論文　各種繊維を用いた初期ひび割れ抑制に関する基礎的研究

竹内　好雄[*1]

要旨：本研究は，コンクリートの初期ひび割れの抑制に関するもので，繊維を用いた場合のコンクリートのひび割れの抑制効果及び圧縮強度や流動性などの基礎物性を調査したものである。特性や形状の違う様々な繊維を用い，繊維の諸特性とコンクリートのひび割れの抑制効果及び基礎物性との関係を調べた。圧縮強度は繊維の種類によらず空気量との相関が見られ，流動性は繊維体積などの繊維形状によって決まる特性に大きく影響され，ひび割れは繊維体積と繊維弾性率の積に大きく影響される事が分かった。

キーワード：初期ひび割れ抑制，繊維，弾性率，形状効果

1. はじめに

近年，コンクリートのひび割れには社会的な関心が集まり，その抑制に様々な方法が試みられている。ひび割れの中でも初期ひび割れの抑制対策には繊維が用いられ，有効であるとの報告がある[1),2)]。しかしながら，材質の違う各種繊維の特性とひび割れの抑制効果や圧縮強度などの基礎物性との関係を調べたものはなかった。そこで，初期ひび割れの抑制対策に一般に広く使用されている弾性率や形状の異なる様々な繊維を添加した場合のコンクリートの流動性や硬化後の特性及びひび割れの抑制効果の調査を行った。それらの結果を基に，繊維の特性がコンクリートの基礎物性及びひび割れの抑制に及ぼす影響を明らかにした。

2. 試験概要

2.1 使用繊維

初期ひび割れの抑制に使用されている繊維の中で，今回の実験に用いた繊維の特性を**表－1**に示す。表中の繊維混入量はメーカー推奨値を示し，全ての試験は推奨量を添加して行った。また，その推奨量を添加した場合のコンクリート中に含まれる単位容積当たりの本数，表面積，体積は，メーカーが公表している比重や直径などのデータから求めた計算値を示している。

2.2 基礎物性

JIS A 5308レディーミクストコンクリートに定められている項目の内，**表－2**に示す配合の24-18-20Nのコンクリートに対して各繊維をメーカーの推奨する量を添加した時の圧縮強度，空気量，スランプを調べた。

表－1　各種繊維の諸特性

略称	GF	PP1	PP2	PP3	NL
材質	耐アルカリガラス	ポリプロピレン			ナイロン
比重*	2.8	0.91	0.91	0.91	1.14
直径(μm)*	13.5	300	65	18	15
長さ(mm)*	13	12	12	12	12
アスペクト比**	960	40	185	670	800
引張強度(GPa)*	1.5	0.5	0.53	0.5	0.55
弾性率(GPa)*	75	5	5.0	5	4.2
繊維混入量(g/m^3)***	500	910	455	600	300
繊維混入量(vol%)***	0.02	0.10	0.05	0.07	0.03
繊維本数(万本/m^3)**	9,600	120	1,250	21,600	12,400
繊維表面積(m^2/m^3)**	52.9	13.6	30.6	147	70.1
繊維体積(cm^3/m^3)**	179	1,018	498	660	263

*・・・メーカー公表値または一般値

**・・・メーカー公表値または一般値から計算した値

***・・・メーカー推奨値または推奨値からの計算値

*1 日本電気硝子（株）　ガラス繊維事業部技術部　（正会員）

表－2　コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量（kg/m³）				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	18	58	4.5	49.1	179	309	859	921	3.09

セメント：普通ポルトランドセメント，細骨材：滋賀県愛知川産川砂，粗骨材：滋賀県愛知川産川砂利
混和剤：ＡＥ減水剤　標準型　１種

表－3　各種繊維を使用した場合のコンクリートの基礎物性

略称		PL	GF	PP1	PP2	PP3	NL
材質		－	耐アルカリガラス	ポリプロピレン			ナイロン
スランプ(cm)		19.5	17.5	14.0	18.0	12.0	16.5
空気量(%)		4.5	5.3	5.7	5.8	5.1	5.5
圧縮強度 (MPa)	材齢7日	27.6	26.6	26.3	26.8	27.7	26.0
	材齢28日	38.0	35.8	34.9	35.6	37.4	35.3

