

覆工コンクリートの噴霧養生における運転管理と 養生効果の検討

Examination of Improvement of Long-term Durability by Atomization Curing for Tunnel Lining

歌川紀之¹・藤谷三千男²・加藤公章³・小泉直人⁴・宇野洋志城⁵

Noriyuki Utagawa, Michio Fujitani, Kimiaki Katoh, Naoto Koizumi and Yoshiki Uno

^{1,5} 正会員 佐藤工業(株) 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

E-mail:utagawa@satokogyo.co.jp, uno@satokogyo.co.jp

^{2,3} 正会員 佐藤工業(株) 大阪支店 (〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜 1-1-6)

E-mail:m.fujitani@satokogyo.co.jp, kimiaki.kato@satokogyo.co.jp

⁴ 正会員 佐藤工業(株) 土木事業本部 技術部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-19)

E-mail:n.koizumi@satokogyo.co.jp

The purpose of this research is to examine the effect of improvement of long-term durability by atomization curing for tunnel lining concrete. The method of managing for driving the atomization machine is decided first. The driving target and the operating method are set on the condition that necessary amount of moisture for the hydration reaction is able to be kept and the decrease in a rapid surface temperature is not caused. The atomization machine is driven in this driving rule on the construction site in the tunnel. The effect of curing is examined by measuring the water content of the surface, the length change and carbonation depth by the accelerated carbonation test. As a result of the examination, the effect of improvement of long-term durability is confirmed.

Key Words : tunnel lining, atomization curing, durability

1. はじめに

これまでのトンネル覆工のコンクリート打設では、坑内では、温度は一定で湿度が高いと考えられていたために、打設翌日に脱型した場合でも、あまり湿潤養生は実施されていなかった。馬場ら¹⁾によると、トンネル環境調査の結果、施工中のトンネル坑内の湿度は60-70%であり、これまで考えられていたよりも高湿度環境ではないこと、さらにトンネル内の作業改善のための換気設備の大型化により、湿度が低くなることが指摘されている。したがって、覆工コンクリートの品質や長期耐久性の向上のためには、一般的なコンクリート構造物と同様な湿潤養生が必要と考えられる。

本報告では、噴霧装置からなる湿潤養生システム（噴

霧養生）を実トンネル施工に用い、その養生効果を試験室での実験と現場計測で検討した。また、施工に先立ち、噴霧養生の運転管理計画を作り、実際にそれに基づいて運転を実施した。養生効果については、保湿効果、ひび割れ抑制効果、耐久性の向上効果に着目した。

2. 覆工コンクリートの噴霧養生

(1) 対象としたトンネル

噴霧養生を実施したトンネルは、東海環状笠神トンネル工事（国土交通省岐阜国道事務所発注）における延長392mの道路トンネルである。図-1に示すように、本トンネルは二車線断面（83.4m²）で、将来は2車線断面のトン

