

論文

[2108] 連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状

正会員○園部泰寿 (筑波大学構造工学系)

藤沢正視 (筑波技術短期大学)

金久保利之 (筑波大学大学院)

米丸啓介 (筑波大学大学院)

1. はじめに

連続繊維に樹脂を含浸させた棒材(以下繊維筋)を鉄筋代替にした補強コンクリートの実用化に向けて、基本的な構造性能の把握を目的とした研究が進められている。本研究では繊維筋を用いた補強コンクリートにおける主筋の付着性状に着目し、片持ちばり式の付着実験及びはり部材の逆対称載荷実験を行い、付着割裂強度及び付着破壊性状について把握することを目的とする。

2. 片持ちばり実験

2.1 実験概要

試験体の一覧を表1に、配筋例を図1に示す。試験体は片持ちばり形式のもので、断面寸法は幅×せい=20cm×35cm、付着長は30cmである。変動因子はコンクリート種類、主筋及び横補強筋に用いた補強筋の種類と横補強筋量である。コンクリートには設計基準強度360kgf/cm²

m²の軽量コンクリート1種と普通コンクリートを用いた。主筋には鉄筋、カーボン繊維筋2種類、アラミド繊維筋を、横補強筋にはアラミド繊維筋、カーボン繊維筋2種類、ガラス繊維筋を組み合わせた。またCC試験体には三次元立体格子状(2WAY)に作成された直線状カーボン繊維が使用されている。表2に材料の力学的性質を示す。加力は、片持ちばり式の主筋引抜き試験法を採用し、全て一方向単調載荷により破壊せしめた。上端

表-1 試験体一覧

No	名称	主筋	横補強筋	Pw(%)	No	名称	主筋	横補強筋	Pw(%)	
1	N36S-4	4-D13	—	0.00	22	L36SC150	4-D13	2-C10' @34	H	1.52
2	N36SC50		2-CFRPφ6 @50	0.57	23	L36SA25		2-K32 @100	H	0.25
3	N36SC75		2-CFRPφ6@33.3	0.85	24	L36SA50		2-K32 @50	H	0.50
4	N36SC100		2-CFRPφ6 @25	1.13	25	L36SA75		2-K32@33.3	S	0.75
5	N36SC150		2-CFRPφ8 @34	1.48	26	L36SA100		2-K32 @25	H	1.00
6	N36SA50		2-K32 @50	0.50	27	L36SA150		2-K64 @34	H	1.50
7	N36SA100		2-K32 @25	1.00	28	L36SG100		2-G5' @25	H	1.52
8	N36SA150		2-K64 @34	1.50	29	L36C-3		3-C128S	—	—
9	N36C-3	3-CFRPφ13	—	0.00	30	L36C-4	—	—	0.00	
10	N36C-4	—	—	0.00	31	L36CC50	4-C128S	—	—	0.52
11	N36CC50	4-CFRPφ13	2-CFRPφ6 @50	0.57	32	L36CC100	2-C8' @50	H	1.03	
12	N36CC75		2-CFRPφ6@33.3	0.85	33	L36CC150	2-C8' @25	H	1.03	
13	N36CC100		2-CFRPφ6 @25	1.13	34, 35	L36A-3	3-K128S	—	—	0.00
14	N36CC150		2-CFRPφ8 @34	1.48	36, 37	L36A-4	—	—	—	0.00
15	L36S-3		3-D13	—	0.00	38, 39	L36AA50	4-K128S	—	—
16, 17	L36S-4	4-D13	—	0.00	40	L36AA100	4-K128S	—	—	1.00
18	L36SC25		2-C8' @100	0.25	41	L36AA150	2-K32 @50	S	1.00	
19	L36SC50		2-C8' @50	0.49	42	L36CC50	2-K32 @25	S	1.50	
20	L36SC75		2-C8' @33.3	0.74	43	L36CC100	2-K64 @34	H	1.50	
21	L36SC100		2-C8' @25	0.98			2-C' 8' @50	H	0.52	
						2-C' 8' @25	H	1.03		

