

## 薄肉鋼板と繊維シートを併用した耐震補強の鉄道鉄筋コン クリート構造物への適用に関する実験的検討

鬼頭直希<sup>1</sup>・中田裕喜<sup>1</sup>・岡本大<sup>1</sup>・室野剛隆<sup>2</sup>・本山紘希<sup>2</sup>・  
山川洋<sup>3</sup>・岡田繁雄<sup>3</sup>・山口啓三郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 （〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

<sup>2</sup>正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター （〒185-8540 東京都国分寺市光町  
2-8-38）

<sup>3</sup>非会員 株式会社サンヨーホーム（〒300-1234 茨城県牛久市中央5-18-1）

<sup>4</sup>非会員 （株）MG耐震技術研究所（〒103-0028 東京都中央区八重洲1-3-19）

### 1. はじめに

鉄道高架橋柱における既存鉄筋コンクリート（以下、RC）柱の代表的な耐震補強工法として、鋼板巻立て工法<sup>1)</sup>やRC巻立て工法、繊維シート<sup>2)</sup>による耐震補強が挙げられる。これらの工法は実績もあり、多く採用されている。しかし最近では、駅部において高架下が店舗や駅施設として利用されている場合や、地下鉄RC中柱のようにクレーンなどの大型の建設機械が使用できない場合など、施工上の制約が厳しいケースが散見される。また、今後想定される東海・東南海・南海地震などの大規模な地震に対しても構造物が崩壊しないことを目標に、さらに耐震補強を進めていくことが求められている。

これらの課題を解決するための補強工法として、薄肉鋼板、連続繊維シート、および無収縮モルタルで構成された耐震補強がある。本工法は個々の構成材料が軽量であるため、施工性に優れていることが特徴である。また、繊維シートと薄肉鋼板を併用することで、軸方向鉄筋の座屈から生じるかぶりコンクリートのはく落による繊維シートの破断を防止することができ、効率的な補強が可能となる。本工法は、建築構造物のRC部材に適用された実績がある。

本研究では、薄肉鋼板と連続繊維シートを併用した耐震補強の鉄道RC構造物への適用について実験的に検討した。対象構造物は、せん断破壊形態である鉄道RCラーメン高架橋柱と地下鉄RC中柱であり、静的正負交番載荷試験により、せん断補強およびじん性補強効果を確認した。

### 2. 実験概要

#### (1) 供試体（既設部）の諸元

表-1および図-1に、既設部の諸元を示す。供試体は全部で3体である。No.1, 2はRCラーメン高架橋柱を、No.3は地下鉄RC中柱を模擬したものであり、いずれも1/2程度の縮尺模型とした。表-2に使用した材料試験結果を示す。いずれも鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）<sup>3)</sup>（以下、RC標準）に従い、無補強の部材について部材が曲げ耐力に達するときのせん断力 $V_{mu}$ と、設計せん断耐力 $V_{yd}$ の比 $V_{mu}/V_{yd}$ が1.0より大きくなるように設定した。表-3に耐力比の検討結果を示す。算出にあたっては、安全係数を1.0、表-2に示す材料試験結果を用いた。表-3には、曲げ降伏耐力時のせん断力 $V_{my}$ と $V_{yd}$ の比 $V_{my}/V_{yd}$ も示しており、1.0を上回っていることから、軸方向鉄筋が降伏する前にせん断破壊が先行する設計とした。軸圧縮応力は、No.1, 2については一般的なラーメン高架橋柱のRC柱における地震時の軸力変動を考慮し、 $3.0\text{N/mm}^2$ とした。No.3は、既存の地下鉄RC中柱部材の諸元を参考に、断面高さ $h$ と断面幅 $b$ の比率を1:2、軸圧縮応力は $7.5\text{N/mm}^2$ とした。

