

高品質,高耐久性を確保する覆工コンクリートの新しい養生方法の現場適用

山田浩幸¹・後藤裕一¹・三原康一²・小山起男³・石川恭義³・笠原光生³

¹正会員 (株)鴻池組 大阪本店 土木技術部 (〒530-8517 大阪市北区梅田三丁目4番地5号)

²島根県 益田県土整備事務所 (〒698-0007 島根県益田市昭和町13-1)

³(株)鴻池組 山陰支店 長沢1号トンネル工事事務所 (〒698-0412 島根県益田市長沢町761-2)

新設トンネル建設時の覆工コンクリートを一定期間、湿潤養生し、その強度増進をはかることによる品質および耐久性の向上が期待される新しいコンクリートの養生方法の研究開発を進めてきた。今回、「温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生工法 (K-tics)」を国内で初めて島根県発注長沢1号トンネル工事に適用して効果の検証を行った。

本論文では、工法の開発背景、工法の概要、室内試験結果、数値解析結果および現場での実証実験結果について報告する。本工法の適用により、覆工コンクリートの品質向上に大きな効果があることが確認された。

キーワード:山岳トンネル, 覆工コンクリート, 湿潤養生, 噴霧, ひびわれ

1. はじめに

(1) 概要

現在の山岳トンネル標準工法である NATM では、一般に覆工には力学的な機能が期待されない。そのため、覆工はこれまで 30cm 程度の厚みの無筋コンクリートで構築され、トンネル坑内の坑内設備（例えば照明、内装設備、換気設備、電力通信設備等）の取付けや設計時に想定していない荷重（地震時などの外力の変化、水压等）に対して構造物の安全性向上や耐久性確保の目的で設けられてきた。しかし、鉄道トンネルや道路トンネルでのコンクリートのはく落事故、近年の公共投資のコスト縮減を受け、社会資本の合理的な整備の観点からトンネルを含むコンクリート構造物のライフサイクルコスト（維持管理、修繕更新費用）の低減、長寿延命化が強く求められるようになり、構造物の重要な構成要素であるコンクリートの高品質化、高耐久性化が求められるようになってきている。

そこで、覆工コンクリートの初期養生を確実に行うことで、ひびわれ発生を抑制し、高品質化・高耐久性化を図る「温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生工法 (K-tics)」を開発し、施工現場に適用し、その効果を実証した。

(2) トンネル覆工コンクリートの現況

一般の RC 構造物では所用の品質を確保するために、コンクリート標準示方書に示される期間の養生¹⁾ (表-1 に示す湿潤養生期間の標準) を行う。これに対し、トンネル新設時の覆工コンクリートについては、トンネル坑内の温度がほぼ一定で、かつ高湿度状態にあるなどの理由により、特別な養生は必要ないとされ、さらに施工時の経済性や工期の問題から、コンクリート打設後 12~20 時間程度での早期脱型が一般的に実施されてきた。²⁾

表-1 湿潤養生期間の標準¹⁾

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメント B 種	早強ポルトランドセメント
15℃以上	5 日	7 日	3 日
10℃以上	7 日	9 日	4 日
5℃以上	9 日	12 日	5 日

(3) 実施工での課題

実際の施工では、トンネル貫通後は坑内に通風が発生し、急激な温度変化や乾燥の原因となっている。また、近年、トンネル坑内作業環境改善を目的として大容量換気設備が導入され、貫通前においても良好な養生環境にあるとは言えなくなっている。

さらに、トンネル断面の大断面化に伴う覆工厚さの増大、設計強度を確保するための単位セメント量

の増大など、コンクリートの養生に対して厳しい条件となるケースが増えてきている。一方、グリーン購入法に基づく資材調達の中で、高炉セメントの利用促進が図られてきた。高炉セメントは水和熱抑制効果や長期強度の増進効果があるとされている反面、養生状態によっては初期強度発現の遅延や乾燥収縮量が増えるなどの覆工コンクリートへの影響が懸念されている³⁾。

以上の様々な条件下では、これまでの養生が十分でない覆工コンクリートに、乾燥収縮ひびわれや温度応力に伴うひびわれなどが生じている。これらのひびわれは、一般の無筋区間においてははく離・はく落の、補強鉄筋区間においてはさらに塩害や中性化も問題となる。これらのことにより、安全性や長期耐久性に問題が生じる要因となる。

