

特集 「自然災害にそなえる」

3次元非線形FEM解析によるRC構造物の
地震時挙動シミュレーション

米澤健次 長沼一洋

Simulation for Seismic Nonlinear Response of RC Structures
by Three Dimensional Dynamic FE Analysis

Kenji Yonezawa Kazuhiro Naganuma

Abstract

“FINAL” has been improved to enable it to simulate seismic nonlinear responses of RC structures by three dimensional dynamic FE analysis based on a solid element, considering the tri-axial stress state. The analysis method can reproduce the detailed configuration of structures and obtain more reliable analysis results because generous assumptions required by other models are not needed. In this study, a non-orthogonal multidirectional cracked concrete model under tri-axial stress was improved to enable it to obtain a stable solution for micro stress reversal. Further the bond stress – slip model between concrete and reinforcing bars was developed to enhance the analytical accuracy. Analyses of past shaking table tests were conducted to verify the validity of the analysis model, and ways of considering rotational acceleration of shaking table under multidirectional input were also investigated through these analyses. It was thus found that the dynamic nonlinear response of RC structures can be simulated well.

概要

3軸応力場のソリッド要素をベースとしたRC部材の3次元動的FEM解析を実現するために、自社開発ソフト「FINAL」を改良した。3軸応力場のソリッド要素を用いることで、構造物の形状を忠実に再現でき、従来の解析モデルと異なり、大まかな仮定を必要としないため、より精度の高い解析結果が得られる。ここでは、微小な繰返し応力変動に対しても安定した挙動を示すように3軸応力下の非直交ひび割れモデルを改良し、更なる動的非線形応答性状に対する解析精度の向上を目的に、鉄筋とコンクリート間の付着すべり特性の履歴モデルを開発した。これらの解析モデルを用いて既往の振動台実験を対象とした検証解析を行い、モデルの有効性を検討した。さらに、多方向入力下における振動台のピッチングの考慮方法を検討した。その結果、本解析モデル及び解析手法を用いることにより、RC構造物の複雑な動的非線形応答性状を良好な精度で再現できることを確認した。

1. はじめに

RC構造物の力学的挙動を再現するための有力なツールとして、有限要素解析（FEM）のニーズは高まっている。当社では非線形FEM解析ソフト「FINAL®」を開発し、1985年から現在に至るまで継続的にその解析精度の向上と適用範囲の拡大に取り組んできた。現在ではパソコン上で解析や種々のポスト処理が可能で、広く実務に利用されている。

FINALの開発は、原子力関連構造物のように面内せん断力を受けるRC壁体の解析精度の向上を目指して開始された。当社で実施した一連のRC平板実験¹⁾に基づき、独自のRC材料構成則²⁾を誘導したのを皮切りに、その後、2次元解析においてRC部材の正負繰返し荷重に対する解析技術³⁾の開発を経て、非線形の時刻歴応答解析⁴⁾を可能とした。さらに、適用範囲を3次元に拡大するため、3軸応力下のコンクリート材料構成則の研究を行い、スーパーコンピュータによる大規模な3次元応力解析を可

能とした。その後、3軸応力下の構成則を繰返し荷重に適用できるように改良し、現在では正負繰返し荷重を受けるRC部材の非線形挙動を精度良く予測あるいは再現できる段階に至っている⁵⁾。

本研究では、FINALの更なる適用範囲の拡大及び解析精度の向上を目指し、RC構造物の3次元動的非線形FEM解析技術の開発を行った。3軸応力を表現できるソリッド要素をベースとしたこの種の非線形動的解析はほとんど例がなく、最先端の解析技術である。

本報では、地震力を受けるRC構造物に対する3次元動的FEM解析手法の概要を紹介し、既往の振動台実験を対象とした検証解析例を通して、解析精度を検討した結果について述べる。

2. 3次元ソリッド要素解析のメリット

従来、地震力を受けるRC建物の非線形挙動に対する解析では、Fig. 1に示すように柱・梁・壁等の構造部材を線

材としてモデル化し、剛床を仮定した簡略的な解析モデルが用いられている。その解析モデルに地震力を直接与えた3次元フレームの時刻歴応答解析も可能ではあるが、一般的には、荷重分布を仮定してFig. 1に示す解析モデルで静的漸増載荷を行って各層のせん断力一層間変位の関係を求め、質点系に置換して時刻歴応答解析を行っている。従来の解析モデルは、計算時間において大きなメリットがあるが、解析モデルを簡略化するための仮定が必要であり、整形で偏心のない建物には適用できるが、複雑な構造形式を採用した建物に対しては適用が難しく、仮定条件により結果が大きく異なる場合がある。また、この解析では建物全体の挙動を概ね再現・予測できても、部材内部の応力状態等の詳細なデータを得ることはできない。

一方、3次元動的FEM解析では、Fig. 2に示すように実際の形状を忠実に表現できるため、簡略化に伴う種々の仮定は不要で、試験体形状のみならず、付加マスなどの荷重条件にも対応可能で、精度の高い解析結果が得られる。また、細部の応力・ひずみ状態の詳細なデータが得られ、設計・施工法の検討などにおいても有力なツールとなり得る。一方では、大規模なモデルになると、解析時間やデータ量が膨大になるため、計算環境（演算速度やメモリー）の制約を受け、実務での使用が困難になることが予想されるが、本技術は計算機性能の著しい発展により実務への展開も可能になりつつある。

