

# 論文 CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力の評価

鳥巢 陽平\*1・山口 浩平\*2・日野 伸一\*3・今井 富士夫\*4

要旨：九州大学で独自に開発した CFRP 製作ロボットを用いて製作された CFRP せん断補強筋は、高強度、耐食性という特徴を有する。CFRP せん断補強筋を RC 部材に適用することで高強度かつ腐食に強い部材の開発が可能となる。これまで著者らは、CFRP ロッドの材料特性や曲げ性能について解明している。しかし、CFRP せん断補強筋を用いた場合のせん断耐力評価方法および破壊メカニズムについては十分な検討がなされていない。そこで本研究では、CFRP せん断補強筋の曲げ成形部強度試験および CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断試験を行い、CFRP せん断補強筋のせん断耐力評価方法および破壊メカニズムを検討した。

キーワード：CFRP せん断補強筋，RC はり，せん断耐力，曲げ成形部強度

## 1. はじめに

新素材として注目されている CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、高強度・軽量・耐食性などの特徴を有しており、鉄筋や PC 鋼材の代替としてコンクリート構造物への適用に関する研究が進められている。本研究で対象とする CFRP せん断補強筋(図 - 1)は、CFRP 自動製作ロボット(図 - 2)を用いて製作される。鉄筋の代替材料として、主筋およびせん断補強筋全てにおいて CFRP を用いた部材の開発を行うために、CFRP せん断補強筋のせん断耐力評価方法を検討することは重要である。

そこで本研究では、自動製造ロボットにより製作される CFRP の曲げ成形部強度試験を実施して、CFRP せん断補強筋の脆弱部分である曲げ成形部強度において、既往の曲げ成形部強度の評価式の適用性を検討する。次に、その CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断試験を行い、せん断破壊の破壊メカニズムを明らかにして、曲げ成形部強度を基にした CFRP を用いた RC はりのせん断耐力の評価について検討する。

## 2. 連続繊維補強材を用いた RC はりの既往のせん断耐力評価方法

### 2.1 コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>による評価

土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>1)</sup>(以下、示方書)では、せん断補強鉄筋を有する棒部材の終局せん断耐力  $V_u$  は、せん断補強鉄筋の効果を無視した部材そのもののせん断耐力  $V_c$  とトラスアナロジーから求めたせん断補強鉄筋の負担せん断耐力  $V_s$  の和とする、式(1)で表される。

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

式(2)にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断

耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{wd} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $f_{wd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}}$  ただし  $f_{wd} \leq 0.72(\text{N/mm}^2)$ ， $\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$  ( $d$ : m, ただし  $\beta_d > 1.5$  の場合は、 $\beta_d = 1.5$ )，

$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$  (ただし  $\beta_p > 1.5$  の場合は  $\beta_p = 1.5$ )，

$\beta_n = 1 + M_o/M_d$  (詳細は文献 1)を参照)  $f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)， $b_w$ : ウェブの幅(mm)， $d$ : 有効高さ(mm)， $A_s$ : 引張補強筋の断面積(mm<sup>2</sup>)， $p_w$ : 引張主鉄筋比(=  $A_s / (b_w d)$ )。

せん断補強筋が負担するせん断耐力  $V_s$  を式(3)に示す。

$$V_s = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s \quad (3)$$

ここに、 $A_w$ : 区間  $s$  におけるせん断補強筋の総断面積(mm<sup>2</sup>)， $\alpha$ : せん断補強鉄筋と部材軸とのなす角度， $f_{wyd}$ : せん断補強筋の設計降伏強度， $z$ :  $z = d / 1.15$ 。

### 2.2 連続繊維補強材および鉄筋のヤング係数比による評価<sup>2), 3), 4)</sup>

既往研究において、主筋やせん断補強筋に CFRP を用いた RC はりのせん断試験が行なわれている。その結果、連続繊維補強材および鉄筋のヤング係数比を考慮した式が提案されている。せん断補強鉄筋を有する棒部材の

