

膨張コンクリートをマトリックスとした 鋼繊維補強コンクリートの複合特性

PROPERTIES OF STEEL FIBER REINFORCED EXPANSIVE CONCRETES

小林 一 輔*・野 口 哲 男**

By Kazusuke KOBAYASHI and Tetsuo NOGUCHI

1. は し が き

鋼繊維補強コンクリートは引張強度、靱性および耐衝撃性が普通コンクリートに比べて格段に優れているが、所要のコンシステンシーを得るために要するセメントペースト量が増大するためにマトリックスの乾燥収縮が増大し、この結果、鋼繊維によるひびわれの拘束効果がかなり減殺される。

一方、膨張コンクリートは乾燥収縮によるひびわれの低減やケミカルプレストレスの導入を目的として使用されている。しかし、コンクリートが膨張する際、セメント硬化体の微小組織の破壊を伴うため、膨張率が過大になると強度低下を生じる。

現在、コンクリートにケミカルプレストレスを導入するため膨張を鉄筋により拘束する方法が用いられているが、この場合鉄筋配置方向のみの膨張が拘束されるのでマトリックスは異方性を示すことになる。換言すれば鉄筋の存在しない方向への過膨張が強度低下をもたらし、構造物への悪影響を与えることが指摘されている。

しかし、これらの2種のコンクリートを組み合わせると、すなわち、膨張コンクリートをマトリックスとし、これに鋼繊維を分散させた複合体をつくると、鋼繊維補強コンクリートの場合の欠点であるマトリックスの乾燥収縮の増大に伴うひびわれ拘束効果の減少の問題が解決されると同時に、膨張コンクリートの欠点である過膨張に基づく強度低下の問題が鋼繊維による3次元的拘束によって回避できることが期待される。また相乗的な効果としては、膨張を拘束することによって生ずるケミカルプレストレスによって鋼繊維の付着強度が増大し、鋼繊維のみを用いた場合よりも曲げ強度およびタフネスが改善される可能性がある。

このような鋼繊維と膨張材を同時に使用する試みはすでに2, 3の研究者^{1)~3)}によってなされており、鋼繊維が膨張を効果的に拘束すること、拘束により、圧縮特性および曲げ特性が改善されることなどの基礎的な事実が明らかにされている。しかし、諸特性を改善するために満たすべき条件についてはこれを明確に提示したものが無い。

本研究は SFRC と膨張コンクリートを組み合わせて、以上のような優れた特性を有する複合材料を得るための諸条件を明らかにすることを目的として実施したものである。

鋼繊維を膨張コンクリートマトリックス中に分散せしめてコンクリートに selfstressing を発生させることにより、その力学的諸性質が改善されることはすでに1976年にブルガリア科学アカデミーの Simeonov らによって確かめられている¹⁾。Simeonov らは繊維量(V_f)=1.7%の鋼繊維補強コンクリートについて膨張材を使用した場合と、使用しない場合の曲げ、割裂引張および圧縮強度を比較し、これらの強度の改善は初期材令において著しく、2~4倍に達するが、材令4週では1.2~1.4倍程度にとどまることを明らかにしている。一方、Paul らはタイプ K (ASTM C 845) の収縮補償セメントを用いた膨張コンクリートに $V_f=1.51\%$ で形状の異なる2種の鋼繊維を混入し、これらの膨張拘束効果、曲げ荷重-たわみ特性、圧縮強度および弾性係数などを調べている²⁾。Paul らは両端にフックを有する鋼繊維が膨張をよく拘束し、曲げタフネスも著しく改善されることを示している。また、戸川らは $V_f=0.5\sim 2.0\%$ の鋼繊維補強コンクリートについてマトリックス中の単位膨張材量を変化させた場合の曲げ、割裂引張および圧縮強度、弾性係数などを調べ、ある量の膨張材を添加すると曲げ強度やタフネスが改善されること、これらの諸特性が低下しはじめる限界の体積膨張率などを示している^{3), 4)}。

以上の諸研究は鋼繊維が適度の膨張効果を有する膨張

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 工修 通産省資源エネルギー庁

コンクリートの膨張を効果的に拘束すること、その結果曲げ強度やタフネスなどが改善されることなどの基礎的な事実を明らかにしたものであるが、以上の諸特性が改善される条件については、これを提示したものが無い。

著者らは上記の Simeonov の報文を契機として、この複合材料を実用化の域にまで発展させることを目的として研究を行ったもので、本文は鋼繊維とマトリックスとの付着特性の検討を通じてこの種の複合体により優れた複合特性が得られる諸条件を明らかにした点に特徴がある。

2. 実験の概要

(1) 実験要因、使用材料および配合

膨張コンクリートと鋼繊維を組み合わせた場合、その強度特性が改善されるためには、鋼繊維が膨張を拘束し、コンクリートにプレストレスが導入されることが必要である。鋼繊維が膨張を拘束できるか否かは、そのマトリックスとの付着力に関係すると考えられるので、以下の要因を取り上げ検討を行った。

