

論文

[2121] CFRP ロッドを主筋及びスターラップに用いたコンクリート梁のせん断性状

正会員○小林俊彦 (J R 西日本)

正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学)

清水敬二 (長岡技術科学大学)

金倉正三 (長岡技術科学大学大学院)

1. はじめに

塩害を受けやすい海洋構造物や、誘導電流および磁気吸引力の増大によって悪影響を受ける超電導磁気浮上式鉄道用の構造物では、鉄筋に代わる補強材としてFRPの使用が検討されている。FRPロッドを用いたコンクリート梁のせん断性状に関しては、これまでにいくつか研究が行なわれており、FRPロッドを主筋に用いると、コンクリートの負担せん断力が小さくなること、骨材のかみ合わせの影響が小さいこと、主筋のほぞ作用が小さいことなどが指摘されている[1]。さらに、FRPロッドをスターラップに用いると、せん断耐力は従来の算定式で求めた値よりも小さいこと、曲げ加工部強度が低下すること等が報告されている[2]。しかし、せん断耐力およびせん断性状に関してはまだ研究が十分に進んでおらず、実際の構造物にFRPロッドを使用するには、その部材性状を明らかにし、設計法を確立する必要がある。

本研究は、FRPロッドを用いたコンクリート梁のせん断耐力および変形状について検討したものである。

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、平均繊維含有率が40%のものである(以下CFRPロッドと記す)。CFRPロッドとして、主筋に用いる場合(C13、C16、C22を使用)には、20cmピッチで交差筋が入って平面格子状になっているものを、またスターラップ(C6を使用)には、ループ状の一体構造のものを使用した。CFRPロッドの物性値を表-1に示す。また、比較用として、表-2に示す鉄筋(SD35)を用いた供試体も作成した。なお、コンクリートの最大骨材寸法は25mmである。

表-1 CFRPの材料特性

種別	公称断面積 cm ²	引張強度 kgf/cm ²	ヤング係数 kgf/cm ²	破断ひずみ %
C6	0.181	13080	9.60×10 ⁹	1.4
C13	0.633	13080	9.60×10 ⁹	1.4
C16	1.028	13080	9.60×10 ⁹	1.4
C22	1.977	13080	9.60×10 ⁹	1.4

表-2 鉄筋の材料特性

種別	公称断面積 cm ²	降伏応力 kgf/cm ²	ヤング係数 kgf/cm ²
D6	0.32	4000	2.00×10 ⁹
D13	1.27	3800	1.90×10 ⁹
D16	1.99	4100	1.95×10 ⁹
D22	3.87	4050	1.80×10 ⁹

2. 2 供試体および実験方法

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) 主筋の配筋段数、4) スターラップの有無、5) 断面寸法、および6) せん断スパン比とした。表-3に供試体一覧を示すとともに、図-1に代表的な供試体の寸法および断面形状を示す。

荷荷は変位制御で行い、二点対称集中荷荷とするために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、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。

なお、せん断ひび割れ幅および曲げひび割れ幅は、あらかじめ供試体に貼付した標点(10cm間隔)をコンタクトストレーンメータにより測定した。また、スパン中央と荷荷点の引張縁に変位計を取り付け、供試体の変位も測定した。

3. 実験結果および考察

実験結果を表-4に示す。

3. 1 スターラップのない梁のせん断耐力

表-4の中で、曲げ耐力の算定には通常の曲げ理論を用いた。また、せん断耐力の算定において、スターラップの

ない梁では基本的に岡村・楨貝の式(1)を用い[3]、FRPを用いたことによる軸方向の剛性の影響をヤング係数比(E_f/E_s)で考慮することとした[4]。これは、せん断耐力に及ぼす主筋の

$$V_c = f_{vo} \{0.75 + 1.4 / (a/d)\} (1 + \beta_{p^*} + \beta_d) b_w d \quad (1)$$

