

山岳トンネルのプレキャスト覆工に関する研究

須田博幸* 松田敦夫** 井上直樹***
 奥野三郎**** 岡村正典**** 下村行男*****

1. まえがき

一般の山陽新幹線福岡トンネルのコンクリート片はく落事故をはじめ、相次いだトンネル覆工コンクリート片はく落事故以来、改めてコンクリート構造物の安全性がクローズアップされ、トンネル覆工の品質や維持管理の重要性が広く認識されるようになってきている。

NATM で施工された山岳トンネルは、構造上支保工と覆工により構成される。支保工は、鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルト、あるいはその他の補強材により構成されトンネル周辺地山の安定を確保し、変形を抑制する機能を有する。一般的に、覆工には力学的機能は要求されず、供用上必要な機能と支保工の品質の不均一性や経時劣化、地山性状のばらつきや経時劣化、緩みなど将来問題が生じるかもしれない不確定要素に対する安全率増加として施工されている。

現在のトンネル覆工は、大型の移動式セントルを用いた現場打ちコンクリートによる覆工（以下、「標準覆工」）が一般的である。このような従来式の覆工コンクリート打設方法では、その施工上あるいは工程上の制約から、コールドジョイントやひび割れ等の発生による品質低下を招くことが懸念されている。

山岳トンネル用のプレキャストライニング版は、製造工場の優れた品質管理のもとで製造され、品質が安定し高品質であることが最大の特長といえるが、高価であるという側面を持ち合わせている。プレキャストライニング版による覆工の現状は、覆工修繕や断面拡幅などの改築を目的としたリニューアル工事がほとんどであり、新設トンネルでの採用事例は極めて少ない。

一方、国際化や構造の多様化への対応、新技術の活用、維持管理や耐久性の重視、コスト削減が叫ばれる現在の社会情勢のなか、設計の自由度が高まる性能規定化は避けてとおれない時代の流れとなりつつある。

こうした背景を踏まえ、本研究課題では、既存のトンネル設計法にとらわれることなく、将来の性能規定化を視野に入れ、新設トンネルにおける従来式の現場打ちコンクリート覆工に代わる薄肉プレキャスト版による覆工方法（以下、「プレキャスト覆工」）の提案を目的とし、コストを含めた調査・研究を行った。本報では、その概要を報告する。

2. プレキャスト覆工の位置付け

将来、設計の性能規定化が進めば、支保工は永久構造物としての機能が加味され、錆びないロックボルトや高品質吹付けコンクリートを使用したシングルシェル構造のトンネルも施工されるようになるかと推測される。こうしたトンネルの覆工には、安全率増加機能は求められず、例えば化粧といった供用上必要な機能のみが求められる。また、プレキャスト覆工には、高品質な覆工の実現や覆工厚低減による掘削断面積の低減なども期待できる。今後の性能規定化を睨んだ将来技術として、プレキャスト覆工は有効な覆工方法の一つであるといえる（図-1参照）。

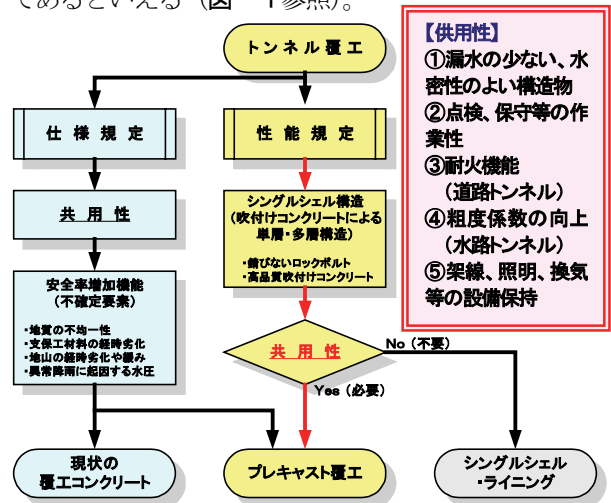


図-1 プレキャスト覆工の位置付け

*技術本部技術開発部 **技術研究所 ***技術本部土木部 ****関西支社土木技術部 *****東京支社土木部

3. 基本方針・前提条件

研究するプレキャスト覆工は、現状の標準覆工の考え方に従い、道路トンネルや鉄道トンネルで採用されている厚さ 30 cm の無筋覆工コンクリートと同等の耐荷力を有し、コスト的には同等に近いレベルで、各種機関の技術基準にできるだけ対応可能な構造・施工方法を目標とした。

