

鋼繊維コンクリートについて

室蘭工業大学 正員 尾崎 誠
 〃 〃 杉本博之
 〃 〃 志村政雄
 〃 〃 扇芝哲夫

1. はじめに

針布線をはさみで切断して鋼繊維をつくり、実験を始めた時代も過ぎ、鉄鋼メーカーによって開発された鋼繊維が市販されるに至り、鋼繊維(スチールファイバー)コンクリートは実用化の段階に入った。しかし、鋼繊維コンクリートの性質を支配する鋼繊維量とアスペクト比やマトリックスとしてのコンクリートの取扱りなど、アスペクト比の定義も含めて、まだはっきりしていない点が多い。このような鋼繊維コンクリートについてワーカビリティ、静的強度、疲労強度、膨張収縮との複合など、これまでに得られた結果を報告したい。

2. 鋼繊維について

実験に用いた鋼繊維は、表-1、および写真-1、に示すようなA、B、C、Dの4種である。A、Bは、市販品がない時代、針布線と称する鋼針金を購入し、表中に示したように20、25、30mmの3種の長さで切断して使用したもので、Aは曲線繊維(Crimped cut wire)、Bは直線繊維(Straight cut wire)である。C、Dは市販品で共に薄板を切断加工した繊維(Sliced sheet)で、両者共付着を高める工夫をし、Cは長手方向に凹凸の異形を施し、Dは切断の仕方を工夫して表面積を大きくしている。

表中に示したアスペクト比は、異形断面を円形断面に換算し、その直径 d で換算長さ l を除いたものと定義し、曲線繊維では真直ぐに伸ばした場合の長さ l としている。

本実験では使用していないが、著者の一人が在外研究から持ち帰った鋼繊維の中に目新しいものがあるので、写真-2で紹介する。Eは溶鋼から直接鋼繊維を回転汲取装置で射出するもので、溶鋼抽出(Melt extract)繊維と呼ぶことができ、価格的にも有望なコンクリートとの付着の良い鋼繊維であるが、かなり脆い点を改良する必要がある。Fは付着を改善する目的で繊維端部を釘頭状に加工したもので、端部拡大(Enlarged end)繊維と名付けられ、ケミカルプレストレスングの効果が期待できそうである。Gは繊維を折曲げて

フックの役目をさせ、さらに“糊”で鋼繊維同士を接着させたもので、ミキサーへの投入時のアスペクト比を小さくすることができ、混合中に“糊”が溶けてばらばらになり、アスペクト比が大きくなるので、変化するアスペクト比(Variable aspect ratio)繊維といった特徴を有する。

表-1 実験に用いた鋼繊維の諸元

記号	公称長さ (mm)	換算長さ l (mm)	換算直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	備考
△ A20	20	20.8	0.3	70	折曲線鋼線切断 $\phi 0.3$ mm, 断面積 0.071 mm ²
▲ A25	25	26.0		87	
▲ A30	30	31.2		104	
○ B20	20	20	0.3	67	直線鋼線切断 $\phi 0.3$ mm, 断面積 0.071 mm ²
● B25	25	25		83	
● B30	30	30		100	
□ C25	25	25	0.39	64	異形押板薄板切断 0.21×0.60 mm, 0.121 mm ²
■ D30	30	30	0.46	66	変形断面薄板切断 0.3×0.3 mm, 0.163 mm ²

