

# 論文 PRC はり部材のせん断耐荷挙動に及ぼすプレストレスの影響

示 敬三<sup>\*1</sup>・井上 晋<sup>\*2</sup>・小林 和夫<sup>\*3</sup>・仁枝 保<sup>\*4</sup>

**要旨：**せん断破壊先行型の T 形断面 PRC はり部材において，せん断補強筋の有無，コンクリート強度および断面下縁のプレストレスレベルの大きさがせん断ひび割れ耐力，終局耐力，破壊性状などの基本的せん断耐荷特性に及ぼす影響を静的載荷試験によって検討した。特に，上述の要因がコンクリートおよびせん断補強筋の分担せん断力に及ぼす影響を，修正圧縮場理論による解析結果とあわせて比較・検討した。その結果，修正圧縮場理論は，コンクリートの引張強度を適切に評価すれば PRC はり部材に対しても十分に適用性があることが確認された。

**キーワード：**修正圧縮場理論，コンクリートの分担せん断力，PRC はり部材

## 1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では，棒部材のせん断耐力はコンクリートが負担するせん断力( $V_{cd}$ )とせん断補強筋が負担するせん断力( $V_{sd}$ )の和として与えられ，通常の一方荷重下では，せん断ひび割れ発生後も $V_{cd}$ は一定値をとると考えられている。しかしながら，せん断ひび割れ発生後のせん断抵抗メカニズムは複雑であり， $V_{cd}$ と $V_{sd}$ の分担率の変化やプレストレス等の軸方向圧縮力が， $V_{cd}$ に及ぼす影響を明確にとらえることが，より合理的なせん断に対する設計法を考える上で今後重要な課題であると考えられる。

本研究では，上述の点に関する基礎資料を得ることを目的として，曲げ・せん断を同時に受けるせん断破壊先行型の PRC はり部材に対して静的載荷試験を行うとともに，Collins らの提案する修正圧縮場理論<sup>2)</sup>を用いてせん断耐荷挙動を解析し，PRC はりにおける導入プレストレスが，せん断ひび割れ発生荷重ならびに $V_{cd}$ と $V_{sd}$ の分担率に及ぼす影響について実験および解析の両面から検討した。

## 2. 載荷試験概要

### 2.1 供試体の種類

本実験で用いた PRC はり供試体の断面形状・寸法を図-1に示す。いずれの供試体も主鉄筋は 2-D16( $f_y = 320N/mm^2$ )とし，せん断補強筋には D6 スターラップ( $f_y = 410N/mm^2$ )を用いた。また，スターラップの配置間隔は $\infty$

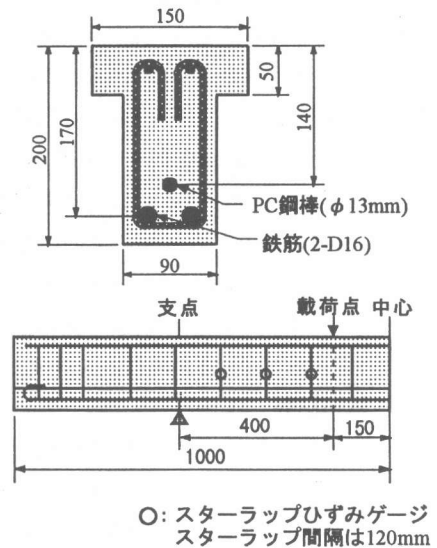


図-1 供試体の断面形状・寸法(単位: mm)

- \*1 中央復建コンサルタント (株) (正会員)
- \*2 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科，工博 (正会員)
- \*3 大阪工業大学教授 工学部土木工学科，工博 (正会員)
- \*4 大阪工業大学講師 工学部土木工学科 (正会員)