また、一般的に工場製造のプレキャスト製品は優れた品質管理体制で製造され、品質が安定し高品質であることが最大の特長といえるが、高価であるという側面をもっていることから、本研究ではプレキャスト覆工のコストダウンに重点をおき、下記の4項目によりコストダウンを図ることを特徴としている。

- ① プレキャスト版を現場作業員が現場で製造することにより、管理費および運搬費を削減する
- ② プレキャスト版の厚さを薄くすることで、材料費を低減するとともに軽量化を図る
- ③ 継手構造、固定方法などを単純な構造とすることで、現場製造をできるだけ容易にするとともに、施工性の向上を図る
- ④ 効率的な組立方法を考案することで、工期短縮を図る

ただし、現場でのプレキャスト版の製造、養生、ストックに要する必要スペースの確保が可能であることを前提条件とする。

4. 工法の概要

ケーススタディーとして、図-2に示すトンネル断面を想定し、はりばねモデルを用いた骨組構造解析による応力度照査を行い、プレキャスト版の構造等、覆工構造および施工方法を検討した。

4.1 ケーススタディー用想定トンネル諸元

- (1) 地 山：中・硬岩
(日本道路公団地山等級：B、C I 程度)
- (2) 断面形状：2車線道路トンネル（3種4級）
- (3) 覆工巻厚（標準覆工）：30 cm
- (4) 覆工コンクリート（標準覆工）の
設計基準強度：18 N/mm²（無筋コンクリート）
- (5) トンネル延長：250 m、500 m、1,000 m

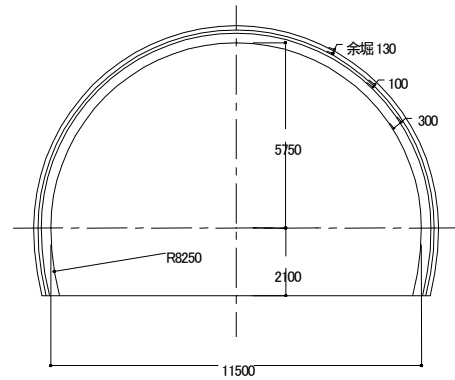


図-2 想定トンネル断面（標準覆工）

4.2 プレキャスト覆工構造の検討

プレキャスト覆工の構造検討は、はりばねモデルによる骨組構造解析を行い、以下のステップで行った。

表-1に解析諸元、図-3に検討フロー、図-4に解析モデル、表-2に解析に用いた各定数を示す。

- (1) 想定トンネルにおける標準覆工が耐え得る天端荷重：P の計算
- (2) 求めた天端荷重：P に耐え得る RC 構造の検討
- (3) 組立完了時における検討（自重のみ考慮）

表-1 解析諸元

項目	内容
解析手法	骨組構造解析
モデル	はりばねモデル
作用荷重	覆工コンクリート自重
	鉛直荷重 水平荷重
その他	・吹付けコンクリートは無視して、覆工の応力状態のみによる検討 ・覆工コンクリートの打設長をL=10.5mに設定

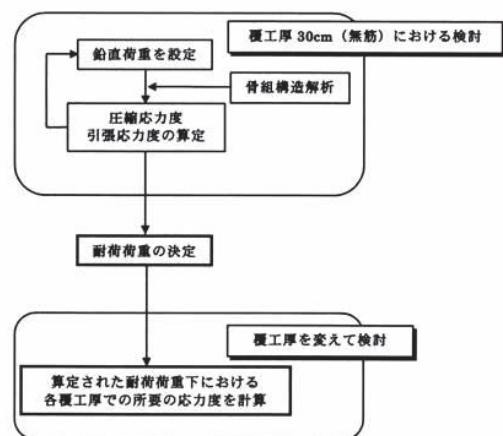


図-3 検討フロー

- (4) 裏込め注入時における検討（自重および注入圧を考慮）
- (5) プレキャスト覆工完成時における検討（自重および土圧を考慮）
- (6) 運搬時、仮置き時、組立時における検討（部材分割仕様、支持点箇所の検討）
- (7) 継手構造の検討
- (8) 裏込め注入材の検討

