

## V-161

## FRPロッドを用いたPC梁の終局ねじり強度

広島大学 学生員 周 平  
 ” 正会員 田澤栄一  
 ” 正会員 米倉亜州夫  
 ” 正会員 宮沢伸吾  
 ” 松尾 昭

## 1. まえがき

FRPロッドは、高強度および高耐食性を有しているためPC緊張材等への利用が検討され、曲げやせん断に対する挙動はある程度明らかにされている<sup>1)</sup>。本研究は、FRPロッド（炭素繊維(CFRP)およびアラミド繊維(AFRP))を緊張材、軸方向補強材および横方向補強材として用いたPC梁の終局ねじり強度に及ぼす緊張量及び補強筋量の影響について実験的に検討したものである。

## 2. 実験概要

使用した緊張材および補強材の品質を表1および2に示す。横補強筋は、AFRPはスパイラル状に連続成型したもの、CFRPは閉合型の鉛直スターラップとした。マトリックスはCFRPはエポキシ樹脂、AFRPはビニルエステル樹脂である。緊張材、軸方向補強材および横方向補強材は同一の種類のものを使用した。供試体は図1に示す断面を有するポストテンション方式PC梁とした。緊張材の引張力は定着用プレートと供試体の間にセットしたロードセルにより管理し、プレストレスは0, 50, 100kgf/cm<sup>2</sup>とした。載荷時圧縮強度は約600kgf/cm<sup>2</sup>である。図2に示す方法で純ねじりモーメントを作用させ、試験区間長さは60cmとした。

## 3. 実験結果および考察

図3は、有効プレストレスとねじりひびわれ発生ねじりモーメントの関係を示したものである。FRPロッドを用いた場合も有効プレストレスの増加と共にねじりひびわれ発生モーメントは増加している。しかし、鋼材を用いた場合と比べてひびわれ発生モーメントは若干小さくなっている。

終局ねじり強度の実験値を表3および図4に示す。梁の破壊は、鋼材を使用した場合はスターラップの降伏により、FRPロッドを用いた場合は軸方向筋および横方向筋の破断により生じた。図4に示すように、鋼材を用いた場合は、横補強筋量の増加と共にほぼ計算値と同じ割合でねじり耐力が増加している。しかし、CFRPロッドおよびAFRPロッドを用いた場合は、横補強筋量の増加に対するねじり耐力の増加割合が極めて小さくなった。

終局ねじり強度の計算値と実験値の比を表3および図5に示す。計算には、鋼材を用いた場合の算定式である土木学会式、Hsu式および児島式<sup>2)</sup>を用いた。土木学会式はプレストレスの効果を評価していない。Hsu式および児島式はコンクリートの負担分と補強筋の負担

表1 FRPロッドの品質

| 緊張材            |             | 径<br>(mm) | 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-------------|-----------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CFRP<br>スターラップ | CFRP        | φ17.8     | 154.9                     | 1.46×10 <sup>5</sup>           | 21200                          |
|                | スターラップ      | φ25.0     | 290.9                     | 1.32×10 <sup>5</sup>           | 19500                          |
|                | AFRP        | 7×φ6      | 198.1                     | 0.54×10 <sup>5</sup>           | 18000                          |
| 補強材            | CFRP<br>ロッド | φ6        | 28.3                      | 1.20×10 <sup>5</sup>           | 17000                          |
|                |             | φ8        | 50.3                      | 1.39×10 <sup>5</sup>           | 21500                          |
|                |             | φ12       | 113.1                     | 1.38×10 <sup>5</sup>           | 18800                          |
|                | AFRP<br>ロッド | φ4        | 12.6                      | 0.54×10 <sup>5</sup>           | 19000                          |
|                |             | φ6        | 28.3                      | 0.54×10 <sup>5</sup>           | 19000                          |
|                |             | φ7.4      | 43.0                      | 0.54×10 <sup>5</sup>           | 19000                          |

