

## 論文 短繊維補強コンクリートの強度特性と乾燥収縮ひび割れ

上田 賢司<sup>\*1</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*2</sup>・清原 千鶴<sup>\*3</sup>・広原 寿竜<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、コンクリート用に開発されたナイロン繊維を混入することに対して、コンクリートのフレッシュ性状および硬化後の特性がどのような影響を受けるか検討した。ナイロン繊維の標準的な混入率は0.04vol%であり、少量の場合はコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響は小さく、0.20vol%までの範囲では圧縮強度および引張強度に影響は認められないが、曲げ強度および曲げタフネスは増大する。また、初期ひび割れ抑制に効果が認められ、さらに乾燥収縮ひび割れの発生が若干遅れることが確認できた。

**キーワード：**ナイロン繊維、初期ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ、曲げタフネス

## 1. はじめに

コンクリート用の二次的な補強材料として使用される短繊維には鋼繊維やビニロン、ポリエチレン、ポリプロピレン、ナイロンなどの合成ポリマー繊維、ガラス繊維などがある。通常、コンクリートに混入される繊維の量は体積あたり1~2vol%とされているが、繊維を混入することによってコンクリートのコンシステンシーは極端に低下し、施工性が劣ることが短繊維補強コンクリートの短所の一つである。

本研究で使用した短繊維は、イスラエルにおいてコンクリート用に開発された直径が19 $\mu$ mで長さが12mmのナイロン繊維(写真-1)であり、標準的な混入率は0.04vol%である<sup>1)</sup>。このような少量の混入にも拘わらず繊維補強効果が得られるのは、繊維1本の径が非常に小さいために繊維本数が極めて多く(1億本/m<sup>3</sup>程度)、それが供試体内に均一に分散していることによるものと推察される。本研究はナイロン繊維を少量添加した短繊維補強コンクリートに関して、繊維の混入がコンクリートのフレッシュ性状、初期ひび割れ、各種強度および乾燥収縮ひび割れの特性に及ぼす影響について検討した。



写真-1 ナイロン繊維

## 2. 実験概要

## 2.1 実験計画

本研究は4つの実験から構成されている。ナイロン繊維の混入率を種々変化させて、実験Ⅰはフレッシュ性状に及ぼす影響、実験Ⅱは初期ひび割れの抑制効果、実験Ⅲは各種強度に及ぼす影響、実験Ⅳは乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性を明らかにするために実験を計画した。

## 2.2 使用材料、調合および練混ぜ

表-1に使用材料の性質、表-2に繊維混入前のコンクリート(基準コンクリート)の調合を示す。ナイロン繊維は基準コンクリートにあと添加とし、繊維混入による調合補正は行っていない。また、実験Ⅱでは初期ひび割れを発生させることを目的として、ブリーディングの少ない

\*1(株)さとうベネック建築事業本部技術部技術開発課 博士(工学)(正会員)

\*2 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

\*3 大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

\*4(株)エイオービー アンド ダヴィンチインターナショナル 代表取締役(正会員)

表-1 使用材料の物理的性質

使用材料	種類	性質または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3270cm <sup>2</sup> /g
細骨材	陸砂	表乾密度:2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.86%, FM:2.58
粗骨材	石灰石碎石	表乾密度:2.70 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.38%, FM:6.63
混和剤	AE減水剤標準形 I 種	主成分:リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
短繊維	ナイロン繊維	密度:1.17g/cm <sup>3</sup> , 繊維径:19μm, 繊維長:12mm, 引張強度:800MPa, ヤング係数:4,200MPa

表-2 基準コンクリートの調査

実験	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
実験 I	21±1.5	4.5±1.5	55	48.9	198	360	814	884	3.60		
	18±1.5				182	331	802	965	3.31		
	15±1.5				172	313	781	1029	3.13		
	8±1.5				156	284	846	1029	2.84		
実験 II	—	—	30	42.6	175	583	734	1029	5.83		
実験 III	18±1.5	4.5±1.5	55	44.1	182	331	802	965	3.31		
実験 IV	シリーズ I				21±1.5	48.9	198	360	814	884	3.60
	シリーズ II				21±1.5	49.0	220	400	791	821	4.00

低水セメント比の高強度コンクリートとし、実験IVではひび割れが発生しやすいように単位水量を大きくした。練混ぜには容量70ℓの可傾式ミキサを用い、全ての材料を投入後3分間練混ぜ、繊維を混入後さらに1分間練混ぜを行った。

