

高強度材料を用いたRC柱部材の変形性能

— 鉄道構造物の設計基準に対する適用の検討 —

黒岩 俊之* 岡本 大* 宮城 敏明*

要約： 本研究では高強度材料を鉄道構造物等に適用することにより、経済性・施工性の向上および構造物の高品質化を図ることを目的としている。高強度材料を RC 部材に適用するためには、耐力や変形性能などの基本的な部材特性を明らかにし、設計に反映させることが必要である。そこで、高強度材料を用いた柱部材の変形性能を評価することを目的として交番載荷試験を行った。

本実験結果を基に、現行の鉄道設計基準への適用性について検討した結果、高強度材料を用いた部材の荷重—変位関係は、普通強度の材料を用いた部材と同様な設計式によって概ね評価できることが明らかとなった。

キーワード： 高強度鉄筋、高強度コンクリート、柱部材、変形性能、耐震性能

目次： 1.はじめに 3.実験結果および考察
2.実験の概要 4.まとめ

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、設計想定地震動の増大に伴った鉄筋の太径化、鉄筋本数の増加による過密配筋は、組立作業の複雑化による施工性の低下のみならず、コンクリートの充填性を損なう原因として懸念される。その対策として、あるいは構造物の高耐久化などを目的として、高強度材料を RC 部材に適用するための研究開発が行われてきている。

これまで、高強度材料を用いた RC 部材に関する研究は、建築分野の高軸力が作用する高層建物の柱部材を対象として進められてきた。土木分野における高強度材料の適用事例としては、実験的な検討に基づき高強度鉄筋を帯鉄筋に採用し、帯鉄筋量を減少することで施工性を改善した例などが報告されてきているが¹⁾²⁾、高強度鉄筋を軸方向鉄筋に、あるいは高強度コンクリートを、RC 部材に一般的に適用するまでには至っていない。

本研究では高強度材料を鉄道構造物に適用することにより、経済性・施工性の向上および構造物の高品質化を図ることを目的としている。高強度材料を RC 部材に適用するためには、耐力や変形性能などの基本的な部材特性を明らかにし、設計に反映させることが必

要である。そこで、高強度材料を用いた柱部材の変形性能を評価することを目的として交番載荷試験を行った。

本論文では、交番載荷実験より得られた荷重—変位関係の包絡線および履歴曲線の形状をもとに、高強度材料を用いた柱部材の変形性能と現行の鉄道設計式³⁾⁴⁾の適用性について述べる。

2. 実験の概要

2.1 試験体の形状および諸元

試験体の諸元を、表1および図1に示す。

実験のパラメータを帯鉄筋の強度、軸方向鉄筋の強度、コンクリート強度として、No.1~No.4 の合計4体の試験体について実験を行った。試験体の外形寸法はすべての試験体で同一であり、幅 B×せい H=320×320mm の矩形断面、せん断スパン $L_a=1200\text{mm}$ とした。なお、No.1 は、他の試験体と使用した載荷装置が異なるためスタブ形状が異なっているが、せん断スパン、試験体断面などの主要な寸法は他の試験体と同一となっている。

試験体の配筋は、比較用の普通強度の鉄筋を用いた

表1 試験体の諸元

| 試験体 | 軸方向鉄筋 | 本数 | p_s (%) | せん断補強鉄筋 | 間隔 (mm) | p_w (%) | $V_u \cdot L_a / M_u$ |
|-------|------------|-----|-----------|-----------|---------|-----------|-----------------------|
| No. 1 | SD295A-D13 | 20本 | 2.68 | SD295A-D6 | etc45 | 0.44 | 2.33 |
| No. 2 | SD295A-D13 | 20本 | 2.68 | USD785-D6 | etc120 | 0.16 | 2.32 |
| No. 3 | USD685-D10 | 16本 | 1.20 | USD785-D6 | etc120 | 0.16 | 2.06 |
| No. 4 | USD685-D10 | 16本 | 1.20 | USD785-D6 | etc120 | 0.16 | 2.25 |

