

# 報告 短繊維補強コンクリートの性能評価と施工性

山下 賢司\*1・鬼丸 和彦\*2・伊藤 始\*3・三宅 祐司\*4

**要旨:** はく落防止を目的としてコンクリートに混入する短繊維の種類・混入率は、フレッシュ性状やはく落抵抗性に影響を与える。実構造物への適用にあたって、経済性も踏まえた上で短繊維の種類や混入率を選定することが重要である。本稿では、ボックスカルバートの上床版を対象に、数種類の短繊維を混入したコンクリートの力学性能を評価するとともに、そのコンクリートの製造方法を決定し、実構造物に適用した結果を報告する。力学性能は、道路トンネルで用いられる曲げ靱性試験と、鉄道構造物で用いられる打撃試験の結果から評価した。コンクリートの製造方法は、短繊維の分散性を確保できる練混ぜ時間から決定した。

**キーワード:** はく落防止, PVA 繊維, ポリプロピレン繊維, 曲げ靱性試験, 打撃試験

## 1. はじめに

平成 11 年の山陽新幹線のコンクリート片はく落事故以来、コンクリートのはく落防止に対する意識が高まっている<sup>1)</sup>。コンクリートのはく落防止対策として、少量の短繊維をコンクリート製造時に混入し、コンクリートのひび割れ抵抗性を高める方法が挙げられる<sup>2)</sup>。短繊維を用いてはく落防止対策を行う場合、使用する短繊維の種類や混入率によってコンクリートのフレッシュ性状やはく落に対する抵抗性が大きく異なる。そのため、要求性能を満たす短繊維の種類や混入率を適切に選定し、実構造物に用いることが重要である。一般にトンネルの覆工コンクリートにおける剥落防止対策として、少量の短繊維(体積比で 0.3%程度)を混入するが、トンネルは無筋であり、使用する短繊維の種類や混入率をそのまま他の構造物に適用するのは難しい。

本稿では、ボックスカルバート(道路構造物)の上床版を対象に、数種類の短繊維を混入したコンクリートの力学性能を評価するとともに、そのコンクリートの製造方法を決定し、実構造物に適用した結果を報告する。力学性能は、道路トンネルで用いられる曲げ靱性試験<sup>3)</sup>と、

鉄道構造物で用いられる打撃試験<sup>4)</sup>の結果から評価した。コンクリートの製造方法は、短繊維の分散性を確保できる練混ぜ時間から決定した。なお、実施にあたっては、短繊維の種類と混入率をパラメータとして、短繊維補強コンクリートの力学性能と施工性に与える影響を確認することで評価を行った。

## 2. 検討手順

検討手順を図-1に示す。本検討は、はく落防止用の短繊維をボックスカルバート(道路構造物)の上床版コンクリートへ適用するための事前検討である。本検討は以下に示す2つの試験で構成される。

### ① 性能評価試験

短繊維補強コンクリートのフレッシュ性状、曲げ靱性およびはく落防止効果を確認した。パラメータとして、使用する短繊維の種類と混入率を設定した。ここでは、実施工に使用する短繊維の種類と混入率の選定を目的とした。

### ② 実機試験

性能評価試験にて選定された配合条件を用いて、実機

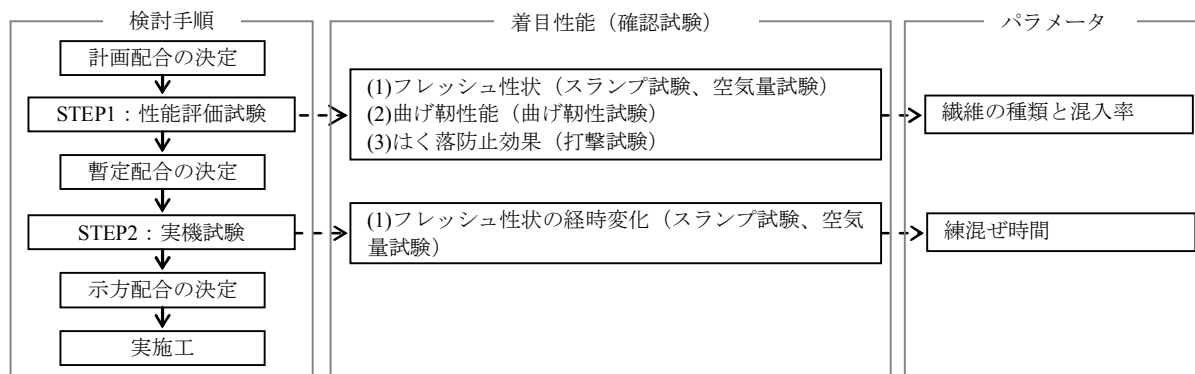


図-1 検討手順

\*1 前田建設工業株式会社 中部支店 工修 (正会員)

