

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

米澤 健次 杉本 訓祥
増田 安彦 勝俣 英雄

Seismic Performance of RC Buildings Subjected to Long-Period Ground Motions Part 2: Large-Scale FE Analysis for Test Specimen of Twenty-Story RC Building

Kenji Yonezawa Kuniyoshi Sugimoto
Yasuhiko Masuda Hideo Katsumata

Abstract

A 3D nonlinear static FE analysis was conducted on a shaking table test specimen, a 1/4-scale twenty-story RC building, using a large-scale analytical model. The analytical results and test results were compared, and the analytical model was found to reproduce the nonlinear behaviors of the test specimen with high accuracy. The analysis results were further examined in order to evaluate both the effects of the floor slabs and the influence of the axial force generated in the girders due to nonlinearities of the members on the structural capacity. While the bending capacity at one end of the girders increased because of the compressive axial force, it decreased at the other end of the girders because of the tensile axial force. Therefore, the axial force in the girders was found to have a small influence on the structural capacity. The portion of the floor slabs found to help increase the ultimate structural capacity was larger than expected.

概要

縮小20層RC造建物試験体の震動実験¹⁾を対象に、大規模モデルを用いた3次元静的非線形FEM解析を実施した。実験と解析の比較により、解析が試験体の非線形挙動を精度良く再現できることを確認した。さらに、架構耐力に対する非線形化に伴う梁の軸力およびスラブの効果について解析結果を分析した。その結果、梁軸力の効果に関しては、梁部材の一端部で圧縮軸力が作用して曲げ耐力が上昇するが、他端部は引張軸力が作用して曲げ耐力が減少するため、梁の両端で曲げ耐力の増減が相殺し、架構耐力に対する梁軸力による影響は小さいことがわかった。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。

1. はじめに

平成23年度および平成24年度国土交通省建築基準整備促進事業課題27-1「長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討」の一環として、縮小20層RC造建物試験体の振動台による加震実験がE-ディフェンスにて実施された¹⁾。この実験では、各層の梁端に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震が行われた。また、実験で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¹⁾。終局耐力が増大した主要因としては、梁部材の非線形化に伴う伸びを柱やスラブが拘束することにより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る。

曲げモーメントが作用した梁部材には、ひび割れや主筋の降伏により、断面内の中立軸が移動することで、伸びが生じる。その伸びを柱やスラブが拘束することにより、梁には圧縮軸力が生じ、梁部材の曲げ耐力が上昇す

る可能性がある。一般的な設計においては、上下階で同程度に梁が伸びるものと仮定した場合は、柱が梁の伸びを拘束することがないため、梁部材には軸力が生じないものと仮定した設計が行われている。

