

## 論文 RC ラーメン橋台柱の変形性能評価に関する実験的研究

楠本 秀樹<sup>\*1</sup>・谷村 幸裕<sup>\*2</sup>・鈴木 裕隆<sup>\*3</sup>・田所 敏弥<sup>\*4</sup>

要旨：一般的な鉄道高架橋柱の変形性能は，実験等により精度の良い評価方法が確立されているが，ラーメン橋台柱のようにせん断スパン比が小さい領域では明らかになっていない。そこで，ラーメン橋台柱をモデル化した実験を行い，変形性能評価方法の検討を行った。その結果，せん断スパン比が小さい領域において，曲げ破壊となる場合には，鉄道構造物等設計標準 - 耐震設計 - の変形性能評価方法を適用することで概ね評価できること，軸方向鉄筋に沿った付着ひび割れが発生し水平荷重が低下する場合には変形性能が低下する場合があること，付着ひび割れの拡大防止には高強度コンクリートの適用が有効であることが明らかになった。

キーワード：RC ラーメン橋台柱，せん断スパン比，変形性能，高強度コンクリート

## 1. はじめに

鉄道高架橋柱の変形性能は実験等により精度の良い評価方法が確立されており，鉄道構造物等設計標準 - 耐震設計 - （以下，「耐震標準」という）<sup>1)</sup>に取り入れられている。これは，せん断スパン比が 3 程度の実験に基づいているものである。しかし，高架橋柱高さが低い場合や，柱断面が大きい場合はせん断スパン比が小さくなる場合があり，そのような柱部材の変形性能は十分に明らかになっていない。そこで，せん断スパン比の小さい RC ラーメン橋台の柱部材をモデル化し，引張鉄筋比，帯鉄筋比およびコンクリート強度をパラメータとして 5 体の試験体による逆対称曲げモーメントを受ける静的交番載荷試験を行い，せん断スパン比の小さい領域における RC 柱部材の変形性能算定方法の検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体形状および諸元

実験に用いた試験体は，既往の実験 <sup>2)</sup>No.1～3 および今回実施した No.4,5 であり，試験体の形

状および諸元を図 - 1 および表 - 1 に示す。これらは，鉄道ラーメン橋台の柱部材の約 50%縮小モデルである。使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表 - 1，表 - 2 に示す。用いた鉄筋の種類は軸方向鉄筋 D16 が SD295A，帯鉄筋 D10 が SD345，帯鉄筋 D6 が SD295A である。また，粗骨材には最大寸法 13mm の骨材を用いている。試験体の断面は 500mm × 500mm（有効高さ 450mm）で，せん断スパンは 562.5mm である。実験のパラメータは引張鉄筋比，帯鉄筋比およびコンクリート強度とし，せん断スパン比は 1.25 で一定とし，計算上，曲げ破壊となるように計画した。なお，帯鉄筋にはすべて溶接閉鎖型の帯鉄筋を用いた。帯鉄筋比，引張鉄筋比は既に設計が完了しているラーメン橋台柱の配筋調査結果から決定した。また，せん断スパン比の小さい柱部材の場合には，文献 2) で記述した No.1 試験体に見られる軸方向鉄筋に沿った付着ひび割れが発生し水平荷重が大きく低下する場合があり，変形性能を評価できないため，付着ひび割れの拡大を防止する目的で，No.4，5 の試験体の配筋は No.1 試験体と同様とし，次の

\*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (正会員)

\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工修 (正会員)

\*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工修 (正会員)

\*4 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工博 (正会員)

表 - 1 試験体諸元

|      | 断面形状 | 引張鉄筋    | 側方鉄筋    | 帯鉄筋<br>鉄筋径@間隔<br>(mm) × 組数 | 引張<br>鉄筋比<br>$p_t$ (%) | 帯<br>鉄筋比<br>$p_w$ (%) | コンクリート圧縮強度                                |                                      |                                           |
|------|------|---------|---------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
|      |      |         |         |                            |                        |                       | 下スタブ<br>$f'_{cf}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 柱部<br>$f'_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 上スタブ<br>$f'_{cf}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
| No.1 |      | D16-9 本 | D16-7 本 | D10@45 × 2 組               | 0.794                  | 1.268                 | 38.3                                      | 28.1                                 | 28.1                                      |
| No.2 |      | D16-5 本 | D16-3 本 | D10@45 × 2 組               | 0.441                  | 1.268                 | 41.9                                      | 32.3                                 | 32.3                                      |
| No.3 |      | D16-5 本 | D16-3 本 | D6@45 × 2 組                | 0.441                  | 0.563                 | 43.0                                      | 33.1                                 | 33.1                                      |
| No.4 |      | D16-9 本 | D16-7 本 | D10@45 × 2 組               | 0.794                  | 1.268                 | 23.5                                      | 59.3                                 | 28.6                                      |
| No.5 |      | D16-9 本 | D16-7 本 | D10@45 × 2 組               | 0.794                  | 1.268                 | 23.6                                      | 26.1                                 | 28.4                                      |