\*2 前田建設工業株式会社 中部支店 (非会員)

\*3 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 工博 (正会員)

\*4 中日本高速道路株式会社 名古屋支社 名古屋工事事務所 緑工事区 工修 (非会員)

表-1 配合 (図-1における計画配合)

呼び名	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
30-18-20 BB	49.5	44.3	182	368	737	1078	3.7

AE 減水剤標準形使用

表-2 短繊維

名称	材料	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
繊維 A	PP	-	12	-	-
繊維 B	PP	64.8	12	5000	530
繊維 C	PVA	100	12	25000	1100

-: 不明

表-3 検討ケースと試験結果

試験条件				試験結果一覧									
No	名称	繊維	混入率 (%)	フレッシュ性状						曲げ靱性試験		打撃試験	
				スランブ(cm)			空気量(%)			最大荷重 (kN)	曲げ靱性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	打撃回数 (回)	打撃回数比
				混入前	混入後	差	混入前	混入後	差				
1		-	-	19.0	-	-	4.6	-	-	27.33	-	43	-
2	A-0.1	繊維 A	0.1	19.0	17.0	-2.0	4.8	4.8	±0.0	27.43	0.65	132	3
3	A-0.2	繊維 A	0.2	18.5	15.0	-3.5	4.6	5.4	+0.8	28.14	0.79	500	12
4	A-0.3	繊維 A	0.3	19.0	13.5	-5.5	4.7	5.5	+0.8	26.96	0.91	500	12
5	B-0.05	繊維 B	0.05	19.0	17.5	-1.5	4.7	4.5	-0.2	23.52	0.50	291	7
6	B-0.1	繊維 B	0.1	18.5	15.0	-3.5	4.8	4.5	-0.3	26.38	0.70	500	12
7	B-0.2	繊維 B	0.2	19.0	12.5	-6.5	4.8	4.9	+0.1	28.62	0.91	500	12
8	B-0.3	繊維 B	0.3	19.0	8.5	-10.5	4.8	4.7	-0.1	29.99	1.13	500	12
9	C-0.075	繊維 C	0.075	19.0	17.0	-2.0	5.0	4.5	-0.5	27.38	0.62	447	10
10	C-0.1	繊維 C	0.1	19.0	16.0	-3.0	4.6	4.9	+0.3	25.28	0.66	500	12
11	C-0.2	繊維 C	0.2	18.5	12.5	-6.0	4.8	5.1	+0.3	27.67	1.05	500	12
12	C-0.3	繊維 C	0.3	19.0	9.0	-10.0	4.7	4.8	+0.1	24.28	1.07	500	12

(トラックアジテータ車)にて製造した短繊維補強コンクリートのフレッシュ性状の経時的な変化および短繊維の分散性を確認した。パラメータは、短繊維補強コンクリートの練混ぜ時間とした。2つの試験を経て、実施工時に使用する配合を決定するものである。以下に各試験の詳細を述べる。

### 3. 性能評価試験

#### 3.1 配合ならびに使用繊維

性能評価試験に用いたコンクリートの配合を表-1に、使用した短繊維を表-2に示す。使用した配合は、目標スランブを18cmとしているため、単体量が182kg/m<sup>3</sup>で、土木学会コンクリート標準示方書・施工編(以下:示方書)<sup>2)</sup>に定められた上限値(175kg/m<sup>3</sup>)を超えている。目標スランブを18cmと設定したのは、短繊維混入によるスランブの低下を考慮したためである。

短繊維には、ポリプロピレン繊維2種類(繊維A、B)とビニロン繊維(繊維C)を用いた。一般的に、ビニロン繊維は親水性が大きく、セメントとの付着力が大きい。一方、ポリプロピレン繊維はセメントとの付着力が小さいため、繊維の形状を加工してセメントとの付着を改善させている。表-2に示す繊維Aは長方形断面を有しており、繊維B、Cは円形断面である。

