

地球シミュレータを利用した 免震建物の擁壁との衝突を考慮した地震応答解析[†]

金野剛典*, 金井喜一**, 眞鍋慶生***, 丹羽一邦***, 坪田張二****, 河西良幸****

Earthquake Response Analysis of Base-isolated Building Considering Collision with Retaining Wall Using Earth Simulator[†]

Yoshinori Konno*, Yoshikazu Kanai**, Yoshio Manabe***

Kazukuni Niwa***, Haruji Tsubota**** and Yoshiyuki Kasai****

This study is an earthquake response analysis for a base-isolated building considering collision with retaining wall using the earth simulator owned by JAMSTEC. The Analytical model was constructed as three-dimensional elastic-plastic FEM model subjected to three-directional earthquake waves. Total number of elements of the used in the analysis was about 4 million elements. As a result, many parameters influenced response characteristics of the base-isolated building. In addition, excessive tension force occurred in the isolator at collision with retaining wall.

Key words : Base-isolated building, Retaining wall, Collision, Supercomputer, Seismic Response Analysis

1 はじめに

本報告では、建物を詳細にモデル化した 3 次元弾塑性 FEM モデルを用いて擁壁との衝突を考慮した免震建物の地震応答解析を行った結果を述べる。筆者らのグループでは現在、独立行政法人海洋研究開発機構の地球シミュレータ（大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータ）を利用できる環境にあり、膨大な解析のデータ処理が可能である。このスーパーコンピュータを利用して、武田や著者ら¹⁾は実大鉄筋コンクリート建物の振動台実験を取り上げ、詳細なシミュレーション解析を行い振動台実験の再現を行った。その結果、スーパーコンピュータと陽解法の有限要素プログラム LS-DYNA²⁾を用いて数値振動台実験を実施できる可能性を示唆した。この解析プログラムを応用して、本解析では免震構造の擁壁衝突現象を取り上げ、解析を

試みる。免震建物の衝突振動現象を明らかにするには、3 次元的な地震動の入力、詳細な建物のモデル化が望まれる。その解析には膨大なデータの処理が可能なスーパーコンピュータの利用が有効である。

著者らは 3 次元弾塑性 FEM モデルを用いて、初めに準備解析として水平 2 方向の地震動を入力した時の免震建物の挙動シミュレーション³⁾を行った。さらにこの解析を発展させ、上下動も考慮した 3 次元的な地震動を入力した時の免震建物の衝突挙動に関しては文献 4)にて、また上下動の考慮による衝突振動性状への影響については文献 5)にて各々報告を行った。

本報告ではこれらの結果を踏まえ上部構造の損傷に関する結果を加えた、免震建物の擁壁衝突現象に関して包括的にまとめた結果を報告する。

[†] 原稿受理 平成 24 年 3 月 1 日 Received March 1, 2012

* 建築学専攻大学院生 (Graduate Student, Department of Architecture)

** 環境・情報工学専攻大学院生 (Graduate Student, Department of Urban Environment and Information Sciences)

*** 株式会社 テラバイト (Terrabyte Co, Ltd.)

**** 建築学科 (Department of Architecture)

を有する鉄筋コンクリート構造の建物である。X方向は3.6m・6スパンの純ラーメン構造、Y方向は14.4m・1スパンの耐震壁付ラーメン構造となっている。また、免震層と擁壁のクリアランスは375mmである。

更に、免震層についてのデータを Table 1 に示す。実際の建物には減衰機構として鋼棒ダンパーが使用されているが、現象を把握しやすくするため、またより過酷な現象を想定するという目的から、本解析では考慮しないものとする。

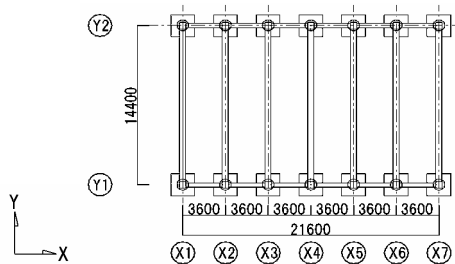


Fig.1 Framing plan⁶⁾

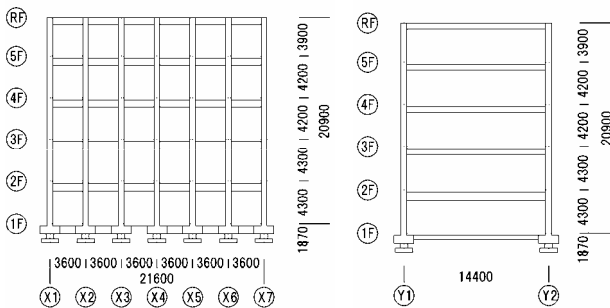


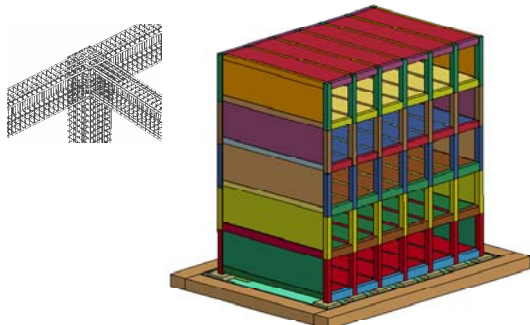
Fig.2 Framing section⁶⁾

Table 1 Summary of isolate^{6),7)}

免震装置	天然ゴム系 積層ゴム(円形)	ゴム径	740 mm
ゴム総数 及び層厚	4.4 mm×61 層 =268.4 mm	免震装置の 水平剛性 K_H	0.89kN/mm
鋼板総数 及び層厚	2.3 mm×60 層 =138.0 mm	免震装置の 鉛直剛性 K_V	1440kN/mm
1次形状係数	33.5	ゴムのせん断 弾性係数 G	0.549N/mm ²
2次形状係数	2.8		

