

報告

[1215] ECL工法に使用する繊維補強コンクリートの基礎的実験

正会員 ○ 横田季彦 (日本国土開発技術研究所)
 正会員 竹下治之 (日本国土開発技術研究所)
 池田 真 (日本国土開発エンジニアリング本部)

1. はじめに

近年、シールドトンネル工事において、工期の短縮、経済性の向上およびテールボイドに起因する地盤沈下の防止などの観点から、セグメントを用いず、現場で直接コンクリートを打設する直打ちシールド (以下、ECLと略記) 工法が脚光をあびている。本報告では、このECL工法の覆工コンクリートに適用する繊維補強コンクリートを選定することを目的として、種々の材質および寸法・形状を有する各種の繊維を用いて行った繊維補強コンクリートの基礎的特性実験の結果と、このうちの一種類の繊維補強コンクリートを用いて行ったポンプ圧送時の繊維の配向性について述べる。

2. 繊維補強コンクリートの基礎的特性実験

表-1 ベースコンクリートの配合

2.1 実験概要

2.1.1 配合および使用材料

スランプ (cm)	Gmax (mm)	w/c (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE減水剤
20±1.5	20	50	65	219	438	1017	555	1.095

ベースコンクリートの配合は、覆工コンクリートとして水密性が要求されること、繊維の混入によりワーカビリティが大きく低下することなどを考慮して決定した。表-1に基本配合を、表-2に使用材料を示す。

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	市原産山砂40% (比重=2.58, FM=1.45) 相模原水系60% (比重=2.58, FM=3.23)
粗骨材	鹿島産川砂利 (比重=2.62, FM=7.03)
AE減水剤	リグニスルホン酸化合物

2.1.2 使用繊維

使用した繊維としては、耐久性、曲げ強度、経済性などの点から、鋼繊維およびビニロン繊維を選定した。このうち、鋼繊維について

表-3 使用繊維の仕様

は、付着、防錆、曲げ靱性などの点から、形状、寸法および材質の異なる6種類について検討を行った。表-3に使用繊維の仕様を示す。なお、各繊維の混入率は体積比で1.0, 1.5, 2.0%の3種類とした。

種類	記号	寸法 (mm)	材質	形状
鋼 繊 維	DA	φ0.60×40mm	亜鉛メッキ	両端フック型
	DB	φ0.80×60mm	炭素鋼	両端フック型
	SC	0.5×0.5×30mm	炭素鋼	ストレート形状
	SSA	φ0.45×30mm	ステンレス鋼	ストレート形状
	SSB	φ0.45×25mm	ステンレス鋼	トフカ [®] 形状
	KC	φ0.60×30mm	炭素鋼	波形異形状
ビニロン繊維	V	0.25×0.75×30mm	ビニロン	ストレート形状

2.1.3 繊維補強コンクリートの製造方法

繊維補強コンクリートの製造は、ベースコンクリートを練り混ぜ後、各繊維を所定量混入し、その後再び練り混ぜを行った。

なお、実験に使用したミキサーはパン型強制式ミキサー (100ℓ) であり、練り混ぜ時間は繊維混入時に1分30秒、その後の練り混ぜ時に2分の計3分30秒とした。

2.1.4 検討内容

繊維補強コンクリートの基礎的特性を把握するため、フレッシュコンクリートおよび硬化コン

クリートについて、表-4に示す試験を行った。このうち、圧縮強度試験および曲げ強度試験は、材令7日および28日で載荷試験を行った。各試験の供試体は、圧縮強度用が20℃標準水中養生、曲げ強度用が20℃、85%RHの恒温恒湿室で気中養生とした。また、発錆状況の観察用供試体は10×10×45cmの角柱供試体を使用し、材令1日で脱型後温度30℃、湿度90%RHの恒温恒湿室に静置し、材令10日で濃度10%の食塩水を3回散布して2ヶ月間静置後、発錆状況を目視により観察した。

表-4 試験項目

フレッシュコンクリート	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量測定試験	JIS A 1128
	スランプフロー試験	—
硬化コンクリート	圧縮強度試験	JIS A 1108
	曲げ強度試験	JIS A 1106
	発錆状況の観察	—

