

既設トンネルの覆工背面空洞調査法の開発について

Development of the lining back void investigating method of an established tunnel

大嶋健二¹・伊藤哲男²・城間博通³・西村晋一⁴・若林成樹⁵

Kennji Ooshima, Tetsuo Ito, Hiromichi Shiroma, Shinichi Nishimura, Naruki Wakabayashi

^{1,2,3} 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部トンネル研究室(〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail:kenji.ooshima@jhnet.go.jp

⁴ 正会員 清水建設株式会社 土木事業本部 技術開発部 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)

⁵ 正会員 清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

We developed the technique of being able to investigate the void and situation on the back of concrete lining, being high-speed and highly precise. The void is judged by digging resistance when digging lining concrete of a tunnel at high speed. This report describes a technical outline, the principle of void detection, the actual result of investigation, and the application method.

Key Words: tunnel lining, maintenance management, void investigation, rotary-percussive drill

1. はじめに

矢板工法により建設されたトンネルでは、鋼製支保工や矢板が支障になり覆工と背面地山との間に空洞が残ることが多く、特にアーチ部では多くの空洞が生じる場合がある。トンネル覆工の耐荷力を高め、変状に対する覆工コンクリートの耐久性の向上を図るには、覆工背面に空洞のあるトンネルを対象に空洞を注入材等で充填することが最善であり、そのためには背面の空洞量・空洞分布を効率的に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、トンネルの補修優先度を、覆工背面の空洞の状態から判定することが必要となってくる。

一般に、既設トンネルの覆工背面空洞調査には電磁波などの物理探査手法が用いられることがあるが、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では、調査精度の低下が危惧されている。また、空洞注入を前提とした空洞量の把握を目的とする調査は、覆工コンクリートをコアドリルで削孔し、計測棒を挿入して計測する方法としている¹⁾。しかし、1箇所あたりの削孔に時間を要し、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、覆工コンクリートを高速削孔しながら、覆工厚や覆工背面の状況を高速かつ高精度で調査できる「既設トンネル覆工背面空洞調査システム(PVM)」の開発を

行った。PVMとはPercussive-drilled Void Measuringの略で、打撃と回転の併用による削孔で、削孔により得られる機械データから空洞を計測する方式を意味する。

本稿では、本システムの概要、空洞検知の原理、基礎実験および2件の調査工事の実績についてその結果を報告するとともに、今後のシステム運用について述べるものである。

2. システムの概要

本システムは、削孔時の各種機械データを一定のルールに従って判読することで、覆工厚や覆工背面の状況を精度よく判定するものである。システムの概要を図-1に示す。本システムは、8トントラックに、削孔装置、発電機、コンプレッサ、ダストコレクタ等を搭載したものである。今回開発したシステムは、岩盤削孔に用いる掘削技術に着目し、図-2に示すとおり、先端に直径33mmのビットを設けた「のみ」を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た。これにより、覆工を高速で削孔する事ができる。しかし、打撃方式による削孔で覆工への影響も一部懸念されるため、可能な限り打撃圧を抑えること(2MPa)、また削孔の速度向上も考慮してビット径は極力小さく(直径33mm)することで、覆工に与える

