

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—

2. 構造—2. 振動

免震 擁壁 衝突

FEM スーパーコンピュータ 地震応答解析

正会員 ○ 金野剛典^{*1}
 // 眞鍋慶生^{*3}
 // 坪田張二^{*4}

正会員 金井喜一^{*2}
 // 丹羽一邦^{*3}
 // 河西良幸^{*4}

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でスーパーコンピュータの利用が有効である。

著者ら³⁾はこれまでに、3次元弾塑性FEMモデルを用いて、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を行っている。本報告では、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、その1では衝突現象の基本的性状に関して報告する。

2. 対象建物について

対象建物の伏図、軸組図を図1及び図2に示す。この建物は、既に公開されている衝突実験³⁾が実施された建物で

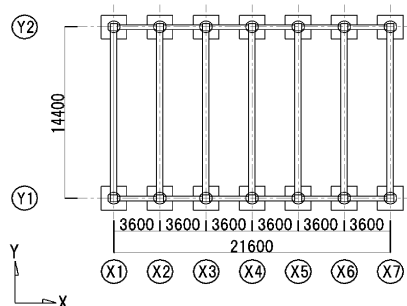


図1 建物伏図⁴⁾

あり、建物は上部構造が5階建ての免震層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表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。

表1 免震装置のデータ^{4),5)}

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。解析モデルを図3に示す。

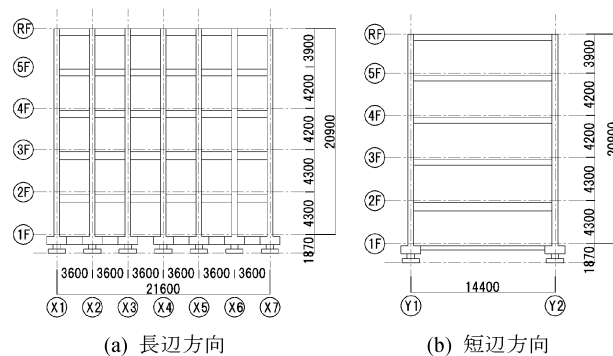


図2 建物軸組図⁴⁾

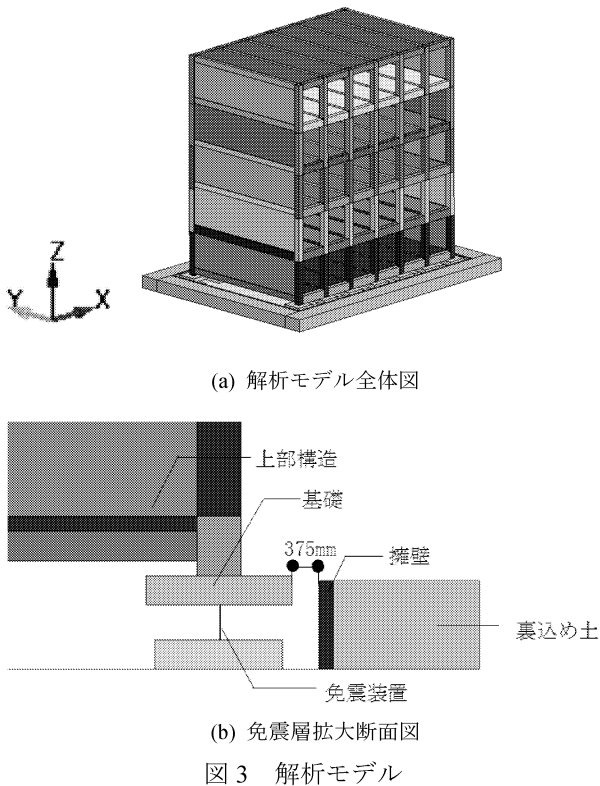


図3 解析モデル

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(図4鉄筋モデル図例参照)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、鉛直剛性は表1の数値を採用した。

