

繊維ネットと光硬化型樹脂を用いた新剥落防止工法

Method for Preventing Spilling and Peeling of Tunnel Arch Concrete Using
a Fiber Net and a Photo-Curing Resin

真下英人¹・石井 清²・滝谷将志³・楠 和也⁴

Hideto Mashimo, Kiyoshi Ishii, Masashi Takiya and Kazuya Kusu

¹正会員 工博 上席研究員 独立行政法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:mashimo@pwri.go.jp

²フェロー 工博 主席研究員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail:kiyo.ishii@shimz.co.jp

³研究主査 昭和高分子株式会社 伊勢崎研究所 (〒372-0833 群馬県伊勢崎市富塚町1019-1)

E-mail:masashi.takiya@shp.co.jp

⁴課長 倉敷紡績株式会社 綿合繊維事業部 (〒541-8581 大阪府中央区久太郎町2-4-31)

E-mail:Kazuya_Kusu@kurabo.co.jp

A method for preventing spilling and peeling of tunnel arch concrete was developed and tested to confirm its applicability to practice problems. In the proposed method, a high-density polyethylene (HDPE) fiber net with a 2-cm slit is bonded to a concrete surface using a clear photo-curing resin and/or a glass-fiber sheet pregnant with the resin. The net was carefully designed and made high-visible because of the irregular behaviors of arch concrete so that small cracks and water leakages could be found easily. The following tests were conducted on the net. Load tests to determine the punching shear of the net and adhesion force, visibility, lasting quality, and anti-combustibility tests.

Key Words: tunnel arch concrete, a method for preventing spilling and peeling of concrete, HDPE-fiber-net, visible-ray photo-curing resin

1. はしがき

近年、道路トンネル等を対象としたコンクリートはく落防止工法が適用される機会が多くなってきているが、広く適用されている連続繊維接着工法等には、次のような技術課題がある。

(i)工数が多く、工期が長くなると、車線規制等の機会が増し、施設利用者への影響時間が長くなる。このため、施設利用者へのサービス低下を防止するため、急速施工ができる工法の開発が望まれる。

(ii)既存工法では、不透明な材料を使うことにより、適用後は覆工面の変状を監視することができない。トンネル覆工の変状や漏水等の状況を監視するためには透明な材料の使用が望ましい。

(iii)施工性や経済性に優れた工法が望まれている。

上述の観点より、道路トンネル等を対象とした新しいはく落防止工法を開発することにした。

この提案工法は、開発して間もないことから、適用

事例については未だ十分な実績を上げていない。このことから、本報告では、提案工法に対する基礎的な性能確認試験のうち、可視性、耐荷性能（押抜き耐荷力）等の試験結果を報告する。

2. 提案工法の概要と特徴

(1)概 要

提案するはく落防止工法は、光硬化型ビニルエステル樹脂を用い、高密度ポリエチレン二軸ネットをコンクリート面に貼り付け、可視光で速やかに硬化させる新しい形のコンクリートはく落防止工法である（工法1）。

また、二軸ネットの上に光硬化型シートを貼付ける方法もある（工法2）。工法2は、光硬化型シートを配置することにより、工法1と比べて高い押抜き耐荷力をもつ。

(2) 材料の規格・構成

材料に関する標準仕様を表-1に示す。また、写真-1は繊維ネット、写真-2は光硬化型シートである。

表-1 材料の規格・構成

繊維ネット	プライマー	含浸樹脂 ・光硬化型シート
高強度ポリエチレン 二軸ネット 幅100cm, 目合2cm 目付量45g/m ²	2液型 エポキシ 樹脂	可視光硬化型 ビニルエステル樹脂 ガラス繊維補強 光硬化型シート