3. 材料構成則の概要と解析条件の留意点

3次元動的FEM解析によりRC構造物の振動台実験をシミュレーションする際には、以下の項目に留意する必要がある。

- 1) 材料構成則
 - 2) 減衰の設定
 - 3) 構造物が受ける入力加速度の再現
(振動台のピッチングの影響)
- 各項目について以下に詳述する。

3.1 材料構成則

RC構造物の非線形解析の精度は、静的、動的解析に限らず材料構成則に大きく依存

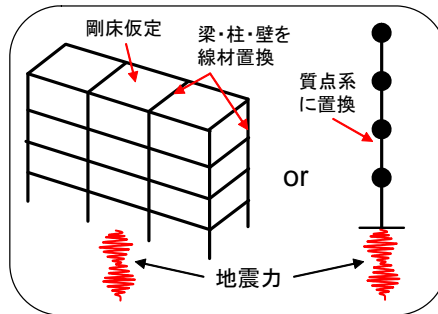


Fig. 1 従来の解析手法
Conventional Frame Analysis

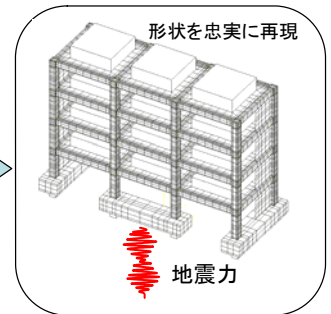


Fig. 2 3次元動的FEM解析
3D-Dynamic FE Analysis

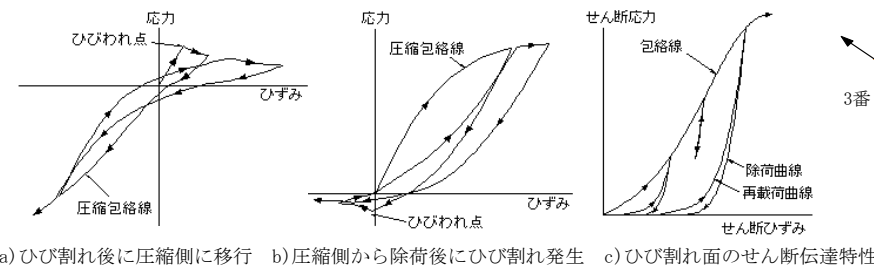


Fig. 3 コンクリートの履歴特性
Hysteretic Characteristic of Concrete

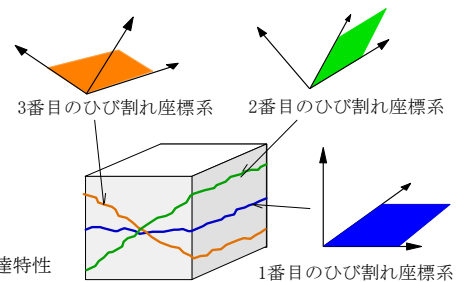


Fig. 4 三次元非直交ひび割れモデル
3D Non-orthogonal Concrete Crack Model

条件に対しても、安定した結果が得られ、実験の履歴挙動を精度良く再現できることを確認した。

RC構造物の非線形挙動に影響を及ぼす因子としては、各構成材料の非線形性に加えて、鉄筋とコンクリート間の付着すべり特性が挙げられる。特に、柱梁接合部や柱脚部に見られるように、コンクリート躯体の不連続部位において鉄筋の抜け出しが顕著な場合には、この付着すべりを考慮する必要がある。通常、解析で付着すべりを考慮する場合は、Fig. 7に示すように鉄筋要素とコンクリート要素の節点を別々に定義し、その間に接合要素を挿入し、付着応力-すべり関係を定義する方法が一般的である。ここで、問題となるのは、接合要素の特性として与える付着応力-すべり関係をどのように定義するかである。従来のFINALでは鉄筋とコンクリートの間の付着すべりモデルとして、Fig. 8 a)に示すような多点折れ線で表現した簡略的なモデルが用いられていた。しかし、動的解析においては材料の履歴特性を適切に表現することが重要であると考え、現実の挙動を忠実に再現できるように付着すべりモデルを改良した。改良後のモデルをFig.

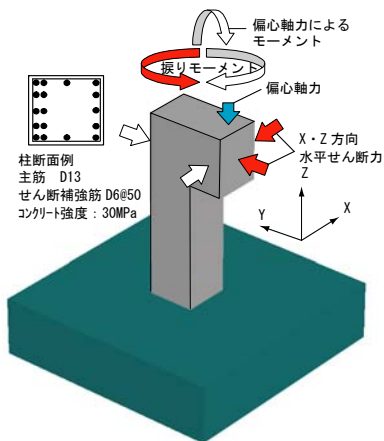


Fig. 5 多方向入力を受けるRC柱
RC Column Subjected to Multidirectional Forces

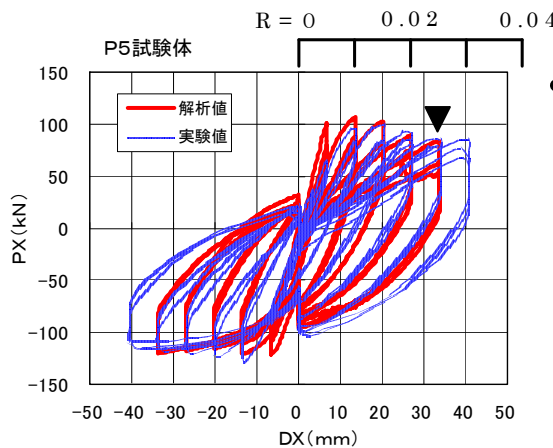


Fig. 6 多方向入力を受けるRC柱の解析結果
Analysis Results of RC Column Subjected to Multidirectional Forces