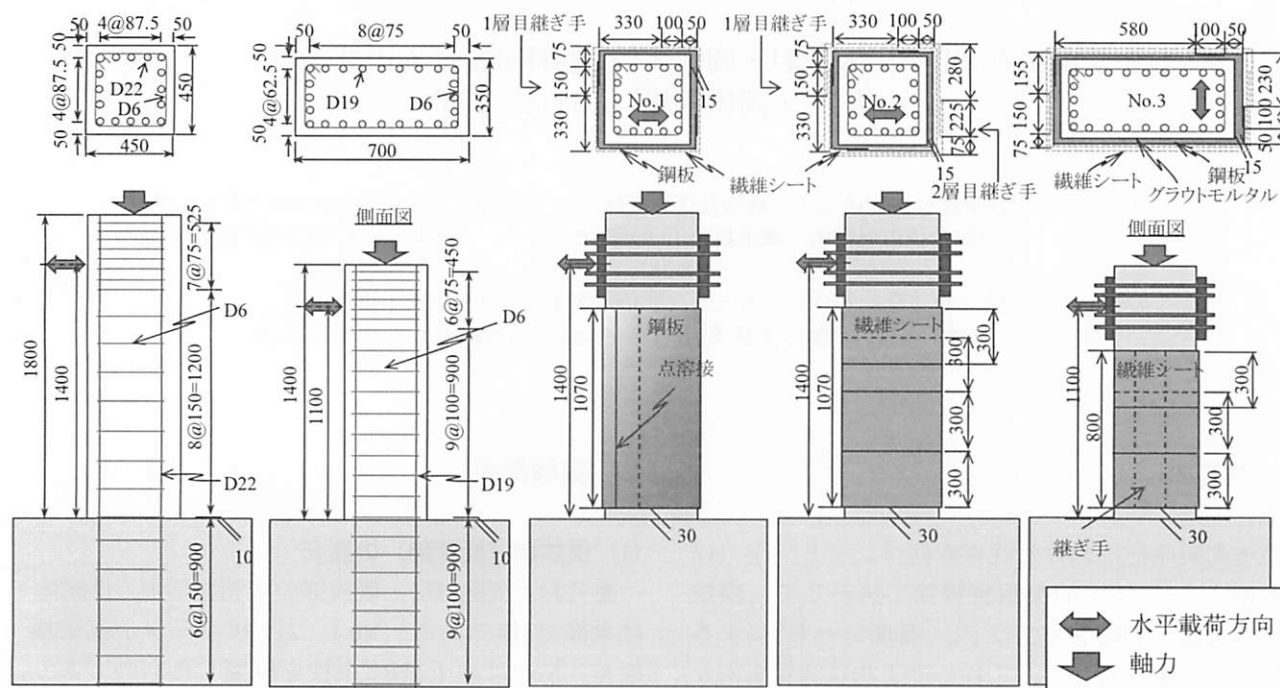
#### (2) 供試体（補強部）の諸元

表-1および図-2に、補強部の概要を示す。供試体は全部で3体とした。いずれの供試体も施工方法は、まず鋼板を設置し、繊維シートを巻き立てながら含浸材を浸透させた。含浸材が硬化した後に、支保工

表-1 試験体の諸元

| 供試体名 | 部材寸法        |             |             |             |       | 軸方向鉄筋 |              | 帯鉄筋      |              | 軸力                         |      | 繊維シート<br>総数 | 鋼板<br>厚さ<br>(mm) | 充填材<br>厚さ<br>(mm) | 含浸材        |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|--------------|----------|--------------|----------------------------|------|-------------|------------------|-------------------|------------|
|      | $b$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $d$<br>(mm) | $a$<br>(mm) | $a/d$ | 径     | $p_t$<br>(%) | 径-間隔     | $p_w$<br>(%) | 応力<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 軸力比  |             |                  |                   |            |
| No.1 | 450         | 450         | 400         | 1400        | 3.50  | D22   | 1.08         | D6etc150 | 0.09         | 3.0                        | 0.10 | 1           | 1.6              | 15                | エポキシ<br>樹脂 |
| No.2 |             |             |             |             |       |       |              |          |              |                            | 0.09 | 2           |                  |                   |            |
| No.3 | 700         | 350         | 300         | 1100        | 3.67  | D19   | 1.23         | D6etc100 | 0.09         | 7.5                        | 0.20 | 2           |                  |                   |            |

$b$ : 断面幅,  $h$ : 断面高さ,  $d$ : 有効高さ,  $a$ : せん断スパン,  $p_t$ : 引張鉄筋比,  $p_w$ : 帯鉄筋比



(a) No.1, 2

(b) No.3

(a) 鋼板補強時

(b) 繊維シート巻立て時

図-1 既設部の諸元 (単位: mm)

図-2 補強部の諸元 (単位: mm)

表-2 材料試験結果

(a) コンクリートおよび充填材

| 試験体名 | 柱コンクリート                      |                               | 充填材<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|      | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |                                     |
| No.1 | 29.6                         | 26.1                          | 43.1                                |
| No.2 | 31.9                         | 27.0                          | 64.3                                |
| No.3 | 37.3                         | 26.8                          | 74.5                                |

