

| | |
|------------|--|
| 氏 名 | 白岩 誠史 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 博理工乙第247号 |
| 学位授与年月日 | 平成30年3月23日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第2項該当 |
| 学位論文題目 | トンネル坑口部覆工コンクリートの耐久性向上を目指した施工技術の開発 |
| 論文審査委員 | 委員長 准教授 牧 剛史 委員 教授 睦好 宏史 委員 准教授 浅本 晋吾 委員 教授 長田 昌彦 |

論文の内容の要旨

1999年6月に山陽新幹線福岡トンネル坑内において、剥落したコンクリート塊が新幹線を破損させるという事故が発生し、同年の10月には山陽新幹線九州トンネル、12月には室蘭本線礼文浜トンネルでも同様の事故が相次いだ。そのため、これまで化粧コンクリートと考えられていた覆工コンクリートの品質や安全性が社会問題となり、品質を確保するための努力が取り組まれてきた。特に養生においては、これまで打設翌日に脱型し、その後の養生を実施することがなった覆工コンクリートに対して、高速道路株式会社3社は、2015年7月にトンネル施工管理要領を改訂し、覆工コンクリートにおいても7日間の湿潤養生を実施するように改定した。この改定に関しては、本研究の1つの柱であるこれまで不可能であった覆工コンクリートへの給水養生を可能にしたアクアカーテンが、2011年に現場適用を開始したことが関係していることは言うまでもない。

また、2014年に国土交通省から通達された“道路トンネル点検定期要領”により定期的な調査が義務化された。土木学会全国大会へ投稿された覆工コンクリートの品質に関する論文は、2006年は1編のみであったが、2013年には6編、2016年においても5編となっており、現在もなお注目されるテーマとなっている。

覆工コンクリートの品質への注目が集まる中、特にトンネル坑口付近の覆工コンクリートは、鉄道および道路トンネルの調査結果から、ひび割れや剥落等の劣化が発生しやすい傾向にあることが報告されている。坑口付近の覆工コンクリートが劣化しやすい要因としては、以下の事項が挙げられる。

- (i) コンクリートの温度収縮による体積変化が、インバートに拘束されて発生する外部拘束ひび割れ。
- (ii) 打設翌日の早期脱型および外気の湿度低下の影響による乾燥収縮ひび割れ。
- (iii) 雨掛り部分の冬期の凍結融解作用による剥離、剥落。
- (iv) 融雪剤の飛散による塩害に起因する鉄筋腐食ひび割れ。

以上の要因による劣化を抑制して、坑口付近の覆工コンクリートの耐久性を向上させるために、上記(i)に起因する外部拘束ひび割れ対策として、打設直後から実施する“部分パイプクーリング”、上記(ii)～(iv)に起因する乾燥収縮や塩害、凍害による品質低下対策として、型枠脱枠後に実施する“シート吸引方式給水養生システム（以下、アクアカーテン）”を開発した。

部分パイプクーリングは、インバートの拘束による外部拘束ひび割れの発生が懸念される部分のみを限定して短期間冷却することで、主に以下の2つの作用により、材齢初期に発生する引張応力を低減し、外部拘束によるひび割れの発生を抑制する新しい発想に基づくパイプクーリング工法である。

- (i) 冷却期間を短期間とすることで、冷却部の再発熱およびまだ発熱の活発な周囲からの熱移動により、冷却部のみが遅れて再膨張する“冷却部の遅れ膨張効果”により引張応力が低減する。弾性係数が大きくなる時期の膨張であるため、引張応力の低減効果が大きい。
- (ii) コンクリートの内部温度が外気温まで降下する過程において、部材下部の冷却部は、冷却により温度収縮量が小さくなり、部材上部の未冷却部は、温度収縮量が大きくなるため、部材上部の未冷却部が締め付ける“未冷却部の締め付け効果”により引張応力が低減する。弾性係数がさらに大きくなる時期の締め付けであるため、引張応力の低減効果が大きい。

部分パイプクーリングは、国土交通省東北地方整備局発注の2車線道路トンネルである“国道115号馬館山トンネル工事”の厚さ450mmの覆工コンクリートにおいて検討され、試験施工を実施した。三次元FEM温度応力解析による検討から、無対策の場合の最小ひび割れ指数が1.0未満となる下半部の高さ1m×延長6mの範囲を、直径25mm、延長5.5mの亜鉛メッキ鋼管を400mmピッチで3段配置して、2.0日冷却することで、ひび割れ発生確率は37%改善することが確認できた。

