

T-FREG工法による 二次覆工コンクリートのはく落防止対策

宇野 洋志城¹・歌川 紀之²・川崎 真史³・小泉 直人³・
上野 清⁴・田中康一郎⁵

¹正会員 佐藤工業株式会社 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)

²正会員 工博 佐藤工業株式会社 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)

³正会員 佐藤工業 土木事業本部技術部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19)

⁴正会員 西日本高速道路株式会社 九州支社 (〒889-0603 宮崎県東臼杵郡門川町大字加草字堂ヶ内53-10)

⁵正会員 西日本高速道路株式会社 建設事業本部 建設事業部 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)

二次覆工コンクリートにおいて、アーチ部分に発生する浮きやひび割れなどの変状に対するはく落防止対策には繊維シート接着などの内面補強工法が施されるケースが多く、要する維持修繕費は多大なものとなる。そこで、筆者らは計画段階から保全行為自体を予防する保全予防の概念に基づいた対策として、二次覆工コンクリートの表層に繊維シートを埋め込みコンクリートのはく落を未然に防止するT-FREG工法(Tunnel-Fiber Reinforced EdGing工法)を開発し、施工性や耐久性に関する検証を行った。その結果、実施工に適応した施工性とはく落防止などの面で十分な耐久性が明らかとなり、東九州自動車道路トンネル工事において2本のトンネルに対して実用化に成功した。

キーワード： 保全予防，二次覆工，はく落防止，繊維シート，耐アルカリガラス

1. はじめに

トンネル二次覆工コンクリートの品質向上は、新設のトンネル建設工事における大きな課題であり、最近では技術提案型総合評価方式の受注に際して独自の施工方法の提案が求められるケースが多い。提案の内容は、二次覆工コンクリートのひび割れ抑制や養生管理に関連した技術に偏重する傾向があり、ひび割れ発生後の保全を見込んだ提案技術は少ない。

また、既設のトンネルにおいて二次覆工コンクリートのアーチ部分にひび割れが発生した場合、はく落の危険性が高い。そのため、対象面積の広い場合の多くは炭素繊維などの連続繊維シートを接着する内面補強工法が、はく落防止対策として提案、採用されている¹⁾。これらは、ひび割れなどの不具合事象が発生した後に機能回復を目指した日常保全の代表的な補修・補強方法の一つとして広く認識されたものである²⁾。

それに対し、今回筆者らが提案、採用しようと試みたT-FREG工法(二次覆工コンクリート目地部付近に繊維シートを適用したはく落防止技術)は、事前の計画段階から二次覆工コンクリートの耐久性を考え、機能を永く維持することで保全行為自体を予防しようとする保全予防の概念³⁾に基づいた技術である。

コンクリートの打込み前の型枠面に連続繊維シートを敷設し、脱型時からコンクリートの表面近傍に埋設した状態で供用開始する工法に関しては、これまでに橋梁上部工の下面(交差部の橋梁下面)⁴⁾や二次製品のシールドトンネル用セグメントの内面(高流動コンクリートセグメント)⁵⁾を対象に実用化されているが、山岳トンネルにおける二次覆工コンクリートへの適用例はない。

以下の報告は、筆者らがT-FREG工法(二次覆工コンクリート目地部付近に繊維シートを適用したはく落防止技術)を適用するべく検証を行い、実施工に採用した結果について述べるものである。