(b) 鋼板

| 種類    | 厚さ<br>(mm) | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|------------|-----------------------------|------------------------------|
| SS400 | 1.6        | 318                         | 405                          |

(c) 繊維シート (規格値)

| 種類                 | ヤング率<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 破断ひずみ<br>(μ) | 比重   | 目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|------|----------------------------|
| ポリエチレン<br>(60tタイプ) | 75                            | 2220                         | 29600        | 0.97 | 258                        |

(d) 鉄筋 (SD345)

| 鉄筋<br>径 | ヤング率<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひ<br>ずみ<br>(μ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 適用鉄筋            |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------|
| D6      | 194                           | 403                         | 2077             | 552                          | 帯鉄筋 (No.1, 2)   |
| D6      | 189                           | 468                         | 2476             | 575                          | 帯鉄筋 (No.3)      |
| D19     | 182                           | 394                         | 2164             | 574                          | 軸方向鉄筋 (No.3)    |
| D22     | 192                           | 365                         | 1901             | 550                          | 軸方向鉄筋 (No.1, 2) |

表-3 耐力比検討

| 供試体名 | $V_{cd}$<br>(kN) | $V_{sd}$<br>(kN) | $V_{yd}$<br>(kN) | $M_y$<br>(kN・m) | $M_u$<br>(kN・m) | $V_{ny}$<br>(kN) | $V_{mu}$<br>(kN) | $V_{ny} / V_{yd}$ | $V_{mu} / V_{yd}$ |
|------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| No.1 | 176              | 59               | 236              | 389             | 471             | 278              | 336              | 1.18              | 1.43              |
| No.2 | 181              | 59               | 240              | 392             | 477             | 280              | 340              | 1.17              | 1.42              |
| No.3 | 323              | 73               | 396              | 489             | 532             | 444              | 483              | 1.12              | 1.22              |

$V_{cd}$ : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力,  $V_{sd}$ : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力,  $V_{yd}$ : 設計せん断耐力,  $M_y$ : 設計曲げ降伏耐力,  $M_u$ : 設計曲げ耐力,  $V_{mu}$ : 設計曲げ耐力時のせん断力,  $V_{ny}$ : 設計曲げ降伏耐力時のせん断力

を設置し鋼板と柱の間にグラウトモルタルを充填した。鋼板は、L形のものを4枚組み合せ、点溶接により固定した。鋼板厚さはすべて1.6mm、充填材の厚さは15mmとした。繊維シートはポリエチレン、含浸材はエポキシ樹脂を使用した。また、繊維シートの水平方向の継ぎ手長は150mmとし、継ぎ手位置を1層巻きのNo.1は荷重面側に統一、2層巻きのNo.2は1層目を荷重面側、2層目を荷重面と逆側になるように配置した。No.3の水平方向継ぎ手位置は、荷重面となる両短辺とし、1層、2層で千鳥配置とした。また、繊維シートは高さ300mmを使用し、補強範囲で端数となる部分は、すべて柱上端で重ね合わせることとした。これは、補強後の曲げ破壊形態を想定し、塑性ヒンジ区間において、継ぎ手の影響をなくするためである。いずれの供試体も曲げ耐力の増加を期待せず、フーチングに接触しないように、補強材の下端にあきを30mm設けた。材料試験結果を表-2に示す。

### (3) 荷重方法

供試体のフーチングを反力床に固定し、柱天端から所定の軸力を作用させながら、所定のせん断スパンの位置にて水平方向に荷重を行った。図-3に試験体設置状況を示す。水平方向の荷重プログラムについては、軸方向鉄筋が降伏しない範囲で1サイクル荷重した後、ひずみ測定から軸方向鉄筋が、初めて降伏ひずみに達した時の水平変位 $\delta_y$ を基に、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\dots$ 、 $\pm n\delta_y$  ( $n$ は整数) で各サイクル3回繰返し荷重を行った。ただし、正負で $\delta_y$ が異なるが、 $2\delta_y$ 以降の荷重では、正負の $\delta_y$ の平均で制御した。また、少なくとも最大荷重に達した後、荷重が降伏荷重を下回るまで荷重した。

