

# トンネル覆工の調査、補修・補強システムに関する提案

山本 一郎\* 武内 秀木\*  
福與 智 \*\* 渡邊 伸弘\*  
伊藤 浩志\*

## 要 旨

近年、マンションなど建築物の外壁や鉄道関係構造物のコンクリート塊崩落事故が発生して、コンクリート構造物の耐久性が問題となっている。山岳工法で施工されたトンネルにおいても、山陽新幹線や室蘭本線で覆工コンクリート剥落事故が相次いで発生し、トンネル覆工コンクリートの耐久性や品質ついて世間の注目を集めることとなった。

一方、昨今の厳しい社会経済状況の中で、既設トンネルの長寿命化が求められていることも事実である。

本研究では、トンネル覆工コンクリートの調査から変状原因の推定および延命化対策についての一連の維持管理システムを提案し、その妥当性について検討を行った。

## 1. はじめに

我々が日夜心を砕いて作っている土木構造物は、華やかな完成記念式典等のとき以外は、世間の注目を集めることは殆どない。普段は、いわば水や電気のように人の心に特別意識されることもなく、あって当たり前の存在となっている。このように、土木構造物の重要性は一般の人々には理解され難いものようであるが、生活や産業を支える上で、なくてはならない社会基盤の一部を構成するものである。

近年、マンションなど建築物の外壁や鉄道関係構造物のコンクリート塊崩落事故が発生して、コンクリート構造物の品質や安全性が問題となっている。

山岳工法で施工されたトンネルにおいても、1999年6月に山陽新幹線福岡トンネル坑内で発生した覆工コンクリート剥落事故を発端に、同年10月に山陽新幹線北九州トンネルで、さらに同年12月に室蘭本線礼文浜トンネルで覆工コンクリート剥落事故が相次いで発生し、トンネル覆工コンクリートの品質や安全性が問題となっている。

このような状況の中で、既設トンネルの覆工コンクリートの状態を良好に保ち、構造物としての寿命を延ばすことが望まれている。

このような背景から、トンネル覆工コンクリートの調査から変状原因の推定および延命化を図るための適切な対策工の選定といった一連の維持管理作業システム（図解法によるシステム）を提案し、トンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料<sup>1)</sup>（以下、技術資料と呼ぶ。）を作成した。

本論文は、提案した維持管理作業システムの利用方法および提案システムの妥当性の確認から構成されている。

## 2. 提案システムの流れ

本システムは、図表等を用いて、トンネル覆工のひび割れパターン等から変状原因を推定し、その主要原因に対して最適な対策工が選定できるシステムとなっている。その流れは、図-1に示すような手順で運用する。

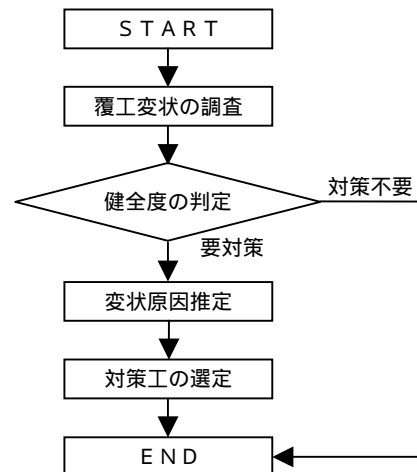


図 - 1 本システムの運用フロー

## 3. 覆工変状の調査

覆工コンクリートの調査項目としては、大別して、  
覆工内部および覆工背面調査：打音検査、簡易強度測定、覆工ボーリング調査、ファイバースコープ調査等

ひび割れ調査：ひび割れ測定、超音波探査等

コールドジョイント調査：目視観測、打音検査等がある。これらの調査から得られるデータは、以降の健全度の判定および対策工の選定といった一連の判定資料となるため、調査項目に漏れないようにチェックシート等を用いて慎重に調査を行う必要がある。