T-FREG工法のイメージおよび目地部付近の繊維シート使用によるはく落防止のイメージをそれぞれ図-1と図-2に示す。

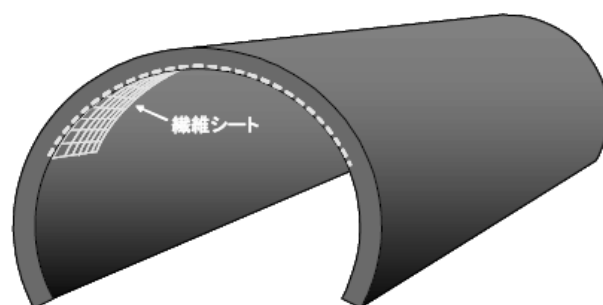


図-1 T-FREG工法のイメージ

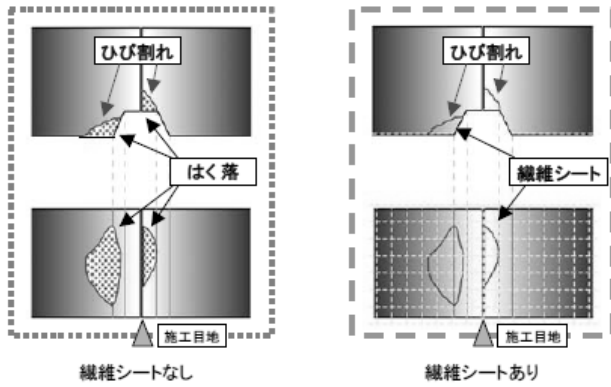


図-2 繊維シート使用による目地付近のはく落防止のイメージ
(上：側面図，下：平面図)

表-1 各シートの諸元

繊維の種類	形状	密度	引張強度	特徴
アラミド	40mm の 3 軸メッシュ	400g/m ² 以上	30kN/m	片面に 3 号 珪砂を付着
耐アルカリガラス	7mm×5mm の開口	400g/m ²	タテ 60kN/m ヨコ 38kN/m	厚さ 0.85mm

2. 適用の概要

(1) 使用材料

過去に行われた同様の適用例^{4),5)}では、橋梁上部工の下面にはアラミド繊維シート、シールドトンネル用セグメントの内面には耐アルカリガラス繊維シートが使用された。各シートの諸元を表-1に示す。

橋梁上部工に適用する場合では底面あるいは側面の型枠内面に独自の治具を用いて固定しており、シールドトンネル用セグメントに適用する場合では型枠底面に鉄筋かごとスペーサーを利用して固定している。

打込み作業は共に治具を外すことなく行われるため、型枠に敷設した繊維シートはしっかりと固定されたままととなり、コンクリートの打込み作業の段階で繊維シート周辺への充てん状況と繊維シートのよれやたるみなどの変形、ずれや移動具合を目視でチェック、修正も可能である。

一方、二次覆工コンクリートを対象とする場合、とくにアーチ天端部分では打込み方向が上方になり、限られた吹き上げ口からコンクリートが型枠内面を横移動しながら充てんする。そのため、吹き上げ口付近の繊維シートはコンクリートによって大きく乱される可能性があり、目視によるチェック、修正ができない条件となる。さらに、T-FREG工法では、はく落防止の観点から固定治具は打込み終了時に撤去することを目標としたため、埋設型の固定治具は使用しない方針であった。

そのため、使用実績のある2種類の繊維シートを用いた実規模レベルの施工性検証実験を行い、曲率のあるト

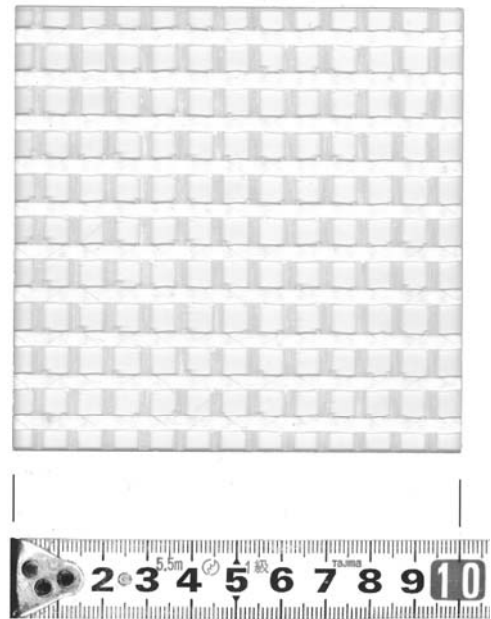


写真-1 耐アルカリガラス繊維シート

ンネル用型枠（以降、セントルと称する）に対しても確実に固定でき、かつ打込みによるコンクリートの圧力により繊維シートのよれやたるみなどの変形、ずれや移動の生じない製品を選定した。

その結果、耐アルカリガラス繊維シート（写真-1）であれば、加工し易くセントルを対象にしても固定でき、打込み終了後にはセントル外側から固定を解除する方法を確立できた（繊維シートの固定方法に関しては特許出願中）ことから、本施工では全対象区間（28BL/Nトンネル10BL，Kトンネル18BL）に耐アルカリガラス繊維シートを適用した。

