

繊維シートを埋設した覆工コンクリート片のはく落防止に関する研究

宇野 洋志城¹・木村 定雄²

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)
E-mail:uno@satokogyo.co.jp

²正会員 金沢工業大学 地域防災環境科学研究所 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

道路トンネルの実効的なアセットマネジメント手法を確立する上で、供用時の覆工コンクリート片のはく落する現象は重要な意味をもつ。そこで、筆者らはコンクリート片のはく落現象を供用時のリスク事象としてとらまえ、事前に繊維シートをトンネル覆工に埋設することで、はく落リスクを低減する保全予防技術を確認した。

本論文では、まず、トンネル構造物の長期運用を図るための保全の考え方を整理し、その中で、はく落現象防止を道路トンネルの重要な要求性能項目として位置づけている。また、はく落防止を実現するための要求性能を設定し、それを具体的に評価する段階で、利用できる評価指標とその定量化のための評価基準を提案するとともに、その性能の妥当性と実用性を実験および実施工によって検証している。

Key Words : maintenance, prevention of exfoliation, tunnel lining, asset management, risk

1. はじめに

我が国の社会資本の整備は、1960年代を主とする高度急成長期をピークとして以降は減少傾向にあり、全体として増大した社会資本ストックの高齢化が急激に進みつつある。例えば、道路トンネルの場合をみると、1955年から1973年までの高度成長期にトンネル全体の約25%が建設されており、建設後50年以上を経過したトンネルの数は10年後には現在の約3倍、20年後には約12倍に達するといわれている¹⁾。

現在、このような社会的背景から社会資本を長寿化させ、社会資本となる構造物の建設、維持、修繕、更新を含めてその費用と便益を総合的に評価し、施設構造物を適切に管理していくことが望まれており、社会資本をアセット(資産)とみなしたアセットマネジメントの確立が急務とされている。そのためには、トンネル構造物に求められる要求性能を規定化し、時間経過に伴う性能の変化予測あるいは寿命予測の精度を高めること、およびライフサイクルコストの算定手法も含めた維持管理シナリオを構築するためのロジックを確立することが重要となる。

現在、アセットマネジメントの研究は徐々に進められ、道路施設構造物を主な対象として国や地方自治体、ならびに民間会社の一部で点検にもとづいてデータベースを

構築し、実用化されている²⁾。

筆者らは、主に道路トンネルを対象としたアセットマネジメント手法の確立を目指している。以降には、本文で論じるマネジメントの考え方および本論文で提案する保全予防技術について述べる。

2. トンネルへのアセットマネジメントの適用

(1) トンネルアセットマネジメントの課題

橋梁や舗装に求められる機能は安全に通行できること³⁾であり、道路施設構造物の場合も同じである。その経年劣化は、主に通過車両の荷重や環境作用等の程度によって進行するため、保有すべき性能の明確化と性能低下予測の精度向上は、ある程度可能と考えられる。また、橋梁であれば架け替えが、舗装であれば打ち換えができることから、事後保全としての技術的対応も可能である⁴⁾。

これに対して、トンネル構造物は、地中を安全に走行するための空間確保が重要な機能となる⁵⁾。トンネル構造物は他の構造物とは異なり、一度構築したら代替のものが無い限りそれを簡単に放棄できない、または相当のコストを必要とする特徴がある。すなわち、適切な維持管理のもとで、半永久的に使い続けるシナリオの構築が重要となる。

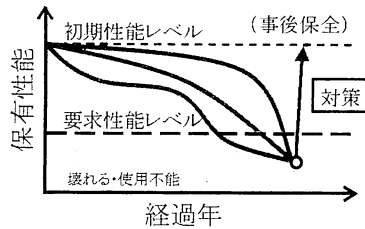


図-1 事後保全の概念

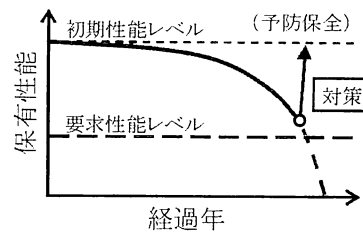


図-2 予防保全の概念

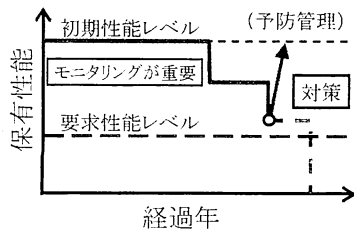


図-3 予防管理の概念

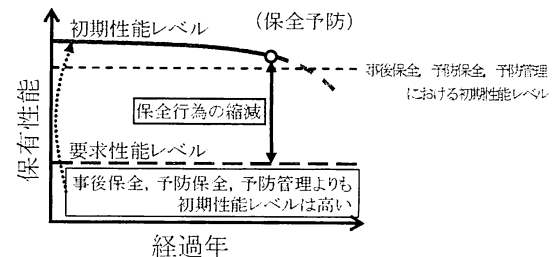


図-4 保全予防の概念

たとえば、中村らはトンネル構造物の耐用年数を永年と考え、寿命は考慮しないものとする²⁾としている。しかしながら、トンネルの効率的な運用と維持管理を目指したトンネルアセットマネジメントの体系は未だ確立されているとはいえない。

その理由として、以下のことが挙げられる。橋梁や舗装の維持管理は、劣化予測に基づき最も効率的かつ経済的にライフサイクルコストを検討して損傷の段階が進まないうちに修繕などの対策を実施することが経験的技術からほぼ可能となっている。しかし、トンネル構造物の多くは周辺地山が非常に複雑であり、構造物の損傷の原因を特定することが困難である。また、一様でない覆工材料や工法などによって構築されるトンネルを対象としている³⁾ことから、覆工コンクリートの劣化メカニズムは未だ十分に解明されていない実情にある。その一つに無筋の覆工コンクリートのはく落現象が挙げられる。

