

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

指導教員 牧 剛史 准教授

2018年3月

白岩 誠史

要 旨

1999年6月に山陽新幹線福岡トンネル坑内において、剥落したコンクリート塊が新幹線を破損させるという事故が発生し、同年の10月には山陽新幹線九州トンネル、12月には室蘭本線礼文浜トンネルでも同様の事故が相次いだ。そのため、これまで化粧コンクリートと考えられていた覆工コンクリートの品質や安全性が社会問題となり、品質を確保するための努力が取り組まれてきた。特に養生においては、これまで打設翌日に脱型し、その後の養生を実施することがなされた覆工コンクリートに対して、2006年制定土木学会標準示方書〔山岳工法編〕・同解説では、坑口付近は、外気の影響を受けやすいため、ここでの覆工は明かり構造物と同じように養生を行う配慮が必要であるとしている。さらに、高速道路株式会社3社は、2015年7月にトンネル施工管理要領を改訂し、覆工コンクリートにおいても7日間の湿潤養生を実施するように改訂した。この改訂に関しては、本研究の1つの柱であるこれまで不可能であった覆工コンクリートへの給水養生を可能にしたアクアカーテンが、2011年に現場適用を開始したことが関係していることは言うまでもない。

また、2014年に国土交通省から通達された“道路トンネル点検定期要領”により定期的な調査が義務化された。土木学会全国大会へ投稿された覆工コンクリートの品質に関する論文は、2006年は1編のみであったが、2013年には6編、2016年においても5編となっており、現在もなお注目されるテーマとなっている。

覆工コンクリートの品質への注目が集まる中、特に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) 冬期の凍結融解作用による雨掛り部分の剥離、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、冷却停止後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、材齢2日から3日にかけて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、温度降下量が少なく収縮量が小さくなるが、部材上部の未冷却部は、温度降下量が多く収縮量が大きくなるため、部材上部の未冷却部が冷却部を締め付ける“未冷却部の締め付け効果”により引張応力が低減する。材齢1週から2週にかけての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し、試験施工を実施した。3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日間冷却することで、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ク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方が、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。

目 次

第1章 序論

| | |
|------------------------------|----|
| 1.1 開発の背景と目的 | 1 |
| 1.2 本論文の構成 | 2 |
| 1.3 覆工コンクリートの耐久性にかかわる劣化要因の種類 | 4 |
| 1.4 まとめ | 35 |

第2章 部分パイプクーリングによるインバート拘束に起因するひび割れ対策

| | |
|-------------------------|----|
| 2.1 はじめに | 39 |
| 2.2 既往の対策と課題 | 40 |
| 2.3 3次元 FEM 温度応力解析による検討 | 42 |
| 2.4 現場適用時のシステム検討 | 57 |
| 2.5 現場適用効果の確認 | 60 |
| 2.6 まとめ | 71 |

第3章 アクアカーテンによる表層の緻密化による耐久性向上対策

| | |
|------------------|-----|
| 3.1 はじめに | 73 |
| 3.2 アクアカーテンの仕組み | 75 |
| 3.3 室内試験による効果確認 | 76 |
| 3.4 現場適用時のシステム検討 | 95 |
| 3.5 現場適用効果の確認 | 101 |
| 3.6 まとめ | 108 |

第4章 モデル現場での適用状況

| | |
|----------------------------|-----|
| 4.1 はじめに | 111 |
| 4.2 3次元 FEM 温度応力解析による事前検討 | 112 |
| 4.3 現場適用時のシステム | 118 |
| 4.4 現場適用効果の確認 (部分パイプクーリング) | 120 |
| 4.5 現場適用効果の確認 (アクアカーテン) | 129 |
| 4.6 まとめ | 135 |

第5章 結論

| | |
|-----------------|-----|
| 5.1 本研究の成果 | 138 |
| 5.2 まとめおよび今後の課題 | 143 |

謝辞

| | | |
|--------|-----------------|-----|
| 参考資料 1 | トンネル用語 | 146 |
| 参考資料 2 | 透気係数の評価についての一考察 | 157 |
| 参考資料 3 | 膨張材の膨張特性とメカニズム | 160 |

第1章 序論

1.1 開発の背景と目的

1999年6月に山陽新幹線福岡トンネル坑内において、剥落したコンクリート塊が新幹線を破損させるという事故が発生し、同年の10月には山陽新幹線九州トンネル、12月には室蘭本線礼文浜トンネルでも同様の事故が相次いだ。そのため、これまで化粧コンクリートと考えられていた覆工コンクリートの品質や安全性が社会問題となり、品質を確保するための努力が取り組まれてきた。特に養生においては、これまで打設翌日に脱型し、その後の養生を実施することがなされた覆工コンクリートに対して、2006年制定土木学会標準示方書[山岳工法編]・同解説では、坑口付近は、外気の影響を受けやすいため、明かり構造物と同じように養生を行う配慮が必要であるとしている。さらに、2016年制定の同解説では、これらの養生を確実にを行うため、型枠や脱枠後のコンクリート面をシート等で覆って封かん養生を行ったり、場合によってはその中にホース等を配置して散水したりして積極的に養生を行う例も見られるとしている。また、高速道路株式会社3社は、2015年7月にトンネル施工管理要領を改訂し、覆工コンクリートにおいても7日間の湿潤養生を実施するように改訂した。この改訂に関しては、本研究の1つの柱であるこれまで不可能であった覆工コンクリートへの給水養生を可能にしたアクアカーテンが、2011年に現場適用を開始したことが関係していることは言うまでもない。また、2014年に国土交通省から通達された“道路トンネル点検定期要領”により、定期的な調査が義務化された。

土木学会全国大会へ投稿された覆工コンクリートの品質に関する論文は、2006年は1編のみであったが、2013年には6編、2016年においても5編となっており、現在もなお注目されるテーマとなっている。

覆工コンクリートの品質への注目が集まる中、特にトンネル坑口付近の覆工コンクリートは、鉄道¹⁾および道路トンネルの調査結果²⁾から、ひび割れや剥離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。そのため、トンネル構造物の耐久性を評価する場合、特に坑口付近の覆工コンクリートの劣化状況に着目し管理する必要がある。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) 外気の湿度低下の影響による乾燥収縮ひび割れ
- (iii) 冬期の凍結融解作用による雨掛り部分の剥離、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“部分パイプクーリング”、上記(ii)～(iv)に起因する乾燥収縮や凍害による品質低下対策として“シート吸引方式給水養生システム(アクアカーテン)”を開発した。

本論文は、それぞれの技術に対して、そのメカニズムや品質向上効果の定量的な評価について明らかにするとともに、モデル現場への適用によりその技術の有用性を考察することを目的とした。

1.2 本論文の構成

以下のように、5章での構成となっている。第1章は、序論ということで、研究の背景や目的、本論文の構成について記述し、覆工コンクリートの耐久性にかかわる劣化要因の種類およびその既往の対策についてまとめた。

第2章は、“部分パイプクーリング(Localized Pipe Cooling: LPクーリング)によるインバート拘束に起因するひび割れ抑制対策について記載した。3次元FEM温度応力解析による検討結果や、実構造物への適用時における計測結果を分析することで得られた部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズム等の知見についてまとめた。

第3章は、アクアカーテンによる耐久性向上対策について記載した。室内試験による耐久性向上効果の確認、実構造物適用時の計測結果を分析することで得られた知見についてまとめた。

第4章は、モデル現場の覆工コンクリートにおいて、部分パイプクーリングおよびアクアカーテンの両技術を適用し、その効果確認および適用状況についてまとめた。

第5章は、結論である。

また、巻末に、トンネル用語の解説および各技術や試験方法の補足説明資料を参考資料として添付した。

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

1.2 本論文の構成

1.3 覆工コンクリートの耐久性にかかわる劣化要因の種類

1.4 まとめ

第2章 部分パイプクーリングによるインバート拘束に起因するひび割れ対策

2.1 はじめに

2.2 既往の対策と課題

2.3 3次元FEM温度応力解析による検討

- 2.4 現場適用時のシステム検討
- 2.5 現場適用効果の確認
- 2.6 まとめ

第3章 アクアカーテンを用いた表層の緻密化による耐久性向上対策

- 3.1 はじめに
- 3.2 アクアカーテンの仕組み
- 3.3 室内試験による効果確認
- 3.4 現場適用時のシステム検討
- 3.5 現場適用効果の確認
- 3.6 まとめ

第4章 モデル現場での適用効果の確認

- 4.1 はじめに
- 4.2 3次元FEM温度応力解析による事前検討
- 4.3 現場適用時のシステム
- 4.4 現場適用効果の確認（部分パイプクーリング）
- 4.5 現場適用効果の確認（アクアカーテン）
- 4.6 まとめ

第5章 結論

- 5.1 本論文の成果
- 5.2 まとめと今後の課題

謝辞

参考資料

- 参考資料1 トンネル用語の説明
- 参考資料2 透気係数の評価についての一考察
- 参考資料3 膨張コンクリートの膨張メカニズム

1.3 覆工コンクリートの耐久性にかかわる劣化要因の種類

(1) はじめに

トンネル坑口付近は構造的に不安定となりやすく、その対策として覆工コンクリートを鉄筋コンクリートとすることが多い。また、ほとんどの場合、覆工コンクリートをインバートで閉合させることから、覆工コンクリート側壁を打ち込むと、インバートに拘束された温度ひび割れが生じやすい。また、坑口付近は気温の影響を受けやすいため、季節変動による温度収縮量や乾燥収縮量がトンネル内部よりも大きく、体積変化によるひび割れの発生を助長する。

また、理想的な養生環境下で養生されたコンクリートは、“本来の性能”を有しており、強度特性や耐久性の面で優れた材料といえる。しかし、実際は、構造物がさまざまな悪条件下で施工され、“本来の性能”とは大きく乖離し、性能を確実に発揮できないコンクリートも少なくない。特に、トンネル覆工コンクリートは、型枠存置期間の短さ（打設翌日の脱型）、施工機械の変化に伴う坑内換気の促進による湿潤状態の消失など、十分な湿潤養生を期待できないケースが多く、坑口付近はその影響が顕著である。

このように、坑口部の覆工コンクリートの品質および供用時の環境下から判断すると、耐久性に関わる劣化要因の種類が多く、しかも劣化作用が大きいと言える。

なお、本論文では、トンネル構造についての専門用語が多数使われるため、専門用語を巻末の参考資料1にまとめた。主な専門用語のみ、下記にまとめておく。

覆工コンクリート：トンネルとしての必要な形状および機能を与え、長期安定性を保持する手段、処置およびその成果としてのコンクリート構造物をいう。通常、インバートコンクリート打設後1ヶ月以上後に施工される。鉄筋が配置される区間と、無筋コンクリートの区間がある。

インバートコンクリート：底盤に設置される逆アーチ形状のコンクリート構造物をいう。おもに覆工コンクリートと一体となって地山の変形を拘束し、トンネルの長期安定性を保持する機能を有する。

坑口部：トンネルの出入り口付近で、土被りが覆工コンクリートの内空幅の1~2倍の範囲をいう。グラウンドアーチが形成されにくく、また、外気の影響を大きく受ける。

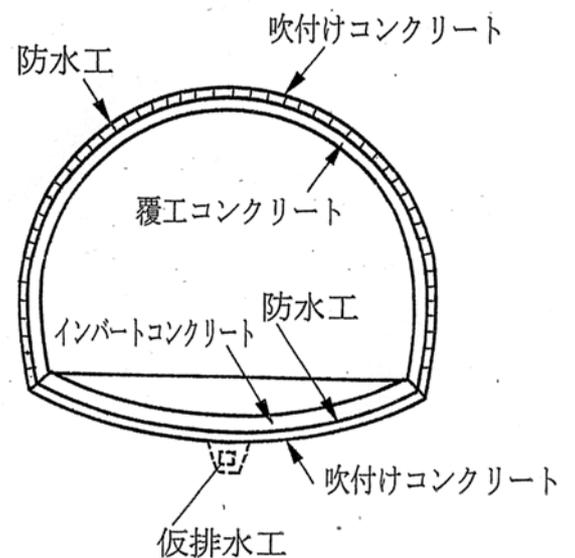


図-1.1 トンネル部位

(2) 一般的な覆工コンクリートの劣化要因の種類

覆工コンクリートにおける劣化の原因は、外的要因と内的要因に大別できる。外的要因および内的要因は、図-1.2 に示すとおり区分できる。

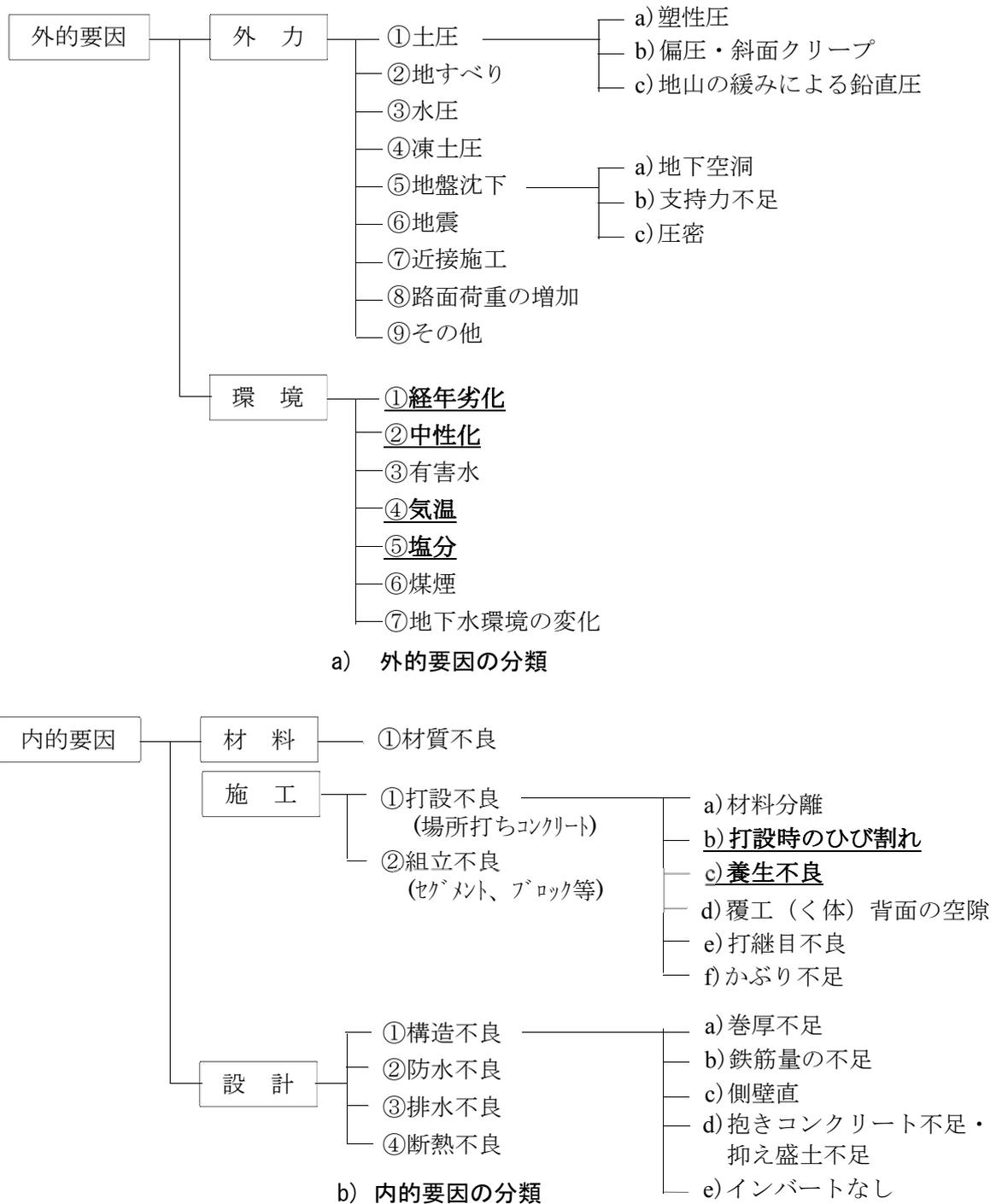


図-1.2 外的小および内的要因の覆工コンクリート劣化の分類³⁾

本論文では、トンネル坑口付近の鉄筋で補強された覆工コンクリートを対象としている。このため、外的要因のうち、環境に分類される、①経年劣化、②中性化、④気温、⑤塩分が特に劣化原因となりうる。さらに内的要因では、施工に分類される①打設不良のうち、b) 打設時のひび割れ、c)養生不良が、かぶりコンクリートの低品質化につながる。

1) 経年劣化

長期間の供用により、空気中に含まれる種々の塩類の溶解作用、温度変化による組成物の膨張・収縮に起因する劣化現象、地下水によるコンクリート中のセメント成分の溶脱等によって覆工が劣化することがある。

経年による材料劣化は、種々の劣化要因が複合して作用した結果ともいえる。経年による劣化現象は、風化および溶脱に大別できるが、覆工コンクリートでは、地下水によるセメント成分の溶脱によって覆工の表面に白色の結晶を生じることがある。

2) 中性化

コンクリート覆工において、大気中の炭酸ガスがコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して、炭酸カルシウムを生成し、次第にアルカリ性を失う。覆工コンクリートは一般的に無筋コンクリートであるため、中性化が問題となることは少ない。しかし、中性化深さが鋼材近傍に達すると鋼材が腐食するので、鉄筋コンクリート覆工の場合は、中性化を無視することはできない。

3) 気温

寒冷地のトンネルでは、変状を生じさせる原因として低気温があげられる。低気温により生じる変状は、a)凍害、b)つらら、c)背面地山の凍結に大別できる。

凍害は寒冷地のトンネルでは覆工の劣化要因の中でも問題となることが多い。水は温度の低下により凍結し、膨張（9%の体積増）する。

コンクリート覆工では、セメント硬化体の膨張により亀甲状に発生するひび割れが特徴的である。発生初期は微小なひび割れであっても、ひび割れの発生に伴い内部への水の侵入が容易になり、凍結融解を繰り返し受けることにより、ひび割れが拡大し、最終的には表面のはく離・はく落に至る。

図-1.3には凍害危険度の分布を示すが、日照や降雨の影響を受けやすいトンネル坑口では、夜間の凍結、昼間の融解が繰り返されるため、トンネル内部よりも変状が進行しやすい。

一方、つららの発生する領域を模式的に示した図-1.4では、トンネル内の気温分布モデルを示しており、冬期のトンネル坑内の気温は、坑口付近では外気温に近く、トンネル内部に入るほど上昇する。つららの発生は坑口付近で著しく、内部に向かって少なくなるのが通例である。

つららの発生領域を見ても、凍結融解作用が坑口付近で大きくなるのが分かる。

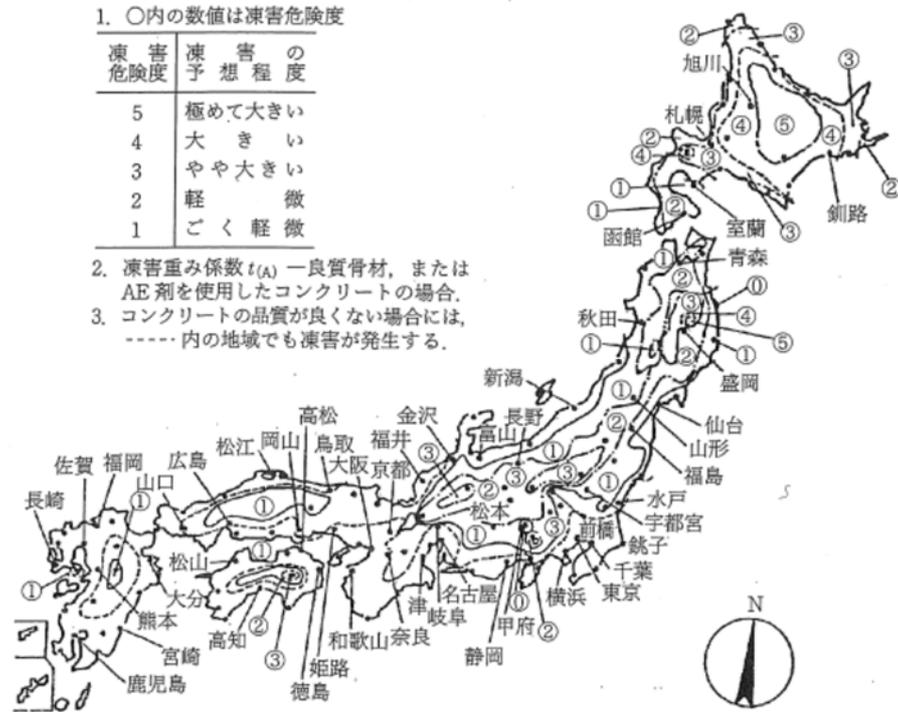


図-1.3 凍害危険度の分布図⁴⁾

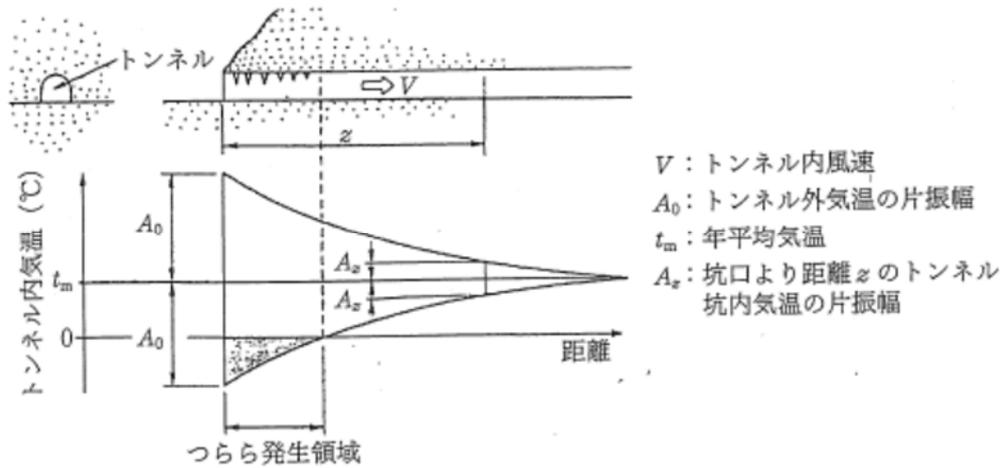


図-1.4 トンネル内の気温分布モデル⁵⁾

4) 塩分

コンクリート中に塩素イオンが侵入し、鋼材位置に達すると、鋼材表面にある不動態被膜を破壊し、鋼材表面に錆層を形成する。生成された錆の体積は、生成前の体積の2.5倍、場合によっては6~7倍となる。そのため、コンクリート中で鉄筋の腐食が生じると、かぶりコンクリートに鉄筋に沿ってひび割れが発生し、コンクリートのはく離(浮き)、錆汁等の変状が現れ、はく落の原因となる。

塩分は、用いたコンクリートに最初から含まれているもの、海岸付近のトンネルで海から飛来して蓄積するもの、路上の雪を除雪する融雪剤に起因するものがある。

コンクリートに最初から含まれるものの代表として海砂の使用があげられる。洗浄が不十分で残留塩分が有害量以上含まれるコンクリート、低温期のコンクリート硬化速度を促進するために塩化カルシウム系混和剤が不適切に使用された場合には、鉄筋を腐食させる危険性がある。

海岸付近で海から飛来することにより供給される塩分については、図-1.5に示すように、一般平野部における海岸からの距離と大気中の塩分量との関係が取りまとめられており、これによると、大気中の塩分量は200m付近までは多く、数百mの付近で急減するとされている。また、海から飛来する塩分の量は、図-1.6に示すように、太平洋側に比べ日本海側特に北陸地方において多いといわれている。

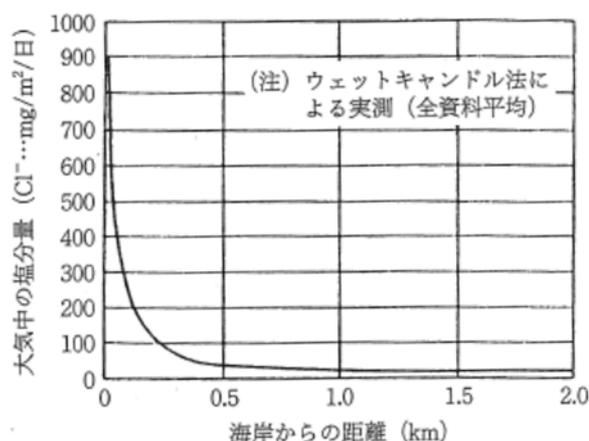


図-1.5 海岸からの距離と飛来塩分量との関係⁶⁾

融雪剤の主成分は塩化カルシウムであり、雪や氷を融雪するメリットの反面、特に鉄筋コンクリート製の構造物などで融雪剤がコンクリートの割れ目などから浸透し、鉄筋を錆により腐食・劣化させることから、構造物の強度低下が発生し、安全性が保てなくなってしまうことがきわめて重大な問題となっている。融雪剤の跳ね返りは、路盤から2.5mの範囲が多く、4m以上も跳ね上がることが報告されている。

