論文 大規模非線形 FEM 解析を用いた RC 建物の架構耐力に関する研究

水越 一晃*1・穴吹 拓也*1・米澤 健次*2

要旨:モデル化手法の違いが建物の構造性能評価に与える影響を把握することを目的に、柱と耐震壁、梁と スラブがそれぞれ同厚の鉄筋コンクリート造3層建物を対象に、建物構造設計で一般的に用いられるフレー ム解析と、建物の形状を忠実に再現したモデルによる非線形 FEM 解析を実施した。解析の結果、フレーム解 析で考慮されない配筋や耐震壁の面外抵抗、およびコンクリート材料モデルの違いが一因となり、フレーム 解析よりも FEM 解析の方が建物の架構耐力を大きく評価した。また、建物の架構耐力に対して最も影響を与 えた要因は、フレーム解析で考慮されない耐震壁の面外せん断抵抗であった。

キーワード:有限要素解析,材料モデル,構造設計

1. はじめに

近年,電子計算機の発達とともに,解析モデル作成省 カ化の技術開発^{例えば1),2)}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。建築分野においても, 鉄筋コンクリート(以下,RCと呼称する)造建物の振動 台実験を精度よく再現した大規模非線形 FEM 解析の事 例も報告されている^{3),4)}。

RC 造建物を対象とした FEM 解析においては、要素分 割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、建築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, 部材の剛性や耐力の評価が困難な場合 がある。例えば、曲面等の線材置換しにくい複雑な形状 の部材や、壁やスラブによって断面が整形ではない部材 を有する建物が挙げられる。一方, FEM 解析は建物形状 を詳細にモデル化するため、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る。よっ て、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, RC 造縮小 20 層建物の振 動台実験を対象とした FEM による再現解析 3)では,得ら れた荷重-変形関係は実験結果と概ね一致したが、フレ ーム解析では実験に比べて架構耐力を33%程度低く評価 した。これは、フレーム解析では梁曲げ耐力に有効なス ラブ筋の範囲を FEM 解析よりも小さく見込んだことで、 梁曲げ耐力を過小評価したことが一因であった。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を有してい る。よって,建物の形状を忠実に再現した FEM モデルを 構造設計に用いることで建物の架構耐力を精度良く評価

*1 (株) 大林組 技術研究所 修士(工学) (正会員)*2 (株) 大林組 技術研究所 博士(工学) (正会員)

することにより,建物をより合理的に設計するためのツ ールとして活用が期待される。活用の例には,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,フレーム解析による構造設計を FEM 解析で代用す るなどが考えられる。しかしながら,現状では建物全体 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。

そこで,建築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)と建物全体を詳細にモデ ル化した FEM 解析を行い,架構耐力等の構造性能を比 較するとともに,FEM を用いた構造設計を行う場合の知 見を蓄積することとした。本報では,図-1 に示す耐震 壁,スラブおよびパラペットの厚さが大きく,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 RC 造 3 層建物を対象に解析を行い,剛性や耐力の評価に及ぼす 影響因子について考察する。なお,本報では,ラーメン 構造である構面(X方向)を対象に検討を行う。複数ス パンにおよぶ耐震壁付きラーメン構造である構面(Y方 向)については,既報⁹において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る ことがわかった。詳細は,文献5を参照されたい。

2. 解析モデル概要

2.1 対象建物および解析条件

対象建物を図-1に示す。建物は3層のRC造とした。 都市部に見られる狭隘な敷地に建つことを想定し、Y1A 構面は道路に面しているものとして中柱のない大開口を 設け、X1およびX2構面は近くに隣接する建物があるも のとして一面に耐震壁を配置した。建物用途は事務室等 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、耐震壁やスラブと 同厚である扁平な柱や大梁を計画した。スラブは、一般 的なスラブよりも厚いことから、ボイドスラブとした。

設計とFEMの両モデルを,図-1および図-2に示す。 各部材の断面は各階共通とした。コンクリートの設計基 準強度は24N/mm²とし,ヤング率はRC規準のより,一 軸引張強度は靱性指針⁷¹よりそれぞれ算出した。鉄筋の 降伏強度は基準強度の1.1倍とした。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。固定荷重は1500N/m²,地震時の積載荷 重は800N/m²とし,各階共通とした。保有水平耐力(以 下,耐力と呼称する)はいずれかの階の層間変形角が1/75 rad.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3800mm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Ai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