2.3 ひび割れ試験

既往の文献など[1),2)]で用いられている評価方法を参考にして，各種繊維のひび割れ抑制効果を調べた。コンクリートの配合はひび割れが発生しやすいように単位セメント量と水量が多い**表－4**に示す富配合とし，各繊維をメーカー推奨量添加した時のひび割れの発生状況を目視観察した。

詳細な評価方法は次の通りとした。

(1) 使用型枠

木製型枠に5φ@50のメッシュ筋を溶接した厚み4.5mmの鉄板を設置し，50mmの枠木で囲った型枠を使用した。コンクリート打設前の型枠を**写真－1**に示す。

写真－1　ひび割れ試験用型枠

(2) 使用コンクリート

ひび割れ試験には，単位セメント量と水量が多い**表－4**に示す配合のコンクリートを使用した。

表－4　ひび割れ試験用コンクリート配合

水	セメント	細骨材	粗骨材	繊維
250	690	690	690	推奨量*

*・・・表－1参照

(3) コンクリートの混練と打設

パン型強制練りミキサーにより粗骨材，細骨材，セメントをドライブレンドした後に水を添加してさらに混練を行いウェットコンクリートを得た。繊維を混練するものについては，そこへ繊維を投入しさらに混練を行って繊維入りコンクリートを得た。

型枠を直射日光の当たる屋外に静置し，得られたコンクリートを50 mm打設した。厚みを調整した後，コテ均しを行った。振動器などによる締め固めは行わず，シート掛けを行わずに屋外で翌日まで養生を行った。

(4) ひび割れの測定

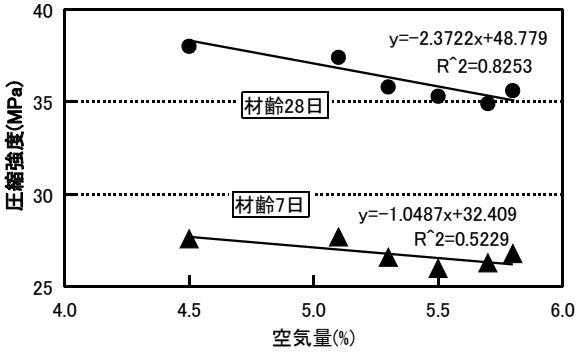
24 時間後のひび割れの幅と長さを測定した。

3. 試験結果

3.1 基礎物性

基礎物性試験結果を**表－3**に示す。

プレーンコンクリートと比較して，繊維を入れたものは全て空気量が増加したが，繊維の混入による空気の巻き込み効果と思われる。空気量と圧縮強度との関係を**図－1**示す。空気量が1%増加すると圧縮強度は4～6%低下すると言われている[3)]。得られた近似式から材齢毎に求めた空気量の差が1%となる4.5%と5.5%の時の圧縮強度の差は，材齢7日で4.0%（27.7→26.6MPa），材齢28日で6.0%（38.1→35.8MPa）となり，一般的な空気量と圧縮強度の関係とほぼ一致する。以上から，圧縮強度の低下の原因は繊維自体にあるのではなく，繊維の添加によるエントラップトエアによる空気量の増加によるものと思われ，空気の増加を見込んだ調合設計を行えば，どの繊維を使用しても設計通りの空気量及び圧縮強度が得られると思われる。

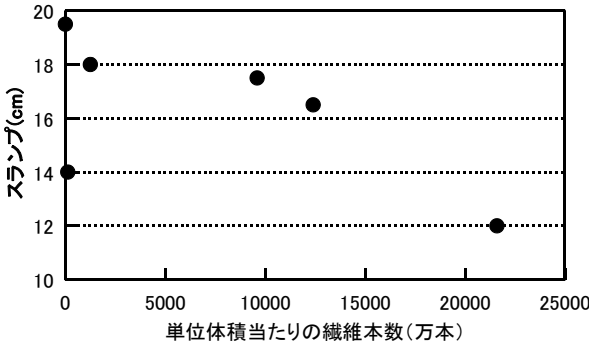


図－1　空気量と圧縮強度の関係

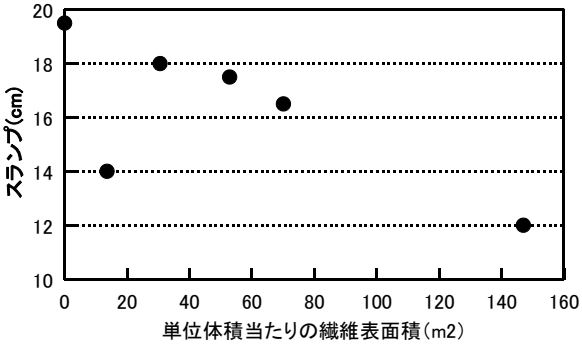
繊維の形状とスランプとの関係を**図－2**から**図－4**に示す。PP1（スランプが14cmのもの）を除くと，繊維の直径と相関のある繊維本数が多いほど，繊維表面積が大きいほど，スランプが小さくなる傾向が見られた。繊維体積はスランプと相関関係が見られ相関係数が0.77，寄与率が0.59となった。