設計においてスラブの効果は建築学会「鉄筋コンクリ

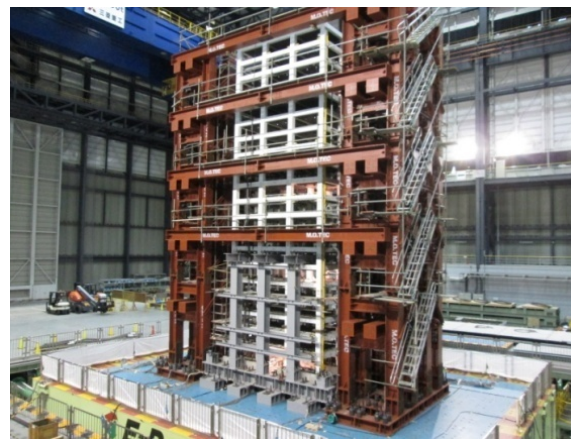


Photo 1 試験体の外観
External Appearance of Specimen

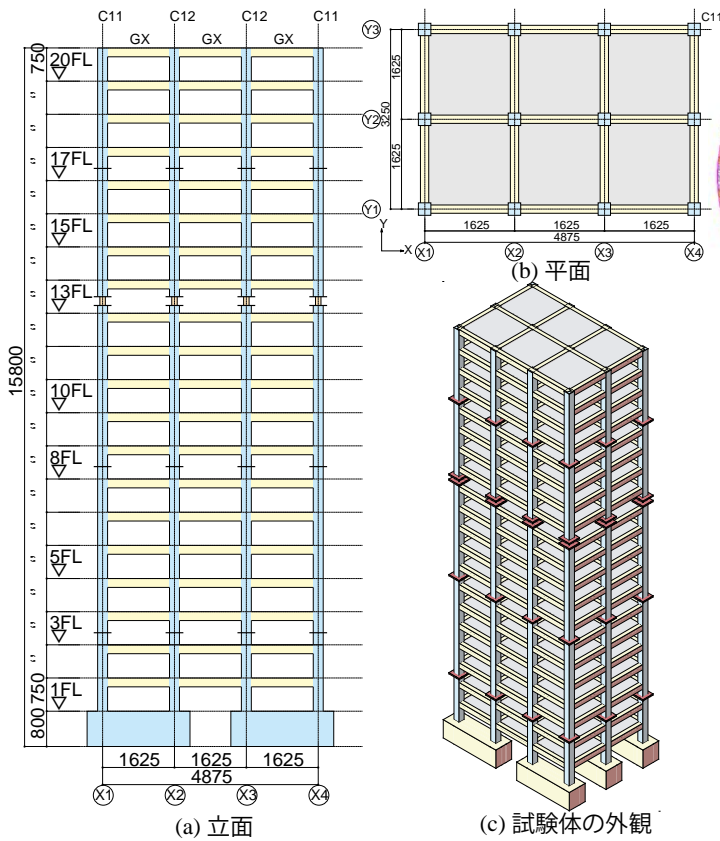


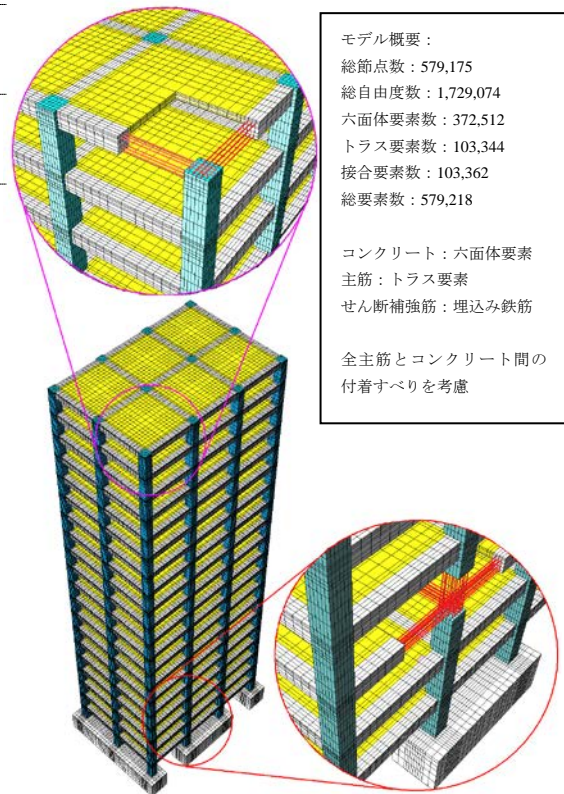
Fig. 1 試験体の形状
Configuration of Specimen

ート構造計算規準・同解説」²⁾ (以下、RC規準) に準じて算定したスラブの有効幅におけるスラブ筋の寄与を梁の曲げ耐力に加算して考慮するのが一般的である。スラブの有効幅に関する既往の知見として、壁谷澤等はスラブ付きの部分架構実験³⁾を行い、実験で得られた架構の終局耐力は、曲げ引張域においてスラブ全幅のスラブ筋が有効に寄与するものと仮定した計算値と良好に対応することを報告している。

本論文では、縮小20層RC造建物試験体の震動実験を対象に、実物の形状を詳細に再現した大規模ソリッドモデルを用いて、静的漸増荷重による3次元非線形FEM解析を実施した。解析と実験の比較により、解析の妥当性を確認し、更に、解析結果の分析により、架構耐力に及ぼす梁に生じる軸力の影響および架構耐力に対するスラブの効果について検討した。

2. 震動実験の概要

試験体は、2x3スパンの20階建てRC造の純ラーメン架構である。試験体の配筋等は、1990年代後半の超高層RC建物の設計手法に基づき設計された建物を参考に、実物の1/4縮尺として計画された。試験体の外観をPhoto 1に、基準階伏図と軸組図をFig. 1に示す。柱断面は225x225mm、梁断面は150x200mmとし、全層共通であり、スラブ厚さは80mmである。試験体の縮尺を考慮し、柱の軸応力度が実大と等しくなるように相似則を設定して、およそ



モデル概要：
 総節点数：579,175
 総自由度数：1,729,074
 六面体要素数：372,512
 トラス要素数：103,344
 接合要素数：103,362
 総要素数：579,218

