

トンネル背面空洞の調査方法と充填対策

背面空洞対策に関する技術基準

道路トンネルの背面空洞の調査及び充填対策に関する技術基準は、現在、以下のものが定められています。

「トンネル補修工法に関する手引き(案)」 平成 19 年 3 月 中国地方整備局

「矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工要領」平成 18 年 10 月 NEXCO

1. 「トンネル補修工法に関する手引き(案)」の概要

中国地方整備局管内の道路トンネルの維持管理、特に、覆工背面空洞に起因する突発性の崩壊に対する調査及び、その評価、対策工設計、対策工の施工を安全かつ合理的に実施することを目的に現場での対応に即した手引書（案）として作成されたものであります。

2. 「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」の概要

東日本高速道路株式会社、中日本高速道路及び西日本高速道路株式会社が管理するトンネルのうち、矢板工法により建設されたトンネルの耐久性の回復もしくは向上を目的として実施される背面空洞注入工の、調査・設計・施工に関する一般的事項および特に配慮すべき事項について示したものであります。

背面空洞の調査方法

背面空洞および覆工巻厚の調査方法は、局所破壊検査と非破壊検査に大別されます。

局所破壊検査とは簡易ボーリングにより覆工コンクリートの一部を削孔し、採取したコアによる物性や劣化状況を調査するとともに削孔時のボーリング孔を利用して覆工コンクリートや背面空洞の有無、背面地山の状況を観察・把握する調査方法であります。

非破壊検査に使用されている手法として実用化されているのは電磁波法（地中レーダ）による覆工巻厚、空洞の有無や大きさの調査であります。

1. 「トンネル補修工法に関する手引き(案)」の調査方法

調査は、設計～施工の各段階に応じて実施するものとし、各段階における調査の目的と調査項目を以下にとりまとめています。

第 1 段階～第 3 段階の位置づけは下記のとおりであります。

- ・ 第1段階：対策の要否判定および調査・検討段階
- ・ 第2段階：対策工の詳細設計段階
- ・ 第3段階：対策工の施工段階

		目的	調査項目	備考
第1段階	対策工の要否判定 調査・検討段階	<ul style="list-style-type: none"> ・覆工巻厚の概略把握 ・空洞有無の概略把握 ・対策工要否の判定 ・第2段階の調査計画 ・補修設計（必要に応じて） 	<ul style="list-style-type: none"> ・観察調査 ・地中レーダー探査 ・簡易ボーリング調査 ・内視鏡観察 ・材料試験（必要に応じて） 	<ul style="list-style-type: none"> ・トンネル全体の安定性を概略的に広範囲にわたって把握する。 ・地中レーダー探査のキャリブレーションとして簡易ボーリング調査を実施する。
第2段階	詳細設計 段階	<ul style="list-style-type: none"> ・覆工巻厚の把握 ・空洞規模（深さ、分布等）の把握 ・詳細な補修設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・観察調査 ・簡易ボーリング調査（注入用のボーリング） ・内視鏡観察 ・材料試験（必要に応じて） 	<ul style="list-style-type: none"> ・1スパン3孔の簡易ボーリング調査を実施する。
第3段階	施工段階	<ul style="list-style-type: none"> ・第2段階の設計の照査 ・対策工施工 	<ul style="list-style-type: none"> ・観察調査 ・簡易ボーリング調査（注入管設置時） ・内視鏡観察（必要に応じて） 	<ul style="list-style-type: none"> ・注入管設置時に第2段階の設計を照査する。 ・要否判定基準に準拠し修正設計を行う。

【各段階における調査内容（案）】

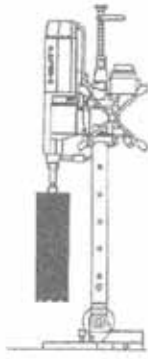
a)第1段階における調査

点検における調査結果を踏まえ、覆工巻厚の確認（巻厚不足箇所の抽出と巻厚の概略把握）と背面空洞の有無の把握を目的とし、地中レーダー探査を主体とします。

① 地中レーダー探査

地中レーダー探査は、矢板工法では全てのトンネルを対象とし、NATMでは定期点検により、A・B判定となったトンネルを対象とします。

地中レーダー探査の測線は、トンネル縦断方向に3測線（天端に1測線、両肩部に2測線を標準とする。測線数は、矢板工法、NATM工法の区別および覆工ひび割れの分布状況から決定します。



【地中レーダー探査の実施測線の例】



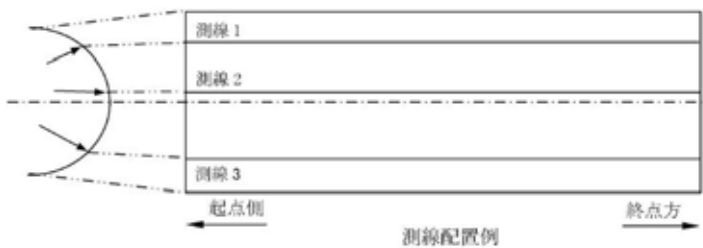
【地中レーダー探査実施状況】

② 簡易ボーリング調査

地中レーダー探査のキャリブレーションのため、簡易ボーリング調査を実施することを基本とする。調査は地中レーダー探査に基づき、空洞が大きいと予想される位置とし、1測線100mあたりに、1箇所程度の実施を目安とします。