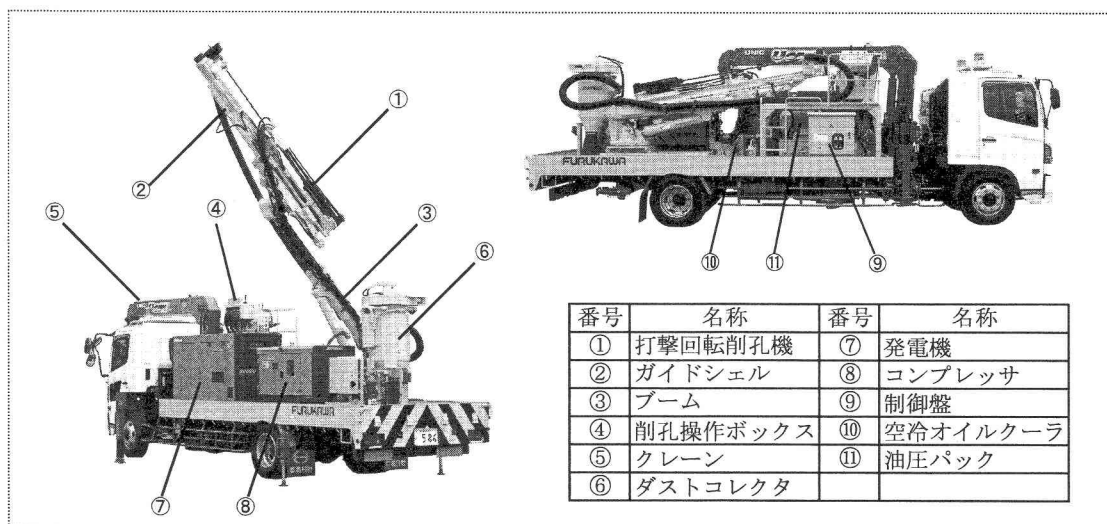


図-1 システムの概要

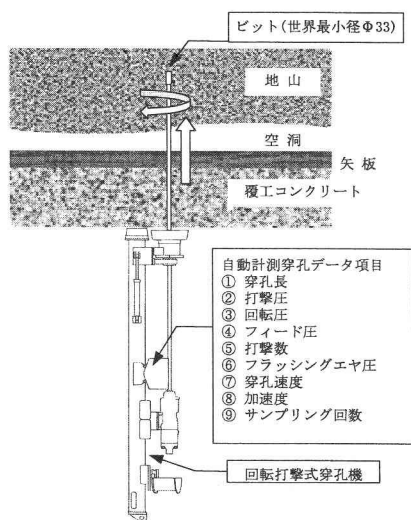


図-2 削孔方式

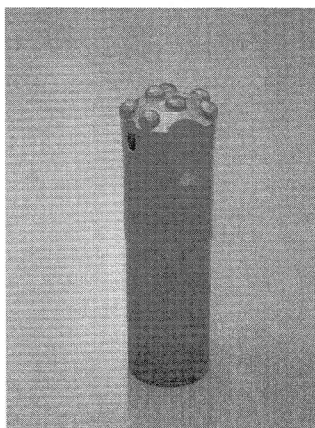


写真-1 直径 33mm ボタンビット

影響を最小限としている。写真-1 に直径 33mm のボタンビットを示す。

機械データは削孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧、打撃数、エアフラッシング圧等で、削孔中に 0.2 秒間隔で計測する。リアルタイムに計測された機械データは、制御装置へ自動的に送信、図化・解析され、覆工厚さや空洞厚さの判定を行なうものである。また、調査の結果、空洞が判明した場合、削孔した孔を注入用に拡張（直径 65mm）する機能も兼ね備えたものである。

3. 基礎実験

(1) 供試体による検証

覆工コンクリートの背面空洞や矢板等を検知・判別できるか確認するために、基礎実験としてコンクリート、矢板、花崗岩の各材料と隙間を組み合わせた供試体を作成し削孔実験を行った²⁾。各材料を削孔するときの削孔速度、回転圧などの機械データを記録・分析し、材料の違いによる削孔特性の変化および空洞通過時の特性の把握を試みた。

図-3 は削孔速度に着目した計測データの一例である。削孔速度はコンクリート、矢板、岩の削孔時は値が小さく、空洞部では明確に大きい値を示している。また、削孔速度が急激に増加を始め、同時に回転圧が急減するポイントを空洞の始点、その逆（削孔速度が急減、回転圧が急増）のポイントを空洞の終点と判断する。表-1 に実測値と実寸法の判読値を示す。判読値は供試体の実寸法とよく一致していることから、空洞部は削孔速度を把握することで精度

