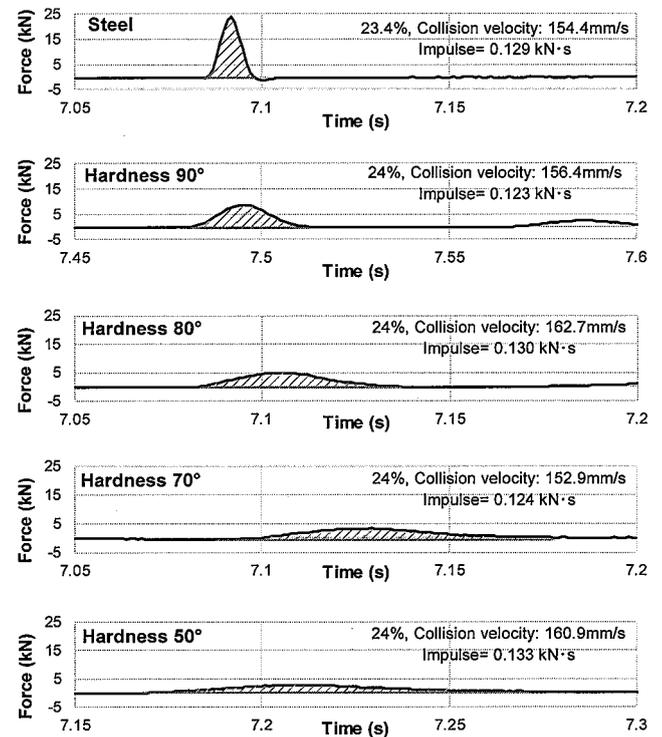


Fig.10 Time history of impact force measured by load cell (Half-sine, With collision)

5. 力積を入力した時刻歴応答解析による衝突現象の再現

4 章より、衝突時に上部構造に生じる層せん断力の増加は 1FL 床に加わる力積の値が支配的であると考察できる。本章では、実験で使用した免震試験体を質点系モデルへと置換し、衝突時に 1FL 床に

加わる力積を質点系モデルの 1FL 床の質点に作用させることで衝突時の上部構造の挙動を再現する解析を行い、衝突時の最大応答について実験結果との比較によって、解析手法の妥当性について検証を行う。次に、非衝突時の時刻歴応答波形と、衝突時の力積を三角波外力として 1FL 床の質点部分に三角波パルスとして作用させて得られた衝突応答波形（減衰自由振動波形）を重ね合わせることで衝突時の最大応答を、より簡易的に評価する解析手法の提案を行う。

5.1 力積を入力した時刻歴応答解析

解析ソフト Matlab を用いて、実験で使用した免震試験体を 4 質点系モデルへと置換して解析を行った。各階の質量、各層の剛性、減衰は Table 1 に示した値を用いており、刻み時間は実験のサンプリング周波数が 1 kHz であったことを考慮し、 $dt=0.001$ s で解析を行っている。上記で述べた質点系モデルに対して、地動（本検討では半周期正弦波パルス）を入力し、免震層変位が設定クリアランスを越えて擁壁に衝突する時刻（衝突時刻 t_c ）で、三角波外力を 1FL 床の質点に作用させて時刻歴応答解析を行った。解析に使用した質点系モデル図と解析概要図を Figure 11 に示す。使用した三角波は、最大衝突力 (F_{max}) を実験時のロードセルでの最大計測値と同じ値にし、三角形の面積 ($1/2 \cdot F_{max} \cdot \Delta t'$) が、実験で得られた 1FL 床に加わった力積の値と等しくなるように衝突継続時間 ($\Delta t'$) を調整することで決定している。

Figure 12 に一例として、半周期正弦波パルス 30% 入力時（硬度 90°）での各階床応答加速度、各層層間変位の実験と解析の時刻歴波形の比較を示す（三角波は、力積値：0.282 kN·s、 $F_{max}=21.2$ kN、 $(\Delta t'=0.026$ s) となるように設定）。

Figure 12 より、1FL 床部分に力積を加えた時刻歴応答解析を行うことで、衝突時に現れる応答の急激な増加が再現されており、各階最大床応答加速度、各層最大層せん断力も概ね解析結果は実験結果に近い値となっていることが確認できた。また、Figure 12 では、硬度 90°の擁壁部材に衝突したケースでの時刻歴波形の比較を示しているが、その他の剛性の擁壁に衝突したケースでも各階最大床応答加速度、各層最大層せん断力は概ね実験結果と近い値であった。このように、本解析手法によって、質点系に衝突の要素（擁壁を考慮した衝突ばね）を含めないモデルでも衝突時の上部構造の各階最大床応答加速度、各層最大層せん断力を概ね再現できる可能性を示した。

