

論文

[2150] FRP ロッドで補強したコンクリートはりのせん断性状

金倉正三^{*1}、丸山久一^{*2}、清水敬二^{*3}、中村裕剛^{*4}

1. はじめに、

連続繊維補強材（以下FRPロッドと示す）は、腐食抵抗性が高いという利点から、鉄筋の代替材料として着目され、種々の研究が行なわれてきている。既往の研究では、FRPロッドはその低剛性ゆえに、せん断耐力への寄与は十分でないとの報告もあるが[1]、FRPロッドを主筋に用いたせん断補強筋のないコンクリートはりのせん断耐力についてさえ、充分定量的に把握されているとは言えず[2、3、4]、それに、FRPロッドをスターラップとして用いた場合の評価方法はほとんど検討されていない。そこで、本研究では炭素繊維を用いた（CFRPロッド）を主筋および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耐力におよぼす影響を検討するものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

今回実験に使用したFRPロッドはPAN系炭素繊維をビニルエステル樹脂で被覆したもので、平均繊維含有率は40%のものである（以下CFRPロッドと示す）。主筋に用いたCFRPロッドは、20cmピッチで交差筋が入って平面格子状に仕上げたもので、また、スターラップは一体ループ状に形成したCFRP（C6）を用いた。CFRPロッドおよび鉄筋の材料特性を表-1に示す。なお、コンクリートは最大骨材寸法25mmのレディーミクストコンクリートを用いた。

2. 2 供試体および実験方法

今回の実験パラメータは、1) 補強筋の材質（CFRPロッド、鉄筋）、2) 主筋比、3) せん断スパン比（ a/d ）、4) スターラップの有無および5) スターラップ間隔である。表-2に供試体一覧および実験結果を示し、図-1に供試体の寸法および断面形状を示す。

表-1 材料特性

種別	断面積 cm ²	引張強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²	破断ひずみ %
C6	0.181	13080	9.60×10^5	1.4
C13	0.633	13080	9.60×10^5	1.4
C16	1.028	13080	9.60×10^5	1.4
C22	1.977	13080	9.60×10^5	1.4
D6	0.32	4000(fy)	2.00×10^6	—
D22	3.87	4050(fy)	1.80×10^6	—