#### 3.2 検討ケース

検討ケースは表-3に示す12ケースとした。ケースNo.1は、短繊維を混入しないベースコンクリートとした。ケースNo.2~ケースNo.12までは表-2に示す短繊維を混入し、混入率をそれぞれ0.05~0.3%とした。短繊維混

入率の上限値0.3%は、トンネル覆工コンクリートにおける標準混入率が0.3%であることから設定した<sup>3)</sup>。一般的に、トンネル覆工コンクリートは、無筋で、また、トンネル内の通風により乾燥しやすく、通常の構造物よりはく落しやすい構造物である。

#### 3.3 フレッシュ性状

##### (1) 試験概要

フレッシュ性状は、スランブ試験と空気量試験により評価した。コンクリートの練混ぜには、公称容量60ℓの強制2軸タイプのミキサを用いた。練混ぜ順序は、骨材と粉体を空練りした後、水を投入し、ベースコンクリートを練上げた後に繊維を投入するものとした。

##### (2) 試験結果

スランブの低下量を表-3および図-2に示す。スランブの低下量とは、短繊維混入前と混入後のスランブの差である。スランブの低下量は、短繊維の混入率が増えるほど大きくなった。繊維の種類で比較すると、繊維Bおよび繊維Cの低下量が大きく、繊維Aの低下量が小さくなった。

空気量の変化を表-3および図-3に示す。短繊維混入率の増加にともなう空気量の変化は、繊維Aのように増加傾向を示すものと、繊維BおよびCのように変化の小さいものがあり、短繊維ごとに異なる性状を示した。一般的に、短繊維をコンクリートに混入すると短繊維が空気を巻き込み、コンクリートの空気量は増加する傾向にあるとされるが、繊維BおよびCにおいて、その傾向は確認できなかった。

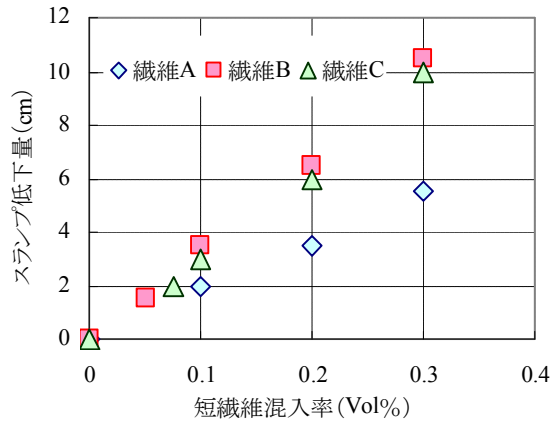


図-2 スランプの変化

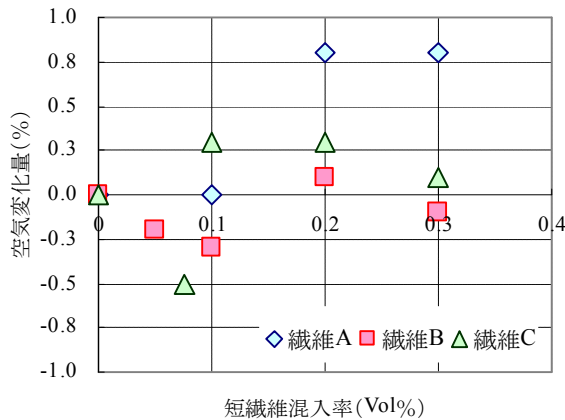


図-3 空気量の変化

### 3.4 曲げ靱性試験

#### (1) 試験概要

曲げ靱性試験は、日本道路公団試験方法 JHS 730-2003「繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法」に準拠した。試験体の寸法は、断面を 150×150mm とし、長さを 530mm とした。曲げ載荷スパンは 450mm とした。計測機器として、荷重は油圧式圧縮試験機の油圧変換機により、たわみは変位計により計測した。