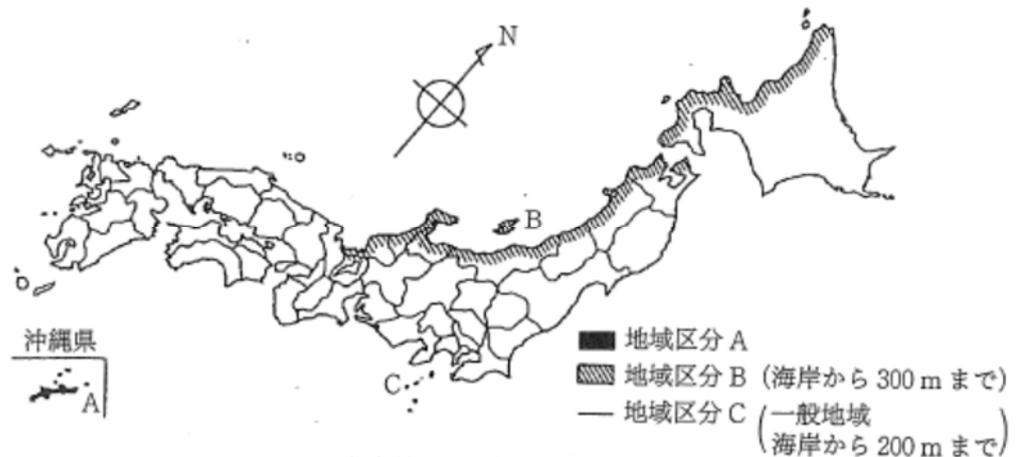


図-1.6 塩害範囲地域区分⁷⁾

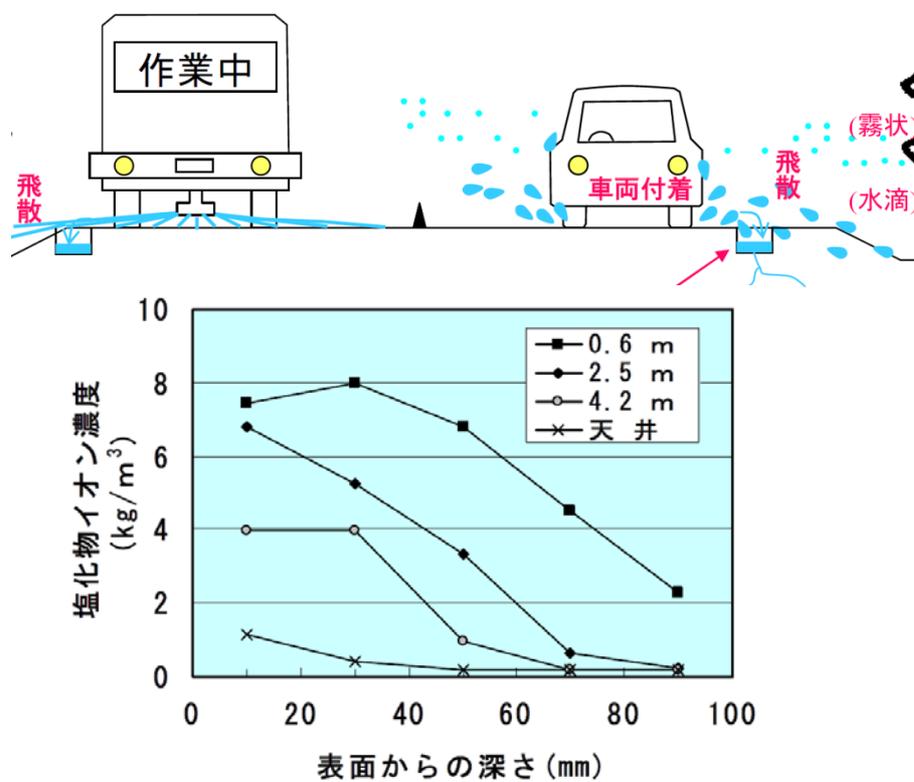


図-1.7 融雪剤の跳ね返り⁸⁾

5) 施工時のひび割れ

一般に、覆工コンクリートは、地山側と内空側で拘束量や温度変化量が異なるため、施工時にひび割れが発生しやすい条件にあるといえる。主なひび割れとしては、①温度ひび割れと②乾燥収縮ひび割れを挙げることができる。

また、最近では、表層コンクリート（かぶりコンクリート）の品質が養生条件、特に湿潤養生条件の影響を大きく受けることが報告されている。中性化、塩分の浸透など劣化要因の侵入速度や凍結融解抵抗性など耐久性に関わる表層コンクリートの緻密度が湿潤養生の影響を大きく受けることが確認されている。

① 温度ひび割れ

コンクリート打設後、セメントの水和反応の進展によりコンクリートの強度が増加していくが、その際に水和熱が発生する。水和熱により覆工温度も上昇し、コンクリートが膨張する。水和反応が終了すると放熱に伴って覆工の温度も下がり、コンクリートが収縮を始める。この際、覆工背面が拘束されている場合や、インバートを有する区間では、インバートも外部拘束体となり、ひび割れの発生につながる。

温度ひび割れが生じる危険性は、内部(地山側)の温度が高くなり表面(内空側)との温度差が最も大きくなる時期(通常1~2日)と、覆工コンクリート全体の温度が低下していく時期(数週間程度)の2度生じる。

② 乾燥収縮ひび割れ

硬化したコンクリートは、乾燥した場所においては収縮する性質がある。収縮量は通常のコンクリートで700 μ 程度といわれており、背面の拘束等により自由に収縮できない場合には、覆工にひび割れが発生することになる。

在来工法で施工される覆工コンクリートは、一般に地山と直接接しているか、矢板にさえぎられて地山に接していないかの条件によって背面拘束の程度が大きく異なるが、地山と接している場合には背面拘束が大きくなってひび割れが発生することが多い。NATMによって施工されるトンネルでは、防水シート等を用いて吹付けコンクリートの拘束を減じることによって覆工コンクリートのひび割れを防止する対策がなされている。

これらのひび割れは、拘束されている箇所により、トンネル延長方向(天端に多い)およびスパン中央に鉛直方向に規則的に発生することが多い。ひび割れは貫通する 경우가多いが、無筋コンクリートにおいては、ひび割れは曲げモーメントを伝達しないので、土圧などの他の荷重が作用する場合は変形が大きくなる。その他、他の要因(ひび割れが多い箇所である、材料不良がある等)が重なると経年劣化後、はく落を生じる危険性がある。

③ 湿潤養生の不足による表層コンクリートの品質低下

高炉セメントを使用する一般のコンクリートの標準的な湿潤養生期間は、夏期で5日

間、春秋期で7日間、冬期には9日間とされている⁹⁾。しかし、覆工コンクリートの場合、16時間から24時間で型枠を撤去・移動させることが多く、一般のコンクリートに比べて型枠存置期間は極めて短く、湿潤養生が不足しているのが実態である。

過去のトンネル施工における資機材の運搬方法が、レール軌道を利用したズリの搬出、コンクリートの打込みなどであり、坑内は湿度の高い環境であったことから、早期に型枠を撤去しても湿潤環境にあるとされてきた。しかし、最近では、ダンプトラックによるズリの搬出、生コン車によるコンクリートの搬入など、内燃機関を多用することから坑内の換気が積極的に進められ、湿度は50%前後と比較的乾燥状態となってきた¹⁰⁾。このため、表層のコンクリートは湿潤養生不足となり、強度の低下、劣化因子の早期侵入などを許すこととなり、特に坑口部の鉄筋コンクリート部材にとっては、養生不足が致命傷となりかねないのが実状である。

これらの傾向を反省し、坑口付近2スパンの覆工コンクリートに対しては、1週間以上、セントル型枠を存置することを試行する発注者も現れてきている。

(3) 坑口部覆工コンクリートの特徴

1) 設計条件の特徴

坑口となる箇所は、一般に地質的な弱層が存在することが多く、これらの弱層に沿って侵食が発達している場合が多い。坑口部は、崖錐や未固結地山等が多く、土かぶりが小さいため、上載する全荷重が作用することもあるので、作用する荷重に耐えるように耐力の高い支保工の設計が必要となる。このため、覆工はインバートを設置するとともに、鉄筋で補強した鉄筋コンクリート構造物とする必要がある。ただし、上載荷重に対する補強鉄筋は、トンネルの周方向に配筋されるため、軸方向応力に対する補強には繋がらない。

インバートとは、底盤部に設置される逆アーチ状の構造物、おもに支保工や覆工と一体となってトンネルとして必要な機能を備え、地山の変形を拘束し、地山の安定を図る役割を果たす。インバートの役割は、施工中にインバートが必要とされる場合と供用開始後を対象として設置する場合とで区分される。前者の設置目的のインバートは、支保的インバート、後者の設置目的の場合は覆工的インバートとして区別されている。インバートの厚さは、300mm～500mm の範囲にある。

インバート設置の判断は、トンネルの使用目的が水路である場合、地山条件が劣り長期劣化が予想される地山区間、坑口区間、周辺環境への悪影響が懸念される区間で判断される。インバートの施工は、覆工よりも先に図-1.8 の順序で行う。なお、レール工法で施工する小断面トンネルでは、通常施工性から覆工を先に施工する。したがって、覆工コンクリートの温度変化に伴う長さ変化がインバートに拘束されて生じる温度ひび割れの危険性が、インバートのない区間よりも高くなる。

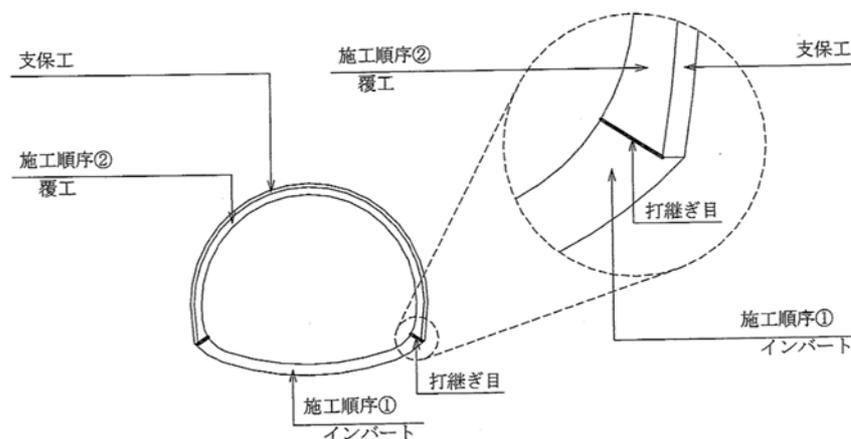


図-1.8 インバートの施工順序¹¹⁾

2) 気象環境上の特徴

坑口部は、外気の影響を受けるため、つららや凍結融解による覆工コンクリートの劣化等が問題となることもある。トンネル内部までは、凍結抑制剤を散布しないが、坑口部まで散布された凍結抑制剤がタイヤに付着して内部まで運ばれたり、気中に巻き上げられた状態でトンネル内部にも飛散していることが最近明らかとなってきた⁸⁾。

坑口部では、凍害や塩害の被災が懸念されるが、鉄筋のかぶりが多いことから、一般のコンクリートと同程度の密実性を有しておれば、塩害は顕在化しないものと思われる。しかし、塩分環境下では、凍害も促進されることから、寒冷地に建設されるトンネル覆工コンクリートには、その表層コンクリートが高い密実性を有することが求められる。

発生したひび割れの本数や延長を指数化したひび割れ指数（TCI）を用いて覆工に発生するひび割れの形態を調べた結果、矢板工法では、天端付近に縦断方向あるいは横断方向のひび割れ形態であるが、NATM では天端中央に1条の縦断方向とわずかであるがSL周辺に横断ひび割れの発生が代表的であるとしている。また、ひび割れ指数は坑口付近で高くなる傾向が見られ、NATM のトンネルでは坑口付近にひび割れが進行する特徴を指摘している¹²⁾。

東日本旅客鉄道(株)が所有する鉄道トンネルのうちコンクリートを使ったトンネルのひび割れ発生位置を分析した結果、トンネル全体においては、坑口から100mを超えるとひび割れ発生率が減少する傾向が確認された。また、凍害危険度4では坑口から坑内に入るとつれてひび割れ発生率が減少する傾向が認められている。

(4) 覆工コンクリートのひび割れ発生要因

1) 一般的なコンクリートのひび割れの原因

コンクリートのひび割れ発生の原因は、表-1.1に示すように区分されている。

表-1.1 ひび割れ発生の原因¹³⁾

| 大分類 | 中分類 | 小分類 | 記号 | 原因 |
|------------|--------|---------------------|------|-------------------|
| A 材料 | 使用材料 | セメント | A1 | セメントの異常凝結 |
| | | | 2 | セメントの水和熱 |
| | | | 3 | セメントの異常膨張 |
| | | 骨材 | 4 | 骨材に含まれている泥分 |
| | | | 5 | 低品質な骨材 |
| | | | 6 | 反応性骨材(アルカリ骨材反応) |
| | コンクリート | | 7 | コンクリート中の塩化物 |
| | | | 8 | コンクリートの沈下・ブリーディング |
| | | | 9 | コンクリートの乾燥収縮 |
| | | | 10 | コンクリートの自己収縮 |
| B 施工 | コンクリート | 練混ぜ | B1 | 混和材料の不均一な分散 |
| | | | 2 | 長時間の練混ぜ |
| | | 運搬 打込み | 3 | ポンプ圧送時の配合の不適當な変更 |
| | | | 4 | 不適當な打込み順序 |
| | | | 5 | 急速な打込み |
| | | 締固め 養生 | 6 | 不適當な締固め |
| | | | 7 | 硬化前の振動や戴荷 |
| | | | 8 | 初期養生中の急激な乾燥 |
| | | 打継ぎ | 9 | 初期凍害 |
| | | | 10 | 不適當な打継ぎ処理 |
| | 鋼材 | | 鋼材配置 | 11 |
| | | 12 | | かぶり(厚さ)の不足 |
| | 型枠 | 型枠 | 13 | 型枠のはらみ |
| | | | 14 | 型枠からの漏水 |
| | | 支保工 | 15 | 型枠の早期除去 |
| | | | 16 | 支保工の沈下 |
| | その他 | コールトジョイント PCグラウト | 17 | 不適當な打重ね |
| | | | 18 | グラウト充てん不良 |
| C 使用環境 | 熱、水分作用 | 温度・湿度 | C1 | 環境温度・湿度の変化 |
| | | | 2 | 部材両面の温度・湿度の差 |
| | | | 3 | 凍結融解の繰返し |
| | | | 4 | 火災 |
| | | | 5 | 表面加熱 |
| | 化学作用 | | 6 | 酸・塩類の化学作用 |
| | | | 7 | 中性化による内部鋼材のさび |
| | | | 8 | 塩化物の浸透による内部鋼材のさび |
| D 構造・外力 | 荷重 | 長期的な荷重 | D1 | 設計荷重以内の長期的な荷重 |
| | | | 2 | 設計荷重を超える長期的な荷重 |
| | | 短期的な荷重 | 3 | 設計荷重以内の短期的な荷重 |
| | | | 4 | 設計荷重を超える短期的な荷重 |
| | 構造設計 | | 5 | 断面・鋼材量不足 |
| | 支持条件 | | 6 | 構造物の不同沈下 |
| | | | 7 | 凍上 |
| E その他 | | | その他 | |

2) 覆工コンクリートのひび割れ発生要因の種類

2016年制定トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説、第3編 設計、第4章 4.2.4 覆工のひびわれ対策では、「覆工に有害なひびわれの発生するおそれがある場合には、ひびわれ対策を講じなければならない。」と規定している¹⁴⁾。

さらに【解説】には、「覆工には、材料、環境、施工に起因するひびわれが発生しやすいが、材料や施工方法について事前に対策を検討し、その発生原因を考慮した対策を講じることにより、ひびわれを低減できる場合が多い。また、ひびわれはその幅や分布状況によっては覆工の機能に影響を及ぼさない場合があり、必ずしもすべてのひびわれが有害なものではない。」としている。

有害なひびわれとして「覆工の耐荷機能を低下させるとともに、その水密性を著しく低下させ、漏水、つらら、凍結融解の原因となって覆工コンクリートの耐久性、安全性や本来の機能等を害することになる。また、複数のひびわれが交差して閉じた場合にははく落の危険性や耐荷力の低下が懸念される。したがって、どのようなひびわれが有害なものであるかについては、覆工の性能を考慮して、慎重に検討する必要がある。」としている。

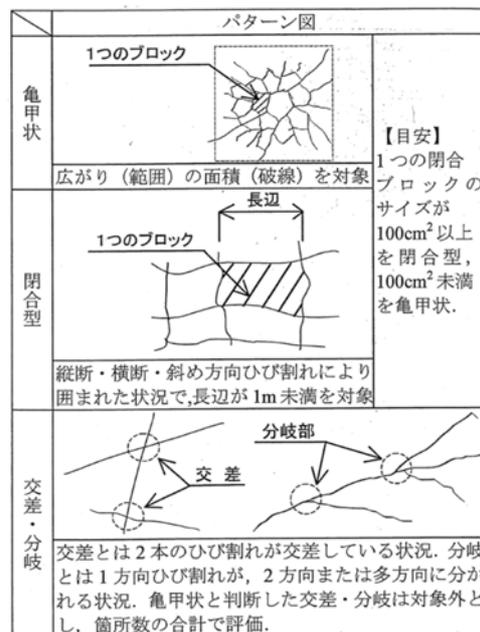


図-1.9 覆工コンクリートのひび割れパターン¹⁵⁾

覆工コンクリートに収縮ひずみが発生する主な要因として、次のものを挙げている。

- ① コンクリートの水和熱で上昇した温度の降下による温度収縮
- ② トンネル内の温度低下による温度収縮
- ③ トンネル内の湿度の低下による乾燥収縮
- ④ コンクリート硬化時の自己収縮

策として、次のものを紹介している。

- 1) ひび割れ抑制工の施工（吹付けコンクリートとの縁切りによる外部拘束の低減）
- 2) コンクリートの品質、材質の改良（収縮ひずみの減少または引張強度の増加）
- 3) ひび割れ発生の制御（ひび割れ誘発目地）
- 4) コンクリートの養生条件の改善

ここで、

- 1) ひび割れ抑制工では、吹付けコンクリートによる覆工コンクリート背面における拘束を低減する方法として、防水シートまたは背面拘束低減用シートを用いた貼付け工法がほとんどのトンネルで用いられている。
- 2) コンクリートの品質、材質の改良では、単位セメント量や、単位水量が少なくなる配合を選定するのが良く、混和剤の使用を挙げている。また、セメントの水和熱に起因した温度収縮を抑制するために水和熱の少ないセメント、混合セメントの使用、コンクリートの乾燥収縮を抑制するために、コンクリート用膨張材や乾燥収縮低減剤を紹介している。コンクリートの材質改良には、ひびわれの発生や幅を制御することを目的とした鋼繊維や耐食性に優れた短繊維を混入した繊維補強コンクリートの使用もあげている。
- 3) ひび割れ誘発目地の適切な間隔は、トンネル断面寸法、覆工コンクリートの厚さ、打込み温度等を考慮して決める必要があるとしている。
- 4) コンクリートの養生条件の改善では、湿度低下、保温、加熱を組み合わせた養生が望ましく、トンネル貫通後の通風等による温度、湿度低下を防ぐため、型枠や脱枠後のコンクリート面をシート等で覆って封かん養生を行ったり、場合によってはその中にホース等を配置して散水したりして積極的に養生を行う例を紹介している。この工法こそまさにアクアカーテンによる給水養生である。

3) コンクリートの温度応力に起因するひび割れ

コンクリート構造物に発生する温度ひび割れは外観上の問題だけでなく、水分や塩分の侵入による鉄筋の腐食など構造物の耐久性にも影響を与える。

温度ひび割れを制御する方法は以前から取り組まれており、その方法の一例として図-1.10に温度ひび割れ制御系統図を示す。温度ひび割れ対策の基本は、ひび割れの発生確率を少なくすること、発生したひび割れの有害性を少なくすることである。この目的を達成するために、具体的には手段レベル4の対策を講じることとなる。ここで、パイプクーリングの実施とあるが、パイプクーリングとは、コンクリートダムを冷却を目的に発達した技術である。コンクリートの水平打継面に設置したパイプに冷水を通じてコンクリートを冷却する方法で、アメリカ合衆国の開拓局において発達してきた方法である。また、わが国においても従来工法（ブロック・柱状工法）で施工するコンクリートダムでは、パイプクーリングの使用が一般的となっている。

パイプクーリングの最初の使用はダム用コンクリートの温度対策として1928-1932年に建設された米国 Owyhee(オワイヒー)において、堤体内部温度を下げるために冷却水のパイプ内循環による方法として開発された。巨大ダムである Hoover(フーバー)の建設を可能としたものである¹⁶⁾。

一般に、パイプクーリングは、ブロック工法においてジョイントグラウチングとともに用いられる。この場合、パイプクーリングは、縦継目ないし横継目以外の部分に温度ひび割れを発生させないように、最高温度及びその後の温度降下を規制するための1次クーリング、ジョイントグラウチングを行うためにダム堤体内の温度を今後生じるであろう最低温度まで冷却し収縮継目を最大に開口させるための2次クーリングに分けられる。

1次クーリングは、硬化したコンクリート内に生じる温度をできるだけ低く抑えるために、打設中から直後のコンクリートに対して1週間前後実施される。

2次クーリングは、ジョイントグラウチングに先立ち、コンクリート温度を最低温度まで冷却し、収縮継目の開度を最大にするために実施する。一般的には貯水開始前の晩秋期から冬期が選ばれ、40~60日程度実施する。

冷却管は、通常1インチ(25.4mm)の薄肉電縫管が用いられ、1コイルの長さは300m以内とすることが多い。冷却管の水平間隔は、ダムのリフト高さが1.5mの標準リフトでは、1.5m間隔とする。冷却水の流量は、13L/分~16L/分とされている。

一方、通常の鉄筋コンクリートの冷却では、ダムでいう1次クーリングに相当するもので、打込み後の上昇温度を抑制するために実施している。ダムでは水平打継面に並べるだけなので電縫管を用いるが、鉄筋や段取り筋に破損することなく固定できる水道管あるいはPC構造物ではプレストレス用シーブ管を用いることが多い。パイプの配置間隔はクーリング効果に直接的に影響する。このため、40cm~75cm間隔で配置することが多い。

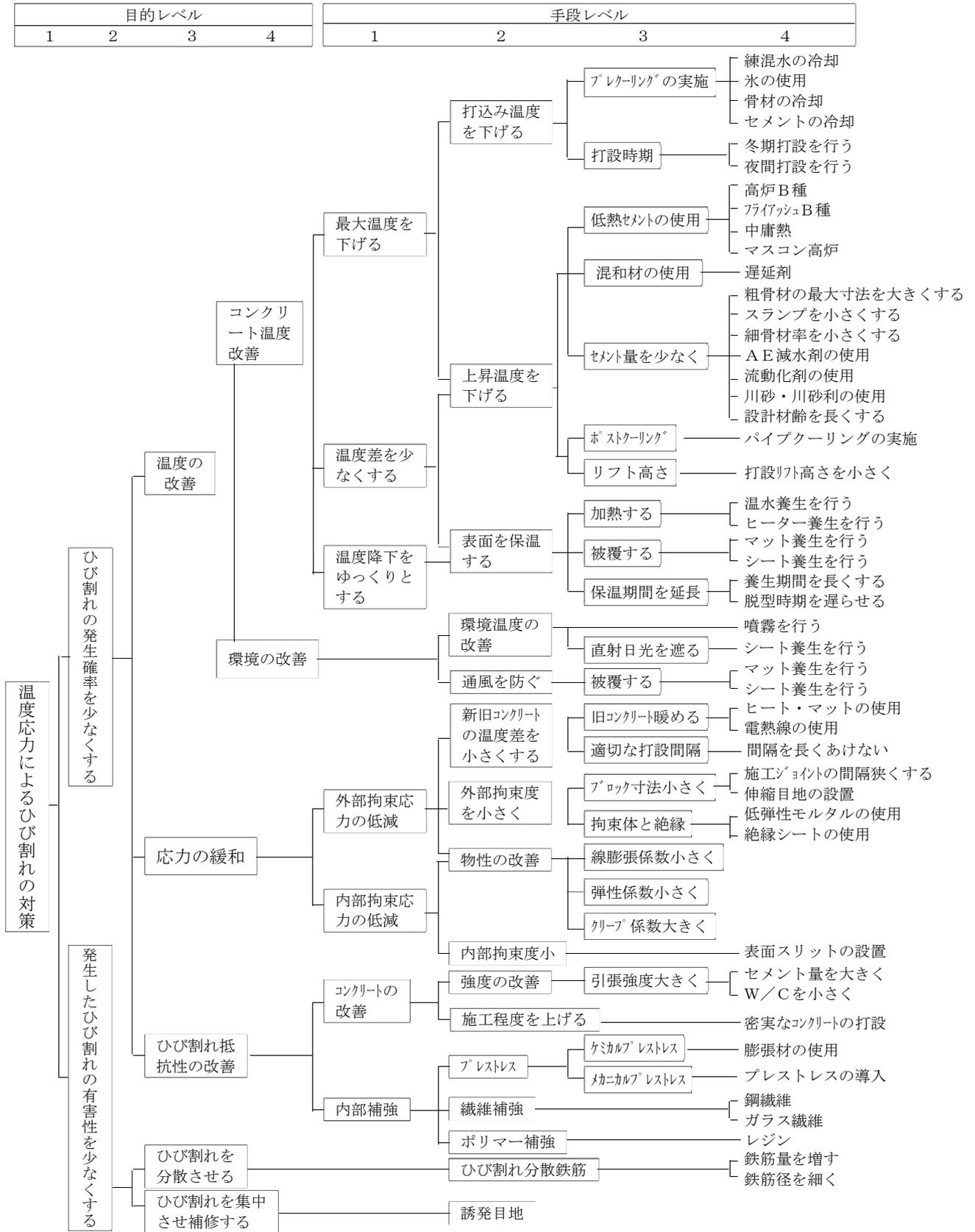
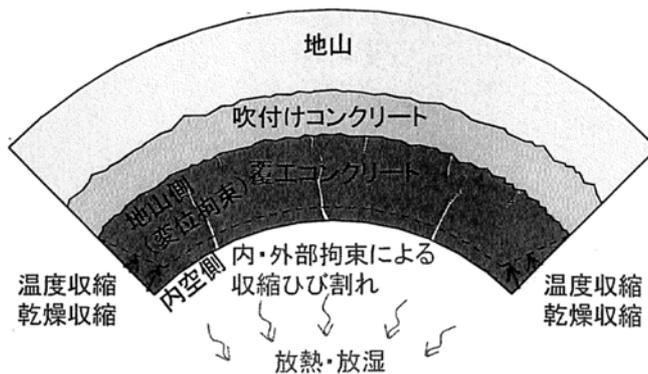


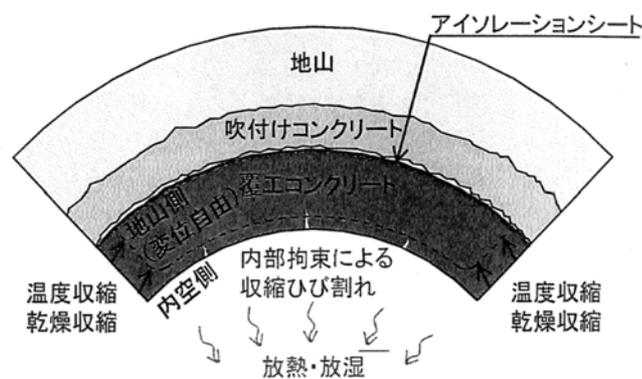
図-1.10 温度ひび割れ制御系統図¹⁷⁾

4) コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れ

NATMで施工された覆工コンクリートでは、トンネル天端付近において軸方向に伸びるひび割れがしばしば確認されている。このひび割れは地圧によるものと類似するため、維持管理段階における健全度評価を困難なものとしている。このひび割れの発生メカニズムを明らかとするため、実際の坑内環境と施工条件を模擬した模型試験とそのシミュレーション解析を実施した高山らの研究¹⁸⁾を以下に引用する。覆工コンクリート背面にアイソレーションシートまたは防水シートが使用されていない場合のひび割れは、図-1.11 (a)に示すように、覆工コンクリートの水和熱による温度収縮を地山の凹凸が拘束することにより発生していると考えられる。この抑制対策として図-1.11 (b)に示すようにアイソレーションシートまたは防水シートが使用されている。この抑止対策を施した場合の覆工コンクリートに生じるひび割れ発生メカニズムは、覆工コンクリートの内空側表面から厚さ方向の乾燥収縮量の違いによる内部拘束により発生しているもので、それは、内空側表面での乾燥・放熱の影響によるものと考えられている。