- a) 繊維量
- b) 繊維種類
- c) 繊維長さ
- d) コンクリートマトリックスの水セメント比

繊維量は 0, 1 および 2% の 3 種とし、鋼繊維は写真 1 に示すように表面形状と寸法が異なる 3 種類を使用した。すなわち、寸法が $\phi 0.5 \times 30$ mm および $\phi 0.6 \times 60$ mm の 2 種類のストレート型ファイバーおよび $\phi 0.4 \times 30$ mm のフック付ファイバーである。なお前 2 者は表面にインデント加工を施した異形ファイバーである。膨張材はエトリンガイト系のものを用いた。

コンクリートマトリックスの水セメント比は 50% および 70% の 2 種類とした。表 1 はこれらの組合せを示したものであって、それぞれの組合せに対して単位膨張材量をセメントの内割で 0, 20, 40, 60 および 80 kg/m³ の 5 種類に変化させた計 30 種類の配合のコンクリートについて実験を行った。これらの配合はスランブが 8 ± 1 cm となるように定めたもので、これを表 2 に示

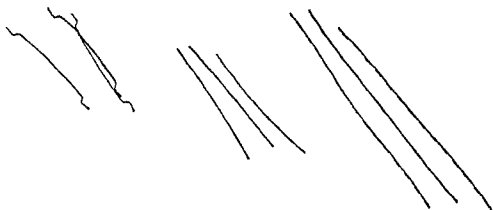


写真 1 使用した鋼繊維

表 1 実験の組合せ

実験番号	繊維種別	繊維寸法 (mm)	繊維量 (%)	水セメント比 (%)
A	—	—	0	50
B	ストレート	$\phi 0.5 \times 30$	1	50
C	ストレート	$\phi 0.5 \times 30$	2	50
D	フック	$\phi 0.4 \times 30$	1	50
E	ストレート	$\phi 0.5 \times 30$	1	70
F	ストレート	$\phi 0.6 \times 60$	1	50

表 2 コンクリートの配合

実験番号	水セメント比 (%)	鋼繊維量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					セメント	水	細骨材	粗骨材
A	50	0	15	52	380	190	936	890
B, D	50	1	15	58	424	212	974	727
C	50	2	15	77	466	233	1204	371
E	70	1	15	62	313	219	1087	686
F	50	1	15	77	466	233	1204	371

す。

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は比重 2.61、粗粒率 3.04 の川砂を、粗骨材は最大寸法 15 mm の碎石を使用した。

(2) 供試体の製造および測定方法

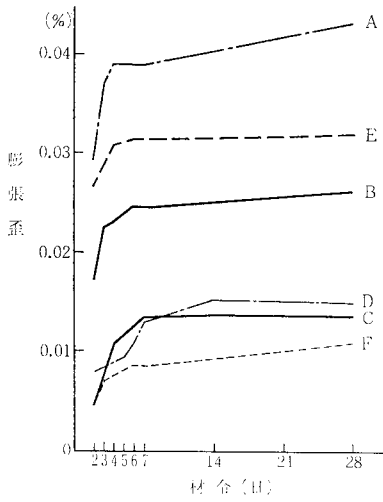
コンクリートの練り混ぜには容量 60 l の水平二軸強制攪拌式ミキサーを使用した。まずコンクリートのみを練り混ぜたのち、攪拌中に鋼繊維を投入し、これを一様に分散させた。

圧縮強度試験用供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱体を用い、曲げ強度試験用供試体は $10 \times 10 \times 40$ cm および $15 \times 15 \times 53$ cm (繊維長さが 60 mm の実験番号 F の場合) の角柱体を用いた。また、膨張ひずみの測定には $10 \times 10 \times 40$ cm の長さ変化率測定用の供試体を用いた。これらの供試体は振動台により締め固め、脱型 (圧縮試験体: 材令 2 日、曲げおよび膨張ひずみ試験体: 材令 1 日) 後、所定の試験材令まで $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。

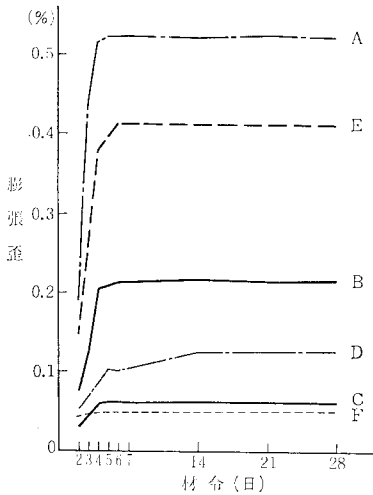
膨張ひずみは標点距離を 34 cm としてコンパレータ方法により測定した。脱型直後 (材令 1 日) に基長の測定を行い、その後材令 4 週まで 9 回にわたり長さ変化の測定を続けた。曲げ強度試験はスパン 30 cm の 3 等分点 2 点荷重により行ったが同時に中央点のたわみを電気的変位計により測定し、荷重-変位曲線を記録した。なお、これらの試験はそれぞれ 3 個の供試体について行い、その平均値を用いてデータを整理した。