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

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

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

効果として軸方向の変形の拘束が挙げられ、主筋の引張剛性が影響するという点を考慮したものである。その結果を図-2に示す。主筋にCFRPを用いた場合の耐力比(P_{max}/P_{cal})の平均値は1.22となり、ある程度の適用が可能であるが、現段階では必ずしも十分とは言えない。また、多段配筋の場合、 A_s ならびに d について検討をおこなった結果、1)有効高さ d は最下段の軸

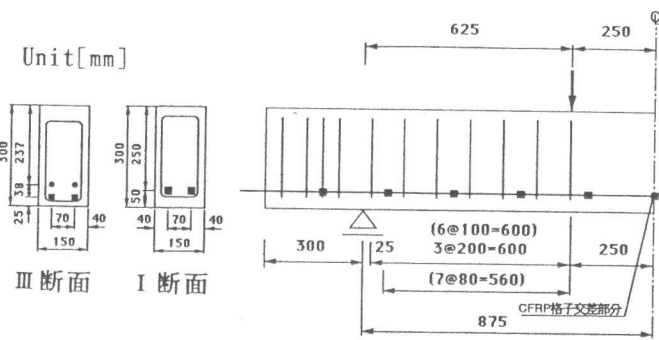


図-1 供試体寸法及び断面形状

表-3 供試体一覧

供試体名称	断面	主筋	スターラップ (間隔:cm)	有効高さ d (cm)	主筋比 (%)	せん断スパン比 a/d
FN1-1	I	2-C16		2.5	0.55	2.50
FN1-2	I	2-C22		2.5	1.05	2.50
FN1-4	I	4-C22		2.5	2.11	2.50
SN1-1	I	2-D16		2.5	1.06	2.50
SN1-2	I	2-D22		2.5	2.06	2.50
MN3-2	III	2C16+2D16		24.5	1.64	2.55
FF1-1-20	I	2-C16	2-C6 (20)	2.5	0.55	2.50
FF1-1-10	I	2-C16	2-C6 (10)	2.5	0.55	2.50
FF1-1-8	I	2-C16	2-C6 (8)	2.5	0.55	2.50
FF1-2-20	I	2-C22	2-C6 (20)	2.5	1.05	2.50
FF1-4-20	I	4-C22	2-C6 (20)	2.5	2.06	2.50
FS1-1-20	I	2-C16	2-D6 (20)	2.5	0.55	2.50
SF1-1-20	I	2-D16	2-C6 (20)	2.5	1.06	2.50
SF1-1-10	I	2-D16	2-C6 (10)	2.5	1.06	2.50
SF1-2-20	I	2-D22	2-C6 (20)	5.0	2.06	2.50
SS1-1-20	I	2-C16	2-D6 (20)	2.5	1.06	2.50
MF3-2-20	III	2C16+2D16	2-C6 (20)	24.5	1.64	2.55
MN3-2AD	III	2C16+2D16		24.5	1.64	4.08
FN2-1	II	4-C22		5.0	0.53	2.50
SN2-1	II	4-D22		5.0	1.03	2.50
MN4-1	IV	8C13+4D13		5.0	0.68	2.50
FF2-1-20	II	4-C22	2-C6 (20)	5.0	0.53	2.50