(a) 地山の凹凸、内空側の乾燥・放熱による不均一な収縮



(b) 内空側の乾燥・放熱による不均一な収縮

図-1.11 覆工コンクリートに生じるひび割れの模式図¹⁸⁾

覆工コンクリート内部の不均一な収縮ひずみに対しては、コンクリート内部に乾燥収縮の分布を考慮する必要があること。さらに、覆工コンクリート地山側に防水シート等のアイソレーションをしない場合には、地山側の外部拘束により、比較的早期に地山側まで貫通する深いひび割れが発生する可能性があること、防水シート等のアイソレーションをした場合には、地山側の外部拘束は緩和される。しかし、内空側の乾燥・放熱の影響による内部拘束により、比較的長い時間の経過後に浅いひび割れが発生する可能性があることこの3点がまとめられ、覆工コンクリートに発生するひび割れの発生時期・深さなどの特徴は表1.2に示すように整理されている。

地山側との収縮量の差(内部拘束)を数値解析で適切に表現するためには、「湿気・応力連成解析」を行う必要があることを示した。

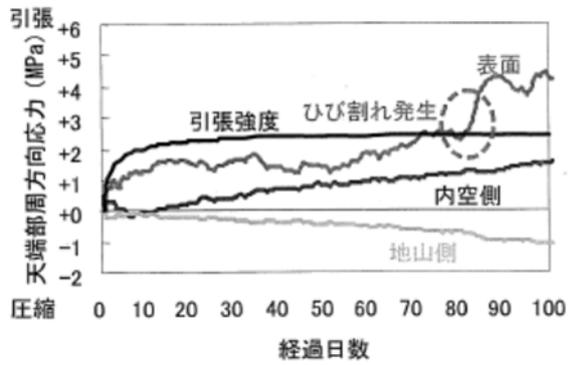
さらに、これらのひび割れが東北新幹線に供用される実トンネルにおける坑内環境下での、夏期、冬期打設された覆工コンクリートの内部ひずみの計測とひび割れ発生状況の調査から熱・応力連成解析と湿気移動・応力連成解析を併せた解析を用いたシミュレーションを行い、実トンネルでの解析手法の適用性を検証し、その解析手法と抑制対策を提案している。

このことは、天端部周方向に発生するひび割れの主原因は、地山側と内空側の乾燥収縮量の差にあり、これによって内部拘束応力によって表面ひび割れが生じる。

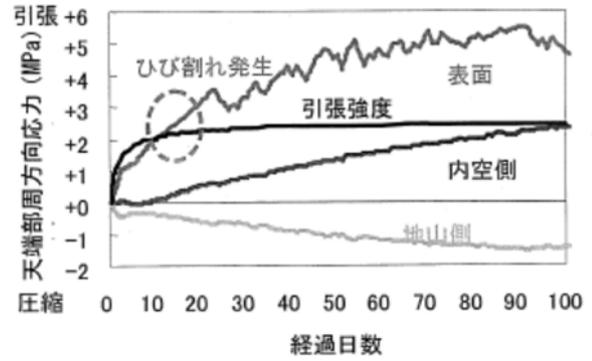
夏期よりも冬期に打設したコンクリートの方が、表面ひび割れが発生しやすいことは、アイソレーションシートによる外部拘束の解消効果によるもので、インバートによる拘束を大きく受ける坑口部覆工コンクリート側壁部においては、温度ひび割れ対策が重要であると考えられる。

表-1.2 覆工コンクリートに発生するひび割れの特徴¹⁹⁾

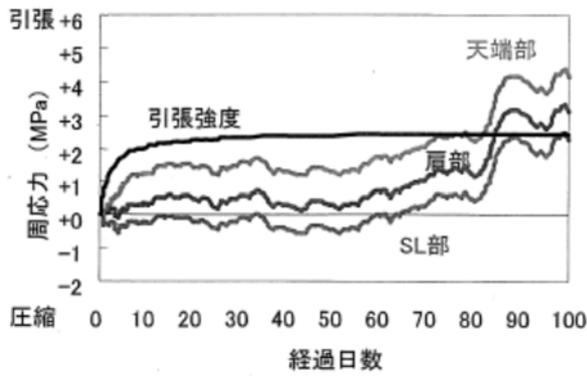
| 発生原因 | 内部拘束(図 1.9(b)) | | 外部拘束(図 1.9(a)) (水和熱による収縮・背面地山の拘束) |
|-----------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|
| | (内空側の乾燥) | (内空側の放熱) | |
| 発生時期(打設後) | 長期 | 短期 | 短期 |
| ひび割れ深さ | 浅い | 浅い | 背面地山まで貫通 |
| 照査方法 | コンクリート内部の不均一なひずみを表現する必要あり | | 既往の評価方法で可能 |
| 備考 | 現在のひび割れの主原因 | ひび割れへの寄与度合いは低い | 防水シート使用で抑制される |



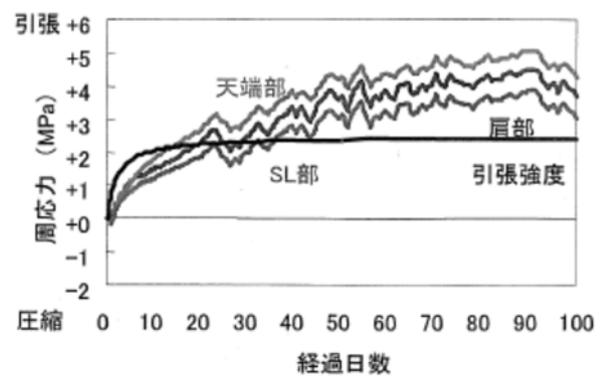
a) 夏期施工の天端部周方向応力



b) 冬期施工の天端部周方向応力



c) 表面の周方向の比較(夏期打設)



d) 表面の周方向の比較(冬期打設)

図-1.12 夏期および冬期の覆工コンクリートの周方向応力¹⁹⁾

(5) 覆工コンクリートの温度ひび割れ対策および養生の現状

1) 覆工コンクリートの品質に対する現状

覆工コンクリートの変状要因とその要因を図-1.1に一覧したが、覆工コンクリート自体の品質低下については、あまり論じられていない。

覆工の役割・機能を確保するための重点課題について、「覆工が果たしうる役割・機能を満足するために、覆工に求められる品質を明確にしておく必要がある。」としながらも、トンネル標準示方書 [山岳編] では、品質という言葉は明確には出てこない。「覆工は、トンネルの使用目的に適合し、安全で長く使用に耐えるものでなければならない。」と漠然と覆工の品質を規定することが多い。

この理由として、覆工コンクリートが型枠内に存置される期間が、一般のコンクリートと比べて極端に短いことから、品質が養生の影響を大きく受けることを軽視せざるを得なかったためではないだろうか。

たとえば、コンクリートの品質を規定する項目としては、圧縮強度、反発度、質量変化、空隙構造、透水性、透気性、塩化物イオン透過性、凍結融解抵抗性、中性化抵抗性、乾燥収縮など、物理的・化学的特性を挙げることができる。これらの品質項目に養生方法が与える影響を以下に示す。

図-1.13 は、湿潤養生期間と圧縮強度の関係を示したもので、数多くの文献で引用されている。養生期間が短いほど圧縮強度は小さくなり、28日間湿潤養生した供試体に比べて気中養生を継続した供試体の圧縮強度は半減することが分かる。

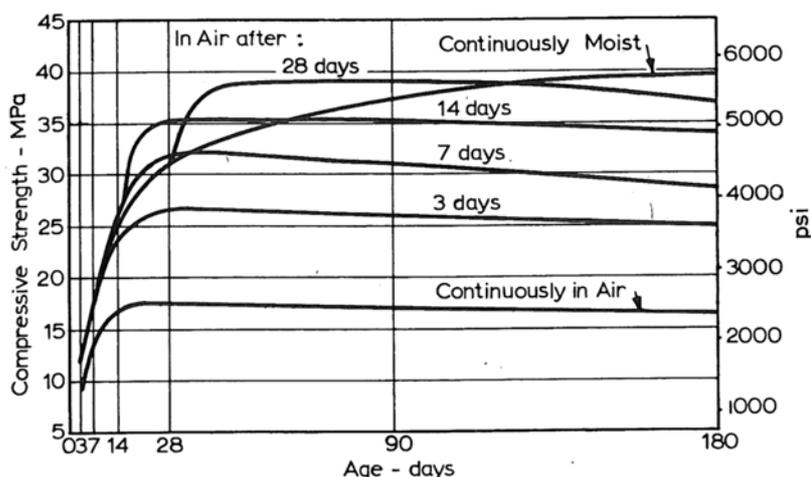


図-1.13 湿潤養生が水セメント比 0.50 のコンクリート強度に及ぼす影響²⁰⁾

2) 覆工コンクリートの養生に関する施工管理基準の変遷

【土木学会コンクリート標準示方書】

2012年制定のコンクリート標準示方書 8章養生 では、耐久性を左右するコンクリート表層の品質ならびにひび割れ抵抗性に及ぼす養生の影響が大きいことを指摘する記述が新たに追加された。

また、これに関連して、近年工夫された給水養生や水分の逸散を抑制する養生が開発され、構造物への適用例が見られるようになったことも紹介されている。

旧版では、養生の基本である湿潤に保つ方策として図-1.14を示してきたが、改訂版では、対策が給水養生と水分逸散抑制養生に大別され、表-1.3に改められた。

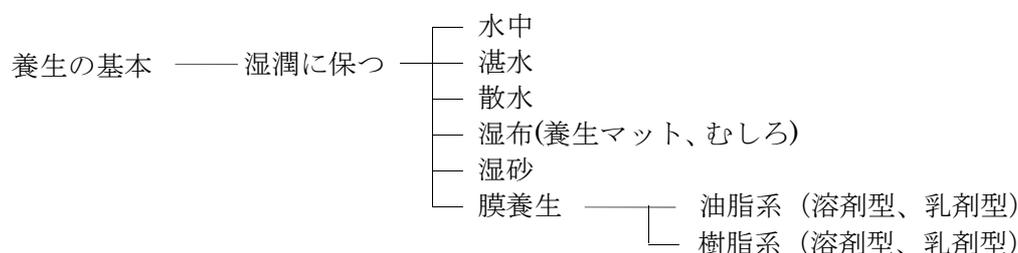


図-1.14 養生の基本 (旧版)

表-1.3 養生の基本 (改訂版)

| 目的 | 対象 | 対策 | 具体的な手段 |
|---------|--------------|--------|------------------------|
| 湿潤状態に保つ | コンクリート 全般 | 給水 | 湛水、散水、湿布、養生マット等 |
| | | 水分逸散抑制 | せき板存置、シート・フィルム被覆、膜養生剤等 |

この中で、養生の方法や期間を決定する際の留意点として、旧版にはなかった「施工者は、養生に関する十分な知識および経験の有する技術者を配置して事前に発注者と協議し、構造物の重要度、施工の効率性や経済性等を考慮して、養生方法を決定することが望ましい。」を追加している。

改訂の内容をもう少し詳しく見ると、コンクリートの湿潤養生について、根本的な考え方を示す記述が追加された。すなわち、コンクリートの品質を確保する最も理想的な方法として「給水養生」と、実務における現実的な制約条件から採用されることの多いせき板存置等による「水分逸散を抑制する養生」の違いが示され、コンクリート打上がり面(水平面)ではできる限り給水養生することが望ましいことが記述された。一方、せき板に接する面(鉛直/傾斜面)は、若材齢から給水養生を行うためにはせき板を取り外さなければならず、そのことによるコンクリートの品質や耐久性に対する弊害の方が大きくなる可能性があることが示された。

また、せき板に接するコンクリート表面が、せき板を取り外した際に濡れた状態になっている場合は、その面は給水状態と同程度の養生がなされているものとみなせる。鋼製型枠では水分の逸散を抑制する効果が高いことから、土木構造物のように比較的マッシブなコンクリートの場合には、コンクリート内部の余剰水の存在により、せき板に接するコンクリート表面は給水養生と同様の効果が得られる。

この示方書では、通常コンクリート工事におけるコンクリートの湿潤養生期間の標準として表-1.4を示している。表中の数値は、十分な給水養生を行った場合を対象とし、コンクリートの強度や初期凍害に及ぼす養生条件の影響を検討した実験の結果等を参考に設定された湿潤養生期間の標準である。ただし、コンクリートの品質向上が期待できる場合には、なるべく湿潤養生期間を長くすることが望ましいとしている。

表-1.4 湿潤養生期間の標準

| 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 |

【土木学会発行 2016年制定トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説】

土木学会発行 2006年制定トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説 第4編 施工 127条 「型枠の取外しでは、型枠は打ち込んだコンクリートが必要な強度に達するまで取り外してはならない。」とあり、【解説】では、「型枠の取外し時期は、覆工の工程に大きく影響するが、早すぎる型枠の取外しは、覆工コンクリートにひびわれを発生させたり、つま部コンクリートに欠けを生じたり、表面仕上がり不良等の有害な影響を及ぼすため、十分な検討が必要である。型枠は少なくとも打ち込んだコンクリートが自重等に耐えられる強度に達した後でなければ取り外してはならない。」

型枠を取り外してよい時期は、コンクリートの種類、トンネルの大きさ、形状、覆工巻厚および施工条件等によって異なるが、通常、コンクリート打込み後、12～20時間で型枠を取り外している例が多い。また、取外し時の強度は、円形アーチのトンネルでは、コンクリートの圧縮強度が2～3N/mm²程度を目安としていることが多い。」としている。

さらに、第133条 覆工コンクリートの養生 では、「覆工コンクリートは、打込み後、硬化に必要な温度および湿度を保ち、有害な作用の影響を受けないよう適切な期間にわたり養生しなければならない。」としている。

また、【解説】では、「打ち終わったコンクリートに十分な強度を発現させ、所要の耐久性、水密性等、品質を確保するためには、打込み後一定期間中、コンクリートを適当な温度及び湿度に保ち、かつ振動や変形等の有害な作用の影響を受けないようにする必要がある。」

る。坑内は坑口付近を除いて温度が安定しており、湿潤状態に保たれているもので、一般には付加的な養生は行われていない。しかし、坑内換気やトンネル貫通後の外気の通風の影響については注意が必要である。

トンネルの環境条件によっては、夏期では坑内の湿度低下を抑制する坑内散水、冬期では温度低下を抑制するシート養生、ジェットヒーターによる加熱、あるいはその組合せ等による養生を行うのが望ましい。その場合は、急激な乾燥、温度変化を与えないように留意する必要がある。とくに、トンネル貫通後には通風等により温度、湿度が低下することがあるため、必要に応じてシート等による通風の遮断や保温、ジェットヒーターによる加熱等、養生に適した坑内環境を確保する必要がある。」としており、「坑口付近は、外気の影響を受けやすいため、ここでの覆工は明かり構造物と同じように養生を行うなどの配慮が必要である。」としている。

2016年に制定された同示方書では、節番号を第133条から8.2.6 覆工コンクリートの養生に改め、「これらの養生を確実にを行うため、型枠や脱枠後のコンクリート面をシート等で覆って封かん養生を行ったり、場合によってはその中にホース等を配置して散水したりして積極的に養生を行う例も見られる。」と追記しており、この方法はまさに後述するアクアカーテンを指している。

【土木学会コンクリートライブラリー「トンネルコンクリート施工指針(案)】

平成12年7月発行に発行された土木学会コンクリートライブラリーでは、「覆工コンクリートは、一般に脱型が早いと、型枠存置による十分な養生効果は期待できない。しかしながら、トンネル内は、坑口付近を除いて温度が安定しており、湿度も高い状態となっている。また、覆工コンクリートは、背面が地山に接しており外気に露出しているのは一面のみである。日照作用もなく風等の影響もほとんど受けない。そのため、コンクリート表面からの水分の逸散は、一般の屋外コンクリート構造物よりも格段に少ない。このような状態が確保されているトンネル内は、湿潤状態に保たれていると見なせるので、一般には、特に付加的な養生は行っていない。」としている。

しかし、たとえば、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¹⁰⁾では、施工時のトンネル坑内湿度は、トンネル延長、トンネルの貫通の有無、季節などの条件により多少の変動があるものの、おおよそ60～70%程度であることを明らかにしている。このことから、施工時のトンネル坑内環境は、必ずしもこれまで考えられていたような高湿度条件ではないことが確認されている。

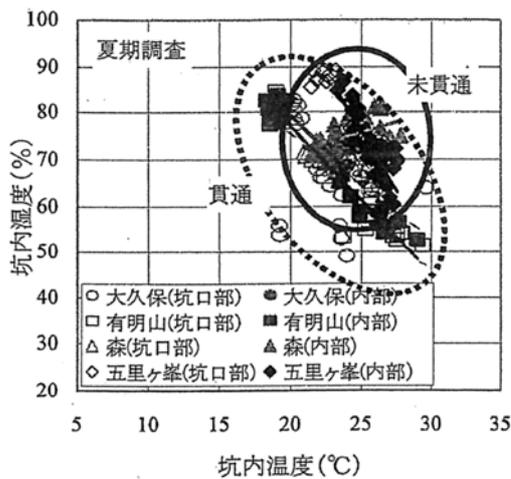


図-1.15 坑内温度と坑内湿度の関係¹⁰⁾
(調査 I 夏期)

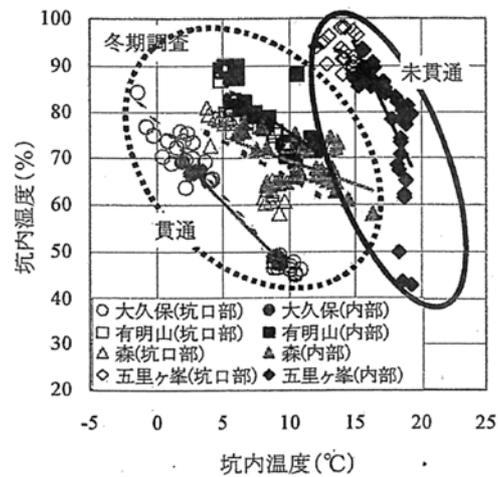


図-1.16 坑内温度と坑内湿度の関係¹⁰⁾
(調査 I 冬期)

【東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株) トンネル施工管理要領】

平成27年7月発行のトンネル施工管理要領 5 覆工 5-8 覆工コンクリートの養生を新たに追加している。

「覆工コンクリートの養生は、給水、水分逸散防止、封緘及び膜養生等で覆工コンクリート表面を7日間湿潤状態に保持する方法を標準とする。なお、養生開始にあたっては、型枠を取り外した後速やかに行うものとし、型枠の取り外しから8時間以内に実施する。

型枠脱型時期を3日程度延長する方法も標準と定めた養生方法と同等に効果が確認されている。

坑口部などの鉄筋区間では、通常のコンクリート構造物と同様に中性化速度や塩化物イオンの侵入が耐久性に大きな影響を与えることから、適切な養生を実施して耐久性を確保する必要がある。鉄筋区間における適切な養生は、「コンクリート標準示方書 施工編 第8章 養生」に準拠して設定してよい。」としており、トンネル標準示方書山岳工法・同解説よりもさらに踏み込んだ記述をしている。

3) 覆工コンクリートの設計の考え方

【土木学会発行 2016年制定トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説】

第3編 4.1.2 覆工の設計の考え方の【解説】では、「山岳工法で施工されるトンネルでは、多くの場合、支保工で地山を安定させ、地山の变形が収束してから覆工を施工する。そのため、覆工には外力は作用しないと考えられ、通常、覆工に力学的な性能を付加させないことが多い。このような場合、覆工に必要な性能は供用性が主となり、覆工は無筋コンクリートで設計、施工される。供用性は一般に定量的に個別設計する項目ではないため、標準設計として事前に標準設計巻厚を決めて適用している。標準設計された覆工を十分な施工管理のもとで施工すれば、覆工は供用性を含めて一般に長期耐久性等の必要な性能も満足する。」としており、坑口部以外では、無筋コンクリートで耐久性を確保できるとしている。

坑口部については、「坑口部では、強度の著しく低い地山や土被りの小さい地山が多く、グラウンドアーチが形成されにくい。そのような場合、耐荷力の高い支保工を選定することが多いため、覆工に力学的な性能を付加させないことが通例である。しかし、将来的に地山荷重の作用が予想される場合や、地形改変や構造物の近接施工により外力の作用が予想される場合等には、覆工に力学的な性能を付加させることも必要となる。また、坑口部は、外気の影響による凍結融解や乾湿の繰返し等による覆工の劣化、地震による影響、長期的な地山の劣化による影響を受けやすいため、おもに覆工のひび割れ進展を抑制するために鉄筋等で補強することがある。」としており、坑口部はひび割れの進展を防ぐことを目的として、補強鉄筋を配置することとしている。補強鉄筋は、シングルでD16を300mmピッチで施工することが多く、鉄筋比は0.08%である。一方、国土交通省東北地方整備局発行の“ひび割れ抑制のための参考資料(案)”における山口県のデータベースによれば、有害なひび割れ幅の発生を防ぐためには、鉄筋比を0.55%とすることとしている。そのため、覆工コンクリートの補強鉄筋は非常に少ないと考えられる。

また、インバート区間においては、通常、補強鉄筋を配置した鉄筋施工区間と、無筋コンクリート区間がある。そのため、無筋コンクリート区間は、覆工にひび割れに抵抗する鉄筋が配置されていないため、ひび割れが発生するとひび割れ幅が大きくなる。そのため、腐食する鉄筋はないものの、発生したひび割れが起点となって、剥落等の発生が懸念され、耐久性の低下を引き起こすと考えられる。

4) 土木学会全国大会に見られる研究の動向

マスコンクリートの温度応力に関する研究は、日本コンクリート工学協会においてマスコンクリートの温度応力研究小委員会が1981年に活動を開始して以来精力的に行われ、温度応力制御技術は、現在のところ実務的にはほぼ体系化されている。表-1.5にはマスコンクリート温度応力研究委員会報告の履歴を示した。土木学会コンクリート標準示方書でもこの研究会の成果を受けて示方書に取り込んでいる。

図-1.17は、土木学会年次全国大会における発表論文のうち、「マスコンクリート」または「温度応力」の二つのキーワードから検索した論文件数である。「または」で結んだ二つのキーワードで検索した論文の総数は83編、内、1969年以前の論文が14編であった。1992年以降、関連論文件数は増加し、以後毎年の論文件数は25～35編とほぼ安定している。これらの論文のうち、表題にトンネル二次覆工が含まれる論文が17編、パイプクーリングが含まれるものは19編であるものの、双方に共通した論文は報告されていない。つまり、トンネル覆工コンクリートの温度ひび割れ対策としてのパイプクーリングの利用に関しては未だ報告例が見当たらないことである。

したがって、本研究に関しての新規性が認められる。

表-1.5 日本コンクリート工学協会の活動履歴と示方書への取込み経緯

| 発行年 | 表 題 | 副 題 | 出展ページ |
|------|--|--------------------------|------------|
| 1982 | マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム | | |
| 1984 | 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム | | |
| 1985 | マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム | | |
| 1985 | マスコンクリートの温度応力研究会報告書 | 既往の研究と外部拘束係数の同定 | |
| 1989 | ユーザーズマニュアル マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム | | |
| 1990 | コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するコロキウム | | |
| 1992 | マスコンクリートの温度応力研究会報告書 | 温度応力ひびわれ幅算定方法についての提案 | |
| 1996 | ユーザーズマニュアル マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム集 | | |
| 1998 | マスコンクリート温度応力研究委員会報告書 | 外部拘束係数の見直しとCP法の適用範囲拡大 | |
| 2006 | マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書 | | |
| 2008 | マスコンクリートのひび割れ制御指針2008 | | pp.1～298 |
| 1996 | 平成8年制定コンクリート標準示方書施工編 | 17章 マスコンクリート温度ひび割れ発生への検討 | pp182～191 |
| 1999 | 平成11年制定コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型— | 4章 施工段階におけるひび割れ照査 | pp.24～35 |
| 2007 | 2007年コンクリート標準示方書[設計編:標準] | 4編 温度応力解析 | pp.331～344 |
| 2012 | 2012年コンクリート標準示方書[設計編:標準] | 6編 温度ひび割れに対する照査 | pp303～318 |

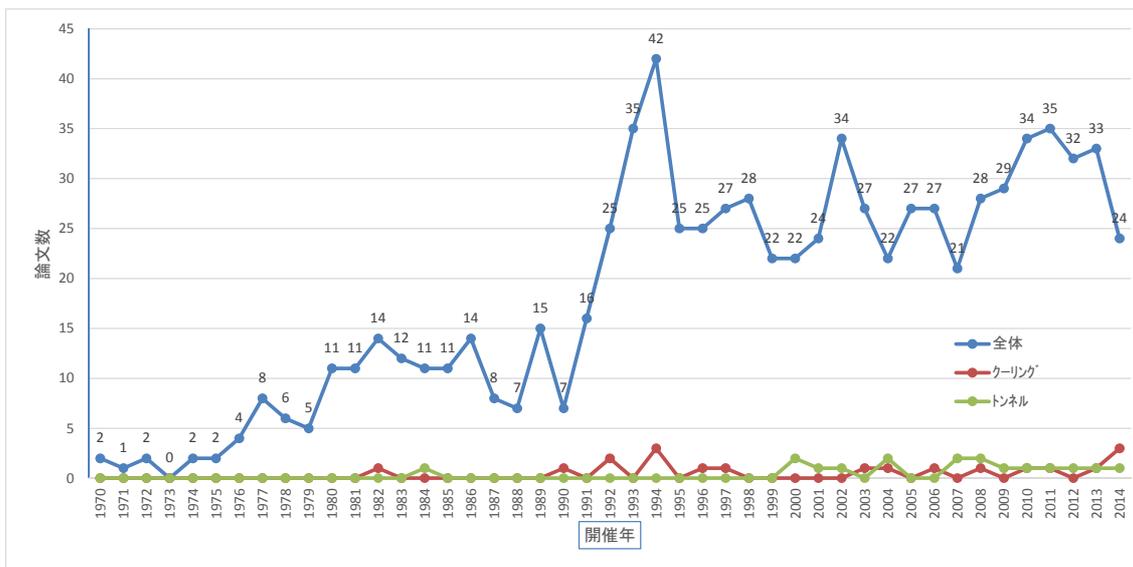


図-1.17 土木学会年次大会発表論文数の経緯

第60回年次学術講演会(2005年)から第71回年次学術講演会(2016年)までの過去12年間の発表論文のうち、コンクリートの養生方法が、①表層コンクリートの品質に与える影響、②温度ひび割れ、③乾燥収縮ひび割れにおよぼす抑制効果に関する論文を集計した。検索のキーワードは「養生」のみであり、これらの一覧からタイトル、キーワードを手がかりに、上記内容にかかわる論文を集約した。なお、論文は、場所打ちコンクリートに使用する一般的な材料・配合・養生方法とし、一般のコンクリート構造物とトンネル覆工コンクリートに区分している。特殊な材料や工場製品等に見られる促進養生は当然含んでいない。