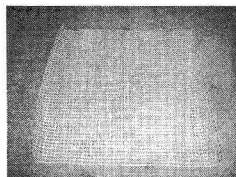


写真-1 繊維ネット



写真-2 光硬化型シート

(3) 施工フロー

施工フローを図-1に示す。また、写真-3(a)～(e)に施工フローの写真を示す。

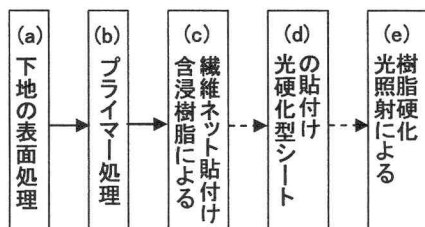
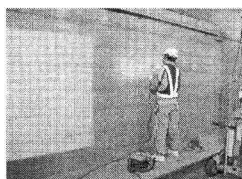


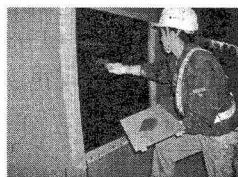
図-1 作業フロー



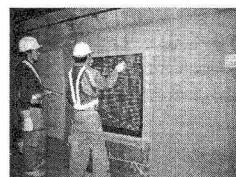
(a) 下地の表面処理
(グラインダー掛)



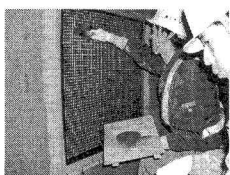
(b) プライマー塗布



(c-1) 含浸樹脂の下塗り



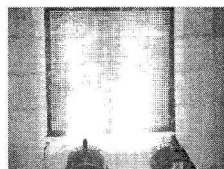
(c-2) 繊維ネットの貼付



(c-3) 含浸樹脂の上塗り



(d) 光硬化型シートの貼付



(e) 光照射による樹脂硬化

- ・(d)は工法2のみ
- ・(e)光照射は20分
(照射条件は作業条件により異なる)

写真-3 施工フロー
(a)～(d)

(a) 下地処理

下地処理としては、グラインダーもしくは高圧水洗浄により行う。また、不陸修正等は出来るだけ行わずに済ませるが、コンクリート面の詳細なひび割れ観察などが必要な箇所では、不陸修正材を出来るだけ使用しないで済むように、グラインダー等による研磨により、表面を平滑に仕上げることもある。

(b) 漏水箇所等の処理

プライマーはコンクリートに含浸して微細なクラックを塞ぐとともに、下塗り剤との馴染みをとるために塗布する。提案工法で使用しているプライマーは水で飽和したコンクリート面に対しても適用できるが、水が出潤している箇所や漏水箇所に対しては適用できない。水が出潤している、垂れている、あるいは漏水している箇所については、止水工、水抜き工、線導水工(溝切り工)などを施し、漏水をとめる必要がある。

(4) 特徴

- ・透明性がある樹脂を使用するため、ネットを貼り付けた後も、コンクリート表面を観察することができる。
- ・光硬化型シートを併用することで、荷重特性、可視性を更に向上することができる。
- ・光照射後は、樹脂硬化は終わっており、直ちに性能を発揮する。
- ・以下の施工性に優れている。(i)高密度ポリエチレンネットは下地コンクリートの不陸への追従性に優れている、(ii)作業が短時間でできる、(iii)軽量のため、運搬や貼付けが容易である。
- ・硬化後は難燃性である。
- ・耐薬品性に優れている。

3. 各種性能確認試験とその結果

(1) 性能確認試験項目

性能確認のため、表-2に示される性能試験を行った。表-2では、試験項目とともに、試験の実施場所を示している。

表-2 性能確認試験

試験名称	試験場所		
	試験室	土木研究所 実大トンネル 実験施設	試験施工 現場
押抜き耐荷力	◎	—	○
付着強度	◎	—	○
耐久性	◎	—	—
可視性	○	◎	○
難燃性	◎	—	—
洗浄性	—	—	○

