

可塑性材料によるトンネル覆工背面空洞の 長距離圧送充填工法の開発

Development of Long Pumping Plastic Material Filling Method into Cavities in the Rear of Tunnel Lining

山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

戸村 豪治 GOUJI TOMURA

中部支店 柳田 利行 TOSHIYUKI YANAGIDA

小断面トンネル、あるいは極小断面トンネルの維持補修を目的として、可塑性材料によるトンネル覆工背面の長距離圧送充填工法を開発した。当該充填工法は、3km程度までの長距離圧送によっても材料分離を生じず、かつ湧水下でも分離・未固結を生じない可塑性材料の開発によって可能となった。本稿では、当該充填工法の概要を示すとともに、坑口近傍に混練機や圧送ポンプを設置できない状況下で、急勾配配管を介して空洞充填を実施した事例を示す。

キーワード：可塑性材料充填工法、長距離圧送、トンネル補修

The author have developed plastic material filling method into cavities in the rear of tunnel lining pumping through a long pipe line in order to maintain and/or rehabilitate a small dimensioning tunnel. This filling method is characterized by the two following material properties: (1) Plastic material can be pumped almost 3km without material separation. (2) Even under spring water condition solidification of plastic material maintains. In this paper, the outline of this filling method is described, and the special construction case of pumping material though the steep gradient pipe line having no space for mixers and pumps that is usually settled near the tunnel portal is also shown.

Key Words: Plastic Material Filling Method, Long Distance Pumping, Tunnel Rehabilitation

1. はじめに

NATM以前の、いわゆる在来工法で建設されたトンネルの長期耐久性確保を目的とした維持・補修では、その覆工が本来有する耐荷力を十全に発現させることが最も重要となる。すなわち、覆工に生じたひび割れ等の構造弱部に対しては、何らかの補修工により、その耐荷機能を回復させるとともに、覆工全体が有効に機能するよう、地山荷重を均等に覆工に作用させなければならない。

一般に前者に対してはロックボルト補強工が、また後者に対しては覆工背面空洞の充填工が有効とされ¹⁾、交通トンネル等の大断面トンネルにおいてはこれらの方法による維持・補修が一般に行われている。しかしながら、水路トンネルをはじめとする小断面・極小断面トン

ネルにおいては、一般の施工機械が使用できないため、これまで対処療法的な補修しか行われてこなかったのが現状である。筆者らは、すでに小断面・極小断面トンネルに特化したロックボルト補修工法を開発し、実務に供してきた²⁾。その後、覆工背面空洞充填工に関しても開発を進め、可塑性材料を用いた長距離圧送充填工法 MOLE-Groutを開発した。本報文は、MOLE-Grout工法の概要を示すとともに、坑口近傍に混練り・圧送機器を設置できない状況下で、急勾配配管を介して空洞充填を実施した事例を示すものである。

2. 可塑性材料による長距離圧送充填工法の概要

(1) 充填材 MGM の選定とその特性

当該圧送充填工法が対象とする小断面・極小断面トン

ネルでは、その空間的な制約条件から、充填工に供する混練機やポンプを坑内に搬入することができない。また、可能としても、これを運搬するために内燃機関を使用することはできない。したがって、その充填方式は坑外からの材料圧送方式によらざるを得ない。

ところが、小断面・極小断面トンネルの多くは、その断面に比して距離が長大であることが一般的で、5kmを超えるトンネルも存在する。このため、3km程度の長距離圧送が可能な圧送充填工法の開発が求められる。すなわち、両坑口を利用すれば、5kmを超える水路トンネルでも全線を充填できる工法が望ましい。

ところが、圧送距離の増大に伴って、配管内の充填材料に作用する圧送圧力や配管抵抗が急増するため、充填材料の分離が問題となり、充填材料の各種性能劣化や未固結が生じ易くなる。したがって、充填材料には長距離が圧送可能なワーカビリティと、性能劣化を生じさせない分離抵抗性が要求されることとなる。

このように背反する要求性能を同時に満たすため、充填材として可塑性材料を採用することとした。ここで、可塑性材料とは、作用する力によって柔軟に変形し、除荷後もその変形が回復しない材料を意味する。