### 2.3 試験項目および方法

#### (1) フレッシュ性状 (実験 I)

表-3に試験項目を示す。基準コンクリートのスランブを8~21cmとし、繊維混入率を0.04~0.50vol%の範囲で変化させた。練混ぜ終了後、直ちにスランブ (JIS A 1101), 空気量 (JIS A 1128), 単位容積質量および温度を測定した。さらに一部のコンクリートはスランブの経時変化の測定およびブリーディング試験 (JIS A 1123) を行った。スランブ測定用のコンクリートは水分の逸散を防ぐために湿布で覆い、打設直後から30分ごとに120分まで測定した。

#### (2) 初期ひび割れ (実験 II)

使用した初期ひび割れ発生用拘束試験装置<sup>2)</sup>は図-1に示すような鋼製型枠である。コンクリートの収縮を4辺のボルトで拘束するために、底板にはテフロンシートを敷き、摩擦力の低減を図った。打設および実験は、温度および湿度の変動する実験室内 (打設時期は10月中旬, 温度

表-3 試験項目 (実験 I)

目標スランブ (cm)	繊維混入率 (vol%)						
	0	0.04	0.08	0.10	0.15	0.20	0.50
21	○	○	○	○	○	○	○
18	◎	◎	○	◎	○	○	○
15	○	○	○	○	—	—	—
8	○	○	○	—	—	—	—

○:スランブ・空気量・単位容積質量

◎:スランブ・空気量・単位容積質量

+スランブ経時変化・ブリーディング

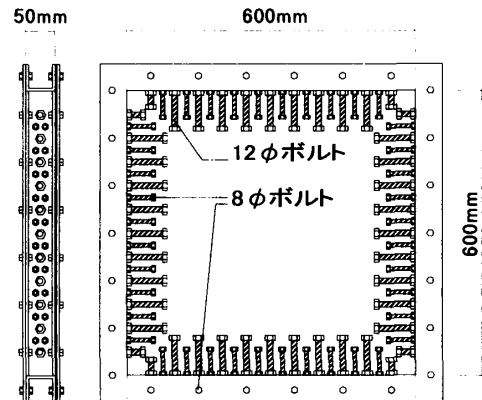


図-1 初期ひび割れ試験装置

および湿度はなりゆき)で行った。打設後直ちに表面を均し、コンクリートの上面をビニールシートで被覆して養生を行った。材齢2時間でビニールシートを取り除き、材齢24時間まで風速4~5m/sの風にさらし、ひび割れの長さおよび幅 (クラックスケールにて測定) を観察した。

(3) 各種強度 (実験Ⅲ)

繊維混入率が0~0.50vol%のコンクリートの材齢28日における圧縮、直接引張および曲げ強度を測定した。供試体は材齢1日で脱型し、標準養生とした。圧縮強度試験は、φ10×20cmの円柱供試体を用い、JIS A 1108に準拠した。また、コンプレッソメータを用いてひずみを測定し、圧縮ヤング係数を強度の1/3における割線ヤング係数として求めた。直接引張強度試験は10×10×60cmの角柱供試体を用い、チャック式の装置<sup>3)</sup>を用いて行った。また、長さ60mmのひずみゲージを貼付けてひずみを測定し、引張ヤング係数は強度の1/2における割線ヤング係数として求めた。曲げ強度試験は10×10×40cmの角柱供試体を用い、支点間距離300mmを3等分2点载荷とした。また、供試体中央部のたわみをスパンの1/150まで測定し、曲げタフネスを算出した。なお、载荷速度は0.2mm/minとした。

(4) 乾燥収縮ひび割れ (実験Ⅳ)

試験項目を表-4に示す。シリーズⅠでは供試体は材齢1日で脱型し、材齢7日まで養生室内(温度20±1℃)で封かん養生とした。シリーズⅡでは材齢1日で脱型後、直ちに実験を開始した。拘束ひび割れ試験はJIS原案<sup>4)</sup>に準拠して行った。拘束鋼材はシリーズⅠではJIS G 3191の溝形鋼(拘束A)およびJIS G 3350の軽溝形鋼(拘束B)の2種類を用い、拘束状態を変化させたが、シリーズⅡでは拘束率の小さい拘束Bのみとした。そのため、コンクリートの単位水量もシリーズⅠよりもさらに大きくし、ひび割れを発生させやすい調合とした。鋼材のひずみは中央に長さ3mmのひずみゲージを貼付けて測定した。脱水量の測定には電子天秤(精度0.1g)を用い、コンクリートのひずみの測定には予め埋め込んだ長

