

山岳トンネルの施工における新技術の適用と 評価に関する一考察

A Study on Application and Evaluation of New Technology for Mountain Tunnel

山田浩幸¹・三原康一²・小山起男³・石川恭義⁴

Hiroyuki YAMADA, Kouichi MIHARA, Tatsuo KOYAMA, Yasuyoshi ISHIKAWA

¹ 正会員 (株) 鴻池組 土木技術部 (山岳トンネル担当) (〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

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 鴻池組・大畑建設・原工務所共同企業体 (〒698-0412 島根県益田市長沢町 761-2)

⁴ 鴻池組・大畑建設・原工務所共同企業体 (〒698-0412 島根県益田市長沢町 761-2)

In the construction of mountain tunnel, it's difficult to obtain integrated engineering data by prior geological investigation. Support patterns need to be modified during excavation according to newly identified geological conditions and measurement data. Since collapsing incident of tunnel lining concrete happened in 1999, quality management for tunnel lining has become an important issue and some progresses have been achieved. In this paper, two new technologies, tunnel estimation system and tunnel lining initial curing system, concerning the construction method of mountain tunnel are introduced, their effects after being introduced into construction are described.

Key Words: mountain tunnel, tunnel estimation system, tunnel lining initial curing system, quality management, durability

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、設計時の調査結果を踏まえた上で、施工時に得られる切羽観察や計測結果に基づき地山の変化に応じた最適支保パターンに修正するのが一般的であり、地質の変化を的確かつ早期に把握することが重要となる。また、最終構造物である覆工コンクリートに関しては、1999年に発生した覆工コンクリートはく落事故を契機に、その品質確保に向けた取り組みが進められている。

本論文では、トンネルの新技術として、①地質変化の著しい地山で実施したトンネル地山評価システムの適用と補助工法の選定、②トンネルの覆工コンクリートの品質向上、耐久性確保の目的で実施した温度制御噴霧式トンネル湿潤養生システムの適用に

ついて述べるとともに、トンネル施工における新技術導入の効果に関して考察したものである。



写真-1 トンネル施工状況

2. 適用トンネルの概要

長沢バイパスは、益田市長沢町地内～匹見町澄川地内までの総延長 $L=3,200\text{m}$ の国道488号の付替道路である。長沢町周辺は匹見川に沿っての道路で狭く、急カーブも多く交通の難所となっており、一般車両の通行に影響を及ぼしている。

今回、新技術を導入した一般国道488号長沢1号トンネル工事は、安全で快適な走行を確保するために、長沢町地内にトンネル($L=1,038\text{m}$)をNATMにより新設するものである。図-1にトンネル位置を示し、表-1に工事概要をまとめた。

本トンネルの地質は鹿足層群と呼ばれ、トンネル部分では、泥質ホルンフェルスが主体であり、5つの主要な断層破碎帯が存在していた。

なお、断層付近は、特に著しくせん断された黒色泥質ホルンフェルスからなっており、熱変成を受けたチャートや緑色岩および砂岩などが、大小さまざまなブロックまたはスラブ状を呈して分布する複雑な地質構造であることが想定されていた。

以上のとおり、断層破碎帯想定箇所では、当初より突発湧水や支保の変状等の懸念があり、設計では長尺鋼管フォアパイリングが計画されていた。

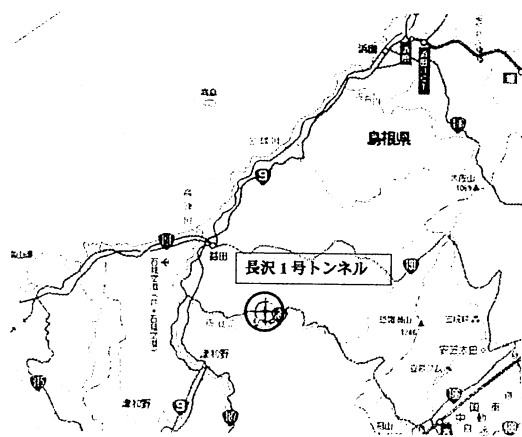


図-1 トンネル位置

表-1 工事概要

工事名称	一般国道488号長沢バイパス改築(改良) (仮称)長沢1号トンネル工事
工事場所	島根県益田市長沢町柿原地内～匹見町澄川地内
工期	2006/3/17～2008/12/26
発注者	島根県(益田県土整備事務所)
施工者	鴻池組・大畑建設・原工務所JV
工事内容	延長 $L=1,048\text{m}$
	断面 ・トンネル延長 $L=1,038\text{m}$ ・掘削断面: $A=54.8\text{m}^2\sim 68.7\text{m}^2$ (2車線)
	施工法 NATM
	掘削方式 発破工法
	掘削工法 ・DⅢパターン(上半先進ベンチカット工法) ・CⅠ, CⅡ, DⅠパターン (補助ベンチ付き全断面工法)
補助工法	・長尺鋼管フォアパイリング ・注入式フォアボーリング