二期線

今回施工

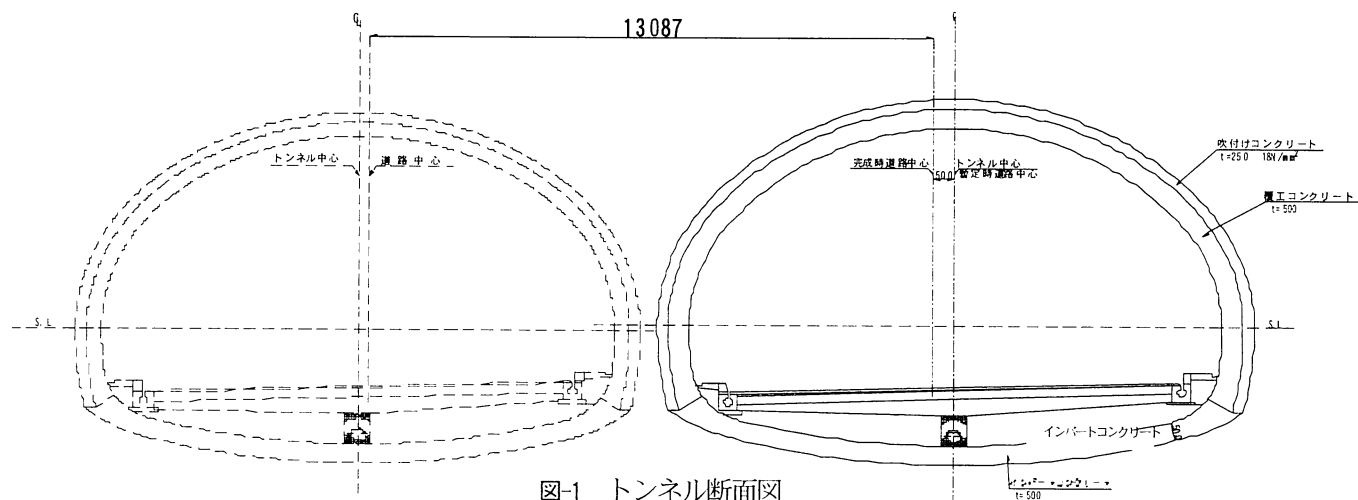


図-1 トンネル断面図

ネルが北側に計画されている。また、二期線との距離が中心線で約 13m と近接するため、全線においてインバートを含む RC 構造（ダブル鉄筋・覆工厚 50cm）である。本トンネルでは、延長が 400m 程度であり、掘削終了後にインバートを打設した後に覆工を打設する。そのため、養生時には外部の湿度の影響を受けるため、噴霧養生を実施することとした。コンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは高炉 B 種である。施工は、5 月～10 月の夏季期間に実施した。平均的な脱枠時間は 18 時間後である。

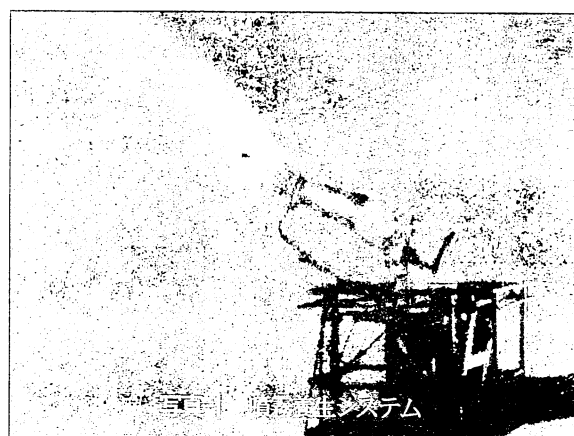
表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)
25	18	47.1	4.5	44.7
単位量 (Kg/m³)				
W	C	S	G	混和剤
175	372	765	946	6.56

(2) 噴霧養生

噴霧養生では「ダストセーバー」という噴霧装置²⁾を用いた。「ダストセーバー」とは、5ミクロンの微細な霧を発生させる機械 (0.72ℓ/min) で、トンネル現場では防塵対策としても用いられている。ここではバズーカ砲タイプを高所作業車に設置し、打設進行方向に向かって、トンネル円周方向に移動させながら、霧の散布を行った。運転状況を写真-1 に示す。

本手法の長所は、①トンネルバルーン³⁾などに比較し、設備費は小さく、他の施工への影響も少ない。②コンクリート表面の湿度を保ち、③過大な温度降下を生じさせない。④散水養生に比較し、湿潤状態を得るための散水量が少なく済むために、路盤のぬかるみが生じにくい



ことである。一方、本手法の短所は、トンネルバルーンなどの覆工面を覆う工法に比較し、温度、湿度の維持は難しく、湿潤状態を維持させるため、運転時間が長くなること、また、過剰な運転は表面温度の降下を招く可能性があることである。

