

## 論文 超高強度コンクリートを用いたRC柱の高軸力下の構造性能

小坂 英生<sup>\*1</sup>・渡辺 英義<sup>\*1</sup>・小室 努<sup>\*2</sup>・川端 一三<sup>\*3</sup>

**要旨：**150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の高軸力下における構造性能を把握する目的で、軸力比を主な実験変数として曲げせん断加力実験を実施した。最大圧縮軸力比0.50の変動軸力を受ける試験体は、部材角1/50まで安定した履歴性状を示し、十分な変形性能を有していた。また、曲げ耐力についてファイバーモデルを使用した断面解析により検討を行った結果、実験値を精度良く評価することができた。

**キーワード：**超高強度コンクリート，RC柱，高強度鉄筋，高軸力，変動軸力

## 1. はじめに

筆者らはRC造建物の更なる高層化・長スパン化を目指し、圧縮強度が150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートを使用したRC柱の開発を実施している。既報<sup>1)</sup>では、超高強度コンクリートを用いたRC柱は横補強筋を適切に配置することにより高いせん断力レベルまで損傷が少なく、十分な変形性能を有していることを示した。

本研究では、大きな変動軸力が作用する外柱を対象として水平加力実験を実施し、構造性能についての検討を行った。

## 2. 実験概要

試験体一覧を表-1に、試験区間断面を図-1に示す。試験体は、断面 $b \times D = 250 \times 250$ mm、せん断スパン比 $M/QD = 1.5$ を共通とした6体である。実験パラメータは軸力比とし、一定軸力および変動軸力とした。

長期軸力（軸力比 $\eta = N/bD\sigma_B = 0.33$ ）相当が作用する中柱を想定した基準試験体150-8に対して、150-9および150-10は、それぞれ軸力比を0.40、0.50とした一定軸力の試験体である。150-11、150-12および150-13は、最大圧縮軸力比をそれぞれ0.50、0.60、0.70とし、最大引張軸力を全主筋引張降伏時軸力の0.7倍とした変動軸力の試験体である。

表-1 試験体一覧

| 試験体    | 主筋比<br>pg [%]             | 圧縮強度<br>$\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 横補強筋比<br>pw [%] | 軸力比<br>$\eta$         |
|--------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| 150-8  | 3.71<br>〔12-D13〕<br>4-D16 | 173                                     | 0.98            | 0.33                  |
| 150-9  |                           |                                         |                 | 0.40                  |
| 150-10 |                           |                                         |                 | 0.50                  |
| 150-11 |                           |                                         |                 | $\eta^{-1} \sim 0.50$ |
| 150-12 |                           |                                         |                 | $\eta^{-1} \sim 0.60$ |
| 150-13 |                           | 154                                     | 1.30            | $\eta^{-1} \sim 0.70$ |

\*1  $\eta = 0.70 \cdot N_u / bD\sigma_B$ ,  $N_u = bD\sigma_y pg$  ( $\sigma_y$ :主筋の降伏強度)

