

論文 連続繊維シートによりせん断補強された RC はりのせん断耐力における寸法効果

石崎克匡^{※1}、丸山久一^{※2}、下村匠^{※3}、高田賢司^{※4}

要旨：連続繊維シートの各種要因が、RC部材のせん断性状およびせん断耐力における寸法効果にどのように寄与しているかについて検討した。その結果、FRPシートの弾性係数の違いがRC部材の変形性状に影響する割合は小さいものの、シートの接着面積の増減により荷重の分担メカニズムが変化することが確認された。また、FRP材料を用いてせん断補強した場合、せん断補強筋の終局時のひずみ分布は補強方法により、変化しないことが分かった。終局時におけるFRPシートの平均ひずみより求めたシートの分担するせん断強度と有効高さの関係より、寸法効果の存在が示唆された。

キーワード：FRPシート、寸法効果、ひずみ分布

1. はじめに

連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート部材に関する研究は近年数多くなされており、特に曲げ及びせん断耐力に関する研究 [1] [3] は数多くなされてきている。本研究は、構造物の大型化に伴い出現する問題の1つである寸法効果に着目した。実験では、供試体の曲げ耐力を卓越させ、せん断破壊の起こりやすい状況にし、連続繊維シート材（以下FRPシート）をせん断補強材として載荷実験を行った。その結果よりFRPシートがせん断耐力にどのように寄与をしているかを実験的に検討したものである。

表-1 FRPシートの材料特性

基材	炭素繊維	アラミド繊維
略称	CF	AF
繊維目付量(g/m ²)	200	235
公称強度(MPa)	2900	2400
弾性係数(×10 ⁴ MPa)	2.44	0.8
換算厚さ(mm)	0.111	0.169

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に補強材の材料特性を示す。せん

表-2 供試体概要および破壊形式

	供試体	断面寸法 b×h (mm×mm)	有効高さ d (mm)	せん断 スパン比 a/d	コンクリート 強度 f_c' (MPa)	主筋		せん断 補強材	接着方法	破壊形式
						本数-呼径	主筋比 ρ_t (%)			
シリーズ1	No.1	250×500	400	2.5	32.6	2D38	2.28	—	—	斜め引張破壊
	No.2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	CF	4面	〃
	No.3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	AF	4面	〃
	No.4	〃	〃	〃	〃	〃	〃	CF	上下面	〃
	No.5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	AF	上下面	〃
シリーズ2	No.6	400×700	600	〃	34.6	3D38	1.43	—	—	〃
	No.7	〃	〃	〃	〃	〃	〃	CF	4面	〃
	No.8	〃	〃	〃	〃	〃	〃	AF	4面	〃

※1 (株) ピー・エス (正会員)

※2 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系、Ph.D (正会員)

※3 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系、博士 (工学) (正会員)

※4 大木建設 (株) 技術研究所、修士 (工学) (正会員)

断補強材は炭素繊維シート（以下「CFシート」）とアラミド繊維シート（以下「AFシート」）を使用した。なお、これらのFRPシートはエポキシ樹脂を含浸させてはり表面に接着した。

2.2 供試体

表－2に供試体概要および破壊形式、図－1に供試体の形状寸法の一例を示す。

すべての供試体において主せん断ひび割れを誘導するために、せん断スパン内にノッチを設けた。ノッチの角度および位置は、二羽らの研究 [2] や趙・丸山らの研究 [3] より定めた。

実験の主なパラメータは、シートの種類と接着方法・有効高さである。各供試体のせん断スパン比 a/d を2.5と一定とした。

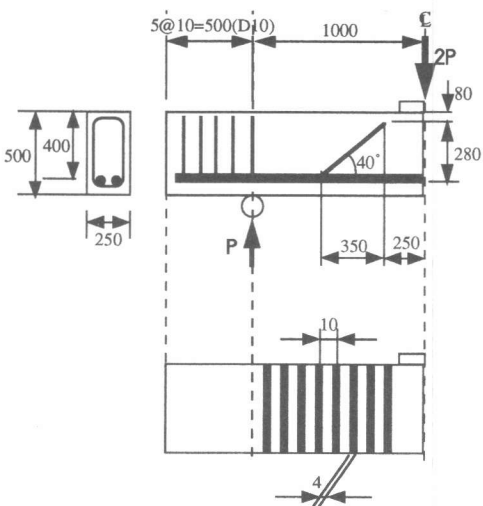
実験方法は1点集中載荷とした。測定項目は(1)荷重、(2)載荷点の変位、(3)曲げとせん断圧縮域のコンクリートひずみ、(4)FRPシートのひずみ、(5)主せん断ひび割れ（ノッチの位置）の幅とずれである。