3. トンネル地山評価システムの導入

(1) トンネル地山評価システムの概要¹⁾

トンネル地山評価システム(K-tes: Konoike tunnel estimation system)は切羽前方探査においてトンネルの標準施工機械であるドリルジャンボの穿孔時の機械データを収集・分析することにより、切羽前方の地質を穿孔エネルギーとして定量的に評価する。

一方、施工の進捗とともに得られる支保パターン毎の切羽評価点や計測データを機械データと同様のファイル形式(CSV形式)で保存、更新を行い、リアルタイムに施工情報をデータ化する。システム内に蓄積された施工データと前方探査により得られた穿孔エネルギーを比較し、地山の変化に基づく適切な支保パターンの選定や必要な対策工(補助工法)の検討を行う。本システム導入により、これまでは、個別に実施して整理していた前方探査データ、切羽観察(評価点)、計測データを系統的に一元管理し、いわゆる巻物(展開図)的に整理することで情報化施工の実現を図るものである。

なお、施工の進行とともに蓄積されたデータを用いて、穿孔エネルギーと切羽評価点や計測結果との相関関係を整理・分析することにより、各トンネルの地山の特性にあわせた補助工法の採用のための閾値を設定することが可能となる。

図-2にトンネル地山評価システム概念図を示し、図-3に長沢1号トンネルでの出力を示す。

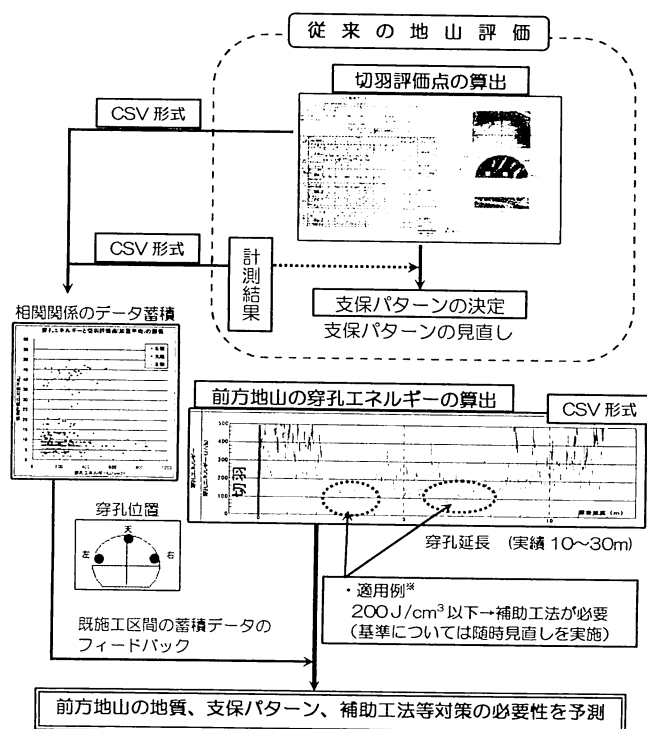


図-2 トンネル地山評価システム概念図¹⁾

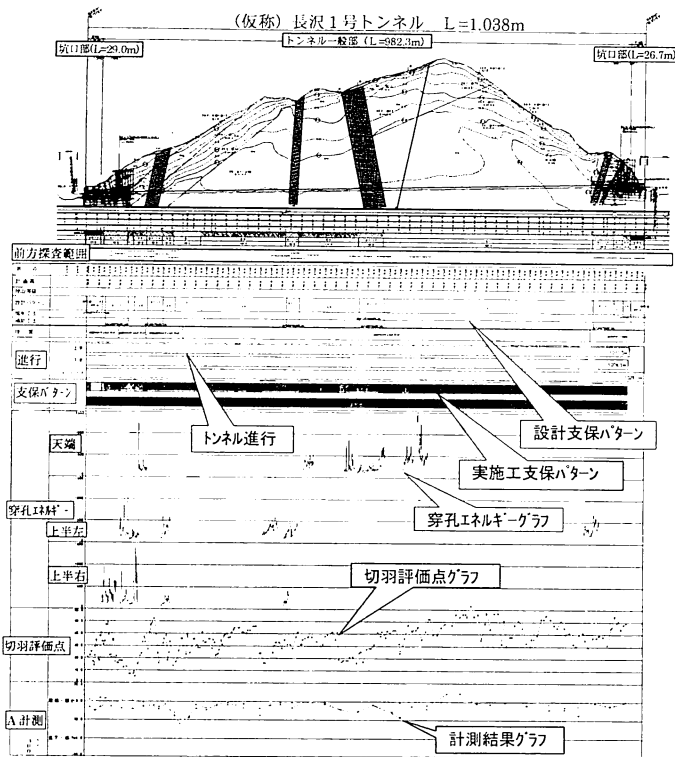


図-3 トンネル地山評価システム出力例

(2) トンネル評価システムによる分析

図-4 に示すように、今回実施した前方探査の結果を切羽評価点（加重平均：旧 JH 法）と式(1)に示す穿孔エネルギー(E_d)の指標で整理した。

$$\text{穿孔エネルギー } E_d \text{ (J/cm}^3\text{)} = \frac{\text{打撃エネルギー } E_p \text{ (J)} \times \text{打撃数 } C_p \text{ (bpm)} \times \text{損失係数 } K}{\text{穿孔速度 } V_d \text{ (cm/min)} \times \text{孔断面積 } S \text{ (cm}^2\text{)}} \quad \text{式(1)}$$