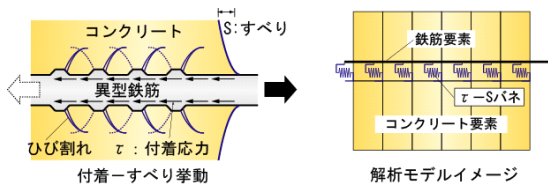


Fig. 7 付着すべり挙動のモデル
Model of Bond Slip Behavior

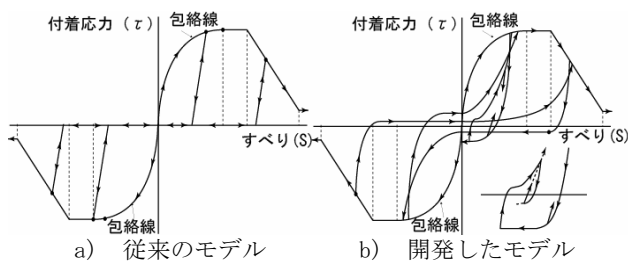


Fig. 8 付着応力～すべり関係
Bond Stress - Slip Relationship

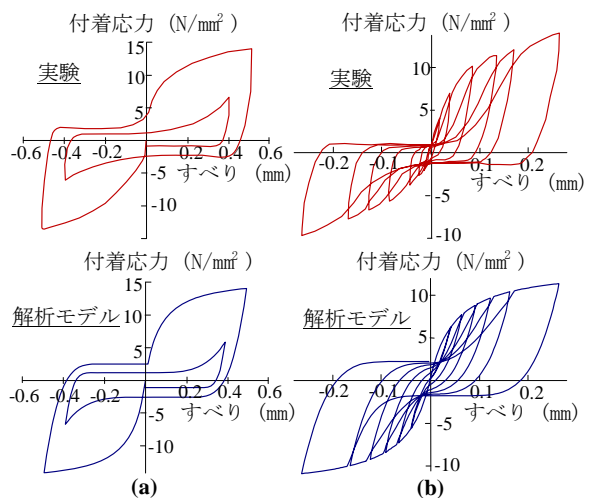


Fig. 9 モデルと実験の比較
Comparison between Model and Test

3.3 構造物が受ける入力加速度の再現

3次元振動台を用いた実験では、1方向水平加振のみを行った場合でも、振動台にはある程度の鉛直動とピッチング（加振方向の回転を伴う縦揺れ）が生じることがある。

本解析では振動台のピッチングを考慮するために、振動台上で測定された水平2方向と鉛直方向の並進加速度に加え、X,Y,Z軸まわりの3方向の回転加速度を解析モデルに入力した。回転加速度は、試験体底面の中心を回転中心とし、その点から全節点に伸ばした腕の直交方向に並進加速度を与えた（Fig. 10参照）。このピッチングの考慮方法は、一方向加振される場合において適用性は検証されているが⁴⁾、多方向入力に対しては未検証であり、多方向入力に対する適用性に関しては、後述の検証解析にて示す。

