Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

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

福井，弘久
藤谷，秀雄
向井，洋一
伊藤，麻衣
モスケーダ，ギルバート

(Citation)
日本建築学会構造系論文集,84(766):1533-1543

(Issue Date)
2019-12-30

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
© 2019 日本建築学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007773

【カテゴリーⅡ】

日本建築学会構造系論文集 第84巻 第766号, 1533-1543, 2019年12月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 84 No. 766, 1533-1543, Dec., 2019
DOI http://doi.org/10.3130/aijs.84.1533

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

RESPONSE EVALUATION AND ANALYSIS USING IMPULSE OF BASE-ISOLATED BUILDINGS DURING A COLLISION WITH RETAINING WALL

福井弘久[*1], 藤谷秀雄[*2], 向井洋一[*3], 伊藤麻衣[*4], モスケーダ ギルバート[*5]

Hirohisa FUKUI, Hideo FUJITANI, Yoichi MUKAI,
Mai ITO and Gilberto MOSQUEDA

The objective of this study is to examine the effect of the base-isolated buildings during a collision with retaining wall using a shaking table and to evaluate by numerical simulation. First, the factors that influence the response of superstructure during a collision were identified from the experimental results. And, an appropriate process was proposed for the evaluation of story shear force. Second, time history analysis using impulse was proposed. This method could not only reproduce the response of superstructure during a collision, but also indicate the possibility to predict it without using collision analysis.

Keywords : *Collision, Retaining Wall, Base-Isolated Structure, Shaking Table Test, Numerical Simulation, Impulse*
衝突，擁壁，免震構造，振動台実験，数値解析，力積

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，建物の機能維持において最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ている。国内では 2003 年十勝沖地震時に釧路市内の免震建物で，設計クリアランス 500mm に対して約 300mm 程度の免震層の変位が観測され [1]，近年では 2016 年熊本地震時に阿蘇にある免震病院で，設計クリアランス 550mm に対して約 460mm 程度の免震層の変位が観測された報告 [2]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は国内では報告されていない。米国では，1994 年ノースリッジ地震の際にロサンゼルスの免震建物での衝突事例の報告があるが [3)4)]，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軽微なものであり，世界的に見ても免震建物のクリアランスが不足して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如何に応答するかを理解することは，建物の安全性を見極めるうえで非常に重要である。近年では，実大免震建物の擁壁衝突実験 [5)]や E-Defense を用いた実大 RC 造免震構造の擁壁衝突実験 [6)]，海外でも振動台を用いた擁壁衝突実験 [7)8)]などが先行研究として行われている。しかし,実大衝突実験は比較的大規模なものであるため,容易に行えず，建物や擁壁が塑性化するまで行った場合には繰り返して実験を行うことが困難であるために,サンプル数に限りがある。

また,擁壁衝突に対して解析を用いて解明しようとする動きも多く，柏らは，非衝突時の時刻歴応答解析より衝突時の最大応答変形予測手法 [9)] を提案し，小倉らは，衝突直前の運動エネルギーと上部構造が吸収するエネルギーとの釣り合いにより免震部材，上部構造の応答を安全側に評価する設計法 [10)]を，安本らは衝突と等価な外力を擁壁部に作用させ，各層の最大応答を予測する手法 [11)]を提案している。これらの研究に対しても，実験結果との比較が行えないため解析のみでの評価となる点や,擁壁の剛性，衝突時の衝突速度の条件を変更した場合での比較・検討が十分でないといった課題がある。

本研究では，振動台に免震試験体モデルを設置し，擁壁衝突実験を行うことで衝突時の上部構造の挙動について基本的な知見を得る

*1 神戸大学大学院工学研究科　博士後期課程　大学院生・修士(工学)／日本学術振興会　特別研究員(DC2)
*2 神戸大学大学院工学研究科　教授・工博
*3 神戸大学大学院工学研究科　准教授・博士(工学)
*4 建築研究所　主任研究員・博士(工学)
*5 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.

ことを目的としている[12]。衝突の際，擁壁が塑性化せずにエネルギー吸収を生じない弾性衝突が最も危険であるといった観点より，本論では弾性範囲内で擁壁剛性を変化させ，様々な衝突速度・入力地震波を用いたケースで実験を行うことで，どの要因が衝突時の上部構造の応答増加に対して大きく影響を与えるかについて検証を行った。また，上部構造の層せん断力を評価する際に，衝突時に各階床に生じる加速度の高周波数成分についても検討を行い，加速度データより層せん断力を求めるための適切な処理方法・評価方法の提案を行った。一方、擁壁衝突時の解析による応答評価を目的に，比較的容易な質点系モデルを用いた衝突解析を行い，実験結果との比較・考察を行った。次に，衝突時に 1FL 床に加わる力積に着目し，力積が上部構造の応答増加に与える影響に対して検証を行うとともに，生じた力積を質点系モデルに入力することで，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。

2. 振動台を用いた免震試験体の擁壁衝突実験

2.1 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，本実験での可動範囲内では線形特性があると判断している（付録）。各層の減衰定数（h）は 1 層ずつ，その層のみを可動にし，他の層を固定してランダム波加振を行い RD 法[13]で評価し,可動層より上部の質量（M）,可動層の水平剛性（K）と同定した減衰定数（h）の値を用いて,$C=2h\sqrt{MK}$より減衰係数（C）を算出した。尚,今回は衝突時の衝撃応答評価におけるダンパーのエネルギー吸収の影響を除くために各層にダンパーは取り付けず,構造減衰のみとしている。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，ロードセルは昭和測器製 RCE-500kN，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。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，ローラーの摩擦に関しては，静止摩擦係数 μ=0.0037 程度であり，十分に小さいものと判断できる。

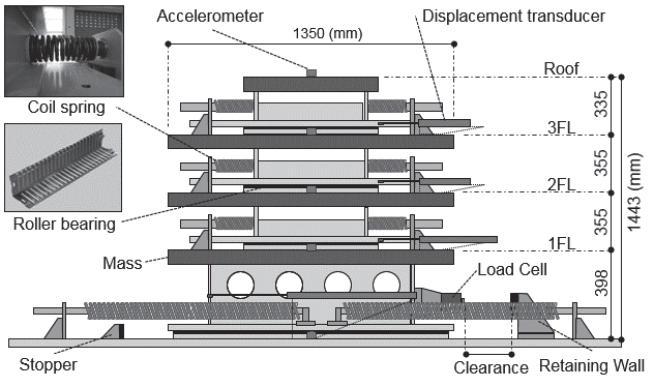


Fig.1 Configuration of base-isolated testing model

Table 1 Structural properties of testing model

Floor	Mass (kg)	Story	Stiffness (N/mm)	Damping coefficient (N・s/m)
Roof	503.5 (=m_4)	Third	124.3 (=K_3)	1145.2 (=C_3)
3FL	482.2 (=m_3)	Second	119.7 (=K_2)	1622.4 (=C_2)
2FL	478.2 (=m_2)	First	158.7 (=K_1)	1539.5 (=C_1)
1FL	734.8 (=m_1)	Base-isolated	11.6 (=K_b)	430.6 (=C_b)

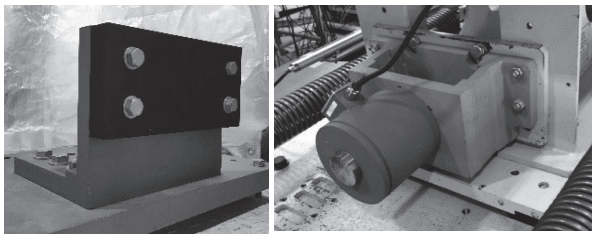
Natural frequency (Hz)	Mode			
	1st	2nd	3rd	4th
Base-isolated	0.36	1.86	3.66	4.78
Base-fixed	1.19	3.32	4.64	−