図-4 に示すとおり、分析結果からは、切羽評価点と穿孔エネルギーの関係にはばらつきは見られるものの、線形関係が確認された。

施工時には、切羽観察や計測結果の結果等の施工実績もふまえ、穿孔エネルギー (E_d) が 200 (J/m³) 以下、切羽評価点が 20 点以下という閾値を補助工法が必要であるという目安として設定し、前方探査の結果を切羽評価点、計測結果と同様に補助工法の必要性の判断材料として利用した。

また、図-5 に坑口から 600m までの前方探査結果を示すが、400m 付近で不一致な部分もあるが、全体的には切羽評価点の急激な変化（地山の急変）で穿孔エネルギーが比較的良好な相関を示している。

実施工においては断層破碎帯が想定される区間においては、切羽前方探査の結果を踏まえて対策工の区間の決定を行っている。一方、図中の小崩落箇所（坑口より 466m 地点）においては、肩部において部分的な崩落を生じたが、前方探査に基づく先受け

対策により、大きな崩落に至る前にできた。

(3) トンネル地山評価システム導入の効果

破碎帯や地質の変化の著しい地山において前方の地山状況を適切に評価できることは、作業の安全性確保と同時に必要な対策の検討を掘削に先立ち実施することが可能となり、施工区間や施工範囲の決定にも有効であると考えられる。

また、本トンネルでは地山特性から削孔水が地山の亀裂に逸散して穿孔不能といった事態を生じたため保護鋼管を設置した穿孔を行った。なお、湧水を伴う破碎帯部分では写真-2 に示すように、前方探査の鋼管を利用した先行水抜きを行った。

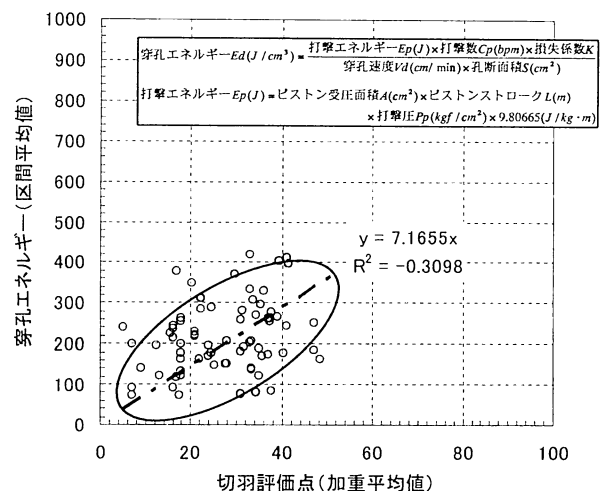


図-4 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

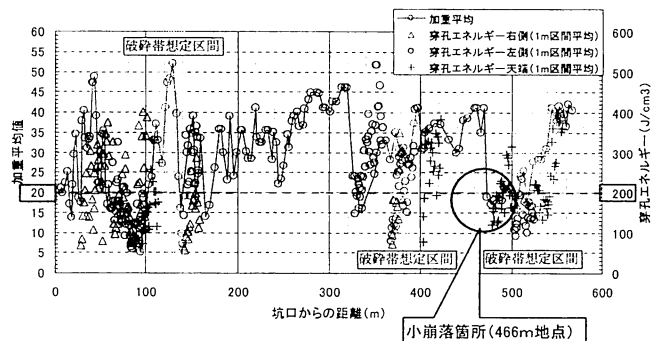


図-5 前方探査結果と補助工法の選定



写真-2 前方探査を利用した湧水対策

4. 覆工コンクリートの新しい養生工法の適用

(1) 覆工養生方法の現状

これまでは、トンネル新設覆工コンクリートについては、トンネル坑内環境の特殊性(坑内温度一定、高湿度状態)により特別な養生は不要とされ、経済性や工期の問題から、コンクリート打設後 24 時間以内での早期型枠脱枠が一般に施工されてきた²⁾。