コンクリート：六面体要素
 主筋：トラス要素
 セン断補強筋：埋込み鉄筋

全主筋とコンクリート間の
 付着すべりを考慮

Fig. 2 解析モデル
Analysis Model

125kNのおもりが各階に設置された。スタブを除く試験体重量は3557kN、通り芯から得られる床面積に対する基準階の単位床重量は11.2kN/m²である。震動実験においては、入力地震動は観測波（3軸）と模擬波（1軸）の2種類を目標レベルに応じて加速度を増幅して用い、試験体の最大応答層間変位が約1/50radに至るまでの加震が行われた。実験の詳細は、文献1)を参照されたい。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

Fig. 2に解析モデルを示す。柱・梁・床等のコンクリート躯体はすべて六面体要素により、柱と梁の主筋はトラス要素によりモデル化し、鉄筋とコンクリートの節点間に接合要素を配し、両者間の付着～すべり関係を考慮した。梁や柱のせん断補強筋や床筋は、六面体要素内の埋込み鉄筋でモデル化し、その補強量を鉄筋比で定義した。解析モデルの総節点数は約58万、総自由度数は約173万、総要素数は約58万である。なお、解析コードには、大規模高速化FEM解析ソフト「FINAL-GEO」⁴⁾を用いた。

3.2 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体とし、多方向のひび割れが考慮できる非直交分散ひび割れモデルを用いた。主応力～等価一軸ひずみ関係は、圧縮側の最大強度までは修正Ahmadモデルを用い、最大強

度後は中村モデルを用いた。引張側に関しては、ひび割れが生じるまでは線形とし、その後は出雲モデル(c=1.0)を用いて若干の引張軟化特性を考慮した。ひび割れ面のせん断伝達特性、及びひび割れ後の圧縮劣化特性には長沼モデルを用いた。鉄筋とコンクリート間の付着～すべり関係には文献5)に示すモデルを用い、付着強度は靱性指針⁶⁾に準じて算定した付着割裂強度とし、付着強度時のすべりは1.0mmを仮定した。コンクリートの破壊条件に関しては、畑中らの係数を用いたOttosenの4パラメータモデルに準じた。鉄筋の応力～ひずみ関係はバイリニア型を仮定し、降伏後の剛性はヤング係数の1/100倍と仮定した。解析で用いた各材料定数は、材料試験結果に準じて設定した¹⁾。なお、各材料構成則の詳細に関しては文献5)を参照されたい。

3.3 境界条件および荷重条件

境界条件としては、基礎の底面における節点を完全固定とし、Ai分布により外力分布を算定し、各階の床上端面の全節点に分布荷重として与え、荷重制御として水平力を正負繰返し載荷した。載荷履歴は、ベースシアが1100 kNで1回、1600kNで1回正負繰返し、最後に正側で押し切り載荷した。Fig. 3にAi分布によるせん断力係数分布を、実験の最大応答せん断力係数分布と比較して示す。Fig. 3によりAi分布により算定した層せん断力分布は実験と良好に対応することが確認できる。

4. 解析結果と実験結果の比較

Fig. 4に解析から得られた1階層せん断力～最上階水平変位関係を示す。図中に実験の各加震で得られた最大応答値、及び文献1)に示される設計用骨組解析モデルによるプッシュオーバー解析の結果（以下、設計用解析）も併記する。設計用解析では、柱はマルチスプリングモデル、梁は材端回転バネを用いてモデル化している。また、実験と解析から得られた8階と10階の層せん断力～層間変位関係の比較をFig. 5に示す。履歴ループに関しては、実験は多数回の繰返し荷重を受けるために、実験は解析に比べて、履歴面積が小さいが、解析と実験の復元力特性のスケルトンは良好に対応し、試験体の荷重～変位関係を精度良く再現できている。Fig. 6に実験と解析におけ

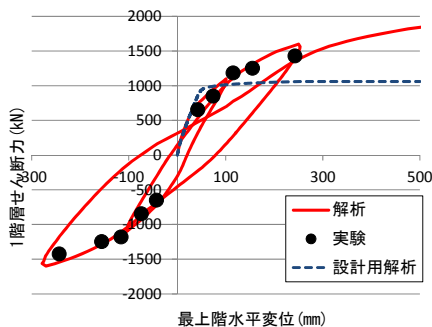


Fig. 4 1階層せん断力～最上階変位関係
Base Shear Force – Roof Disp. Relationship

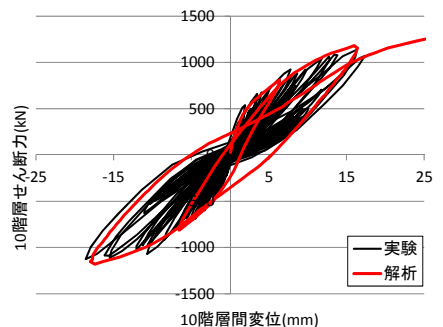
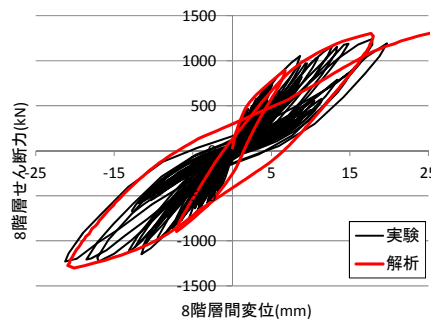