表-1 供試体の詳細およびせん断ひび割れ発生荷重

| 供試体      | スターラップ<br>間隔<br>(mm) | *1<br>PC<br>鋼材 | *2<br>断面下縁<br>プレストレス<br>$\sigma_p$<br>( $N/mm^2$ ) | コンクリート<br>実圧縮強度<br>$f_c$<br>( $N/mm^2$ ) | せん断ひび割れ発生荷重<br>(KN) |                 |                          |                 |                          |
|----------|----------------------|----------------|--|--|---------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
|          |                      |                |  |  | 実測値<br>$P_{cs}$     | 計算値             |                          |                 |                          |
|          |                      |                |  |  |                     | *3<br>$P_{cs1}$ | $\frac{P_{cs}}{P_{cs1}}$ | *4<br>$P_{cs2}$ | $\frac{P_{cs}}{P_{cs2}}$ |
| T-0-0    | $\infty$             | $\phi 13$      | 0  | 41.1                                     | 59.1                | 42.1            | 1.41                     | 55.2            | 1.07                     |
| T-12-0   | 120                  |                |  |  | 61.3                | 42.1            | 1.46                     | 55.2            | 1.10                     |
| T-0-20   | $\infty$             |                | 1.96   | 40.7                                     | 65.5                | 44.8            | 1.46                     | 63.2            | 1.03                     |
| T-12-20  | 120                  |                |  |  | 70.1                | 44.8            | 1.56                     | 63.2            | 1.11                     |
| T-0-40   | $\infty$             |                | 3.92   | 40.7                                     | 68.6                | 47.7            | 1.44                     | 70.3            | 0.98                     |
| T-12-40  | 120                  |                |  |  | 71.2                | 47.7            | 1.49                     | 70.3            | 1.01                     |
| HT-0-0   | $\infty$             | $\phi 13$      | 0  | 79.8                                     | 81.1                | 52.6            | 1.58                     | 77.5            | 1.05                     |
| HT-12-0  | 120                  |                |  |  | 81.4                | 52.6            | 1.61                     | 77.5            | 1.05                     |
| HT-0-20  | $\infty$             |                | 1.96   | 90.4                                     | 88.4                | 57.9            | 1.53                     | 91.7            | 0.96                     |
| HT-12-20 | 120                  |                |  |  | 91.6                | 57.9            | 1.62                     | 91.7            | 1.00                     |
| HT-0-40  | $\infty$             |                | 3.92   | 90.4                                     | 93.8                | 60.9            | 1.74                     | 99.6            | 1.06                     |
| HT-12-40 | 120                  |                |  |  | 95.5                | 60.9            | 1.57                     | 99.6            | 0.96                     |

\*1  $\phi 13 : f_{py} = 1492 N/mm^2$

\*2  $\sigma_p = 0$  の供試体は PC 鋼棒を非緊張の状態に配置し、グラウト注入のみを実施したものである

\*3  $P_{cs1} = 2V_{cd}$ , ( $V_{cd}$  は土木学会コンクリート標準示方書による。

ただし、材料係数  $\gamma_c = 1.0$ , 部材係数  $\gamma_b = 1.0$ )

\*4  $P_{cs2} = 2V_c$ , ( $V_c$  は修正圧場理論による)

(スターラップ無配置), 120mm (せん断補強筋比: 0.588%) の 2 種類を選定した。コンクリートの設計圧縮強度は  $40 N/mm^2$ ,  $80 N/mm^2$  の 2 種類とし, さらに  $\phi 13mm$  PC 鋼棒 ( $d_p = 140mm$ ) を用いて各々の断面下縁に 0 (非緊張状態でナット定着後グラウト注入), 2.0,  $4.0 N/mm^2$  の有効プレストレスを導入した。また, PC 鋼棒はスパイラルシース内にセメントペーストグラウト (W/C=35%) を注入したボンダタイプとした。これらの要因の組み合わせにより表 1 に示す合計 12 体のはりを作製した。

## 2.2 載荷試験

載荷試験は, 全長 2000mm の単純はりに対して, 曲げスパン 300mm, せん断スパン 400mm とした ( $a/d = 2.35$ ) 対称 2 点集中荷重方式で実施し, 載荷時には荷重, せん断スパン内の全スターラップひずみ, スパン中央位置での変位, コンクリートの主引張, 主圧縮ひずみ等を測定した。

