

論文

[1204] 連続繊維緊張材を用いて鉛直プレストレスを導入したはりのせん断試験

近藤順*1・出光隆*2・原田哲夫*3・吉岡民夫*4

1. まえがき

近年、連続繊維緊張材をRC補強材やPC緊張材として用いる研究が盛んに行われている。その結果、連続繊維緊張材は、RC部材よりPC部材に用いた方が有利であることが明らかにされている [1]。しかしながら、連続繊維緊張材をせん断補強材として用いる場合、補強材が引張破断する前にせん断破壊が生じるために、その高い強度が十分に発揮できないことも分かってきた [2]。連続繊維緊張材を用いてコンクリート構造物のノンメタル化を図るには、簡便で効果的なせん断補強方法を確立する必要がある。本研究は、せん断補強筋に連続繊維緊張材を用いて鉛直方向にプレストレスを導入したはりのせん断補強効果およびその特性について基礎的な検討を行ったものである。将来飛沫帯における大型箱けた橋のせん断補強等の応用が考えられる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用したせん断補強筋は、 $\phi 10.4\text{mm}$ の組紐状アラミド繊維緊張材および外径 $\phi 10.5\text{mm}$ の7本より線炭素繊維緊張材である。これらの材料特性値を表-1に示す。表中の破断荷重は、緊張材の引張試験により求め、弾性係数は、その試験の応力とひずみの関係より求めた。また、今回は鉛直プレストレスの影響のみを調べるため、他の要因を受けないよう主筋には、連続繊維緊張材を用いず、鋼材を使用した。コンクリートは、設計基準強度を 500kg/cm^2 とし、粗骨材の最大寸法を 20mm とした。

2 供試体

供試体の一覧を表-2に示す。供試体は、せん断補強筋の有無とその種類、プレストレスの有無、せん断スパン比 a/d を要因とし12体製作した。なお鉛直プレストレスの導入はポストテンション方式で行い、プレストレス

表-1 緊張材の特性値

緊張材繊維の種類	公称直径 (mm)	緊張材断面積 (mm^2)	保証破断荷重 (tf)	破断荷重 (tf)	弾性係数 (kgf/mm^2)	伸び率 (%)
アラミド	10.4	85.0	12.8	17.0	8140	2.46
炭素	10.5	55.7	9.80	10.4	14300	1.70

表-2 供試体一覧

供試体名	せん断補強筋	定着方法	緊張力(tf)	a/d
A0-1	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	0	2.5
A0-2	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	0	2.5
A6-1	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	12.8×0.6	2.5
A6-2	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	12.8×0.6	2.5
N-1	なし	-	-	3
N-2	なし	-	-	3
A0-J	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	0	3
A0-B	アラミド $\phi 10.4$	膨張材	0	3
A6-J	アラミド $\phi 10.4$	樹脂	12.8×0.6	3
A6-B	アラミド $\phi 10.4$	膨張材	12.8×0.6	3
C6-1	炭素 $\phi 10.5$	樹脂	9.80×0.6	3
C6-2	炭素 $\phi 10.5$	樹脂	9.80×0.6	3

*1 : オリエンタル建設 (株) 技術研究所 主任研究員、(正会員)
 *2 : 九州工業大学教授 設計生産工学科 建設工学教室、工博 (正会員)
 *3 : 長崎大学助教授 工学部 構造工学科、工博 (正会員)
 *4 : オリエンタル建設 (株) 技術研究所 主任研究員、(正会員)

力は各緊張材の保証破断荷重の60%とし、導入後シース孔にはグラウトを注入した。また、緊張材の定着には樹脂および定着用膨張材を使用した。

供試体の形状および寸法を図-1に示す。すべての供試体は、200×400×3000mmの矩形断面はりで有効高は340mmである。連続繊維緊張材は供試体片側部分にのみ用い、250mm間隔で計5本配置した。他方片半分側は、せん断補強筋としてD13の鉄筋を用い、片側の連続繊維補強材側でせん断破壊するように、十分に必要の鋼材を配置した。

