

東京理工専門学校 〇正員 趙 力 采
東大生産技術研究所 正員 小 林 一 輔

1. はしごき

従来より、鋼繊維補強コンクリートの強化則に関しては、繊維間隔説と混合則に基くものの2つの考え方があ
る。筆者らは既に鋼繊維補強モルタルの引張強度（又はひびわれ開始応力度）と繊維間隔の平方根の逆数との間
に線形関係が成立することを確かめ、繊維間隔説の妥当性を示した。一方、鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度
を混合則を適用して推定しようとする試みもあるが、鋼繊維補強コンクリートの場合比較的複合体のひずみ
小さい段階でひびわれを生じて、繊維とマトリックスにおける弾性ひずみが等しいという混合則の適用条件が失
われることから適用に無理があると思われる。本文は鋼繊維補強コンクリートの引張強度及び曲げ強度に及ぼす
繊維の直径、長さ、アスペクト比、繊維混入率ならびに水セメント比の影響を検討し、これらの結果に基づき鋼
繊維補強コンクリートの引張強度及び曲げ強度の推定式を提案したものである。

2. 実験の概要

コンクリートの配合は5/aを一定(60%)とし、粗骨材の最大寸法は
5×5×35mm曲げ供試体の場合の7mmを除き、全て10mmとした。引
張試験は中央部断面が10×6cm長さ4mの平行部を持つ供試体を用
い、曲げ試験は三等分実載荷方法(スパン30cm)により実施した。

3. 実験結果

(1) 繊維の長さのアスペクト比の影響

図1～2はそれぞれ繊維混入率($P=2\%$)と繊維の直径を一定とし、
広範に長さの異なる(即ちアスペクト比の異なる)繊維を用いた場
合の引張強度と曲げ強度の変化を示したものである。これらの図より
明らかなことは、繊維の直径が一定の場合、1)引張強度に及ぼす纖
維の長さ又はアスペクト比の影響は比較的小さい、2)曲げ強度はそ
れらが大きくなるに従って著しく増大することである。

(2) 繊維の直径の影響

引張強度に及ぼす繊維の直径の影響は図1から明かなように
アスペクト比が一定($L/d=60$)の場合、繊維の直径が小さくなるに
従って強度が増大することがわかる。一方、図3はアスペクト比が
一定($L/d=30$)で直径の異なる繊維を用いた場合の繊維混入率と曲
げ強度の関係を示したものである。図より、明かなように曲げ強
度もアスペクト比が一定の場合、繊維の直径が細いものを用いた方
が補強効果が大きいことがわかる。

(3) コンクリートマトリックスの強度の影響

図4は水セメント比を広範に変化させたコンクリート中にせん断
ファイバーをそれぞれ1%、2%、2.5%混入した場合の引張強度と
繊維間隔(S)の平方根の逆数($1/\sqrt{S}$)との関係を示したものである。
この図から、鋼繊維補強コンクリートの引張強度に関しては、マト
リックス自体の強度と鋼繊維による補強分に分けて考えることがで

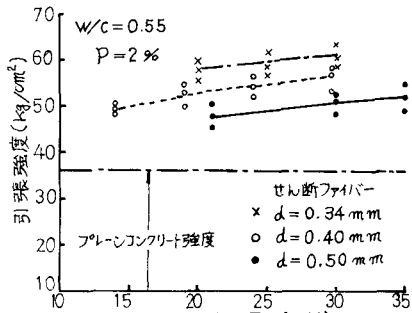


図1. 引張強度に及ぼす繊維の長さの影響

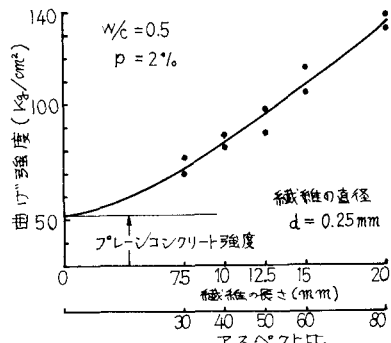


図2. 曲げ強度に及ぼす繊維の長さの影響

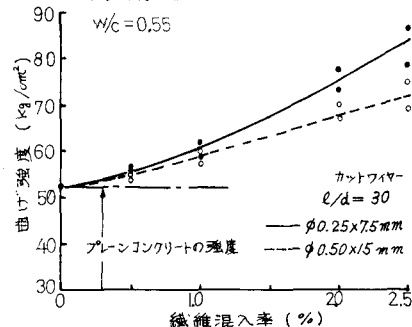


図3. 曲げ強度に及ぼす繊維の直径の影響

き、前者は後者に対して加算的に寄与していることが明らかである。一方、図4は同様にコンクリートにカットワイヤーをそれぞれ0.5～2%混入した場合の曲げ強度と繊維混入率ならびに水セメント比との関係を示したものである。図より曲げ強度において上記の関係が成立することが明らかである。