(2) 適用範囲

繊維シートの縦断方向の適用範囲はつま部から約50cmとし、台形目地部分にも適用した（図-3）。

台形目地は、繊維シートを加工、固定する際の確実性を優先させて高さを抑え、寸法上辺37mm、底辺77mm、高さ30mmのタイプを使用した。

横断方向の適用範囲は建築限界をカバーし、かつセントルをジャッキダウンできる上部120°（円周方向の長

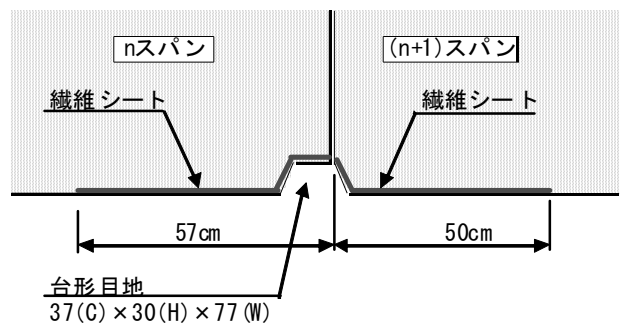
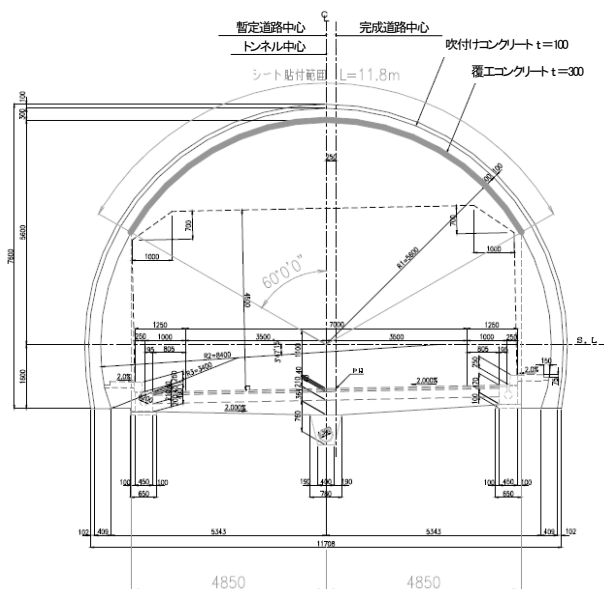


図-3 繊維シート適用範囲（縦断方向）



さ11.8m)とした(図-4)．セトル内部からつま側を見た場合の繊維シート敷設完了状況を写真-2に示す．

(3) 施工方法

繊維シートの敷設～固定までの設置作業は、通常作業と並行して行った。作業手順の例を図-5に示す。

繊維シートは、敷設した後にセントルに開けた孔と釣り糸を利用して固定した（特許出願中）。

本施工の二次覆工コンクリートに使用した配合はすべて粗骨材の最大寸法が20mmであり、T-FREG工法の対象区間のうち23BLがT1-1配合、5BLがT3-1配合（非鋼繊維補強コンクリート）であった。配合表を表-2に示す。

目標のスランプおよび空気量は、T1-1配合で 19 ± 1.0 cm,
5.0 $\pm$ 0.5%, T3-1配合で非鋼繊維混入後に 19 ± 1.0 cm,
5.0 $\pm$ 0.5%とした。