噴霧養生については、コンクリート標準示方書⁴⁾では散水養生の範疇に入っており、期間は明記されているものの「湿潤状態に保つ」と記述されており、どの程度濡らすかという指定はない。これまで、本手法の運転期間や運転方法については、打設後 7 日まで 30 分に 1 回以上の噴霧を実施し、乾燥収縮ひび割れを防いだという事例⁵⁾がある程度である。

(3) 運転管理方法

本施工では、新たに運転管理目標を定め、その目標を達成するために、表面温度と表面水分量を測定しながら、運転を実施した。コンクリート標準示方書⁴⁾から、養生期間は 7 日間 (日平均気温 15℃以上、混合セメント B 種) と定め、表面湿度・温度を低下させず、運転時間をできるだけ短くできるように、表面水分量と表面温度の管理目標値を設定した。

a) 表面水分量の管理目標値

コンクリートが硬化する際、セメントの水和作用が完全に行われるために必要な水セメント比は 22-27^⑥と言われている。ここでも、養生期間の 7 日間にコンクリートの表面水分量を水セメント比 22-27^⑥程度（表面水分量換算 3.9-4.8%）に保つことを目標とし、運転開始時間を 5.0%と定めた。

b) 表面温度の管理目標値

噴霧養生では、表面に水を直接散布することにより、コンクリート表面が冷やされ、内部拘束ひび割れの発生の可能性がある。そこで、ここでは運転開始後に中心部と表面の温度差を 15℃以内に保つ^⑦ように、運転を調整した。

運転のフローを図-2 に示す。表面水分量は高周波容量式のコンクリート・モルタル水分計、表面温度は赤外線温度計により測定し、中心部温度は Shumidt 法により推定した。また、噴霧養生装置の運転方法（インターバルおよび散水量）は初期の試験運転により定めた。

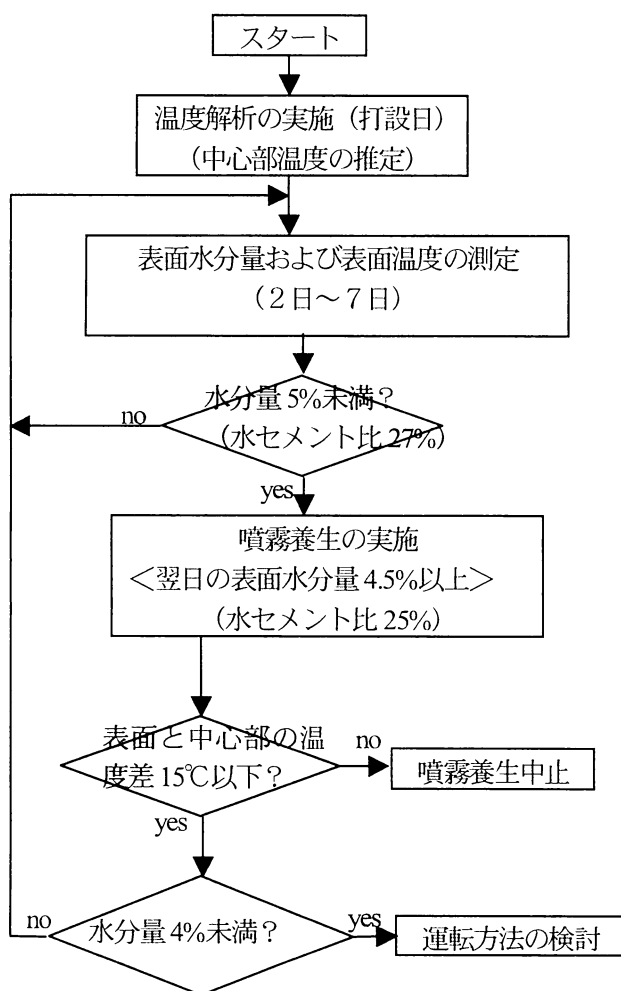


図-2 噴霧養生システム運転フロー

(4) 運転状況と覆工コンクリート

噴霧養生の運転状況と覆工コンクリートの状況を 2007 年 9 月 25 日に打設した 33 スパンに着目し、以下に示す。湿潤状態、表面温度の管理状態を把握するため、表面水分量、表面温度は左右側壁、天端の 3 か所、計 9 点で測定した。表面水分量の測定結果を図-3、表面温度の測定結果を図-4 に示す。湿度は 60-85%程度であった。