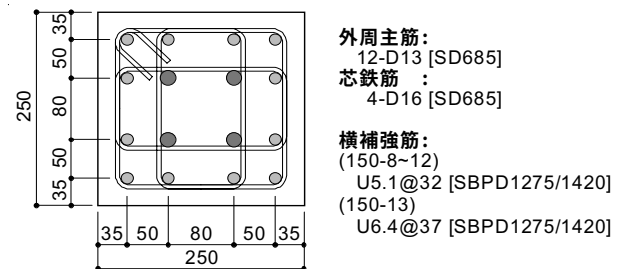


図-1 試験区間断面

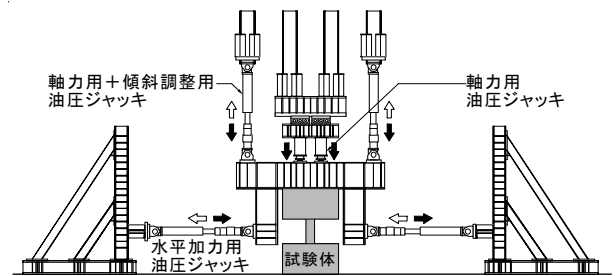


図-2 加力方法

加力方法を図-2に、変動軸力の载荷履歴を図-3に示す。変動軸力試験体では、作用軸力が水平せん断力に追従するように設定した。加力

\*1 大成建設（株） 技術センター 建築技術研究所 工修（正会員）

\*2 大成建設（株） 設計本部 構造グループ 工修（正会員）

\*3 大成建設（株） 設計本部（正会員）

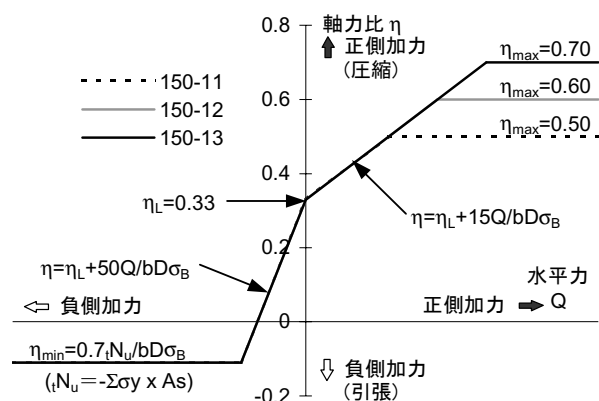


図-3 軸力載荷履歴

表-2 コンクリート調査

| 試験体      | 水結合材比[%] | 結合材 <sup>*1</sup><br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 水<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 粗骨材 <sup>*2</sup><br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 細骨材 <sup>*3</sup><br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------|----------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 150-8~12 | 17.0     | 882                                       | 150                       | 871                                       | 568                                       |
| 150-13   | 15.0     | 1000                                      | 150                       | 871                                       | 461                                       |

\*1 普通ポルトランドセメント:スラグ石膏:シリカフェーム=7:2:1(質量比)

\*2 安山岩系砕石 \*3 安山岩系砕砂

表-3 コンクリート圧縮試験結果

| 試験体      | 圧縮強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | ヤング係数<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | ポアソン比 |
|----------|------------------------------|--------------------------------|-------|
| 150-8~12 | 173                          | 48.7                           | 0.24  |
| 150-13   | 154                          | 43.6                           | 0.25  |

表-4 鉄筋の材料特性

| 鉄筋   | 降伏点<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | ヤング係数<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | 破断伸び<br>[%] |
|------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|
| D13  | 724                         | 944                          | 196                            | 11.0        |
| D16  | 730                         | 944                          | 191                            | 9.6         |
| U5.1 | 1455                        | 1477                         | 199                            | 9.2         |
| U6.4 | 1460                        | 1482                         | 206                            | 8.4         |

は水平力を変位制御で正負繰り返しに作用させ、部材角±1/500を1回、±1/200、±1/100、±1/50をそれぞれ3回、±1/25を2回とした。

コンクリートの調査を表-2に示す。結合材はセメントとシリカフェームにスラグ石膏系混和材を加えたものであり、粗骨材には最大径20mmのものを使用した。コンクリートの圧縮試験結果を表-3に示す。150-8~12は夏季に、150-13は冬季に打設したため、圧縮強度が多少異なっている。150-8~12の圧縮強度は、実験期間中に行った3回の材料試験結果の平均値である。主筋にはD13およびD16のSD685を、横補強筋には異形PC鋼棒(SBPD1275/1420)を使用した。鉄筋の材料特性を表-4に示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 セン断力-部材角関係

P-Δ効果を考慮したせん断力Q-部材角R関係を図-4に、各試験体のR=1/100ピーク時のひび割れ発生状況を写真-1に示す。

写真-1よりR=1/100ピーク時では、全ての試験体においてせん断ひび割れと材端部かぶりコンクリートの圧壊が発生している。また、変動軸力の試験体では、引張軸力による影響で輪切り状のひび割れが発生している。各試験体を比較すると、軸力比が大きいほどせん断ひび割れが縦方向に発生する傾向がみられた。

