

山岳トンネルにおけるRC覆工の 高品質化施策とその評価

日向 哲朗¹・多宝 徹²・緒方 秀敏³・杉山 律⁴・武若 耕司⁵

¹正会員 (株) 間組 本店 土木事業本部 技術第三部 (〒105-8479 東京都港区 虎ノ門 二丁目2-5)

E-mail:hyugat@hazama.co.jp

²正会員 (株) 間組 九州支店 新武岡トンネル作業所 (〒890-0034 鹿児島県鹿児島市田上 七丁目1143)

E-mail:taho@hazama.co.jp

³国土交通省 九州地方整備局 鹿児島国道事務所 (〒892-0812 鹿児島県鹿児島市浜町 2-5)

E-mail:ogata-h8912@qsr.mlit.go.jp

⁴正会員 (株) 間組 本店 土木事業本部 土木設計部 (〒105-8479 東京都港区 虎ノ門 二丁目2-5)

E-mail:sugiyama@hazama.co.jp

⁵正会員 鹿児島大学大学院教授 (〒890-0065 鹿児島市郡元 一丁目21-40)

E-mail:takewaka@oce.kagoshima-u.ac.jp

鹿児島市に位置する新武岡トンネルのランプトンネル(延長約700m)は、未固結なしらす地山を掘削する2車線の道路トンネルで、将来、供用後に並行して掘削される予定の本線トンネルによる影響を考慮して、全線にわたりRC構造の覆工となっている。RC構造とすることで、覆工は力学的機能を付加されたものとなるが、一方で、一般の無筋コンクリートの覆工とは異なる品質の管理なども必要となる。

新武岡トンネルでは、このRC構造の覆工の施工にあたり、覆工コンクリートが鉄筋コンクリートとなる場合の要求性能を明確化し、RC覆工の高品質化に取り組んだ。本稿では、RC覆工の高品質化に対する取り組みとその評価について報告する。

Key Words : mountain tunnel, lining, reinforced concrete, curing, performance requirements

1. はじめに

山岳工法のトンネルの覆工材料には、古くは、れんがやコンクリートブロックが使用されていた。昭和に入ってから、現場打ちコンクリートが用いられるようになり、1950年代には、ほぼ全面的に生コン工場生産の生コンクリートが使用されるようになった。

この頃、支保工も木製支保工に替わって鋼アーチ支保工が使用されるようになり、その後、しばらくは、矢板工法、すなわち、鋼アーチ支保工と木矢板で一時的に支保してから覆工コンクリートで地山を支持する時代が続く。そして、1980年代に入り、矢板工法に替わり、吹付けコンクリートとロックボルトを主たる支保部材とするいわゆる NATM が主流となった。

NATM において、覆工は、吹付けコンクリートや鋼製支保工などと同様にトンネルの支保部材の一部とみなされるものの、覆工は地山の安定を確認した後に施工する支保部材で、化粧巻としての意味合いも持ち、他の支保部材とはいくらか性格を異にするものとなった。

こうしたトンネル技術の変遷の過程で、トンネルの覆工に求められる機能や施工方法や、覆工のコンクリートそのものに求められる品質や打設方法も変化してきてい

る。また、1999年には、覆工コンクリートの剥落事故が相次ぎ、覆工コンクリートの高品質化を目指す取り組みは、現在も、継続的に続けられているところである。

山岳工法トンネルの覆工の機能として、現在では、他の支保部材とともに、何らかの耐荷力を有しているものと考えてのが一般的である。その前提に立った上で、覆工は、RC 構造として積極的に力学的機能を付加される場合と、無筋構造物として積極的に力学的機能を付加されない場合に大きく分けられるが、現在、ほとんどの山岳工法トンネルの覆工は力学的な機能を付加させない無筋もしくは補強鉄筋による構造となっている¹⁾。このような力学的機能を付加しない覆工については、余力保持機能として、あらかじめ想定することが難しい荷重に対しての耐荷性能を有している²⁾と考えられているが、定量的な評価を行えるところまでは至っていない。

また、耐荷力以外の機能に着目すると、近年、構造物の使用性、機能性、耐久性、ひび割れ抵抗性、第三者影響度に関する性能、美観・景観等にも配慮する必要性が指摘され³⁾、このような機能に対する評価方法の研究も進んできている。

一方で、コンクリートの施工性に着目すると、打設方法やワーカビリティなどの改善も継続的に行われてい

る。しかし、鉄筋コンクリートとする場合の施工性については、単純に無筋コンクリートを有鉄筋化する以外の要素について、十分な検討が行われているとは言い難く、無筋コンクリートの覆工以上に、機能の明確化と適切な品質向上施策の策定が望まれるところである。

このような背景のもと、鹿児島市の新武岡トンネルのランプトンネル（延長約 700m）では、未固結地山の 2 車線道路トンネルで、将来、供用後に並行して掘削される予定の本線トンネルの影響を考慮して、全線にわたり、力学的機能を付加した鉄筋コンクリートによる覆工を施工している。先に述べたように、覆工の力学的機能の定量的な評価は難しいが、本工事では、それ以外の覆工の機能の評価を行った上で、RC 覆工の高品質化対策に取り組んでおり、施工を通じてその対策効果の評価を行った。本論文では、これらの成果を報告する。

2. 適用工事の概要

(1) トンネルの概要

新武岡トンネル⁴⁾は、トンネルの中央付近で本線トンネルとランプトンネルの 2 本のトンネルに分岐する。将来、本線トンネルは延伸されるが、今回の工事では、本線トンネルは分岐部付近で止めて、暫定的に本線トンネルとランプトンネルを約 1500m の 1 本のトンネルとして暫定的に供用することを目指している。

今回、評価の対象とするランプトンネルは、地中深部で本線と分岐する箇所から終点側の坑口までの約 700m となる。ランプトンネルと称しているが、暫定的に 1 本

のトンネルで運用するため、2 車線断面のトンネルとなっている。

トンネル掘削対象の地質は、未固結のしらすであり、一軸圧縮強度 50kN/m^2 と極めて軟質であるが、しらすはその独特な変形特性から、未固結地山にしてはトンネルの安定性が高く、条件のよい区間では D I 相当の支保パターンによる施工が可能な地山である⁹⁾。図-1 にトンネルの平面図、図-2 に地質縦断面図を示す。

(2) ランプトンネルの覆工コンクリートの概要

ランプトンネルの覆工コンクリートは、全線にわたり鉄筋で補強されている。区間ごとの設計条件と覆工コンクリートの仕様を、表-1 に示す。また、ランプトンネルの標準断面を図-3 に示す。

ランプトンネルについては、基本的に全線にわたって、将来的な荷重の変化に対応できるように構造解析を行って、力学的機能を持たせた構造としている。一方で、すべての区間において、地山の変位の収束を確認した後に覆工を施工するため、将来の近接トンネルの施工や地山