簡易ボーリング機を用いたボーリングを標準とし、ボーリング深さは覆工コンクリート背面までとします。

第1段階における簡易ボーリング調査は、 $\phi 32\text{mm}$ 程度を標準とする。ただし、ジャンカ、濁音等により覆工の劣化が著しいと判断され、材料試験を実施する場合には、コアボーリング ($\phi 100\text{mm}$) を採用するのが望ましいです。



【簡易ボーリング機の例】



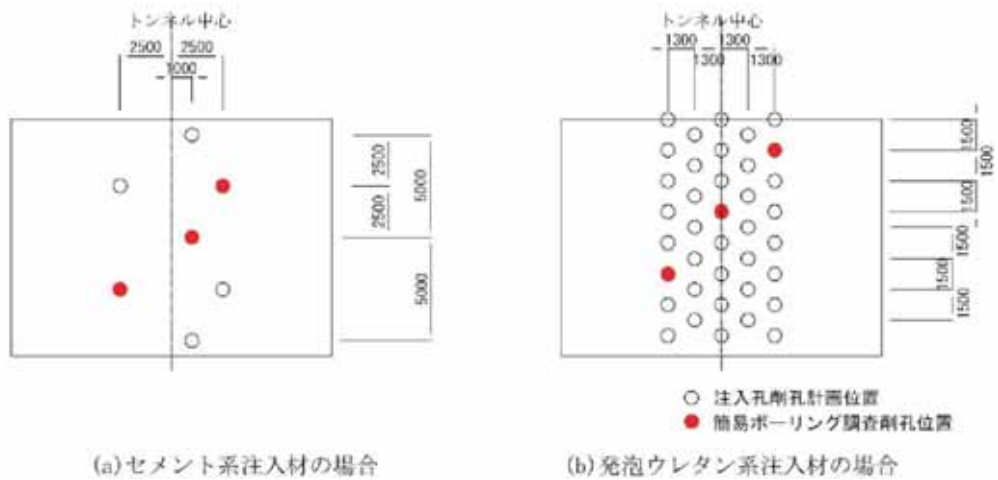
【簡易ボーリング調査の施工状況】

(道路トンネル維持管理便覧より)

b)第2段階における調査

空洞規模の把握、覆工背面空洞充填対策の設計を目的として、簡易ボーリング調査を主体とします。

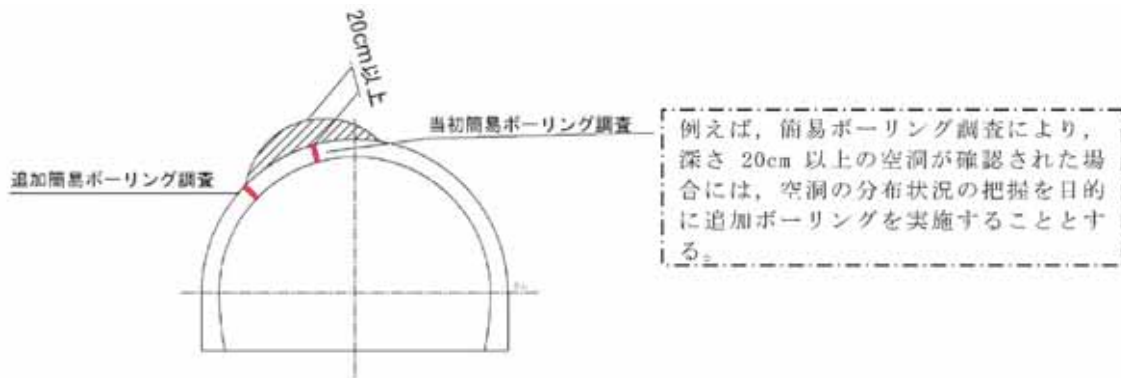
第1段階の調査結果を踏まえて、1スパンに3箇所を目安とする。ただし、空洞深さ20cm以上の空洞が確認された場合には、近傍に簡易ボーリングを追加し、空洞の分布状況を確認するものとします。また、削孔箇所は、注入用の削孔に合わせた位置を標準とします。



(a)セメント系注入材の場合

(b)発泡ウレタン系注入材の場合

【第2段階における簡易ボーリング調査の実施位置の例】



【追加簡易ボーリング調査の概念図】

c)第3段階における調査

注入管配置を目的とした注入孔を利用した調査であり、第2段階における空洞充填量の設計および内面補強工の設置箇所等の照査を目的とします。

その他の背面空洞調査方法として、背面空洞の平面的な広がりが大きいと予測された場合には、空洞規模を把握するため、ボーリング孔内にファイバースコープまたはボアホールカメラを挿入して、覆工背面の空洞および地質状況を観察することが望ましいとされています。

