

トンネル覆工コンクリートにおける表層部の品質に関する検討

— 東九州自動車道新津トンネル工事 —

A Study on the Quality of Surface Layer of Tunnel Lining Concrete
(Construction of the ARATSU Tunnel on the Higashi-Kyushu Expressway)

平間昭信^{*1} 筒井隆規^{*2} 中辻尚^{*2} 小西裕之^{*2}
Akinobu Hirama Takanori Tsutsui Hisashi Nakatsuji Hiroyuki Konishi
瀧間優作^{*2} 築地功^{*3} 熊谷幸樹^{*3}
Yuusaku Takigiku Isao Tsukiji Koki Kumagai

【要旨】

当社は、トンネル覆工コンクリートの品質向上を目指して、天端部の締固め、打設管理、養生管理などの技術向上について取り組んでいる。更なる高度化を目指し、東九州自動車道新津トンネル工事において、当社では初めて中流動コンクリートを適用し、これまでに様々な検討を行い、貴重な技術データを収集した。その中で、中流動コンクリートの適用によりコンクリートの美観性が向上していることを既に報告している¹⁾。

本報告では、中流動コンクリートと通常コンクリートを用いた覆工コンクリートについて、美観性の評価とともに、原位置での透気係数、細孔径分布などの測定を行ない、コンクリート配合、締固め方法が覆工コンクリートの表層部の品質に及ぼす影響について検討した。その結果、通常の覆工コンクリートより中流動コンクリートは、美観性は向上するとともに、透気係数、細孔径分布から求めた細孔率などの表層の品質は向上していることを確認した。また、型枠パイプレータのみの施工ではアバタが多く美観性に劣る状況であるが、透気係数および細孔率は挿入式パイプレータと同等の結果であり、密実性に着目した品質は同程度であることが確認された。

【キーワード】 中流動コンクリート 覆工コンクリート 締固め 表層部の品質 美観性 透気係数

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの品質確保のニーズの高まりを受けて、施工の合理化、高品質化を目的として、当社では打込み、締固めなどの施工技術、打設管理および養生管理など施工管理技術の向上について取り組んでいる。

更なる覆工コンクリートの高度化を目指し、東九州自動車道新津トンネル工事において、当社では初めて中流動コンクリートを適用した¹⁾。中流動コンクリートの特徴を最大限に生かすために、実施工では、保有技術である自動配管切り替え装置「スパイダー打設システム」や、型枠パイプレータの集中制御システムなどを採用したセントル設備、コンクリート養生システム、養生管理システムなどの合理的なトンネル覆工打設管理システムを適用し、トンネル覆工に関する合理化、およびコンクリートの品質向上を目指した施工を行った。平成24年3月23日に施工延長2,074mの覆工打設を完了し、そのコンクリート数量は18,560^mである。

中流動コンクリートを用いた覆工コンクリートは、東日本、中日本、西日本の各高速道路株式会社により、「トンネル施工管理要領(中流動コンクリート編)」²⁾以下、

中流動覆工管理要領と記す)が平成20年8月に制定されている。この要領に基づき、新津トンネルでは中流動コンクリートの実績とともに、新たに製造設備の制約を受けない増粘剤系中流動コンクリート(HY-TOM40)を開発・適用し、貴重な技術データを収集し報告を行っている。その中で、中流動コンクリートの適用によりコンクリートの美観性が向上していることを報告している³⁾。

本報告では、中流動コンクリートと覆工コンクリートについて、原位置での透気係数、細孔径分布の測定を行ない、覆工コンクリートの美観性を含めた覆工コンクリートの表層に着目して評価した結果について報告する。

2. 検討概要

今回の検討は、配合および締固め方法による覆工コンクリートの美観性を含めた品質を評価をしたものである。

2.1 中流動覆工コンクリートとは

中流動覆工管理要領では、「中流動コンクリート」とは、スランプフロー35cm～50cm程度で、スランプ15cm～18cmの普通(従来)コンクリートとスランプフロー65cm程度の高流動コンクリートの中間的な性状を有す