表-1 ランプトンネル覆工コンクリートの設計条件と仕様

区間概要	測点	延長 (m)	荷重条件	厚さ (cm)	設計基準強度 (N/mm ²)	配筋 (周方向)
分岐部付近	No.5+10.6 ~10+4.0	93.4	ゆるみ荷重	40	30	内 D25@200 外 D22@200
一般部	No.10+4.0 ~36+13.1	529.1	将来近接トンネル影響	35	18	内 D19@200
坑口部②	No.36+13.1 ~38+3.1	30.0	ゆるみ荷重	50	24	内 D19@200 外 D19@200
坑口部①	No.38+3.1 ~39+16.4	33.3	全土被り荷重 (t=6m)	50	24	内 D22@250 外 D22@250

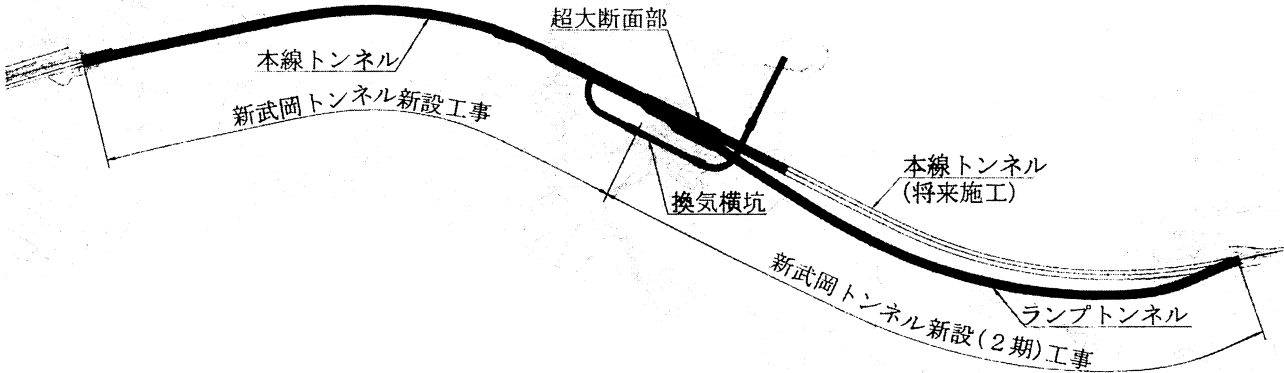


図-1 新武岡トンネル平面図

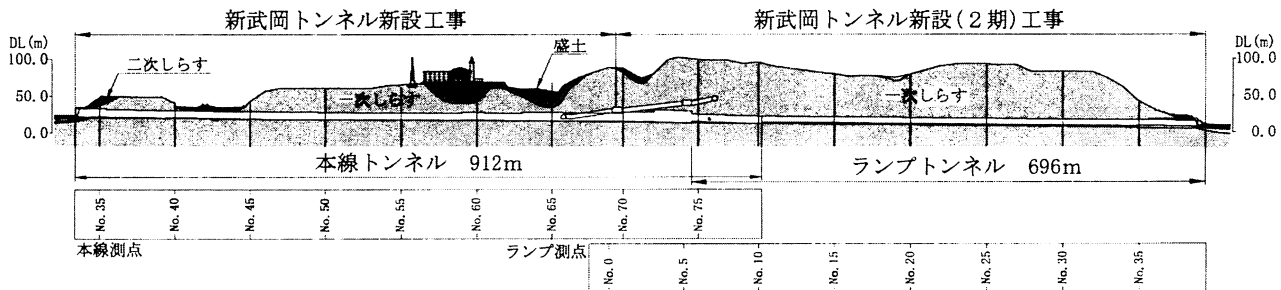


図-2 新武岡トンネル縦断面図

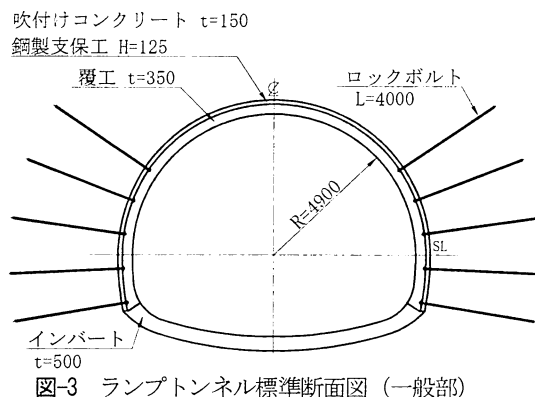


図-3 ランプトンネル標準断面図（一般部）

表-2 覆工の施工方法による機能や施工方法などの違い

機能や 施工方法	矢板工法	NATM	
		無筋	RC
力学的機能	期待	付加しない	付加する
打設方式	引抜き方式	吹上げ方式	
打設範囲	上半	全断面	
覆工厚	40～70cm程度	30cm	35cm程度以上
スランプ	12cm程度	15cm程度	
最大骨材寸法	40mm	40mm	

の改変がない限りにおいては、安全率の向上を目的とした余力保持機能を有しているとも考えることができる。

3. RC覆工に求められる機能・品質

(1) 山岳トンネルにおけるRC覆工の課題

山岳トンネルの覆工は、矢板工法から NATM へと工法が変遷する過程で機能や施工方法が変化してきている（表-2 参照）。本項では、矢板工法と NATM における覆工の違いを整理し、さらに NATM 覆工を RC 構造とする際の課題について述べる。

矢板工法では、矢板と地山の間に空隙が生じやすく、覆工打設後に空隙の充填を行う必要があった。そのため矢板工法の覆工は、覆工そのものが緩み荷重などを支持する構造体としての機能を求められていた。この構造体としての覆工は一般に無筋コンクリートで軸力を伝達する機能が求められ、一般地山の 2 車線道路トンネル程度の断面の場合、覆工厚が 40～70cm 程度と現在の NATM と比べて厚いものとなっていた。

NATM に山岳トンネルの施工方法が替わって、覆工は、吹付けコンクリートなど他の支保構造部材とともにトンネルの安定を確保する支保構造の一部を構成する部材ではあるものの、一般には力学的機能を付加しない化粧巻きとしての要素が強いものと捉えられるようになった。しかし、NATM においても、膨張性地山のように地山の変形の収束前に覆工を打設せざるを得ない場合や、都市部の未固結地山などで将来の荷重変動を考慮し

ないといけな場合などにおいては、覆工に力学的機能を求めることとなる。このような場合、覆工を RC 構造とするのが一般的であるが、NATM 覆工への RC 構造の適用については、施工上の課題もある。