記号の説明：◎、○：実施（◎は主となる試験）

(2) 押抜き耐荷力試験

押抜き耐荷力については、工法1と2に対して(a)大型試験体による試験、(b)小型試験体による試験、(c)現位置引抜き試験を行った。

表-3 押抜き耐荷力試験

J7径 (mm)	試験室試験			現位置 引抜き 試験
	大型試験 体による	小型試験体による		
		文献1	文献2	
100	—	○	○	○
250	○	—	—	△
500	○	—	—	—

記号の説明：○工法1,2ともに実施, △工法1のみ実施

(a) 大型試験体による押抜き試験

トンネル覆工からコンクリート片がはく落する場合を想定して、写真-4に示す載荷装置を用いて試験を行った。この載荷装置では、繊維ネット等の観察を容易にするため、実際とは逆に、繊維ネット等を貼付けた面を上側にしている。

試験体は、図-2に示すように寸法1,500×1,500×厚さ150mmのコンクリートスラブであり、中央部に円孔（φ=250,500mm）を設け、その中にコンクリート製の圧子（コア）を挿入したものである。コンクリートスラブと圧子との間隙は約5mmである。コンクリートスラブの材令28日の1軸圧縮強度 σ_c は26.2N/mm²であった。幅100cmの繊維ネットと幅90cmの光硬化型シートを使用し、1,300mm角の範囲を補強した。また、コンクリートスラブは乾燥状態であり、試験体数は1である。

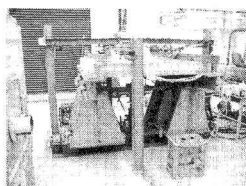
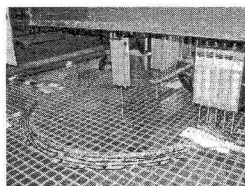
写真-4 大型試験体
押抜き試験装置

写真-5 載荷状況

載荷の方法は、手動ジャッキによる変位制御として、圧子に鉛直力を作用させた。強制変位は0.25mm/minで増加させ、2分間その状態を保持した後、計測を行うというステップを繰り返し、最終破壊を確認するまで載荷を継続した。試験体の載荷状況を写真-5に示す。

大型試験体による試験結果を表-4に示す。また、荷重-変位図を図-3に、そして載荷後の試験体の状況を写真-6に示す。

工法1試験体に最初に生じる損傷は、繊維ネットを貼付けている接着樹脂のひび割れであり、このとき載荷荷重における最初の荷重低下が認められる。表-4では、このときの荷重を押抜き耐荷力として示している。工法2試験体においても、接着樹脂の割れにともなって載荷荷重の低下が認められるが、表面に光硬化型シートを配置した効果により荷重の伝達や剥れが工法1試験体と比べて円滑になるので、荷重-変位図の中ではその位置が目立たなくなっている。

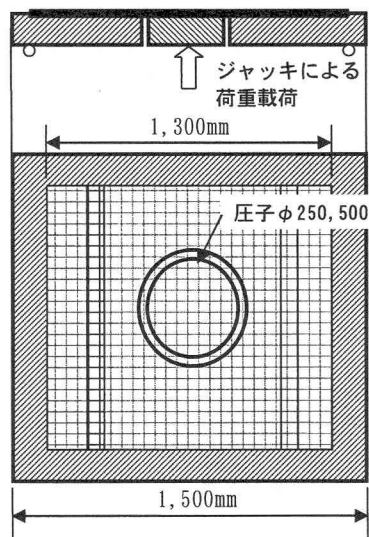


図-2 大型試験体（押抜き試験）

表-4 大型試験体による押抜き試験結果

工法	J7径	押抜き耐荷力*1 (変位)	最大荷重値 (変位)*2
工法1	25cm	4.34kN(4.51mm)	6.07kN(14.8mm)
	50cm	8.18kN(4.51mm)	8.55kN(12.5mm)
工法2	25cm	9.66kN(6.99mm)	13.3kN(22.5mm)
	50cm	14.9kN(4.24mm)	17.0kN(11.0mm)