3. 建物のモデル化

対象建物の建物形状を詳細にモデル化して解析を行う。上部構造に関して詳細なデータ（配筋、壁床の開口など）は入手していないため、入手できたデータを基に試設計を行った。試設計したモデルは許容応力度設計を満足している。解析モデルを Fig. 3 に示す。



Example: steel bar

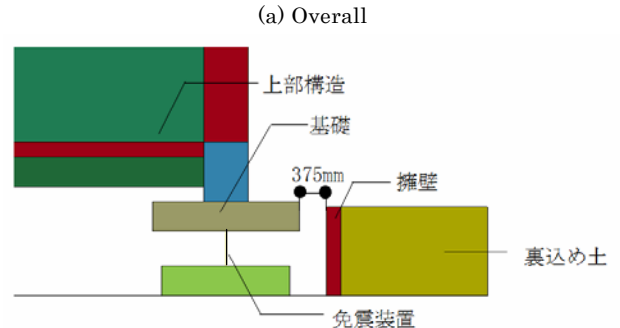
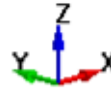


Fig.3 Analytical model

解析モデルの総要素数は計 3,903,398 要素、上部構造と免震層の総質量は 2576t(総重量 25.24MN)、1次固有周期は 2.79 秒である。

本モデルでは上部構造及び擁壁のコンクリート、裏込め土をソリッド要素、鉄筋をビーム要素で各々あるがままにモデル化(Example: steel bar 参照)した。コンクリートと鉄筋は節点を共有することで完全付着とした。

地盤面は剛体シェル要素でモデル化し、地震波の加速度を入力した。

免震装置についてはバネ要素に置き換えモデル化を行った。免震ゴムの水平剛性、鉛直剛性は Table 1 の数値を採用した。

ここで各部材の材料特性を Table 2 及び Fig. 4 に示す。3方向の地震動入力を行うため、バネ要素は鉛直、水平 2 方向の材料特性を設定した。水平方向のせん断特性はトリリニア型の非線形モデルとした。せん断ひずみ 250%までは線形性を保持し、250%以後にハードニングが発生する。剛性は初期剛性を E_H とすると 250%から 350%までは $2E_H$ 、350%以後は $7E_H$ と設定した⁸⁾。圧縮特性は弾性と仮定した。これは既往実験データ⁹⁾においても非線形領域が小さく、降伏時の平均圧縮応力度も 120N/mm^2 程度あることから弾性バネとみなしても影響はないと考えたためである。引張特性は、降伏時の引張応力度が 1.0N/mm^2 となるバイリニア型の材料特性とした。また、初期剛性は圧縮剛性の 1/10、降伏後の剛性は初期剛性の 1/100 とした¹⁰⁾。

鉄筋は移動硬化を考慮した等方弾塑性体とした。使用鉄筋を SD295 と設定し、降伏強度を 295N/mm^2 、

Table 2 Summary of material property¹¹⁾

Table 2 Summary of material property¹⁾

	弾性係数 (N/mm ²)	質量密度 (t/m ³)	ポアソン 比
コンクリート	2.94×10 ⁴	2.28	0.207
鉄筋	2.05×10 ⁵	7.85	0.300
裏込め土	11.8	1.35	0.219

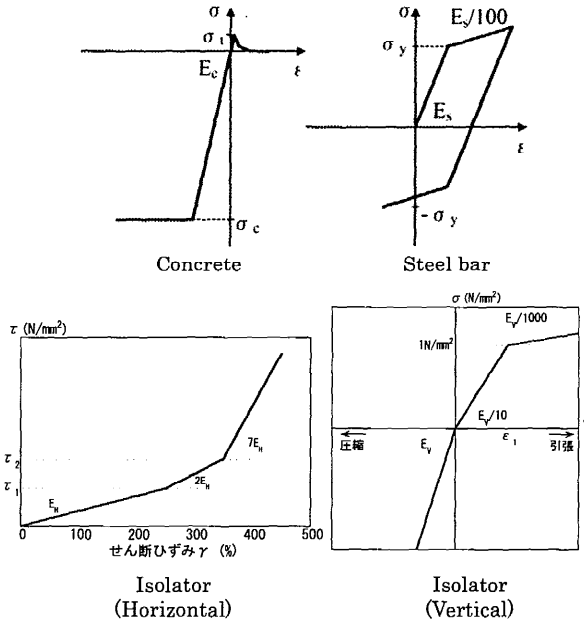


Fig. 4 Material property of element

降伏後の塑性硬化係数を弾性係数の 1/100 とした。

コンクリートはひずみ速度効果, Ottosen の破壊基準, スマードクラック等の特徴を持つ材料特性¹⁾を与えた。設計基準強度を 30.0N/mm²と設定し, 引張強度は圧縮強度の 1/10 とした。

裏込め土は, せん断波速度 $V_s=60\text{m/s}$ の弾性体地盤としてモデル化した。モデルの境界面には, 無反射境界条件を設定し地盤の無限領域を表現できるようにした。

