

山岳トンネル二次覆工コンクリートのプレキャスト化

Study of Precasting of lining concrete in mountain tunnel

佐藤 幸三*

Kozo Sato

石山 宏二*

Koji Ishiyama

我彦 聡志**

Satoshi Wabiko

岡井 崇彦***

Takahiko Okai

要 約

山岳トンネルの二次覆工コンクリートには、巻厚不足、締固め不足による品質不良の発生や施工時の劣悪な作業環境等の課題がある。これらの課題に対し、二次覆工コンクリートをプレキャスト化することにより、覆工コンクリート自体の品質向上を図るとともに、作業環境の改善・施工の効率化による生産性向上を図ることが可能であると考えて検討を行ってきた。本報では模擬覆工を用いた移動・設置試験を通して得られた知見等を含め、二次覆工コンクリートのプレキャスト化への可能性を示す。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. プレキャスト化のメリット
- § 3. プレキャスト化の概要
- § 4. 鉄筋定着試験
- § 5. 模擬覆工を用いた確認試験
- § 6. コスト比較
- § 7. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネルの二次覆工コンクリートは、吹付けコンクリートとセントルの間の狭隘な空間にコンクリートを打込んで構築される。そのため、巻厚不足や締固め不足等による品質不良が懸念されるとともに、セントルの押上げ、乾燥収縮や温度変化に起因するひび割れの発生が懸念される。これらの対策として流動性の高いコンクリートの使用やマイスタークリート工法の採用等を行うことにより不具合の発生は減少しているが完全には防止できていない。また、狭隘な空間でのセントル面板のケレン、剥離剤塗布、棒状バイブレータを用いた締固め等は苦渋作業となっており生産性向上を妨げる一因となっている。

そこで、山岳トンネルの二次覆工をプレキャスト化することで各種問題を解決できると考えて検討を加えた。

§ 2. プレキャスト化のメリット

二次覆工コンクリートのプレキャスト化のメリットとしては以下の点が挙げられる。

(1) 生産性向上

熟練工を必要とせず、現場打ちに比べて覆工コンクリートの施工速度が約 1.5 倍に向上する（試算）。

(2) 品質向上

プレキャスト製品を使用するため、均質かつ緻密なコンクリートとなるとともに巻厚不足や温度応力、施工上のひび割れを抑制できる。

(3) 安全性向上

狭いセントル内での苦渋作業が無くなり、坑内にセントル等の大型設備が不要となることで作業時および車両通行時の安全性が向上する。

(4) 環境影響低減

プレキャスト部材の薄肉化により掘削土量やコンクリート使用量が減少することによる CO₂ 削減、および覆工施工用車両通行の減少による坑内環境の改善が期待できる。

§ 3. プレキャスト化の概要

3-1 仕様・形状

従来、覆工コンクリートの部材厚さは経験工学的に 300 mm 以上に設定されている。プレキャスト化にあたり、ハンドリング、掘削断面の減少等を考慮して薄肉化を図るために鉄筋コンクリート構造とした。プレキャスト化する部材厚は、現在の部材性能を満足する仕様を図-1 および 2 に示す M-N 破壊包絡線から求め、C II

