

報告

[1196] ビニロンFRPロッドをスターラップとして用いたはりのせん断試験

正会員 手塚正道 (オリエンタル建設技術研究所)

正会員 近藤 順 (オリエンタル建設技術研究所)

岡崎正樹 (クラレ産資リビング事業本部)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の補強材として、耐食性や非帯磁性に優れた新素材による繊維強化プラスチック (以下FRP) のロッドに関する研究が盛んに進められている。特にその素材としては、炭素繊維、アラミド繊維及びガラス繊維によるものが多く報告されている。

ここでは、素材として高強度ビニロン繊維に着目した。一般に短繊維 (汎用品) として抄造用または吹付けモルタル用の補強材として用いるビニロン繊維はポリビニルアルコール (以下PVA) から作られるが、本繊維 (高強度品) は、高重合度のPVAを用いて湿式紡糸し、高延伸することにより従来の繊維に比べ高強度、高弾性率化されたものである。

この素材を他の素材と比較するために、小林ら¹⁾がまとめた各種高張力繊維の特性値の表に付記したものを表-1に示す。この表によると、高強度ビニロン繊維は軽量で伸び能力はあるが、引張強度及び弾性係数は比較的小さい部類の素材となる。また、熱分解温度が低いので、高温になることが想定される場合は使用上の注意が必要となる。

他に特性としては、アルカリ性に対して安定性が有り、また、クリープ変形が小さいという結果が得られている。(図-1、2参照)

本報告は、この高強度ビニロン繊維から成るFR

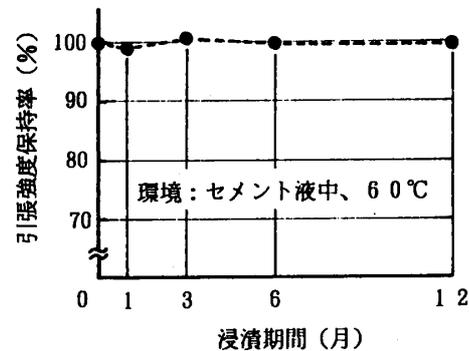


図-1 耐アルカリ性試験結果

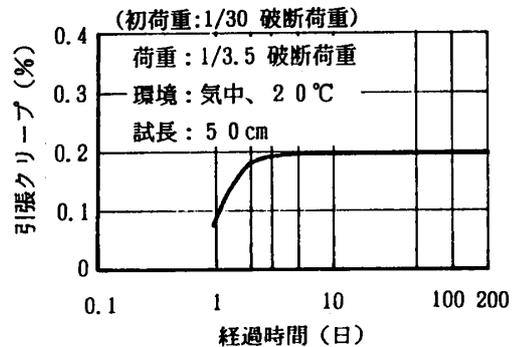


図-2 クリープ試験結果

表-1 各種高張力繊維の特性

(1988)

諸元	炭素繊維				アラミド繊維			ビニロン繊維		ガラス繊維
	PAN系		ピッチ系		ケブラー		テクノーラ	汎用品	高強度品	
	高強度品	高弾性品	汎用品	高強度・高弾性品	ケブラー49	ケブラー29				
引張強度 (kg/mm ²)	280~450	200~250	100	300~	280	280	310	70~150	230	250~350
弾性係数 (kg/mm ²)	20,000~24,000	35,000~45,000	4000	40,000~80,000	13,000	6,300	7,700	1,100~3,700	6,100	7,000~8,000
伸び (%)	1.9~1.8	0.4~0.6	2.5	0.4~0.6	2.3	4.0	4.4	7.0	5.0	4.5~6.0
密度 (g/cm ³)	1.7~1.8	1.8~1.9	1.6	1.9~2.1	1.45	1.44	1.39	1.26~1.3	1.3	2.5
直径 (μm)	7~8		10		12		12	14		12
価格 (円/kg)	10,000~15,000	20,000~40,000	2000~3000	PAN系の同等品より安くなる	10,000	6,000	6,000	700/1,300*1	2,000	400
熱分解温度	3000°C				600°C		500°C	240°C		800°C