各種可塑性材料を比較検討・検証して選定した材料をMGM (MOLE-Grout Material) と名づけた。MGM は、上記要求性能以外に、以下のような充填材に適する性質を持つ。

- ① 2液混合後、瞬時にゲル化するため、水中分離抵抗性が高く、湧水下でも分離せず確実に固化する。
- ② 可塑性であるため、岩盤の割れ目やコンクリートのひび割れからのリークがある程度で収束する。
- ③ 充填直前に、2液混合することで、材料分離や品質

低下を生じず3km程度まで長距離を圧送することが可能となる。

一般に、湧水発生箇所のトンネル覆工背面には大規模な空洞が形成されやすいため、上記の①は特に重要となる。また、上記②と同じ機構で、背面空洞以外の岩盤割れ目などに必要以上に充填材が逸走することを防止する効果も期待される。

表-1に MOLE-Grout の構成材料を、表-2にトンネル覆工背面空洞充填工に関する各種基準から抽出した充填材料の要求性能と MGM との性能比較を示す。また、写真-1,2には検証時に実施した流動性試験と水中分離抵抗試験状況をそれぞれ示す。

表-1 MOLE-Grout の構成材料表

MOLE-Grout 構成材		成分
A 材	固化材	普通ポルトランドセメント
	MG-A I	可塑促進剤
	混練り水	水道水
B 材	MG-B I	可塑化材
	MG-B II	粘度調整材
	混練り水	水道水

表-2に示すように、MGM は覆工背面空洞充填材料に要求される諸元をすべて満たし、かつ長距離圧送に対する分離抵抗性も高く、小断面・極小断面トンネルの充填材として好適であるものと判断した。

(2) MOLE-Grout工法の充填システムと充填工法

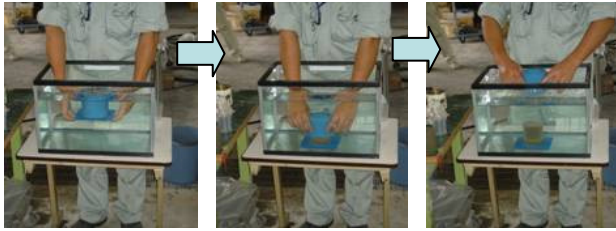
図-1に、MOLE-Grout 工法の充填システム概念図を、表-3にシステムを構成する機器の仕様をそれぞれ示す。

表-2 覆工背面充填材の要求基準と MGM の性能比較

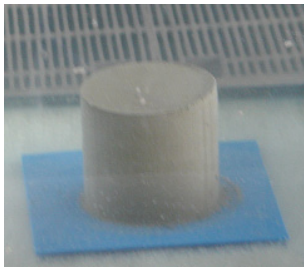
性能項目	覆工背面充填材の要求性能	MGM の基本性能
充填性 (流動性)	覆工コンクリートクラックからの漏出や地山への逸走が少なく、充填性に優れていること	フロー値 (JHS 313) 100 ± 20mm
圧縮強度	充填材により作用土圧を均等に伝達する必要があるため、1.5N/mm ² 以上の圧縮強度が求められる。	圧縮強度 1.5N/mm ² 以上
比重	充填箇所に湧水のあることが考えられるため、比重が 1.0 以上である必要がある。また、既設覆工コンクリートへの影響を考慮して軽量であることが求められる。	比重 1.34 ± 0.1
非漏出性	注入材がトンネル内に漏出するおそれがあるため、覆工コンクリートからの漏出や地山への逸走が少ないこと	「矢板工法トンネルの背面空洞注入工 - 設計施工指針 4.8 試験法 (中日本道路株式会社)」に示される試験性能をいずれも満足する。
水中分離抵抗性	充填箇所に湧水があることが考えられるため、水に希釈されにくいことが求められる	
非収縮性	覆工と背面の地山を密着させる必要があるため、ブリージングが少なく、注入後の体積変化が少ないこと	
耐環境性	地下水と接触した場合に、耐環境性が求められる。	無機材料とする。



写真-1 静止フロー試験状況 (D=98mm)



