

# 大規模非線形FEM解析を用いたRC建物の構造設計に関する研究

水越 一晃 穴吹 拓也 米澤 健次

古島 正博 日野 惇

(本店建築事業部)

(本社設計本部)

## Structural Design for RC Building with Nonlinear FE Analysis

Kazuaki Mizukoshi Takuya Anabuki Kenji Yonezawa

Masahiro Kojima Jun Hino

### Abstract

When analyzing a complex-shaped building using a frame model, the stiffness and ultimate strength of the building may be affected by the modeling method. However, finite element (FE) analysis can evaluate the structural performance of a building more accurately based on a detailed model. Therefore, the building can be designed more safely based on FE analysis instead of frame analysis. In this study, both FE and frame analyses are conducted to compare building performances. The results indicate that the shear wall, slab, and parapet, which are not considered in the frame analysis, significantly affected the building performance.

### 概要

建物の構造設計に一般的に用いられるフレーム解析は、線材置換しにくい複雑な形状の建物を対象とする場合、モデルの作り方によっては建物における剛性および耐力の評価が大きく異なる可能性がある。一方、有限要素解析は建物全体を忠実に再現したモデルを用いることで建物の性能を精度よく評価できるため、フレーム解析の代用として活用することにより建物をより安全に設計できることが期待される。そこで、曲げ変形が卓越する複数スパンにおよぶ耐震壁を有する鉄筋コンクリート造建物を対象にフレーム解析および非線形有限要素解析を行い、剛性および耐力に関する比較を行った。その結果、有限要素解析では、耐震壁の面外曲げ抵抗や、スラブ筋およびパラペットの梁曲げ耐力への寄与により、フレーム解析に比べて耐力を高く評価したことから、フレーム解析で考慮されない要因が建物の性能評価に大きな影響を及ぼすことがわかった。

## 1. はじめに

近年、電子計算機の発達に加えて、解析モデル作成の省力化技術の開発<sup>例えば1),2)</sup>によって、大規模モデルを用いた有限要素法(以下、FEMと呼称する)による解析が様々な分野で活発に行われ始めている。大林組においては、大規模非線形FEM解析プログラム「FINAL-GEO®」<sup>3)</sup>を開発し、縮小20層鉄筋コンクリート(以下、RCと呼称する)造ラーメン建物の振動台実験や縮小6層RC造連層耐震壁付きラーメン建物の振動台実験を対象としたFEM解析等を通じて、本プログラムの有効性を確認してきた<sup>4),5)</sup>。

RC造建物のFEM解析においては、メッシュ割付や材料モデルの選択等にノウハウが必要となる。また、モデル規模が大きくなるほど膨大な計算時間が必要となる。そのため、構造設計の実務においては、FEM解析ではなく、比較的取り扱いが容易なフレーム解析が用いられる。しかし、フレーム解析においては部材を線材に置換するため、部材の断面性能を適切に評価できていない可能性がある。例えば、複雑な形状の建物や、壁やスラブなどが取り付く柱梁部材あるいは線材置換しにくい壁やスラブを有する建物の剛性や耐力を適切に評価できない恐れがある。一方で、FEM解析は部材の断面形状を詳細にモデ

ル化するため、フレーム解析では線材置換しにくい部材の挙動や部材間の相互作用を詳細に表すことができ、フレーム解析よりも精度よく建物の構造性能を評価できる可能性がある。例えば、縮小20層RC造建物の振動台実験を対象としたFEM解析<sup>4)</sup>では、得られた荷重-変形関係は実験とよく一致したが、フレーム解析では実験に比べて耐力を33%程度低く評価した。この差は、梁曲げ耐力に影響を与えるスラブ筋の有効範囲の違いによるものであった。このフレーム解析の結果のように部材耐力を過小評価した場合、想定とは異なる建物の崩壊形に繋がる可能性がある。よって、建物の形状を忠実に再現したFEMモデルを用いることにより、建物をより安全に設計できるとともに、構造解析の高度化につながることを期待される。例えば、フレーム解析とは別にFEM解析を行い建物の終局状態を把握すること、あるいは、フレーム解析による構造設計をFEM解析で代用することが考えられる。しかしながら、建物全体を詳細にモデル化したFEM解析とフレーム解析の結果を比較した例は少ない現状にある。