ひびわれの発生を抑制する方法としては、

- ・乾燥収縮を抑制すること
- ・強度（特に引張強度）をあげること

が主対策となるが、覆工コンクリート養生においては、以下のような方法が現在、開発適用されている。

①風船等の空気膜による覆工コンクリート表面の密閉養生

②乾燥収縮低減剤等の被膜養生材の表面への塗布

これらの方法は、いずれもコンクリート表面からの水分の蒸発を防ぎ、乾燥収縮の低減を主目的としたものであり、強度増進に関わる水和反応を積極的に促進するものではない。また、実際の施工においては、①では台車の据付・移動時の養生中断による乾燥、②では養生被膜の均一な形成が困難であることなどの課題がある。

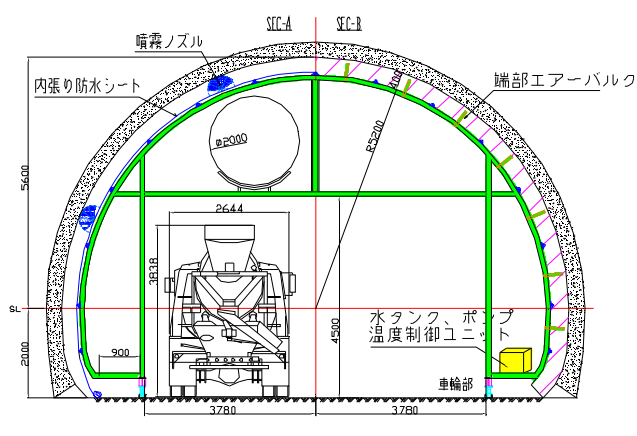


図-1 噴霧養生台車断面図

そこで、図-1 の噴霧養生台車断面図および図-2 の養生空間模式図（CG）に示すように、

- ・セントル脱型後に覆工全面を覆うシートを有した台車で、密封された養生空間を確保する。

- ・コンクリート面に、温度調整を行った微粒の水を噴霧し湿潤状態を維持する。

を特徴とした養生方法を研究・開発した。

本論文では、養生方法の概要および養生条件の違いによるコンクリートの強度特性について比較検証した実験および温度応力解析による検討結果、現場適用時の実証試験結果について述べる。

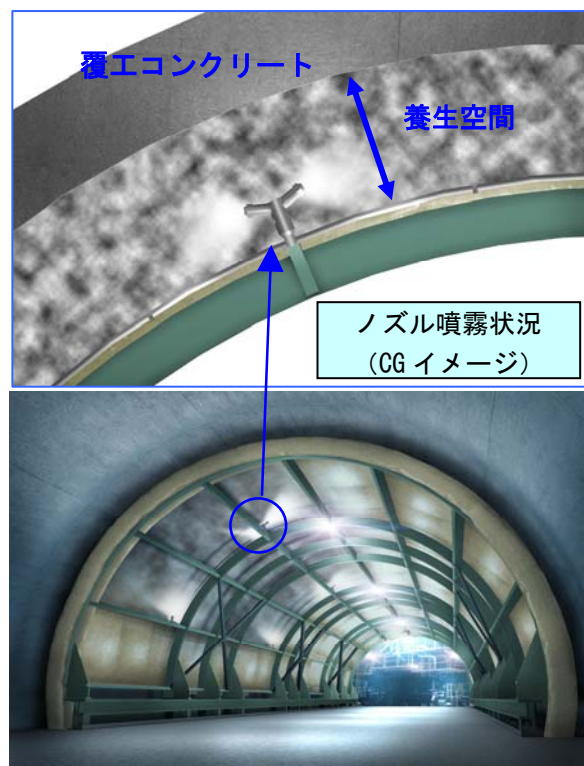


図-2 養生空間模式図（CG）

2. 温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生工法の概要

(1) 養生技術の概要

本工法は、図-3 に示すように、覆工用セントルの後方に、セントルと同じ幅のレールゲージを有する3スパン相当の移動式養生台車を連結させることにより、コンクリートを一定期間、湿潤状態で養生できるように工夫した工法である。

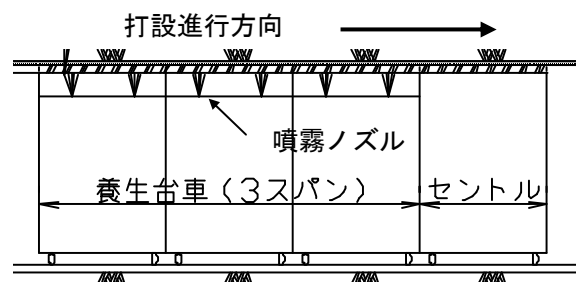


図-3 噴霧養生台車連結設置図

(2) 養生台車および温度制御システム

養生台車には、遮水シートおよび端部締め切り用の空気充填膜が取り付けられており、コンクリートとの間に 30～60 cm 程度の密閉された養生空間を確保することができる。養生台車には、噴霧装置が取り付けられており、養生空間内に霧を発生させることで湿度 90～100% の湿潤状態を保つ。