3. 実験結果および考察

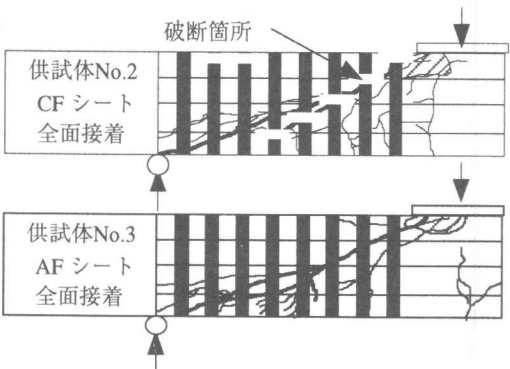
3.1 破壊形式およびせん断耐力

表－2に破壊形式を示す。破壊形式は全ての供試体において斜め引張破壊である。破壊状況の一例を図－2に示す。終局時において供試体No.2,7およびNo.8ではシートは主せん断ひび割れ部で破断した。供試体No.3ではAFシートは終局に至る前に定着部が剥離した。よって以下に示すNo.3のデータは参考値である。

表－3にせん断耐力の実験値 $V_{u,exp}$ と計算値を示す。せん断耐力の算定はコンクリートの分担するせん断耐力 $V_{c,cal}$ については二羽式 [4] でせん断耐力を求めた。FRPシートの分担するせん断耐力については、計算値 $V_{s,cal}$



図－1 供試体形状寸法（上段）並びにシート接着方法（下段）の一例（シリーズ1）



図－2 供試体の破壊状況

表－3 せん断耐力の実験値と計算値

供試体 No.	実験値	計算値		
	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{c,cal}$ (kN)	$V_{s,cal}$ (kN)	$V_{s,exp}$ (kN)
1	181	186	-	-
2	285	186	76	104
3	236	186	9	55
4	184	186	18	3
5	166	186	11	-
6	295	262	-	-
7	569	262	99	274
8	530	262	65	235

ではトラスモデルを仮定し、終局時のFRPシートの実測平均ひずみ(以下 $\epsilon_{w,ave}$ とする)より算定した。実験値 $V_{s,exp}$ は補強有の場合における $V_{u,exp}$ から、無補強の供試体(No.1,6)の $V_{u,exp}$ を差し引いて求めた。

3.2 FRPシートの種類、接着方法による影響

図-3(a)にシリーズ1、図-3(b)にシリーズ2の荷重と変位の関係を示す。図-3(a)、(b)においてFRPシートによりせん断補強されているNo.2~5およびNo.7,8とされていないNo.1およびNo.6とでは、せん断補強されている供試体において荷重に対する変位の増加傾向が大きいことが分かる。またこの図よりシリーズ1,2においてFRPシートの種類(No.2,3とNo.7,8)に着目すると、荷重のピークに差がみられるものの、荷重に対する変位の進展状況はいずれの供試体においてもほぼ同じである。(No.3については終局時に点線に示すような挙動をすると仮定する。)従って、FRPシートの弾性係数の違いが及ぼす影響は部材の変形性状に対してさほど無いものと思われる。

図-3(a)よりシリーズ1において接着方法の違いで見ると、4面を接着したNo.2,4は、はりのせん断破壊と同時に終局に至っているのに対して、上下面のみを接着したNo.3,5では部材が終局に近い状態になっても変位が伸展していることが分かる。これは、上下面を接着した場合は、シートが破断しないため、主せん断ひび割れが圧縮縁まで貫通した後に再びシートがせん断力を分担し始めることが原因であると思われる。