そこで、構造設計で一般的に用いられるフレーム解析(以下、設計と呼称する)とFEMにより建物全体をモデル化した解析を行い、剛性および耐力に関する比較を行っ

た。本報では、耐震壁、スラブおよびパラペットの断面が大きく、柱梁の線材置換方法による建物の挙動への影響が大きい建物を対象として解析を行った。

## 2. 解析モデル概要

### 2.1 対象建物および解析条件

対象建物をFig. 1に示す。建物は都市部に見られる狭い敷地に建つことを想定し、道路側には開口部を大きく設け、隣地側には開口部を設けない3層のRC造建物とした。建物の用途は事務室や小規模な店舗を想定したことから、内部レイアウトの自由度が高く、柱や梁型のない大空間とするために、スラブや耐震壁と同厚である扁平な柱や大梁を計画した。なお、モデルを複雑化しないため、階段などによる床開口等は省略した。

設計とFEMの両モデルをFig. 1およびFig. 2に示す。各部材の断面は各階共通とした。コンクリート設計基準強度は $24\text{N/mm}^2$ とし、ヤング率はRC規準<sup>6)</sup>より、引張強度は靱性指針<sup>7)</sup>よりそれぞれ算定した。鉄筋の降伏強度は、基準強度の1.1倍とした。固定荷重は $1500\text{N/m}^2$ 、地震時の積載荷重は $800\text{N/m}^2$ とし、各階共通とした。保有水平耐力は、いずれかの階の層間変形角がX方向は $1/75$ 、Y方向は $1/250$ に達した時の荷重とした。層間変形角は、各層剛心位置の層間変位を階高 $3800\text{mm}$ で除して求めた。解析は、自重、固定荷重および積載荷重を与えた後に、設定した層間変形角に達するまで $A_i$ 分布に基づく地震力を各層に与える、荷重制御によるプッシュオーバー解析とした。

### 2.2 設計モデル

本建物は、X方向は柱梁からなるラーメン構造、Y方向は複数スパンにおよぶ耐震壁付きラーメン構造である。一方、Y方向は柱と壁が同厚であるため、1枚の壁としてモデル化することも考えられる。その場合、直交するラーメン架構の挙動を適切に評価できない可能性があることから、X方向の解析にはY方向を4スパンに分割したモデル、Y方向の解析にはY方向を1スパンで表したモデルを用いることとなる。なお、加力方向毎に異なるモデルを用いる際には、柱の負担軸力等の評価に注意が必要となる。

解析には「SS3(ver1.1.49)」を用いた。X方向は、柱梁を線材に置換したラーメン構造とした。柱梁の材端には、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏を考慮した弾塑性回転バネを有する。Y方向は、上下の梁を剛体の線材に、両側柱を軸方向ばねに、壁板を軸方向ばね、せん断ばねおよび曲げばねから成る要素にそれぞれ置換した壁エレメント置換モデル<sup>8)</sup>による耐震壁付きラーメン構造とした。これにより、耐震壁の軸変形、曲げ変形および面内せん断変形を考慮することができる。すなわち、柱はX方向とY方向で評価が異なることとなる。各層の床面には剛床を仮定した。耐震壁が面外加力を受ける場合、耐震壁は剛性計算に考慮されるが、耐震壁の縦筋は面外曲げ