p_s ：軸方向鉄筋比、 p_w ：帯鉄筋比
 V_u ：せん断耐力、 L_a ：せん断スパン長、 M_u ：曲げ耐力

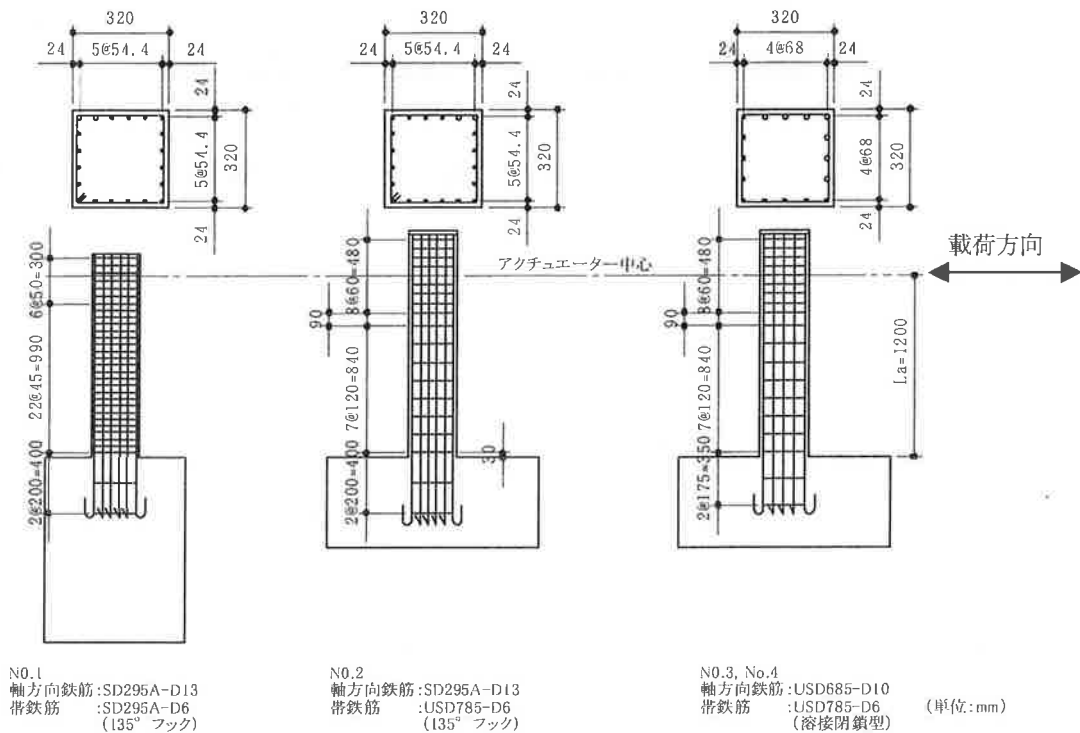


図1 試験体の配筋

表2 鉄筋の材料試験結果

| 試験体 | 種類 | 呼び名 | 降伏強度 f_{sv} (N/mm ²) | 弾性係数 E_s (N/mm ²) | 引張強度 f_{tm} (N/mm ²) |
|------|--------|-----|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| No.1 | SD295A | D13 | 355 | 187000 | 515 |
| | SD295A | D6 | 444 | 192000 | 576 |
| No.2 | SD295A | D13 | 368 | 195000 | 553 |
| | USD785 | D6 | 855 | 205000 | 861 |
| No.3 | USD685 | D10 | 711 | 193000 | 891 |
| | USD785 | D6 | 1070 | 186000 | 1232 |
| No.4 | USD685 | D10 | 711 | 193000 | 891 |
| | USD785 | D6 | 1070 | 186000 | 1232 |