2.2 入力地震波

入力地震波は観測地震波の最大振幅を変化させて使用している。使用した地震波は， 1968 年の十勝沖地震において八戸港湾で観測された地震波の NS 成分（以下, Hachinohe）を 35%から 40%まで，1940 年の Imperial Valley 地震において，El Centro で観測された 地震波の NS 成分（以下，El Centro）を 95%から 107%まで，1995 年の兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された地震波の NS 成分（以下，Takatori）を 30%から 38%まで入力倍率を 1%刻みで変化させたものとする。

2.3 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 100mm（反対側は 200mm）に設置している擁壁（Figure 2.(a)）に，免震層部分に設置したロードセル（Figure 2.(b)）を衝突させることで免震構造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（サンプリング周期 dt=0.001s）で計測し,非衝突時では擁壁を取り外して計測を行った。今回の実験では衝突が複数回生じた場合でも 1 回目の衝突のみを評価の対象とする。また，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° を使用し検討を行った。ゴム部材については JIS 規格に記載されている測定方法（JIS K6254;2010 の 5.1 圧縮試験の A 法を採用）に基づき圧縮試験を行い，圧縮力−変形曲線から各硬度のヤング率（E）を算出した。また，各ゴム部材の剛性（K_r）は，計測で得られたヤング率（E）,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），ゴムの厚み（L）から $K_r=E\cdot A/L$（kN/mm）より算出して以降の解析では使用している。各硬度のヤング率（E）と剛性（K_r）を Table 2 に示す。



(a) Retaining Wall (b) Load Cell

Fig.2 Photo of Devices at colliding position

Table 2 Young's modulus and rigidity of rubber member

	Young's modulus : E (MPa)	Rigidity : K_r (kN/m)
Hardness 50°	3.69	292.23
Hardness 70°	6.82	540.11
Hardness 80°	18.53	1467.47
Hardness 90°	25.99	2058.26

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記録した。

3.1 衝突速度の算出方法

Figure 3 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。

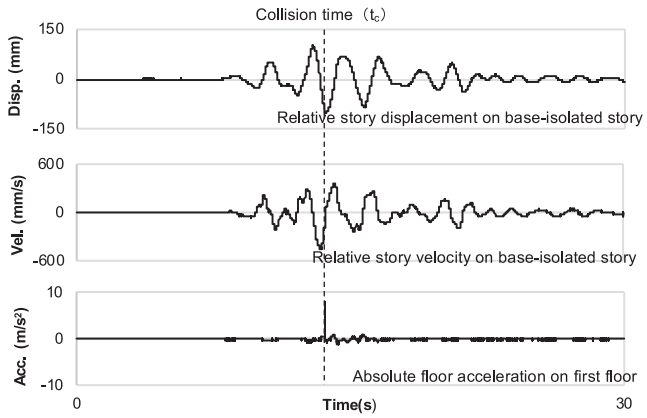


Fig.3 Time history of responses of base-isolated story and first floor (Takatori30% ; Hardness 90° ; With collision)

3.2 各応答量と衝突速度の関係

3.2.1 衝突速度－層せん断力

全地震波に対する，衝突速度（v）と 1 層の層せん断力（F_1^d）の関係を Figure 4 に示す。衝突速度は 3.1 で述べた方法で算出し，非衝突時は，衝突時のクリアランスに達した際の速度をプロットしている。層せん断力は変位計より得られた層間変位の時刻歴波形に，Table 1 に示した層剛性を乗じて算出し，衝突時では，衝突後の最大層せん断力を，非衝突時では，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。Figure 4 より，上部構造の最大層せん断力は衝突が生じることで,衝突速度と概ね線形の関係で増加することが確認できた。また，ゴム部材の硬度（擁壁の剛性に相当。以下「擁壁剛性」と述べる。）や地震動の違いによる明確な応答の変化は確認できず,衝突時の層せん断力は近い結果となり，これらの結果は各層とも同様の傾向が得られた [12]。

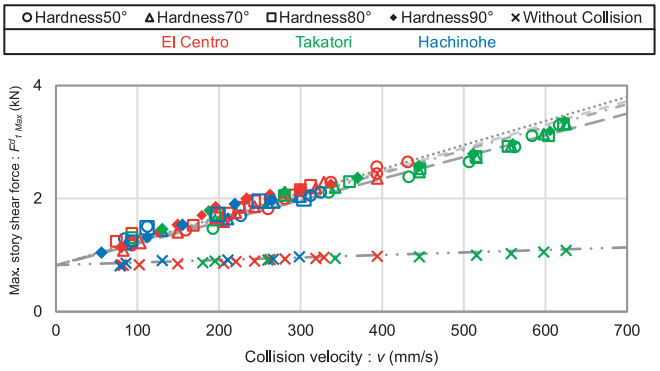


Fig.4 Collision velocity vs. story shear force relationship on first story

3.2.2 衝突速度－床応答加速度

全地震波に対する，衝突速度（v）と 1FL での床応答加速度（a_1）の関係を Figure 5 に示す。衝突速度は 3.2.1 と同じ値で，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，非衝突時では，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 5 より床応答加速度についても，衝突により最大床応答加速度が増加し，衝突速度と概ね線形の関係となることが確認できた。また，衝突階である 1FL では，擁壁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が確認できた。

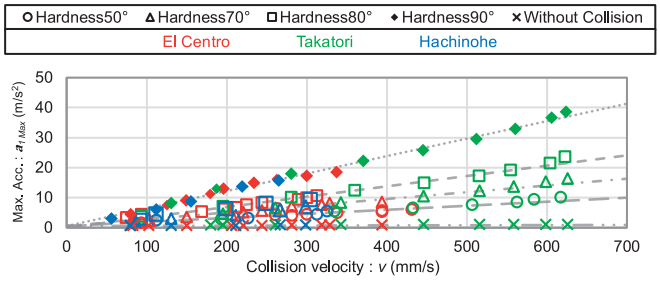


Fig.5 Collision velocity vs. floor acceleration relationship on first floor

3.2.3 衝突速度－衝突力

全地震波に対する，衝突速度（v）と 1FL 床に生じる衝突力（F）の関係を Figure 6 に示す。衝突速度は 3.2.1 と同じ値で，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 6 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となることが確認でき，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。

衝突速度 - 最大床応答加速度関係（Figure 5）と，衝突速度 - 最大衝突力関係（Figure 6）の硬度 50° での回帰直線の傾きを基準とした場合での各硬度の増幅率の比較を Table 3 に示す。Table 3 より，衝突時に生じる最大床応答加速度と最大衝突力は，擁壁剛性の増加に対して同様の増幅率で増加していることが確認できた。以上の結果より，本実験の範囲内では，衝突時に生じる最大層せん断力，最大床応答加速度，最大衝突力は,入力される地震動の違いによる明確な応答の変化はみられず,衝突速度の増加に依存して概ね線形に増加することが確認できた。また，最大床応答加速度，最大衝突力は擁壁剛性の増加に伴って大きな値となるが最大層せん断力は擁壁剛性にほとんど依存しない結果になった。