1.建設事業本部 エンジニアリング事業推進部 2.九州支店 3.建設事業本部 土木事業統括部

るコンクリートである」と定義されているコンクリートである。流動性を確保しつつ、材料分離を防ぐために、混和材料（石炭灰FAまたは石粉LS）を添加して粘性を付与したコンクリートである。表-1に中流動覆工コンクリートの配合決定のための基準を示す。

2.2 検討配合

今回検討した配合は、通常の覆工コンクリートが1配合（以下、N）、中流動コンクリートは中流動覆工管理要領に準じた石灰石微粉末を用いた粉体系（以下、M-LS）と、当社の開発した増粘剤系（以下、M-SC）の2配合の計3配合である。検討した配合を表-2に示す。

2.3 締固め方法の比較検討

新津トンネルでは、試験施工で確認した振動伝搬の減少率に基づき、実施工では、図-1に示すように、50台の固定式の型枠バイブレータを設置した。ただし、側壁部に関しては、既往の報告、試験施工の結果において、型枠バイブレータでの締固めでは美観性に劣る結果であったことから、挿入式バイブレータでの施工とした。

今回の検討では、挿入式および型枠バイブレータについて、それぞれ単独での締固めを行い、覆工コンクリートの表層の品質について比較検討した。

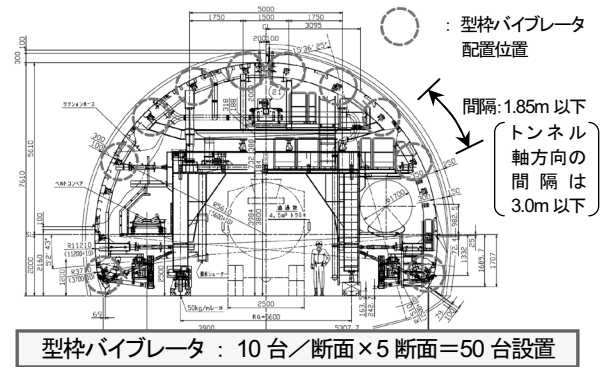


図-1 型枠バイブレータの配置状況

3. 試験項目および試験方法

3.1 トンネル技術者による美観性評価

トンネル技術者による美観性の目視評価は、NPO 法人臨床トンネル工学研究所が提案している覆工コンクリートの出来映え評価に準拠して美観性評価を実施した。今回の評価はトンネルにおける4年以上の現場経験を有する現場担当者3名が行った。

評価は、加点方式と減点方式での総合評価点での評価である。加点方式の評価項目は①アバタ、②打設縞、③打継目、④窓枠目地の4項目25点の100満点評価である。一方、減点方式は①打設ヒゲ、②水走り、③表面剥離、④打設目地通りの各項目において最大-5点の減点評価である。

表-1 中流動覆工コンクリートの配合決定のための基準²⁾

種別	材齢28日における圧縮強度(N/mm ²)	粗骨材最大寸法(mm)	スランプおよびスランプフロー(cm)	加振変形試験(cm)	U形充填性高さ(障害無し)(mm)	空気量(%)	セメントの種類	最低単位セメント量(kg/m ³)	単位水量(kg/m ³)	最大塩化物含有量(Cl)(g/m ³)	繊維混入率(%)	材齢28日における曲げ靱性
T1-1(LS) T1-1(FA)	18	20 25	21±2.5 35~50	10秒加振後のスランプフローの広がり 10±3 加振後の広がったコンクリートにおいて、中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく、周囲部に2cm以上のペーストや遊離した水の帯が無いこと	280以上	4.5±1.5	普通ポルトランドセメント(LSの場合高炉セメントB種を使用しても良い)	270	LS:175以下 FA:180以下	300	—	—
T3-1(LS) T3-1(FA)											0.3以上で「繊維補強覆工コンクリート編」で求まる最低混入率とする	「繊維補強覆工コンクリート編」に示される基準線を下回らないこと、かつ曲げ靱性係数の平均値で1.40N/mm ² を下回らないこと