4.3 プレキャスト覆工構造の提案

提案するプレキャスト覆工は、施工性から現場打ちの基礎コンクリート（厚さ 20 cm）を施工し、その上にプレキャスト版を組立て、組立後プレキャスト版背面に裏込め注入を行い覆工を構築する方法である。

a. 分割数

分割数および継手位置等については、以下の点を考慮して1断面3分割とした。

- ① 想定トンネル断面において、数値解析から応力的に最も有利な箇所（両肩部）に継手（剛結）を設置
- ② 仮置き時、運搬時、組立時における支持箇所
- ③ 施工性

図-5にプレキャスト覆工の構造例を、図-6に天端ピースの構造例を示す。

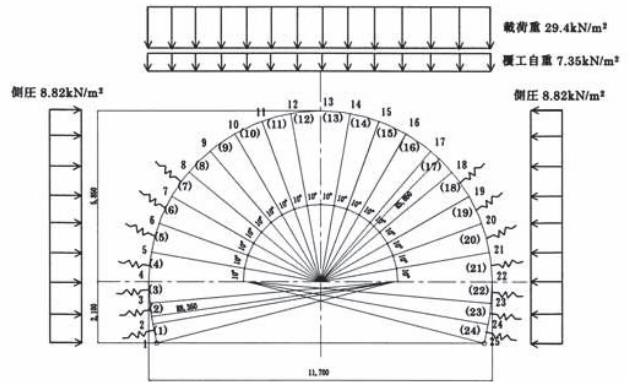


図-4 解析モデル

表-2 解析に用いた定数

項目	数値	
コンクリート	設計基準強度	18N/mm ²
	弾性係数	2.4 × 10 ⁷ kN/m ²
	許容応力度 (圧縮)	5,880kN/m ² (60kgf/cm ²)
	許容応力度 (引張)	294kN/m ² (3kgf/cm ²)
岩盤	単位体積重量	2.5t/m ³
	弾性係数	1.96 × 10 ⁶ kN/m ² (20,000kgf/cm ²)
	ポアソン比	0.25