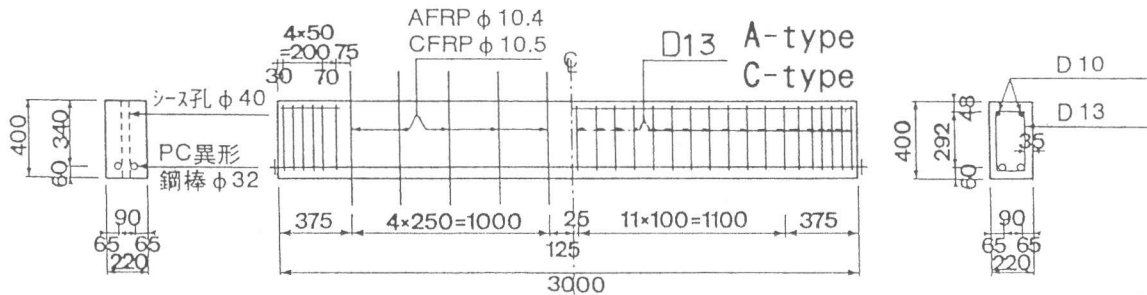


図-1 供試体配筋図および形状寸法

2.3 実験方法

荷重装置の概略図 ($a/d=3$ の場合) を図-2に示す。荷重点の近傍ではせん断補強筋の定着部が障害となるためI形鋼を用い、荷重点距離を1000mm ($a/d=2.5$) および500mm ($a/d=3$) とし、単純ローラー支持の対称二点荷重とした。荷重方法は単調漸増静荷重とし、5tf毎に緊張材のひずみ、供試体のたわみ量およびクラックスケールを用いたせん断ひびわれ幅の測定を行った。

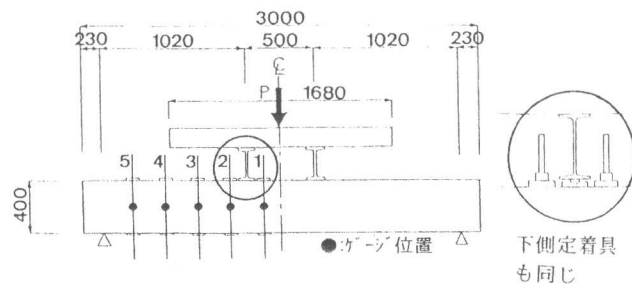


図-2 荷重方法概略図

3. 実験結果および考察

3.1 せん断耐力

実験結果の一覧を表-3に示す。なお、最大耐力の計算値 P_{cal} は次式により算出した。

$$P_{cal} = 2 \cdot (V_c + V_s) \quad (1)$$

$$V_c = 0.94 \cdot (f_c \cdot p)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot \left\{ 0.75 + \frac{1.4}{(a/d)} \right\} b \cdot d \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_{sf} \cdot E_{sf} \cdot \epsilon_{sf}}{s} d \quad (3)$$

ここに V_c : コンクリートの受持つせん断耐力 V_s : せん断補強筋の受持つせん断耐力
 f_c : コンクリートの設計基準強度, a : せん断間隔, b, d : はりの幅, 有効高さ, p : 引張鉄筋比
 $A_{sf}, E_{sf}, \epsilon_{sf}$: せん断補強筋の断面積, 弾性係数, 緊張していない引張破断時のひずみ

式(2)はせん断補強筋のない部材のせん断耐力式の基本となった二羽らの式を用い [2]、式(3)はトラス理論による佐藤らの式を用いた [3]。ここで式(3)は、せん断補強筋の応力を $E_{sf} \cdot \epsilon_{sf}$

としているが、供試体破壊時においても連続繊維緊張材のひずみが破断ひずみに達しないことを考慮し、供試体破壊時のA0供試体のひずみは 10000μ として算出した。また、鉛直プレストレスを導入した供試体については、 $A_{sf} \cdot E_{sf} \cdot \epsilon_{sf}$ を保証破断荷重として算出した。

表-3 試験結果一覧

供試体名	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	グラウト 圧縮強度 (kgf/cm ²)	せん断 ひびわれ 発生荷重 (tf)	P = 2 × せん断耐力 (tf)				破壊形式
				P _{test}	P _{cal}	$\frac{P_{test}}{P_{cal}}$	平均値	
A0-1	499	315	27.0	58.6	40.8	1.43	1.33	せん断圧縮
A0-2	387	337	24.0	47.1	38.7	1.22		せん断圧縮
A6-1	499	337	42.0	82.2	59.4	1.38	1.28	せん断圧縮
A6-2	387	337	40.0	67.6	57.3	1.18		せん断圧縮
N-1	560	---	24.9	24.9	23.8	1.05	1.09	せん断圧縮
N-2	638	---	27.9	27.9	24.8	1.13		せん断圧縮
A0-J	560	234	30.0	54.9	42.5	1.29	1.20	せん断圧縮
A0-B	638	275	28.9	48.6	43.6	1.11		せん断圧縮
A6-J	560	234	47.5	76.6	58.6	1.31	1.22	せん断圧縮
A6-B	638	275	44.0	66.8	59.6	1.12		せん断圧縮
C6-1	684	195	34.0	64.1	52.0	1.23	1.21	せん断圧縮*
C6-2	684	192	31.0	56.5	52.0	1.18		せん断圧縮*