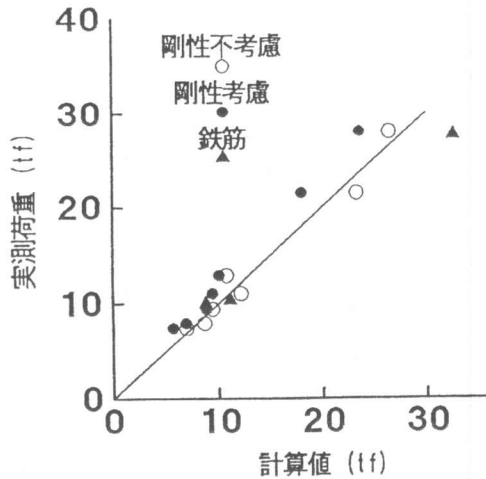


図-2 スターラップのない梁のせん断耐力

方向補強筋の有効高さ d_1 とする。2) 補強筋量 A_s は軸方向補強筋量を軸方向補強筋の上面からの距離と最下段の補強筋の有効高さ d_1 との比により低減

$$A_s = \sum \{ (E_i/E_s) (d_i/d_1) A_i \} \quad (2)$$

し、式(2)より求めた[5]。その結果を図-3に示す。この場合、実測値は算定値に僅かではあるが近づいている。これは多段配筋の場合、変形に最も影響する最下段の軸方向補強材の効果を考慮したものである。

3. 2スターラップのある梁のせん断耐力

スターラップのある梁のせん断耐力は、トラス理論を用いた土木学会式(式(3))によるものである。この算定式中で、FRPスターラップの効果をどのように評価するかが問題となるが、ここでは便宜的にスターラップ断面積にヤング係数比を考慮し、強度は破断強度を用いた。なお、FF1-4-20以外の供試体では、スターラップの破断は認められなかった。主筋剛性の増加とスターラップの効果の関係を図-4に示す。ここで、最大荷重時にスターラップの曲げ加工部が引張破断したFF1-4-20を考慮すれば、CFRPスターラップは、主筋剛性が大きくなるとスターラップの受け持つせん断力が大きくなる。

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

ここで、 $V_s = A_w^* f_w (\sin \alpha + \cos \alpha) (z/s)$ 、 $A_w^* = A_w (E_f/E_s)$

表-4 実験結果

供試体名称	圧縮強度 f_c' (kgf/cm ²)	破壊荷重 P_{max} (tf)	耐力計算値 P_{cal} (tf)		$\frac{P_{max}}{P_{cal}}$	破壊形式
			曲げ	せん断		
FN1-1	275	7.40	13.50	5.65	1.31	せん断
FN1-2	275	7.90	16.90	6.87	1.15	せん断
FN1-4	349	11.55	24.80	9.41	1.23	せん断
SN1-1	285	10.35	10.60	8.78	1.18	せん断
SN1-2	275	10.30	20.50	11.12	0.93	せん断
MN3-2	350	12.85	21.30	10.06	1.28	せん断
FF1-1-20	362	11.80	16.00	11.34	1.04	せん断
FF1-1-10	383	16.80	16.60	16.60	1.01	せん断
FF1-1-8	325	16.20	15.00	18.84	1.08	曲げ
FF1-2-20	350	14.55	19.90	12.59	1.16	せん断
FF1-4-20	349	16.50	24.80	14.55	1.13	せん断
FS1-1-20	300	9.75	14.20	11.38	0.86	せん断
SF1-1-20	378	13.35	12.10	14.79	1.10	曲げ
SF1-1-10	383	13.05	12.20	19.98	1.07	曲げ
SF1-2-20	300	21.60	21.10	16.59	1.30	せん断
SS1-1-20	293	11.60	11.90	14.43	0.97	曲げ
MF3-2-20	389	19.25	22.60	15.46	1.25	せん断
MN3-2AD	394	9.40	14.20	8.80	1.07	せん断
FN2-1	328	21.45	59.30	17.97	1.19	せん断
SN2-1	394	27.60	46.90	32.64	0.85	せん断
MN4-1	356	28.00	60.20	23.64	1.18	せん断
FF2-1-20	325	32.70	59.00	28.21	1.16	せん断

