

論 文

[1190] FRPロッドで補強したコンクリート部材特性の改善方法の提案

正会員 橋田敏之（熊谷組PC技術部）

正会員 池田 弘（熊谷組技術研究所）

正会員○本田 勉（熊谷組技術研究所）

大原英史（熊谷組技術研究所）

1. まえがき

F R Pで補強したコンクリート部材は、F R Pの剛性が低いために、鉄筋で補強したコンクリート部材より曲げひびわれが発生しやすく、またひびわれ発生後のたわみも大きくなってしまうことが報告されている¹⁾。したがって部材のたわみ制御が要求される場合には、鉄筋補強部材より低いレベルで設計荷重を設定せざるを得ず、すなわち引張側のF R P主筋の負担応力を低いレベルに抑制することになるので、F R Pの高強度性という特徴が全く活かされない結果となる。

F R P補強部材のこのような曲げによるたわみ特性を改善する方法としてプレストレスの導入が有効と考えられるが^{2) 3)}、以下ではF R Pの高強度性を活用するため、低レベルに抑制されたF R Pの余剰の強度部分を緊張材として利用する方法を試みた。つまり、鉄筋代替材として適用したF R Pをプレテンション緊張材としても兼用するわけである。

この方法は鉄筋の余剰強度部分の利用法として既に提案されているが^{4) 5)}、鉄筋は高剛性なので緊張に伴う伸びが小さいから、長期的にはコンクリートの乾燥収縮やクリープのためにプレストレスは減少し、そのプレストレス導入効果は比較的初期に限定される。ところがF R Pは緊張に伴う伸びが大きいから、プレストレスは長期的にも残存する。すなわちこの主筋を緊張材として兼用する方法は、F R Pという高強度でかつ低剛性の素材を適用することにより、はじめてその真価を発揮することになる。

以下では主筋として配置したF R Pロッドをプレテンション緊張材として兼用したはり供試体を作成し、その載荷試験を行って確認した曲げ特性の改善について述べるとともに、プレストレスによるせん断特性の改善についても考察を加えた。

2. 試験方法

表1 補強筋特性

種類	径 (mm)	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び (%)	最大荷重 (kgf)
C F R P	φ 6	—	158	12,200	1.3	4,460
G F R P	φ 8	—	134	4,390	3.1	6,710
G F R P	φ 6	—	123	4,050	3.3	3,480
鉄筋	D 13	36.7	52.1	19,100	18.5	6,600
鉄筋	φ 6	33.6	44.0	19,200	28.4	1,240

試験に供したF R Pロッドは、エポキシをマトリクスとし、強化繊維には炭素繊維またはガラス繊維を使用したもので、コンクリートとの付着の確保のため、ロッド表面に繊維をらせん状に巻き付けたものである。補強筋の基本的特性を表1に、またコンクリートの特性を表2に示す。

表2 コンクリート特性

材令7日 圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	材令28日 圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
317	2.04×10^5	470	48.3	2.52×10^5

供試体は(1)主筋の種類(2)スターラップの種類(3)プレストレスの有無をパラメーターとして表3に示す9種類を作成した。供試体の配筋を写真1、図1に示す。

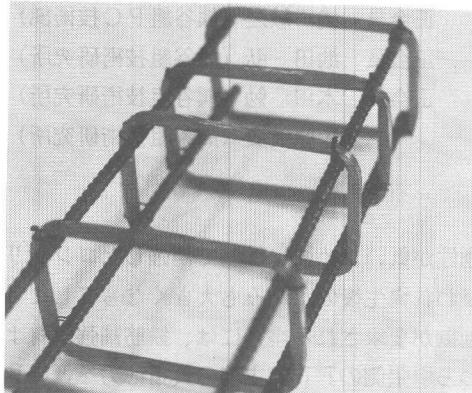


写真1 F R P補強筋

供試体のプレストレスは主筋にあらかじめ緊張力を与えるプレテンション方式とし、材令7日で緊張力を解放し、プレストレスを導入した。

緊張力は主筋が緊

張材を兼用していることを考慮し、CF主筋の $0.4P_u$ (最大荷重)に相当する1780kgf/本とした。この緊張力はGFに対しては $0.27P_u$ 、鉄筋に対しては $0.38P_y$ (降伏荷重)に相当する。また、コンクリートには $\sigma_p = 47.5 \text{ kgf/cm}^2$ のプレストレスが導入される。

供試体の曲げ載荷試験は材令28日で行うこととし、これに至る3週間コンクリートおよび主筋ひずみの経時変化を測定した。曲げ載荷試験は図1に示すように、せん断スパン比 $a/d = 2.65$ とし、荷重は単調増加で破壊に至るまで載荷した。

