

# せん断補強筋を有する連続繊維補強プレストレスト コンクリートはりのせん断耐力

佐藤靖彦<sup>1</sup>・上田多門<sup>2</sup>・角田與史雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 北海道大学助手 工学部 土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学助教授 工学部 土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>正会員 工博 北海道大学教授 工学部 土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

本研究において、非線形有限要素解析による数値実験により連続繊維補強プレストレストコンクリートはりのせん断耐力評価式を構築した。本評価式は、既に著者が提案した連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力評価式を、プレストレス力の影響を考慮し拡張したものである。最終的に、本評価式の妥当性が既往の実験結果と比較することにより示された。

**Key Words** : FRP rods, PC beams, shear strengths, shear reinforcement, non-linear finite element analysis

## 1. 序論

連続繊維補強材は、鋼材に比べ引張強度が大きく、耐腐食性に優れるといった特性を有することより、プレストレストコンクリート（以下「PC」）部材の緊張材としての利用に大きな期待が寄せられている。

現在までの研究は、連続繊維補強プレストレストコンクリートはりの曲げ性状の把握に重点が置かれており、その曲げ耐力の算定にあたっては、鉄筋コンクリートはりと同様に従来のはり理論を適用できることが報告されている<sup>1)</sup>。しかし、連続繊維補強PCはりのせん断特性に関する検討は行われているものの、そのせん断耐力を正確に予測できるまでには至っていない。これは、せん断耐力に及ぼす補強材の力学的特性の影響とともにプレストレス力の効果を的確に評価できていないことによる。

著者らは、鉄筋または連続繊維補強材により補強したコンクリート（以下「RC」）はりにおいて、補強筋の力学的特性の相違により、せん断耐荷性状が如何に異なるものであるか解析的な検討を行い<sup>2)</sup>、せん断補強筋を有する連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力評価式<sup>3)</sup>を構築したが、本論文では、さらに、プレストレス力が作用する場合に、RCはりに対するせん断耐力評価式を構成する各要素が受け持つせん断力<sup>3)</sup>が、どのような影響を受けるもの

であるか定量的に示す。ただし、連続繊維補強材が破断することによるせん断破壊は、本研究では検討の対象外としている。

## 2. 数値実験の概要

### (1) 解析プログラム

本研究で用いた解析プログラムは、RCはり部材のせん断問題に対して開発されたものであり、分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素解析プログラムである<sup>4)</sup>。

### (2) 解析方法

Fig.1に本解析における要素分割の一例を示す。解析対象として2点集中荷重を受ける単純ばり（矩形断面）を選定する。解析において、その対称性を考慮し半スパンのみモデル化している。プレストレス力は斜線部で示される鋼要素を介して外力として作用させている。また、はり供試体に直接強制変位を与えることにより解析を行っている。

### (3) 解析変数

せん断力に及ぼす要因は数多く存在することが指摘されているが、本研究では、プレストレス力の大きさを主たる解析変数とし、これに連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力評価式を導く上で設定

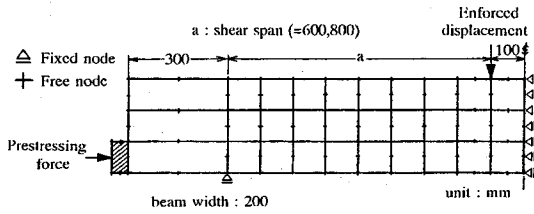


Fig.1 Finite Element Mesh

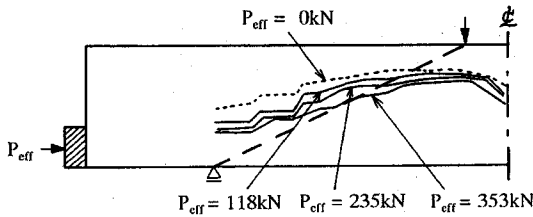


Fig.3 Location of Neutral Axis of Analyzed Specimens

した解析変数を考慮して以下の5つを設定する（括弧内の数値は各変数の値を示す）。

- ①プレストレス力 ( $P_{eff}=78\sim 470\text{kN}$ )
  - ②コンクリート強度 ( $f_c'=29, 44, 59\text{MPa}$ )
  - ③せん断スパン比 ( $a/d=2.4, 3.2$ )
  - ④緊張材の剛性 ( $p_s E_s=2472, 4944\text{MPa}$ )
  - ⑤せん断補強筋の剛性 ( $p_w E_w=137, 412, 824\text{MPa}$ )
- ここに、

- $p_s$  : 緊張材比
- $E_s$  : 緊張材の弾性係数
- $p_w$  : せん断補強筋比
- $E_w$  : せん断補強筋の弾性係数

プレストレス力は、部材断面内の平均プレストレス ( $P_{eff}/bh$ ,  $b$ : 断面幅,  $h$ : 高さ) が、コンクリート強度に対して4.5%, 9%, および13.5% (最大プレストレスで10%から35%程度) となるように設定したものである。ただし、すべての供試体において断面幅は200mm, 高さは300mmと一定である。本論文の対象は、緊張材およびせん断補強筋に連続繊維補強材を用いたPCはり部材であり、緊張材およびせん断補強筋のせん断耐力に与える影響は剛性により評価することとしている<sup>3)</sup>。なお、本解析において緊張材でない引張補強材は用いられていない。

一般に、プレストレス力の作用位置によりせん断耐力が異なる<sup>3)</sup>ものであるが、本研究では、プレストレス力が作用する位置を固定し、曲げ引張縁に圧縮応力が作用する場合のみ取り扱っている。さらに、せん断スパン比が非常に小さい場合において、載荷

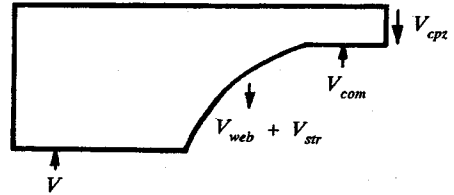


Fig.2 Shear Resisting Model

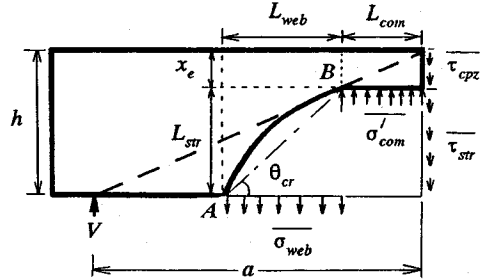


Fig.4 Distribution of Shear Resisting Stresses

板幅の影響が大きいことが実験および解析的に示されているが<sup>6)</sup>、本研究では、載荷板の影響を考慮しない。また、圧縮補強筋の効果に関しては、本研究では取り扱わない。

#### (4) 解析における破壊形式

本解析における破壊は、荷重-変位曲線のピーク値において載荷点付近のコンクリートが軟化を起こすことにより破壊するものである。つまり、実際の破壊形式におけるせん断圧縮破壊に対応する。よって、数値実験により得られる本せん断耐力評価式は、せん断圧縮破壊を起こすのみに適用されるものである。

