

## 論文 鋼板巻き RC 柱の変形性能に関する実験的研究

花井 伸明<sup>\*1</sup>・古川 淳<sup>\*2</sup>・長塚 典和<sup>\*3</sup>・荒川 玄<sup>\*4</sup>

**要旨:** RC柱に高い変形性能を持たせることを目的として、鋼板と帯筋による二重拘束RC柱について、帯筋と鋼板をパラメータとして繰り返し載荷実験を行い、最大荷重と変形性能について比較検討を行った。その結果、パラメータ（帯筋量、鋼板厚、帯筋強度）による最大荷重への影響は見られなかったが、大変形時の変形性能に違いが見られた。また、帯筋と鋼板の拘束効果を考慮しない既往の耐力式で最大荷重を評価すると計算値が実験値を大きく下回り、拘束効果を考慮したコンクリート強度を用いて断面解析を行うことにより、実験値とよく対応した。

**キーワード:** 鋼板巻き RC 柱, 帯筋量, 鋼板厚, 帯筋強度, 高軸力, 変形性能

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、例えばピロティ建物の下層階の柱など、大地震時に大きな付加軸力を負担する柱部材の脆性的な破壊防止が求められている。こうした柱部材の構造安全性を確保するには、柱に十分な強度・剛性を確保する、あるいは柱に高い変形性能を確保する、などの手法が挙げられる。

柱の強度・剛性を確保するためには、使用材料の強度を高くする、部材断面を大きくする、などの方法が考えられるが、設計上の制約が多い。

また、柱に高い変形性能を確保する手法のひとつとして、通常の鉄筋コンクリート柱の外周に鋼板を配置することにより、高軸力下において高い変形性能を発揮する柱部材（以下、鋼板巻き RC 柱）が提案されている（例えば1）。しかし、同様の研究は数が少なく、鋼板巻き RC 柱の性能の評価法を検討するには十分でない。

そこで、本研究は、高軸力下での鋼板巻き RC 柱の、最大荷重や変形性能など

構造性能について把握することを目的とする。

## 2. 実験計画

## 2.1 試験体

曲げ破壊を想定した4体の試験体を計画した。

表－1に試験体の諸元を示し、試験体の形状および配筋を図－1に示し、鋼材の機械的性質を

表－1 試験体諸元

| 試験体                                             |                                    | NO1      | NO2     | NO3      | NO4     |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|----------|---------|----------|---------|
| RC<br>形状                                        | b×D(mm)                            | 360×360  |         |          |         |
|                                                 | 内法スパン(mm)                          | 1080     |         |          |         |
|                                                 | M/QD                               | 1.5      |         |          |         |
| 主筋                                              | 本数・径                               | 12-D19   |         |          |         |
|                                                 | 材種                                 | SD390    |         |          |         |
|                                                 | 全鉄筋比 $p_g(\%)$                     | 2.65     |         |          |         |
|                                                 | 引張鉄筋比 $p_t(\%)$                    | 0.98     |         |          |         |
| 帯筋                                              | 本数・径                               | 4-D6@100 | 4-D6@50 | 4-D6@100 | 4-D6@50 |
|                                                 | 材種                                 | SD295A   |         |          | SD790相当 |
|                                                 | 帯筋比 $p_w(\%)$                      | 0.35     | 0.7     | 0.35     | 0.7     |
|                                                 | $p_w \cdot \sigma_{wy} \text{ ※}$  | 1.3      | 2.6     | 1.3      | 7.5     |
| 鋼板                                              | 材種                                 | SS400    |         |          |         |
|                                                 | 鋼板厚(mm)                            | 4.5      |         | 6.0      | 4.5     |
|                                                 | 鋼板比 $p_s(\%)$                      | 2.5      |         | 3.3      | 2.5     |
|                                                 | $s p_w \cdot s \sigma_y \text{ ※}$ | 7.4      |         | 8.9      | 7.4     |
| 軸力比                                             |                                    | 0.6      |         |          |         |
| コンクリート強度<br>$\sigma_B(\text{N/mm}^2) \text{ ※}$ |                                    | 33.1     | 33.8    | 33.6     | 34.7    |

