

## FINAL-GEO®による実在RC建物の大規模非線形FEM解析

米澤 健次 水越 一 晃

古島 正博 日野 惇  
(設計本部) (設計本部)

## Large Scale Non-Linear FE Analysis for Real RC Building by FINAL-GEO

Kenji Yonezawa Kazuaki Mizukoshi

Masahiro Kojima Jun Hino

## Abstract

Recently, the accuracy of nonlinear FE analysis for RC structures has improved, and large-scale FE analysis that accurately reproduces the entire building has also been performed. In the near future, a rational structural design will be performed using FE analysis. In this study, an FE analysis was conducted for an existing RC building using a large-scale model. The results of the frame analysis used in the conventional design were compared with those of the FE analysis. Consequently, the building bearing capacity of the FE analysis was approximately 1.3 times that of the frame analysis. The difference was attributed to the fact that the out-of-plane resistance of the shear wall and bending resistance of the parapet were not considered in the frame analysis.

## 概 要

近年、RC造構造物を対象とした非線形FEM解析の精度が向上し、建物全体を忠実に再現した大規模FEM解析も行われるようになってきた。将来的には、建物全体をモデル化したFEM解析を用いて、より合理的な構造設計が行われるものと考えられる。本論は、その第一ステップとして、実在するRC造建物を対象として、実物の形状を忠実に再現した大規模モデルによるFEM解析を行った。また、従来、構造設計で用いられるフレーム解析による結果とFEM解析の結果の比較を行い、両者の差異を分析した。その結果、FEM解析の保有水平耐力は、フレーム解析と比較して約1.3倍程度となり、フレーム解析では考慮されていない耐震壁の面外抵抗やパラペットの曲げ抵抗が両者の差異の要因であることがわかった。

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下、RC）構造物の安全性を評価する有効なツールとして、構造物が破壊に至るまでの挙動を再現できる有限要素法（以下、FEM）による解析のニーズが高まっている。

大林組は、独自のRC材料構成則を導入した非線形FEM解析ソフト「FINAL®」<sup>1</sup>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み、今では広く実務に活用されている。また、近年では、構造物の形状を細部にわたり忠実に再現した詳細なモデルによる非線形地震応答解析のニーズに応え、「FINAL」をベースに、演算速度を飛躍的に高速化して大規模解析を可能にした「FINAL-GEO®」<sup>2</sup>を開発した。従来は単一の柱・梁・壁などの部材を対象としたFEM解析が一般的に行われていたが、「FINAL-GEO」により、建物全体を詳細に再現した大規模モデルによる解析が可能となった。

現状、建物の構造設計は、柱・梁・壁などの部材を線材に置換した比較的簡易なフレーム解析に基づいて行われている。フレーム解析では、部材が一般的な形状で構成される建物であれば、比較的精度良く建物の構造性能

を評価できる。しかし、昨今の建物の多様化・複雑化に伴い、複雑な形状で線材に置換し難い部材を有する建物が多く、そのような場合、フレーム解析では、様々な仮定を用いることになり、合理的に設計できない可能性がある。一方、FEM解析では、建物を構成する部材の形状を忠実に再現でき、複雑な形状の建物であっても、精度良く構造性能を評価できる。FEM解析により建物の構造設計が可能になれば、経済性と安全性の両面から合理的な設計が可能となり、豊かで持続可能な社会の構築に貢献できるものと考えられる。

今後、FEM解析による建物の構造設計を可能にするためには、電子計算機の更なる発展に加えて、解析モデル作成の省力化技術の開発が必要である。また、建物全体を詳細にモデル化したFEM解析の事例は少なく、多くの事例を通して、FEM解析による構造設計の可能性を検証する必要がある。そこで、近い将来の合理的な構造設計手法の確立に向けた第一ステップとして、実在のRC建物を詳細に再現した大規模モデルによるFEM解析を行い、構造設計で用いられるフレーム解析による結果と比較して、両者の差異を検討した。

本論では、まずは既往の検証例を通して、建物全体をモデル化した大規模FEM解析の精度について述べる。次

に、解析対象とした実在RC建物の解析概要、およびFEM解析とフレーム解析の差異の要因を検討した結果について述べる。

## 2. 建物全体を対象としたFEM解析の精度

建物や構造物の挙動を、非線形解析を用いて評価する上で、最も重要なのは「解析の信頼性」である。すなわち、解析結果が実現象を精度良く再現できることが求められる。一般に、この解析精度は、実験を予測・再現する解析を行い、実験結果と解析結果の比較により検証されることが多い。今までは、これらの解析精度の検証は、柱・梁・壁など単一の部材を対象とした実験との比較によるものが殆どであったが、「FINAL-GEO」の開発により、建物全体を模擬した大規模振動台実験を対象とした実験との比較も行われ始めている。そこで、2つの既報の解析事例を通して、建物全体を対象とした大規模FEM解析の精度について述べる。

### 2.1 縮小20層RC建物試験体の震動実験に対する解析<sup>3)</sup>

国土交通省建築基準整備促進事業の一環として、縮小20層RC造建物試験体の震動実験が行われた。この実験では、20層RC層造ラーメン架構建物を想定し、各層の梁端に塑性ヒンジを生じる全体降伏形のメカニズムを形成し、概ね終局状態に至るまでの加振が行われた。この震動実験を対象に、大林組が独自に開発した材料構成則（後述3.2.2項を参照）を用い、試験体の形状を忠実に再現した解析モデルによる大規模FEM解析を行った。Fig. 1に解析モデルおよび解析結果の一例を示す。解析と実験から得られた荷重-変形関係や各層変形角分布が実験結果と概ね良好な対応を示し、実験の非線形挙動を良好な精度で