#### 4．覆工の健全度の判定

補修・補強の要否は、覆工変状の調査と診断から構造物としての健全度を検討・判定する。判定は各管理者の判定基準に準ずることとした。

技術資料には、国道や地方道等については、道路トンネル維持管理便覧<sup>2)</sup>の判定基準を、鉄道については、トンネル保守管理マニュアル<sup>3)</sup>の考えを踏まえたトンネル保守マニュアル(案)<sup>4)</sup>の判定基準を、高速道路については、設計要領 第三集トンネル本体工 保全編(変状対策)<sup>5)</sup>の判定基準を紹介している。

#### 5．変状原因の推定

トンネル覆工の変状は、コンクリート材料及施工方法だけでなく、土圧や水圧等の外力によっても発生する。さらに、地下水の凍結融解やトンネル火災等による温度の影響、酸・塩類による化学作用等、さまざまな使用・環境条件が変状の原因になることもある。このように変状原因と考えられる事が多岐にわたるため、着目点の違いから個人により、さまざまな原因が推定される恐れがある。

変状原因の推定結果は、その後の対策工の対象や目的、対策工の種類や施工時期にも大きく係わるため、誰が行っても同様な正しい変状原因が推定できるような方法が望ましい。

そこで、コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針<sup>6)</sup>を参考に、覆工変状の状態を下記に示す4つの観点から分類し、一覧表にまとめた。

ひび割れパターンによる分類(表 - 1)

ひび割れ発生時期・規則性・形態による分類(表 - 2)

設計図書等(ひび割れの範囲)による分類(表 - 3)

配合や打設時の気象による分類(表 - 4)

ひび割れの形状やパターン、ひび割れ発生時期や発生箇所での分類は、基本的にはコンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針<sup>6)</sup>に基づいているが、本提案では、トンネル構造に限定して覆工コンクリート変状原因とひび割れパターン、発生時期、形態およびその他について追加分類している。

変状原因の推定手順は次の通りである。

4つの分類一覧表を用いて、それぞれの観点から変状原因を抽出する。

4つの観点から選り出された変状原因が同じであったら、それを変状主要原因とする。

4つの観点から選り出された変状原因が同じでなかったり、個々の観点からその変状原因を特定できなかった場合には、詳細調査を行い変状原因の推定を行う。

表 - 1 ひび割れパターンによる分類(例)

大分類	中分類	小分類	番号	原因	ひび割れパターン図
A 材料	使用材料	セメント	A1	セメントの異常凝結	
			A2	セメントの水和熱	
			A3	セメントの異常膨張	
		骨材	A4	骨材に含まれる泥分	
			A5	低品質な骨材	
			A6	アルカリ反応性骨材	
	コンクリート	コンクリート	A7	コンクリート中の塩化物(鉄筋区間)	
			A8	コンクリートの沈下・ブリージング	
			A9	コンクリートの乾燥収縮・温度	
B 施工	コンクリート	練り混ぜ	B1	混和材料の不均一な分散	
			B2	長時間の練混ぜ	
		運搬	B3	ポンプ圧送時の配合の変	
			B4	(不適当な打込み)	
		打込み	B5	急激な打込み	
			B6	不十分な締固め	
			B7	硬化	
		養生	B8	初期養生中の急激な乾燥	
			B9	初期凍害	
			B10	不適当な打足し処理	
	鉄筋	配筋	B11	配筋の乱れ	
			B12	かぶり厚の不足	
	型枠	型枠	B13	型枠のはらみおよび沈下	
			B14	型枠からの漏水、路盤への漏水	
			B15	型枠の早期除去	
			B16	型枠セット時の負荷	
			B17	支保工の沈下	