※  $\sigma_{wy}$ ,  $s \sigma_y$  および  $\sigma_B$  は実強度。

\*1 大木建設(株) 技術研究所 工修（正会員）

\*2 鉄建建設(株) 技術研究所 工修（正会員）

\*3 飛島建設(株) 技術研究所 工修

\*4 大木建設(株) 技術研究所 工修

表－2に示す。共通因子として、 $b \times D=360\text{mm} \times 360\text{mm}$ ，内法高さ $=1080\text{mm}$ ，シアスパン比 $=1.5$ ，コンクリート強度 $F_c=36\text{N/mm}^2$ ，主筋をSD390の12-D19，鋼板をSS400材とし，帯筋は溶接閉鎖型を用いた。主筋は定着プレートにより定着した。また，鋼板を型枠代わりにして直接コンクリートを打設しているので一体化されている。鋼板とスタブの間には20mmのクリアランスを設けた。

実験パラメータは以下の3点とした。

- ・ 帯筋量の影響…NO1 ( $D6@100$ ,  $p_w=0.35\%$ )  
NO2 ( $D6@50$ ,  $p_w=0.7\%$ )
- ・ 鋼板厚の影響…NO1 (4.5mm)  
NO3 (6mm)
- ・ 帯筋強度の影響…NO2 (SD295A)  
NO4 (SD790 相当)

## 2.2 載荷方法

載荷は正負交番逆対象加力とし，軸力 $0.6bD\sigma_B$ の一定軸力を加えた。載荷装置の概要を図－2に示す。水平力載荷履歴は $R=1/800$ ， $1/400$ を各1回， $1/200$ ， $1/100$ を各2回， $1/67$ を1回， $1/50$ を2回， $1/33$ を1回， $1/20$ を2回ずつ繰り返し，最後に $1/15$ の押し切り載荷を標準とする，計13サイクルとした。

## 2.3 測定方法

測定項目は荷重，変位，軸ひずみ，鋼板の膨らみおよび主筋と帯筋のひずみとし，それぞれロードセル，変位計およびひずみゲージにより測定した。ここで，軸ひずみとは軸方向の変形を内法スパンで除したものである。また，鋼板の膨らみとは，柱頭・柱脚の危険断面から315mmの位置で測定した図－3のA－A'間の距離の増分のことである。

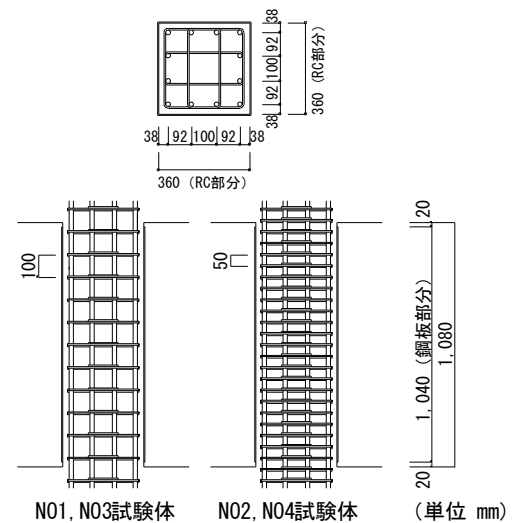
表－2 鋼材の機械的性質

| 材種 |       |        | 降伏応力度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 破断応力度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 降伏ひずみ<br>(%) |
|----|-------|--------|------------------------------|------------------------------|--------------|
| 鉄筋 | D19   | SD390  | 442                          | 628                          | 0.26         |
|    | D6    | SD295A | 375                          | 558                          | 0.35         |
|    | D6    | KSPD80 | 1068                         | 1256                         | 0.79         |
| 鋼板 | t=4.5 | SS400  | 296                          | 426                          | 0.31         |
|    | t=6.0 | SS400  | 271                          | 418                          | 0.32         |