## 3. 実験結果

### (1) 破壊状況と水平荷重－水平変位関係

図-4にNo.1の損傷状況および水平荷重－水平変位関係を示す。 $\pm 1\delta_y \times 1$ に柱基部にて曲げひび割れが発生し、 $\pm 3\delta_y \times 1$ に柱基部にて微細なコンクリートの圧壊が生じ、荷重とともに圧壊が進行した。その後、図-4 (a) に示すように、 $\pm 6\delta_y \times 1$ に荷重面基部がはらみ出し繊維シートの継ぎ手の剥離および鋼板の点溶接の剥離が生じた。図-4 (b) に試験終了後に補強材および浮きコンクリートを撤去した状況を示す。柱基部で軸方向鉄筋の座屈が確認できた。図-4 (c) には、表-3に示したせん断耐力の計算値 $V_{yd}$ および曲げ耐力の計算値 $V_{mu}$ を併記した。 $V_{yd} =$

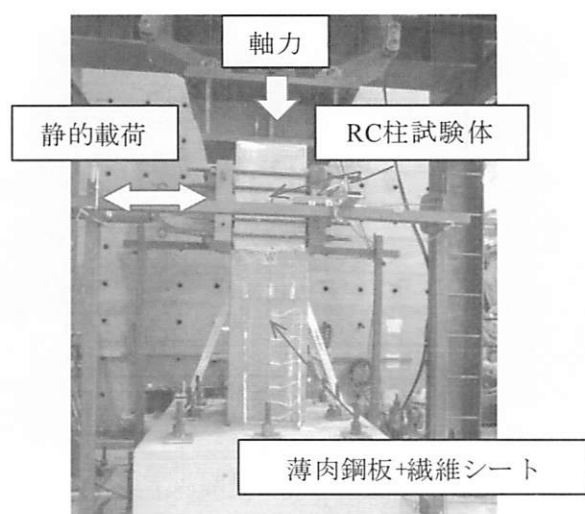
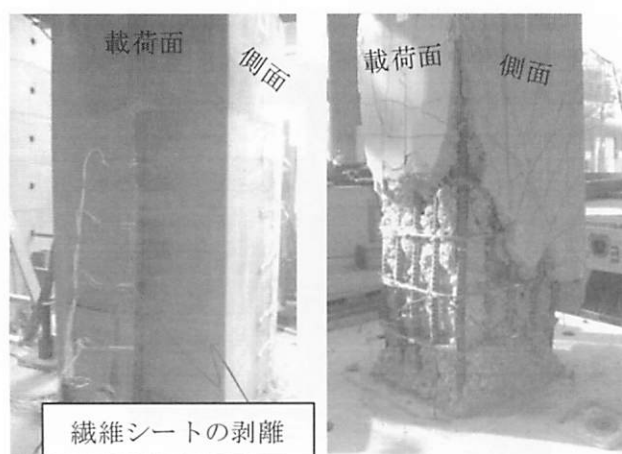


図-3 試験体設置状況

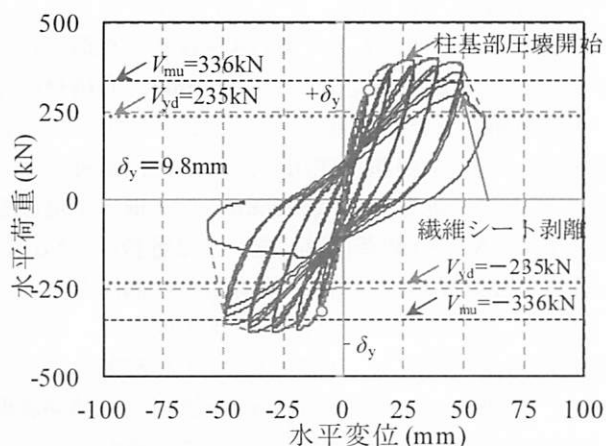
236kNに達した後も荷重は増加し、 $\pm 4\delta_y \times 1$ で最大荷重 $P_{max} = 395kN$  (正側)、 $370kN$  (負側) に達した。また、 $V_{mu} = 336kN$ であることから、最大荷重は曲げ耐力に達しており、せん断破壊に対する補強効果が確認できた。その後、 $\pm 6\delta_y \times 1$ において、繊維シートの継ぎ手および鋼板の剥離が生じ、水平荷重が低下した。

