

[2181] 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

佐藤靖彦^{*1}・上田多門^{*2}・角田與史雄^{*3}

1. はじめに

連続繊維補強材は、鋼材に比べ引張強度が大きく弾性係数が小さいといった特徴を有することより、プレストレストコンクリート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、RC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 [1]。しかし、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性状およびその耐力に関する検討は、あまりなされていない。そこで本研究は、プレストレス力が作用することにより、はりのせん断耐荷性状にどのような影響が現れるものであるか、また、緊張材およびせん断補強筋の弾性係数の大きさによりプレストレストコンクリートはりのせん断耐荷性状が如何に異なるものであるか解析的に評価することを目的として行った。

2. 解析の概要

2.1 解析プログラム

本研究で用いた解析プログラム [2] は、鉄筋コンクリートはり部材のせん断問題に対し開発されたものである。本プログラムは、ひび割れの影響を平均的に捉え連続体に置き換えられるよう鉄筋コンクリート要素の平均応力-平均ひずみ関係を採用した分散ひび割れモデルを用いている。

2.2 解析供試体

本研究では、プレストレス力の有無、緊張材およびせん断補強筋の弾性係数の大きさを解析変数とした4体のはり供試体を選定した。解析供試体の諸元を表-1に、要素分割を図-1に示す。これらは、せん断スパン比を2.4とし、緊張材比が4.0%、せん断補強筋比が0.42%と等しい。また、コンクリート強度は、39MPaとして解析した。解析においてプレストレス力は、図-1の斜線で示される鋼要素に外力として作用させた。

表-1 解析供試体諸元

Analyzed specimen	P_{eff} (kN)	Tendon		Shear reinforcement		V_u (kN)
		E_s (GPa)	f_{st} (MPa)	E_w (GPa)	f_{wt} (MPa)	
AP-P	196	69	1255	206	1255	213
PA-P	196	206	1255	69	1255	232
PP-P	196	206	1255	206	1255	260
PP	0	206	1255	206	1255	240

P_{eff} : Prestressing force
 E : Young's modulus
 f_t : Tensile strength
 V_u : Ultimate shear force

*1 北海道大学助手 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

3. せん断耐荷性状

3.1 せん断耐荷モデル

一般に、斜めひび割れを持つはり部材の作用せん断力に対する力の釣合は、図-2に示すように、せん断ひび割れが進展していないせん断ひび割れ上部のコンクリート圧縮域でのせん断抵抗力(V_{ucz})、骨材の噛み合わせ作用によるせん断抵抗力(V_{agr})と補強筋のダウエル作用によるせん断抵抗力(V_{dow})、さらにせん断補強筋によるせん断抵抗力(V_{web})により考えることができる。そこで本研究では、次式で表されるせん断耐荷モデルを仮定した[3]。

$$V = V_{total} = V_{ucz} + V_{dcz}$$

V_{ucz} : 斜めひび割れより上部のコンクリート圧縮域
(以下「非ひび割れ圧縮域」)で受け持つせん断力

V_{dcz} : 斜めひび割れ域で受け持つせん断力
($=V_{web}+V_{str}$)

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_{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 ($=V_{agr}+V_{dow}$)

3.2 力の釣合を考える抵抗断面の仮定

先に示した図-1には、供試体PP-Pの解析より得られたひび割れパターンを考慮し設定した力の釣合を考える抵抗断面をも示してある。プレストレス力の有無、緊張材およびせん断補強筋の弾性係数の大きさによりひび割れ性状が異なるため、それぞれの解析供試体において設定した抵抗断面が異なる。各供試体の抵抗断面は、終局時において斜めひび割れ域での抵抗力が最も大きかった経路を抽出したものである。また、各抵抗力は、各ガウスポイントが受け持つ領域面積に応力を乗ずることにより求めたものである[3]。