表-2 新津トンネルにおける中流動覆工コンクリートの配合

配合名	水セメント比 W/C(%)	水粉体比 W/(C+LF)(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)							
				水 W	セメント C	石粉 LS	細骨材 S	粗骨材 G	増粘剤 Sc	繊維 ^{※1} F	混和剤 Ad
N (従来)	49.4	49.4	48.0	168	340 ^{※3}	-	861	947	-	2.73	0.85 ^{※5}
M-LS (中流動)	59.6	45.3	52.0	170	285 ^{※2}	90	915	859	-	2.73	3.75 ^{※4}
M-SC (中流動)	50.0	50.0	52.0	170	340 ^{※3}	-	930	871	0.3	2.73	2.55 ^{※4}

※1：ポリプロピレン繊維、※2：普通ポルトランドセメント、※3：高炉セメントB種、※4：高性能AE減水剤、※5：AE減水剤



写真-1 トンネル技術者による美観性評価状況

3.2 アバタ発生数による美観性評価

アバタ発生数による美観性の評価方法は、側壁部にアバタが発生し易いことから、側壁部に発生するアバタの数の注目して行った。図-2、写真-2に示すように、SLから下半2mまでに発生する最大径1cm以上のアバタの数の測定し、1打設スパン12.5mの下半部分を16分割して測定したアバタ数を測定した面積で除して単位面積におけるアバタ発生数を求め、美観性の指標とした。

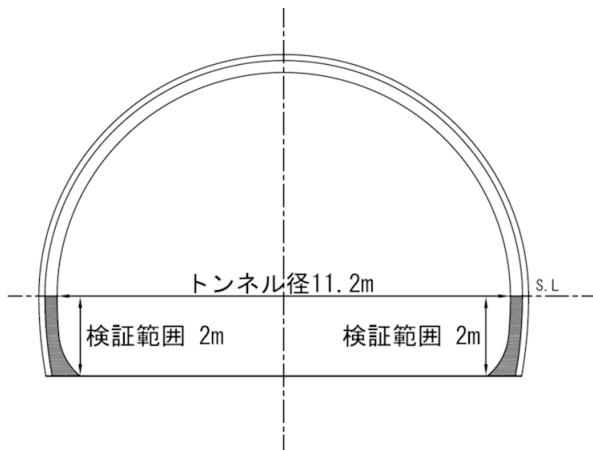


図-2 アバタ発生数の評価範囲

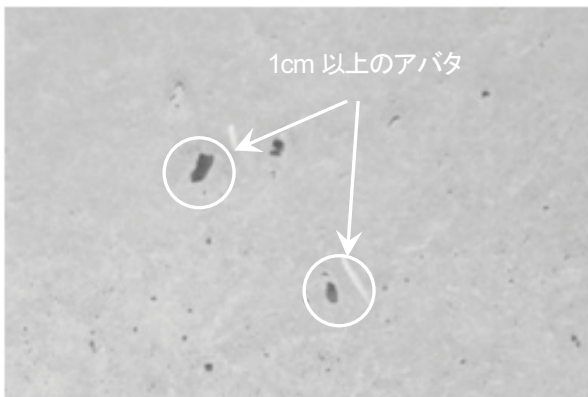


写真-2 アバタの発生状況

3.3 透気試験

透気試験はトレント法を用いて測定を行った。測定位置は覆工コンクリートの側壁部において、写真-3に示すように、打設口位置と既設側目地から約1m離れた位置の2箇所、路盤から2m程度の高さで測定した。



写真-3 透気試験の測定状況

3.4 コンクリートコアによる細孔径分布測定

細孔径分布の測定は、図-3に示すように、透気試験を実施した位置においてコアを採取し、覆工コンクリート表層から約2cmの試料を対象として、水銀圧入法により細孔径分布の測定を実施した。