注) ひび割れパターンの分類全体については、技術資料<sup>1)</sup>を参照のこと。

表 - 2 ひび割れの発生時期・規則性・形態による分類

発生時期	規則性	形態	推定されるひび割れの原因				
			A : 材料	B : 施工	C : 使用・環境	D : 構造・外力	E : その他
数時間 ～ 1日	有	網状		B2, B3			
		表層	A8	B2, B3, B5, B14, B16, B17			
		貫通		B2, B3, B4, B10, B16, B17			
	無	網状		B8			
		表層	A1	B5, B7, B8, B13			
		貫通		B4, B10			
数日	有	網状					
		表層	A2	B15		D6	E4
		貫通	A2	B17			E4
	無	網状	A4	B9			
		表層		B7, B9			
		貫通					
数10日 以上	有	網状	A9	B2, B3		D4	
		表層	A7, A9	B2, B3, B11, B12	C1, C2, C7, C8	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	E1, E2, E3, E5, E6
		貫通	A9	B2, B3, B4, B10	C1	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	E1, E2, E3, E5, E6
	無	網状	A3, A4, A6	B1, B9	C3, C4, C5, C6		
		表層	A3, A4, A5, A6	B6, B9	C3, C4, C5, C6		
		貫通		B6, B10			

表 - 3 設計図書等による分類

コンクリートの 変形要因	ひび割れに 関する範囲	推定されるひび割れ原因				
		A : 材料	B : 施工	C : 使用・環境	D : 構造・外力	E : その他
収縮性	材料	A1, A2, A4, A9	B1	C1, C3, C4, C5		E4
	部材	A2, A9	B2, B3, B8, B14, B15	C1, C2, C3, C4, C5		E4
	構造体	A9	B2, B3, B8, B15	C1, C4, C5		
膨張性	材料	A3, A5, A6	B1	C1, C3, C4, C5, C6		
	部材	A7		C1, C2, C3, C4, C5, C7, C8		
	構造体	A7		C1, C4, C5		
沈下、曲げ、 せん断等	材料	A5, A6		C1		
	部材	A8	B4, B5, B6, B7, B9, B10 B11, B12, B13, B16, B17	C1, C2	D6	E3, E5, E6
	構造体		B6	C1	D1, D2, D3, D4 D5, D6, D7, D8	E1, E2, E3, E5, E6

表 - 4 コンクリート配合や打設時の気象による分類

		推定されるひび割れの原因
配合	富配(調)合	A2, A6, A9, E4
	貧配(調)合	A8, C3, C6, C7, C8
気象	高温	A2, B2, B8, B10, E4
	低温	B9, E4
	高湿	A4, A9, B8

## 6. 対策工の選定

覆工コンクリート変状対策工は、前述した変状原因の推定で導き出された主原因に対して、最適な対策工( ) 適合する対策工( ) 場合によっては有効な対策工( ) に分類した対策工選定一覧表を利用し、さらに現場条件等も考慮して選定する。

表 - 5 に、覆工コンクリート変状対策工の選定表の一部を示す。同表には、その概要および各対策工に期待する効果が併記されている。

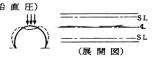
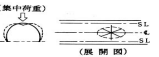
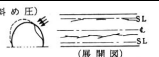

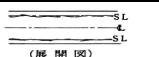

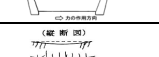
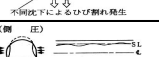

また、変状対策工のうち対策工が大規模となる部分改築については、特に決められた方法がない。

そこで、現時点で施工可能な部分改築方法を、鉄道ト

ンネルおよび道路トンネルに対して、各3案ずつ提案している。

提案改築工法の詳細については、トンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料(改築工法の詳細資料)<sup>7)</sup>を参考にしていきたい。

表 - 5 覆工コンクリート変状対策工の選定表 (例)