事前に鋼製型枠を用いて実規模レベルで行った施工性
検証実験では、スランプ8cmから21cmの配合（表-3）を
使用してコンクリートのコンシステンシーが繊維シート

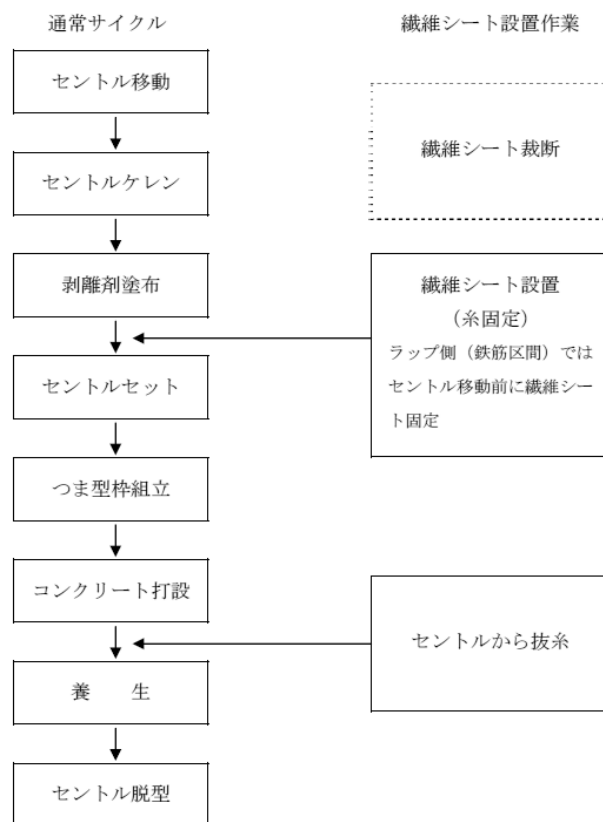


表-2 配合表 (本施工)

区分	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
			W	C	S1	S2	G	Ad	Fiber
Nトン補 T1-1	57.0	48.3	172	302	631	236	927	2.567	—
Kトン補 T1-1	58.4	52.0	163	279	475	473	880	2.930	—
Kトン補 T3-1	48.5	53.0	173	357	459	458	820	3.213	2.73

Nト初
C：高炉セメントB種
S1：延岡市大武長産 海砂， S2：津久見市産 砕砂
G：東郷町山陰産 砕石， Ad：AE減水剤

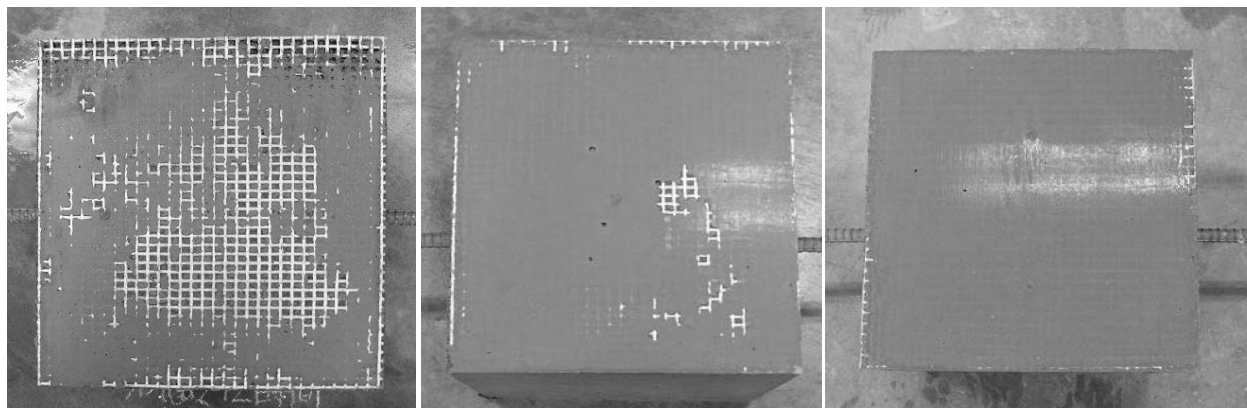
Kト初
C：高炉セメントB種
S1：延岡市大武長産 海砂， S2：東郷町山陰産 川砂
G：東郷町山陰産 砕石， Ad：高性能AE減水剤， Fiber：ポリプロピレン

表-3 配合表 (検証実験)

配合 (スラブ)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
8cm	60.0	45.4	152	253	686	172	623	416	2.53
15cm	59.9	47.1	166	277	690	173	585	390	2.77
21cm	59.9	49.8	181	302	705	177	537	358	3.02

C: 高炉セメントB種
S1: 大月市初狩産 砕砂, S2: 富津市鶴岡産 陸砂
G1: 大月市初狩産 砕石(2005), G2: 大月市初狩産 砕石(4020)
Ad: 高性能 AE 減水剤

に及ぼす影響を確認した。充てんさせるために使用した高周波の棒状振動機は一般にトンネル施工現場で使用する



材齢 12 時間（圧縮強度 0.20N/mm²）

材齢 15 時間（圧縮強度 0.75N/mm²）

材齢 18 時間（圧縮強度 1.10N/mm²）

写真-3 若材齢で脱型したコンクリートの表面

る振動部外径を43mmとするタイプとし、締固め作業中には繊維シートに振動部の先端が激しく当たる状況を再現しつつ、入念な締固めを行った。

それでも、締固め作業中に繊維シートがよれたり、変形することはなく、脱型後の確認でも繊維シートが目標の位置から移動したり、繊維シート自体が傷んだような状況は認められなかった。