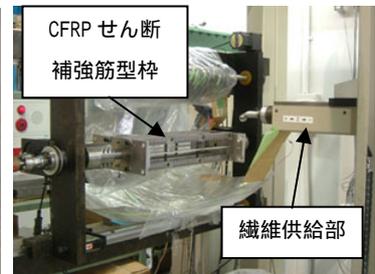


図 - 1 CFRP せん断補強筋 図 - 2 CFRP 製作ロボット

\*1 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 修士2年 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博(工) (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

\*4 宮崎大学 工学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

終局せん断耐力  $V_u$  は、コンクリートの負担せん断耐力  $V_c$  とせん断補強鉄筋の負担せん断耐力  $V_s$  の和としており、式(1)で表される。 $V_c$  には岡村・檜貝式<sup>4)</sup>を用い、CFRP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で考慮している。また  $V_s$  については示方書式を基本とし、せん断補強筋断面積にヤング係数比をかけることにより低減することで、せん断耐力評価が可能と提案されている。

式(4)にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = f_{v0} (0.75 + 1.4d/a) (1 + \beta_p^* + \beta_d) bwd \quad (4)$$

ここに、 $f_{v0} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}}$  ただし  $f_{v0} \leq 0.72 (\text{N/mm}^2)$ 、 $\beta_d = \sqrt{1/d}$  ( $d: \text{m}$ 、ただし  $d \leq 1.1$ )、 $\beta_p^* = \sqrt{p_w^*}$

$1(p_w^* = p_w E_{CFRP}/E_0$ 、ただし  $p_w \leq 3\%$ )、 $E_{CFRP}$ : 引張補強筋のヤング係数、 $E_0$ : 基準(引張補強筋)のヤング係数(=200kN/mm<sup>2</sup>)、 $p_w$ : 引張主鉄筋比(=  $A_f / (b_w d)$ )、 $A_f$ : 引張補強筋の断面積(mm<sup>2</sup>)。

せん断補強筋が負担するせん断耐力  $V_s$  を式(5)に示す。

$$V_s = A_w^* f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) z/s \quad (5)$$

ここに、 $A_w^* (= A_w E_{CFRP}/E_0)$ : 区間  $s$  におけるせん断補強筋の総断面積(mm<sup>2</sup>)。

### 2.3 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)による評価<sup>5)</sup>

土木学会は、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」<sup>5)</sup>(以下、指針)により、連続繊維補強材を用いた RC はりのせん断耐力をコンクリートが負担するせん断耐力項はヤング係数比によって評価し、せん断補強筋が負担するせん断耐力項は連続繊維補強材の曲げ成形部強度によって評価することを提案している。せん断補強鉄筋を有する棒部材の終局せん断耐力  $V_u$  は式(1)に示す。

式(6)にせん断補強筋を用いない棒部材のせん断耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p^{**} \cdot \beta_n \cdot f_{wd} \cdot b_w \cdot d \quad (6)$$

ここに、 $\beta_p^{**} = \sqrt[3]{100 p_w E_{fu} / E_0}$  (ただし  $\beta_p^{**} > 1.5$  の場合は  $\beta_p^{**} = 1.5$ )、 $E_{fu}$ : 引張補強筋のヤング係数。

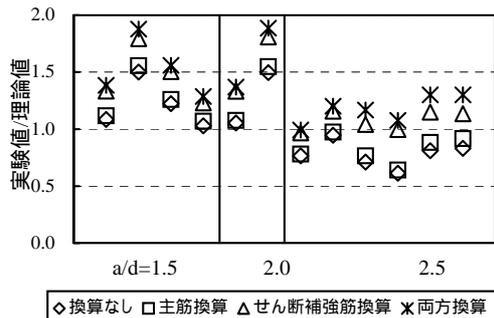


図 - 3 実験値および理論値の比較(既往研究)

式(7)にせん断補強筋により受け持たれるせん断耐力  $V_s$  を示す。

$$V_s = A_w E_w \varepsilon_{fwd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) z/s_s \quad (7)$$