(注) *1 700円は抄造用、1300円はコンクリート補強用

P ロッド (以下VFRPロッド) をスパイラル状に連続成形し、スターラップとしてRCはりまたはPCはりに用いた場合のせん断性状について載荷試験を行って検討したものである。

2. 試験の概要

2.1. 使用材料

本試験で用いたVFRPロッドは、高強度ビニロン繊維を集束し、エポキシ樹脂を含浸させて引抜成形法により成形し、樹脂を硬化させながらロッド表面にコンクリートとの付着を得るために同一繊維で綾状に巻付け処理をしたものである。更に、スパイラル状のスターラップにするために、加熱(100~110℃)した雰囲気中で所定形状の型に巻付け成形を行った。(図-3参照)

VFRPロッドの特性値を表-2に示す。

主筋として、鉄筋にはSD30A、PC鋼材にはPC鋼7本より線、及びアラミド繊維によるFRPロッド(以下AFRPロッド)には1本当たりの保証破断荷重12.8t、弾性係数 $0.66 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ のものをそれぞれ使用した。

コンクリートは、目標強度をRCはりでは 300 kgf/cm^2 、PCはりでは 400 kgf/cm^2 とし、セメントは早強ポルトランドセメント、骨材は粗骨材の最大寸法 20mmのものを使用した。

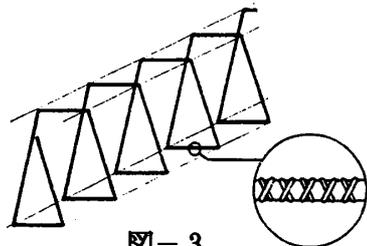


図-3

せん断補強用VFRPロッド概要図

表-2 VFRPロッドの特性値

呼び径 ϕ (mm)	繊維含有率 (%)	断面積 A_v (mm ²)	破断荷重 P_{vu} (kgf)	破断強度 σ_{vu} (kgf/mm ²)	初期弾性係数 E_v (kgf/mm ²)	伸び (%)
7	66.5	40.7	2,500	61	3,700	3.0

2.2. 供試体の形状及び種類

試験は、せん断スパン比 (a/d)、スターラップ (ここでは全てスパイラル状のVFRPロッドを指す) のピッチ(s)、主筋の種類、及びプレストレス量(P) をパラメータに選び、供試体の形状はRCはり(No. 1~11) とPCはり(No. 12~23)の2種類として、供試体を23体構成して行った。

代表的な供試体の形状及び配筋状況を図-4に示す。また、供試体の一覧表を試験結果と合わせて表-3に示す。

2.3. 載荷方法及び測定項目

載荷方法は、対称2点集中荷重とし、静的に一方荷重とした。

測定は、スパン中央のたわみ、スターラップのひずみ、ひびわれ発生状況及び最大耐力に着目して行った。

3. 試験結果及び考察

3.1. ひびわれ性状

ひびわれ状況について要因別に比較整理した一部を図-5に示す。

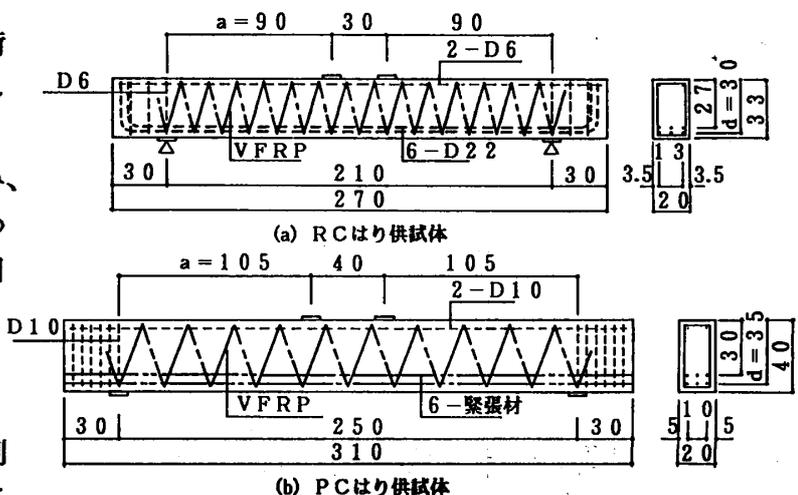


図-4 供試体配筋図 (単位 ; cm)

