

鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験について

室蘭工業大学 正員 ○ 尾崎 誠
 ≡ ≡ 志村政雄
 ≡ ≡ 昆野 茂

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは、鉄鋼各社が鋼繊維の生産に参加し、試験段階から実施工の時期に入り、今後ますます利用の増大が予想される。鋼繊維によってひびわれを拘束し、コンクリートの引張強度を改善しようというが、鋼繊維コンクリートを開発した当初からの主たる目標で、かなりの研究がなされてきた。しかし、研究の多くはモルタルに関するもので、コンクリートを基材とした引張強度に関する研究は少なく、特に最大寸法150mm以上の粗骨材を用いた資料は少ないので、土木構造物に広く用いられているようなコンクリートの引張性状改善のために鋼繊維を利用するには、さらなる研究が必要である。一方、円柱状供試体による割裂試験法が鋼繊維コンクリートの引張強度試験として適当でなことは早くから指摘されているが、これによる研究が多く、鋼繊維補強コンクリートに適した引張強度試験法が望まれる。幾つかの研究例に見受けられる一軸引張試験法も、粗骨材の大きさや鋼繊維の長さを考慮しても十分な断面寸法の供試体を試験できるようにする必要がある。

本研究は、これらの実を考慮して試作した一軸引張試験装置の性能を確認し、これを用いて実験した鋼繊維コンクリートの試験結果を検討するもので、特に供試体断面における鋼繊維の濃度分布の測定結果も併用している。なお、前年度発表した鋼繊維コンクリートについての内容のうち、¹⁾引張強度に関して結論を得なかったので、これを補足するものでもある。

2. 一軸引張強度試験法

コンクリートの一軸引張強度試験は、荷重が偏心しがちで、試験値の変動が大きく、試験が面倒なので規格試験にはないが、供試体を定着する装置に工夫をこらした幾種かの試験法がある。これらの多くは、供試体の試験部の断面を定着部の断面より小さくするために鋼繊維コンクリートには不向きで、できるだけ一定断面に近いものがよい。

著者が試作した装置は、Johnstonの研究²⁾を参照したもので、またつによる定着を原理とする写真-1に示すような試験装置であり、100×100×50mmの角柱状供試体の単純引張試験である。この場合の寸法では、供試体が滑らずに試験できるためには、コンクリート供試体と装置の接触面の摩擦係数が0.29以上あればよい。

性能試験は、比較のためにおこなう割裂引張強度試験が鋼繊維コンクリートでは問題なので、鋼繊維を含まないコンクリートについて実施した。ただし、実験に用いたコンクリートの配合の種類は、後述する12種類の鋼繊維コンクリートにおけるコンクリートの配合と同じものを用いた。(表-1、参照)

一軸引張試験用供試体型枠は曲げ試験用供試体型枠と同様に水平に置いてコンクリートを打設し、これと同時に割裂引張試験用供試体を製作し、標準養生をおこなひ、材齢28日で試験した。

12種の配合のコンクリートについて、それぞれ3本の供試体の平

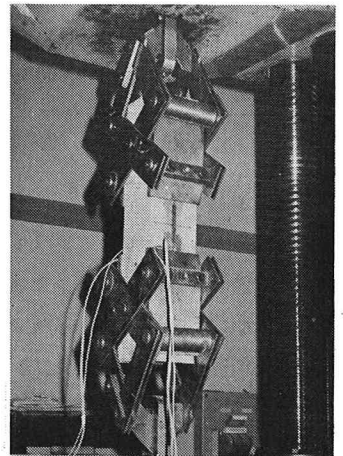


写真-1.

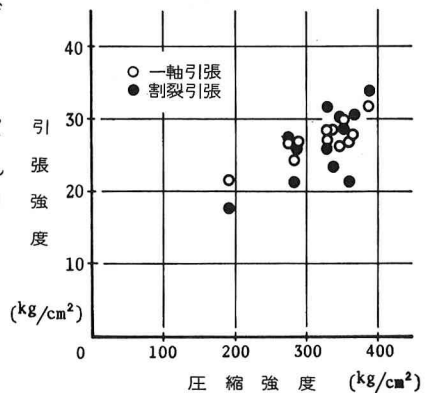


図-1.