図-3 に示すように、表面水分量が 5%未満になった打設 6 日後に噴霧養生を実施し、養生期間内の湿潤目標 4.5%は達成した。表面温度については、管理基準となる中心温度から 15℃を引いた値（天端、側壁）も一緒に示した。図-4 に示すように、噴霧後の 7 日目でも表面温度は基準値を上回っていることが分かる。今回のケースでは、打設当初は表面水分量が高く噴霧養生は不要であったが、打設当初から噴霧養生が必要なケースでは、使用する水の水温を高め噴霧するなどの対策が必要となろう。

同時に測定したコンクリート内部（天端中央中心部、側壁中央中心部、表層から 10cm）の温度分布を図-5 および天端延長・円周方向、側壁延長方向の歪、無応力歪から算定した有効歪の経時変化を図-6 に示す。図-5 のコンクリートの温度分布に着目すると、天端は熱が滞留するため温度が高くなるので、噴霧により急激な表面温度の低下を避けることが必要となる。図-6 に示すように有効歪は打設 28 日経過した後でも収縮側にあり、外部拘束によるひび割れは発生しないことが予想される。また、側壁における歪がもっとも膨張側にあり、インパートの拘束の影響が大きいことが分かる。

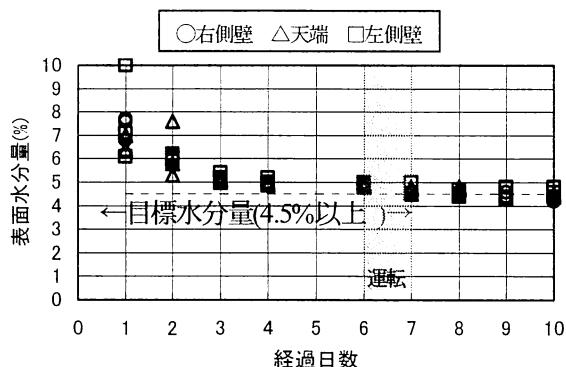


図-3 表面水分量の変化

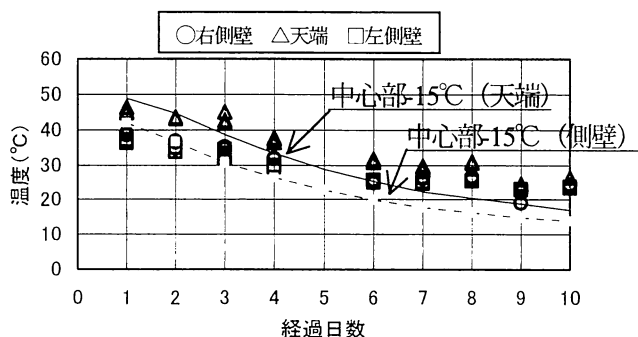


図-4 表面温度の変化

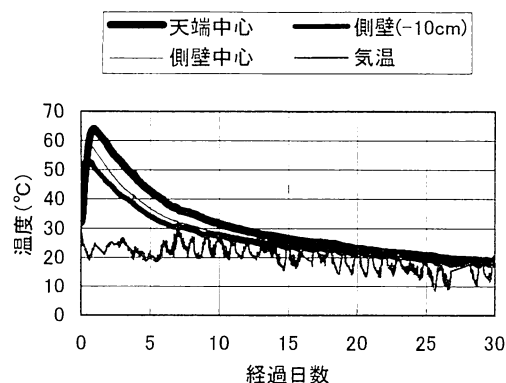


図-5 コンクリート内の温度変化

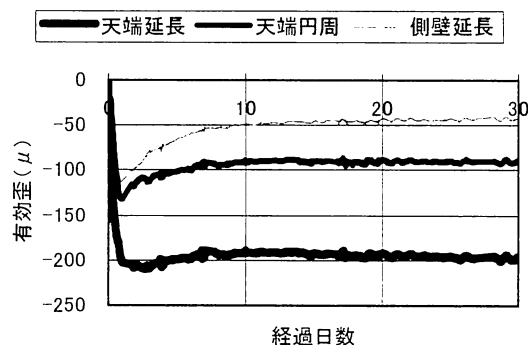


図-6 有効歪の変化

3. 噴霧養生の効果確認

噴霧養生の効果と考えられる、保湿効果、ひび割れ抑制効果、耐久性の向上を確認するため、試験室における3種類の養生条件が異なる試験体による水分量測定、長さ変化測定、促進中性化試験、現地における表面水分量測定、表面歪測定を3カ月間実施した。試験室における試験ケースおよび現地の測定ケースを表-2に示す。なお、試験室のコンクリートの配合は現地と同じものである。

表-2 噴霧養生の効果確認のための試験

	試験室 (20℃,65%RH)			現場 (33 スパン)		
	気中養生	2日水中養生	7日水中養生	右側側壁	天端	左側側壁
保湿効果	表面水分量測定 (各3体*3面)			表面水分量測定 (各3か所)		
