

トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ抑制効果の評価に関する一考察

佐川, 康貴
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

濱田, 秀則
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

今田, 一典
国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所

原, 秀利
前田建設工業株式会社九州支店土木部

他

<https://hdl.handle.net/2324/15640>

出版情報：コンクリート構造物の表層品質評価と耐久性能検証に関するシンポジウム, 2009-10-17
バージョン：
権利関係：

トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ抑制効果の評価に関する一考察

佐川 康貴*¹・濱田 秀則*²・今田 一典*³・原 秀利*⁴・坂口 伸也*⁵

1. はじめに

1999年に発生した新幹線トンネル覆工コンクリート片の剥落事故をきっかけに、覆工コンクリートの品質および耐久性向上に向けた研究や開発が急速に進められている。特に近年では、ひび割れ抑制対策に主眼が置かれており、例えば、配合に関する検討、養生方法に関する検討などがある¹⁾。覆工コンクリートの施工において、他のコンクリート構造物と大きく異なるのは、下記の点である。

- ・一般的にコンクリート打設の翌日に脱型が行われる。また、脱型後は、十分な湿潤養生が行われないことが多い。
- ・トンネル掘削中は高湿度であるが、貫通後は通風により急激に湿度が低下する。
- ・坑口付近では掘削中でも湿度変化が大きく、トンネル全長において温度や湿度が異なる。
- ・背面の吹付けコンクリートの凹凸やロックボルト等により、拘束度の程度が異なる。

本報告では、まず、トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ抑制対策のうち、配合に着目し、膨張材や合成短繊維の混入による覆工コンクリートのひび割れ抑制効果について、実構造物の施工結果より考察した。次に、覆工コンクリートの品質に関する比較を行うため、土木学会 216 委員会調査団が実施した現地表面透気試験の結果を用いて、表層コンクリートの透気係数について考察した。

2. 実験概要

本研究で対象とした K トンネルは、全長 1,544m であり、第 1 期工事では全区間で普通コンクリートが用いられた。第 2 期工事では、ひび割れ抑制対策として膨張コンクリートが用いられ、坑口付近には合成短繊維混入コンクリートが用いられた。

覆工コンクリートの締固め不足およびコールドジョイントを防止し、また、ひび割れの発生を抑制するために、本構造物では表—1 に示すように、コンクリートの打込み、締固め、養生について新技術を適用した。各技術の概要は、表に示す通りである。また、トンネル貫通後の通風を遮断し、トンネル内を高い湿度に保つため、貫通後に隔壁バルーンを設置した。隔壁バルーンは他工事の支障となるまでの期間、継続して設置した。

K トンネルの施工にあたり、ひび割れ抑制対策の効果を定量的に把握することを目的とし、図—1 に示す 3 箇所のブロック (BL1, BL2, BL3) において側壁コンクリート内部に埋込み型ひずみ計を設置し、コンクリートのひずみを計測した。また同時に、坑内の温度および湿度を計測した。

*¹ 九州大学大学院助教 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学)

*² 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学)

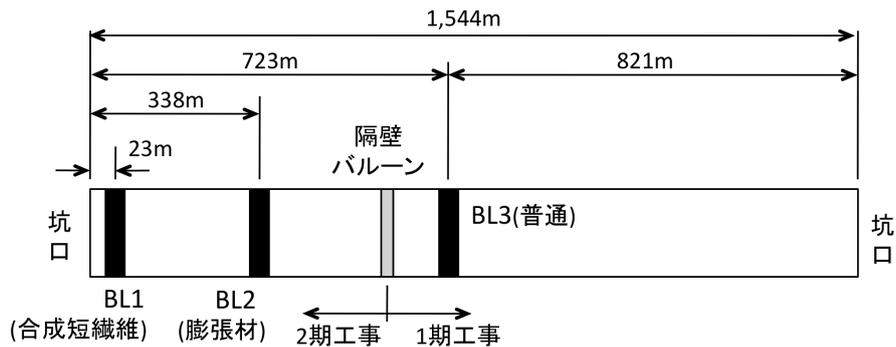
*³ 国土交通省 九州地方整備局 福岡国道事務所

*⁴ 前田建設工業(株) 九州支店 土木部

*⁵ 前田建設工業(株) 九州支店 土木部 修士(工学)