さらに、トンネル構造物を対象とするアセットマネジメントにおいては、従来までの維持管理シナリオのような性能低下予測の概念を導入したマネジメントシステムとともに、トンネルの運用リスクをも考慮してマネジメントシステムを構築する必要がある。

運用リスクの要因例としてトンネル覆工のコンクリート片のはく落や漏水現象が挙げられる。これらは修繕作業などの保全行為によって性能回復は可能であるが、構造部材耐力のように定量化することは難しい。そのため、保有性能としてはく落現象等を考慮する場合には、適みなし規定（平成15年に土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会：包括設計コード（案）において定義された用語であり、要求性能を満足していると見なされる

「解」を例示したもので、性能照査方法を明確に表示できない場合に規定される構造材料や寸法、および従来の実績から妥当と見なされる現行基準類に指定された解析法、強度予測式等を用いた照査方法を表す⁶⁾）を適用せざるをえない。

(2) 管理手法の概念と研究の位置づけ

維持管理段階での管理手法の意図について考えると、保有性能の低下に伴う保全行為の時期によって、幾つかの管理手法が挙げられる。図-1～図-4はそれらを示したものである。

ここで、設計段階における要求性能レベルは、一般に設計性能レベルを指すものと考えられるが、実際に構造物が構築される施工段階の初期性能レベルは安全率を考慮して常に要求性能レベルを上回るのが一般的である。したがって、保有性能を評価する上では初期値の与え方が、設計段階と維持管理段階では異なる可能性がある。維持管理段階におけるマネジメントでは、その保有性能の変化に着眼するため、安全率を見込んだ初期性能レベルを100%として評価するのが妥当である。以降、このような基本的な原則にもとづいて管理手法を考える。

まず、第1は壊れた、あるいはトンネルとして安全に通行できる空間を確保できない程度まで機能が低下した段階で補修、補強等の対策を施す管理手法である（図-1）。これを事後保全と定義する。この管理手法は、建設当初の品質の程度ならびに環境作用の影響を受けて、保有性能が要求性能を下回ってから性能回復させるため、大規模な修繕が必要となり、トンネルの規模次第では不経済となる可能性がある。

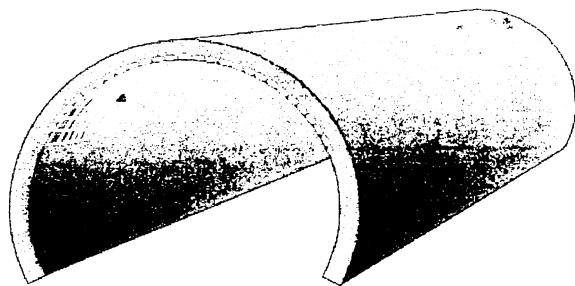


図-5 繊維シート適用のイメージ

第2は、建設、維持の段階から調査、点検を通じて不具合を発見、または保有性能の低下を予測し、要求性能レベルを下回る前に不具合を補修、補強などの対策を施す管理手法である（図-2）。これを予防保全と定義する。この管理手法は、何らかの軽微な変状が発見された段階で性能回復させるため、性能低下の予測精度の向上が重要となる。その一方で、要求性能を満足しているか否かの技術的判断は困難な場合が多い。

第3は、トンネルにおいてはどの段階で対策を行っても対策費用や社会的費用は同じであると考え、壊れる、すなわち安全な通行が妨げられる寸前に対応することが最も経済的であるとして、対策を施す管理手法である（図-3）。このため管理にはモニタリングが重要となり、中村らはこれを予防管理と定義している。既に石川県では2006年4月からトンネルアセットマネジメントとしての運用を開始している²⁾。

第4は、計画、設計の段階から何らかの劣化現象、たとえばはく落現象をリスクとしてとらまえ、これを防止する施策を新設時に実行する管理手法である。この場合、はく落リスクが相当に低減されるため、その後の保全行為そのものも低減できる（図-4）。これを保全予防と定義する。この管理手法は建設当初の初期投資を必要とするものの、その後の維持管理に要する調査、点検、修繕費用が低減できる可能性があり、長期間にわたる運用費用の経済性が高まる。とくに、新設のトンネル構造物に対しては第4の概念を適用することが可能であり、既設のトンネル構造物とは異なる新しい管理手法といえる。

筆者らは、主に道路トンネルを対象としたアセットマネジメント手法の確立を目指している。具体的には、はく落リスクなどの災害リスクを定量化できるモデルを構築し、より精緻なライフサイクルコスト算定手法の体系を確立することを目的としている。