図-5にNo.2の損傷状況および水平荷重－水平変位関係を示す。No.1と同様に、柱基部での曲げひび割れ発生以降、 $\pm 3\delta_y \times 1$ に柱基部にて微細なコンクリートの圧壊が生じ、荷重とともに進行した。図-5 (a) に示すように、 $\pm 7\delta_y \times 1$ において荷重面の基部で明らかなはらみ出しが認められた。その後の荷重でははらみ出し量が増加し、水平荷重が低下したため、 $-9\delta_y \times 1$ で試験を終了した。No.1と異なり、繊維シートの継ぎ手の剥離や鋼板の剥離は認められなかった。試験終了後の補強材および浮きコンクリートはつり後の状況を図-5 (b) に示す。軸方向鉄筋の明らかな座屈が確認できたことから、はらみ出しの増加は、軸方向鉄筋の座屈に起因するものと考えられる。図-5 (c) に示す水平荷重－水平変位関係から、せん断耐力の計算値 $V_{yd} = 240kN$ に達した後も荷重は増加し、 $\pm 5\delta_y \times 1$ で最大荷重 $P_{max} = 410kN$  (正側)、 $397kN$  (負側) に達した。また、最大荷重は曲げ耐力の計算値 $V_{mu}$ に達しており、せん断破壊に対する補強効果が確認できた。降伏変位 $\delta_y$ と終局変位 $\delta_n$ と比であるじん性率 $\mu$ は7.6であった。なお、 $\mu$ の算定において $\delta_y$ は正負の平均値、 $\delta_n$ は降伏荷重を下回らない最大変位とした。1層巻きであるNo.1と比較すると、繊維シートおよび鋼板の剥離が認められず、 $\mu$ が増加しており、本工法においては少なくとも2層以上の繊維シートを巻き立てることが望ましいと考えられる。