注:コンクリートの破壊はすべて連続繊維補強材側で生じた。*は緊張材の破断を伴う

表-3より、実験耐力値はすべて計算値を上回り、その比は平均でN供試体を除き1.2倍以上あった。せん断ひびわれ発生荷重はA供試体において比較すると、プレストレスを導入することで約15tf上回っている。また最大耐力について、 $a/d=3$ でA6はA0の約1.4倍となりプレ

表-4 導入プレストレス力

ストレス導入によるせん断補強効果が表れている。また、プレストレスを導入した供試体の緊張材について、実際に導入したプレストレス力の結果を表-4に示す。同表より、試験直前のプレストレス力は目標よりも小さくなっている。これは、定着部の抜け出しおよびコンクリートのクリープ、緊張材のリラクセーション等の影響によるものと考えられる。なお、A6-Bの膨張材による定着は、減少量にばらつきがみられず確実な定着方法であると考えられる。

供試体名	FRP NO.	プレストレス導入時		試験直前		減少量 (%)
		ひずみ (μ)	プレストレス力(tf)	ひずみ (μ)	プレストレス力(tf)	
A6-1	3	12163	7.63	11600	7.28	4.59
	4	12538	7.74	12033	7.43	4.01
	5	12336	7.78	11109	7.01	9.90
A6-2	3	12053	7.43	10693	6.78	9.02
	4	11532	7.68	10025	6.68	13.0
	5	12586	7.77	11288	6.97	10.3
A6-J	2	12251	7.63	10086	6.40	16.1
	3	12112	7.63	9068	5.71	25.2
	4	12422	7.63	10800	6.63	13.1
	5	13103	7.67	11259	6.60	14.0
A6-B	2	13052	7.72	11082	6.55	15.2
	3	12690	7.63	10604	6.37	16.5
	4	13114	7.67	11324	6.62	13.7
	5	13228	7.67	11380	6.60	14.0
C6-1	2	7708	6.02	7610	5.40	10.3
	3	7563	6.20	7423	4.84	21.9
	4	7986	6.17	7863	5.16	16.4
	5	7496	6.18	7099	5.59	9.55
C6-2	2	6971	6.05	6907	5.30	12.4
	3	7791	6.27	7716	5.35	14.7
	4	7182	6.27	7141	5.01	20.1
	5	7070	5.85	7026	4.90	16.2

3.2 破壊およびひびわれ状況

代表的な最終ひびわれ状況を図-3に示す。A供試体はいずれもせん断補強筋の破断は認められなかった。しかし、C6供試体においては脆性的にせん断補強筋の破断が生じ、同時に破断位置付近のコンクリートが飛散した。ひびわれ発生状況としては、まず純曲げスパン内に曲げひびわれが発生し、次いでせん断スパン内の下側からも曲げひびわれが生じた。その後載荷点に向かって曲げせん断ひびわれが生じ、さらに支点に向かってひびわれがのび、最終的な破壊に至った。

N供試体がひびわれ発生後一気に破壊に至ったのに対し、A0, C6, A6の順にひびわれが穏やかで破壊に至った。図-3よりプレストレスを導入しない供試体の破壊に至ったひびわれは、支点と

