

# 論文 シールド工用コンクリート系セグメントの剥落防止を目的とした 繊維シートの適用に関する研究

星 英徳<sup>\*1</sup>・倉木 修二<sup>\*2</sup>・清水 幸範<sup>\*3</sup>・木村 定雄<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート片の直接落下を防止することを目的に, その内表面に耐アルカリガラス繊維シートをあらかじめ布設して製作するセグメントを開発している。繊維シートがかぶり部分のコンクリートの剥落を防止する効果を, 圧縮実験, 押抜き実験および実物大セグメントの偏圧載荷実験により確認した。その結果, 繊維シートを布設することにより, かぶり部のコンクリート片の剥落防止に対して繊維シートが有効に働くことを確認した。

**キーワード:** シールドトンネル, セグメント, 繊維シート, 剥落防止, リスクマネジメント

## 1. はじめに

近年, シールドトンネル工事では, 工期短縮やコストの縮減等を目的として, 従来から用いられてきた二次覆工を省略する傾向がある。二次覆工が省略されることにより, トンネル内面となるコンクリート表面部では, 漏水や中性化等により, 鉄筋腐食などの劣化速度が急激に早まることが予想される。その一方で, ライフサイクルコストの観点に立つと, 維持補修に関するコストの縮減が求められている。さらにまた, 施工時におけるシールドマシンの過大なジャッキ推力等によりセグメントの隅角部や稜線部に生じるコンクリートの欠け等は, その直下にある設備や作業者に影響を与えることが懸念される。このような背景から, 道路トンネルや鉄道トンネルでは, コンクリート片の剥落を防止するために, 各種の繊維シートを後付け施工する工法が種々検討されている<sup>1)</sup>。そこで筆者らは, あらかじめ繊維シートをセグメントの内表面に

布設し, 剥落を長期にわたって防止することを考えた<sup>2)3)4)</sup>。本研究は耐アルカリガラス繊維シートをあらかじめ布設した鉄筋コンクリート製セグメントの表面部コンクリートの剥落を防止する性能を各種の実験で検討したものである。

## 2. 基礎検討

### 2.1 検討概要

表 - 1 に基礎検討の実験項目とその目的を示す。基礎検討では, 圧縮実験および薄版を用いた押抜き実験を実施した。実験材齢は 45 ~ 54 日である。

### 2.2 繊維シート

表 - 2 に繊維シートの緒元を示す。繊維シートの選定は, アルカリ性を示すコンクリート中に繊維シートを直接布設するため, 耐アルカリガラスとした。繊維シートの種別はその編目格子サイズ, 繊維の織密度および単位面積あたりの重量の異なる 4 種類 (写真 - 1) である。

表 - 1 基礎検討の実験項目とその目的

実験項目	実験目的	測定項目	観察項目
圧縮実験	局部コンクリートの圧壊に対する繊維シートの抑止効果の確認	最大荷重 荷重と鉛直・水平変位	圧壊時の状況
押抜き実験	表面部コンクリートの脱落に対する繊維シートの抑止効果の確認	荷重と鉛直変位量 繊維シート剥離面積	繊維シート剥離状況

\*1 石川島建材工業(株) セグメント事業本部技術部 (正会員)

\*2 日本コンクリート工業(株) セグメント営業部

\*3 パシフィックコンサルタンツ(株) 鉄道部 修士(工学)

\*4 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 博士(工学) (正会員)

表 - 2 繊維シートの緒元

No	格子サイズ	引張強度 (N/25mm)		繊維密度 (本/25mm)		単位重量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)
		縦	横	縦	横		
A	1.0×1.0	333	588	16×2	16	93	0.20
B	7.0×5.0	1750	1500	2.7×17	33	430	0.85
C	5.0×5.0	300	300	5.0×2	5	60	0.20
D	5.0×5.0	550	550	5.0×2	5	130	0.35

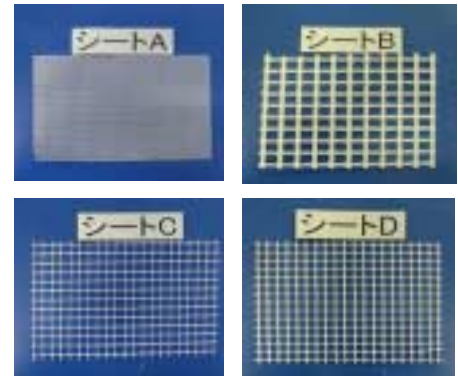


写真 - 1 繊維シート

### 2.3 コンクリートの配合と材料

基礎実験で用いたコンクリートは、水セメント比 (= W/C) 35% , 細骨材率 (= s/a) 48% , 最大骨材径 20mm , スランプ 7.5cm , 空気量 2.4% の普通コンクリートとした。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は栃木県葛生町産の砕砂を、粗骨材は栃木県田沼町産の砕石を、混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。