3. 膨張性状

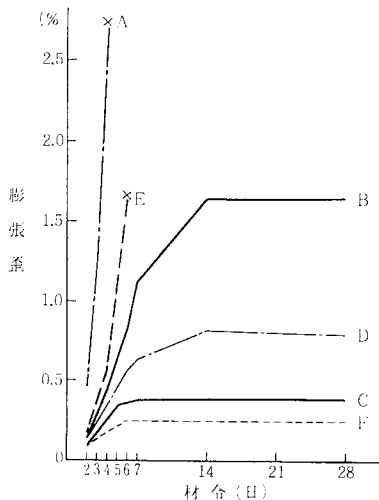
図 1 は単位膨張材量をそれぞれ、40, 60 および 80 kg/m³ 用いた場合における実験番号 A~F の場合の膨張ひずみと材令との関係を示したものである。膨張材量の



(a) 膨張材量=10kg/m³



(b) 膨張材量=60kg/m³

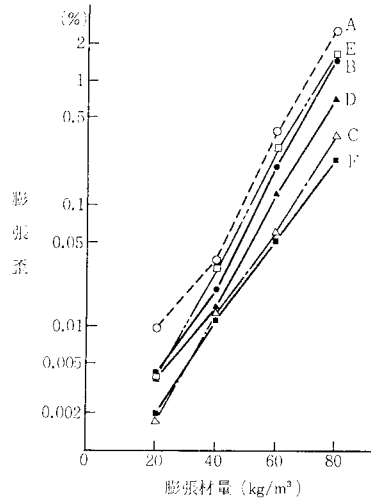


(c) 膨張材量=80kg/m³

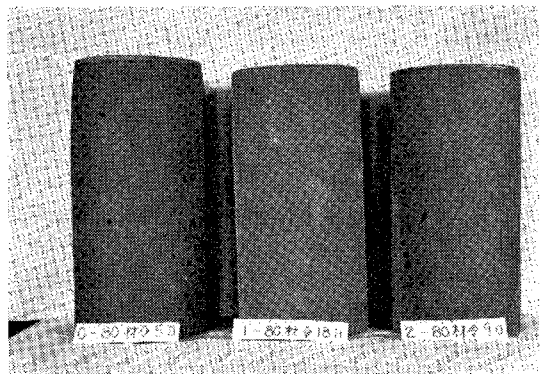
図一 膨張ひずみの経時変化

少ない 40, 60 kg/m³ では材令 7 日ではほぼ膨張は終了しているのに対し, 80 kg/m³ では 14 日まで膨張が継続している. また, 80 kg/m³ では A (鋼繊維量=0%) および E (W/C=70%) がそれぞれ材令 5 日と 7 日で異常膨張し崩壊した. 鋼繊維を混入することで膨張は抑えられるが, その程度はそれぞれの場合で大きく異なり繊維量の多いもの, 端部にフックがついているもの, 繊維長さの長いものほど膨張が拘束されている. すなわち鋼繊維とマトリックス間の付着力が大きい組合せのものほど拘束力も大きいと推察される.

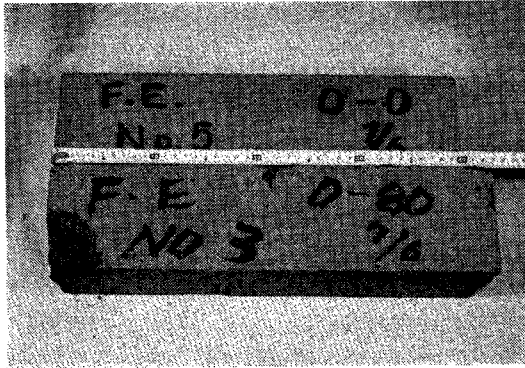
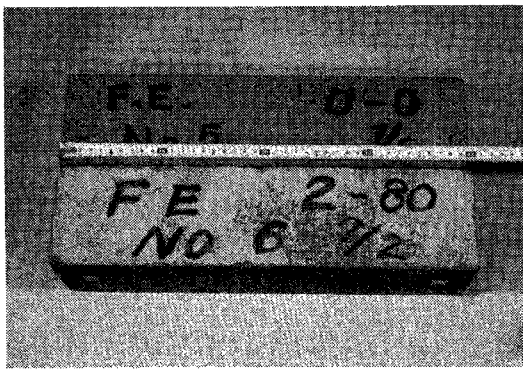
図一2 は単位膨張材量と材令 4 週の膨張ひずみとの関係を片対数で表わしたものであるが, 鋼繊維に関する要因のいかんにかかわらず単位膨張材量を増すに従って膨張ひずみはすべて指数関数的に増大していることがわかる. 写真一2 は膨張材量を 80 kg/m³ 混入し, 左から鋼繊維量を 0, 1, 2% とした場合の外観を示したもので, 鋼繊維量 0% の場合は崩壊寸前の状態である. 写真一3 は単位膨張材量を 80 kg/m³ とした場合について鋼繊維による膨張の拘束効果を普通コンクリートと対比すること