噴霧水の温度を、スパン毎に打設時の温度条件や材齢等を考慮して個別調整することも可能で、これにより養生温度を制御（写真-1）し、コンクリートへの急激な温度変化を与えることなく最適な養生状態を保持することが可能となる。

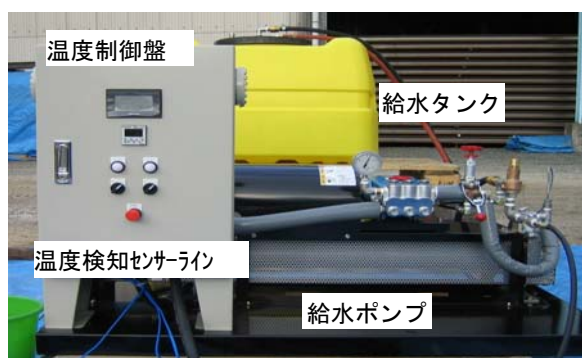


写真-1 温度制御装置

(3) 噴霧養生の手順

本工法による養生の手順は以下のとおりである。

- ① 覆工コンクリートの打設には全断面スチールフォームセントルを使用し、通常と同様の打設方法で施工する。
- ② 型枠は、打設したコンクリートが所定の強度に達したことを確認した後に脱型する。
- ③ 脱型後、型枠は次打設スパンへ移動・据付を行なう。
- ④ 覆工コンクリートの出来形確認検査完了後、当該スパンへ噴霧台車の移動・据付を行なう。
- ⑤ 噴霧台車の据付後、セントルの端部とシートを接続し、噴霧台車後端部をエアーバルブにより締め切り密閉後、噴霧養生を開始する。

標準的な覆工コンクリートの打設サイクルは、2 日に 1 回、すなわち 1 週間に 3 スパン分の打設である。噴霧台車の延長は、覆工用セントルの 3 スパン分（ $L=10.5\text{m}$ の場合、 31.5m ）としたため、休工期を含めて、コンクリート標準示方書における標準養生期間である 1 週間（7 日）における湿潤養生が可能となる。

(4) 噴霧装置

噴霧装置は加湿器や加熱器ではなく写真-2 に示す工業用微霧発生用ノズルを用いることにより、粒

径 $45\sim 60\mu\text{m}$ 程度の微粒の霧を発生させる。微粒の霧は密閉空間に浮遊するため、アーチ状の養生空間全体を均一に、湿度を 90～100% 程度に保持することができる。

3 スパンの養生に必要な水量は 1440 / 時間程度の少ない供給量でまかなえる。また、一般の散水養生のように粒径の大きな水を散水しないことから、コンクリート表面の水による洗われによる、コンクリート成分の逸失、強度低下、および筋状の水だれ跡等美観の低下などがない。



写真-2 工業用微霧発生用ノズル

(5) 養生状態の設定と管理

養生状態の設定と管理は、図-4 に示すフローに基づき実施する。まず養生状態、すなわち養生温度の設定は、事前に行う覆工コンクリートの打設条件、配合、トンネル坑内温度等を考慮した温度応力解析による養生温度シミュレーションの結果に基づいて行う。このシミュレーションに基づき最適養生温度の設定を行なう。

次に、養生時には、温度制御装置により、予め設定された養生温度に合うように自動的に噴霧温度が調整される。

I. 温度解析による養生温度シミュレーション

最適な養生条件の設定のためには、材齢とともに変化する覆工コンクリートの温度変化にあわせた養生温度の設定が必要。

II. 打設温度、目標養生温度の決定

打設温度の設定や、温度解析結果に基づく最適養生温度の設定により、温度変化に伴う引張応力の発生を低減。

III. 養生時の計測管理と養生温度自動調整

コンクリート打設後 7 日までの養生期間においては、温度センサーにより実養生温度の計測を行うとともに、計測結果に連動して自動的に温度調整を実施。

IV. 覆工コンクリートの品質向上の実現

温度の制御、湿度維持により最適な養生管理の結果として表面の緻密化、強度発現の増進により表面の欠陥の発生を低減。覆工コンクリートの品質性能の向上を図る。

図-4 養生管理フロー

3. 効果確認室内実験

本工法の効果を確認するために、恒温室内で、供試体での要素実験を実施し、養生方法の違いがコンクリートの強度特性等に与える影響について検討を行った。

(1) 実験方法

a) 実験項目

実験は、強度特性を比較検討するために、①圧縮強度試験、②引っかかり試験、③シュミットハンマー試験（反発度）の3項目について、またコンクリート細部構造の緻密化を測定するために、④水銀圧入式による有効細孔量（空隙率測定試験）測定を実施した。