3.3 せん断耐荷性状

(1) プレストレス力の影響

図-3は、非ひび割れ圧縮域と斜めひび割れ域よりなる抵抗断面における各分担せん断力の作用せん断力に対する推移を示すものである。プレストレス力が作用する供試体PP-Pにおいて、非ひび割れ圧縮域での分担力 V_{ucz} が大きく、斜めひび割れ域での分担力 V_{dcz} が小さいことが明かである。これは、プレストレス力が作用する供試体PP-Pにおいて、プレストレス力が作用しない供試体PPに比べ斜めひび割れの上部への進展が遅く、分担力 V_{ucz} を負担する領域が大きいためである。

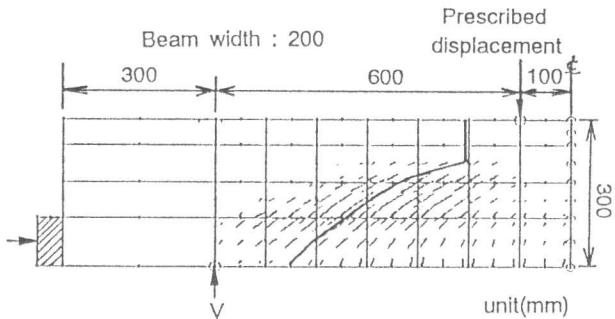


図-1 要素分割およびひび割れ性状

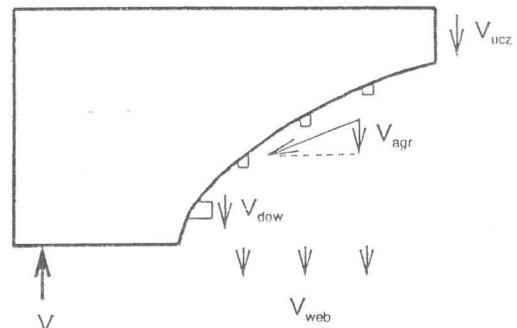


図-2 作用せん断力に対する力の釣合

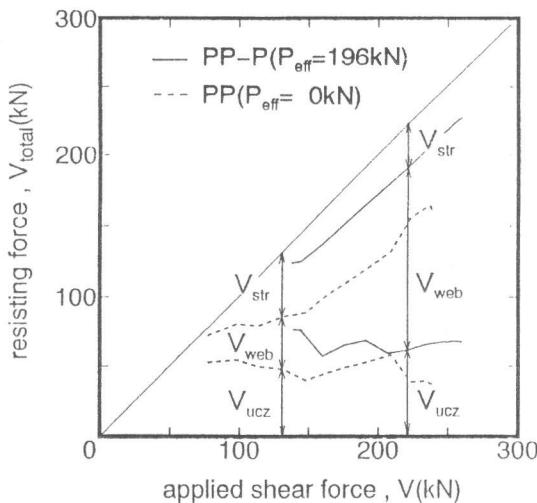


図-3 作用せん断力と各分担力との関係

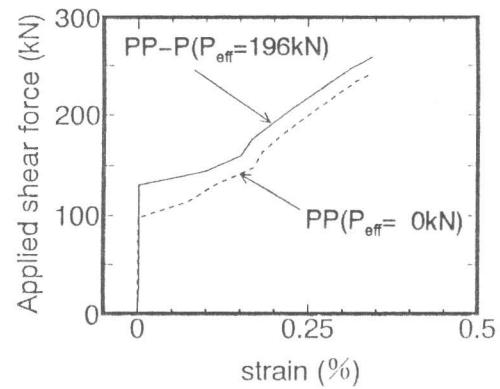


図-4 荷重-せん断補強筋ひずみ曲線

図-4は、仮定した抵抗断面でのせん断補強筋の荷重-ひずみ曲線を示すものであるが、プレストレス力が作用する供試体PP-Pにおいて、同荷重に対するひずみが小さいことが明かである。プレストレス力が作用する場合には、斜めひび割れでの変形が小さいことを示している。これは、プレストレス力が作用する場合の方が、作用せん断力に対するせん断補強筋の応力が小さいことを意味する。よって、せん断補強筋の受け持つ分担力は、プレストレス力が作用する場合の方が小さくなるものと考えやすいが、実際には、図-3より明らかなようにせん断補強筋の受け持つせん断力は、プレストレス力を受けるものの方が大きい傾向にある。この理由は、次のように考えられる。図-5および図-6は、作用せん断力が180kNである時の供試体PP-PとPPのひび割れ性状と抵抗断面を示すものである。プレストレス力が作用する供試体PP-Pは、プレストレス力の作用しない供試体PPに比べ、斜めひび割れ角度が小さいことが明かである。したがって、供試体PP-Pの方が供試体PPよりも、せん断補強筋を跨ぐ斜めひび割れ領域が大きくなるために、せん断補強筋による抵抗力 V_{web} が大きくなるのである。