注1) 試験体名称 L36 S C 7.5
 ① ② ③ ④
 ①コンクリートの種類を表す。L36:設計基準強度360kgf/cm²の軽量コンクリート N36:設計基準強度360kgf/cm²の普通コンクリート
 ②主筋の種類を表す。S:鉄筋 A:アラミド繊維 C:カーボン繊維
 ③横補強筋の種類を表す。G:ガラス繊維 A:アラミド繊維 C:カーボン繊維 - :横補強筋の無い試験体
 ④横補強筋量を表す。50:0.5% 75:0.75% 100:1.0% 150:1.5%
 なお、横補強筋の無い試験体については主筋の本数を表す。(横補強筋のあるものについては全て4本)

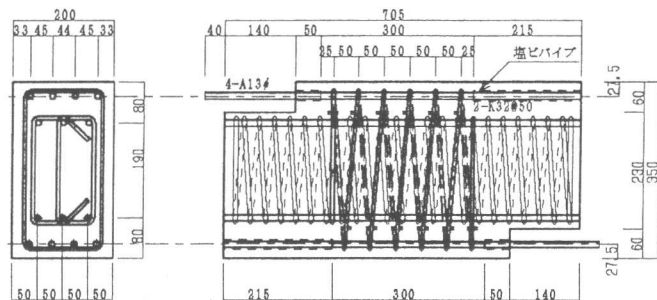


図-1 L36AA50試験体配筋図

筋加力後試験体を反転させ下端筋についても同様の加力を行った。以後、上端筋加力の場合をTOP、下端筋加力の場合をBOTTOM と称す。計測項目は、全引張荷重、隅筋及び中筋に付いての荷重端及び自由端の抜け出し量、及び主な位置の補強筋の歪である。

2. 2 破壊経過及び上下端筋の違い

全試験体とも全割裂型の付着割裂で破壊した。図-2 に荷重端抜け出し量と平均付着応力の関係を示す。主筋及び横補

表-2 材料の力学的性質

コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	備考		
普通	386	24.4	2.15×10 ⁶	No. 1~8		
普通	380	26.6	2.31×10 ⁶	No. 9~14		
軽量1種	435	29.1	2.07×10 ⁶	No. 15, 16, 18~21, 23~26, 34, 36, 38		
軽量1種	352	22.4	1.89×10 ⁶	上記以外の試験体		
補強筋	呼び名	断面積 (cm ²)	表面形状	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	備考
鉄筋	D13	1.27	異形	11370	2.05×10 ⁶	主筋 (No. 1~8, 17, 22, 27, 28), 主筋 (No. 15, 16, 18~21, 23~26)
	D13	1.27	〃	$\sigma_y=10940$ 8130	1.94×10 ⁶	
カーボン	C128S	1.00	縦線状付	12770	1.10×10 ⁶	主筋
	C10'	0.517	直線状	11640	0.986×10 ⁶	
	C8'	0.258	〃	11550	0.984×10 ⁶	〃
	C 16'	1.33	直線状2WAY	14630	1.03×10 ⁶	〃
	C 8'	0.258	〃	13100	1.01×10 ⁶	〃
	(CFRP)	φ13	1.33	螺旋糸巻	17300	1.33×10 ⁶
アラミド	φ8	0.503	〃	18200	1.31×10 ⁶	横補強筋
	φ6	0.283	〃	15500	1.16×10 ⁶	〃
	K128S	1.00	縦線状付	13870	0.600×10 ⁶	主筋
	K64	0.500	直線状	13600	0.591×10 ⁶	横補強筋
ガラス	K32	0.250	直線状	13600	0.591×10 ⁶	〃
	G5	0.250	直線状	7920	0.328×10 ⁶	