(a) 供試体水中投入状況



(b) 水中内24時間放置後の供試体
写真-2 水中分離抵抗試験状況

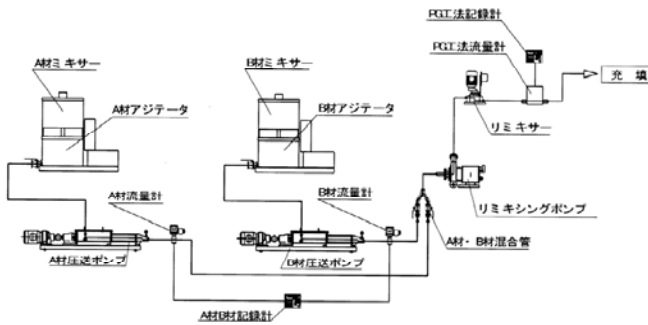


図-1 MOLE-Grout 工法の充填システム

表-3 MOLE-Grout 工法のシステム構成機器

機械名	数量	Remarks
ミキサー	2	縦型 2 連式, 攪拌容量 200 ℓ, 200V / 3.7kW
注入ポンプ	2	スネークポンプ, 200V / 3.7kW
流量計 A	2	100V A/B 材用
流量計 B	1	100V 混合材用
リミキシングポンプ	1	200V / 3.7kW
リミキサー	1	200V / 2.2kW

表-1に示すように, MGM は二材で構成されるから,

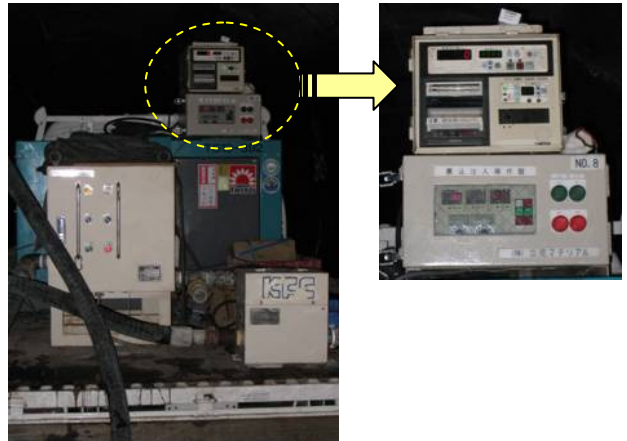
A材, B材を個別に混練り後, 計量しつつ注入箇所近傍まで圧送し, Y字管で二材を混合後, リミキシングをかけてから注入する手順を採用した。写真-3にミキサー, およびポンプの設置状況を, また写真-4に坑内の合流部 Y字管, および充填制御部を示す。



写真-3 ミキサー, およびポンプ設置状況



(a) 合流部 Y字管



(b) 充填制御部

写真-4 充填箇所近傍の充填機器設置状況

写真-4(b)の事例では, 坑内に原動機を搬入したため, 2tonトラックの荷台にリミキシングポンプ, リミキサー, 流量計, 充填制御等を積載した。しかし, 極小断面トンネルでは, 別途坑内配線により電源供給し, これらの機器は手押し車等で搬入・運搬すればよい。

充填作業手順を図-2に示す。図に示すように, MOLE-Grout 工法では注入口設置工と配管工は並行して実施することを前提としている。これは, 水路トンネルにおい