(2)「矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工要領」の調査方法

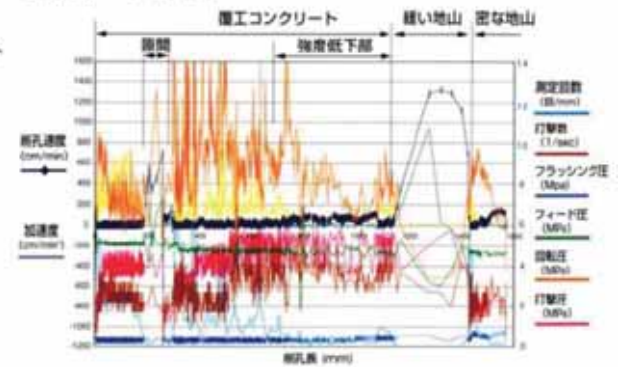
「矢板工法トンネルの背面空洞注土工 設計・施工要領」には、参考資料として「トンネル覆工背面の空洞探査法（PVMシステム）マニュアル」が取りまとめられています。

PVM(Percussive-drilled Void Measuring)システムとは、トンネルの覆工コンクリートと背面の地山を、回転・打撃式の油圧さく岩機を使って高速に削孔し、種々の計測データをリアルタイムに採取、グラフ化・解析することにより、覆工コンクリート背面の状況を高精度に調査できるシステムであります。

●システムの概要



●機械データの事例



【PVMシステムの概要と機械データの事例】



■各部の名称



施工風景



【調査機と施工風景（古河ロックドリル株式会社 カタログより）】

覆工背面空洞を調査する既存の手法である「コアボーリング削孔による直接評価」との比較表は以下のとおりであります。

	PVMシステム	コアボーリング
調査方法	回転打撃で削孔し、この時の機械データから覆工及び空洞を検知する	φ65mmのコアドリルにより削孔し、スケールで空洞高を直接測定する。
調査速度	○	△
調査精度	○	○
備考	機械データの解析・判読にはトンネルごとのキャリブレーションが必要	高所作業車上での作業となる

【調査法の比較表】

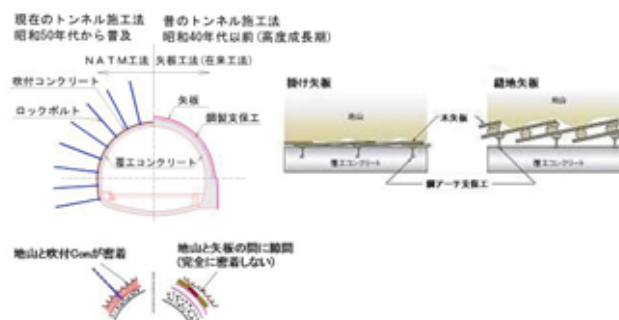
従来の調査法と比較して、調査速度が速いため交通規制時間が短縮され、高所作業がないため作業員の安全性が向上するという長所があります。

背面空洞の充填対策

1.裏込め注入工の必要性

a)矢板工法で施工されたトンネルの特徴

現在のトンネル施工法であるNATM工法は、地山と吹付コンクリートが密着し、覆工コンクリートは吹上げ方式で打設されるため、空洞が残りにくいです。一方、昭和40年代以前（高度成長期）に施工され、現在、維持補修の主な対象となっている矢板工法で施工されたトンネルは、施工上鋼製支保工の背面に矢板を配置するため、地山と矢板の間に隙間が生じます。また、覆工コンクリートは引抜き方式で打設され、当時のコンクリート打設方法は万全でなく、天端で巻厚不足となりやすいです。よって、矢板工法で施工されたトンネルは、背面空洞の存在が懸念されます。