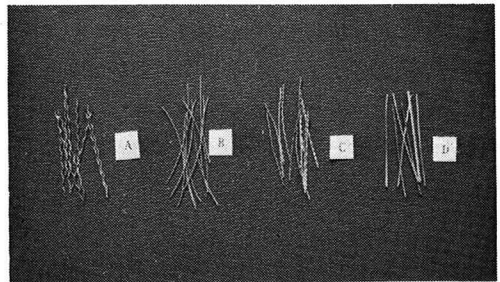


写真-1 実験に用いた鋼繊維

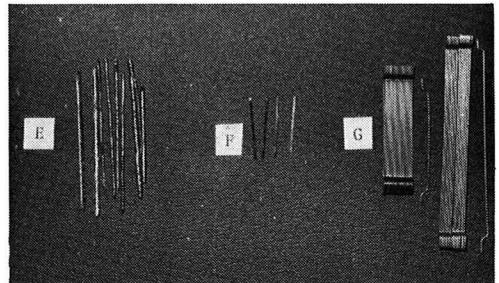


写真-2 興味ある外口の鋼繊維

3. マトリックスとしてのコンクリート

鋼繊維コンクリートにおけるマトリックスとしてのコンクリートの影響を明らかにする必要があるが、これとは独立に、鋼繊維の効果を明らかにするために、コンクリートの品質を固定した実験を先行させている。この場合、ワーカビリティーを固定したものを基準とすべきか、あるいはコンクリートの配合を固定したものを基準とすべきかは議論のあるところであるが、本実験では簡便のため、後者によって実施してきた。また、鋼繊維コンクリートでは、最大寸法の大きな粗骨材の使用を避けてきたが、本実験では主として最大寸法20mmの粗骨材を使用している。

コンクリートに使用した材料について記すと、セメントは比重3.16の普通ポルトランドセメント、粗骨材は比重2.68で最大寸法20mm、および比重2.67で最大寸法15mmの川砂利、細骨材は海砂で比重2.70、粗粒率2.00の細砂、比重2.73で粗粒率2.69の中砂、比重2.71で粗粒率3.15の粗砂を使用した。

コンクリートの配合は、先に述べた鋼繊維の種類A、B、C、Dに対し、表-2のような配合のものを基準とし、これに鋼繊維を加えている。

表-2. コンクリートの配合

練り混ぜは可傾式ミキサーを用いてい

るが、配合Bでは手練りを採用した。供試体製作には振動棒を用い締め固めをおこない、フリージング終了後に表面成形したものを翌日脱型して20°Cの恒温水槽で養生し、投令28日で試験をしている。

配合記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	砂のF.M.	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)			
							W	C	S	G
A	20	2.00	15	1.7	55	56	175	317	1074	836
B	20	3.15	15	1.9	55	57	175	317	1112	833
C, D	15	2.69	17	2.0	55	53	181	329	1006	872

4. 鋼繊維混入によるスランプの低下

鋼繊維コンクリートにおける難点はワーカビリティーの悪化である。これを表現するには、スランプの低下値とした方が理解し易いが、基準コンクリートのスランプ値や配合によつて低下値が異なるので、ここでは、スランプ比を用いる。スランプ比は基準コンクリートのスランプ値に対する鋼繊維コンクリートのスランプ値と定義する。本実験の結果を示すと図-1のようになり、鋼繊維量とアスペクト比による影響が顕著であつて、 $l/d = 70$ 以上のアスペクト比では、鋼繊維量の増加により急激にスランプが低下する。これらの関係

を一般的に表現するものとして、鋼繊維間隔¹⁾を考慮することができる。いま、その逆数をとれば、鋼繊維量を含む $\sqrt{P}/d$ とあけるので、アスペクト比との積で表わすと、図-2のような直線で近似させることができる。