矢板工法時代の覆工は、コンクリートポンプの性能の面から吹上げ方式での打設が難しく、覆工天端部に打設用の配管を設置し、引き抜きながら打設する引抜き方式での施工であった。その後、コンクリートポンプの性能向上に伴い、NATM が主流となるころには、吹上げ方式の打設に変わった。引抜き方式では、コンクリートの投入箇所が随時移動し、コンクリートの連続性が保ちづらかったのに比べ、吹上げ方式は 1 箇所から連続的に打設を行えるため、相対的に覆工コンクリートの品質は向上した。しかし、天端部のコンクリートの流動距離に着目すると、その距離は長くなり、一般の土木構造物と比べるとかなり特殊な打設方法となった。

このように打設方法やの変化に伴い、コンクリートに施工上求められる性能も変化した。しかし、指針等で定められている覆工コンクリートの配合は、矢板工法時代の配合をベースにしたものであり、覆工の高品質化に着目した場合、改善の余地があると考えられる。さらに、無筋コンクリートで使用されている配合を RC 覆工に適用した場合には、鋼材によりコンクリートの流動性、材料分離抵抗性が見かけ上、低下し、無筋コンクリートの場合と比べて、充填性の低下が懸念されることから、要求品質を十分に満たしているとは言い切れない。特に、トンネル天端部での施工方法を考慮すると、コンクリートの流動性、材料分離抵抗性等の充填性に係わるワーカビリティについては、改善が必要であるといえる。

打設後の養生に着目すると、NATM に替わっても大きな技術的な進歩はない。山岳トンネルの覆工の型枠は、施工サイクルの関係で 16～20 時間程度で脱型されるのが一般的であり、そのため、脱型時点での発現強度が小さい。また、通常のコンクリート構造物は、脱型後に湿潤養生を行うのが一般的であるが、覆工コンクリートについては、未だ、効果的な養生が行えていないのが現状である。さらに、RC 覆工とする場合には、内部に配置された鋼材が長期にわたって所要の機能を発揮するために、コンクリートがこれらの鋼材を腐食から十分に保護する性能を有していることが必要であり、RC 覆工では、無筋コンクリートの場合以上に、養生が重要となる。

(2) RC覆工の要求性能と高品質化の目標

山岳トンネルの覆工の役割・機能は、トンネルの道路や鉄道、水路といった使用用途、使用条件により幾分異なるものの、概ね、表-3 のように整理できる²⁾。

表-3 に示す機能をできるだけ長期的に維持する高品質の覆工を構築するためには、設計・施工段階で、覆工

表-3 覆工の機能

供用性に関する機能	内空断面保持機能
	防水機能
	耐火機能
	保守管理機能
	内装機能
	トンネル内設備の保持機能
不確定要素に関する機能	余力保持機能
	変形性能保持機能
	構造的安定機能
力学的機能	付加外力の支持機能
	支保工の補完機能

文献²⁾ 表-1.3.1 から抜粋

表-4 山岳トンネルの覆工の要求性能の目安

要求性能項目		覆工	坑門	橋梁上部構造(参考)
安全性	耐荷性能	○	○	○
	耐震性能		○	○
	耐疲労性能			○
	耐衝撃性能			○
使用性	構造物の使用性	○	○	○
	機能性	○		
耐久性	中性化		○	○
	塩害		○	○
	化学的侵食	○	○	○
	アルカリ骨材反応	○	○	○
	凍害	○	○	○
ひび割れ抵抗性		○	○	○
第三者影響度に関する性能		○	○	○
美観・景観		○	○	○

文献³⁾から抜粋・加筆

に求めるべき品質目標を設定する必要がある。

国土交通省九州地方整備局では、土木コンクリートの品質確保を目的に、「九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針（案）」³⁾を策定しており、この指針（案）で、山岳トンネルの覆工の要求性能の目安を表-4 のとおりまとめている。そこで、本項では、表-4 に示される要求性能に基づき、本ランプトンネル RC 覆工に関する要求性能と高品質化の目標を設定する。

a) 安全性・使用性

耐荷性能などの安全性能や、使用性については、一般には、設計基準を満足するように部材設計を実施することで、与条件に対して、性能を満足しているものと考えられる。山岳トンネルの覆工は力学的機能を付加した場合でも、これに関わる荷重の設定方法や、耐荷性能については、研究の途上であり、耐荷力などの安全性能や使用性については、高品質化の検討の対象とはしない。

b) 耐久性

表-4 に示される中性化については、無筋の覆工ではあまり問題とならない。また、鉄筋コンクリートの場合も、一般に基準に示される最小かぶりを満足することで、要求性能を満足すると考えられるが、山岳トンネルの覆

工を全線、有鉄筋化した事例は少なく、不確定要素も小さくないと考えられるため、高品質化の検討対象とする。

アルカリ骨材反応に対しての照査は、無害な骨材の使用を確認することで行っており、また、凍害・塩害・化学的侵食については、当該地域の特性から問題は想定されず、高品質化の検討の対象としない。

c) ひび割れ抵抗性に関する性能

これまでの無筋の覆工コンクリートでは、ひび割れ抵抗性に関する特別な照査が行われることは稀であったが、本トンネルでは、鉄筋コンクリート化に伴うひび割れ抵抗性等について、乾燥収縮および温度応力に起因して発生するひび割れに対する抵抗性について検討する。

d) 第三者影響度に関する性能

第三者影響度に関する性能は、構造物の一部(かぶりコンクリート片など)が剥落することにより、人や物に危害を加える可能性について考慮するものである。

一般の RC 構造物の場合、かぶりコンクリート片の剥落は、主として中性化や塩害による鋼材腐食によって生じるので、中性化や塩害による耐久性を設計耐用期間にわたって満足すれば、問題ないと考えられている。

しかし、覆工コンクリートの場合、対象面積が広く、打設方法や養生方法も他の一般構造物と異なることから、部分的なかぶり不足や充填不良といった施工時の欠陥によって、かぶり部分が剥落する可能性が一般のコンクリート構造物より大きい。さらに、一般の構造物の場合、剥落等の兆候は維持管理における日常点検や定期点検によって発見されやすいが、山岳トンネルの覆工の場合、対象面積も広く、供用中の点検作業は容易ではない。

このようなことから、第三者影響度に関する性能向上施策として、コンクリートの剥落に対する抵抗性向上、充填不良等の初期欠陥を回避するためのコンクリートの性能向上を目指した検討を行う。

e) 美観・景観

一般には、美観・景観に関しては、周辺環境・周辺構造物を考慮して設計、施工計画を実施することとして、要求性能を満たしていると考ええる。また、近年の覆工は打設方法の改善により、以前ほど完成時の美観に問題のあることは少なく、さらに、完成のトンネル覆工は、必要に応じて内装板の設置等の対策が取られるため、完成時の美観については、特に高品質化の対象とはしない。

以上より、安全性、使用性および美観・景観を除いた要求性能項目について、本トンネル覆工で高品質化の検討対象とし、高品質化を達成するための着目点を表-5 のとおりとした。