表-3 供試体一覧表及び試験結果

No	供試体名称	コンクリート強度 f_c (kg/cm ²)	有効プレストレス力 P_s (tf)	実験値 (tf)				計算値 (tf)				V_{tt}	V_{ts}	破壊形態
				V_{tc}	V_{ts}	V_{tp}	V_{tt}	V_{cc}	V_{cs}	V_{cp}	V_{ct}			
1	S-0-2-0	380	--	16.8	--	--	16.8	19.9	--	--	19.9	0.84	--	せん断
2	S-1/4-2-0	380	--		6.7	--	23.5		7.2	--	27.1	0.87	0.93	"
3	S-1/2-2-0	380	--		5.8	--	22.6		3.5	--	23.4	0.97	1.66	"
4	S-3/4-2-0	380	--		2.0	--	18.8		2.3	--	22.2	0.85	0.87	"
5	S-0-3-0	360	--	8.9	--	--	8.9	11.3	--	--	11.3	0.79	--	"
6	S-1/4-3-0	360	--		8.4	--	17.3		7.2	--	18.5	0.94	1.17	"
7	S-1/2-3-0	360	--		5.1	--	14.0		3.5	--	14.8	0.95	1.46	"
8	S-3/4-3-0	360	--		3.1	--	12.0		2.3	--	13.6	0.88	1.35	"
9	S-0-4-0	320	--	8.3	--	--	8.3	9.4	--	--	9.4	0.88	--	"
10	S-1/4-4-0	320	--	$V_{tt} \geq P_{tu} = 12.7$					7.2	--	16.6	--	--	曲げ
11	S-1/2-4-0	320	--		3.5	--	11.8		2.3	--	11.7	1.01	1.52	せん断
12	P-0-3-5	410	5.5	(V_{tc}	--	V_{tp})	9.8	7.2	--	2.0	9.2	1.07	--	"
13	P-2/7-3-5	410	5.5		7.7		17.5		6.3		15.5	1.13	1.22	"
14	P-1/2-3-5	410	5.5		4.0		13.8		3.5		12.7	1.09	1.14	"
15	P-5/7-3-5	410	5.5		2.3		12.1		2.4		11.6	1.04	0.96	"
16	P-5/7-3-5H	625	5.5	(V_{tc})	16.6	8.3			12.7	1.31	1.57	"
17	P-0-3-21	345	21.9	(V_{tc}	--	V_{tp})	12.6	6.8	--	8.0	14.8	0.85	--	"
18	P-5/7-3-21	345	21.9		1.7		14.3		2.4		17.2	0.83	0.71	"
19	P-5/7-4-21	345	21.9	(V_{tc}	V_{ts}	V_{tp})	12.9	6.1	2.4	6.0	14.5	0.89		"
20	A-0-3-5	430	5.5	(V_{tc}	--	V_{tp})	6.7	5.1	--	2.0	7.1	0.94	--	"
21	A-2/7-3-5	430	5.5		6.5		13.2		6.3		13.4	0.99	1.03	"
22	A-1/2-3-5	430	5.5		5.2		11.9		3.5		10.6	1.12	1.49	"
23	A-5/7-3-5	430	5.5		2.0		8.7		2.4		9.5	0.92	0.83	"

注) 試体名称の説明
 主筋の種類
 S:鉄筋(SD30 6-D22)
 P:PC鋼より線(SWPR7A 6-T12.4)
 A:AFRP 繊維(FIBRA 6-K128)
 — スパイラル筋のピッチ (有効高 d に対する比率)
 — せん断スパン比 (a/d)
 — プレストレス力 (引張力: tf)