表一 本研究で適用した覆工コンクリート高品質化技術

種類	施工箇所	対象部位	概要
センサー付きバイブレータシステム	第二期工事区間 L=615m	側壁部, アーチ部	特殊センサー付きバイブレータにより, 側壁部を自動で締固め, 巻き上げるシステム.
クラウン部水平圧入打設工法	覆工全区間 L=1,544m	側壁部, アーチ部	アーチ肩部に圧入可能な吹上げ口を増設し, 打込み可能な最大高さまでコンクリートを圧入して打ち上げることで, 天端部吹上げ口からの打込み量及び打込み時間を最小限にする工法.
高品質トンネル覆工天端部締固めシステム	覆工全区間 L=1,544m	天端部	長尺高周波バイブレータにより, これまで困難であった天端部の十分な締固めを可能とするシステム.
コンクリート充填圧管理システム	覆工全区間 L=1,544m	天端部	セントル天端部に設置した圧力センサーにより, 現場でコンクリートの充填圧をリアルタイムに確認しながら, 型枠設計強度以下の充填圧でクラウン部の打設を行う打設管理システム.
ミスト噴霧による湿潤養生	覆工全区間 L=1,544m	覆工全体	覆工天端にシートで密閉した移動式の専用設備を懸架し, その内部にミストを充填させることで, 十分な湿潤養生を可能とする技術.



図一 トンネル内における測定位置

表二 工程表

日数	0	9	12	23	80	152	324	423	598	611	
BL1					打設	ひび割れ調査	ひび割れ調査		ひび割れ調査		
BL2	打設										
BL3			打設								
	貫通		設置		隔壁バルーン設置期間				撤去		開通

BL1は、乾湿の変化が大きい坑口付近であり、コンクリートのひび割れ抑制対策として合成短繊維を用いた箇所である。BL2は、トンネル延長の約1/4の場所に位置し、コンクリートのひび割れ抑制対策として膨張材を用いた箇所である。BL3は、トンネル全長の中央付近に位置する。BL1については、配合上、特別な対策を施さなかった。

各ブロックの打設日、隔壁バルーンの設置期間、トンネルの貫通および開通日を時系列に整理すると、表一2の通りとなる。なお、時間軸は、最初に打設を行ったBL2の打設日を基準とした日数で表記している。各ブロックで用いられたコンクリートの使用材料および配合をそれぞれ、表一3、表一4に示す。

表一3 使用材料

ブロック	セメント	粗骨材	細骨材	混和材	混和剤
BL1	高炉セメント B種	砕石 2005	海砂と砕砂の混合砂	合成短繊維 (ポリプロピレン)	高性能 AE 減水剤
BL2	高炉セメント B種	砕石 2005	川砂、海砂および砕砂の混合砂	膨張材	高性能 AE 減水剤
BL3	高炉セメント B種	砕石 2005	海砂と砕砂の混合砂	—	AE 減水剤

表一4 コンクリート示方配合

ブ ロ ッ ク	水 セ メ ン ト 比 W/C (%)	細 骨 材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
			水 W	セ メ ン ト C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	膨 張 材	合 成 短 繊 維 (vol%)	高 性 能 A E 減 水 剤 (ml)	A E 減 水 剤 (ml)
BL1	51	48.0	164	322	852	1012	-	0.3	2415	-
BL2	57	50.0	171	300	884	976	20	-	2880	-
BL3	57	45.4	167	293	826	1021	-	-	-	1758

