

[63] 繊維補強鉄筋コンクリート梁のせん断特性に関する研究

正会員 ○ R. K. ウィーラタナ(東京大学大学院)

正会員 魚本 健人(東京大学生産技術研究所)

正会員 西村 次男(東京大学生産技術研究所)

1. まえがき

繊維補強コンクリートを構造部材へ適用する場合、無筋コンクリートとして用いるよりも鉄筋を併用した繊維補強鉄筋コンクリート構造とする方が一般性のある構造材を製造することができる。今日までの研究結果から、例えば鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の場合には、普通鉄筋コンクリート梁に比べて単に曲げ耐力が増大するのみならず、せん断耐力も増大することが報告されている。^{1)~3)}しかし、これらの結果はいずれも主に特定の鋼繊維を用いた場合のもので、繊維の材質や繊維形状が変化した場合の影響などについてはまだ十分に明らかにされていない。一方、無筋コンクリートの場合については、繊維補強コンクリートであっても使用する繊維の種類、繊維混入率等によってかなりその特性が変化することが明らかにされている。⁴⁾

そこで、本研究は、繊維の種類や形状をも含めた各種要因が繊維補強鉄筋コンクリート梁のせん断特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施したものである。

2. 実験概要

実験で取り上げた影響要因は、次に示す6種類とし、重回帰分析による解析を行った。① 繊維種類、② 繊維混入率(V_f)、③ せん断スパン比(a/d)、④ 主鉄筋比(ρ)、⑤ 梁の有効高さ(d)、⑥ コンクリート圧縮強度(空気量の違い含む)。

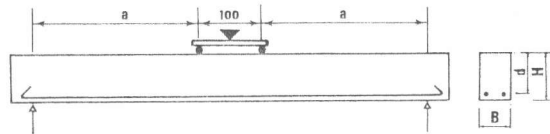


図-1 実験に用いた試験体

繊維種類としては、土木構造物に多く用いられている鋼繊維とポリエチレン繊維を用いた。鋼繊維については引張強度や付着強度が高いと言われているインデント加工された異形カットワイヤー($\phi 0.5 \times 3.0 \text{ mm}$)と、一般に用いられているせん断品($0.5 \times 0.5 \times 3.0 \text{ mm}$)の2種類とした。なお、ポリエチレン繊維の寸法は $\phi 0.9 \times 4.0 \text{ mm}$ である。繊維混入率は、鋼繊維の場合0.75%と1.50%の2種類としたが、ポリエチレン繊維の場合には既応の実験結果⁵⁾を考慮して3%のみとした。

せん断スパン比は1.0から5.0の間で変化させ、鉄筋比は0.84%と2.2%の2種類としたが、有効高さについては18.2 cmの場合のみを実験し、8.0 cm及び8.5 cmについては既発表の結果³⁾を用いるものとした。また、コンクリート圧縮強度は $W/C=50\%$ と一定にし、空気量を変え、試験時材令(7~8週)で 590 Kg/cm^2 と 480 Kg/cm^2 の2種類とした。実験に用いた梁の一般図を図-1に示す。なお、鉄筋は全てSD30である。

セメントは全て普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法15 mmの秩父両神産砕石(比重2.71、吸水率0.48%、F.M. 633)を細骨材は大井川産川砂(比重2.62、吸水率1.56%、F.M. 2.79)を用いた。AE剤はヴィンゾールレジ系とし、AEコンクリートの空気量は $6 \pm 1\%$ となるよう定めた。コンクリートの配合は、いずれも水セメント比50%、スランプ $10 \pm 1 \text{ cm}$ で、試験体打設後3週間湿空養生を施し、試験時材令までは試験室内に放置した。

載荷試験は、いずれの場合にも図-1に示すように等曲げモーメント区間を10 cmと一定に保ち、条件に応じてスパンを変化させ、ひびわれの進展、たわみ量、鉄筋及びコンクリートのひずみ量を測定しながら、梁の最大耐力まで静的に行った。なお、梁のせん断ひびわれ発生時並びに鉄筋降伏時には一時荷重を除荷し、再度梁の最大荷重時まで載荷を行った。