4. 考察

以上の結果より、鋼繊維補強コンクリートの引張強度が直径が一定の場合、繊維の長さやアスペクト比にはほとんど関係なく、繊維の直径と繊維混入率に影響されること、即ち繊維間隔の平方根の逆数と線形関係が成立するという事実は繊維間隔説の妥当性を示すものである。一方、曲げ強度は繊維の長さやアスペクト比とともに増大するばかりでなく、同一繊維混入率で同一アスペクト比であっても繊維の直径が細いものを用いると強度が増加する。このことは鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度が鋼繊維の混入率のみならず、任意断面における繊維本数すなわち繊維間隔によって左右されることを示すものであって、単に構成素材の容積比のみをパラメーターとする混合則の適用が困難であることを示唆するものである。また鋼繊維補強コンクリートの引張及び曲げ強度に及ぼすマトリックス強度の寄与が鋼繊維による補強分に対して加算的になるという事実も上記の結論を裏付けるものである。

5. 鋼繊維補強コンクリートの強度推定式

(1) 鋼繊維補強コンクリートの引張強度の推定式は以下のように示されろ。

$$\sigma_t = \sigma_m + K(1/\sqrt{S} - 1)$$

σ_m, σ_t : 夫々フレン及び鋼繊維補強コンクリート(又はモルタル)の引張強度(kg/cm²)

K : コンクリートの場合、せん断ファイバーとカットワイヤーに対し、夫々 26 と 19

S : 引張断面における繊維間の平均間隔(cm)で、次式を用いる。

$$S = 5\sqrt{\frac{V_f}{\rho}} \cdot \frac{d}{\sqrt{P}} \left\{ \begin{array}{l} \beta: \text{鋼繊維の配向係数、アスペクト比を考慮して、}\beta = 0.002(2/d) + 0.4 \\ d, P: \text{それぞれ、鋼繊維の直径(cm)と容積百分率(\%)} \end{array} \right.$$

(2) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始時及び最大荷重時のフレンコンクリートに対する荷重の増分は中立軸より下の間隔 S で幾何目状に配置された全繊維によってのみ与えられると仮定した場合;

ひびわれ時の荷重の増分(ΔP_0)と最大荷重時の荷重の増分(ΔP)は、

$$\Delta P_0 = P_0 - P_{m0} = \frac{b}{2l} \cdot \tau_a \cdot A \left(\frac{d}{2S} + 1 \right) \left(\frac{d}{S} + 1 \right)$$

$$\Delta P = P - P_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{b}{l} \cdot \tau_a \cdot A \cdot \frac{\pi d}{S} \left(\frac{\pi d}{S} + 1 \right)$$

P_{m0} と P_0 : フレン及び鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重(kg)

P_m と P : フレン及び鋼繊維補強コンクリートの最大荷重(kg)

b, d と l : 夫々はり供試体の幅、高さ及び三等分点載荷方法のスパン(cm)

A, τ_a : 夫々、鋼繊維の表面積と鋼繊維のマトリックスとの付着強度(せん断ファイバーは $\tau_a = 30 \text{ kg/cm}^2$, カットワイヤーは $\tau_a = 25 \text{ kg/cm}^2$)

π : 最大荷重時における中立軸のより高さに対する比で、実験式 $\pi = 0.016P^2 + 0.5$ より求める。但し P は繊維混入率(%)

一方、図6～7はそれぞれ鋼繊維の種類と供試体の断面寸法の異なる鋼繊維補強コンクリート梁の曲げ荷重と繊維混入率との関係を示したものであり、図より推定値と実験値とがよく一致することが確かめられた。

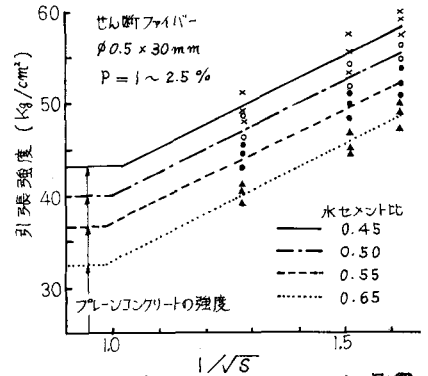


図4. 引張強度に及ぼすマトリックス強度の影響

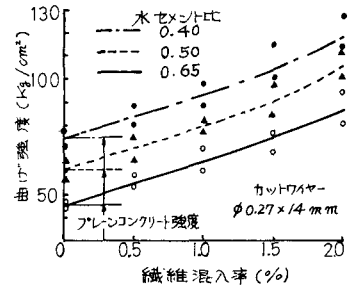


図5. 曲げ強度に及ぼすマトリックス強度の影響

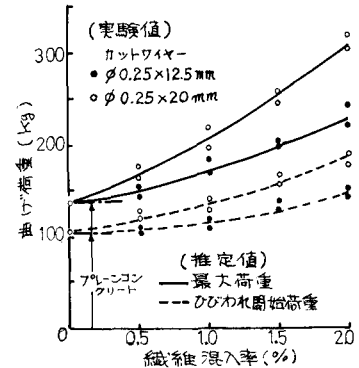


図6. 実験値と推定値の比較 (5×5×35cm供試体)

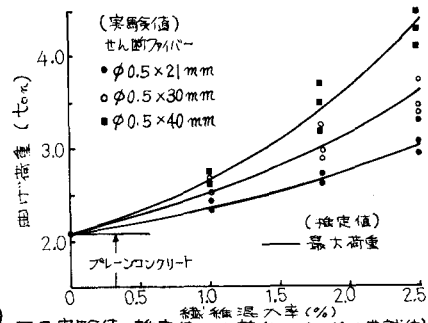


図7. 実験値と推定値の比較 (10×10×40cm供試体)