ここに、 $E_w$ : せん断補強筋のヤング係数、 $\varepsilon_{fwd}$ : 終局限界状態におけるせん断補強筋のひずみの設計用値で、式(8)により求めてよい。ただし、 $E_w \varepsilon_{fwd}$  が曲げ成形部強度の設計用値  $f_{fbd}$  より小さい場合は  $E_w \varepsilon_{fwd}$  を  $f_{fbd}$  に置換する。

$$\varepsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\sigma'_N}{f'_{mcd}} \right) \right]} \times 10^{-4} \quad (8)$$

連続繊維補強材の曲げ成形部設計強度  $f_{fbd}$  は、一般に式(9)により求めてよい。

$$f_{fbd} = (0.05r/h + 0.3) f_{fik} \quad (9)$$

ただし、式(9)の右辺の値が  $f_{fik}$  より大きくなる場合は、 $f_{fbd} = f_{fik}$  とする。 $f_{fbk}$ : 曲げ成形部強度の特性値、 $f_{fik}$ : 一軸引張強度の特性値、 $r$ : 曲げ内半径、 $h$ : 連続繊維補強材の断面高さ、 $\alpha_s$ : せん断補強筋が部材軸となす角度、 $s_s$ : せん断補強筋の配置間隔、 $p_{web}$ :  $A_w / (b_w \cdot s_s)$ 、 $\sigma'_N$ : 平均軸圧縮応力、 $\sigma'_N = (N' + P_e) / A_g$ 、ただし、 $\sigma'_N > 0.4f'_{mcd}$  となる場合には  $\sigma'_N = 0.4f'_{mcd}$  とする。 $P_e$ : 軸方向緊張材の有効引張力、 $A_g$ : 全断面の断面積、 $f'_{mcd}$ : 寸法効果を考慮したコンクリートの設計圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{mcd} = (h/0.3)^{-1/10} \cdot f'_{cd}$ 、 $h$ : 部材の高さ(m)。

### 2.4 既往の評価式のまとめ<sup>1), 2), 3)</sup>

主筋とせん断補強筋に CFRP を用いた場合の RC はりのせん断耐力評価について、著者らの知る限りでは、2.2 および 2.3 に述べた 2 つの方法が存在するのみである。しかし、2.3 については既往研究の曲げ内半径のデータが不明なため検討できなかった。そこで、CFRP を用いた RC はりせん断耐力の既往研究のデータ<sup>2), 3)</sup>から(1)ヤング係数比を用いない、(2)主筋のみヤング係数比を用いる、(3)せん断補強筋のみヤング係数比を用いる、(4)主筋およびせん断補強筋にヤング係数比を用いる場合について検討した。なお、せん断スパン比が 2.0 以下の  $a/d=1.5$  および 2.0 の供試体せん断耐力理論値は、ディーブピーム式<sup>1)</sup>を適用した。

CFRP を用いた RC はりのせん断耐力の既往研究による実験値と理論値の関係を図 - 3 に示す。なお、理論値については 2.2 に示した RC はりのせん断耐力評価方法について検討した。同図に示したデータはせん断スパン比  $a/d=1.5, 2.0, 2.5$  の供試体である。 $a/d=1.5$  および 2.0 の供試体は、示方書での実験値と理論値の比が 1.0 を超えていた。主筋およびせん断補強筋にヤング係数比を用いた場合は、十分な安全側で評価できている。 $a/d=2.5$  の供試体は、示方書では実験値と理論値の比が 1.0 未満であるが、主筋とせん断補強筋にヤング係数比を用いることで、その比は 1.0 を超え実験値をよく評価できる結果となっている。