3. 実験結果と考察

実験結果を表-1及び表-2にまとめて示す。

3.1 破壊モードと梁耐力

梁の最大抵抗モーメントと a/d との関係を図-2に示す。

表-1と図-2から明らかなように、梁の破壊モード及び最大抵抗モーメント (M_{max}) は a/d のみならず、使用する繊維の種類及び繊維混入率によって大きく変化する。異形カットワイヤーを用いた場合には、 V_f が 0.75 以上であれば a/d が 2.5 以上でほぼ一定の M_{max} を示しており、ほとんどが曲げ破壊である。また、 a/d が 2.5 以下でせん断破壊となった梁でも、 M_{max} は $V_f = 1.5$ % で約 5 %、 $V_f = 0.75$ % で約 20 % の低下にすぎない。この値は普通鉄筋コンクリート梁の M_{max} 低下率約 50 % と比較するとかなり小さい。同じ鋼繊維であるせん断品と比較しても、異形カットワイヤーで $V_f = 0.75$ % は、せん断品の $V_f = 1.5$ % より高い値を示している。

ポリエチレン繊維を使用した場合 $V_f = 3$ % と鋼繊維の場合よりも V_f が大きいにもかかわらず、せん断耐力の向上にはあまり有効でなく、せん断品の $V_f = 0.75$ % の場合とほぼ同じ耐力しか得られていない。

3.2 荷重-中央点たわみ曲線

表-1に示した $a/d = 2.5$ の梁の荷重-中央点たわみ曲線を図-3に示す。なお、最大荷重到達後は荷重が急に低下するか、たわみがスパンの $L/150$ となるまで継続して載荷した。

この図より、異形カットワイヤーを用いた場合には、せん断破壊となった $V_f = 0.75$ % の場合でも、他の場合より高い耐力を有しているのみならず、大きな変形能を有しており、せん断品の $V_f = 1.5$ % の場合とほぼ同じ性状を示している。ポリエチレン繊維の場合の特徴として、ひびわれ発生後の剛性が鋼繊維の場合に比べ小さいが、変形能はあまり変らない。このことは、 V_f の違いを考慮に入るとポリエチレン繊維を用いてもあまり変

表-1 試験結果 (その1)

	V_f (%)	a/d	P_y (tonf)	P_{max} (tonf)	P_{sh} (tonf)	M_{max} (tonf·cm)	τ_{cr} (kgf/cm ²)	Failure Mode
PLAIN	0	1	—	24.65	9	224.31	67.7	A.C
	1.5	—	12.31	6	168.03	33.8	S.C	
	2	—	10.34	4	188.19	28.4	D.T	
	2.5	—	5.55	4.7	126.26	15.25	S.C	
	3	—	6.74	6	184	18.5	S.B	
	3.5	—	5.98	5	190.46	16.4	S.B	
	5	5.58	5.58	—	253.9	15.33	S.C	
INDENTED CUT-WIRE	0.75	1.5	—	20.2	7	275.73	55.5	S.C
		2	—	13.2	5	240.24	36.26	S.C
		2.5	—	12.66	4.8	288	34.78	D.T
		3	—	10.44	4	285	28.68	F
		3.5	8.8	9	6	286	24.73	F & S
	5	5.8	6.57	—	298.9	18.05	F	
	1.5	1	—	26.9	14	244.8	73.9	A.C
		1.5	19.5	22.35	10	305.07	61.4	S.C
		2	15.7	15.7	4.5	285.74	43.13	S.C
		2.5	12.2	12.63	6	287.33	33.5	F
3		10.7	10.78	—	294.29	29.61	F	
3.5	8	9.29	—	295.88	25.5	F		
5	5.7	6.28	—	285.74	17.25	F		
SHEARED	0.75	1.5	—	16.8	6.7	229.3	46.15	A.C
		2	—	11.68	6	212.6	32.1	S.C
		2.5	—	9.38	4.8	213	25.77	D.T
		3	—	8.56	4	233.7	23.52	S.C
		3.5	—	7.52	3.5	239.5	20.66	S.C
	5	5.4	6.13	—	279	16.84	F & S	
	1.5	1.5	—	19.88	7.5	271.36	54.62	S.C
		2	11.29	12.26	10.4	223.1	33.68	S.C
		2.5	—	11.85	8	269.6	32.55	D.T
		3	—	10.64	4	290.47	29.23	F&S
3.5		8.6	9.28	6	295.57	25.5	F	
5	5.1	5.95	—	270.3	16.35	F		
POLYETHYLENE	3.0	1.5	—	19.08	8	260.4	52.42	A.C
		2	—	18.2	7.5	198	50	S.C
		2.5	—	10.16	6	231	27.9	D.T
		3	—	9.38	4.8	256	25.77	S.B
		3.5	7.6	8.7	4	277	23.9	F & S
5	5.1	5.94	—	270.3	16.32	F		