(3) 着目点と具体的な対策

高品質化対象項目として選定した着目点に対して、本覆工における具体的な対策を表-6 のように選定した。

表-5 高品質化対象項目

要求性能	着目点
耐久性	・中性化に対する抵抗性
ひび割れ抵抗性	・乾燥収縮および温度ひび割れに対する抵抗性
第三者影響度に関する性能	・剥落に対する抵抗性 ・初期欠陥の防止

表-6 高品質化を目的とした具体的対策

着目点	中性化に対する抵抗性	乾燥・温度ひび割れに対する抵抗性	剥落に対する抵抗性	初期欠陥の防止
具体的対策				
流動性の高いコンクリートの採用	○		○	◎
セメント種類の変更	○	○		
膨張材の採用		◎		
短繊維の採用		○	◎	
打設方法	打設方法の改善	○		◎
養生	湿潤養生の実施	◎	◎	

◎：効果が大きく期待できるもの
○：効果が期待できるもの

4. RC覆工の高品質化施策

(1) コンクリートの配合検討

a) 検討概要

前章の検討結果より、配合面では、表-7 に示す対策を行う。配合選定にあたっては、通常の覆工コンクリートの仕様を満たす配合との性能比較を行うために、基礎的な室内試験を合わせて実施した。

試験ケースを表-8 に示す。④が今回選定した高品質化対策を適用したケースであり、①から③は性能比較のためのケースである。なお、表-7 に示す対策のうち、粗骨材の最大寸法とセメントの種類の変更については、①から③の比較配合においても見込んでいる。

①は、スランプ 15cm、単位セメント量 270kg/m³ 以上、水セメント比 60%以下の通常の覆工コンクリートの仕様を想定している。②は、①の水セメント比を 55%以下として、鉄筋コンクリートに対応可能としたものである。③は②をベースとして、中流動覆工コンクリートの仕様を満足するように流動性を高めたものである。④は、さらにひび割れ抑制効果と剥落防止性能を付与するために膨張材と短繊維を添加している。

これらのケースについて、表-9 に示す室内試験を行い、フレッシュコンクリートの性状と硬化コンクリートの特性を比較した。使用材料の一覧を表-10 に、各ケースの配合を表-11 に示す。なお、③では高性能 AE 減水剤は特殊増粘剤一体型のものを使用し、また、単位水量

表-7 配合面の高品質化対策

着目点	対 策
初期欠陥の防止	・中流動コンクリートの採用 ・粗骨材の最大寸法の変更 (40mm→20mm)
中性化に対する抵抗性	・セメントの種類を変更 (高炉B種→普通ポルトランド)
乾燥・温度ひび割れに対する抵抗性	・膨張材の採用
剥落に対する抵抗性	・短繊維 (合成繊維) の採用

表-8 試験ケース

区 分	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	単位セメント量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)
性能比較	①通常(無筋)	15±2.5	—	270 以上	60 以下
	②通常(RC)				55 以下
	③中流動			320 程度	55 以下
高品質化	④中流動・膨張材・短繊維	21±2.5	35～50	340 以上	55 以下

表-9 室内試験項目

試験項目		試験方法
フレッシュ コンクリ ートの性状	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	加振変形量	NEXCO 試験方法
	U形充填高さ(障害無し)	733-2008
	ブリーディング率	JIS A 1123
硬化コンク リートの 特性	圧縮強度 σ_7 , σ_{28}	JIS A 1108
	長さ変化試験	JIS A 6202 附属書 2 B 法

表-10 使用材料一覧

材料		種類・産地など	密度その他
セメント		普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm ³
細骨材 S1	砕砂	石灰岩：大分県津久見市上青江戸高鉾山	2.67 g/cm ³ FM=2.75
細骨材 S2		硬質砂岩：鹿児島県日置市吹上町田尻	2.62 g/cm ³ FM=2.85
粗骨材 G1	砕石 2005	硬質砂岩：鹿児島県日置市吹上町田尻	2.64 g/cm ³ 実績率 59.5%
粗骨材 G2		石灰岩：大分県津久見市下青江津久見鉾山	2.70 g/cm ³ 実績率 60.0%
高性能AE減水剤 SP1		ポリカルボン産エーテル系化合物	1.04～1.11 g/cm ³
高性能AE減水剤 SP2		ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体	1.03～1.10 g/cm ³
膨張材 Ex		エトリンガイト・石灰複合系	2.98 g/cm ³
短繊維 F		ポリプロピレン製	0.91 g/cm ³ 繊維長 48mm

増加による乾燥収縮ひずみを低減するため、石灰石骨材の単位量が増加するように使用骨材の混合比率を変更している。

表-11 配合表

配合区分	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									F (kg/m ³)
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ex	SP1	SP2	
①通常 24-15-20	58.0	50.6	168	290	235	692	634	278		4.06		—
②通常 27-15-20	53.0	50.1	167	315	230	679	634	278		4.41		—
③中流動	53.0	50.1	175	331	316	576	267	637			5.63	—
④中流動 (高品質)	50.0	55.0	175	350	336	610	238	567	20		7.35	2.73

※①②の骨材容積比 S1:S2=25:75, G1:G2=70:30

③④の骨材容積比 S1:S2=35:65, G1:G2=30:70

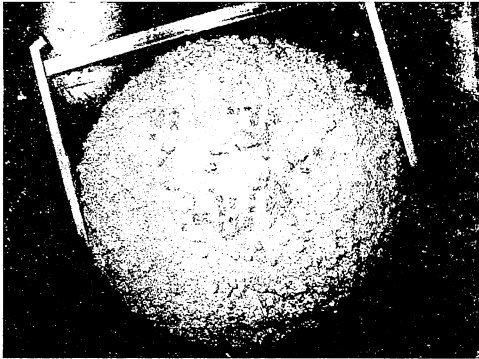


写真-1 加振後の状況 (配合④)

b) フレッシュコンクリートの試験結果

試験結果を図-4 に、配合④の加振変形試験後の状況を写真-1 に、ブリーディング試験結果を表-12 に示す。

配合③、④は、流動性が高く、スランプ 15cm の配合①、②と比較するとスランプや空気量の経時変化が小さく、良好なスランプ・空気量の保持性能を有することが確認できた。また、中流動コンクリートは、充填高さ試験結果から、配合①、②に比べ充填性能が非常に高いことがわかる。

配合③、④の加振変形試験後の外観は、写真-1 に示すように、粗骨材の分離や外周部のペーストの分離がほとんど見られず、中流動コンクリートは良好な材料分離抵抗性を有していることが確認できた。

ブリーディング試験においては、配合③、④は、配合①、②より単位水量が多いにもかかわらず、ブリーディング率が小さく、微視的な材料分離抵抗性についても中流動コンクリートが優れていることが確認できた。

c) 硬化コンクリートの特性

硬化コンクリートの特性として、長さ変化試験結果を図-5 に示す。図-5 より、配合④は配合①、②と比較すると、膨張ひずみにより、乾燥収縮ひずみが 100μ 程度低減している。したがって、膨張材の採用により乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性が向上していることが確認できた。