2.2 実験結果および考察

2.2.1 フレッシュコンクリートによる比較

繊維混入率とスランプの低下量との関係を図-1に、繊維混入率とスランプフローの低下量との関係を図-2に示す。

これらの図に示されるように、繊維の種類に関係なく、いずれも繊維の混入率の増加に伴い、スランプおよびスランプフローもほぼ直線的に低下することが分かる。特に、ピニロン繊維(V)を混入

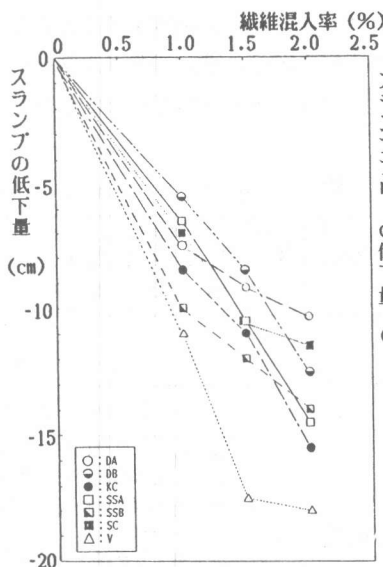


図-1 繊維混入率とスランプの低下量との関係

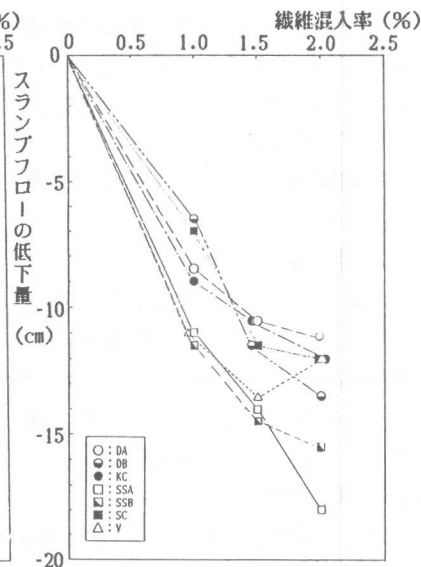


図-2 繊維混入率とスランプフローの低下量との関係

した場合はスランプの低下が大きく、混入率を1.0、1.5、2.0%と増加させることにより、スランプの低下量は、11.0、16.5、17.0cmとなった。

また、繊維の形状に関しては、異形のもの(SSBおよびKC)のスランプおよびスランプフローの低下量が大きくなっており、ストレートよりも異形の繊維のほうが、繊維の混入によるワーカビリティの低下が大きいと考えられる。

既往の研究¹⁾によれば、繊維補強コンクリートをポンプ圧送する場合のスランプの限界は12cm程度とされており、ECL工法にこのようなスランプの低下が大きな繊維補強コンクリートを用いる場合は、流動化剤等を併用し、コンクリートの流動性を高める必要があると考えられる。

繊維混入後の空気量の変動を図-3に示す。同図に示されるように、DBを除き、いずれも繊維混入後の空気量は幾分低下している。既往の研究²⁾によれば、繊維補強コンクリートは繊維の混入時に空気をまき込むため、ベースコンクリートよりも若干空気量が増大するとされており、本実験の結果と異なる。この原因は明確ではなく、今後ベースコンクリートの混和剤や、使用ミキサーのタイプに関して、空気量の変動について検討を行いたい。

2.2.2 硬化コンクリートによる比較

(1) 圧縮強度

ベースコンクリートの圧縮強度を基準として算定した各繊維補強コンクリートの圧縮強度比と繊維混入率との関係を図-4に示す。

同図に示すように、長さ60mmの両端フック付繊維を混入したもの(DB)については、圧縮強度比が0.9前後となっており、約10%の強度低下が認められる。この原因としては、供試体寸法($\phi 10 \times 20\text{cm}$)に対して繊維長が長かったことが考えられる。他の繊維補強コンクリートは、いずれもベースコンクリートに比べて若干強度が増加している。特に、7日強度の増加が大きく、なかでもドックボーン形状のもの(SSB)の増加率が大きい