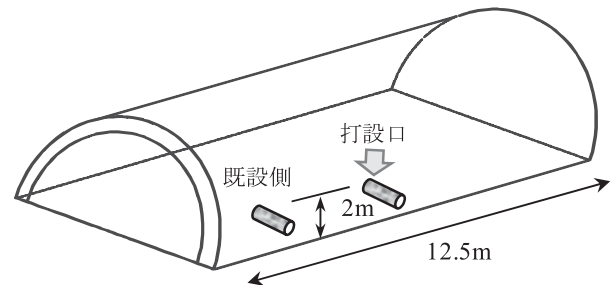


図-3 試験体採取概要図

4. 試験結果

4.1 トンネル技術者による美観性評価

3名のトンネル技術者による美観性評価結果の結果を図-4に示す。通常の覆工コンクリートNの総合評価点94.0点に対して、中流動コンクリートの粉体系M-LSが95.4点、増粘剤系M-SCが95.7点とは1.5点程度高い結果である。その差は、打継目の評価点の差であったことから、中流動コンクリートの方が材料分離抵抗性に優れていることためと考えられる。

また、M-LSで比較した締固め方法では、型枠バイブレータのみはアバタの評価点は、挿入式バイブレータを用いた場合より5点程度小さいために、総合評価点が82点と低い評価となっている。

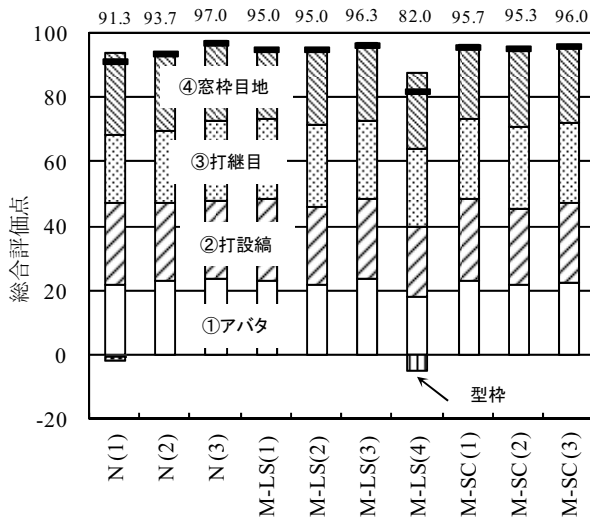


図-4 トンネル技術者による美観性評価結果の結果

天端部の縞模様の発生状況は、写真-4、写真-5に示すように、通常の覆工コンクリートに比べて、中流動コンクリートの方が少ないことがわかる。このことは、中流動コンクリートはセルフレベルング性が高いことと、分離抵抗性が高いことと考えられる。同様に、側壁部についても、中流動コンクリートの方が縞模様が少ない状況であった。



写真-4 通常の覆工コンクリートの仕上がり状況



写真-5 中流動コンクリート (M-LS) の仕上がり状況

締固め方法の違いによる美観性への影響は側壁下端部で顕著である。写真-6に示すように、挿入式バイブレータはアバタは少なく、良好な美観性である。これに対して、写真-7に示すように、型枠バイブレータのみではアバタが多く、仕上がりも粗い状況であった。