図一2 膨張ひずみと単位膨張材量との関係



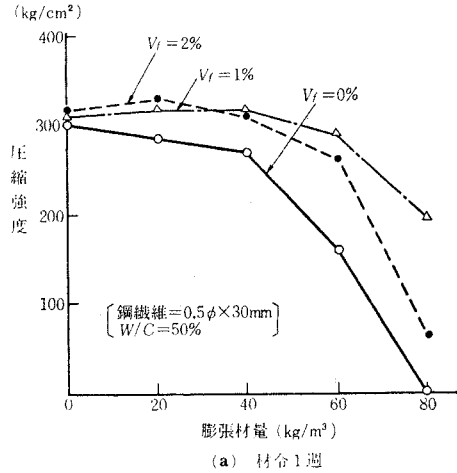
写真一2 鋼繊維による膨張の拘束状況 (左から V_f=0%, 1%, 2%)

(a) $V_f=0\%$, 単位膨張材量: 80 kg/m^3 (b) $V_f=2\%$, 単位膨張材量: 80 kg/m^3 写真-3 膨張コンクリート(下部)の膨張状態の
普通コンクリート(上部)との比較

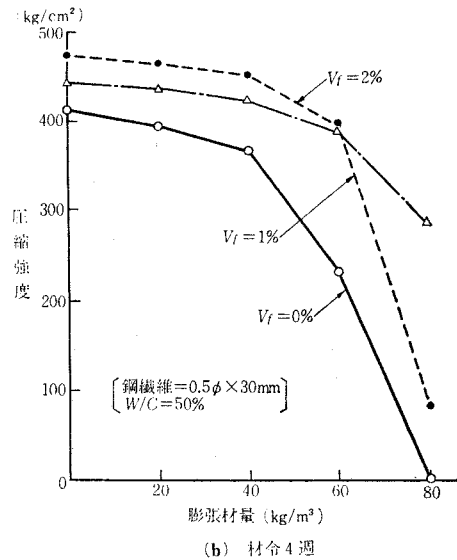
とにより示したものである。写真-3(a)と写真-3(b)を対比することにより、鋼繊維が膨張を効果的に拘束していることがわかる。

4. 圧縮強度

図-3は圧縮強度と単位膨張材量との関係に及ぼす鋼繊維量の影響を示したものである。鋼繊維を含まない場合、単位膨張材量が 40 kg/m^3 までは圧縮強度の低下量は小さく、その値は 10% 程度であるが、さらに膨張材量を増すと、膨張によりマトリックスが多孔質となり、圧縮強度は著しく低下する。これに対して鋼繊維を混入すると、単位膨張材量 60 kg/m^3 程度までは圧縮強度の低下は少なく、鋼繊維が強度低下を抑制していることがわかる。このような、膨張量と圧縮強度との関係は膨張材を用いない普通ポルトランドセメントのみを用いたペーストの空隙率と圧縮強度との関係に類似しているものと思われる。したがって硬化した膨張セメントペーストの膨張量と空隙率および強度との間には高い相関関係が存在していることを示唆しているものと考えられる。図-4は鋼繊維の混入が膨張材を使用したセメントペースト



(a) 材令 1 週



(b) 材令 4 週

図-3 圧縮強度と単位膨張材量との関係

ト硬化体の細孔径分布に及ぼす影響を示したものである。用いた試料はいずれも水セメント比が 50% のセメントペーストで (a) は実験番号 A の条件で単位膨張材量が 40 kg/m^3 の場合のコンクリート中のセメントペーストと同一の組成のものを練り混ぜてつくったものであり、(b) はこれをマトリックスとして鋼繊維を混入したものである。鋼繊維が膨張材を使用したセメントペースト硬化体の全空隙量、特に 2400 \AA 以上の粗大な空隙量を大幅に減少させていることがわかる。すなわち、鋼繊維を混入することによって膨張が抑制されるものと考えられる。

一方、図-5~7は圧縮強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維長さ、繊維形状およびコンクリートの水セメント比の影響を示したものである。これらの図より膨張材量が同一でも、繊維の形状、繊維の長さおよび水セ

