

をそれぞれ3層、5層、8層、部材軸直角方向に貼付けて補強した。D-SはCFS<sub>t</sub>により補強された試験体でD-5と同じ補強量である。補強区間は柱の基部から2D（D：断面の高さ）の範囲とした。

試験体の鉄筋量は、実橋脚を参考に5体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_t=2.59\%$ （16-D32）、帯鉄筋比 $p_w=0.12\%$ （ $\phi 9@150\text{mm}$ ）とした。

CFS<sub>h</sub>貼付後、1週間は養生シートで覆い約15℃以上となるよう保温し、その後実験開始まで現場養生とした。D-S試験体におけるCFS<sub>t</sub>の巻付け作業は専用のCF巻付け装置を使用した。なおCFS<sub>h</sub>貼付けおよびCFS<sub>t</sub>巻付け作業時に強度試験用のテストピースをそれぞれ採取した。

### (2) 使用材料

試験体には呼び強度21MPa、スランプ8cm、粗骨材の最大寸法が20mmのレデーミクストコンクリート（早強）を使用した。実験時における各試験体のコンクリートの性質を表-2に示す。

鉄筋は柱部の主鉄筋にD32（SD295A）を、せん断補強筋はじん性補強区間（基部より2D区間）に $\phi 9$ （SR235）を、それより上部にD13（SD295A）を用いた。引張試験結果を表-3に示す。

補強材に用いたCFS<sub>h</sub>は、1層あたりの炭素繊維量（目付量）が200g/m<sup>2</sup>の製品で、換算厚さは1層当たり0.111mmである。炭素繊維の公称強度は3430MPaである。JIS K 7073に準拠しCFS<sub>h</sub>とCFS<sub>t</sub>の引張試験を実施した。試験結果を表-4に示す。

### (3) 載荷と測定

加力装置を図-2に示す。試験体を反力床に鋼棒で固定し、反力壁に取り付けた油圧ジャッキ2基により試験体頭部に水平力を加えた。圧縮軸力は1921kN（柱単位断面積あたり3.9MPa）を試験体頭部に加え保持した。加力サイクルは最外縁主筋の降伏変位（ $+\delta_y, -\delta_y$ ）を基準とし、順にその整数倍の変位をピークとして、各3回繰り返した。

各荷重段階で、荷重、軸力、変位および炭素繊維・鉄筋のひずみを測定した。

## 3. 実験結果

### (1) 破壊性状

最終破壊状況を写真-1に示す。各試験体とも、曲げひび割れの発生、主筋の降伏、主筋の座屈によるコンクリートのはらみ出しの順で破壊が進み、補強試験体は終局時に以下の2つの性状を示した。

- ・炭素繊維が破断して破壊：D-3、D-5

表-2 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>$f_c$ (MPa) | 引張強度<br>$f_t$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_c$ (GPa) |
|-----|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|
| D-0 | 31        | 36.7                | 3.01                | 27.7                 |
| D-3 | 48        | 38.2                | 3.18                | 28.5                 |
| D-5 | 36        | 37.1                | 3.06                | 27.9                 |
| D-8 | 56        | 38.9                | 3.25                | 28.9                 |
| D-S | 64        | 39.6                | 3.33                | 29.3                 |

表-3 鉄筋の引張試験結果

| 鉄筋              | 降伏強度<br>$f_y$ (MPa) | 降伏ひずみ<br>$\times 10^{-4}$ | 引張強度<br>$f_u$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_s$ (GPa) |
|-----------------|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| D32 主筋          | 349                 | 1757                      | 544                 | 202                  |
| $\phi 9$ せん断補強筋 | 345                 | 1664                      | 489                 | 210                  |
| D13 せん断補強筋      | 355                 | 1857                      | 533                 | 200                  |