各試験体の実験状況を以下に示す。

##### (1) 150-8 (一定軸力 η=0.33)

R=1/500ではひび割れは観察されず、R=1/200の加力中に曲げひび割れが発生した。R=1/200のピーク時のせん断応力度(Q/bD)は12N/mm<sup>2</sup>と非常に大きいレベルであるにもかかわらず、せん断ひび割れは発生しなかった。R=1/100の加力中にかぶりコンクリートの圧壊とせん断ひび割れが発生し、耐力低下とほぼ同時に圧縮側主筋が降伏した。その後は、R=1/25の1回目の加力までエネルギー吸収能力の高い安定した履歴性状を示し、R=1/25の正側2回目加力中に軸方向ひずみが増大したためそのまま押し切りとした。R=1/20で耐力が低下し、軸力保持能力を喪失したため実験を終了した。

##### (2) 150-9 (一定軸力 η=0.40)

150-8とほぼ同様の破壊経過となったが、R=1/25の負側1回目ピーク時に軸方向ひずみが大きく進展し、耐力低下が顕著となったため実験を終了した。

##### (3) 150-10 (一定軸力 η=0.50)

R=1/500ではひび割れは観察されず、R=1/200の負側1回目ピーク時にかぶりコンクリートが圧壊し、耐力低下とほぼ同時に圧縮側主筋が降伏した。R=1/50の負側1回目ピーク時に軸方向ひずみが増大したため実験を終了した。

