

論文 ノッチを設けたFRP補強コンクリートはりのせん断耐荷性状に関する実験的研究

趙 唯堅*1・丸山久一*2・鈴木秀門*3・木暮明仁*4

要旨：FRPロッドを主筋およびせん断補強筋に用い、試験区間にノッチを設けたコンクリートはりのせん断耐荷性状および各種要因の影響を実験的に検討し、以下のような結論が得られた。主筋比はスターラップの寄与に大きな影響はなく、弾性係数比を考慮することにより主筋比の効果を既往の通りに評価できる。しかし、せん断補強筋が多いほど、コンクリートの受け持つせん断耐力は上昇し、またせん断補強筋の弾性係数及びせん断スパン比が大きいほど、耐力限界時のスターラップのひずみは小さくなる。

キーワード：FRPロッド、ノッチ、コンクリートはり、せん断耐力、せん断圧縮破壊

1. はじめに

FRPロッドを用いたコンクリート部材のせん断挙動について、変形性状は無論のこと、終局耐力すらも十分に推定できるまでには至っていない。これは、曲げに比べせん断耐荷機構が、通常のRC部材においてすら十分解明されていないことに起因している。

主筋がFRPロッドでせん断補強筋を持たないはりのせん断耐力に関して、FRPロッドと鉄筋の弾性係数比を考慮するなどの提案はあったが、まだ検証する余地が残っている [1]。また、FRPロッドをせん断補強筋に用いた場合、終局時にFRPスターラップの応力が一定でなく、しかも鉄筋のような応力再分配が起こらないため、種々の要因によってスターラップの寄与 V_s が異なり、ひいてはコンクリートの受け持つせん断耐力 V_c に影響を及ぼす可能性もある。

そこで、これらの耐荷力および変形性状を解明するために、せん断スパン内にノッチを設けたFRP補強コンクリートはりを製作し、載荷実験を行った。本論文はその結果の一部として、はり全体の挙動に着目し、せん断耐力およびそれに及ぼす主筋比、スターラップの弾性係数、せん断スパン比等の影響について述べる。

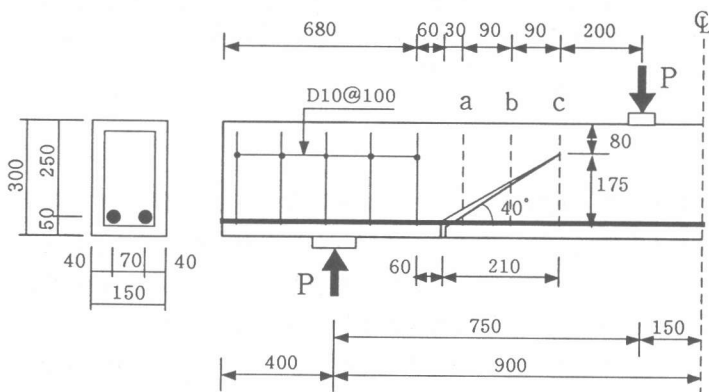


図-1 供試体寸法、配筋、および載荷方法

- * 1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修（正会員）
- * 2 長岡技術科学大学 教授 工学部建設系 Ph. D.（正会員）
- * 3 西日本旅客鉄道株式会社 工修
- * 4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表-1 補強筋の材料特性

種別	材質	略称	断面積 (cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	破断時伸び (%)	用途
ANCP19	CFRP	C19	2.840	1.05×10 ⁶		11240	1.21	主筋
SGR6	GFRP	G6	0.283	0.39×10 ⁶		11000	2.80	スターラップ
SCR6	CFRP	C6	0.283	1.00×10 ⁶		13000	1.30	
D6	Steel	S6	0.317	2.10×10 ⁶	3680	5220	25.0	