### 2.4 基礎実験概要

#### (1) 圧縮実験

圧縮実験は、施工時の過大なジャッキ推力などによりセグメントの隅角部や稜線部などの局部に生じるコンクリートの欠落ち現象を局部的なコンクリートの圧縮破壊現象ととらえ、100×200mm の円柱供試体を用いてモデル化した。供試体は円柱の内表面に繊維シートを布設して作製した(写真 - 2)。実験ケースは、シート有り4水準、シート無し1水準とし、各3体ずつの計15体とした。円周方向のシートの接続は、シートの接続端部を10mm程度重ねるのみとした。載荷は0.02N/mm<sup>2</sup>/secの応力制御とした。

#### (2) 押抜き実験

押抜き実験は、セグメント表面のかぶり部分のコンクリートの剥落に対する繊維シートの脱落抑止効果を確認するため、600×400×60mmの薄版を用いて行った(写真 - 3)。実験ケースは、シート有り4水準、シート無し1水準とし、各2体ずつの計10体とした。また、中央部分より押し抜くため、供試体には材齢14日の時点で、7±1mmのかぶりを残して直径100mmの円形の切込みを設けた。載荷は支間長を300mmとし、0.5mm/minの変位制御とした。



写真 - 2 シートの布設と圧縮実験状況



写真 - 3 押抜き供試体と実験状況

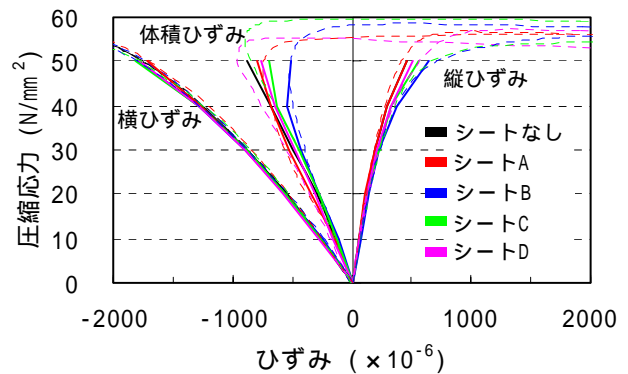


図 - 1 圧縮応力と平均ひずみの関係

### 2.5 基礎実験結果

#### (1) 圧縮実験結果

圧縮強度は55～58N/mm<sup>2</sup>の範囲に、弾性係数は3.12～4.12×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>の範囲に分布していた。載荷時の圧縮応力と平均ひずみの関係を図 - 1に、また、繊維シート無しの供試体に対する各シートの供試体の圧縮強度比（繊維シート有り / 繊維シート無し）および同様の方法で求めた弾性係数比を図 - 2に示す。繊維シート有りは無しに比べて若干の強度増加が認められた。

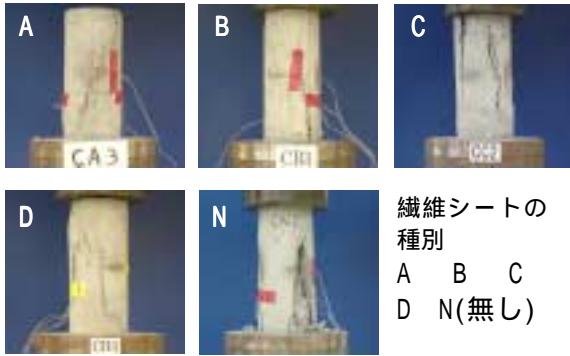


写真 - 4 圧縮実験後の供試体状況

しかしながら、その差がわずかであることから、繊維の存在が圧縮強度の増加にほとんど寄与していないと考えられる。また、弾性係数比を見ると、繊維シートの有無の影響が弾性係数の大きさに影響していなかった。次に、圧縮応力レベルごとの平均ひずみ比を圧縮強度比と同様に求めた。図 - 3~図 - 5 は各々の供試体の縦ひずみ比、横ひずみ比および体積ひずみ比の平均値を示したものである。10~50 N/mm<sup>2</sup>の範囲における縦ひずみ比は、繊維シートの種類にかかわらず同程度となった。横ひずみ比を見ると、繊維シートの種類ごとにひずみの大きさが異なっており、とくに繊維シートBでは、圧縮応力20 N/mm<sup>2</sup>程度からひずみが増加する傾向が認められる。これは、繊維シートBの厚さが他のシートの厚さに比べ大きいことが影響していると考えられる。図 - 1 に示した体積ひずみを見ると、すべてのケースで50 N/mm<sup>2</sup>を越えたあたりから体積ひずみが膨張に転じ、破壊に伴うダイラタンシー現象が生じていた。また、図 - 5 の体積ひずみ比の結果をあわせ考えると、50 N/mm<sup>2</sup>あたりからすべての繊維シートの膨張抑制効果が現れており、とくに繊維シートBの膨張抑制効果が顕著である。写真 - 4 に圧縮実験後の供試体の状況を示す。繊維シートを布設しない供試体では圧壊時にコンクリート片の欠落ちが生じたのに対し、繊維シートA~Dを布設した供試体では欠落ちはほとんど見られず、繊維シートによるコンクリート片の欠落ちを抑制する効果が認められた。