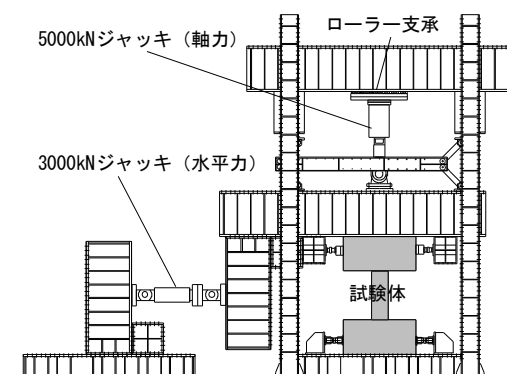
## 3. 実験結果

### 3.1 実験時状況

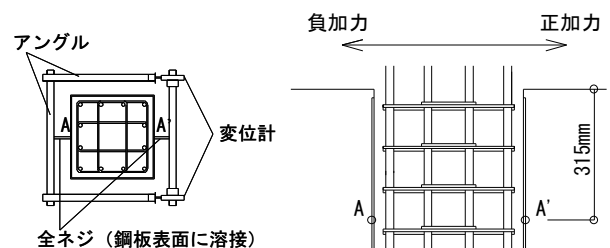
最終破壊状況の写真の例としてNO1およびNO4試験体について写真－1に示す。すべての試験体において，鋼板の膨らみ（図－3参照）が目視で確認された。特に柱頭で顕著であった。NO4試験体は，他の試験体と比較して鋼板の膨らみが小さかった。柱頭柱脚のクリアランス部分のコンクリートの圧壊は，NO1試験体の柱頭が特に顕著であった。NO1およびNO3試験体では最終的に柱頭の鋼板がスタブに接触した。



図－1 試験体配筋図



図－2 載荷装置図



図－3 鋼板の膨らみの測定位置（柱頭）

### 3.2 水平荷重一層間変形関係

図－4に水平荷重一層間変形関係を示す。各試験体とも主筋が± 1/200 で圧縮降伏した。最大荷重はいずれの試験体も 800kN程度と、パラメータの違いによる最大荷重の大きな差異は見られなかった。帯筋量の違う NO1, NO2 試験体を比較すると、最大荷重時の変形は、NO1 試験体が 1/67 で、NO2 試験体では 1/33 となり、帯筋量の違いにより最大荷重時の変形が異なった。

次に、最大荷重以降では、帯筋量の影響についてみると、 $p_w=0.35\%$  の NO1 試験体では、± 1/33 以降に荷重の低下が見られ、+1/20 の 1 回目の荷重は最大荷重の約 60% であった。 $p_w=0.7\%$  の NO2 試験体では、± 1/20 の 1 回目まで荷重を保持した後、2 回目のサイクルで最大荷重の約 82% までの低下にとどまったことから、NO1 試験体と比較すると高い靱性を有していた。帯筋強度が高い NO4 試験体では、+1/15 でも荷重が急激に低下することなく、大変形時まで良好な紡錘形のループ性状となった。鋼板厚の影響についてみると、鋼板厚を 4.5mm とした NO1 試験体と 6mm とした NO3 試験体では ± 1/33 までは変形性能の顕著な違いは見られなかったが、± 1/20 では NO1 試験体で他に見られない荷重低下があった。