表-4 炭素繊維の引張試験結果

| 試験片                                | 公称強度<br>(MPa) | 引張強度<br>$f_{cf}$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_{cf}$ (GPa) | 試験体     |
|------------------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------|
| 炭素繊維シート<br>(200 g/m <sup>2</sup> ) | 3430          | 4312                   | 252                     | D-3、D-5 |
|                                    | 3430          | 4322                   | 246                     | D-8     |
| 炭素繊維ストランド                          | 3430          | 3814                   | 234                     | D-S     |

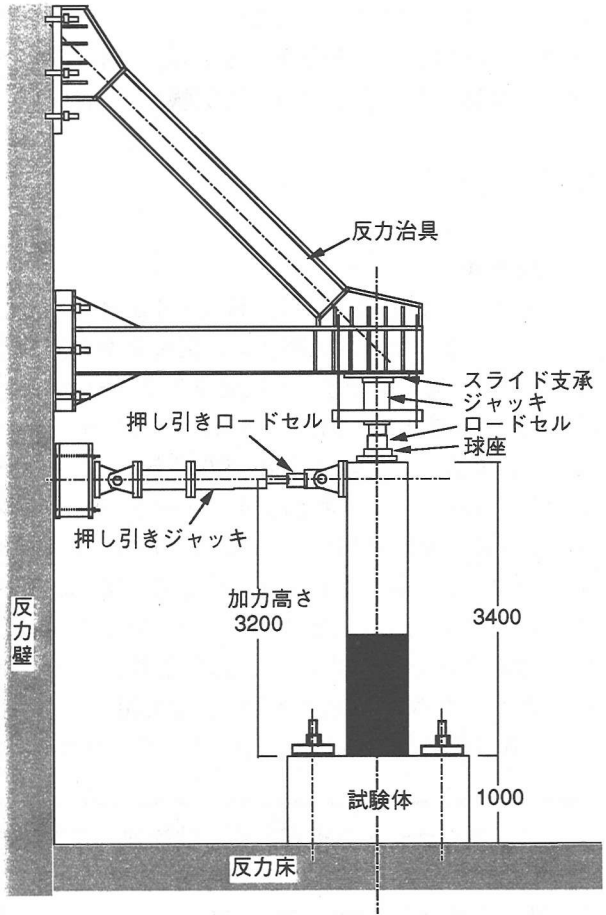


図-2 加力装置

をそれぞれ3層、5層、8層、部材軸直角方向に貼付けて補強した。D-SはCFS<sub>t</sub>により補強された試験体でD-5と同じ補強量である。補強区間は柱の基部から2D（D：断面の高さ）の範囲とした。

試験体の鉄筋量は、実橋脚を参考に5体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_t=2.59\%$ （16-D32）、帯鉄筋比 $p_w=0.12\%$ （ $\phi 9@150\text{mm}$ ）とした。

CFS<sub>h</sub>貼付後、1週間は養生シートで覆い約15℃以上となるよう保温し、その後実験開始まで現場養生とした。D-S試験体におけるCFS<sub>t</sub>の巻付け作業は専用のCF巻付け装置を使用した。なおCFS<sub>h</sub>貼付けおよびCFS<sub>t</sub>巻付け作業時に強度試験用のテストピースをそれぞれ採取した。

(2) 使用材料

試験体には呼び強度21MPa、スランプ8cm、粗骨材の最大寸法が20mmのレデーミクストコンクリート（早強）を使用した。実験時における各試験体のコンクリートの性質を表-2に示す。

鉄筋は柱部の主鉄筋にD32（SD295A）を、せん断補強筋はじん性補強区間（基部より2D区間）に $\phi 9$ （SR235）を、それより上部にD13（SD295A）を用いた。引張試験結果を表-3に示す。

補強材に用いたCFS<sub>h</sub>は、1層あたりの炭素繊維量（目付量）が200g/m<sup>2</sup>の製品で、換算厚さは1層当たり0.111mmである。炭素繊維の公称強度は3430MPaである。JIS K 7073に準拠しCFS<sub>h</sub>とCFS<sub>t</sub>の引張試験を実施した。試験結果を表-4に示す。