大分類	中分類	小分類	番号	ひび割れパターン図	原因およびひび割れ状況	対策工法												備考							
						表面処理工	ひび割れ注入工	充填工	当て板・防護ネット	漏水防止工	裏込め注入工	内巻工	センター補強工	ロッドボルト補強工	限間めコンクリート	インバート工	地山注入工		斜面安定工(坑外)	アンカー工	断熱工	排水工改良・新設	部分改築		
D 構造・外力	荷重	斜め荷重	D1		縦み土圧が荷重として、鉛直方向に作用し、アーチの先端にトンネル縦断方向の開口性ひび割れを生じる。																				
			D2		トンネル上部の大きな空隙から岩塊が落下し、衝撃的に覆工に衝突してひび割れを生じる。																				
			D3		斜面下や傾斜した片理や直行方向に緩みが生じて側土圧が作用し、トンネルが変状するものである。山腹アーチ肩部に水平開口ひび割れ、段差が生じることが多い。																				
			D4		地すべりによる変状は、トンネルどすべり面の位置関係により変状発生形態が異なる。																				
			D5		膨張性土圧による変状では、左右の側壁やアーチ両側に、複雑な水平ひび割れが生じやすく、アーチと側壁間に打眼目がある場合には段差が生じることがある。																				
	その他																								
	構造設計	D6		断面・鉄筋量の不足による強度不足によるひび割れ																					
	支保条件	D7		ひび割れは、縦断方向沈下の場合、輪切り方向が生じやすい。横断方向沈下の場合、トンネル軸の回転を伴い斜め方向が生じる。																					
		D8		水圧・凍上圧は、漏水と関係があり、トンネルに作用する場合は、側圧が卓越し、側壁やアーチ肩部の水平ひび割れが生じる。																			1)凍上圧が主原因の場合		

注) 覆工コンクリート変状対策工の選定表全体については、技術資料<sup>1)</sup>を参照のこと。

### 7. 本システムの妥当性の確認

過去の事例を対象に、本システムを使った変状原因の推定と対策工の選定を試行し、その妥当性を確認した。

事例対象トンネルは、変状トンネル対策工設計マニュアル<sup>8)</sup>より在来工法で建設された鉄道トンネルの「仙岩トンネル」とトンネルと地下<sup>9)</sup>よりNATMで建設された道路トンネルの「うれしのトンネル」とした。

本論文では、仙岩トンネルを対象とした検証例を示す。以下に参考文献<sup>8)</sup>で報告されている仙岩トンネルの概要、変状の状況とその原因、変状対策工について記す。

#### 7.1 仙岩トンネルの概要

仙岩トンネルは、JR東日本田沢湖線の赤淵～田沢湖間に位置し、昭和41年に在来工法で建設された延長3,915mの単線鉄道トンネルで、新第三紀の緑色凝灰岩や花崗閃緑岩よりなる標高800～1,000m程度の奥羽山脈を東西に貫いている。

変状は、起点側坑口より1,690m地点で発生している。この変状区間は、施工当時、多量の湧水と断層角礫により埋没したため、水抜き坑を兼ねた迂回坑を設置した他、水抜きボーリング、薬液注入等の補助工法を用いた箇所である。

変状区間の覆工構造は、巻厚40cmのコンクリート造で、側壁部は垂直壁である。インバートは施工されていない。この区間は、平成2年以前にはアーチ部・側壁部対

して漏水防止工が、平成3年には側壁部に対して断熱防止板の設置が、平成4年にはアーチ部に対して落下防止工が、平成5～6年には側壁部に対して水抜き工が実施されている。

#### 7.2 変状の状況

トンネル覆工変状区間におけるひび割れ展開図を図-2に示す。

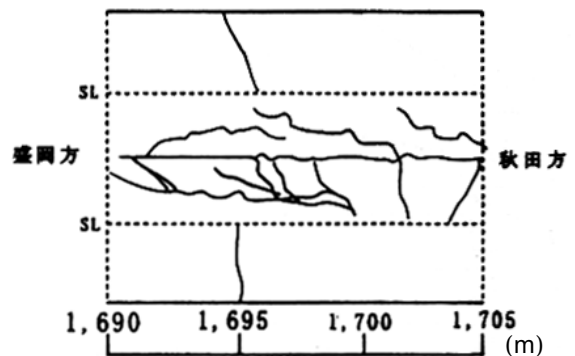


図 - 2 ひび割れ展開図

変状現象の調査結果は次の通りであった。

アーチ部に、圧ざ、剥落、ひび割れが顕著にみられた。平成2年には天端部軸方向のひび割れと、このひび割れからアーチ部全体に斜め方向のひび割れが多数発生し

ていることが確認された。

平成4年にも天端部の剥離・剥落が確認され、圧ざの可能性があるので、剥落防止工で対処した。

側壁部は構造的に弱い側壁直であるが、顕著なひび割れは見られず、側壁部のひび割れ幅と食い違い幅を継続して測定してきたが、ほとんど変化はなかった。

覆工背面の空洞調査時に天端部の巻厚を測定したが、圧ざ箇所では巻厚不足と覆工背面に最大1mの空洞が確認された。

水抜き孔から多量の湧水(0.3m<sup>3</sup>/分)が確認されるが、変状箇所付近は冬季でも0以下になることはない。内空断面は、2.2mm/年程度縮小しており、特に、起点方坑口より1,700m地点は最も変位が大きく、平成3年10月～平成8年2月間に約10mm縮小した。