さ60mm、直径4mmの埋込みゲージを用いた。なお、乾燥は恒温恒湿室(温度20±1℃、湿度60±5%R.H.)で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状 (実験Ⅰ)

図-2に繊維混入率とスランプの関係を示す。基準コンクリートのスランプに拘わらず、繊維混入率の増加に従いスランプが低下する。その値は0.04vol%では0.5~1.5cmでありコンシステンシーに及ぼす影響は小さいが、0.04vol%を超えて0.20vol%までの繊維混入率の場合、スランプの低下は著しい。また、空気量および単位容積質量には繊維混入による影響は認められない。

図-3にスランプ低下量の経時変化を示す。繊維

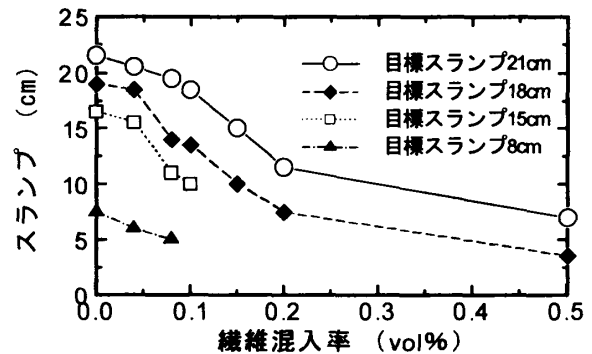


図-2 スランプと維混入率の関係

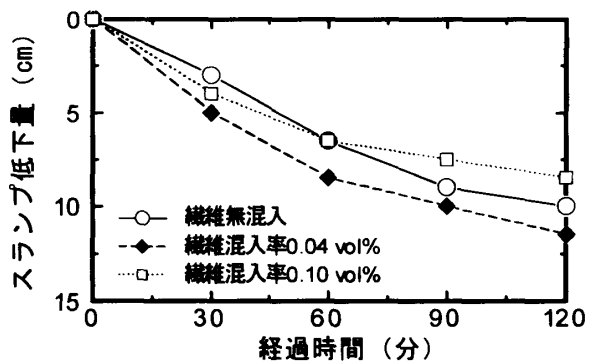


図-3 スランプ低下量の経時変化

表-4 試験項目 (実験Ⅳ)

	試験項目	乾燥開始材齢	形状	
			JIS原案	拘束供試体
シリーズⅠ	乾燥収縮ひび割れ	7日	JIS原案	A: 溝形鋼(断面積: 11.92 cm <sup>2</sup> )
	乾燥収縮ひずみ, 脱水量		B: 軽溝形鋼(断面積: 6.063 cm <sup>2</sup> )	
シリーズⅡ	乾燥収縮ひび割れ	1日	JIS原案	B: 軽溝形鋼(断面積: 6.063 cm <sup>2</sup> )
	乾燥収縮ひずみ, 脱水量		角柱供試体(10×10×40cm)	

維混入の影響はあまりみられず、120分で10cm程度スランプロスがある。また、ブリーディング量は、繊維無混入は $0.214\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.04\text{vol}\%$ は $0.199\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.10\text{vol}\%$ は $0.181\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、混入率が大きくなるほどブリーディング量も少なくなる傾向がみられた。なお、ブリーディングの終了時間に大差は認められなかった。

### 3.2 初期ひび割れ (実験Ⅱ)

ひび割れの評価には、ひび割れ長さおよびひび割れ幅を積算したひび割れ総面積を用いた。図-4に材齢とひび割れ総長さおよびひび割れ総面積の関係を示す。各供試体とも初期ひび割れは材齢6時間で発生し、その後急激に成長し、材齢14時間程度で成長が止まり、その後の進展は少ない。ひび割れ発生材齢に繊維混入の効果は認められないが、繊維を混入したものはひび割れの進展が遅く、材齢24時間ではひび割れ長さ、面積とも繊維無混入のもの半以下である。浜田ら<sup>5)</sup>はビニロン短繊維の混入によりコンクリートの初期ひび割れの進展が抑制できることを示しており、短繊維がひび割れ部分で架橋となり、引抜き摩擦力がひび割れの拡大を防ぐと論じているが、ナイロン繊維にも同様の効果が認められた。