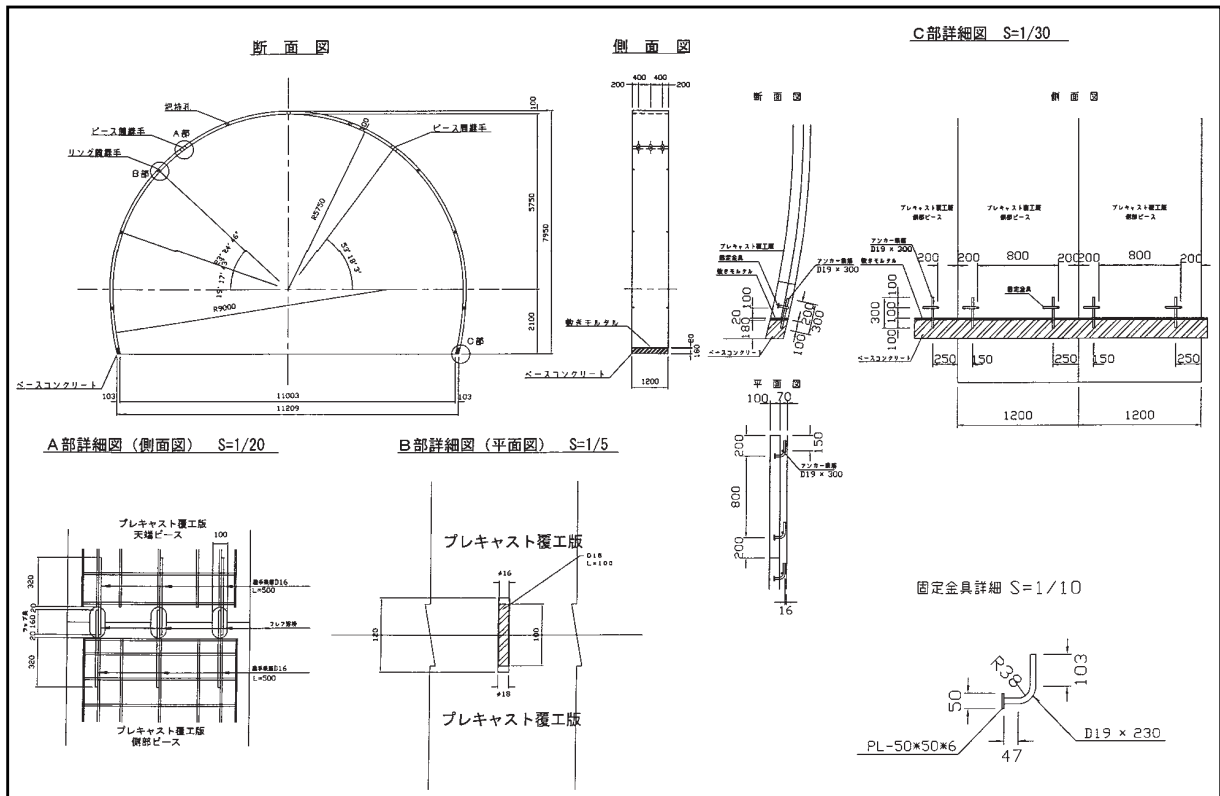


図-5 プレキャスト覆工 構造例

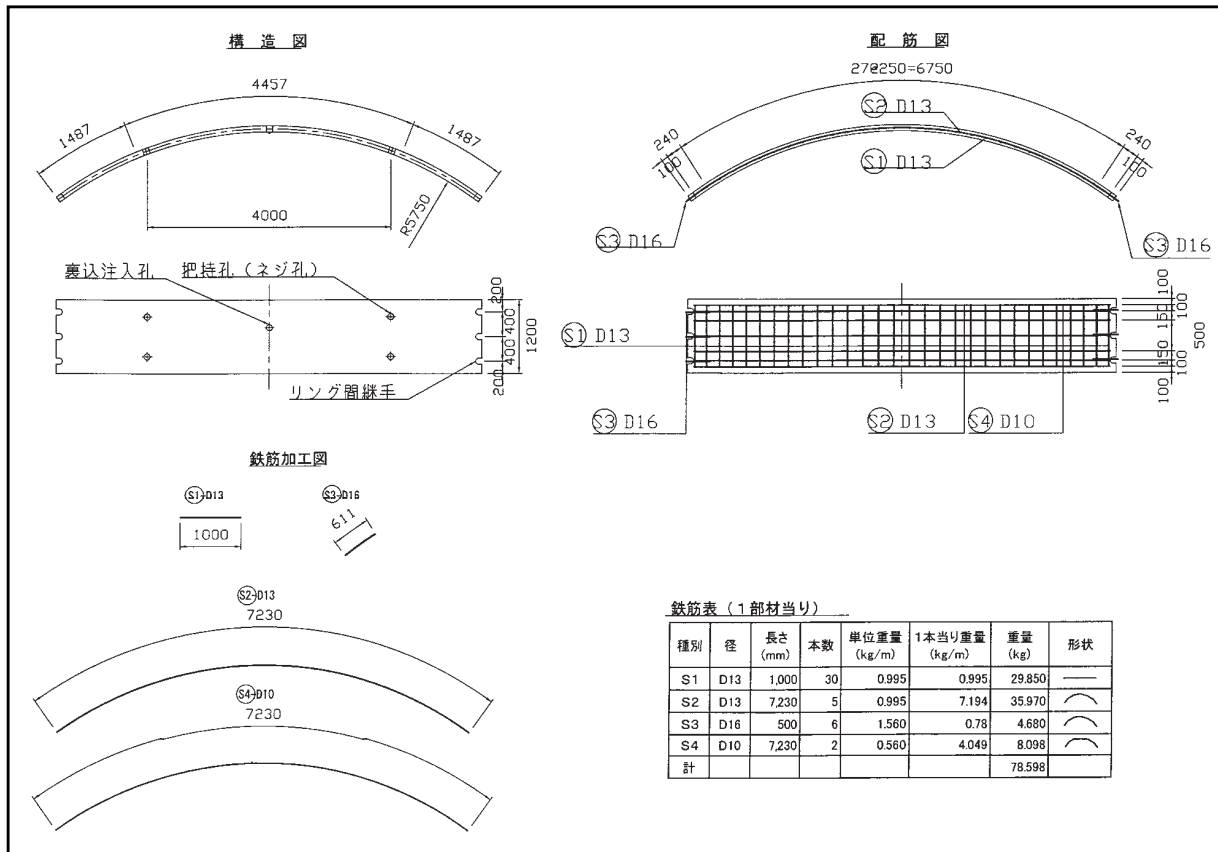


図-6 天端ピース 構造例

b. プレキャスト版の構造

上記の各検討結果を総合的に判断し、最も経済的な構造を決定した。

1ピースの大きさ：

(天端) 幅 1,200mm×長さ 7,431mm×厚さ 100mm

(側部) 幅 1,200mm×長さ 7,310mm×厚さ 100mm

設計基準強度：40N/mm²

RC 構造：D13@250 (シングルで中央に配置)

c. プレキャスト版固定方法

ピース間継手は、鉄筋フレア溶接継手とし、「鉄筋フレア溶接継手設計施工指針：(財) 鉄道総合技術研究所」に準ずるものとする。継手部の断面欠損部は、プレキャスト版と同等の強度を有するモルタル充填により対応する。

リング間 (トンネル軸方向) 継手は、軸方向挿入ピン継手とする。

基礎コンクリートとの接合方法は、アンカー鉄筋とL型固定金具の組合せとした。この固定構造は、プレキャスト版設置時の方向修正等をし易くするために、可動自由度を高くし、施工性の向上を図っている (特

許出願中)。

裏込め注入材は、現場製造の通常モルタルに凝結促進剤を添加したものを使用し、強度は 20~30 N/mm²とする。

4.4 プレキャスト版の現場製造

原則として吹付けコンクリート用のバッチャープラントを使用し、セメントは普通ポルトランドセメントを使用、粗骨材最大寸法は 15 mm とする。必要に応じ AE 減水剤を使用する。脱型はコンクリート打設後 24 時間とし、蒸気養生設備 (簡易養生小屋) を備えるものとする。工程の関係から、吹付けコンクリート用のバッチャープラント設置前から、プレキャスト版の製造が必要な場合は、購入コンクリートを使用する。