4. 検証解析

以下に示す既往の振動台実験の解析を通して、上述の解析手法及び解析モデルの適用性を検証した。

- 1) 独立RC柱の2方向加振実験⁷⁾
- 2) RC4層耐震壁フレーム模型の3方向加振実験⁸⁾

各実験の検証解析の結果を以下に述べる。

4.1 独立RC柱の2方向加振実験

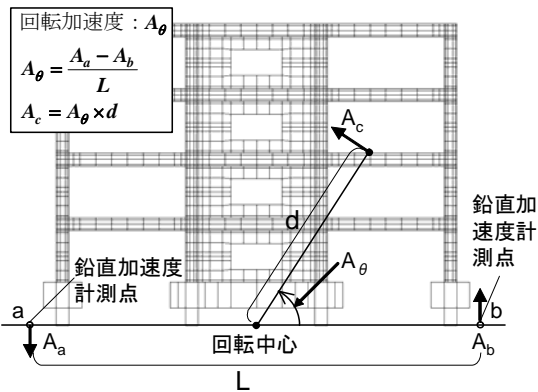


Fig. 10 回転加速度の考慮方法
Acceleration Input of Rotation at the Bottom

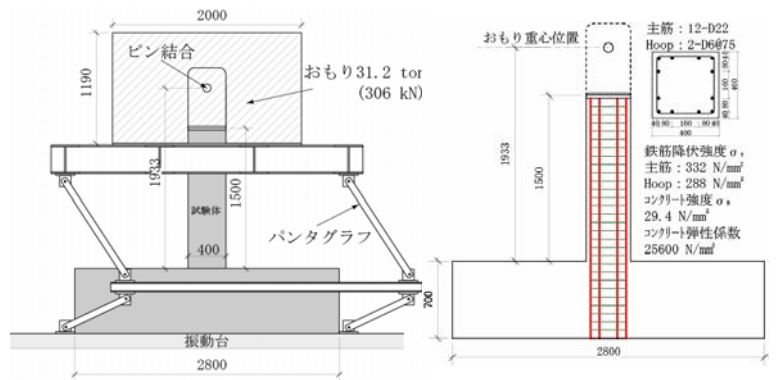


Fig. 11 加振システム
Specimen Setting on Shaking Table

Fig. 12 試験体形状
Configuration of Specimen

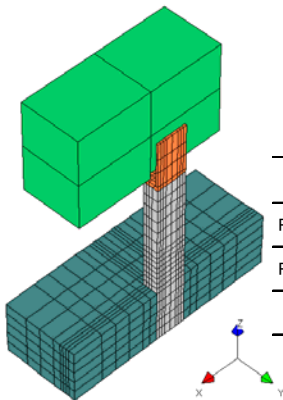


Fig. 13 解析モデル
Finite Element Model

Table 1 加振一覧
List of Input Acceleration

	入力加速度		回数
	水平	鉛直	
Run1~3	東海地震想定波 150gal相当	なし	3
Run4~5	正弦波 1Hz 200gal相当	正弦波 1Hz 120gal相当	2
Run6	正弦波 1Hz 400gal相当	正弦波 1Hz 240gal相当	1

4.1.1 実験概要

解析対象は、RC柱の1質点系を模擬した独立RC柱の2方向加振動実験である⁷⁾。試験体形状、加振共に基礎的な実験ではあるが、解析モデル及び解析手法を検討する上では、非常に有用なデータが得られている。

Fig. 11に加振システム、Fig. 12に試験体形状及び配筋を、Fig. 13に解析モデルをそれぞれ示す。試験体の柱頭部には、306kNの付加マスをピン結合で取り付け、付加マスの回転による影響をなくしている。振動台の入力としては、破壊に至るまでTable 1に示す6回の加振が行われている。Run1,2,3では、時間軸を $\sqrt{2/3}$ 倍した東海地震想定波を用い、入力レベルは曲げひび割れが生じる程度の150gal相当とし、Run1~Run3まで同じ入力を水平方向にのみ3回加振している。Run4,5,6は水平+鉛直の2軸加振としている。Run4,5では200gal相当、鉛直120gal相当の1Hzの正弦波を2回加振している。その後、Run6として水平400gal、鉛直240gal相当の1Hzの正弦波を入力している。なお、解析では柱脚においてベースマットからの鉄筋の抜け出しが全体の挙動に大きな影響を与えることが考えられるため、3.1節に示す付着~すべりモデルを用いて鉄筋とコンクリート間の相対すべりを考慮した。

4.1.2 解析結果

Fig. 14にRun3に対して振動台のピッチングを考慮するための回転加速度を入力した解析と入力しない解析の

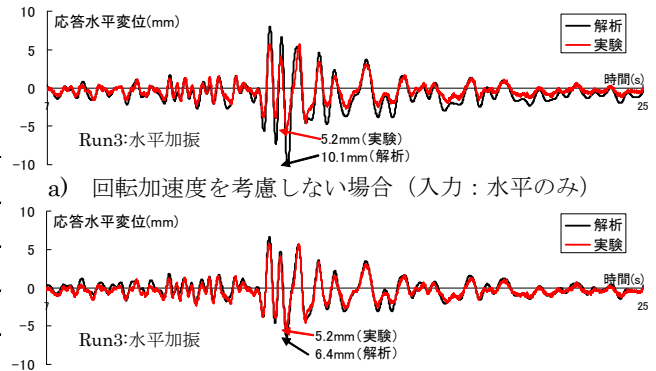


Fig. 14 振動台のピッチングの考慮の有無による違い
Effect of Rotational Acceleration Input on Analysis Result

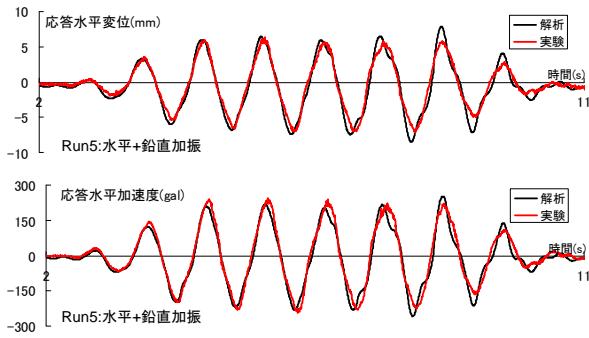


Fig. 15 Run5における応答変位・加速度の時刻歴の比較
Comparisons of Time Histories of Response on Run5

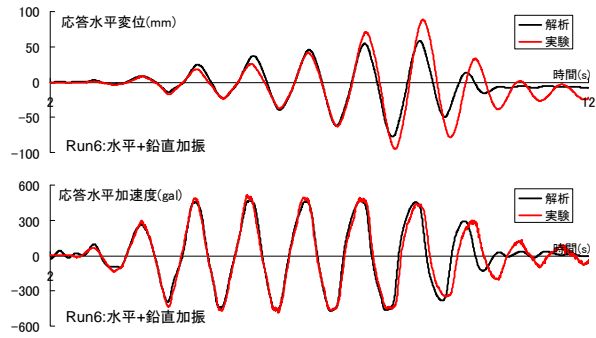


Fig. 16 Run6における応答変位・加速度の時刻歴の比較
Comparisons of Time Histories of Response on Run6