図-4(a)にシリーズ1、図-4(b)にシリーズ2の荷重と主せん断ひび割れ(ノッチ部分)におけるシートの平均ひずみの関係を示す。これらの図よりいずれの供試体においても、主せん断ひび割れの発生以後、シートひずみは急激に増加傾向を示すことが分かる。図-4(a)より全面接着したNo.2,4の場合、繊維の種類を問わずせん断ひび割れが発生した時点で急激にシートひずみが増大するのに対し、上下面のみを接着したNo.3,5ではコンクリートがせん断破壊に至るまでは急激にひずみが増大

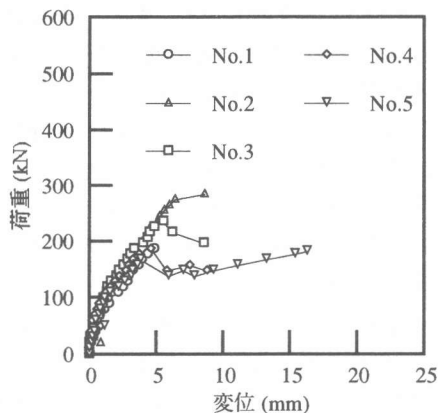


図-3(a) 荷重—変位の関係(シリーズ1)

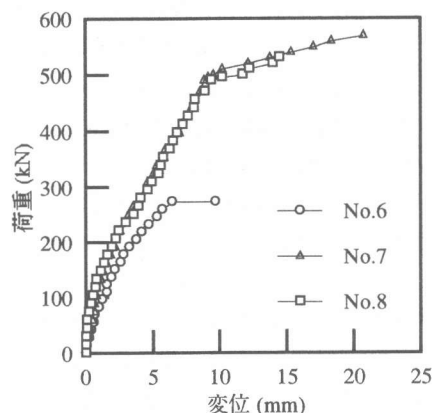


図-3(b) 荷重—変位の関係(シリーズ2)

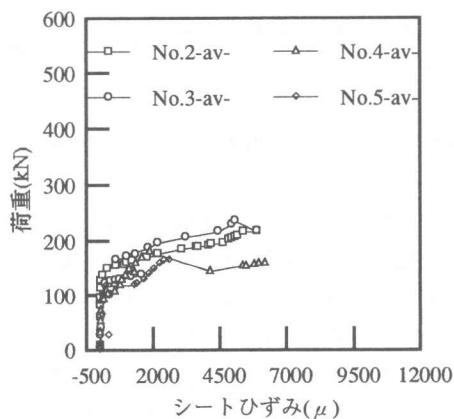


図-4(a) 荷重—シートひずみの関係
(シリーズ1)

することはないことが分かる。また、図-4(b)よりシリーズ2においても、せん断ひび割れが発生するとひずみが急激に増加するのはシリーズ1と同じであると言える。これらより、FRPシートを接着する面積によってシートがせん断ひび割れを拘束する力が異なるため、シートの接着面積の増減により荷重の分担メカニズムは変化するということが分かる。

図-5(a)にシリーズ1、図-5(b)にシリーズ2の載荷点からの距離と荷重ごとのFRPシートのひずみの分布状況を示す。図-5(a)より、データ不良であるNo.3を除いて、いずれの供試体においてもFRPロッドをスターラップとして用い内部補強した場合[3][5]とはほぼ同様な放物線の形をしている。このことからFRPをせん断補強筋として用いたRC部材において、FRPシートで外部からせん断補強した場合とFRPロッドで内部から補強した場合とでは、ひずみの最大値は異なるものの、その分布は放物線になることがわかる。この現象をモデル化し、文献[5]におけるFRPロッドの場合の算定式を本実験の結果を用いて再検討した式を用いてFRPシートの場合のせん断耐力を評価した。この結果、他の算定式[6][7]との比較において、その計算値は良好な算定精度を有しているという知見が得られた[8]。詳細な議論は文献[8]を参照されたい。