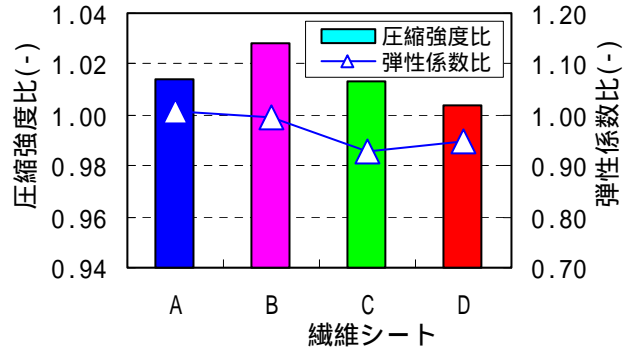


図 - 2 圧縮強度比と弾性係数比

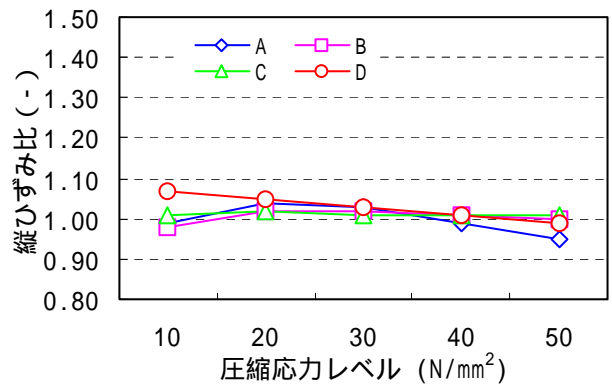


図 - 3 応力レベルごとの平均縦ひずみ比

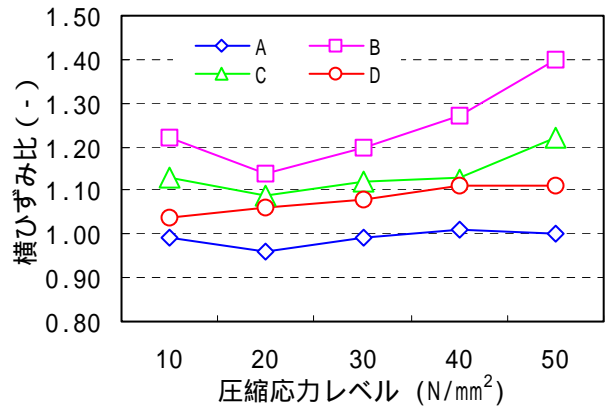


図 - 4 応力レベルごとの平均横ひずみ比

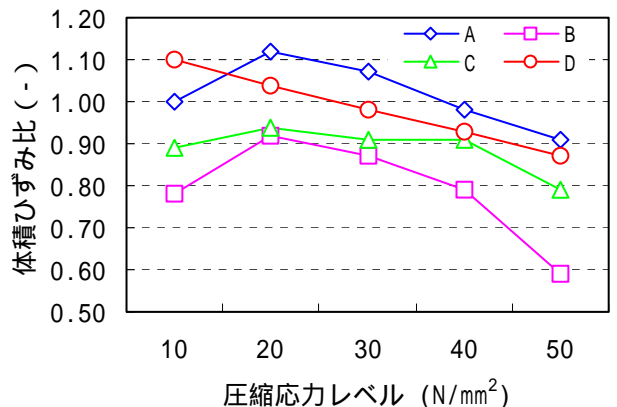


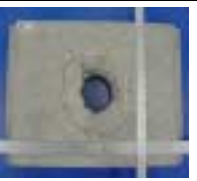
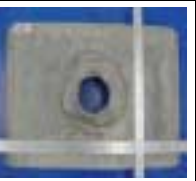