### 3. 連続繊維補強プレレストコンクリートはりのせん断耐力評価式

#### (1) せん断耐荷モデル

著者らが提案した連続繊維補強コンクリートはりに対するせん断耐荷モデルは、様々な要素が受け持つせん断力の和として次式により与えられる<sup>3)</sup> (Fig.2参照)。

$$V = V_{cpz} + V_{web} + V_{str} - V_{com} \quad (1)$$

ここに、

- $V_{cpz}$  : 曲げ圧縮域（軸方向ひずみより求めた圧縮域）でのコンクリートが受け持つせん断力

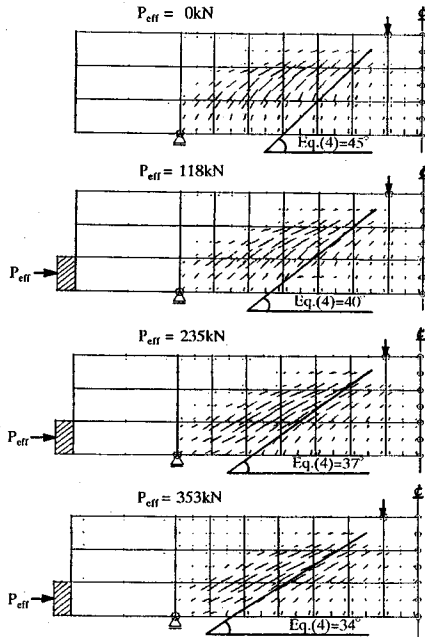


Fig.5 Crack Pattern of Analyzed Specimens

- $V_{str}$  : 斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力
- $V_{web}$  : 斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力
- $V_{com}$  : 水平領域でのコンクリートによるせん断力

式(1)は、荷重点直下の破壊断面と受け持つせん断力が最も大きくなる斜めひび割れ域を結び付ける為に、水平領域を設定している。

Fig.3は、せん断スパン比(以下「 $a/d$ 」と言う)が、2.4である本解析供試体の部材断面内の軸方向ひずみより得た中立軸位置を表す。プレストレス力の増加に伴い中立軸が下がることが明かである。今、中立軸線と荷重点と支点とを結ぶ線との交わる点を交点と呼べば、プレストレス力が作用しないはりの中立軸は、交点まではほぼ一定の深さを保ちそこから支点方向に向かいより深くなるものであった<sup>3)</sup>。Fig.3において、 $P_{eff}=353kN$ の時、若干一定でない部分が見受けられるが、プレストレス力が作用する場合にも、概ね同様の傾向にあるものと考えることができる。また、プレストレス力が作用する場合にも、プレストレス力が作用しない場合と同様に<sup>3)</sup>、交点付近に進展する斜めひび割れ域を考えた場合にそこで受け持たれるせん断力が最も大きくなるものであった。そこで、プレストレス力が作用するはりにおいても、式(1)で表されるせん断耐荷モデルを

設定することとする。

ただし、式(1)における各要素が受け持つせん断力は、Fig.2に示す断面に沿う各ガウスポイント(数値積分により応力ベクトルや荷重ベクトルの計算を行う際の積分点)が受け持つ領域面積に、ガウスポイントでの各応力を乗じたものの和をとることにより求めるものである。解析において、曲げ圧縮域が受け持つせん断力は、荷重点から最も近いガウスポイントを通る断面(荷重点から支点側に11.3mmの位置)でのコンクリートのせん断応力により算出する。水平領域が受け持つせん断力は、コンクリートの圧縮応力により算出する。また、斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力は、コンクリートと補強筋の引張応力を足し合わせた応力により算出し、せん断補強筋以外が受け持つせん断力は、骨材の噛み合わせによるせん断伝達応力から算出する<sup>2)3)</sup>。

上述したように式(1)における各せん断力は、各領域の応力を積分することにより得られるものであるが、各領域における平均値を用いると、式(1)は次式のように表される(Fig.4参照)。

$$V = bx_e \overline{\tau_{cpz}} + p_w b L_{web} \overline{\sigma_{web}} + b L_{str} \overline{\tau_{str}} - b L_{com} \overline{\sigma'_{com}} \quad (2)$$

ここに、

- $\overline{\tau_{cpz}}$  : 曲げ圧縮域での平均せん断応力
- $\overline{\sigma_{web}}$  : 斜めひび割れ域でのせん断補強筋の平均引張応力
- $\overline{\tau_{str}}$  : 斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外の平均せん断応力
- $\overline{\sigma'_{com}}$  : 水平領域でのコンクリートの平均圧縮応力
- $L_{web}$  : 斜めひび割れ域の部材軸水平投影長さ
- $L_{str}$  : 斜めひび割れ域の部材軸垂直投影長さ
- $L_{com}$  : 水平領域長さ
- $b$  : 断面幅
- $x_e$  : 曲げ圧縮域深さ

ただし、水平領域長さは次式の値とする<sup>3)</sup>。

$$L_{com} = \frac{a}{h} x_e \quad (a > h) \quad (3)$$

プレストレス力が作用しないRCはりにおいて、斜めひび割れの始点(Fig.4の点A)と終点(Fig.4の点B)を結ぶ線が部材軸に対し45度の角度を持つものと仮定した<sup>3)</sup>。これは主筋やせん断補強筋の剛性などにより斜めひび割れ角度に明確な相違が認められなかったことによる。

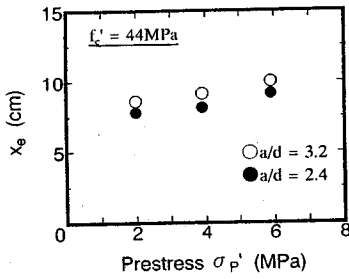
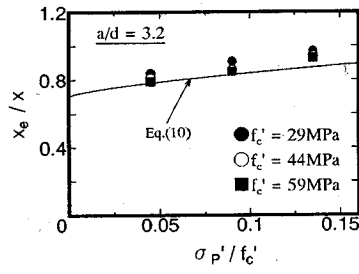
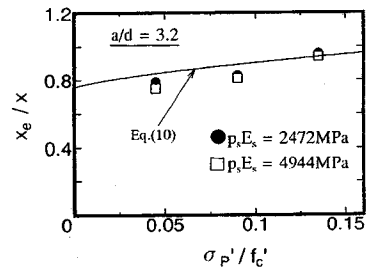


Fig. 6 Relationships between Size of Compression Zone and Prestress



(a) For different concrete strengths ( $p_w E_s = 4944 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{ MPa}$ )



(b) For different stiffness of tendon ( $f_c' = 44 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{ MPa}$ )