本論文では、トンネル構造物のはく落現象を適合みなし規定としてとらまえ、計画、設計段階で定量化できないはく落現象を防止するための要求性能を明確にすると

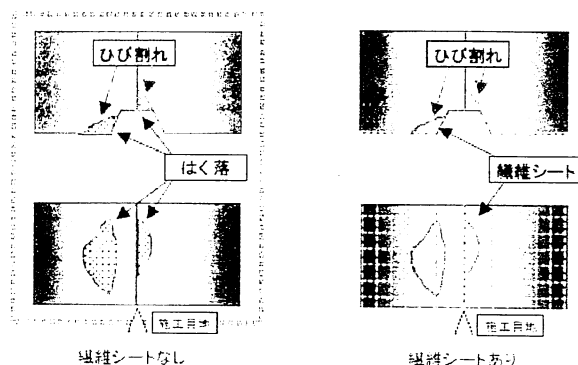


図-6 繊維シート適用によるはく落防止のイメージ

ともに、保全予防としてのはく落防止技術を定量的に評価する手法を提案する。

3. コンクリート構造物のはく落防止に関する研究

(1) 既往の研究

保全予防の概念にもとづき、コンクリートの施工計画や新設のコンクリートの打込み前の段階あるいは既設のコンクリートに不具合が生じる以前の段階から何らかの対策を講じる研究には、主にははく落現象を対象としたものが多い。とくにはく落防止に繊維シートを適用する既往の研究^{7)~17)}は、部材レベルでの研究他にも具体的に橋梁やトンネルなどの構造物を対象にしたものが散見される。

部材レベルでの研究には、池田ら⁷⁾、小牧ら⁸⁾、藤倉ら⁹⁾、兼松ら¹⁰⁾による後貼りの繊維シートを適用したはく落防止性能を評価したものがある。

具体的な構造物として橋梁を対象にした場合には、小島ら¹¹⁾による繊維シート接着工によるはく落対策設計法の提案や、寺田ら¹²⁾による橋梁上部工を対象にした開発がある。とくに後者に関しては型枠面に繊維シートを敷設、独自の固定治具を用いて固定し、その治具を取り外すことなくコンクリートの打込み作業を行い、脱型時からコンクリートの表面近傍に埋設した状態で運用開始する保全予防技術として確立されており、橋梁上部工の下面（交差部の橋梁下面）への実用例がある。

一方、トンネルを対象としてみると、NATM における覆工コンクリートと都市シールド工法におけるセグメントへの適用に関する研究がある。

覆工コンクリートへの適用に関しては、新堀ら¹³⁾、蒲田ら¹⁴⁾、城間ら¹⁵⁾による実験的研究がある。しかしながら、これらの研究はすべて既設のコンクリートへの後貼りによるものであり、運用期間中に対策を施す概念に基づいたもので、筆者らの目指す保全予防概念に基づく対

表-1 覆工に求められる代表的な機能^{18)~22)}

覆工の機能	関連するコンクリート現象	求められる役割
内空断面保持	変形, ひび割れ, はく落, 崩落	通行に必要な内空断面の確保
防水	ひび割れ, 漏水	水滴落下による視野障害, 路面の滑り, 寒冷地のつらら, 凍結, 壁面汚れ, 絶縁不良, および腐食の防止
耐火	変形, はく落, 発熱, ガス発生, 崩落	火災中の避難経路の確保, 火災後の崩落の防止
保守管理	平滑, 変形, 漏水	保守点検の容易さの確保
内装	変形, 変色	視認性の確保
その他	変形, はく離, はく落	付帯設備の取付易さの確保

表-2 はく落防止にかかわる要求性能と評価指標および評価基準

要求性能	評価指標	評価基準
衝撃や荷重により, コンクリート片がはく 落しないこと (はく落防止性能)	曲げ靱性係数	JHS 730-2003『繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法』 ²³⁾ に準拠して行った試験結果が, 繊維補強覆工コンクリートにおける基準(曲げ靱性係数 1.40N/mm ² 以上)と同等であること
	押抜き耐力	JHS 424-2004『はく落防止の押抜き試験方法』 ²⁴⁾ に準拠して行った試験結果が, 繊維シート後貼り工法における基準 ²⁵⁾ (変位10mm以上での最大荷重 1.5kN以上)と同等であること

策とは異なる。

また, シールドトンネル用セグメントをみると, 玉井, 木村ら¹⁶⁾による研究がある。橋梁を対象とした研究と同様に型枠面に繊維シートを敷設し, 表面近傍にそれを埋設した状態ではく落を防止する技術である。沼澤ら¹⁷⁾により地下鉄換気塔への実用例が報告されているが, これらコンクリート二次製品として工場管理のもとで開発されたものであり, 山岳トンネルにおける覆工コンクリートのように現場でのコンクリート打設には適さない。

以上のはく落防止にかかわる既往の研究を踏まえて, 筆者らは, 山岳トンネルに適用できるはく落防止技術を開発することを目指す。具体的には, 本研究はトンネル覆工コンクリートを対象として, 覆工コンクリート打設前の段階に曲率のあるトンネル用型枠(以降, セントルと称す)に埋設型の繊維シートを設置し(図-5, 図-6), 施工計画の段階からコンクリート片のはく落防止, すなわちゼロリスクを目指すものである。

以降では, コンクリート片のはく落現象を防止するために必要となる要求性能を設定し, それを具体的に評価する段階で, 利用できる評価指標とその定量化のための評価基準を述べる。