## 3. 解析方法

せん断耐荷挙動を解析する方法として, 斜めひび割れ間のコンクリートの引張応力とひび割れ後の圧縮強度の低下を考慮した修正圧縮場理論を用いた。同理論によるせん断抵抗力は式(1)より算出される。この式は強度累加式の形をとり, ひび割れ傾斜角  $\theta$  と主引張応力  $f_1$  の関数で表されている。

$$V = V_c + V_s \\ = f_1 b_w jd \cot \theta + (A_w f_w / s) jd \cot \theta \quad (1)$$

ここに,  $f_1$ : コンクリートの主引張応力度 (斜めひび割れ発生後はひび割れ間コンクリートの引張抵抗の寄与を考慮),  $b_w$ : ウェブ幅,  $jd$ : 圧縮合力作用位置から引張鉄筋圆心位置までの距離,  $\theta$ : 圧縮斜材角 (せん断ひび割れの角度),  $A_w$ : せん断補強筋の断面積,  $f_w$ : せん断補強筋の応力度,  $s$ : スターラップ配置間隔である。なお, この理論は純せん断に対するものであるが, 断面分割法等の通常の曲げ解析と組み合わせることにより, 曲げモーメント・軸力・せん

表-2 実験結果

| 供試体      | *1<br>曲げ破壊<br>荷重計算値<br>$P_{ub}$ (KN) | せん断破壊荷重計算値<br>$P_{us}$ (KN) |                       |                 |                       | 最大荷重<br>実測値<br>$P_u$<br>(KN) | *4<br>破壊<br>形式 |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|----------------|
|          |                                      | *2<br>$P_{us1}$             | $\frac{P_u}{P_{us1}}$ | *3<br>$P_{us2}$ | $\frac{P_u}{P_{us2}}$ |                              |                |
| T-0-0    | 187.2                                | 42.1                        | 1.46                  | 55.2            | 1.07                  | 59.1                         | STF            |
| T-12-0   | 187.2                                | 105.6                       | 1.26                  | 144.2           | 0.92                  | 133.3                        | STF            |
| T-0-20   | 190.7                                | 44.8                        | 2.26                  | 63.2            | 1.60                  | 101.1                        | STF            |
| T-12-20  | 190.7                                | 108.4                       | 1.45                  | 145.1           | 1.08                  | 156.9                        | SCF            |
| T-0-40   | 192.2                                | 47.7                        | 2.31                  | 70.3            | 1.56                  | 110.3                        | STF            |
| T-12-40  | 192.2                                | 111.2                       | 1.30                  | 146.6           | 0.99                  | 144.8                        | SCF            |
| HT-0-0   | 220.1                                | 52.6                        | 2.90                  | 77.5            | 1.98                  | 153.7                        | STF            |
| HT-12-0  | 220.1                                | 116.0                       | 1.61                  | 164.3           | 1.13                  | 186.4                        | STF            |
| HT-0-20  | 222.9                                | 57.9                        | 2.90                  | 91.7            | 1.80                  | 165.9                        | STF            |
| HT-12-20 | 222.9                                | 121.3                       | 1.49                  | 169.1           | 1.06                  | 180.2                        | SCF            |
| HT-0-40  | 223.0                                | 60.9                        | 2.97                  | 99.6            | 1.81                  | 180.7                        | STF            |
| HT-12-40 | 223.0                                | 124.3                       | 1.58                  | 173.6           | 1.13                  | 196.6                        | FCF            |

\*1 断面分割法による曲げ解析を用いた。コンクリートの応力-ひずみモデルはコンクリート標準示方書の手法を、また、鉄筋にはトリリニアモデル、PC鋼材にはBlakeley&Parkモデル<sup>4)</sup>を用いた。

\*2  $P_{us1} = 2(V_{cd} + V_{sd})$ , ( $V_{cd}$ ,  $V_{sd}$  は土木学会コンクリート標準示方書による。

ただし、材料係数  $\gamma_s = \gamma_c = 1.0$ , 部材係数  $\gamma_b = 1.0$ )