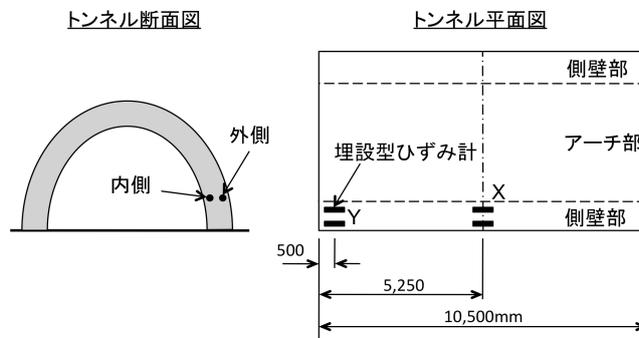
3. ひび割れ調査結果

竣工前におけるひび割れ調査の結果、幅 0.2mm 以上のひび割れ発生ブロック率（全ブロックに対するひび割れ発生ブロックの比率）で 1.3%と極めて少ない結果となった。また、竣工から6ヶ月および1年半の時点で追跡調査を行った結果、6ヶ月後で2.6%、1年半後で4.6%となり、ひび割れの増加は認められたものの、他のトンネルと比較して少ない結果と言える。なお、幅 0.3mm で長さ 50cm 以上のひび割れ発生ブロック率は、竣工時 0%、6ヶ月後 1.3%、1年半後 2.6%であった。さらに、標準工法ではアーチ部に竹割り状の縞模様ができることが多いが、このトンネルでは、縞模様は認められなかった。

4. ひずみ計測結果および考察

4.1 計測の概要

BL1～BL3の各ブロックにおいて、図一2に示す位置に埋設型ひずみ計を設置し、側壁部のコンクリートひずみを計測した。通常、トンネル円周方向のひび割れ発生事例が多く見られることから、トンネル延長方向のひずみを計測した。各ブロック内における測定位置は、各ブロックの中央部(図中のX)および端部(図中のY)の2箇所とした。



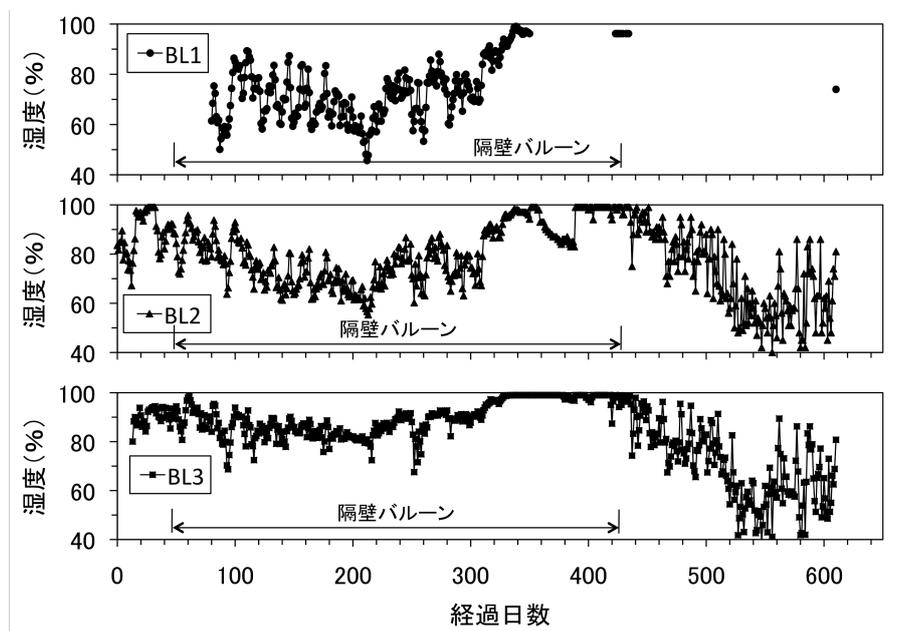
図一2 ひずみ計測位置

さらに、吹付けコンクリートの凹凸等による外部拘束の影響について確認するため、各断面内において覆工コンクリート内側（坑内側）と外側（地山側）の2箇所について測定を行った。