4 入力地震波

入力地震波として「新潟県中越沖地震・K-NET 柏崎観測点」(以下 NIG008)での地震波を使用した。入力地震波の加速度波形及び各方向の応答スペクトルを Fig. 5 に示す。この地震波形は, 観測された波形のうち最大加速度を含む 6.0 秒間を取り出したものである。NS 方向の地震波形を見ると周期が長い波形が見られる。最大加速度を見ても 667Gal と非常に大きな値を示している。このことから NIG008 は長周期パルスの特徴を持った地震波と考えることができる。

また, 6.0 秒間の応答スペクトル波形を見ると水平方向では 2.50s 付近の成分が卓越し, NS 方向の地震波は EW 方向より約 1.5 倍大きな応答を示している。建物モデルの 1 次固有周期が 2.79 秒であることから, 共

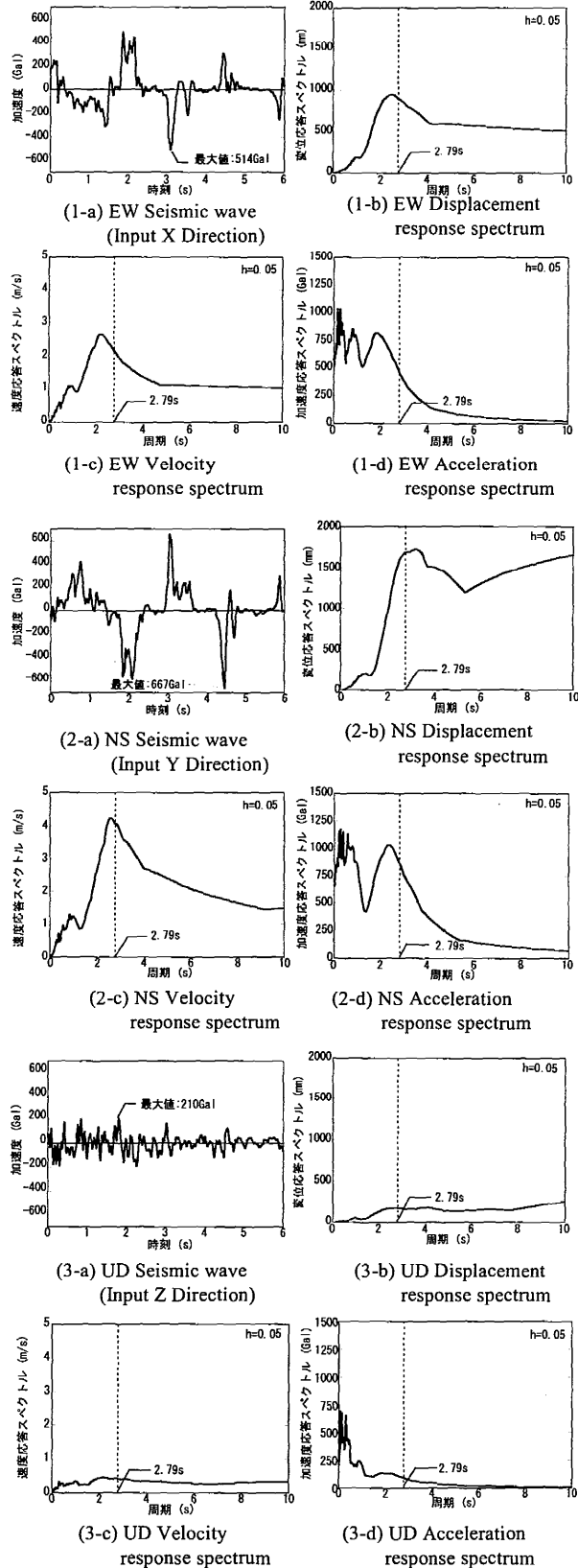


Fig. 5 Input seismic wave and response spectrum

振現象を引き起こしやすい地震波と言える。

入力はEW方向の地震波を Fig. 3(a)におけるモデルのX方向に、NS方向の地震波をモデルのY方向に、UD方向の地震波をモデルのZ方向に各々入力した。

5 地球シミュレータ及び解析条件

検討では、6.0秒間の解析を行った。本解析モデルでの減衰は質量比例型とし、上部構造には3%、擁壁部には7%の減衰定数⁹⁾を各々設定した。

また本解析では約400万要素もの膨大なデータを扱うため、計算には大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータである地球シミュレータを利用した。利用にあたり、16node (8CPU×16=128CPU)、解析時間12時間が1回の解析で利用できた。この条件で計算を行った場合、本解析モデルでは1.5秒～2.0秒程度の解析を1回で行うことができた。解析は6.0秒間行うため、ソフトに実装されているリスタート機能を使用して計算を進めた。解析での時間増分は 5.62×10^{-6} 秒(5.62 μ s)であり、解析結果の出力間隔は0.02秒とした。

6 解析結果

6.1 建物の挙動

ここでは免震層における水平方向の変位について見ていく。オービットを Fig. 6 に示す。Fig. 6 において図中の点線はクリアランス 375mm を示す線であり、この線を越えた時に衝突が生じることになる。また、図中での数字は衝突の順番を表しており、後に示す Fig. 7 での数字と対応する。なお、解析による挙動のアニメーションを見ることも可能である。

