

PVMシステムを利用したトンネル 背面空洞注入工

宮沢一雄¹・石田慎治²・中野清人³

¹正会員 東日本高速道路(株) 東北支社 福島管理事務所 (〒960-0231福島市飯坂町平野字前原11)
k.miyazawa.aa@e-nexco.co.jp

²非会員 東日本高速道路(株) 関東支社 水戸管理事務所 (〒311-4163水戸市加倉井町2206)

³正会員 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508東京都町田市忠生1-4-1)

現在、矢板工法で建設されたトンネルでは、長期耐久性の向上を図るために、優先順位を付け計画的に覆工背面空洞にグラウトを注入する事としている。従来、空洞の大きさや位置の調査において、電磁波探査などの非破壊検査が行われてきたが、覆工コンクリートが厚い場合や背面に崩落土砂が堆積している場合などは、調査精度の低下が危惧された。そのため現空洞注入指針では、覆工コンクリートをコアドリルで削孔し、空洞を直接計測する方法を基本としている。しかし、1箇所あたりの削孔に時間を要し、膨大な労力と時間およびコストがかかり課題を残している。このような背景から、空洞対策を円滑に実施していくために、既設トンネルの覆工コンクリートを高速削孔しながら、覆工コンクリート厚や覆工コンクリート背面の状況を高速かつ高精度で調査するために開発された「PVMシステム」(Percussive-drilled Void Measuring)を本格的に採用することとした。本報告では、この新しいシステムの紹介と共に常磐自動車道の日立トンネル群における実施工について報告するものである。

Key Words : mountain tunnel, maintenance management, void investigation, tunnel lining, grouting.

1. はじめに

NATMが広く採用される1983年以前の矢板工法によるトンネルでは、矢板が支障となり、覆工コンクリートと背面地山との間に空洞が生じる場合がある。覆工背面に生じた空洞が、トンネル構造に悪影響を及ぼし、第三者被害も考えられることから、将来的な機能保全及び耐久性向上を図るために空洞にグラウトを充填するトンネル背面空洞注入工による対策工をすることとしている。対策工を行うためには背面の空洞量・空洞分布を把握する必要がある。また、アセットマネジメントの観点からも、重要な社会資本であるトンネルを対策する優先度を背面空洞の状況から判定することが必要となってきた。しかし、従来調査法である電磁波などの物理探手法では、覆工コンクリートが厚い場合や背面に崩落土砂が堆積している場合などでは、調査精度の低下が危惧された。現空洞注入指針では、空洞量の把握を目的とした調査をコアドリル(φ65mm)で覆工コンクリートを削孔し、その孔に計測棒を挿入して計測する方法としているが、1箇所あたりの削孔に45分~60分の時間を要し、工事規制日数が多くなることから工期や費用面で課題を残してい

る。このような背景から、今後の空洞対策を円滑に実施していくために、既設トンネルの覆工コンクリートを高速削孔しながら、覆工コンクリート厚や覆工コンクリート背面の状況を高速かつ高精度で調査するために開発された「PVMシステム」を本格的に採用することとした。

本報告では、PVMシステムを紹介すると共に2003年より常磐自動車道の日立トンネル群においてPVMシステムを導入した背面空洞注入工の実施工の検証について報告する。

2. トンネル概要

対象とした日立トンネル群は、常磐自動車道の日立南太田~いわき勿来間に15トンネル、総延長が約25kmに及ぶトンネル連続区間があり、全国でも有数のトンネル群である(図-1)。ほとんどのトンネルが在来工法で建設されており、建設後20年以上経過して、劣化対策が必要となった。背面空洞対策では、空洞注入が必要な在来トンネルが11トンネル、延長が21kmと対象数量が膨大であり実施にあたっては、空洞調査および空洞注入について最適な手法を定め、全体の状況を把握した上