再現できることを確認した。

この実験およびFEM解析の結果より、計測された架構全体の終局耐力は、一般に設計で用いられるフレーム解析の結果に比べて1.5倍程度であることがわかった。設計値よりも終局耐力が増大した主要因としては、梁部材のひび割れに伴う伸びを柱やスラブが拘束することにより梁に生じる圧縮軸力の影響、およびスラブの有効幅の広がりによる影響が考えられた。そこで、このFEM解析から得られた部材の要素応力より、終局耐力が設計値よりも増大した主要因を検討した。解析結果より梁の応力を抽出し、梁に生じる軸力の変動を考察し、また、スラブ筋の応力コンター等によりスラブの有効幅について考察した。その結果、架構耐力に対する梁軸力による影響は小さいこと、また、スラブの効果に関しては、想定よりも幅広い範囲のスラブが架構耐力に対して有効に寄与することがわかった。

### 2.2 縮小6層RC建物試験体の震動実験に対する解析<sup>4)</sup>

文部科学省の地震防災研究戦略プロジェクトの一環として、崩壊余裕度の定量化に必要な基礎データを得ることを目的に、縮小RC建物の震動破壊実験が行われた。本実験の試験体は、6階建てとし、一方向（短辺方向）が連層耐震壁付きラーメン架構、他方向（長辺方向）が純ラーメン架構で、各部を実大の30%とした縮小模型が用いられた。実験では3方向入力加振として、徐々に振幅を大きくして試験体が崩壊に至るまで加振が行われた。この震動実験を対象に、前述の解析例と同様の材料構成則を用い、試験体の形状を忠実に再現した大規模FEMモデルによる事前・事後の時刻歴応答解析を行った。Fig. 2に実験の全体計画、実験後の試験体破壊状況、解析モデル、および解析結果例を示す。実験と解析の各加振における応

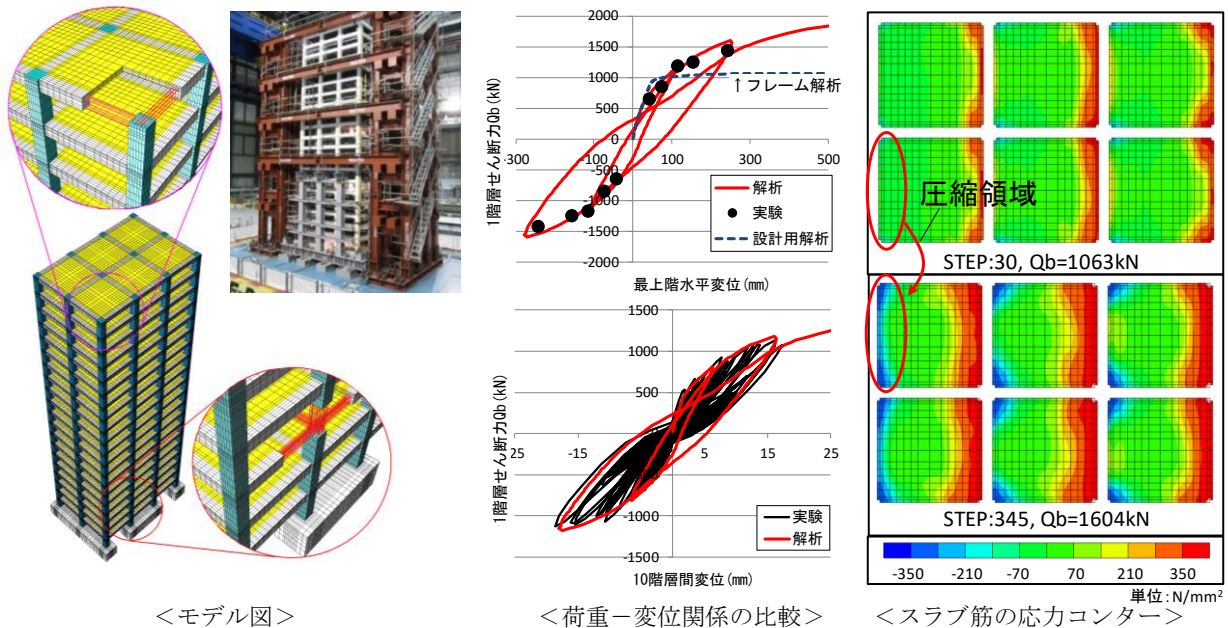


Fig. 1 縮小20層RC建物試験体の震動実験を対象としたFEM解析事例<sup>3)</sup>  
FE Analysis of Shaking Table Test of 20-Story RC Building Specimen

答変位や応答層せん断力の時刻歴と破壊モードの比較を通して、解析により実験の破壊に至るまでの非線形応答性状を良好な精度で予測・再現できることを確認した。

ここでの解析においても、FEM解析結果を活用し、解析から得られた要素応力から各部材の負担力を分析し、連層耐震壁の負担せん断力～変形関係について考察した。

上記2例は、実験結果との比較により解析精度を検証するだけでなく、実験結果を詳細に分析するツールとしてFEM解析を活用し、建物の耐荷機構に関する新たな知見が得られた事例である。FEM解析は実験計測では得られないデータが得られ、建物や構造物の構造性能の評価に有効である。ゆえに、FEM解析による構造設計が可能になれば、経済性と安全性の両面から合理的な設計が可能になるものと考えられる。

### 3. 実在RC建物の大規模非線形FEM解析

近い将来の合理的な構造設計手法の確立に向けた第一ステップとして、実在のRC建物を詳細に再現した大規模モデルによるFEM解析の結果とフレーム解析に基づく従来の構造設計法による結果を比較して、両者の差異を検討した。

#### 3.1 解析対象建物

解析対象とした建物は、大林組で設計施工されたRC造（一部S造）地上3階建ての事務所ビルである。Fig. 3に鳥瞰図、各階床伏図、代表的な構面の軸組図を示す。以下に解析対象建物の概要を示す。この建物には、様々な大きさの開口を有する耐震壁が多く配置されている。フレーム解析では、有開口耐震壁を線材モデルにて適切に表すことが難しいため、FEM解析との差異が生じやすいものと判断し、解析対象として本建物を選定した。