のが特徴的である。また、繊維の混入率に関しては、その増加に伴い圧縮強度比も大きくなる傾向にあることが分かる。

(2) 曲げ強度

前述した圧縮強度比同様、ベースコンクリートの曲げ強度を基準として算定した各繊維補強コンクリートの曲げ強度比と繊維混入率との関係を図-5に示す。同図に示すように、いずれも繊維の混入率を2.0%とすることによって、材令28日における曲げ強度比は2.0~2.5倍にもなることが分かる。

繊維の形状の違いが曲げ強度比に及ぼす影響については、SSBとSSAの試験結果の比較から、異形の繊維を混入した方(SSB)が曲げ強度比が大きくなることが分かる。すなわち、異形繊維を混入した場合、繊維とコンクリートとの付着力が増大して繊維が抜けにくくなり、曲げに対する補強効果が増大するものと考えられる。また、DAとDBの試験結果から、繊維長が長いものの(DB)方が、曲げ強度比が大きくなることが分かる。

(3) 変形特性

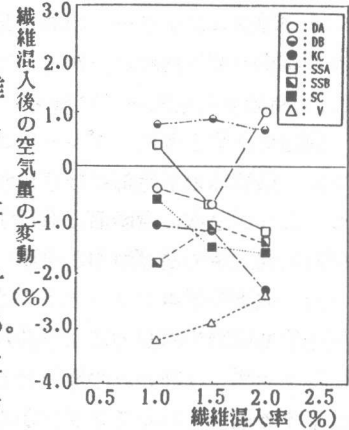


図-3 繊維混入後の空気量の変動

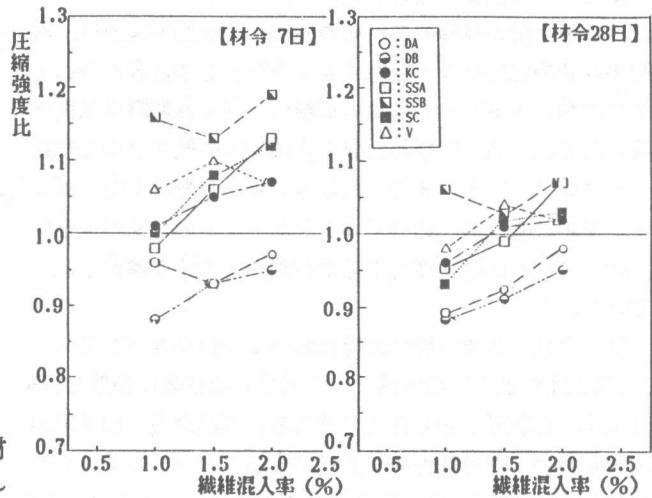


図-4 圧縮強度比と繊維混入率との関係

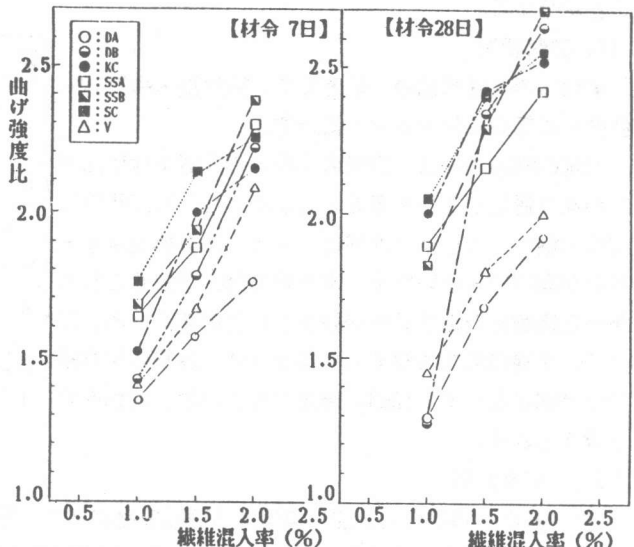


図-5 曲げ強度比と繊維混入率との関係

繊維補強コンクリートの曲げ強度試験における荷重～変位曲線の一例として、混入率2.0%時の場合を図-6に示す。

同図に示すように、プレーンコンクリートでは、供試体の下縁部にひびわれが発生すると、これが急激に全断面に進行するため、ひびわれ発生後の曲げ耐力が急激に低下する。一方、繊維補強コンクリートでは、ひびわれ発生後も繊維の引張力により曲げ耐力は急激に低下せず、ひびわれの進行とともに徐々に低下する傾向にあることが分かる。