図 - 5 応力レベルごとの平均体積ひずみ比

表 - 3 押抜き試験破壊時の状況

繊維シートの種類	A	B	C	D	N(無し)
供試体の破壊状態					
最大鉛直変位量 (mm)	14.0	36.9	23.3	29.9	2.1
剥離面積 (cm <sup>2</sup> )	379	495	407	409	192

注) コンクリート圧縮強度 : 56 N/mm<sup>2</sup>

(2) 押抜き実験結果

押抜き実験時の供試体の破壊状態，最大鉛直変位量および剥離面積を表 - 3 に，繊維シートの剥離状況の一例を写真 - 5 に示す。また，押抜き後の変位追従性と荷重保持性の計測結果を図 - 6 に示す。すべてのケースで1~2mm程度の鉛直変位時にコア部のコンクリートが押し抜かれた。繊維シートの無い供試体は破断と同時にコンクリートが脱落したのに対し，繊維シートを布設した供試体はコア部のコンクリートを保持したままシートの剥離が進行した。そして，鉛直変位が14~37mm程度になった時点でシートが破断した。これは繊維シートの脱落抑止効果であり，その変位追従性はシートの種類により異なる。繊維シートが保持できる荷重は繊維シートA，Dでは約0.5kN，繊維シートCでは約1.5kN，繊維シートBでは約2kNとなっている。

次に，繊維シートの剥離部分を等価な面積をもつ円と仮定してその周長（等価円周長）を求めた。図 - 7 は繊維シートの種類ごとの等価円周長を求めたものである。この図から，繊維シートBの等価円周長が他の繊維シートに比べて若干大きくなっていることがわかる。等価円周長は，繊維シート自身の引張強度が大きければ，鉛直変位の増大に伴って大きくなると考えられる。これらのことから，繊維シート自身の引張強度およびコンクリートとの繊維シートの付着性によって，コンクリート片の脱落に対する抵抗性能が決定されると考えられる。

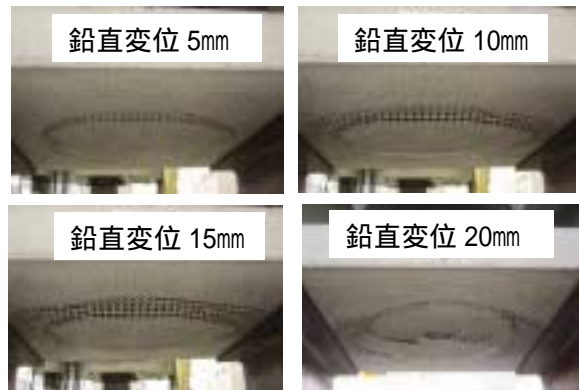


写真 - 5 剥離状態の一例（繊維シート B）

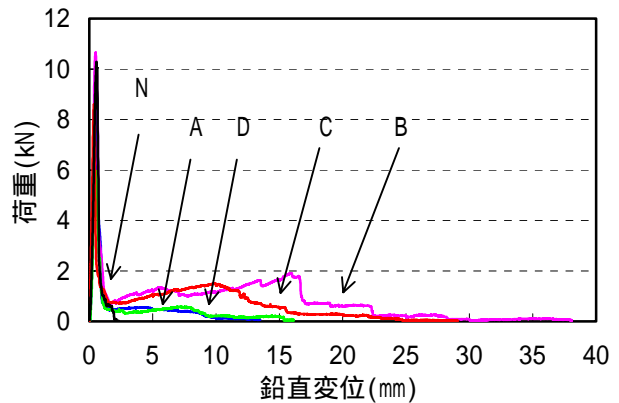


図 - 6 押抜き後の荷重保持性

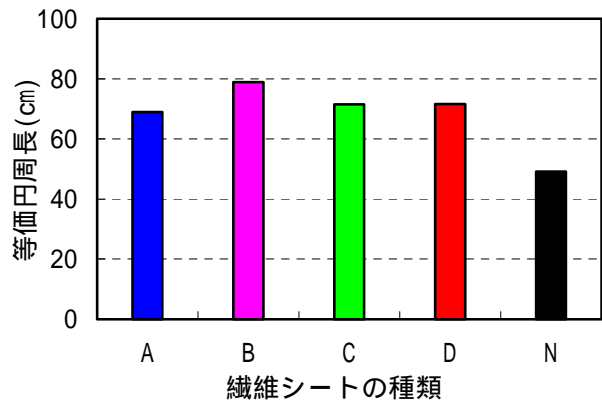


図 - 7 等価円周長

### 3. 実物大セグメントによる検討

#### 3.1 検討概要

前述した一連の基礎実験の結果より、繊維シートBは剥落防止の性能が他の繊維シートよりも高いと判断した。そこで、繊維シートBを用いて実物大セグメントによる検討を行うこととした。実験は繊維シート有りとしの2種類のセグメントについて偏圧载荷実験（ジャッキ推力の偏圧载荷を模擬した推力試験）を行い、破壊荷重の把握と破壊性状を確認した。実験に用いたコンクリートセグメント（写真-6）は、外径5.35m、幅1.2m、厚さ275mmのA型とし、コンクリートは製作性を考慮して高流動コンクリートを使用した。