(2) トンネル覆工コンクリートの要求性能

a) トンネルに要求される機能

これまで多くのトンネルの機能と要求性能に関する研究^{18)~22)}が行われている。覆工に求められる代表的な機能を表-1に整理して示す。

たとえば道路トンネルを例にとると, トンネルが保有

すべき機能は安全に快適かつ円滑に通行できること³⁾である。トンネル構造, 利用者, 管理者それぞれの面から定性的に表現すれば, トンネル構造にとっては地山に作用する荷重に対して安定していることや覆工コンクリートに有害な変形や変状(ひび割れ, 漏水など)が生じないことであり, 利用者にとっては安全で快適な通行が妨げられないこと, 管理者にとっては運用状態を管理し易く維持管理が適切に行えることなどである。

b) 本研究の対象とした覆工コンクリートの要求性能

本論文では, トンネル覆工に対する保全予防技術のうち, コンクリート片のはく落防止を目的として事前に埋設型の繊維シートを設置することを前提としている。

そのため, 対象にはトンネル構造自体を支える地山に対する安定や周辺環境に関わる性能ではなく, あくまでもトンネル覆工を構成するコンクリートの安全性能を選定する。

トンネル覆工のコンクリート片のはく落防止を目的として埋設型繊維シートを適用する技術の安全性を確保するための要求性能, 評価指標および評価基準を表-2に示す。

(3) 評価指標および評価基準

これまで, 予防保全として既設コンクリート, あるいは既設のトンネル覆工を対象に繊維シート後貼り工法などのはく落防止技術が, 開発され適用されている。保全予防としては, 新設コンクリート, あるいは新設のトンネル覆工を対象に短繊維などの補強材を混入するはく落防止技術が, 開発され適用されている。

表-3 繊維シートの諸元

繊維の種類	耐アルカリガラス	外観
形状	7mm×5mmの開孔	
密度(目付量)	400g/m ²	
引張強度	タテ 60 kN/m, ヨコ 38 kN/m	
特徴	厚さ 0.85 mm	

表-4 配合表(はく落防止性能の検証)

配合 (スラブ)	水セメント (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤
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

セメント: 高炉セメントB種

細骨材1: 大月市初狩産砕砂, 細骨材2: 富津市鶴岡産陸砂

粗骨材1: 大月市初狩産砕石(2005), 粗骨材2: 大月市初狩産砕石(4020)

混和剤: 高性能 AE減水剤

一方、短繊維などの補強材を混入しないレディミクストコンクリートを使用した、新設コンクリート、あるいは新設のトンネル覆工を対象としたはく落防止にかかわる技術は見あたらず、当然それを評価するための指標や基準はない。そこで、まず保全予防としての短繊維補強コンクリートや、予防保全として既設コンクリート、あるいは既設のトンネル覆工で適用されているはく落防止技術の評価に対する考え方を整理し、参考とした。

馬場ら²⁹⁾によれば、トンネル覆工へ適用される短繊維補強コンクリートの規格として性能評価に利用実績の多い指標の曲げ靱性係数は、1.40N/mm²以上であれば、トンネル覆工におけるφ4.0m×0.3mのコンクリート塊のはく落防止に対し有効であるとしている。そこで、現在適用されている曲げ靱性係数の基準値を採用することで、はく落防止性能の評価に対する信頼性が得られると考え、基準値を短繊維補強コンクリートにおける曲げ靱性係数と同じく1.40N/mm²以上とする。

伊藤ら²⁹⁾の調査結果によれば、運用開始から約10年～20年以上経過している道路トンネル(7本: 総延長約9109m)におけるはく落実態(113件)のうち、確認されたものは最長辺100mm未満、厚さ10mm～20mm程度の薄片状のコンクリート塊が約71%と最も多く、150mm以上のコンクリート塊では約12%、最大のコンクリート塊でも250mm×60mm×50mmである。

これより、筆者らは馬場ら²⁹⁾の述べるように曲げ靱性係数でφ4.0m×0.3mの大きさのコンクリート塊のはく落防止性能を評価できれば、十分であると考えた。

また、橋梁下面やトンネル覆工の補修、補強などへ適

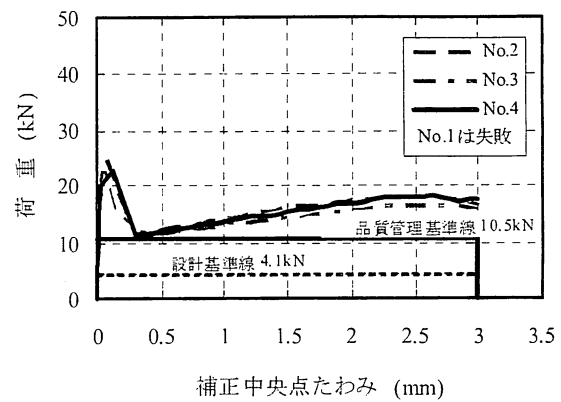


図-8 曲げ靱性試験結果

用される連続繊維シート後貼り工法の規格として利用実績の多い押抜き耐力は、変位10mm以上における最大荷重が1.5kN以上であれば、コンクリート片のはく落防止に対し有効であるとしている²⁹⁾。

そこで、筆者らは、はく落防止性能を評価する対象が繊維シートを埋設した新設コンクリートの場合でも、繊維補強コンクリートあるいは既設コンクリートに繊維シートを後貼りした場合と同様に評価できると判断し、曲げ靱性係数と押抜き耐力の2つを評価指標として設定した。評価基準はこれまでの実績を準えて曲げ靱性係数で繊維補強覆工コンクリートの基準と同等に1.40N/mm²以上の数値を確保することと、押抜き耐力で繊維シート後貼り工法の基準と同等に変位10mm以上における最大荷重で1.5kN以上を確保することの両方を満足することとする。

4. 要求性能の検証

(1) 要求性能の評価方法

はく落防止に使用した埋設型の繊維シートの諸元を表-3に示すとともに、それを適用したコンクリートの要求性能について、検証した結果を以下に示す。

要求性能の評価方法は、試験体を用いた室内実験によって、定量的にはく落防止性能が表-2に設定した評価基準を満足するか否かによって判断する。

(2) はく落防止性能

曲げ靱性試験と押抜き試験の結果を以下に示す^{28)~33)}。

試験体の作製に用いたコンクリートは表-4に示すとおりであり、試験体はともに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(押抜き試験ではプレキャストコンクリート製品を使用せず、繊維シートを一体化させた試験体を作製した)。