b) 配合

コンクリートの配合は、表-2 に示すように、一般的なトンネルの覆工コンクリートに通常用いられる JISA5308：レディーミクストコンクリート規格品（セメントの種類高炉セメント B 種、粗骨材最大寸法 20mm、水セメント比 55%）の 24-15-20BB とした。

表-2 コンクリート配合

最大骨材寸法 (mm)	スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位 セメ ント 量 (kg)	AE 減水 剤 (kg)
20	15±2.5	55.0	44.3	329	0.823



写真-3 室内実験状況

（恒温室内に模擬の噴霧養生空間＝ビニール室を設置）

c) 養生条件

供試体は、コンクリートを打ち込み、型枠を付けた状態で 20℃の恒温室内で養生した後、一般的な NATM によるトンネル施工での覆工コンクリートの

脱型時期を考慮して脱型した。その脱型時期は、脱型強度（2N/mm²）を確認した結果、材齢 18 時間後とした。その後、各々の供試体について、表-3 に示す噴霧養生、気中養生（50, 70, 90%RH）、標準養生の 5 種類の養生を所定の試験材齢まで実施した。なお、何れの養生も 20±3℃の恒温室内で実施した。

噴霧養生では、実際のシステムで使用する噴霧ノズルを用い、20±3℃の水道水を材齢 7 日まで噴霧し続け、その後は気中養生（20℃、70%RH）を実施した。

表-3 養生条件

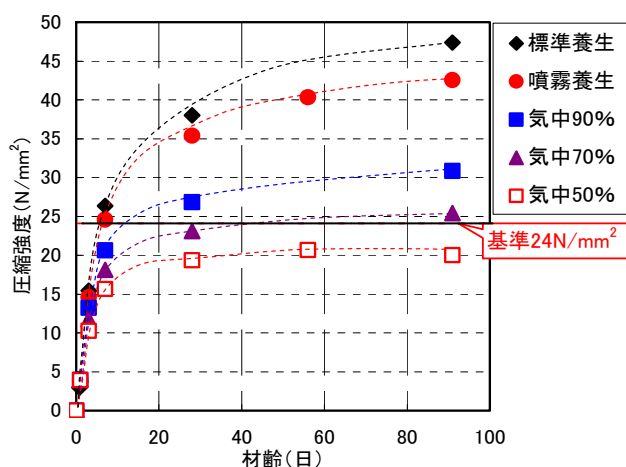
材齢(日)		～7日まで	～28日まで
養生方法	噴霧養生	噴霧養生	気中(70%RH)
	気中養生	90%RH	気中(90%RH)
		70%RH	気中(70%RH)
		50%RH	気中(50%RH)
	標準養生	水中(20℃)	

(2) 実験結果

a) 圧縮強度試験結果

図-5 に圧縮強度試験結果を示す。

図-5 圧縮強度試験結果



① 気中養生

気中養生の供試体の圧縮強度は、湿度の影響を大きく受け、湿度が低いほど強度発現が低い。また、湿度の高い 90%の環境下であっても、材齢 28 日で 27.1N/mm²であり、標準養生の 8 割弱の強度であった。この理由としては、気中養生では、湿度を高く保持しても、コンクリート表面からの水分の逸脱により水和反応が阻害され、強度発現が低下したものと考えられる。

② 噴霧養生

噴霧養生の供試体は、強度発現が早く、かつ噴霧養生を実施しない材齢 7 日以降も強度が増加する。材齢 28 日では 35.4 N/mm²であり、標準水中養生

(20℃恒温水槽内)と同程度である。

これらのことより、材齢 7 日まで噴霧養生を実施することが、コンクリートの強度発現に極めて有効であることが確認できた。これは、材齢 7 日までの初期材齢中のコンクリート表面からの水分の逸脱がなくなることで、水分供給によりコンクリートが緻密化したことによると考えられる。

b) 有効細孔量測定試験

(空隙率 (ポロシティ) 測定試験)