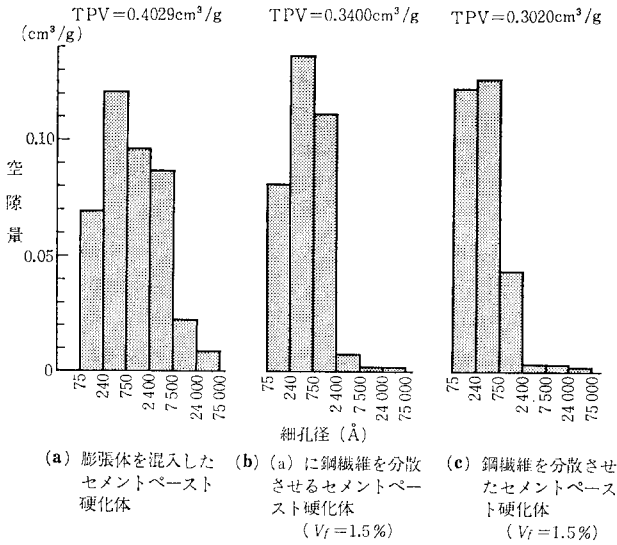


図-4 硬化セメントペーストの細孔径分布

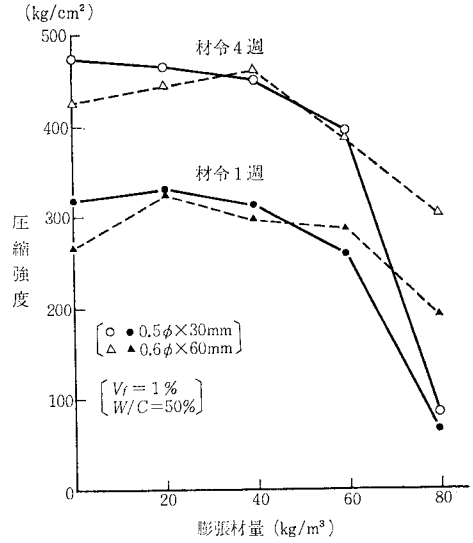


図-6 圧縮強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維長さの影響

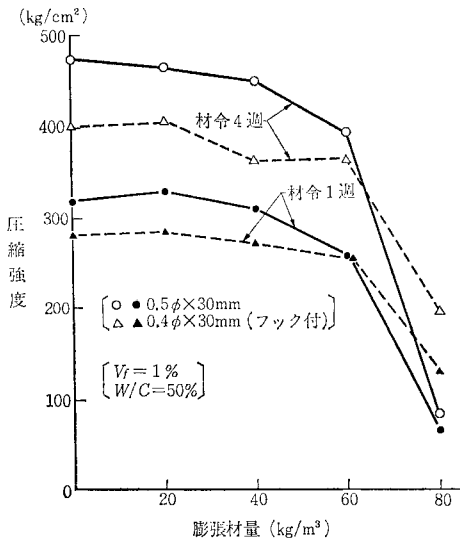


図-5 圧縮強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維形状の影響

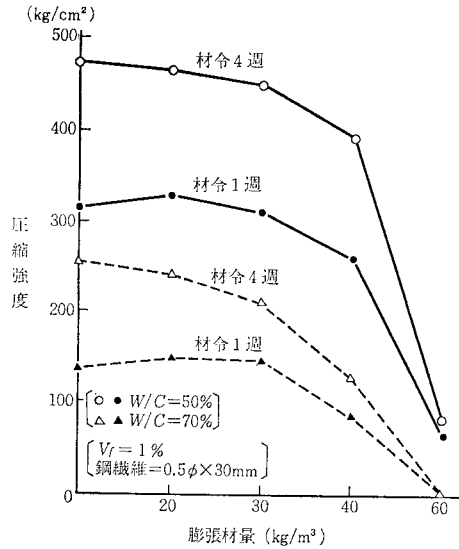


図-7 圧縮強度と単位膨張材量との関係に及ぼす水セメント比の影響

メント比によって強度低下の割合が異なることがわかる。これはおもにこれらの要因がコンクリートの膨張量に影響を及ぼす程度の差によるものと考えられる。

そこで図-8 に膨張ひずみと圧縮強度との関係を示した。横軸は材令 4 週における膨張ひずみを対数で表わしたものであり、縦軸はこれに対応する圧縮強度を膨張材量を添加しない場合の圧縮強度に対する比によって表わしたものである。この図より、圧縮強度の低下を防ぐためには膨張ひずみを 0.1% 程度以下とする必要のあること、配合のいかんを問わず膨張ひずみと圧縮強度比との間には一定の関係が存在することが認められる。

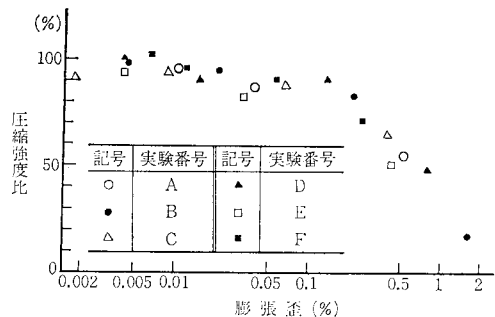


図-8 圧縮強度比と膨張ひずみとの関係

このことは圧縮強度の低下率は膨張材量や繊維量のいかんにかかわらず膨張量のみによって決定されることを意味する。

膨張コンクリートは、従来鉄筋の配置方向以外への過膨張が強度低下をもたらし、構造物に対して悪影響を与えることが指摘されてきた。このため膨張材使用量はおのずから制限され、膨張材の特性が十分に発揮されてきたとはいえない。図-8より明らかなように強度低下を防ぐためには膨張ひずみを0.1%以下に抑えることが必要であるが、この値は単位膨張材量40~50 kg/m³に相当する。膨張コンクリートに鋼繊維を混入することにより多くの膨張材を用いても膨張ひずみを0.1%以下に抑制することができる。たとえば膨張材を60 kg/m³添加しても鋼繊維を1%混入すれば上記の条件が満足される。