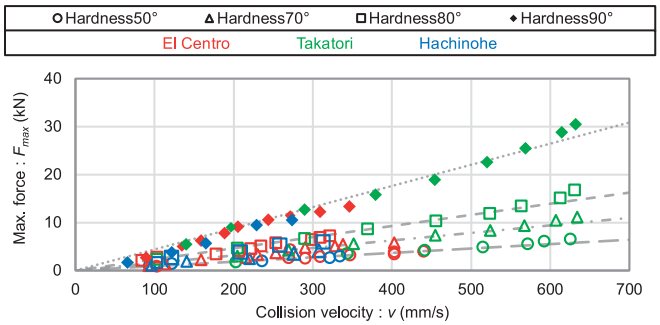


Fig.6 Collision velocity vs. impact force relationship on first story

Table 3 Comparison of Inclination of regression line

	Inclination of regression line		The amplification ratio to inclination of Hardness 50°	
Hardness	Acc.	Force	Acc.	Force
50°	0.014	0.0094	1.00	1.00
70°	0.023	0.016	1.64	1.70
80°	0.034	0.023	2.43	2.44
90°	0.058	0.039	4.14	4.15

4. 層せん断力

4.1 層せん断力（F^d），（F^i）の評価方法

本稿では，上部構造に生じる層せん断力の評価方法として以下の2つの手法を用いた。

ⅰ）層間変位の値を基に算出

各層の変位計より得られた層間変位に層剛性（本実験では，ばね剛性）を乗じることで層せん断力（F^d）を評価する。（式（1））

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

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

ⅱ）床応答加速度の値を基に算出

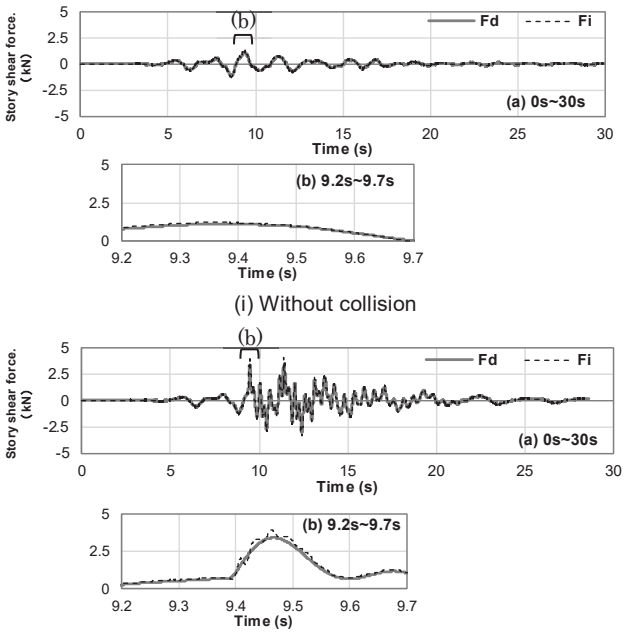
各階の加速度計より得られた床応答加速度に質量を乗じることで，各階の慣性力を算出する。当該層より上階の慣性力を足し合わせることで層せん断力（F^i）を評価する。（式（2））

$$F_{n-1}^i = \sum_n^4 m_n \cdot a_n \quad (n = 2,3,4\ (4{:}Roof)) \tag{2}$$

$$m_n = n\text{階質量} \qquad a_n = n\text{階床応答加速度}$$

4.2 層せん断力（F^d），（F^i）の比較

4.1に述べた手法で算出した1層の層せん断力（F_1^d），（F_1^i）の非衝突時と衝突時での時刻歴波形の比較をFigure 7（Takatori 38%入力時）に示す。Figure 7より，非衝突時では両者は精度よく一致しており，いずれの評価方法でも上部構造の層せん断力が適切に評価できていると考えられる。一方，衝突時には衝突後の応答で両者に差が生じていることが確認できた。



(i) Without collision

(ii) With collision (Hardness 90°)

Fig.7 Comparison of story shear force F^i and F^d on first story (Takatori 38%)

4.3 周波数領域からの検討

4.3.1 フーリエスペクトル

衝突時の上部構造の層せん断力を評価する場合では，4.1－ⅱ)で述べた手法を用いた場合のみ，衝突後の層せん断力の時刻歴波形に高周波数の波形が含まれていることが確認できる（Figure 7.(ii)）。本節ではこれら層せん断力の時刻歴波形をフーリエ変換し，周波数領域での比較を行うことで，衝突時に生じる高周波数成分が，層せん断力を評価する際に与える影響について検討を行う。

Figure 8にTakatori 38%衝突時（硬度90°）の1層層せん断力（F^d），（F^i）のフーリエスペクトルを示す。Figure 8より， 低周波数領域（主に10Hz以下の範囲）では，層せん断力（F^d），（F^i）のフーリエスペクトルは衝突時・非衝突時ともに概ね一致しており，固有値解析結果より得られた各次の固有周波数（0.36Hz (1st), 1.86Hz (2nd), 3.66Hz (3rd), 4.78Hz (4th)）で，それぞれ卓越していることが確認できる。また，衝突時では4次の固有周波数まで明確に現れていることから，衝突により上部構造に高次モードの振動が励起されることも確認できた。一方，高周波数領域（主に10Hz以上の範囲）では，衝突時の層せん断力（F^i）にのみ，いくつかの高周波数成分が含まれており，これらの高周波数成分が原因で衝突時では層せん断力（F^d）と（F^i）の評価に差が生じたものと推定できる。

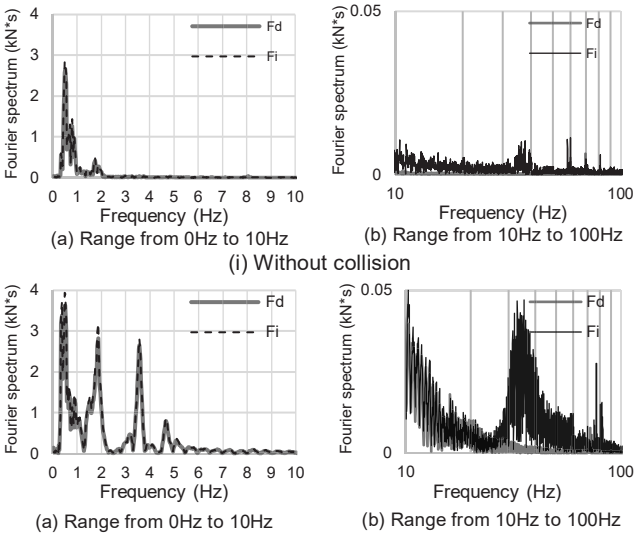


Fig.8 Fourier spectrums of story shear force F^d and F^i on first story (Takatori 38%)

4.3.2 高周波数成分を含む力（$\tilde{F}^i$）と基準フィルタによる周波数成分の分解

4.3.1での検討結果より，衝突時では構造物の各階床の剛体変位に伴い生じる床応答加速度（a_n）に加えて，瞬間的に生じる高周波数の加速度成分（$a_n{}^*$）が加速度計データに含まれる（式（3））と考えれば，4.1－ⅱ)で述べた加速度計データの値を基に算出した層せん断力（F^i）は式（1）で示したF^dとは異なる力（以下，「仮想衝撃力（$\tilde{F}^i$）」と定義する。）として評価できるものと考えられる。（式（4））

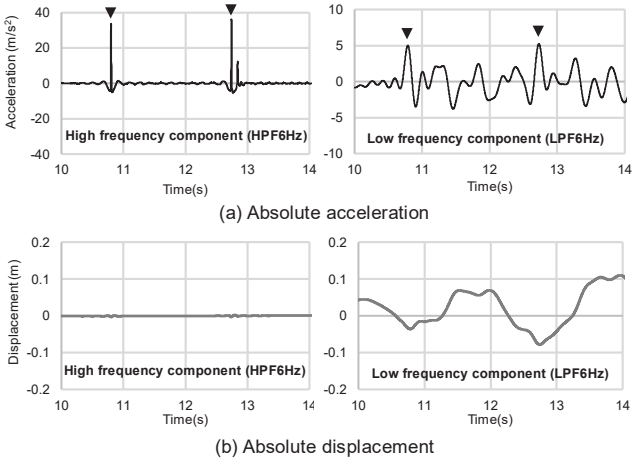
$$\tilde{a}_n = a_n + a^*{}_n \ (n = 1,2,3,4\ (4{:}Roof)) \tag{3}$$

$$\tilde{F}_{n-1}^i = \sum_n^4 m_n \cdot \tilde{a}_n \ (n = 1,2,3,4\ (4{:}Roof)) \tag{4}$$

