

温度制御噴霧式覆工コンクリート養生工法の開発

Curing Method of Tunnel Lining Concrete using Temperature Controlled Mist

後藤 裕一*¹ 山田 浩幸*¹ 富澤 直樹*²
Yuuichi Gotoh Hiroyuki Yamada Naoki Tomisawa
小山 起男*³ 石川 恭義*³
Tatsuo Koyama Yasuyoshi Ishikawa

要旨

山岳トンネルの覆工コンクリートを養生する方法として、シートで密閉した空間に養生に適した温度に制御した水を噴霧する工法「K-tics」を開発した。本報告では、本工法の開発背景、工法概要、室内試験結果、数値解析結果、および現場での実証結果の速報を報告する。それぞれの試験等の結果、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：覆工コンクリート 養生 温度制御 噴霧 ひびわれ 圧縮強度 温度応力

1. はじめに

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 30cm 程度の厚みの無筋コンクリートで構築され、「化粧巻き」と呼ばれることもある。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剥落事故や、昨今のコンクリート構造物の長寿延命化を求める気運を背景に、山岳トンネルの覆工においても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た。その結果、一般の RC 構造物では当たり前であったものの、これまで山岳トンネルの覆工ではあまり重視されていなかったコンクリートの“養生”が必要となってきている。

そこで、覆工コンクリートの初期のひびわれ発生を抑制し、高品質化を図る「温度制御噴霧式覆工コンクリート養生工法（K-tics）」を開発し、その効果を実証した。

2. 現況と課題

これまで、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ていた。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 24 時間以内での早期脱枠が一般的に実施されてきた¹⁾。

しかし、実際には、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の増大などによる覆工コンクリートへの影響が懸念されている²⁾。

これら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、乾燥収縮ひび割れや温度応力に伴うひび割れなどが生じている。これらのひび割れは、一般の無筋区間においては剥離・剥落の、補強鉄筋区間においてはさらに塩害や中性化の原因となり、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には、

- ・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、覆工コンクリートを養生する方法として、以下のような方法が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撒布もしくは塗布。

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。

*1 大阪本店 土木技術部 *2 土木本部 工務管理部 *3 山陰支店 土木部

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。

そこで、図1に示すように、

- ・セントル脱枠後に覆工全面を覆うシートを有した台車で密封養生する
- ・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

ことにより、乾燥収縮を低減すると共に、コンクリート材齢初期の水和反応を促進する養生方法を研究・開発し、それを「温度制御噴霧式覆工コンクリート養生工法(K-tics)」と命名した。

本報告では、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について述べる。



図1 養生台車と噴霧ノズル(CG)

3. 温度制御噴霧式覆工コンクリート養生工法

3.1 養生技術の概要

本工法は、図2に示すように、覆工用セントルの後方に、セントルと同じ4.5m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。

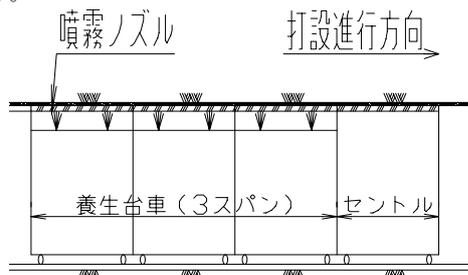


図2 養生概要

3.2 養生台車および温度制御システム

図3に示すように、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30~60cm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%の湿潤状態に保つ。

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が可能で、これにより養生温度を制御し、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。

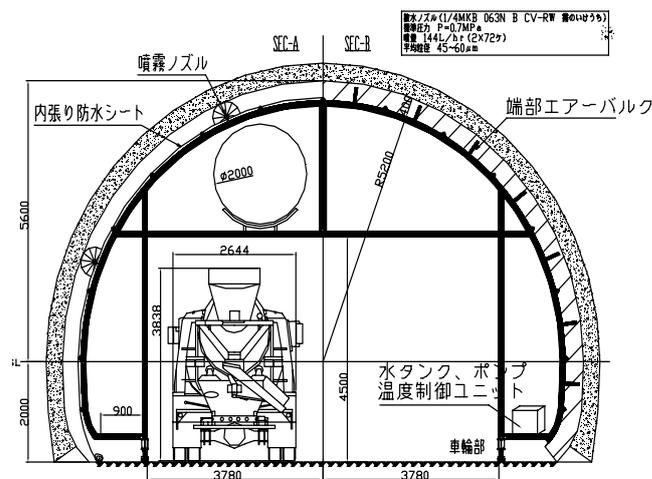


図3 養生台車断面図

3.3 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セントル型枠は、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枠する。
- ③脱枠後、セントル型枠は次打設スパンへ移動・据付を行なう。
- ④脱枠後、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を移動・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=10.5mの場合、31.5m)としたため、休日を含めて、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。