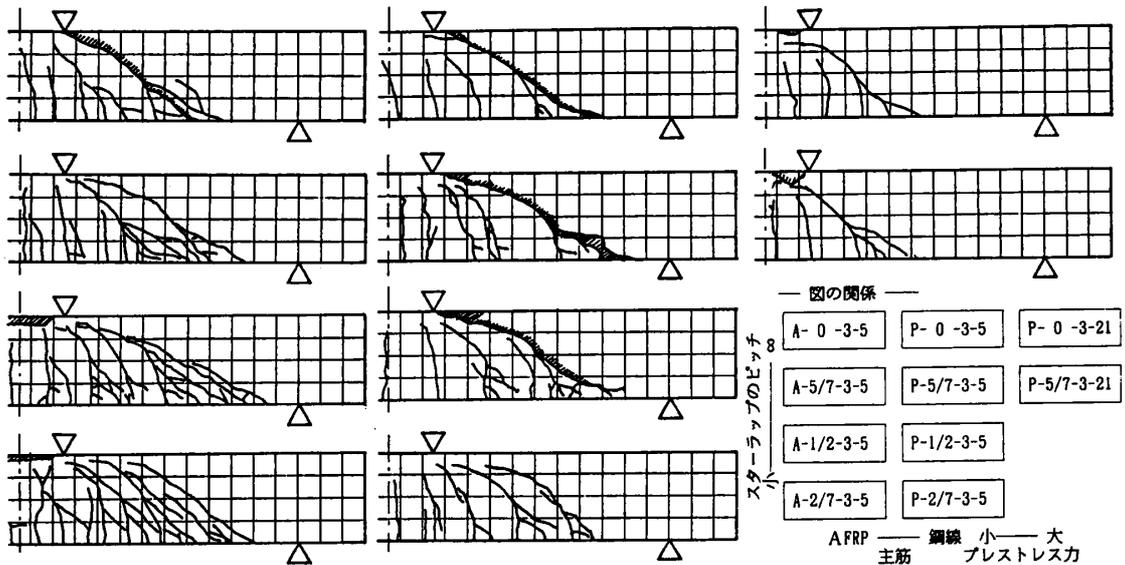


図-5 ひびわれ状況

中央の列には主筋としてPC鋼より線を用いて、上段にスターラップの配置が無い供試体、次から配置ピッチが順に小さい供試体の結果を並べた。

中央の列に対して、左側の列は主筋をAFRPロッドに代えた供試体、右側の列はプレストレス力を変化させた供試体の結果をそれぞれ並べた。

これらの比較から次の事柄が把握された。

①スターラップのピッチが小さい程せん断ひびわれの分散性が高い。

②主筋にAFRPロッドを用いた供試体は、曲げひびわれ及びせん断ひびわれの分散性が高い。これは、AFRPロッドの表面が組紐状で砂が付いているため付着力が高いことと、弾性係数が低い事に起因しているものと思われる。