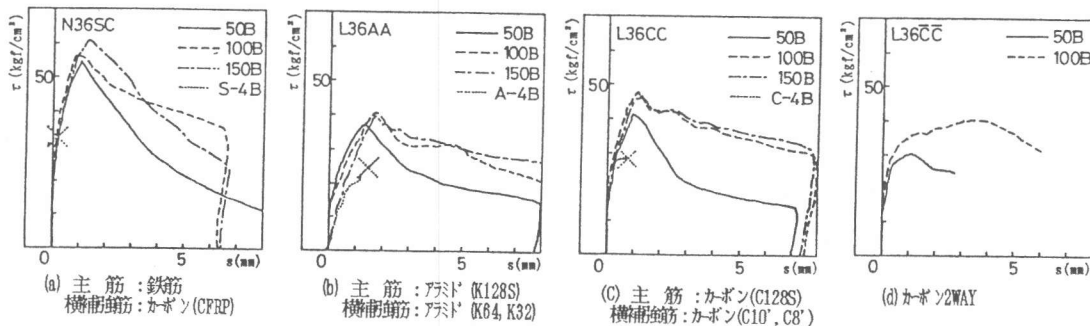


図-2 荷重端抜け出し量-平均付着応力曲線

強筋の組み合わせはそれぞれ、(a)が鉄筋、カーボン(CFRP)、(b)が共にアラミド、(c)がカーボン(C128S)、カーボン(C8', C10')、(d)がカーボン2WAYである。それぞれ横補強筋量の増加にともない付着強度が増加し、付着強度以降の勾配は緩慢になっている。一方、2WAY試験体では、コンクリートの割裂の後も応力の低下が少なく、最終的には横補強筋の破断により急激な応力低下を起こしており、曲線の形状が他の試験体とは異なっている。次に同一配筋試験体での付着強度を、縦軸にTOP、横軸にBOTTOMの実験値をプロットして図-3に示す。TOPのBOTTOMに対する比の平均は普通コンクリート試験体では0.99、軽量コンクリート試験体では0.91となり、試験体の寸法、コンクリート強度などの影響を受けると思われる。なお、以後の検討ではTOPの実験値にそれぞれの比の逆数を乗じ、BOTTOMの実験値と同等として扱う。

2. 3 主筋鉄筋の場合の横補強筋の効果

図-4に横補強筋の無い試験体の付着強度の実験値と計算値¹⁾を比較して示す。軽量コンクリートのコンクリート負担分の付着強度(τ_{co})は、計算値と良い対応を示しており、普通コンクリートと同等であるという。次に横補強筋による付着強度の増加分を評価するために、付着強度実験値(τ_{bu})からコンクリート負担分の付着強度計算値(τ_{co})を差し引いた横補強筋による付着強度増分(τ_{st})について検討する。普通コンクリート試験体に着目し、中筋隅筋別に τ_{st} をコンク

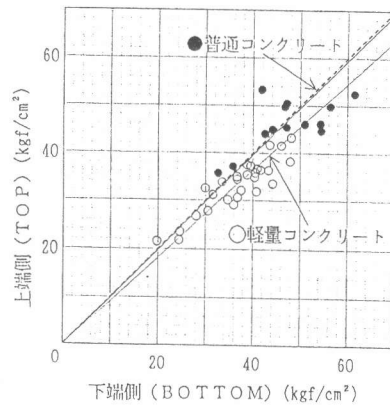


図-3 TOPとBOTTOMの付着強度

リート強度(σ_B)の平方根で除して基準化したものを縦軸に、横補強筋比(Pw')¹⁾を横軸にとったものを図-5に示す。繊維筋の種類別にみると、アラミド繊維筋よりカーボン繊維筋(CFRP)の方が付着強度の増加分が大きい。これらそれぞれのグラフに付いて原点を通る直線で回帰し、この傾きより隅筋と中筋の寄与率を算出したところ、鉄筋の10:5¹⁾に対してカーボン(CFRP)の場合6.73:2.93、アラミドの場合3.84:2.12となり、隅筋と中筋の比率はいずれの繊維筋の場合も約2:1となった。これらの値を計算式に代入することでそれぞれ次の式を得た。(式中の記号は文献1)参照)

$$\text{カーボン: } \tau_{st}/\sqrt{\sigma_B} = (6.73 \cdot 2/Nt + 2.93 \cdot Nu/Nt) \cdot b/d_b \cdot Pw' \quad (1)$$

$$\text{アラミド: } \tau_{st}/\sqrt{\sigma_B} = (3.84 \cdot 2/Nt + 2.12 \cdot Nu/Nt) \cdot b/d_b \cdot Pw' \quad (2)$$

各補強筋材料の主な違いはヤング係数であると考え、ヤング係数による評価法を以下に検討する。隅筋:中筋の比率を鉄筋の場合と同様2:1¹⁾に固定し、中筋の寄与係数の鉄筋との比率をKとおく。図-6に横補強筋のヤング係数を鉄筋のヤング