また、このような繊維補強コンクリートにおける最大耐力以降の曲げ耐力の緩やかな低下傾向は、繊維の形状や材質によっても大きく異なるものと考えられる。すなわち、ストレート形状の繊維に比べて異形繊維は引き抜けにくいいため、ひびわれ発生後の荷重の低下がかなり緩やかになっている。また、同じストレート形状でも、ビニロン繊維は鋼繊維に比べてコンクリートとの付着が大きいいため、ひびわれ発生後もさらに荷重が増大する傾向を示している。

図-7は、荷重～変位曲線において変位がスパン長の1/150に達するまでの面積として求めた曲げ靱性係数と繊維混入率との関係を示したものである。同図から、混入率の増加に伴い、曲げ靱性係数も増加することが分かる。また、プレーンコンクリートの曲げ靱性係数が約5 kgf/cm²程度と考えられることから、繊維の混入により曲げ靱性係数は4～9倍にもなることが分かる。

(4) 発錆状況

供試体の発錆状況の一例として、繊維混入率2%の供試体の観察結果を表-5に示す。

発錆の試験条件は、実際の地中での発錆条件に比べてかなり過酷なものと考えられるが、ECL工法では床版の施工のように表面部にペースト層を形成させることが期待できないため、本実験で発錆が認められなかった繊維を選定するのが好ましいと考えられる。従って、試験結果でも認められるように、通常の炭素鋼では長期において、発錆が懸念されるため、これをECL工法に適用するのは好ましくないものと考えられる。

2.2.3 総合評価

図-8に、本ECL工法に適用する繊維の選定フロー図を示す。同図に示すように、施工性および本実験での改善効果から、今回実験を行った範囲ではステンレス製ドッグボーン形状の繊維

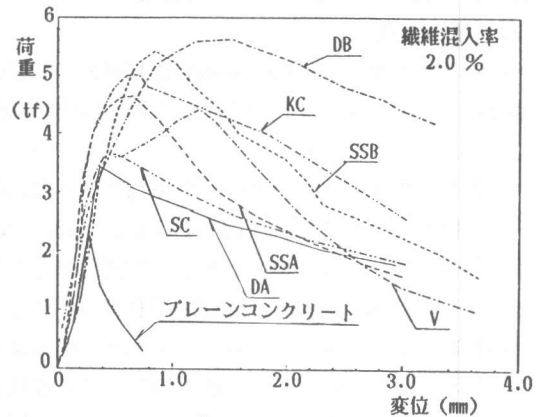


図-6 荷重～変位曲線の一例

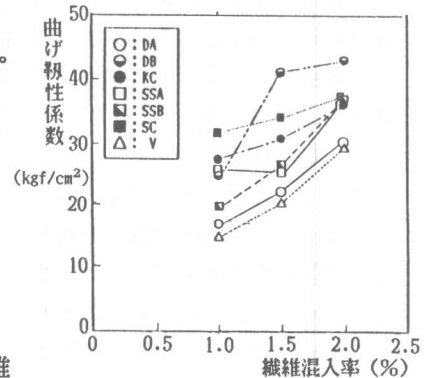


図-7 曲げ靱性係数と繊維混入率との関係

表-5 発錆状況の観察結果 (Vf=2.0%)

記号	材質	発錆状況	評価
D A	亜鉛メッキ	繊維露出部で発錆有り	○
D B	炭素鋼	一部に発錆有り	△
K C	炭素鋼	全面に斑点状で有り	×
SSA	ステンレス	ほとんど無し	○
SSB	ステンレス	繊維露出部で発錆有り	○
S C	炭素鋼	全面に斑点状で有り	×
V	ビニロン	発錆無し	◎