耐力の算定は、主筋及びスターラップに換算断面積を使用した。
FF1-4-20以外の供試体において、スターラップの破断は認められなかった。

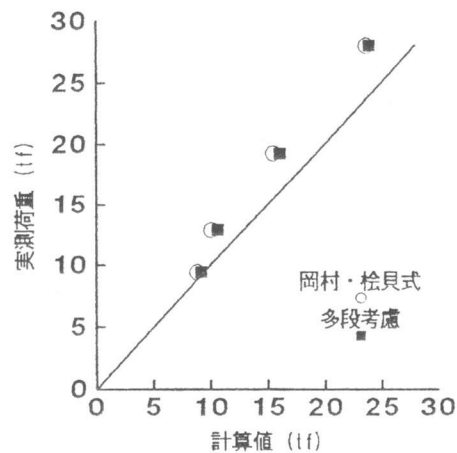


図-3 多段配筋のせん断耐力

3. せん断ひび割れ

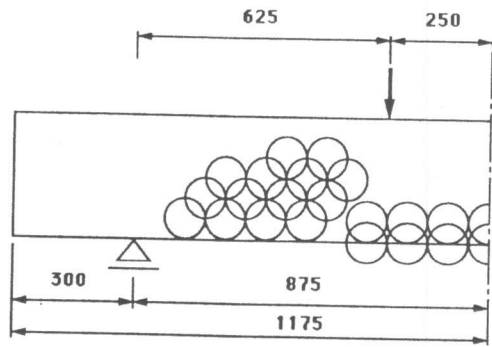
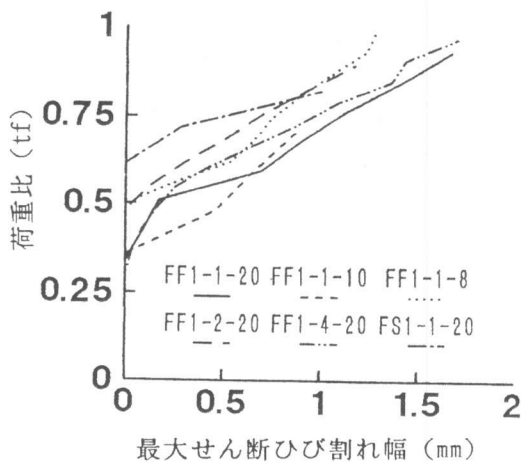


図-5 測定位置

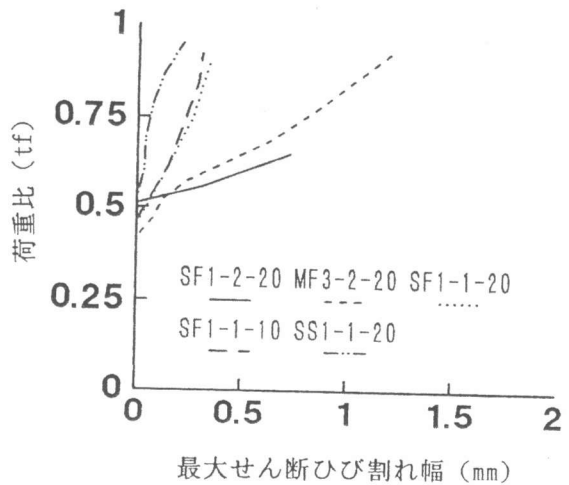
斜めひび割れが発生すると予想された領域（図-5参照）について水平方向および鉛直方向の変形量（ Δl_x 、 Δl_y ）およびひび割れが水平方向となす角（ α ）を測定した。そして、せん断ひび割れ幅（ W ）

として、ひび割れ面の垂直変位を式（4）により求めた。図-6に供試体の上縁から約15cmの位置の最大せん断ひび割れ幅を示す。スターラップを有しない供試体は、せん断ひび割れ発生とほぼ同時に破壊してしまうためほとんどの供試体で測定することができなかった。主筋にCFRPを用いた梁では、荷重比（ P/P_{max} ）と最大せん断ひび割れ幅の関係は、主筋比やスターラップ量にそれほど影響されていない。

