

# 論文 縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験に対する 3 次元 FEM 解析 — 架構耐力に対する梁に生じる軸力とスラブの効果 —

米澤 健次\*1・杉本 訓祥\*1・勝俣 英雄\*2・福山 洋\*3

**要旨:** 縮小 20 層 RC 造建物試験体の震動実験<sup>1)</sup>を対象に、大規模モデルを用いた静的 3 次元非線形 FEM 解析を実施した。実験と解析の比較により、解析の妥当性を検討した上で、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、終局状態において、幅広い範囲のスラブが架構耐力に対して寄与することがわかった。

**キーワード:** 超高層 RC 造建物, 長周期地震動, 大規模 FEM 解析, スラブの効果, 静的漸増載荷

## 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、長周期地震動に対する超高層鉄筋コンクリート造建物の耐震安全性の検証を目的に、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」<sup>3)</sup> (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<sup>4)</sup>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、静的漸増載荷による 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、架構耐力に対する梁に生じる軸力の影響および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、2 × 3 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。試験体の外観を写真-1 に、基準階伏図と軸組図を図-1 に示す。柱断面は 225 × 225mm、梁断面は 150 × 200mm とし、全層共通であり、

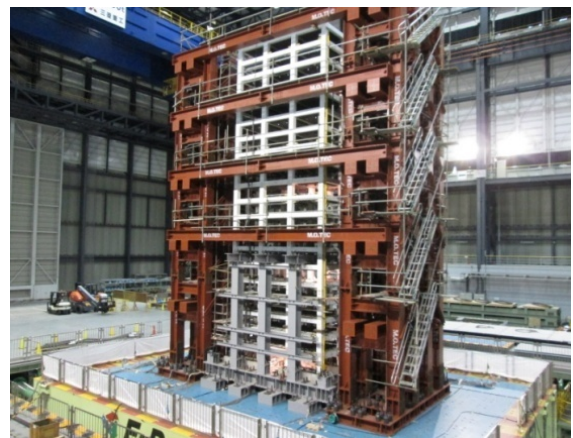


写真-1 試験体の概観

\*1 大林組 技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 大林組 技術研究所 副所長 (正会員)

\*3 独立行政法人 建築研究所 工博 (正会員)