(3) 載荷と測定

加力装置を図-2に示す。試験体を反力床に鋼棒で固定し、反力壁に取り付けた油圧ジャッキ2基により試験体頭部に水平力を加えた。圧縮軸力は1921kN（柱単位断面積あたり3.9MPa）を試験体頭部に加え保持した。加力サイクルは最外縁主筋の降伏変位（ $+\delta_y, -\delta_y$ ）を基準とし、順にその整数倍の変位をピークとして、各3回繰り返した。

各荷重段階で、荷重、軸力、変位および炭素繊維・鉄筋のひずみを測定した。

3. 実験結果

(1) 破壊性状

最終破壊状況を写真-1に示す。各試験体とも、曲げひび割れの発生、主筋の降伏、主筋の座屈によるコンクリートのはらみ出しの順で破壊が進み、補強試験体は終局時に以下の2つの性状を示した。

・炭素繊維が破断して破壊：D-3、D-5

表-2 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>$f_c$ (MPa) | 引張強度<br>$f_t$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_c$ (GPa) |
|-----|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|
| D-0 | 31        | 36.7                | 3.01                | 27.7                 |
| D-3 | 48        | 38.2                | 3.18                | 28.5                 |
| D-5 | 36        | 37.1                | 3.06                | 27.9                 |
| D-8 | 56        | 38.9                | 3.25                | 28.9                 |
| D-S | 64        | 39.6                | 3.33                | 29.3                 |

表-3 鉄筋の引張試験結果

| 鉄筋              | 降伏強度<br>$f_y$ (MPa) | 降伏ひずみ<br>$\times 10^{-3}$ | 引張強度<br>$f_u$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_s$ (GPa) |
|-----------------|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| D32 主筋          | 349                 | 1757                      | 544                 | 202                  |
| $\phi 9$ せん断補強筋 | 345                 | 1664                      | 489                 | 210                  |
| D13 せん断補強筋      | 355                 | 1857                      | 533                 | 200                  |

表-4 炭素繊維の引張試験結果

| 試験片                                | 公称強度<br>(MPa) | 引張強度<br>$f_{cf}$ (MPa) | ヤング係数<br>$E_{cf}$ (GPa) | 試験体     |
|------------------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------|
| 炭素繊維シート<br>(200 g/m <sup>2</sup> ) | 3430          | 4312                   | 252                     | D-3、D-5 |
|                                    | 3430          | 4322                   | 246                     | D-8     |
| 炭素繊維ストランド                          | 3430          | 3814                   | 234                     | D-S     |