ひび割れ抑制	長さ変化測定<ダイヤルゲージ方式> 3体 — 3体			長さ変化測定<コンタクトゲージ方式> (各3か所)		
耐久性 (中性化)	促進中性化試験 (養生144日後~) (各3体)			—		

*表面水分量測定は、高周波型容量式水分計 (深さ 40mm で設定) を用いた。
促進中性化試験はJISA1153 に準じた。

(1) 保湿効果

長さ試験供試体 (100mm*100mm*400mm 直方体) に、現地と同じコンクリートを打設し、3種類の異なる養生条件 (気中養生3体 (翌日脱型後に 20℃65%RH の恒温恒湿室で気中養生)、2日水中養生3体 (翌日脱型、1日間水中養生した後に恒温恒湿室で気中養生)、7日水中養生3体 (翌日脱型、6日間水中養生した後に恒温恒湿室で気中養生)) で、こてならし面以外の3面の表面水分量を測定し平均値を求めた。この結果を前述した現場の側壁、天端の測定結果と比較し、図-7に示す。

図-7に示すように、気中養生に比較し、水中養生を長く実施したケースほど、保湿されることにより表面水分量は大きく、養生開始から128日経過後、気中養生3.0%、2日水中養生3.3%、7日水中養生3.9%となっており、1%程度の差異が生じていることが分かる。これは、水中養生を十分に実施することにより、表面が緻密化することによって、内部の水分が抜けにくい構造になったためと考えられる。またこの差は、長期間継続することが分かった。

現地のデータをこれらと比較すると、試験室の2日水中養生と7日水中養生の結果の間にあり、温度や湿度などの環境条件は異なるものの、今回の噴霧養生の条件では、7日の水中養生に相当する湿潤効果は得られていないが、2日水中養生以上の湿潤効果はあったものと思われる。

(2) ひび割れ抑制効果

気中養生および7日水中養生の試験体について長さ変化試験を実施した結果を現場の側壁、天端の表面延長方向の表面歪測定結果と比較し、図-8に示す。

図-8に示すように、水中養生を実施することにより、気中養生に比較し、打設後50日までの間では収縮量は小さく、その間であれば乾燥収縮ひび割れの抑制効果はあるものと思われる。ただし、打設50日以降については、養生条件に関わらず収縮量は同程度になるので、ひび割れ抑制効果については単純に収縮量のみに着目せずに強度発現や表面の緻密化の違いも考慮に入れた検討も必要である。