注) 引張鉄筋比  $p_t$ :  $p_t = A_t / (b \cdot d)$   $A_t$ : 引張鉄筋の断面積  $b$ : 部材幅  $d$ : 有効高さ  
 帯鉄筋比  $p_w$ :  $p_w = A_w / (b \cdot S_s)$   $A_w$ : 区間  $S_s$  における帯鉄筋断面積  $b$ : 部材幅  $S_s$ : 帯鉄筋の配置間隔  
 断面形状: ~ は図 - 1 参照

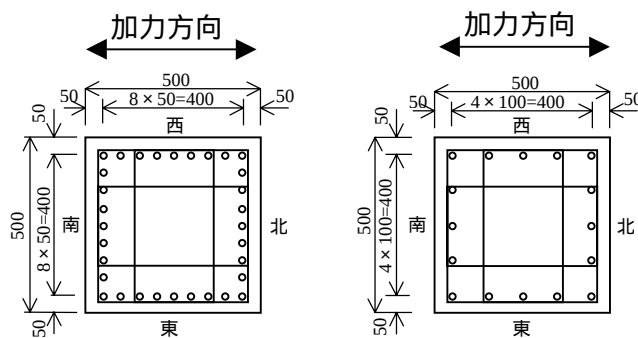


図 - 1 試験体の断面形状

対策を行い実験を行った。

高強度コンクリートの適用 (No.4 試験体)

図 - 2 に示すようなプレート (40mm × 40mm,  $t=9$ mm) を試験体柱スパン中央付近の全ての軸方向鉄筋に取り付け軸方向鉄筋がずれないようにする方法 (No.5 試験体)



図 - 2 プレート取付状況

## 2.2 荷重方法および計測項目

荷重は 5 試験体とも逆対称曲げモーメントが作用するように行った。図 - 3 に荷重装置の概要図を示す。鉛直軸力および水平力は、試験体上部に取り付けた L 型フレームを介して加力し

表 - 2 鉄筋の材料試験結果

| 鉄筋径 | 引張降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| D16 | 354.4<br>(365.3)               | 184.6<br>(193.3)               |
| D10 | 389.0<br>(402.7)               | 187.7<br>(190.7)               |
| D6  | 353.4                          | 195.0                          |

注) ( ) 内は No.4,5 の材料試験結果

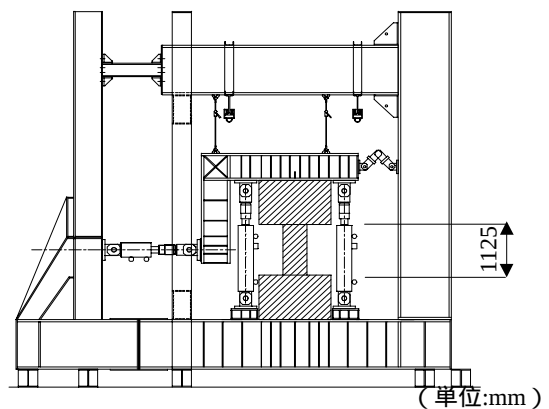


図 - 3 荷重装置の概要図

た。加力に際しては、逆対称曲げモーメントを受けるように試験体の左右に設置したジャッキ 2 機で、上下スタブを平行に保ちながら、柱高さの 1/2 に設置したジャッキで水平力を荷重した。鉛直軸力は、900kN (3.6N/mm<sup>2</sup>) の一定とした。水平方向には、予備荷重を行った後、引張鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の水平変位を降伏変位  $\delta_y$  とし、これを基準として  $\delta_y$  の整数倍で 3 回ずつ正負繰返し荷重を行った。荷重の終了は水平荷重が低下し、降伏荷重の 80%を