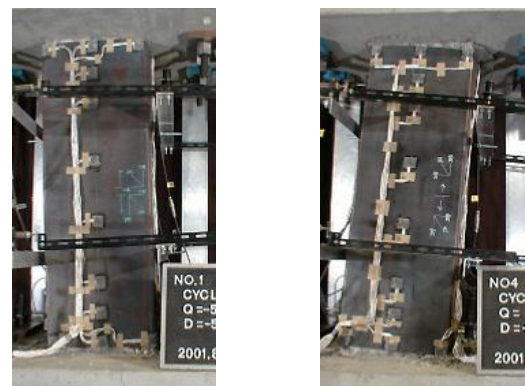
### 3.3 軸ひずみ

図－5に NO1 および NO4 試験体の層間変位と柱部材の軸ひずみの関係を示す。なお、軸ひずみは圧縮側を正とした。各試験体とも ± 1/33 までは同様の挙動を示し、軸ひずみが約 0.4% 程度にとどまった。± 1/20 以降、NO1 試験体で軸ひずみが急激に増加し、最

終的に約 1.2%～1.4% 程度にまで達した。NO2 および NO3 試験体も同様な挙動を示したが、NO1 試験体ほど顕著ではなかった。NO4 試験体では、他の試験体と比較して軸ひずみが小さく、約 0.9% 程度にとどまった。これは、帯筋強度を増すことで軸ひずみが抑制されるからと考えられる。NO1～NO3 試験体の軸ひずみが急激に増加した変形は、前節で述べた水平荷重の低下と同時期であった。

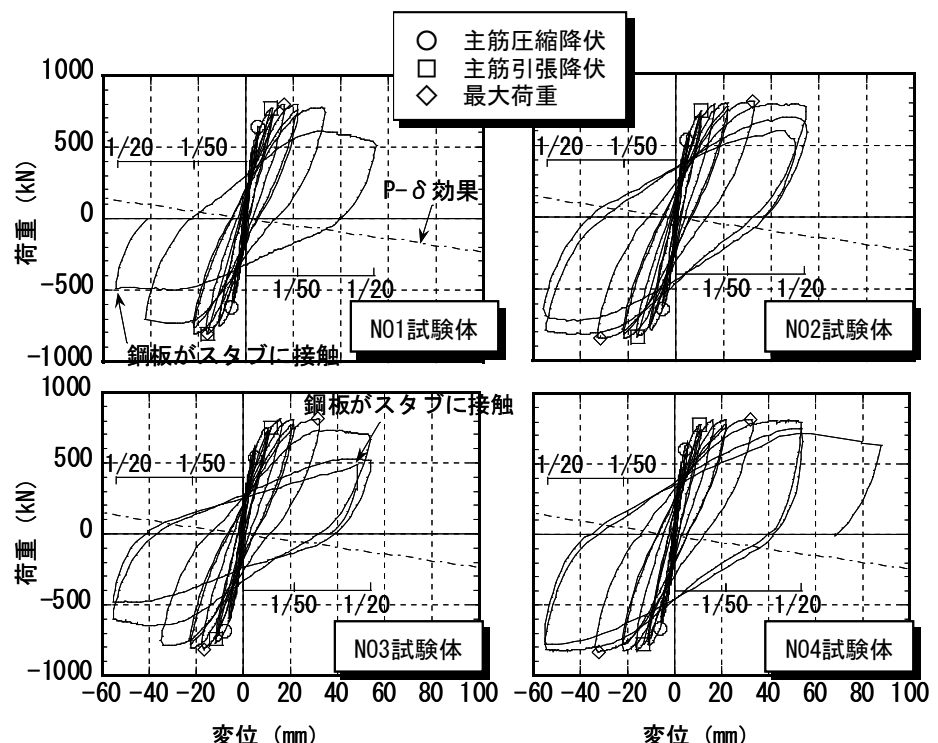
### 3.4 鋼板の膨らみ

図－6に NO1 および NO4 試験体の柱頭における鋼板の膨らみを示す。各試験体とも +1/33 ま



(a) NO1 試験体 (-1/20) (b) NO4 試験体 (+1/12)