3.3 シートのせん断耐力における寸法効果への影響

表-3の結果を基に、 $V_{s,exp}$ と $V_{s,cal}$ を比較した結果を図-6に示す。ここでは比較のためシリーズ1,2共に4面接着の供試体(No.2,4,7,8)の実験結果のみで検討を行う。図よりトラス理論を仮定して求めた $V_{s,cal}$ と実験値より求めた $V_{s,exp}$ との間には大きな差があることが分かる。よって実験結果を詳細に検討する必要があるものの、実験値から便宜的に求めた $V_{s,exp}$ を用いて

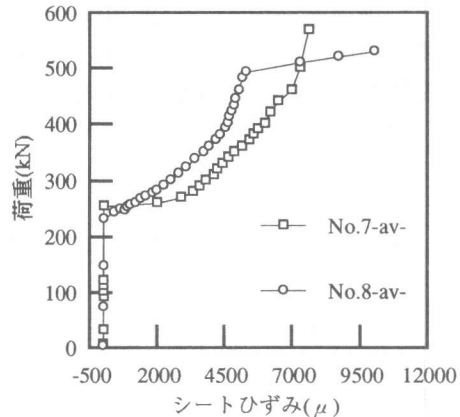


図-4(b) 荷重—シートひずみの関係 (シリーズ2)

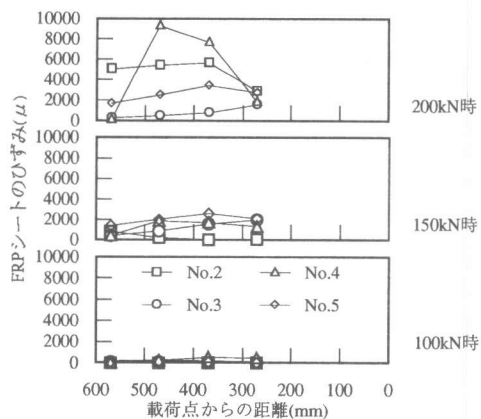


図-5(a) 連続繊維シートのひずみ分布(シリーズ1)

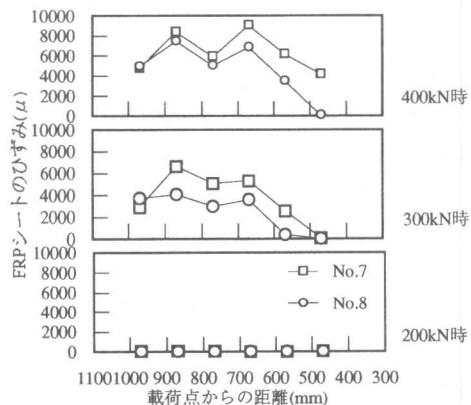


図-5(b) 連続繊維シートのひずみ分布(シリーズ2)

FRPシートの寄与するせん断耐力における寸法効果を検討するのは困難といえる。

図-7に本実験におけるせん断強度と有効高さの関係を示した。ここでは前述の考察を踏まえ、せん断強度は表-3における $V_{s,cal}$ を $(bw \cdot d)$ で除したものとした。なお、No.3のせん断強度を算定する上で ϵw_{ave} はFRPシートの引張強度試験より得られた最大ひずみ [6] [7]

を基にNo.2,7供試体における ϵ

w_{ave} の減少率を求めた上で推測した。その結果を表-4に示す。図-7より、

有効高さの増加

に伴い、せん断強度が減少していることが分かる。すなわち、有効高さ ϵw_{ave} の間には線形的な関係が存在しないということになり、FRPシートのせん断耐力の寄与において寸法効果の存在が示唆されたと言える。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

(1)FRPシートでRCはりにせん断補強した場合、FRPシートの弾性係数の違いが及ぼす影響は部材の変形状態に対してさほど無いものと思われる。

(2)FRPシートを接着する面積によって

シートがせん断ひび割れを拘束する力が異なるため、シートの接着面積の増減により荷重の分担メカニズムは変化する。

(3)FRPをせん断補強筋として用いたRC部材において、FRPシートで外部からせん断補強した場合とFRPロッドで内部から補強した場合とでは、ひずみの最大値は異なるものの、その分布は放物線になる。