### 7.3 変状原因の推定

調査結果から当初は地下水が原因で内空断面が縮小していると考え水抜き工を施工したが、断面の縮小は止まらなかった。そこで変状原因を以下のように考えた。

- ・地山の緩み(鉛直圧) 塑性化(塑性圧)
- ・覆工背面の空洞
- ・天端部の巻厚不足

### 7.4 変状対策工

変状対策工は、以下の対策工が採用された。

- ・裏込め注入工(ウレタン)
- ・ロックボルト補強工(摩擦型ロックボルト)
- ・防水シート工(リブ付き防水シート)
- ・内巻工+セントル補強工(H100@1.0m+SFRCS10cm)

施工は、田沢湖線を全面運休する期間(平成8年3月から1年間)を利用して実施され、対策後は顕著な変状の進行は確認されていない。

図-3に実施対策工の概念図を示す。

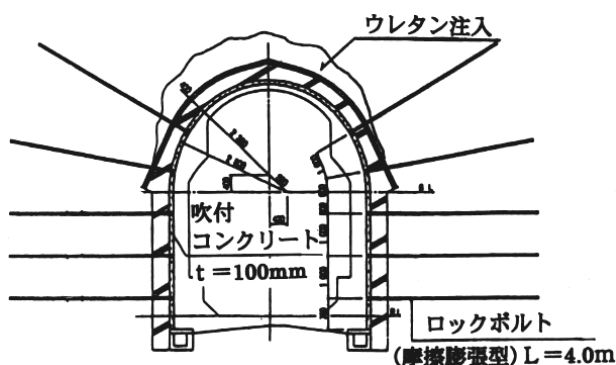


図-3 実施対策工の概念図

以上が、変状トンネル対策工設計マニュアル<sup>8)</sup>で報告されている内容である。

### 7.5 本システムによる変状原因の推定

仙岩トンネルの変状状況および調査結果をもとに、本システムによる変状の原因推定を行った。表-6に、本システムより抽出された項目および共通する項目を抽出した結果を示す。

表-6 変状原因の推定結果

分類	A 材料	B 施工	C 使用・環境	D 構造・外力	E その他
	-	B15, B17	-	D1, D6	E1, E3, E6
	A9	B2, B3, B4, B10	C1	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	E1, E2, E3, E5, E6
	-	B6	C1	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	E1, E2, E3, E5, E6
	-	-	-	-	-
共通項目	-	-	-	D1, D6	E1, E3, E6

同表より仙岩トンネルの覆工変状の主要原因として、以下のことが導き出される。

構造・外力に起因する項目

D1: 緩み土圧 D6: 断面・鉄筋量の不足

その他に起因する項目

E1: 背面の空洞 E3: 巻厚不足 E6: 漏水

これらをまとめると、仙岩トンネルの変状箇所は、破砕帯部分で起きていることから、地山の緩みや漏水による背面土砂の流出に伴う緩み等による外力の増加、覆工背面の空洞および圧ざ部分の巻厚不足が変状の主要原因と考えられる。

### 7.6 本システムによる変状対策工の選定

推定された主要原因に対する変状対策工を本システムにより選定すると、以下の通りとなる。

最適と考えられる対策工( )

- ・漏水防止工
- ・裏込め注入工
- ・内巻工
- ・セントル補強工
- ・排水工改良・新設
- ・部分改築

適合すると考えられる対策工( )