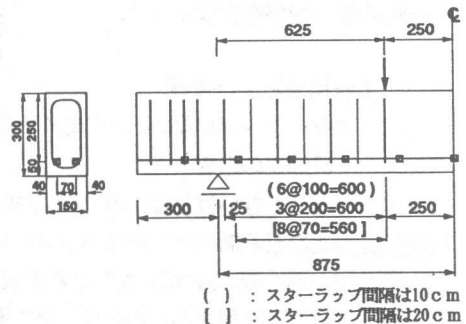


図-1 供試体の寸法および断面形状

*1：株式会社間組 工修（正会員）

*2：長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 Ph.D.（正会員）

*3：長岡技術科学大学教授 工学部建設系 農博

*4：長岡技術科学大学 工学部 技官

表-2 供試体一覧および実験結果

供試体名称	主 筋	スターラップ (間隔: cm)	主筋比 (%)	a/d	圧縮強度 f_c' (kgf/cm ²)	曲げ耐力 計算値 (tf)	せん断耐力		P_{exp} P_{cal}	破壊形式
							実測値 P_{exp} (tf)	計算値 P_{cal} (tf)		
FN1	2-C16		0.55	2.5	275	6.75	3.70	2.83	1.31	せん断
FN2	4-C16		1.10	2.5	331	9.71	4.25	3.70	1.15	せん断
FN3	2C22+2C13		1.39	2.5	305	9.94	4.70	3.90	1.21	せん断
FN4	4-C22		2.11	2.5	349	12.40	5.78	4.71	1.23	せん断
FN4-2.0	4-C22		2.11	2.0	373	16.22	6.28	5.32	1.18	せん断
FN4-3.0	4-C22		2.11	3.0	348	10.30	5.45	4.37	1.25	せん断
FN4-4.0	4-C22		2.11	4.0	373	8.11	4.54	4.04	1.13	せん断
FF1-20	2-C16	2-C6 (20)	0.55	2.5	362	8.00	5.90	5.67	1.04	せん断
FF1-10	2-C16	2-C6 (10)	0.55	2.5	383	8.30	8.40	8.30	1.01	せん断
FF2-20	2-C22	2-C6 (20)	1.05	2.5	350	9.95	7.28	6.30	1.16	せん断
FF2-10	4-C16	2-C6 (10)	1.10	2.5	331	9.71	8.90	8.91	1.00	せん断
FF3-10	2C22+2C13	2-C6 (10)	2.11	2.5	313	10.11	9.50	9.13	1.04	せん断
FF4-7	4-C22	2-C6 (7)	2.11	2.5	313	11.46	11.95	11.97	1.00	曲 げ
FF4-10	4-C22	2-C6 (10)	2.11	2.5	305	11.25	11.95	9.70	1.23	せん断
FF4-13	4-C22	2-C6 (13)	2.11	2.5	305	11.25	8.60	8.50	1.01	せん断
FF4-16	4-C22	2-C6 (16)	2.11	2.5	313	11.46	7.50	7.79	0.96	せん断
FF4-20	4-C22	2-C6 (20)	2.11	2.5	349	12.40	8.25	7.28	1.13	せん断
FS1-20	2-C16	2-D6 (20)	1.06	2.5	300	7.10	4.88	5.69	0.86	せん断
SF2-20	2-D22	2-C6 (20)	2.06	2.5	300	10.55	10.80	8.30	1.30	せん断

載荷は、変位制御で行い、二点对称集中載荷とし、荷重分配桁の下に相互にゴムホースで連結した油圧ジャッキを配している。さらに、ジャッキと支圧板との間にテフロンシートを使用し摩擦を少なくした。さらに、支承は両端とも回転および移動を可能とし、軸方向の拘束の影響を少なくした。

3. 実験結果および考察

3.1 スターラップのないはりのせん断耐力

3.1.1 鉄筋比の影響

スターラップのないはりは、表-2に示すように主筋比およびせん断スパン比をパラメータとした7体である。表-2に示した“せん断破壊”はスターラップの有無にかかわらず、全て載荷点近傍(外側)のコンクリートが破壊してはりの破壊に至っている。主筋比の小さい供試体は、斜めひび割れ発生とはほぼ同時にひびわれが載荷点近傍につき抜け、はりの破壊に至っており、主筋比の大きい供試体は、斜めひび割れが発生してから耐荷増加があり、最終的には載荷点近傍のコンクリートが破壊してはりのせん断破壊となっている。スターラップのないはりのせん断耐力の算定については、基本的に岡村・檜貝の式(1)を用いた[5]。ここで、主筋にCFRPロッドを用いた場合、CFRPの低剛性により軸方向のはりの変形の拘束程度が低下すると考え

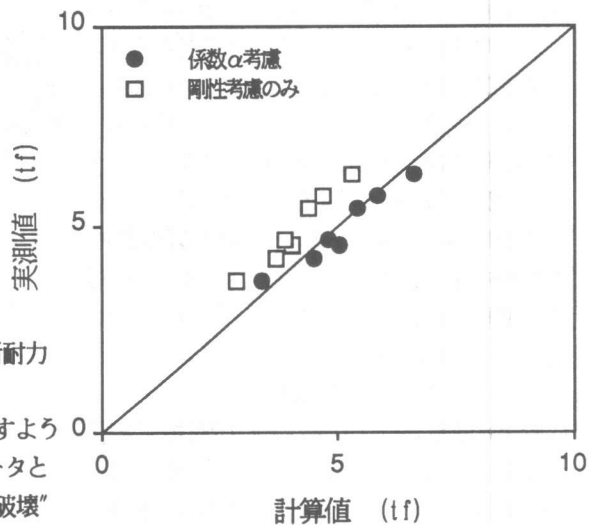


図-2 スターラップのないはりのせん断耐力

られることから、軸方向の剛性をヤング係数比 (E_f/E_s) で考慮する方法が提案されている [1]。しかし、著者らの研究では [4]、ヤング係数比による補正は必ずしも充分ではない。実験結果との整合性をとるために、式 (1) 中の p_w^* に示したように係数 α を導入した時、 $\alpha = 1.8$ とすると最も良い適合が得られた。ヤング係数比を用いた結果 (図-2 中の口) および係数 $\alpha (=1.8)$ による補正の結果を図-2 に示す。また主筋のひずみ分布の一例を図-3 に示す。このことは、主筋による軸方向の変形を拘束する効果が、単に引張剛性比だけで示されるのではなく、終局時のはりの変形、主筋のひずみ等より詳細な検討が必要であることを示している。