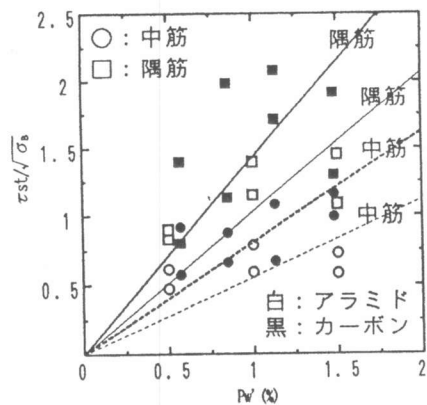


図-5 横補強筋による付着強度の増加

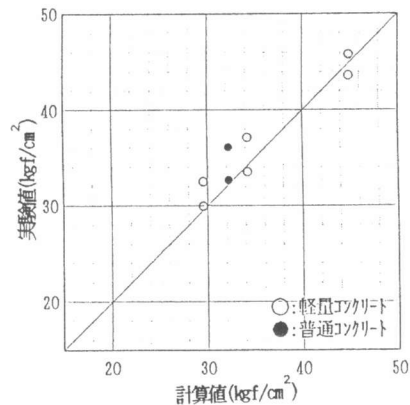


図-4 コンクリート負担分の付着強度 (主筋:鉄筋)

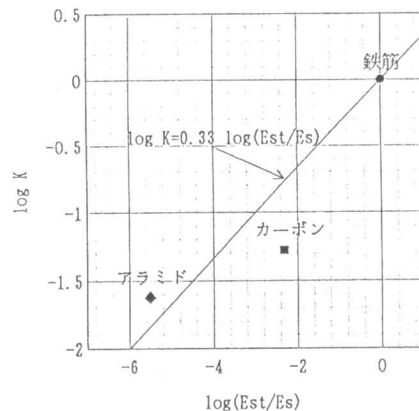


図-6 ヤング係数比とK

係数で除した値(以下ヤング係数比)の常用対数をとったものを横軸に、Kの常用対数をとったものを縦軸にとったグラフを示す。このグラフを直線回帰することで(3)式を得た。したがって(1)式、(2)式は(4)式で示される。

$$\log K = 0.33 \log(Est/Es) \rightarrow K = (Est/Es)^{0.33} \quad (3)$$

$$\tau_{st}/\sqrt{\sigma_B} = (10 \cdot 2/Nt + 5 \cdot Nu/Nt) \cdot b/d_b \cdot Pw' \cdot K \quad (4)$$

2.4 主筋繊維筋の場合の付着強度

図-7に横補強筋の無い試験体の実験値と、既存の鉄筋を用いた場合の計算値¹⁾を比較して示す。主筋に用いた繊維筋の種類により付着強度は異なり、実験値の計算値に対する比の平均はK128S(アラミド)で0.65、C128S(カーボン)で0.71、CFRP(カーボン)では鉄筋と同等となった。主筋が鉄筋の場合と同様にして付着強度増加に寄与する係数を算出した結果を表-3に示す。主筋に鉄筋を用いた場合の係数とは異

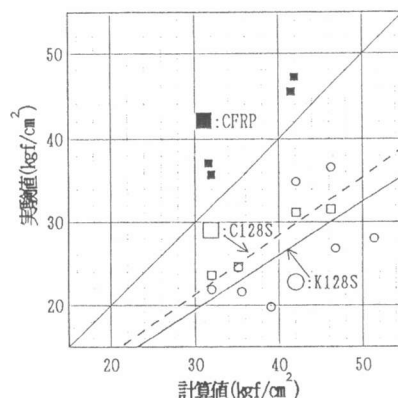


図-7 コンクリート負担分の付着強度 (主筋:繊維筋)

なっており、横補強筋の性質だけでは横補強筋の影響度を論ずることができず、本実験の範囲ではそれぞれの繊維筋による係数が把握できた。概ね主筋が鉄筋の場合よりも小さな値となり、中筋の寄与率が高くなる傾向がみられる。

2.5 主筋繊維筋の場合の局所的な付着応力

主筋に60mm間隔で添付したストレインゲージより、隣あった区間の歪度を用いてその区間の局所的な平均付着応力を算出し、それを縦軸に、加力ステップを横軸にプロットした図を図-8に示す。代表的な例としてL36AA50Tを取り上げた。図中の数字は若いほど荷重端側に近い区間であることを示し、破線は全付着長で除した平均付着応力を示す。主筋が繊維筋の場合、局所的にはかなり大きな付着応力がみられ、荷重端側に近い区間から順に応力を担う区間が遷移していく様子がうかがえる。これは、主筋の低いヤング係数に起因する荷重端側からの連鎖的破壊に起因するものであると思われる。