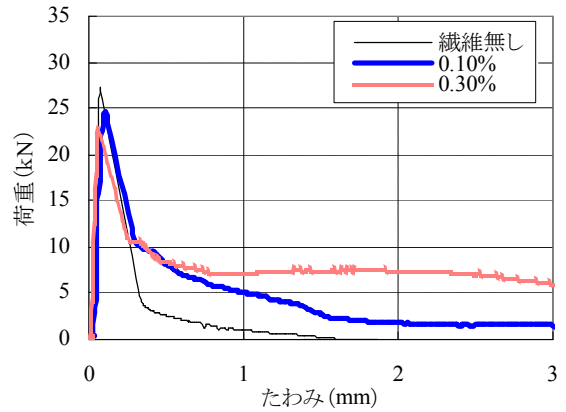
表-3 に示した曲げ靱性係数は下記の方法で算出した。

$$\sigma_b = \frac{T_b}{\delta_c} \cdot \frac{L}{wh^2}$$

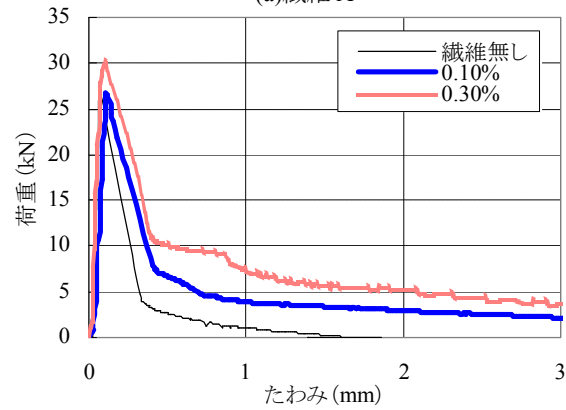
ここに  $\sigma_b$  : 曲げ靱性係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $T_b$  : たわみ 3mm までの面積 (N・mm)  
 $\delta_c$  : 3mm  
 $L$  : スパン 450mm  
 $w$  : 破断面の幅 (mm)  
 $h$  : 破断面の高さ (mm)

#### (2) 試験結果

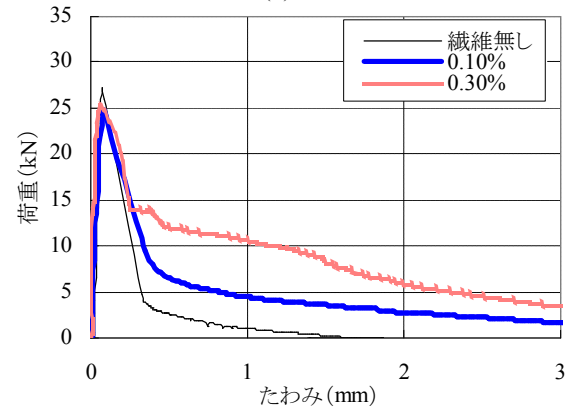
試験結果を表-3 に、荷重-たわみ曲線を図-4 に示す。なお、荷重-たわみ曲線は、短繊維無し (ベースコンクリート)、短繊維混入率 0.1%および 0.3%の結果を示した。試験体数は 3 体であるが、3 体とも同様の性状を示



(a)繊維 A



(b)繊維 B



(c)繊維 C

図-4 荷重-たわみ曲線

したため、同図中には、代表的な 1 体の試験結果のみを示した。

表-3 に見られるように、最大荷重と短繊維の混入率との明確な相関は確認できなかった。一方、曲げ靱性係数は、短繊維の混入率が大きくなるほど増加する傾向がみられる。

図-4 に見られるように、ベースコンクリートの荷重は、ひび割れ発生後に低下し、たわみ 1.6mm 付近で消失している。一方で、短繊維補強コンクリートの荷重は、ベースコンクリート同様にひび割れ発生後に低下するものの、ベースコンクリートに比べて高い値を保持しており、短繊維の混入率が大きくなるほどその効果も高い。

道路トンネルの覆工コンクリートにおいては、はく落防止対策として、本検討で対象としている短繊維（繊維径  $100\mu\text{m}$  程度、繊維長  $12\text{mm}$  程度）より太くて長い短繊維（繊維径  $1000\mu\text{m}$  程度、繊維長  $40\text{mm}$  程度）を、標準で  $0.3\%$  混入する<sup>3)</sup>。その管理値は、本実験にて実施した曲げ試験方法と同じ JHS 730-2003 法から求められた荷重-たわみ曲線において、たわみ  $3\text{mm}$  時の荷重が  $10.5\text{kN}$  以上としている。本検討で用いた短繊維は、すべてのケースでその管理値を満足していない。今回用いた細径の短繊維の荷重保持性能は、覆工コンクリートで用いられる太径の短繊維よりも低いことが確認できた。