表3 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 部位 | 呼び名 | 圧縮強度 f'_c (N/mm ²) | 弾性係数 E_c (N/mm ²) |
|------|-----|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| No.1 | 柱 | 18-15-10H | 28.3 | 20400 |
| | スタブ | 21-15-20H | 33.9 | - |
| No.2 | 柱 | 18-15-10H | 17.8 | 20200 |
| | スタブ | 21-15-20H | 32.8 | - |
| No.3 | 柱 | 18-15-10H | 25.5 | 28700 |
| | スタブ | 21-15-20H | 23.2 | - |
| No.4 | 柱 | 目標強度80N/mm ² | 81.1 | 37000 |
| | スタブ | 21-15-20H | 23.0 | - |

No.1 と帯鉄筋のみに高強度鉄筋を用いた No.2, および帯鉄筋と軸方向鉄筋の両方に高強度鉄筋を用いた No.3, No.4 において、曲げ耐力および曲げ・せん断耐力比ができるだけ等しくなるように決定した。No.1~No.3 は普通強度のコンクリート (17.8~28.3 N/mm²) を用い、No.4 は、目標強度を 80N/mm² としたコンクリートを用いた。また、帯鉄筋の定着方法は、No.1 と No.2 は 135° フックを使用し、No.3 と No.4 は溶接閉鎖型とした。なお、試験体設計時の耐力計算においては、鉄筋強度

には規格値を、コンクリート強度には予測値として、No.1~No.3 に関しては 24N/mm² を、No.4 には 80N/mm² を用いた。

帯鉄筋に高強度鉄筋を用いることで普通強度のものをういた場合に比べて、帯鉄筋比は 0.44% から 0.16% に減少している。また、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用することで、軸方向鉄筋比は 2.68% から 1.20% に減少している。

試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果をそれぞれ表 2, 表 3 に示す。コンクリートの材料試験値は、封かん養生したテストピースの載荷試験時のデータである。

2.2 載荷方法

載荷は、スタブを反力床に固定して試験体上部に水平力を加えるカンチレバー式とし、軸力は載荷していない。

載荷サイクルは、軸方向鉄筋に SD295A を用いた No.1, No.2 に関しては、0.5Py (Py: 降伏荷重の計算値), 0.75Py を正負各 1 回ずつ繰り返し、その後 1δy (δy: 降伏変位), 2δy, 3δy... と降伏変位の整数倍を各 3 回ずつ繰り返し漸増定変位正負交番載荷とした。軸方向鉄筋に USD685 を用いた No.3, No.4 に関しては、降伏変位が SD295A を用いた試験体に比べ 2 倍程度になることが予測されたため、降伏以後の繰り返しを 0.5δy ピッチとして同レベルの変位における繰り返し回

表4 試験体耐力の実験値と計算値の比較

| 試験体 | 降伏荷重 | | | 最大荷重 | | |
|------|------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| | Pycal (kN) | Pyexp (kN) | exp/cal | Pucal (kN) | Puexp (kN) | exp/cal |
| No.1 | 77.50 | 88.50 | 1.14 | 101.50 | 99.63 | 0.98 |
| No.2 | 77.70 | 88.25 | 1.14 | 100.30 | 106.75 | 1.06 |
| No.3 | 72.60 | 84.95 | 1.17 | 88.10 | 96.55 | 1.10 |
| No.4 | 78.10 | 85.40 | 1.09 | 96.90 | 98.85 | 1.02 |

Pycal: 降伏荷重の計算値 Pucal: 最大荷重の計算値
 Pyexp: 降伏荷重の実験値 Puexp: 最大荷重の実験値

数ができるだけ等しくなるようにして载荷を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ耐力

各試験体の終局状態に大きな違いは無く、柱脚部に形成された塑性ヒンジにおいてかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋の座屈、破断を伴い耐力低下した。その破壊経過から曲げ破壊と考えられる。

各試験体の降伏耐力および最大耐力の実験値と計算値の比較を表4に示す。曲げ耐力の計算はファイバーモデルを用いて、以下の条件で行った。

- (1) 降伏耐力は最外縁の軸方向鉄筋が材料試験における降伏ひずみに達した時点とする。
- (2) 鉄筋の降伏強度、弾性係数には、表2に示す材料試験結果を使用する。
- (3) コンクリート強度には、表3に示す载荷時点における圧縮強度を使用する。
- (4) コンクリートの終局ひずみは、No.1~No.3については $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ 、高強度コンクリートを用いたNo.4に関しては「コンクリート標準示方書・設計編」⁴⁾に準じて0.0025として計算する。