PP1はメーカー公表値の直径から計算した本数や繊維表面積が極端に少ないにもかかわらず，スランプの低下が大きかった。PP1の繊維を**写真－2**に示す。PP1は他の繊維と違い，写真のような網目構造をしており，裂けてさらに細くなって本数や表面積が増えていたり，網目状のままコンクリート中に存在していることが考えられ，これらのことがスランプが大きく低下している原因ではないかと思われる。GFの製品形態も，13.5μmのガラスの単繊維が束ねられた1mmほどの幅を持った繊維束であるが，コンクリート中で単繊維に分散する。PP1も簡単に手で裂けることから，ガラス繊維と同様の分散機構でメーカー公表値である300μmよりはるかに細い状態でコンクリート中に分散していると思われる。

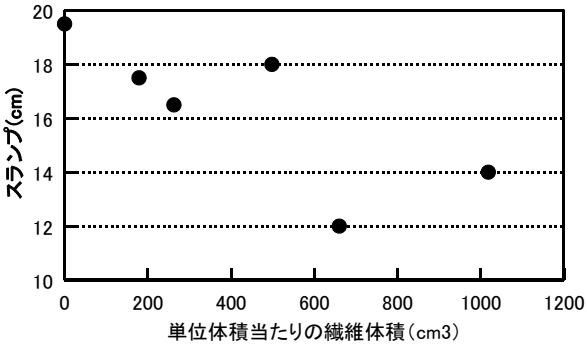
PP1を除いた場合は非常に強い相関が見られ，繊維本数であれば相関係数が0.94，寄与率が0.89となり，繊維表面積であれば相関係数が0.99，寄与率が0.99となる。