表 - 4 試験結果

シリーズ	TYPE	No.	実験値(kN)			理論値(せん断耐力)(kN)										実験値 /示方 書	実験値 /ヤング 係数	実験値 /指針	破壊形式
			平均値			示方書			ヤング係数			指針							
			$V_c+V_s$	$V_c$	$V_s$	$V_c+V_s$	$V_c$	$V_s$	$V_c+V_s$	$V_c$	$V_s$	$V_c+V_s$	$V_c$	$V_s$	$V_c+V_s$				
a	Sa	1	121																斜め引張 せん断圧縮 斜め引張
		2	123	116	116	0	85	85	0	-	-	-	-	-	-	1.36	-	-	
		3	111																
	SSa	1	269																せん断圧縮 せん断圧縮 せん断圧縮
		2	226	227	116	111	152	85	67	-	-	-	-	-	-	1.49	-	-	
		3	229																
	SCa	1	209																斜め引張 斜め引張 斜め引張
		2	237	208	116	92	264	85	179	204	85	118	178	85	93	0.78	1.02	1.17	
		3	177																
b	SSb	1	267															斜め引張 斜め引張 斜め引張	
		2	255	261	127	134	168	93	75	-	-	-	-	-	1.55	-	-		
		3	294																
	SCb	1	254															斜め引張 斜め引張 斜め引張	
		2	240	251	127	124	273	93	179	212	93	118	186	93	93	0.92	1.19		1.35
		3	260																

4. CFRP をせん断補強筋に用いた RC はりのせん断試験

4.1 供試体および試験方法

供試体は、幅 180mm、高さ 200mm、有効高さ 160mm、長さ 1460mm、スパン 1160mm(a/d=3.0)と、長さ 1140mm、スパン 1000mm(a/d=2.5)とする単純 RC はりとした。パラメータは、せん断補強筋種類、せん断スパン比である。主鉄筋は、D22 を 3 本、圧縮側に D10 を 3 本配置した。また、せん断補強筋に D6 および CFRP を用いた。各供試体は 3 体ずつ製作した。表 - 2 に供試体概要、表 - 3 に使用材料諸元、図 - 6 に供試体概略図を示す。なお、表 - 3(a)の CF は炭素繊維そのものの力学特性、CFRP はエポキシ樹脂を含む CFRP としての力学的性質である。表 - 3(b)のコンクリートは、製作の都合上、シリーズ a には普通セメントを、シリーズ b には早強セメントを用いた。

4.2 結果および考察

4.2.1 変形状況

試験結果を表 - 4 に、ひび割れ状況を図 - 7 に示す。また、図 - 8 に供試体中央部の荷重 - 変位関係を各タイプ 1 体ずつ示す。ひび割れ発生荷重の 10~20kN までは全断面有効の挙動を示すが、ひび割れ発生荷重を超えてからは、ひび割れ断面としての挙動を示す。最大荷重まで漸増荷重した後、せん断破壊して急激に荷重が減少した。Sa No.2, SSa No.1~No.3 および SSb No.3 は、荷重が急激に減少することなく徐々に荷重が減少する破壊形式で、せん断圧縮破壊と考えられる。その他の供試体は斜め引張破壊であった。CFRP せん断補強筋を用いた SCa, SCb は、せん断破壊と同時にせん断補強筋の曲げ成形部で破断するため、CFRP せん断補強筋は荷重を受け持つことができず、せん断補強筋に鉄筋を用いた SSa, SSb に比べて急激に破壊すると考えられる。

次に、各供試体の剛性を見ると、各シリーズにおける SS と SC の断面諸元は同じであるが、後述するがせん断補強筋ひずみが増加する荷重から CFRP せん断補強筋を用いた SC 供試体は剛性が小さくなっている。これは、