写真－1 最終破壊状況



図－4 水平荷重一層間変形関係

では同様の挙動を示し、約5mm程度にとどまった。 $-1/33$ 以降、NO1試験体で鋼板の膨らみが急激に増加し、最終的に約25mm程度にまで達した。NO2およびNO3試験体も同様な挙動を示したが、NO1試験体ほど顕著ではなかった。NO4試験体は他の試験体と比較して鋼板の膨らみが小さく、約7mm程度にとどまった。NO1～NO3試験体の鋼板の膨らみが増加した変形は、3.2節および前節で述べた水平荷重の低下や軸ひずみの増加と同時期であった。

### 3.5 主筋のひずみ

図-7にNO1およびNO4試験体の主筋のひずみ分布を示す。各試験体とも軸力導入時のひずみは約0.1%程度であった。また、危険断面位置(A点, G点)では圧縮側は $1/200$ で、引張側は $1/67$ で降伏に至っている様子が確認できる。柱中央付近D点のひずみは軸力導入時からほとんど変化せず、B点からF点の間では $\pm 1/50$ までひずみの進展が少ない。さらに、ひずみ勾配があることから、良好な付着性状であったことが確認できる。

### 3.6 帯筋のひずみ

図-8にNO1, NO2およびNO4試験体の帯筋のひずみ分布を示す。いずれの試験体も外周筋は降伏していない。 $p_w=0.35\%$ のNO1試験体では危険断面位置から $1D$ の区間で、 $\pm 1/67 \sim \pm 1/50$ で中子筋が降伏している。NO3試験体も同様であった。 $p_w=0.7\%$ としたNO2およびNO4試験体では、中子筋のひずみが0.3%程度にとどまり、降伏していない。以上より、帯筋は外周筋より中子筋の方がコンクリートへの拘束力を負担する割合が大きいと考えられる。また、3.2節で述べた、NO1試験体より帯筋を増したNO2試験体の最大荷重以降の変形性能が良好であったことを総

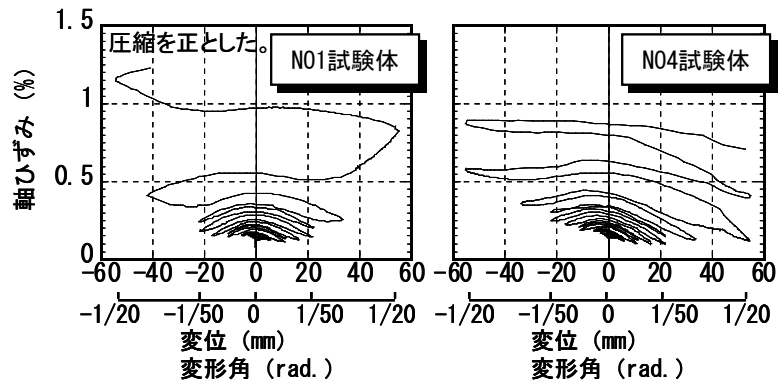


図-5 変位と軸ひずみの関係(柱頭)