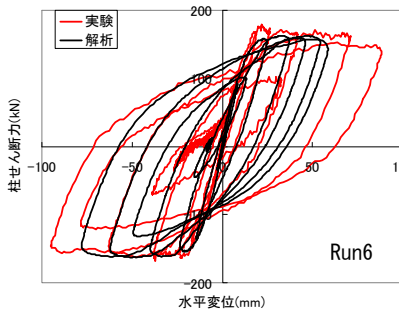


Fig. 17 せん断力～水平変位関係の比較
Comparison of Force – Displacement Relationship

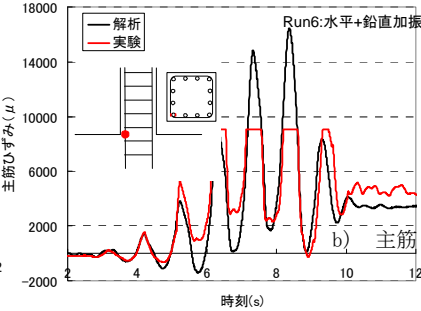
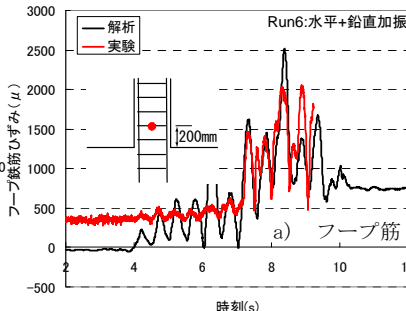


Fig. 18 鉄筋ひずみの時刻歴の比較
Comparisons of Time Histories of Rebar Strain

応答水平変位の時刻歴を実験と比較して示す。回転加速度を入力しない解析では実験に比べ応答変位が大きくなるのに対し、回転加速度を入力した解析では応答変位の時刻歴が実験結果とほぼ一致する結果となった。このことより、振動台のピッチングが試験体の応答性状に与える影響は大きく、その影響を本手法により精度良く考慮できることを確認した。

Fig.15及びFig.16にRun5とRun6における応答変位と応答加速度の時刻歴の比較を示す。Run5では曲げひび割れが生じ試験体の降伏耐力の1/2程度の応答を示し、Run6では脚部が曲げ降伏し、応答変位が最大で変形角1/25rad程度になり、最終的には脚部のせん断破壊により耐力が低下した。Run5に関して、解析と実験の変位及び加速度の応答性状はほぼ一致し、Run6に関して、大きな変位レベルにおいて、解析と実験に若干の差異が認められるが、解析は実験の応答性状を概ね再現している。Fig.17に解析と実験の柱せん断力（慣性力）—水平変位関係を示し、Fig.18 a)に脚部におけるフープ鉄筋ひずみ、Fig.18 b)に脚部の主筋ひずみの時刻歴を示す。履歴特性及び各鉄筋ひずみの推移に関して実験と解析は良好に対応することを確認した。なお、計測上のトラブルにより9000 μ以上の主筋ひずみの実験値はカットされている。

4.2 RC 4層耐震壁フレーム模型の3方向加振実験⁸⁾

4.2.1 実験概要

この実験は「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一環として、防災科学研究所からの委託により当社の3次元振動台を用いて実施されたものである⁸⁾。

解析対象とした試験体の形状及び概要をFig.19, Fig. 20

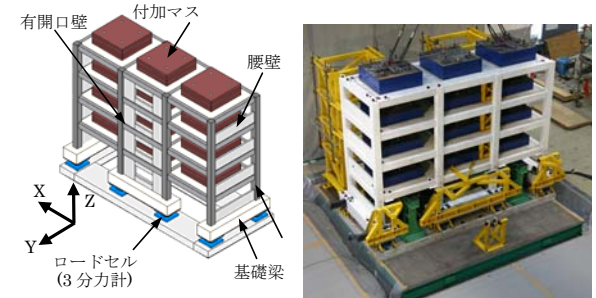


Fig. 19 試験体形状
Configuration of Specimen



Photo 1 試験体の外観
Overall View of Specimen

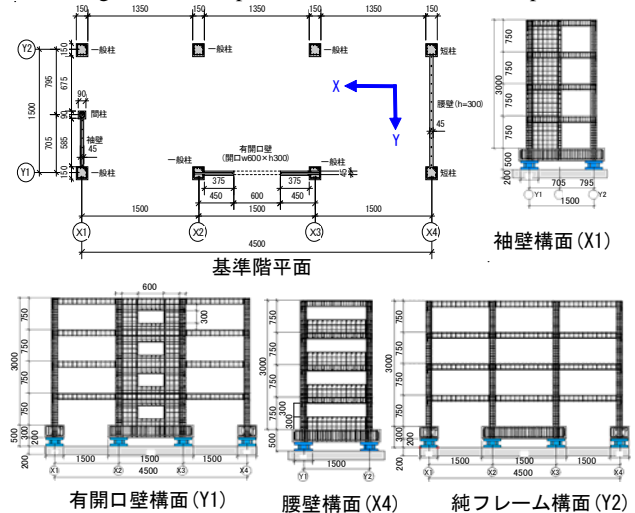


Fig. 20 試験体の概要
Outline of Specimen

及びPhoto 1に示す。試験体は4層、1×3スパン、1/4スケールのRC壁フレーム模型で、平面スパンは1500×1500mm、階高は750mmである。Y2,X2,X3構面は純フレ