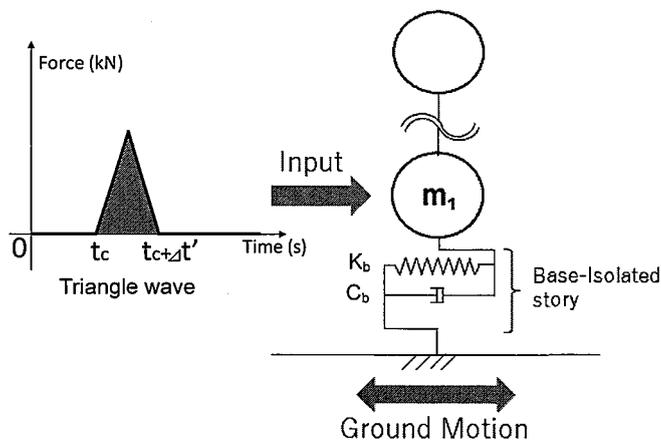
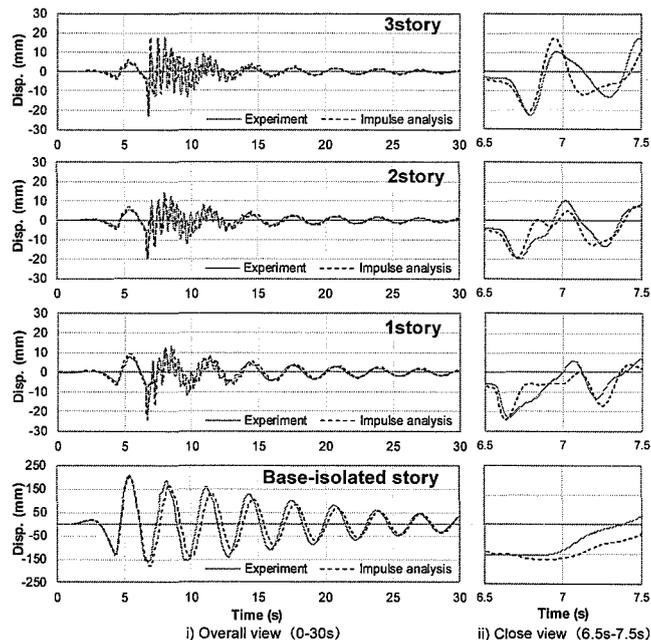
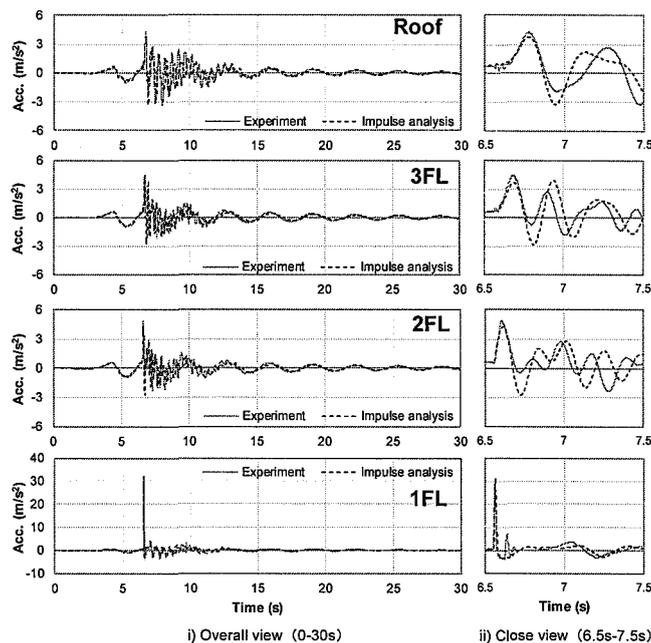


Fig. 11 Schematic diagram of impulse analysis



a) Relative story displacements



b) Absolute accelerations

Fig. 12 Comparison of relative story displacements and absolute floor accelerations between experiment and Impulse analysis (Half-sine 30%, Hardness 90°, Collision)

5.2 時刻歴応答波形の重ね合わせによる衝突時応答評価法

前節までの結果より、衝突時に上部構造に生じる層せん断力は、免震層に加わる力積の値によって変化し、力積を質点系モデルの 1FL 床の質点に入力した時刻歴応答解析を行うことで衝突時の上部構造の挙動を概ね追跡でき、実験時に生じた最大床応答加速度、最大層間変位を精度良く再現できていることを確認した。また、これまでの先行研究から、衝突時に生じる上部構造の床応答加速度、層せん断力に対して周波数領域からの検証を行ったところ、非衝突時では 1 次のモードが支配的であったのに対し衝突時では高次のモー