*1 接着樹脂の(最初の)損傷時、図-3の●印位置。

*2 図-3の▼印位置

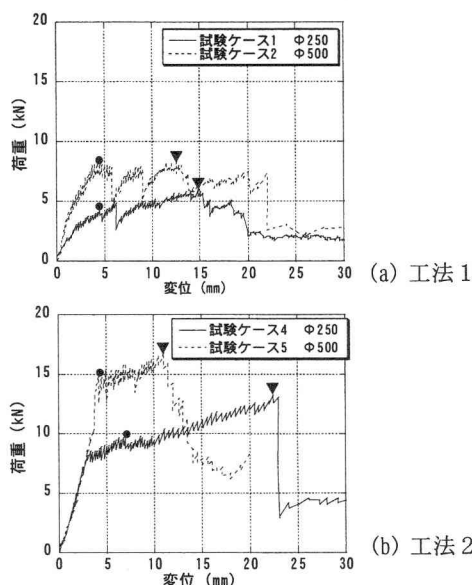
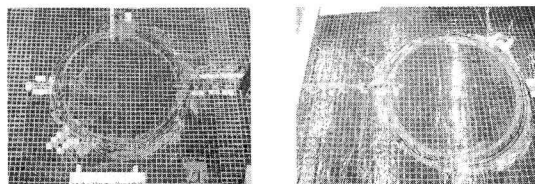


図-3 大型試験体による荷重-変位図

写真-6から、工法1の破壊状況は繊維ネットの破断であり、工法2の破壊状況は繊維ネット・光硬化型シート複合体の破断であった。剥がれの進展はほとんどない。



(a) 工法1 (b) 工法2

写真-6 大型試験体の載荷後

(b) 小型試験体による押抜き試験

コア径100mmの試験は、文献1,2の試験法に準じて行った。ここで、両文献とも試験体は、JIS規格によるコンクリート2次製品：側溝板を使用しているが、文献2による試験体では、押抜きコア(圧子)は試験体と分離しておらず、ネットの貼付け面側にて厚さ5mmほど圧子と試験体が連続している。また、コンクリート板を用いて、文献1,2の試験法に対して試験体をそれぞれ製作した。なお、いずれの試験体も乾燥状態とした。試験結果(平均値)を表-5に示す。

表-5 小型試験体による押抜き試験結果

工法	コア径	押抜き耐荷力 (変位)		破壊形態
		文献1に 準拠	文献2に 準拠	
工法1	100mm	2.9kN (13.5mm)	3.3kN (10.8mm)	繊維ネットの破断
工法2	mm	6.1kN (24.9mm)	9.9kN (29.5mm)	剥がれが進展し 端部に至る

(c) 現位置における引抜き試験

北海道一般国道トンネルにおいて実施した試験施工において、側壁において引抜き試験を行った。実際のトンネルでは押抜き試験はできないので、側壁部にコアボーリングで所定の径の穴を設け、予め製作しておいたピアノ線付きのコンクリート製の引抜きコアをその穴に配置し、繊維ネット等を貼付け、しかる後、繊維ネット貼付け部周辺の側壁に反力をとりピアノ線を手がかりとして、引抜き試験を行った(写真-7参照)。また、引抜き試験の結果(平均値)を表-6に示す。コンクリートの1軸圧縮強度は40N/mm²程度である。

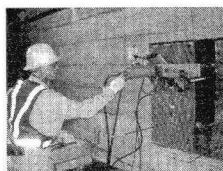


写真-7 現位置引抜き試験

表-6 現位置における引抜き試験結果

工法	コア径	引抜き耐荷力 (変位) *1	最大荷重値 (変位)
工法1	100mm	3.01kN(8.01mm)	—
	250mm	5.30kN(7.20mm)	7.48kN(20.3mm)
工法2	100mm	4.88kN(9.53mm)	6.80kN(17.1mm)
	250mm	—	—