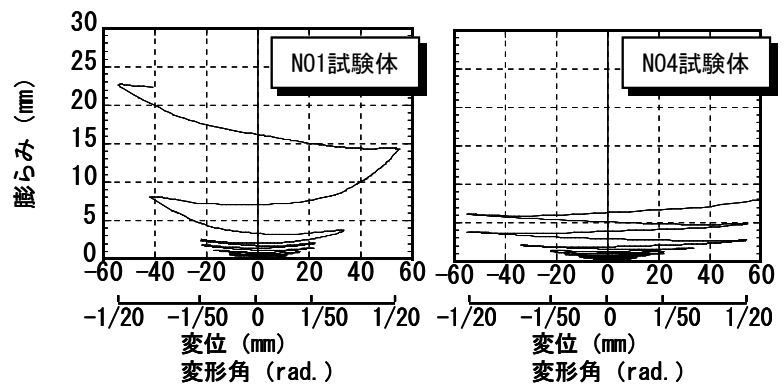


図-6 鋼板の膨らみ

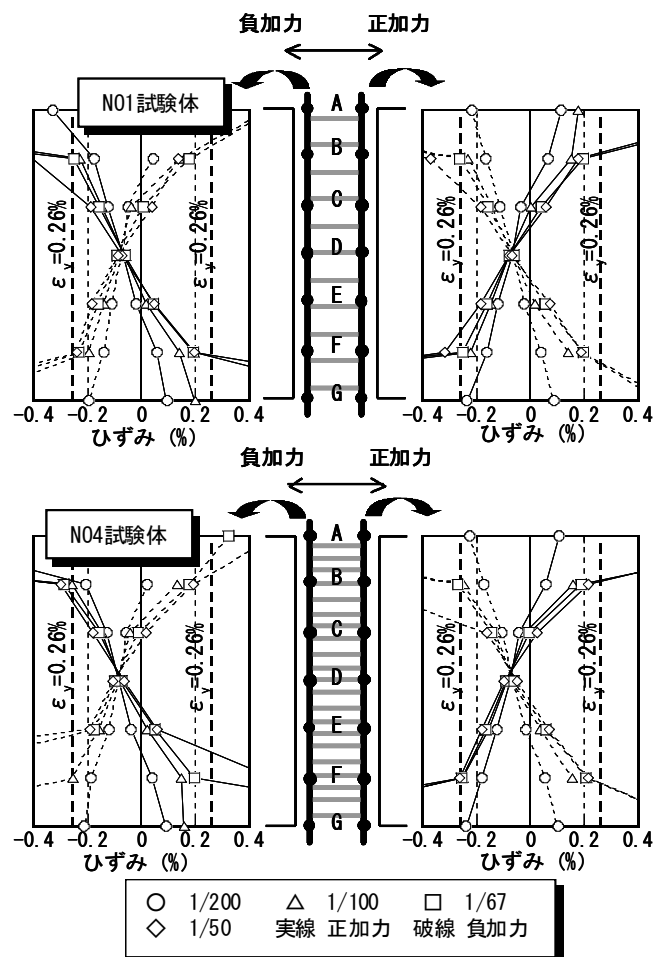


図-7 主筋ひずみ分布

合すると、中子筋量が変形性能に寄与すると考えられる。

#### 4. 考察

##### 4.1 実験値と計算値の対応

曲げ強度をストレスブロック法<sup>2)</sup>(Case 1), および断面解析 (Case 2) の2通りの方法で算定し、最大荷重と比較した。なお, Case 1ではコンクリート強度に実強度を用いた場合 (Case 1a), 拘束コンクリートのコンクリート強度上昇を, 帯筋項としてManderら<sup>3)</sup>による強度式に鋼板項として松村ら<sup>4)</sup>による強度式を累加して算定した<sup>1), 5)</sup>場合 (Case 1b) の2通り, Case 2では帯筋項としてNew RC<sup>6)</sup>による強度式に鋼板項として孫ら<sup>7)</sup>による強度式を累加して算定した場合 (Case 2a), Case 1bと同様の構成則を用いた場合 (Case 2b) の2通り, 計4通りの計算を行った。計算方法の一覧を表-3に示し, コンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 関係を図-9に示す。

計算結果を表-4に示す。断面解析を行ったCase 2は比較的よい対応を示している。しかし, 帯筋をSD790相当とし $p_w=0.7\%$ としたNO4試験体については, 他の試験体と比べ (実験値) / (計算値) が小さく, NO4試験体のように $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が大きいものに関しては計算値が大きくなる傾向にあると考えられる。拘束効果を考慮しないCase 1aは, すべての試験体で実験値が計算値に対し約1.6倍となった。