下回ること目途とした。計測項目は、試験体の水平変位、鉛直変位、軸方向鉄筋、帯鉄筋のひずみおよびひび割れ状況である。

### 3. 実験結果

以降に、No.4,5 試験体の破壊状況を説明する。加力方向は、南面側から北面側に向けての载荷を正载荷としている。また、観察面は東面としている。なお、No.1～3 試験体の破壊性状については、文献 2) に詳細を記述している。なお、図 4 (b) に示す No.4 試験体の正側 12mm 程度までの包絡線が大きくなっているのは、鉄筋降伏時点が明確とならず、過载荷となったためである。よって、No.4 の Y 点の水平荷重と水平変位は計測していた軸方向鉄筋のひずみデータから判断し決定している。M 点はこの過载荷点の水平荷重を以降の繰返し载荷により上回らないため、この点を水平荷重とした。水平変位は荷重の繰返しにより水平荷重が低下する点としている。

#### 3.1 No.4 試験体の破壊性状

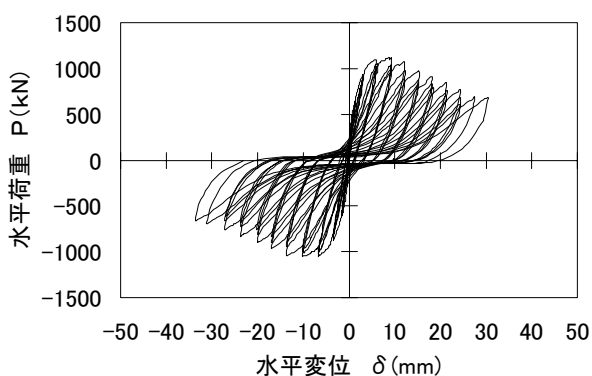
まず、北面において柱上端基部に曲げひび割れが発生し、柱下端基部に貼付けた軸方向鉄筋のひずみが 1000  $\mu$  時に柱上下端基部付近にせん断ひび割れが発生した。軸方向鉄筋降伏時 (1  $\delta y$ ) に東面全体にせん断ひび割れが発生した。最大荷重時の 3  $\delta y$  までせん断ひび割れが進展し、柱上端基部付近においてコンクリートの圧壊、はく落が生じ水平荷重が低下し始めた。7  $\delta y$  まで圧壊が進展し、8  $\delta y$  時以降、軸方向鉄筋が座屈し、順次破断により水平荷重が大幅に低下した。帯鉄筋は降伏しなかった。したがって、曲げ破壊したものと考えられる。

#### 3.2 No.5 試験体の破壊性状

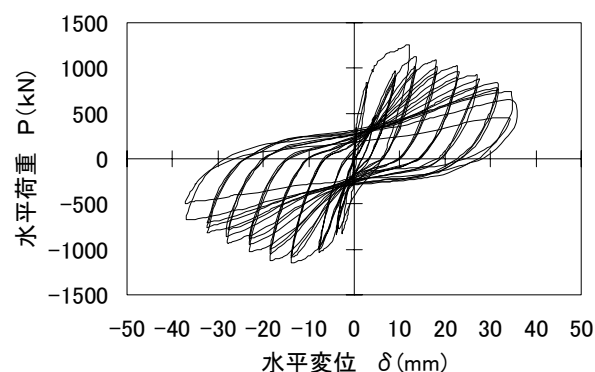
まず、南面において柱下端基部に曲げひび割れが発生し、柱下端基部に貼付けた軸方向鉄筋のひずみが 1000  $\mu$  時にせん断ひび割れが発生した。軸方向鉄筋降伏時 (1  $\delta y$ ) に東面全体にせん断ひび割れが発生すると共に、柱上下端基部付近においてコンクリートの圧壊が生じた。3  $\delta y$  時にせん断ひび割れに沿ったかぶりコンクリ

