

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

Development of high-quality concrete segment covered with fiber sheets

玉井 攻太¹・木村 定雄²・松浪 康行³・倉木 修二⁴・水上 博之⁵

Kohta Tamai, Sadao Kimura, Yasuyuki Matsunami, Syuji Kuraki, Hiroyuki Minakami

¹学生員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

a.6401698@venus.kanazawa-it.ac.jp

²正会員 工博 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³正会員 石川島建材工業(株) セグメント事業本部 技術部 (〒100-0006 東京都千代田区有楽町1-12-1)

yasuyuki_matsunami@ikk.co.jp

⁴日本コンクリート工業(株) セグメント営業部 (〒108-0075 東京都港区港南1-8-27)

kuraki@star.ncic.co.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 交通技術本部 鉄道部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

Hiroyuki.Minakami@tk.pacific.co.jp

As a segment of the shield tunnel without the secondary lining, the development of the concrete segment(CSFS) which can prevent the exfoliation of the cover concrete has been carried out. CSFS is buried the fiber sheet made from alkaliproof glass in it's cover. The basic experiment for confirming the effect in which the fiber sheet can prevent the exfoliation of the cover concrete was carried out. The basic experiment consists of compressive tests and press omission tests of the concrete specimens which buried the fiber sheet. At the result of the basic experiment, it was confirmed that the fiber sheets was effective for the exfoliation prevention of the cover concrete.

Key Words : shield tunnel, concrete segment, secondary lining, fiber sheets, durability, high-quality

1. はじめに

現在、シールドトンネルの建設においては、コスト縮減や工期短縮を目的として、その用途に応じて二次覆工を省略する傾向が強まっている。しかしその一方で、覆工の耐久性能の観点にたつと、主体構造であるセグメントの初期性能は高いものの^{1), 2)}、それを覆い保護してきた二次覆工がなくなること、セグメントの性能が早期に低下することが懸念される。例えば、施工時の過大なジャッキ推力やエレクターの操作荷重などによって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け落ちや供用中の漏水現象等による鉄筋腐食やかぶりコンクリートの脆弱化などにより、セグメントの性能が低下することが想定される。

そこで、著者らは事前にセグメントの内表面に繊

維シートを布設し、表面部(かぶり部)のコンクリートの損傷や落下を抑制できるセグメント(Covered Segment with Fiber Sheets)を開発している^{3), 4)}(写真1参照)。

本報告はCSFSのもつ性能のうち、コンクリート片のはく落に対する抵抗性能を確認することを主な目的として実施した基礎実験(圧縮実験、押抜き実験)の結果について述べたものである。

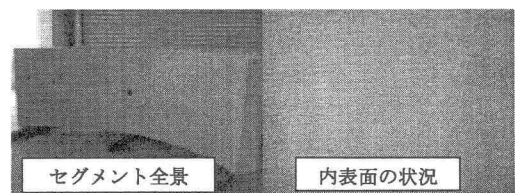


写真1 繊維シートを布設したセグメント

表1 ARGの特性

耐アルカリガラス繊維シート	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)	密度 (g/cm ³)	直径 (μm)
力学的特性	1800~3500	70000~76000	2~3	2.27	8~12
耐アルカリ性 重量減少率	セメント飽和水溶液, 80℃×200時間 0.8%				
耐アルカリ性 引張強度保持率	ガラス繊維ストランドにセメントペーストを塗布して, 50℃, 100%RHの条件下に300時間保持した 75%				
耐酸性 重量減少率	10% HCl, 80℃×90時間 1.6%				
	10% H ₂ SO ₄ , 80℃×90時間 1.2%				

表2 繊維シートの諸元

繊維シート の種類	格子サイズ (mm)	引張強度(N/25mm)		織密度(本/25mm)		単位質量 (g/m ²)	厚さ (mm)
		タテ	ヨコ	タテ	ヨコ		
A	□1.0×1.0	333	588	16×2	16	93	0.2
B	□7.0×5.0	1750	1500	2.7×17	33	420	0.85
C	□5.0×5.0	300	300	5.0×2	5.0	60	0.2
D	□5.0×5.0	550	550	5.0×2	5.0	130	0.35