以上の結果より、高品質化対策を適用した配合④は、流動性と材料分離抵抗性に優れており、充填性能が高く、

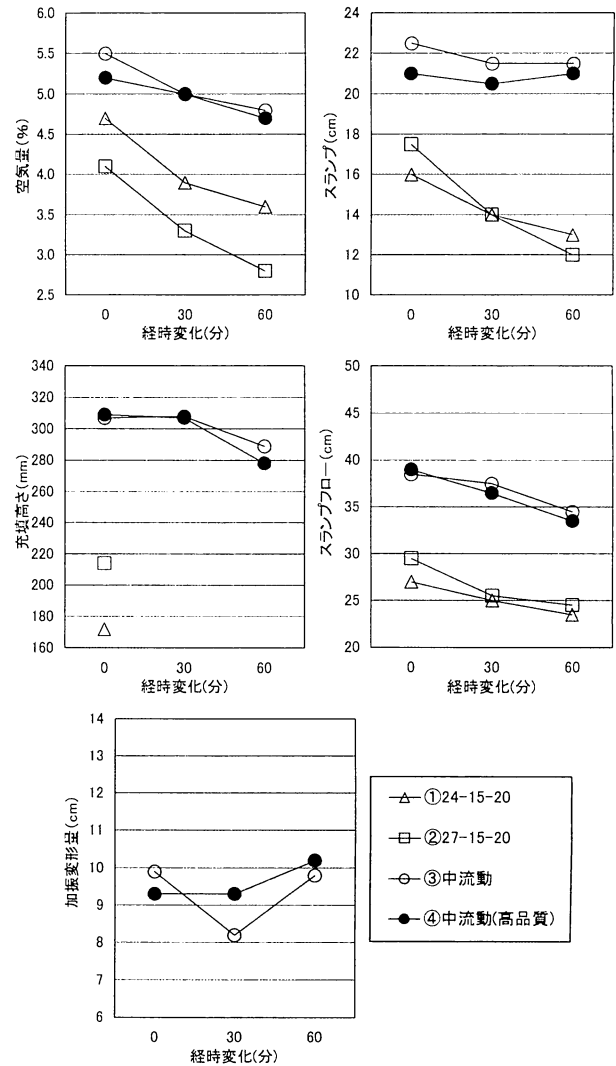


図-4 フレッシュ性状試験結果

表-12 ブリーディング率の試験結果

配合区分	①	②	③	④
ブリーディング率(%)	0.38	0.38	0.30	0.06

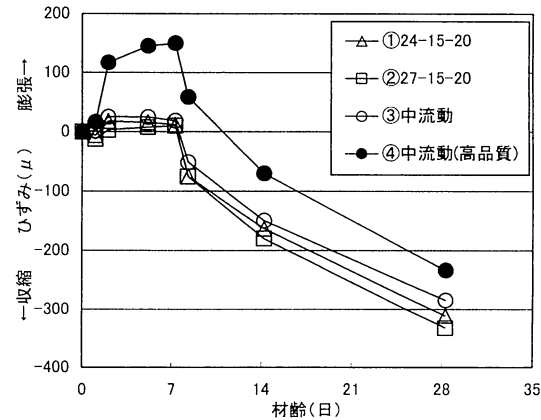


図-5 長さ変化試験結果

また、乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性も向上していることが確認できた。

(2) 打設方法の改善

今回採用した中流動コンクリートは、締固めが困難な天端部の充填性向上や型枠バイブレータ等を用いることによる省力化を目的に開発されたものである。これを鉄筋コンクリート覆工に用いることで充填性の向上が期待でき、初期欠陥の少ないコンクリートの構築が可能となる。ただし、鉄筋コンクリート覆工は、普通の無筋コンクリートの覆工に比べて充填性を確保するのが難しいため、中流動コンクリートの採用だけでは高品質化の施策としては十分とは言えず、打設方法の改善も必要となる。

そこで、表-6 に示した初期欠陥の防止を第一の目的として、打設方法の改善に取り組んだ。それぞれの取り組みの詳細と改善効果については、次章で述べる。

(3) 養生

コンクリートは、打込み後のごく早い時期に表面が乾燥して内部の水分が失われると、セメントの水和反応が十分に行われずひび割れ発生の要因となり、さらに、風などによって表面だけが急激に乾燥すると、ひび割れ発生の確率が高くなる。また、コンクリートの力学的性能、耐久性、およびその他の性能等の品質を高めるためには、コンクリートを十分硬化させることと、硬化中の乾燥による収縮をできるだけ小さくすることが必要である。そのため、打ち込み後は、できるだけ長く湿潤状態に保つことが望ましい⁶⁾。

このようなことから、スラブ上面やダム等のマスコンクリートの露出面などは、湛水養生、養生マットの敷設などが容易であることもあって、積極的に、湿潤養生が行われている。これに対して、トンネル覆工コンクリートのような壁面やアーチ部材の下面については、湿潤養生は難しく、主に、定期的な散水などの養生が行われるのに留まっている。

筆者らは、このような従来湿潤養生の難しかった壁面やアーチ部材の下面に対する浸水養生システム（以下アクアカーテンという）を開発しており⁷⁾、今回、ランプトンネルに適用した。

アクアカーテンは、浸水養生シートを密着させて、給水を行うことで、コンクリート表面に常に水膜を形成させる浸水養生システムである。図-6 にシステム概要図を示すとともに、浸水養生シートの設置から給水養生までの手順を以下に示す。

- ①塩ビ製のフレームを用いて浸水養生シートを覆工の覆工表面近くに仮固定する（写真-2 参照）。
- ②シート端部および脚部の気密を確保し、吸引装置により、コンクリートと浸水養生シート間の空気を吸引し、負圧にすることで、シートを覆工コンクリートに密着する（写真-3 参照）。