4.2 トンネル内の環境変化に関する考察

コンクリート打設から開通までのトンネル内の各ブロック位置における湿度（日平均）の変化を、図一3に示す。なお、BL1については、350日以降のデータの大部が欠測となっている。隔壁バルーンを撤去（423日）するまでのデータを見ると、BL3ではほぼ80%以上となっており、高い湿度が保たれていることが分かる。また、BL2およびBL1の湿度はBL3よりも低く、坑口に近づくにつれて湿度が低くなっていることが分かる。

隔壁バルーン撤去（423日）後の湿度の変化を見ると、550日までの期間で湿度が低下していることが分かる。すなわち、隔壁バルーンを設置し、通風を防ぐことにより、トンネル内を高湿度に保持できることが実測データより示された。これにより、コンクリート表面の乾燥を防ぐことができると考えられる。



図一3 トンネル内の湿度変化

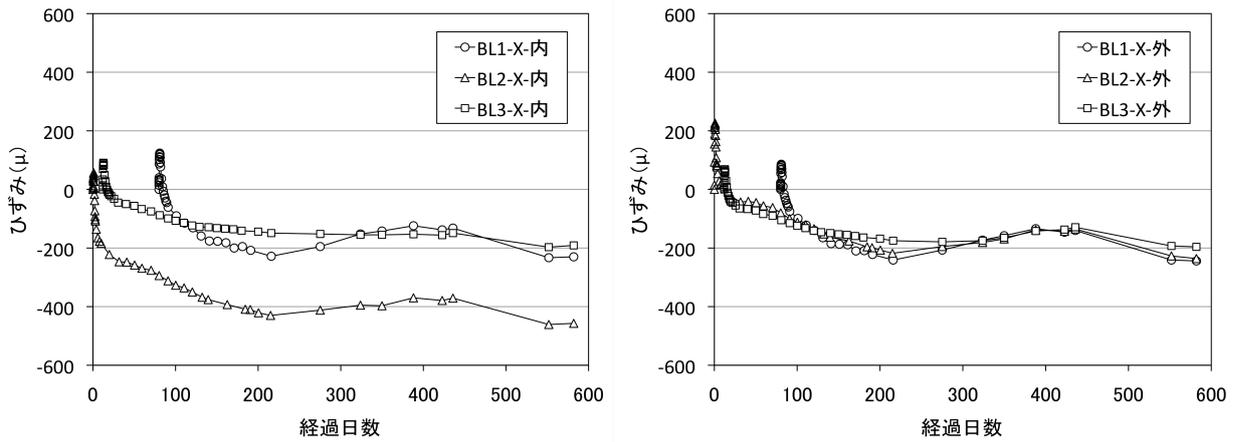
4.3 コンクリートのひずみ測定結果および考察

図一4に、側壁部のコンクリートのひずみ測定結果を示す。なお、コンクリートひずみの値は、コンクリート温度の変化による影響の補正を行っていない。

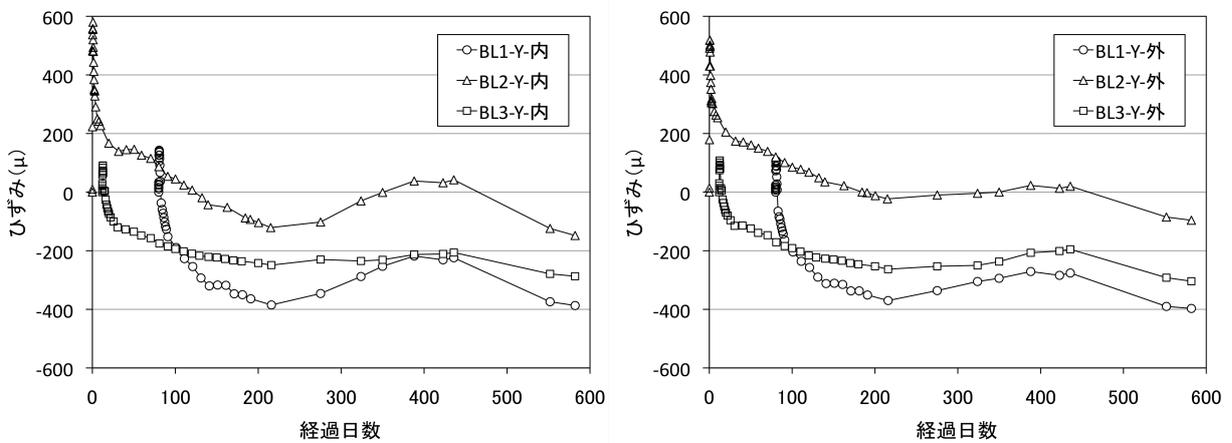
図より、経過日数200~400日にかけてひずみが収縮から膨張に転じていることが分かる。これは、夏期のためにコンクリート温度が上昇したことによるものである。一方、400日以降は収縮ひずみが増大しており、これは冬期にかけて気温が低下したこと、また、隔壁バルーンの撤去（423日）によりトンネル内の湿度が低下したことの両者が原因として考えられる。

端部 Y の結果（図(b)）より、各ブロックにおける打設後の膨張ひずみの最大値を比較すると、BL1およびBL3については、覆工コンクリートの内側、外側ともに100 μ 程度であるのに対し、膨張材を用いたBL2は、500~600 μ 程度である。よって、400 μ 程度の膨張ひずみの導入効果が認められ、長期的に見ても、その差が継続して認められた。なお、計測の範囲内では、中央部 X では大きな膨張ひずみは認められなかった。