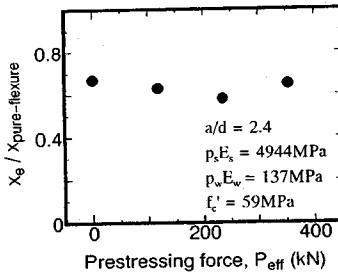
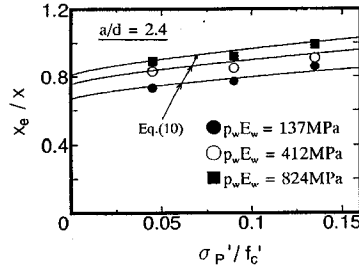


Fig. 7 Relationships between Ratio of Compression Zone of Size in Flexure-Shear Region to that Pure-Flexure Region and Prestressing Force



(c) For different stiffness of shear reinforcement ( $f_c' = 44 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_s = 4944 \text{ MPa}$ )

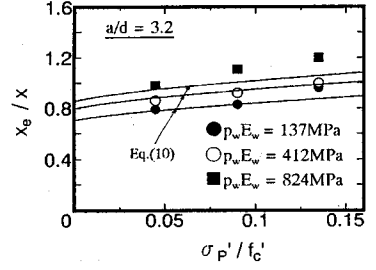


Fig. 8 Relationships between Normalized Size of Compression Zone and Prestress Level

Fig. 5は、解析より得られたプレストレスが異なるはりのひび割れ図を示すものであるが、プレストレスの増加に伴い斜めひび割れ角度が小さくなる事が明かである。そこで、その角度  $\theta_{cr}$  をプレストレスに応じて以下のように与える。

$$\theta_{cr} = 45 \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_p'}{f_c'} \right)^{0.7} \right] \quad (\text{deg}) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_p'$  は、プレストレスを部材断面積で除した値である。

Fig. 5に示した供試体において、仮定した斜めひび割れ域の角度はプレストレスが小さい順に  $42^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $34^\circ$  であるのに対し上式によるそれは、 $40^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $34^\circ$  であり概ね一致している。

また、斜めひび割れ域の部材軸水平投影長さは、次式で与えられる。

$$L_{web} = \frac{L_{sr}}{\tan \theta_{cr}} \quad (5)$$

ここで、

$$L_{sr} = h - x_e \quad (6)$$

ただし、その幾何学的な制約より以下の条件を満た

す範囲に対し本モデルを適用できる。

$$L_{com} + L_{web} < a \quad (7)$$

最終的に、破壊断面における曲げ圧縮域深さ  $x_e$  と斜めひび割れ領域角度  $\theta_{cr}$  が与えられることにより、各応力の分布領域を求めることができる。数値実験において、先に示した解析変数により各分布領域および応力がどのような影響を受けるものであるのかを検討する。

## (2) 破壊断面の曲げ圧縮域深さ

Fig. 6は、解析供試体の曲げ圧縮域深さとプレストレスとの関係を示すものである。終局時の曲げ圧縮域深さは、プレストレスの増加とともに、大きくなる事が明かである。また、RC はり<sup>3)</sup>と同様に、せん断スパン比  $a/d$  が大きいほど、曲げ圧縮域深さは大きい。

RC はりの曲げ圧縮域深さは、曲げ理論におけるコンクリートの引張断面を無視した弾性計算値との比を与えることにより求められる<sup>3)</sup>。これは、解析において、純曲げ領域の曲げ圧縮域は、弾性計算値

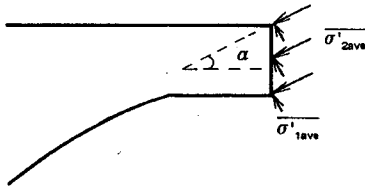


Fig.9 Principal Stress State in Compression Zone

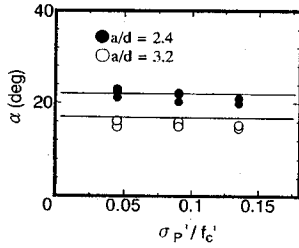


Fig.11 Relationships between Angle of Principal Stress and Prestress Level

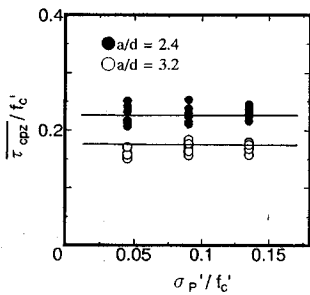
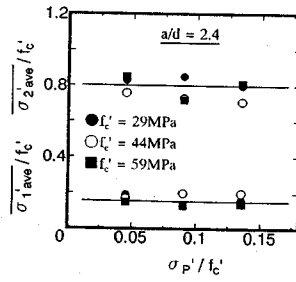
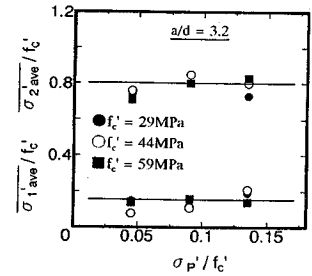


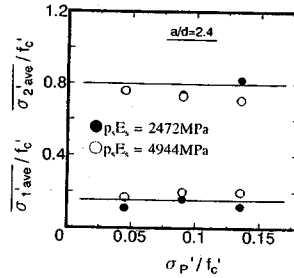
Fig.12 Relationships between Average Shear Stress at Compression Zone and Prestress Level



(a) For different concrete strengths  
( $p_s E_s = 4944 \text{MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{MPa}$ )



(b) For different stiffness of tendon  
( $f_c' = 44 \text{MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{MPa}$ )



(c) For different stiffness of shear reinforcement  
( $f_c' = 44 \text{MPa}$ ,  $p_s E_s = 4944 \text{MPa}$ )

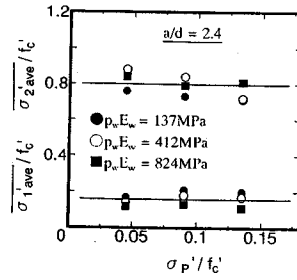
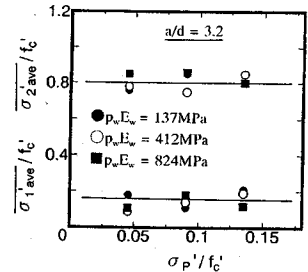


Fig.10 Relationships between Average Principal Stress and Prestress Level



より求まる中立軸位置と概ね一致し、曲げせん断領域での中立軸位置は、それに比べ小さくなる結果に基づいたものである。

Fig.7は、曲げせん断領域での曲げ圧縮域深さ $x_s$ と純曲げ領域での曲げ圧縮域深さ $x_b$ との比とプレストレス力との関係を示す。これより、プレストレス力によらず概ね等しい比となっていることが明かである。よって、この場合も、純曲げ領域での圧縮域深さを基準として破壊断面での曲げ圧縮域深さを定義することができると考えられる。しかし、プレストレス力が作用する場合の弾性計算による中立軸位置は、圧縮縁でのコンクリートの圧縮ひずみの関数として与えられる。そこで、本研究では、プレストレストコンクリートはりの曲げ圧縮域深さも、次式で