### 3.5 打撃試験

#### (1) 試験概要

示方書<sup>2)</sup>によると、「使用する短繊維の種類に応じてはく落防止効果を付与するのに有効な混入率を定めるためには、打撃による損傷を加えることではく落させる実験等により、その効果を確認するのがよい」と明記されている。本実験においては、はく落防止効果を評価する試験として打撃試験を用いた。打撃試験とは、人力によりコンクリートのひび割れ導入部に打撃エネルギーを与え、ひび割れの進展（コンクリートのはく落）に対する抵抗性を評価する試験である。人力で打撃を加える場合、作業者ごとに試験条件が異なり客観的に性能を評価しているとは言い難い。

そこで、本実験では、示方書に定められた打撃試験を再現できる試験機を製作し、試験を実施した。製作した試験機を図-5 に示す。試験機は、4本のハンマーと駆動部（モーターおよびカム）、制御盤、これらを支える架台で構成される。ハンマーは水平位置より  $30\text{cm}$  の高さから自由落下させるよう設計されている。ハンマー1本当たりの重さは  $700\text{g}$  である。また、ハンマーの打撃速度は制御盤内のハンドルにて調整でき、 $2$  回/秒を目安とした。各ハンマーの打撃回数は制御盤にてデジタル表示される。

試験体には、示方書に従い図-6 に示すように、模擬的にひび割れを導入するために、あらかじめ穴をあけておき、所定のコンクリート強度が発現した後、膨張材の膨張圧により模擬的なひび割れを導入した。

#### (2) 管理値

打撃試験の管理値は、示方書を参考に打撃回数比  $8$  以上とした。打撃回数比とは、短繊維補強コンクリートにおけるコンクリート片がはく落したときの打撃回数を、ベースコンクリートにおけるコンクリート片がはく落したときの打撃回数で除した値である。既往の文献<sup>5)</sup>によると、打撃回数比が  $8$  あたりを境に、打撃によりはく落を生じない性状を示したとされている。



(a) 打撃試験機



(b) 打撃試験機ハンマー部

図-5 打撃試験機



図-6 打撃試験用試験体

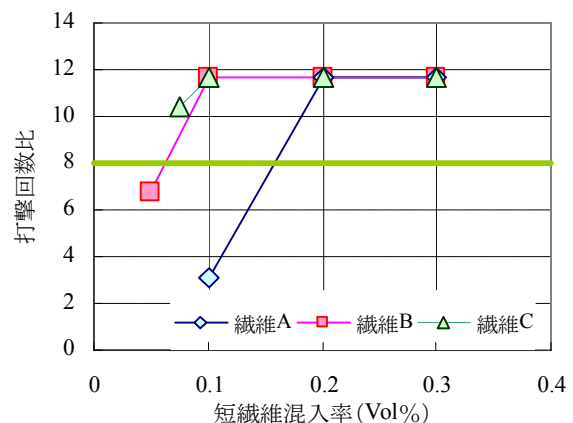


図-7 打撃回数比と短繊維混入率の関係

#### (3) 試験結果

試験結果を表-3 に、打撃回数比と短繊維混入率の関係を図-7 に示す。打撃試験において打撃回数  $500$  回を超えるケースは、コンクリートにはく落に進展するひび割れが確認できなかったため、打撃試験は打撃回数  $500$  回（打撃回数比  $12$  に相当）で終了した。表-3 に示すようにベースコンクリートの打撃回数は  $43$  回であり  $344$  回で打撃回数比  $8$  に相当する。管理値である打撃回数比  $8$  以上を満足する短繊維混入率は、繊維 A で  $0.2\%$ 、繊維