一方、図-3より斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つ分担力 V_{str} は、供試体PP-Pの方が小さいことが明かである。図-7は、せん断スパン中央部におけるせん断補強筋の引張ひずみ(ε_{web})とひび割れ方向のせん断ひずみとひび割れ直角方向の引張ひずみの比($\gamma_{cr}/\varepsilon_{cr}$)との関係を示す。プレストレス力が作用する場合には、同じせん断補強筋のひずみにおいてひび割れでの引張ひずみに対するせん断ひずみが小さくなっていることが明かである。これは、プレスト

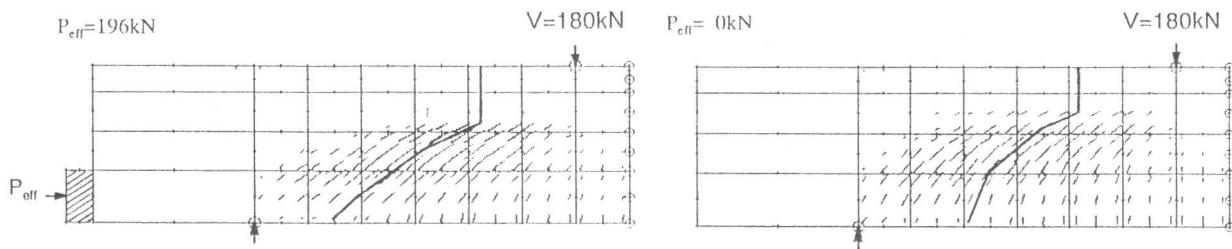


図-5 ひび割れ性状と抵抗断面(供試体PP-P)

図-6 ひび割れ性状と抵抗断面(供試体PP)

レス力が作用する場合には、せん断補強筋の引張応力が等しい時に、骨材の噛み合わせによる伝達応力が小さいことを意味する。また、作用せん断力に対する抵抗応力は、ひび割れに沿う伝達応力の鉛直方向成分であるから、ひび割れ角度が小さくなることによりその応力は小さくなる。よって、プレストレス力が作用する場合、斜めひび割れ角度が小さくなるために斜めひび割れ域でのせん断抵抗力 V_{str} は小さくなるものと言える。

(2) 緊張材の弾性係数の影響

図-8は、供試体PP-Pと供試体AP-Pの作用せん断力に対する各分担せん断力の推移を示す。緊張材の弾性係数が小さい供試体AP-Pにおいて、非ひび割れ圧縮域での分担力 V_{ucz} が小さく、斜めひび割れ域での分担力 V_{dcz} が大きい。これは、弾性係数が小さい供試体AP-Pの方が、斜めひび割れの上部への進展が速く、分担力 V_{ucz} を負担する領域が供試体PP-Pに比べ狭いためである。

図-9は、斜めひび割れ域でのせん断補強筋の荷重-ひずみ曲線を示すものであるが、供試体AP-Pにおいて同荷重に対するひずみが大きいことが明かである。RCはりと同様に[3]、PCはりにおいても緊張材の弾性係数が小さい場合には斜めひび割れでの変形が大きくなるのである。