Fig. 5 8,10階の層せん断力～層間変位関係の比較
Story Shear Force – Story Disp. Relationships at 8th and 10th Floor

る層間変位分布の比較を示す。解析の層間変位は、6階の層間変位が実験の加震3-5における6階の層間変位と同等になる解析ステップの変位分布である。図より、8,10階の層間変位に関して、実験と解析で差異が見られるが、層間変位分布形状の定性的な傾向に関して、実験と解析が良好に対応することを確認した。

5. 梁の軸力が曲げ耐力に及ぼす影響

RC梁はひび割れ、鉄筋降伏等の非線形化に伴い、材軸方向に伸びようとするため、その伸びを柱や床スラブが拘束した場合は、梁に圧縮軸力が生じることがある。また、床スラブの慣性力が梁を介して柱に伝達されるため、梁の片端には圧縮軸力、他端には引張軸力が作用する。RC構造部材は軸力の大小により曲げ耐力が増減する。ここでは、梁に生じる軸力が全体架構の挙動にどの程度影響するのかを検討するために解析結果における要素応力を考察した。

これらの検討は、Fig. 7に示す3つの出力点④⑤⑥について、Fig. 7中に示す検討断面位置に対して行った。検討断面は解析において層間変位が最も大きくなる6階の梁に着目した。

まず、検討断面における梁が軸力の影響を受けて、どの程度曲げ耐力が増減するのかを把握するために、6階梁断面に対して積層梁要素を用いた解析を行った。その結果をFig. 8に示す。圧縮軸力が増大するに従い曲げ耐力は

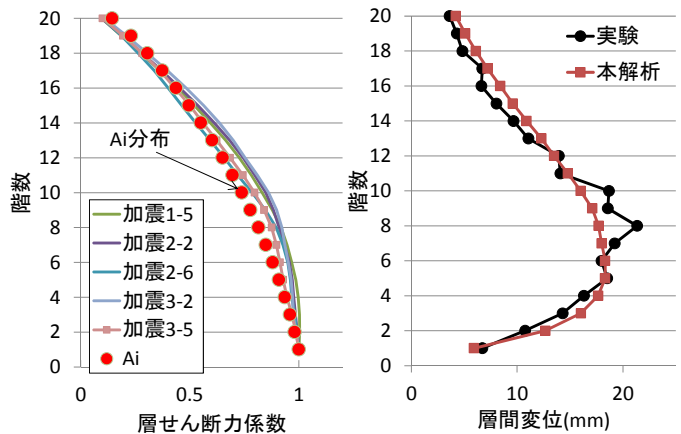


Fig. 3 層せん断力係数分布
Distribution of Story Shear Coef.

Fig. 6 層間変位分布
Distribution of Story Disp.

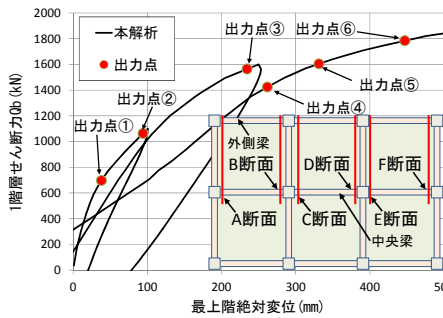


Fig. 7 出力ステップと出力断面
Output Steps and Output Section

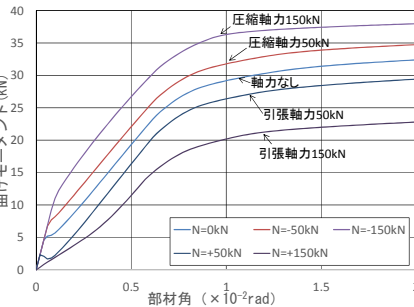


Fig. 8 軸力を変数とした解析結果
Fiber Analysis Results

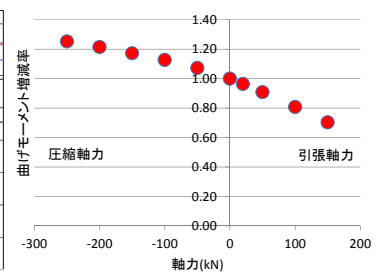


Fig. 9 軸力と曲げ耐力の関係
Bending Capacities - Axial Force

Table 1 梁断面の曲げモーメント、軸力、曲げ耐力増減率
Bending Moment, Axial Force, Rate of Change of Bending Capacity of Girder Section