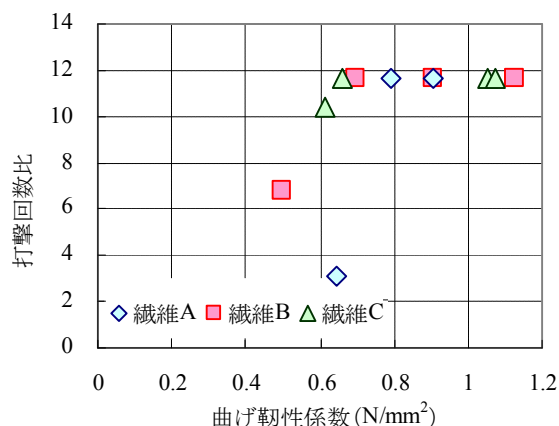


図-8 打撃回数比と曲げ靱性係数の関係

Bで0.1%、繊維Cで0.075%であった。

### 3.6 打撃回数比と曲げ靱性係数との関係

打撃回数比と曲げ靱性係数との関係を図-8に示す。打撃試験結果は、試験を途中で終了しているため、打撃回数比12で頭打ちになっている。繊維Aの打撃回数比が最も小さいケース（打撃回数比：3、曲げ靱性係数：0.65N/mm<sup>2</sup>）と繊維Cの打撃回数比が最も小さいケース（打撃回数比：10、曲げ靱性係数：0.62N/mm<sup>2</sup>）を比較すると、曲げ靱性係数は、繊維Aより繊維Cの方が低い値を示したが、打撃回数比は繊維Cより繊維Aの方が低い値を示した。これらより、打撃回数比と曲げ靱性係数との関係は、繊維（種類や形状）ごとに傾向が異なるため、短繊維の評価にあたっては、使用目的に合った試験方法の選択が重要である。

## 4. 実機試験

短繊維補強コンクリートの実施工を考えた場合、スランプの低下などの施工性からの観点に加えて、経済性の観点から、同じく落防止効果が得られる場合には、少ない短繊維の混入率のほうが合理的である。実施工には、図-7の打撃回数比と経済性から繊維Cを選定し、混入率を0.075%とすることとした。本章では、実機（トラックアジテータ車）にて製造した短繊維補強コンクリートの経時的なフレッシュ性状の変化および繊維の分散性を確認した。

### 4.1 配合ならびに検討ケース

配合表を表-4に示す。配合は、土木学会「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）」を使用し、短繊維混入によるスランプの低下も見込み、ベースコンクリートのスランプを15cmとした。また、混和剤には高性能AE減水剤を使用し、単位水量を減らした。

パラメータとして短繊維のアジテータ車による練混ぜ時間を2分、3分、および4分と設定した。

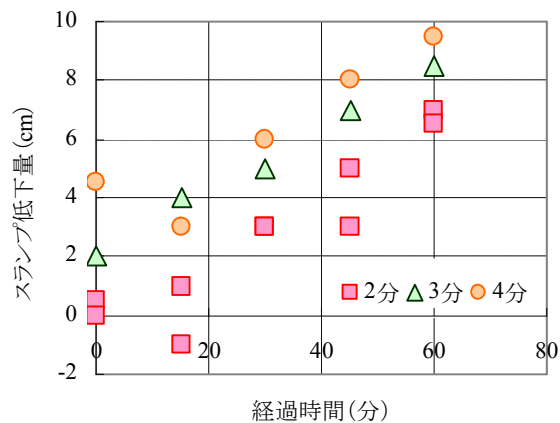


図-9 スランプの経時変化

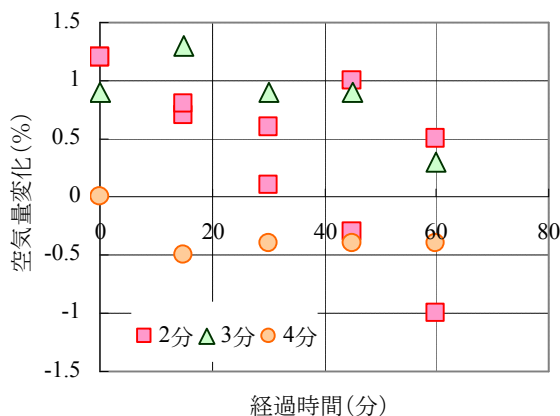


図-10 空気量の経時変化

表-4 配合（図-1における暫定配合）

呼び名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
30-15-20 BB	50.0	46.5	161	322	832	1093	3.2

高性能 AE 減水剤使用

### 4.2 フレッシュ性状の経時変化

フレッシュ性状（スランプ、空気量）の経時変化を図-9および図-10に示す。短繊維投入後から60分程度で10cm程スランプが低下している。スランプの低下原因として、短繊維の吸水や、空気量の低下、さらには、実機試験を実施した時期が8月中旬であり、セメントの水和反応や混和剤のスランプ保持性能の低下などが考えられる。