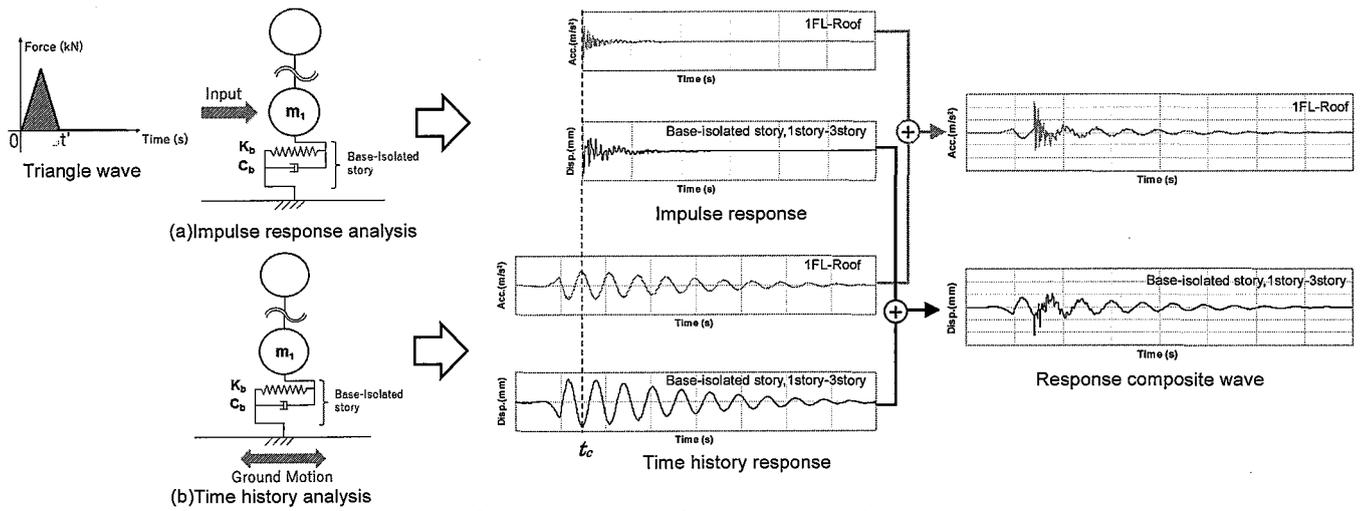


Fig.13 Schematic diagram of response composite wave

ドが励起されていることが確認できている¹²⁾。本節では、実験で用いた試験体の応答が概ね線形範囲内の応答であることから、1次モードが支配的である非衝突時の時刻歴応答波形をまず求めておき、衝突時に入力される力積を1FL床の質点への三角波パルス入力として作用させた場合に生じる、高次モードが卓越する衝撃応答(減衰自由振動波形)をあとから重ねあわせることで衝突時の上部構造の応答を模擬することを試み、5.1節で述べた解析手法に比べて、より簡易な応答解析のみで衝突時の最大応答を予測する手法を提案する。各階の質量、各層の剛性、減衰、刻み時間は5.1と同様の数値を用いている。Figure 13に、解析に使用した質点系モデルと解析概念図を示す。静止状態の質点系モデルに対してFigure 11で示した三角波(外力の作用開始時間を0とする。)を1FL床の質点に三角波パルス入力し、加速度、層間変位の減衰自由振動波形をそれぞれ得る(Figure 13(a))。また、質点系モデルに対して地動(本検討では半周期正弦波パルス)を入力し、加速度、層間変位の非衝突時時刻歴応答解析を行い、応答波形をそれぞれ得る。その後、非衝突時の免震層層間変位が設定クリアランスを越える時刻(衝突時刻 t_c)を基準として、地震応答解析により得られた上部構造の応答波形に、Figure 13(a)で得られた減衰自由振動波形を t_c 以降に足し合わせることで衝突時の応答を模擬した。(以降、「応答合成波形(Response composite wave)」と呼ぶ。)

Figure 14に、例として、半周期正弦波パルス30% (硬度90°)入力時に得られた床応答加速度、層間変位の応答合成波形と、実験より得られた計測波形との比較を示す(三角波外力は5.1で検討を行った場合と同様に、力積値: $0.282 \text{ kN}\cdot\text{s}$, $F_{max}=21.2 \text{ kN}$, ($\Delta t'=0.026 \text{ s}$)となるように設定)。Figure 14より、応答合成波形を用いた場合でも衝突時の上部構造の床応答加速度、層間変位の応答増加を概ね追跡でき、最大値についても十分評価可能であることを確認した。

ただし、免震層変位に着目すると本来、免震層変位がクリアランス位置へと達した瞬間に、衝突により強制的に免震層変位が抑制され進行方向と反対方向への運動となることで応答周期が変動するが、本節で示した応答合成波形を用いる手法、ならびに5.1節で述べた、1FL床部分に力積を加えた時刻歴応答解析のいずれの手法を用いた場合も、このような強制的な変位の抑制が再現できていないために、実験と解析結果で若干の位相差が生じたものと考えられる。