（上記の関係において，非衝突時は$a^*{}_n = 0$とみなせるため，式（4）は式（2）と同様の意味となる。）

ここで本実験に用いた試験体の最高次（4 次）の固有周波数が 4.78Hz であることを考慮して，6Hz を基準として加速度波形にローパスフィルタ（LPF），ハイパスフィルタ（HPF）処理を行い，高周波数成分と低周波数成分に分けて検討を行った。1FL 床応答加速度に対して HPF 6Hz で処理したものを Figure 9 左側，LPF 6Hz で処理したものを Figure 9 右側に示す。また，波形処理プログラム k-WAVE を用いて加速度を積分（Trifunac 法）して求めた変位波形を Figure 9（b）に示す。Figure 9（a）より，衝突時に高周波数成分で最大 30m/s²，低周波数成分で最大 5m/s² 程度の値（図中▼に示す部分）が確認でき，どちらの周波数成分も加速度応答に衝突の影響があることが確認できる。一方，変位に積分した場合では，低周波数成分では最大 0.1m 程度に対し，高周波数成分では最大 0.002m 程度の値となり，高周波数成分は上部構造の変形にほとんど影響を与えない結果となった。尚,これらの上部構造の変形には寄与しない高周波数成分については，衝突時に生じる部材内部の伝達波の加速度[14] などが含まれることが原因であることが確認されている。

以上の結果を基に，衝突時の仮想衝撃力（$\tilde{F}^i$）に対して 6Hz の LPF 処理を行い，再び，層せん断力（F^d）との比較を行った（Figure 10）。Figure 10 より，両者は概ね一致し，フィルタ処理前では約 15% あった最大値の相対誤差は，3%未満となっていることが確認できた。以上の検証から，衝突時に床応答加速度の値を用いて層せん断力を評価する場合では，衝突時に生じる高周波数加速度成分が含まれることを考慮することが重要である。そして，これらの高周波数加速度成分は変形に寄与しないことが確認できたことから，上部構造の変形に寄与する範囲（最高次の固有周波数を含む範囲）で適切なフィルタ処理を施すことで各層の慣性力の和として与えられる層せん断力（F^i）でも,衝突時に F^d と同様の評価が可能であることを示した。



(a) Absolute acceleration

(b) Absolute displacement

Fig.9 Time history of floor acceleration and displacement on first story (Decomposed into high and low frequencies) (Takatori 38%, Hardness90°, Collision)

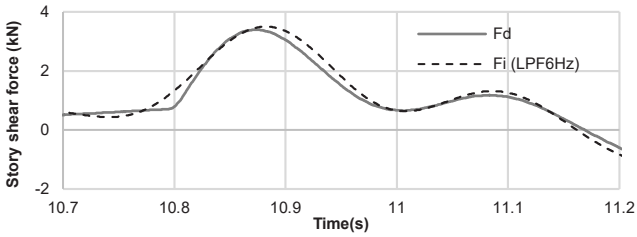


Fig.10 Time history of story shear force on first story (Takatori 38%, Hardness90°, Collision)

5. 衝突解析

振動台実験では，入力地震波の倍率や擁壁剛性の設定に関して扱える範囲に限界があり，今後，実在建物の擁壁衝突時の応答評価を念頭に置くと，より衝突速度の速い領域や擁壁の弾塑性挙動に対する検討が必要となり，衝突解析を用いた応答評価が有効であると考えられる。本章では，衝突解析の基礎となるモデルの構築を行い,衝突解析結果と，擁壁衝突実験結果との比較を行うことで，モデルの妥当性を検証した。

5.1 解析モデル

質点系モデルを作成し,汎用解析ソフト Matlab を用いて解析を行った。解析モデル図を Figure 11 に示す。モデルは実験結果と比較するために免震層部分を含めた 4 質点系モデルとし，各階質量，各層剛性，減衰は Tables 1, 2 の値を用いた。刻み時間は実験時の計測サンプリング時間と同じ dt=0.001s で行っている。衝突に関して，免震層部分に免震層ばね（K_b）と並列に，クリアランス変位までは剛性が生じず，クリアランス変位を越えるとゴム部材の剛性（K_r）が加わるバイリニア型の衝突ばね（K_w）を設置する事で衝突を模擬した。免震クリアランスは実験で設定した値と同じ値を用いている。

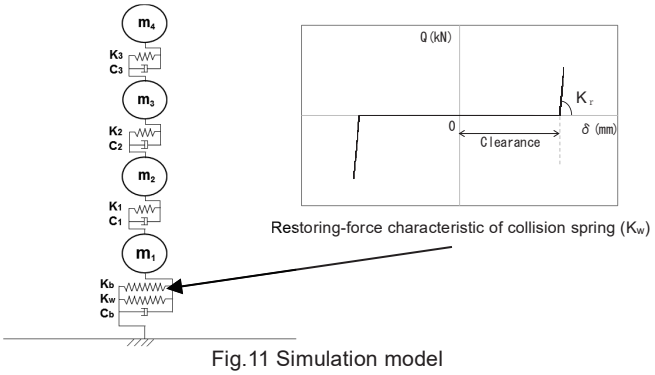
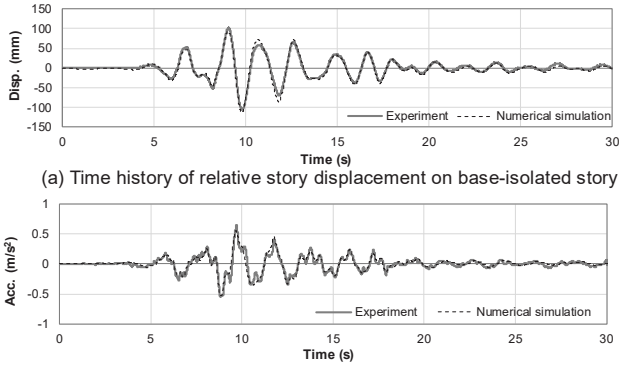


Fig.11 Simulation model

5.2 実験結果と解析結果の比較

5.2.1 非衝突時

質点系モデルによる応答解析の妥当性について検証するため,一例として Takatori 30% 非衝突時での 1 層層間変位と 1FL 床応答加速度時刻歴波形の実験と解析結果の比較を Figure 12 に示す。Figure 12 より，全継続時間を通して，解析結果は実験結果を精度良く再現しているものと考えられる。また，上部構造に関しても各階，各層で解析結果と実験結果は精度良く一致していた。



(a) Time history of relative story displacement on base-isolated story

(b) Time history of absolute acceleration on first floor

Fig.12 Comparison of responses by experiment and numerical simulation (Takatori 30%, Without collision)