NOTE : $d = 18.2$ cm P_{max} - Maximum Load P_{sh} - Shear cracking Load
 P_y - Yield Load M_{max} - Maximum Moment τ_{cr} - Critical Shear Stress
A.C - ARCH COMPRESSION S.C - SHEAR COMPRESSION S.B - SHEAR BOND FAILURE
D.T - DIAGONAL TENSION F - FLEXURE

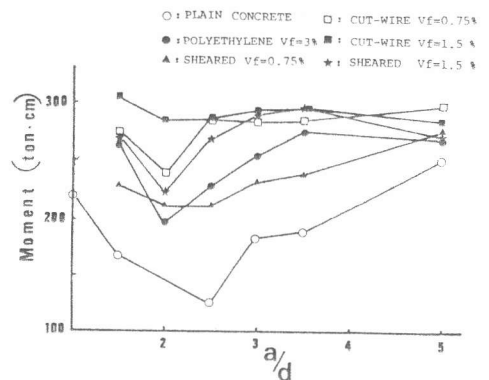


図-2 最大抵抗モーメントと a/d

形能に期待できないと予想される。

3.3 各種要因がせん断耐力に及ぼす影響

表-1、表-2及び既発表の実験結果³⁾に示した公称せん断応力 ($\tau_{cr} = P_{max} / (2bd)$) に及ぼす各種要因について検討を行うため、重回帰分析を行った。各種繊維毎に行った分析結果を表-3~表-5にまとめて示す。なお、解析においては普通コンクリートを $V_f = 0\%$ として取り扱った。

分析結果をまとめると次のようになる。

- 1) いずれの繊維を使用した場合でも、最も大きな影響を及ぼす要因は a/d であり a/d が小さくなるほど τ_{cr} は大きくなる。
- 2) 鉄筋比 ρ は a/d に次ぐ影響因子であり、表-3に示すように、 ρ が増大するにつれ τ_{cr} は増加する。
- 3) 繊維混入率 V_f の影響が最も大きいのは異形カットワイヤーの場合であり、せん断品とポリエチレン繊維の場合にはほぼ同程度の影響しか与えていない。いずれの繊維の場合にも V_f は τ_{cr} と正の相関があり、 V_f が増大するにつれ τ_{cr} は増加する。
- 4) コンクリートの圧縮強度の影響は繊維種類によってやや異なっている。異形カットワイヤーの場合にはほとんど影響を及ぼさないが、せん断品の場合にはやや大きな影響を及ぼしている。

これらの結果は限られたデータに基づいているため一般的な結果とは言えないが、繊維種類の違いによって例えば V_f の影響に差があるのは、繊維そのものの品質(強度、剛性等)やマトリックスとの付着特性の違いに起因するものと考えられる。⁴⁾