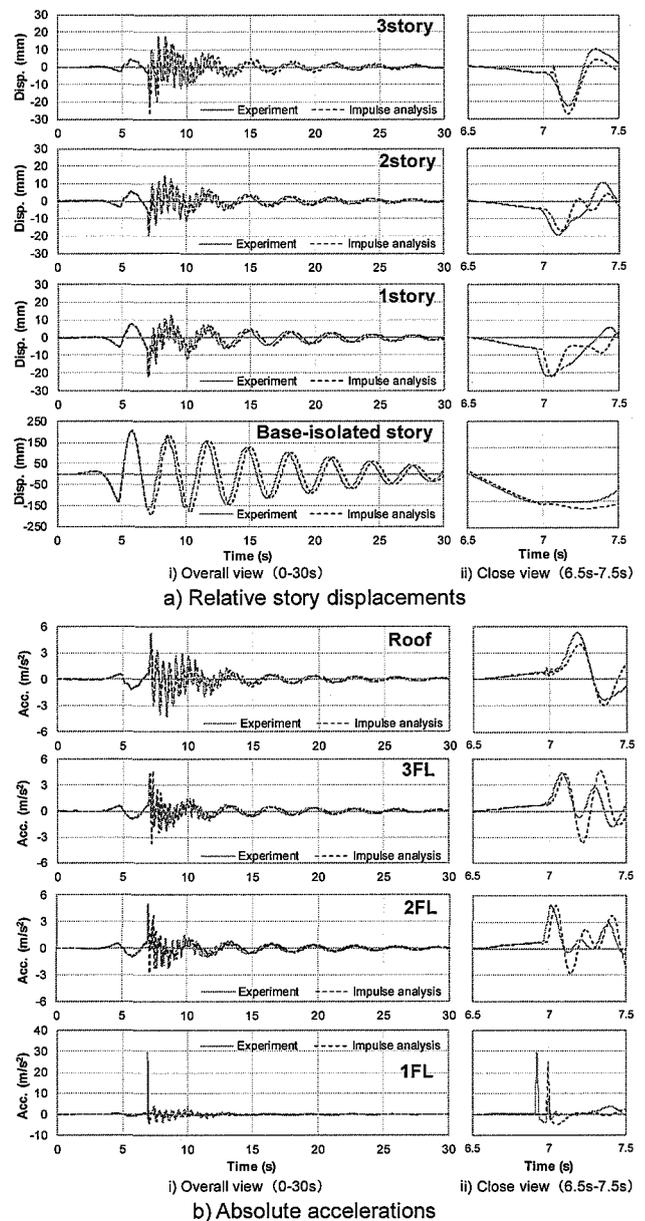


Fig.14 Comparison of relative story displacements and absolute floor accelerations between experiment and response composite wave (Half-sine 30%, Hardness90°, Collision)

5.3 全ケースでの最大応答値比較

Figure 15 に各擁壁剛性、入力倍率で、5.1 で述べた 1FL 床部分に力積を入力した時刻歴応答解析 (Impulse analysis) と、5.2 で述べた応答合成波形 (Response composite wave) をそれぞれ用いた際の各層最大層間変位と各階最大床応答加速度の解析結果の比較を示す。それぞれの解析で使用した三角波外力は、各入力倍率で衝突した際の衝突力波形より算出した力積値、最大衝突力から求めている。Figure 15 には、解析結果の最大応答値を実験結果の最大応答値で除した応答比としてプロットしており、縦軸の応答比が 1.0 に近いほど解析の精度が良い。各層最大層間変位を評価する場合については、力積を入力した時刻歴応答解析と応答合成波形のいずれを用いた場合でも、精度よく実験結果を再現できているものと考えられる。一方、最大床応答加速度を評価する場合については、擁壁剛性が高いケース (硬度 90°, Steel) で、応答合成波形の 1FL の最大床応答加速度の再現性が、力積を入力した時刻歴応答解析の結果に対してやや精度が低い部分があるものの、それを除けばいずれの解析手法でも概ね精度よく実験結果を再現していることが確認できた。

なお, Steel 部材に衝突した際の 1FL 最大床応答加速度について、両方の解析結果が実験結果に対して過少となっており、その他のケースでは床応答加速度、層間変位ともに実験と解析結果の差は 20% 未満であるのに対し、このケースのみ 20% を上回る差となった。ここで、周波数領域での検討を行った先行研究結果¹⁵⁾より、衝突時の床応答加速度波形には上部構造の層間変形には寄与しない床板内部の伝達波などの高周波数加速度成分が含まれており、擁壁剛性が高い

い場合には、それらの影響はより顕著であるといったことが確認できている。このことから、実験結果より得られた床応答加速度が、解析結果より得られた床応答加速度に対して大きな値となり、実験結果と解析結果に開きが生じたものと推測される。

以上の検証結果から、本稿で提案した、非衝突時の時刻歴応答解析波形と衝突時に入力される力積を 1FL 床の質点へ三角波パルス入力した衝撃応答波形を重ね合わせた応答合成波形による応答評価手法を用いて衝突時の上部構造の応答を評価した場合、各層層間変位の最大値については十分再現できており、各階の最大床応答加速度についても力積を入力した時刻歴応答解析に比べてやや精度は落ちるものの十分に追跡できていると考えられ、単純な地震応答解析結果と衝撃応答解析結果の足し合わせで非衝突時の時刻歴応答解析結果から衝突時の応答を評価できる点で有効な解析手法であると考えられる。