一方、覆工コンクリートは原則的に無筋構造であるため、乾燥収縮による初期のひび割れは、時間とともに、そのひび割れ幅が増大して、はく離、はく落の原因となる可能性がある。

以上のような背景から、近年、コンクリートの養生手法として技術開発が進められ、①覆工面の密閉養生方法や②乾燥収縮低減剤等の膜養生材の表面への撒布、塗布といった工法が実用化されている。

しかしながら、いずれの工法もコンクリート表面からの水分の蒸散を防ぎ乾燥収縮の低減を主目的としたものであり、水和作用を積極的に促進するものではないのが実状であった。

(2) 新しい覆工コンクリート養生工法の概要³⁾

本工法は、覆工セントル後方に 3 スパン相当の移動式養生台車を連結し、コンクリートを一定期間(標準で 7 日間)、湿潤状態に養生できるように工夫した工法である。写真-3 に示すとおり、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、覆工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。この養生空間に粒形 45～60 μ m 程度の微粒の霧を専用ノズル(写真-3 右上)より噴霧することにより湿度 90～100% の湿潤状態をつくる。また、温度感知センサーと写真-4 に示す噴霧水の温度制御システムにより養生温度を制御し最適な養生状態を保持することが可能であり、覆工コンクリートへの急激な温度変化等の影響を与えることなく連続的な水和反応の持続を維持できる。



写真-3 養生台車と噴霧ノズル

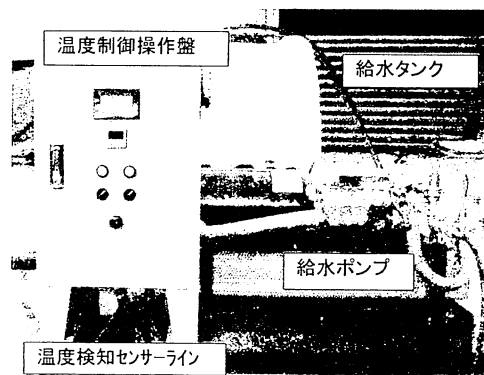


写真-4 温度制御装置と給水設備

(3) 噴霧養生の効果検証試験⁴⁾

a) 効果検証試験の方法

本工法の効果を確認するために写真-5 に示す供試体での要素試験(20℃恒温実験室)と、実施工現場において、噴霧養生 7 日間あり区間と養生なし区間を設け比較検証を実施した。現場試験は、噴霧養生空間の温度湿度測定、覆工内部温度測定、および、養生の有無による強度発現への影響を強度試験と引っかき試験(表面強度)により比較検証した。

①養生なし(供試体を覆工脱枠時期に合わせ脱型、坑内気中へ存置養生)

②噴霧養生あり(同上脱型後、現場台車の噴霧空間内での 7 日間養生、以後坑内存置養生)



写真-5 供試体要素実験
(恒温室内での実験)

b) 強度試験結果

図-6、7 に圧縮強度試験結果を示す。現場における養生なし(気中養生)の供試体の圧縮強度は、材齢 7 日では坑内温度の影響(22～24℃)で標準に比べ強度発現しているが、長期材齢 91 日では平均