#### 3.2 コンクリートの配合と材料

高流動コンクリートの配合は、水粉体比（=W/P）34%（セメント混和材比3:2、単位水量170kg/m<sup>3</sup>）、細骨材率（=s/a）53.1%、最大骨材径20mmとし、スランプフロー65cm、空気量1.3%であった。セメントは早強ポルトランドセメントを、混和材は高炉スラグを、細骨材・粗骨材は静岡県大井川産の川砂・砕石を、混和剤は高性能減水剤を使用した。

#### 3.3 セグメントの偏圧载荷実験

偏圧载荷実験は、一般に行われているセグメントの推力試験の方法を応用した<sup>5)</sup>。偏圧载荷は、セグメント設置時にセグメントと反力フレーム底盤との間に100mm、厚さ3mm程度の円形鉄製の調整板を挟み込み载荷する方法とした。写真-7に偏圧载荷実験状況を示す。

#### 3.4 偏圧载荷実験結果

表-4に偏圧载荷実験の結果を示す。繊維シートを布設したセグメントの方が、それが無いものに比べて破壊荷重が若干大きかった。

写真-8に破壊性状を示す。破壊性状には差が現れており、繊維シート無しのセグメントは爆裂を生じ、かぶり部分のコンクリートが剥落した。一方、繊維シート有りのセグメントは、破損したコンクリート片が繊維シートに包含され爆裂を防止していた。



写真-6 繊維シート入りセグメント



写真-7 偏圧载荷実験状況

表-4 偏圧载荷実験結果

繊維シートの有無	有り	無し
ひび割れ発生荷重(kN)	1290	1090
破壊荷重(kN)	1690	1310
破壊性状 <sup>注)</sup>	表面剥離	表面剥落
破片の落下の有無	なし	あり
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	65.5	68.4

注) 表面剥離：コンクリート片が浮上った状態  
表面剥落：コンクリート片が落下した状態

さらに、供試体を持上げてみるとその状況の違いが明らかに見られた。写真-9に示すように繊維シート無しはコンクリート片がすべて剥落していたが、有りはコンクリート片の剥落が認められなかった。これらのことから、ジャッキ推力等の偏圧荷重によりかぶり部分のコンクリートが破損しても繊維シートがその爆裂を抑制する効果と剥落を防止する効果が確認された。



写真 - 8 破壊性状の比較



写真 - 9 繊維シートの効果

#### 4. まとめ

繊維シートを布設した圧縮実験，押抜き実験および実物大セグメントを用いた偏圧载荷実験により得られた繊維シートの効果をまとめると次のとおりである。

- (1) 繊維シートはコンクリートの圧壊時にコンクリートの爆裂を防止する効果がある。また，コンクリート表層部に繊維シートが存在してもコンクリート自身の圧縮強度や静弾性係数の大きさにはほとんど影響しない。
- (2) 繊維シートはコンクリートの押抜きに対して脱落防止効果がある。また，押抜き荷重の保持性および変位追従性は，繊維シート自身の引張強度およびコンクリートとの付着性に依存する。
- (3) セグメントに偏圧荷重が生じた場合，繊維シートにはコンクリート片の爆裂抑制効果と剥落防止効果がある。

#### 参考文献

- 1) 例えば，小島芳之，吉川和行，六車崇司，小林朗，若菜和之，松岡茂，朝倉俊弘，吳智深：繊維シート接着工法によるトンネル覆工コンクリートの剥離対策設計法，土木学会論文集，No756，-62 pp.101-116，2004.3
- 2) 引間昭光，木村定雄，橋本博英，倉木修二，水上博之：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シートの適用(1)，土木学会第59回年次学術講演会，VI-6，2004.9
- 3) 玉井攻太，木村定雄，菊弘樹，松浪康行，栗原陽一：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シートの適用(2)，土木学会第59回年次学術講演会，VI-7，2004.9
- 4) 玉井攻太，木村定雄，松浪康行，倉木修二，水上博之：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シートの適用，トンネル工学報告集，vol14，pp.384-394，2004.11
- 5) シールド工事用標準セグメント，日本下水道協会，pp.300-301，2001