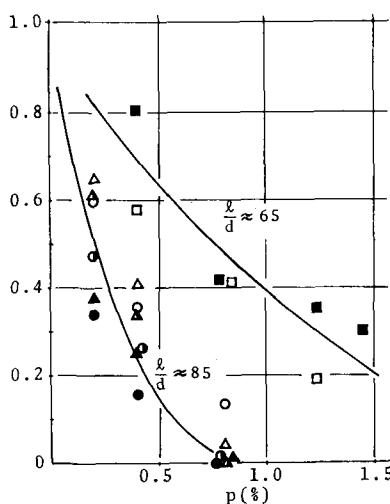


図-1 鋼繊維混入率とスランプ低下

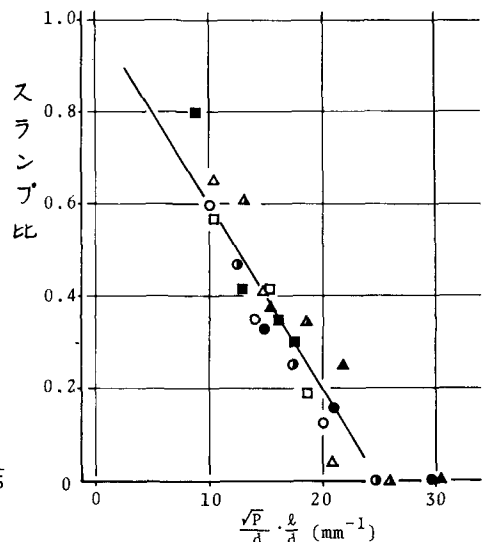


図-2 鋼繊維間隔とアスペクト比によるスランプ低下

5. 鋼繊維混入による引張強度の増大

鋼繊維コンクリートにおける主な関心事は、コンクリートの引張強度の改善であり、鋼繊維によるひびわれ拘束である。コンクリートの引張強度試験方法は、円柱供試体による割裂試験法が規格になっているが、鋼繊維コンクリートの引張強度試験には不適当と思われる。本学では一軸引張試験のための引張装置²⁾を試作し、目下これを用いた実験を実施中であるが、ここでは $\phi 10 \times 200\text{cm}$ の円柱供試体を用いた規格試験による結果を示す。図-3はA, B, C, D4種の鋼繊維に関する引張強度の結果である。一応、アスペクト比による影響を示してあり、鋼繊維量との積³⁾として表現できないこともないが、資料のばらつきが大きいので、一軸引張試験の結果を待つて結論を下したい。

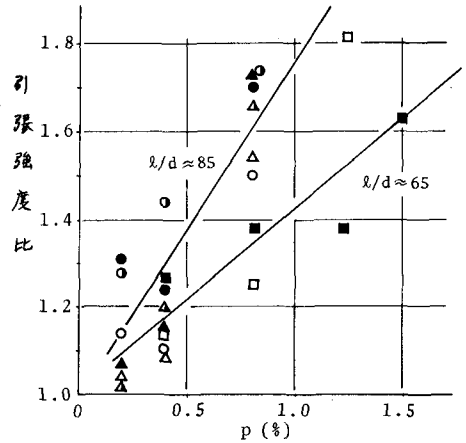


図-3 引張強度の増加倍率

6. 鋼繊維混入による曲げ強度の増大

鋼繊維コンクリートの応用例の考へは、道路や空港の舗装に見られる。これらのものでは、ひびわれ拘束による目地間隔の増大や耐久性の改善などを同時に期待しているが、増大する曲げ強度を直接の用途としている。本実験で得られた結果は、断面が $7 \times 15\text{cm}$ で長さ 50cm のはり供試体による支間 45cm の中央載荷試験によるもので、図-4のようになる。これも、アスペクト比によって大きく影響され、ばらつきも大きい。さらにスラングの項目で採用したような、鋼繊維間隔とアスペクト比との関数という考え方による $(\sqrt{F}/d)(l/d)$ を用いれば、図-5のようになり、かなり一般的関係が得られる。

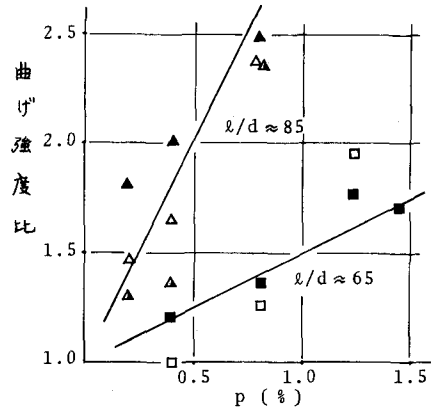


図-4 曲げ強さの増加倍率

7. 鋼繊維コンクリートの圧縮強度

鋼繊維コンクリートにおいて、圧縮強度の増大は、余り大きくはないが、変形能力の増大による靱性の向上は、鉄筋コンクリートやスレストレストコンクリートに利用した場合、限界状態設計法における強度の増大を期待できる。円柱供試体の圧縮試験による応力-ひずみ曲線の例を図-6に示す。圧縮強度の増加倍率は $1.0 \sim 1.5$ の範囲に、圧縮ひずみの増加倍率は $1.0 \sim 1.7$ の範囲に広く分布するが、コンクリートの品質の影響を大きく受ける。