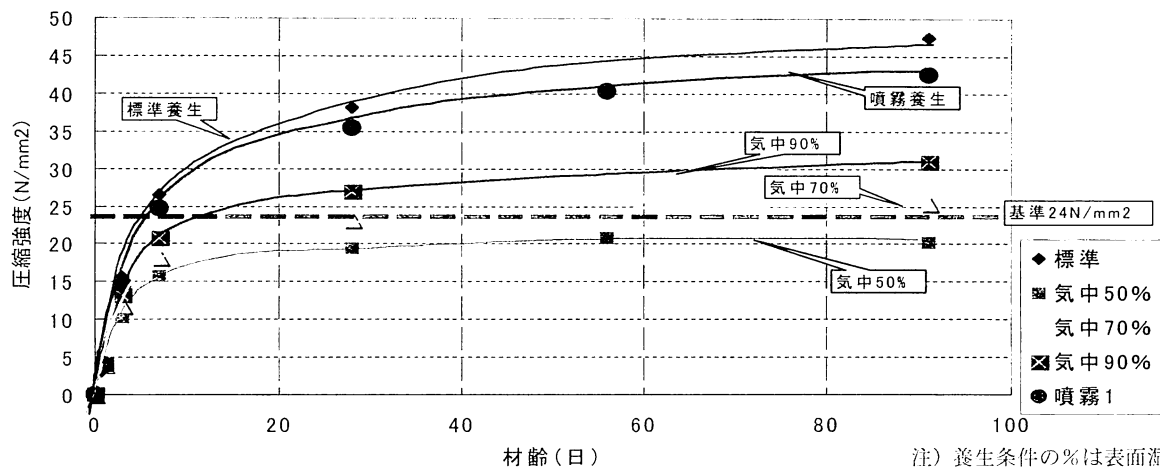
25.5N/mm²（標準養生強度の 70%）であった。噴霧養生を実施した供試体は、強度発現が早く、かつ噴霧養生を終えた以降も順調に強度が増加し材齢 91 日では平均 35.7 N/mm² と標準養生（20℃恒温水槽内）の供試体と同程度であった。以上のことより、材齢 7 日まで噴霧養生を実施することが、コンクリートの強度発現に極めて有効的に作用し、長期強度が標準養生と同程度に増進することが確認できた。また、図-8 にシュミットハンマー（低反発用、高強度用）による表面強度比較結果を示す。特に低反発（初期強度）では、噴霧養生による反発度の増加効果が確認できた。

c) 養生方法の比較

図-9 に養生方法の違いによる表面湿度の差異について示した。噴霧養生は 90～100%RH（相対湿度）であった。

以上、養生条件と強度試験結果（図-6）より、脱枠後にコンクリート表面の湿度を高く保持する他の養生方法は、気中養生（90%RH）に相当し、無養生と比較すると、強度発現が増加するが、標準養生（100%RH）と比較すると、十分に強度が発現しているとはいえない。