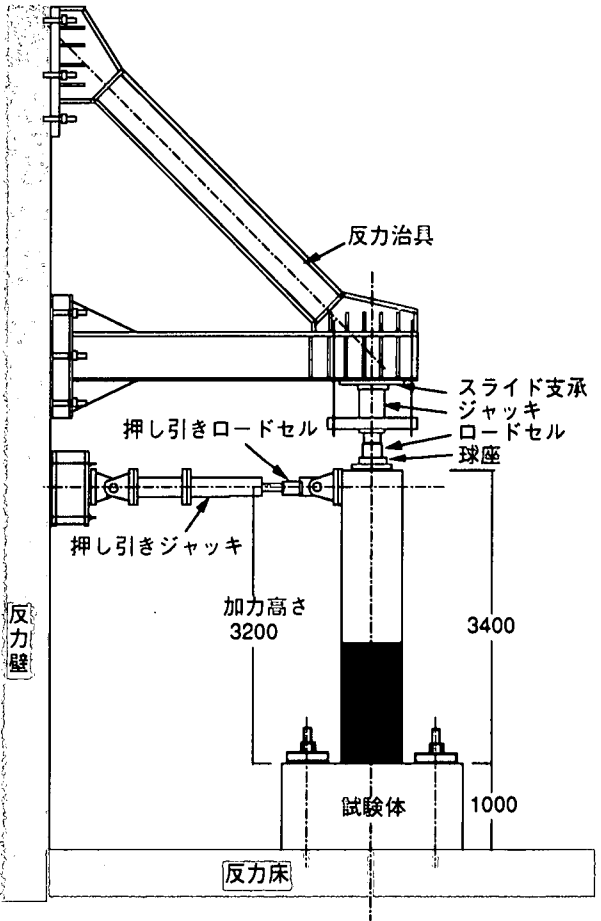


図-2 加力装置

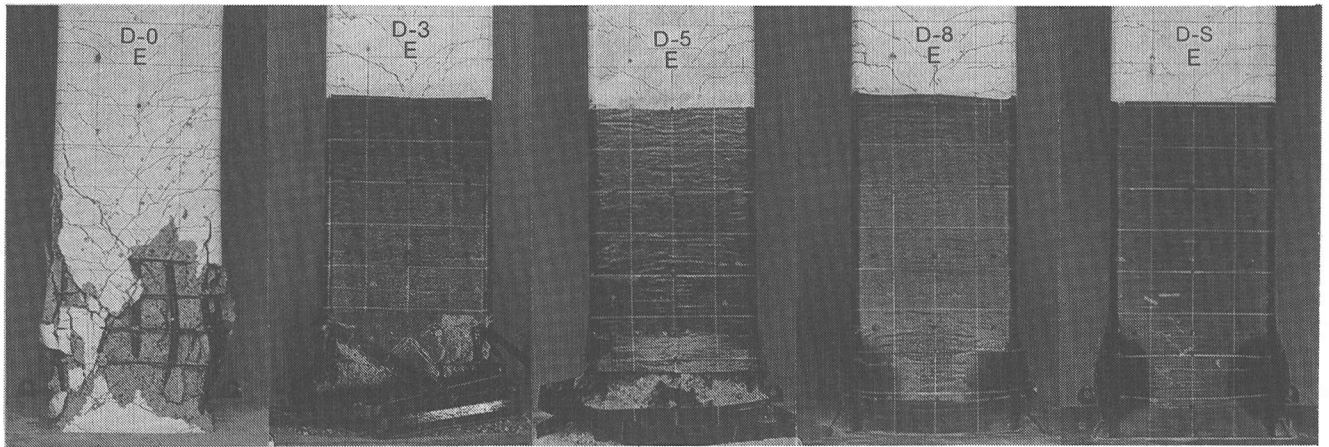


写真-1 最終破壊状況

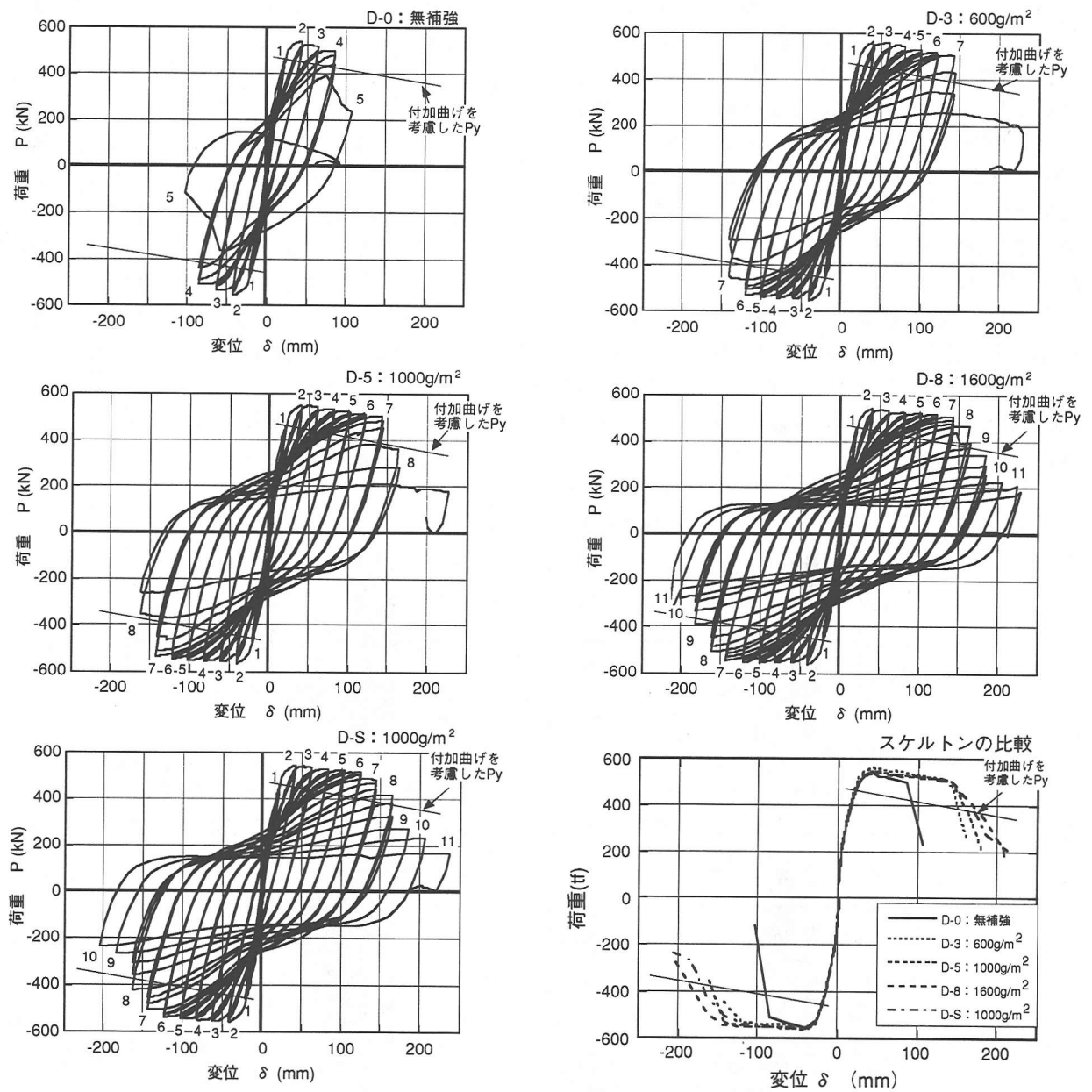


図-3 荷重-変位関係

・柱基部の断面形状が矩形から円形に変化し破壊：  
D-8, D-S

各試験体の内、比較的補強量の少ないD-3, D-5は主筋が座屈した後、コンクリートが外側にはらむのを拘束しきれなくなった時点で、柱隅角部でCFSHが破断し荷重が低下した。これに対し、D-8では補強量が多いため、主筋が座屈しコンクリートがはらんでもCFSHは十分コンクリートを拘束する。このため終局時に至ってもCFSHは破断せず、柱基部のコンクリートが内部で破損し、柱の断面形状が矩形から円形に近づく変化が生じた。また、D-5はCFSHが破断したのに対し、同じ補強量のD-SのCFSHは破断しなかった。

## (2) 変位性状

各試験体の荷重と変位の関係とスケルトンの比較を図-3に示す。図中には柱頭部の変形にともなう付加曲げを考慮した降伏荷重 $P_y$ を記した。終局変位 $\delta_u$ は変位のスケルトンと付加曲げを考慮した $P_y$ の交点とした。これらの図から炭素繊維でじん性補強した試験体は無補強試験体に比べ、終局変位が増加していることがわかる。また補強量が増加するにつれて終局変位も増加している。

## (3) ひずみ性状

### a) 炭素繊維のひずみ

図-4に補強試験体の炭素繊維の水平ひずみの変化を示す。測定位置は柱側面の基部より45cmの高さである。加力にしたがいひずみが増えており、炭素繊維がコンクリートを拘束していることがわかる。