表-2 供試体一覧および実験結果

シリーズ	供試体名	主筋		せん断補強筋			せん断 スパン比 a/d	せん断耐力		破壊形式
		本数・筋種・径 (mm)	主筋比Pt (%)	位置・間隔 (cm)	筋種・径 (mm)	補強筋比Pv (%)		実験値 (tf)	計算値* (tf)	
I	No.1	2-C19	1.512	---	—	0	3.0	4.50	3.85	せん断圧縮
	No.2	〃	〃	a---	G-φ6		〃	5.85	6.00	スターラップ 破断
	No.3	〃	〃	-b-	〃		〃	6.12	5.67	せん断圧縮
	No.4	〃	〃	--c	〃		〃	5.44	5.33	せん断圧縮
	No.5	〃	〃	abc@9	〃	0.419	〃	8.61**	7.80	曲げ圧縮
II	No.6	4-C19	3.024	---	—	0	〃	4.60	4.94	せん断圧縮
	No.7	〃	〃	a---	G-φ6		〃	6.92	6.60	せん断圧縮
	No.8	〃	〃	-b-	〃		〃	7.16	6.70	せん断圧縮
	No.9	〃	〃	--c	〃		〃	6.42	6.20	せん断圧縮
	No.10	〃	〃	abc@9	〃	0.419	〃	11.30	9.43	せん断圧縮
III	No.11	4-C19	3.024	a---	C-φ6		〃	8.50	8.05	せん断圧縮
	No.12	〃	〃	-b-	〃		〃	8.42	7.40	せん断圧縮
	No.13	〃	〃	--c	〃		〃	7.83	7.57	せん断圧縮
	No.14	〃	〃	abc@9	〃	0.419	〃	12.59	11.45	せん断圧縮
IV	No.15	3-C19	2.268	---	—	0	〃	4.05	4.44	せん断圧縮
	No.16	〃	〃	abc@9	G-φ6	0.419	〃	11.62	9.42	せん断圧縮
V	No.17	2-C19	1.512	abc@9	S-D6	0.470	〃	12.00**	10.85	曲げ圧縮
VI	No.18	2-C19	1.512	abc@9	G-φ6	0.419	2.0	12.33	11.65	せん断圧縮
	No.19	〃	〃	〃	〃	〃	4.0	7.33	7.72	せん断圧縮

* $V_u = V_c + V_s$. V_c は主筋比に弾性係数比(E_f/E_s)を乗じた岡村・樽貝式を用いた。また、 V_s は実測のスターラップひずみで算出した。
** 曲げ圧縮破壊の耐力実験値である。

2. 実験概要

主筋は表面異形加工のカーボン系FRPロッド（略称C、以下同）を使用し、スターラップはガラス繊維（G）、カーボン繊維（C）、および普通の鉄筋（S）の3種類を使用した。FRPスターラップは一体化ループ状に形成したものである。補強筋の材料特性は表-1に示す。コンクリートのシリンダ圧縮強度の平均値は343kgf/cm²である。

供試体は、矩形断面を有する単純はりであり、断面寸法は15cm×30cm、有効高さ25cmである。図-1に供試体の形状寸法および配筋を、表-2に供試体諸元を示す。供試体長手方向の左右に試験区間と補強区間に分け、試験区間のせん断スパン内に主せん断ひびわれを誘発するために、図-1に示す位置に片側深さ3cmずつのノッチを設けた。

供試体は6シリーズで構成され、合計19体である。主な実験パラメータは①主筋比、②スターラップの有無、③スターラップの配置位置、④スターラップの弾性係数、および⑤せん断スパン比などである。

荷重は対称2点集中の静的荷重とした。測定項目は、①荷重、②スパン中央と載荷点の変位、

③曲げとせん断圧縮域コンクリートのひずみ、④主筋のひずみ、⑤スターラップのひずみ、⑥主せん断ひびわれ（ノッチ位置）の幅とずれ、および⑦せん断圧縮域の高さなどである。