##### (4) 150-11 (変動軸力 η=0.50)

R=1/500の正側ではひび割れは観察されなかつ

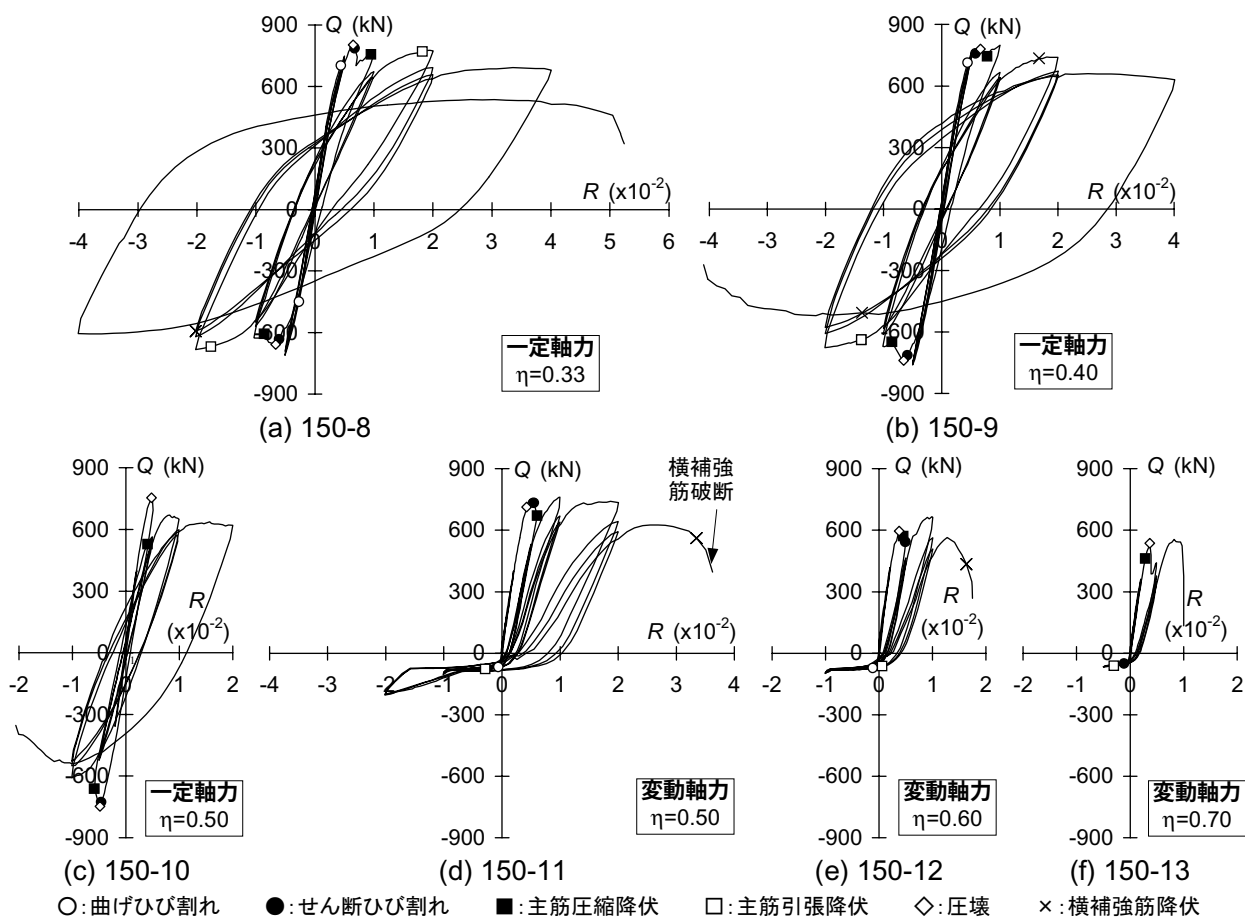
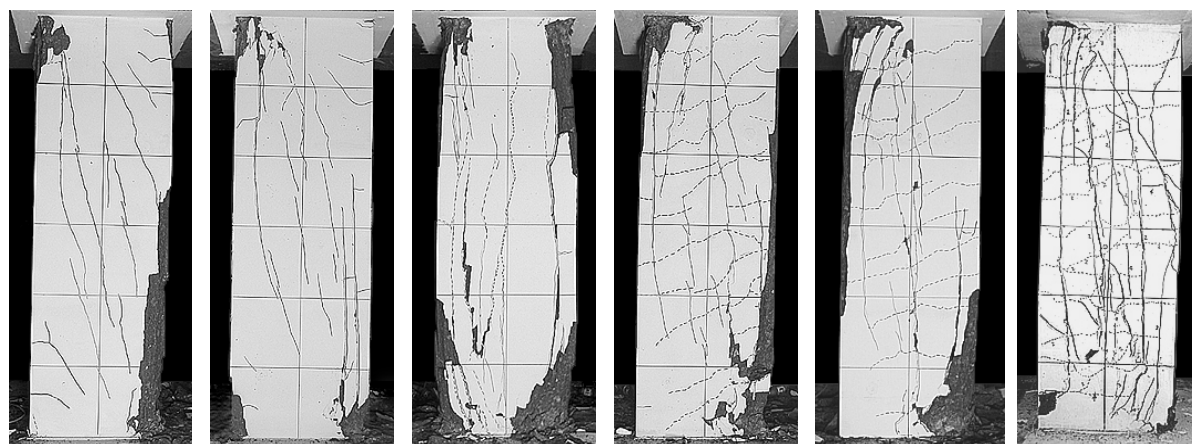


図-4 せん断力-部材角関係 (P-Δ効果考慮)



一定軸力  $\eta=0.33$     一定軸力  $\eta=0.40$     一定軸力  $\eta=0.50$     変動軸力  $\eta=0.50$     変動軸力  $\eta=0.60$     変動軸力  $\eta=0.70$   
 (a)150-8    (b)150-9    (c)150-10    (d)150-11    (e)150-12    (f)150-13

写真-1 ひび割れ発生状況 (R=1/100)