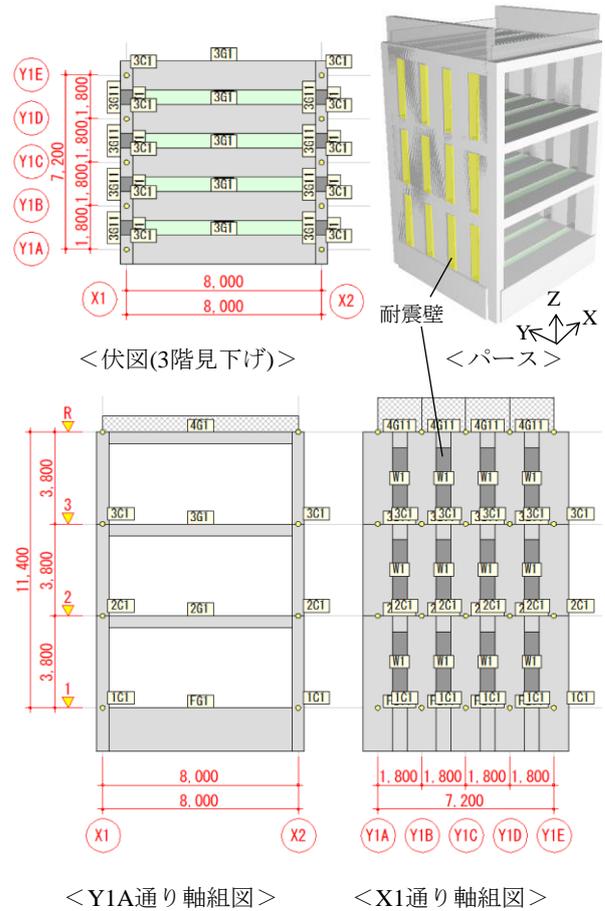


Fig. 1 対象建物・設計モデル  
Analysis Model

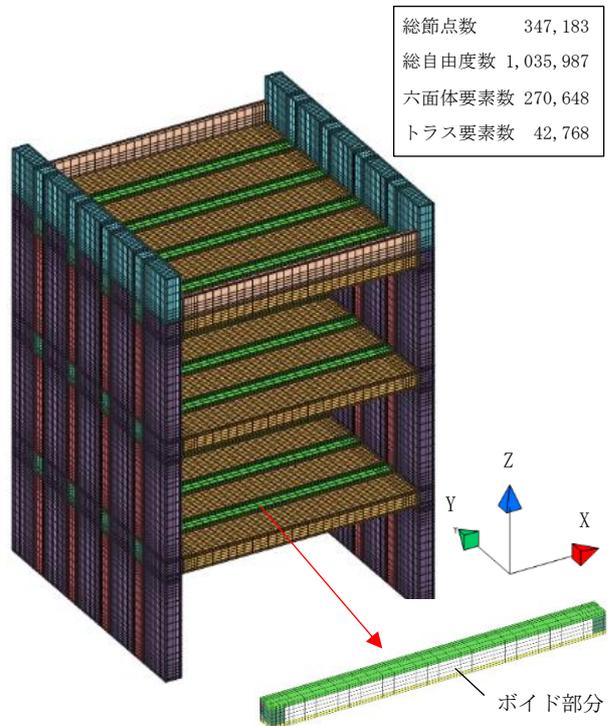


Fig. 2 FEMモデル  
Finite Element Model

に対して考慮されない。スラブ内の鉄筋は、その影響を明確に表すために、梁の曲げ耐力の計算には考慮しなかった。また、パラペットは梁の剛性計算に考慮したが、耐力計算には考慮しなかった。

### 2.3 FEMモデル

FEM解析には大林組開発ソフト「FINAL-GEO」<sup>3)</sup>を用いた。RC躯体は六面体要素、柱梁主筋はトラス要素、柱梁せん断補強筋、スラブ筋および壁筋は埋込鉄筋とした。柱梁スラブ壁の要素分割数は、幅方向せい方向とも8~14分割とした。各鉄筋は完全付着を仮定し、コンクリートとの相対すべりは考慮しなかった。ボイド部分は十分に柔らかい弾性体としてモデル化した。鉄筋は降伏点を折れ点とし、降伏後の剛性は初期剛性の1/1000とする弾塑性モデルとした。コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性体とし、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モデルをTable 1に示す。これらの材料モデルは、実験との比較<sup>(例えば4), 5)</sup>を通じて有効性が確認された材料モデルである。それぞれの材料モデルに関する詳細は、文献8および文献9を参照されたい。

### 2.4 両モデルの相違点

各部材の断面をFig. 3~Fig. 5に示す。FEMモデルの鉄筋位置はメッシュ割付けの影響で設計と若干の差があるが、鉄筋量は整合していることから解析結果への影響は小さいと判断した。ボイドスラブについて、FEMモデルでは想定した建物と同じ寸法でモデル化した。一方、設計モデルではボイド部を除いたコンクリート断面積が等価となる厚さ(330mm)とした。基礎部分については、設計モデルでは保有水平耐力(以下、耐力と呼称)時においても降伏しない断面を有する基礎梁をモデル化した。一方、FEMモデルでは基礎梁を省略して1階の柱脚部および耐震壁脚部における節点の全自由度を拘束した。