表4に示すように、降伏および最大耐力の実験値と計算値の比は0.98~1.17であり、高強度鉄筋を使用したNo.2およびNo.3に関しても通常のRC部材と同様な精度で計算されている。また、高強度コンクリートを使用したNo.4に関しても他の試験体と同様な精度で耐力を算定できている。

3.2 荷重-変位関係の計算

各試験体の荷重-変位履歴曲線の実験値と計算値を図2~図5に合わせて示す。包絡線の計算値は「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」²⁾(以後、耐震標準と記す。)にもとづいてM- θ 関係を算定し、これをP- δ 関係に変換したものである。計算値の各折れ点の算定において、高強度鉄筋、および高強度コンクリートを使用することで耐震標準に記される式に関して特別に考慮した点について以下に記す。

(1) 第1折れ点(C点)

C点は曲げひび割れ発生点であり、曲げモーメントは

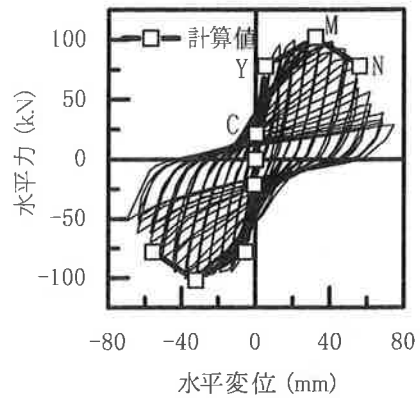


図2 荷重-変位曲線 (No.1)

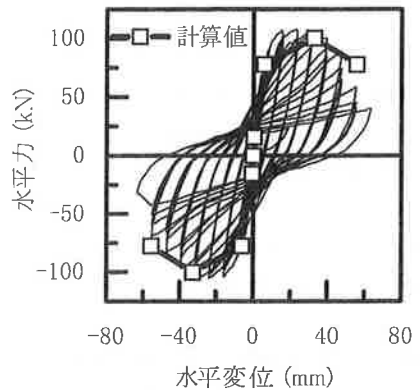


図3 荷重-変位曲線 (No.2)

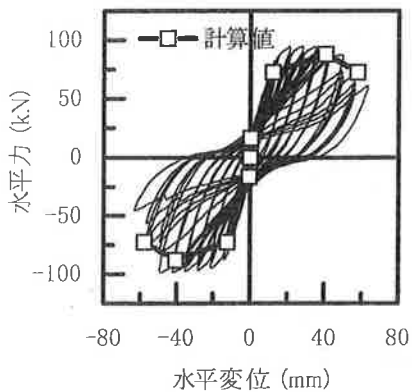


図4 荷重-変位曲線 (No.3)

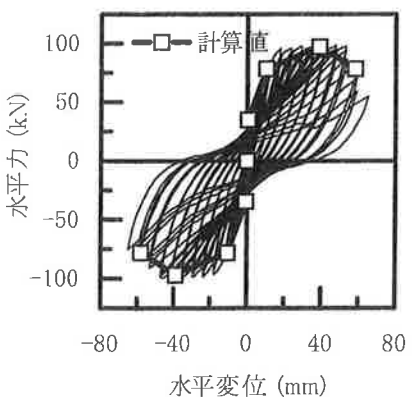


図5 荷重-変位曲線 (No.4)

コンクリートの縁引張応力が「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」³⁾（以後、RC 標準と記す。）に示す部材寸法を考慮した設計曲げ強度に達する時として定義されている。RC 標準では設計曲げ強度の算定式の適用範囲として、 f'_c が 20~50N/mm² のコンクリートとされているが、本検討では $f'_c \doteq 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた No.4 に関しても、RC 標準に示される式を適用した。

(2) 第2折れ点 (Y 点)