3.4 噴霧装置

噴霧装置は加湿器や加熱器ではなく工業用微霧発生用ノズルを用いることにより、粒径 45~60 μ 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 144l/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形の大きな水を散水しないため、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、強度低下や、筋状の水だれ跡等美観の低下などが無い。

3.5 養生状態の設定と管理

養生状態の設定と管理は、図 4 に示すフローで実施する。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、写真 1 に示す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。

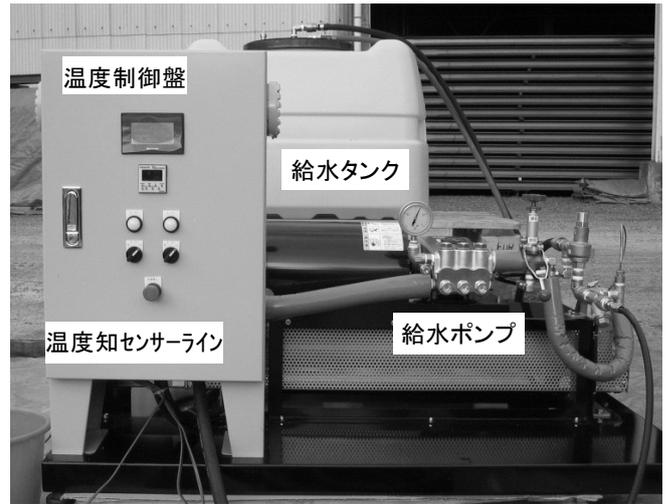


写真 1 温度制御装置および給水設備

4. 効果確認室内実験

4.1 実験方法

4.1.1 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引っかき試験、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検討するために、水銀圧入式による空隙率測定試験を実施した。

本工法の効果を確認するために、写真 2 に示すように、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。



写真 2 供試体要素実験

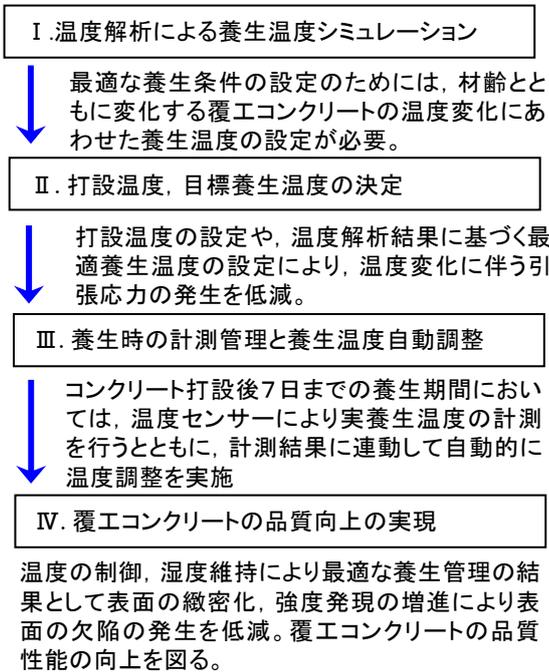


図 4 養生管理フロー

4.1.2 配合

コンクリートの配合は、表 1 に示すように、一般的なトンネルの覆工コンクリートと同等配合であるレディーミク

ストコンクリートの24-15-20BBとした。

表1 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

4.1.3 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程度)を確認した結果、材齢18時間とした。その後、各々の供試体について、表2に示す噴霧養生、気中養生(50、70、90%RH)、標準水中養生の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2 養生条件

材齢(日)		~7	~28
養生方法	噴霧養生	噴霧	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℃)	

4.2 実験結果

4.2.1 圧縮強度試験結果

図5に圧縮強度試験結果を示す。

(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。

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35.4N/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をなくなること、および水分供給により、コンクリートが緻密化したことによると考えられる。