なお、論文数の全体推移は図-1.18のとおりである。

2005年ころから論文数が増加し、ここ数年は、20編前後で推移している。

このように、養生に関連した論文の増加は、土木学会コンクリート委員会に2005年9月に「構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会」が活動を開始し、さらには、「歴代構造物品質評価/品質検査精度研究小委員会」が2008年4月に発足、2009年9月「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会」へと引き継がれた一連の研究への取り組みによるものと思われる。

養生の対象とする構造物を明かり構造物とトンネル覆工コンクリートに区分してその論文数の推移を図-1.19に示すが、どちらも明かり構造物が上回るものの、ほぼ同様の傾向で、推移している。

さらに、明かり構造物の養生に関する論文数の推移を図-1.20に示すが、表層コンクリートの品質に関する論文数が増大している。

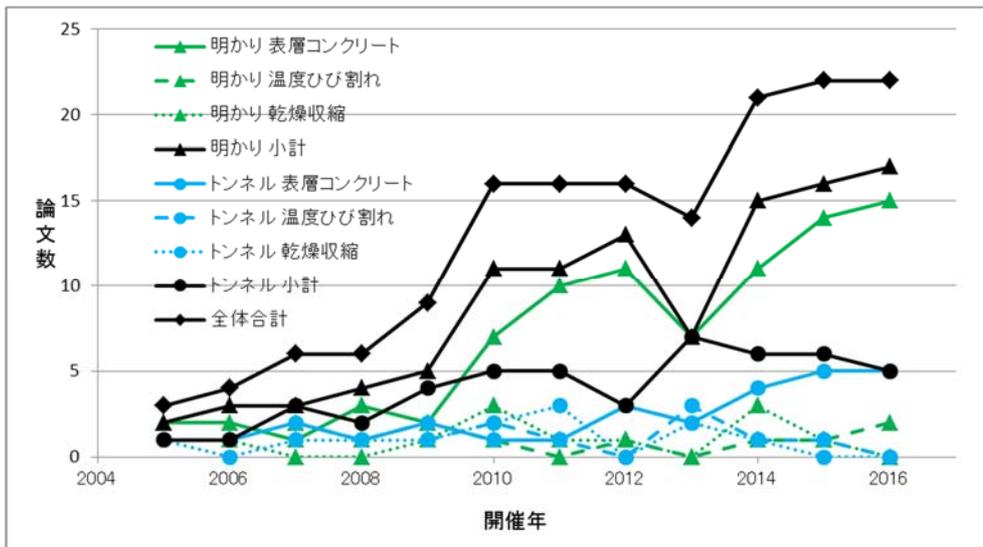


図-1.18 土木学会年次大会『養生』論文数の全体推移

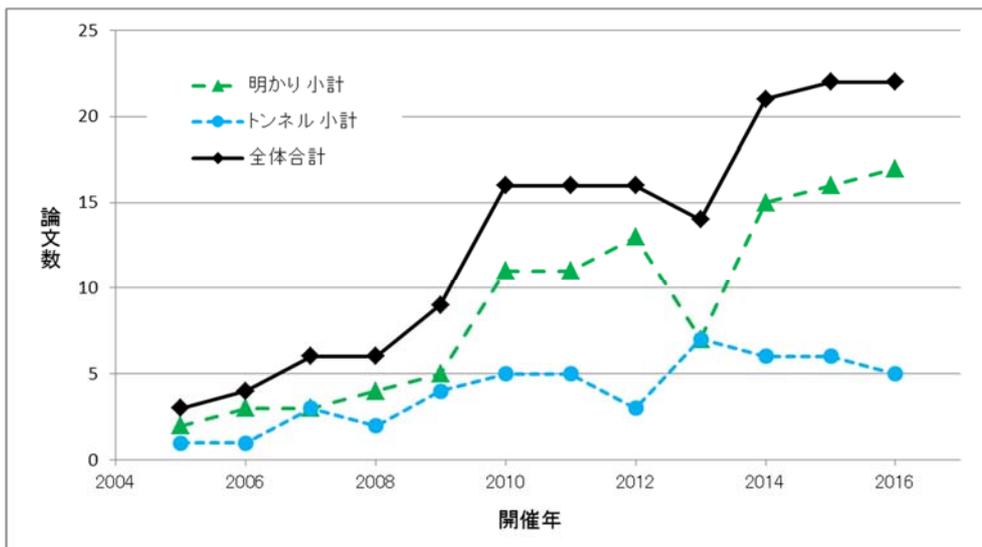


図-1.19 土木学会年次大会における明かりとトンネルに関する『養生』論文数の推移

温度ひび割れや乾燥収縮については、養生の観点よりも、膨張材や緩衝収縮低減材など新材料などに関する研究に取り組まれているものと思われる。

一方、トンネル覆工コンクリートに関する論文数の推移を図-1.21 に示すが、いずれの年度も 5 件程度であり変化していない。

トンネル覆工コンクリートに対する具体的な養生方法としては、噴霧養生を主体として、追加的機能として、環境温度を調節するための保温装置を加えたもの²¹⁾。水分逸散抑制法としてシートあるいは保温性のあるマットをコンクリート表面近傍に取り付ける方法²²⁾、あるいは粘着性を付与したテープや気泡緩衝シートを覆工コンクリートに直接貼り付ける方法²³⁾などの多く方法およびこれらが表層コンクリートの品質に与える影響が報告されている



図-1.20 土木学会年次大会における明かりに関する『養生』論文数の推移

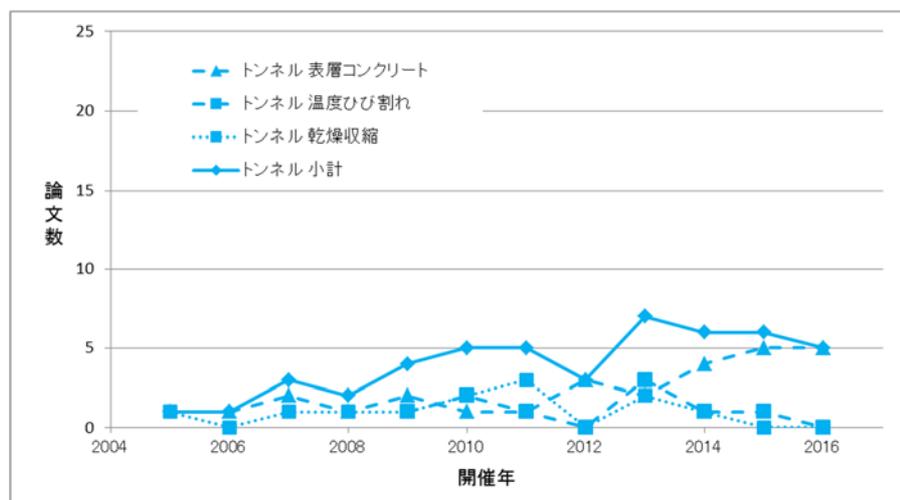


図 1.21 土木学会年次大会におけるトンネルに関する『養生』論文数の推移

5) 海外における覆工コンクリートの施工

海外における覆工コンクリートの研究の動向について調査する前に、施工方法について、調査した。

米国運輸省連邦ハイウェイ管理局が発行している“道路トンネルにおける設計及び施工に関する技術仕様書”²⁵⁾の“10章 覆工”では、2次覆工の設計および施工方法について、以下の4つの工法に分けて、まとめている。日本のように、山岳トンネルとシールドトンネルで分けられていない。

- (1) 現場打ちコンクリート (→日本の山岳トンネルで主流の工法)
- (2) プレキャストセグメントコンクリート (→日本のシールドトンネルで主流の工法)
- (3) 鋼製プレート (→日本のシールドトンネルの曲線区間で適用されている工法)
- (4) 仕上げ吹付けコンクリート
(→日本の山岳トンネルの1次覆工では主流だが、2次覆工では適用されていない。)

現場打ちコンクリートの設計については、下記のように記載されている。

- ・覆工厚さはできる限り薄くする。最小厚さは25cmとする。(日本においては、最小値は35cm、通常35～45cmである。)
- ・覆工厚の薄い箇所を鉄筋コンクリートとすることは、コンクリートの打込みが困難になる。ヨーロッパ等では、自己充填性のコンクリートで打設した事例もある。(日本においては坑口部のDⅢ区間は、鉄筋コンクリートで設計する。)
- ・コンクリート打設前には、覆工の背面に防水工を実施する。鉄筋を配置する場合は、鉄筋が防水工を傷つける可能性が高いため、無筋コンクリートで設計することが望ましい。(日本においては、防水シート施工区間でも鉄筋コンクリートで施工する。)
- ・トンネル内での火災に対しての耐久性が必要。ポリプロピレン繊維の混入等の対策が望まれる。(日本においても同様であり、高速道路3社は、剥落防止効果も見込み、標準化している。)

現場打ちコンクリートの材料については、下記のように記載されている。

- ・スランプの推奨値は、12.7cm。(日本においては設計で15cmだが、最近では18cmへの変更が多い。また、高速道路3社は、スランプフロー35～50cmの中流動覆工コンクリートを標準化している。)
- ・空気量の推奨値は、3～5%。(日本においては4.5%としている。凍害の危険度の高い地域では7%にした事例もある。)
- ・材齢28日での圧縮強度の推奨値は、24～31N/mm²。(日本においては18～24N/mm²。超大断面の覆工では30N/mm²程度。)

現場打ちコンクリートの施工については、下記のように記載されている。

- ・型枠の脱型時期は、現場養生した供試体の圧縮強度で判断する。必要な圧縮強度は、設計者が計算する。（日本においては、 3N/mm^2 を標準の脱型強度としているが、有限要素法による計算結果から、 3N/mm^2 以下に変更することもある。）
- ・型枠脱型後は、コンクリート表面を湿潤に保つか、養生剤を塗布する。（日本においては、坑口部は明かり構造物と同等の養生を実施することとしている。）
- ・1回の打設スパンは、コンクリートの収縮を最小化するために制限されるべきだが、施工が困難にならないようにする。（日本では、10.5mが標準。）
- ・天端部の空洞には、グラウトを注入する。そのため、あらかじめグラウトホースを設置する。（日本においては、背面空洞が発生しないように施工することが前提となっており、空洞発生時の具体的な記載はない。）

日本における山岳トンネル（NATM）の覆工の施工は、現場打ちコンクリートが基本となっているが、以上の調査のように、米国運輸省連邦ハイウェイ管理局の技術仕様書では、プレキャストセグメントや仕上げ吹付けコンクリートについても規定されている。プレキャストセグメントは、シールドトンネルに採用される覆工として、日本でも一般的な工法となっているが、山岳トンネルでの施工実績は非常に少ない。仕上げ吹付けコンクリートは、日本では設計および施工に関する規定はなく、近年の主要道路および鉄道トンネル2次覆工での施工実績はない。

仕上げ吹付けについては、海外では積極的に採用されている。イギリスの鉄道トンネルの施工では、隣接する2箇所駅の駅部の覆工の施工に、仕上げ吹付けと現場打ちコンクリートとの2工法を適用して、工程や工費、施工方法について比較し、報告している²⁶⁾。その報告書では、仕上げ吹き付けは、今後の改良により、現場打ちコンクリートよりも工期および工費を短縮できる可能性が高いと結論付けている。

また、養生については、脱型後に実施するように記載されているが、具体的な日数や方法等の記載はない。覆工コンクリートの進捗は、文献調査によると、イギリスの鉄道トンネル²⁶⁾では6m/日であるため、およそ1.5日で1打設（約10m）となる。また、スロバキアやドイツ等のヨーロッパでも1.5日で1打設（約10m）である²⁷⁾。そのため、打設から脱型までの時間は、日本と同等か短い傾向となる。脱型後の養生方法が重要となる。

6) 海外の論文に見られる研究動向

海外における覆工コンクリートの研究動向を調べるために、海外のインターネット論文検索にて、“tunnel concrete linig”を検索し、2016年～2018年に発表された上記キーワードに関連の深い論文50件をピックアップした。これらの論文は、主に以下の3団体に投稿された論文である。また、表-1.6に、そのピックアップした結果を示す。

- ・ Tunnelling and Underground Space Technology エルゼビア*発行
- ・ Engineering Structure エルゼビア*発行
- ・ Underground space 中国、米国、日本、上海の大学教授が編集

*：エルゼビア (Elsevier) は、科学・技術・医学関連情報の論文および製品、サービスを専門とする世界的企業。

表-1.6より、覆工コンクリートの型枠脱型後の養生および温度ひび割れに関する論文は確認できない。本論文で対象とした部分的なクーリングによる温度ひび割れ防止、型枠脱型後の給水養生によるコンクリート表面の緻密化および乾燥収縮ひび割れ抑制については、海外での研究はまだなされていないと考えられる。日本の山岳トンネルにおいては、プレキャストセグメントや仕上げ吹付けコンクリートの適用は検討されず、現場打ちコンクリートの技術に特化して、集中的に研究されてきたためと考えられる。

表-1.6 海外の覆工コンクリートに関する研究動向

| No. | テーマ | 件数 | 内容 |
|-----|----------|----|------------------------------------|
| 1 | セグメント | 9 | ジョイント部の構造、繊維混入による耐火性向上およびひび割れ抑制。 |
| 2 | ひび割れ | 7 | 繊維混入によるひび割れ抑制対策、施工後に発生したひび割れに関する検討 |
| 3 | 耐震 | 4 | 地震の被害に関する報告、解析的検討 |
| 4 | 耐火 | 6 | 繊維混入による抑制対策、コンクリートの耐火性向上に対する研究 |
| 5 | 繊維コンクリート | 4 | 耐火性能向上、ひび割れ抑制 |
| 6 | 仕上げ吹付け | 3 | 工程、工費の圧縮 |
| 7 | 挙動 | 6 | 覆工施工時の挙動、近隣施工時の既設トンネルの挙動 |

1.4 まとめ

1) 覆工コンクリートの一般的な変状要因

覆工コンクリートの一般的な変状要因は、外的要因として、①経年劣化、②中性化、③気温、④塩分が、内的要因では、①打設不良のうち、養生不足による表層コンクリートの低品質化が挙げられる。

2) 覆工コンクリートの養生に対する考え方と実例

コンクリートの養生に対する課題と対策の考え方として土木学会コンクリート標準示方書では、施工者は、養生に関する十分な知識および経験を有する技術者を配置して事前に発注者と協議し、構造物の重要度、施工の効率性や経済性等を考慮して、養生方法を決定することが望ましいとし、表層コンクリートの品質を確保するためには湿潤養生の重要性をさらに喚起している。一方、トンネル覆工コンクリートでは型枠を取り外してよい時期は、通常、コンクリート打込み後 12～20 時間としている例が多く、養生時間としては極端に不足している。

3) 坑口部覆工コンクリートと周辺環境

坑口部覆工コンクリートは、坑口が地質的に弱層な箇所に位置することが多く、インバートを有する鉄筋コンクリート構造物となることが多い。同時に、凍害や凍結抑制剤がトンネル内部にまで飛散することの影響を受けることからその表層は緻密であることが求められる。

4) 覆工コンクリートに生じるひび割れの原因

覆工コンクリートに生じるひび割れの種類には、過大な荷重が作用した場合の変形に伴うひび割れとは別に、温度降下、内部と表面の温度差、自己収縮など覆工コンクリートに生じる収縮ひずみが主な原因のひび割れがある。

5) 天端部に生じるひび割れの主原因

天端部周辺に発生するひび割れの主原因は、地山側と内空側の乾燥収縮量の差にある。また、温度応力に起因する温度ひび割れも発生する。

6) 養生方法が表層コンクリートの品質の及ぼす影響

養生方法が表層コンクリートの品質に及ぼす影響が大きく、特に、型枠存置期間が 15～18 時間と短い覆工コンクリートでは、圧縮強度の発現が抑制される。凍結融解抵抗性への影響は著しく、スケーリングによって表層から剥がれ落ちることから重量減少が多い。

7) 土木学会に見られる研究の動向

土木学会全国大会に見られる研究の動向を過去10年にわたって調べると、最近の5年間は15～20件の報告があり、表層コンクリートに及ぼす影響に関する論文が多くを占めている。これは、2005年土木学会コンクリート委員会で活動を開始した表層コンクリートの品質に関する研究の取組みによるものと思われる。

8) 海外における施工及び研究動向

海外における施工および研究動向の調査により、海外では仕上げ吹付けコンクリートや繊維コンクリート、コンクリートの耐火性に関する研究がされており、養生や温度ひび割れに関する研究は、あまりされていないことが確認できた。

参考論文

- 1) 菅藤太郎、伊藤信、鈴木尊、脇山勘治：鉄道トンネルで発生している変状の傾向に関する一考察,トンネル工学報告集,第26巻, I -20,2016.11.
- 2) 笹田俊之、砂金信治、石村利明：点検結果にもとづく道路トンネルの変状進行に関する一考察,トンネル工学報告集,第26巻, I -18,2016.11.
- 3) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 トンネル)：(財)鉄道総合研究所 丸善株式会社,平成19年1月
- 4) 長谷川寿也、藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害,技報堂,1986
- 5) 岡田勝也：トンネルの凍害防止工設計のためのつらら発生領域の統計的・理論的予測式, 鉄道総研報告,Vol.2, No.1, 1988
- 6) 大即信明、榎野教之、片脇清士、小林明夫、宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害,技報堂,1986
- 7) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、1984
- 8) 国土技術政策総合研究所資料凍結防止剤散布と沿道環境,平成19年7月
- 9) 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編],(社)土木学会,丸善出版(株)
- 10) 馬場弘二、伊藤哲男、城間博道、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、27-35,2003.9
- 11) トンネルライブラリー第25号,山岳トンネルのインバート-設計・施工から維持管理まで-公益社団法人土木学会,丸善出版(株),平成25年11月
- 12) 前田佳克、八木弘、海瀬忍、増田弘明、水野希典、重田佳幸、前田洸樹：ひびわれ指数(TCI)を用いた覆工に発生するひびわれ形態の整理,トンネル工学報告集,第26巻, I -30,2016.11.
- 13) コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-,公益社団法人日本コンクリート工学会
- 14) 2016年制定トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, 土木学会,丸善出版(株),平成28年8月
- 15) 山田隆昭、佐野信夫、馬場弘二、吉武勇、中川浩二、西村和夫：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準,土木学会論文集 F Vol.63,No.1,86-96,2007.3
- 16) 改定3版コンクリートダム細部技術,(財)ダム技術センター,平成22年7月,pp.28-29
- 17) コンクリートの温度ひびわれ防止指針,(株)間組,昭和61年
- 18) 高山博文、増田康男、仲山貴司、榎村義幸、NarentonYINGYONGRATTANAKUL、朝倉俊弘：トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの発生メカニズムに関する実験的研究,土木学会論文集 F Vol.66,No.1,132-145,2010.3
- 19) 高山博文、増田康男、仲山貴司、重田佳幸、NarentonYINGYONGRATTANAKUL、朝倉俊弘：トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの現地計測・解析と発生抑制法

- の一考察,土木学会論文集F(トンネル工学) Vol.67,No.1,46-61,2011
- 20) W.CPrice、Factors influencing concrete strength, Amer.Concr.Inst, Vol.47,pp.417-432
 - 21) 石田哲也、坂田昇、渡邊賢三、温品達也、矢野英伸：熱可塑性樹脂シート養生によるコンクリートの表層改質,土木学会第69回年次学術講演会,V-059,V-060,V-061,V-063,V-064,V-065,V-066,2014
 - 22) 野々目洋、間中明浩、藤井弘三、高橋俊昭：新開発の湿潤・保温養生マットによるコンクリートの保温養生効果について,土木学会第64回年次学術講演会,V-335,2009
 - 23) 小林雅彦、庄野昭、森島敏之：水分逸散抑制・保温養生シートMTPの養生効果,土木学会第69回年次学術講演会,V-361,2014
 - 24) 打田安宏、山崎学：保水養生粘着テープを用いた覆工コンクリートの長期養生,土木学会第69回年次学術講演会,VI-567,2014
 - 25) U.S.Department of Transportation Federal Highway administration : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements, 2009/12
 - 26) Edward Batty, Nathan Bond, Eleanor Kentish, Alan Skarda : Comparison between sprayed and cast in-situ concrete secondary linings at bond street and farringdon stations, 2016/08
 - 27) 青木俊彦、Stefan CHOMA、端則夫、岩野政浩：スロバキア高速道路トンネルの施工,トンネルと地下, vol.39, No.1, 2008/01

第2章 部分パイプクーリングによるインバート拘束に起因するひび割れ対策

2.1 はじめに

山岳トンネルにおいて、土かぶりの小さい坑口部や、地山条件の悪い区間の覆工は、インバートを設けて断面を閉合し、アーチ効果でトンネル構造物を安定させる。しかし、インバートを施工する区間の覆工コンクリートは、鉄筋コンクリートであることが多く、図-2.1に示すように、コンクリート打設後のセメントの水和熱による内部温度の上昇および下降や、季節による外気温の変動による温度収縮がインバートに拘束されて、貫通ひび割れが発生し、鉄筋腐食による耐久性の低下が懸念されている。

そこで、引張応力の集中する側壁下部中央の範囲のみを限定的に短期間冷却する“部分パイプクーリング (Localized Pipe Cooling、以下部分パイプクーリング)”を、覆工コンクリートのひび割れ抑制対策として適用することを提案した¹⁾。さらに、「国道115号馬館山トンネル工事」の覆工コンクリートに適用して、3次元FEM温度応力解析により抑制効果を定量的に確認し^{2)、3)}、ひび割れの発生を抑制できたことを確認した。

本論文では、“馬館山トンネル”におけるインバートに拘束された覆工コンクリートを対象とし、3次元FEM温度応力解析により、部分パイプクーリングの引張応力集中範囲の応力低減メカニズムの考察および適用時の指標についてまとめた。また、部分パイプクーリングを実構造物へ適用し、覆工コンクリートで計測した内部温度およびひずみを解析条件として取り込み、事後解析を実施してひび割れ抑制の効果を検証した結果について記述する。

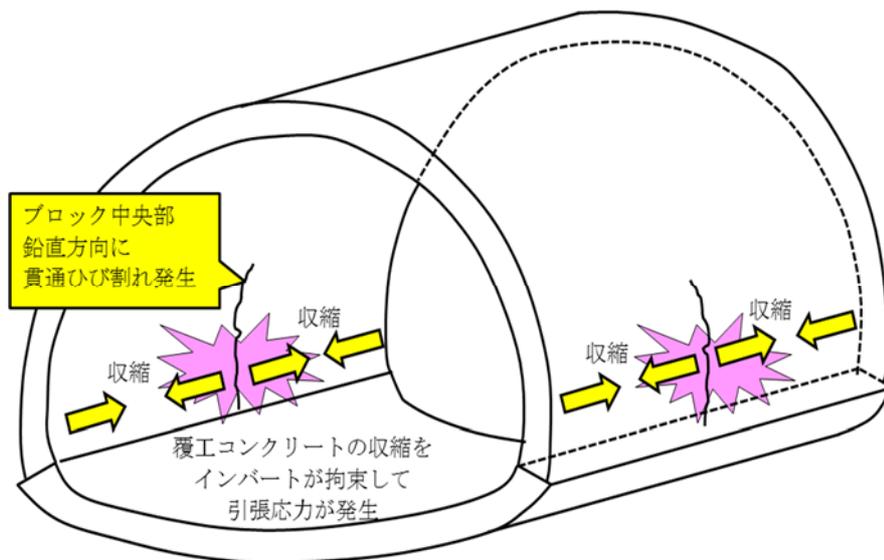


図-2.1 インバート拘束により発生する貫通ひび割れ

2.2 既往の対策と課題

覆工コンクリートに発生するひび割れは、コンクリート硬化時の温度上昇・下降やトンネル内温度の降下による温度収縮、トンネル内湿度の低下による乾燥収縮、コンクリート硬化時の自己収縮等による体積変化を、覆工コンクリート背面やインバートコンクリートが拘束することによって生じる⁴⁾。そのため、ひび割れを抑制するためには、1) 体積変化を抑制する方法、2) 応力を低減する方法、3) 引張抵抗性を向上させる方法が考えられる。

1) 体積変化を抑制する方法

膨張材や収縮低減剤等によりコンクリートの品質や材質を改良する方法⁵⁾がある。また、低発熱系のセメントの使用やプレクーリングにより、コンクリートの水和発熱や打設温度を低減する方法もある。

2) 応力を低減する方法

防水シートやアイソレーションシートの張付けによる吹付けコンクリートとの縁切りを実施する方法⁶⁾がある。また、一度に打設するスパン長の低減やひび割れ誘発目地を設置する方法⁷⁾もある。

3) 引張抵抗性を向上させる方法

ひび割れ補強鉄筋や耐食性に優れたアラミド繊維等の短繊維をコンクリートに混入する方法や耐アルカリガラス繊維等のシートをひび割れ発生が懸念される箇所に設置する方法⁸⁾がある。また、近年は、これまで困難とされてきた覆工コンクリートの養生工法⁹⁾が開発され、初期の確実な給水養生によりコンクリート表層を緻密化させる方法もある。

覆工厚さ 300～500mm 程度の覆工コンクリートにパイプクーリングを適用した事例は少ないが、本論文では、以下の理由により部分パイプクーリングによるひび割れ対策を選定した。

1) 膨張材や収縮低減剤は、通常 1m^3 あたりの添加量を一定として使用するため、部材形状やコンクリート物性値の変更等により、ひび割れ抑制効果の変動することがある。また、異種配合の打重ねが品質上問題となることがあるため、膨張材や収縮低減剤は、覆工コンクリート全体に使用される場合が多く、対策費用が高くなる。部分パイプクーリングは、クーリングパイプの設置位置および通水温度の変更によって、ひび割れ抑制効果を調整できるため、所要の効果を確保しやすい。また、冷却する部位を限定できるため経済的である。