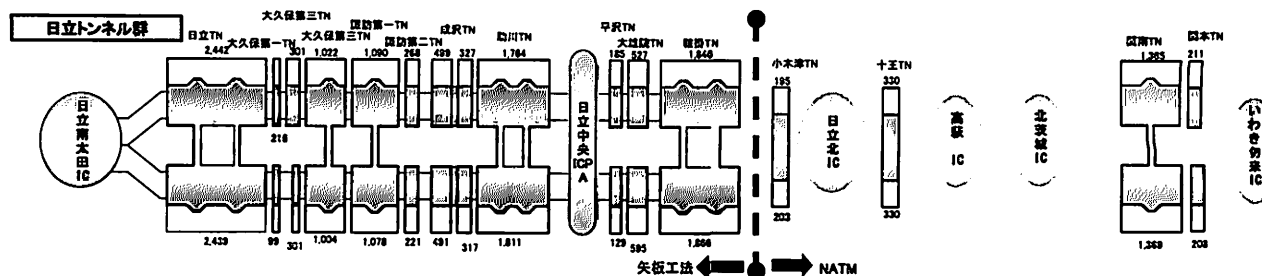


図-1 日立トンネル群位置図

表-1 トンネル概要と注入状況

No	トンネル名	延長(m)		掘削工法		岩質	供用 経年	実施状況
		上り線	下り線	上り線	下り線			
1	日立	2,439	2,442	上部半断面	上部半断面(坑口側壁導坑)	粘板岩、緑色片岩、石灰岩	26	
2	大久保第一	99	216	側壁導坑	上部半断面(坑口側壁導坑)	珪質粘板岩、	26	
3	大久保第二	187	301	上部半断面(坑口側壁導坑)	上部半断面(坑口側壁導坑)	珪質粘板岩、石灰岩	26	
4	大久保第三	1,004	1,022	上部半断面	上部半断面(坑口側壁導坑)	珪質粘板岩、石灰岩	26	
5	諏訪第一	1,078	1,090	上部半断面	上部半断面	黒色珪質粘板岩、石灰岩	26	2007下り
6	諏訪第二	221	268	上部半断面(坑口側壁導坑)	上部半断面(坑口側壁導坑)	黒色粘板岩	26	2007下り
7	成沢第一	491	499	上部半断面(坑口側壁導坑)	上部半断面(坑口側壁導坑)	黒色粘板岩、石灰岩	26	2001下り
8	成沢第二	317	327	上部半断面(坑口側壁導坑)	上部半断面	黒色粘板岩、石灰岩	26	2003下・2005上
9	助川	1,811	1,764	上部半断面(坑口側壁導坑)	上部半断面(坑口側壁導坑)	黒色粘板岩、石灰岩	26	2003下・2005上
10	平沢	129	185	側壁導坑	上部半断面(坑口側壁導坑)	珪質片岩	26	
11	大雄院	595	527	上部半断面	上部半断面	珪質岩、石灰岩	26	
12	鞍掛	1,866	1,846	上部半断面	上部半断面	緑色片岩、石灰岩	26	2008・2009上り
13	小本津	203	195	NATM(坑口中央導坑)	NATM(坑口中央導坑)	圧砕性花崗閃緑岩	26	
14	十王	330	330	NATM(坑口側壁導坑)	NATM(坑口側壁導坑)	緑色片岩、花崗岩質砂岩	23	
15	関南	1,359	1,359	NATM	NATM	凝灰質泥岩、泥岩	23	
16	関本	211	211	NATM	NATM	凝灰質泥岩、泥岩、細粒砂岩	23	
計		12,340	12,582					

上下線計 24,922

在来工法計 20,724

NATM工法計 4,198

注入済計 7,942(38.3%)

で対策順位を定める必要があった。そこで、覆工コンクリートにひびわれが多く、漏水が比較的多い成沢、助川トンネルを2001年から対策を開始し、2003年より助川トンネルにてPVMシステムを導入した背面空洞注工を施工し、現時点では約4割が対策済である(表-1)。トンネル連続区間で他トンネル工事で輻輳施工となるため、トンネル群全体の劣化対策計画を策定してブロック毎の集中工事方式にて工事を実施している。

3. PVMシステム

空洞調査において、高速削孔と同時に空洞を検知できるシステムを目指し、日本道路公団、清水建設㈱、古河機械金属㈱が共同開発したシステムである。削孔方式は、従来用いられているコアドリルに代えて岩盤削孔に用いる掘削技術に着眼し、先端にφ33mmのビットを設けた「のみ」に回転と打撃を同時に加えて削孔するロータリーパーカッションドリルの技術を採用している(図-2)。これにより高速削孔が可能となった。削孔中は、削孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧、打撃数、エアフラッシング圧等の機械データをリアルタイムに採取して、覆工コンクリート背面の空洞量や覆工コンクリートの厚さ、地山状況を客観的に把握できるシステムである。また、調査の結果、空洞が判明した場合には、その場でビ