表3 セグメント用コンクリートの配合と使用材料

G _{max} (mm)	W/C (%)	空気量 (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	混和剤
20	35	2.4	48	7.5	160	457	830	967	3.2
セメント					普通ポルトランドセメント				
細骨材					栃木県葛生町石灰岩				
					密度=2.68g/cm ³				
					F.M=2.90				
					吸水率=1.28%				
粗骨材					栃木県田沼町玄武岩				
					密度=2.77g/cm ³				
					F.M=6.64				
					吸水率=0.58%				
混和剤					高性能AE減水剤				

表4 圧縮実験の確認項目

実験名	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制効果の確認	最大荷重 荷重と鉛直変位量	圧壊時の状況

2. 実験概要

(1) 繊維シートの性能およびセグメント用コンクリートの配合

本実験で用いた繊維シートの素材は、耐アルカリガラス(以下、ARGと呼ぶ)を基本とした。表1はARGの力学的特性とともにアルカリや酸に対する化学的抵抗性を示したものである。表2はARGを織り込んで作製した繊維シートの仕様を示したものであり、写真2はその状況を示したものである。本実験に用いた繊維シートの種類はA～Dの4種類であり、それぞれ格子サイズ、繊維の織密度および単位面積あたりの質量などが異なる。供試体の作製に用いたコンクリートは表3に示すセグメント用コンクリートの配合とした。なお、使用したコンクリートは高流動コンクリートである。

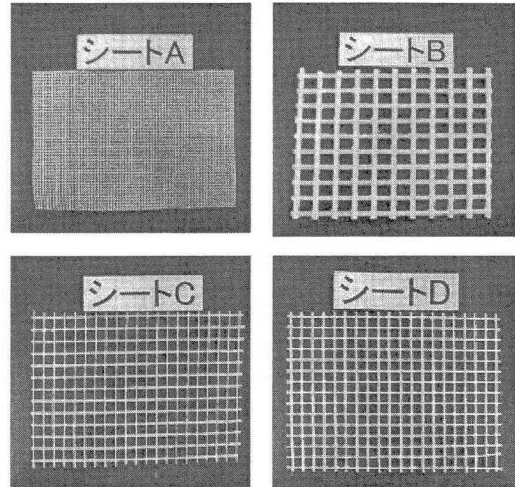


写真2 繊維シート

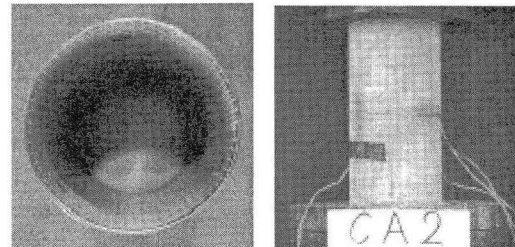


写真3 繊維シートの布設状況 写真4 供試体の状況

(2) 圧縮実験

施工時の過大なジャッキ推力などによって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け落ちる現象を局部的なコンクリートの圧壊現象としてとらえ、それを圧縮実験にモデル化した。すなわち、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の内側面に沿って繊維シートを布設し(写真3参照)、圧縮破壊時の繊維シートの抑制効果を確認した。供試体側面の周方向での繊維シートの接続は、繊維シートを10mm程度重ね合わせるのみとした。表4に圧縮実験によって確認した項目をまとめて示す。写真4に示すように載荷方向(縦方向)とそれに直交する方向(横方向)に、計4枚のひずみゲージを貼付し、繊維シートの拘束効果も確認した。供試体数はA～Dの繊維シートを布設したケースおよび繊維シートを布設しないケースで各々3体ずつとした。なお、圧縮載荷は0.02N/mm²/secの応力制御とした。