均値として得られた一軸引張強度と割裂引張強度を、圧縮強度と比較して図-1. に示す。ただし、この場合の圧縮強度は、一軸引張試験後に、定着部を長さ約20cmの角柱に切り出して試験した角柱の圧縮強度である。

規格試験法である割裂引張強度よりも一軸引張強度の方が圧縮強度との比においてばらつきが小さいことは図-1. からわかるが、バツク内変動を標準偏差の推定値から求めた変動係数を表わすと、割裂試験では8.5%の変動を示したのに対し、一軸引張試験では4.4%と約半減しており、割裂試験よりもよい性能を確認できた。なお、割裂試験と一軸引張試験による引張強度の関係を図-2. に示すと、引張強度が小さいほうは一軸引張試験の結果が割裂試験の結果より大きいが、強度が大きい場合には逆に小さい値を示す傾向がある。

3. 実験に用いた鋼繊維コンクリート

本研究では、鋼繊維コンクリートの引張強度を支配する鋼繊維の影響を調べることを目的とするが、マトリックスとしてコンクリートは一律類に固定せず、表-1. に示すようなかなり広い範囲の性格のものになっている。すなわち、セメント比 W/C (%)、単位セメント量 C (kg)、細骨材率 S/A (%)を因子とするほか、混和剤もセメント量に対する重量比 A/C (%)としてとり入れたコンクリートは、鋼繊維を割裂セメント量に対する重量比 F/C (%)で加之配合している。このような5因子・4水準のものを直交表 $L_{16}(2^5)$ を利用しており、実験をおこなった。

コンクリートに用いた材料は、セメントが比重3.14の普通ポルトランドセメント、細骨材は比重2.75、粗粒率2.81の海砂、粗骨材は比重2.61、最大寸法15mmの川砂利のほか、混和剤として減砂剤Aを減水剤を使用している。今回用いた鋼繊維は約 0.3×0.3 mmの変形断面を有する薄板切斷タイプのもので、長さ $l=30$ mm、換算直径 $d=0.46$ mm(断面積 0.163 mm²)、アスペクト比 $l/d=66$ のものである。

練り混ぜは可傾式ミキサを使用し、40lのコンクリートを3分間練り混ぜた後、鋼繊維を投入し、さらに3分間練り混ぜている。

供試体は引張強度試験と曲げ強度試験のための $10 \times 10 \times 50$ cm角柱(梁)供試体6本および圧縮強度試験のための $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体3本を同時に製作し、標準養生をおこない、材令28日で試験をした。

4. 強度試験

引張強度は前述の一軸引張試験装置を万能強度試験機にとりつけ、これに供試体をはさんで定着し、単純に引張り、切斷面の面積 10×10 cm²を破壊時荷重を除去して求める。圧縮強度試験は規格試験の通りであるが、曲げ強度試験は規格とは異なりスパン45cmの中央1点荷重とした。このような一軸引張試験による鋼繊維コンクリートの引張強度と圧縮強度との関係を図-3. に、曲げ強度との関係を図-4. に示す。

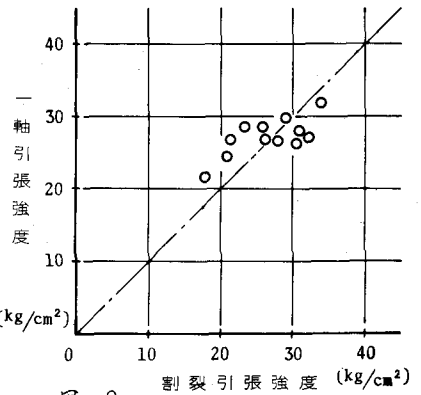


図-2

表-1.

因子	水準	1	2	3	4
W/C (%)		47	50	53	56
C (kg)		280	300	320	340
S/A (%)		40	50	60	70
A/C (%)		0	0.005	0.010	0.015
F/C (%)		0	15	30	45

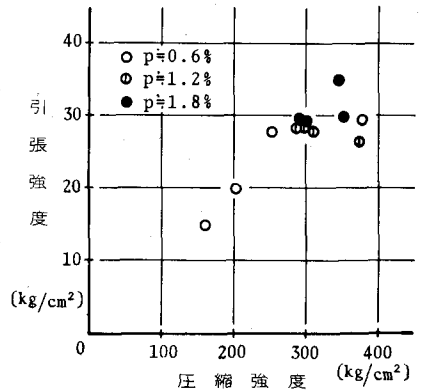


図-3.

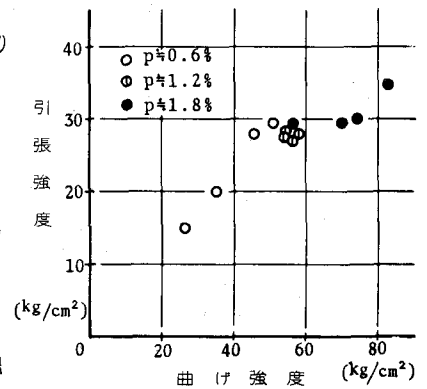


図-4.