$$W = \Delta l_x \cdot \cos \alpha + \Delta l_y \cdot \sin \alpha \quad (4)$$



(a) 主筋：CFRP



(b) 主筋：鉄筋

図-6 最大せん断ひび割れ幅

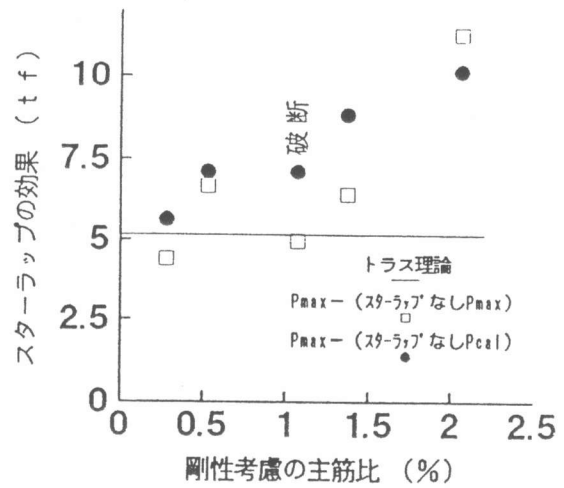


図-4 スターラップの効果

3. 4 せん断卓越域の変形

せん断に関する実験結果及びせん断ひび割れ幅の状況を検討すると、主筋及びスターラップの剛性がせん断耐力に影響を及ぼしていることが認められる。これは梁の変形、主としてせん断卓越領域における変形とせん断耐力とに関係があると考えられる。そこで、せん断変形が卓越する領域における変形を表わす指標として式(5)を用いることとした。

$$D = \sum \sqrt{\Delta l_x^2 + \Delta l_y^2} \quad (5)$$

ここで対象とする変形は、図-5での領域のもので、各供試体で同じ位置である。この指標と荷重荷重比(P/Pmax)の関係を図-7に示す。但し、スターラップのある梁についてのみ示してあり、スターラップのない梁では斜めひび割れの発生とともに終局に達したため、Dは得られていない。荷重比とDの関係は、主筋比にそれほど影響されていない。

3. 5 耐力算定式の再評価

実験結果を検討すると、主筋の剛性がスターラップの効果に影響を及ぼしていることが認められる。せん断破壊したCFRPスターラップを有する供試体のDと荷重荷重の間には、図-8のような関係がある。スターラップの効果とDは関係があると考えられ、また、実験結果も考慮して、式(6)のようなスターラップの受け持つせん断耐力の算定値を提案した。

$$V_s^* = 0.9 A_w f_y \sqrt[3]{p w^* / 2} (\sin \alpha + \cos \alpha) (z/s) \quad (6)$$

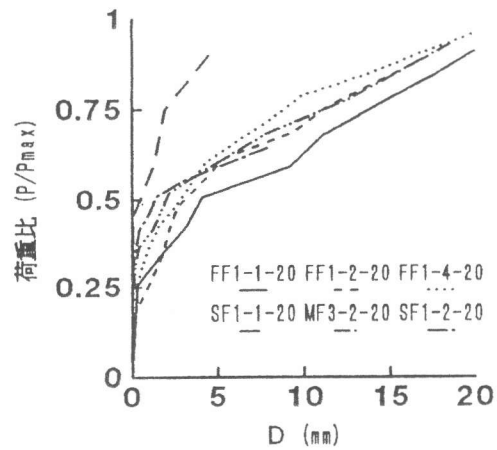


図-7 せん断卓越域の変形量

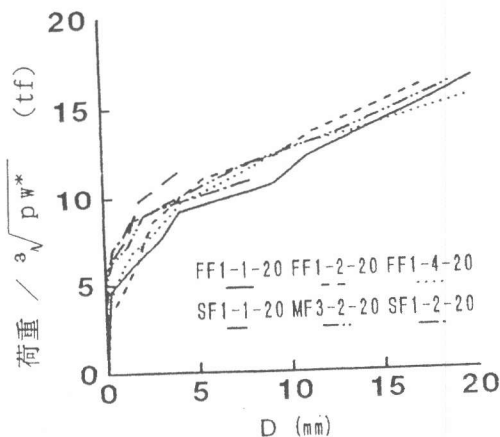
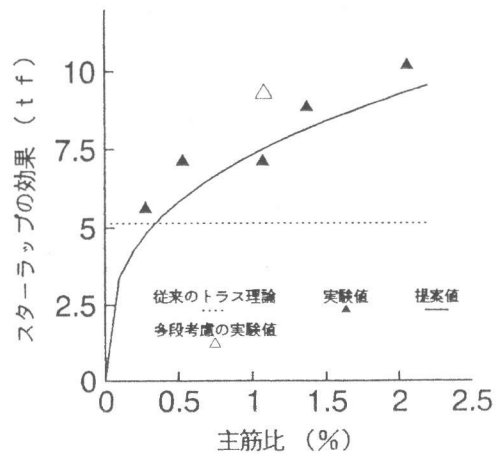