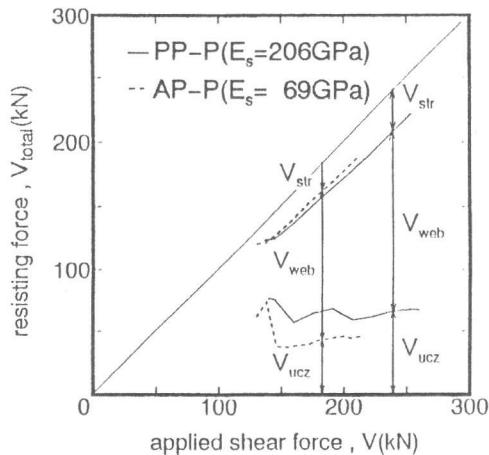


図-8 作用せん断力と各分担力との関係

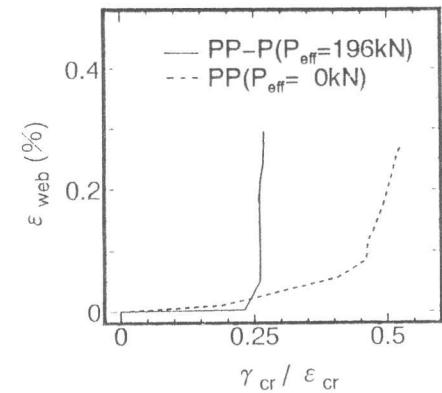


図-7 せん断補強筋ひずみと引張ひずみ／せん断ひずみとの関係

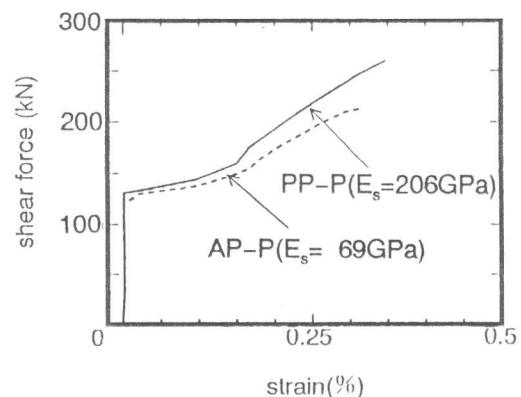


図-9 荷重-せん断補強筋ひずみ曲線

(3) せん断補強筋の弾性係数の影響

図-10は、せん断補強筋の弾性係数の大きさが異なる供試体PP-Pと供試体PA-Pの作用せん断力と各分担力との関係を示す。せん断補強筋の弾性係数が小さい供試体PA-Pは、せん断補強筋の弾性係数が大きい供試体PP-Pに比べ、作用せん断力が130kN付近より斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つ分担力 V_{str} が大きく、せん断補強筋による分担力 V_{web} が小さくなる傾向にある。これは、プレストレス力を受けないRCはりにおける耐荷性状において観察された結果と一致する[3]。せん断補強筋の弾性係数が小さい場合は、せん断補強筋の弾性係数が大きい場合に比べひび割れ面でのずれ変形が大きく、骨材の噛み合わせによる伝達応力が大きくなることにより、

せん断補強筋以外が受け持つ分担力 V_{str} が大きくなり、せん断補強筋による分担力 V_{web} が小さくても作用せん断力と釣り合うものである。また、これらの分担力を足し合わせた斜めひび割れ域での分担力 V_{dcz} は、せん断補強筋の弾性係数が小さいものの方が大きい。

4. せん断破壊機構

4体の解析供試体は、載荷点付近でコンクリートが軟化を起こすことにより破壊に至っており、せん断圧縮破壊を起こすものと考えられた。そこで、軟化を起こしていたコンクリート圧縮域断面（載荷点から11.3mm）の応力状態