表されるRCはりに対する弾性計算による圧縮域深さを基準として考える。

$$x = kd \quad (8)$$

$$k = -np_s + \sqrt{(np_s)^2 + 2np_s} \quad (9)$$

Fig.8は、曲げ圧縮域深さとプレストレスとの関係を、式(8)による弾性計算値 $x$ で除して正規化した曲げ圧縮域深さと、プレストレスをコンクリート強度で除した値(以下「プレストレスレベル」と言う)により整理したものである。Fig.8(a)より、コンクリート強度の大きさによる影響は、プレストレスレベルにより取り扱えることが明かである。そこで、プレストレス力の作用するはりの曲げ圧縮域深さを、

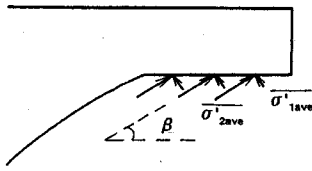
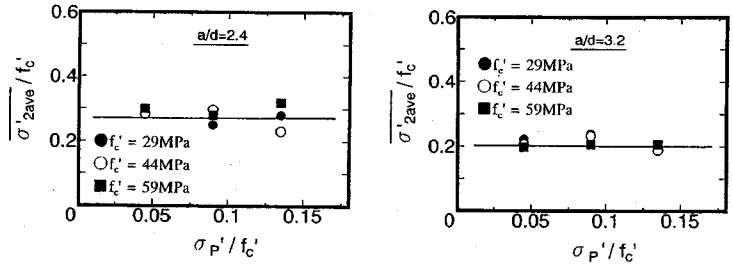


Fig.13 Principal Stress State in Horizontal Zone



(a) For different concrete strengths  
( $p_s E_s = 4944 \text{MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{MPa}$ )

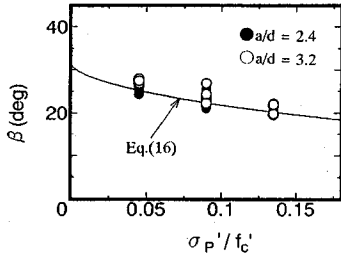
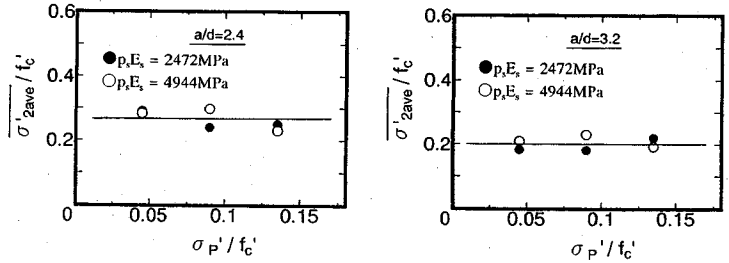


Fig.15 Relationships between Angle of Principal Stress and Prestress Level



(b) For different stiffness of tendon  
( $f'_c = 44 \text{MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{MPa}$ )

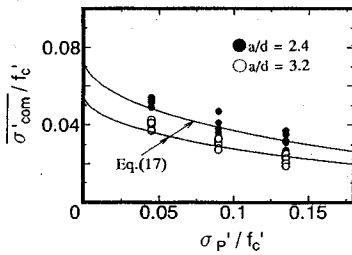
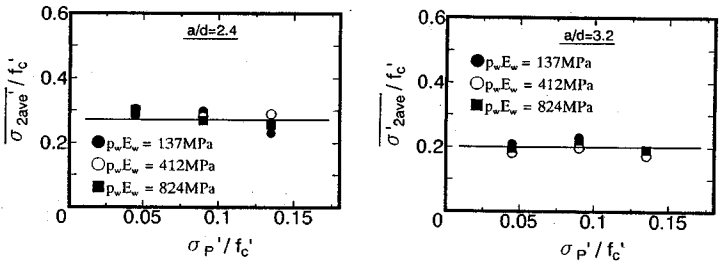


Fig.16 Relationships between Average Compressive Stress and Prestress Level



(c) For different stiffness of shear reinforcement  
( $f'_c = 44 \text{MPa}$ ,  $p_s E_s = 4944 \text{MPa}$ )

Fig.14 Relationships between Average Principal Stress and Prestress Level

RCはりに対する推定式<sup>3)</sup>にプレストレス力を考慮する項を加えて以下のように求めることとする。

$$\frac{x_e}{x} = \left( \frac{x_e}{x} \right)_{\sigma'_P=0} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma'_P}{f'_c} \right)^{0.7} \right] \quad (10)$$

$$= \frac{1 - e^{-\left(\frac{a}{d}\right)}}{1 + 3.2 \cdot 0.12(p_w E_w)^{0.4}} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma'_P}{f'_c} \right)^{0.7} \right]$$

図中の実線は式(10)による予測値を示すものであるが、解析結果の傾向を概ね捉えていると言える。

### (3) 曲げ圧縮域でのコンクリートの平均せん断応力

ここで曲げ圧縮域での主応力 (Fig.9参照) に着目し破壊基準及び平均せん断応力の予測式を構築する。

Fig.10は、曲げ圧縮域における最大主応力の平均値

( $\overline{\sigma'_{1ave}}$ ) 及び最小主応力の平均値 ( $\overline{\sigma'_{2ave}}$ ) とプレストレスレベルとの関係を示す。これより、RCはり<sup>3)</sup>と同様にプレストレスレベルによらず、最小主応力の平均値は、コンクリート強度及び $a/d$ の影響を受けず1軸圧縮強度 $f'_c$ 'のほぼ80%、また、最大主応力の平均はほぼ15%となっている。また、緊張材及びせん断補強筋の剛性の大きさによる影響は観察されずほぼ一定の主応力となっている。

そこで、本研究では、RCはりと同じ破壊基準をPCはりに対しても設定する。

$$\frac{\overline{\sigma'_{2u}}}{f'_c} = 0.80 \quad (11)$$

$$\frac{\overline{\sigma'_{1u}}}{f'_c} = 0.15 \quad (12)$$

ここで、 $\overline{\sigma_{2u}}$  と  $\overline{\sigma_{1u}}$  は破壊時の曲げ圧縮域での最小及び最大主応力の平均値である。