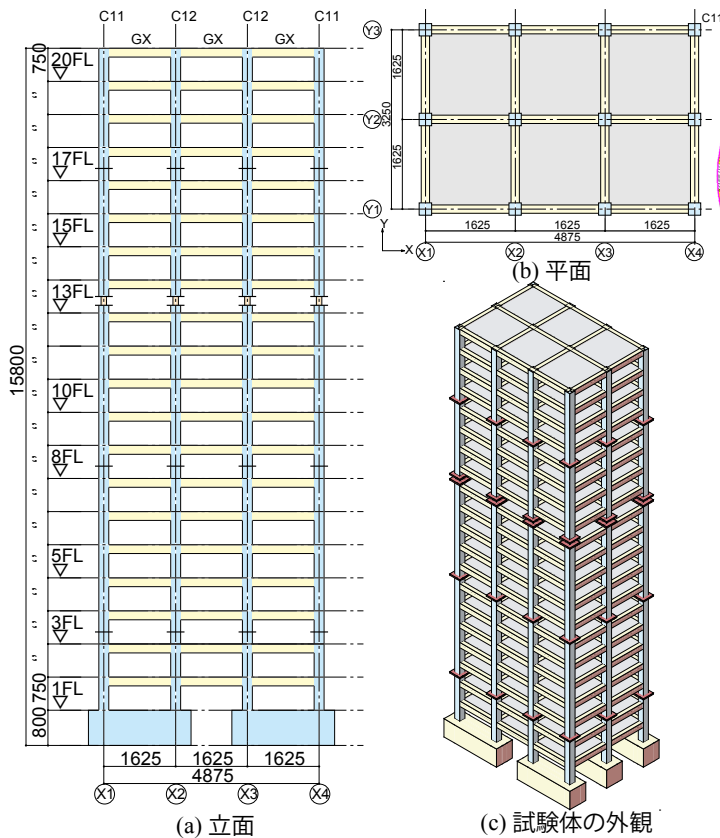


図-1 試験体の形状

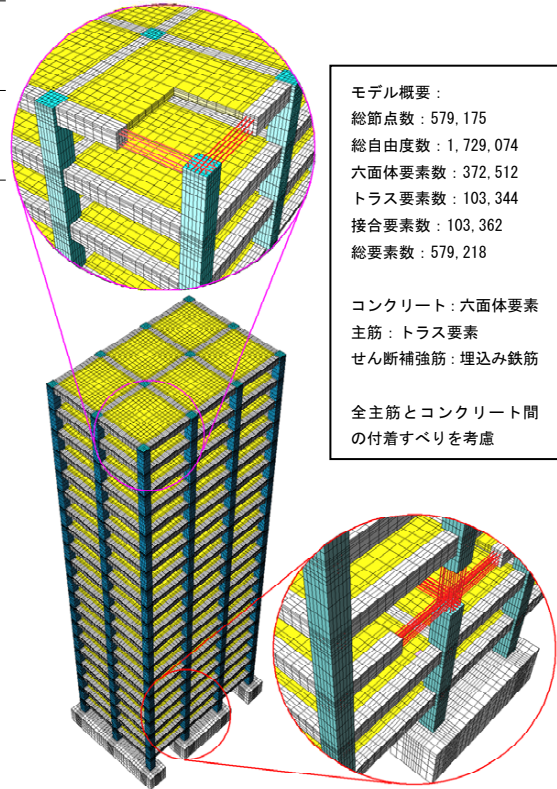


図-2 解析モデル

表-1 実験の主要な加震

| ケース | 波形 (倍率)     | 固有周期[sec.]<br>本加震/特性把握加震 | 最大応答<br>層間変形角[rad.] |
|-----|-------------|--------------------------|---------------------|
| 1-5 | 東京観測波(100%) | 0.82/0.76                | 1/234               |
| 2-2 | 東京観測波(200%) | 0.89/0.89                | 1/137               |
| 2-6 | 東京観測波(300%) | 1.02/1.02                | 1/86                |
| 3-2 | 津島波(150%)   | 1.14/1.08                | 1/64                |
| 3-5 | 津島波(200%)   | 1.14/1.28                | 1/35                |

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/m<sup>2</sup>である。

震動実験における入力地震動は、長周期地震動とし、2011年東北地方太平洋沖地震の際に関東地方で観測された東京観測波(3軸)と、東海・東南海・南海地震を想定して作成された模擬波(津島波, 1軸)を基本とし、2種の地震波を、目標レベルに応じて加速度を増幅して用いている。実験で行われた主要な加震を表-1に示す。実験の詳細については、文献<sup>1),2)</sup>を参照されたい。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

図-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」<sup>5)</sup>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、鉄筋とコンクリート間の付着～すべり関係には文献<sup>6)</sup>に示すモデルを用い、付着強度は靱性指針<sup>7)</sup>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Ottoosen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<sup>1)</sup>。なお、各材料構成則の詳細に関しては文献<sup>6)</sup>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、 $A_i$  分布<sup>8)</sup>により外力分布を算定し、各階の床上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载荷した。载荷履歴は、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载荷した。図-3に  $A_i$  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。図により  $A_i$  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

図-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。図中に実験の各加振で得られた最大応答値、及び文献<sup>2)</sup>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図-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。図-6に実験と解析におけ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振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。

設計用解析では、図-4に示すように、本解析と実験に比べて最大耐力が低く、実験と解析で顕著な差異が見られる。このことより、試験体の形状を詳細にモデル化することで、解析の精度が向上することがわかる。設計用解析では、梁部材の曲げ耐力にRC規準に準じたスラブの有効幅を考慮し、材端回転バネを用いているため非線形化に伴って梁に生じる軸力は考慮されていない。一方、

本解析では、スラブ全体を忠実にモデル化することでスラブの効果が考慮され、非線形化に伴って梁に生じる軸力の影響も考慮されている。そこで、本解析結果を用いて、一般に用いられる設計モデルに比べて試験体の終局耐力が増大した原因について、梁に生じる軸力の影響およびスラブの効果に着眼して検討した。

### 5. 梁軸力による曲げ耐力に対する影響

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、図-7に示すように本解析におけるSTEP340～350の3ステップについて、図-7中に示す検討断面位置について行った。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階梁断面に対してファイバーモデルによる断面解析を行った。その結果を図-8に示す。圧縮軸力が增大す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