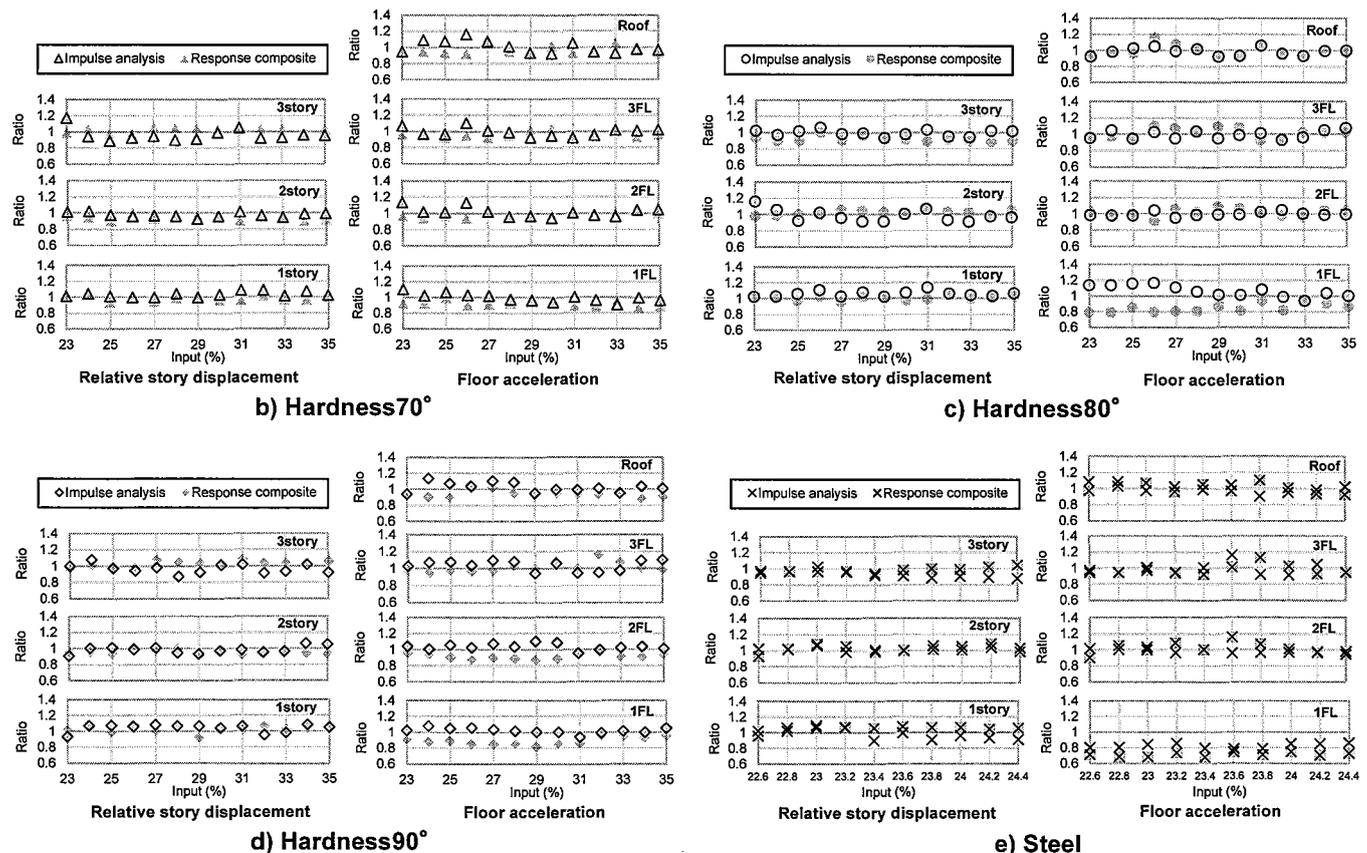


Fig.15 Comparison of maximum response ratio calculated by experiment and numerical simulation (Impulse analysis and Response composite wave)

5.4 地震動による応答合成波形の解析精度検証

これまでに入力に半周期正弦波パルスを用いた加振ケースで得られた実験結果と解析結果の比較を行ってきた。本節では、地震動を振動台に入力した衝突実験結果（クリアランス 150 mm，サンプリング周波数 1 kHz で計測）と応答合成波形との比較を行う。Figure 16 に一例として、最大加速度振幅を 30 % に調整した JR 鷹取波入力時（硬度 90°）での各階床応答加速度，各層層間変位の実験結果と応答合成波形の比較を示す。応答合成波形は，振動台実験で計測した加速度波形を質点系モデルに入力して得られた非衝突時の地震応答解析波形と，振動台実験より得られた衝突力の波形の値を基に算出した力積値，最大衝突力から設定した三角波外力（力積値：0.064 kN・s， $F_{max}=5.25$ kN， $(\Delta t'=0.024$ s）となるように設定）を 1FL 床の質点へ三角波パルス入力して得られた衝撃応答波形を重ね合わせて算出している。Figure 16 より，地震動入力時の上部構造の衝突時の挙動に対しても，応答合成波形は実験時の応答波形を概ね追跡できており，最大床応答加速度，最大層間変位も実験結果を精度よく再現していることが確認できた。また，これらの傾向は，入力地震動が異なる場合（El Centro 波，八戸波）でも同様の結果を得ており，本節での検討結果から，様々な周期成分が含まれている地震動を入力した際の上部構造の衝突時応答についても応答合成波形を用いて再現可能であることを示した。