一方Fig.11は、主応力角度 $\alpha$ とプレストレスレベルとの関係を示す。曲げ圧縮域における主応力角度は、プレストレスによる影響を受けず概ね一定であり、 $a/d$ のみに影響を受けるものであった。図中の実線は、次式により与えられるRCはりに対する曲げ圧縮域の主応力角度を示すものであるが、プレストレスが作用する場合にも適用できることが明かである。

$$\tan\alpha = \left(\frac{a}{d}\right)^{-1} \quad (13)$$

最終的に、式(11) (12)より曲げ圧縮域での平均せん断応力  $\overline{\tau_{cpz}}$  は、次式により与えられる。

$$\frac{\overline{\tau_{cpz}}}{f'_c} = 0.65 \sin\alpha \cos\alpha \quad (14)$$

Fig.12は、曲げ圧縮域での平均せん断応力とプレストレスレベルとの関係を示すものであるが、実線で示される式(14)による予測値は、解析値を評価できていることが明かである。この予測式によると、せん断スパン比 $a/d$ が1以下の範囲で、 $a/d$ が小さくなるにつれ  $\overline{\tau_{cpz}}$  が低下する<sup>3)</sup>。しかし、この範囲はせん断スパン $a$ が式(7)の条件を満たさない場合であり、本研究では詳細な検討は行っていない。

#### (4) 水平領域でのコンクリートの平均圧縮応力

Fig.13は、水平領域におけるコンクリートの主応力状態を示すものであるが、すべての解析供試体において最大主応力の平均値 ( $\overline{\sigma'_{1ave}}$ ) は、最小主応力の平均値 ( $\overline{\sigma'_{2ave}}$ ) の10%以下となっており、RCはりと同様に<sup>3)</sup>最小主応力のみが作用する1軸圧縮応力状態で近似することができた。

Fig.14は、プレストレスレベルと最小主応力の平均値との関係を示す。この領域における主応力は、プレストレスが作用する場合においても、コンクリート強度の大きさに比例し、緊張材およびせん断補強筋の剛性による影響を受けず、 $a/d$ により固有の値を持つものと言える。ここで、図中の実線は、次式で表されるRCはりに対する主応力の予測値<sup>3)</sup>を示すものであるが、PCはりに対してもその応力を評価できることが明かである。

$$\frac{\overline{\sigma'_{2ave}}}{f'_c} = 0.64 \left(\frac{a}{d}\right)^{-1} \quad (15)$$

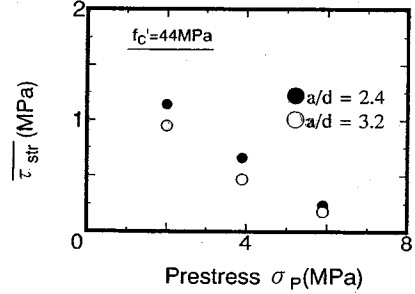


Fig.17 Relationships between Average Shear Stress at Diagonal Cracking Zone and Prestress ( $f'_c = 44 \text{ MPa}$ ,  $p, E_s = 4944 \text{ MPa}$ ,  $p, E_w = 137 \text{ MPa}$ )

一方Fig.15は、主応力角度とプレストレスレベルとの関係を示す。主応力角度は、明らかにプレストレスレベルが大きくなることにより小さくなる。ただし、その大きさには、他の各解析変数の大きさによる影響は観察されなかった。

そこで、水平領域における主応力の角度 $\beta$ を、プレストレスレベルのみの関数として次式で与える。

$$\begin{aligned} \beta &= (\beta)_{\sigma'_p=0} \left[1 - \left(\frac{\sigma'_p}{f'_c}\right)^{0.5}\right] \\ &= 32 \left[1 - \left(\frac{\sigma'_p}{f'_c}\right)^{0.5}\right] \quad (\text{deg}) \end{aligned} \quad (16)$$

各図中の実線は、式(16)による予測値を示す。RCはりにおいては、水平領域における主応力角度を $32^\circ$ に一定と仮定できるものであったが<sup>3)</sup>、上式は、RCはりの主応力角度を基準として、プレストレスレベルにより低下させたものである。

最終的に、コンクリート水平領域に分布する平均直応力 ( $\overline{\sigma'_{2ave}}$  の鉛直方向成分) は圧縮応力であり、式(15)で表される主応力  $\overline{\sigma'_{2ave}}$  を式(16)で与えられる主応力角度により座標変換することにより次のように求めることができる。

$$\frac{\overline{\sigma'_{com}}}{f'_c} = 0.64 \left(\frac{a}{d}\right)^{-1} \sin^2\beta \quad (17)$$

ここに、 $\overline{\sigma'_{com}}$  は水平領域の平均圧縮応力である。

Fig.16は、解析により得られた水平領域の平均圧縮応力とプレストレスレベルとの関係を示す。図中の実線が式(17)による予測値を示すものであり、プレストレスレベルの増加に伴う平均圧縮応力  $\overline{\sigma'_{com}}$  の低下傾向を評価できることが明かである。

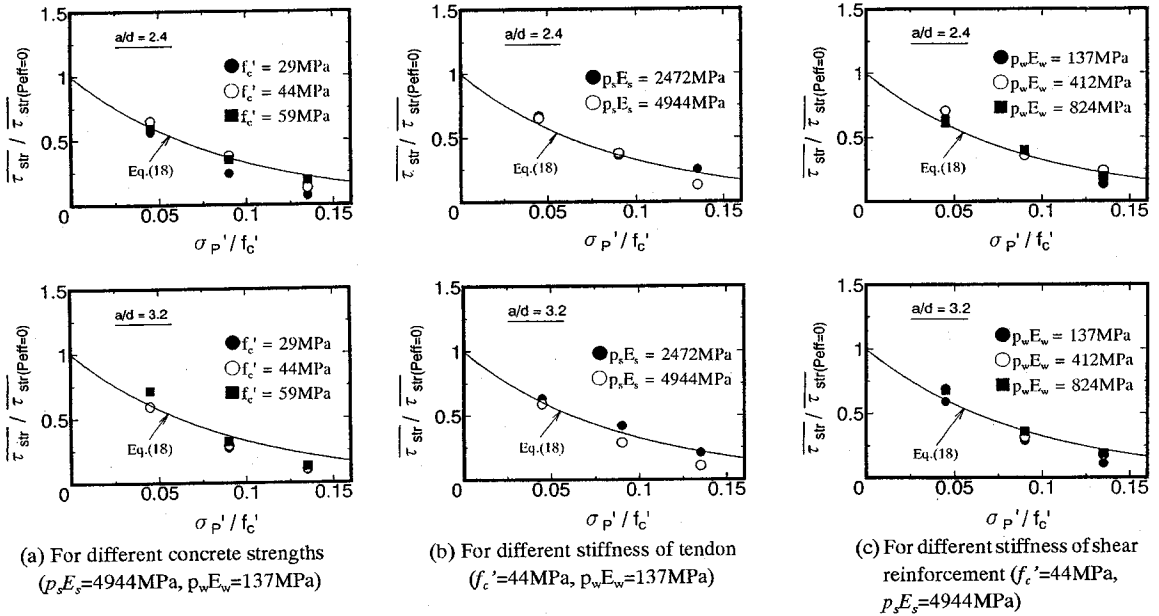


Fig.18 Relationships between Average Shear Stress and Prestress Level

(5) 斜めひび割れ域での平均せん断応力

過去に著者らが行ったPCはりのせん断耐荷性状の比較において、プレストレスが作用することにより斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力が低下することが明らかにされた。これは、プレストレスが作用することにより斜めひび割れ角度が緩くなるために、ひび割れ面でのせん断変形成分が相対的に小さくなり、せん断伝達応力が低下することによるものであった。