(a)  $+6\delta_y-1$

(b) 試験終了後（補強材撤去）



(c) 水平荷重－変位関係

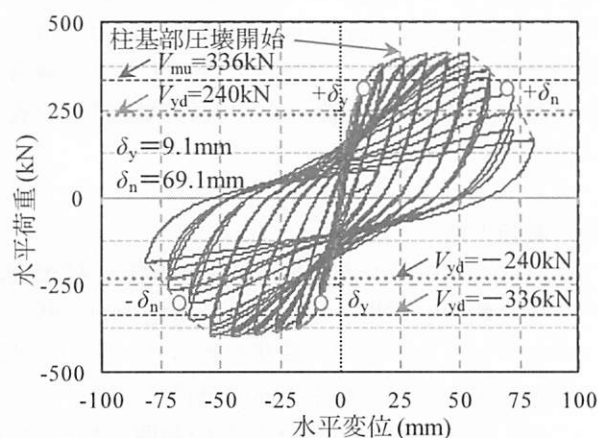
図-4 No. 1 供試体の損傷状況と変位履歴



(a)  $+7\delta_y-1$



(b) 試験終了後（補強材撤去）



(c) 水平荷重－変位関係

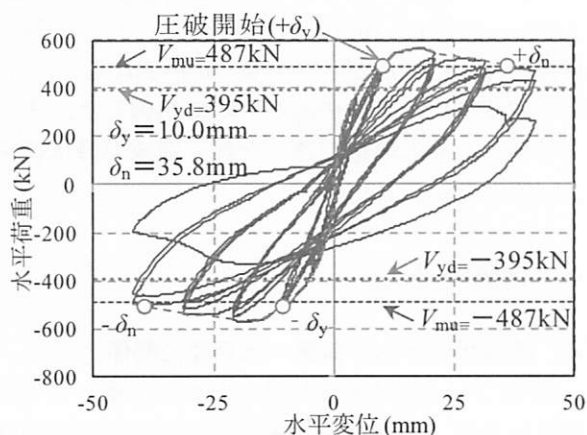
図-5 No. 2 供試体の損傷状況と変位履歴



(a)  $+4\delta_y-3$



(b) 試験終了後（補強材撤去）



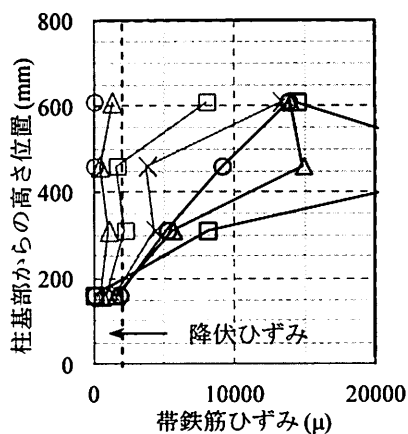
(c) 水平荷重－変位関係

図-6 No. 3 供試体の損傷状況と変位履歴

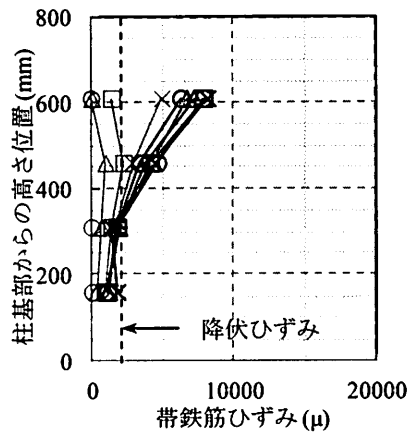
図-6に地下鉄RC中柱をモデルとしたNo.3の損傷状況および水平荷重－水平変位関係を示す。±1δ<sub>y</sub>×1に軸方向鉄筋の引張降伏前に柱基部で圧壊を確認した。No.1, 2に比して軸力大きいことが柱基部でのコンクリートの圧壊が早くなった原因と考えられる。その後も圧壊が進行し、図-6 (a) に示すように、±4δ<sub>y</sub>×3に柱基部より300mm上方部付近で

明らかなはらみ出しを確認した。また、繊維シートの継ぎ手の剥離や鋼板の剥離は認められなかった。試験終了後の補強材および浮きコンクリートはつり後の状況を図-6 (b) に示す。柱基部から500mmの範囲で軸方向鉄筋が座屈していることから、はらみ出しは軸方向鉄筋の座屈に起因するものと考えられる。図-6 (c) に示す水平荷重－水平変位関係

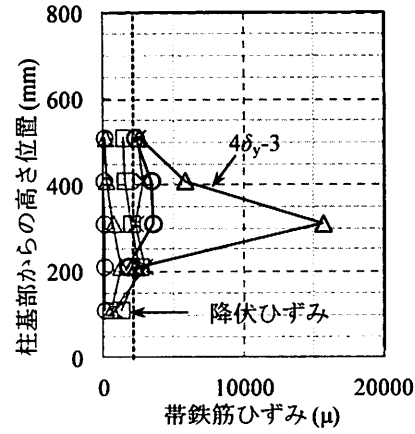
—○— 0.5 $\delta_y$  —△— 1 $\delta_y$  —□— 2 $\delta_y$  —×— 3 $\delta_y$  —○— 4 $\delta_y$  —△— 5 $\delta_y$  —□— 6 $\delta_y$  —×— 7 $\delta_y$  —○— 8 $\delta_y$  —△— 9 $\delta_y$