攪拌時間に注目すると、攪拌時間が長くなるほど、スランプの低下が大きい。また、空気量では、攪拌時間が短いほど、時間の経過による空気量の低下が大きい結果であった。

### 4.3 分散性確認試験

#### (1) 試験概要

本検討における短繊維補強コンクリートは、プラントにてベースコンクリートを製造後、アジテータ車にて施



図-11 分散性確認試験

工現場へ運搬し、施工現場でアジテータ車にて短繊維を練混ぜた。そのため、短繊維の補強効果を期待する場合、アジテータ車による均質な短繊維の練混ぜが重要であった。短繊維の分散性確認試験は、JSCE-F554-1999「鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」に準じた。分散性確認試験は図-11に示すように所定量のコンクリートを水で洗い、取り出された短繊維の混入率を測定する試験である。試料はエアメータの容器（約70）によって採取した。取り出した短繊維は、市販のドライヤーで十分に乾かした後、重量を測定した。

なお、試料の採取位置は、アジテータ車内の短繊維の分散状況を確認するために、アジテータ車4.5m<sup>3</sup>のうち、最初の1m<sup>3</sup>から一回、真ん中の1m<sup>3</sup>から一回、最後の1m<sup>3</sup>から一回ずつ採取して、それぞれの試料を前半部、中間部および後半部とした。

## (2) 試験結果

分散性確認試験結果を図-12に示す。混入比率とは、採取した試料中に含まれる短繊維の実測値と設計の比率である。アジテータの攪拌時間が、2分もしくは3分では、混入比率のばらつきが大きい。本実験では、短繊維の様な分散を考えた場合、4分程度のアジテータ車の攪拌が必要であるものと考えられる。

アジテータ車の練混ぜ時間を4分としても、短繊維の混入比率が90%を下回っていた。この原因は、分散性確認試験において、水でコンクリートを洗う際に、短繊維が細かすぎてコンクリートと一緒に水で流されてしまったためである。分散性確認試験の試験方法の確立は、品質管理に重要であり今後の課題である。

## 5.まとめ

本検討で得られた結果を以下に示す。

- (1) 室内試験の結果から、コンクリートのスランプは短繊維混入率の増加にともない低下することが確認できた。空気量は、傾向が明確でなかった。

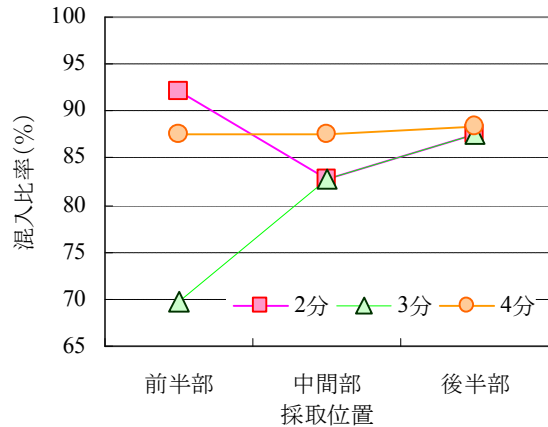


図-12 分散性確認試験結果

- (2) 曲げ靱性試験の結果から、曲げ靱性係数は短繊維混入率の増加にともない増加し、最大荷重は変化しないことが確認できた。また、今回用いた細径の短繊維の荷重保持性能は、覆工コンクリートで用いられる太径の短繊維よりも低いことが確認できた。
- (3) 打撃試験の結果から、管理値とした打撃回数比8を満足した短繊維の混入率は、繊維Aで0.2%、Bで0.1%、Cで0.075%であった。また、曲げ靱性係数と打撃回数比は明確な相関は確認できなく、今後、データの蓄積が望まれる。
- (4) アジテータ車を用いて練り混ぜたコンクリートのフレッシュ性状と分散性確認試験から、短繊維の攪拌時間は4分程度が適切と判断した。分散性確認試験の試験方法の確立は、品質管理に重要であり今後の課題とした。

## 参考文献

- 1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片はく落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】, 2007.12.
- 3) 中日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領【繊維補強覆工コンクリート編】, 2008.8.
- 4) 日本鉄道施設協会: 土木工事標準仕様書, 2006.4.
- 5) 細田 暁, 菅野貴浩, 石橋忠良: 合成短繊維添加によるコンクリート片のはく落対策, 土木学会論文集, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003