次にせん断ひびわれ幅について、スターラップのピッチに着目した荷重せん断応力度との関係を図-6に示す。

同一せん断応力度に対して、ピッチが小さい程せん断ひびわれ幅が小さい。これは、ピッチだけを変化させた同一形状のシリーズ全てにおいて、同様であった。

3.2 スターラップのひずみ分布

せん断ひびわれとスターラップのひずみの関係について、図-7~9に示す。

図-7は、せん断ひびわれの状況とスターラップの高さ方向中央部に貼付したひずみゲージS1~S10における比較的終局に近い状況 (P=12.2t) の測定値を示す。

これによると、ひびわれが通過しているスターラップのひずみが大きな値を示している。

図-8は、荷重荷重とスターラップのひずみの関係を示す。せん断ひびわれ発生後、ひずみは直線的に増加している。

図-9は、せん断ひびわれの通過しているスターラップのひずみとその近傍のひびわれ幅の関係を示す。

せん断ひびわれ幅とスターラップのひずみには線形に近い関係がみられる。

3.3 たわみ性状

荷重荷重とスパン中央変位の関係について、スターラップのピッチに着目して、RCはり及びPCはりの代表的なシリーズを図-10に示す。

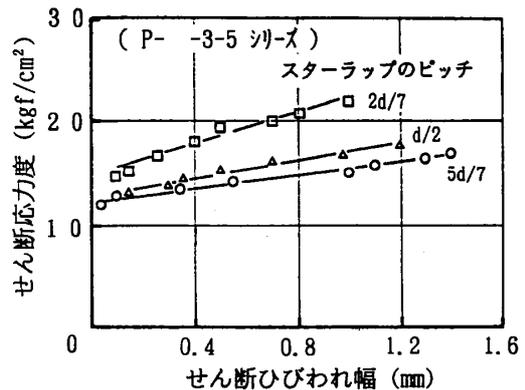


図-6 せん断応力度とせん断ひびわれ幅の関係

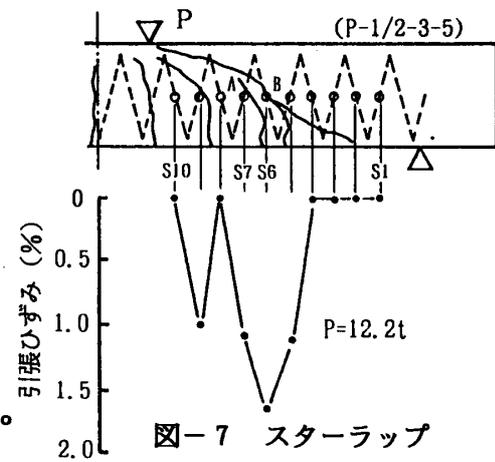


図-7 スターラップのひずみ分布

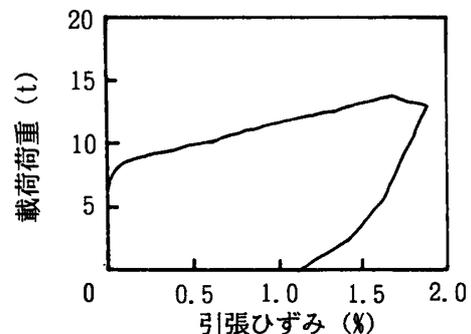


図-8 荷重荷重(P)とスターラップのひずみ(S6)の関係

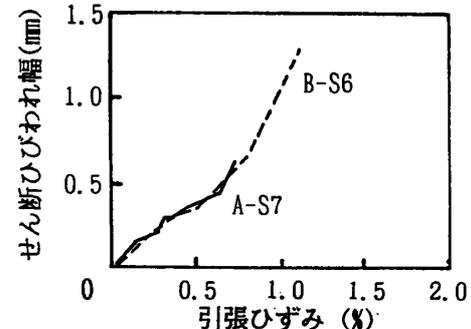


図-9 せん断ひびわれ幅とスターラップのひずみの関係

せん断ひびわれの発生までは同一の軌跡をたどり、その後、スターラップのピッチが大きいものから順に、スパン中央変位が小さい位置でせん断破壊が発生している。

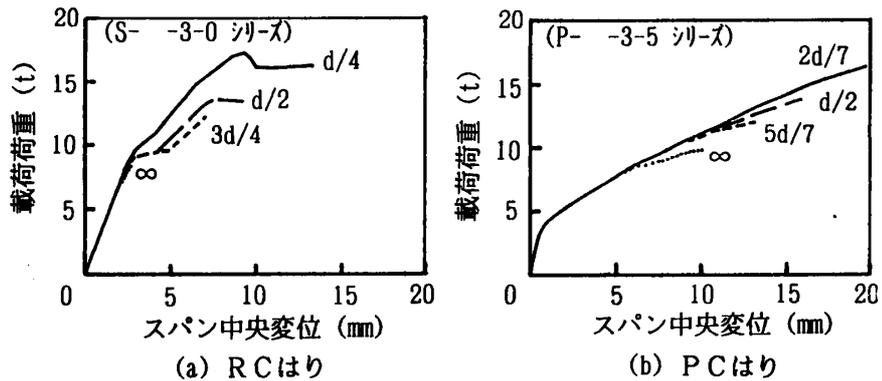


図-10 載荷荷重とスパン中央変位の関係

3.4 せん断耐力

(1) せん断耐力の算定式

載荷試験によるせん断耐力の結果を表-3にまとめて示した。この表中の計算値は以下の算定式により求めた値である。

$$V_{ct} = V_{cc} + V_{cs} + V_{cp} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 V_{ct} : せん断耐力 V_{cc} : コンクリートのせん断耐力