名称：K事務所ビル  
 構造形式：RC造（一部S造）地上3階  
 架構形式：耐震壁付きラーメン構造  
 用途：事務所  
 延べ面積：約1800m<sup>2</sup>  
 建物最高高さ：約14.5m（最高軒高：約13.0m）

本物件は、建物短辺方向の妻面全スパンと建物長辺方向の両側1スパン分にRC造連層耐震壁を配置し、主な耐震要素はこの連層耐震壁である。しかし、Fig. 3の軸組図からわかるように、連層耐震壁の各所に多くの開口が設けられている。なお、Fig. 3の赤のハッチ部分は開口を示す。本建物の内部は、RC造ラーメン架構が主であるが、AY3通りのAX2～AX5通り間、およびAX3とAX4のAY2～AY3間は鉄骨梁、AX3-AY3およびAX4-AY3は、鉄骨柱が配されている。主なRC造梁の断面は、幅500mm×高さ800mmで、主なRC造柱の断面は幅800mm×せい750mmまたは、幅1200mm×せい600mmである。耐震壁の厚さは200mm～600mm（例えば、Fig. 3のSW40、SW60）で、床スラブ厚は170mm～190mmである。なお、一部の床はハーフプレキャスト造となっている(VS1～3)。

#### 3.2 解析モデルの概要

3.2.1 モデル化手法 Fig. 4に解析モデルを示す。RC躯体はすべて六面体要素によりモデル化し、梁・柱の主筋はトラス要素を用いてモデル化した。壁筋や梁・柱のせん断補強筋は、六面体要素の埋込鉄筋によりモデル化し、鉄骨梁は梁要素でモデル化した。なお、鉄骨柱は軸力のみを負担するトラス要素とし、主筋とコンクリート間は、共有節点として相対すべりは考慮しなかった。

モデル規模は総節点数565,348、総自由度数1,690,821、六面体要素数464,028、梁・トラス要素数70,401である。各部材の要素分割としては、Fig. 4に示すように、大梁

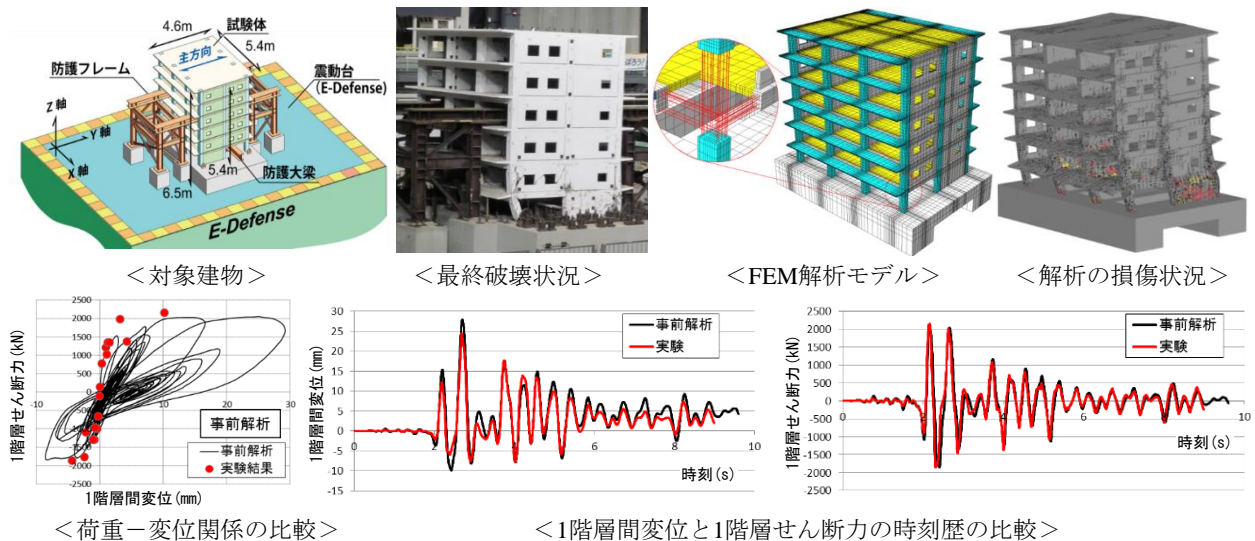


Fig. 2 縮小6層RC建物試験体の震動実験を対象としたFEM解析結果<sup>4)</sup>  
 FE Analysis of Shaking Table Test of 6-Story RC Building Specimen

は幅方向6分割、せい方向13分割程度とし、厚さ200mm以下の床は厚さ方向3分割、それ以上の厚さの床は5分割とした。柱の要素分割は、断面形状により異なるが5分割～9分割とし、耐震壁の厚さ方向の要素分割は壁の厚さに応じて、SW60は6分割、SW40は5分割、SW20は3分割とした。また、壁および床に関しては、断面内の鉄筋位置を可能な限り正確に表現できるように厚さ方向に無筋コンクリート部と鉄筋コンクリート部に分けて要素タイプを定義した。

各部材のコンクリート圧縮強度は27N/mm<sup>2</sup>であるが、床VS1～3の圧縮強度はハーフプレキャスト部材であるため36N/mm<sup>2</sup>である。コンクリートの引張強度 $\sigma_t$ は、圧縮強度 $F_c$ を基に $\sigma_t=0.33 \times F_c^{0.5}$ (N/mm<sup>2</sup>)で算定した<sup>5)</sup>。

鉄筋は、D16以下はSD295、D19～D25はSD345が用いられており、本解析では公称強度を用いた。

**3.2.2 材料構成則** コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルとし、非直交分散ひび割れモデルを用いて、多方向に生じるひび割れを考慮した。

コンクリートの材料構成則を以下に示す。各材料構成則の詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。なお、鉄筋の応力～ひずみ関係は降伏点を折れ点とする弾塑性モデルとした。