表-3 横補強筋の付着強度に寄与する係数

主筋	横補強筋	Kc	Ku
CFRPφ13	CFRPφ6, φ8	5.69	4.31
C128S	C8, C10	6.63	5.60
K128S	K32, K64	5.96	4.32

$$\frac{\tau_{st}}{\sqrt{\sigma_b}} = \left(\frac{K_c \times 2}{N_t} + \frac{K_u \times N_u}{N_t} \right) \times \frac{b}{d_c} \times P_w$$

Kcは横筋、Kuは中筋に対して寄与する係数
他の係数は文献(1)参照

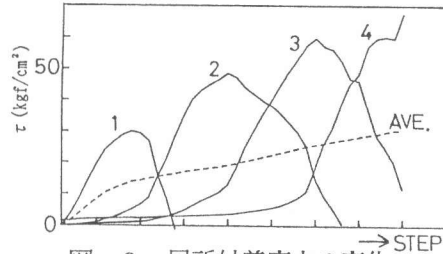


図-8 局所付着応力の変化

3. はり部材の逆対称荷重実験

3.1 実験概要

試験体は計6体で、試験体の一覧を表-4に、配筋例を図-9に示す。断面の大きさは幅×せい=17.5cm×27cmで、変動因子は、主筋の種類、横補強筋の種類、横補強筋量、内法スパン長である。コンクリートには設計基準強度360kgf/cm²の普通コンクリートを使用した。主筋はNo. 1, 2には異形鉄筋を、その他にはらせん巻きカーボン繊維筋を用いた。筋筋については試験体No. 1は組み紐状アラミド繊維筋を、その他はらせん巻きカーボン繊維筋を用いた。表-5に材料の力学的性質を示す。加力には建研式加力装置を用い、正負交番繰り返し加力を行った。加力は部材角を制御することにより行い、R=±1/200、±1/100、±1/50、±1/33を各々2回づつ、R=±1/20で1回繰り返し、最後にR=+1/15の加力を行うことを目標とし、急激なせん断力の低下があった時点で加力を中止した。主な計測項目は、スタブ間の相対変形と軸方向変形および主な位置の補強筋の歪である。

表-4 試験体一覧

No	共通事項	M/QD	主筋		横補強筋	
			種類	Pt(%)	種類	Pw(%)
No. 1	b=17.5cm D=27.0cm d=24.3cm Fc=360 Kgf/cm²	2.5	4-D13	1.19	2-K32 @35	0.82
No. 2					2-CFRPφ6 @40	0.81
No. 3					2-CFRPφ4 @40	0.36
No. 4		2.0	4-CFRPφ13	1.25	2-CFRPφ6 @40	0.81
No. 5					2-CFRPφ4 @40	0.36
No. 6					2-CFRPφ6 @40	0.81

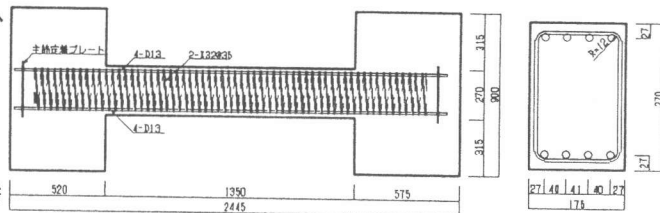


図-9 No.1試験体配筋図

表-5 材料の力学的性質

コンクリート		圧縮強度 (kgf/cm²)	引張強度 (kgf/cm²)	静弾性係数 (kgf/cm²)	備考
普通		386	24.43	2.15×10⁵	No. 1~2
普通		380	26.56	2.31×10⁵	No. 3~6
補強筋 呼び名		降伏点 (kgf/cm²)	引張強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (kgf/cm²)	備考
鉄筋	D13	8860	9520	2.09×10⁶	主筋
カーボン (CFRP)	φ13	—	17300	1.33×10⁶	横補強筋
	φ6	—	16500	1.16×10⁶	横補強筋
	φ4	—	20200	1.52×10⁶	横補強筋
アラミド	K32	—	13600	0.591×10⁶	横補強筋