3. 試験結果

3. 1. プレストレスの導入状況

供試体表面に貼付したひずみゲージで測定したプレストレスの分布状況を図2に示す。プレテンション緊張材の定着に必要な伝達長は、FRPの場合図2から約20cmであり、ロッド径の約30倍に相当している。異形鉄筋の伝達長は30~40cmとやや大きくなるが、やはりロッド径に比すると約30倍である。

プレストレスの期待値 $\sigma_p = 47.5 \text{ kgf/cm}^2$ に対しては、FRP主筋ではほぼ期待通りの値が得られ、鉄筋ではやや小さくなっている。

表3 供試体の種類

記号	主筋	スターラップ	プレストレス
1 C N N	CF $\phi 6$	なし	×
2 C N P	CF $\phi 6$	なし	○
3 C C N	CF $\phi 6$	CF $\phi 6$	×
4 C C P	CF $\phi 6$	CF $\phi 6$	○
5 G G N	GF $\phi 8$	GF $\phi 6$	×
6 G G P	GF $\phi 8$	GF $\phi 6$	○
7 S N N	鉄筋 D13	なし	×
8 S S N	鉄筋 D13	鉄筋 $\phi 6$	×
9 S S P	鉄筋 D13	鉄筋 $\phi 6$	○

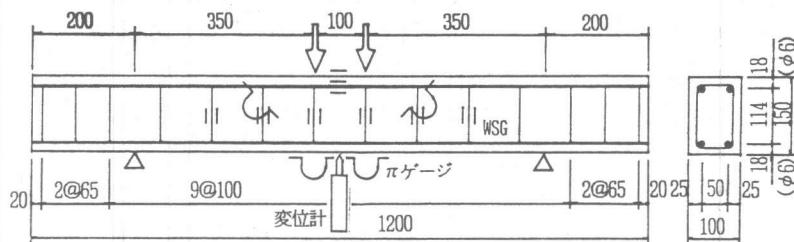


図1 供試体の配筋

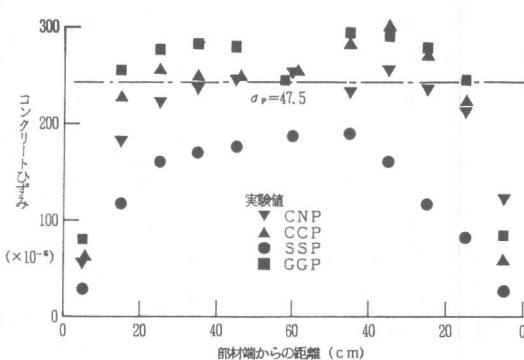


図2 プレストレスの導入状況

いる。ここで緊張時のロッドの伸び量は、主筋の剛性に比例するから鉄筋がもっとも小さく、プレストレス導入時の弾性収縮によって、鉄筋供試体のプレストレス損失が大きくなるのは当然の結果である。

3. 2. プレストレスの経時変化

プレストレス導入直後から、曲げ載荷試験前日までのコンクリートおよび主筋のひずみ変化を測定した結果が図3である。

F R P供試体と鉄筋供試体とでは明らかにF R P供試体のひずみ変化の方が大きく、鉄筋供試体に導入されたプレストレスが小さかったことを裏付けている。

供試体に残存している有効プレストレスは、主筋のひずみロス相当分を損失として考慮した。プレストレスの有効率を表4に示す。

3. 3. 曲げ載荷試験結果

曲げひびわれ発生荷重 P_{cr} 、および終局荷重 P_u の試験結果を計算値と比較して表4に示す。

P_{cr} の計算値は、補強筋とコンクリートとの付着を完全とみなし、全断面を有効とする弾性理論より求めた。計算結果は、スターラップで補強し、かつプレストレスのない供試体C C N, G G N, S S Nおよびプレストレスのある鉄筋供試体S S Pを除いて、良く試験結果と一致している。スターラップ補強供試体は、いずれもスターラップの純かぶりが9 mmと小さく、この影響でひびわれが計算値より早く発生したものと考えられる。これに対してスターラップ供試体でもプレストレスを導入した場合には、かぶり部分も有効とした計算値に良く一致する。鉄筋供試体S S Pにおいてひびわれ発生が早いのは、鉄筋の剛性が高いために養生期間中のコンクリートの乾燥収縮が拘束され、あらかじめ微細な欠陥があったためと推測される。