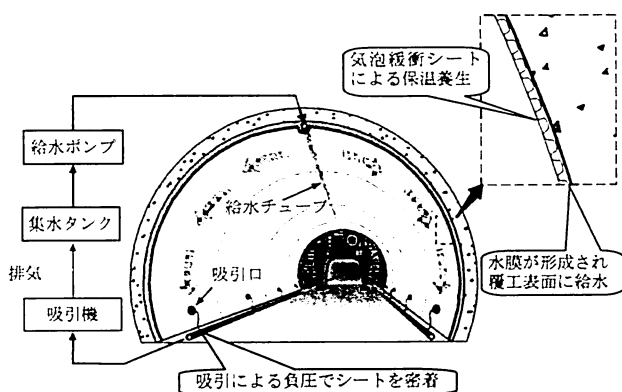


図-6 アクアカーテンの概要図

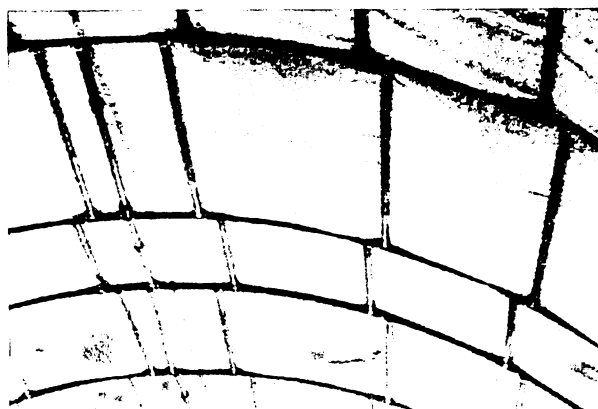


写真-2 浸水養生シート仮固定状況（吸引前）

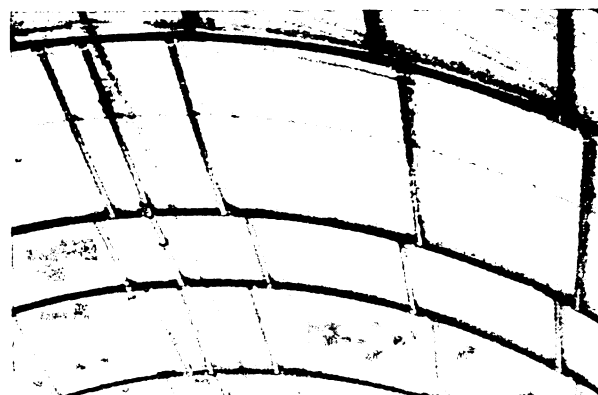


写真-3 浸水養生シート吸着固定状況（吸引後）

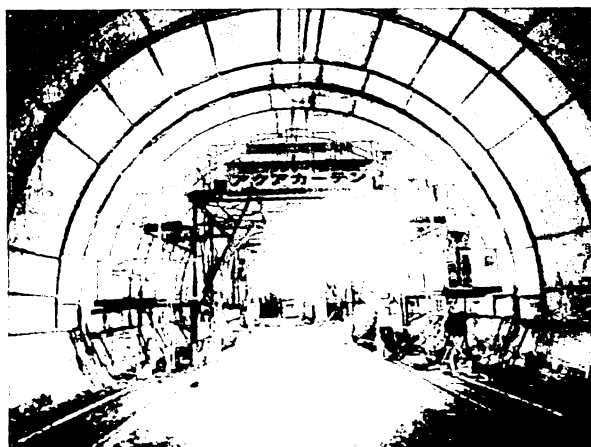


写真-4 アクアカーテン養生全景

③シート天端部に覆工縦断方向に設置した給水チューブにより、シートとコンクリート間に給水し、コンクリート表面全体に水膜を形成する。

また、シート移動は、浸水養生シートを塩ビ製のフレームごと専用の移動台車に乗せて運搬し、設置位置でジャッキアップする。

浸水養生シートは、表面に凹凸形状を有するもので、広範囲に空気の流路が確保され浸水養生シート全体を負圧にできるため、覆工コンクリート全面に確実に密着させることができる。さらに、空気の流路に引き続き給水することで、覆工全面を浸水させることができる。

写真-4に、アクアカーテンによる養生全景を示す。

5. 高品質化施策の評価

本章では、4章で示した高品質施策の評価を行う。

(1) 中性化に対する抵抗性

覆工コンクリートにおける浸水養生の効果を比較した既往の研究⁹⁾では、浸水養生1週間の後に気中養生3週間を行った供試体と、気中養生4週間を行った供試体について、促進中性化試験を行い、中性化深さを比較している。これによると、50年後の中性化深さの推定値は、気中養生4週間では43mm、浸水養生1週間では20mmとなり、浸水養生により中性化深さを大幅に低減できることが確認されている。

よって、ランプトンネルにおける浸水養生の実施により、かぶりコンクリートの中性化速度が低減し、鋼材を腐食から十分に保護する性能が付与されたとと言える。

(2) 乾燥・温度ひび割れに対する抵抗性

a) 膨張材による初期ひび割れの低減効果

覆工コンクリートの高品質化対策による、初期ひび割れ低減効果を検証するため、3次元 FEM 温度応力解析を行い、ひび割れ指数(コンクリートの引張強度/発生引張応力)を算出することで評価した。

検討は、配合選定で比較した4配合(表-11 参照)について行った。その解析モデルを図-7に、主な解析条件を表-13に示す。解析モデルはランプトンネルの一般部(図-3 参照)を対象として、トンネルの対照性を考慮し、トンネル断面を左右2分割、1スパン10.5mをスパン中央で2分割した1/4モデルとした。検討時期は、コンクリート温度が最も高くなる8月初旬の打設を想定して比較した。

なお、解析プログラムにはマスコンクリートの非線形温度応力解析プログラム ASTEA MACS for Windows(Ver.6)を使用した。

表-13 解析条件

特性値	単位等	覆工コンクリート	吹付けコンクリート	地山(シラス)
打込み温度	℃	31.7	—	—
熱伝導率	W/m℃	2.7	2.7	3.45
比熱	kJ/kg℃	1.15	1.15	0.8
単位容積質量	kg/m ³	①2297, ②2303 ③2302, ④2296	2,300	1,550
断熱温度上昇式(打込み20℃)	基本式	$Q(t) = K(1 - \exp(-\alpha t^{\beta}))$		
	(セメント量) kg/m ³	①290, ②315 ③331, ④350	—	—
	(K)℃	①44.9, ②47.7 ③49.4, ④51.5		
	(α, β)	①(1.07,1.00) ②(1.16,1.00) ③(1.22,1.00) ④(1.29,1.00)		
熱膨張係数	×10 ⁻⁶	10	10	10
ポアソン比	—	0.2	0.2	0.3
有効ヤング係数	N/mm ²	$E_e = \Phi(t) \times 4700(f_{ct}(t))^{0.5}$ $\Phi(0 < t < 3 \text{ 日}) = 0.73$ $\Phi(3 \leq t < 5 \text{ 日}) = 0.73 \sim 1.0$ $\Phi(t \geq 5 \text{ 日}) = 1.0$	22,000	216
引張強度	N/mm ²	$f_{ct}(t) = 0.44(f_{ck}(t))^{0.5}$	—	—
膨張ひずみ	×10 ⁻⁶	④のみ150付与	—	—

注) ①～④は配合No.