(SSB) が本ECL工法には最適であることが分かった。このため、この繊維を用いて後述する配向性検討実験を行った。

3. 繊維補強コンクリート圧送時の配向性検討実験

3.1 試験目的

一般に繊維補強コンクリートでは、繊維の配向性はその力学的性質に大きな影響を及ぼす。すなわち、引張応力方向に対して繊維の配向が同方向であれば、繊維による補強効果は最大となるが、引張応力方向と直角方向に繊維が配向されると、補強効果はほとんど期待できない。このため、シールドの覆工コンクリートとして繊維補強コンクリートを適用する場合には、コンクリート中の個々の繊維が覆工コンクリートの作用外力に対して、有効な方向に配向されることが望ましい。

このような観点から、繊維補強コンクリート圧送時の配向性について基礎データを得ることを目的として、配向係数の測定を行った。

3.2 実験概要

実験に使用した繊維は、前述した基礎的特性試験の結果からステンレス製のドッグボーン形状のもの（繊維長：30mm）であり、繊維の混入率は1.0%とした。配向係数の測定位置は、図-9に示す①～⑨の位置であり、断面中の繊維の本数を測定して、次式によって算定した。

$$\beta = \frac{n \cdot A_f}{A_c \cdot V_f} \quad \dots\dots ①$$

ここに、 β ：配向係数、 n ：繊維の本数、 A_f ：繊維1本の断面積(cm^2)
 A_c ：コンクリートの断面積(cm^2)、 V_f ：繊維の混入率(%)

3.3 実験結果および考察

配向係数の算定結果を表-6に、配向係数と圧送距離との関係を図-10に示す。

図-10に示すように、ポンプ圧送時の配向係数はコンクリートポンプ内では、3次元ランダム配向の理論値(0.405)以下

で最小値となり、テーパ管通過後に最大値を示す。また、分岐管およびベント管を通過後は配向係数は小さくなり、ストレート管中では再び増大する傾向にある。小林らの研究³⁾によれば、繊維補強コンクリートの配向係数は周囲の拘束状態に大きく影響を受けることが報告されており、本実験でも、これらの傾向が認められた。すなわち、テーパ管通過後は、断面寸法が次第に小さくなるため周囲の拘束が増大し、コンクリート中の繊維が圧送方向に配向される傾向を示す。また、分岐管やベント管通過時は断面内での流速が不均一となるため繊維の配向が乱され、配