本解析では6.0秒間に計5回の衝突が生じた。1回目の衝突はY1通り側の擁壁に衝突し、擁壁に接触しながらX7通り側の擁壁に衝突した。2回目の衝突時にはX方向にクリアランスを150mmを超える変位が見られた。これは裏込め土の剛性が低いことが影響している。衝突が発生した擁壁部分には、コンクリートの破壊も見られた。

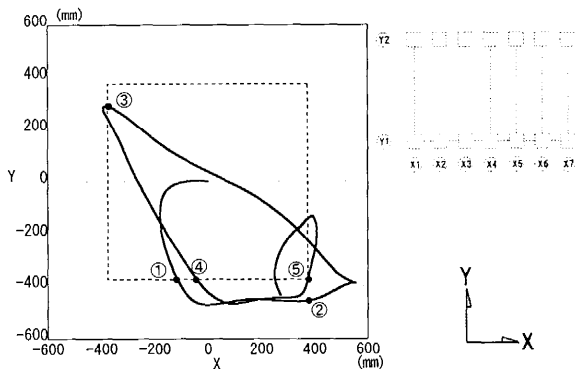


Fig. 6 Orbit of isolation layer

6.2 衝突による衝撃力

X方向及びY方向の時刻歴衝撃力波形を Fig. 7 に示す。波形は力の方向も考慮して出力しているため、衝突によって符号が異なる。①、④は Fig. 1 でのY1通り側、②、⑤はX7通り側、③はX1通り側の擁壁で各々衝突が発生していることを示している。なお、図中にはそれぞれの衝撃力についてピーク値 P、力積 I (衝撃力の面積から算定)を記している。本解析では、6.0秒間に大きな衝突がY方向で2回生じた。特に1回目の衝撃力(①)のピーク値は16.86MNであった。これは、建物の総重量25.24MNの0.67倍程度である。また、その時の衝撃力積は7.51MN・sであった。この時の衝突直前の速度は1.05m/s、衝突直後の速度は衝突前とは逆の方向に0.22m/sであった。これらの値と建物の総質量2576tを用いて運動量の変化 Δmv を算出すると約3272t・m/s(3.27MN・s)となり、力積Iの約0.44倍である。衝撃力の継続時間は0.94秒で、免震建物の1次固有周期2.79秒の約1/3である。衝撃応答の特性¹²⁾から見ると、力積Iの大きさが衝撃力のピーク値Pよりも建物の応答特性に及ぼす影響が大きいと判断される。

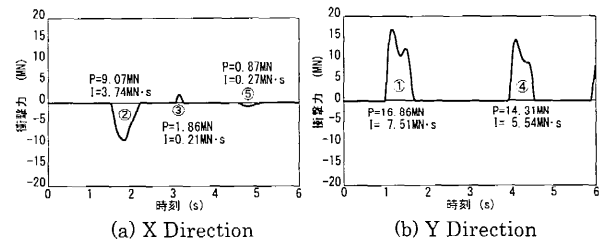


Fig.7 Time history of impact force

6.3 免震装置の水平荷重

Fig. 8 に免震装置に作用する水平方向の荷重時刻歴波形を示す。波形は免震装置の形状が円形であることからX方向、Y方向の合力として水平方向の荷重を出力している。ここでは、Fig. 1における隅部Y1-X1の免震装置についての時刻歴波形を示すが、その他の免震装置についてもほぼ同様の波形を示していた。なお、図中の黒点は、衝突が発生した時刻を示し、番号は Fig. 6 及び Fig. 7 での番号と対応している。

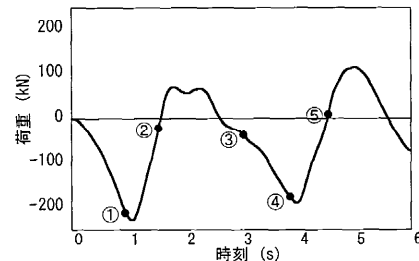


Fig. 8 Time history of horizontal force on Y1-X1 isolator

荷重は最大で 220kN 程度であり、ハードニングが発生する領域には達していない[Fig.4 Isolator (Horizontal)参照]。これは、擁壁によって免震装置の変位が抑えられるためである。

6. 4 鉛直方向の挙動

免震装置における鉛直方向の荷重波形について、Fig.9 に各々示す。図の縦軸は正の値が引張力、負の値が圧縮力を各々示している。各図の右上には解析モデルの模式図を示し、対象部分を黒の塗りつぶして表示している。波形の中で衝突が発生した時刻を黒点で示し、数字は衝突の回数を表し Fig. 7 の番号と対応する。

衝突した側には大きな圧縮力が、反対側には引張力が作用している。この現象は、柔道における「送り足払い」と似た現象と言える。これは衝突側を回転軸として建物にロッキング挙動が発生する現象である。1 回目の衝突を例にとると、Y1 通り側(Fig. 1 参照)の擁壁に衝突した時、建物は Y1 通りを軸としてロッキング挙動が発生する。一方で、衝突面とは反対側の Y2 通り側には引張力が働く。この時の荷重波形は降伏荷重に達し、剛性の低下が生じている。

3.04s(③)、4.54s(⑤)の衝突は、ピーク値、力積共に他の衝突に比べ小さいため、衝突の影響による軸力の変動はほとんど見られない。⑤の衝突後に隅部で大きな高周波の軸力変動[Fig.9 (a)図及び(c)図参照]が見られるが、これは衝撃力の大きい4回目の衝突によって生じたロッキング挙動と上部構造に生じた高周波の振動(後述の 6.6 参照)による影響と考えられる。