5. 曲げ特性

図-9は曲げ強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維混入率の影響を示したものである。鋼繊維を混入しない場合、膨張材量を増すに従い曲げ強度は低下している。

これは圧縮強度の場合と同様の理由によると考えられる。これに対して鋼繊維を混入すると膨張材量によってはかえって曲げ強度が上昇しており、ケミカルプレストレスが導入されていることが認められる。すなわち用いる鋼繊維に応じて単位膨張材量と鋼繊維との最適な組合せが存在する。たとえば繊維量1%では、単位膨張材量20~30 kg/m³の場合に曲げ強度はピークを示し、1週、4週ともに約10 kg/cm²上昇している。繊維量2%では

単位膨張材量50~60 kg/m³の場合にピークを示し、強度は20 kg/cm²程度上昇している。

このように膨張を拘束し、膨張を小さく抑制することができるものほど曲げ強度に関して最適な膨張材量は大きくなっており、強度上昇も大きい。また材令1週、4週において、強度増加分がほぼ同一であることは打設後1週間でプレストレスが付与されたことを物語り、このことは膨張が約1週間で終了することと一致している。

図-10~12は曲げ強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維長さ、繊維形状およびコンクリートの水セメント比の影響を示したものである。これらの図より単位膨張材量が同一であっても、圧縮強度の場合と同様繊維長