## 3. 解析結果

### 3.1 設計モデル

設計モデルにおける耐力時の塑性ヒンジ分布をFig. 6に示す。X方向加力では、一般的なラーメン構造の崩壊形と同様に梁端部と1階柱脚部に塑性ヒンジが生じた。Y方向加力では、耐震壁脚部に塑性ヒンジが生じており、面内曲げが卓越した崩壊形となった。

Table 1 コンクリート材料モデル<sup>8), 9)</sup>(FEM)

Material Model of Concrete	
項目	モデル名
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(応力のみ低減)
テンションスティフニング特性	出雲モデル(係数c=1.0)
コンクリートの破壊条件	Otosenの4パラメータモデル

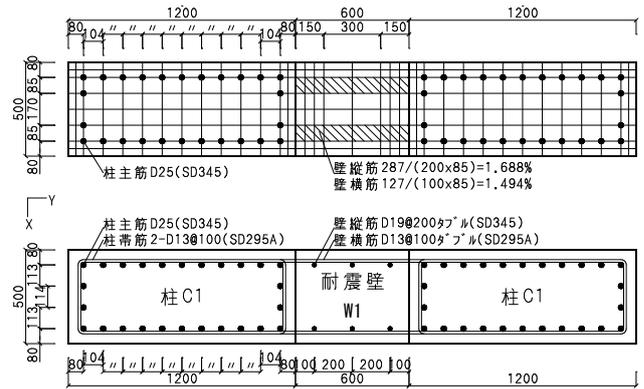


Fig. 3 柱および耐震壁の断面(上：FEM，下：設計)  
Cross Section of Column and Shear Wall

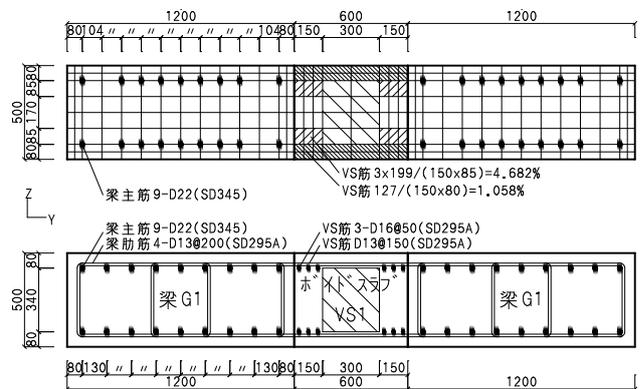


Fig. 4 梁(X)およびスラブの断面(上：FEM，下：設計)  
Cross Section of Beam and Slab in X Direction

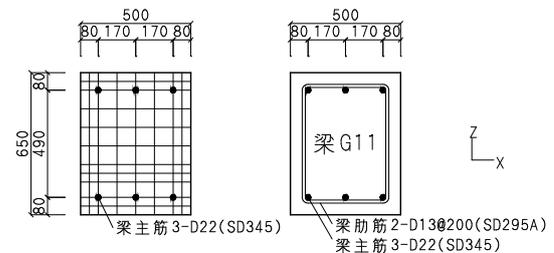
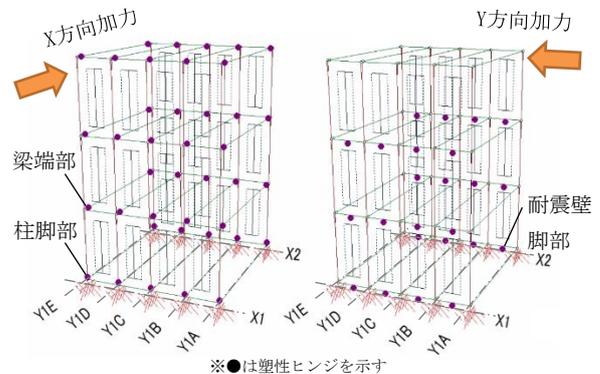


Fig. 5 梁(Y)の断面(左：FEM，右：設計)  
Cross Section of Beam in Y Direction



※●は塑性ヒンジを示す  
Fig. 6 保有水平耐力時の塑性ヒンジ分布(設計)  
Plastic Hinge Distribution at Ultimate Strength

