

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

Development of Construction Technology to Improve Durability of Tunnel Entrance
Concrete Lining



Seishi SHIRAIWA 白岩誠史 *1

要 旨

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%改善でき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130 μ 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。

キーワード：覆工コンクリート、給水養生、パイプクーリング、三次元FEM温度応力解析、温度ひび割れ、拘束ひずみ

Summary:

The title of this doctoral thesis is “DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY TO IMPROVE DURABILITY OF TUNNEL ENTRANCE CONCRETE LINING”. The aim of this thesis is to improve the quality of the tunnel entrance concrete lining by “The Localized Pipe Cooling System” and “The Aqua Curtain Wet Curing System”.

It is highly probable that the concrete lining at a tunnel entrance will experience thermal cracks and drying shrinkage due to its exposure to external air and the dispersion of snow melting agents. Therefore, in order to avoid thermal cracks, “The Localized Pipe Cooling System” was developed. Also, to prevent drying shrinkage cracks and salt-damage, “The Aqua Curtain Wet Curing System” was developed at an actual construction site.

The construction of invert concrete, a section of the lining concrete, experiences cracks caused by temperature contraction caused by the cement heat of hydration and the fluctuations of the outer temperature. The creation of these cracks is caused by durable aggravation. Therefore, in order to minimize the creation of these cracks, we proposed “The Localized Pipe Cooling System”. This method consists of placing cooling pipes only in the parts of the lining concrete experiencing high tensile stress. In this particular case of this study, the cooling pipes were placed in the lower-center part of the lining concrete. To confirm the mechanism of this method, three-dimensional FEM thermal stress analysis was performed.

In addition, the localized pipe cooling method was applied to a real tunnel under construction. The application of this method was able to prevent the propagation of penetration cracks. Lastly, as a follow-up analysis, we measured the inner temperature and restriction distortion measured in blocks 1 to 4 of the concrete lining. We confirmed that the crack-propagation probability dropped by 31% from 68% to 37%.

There has been no such engineering method until now to enable water treatment in tunnel entrance concrete lining after the removal of formworks. The Aqua Curtain wet curing system has been developed to supply a sufficient amount of water to the vertical surfaces of concrete. The Aqua Curtain prevents rusting of reinforcing bars by making the surface of concrete denser. In this way, the Aqua Curtain also contributes to the realization of more resistant and long-life concrete structures. In other words, implementation of this system leads to improvement of the endurance and economy of concrete structures by reducing the consumption of resources.