

阪神高速道路公団 正員 南 莊 淳
 京都大学工学部 正員 岡田 清
 京都大学工学部 学生員 徳永博文

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリートは、普通コンクリートの引張強度特性を改善することによりその脆性的破壊を防ぐことが可能であり、近年研究・開発が進んでいる。一方、構造物に数多く用いられているディープビームはその破壊形式が、メカニズムの複雑なせん断破壊が中心となるためにせん断補強方法についての研究が望まれている。そこで、本研究では鋼繊維補強コンクリートをディープビームに用いた場合のせん断補強効果を明らかにする目的で実験を行った。そして、その破壊形式・破壊耐力等を中心に検討し、鋼繊維のせん断補強効果およびせん断破壊耐力算定式について考察した。

2. 実験方法

(1) 使用材料およびコンクリート配合：セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は愛知川産川砂(FM=30)と鞍馬産碎石(最大寸法15mm)、主鉄筋はSD35(D10, D16) 腹鉄筋に丸鋼(φ6)を使用した。鋼繊維には冷間圧延鋼板切断法による異形鋼繊維(0.25×0.5×25mm, アスベクト比62.5)を使用した。鋼繊維混入率は0.3, 0.6, 1.2% vol. とした。コンクリート配合を表-1に示す。

(2) 供試体および試験方法：供試体は10cm×30cm(有効高さ27cm)の矩形断面で、スパンは36cm, 74cm(モーメントスパンは20cm)とした。主鉄筋の両端には定着板(10×10×0.9cm)を溶接し、腹鉄筋は主鉄筋に垂直と平行で等間隔(5~6cm)に配置した。載荷は2点集中載荷とした。鉄筋比とせん断スパン長/有効高さ a/d の値を表-2に示す。

3. 実験結果および考察

実験結果を表-2に示す。また、斜めひびわれ耐力比および破壊耐力比と鋼繊維混入率との関係を図-2および図-3に示す。

(1) 破壊形式：表-2の中の破壊形式を図-1に示し、次に説明する。

Mode I 載荷点と支点とを結ぶ斜めひびわれの発生と同時に起こる剪断破壊

Mode II 載荷点付近のコンクリートの押し抜きにより、斜めひびわれが圧縮域にまで貫通するせん断斜め破壊

Mode III 主鉄筋の定着板とコンクリートの界面に起こる定着破壊

Mode IV 主鉄筋の降伏による曲げ破壊またはせん断圧縮破壊

(2) 斜めひびわれ耐力：鋼繊維混入による斜めひびわれ耐力の向上は、腹鉄筋補強の場合と同様に少なく、無補強の普通コンクリートと同一と見なせる。

(3) 終局耐力：Mode I, IIで破壊するタイプ($a/d=0.3$)の場合は、1.2% vol. の鋼繊維混入により、無補強の普通コンクリートに比べて約1.3~1.5倍のせん断破壊耐力の向上が見られる。一方、 $a/d=1.0$ の場合は破壊形式もばらつき、鋼繊維混入による補強効果は明確とはならなかった。しかし、全般的に見ると1.2% vol.

表-1 コンクリート配合と諸特性

配合名	単位量 (kg/m ³)				スラグ (%)	σ_c (cm)	σ_c (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	σ_{cu} (kg/cm ²)	E (x10 ¹⁰ kgf/cm ²)	
	W	C	S	G							
P	211	352	882	899	0	50	18.5	27.9	23.6	42.1	25.4
S	211	352	882	899	0	50	15.0	25.9	22.3	35.5	
X	222	370	926	804	23.4 (0.3)	54	14.5	29.3	24.8	54.7	25.9
Y	224	374	935	779	46.8 (0.6)	55	14.5	30.8	29.0	79.6	
Z	243	405	1013	606	93.6 (1.2)	63	9.0	29.7	36.5	110.5	24.1