【矢板工法トンネルの特徴】

b)背面空洞に起因するトンネルの変状

背面空洞があっても覆工厚さが十分であれば、覆工に変状となって現れないこともあるが、一般には覆工コンクリートには次のような変状が懸念されます。

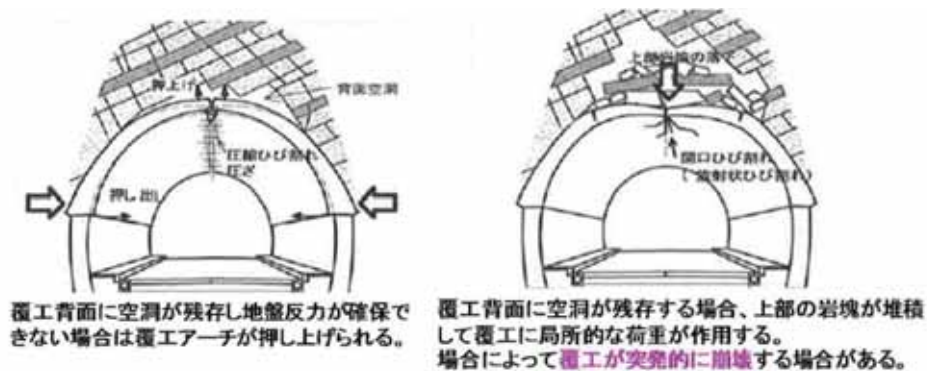


愛知県トンネル崩落事故状況
NHKスペシャル
「調査報告日本のインフラが危ない」より

断層部の土砂が、集中豪雨に伴う地下水
流入により崩落(水路トンネル)
「山岳トンネル覆工の現状と対策」より

【背面空洞に起因するトンネルの変状】

背面空洞に起因する突発的崩壊の事例を以下に紹介します。



覆工背面に空洞が残し地盤反力が確保できない場合は覆工アーチが押し上げられる。

覆工背面に空洞が残存する場合、上部の岩塊が堆積して覆工に局所的な荷重が作用する。場合によっては覆工が突発的に崩壊する可能性がある。

【背面空洞に起因する突発的崩壊の事例】

c)裏込め注入工の目的と効果

以上のとおり、覆工背面空洞の存在はトンネル構造に種々の悪影響を及ぼします。したがって、覆工と地山を密着させ、覆工体に均等な荷重が作用するようにするとともに、地盤反力を十分期待できるようにすることが肝要であります。

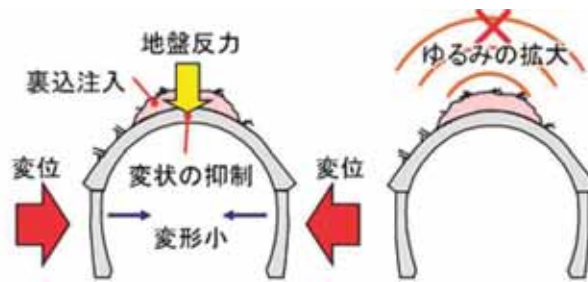
裏込め注入工の目的を以下に示します。

- ① 覆工が外力に対抗するための反力をとれるようにします。
- ② 作用する土圧を分散することにより一様な荷重を覆工に作用させます。

(点接触の防止、偏土圧の防止)

- ③ 空洞を安定化させます。

- ④ 漏水による覆工の劣化を防止します。
- ⑤ 漏水を止め、通行車両の安全を確保します。



【裏込め注入効果】

このように、裏込め注入工は、覆工コンクリートや地山の劣化を防止するだけでなく、車両等の通行の安全性を確保するなど、トンネル構造の品質を向上させる基本的で有効な対策工であります。

d)対策工（裏込め注入工）の要否判定

「トンネル補修工法に関する手引き(案)」では、背面空洞の分布状況（平面的広がりがある場合、局所的な分布の場合）に対し、覆工厚さと背面空洞の大きさに応じて背面空洞対策の要否判定を細分化している。次頁に「トンネル補修工法に関する手引き(案)」から抜粋した「覆工背面对策の要否判定基準フロー（案）」を示します。

判定基準では10cm以下の空洞は対象とされていないが、1cmの隙間でも、ある一定の広がりで存在すると構造的に地山の反力が期待できなくなるため、ひび割れの進行が起きる等、経年の劣化が進む可能性があります。

この要否判定は、あくまで目安で、中国地方と地質条件が異なる全トンネルに適用するのは危険であり、地質条件、構造条件、変状の原因・程度・進行状況等を勘察し、トンネルごとに個別で慎重な判断が必要であります。