図-8 主筋比考慮のせん断卓越域の変形



ここで、実験値 = (実測値) - (スターラップなしの算定値)

図-9 提案式のスターラップの効果

ここに、 A_w はCFRPスターラップ断面積、 p_w^* は剛性考慮の主筋比(%)である。この結果を図-9及び図-10に示す。この結果、耐力比(P_{max}/P_{cal})の平均値は1.12から1.04になり、変動係数(%)は4.8から4.5になった。この結果、スターラップにCFRPを用いる場合、スターラップの受け持つせん断耐力は、主筋の剛性の影響を受ける。

4. まとめ

本研究によって得られた結果は、次の通りである。

- (1) せん断変形を表わす新しい指標を導入することで、せん断耐力とせん断変形の関係を表わすことが可能である。
- (2) 主筋およびスターラップに弾性係数の異なる補強筋を用いる場合には、引張剛性で補正することによって、従来の算定式もある程度適用可能である。
- (3) CFRPスターラップの受け持つせん断力は、主筋の剛性の影響を受ける。

[謝辞]

本研究を実施するにあたり、実験の遂行に際しては新潟県の酒井公生氏、清水建設の山本康之氏、長岡技術科学大学の大高昌彦氏、趙唯堅氏、柳益夫氏、長岡技術科学大学建設系文部技官の中村裕剛氏の御協力を得、また、CFRPロッド等の材料に関しては清水建設の中辻照幸氏に多大なる御協力を頂きました。ここに心から謝意を表わし、厚くお礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 寺田年夫・鳥取誠一・涌井 一・宮田尚彦：FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について、コンクリート工学年次論文報告集、vol.10、No.3、pp.541~546、1988
- 2) 涌井 一・鳥取誠一・寺田年夫・原 千里：FRP棒材を緊張材ならびにらせん状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験、コンクリート工学年次論文報告集、vol.11、No.1、pp.835~838、1989
- 3) H. Okamura・T. Higai：Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement、Proc. of JSCE、pp.131~141、No.300(1980.8)
- 4) 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及びせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、vol10、No3、pp.547~552、1988
- 5) 石橋忠良・斉藤啓一・寺田年夫：重ねられた鉄筋コンクリートはりのせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol18、pp.781~784、1986

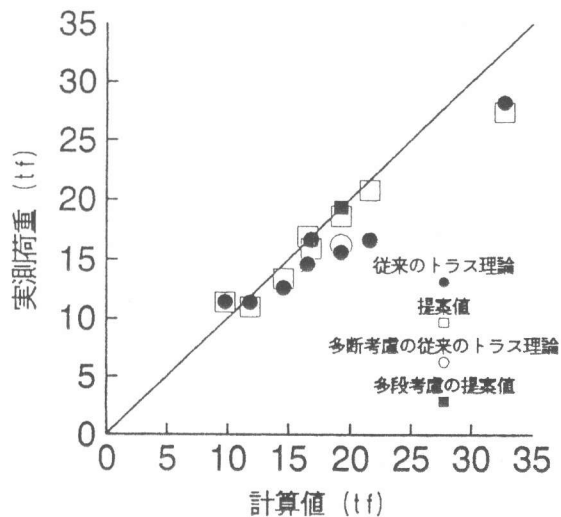


図-10 スターラップのある梁のせん断耐力