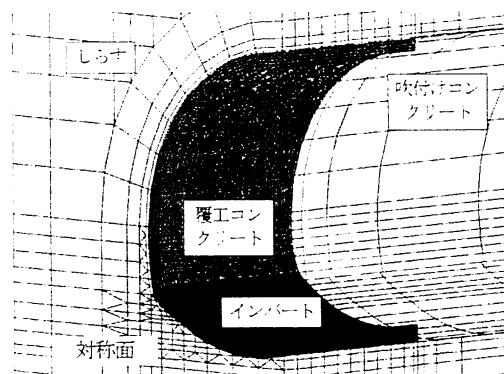


図-7 解析モデル (1/4モデル)

表-14 3次元温度応力解析結果および推定ひび割れ幅

配 合	最小ひび割れ指数	ひび割れ*発生確率(%)	トンネル軸方向鉄筋比(%)	推定最大*ひび割れ幅(mm)
①通常 24-15-20	1.02	83	—	—
②通常 27-15-20	1.04	80	—	—
③中流動	1.01	84	0.19	0.28
④中流動(高品質)	1.56	14		0.06

* : 2007年版・土木学会・コンクリート標準示方書(設計編)に準拠して算出

解析結果をまとめて表-14に示す。また、図-8に各配合の最小ひび割れ指数分布図を示す。温度応力の発生形態としては、側壁部にトンネル軸方向に引張応力が発生していることから、アーチ部のコンクリートがインバートに拘束されて発生する外部拘束応力が卓越する結果となっている。

配合①、②および③においては、最小ひび割れ指数が1.0程度となっているものの、④の高品質化した中流動コンクリートは、膨張材の採用により、最小ひび割れ指数が1.56となっており、ひび割れ発生の可能性を低減

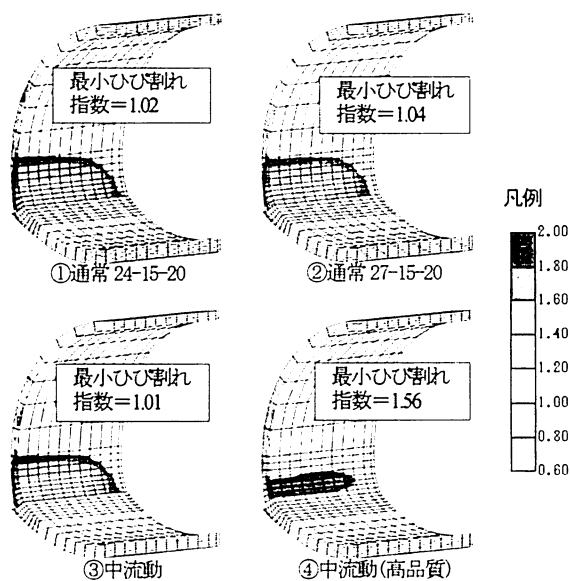


図-8 最小ひび割れ指数分布

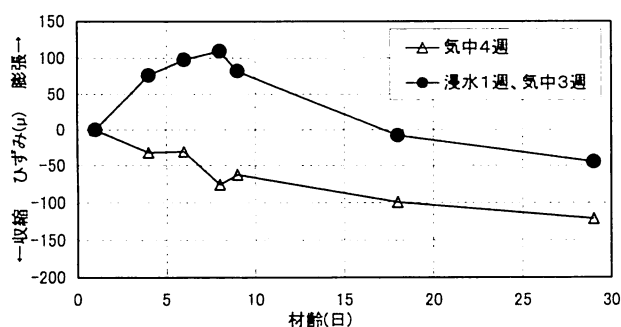


図-9 乾燥収縮ひずみの比較

表-15 圧縮強度の比較

養生条件	28日強度(N/mm ²)
坑内気中養生4週間	33.1
坑内浸水1週間、気中3週間	39.8

できることがわかる。

また、トンネル軸方向の鉄筋量(トンネル軸方向鉄筋比 0.19%)とひび割れ指数からひび割れ幅を算出すると、配合③では 0.28mm となるが、高品質化した中流動コンクリートは 0.06mm 程度と小さくなっている。

b) 浸水養生による乾燥収縮ひずみの低減効果

浸水養生による乾燥収縮ひずみの低減効果を、実際の配合で確認するため、コンタクトゲージ法による乾燥収縮ひずみの比較を行った。また、圧縮強度の比較も合わせて行った。

10×10×40cm の角柱供試体を覆工コンクリート打設時に採取し、実際の施工と同様に翌日脱型した後、ゲージプラグを取り付け、坑内において、気中養生4週間を行ったものと、浸水養生1週間の後に気中養生3週間を行ったものの2条件で養生し、長さ変化を比較した。また、同様の条件でφ12.5×25cm の円柱供試体を養生し、圧縮強度を比較した。なお、材齢28日までの間の坑内

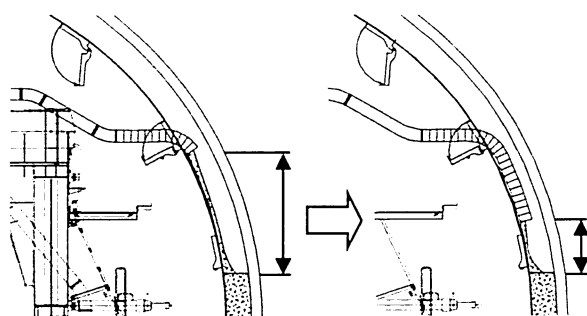


図-10 コンクリート落下高さの低減



写真-5 コンクリート締固め状況

平均気温は 27.8℃、平均湿度は 77%であった。

試験結果を図-9 および表-15 に示す。図-9 より、1 週間の浸水養生の実施により、材齢 28 日における乾燥収縮ひずみが約 75μ 低減することが確認できた。また、表-15 より圧縮強度は約 20%向上することが確認できた。

以上の膨張材および浸水養生工法の採用により、現時点で RC 覆工にひび割れは発生していない。

(3) 初期欠陥の防止

覆工コンクリートを鉄筋コンクリートとした場合に発生しやすい初期欠陥と本工事で行った対策およびその効果を以下にまとめる。

a) 豆板 (ジャンカ)

豆板は、覆工コンクリートの場合、側壁とインバートとの打継目部分、および投入口を下段の窓から上段の窓に切り替えた際の打重ね部分に発生しやすい。

対策としては、シュートを長くし、コンクリートの落下高さを小さくすることで材料分離を防止した(図-10 参照)。しかし、鉄筋コンクリートの場合は、鉄筋に阻まれてコンクリートが充填されづらい箇所が生じる場合があるため、締固めの層厚の管理を確実に行って、写真-5 に示すように目視にて棒状バイブレータによる締固めを行った。