$$V_c = f_{vo} \{ 0.75 + 1.4 / (a/d) \} (1 + \beta_p^* + \beta_d) b_w \cdot d \tag{1}$$

ここで、 $f_{vo} = 0.94 \sqrt[3]{f_c}$ (kgf/cm²)

$$\beta_p^* = \sqrt{100 p_w^*} - 1 \leq 0.73 \quad , \quad p_w^* = \alpha \cdot (E_f/E_s) \cdot A_f / (b_w \cdot d)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d} - 1 \quad (\text{cm})$$

3.1.2 セン断スパン比の影響

CFRPの低剛性によりはりの変形が大きくなり、アーチ作用による力の伝達メカニズムが低下する様子を示したのが図-4である。縦軸のM/FUは通常の曲げ解析による終局曲げ耐力であり、Mはせん断破壊したときの曲げモーメントである。a/d=2.0でも耐力は小さく、アーチ作用が認められていない。

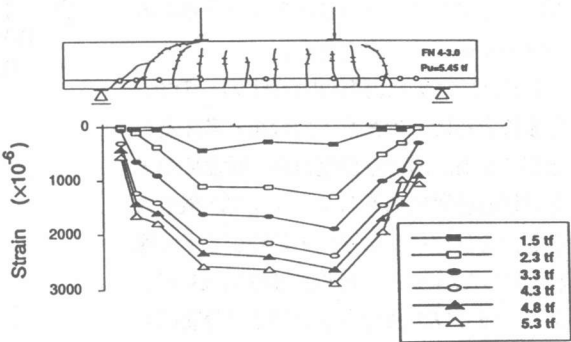


図-3 主筋のひずみ分布

3.2 スターラップ効果

本研究でのはりの破壊は、荷点近傍(外側)のコンクリートが破壊することにより生じていて、その際、CFRPのスターラップは破断していない。そこで、CFRPスターラップの効果としては、はり全体の変形を拘束し、荷点近傍のコンクリートの応力を緩和することではりの耐力増加に寄与していると考えられる。スターラップの寄与分を(2)式のように求め、主筋比との関係を示したのが図-5である。

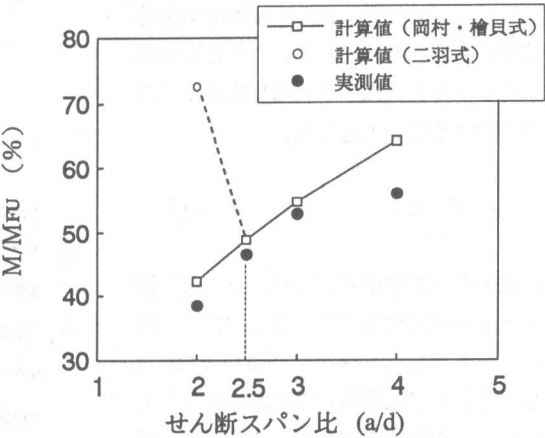


図-4 セン断スパン比の影響

$$V_s = V_{exp} - V_c$$

(2)

ここで、 V_{exp} : 実験でのせん断耐力

V_c : スターラップのない場合のせん断耐力 (実験値)

著者らの既往の研究[3、4]で、主筋に鉄筋、スターラップにCFRPロッドを用いた場合には、スターラップの効果は主筋比の影響を受けることが認められたが、主筋およびスターラップともCFRPロッドを用いた場合は、その影響があまり顕著ではない。