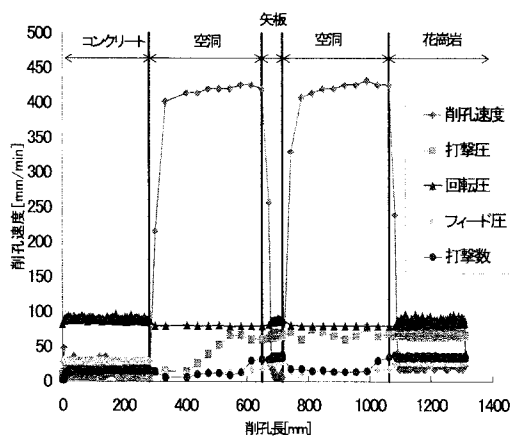


図-3 基礎実験の計測データの例

表-1 実測値と判読値の比較

材料	材料の厚さ (mm)			コンクリート上面から各材料までの深さ (mm)		
	実測値	判読値	差	実測値	判読値	差
コンクリート	300	283	-17	—	—	—
空洞	350	357	7	300	283	-17
矢板	50	66	16	650	640	-10
空洞	350	347	-3	700	706	6
花崗岩	—	—	—	1050	1053	3

表-2 機械データの傾向と特性

調査対象	削孔速度	回転圧	エプソン圧
覆工コンクリート	非常に小さい値で安定	一定幅で安定	一定値で安定
空洞	急激に上昇	急激に低下し、安定	変化なし
緩い地山	緩やかに上昇	緩やかに低下	変化なし
木製矢板	非常に小さい。覆工と同等	覆工より小さい値で安定	上昇
裏込め	覆工に比べやや増し安定	木製矢板より小さい値で安定	上昇
地山(岩)	覆工と同傾向の計測データが得られるが、岩石強度により程度は異なる。		

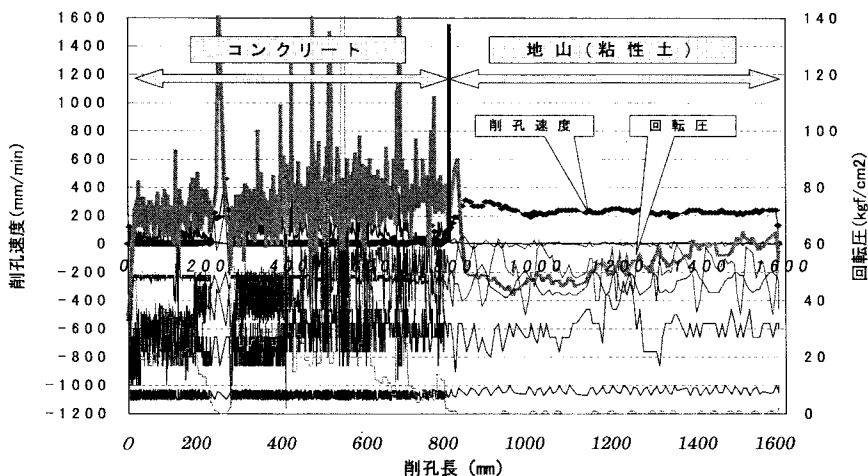


図-4 基礎実験の計測データの例

よく判読できることがわかった。

(2) 実トンネルによる検証

基礎実験の結果を踏まえて、実トンネルの覆工を使い確認実験を実施した。計 23 箇所を調査削孔し、本システムによる調査結果と孔内を検尺した実測値とを比較して調査精度の検証を行った。図-4 は、実トンネルにおける調査削孔データの一例である。この例では背面に空洞はなく、覆工に地山が接している。削孔時の機械データのうち、削孔速度と回転圧の 2 項目が背面の物性の変化に敏感に反応していることがわかる。このデータでは、覆工表面から 800mm までがコンクリート、以降 1600mm までの削孔速度の増加と回転圧の急激な低下が発生する時の削孔長が

地山と判読できる。この判読は孔内の検尺およびボアホールカメラによる目視確認の結果と一致していた。これより、空洞部に限らず、背面の状況は削孔速度および回転圧の変化を把握することで精度よく判読できることが判明した。