また、各ブロックにおける全体的な挙動を見ると、BL3が最もひずみの変化が小さく、緩やかな挙動となっていることが分かる。BL3は、トンネル中央部に位置しており、乾湿の変化が小さく、また、隔壁バルーンの効果もあり、ひずみの変化が小さかったものと考えられる。



(a) 中央部 X



(b) 端部 Y

図一4 各ブロックのコンクリートひずみ（膨張＋，収縮－）

さらに、覆工コンクリートの内側（坑内側）と外側（地山側）のひずみを比較すると、BL2（膨張材使用）の中央部 X で、内側のひずみが外側よりも大きな収縮ひずみが生じていることが分かる。これは、覆工コンクリートが地山および吹付けコンクリートの凹凸による外部拘束の影響を受けたことによるものと推察される。すなわち、覆工コンクリートの外側は拘束により収縮ひずみは小さいが、内側は乾燥を受け収縮ひずみが生じたと考えられる。

5. 現地表面透気試験

5.1 概要

標準工法では、竹割り状の縞模様ができるが、高品質化技術を適用した K トンネルでは、クラウン部水平圧入打設工法の効果により縞模様は認められなかった。一方、標準工法で施工され、既に供用中の S トンネルでは、特に天端部においてコンクリート表面に縞模様や一部ではひび割れの発生が認められている。

そこで、両者の違いをコンクリート品質の観点から比較するため、土木学会 216 委員会が実施したトレント法による現地表面透気試験の結果を用いて考察する。この試験法では、試験から得られた透気係数を基に、表層の透気性品質を 5 段階（表一5）に区分して評価が行われる²⁾。

5.2 試験結果および考察

試験結果を図一5 に示す。なお、測定は同一箇所でも 2 回または 3 回実施されている。K トンネルでは、表

層透気係数 KT が 10^{-2} または 10^{-1} オーダーを示し、透気性グレードは 2 または 3 となっている。その一方で、S トンネルでは、 KT が 10^{-1} オーダー以上の値を示し、透気性グレードは 3 または 4 となっており、目視による調査結果の傾向と一致している。なお、トンネル覆工に用いられるコンクリートは、呼び強度が 21 または 24(N/mm²) であり、強度クラスが低いことから、表一5 中にある透気性グレード 1 は得られなかったものと推察される。