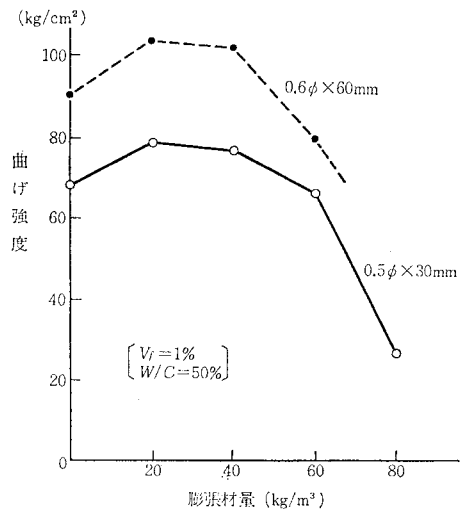


図-10 曲げ強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維長さの影響

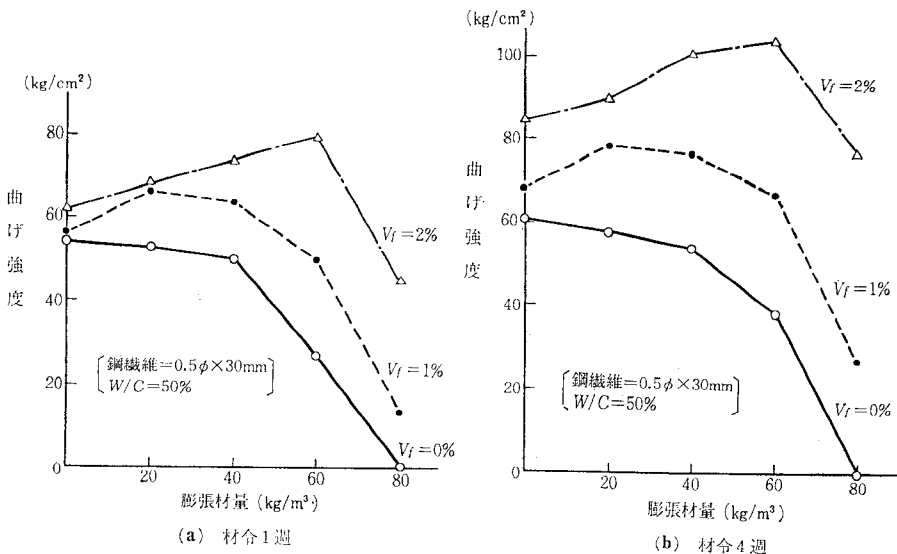


図-9 曲げ強度と単位膨張材量との関係

さ、繊維の形状およびコンクリートの水セメント比によって曲げ強度は著しく相違することがわかる。

図-13 は曲げ強度比と膨張ひずみとの関係を示した

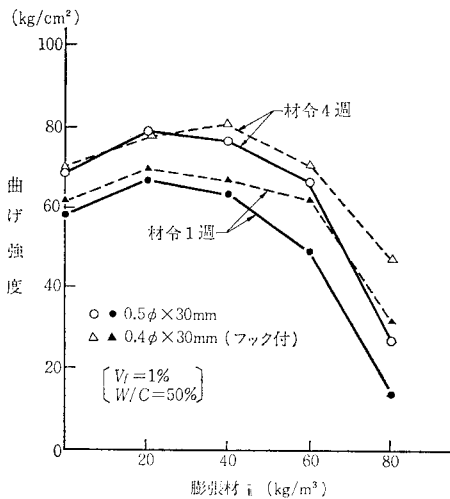


図-11 曲げ強度と単位膨張材量との関係に及ぼす繊維形状の影響

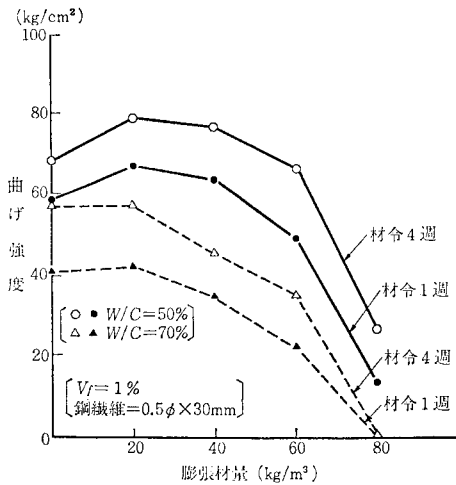


図-12 曲げ強度と単位膨張材量との関係に及ぼす水セメント比の影響

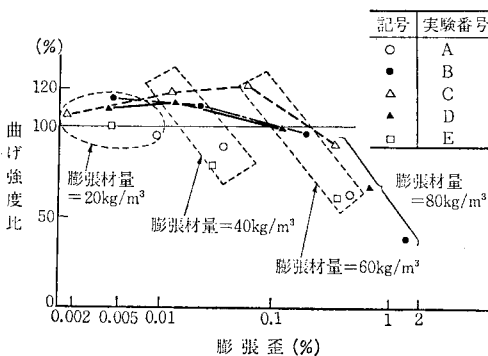


図-13 曲げ強度比と膨張ひずみとの関係

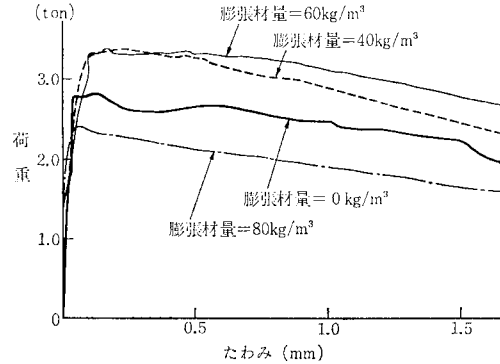


図-14 曲げ荷重-変形曲線

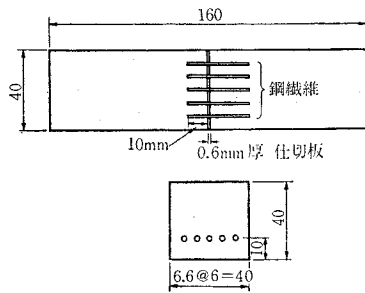
ものである。横軸は材令 4 週の膨張ひずみを対数でとり、縦軸はこれに対する曲げ強度を膨張材を添加しない場合の曲げ強度に対する比によって表わしたものである。この図より水セメント比が 70% の場合には曲げ強度の上昇は望めないことがわかる。また、曲げ強度の低下を防ぐためには圧縮強度の場合と同様膨張ひずみを少なくとも 0.1% 以下に抑える必要があり、このためには繊維量 1% で単位膨張材量 20~30 kg/m³ 程度、2% で 50~60 kg/m³ 程度用いるのが適当である。

図-14 は繊維量 2% の場合における曲げ荷重-変形曲線に及ぼす膨張材量の影響を示したものである。この図は単位膨張材量が 60 kg/m³ の場合には最大荷重が高く、その後の荷重低下も少ないことを示しているが、このことは、この条件で鋼繊維のマトリックスに対する十分な付着強度が得られていることを示している。

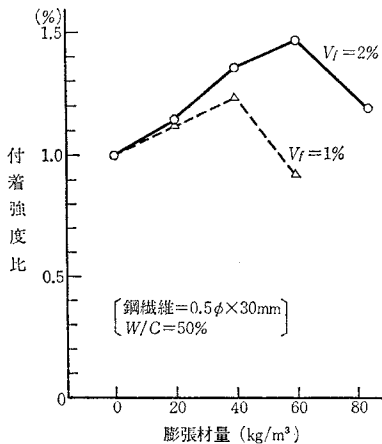
以上のように鋼繊維補強コンクリートのマトリックスとして膨張コンクリートを用いることにより、繊維量が 1% の場合に約 10 kg/cm²、2% の場合に約 20 kg/cm² だけ曲げ強度が上昇するとともに、優れた曲げタフネスを期待することができる。

6. 圧縮および曲げ特性と鋼繊維の付着強度

さて、鋼繊維量に応じた適量の膨張材を混入することにより、曲げ強度が上昇する原因としては、鋼繊維が膨張を 3 次元的に拘束することによって生ずる膨張圧によって鋼繊維の付着強度が上昇することが考えられる。従来、鋼繊維のマトリックスに対する付着特性を調べるための試験としては一般にブリケット型供試体を用いた直接引張試験が行われてきた。しかし、この方法では鋼繊維が供試体の最小断面部分において引張方向に配向し、鋼繊維を 3 次元的に配置することは不可能である。そこで曲げ荷重による付着試験方法を用いることにした。供試体は 40×40×160 mm のモルタル試験用供試体を用いた。この供試体は中央部にスリットを設けて左右を完全