 V_{cs} : スターラップの効果 V_{cp} : プレストレス力による軸方向成分の効果

V_{cc} には以下に示す石橋らが提案したスターラップを有しないコンクリートはりのせん断耐力式を用いた。²⁾

$$V_{cc} = 0.94 \{0.75 + 1.4/(a/d)\} p_w^{1/3} f'cd^{1/3} d^{-1/4} b d \quad (a/d \geq 2.5)$$

$$= 3.58 (a/d)^{-1.166} p_w^{1/3} f'cd^{1/3} d^{-1/4} b d \quad (1.0 \leq a/d < 2.5) \quad \text{-----(2)}$$

ここで、主筋にFRPロッドを用いた場合は p_w の算出における主筋の断面積として、FRPロッド断面積 A_f に弾性係数比 E_f/E_c を乗じた値を用いることとした。

V_{cs} はスターラップにVFRPロッドを用いており、この場合の効果の算定式として次式を用いることとした。

$$V_{cs} = \{A_{vf} \sigma_{vf} d (\sin \alpha + \cos \alpha) / (s z)\} (E_{vf}/E_c)^{1/2} \quad \text{-----(3)}$$

V_{cp} は佐藤ら鳥取らの実験から、デコンプレッションモーメント M_0 による次式の評価式^{3) 4)}を用いることとした。

$$V_{cp} = 2 M_0 / a \quad \text{-----(4)}$$

(2) 計算値と実験値の比較

ここでは、スターラップの効果に着目し、計算値(V_{cs})と実験値(V_{ts})を比較することを試みた。結果の一覧表を表-3に示す。(表中、耐力 V の後に計算値はc、実験値はtの添字を付けて示す。)

V_{ts} は直接的に測定ができないため、実験耐力値(V_{ti})からスターラップの配置以外同一条件におけるスターラップを有しない供試体の実験耐力値($V_{tt} = V_{tc}$ または $V_{tc} + V_{tp}$)を差し引いた値とした。

ここで、表中の()内は V_{tc} と V_{tp} の効果割合が明確でないため、記号で表示している。

図-11に各要因別に両者を比較したものを示す。この図から次の事柄が把握された。

- (a) 主筋の種類よるスターラップの効果に対する影響は少ない。
- (b) スターラップのピッチが大きい場合に実験値が計算値に比べて若干小さい傾向にある。
- (c) せん断スパン比のスターラップの効果に対する影響は少ない。