\*3  $P_{us2} = 2(V_c + V_s)$ , ( $V_c$ ,  $V_s$  は修正圧場理論による)

\*4 STF : せん断引張破壊, SCF : せん断圧縮破壊, FCF : 曲げ圧縮破壊

断力同時作用下のスターラップ等のひずみを求めることができる。また、比較のために土木学会コンクリート標準示方書の算定式(材料係数・部材係数は全て 1.0)を用いた。なお、コンクリートの圧縮および引張側の応力-ひずみ関係は Collins らが提案しているもの<sup>2)</sup>を用いた。解析値の種類は、コンクリートの引張強度  $f_t$  として  $10\phi 20\text{cm}$  の円柱供試体による割裂強度を用いたものを解析値 1, Collins らが提案している式 ( $f_t = 0.33\lambda\sqrt{f'_c}$  N/mm<sup>2</sup> :  $\lambda = 1.00$ ,  $f'_c$  : 圧縮強度) で算出した引張強度を用いたものを解析値 2 とした。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 せん断ひび割れ発生荷重と最大荷重

せん断ひび割れ発生荷重, 最大荷重の実測値および破壊形式を、それぞれ表-1, 2 に、導入プレストレスとせん断ひび割れ発生荷重の関係の一例を図-2 に示す。なお表中の  $P_{us2}$ ,  $P_{us1}$  は Collins らが提案する引張強度式を用い

て算出したものである。

表-1 および図-2 に示すように、プレストレスレベルの増加とともにせん断ひび割れ発生荷重が増加し、その増加率は  $f'_{ck} = 40\text{N/mm}^2$  と  $f'_{ck} = 80\text{N/mm}^2$  ではほとんど変わらないことがわかる。また、プレストレスレベルが同一の場合、 $f'_{ck} = 80\text{N/mm}^2$  の場合は  $f'_{ck} = 40\text{N/mm}^2$  の場合に比べてせん断ひび割れ発生荷重が、23~41%大きくなり、コンクリート強度の影響が顕著に現れた。一方、表-2 から、せん断補強筋無配置のはりの断面下縁に  $2.0\sim 4.0\text{N/mm}^2$  程度のプレストレスを導入した場合、 $f'_{ck} = 40\text{N/mm}^2$  の場合の終局耐力は、71~88%増となり相当量大きくなるものの、 $f'_{ck} = 80\text{N/mm}^2$  の場合における増加は前者程ではない。すなわち、終局せん断耐力も、導入プレストレスの増加にともない大きくなるものの、その増加率にはコンクリート強度の影響が認められた。

表-1, 2 において実測値と土木学会示方書

に準じた算定値との比  $P_{cs}/P_{cs1}$  および  $P_u/P_{us1}$  は、それぞれ 1.41~1.74, 1.26~2.97 となり、かなり安全側にばらつく傾向が認められた。また、せん断ひび割れ発生荷重の実測値と修正圧縮場理論を用いた算定値との比  $P_{cs}/P_{cs2}$  は、0.96~1.10 となり、プレストレス量、コンクリート強度、せん断補強筋量に関係なくほぼ妥当な範囲で実測値を推定していることがわかる。一方、せん断補強筋を配置した場合の最大荷重の比  $P_u/P_{us2}$  は、0.92~1.13(曲げ破壊したものは除く)となりプレストレス量、コンクリート強度に関係なく終局せん断耐力を程良く推定しているのに対し、せん断補強筋無配置の場合の比は T-0-0 を除き 1.56~1.98 となり、かなり安全側の評価を示し、せん断補強筋量による影響が顕著に認められた。

#### 4.2 ひび割れ性状および破壊形式

図-3 にせん断補強筋無配置の供試体における載荷終了後のせん断スパンのひび割れ状況を示す。導入プレストレス  $\sigma_p = 0 \sim 4.0 \text{ N/mm}^2$  の範囲において、コンクリート強度によるひび割れ分散性状に顕著な差は見られなかった。