Y 点は引張鉄筋が降伏する点である。Y 点を算定するにあたっては、耐震標準に示される考え方をそのまま準用した。

(3) 第3折れ点 (M 点)

M 点は最大水平荷重をほぼ維持できる最大変位点として定義され、M 点の部材角は(1)式により求められる。

$$\theta_m = \theta_{mi} + \theta_{pm} + \theta_{mb} \quad (1)$$

ここに、

θ_m : M 点における部材角

θ_{mi} : M 点における軸方向鉄筋の抜け出しによる部材角

θ_{pm} : M 点における塑性ヒンジ部の回転角

θ_{mb} : M 点における塑性ヒンジ部以外の回転角

このうち、 θ_{pm} は(2)式により算定される。

$$\theta_{pm} = \frac{0.021k_{w0} \cdot p_w + 0.013}{0.79p_t + 0.153} \quad (2)$$

ここに、

k_{w0} : 帯鉄筋強度を考慮する係数

p_w : 帯鉄筋比(%)

p_t : 引張鉄筋比(%)

本検討では、高強度帯鉄筋を用いた No.2~No.4 試験体について、 k_{w0} の値として帯筋の降伏強度の規格値 785 N/mm² を 345N/mm² で除した値 2.28 を用いた。これは、RC 標準に示されている SD295, SD390 の k_{w0} の値が、SD345 の規格値を基準として決定されており、SD295, SD390 の場合は各々の規格値を 345N/mm² で除した値により定められていることに基づいている。

また、 $f'_c \doteq 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートを使用している No.4 に関しては、M 点の曲げモーメントを算出する際にコンクリートの終局ひずみ ϵ'_{cu} の値を、「コンクリート標準示方書・設計編」に準じて 0.0025 とした。

(4) 第4折れ点 (N 点)

N 点は、降伏荷重を維持できる最大変位として定義される。N 点を算定するにあたっては、耐震標準に示される式をそのまま準用した。

表5 荷重-変位関係の実験値と計算値の比較

| 試験体 | M点 | | | N点 | | |
|------|------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| | Pmcal (kN) | Pmexp (kN) | exp/cal | Pncal (kN) | Pnexp (kN) | exp/cal |
| No.1 | 101.80 | 97.65 | 0.96 | 78.12 | 78.14 | 1.00 |
| No.2 | 100.40 | 106.80 | 1.06 | 77.70 | 58.50 | 0.75 |
| No.3 | 88.01 | 92.80 | 1.05 | 72.71 | 70.60 | 0.97 |
| No.4 | 96.95 | 97.50 | 1.01 | 78.31 | 80.80 | 1.03 |

Pmcal: M点荷重の実験値 Pncal: N点荷重の実験値
Pmexp: M点荷重の計算値 Pnexp: N点荷重の計算値

3.3 荷重-変位関係の履歴曲線

図2~図5より、いずれの試験体においても計算値と実験値は概ね整合している。表5に荷重-変位関係の計算値と実験値の比較を示す。

帯鉄筋にのみ高強度鉄筋を使用した No.2 と No.1 とを比較すると、その履歴曲線は、履歴面積の大きな安定したループを描き、同様な破壊性状を示した。ただし、表5に示すように No.2 の場合には、最大耐力点以後の負勾配域における荷重の低下が No.1 に比べて大きく、計算値 (77.70kN) に対しても危険側の評価 (exp/cal=0.75) となっている。この原因は、No.2 の帯鉄筋は柱隅角部において 135° フックによりコアコンクリートに定着されており、軸方向鉄筋の座屈開始後に塑性ヒンジ区間の帯鉄筋のフックが抜け出し、帯鉄筋による拘束が失われたためである。帯鉄筋を高強度化して帯鉄筋量を減じた場合、加工形状を溶接閉鎖型とするなどの対策が必要と考えられる。

軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた No.3 は、普通強度鉄筋を用いた No.1, No.2 に比べて残留変位が小さいために履歴ループの囲む面積が小さくなっている。これは軸方向鉄筋の違いによるものといえる。また、帯鉄筋を溶接閉鎖型とした No.3 は、No.2 に比べて最大耐力以後の耐力低下が緩やかで、計算値と良い整合性を示した。これは、帯鉄筋を溶接閉鎖型とすることにより、軸方向鉄筋の座屈に対する拘束が高められた効果と考えられる。

No.4 試験体は高強度コンクリートと高強度鉄筋を併用した試験体であり、No.3 試験体と同様な履歴性状を示している。

また、各試験体の降伏変位を比較すると、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用した No.3, No.4 は、普通鉄筋を用いた No.1, No.2 に比べて径および本数を減じたためにひび割れ発生後の剛性が小さくなること、高強度鉄筋の降伏ひずみ (3680 μ) が普通鉄筋の降伏ひずみ (1890 μ) の約2倍であることなどから、降伏変位が2倍程度になった。

3.4 残留変位

図6に各試験体における変位復元率（ピーク変位から

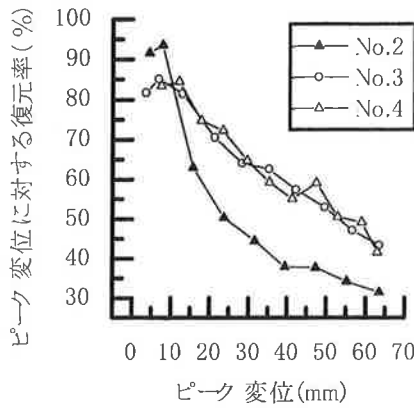


図6 各試験体の変位復元率の推移

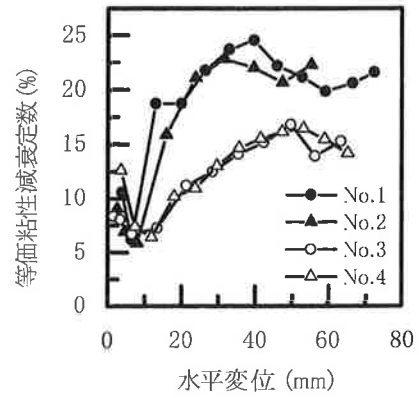


図9 等価粘性減衰定数

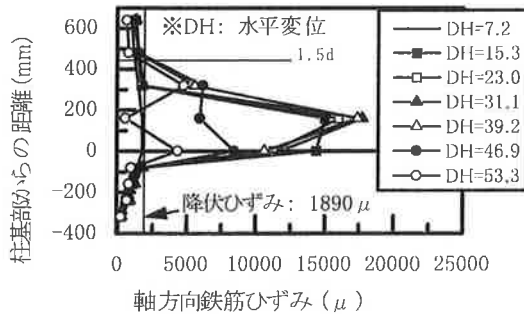


図7 軸方向鉄筋ひずみの縦断分布(No.2)

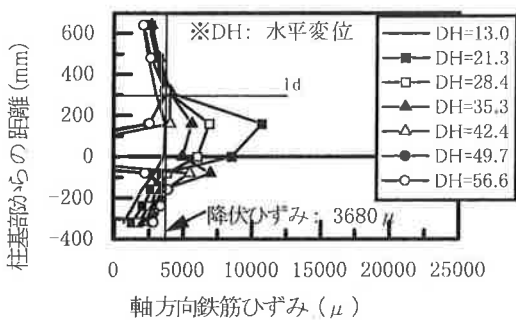


図8 軸方向鉄筋ひずみの縦断分布(No.3)

残留変位までの変形量をピーク変位で除した値)の推移を示す。軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた No.3, No.4 は、普通鉄筋を用いた No.2 に比べて残留変位が小さくなる傾向を示した。

図7 および図8 にそれぞれ試験体 No.2, No.3 の正側載荷時に引張を受ける軸方向鉄筋の降伏後の各ピークにおける柱高さ方向のひずみ分布を示す。

柱部分のひずみを見ると、軸方向鉄筋に USD685 を用いた No.3 は、水平変位 DH=21.3mm (降伏変位の 1.5 倍) 以降の降伏範囲が柱基部より約 1d (d: 断面の有効高さ) の区間となっている。これに対して、SD295A を