また、免震層における鉛直方向の変位について、Fig.10 に各々示す。それぞれのグラフから衝突が発生した時に、大きな引張方向の変位が生じている。また、

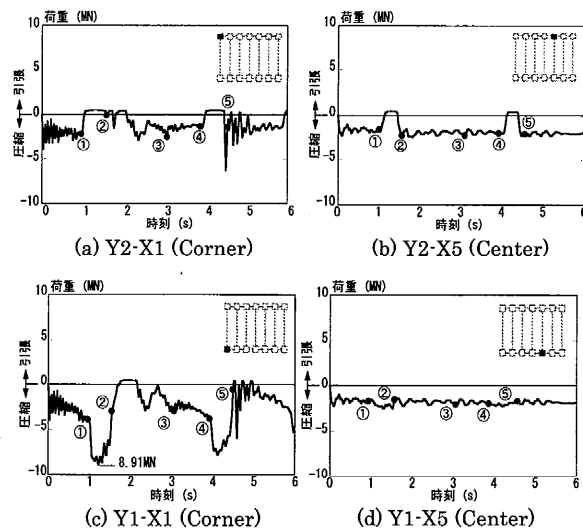


Fig. 9 Time history of vertical force of each isolator

各図の(a)と(b)から中央部と隅部の免震装置を比べると、隅部の引張側の変位量が大きい。圧縮剛性は引張剛性の 10 倍と剛性が高いことから、圧縮方向の変位は極めて小さい。Y 方向は耐震壁があるため X 軸回りのロッキング挙動が発生しやすいことに加え、入力波の大きさ、アスペクト比も影響している。

6. 5 免震装置の応力 σ -ひずみ ϵ 関係

免震装置における鉛直方向の応力 σ -ひずみ ϵ 関係について、Fig. 11 に各々示す。衝突が発生し、引張力

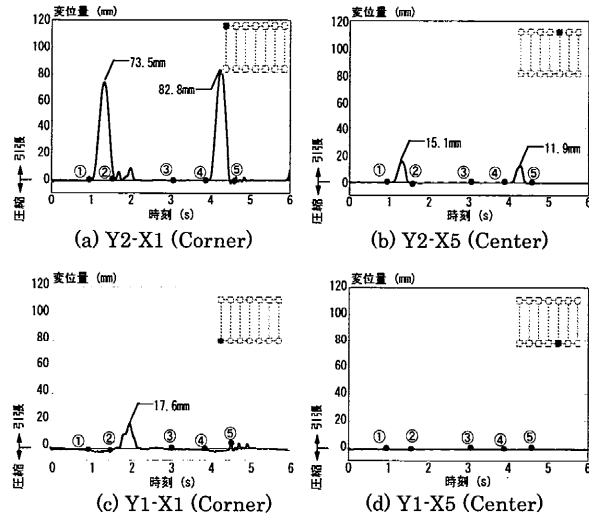


Fig. 10 Time history of vertical displacement of each isolator

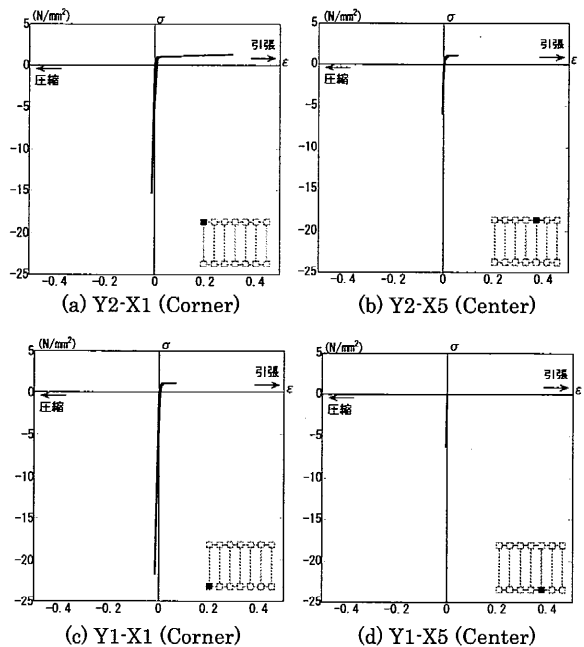


Fig. 11 Stress(σ)-strain(ϵ) relation of each isolator

が作用した免震装置は全て降伏点 1.0N/mm^2 を超えるという結果となった。特に隅部 Y2-X1 の免震装置では降伏点を大きく超えるひずみが発生している。圧縮側の応力を見ると、Y1-X1 の免震装置においてもっとも圧縮応力が大きく約 22N/mm^2 となった。既往の実験結果⁹⁾では圧縮方向の限界応力が 150N/mm^2 程度なので、衝突による免震装置への圧縮方向の力は免震性能に大きく影響を与える要因ではないと見られる。

6.6 上部構造の水平加速度

R階、3階、1階床における水平方向の加速度波形について Fig. 12 に各々示す。衝突が発生した時刻を黒点で示し、数字は衝突の回数を表している。全ての縦軸と横軸の大きさを同一に示し、図の最下段には各方向の入力波を示すことで上部構造の加速度と対応させた。なお、1階{(e)図及び(f)図}の波形が免震層の加速度を表している。