解析には一貫構造計算プログラム「SS7 (verl.1.1.15)」 を用いた。柱梁はトリリニア型のせん断特性を考慮した 線材に置換し、剛域とした柱フェースにはコンクリート のひび割れや鉄筋の降伏を考慮したトリリニア型の弾塑 性回転ばねを与えた。耐震壁は、軸方向ばね、せん断ば ねおよび曲げばねで構成される壁エレメントモデルのに 置換した。壁エレメントモデルの面外方向の特性は、側 柱は軸力・曲げ・せん断に対して抵抗するが、壁板部分 は軸力には抵抗し、曲げ・せん断には抵抗しないモデル である。各層の床面には剛床を仮定した。スラブ筋は架 構耐力への影響を確認するために、梁の曲げ耐力には考 慮しなかった。パラペットによる架構耐力への影響を把 握するため、最上階の梁の剛性はパラペット形状を考慮 して計算し、耐力の計算には梁断面のみを考慮した。

2.3 FEM モデル

FEM 解析には大規模非線形 FEM 解析プログラム 「FINAL-GEO」⁸⁾を用いた。本プログラムは, RC 造縮小 20 層ラーメン建物の振動台実験や RC 造縮小 6 層連層耐 震壁付きラーメン建物の振動台実験を対象とした再現解 析等を通じて,有効性が確認されている^{3,4)}。

RC 躯体は六面体要素, 柱梁主筋はトラス要素で表現 した。柱梁せん断補強筋, スラブ筋および壁筋はコンク リート要素の鉄筋方向の剛性に重ね合わせる埋込鉄筋と して表した。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。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。コンクリート材料モデルを, 表-1 に示す。モデル化手法および材料モデルは, 建物の構





表-1 コンクリート材料モデル(FEM) ^{9)~11)}							
項目	モデル名						
圧縮強度点までの応力-ひずみ曲線	修正Ahmadモデル						
コンクリート破壊判定条件	 圧縮:Ottosenの4パラメータ モデル(畑中らの係数) 引張:一軸引張強度 						
テンションスティフニング特性	出雲モデル(係数c=1.0)						
圧縮強度到達後のひずみ軟化域	中村・桧貝モデル						
ひび割れ後のせん断伝達特性	長沼モデル						

造性能を精度よく評価できることが検証された文献3と 同様とした。それぞれの材料モデルに関する詳細は,文 献9~11を参照されたい。

2.4 両モデルの相違点

各部材の断面を図-3から図-5に示す。FEM の鉄筋 位置は要素分割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は、FEM では想定した 建物と同じ寸法でモデル化し、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。基礎梁は、設計モデルでは耐力時においても降 伏しない断面とし、基礎梁下の境界条件はピン支持とし た。一方、FEM 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。載荷



方法について, FEM では自重を全ての六面体要素に物体 力として付与し,固定荷重は各階フロアレベルにある梁 やスラブの要素に,水平荷重は各階フロアレベルにある 全ての要素にそれぞれ一様な面分布荷重で与えた。一方, 設計では鉛直荷重は部材ごとの重量を節点に振り分けて 付与し,水平荷重は各層の重心位置に作用させた。

3. 解析結果

3.1 各解析モデルの結果

設計における耐力時の塑性ヒンジ分布を、図-6 に示 す。塑性ヒンジは、1 階柱脚部に先行して発生した後に 各階の梁端部に発生した。その後、2 階の層間変形角が 1/75rad.に達して終局状態となった。

FEM における耐力時のひび割れ分布を,図-7に示す。 耐震壁とともに各柱梁の曲げ引張側にひび割れが生じた。 耐力に至るまでにおいては、2階および3階の梁端部で 主筋が降伏し,やや遅れて1階柱脚部の主筋が降伏した。

3.2 解析による耐力等の比較

(1) FEM と設計の比較

FEM および設計における各階の層せん断力-層間変 位関係を図-8 に示す。図中の数値は耐力時の各階層せ ん断力である。FEM と設計の初期剛性は概ね一致したこ とから、モデル化方法による差は小さいことがわかる。





一方, FEM の耐力は設計の 1.24 倍であり, 差が生じた。

(2) FEM における耐力増大要因

両解析間で生じた耐力の差について考察する。本建物 の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寄与するものと考えられる。 耐力時における耐震壁縦筋のひずみ分布を,図-9 に示 す。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,耐震壁に大き な曲げモーメントが生じたことがわかる。一方,設計で は耐震壁の面外方向耐力は無視される。よって,FEM と 設計における耐力差には,耐震壁の面外曲げ抵抗が一因 となると考えられる。