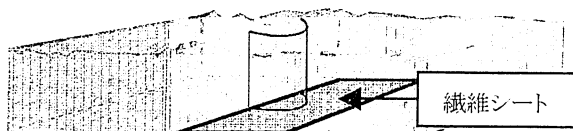


図-9 半円状の押抜きイメージ

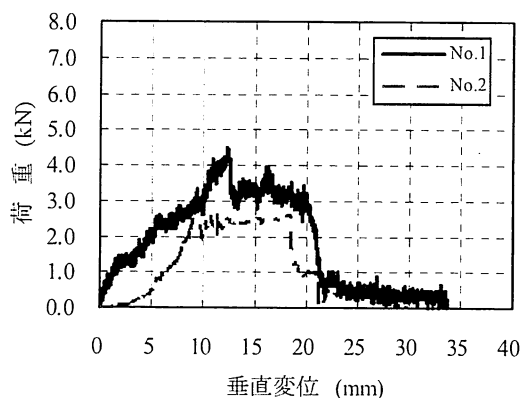


図-10 半円状の押抜き試験結果

材齢18時間で脱型した後は20℃の恒温室内で湿潤養生を行い、試験は材齢28日に実施している。

a) 曲げ靱性係数

曲げ靱性試験方法は基本的に JHS 730-2003『繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法』²⁾に準拠した。

ただし、荷重の載荷面は試験体製作時の側面ではなく仕上げ面とし、繊維シート埋設面を下側にセットした。

曲げ靱性試験の結果を図-8に示す。曲げ靱性係数は平均値で 2.02N/mm^2 が得られ、今回設定する評価基準の曲げ靱性係数 1.40N/mm^2 を十分に上回る。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有する曲げ靱性係数³⁾よりも大きい。

曲げ靱性係数のばらつきが小さいのは繊維シート使用による繊維の配列方向が一定であることに関係している。その結果、短繊維の分散状況に比べて安定して繊維を配置することができ、効率よく靱性を向上させている。

なお、試験実施後も試験体は繊維シート部分で一体化が保たれている状況にあり、はく落防止性能は十分に余裕のあることが確認できる。

b) 押抜き耐力

押抜き試験方法は基本的に JHS 424-2004『はく落防止の押抜き試験方法』²⁾に準拠した。

ただし、通常は試験前に試験体中央部を繊維シート面の反対側（打設面）に $\phi 100\text{mm}$ の形状で $55 \pm 0.5\text{mm}$ 深さまで切込みを入れるが、山本ら²⁹⁾は継目部分を跨いではく落現象が発生することを想定し、図-9に示すよう

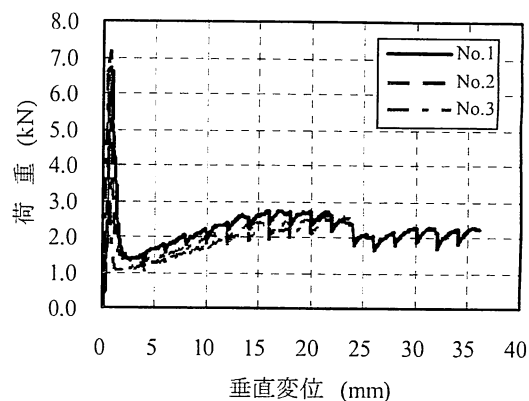


図-11 載荷速度の遅い押抜き試験結果

に実際のつま部において埋設される繊維シートがトンネル縦断方向に連続していない場合の押抜き耐力について切込みを半円状にしたケースで試験を実施した。

その試験結果を図-10に示す。半円状の押抜き試験では変位 10mm 以上における最大荷重は 4.50kN と 2.70kN が得られ、数値にばらつきは認められるものの、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ている。

一方、川崎ら³¹⁾は載荷速度を緩めてクリープの影響も加味する厳しい載荷条件で試験を実施した。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 分間載荷を停止して載荷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 と設定し、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慮しない。

その試験結果を図-11に示す。載荷速度の遅い押抜き試験の場合では変位 10mm 以上における最大荷重は安定した数値となり、平均で 2.62kN が得られている。この場合も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ている。

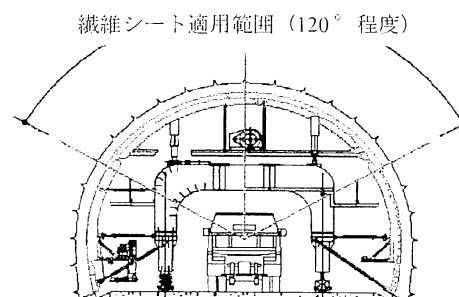
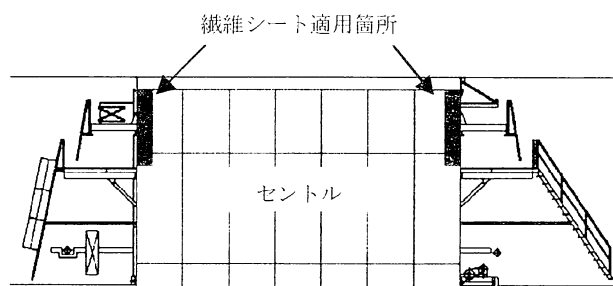
なお、試験実施後の試験体はコンクリート塊が貫通することなく繊維シートで保持されている状況にあり、十分にはく落現象を防止できている。