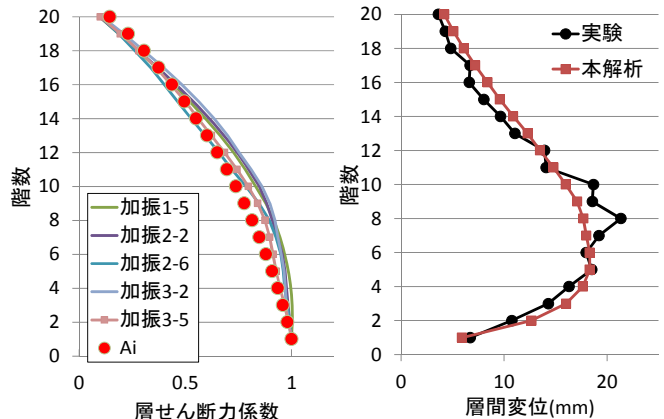


図-3 層せん断力係数分布 図-6 層間変位分布の比較

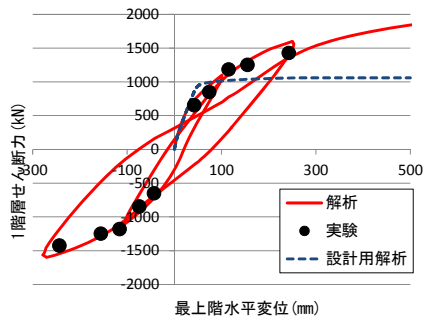


図-4 層せん断力～最上階変位関係の比較

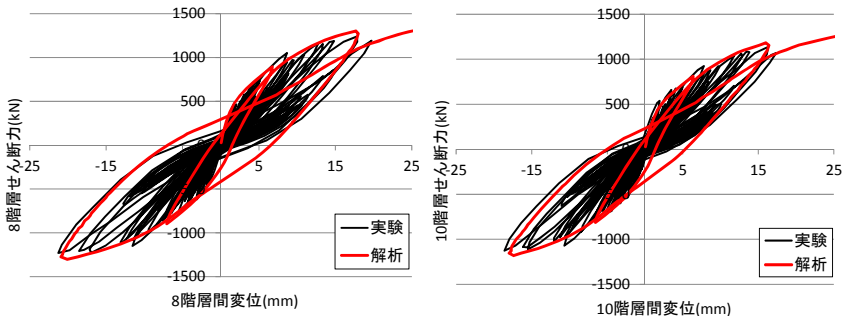


図-5 8,10階の層せん断力～層間変位関係の比較

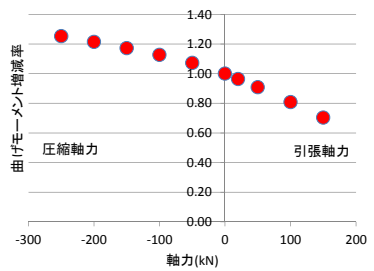
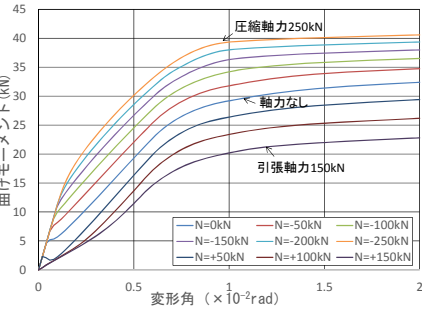
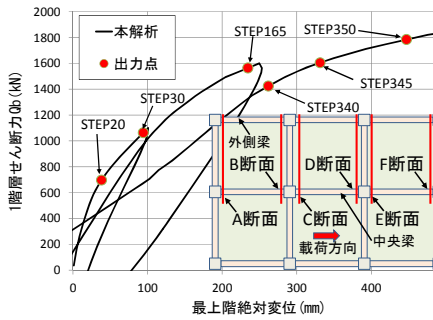