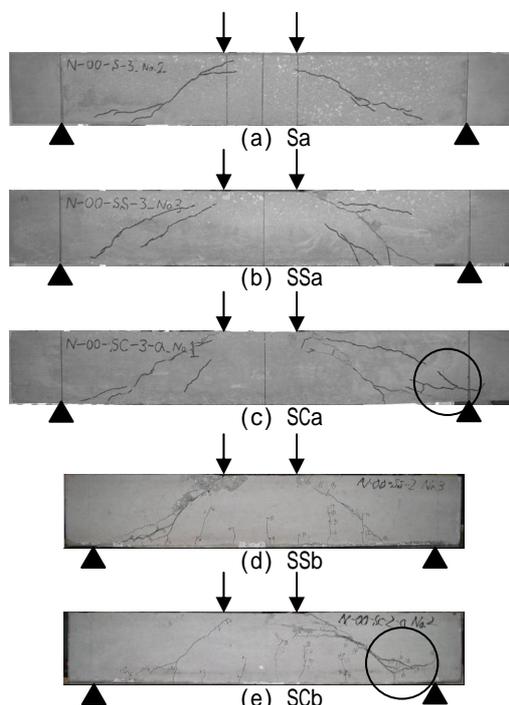


図 - 7 ひび割れ状況

せん断補強筋での CFRP の剛性(EA)が鉄筋に比べて小さいことに起因している<sup>7)</sup>と考えられる。

4.2.2 ひび割れ状況

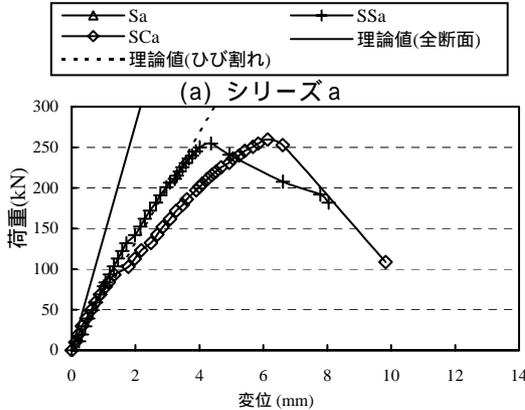
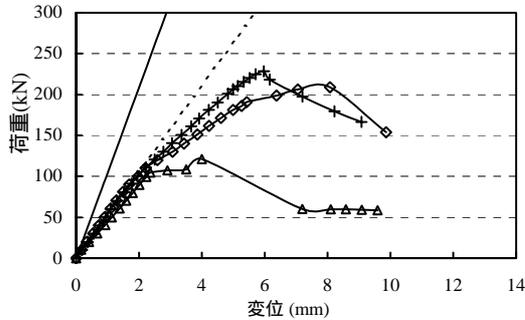
ひび割れは、荷重点と支点を結ぶせん断ひび割れであった。図 - 7(c), (e)の丸で示すように、CFRP せん断補強筋を用いた供試体は、主要なせん断ひび割れの発生後、破壊と同時に主鉄筋に沿ったひび割れが発生して大きな音とともに破壊に至った。これは、破壊時に主筋に急激な引張力が作用したためであると考えられる。なお、終局時のせん断ひび割れ幅は、せん断補強筋に鉄筋を用いた供試体に比べて CFRP を用いた供試体のほうが大きいことが確認された。試験終了後にコンクリートをはつり、せん断補強筋の破壊状態を確認した。図 - 9 にせん断補強筋破壊状況を示す。SCa および SCb の CFRP せん断補強筋は全ての供試体において曲げ成形部で破断していた。しかし、CFRP せん断補強筋の直線部は破断し

ていなかったため、供試体のせん断破壊と同時に CFRP せん断補強筋の曲げ成形部が破断したと考えられる。

#### 4.2.3 せん断補強筋ひずみ

図 - 10 にせん断補強筋ひずみを示す。SSa および SSb の鉄筋せん断補強筋のひずみは降伏ひずみ付近まで達していたので降伏状態であったと考えられる。SCa の CFRP せん断補強筋ひずみは  $7157\mu$  であり、破断ひずみ  $17391\mu$  の 41% であった。SCb の CFRP せん断補強筋ひずみは  $10151\mu$  であり、破断ひずみの 58% であった。これは、式(9)による曲げ成形部強度の破断ひずみ  $8987\mu$  に近い値であった。これらの結果から、CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価は、CFRP 曲げ成形部強度を用いた評価方法が適切であると言える。

次に、全供試体ともせん断補強筋ひずみ(図 - 10 参照)は載荷直後にはほとんど発生していなかったが、100~130kN 付近で急増した。これは、100kN まではコン