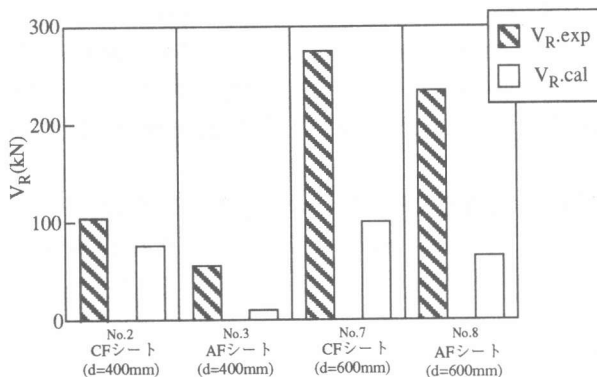


図-6 $V_{s,exp}$ と $V_{s,cal}$ の比較

表-4 ひずみ減少率を踏まえたNo.3における ϵw_{ave} の予測結果

供試体 No.	FRPシート	引張強度* (MPa)	ϵ_{max} *	ϵw_{ave}	$\epsilon w_{ave} / \epsilon_{max}$	$V_{R,cal}$ (kN)
2	CF	3990	16350	8778	0.54	76.1
7	CF	3990	16350	7621	0.47	99.1
3	AF	2920	36500	11315	0.31	49.0
8	AF	2920	36500	10029	0.27	65.1

*: 実測値であり文献 [6] および文献 [7] より抜粋

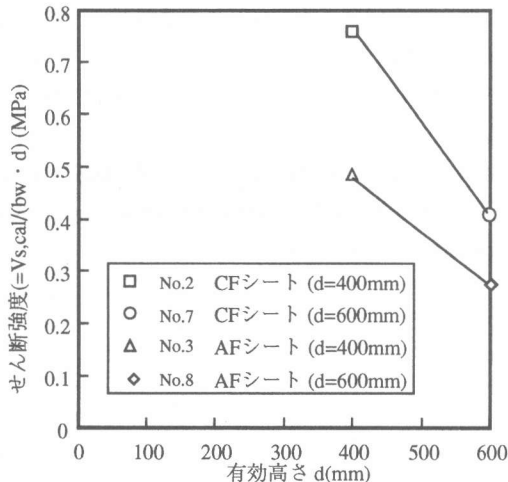


図-7 $V_{s,cal}$ から求めたせん断強度と有効高さの関係

(4)部材終局時におけるFRPシートの平均ひずみを用い、トラス理論を仮定して得られたFRPシートの分担するせん断応力と有効高さの関係より、有効高さの増加に伴い、せん断強度が減少していることが得られた。よって、有効高さとFRPシートの平均ひずみの間には線形的な関係が存在しないということになり、FRPシートのせん断耐力の寄与において寸法効果の存在が示唆された。

〔謝辞〕 本研究を実施するにあたり実験で使用した連続繊維シート材料のうち、炭素繊維は三菱化学（株）、アラミド繊維は帝人（株）にそれぞれ提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Maruyama,K、Zhao,W：Size Effect in Shear Behavior of FRP Reinforced Concrete Beams advanced Composite Materials in Bridges and structures, CSCE, pp.227-234, August.1996
- [2] 二羽淳一郎・崔 益暢・田辺忠顕：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究、土木学会論文集、第508号/V-26,pp.79-88,1995.2
- [3] 趙唯堅・丸山久一・鈴木秀門・木暮明仁：FRPせん断補強筋が受け持つせん断耐力の算定、土木学会第50回年次学術講演会概要集第5部/V-182,pp.364-365,1995.9
- [4] 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、第372号/V-5,pp.167-176,1986.8
- [5] 趙唯堅：コンクリート部材の曲げせん断耐荷機構の解明およびその設計法に関する研究、長岡技術科学大学博士論文、1996.3
- [6] （財）鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針,1996.7
- [7] （財）鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針,1996.7
- [8] Maruyama,K、Kamiharako,A et al.：Evaluation of Shear Contribution of FRP Sheets Attached to Concrete Beams, Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, RILEM, 投稿中