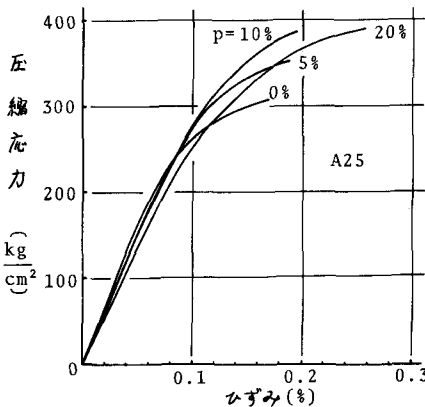


図-6 圧縮応力-ひずみ曲線

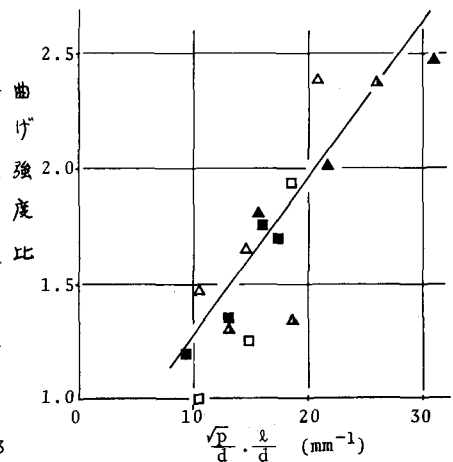


図-5 曲げ強度倍率の一般化

特に空隙の大きさと量による影響が強りようなので、今後この方面からの研究を続けて行きたい。

8. 鋼繊維コンクリートの圧縮疲労強度

鋼繊維コンクリートの疲労強度は、鋼繊維によるコンクリートのひき割れ拘束の観点から向上が期待され、特に曲げ疲労試験では、初き裂発生時の曲げ強度の74%、片振載荷の場合は83%といった値が発表されている⁴⁾。コンクリートの圧縮疲労強度は一般に55%程度と云われているが、鋼繊維コンクリートのそれを確認すべく、つぎのような圧縮疲労試験を実施した。鋼繊維の種類および配合は之きに述べたBのみに限定し鋼繊維の長さとは20, 25, 30 mmの3種、鋼繊維量は5

, 10, 20%の3種、合計9種類の鋼繊維コンクリートのみについて実験を行った。各種類ごとに用意した供試体は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体16本でこの内、6本は静的強度の測定に、残りの10本は疲労強度の測定に用いた。繰返載荷重の大きさは、供試体を固定するのに必要な下限応力として 13 kg/cm^2 の一定値を採用し、上限応力は静的圧縮強度に対する $0.6 \sim 0.90$ の範囲の応力比を 0.05 きざみりの大きさで採用させた。繰返し荷重速度は 10 Hz で、繰返し回数は200万回までとした。求めた $S-N$ 線図の1例を図-7に示す。図中の実線は同帰線を示し、一実鎖線は95%信頼限界を示している。

これら9枚の $S-N$ 線図の $N=200$ 万回における95%信頼限界の下限をプロットしたものが図-8である。これらの値を実線で近似し、鋼繊維量との傾向を説明すると、 $P=0.4\%$ 以上の鋼繊維混入により圧縮疲労強度に関する鋼繊維の効果が表われ、疲労強度は応力比で65%位であることが解る。また、同じ鋼繊維量では $B25 \text{ mm}$ 、すなわちアスペクト比67のものが最も優れている。さらに横軸に鋼繊維率(%)とアスペクト比との積 $P(l/d)$ をとって表わすならば図-8にプロットした点は、 $P(l/d)=60$ 附近にピークをもつ曲線上に並び、 $P(l/d)=30 \sim 70$ あたりが適当な範囲のように思われる。しかし、この疲労試験ではB種の鋼繊維のみしか用いていないためこの結果だけでは、アスペクト比と云つては鋼繊維の長さ l だけしか反映していないのでこゝには図を省略し結論とはしない。

なお、図中の一実鎖線は、9種の $S-N$ 曲線における同帰曲線の200万回疲労強度の点とプロットした場合の値の傾向を示す。

表-3 疲労強度/静的強度(%)
および応力比 (下限応力 13 kg/cm^2)

繊維量 $P(\%)$	繊維の長さ $l(\text{mm})$		
	20	25	30
0.2	261/318	232/362	237/388
	0.82 ± 0.20	0.64 ± 0.09	0.61 ± 0.04
0.4	241/321	244/326	234/316
	0.75 ± 0.06	0.75 ± 0.12	0.74 ± 0.08
0.8	267/351	240/348	213/288
	0.76 ± 0.03	0.69 ± 0.05	0.74 ± 0.09