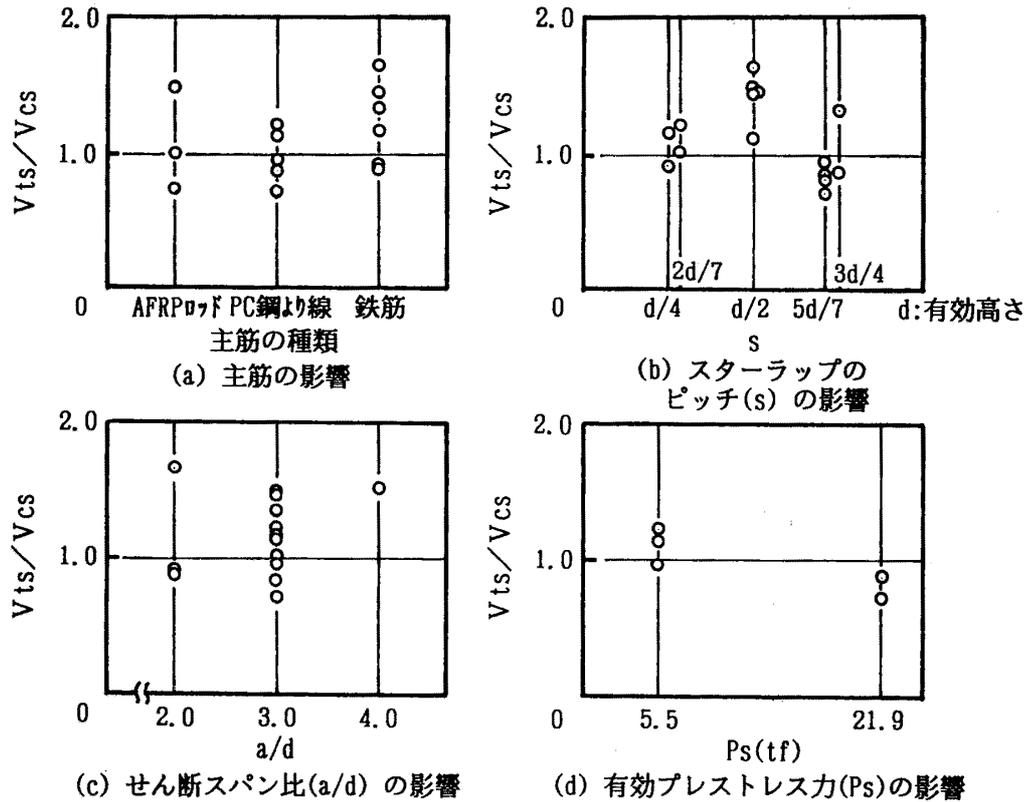


図-11 スターラップの効果に関する計算値と実験値の比較

(d) 有効プレストレス力の影響に対しては、試験データが少ないが、有効プレストレス力が大きくなると実験値が計算値に比べ低い傾向にある。これは、ひびわれ性状からも有効プレストレス力が大きい場合は分散性が低い傾向に有り、このことに起因しているものと思われる。

4. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると次のようになる。

1) せん断耐力において、スパイラル状のVFRPロッドによるスターラップの効果は、ばらつきがあるものの(3)式が比較的安全側に近似した結果を与えている。

ただし、スターラップのピッチが大きい場合、及び有効プレストレス力が大きい場合は別途考慮する必要がある。

2) せん断ひびわれは、スターラップのピッチが小さい程、分散性が高く、幅が制御されている。

3) せん断ひびわれ幅は、スターラップのひずみと線形に近い関係を示す。

以上本実験の範囲では、スパイラル状のVFRPロッドが鉄筋に替わるコンクリートはりのスターラップとして評価できる結果が得られた。

[謝辞]

本試験を実施するにあたり、御指導を頂いた(財)鉄道総合技術研究所の涌井氏、鳥取氏に感謝致します。

[参考文献]

- 1) 小林他：FRP緊張材を用いたプレレストコンクリート構造、プレレストコンクリート Vol. 30, No. 5, 1988
- 2) 石橋他：RCはりの腹部に配置された軸方向鉄筋のせん断破壊性状に及ぼす影響について、セメント技術年報40
- 3) 佐藤他：プレレストコンクリートはりのせん断強度、鉄道総合技術研究所報告 Vol. 2, No. 8, 1988
- 4) 鳥取他：FRP棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験、第11回JCI年講
- 5) 寺田他：FRPで補強したRCはりの破壊性状について、第10回JCI年講
- 6) 遠藤他：組紐状FRPロッドによるスパイラル筋を用いたコンクリート梁のせん断性状、第11回JCI年講