たが、負側では早期に曲げせん断ひび割れが発生した。R=1/200の正側加力では150-10と同様、ピーク時にかぶりコンクリートの圧壊、せん断ひび割れ、圧縮側主筋の降伏が発生した。負側の加力では引張軸力の影響による輪切り状のひび割れが発生した。R=1/50の3回目加力まで安定

した履歴性状を示したが、R=1/25の正側1回目加力中に耐力が低下し、横補強筋が破断して軸力を保持できなくなり実験を終了した。

#### (5) 150-12 (変動軸力 $\eta=0.60$ )

R=1/100までは150-11とほぼ同様の破壊経過であったが、R=1/50の正側1回目加力中に耐力

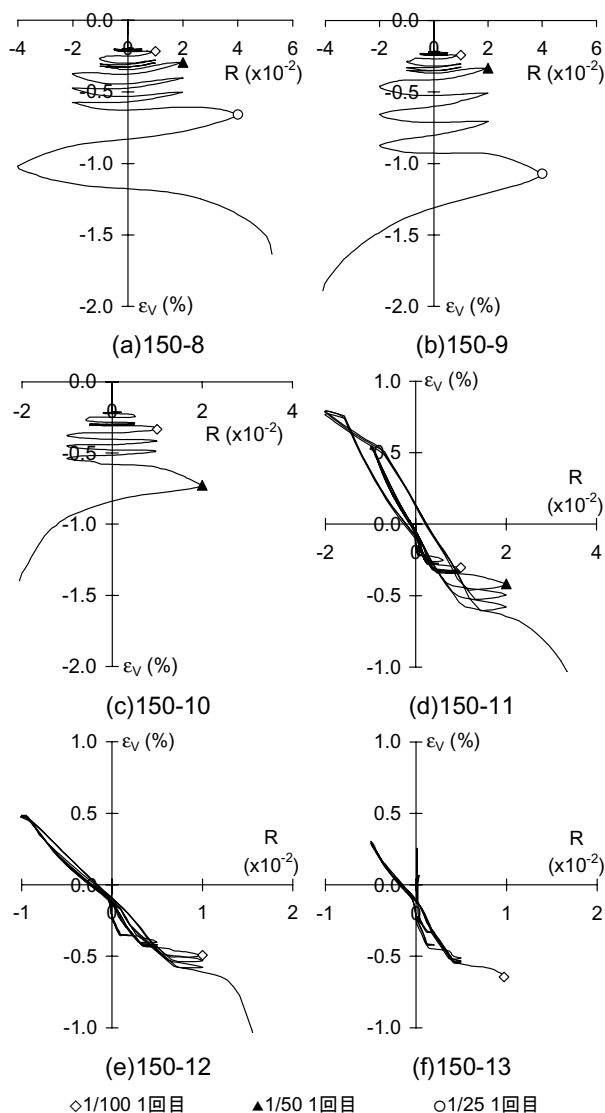


図-5 軸方向ひずみ-部材角関係

が著しく低下し、軸力保持能力を喪失したため実験を終了した。

### (6) 150-13 (変動軸力 $\eta=0.70$ )

$R=1/500$ の負側1回目でせん断ひび割れが発生し、 $R=1/200$ の正側1回目でかぶりコンクリートの圧壊が生じた。曲げひび割れと正側のせん断ひび割れは観察されなかった。 $R=1/100$ の正側1回目で縦ひび割れが広範囲に発生し、軸力を保持できなくなり実験を終了した。

### 3.2 軸方向ひずみ

各試験体の軸方向ひずみ-部材角関係を図-5に示す。軸方向ひずみは柱芯位置の上下スタブ間で測定した変位を試験区間高さで除したものである。一定軸力の基準試験体150-8と比較し