ーム、Y1構面には連層開口耐震壁、X4構面には腰壁付き短柱、X1構面には袖壁が組み入れられており、実際の建物でも見られるような不整形な構造計画がなされている。

実験は同仕様・同寸法の試験体を2体製作し、入力波の主軸の向きを変数として2ケースの加振実験を行っている。ここでは試験体長辺方向を強軸加振としたCase1を解析対象とした。その入力にはJMA神戸波(1995)のNS、EW、UD各加速度記録を基に、時間軸を1/2倍に圧縮し、入力波の主軸を試験体の長辺方向(X軸)に対応させて原波形をZ軸回りに45度回転した入力波形を採用している。

実験では入力波の加速度振幅を係数倍して漸増させ、Run1~7の計7回の加振が行われている。各Runの加速度振幅の倍率と実験結果の概要をTable 2に示す。実験では、腰壁の破壊により短柱が長柱化し、剛性・耐力の分布が不均一になって振れ振動が顕著に励起された複雑な応答性状を示し、最終的に有開口壁と腰壁が破壊に至った。

Fig.21に解析モデルを示す。本モデルの総節点数は29889(自由度数:88247)であり、解析実行時の使用メモリーは約2GBであった。解析にはパソコン(CPU 3.0GHz)を用い、時間増分は1/200秒を基本として、自動時間増分調節機能により1加振を約3500ステップで計算した。なお、本解析ではメモリーの制約により、鉄筋とコンクリート間の付着すべりは考慮せず、鉄筋とコンクリートの節点は共有節点とした。

4.2.2 解析結果

Table 2 加振一覧
List of Input Acceleration

Run	入力倍率	実験結果	
		R _{有開口壁} ^{※1}	主な損傷
Run1	5%	1/8500	—
Run2	20%	1/1550	1層腰壁・有開口壁にひび割れ
Run3	40%	1/615	1層有開口壁にひび割れ
Run4	60%	1/381	2~4層有開口壁にひび割れ
Run5	80%	1/209	1層有開口壁の縦筋降伏
Run6	100%	1/124	1~2層腰壁隅角部の破壊
Run7	125%	1/32	1層有開口壁のせん断破壊

※1 有開口壁構面(Y1構面)での1層X方向の最大層間変形角(rad)

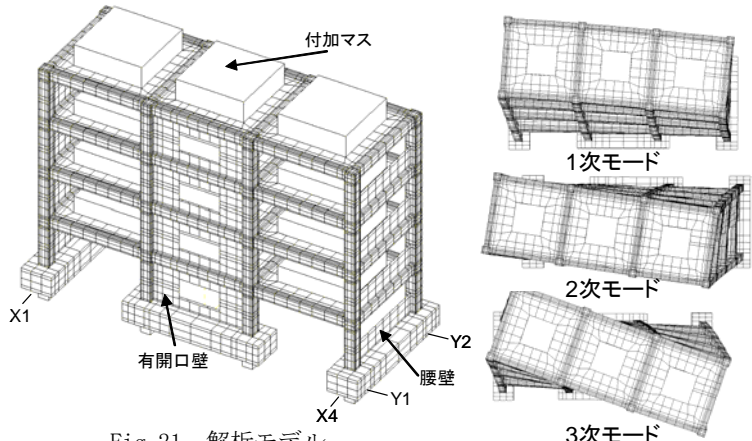
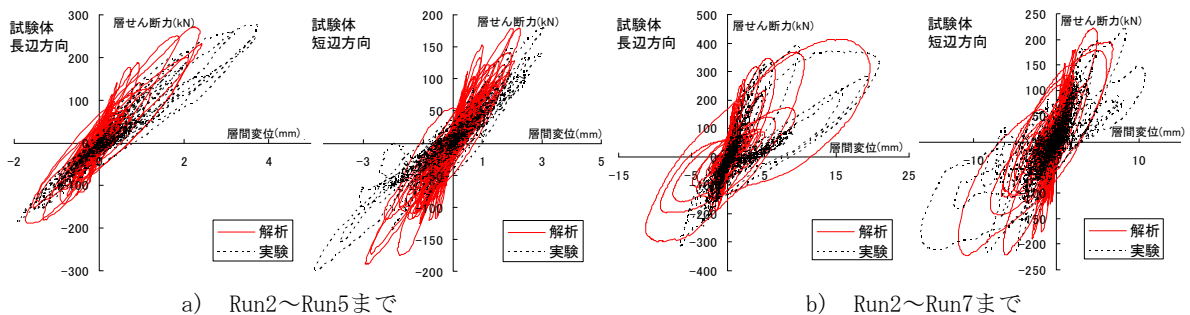


Fig. 21 解析モデル
Finite Element Model

Fig. 22 固有モード
Eigen Modes



a) Run2~Run5まで

b) Run2~Run7まで

Fig. 23 1階の層せん断力～層間変位関係の比較
Comparisons of 1st Story Shear Force - Displacement Relationship