一方、噴霧による養生では、標準養生と同等の強度が発現し、十分な養生効果を有していると言える。



注) 養生条件の%は表面湿度の相違

図-6 圧縮強度試験結果（実験室）

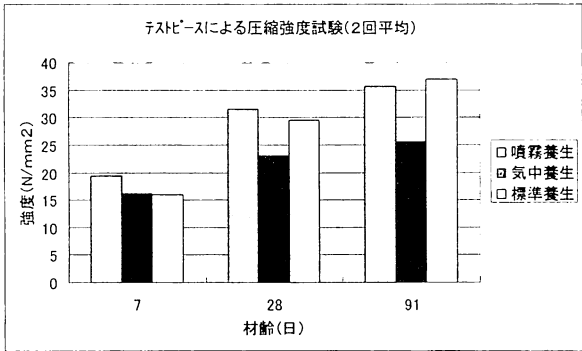


図-7 圧縮強度比較試験結果（現場）

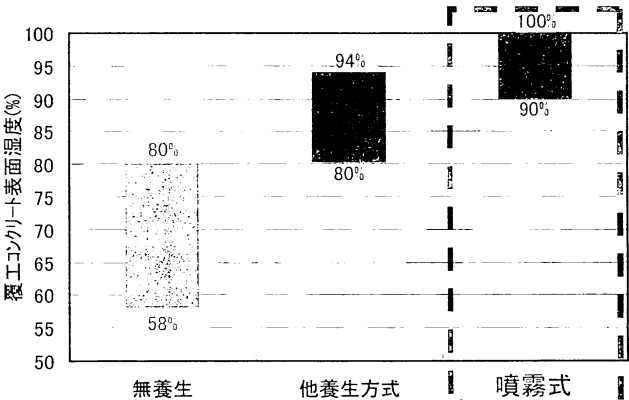


図-9 養生方法と表面湿度

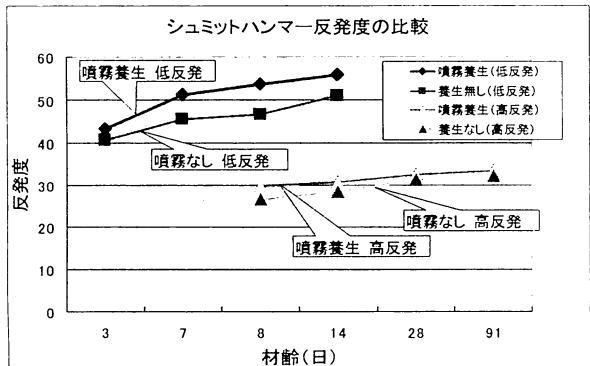


図-8 表面強度比較結果

d) 引っかかり試験結果（日本建築仕上学会式）

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⁵⁾を実施した。

写真-6 に引っかかり試験器を示し、図-10 に引っかかり試験（表面強度）の結果を示す。引っかかり幅は、クラックスケールを用いて測定した。なお、引っかかり圧の大きい 0.10MPa での引っかかり幅の値に着目すると、気中養生の引っかかり幅は当初 0.4mm であり、材齢が経過してもさほど引っかかり幅の変化が見られない。一方、噴霧養生の場合は、当初が 0.25mm で

気中養生より小さく、材齢の経過に伴い引っかかり幅が小さくなり（0.1mm：材齢 14 日）表面強度が増加（緻密化）することが確認できた。

このことより、表面硬度は、若材齢時の養生条件が大きく影響を与えることが確認できた。

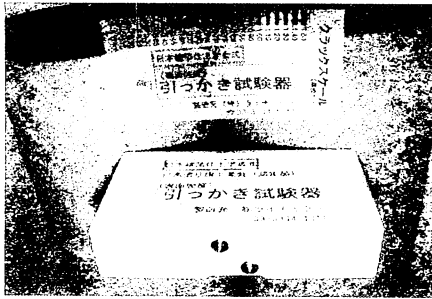


写真-6 引っかかり試験器

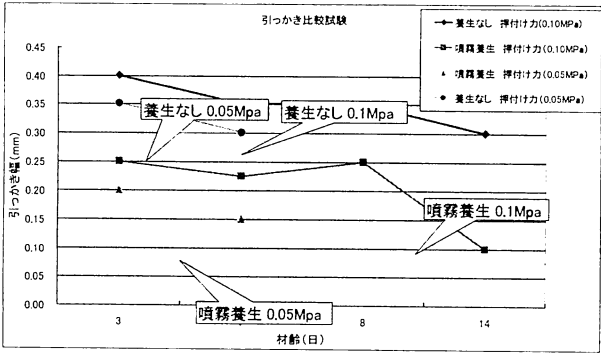


図-10 引っかかり試験比較結果

e) 空隙率（ポロシティ）測定試験

覆工コンクリートの緻密度の指標である有効細孔量測定試験を実施した。図-11 にその結果を示す。

噴霧養生状態を 20℃恒温実験室内に再現し、材齢 7、28 日の供試体より破碎試料（2.5mm～5.0mm 粒度調整；表層、内部）を採取しアセトンで水和反応を停止後、水銀圧入式ポロシメータによる有効細孔量測定を実施した。試験結果から以下の知見が得られた。

- ・噴霧養生では表層、内部の細孔構造の差異が小さくなっている。
- ・噴霧養生では気中に比べ細孔構造の緻密化が進む。着目径 1000Å では、以下のとおりとなった。

$$\textcircled{1}=0.05/0.18=28\% < \textcircled{2}=0.16/0.22=73\%$$

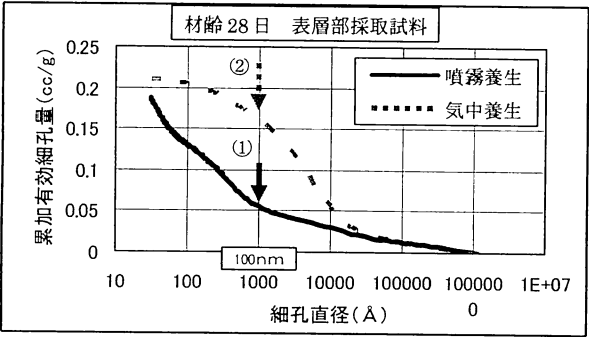


図-11 有効細孔量測定

f) 数値解析による効果の検証

i) 温度応力解析による解析手法

本検討では、コンクリートの温度応力を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温度応力解析を実施した。なお、解析では、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) を用いた。覆工コンクリートに発生するひび割れ発生要因のうち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。

これらの条件のもと、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、ひび割れ指数の算定を行い、その変化について比較検討した。

ii) 解析モデル

図-12 に本検討で用いた解析モデルを示す。

トンネル形状は一般的な 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、補強鉄筋は考慮していない。また、モデルは平面ひずみ要素とし、鋼製支保工は無視した。