終局荷重 P_u の計算値は、曲げ破壊の場合には、コンクリートの上縁ひずみが0.35%となるつりあい状態を等価応力ブロックにより求めた。試験結果は計算値と良く一致しているといえる。ただし、鉄筋補強供試体S S N, S S Pにおいては、鉄筋の降伏以後の荷重負担増加分を考慮していないため、計算値は試験結果よりやや小さい値を与えていている。

表4 試験結果一覧

NO	記号	残留 プレストレス kg/cm^2	プレストレス 有効率	まげひびわれ P_{cr} (kgf)	P_{cr} 計算値	せん断ひ びわれ荷重 (kgf)	P_u (kgf)	破壊形式	P_u 計算値
1	CNN	—	—	1,000	0.98	2,070	2,600	斜引張	1.07
2	CNP	41.9	0.88	2,120	1.04	4,190	4,990	せん断圧縮	1.15
3	CCN	—	—	590	0.58	2,300	6,640	せん断圧縮(主筋)	0.65(1.07)
4	CCP	42.8	0.90	1,890	0.92	3,790	6,180	曲げ引張(主筋)	1.01
5	GGN	—	—	690	0.67	1,790	5,900	せん断圧縮(スターラップ)	1.12
6	GGP	44.0	0.93	1,900	0.93	3,790	6,380	曲げ圧縮	1.17
7	SNN	—	—	1,300	1.22	3,990	4,700	斜引張	0.97
8	SSN	—	—	690	0.65	4,490	7,850	曲げ圧縮	1.26
9	SSP	14.0	0.43	1,090	0.62	4,160	8,000	曲げ圧縮	1.28

せん断破壊の場合の P_u の計算値は、以下の式により求めた。

$$P_u = 2 (V_c + V_s + V_p) \quad (1)$$

$$V_c = 0.94 \{0.75 + 1.4(d/a)\} \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[3]{100P_w} \sqrt[4]{100/d} \quad (2)$$

$$V_s = A_w (E_f/E_s) f_w d / (1.15S) \quad (3)$$

$$V_p = 2 M_o / a \quad (4)$$

$$P_w = A_s (E_f/E_s) / (bd) \quad (5)$$

ここに d : 有効高さ、 b : 供試体幅、 A_w : 区間 s におけるスターラップの総断面積、 f_w : スターラップの（降伏）強度、 E_f/E_s : F R P と鉄筋のヤング係数比、 M_o : デコンプレッションモーメント、 a : せん断スパン、 A_s : 引張側主筋の断面積である。

(2) 式は土木学会コンクリート標準示方書式の基本とされた式で⁶⁾、(3) 式はトラス理論、(4)式は佐藤ら⁷⁾の提案式である⁸⁾。せん断破壊の場合にも、試験結果は計算値と良い一致を示している。ただし、CCN 供試体では主筋がせん断により破断したため、試験結果は計算値より小さい値となっており、この場合()内に示した曲げ破壊による計算値との比較の方が試験結果と一致する。

3.3.1. ひびわれ状況

供試体の破壊時のひびわれ分布を図 4 に示す。ひびわれの分散は F R P 補強供試体と鉄筋補強供試体とでほとんど差はない。

スターラップで補強した供試体では、無補強の場合より曲げひびわれが多く発生しており、せん断補強効果が確認できる。

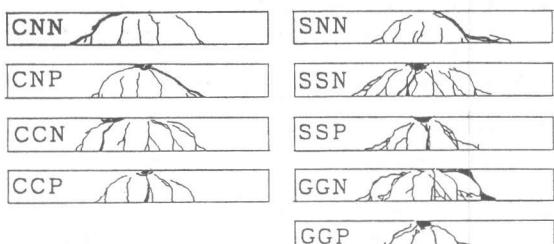


図 4 ひびわれ状況

また、プレストレスを導入した供試体では、せん断ひびわれが抑制されている様子が見受けられ、プレストレスによるせん断補強効果を示しているものと考えられる。

3.3.2. 荷重～たわみ関係

図 5 (a), (b) では、プレストレスなし、およびありの場合の荷重～たわみ関係を計算値と比較した。計算値は、ひびわれ発生までは全断面有効とし、ひびわれ発生以後は土木学会コンクリート標準示方書の(6) 式による平均有効断面 2 次モーメント I_e を用いた。