(a) シリーズ a  
(b) シリーズ b  
図 - 8 荷重 - 変位関係

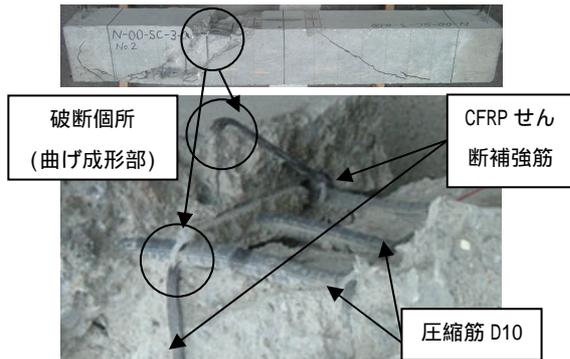


図 - 9 CFRP 破断状況(SCa)

クリートが全せん断力を受け持っていることを示唆している。シリーズ a において、せん断補強筋ひずみが急増する荷重は 100~130kN の範囲であった。また、せん断補強筋を配置していない Sa の最大荷重はコンクリート負担分せん断耐力  $V_c$  であり 116kN であった。これらの結果からも、せん断補強筋ひずみの急増する点で、せん断力の分担がコンクリートからせん断補強筋へ移行していると考えられる。シリーズ b においても、同様のことが言える。そこで、シリーズ b では  $V_c$  をひずみが急増する荷重の平均値 127kN とした。

また、せん断補強筋ひずみが急増する点において、せん断補強筋に鉄筋を用いた SSa, SSb と CFRP を用いた SCa, SCb を比較すると、SC 供試体のひずみが大きくでている。これは、せん断補強筋の剛性が、CFRP せん断補強筋は鉄筋の約 1/4 であるため、同じ荷重時のひずみは CFRP のほうが大きくなるためと考えられる。

#### 4.2.4 最大荷重

タイプごとの最大荷重は、No.1~No.3 の平均値とした。この際、Sa No.2 および SSb No.3 は破壊挙動が異なったため、また SSa No.1 は極端に荷重が異なったため平均値から除外した。

Sa の最大耐力平均値は 116kN であった。図 - 11 に最大耐力平均値の実験値と理論値の関係を示す。Sa, SSa および SSb のせん断耐力は、示方書での比は 1.36, 1.49 および 1.55 で評価できた。SCa および SCb は、示方書での比は 0.78 と 0.92 と実験値は危険側であった。ヤング係数でせん断耐力を評価した場合は、その比は 1.02 と 1.19 であり、指針の場合は、その比は 1.17 と 1.35 と実験値をよく評価できた。

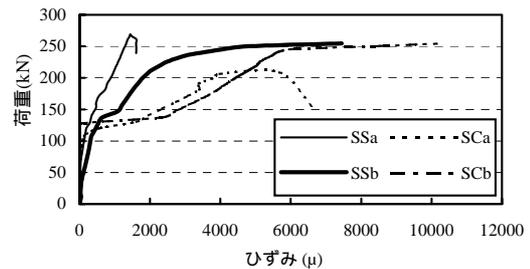
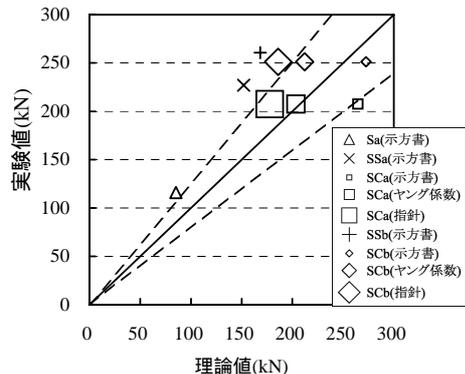