上記の実験結果を踏まえ、本施工の際にも同タイプの高周波棒状振動機を使用し、繊維シートに先端部が当たることを気にせず通常どおり入念な締固め作業を行った。

3. 耐久性に関する検証

(1) 繊維シートの付着

繊維シートには、脱型直後の段階から二次覆工コンクリートとの一体化が要求された。脱型時に繊維シートが十分に付着していることは最低条件であるが、脱型が行われるのは極めて若材齢であることから、繊維シートがセメントと一緒にコンクリートからはく離してしまうことが懸念された。

そこで、材齢24時間以内の若材齢で十分な強度発現がまだ得られていない状況下の脱型でも、繊維シートがコンクリート側に付着していること、およびそのときの強度限界を確認するための室内試験体レベルでの接着力試験を実施した。

対象は若材齢において二次覆工コンクリートを脱型した場合の繊維シート埋設面（繊維シートがごく表層に存在していることは目視で確認できる）とし、試験方法はJIS A 6909（建築用仕上塗材）の規格に準拠して建研式の簡易型短軸引張試験機を用いた接着力試験とした。

接着力試験をはじめとする検証実験に用いるコンクリートは、施工性検証実験と同じとした（表-3）。

試験体の寸法、形状は30cm×30cm×30cmの立方体とし、底面に繊維シートを敷設、固定は行わない状況でコンク

表-4 接着力試験結果

配合 (スラブ)	脱型材齢別の接着力強度 (N/mm ²)			
	12時間	15時間	18時間	(母材 12時間)
8cm	1.03 [0.68]	1.07 [0.71]	1.00 [0.66]	1.51 [1.00]
15cm	1.36 [0.62]	1.33 [0.61]	1.31 [0.60]	2.19 [1.00]
21cm	0.78 [0.52]	0.71 [0.48]	0.89 [0.60]	1.49 [1.00]

母材の接着試験は材齢12時間で脱型した試験体で実施した。

[]内は母材強度に対する比である。

リートを打ち込み作製した。脱型材齢は12時間、15時間、18時間の3水準とし、脱型後は20℃の恒温室内で湿潤養生を行い、材齢28日で接着力試験を実施した。脱型直後のコンクリート表面を写真-3に、試験結果を表-4に示す。

脱型すると繊維シートが型枠と一緒にコンクリートからはく離してしまうのではないかと懸念に対しては、写真-3に示すように材齢12時間（圧縮強度は0.20N/mm²～0.47N/mm²）で脱型した場合、コンクリート表面のモルタルペーストの一部がはく離したが、繊維シートがはく離する状況は一切認められなかった。ただし、美観の面から判断すれば、脱型は材齢18時間（圧縮強度は1.0N/mm²程度）まで待った方が望ましい結果となった。

一方、材齢28日に行った接着強度を母材の接着強度との比で表すと、脱型材齢12時間～18時間の範囲では大きな差はなく、必ずしも若材齢であるほど付着が得られないという結果にはならなかった。

通常の二次覆工コンクリートの脱型に必要とされるコンクリート強度に関しては、自重によりコンクリートにひび割れが発生しないように構造計算結果から算出したり、土木学会トンネルコンクリート指針（案）⁶を参考に圧縮強度で2.0N/mm²～3.0N/mm²を目安とする場合が多く、今回の試験条件のように圧縮強度0.2N/mm²程度で脱型することはあり得ない。実施工のセメントと検証実験で使

