

論文

[1139] 鋼繊維補強鉄筋コンクリートのせん断抵抗における鋼繊維の補強効果

正会員 ○望月 重 (武蔵工業大学建築学科)

正会員 濱本卓司 (武蔵工業大学建築学科)

正会員 西岡聖雅 (武蔵工業大学大学院)

正会員 平原健一 (東電設計)

1. はじめに

鋼繊維によって鉄筋コンクリート部材を補強した場合、その部材の抵抗を鉄筋コンクリートと鋼繊維とするのか、または鋼繊維コンクリートと鉄筋と捉えるべきか、すなわち鋼繊維を鉄筋と同様に一種の補強筋の要素 (以下、解法Aと称す) とするか、鋼繊維を含んだ一種のコンクリートの要素 (以下、解法Bと称す) とするかに関しては、未だ十分な説明は成されていない。純引張をうける場合に関しては、既に著者らの一部が発表した<sup>1)</sup> 圧縮せん断に関しては述べるに至っていない。本研究では鋼繊維補強鉄筋コンクリートのS形の圧縮せん断実験を行い、修正Mohr-Coulombの破壊規準を用いた極限解析と比較することにより、鋼繊維の補強効果について検討した。

2. 実験計画

試験体は、図1に示すように全高55cm、全幅30cm、厚さ12.5cmで、予想破壊面の面積 (12.5x20 cm<sup>2</sup>) を有するS形試験体である。試験体名の第1項は予想破壊面と加力方向とのなす角度、第2項は鋼繊維混入率、第3項は補強鉄筋を示している。試験体のパラメータは補強筋比、予想破壊面のなすの角度 (0°, 30°) とする。予想破壊面の補強鉄筋はD10、もしくはD13の1~3本で、せん断面と直交に配筋する。ただし、30°-SF2.0-0は補強がない。用いた鋼繊維は、せん断ファイバーで、断面0.5x0.5mm<sup>2</sup>、長さ30mm、形状はフラット形であり、混入比2.0%としてコンクリート練り混ぜ時に分散投入する。表1に構造諸元および各種材料強度、また図2に加力装置の概要を示す。加力は、200tf容量のアムスラー型耐圧試験機により、鉛直荷重を漸増载荷する、push-off形式とす