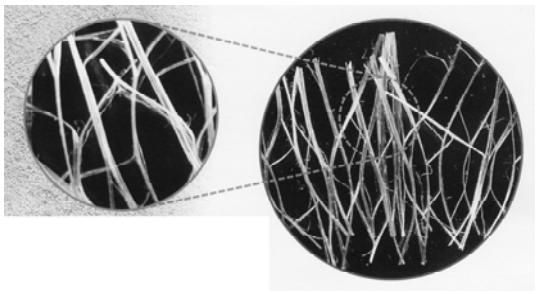
図－2　繊維本数とスランプの関係



図－3　繊維表面積とスランプの関係



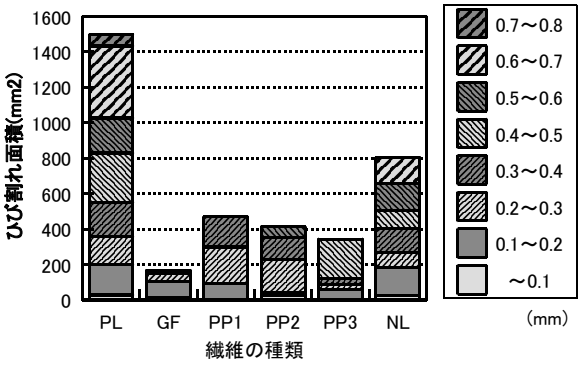
図－4　繊維体積とスランプの関係



写真－2　PP1の拡大写真

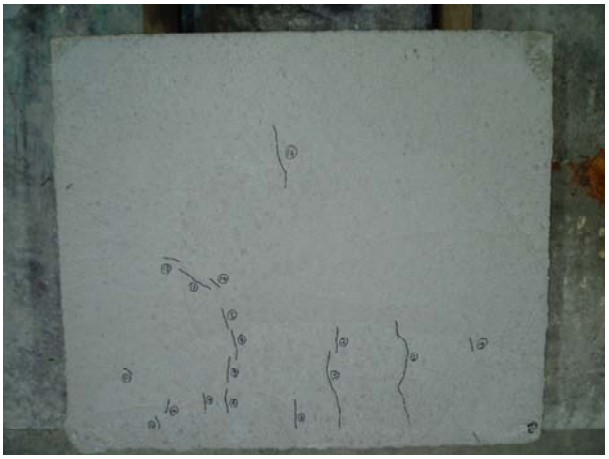
3.2 ひび割れ抑制効果

材齢24時間のひび割れ試験体のひび割れ発生状況を**図－5**と**写真－3**から**写真－8**に示す。ひび割れ面積は，ひび割れ幅と長さの積であり，ひび割れごとに計測した幅と長さからひび割れ面積を算出した。**図－5**中の凡例に示す数字はひび割れの幅を表し，棒グラフの塗りつぶしの各パターンは該当する幅のひび割れの面積を示し，総和が全てのひび割れの総面積を表す。発生したひび割れ面積は繊維によって違いが見られ，GFが最も少なくプレーンコンクリートの約1/9であった。PP3，PP1，PP2，NLの順で多くなった。NLはプレーンコンクリートの半分以上のひび割れが発生しており，ひび割れ抑制効果は低かった。ひび割れ総面積が小さいものほど幅の広いひび割れの発生が少なく，特にGFは0.2mm以上のひび割れの発生はほとんど見られなかった。



図－5　ひび割れ発生状況

写真－3　プレーンコンクリートのひび割れ発生状況

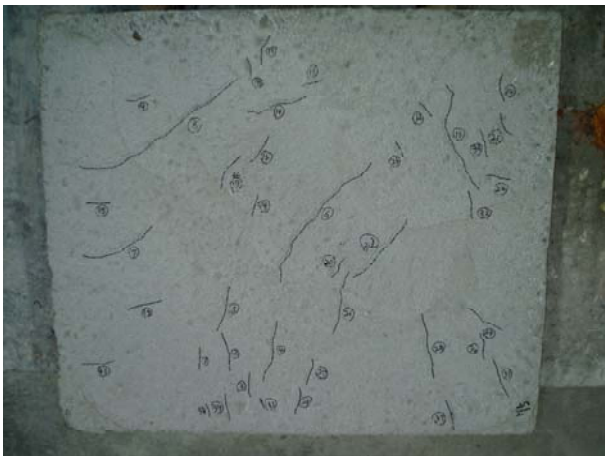


写真－4　GF入りコンクリートのひび割れ発生状況

写真－5　PP1入りコンクリートのひび割れ発生状況

写真－6　PP2入りコンクリートのひび割れ発生状況

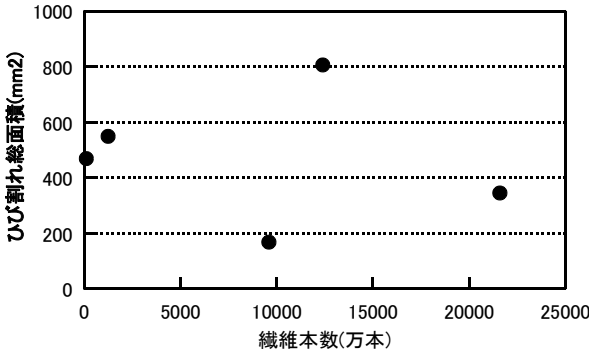
写真－7　PP3入りコンクリートのひび割れ発生状況



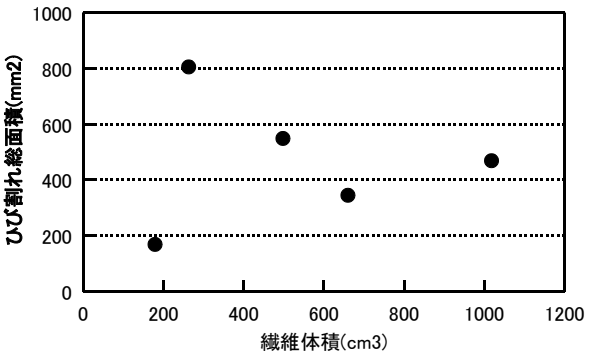
写真－8　NL入りコンクリートのひび割れ発生状況

繊維の諸特性とひび割れ総面積との関係を図－6から図－10に示す。繊維を含まないプレーンコンクリートはプロットしていない。繊維の本数，体積，表面積とひび割れ面積との間には相関関係が見られなかった。唯一相関が認められたのは繊維体積に弾性率を掛けたもので，相関係数が0.83，寄与率が0.68となった。このことから，発生するひび割れの面積は，単に繊維の本数だけではなく，繊維の物性とも密接な関係があり，高弾性の繊維を使用した方がひび割れの低減に効果的であると考えられる。