3.2 破壊経過

各試験体の荷重-変形曲線を図-10に、最終ひびわれ図を図-11に示す。各試験体とも部材角R=±1/200の加力で曲げ及び曲げせん断ひびわれが発生し、R=±1/100の加力でせん断ひびわ

れが発生、その後、R=±1/50または±1/33で最大荷重に達し次第に耐力は減少し始め、最終的には付着割裂破壊により耐力低下を起こした。荷重-変形曲線は全試験体とも逆S字型の貧弱なループを描いた。なお、主筋に鉄筋を用いた試験体では主筋の降伏はみられなかった。

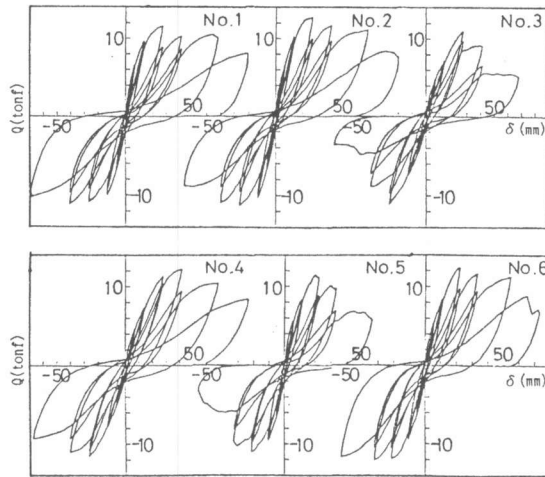


図-10 荷重-変形曲線

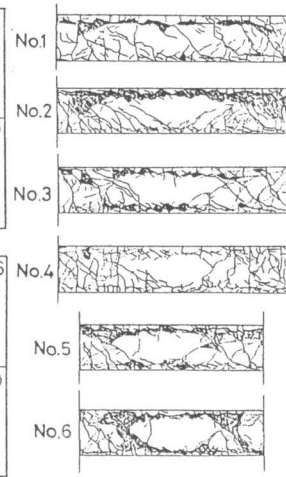


図-11 最終ひびわれ図

3.3 実験結果

表-6に主な実験結果と計算値を示す。なお、表中の付着割裂強度には片持ちばり実験で導出した式を用いている。表-6より主筋にカーボンを用いた試験体(No. 3~6)の弾性剛性および曲げひびわれ強度の実験値は計算値より低い値となり、せん断系のひびわれ強度は既存の算定式と

表-6 実験結果

試験体	せん断余裕度		付着割裂強度 cτbu (kgf/cm ²)	付着余裕度 cτbf	弾性剛性 (tonf/cm)		曲げひびわれ強度 (tonf)		曲げせん断ひびわれ強度 (tonf)		せん断ひびわれ強度 (tonf)		最大荷重 (tonf)		限界変形 (mm)	破壊形式
	cQsu/H cQmu	cQsu/A cQmu			実験値	実/計	実験値	実/計	実験値	実/計	実験値	実/計	実験値	実/計		
No.1	0.61	1.36	40.59	1.11	22.88	0.83	2.03	1.33	4.48	1.10	6.89	1.36	11.51	0.79	79.0 (1/17)	BO
No.2	0.67	1.76	43.46	1.19	22.43	0.81	1.50	0.98	4.52	1.11	6.75	1.33	12.68	0.87	74.5 (1/18)	BO
No.3	0.50	0.53	32.40	0.87	20.93	0.79	0.69	0.51	3.50	0.92	5.95	1.18	11.08	0.68	43.0 (1/31)	BO
No.4	0.60	0.86	37.65	1.02	19.32	0.73	0.74	0.56	4.78	1.25	6.14	1.22	12.21	0.75	74.5 (1/18)	BO
No.5	0.44	0.45	32.40	0.66	24.26	0.53	0.68	0.41	3.71	0.85	7.38	1.29	11.46	0.56	37.0 (1/29)	BO
No.6	0.52	0.70	37.65	0.76	31.11	0.68	0.67	0.40	4.49	1.03	6.80	1.19	12.41	0.61	60.5 (1/18)	BO