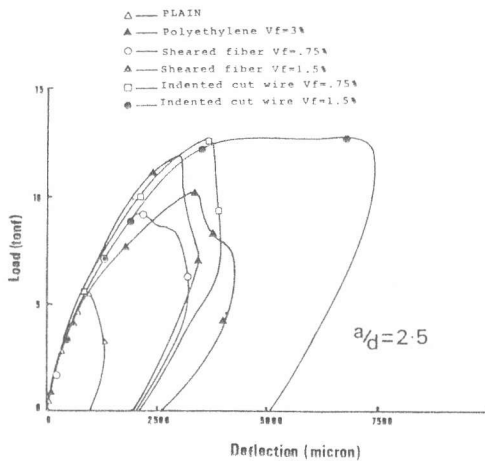


図-3 梁の荷重-中央点たわみ曲線

表-2 試験結果 (その2)

	a/d	$\rho\%$	air%	P_y (tonf)	P_{max} (tonf)	τ_{cr} kgf/cm ²	Failure Mode
PLAIN	2	0.84	*	7.2	7.22	19.51	F & S
	2	2.2	*	—	13.1	36	D.T
	3.5	0.84	*	3.3	4.02	10.86	FLEXURE
	3.5	2.2	*	—	6.3	17.3	S.B
	2	0.84	5.6	6.4	6.84	18.5	F & S
	2	2.2	5.6	—	8.62	23.7	D.T
	3.5	0.84	5.6	3.5	4.17		FLEXURE
	3.5	2.2	5.6	—	6	16.5	S.B
INDENTED CUT-WIRE $V_f = 1.5\%$	2	0.84	*	7	9.06	24.5	FLEXURE
	2	2.2	*	—	16.6	45.6	S.C
	3.5	0.84	*	4.2	4.95	13.38	FLEXURE
	3.5	2.2	*	10.08	10.09	27.7	FLEXURE
	2	0.84	6.8	8.3	8.53	23.1	FLEXURE
	2	2.2	6.8	—	17.02	46.75	S.C
	3.5	0.84	6.8	4.4	5.02	13.56	FLEXURE
	3.5	2.2	6.8	9.8	10.3	28.3	FLEXURE

NOTE: $\rho\%$ -Steel percentage
* - Air entraining agent was not used

表-3 重回帰分析結果 (異形カットワイヤー)

	Beam Height X(1)	Steel R/F ratio X(2)	f'_c X(3)	(a/d) Ratio X(4)	$V_f\%$ X(5)	τ_{cr} Y
X(1)	1.000					
X(2)	-0.306	1.000				
X(3)	-0.144	-0.273	1.000			
X(4)	-0.114	0.032	0.065	1.000		
X(5)	-0.298	0.493	0.005	0.032	1.000	
τ_{cr} Y	-0.121	0.412	-0.076	-0.747	0.387	1.000

Multiple correlation coefficient = 0.896
Coefficient of determination = 0.803

Note: τ_{cr} -Critical shear stress
 f'_c -Concrete compressive stress

表-4 重回帰分析結果 (せん断品)

	f'_c X(1)	(a/d) Ratio X(2)	$V_f\%$ X(3)	τ_{cr} Y
X(1)	1.000			
X(2)	0.077	1.000		
X(3)	0.996	0.083	1.000	
Y	0.143	-0.768	0.136	1.000

Multiple correlation coefficient = 0.794
Coefficient of determination = 0.630

3.4 繊維補強鉄筋コンクリート梁のせん断耐荷機構に関する考察

以上の結果を考慮して、せん断力を受ける腹鉄筋のない普通鉄筋コンクリート梁と繊維補強鉄筋コンクリート梁の力のつりあいを考え、モデル化したものを図-4に示す。この図では必ずしも各々の力を定量的に図示してはいないが、定性的な傾向を示している。