これらの実験結果から、埋設型の繊維シートを適用した試験体のはく落防止性能は、表-2に示す評価基準を満足していることが確認できた。

5. 施工性能の検証

(1) トンネル覆工への適用

本技術を新設の道路トンネル工事へ導入し、施工性能



従来のセントルを使用し、繊維シート固定のための孔あけなどの加工はごく僅か、繊維シート適用のための特殊機械は不要

図-12 繊維シートの適用範囲（セントルとの位置関係）

表-5 配合表（実施工）

区分	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材	混和剤	短繊維
Nトンネル T1-I	57.0	48.3	172	302	631	236	927	2.57	—
Kトンネル T1-I	58.4	52.0	163	279	475	473	880	2.93	—
Kトンネル T3-I	48.5	53.0	173	357	459	458	820	3.21	2.73

Nトンネル セメント：高炉セメントB種

細骨材1：延岡市大武長産海砂、細骨材2：津久見市産砕砂

粗骨材：東郷町山陰産砕石、混和剤：高性能 AE 減水剤

Kトンネル セメント：高炉セメントB種

細骨材1：延岡市大武長産海砂、細骨材2：東郷町山陰産川砂

粗骨材：東郷町山陰産砕石、混和剤：高性能 AE 減水剤、

短繊維：ポリプロピレン

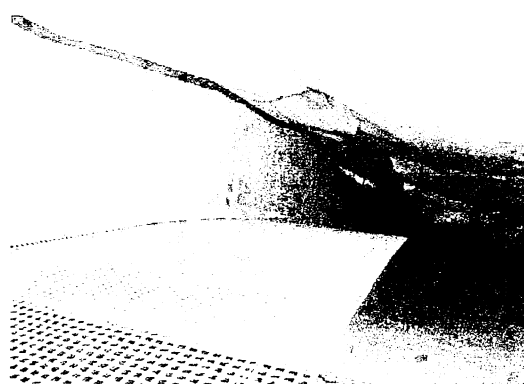


写真-1 繊維シート設置完了状況

を検証した。なお、適用した繊維シートは4. 要求性能の検証において使用したものと同一である（表-3）。対象区間は2つのトンネル（Nトンネル：延長215mとKトンネル延長：243m）のうち、28ブロック（1回の打設区間：以降BLと表記する）計294mとした。内空断面積は共に70m²程度、覆工コンクリートの厚さは無筋区間で300mm、有筋区間で350mmである。

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、対象区間のうち23BLではT1-I配合、5BLではT3-I配合（短繊維補強コンクリート）を打設した。配合表を表-5に示す。

山田ら³⁹⁾によれば、供用開始から約5年～8年経過している道路トンネル（5本：総延長約3,937m）におけるはく落実態調査（275件）の結果、覆工コンクリートの浮き、はく落の発生箇所は施工目地からトンネル縦断方向へ1m程度の範囲に約67%、トンネル横断方向におけるクラウン部60°の範囲に約61%が集中している。

これらを参考にすれば、はく落リスクをゼロリスクとするために、その適用範囲を縦断方向には各BLの両端から1mまでを対象とすれば十分であると考えた。しかしながら、セントルクラウン部にあるコンクリート圧入口やクラウン部と肩部にある打設窓（開口部）の位置が障害となるため、確実に固定できる範囲の約500mmまで

とした。

同様に、適用範囲を横断方向にはクラウン部（アーチ天端部）とすれば十分であると考えた。つまり、セントルの構造上ジャッキダウンできるクラウン部材は120°程度あり、連続する繊維シートでクラウン部60°の範囲を含む120°範囲を対象とすることが効果的であると考えた。

そこで、現場で使用するセントルの形状や吹き上げ口の位置、セントルの分割位置、ジャッキダウンで生じるスペース、使用者の安全等を考慮した結果、適用範囲は図-12に示すとおりとした。

横断方向に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°（円周方向に長さ約11.8m）まで、縦断方向には各BLの両端から約500mmまでとし、つま部の台形目地部分も含めている。

なお、はく落防止の観点から、繊維シートは限りなくコンクリート表層近傍に設置した（写真-1）。繊維シートの間隙を通じて、モルタルあるいはセメントペーストが繊維シートとセントルとの隙間に充てんされる。脱型後の繊維シートまでのコンクリート被りは5mm程度以下であった。

(2) 固定の確実性

繊維シートの埋設位置に関しては、はく落防止の目的

から限りなく覆工コンクリートの表層近傍であることが望ましい。繊維シートをコンクリート表層から 5mm 程度以内に埋設するためには、繊維シートはセントル表面に設置後、物理的な方法で固定する必要があった。

そこで、セントル内部からの簡単な作業のみで行える固定方法について検討し、セントルに直径約 3mm の孔を約 500mm ピッチで開け、そこからナイロン樹脂製の釣り糸（釣り糸の呼称：18 号、直径 0.7mm、張力は約 360N）を通して繊維シートを線状に固定し、そのままの状態でもコンクリートを打設し、充てん後には養生開始前のタイミングで釣り糸を引き抜く方法を選定した。

モデル試験体を利用して検証実験を行った結果、釣り糸を利用して繊維シートを固定するために必要な張力は、作業性を考慮して特殊な機械を使わずに容易にかけられる 100N であれば十分であることが明らかとなった。上記の方法で繊維シートを固定すれば、コンクリートの流動やφ43mm の棒状振動機を用いた締固め作業による影響を受けても、繊維シートの損傷、ずれ、移動などの不具合は認められない。