X方向では衝突によって $200\sim 500\text{Gal}$ の加速度が生じている。衝突が発生した 1.50s (②)、 3.04s (③)、 4.54s (⑤)直後には高周波の波が見られるが波の振幅は小さい。

一方でY方向では衝突によって $500\sim 700\text{Gal}$ の加速度が生じている。こちらにも衝突直後に高周波の波が見られるが、X方向よりその振幅は大きく、長時間継続して振動している。(b)図を見ると、R階において 4.5s あたりに約 1300Gal の加速度が生じているが、(h)図で示したNS方向の地震波形と合わせて見ると、最大加速度を示している時刻と対応しているため、衝突と地震波の影響が重なって発生したものと考えられる。

また、各階における最大応答加速度の分布を Fig. 13 に示す。衝突時の応答はX、Y方向共に、中間階が小さく下階及び最上階が大きい。固有値解析での2次周期が 0.14 秒であったが、この周期と衝突後に発生した高周波の周期はほぼ一致している。更に固有モードからも判断すると2次モードでの振動が励起されたと考えられる。

6.7 応力状況

衝突時における各種コンター図を Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。Fig. 14 では、1回目の衝突時におけるX1通りの図を示しており、1階の損傷が激しいと見られたためY1-X1付近を拡大している。また、(a)図及び(b)図はミーゼスの相当応力、(c)図は最大主応力で表示している。図において応力は色が薄い部分ほど大きいことを表している。応力は柱脚部に集中しており、耐震壁では柱側の柱脚付近が高い応力を示している。衝撃力は柱脚から耐震壁へと流れていると見られる。また、(c)図で耐震壁を見ると斜めの線が入ったような部分がある。3つの図から判断すると、衝突によってコンクリートのせん断破壊が生じたと見られる。

Fig. 15 には、2回目の衝突におけるY1-X7付近を拡大した図を示す。(a)図及び(b)図はミーゼスの相当応

力、(c)図は最小主応力で表示している。応力は柱梁接合部において高い応力が見られた。3つの図から判断すると高い応力が見られた1階梁は、衝突による圧縮力によってせん断破壊が生じていると見られる。また、擁壁に過大な変位が生じたことから、応力も高い値を示している。