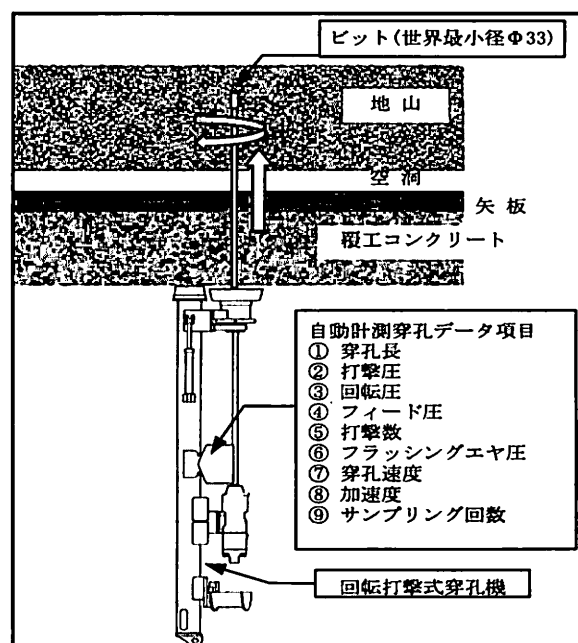


図-2 削孔方式

ットを交換することで、削孔した調査孔(φ33mm)を注入孔(φ65mm)に拡張する機能を兼ね備えている。PVMシステムの特徴としては、①調査に必要な機材を全てトラックに搭載しており、高い機動性を持って測定場所に自走が可能。②高速掘削により調査時間が短い。③機械データを自動記録するために調査精度が高い。④削孔径が33mmと最小のためトンネル構造や管理面への影響を最