図 - 10 荷重 - せん断補強筋ひずみ関係



破線は  $\pm 20\%$  の範囲を示す。  
図 - 11 実験値および理論値の比較

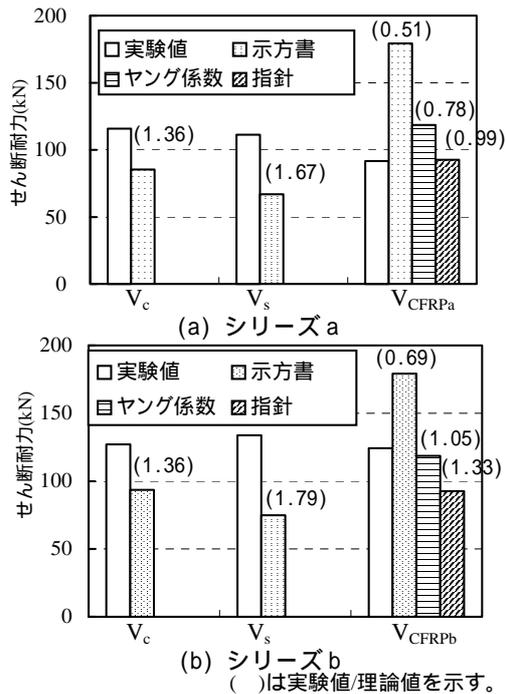


図 - 12 せん断耐力の比較

#### 4.2.5 せん断耐力の評価

せん断耐力の  $V_c, V_s$  の実験値および理論値の比を図 - 12 に示す。4.2.1 および 4.2.3 よりコンクリート負担分せん断耐力は、シリーズ a, b においてそれぞれ 116kN, 127kN である。ここで、RC はりのせん断耐力は、式(1)のようにコンクリート負担分せん断耐力  $V_c$  とせん断補強筋が受け持つせん断耐力  $V_s$  で表される。よって、実験値から鉄筋が受け持つせん断耐力は、SSa と Sa の差の 111kN と SSb の最大荷重から 127kN を引いた 134kN となる。また、SCa は 208kN より、シリーズ a における CFRP 負担分せん断耐力は 92kN となる。SCb は 251kN より、シリーズ b における CFRP 負担分せん断耐力は 124kN となる。 $V_c$  および  $V_s$  は、示方書により実験値と理論値の比は、シリーズ a では 1.36, 1.67 で評価できた。シリーズ b では、示方書により比は、1.36, 1.79 で評価できた。また、SCa および SCb の CFRP せん断補強筋が受け持つせん断耐力  $V_{CFRPa}$  および  $V_{CFRpb}$  は、示方書での比は 0.51, 0.69, ヤング係数での比は 0.78, 1.05, 指針での比は 0.99, 1.33 となり、ヤング係数および指針により安全側に評価できた。

#### 5. まとめ

- (1) CFRP 曲げ成形部強度は理論値の 0.93 であり、破断箇所は曲げ成形部であった。九州大学で製作される CFRP せん断補強筋の曲げ成形部強度は、式(9)によって評価可能である。
- (2) CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価はヤング係数比を考慮した場合、実験値と理論値の比は 1.02 および 1.19, 指針では 1.17 および

1.35 と安全側で実験値をよく評価できた。ヤング係数比による評価と指針によりせん断耐力評価は可能である。

- (3) CFRP せん断補強筋の破断箇所は曲げ成形部であり、直線部は破断していなかった。よって、CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価を行う場合は、CFRP の曲げ成形部強度を基にせん断耐力を評価できる。
- (4) CFRP 曲げ成形部強度は、式(9)で評価可能であること、CFRP せん断補強筋を用いた RC はり試験において CFRP せん断補強筋は曲げ成形部で破断したことおよび指針によりせん断耐力評価が可能であることから、指針により CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力を評価するのが適切である。

#### 謝辞

本研究は日本管洗工業(株)との共同研究であるとともに、一部は科学研究費若手研究(B)による補助を受けて実施した。また、九州大学大学院工学研究院知能機械システム部門鬼鞍宏猷教授、佐島隆生助教には CFRP の製作を、九州大学田北翔氏、宮崎大学住朋樹氏、柳川真未氏には試験に関して協力を頂いた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 2) 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.701-706，1992
- 3) 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.2，pp.783-788，1991
- 4) OKAMURA.H, HIGAI.T: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, No.300, pp.131-141, Aug.1980
- 5) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，1996
- 6) 大原英史，本田勉，FRP スターラップの曲げ加工部の引張強度に関する研究，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集，pp.320-321，1990
- 7) 本田勉，池田弘，橘田敏之：FRP スターラップで補強したコンクリート部材のせん断特性に関する研究，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集，pp.342-343，1990