### b) 主筋のひずみ

図-5に各試験体の主筋の高さ方向のひずみ分布を示す。柱の引張側中央部の主筋における、各正加力サイクルピーク時のひずみ測定値である。これから、各試験体とも破壊に至るまで1.5Dから上方では鉄筋は降伏しないこと、また炭素繊維の補強量は、主筋の降伏する範囲に顕著に影響しないことがわかり、本実験では塑性ヒンジ領域は基部から1.5D以下の範囲であったと言える。

## (4) 諸荷重

表-5に諸荷重と変位の一覧を示す。なお計算値は、RCの曲げ理論で計算した。降伏荷重、最大荷重とも各試験体で実験値と計算値はよく整合している。変位は補強量に係わらず降伏時、最大荷重時とも同程度であり、補強による曲げ剛性の変化がないことがわかる。

## (5) じん性率

表-6にじん性率と部材角の一覧を、またじん性率・部材角と補強量の関係を図-6にそれぞれ示す。じん性率は前述した $\delta_u$ を降伏変位 $\delta_y$ で除した値とした。じん性率は、無補強のD-0が4程度であるのに比較し、補強型ではその量に応じて7～9程度まで増大しており補強効果があることがわかる。また、CFSHによる補強効果(D-S)はCFSH(D-5)より僅かに大きい程度である。

また、部材角で評価すると補強型は1/17～1/23でじん性能が高いといえる。

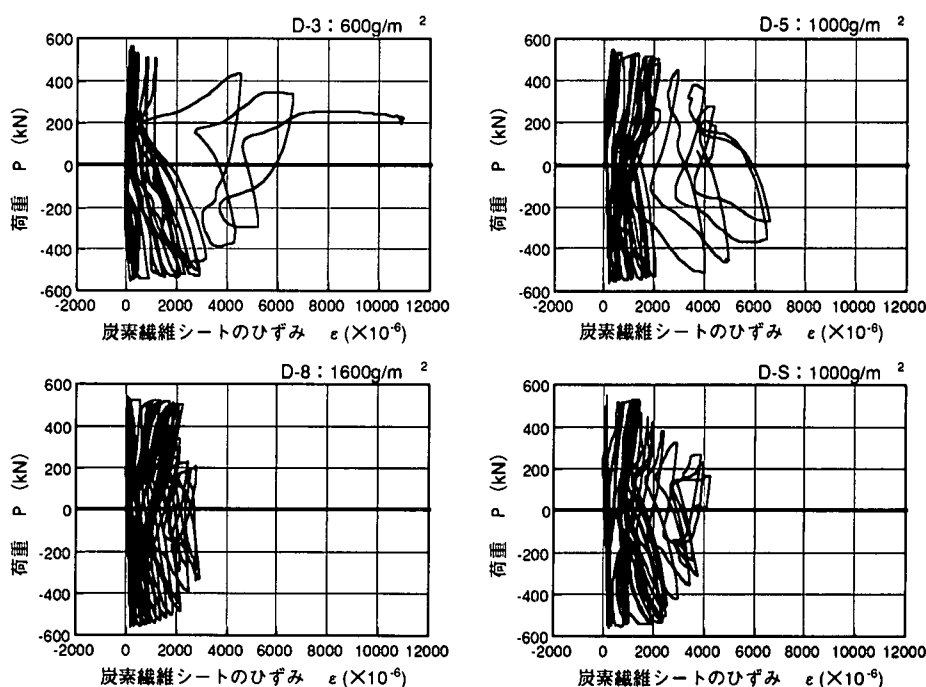
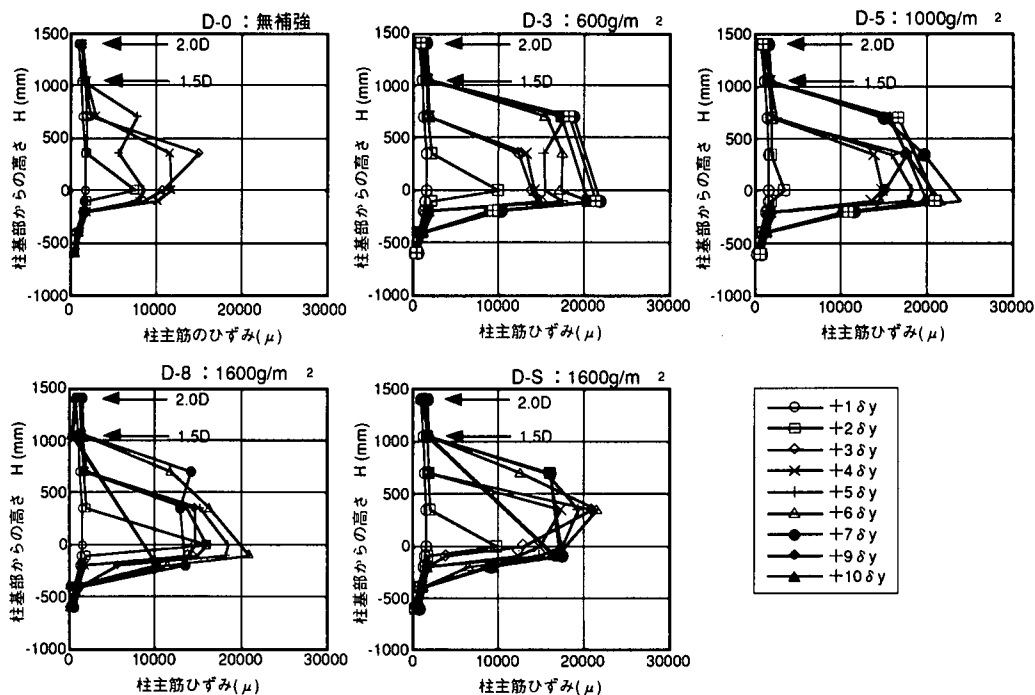