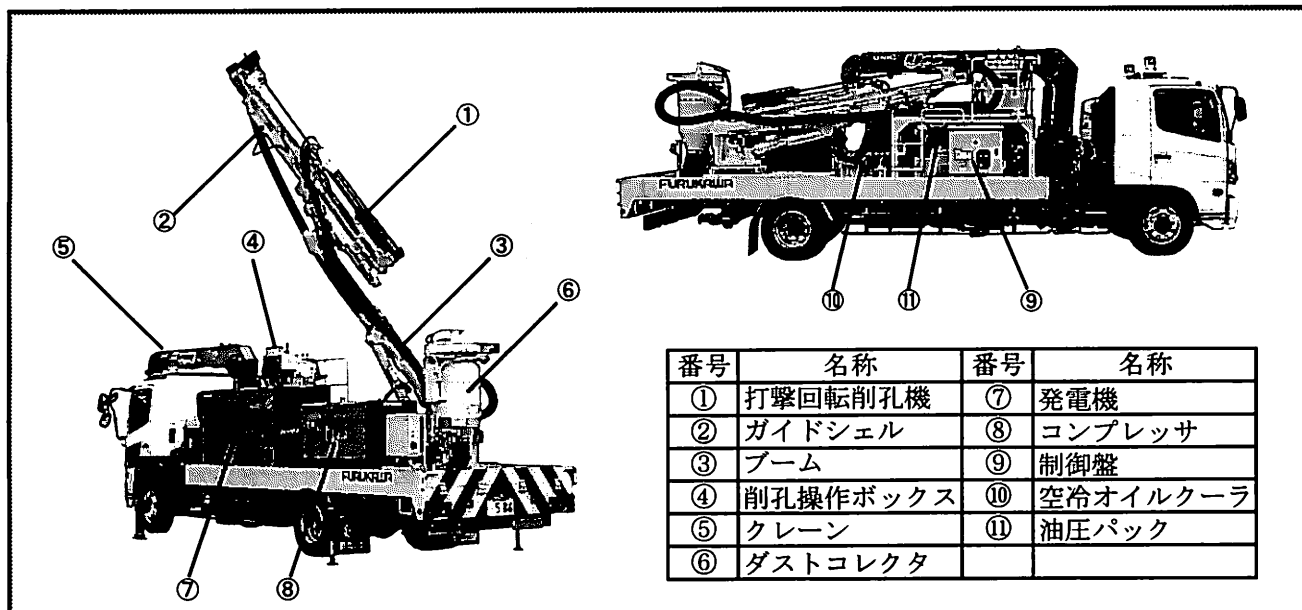


図-3 PVMシステム調査専用機の概要

小限に抑制され、空洞有りと確認されれば即時拡張が可能等が主に挙げられる。

PVMシステム調査専用機は、トンネル車線規制内での調査を配慮して 8ton トラックに削孔装置、発電機、コンプレッサ、ダストコレクタ、そして記録・解析用コンピュータユニットを搭載している（図-3）。

4. PVMシステムの実施工

(1) 空洞調査と注入孔拡張

トンネル補修工事において調査削孔工としてPVMシステムを採用した。主に覆工背面への注入工事の基礎データの収集を目的として「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」¹⁾により10m間隔で天端と両肩部の空洞調査を実施した（図-4）。空洞調査の結果、空

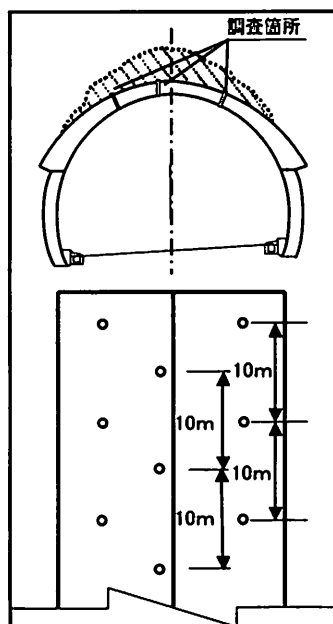


図-4 調査孔配置図

洞が認められた場合は、将来的にこの空洞に対して注入が必要となるため、調査したφ33mmの孔を有効利用して、その場で直ちにφ65mmビットに交換したのち拡張を行い、注入管の取り付けまで行なった。

(2) 調査方法

作業編成は、5人編成とした（図-5）。また、削孔中に湧水が発生した場合の処理や削孔調査後の処理として、空洞無しの場合は調査孔閉塞、空洞有りの場合には注入管設置など所要の作業に必要な高所作業車を後部に配置した。調査は、作業フロー（図-6）により工事規制を行ったトンネル内に専用機を移動し、天端部の調査削孔をφ33mmで開始する。鋼製支保工、鉄筋などにより削孔ができない場合はブームスライド機構により削孔位置を10cm以上ずらし再削孔を行う。削孔データを分析、判定し空洞ありと判定された場合は、φ65mmに拡張削孔を行い、続けて肩部を親子ビットでφ65mmに削孔し、空洞なしの場合は調査孔の閉塞を行う。