(a) No.1

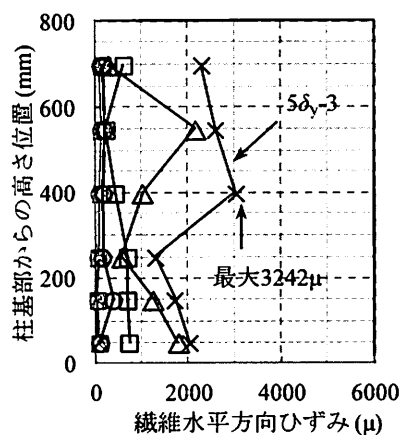


(b) No.2

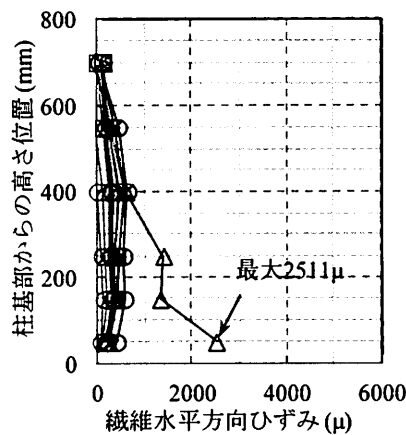


(c) No.3

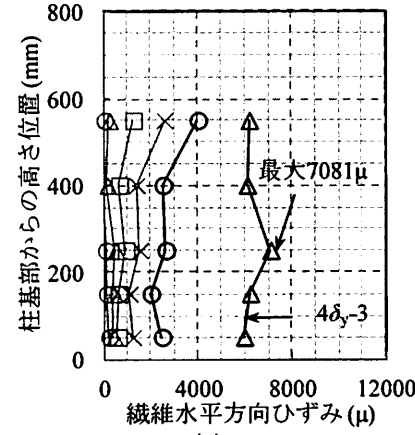
図-7 帯鉄筋ひずみ



(a) No.1

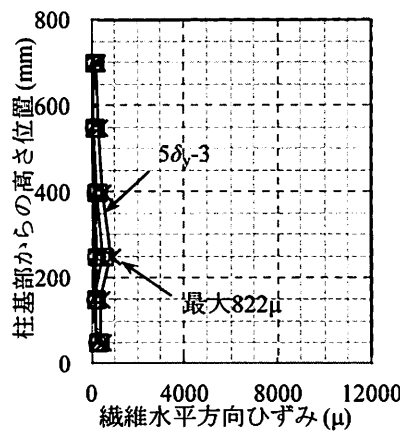


(b) No.2

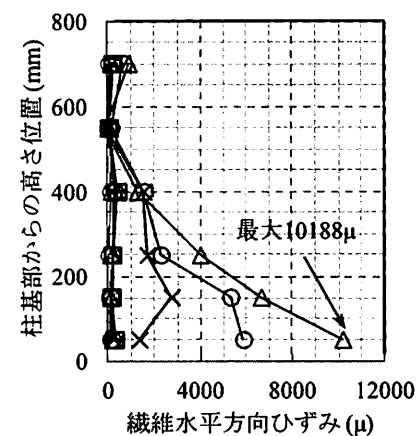


(c) No.3

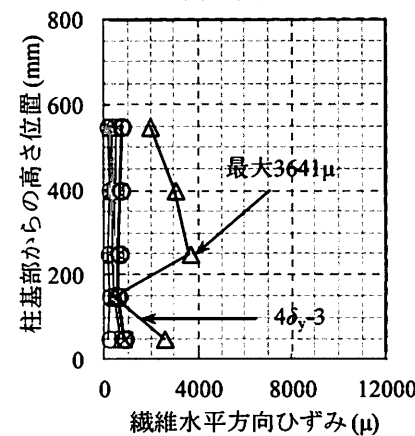
図-8 繊維シートひずみ（載荷方向に平行な面）



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

図-9 繊維シートひずみ（載荷方向に直角な面）

から、せん断耐力の計算値 $V_{yd}=395\text{kN}$ に達した後も荷重は増加し、最大荷重 $P_{\max}=566\text{kN}$ （正側）に達した。また、最大荷重は曲げ耐力の計算値 $V_m$ に達しており、せん断破壊に対する補強効果が確認できた。降伏変位 $\delta_y$ は10.0mm、終局変位 $\delta_n$ は35.8mmであり、これより計算したじん性率 $\mu$ は、3.6であった。

## (2) 帯鉄筋と繊維シートのひずみ

図-7に各供試体の帯鉄筋ひずみ分布の例を示す。主に斜めひび割れに起因するひずみとして、載荷方向に平行な面でのひずみを示す。いずれの供試体も、基部または計測範囲の上部を除き帯鉄筋は概ね降伏した。また、初降伏の載荷サイクルは2 $\delta_y$ であり、3章1節で述べたようにいずれも終局変位は2 $\delta_y$ 以上で



あるので、補強材がせん断力を負担し、終局変位が増加したものと考えられる。

図-8に荷重方向に平行な面の繊維シート水平方向ひずみ分布を示す。No.1においては繊維シート継ぎ手および鋼板の剥離前の $5\delta_y$ におけるひずみは $2000\mu$ 程度であり、最大ひずみは $5\delta_y \times 3$ の $3242\mu$ であった。No.2においては、終局変位前の $8\delta_y$ におけるひずみは $1000\mu$ 程度であった。No.2は2層巻きであるため、1層巻きであるNo.1よりも小さなひずみであったと考えられる。なお、No.2の最大ひずみは $2511\mu$ であるが、柱基部で卓越しており、軸方向鉄筋の座屈の影響を受けているものと考えられる。No.3は、荷重方向に直角な面でははらみ出しが確認できた $4\delta_y \times 3$ でひずみが急増し、最大 $7081\mu$ であった。はらみ出し前までは、全体に $3000\mu$ 程度であった。