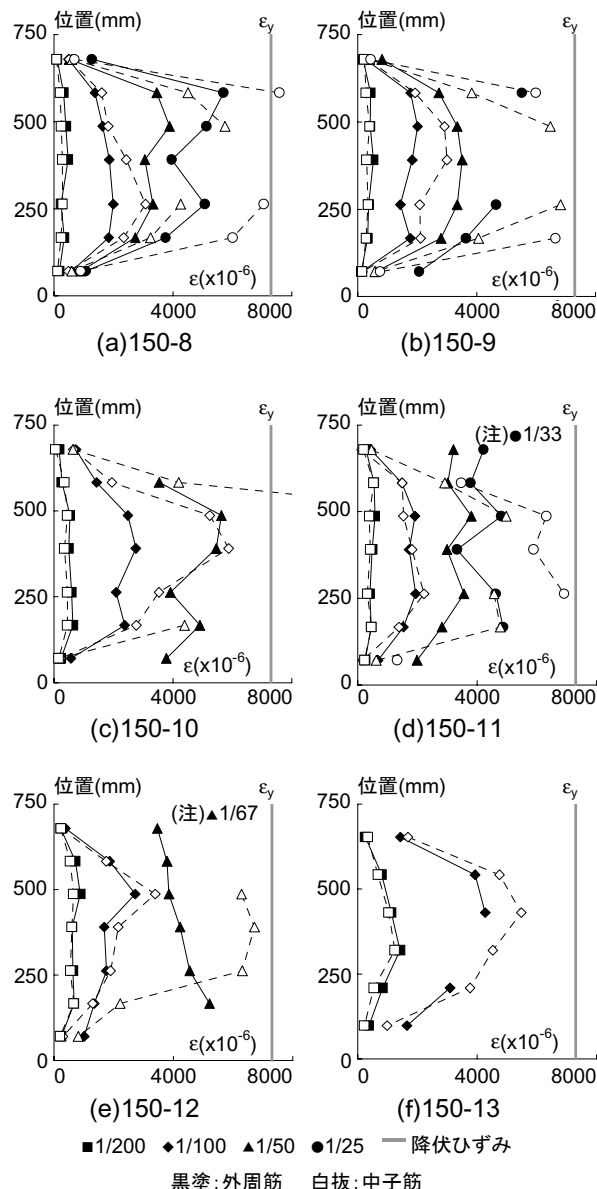


図-6 横補強筋ひずみ分布

て、150-9、150-10と軸力比が大きくなるほど同一変形時の軸方向ひずみは増大しており、変動軸力の試験体においても同様の傾向がみられた。また、軸力比が大きいほど、実験終了時あるいは軸力保持限界時の軸方向ひずみは小さくなる傾向にあった。150-10（一定軸力： $\eta=0.50$ ）と比較して、150-11（変動軸力： $\eta_{\max}=0.50$ ）の同一変形時の軸方向ひずみは小さい。

### 3.3 横補強筋のひずみ

試験区間内の横補強筋ひずみ分布（正側1回目加力ピーク時）を図-6に示す。いずれの試験体ともせん断ひび割れ発生以降、中子筋のひずみが外周筋よりも大きくなっており、その傾向は