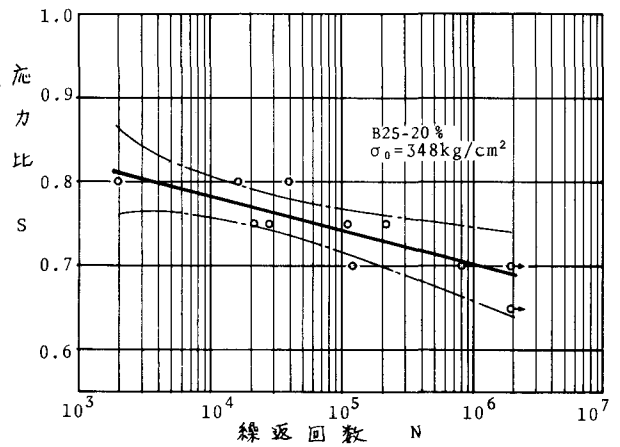


図-7 鋼繊維コンクリートの $S-N$ 線図

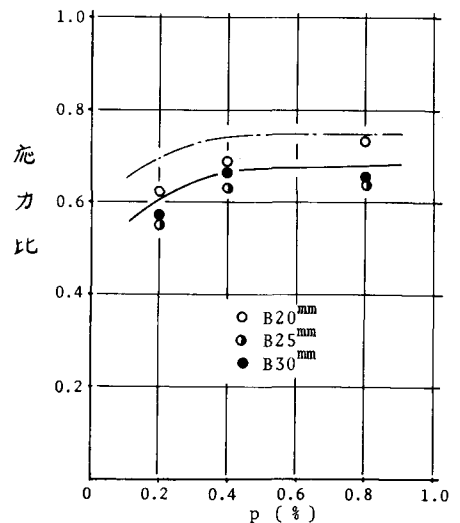


図-8 疲労強度(95%信頼限界下限値)

9. 鋼繊維コンクリートに膨張剤を用いた場合の効果

コンクリートの乾燥収縮を相殺する目的で、さらには、ケミカルプレストレスを導入する目的で、膨張性混和材が用いられることがある。この利き方には方向性がないことを考えると、同様に方向性がなくランダムにコンクリート中に配置される鋼繊維がうまくこの膨張量を拘束してくれれば、ケミカルプレストレスによるコンクリート組織の緻密化に起因する強度の増大が期待される。この目的のために用いられた鋼繊維および配合は、さきに述べたC種のみに限定した。膨張剤としてはカルシウムサルフォアアルミネート系の膨張混和材を用い、使用量はセメントの一部を膨張剤で置きかえて、重量パーセントで0, 10, 15% (一部12%も追加)とした。

膨張率は、曲げ試験用はり供試体の4面にコンタクトボールを設置し、コンタクトゲージを用いてボール間の従横方向の長さ変化を測定して求めた。養生1日から養生28日まで測定して得た膨張率のグラフは省略するが、型枠拘束の強い底面ほど大きな膨張率を示している。これらの値を平均して、供試体の中心位置の膨張率に相当するような、養生28日における膨張率を用いて鋼繊維による膨張の拘束の程度を示したものが図-9である。

このような、膨張率を示すような鋼繊維と膨張剤との割合による曲げ強度の増加倍率を、図-10に示した。また、引張強度および圧縮強度に関する同様の値を図-11と図-12に示した。

これらの結果では、鋼繊維を0.83%, 膨張剤を10%混入した場合が最も効果を発揮しているが、この場合の鋼繊維による拘束膨張率は 250×10^{-6} 程度である。適当量の膨張剤と鋼繊維量との複合により、ある程度のケミカルプレストレス効果があることは分るが、鋼繊維による膨張率拘束の大きさから予想されるような大きな効果はなかった。このことは、鋼繊維が短いので、付着長の奥からうなずけるがコンクリートとの付着力の格段に優れた鋼繊維を利用できるようになれば(例えば2.で紹介したような鋼繊維をさらに改良して)、膨張剤の膨張時期の調節とあわせて、一層の効果が期待できる。