を比較することとする。ここで言う圧縮域断面は、軸方向ひずみより求めた中立軸により定義されるものである（以下「曲げ圧縮域」）。

図-11aは、供試体PPと供試体PP-Pの作用せん断力と曲げ圧縮域での平均せん断応力との関係を示すものであるが、プレストレス力が作用しない供試体PPの方が、同じ作用せん断力に対する平均せん断応力が大きく、両者ともにほぼ8MPaに達した時に最大耐力に至っている。また、図-12aは、作用せん断力と曲げ圧縮域での平均圧縮応力との関係を示すものであるが、プレストレス力が作用しないものの方が同じ作用せん断力に対する平均圧縮応力が大きく、両者ともに、およそ30MPaで最大耐力に至っている。この増加割合の相違は、図-13に示すように、プレストレス力が作用するものの方が中立軸位置が低く、曲げ圧縮域が大きいことによる。

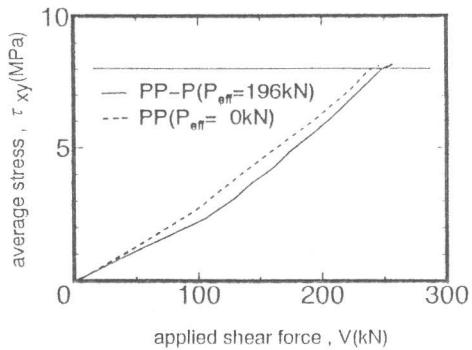


図-11a 作用せん断力と平均せん断応力

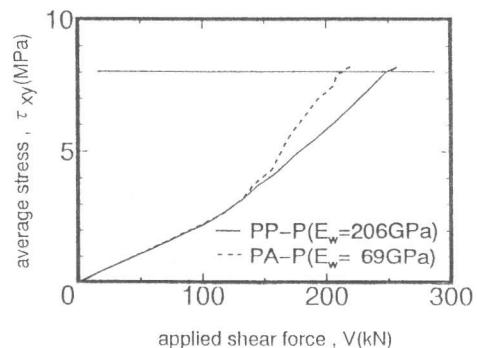


図-11b 作用せん断力と平均せん断応力

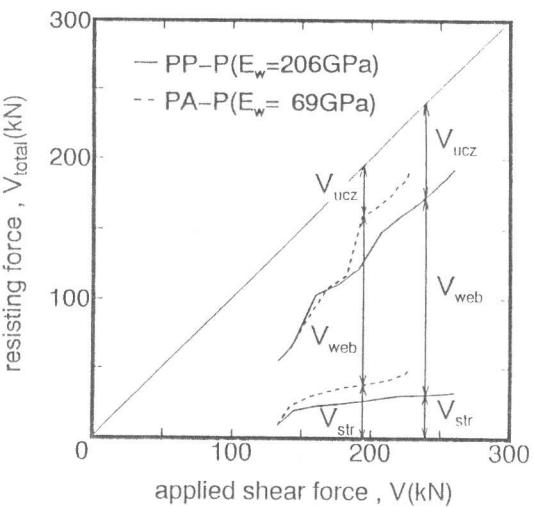


図-10 作用せん断力と各分担力との関係

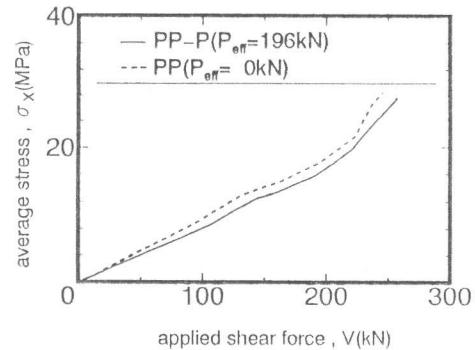


図-12a 作用せん断力と平均圧縮応力

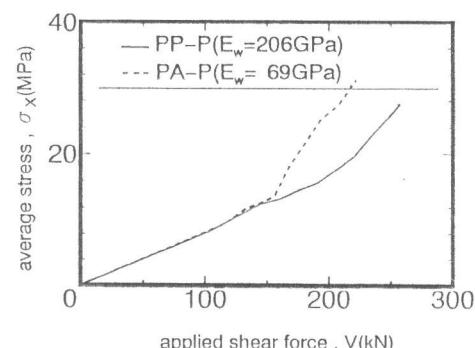


図-12b 作用せん断力と平均圧縮応力

図-11b、図-12bは、せん断補強筋の弾性係数が異なる供試体PP-Pと供試体PA-Pの作用せん断力と曲げ圧縮域での平均せん断応力および平均圧縮応力との関係を示す。斜めひび割れが発生した140kN付近以降より、同じ作用せん断力時の各平均応力は、せん断補強筋の弾性係数が小さなものが大きいことが明かである。これは、せん断補強筋の弾性係数が小さい供試体PA-Pの方が、曲げ圧縮域が小さいことによるものであった。また、せん断補強筋の弾性係数の大きさによらず、平均せん断応力が8MPa程度、平均圧縮応力が30MPa程度に達した時に破壊に至っている。上述した結果は、緊張材の弾性係数の小さい供試体AP-Pにおいても同様であった。