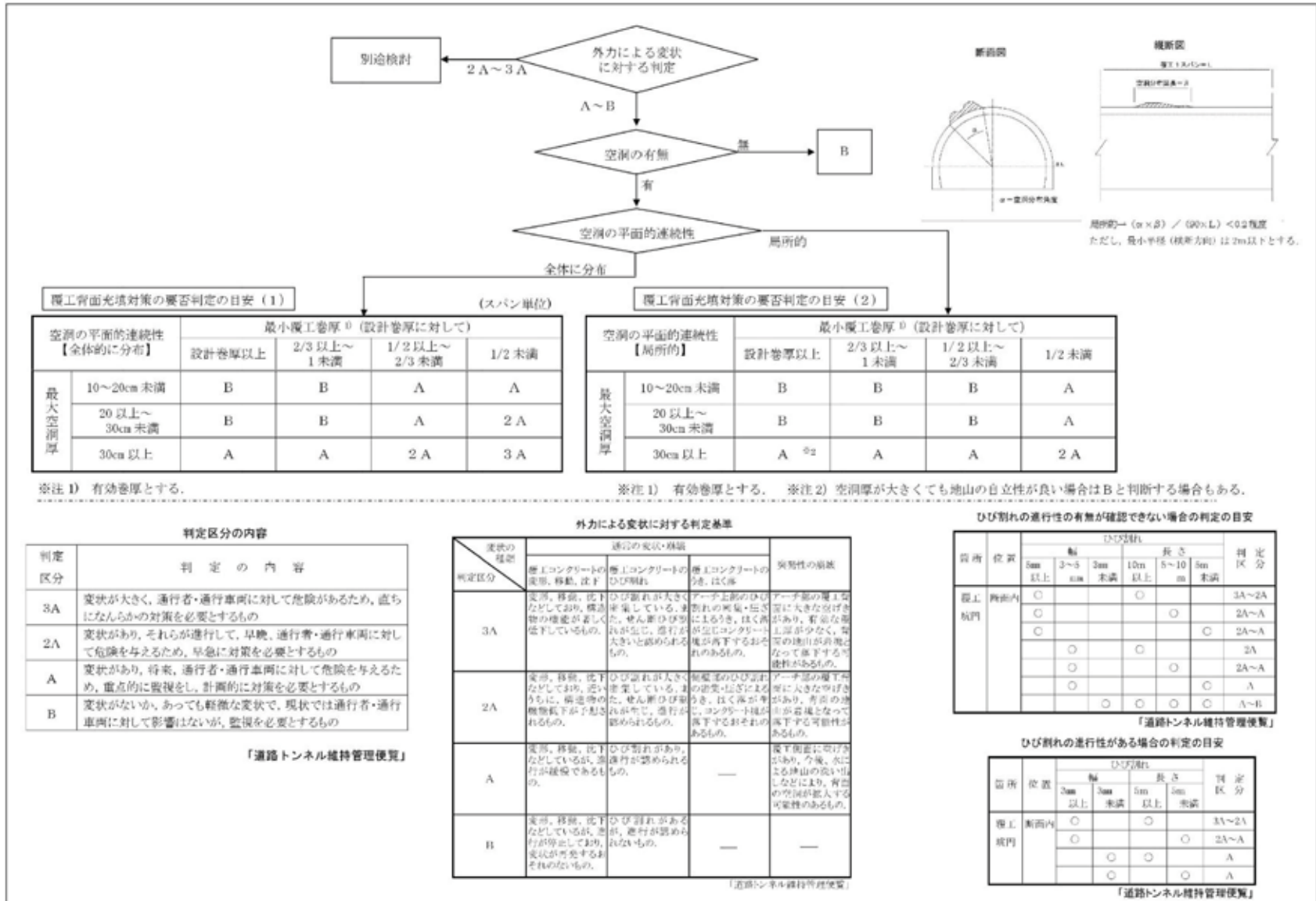


図 2.3.3 覆工背面空洞対策の要否判定基準のフロー（案）
 【覆工背面对策の要否判定基準フロー（案）】

※注 1) 有効巻厚とする。

※注 1) 有効巻厚とする。 ※注 2) 空洞厚が大きくても地山の自立性が良い場合はBと判断する場合もある。

判定区分の内容

判定区分	判定の内容
3A	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、直ちになんらかの対策を必要とするもの
2A	変状があり、それらが進行して、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの
A	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、重点的に監視をし、計画的に対策を必要とするもの
B	変状がないか、あっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して影響はないが、監視を必要とするもの

「道路トンネル維持管理便覧」

外力による変状に対する判定基準

変状の種類 判定区分	通行の変状・崩壊			突発性の崩壊
	膨らみ・移動、沈下	膨らみ・移動、沈下	膨らみ・移動、沈下	
3A	変形、移動、沈下などがあり、構造物の健全性が著しく低下しているもの。	ひび割れが大きい。せん断ひび割れが広く、通行が困難となるもの。	アーチ上部のひび割れの発生・広がり、はく落がある。はく落がアーチ上部に落ち、通行が困難となるもの。	アーチ部の覆工が破損し、大きなひび割れや、有害な塊が落下する可能性があるもの。
2A	変形、移動、沈下などがあり、近いうちに、構造物の健全性が低下するおそれがあるもの。	ひび割れが大きい。せん断ひび割れが広く、通行が困難となるもの。	他要素のひび割れの発生・広がり、はく落がある。はく落がアーチ上部に落ち、通行が困難となるもの。	アーチ部の覆工が破損し、大きなひび割れや、有害な塊が落下する可能性があるもの。
A	変形、移動、沈下などがあり、通行が認められるもの。	ひび割れがあり、通行が認められるもの。	—	覆下面積にひび割れがあり、今後、水による地山の自立性などが低下するおそれがあるもの。
B	変形、移動、沈下などがあり、通行が認められるもの。	ひび割れがあるが、通行が認められるもの。	—	—