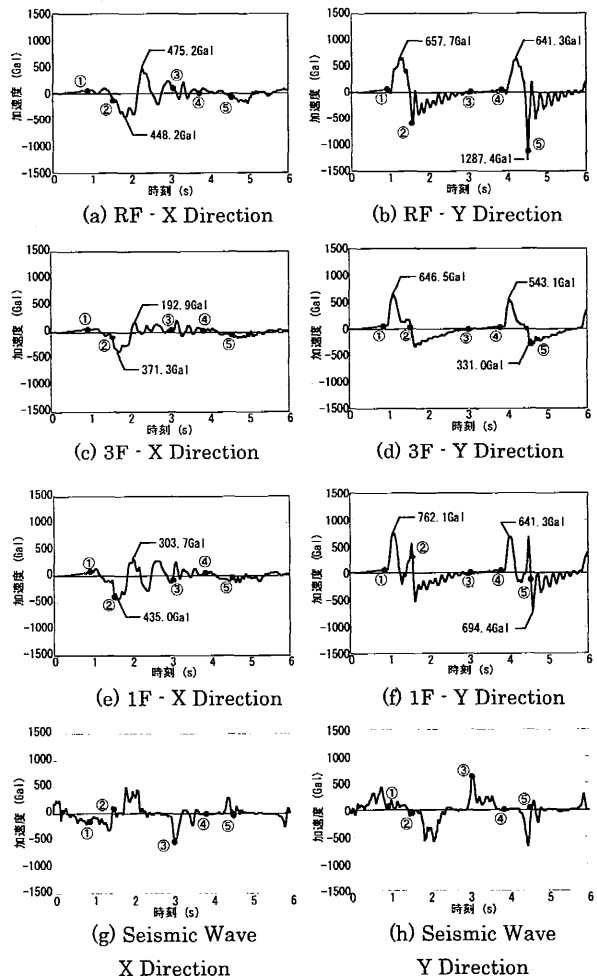


Fig.12 Time history of acceleration on each floor

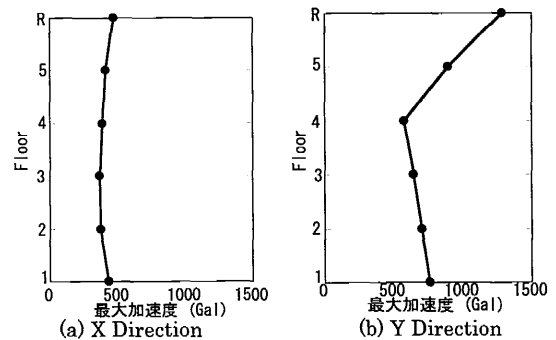
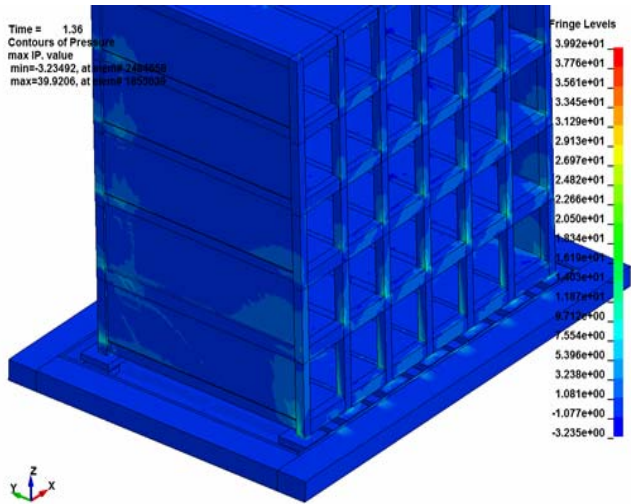
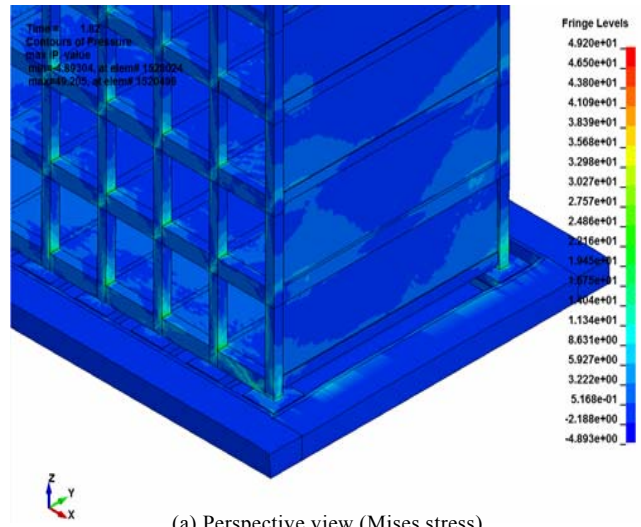


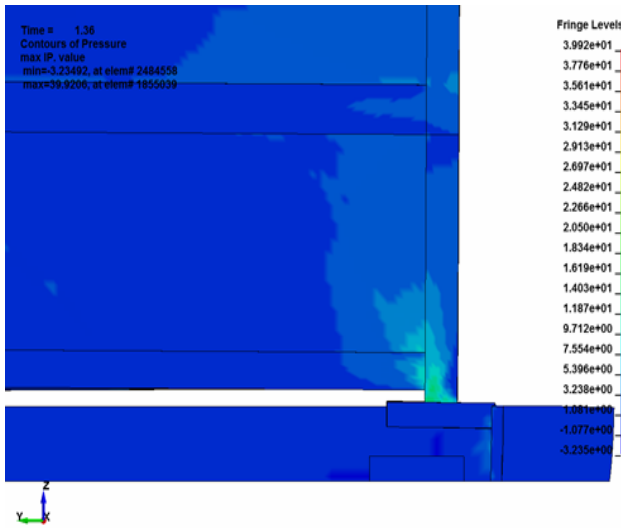
Fig. 13 Distribution of maximum acceleration



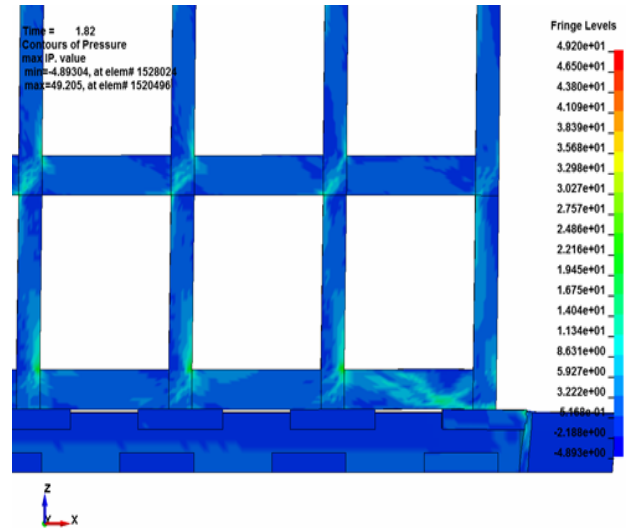
(a) Perspective view (Mises stress)



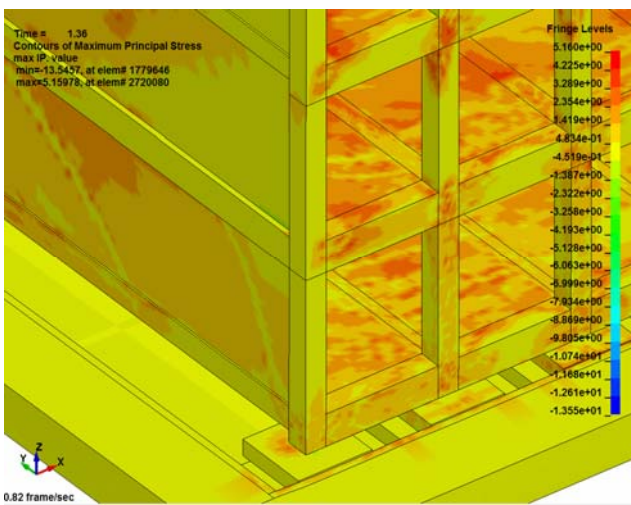
(a) Perspective view (Mises stress)