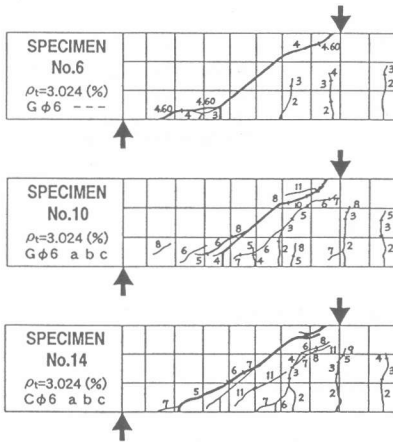


図-2 ひびわれおよび破壊状況

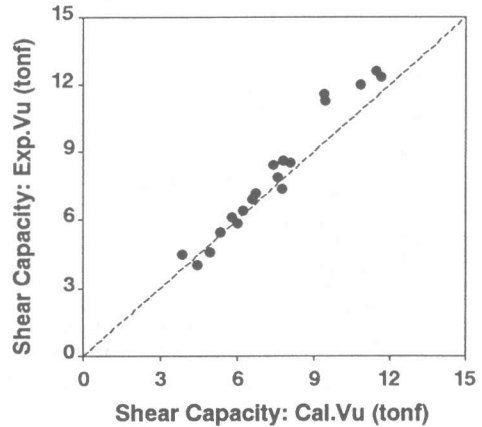


図-3 せん断耐力の実験値と計算値の比較

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状およびせん断耐力

試験区間のひびわれ、および破壊状況の例を図-2に示し、破壊形式およびせん断耐力の実験結果は表-2に示す。No.5とNo.17の2体を除き、ほかは全てせん断破壊となっている。また、せん断破壊した供試体のうち、No.2だけスターラップが破断したが、あとはスターラップが破断する前にせん断圧縮破壊を起こした。

表-2にせん断耐力の計算値も示している。この計算値は、スターラップのない供試体の V_c について式(1)に示す岡村・檜貝式を用いたが、スターラップのある供試体については、 V_c と実測のスターラップひずみで算出した V_s を足し併せてせん断耐力 V_u を求めた。この種の計算値を用いた理由は、 V_s について適切な算定方法はないことと、実際の V_s が分かれば、スターラップのある供試体においても V_c の実測値と計算値は比較できることである[2]。

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

ここで $f_{vo} = 0.94 (f_{c'})^{1/3}$ (kgf/cm²)

$$\beta_p = (100 \rho_w)^{1/2} - 1 \leq 0.73, \quad \rho_w = A_f / (b_w d) \cdot (E_f / E_s)$$

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

表-2の実測値と計算値をプロットしたのが図-3である。高いせん断耐力を有するのはa、b、cの位置に全てスターラップを配置している供試体であるから、図-3からせん断補強筋が

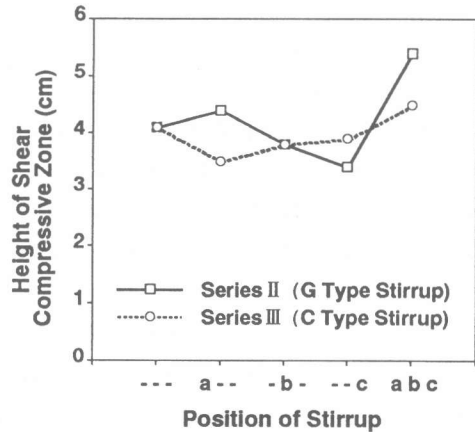


図-4 せん断圧縮域高さ

多いほど、実験値は計算値よりわずかながら大きくなる傾向がある。このことと図-4に示すせん断圧縮域高さ測定値の傾向と併せると、せん断補強筋が多いほど斜めひびわれの進展が抑制され、コンクリートの受け持つせん断耐力は上昇していると推定できる [2]。