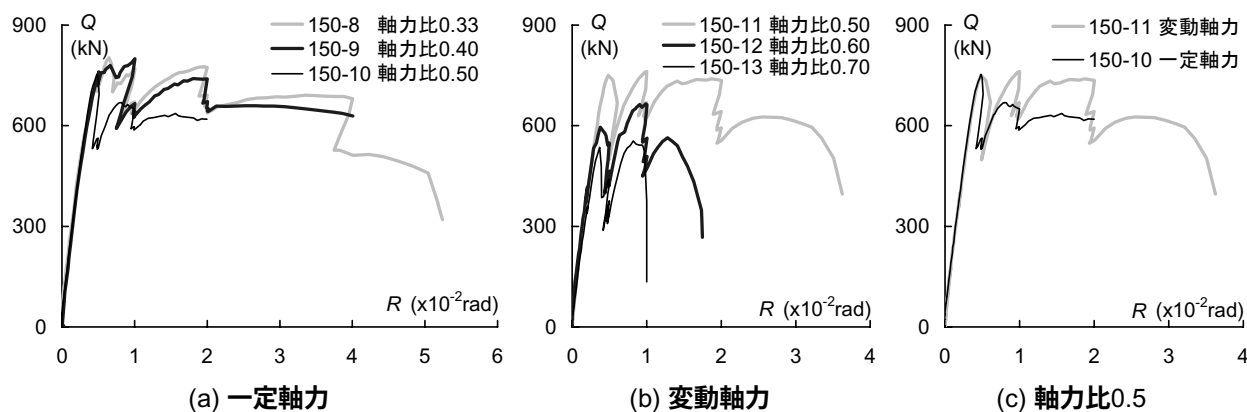


図-7 せん断力-部材角関係の包絡線

部材中央部で特に顕著であった。一定軸力，変動軸力によらず，軸力比が大きいほど同一変形時の横補強筋ひずみは大きくなっている。150-10（一定軸力： $\eta=0.50$ ）と比較して，150-11（変動軸力： $\eta_{\max}=0.50$ ）の同一変形時の横補強筋ひずみは小さくなっている。

大きな軸力が作用する変動軸力の試験体は，材端部の外周筋のひずみが増大する傾向にある。150-13を除く5体の試験体では，実験終了時に横補強筋はほぼ降伏ひずみに達していたが，150-13では降伏ひずみに達していなかった。

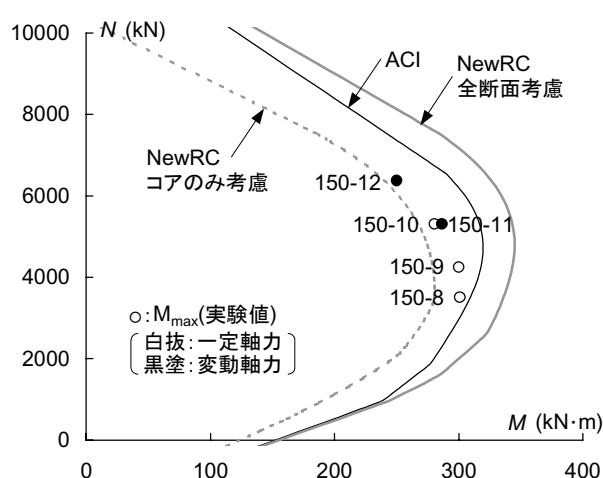


図-8 軸力-曲げ耐力関係

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1 包絡線の比較

P- $\Delta$ 効果を考慮したせん断力-部材角関係の包絡線を実験因子毎に比較して図-7に示す。

図-7(a)には一定軸力試験体の比較を示しているが，軸力比が大きいほど変形能力は劣る傾向にある。150-8と150-9の最大耐力はほぼ同じであったが，150-10の最大耐力は150-8,9と比較して6%程度低くなっている。図-7(b)には変動軸力試験体の比較を示しているが，変動軸力においても，一定軸力と同様に軸力比が大きいほど変形能力が劣る傾向にある。また，軸力比が大きくなるほど最大耐力は小さくなっている。

図-7(c)に軸力比0.5の試験体の比較を示す。かぶりコンクリートの圧壊までは150-10と150-11の間に差はみられないものの， $R=1/100$ 以降では150-11は150-10のせん断力を上回る結果とな

り，軸力比が同じであるにもかかわらず変動軸力の試験体は一定軸力の試験体よりも変形能力が優れていた。

##### 4.2 曲げ耐力の検討

###### (1) 既往の評価法に基づく検討

曲げ耐力の算定は，コンクリート圧縮応力分布を等価なストレスブロックに置換し，平面保持を仮定することにより行った。圧縮縁の終局ひずみとストレスブロックの設定は，ACI318標準<sup>2)</sup>(以下，ACI)およびNewRC報告書<sup>3)</sup>(以下，NewRC)の方法を用いた。各評価法によって算出した曲げ耐力と軸力との関係を実験結果と併せて図-8に示す。図-8中の実験結果はP- $\Delta$ 効果を考慮したものである。