「道路トンネル維持管理便覧」

ひび割れの進行性の有無が確認できない場合の判定の目安

箇所	位置	ひび割れ				判定区分		
		幅	長さ	幅	長さ			
覆工	側面内	5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	3A~2A
		○			○			2A~A
		○					○	2A~A
		○			○			2A
		○				○		2A~A
		○					○	A
成門	側面内	○			○		○	A~B
		○					○	
		○					○	

「道路トンネル維持管理便覧」

ひび割れの進行性がある場合の判定の目安

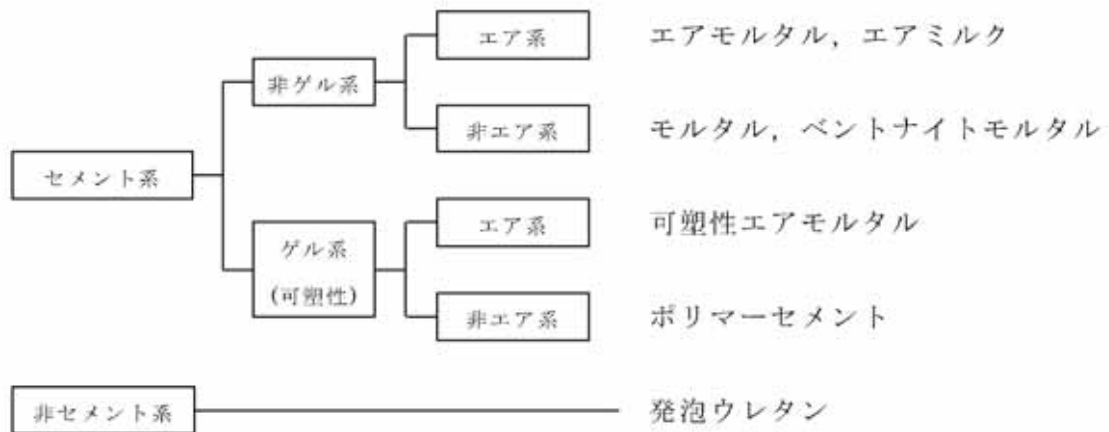
箇所	位置	ひび割れ				判定区分	
		幅	長さ	幅	長さ		
覆工	側面内	2mm以上	3mm未満	5mm以上	5m未満		3A~2A
		○		○			2A~A
		○		○			A
		○		○			A

「道路トンネル維持管理便覧」

2.裏込め注入工の注入材

a)注入材の分類

注入材は、セメント系と非セメント系に大別され、下図のとおり分されます。



【裏込め注入材の分類】

b) 「トンネル補修工法に関する手引き(案)」による注入材の選定

「トンネル補修工法に関する手引き(案)」では、裏込め注入材の材料特性と適用性による選定の目安を次頁の表のとおり示しています。

この表は「道路トンネル変状対策工マニュアル(案)」に40倍発泡ウレタン系材料を追加したもので、注入材の選定にあたっては、「道路トンネル変状対策工マニュアル(案)」に準拠し、以下に示す注入箇所への適用性、施工性を考慮します。

- ① 覆工への影響（覆工巻厚が不足する場合）
- ② 注入箇所の湧水状況
- ③ 空洞細部への充填性
- ④ 坑内の施工ヤードの状況（片側通行規制で実施されることが多いため、内空断面の小さなトンネルでは、搬入機材に制約を受ける場合もある）
- ⑤ 坑内の施工ヤードの確保（材料の生コン取りができない場合）
- ⑥ 環境に与える影響（主に坑内排水の水質に与える影響が問題となる場合）

施工実績は、これまで可塑性エアモルタルが多く採用されたが、近年発泡倍率40倍の発泡ウレタンが開発・実用化され、簡便な設備で、注入材の逸走が少なく強度発現が速いことから施工期間の短縮が可能となるため、採用実績が増加しています。

表 3.1.2 裏込め注入材料の材料特性と選定の目安
 (「道路トンネル変状対策エマニアル(案)」に加筆)