ートのはく落し、柱上端基部付近に軸方向鉄筋に沿ったひび割れが発生し、これに伴い水平荷重が低下し始めた。

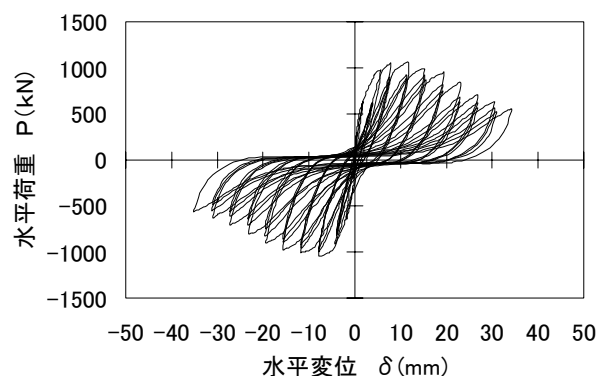
5  $\delta y$  以降、かぶりコンクリートのはく落範囲が広がり、北西面に軸方向鉄筋に沿った付着ひび割れが発生した。8  $\delta y$  時に柱東面全体のコンクリートが浮上り、一部のはく落した。なお、载荷終了時には軸方向鉄筋の座屈、帯鉄筋の降伏は確認できなかった。したがって、No.5 はせん断ひび割れおよび付着ひび割れの拡大により破壊したものと考えられる。



(a) No.1



(b) No.4



(c) No.5

図 - 4 荷重 - 変位関係

### 3.3 試験体の比較

図 - 4 に No.1,4,5 の荷重 - 変位関係を示す。No.1 と No.4 を比較すると図 - 4 (a), (b) より、荷重 - 変位関係の履歴ループは No.1 がスリップ型であるのに対し、No.4 は紡錘型となっており、また、図 - 5 に示すエネルギー吸収は No.1 よりも No.4 が大きくなっている。したがって、高強度コンクリートにより、付着ひび割れの拡大による変形性能の低下を防止する効果があったものと考えられる。図 - 4 (c) に示すプレートを取りつけた No.5 試験体は No.1 と比較して破壊性状、荷重 - 変位関係およびエネルギー吸収量に大きな差が見られない結果となった。したがって、部材のスパン中央にプレートを取付け、軸方向鉄筋のすべりを防止しても、付着ひび割れの拡大による変形性能の低下防止には効果がなかったと考えられる結果となった。これは、付着ひび割れが柱基部に発生し拡大しているため、柱中央付近にプレートを取付けた効果が小さかったためと考えられる。

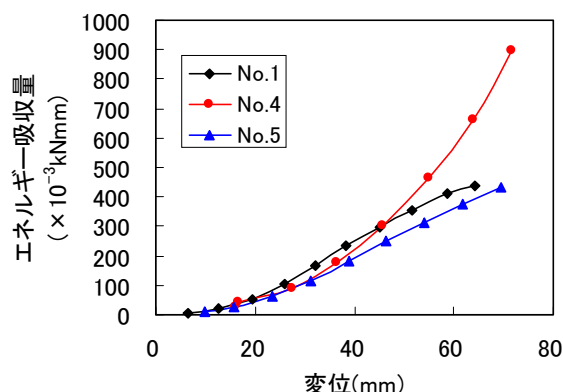


図 - 5 履歴エネルギー - 吸収の比較

### 4. 変形性能算定方法の検討

文献 3) には、曲げ破壊となる部材に適用できる変形性能算定方法が示されており、耐震標準にはこれをもととした変形性能算定方法が示されている。今回の実験で曲げ破壊型となった No.2,3,4 試験体について、文献 1), 3) に示される算定結果と、今回の実験結果とを比較することにより、せん断スパン比の小さい柱部材への適用性について検討した。なお、破壊形態の判定

は、式(1)に示す曲げせん断耐力比を用いて、1 を下回る場合には曲げ破壊、1 を上回る場合にはせん断破壊と判定される。

$$V_{mu} / V_{yd} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 $V_{mu}$ ：部材が曲げ耐力に達する時のせん断力(N)

$V_{yd}$ ：設計せん断耐力(N)

#### 4.1 耐震標準による算定方法

鉄道高架橋柱部材の変形性能算定方法は、せん断スパン比が 3 程度の実験をもとに精度の良い方法が提案されている<sup>3)</sup>。これをもとに文献 1), 3) に変形性能算定方法が記述されており、梁・柱等の棒部材を線材にモデル化するときの荷重と変位の関係を図 - 6 に示すような復元力モデルにより表すこととしている。