また、破壊形式は、せん断補強筋無配置のほりの場合、コンクリート強度に関係なく、全てウェブせん断ひび割れの進展により最終的には軸方向鉄筋とコンクリートとの付着破壊による、せん断引張破壊を呈した。一方、せん断補強筋を配置したはりでは、導入プレストレス量の増大にともない破壊形式がせん断引張破壊から曲げせん断破壊となり  $f'_{ck} = 80 \text{ N/mm}^2$  で導入プレストレスを  $4.0 \text{ N/mm}^2$  としたはり(HP-12-40)では、最終的に曲げ圧縮破壊した。これは、プレストレスレベルの大きさがせん断ひび割れ発生以後、最大耐力に至るまでの荷重増加量およびせん断破壊荷重や破壊形式に及ぼす影響がきわめて大きいことを示している。

#### 4.3 斜めひび割れ傾斜角

図-4 に作用せん断力とひび割れ傾斜角の関係の一例を実測値および解析値2について示す。導入プレストレス  $\sigma_p = 0 \sim 4.0 \text{ N/mm}^2$  の範囲

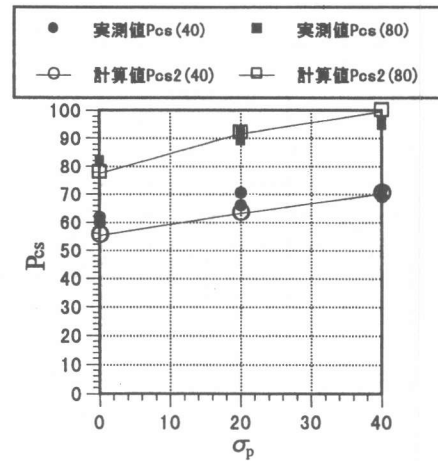


図-2 導入プレストレス—ひび割れ発生荷重関係  