### 3.2 FEMモデル

FEMにおける耐力時のひび割れ分布をFig. 7に示す。X方向加力では、各柱梁の曲げ引張側、1階の耐震壁およびパラペットにひび割れが生じたことから、架構の各部材に逆対称曲げが生じたと推定される。Y方向加力では、1階柱脚部における曲げ圧縮側のコンクリートに圧壊が生じた。また、壁面に斜めひび割れが、その脚部には水平方向にひび割れが生じた。ここで、全体架構に対して顕著に表れているひび割れの種類を把握するため、Fig. 7右にひび割れ直交方向のひずみが $3000\mu$ 以上となるコンクリート要素に生じたひび割れのみを示す。斜めひび割れが生じた要素よりも水平方向にひび割れが生じた要素の方が最大主ひずみが大いことから、建物全体の曲げ変形が卓越したと推定した。

### 3.3 解析結果の比較

FEMおよび設計の1階の層せん断力-層間変形角関係をFig. 8に、耐力時の各階の層せん断力をTable 2に示す。初期剛性について考察する。X方向については、FEMと設計の初期剛性は概ね一致した。一方、Y方向はFEMの方が設計よりも高い初期剛性を示した。ここで、Y方向全体を等価な断面を有する片持ち柱に置換し、柱壁を1つの断面で計算した曲げ剛性と、4つの断面に分割して計算した曲げ剛性より、初期剛性をそれぞれ算出した。計算結果をFig. 8下に示す。1断面とした場合はFEMの初期剛性と一致し、4断面とした場合は設計の初期剛性と一致した。よって、FEMでは柱と壁が一体的に挙動した一方で、設計では重ね梁と同様の挙動を示したと考えられる。また、4スパンの柱および耐震壁で構成される設計モデルを鉄筋量が等価な1スパンの設計モデル(Fig. 9)に置換して解析を行った。解析結果をFig. 8下に示す。1スパンモデルは4スパンモデルに比べてFEMの結果とよく一致した。よって、FEMが設計よりも初期剛性を高く評価した原因は、建物の曲げ剛性の評価方法の違いによるものと考えられる。

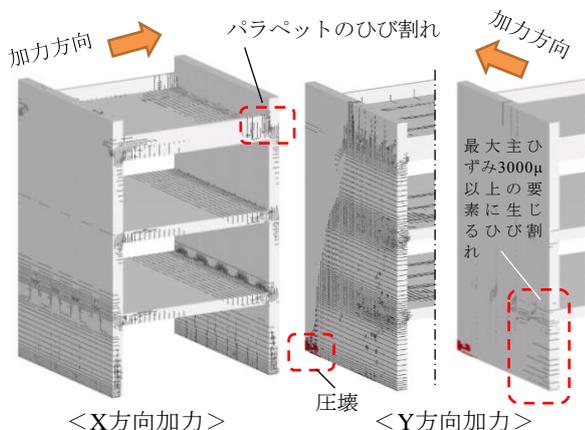


Fig. 7 保有水平耐力時のひび割れ分布(FEM)  
(■ : 圧縮軟化要素)

Crack Distribution at Ultimate Strength

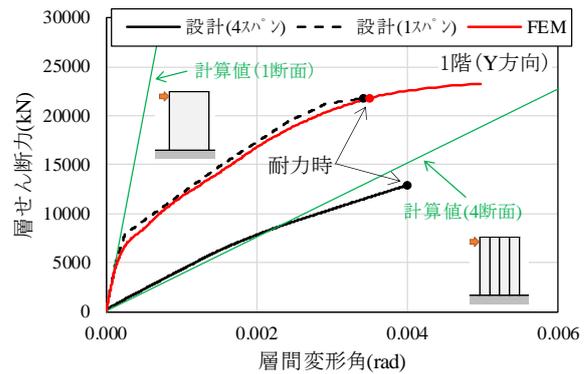
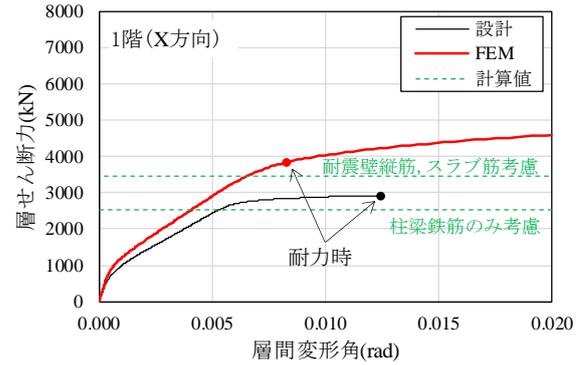