| | 梁断面-A | | 梁断面-B | | 梁断面-C | | 梁断面-D | | 梁断面-E | | 梁断面-F | | |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | 軸力 (kN) | 曲げ耐力増減率 | |
| 出力点④ | 外端 | 68.4 | 0.86 | -79.7 | 1.08 | 38.5 | 0.92 | -123.2 | 1.12 | 34.5 | 0.93 | -48.5 | 1.05 |
| | 中央 | 165.8 | 0.67 | -222.8 | 1.22 | 77.2 | 0.85 | -257.6 | 1.26 | 107.2 | 0.79 | -158.8 | 1.16 |
| 出力点⑤ | 外端 | 61.6 | 0.88 | -103.1 | 1.10 | 38.3 | 0.92 | -119.0 | 1.12 | 3.4 | 0.99 | -38.8 | 1.04 |
| | 中央 | 224.5 | 0.55 | -231.9 | 1.23 | 83.4 | 0.83 | -246.8 | 1.25 | 98.8 | 0.80 | -193.3 | 1.19 |
| 出力点⑥ | 外端 | 58.9 | 0.88 | -113.9 | 1.11 | 35.5 | 0.93 | -98.2 | 1.10 | 14.0 | 0.97 | -42.1 | 1.04 |
| | 中央 | 249.9 | 0.50 | -237.4 | 1.24 | 118.5 | 0.76 | -171.8 | 1.17 | 112.1 | 0.78 | -228.2 | 1.23 |

(圧縮軸力: 負、引張軸力: 正)