図—15 付着強度試験用供試体



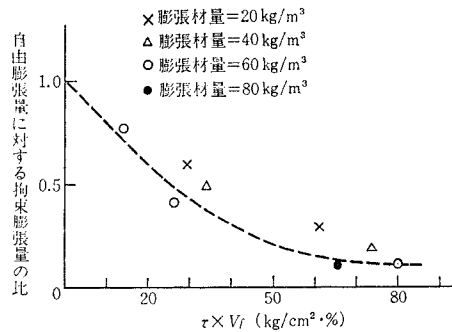
図—16 付着強度比と単位膨張材量との関係

に分離し、埋め込み長さを 10 mm とした鋼繊維 (φ 0.5 × 30 mm) を等間隔に 5 本配置した (図—15)。

付着試験は変位制御型試験機 (島津オートグラフ SD-10) を用い、スパンを 15 cm として 3 等分点 2 点曲げ载荷により行った。载荷速度はクロスヘッドの速度で 0.5 mm/min である。

図—16 は繊維量 1% および 2% の場合について、単位膨張材量と付着強度との関係を示したもので、付着強度は膨張材を添加しない場合の値を基準とした強度比によって表わしてある。なお付着強度は、まず引張力の作用点を鋼繊維の埋め込み位置、圧縮力の作用点を供試体上縁と仮定し、モーメントのつり合いから最大引張力を求め、次に得られた最大引張力を引抜け部分の周面積で除して求めた。

この図より膨張材を増すに従い、付着強度は上昇することがわかるが、これは鋼繊維が膨張を拘束することによって生じる膨張圧によって鋼繊維の付着力が増大したことによるものと考えられる。このことは Pinchin ら⁹⁾ のマトリックスに圧力を加えた条件下における鋼繊維の付着試験によっても確かめられている。しかし、膨張材を多量に使用すると逆に付着強度は減少している。これはマトリックスが多孔質となり、鋼繊維を拘束する力が弱くなったためと考えられる。これらの関係は曲げ強度



図—17 $\tau \times V_f$ と自由膨張量に対する拘束膨張量の比 (材令 1 週)

と単位膨張材量との関係にほぼ一致し、曲げ強度の最大値を示す単位膨張材量もほぼ同一である。

図—17 は横軸に付着強度 (τ) と鋼繊維量 (V_f) との積をとり、縦軸には自由膨張量と鋼繊維によって拘束したときの膨張量の比をとってある。 $\tau \times V_f$ が大きくなるほど拘束膨張量は減少し、この 2 つの積によって拘束膨張量が決定されることがわかる。図—8 および 図—13 より、鋼繊維と膨張コンクリートを組み合わせることによって優れた効果を得るためには、膨張ひずみを 0.1% 以下に抑える必要があることが明らかになったが、この条件を満たすためには、たとえば膨張材量を 60 kg/m³ 混入した場合、 $\tau \times V_f$ を 50 以上とすればよい。すなわち、前述のような付着試験方法により鋼繊維のマトリックスに対する付着強度を調べることにより、所定の条件を満足する鋼繊維と膨張コンクリートとの組合せを求めることができる。

7. 結 論

膨張材を添加した鋼繊維補強コンクリートの諸特性を検討した結果、次のような結論を得た。

(1) 鋼繊維を混入することにより、膨張コンクリートの膨張を大幅に拘束することができる。鋼繊維はセメント硬化体の組織が多孔質になることを防止する役割を果たし、このため圧縮強度の低下を抑制することが可能となる。

(2) 鋼繊維と膨張材を適切に組み合わせることにより、鋼繊維のみを用いた場合に比べて、曲げ強度を 20% 程度上昇させることが可能となる。また、それぞれの強度に対応した優れた曲げタフネスが得られる。

(3) 鋼繊維と膨張材を組み合わせることにより、優れた効果を得るためには膨張ひずみを 0.1% 程度以下に抑えることが必要である。鋼繊維による膨張コンクリートの拘束力は鋼繊維のマトリックスに対する付着強度と繊維量によって決定される。

付着強度を求めることによって上記の条件を満足する鋼繊維と膨張材の組合せを決定することができる。

8. あとがき

本文は、著者の1人が東京大学大学院在学中に修士論文としてとりまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) Simeonov, Y.T. and N.B. Djabarov : A possibility to improve strength and deformation characteristics of fiber reinforced concrete, Proc. of the 2nd Int. Conference on Mechanical Behavior of Materials, I.C.M., Aug. 1976.
- 2) Paul, B.K., M. Polivka and P.K. Mehta : Properties of Fiber Reinforced Shrinkage-Compensating Concrete, ACI Journal, Technical Paper, Nov.-Dec. 1981.
- 3) 戸川一夫・中本純次 : 鋼繊維補強膨張コンクリートの力学的特性, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第5部
- 4) 戸川一夫・中本純次 : 鋼繊維補強膨張コンクリートの力学的特性に関する研究, セメント技術大会講演概要集, 1982.
- 5) Pinchin, D.J. and D. Tabor : Interfacial contact pressure and frictional stress transfer in steel fibre cement, RILEM Symposium 1978.

(1982.10.22・受付)