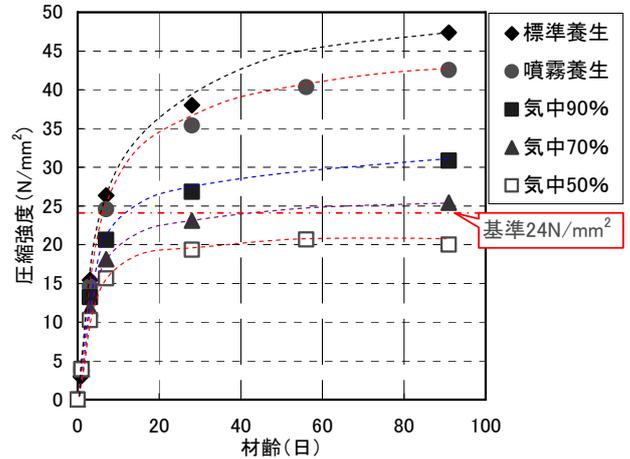


図5 圧縮強度試験結果

4.2.2 引っかき試験結果

図6に引っかき試験(表面強度)の結果を示す。なお、引っかき試験器(写真3)は、日本建築仕上学会式³⁾のものを使用し、引っかき幅は、クラックスケールを用いて測定した。

(1) 気中養生

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(70%RH)の表面強度は、材齢が経過してもあまり増加が見られない

(2) 噴霧養生

材齢7日以降は噴霧を実施していないにも関わらず、材齢の経過に伴い表面強度が大幅に増加(緻密化)することが確認できた。

これらのことより、表面強度は若材齢時の養生条件の大きな影響を受けることが判った。

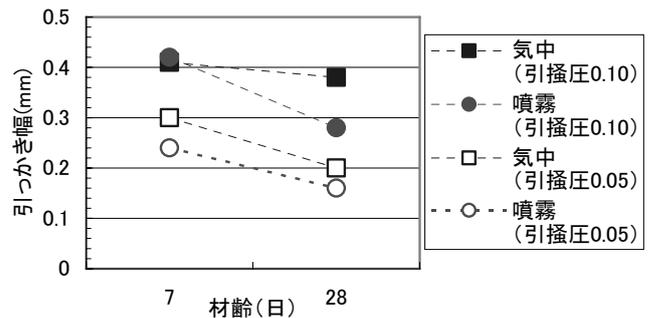


図6 引っかき試験(表面強度)結果



写真3 引っかき試験器

4.2.3 シュミットハンマー試験

図7にシュミットハンマー試験(反発度)の結果を示す。シュミットハンマーは低強度用P型を使用した。角柱供試体を載荷試験機で固定し、側面と底面を対象としハンマーの反発度を測定した。

これによると、材齢3日~28日の全材齢において、気中養生に比較して、噴霧養生による反発度の増加が認められた。これにより、噴霧養生により表面部の強度増進が促進されていることが確認された。

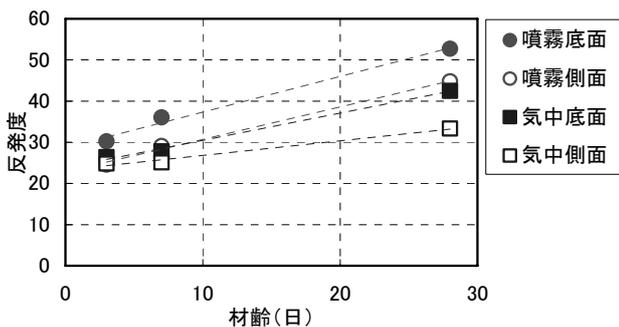


図7 シュミットハンマー試験(反発度)結果

4.2.4 空隙率(ポロシティー)測定試験

材齢7日、28日の供試体の表層及び内部から、粒径2.5~5.0mmに粒度調整をした破碎試料を採取し、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8に、空隙率試験結果を示す。図中、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。