* 技術研究所

** 技術研究所土木技術グループ

*** 土木設計部

や DⅠパターン等の無筋区間は 170 mm, DⅢパターンの有筋区間は 230 mm に設定した。

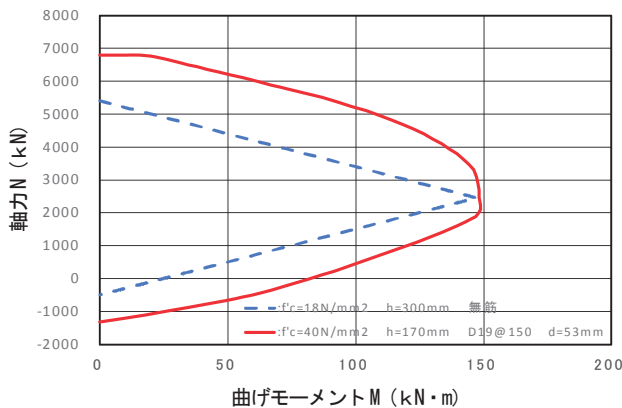


図-1 M-N 破壊包絡線（無筋区間）

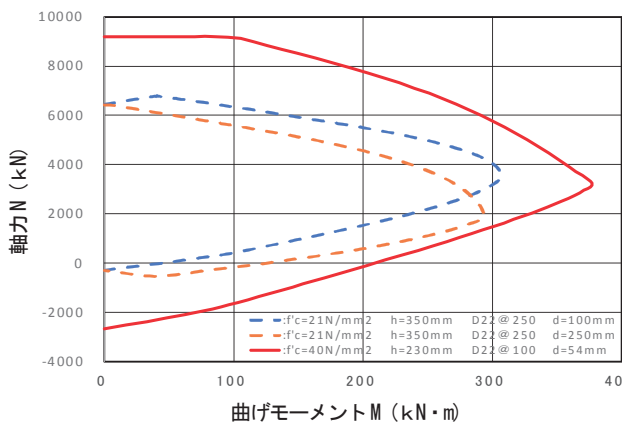


図-2 M-N 破壊包絡線（有筋区間）

プレキャスト化した覆工（以下、PCa 覆工）は、製造場所から運搬可能な形状とするために図-3 に示すような 3 分割とした。

PCa 覆工の脚部形状は、坑内運搬時の安定性と設置後の構造的安定性を両立するために図-4 に示すような 2 面構造とした。一面は必要覆工厚の外側にやや厚みを持たせてレール上を安定走行するための水平なローラ接地面であり、もう一面はローラ撤去後にインバートコンクリートと接続する面で、インバート軸線に直交する角度を付けた面である。

3-2 施工方法

坑外で 2 リング分の PCa 覆工を組み立て、事前に設置した移動用レール上を運搬して坑内の奥側から順次設置し、PC 鋼棒でトンネル軸方向に連結する。その後、一定の区間ごとにプレキャスト覆工背面に裏込め注入する。この作業を繰り返すことで覆工コンクリートを完成させる（図-5 参照）。この場合、レールは同一レベルにあることが必要のため、インバートが必要ない区間においても基礎コンクリートを打設する。

組立、運搬および設置時は、坑口部および坑内に切羽

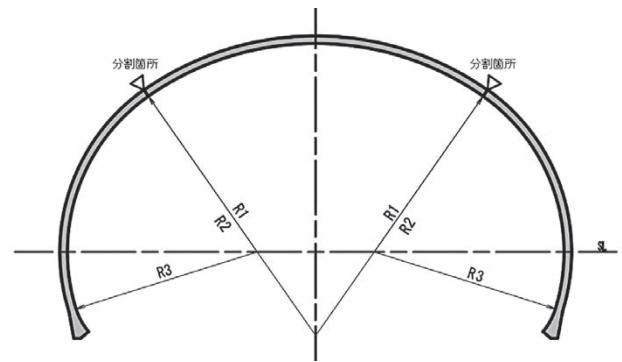


図-3 分割位置（3 分割）

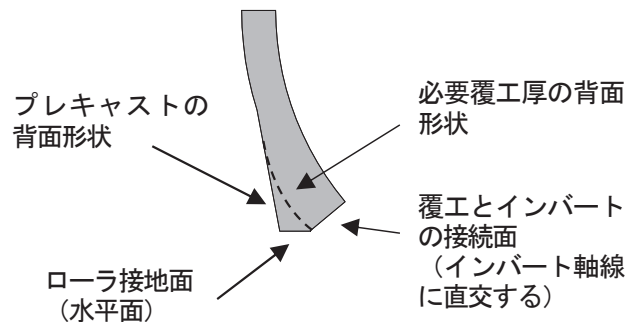


図-4 脚部詳細（断面図）

作業の重機やダンプトラック等が通行できる空間を確保しているため、切羽作業と同時進行が可能である。また、運搬に使用するローラの回収が可能のように、レールの基盤となるインバートコンクリートに切欠き部を設ける等、設置方法も工夫しコストダウンを図っている。