想定トンネルにおいて必要な製造・養生スペースおよびストックスペースは以下のとおりである。図-7 に現場製造の概念図を示す。

a. 製造・養生スペース

型枠設置方法を縦置き (2リング：6ピース) とし、製造速度は1日当たり2リング分 (6ピース) とすると、1ピース当たりの縦置き面積は 2 m×10 m=

20 m²であり、製造・養生に必要なスペースは 360 m²となる。

b. ストックススペース

横置き6段重ねでストックしたとすると、6ピース当たりの必要面積は 2 m×10 m=20 m²である。縦置き6ピース並列でストックしたとしても、必要面積は同じである。

プレキャスト版製造開始時期とトンネル延長の条件によりストックスペースは変化する。今回の設定条件は、準備期間3ヶ月でバッチャープラントを組立、さらに2ヶ月後切羽が150 m進捗した段階でプレキャスト覆工組立開始とした。トンネル延長別に必要スペースを以下に示す。

- トンネル延長：L= 250m 1,620m² (126リング分)
- トンネル延長：L= 500m 2,860m² (250リング分)
- トンネル延長：L=1,000m 5,360m² (500リング分)

4.5 プレキャスト覆工施工方法の検討・提案

a. 施工方法の特徴

既設の山岳トンネルの改修、拡幅等のリニューアル工事にプレキャスト版が用いられる事例が見られるが、プレキャストコンクリートライニング工法等では、厚さは20 cm以上あり、1ピースずつ直接フォークリフトやクレーンで組立てている。このような方法では、コストも高く、作業効率も悪いため、新設のトンネル工事には採用されにくい。コストダウンと作業性向上(効率化)を主眼に施工方法を考案した(特許出願中)。以下に本施工方法の特徴を示す。