(3) 機械データの傾向と特性

PVM システムの目的は空洞の存在を正確に把握することが主たる目的である。しかし、覆工の背面には地山の他に、空洞、崩落して緩く堆積した地山、木製矢板、裏込め材などの存在が考えられる。表-2 に、供試体による基礎実験や実トンネルによる検証結果から得られた調査対象物と機械データの傾向・特性を示す。表-2 に示すとおり、覆工コンク

リート、空洞、緩い地山等の調査対象物は、機械データのうち削孔速度、回転圧およびエアフラッシング圧の3項目を分析することにより可能となった。

4. 調査工事の実績

(1) 調査工事の概要

本システムは、札幌自動車道の若竹トンネル（上下線：851m）と朝里トンネル（上下線：1535m）における調査工事（平成15年9月）、ならびに常磐自動車道の助川トンネル（上り：1811m）における調査工事（平成15年12月）の2件で採用した。

各トンネルにおいて、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、全線にわたり10m間隔で天端と両肩部の空洞調査を実施した。空洞が認められた場合、将来的にこの空洞に対して充填注入が必要となり、直径65mmの注入孔を通常5m間隔で新たに設けている。そこで、本調査工事で空洞が認められた場合には、10m間隔で調査した直径33mmの孔を有効利用して、直径65mmにその場で直ちに拡張したのち注入管の取付けを行った。

(2) 調査結果

調査結果の内訳を図-5に示す。2件の調査工事で調査削孔を行ったうちの約7割で空洞が存在した。また、削孔途中で鋼アーチ支保工等が障害になり削孔不能となった割合は、削孔対象箇所数に対して約4割となった。

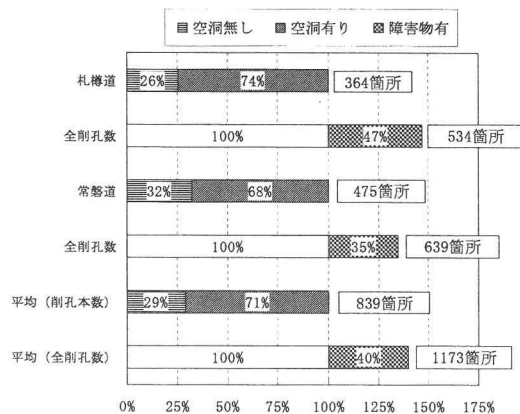


図-5 調査結果の内訳

(3) 調査時間と調査能力

1箇所あたりの所要時間は、直径33mmによる調査削孔（空洞が無かった場合）が平均で15分、空洞が有り削孔した孔を注入用に拡張（直径65mm）した場合が平均で23分であった。調査能力の比較を

表-3に示す。調査能力は、コアドリルに対してPVMのほうが高い結果となった。

表-3 調査能力の比較

コアドリル【箇所/日(7hr)】	PVM【箇所/日(7hr)】	
	直径33mm	直径33mm+65mm
0.77h/m【2セット】	15分/箇所	23分/箇所
↓ 9.1m/日(7hr)		
↓ 16.5本/日【平均覆工厚さ:0.55m】		
17	28	18

(4) 施工誤差

今回の2件の実績においては、覆工背面の空洞厚さおよび覆工の厚さの最大誤差が15mmという精度で判定できることを実証した。

5. SOM(自己組織化マップ)による判定法³⁾

本システムでは、これまでに実施した基礎実験および実工事の多種類の機械データを複合的に判読し、客観的かつ精度よく削孔対象を判定するための手法として人工知能の一種であるSOMによる分類・予測手法の適用性も同時に検討しており⁴⁾、今後、更にデータを蓄積することでSOMによる分類・予測手法の有効性が高まると思われる。

6. システムの運用について

本システムは空洞を調査することを目的とした技術であるが、覆工を削孔する手法であるため、その孔を将来の注入用に利用することも可能である。その場合、調査孔の直径33mmに対し、注入管用の直径は通常65mmであるため、調査孔を直径65mmに拡張削孔を行うことになる。また、あらかじめ覆工背面の空洞が既知の場合、あるいは天端部の調査の結果、天端部に空洞が判明し、空洞の有無に係らず拡張することが決まっている場合には、写真-2に示す親子ビットを使用して一度に直径65mmを削孔することができる。PVMシステム