(3) 脱型時の接着性

トンネル覆工へのコンクリート打設は 2 日に 1BL の頻度で繰り返されることが多く、その場合には打設完了後 16 時間～18 時間程度の型枠内養生期間を経た若材齢状態で脱型されることになる。つまり、十分な圧縮強度発現が得られる前に脱型が行われる。そのため、繊維シートがコンクリートの表層近傍に埋設されている条件下では、コンクリートの強度不足により繊維シートが型枠とともに離れる、あるいは脱型時の接着強度不足が原因で硬化後のはく落防止性能に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、筆者らは脱型時の圧縮強度が小さい場合でも繊維シートのはく離等の不具合が生じない限界について検討し、美観がよく、かつ接着性および硬化後のはく落防止性能を満足する脱型方法を選定した。

モデル試験体を利用して脱型時の圧縮強度 0.20N/mm²～1.10N/mm² の範囲で検証実験を行った結果、通常のトンネル覆工ならば脱型しないコンクリートの圧縮強度範囲（0.20N/mm²～0.47N/mm²）で脱型した場合、繊維シート自体ははく離しなくても表層のモルタルあるいはセメントペーストが型枠とともに離れる不具合が生じたが、コンクリートの圧縮強度が 1.0N/mm² 以上となつてから脱型した場合には、繊維シートと表層のモルタルあるいはセメントペーストはともに離れず、美観、接着性および材齢 28 日時点のはく落防止性能も満足することが確認できた。また、材齢 28 日時点での接着強度では、脱型材齢の違いによる強度発現不足の影響は認められない³²⁾。

表-6 実施工における実績

項目	部位	時間 (分)	施工面積 (m ²)	歩掛り (分/m ²)	合計 (分/m ²)
繊維シート 設置	つま側	1 385	187.6	7.4	12.4
	ラップ側	1 730	165.2	10.5	
準備 他		1 260	—	3.6	

なお、覆工コンクリートのハンマーによる叩き点検を実施した。その後、繊維シートを適用していない部位のコンクリートの場合と同じであることを確認している。

(4) 施工に要する手間と時間

施工時において作業に要した時間を整理した結果を表-6に示す。対象区間28BLにおける総施工面積352.8m²に対して、繊維シートの準備～設置～固定に要した時間の実績は約12.4分/m²である。

今回の施工条件では1回打設あたりの繊維シート設置面積は12.6m²であることから、全工程で156分/回の作業時間が必要となる。しかしながら、繊維シートの準備作業に含まれる裁断等は事前の段取りが可能であり、設置～固定は通常のセントルケレン～移動～はく離剤塗布～セントルセット作業との並行作業も可能である。今回の現場導入実績でも、作業員の増員あるいは時間外作業を必要とせず、通常の作業サイクルの中で作業を吸収できるものと考えられる。

本論文で提案するはく落防止技術は、そのリスク抑制効果をライフサイクルコストの評価の中で融合することを可能とする。なお、ここで論じたはく落防止技術の適用結果は、施工条件のみで運用条件を考慮していない。したがって、本論文の中では、はく落防止技術のコストにかかわる定量的な評価は、安易かつ単純に論ずることは避けることとする。

6. 結論

筆者らは、主に道路トンネルを対象に、はく落リスクなどの災害リスクを定量化できるモデルを構築し、より精緻なライフサイクルコスト算定手法の体系を確立することを目指している。そのため、トンネル構造物の適合みなし規定において計画、設計段階で定量化できないはく落防止に着目した。既往のはく落防止技術を整理するとともにコンクリート片のはく落リスクを低減する保全予防の考え方を確立し、はく落防止性能を定量的に評価する手法を構築した。さらに、これらの評価手法によって新設のトンネルに適用を試みた。

その結果得られた提案知見を示せば以下のとおりである。

- ① 埋設型の繊維シートを適用したはく落防止技術の評価するために、評価指標として曲げ靱性係数と押抜き耐力およびそれぞれの評価基準を提案した。
- ② 室内実験による検証の結果、本技術を適用したコンクリートは、はく落防止性能を有していることが確認できた。
- ③ 現場導入による検証の結果、本技術は適用範囲、固定方法、脱型時期、作業手間などの面で実用的な施工性を有していることが確認できた。

7. おわりに

筆者らは、主に道路トンネルを対象に、はく落リスクなどの災害リスクを定量化できるモデルを構築し、より精緻なライフサイクルコスト算定手法の体系を確立することを目指している。そこで、本論文ではトンネル覆工からのコンクリート片のはく落現象に着目し、覆工コンクリートの初期性能を高めることでアセットマネジメントにおける保全行為そのものを縮減する保全予防技術を提案した。

なお、本技術は、覆工コンクリートのはく落リスクに対する安全性を必要とする鉄道施設構造物への適用も十分に効果的であると考ええる。

さらに、本技術に代表される概念は長期にわたる災害の損失リスクを定量化するモデルに組み込むことにより、アセットマネジメントとの融合を図ることが可能となり、今後のマネジメント体系の進展に役立つものと考ええる。