普通鉄筋コンクリート梁と繊維補強コンクリート梁との最も大きな違いは、斜め引張ひびわれ発生後のコンクリートの分担力である。即ち、普通コンクリートの場合にはひびわれ面における骨材のかみ合いだけしか分担しないのに対し、繊維補強コンクリートの場合にはひびわれ発生後もコンクリートが引張力を分担するのみならず、繊維の拘束によりひびわれ幅が小さなものとなり、骨材のかみ合いによる抵抗や繊維そのもののダウエル効果によって G_f と T_f が大きなものとなる。また、普通コンクリートに比べ繊維補強コンクリートのせん断強度が大きいこと⁵⁾や、鉄筋とのダウエル耐力も大きいこと⁶⁾から、 V_{cf} 及び V_{df} も V_{cp} や V_{dp} に比べ大きなものとなる。

このようなことが原因となって、繊維補強鉄筋コンクリート梁は普通鉄筋コンクリート梁に比べ高いせん断耐力を有すると考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 繊維種類が異なると繊維補強鉄筋コンクリート梁のせん断耐力は大きく変化し、本実験で用いた異形カットワイヤーのようにせん断補強効果のすぐれた繊維も存在する。
- 2) せん断補強効果の優れた繊維を用いると、せん断破壊となる a/d の値が普通コンクリートよりも小さな値となり、せん断耐力も増大する。
- 3) 破壊時における公称せん断応力 τ_{cr} は、主に a/d 、 ρ 、 V_f の影響を受ける。

参 考 文 献

- (1) 藤野、小林、魚本：J.C.I.第3回年次講演会論文集、1981.4
- (2) 原田、二羽、岡村：土木学会論文集、№348、V-1、1984.8
- (3) 魚本、西村、R.K.ウィーララタナ：FRCに関するシンポジウム論文集、J.C.I.、1984.2
- (4) 坂井、中村：FRCに関するシンポジウム論文集、J.C.I.、1984.2
- (5) 峰松、小林、魚本：J.C.I.第3回年次講演会論文集、1981.4
- (6) Swamy, R.N., Bahia, H.M. : A.C.I. Journ. Proceedings. Vol. 76-17, Feb. 1979

表-5 重回帰分析結果(ポリエチレン繊維)

	(a/d) Ratio X(1)	vf% X(2)	τ_{cr} Y
X(1)	1.000	S Y M M E T R I C	
X(2)	0.113	1.000	
τ_{cr} Y	-0.762	0.150	1.000

Multiple correlation coefficient = 0.798
Coefficient of determination = 0.637

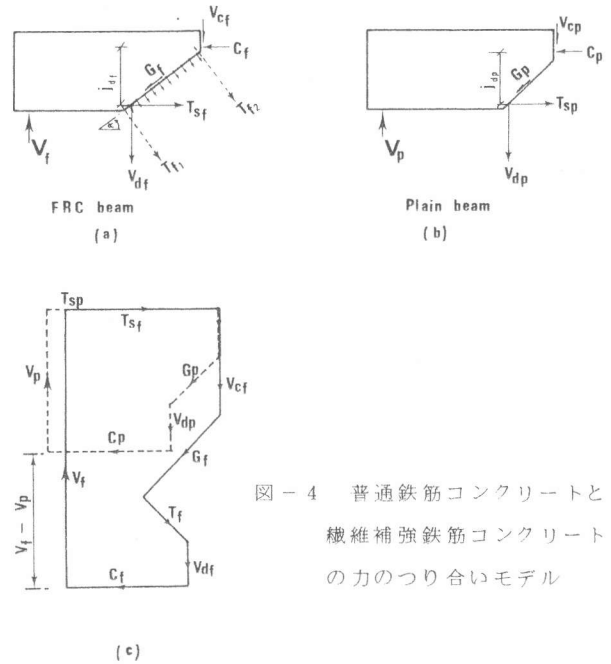


図-4 普通鉄筋コンクリートと繊維補強鉄筋コンクリートの力のつり合いモデル