- ・ 応力～ひずみ関係の包絡線：修正Ahmadモデル
- ・ ひび割れ面のせん断伝達特性：長沼モデル
- ・ ひび割れ後の圧縮劣化特性：長沼モデル
- ・ テンションスティフニング特性：出雲モデル(c=1.0)
- ・ 破壊条件：Ottosenの4パラメータモデル

**3.2.3 荷重条件および荷重条件** 境界条件としては1階脚部を完全固定とし、自重解析を行った後、各床に所定の積載荷重（仕上げ荷重も含む）を与え、次に各床に地震力に相当する水平力を床全面に等分布荷重として与えた。また、解析ステップ数を300とし、設計の水平力分布に整合させて、Table 1に示す水平力に達するまでプッシュオーバー解析を実施した。なお、自重解析におけるRC躯体の単位体積重量は2.353×10<sup>5</sup>N/mm<sup>3</sup>とした。解析はX方向（建物長辺方向）とY方向（建物短辺方向）に対して正側・負側の計4方向の荷重を行った。

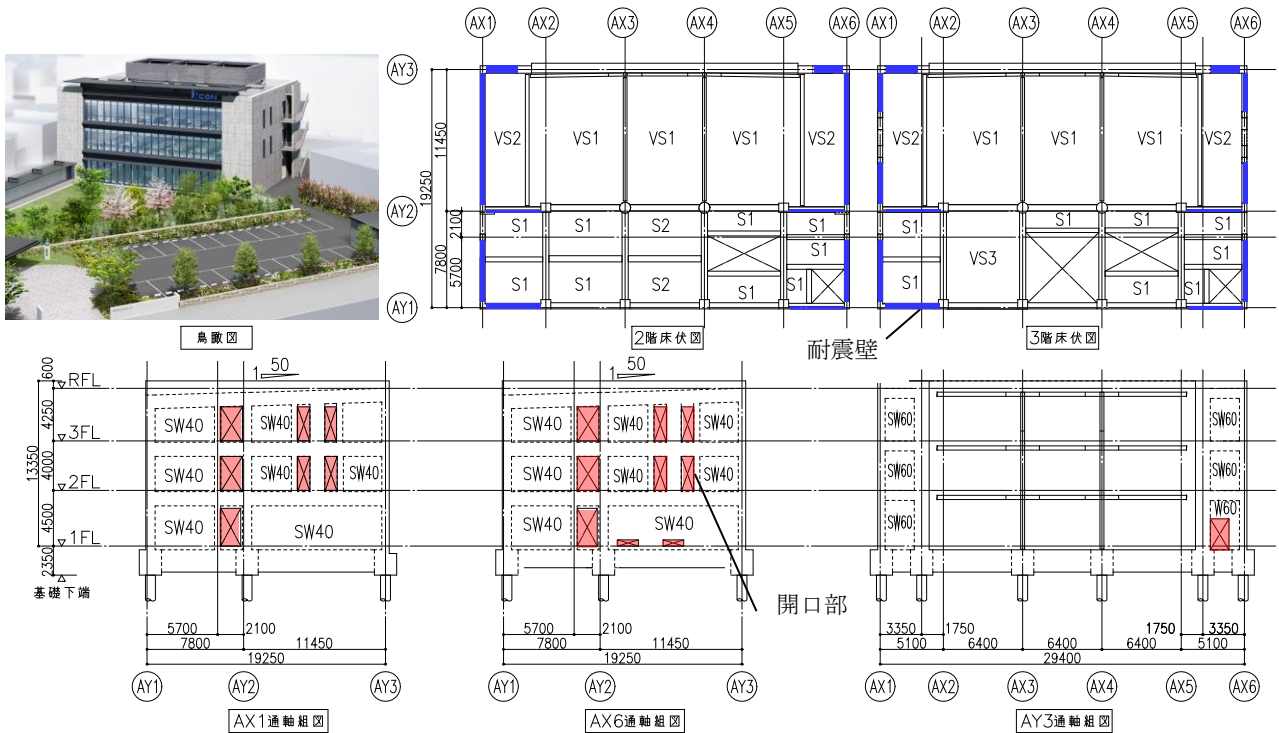


Fig. 3 解析対象建物  
Building Plan for Analysis

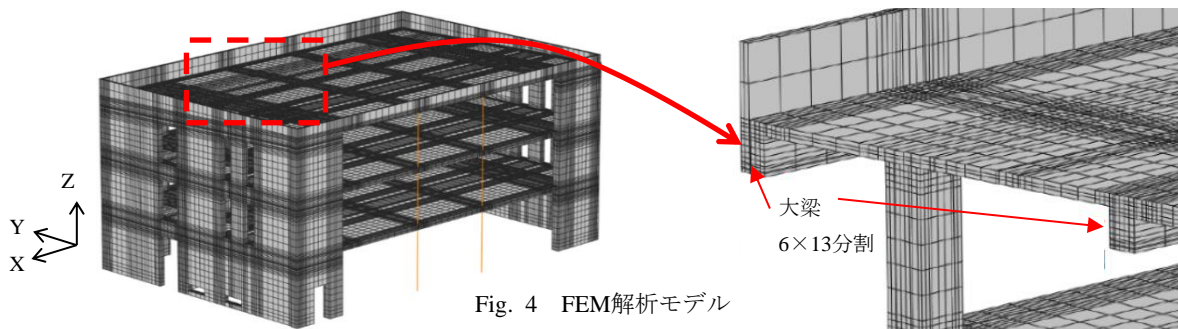


Fig. 4 FEM解析モデル  
FE Analysis Model

3.2.4 フレーム解析による構造設計法の概要

フレーム解析は、従来の構造設計で用いられている一貫構造計算プログラム<sup>6)</sup>を用い、柱・梁・壁（壁エレメント要素）を線材としてモデル化した。ここで、壁エレメント要素とは、一般に壁谷沢モデルと呼ばれ、壁部材を線材置換してモデル化したもので、Fig. 5に示すように壁上下の梁を剛体の線材として、両側柱と壁板を三本の鉛直方向線材としてモデル化し、壁の軸方向変形、曲げ変形、面内せん断変形を考慮したモデルである。床自体はモデル化せず、剛床仮定を用い、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010年版」<sup>7)</sup>（以下、RC規準2010年版）に準拠した有効幅内の上端スラブ筋を梁の曲げ耐力の算定において引張鉄筋として考慮した。耐震壁の終局せん断耐力は、RC規準2010年版に示される荒川mean式（係数0.068）を用い、開口がある場合には開口の大きさに応じた低減率を乗じて算定した。