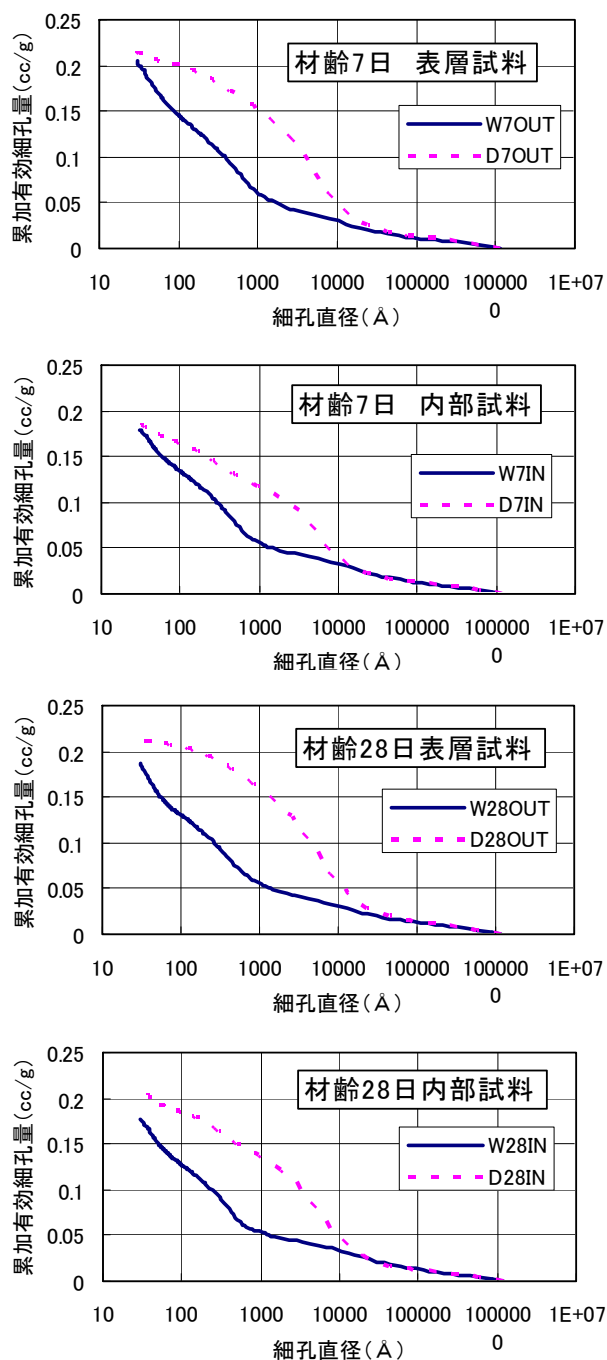


図-6 空隙率 (ポロシティ) 測定結果

空隙率の測定は材齢 7 日、28 日の供試体の表層及び内部から、破碎試料 (粒径 2.5~5.0mm に粒度

調整)を採取し、アセトンで水和反応を停止させ、水銀圧入式ポロシメータによる有効細孔量測定を行った。図-6 に、空隙率測定結果を示す。図中の記号 W, 7, OUT 等はそれぞれ養生条件 (W: 噴霧養生, D: なし), 材齢 (7 日, 28 日), 試料採取位置 (OUT: 表層, IN: 内部) を示す。

以下に得られた知見を示す。

① 気中養生

養生なしでは 1000 Å (オングストローム) 以上の細孔割合が多く、材齢 28 日でも粗な状態が続く。また、噴霧養生と比較して、表層と内部の細孔構造の差異が大きい。

② 噴霧養生

養生なしと比較して細孔構造が緻密化している。(累加曲線が左側 (細かい方) へ分布している。) また、表層と内部の細孔構造の差異が小さい。以上のことより、噴霧養生が、表層及び内部の水和反応に寄与⁴⁾⁵⁾していることがわかった。

4. 数値解析による効果の検証

(1) 温度応力解析による解析手法

覆工コンクリートについて、温度応力解析を実施した。コンクリート打設後材齢 7 日以内の初期段階のひびわれ発生の原因になると考えられる作用応力として、脱型後の覆工コンクリートの自重による発生応力および水和熱による温度応力の影響を考慮した。解析には、コンクリートの非線形温度応力解析が可能な 2 次元有限要素解析コード ASTEA-MACS (Ver. 5.0; 計算力学研究センター) を用い、コンクリートの温度によるヤング係数の変化を考慮したコンクリート温度応力解析を実施した。