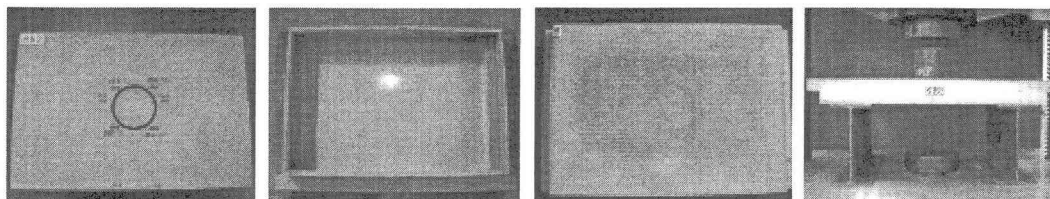


写真 5 供試体上面の状況 写真 6 繊維シートの布設状況 写真 7 供試体下面の状況 写真 8 荷重状況

(3) 押抜き実験

表面部のコンクリートのはく落に対する繊維シートの脱剥抑止効果を確認するために押抜き実験を行った。押抜き実験に用いた供試体の形状寸法は $600 \times 400 \times 60 \text{ mm}$ であり(写真 5 参照)、セグメントの内側面を想定した下面部(写真 6 参照)に繊維シートを布設した。写真 7 は繊維シートを布設した供試体の表面の状況を示したものである。また、材齢 14 日目に供試体中央部の上方から、 $7 \pm 1 \text{ mm}$ のかぶりを残して直径 100 mm の円形の切込みを設けた(写真 5 参照)。表 5 に押抜き実験によって確認した項目をまとめて示す。供試体数は A～D の繊維シートを布設したケースおよび繊維シートを布設しないケースで各々 2 体ずつとした。写真 8 は荷重状況を示したものであり、支間長を 300 mm とし、その中央に位置する円形のコア部を上方から押し抜いた。また、荷重中には、繊維シートのはく離範囲を観察し、繊維シートがすべて破断した状態で荷重を終了した。荷重方法は変位制御で 0.5 mm/min とした。なお、押抜き実験時のコンクリートの平均圧縮強度は 56.4 N/mm^2 であった。

3. 実験結果およびその考察

(1) 圧縮実験に基づく繊維シートの抑制効果

a) 圧縮強度および静弾性係数への影響

圧縮強度および静弾性係数の実験結果を表 6 に示す。表 6 中の値は、すべてのケースの実験値をあわせて整理したものである。圧縮強度の平均値は 56.8 N/mm^2 、標準偏差は 2.3 N/mm^2 、変動係数は 4.1% である。したがって、繊維シートの種類やその存在が圧縮強度の大きさにはほとんど影響を及ぼさず、コア部となるコンクリートを拘束し増強する効果は認められない。なお、静弾性係数の平均値は $3.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、標準偏差は $2.3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、変動係数は 6.5% であり、コンクリートの弾性範囲内における変形特性に対しても繊維シートの存在の影響はないものと考えられる。

表 5 押抜き実験の確認項目

実験名	実験目的	測定項目	観察項目
押抜き実験	表面部コンクリートの脱剥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	繊維補強シートのはく離範囲

表 6 圧縮強度および静弾性係数

諸 元	圧縮強度(N/mm^2)	静弾性係数(N/mm^2)
材齢(日)	45～54	45～54
データ数(体)	15	15
平均値	56.8	3.51×10^4
標準偏差	2.3	2.3×10^3
変動係数(%)	4.1	6.5

b) 圧壊時の抑制効果

写真 9 に荷重終了時の供試体の破壊状況とその破壊部分を示す。すべての供試体の破壊は、上下の荷重面での横方向の拘束の影響を受け、せん断破壊に近いものとなった。繊維シートを布設しないケースでは、コンクリートの破壊に伴って供試体の一部が欠け落ちた。一方、繊維シート A～D を布設したケースでは、コンクリートにひび割れが生じた後も供試体側部のコンクリートの欠け落ちはみられず、繊維シートがコンクリート片の欠け落ちを抑制する効果が認められた。なお、破壊部の状況から、繊維シート A、C、D は繊維シートの破断がみられたが、繊維シート B は破断していなかった。

c) 圧壊前の繊維シートの拘束効果

図 1 はすべてのケースの圧縮応力と縦ひずみ、横ひずみおよび体積ひずみとの関係を示したものである。一般にコンクリートの弾性範囲(最大圧縮応力の $1/3$ 程度)と考えられる約 20 N/mm^2 を超えて 50 N/mm^2 の圧縮応力まで、すべてのケースの縦ひずみはほぼ同じである。一方、横ひずみをみると、 20 N/mm^2 の圧縮応力まではすべてのケースがほぼ同じ値となっているが、 20 N/mm^2 を超えた段階からとくに繊維シート B のケースの横ひずみが大きくなる傾向がある。また、縦ひずみと横ひずみから求めた体積ひずみをみても、繊維シート B のケースが他のケースよりも小さくなっている。そこで、この傾向を定量的に把握するために、各圧縮応力段階ごと ($20, 30, 40, 50 \text{ N/mm}^2$) における各ケースの平均ひずみを求め、基準