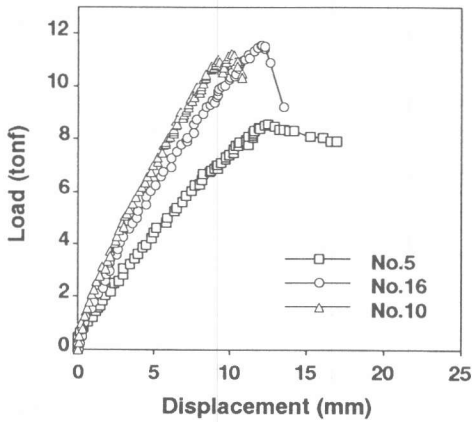


図-5 荷重-変位関係(1)

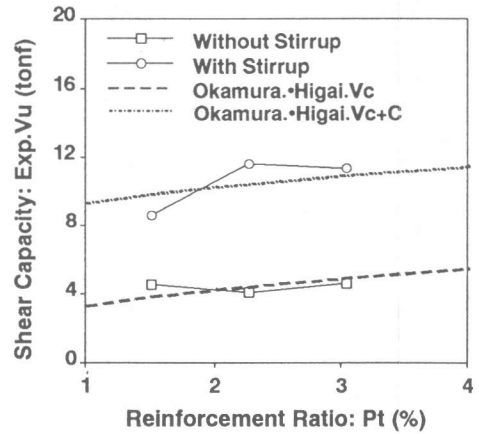


図-6 主筋比による影響

3. 2 主筋比の影響

図-5にせん断補強筋量が同じで、主筋比だけが異なる供試体の荷重-変位関係を示す。供試体No. 5は曲げ圧縮破壊を起こしたが、せん断耐力およびそれに伴う変形がこれ以上のものとなる。また、せん断破壊する鉄筋コンクリートはりの性状と比べると、スターラップの降伏による剛性低下はなく、ピーク時までほぼ直線的に伸びているのが特徴である。図-6にせん断補強筋がない場合、および同じせん断補強筋量を有する場合のせん断耐力に及ぼす主筋比の影響を示す。同時に式(1)による V_c (破線)と、

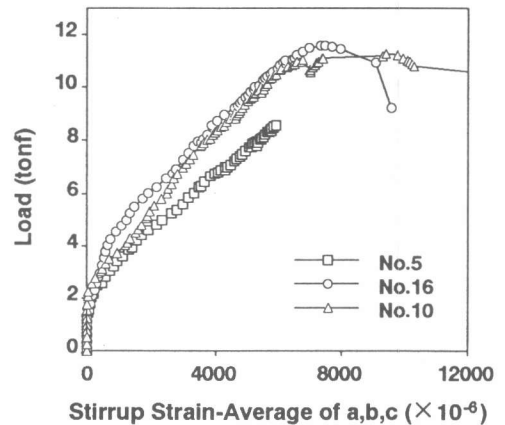


図-7 荷重-スターラップひずみ関係(1)

$V_c + \text{常数} C$ (一点鎖線)を示す。両者の傾向はほぼ一致しており、今回の実験では式(1)に弾性係数比を考慮することで主筋比の効果を既往の通りに評価できると言える。図-7に図-5と同じ供試体の荷重-スターラップひずみ関係を示す。全体の挙動を見るために、a, b, c 3本のひずみの平均値を用いた。この図によると、主筋比が小さいほどスターラップひずみの伸びが早い、破壊時(ピーク荷重時)のひずみがほぼ同程度のようなのである。すなわち、せん断耐力に対するスターラップの寄与は主筋比にあまり影響されない。

3. 3 せん断補強筋の弾性係数の影響

図-8に主筋比が同じで、せん断補強筋の引張剛性が異なる供試体の荷重-変位関係を示す。せん断補強筋の有無および弾性係数ははりの剛性に影響しない。また、スターラップの有無によって耐力の差が大きいが、弾性係数が3倍近く変わっても、耐力はそれほど変わらない。図-9にシリーズIIとシリーズIIIのせん断耐力の比較を示す。スターラップの位置に関係なく、弾性係