(1) 気中養生

養生なしでは1000Å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。

また、表層と内部の細孔構造の差異が小さい。

これらより、噴霧養生は、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る。

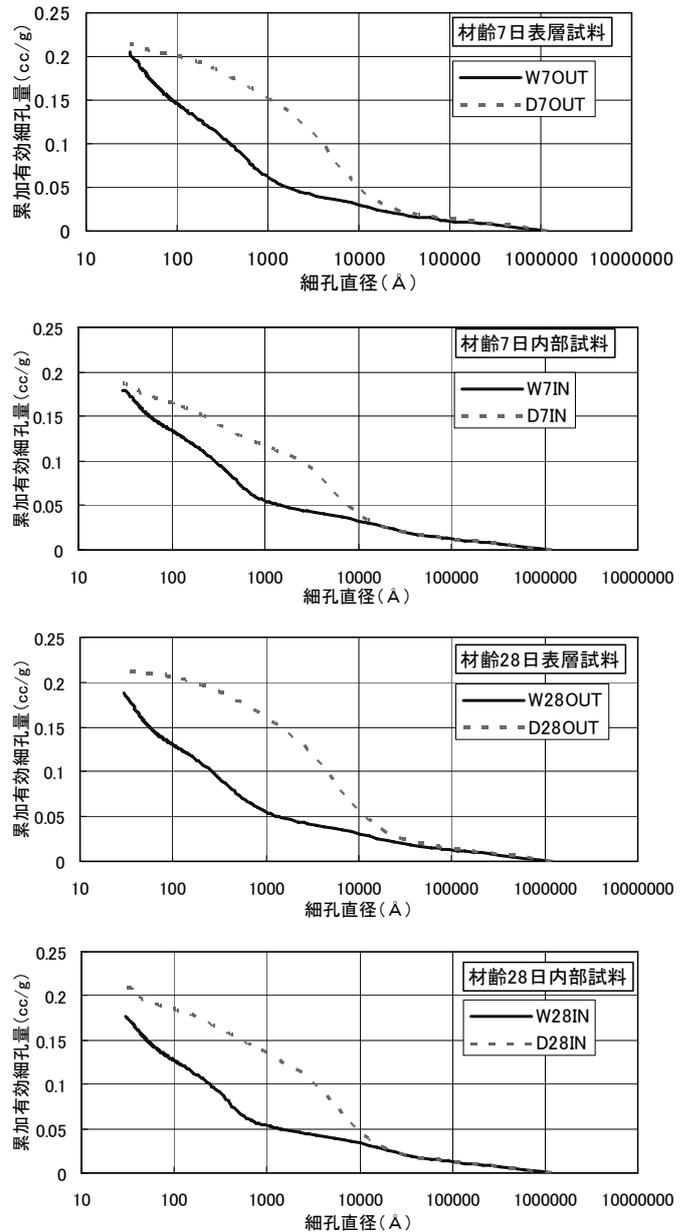


図8 空隙率(ポロシティー)測定結果

5. 数値解析による効果の検証

5.1 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、温度応力を考慮したひびわれ解析を実施した。

コンクリート打設後材齢7日以内の初期段階のひび割れ発生の原因になると考えられる作用応力として、脱枠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

ASTEAMACS (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おこなった。

本解析により、噴霧養生の温度を 5、10、15、20 および 30℃とした場合について、ひび割れ指数を算定した。

5.2 解析モデル

図 9 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 30cm、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、吹付けコンクリートおよびロックボルト等の支保部材は考慮しなかった。

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。また、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。

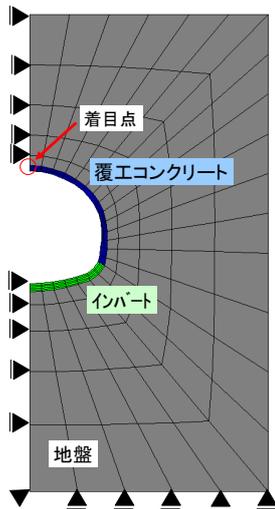


図 9 解析モデル

5.3 解析ステップ

解析ステップは、図 10 に示すように、実際の覆工コンクリートの打設にあわせ以下の施工サイクルを解析ステップに組み込んだ。

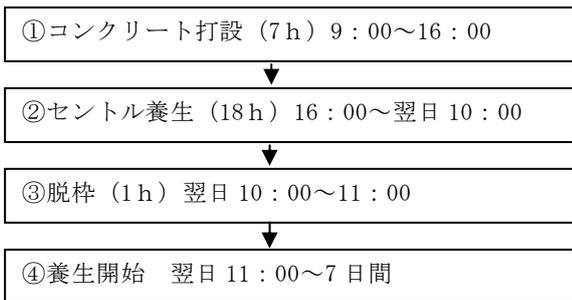


図 10 解析ステップ

5.4 入力条件

表 3 に解析に用いた物性値⁶⁾を示す。

表 3 解析入力物性値

項目	数 値 等	単 位
セメントの種類	高炉セメントB種	-
単位セメント量	278	kg/m ³
断熱温度上昇式	$Q(t)=42.8 \times (1-e^{-0.902t})$	-
坑内温度	15(一定)	°C
コンクリートの打設温度	20	°C
熱伝導率	コンクリート	2.7
	地盤	3.2
比熱	コンクリート	1.15
	地盤	0.79
線膨張率	コンクリート	10×10^{-6}
	地盤	8.0×10^{-6}
熱伝達率	セメント	14
	脱型後(大気)	14
	地盤	2

