

小断面水路トンネルにおけるプレキャスト補修部材の 急速運搬・組立工法

モール・シールドビルダー工法施工の実際と課題

山 地 宏 志・中 森 純一郎・野 澤 是 幸

補修期間が限定される水路トンネルの補修にはプレキャスト部材を利用し、坑内作業時間を極小化することが望ましい。しかし、水路トンネルの大半を占める内空断面 10 m^2 未満の小断面トンネルでは、プレキャスト部材の運搬・組立てに供する大型機器の搬入組み立てが困難なため、ほとんどこれが実施されることはなかった。筆者らは、現場での小さな工夫を集め、体系化・システム化することで、小断面水路トンネルにおいてプレキャスト部材の急速運搬・組立てを可能とする工法を開発した。この工法開発により、内空断面 9.7 m^2 の水路トンネルにおける $40\text{-}50\text{ m}$ 区間のプレキャスト部材による内面補強工を7日以内に完了することが可能になった。

キーワード：小断面トンネル補修，プレキャスト部材，モール・シールドビルダー工法，着脱式車輪

1. はじめに

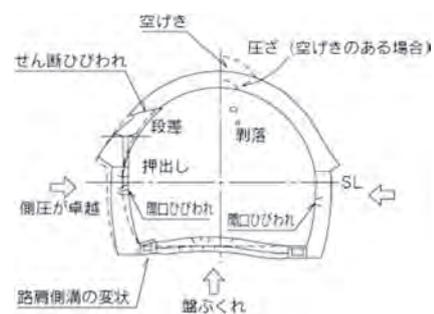
発電導水路トンネル，工業用水トンネル，あるいは農業用水トンネルなどの産業基盤を支えるトンネルの多くは内空断面 10 m^2 未満の小断面トンネル，あるいは 3 m^2 未満の極小トンネルであることが一般的である。また，その多くが老朽化の時期に差し掛かり，適切な維持・補修対策を望まれていることは言を俟たない。

トンネルの劣化形態は，図-1 (a)¹⁾ のように種々の形態が報告されているが，その構造的な補修・補強工法は，現在，図-1 (b)¹⁾ に示す覆工背面空洞充填工，ロックボルト補強工，あるいは内面補強工が最も効果的とされ，劣化形態に応じて適切な補修・補強工を選択することが重要とされる。ところが，これらの補強工を小断面トンネル内で施工することは著しく困難である。その理由は大きく以下の3つに大別することができるであろう。

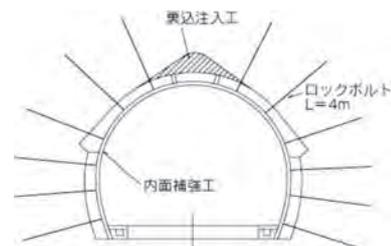
- i) 内空断面が狭小なため，坑内に大型機械を搬入できない。
- ii) トンネル坑内には，補修工の施工に必要となる動力源，照明，水，空気等を供給するユーティリティが整備されておらず，限られた断水・落水期間のうちこれを整備し，撤去しなければならない。
- iii) 小断面でありながら，長大トンネルであることが多いため，一般に換気状況が劣悪で，坑内での内燃機関や有機溶剤を使用できない。

このような，小断面トンネル特有の施工条件下で，

効率的にその補修・補強工を実施するため，われわれは可塑性充填材を $L = 5\text{ km}$ 以上圧送可能な工法（モール・グラウト工法^{2), 3)}）を開発し，大型の混練りプラントを坑内に搬入することなく，長大な小断面トンネルの効率的な覆工背面空洞充填工を可能とした。また，空気配管だけですべての削孔作業を可能とする小型軽量の削孔システムを開発し，狭小な極小断面トンネルの施工空間においても効率的なロックボルト打設を可能とする工法を確立した（モールボルティング工法^{2), 4)}）。



(a) 外力によるトンネル変状の種類



(b) 外力に対する補修・補強工

図-1 外力によるトンネル変状とその対策¹⁾

内面補強工に対しても、この小断面トンネル特有の施工上の制約が課せられる。内面補強工の最も一般的な覆工コンクリート厚の現場増し打ち施工を考えると、限定された断水・落水期間内に、配筋、型枠施工、コンクリート打設、脱型、養生を行わねばならない。併せて、狭隘な坑内を大量の鉄筋、型枠材、コンクリート等を運搬する手段、コンクリートポンプ稼働のための動力源の確保、または代替の打設手段等、検討すべき課題は山積する。