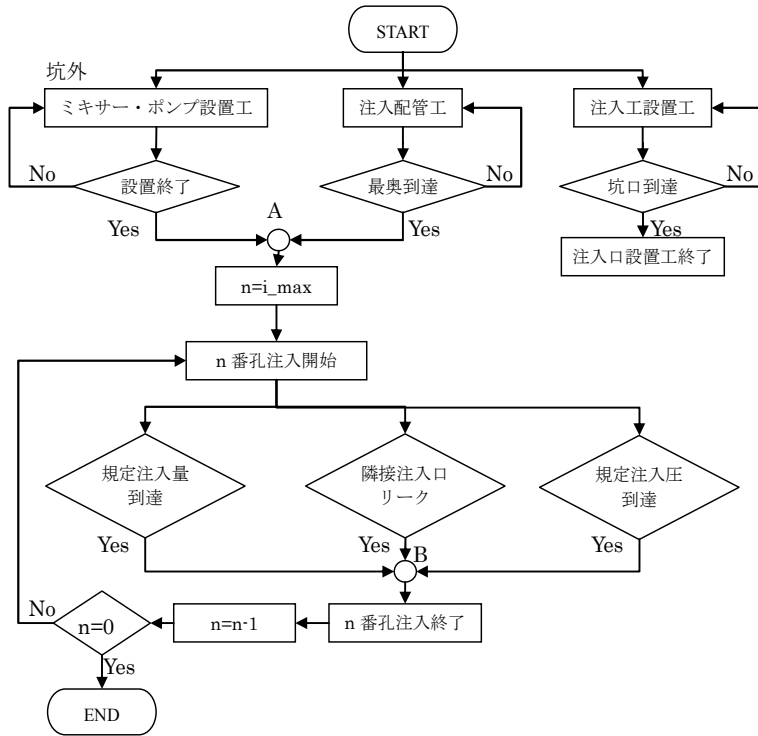


図-2 MOLE-Grout 工法作業手順

で許される短い断水期間中に充填作業を終了することを目的としたものである。このとき、注入工設置工は最先端の注入箇所から坑口に向かって、配管設置工は坑口から奥へ向かって施工することで、狭小な坑内での作業の交錯を回避するものとした。



(a) 注入口削孔作業状況



(b) 注入口設置状況

写真-5 注入口設置状況

注入口は、トンネル軸方向 5m ごとに 1 箇所設置する

ものとする。その設置箇所は、トンネル断面積 10m² 未満では天端部に、それ以上のトンネルでは左右肩部に千鳥で設けるものとするが、事前調査により側壁部などに大規模な空洞が確認されている箇所ではこの限りではない。

また、注入口は削孔径 φ 65mm で、写真-5(a)のように電動コアマシンで削孔し、φ 50mm のソケット付き注入管を写真-5(b)のように挿入・固定する。

一方、配管は内部を特殊コーティングした専用の電縫管 (3B,L=6m) を 3 系統配管する。このうち 2 系統は MGM の A/B 材供給に供し、他の 1 系統 (C 系統と呼ぶ) は充填作業終了時に配管内の残材処理に供する。すなわち、注入管先端部にある弁 (写真-6) を切り替えることにより、充填材は C 系統配管内へと流入し、残材はポンプ設置箇所まで運ばれる。これは、残材処理の効率化を図ったものであり、残材の坑内運搬は不要となる。



写真-6 注入管先端部のリターン用分岐



写真-7 充填作業状況

写真-7に充填作業状況を示す。充填工は、最先端の注入孔 (図-2では、n=i_max) 箇所から坑口に向かって実施することを基本とする。この場合、注入工設置工が終了していても、充填工を開始することが可能となる。図-2中の結節点 A は、坑外の混練機・ポンプ設置工

と配管工が終了すれば、充填工を開始できることを意味するものであり、作業可能期間が限定される水路トンネル等での効率を図ったものである。この方式では、各注入口の注入が終了すれば、逐次配管を撤去することができるため、注入後の坑内後片付けも大幅に短縮される。また、最終の管内残材量も大きく低減することができるなどの利点もある。

各注入孔の充填管理は、①注入圧、②注入量、③隣接注入孔からのリークの3項目により実施する。図-2中の結節点Bはいずれかの項目が規定に達した時点で、当該注入孔の充填作業を終了することを意味する。このとき、規定注入量は事前調査、あるいは注入口削孔時の空洞幅測定結果から決定し、注入圧は覆工へ過大な負荷を与えないため0.2MPaを標準の規定注入圧に設定している。

以上の要領で、各注入孔を逐次充填し、坑口に最も近い充填孔(図-2ではn=1)の注入が終了後、充填工は終了する。以降、配管・配線撤去、坑内清掃、およびそれらの確認後、トンネルの開放、あるいは通水が可能となる。