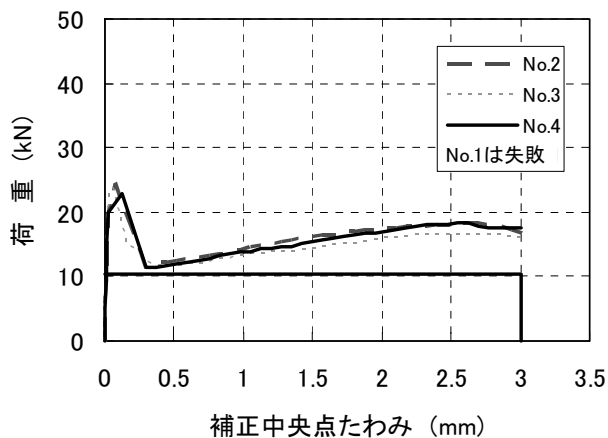


図-6 曲げ靱性試験結果

セントルと一緒に繊維シートがはく離する危険性はないものと考えられた。

したがって、T-FREG工法において繊維シートの付着性能に関する心配はないものと考えられた。

(2) はく落防止

二次覆工コンクリートのはく落防止に対する効果の評価指標に関しては、曲げ靱性係数が広く認識されている。ただし、短繊維を混入した繊維補強コンクリートの規格として適用され、曲げ靱性係数は JHS 730-2003『繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法』⁷⁾に準拠して実施した試験結果によるもので理論上 1.40N/mm^2 以上であれば $\phi 4.0\text{m} \times 0.3\text{m}$ の覆工コンクリート塊のはく落防止に対し有効である⁸⁾とされている。

一方、『連続繊維シート接着の押抜き試験方法』⁹⁾や JHS 424-2004『はく落防止の押抜き試験方法』¹⁰⁾なども存在するが、ともに既設のコンクリートに繊維シートを接着する場合のはく落防止に対する効果の評価方法であり、変位 10mm 以上における最大荷重 1.5kN 以上であれば合格⁹⁾として、これまで連続繊維シート後貼り工法の規格として適用されている。

したがって、現時点ではT-FREG工法のように保全予防の概念に基づいて新設のコンクリート表層に繊維シートを埋設して適用する場合の評価方法は整備されておらず、明解なはく落防止に対する効果の評価方法はまだ存在しない。

そこで、今回T-FREG工法のはく落防止性能を評価するに当たっては、既存の試験方法による曲げ靱性係数と押抜き耐力の基準を満足することで十分なはく落防止性能があると判断することとした。

曲げ靱性係数および押抜き耐力の検証実験には、接着力試験と同じコンクリートを用いた(表-3)。

a) 曲げ靱性試験

試験体の寸法、形状は $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 53\text{cm}$ の直方体とし、底面に繊維シートを敷設、固定は行わない状況でコンク

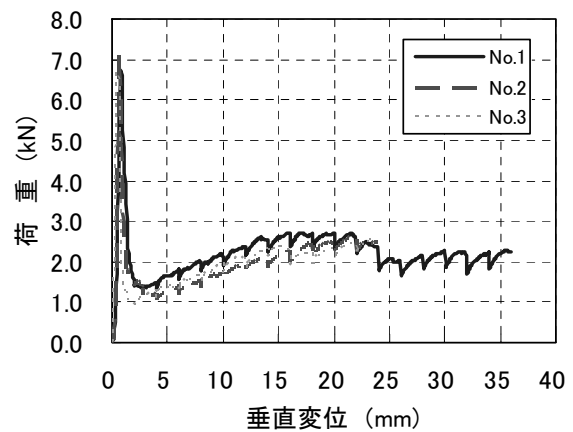


図-7 押抜き試験結果

リートを打ち込み作製した。材齢18時間で脱型した後は 20°C の恒温室内で湿潤養生を行い、材齢28日に曲げ靱性試験を実施した。

荷重方法に関してはJHS 730-2003『繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法』⁷⁾に準拠したが、本来JHS 730-2003で側面とするべき荷重面は、繊維シートを埋設した側を下面とするため、仕上げ面とした。

試験結果を図-6に示す。曲げ靱性係数は平均値で 2.02N/mm^2 が得られ、繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性係数の基準である 1.40N/mm^2 を十分に上回る結果を示した。その数値は非鋼繊維を容積混入率で0.3%使用した場合の短繊維補強コンクリートが示す水準を超えており¹¹⁾、曲げ靱性係数のばらつきも明らかに小さい。その要因は繊維シートによる繊維配列方向が短繊維の分散状況に比べて安定していることに関係していると考えられた。

なお、試験実施後の試験体は繊維シート部分で一体化が保たれており、破断面に見える一部の繊維シートが伸びている状況が確認できる。

したがって、曲げ靱性係数から判断するとT-FREG工法は十分なはく落防止性能があると考えられた。

b) 押抜き試験

試験体の寸法、形状は $600\text{mm} \times 400\text{mm} \times 60\text{mm}$ の平板とし、 $600\text{mm} \times 400\text{mm}$ の底面に繊維シートを敷設、固定は行わない状況でコンクリートを打ち込み作製した。材齢18時間で脱型した後は 20°C の恒温室内で湿潤養生を行い、材齢28日に押抜き試験を実施した。