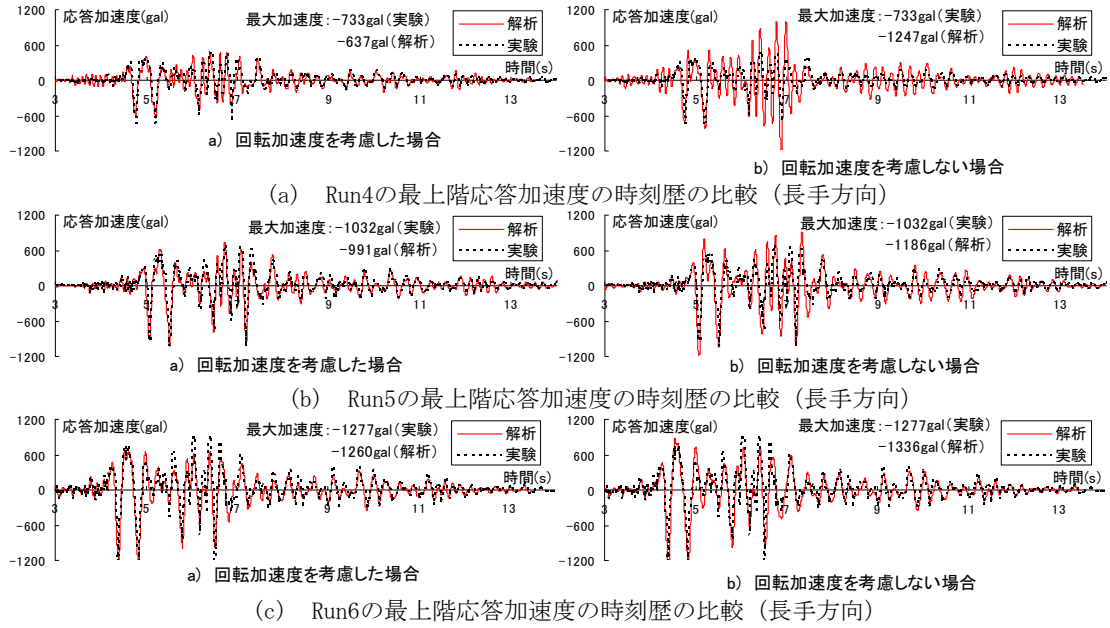


Fig. 24 振動台ピッチングの考慮の有無による違い (Run4, 5, 6)
 Effect of Rotational Acceleration Input on Analysis Result

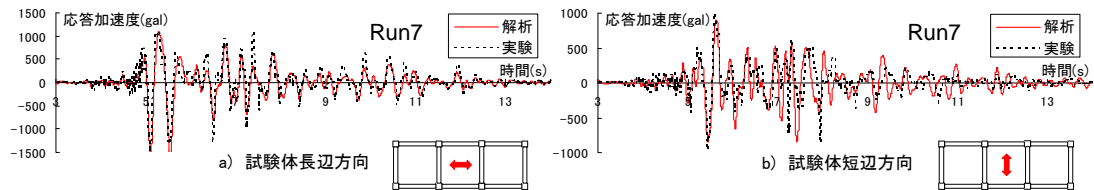


Fig. 25 最上階重心位置における応答加速度の時刻歴の比較 (Run7)
 Comparisons of Time Histories of Acceleration Response (Run7)

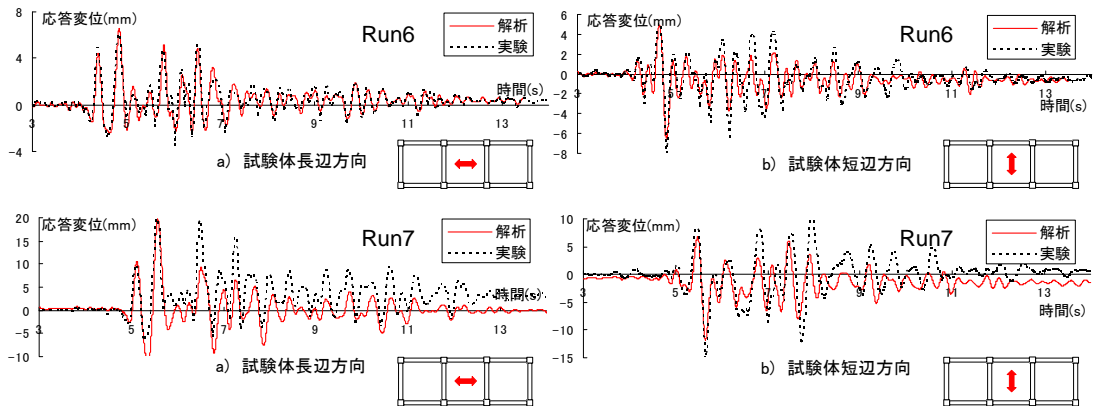


Fig. 26 2階床重心位置における応答変位の時刻歴の比較 (Run6, 7)
 Comparisons of Time Histories of Displacement Response (Run6,7)

る。これらの結果から、本ピッチングの考慮方法が多方向入力の場合に対しても有効であることが確認できた。

(4) 応答加速度・応答変位の時刻歴の比較: Run7について、解析と実験の最上階重心位置における応答加速度の時刻歴をFig. 25に示す。大きな損傷を受けるRun7において、両方向ともに実験と解析の応答加速度の波形は概ね一致し、解析は実験を良好な精度で再現している。

Fig.26に解析と実験の1階層間変位の時刻歴をRun6とRun7について示す。Run6の長辺方向については、全般的に解析と実験の応答変位は良好に対応している。短辺方

向に関しては、解析で付着すべりを考慮していないため、Run6, Run7ともに解析の変位がやや小さい。Run7の長辺方向に関しては、最大変位までの挙動は実験を良好に再現しているが、それ以降においては解析の変位が実験に比べ小さくなっており、ポストピーク挙動に対する精度に関しては、今後、検討が必要である。