$$I_e = (M_{cr}/M)^3 I_g + \{1 - (M_{cr}/M)^3\} I_{cr} \quad (6)$$

ここに I_g , I_{cr} : それぞれ全断面有効、引張側コンクリート無視の断面 2 次モーメント

(a) のプレストレスなしの場合には、ひびわれ発生荷重が試験結果と計算値とで異なるために、

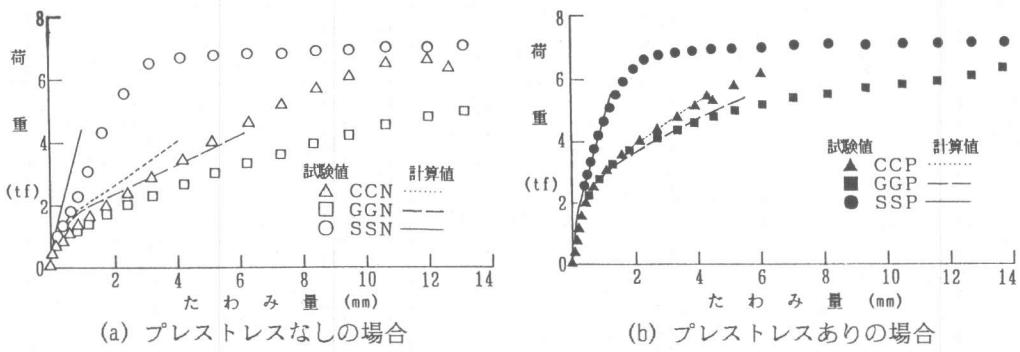


図 5 荷重～たわみ関係

両者には差が見られるが、ひびわれ後の勾配に着目すると、曲げひびわれが卓越する範囲内では両者はほぼ等しくなっている。ただし、せん断ひびわれが発生して終局荷重に近づくにしたがって、両者の近似は悪くなる。

(b) のプレストレスありの場合には、試験結果と計算値は良い一致を示している。

またいずれの場合にも主筋の剛性がたわみに与える影響が明瞭である。

図6ではプレストレスによるたわみ制御の効果を比較した。いまこの部材の使用状態レベルを、安全率3を考慮して、終局荷重の1/3程度（約2tf相当）と見込むと、プレストレスを導入したFRP補強供試体CCP, GGPのたわみはプレストレスなしの鉄筋補強供試体SSNよりも小さく、FRP補強筋を緊張材と兼用して導入したプレストレスの効果が明瞭である。

またプレストレスを導入した鉄筋補強供試体SSPは、本来ならもっともたわみが小さくなる筈であるが、プレストレスの損失が大きいためにFRP補強のCCP, GGPとほとんど差が無くなってしまい、主筋を緊張材と兼用する場合のFRPの優位性が実証されている。

3.3.3. 荷重～曲げひびわれ幅関係

図7には、荷重～曲げひびわれ幅関係を試験結果と計算値を比較して示した。計算値は土木学会のコンクリート標準示方書に示されている(7)式を用いた。

$$w = k_1 \{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \sigma_s / E_s \quad (7)$$