*1 大型試験体の押抜き試験との整合性をとるため、荷重・変位曲線における最初の荷重低下が起きた段階における値

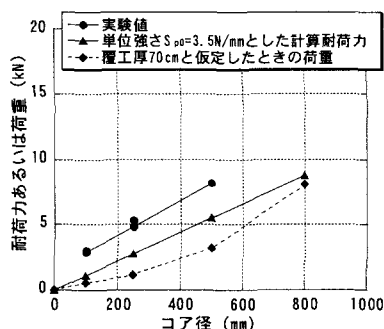
(d) 3つの試験結果の比較とその考察

各種押抜き・引抜き試験結果の比較表を表-7に示す。この表では評価を安全側にするため、大型試験体による結果は接着樹脂に損傷が見られたときの耐荷力を示し、現位置における引抜き試験では表-6の引抜き耐荷力を示している。一方、小型試験体による結果では表-5において文献1に準拠した試験結果を示している。また、表-7の結果を図-4に示した。図-4の横軸はコア径を、縦軸は耐荷力を示している。図-4には、「単位強さ Sp_0 」と圧子周長($\pi\phi$)との積により与えられる押抜き耐荷力(図-4では2番目の線)を示している。ここで、単位強さは、実験により求められた耐荷力を圧子周長で除すことにより与えている。具体的には、種々の試験結果から求められた値の中から最小値として工法1で $Sp_0=3.5\text{N/mm}$ 、工法2で $Sp_0=4.5\text{N/mm}$ とした。さらに、はく落コンクリート片の厚さを仮に70cmとして円筒状のコンクリート塊の重量を参考値として図中の破線で示している。試験により得られた耐荷力には参考値に対して相当の安全余裕があることが判る。

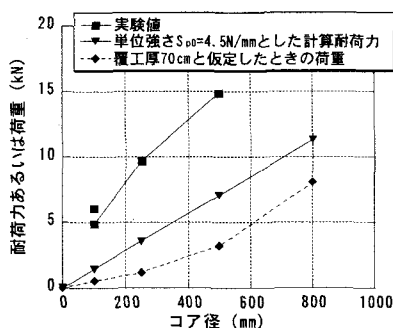
表-7 各種押抜き・引抜き試験結果の比較

工法	コア径 (mm)	大型試験 体による 押抜き*2	小型試験 体による 押抜き*3	現位置 による 引抜き*4
工法 1	100	—	2.87kN (13.5mm)	3.01kN (8.01mm)
	250	4.34kN (4.51mm)	—	5.30kN (7.20mm)
	500	8.18kN (4.51mm)	—	—
工法 2	100	—	6.06kN (24.9mm)	4.88kN (9.53mm)
	250	9.66kN (6.99mm)	—	—
	500	14.9kN (4.24mm)	—	—

*2 接着樹脂損傷時の押抜き耐荷力 *3:文献1に準拠した試験結果を示す *4:荷重・変位曲線において最初の荷重低下時の荷重。



(a) 工法 1



(b) 工法 2

図-4 押抜き (引抜き) 試験結果の比較図

(3) 付着力試験

コンクリート面と被着体(例, 繊維ネット)との接着力を確認するために, 押抜き・引抜き試験の際に JIS A 6916 に準拠して付着強度試験を行った(建研式引張試験機を使用)。付着強度試験の結果(平均値)を表-8に示す。付着力は文献2の管理基準値である1.5MPa以上を満足した。

表-8 付着強度試験結果(単位: MPa)

工法	大型試験 体による	小型試験 体による*1	現位置試験による		
			場所	施工直後	1.5年経過後
工法 1	2.16	4.18	側壁	3.81	3.36
			天井	—	5.25
工法 2	—	5.58	側壁	3.79	3.59
			天井	—	4.82