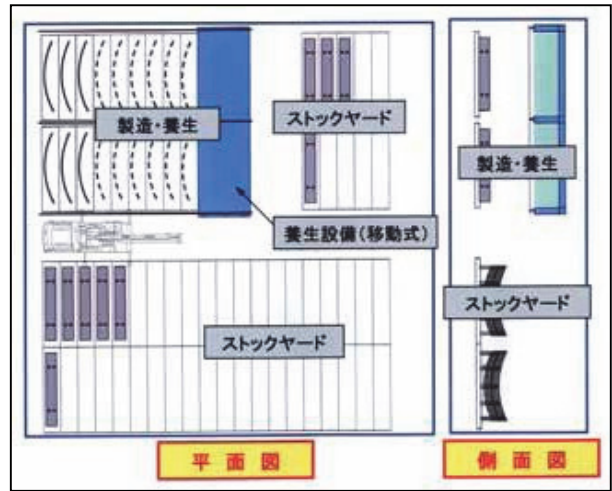


図-7 現場製造の概念図

- ① プレキャスト版が薄いので、運搬時や組立時の欠けや割れを防ぐために専用の運搬組立台車と運搬組立用補助枠(図-8)を使用する
- ② 1リング3分割のプレキャスト版を、各々の分割ピース毎に5リング分を坑外で連結して組立、運搬組立用補助枠に固定し、運搬組立台車で坑内に運搬し、一度に5リング分を組立てることで作業効率の向上と組立精度の向上を図る
- ③ プレキャスト版背面の裏込め充填注入時は、プレキャスト版背面に圧力が作用する。注入材が硬化するまでは、運搬組立用補助枠をアーチ状の支保工として残置し、アーチ効果により注入圧に耐えさせる