ACIの方法による曲げ耐力は，既報1)の結果と同様に，全ての試験体において多少大きめの

評価となっている。NewRCで全断面を考慮した場合の曲げ耐力は更に大きめの評価となったが、コア断面のみを考慮した場合の曲げ耐力は実験値に比較的近く安全側の評価となった。150-13は、コンクリート強度が他の試験体と多少異なるため図-8にプロットしていないが、ほぼ同じ傾向であった。

150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートを用いる場合は、文献1)で試みているようにACIの方法における $\beta_1$ を0.5とするなどの方法が必要であると考えられる。

## (2)断面解析による検討

より詳細に曲げ耐力を算定するために、平面保持を仮定した危険断面位置でのファイバーモデルによる断面解析を行った。ファイバーモデルは、かぶりコンクリート部分と横補強筋によって囲まれたコアコンクリート部分を個別に考慮できるモデルとした。材料の応力-ひずみ関係は、プレーンおよび拘束コンクリートについては文献4)に示されている六車・渡邊モデルを、鉄筋については完全弾塑性モデルを用いた。

曲げ耐力の実験結果と解析結果を比較して図-9に示す。解析による曲げ耐力は、実験の最大耐力とほぼ一致している。図中にはプロットしていないが、150-13も解析値と実験値はほぼ一致した。今回の解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係モデル<sup>4)</sup>は130N/mm<sup>2</sup>程度までを対象として提案されたモデルであるが、本検討より、170N/mm<sup>2</sup>程度まで適用できる可能性があると考えられる。

## 5. まとめ

圧縮強度150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートを用いたRC柱の高軸力下の水平加力実験を行い、検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1)最大軸力比0.50の変動軸力が作用する試験体は、部材角1/50に至るまで安定した履歴性状を示し、十分な変形性能を有していた。
- (2)変動軸力が作用する試験体は、一定軸力の試

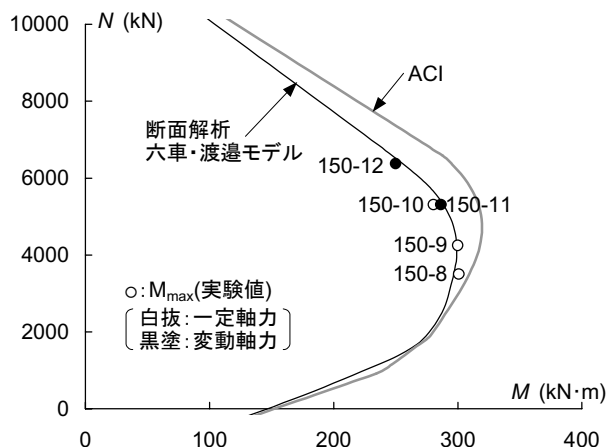


図-9 軸力-曲げ耐力(解析)関係

験体と比較して、同一変形時の軸方向縮み、横補強筋ひずみが小さく、また、最大耐力以降の変形能力が優れていた。

- (3)ACI 標準のストレスブロックを用いた曲げ耐力評価法は、実験値を多少大きめに評価する。
- (4)適切な材料の応力-ひずみ関係と平面保持を仮定したファイバーモデルによる断面解析によって、部材の曲げ耐力を精度よく評価することができる。

**謝辞** 実験計画の立案に際して、京都大学渡邊史夫教授の御指導を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)小室努, 渡辺英義, 是永健好, 川端一三:150MPa 超高強度コンクリートを用いたRC柱の耐震性能, コンクリート工学年次論文報告集24-2, pp.277~282, 2002.6
- 2)American Concrete Institute: Building Code and Commentary ACI 318M-02, 2002.
- 3)建設省総合技術開発プロジェクト:平成4年度 NewRC 研究開発概要報告書, pp3-2-88~95,1993
- 4)渡邊史夫, 西山峰広, 六車熙:超高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ強度と靱性, 日本建築学会構造系論文集, 第446号, pp.99~106, 1993.4