用いた No.2 は、水平変位 DH=39.2mm の時点で降伏範囲が 1.5d 程度であり、No.3 に比べて軸方向鉄筋の降伏範囲が広がっている。

一方、フーチング内部のひずみは、No.2 に比べて軸方向鉄筋量が少なく、鉄筋径の小さい影響で、No.3 の方が大きくなっており、塑性化している範囲も No.3 の方が広い。

以上のことから、No.2 と No.3 では試験体の水平変位のうち、柱部分の変形による成分と軸方向鉄筋のフーチングからの抜け出しによる成分の占める割合が異なり、No.3 は No.2 に比べて抜け出しによる変形の割合が大きいと考えられる。抜け出しによる変形はフーチング内の軸方向鉄筋のひずみ分布から求められる。高強度鉄筋は、普通強度鉄筋に比べて同一荷重レベルに載荷した後の残留ひずみが小さくなることに加え、フーチング内部の軸方向鉄筋は、柱部の塑性化区間に比べてひずみ値も小さいことから、除荷することによりひずみが復元する割合が大きいと考えられる。そのため、柱部分の軸方向鉄筋の塑性範囲が小さく、抜け出しの大きい No.3 の方が No.2 に比べて残留変位が小さくなったと考えられる。

3.5 等価粘性減衰定数

図9 に等価粘性減衰定数と水平変位の関係を示す。等価粘性減衰定数は、軸方向鉄筋に普通鉄筋を用いた場合には 20%程度であるのに対して、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用した場合には 15%程度であった。これは、高強度の軸方向鉄筋を用いた場合には残留変位が小さいことに起因している。

一方、試験体 No.3 と No.4 を比較すると、等価粘性減衰定数は同様な傾向を示しており、軸力を導入していない本実験では、高強度コンクリートを使用した影響は小さかった。

4. まとめ

高強度材料用いた RC 柱部材について交番載荷試験を

行い、今回実験を行ったパラメータの範囲において以下のことが確認できた。

- (1) 高強度材料を用いた部材の荷重—変位関係は、普通強度の材料を用いた部材と同様な設計式で概ね評価できた。
- (2) 高強度の軸方向鉄筋を用いたケースでは、普通強度の軸方向鉄筋を用いたケースに比べて残留変位が小さくなる傾向を示した。
- (3) 高強度の軸方向鉄筋を用いたケースでは、水平変位量のうちの抜け出しによる変位成分の占める割合

が普通強度の軸方向鉄筋を用いたケースに比べて大きくなった。

- (4) 高強度の軸方向鉄筋を用いたケースでは、等価粘性減衰定数が普通強度の軸方向鉄筋を用いた場合の75%程度となった。

謝 辞

本論文の内容は、(財)鉄道総合技術研究所と実施した共同研究の一部である。本研究を進めるにあたり、多大なご指導・ご協力を戴きました(財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 神川安之助・津吉毅：東北本線赤羽駅付近高架化工事の施工，日本鉄道施設協会誌，1998.11月号，pp.864~866，1998年11月
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999年10月
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，1999年10月
- 4) 土木学会編：平成8年制定・コンクリート標準示方書（設計編），1996年3月

DEFORMATION CAPACITY OF RC COLUMNS USING HIGH STRENGTH MATERIALS

T.Kuroiwa, M.Okamoto, and T.Miyagi

By using high strength concrete and/or reinforcement for the railway structures, it is possible to attempt economical efficiency and improvement of the workability and high quality of the structures.

In order to apply high strength materials to RC members, it is necessary to clarify the basic properties such as ultimate capacity of section and deformation performance, and reflect them to design. To investigate the ultimate capacity and deformation performance, therefore, cyclic load tests were conducted on RC column members using high strength materials.

This paper describes the applicability of ordinary design codes to RC members using high strength materials, based on load-displacement relationships obtained by cyclic load tests.