表-2 実験結果

供試体 記号	鉄筋比 (%)	a/d	鋼繊維 混入率 (%)	曲げ耐力 (kg)	せん断耐力 (kg)	破壊形式	モード
PA-1	1.47	0	0	17.0	2.1	II	I
PA-2	0	0	0	20.0	2.5	II	I
PA-3	0	0	0	16.0	2.0	II	I
XA-1	0.3	0	0	17.0	2.1	II	I
YA-1	0.6	0	0	16.0	2.0	II	I
ZA-1	1.2	0	0	22.0	3.0	II	I
SA-1	0	1.73	0	35.0	14.0	II	II
PB-1	0	0	0	17.0	2.1	II	I
XB-1	0	0	0	17.0	2.1	II	I
YB-1	0.6	0	0	16.0	2.0	II	I
ZB-1	1.2	0	0	22.0	3.0	II	I
SB-1	0	1.65	0	35.0	14.0	II	II
PC-1	0	0	0	19.5	2.5	II	I
XC-1	0.3	0	0	18.0	2.2	II	I
YC-1	0.6	0	0	25.0	10.0	II	II
ZC-1	1.2	0	0	23.5	15.5	II	II
SC-1	0	1.73	0	34.0	20.5	II	II
PD-1	0	0	0	22.5	11.0	II	II
XD-1	0	0	0	30.0	14.5	II	II
YD-1	0.3	0	0	35.0	15.5	II	II
ZD-1	0.6	0	0	37.0	13.5	II	II
SD-1	1.2	0	0	60.0	14.0	II	II
SD-2	0	1.65	0	30.0	11.0	II	II

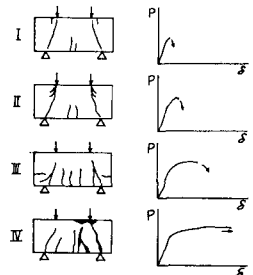


図-1 鋼繊維補強コンクリートディープビームの破壊モード

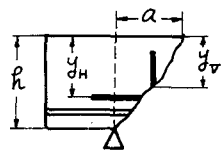
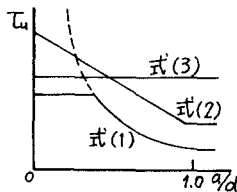
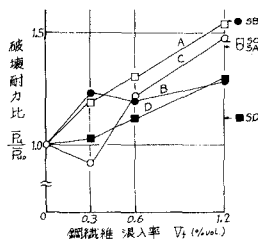
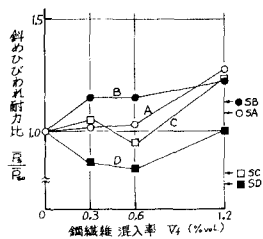


図-2 鋼繊維混入率と斜めひびわれ耐力比 図-3 鋼繊維混入率と破壊耐力比

図-4 耐力式の比較

図-5 腹鉄筋の位置

の鋼繊維を混入したものは、 $a/d = 0.3, 1.0$ のいずれの場合も腹鉄筋と同等あるいはそれ以上の補強効果があった。

(4) RCディープビームのせん断破壊耐力についての考察 (破壊形式がⅠとⅡの場合)

(i) せん断補強のない場合 従来の研究により次のような算定式が提案されている。

$$\text{ACI 318-71} \quad \tau_c = (3.5 - 2.5 \frac{M_u}{S_u d}) \tau_c \leq 1.59 \sqrt{f_c} \quad (1) \quad \tau_c: \text{ディープビームせん断強度}$$

$$\tau_c = 0.504 \sqrt{f_c} + 176 \frac{S_u d}{M_u} \quad \tau_c: \text{普通コンクリート梁のせん断強度}$$

$$\text{Paivaら} \quad \tau_c = 0.8 (1 - 0.6 a/h) \tau_c \quad (2) \quad R_u: \text{ディープビームのせん断耐力}$$

$$\tau_c = 14 + 0.188 R_u + 1498 p \quad 0 \leq a/h \leq 1 \quad h: \text{全梁高さ} \quad d: \text{有効高さ}$$

$$\text{Ramakrishnanら} \quad R_u = \pi \phi b h \quad (3) \quad a: \text{せん断スパン長} \quad b: \text{梁の幅}$$