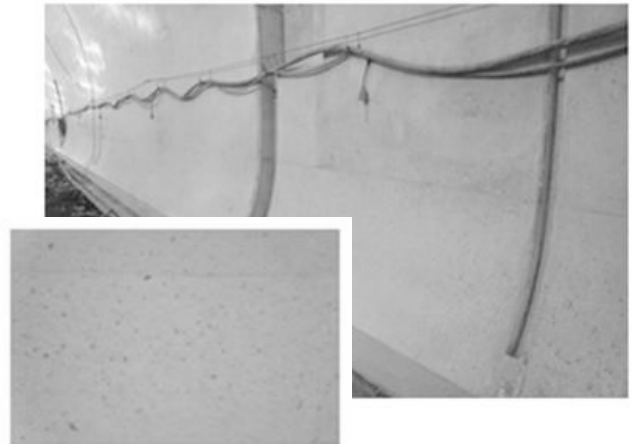


写真-6 M-LS : 挿入式バイブレータのみ

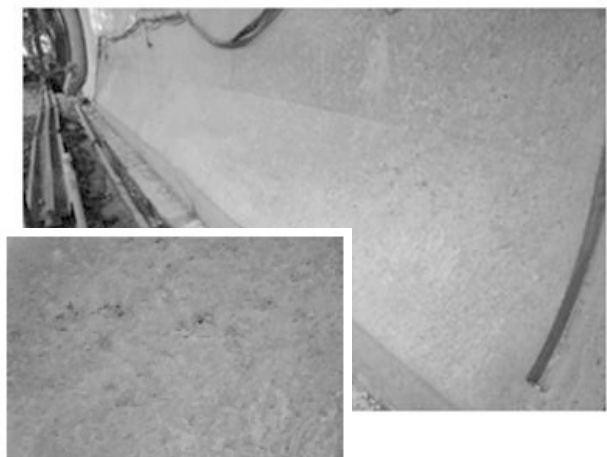


写真-7 M-LS : 型枠バイブレータのみ

4.2 アバタ発生数による美観性評価

アバタ発生数を指標として評価した美観性の結果を図-5に示す。今回の測定範囲においては、通常の覆工コンクリートが平均で10.1個/m²に対して、中流動コンクリートの粉体系M-LSが9.7個/m²、増粘剤系M-SCが6.5個/m²と中流動コンクリートの方がアバタ発生数は小さな結果であった。しかし、その差は約2~4個/m²であり、目視による美観性の大きな違いは見られなかった。

M-LSで比較した締固め方法では、挿入式が9.7個/m²に対して、型枠バイブレータのみの施工では30.9個/m²であり、目視評価と合致する結果であった。

トンネル技術者による評価およびアバタ発生数による美観性評価の結果から、既往の報告と同様、中流動コンクリートにおいて、側壁部の美観性を考えた場合には、挿入式バイブレータの使用が適切と判断される。

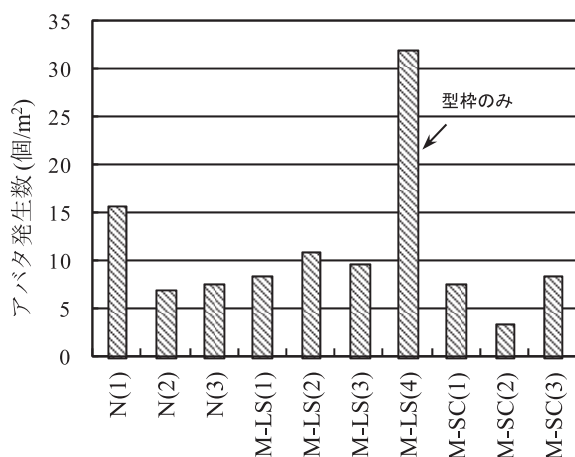


図-5 アパタ発生数の測定結果

4.3 透気係数

トレント法により測定した透気係数の結果を図-6に示す。図に示すように、通常の覆工コンクリートNと中流動コンクリートの粉体系M-LSの比較では水セメント比が大きいM-LSの方が透気係数は若干小さい結果である。また、水セメント比がほぼ同一の中流動コンクリートの増粘剤系M-SCの透気係数は $0.02 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度であり、通常の覆工コンクリートNの1/10の値であった。この結果から、検討した粉体系、増粘剤系中流動コンクリートは、通常の覆工コンクリートに比べて表面の品質が向上することが確認された。

また、M-LSで比較した締固め方法では、挿入式と型枠バイブレータとでは透気係数は同等の値であった。今回の検討範囲においては、型枠バイブレータのみでの施工は美観性には劣るが、透気係数は同程度であることが確認された。