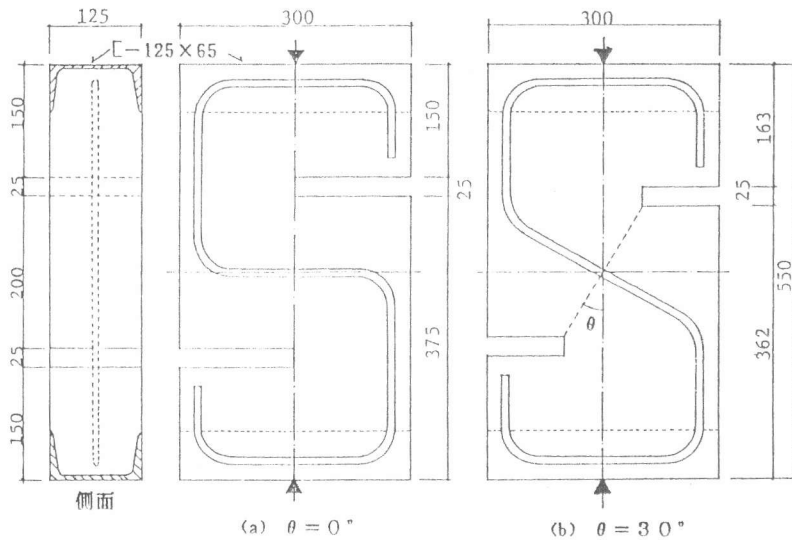


図1 試験体概要図

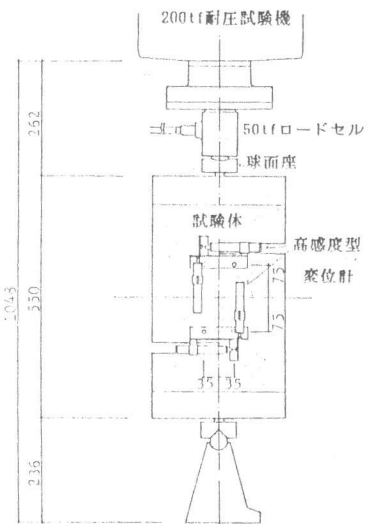


図2 加力・測定装置図

る。荷重は、50tfロードセルを用いて測定する。変位測定は、ひび割れ幅方向である予想破壊面に直交する方向と、予想破壊面に平行な方向の2方向の変位である。ひずみ測定は、補強鉄筋では予想破壊面上に、さらに、コンクリートでは補強鉄筋のひずみ測定位置の直上の試験体表裏で補強筋と同方向のひずみである。

### 3. 実験結果

#### 3.1. 破壊経過

予想破壊面のなす角度  $\theta = 0^\circ, 30^\circ$  ともに、破壊は予想破壊面で生じた。 $\theta = 0^\circ$  の試験体で、 $0^\circ$ -SF2.0-D10は13.56tfで予想破壊面に沿ってひび割れが発生したが、その後も耐力は上昇し続け、D10の降伏ひずみ近くに達すると最大耐力となった。他の3体も最大耐力以前にせん断ひび割れが入ったが、その後も耐力は上昇し続け、やはり補強鉄筋の降伏ひずみ近くで最大耐力となった。各試験体の最大耐力は、補強筋比 ( $A_s/A$ ) に比例して上昇する結果を示した。

$\theta = 30^\circ$  の試験体は  $0^\circ$  の試験体に比べ、耐力が著しく増大した。鉄筋のない  $30^\circ$ -SF2.0-0は、最大耐力45.1tf以降、補強筋のある試験体に比べ耐力低下の割合が大きかった。最大荷重に関して  $0^\circ$ -SF2.0-D13はやや大きい値を示し、 $30^\circ$ -SF2.0-D10は小さい値を示した。これは打設時に鋼繊維が均一に投入されなかったことによると考えられる。

#### 3.2. 変位およびひずみ性状に関する検討

図3は、各試験体の荷重とずれ変位との関係を

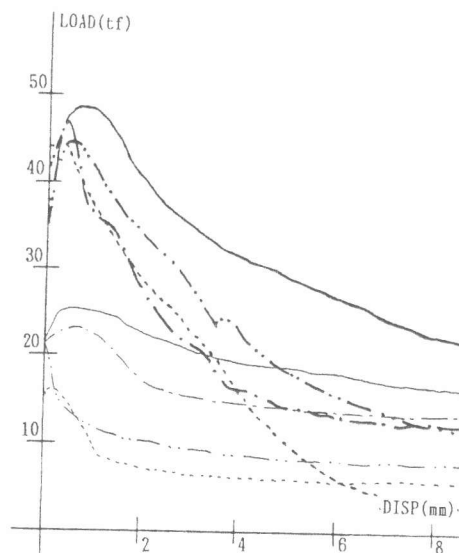


図3 荷重-ずれ変位曲線

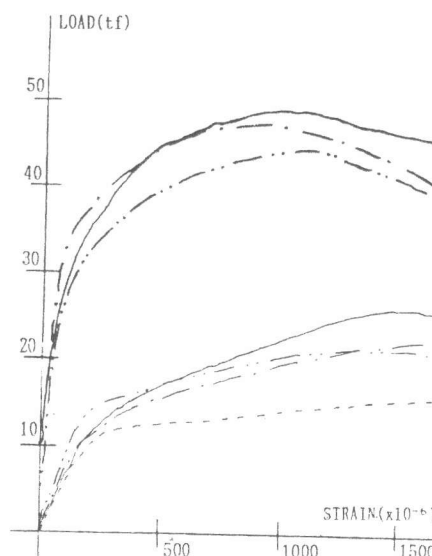


図4 補強鉄筋の荷重-ひずみ曲線

- 30°-SF2.0-0                      --- 0°-SF2.0-D10
- 30°-SF2.0-D10                --- 0°-SF2.0-D13
- 30°-SF2.0-D13                --- 0°-SF2.0-2D13
- 30°-SF2.0-2D13                --- 0°-SF2.0-3D13