スラブは、一般的なスラブとは異なり、梁と同厚であ る。また、スラブ筋は梁上下主筋と同じレベルに配筋さ れている。よって、上下スラブ筋とも梁の曲げ耐力に寄 与すると考えられる。FEM ではスラブ筋の位置を忠実に モデル化した。一方で、設計ではスラブ筋はモデル化し ていない。従って、スラブ筋の扱い方は両モデルで差異 がある。FEM の耐力時におけるスラブ筋のひずみ分布を、 図-10 に示す。FEM では耐力時において引張応力が生 じるスラブ筋に降伏ひずみ以上の引張ひずみが生じたこ とから、スラブにも曲げが生じ、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 と設計の耐力差は、 スラブのモデル化の違いも一因していると考えられる。

次に、耐力時のコンクリート最小主応力分布を図-11 および図-12上に示す。最上階のパラペットにおいては、 曲げ圧縮側に最大で-13.1N/mm²の圧縮応力が生じてお り、梁の上端筋より上側に圧縮応力が広く分布している。 また、下端筋に曲げ引張力が生じるパラペット付き梁断 面における梁主筋の軸ひずみ分布を図-12下に示す。上 端筋9本のうち7本に引張ひずみが生じた。よって、パ ラペットが曲げ圧縮を負担することで中立軸はパラペッ ト側に移動し、応力中心間距離が広がることによって梁 の曲げ耐力が上昇したと考えられる。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 ると考えられる。

以上より, RC 造 20 層建物の振動台実験 ³⁾の再現解析 と同様に, FEM による耐力は設計よりも高く評価され, 設計で考慮されない要因が建物の性能評価に影響を及ぼ す可能性があることがわかった。一方で, FEM において は材料モデルの選定により建物の性能評価も変化するこ とから, 材料モデルも耐力に影響を及ぼす一因となる可 能性がある。例えば, FEM では, テンションスティフニ ング特性として設計で考慮されないコンクリートの引張 応力負担を考慮している。また, コンクリートの圧縮強





1000 2000 (µ)

※降伏ひずみ=1583µ

0

(2FL伏図)

X2

柱

+++++

↓↓↓↓↓↓**↓** <上端筋>

X x1

<下端筋>

-2000 -1000



度は、設計では設計基準強度を用いて計算する一方で、 FEM では畑中らの係数を用いた Ottosen の4パラメータ モデル¹¹⁾をコンクリート圧縮破壊判定条件に用いること で、三軸応力による圧縮強度の増大を考慮している。

以上より,これらコンクリート材料モデルの違いも設 計と FEM の耐力に差が生じた一因であると考え, 壁筋 やスラブ筋を除外する, コンクリート材料モデルを変更 するなどして設計により近い条件で解析を行い、それら の影響を確認した。解析パラメータを表-2 に、コンク リート材料モデルの概念図を図-13 に示す。前述した FEM を case1 とし、最も設計に近しい条件を想定した FEM を case2 とした。case2 においては、コンクリート引 張特性にひび割れ発生後に応力を一切負担しない cutoff モデルを用いるとともに、コンクリートの圧縮強度に設 計基準強度を用いるモデルを用いた。解析結果を,図-14 に示す。コンクリートひび割れ後の剛性については設 計と FEM で概ね一致したが、耐力にはまだ差が生じて いる。ここで、設計で考慮されない耐震壁の面外せん断 力負担分を除外するために、耐力時に1階の耐震壁が負 担するせん断力を要素面積とせん断応力の積から求める と 369kN となり, case2 の耐力から差し引くと柱の負担 せん断力は 3083kN となる。この結果を図-14 に重ねる と、設計の耐力とよく一致した。よって、case2と設計に おける耐力の差は、設計で考慮されない耐震壁の面外せ ん断抵抗によるものであると考えられる。

以上より、本建物における設計とFEM (casel)の耐力 差は、配筋、コンクリート材料モデル、耐震壁による面 外せん断抵抗が一因で生じたと考えられる。

(3) 壁筋およびスラブ筋の影響

次に、上述したそれぞれの要因がどの程度耐力に影響 を与えたか把握するため、感度解析を行った。ここで、 FEM では耐震壁の面外せん断抵抗を考慮しない状態を モデル化できないため、case2 を基準に検討した。解析パ ラメータを表-2 に示す。基準となる case2 に対して、壁 筋 (case3)、スラブ筋 (case4) のみをそれぞれ与えた解 析の結果を、図-14 および表-2 に示す。スラブ筋の方 が壁筋よりも耐力への影響が大きい結果となった。ただ し、case3 および case4 の1 階層せん断力-1 階層間変位