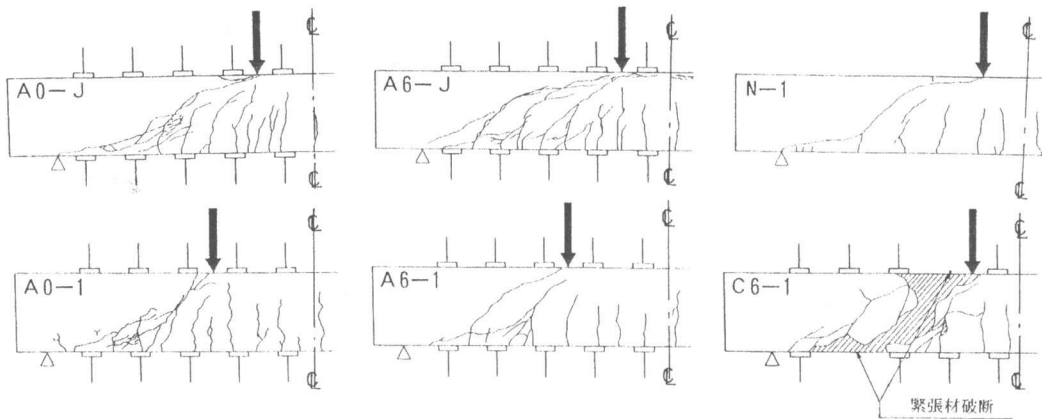


図-3 最終ひびわれ状況

載荷点を結ぶ直線に沿っているのに対し、プレストレスを導入したものは上側に若干湾曲している。a/dが違う供試体でも、ひびわれ本数は異なるものの上記と同様の傾向がみられた。

3.3 せん断ひびわれ幅

a/d=3 の供試体について最大せん断ひびわれ幅の測定結果を表-5および図-4に示す。ただし、表中のひびわれ幅は裏表の平均値を示した。

表-5の各供試体は最大耐力が異なるので最大荷重の80%載荷時で比較を行うと、A6のせん断ひびわれ幅はA0のそれの1/4となっている。またA6とC6のひびわれ幅の相違は認められなかった。

図-4において、いずれの供試体もコンクリートの受持つせん断耐力(V_c)までは同程度のひびわれ幅となっているが、Nはこれを越えると一気に過大なひびわれを生じA0は急速にひびわれ幅が成長しはじめている。それに対しプレストレスを導入したものは、その傾向はほとんどみられずひびわれ幅の成長は著しく小さい。

表-5 最大せん断ひびわれ幅(mm)

荷重 (tf)	N-1 (24.9tf)	A0-J (54.9tf)	A6-J (76.6tf)	C6-1 (64.1tf)
2.0	0.02	0.02		
2.5	5.00	0.04	0.02	0.02
3.0		0.68	0.02	0.04
3.5		1.30	0.07	0.07
4.0		2.00	0.09	0.13
4.5			0.20	0.33
5.0			0.25	0.48
5.5			0.35	
6.0			0.50	

注：()内の値は、最大耐力を示す。
 〇は、最大耐力の80%載荷時の値

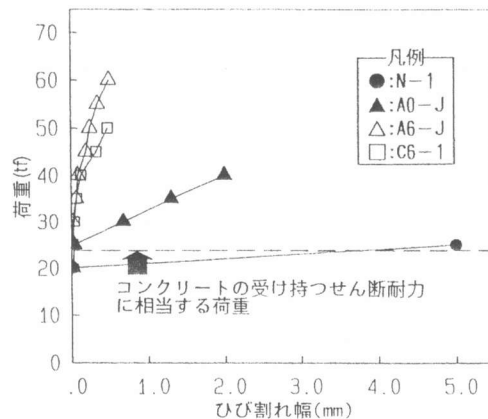


図-4 荷重とせん断ひびわれ幅の関係

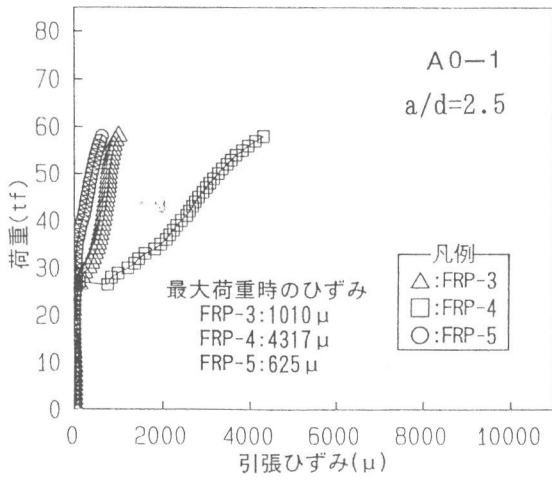
このことから、プレストレスを導入することでせん断ひびわれの発生を遅らせるだけでなくせん断ひびわれ幅の成長も抑制できることが明らかとなった。