*1:乾燥面におけるデータを使用

(4) 耐久性

耐久性試験として, (a) 温冷繰返し試験と (b) 乾湿繰返し試験を行った。(a) 温冷繰返し試験では, 水温20℃の水槽に18時間浸漬, その後温度-20℃の恒温槽に3時間入れ, そして温度50℃の恒温槽に3時間入れるのを1サイクル(1日)としてこれを10サイクル繰り返した。一方, 乾湿繰返し試験では, 温度60℃循環型空気乾燥機で18時間養生後, 温度60℃の恒温槽で6時間, 水浸養生するのを1サイクル(1日)として3サイクルし, その後標準状態で24時間養生した。これらの負荷は JIS A 6909 に準じるものである。

試験体は文献1に準拠して製作した。試験体の寸法は400×600×厚さ60mmである。試験体は3体とし, これとは別に予めハンマーによる打撃によりコンクリート板にひび割れを入れた観察用1体を製作した。試験内容としては①概観検査, ②(小型試験体による)押抜き耐荷力, ③付着力である。

以下, 結果を示す。

表-9 耐久性試験結果①概観検査

試験名	工法	試験結果
温冷繰返し	工法1	試験後, 貼り付け箇所にしわ, むら, はがれ, われは生じなかった
	工法2	同上
乾湿繰返し	工法1	同上
	工法2	同上

表-10 耐久性試験結果②押抜き耐荷力

試験名	工法	耐荷力 (変位)	破壊形態	参考 *1
温冷繰返し	工法1	2.98kN (16.8mm)	繊維ネットの破断	2.9kN
	工法2	7.94kN (21.3mm)	剥れの進展	6.1kN
乾湿繰返し	工法1	2.98kN (26.5mm)	繊維ネットの破断	2.9kN
	工法2	5.99kN (21.2mm)	剥れの進展	6.1kN

*1 表-5参照

表-11 耐久性試験結果③付着力

試験名	工法	付着力	参考*2
温冷	工法1	2.93MPa	4.18MPa
繰返し	工法2	5.10MPa	5.58MPa
乾湿	工法1	2.78MPa	4.18MPa
繰返し	工法2	5.30MPa	5.58MPa

*2 表-8 小型試験体による結果を使用

耐久性試験の結果からは、押抜き耐荷力の低下は見られない。また、付着力の結果では、耐久性試験後のものの数字がやや小さいが、表-8によれば統計的なばらつきの範囲内と言える。

(5) 可視性

樹脂硬化体の透明度を向上させるために、透明度の高い樹脂を使用するとともに、樹脂や光硬化型樹脂シートの屈折率を1.6となるように調整した。さらに、下塗り材や不陸修正材等にダレ止めとして添加する増粘剤(シリカゲル)が透明性を損なう主な理由であると考えられることから、繊維ネットの厚さを薄くし、不陸に対する追従性を増して、不陸修正材を出来る限り使わないようにするとともに含浸樹脂層の厚塗りをしないで済むようにした。

可視性については、実大トンネル実験施設において天井および側壁において約1.0m²の施工を行い、照明を通常照明、通常照明より明るくした照明(通常照明の約10倍の明るさ)、手元懐中電灯の使用のときに分け、また観察位置を路面と近接位置の2種類として、ひび割れ等の目視による視認性を確認した。結果を表-12に示す。また、ひび割れの観察例を写真-8に示す。

表-12 目視による可視性の確認結果

工法	観察場所	観察者の位置	
		路面	近接
工法1	側壁	照明の条件によらず、判別不可能。工法1ではネットの白さが目立つ	照明の条件によらず、ひび割れは繊維ネットが重なった部分を除けば、観察可。クラック'-シ'による0.2mm幅のひび割れの読取りも可能。工法2では光硬化型シートの使用により可視性は向上
	天井		
工法2	側壁		
	天井		