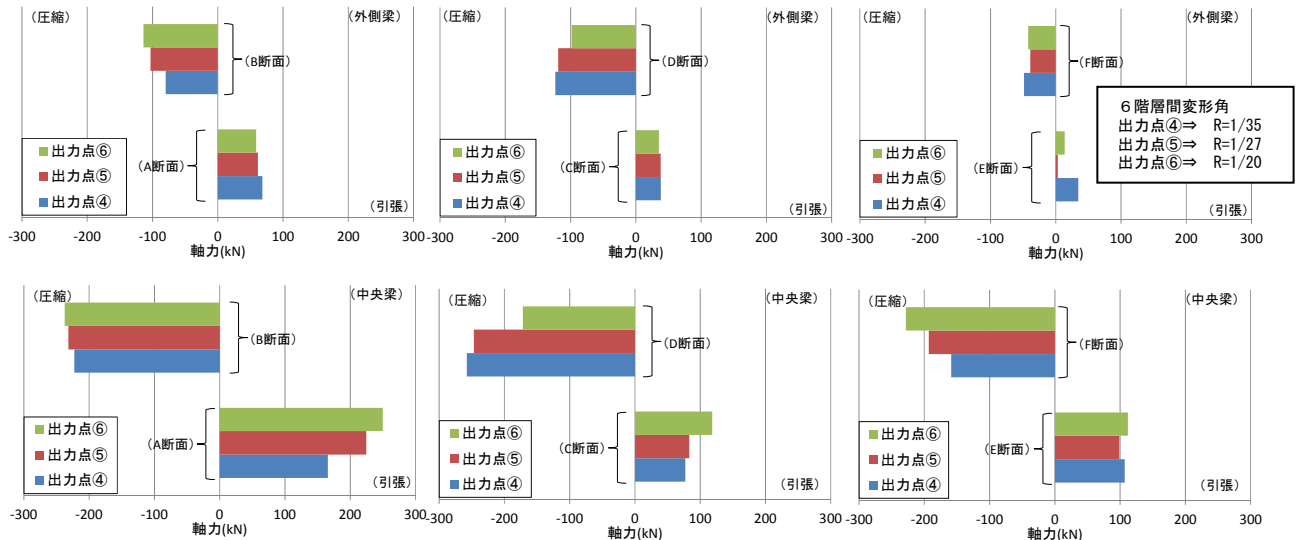


Fig. 10 各梁端部の軸力の推移
Transition of Axial Forces at End of Girder

上昇し、引張軸力が大きくなるに従い曲げ耐力が減少する傾向がみられる。これらの結果から、軸力がゼロの時の曲げ耐力に対する各軸力が作用した場合の曲げ耐力の比を増減率とし、軸力による曲げ耐力の増減率を算定した。Fig. 9に軸力による曲げ耐力の増減率の変動を示す。ここで、曲げ耐力はFig. 8に示す曲げモーメント～部材角関係において、部材角0.02rad時の曲げモーメントとした。圧縮軸力が大きくなるに従い、曲げ耐力は上昇し、引張軸力が大きくなるに従い、曲げ耐力は減少するが、引張軸力における増減率は、圧縮軸力の場合に比べて、大きいことがわかる。Table 1に各出力点について各検討断面における負担軸力および曲げ耐力の増減率の一覧を示す。これらの曲げモーメント及び軸力は、検討断面におけるコンクリートと鉄筋の要素応力から算定した。また、Fig. 10に各検討断面における負担軸力の推移を示す。外側の

梁よりも中央に位置する梁の方が大きな軸力を負担している。これは、床の慣性力（水平力）が梁の軸力として柱に伝達されるため、両側に床が付いた中央の梁の方が、外側梁に比べて負担軸力が大きくなったものと考えられる。一つの梁部材においては、片端には圧縮軸力、他端には引張軸力が作用し、引張軸力に比べると、圧縮軸力の方が大きい。これは、圧縮軸力が作用している部分に比べて、引張軸力が作用している部分は、コンクリートがひび割れることにより、軸剛性が低下していることと、梁が非線形化することによる伸びがある程度拘束されていることの2つの理由が考えられる。また、図より外側梁のE,F断面が他の断面よりも軸力が低いことがわかる。E,F断面の梁は転倒圧縮軸力を受ける柱に取り付いているため、転倒引張軸力を受ける柱に取り付く梁よりも曲げモーメント増分が大きい。そのため、出力点④以前にお