2) 低発熱系のセメントの使用は、初期強度の発現が遅延し、型枠脱型までの養生期間が延長するため、適用が難しい。部分パイプクーリングは、通水期間が2日間程度であり、さらに初期強度発現への影響は小さいことから、型枠脱型等への工程の影響が小さい。

3) プレクーリングによる対策は、コンクリート製造時に練混ぜ水や骨材を冷却する必要があるため、専用の設備がないところでは実施できない。部分パイプクーリングは特別

な大規模の機材が不要なため実施場所を選ばない。

- 4) 一度に打設するスパン長を短くする対策は、覆工コンクリートの打設回数が増加するため、工程的に採用が難しい。
- 5) 引張抵抗性を向上させる方法は、どの技術もひび割れ発生後のひび割れ幅の制御はできるが、ひび割れの発生自体を抑制できない。部分パイプクーリングは、収缩量増加の原因となる部材の温度上昇を低減できるため、ひび割れの発生を抑制できる。

外部拘束による温度ひび割れ対策として、部分パイプクーリングを採用した。主な対策工法と比較した結果を表-2.1に示す。部分パイプクーリングは、(i) ひび割れ抑制効果が高いこと、(ii) 次工程への影響がないこと、(iii) 費用対効果が高いことから選定した。

表-2.1 外部拘束ひび割れ対策¹⁰⁾

| NO. | 対策 | ひび割れ抑制効果*1 | 工程への影響*2 | 経済性*3 | 備考 |
|-----|----------|------------|----------|-------|--------------|
| 1 | ブロック長の低減 | ◎ | × | × | 目地が多くなる。 |
| 2 | 低温期に打設 | ○ | × | × | — |
| 3 | 膨張材の添加 | ○ | ○ | △ | — |
| 4 | 補強鉄筋の設置 | △ | ○ | ○ | ひび割れ幅の制限のみ。 |
| 5 | プレクーリング | △ | ○ | × | 大規模な設備必要。 |
| 6 | パイプクーリング | ○ | ○ | ○ | パイプは事前に設置可能。 |

*1：◎大きい、○やや大きい、×小さい

*2：○影響しない、×遅くなる

*3：○良い、△：普通、×：悪い

2.3 3次元FEM温度応力解析による検討

(1) 3次元FEM温度応力解析の入力条件

部分パイプクーリングの計画を行うにあたり、3次元FEM温度力解析を実施した。その入力条件を表-2.2に示す。入力条件は、2012年制定コンクリート標準示方書設計編に準じた。計画時の解析で想定した打設日および温度条件を表-2.3、解析モデルを図-2.2および図-2.3に示す。

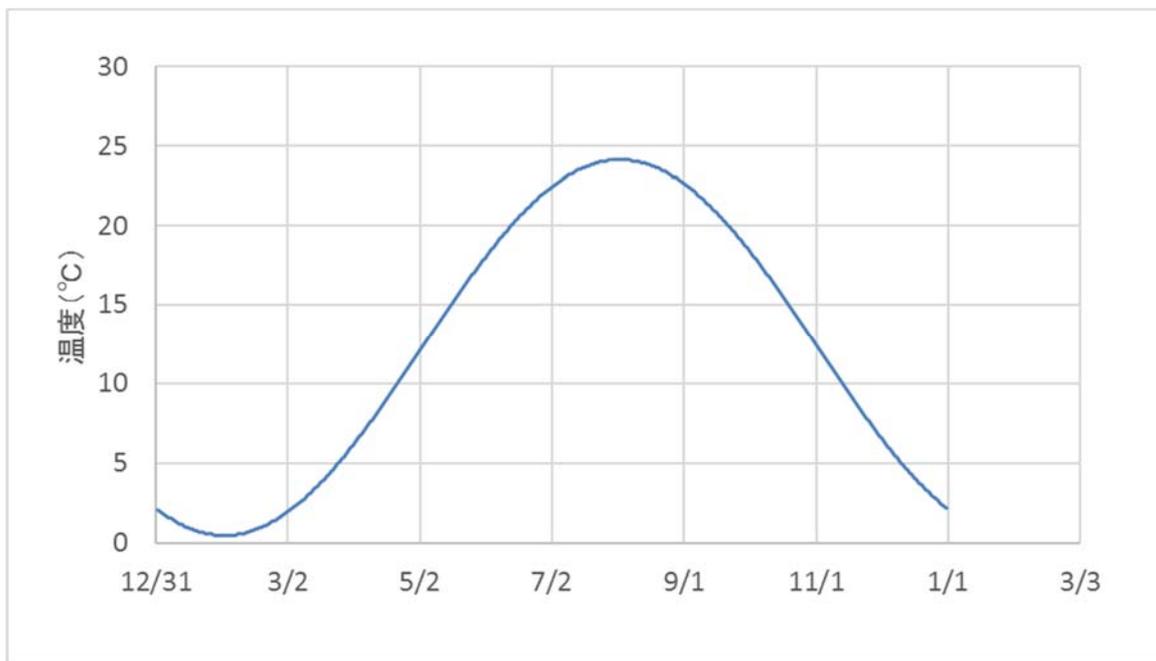
解析モデルは1/4モデルとし、これまでの解析および計測結果の実績から、防水シートおよび地盤Bond要素を取り入れ、吹付けコンクリートや地盤との付着強度を反映させた。解析時間は、2012年制定コンクリート標準示方書設計編では、温度変化が外気温とほぼ平衡状態になるまでの期間を対象に行えばよく、部材厚さが2m以内の場合でおおよそ1ヶ月程度となる。しかし、本論文では、冬期の外気温低下によるひび割れ発生の影響を考慮するため、表-2.3に示すように、2015年3月31日まで解析を実施した。

表-2.2 解析入力値

| 物性値 | 発熱体 | | 非発熱体 | |
|-------------------------------------|--|---------|-------|------|
| | 覆工コン | インバートコン | 防水シート | 地盤 |
| 熱伝導率 (W/m°C) | 2.7 | 2.7 | 0.5 | 3.5 |
| 比熱 (kJ/kg°C) | 1.15 | 1.15 | 2.60 | 0.80 |
| 単位 セメント量 (kg/m ³) | 断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$ | | — | — |
| | 350 | 290 | | |
| 熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C) | 12 | 12 | 12 | 10 |
| ポアソン比 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.25 |
| 有効ヤング 係数 (N/mm ²) | $E_c(t') = \Phi_e(t') \times 6.3 \times 10^3 \cdot f'_c(t')^{0.45}$ $\Phi_e(t')$: 最高温度に達する有効材齢まで 0.42 最高温度に達する有効材齢 + 1 有効材齢以降: 0.65 | | 5 | 1000 |
| 引張強度 (N/mm ²) | $f_{tk}(t') = 0.13 \cdot f'_c(t')^{0.85}$ | | 0.10 | 20 |
| 自己収縮 (μ) | $\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \varepsilon_{sh,\infty} \beta_{sh}(t_e)$ | | — | — |

表-2.3 温度条件（打設日、想定温度）

| 部位 | 打設日 | 外気温（℃） | 打込み温度（℃） |
|----------|-----------|--------|----------|
| インバート1 | 2013/4/1 | 6.1 | 6.1 |
| インバート2 | 2013/4/3 | 6.1 | 6.1 |
| 覆工コンクリート | 2014/8/27 | 21.0 | 24.0 |
| 解析終了 | 2015/3/31 | 6.0 | - |



注) : 外気温は気象庁福島气象台の過去30年間の年平均気温とし、覆工コンクリートの打込み温度は、過去の実績から年平均気温+3℃とした。

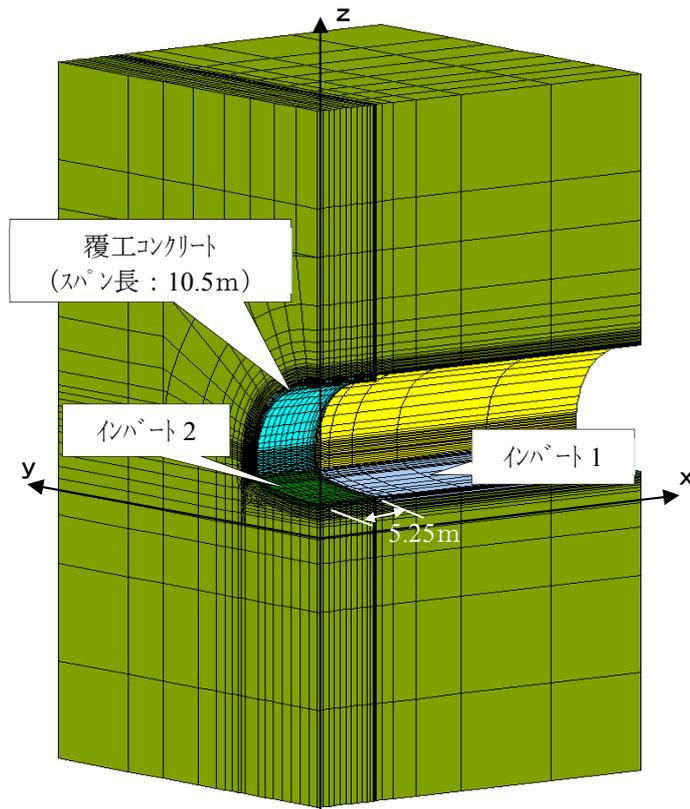


図-2.2 覆工コンクリート解析モデル (1/4モデル)

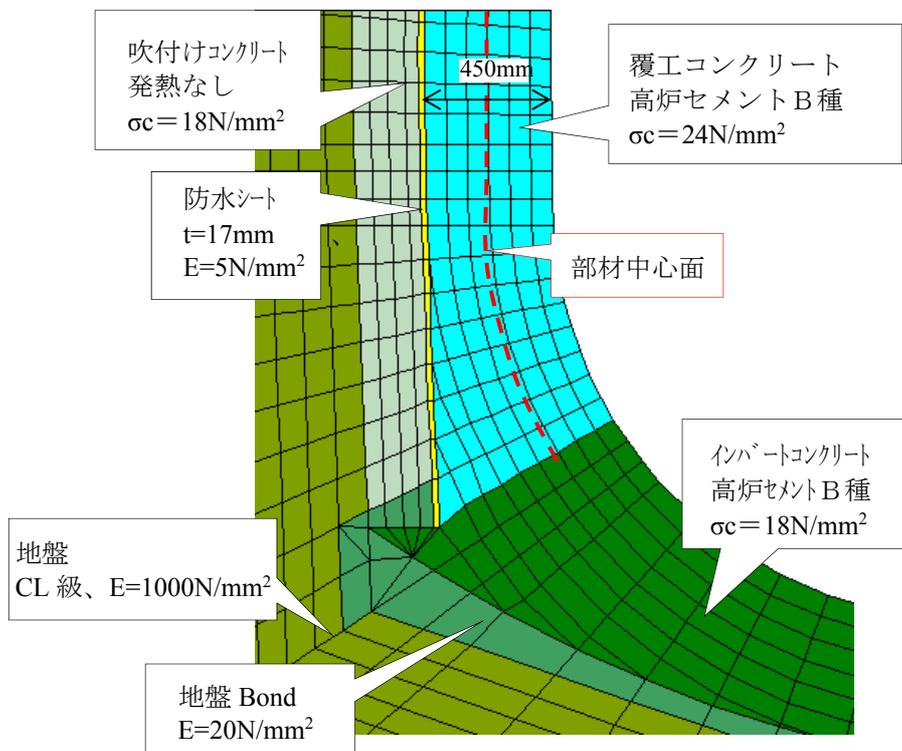


図-2.3 覆工コンクリート解析モデル詳細図

(2) クーリングパイプの配置および通水条件の検討

1) クーリング未実施の場合

クーリングを実施しない場合の部材中心の最高温度および最小ひび割れ指数（以下、指数）分布図を図-2.4 に示す。最高温度分布図は、その要素が経験した最大温度を表示し、指数分布図は、その要素が経験した最小の指数を表示している。

部材中心の最高温度が 44.1℃、指数は 0.95、ひび割れ発生確率（以下、発生確率）は 58% となり、ひび割れの発生する可能性が高い結果となった。

図-2.5 に側壁とインバートの接続部の指数分布の詳細図を示す。指数 1.0 以下の範囲は、高さ方向はインバート天端から 0.8m まで、延長方向はスパン長 10.5m のうち 6.0m となっている。

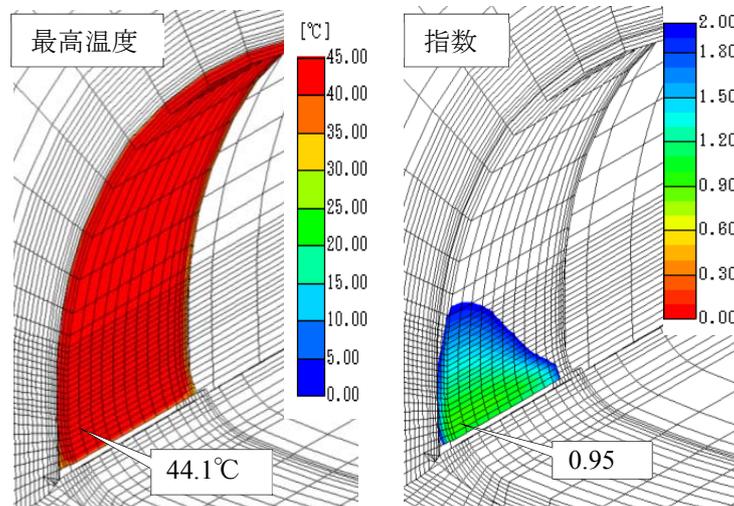


図-2.4 部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(計画時のクーリング未実施時の解析結果)

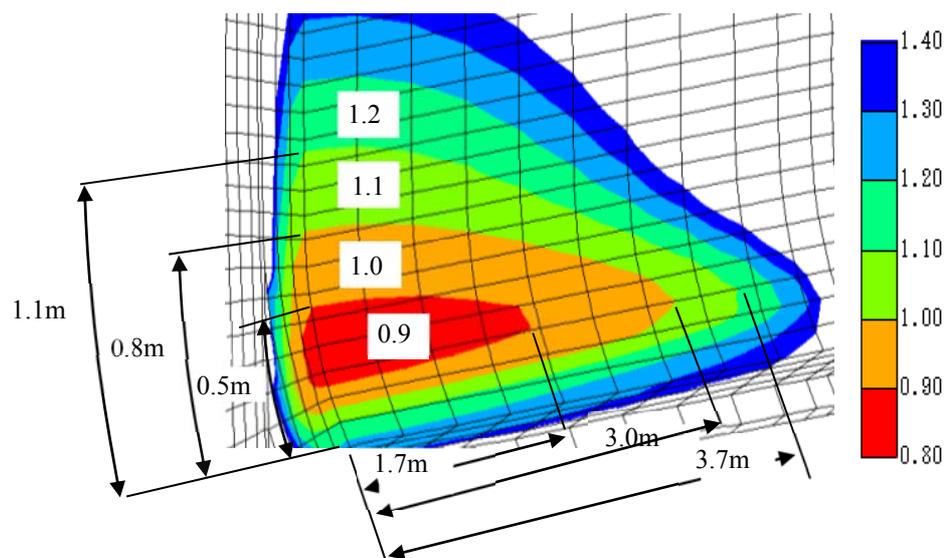


図-2.5 部材中心の最小ひび割れ指数分布詳細図
(計画時のクーリング未実施時の解析結果)

2) 部分パイプクーリング実施の場合

図-2.5 に示すように、指数 1.0 以下の部分である延長方向 6.0m×高さ 0.8m の範囲（延長方向はスパン長の 60%程度、高さ方向は部材厚の 2 倍程度）は、部材中心に発生する引張応力がコンクリートの引張強度を上回る範囲である。そのため、指数 1.0 以下の範囲をクーリングすれば、ひび割れ指数を向上できると考えられる。

図-2.6 に、今回検討するクーリングパイプの配置パターン図を示し、その検討結果およびクーリング条件の一覧表を表-2.4 に示す。表-2.4 中のひび割れ指数は、打設後 2 週間程度の初期の指数と、冬期の外気温が下がってきたときの指数を記載している。

“解析 No.②～④” が、直径 2.5cm、延長 10m のクーリングパイプを側壁下部に 2、3、4 段配置した場合の解析結果である。ひび割れ指数は、2 段配置することでクーリングをしない場合よりも初期で 0.39、冬期で 0.17 改善し、また 2 段から 3 段にすることでさらに初期で 0.2、冬期で 0.12 改善する。しかし 3 段から 4 段にすることで、初期で 0.01、冬期で 0.05 のみの改善効果であることが確認できた。

“解析 No.⑤、⑥”が、直径 5.5cm のクーリングパイプを 2 段および 3 段配置した場合の解析結果である。直径 2.5cm の場合で 2 段および 3 段配置した場合の“解析 No.②、③”と比較すると、2 段の場合はひび割れ指数が 0.04 改善するが 3 段の場合は変わらない。

次に、直径 2.5cm で 3 段配置する場合に、クーリングパイプの延長を短くできないか検討した。“解析 No.⑦、⑧”がその結果である。3 段全ての延長を 10m から 5.5m に短くしてもひび割れ指数は変わらない結果となった。

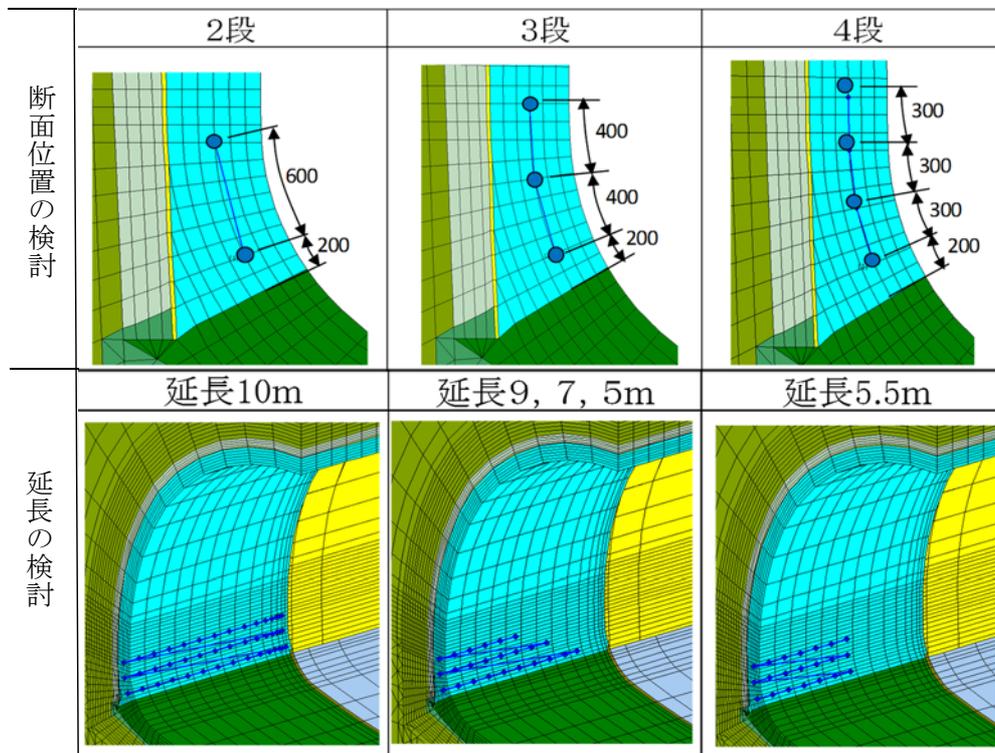


図-2.6 クーリングパイプ配置パターン図（断面および延長）

表-2.4 解析結果一覧表（クーリングパイプ配置検討）

| No. | クーリング条件 | | | | | | | 解析結果 | | |
|-----|-----------|-----------|------------|-------------|--------------------------------|-------------|------------|--------------------|------------------|--------------|
| | パイプ配置パターン | | | 通水条件 | | | | 内部最高 温度 (°C) | ひび割れ指数 [発生確率] | |
| | 段数 | 延長 (m) | 直径 (cm) | 流量 (L/分) | 熱伝達率* (W/m ² °C) | 通水期間 (日) | 水温 (°C) | | 初期 | 冬期 |
| ① | - | - | - | - | - | - | - | 44.3 | 0.75 [91] | 1.00 [50] |
| ② | 2段 | 10 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 40.8 | 1.14 [33] | 1.17 [30] |
| ③ | 3段 | 10 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 37.7 | 1.34 [18] | 1.29 [21] |
| ④ | 4段 | 10 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 36.2 | 1.35 [18] | 1.34 [18] |
| ⑤ | 2段 | 10 | 5.5 | 4 | 161.1 | 2 | 20 | 40.3 | 1.19 [28] | 1.21 [27] |
| ⑥ | 3段 | 10 | 5.5 | 4 | 161.1 | 2 | 20 | 37.5 | 1.34 [18] | 1.29 [21] |
| ⑦ | 3段 | 9,7,5 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 37.8 | 1.33 [19] | 1.29 [21] |
| ⑧ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 37.8 | 1.33 [19] | 1.29 [21] |

* 田辺らの式¹²⁾より算出

直径 2.5cm のクリーニングパイプを延長 5.5m、3 段配置した場合のクリーニング水の流量および温度の影響を確認した。その解析結果を表-2.5 に示す。

“解析 No.⑧～⑩”が流量を 3～4L/min.まで変えたときの解析結果である。ひび割れ指数はほとんど変わらない。次に“解析 No.⑪～⑬”で、水温を 15℃～25℃まで変化させた。その結果、水温が 5℃変化するだけでひび割れ指数が 0.1 以上変化し、水温の影響が大きいことが分かった。

表-2.5 解析結果一覧表（通水条件の検討）

| No. | クリーニング条件 | | | | | | | 解析結果 | | |
|-----|-----------|-----------|------------|-------------|-------------------------------|-------------|------------|--------------------|------------------|--------------|
| | パイプ配置パターン | | | 通水条件 | | | | 内部最高 温度 (°C) | ひび割れ指数 【発生確率】 | |
| | 段数 | 延長 (m) | 直径 (cm) | 流量 (L/分) | 熱伝達率 (W/m ² °C) | 通水期間 (日) | 水温 (°C) | | 初期 | 冬期 |
| ⑧ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 20 | 37.8 | 1.33 [19] | 1.29 [21] |
| ⑨ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 3.5 | 116 | 2 | 20 | 37.9 | 1.32 [19] | 1.28 [22] |
| ⑩ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 3 | 106 | 2 | 20 | 38.0 | 1.30 [20] | 1.28 [22] |
| ⑪ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 3 | 106 | 2 | 25 | 40.0 | 1.18 [29] | 1.18 [29] |
| ⑫ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 4 | 125 | 2 | 25 | 39.9 | 1.19 [28] | 1.19 [28] |
| ⑬ | 3段 | 5.5 | 2.5 | 3 | 106 | 2 | 15 | 36.7 | 1.35 [18] | 1.34 [18] |

内空直径 2.5cm の延長 5.5m の鋼管を図-2.6 に示すように 400mm 間隔で 3 段配置して、48 時間、毎分 4L 通水する条件で解析を実施した。解析では、水温を 20℃ で設定し、熱伝達率は 125W/m²℃ とした^{1), 3)}。図-2.7 に部分パイプクーリングを実施した場合の指数および温度分布図を示す。冷却範囲の最高温度が 37.2℃ となり未実施時と比較すると 6.9℃ 低減した。指数は 1.29 となり、発生確率は 21% となり 37% 改善した。

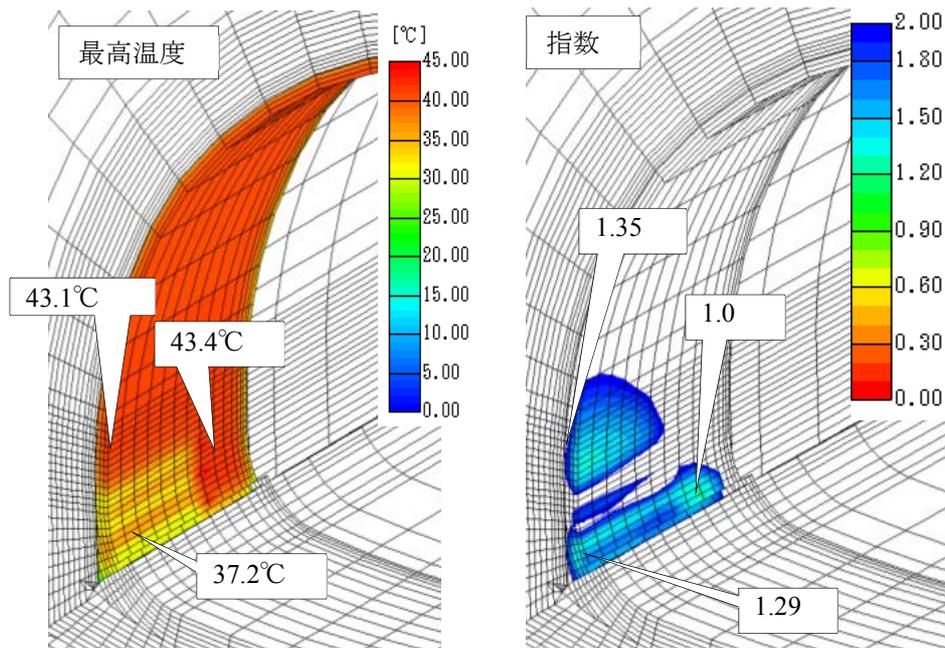


図-2.7 部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(計画時の部分パイプクーリング実施時の解析結果)

(3) 実際の打設日を考慮した事前解析結果

「国道115号馬館山トンネル工事」の覆工コンクリート1～4ブロックにおいて、温度やひずみ等の計測を実施するため、各ブロックの打設日を反映した事前解析を実施し、施工時の管理指標を求めた。その結果を表-2.6に示す。外気温は気象庁福島気象台の平年値から算出し、コンクリートの打込み温度は実績から外気温+3℃とした。

この結果から、事前解析時のひび割れ指数のしきい値を1.25以上(ひび割れ発生確率25%以下)とした場合、ブロック長が7mと短い1ブロックはクーリングを実施しない場合でもしきい値を満足するが、2～4ブロックはクーリングを実施することでしきい値を満足することが確認できた。また、部材内部の最高温度の管理値を得ることができた。