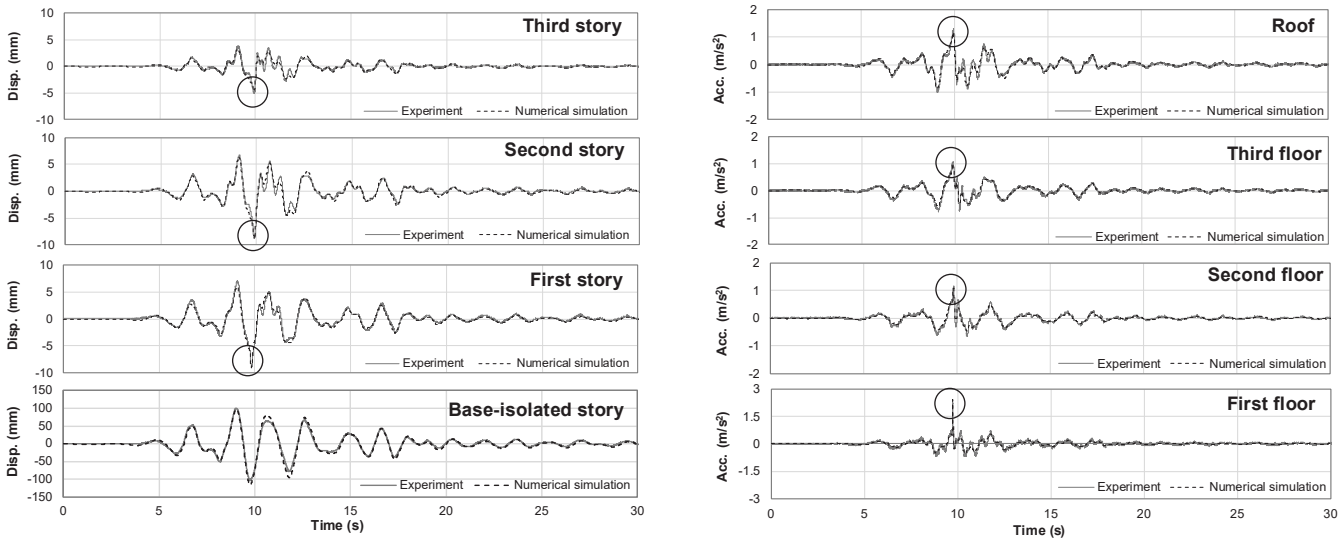
5.2.2　衝突時

Takatori 30% 衝突時（硬度 70°）での衝突解析結果と実験結果の比較を Figure 13 に示す。Figure 13 より，解析結果と実験結果は全時間を通して概ね精度良く一致していることが確認できた。また，擁壁に衝突した際に生じる上部構造の最大応答値（図中に○で示す部分）の比較を各擁壁剛性について Table 4 に示す。Table 4 より，擁壁剛性が異なる場合でも，衝突解析結果と実験結果の相対誤差は最大でも約 9%程度であり，衝突解析によって上部構造の最大応答を概ね再現できる結果となった。これらの傾向は入力倍率を変化させた場合や，他の入力地震波で検討を行った場合でも同様の結果が確認できた。以上の結果より，擁壁剛性やクリアランス,衝突速度の設定を正確に行うことで，本検討で用いた衝突解析モデルで衝突実験結果を十分に再現できるものと考えられる。

6.　力積を用いた上部構造の応答評価

3 章で得られた実験結果より，上部構造に生じる最大床応答加速度や 1FL 床に加わる最大衝突力は衝突速度に比例するように大きくなり，擁壁剛性の影響も受けることが分かる。一方,上部構造の変形及び層せん断力については，衝突速度に比例するが,擁壁剛性との関係はほとんど確認できなかった。本章ではこれらの事象に対して,1FL 床に加わる力積が上部構造の変形に影響を与えるものと考え，力積と上部構造の応答増加の関係について検討するとともに,力積を用いた時刻歴応答解析手法の提案とその妥当性の検証を振動台実験と解析によって行う。尚,衝撃についての既往の研究[15) 16)]により，構造物に瞬間的に力が作用する場合では，その力積によって破壊が生じるといった知見が得られている。

また,3.2 より上部構造の応答の増加には地震動の違いによる影響がほとんどみられなかったことから，本章では,新たに入力波として半周期正弦波パルスを用いた検討を行うものとした。今回は，振動台での正弦波加振時に最大加速度（10m/s²）,最大速度（1m/s）の上限スペックまで加振可能な周波数 1.6Hz で，衝突速度 100mm/s から 450mm/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に,最大加速度振幅 3m/s² に対して振幅を 23%から 35%の範囲で調整した半周期正弦波パルスを用いている。尚，クリアランスは約 150mm，サンプリング周波数は 1kHz とした。以下の，6.1 では，衝突実験より計測した衝突力の時刻歴波形より，1FL 床に加わる力積を定量的に評価し，上部構造の層せん断力との関係について考察を行う。次に，6.2 で質点系モデルに対



(a) Relative story displacement　　(b) Absolute floor acceleration

Fig.13 Comparison of relative story displacements and absolute floor accelerations between experiment and numerical simulation (Takatori 30%, Hardness70°, Collision)

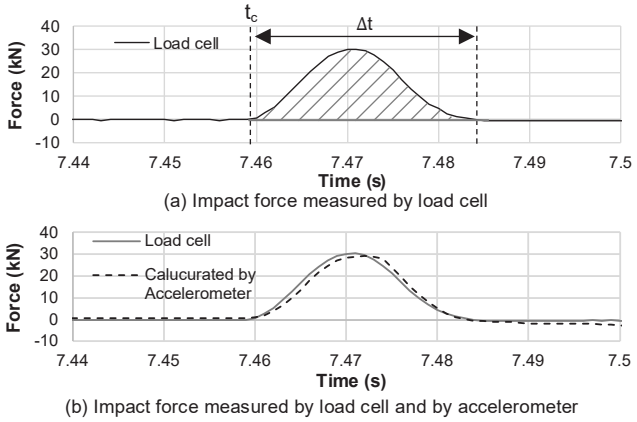
Table 4 Comparison of maximum floor accelerations and story displacements between experiment and numerical simulation (Takatori 30%, Collision)

Hardness	Kind of responses	Maximum floor acceleration (m/s²)				Maximum story displacement (mm)		
	Floor, Story	1FL	2FL	3FL	Roof	First	Second	Third
50°	Experiment	2.76	1.67	1.43	1.75	11.03	11.07	7.00
	Numerical Simulation	2.61	1.67	1.32	1.62	10.06	10.25	6.66
	Relative error	-5.68%	0.28%	-7.86%	-7.46%	-8.86%	-7.45%	-4.89%
70°	Experiment	2.24	1.18	1.08	1.31	9.02	8.80	5.10
	Numerical Simulation	2.35	1.12	0.99	1.28	8.99	8.79	4.81
	Relative error	4.81%	-5.01%	-8.31%	-2.15%	-0.33%	-0.12%	-5.74%
80°	Experiment	3.65	1.41	1.23	1.49	9.87	9.66	5.87
	Numerical Simulation	3.60	1.38	1.13	1.39	9.33	9.01	5.55
	Relative error	-1.52%	-1.81%	-8.21%	-6.96%	-5.51%	-6.69%	-5.43%
90°	Experiment	8.07	1.71	1.42	1.75	10.96	10.80	6.93
	Numerical Simulation	7.58	1.57	1.35	1.67	10.71	10.66	6.68
	Relative error	-6.08%	-8.31%	-5.33%	-4.44%	-2.24%	-1.28%	-3.74%

して力積を入力することで衝突時の上部構造の挙動を再現する解析手法の提案を行い，6.3 で実験結果との比較を行い，解析結果の妥当性を検証する。

6.1 1FL 床に入力される力積

1FL 床に加わる力積は，Figure 14（a）に示すような計測衝突力の時刻歴波形を基に，衝突によりロードセル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，再びロードセルの値がゼロに戻る衝突時間（Δt）内で積分すること（Figure 14（a）斜線部分の面積）で算出している。一方，力積に対して，本研究ではロードセルを用いて直接，衝突力を計測し，得られた時刻歴波形を基に算出しているが，実験装置の都合や実在建物などを想定した場合ではロードセルから直接衝突力を計測することは困難であると想定される。このようなケースでは，文献[15]に示されているように衝突体で計測した応答加速度に衝突体の質量を乗じたものを換算衝撃力として求める方法が用いられている。Figure 14（b）にロードセルで直接計測した衝突力と，1FL 床応答加速度に 1FL の質量を乗じた換算衝撃力の比較を示す。Figure 14（b） より，両者は概ね一致する結果となった。Table 5 にロードセルで計測した衝突力の波形より求めた力積と 1FL 床応答加速度波形から換算衝撃力として求めた力積の比較を示す。