### 3.3 各種強度 (実験Ⅲ)

表-5に各種強度試験結果、図-5に繊維混入率と強度比の関係を示す。これらの結果では、圧縮および直接引張強度は繊維混入の及ぼす影響は少ない。また、ヤング係数に関しても繊維混入の影響がほとんど見られない。一方、曲げ強度は繊維混入率の増加につれて多少増加する傾向がみられる。引張強度試験の場合は繊維の引抜きや破断が一瞬で起きるが、曲げ強度試験では荷重速度が非常に遅いため、繊維が微細なひび割れの進展に抵抗していることが考えられる。曲げ試験終了後の破断面の状況を目視およびデジタル顕微鏡で観察したところ、繊維混入率が $0.20\text{vol}\%$ では一部ファイバーボールが見られたが、全般的に繊維の分散状況は良好であった。

図-6に繊維混入率と曲げタフネス比の関係を示す。

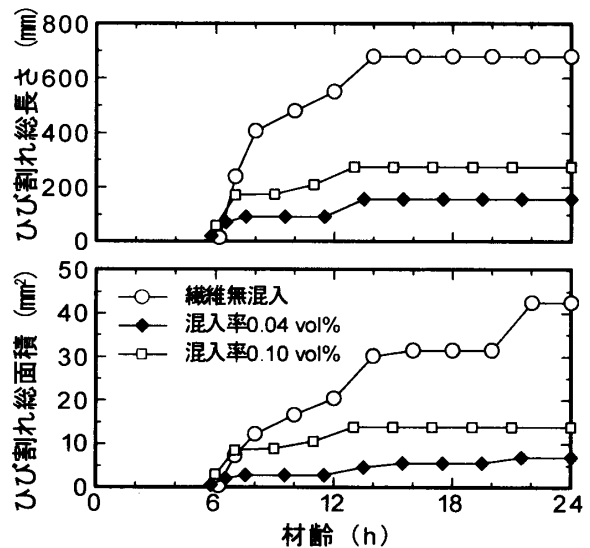


図-4 初期ひび割れの経時変化

表-5 各種強度結果の一覧

繊維混入率 (vol%)	圧縮		直接引張		曲げ強度 (MPa)
	強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
0	36.2	29.2	2.96	31.0	4.86
0.04	37.1	29.7	2.97	31.8	5.29
0.10	37.1	30.0	3.04	30.2	5.21
0.15	36.1	30.9	2.98	30.2	5.62
0.20	33.9	29.0	3.08	30.4	5.64

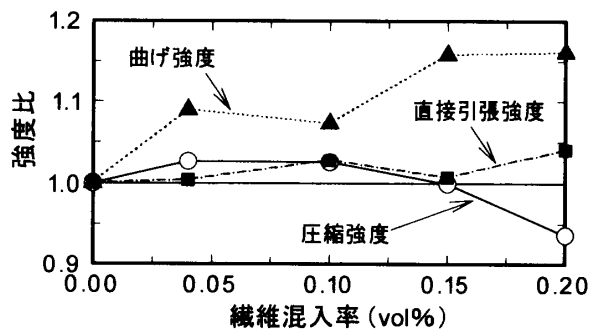


図-5 繊維混入率と強度比の関係

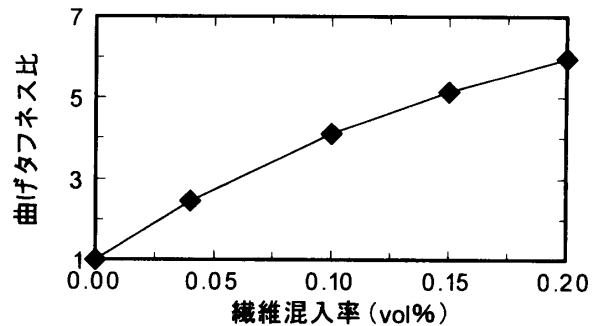


図-6 繊維混入率と曲げタフネス比の関係

示す。繊維混入率が少量であり、また、繊維長さが12mmであるため引抜きに十分に抵抗できないことから、初期ひび割れ発生後の強度は増加することなく、荷重は急激に低下する。しかしながら、少量の混入でも破壊までは至らず、変位2mmまで曲げ耐力を保持した。この時の荷重は繊維混入率が大きいものほど大きくなるため曲げタフネスも増加し、少量の繊維混入にも拘わらず靱性の向上が認められた。

### 3.4 乾燥収縮ひび割れ (実験Ⅳ)

図-7に乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を示す。乾燥開始材齢が1日で単位水量の多いシリーズⅡのほうが収縮ひずみ、脱水量ともに大きくなっている。繊維混入による影響は、両者とも明確には現れておらず、繊維の混入が及ぼす影響は小さいものと考えられる。