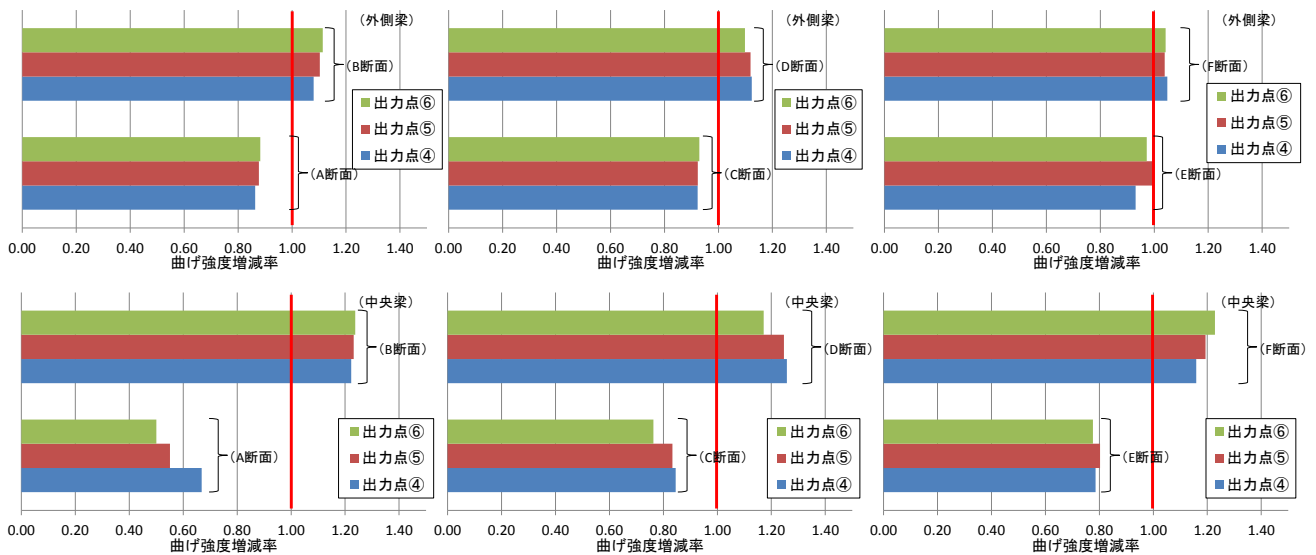


Fig. 11 各梁材端部の曲げ耐力増減率の推移
Transition of Change Rate of Bending Capacity

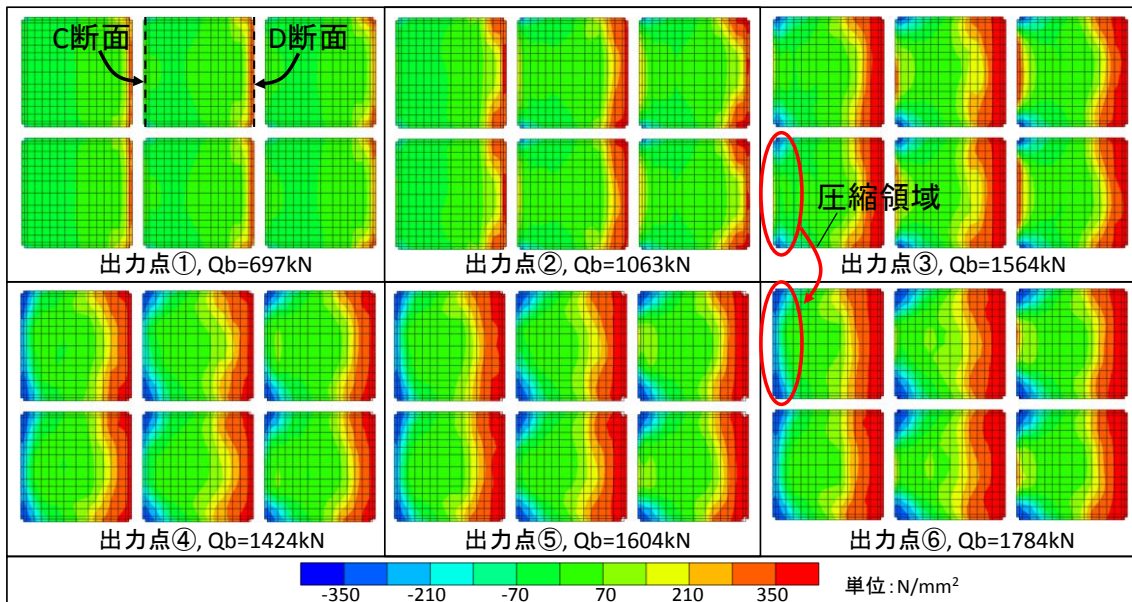


Fig. 12 床スラブ上端筋応力コンター
Contour of Upper Rebar Strain of Floor Slab

いて、他の梁に先行して、E,F断面における外側梁端部のコンクリートに圧壊領域が広がり、軸力が低下したものと考えられる。

Fig. 11に軸力に応じた曲げ耐力増減率の推移を示す。ここで、曲げ耐力の増減率は、軸力に応じてFig. 9に示すデータを線形補間することで算定した。圧縮軸力が作用した断面に関しては、軸力がゼロの場合の曲げ耐力に比べてかなり大きな曲げモーメントを負担することになる。一方で、引張軸力が作用した断面における曲げモーメントは、軸力がゼロの場合に比べて小さい。つまり、圧縮軸力が作用する断面では曲げ耐力が増加するが、同程度に引張軸力が作用する断面では曲げ耐力が減少する。そのため、軸力による材端部曲げ耐力の増加分と減少分が相殺され、梁部材の曲げ耐力時のせん断力は軸力がゼロの場合と同等になるものと考えられる。このことから、

梁に軸力は生じるがその軸力が架構全体の耐力に与える影響は小さいことが本解析結果より推察される。

6. 架構耐力に対するスラブの効果

Fig. 12に Fig. 7に示す各出力点における6階床の上端筋の応力コンターを示し、Fig. 12に示すC,D断面における床上端筋の応力分布をFig. 13に示す。本試験体の床スラブの配筋状況としては、Fig. 14に示すように上端筋は通し配筋としているが、下端筋に関しては梁に12mm程度のみ込ませているだけで、殆ど梁に定着されていない。このことを解析で考慮するために、本解析ではFig. 14に示す梁両側下方のスラブの要素を無筋コンクリートとして下端筋が梁に定着されていないことをモデル化した。Fig. 12のコンターにおいては赤に近づくほど高い引張応