Fig. 8 1階の層せん断力-層間変形角関係  
(上 : X方向 下 : Y方向)

Base Shear Force - Drift Angle Relationships

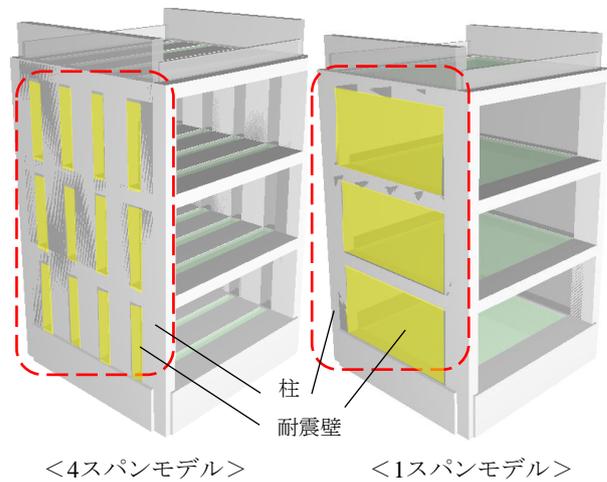


Fig. 9 設計モデル  
Frame Model

Table 2 保有水平耐力時の層せん断力 $Q_u$   
Shear Force at Ultimate Strength

階	X方向			Y方向(4スパンモデル)			Y方向(1スパンモデル)		
	$Q_{u,設計}$ (kN)	$Q_{u,FEM}$ (kN)	$\frac{Q_{u,FEM}}{Q_{u,設計}}$	$Q_{u,設計}$ (kN)	$Q_{u,FEM}$ (kN)	$\frac{Q_{u,FEM}}{Q_{u,設計}}$	$Q_{u,設計}$ (kN)	$Q_{u,FEM}$ (kN)	$\frac{Q_{u,FEM}}{Q_{u,設計}}$
3	1316	1726		5801	9796		9903	9796	
2	2236	2939	1.31	9854	16678	1.69	16699	16678	1.00
1	2928	3846		12907	21825		21825	21825	

保有水平耐力について考察する。1スパンモデルは耐力を算定する層間変形角に達する前に1階の耐震壁にせん断破壊が生じたため、その時の層せん断力を耐力とした。Table 2に示すように、X方向におけるFEMの耐力は設計の1.31倍であった。柱せいと耐震壁厚が等しいことに着目すると、耐震壁の縦筋は面外曲げに対して影響があると考えられる。Fig. 10に示すようにFEMでは耐力時において耐震壁脚部の縦筋に降伏ひずみ以上の引張ひずみが生じたことから、面外曲げに対して寄与したと考えられる。一方、設計では耐震壁縦筋は面外曲げに考慮されない。よって、FEMと設計の耐力の差には、耐震壁縦筋の効果が含まれると考えられる。同様に、梁せいとスラブ厚が等しいことから、長辺方向のスラブ筋は梁曲げ耐力に対して効果があると考えられる。Fig. 11に示すようにFEMでは耐力時においてスラブ上端筋に降伏ひずみ以上の引張ひずみが生じたことから、梁曲げ耐力に対して寄与したと考えられる。一方、設計ではスラブ筋は梁曲げ耐力に考慮していない。よって、FEMと設計の耐力の差には、スラブ筋の効果も含まれると考えられる。ここで、耐震壁の縦筋および長辺方向のスラブ筋による耐力への影響を把握するために、Fig. 12に示す1階柱脚部と

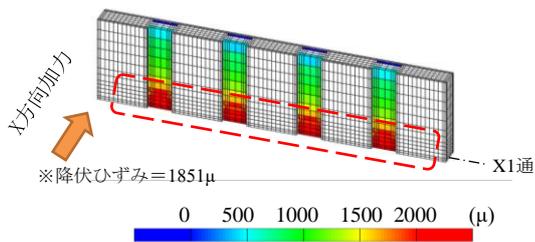


Fig. 10 保有水平耐力時の縦筋ひずみ分布(引張側)  
Strain Distribution of Vertical Bar at Ultimate Strength