表1 構造諸元・使用材料の性質

試験体名	$\theta$ (°)	挿入 鉄筋	$A_s$ ( $\text{cm}^2$ )	$V_f$ (%)	$f_c$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$f_t$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$E_c$ $\times 10^5$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$f_{SPc}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$f_{SPt}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$ESPC$ $\times 10^5$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$f_y$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$E_s$ $\times 10^6$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	b (cm)	h (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )
0°-SF2.0-D10	0	D10	0.71	2.0	290	19.9	2.33	308	46.3	2.54	3510	1.61	12.5	20.0	250
0°-SF2.0-D13		D13	1.27												
0°-SF2.0-2D13		2D13	2.54												
0°-SF2.0-3D13		3D13	3.81												
30°-SF2.0-0	30	-	-	2.0	306	29.6	2.37	347	49.5	2.56	-	-	12.5	23.1	289
30°-SF2.0-D10		D10	0.71												
30°-SF2.0-D13		D13	1.27												
30°-SF2.0-2D13		2D13	2.54												

$\theta$ : 予想破壊面のなす角度  $A_s$ : 鉄筋断面積  $V_f$ : 鋼繊維混入率  $f_c$  ( $f_{SPc}$ ): コンクリート (鋼繊維) 圧縮強度  $f_t$  ( $f_{SPt}$ ): コンクリート (鋼繊維) 引張強度  
 $E_c$  ( $ESPC$ ): コンクリート (鋼繊維) ヤング係数  $f_y$ : 鉄筋降伏強度  $E_s$ : 鉄筋ヤング係数  $b$ : せん断有効幅  $h$ : せん断有効せい  $A$ : せん断有効面積

比較したものである。 $\theta = 0^\circ, 30^\circ$  の試験体は、同様な荷重-ずれ変位曲線を示したが、補強筋のない  $30^\circ$ -SF2.0-0 の最大耐力以降の耐力低下は著しく大きかった。図4は、各試験体の補強鉄筋の荷重とひずみ度との関係を示したものである。 $\theta = 0^\circ$  および  $\theta = 30^\circ$  のいずれも、引張ひずみが荷重とともに徐々に増加した。 $\theta = 0^\circ$  では4体とも全て最大耐力時に降伏ひずみ近くに達したが、 $\theta = 30^\circ$  は降伏ひずみに達しなかった。これは、予想破壊面が傾きを持つ場合、圧縮せん断状態になるため補強筋に圧縮力が作用するためである。表2に各試験体の最大荷重、および最大荷重時のずれ変位を示す。

表2 最大荷重

試験体名	$P_{max}$ (tf)	$\tau_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	最大耐力時 ずれ変位 (mm)
0°-SF2.0-D10	16.6	66.4	0.159
0°-SF2.0-D13	21.5	86.0	0.110
0°-SF2.0-2D13	22.6	90.4	0.534
0°-SF2.0-3D13	25.3	101.2	0.550
30°-SF2.0-0	45.1	156.1	0.036
30°-SF2.0-D10	45.7	158.1	0.465
30°-SF2.0-D13	47.2	163.3	0.186
30°-SF2.0-2D13	48.5	167.8	0.887

$P_{max}$ : 最大せん断荷重  $\tau_{max}$  ( $=P_{max}/bh$ ): 最大せん断応力度

#### 4. 解析

試験体のせん断抵抗を解明するために極限解析を用いて、そのせん断耐力を求める。以下は、解法Aの解析を対象とする。なお、解法Bの場合の解析は  $f_c, f_t$  の代わりに  $f_{SPC}, f_{SFT}$  を代入し、以下に示す(2)③の鋼繊維の内力仕事を省くことにより求められる。