現場導入時には、内部温度および拘束ひずみを測定し、さらに事後解析を実施して、その効果を確認した。その結果、実測値と事後解析値の温度および拘束ひずみは、概ね一致し、部分パイプクーリングを実施することで、ひび割れ発生確率を20%以上低減できたことが確認できた。施工後の1年点検では、外部拘束によるひび割れは発生していなかった。

アクアカーテンは、特殊な養生シートとコンクリートの隙間の空気を吸引して、負圧とすることで、コンクリート表面にシートを密着させ、その隙間に養生水を流下させることで、これまで不可能であった鉛直面や覆工コンクリートのようなオーバーハングしたコンクリートの給水養生を可能とした世界初の工法である。まず室内試験において、給水養生の効果を確認した。その結果、2週間の給水養生を実施することで、養生を実施しない場合（覆工コンクリートの打設翌日に脱型し、その後養生なしを想定）と比較して、圧縮強度が1.6倍に増加、促進中性化深さは49%低減し、凍結融解試験による質量変化率は示方書6.0%改善することが確認できた。

現場においては、コンクリート表面の拘束ひずみや現場表層透気試験を実施して、効果を確認した。その結果、拘束ひずみが 56μ 低減、透気係数は翌日脱型しその後養生をしない場合と比較して、ランクが1つ向上することが確認できた。

研究の集大成として、国土交通省北陸地方整備局発注の2車線道路トンネルである“神谷内トンネル（Ⅱ期線）工事”をモデル現場として、坑口付近の覆工コンクリートに、“部分パイプクーリング”と“アクアカーテン”の両技術を同時に適用した。実構造物および供試体において、ひずみや温度、透気試験を実施して、その効果を確認した。

部分パイプクーリングにおいては、部材内部のひずみおよび温度の測定結果から、冷却停止後の拘束ひずみの低減効果が確認できたとともに、膨張コンクリートとのひび割れ抑制効果の比較をし、部分パイプクーリングのほうが、ひび割れ抑制効果が高いことが確認できた。また、実測値を反映した3次元FEM温度応力解析による事後解析では、ひび割れ発生確率を無対策の場合と比較して25%以上低減できたことが確認できた。

アクアカーテンにおいては、実構造物の透気係数が概ねランク 2（良い）となり、コンクリート表面が密実に仕上がっていることが確認できた。また、供試体におけるひずみ測定の結果、表面の拘束ひずみが 130μ 程度低減できたことが確認できた。施工後の 1 年点検では、ひび割れは発生していなかった。

本研究により、開発および効果の確認できた“部分パイプクーリング” および“アクアカーテン”を覆工コンクリートの坑口部分に適用することで、トンネル構造物全体の耐久性を向上できることが確認できた。

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 30 年 2 月 9 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表（40 分間）に引き続いて質疑応答（30 分間）を実施して論文内容の審査を行った。以下に審査結果を要約する。

1999 年 6 月に山陽新幹線福岡トンネル坑内において、剥落したコンクリート塊が新幹線を破損させるという事故が発生し、同年 10 月には山陽新幹線九州トンネル、12 月には JR 室蘭本線札文浜トンネルでも同様の事故が相次いだ。また、2012 年 12 月には、中央自動車道笹子トンネルで約 130m にわたり天井板が落下し、死亡事故を引き起こした。天井板落下の直接原因は定着アンカーの劣化と言われているものの、これまでは単なる化粧コンクリートと考えられてきた覆工コンクリートの品質や安全性が社会問題となり、品質を確保するための努力が取り組まれてきた。特に、コンクリート施工後の養生においては、これまでトンネル施工サイクルとの兼ね合いで、打設翌日に脱型し、その後の養生をほとんど実施することのなかった覆工コンクリートに対して、高速道路株式会社 3 社は、覆工コンクリートにおいても 7 日間の湿潤養生を実施するよう、2015 年 7 月にトンネル施工管理要領を改訂した。覆工コンクリートへの連続給水養生はこれまで不可能であったが、本研究の二本柱の一つであるシート吸引式給水養生システム（アクアカーテン）がそれを可能とし、2011 年に現場適用を開始したことが密接に関係している。また、2014 年に国土交通省から通達された“道路トンネル定期点検要領”においてトンネル覆工コンクリートにも定期的な点検調査が義務付けられたこともあり、覆工コンクリートの耐久性および維持管理に関しても画期的な技術の開発が急務とされている。