材 料		セメント系				非セメント系	
		① 従来の注入材		② 可塑性注入材			
		非エア系	エア系	非エア系	エア系		
		モルタル、 ベントナイトモルタル	エアモルタル、 エアミルク	ポリマーセメント	エアモルタル + 添加剤		
選 定 項 目							
材料特性	材料の特徴	モルタルやそれにベントナイトを混合して流動性をよくしたもの	モルタルやセメントミルクに空気を混入し流動性をよくしたもの	セメントベントナイト等にポリマー材料を混入し流動性を高めたもの	エアモルタルに可塑性剤を添加したもの	裏込め注入用発泡ウレタン(発泡倍率12~30)	裏込め注入用発泡ウレタン(発泡倍率40)
	単位体積重量 (kN/m ³)	20程度	11~14; エアモルタル 6程度: エアミルク	13~15	11~12	0.4~1.0	0.3
	ゲルタイム	数時間~1日程度	数時間~1日程度	注入直後から可塑性	注入直後から可塑性	1~3分程度 (硬化時間)	1~3分程度 (硬化時間)
	フロー値 (mm)	15~20sec (プロート法)	200±20mm (シリング法)	80~120mm (シリング法)	80~150mm (シリング法)	発泡しながら硬化するため、特にフロー値はない	発泡しながら硬化するため、特にフロー値はない
適用性による選定の目安	覆工への影響	荷重増加	大	中		小	小
		巻厚不足箇所への適用	内巻工、内面補修工等の検討を要する				可
	湧水箇所への適用	適	不適 (材料分離しやすい)	適		適	
	空洞確部への充填	充填しにくい	微細部まで充填可能	加圧により充填可能		注入孔を設けることで、充填可能	
	片側通行規制下での施工機材配置	内空断面が小さい場合には要注意 (道幅6.5m以上で片側施工の実績がある)				施工機材が小規模で特に注意を要しない。	
	施工後の坑内排水 pH変動	変動する可能性あり				変化しない ※1	
	冬季施工	可				10℃以下要注意 ※2	
備 考	機械化による大量施工には向かない。		長距離圧送が可能なものもある。品質管理(強度管理)が容易。	トンネルでの施工実績が多い。エア混入のため材料の使用量が少ない。	発泡倍率により強度調整が可能。	注入材自体の強度が要求される場合には不向き。近年採用実績が増加。	
コスト ※3	低 (材料の逸走が懸念される場合には高くなる場合がある。)		中		高 (小規模な充填の場合には有利となる場合もある。)		中

※1: 未固結状態では、露境上問題となる可能性がある。

※2: 粘性が厚し注入機械への過剰負担と、硬化不足が懸念され、硬める必要がある。

※3: コストは施工の環境により変動するため、個別に検討が必要である。

【裏込め注入材の材料特性と選定の目安】

c) 「矢板工法トンネルの背面空洞注工 設計・施工要領」による注入材の選定

「矢板工法トンネルの背面空洞注工 設計・施工要領」では、下図のとおり注入材選定フローを示しており、また、可塑状注入材は TYPE1～TYPE6 に分類され、以下に示す条件を整理した上で、安全性、施工性、経済性の観点から最も合理的な材料を選定します。

- ① 充填性、流動性
- ② 非漏出性
- ③ 水中分離抵抗性
- ④ 非収縮性
- ⑤ 硬化時間（凝結時間）
- ⑥ 強度
- ⑦ 比重



【注入材選定フロー】

種別	モルタル系注入材	*1 可塑状注入材						非セメント系注入材
		TYPE1	TYPE2	TYPE3	TYPE4	TYPE5	TYPE6	
材料種別	エアモルタル	エアモルタルに可塑剤を加えたもの		ポリマーセメント系のもの	モルタルに特殊増粘材を加えたもの		可塑性セメントに可塑剤を加えたもの	発泡ウレタン(シリカレジン含む)
材質	比重(KN/m ³)	9~15程度		11~12程度		13~15程度		1~2程度
	硬化(凝結)時間	数時間		速い(1hr程度)	数時間	数時間	速い(1hr程度)	数時間
	覆工への荷重負担	中		中				小
	耐火性	不燃性		不燃性				難燃性(自己消火性あり)
適用性	充填性・流動性	可塑状注入材より劣るが状況により適用可		適用可				適用可
	非漏出性	漏出しやすいが状況により適用可		適用可				適用可
	水中分離抵抗性	材料分離が生じやすいので湧水が多い箇所では不適		適用可				適用可
	非収縮性	適用可		適用可				適用可

【背面空洞注入用材料比較表】

道路トンネル点検における新技術・新工法の紹介

1.新しいトンネルの点検技術

本節では、「新型走行型画像計測システム(MIMM-R)」(株式会社パシフィックコンサルタンツ・三菱電機株式会社・株式会社ウォールナット)、「トンネル覆工レーダー探査装置」(株式会社メンテック)、「レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート剥離検知装置」(JR西日本)を新しいトンネルの点検技術として以下に紹介します。