図-4 荷重-ひずみ関係



図－5 主筋のひずみ分布

表－5 諸荷重と変位一覧

| 試験体 | 主筋降伏時       |     |         |      | 最大荷重時         |     |         |      |
|-----|-------------|-----|---------|------|---------------|-----|---------|------|
|     | 降伏荷重Py (kN) |     | 変位 (mm) |      | 最大荷重Pmax (kN) |     | 変位 (mm) |      |
|     | 計算値         | 実験値 | 実/計     |      | 計算値           | 実験値 | 実/計     |      |
| D-0 | 448         | +   | 465     | 1.04 | 556           | +   | 540     | 0.97 |
|     |             | -   | 475     | 1.06 |               | -   | 554     | 0.99 |
| D-3 | 448         | +   | 471     | 1.05 | 560           | +   | 564     | 1.01 |
|     |             | -   | 462     | 1.03 |               | -   | 552     | 0.99 |
| D-5 | 449         | +   | 465     | 1.04 | 563           | +   | 549     | 0.98 |
|     |             | -   | 467     | 1.04 |               | -   | 557     | 0.99 |
| D-8 | 450         | +   | 455     | 1.01 | 563           | +   | 545     | 0.97 |
|     |             | -   | 463     | 1.03 |               | -   | 559     | 0.99 |
| D-S | 451         | +   | 462     | 1.02 | 565           | +   | 548     | 0.97 |
|     |             | -   | 463     | 1.03 |               | -   | 558     | 0.99 |