覆工コンクリートの品質向上が急務とされる中、特にトンネル坑口付近の覆工コンクリートは、既存の鉄道および道路トンネルの調査結果から、ひび割れや剥落等の劣化が発生しやすい傾向にあることが報告されているが、その原因として、1) コンクリートの温度収縮がインバートに拘束されて発生する外部拘束ひび割れ、2) 打設翌日の早期脱型および外気の湿度低下に起因する乾燥収縮ひび割れ、3) 冬季の凍結融解作用による雨掛り部分の剥離・剥落、4) 融雪剤の飛散に起因する塩害による鉄筋腐食およびひび割れの誘発、が主として挙げられる。これらの要因による劣化を抑制して、坑口付近の覆工コンクリートの耐久性を向上させるための技術として、本論文では、1) に対して「部分パイプクーリング」、2) ～ 4) に対して「シート吸引式給水養生システム」を開発するとともに、実施工現場への適用および効果確認を図っている。本論文の第 1 章では、以上の研究背景と目的、トンネル覆工コンクリートの劣化の実態について述べている。

第 2 章では、インバート拘束による外部拘束ひび割れの抑制を目的とした「部分パイプクーリング」に関する検討結果をまとめている。本手法は、外部拘束ひび割れの発生が懸念される部分のみに限定して、打設後のコンクリートを短期間冷却することにより、材齢初期に発生する引張応力を低減し、ひび割れ発生を抑制する新しい発想に基づく手法である。本章では、三次元有限要素解析による解析的検討および施工現場での長期計測結果から、局所的に短期間冷却することの効果のメカニズムを冷却部の遅れ膨張効果と未冷却部の締付け効果の二点により説明できるとしている。国土交通省東北地方整備局の国道トンネル施工において試験適用を実施し、実測結果に基づく事後解析を行うことにより、ひび割れ発生確率を数十%程度と大幅に低減できたことを確認している。

第 3 章では、これまで不可能であった覆工コンクリートの連続給水養生を可能とした「シート吸引式給水養生システム（アクアカーテン）」に関する検討結果をまとめている。本手法は、特殊な養生シートとコンクリートとの間の間隙空気を吸引して負圧とすることで、コンクリート表面に養生シートを密着させた上で、その隙間に養生水を流下させることで、これまで不可能であった鉛直面やオーバーハングした表面の給水養

生を可能とした世界初の工法である。実施工現場への適用に先立ち、数多くの室内試験を実施して、コンクリート強度の増加、中性化深さの低減、凍結融解抵抗性の改善など、品質の大幅な向上が期待できることを明らかにした。さらに、本手法を実施工現場へ適用し、合わせて施工時計測および長期計測を実施して、コンクリートの緻密化に起因するひずみの低減およびコンクリート耐久性の指標の一つである透気係数ランクの向上を確認している。

第4章では、研究の集大成として、国土交通省北陸地方整備局の道路トンネルをモデル現場として、坑口付近の覆工コンクリートに「部分パイプクーリング」と「シート吸引式給水養生システム」の両技術を同時に適用した。実構造物および同時に作製した小型供試体において、ひずみや温度等の諸値の測定および透気試験を実施してその効果を確認している。併せて、従来型のひび割れ抑制技術の一つである膨張コンクリート適用箇所との効果比較を実施し、本論文で提案する二つの技術を導入した箇所の方が、ひび割れ抑制効果が高いことを明らかにした。

第5章では、本論文の結論と今後の課題および研究展開の方向性についてまとめている。

以上のように、本論文は、トンネル坑口部の覆工コンクリートの耐久性向上を目指し、周到的な室内試験および解析的検討を行っただけでなく、提案手法を実際のトンネル施工現場へ適用し、現場実測結果からその有効性を示している点で、工学的価値が非常に高いと認められる。また、現場に高価な装置を必要とせず、容易に現場へ適用可能な技術であるという点でも高い工学的価値が認められる。研究の観点からは、第2章の内容を和文学術雑誌に1編、第3章の内容を英文学術雑誌に1編、第4章の内容を和文学術雑誌に1編(3月掲載予定)投稿しており、国内外への成果公表も十分に行われていると判断される。本学位論文審査委員会では、以上を総合的に考慮し、博士(工学)の学位にふさわしいものであると認め、合格と判定した。