(1) 外力Pのなす仕事  $W_0$  は、図5から

$$W_0 = P v \cos \alpha - P \tan \theta v \sin \alpha \quad \dots(1)$$

(2) 内力のなす仕事  $W_I$  は、①鉄筋の内力仕事と②コンクリートの内力仕事、および③鋼繊維の内力仕事からなる。

$$W_I = W_{IR} + W_{IC} + W_{ISF} \quad \dots(2)$$

① 鉄筋の内力仕事  $W_{IR}$  は、だぼ効果を無視する。

$$W_{IR} = A_s f_y v \sin \alpha \quad \dots(2.1)$$

② コンクリートの内力仕事  $W_{IC}$  は

$$W_{IC} = D_A b h \quad \dots(2.2)$$

変形領域における平面応力状態は、図6の線ABC上のみ存在する。AB上では  $\alpha = 90^\circ$ 、点Bでは  $\phi \leq \alpha \leq 90^\circ$ 、BC上では  $\alpha = \phi$ 、点Cでは  $0^\circ \leq \alpha \leq \phi$ 。

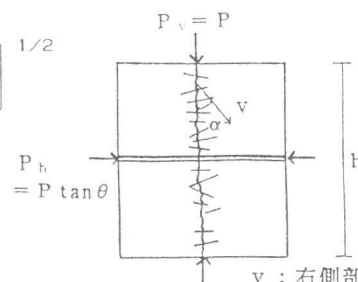
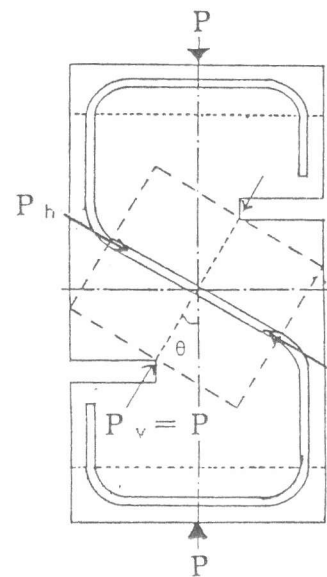
なお、主ひずみ速度は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}^{P1} \\ \dot{\epsilon}^{P2} \end{bmatrix} &= \frac{\dot{\epsilon}_x^P + \dot{\epsilon}_y^P}{2} \begin{bmatrix} + \\ - \end{bmatrix} \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon}_x^P - \dot{\epsilon}_y^P}{2} \right)^2 + (\dot{\epsilon}_{xy}^P)^2 \right]^{1/2} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{v}{2\delta} (\sin \alpha + 1) \\ \frac{v}{2\delta} (\sin \alpha - 1) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

変形領域内単位長さあたりの内部エネルギー散逸速度  $D_A(\dot{\epsilon}^P)$  は以下ようになる。

$$D_A(\dot{\epsilon}^P) = (\sigma_1 \cdot \dot{\epsilon}^{P1} + \sigma_2 \cdot \dot{\epsilon}^{P2}) \cdot \delta$$

ひずみ速度と変位の関係式より以下の式を得る。



$v$ : 右側部分の左側部分に対する相対変位

$\alpha$ : 降伏線と変位との角度

図5 破壊メカニズムのモデル化

$$D_A = \frac{1}{2} v \sigma_1 (1 + \sin \alpha) + \frac{1}{2} v \sigma_2 (1 - \sin \alpha)$$

また、応力状態と主ひずみ速度から次式を得る。  
降伏線上で平面応力場を仮定し、平面応力の状態に

1) A B 上 ( $\alpha = 90^\circ$ )

$$D_A = \delta f_t \dot{\epsilon}^p = f_t v \quad \dots (2.2a)$$

2) 点 B ( $\alpha \geq \phi$ )

$$D_A = v \left( \frac{1 - \sin \alpha}{2} f_c + \frac{\sin \alpha - \sin \phi}{1 - \sin \phi} f_t \right) \quad \dots (2.2b)$$