荷重方法に関しては基本的にJHS 424-2004『はく落防止の押抜き試験方法』¹⁰⁾にならない、試験前に試験体中央部を繊維シート面の反対側(打設面)から $\phi 100\text{mm}$ の形状で $55 \pm 0.5\text{mm}$ 深さまで削孔した。荷重速度は開始時点で 0.2mm/min 、以降変位 2.0mm から終了までは 1.0mm/min とし、 2.0mm の変位毎に2.0分間荷重を停止して荷重面反対側のはく離範囲を目視観察し、はく離範囲をマーキングした。最終変位は 23mm とし、その時点での最大荷重を記録するが、変位 10mm までに得られた最大荷重データは考

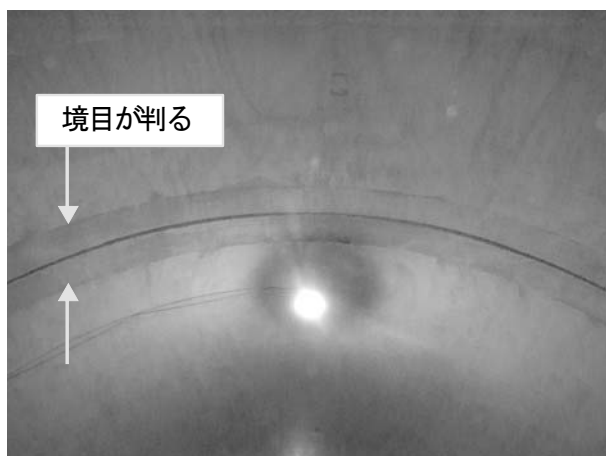


写真-4 脱型直後の出来形



写真-5 脱型 4 週経過後の出来形

慮しなかった。

試験結果を図-7に示す。変位10mm以上における最大荷重は平均値で2.62kNが得られ、連続繊維シート後貼り工法の基準である1.5kNを十分に上回る結果を示した。なお、試験実施後の試験体はコンクリート塊が繊維シートを貫通することなく、繊維シートで保持されている状況が確認できる。

したがって、押抜き耐力から判断するとT-FREG工法は十分なはく落防止性能があると考えられた。

4. 実施工の結果

実施工における打込み作業は通常の二次覆工コンクリートと同様に行った結果、充てん状況に問題のないことが確認できた。また、締固め作業の影響による繊維シートの損傷箇所も認められなかった。

脱型後の出来形を写真-4（脱型直後）、写真-5（脱型4週経過後）に示す。脱型直後には繊維シートの境目が目視確認できるが、時間経過とともに目立たなくなり、違和感のない仕上がりとなった。

5. おわりに

保全予防の概念に基づいたT-FREG工法を適用するにあたり、施工性に関しては実規模レベルで、耐久性に関しては室内試験体レベルで検証を行った結果は良好であり、実施工に十分通用する技術であることが証明できた。

今後は、はく落防止対策に有効な方法の一つとして水平展開させるための準備を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003-, 2003. 6
- 2) 小島芳之, 吉川和行, 六車崇司, 小林朗, 若菜和之, 松岡茂, 朝倉智深：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, No. 756, VI-62, pp. 101-116, 2004. 3
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No. 71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2006. 9
- 4) 寺田典生, 青木圭一, 中井裕司：繊維シートによる剥落防止対策の開発, 橋梁と基礎, pp. 27-32, 2003. 11
- 5) 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, Vol. 14, pp. 389-394, 2004. 11
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー102 トンネルコンクリート施工指針（案）, 2000. 7
- 7) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路：トンネル施工管理要領, 2006. 10
- 8) 馬場弘二, 伊藤哲男, 城間博通：覆工コンクリートのはく離・はく落抑制を目指した鋼繊維補強仕様の確立に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol. 39, pp. 91-106, 2002. 11
- 9) 日本道路公団：コンクリート片はく落防止対策マニュアル, 2000. 11
- 10) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路：試験方法第4編構造関係試験方法, 2006. 10
- 11) 宇野洋志城, 歌川紀之, 小泉直人, 木村定雄：埋設型連続繊維シート補強コンクリートの曲げ靱性, 土木学会第 63 回年次学術講演会, VI-308, pp. 615-616, 2008. 9