表-2.6 解析結果一覧表(事前解析)

| ブロック No. | 解析条件 | | | | 解析結果 | | |
|-------------|------|---------------------|-------------|--------------|-------------------|------------------------|---------------|
| | 打設日 | クーリング 条件 | 想定温度 (℃) | | 内部最 高温度 (℃) | 上段：ひび割れ指数 下段：[発生確率] | |
| | | | 外気温 | コンクリート 温度 | | 初期*1 | 冬期*2 |
| 1 | 9/12 | なし | 21.3 | 24.3 | 43.5 | 1.25 [23%] | 1.4 [16%] |
| 2 | 9/26 | 3段、L=5.5m 水温=20℃ | 19.2 | 22.2 | 35.9 | 1.25 [23%] | 1.35 [17%] |
| 3 | 10/6 | 3段、L=5.5m 水温=20℃ | 17.5 | 20.5 | 34.3 | 1.26 [22%] | 1.37 [17%] |
| 4 | 10/8 | 3段、L=5.5m 水温=20℃ | 17.1 | 20.1 | 33.9 | 1.27 [21%] | 1.38 [16%] |

*1：打設後2週間での最小ひび割れ指数、

*2：冬期に外気温が下がってきたときの最小ひび割れ指数

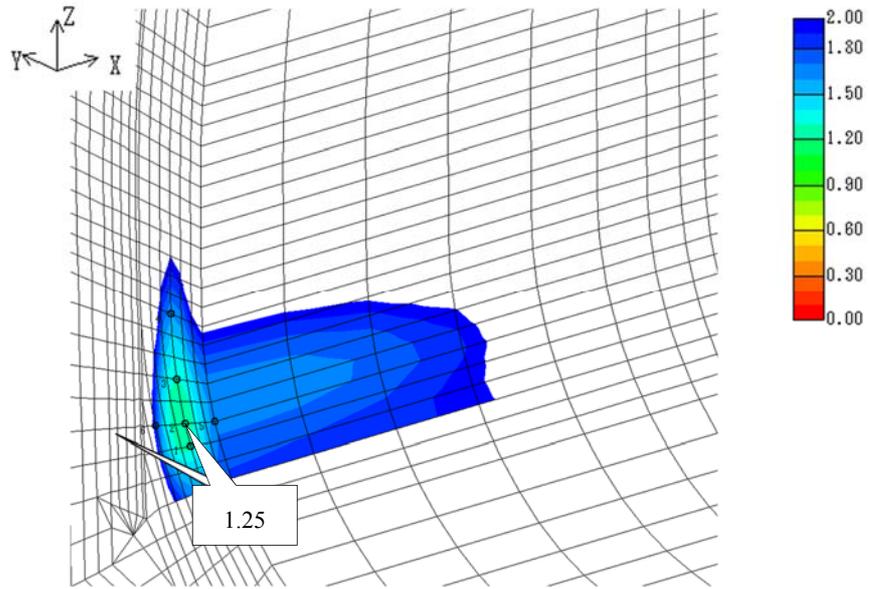


図-2.8 部材中心部の最小ひび割れ指数分布図（1ブロックの事前解析）

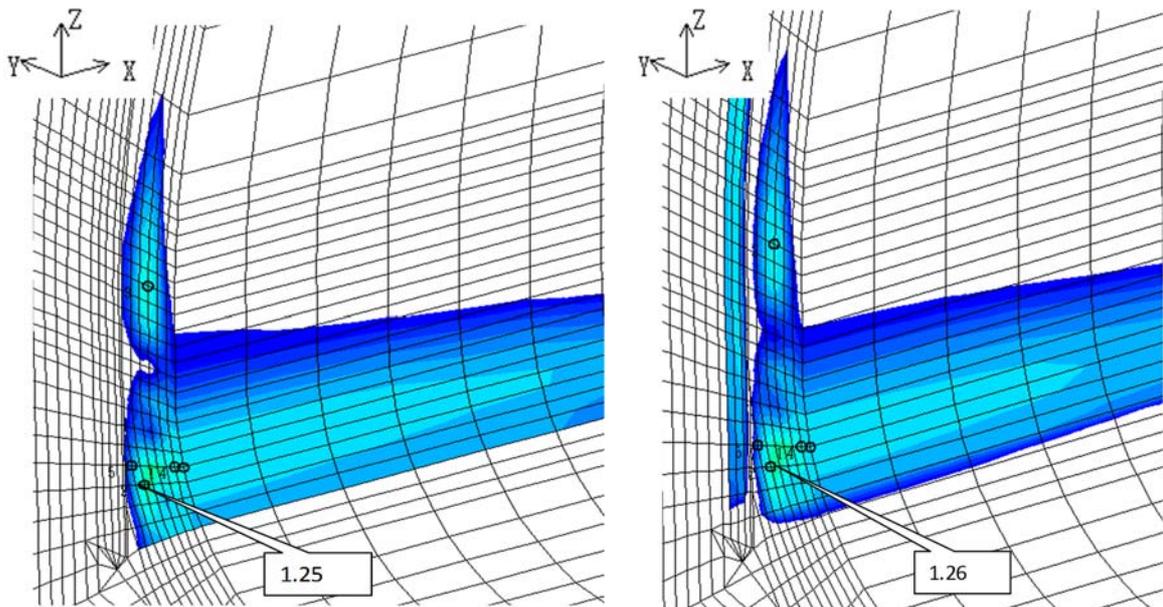


図-2.9 部材中心部の最小ひび割れ指数分布図（2 および 3 ブロックの事前解析）

(4) ひび割れ発生抑制メカニズムの検討

部分パイプクーリングによるひび割れ発生抑制メカニズムを把握するため、インバート天端から SL ライン(参考資料 1 参照)までのブロック長全体に内空直径 2.5cm の延長 10.5m の鋼管を 400mm 間隔で 6 段配置した全体クーリング実施時の解析を行った。通水条件は、部分パイプクーリング実施時と同じである。その結果、**図-2.10** に示すように、部材中心の最高温度は、部分パイプクーリング実施時と同程度の 37.1℃であったが、指数は、1.22 となり部分パイプクーリングに劣る結果となった。

クーリング未実施、部分パイプクーリング実施、全体クーリング実施の 3 ケースの場合の指数が最も低下する位置 (**図-2.4** の指数 0.95、**図-2.7** の指数 1.29、**図-2.10** の指数 1.22 の位置) の材齢 6 日 (8/27~9/2) までの時間ごとのコンクリート部材中心の温度の比較を**図-2.11**、コンクリート引張強度および発生応力の比較を**図-2.12** に示す。

図-2.11 の部材中心温度の比較から、部分パイプクーリングおよび全体クーリングを実施する場合は、クーリング未実施の場合に比較して最高温度を 7℃低減できている。また、部分パイプクーリングおよび全体クーリングを実施する場合においては、通水停止後の材齢 2 日目 (8/29) から、まだ発熱している周囲からの熱の移動および自己発熱により温度降下が緩やかになっている。

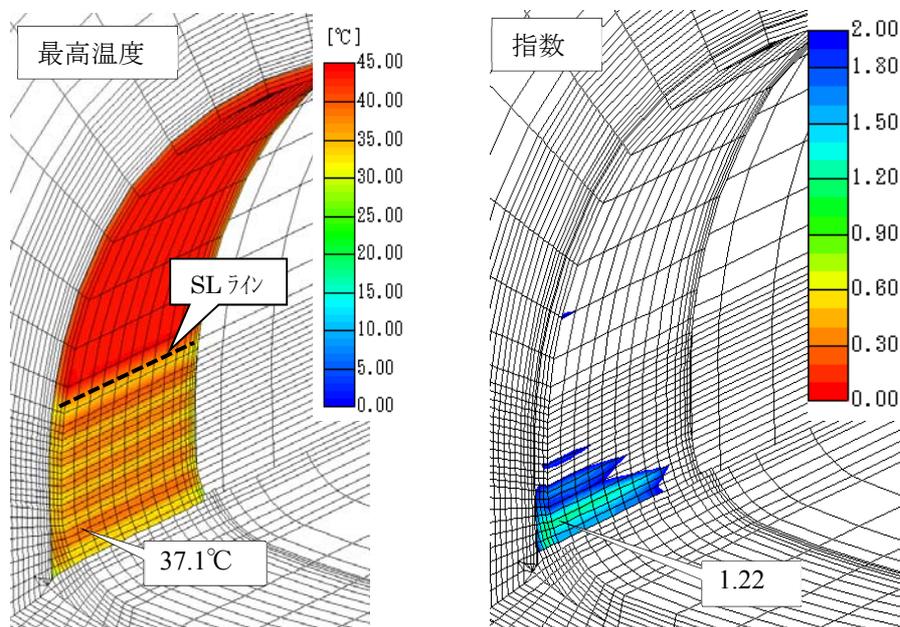


図-2.10 部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(計画時の全体クーリング実施時の解析結果)

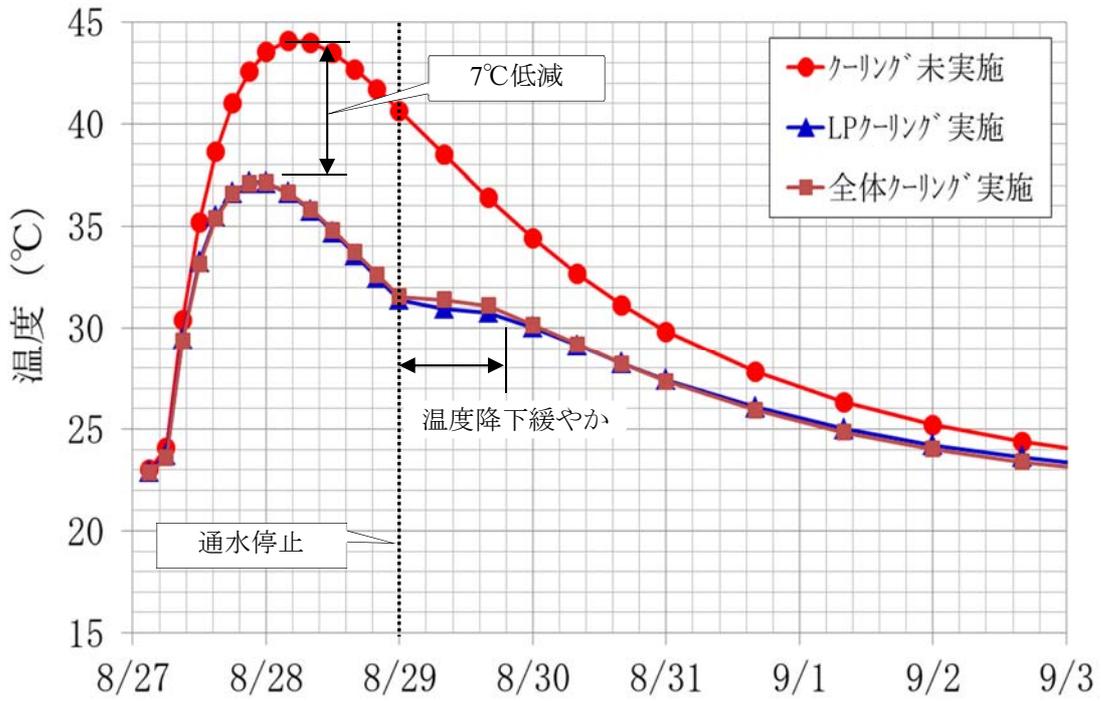


図-2.11 部材中心のコンクリート温度の比較

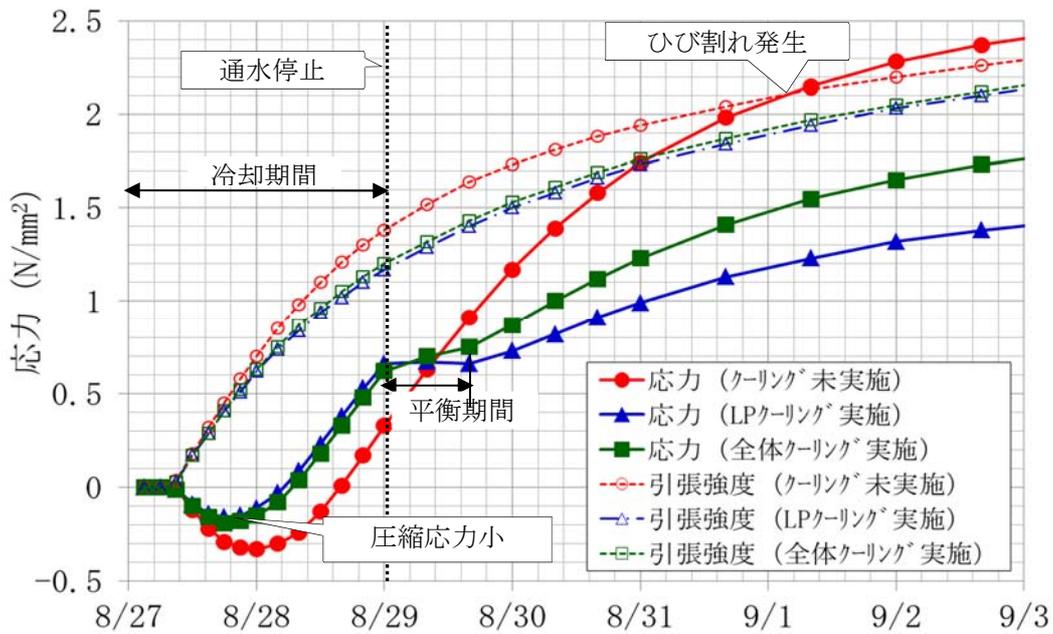


図-2.12 部材中心の発生応力および引張強度の比較

図-2.12 の引張強度および発生応力の比較から、クーリング未実施の場合は、材齢 5 日 (9/1) の時点で、発生する応力がコンクリートの引張強度を上回り、解析上ひび割れが発生する結果となっている。引張強度より応力の発生速度の方が大きいためである。

一方、部分パイプクーリングおよび全体クーリング実施の場合は、材齢 2 日 (8/28) まで通水して冷却しているため、図-2.12 に示すように、膨張による圧縮応力が小さく、クーリング未実施の場合よりも発生する引張応力が大きい。しかし、通水停止後は、引張応力の発生速度が緩和され、ひび割れが発生しない解析結果となっている。

ここで、通水停止後の引張応力の発生速度は、全体クーリングを実施した場合よりも、部分パイプクーリングを実施した場合の方が遅いことが確認できる。これは、通水停止時において、部分パイプクーリングの場合は、まだ発熱している周囲から冷却範囲への熱の供給により、発生する応力が平衡状態となっているためと考えられる。その後の材齢 3 日からは、一度平衡状態となったため、引張応力の発生速度は全体クーリングを実施した場合よりも緩やかになり、ひび割れがさらに発生しない解析結果となっている。

このように、部分パイプクーリングは、水和熱の上昇時期に応力集中範囲を限定して短期間冷却することで、ひび割れ発生の懸念が高い範囲に応力の平衡期間を設け、その後の応力発生速度を低減させるメカニズムによって、ひび割れの発生を抑制できる。覆工コンクリートに限らず、外部拘束の卓越する壁状構造物に適用可能と考えられる。

また、通水期間を 1 日に短縮および 5 日間に延長した解析を実施した。その結果、図-2.13 に示すように、通水期間を 5 日間に延長する方が早期に温度低下するが、図-2.14 に示すように、通水期間中に発生する応力が増加し、コンクリートの引張強度に接近することで、ひび割れが発生しやすくなる傾向が見られた。そのため、通水停止時期は、図-2.13 に示すように最高温度に達した後、通水停止による再上昇が発生しない時で、さらに冷却部以外の発熱が継続している時 (2~3 日程度) と考えられる。

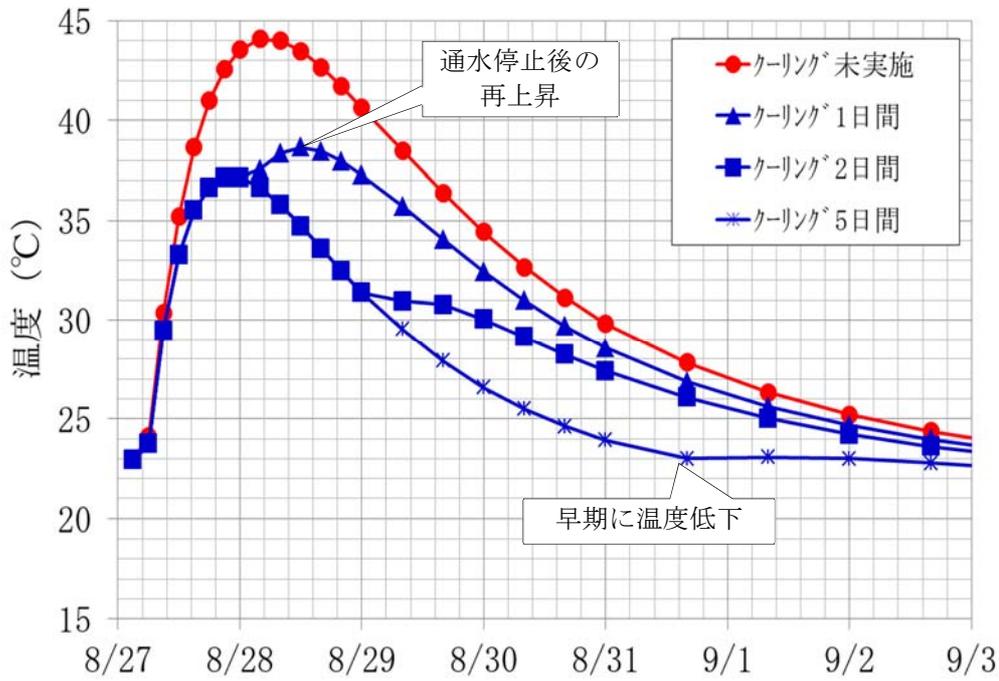


図-2.13 通水期間が部材中心温度に与える影響

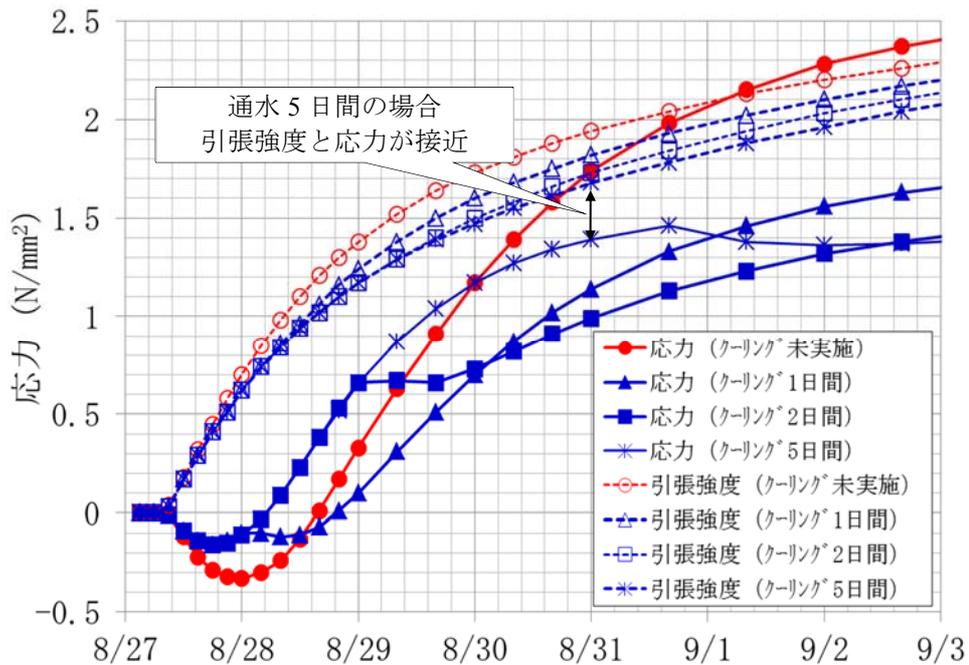


図-2.14 通水期間が部材中心応力および引張強度に与える影響

(5) 部分パイプクーリング適用時の指標

ここで、今回の解析による検討結果から得られた知見より、覆工コンクリートに部分パイプクーリングを適用する場合の指標について以下にまとめる。

1) 冷却範囲

部分パイプクーリングによる冷却範囲は、事前解析において部材中心に発生する引張応力がコンクリートの引張強度を上回る範囲であるひび割れ指数1.0以下の部分である。今回の解析結果から、延長方向はスパン長の60%程度、高さ方向は壁厚の2倍程度冷却すれば効果があると考えられる。

2) 通水期間

部分パイプクーリングによる通水停止は、部材中心が最高温度に達した後、通水停止による再上昇が発生しない時で、さらに冷却部以外の発熱が継続している時と考えられる。今回の解析結果から、打設時から通水開始し、最高温度到達後24時間程度に通水停止すればいいと考えられる。

2.4 現場適用時のシステム検討

(1) 部分パイプクーリングシステムの概要

部分パイプクーリングを「国道115号馬館山トンネル工事」に適用した。その時のシステム概要図を図-2.15に示す。覆工コンクリート左右の側壁内部に、内空直径2.5cm、延長5.5mの鋼製の亜鉛メッキパイプを400mmピッチで3段設置した。打設開始直後から、セントルに設置したサプライタンクから20℃以下の冷水をクーリングパイプに毎分4ℓで送水する。躯体内部のコンクリートの熱を吸収させ、温度上昇した水をリターンタンクに戻し冷却装置にて20℃以下の温度に冷却したのちに、再びサプライタンクに戻し、循環させる。

クーリングパイプの設置状況を写真-2.1および写真-2.2に示す。クーリングパイプの流入口および流出口には、鋼製のフレキシブルホースを設置し、既設のインバートを切欠いて型枠の外に取り出した。

また、クーリング終了後、パイプは無収縮モルタルを圧送して充填した。配合は、W/C=23%とし、フロー値は18±1.5cmとした。フロー値は、地組みしたクーリングパイプに充填する充填試験により選定した（写真-2.3参照）。

充填完了後、流入口および流出口の鋼管を切断し、インバートの切欠き部分を無収縮モルタルで充填した。

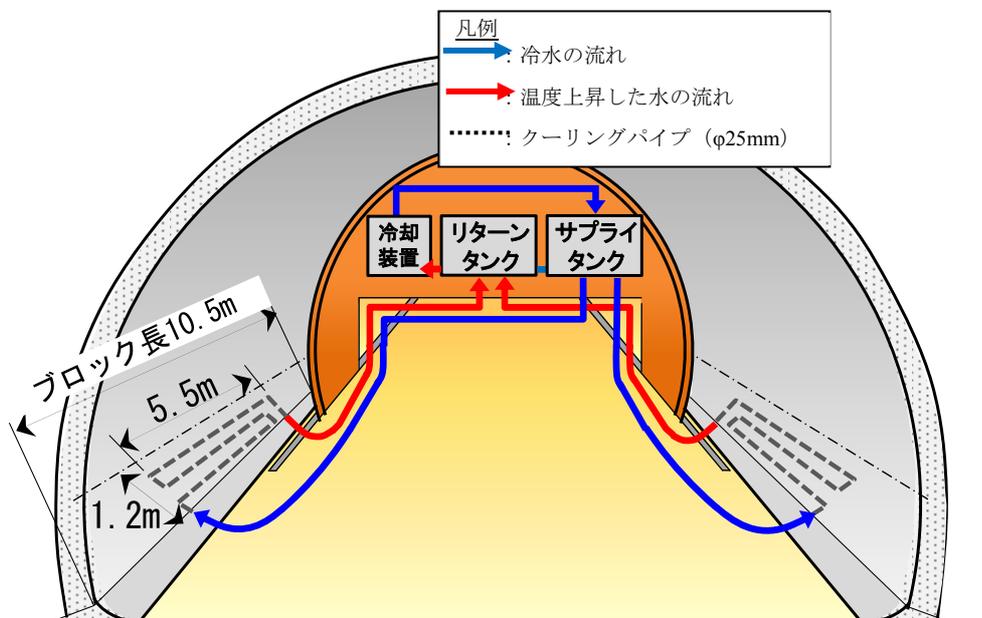


図-2.15 部分パイプクーリングシステム

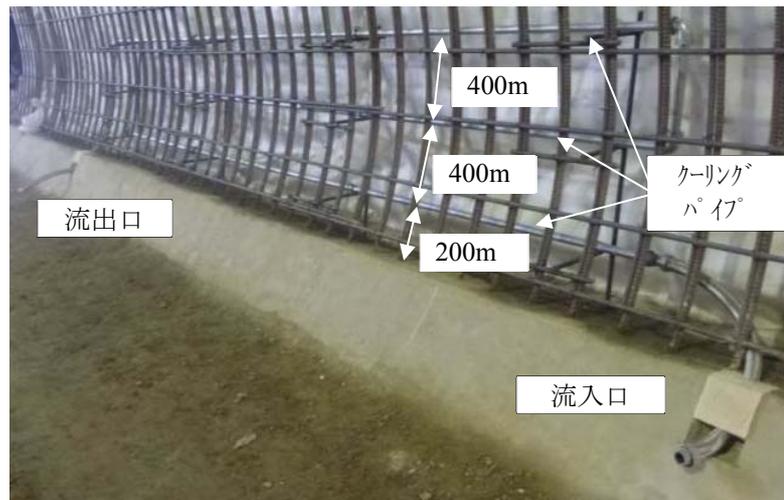


写真-2.1 クーリングパイプ設置状況

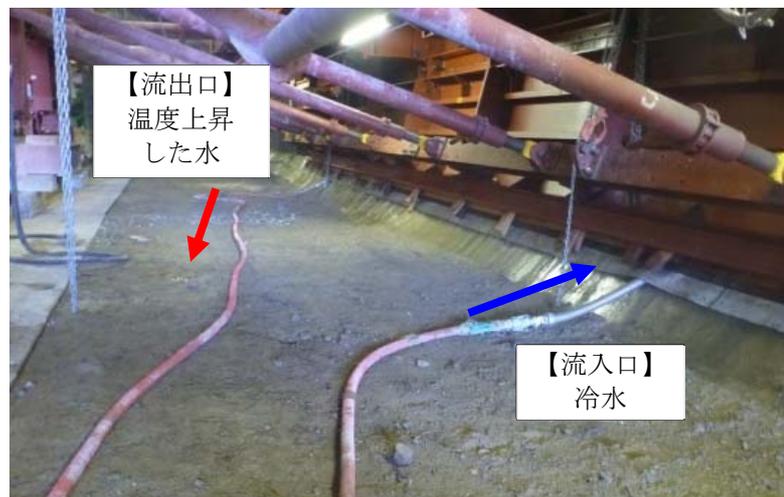


写真-2.2 クーリングパイプ通水状況



写真-2.3 パイプ内の充填状況（充填試験時）

(2) 通水設備の工夫

通水設備は、移動台車に搭載して移動の手間を省き、冷却装置を使用して循環式とすることで給水の手間を省いた。また、流量計および無線型の温度計を使用して、流量および水温の管理をパソコン上で一括管理できるシステムを開発した。