表2 鋼材の品質

|        | 直径<br>(mm) | 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 降伏強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|--------|------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 標準PC鋼筋 | 23         | 423.8                     | 2.1×10 <sup>5</sup>            | 1585                           | 13071                          |
| SR-24  | 6          | 28.3                      | 2.1×10 <sup>5</sup>            | 3870                           | 5850                           |
|        | 9          | 54.1                      | 2.1×10 <sup>5</sup>            | 3076                           | 4548                           |
| SD-30  | 13         | 121.0                     | 2.1×10 <sup>5</sup>            | 3256                           | 4660                           |

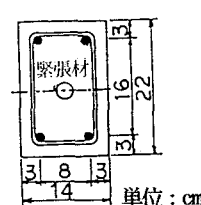


図1 供試体断面図

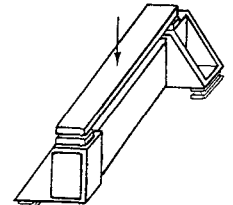


図2 載荷方法

表3 終局ねじり強度の実験値と計算値

| No. | 梁供試体名            | 有効プレ<br>ストレス<br>係数<br>$\alpha$ | プレスト<br>レス<br>係数<br>$\gamma$ | 補強筋比 (%) |       |           | 実験値<br>(t・m) | 計算値 / (実験値) |       |       |
|-----|------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|-------|-----------|--------------|-------------|-------|-------|
|     |                  |                                |                              | $P_1$    | $P_2$ | $P_1/P_2$ |              | 木本学会        | Hsu   | 児島式   |
| 18  | A-6-6, 15.0-0    | 0                              | 1.00                         | 0.37     | 0.37  | 1.00      | 0.544        | 1.579       | 0.868 | 0.543 |
| 19  | A-6-4, 7.0-0     | 0                              | 1.00                         | 0.37     | 0.35  | 1.06      | 0.542        | 1.542       | 0.831 | 0.543 |
| 1   | A-6-4, 7.0-50    | 46.1                           | 1.47                         | 0.37     | 0.35  | 1.06      | 0.820        | 1.542       | 1.193 | 1.201 |
| 2   | A-6-6, 15.0-50   | 46.9                           | 1.47                         | 0.37     | 0.37  | 1.00      | 0.730        | 1.579       | 1.240 | 1.204 |
| 26  | A-7-4, 7.0-50    | 52.3                           | 1.50                         | 0.56     | 0.35  | 1.60      | 0.934        | 1.698       | 1.223 | 1.535 |
| 27  | A-7-4, 7.0-50    | 52.3                           | 1.50                         | 0.56     | 0.35  | 1.60      | 0.846        | 1.698       | 1.223 | 1.535 |
| 13  | C-6-4, 7.0-100   | 95.3                           | 1.84                         | 0.37     | 0.35  | 1.06      | 1.026        | 1.542       | 1.402 | 1.371 |
| 14  | A-6-6, 15.0-100  | 95.3                           | 1.84                         | 0.37     | 0.37  | 1.00      | 1.063        | 1.579       | 1.445 | 1.371 |
| 24  | A-6-4, 7.0-100   | 93.0                           | 1.83                         | 0.37     | 0.35  | 1.06      | 1.168        | 1.542       | 1.393 | 1.364 |
| 25  | A-6-6, 15.0-100  | 93.0                           | 1.83                         | 0.37     | 0.37  | 1.00      | 1.060        | 1.579       | 1.437 | 1.364 |
| 3   | C-8-8, 6.0-50    | 49.1                           | 1.49                         | 0.65     | 1.55  | 0.42      | 1.020        | 3.161       | 3.643 | 1.705 |
| 4   | C-8-8, 8.5-50    | 46.6                           | 1.47                         | 0.65     | 1.09  | 0.60      | 0.940        | 3.161       | 2.689 | 1.702 |