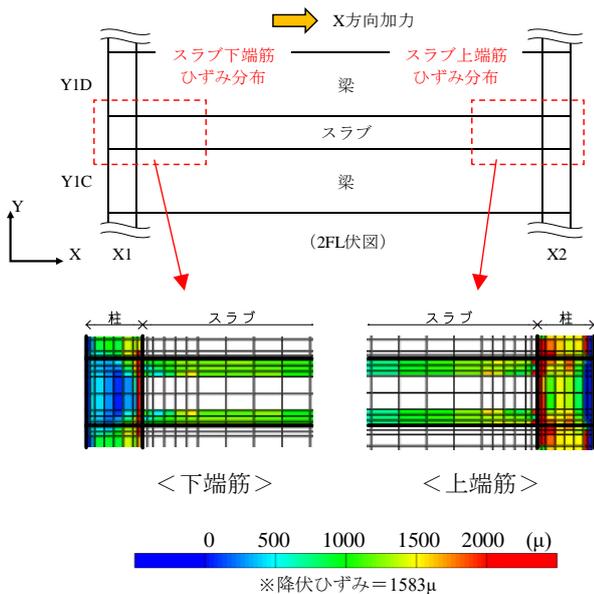


Fig. 11 保有水平耐力時のスラブ筋ひずみ分布  
Strain Distribution of Horizontal Bar at Ultimate Strength

各階梁端部が降伏する崩壊形を想定し、柱梁の鉄筋のみを考慮した場合と、耐震壁縦筋およびスラブ筋も考慮した場合の崩壊時における1階層せん断力 $Q_b$ を計算した。計算結果をFig. 8上に示す。前者は設計の、後者はFEMの急激な剛性低下が生じる近傍にそれぞれ一致した。以上より、FEMでは耐震壁の面外曲げ抵抗およびスラブの有効幅が適切に考慮されたことにより、FEMは設計よりも耐力を高く評価したと考えられる。

次に、Fig. 13およびFig. 14にX方向における耐力時のコンクリート最小主応力分布を示す。最上階におけるパラペットの曲げ圧縮側に最大で $12.8\text{N/mm}^2$ の圧縮応力が生じた。パラペットが圧縮応力を負担することによって梁の上端筋にも引張力が生じ、応力中心間距離が広がることにより、梁の曲げ耐力が上昇した可能性が考えられる。パラペット付き梁端部における梁主筋の軸ひずみ分布をFig. 14下に示す。上端筋9本のうち7本に引張ひずみが生じたことから、中立軸がパラペット側に近づいているとともに、上端筋も曲げ引張に対して有効であることがわかる。一方、設計ではパラペットは梁曲げ耐力の計算に考慮されないことから、パラペットはFEMと設計の耐力に差が生じる一因となる可能性があると考えられる。