特に、民間が保有する発電導水路や工業用水路等では、断水・落水期間の問題は重要で、工場等の操業を一斉に停止させる7～10日程度のメンテナンス期間内に予定区間の補修・補強を完了させなければ、生産再開が遅延し、重大な経済的な損失を発生させる。したがって、このような水路トンネルの内面補強工には、鋼板やプレキャスト部材による内面補強工が採用されることが多いが、鋼板は外水圧のかかる場合は使用に適さない場合もある。

そこで、本稿はプレキャスト部材による小断面トンネル補修工の合理化・効率化に向けた改良や工夫を体系化した工法（モール・シールドビルダー工法）の施工の実態を示すとともに、改良に向けた課題を整理し、報告する。

2. プレキャスト部材による小断面トンネル内面補強工施工の問題点とその対策

(1) プレキャスト部材坑内運搬上の問題点と対策

プレキャスト部材によるトンネル内面補強工は、専用の運搬・組立て機械により施工することが一般的である。しかしながら、その動力は内燃機関に依存するため、換気状況の劣悪な小断面水路トンネルでは、良好な作業環境を維持することが著しく困難となる。

また、専用機械の坑内への搬入・搬出も難しい。写真一は水路トンネルへのプレキャスト部材の搬入状況を示すものであるが、この写真から分かるように、一般に水路トンネルへのアクセスは確保されておらず、自走による坑内への搬入はほとんどの場合行えない。したがって、揚重機などによる搬入が必要となるが、水路トンネル坑口近傍には、写真一のように水門などの水路構造物が存在することが多く、搬入できる資機材の寸法は限定される。

このため、専用機械を分解し、坑内で組み立てる案なども出されたが、揚重機が使えない坑内で、人力だけで専用機を組み立てることは著しく困難であること、および付帯作業である搬入・組み立てに1日、分

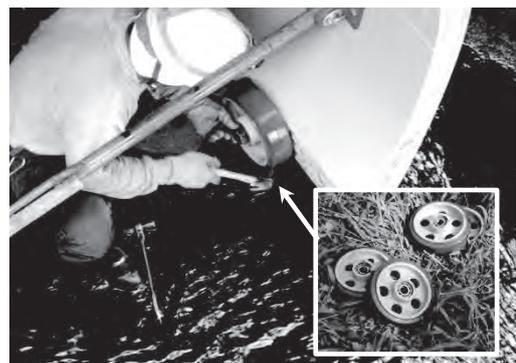


写真一 プレキャスト部材坑内搬入状況

解・搬出に1日を要し、補修作業期間そのものを大きく制限すること等から採用には至らなかった。以上は、われわれが当該工法の施工計画を立案した際に行った議論の一部であり、交通トンネルなどでは完成した工法であっても、小断面水路トンネルの補修にはそのまま適用できないことを理解いただくために、あえて紹介した。

以上のような議論を経て、最終的に写真二に示すように、予めプレキャスト部材に車輪を装着できるねじ穴を設け、坑内搬入後にこれを装着し、小型牽引車両でけん引する方式を考案した。このとき、簡便化のため、荷台にプレキャスト部材を搭載し、荷台ごと牽引する方式も検討したが、プレキャスト部材外面と既設覆工内面の余裕がほとんどないため、荷台搭載によるわずかな高さの上昇は、運搬時に部材と既設覆工が接触し、破損する可能性があるかと判断され、採用には至らなかった。

当該工法において、車輪の材質は重要である。大正年間、あるいは昭和初期に運開した水路トンネルは、洗掘による底盤コンクリートの剥離がはなはだしく、これにより形成された凹凸に適した車輪を選定しなければ、円滑で所定の運搬能率を確保した坑内運搬は実現できない。このため、予め数種の候補材を選定し、対象となる補修区間に至る経路の凹凸状況に適した車