図-7 出力ポイントおよび出力断面 図-8 軸力を変数とした断面解析結果 図-9 軸力による曲げ耐力の変動

表-2 梁断面の軸力・曲げモーメント・曲げ強度増減率

| STEP |    | 梁断面-A |     |          | 梁断面-B |    |          | 梁断面-C |     |          | 梁断面-D |    |          | 梁断面-E |     |          | 梁断面-F |    |          |
|------|----|-------|-----|----------|-------|----|----------|-------|-----|----------|-------|----|----------|-------|-----|----------|-------|----|----------|
|      |    | N     | M   | $\alpha$ | N     | M  | $\alpha$ | N     | M   | $\alpha$ | N     | M  | $\alpha$ | N     | M   | $\alpha$ | N     | M  | $\alpha$ |
| 340  | 外側 | 68    | -24 | 0.86     | -80   | 33 | 1.08     | 38    | -27 | 0.92     | -123  | 37 | 1.12     | 35    | -27 | 0.93     | -48   | 33 | 1.05     |
|      | 中央 | 166   | -20 | 0.67     | -223  | 39 | 1.22     | 77    | -27 | 0.85     | -258  | 44 | 1.26     | 107   | -27 | 0.79     | -159  | 37 | 1.16     |
| 345  | 外側 | 62    | -28 | 0.88     | -103  | 36 | 1.10     | 38    | -30 | 0.92     | -119  | 38 | 1.12     | 3     | -32 | 0.99     | -39   | 34 | 1.04     |
|      | 中央 | 225   | -19 | 0.55     | -232  | 41 | 1.23     | 83    | -29 | 0.83     | -247  | 44 | 1.25     | 99    | -29 | 0.80     | -193  | 41 | 1.19     |
| 350  | 外側 | 59    | -32 | 0.88     | -114  | 38 | 1.11     | 35    | -33 | 0.93     | -98   | 37 | 1.10     | 14    | -33 | 0.97     | -42   | 36 | 1.04     |
|      | 中央 | 250   | -18 | 0.50     | -237  | 41 | 1.24     | 119   | -28 | 0.76     | -172  | 39 | 1.17     | 112   | -29 | 0.78     | -228  | 45 | 1.23     |

N: 軸力 (kN), M: 曲げモーメント (kN・m),  $\alpha$ : 曲げ耐力増減率

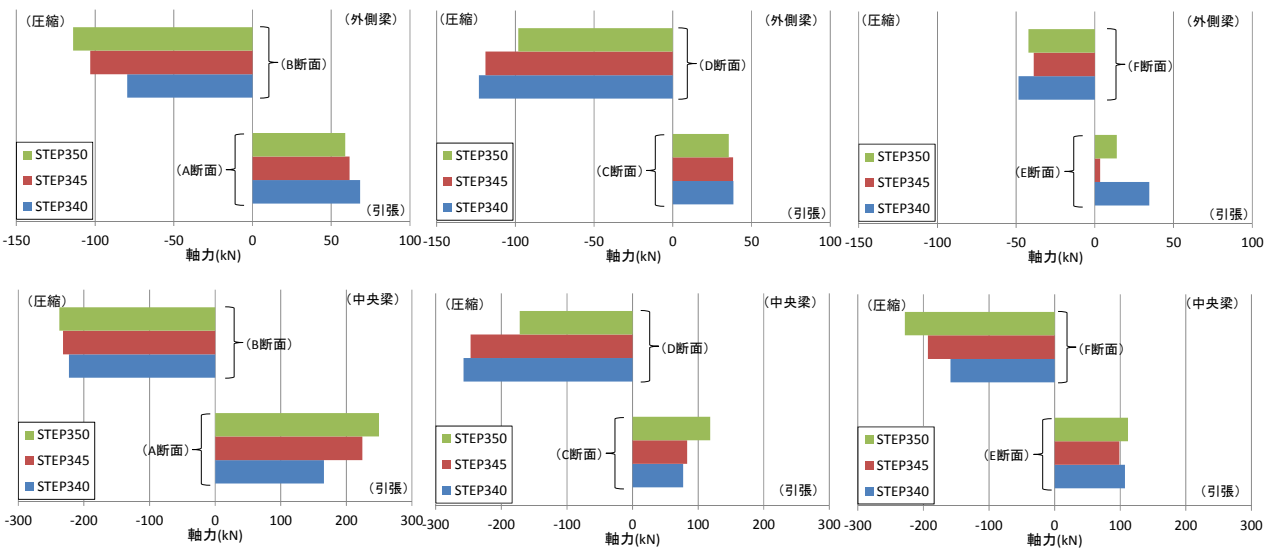


図-10 各梁材端部の負担軸力の推移

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。図-9に軸力による曲げ耐力の増減率の変動を示す。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。つまり、引張軸力は、圧縮軸力よりも、曲げ耐力の増減に対する感度が高いことがわかる。

表-2に各ステップについて各検討断面における曲げモーメント、負担軸力および負担軸力に応じた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、図-10に各検討断面における負担

軸力の推移を示す。図から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とがわかる。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。また、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とがわかる。これは、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、圧縮軸力が作用している部分に比べて、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

図-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、軸力に応じて図-9に示すデータを線形補完することで算定した。圧縮軸力が作用