3) 線 B C 上と点 C ( $\alpha < \phi$ )

$$D_A = v \left( \frac{1 - \sin \alpha}{2} f_c \right) \quad \dots (2.2c)$$

③ 鋼繊維の内力仕事  $W_{ISF}$  は、鋼繊維の引き抜けて決まるとする。

(解法 A の場合のみ本項を用いる。)

$$W_{ISF} = \sigma_{SF} h b v \sin \alpha \quad \dots (2.3)$$

$$\text{ただし } \sigma_{SF} = \frac{B_f l_f / A}{A_{SF}} \beta V_f$$

ここで  $l_f$  は鋼繊維の長さ [cm]、 $A_{SF}$  は鋼繊維の断面積 [cm<sup>2</sup>]、 $V_f$  は繊維混入率とする。

また  $\beta$  は鋼繊維の配向係数、 $B_f$  は鋼繊維の単位長さ当たりの付着強さ [kg/cm] で、以下のように設定される。

1) 配向係数  $\beta$  は 3 次元ランダム配向とする<sup>2)</sup>。

$$\beta = \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = 0.5$$

2) 付着強さ  $B_f$  は繊維の形状とマトリクス圧縮強度によって下式のように表される<sup>3)</sup>。

$$B_f = 0.35 \sqrt{f_c}$$

ここで  $f_c$  はコンクリートの圧縮強度 [kg/cm<sup>2</sup>] である。

(3) 外力仕事  $W_o$  は内力仕事  $W_I$  に等しいので、次の 4 つの場合について耐力を求める。

$$W_o = W_I \quad \dots (3)$$

以上の関係から、せん断耐力を次の 4 つの場合について求める。

①  $\alpha > \phi$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1 - \sin \alpha}{2(\cos \alpha - \tan \theta \sin \alpha)} + \frac{\sin \alpha - \sin \phi}{(1 - \sin \phi)(\cos \alpha - \tan \theta \sin \alpha)} \cdot \frac{f_t}{f_c} + \frac{\psi' \sin \alpha}{\cos \alpha - \tan \theta \sin \alpha}$$

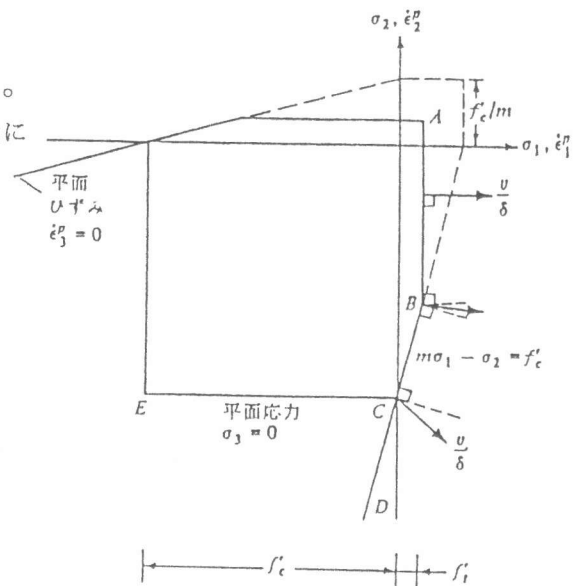


図6 平面応力状態での修正Mohr-Coulombの破壊基準

この式の最小値は

$$\frac{\tau}{f_c} = \left( \sqrt{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} + \frac{\tan\theta \sin\phi}{1-\sin\phi} \right) \cdot \left\{ 1 / \left( \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} - \frac{\tan\theta \sin\alpha}{1-\sin\alpha} \right) \right\}^2 \quad \dots(3.1)$$

$$\cdot \left( \frac{1-2\psi}{2} - \frac{f_t/f_c}{1-\sin\phi} + \frac{(f_t/f_c) + \psi'}{1-\sin\alpha} \right)$$