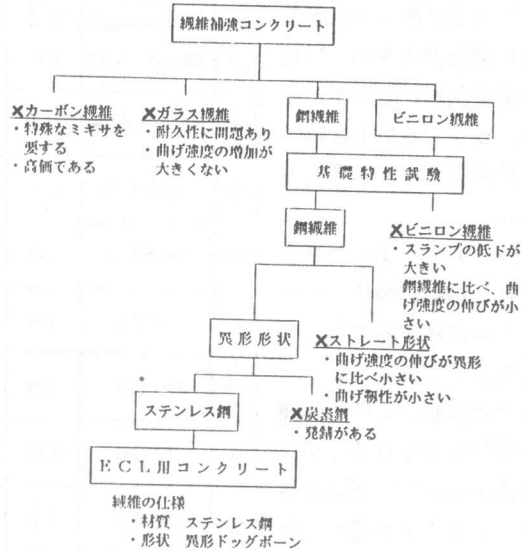


図-8 繊維の選定フロー図

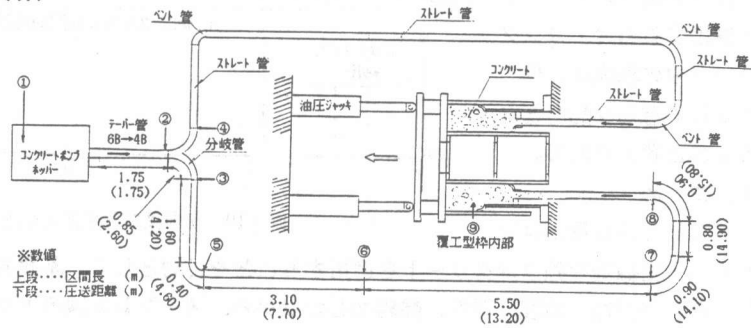


図-9 配向係数の測定位置

向係数も小さくなる。そして、ストレート管部では断面内の流速が一定となるため、繊維は次第に圧送方向に配向される傾向にある。

表-6 配向係数の算定結果

測定位置	配管状態	圧送距離 L (m)	断面積 A _G (cm ²)	繊維断面積 A _f (mm ²)	繊維混入率 V _f (%)	断面積中の繊維の数 n (本)	配向係数 β
①	コンクリート・ネッパ内	0.00	78.54	0.196	1.0	1 147	0.332
						2 119	
②	6B→4B, 分岐管前	1.75	78.54	0.196	1.0	1 221	0.566
						2 232	
③	分岐管後・A	2.60	78.54	0.196	1.0	1 161	0.427
						2 180	
④	分岐管後・B	2.60	78.54	0.196	1.0	1 169	0.437
						2 181	
⑤	ベント管後	4.60	78.54	0.196	1.0	1 181	0.457
						2 184	
⑥	ストレート管中	7.70	78.54	0.196	1.0	1 196	0.497
						2 202	
⑦	ベント管前	13.20	78.54	0.196	1.0	1 192	0.462
						2 178	
⑧	ベント管後	15.80	78.54	0.196	1.0	1 172	0.427
						2 169	
⑨	型枠内部	18.80	78.54	0.196	1.0	1 143	0.382
						2 162	

これらに対して、覆工型枠内では断面寸法が急激に増加するため、周囲の拘束状態が緩やかとなり、ランダム配向に近い状態になるものと考えられる。

以上のことから判断すれば、繊維補強コンクリートを圧送する場合、圧送配管内ではコンクリート中の繊維が配管の周囲から拘束を受けるため、圧送方向に配向される状態となることが考えられるが、覆工型枠内では急激に断面寸法が大きくなるため再びランダム配向状態となり、覆工コンクリートとして十分適用可能であることが確認できた。従って、ECL工法に繊維補強コンクリートを適用する場合、コンクリート中の繊維は、外力に対して有効な配向となるものと考えられる。

4. まとめ

ECL工法の覆工コン

クリートに繊維補強コンクリートを適用することを目的として、基礎的特性試験を行った結果、施工性、経済性、強度、靱性、発錆などの点から、ステンレス製のドッグボーン形状の繊維が適していることが分かった。また、繊維補強コンクリートをポンプ圧送した場合、配管内では圧送方向に卓越した配向となるが、覆工型枠内部でランダム配向状態となることが分かった。しかし、繊維の配向性については、繊維の形状・寸法や最大骨材寸法なども影響を及ぼすと考えられるため、今後は、これらについて引き続き検討を行いたい。

【参考文献】

- 1) 西垣、石堂、桐ヶ谷、山内；スチールファイバーコンクリートの圧送性能に関する実験的研究、第9回コンクリート工学年次論文報告集、1987年6月
- 2) 三瀬、真嶋、宮武；各種繊維補強コンクリートの比較試験、第6回コンクリート工学年次論文報告集、1984年6月
- 3) 小林；繊維補強コンクリート、オーム社、1981年6月

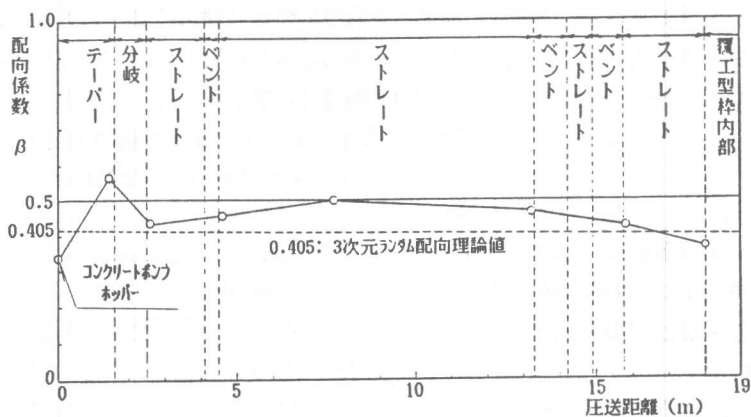


図-10 配向係数と圧送距離との関係