DⅢパターンにおいては、インバートコンクリートの鉄筋を覆工コンクリートに定着させる必要がある。従来の現場打ちのようにインバート端部から鉄筋が突出した状態では PCa 覆工の運搬が不可能である。そのため、図-6 に示すように運搬時は PCa 覆工側に鉄筋を収納しておき、設置箇所でインバートコンクリート側にあらかじめ埋込んだモルタル充填継手に落とし込む方法を考案した。

§ 4. 鉄筋定着試験

有筋区間の PCa 覆工は、定着用鉄筋でインバートと接合される。その場合、インバート側はモルタル充填継手で接合するが、PCa 側は落とし込み等の作業が必要となるため、鉄筋内蔵箇所は内面に凹凸のない形状が求められる。そこで、コストダウンも考慮に入れ、市販のシース等に定着鉄筋の先端を差込んで定着させる方法とした。使用する鉄筋には定着長が 4D であるあと施工せん断補強鉄筋「SNB」を採用し、鉄筋長の短縮を図った。

「SNB」は通常ハンマードリルやコアドリルで削孔した後モルタルカプセルで定着するが、本工法ではシース等での定着となる。そのため、SNB がシース等で十分に定



写真一2 試験状況

表一2 試験結果

供試体		最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (mm)	破壊形態
スパイラル ルシース	A-1	69.3	0.42	コンクリート破壊
	A-2	59.9	0.35	コンクリート破壊
	A-3	76.4	0.36	コンクリート破壊
	平均	68.5	0.38	
カップラ ー継手	B-1	54.0	0.17	コンクリート破壊
	B-2	52.4	0.17	コンクリート破壊
	B-3	48.1	0.5	コンクリート破壊
	平均	51.5	0.20	



スパイラルシース

カップラー継手

写真一3 破壊形態

プラー継手の肩部を頂点としたコンクリートのコーン状破壊と考えられる。

- 最大引張荷重は、スパイラルシースがカップラー継手よりも大きい。理由として、有効埋込み長さはスパイラスシースではSNB 特殊ナットの位置となるが、カップラー継手では肩部になるためと考えられる。カップラー継手の肩部位置は、既製品を使用したため有効埋込み長さが小さくなったが、肩部位置を変更することで引張荷重を改善できると考えられる。

SNB のスパイラルシース、カップラー継手内での定着は問題ないと判断されたため、シース長、カップラー継手の肩部位置を調整することによって必要定着力を確保することが可能であると判断された。

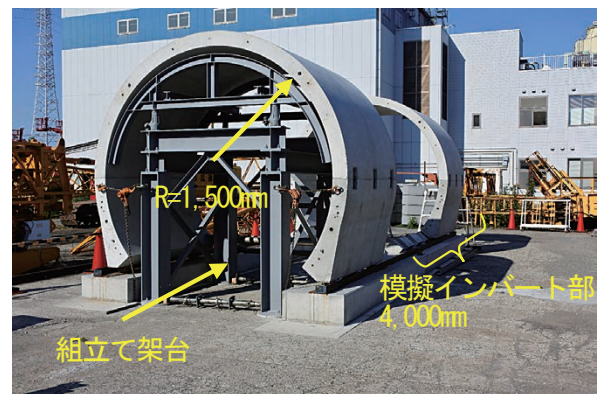
§ 5. 模擬覆工を用いた確認試験

模擬覆工 2 リングを用いて愛川技術研究所において移動・設置試験を実施した（写真一4～10 参照）。

製作した PCa 覆工は $R=1,500$ mm の単心円、 $t=170$ mm、 $L=2,000$ mm であり、脚部構造は図一4 に示したような形状とした。移動用レールの延長は 8,000 mm とし、1/2 の 4,000 mm 範囲には移動用ローラの撤去・仮受け材設置等の作業を確認するために切欠き部を設けた模擬インバートを設置した。実トンネルでは、PCa 覆工を千鳥配置の 3 分割として計画するが、模擬覆工では覆工製作の関係から脚部 2、上半部 1 の 3 分割とした。