図-9に軸方向鉄筋のはらみ出しに起因するひずみとして、荷重方向に直角な面における繊維シート水平方向ひずみ分布を示す。No.1は最大 $822\mu$ であるのに対し、No.2は柱基部で $10188\mu$ であった。No.1は繊維シート継ぎ手および鋼板が剥離したためひずみが小さく、No.2は軸方向鉄筋の座屈を十分拘束できた結果といえる。No.3は柱基部から $300\text{mm}$ 程度の位置で最大 $3641\mu$ であり、軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出し位置と一致している。

### (3) 等価粘性減衰定数

図-10に各供試体の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ を各グループごとに示す。等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ は、エネルギー吸収量を等価な粘性減衰に置き換えて定量的に表現する指標である。No.1で繊維シート継ぎ手および鋼板の剥離が生じる前の $4\delta_y$ で20%程度であり、No.2も同様の値となった。No.2は $4\delta_y$ 以降も増加傾向を示し $9\delta_y$ で最大30%程度を示す結果となった。No.3においても、 $4\delta_y$ で20%程度とNo.1、2と同様の値となった。

## 4. まとめ

薄肉鋼板および繊維シートを用いた耐震補強をせん断破壊形態の鉄道RC柱に適用し荷重実験を行った。その結果、RCラーメン高架橋柱モデルおよび地下鉄RC中柱のいずれにおいても、せん断破壊を防ぎ、曲げ破壊形態とすることができた。なお、本工法においては、繊維シートの継ぎ手および鋼板の剥離を生じさせないように、少なくとも2層以上の繊維シートを用いることが望ましいと考える。

また、本実験は1/2程度の縮尺モデルでの検討であり、今後は断面寸法の影響を考慮した部材角による変形性能の定式化が課題である。

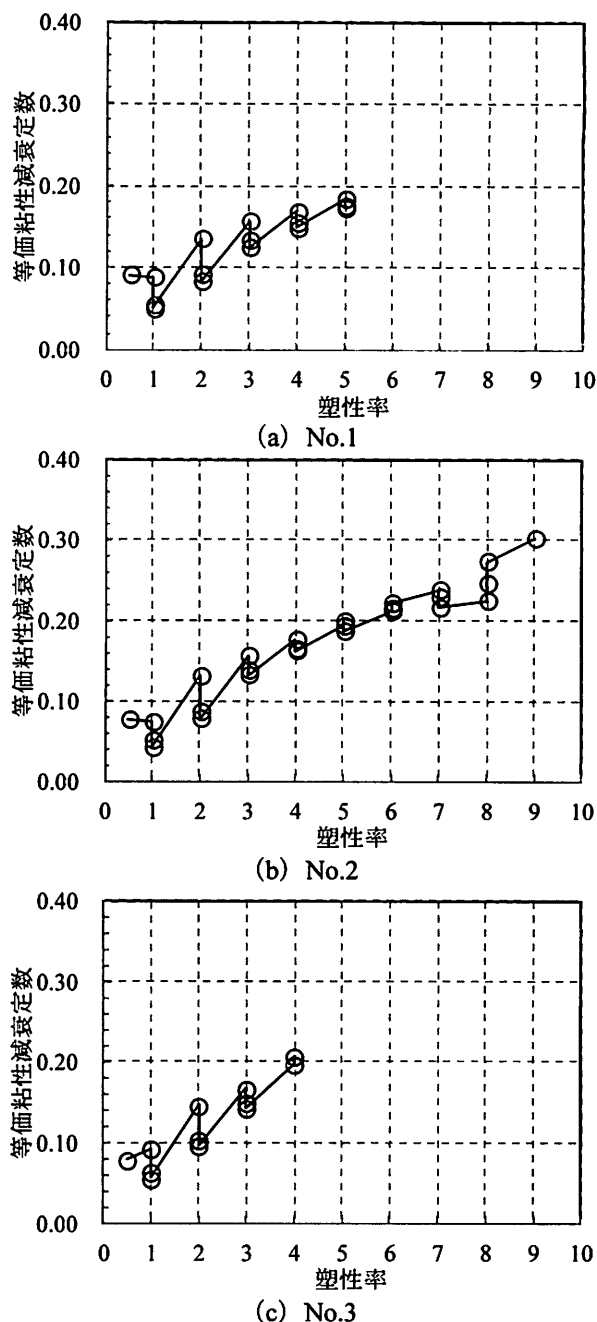


図-10 各グループにおける等価粘性減衰定数

## 参考文献

- (公財) 鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針，2013.12
- (財) 鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996.11
- (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，2004