| 9   | C-8-6, 4.0-50    | 59.8                           | 1.58                         | 0.65     | 1.30  | 0.50      | 1.024        | 3.161       | 3.207 | 1.488 |
| 10  | C-8-6, 11.0-50   | 59.8                           | 1.58                         | 0.65     | 0.47  | 1.38      | 0.883        | 3.161       | 1.479 | 1.488 |
| 17  | C-5-6, 11.0-50   | 57.2                           | 1.56                         | 0.13     | 0.47  | 0.28      | 0.861        | 0.573       | 1.467 | 0.823 |
| 21  | C-12-6, 11.0-50  | 51.7                           | 1.52                         | 1.47     | 0.47  | 3.13      | 0.868        | 1.816       | 1.441 | 1.580 |
| 7   | C-8-8, 8.5-100   | 102.7                          | 1.89                         | 0.65     | 1.09  | 0.60      | 1.382        | 3.161       | 2.922 | 1.797 |
| 8   | C-8-8, 6.0-100   | 102.7                          | 1.89                         | 0.65     | 1.55  | 0.42      | 1.496        | 3.161       | 3.664 | 1.797 |
| 11  | C-8-6, 4.0-100   | 96.1                           | 1.85                         | 0.65     | 1.30  | 0.50      | 1.252        | 3.161       | 3.353 | 1.586 |
| 12  | C-8-6, 11.0-100  | 96.1                           | 1.85                         | 0.65     | 0.47  | 1.38      | 1.070        | 1.816       | 1.625 | 1.586 |
| 20  | C-5-6, 11.0-100  | 96.1                           | 1.85                         | 0.13     | 0.47  | 0.28      | 1.052        | 0.573       | 1.625 | 1.030 |
| 22  | C-12-6, 11.0-100 | 96.1                           | 1.85                         | 1.47     | 0.47  | 3.13      | 1.108        | 1.816       | 1.625 | 1.580 |
| 23  | C-8-8, 6.0-100   | 98.3                           | 1.86                         | 0.65     | 1.55  | 0.42      | 1.300        | 3.161       | 3.848 | 1.788 |
| 30  | R-13-9, 6.0-0    | 0                              | 1.00                         | 1.57     | 1.70  | 0.92      | 0.840        | 1.067       | 0.685 | 0.720 |
| 31  | R-13-9, 6.0-0    | 0                              | 1.00                         | 1.57     | 1.70  | 0.92      | 0.810        | 1.067       | 0.685 | 0.720 |
| 32  | R-13-9, 8.5-0    | 0                              | 1.00                         | 1.57     | 1.20  | 1.31      | 0.660        | 0.850       | 0.501 | 0.543 |
| 15  | P-13-9, 6.0-50   | 54.6                           | 1.54                         | 1.57     | 1.70  | 0.92      | 1.372        | 1.067       | 1.094 | 1.028 |
| 16  | P-13-9, 8.5-50   | 52.5                           | 1.52                         | 1.57     | 1.20  | 1.31      | 1.206        | 0.850       | 0.900 | 0.826 |
| 28  | C-10-9, 11.0-50  | 56.8                           | 1.56                         | 0.91     | 0.93  | 0.98      | 0.510        | 0.820       | 0.683 | 0.683 |
| 29  | P-6-9, 11.0-50   | 60.1                           | 1.58                         | 0.30     | 0.93  | 0.32      | 0.267        | 0.835       | 0.695 | 0.695 |
| 5   | P-13-9, 8.5-100  | 90.0                           | 1.80                         | 1.57     | 1.20  | 1.31      | 1.254        | 0.850       | 1.058 | 0.979 |
| 6   | P-13-9, 6.0-100  | 92.0                           | 1.82                         | 1.57     | 1.70  | 0.92      | 1.334        | 1.067       | 1.286 | 1.195 |