この終局時の平均応力の値は、プレストレス力が作用しないRCはりにおいて、主筋やせん断補強筋の弾性係数の大きさによらず概ね等しいことが確認されており [3] 、これらの平均応力を本解析供試体の限界応力と考えるならば、プレストレス力が作用する場合においても、コンクリート強度やせん断スパン比といった供試体諸元が等しければ、プレストレス力が作用しないはりと同一の限界応力に達した時に破壊に至るものと言える。

5.まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) はりにプレストレス力が作用する場合には、プレストレス力が作用しない場合に比べ、非ひび割れ圧縮域での分担せん断力が大きく、斜めひび割れ域での分担せん断力が小さい。
- (2) はりにプレストレス力が作用する場合には、プレストレス力が作用しない場合に比べ、せん断補強筋が受け持つ分担せん断力が大きく、せん断補強筋以外が受け持つ分担せん断力が小さい。これは、プレストレス力が作用する場合には、斜めひび割れ角度が緩くなることによる。
- (3) 緊張材およびせん断補強筋の弾性係数が小さい場合には、弾性係数が大きいものに比べ、非ひび割れ圧縮域での分担せん断力が小さく、斜めひび割れ域での分担せん断力が大きい。
- (4) プレストレス力の有無によらず、曲げ圧縮域の平均せん断応力および平均圧縮応力は、ほぼ一定のレベルに達し破壊を起こすものと考えられ、プレストレス力が作用する場合には、曲げ圧縮域が大きいためにせん断耐力が増加すると言える。また、緊張材およびせん断補強筋の弾性係数が大きい場合にも、同様のことと言える。

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イ一72 (1992)
- [2] ナレス パンタラトーン：鉄筋コンクリート梁におけるせん断抵抗機構の有限要素解析、東京大学博士論文 (1991)
- [3] 佐藤靖彦、上田多門、角田與史雄：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性的評価、土木学会論文集、第484号 (1994)

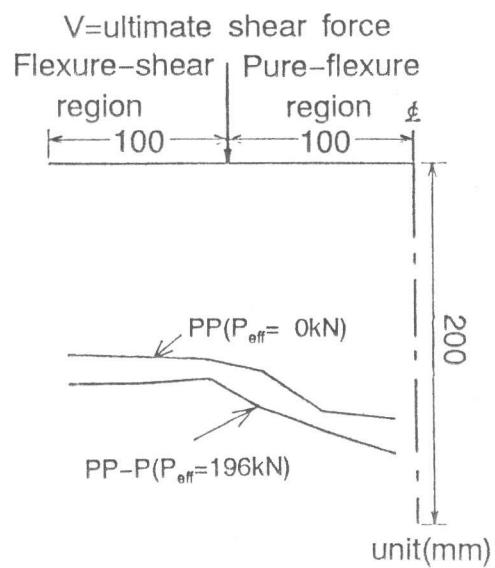


図-13 終局時の中立軸位置