本解析により、噴霧養生の温度を 10, 15, 20, 25 および 30℃とした各ケースについて、ひびわれ指数を算定した。

(2) 解析モデル

図-7 に、本検討で用いた解析モデルを示す。形状は一般的な 2 車線道路トンネル断面とし、覆工コンクリートの厚みは 30~35cm, 補強鉄筋はないものとした。モデルは平面ひずみ要素とし、鋼製支保工およびロックボルト等の支保部材は考慮していない。

また、インバートコンクリートは、覆工コンクリートに先行して打設され、強度発現および発熱は終了しているものとした。なお、覆工コンクリートが

外接する吹付けコンクリート面は、アイソレーションシートにより拘束を受けないものとした。

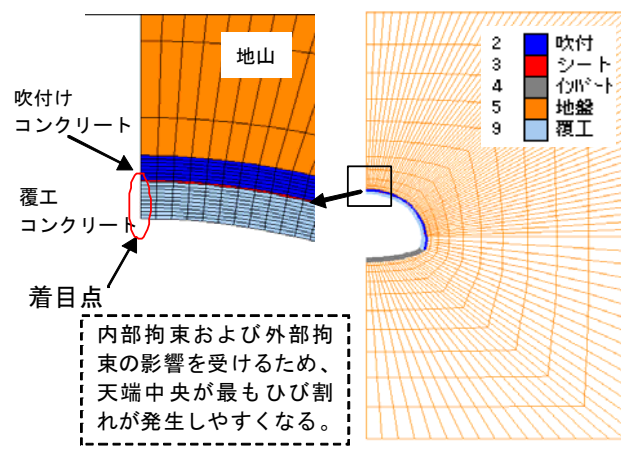


図-7 解析モデル

(3) 解析ステップ

解析ステップは、図-8 に示すように、実際の覆工コンクリートの打設にあわせて以下の施工サイクルを解析ステップに組み込んだ。

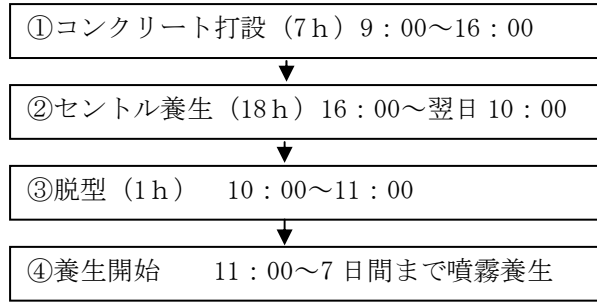


図-8 解析ステップ

(4) 入力条件

解析に用いた物性値を表-4 に示す。
表-4 解析に用いた物性値

項目	数値等	単位
セメントの種類	普通ポルトランド	—
単位セメント量	320	kg/m ³
断熱温度上昇式	$Q(t)=48.2 \times (1-e^{-1.18t})$	—
坑内温度	20(一定)	℃
コンクリート打設温度	20、25、30	℃
熱伝導率	コンクリート 2.7 地盤 3.2	W/m℃
比熱	コンクリート 1.15 地盤 0.79	kJ/kg℃
線膨張率	コンクリート 10×10^{-6} 地盤 8×10^{-6}	/℃
熱伝達率	セントル 12 脱型後 12 地盤 2	W/m ² ℃

(5) 解析結果

一例として、打設温度 20、25、30℃、坑内温度 20℃としたケースについて、噴霧養生の温度を 10 から 30℃とした時の結果を図-9 に示す。

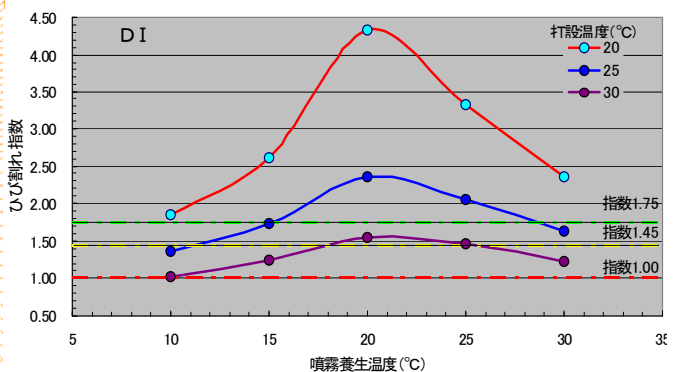


図-9 養生温度とひびわれ指数

本条件では、ひびわれ指数は、養生温度 20℃の場合に最大を示し、ひびわれの発生がほぼ抑制できる結果となった。なお、養生温度が 20℃から低温側・高温側いずれの方向にも離れるにつれてひびわれ指数が小さくなることから、養生温度を適切に保つことがひびわれ発生抑制に対して有効であると考えられる。