現地のデータと試験結果を比較すると、現地のデータは、初期の段階で、気中養生と同等の収縮であり、今回の噴霧条件では、7日水中養生程度の収縮抑制効果は出ていないことが分かった。ただし、この時期に内部と表面の実歪の結果から、内部拘束ひび割れが発生するような歪レベルではないことが分かった。

● 気 ▲ 水2 ■ 水7 ○ 側壁 △ 天端 □ 側壁

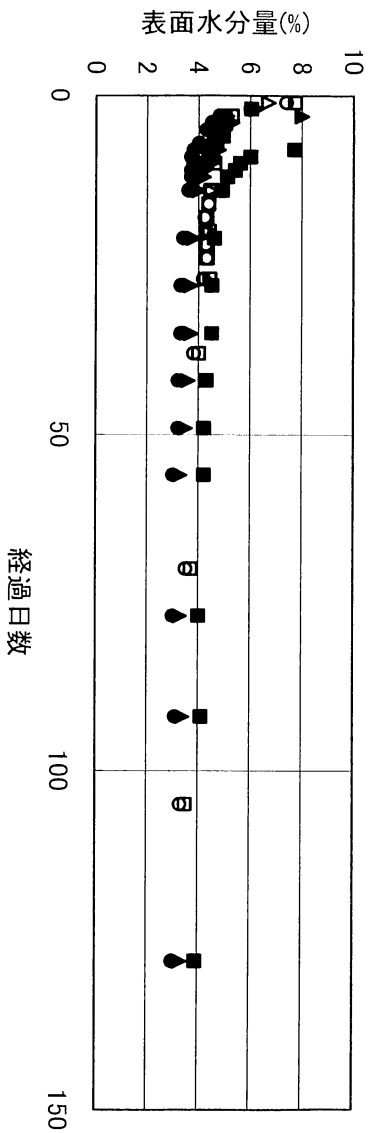


図-7 表面水分量の比較

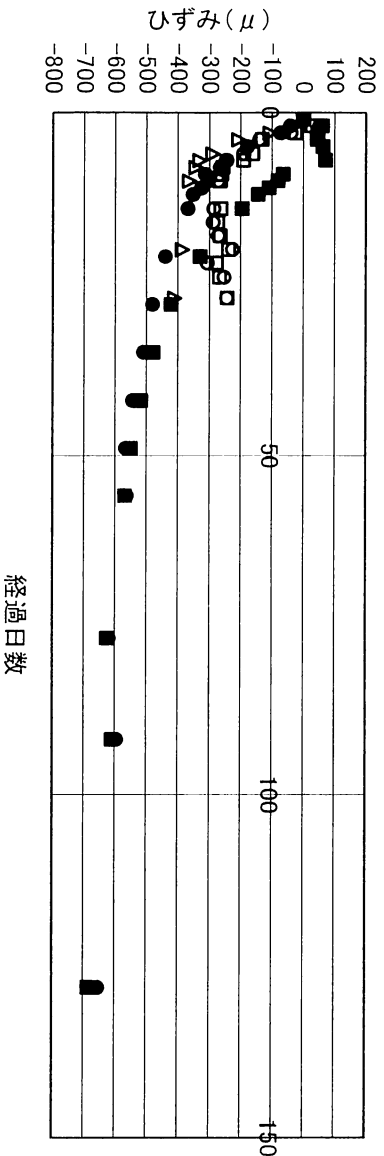


図-8 収縮率の比較

(3) 耐久性の向上

本覆工はRC 覆工であるので、耐中性化性能に着目して、耐久性を検討した。3 種類の養生条件が異なる長さ変化の試験体について、打設 144 日後から、促進中性化試験を実施した。促進中性化試験を実施する前の、気中養生と7 日水中養生の試験体の中性化状況を写真-2 に示す。中性化範囲の経時変化を図-9 に示す。