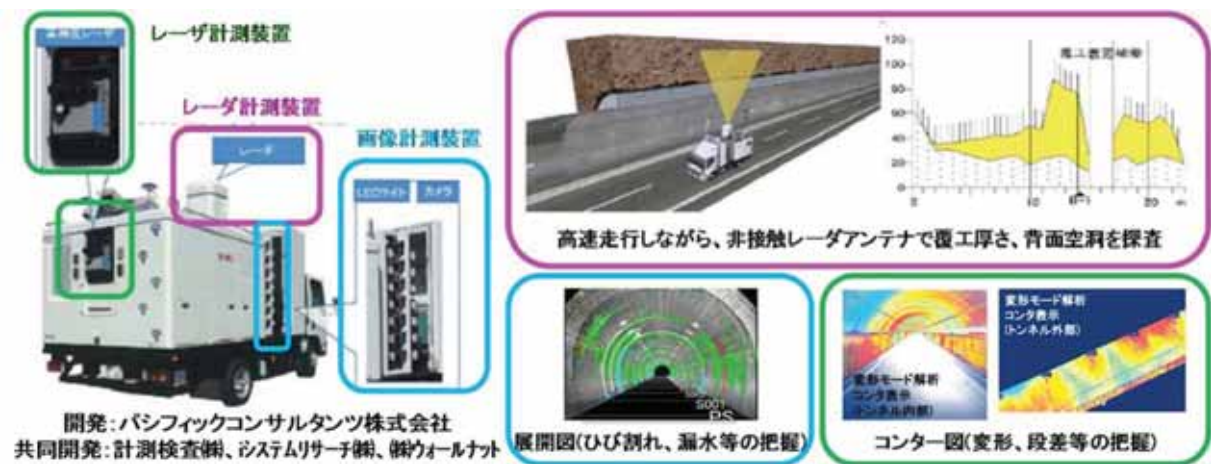
また、国土交通省が次世代社会インフラ用ロボット現場検証対象技術に決定した技術から、トンネル維持管理に役立つ技術16件・10者を紹介します。

2.新型走行型画像計測システム

新型走行型画像計測システム(MIMM-R)は、交通規制が不要で、高速走行しながらトンネル点検が可能な新技術で、デジタルカメラと3Dレーザースキャナーを搭載した、前機種「MIMM」の車体の上に電磁波レーダーを搭載したシステムであり、以下の機能を備えています。

- ・トンネルレーザ計測及び変形解析：断面の変形(覆工の変形、段差等)の検出。
- ・トンネル画像計測及び損傷度評価：覆工コンクリート表面の画像撮影と損傷把握。
- ・トンネルレーダ計測及び空洞評価：非接触型レーダーによる巻厚、背面空洞の探査。

MIMMからの改良点は、走行型非接触レーダーにより、速度50~70 km/hで走行しながら、巻厚、背面空洞を探査できる点であります。探査可能な深度は巻厚で変化し、40 cm~80 cm程度であり、覆工が薄く、しかも空洞がある危険箇所を迅速に検出することを目的としています。



【MIMM-R 概要図】

3. トンネル覆工レーダー探査装置

(1) トンネル覆工レーダー探査装置の概要

トンネル覆工レーダー探査装置(【NETIS】KT-980444-A)は、トンネル覆工表面から電磁波探査装置を利用して非破壊で覆工厚・覆工内部状況及び覆工背面状況(空洞有無等)を把握する装置で、従来の「点」情報から、「線」情報として連続的に覆工厚及び覆工背面状況(空洞有無等)を把握することができます。

従来、トンネル覆工厚さと覆工背面空洞等はコアボーリングにより覆工に削孔して目視確認、実測計測する方法で「点」情報として調査されています。非破壊で探査測線上連続的に探査把握することにより調査速度が速く(1/5程度)なり、探査測線上を連続的に覆工厚・覆工内部状況及び覆工背面状況(空洞有無等)を把握できるので、トンネル健全度評価に有効であります。

(2) トンネル覆工レーダー探査装置の特徴

トンネル覆工レーダー探査装置の特徴を以下に示します。

- ・ 設定した測線上のトンネル覆工厚さ及び、その背面空洞及び崩積土状況を連続して把握できます。
- ・ 供用2車線道路トンネルでは、片側交互通行規制で探査が可能です。
- ・ 在来工法及びNATM工法で施行されたトンネルの覆工厚・背面状況を連続的に高精度で把握できます。
- ・ 覆工内部のジャンカ部検出ができます。
- ・ 支保工の位置・間隔が把握できます。

- ・補強鉄筋区間及び鉄筋被り厚が把握できます。
- ・探査速度は、約1km/h程度であります。
- ・適応覆工厚は、アンテナ中心周波数400MHzで約80cm程度までであります。
- ・探査結果は、デジタルデータとして、現地で画像確認できます。
- ・専用解析ソフトが装備されています。



【トンネル覆工調査状況】



【調査用アンテナ(中心周波数500MHz)】

(3) 成果品例

トンネルの健全度を評価する場合、当初設計巻厚に対しての現状覆工厚の把握が必要であり、健全度評価の重要な1項目であります。また、地山の覆工耐荷力分散のため、覆工背面空洞の有無と空洞深把握も重要な評価項目であります。

下記に在来工法で施工されたトンネルにて電磁波レーダー探査（アンテナ中心周波数400MHz）を3測線（トンネルセンターから0.4mと左右1.5m）で探査を実施し、解析した縦断図例を示します。また削孔結果も併記しました。

その他の活用としては、覆工表面に発生している変状発生要因の推測と、補修・補強設計を検討する際の資料として用いられています。また、削孔して収集されたコンクリート試料はコンクリート一軸圧縮強度及び中性化試験を実施し、トンネル健全度評価の1項目として用いられています。