スターラップの負担力を詳細に検討するために、スターラップに貼付したひずみゲージよりスターラップのひずみ分布を示したのが図-6～8である。

CFRPロッドは降伏点を有しないので、ひずみ分布はそのまま応力分布と考えることができる。斜めひび割れが、断面の中央を横切る位置にあるスターラップが最も大きな力を負担しており、その両サイドに離れるにしたがって、負担力が減少している。スターラップの負担力およびその分布はスターラップ間隔によって異なることが認められた。

スターラップの効果は、ひびわれの状態、スターラップの位置、はりの変形等の影響を受けるものと考えられるが、ここでは取り合えず(3)式に示される従来のトラス理論で検討することとした。

$$V_u = V_c + V_s \quad (3)$$

従来のトラス理論によれば、 45° の圧縮ストラットを横切るスターラップは全て降伏しているとして $V_s = V_y$ を求めている。しかし、CFRPは降伏していないことから、ここでは実測ひずみに基づいて応力を算定することとした。終局時に斜めひびわれが

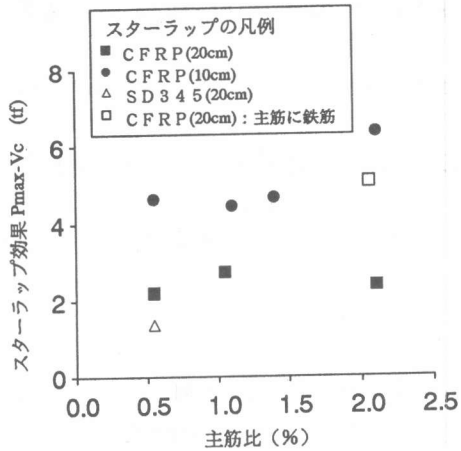


図-5 スターラップ効果

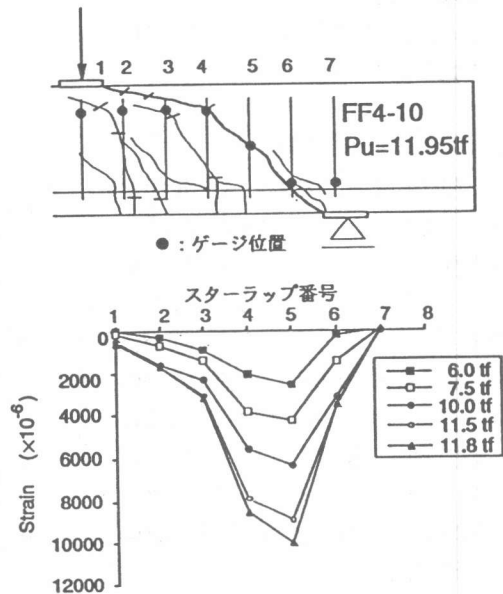


図-6 CFRPスターラップひずみ

横切ったスターラップの実本数を用いてそのひずみを平均すると図-9のようになり、スターラップ間隔が大きくなると平均的な値も大きくなるようである。このひずみ値とスターラップの実本数（45° トラスではなくなっている）を用いて V_s を算定し、かつ V_c を（1）式で算定した計算値を実測値と比較した結果を表-3に示す。