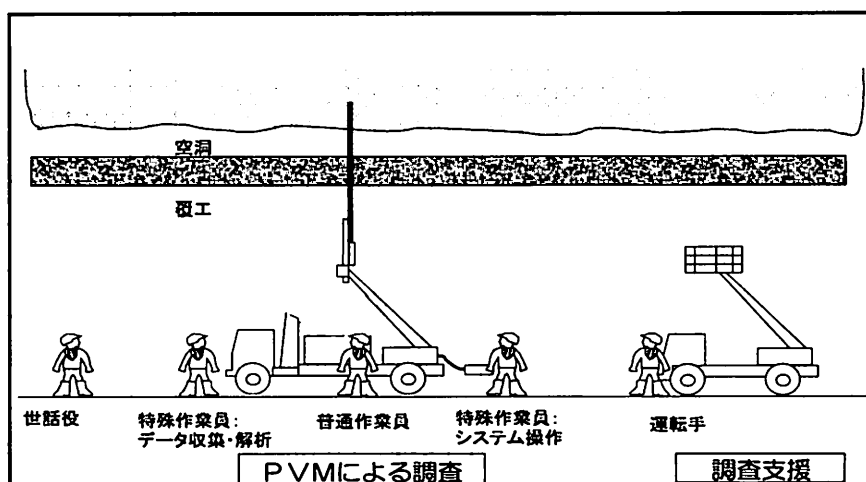


図-5 作業編成

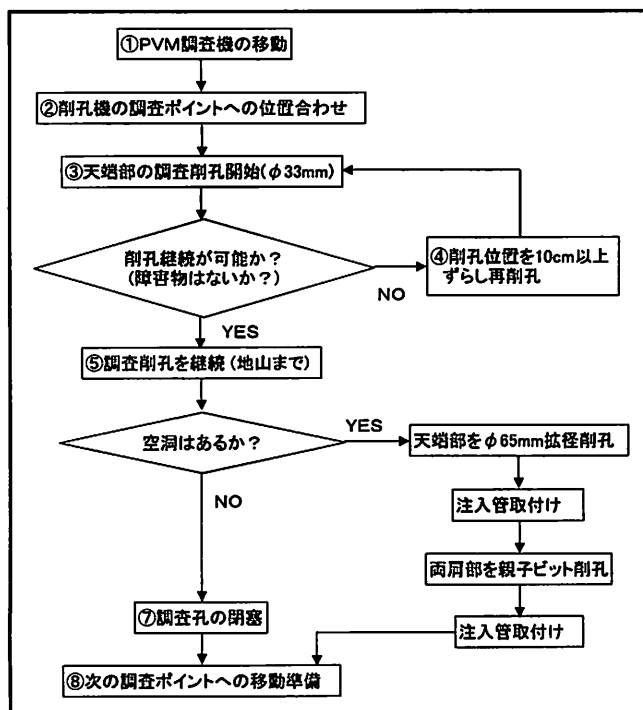


図-6 調査作業フロー

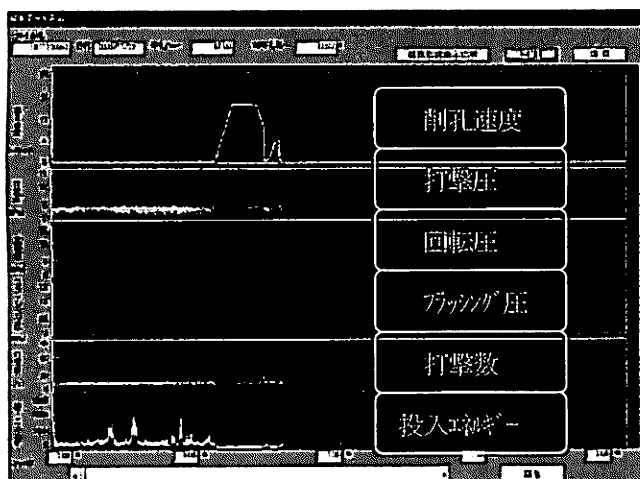


図-7 計測データ表示画面

(3) データ処理と判定

小型油圧ドリフタによる覆工と背面地山を回転削孔時の削孔速度、打撃圧、回転圧、フラッシング圧などの機械データは、パソコンで処理され、数値データとして蓄積される。現場においてリアルタイムに計測データが判読できる(図-7)。このグラフの横軸は削孔長で、空洞の有無や背面地山の状況は、主に削孔速度、回転圧、フラッシング圧の変動を読み取ることにより判読する。また、空洞高さや覆工厚は数値データから読み取る。空洞判読のポイントとして、削孔速度の急激な上昇と回転圧の急激な低下が挙げられる(図-8)。覆工背面が緩い地山の場合は、削孔速度は緩やかに上昇し、回転圧は緩やかに低下した。覆工背面に木製支保工や裏込めがある場合は、フラッシング圧が上昇した。