（但し，本報の検討範囲では衝突は 1 回のみで，衝突直後の応答推定を扱っている。）

6. まとめ

本研究では振動台を用いた免震試験体の擁壁衝突実験を行い，ロードセルにより計測された擁壁との衝突力の値から，免震建物の 1FL 床に加わる力積を定量的に評価し，力積と上部構造の層間変位，床応答加速度の関係について検討を行った。また，衝突解析を用いることなく，衝突時に加わる力積の値を外力として入力する時刻歴

応答解析を行い，衝突時の最大応答値を精度良く追跡可能であることを示した。さらに，静止状態のモデルに力積の値を 1FL 床の質点へ三角波パルスとして作用させて，得られた衝撃応答波形（減衰自由振動波形）をあらかじめ求めておき，その波形と非衝突時の地震応答波形を重ね合わせた応答合成波形を提案し，実験結果との比較から，衝突時の応答を精度よく再現可能であることを確認し，提案した解析手法の有効性について示した。

1) 衝突時の応答に各要因が与える影響

衝突実験で計測された床応答加速度，衝突力，ならびに層間変位に層剛性を乗じた層せん断力の最大応答値は，いずれも免震層の衝突速度と概ね線形の関係にあった。また，擁壁部に取り付けているゴム部材の硬度を変化させた場合や，鋼材に衝突した場合など擁壁剛性の変化に伴う上部構造の応答の違いについて検討を行ったところ，最大床応答加速度，最大衝突力は擁壁剛性の増加に伴い増加したが，最大層せん断力は擁壁剛性の影響をほとんど受けなかった。

2) 力積と上部構造の応答との関係

ロードセルにより計測した衝突力の時刻歴波形より，1FL 床に加わる力積を算出した。力積は衝突時の衝突速度の増加に伴って概ね線形に増加していることが確認できた。また，擁壁剛性の増加に伴って最大衝突力は大きくなる一方，衝突時間が短くなることで，力積の値は擁壁剛性の違いにほとんど影響されなかった。このことから，衝突時に生じる上部構造の最大層せん断力が擁壁剛性に依存しないのは 1FL 床に加わる力積の値が擁壁剛性によって変化しないことに関連づけられるものと考えられる。一方，最大床応答加速度が擁壁剛性の大きさに依存するのは，1FL 床に加わる最大衝突力の値が擁壁剛性に依存し，衝突力が加速度応答に対して支配的であるためと考えられる。

3) 力積を入力した時刻歴応答解析

1FL に加わる力積を三角波外力として，質点系モデルの時刻歴応

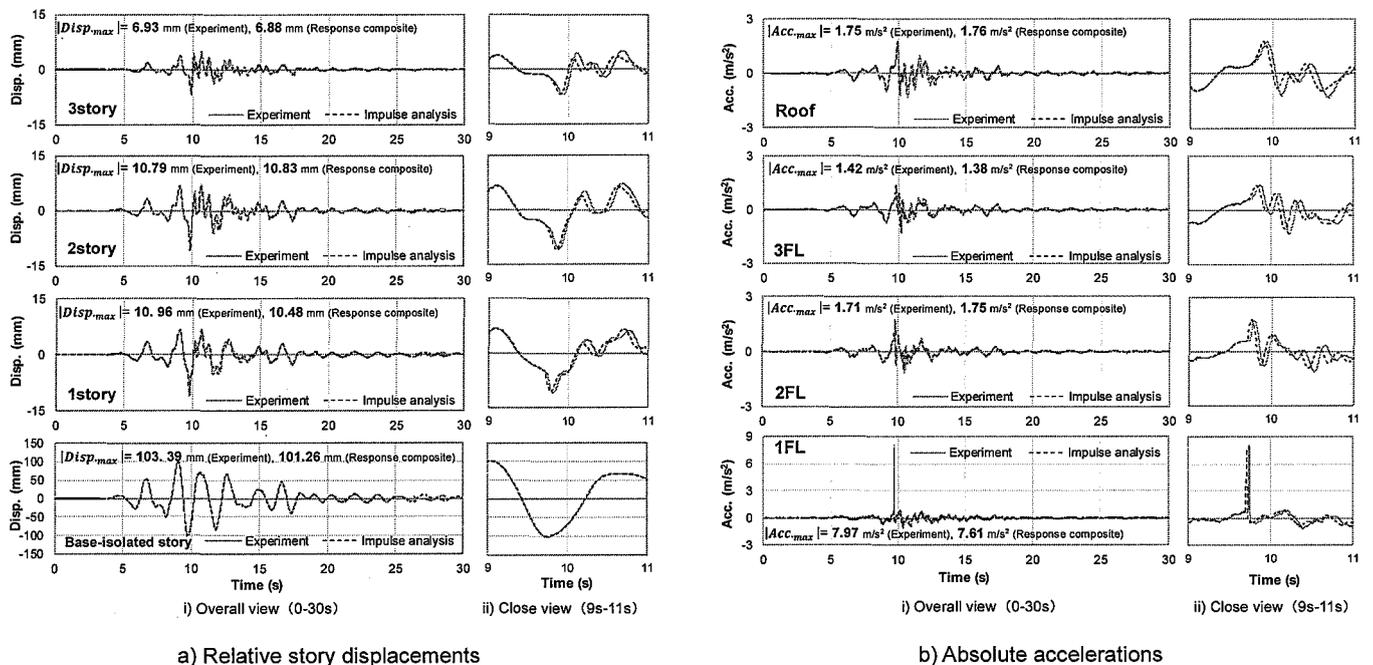


Fig. 16 Comparison of relative story displacements and absolute floor accelerations between experiment and response composite wave (Takatori 30%, Hardness 90°, Collision)