5.5 解析結果

一例として、打設温度 20℃、坑内温度 15℃としたケースについて、噴霧養生温度を 5、10、15、20 および 30℃とした結果を図 11 に示す。

本条件では、ひび割れ指数は、養生温度 15℃の場合に最大の 1.7 となり、ひび割れの発生がほぼ抑制できる結果となった。しかし、養生温度が 15℃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割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割れ発生抑制に対して有効であることが確認できた。

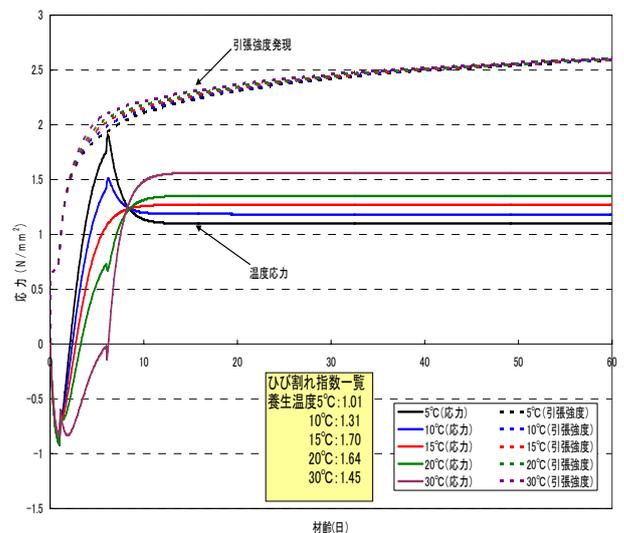


図 11 温度応力解析結果

6. 現地適用結果(速報)

現在、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、噴霧養生を行なっている。まだ施工中であるが、その一部を紹介する。

6.1 コンクリート配合

本現場で使用している覆工コンクリートの配合を、表4に示す。

表4 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

6.2 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。

前述と同様に、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

6.3 強度試験結果

覆工コンクリート打設時にコア供試体（φ100×200）を採取し、それぞれ標準養生、養生システム外に存置し一般的な養生状態にある気中養生、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12にまとめて示す。

(1) 気中養生

従前の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、標準養生に対して、材齢7

日で127%、材齢28日で113%と大きく上回り、材齢91日で95%と逆転する。また、気中養生に対しては、それぞれの材齢で120%、135%、131%と大きく上回る。特に、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。これにより、本工法が覆工コンクリートのひびわれ発生の抑制、および強度増進による耐久性の向上に関して効果があることが確認された。

今後、本現場でより多くのデータを収集すると共に、ひびわれ発生状況を確認する予定である。

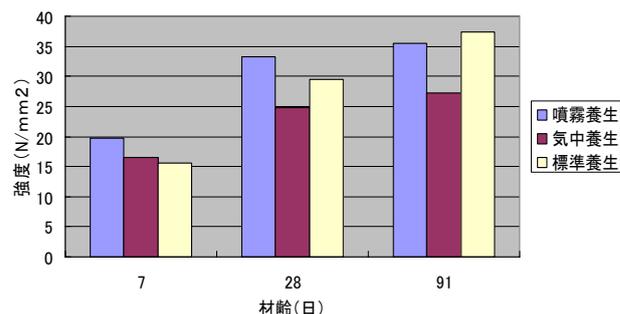


図12 強度試験結果

7. 噴霧養生システム導入の効果のまとめ⁷⁾

室内実験、現場での実証、および数値解析により、本工法について、以下の効果が確認された。

- ①従前の気中養生に比較して、コンクリートの強度が20～35%増加する。
- ②従前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が低減する。
- ④乾燥収縮によるひびわれ発生が低減する。

このように、ひびわれの少なく強度が大きい、長期耐久性に優れた構造体を得られる結果、長寿命化と、維持管理や修繕費を含めたライフサイクルコストの低減を図ることができる。

8. 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割れの発生が抑制できる。

今回の実験により、「温度制御噴霧式覆工コンクリート養生システム」の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。本システムの適用により、これまで養生が不十分であ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を実現できると考えられる。

また、本工法は、山岳トンネルの覆工以外にも、部材厚の大きいアーチカルバートやボックスカルバート等のコンクリート構造物への適用も可能である。今後、本工法を多くの現場に適用し、コンクリート構造物の高品質・高耐久性を図っていくつもりである。

参考文献

- 1) 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. 58-59，2002
- 2) 西村和夫：トンネル技術の発展と現状，地盤工学会誌 Vol. 54, pp. 1-5, 2006. 11
- 3) 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, 2000. 9
- 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，2007. 6
- 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, 1996. 1
- 6) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，pp. 41-47, 2002
- 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