ただし

$$\sin\alpha = 1 - \frac{2(\psi' + f_t/f_c)(1-\sin\phi) + \tan^2\theta(1-\sin\phi - 2(f_t/f_c)\sin\phi) \pm \tan\theta\sqrt{\beta'}}{(1-\tan^2\theta)\{1-\sin\phi - 2(f_t/f_c)\sin\phi\}}$$

$$\beta' = (1 + \tan^2\theta)\{(1-\sin\phi) - 2(f_t/f_c)\sin\phi\}^2 - \{(2\psi' - 1)(1-\sin\phi) + 2(f_t/f_c)\}^2$$

②  $\alpha = \phi$

①  $\alpha > \phi$  の場合の(3.1)式で  $\alpha$  に  $\phi$  を代入すると

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1-\sin\phi}{2(\cos\phi - \tan\theta \sin\phi)} + \frac{\psi' \sin\phi}{\cos\phi - \tan\theta \sin\phi} \quad \dots(3.2)$$

③  $0 < \alpha < \phi$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{\cos\alpha - \tan\alpha \sin\alpha} \left( \psi' \sin\alpha + \frac{1-\sin\alpha}{2} \right)$$

この式の最小値は

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{4\psi'(1-\psi') + \tan^2\theta + (2\psi' - 1)\beta' \tan\theta}{\sqrt{4\psi'(1-\psi')(1-\tan^2\theta) + 2(2\psi'\beta' - \beta' + \tan\theta)\tan\theta - \tan\theta(1-2\psi' + \beta'\tan\theta)}} \quad \dots(3.3)$$

ただし

$$\sin\alpha = 1 - \frac{(\tan^2\theta + 2\psi') \pm \tan\theta \sqrt{\tan^2\theta - 4\psi'(1-\psi')}}{1 + \tan^2\theta}$$

$$\beta' = \pm \sqrt{\tan^2\theta + 4\psi'(1-\psi')}$$

④  $\alpha = 0$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \quad \dots(3.4)$$

ここで、

$$\tau = \frac{P}{hb} \quad \psi' = \frac{A_s f_y}{hb f_c} + \frac{\sigma_{SF}}{f_c}$$

なお、解法Bの場合  $\psi' = \frac{A_s f_y}{hb f_c}$  となり、 $f_c, f_t$  の代わりに  $f_{SFc}, f_{SFt}$  を代入する。

ただし、 $\tau$  : 破壊面でのせん断平均応力度、 $\psi'$  : 単位面積当たりの補強筋降伏強度と鋼繊維引き抜け強度の和のコンクリート圧縮強度との比を示す。

## 5. 計算値と実験値の比較

4. 解析で求めたせん断強度の解に、材料試験の結果の諸数値を代入した解析値と、3. 実験結果で得られた実験値との比較を、図7に示す。グラフは縦軸に $\tau / f_c$ 、横軸に補強筋の降伏強度とコンクリートの強度比 $\phi$ をとり、せん断強度の解析値曲線と実験結果の点をプロットした。縦横両軸ともに $f_c$ で割ることにより無次元化した。表3に解法Aと解法Bのそれぞれの解析値(精解)と実験値との比を表す。

$\theta = 0^\circ$ の試験体は、 $0^\circ$ -SF2.0-D13で実験値が若干高めにしているのを除けば、全試験体とも解法Aの鋼繊維の補強を「鉄筋コンクリートと鋼繊維」とした場合の方が適当である。 $\theta = 30^\circ$ の試験体も、 $30^\circ$ -SF2.0-D10が解法A、Bのどちらとも考えられる以外は、やはり解法Aの考え方の方が妥当であるといえる。また、 $\theta = 0^\circ$ の実験値の $\tau / f_c$ には有効係数として2/3を乗じた<sup>4)</sup>。なお、解析Aの試験体名 $0^\circ$ -SF2.0-D10でのコンクリート、鉄筋、鋼繊維の $\tau / f_c$ に占める割合は、各々77.50%、8.05%、14.44%である。