ここに c : かぶり、 C_s : 補強筋間隔、 ϕ : 補強筋径、 k_1 : 主筋の付着性状を表す係数で図7では1.0とした。

試験結果と計算値とは、とくに初期のひびわれが小さい範囲においては良い対応を示している。

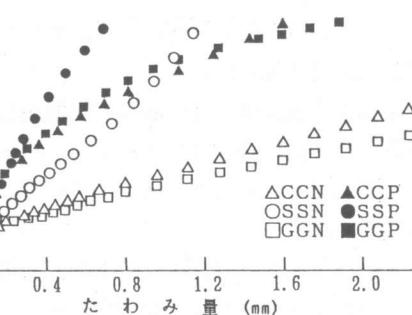


図6 プレストレスによるたわみ抑制効果

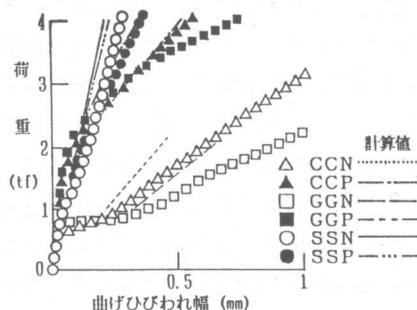


図7 荷重～曲げひびわれ関係

また、図7からもFRP補強筋を緊張して導入したプレストレスの効果が明瞭である。

3.3.4. スターラップによるせん断補強効果

図8では荷重～たわみ関係を用いてスターラップによるせん断補強効果を比較した。スターラップによる供試体のせん断耐力の増加が確認できる。

図9にはこの時の載荷点下のスターラップの荷重～ひずみ関係を示した。荷重～たわみ関係と

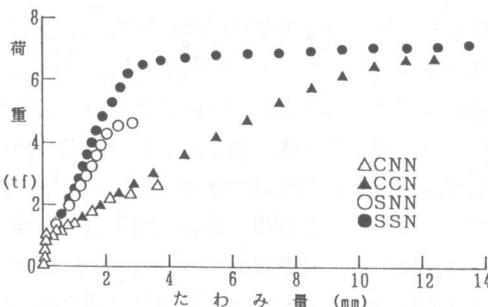


図8 スターラップによるせん断補強効果

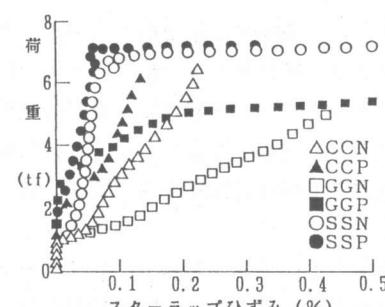


図9 荷重～スターラップひずみ関係

同様に、スターラップひずみの増加勾配においても F R P の剛性の影響があらわれており、(3)および(5)式で (E_f/E_s) の項を乗じたのは、この影響を考慮するためである。

3.3.5. プレストレスによるせん断補強効果

図10では、スターラップのない F R P 補強供試体 C N N 、 C N P の荷重～たわみ関係から、プレストレスによるせん断補強効果を比較した。

図10から供試体のせん断耐力が増加していることが確認できる。この增加分は(4)式と良い一致を示した。

さらに図9からはプレストレスによるせん断剛性の増加も確認できる。

4. まとめ

本研究で得られた成果は以下の様にまとめられる。

- (1) 主筋をプレテンション緊張材として兼用する方法で導入したプレストレスの有効率は、3週間後で F R P の場合 0.9、鉄筋の場合 0.4 であった。したがって本方法で長期的にプレストレスを期待する場合には、F R P 補強筋の方が有利である。
- (2) 導入したプレストレスにより、部材のたわみ、および曲げひびわれ幅は抑制され、期待どおり曲げ特性が改善される。またその改善効果は、本論文で示した計算方法により良く説明できる。
- (3) F R P スターラップによるせん断補強は、せん断耐力の増加においては鉄筋スターラップとほぼ同等の効果がある。ただし弾性係数の影響でせん断剛性が低く、変形の抑制効果は小さくなる。しかし、本方法で導入したプレストレスにより、せん断剛性もまた改善される。

F R P を補強筋として適用する場合、F R P が低剛性であることは、たわみ、ひびわれ幅が大きくなってしまうためにむしろ欠点と考えられてきたが、以上の本研究で示した F R P 主筋をその余剰の強度部分を利用してプレテンション緊張材として兼用する方法により、F R P 補強部材の特性を鉄筋補強部材と比較して、使用状態においては同等以上のレベルまで改善することができた。さらに本方法で鉄筋を緊張材と兼用した部材と比較してもほぼ同等レベルとできた。これは F R P 補強筋の低剛性という特徴を逆にメリットとして活用できたためで、さらに高強度、軽量、耐久性に優れる、非磁性といった他のメリットと併せ、F R P の付加価値を高めることができたと考えられる。

なお本研究の実施にあたり F R P 緊張材研究会の諸氏より助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

[参考文献]

- 1) 橋田ら：繊維強化熱可塑プラスチックで補強したコンクリート部材の曲げ特性、11回 JCI 年講
- 2) 関島ら：格子状 F R P 緊張材を用いたプレストレストコンクリートの開発研究、11回 JCI 年講
- 3) 岡本ら：アラミド繊維による組紐状棒材を用いた P R C はりの曲げ性状、第11回 J C I 年講
- 4) 出光ら：鉄筋を緊張材として用いたⅢ種 P C はりに関する研究、第8回 J C I 年講、1986
- 5) 鈴木ら：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した P R C はりの曲げ性状、第9回 JCI 年講
- 6) 土木学会：コンクリートライブラー第61号、コンクリート標準示方書（昭和61年）改訂資料
- 7) 佐藤ら：プレストレストコンクリートはりのせん断強度、鉄道総研報告、vol2, no8, 1988
- 8) 涌井ら：F R P 棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験、第11回 J C I 年講、1989

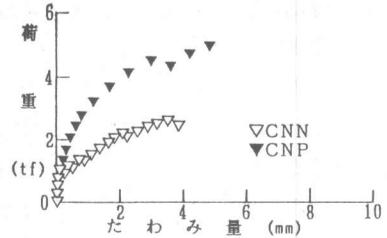


図10 プレストレスによるせん断補強効果