スターラップのない場合とある場合では斜めひびわれの状態が同じではない為（3）式のような単純な重ね合わせでは、計算値が大きくなっている。

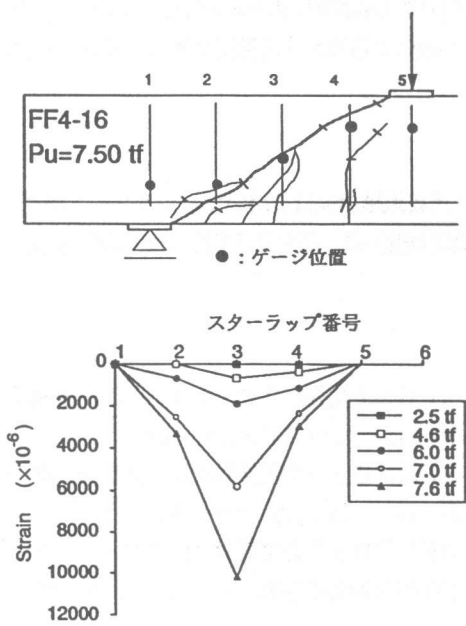


図-7 CFRPスターラップひずみ

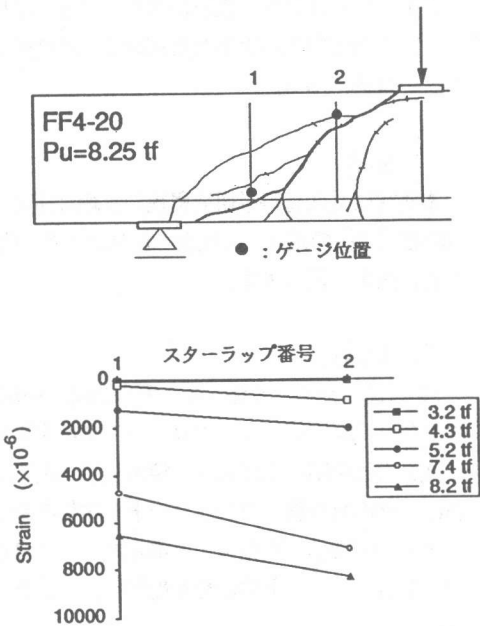


図-8 CFRPスターラップひずみ

表-3 耐力比較

	実測値 V_u (tf)	計算値 $V_{u,cal}$ (tf)	$V_u/V_{u,cal}$
FF1-20	5.90	5.27	1.12
FF2-20	7.28	8.44	0.86
FF2-10	8.90	14.32	0.62
FF3-10	9.50	13.08	0.73
FF4-10	11.95	14.72	0.81
FF4-13	8.60	11.19	0.77
FF4-16	7.50	10.37	0.72
FF4-20	8.25	11.22	0.74

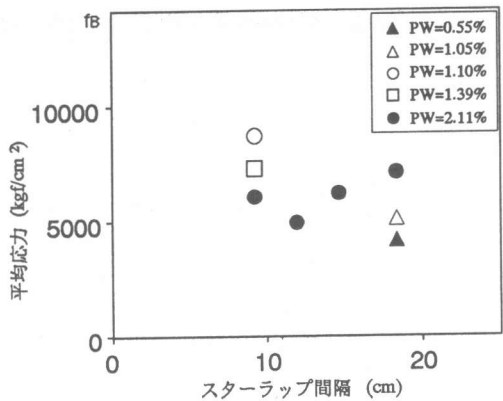


図-9 スターラップの間隔と応力の関係

4. まとめ

本研究より得られた結果は次の通りである。

- 1) スターラップのないはりのせん断耐力に及ぼすCFRPロッド主筋の効果は、既往の算定式において、鉄筋を主筋とした場合との引張剛性比による効果以上のものがある。その理由として、せん断破壊するまでの主筋の伸び変形が大きく、剛性比以上に軸力が導入されていることが考えられる。
- 2) CFRPを主筋及びスターラップに用いたはりのせん断耐力については、スターラップの実応力及び実本数を用いて、既往のトラス理論による算定式に適用すると、算定値が大きめに出る。

[謝辞]

本研究は文部省科学研究費補助金総合研究(A)「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計手法の確立」(代表 北海道大学 角田史雄教授)の一部を受けて行ったものである。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 辻 幸和・斉藤 等・関島謙蔵・小川広幸：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集Vol.10, No.3, pp. 547～552, 1988
- 2) 白砂和昭・丸山久一・清水敬二・山本康之：CFRPロッドで補強したコンクリート梁の曲げ・せん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13, No. 1, pp. 783～788
- 3) 小林俊彦・丸山久一・清水敬二・金倉正三：CFRPロッドを主筋およびスターラップに用いたコンクリート梁のせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 2, pp. 701～706
- 4) 丸山久一・小林俊彦・清水敬二：FRPロッドを主筋およびスターラップに用いたコンクリートはりのせん断性状：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講演論文報告集(土木学会)、pp. 187～192
- 5) H. Okamura・T. Higai：Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, p. 131～141 No. 300 (1980. 8)