3. 急勾配配管を介した注入事例

水路を中心とする小断面・極小断面トンネルでは、坑口近傍に混練機やポンプを設置するヤードを確保できない作業条件がしばしば現れる。このため、坑外にも長距離配管が必要となるが、水路トンネル等の坑口は急峻な地形に設置されることが多く、配管経路に急勾配を介する可能性が高い。このとき、上り勾配ではポンプの圧送能力が、また下り勾配では充填材の閉塞が問題となる。特に、充填材の施工可能性を支配する深刻な問題となる。

の関係から、下り急勾配配管を介して充填作業を行った。

図-3にその配管平面図を、写真-8,9にその配管状況を示す。図に示すように、水路から約25m上部にミキサーやポンプ等の混練りプラントを設置し、約30°の下り勾配で法面に配管する(図-3①、写真-8)。その後、斜面に沿って約250m水平配管(図-3②、写真-9(a))し、開水路部へ接続するため鉛直に5mの配管(図-3③)後、さらに開水路部を120m配管(図-3④、写真-9(b))して坑内へと進入する。なお、坑内充填区間長は180mである。



写真-8 混練りプラントおよび法面部配管状況



(a) 水平配管部 (b) 開水路配管部

写真-9 水平および開水路内配管状況

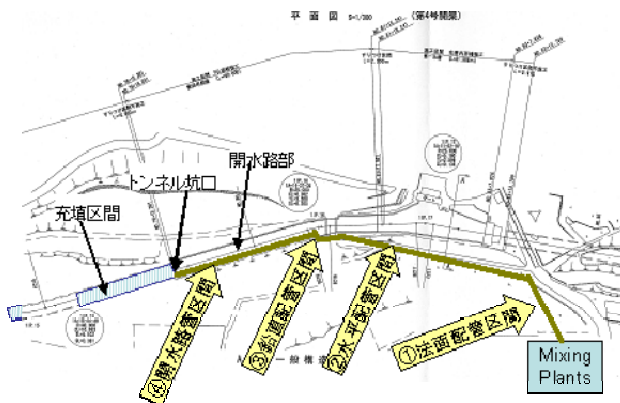


図-3 下り急勾配を介した坑外配管経路

当該事例は、大正時代に建設された発電所水路トンネルの覆工背面空洞充填において、用地、および運搬経路

このように、複雑な配管系で充填作業を行ったが、総配管距離約600mで充填作業中、閉塞等の不具合は一切生じず、通常どおりの作業効率で充填作業を実施することができた。

なお、対象トンネルは大正年間に建設されたこともあり、その覆工は非常に多孔質で、各孔の注入開始とともに、地下水が注入進行方向に向かって、覆工壁面から、逐次、排出され、やがて隣接注入孔からも地下水の排出が確認された。これは、充填材が覆工背面に滞留していた地下水を排除しつつ、充填されているものであり、可塑性材料の良好な充填性を証明する事象であると考え

る。

また、比較的大きな覆工ひび割れ部や貫通孔からは、**写真-10**のように充填材の漏出が見られたが、漏出の継続は長くても4分程度であり、コーキング等の処理が必要になった漏出箇所は確認されなかった。これも可塑性材料の充填材としての適性を示す事象であると考える。



写真-10 貫通割れ目からの漏出状況

4. おわりに

小断面トンネル、あるいは極小断面トンネルの維持補修を目的として、可塑性材料によるトンネル覆工背面の長距離圧送充填工法を開発した。これまでの施工実績では、工法の成立性に疑問が生じる不具合は確認されておらず、交通トンネルなどの大断面トンネルと同等の施工性と充填品質が確保されているものと判断する。

しかしながら、小断面・極小断面トンネルにおける施工条件は種々多様なものであり、配管工を含む準備工・付帯工の改良・開発を進め、より広範囲な施工条件に対して適用可能な工法の開発を継続する方針である。

謝辞：当該工法の開発に当たり、全面的なご支援・ご指導を賜りました羽場徹様、阿波宏司様をはじめとする株式会社ケー・エフ・シーの皆様へ深甚の謝意を表し、本小論の結びといたします。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，丸善，1993
- 2) 山地宏志，黒川幸彦，長野 祐司，中野陽一：極小断面トンネル補修のためのロックボルト補強設計と施工，三井住友建設技術研究所報告，Vol.6,pp.75-80,2008.