実験および文献 1), 3) に基づき算出した Y 点、M 点、N 点の水平荷重、水平変位を表 - 3 に示す。なお、実験による Y 点は鉄筋が降伏した時点の水平荷重と水平変位を、M 点の荷重は最大水平荷重を、変位は繰返し载荷により荷重の低下が顕著とならない水平変位を、N 点は最大水平荷重以降、降伏時の水平荷重を維持できる点の水平荷重と水平変位としている。なお、水平変位は上下のスタブ間の相対変位から算出している。

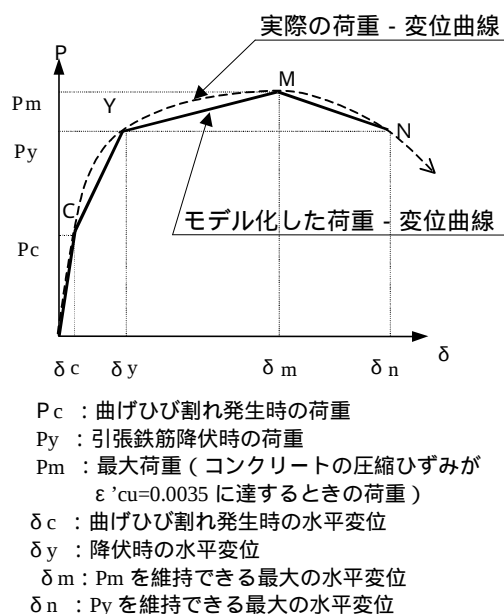


図 - 6 荷重と変位の関係

表 - 3 実験値と計算値の比較

|     |     |    | 実験値                  |                       | 計算値                  |                        |                        | 実験値 / 計算値                         |                                              |                                              |
|-----|-----|----|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|     |     |    | 水平荷重<br>Pexp<br>(kN) | 層間変位<br>δ exp<br>(mm) | 水平荷重<br>Pcal<br>(kN) | 層間変位<br>δ cal1<br>(mm) | 層間変位<br>δ cal2<br>(mm) | 水平荷重<br>$\frac{P_{exp}}{P_{cal}}$ | 層間変位<br>$\frac{\delta_{exp}}{\delta_{cal1}}$ | 層間変位<br>$\frac{\delta_{exp}}{\delta_{cal2}}$ |
| № 2 | Y 点 | 正側 | 656.2                | 2.05                  | 599.6                | 1.17                   | 1.17                   | 1.09                              | 1.75                                         | 1.75                                         |
|     |     | 負側 | -645.3               | -2.11                 |                      |                        |                        | 1.08                              | 1.80                                         | 1.80                                         |
|     | M 点 | 正側 | 811.4                | 16.46                 | 713.2                | 17.69                  | 23.31                  | 1.13                              | 0.91                                         | 0.70                                         |
|     |     | 負側 | -801.3               | -17.09                |                      |                        |                        | 1.12                              | 0.95                                         | 0.72                                         |
|     | N 点 | 正側 | 656.2                | 25.57                 | 599.6                | 22.67                  | 30.06                  | 1.09                              | 1.11                                         | 0.84                                         |
|     |     | 負側 | -645.3               | -26.31                |                      |                        |                        | 1.08                              | 1.14                                         | 0.87                                         |
| № 3 | Y 点 | 正側 | 679.5                | 2.38                  | 601.4                | 1.15                   | 1.15                   | 1.12                              | 2.07                                         | 2.07                                         |
|     |     | 負側 | -639.5               | -2.37                 |                      |                        |                        | 1.06                              | 2.06                                         | 2.06                                         |
|     | M 点 | 正側 | 789.0                | 14.33                 | 716.4                | 10.37                  | 13.95                  | 1.10                              | 1.33                                         | 1.01                                         |
|     |     | 負側 | -768.0               | -14.21                |                      |                        |                        | 1.07                              | 1.32                                         | 1.01                                         |
|     | N 点 | 正側 | 679.5                | 19.91                 | 601.4                | 15.58                  | 20.74                  | 1.12                              | 1.26                                         | 0.95                                         |
|     |     | 負側 | -639.5               | -19.43                |                      |                        |                        | 1.06                              | 1.23                                         | 0.93                                         |
| № 4 | Y 点 | 正側 | 964.3                | 3.87                  | 944.2                | 1.42                   | 1.42                   | 1.02                              | 2.72                                         | 2.72                                         |
|     |     | 負側 | -809.6               | -3.83                 |                      |                        |                        | 0.86                              | 2.69                                         | 2.69                                         |
|     | M 点 | 正側 | 1251.6               | 18.08                 | 1164.3               | 18.96                  | 24.87                  | 0.97                              | 0.93                                         | 0.72                                         |
|     |     | 負側 | -1126.0              | -18.52                |                      |                        |                        | 0.97                              | 0.95                                         | 0.74                                         |
|     | N 点 | 正側 | 1016.2               | 23.04                 | 944.2                | 24.65                  | 32.65                  | 1.08                              | 0.91                                         | 0.70                                         |
|     |     | 負側 | -809.6               | -32.59                |                      |                        |                        | 0.86                              | 1.39                                         | 0.98                                         |