数の増加による耐力の増加はほぼ同程度のものである。図-10に4供試体のスターラップひずみの進展状況を示す。まず主筋比が1.512%のNo.5に比べ、主筋比が倍の3.024%のNo.10の方が同荷重レベルにおいてスターラップのひずみは小さい。次にNo.10に比べ、主筋比が同じでスターラップの弾性係数が約3倍大きいNo.14の方が同荷重レベルにおいてだけでなく、破壊時のひずみも小さくなる。更にNo.5に比べ、同じ主筋比で鉄筋のスターラップを有するNo.17では、降伏するまでスターラップの剛性が最も大きいので、ひずみは最も小さいが、降伏することによって急激な進展が見られ、途中からNo.14と逆転している。No.17は最後に曲げ破壊が卓越したため、再びひずみが伸びなくなる。以上を総合して言えば、せん断補強筋の弾性係数が大きいほど、耐力限界時のひずみは小さくなるが、終局せん断耐力は大きくなる。

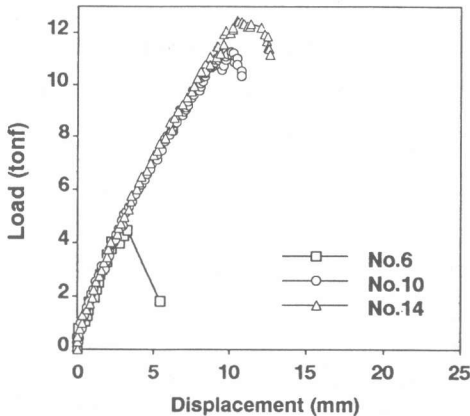


図-8 荷重-変位関係(2)

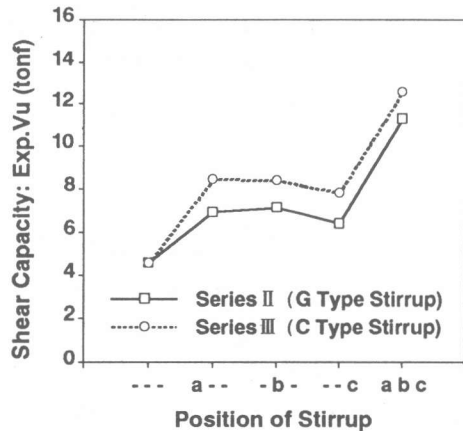


図-9 スターラップの弾性係数による影響

3. 4 せん断スパン比の影響

図-11にせん断スパン比のみが異なる3供試体の荷重-変位曲線を示す。せん断スパン比が大きくなるにつれ、鉄筋コンクリートはりと同様に、せん断耐力もはりの剛性もかなり低下する。図-12はせん断耐力実験値とせん断スパン比の関係、および式(1)との比較を示すものである。スターラップ以外が受け持つせん断耐力 V_c の実験値は終局耐力 V_u から終局時のスターラップひずみより算出した V_s を差し引いて求めた。 V_c の実測値と式(1)は比較的に一致しており、このことから斜めひびわれ耐力を与

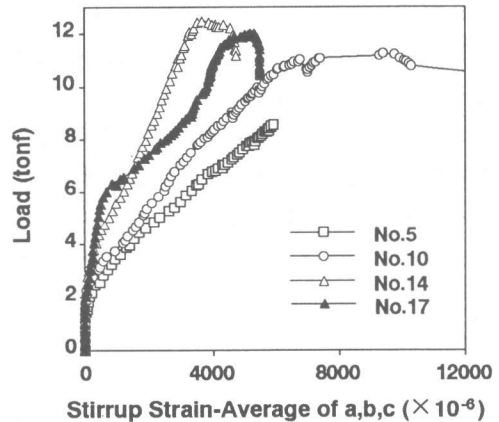


図-10 荷重-スターラップひずみ関係(2)