##### 4.2 補強量と変形性能の関係

図-10に補強量・せん断余裕度と変形性能の関係を示す。図-10(a)の横軸は帯筋と鋼板の

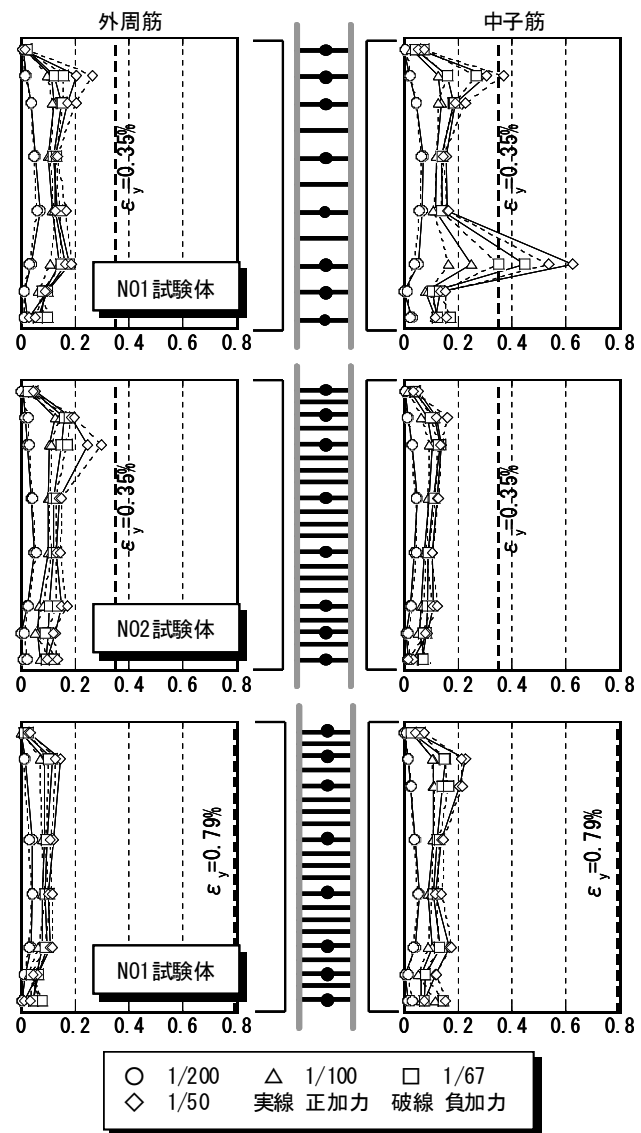


図-8 帯筋ひずみ分布

表-3 計算方法一覧

|         | 算定法       | 拘束効果        |
|---------|-----------|-------------|
| Case 1a | ストレスブロック法 | 考慮せず        |
| Case 1b |           | Manderら+松村ら |
| Case 2a | 断面解析      | New RC+孫ら   |
| Case 2b |           | Manderら+松村ら |

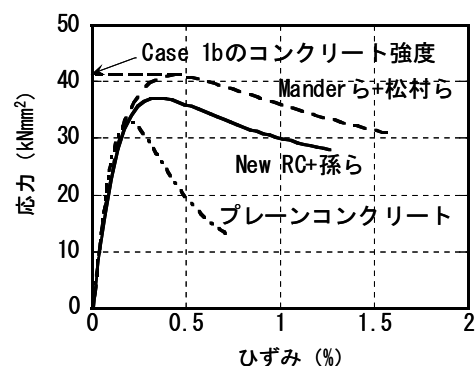


図-9 コンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 関係 (N01)

表-4 計算結果

| 試験体 |          | Case 1a | Case 1b | Case 2a | Case 2b |
|-----|----------|---------|---------|---------|---------|
| NO1 | 計算値 (kN) | 497     | 597     | 666     | 683     |
|     | 実／計      | 1.62    | 1.35    | 1.21    | 1.18    |
| NO2 | 計算値 (kN) | 502     | 676     | 686     | 728     |
|     | 実／計      | 1.68    | 1.25    | 1.23    | 1.16    |
| NO3 | 計算値 (kN) | 500     | 613     | 690     | 709     |
|     | 実／計      | 1.62    | 1.32    | 1.18    | 1.14    |
| NO4 | 計算値 (kN) | 508     | 864     | 738     | 814     |
|     | 実／計      | 1.63    | 0.96    | 1.12    | 1.02    |