注) Pcal : 図 - 6 に示す Py, Pm 点の計算値, δ cal1 : 耐震標準により求めた層間変位 (塑性ヒンジ長 = 1 D)

δ cal2 : 文献 3) により求めた層間変位 (塑性ヒンジ長 = Mattock 式), D : 部材高さ

表 - 4 降伏時 (Y 点) 水平変位量の実験値と計算値の関係

|      |    | 実験値   | 計算値  |      |       |        | 降伏変位                            |
|------|----|-------|------|------|-------|--------|---------------------------------|
|      |    | 降伏変位  | 降伏変位 | 曲げ変位 | せん断変位 | 鉄筋拔出変位 | $\frac{\text{実験値}}{\text{計算値}}$ |
| No.2 | 正側 | 2.05  | 1.90 | 0.59 | 0.73  | 0.58   | 1.07                            |
|      | 負側 | -2.11 |      |      |       |        | 1.11                            |
| No.3 | 正側 | 2.38  | 2.14 | 0.58 | 0.99  | 0.57   | 1.11                            |
|      | 負側 | -2.37 |      |      |       |        | 1.11                            |
| No.4 | 正側 | 3.87  | 2.20 | 0.59 | 0.78  | 0.83   | 1.76                            |
|      | 負側 | -3.83 |      |      |       |        | 1.74                            |

注) 計算値の降伏変位 = 曲げ変位 + せん断変位 + 鉄筋拔出変位

計算値の曲げ変位, 鉄筋拔出変位は耐震標準により算出

計算値のせん断変位は学会示方書により算出

評価を行った。その結果を表 -

4 に示すが, 実験値が計算値の 1.07 ~ 1.76 倍となり, No.2,3 はほぼ妥当な評価となったものの, No.4 は若干過小評価となる結果となった。これは, 高強度コンクリートを用いたことによる影響

であると考えられる。

#### 4.3 M 点について

水平荷重は, 各試験体とも実験値が計算値の 0.97 ~ 1.13 倍であり概ね一致する結果となった。

水平変位については, 文献 1), 3) で等価塑性ヒンジ長の設定方法が異なっており, この影響で水平変位の計算値が大きく異なるため, 等価塑性ヒンジ長について検証を行った。等価塑性ヒンジ長の算定は, 文献 3) では式(2)を用いている。

$$L_p = 0.5d + 0.05a \quad (2)$$

ここに,  $L_p$  : 塑性ヒンジ長(mm)

$d$  : 断面有効高さ(mm)

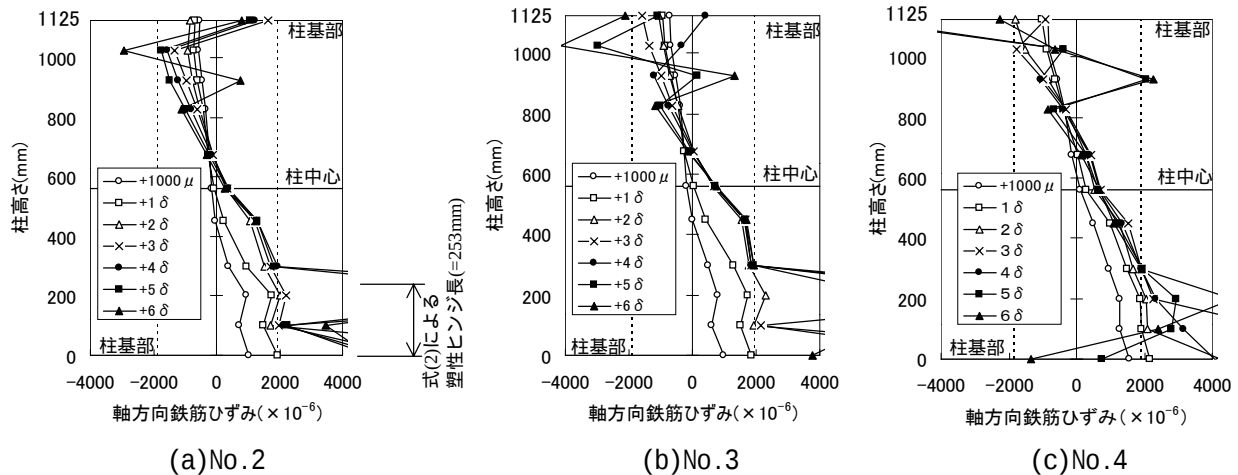
$a$  : せん断スパン(mm)