Fig.17は、斜めひび割れ域での平均せん断応力とプレストレスとの関係を示すものである。プレストレスの増加に伴い、せん断応力は低下することが明かである。この時、RCはりにおける傾向<sup>2)</sup>と同様に、せん断スパン比 $a/d$ が小さいものの方が平均せん断応力は大きい。

ここで、RCはりにおけるせん断伝達応力を基準として、プレストレスによる影響を整理することを考える。Fig.18は、平均せん断応力をプレストレスが作用しない場合の平均せん断応力で除した値と、プレストレスレベル $\sigma_p' / f_c'$ との関係を示すものである。Fig.18(a)より、せん断応力は、コンクリート強度によらずプレストレスレベルの増加とともにほぼ一定の割合で減少していることが明かである。また、RCはりの斜めひび割れ域でのせん断応力は、主筋やせん断補強筋の剛性の影響を受けない<sup>3)</sup>ものであったが、プレストレスが作用する場合も、プ

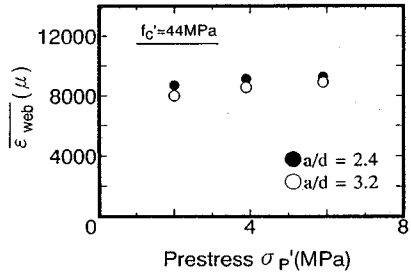


Fig.19 Relationships between Average Stirrup Strain and Prestress ( $f_c' = 44 \text{ MPa}$ ,  $p_s E_s = 4944 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{ MPa}$ )

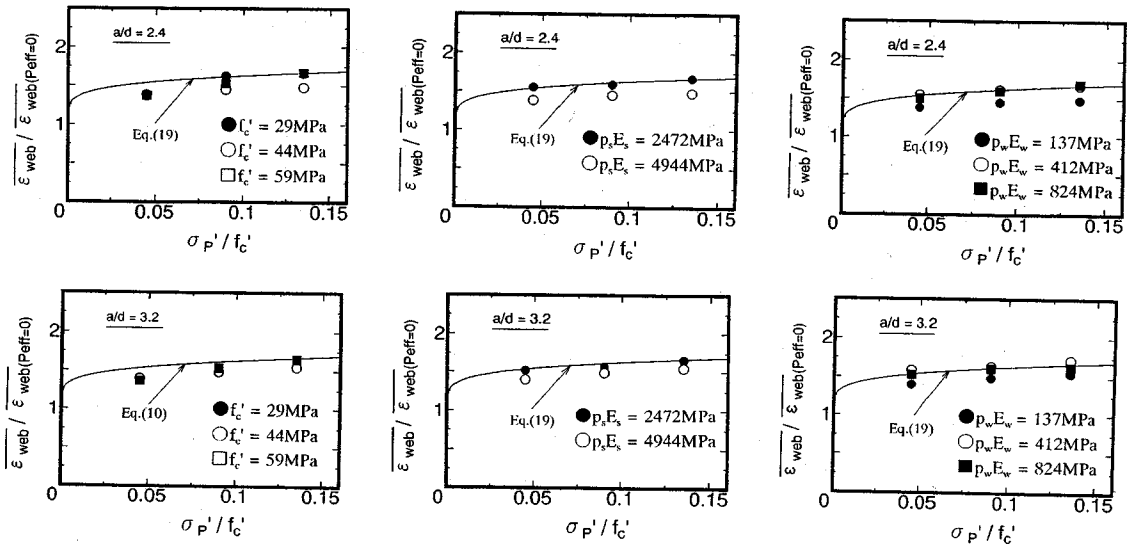
レストレスレベルが等しければ、そのせん断応力は、ほぼ一致することが明かである。

よって、本研究では、RCはりに対する予測式により与えられる斜めひび割れ域でのせん断応力を、プレストレスレベルに応じて以下のように低下させることとする。

$$\frac{\overline{\tau_{str}}}{f_c'^{1/3}} = \left( \frac{\tau_{str}}{f_c'} \right)_{\sigma_p'=0} \cdot e^{-11.2 \frac{\sigma_p'}{f_c'}} = \frac{1.28}{\sqrt{a/d+1}} e^{-11.2 \frac{\sigma_p'}{f_c'}} \quad (18)$$

各図中の実線は、上式による予測値を示すものであるが、概ね解析値を捉えていることが明かである。





(a) For different concrete strengths ( $p_s E_s = 4944 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{ MPa}$ )

(b) For different stiffness of tendon ( $f_c' = 44 \text{ MPa}$ ,  $p_w E_w = 137 \text{ MPa}$ )

(c) For different stiffness of shear reinforcement ( $f_c' = 44 \text{ MPa}$ ,  $p_s E_s = 4944 \text{ MPa}$ )

Fig.20 Relationships between Average Stirrup Strain and Prestress Level

#### (6) 斜めひび割れ域でのせん断補強筋の平均ひずみ

ここで、斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力の予測式を構築する。ただし、RCはりにおける予測式<sup>3)</sup>と同様にせん断補強筋の平均ひずみによりその定量化を行う。

Fig.19は、せん断補強筋の平均ひずみとプレストレス力との関係を示すものである。プレストレス力の増加とともに終局時の平均ひずみが多少大きくなることが明かである。一般に同じせん断力作用時のせん断補強筋のひずみはプレストレス力が増加するにつれ小さくなる<sup>8)</sup>。本解析結果でも、同じせん断力作用時のせん断補強筋のひずみは、プレストレス力が増加するにつれ小さくなる。終局せん断力が大きかった為終局時のせん断補強筋のひずみは、プレストレス力が増加するにつれ大きくなる。

ここでも、プレストレス力が作用する場合のせん断補強筋の平均ひずみを、RCはりの場合の平均ひずみを基準に考えることとする。

Fig.20は、せん断補強筋の平均ひずみを、RCはりの平均ひずみで除した値とプレストレスレベルとの関係を示す。いずれのコンクリート強度に対してもプレストレスレベルが大きくなることによりほぼ同様の割合で平均ひずみが大きくなること明かである。また、Fig.20(b)、Fig.20(c)より明らかなように、緊張材およびせん断補強筋の剛性によらず概ね

等しい増加傾向を示すことが明かである。

そこで、プレストレス力が作用する場合のせん断補強筋の平均ひずみは、RCはりに対する予測式<sup>3)</sup>を基準として以下のように与えることとする。

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_{web} &= (\bar{\epsilon}_{web})_{\sigma_p=0} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_p'}{f_c'} \right)^{0.2} \right] \\ &= 0.0053 \frac{\sqrt{f_c'}}{\sqrt{ad} + 1} e^{\left( -\frac{1000}{p_s E_s} - 0.05 \sqrt{p_w E_w} \right)} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_p'}{f_c'} \right)^{0.2} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