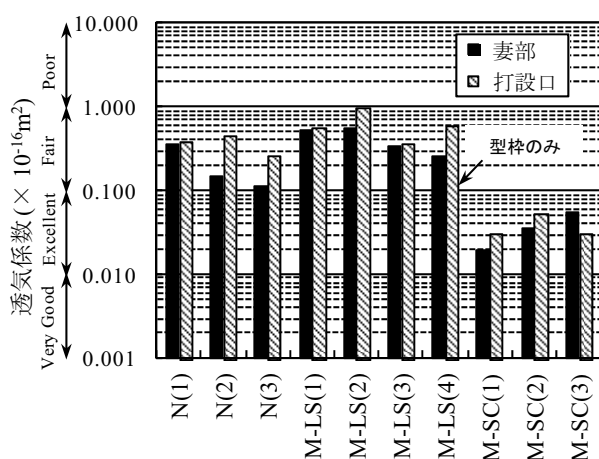


図-6 透気係数測定結果

4.4 細孔径分布

細孔径と細孔容積の関係を図-7に、細孔率の結果を図-8に示す。図-7に示す細孔径と細孔容積の関係において、中流動コンクリートの増粘剤系M-SCは、

粉体系の中流動コンクリートM-LCと比較して約 $0.03 \sim 1 \mu\text{m}$ の範囲に相当する空隙が少なく、異なる空隙構造であることがわかる。この範囲の空隙は、セメント粒子やその表面に生成した水和物の間隙に存在する毛細管空隙に相当するものと思われ、使用したセメントの種類が異なるためと考えられる。また、M-LSで比較した締固め方法では、挿入式と型枠バイブレータとでは空隙構造はほぼ同様の結果であった。このことから、今回の試験条件においては、締固め方法が空隙構造には影響しないことが確認された。

図-8に示すように、細孔率の結果は、透気係数とほぼ同様な傾向であった。締固め方法の比較では、挿入式バイブレータと型枠バイブレータの細孔率は約18%と同等の値であった。また、中流動コンクリートの配合の比較では、M-SCの細孔率はM-LSより4%程度小さく、当社が開発した増粘剤系中流動コンクリートは、覆工コンクリートの表層の密実性が向上することが確認された。

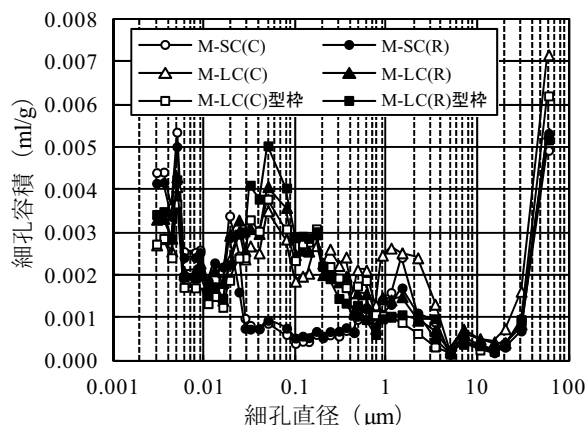


図-7 細孔径と細孔容積の関係

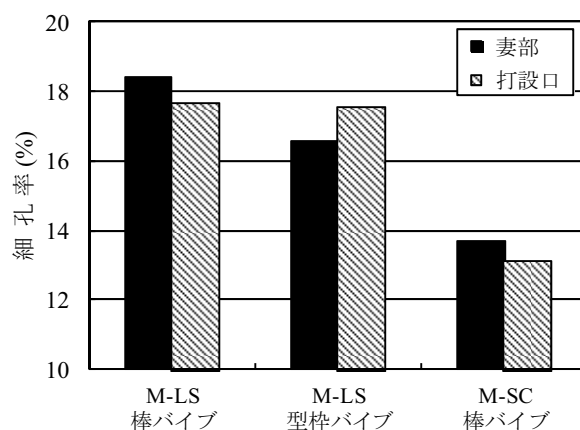


図-8 細孔率測定結果

ここで、細孔率と透気係数の関係を図-9に示す。図に示すように、透気係数と細孔率は高い相関関係が認められる。このことから、比較的測定が容易で非破壊試験であるトレント法により、覆工コンクリートの表層の密実性を評価できることが確認できた。