計算式: 弾性剛性 $cK_e = Q/\delta$ $\delta = \delta_n + \delta_s$ $\delta B = Q \cdot L^3 / 12cE \cdot I_e$ $\delta S = \kappa \cdot Q \cdot L / Gc \cdot A_c$ 曲げひびわれ強度 $cQ_{bc} = cM_{bc} / (L/2)$ $cM_{bc} = 1.8 \sqrt{\sigma_n} \cdot 2e$
 曲げせん断ひびわれ強度 $cQ_{bsc} = 0.265b \cdot d \sqrt{\sigma_n + cM_{bc} / (M/Q \cdot d)}$ せん断ひびわれ強度 $cQ_{sc} = [0.085kc(500 + \sigma_B) / M / (Q \cdot D) + 1.7] \cdot b \cdot j$
 曲げ強度 $cQ_{mu} = e$ 実験法 せん断強度 $cQ_{su} = [0.053P_t^{0.23} (\sigma_n + 180)] / M / (Q \cdot d) + 0.12 + 2.7 \sqrt{(P_w \cdot \sigma_{mu})} \cdot b \cdot j$ $\sigma_{mu} = 3.8 \sqrt{E_w}$
 $cQ_{su} = b \cdot j_t \cdot P_w \cdot \sigma_{mu} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_n / 2$ 縦筋の場合 $\nu = 0.35$, $\phi = 45^\circ$ 付着割裂強度 $c\tau_{bu} = c\tau_{co} + c\tau_{st}$ $c\tau_{co} = (0.4bi + 0.5) \sqrt{\sigma_n}$
 (主筋: 鉄筋) $c\tau_{st} = (20/N_t + 5N_u/N_t) \cdot P_w \cdot K \cdot b \sqrt{\sigma_n} / db$ $K = (E_{st}/E_s)^{0.33}$ (主筋: カーボン/縦筋) $c\tau_{st} = (5.69 \cdot 2/N_t + 4.31 \cdot N_u/N_t) \cdot P_w \cdot b \sqrt{\sigma_n} / db$
 露出付着応力度 $c\tau_f = db \cdot \Delta \sigma / (4(L \cdot D))$ $\Delta \sigma = e$ 実験法による曲げ終局強荷時の主筋平均部の応力差

注) 1): 各ひびわれ強度は正則、負則の両方から得られた値の平均、その他は正則の両方から得られた値
 2): 限界変形とは包絡線上の荷重が最大荷重の80%を割ったときのたわみ量
 3): 破壊形式 BO: 付着割裂破壊

良い対応を示した。図-12に付着余裕度(cτbu/cτf)と最大荷重比(eQmax/cQmu)の関係を示す。付着余裕度の計算については前述の片持ちばり実験より得られた計算式を用いた。原点と縦軸及び横軸が1の点を結ぶ直線とは逸れているが、各試験体ともほぼ直線状に並び各点に付いて回帰計算を行ったところ以下の式を得た。

$$eQ_{max}/cQ_{mu} = 0.577 \cdot c\tau_{bu}/c\tau_f + 0.189 \quad (5)$$

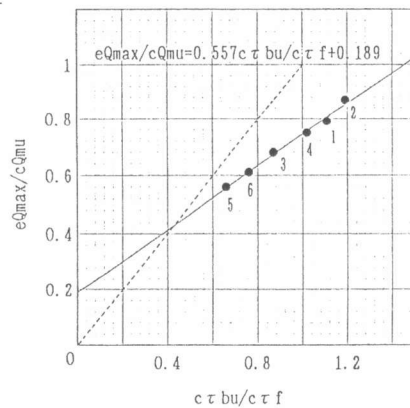


図-12 付着余裕度と最大荷重比

上式により補強筋の種類を問わず付着割裂破壊による最大荷重の予測が可能である。また、最大荷重比が1の時の付着余裕度は1.45となり、この値が付着破壊の境界の付着余裕度と推定できる。

3. 4 主筋の局所付着応力の変化

図-13に示す主筋の歪の各々の測定区間ごとに、区間両端の歪の差からその区間における平均した付着応力を算出し、それを縦軸に、区間の平均歪度を横軸にプロットしたグラフの包絡線を図-14に示す。図中、Tは上端筋を、Bは下端筋を示し、1から4が区間番号、破線は1~4区間の総平均である。また点線で片持ちばり実験による付着割裂強度計算値($c\tau_{bu}$)が示してある。主筋に鉄筋を用いた試験体(No.1、No.2)では、上端筋の付着応力で突出して大きな値を示している区間がなく、