( )内はコンクリートの設計圧縮強度

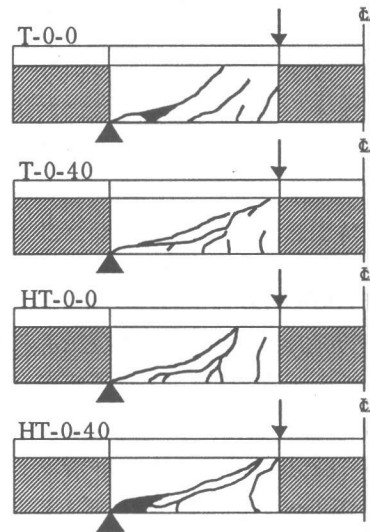


図-3 せん断スパンのひび割れ性状

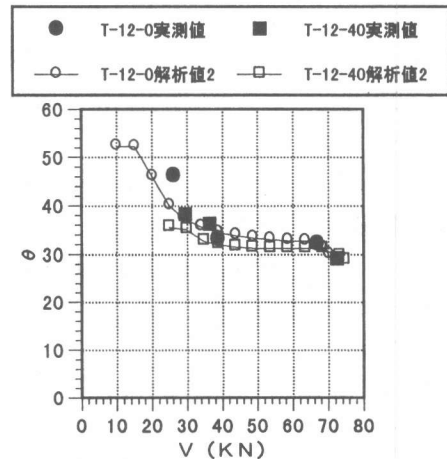


図-4 作用せん断力—ひび割れ傾斜角関係の一例

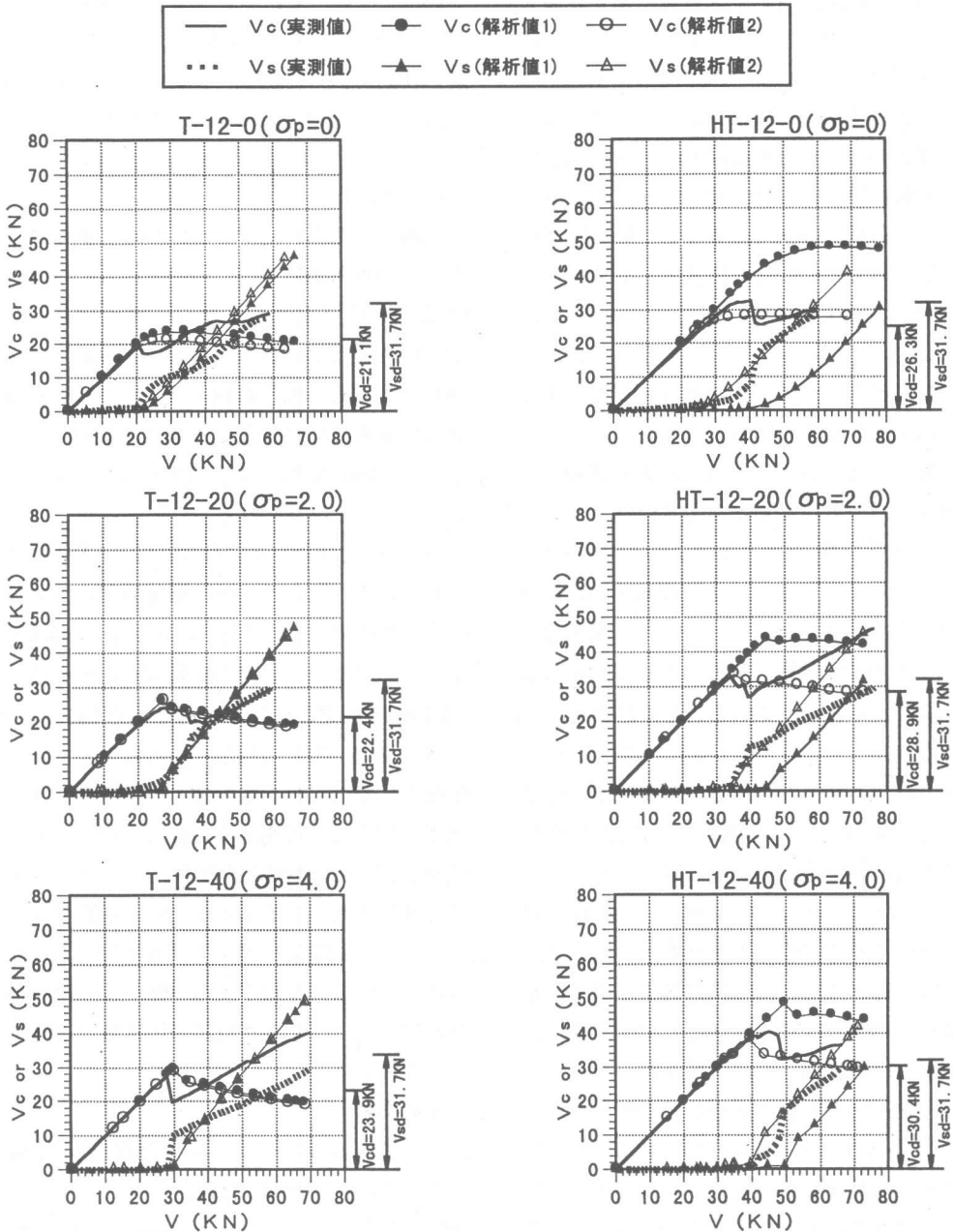


図-5 作用せん断力-コンクリート・せん断補強筋の分担せん断力の関係

においては、プレストレスレベルの大きい供試体ほどひび割れ傾斜角が若干小さくなる傾向が認められた。また、終局時のひび割れ傾斜角の実測値は  $28\sim 35^\circ$  程度となり、 $45^\circ$  よりかなり小さくなること、また、この傾向を修正圧縮場理論による解析は十分な精度で推定していることがうかがえる。

#### 4.4 コンクリートおよびせん断補強筋の分担せん断力

図-5は、せん断補強筋を配置したはりにおける作用せん断力とコンクリートおよびせん断補強筋の分担せん断力の関係を示したものである。これらの図中の $V_s$ の実測値は、支配的なせん断ひび割れと交差するスターラップひずみ