ここで各部材の材料特性を表2及び図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⁶⁾。圧縮特性は弾性と仮定した。これは既往実験データ⁷⁾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⁸⁾。

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 、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/mm^2 と設定し、引張強度は圧縮強度の 1/10 とした。

裏込め土は、弾性体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。

表2 各要素材料特性一覧⁹⁾

	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

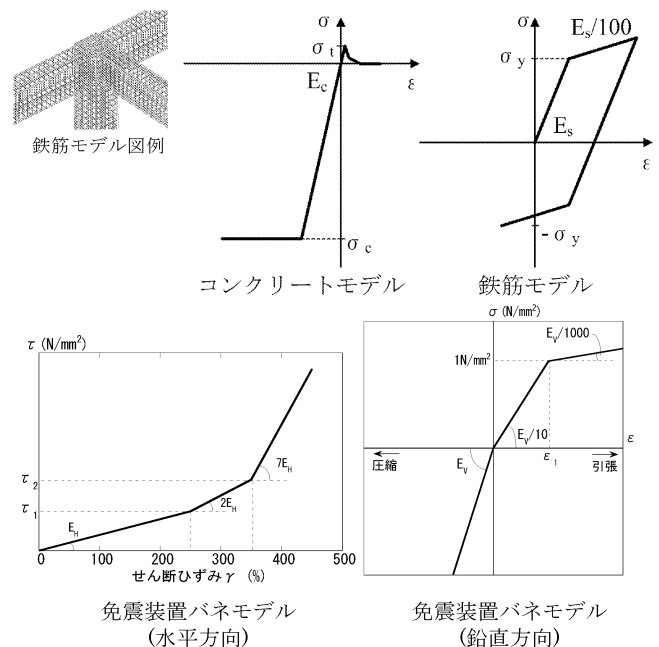


図4 各要素の材料特性

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図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