(5) 振れ挙動に対する比較: 最上階重心位置回りの回転加速度の時刻歴について、実験と解析の比較をFig. 27に示す(一例としてRun5, Run6)。Run5までの回転加速度に関しては、解析と実験ではほぼ一致する結果であったが、

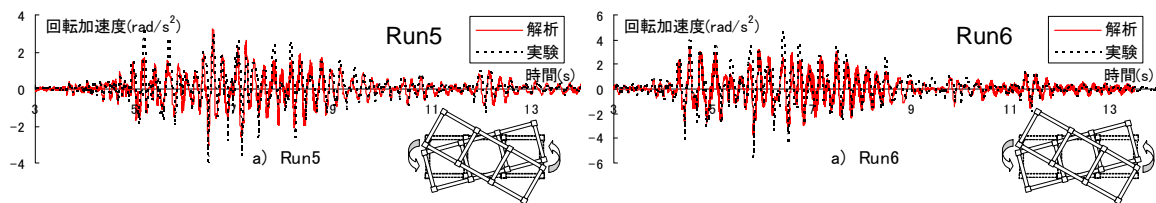


Fig. 27 最上階重心周りの回転加速度の時刻歴の比較 (Run5,6)
Comparisons of Time Histories of Rotational Acceleration Response (Run5,6)

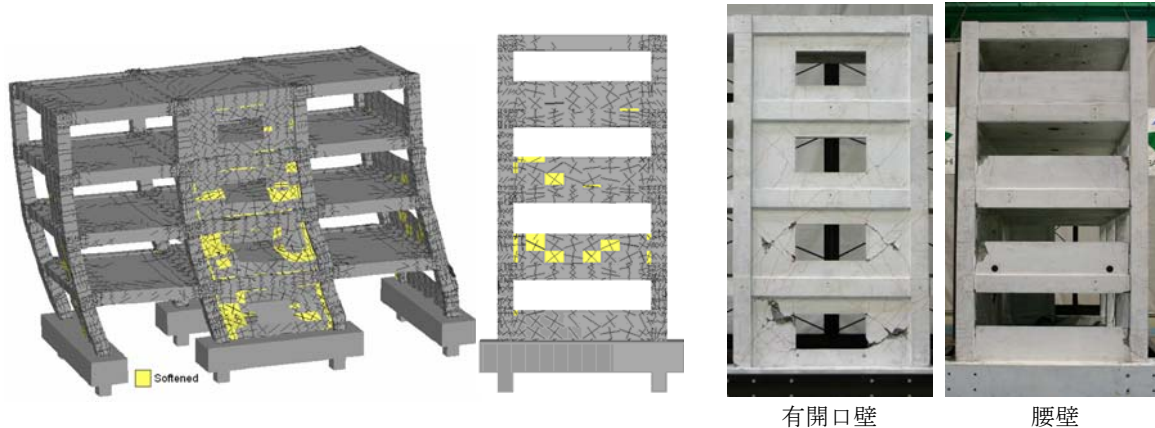


Fig. 28 最大変位時の損傷状況 (解析)
Damage of Specimen at Maximum Displacement (Analysis)

Photo 2 最終破壊状況
Damage of Specimen After Test

Run6以降からは実験より解析の方がやや小さくなる傾向が見られた。しかし、解析と実験の波形は良好に対応しており、試験体の振れ挙動に対しても解析は実験を概ね再現できているものと考えられる。

(6) 損傷状況：Fig. 28にRun7の最大変位時における解析モデル全体の変形及び損傷状況と腰壁構面の損傷状況を示し、Photo 2に実験の最終破壊状況を示す。なお、Fig. 28の色分けされた部分はコンクリートが圧縮強度を超えて圧縮軟化域にある要素を示している。Fig. 28とPhoto 2の比較より、解析と実験で大きな損傷を受けている位置が概ね対応しており、破壊性状に関しても解析は実験を良好に再現できている。

5. まとめ

自社開発ソフト“FINAL”による3次元動的非線形FEM解析を可能とし、既往の振動台実験を対象として、解析手法および解析モデルの有効性を検証した。その結果、本解析手法により、振動台上で多方向入力を受けるRC構造物が破壊に至るまでの非線形応答性状を良好に再現できることを確認した。

謝辞

本報で解析対象としたRC4層耐震壁フレーム模型の3方向加振実験は「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一環として、防災科学研究所からの委託により東京大学地震研究所・壁谷澤寿海教授のご指導の下に実施されたものである。

参考文献

- 1) 山口恒雄, 他: 面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の力学的特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第419号, pp. 77~86, 1991. 1
- 2) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp. 39~48, 1991. 3
- 3) 長沼一洋, 他: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp. 135~142, 2000. 10
- 4) 長沼一洋, 他: プレストレストコンクリート格納容器模型の動的非線形FEM解析, 日本建築学会構造系論文集, 第566号, pp. 105~112, 2003. 4
- 5) 米澤健次, 他: 正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の3次元非線形FEM解析, 大林組技術研究所報No. 67, 2003年
- 6) 大内一, 他: 2方向繰返し水平荷重を受ける逆L字型RC橋脚模型実験のFEM3次元解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, 2005年
- 7) 米澤健次, 他: RC柱の3次元動的FEM解析精度の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 構造IV, pp. 335-336, 2005. 9
- 8) 勝俣英雄, 他: 鉄筋コンクリート造4層壁フレーム模型の多方向入力振動台実験(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 407~410, 2005. 9