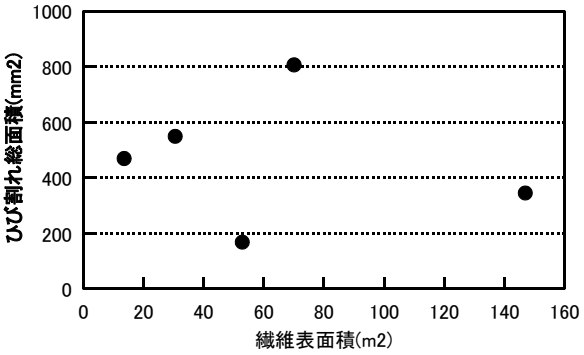
さらに，各種の繊維を添加した場合のスランプは，繊維本数と負の相関が認められるため（図－2），繊維本数を増やしてひび割れを抑制しようとすることには限界がある。すなわち，流動性（スランプ）を保ちつつ高いひび割れ抑制効果を得るためには，高弾性の繊維を使用する方が効果的であると考えられる。



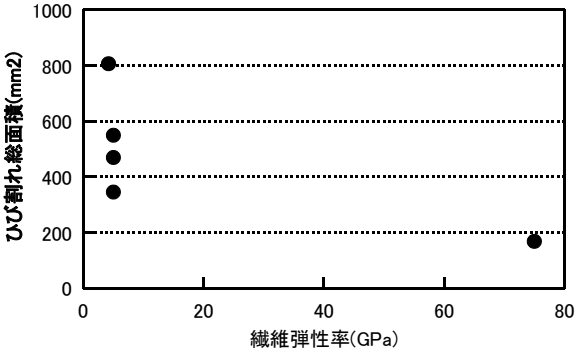
図－6　繊維本数とひび割れ総面積との関係



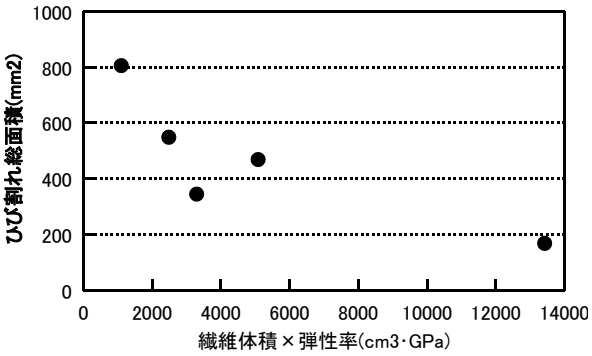
図－7　繊維体積とひび割れ総面積との関係



図－8　繊維表面積とひび割れ総面積との関係



図－9　繊維弾性率とひび割れ総面積との関係



図－10　繊維体積×弾性率とひび割れ総面積との関係

4. まとめと今後の課題

(1) 繊維を添加することで圧縮強度が低下したが，これは巻き込み空気によるものであり，増加を見込んで配合設計を行えば，どの繊維を用いても設計通りの空気量と圧縮強度が得られると思われる。
(2) 流動性（スランプ）と繊維本数や表面積との間に強い相関があり，本数や表面積の大きい繊維を用いるほどスランプの低下が大きいことが分かった。
(3) 材質の違う繊維を用いて評価した場合，発生するひび割れと繊維本数などの繊維形状との間に相関は見られなかった。
(4) 発生するひび割れ量は，繊維体積と弾性率の積との間に相関が認められた。

今回調査を行った繊維は初期ひび割れの抑制に広く使われているものに限定して調査を行ったため，弾性率の極端に低いものと高いものに偏ってしまった。弾性率が今回の繊維の中間に位置するようなポリビニルアルコール繊維やガラス繊維よりも高いアラミド繊維やカーボン繊維などの調査を行う予定としている。

参考文献

1) 浜田敏裕ほか：ビニロン短繊維によるコンクリートのプラスチック収縮ひび割れ抑制に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol22，No.2，pp.319-324，2000
2) 竹内好雄：耐アルカリ性ガラス繊維によるコンクリートの初期ひび割れの抑制に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.447-448，2001.9
3) コンクリート便覧　第二版　技報堂出版