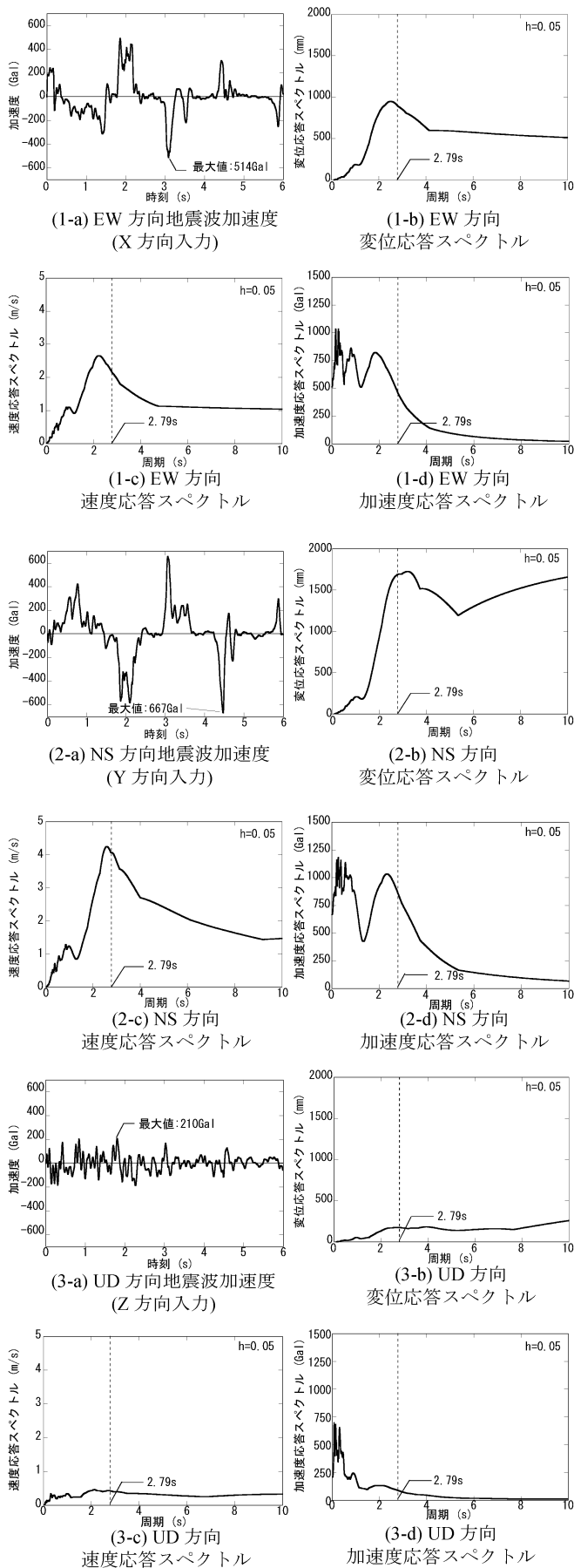


図5 入力地震波加速度波形及び地震波の応答スペクトル (h=0.05)

1次固有周期が2.79秒であることから、共振現象を引き起こしやすい地震波と言える。

入力はEW方向の地震波を図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。オービットを図6に示す。図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、後に示す図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

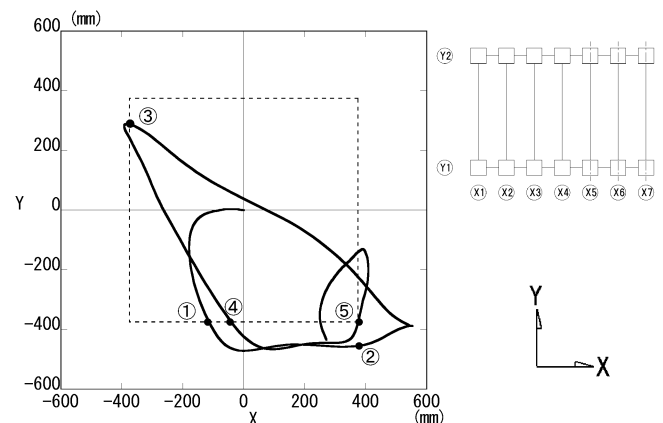


図6 免震層オービット

した擁壁部分には、コンクリートの破壊も見られた。

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図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は図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¹⁰⁾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。

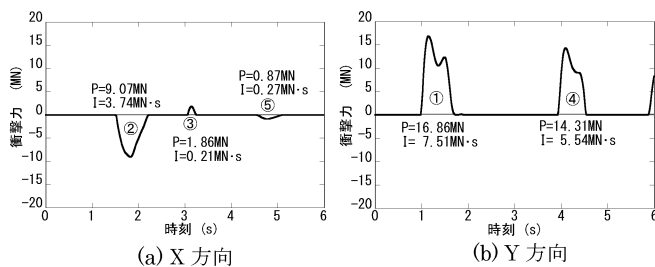


図7 各方向の衝撃力時刻歴波形

6.3 免震装置の水平荷重

図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、図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、番号は図6及び図7での番号と対応している。

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(図4免震装置の水平方向バネモデル参照)。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。

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

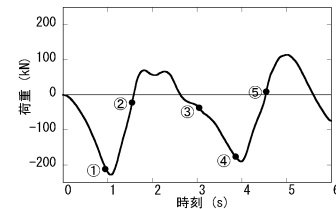


図8 免震装置の水平方向時刻歴荷重波形(Y1-X1)

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。

その1では、衝突挙動に関する基本性状について分析を行った。その結果、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。

その2では、パラメータの一つである上下動の考慮による衝突振動現象への影響について述べる。

<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) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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

*1 前橋工科大学大学院工学研究科 博士前期課程

*2 前橋工科大学大学院工学研究科 博士後期課程・修士

*3 株式会社 テラバイト

*4 前橋工科大学大学院工学研究科教授・工博