5. 現場適用、実証試験結果

島根県発注国道 488 号長沢バイパス改築 (改良) 工事長沢 1 号トンネル (仮称) にて、本工法の 1 号機を導入し、噴霧養生を行なった。比較検証を行うため同一トンネル内にて噴霧養生実施スパンと、養生なしのスパンを設けて実証試験を実施した。

(1) コンクリート配合

本現場で使用した覆工コンクリートの配合を、表-5 に示す。

表-5 コンクリート配合

最大骨材寸法 (mm)	スラン プ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg)	AE 減水剤 (kg)
20	15±2.5	55.0	44.3	329	0.823

(2) 施工概要

本現場に導入した養生システムを写真-4 に示す。覆工打設用セントルの延長は 10.5m であり、その 3 スパン分をカバーするために養生台車 3 台を導入している。前述のとおり、覆工コンクリートの打設は、2 日に 1 回、週 3 スパンの進捗であり、本工法による養生期間は 7 日間である。



写真-4 養生システム実機全景

(3) 実証試験結果

覆工コンクリート打設時に供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を採取し、それぞれ、標準養生、一般的な養生状態にある気中養生（覆工脱型時間に合わせ供試体を脱型後トンネル坑内打設スパン付近に存置）および養生システムの養生空間内に存置した噴霧養生について、圧縮強度を比較した。その結果を、図-10に示す。

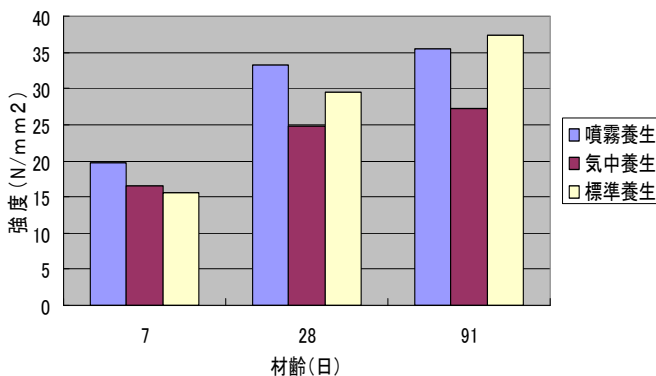


図-10 養生状態の違いによる強度試験結果

a) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果のまとめを以下に示す。

① 気中養生

これまでの覆工養生状態に該当する気中養生では、標準養生に対して、材齢 7 日で 106%と同等であるが、それ以降については材齢 28 日で 84%，材齢 91 日で 73%となり、大きく下回っている。

② 噴霧養生

本工法による噴霧養生では、標準養生に比較し材齢 7 日で 127%，材齢 28 日で 113%と上回り、材齢 91 日で 95%の強度発現をした。また、気中養生に対しては、それぞれの材齢で大きく上回る。なお、材齢 7 日での強度が大きいことは、初期ひびわれの抑制に有効であると考えられる。さらに、材齢 7 日ま

での初期段階の噴霧養生が 28 日以降の長期においても標準養生とほぼ同等に強度の増進がみられることより、本工法が覆工コンクリートのひびわれ発生の抑制および耐久性の向上に関して効果があることが確認された。