答解析中の衝突時刻 t_c に 1FL 床の質点に作用させることで、擁壁衝突時の上部構造の実験時応答と概ね近い応答波形が得られることが確認できた。また、最大床応答加速度、最大層間変位について実験結果との比較を行った結果、いずれの擁壁剛性に衝突したケースでも本解析で精度良く追跡できた。

4) 時刻歴応答波形の重ね合わせによる応答合成波形

三角波外力を 1FL 床の質点へ三角波パルス入力し衝撃応答波形（減衰自由振動波形）をあらかじめ求めておき、地動を入力した非衝突の応答波形を時刻歴応答解析により算出し、その後、衝突が起こる時刻（非衝突解析による免震層間変位がクリアランス変位を超える時刻）を基準として衝撃応答波形を非衝突時の応答波形に重ね合わせる応答合成波形による応答評価法を提案した。応答合成波形は、衝突時の上部構造の挙動を概ね模擬できており、最大床応答加速度、最大層間変位は実験結果を十分再現できることが確認できた。また、地震動が作用した際の衝突時応答評価においてもその有効性を確認できた。

本論で提案した解析手法を用いることで、擁壁をモデル化した衝突ばねなどを含む衝突解析とは異なり、非衝突の時刻歴応答解析のみで、衝突時の上部構造の応答を模擬できることを示した。また、応答合成波形による応答評価法では、力積を入力した時刻歴応答解析に比べて、剛性の高い擁壁に衝突した際の 1FL 最大床応答加速度などでやや応答評価の精度が落ちるものの、層間変位の評価には十分な精度を有しており、時刻歴応答解析中の衝突時刻に力積を外力として入力する過程を除き、単純な時刻歴応答解析結果のみで応答評価が可能である点で、より簡易な手法と考えられる。

ただし、今回は力積の値を求める際に、実測値を用いて算出しているが、非衝突解析結果からクリアランス変位を超える際の速度（衝突速度）と、物体間の材料特性から求まる反発係数を利用することで、運動量保存則により、理論値として算出することは可能であると考えている。今後は、設計値による力積から衝突時の上部構造の応答予測法の確立を目指す。

また、本実験で取り扱った上部構造、擁壁は、線形範囲の応答であり、現実に起こる擁壁衝突の際には、非線形範囲までの応答が十分に考えられることから、今後は非線形範囲を考慮した振動台実験、解析検証も必要である。

謝辞

本研究は 2019 年度 JSPS KAKENHI Grant Number JP 19J12113 の助成および、JSPS「国際的な活躍が期待できる研究者の育成 (R2904)」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Suzuki, Y., Takenaka, Y., Urushizaki, T. and Saito, H.: Behavior of a Base-Isolated Building in Kushiro City for the Tokachi-Oki Earthquake in 2003 (Part 1 and Part 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp.279-281, 2004.7 (In Japanese)
鈴木芳隆, 竹中康雄, 漆崎隆, 斉藤一: 2003 年十勝沖地震における釧路市内免震事務所ビルの地震挙動について (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.279-281, 2004.7
- 2) Takayama, M., Morita, K.: A study on the response of seismically isolated hospital in Aso during 2016 Kumamoto earthquake, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp.1051-1052, 2017.7 (In Japanese)
高山峯夫, 森田慶子: 熊本地震における阿蘇免震病院での地震応答 (けが