図-8にひび割れ発生までの期間を示す。シリーズⅠの1体を除いてひび割れが発生した。ひび割れの発生はシリーズⅠでは拘束率の大きい拘束Aのほうが早く、シリーズⅡは収縮量が大きいからさらに早くなっている。また、各シリーズとも繊維混入率が増えるに従い、ひび割れの発生が遅れることが分かる。

図-9にひび割れ発生までの期間とひび割れ発生時のコンクリートの引張応力 ( $\sigma_r$ ) の関係を示す。引張応力は鋼材の測定ひずみからひずみ分布を考慮した式 (1) を用いて算出した<sup>6)</sup>。

$$\sigma_r = \frac{E_s \cdot \varepsilon_s}{\left(\frac{1}{A_s} + \frac{e}{I_y} \cdot X_c\right) \cdot A_c} \quad (1)$$

ここで、 $E_s$ は鋼材のヤング係数 ( $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ )、 $\varepsilon_s$ は鋼材のひずみ、 $A_s$ は鋼材の断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $A_c$ はコンクリートの破断面の断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $X_c$ は鋼材の重心位置からひずみ測定点までの距離 ( $\text{mm}$ )、 $e$ は偏心距離 ( $\text{mm}$ )、 $I_y$ は鋼材の断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ ) である。なお、 $e$ は2mmと仮定した。

ひび割れ発生時の応力は強度の増進に伴い、材齢が長期になるほど大きくなる傾向がみられるが、直接引張強度と同様に繊維混入の影響は

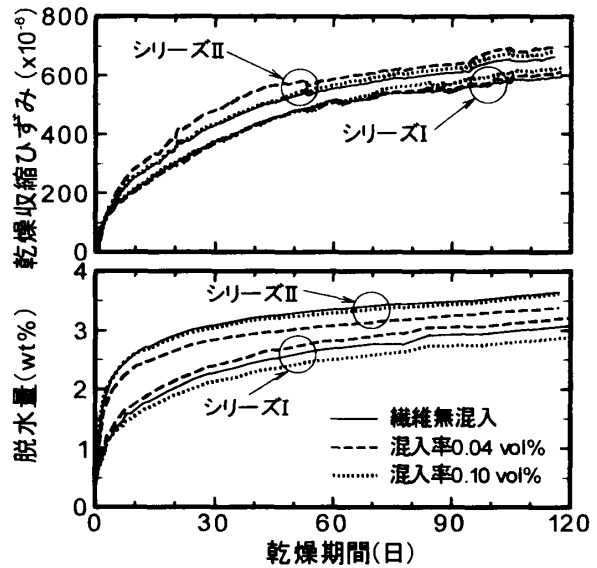


図-7 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化

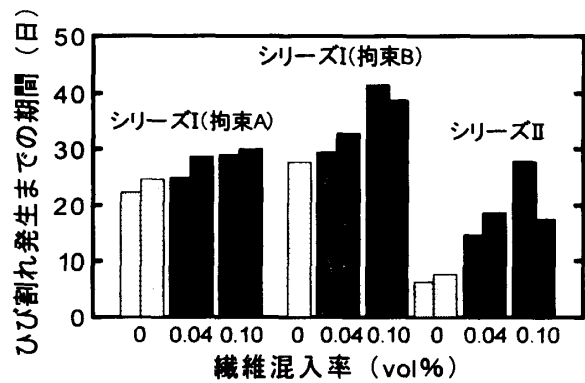


図-8 ひび割れ発生までの期間

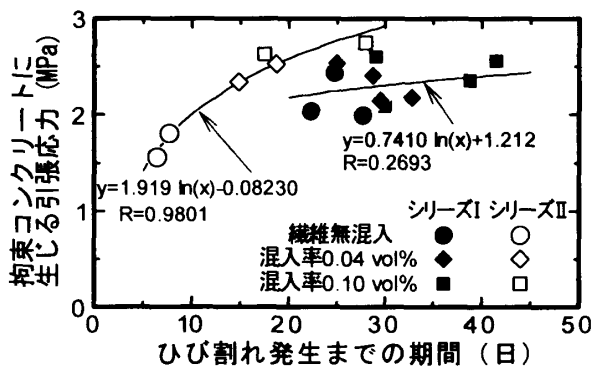


図-9 ひび割れ発生までの期間とコンクリートの引張応力の関係

認められない。また、シリーズⅡの応力のほうが大きい、28日標準養生における基準コンクリートの圧縮強度はシリーズⅠで約36MPa、シリーズⅡで約39MPaであり、強度の違いによる影響と考えられる。