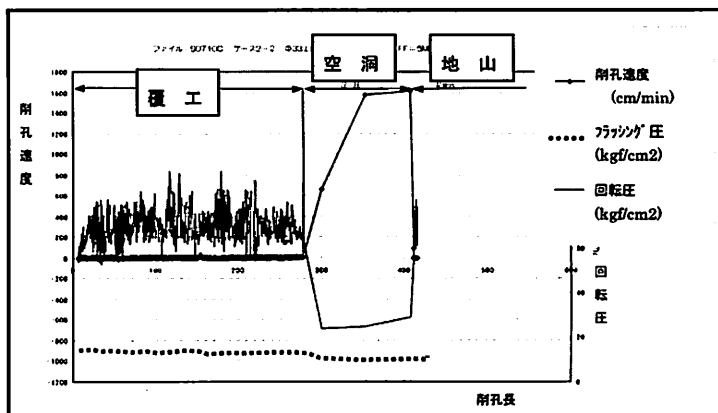


図-8 計測データグラフ

5. 施工実績からの検証

PVMシステムを導入して背面空洞注入工を施工した5チューブの中、助川トンネル上り線(L=1,811m)の施工実績から検証を行った。

(1) 調査結果

延べ30日間で約1,000本の削孔を実施した(表-2)。φ33mmの調査削孔の結果、約7割の335箇所で空洞が確認された。空洞高30mm以上を空洞ありとして、平均空洞高は約370mm、最大空洞高は998mmであった。また、削孔途中で鋼アーチ支保工等により削孔不能となった障害物干渉箇所は、完成図の支保工間隔から推定して削孔箇所を選定するものの、一向に障害物干渉割合は減少せず、約2割の180箇所におよんだ。

表-2 調査結果集計

		天端部	肩部	合計
φ 33 mm	削孔本数	238	415	653
	障害物干渉	63	102	165
		26.5%	24.6%	25.3%
	調査完了	175	313	488
	空洞あり	120	215	335
		68.6%	68.7%	68.6%
φ 65 mm	削孔本数	127	224	351
	障害物干渉	7	9	16
		5.5%	4.0%	4.6%
	注入孔完了	120	215	335
総計	削孔本数	365	639	1004
	障害物干渉	70	111	181
		19.2%	17.4%	18.0%
	調査・注入孔完了	295	528	823

(2) 調査精度

PVMシステムによる調査結果と孔内を検尺した実測値を比較して計測誤差より調査精度の検証を行なった(図-9)。この結果、孔内を検尺した実測値に対し、PVMによる空洞高の計測値は、平均で6.6mm、最大でも15mmの誤差であった。また、ボアホールカメラによる目視確認を実施したが調査結果と一致していた。

(3) 調査時間と能力

調査時間の結果を示す(図-10)。所要時間とは、トラックの移動から削孔までの1箇所当たりの作業時間で

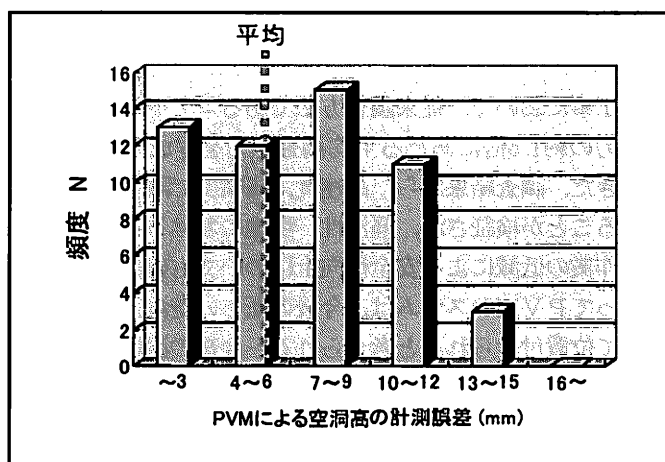


図-9 空洞高の計測誤差

ある。空洞がなくφ33mm削孔した平均所要時間が14.2分であり、空洞を確認し連続してφ65mmで拡張削孔した平均所要時間が21.4分であった。かけ離れて多くの時間を費やした箇所は、湧水対策や同時施工していた内装板改良工事との調整による作業待ち時間が含まれている。

箇所当たり平均所要時間の結果から調査能力を算出した。

φ33mm 調査 約30箇所/日
φ33mm調査+φ65mm削孔 約20箇所/日

在来の調査方法であるコアドリルでは、標準の2パーティーで約17箇所/日程度の調査能力であるため、調査のみでは2倍、注入孔の削孔を連続実施してもPVMの能力が高いことが検証された。さらに3割におよんだ障害物干渉箇所の再削孔では、ブームのスライド移動のみで削孔可能であったため1箇所当たり8分と短時間で調査が実施された。