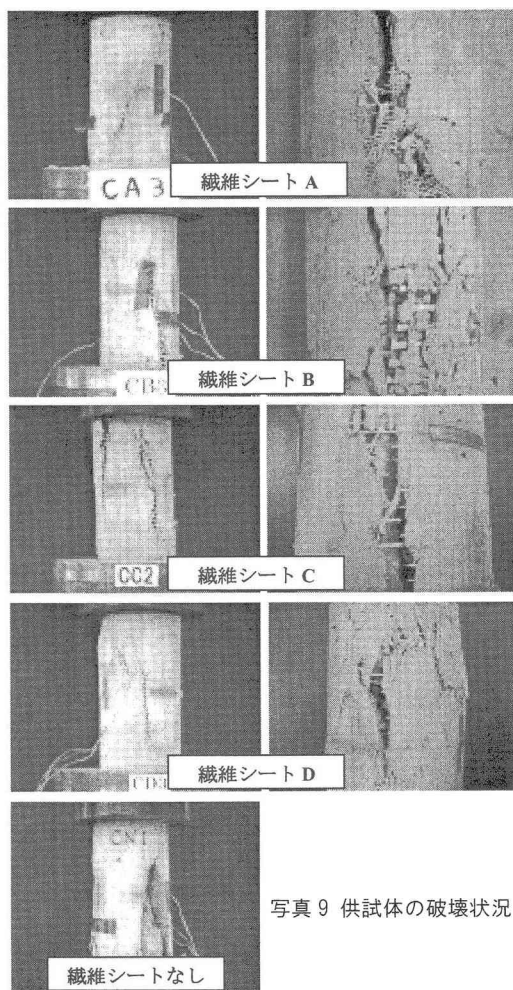


写真 9 供試体の破壊状況

となる繊維シートを布設していないケースの平均ひずみに対する比を求めた。表7はその結果である。

縦ひずみ比をみるとすべてのケースにおいて、繊維シートの存在の影響がほとんど認められない。これは繊維シートBのケースについても同じである。一方、横ひずみ比をみると、圧縮応力が小さい段階(20N/mm²)から、繊維シートBのケースの横ひずみ比がとくに大きくなる傾向がある。また、破壊に伴う体積膨張を起こし始める直前の50N/mm²の圧縮応力段階に着目すると、繊維シートBのケースの横ひずみ比と体積ひずみ比が大きく変化している。これは、繊維シートBは他の繊維シートと比べてその厚さが0.85mmと厚いため、繊維シートBを布設した供試体表面の薄い層と、コアとなる内部コンクリートとが重ね構造として個々に異なる引張挙動をしたためと推察する。

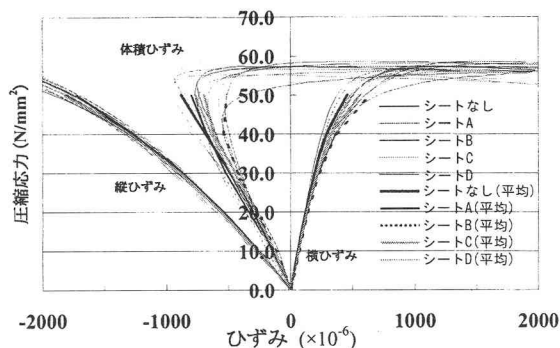


図 1 圧縮応力とひずみの関係

表7 圧縮応力段階ごとの平均ひずみ比

圧縮応力 (N/mm ²)		20.0	30.0	40.0	50.0
縦ひずみ比	A	1.04	1.03	0.99	0.95
	B	1.02	1.02	1.01	1.00
	C	1.02	1.01	1.01	1.01
	D	1.05	1.03	1.01	0.99
横ひずみ比	A	0.96	0.99	1.01	1.00
	B	1.14	1.20	1.27	1.40
	C	1.09	1.12	1.13	1.22
	D	1.06	1.08	1.11	1.11
体積ひずみ比	A	1.12	1.07	0.98	0.91
	B	0.92	0.87	0.79	0.59
	C	0.94	0.91	0.91	0.79
	D	1.04	0.98	0.93	0.87