- き記録) に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.1051-1052, 2017.7
- 3) Earthquake Engineering Research Institute (EERI): Northridge Earthquake of January 17, 1994 (Preliminary Reconnaissance Report), Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 1994.3
- 4) Shakal, A., Huang, M., Darragh, R., Cao, T., Sherburne, R., Malhotra, P., Cramer, C., Sydnor, R., Graizer, V., Maldonado, G., Petersen, C. and Wampole, J.: CSMIP Strong-Motion Records from the Northridge California Earthquake of January 17 1994, California Strong Motion Instrumentation Program 1994, Report No. OSMS 94-07, 1994.2
- 5) Fukui, H., Yabuta, T., Fujitani, H., Ito, M., Sato E. and Sasaki, T.: Development of Innovative Base-Isolation Systems based on E-Defense Full-scale Shake Table Experiments (Part 6,7,8), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp.557-562, 2015.7 (In Japanese)
福井弘久, 藪田智裕, 藤谷秀雄, 伊藤麻衣, 佐藤栄児, 佐々木智大: E-Defense を用いた実大実験による免震技術の高度化 (その 6,7,8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.557-560, 2015.7
- 6) Miwada, G., Komaki, J., Sato, K., Sano, T., Katsumata, H., Takiyama, H. and Hayashi, Y.: Experiments and Simulation Analysis of Collision to Retaining Wall with Real Scale Base-Isolated Building, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.76, No.663, pp.899-908, 2011.5 (In Japanese)
三輪田吾郎, 小巻潤平, 佐藤浩太郎, 佐野剛志, 勝俣英雄, 多幾山法子, 林康裕: 実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.663, pp.899-908, 2011.05
- 7) Masroor, A. and Mosqueda, G.: Impact model for simulation of base isolated buildings impacting flexible moat walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42(3), pp.357-376, 2013
- 8) Masroor, A. and Mosqueda, G.: Experimental simulation of base-isolated buildings pounding against moat wall and effects on superstructure response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41(14), pp.2093-2109, 2012
- 9) Fukui, H., Fujitani, H., Mukai, Y., Ito, M., Hashimoto, S. and Mosqueda, G.: Behavior of base-isolated testing model colliding with retaining wall by shaking table tests, Journal of Structural Engineering, Vol.64B, pp.279-286, 2018.3 (In Japanese)
福井弘久, 藤谷秀雄, 向井洋一, 伊藤麻衣, 橋本将次, Gilberto Mosqueda: 振動台実験による免震試験体の擁壁衝突時の挙動, 構造工学論文集, Vol.64B, pp.279-286, 2018.3
- 10) Watanabe, S. and Miyamoto, Y.: Resistance characteristics of retaining wall with back soil in the collision of base-isolation building, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.727, pp.1413-1421, 2016.9 (In Japanese)
渡辺翔太郎, 宮本裕司: 免震建物の擁壁衝突時における擁壁-背後地盤の抵抗特性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.727, pp.1413-1421, 2016.9
- 11) Tamura, Y., Sasaki, A. and Tsukagoshi, H.: Evaluation of Damping Ratios of Randomly Excited Building Using the Random Decrement Technique, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.454, pp.29-38, 1993.12 (In Japanese)
田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.454, pp.29-38, 1993.12
- 12) Fukui, H., Fujitani, H., Mukai, Y., Ito, M. and Mosqueda, G.: Response evaluation and analysis using impulse of base-isolated buildings during a collision with retaining wall, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.766, 2019.12 (In Japanese)
福井弘久, 藤谷秀雄, 向井洋一, 伊藤麻衣, Gilberto Mosqueda: 免震構造の擁壁衝突時の上部構造の応答評価と力積を用いた解析, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.84, No.766, pp.1533-1543, 2019.12
- 13) Muto, K.: The World of Impulse Destruction, Transactions of the Institute of Japanese Architects, Vol.21, pp.246-251, 1941.4 (In Japanese)
武藤清: 力積破壊の世界, 建築學會論文集, 第 21 卷, pp.246-251, 1941.4
- 14) Takeda, S. and Kasai, Y.: Proposal for Impact Response Calculation Method using Response Spectrum based on Identical Impulses, Journal of Structural Engineering, Vol.57A, pp.1225-1238, 2011.3 (In Japanese)

武田慈史, 河西良幸: 同一力積衝撃応答スペクトルによる衝撃応答算出法の提案, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1225-1238, 2011.3

- 15) Miyamoto, G., Fukui, H., Ito, M., Mukai, Y. and Fujitani, H.: Impulsive Behavior of Base-Isolated Building Colliding against Retaining Wall (Part 6) Identification of High Frequency Components Generated by Collision, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp.207-208, 2019.7 (In Japanese)
 宮本郷生, 福井弘久, 伊藤麻衣, 向井洋一, 藤谷秀雄: 免震構造の擁壁衝突時の挙動 (6) 衝突時に生じる高周波数成分の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.207-208, 2019.7

付録：検討に用いたゴム部材の剛性について

本研究では、擁壁剛性の違いが上部構造に与える影響に対して検討するため、擁壁の衝突部分に取り付けているゴム部材にニトリルゴム (NBR) 硬度 50°, 70°, 80°, 90° を使用した。本文中には、材料試験より算出したヤング率 (E) の値のみの記載となっていたため、Table 3 に、各ゴム部材を線形ばねへとモデル化した場合でのばね剛性 (K_r) の値と、免震層の剛性 (K_b) に対する擁壁ばね剛性 (K_r) の比率を示す。各擁壁ばね剛性 (K_r) は、衝突部のゴムの断面積 (ロードセルの先端部の面積に相当) (A) とゴムの厚み (L) より、 $K_r = E \cdot A / L$ (kN/mm) として算出した。今回の衝突実験に用いたゴム部材の剛性は、試験体の免震層剛性に対して最も剛性の低い場合 (硬度 50°) で 24.9 倍、最も剛性の高い場合 (硬度 90°) で 175.9 倍の範囲で検討を行っている。

Table 3 Rigidity of rubber member

	Rigidity : K_r (kN/m)	Ratio to rigidity of base-isolated story (K_r/K_b)
Hardness 50°	292.23	24.9
Hardness 70°	540.11	46.2
Hardness 80°	1467.47	125.4
Hardness 90°	2058.26	175.9