(a) Impact force measured by load cell

(b) Impact force measured by load cell and by accelerometer

Fig.14 Time history of impact force measured by load cell (Half-sine 35%，With collision, Haldness90°)

Table 5 より，擁壁剛性が異なるいずれの場合についても,両者の力積の値は概ね一致していることから，換算衝撃力を用いて力積を評価することは，ロードセルで衝突力の計測を直接行うのと同様に有効であると確認できた。また，各擁壁剛性のケースで算出された力積の値と衝突速度との関係をみると，いずれのケースでも衝突速度が増加するにつれて 1FL 床に加わる力積は増加することが確認できた。また，衝突速度が同程度の場合では，擁壁剛性が異なっても，1FL 床に生じる力積は同程度の値となった。これらは，Figure 15 に示すように，擁壁剛性が高くなるに伴って，最大衝突力は増加するが，衝突時間が反対に減少することで 1FL 床に加わる力積としては擁壁剛性によらず同程度の値になったものと考えられる。

以上の結果より，1FL 床に生じる衝突力については,床応答加速度による換算衝撃力[17]が，ロードセルより直接計測した衝突力とほぼ一致する（Figure 14(b)）ことと，衝突力は擁壁剛性が大きくなるとそれに伴い増加することから,衝突時の床応答加速度は擁壁剛性に依存して変化することの説明ができる。また，上部構造の層せん断

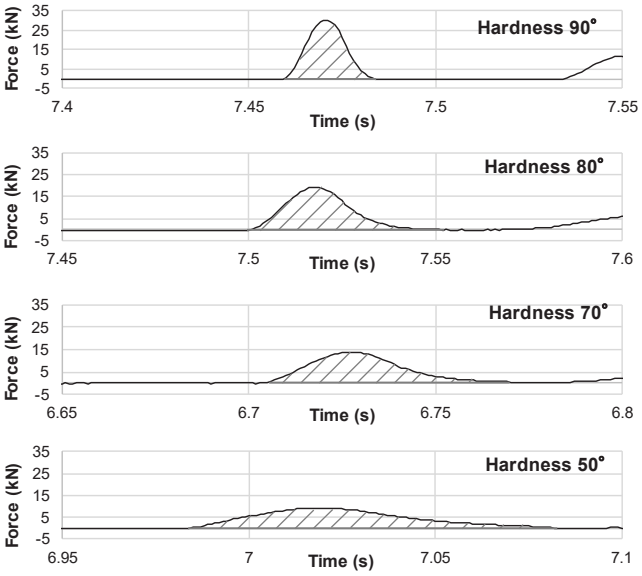


Fig.15 Time history of impact force measured by load cell (Half-sine 35%，With collision)

Table 5 Value of impulse and collision velocity for each hardness

Input	Hardness 90°			Hardness 80°			Hardness 70°			Hardness 50°		
	Collision velocity (mm/s)	Impulse (kN・s)		Collision velocity (mm/s)	Impulse (kN・s)		Collision velocity (mm/s)	Impulse (kN・s)		Collision velocity (mm/s)	Impulse (kN・s)	
		Load cell	Acceler-ometer		Load cell	Acceler-ometer		Load cell	Acceler-ometer		Load cell	Acceler-ometer
23%	119.3	0.092	0.096	119.1	0.087	0.101	102.4	0.074	0.084	119.7	0.086	0.099
24%	156.4	0.123	0.127	162.7	0.130	0.137	153.0	0.124	0.134	160.9	0.133	0.140
25%	192.3	0.164	0.170	185.4	0.163	0.168	192.7	0.168	0.166	184.1	0.154	0.166
26%	224.9	0.177	0.197	216.9	0.201	0.200	222.3	0.183	0.195	218.6	0.188	0.194
27%	244.4	0.214	0.212	250.2	0.220	0.218	247.7	0.214	0.218	242.0	0.203	0.219
28%	275.7	0.237	0.238	273.0	0.243	0.238	271.5	0.242	0.244	272.9	0.243	0.251
29%	296.6	0.254	0.261	295.8	0.254	0.260	290.7	0.261	0.259	288.1	0.263	0.260
30%	318.3	0.282	0.283	312.6	0.279	0.281	313.8	0.291	0.277	314.5	0.281	0.282
31%	337.9	0.294	0.292	338.5	0.298	0.300	333.9	0.301	0.298	338.3	0.306	0.304
32%	359.4	0.324	0.314	358.0	0.321	0.310	352.3	0.325	0.313	357.2	0.328	0.324
33%	379.4	0.333	0.331	379.4	0.345	0.330	376.2	0.351	0.333	378.0	0.357	0.343
34%	392.6	0.341	0.343	399.2	0.355	0.350	397.2	0.358	0.351	393.7	0.359	0.351
35%	424.2	0.374	0.371	427.4	0.382	0.378	438.5	0.391	0.386	423.2	0.381	0.378

力が，擁壁剛性には依存せず同程度の値になることについては,1FL 床に加わる力積が，擁壁剛性の値が変わっても同程度の値となることから，上部構造の変形が力積に依存して生じると考えれば説明がつく。次節では，これらの結果を基に，1FL 床に加わる力積から衝突時の時刻歴応答を評価可能であるかについて検討を行う。

6.2　力積を入力する時刻歴応答解析

前節までの検討結果より，衝突時に上部構造に生じる層せん断力は 1FL 床に加わる力積に依存していると考えられる。本節では，5 章で用いた質点系モデルに対して，衝突により生じる力積を 1FL 床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手法を提案し，衝突時の最大応答について実験結果との比較によって，提案する解析手法の妥当性について検証を行う。

1FL 床に加わる力積は，Figure 16 に示す三角波外力で与える。最大衝突力（F_{max}）は,実験時にロードセルで計測した最大衝突力と同じ値であり，三角形の面積がその際の力積の値と等しくなるように衝突継続時間（$\Delta t'$）を決定している。解析モデルは，Figure 11 に示したモデルから衝突ばね（K_w）を取り除いた 4 質点系モデルとし，解析モデルに対して地震波（本検討では半周期正弦波パルス）を入力し，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。（Figure 17 参照）

6.3　実験結果との比較・考察

Figure 17（b）に例として，半周期正弦波パルス 30%（硬度 90°）入力時で得られた上部構造の層せん断力（F^d）の時刻歴応答波形について,実験結果と解析結果の比較を示す（三角波は，力積値が 0.282kN･s ,F_{max}=21.2kN,（$\Delta t'$=0.026s）となるように設定）。力積を用いた時刻歴応答解析結果から，衝突時に現れる応答の急激な増加が確認できており，質点系に衝突の要素（衝突ばね）を含めないモデルでも衝突時の上部構造の挙動を概ね再現できる可能性を示した。Figure 18 に上部構造の各階床応答加速度と各層層せん断力について解析結果と実験結果の最大値の比較を示す。図に解析結果の最大値を実験結果の最大値で除した比をプロットしている。Figure 18 より,実験結果と解析結果の相違は高々20%以下となっており,力積を用いた時刻歴応答解析によって衝突時に生じる各階最大床応答加速度，各層最大層せん断力を精度良く追跡していることが確認できた。また,実験時にみられた,最大床応答加速度が擁壁剛性の増加に依存して大きな値となる一方，最大層せん断力はほとんど影響を受けない傾向も本解析により再現できていることが確認できた。