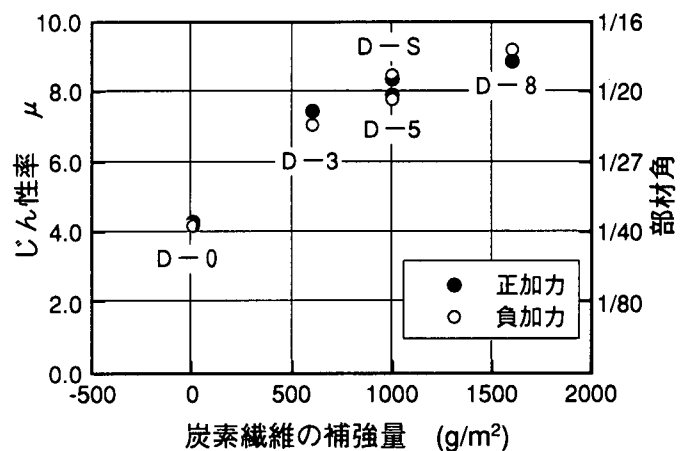
表－6 じん性率と部材角の一覧

| 試験体 | 方向 | 降伏変位<br>$\delta y$<br>(mm) | 終局変位<br>$\delta u$<br>(mm) | じん性率<br>$\mu = \delta u / \delta y$ | 部材角<br>$\delta u / \text{加力高さ}$ |
|-----|----|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| D-0 | +  | 21.20                      | 91.23                      | 4.30                                | 1/35                            |
|     | -  | 21.20                      | 88.65                      | 4.18                                | 1/36                            |
| D-3 | +  | 20.10                      | 150.07                     | 7.47                                | 1/21                            |
|     | -  | 20.10                      | 141.70                     | 7.05                                | 1/23                            |
| D-5 | +  | 20.30                      | 160.32                     | 7.90                                | 1/20                            |
|     | -  | 20.30                      | 158.10                     | 7.79                                | 1/20                            |
| D-8 | +  | 20.30                      | 180.75                     | 8.90                                | 1/18                            |
|     | -  | 20.30                      | 187.63                     | 9.24                                | 1/17                            |
| D-S | +  | 20.50                      | 171.64                     | 8.37                                | 1/19                            |
|     | -  | 20.50                      | 174.17                     | 8.50                                | 1/18                            |

#### 4. まとめ

柱部材の炭素繊維シートによるじん性補強効果を把握し、構造物への適用をはかるため、実物大寸法での構造実験を実施した。その結果以下のことがわかった。

- (1) 鉄筋コンクリート柱の基部から高さ方向2D区間の全周にCFShを帯筋方向に貼付けることにより、じん性能に対して補強効果が認められ、補強量の増加にしたがってじん性率が補



図－6 じん性率と補強量の関係

強前の4程度から7～9程度まで向上する。

- (2) 破壊性状は、曲げひび割れの発生、主筋の降伏、主筋の座屈によるコンクリートのはらみ出しの順で破壊が進み、終局時には補強量により炭素繊維シートが破断する場合と破断せずに柱基部の断面形状が矩形から円形に変化する場合がある。
- (3) 同じ補強量 ( $1000\text{g/m}^2$ ) で補強した炭素繊維シートとストランドは、同程度のじん性能を発揮する。
- (4) 本実験では塑性ヒンジ領域は基部から  $1.5D$  以下の範囲であった。

謝辞：本実験は鉄道高架橋炭素繊維シート利用耐震補強工法研究会からの委託により実施したものです。同研究会の会員各位に深謝致します。

#### 【参考文献】

- 1) 小島克朗, 勝俣英雄, 大野了：CFRP 巻付け工法で耐震補強された既存 RC 橋脚のじん性能, 土木学会第49回年次学術講演概要集, V-459, pp918～919, 1994年9月
- 2) 大野了, 大内一：炭素繊維による RC 橋脚の耐震補強に関する実験的検討, 土木学会第51回年次学術講演概要集, V-476, pp950～951, 1995年9月

## Experiment on Ductility of Railway Viaducts Columns Retrofitted by Carbon Fiber Sheet

Tomoaki Moriyama, Nobuyuki Matsumoto, Hajime Wakui  
Motoyuki Okano, Hajime Ouchi

In order to improve ductility of RC columns, an effective retrofitting method by carbon fiber has been studied. But in the case of railway viaducts, the axial force of columns become high compressive level at earthquake.

Therefore, cyclic flexural tests under high compressive stress at full scale specimen retrofitted by carbon fiber were conducted.

And the following results were concluded:(1)Retrofitted specimens were improved in ductility by Carbon fiber sheet and strand. (2)Area of plastic hinge is under  $1.5D$ ( $D$ :depth of column) from the bottom.