覆工脚部のインバートコンクリートは、強度発現および発熱は終了しているものと仮定した。

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。

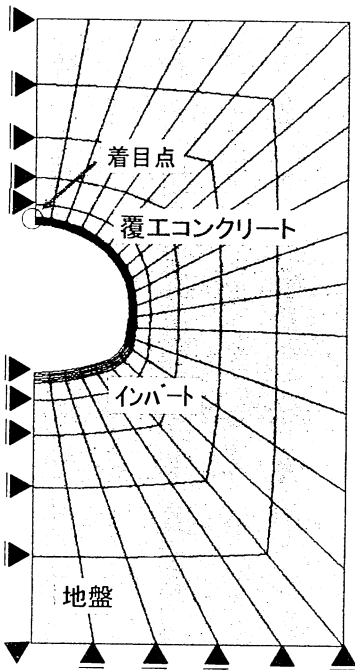


図-12 解析モデル

iii) 解析ステップ

解析ステップは、図-13 に示すとおり、実際の覆工コンクリートの打設にあわせた施工サイクルを解析ステップに組み込んだ。

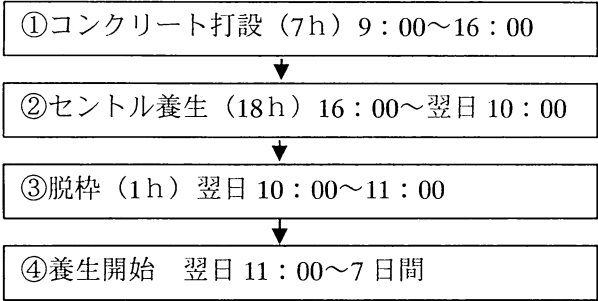


図-13 解析ステップ

iv) 入力条件

表-2 に解析に用いた入力物性値⁶⁾を示す。

なお、断熱温度上昇式はセメント種別と単位セメント量からコンクリート標準示方書の換算式を用い、

表-2 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	W/m°C
地盤	3.2	
比熱	コンクリート 1.15	kJ/kg°C
地盤	0.79	
線膨張率	コンクリート 10×10^{-6}	/°C
地盤	8.0×10^{-6}	
熱伝達率	セントル 14	W/m ² C
脱型後(大気)	14	
地盤	2	

線膨張率やセントルの熱伝導率は理科年表から引用した。打設温度 20°C、坑内温度 15°Cを同一条件とし、噴霧養生の温度を 5, 10, 15, 20 および 30°Cとした場合について検討した結果を図-14 に示す。

今回の条件では、ひび割れ指数（引張強度／引張応力）が最も大きくなるのは、15°Cの場合で、その値は 1.7 であり、ひび割れの発生はほぼ抑制できる結果となった。しかし、養生温度が極端に高い場合や低い場合は、ひび割れ指数は 15°Cの場合より小さくなり、適切な養生温度にすることがひび割れ発生の抑制に対して有効であることが確認できた。

今後は、適用事例を増やし、実際の現場環境条件にあわせて検討を行うとともに、実施工に適用した際のデータの蓄積および検討結果の妥当性評価を行っていく予定である。

(4) 本工法の適用によって得られた効果⁷⁾

- ①初期 7 日間の噴霧養生で、覆工コンクリートの水和反応の積極的促進により初期および長期強度の増進が得られる。
 - ②十分な水和反応の持続による覆工コンクリート表面の細部構造の緻密化が得られる。
 - ③噴霧養生により覆工内外の温度差による内部拘束の低減、温度ひびわれ発生の抑制効果が得られる。
 - ④脱枠後材齢初期の急激な乾燥を生じさせず、乾燥収縮ひび割れ発生の低減効果が得られる。
- 上記効果の総合的な成果として、覆工コンクリートの品質および長期耐久性の向上が得られると考えられる。