フレーム解析では、一般的に行われている設計法に倣い、耐震壁が終局せん断耐力に達した時（脆性破壊するものと判定）あるいは層間変形角が1/100に達した時のせん断力を建物の保有水平耐力と定義し、その保有水平耐力に達するまでせん断力を載荷した。

4. 解析結果

4.1 荷重～変形関係

Table 2にFEM解析とフレーム解析による保有水平耐力についての比較を示し、Fig. 6に荷重～変形関係の比較結果一覧を示す。なお、Fig. 6においてX方向の載荷については正負で顕著な差異がなかったため、代表として正側載荷の結果のみを示す。フレーム解析においては、X方向（建物長辺方向）の載荷では、正負ともに脆性的な破壊に至る部材はなく、層間変形角が1/100に達した時を保有水平耐力とし、Y方向（建物短辺方向）の載荷では、正負ともにAX6通り1階の開口耐震壁が脆性破壊するものと判断され、保有水平耐力が決まった。

FEM解析はプッシュオーバー解析であるため、明確に最大耐力が得られない。そのため、ここでのFEM解析による保有水平耐力（終局耐力）は、X方向に関しては、設計と同様に、いずれかの層間変形角が1/100に達した時の荷重とし、Y方向に関しては、コンクリート躯体の圧縮ひずみの最大値が2.0%に達した時の荷重として定義した。このコンクリートの圧縮ひずみの閾値に関しては、土木学会コンクリート示方書<sup>8)</sup>では、周囲の要素ひずみの平均値に対して1.0%を閾値としているが、本報では平均化せずに局所的な要素ひずみで判定したため2.0%としたが、この閾値に関しては、今後検討の余地を残す。荷重～変形関係の傾向としては、X方向載荷においては層間変形10mm程度、Y方向載荷では層間変形5mm程度まで、FEM解析と設計の結果は概ね一致したが、その後、FEM解析の方はフレーム解析に比べて耐力が顕著に上昇する結果となった。Table 2から確認できるように、FEM解析

による保有水平耐力は、両方向ともに、設計の必要保有水平耐力の約2倍以上、フレーム解析の保有水平耐力に比べて約1.3倍程度となることがわかった。なお、FEM解析による保有水平耐力は、前述の判定における閾値に依存することに注意が必要である。

4.2 FEM解析とフレーム解析の差異の分析

前節に示すように、X方向載荷に関しては、フレーム解析と同様に層間変形角の制限でFEM解析における保有水平耐力を算定したが、FEM解析の保有水平耐力がフレーム解析に比べて約1.3倍程度大きい。Y方向載荷では、フレーム解析では1階開口耐震壁がせん断破壊に至り、保有水平耐力が決まったが、FEM解析では、当該耐震壁の破壊が先行することなく、X方向と同様に、1.3倍程度の保有水平耐力を発揮した。この両者の差異の理由について、FEM解析結果を分析した。

4.2.1 スラブの有効範囲拡大による影響

Fig. 7にX方向正側載荷の終局時における鉄筋ひずみコンターを示す。設計においてスラブの効果は、梁際から1mの範囲のスラブの上端筋のみが考慮されているが、FEM解析で

Table 1 各階の水平力（正負共通）（単位:kN,mm）

Horizontal Force of Each Floor								
FL	設計Qu	設計Pu	比率	面積	単位荷重	水平力Q	層せん断力	Q/Pu
X方向	R	10530	1.99	5.73×10 <sup>8</sup>	0.0320	18324	18324	1.74
	3	17119	1.25	5.14×10 <sup>8</sup>	0.0223	11458	29783	
	2	22399	1.00	5.48×10 <sup>8</sup>	0.0168	9189	38972	
Y方向	R	12576	1.99	5.73×10 <sup>8</sup>	0.0368	21073	21073	1.67
	3	20446	1.25	5.14×10 <sup>8</sup>	0.0256	13177	34250	
	2	26752	1.00	5.48×10 <sup>8</sup>	0.0193	10567	44817	

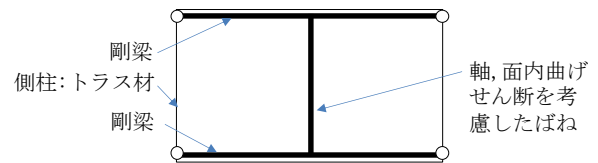


Fig. 5 壁エレメントモデル  
Wall Element Model

Table 2 保有水平耐力の比較（単位：kN）

Comparison of Ultimate Strength							
	階	Pu	Qun	Qu <sub>SS3</sub>	Qu <sub>FEM</sub>	Qu <sub>FEM</sub> /Qun	Qu <sub>FEM</sub> /Qu <sub>SS3</sub>
X方向 正側	3	10530	6719	10530	13879	2.07	1.32
	2	6589	10920	17119	22588		
	1	5280	14290	22399	29601		
X方向 負側	3	10530	6719	10582	13670	2.04	1.29
	2	6589	10920	17204	22236		
	1	5280	14290	22511	29025		
Y方向 正側	3	12576	6719	12576	17321	2.59	1.38
	2	7870	10920	20446	28275		
	1	6306	14290	26752	37013		
Y方向 負側	3	12576	6719	12177	15963	2.38	1.31
	2	7870	10920	19797	25996		
	1	6306	14290	25903	33990		