写真二 着脱式車輪とその装着状況

輪を選定できるよう準備した。

また、大正年間頃に運開した水路トンネルは、図面通りの断面が確保されていない区間もあるため、トンネル断面図にだけ頼り坑内運搬を計画した場合、実施時にプレキャスト部材が通過できない箇所が存在する可能性がある。このため、補修工実施前に、坑口から補修区間までのプレキャスト部材通過を予め確認する必要もある。

これらの車輪材質評価と部材通過確認のため、写真—3のようにプレキャスト部材外周寸法に合わせたゲージ模型を作成し、これに部材自重に相当するウェイトを載荷した坑内通過実験を、年度末の休暇期間中等に実施することを、われわれは標準の事前確認としている。



写真—3 ゲージ通行試験状況

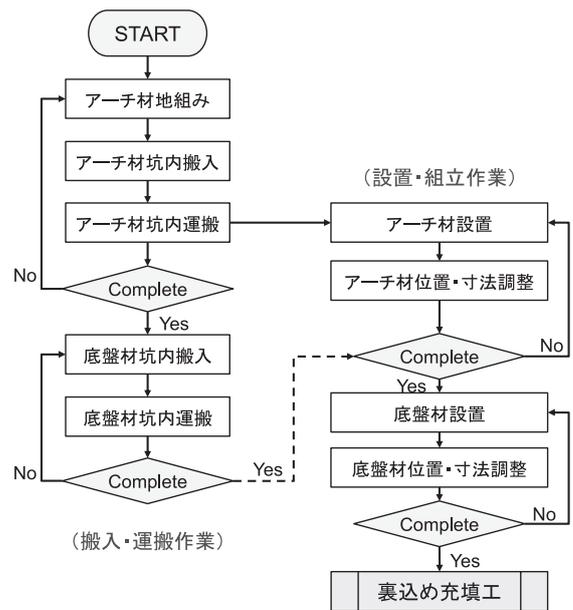
(2) プレキャスト部材設置・組立上の問題点と対策

プレキャスト部材の運搬・組立専用機械を用いない場合、その施工手順は図—2のように整理することができる。ここで重要な点は、プレキャスト部材の搬入・運搬作業と、設置・組立作業が平行作業化される点にある。すなわち、専用機械を用いた場合、各部材を、搬入、坑内運搬、設置・組立しないと、次の部材の組立てに着手できないのに対し、専用機械を用いない場合は、これらが平行作業化されるため、全体の施工サイクルが効率化される。この効率化は、坑口から補修区間までの運搬距離が長くなるほど顕著となる。

一方で、専用機械を用いない場合、動力源の確保が難しいこともあり、設置・組立て作業を人力とブロックチェーンなどの手動工具にのみ頼らざるを得ない。この作業を、小さな工夫で多少なりとも効率化させることが、当該作業の必要な改良点となる。

これらの工夫・改良は以下のように、まとめることができる。

- a) レバブロック等の手動工具を利用できるよう、



図—2 専用機械を用いない場合の施工次第

プレキャスト部材に、予めフックなどを取り付けられるよう細工する。この時、可能な限り、既存の注入孔などを利用することを志向する。

- b) 位置調整を容易化するように、部材牽引時に位置誘導できる治具をプレキャスト部材に設置する。
- c) 寸法調整などを容易化するように、二分割されたアーチ部材の接合部を一時的に可変化する。
- d) 狭小な坑内での組み立て作業を、予め、地上でリハーサルし、問題点の抽出と改良を実施する。

写真—4は、これらの工夫のいくつかを示すものであり、写真—4 (a) は、注入孔を利用してレバブロックにより、所定位置に牽引する状況を示した図であり、四角の枠で囲まれた治具が、牽引により後続部材を所定位置に誘導する治具である。また、写真—4 (b), (c) は、同じく注入孔を利用して、レバブロックにより幅員調整作業、ならびに底盤部材の設置作業を実施している状況をそれぞれ示すものである。

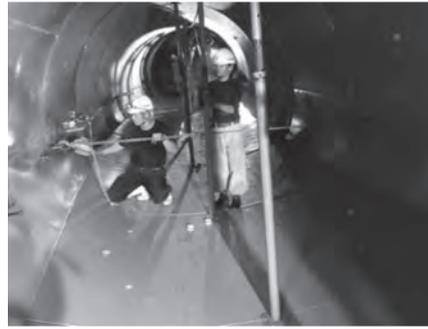
このようにして設置した内面補強工の組立状況を写真—5に示す。写真—5中の支保工は、裏込め注入時の底盤部材の浮き上がり防止を目的とするものである。また、設置後1年経過した内面補強部材の状況を写真—6に示す。