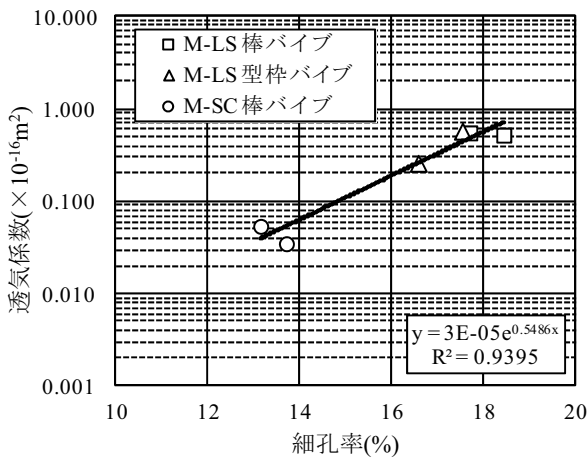


図-9 細孔率と透気係数の関係

5. まとめ

トンネル技術者による目視およびアバタ数による美観性評価、透気係数および細孔径分布による覆工コンクリートの表層部に関する品質に関する評価結果を、以下にまとめる。

- 1) 中流動コンクリートはセルフレベリング性が高く、分離抵抗性が高いために、通常の覆工コンクリートに比べて縞模様やアバタ数は少なく美観性に優れることを確認した。
- 2) 中流動コンクリートの側壁部の施工において、型枠バイブレータのみの施工ではアバタの発生が多いことが確認された。この結果から、中流動コンクリートにおいて、美観性を含めた側壁部のコンクリート品質を考えた場合には、挿入式バイブレータの使用が適切と判断される。

- 3) 通常のコンクリートを用いた覆工コンクリートに比べて、中流動コンクリートを用いた場合には、透気係数および細孔率は向上することが確認された。特に、開発した増粘剤系は良好な結果が確認され、美観性ととも表層の品質も向上することが確認された。
- 4) 透気係数と細孔率は高い相関関係が認められ、比較的測定が容易で非破壊試験であるトレント法により、覆工コンクリートの表層の密実性を評価できることが確認できた。

謝辞: 新津トンネルにおける中流動コンクリートの施工に際しては、西日本高速道路(株)福岡工事事務所、福岡技術事務所、九州支社建設事業部、本社技術部の皆さま、中村産業生コン(株)、BASF ポゾリス(株)をはじめ、多数の皆さまからご協力をいただきました。本誌面を借りまして、心より感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 柳森豊・堂園淳一・平間昭信・筒井隆規：トンネル二次覆工への中流動コンクリートの適用，コンクリート工学，Vol.49，No.6，pp.11-17，2011
- 2) 西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領中流動覆工コンクリート編，pp.1-4，2008
- 3) 平間昭信，松原利之，柳森豊，岡田朋道，筒井隆規，小西裕之，瀧間優作，山口達也：増粘剤を用いた中流動コンクリートの開発および現場適用－東九州自動車道新津トンネル工事－，とびしま技報，第60号，pp.1-9，2011。

Summary In-situ air permeability coefficient and pore size distribution were measured for medium-fluidity concrete and lining concrete, and the effects of concrete mix proportions and compaction methods on the quality of surface layer of lining concrete were examined. As a result, it was verified that aesthetics of medium-fluidity concrete improved over ordinary lining concrete and that the quality of surface layer was enhanced in such terms as air permeability coefficient and pore size distribution. Medium-fluidity concrete that was constructed using form vibrators suffered frequent honeycombing and was not aesthetically pleasing. Air permeability coefficient and pore size distribution were similar to those in the case where insertion vibrators were used. It was verified that quality in terms of density was nearly the same.

Key Words: Middle-Fluidity Concrete, Lining Concrete, Quality