一方, せん断スパン比の比較的大きい領域では, 等価塑性ヒンジ長の大小が変位の計算結果に大

#### 4.2 Y 点について

各試験体とも水平荷重については, 実験値が計算値の 0.9 ~ 1.1 倍程度であり, 概ね一致する結果となった。

水平変位については, 各試験体とも実験値が計算値の 1.75 ~ 2.72 倍程度とかなり過小評価となった。これは, 計算値が曲げ変形と軸方向鉄筋拔出しによる変形のみを考慮し, せん断変形は考慮されていないのに対し, 実験値は, 降伏時にせん断ひび割れが発達したため, せん断変形の影響が大きいと思われる。そこで, 土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編](以下, 学会示方書という)<sup>4)</sup>に示されるせん断変形算定式によりせん断変形の算定を行い, これを耐震標準による Y 点の水平変位に加えて



注) ..... は軸方向鉄筋の降伏ひずみを示す

図 - 7 軸方向鉄筋のひずみ分布

きく影響しないため<sup>3)</sup>,耐震標準においては等価塑性ヒンジ長を簡易的に  $L_p=D$  ( $D$ :部材高さ)としている。実験により計測された軸方向鉄筋のひずみ分布を図-7に示した。柱上下端の基部より100mm毎にひずみを測定したが,下端基部に着目すると,基部より100mm及び200mmの高さにおけるひずみの測定値はいずれも降伏ひずみを大きく超えているが,300mmの高さではほぼ降伏ひずみに達する程度にとどまっている。従って,軸方向鉄筋のひずみ分布から想定される塑性ヒンジ長は式(2)より求まる  $L_p=253\text{mm}$  と同程度と考えられ, $D=500\text{mm}$  よりもかなり小さくなっていることが分かる。一方, $M$ 点変位の算定結果は, $\delta_{\text{exp}}/\delta_{\text{cal1}}$  が  $0.91 \sim 1.33$ ,  $\delta_{\text{exp}}/\delta_{\text{cal2}}$  が  $0.70 \sim 1.01$  となっており,式(2)を用い算定した  $\delta_{\text{cal2}}$  は,やや過大評価となっている。従って,せん断スパン比が比較的大きい場合よりも塑性ヒンジ部の回転性能が低下していることが分かる。ただし, $\delta_{\text{cal1}}$  は実験値とほぼ一致しており,耐震標準の方法を用いることで概ね評価できるものと考えられる。

#### 4.4 N点について

N点についてはM点と同様の傾向を示していた。

#### 5. まとめ

RC ラーメン橋台柱をモデル化した試験体を

用いた実験結果より変形性能評価について検討を行った結果,以下のことが明らかとなった。

- (1) 降伏変位には,せん断変形の影響が大きく,計算上無視できないと考えられる。
- (2) 高強度コンクリートを用いることで,付着ひび割れの拡大を防止し,曲げ破壊モードとすることができ,変形性能が向上した。
- (3) 曲げ破壊となる場合は,耐震標準の変形性能算定方法を用いると  $M$ ,  $N$  点変位は,塑性ヒンジ回転角および塑性ヒンジ長を妥当に評価できないが,トータルの変位は実験値とほぼ一致し,耐震標準により概ね評価できるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説-耐震設計-,丸善,1999.10
- 2) 楠本秀樹ほか:せん断スパン比の小さい鉄道高架柱の変形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.25, No.2, pp.1249-1254, 2003.7
- 3) 渡辺忠朋ほか:鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定方法,土木学会論文集, No.683, V-52, pp.31-45, 2001.8
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編], 2002