写真-2.4 通水設備

2.5 現場適用効果の確認

(1) 温度測定結果

No.1～No.4 ブロックの温度計測結果のうち、No.2 ブロックの結果を図-2.16 に示す（測定箇所は図-2.17 参照）。その他のブロックの計測を含めた結果の一覧表を表-2.7 に示し、事前解析結果（表-2.6 参照）と比較した。クリーニング水の通水温度は、流出時の温度が解析で想定した 20℃を超えないように管理でき、冷却範囲の内部最高温度（No.3）は、どのブロックも解析値以下に管理できた。そのため、事前解析時と同程度の温度ひび割れ抑制効果があったと考えられる。

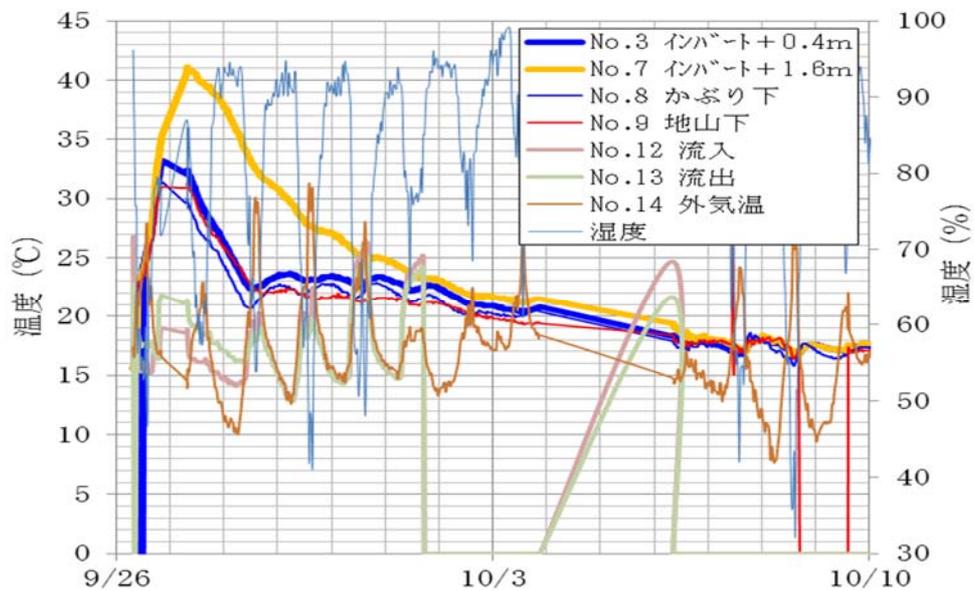


図-2.16 温度測定結果の例（No.2 ブロック）

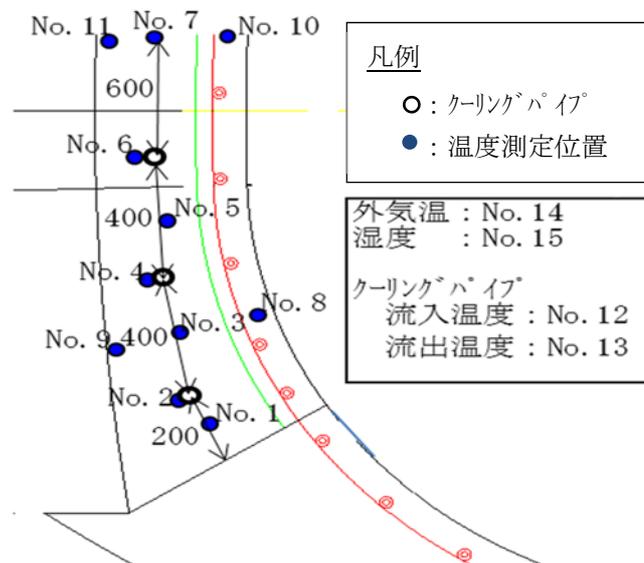


図-2.17 温度計測位置

表-2.7 温度管理結果（事前解析と測定値の比較）

| ブロック No. | 温度（℃） | | | | | | | |
|-------------|--------|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 外気温 | コンクリート 温度 | クーリング水の温度 | | | | 内部最高温度 | |
| | | | 流入時 | | 流出時 | | No. 3 | No. 7 |
| | | | 平均 | 最高 | 平均 | 最高 | | |
| 1 | 21.3 | 24.3 | - | - | - | - | - | 43.5 |
| | [19.5] | [23.5] | - | - | - | - | - | [36.5] |
| 2 | 19.2 | 22.2 | 20 | 20 | 20 | 20 | 35.9 | 40.5 |
| | [19.0] | [21.0] | [15.8] | [19.0] | [18.1] | [21.8] | [33.2] | [41.1] |
| 3 | 17.5 | 20.5 | 20 | 20 | 20 | 20 | 34.3 | 38.3 |
| | [15.0] | [19.5] | [15.2] | [16.2] | [16.8] | [17.8] | [28.2] | [34.8] |
| 4 | 17.1 | 20.1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 33.9 | 37.8 |
| | [12.0] | [16.5] | [15.5] | [17.4] | [17.0] | [18.1] | [27.0] | [32.1] |

*：上段は事前解析値、下段は測定値。

(2) ひずみ測定結果

測定位置を図-2.18、ひずみ計の設置状況を写真-2.5に示す。各計器は、以下のことを目的として設置した。

- 1) 無応力計：コンクリートの温度変化による線膨張係数を測定した。各ひずみ計測位置の温度変化に、無応力計で測定した線膨張係数を乗じたひずみを自由ひずみ ε_f とした。
- 2) ひずみ計：覆工延長方向中心部の内部に、ひずみ計を水平に設置し、拘束された全ひずみ(見掛けのひずみ) ε_m を測定した。

また、拘束ひずみ ε_e は、下記の式により計算した。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_f - \varepsilon_m \quad (1)$$

ただし、 ε_e ：拘束ひずみ

ε_f ：自由ひずみ

ε_m ：全ひずみ（見掛けのひずみ）

測定結果の例を図-2.19 および図-2.10に示す。また、その他のブロックの結果一覧表を表-2.8に示す。ここで、測定された線膨張係数は、示方書設計編の $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ に比較して、小さい値となった。骨材の影響等が考えられる。

また、覆工延長方向のひずみの最大値は、No.2ブロックが最も大きく 120μ となった。スパン長 10.5m の中で、No.2ブロック打設時が、外気温およびコンクリート温度が最も高かったためと考えられる。

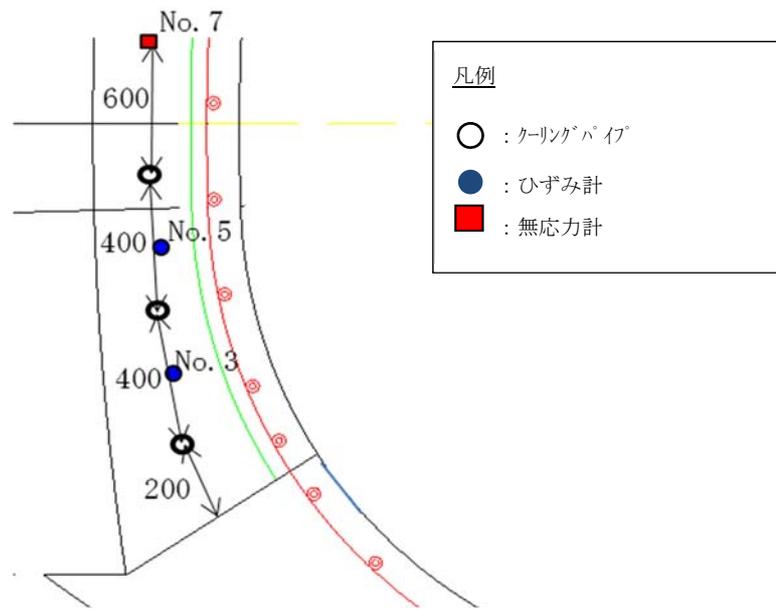


図-2.18 ひずみ測定位置

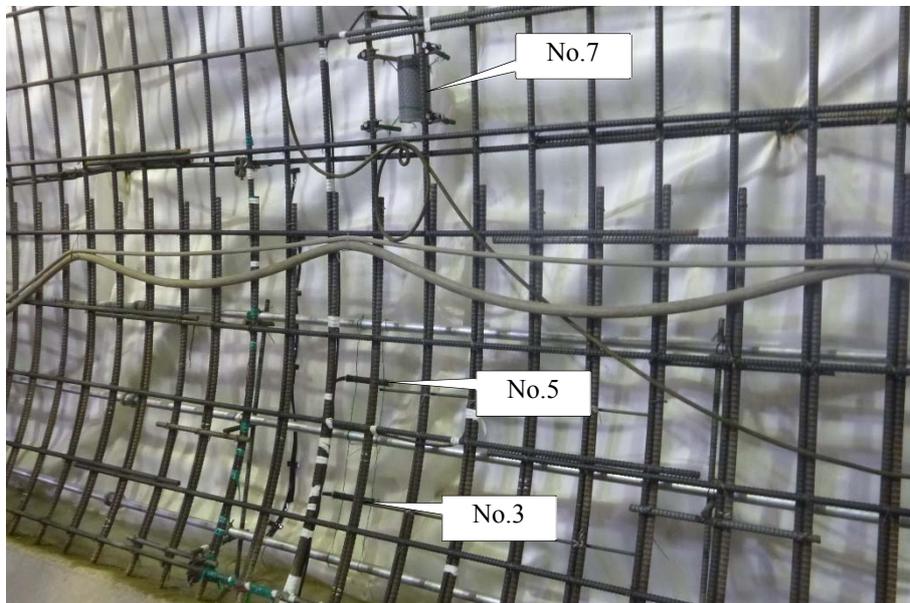


写真-2.5 ひずみ計設置状況

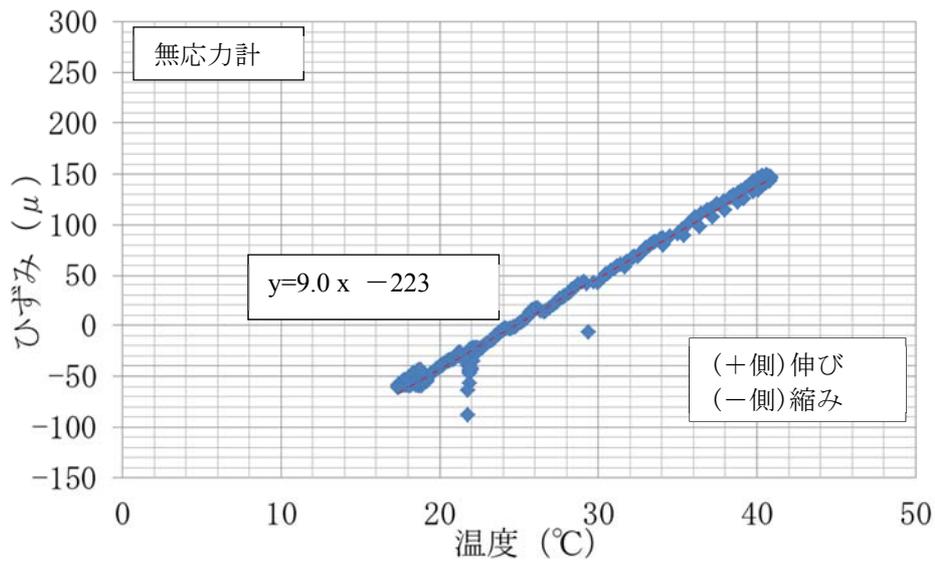


図-2.19 無応力計の測定結果 (No. 2 ブロック)

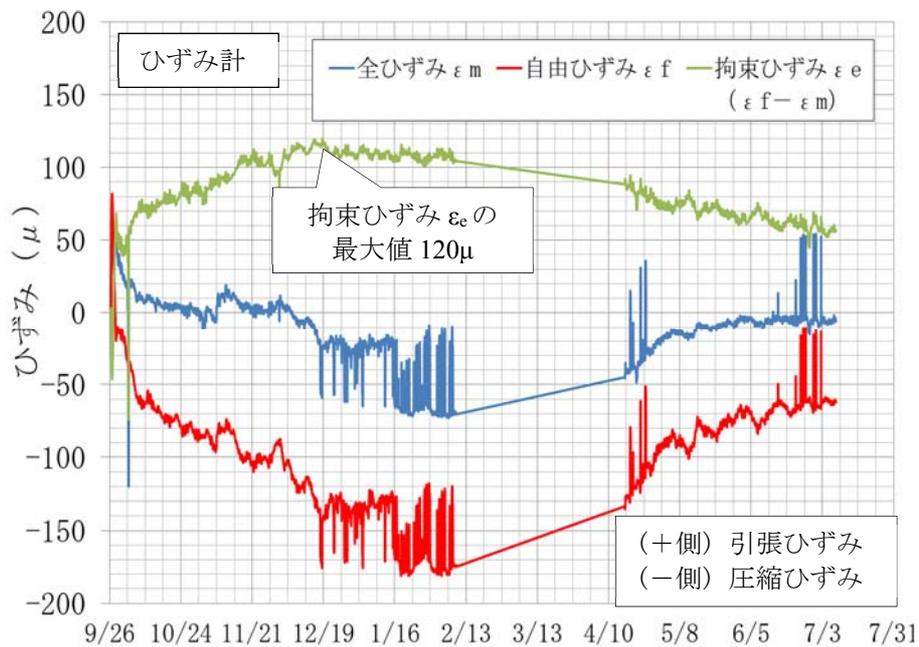


図-2.20 拘束ひずみの測定結果 (No. 2 ブロック)

(3) 事後解析の実施および検証

測定された外気温および打込み温度、表-2.8に示す線膨張係数を反映させた3次元FEM温度応力解析により事後解析を実施し、測定値と比較した結果を表-2.9に示す。

線膨張係数については、解析上の安全率を確保するために、最も値の高い $9.31 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ を採用した。2012年制定コンクリート標準示方書設計編では、高炉セメントB種を使用したコンクリートの線膨張係数は $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であり、今回計測された線膨張係数は $7.39 \sim 9.31 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ と比較的小さい値と考えられる。線膨張係数は、骨材の岩種にも大きく影響を受けることが確認されており、本配合で使用している骨材の岩種が、線膨張係数が低いとされる玄武岩であることが、線膨張係数が小さい1つの原因と考えられる¹²⁾。

また、実測された拘束ひずみの値が最も大きかったNo.2ブロックにおける温度および拘束ひずみの履歴図を、事後解析結果と比較して図-2.21および図-2.22に示す。表-2.9および図-2.21、図-2.22から、事後解析は、今回計測した4つのブロックのいずれにおいても温度およびひずみとも実測値に概ね近似しており、実際の覆工コンクリートの挙動を再現できていることが確認できた。

表-2.8 ひずみ測定結果

| ブロック No. | 線膨張係数 ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) | 最大拘束ひずみ ϵ_e ($\times 10^{-6}$) |
|-------------|--|--|
| 1 | 9.31 | 82 |
| 2 | 9.01 | 120 |
| 3 | 7.39 | 78 |
| 4 | 7.67 | 71 |

表-2.9 測定値と事後解析値の比較

| ブロック No. | 種別 | 最高温度 ($^\circ\text{C}$) | | 最大拘束ひずみ ϵ_e ($\times 10^{-6}$) |
|-------------|-----|---------------------------|-------|---|
| | | No. 3 | No. 7 | |
| 1 | 計測値 | - | 36.5 | 82 |
| | 解析値 | - | 39.2 | 72 |
| 2 | 計測値 | 33.2 | 39.9 | 120 |
| | 解析値 | 32.9 | 39.1 | 121 |
| 3 | 計測値 | 28.2 | 34.6 | 78 |
| | 解析値 | 29.2 | 34.9 | 80 |
| 4 | 計測値 | 27.0 | 32.1 | 71 |
| | 解析値 | 28.3 | 33.5 | 77 |

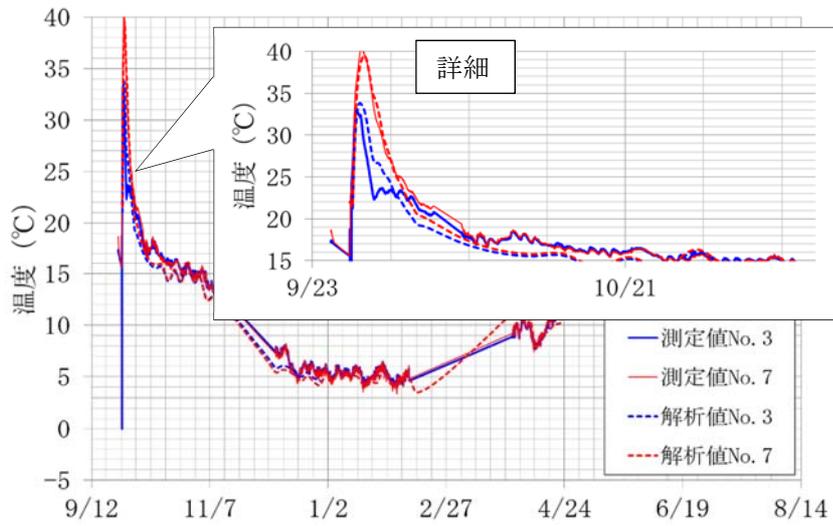


図-2.21 測定値と事後解析値の比較（温度）



図-2.22 測定値と事後解析値の比較（拘束ひずみ）

(4) ひび割れ抑制効果の確認

今回の事後解析結果の部材中心での指数および同条件で実施したクーリング未実施の場合の指数を表-2.10に示す。また、No.2ブロックの事後解析時の最高温度分布図および指数分布図を図-2.23、No.2ブロックのクーリング未実施の場合の最高温度分布図および指数分布図を図-2.24に示す。この結果、部分パイプクリーニングを実施することにより、全てのブロックについて指数が0.2以上改善し、発生確率が20%以上改善できた。

表-2.10 事後解析でのひび割れ抑制効果の確認

| ブロック No. | クーリング 実施の 有無 | 最高温度 (°C) | | 最小 ひび割れ 指数 | ひび割れ発 生確率 (%) |
|-------------|--------------------|--------------|------|------------------|---------------------|
| | | No.3 | No.7 | | |
| 1 | 未実施 | - | 39.2 | 1.27 | 23 |
| 2 | 実施 | 32.9 | 39.1 | 1.10 | 37 |
| | 未実施 | 38.8 | 39.8 | 0.89 | 68 |
| 3 | 実施 | 29.2 | 34.9 | 1.26 | 23 |
| | 未実施 | 34.7 | 35.7 | 1.00 | 50 |
| 4 | 実施 | 28.3 | 33.5 | 1.23 | 25 |
| | 未実施 | 33.2 | 34.1 | 1.01 | 48 |

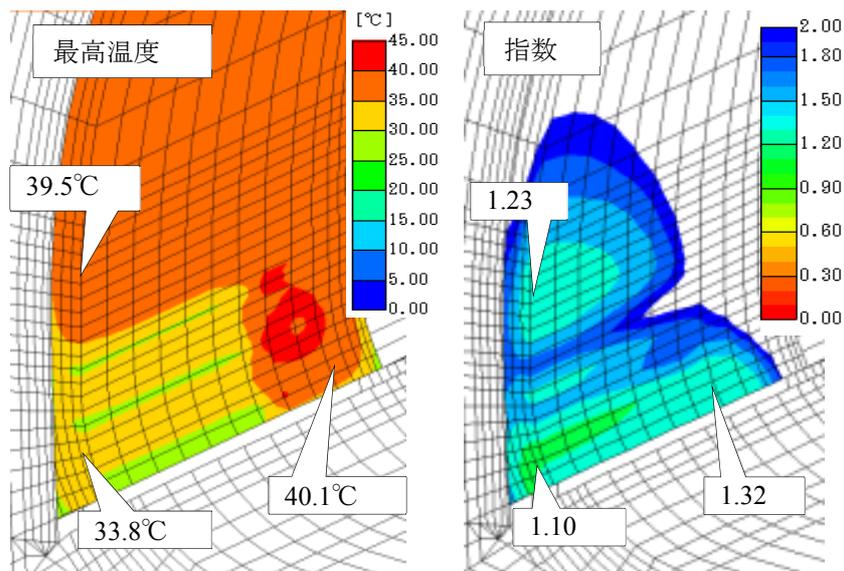


図-2.23 部材内部の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(事後解析、部分パイプクリーニング実施)

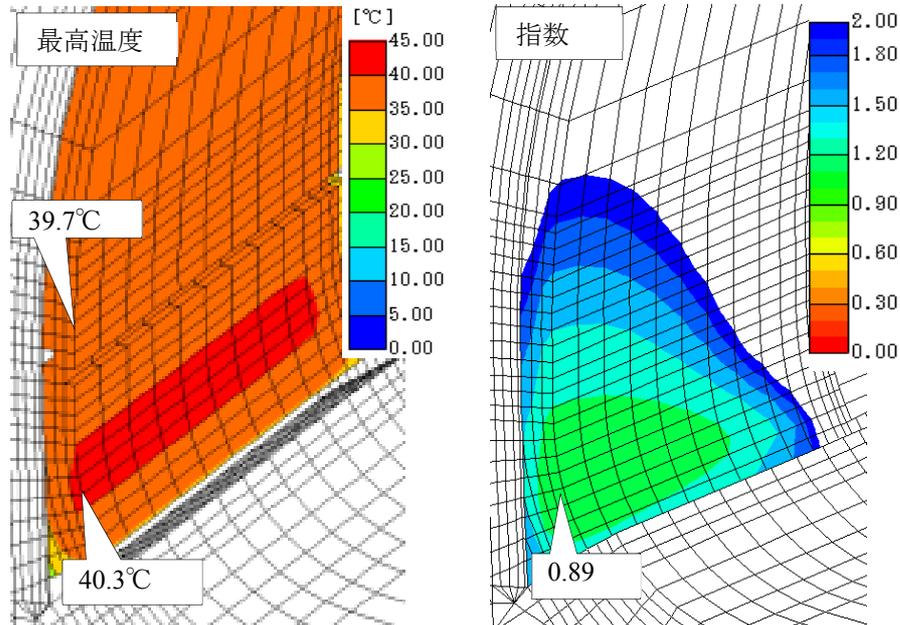


図-2.24 部材内部の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(事後解析の条件でクリーニング未実施の場合を想定)

部分パイプクリーニング未実施と実施時の場合の2ブロックのひび割れ指数分布図の経時変化を図-2.25に示す。

材齢2日(9/28)の通水停止直後までは、部分パイプクリーニングを実施している方が側壁下部のひび割れ指数が低い。これは、図-2.12にも示すように、初期の温度上昇による膨張が小さいため、早期に引張応力が作用するためと考えられる。

その後、内部温度が降下途中の材齢3日(9/29)では、未実施の場合は温度降下とともに引張応力が増加することでひび割れ指数が低下するが、実施時の場合は周囲からの熱の移動により温度降下が緩やかになり引張応力が平衡状態となることで、ひび割れ指数が改善している。

ただし、指数は改善されているが、実施時の材齢12日(10/8)のひび割れ指数分布図から、指数の低い箇所が合計3箇所発生していることが確認できる。冷却範囲に熱が移動することで引張応力が増加した箇所が発生した。

また、ひび割れ指数が最も低下する材齢3ヶ月(12/15)においても、部分パイプクリーニング実施時の材齢初期でのひび割れ指数の改善効果が確認できる。

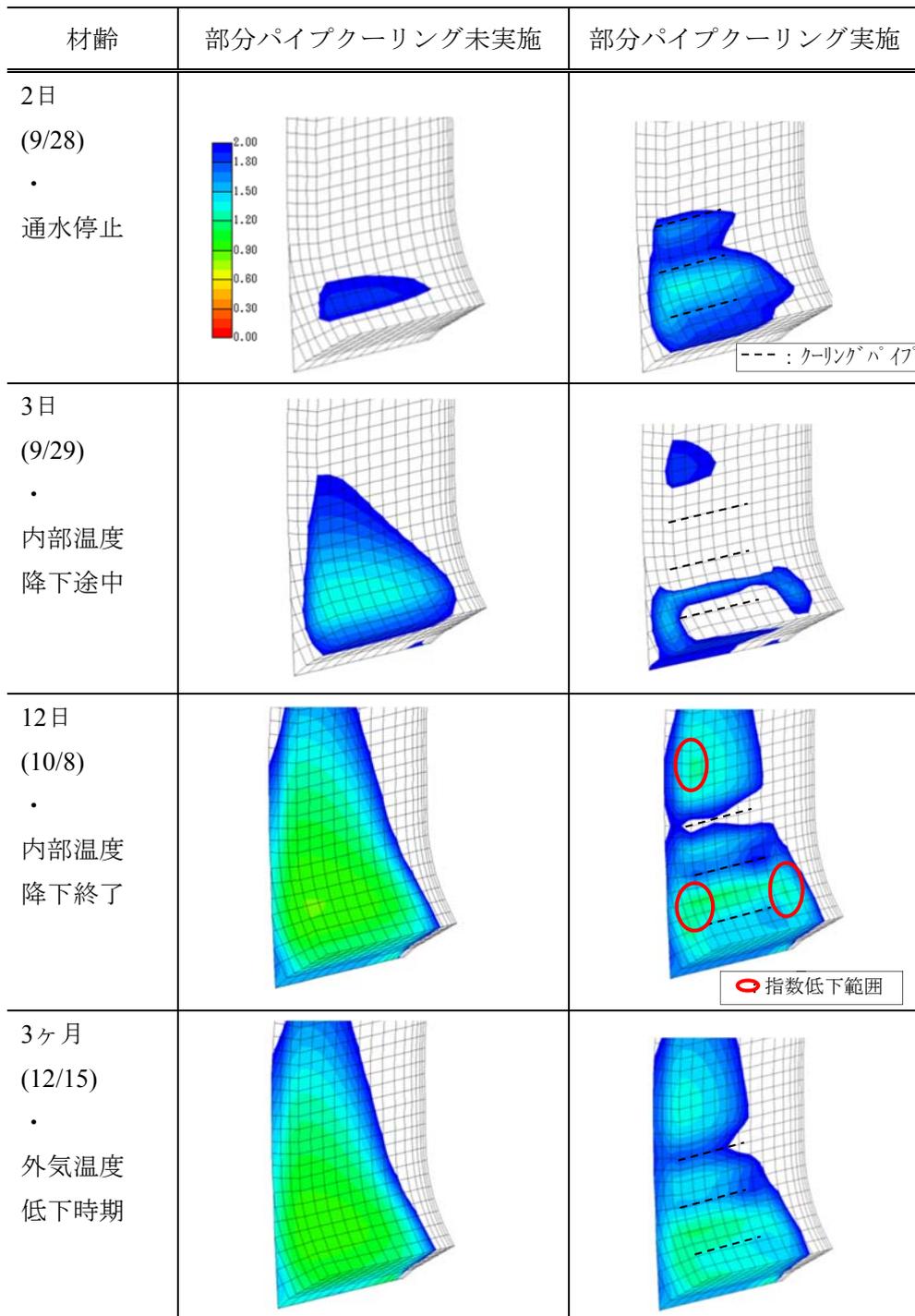


図-2.25 部分パイプクーリング未実施時と実施時の部材中心部のひび割れ指数分布図の経時変化 (No. 2 ブロック)