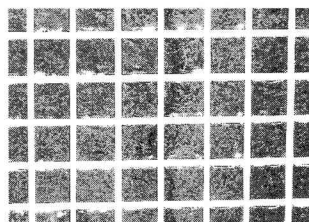


写真-8 ひび割れの可視性

なお、試験施工等の例からは、夜間工事用照明を使用することにより、コンクリート下地の汚れを手がかりに路面からもアーチ部のひび割れが観察できることを確認している。

(6) 難燃性

トンネル内での火災発生時において、提案工法の類焼・延焼の有無がないことを確認するために、難燃性について調べた。試験方法は文献3によった。すなわち、所定の角度(縦壁面、天井面、45°面)に設置した試験体に、1000℃以上のバーナーの炎を30秒間当てる。炎を取り去ってから、炎が消えるまでの時間(消炎時間)時間をストップウォッチを用いて測定する。試験結果は、表-13に示されように、30秒以内に消炎しており、難燃性が確認された。

表-13 難燃性試験

工法	試験条件(設置角度)	消炎時間
工法1	縦壁面	28秒
	天井面	5秒
	45°面	3秒
工法2	縦壁面	1秒以内
	天井面	3秒
	45°面	1秒

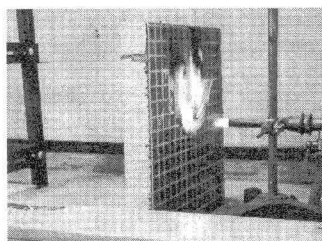


写真-9 難燃性試験

(7) 洗浄性

時間経過と共に提案工法の表面は排気ガス・埃などにより汚れるため、その表面汚れを洗浄試験し、提案工法適用面の汚れの除去具合、表面塗膜の剥がれなど不具合の有無を確認した。試験方法として、雑巾などによる拭き取り洗浄や高圧水洗浄を実施し汚れの状態を比較確認した。高圧水洗浄は、最大水圧5MPa、提案工法適用面より20cm以上離して実施した。なお、試験場所は試験施工場所において引抜き試験の実施箇所を使用した。試験時期は、施工後約1.5年経過後である。結果として、雑巾などによる拭き取り洗浄の場合、提案工法適用面の汚れは除去でき、比較的きれいな表面が回復する。高圧水洗浄の場合、適用工法適用面の端部に対して浅い角度より高圧水を噴射して洗浄すると、補強ネットの貼付け部端部に剥がれ不具合が生じることがある。しかし、できる限り垂直方

向より噴射して洗浄した場合には、汚れの除去が可能で、きれいな表面が回復し、また剥がれなど不具合もない。

4. まとめ

本報告は次のようにまとめられる。

- ① 提案工法の（接着樹脂損傷時における）押抜き耐荷力は、大型試験体による試験から工法1（繊維ネットの直貼り）では、φ250で4.3kN、φ500で8.2kN、工法2（繊維ネットの上に光硬化型シートを配置）では、φ250で9.7kN、φ500で14.9kNとなった。（この値は、連続炭素繊維シート工法と同程度である）なお、提案工法では、接着樹脂損傷時の荷重低下は一時的で、繊維ネットや光硬化型シートの破断まで押抜きに若干抵抗し、押抜き荷重は押抜き耐荷力より若干大きくなる。
- ② 提案工法では、近接位置においては、下地の観察が可能である。
- ③ 耐久性（温冷繰返し、乾湿繰返し）を保持していることを確認した。

提案工法のコストと施工期間については、施工事例の蓄積を待ち、別の機会に報告したい。なお、小規模な試験施工を含めて、6例の適用例があるが、それらの例から、連続炭素繊維シート工法に比べて、十分なコストおよび施工期間の縮減が期待できると考えている。

また、工法2は工法1と比べて押抜き耐荷力や可視性に優れているが、反対にコストや工期には劣る。両者の使い分けについては、施工事例の蓄積を待ち、整理していきたい。

謝辞：試験施工においては、北海道開発局 留萌開発建設部 留萌開発事務所の方々のご協力を得た。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1)(財)鉄道総合技術研究所：トンネル覆工剥落防止用繊維シートの性能確認試験要領(案), 2003年10月
- 2)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年11月
- 3)トンネル安全対策工法研究会(TSC研究会)編著：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル, 山海堂, 2003.5