Qun：設計の必要保有水平耐力  
 Qu<sub>SS3</sub>：設計の保有水平耐力  
 Qu<sub>FEM</sub>：FEM解析における保有水平耐力

は、Fig. 7(a)より、終局時には広い範囲でスラブ筋が効いていることがわかる。2.2節で述べた縮小20層RC造建物試験体の震動実験においても、建物の保有水平耐力が設計時の保有水平耐力を大きく上回った。その理由として、終局状態においては設計で想定した以上に広範囲にスラブが有効になったことが挙げられており、本検討例でも同様な傾向がみられた。

このように、フレーム解析で考慮した以上にスラブの有効幅が拡大したことが、FEM解析の保有水平耐力がフレーム解析よりも大きい理由の一つと考えられる。

**4.2.2 耐震壁の面外せん断抵抗** Fig. 7(b)にX方向正側載荷の終局時における載荷直交方向耐震壁（以下、直交壁）の壁縦筋ひずみコンターを示す。Fig. 7(b)より、転倒曲げモーメントによる圧縮力を受ける側に配置された直交壁の建物内側の縦筋が引張降伏に至っていることが確認できる。このことより、直交壁脚部の面外方向において曲げ降伏しているものと判断でき、直交壁が面外曲げせん断に対して有効に寄与していることがわかる。フレーム解析においては、軸引張力に対して直交壁の縦筋の効果を考慮しているが、直交壁の面外曲げせん断に対する効果は考慮していない。ゆえに、フレーム解析において直交壁の面外曲げせん断抵抗を考慮していないことも、FEM解析の保有水平耐力がフレーム解析よりも大きくなった理由の一つと考えられる。

**4.2.3 パラペットの曲げ抵抗による梁曲げ耐力の上昇**

Fig. 8にX方向正側載荷の終局時におけるRC躯体の最小主応力コンターを示す。Fig. 8に示すようにパラペットに比較的大きな圧縮応力が作用していることが確認できる。本解析では、パラペットは無筋コンクリートとしているため、パラペットに曲げ引張力が作用する方向の曲げモーメントに対しては、パラペットの寄与はほとんどないものと考えられるが、パラペットに曲げ圧縮力が作用する方向の曲げモーメントに対しては、パラペットのコンクリートで圧縮力を負担できるため、パラペットが曲げ抵抗に寄与するものと考えられる。Fig. 9にパラペットが取り付く場合とない場合の梁の曲げ抵抗機構の概念を示す。パラペットが曲げ圧縮力を負担することにより、最上階の梁の下端・上端主筋ともに引張力を負担することになり、かつ、引張合力と圧縮合力との距離が広がり、下端引張となる方向において梁の曲げ耐力が上昇するものと考えられる。このことより、フレーム解析においてパラペットの寄与を考慮していないことも、FEM解析の保有水平耐力がフレーム解析よりも大きくなった理由の一つと考えられる。

**4.2.4 有開口耐震壁の耐力評価の差異** フレーム解析においては、有開口耐震壁の耐力は、開口の位置にかかわらず、開口の大きさ（開口周比）に応じた低減率を無開口の耐震壁の耐力に乘じるにより算定している。

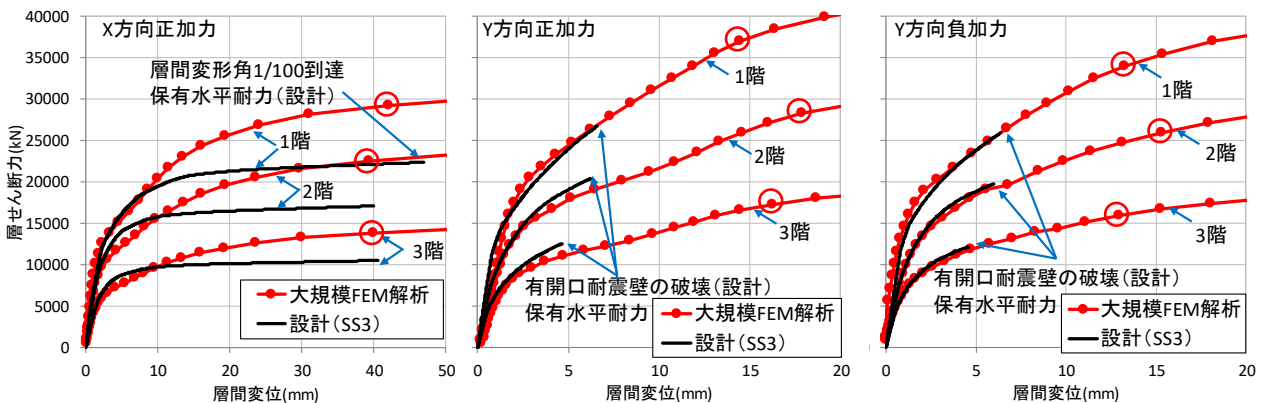


Fig. 6 層せん断力ー層間変位関係 (図中赤○はFEMの保有水平耐力時を示す)