写真-2 に示すように、促進養生を実施する前の打設 144 日後で、気中養生で 6.2mm、2 日水中養生で 4mm、7 日水中養生で 2.3mm の中性化範囲となっており、気中養生では7 日水中養生に比較し、3 倍程度の中性化範囲となっている。図-9 に示すように促進中性化後にも養生の効果は保たれることが分かった。今回の設計かぶり 10cm まで中性化する時間は、気中養生で 72 年、2 日水中養生で 127 年、7 日水中養生で 250 年となる。表面の湿潤程度と耐中性化抑制性能が比例するものと考えると、3.1 節に示すように、今回の噴霧養生の湿潤程度が試験体における2 日水中養生と7 日水中養生の間にあるため、鉄筋まで中性化範囲が到達する時間は 127 年以上となり、100 年以内で耐久性の問題は生じないことが分かった。ただし、この結果からトンネル覆工で鉄筋を使っている部分については、湿潤養生を十分に実施する必要があるものと思われる。



写真-2 中性化状況

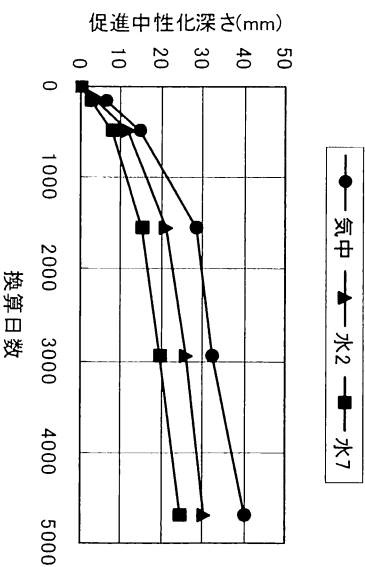


図-9 養生条件が異なる促進中性化試験

4. まとめ

噴霧養生の運転管理目標、方法を作り、それに基づいた運転を実施した。その結果、管理目標である養生期間 7 日間の表面水分量の目標値 4.5% (水セメント比 25%) は達成した。歪測定の結果からは、拘束による有害なひび割れが発生する可能性は低いものと思われた。また、竣工時点でのひび割れも少なかった。

今回の運転方法により、湿潤効果は試験室レベルにおける 2 日水中養生 (翌日脱枠、1 日水中養生後に気中養生) 以上の効果が得られた。また、耐中性化性能についても、鉄筋に達するまで 100 年以上掛ることが判り、十分な耐久性があるものと考えられる。ひび割れ抑制効果については、試験室の気中養生と同等の収縮挙動になっており、水中 7 日養生レベルまでの湿潤状況とはなっていないものと思われる。

トンネル覆工についての湿潤養生は、近年実施されるケースが多くなっているが、現状では効果については明確にされていないものと考えられる。湿潤養生により強度増進以外にも表面の緻密化による耐久性向上などの効果があるので、トンネル覆工の長期耐久性向上には欠かせない効果があるものと思われる。トンネル覆工にとっての養生効果を明確にすることにより、湿潤養生の方法も改善されていくものと思われる。

参考文献

- 1) 馬場弘二, 伊藤哲男, 城間博通, 宮野一也, 中島浩, 谷口裕史: 施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究, 土木学会論文集, No. 742/VI-60, pp. 27-25, 2003. 9.
- 2) <http://www.eac.co.jp/pdf/dust.pdf>
- 3) 小野利昭, 安部俊夫, 佐藤幸三, 新藤敏郎, 松井健一, 椎名貴快: トンネルバルーンー覆工コンクリートトータル養生工法, 西松建設技報, vol. 28, pp. 1-6, 2005.
- 4) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書施工編, 2007.
- 5) 濱田洋志, 大山茂, 須田政成, 羽瀨貴士: 噴霧養生装置における覆工コンクリートの乾燥収縮低減対策の効果, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点' 07, 2007.