以上の検証結果から，質点系モデルを用いて 1FL 床に力積を加え時刻歴応答解析を行うことで衝突現象を模擬することが可能となり，上部構造に生じる最大応答値を概ね予測できることを示した。この解析手法は,衝突ばねを用いた衝突解析に比べ,擁壁剛性をモデル化する必要がなく，構造体モデルのみでよいという点で非常に明快で簡易に解析できる手法と考えられる。また，6.1 で述べた,衝突時の最大床応答加速度は 1FL 床に生じる最大衝突力に依存し，上部構造の層せん断力は 1FL 床に加わる力積の値に依存するという実験結果についても,本解析法により再現されることが確認できた。

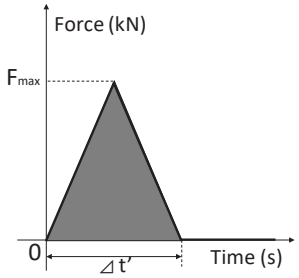


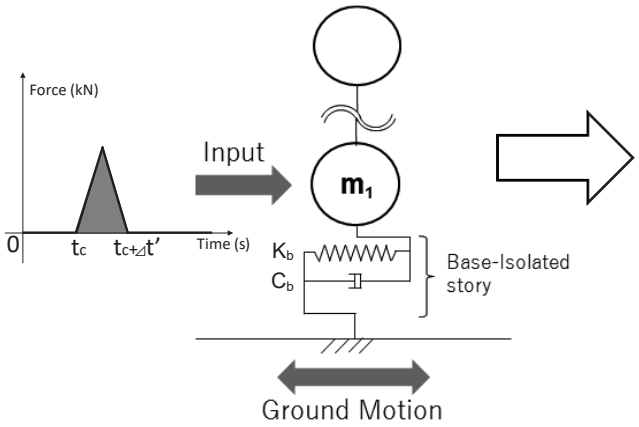
Fig.16 Triangular wave

7.　まとめ

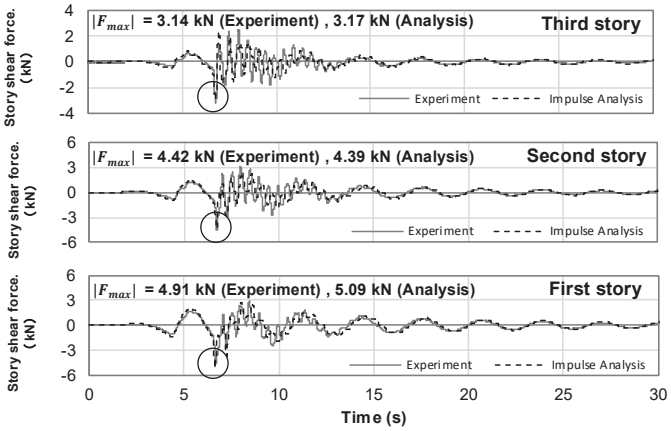
本研究では振動台を用いた免震試験体の擁壁衝突実験を行い，上部構造に生じた層せん断力，床応答加速度，擁壁との衝突力に対して擁壁剛性，衝突速度の変化による影響について考察を行った。また,衝突時の上部構造の応答を再現するために，衝突解析モデルを構築し，実験結果との比較を行い，その妥当性を示した。更に，衝突ばねをモデル化しなくても,衝突力を外力として与える時刻歴応答解析手法を提案し,衝突時の最大応答値を精度良く追跡可能であることを示した。以下に得られた知見を示す。

1）衝突時の応答に各要因が与える影響

衝突実験より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（F^d）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り,地震動の違いによる明



（a）Simulation model



（b）Time history of story shear force

Fig.17 Schematic diagram of impulse analysis and comparison of story shear forces by experiment and by impulse analysis (Half-sine 30%，With collision, Haldness90°)

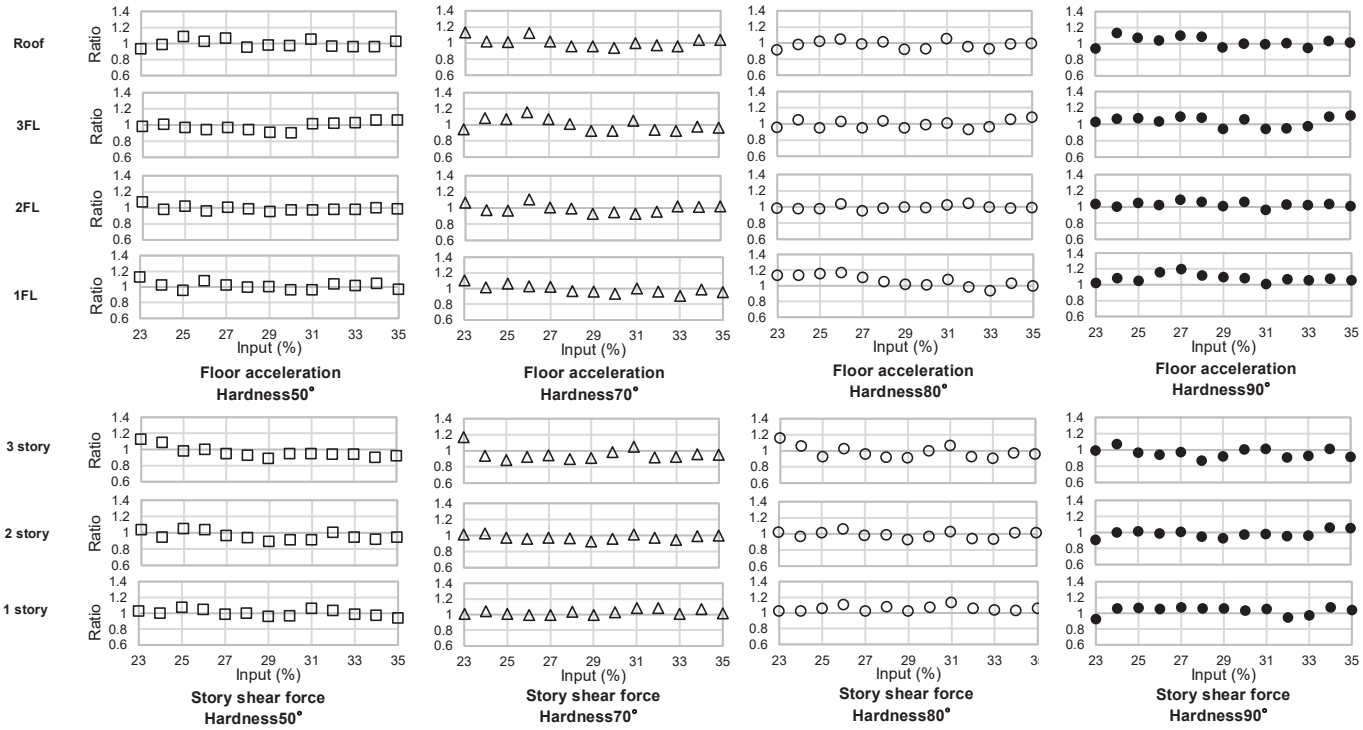


Fig.18 Comparison of maximum response values calculated by experiment and Impulse analysis

確な応答の差は確認できなかった。また，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（F^d）は擁壁剛性の影響をほとんど受けなかった。

2）衝突時の層せん断力の評価

層間変位の値を基に算出した層せん断力（F^d）と，床応答加速度の値を基に算出した慣性力の足し合わせにより求めた層せん断力（F^i）を評価した。非衝突時ではこれらの層せん断力の値（（F^d）と（F^i））は精度よく一致した。一方，衝突時には瞬間的な加速度の上昇が生じるため，両者に相違がみられた。この問題に対して，衝突時に生じる高周波数の加速度波形に注目し検討を行った結果，高周波数加速度は建物の変形には寄与しない成分であることが明らかとなり，上部構造の最高次固有周波数を考慮したローパスフィルタ処理を施すことで層せん断力（F^i）は衝突時でも層せん断力（F^d）と同等の値となることを示した。