Shear Force - Displacement Relationship

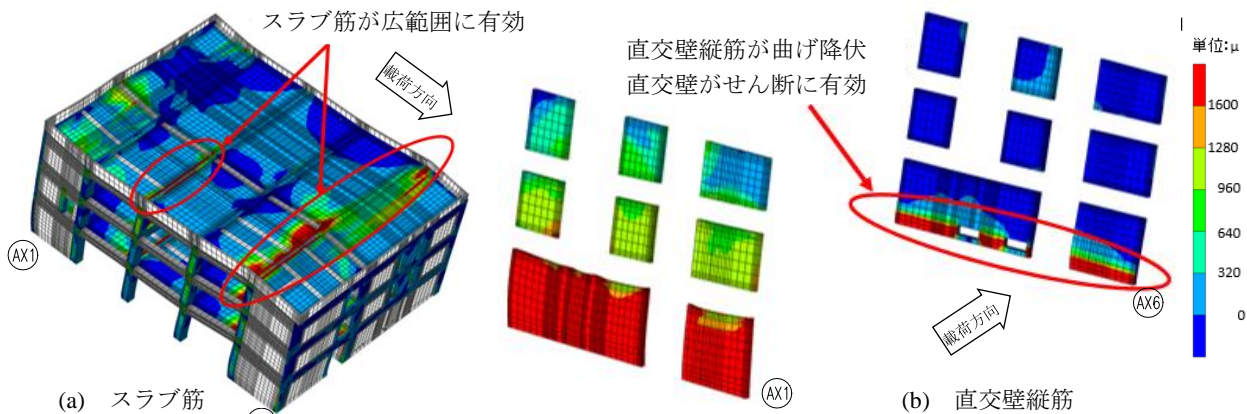


Fig. 7 X方向（正載荷）終局時の鉄筋ひずみコンター  
Reinforcing Bar Strain Contour at Ultimate Strength

フレーム解析において、Y方向の保有水平耐力を決めた1階のAX6通りの有開口耐震壁は、脚部に2つの小さな開口があることにより、無開口の耐震壁の耐力に対して約0.7倍の低減率を乗じて耐力が算定されている。実際、当該有開口耐震壁の耐力は、2つの小さな開口が偏在配置されているため、圧縮ストラットが形成される位置に開口があるかないかで、応力の流れが変わり、正側と負側で異なるものと考えられる。しかし、フレーム解析では、正側・負側ともに同じ耐力として算定される。このように、フレーム解析における部材の耐力算定においては、実状を適切に考慮されていない分、余裕を持たせることになる。Fig. 10(a)にフレーム解析の保有水平耐力に相当する水平力が作用した時のFEM解析における躯体のひび割れ状況、最小主応力、および最小主ひずみコンターを示す。設計における保有水平耐力に相当する水平力を受けた時では、多数のひび割れは生じるが、圧縮主ひずみは $400\mu\sim 800\mu$ 程度、圧縮応力は $5\text{N/mm}^2\sim 11\text{N/mm}^2$ の範囲にあり、フレーム解析ではこの荷重レベルで有開口耐震壁がせん断破壊するものと判断されるが、FEM解析では顕著な損傷は生じていないことがわかる。

Fig. 10(b)にFEM解析の終局時におけるFEM解析の躯体のひび割れ状況、最小主応力、および最小主ひずみコンターを示す。FEM解析においては、上下に開口を有する境界梁に大きなひずみが集中していることが確認できる。フレーム解析では、1階有開口耐震壁がせん断破壊に至るものと判断されるが、FEM解析では、当該耐震壁が破壊する前に、上下に開口を有する境界梁に変形が集中し、破壊に至ったものと考えられる。このことより、構造物全体系の損傷モードをより適切に把握するには、フレーム解析よりも材料非線形による大規模FEM解析が有用であると考えられる。

以上より、検討対象とした建物においては、FEM解析では従来設計法におけるフレーム解析に比べて1.3倍以上の保有水平耐力を発揮することを確認できた。

なお、一般の建物において、終局耐力が設計で想定したものよりも上昇することが、必ずしも保守側の設計ではないことに注意を要す。通常、設計では建物の変形性能を確保するために梁曲げ降伏先行型の崩壊モードを想定するが、今回のようにスラブやパラペットの寄与により梁の耐力が上昇すれば、柱の曲げ降伏や破壊が先行する場合が考えられ、想定した崩壊モードにならないことがあることに留意する必要がある。

## 5. まとめ

実在RC造建物を対象に大規模モデルによる非線形FEM解析を行い、従来設計法で用いられるフレーム解析との比較により、設計の合理化の可能性を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 検討対象とした建物においては、FEM解析ではフレーム解析に比べて1.3倍以上の建物耐力を発揮

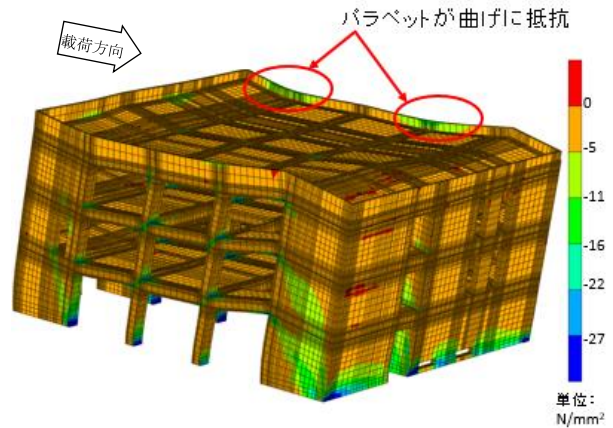


Fig. 8 X方向（正荷重）終局時のRC躯体の最小主応力コンター  
Minimum Principal Stress at Ultimate Strength

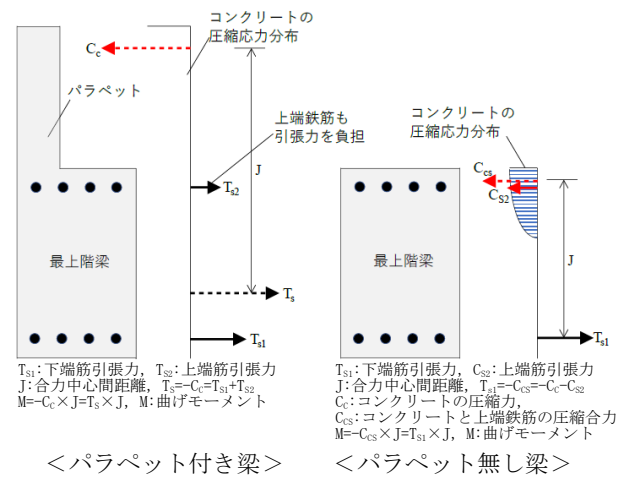


Fig. 9 パラペット近傍の曲げ抵抗機構  
Bending Resistance Mechanism near Parapet

することを確認した。

- 2) FEM解析とフレーム解析の差異の要因として、従来設計法では有開口耐震壁の耐力やスラブの効果を過小評価すること、壁の面外せん断抵抗やパラペットの抵抗を考慮していないこと等が挙げられた。
- 3) FEM解析の活用により、安全性を確保しつつ、断面や鉄筋量を削減でき、合理的な設計が図れる可能性を示した。ただし、建物を設計する際には、建物耐力の算定における仮定だけでなく、設計外力の設定など、様々な仮定が用いられる。設計の合理化を図るためには、設計における様々な仮定条件の不確実性を考慮した上で慎重に検討する必要がある。