Y方向のFEMの耐力は4スパンモデルの1.69倍、1スパンモデルの1.00倍であった。即ち、フレーム解析は耐震壁のモデル化方法により、耐力にも変化が見られた。

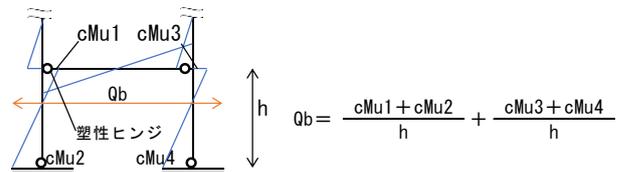


Fig. 12 耐力計算に用いた建物の想定崩壊形  
Collapse Mode for Calculation of Ultimate Strength

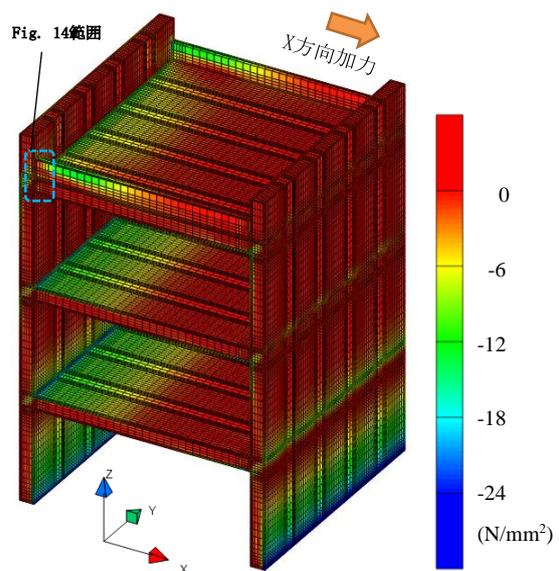


Fig. 13 保有水平耐力時の最小主応力分布  
Minimum Principal Stress at Ultimate Strength

以上より、ラーメン構造としたX方向のFEMによる耐力は、20層RC造建物の振動台実験<sup>4)</sup>の解析と同様にフレーム解析よりも高く評価され、フレーム解析で考慮されない要因が建物の性能評価に大きく影響することがわかった。一方、耐震壁付きラーメン構造としたY方向の剛性や耐力は1スパンモデルとすることでFEMと概ね一致した。これは、複数スパンにおよぶ耐震壁をスパン毎に壁エレメントモデルに置換した場合、連層耐震壁の脚部における曲げ剛性や耐力が適切に評価されていない場合があることを示しており、フレーム解析を行う際に注意が必要である。よって、複数スパンにおよぶ曲げ変形が卓越する耐震壁を有する建物の評価には、モデル化方法の違いによる影響が少ないFEM解析が有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

建物の構造設計におけるFEM解析の有効性を模索するために、X方向をラーメン構造、Y方向を複数スパンにおよぶ曲げ変形が卓越する耐震壁を有するラーメン構造とした3層RC造建物を対象に、建物を線材置換したフレーム解析と建物形状を詳細にモデル化した大規模非線形FEM解析を実施し、両解析の差異について検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) ラーメン構造であるX方向については、FEMとフレーム解析の初期剛性は概ね一致した。一方で、フレーム解析で考慮されない耐震壁の面外曲げ抵抗、スラブ筋およびパラペットの梁曲げ耐力への寄与により、FEMとフレーム解析の耐力に差異が生じた。よって、フレーム解析で考慮されない要因が建物の性能評価に大きな影響を及ぼすことがわかった。
- 2) 耐震壁付きラーメン構造であるY方向のフレーム解析においては、複数スパンにおよぶ耐震壁のモデル化方法によって、建物の剛性や耐力の評価に大きな差異が生じた。
- 3) 計算過程に様々な仮定が含まれるフレームモデルに比べて、FEMは建物の形状を忠実にモデル化することから、複雑な形状の建物に対する構造性能評価においても有効であると考えられる。

今後もフレーム解析とFEM解析の比較検討を重ね、FEMを設計ツールとして活用できるよう、知見を蓄積する方針である。なお、FEM解析においては、材料モデルの選択、要素分割など解析者(設計者)の判断で解析結果が異なる可能性も有するため、FEMによる建物の設計モデル作成方法に関する技術資料を整備予定である。

#### 参考文献

- 1) 吉田洋之, 間瀬辰也: 3DFEMを用いた建物のモデル

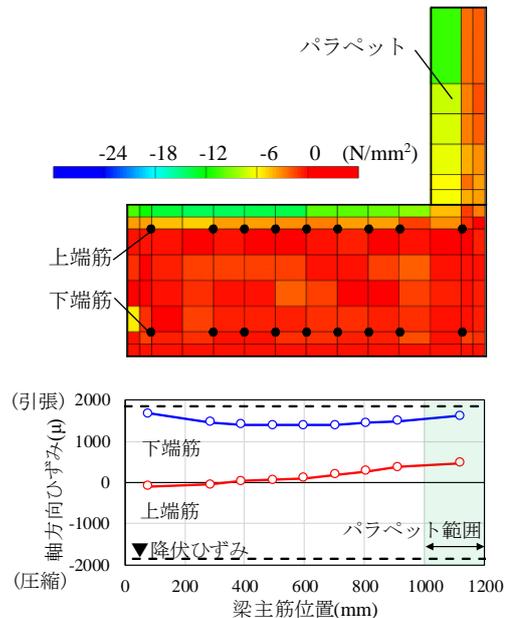


Fig. 14 保有水平耐力時の最小主応力分布および梁主筋軸ひずみ分布  
(Fig. 13中青枠で示すパラペットおよび梁の端部)  
Strain Distribution of Main Bar and Minimum Principal Stress Distribution at Ultimate Strength

化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 281-282, 2019

- 2) 日経BP: AIで「爆速建築」, 日経アーキテクチャ, p. 47, 2019.6
- 3) 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻譲嗣: 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No. 87.9-1, pp. 107-120, 1987.9