(4) 経済性

今回の実績をもとに、PVMシステムとコアドリルの調査費の比較結果を示す(図-11)。コアドリルによる1箇所当たりの調査費を1とした場合のPVM調査費の比率を縦軸に、PVMの調査能力(1日当たりの調査箇所数)を横軸にとっている。コアドリルの調査能力は標準(2台使用)の17箇所/日としている。この図よりPVMの調査能力が24箇所以上でコアドリルと同等以下となる。今回の調査能力からすると、空洞が無い場合はPVMが安価、空洞が有る場合はPVMが高価、障害物に干渉した場合はPVMが安価となる。しかし、空洞の分布状況や障害物の干渉箇所の割合により、単に1箇所当たりの単位比較では経済性を把握できない。今回の実績結果では、全体調査費用としては、PVMが安価になることがわかった。

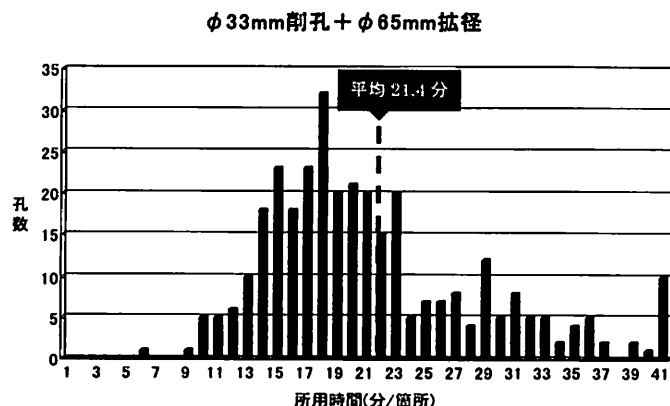
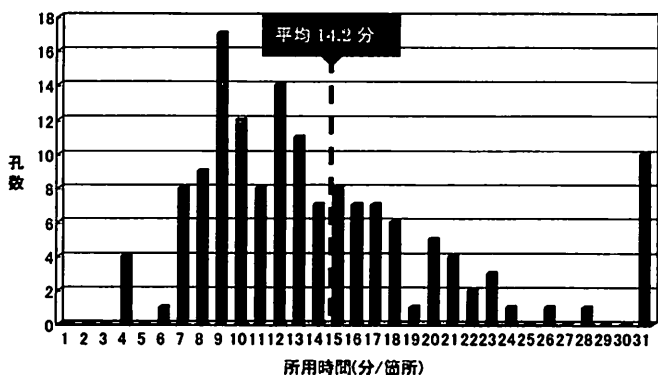