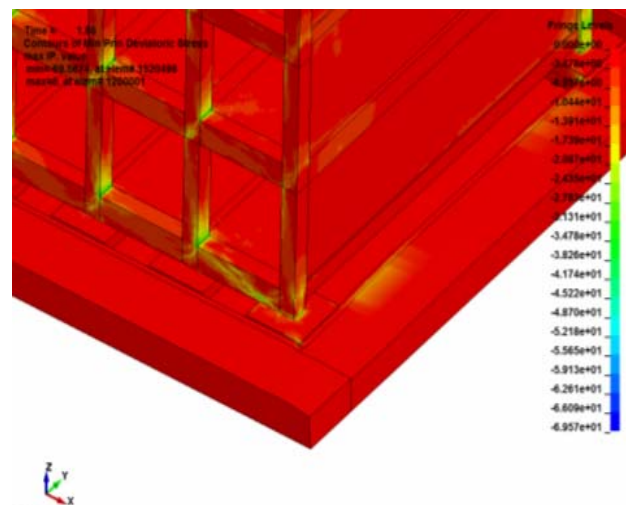
(b) Section view for Y-direction (Mises stress)



(b) Section view for X-direction (Mises stress)



(c) Perspective view (Maximum principal stress)



(c) Perspective view (Maximum principal stress)

Fig. 14 stress contour at first collision

Fig. 15 stress contour at second collision

7 まとめ

大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータである地球シミュレータの16node(8CPU×16=128CPU)と陽解法3次元FEM解析プログラムを用いることにより、約400万要素もある免震建物の周辺擁壁との衝突を考慮した地震応答解析を、主要な衝突を含む6秒間について実施することができた。

分析によって得られた結果を以下に示す。

- (1) 本解析で発生した衝突は、建物の固有周期に比べ継続時間の短い衝撃力であり、力積Iの大きさが衝撃力のピーク値Pよりも建物の特性に及ぼす影響が大きいと判断される
- (2) 強い衝突が生じた場合、柔道に「送り足払い」に似た、建物がロッキング挙動を伴い免震装置に引張方向の変位が生じる現象が発生した。本解析では、上下動が免震装置の引張変位を低減するように作用した。
- (3) 衝突によって、免震装置に作用する圧縮力は免震性能に影響を与えるまでには至らない。
- (4) 強い衝突によって、本解析モデルでは水平方向の加速度波形に2次モードのような高周波の振動が見られた。
- (5) 衝突によって建物には耐震壁及び梁にせん断破壊が見られた。

擁壁への衝突が生じた場合、免震層部分では「送り足払い」のような現象が建物の免震性能に大きな影響を与えると考えられ、衝突による引張力を抑制する対策が有効であると考えられる。

地震波が作用した場合の衝突回数、衝突速度、衝撃力のピーク値、力積、継続時間など耐衝撃安全性評価に関わる応答結果を算定できた。解析結果から各種のパラメータの影響が考えられ、これらの影響について評価していくことが重要である。本解析を通じ、スーパーコンピュータと陽解法の有限要素プログラムを用いて免震建物のような構造においても数値振動台実験の実施が可能なが示唆された。免震建物の場合、相似則等の関係から実大実験を実施することは困難である。そこで、鉄筋や地盤などの要素を詳細にモデル化し、数値振動台実験というコンピュータシミュレーションを行うことで、実験困難な現象に対しても有用なデータが得られた。

衝突振動現象には様々なパラメータの影響が関わっていることが分かり、本報告では上下動の考慮をパラメータとして扱い分析を行った。今後、本解析のような解析モデルを用いて、その他のパラメータについても分析を行うことが、衝突振動現象に対しての対策を

立てていくことに有効であると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、平成23年度、独立行政法人海洋研究開発機構の地球シミュレータ公募プロジェクト採択により地球シミュレータの使用を許可して頂きました。また、観測地震波の使用にあたり、独立行政法人防災科学技術研究所が運用するK-NETの情報を利用させて頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 武田慈史, 河西良幸 他: 陽解法衝撃解析コードの実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験結果への適用 その2, 前橋工科大学研究紀要第14号 pp.17-24, 2011.3
- 2) LS-DYNA (general purpose transient dynamic finite element program), Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- 3) Konno, Y., Kasai, Y. et al. Seismic Response Analysis of Base-isolated Building Considering Collision with Retaining Wall: International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation pp.161-168, 2011.9
- 4) 金野剛典, 河西良幸 他, "免震建物に関する擁壁衝突を考慮した3次元弾塑性FEMモデルによる地震応答解析—その1 衝突挙動に関する基本的性状", 2011年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.253-256, 2012年2月.
- 5) 金野剛典, 河西良幸 他, "免震建物に関する擁壁衝突を考慮した3次元弾塑性FEMモデルによる地震応答解析—その2 上下動の考慮による衝突振動性状への影響", 2011年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.257-260, 2012年2月.
- 6) 勝俣英雄 他: 実免震建物の擁壁衝突実験, シンポジウム「パルス性地震動に対する建物の応答特性を考える」, pp.9-18 2010.10
- 7) 関松太郎, 武田寿一: 免震建物ハイテク R&D センター, 建築防災 pp.2-11 1987.8
- 8) 中澤俊幸 他: 設計想定外の地震動入力に対する免震構造物の耐震安全性の確率論的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.393-398 2011.8
- 9) 社団法人 日本免震構造協会 編: 免震構造入門, オーム社, 1995.9
- 10) 北山翔馬 他: 断面内剛性分布を考慮した免震積層ゴムの大変形挙動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.525-526 2011.8
- 11) 多幾山法子 他: 免震建物の擁壁衝突挙動の評価, シンポジウム「パルス性地震動に対する建物の応答特性を考える」, pp.27-36, 2010.10
- 12) 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定法の提案, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.1225-1238, 2011.3