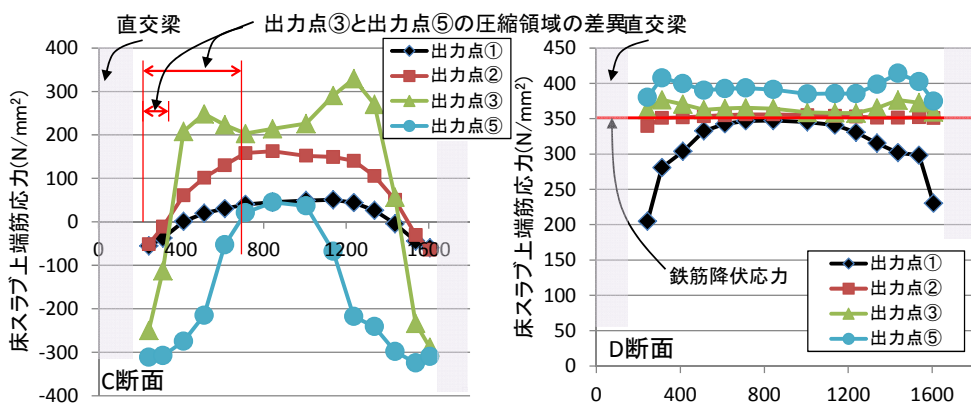


Fig.13 床スラブ上端筋応力分布
Distribution of Upper Rebar Strain of Floor Slab

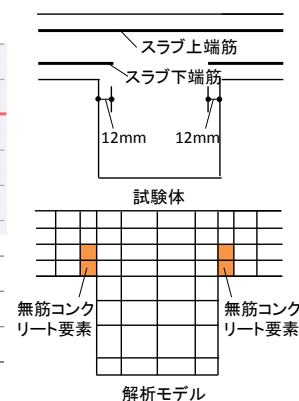


Fig.14 スラブ筋のモデル化
Modeling of Rebar of Slab

力が生じている部分を示している。梁の上端側が曲げ引張を受ける位置（D断面など）にあるスラブに関しては早期から高い応力を示し、Fig. 13に示すようにスパン全域に渡って一様に降伏し、全幅にわたってスラブ筋が曲げ耐力に寄与していることがわかる。梁の上端側が曲げ圧縮を受ける位置（C断面など）にあるスラブに関しては、Fig. 13に示すように、出力点③まではスラブ中央部の引張応力が進展するが、その後、出力点⑤においては、中央部の引張応力が低下し、圧縮領域が広がる傾向を示した。この圧縮域の広がり、Fig. 12のコンターからも見て取れる。このことより、終局状態においては、曲げ引張域に位置するスラブにおいては、全幅のスラブ上端筋が架構耐力に寄与すること、そして、曲げ圧縮域に位置するスラブにおいては、塑性化が進むほどに、スラブの圧縮域が広がり、曲げ圧縮に対してもスラブが有効に寄与することがわかった。以上より、設計耐力よりも本試験体の架構耐力が増大した一因としては、スラブが曲げ引張に対してだけでなく、曲げ圧縮に対しても広い範囲で抵抗し、架構耐力に対してRC規準に準じた有効幅以上にスラブが有効に寄与したことがあげられる。

7. まとめ

縮小20層RC造建物試験体の震動実験に対して、試験体の形状を細部にわたり詳細に再現した大規模モデルによる3次元静的非線形FEM解析を実施した。その結果より、解析手法の妥当性を示すとともに、部材内部の応力状態の考察により、試験体の耐荷機構に及ぼすRC梁に生じる軸力の影響や架構耐力に対する床スラブの効果について分析した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 解析と実験の比較により、実物の形状を詳細にモデル化することで試験体の非線形挙動を良好に再現できることが確認できた。
- (2) 解析結果の部材内部の応力から梁に作用している軸力及び曲げモーメントを算出し、架構耐力に対する梁軸力の影響を検討した。その結果、梁には軸力が生じるが、片端は圧縮軸力、他端は引張軸力が作用し、圧縮軸力による曲げ耐力の増大を引張軸力による曲げ耐力の減少で

相殺するため、本試験体の架構耐力に対する梁軸力の影響は小さいことが推察された。

- (3) 本試験体の終局状態では、曲げ引張域に位置するスラブでは、全幅のスラブ上端筋が架構耐力に寄与する。また、曲げ圧縮域に位置するスラブでは、塑性化の進展に伴い、スラブの圧縮域が広がり、曲げ圧縮に対してもスラブが有効である。

謝辞

本研究は、平成23年度および平成24年度国土交通省建築基準整備促進事業課題27-1「長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討」の一環として実施しました。関係各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 杉本訓祥, 他: 縮小20層RC造建物試験体の長周期地震動による震動実験(その1~その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.638-666, 2013
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010年版
- 3) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 福山洋, Xuan Deng: 超高層鉄筋コンクリート造建築物のスラブ有効幅に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.17-20, 2013.8
- 4) 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻謙嗣: 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, 2011.12, CD-ROM
- 5) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O., Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Paper No.586, Aug., 2004
- 6) 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(案)・同解説, 1997年版