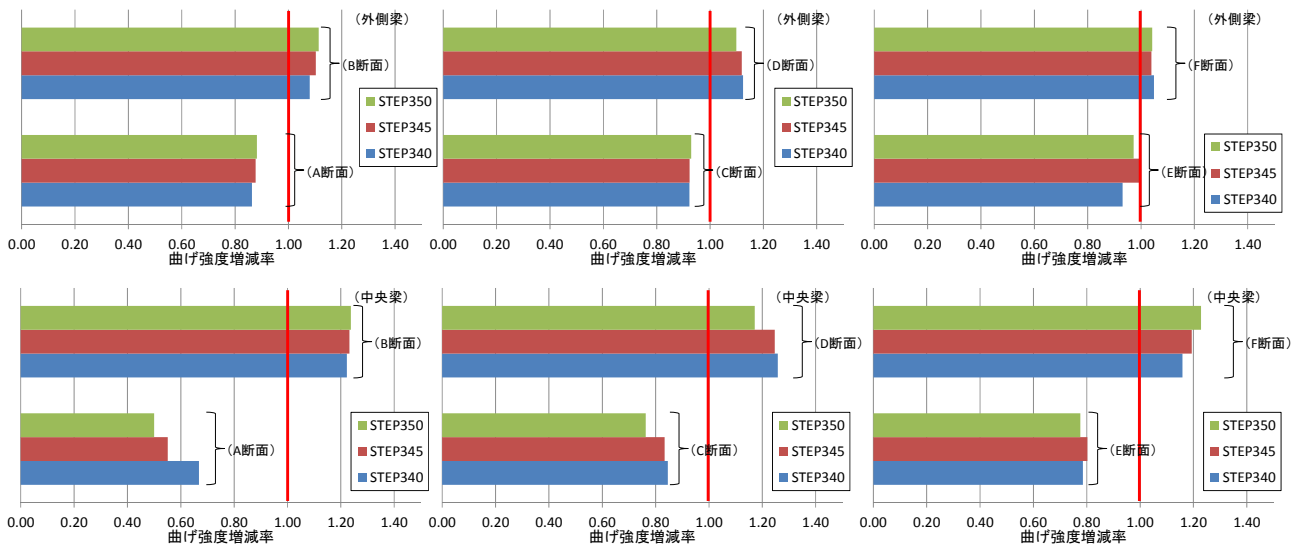


図-11 各梁材端部の曲げ耐力増減率の推移

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、圧縮軸力が作用している断面において曲げ耐力は増加するが、同程度に引張軸力が作用している断面においては減少するため、曲げ耐力の増加分が相殺され、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であると言える。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わかった。

## 6. スラブの効果

図-12に図-7に示す解析ステップにおける6階床の上端筋の応力コンターを示し、図-12に示すC,D断面における床上端筋の応力分布を図-13に示す。本試験体の床スラブの配筋状況としては、図-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、本解析では図-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。

図-12のコンターにおいては赤に近づくほど高い引張応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、図-13に示すようにスパン全域に渡って一様に降伏し、全スパン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、図-13に示すように、STEP165まではスラブ中央部の引張応力が進展するが、その後、STEP345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。この圧縮領域の広がり、図-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、全スパン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することになり、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

本論では、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超大規模モデルによる3次元静的FEM解析を実施し、解析手法の妥当性を示すとともに、解析結果から部材内部の応力状態の考察により、試験体の耐荷機構に対するRC梁に生じる軸力の影響や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強度の増大を引張軸力による曲げ強度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わかった。
- (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、全スパンのスラブ上端筋が架構耐力に寄