の実測値の平均値からトラス理論により計算したものであり、 $V_c$ の実測値は作用せん断力 $V$ から $V_s$ を差し引いたものである。一方、 $V_s$ および $V_c$ の解析値は、それぞれ(1)式の右辺第2項および第1項から作用曲げモーメントの値を考慮して解析的に得られた値である。その解析位置は、せん断ひび割れの発生している領域を平均化して考え、その代表位置としてスターラップひずみが計測されている支点より 220mm 位置とした。

図-5 に示すように、解析値 1, 2 ともせん断ひび割れ発生荷重時におけるコンクリート分担せん断力の低下現象や、せん断補強筋の分担せん断力の増加を程良くとらえている。

斜めひび割れ発生時では、 $f'_{ck} = 40N/mm^2$ のコンクリートはりの解析結果および $f'_{ck} = 80N/mm^2$ のコンクリートはりの解析値 2 は、実測値と多少差異があるものの実現象の傾向を非常によくとらえていることが認められた。しかしながら、 $f'_{ck} = 80N/mm^2$ のコンクリートはりのコンクリート分担せん断力は解析値 1 より約 25%程小さく、解析値 1 は実測値をかなり危険側の評価をする傾向が認められた。

この一因としては、 $f'_{ck} = 80N/mm^2$ のコンクリートはりでの実際の引張強度が、応力状態の違い等の影響により円柱供試体より求めた割裂強度に比べ低くなっていることが考えられ、この値を用いて算出した解析値 1 がコンクリートの分担せん断力を過大評価したと考えられる。

斜めひび割れ発生直後、 $f'_{ck} = 40N/mm^2$ のコンクリートはりではプレストレスレベルが大きいはり部材ほどコンクリートの分担せん断力の一時的な減少が顕著に現れるものの、 $f'_{ck} = 80N/mm^2$ のコンクリートはりでの減少率はプレストレスレベルに関係なく約 20%となった。

また、コンクリートの分担せん断力の実測値は、斜めひび割れ発生後、一旦減少傾向を示すものの、いずれの供試体においてもコンクリート標準示方書による設計せん断耐力 $V_{cd}$ は実測値に対して、ほぼ安全側の値を与えることが示

された。なお、上述のような $f'_{ck} = 40N/mm^2$ のコンクリートはりでの現象は、 $f'_{ck} = 30N/mm^2$ 程度のコンクリートを用いた PRC はりに対する先の研究<sup>3)</sup>での結果とほぼ同様であった。

## 5. まとめ

本研究から得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

- (1)せん断ひび割れ発生荷重の算出法として、修正圧縮場理論を用いた場合、プレストレスレベル、せん断補強筋量およびコンクリート強度等の各種要因に関係なく、ほぼ実測値に近い値を与え、部材挙動をより正確に求める場合には有効であると考えられる。
- (2) $\sigma_p = 2.0 \sim 4.0 N/mm^2$ 程度のプレストレスを導入することにより、せん断補強筋の無いはりのせん断耐力はかなり増加するが、その増加率にはコンクリート強度の影響がうかがえる。
- (3)本研究で得られた修正圧縮場理論による解析値 1 と 2 では、Collins らの提案している引張強度式を適用した解析値 2 が、コンクリート強度に関係なく実測値を精度よく推測している。
- (4)修正圧縮場理論による解析結果は、実験結果と多少差異があるものの、はり部材のコンクリートの引張強度を適切に評価すれば、本研究のような一方向荷重下での PRC はり部材の載荷の進行に伴うせん断抵抗挙動を逐一追跡できると考えられる。

## 参考文献

- 1)土木学会：コンクリート標準示方書(平成 8 年度制定)，設計編，1996。
- 2)M.P.Collins and D.Mitchell：Prestressed Concrete Structural，PRENTICE HALL，1991。
- 3)示 敬三，井上 晋，小林和夫：RC および PRC はり部材のせん断耐荷挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19 No.2，pp.711-716，1997。
- 4)Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beam Sections，PCI JOURNAL March-April，pp.46-69，1980。