参考文献

- 1) たとえば土木学会：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的な性能，pp.169-177，2006.9
- 2) 中村一樹，細沼宏之，高田充伯，大津宏泰，小林潔司：トンネルアセットマネジメント，建設マネジメント勉強会『Summer School 2007 建設マネジメントを考える』テキスト，pp.143-152，2007.8
- 3) 土木学会：トンネルライブラリー第 21 号性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント，pp.127-130，2009.10
- 4) 青木一也，小田宏一，児玉英二，貝戸清之，小林潔司：ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.40-52，2010.3
- 5) 安田亨，大津宏泰，大西有三：トンネル構造物における健全度低下モデルの検討，建設マネジメント勉強会『Summer School 2004 建設マネジメントを考える』テキスト，pp.109-116，2004
- 6) 土木学会：包括設計コード（案）性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 第 1 版，38p，2003.3
- 7) 池田憲二，今野久志，渡邊一悟，三上浩，巽治：各種連続繊維ネットを用いた RC 構造物の剥落防止実験，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集，V-363，pp.725-726，2002.9
- 8) 小牧秀之，前田敏也，藤間章彦，小島芳之，吉川和行，栗林健一：トンネル覆工剥落対策における緩衝材を用いた繊維シート接着工の適用性に関する検討，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集，V-575，pp.1147-1148，2003.9
- 9) 藤倉裕介，伊藤祐二，秋父顕美：無機系材料による剥落防止工法の押し抜き耐力の評価法，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1737-1742，2004.7
- 10) 兼松学，朴同天，野口貴文：乾式剝離防止シートの性能評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1749-1754，2004.7
- 11) 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，呉智深：繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策設計法，土木学会論文集，No.756/VI-62，pp.101-116，2004.3
- 12) 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
- 13) 新堀敏彦，松田芳範：新しいトンネルはく落対策工法の開発，土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，V-588，pp.1176-1177，2001.9
- 14) 蒲田浩久，真下英人，石村利明，森本智：トンネル覆工はく落対策工に関する実験的研究，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集，V-301，pp.601-602，2002.9
- 15) 城間博通，伊藤哲男，大嶋健二，倉持秀明，山本秀樹：トンネル覆工目地部におけるはく落対策用繊維シート接着工の実験的研究，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集，III-021，pp.41-42，2003.9
- 16) 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
- 17) 沼澤憲二郎，藤沼愛，藤木育雄，倉木修二：特殊セグメントを用いた地下鉄換気塔ー地下鉄 13 号線雑司ヶ谷駅ー，トンネルと地下，Vol.37，No.12，pp.905-914，2006.12

- 18) 土木学会：トンネルライブラリー12 山岳トンネル覆工の現状と対策, pp.1-9, 2001.9
- 19) 岡田正之, 藤原康政, 山田浩幸：山岳トンネルの要求性能と照査項目に関する一考察, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第10巻, pp.213-220, 2005.1
- 20) 道路保全技術センター他：山岳トンネルのライフサイクルコスト調査研究報告書（平成16年度報告書）, pp.1-30, 2005.3
- 21) 山本努, 白井孝典, 野田賢治, 内藤幸弘, 藤橋一彦：トンネルのデザインとマネジメント（その3）ートンネルの機能と要求性能の整理ー, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, VI-168, pp.335-336, 2007.9
- 22) 粥川幸司, 栗木実, 山本努, 安田亨, 重田佳幸：トンネルのデザインとマネジメント（その4）ートンネルにおける要求性能とその照査指標ー, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, VI-169, pp.337-338, 2007.9
- 23) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路：繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法, 試験方法 第7編 トンネル関係試験方法, pp.85-89, 2006.10
- 24) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路：はく落防止の押抜き試験, 試験方法 第4編 構造関係試験方法, pp.98-100, 2006.10
- 25) 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, pp.34-36, 2000.11
- 26) 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
- 27) 伊藤哲男, 馬場弘二, 城間博通, 吉武勇, 中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ形態調査による剥落危険性評価, 土木学会論文集, No.763/VI-63, pp.87-93, 2004.6
- 28) 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回年次学術講演会概要集, VI-308, pp.615-616, 2008.9
- 29) 山本一也, 宇野洋志城, 木村定雄：繊維シートを適用したトンネル覆工コンクリートのつま部のはく落現象の防止, トンネル工学報告集, Vol.18, pp.31-36, 2008.11
- 30) 上野清, 田中康一郎, 歌川紀之, 宇野洋志城：はく落防止を目的とした繊維シートの中岳トンネル二次覆工コンクリートへの適用, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, VI-284, pp.567-568, 2009.9
- 31) 川崎真史, 上野清, 馬場弘二, 宇野洋志城：埋設型繊維シートにより補強したコンクリートの押抜き耐力, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, VI-286, pp.571-572, 2009.9
- 32) 宇野洋志城, 歌川紀之, 川崎真史, 小泉直人, 上野清, 田中康一郎：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, 土木建設技術発表会2009 概要集, pp.1-6, 2009.11
- 33) 宇野洋志城, 歌川紀之, 木村定雄：繊維シートを用いたはく落防止技術（T-FREG）, 平成21年度建設技術報告会報文集, pp.109-112, 2009.10
- 34) 宇野洋志城, 歌川紀之, 小泉直人：長期耐久性を向上させるための覆工コンクリートの配合検討, トンネル工学報告集, Vol.17, pp.221-226, 2007.11
- 35) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価, 土木学会論文集F, Vol.63, No.1, pp.86-96, 2007.3

PREVENTION OF EXFOLIATION OF TUNNEL COVER LINING CONCRETE PIECE REINFORCED WITH FIBER SHEET

Yoshiki UNO and Sadao KIMURA

In the establishment of an effect asset management for road tunnel, the exfoliation phenomenon of concrete piece leads to much. The authors attached importance it as a risk event. The maintenance prevention technology that decreased the exfoliation risk by laying the fiber seat to the tunnel lining was established. In this paper, the idea of the maintenance to attempt long-term operation of the tunnel was arranged. Exfoliation is located as an important demand performance item of the road tunnel in that. It proposes evaluation figure and the criterion to the demand performance, and validity and the practicality of the performance are verified by the experiment and the execution.