(2) 押抜き実験に基づく繊維シートの脱落抑止効果

a) 押抜き力に対する変位追従性および耐荷性

図2に荷重と鉛直変位量の関係を示す。繊維シートなしのケースでは、最大荷重後に急激な荷重低下が生じ、コア部のコンクリートが脱落した。一方、繊維シートを布設したA～Dのケースでは、コア部のコンクリートが破断した直後に荷重の低下がみられるものの、破断直後にコア部のコンクリートが脱落しなかった。これは繊維シートの脱落抑止効果であり、また繊維シートの種類に応じて、変位追従性および荷重の保持性が異なる。変位追従性をみると、単位面積あたりの繊維の質量が小さい繊維シートAは約14mmの変位、繊維シートCは約23mmの変位まで追従している。一方、単位面積あたりの繊維の質量が大きい繊維シートBは約37mmの変位、繊維シートDは約30mmの変位まで追従している。荷重の保持性をみると、繊維シートBおよび繊維シートDでは鉛直変位量が15～17mmとなるまで、それぞれ、約2kNおよび約1kNの荷重を保持している。したがって、コンクリートの押抜きに対する性能は、繊維シートの引張強度、すなわち、単位面積あたりの繊維の質量や繊維密度に関係していると考えられる。

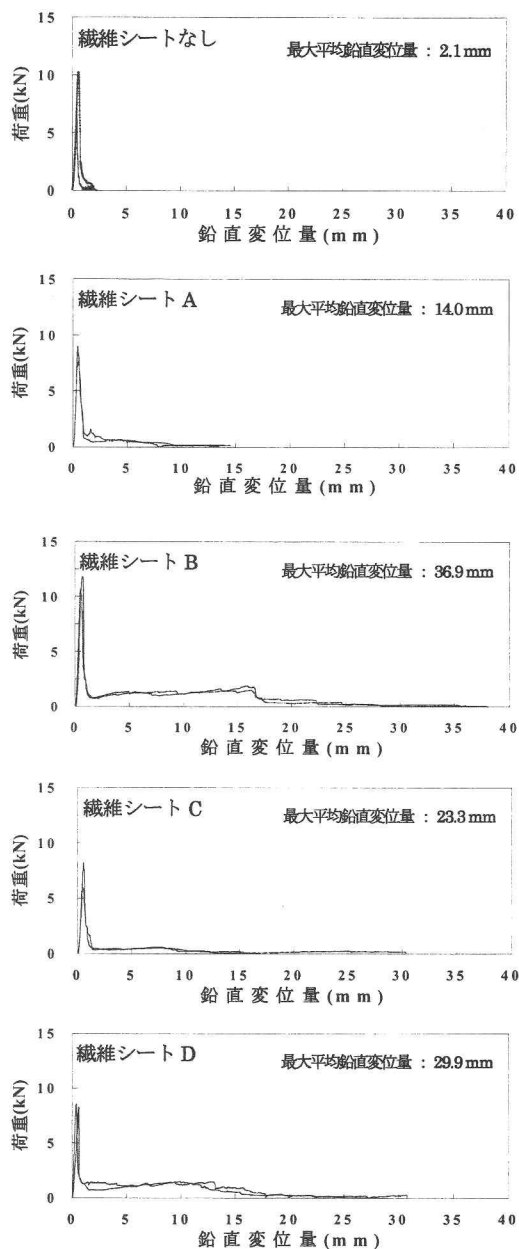


図2 荷重と鉛直変位量の関係

b) 繊維シートの引張強度とはく離面積に関する考察

繊維シートとコンクリートの付着性に着目して載荷終了後の繊維シートのはく離面積を求めた(写真10参照)。図3はその定量的な値を示したものである。繊維シートがないケースでは、円形の切込み部に沿ってコア部のコンクリートが脱落したため、コンクリートの平均はく離面積が小さい。