以上より、FEM解析を用いて構造部材の形状など、詳細に建物をモデル化し、それぞれの構造部材の性能を適切に考慮することで、安全性を保ちつつ、断面や鉄筋量を削減でき、合理的な設計が図れる可能性がある。

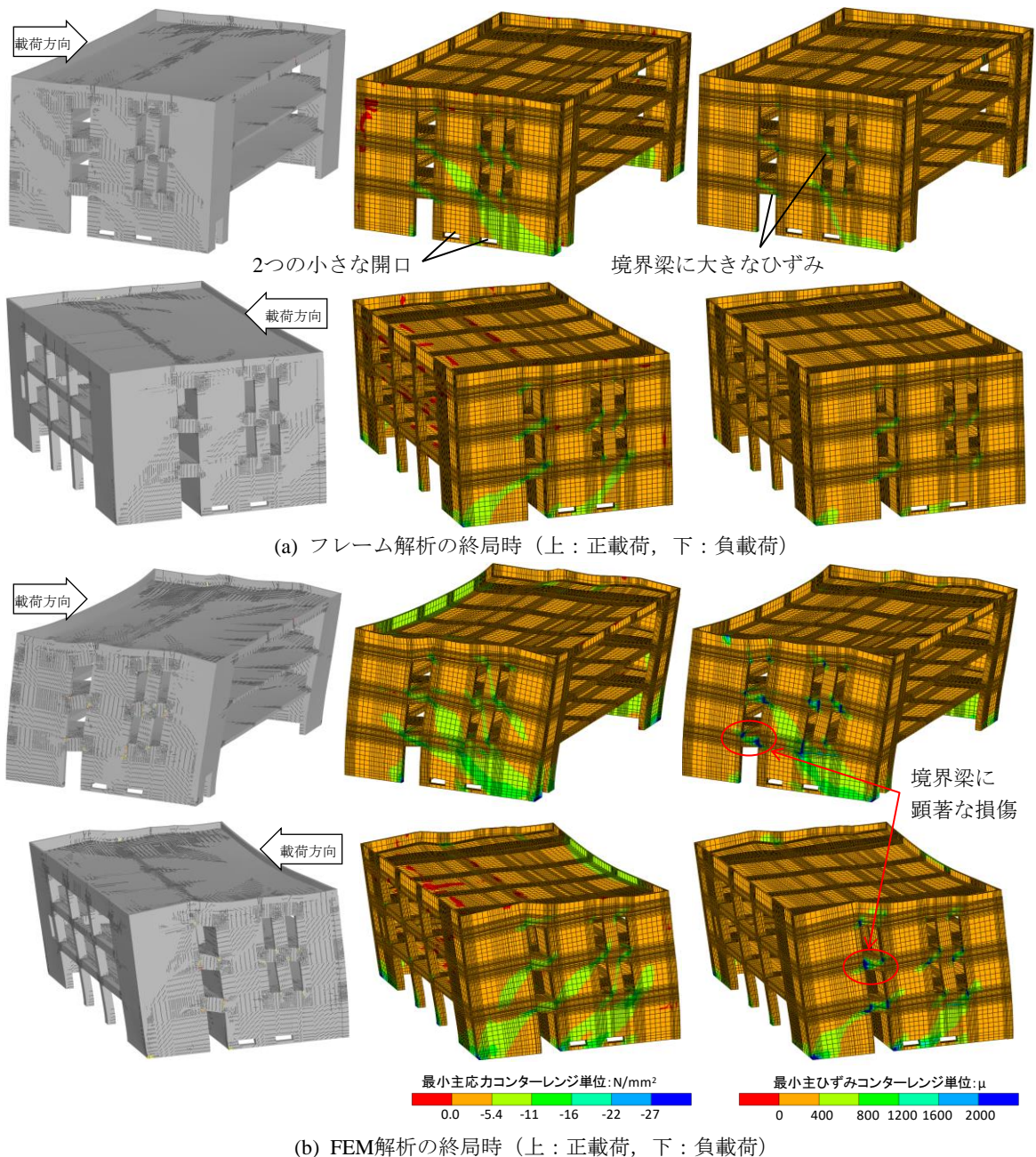


Fig. 10 FEM解析結果によるひび割れ状況と最小主応力・最小主ひずみコンター（Y方向載荷）  
 （左：ひび割れ図，中央：最小主応力図，右：最小主ひずみ図）

Crack Propagation, Minimum Principal Stress and Strain Contour from FE Analysis Result

参考文献

- 1) K. Naganuma, K. Yonezawa, O. Kurimoto, H. Eto: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 586, 2004.8
- 2) 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻讓嗣: 大規模・高速化非線形FEM解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術研究所報, No. 75, 2011
- 3) 米澤健次, 杉本訓祥, 増田安彦, 勝俣英雄: 長周期地

- 震動を受ける超高層鉄筋コンクリート造建物の耐震性能 その2 大規模FEMによる架構耐力に対する分析, 大林組技術研究所報, No. 78, 2014
- 4) 米澤健次, 増田安彦, 勝俣英雄: 大規模FEMモデルによるRC6層振動台実験に対する事前・事後解析, 大林組技術研究所報, No. 80, 2016
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 6) (株)ユニオンシステム: Super Build/SS3 ver1.1.1.46
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2017