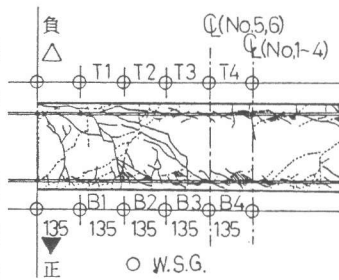


図-13 主筋歪測定区間

区間における付着応力の最大値は計算値と良い対応を示している。一方主筋に繊維を用いた試験体(No.3~6)では、大きな付着応力が部分的にみられるが、総平均は計算値と良い対応を示している。これらの挙動は、主筋に用いた補強筋の性質を示しているものであり、片持ちばり形式の付着実験により、梁部材における主筋の付着強度、全体的あるいは局所的な付着性状等、ある程度の予測は可能であると思われる。

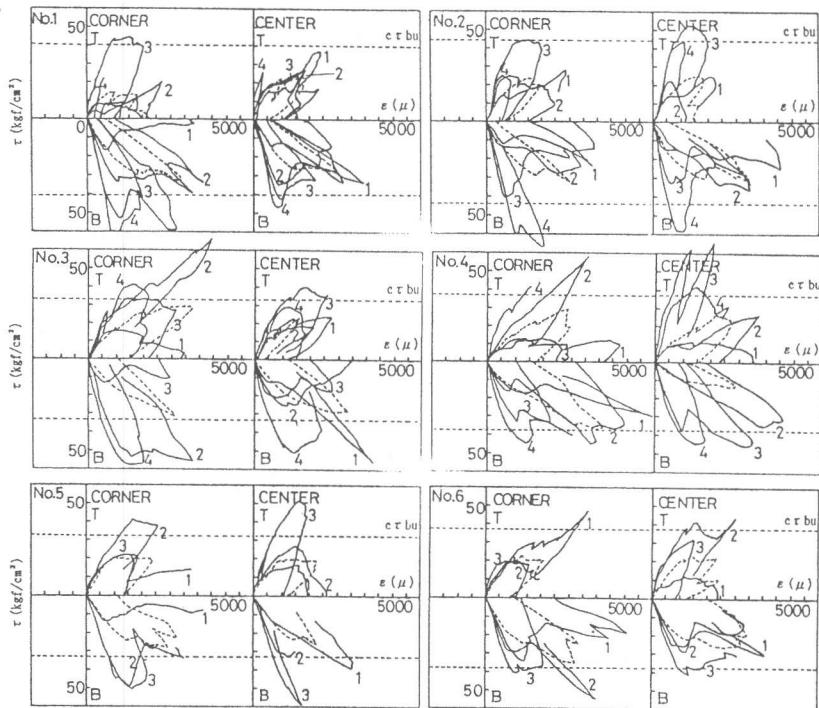


図-14 平均付着応力-平均歪曲線の包絡線

4. まとめ

- (1) 主筋が鉄筋で横補強筋に繊維筋を用いた場合の付着強度増加率は、鉄筋に対する繊維筋のヤング係数比のべき状の補正を行うことで評価できる。
- (2) 主筋にも繊維筋を用いた場合の付着強度は、横補強筋の性質のみでは評価できず、それぞれの繊維筋の組み合わせについてその寄与する係数を把握した。
- (3) 主筋に繊維筋を用いた場合、局所的には付着応力は増大する。
- (4) 片持ちばり形式の付着実験で得られた付着強度計算値を用いた付着余裕度で、付着割裂破壊で耐力が決定されるはりの最大荷重が予測できる。
- (5) 繊維筋を用いたはりの主筋の付着性状は、片持ちばり形式の付着実験により予測ができる。

謝辞 普通コンクリート試験体関連項目については、建設省新素材総プロ長繊維補強コンクリートWGの一環として行ったものであり、軽量コンクリート試験体関連項目については、文部省科学研究補助金(一般研究費(B)課題番号01460189)及び平成2年度筑波大学特別プロジェクト「長繊維補強軽量コンクリート造の基本的構造特性」によっている。関係各位に感謝いたします。

参考文献 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990