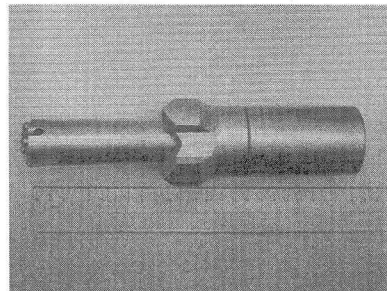
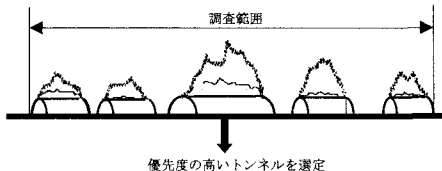
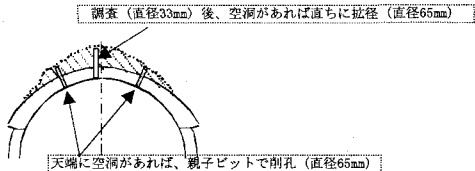


写真-2 親子ビット

表-4 PVMシステムの運用方法

1 注入優先度の高いトンネルの選定等 【PVMを「調査専用機」として適用】	複数のトンネルで優先候補トンネルを選定あるいは1本のトンネルで優先箇所を選定 ○複数あるいは1本のトンネルの天端のみ調査（直径33mm）  優先度の高いトンネルを選定
2 特定のトンネル（空洞未知）を調査し注入 【PVMを「調査、削孔兼用機」として適用】	○天端のみ調査（直径33mm）後、空洞があれば直ちに拡径（直径65mm） ○天端に空洞があれば、両肩部は親子ビットで削孔（直径65mm）  調査（直径33mm）後、空洞があれば直ちに拡径（直径65mm） 天端に空洞があれば、親子ビットで削孔（直径65mm）
3 過去の空洞調査から空洞の存在が判明しており、注入を前提とする場合 【PVMを「削孔機」として適用】	○天端と両肩部を親子ビットで調査削孔（直径65mm） ○天端の調査孔がφ33mmの場合は拡径（直径65mm）

ではこうした利用法にも適応できる機能を有しているため、調査のみを行う場合や調査後直ちに注入用の拡径を行う場合など様々な運用方法がある。

従って、トンネルの調査種別、調査規模（トンネル本数や削孔箇所数）や調査期間等の条件を考慮して適用の判断を行うこととなるが、現時点においては表-4 に示す3 ケースについて運用が可能であると考えられる。

7. おわりに

今回の基礎実験および実工事により、空洞や地山の判読に有用な機械データとしては、削孔速度・回転圧を把握することが重要であることがわかった。しかし、判定にはヒューマンエラーの可能性もあることから、今後はコンピュータによる自動判定システムの開発、あるいは5章で述べた人工知能による予測手法の開発に力をいれる所存である。また、本システムでは覆工コンクリートの劣化状況も検知できることから、将来は覆工全体の健全度評価への適用も視野に考えていきたい。社会資本ストックを

効率的に維持することやライフサイクルを延命することが急務である中、今回紹介したトンネル覆工背面空洞調査システムは、アセットマネジメントの見地からも有効で高度な調査技術として、社会的に貢献すると考える。

最後に、今回の試験施工に際してご協力を頂いた関係各位に対しまして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団：矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工指針，2002. 10
- 2) 大嶋，西村，河野，阿部：既設トンネルの覆工背面空洞調査法（PVM システム）の開発（その1），土木学会第 58 回年次学術講演会，2003. 9
- 3) T. コホリ著，徳高・岸田・藤村訳：自己組織化マップ，シュブリンガー・フェアラーク東京，1996.
- 4) 城間，大嶋，本多，若林，安部：既設トンネルの覆工背面空洞調査法（PVM システム）の開発（その2）-SOM による判定法-，土木学会第 58 回年次学術講演会，2003. 9