3. プレキャスト部材による内面補強と通水量

水路トンネル内面補強工の設計は、内面補強後に所要の通水量を確保し得るよう設計しなければならない。したがって、補強部材厚さは、所要の剛性と強度を確保したうえで最小化し、かつ坑内運搬可能な範囲



(a) レバーブロックによる後続部材の牽引

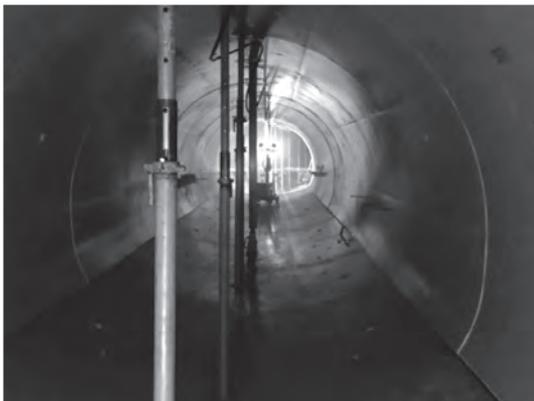


(b) レバーブロックによる部材の幅員調整



(c) レバーブロックによる底盤材の設置状況

写真—4 プレキャスト内面補強部材組立状況



写真—5 組立後のプレキャスト内面補強工設置状況



写真—6 1年経過後のプレキャスト内面補強工状況

減少を生じさせない。この事例では、底盤部を除いたアーチ部に、厚さ $t = 100 \text{ mm}$ のプレキャスト部材を、既設覆工内面との離隔距離 $d = 5 \text{ mm}$ で設置することを計画したものである。このプレキャスト補強部材を設置すると、通水断面積 $A_{pre} = 3.671 \text{ m}^2$ 、潤辺長 $P_{pre} = 5.486 \text{ m}$ が、それぞれ $A_{post} = 3.126 \text{ m}^2$ 、 $P_{post} = 5.274 \text{ m}$ に減少するが、通水量は $Q_{pre} = 5.179 \text{ m}^3/\text{s}$ が、 $Q_{post} = 5.177 \text{ m}^3/\text{s}$ とほとんど変化しない。なお、既設覆工面の粗度係数は $n = 0.014$ と仮定したが、これは安全の側の仮定と考える。

このような、表面粗度の改善は、断面縮小部に流速増大を生じさせるようで、写真—7に示すように内面補強区間では通水の水位低下が確認されている。この水位低下は内面補強工施工後、10年が経過しても変化はなく、樹脂パネルの粗度は、ほとんど増大していないと判断される。

4. おわりに

表—1は、民間所有の水路における当該工法による補修施工実績の一部を取りまとめたものである。当該工事は、毎年、夏季に7日程度、水路を断水し、緊急性の高い区間から、順次、計画的に補修を実施してきた。

で、既設覆工内面とプレキャスト外面の離隔距離を最小化し、内面補強後の内空断面積を最大化することが求められる。

これらの設計的配慮とは別に、一般に、プレキャスト部材の表面には粗度を低減する各種施工がなされている。例えばPCL工法⁵⁾のプレキャスト部材の表面には粗度係数 $n = 0.010$ の樹脂パネル ($t = 2 \text{ mm}$) がコーティングされている⁶⁾。

この粗度係数は、われわれがプレキャスト部材内面補強を検討した最も小さな水路断面（高さ $H = 2.1 \text{ m}$ 、幅員 $W = 2.117 \text{ m}$ ）でも、ほとんど通水量の