なお、土木学会 216 委員会からの現地表面透気試験結果の提供にあたっては、新設構造物である K トンネルの透気係数は今後の乾燥の進行に伴ってグレードが大きい(悪い)方向に推移する可能性がある²⁾との付帯意見が示されており、厳密な比較については含水率が定常に至ってから行う必要があることを付記しておく。

6. まとめ

本報告では、まず、トンネル覆工コンクリートのひび割れ抑制対策について、実構造物の施工結果より考察した。次に、覆工コンクリートの品質に関する比較を行うため、現地表面透気試験から考察した。以下に、得られた結果を示す。

- (1) 本研究の範囲内では、普通、膨張材、合成短繊維のすべてにおいて、ひび割れの発生は極めて少ない結果となった。これは、高品質化技術の採用により初期欠陥の低減が図られたこと、また、隔壁バルーンを長期間設置することにより湿潤状態が保たれたことによる効果であり、施工上の対策が大きく寄与したものと考えられる。
- (2) 現地表面透気試験により得られた表層透気係数を比較した結果、標準工法で施工されたコンクリートよりも、高品質化技術を採用し、十分な湿潤養生が行われたコンクリートの方が透気係数が小さく、密実なコンクリートとなっていることが明らかとなった。ただし、覆工コンクリートは強度クラスが低いいため、透気性のグレードは最高でも 2 であった。

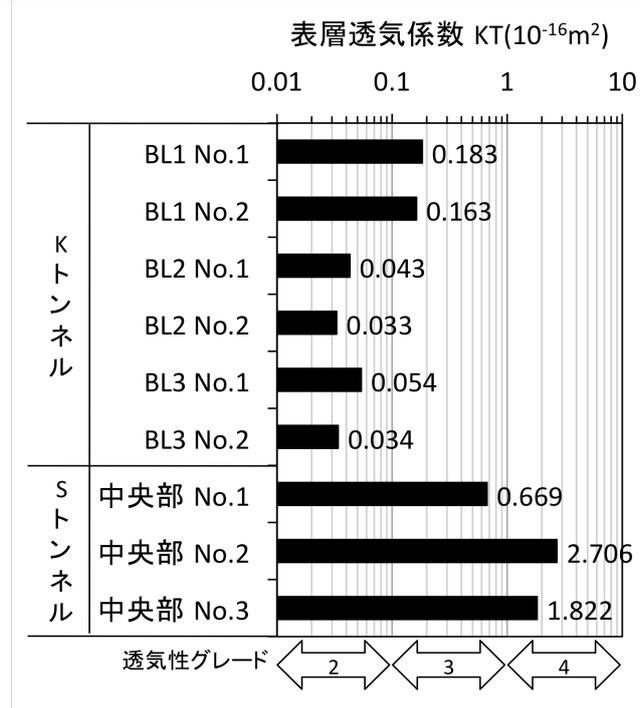
謝辞：本研究で使用した現地表面透気試験結果は、土木学会「歴代構造物品質評価・品質検査制度研究小委員会」(216 委員会) から提供されたものである。委員会調査メンバー各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、馬場弘二、伊藤哲男、佐野信夫、谷口裕史、杉山律、福留和人：覆工コンクリート模擬モデルによるひび割れ抑制対策比較実験，土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.285-295, 2006.4
- 2) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.80, pp.30-36, 2008.4

表一5 透気性評価方法²⁾

透気係数 KT ($\times 10^{-16}m^2$)	0.001 ～ 0.01	0.01 ～ 0.1	0.1 ～ 1	1 ～ 10	10 ～ 100
透気性 グレード	1	2	3	4	5
透気性 評価	優	良	一般	劣	極劣



図一5 現地表面透気試験結果