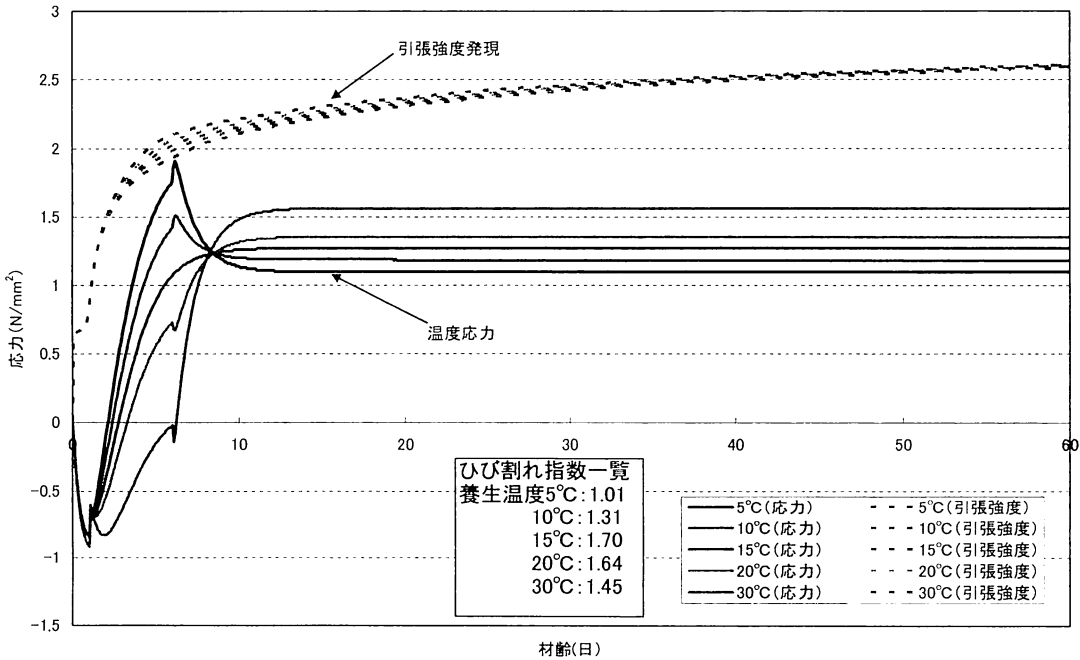


図-14 温度応力解析結果

5. まとめ

今回、実現場において、2つの新技術の適用により、山岳トンネルの施工における効果が確認できたと考えている。

1つ目の新技術であるトンネル地山評価システムの導入に関しては、これまでの施工上の課題のうち、事前地質調査によって得られる情報の限界という課題の解決策として期待できることが確認できた。

実際の現場においては、補助工法の必要性や区間を決定する判断資料に有効に利用し、結果的に工程管理の面でも有用であった。

特に、破碎帯や地質の変化の著しい地山において前方の地山状況を適切に評価できることは、作業の安全性確保と同時に必要な対策の検討を掘削に先立ち実施することが可能となり、施工区間や施工範囲の決定にも有効であると考えられる。

また、本トンネルでは地山特性から削孔水が地山の亀裂に逸散して穿孔不能といった事態を生じたため、その対策として保護鋼管を設置した穿孔を行った。前述の写真-2に示すように、湧水を伴う破碎帯においては、前方探査に用いた鋼管を利用した先行水抜きとしても有効に機能した。

2つ目の温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生システムの導入に関しては、事前の実験室レベルでの要素試験により、初期及び長期の圧縮強度の増大を確認するとともに、表面の緻密性といった観点から比較試験を行い、引っかかり試験結果や空隙率（ポロシティ）測定試験結果から、温度制御噴霧式覆工コンクリート湿潤養生による効果を確認できた。

また、同一トンネル内において噴霧養生状態の違いによる検証試験を実施した。これまでの標準的な覆工の施工においては、特別な養生は実施されてこなかった。しかしながら、今回の効果の検証結果から判断すると、当工法の適用により、より一層の高品質、高耐久性の覆工コンクリートの施工を実現できるとともに、現在、大きな社会問題となっている覆工コンクリートのはく離・はく落対策としても有効であると考えられる。

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、今後急速に増えていくことが想定されるトンネル構造物の合理的

かつ効果的な維持管理に向けて、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、長寿延命化が期待できるものと考えられる。

これからも、新技術の施工実績を積み重ね、評価・分析を進めていきたいと考えている。今回の報告が、今後、新設されるトンネル工事の参考になれば幸いである。

最後に、新技術の採用および施工時の検討にあたり、ともに検討に携わった島根県益田県土整備事務所の関係者各位に深く感謝の意を表します。



写真-7 坑内状況

参考文献

- 1) 山田浩幸，原田雅也，田中英男，三木秀二：トンネル地山評価システムを用いた補助工法選定に関する一考察，トンネル工学論文集，第16巻，pp93-100,2006.
- 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，pp58-59,2002.
- 3) 後藤裕一，山田浩幸，三原康一，小山起男，石川恭義：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，第63回土木学会年次学術講演会，2008.9.
- 4) 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.
- 5) 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「引っかかり試験器」に関する考察，日本建築仕上学会，論文集，Vol.12.No72, pp.52-53,2005.
- 6) 2002年制定 コンクリート標準仕方書[施工編]，土木学会，pp41-47,2002.
- 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.