- ・ひび割れ注入工
- ・充填工
- ・当て板・防護ネット
- ・ロックボルト補強工
- ・アンカー工
- ・地山注入工

### 7.7 本システムの妥当性の確認

表-7に実施事例と本システムでの選定結果対比表を示す。同表中の本システム欄のゴシック部分は、実施事例と一致していることを意味している。

本システム適用の結果、変状原因および対策工とも実

施事例をほぼ含んでおり、その妥当性が確認された。

ここで、本システムで選定された対策工の数が多いのは、有効な対策工をすべて列挙しているためである。

したがって、対策工の方向性が決定した後は、各トンネルの施工条件や周辺環境等を考慮し、施工方法や施工時期、使用機械や使用材料等を計画する必要がある。

表 - 7 検討結果の対比表

	実施事例	本システム
変状原因	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地山の緩み(鉛直圧)、塑性化(塑性圧)</li> <li>・覆工背面の空洞</li> <li>・天端部の巻厚不足</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩み土圧</li> <li>・断面、鉄筋量の不足</li> <li>・覆工断面の空洞</li> <li>・巻厚不足</li> <li>・漏水</li> </ul>
対策工	<ul style="list-style-type: none"> <li>・裏込め注工(ウレタン)</li> <li>・ロックボルト補強工(摩擦型ロックボルト)</li> <li>・防水シート工(リブ付き防水シート)</li> <li>・内巻工+セトル補強工(H100@1.0m+SFR10cm)</li> </ul>	最適な対策工 <ul style="list-style-type: none"> <li>・漏水防止工</li> <li>・裏込め注工</li> <li>・内巻工</li> <li>・セトル補強工</li> <li>・排水工改良・新設</li> <li>・部分改築</li> </ul>
		適合する対策工 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ひび割れ注工</li> <li>・充填工</li> <li>・当て板、防護ネット</li> <li>・ロックボルト補強工</li> <li>・アンカー工</li> <li>・地山注工</li> </ul>

## 8. あとがき

現在の社会経済情勢から、これまでのようなダイナミックな社会資本整備は見込めず、維持管理に力をいれることにより、現有社会資本の寿命を伸長させる必要がある。トンネルの耐久性については、橋梁等と比較してその調査や研究が十分ではなく不明な点が多い。

これは、

- ・トンネルは一般に地中線状長大構造物である
- ・トンネルは山岳部に建設されるものが多い
- ・トンネル構造の背面の調査が難しい
- ・トンネルの耐荷力が失われても地山自身で安定することがある
- ・トンネル覆工コンクリートにひび割れが入っても、空間保持という機能は損なわれないことがある
- ・トンネル覆工コンクリートのひび割れ原因の特定が難しい

などのトンネルの特殊性によるところが大きい。

レンガ覆工や矢板工法で建設されたトンネルに関する健全度診断エキスパートシステムは見られるが、NATMで建設したトンネルに対する健全度診断法は見られないようである。

今回提案した図解法によるシステムは、NATMで施工したトンネルに対しても、十分対応できるものである。

しかし、調査、診断、補修・補強に関する技術は、日進月歩の状態にあるので、本システムの利用に際しては、常に最新の技術を取り入れながら運用していくことが重要である。

本システムについては、トンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料<sup>1)</sup>およびトンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料 - 改築工法の詳細資料 - <sup>7)</sup>に詳しくまとめているので、あわせて参照していただきたい。

## 参考文献

- 1) 五洋建設(株)：トンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料、2000.5
- 2) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、pp123～137、1993.11
- 3) トンネル安全問題検討会：トンネル安全問題検討会報告書、pp49～83、2000.2
- 4) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル(案)、pp35～46、2000.5
- 5) 日本道路公団：設計要領 第三集トンネル本体工 保全編(変状対策)、pp47～54、1998.
- 6) 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、pp41～47、1987.
- 7) 五洋建設(株)：トンネル覆工の調査、補修・補強に関する技術資料 - 改築工法の詳細資料 - 、2000.5
- 8) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、pp142～144、1998.2
- 9) 河野正博、高卯和博：供用トンネルにおける変状と対策、トンネルと地下、VOL.31、NO.6、pp15～22、1999.