3.4 荷重とせん断補強筋のひずみの関係

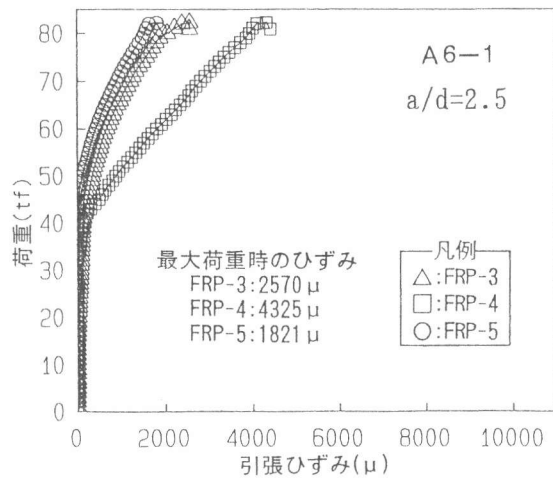
せん断スパン内の緊張材について荷重とひずみの関係を図-5に示す。

同図より、最大荷重時の緊張材の最大ひずみは、プレストレス導入による差異は見られずa/d=

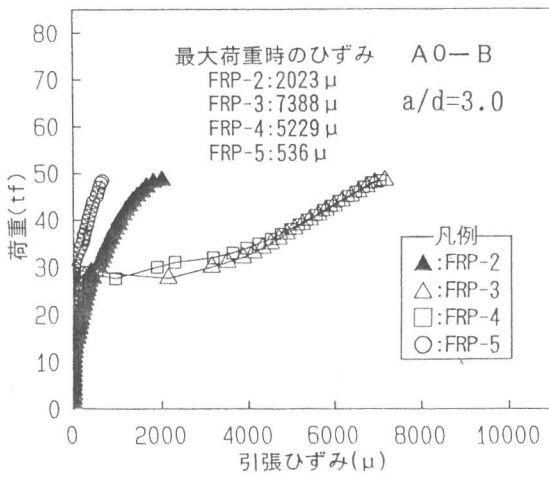
2.5の場合約4000 μ 、 $a/d=3$ では約7000 μ となっている。今回 V_s の算定においては、供試体破壊



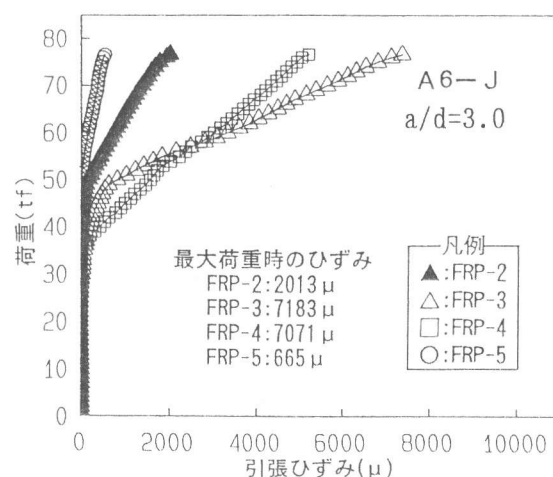
(a) 供試体A0-1



(b) 供試体A6-1



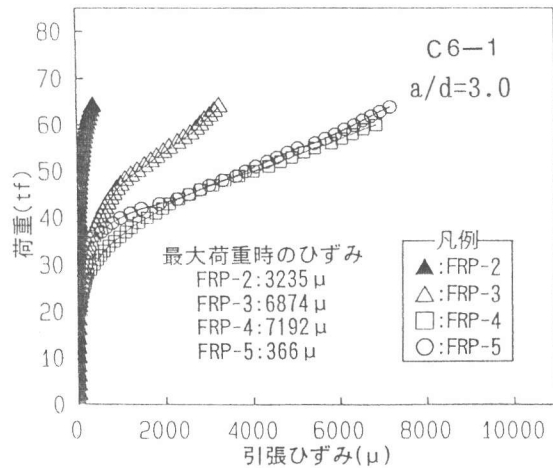
(c) 供試体A0-B



(d) 供試体A6-J

時の緊張材のひずみを10000 μ としたが、実測値はその値を大きく下回っており、また、 a/d も関係してくるものと考えられる。 V_s の算定については、今後詳細な検討が必要と思われる。