各図中の実線は、上式による予測値を示すものであるが、解析値を概ね評価できることが明かである。斜めひび割れ域でのせん断補強筋のひずみは、プレストレス力が作用する場合にも、 $a/d$ 、コンクリート強度、緊張材およびせん断補強筋の大きさによる影響を受ける。しかし、プレストレス力の増加に伴うひずみ増加は、RCはりのせん断補強筋のひずみを基準とすれば、全ての場合同一と考えることができるのである。

#### 4. 本せん断耐力評価式に対する評価

##### (1) せん断耐力評価式と各影響因子との関係

ここで、前節において構築されたせん断耐力評価式によって算定されるせん断耐力が、コンクリート強度、せん断スパン比、緊張材の剛性、せん断補強

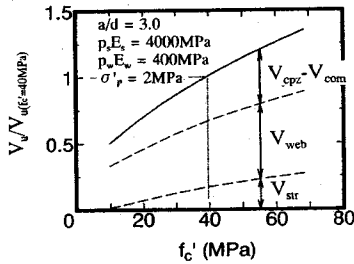


Fig.21 Relationships between Shear Strength and Concrete Strength

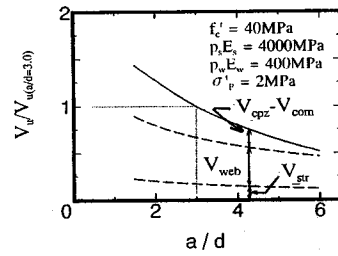


Fig.22 Relationships between Shear Strength and a/d

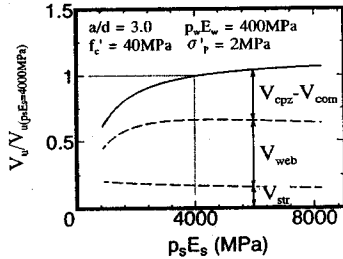


Fig.23 Relationships between Shear Strength and Stiffness of Tendon

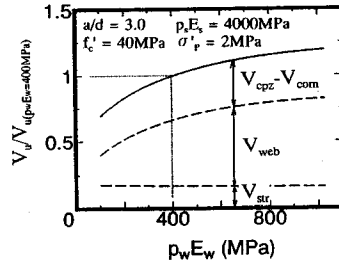


Fig.24 Relationships between Shear Strength and Stiffness of Shear Reinforcement

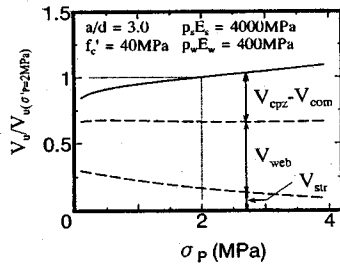


Fig.25 Relationships between Shear Strength and Prestress

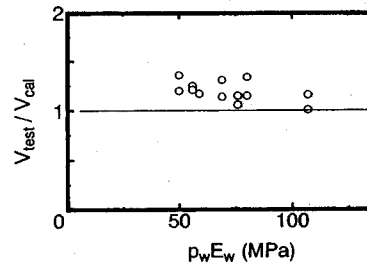


Fig.26 Relationships between Ratio of Shear Strengths and Stiffness of Shear Reinforcement

筋の剛性，プレストレス力によりどのような影響を受けるものであるかを示す。

#### a) コンクリート強度の影響

Fig.21は，コンクリート強度とせん断耐力との関係を示す。ここでは，緊張材およびせん断補強筋の剛性，せん断スパン比を一定として，コンクリート強度が40MPaである場合のせん断耐力を基準としている。60MPaでのせん断耐力は，20MPaでのその約1.5倍であり，せん断耐力は，コンクリート強度の大きさによる影響を比較的大きく受けることが明らかである。

#### b) せん断スパン比の影響

Fig.22は，せん断スパン比とせん断耐力との関係

を示す。ここでは，せん断スパン比が3.0である場合を基準としている。せん断耐力は，せん断スパン比が小さくなるにつれ増加する傾向にある。この場合，せん断スパン比が大きくなると，斜めひび割れ域で受け持たれるせん断力 ( $V_{web}+V_{str}$ ) の占める割合が大きく，せん断スパン比が小さくなるにつれ，その割合は減少する。

#### c) 緊張材の剛性の影響

Fig.23は，緊張材の剛性とせん断耐力の関係を示す。ここでは，緊張材の剛性が4000MPaである場合のせん断耐力を基準としている。せん断耐力は，緊張材の剛性が大きくなるにつれ増加する傾向にあるものの，その増加割合は鈍化する。また，緊張材の

Table 1 Test Specimens and Shear Strengths<sup>9)</sup>

Specimen	$P_{eff}$ (kN)	$f'_c$ (MPa)	Tendon			Shear reinforcement			$V_{test}$ (kN)	$V_{cal}$ (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{cal}}$
			Type	$P_s$ (%)	$P_s E_s$ (MPa)	Type	$P_w$ (%)	$P_w E_w$ (MPa)			
C-G2-1	123	39	C	0.70	982	G	0.15	56	162	130	1.25
C-G1-1	125	39	C	0.70	982	G	0.21	80	157	137	1.15
C-G2-2	178	51	C	0.70	982	G	0.15	56	181	149	1.21
C-G1-2	179	47	C	0.70	982	G	0.21	80	199	149	1.34
C-A2-1	125	48	C	0.70	982	A	0.07	50	151	126	1.20
C-A1-1	125	38	C	0.70	982	A	0.10	69	170	130	1.31
C-A2-2	176	46	C	0.70	982	A	0.07	50	185	136	1.36
C-A1-2	177	60	C	0.70	982	A	0.10	69	200	175	1.14
C-C2-1	126	45	C	0.70	982	C	0.07	76	157	148	1.06
C-C1-1	126	41	C	0.70	982	C	0.10	107	152	151	1.01
C-C2-2	178	52	C	0.70	982	C	0.07	76	182	159	1.15
C-C1-2	177	51	C	0.70	982	C	0.10	107	194	168	1.16
C-CS2-2	175	52	C	0.70	982	C	0.04	59	178	152	1.17