case名		文献3	case1	case2	case3	case4	case5	case6
司符	壁筋	_	あり	なし	あり	なし	なし	なし
肖仁 月力	スラブ筋	_	あり	なし	なし	あり	なし	なし
	引張特性	出雲	出雲	cutoff	cutoff	cutoff	出雲	cutoff
コンクリート		(c=1.0)	(c=1.0)				(c=1.0)	
材料モデル	圧縮破壊	ottosen	ottosen	設計基準	設計基準	設計基準	設計基準	ottosen
	判定条件	(畑中ら)	(畑中ら)	強度Fc	強度Fc	強度Fc	強度Fc	(畑中ら)
耐力時1階層せん断力(kN)		_	3891	3452	3515	3609	3640	3421
case2との差(kN)		_	439	0	63	157	188	-31

表-2 解析パラメータおよび耐力時1階層せん断力

関係は概ね一致しており、スラブ筋と壁筋がそれぞれ架 構の構造性能に及ぼす影響は同程度と考えられる。

(4) コンクリート材料モデルの影響

次に、基準となる case2 に対して、コンクリートの引 張特性(case5), コンクリートの圧縮破壊判定条件(case6) のみをそれぞれ変更した解析の結果を,図-15および表 -2 に示す。層せん断力-層間変位関係におけるコンク リートひび割れ開始点はcase2と概ね一致した。その後、 テンションスティフニング特性を考慮した case5 は case2 に比べて剛性低下が緩やかであり,荷重がやや大きかっ た。これは、case5は引張強度到達後もコンクリートがあ る程度引張応力を負担する材料モデルであるのに対し、 case2 は引張強度到達後は一切応力を負担しないモデル を用いたためと考えられる。その後, case5 は主筋の降伏 が進展すると徐々に case2 と同程度の荷重に近づいた。 case6の耐力は case2 よりも若干低下した。これは、2 階 の層間変形角が 1/75rad.に達するタイミングがわずかに 早まったためである。図-15の層せん断力-層間変位関 係は主筋降伏まで概ね一致しており, case2 との差はほと んど無いものと考えられる。1 階柱および壁の曲げ圧縮 を受ける脚部においては、三軸応力による効果によって 設計基準強度 24N/mm² から 33.2N/mm² までコンクリー ト圧縮応力が上昇した。しかし、設計基準強度を超える 要素は全体に対してわずかであったたため、コンクリー トの圧縮破壊判定条件が耐力に与える影響は小さかった。

以上より,設計とFEM (casel)の耐力差には,設計で 考慮されない耐震壁による面外せん断抵抗が耐力の評価 に最も影響を及ぼしていることがわかった。

4. まとめ

モデル化手法の違いが建物の構造性能評価に与える 影響を把握するために,柱と耐震壁,梁とスラブが同厚 のRC造3層建物を対象に,建築構造設計で一般的に用 いられるフレーム解析と,建物の形状を忠実に再現した モデルによる大規模非線形 FEM 解析を実施した。得ら れた知見を以下に示す。

- 架構の初期剛性は,FEMとフレーム解析で概ね一致
 し、モデル化方法による差が小さいことを確認した。
- 2) FEM 解析による建物の架構耐力は、フレーム解析で 考慮されない壁、スラブ、パラペットなどの鉄筋、 コンクリート材料モデルによる違い、耐震壁の面外 せん断抵抗が一因となり、フレーム解析の1.24倍と なった。
- 3) モデル化手法の違いにより、建物の架構耐力に対し て最も影響を及ぼした要因は、フレーム解析で考慮 されない耐震壁の面外せん断抵抗であることを確 認した。面外方向に耐震壁を多く有する建物の架構



図-15 材料モデルをパラメータとした解析結果

耐力を評価する際には注意が必要と考えられる。

参考文献

- 吉田洋之,間瀬辰也: 3DFEM を用いた建物のモデル 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
- 日経 BP: AI で「爆速建築」,日経アーキテクチュア, 2019 年 6 月 27 日号, p.47
- 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
- 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) 水越一晃, 穴吹拓也, 米澤健次, 古島正博, 日野惇: 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, 大林組技術研究所報, No.84, 2020
- 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
- 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
- 9) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Threedimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.586, 2004.8
- 10) 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
- 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひず み関係,日本建築学会構造系論文集,第474号,pp. 163-170,1995.8