組立て架台で覆工の組立てを行い、8,000 mm を牽引した後、模擬インバート部で移動用ローラを仮受け材に受け替えて、移動のスムーズさおよび設置の容易さ等を確認した。

本試験によって、検討した PCa 覆工の組立・運搬・設置に至る一連の施工方法に対する妥当性を確認した。



写真一4 模擬覆工全景



写真一5 組立て架台による組立て

§ 6. コスト比較

あらかじめ従来覆工と PCa 覆工でのコストの概算を行ったところ、PCa 覆工の製造コストがネックとなり



写真-6 移動時の脚部



写真-7 模擬覆工の移動



写真-8 小型ジャッキによる盛替え



写真-9 PC 鋼棒による接合



写真-10 設置完了

100～300 m 程度で全体コストの境界点があることが確認された。そこで、200 m で詳細なコスト試算を行い従来工法との比較を行った。

6-1 コスト試算の前提

(1) 検討断面

検討断面は、国土交通省発注の A トンネル（2 車線断面）とした。A トンネルの覆工構造は、DⅢ区間が $t=350\text{ mm}$ シングル補強鉄筋、DⅠ区間が $t=300\text{ mm}$ 無筋となっている。図-9 に代表として DⅠ区間の覆工寸法図を示す。

(2) 施工区分および覆工条件

PCa 覆工は、有筋区間と無筋区間では覆工厚を変えることとしている。そのため、DⅢ区間と DⅠ区間の延長を表-3 のように設定した。

(3) 部材厚、強度、配筋の設定

従来覆工と M-N 破壊包絡線から求められた PCa 覆工の部材厚、圧縮強度、配筋を表-4 のように設定した。

(4) 余掘り、吹付け厚、余巻、覆工厚の設定

PCa 覆工を使用した場合、覆工厚が減少することによって掘削断面が減少する。その部分を考慮するために、従来覆工と PCa 覆工での余掘り、吹付け厚、余巻、覆工厚を表-5 および表-6 のように設定した。

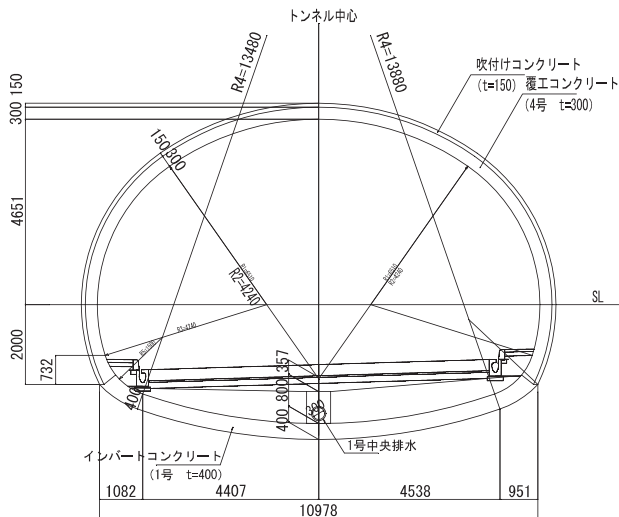
(5) PCa 覆工の組立て、設置速度

従来工法では、2 日で 10.5 m 打設する。検討の結果、PCa 覆工は、覆工の組立て・設置を 4 スパン/日行うことが可能であると判断した。表-7 に組立て・設置の設定値を示す。