$p_w$  と降伏強度を乗じて累加した値 (以下,  $\Sigma p_w \cdot \sigma_{wy}$ ) を, 図-10(b) の横軸はせん断余裕度を, 縦軸は限界変形角を示す。せん断余裕度は Case 2b の曲げ計算値を, Case 2b のコンクリート強度と  $\Sigma p_w \cdot \sigma_{wy}$  を用いて修正荒川式で算定したせん断計算値で除したものである。限界変形角とは各試験体の最大荷重に対して 80% の荷重時の包絡線上における変形角と仮定し, 正負載荷時の小さい値を採用した。なお, NO2 試験体は, 実験範囲内で最大荷重時の 80% の荷重低下をしていないので, 最終変形角以上とした。

図-10(a) では, NO1 程度の補強量であれば, 限界変形角  $4 \times 10^{-2} \text{rad}$  程度を確保することができる。NO2 と NO3 を比較すると, 帯筋を増した NO2 の方が限界変形角が大きかった。以上より, 曲げ降伏した本試験体では, 変形性能に与える影響は鋼板厚より帯筋量の方が大きいと考えられる。また, 図-10(b) では, せん断余裕度が大きい試験体ほど限界変形角も大きくなった。図-10(a) で補強量が NO3 よりやや少ない NO2 が, 図-10(b) ではせん断余裕度がやや大きくなっている。これは, 拘束コンクリートの強度算定において帯筋の影響が大きく, せん断強度の算定に用いた拘束コンクリートの強度の違いが影響したことによるものである。

## 5. まとめ

本実験の範囲では以下の知見が得られた。

- (1) 鋼板を巻くことにより, 高軸力下でも良好な変形性能であった。
- (2) 変形性能に与える影響は, 鋼板厚より帯筋量の方が大きかった。
- (3) 帯筋量, 鋼板厚, および帯筋強度を変化させても, 最大荷重への影響はない。
- (4) 鋼板巻き RC 柱の最大荷重は帯筋と鋼板の拘束効果を考慮したコンクリート強度を用いて断面解析を行うことで評価できる。

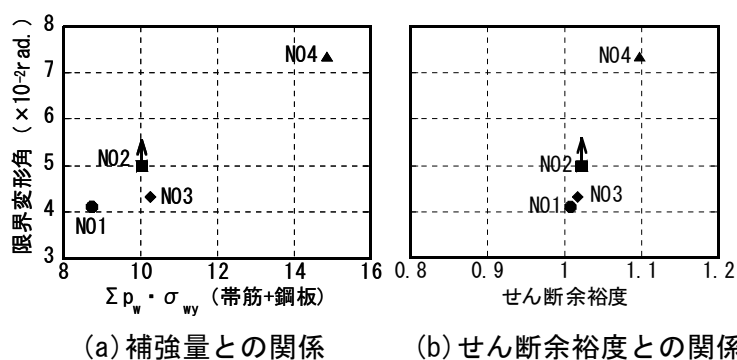


図-10 補強量・せん断余裕度と変形性能の関係

## 謝辞

本研究を行うに当たり, 東京都立大学・芳村学教授の御指導を賜りました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 米奥久貴ほか: 高軸力を受ける鋼板巻き RC 柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.289-294, 1999
- 2) 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
- 3) Mander, J.B., et.al.: THEORETICAL STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug.1988
- 4) 松村弘道ほか: 角形鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.1627-1628, 1989.10
- 5) 山川哲雄ほか: 鋼管と帯筋で二重に横補強した RC 短柱の弾塑性解析 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.231-234, 1991.9
- 6) 国土開発技術研究センター: 平成 4 年度 New RC 研究開発概要報告書, 1993.3
- 7) 孫玉平ほか: 正方形鋼管横補強鉄筋コンクリート柱の曲げ終局強度の算定法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.131-136, 1996