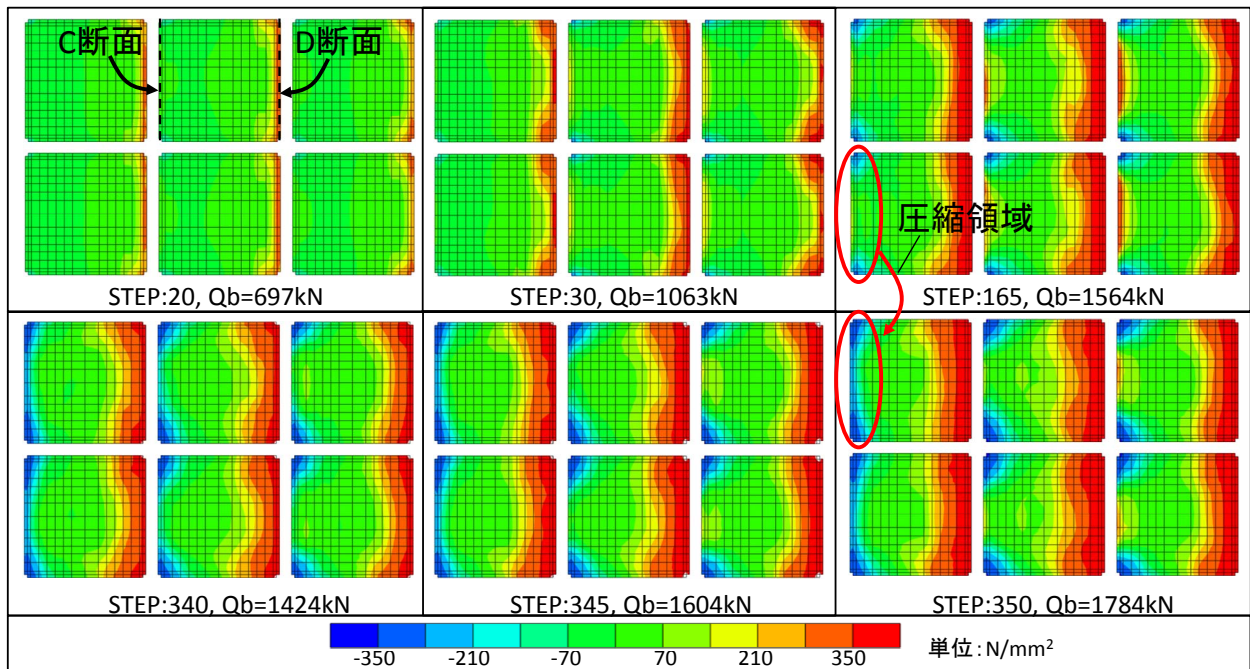


図-12 床スラブ上端筋応力コンター

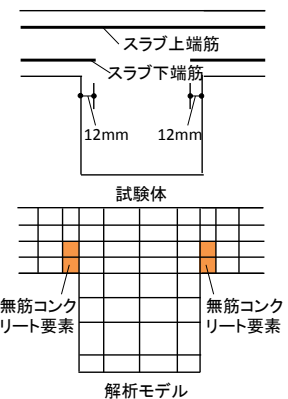
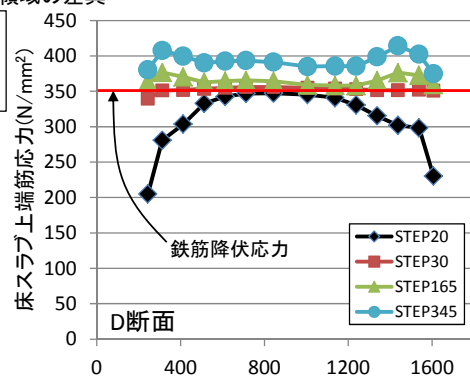
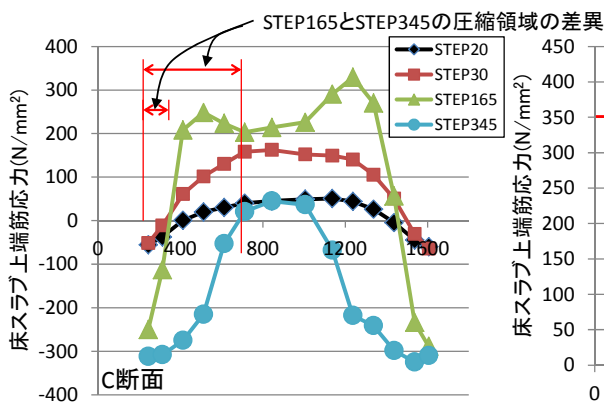


図-13 床スラブ上端筋応力分布

図-14 床スラブ筋のモデル化

与すること、そして、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になることがわかった。

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, 勝俣英雄, 三輪田吾郎, 福山洋: 縮小20層RC造建物試験体の震動実験, コンクリート工学, Vol.17, No.5, pp.87-95, 2013.7
- 2) 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.637-638, 2013

- 3) 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
- 4) 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
- 5) 米澤健次, 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, 2011.12, CD-ROM
- 6) 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
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1997年版
- 8) 監修 国土交通省住宅局建築指導課, 他: 建築物の構造関係技術基準解説書, 2007年版