b) シュミットハンマー試験結果

図-11 に養生実施ありスパンとなしスパンでの表面強度の違いを検証したシュミットハンマー反発度の測定結果を示す。

シュミットハンマー（低反発用，高反発用）による表面強度比較結果においても噴霧養生による反発度の増加が明らかとなった。

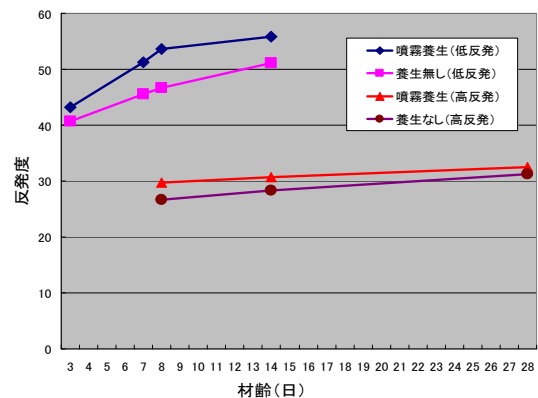


図-11 シュミットハンマー反発度試験結果

c) 引っかかり試験結果

覆工コンクリート表面硬度および緻密度の指標を得る目的で引っかかり試験⁶⁾を実施した。



写真-5 引っかかり試験器具

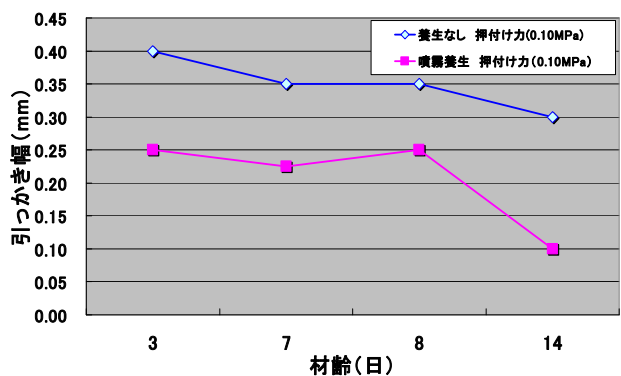


図-12 引っかかり試験結果

写真-5 に引っかかり試験器（日本建築仕上学会式）を示し、図-12 に引っかかり試験（表面強度）の

結果を示す。なお、引っかき試験は表面の凸部金属突起をコンクリート表面に押し当て引掻き、傷の幅をクラックスケールを用いて測定した。引っかき圧の大きい 0.10MPa での引っかき幅の値に着目すると、気中養生の表面強度は、材齢が経過しても引っかき幅の増加が見られない。一方、噴霧養生の場合は、材齢の経過に伴い引っかき幅が小さくなり表面強度が増加（緻密化）することが確認できた。以上のことから、表面硬度には、若材齢時の養生条件が大きく影響を与えることが分かった。

6. 噴霧養生システム導入の効果のまとめ

室内実験、現場での実証および数値解析により、今回実施した温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生工法について、以下の効果が確認された。^{7) 8)}

- ①従来の気中養生に比較して、コンクリートの強度が 20～30%増加する。
- ②従来の気中養生に比較して、コンクリート表面および内部の細部構造が緻密化する。
- ③内部拘束に起因する温度ひびわれ発生率が低減する。
- ④乾燥収縮によるひびわれ発生率が低減する。

7. おわりに

覆工コンクリートの品質確保のためには、配合、運搬、打込み、養生といったそれぞれの工程での工夫が必要となる。本システムでは、コンクリート打設後 7 日程度までの初期養生に着目し、事前の温度解析結果により予測した最適な養生温度で噴霧による湿潤状態を保つことにより、初期強度の増進と乾燥収縮によるひびわれの発生が抑制できると考えられる。

今回の実証実験により、強度増進効果および乾燥収縮ひびわれ抑制効果が確認された「温度制御噴霧

式覆工コンクリート湿潤養生システム」の適用により、これまで養生が十分でなかったトンネルの覆工コンクリートにおいて、合理的かつ最適な養生の実施が可能となり、高品質、高耐久性の覆工コンクリートの施工が実現できると考えられる。

道路におけるトンネル構造物に関しては、建設後、50 年以上経過したものが、全体の 20%（延長：540km）を占め、今後急速に増えていくことが想定されている。一方、公共投資が抑制される中で、道路の維持管理、更新に関する社会的な関心も高まっている。

したがって、本工法の採用により、今後新設される山岳トンネルのライフサイクルコスト（維持管理、修繕更新費用）の低減が図れ、長寿延命化への寄与が期待できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 2007 年制定 コンクリート標準仕方書[施工編]、土木学会 pp.126-129
- 2) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策 トンネルライブラリー第 12 号 pp.58-59
- 3) 西村和夫：トンネル技術の発展と現状 地盤工学会誌 Vol.54 November, 2006 pp.1-5
- 4) 電中研報告 N06018：フライアッシュコンクリートのポズラン反応に伴う強度発現メカニズムについての考察
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧 セメントペースト硬化体の性質 pp.37-39
- 6) 関口博康：コンクリート表面強度の簡易測定法 仕上学会認定「引っかき試験器」に関する考察 日本建築仕上学会論文集 Vol.12.No72 pp.52-53
- 7) 後藤裕一，山田浩幸，為石昌宏，水町 実：高品質、高耐久性を確保するためのトンネル覆工コンクリートの新しい養生方法，第 62 回土木学会年次学術講演会，2007. 9
- 8) 山田浩幸，後藤裕一，水町 実，坂本全布：温度制御噴霧式覆工コンクリート養生方法の開発，トンネルと地下 vol.39, No.4, pp289-297, 2008.