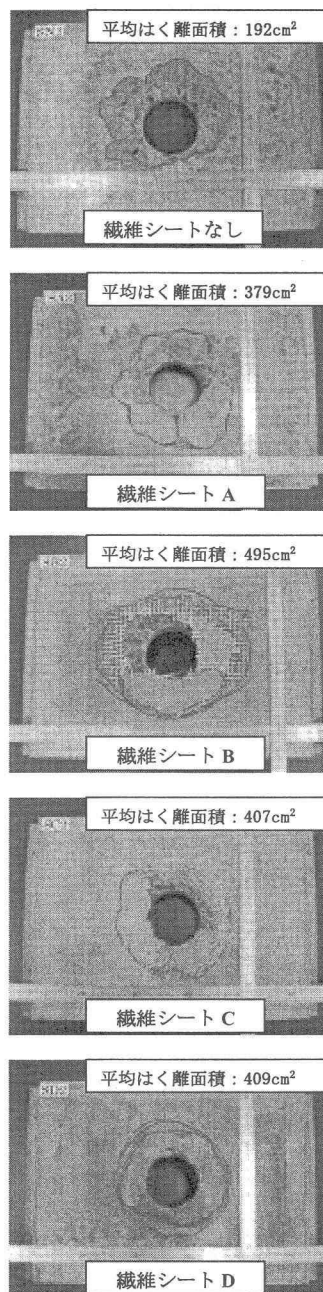


写真10 供試体のはく離面積

一方、繊維シートBのはく離面積が他の繊維シートと比べて90cm²程度大きい。これは繊維シートの引張強度とともに、その格子サイズおよび厚さが大きいことが起因していると考えられる。写真11は繊維シートBの鉛直変位段階ごと(5,10,15,20mm)のはく離状況を示したものである。鉛直変位量が增大する

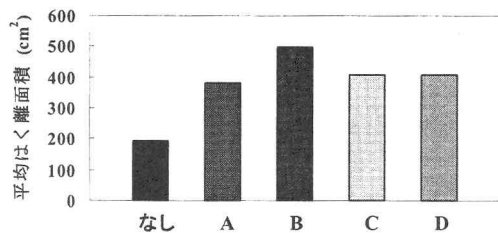


図3 平均はく離面積

につれて、はく離面積が増大している。これは繊維シートBの引張強度が大きいために、繊維シートそのものが破断せず、繊維シートとコンクリートの付着抵抗となる付着域が広がったためと考えられる。すなわち、はく離した部位をとり囲む繊維シートとコンクリートとが接する境界線が大きくなったものと考えられる。このことから、コンクリートの脱落に対して、繊維シートの引張強度を十分に生かすためには、繊維シートとコンクリートの付着特性も考慮することが重要であると考えられる。

以上から、セグメントの内表面で、はく落を生じやすい隅角部や稜線部の局所に繊維シートを布設する際には、繊維シートの引張強度に応じたはく離面積が、その最小布設面積を定めるときの目安になると考えられる。

4. まとめ

繊維シートを布設したコンクリートの圧縮実験および押抜き実験から得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1) コンクリートの圧壊に対する繊維シートの抑制効果

- ① コンクリートの表面部に繊維シートが存在しても、コアとなるコンクリートの圧縮強度や静弾性係数の大きさに影響を及ぼさない。
- ② 繊維シートは圧壊時のコンクリート片の欠け落ちを抑制する効果がある。

(2) コンクリートの脱落に対する繊維シートの抑止効果

- ① コンクリートの押抜きに対して繊維シートの脱落抑止効果がある。さらに、押抜き時の変位追従性や耐荷性は、繊維シートの強度、すなわち、単位面積あたりの繊維の質量や繊維密度に関係している。
- ② コンクリートの押抜きに対して、繊維シートの

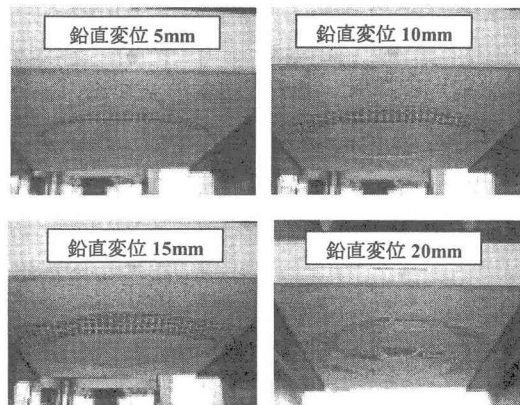


写真 11 はく離状況(繊維シート B)

引張強度を十分に生かすためには、繊維シートとコンクリートの付着特性も考慮する必要がある。

本実験の結果より、セグメントの表面部に繊維シートを布設した際の基本的な効果が確認できたと考える。今後は、実物セグメントを用いて各種の効果を確認するとともに、セグメントの表面部の耐久性などについても検討を加える予定である。

参考文献

- 1) 例えば、木村，岡村，宇野，清水，小泉：シールド工事用コンクリート系セグメントの耐久性能と耐火性能，土木学会論文集，No.728/VI-58，pp.107-119，2003.3.
- 2) 例えば、木村，守山，宇野，清水：シールド工事用セグメントの表面の微細構造，トンネル工学論文・報告集，Vol.12，pp.109-116，2002.11
- 3) 引間，木村，橋本，倉木，水上：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.
- 4) 玉井，木村，菊，松浪，栗原：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.