3）衝突解析モデルの構築

質点系モデルの免震層部分に，クリアランスを越えるとゴム部材の剛性（擁壁の剛性に相当）が加わるバネ要素を設置した衝突解析モデルの妥当性を検証した。実験結果との比較により，衝突解析モデルは,本実験の衝突時の上部構造の応答を概ね再現できることを確認した。

4）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。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。

5）力積を用いた時刻歴応答解析

衝突ばねモデルを用いず，1FL 床部分に力積を加える時刻歴応答解析により衝突時の応答を概ね再現でき,最大床応答加速度,層せん断力に対しても精度良く追跡できることが確認できた。本稿で提案した解析手法を用いることで,衝突解析に比べ比較的簡易な質点系モデルのみで衝突時の最大応答を予測できる可能性を示した。

尚，本研究で得られた知見は，本試験で設定した条件下での現象である。また,免震試験体，擁壁ともに線形範囲の特性となっており，今後は非線形範囲への拡張などを行い，より一般化された結果を導くことが必要であると考えられる。

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 (Part1 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) 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

6) 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－ディフェンスを用いた実大実験による免震技術の高度化（その 6,7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.557-560, 2015.7

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) Kashiwa, H., Nakayasu, N. and Nakashima M. Response and Damage of Base-Isolated Buildings Subjected to Very Large Earthquakes, Journal of Structural Engineering, Vol.51B, pp.237–246, 2005.3 (In Japanese)
柏尚稔, 中安誠明, 中島正愛: 過大地震動下における免震建物の応答と損傷特性, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.237-246, 2005.3

10) Ogura, T., Maeno, T., Kondo, K., Fujitani, H., Hayashi, Y., Kuramoto, H. and Kaitani, J.: Research on Design Input Ground Motion and Design Method of Building for Uemachi Fault Earthquake (Part8,9) Design Method of Base-Isolated Structure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp.551–554, 2011.7 (In Japanese)
小倉正恒, 前野敏元, 近藤一雄, 藤谷秀雄, 林康裕, 倉本洋, 貝谷淳一: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究（その 8, 9）免震構造建物の設計方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.551-554, 2011.7

11) Yasumoto, H., Okazawa, R., Takiyama, N., Onishi, Y. and Hayashi, Y.: Maximum Response Evaluation of Base-Isolated Buildings against Pulse-like Ground Motions in Case of Collision to Retaining Wall. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.79, No.697, pp.385–392, 2014.3 (In Japanese)
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, Vol.79, No.697, pp.385-392, 2014.3

12) 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, 橋本将汰, 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

13) 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

14) 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（その 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

15) Kiyoshi, M. 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 巻, pp.246-251, 1941.4

16) 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

17) Japan Society of Civil Engineers: Fundamental and Application of Impact Experiments and Analysis (Structural Engineering series 15), Maruzen, 2004.3 (In Japanese)
土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用（構造工学シリーズ 15), 丸善, pp.23-51, 2004.3

付録

1) 本研究で用いた免震試験体（Fig.1）の各層に復元力を与えるコイルばね（免震層は引きばね,上部構造は押しばね）について,可動範囲内では線形特性があると判断したと本文で述べている。
それらの根拠について説明するために,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（Fig.19）を示す。
Fig.19 より,各層の復元力特性は, 概ね線形であることが確認できる。尚,慣性力（y）,変形（x）とした場合でのそれぞれの線形回帰直線の値から各層の剛性の値を決定している。

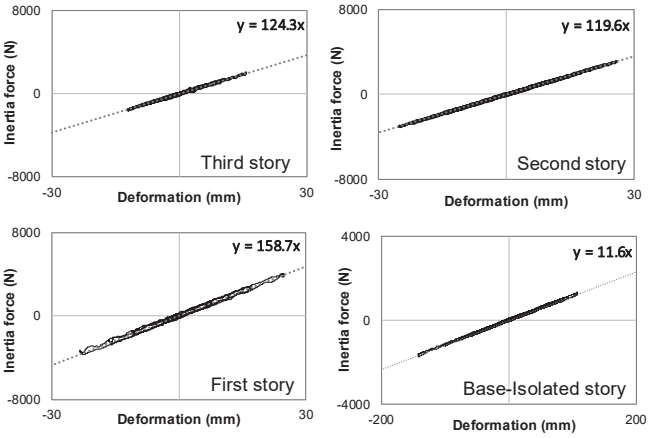


Fig.19 Restoring-force characteristic of springs

RESPONSE EVALUATION AND ANALYSIS USING IMPULSE OF BASE-ISOLATED BUILDINGS DURING A COLLISION WITH RETAINING WALL

Hirohisa FUKUI [*1], *Hideo FUJITANI* [*2], *Yoichi MUKAI* [*3],
Mai ITO [*4] *and Gilberto MOSQUEDA* [*5]

[*1] Ph.D. Student, Graduate School of Engineering, Kobe University, M.Eng. /
JSPS Research Fellow (DC2)
[*2] Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr.Eng.
[*3] Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr.Eng.
[*4] Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.
[*5] Prof., Dept. of Structural Engineering, University of California, San Diego, Ph.D.

Base-isolated systems have been demonstrated to be an effective structural design to minimize damage to building superstructures during earthquakes. However, when the deformation of a base-isolated story exceeds design considerations under extreme earthquake ground motions, a superstructure may collide with a displacement-limiting device such as the surrounding retaining wall. In this study, collision tests using a shaking table were conducted considering a collision of a base-isolated model specimen with a retaining wall. Considering the relative story displacements, the floor accelerations and impact forces measured on the base-isolated model specimen during the collision, the influence of collision for the superstructure was investigated. Numerical simulation was also carried out to reproduce the measured responses during the collision and analysis results are compared with experimental results to validate the numerical model for collision analysis. In addition, time history analysis using impulse which can reproduce the behavior of superstructure during a collision was proposed. Findings were summarized as follows.

1) The maximum values of story shear force, floor acceleration and impact force during a collision have an almost linear relationship with collision velocity. The maximum values of floor acceleration and impact force depend on the rigidity of the retaining wall, whereas, the maximum story shear force depends less on the rigidity of the retaining wall.
2) About the story shear force (F^i) calculated by summing inertial force, the story shear force (F^i) becomes close to the story shear force (F^d) calculated by using relative story displacement in case without a collision. However, in a case with a collision, story shear forces F^i and F^d become different because of acceleration responses including high-frequency components. By considering floor acceleration responses filtered out the range over than the highest natural frequency of testing model, both the story shear forces F^i and F^d during a collision become the similar value.
3) By calculating the impulse using the first floor impact force measured by a load cell, it was found that the impulse depends less on the wall rigidity. Because, although the impact force increases, the impact duration decreases about the increase of wall rigidity. Therefore, the maximum story shear force of the superstructure depends on the impulse and the maximum floor acceleration depends on the maximum impact force.
4) The collision analysis including collision spring for MDOF model can accurately reproduce the experimental results. Furthermore, it is confirmed that the response of superstructure during a collision can be well-reproduced by using numerical analysis which applies time history of the impulse to the first floor, and the maximum floor acceleration and story shear force also have good agreement with experimental results. By using this analysis method, the possibility to easily predict the maximum response of superstructure during a collision can be indicated without using collision analysis.

（2019 年 6 月 10 日原稿受理，2019 年 9 月 2 日採用決定）