える式(1)では、せん断補強筋を有しせん断圧縮破壊を起こす場合のせん断補強筋以外が受け持つせん断耐力にもほぼ適用できると言える。また図-12では、終局耐力 V_u は V_c と異なった勾配を示した。これはスターラップがせん断耐力に対する寄与の違いによるものである。図-13に示すように、供試体No.5が先に曲げ破壊を起こさず、そのひずみがもう少し伸びると考えると、せん断スパン比が小さいほど、耐力限界時のスターラップのひずみは大きくなる。

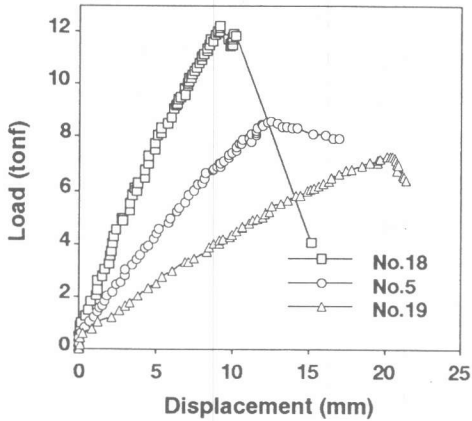


図-11 荷重・変位関係(3)

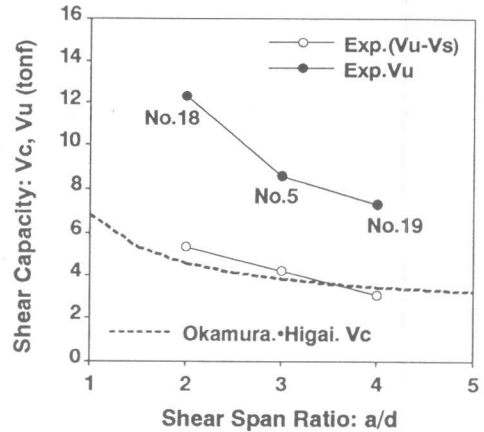


図-12 せん断スパン比による影響

4. まとめ

FRPロッドを主筋とせん断補強筋に用いたコンクリートはりのせん断耐荷性状に関して、本研究より得られた結論は次の通りである。

(1) せん断補強筋が多いほど、斜めひびわれの進展が抑制され、コンクリートの受け持つせん断耐力はわずかながら上昇する。

(2) スターラップの終局ひずみに及ぼす主筋比の影響は小さい。また、弾性係数比を考慮することでせん断耐力に対する主筋比の効果を既往の通りに評価できる。

(3) スターラップの配置位置に関係なく、弾性係数の増加による耐力の増加はほぼ同程度のものである。また、せん断補強筋の弾性係数が大きいほど、耐力限界時のひずみは小さくなるが、終局せん断耐力は大きくなる。

(4) せん断スパン比が大きいほど、耐力限界時のスターラップのひずみは小さくなる。

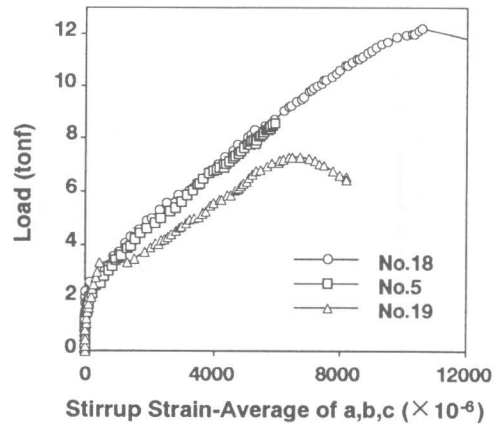


図-13 荷重・スターラップひずみ関係(3)

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金（総合研究(A)、課題番号04302040、代表者：角田與史雄 北海道大学教授）の一部を受けて行ったものである。また、FRPロッドは熊谷組から提供して頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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、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に関するシンポジウム論文集、pp.187-192、1992.4
- 2) 趙 唯堅・丸山久一・鈴木秀門・金倉正三：CFRPロッドを用いたRCはりのせん断耐力とせん断変形に関する一考察、土木学会第49回年次学術講演会概要集(V)、pp.928-929、1994.9