以上の式で計算された値と実験値とを比較すると、式(1)では安全側を示し、 $a/d = 1.0$ の場合は式(2)が、 $a/d = 0.3$ の場合は式(3)が比較的良好合う。上記三式の関係は図-4 のようになる。

(ii) せん断補強された場合

a) 腹鉄筋 腹鉄筋によるせん断補強効果は式(4)によって評価することができる。この場合の梁の耐力算定式としては、無補強普通コンクリートの受けもつ力 S_p と腹鉄筋の受けもつ力 S_w との和とした累加強度式が一般に用いられており、表-3 に示すように実験値と計算値とよく合っている。

$$S_t = S_p + S_w, \quad S_w = \frac{C_s A_w}{h((a/h)^2 + 1)} \{ \Sigma y_H + (a/h)^2 \Sigma y_V \} \quad (4) \quad C_s = 0.5, \quad A_w: \text{腹鉄筋1本当りの断面積}$$

y_H, y_V は図-5 に示す。

b) 鋼繊維 鋼繊維によるせん断補強機構は、せん断摩擦理論によって説明できると考えられる。すなわち、鋼繊維とコンクリートとの付着力 T_a によって斜めひびわれ面に垂直力 C が発生し、斜めひびわれ面に沿った一樣せん断摩擦抵抗力 S を生じる。そして、 S の鉛直方向成分 S_f によって梁のせん断破壊に対して抵抗するものとする。これらの力を図-6 に示す。つまり、 $C = T_a$ 、 $S = C \tan \phi$ とすると、

$$S_t = S_p + S_f, \quad S_f = S \sin \theta = T_a \tan \phi \sin \theta = 2 \alpha^2 V_f (l/b) \tau_b b h \tan \phi \quad (5) \quad \text{図-6 斜めひびわれ面での力}$$

この式で l/b はアスヤクト比であり、面状係数 α 、平均付着力 τ_b 、摩擦係数 $\tan \phi$ を次のように仮定してせん断破壊耐力 S_t を求める。 $a/d = 0.3$ で $\alpha = 0.6$ 、 $a/d = 1.0$ で $\alpha = 0.5$ 、 $\tau_b = 26 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\tan \phi = 1.4$ 。算定式と実験値との関係は、表-3、図-7 に示すようにかなり一致する。

4. まとめ

鋼繊維補強RCディープビームのせん断破壊耐力の増加は、鋼繊維とコンクリートとの付着効果によって説明することができる。また、鋼繊維のせん断補強効果は式(5)の S_f によって評価できる。

供試体	補強有	補強無	式(4)	式(5)	$S_t = S_p + S_w$	$S_t = S_p + S_f$
	S_p	S_w	$(S_w/S_p)/S_w$	S_f	S_t	S_t
SA	18.8	13.1	4.6	1.24	15.7	1.20
SC	16.5	11.3	4.6	1.13	15.7	1.05
供試体	補強有	補強無	式(5)	式(5)	$S_t = S_p + S_f$	$S_t = S_p + S_f$
	S_p	S_f	$(S_w/S_p)/S_f$	S_f	S_t	S_t
YA	15.9	13.1	3.0	0.93	14.1	1.09
ZA	19.4	13.1	6.0	1.05	17.1	1.13
YB	11.6	7.0	2.1	2.19	10.9	1.03
ZB	12.4	7.0	4.2	1.29	13.0	1.01
YC	14.6	11.3	3.0	1.10	14.1	1.04
ZC	17.3	11.3	6.0	1.00	17.1	1.01

表-3 腹鉄筋および鋼繊維の補強効果式と累加強度式 (S_p, S_w, S_f, S_t の単位は ton)

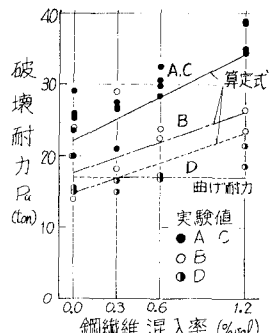


図-7 鋼繊維混入率と破壊耐力 (算定式と実験値との比較)