図-10 削孔時間実績

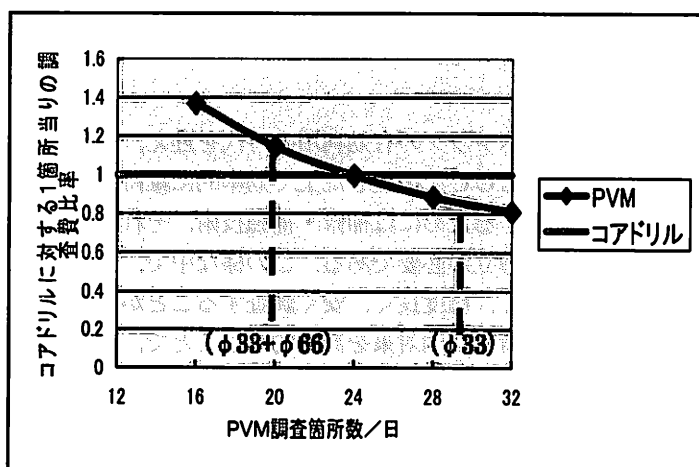


図-11 経済性比較

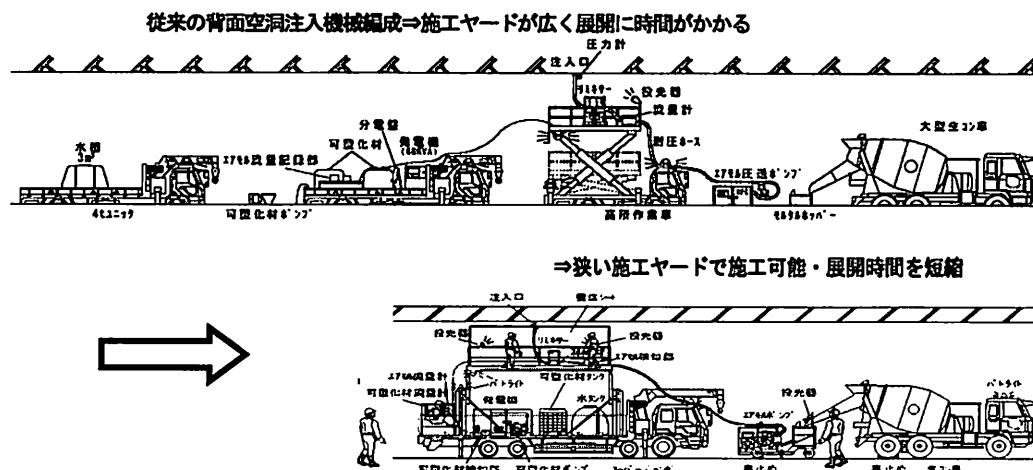


図-12 背面空洞注入工機械配置

(5) 背面空洞注入工

PVMシステムにより空洞調査が行われ、注入孔が削孔され注入管および取付器具を設置されたトンネルより順次、背面空洞注入工の施工を行った。PVMシステムでは調査削孔・拡張削孔・注入孔削孔の利用にも適用できる機能を有しているため、延長が1,000mを超えるトンネルでは、前年度に調査のみを行い空洞状況を十分に把握した上で次年度注入工事を発注する運用が可能であり、工事数量・費用管理に有効であった。注入材は湧水が存在し、施工規模が大規模であることから可塑状注入材を採用した。主に体積収縮が少なく局部的な大規模の空洞に適しているエアモルタルに可塑剤を加えた注入材を使用し、湧水が多量であった助川トンネル下り線では、近傍IC付近に仮設プラントを設置してポリマーセメント系の注入材を使用した。注入機械の工事規制への搬入・搬出時の展開や工事規制内での移動展開の時間を短縮すると共に施工性を向上するために公道走行可能なスーパージャンボに可塑状注入機械を搭載した独自注入システムを採用し、条件の制約が多い高速道路上の工事規制内での施工において安全性及び施工性が向上した（図-12）。

6. まとめ

社会資本ストックの有効利用の時代を迎え、社会資本ストックをLCCを把握した上で効率的に維持することや長寿命化するためには補修・補強技術、それに基づく調査技術の確立が必要である。この様な中で、PVMシステムは速く、精度良く、安く調査することができ、トンネル覆工背面空洞対策を計画的行うことで、重要な社会資本であるトンネルの長寿命化を図り、さらに災害を未然に防いで安全なトンネル空間を提供するための貢献ができると考える。これまでのPVMシステムを利用し

た工事において、従来調査方法であるコアドリルの調査能力の約1.5倍にあたる平均調査能力を達成することができた。調査結果から、高速度、高精度で調査が可能であることが検証され、経済性、現地における実用性、高所作業の低減による安全性向上についても確認できた。よってPVMシステムは、今後の新しい空洞調査手法として位置付けられると考えられる。今後の課題は、多くの時間を費やした湧水処理作業による作業時間ロスおよび3割におよんだ障害物干涉箇所の再削孔などに関する対策を開発・導入することによって、さらに能力向上による合理化が可能と考えられる。今後の展開としては、鋼製アーチ支保工や矢板が支障となって、覆工背面地山に空洞が生じていると予想されるトンネルがまだ数多く残っている。このため、覆工背面空洞に注入材を充填し、補強するための調査手法として、PVMシステムの更なる展開が期待される。今後は道路トンネルだけでなく鉄道トンネル、導水路トンネルなどへ展開していきたい。今後さらに現地での実績の積み重ねと技術開発を実施することで有効かつ高度な調査技術としてさらなる展開が期待される。最後に、今回の施工に際して指導を頂いた関係各位に対して心より御礼申し上げるとともに、本報告が今後の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 東日本高速道路㈱：矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領，2006年10月
- 2) 日本道路公団：トンネル覆工背面の空洞調査法(PVMシステム)マニュアル(案)，2004年7月
- 3) 大島，伊藤，城間，西村，若林：既設トンネルの覆工背面空洞調査法の開発について，トンネル工学研究論文報告集第14巻報告(46)，土木学会pp. 313-317，2004年11月