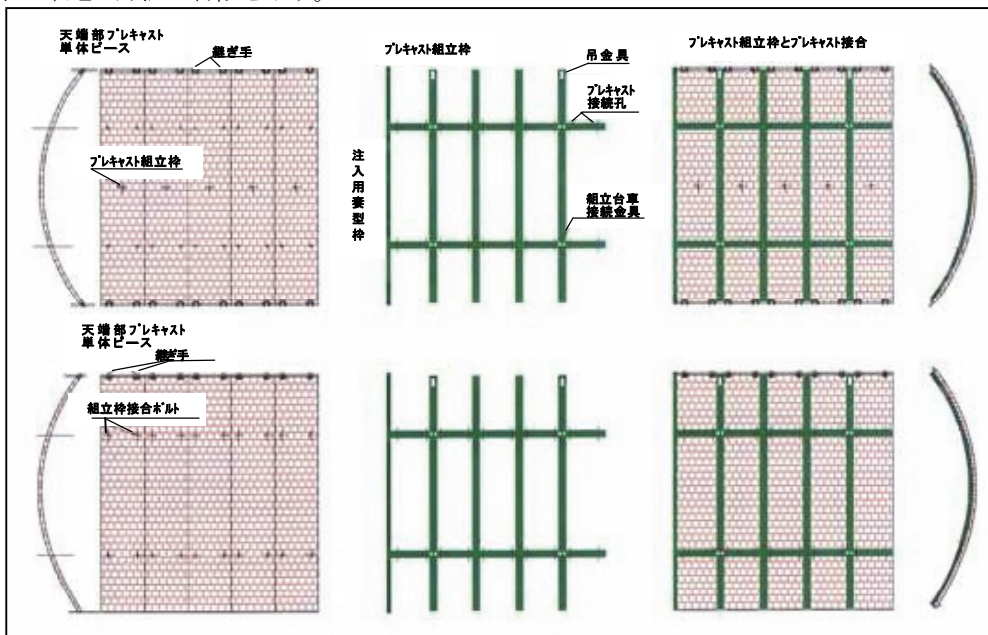


図-8 プレキャスト版運搬組立補助枠

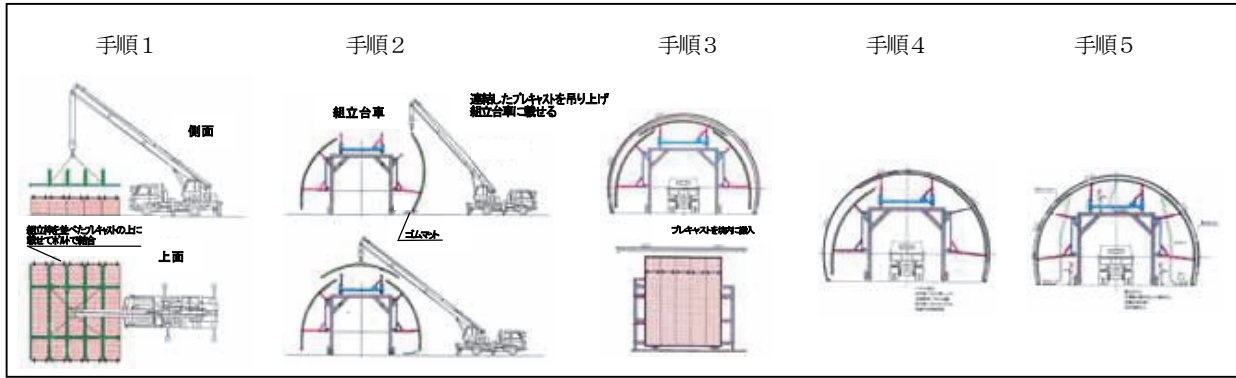


図-9 プレキャスト覆工 施工手順概要図

b. 施工手順

図-9に、プレキャスト版と運搬組立用補助枠の接合一体化からプレキャスト版背面裏込め充填注入後の養生までの作業手順を示す。

- 手順1：上部、左側部、右側部の3ピースに分割されたプレキャスト版を各々の部分ピース毎に5リング分を坑外で連結して組立、運搬組立用補助枠を取り付ける。
- 手順2：プレキャスト版を取り付けた運搬組立用補助枠を専用の運搬組立台車に固定する。
- 手順3：運搬組立台車でプレキャスト版を坑内の設置箇所に運搬する。
- 手順4：一度に5リング（6m）分のプレキャスト版を組立、組立完了後にプレキャスト版背面に裏込め充填注入をする。
- 手順5：この状態で裏込め注入養生し、養生後に運搬組立用補助枠をプレキャスト版から外して覆工を完了する。

型枠数を増やす必要があると同時に用地費が増加するためである。プレキャスト版製造費内訳の割合を図-10に示す。

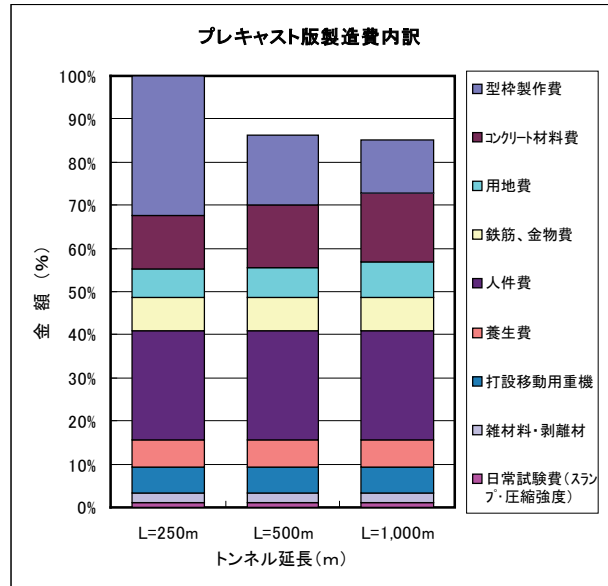


図-10 プレキャスト版製造費内訳比率

4.6 施工コスト

ケーススタディーとして、想定トンネルにおける標準覆工とプレキャスト覆工のトンネルm当たり概算工事費を比較した結果を表-3に示す。トンネル延長500 m以下の2車線道路トンネルの場合、標準覆工よりコスト的に有利になる試算である。

表-3 概算工事費比較（トンネルm当たり）

トンネル延長 (m)	標準覆工 (%)	プレキャスト覆工 (%)
250m	100.0%	90.5% (-9.5%)
500m	100.0%	98.5% (-1.5%)
1,000m	100.0%	109.4% (+9.4%)

トンネル延長が1,000 mでもコストが大きく下らない要因は、型枠が高額であることと、転用回数から

5. あとがき

実施工段階までには、実物大製造試験、組立試験等の実証実験が必要であり解決しなければならない課題が残されているが、実プロで対応したいと考えている。

本研究結果では、トンネル延長500 m以下のトンネルで、現状の標準覆工よりコスト的に有利となる試算である。更なるコストダウンを図るためには型枠コストを低減させることが大きな要因である。

冒頭でも述べたように、現状の設計の考え方が仕様規定から性能規定へ変化していくことで、将来技術としてプレキャスト覆工は有効な覆工方法の一つといえる。これらの課題への取り組みは、今後の社会の流れをにらみ、実施工での対応に備えていきたい。