以上の対応の結果、鉄筋コンクリートの打設区間全線にわたり、豆板と判定されるようなコンクリートの初期欠陥は認められなかった。

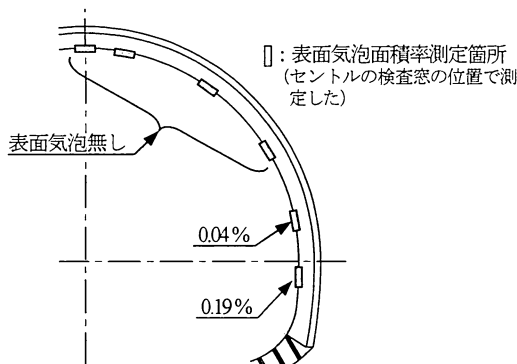


図-11 表面気泡面積率の分布

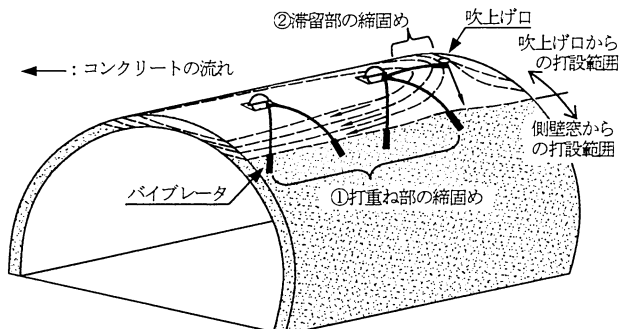


図-12 天端部の締固め

b) 表面気泡

表面気泡は、セントルのせき板に接するコンクリートの表面にコンクリート打込み時に巻き込んだ空気、あるいはエントラップドエアが残って露出し、硬化したものである。型枠が傾斜を有する部分では、十分な締固めを行っても表面気泡が発生しやすく、トンネル覆工では、傾斜面となるSL下方で発生しやすい。

今回、採用した中流動コンクリートは材料分離抵抗性が高いため、材料分離を気にすることなく十分なバイブレータによる締固め作業ができる。側壁部では、締固め作業において、1層の打ち上がり高さを制限して、気泡を抜けやすくした。

以上の中流動コンクリートの採用と、締固め方法の改善により表面気泡の発生はほとんどなかった。また、完全に表面気泡をなくすことが難しいSL下方においても、表面気泡面積率は0.2%程度となり、良好な仕上がりとなった(図-11参照)。

c) コールドジョイント・縞模様

一般に、コールドジョイントは、適切な打重ね時間間隔で打設し、層境界部の締固めを十分行うことで発生を回避することが可能であり、近年のトンネル覆工で、コールドジョイントが発生する例は少ない。

天端部で、吹上げ方式で打設したコンクリートは、先に流れたコンクリートの上に一定の時間を置いたのちに流れる場合が多い。そのため、若干の硬化時間の差やブリーディングの影響により縞模様となって現れやすい。そこで、中流動コンクリートで使用する型枠バイブレ

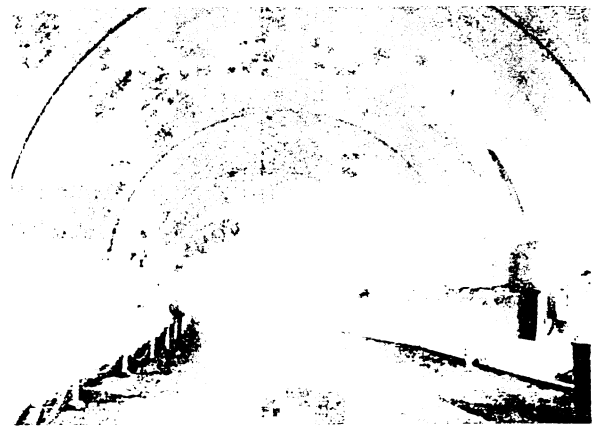


写真-6 高品質化覆工の仕上がり状況

ータに加え、以下の対策を行った。

先に流れたコンクリートと後に流れたコンクリートの境界部については、棒状バイブレータにより確実に締め固めることを基本とした(図-12中①参照)。

また、特に鉄筋コンクリートの場合、吹上げ口付近には、滞留して動かないコンクリート塊が生じやすいため、打設中常に棒状バイブレータで、滞留したコンクリートの締固めを行った(図-12中②参照)。

d) 砂すじ

砂すじは、せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート中の水分が分離して外部に流れ出す場合に生じ、コンクリート表面に細骨材が縞状に露出するものである。今回採用した中流動コンクリートは、ブリーディング率が低く材料分離抵抗性が高いため、入念なバイブレータの締固めに関わらず、砂すじの発生は非常に少なかった。

(4) 美観・景観

美観・景観については、今回、高品質化の対象としていない。しかし、今回の施策を行うことにより、初期欠陥がなく、さらに打設による縞模様などの少ない良好な美観・景観となっている。

仕上がり状況を写真-6に示す。

6. 結論

RC覆工の高品質化施策とその評価を行った結果、得られた技術的知見を以下にまとめる。

- ・RC覆工の機能に着目し、高品質化に取り組むべき項目を整理した。
- ・RC覆工に中流動コンクリートを適用することで、コンクリートの流動性、材料分離抵抗性などの充填性を改善し、ワーカビリティを向上させることができた。
- ・浸水養生工法(アクアカーテン)の採用により、中性

化に対する抵抗性が向上し、RC 覆工の長期耐久性向上が期待できることを確認した。

- ・膨張材の採用により、乾燥収縮および温度ひび割れに対する抵抗性が向上することを確認した。
- ・コンクリートのワーカビリティの向上に加え、打設方法の改善により、RC 覆工に生じやすい初期欠陥を低減できることを確認した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，pp.121-124，2003.
- 2) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，pp.6-8，2002.
- 3) 国土交通省九州地方整備局，九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針（案），2008.
- 4) 五反田信幸，緒方秀敏，多宝 徹，日向哲朗：シラス

地盤に超大断面 378m² の地中分岐部を建設 鹿児島東西道路 新武岡トンネル，トンネルと地下，Vol. 43，No. 3，pp. 15-25，2012.

- 5) 多宝 徹，鈴木雅行，菅原健太郎，北村良介：しらす地山の特性に着目したトンネルの力学的研究，土木学会論文集 C，Vol. 68，No. 2，pp. 321-340，2012.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，pp.126-129，2007.
- 7) 古川幸則，日向哲朗：浸水養生工法（アクアカーテン）によるトンネル覆工コンクリートの養生，臨床トンネル工学研究所，平成 23 年度最新トンネル技術講演会，pp.57-64，2011.
- 8) 新居秀一，白岩誠史，林俊斉，齋藤淳：覆工コンクリートにおける給水養生開始時期の品質に与える影響，土木学会第 67 回年次学術講演会，VI-002，pp.3-4，2012.9.

(2012.9.3 受付)

IMPROVEMENT OF QUALITY OF REINFORCED CONCRETE LINING IN MOUNTAIN TUNNEL

Tetsuro HYUGA, Toru TAHO, Hidetoshi OGATA,
Ritsu SUGIYAMA and Koji TAKEWAKA

Lining of Shin Takeoka tunnel is designed as reinforced concrete to prepare against construction of adjacent tunnel in the near future. Application of reinforced concrete requires a lining concrete to have additional performance, for example, high fluidity and resistance to carbonation.

Authors confirmed the performance requirements for reinforced concrete lining, and carried out several measures to improve quality of lining. This paper reports on the measures and its evaluation to improve quality of reinforced concrete lining.