## 6. 結び

今回行った実験および解析結果から、鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の圧縮せん断抵抗を、鉄筋コンクリートと鋼繊維とした場合、すなわち鋼繊維を鉄筋と同様に一種の補強筋の要素とする方が、鋼繊維コンクリートと鉄筋と捉えるより、鋼繊維の補強効果の評価には適合していることが分かった。

## 参考文献

- 1) 永坂具也 望月重 榎谷栄次：鋼繊維とせん断補強筋との複合抵抗機構に基づく鋼繊維補強コンクリート柱のせん断耐力，日本建築学会論文報告集，1990，Vol. 410，pp. 53～61
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート，オーム社，1981
- 3) 坂井正美：鋼繊維の形状・材質が鋼繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす影響に関する研究，東京大学学位論文，1984
- 4) W. F. Chen: PLASTICITY IN REINFORCED CONCRETE, McGRAW-Hill, 1982

(謝辞) 本研究の鋼繊維は日本鋼管株式会社の提供によるものである。ここに厚く感謝致します。

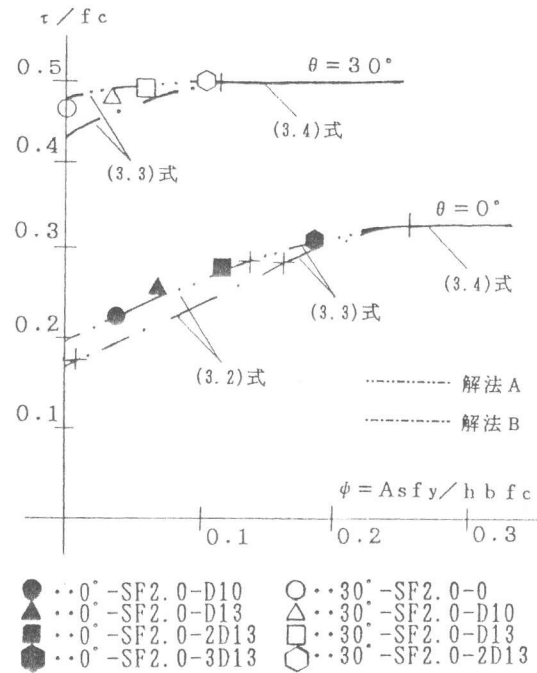


図7  $\tau / f_c - \phi$  曲線

表3 実験値と解析値の比較

試験体名	$\tau / f_c$		$\tau / f_c$		$\tau / f_c$	
	(実験値)	解析値(A)	実験値	解析値(B)	実験値	解析値(B)
$0^\circ$ -SF2.0-D10	0.215	0.215	1.00	0.182	1.18	
$0^\circ$ -SF2.0-D13	0.256	0.231	1.10	0.197	1.30	
$0^\circ$ -SF2.0-2D13	0.272	0.263	1.03	0.223	1.22	
$0^\circ$ -SF2.0-3D13	0.304	0.295	1.03	0.252	1.21	
$30^\circ$ -SF2.0-0	0.461	0.472	0.98	0.433	1.07	
$30^\circ$ -SF2.0-D10	0.469	0.483	0.97	0.451	1.04	
$30^\circ$ -SF2.0-D13	0.483	0.490	0.99	0.465	1.04	
$30^\circ$ -SF2.0-2D13	0.498	0.498	1.00	0.485	1.03	

解析値(A): 鋼繊維補強鉄筋コンクリートを鉄筋コンクリートと鋼繊維と考えた場合  
 解析値(B): 鋼繊維補強鉄筋コンクリートを鋼繊維コンクリートと鉄筋と考えた場合