図-10にひび割れ発生までの期間と拘束引張ひずみの関係を示す。拘束引張ひずみ ( $\epsilon_r$ ) は自由収縮(乾燥収縮)ひずみから拘束されたコンクリートの収縮ひずみを引いて求めた。拘束引張ひずみには弾性ひずみとクリープひずみが含まれており、コンクリートの引張伸び能力を表すものである。同図は材齢が長期になるほど伸び能力も大きくなることを示しており、繊維の混入率、乾燥開始材齢、調合の影響は少ない。すなわち、繊維混入率の違いは、ひび割れ発生までの期間には影響するが伸び能力には影響せず、拘束引張ひずみはひび割れ発生までの期間との関係で表すことができることを示している。換言すると、繊維混入によって強度やヤング係数などの物性値は変わらないが、ひび割れ発生だけが遅れていることになる。乾燥を受けるコンクリートは、水分分布に伴う内部応力が生じるため表面の引張応力が大きく、表面の微細なひび割れが進展して破壊に至るものと考えられる。したがって、繊維を混入したものは、微細なひび割れの進展を抑制する効果があると考えられ、このことがひび割れの発生を遅らせたものと思われる。本実験ではひずみ計測に埋込みゲージを使用しているため、ひび割れ幅に関しては明確な論議はできないが、繊維を混入したものはひび割れ幅が小さくなる傾向が認められ、ひび割れ幅抑制効果も見られた。このことは、ひび割れ位置で繊維への応力伝達が行われているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) ナイロン繊維混入率が0.04vol%までは、混入前のコンクリートに対してほとんどスランプは低下しないが、0.10vol%を超えると急激なスランプ低下が見られる。
- (2) 初期ひび割れに対しては0.04vol%の混入率でひび割れ進展の抑制効果が認められた。
- (3) 圧縮、直接引張強度、圧縮および引張ヤング係数には、繊維混入の影響はほとんど見られ

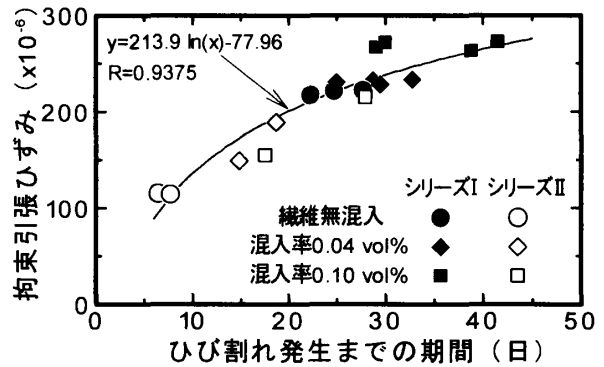


図-10 ひび割れ発生までの期間と拘束引張ひずみの関係

ないが、曲げ強度は0.04vol%の繊維混入率で強度が増大する。また、曲げタフネスは繊維混入率に比例して増大する。

(4) 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化に繊維混入の及ぼす影響は小さい。また、乾燥収縮ひび割れは繊維混入率が大きくなるに従いひび割れの発生が若干遅れる。

以上のようにナイロン繊維を混入したコンクリートは少量であっても靱性の向上が見られるため、コンクリート用材料として常時使用することにより、機能性を備えたコンクリートとして期待できる。

#### 謝辞

本研究は、イスラエルの企業POLYSSIVE LTD. (Dr. D. Selivansky) 並びにBETA TEC (Mr. H. Golombek & Mr. Z. Birger) との共同研究として実施した。

#### 参考文献

- 1) 広原寿竜, D. Selivansky, H. Golombek, Z. Birger, 私信, 2000
- 2) 笠井芳夫, 横山清, 松井勇: コンクリートの初期ひび割れに関する研究, セメント技術年報 XXX, pp. 336-339, 1976
- 3) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 永松静也: コンクリートの直接引張強度に及ぼす乾燥の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp. 828-833, 1997
- 4) ひび割れ研究会: コンクリートのひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その1), セメント・コンクリート, No. 532, pp. 49-56, 1991
- 5) 浜田敏裕, 大森寿志, 齊藤忠, 平居孝之: 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, Vol. 22, No. 2, pp. 319-324, 2000
- 6) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 永松静也: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No. 1, pp. 703-708, 1997