6-2 コスト比較

6-1 で設定した条件に基づいて、積算した結果を表-8 と図-10 に示す。シールド工法のセグメント同様、PCa 覆工に防水機能を持たせることとしたため、PCa 覆工の防水工にかかるコストは 0 としている。

PCa 覆工は従来覆工に比べて 6% コストアップとなる。項目を見ると覆工費の差額が大きくなっていることが分



図一〇 検討断面 (D I 断面)

表一三 施工パターン毎の施工延長設定値

施工パターン	延長	
	従来覆工	PCa覆工
D III	25	25
D I	150	150
D III	25	25
計	200	200

表一四 部材厚, 強度, 配筋

区分	種別	部材厚 t	強度 f_c	配筋
無筋区間 D I	従来覆工	300mm	18N/mm ²	-
	PCa覆工	170mm	40N/mm ²	2-D19 @250mm
鉄筋区間 D III	従来覆工	350mm	21N/mm ²	1-D22 @250mm
	PCa覆工	230mm	40N/mm ²	2-D22 @100mm

表一五 余掘り, 吹付け厚, 余巻, 覆工厚 (従来覆工)

	単位	従来覆工		摘要
		D III	D I	
余吹き	mm	50	50	余掘 130
吹付厚	mm	250	150	
余巻	mm	80	80	
覆工厚	mm	350	300	
計	mm	730	580	

表一六 余掘り, 吹付け厚, 余巻, 覆工厚 (PCa 覆工)

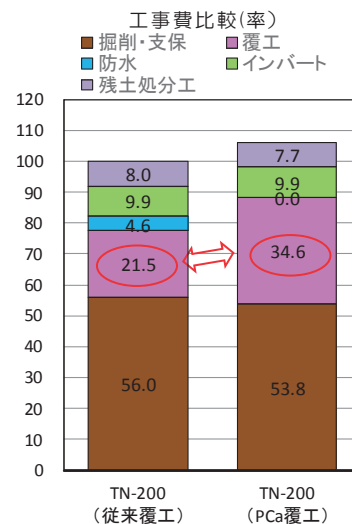
	単位	PCa覆工		摘要
		D III	D I	
余吹き	mm	50	50	余掘 130
吹付厚	mm	250	150	
裏込め厚	mm	80	80	
覆工厚	mm	230	170	
計	mm	610	450	
掘削減少分	mm	-120	-130	

表一七 組立・設置速度

	D III, D I
日当たり組立・設置	4スパン/日 (8m/日)

項 目	TN-200 (従来覆工)	TN-200 (PCa覆工)
掘削・支保	56.0	53.8
覆工	21.5	34.6
防水	4.6	0.0
裏面排水	0.0	0.5
インバート	9.9	9.9
残土処分工	8.0	7.7
計	100	106

表一八 コスト比較表



図一〇 コスト比較図

かる。PCa 覆工は延長が長くなることで単価が下がるわけではないことから、延長が長くなれば PCa 覆工のコスト増はより大きくなる。このことから、今回の前提を基にした現状の積算方式ではトンネル延長 200 m が従来覆工と PCa 覆工の境界点となると考えられる。なお、PCa 覆工の製造コストを抑えることで、より長距離への適応が可能であると考えられる。

§ 7. おわりに

本検討は、施工の合理化、高品質化に向けた覆工コンクリートのプレキャスト化に対する可能性を示したものである。

山岳トンネルには、各種設備を設置するための箱抜き、トンネル線形、勾配等の特徴が現場毎に異なるため、覆工コンクリートのプレキャスト化には解決しなければならない課題が残されている。しかしながら、生産性、品質、安全性、環境影響、ライフサイクルコストの面から覆工コンクリートをプレキャスト化することのメリットは大きいと考える。

プレキャスト化を前提とした設計・施工とすることで、種々の課題は解決できると考えている。

本検討は、戸田建設(株)、(株)ジオスターと共同で実施したものである。