写真—7 内面補強区間での水位低下

表一 1 モール・シールドビルダー工法施工実績

施工年度	施工場所	施工総延長 (内曲線部延長)		坑内 運搬 距離	PCL 版組立工			地組 日数	裨枠 組立 日数	裏込注入工	
					設置 日数	平均組立数				注入量	注入 日数
2011年(平成23年)	第5暗渠	26.0 m	(4.0 m, R=35)	536.0 m	5日	2.6組/日	(5.2 m/日)	3.0日	2.0日	24.0 m ³	2.0日
2012年(平成24年)	第4暗渠	40.0 m	(18.0 m, R=50)	138.0 m	6日	3.3組/日	(6.6 m/日)	3.0日	2.0日	36.0 m ³	1.0日
2013年(平成25年)	第4暗渠	50.0 m		98.0 m	5日	5.0組/日	(10.0 m/日)	3.0日	0.5日	44.0 m ³	1.0日
2014年(平成26年)	第4暗渠	48.0 m		48.0 m	4日	6.0組/日	(12.0 m/日)	3.0日	1.0日	46.0 m ³	1.0日
2015年(平成27年)	第2暗渠	34.0 m		90.0 m	3日	5.7組/日	(11.4 m/日)	3.0日	2.0日	28.0 m ³	1.0日
2016年(平成28年)	第1暗渠	38.0 m	(30.0 m, R=30)	60.0 m	5日	4.0組/日	(8.0 m/日)	3.0日	2.0日	36.0 m ³	1.0日
2017年(平成29年)	第1暗渠	22.0 m		22.0 m	2日	5.5組/日	(11.0 m/日)	2.0日	1.0日	18.0 m ³	1.0日
2018年(平成30年)	第3暗渠	36.0 m		238.0 m	4日	5.0組/日	(10.0 m/日)	3.0日	1.0日	36.0 m ³	1.0日

年度により、施工条件や補修区間長が異なるが、いずれの条件下でも、所定の施工期間で、問題なく補修工を完了しており、本稿で紹介したモール・シールドビルダーは、十分に実用レベルの工法であると判断する。

しかしながら、当該工法は、その部材の設置・組立作業を人力に頼る工法であり、苦渋作業の排除、省力化をより志向してゆかねばならないことは自明である。これまでも当該作業の機械化による省力化の検討を、種々に、行い、坑内運搬に供する小型電動牽引車両の導入やパワーツの試験的導入などを実施してきたが、まだまだ十分とは言えない。前述の動力源の確保や、機械の坑内搬入・運搬等の問題解消には、機械化による安全面の問題の発生に配慮が必要になる。例えば、写真一4(a)に示す、部材の設置牽引に、坑内搬入・運搬が容易な、電動ウインチの利用を検討したが、電動ウインチによる牽引は急制動となるため、微妙な調整が難しく、挟まれ事故を誘発しやすいことが何よりも懸念され採用には至らなかった。また、慣性力が部材に働くと、これを停止することが難しいため、新規設置部材が既設部材に衝突し、破損する可能性も懸念された。

このように、狭隘な空間での作業を要する当該工法の機械化は、省力化・効率化と安全性低下のトレードオフを解消できるよう検討を進めてゆかなければならないが、毎年蓄積される知見を有効に生かし、より安全で、効率的な工法に改良してゆく方針である。

謝 辞

モール・シールドビルダー工法の開発、施工、改良に、ご尽力賜りました三井住友建設(株) 故山田剛弘様、那須野佑司様、高塚浄乃様、(株) IHI 建材工業 内藤泰文様に深甚の感謝を述べ、本文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、高橋直樹、櫻井春輔：小断面トンネルリニューアルシステム工法、電力土木、No.349、pp.106-110、2010.
- 3) 山地宏志、林豊、櫻井春輔：覆工背面空洞充填工における石炭灰有効利用技術の開発、電力土木、No.356、pp.102-106、2011.
- 4) 山地宏志、中野陽一、清水則一：ロックボルトによる極小断面水路トンネル補修の設計と施工法、平成21年度建設施工と建設機械シンポジウム講演論文集、pp.23-28、2009.
- 5) PCL工法協会：PCL工法、<http://pcl-kyokai.o.o7.jp/>
- 6) JERコンクリート補改修協会：「ジックボード工法」カタログ、<http://www.jer.jp/pdf/c-tech/jb.pdf>
- 7) 地方共同法人日本下水道事業団：下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術マニュアル、2017.

【筆者紹介】



山地 宏志(やまち ひろし)
三井住友建設(株) 技術本部 主席研究員



中森 純一郎(なかもり じゅんいちろう)
三井住友建設(株) 技術本部 主席研究員



野澤 是幸(のざわ よしゆき)
三井住友建設(株) 土木本部 顧問