A0は V_c を越えるとせん断スパン中央付近の緊張材のひずみが急激に増大している。それに対しプレストレスを導入したものは、その傾向はみられず、ひずみの増大し始める荷重は、供試体2体の平均でA0にたいし約25%大きい。さらに、せん断ひびわれが入ってから、最大耐力までの耐力の伸びも平均で15%大きいため最終的にはA0に対し40%の耐力増が認められた。このことは、プレストレスによりせん断ひびわれの発生が遅れ、そ



(e) 供試体C6-1

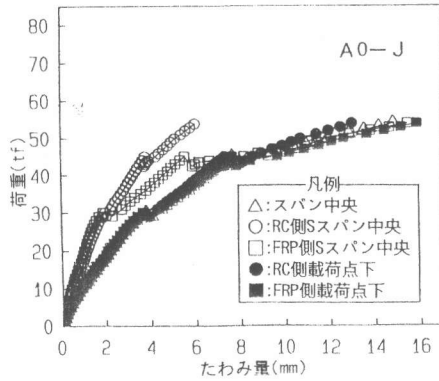
図-5 荷重と緊張材のひずみの関係

れによりひずみの増大し始める荷重が大きくなったものと考えられる。また、プレストレスによ

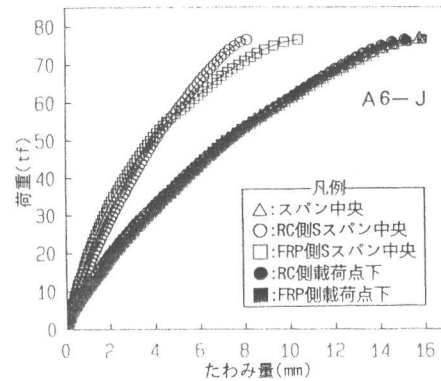
りせん断ひびわれ幅がきわめて小さいため、ひびわれ界面のコンクリートの骨材のかみ合わせにより、ひびわれ発生後の耐力の伸びがA0より大きかったものと考えられる。

3.5 荷重とたわみ量の関係

荷重とたわみ量の関係を図-6に示す。

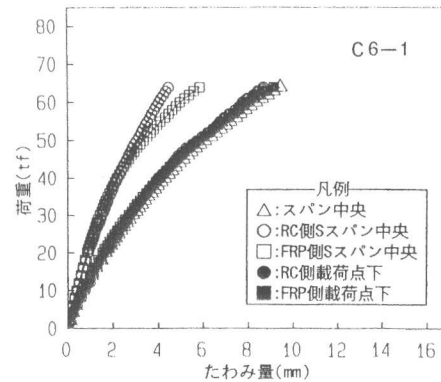


(a) 供試体A0-J



(b) 供試体A6-J

図-6より、RC側とFRP側でのせん断スパン中央のたわみ量の差が、A0では最大荷重の1/2付近から顕著に現れはじめるのに対し、A6では最大荷重付近までほぼ一致している。またC6においても同様の傾向がみられる。このことから、プレストレス導入により、破壊荷重近くまでせん断スパン内のはりの剛性低下が抑制されていることが分かる。



(c) 供試体C6-1

図-6 荷重とたわみ量の関係

4. まとめ

- (1) 鉛直プレストレスを導入すると、せん断ひびわれ界面での骨材のかみ合わせが良くなり、プレストレスを考慮した計算値以上にせん断耐力が向上する。
- (2) 鉛直プレストレス導入により、せん断ひびわれの発生を遅らせ、また、ひびわれ幅の成長も抑制でき、連続繊維緊張材の材料特性を有効に生かすことができる。
- (3) 最大耐力時のせん断補強筋のひずみは、 $a/d=2.5$ の場合 4000μ 、 $a/d=3$ では 7000μ となっていることから、 V_s の算定式には a/d が関係してくるものと考えられる。

<謝意>本実験の実施及び本論文の製作にあたって多大な協力をいただいた当時九州工業大学大学院生橋高広一郎氏（現清水建設）、学部生福重氏（現山口県庁）に敬意を表します。

<参考文献>

- 1) 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用：土木学会コンクリートライブラリ-72, 1992. 4
- 2) 鳥取誠一・佐藤勉：連続繊維補強材を用いた側壁ビーム方式ガイドウェイの設計法に関する研究、プレストレスコンクリート VOL. 35 NO. 1 pp59-67, 1993. 2
- 3) 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はりせん断補強度式の再評価、土木学会論文集第372号, 1986. 8