図-3.によれば、圧縮強度が大きいわりには引張強度が大きくなり
ない。その裏は、ワカビリチーに問題があるようである。もしこれを除
くと、鋼繊維コンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10と見ることが
できる。また、図-4.によれば、大量(1.8%位)の鋼繊維を入れた
場合、曲げ強度は増大するが引張強度はやや落ち込み、引張強度は曲
げ強度の50%以上という関係が持続できなくなる。

とこのこと、このような引張強度について、鋼繊維量(この場合は%)
のそれぞれの水準で期待される実現値を求め、これを鋼繊維が入つて
いない場合の値を基準として表わすと図-5.の引張強度増加比
が得られる。ただし、この図では鋼繊維量を鋼繊維コンクリートに
対する容積比で表わし、鋼繊維率 p (%)として近似した値をプロットし
ている。この図から想像できることは、鋼繊維は少なくとも $p=0.5\%$
以上混入しなくては効果がないこと、鋼繊維の増加の割合には引張強
度が増加しないこと、などがわかる。

5. 供試体切断面における鋼繊維濃度

強度試験に供した角柱供試体の中央部を2分切で切断し、厚さ10mm
の立本体をとり出し、切断面の鋼繊維本数を調べた。この場合、切
断面を縦横それぞれ4等分し、16のブロックに分けて各ブロックの
鋼繊維本数を求め、単位面積(cm²)当たりの本数を鋼繊維濃度とした。
これから両面における値を1種類の配合につき3個の供試体で平均し
た値を図-6.7.8.に示す。

図-6.により、中心部および側面部の鋼繊維濃度はおおむね全体を
代表するよう平均的濃度と見えるが、鋼繊維量が多くなるにつれて
中央部がやや多くなる傾向を示す。この中心部を基準にして上下面
部と比較すれば、いずれも鋼繊維量が多くなると大きくはらつき、總
体的には下面部は中心部と殆んど変わらないが、上面部は本なり鋼繊維
濃度が少なくなる。(図-7.) 図は省略するが上下隅角部もほぼ
上下面部と同じくらいはらつき、鋼繊維量が多い場合、さらに鋼繊維濃
度が少なくなる。

なお、このような鋼繊維濃度に関して鋼繊維率 p (%)との関係を図
示すれば、図-8.のようになる。これはよれば、 p (%)が大きくな
るにつれて鋼繊維濃度 n (#/cm²)が直線変化以上に増える傾向にあ
るが、切断面に直角に鋼繊維がまろえられた1次元配向の場合に有効
係数 $\beta=1$ とすれば、本実験では $\beta=0.53$ の直線上に並ぶ。
図中の $\beta=1$ の真線は： $n = p/f$ (f は鋼繊維1本の断面積)
から求まるもの。ランダムに鋼繊維が入っている場合： $n = \beta p/f$
で表わされる β が問題となる。

良く知られている Romualdi の成果³⁾では $\beta=0.41$ であるが、こ
れより本なり大きな値に示すことが確かめられた。 $\beta=0.6$ を採
用する Krenchel⁴⁾の計算法により妥当なようである。

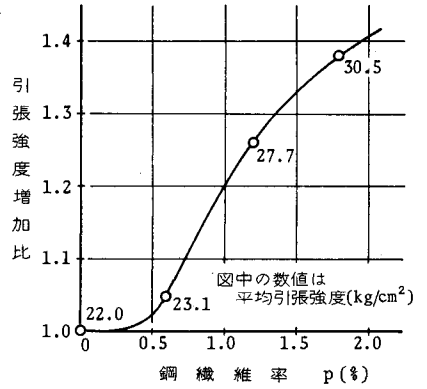


図-5

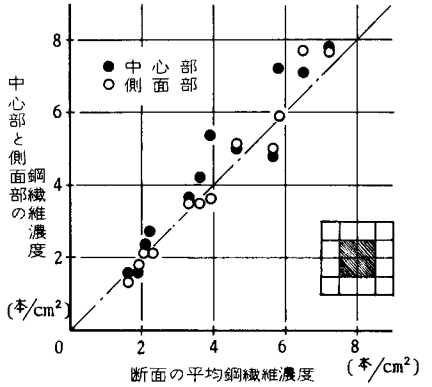


図-6

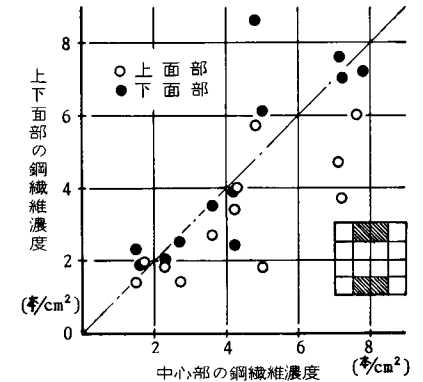


図-7

6. 鋼繊維間隔による引張強度の検討

さきに図-5に示した引張強度増加比は、鋼繊維間隔を支配する変数 d/\sqrt{P} の平方根の逆数で表わすと、図-9のようにプロットされ、次式のような直線で近似できる。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} = 1 + 0.78 \left(\sqrt{\frac{d}{P}} - 1.24 \right) \quad \text{----- (1)}$$