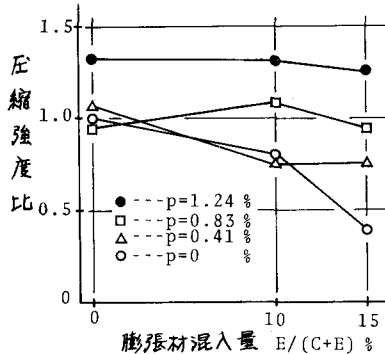


図-12 圧縮強度倍率の変化

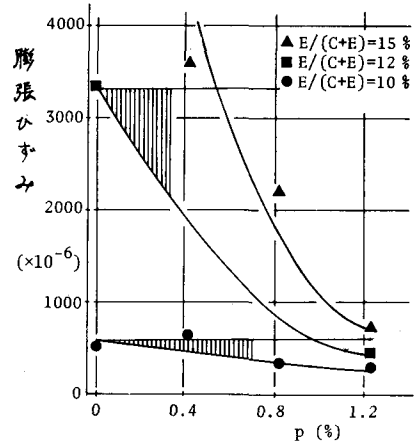


図-9 膨張ひずみ拘束の程度

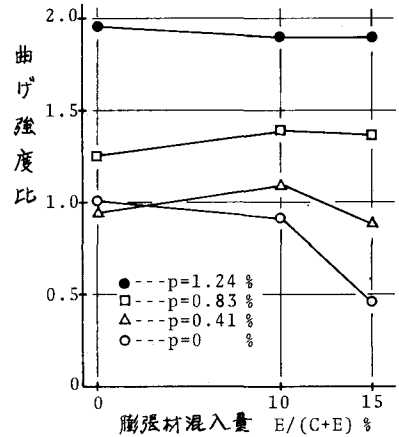


図-10 曲げ強度倍率の変化

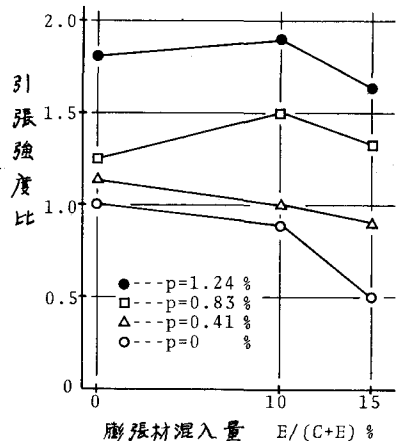


図-11 引張強度倍率の変化

10. むすび

鋼繊維コンクリートの強度その他の性質は、マトリックスとしてのコンクリートの性質に、鋼繊維の性質と混入量による因子が複合するが、ここではコンクリートの影響は検討せずに、それぞれのコンクリートの品質を基準とした値(比)によつて鋼繊維の影響のみを独立に調べた。この場合、鋼繊維の混入量($P\%$)、換算長さ(l)、換算直径(d)を用いた整理をおこなひ、次の結論を得た。

1. 鋼繊維コンクリートのスランジは、アスペクト比の大きい鋼繊維ほど、混入率が等しいほど低下すると云われているが、スランジ比の低下は鋼繊維のアスペクト比を鋼繊維間隔で除した値、 $(\sqrt{P}/d)(l/d)$ に、ほぼ比例する。ただし、スランジ0の鋼繊維コンクリートは、同じスランジ0の普通コンクリートよりもワカスルであり、スランジ測定値の対象外とする。
2. 鋼繊維コンクリートの強度は、アスペクト比が大きい鋼繊維ほど、混入率が等しいほど増大するが、特に曲げ強度の増加率は一般に云われるような $P(l/d)$ の関数とはならず、むしろアスペクト比を鋼繊維間隔で除した値、 $(\sqrt{P}/d)(l/d)$ にほぼ比例する結果を示した。
3. 本実験の範囲で得られた強度の増加の最高は、曲げ強さ比が2.5、引張(割裂)強さ比が1.8、圧縮強さ比が1.5であつた。
4. 疲労試験の結果は95%信頼限界値の下限值で表わすと、 $P=0.5\%$ 以上の鋼繊維混入で静的圧縮強さの66%が確保できそうである。なお本実験における最高の圧縮疲労強度は静的圧縮強さの73%であつた。
5. 鋼繊維コンクリートに膨張剤を併用して両者の複合作用であるケミカルプレストレスをよえた効果は、鋼繊維の付着性能が不十分で、本実験の場合では最も効果があつた場合でも、膨張剤を便りなかつた場合の20%程度の強度の増加を示したに過ぎず、アスペクト比を大きくせずには着性を改善する鋼繊維が望まれる。

参 考 文 献

- 1) J.P.Romualdi & J.A.Mandel; Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement, Journal of A.C.I., June 1964.
- 2) C.D.Johnston & E.H.Sidwell; Testing Concrete in Tension and in Compression, Magazine of Concrete Research, Vol.20, No.65, Dec.1968.
- 3) C.D.Johnston; Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete: A Review of Mechanical Properties, A.C.I. Publication SP-44, 1974.
- 4) G.Batson, C.Ball, L.Bailey, E.Landers, and J.Hooks; Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, Journal of A.C.I., Nov.1972.