剛性の増加により斜めひび割れ域で受け持たれるせん断力の占める割合は、徐々に減少する傾向にある。

d) せん断補強筋の剛性の影響

Fig.24は、せん断補強筋の剛性とせん断耐力との関係を示す。ここでは、せん断補強筋の剛性が400MPaであるものを基準としている。せん断耐力は、せん断補強筋の剛性の増加とともに大きくなるものであるが、その耐力の増加は、せん断補強筋により受け持たれるせん断力の増加に大きく依存していることが明かである。

e) プレストレスカの影響

Fig.25は、プレストレスとせん断耐力との関係を示す。ここでは、プレストレスが2MPaであるはりのせん断耐力を基準としている。プレストレスの増加とともにせん断耐力が大きくなることが明かである。各要素が受け持つせん断力に着目すると、プレストレスの増加とともに、斜めひび割れ域が受け持つせん断力 ( $V_{web} + V_{str}$ ) の占める割合が低下し、それ以外で受け持たれるせん断力 ( $V_{cpz} - V_{com}$ ) の占める割合が増加していることが観察される。せん断力に対する斜めひび割れ域が受け持つせん断力の分担割合の低下は、斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力  $V_{str}$  がプレストレスの増加とともに小さくなることによるものである。

(2) 本せん断耐力式の既往の実験結果による評価

ここで連続繊維補強プレストレストコンクリートはりに対する本せん断耐力評価式の妥当性を確認する目的で既往の実験データとの比較を行う。

ここで用いた実験データは、矩形断面を有する13体のPCはりの実験結果である<sup>9)</sup>。その実験供

試体諸元をTable 1に示す。ただし、 $a/d$ はすべて3.0である。表中の  $V_{test}$  は実験によるせん断耐力を、 $V_{cal}$  は本評価式によるせん断耐力を表す。また、Aはアラミド繊維、Cは炭素繊維、Gはガラス繊維であることを示す。

Fig.26は、実験値を計算値で除したせん断耐力比とせん断補強筋の剛性との関係を示す。本せん断耐力式は、すべてのデータに対し若干安全側に評価する傾向にあり、全データに対する耐力比の平均は1.18である。しかし、変動係数は7.8%でありバラツキは小さい。この安全側の評価を与える理由は、本研究では明らかにすることができず、今後多くの実験結果との比較検討を進めていく必要がある。

プレストレスカの無い連続繊維補強コンクリートはりに対して本せん断耐力式は、せん断補強筋の剛性が小さい場合（おおよそ100MPa以下）に危険側に評価するものであった<sup>3)</sup>。これは、RCはりにおいて、せん断補強筋の剛性が極端に小さい場合には、斜め引張破壊的な破壊を起こし、斜め引張破壊を正確に追跡できない本解析プログラムを用いた数値実験より得られた本せん断耐力評価式は、その耐力を予測できないからであった。

しかし、連続繊維補強プレストレストコンクリートはりに対する本せん断耐力式は、せん断補強筋の剛性が100MPa以下の場合にもPCはりのせん断耐力を概ね予測することができた。

せん断耐力の比較を行った実験供試体は、プレストレスカが作用することにより、その破壊形式が斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へと変化することが確認されており<sup>9)</sup>、せん断補強筋の剛性が小さくてもせん断圧縮破壊を起こす場合には、本解析プロ

ラムはその耐力を評価できる。よって、数値実験により構築した連続繊維補強プレストレストコンクリートはりのせん断耐力式も、その耐力を予測できるのである。

## 5. 結論

本研究の結論を以下に示す。

(1) 非線形有限要素解析による数値実験により、せん断補強筋を有する連続繊維補強プレストレストコンクリートはりのせん断耐力評価式を構築した。本せん断耐力評価式は、はりがせん断圧縮破壊を起こす場合を想定したものであり、その破壊基準を曲げ圧縮域での主応力により規定している。本評価式によるせん断耐力は、曲げ圧縮域でのコンクリートが受け持つせん断力、曲げ圧縮域と斜めひび割れ域とを結ぶ水平領域でのコンクリートが受け持つせん断力、斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力およびせん断補強筋以外が受け持つせん断力の和として定義される。これらの各領域が受け持つせん断力は、プレストレスレベル、せん断スパン比、コンクリート強度、緊張材およびせん断補強筋の剛性の関数として与えられる各領域での応力とその領域面積を掛け合わせるにより算出される。

(2) 本せん断耐力評価式により得られたせん断耐力は、コンクリート強度が大きいほど、せん断スパン比が小さいほど大きくなる。また、緊張材、せん断補強筋の剛性およびプレストレス力が大きくなるにつれせん断耐力が緩やかに増加する。

(3) 既往の実験結果との比較を行うことにより、本せん断耐力評価式の検証を行った結果、妥当にせん断耐力を予測できることが示された。しかし、本評価式の検証に用いた実験データは、主筋の剛性、せん断スパン比が一定であり、今後さらに多くの実験結果に対する検証を行う必要がある。

また、本研究は、偏心プレストレス力が作用する場合にのみ着目したものであるが、今後の課題として、プレストレス力の作用位置による影響の検討と

ともにパーシャリープレストレストコンクリート (P R C) 部材に対する検討が挙げられ、統一性のある実用的な設計式を考えていく必要がある。ただし、本せん断耐力評価式による鋼材を用いた P C はりのせん断耐力の算定への適用方法は、別報にて述べる予定である。

謝辞：本研究で用いた解析プログラムは、Nares Pantaratorn 博士により開発されたものでありここに深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー72，1992年4月。
- 2) 佐藤靖彦，上田多門，角田史雄：有限要素解析による連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐荷性状の定量的評価，土木学会論文集，No.484/V-22，pp.51-60，1994年2月。
- 3) 佐藤靖彦，上田多門，角田史雄：せん断補強筋を有する連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力の定量的評価，土木学会論文集，No.520/V-28，1995年8月。
- 4) Ueda, T., Pantaratorn, N. and Sato, Y. : Finite Element Analysis on Shear Resisting Mechanism of Concrete Beams with Shear Reinforcement, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, No.520/V-28, August 1995.
- 5) 堀部慶次，上田多門：鉄筋コンクリートはりのせん断挙動に与える軸圧縮力の影響，土木学会第40回年次学術講演会概要集，pp.329-320，1985年9月。
- 6) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディーブームのせん断耐力算定式，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム，JCI，pp.119-126，1983年10月。
- 7) 佐藤靖彦，上田多門，角田史雄：連続繊維補強プレストレストコンクリートはりのせん断耐荷性状の解析的評価，コンクリート工学年次論文報告集，pp.1087-1092，1994年6月。
- 8) 野村謙二，上田多門：スターラップのひずみ性状に与える軸力の影響，土木学会第41回年次学術講演会，pp.223-224，1984年10月。
- 9) 涌井一，鳥取誠一：FRP棒材をらせん状せん断補強筋として用いた場合のコンクリートはりのせん断補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12, No.2, pp.1141-1146, 1990年6月。

(1994.10.27受付)

## SHEAR STRENGTH OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH FRP TENDON

Yasuhiko SATO, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

The shear resisting model for concrete beams reinforced with FRP rod which was proposed by the authors is expanded to predict the shear strength of prestressed concrete beams with FRP tendon. The shear resisting model consists of four shear resisting forces which are defined as functions of prestressing force, concrete strength, shear span to effective depth ratio, stiffness of tendon and shear reinforcement. The applicability of the model is confirmed by comparing with experimental results.