一方、鋼繊維間隔については、その配列の仕方を変換することによって変ってくるが、鋼繊維が格子状に配置（四角形分布）すると仮定すれば、鋼繊維間隔 S は、 $S = 1/\sqrt{n}$ ----- (2) で表わされる。こゝの n はさきに求めた鋼繊維濃度である。

前述の有効係数 β を用いて表わすと、 $n = \beta P / f$ なるゆゑ、

$$S = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \sqrt{\frac{f}{P}} = \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{\beta} \sqrt{P}} \cdot \frac{d}{\sqrt{P}} \quad \text{----- (3)}$$

さきに得られた $\beta = 0.53$ を用いれば、

$$S = 1.22 \frac{d}{\sqrt{P}} \quad \text{----- (4)}$$

これを(1)式に代入すれば、図-9の直線は次式で表わせる。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} = 1 + 0.86 \left(\frac{1}{\sqrt{S}} - 1.12 \right) \quad \text{----- (5)}$$

これらの結果から、本実験では最小限 $P > 0.48\%$ となるような鋼繊維を投入、鋼繊維間隔は $S < 0.8 \text{ cm}$ としなれば、鋼繊維コンクリートとして引張強度の改善が全然なされないことがわかる。

7. おわりに

鋼繊維コンクリートの引張性状を研究するために試作した一軸引張試験装置は、期待した性能を示した。一般のコンクリートにも十分使えるように、特に割製試験に比べて容易にひずみを直接求める利便もある。

供試体切断面の鋼繊維本数を測定して求めた鋼繊維の有効係数は $\beta = 0.53$ と得られ、一般に知られている 0.41 あるいは 0.5 よりも大きい。また、この有効係数は鋼繊維量に関係なく一定といわれれているが、本実験の結果では鋼繊維量が大きくなる場合にも大きくなる傾向を示した。

鋼繊維コンクリートの引張強度は鋼繊維量に比例するといわれれているが、本実験の結果では比例せず、 \sqrt{P}/d に比例する。これは鋼繊維間隔の平方根に反比例するこゝも意味する。

なお、引張強度の場合も曲げ強度の場合と同様、アスファルトも同時に考慮した直線関係が得られることを予想しているが、今回の実験では鋼繊維も1種類しか用いていないので、この点は確認できなかった。

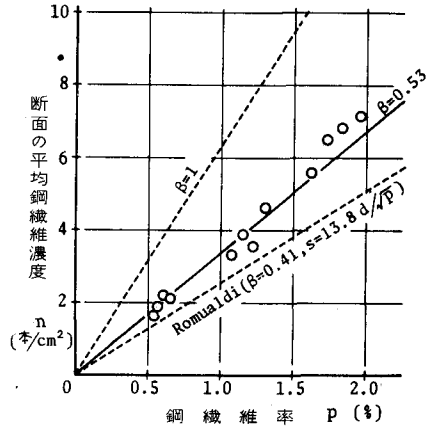


図-8

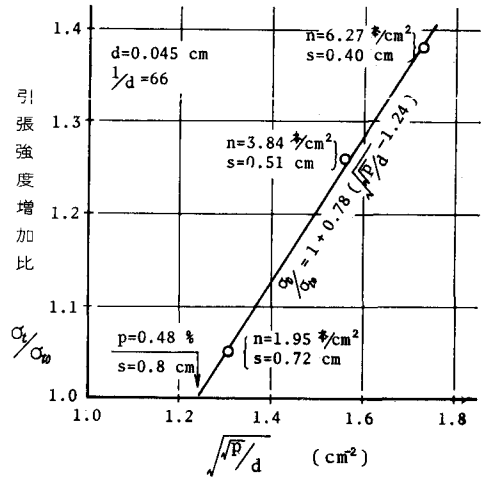


図-9

参考文献

- 1) 尾崎, 杉本, 丸村, 扇茂; 鋼繊維コンクリートについて, 土木学会北海道支部論文報告集, 33号, 昭和45年2月.
- 2) Johnston, C.D. and E.H. Sidwell; Testing Concrete in Tension and in Compression, Magazine of Concrete Research, V. 20, No. 65, Dec. 1968.
- 3) Romaldi, J.P. and J.A. Mandel; Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement, ACI, June 1964.
- 4) Krenchel H.; Fibre Spacing and Specific Fibre Surface, RIREM Symposium, 1975.