供試体名：補強材種類・軸方向筋径・横方向筋径、ビッチ・プレストレス A：AFRP, C：CFRP, R：鉄筋, P：PC鋼棒  
※：緊張材のみCFRP

分の和としているが、児島式では軸方向筋と横方向筋の降伏を区別して考慮できる。これらの算定式のなかでは児島式による推定値が実験値に比較的近い値を示した。しかし、鋼材を用いた場合は安全側の推定値を与えるが、鋼材の降伏値の代わりにFRPロッドの引張強度を代入して算出するとかなり危険側の推定値を与えることとなった。これは、FRPロッドの曲率部での強度低下や、せん断力の作用によりひびわれ部で一軸引張強度より低い荷重で補強筋が破断することにより梁の破壊に至るためと考えられる。

#### 4. まとめ

FRPロッドを緊張材および補強材に用いたPC梁の終局ねじり耐力を既往の算定式を用いて推定するとかなり危険側となる。従って、FRPロッドの引張強度として一軸引張強度からある程度低減した値を用いて算定する必要があると考えられる。

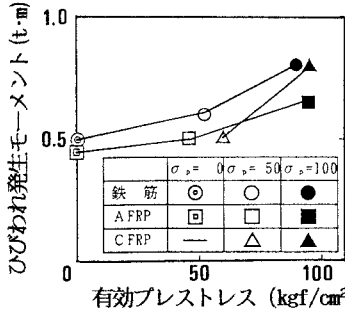


図3 プレストレスとひびわれ発生モーメントの関係

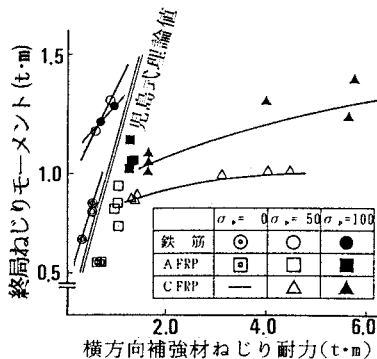


図4 横補強と終局ねじりモーメントの関係

Hsu式  

$$M_{tu} = \frac{b^2 h}{3} \cdot 2.4 \sqrt{f_c} (2.5 \sqrt{1 + 10 \sigma_p / f_c} - 1.5) + \alpha \frac{b a h A_{tw} f_{tu}}{S}$$

$$\alpha = 0.66 + 0.33 h a / b a$$
 児島式  

$$M_{tu} = M_{tc} + M_{ts}$$

$$M_{tc} = (1 - 2t/b)^2 (1 - 2t/h) \gamma M_{tcr}$$

$$M_{tcr} = M_{t0} + 1/4 \cdot (f_b / f_t - 1) (5 - f_b / f_t) (M_{t0} - M_{ts})$$

$$M_{t0} = \frac{1}{3 + 1.8b/h} b^2 h f_t, M_{t0} = \frac{1}{2} (1 - \frac{b}{3h}) b^2 h f_t$$

$$M_{ts} = 2 \lambda A_m \gamma \frac{A_{tw} f_{tu}}{S} \quad (\text{横方向筋降伏})$$

$$M_{ts1} = 2 \lambda A_m \frac{A_{tw} f_{tu}}{\gamma u} + 2 A_m \frac{\sigma \cdot t}{\gamma u} \quad (\text{軸方向筋降伏})$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \sigma_p / f_t}, A_m = b a h a, \lambda = 0.6 \text{ (抵抗係数)}$$

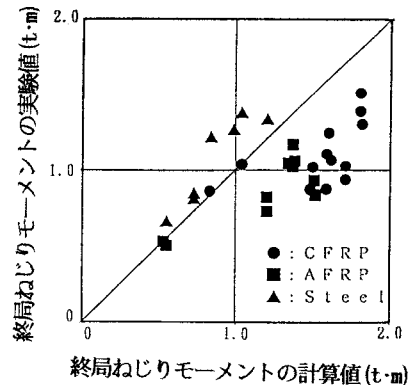


図5 終局ねじりモーメントの実験値と計算値の関係

#### <参考文献>

- 1) 米倉亜州夫他：FRPロッドを用いたPC梁の曲げおよびせん断強さ，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム，土木学会，pp.241-246，1992
- 2) 児島孝之他：PRC部材の終局ねじり耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，12-2，pp.191-196