(5) ひび割れ発生状況

馬館山トンネル工事にて、2014年9月～2014年11月の期間に打設した15ブロックにて、部分パイプクーリングを実施した。その結果、2014年2月の調査ではひび割れは発見されなかったが、2015年11月の調査（打設後2回目の冬期）では、スパン中央に幅0.1mm程度以下の微細な鉛直方向のひび割れが7ブロックにて確認された。

これらのひび割れの発生要因は、温度測定結果および2回目の冬期に発生したことから、冬期の温度低下による表面の温度収縮および長期の乾燥収縮の2つが主要因と考えられる¹⁰⁾。これにより、覆工コンクリートの発熱に起因する温度収縮により発生する貫通ひび割れは、部分パイプクーリングにより抑制効果があったと考えられる。

2.6 まとめ

今回の開発および現場への適用により得られた知見を以下に示す。

1) 部分パイプクーリングの特長

部分パイプクーリングは、インバートの拘束により発生する貫通ひび割れ対策として、他の工法と比較して、以下の点で優れている。

- ・ クーリングパイプの設置位置や通水条件等の変更によって、ひび割れ抑制効果を調整できるため、所要のひび割れ抑制効果を得ることができる。
- ・ 冷却する部位を縮小できるため、対策費用が経済的である。
- ・ 打設翌日に脱型可能なため、導入による工程への影響は小さい。
- ・ 特別な機材を必要としない。

2) ひび割れ抑制のメカニズム

部分パイプクーリングは、水和熱の上昇時期に応力集中範囲を限定して短期間冷却することで、ひび割れ発生の懸念が高い範囲の引張応力を低減させ、その後の応力発生速度を低減させるメカニズムによって、ひび割れの発生を抑制できる。

3) 部分パイプクーリングの適用仕様

今回の覆工コンクリートの条件に類似する場合、有害なひび割れの発生抑制を目的として、部分パイプクーリングを適用する場合の指標は、以下とする。

- ・ 目標とする指数は、実施工実施前の事前解析時で1.25以上。
- ・ 冷却範囲は、事前解析時に指数1.0以下となった範囲（延長方向はスパン長の60%程度、高さ方向は壁厚の2倍程度）。
- ・ 通水の停止は、部材中心が最高温度に達し、冷却部以外の発熱が継続している時（最高温度到達後24時間以内）。

4) 改善効果

覆工コンクリートの実施工に適用したときのひび割れ抑制効果は、計測された内部温度およびひび割れを取り込んだ事後解析の結果、指数が0.2程度改善し、発生確率が20%以上改善した。

5) ひび割れ防止効果

部分パイプクーリングを適用することで、幅0.2mm以上の貫通ひび割れを防止することができた。

参考文献

- 1) 新居秀一、荒井匠、白岩誠史、表康弘：部分パイプクーリングによる覆工コンクリートの温度ひび割れの解析的検討，土木学会第70回年次学術講演会,VI-652, pp.1303-1304, 2015.09
- 2) 川中政美、高橋拓真、白岩誠史、表康弘：覆工コンクリートの温度ひび割れに対する部分パイプクーリングの適用,土木学会第70回年次学術講演会,VI-651,pp.1301-1302, 2015.09
- 3) 白岩誠史、高橋拓真、川中政美、佐藤正：覆工コンクリートへの部分パイプクーリングの適用とその効果確認，コンクリート工学年次論文集,Vol.38, No.1,2016.07
- 4) 土木学会：2006年制定トンネル標準示方書山岳工法.pp.99-101.2006
- 5) 平川泰之、竹下永造、永久和正、橋爪正博：膨張材を使用したトンネル覆工コンクリートのケミカルプレストレス量の評価.コンクリート工学年次論文集, Vol.32,No.1,pp.503-508,2010.07
- 6) 日本トンネル技術協会,NATM2次覆工の設計施工に関する調査研究報告書(国鉄大阪工事局委託),1983
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー102 トンネルコンクリート施工指針(案),pp.133,2000.07
- 8) 郭度連、中出睦、杉野雄亮：各種ひび割れ低減材料の効果に関する実験的検討,プレストレストコンクリート技術協会第20回シンポジウム論文集,pp.537-540,2011.10
- 9) Seishi Shiraiwa、Kazuto Fukudome、Atsushi Saito、Toshinari Hayashi : Effects of Improving Endurance of Concrete Structures by Wet Curing System, Journal of Advanced Concrete Technology,Vol.13, pp.155-162, 2015
- 10) 白岩誠史、高橋拓真、川中政美、佐藤正：覆工コンクリートの環境温度変化および乾燥収縮による表面ひび割れについて,土木学会第71回年次学術講演会,VI-439,pp.877-878 2016.09
- 11) 田辺忠顕、山川秀次、渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析,土木学会論文集,第343号,pp.176,1984年3月
- 12) 日本コンクリート工学会，コンクリート技術の要点'17, 2017

第3章 アクアカーテンを用いた表層の緻密化による耐久性向上対策

3.1 はじめに

型枠内に打込まれたコンクリートは、日平均気温や用いたセメントの種類に応じて標準的な湿潤養生期間が決められている。また、型枠を取りはずした後の湿潤養生方法としては、シート養生や養生剤の塗布といった水分の蒸発を抑制する水分逸散抑制養生方法がとられるが、外部からコンクリートに水分を供給することはできない。

セメントの水和を有利に進行させるためには、生成される水和物間の隙間に水が満たされていることが理想であり、外部から十分な水を供給することが、コンクリートの強度増進や密実性の向上に役立つ。スラブ上面やダム等のマスコンクリートの露出面などは、湛水養生や水を含ませた養生マットの敷設などが容易であることから給水養生が可能である。しかし、トンネル覆工コンクリート内面や型枠を取りはずした鉛直面や傾斜面での給水養生は、極めて困難とされている。

今回開発したアクアカーテン養生システムは、吸引によって養生シートをコンクリート面に貼り付けるため、湿潤養生が難しかったトンネルの覆工コンクリートだけでなく壁や柱にも適用できる。また、外部から水分供給も可能であるため、コンクリート構造物を水中養生するのと同じ効果が得られるものである。なお、アクアカーテン（AQUA CURTAIN）は、特許工法（5091167号、発明の名称：コンクリートの養生装置と養生方法）であり、商標登録（第5360643号）を受けた養生工法である。

本養生方法は、型枠を取りはずした後、できる限り長期間給水養生を継続したい場面で活用されることが期待される。その中でも、コンクリート打込み後12～24時間程度で型枠を取りはずすトンネル覆工コンクリートの養生には特に適している。また、覆工コンクリートでは、近年高炉スラグを混合した混合セメントの使用が主流になっているが、外気の影響を受けやすい坑口付近では日平均気温が低い時期には湿潤養生期間を相当長くする必要がある。

アクアカーテンによる養生は、壁面や柱および覆工等のコンクリート構造に対し、安定的に水膜を形成させ養生水を供給できる。

ネビルは、コンクリートに給水を行う方法とコンクリートから水が失われるのを防ぐ方法とに養生方法を分類¹⁾し、それぞれ湿潤養生および膜養生と表現している。また、その中で各養生方法の原理について考察を加えている。ネビルの分類したものを図化し、これにアクアカーテンによる養生方法を加筆修正したものを図-3.1に示す。

また、コンクリート標準示方書²⁾では、表-3.1に示すように養生を目的別に分類し、その目的を湿潤に保つこと、温度を制御すること、および有害な作用に対して保護することの3項目に分類している。

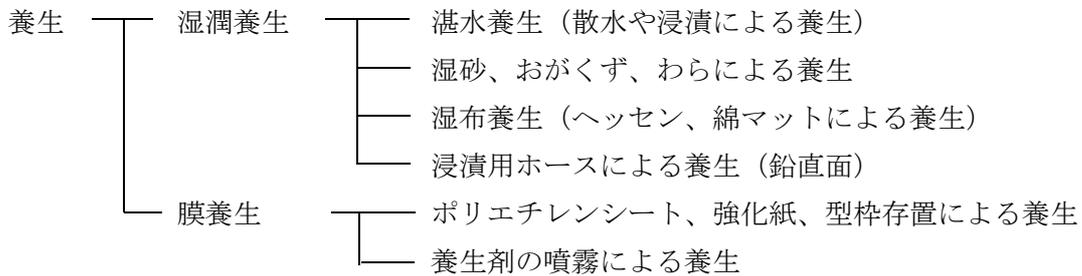


図-3.1 ネビルの養生分類

表-3.1 養生の基本²⁾

| 目的 | 対象 | 対策 | 具体的な手段 |
|-------------------|----------|-------------|------------------------|
| 湿潤状態 に保つ | コンクリート | 給水 | 湛水、散水、湿布、養生マット等 |
| | 全般 | 水分逸散抑制 | せき板存置、シート・フィルム被覆、膜養生剤等 |
| 温度を 制御する | 暑中コンクリート | 昇温抑制 | 散水、日覆い等 |
| | 寒中コンクリート | 給熱 | 電熱マット、ジェットヒータ等 |
| | | 保温 | 断熱性の高いせき板、断熱材等 |
| | マスコンクリート | 冷却 | パイプクーリング等 |
| | | 保温 | 断熱性の高いせき板、断熱材等 |
| 工場製品 | 給熱 | 蒸気、オートクレーブ等 | |
| 有害な作用に対 して保護する | コンクリート全般 | 防護 | 防護シート、せき板存置等 |
| | 海洋コンクリート | 遮断 | せき板存置等 |

3.2 アクアカーテンの仕組み

本システムは、養生シート、吸引装置、給水装置から構成される。鉛直壁面にアクアカーテンを適用する場合のシステム概要図を図-3.2 に示す。養生シートとコンクリート表面の間の空気を、吸引機により吸出し減圧することで、コンクリート面に養生シートを密着させ、その間に給水を行いコンクリート表面に水膜を形成させるものである。

アクアカーテン養生システムの構成は、図-3.3 に示すように養生シート、給水ホース、給水ポンプ、給水タンク、吸引機、吸引口などからなっている。養生水は、所定量の水量を貯めた給水タンク内の養生水を給水ポンプにより給水管、給水ホースまで汲み上げ、給水ホースから自然流下させる。流下した養生水が養生シート下部から流出しないように、給水量を調整する。

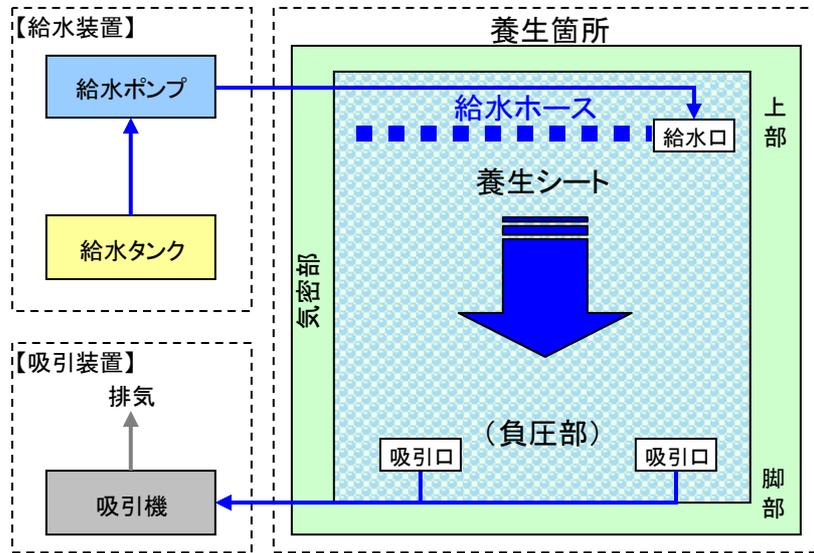


図-3.2 アクアカーテン養生システムの構成

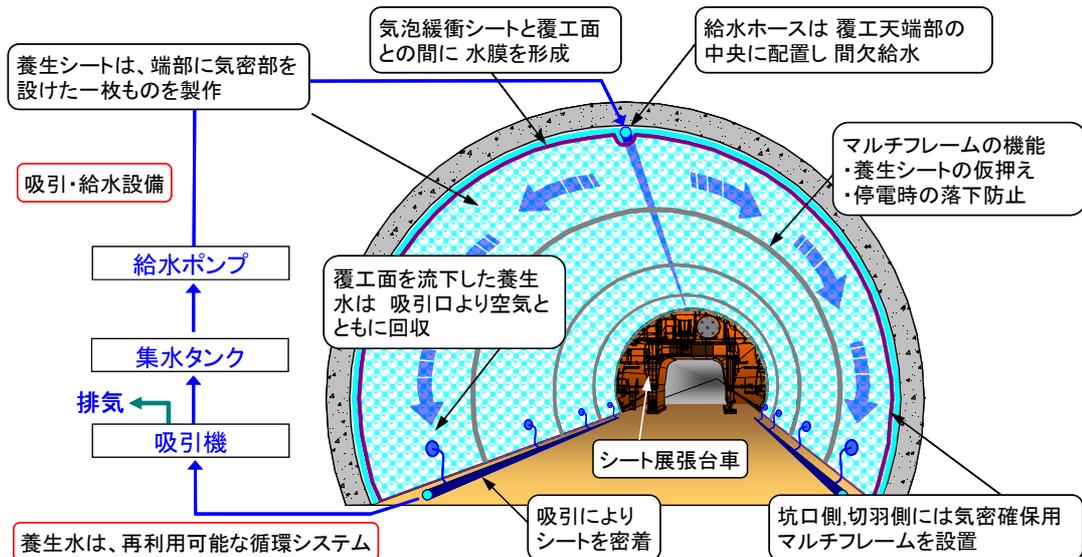


図-3.3 トンネルでのアクアカーテンシステム構成

3.3 室内試験による効果確認

(1) はじめに

コンクリートが硬化後、所要の強度、耐久性、ひび割れ抵抗性等の性能を発揮させるためには、硬化初期において適切に養生を行うことが重要である。すなわち、打込み後一定期間、適切な温度および湿度に保つ必要がある。特に、耐久性を確保する観点から、コンクリート表層部の鉄筋のかぶり部が所要の物質移動抵抗性を有している必要があり、養生の良否が大きく影響することが容易に推察される。

土木学会コンクリート標準示方書、建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事等の標準類では、セメント種類、日平均気温、構造物の供用期間の級等に応じた湿潤養生期間の標準が示されている。しかし、これらの湿潤養生期間が終了した時点ではセメントの水和は不十分であり、当然ながら、コンクリートは所要の強度、耐久性を発揮していない。したがって、構造物のおかれる環境条件によっては、その後のセメントの水和反応が十分進行せず、所要の性能に達しない可能性も考えられる。

コンクリート構造物の性能を確実に確保するためには、できる限り長く湿潤養生を行うことが望ましい。さらに水分逸散を防ぐだけでなく、積極的に水を供給し十分な水がコンクリート中に保たれた状態を維持すること、すなわち給水養生が重要である。ただし、湿潤養生期間の延長、給水養生の実施は、コンクリート構造物の種類によっては、必ずしも施工は容易ではなく、工期の遅延、工事費のアップに繋がる可能性も高い。しかし、本研究で開発したアクアカーテンを採用することで、水中養生が困難な覆工表面についても確実な給水養生が可能である。

本節ではアクアカーテンによる養生について、より実構造物に近い条件で養生効果を明らかにするため、大型供試体を用いた室内実験について述べる。なお、実験では普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを使用したコンクリートを養生条件や養生期間を変化させ、強度発現特性や長期耐久性に及ぼす影響を検討する。

(2) 使用材料およびコンクリート配合

実験に使用するセメントは、覆工コンクリートに使用される頻度の高い高炉セメント B 種とポルトランドセメントの基本性能を確認する上で参考となる普通ポルトランドセメントを用いる。表-3.2 にセメント試験結果を示す。

配合試験は、トンネル覆工コンクリートとして最も一般的な配合条件として、スランプ 15cm、水セメント比 60%の標準品を配合条件とする。いずれのコンクリートも同一の生コン工場から購入し、材料も同工場のものを使用する。なお、トンネル覆工コンクリートと同配合にするためには最大粗骨材寸法は 40 mm となるが、全配合統一して 20 mm とする。実験

用のコンクリートに使用する材料の詳細を表-3.3、配合を表-3.4に示す。

表-3.2 セメント試験結果

| セメントの種類 | 密度 | 粉末度 | 始発 | 終結 | 7日強度 | 28日強度 |
|---------|------|------|------|------|------|-------|
| 普通 | 3.16 | 3300 | 2-15 | 3-21 | 45.4 | 62.1 |
| 高炉 B | 3.04 | 3820 | 2-46 | 4-32 | 34.9 | 61.9 |

セメント：太平洋セメント(株)製

細骨材：神栖産陸砂、表乾密度 2.60g/cm³、FM2.4

佐野(唐沢鉱山)砕砂、表乾密度 2.70g/cm³、FM3.1

粗骨材：石岡産碎石、表乾密度 2.67g/cm³、実積率 60.0%

混和剤：AE減水剤標準形I種 ポゾリスNo.70

表-3.3 使用材料

| 材料 | 種類 | 仕様 |
|--------|-----------------------|---|
| セメント C | 普通ポルトランドセメント | 密度 3.16g/cm ³ |
| 細骨材 S | S1 陸砂 (70%) 茨城県鹿島産 | 密度 2.58g/cm ³ FM.3.00 |
| | S2 砕砂 (30%) 栃木県佐野産 | 密度 2.78g/cm ³ F.M.2.51 |
| 粗骨材 G | 碎石(20mm) 茨城県石岡産 | 密度 2.67g/cm ³ 、 吸水率 0.55% |
| 混和剤 | AE 減水剤 | リグニンスルホン酸系 |

表-3.4 試験コンクリートの配合

| セメントの種類 | Gmax (mm) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|----------|-----------|-----------|---------|------------|----------|--------------------------|------|-----|-----|------|------|
| | | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | | 粗骨材 | 混和剤 |
| | | | | | | | | 陸砂 | 砕砂 | | |
| 普通 | 20 | 8±2.5 | 4.5 | 55 | 43.1 | 157 | 286 | 561 | 241 | 1073 | 3.05 |
| 高炉 B | 20 | 8±2.5 | 4.5 | 55 | 43.4 | 153 | 279 | 567 | 243 | 1073 | 2.97 |
| トンネル用 BB | 20 | 15±2.5 | 4.5 | 60 | 46.5 | 164 | 274 | 600 | 257 | 1001 | 2.92 |

※最小セメント量 270kg/m³、W/C=60%、Gmax40mm、W=165kg/m³

(3) 大型試験体の作製

試験体は、表-3.4に示す3種類の配合で、コンクリートを長さ7.2m(4.2m+3.0m)、高さ1.2m、幅0.30mの2つの擁壁構造体にそれぞれ打ち込む(合計2.59m³)。打込みは、生コン車からバケットに一旦受け、バケットにより打設する。試験体は擁壁形状となっており概要を写真-3.1および写真-3.2に示す。試験体となる壁部分は無筋コンクリートとするが、基礎部および立ち上がり部には転倒防止のため、鉄筋を200mm間隔に配筋する。

コンクリート打込み後、所定の型枠存置期間に達した範囲から順次計画した養生を実施する。大型試験体は、分割して型枠を取りはずせるような工夫を行い、各養生条件にもとづき所定の時期に型枠を取りはずす。型枠および給水養生終了後のコンクリート面については、観察を続ける面は気中養生とし表面を露出状態とし、それ以外の背面、天端および側面については乾燥を防止するために、養生用塩ビフィルム(アキレスマジキリⅡ、品名FTEP4939)をシリコーン接着剤にて貼り付ける。



写真-3.1 大型試験体



写真-3.2 大型試験体

(4) 圧縮強度試験および質量変化試験の評価

1) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3.5 に示す。圧縮強度と物質透過性等の耐久性にかかわる性能は、必ずしも対応しないことが指摘されており³⁾、様々な性能を総合的に評価することが必要である。本節では、コンクリートの代表的な性能である圧縮強度により湿潤養生条件の影響を評価することで基本的な知見を得る。また、給水状態を定量的に把握するため、打込み時、養生終了時および圧縮強度試験時に供試体の質量を測定する。

表-3.5 試験項目および試験方法

| 試験項目 | 試験方法 |
|-------|--|
| 圧縮強度 | JIS A 1108に準拠、φ10×20cm 材齢7、28、91、182日および365日 短縮養生、示方書養生終了時 |
| 試験体質量 | 打込み直後、脱枠時、圧縮強度試験時および 養生終了時 |

2) 圧縮強度試験結果

図-3.4 に示す示方書（示方書に表示された標準日数期間養生したもの）や短縮養生（標準日数の6割の期間養生したもの）は、材齢28日までは水中養生とで大きな差は見られないが、長期の強度増進がほとんど見られず、材齢経過とともに水中養生との差が大きくなっている⁴⁾。給水養生の延長によって長期強度の改善が見られ、水中養生の材齢28日と同等以上の圧縮強度が得られている。高炉Bの場合、普通セメントの場合とほぼ同様な強度発現が見られており、普通セメントより2日間長く養生することがほぼ妥当であると言える。両セメントも水中養生期間を延長することによって強度増進が大きくなっており、効果は明確である。その効果は、普通ポルトランドセメントよりも高炉Bで水中養生期間の延長の効果が大きい。

普通ポルトランドセメントや高炉セメントにおいては、示方書、短縮養生では、いずれも材齢28日まで圧縮強度が増加し、長期的に減少する傾向が見られる。これは、湿潤養生終了に伴う乾燥過程で圧縮強度が見かけ上増加することによると考えられ⁵⁾、水和の進行によるものではないことに留意が必要である。永松らは、十分に水中養生を行ったコンクリートを用いて、乾燥に伴う強度変化を調べている⁶⁾。これによると、乾燥過程で圧縮強度の増加が見られるが、乾燥がさらに進行すれば、湿潤状態とほぼ同等の値を示すことを明らかである。今回の試験結果においても、圧縮強度は、材齢28日で増加した後、低下が見られ材齢91日以降ほぼ一定となっている。このことから、乾燥による圧縮強度への影響は、乾燥が進行した材齢91日以降は、無視できるものと考えられる。以上のことから、後述の圧縮強

度発現特性の評価において、示方書養生、短縮養生および給水養生の材齢28日の圧縮強度の試験値は除外する。

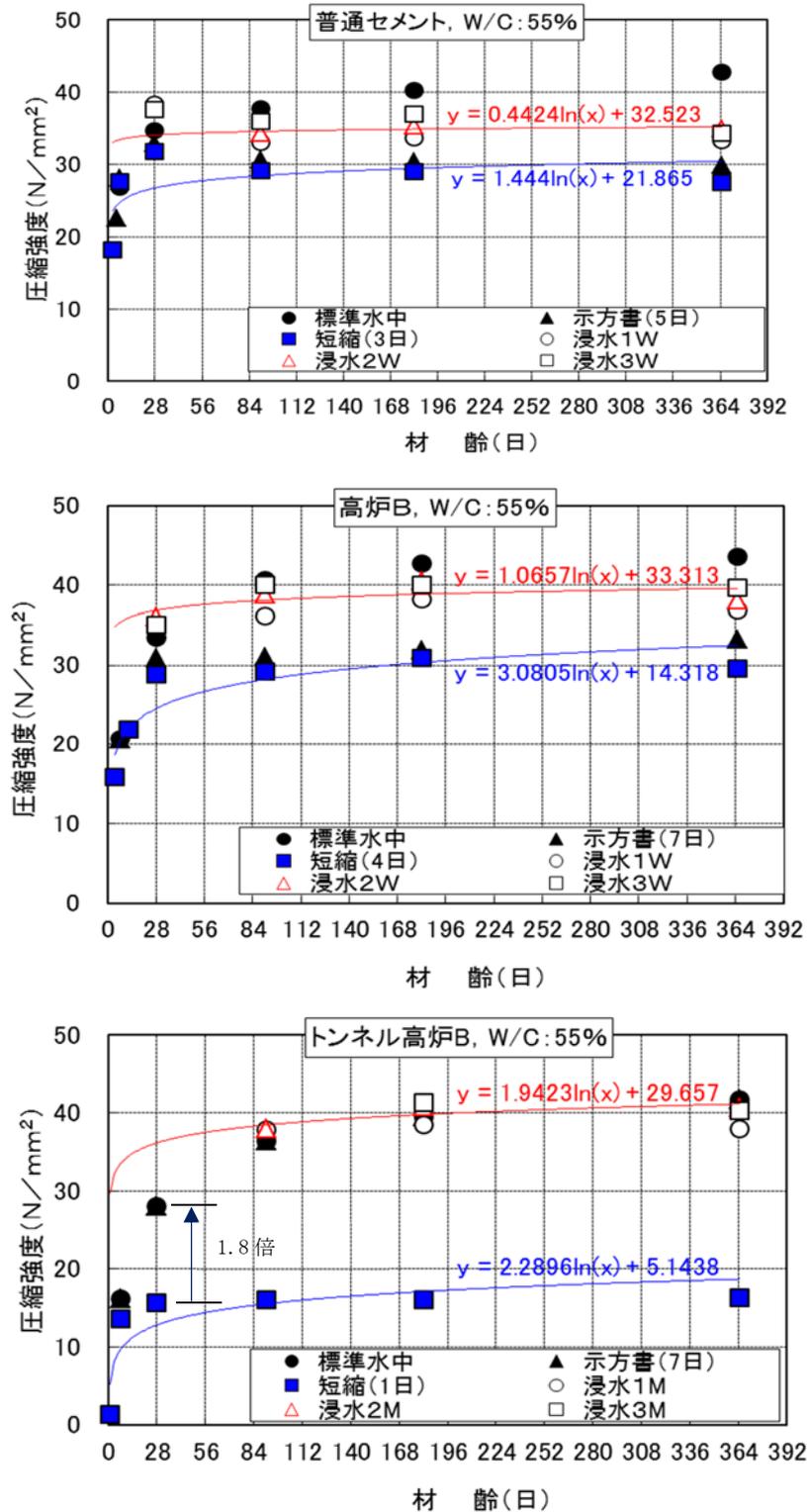


図-3.4 各セメントの圧縮強度と材齢の関係

養生方法をレーダーチャートで整理したものを図-3.5 に示す。養生方法や期間が異なっても、普通セメントはほぼ円形に近い形を示しており、養生方法の影響を受け難いのに対し高炉セメントは養生条件の影響を受けやすい。さらに、覆工コンクリートのように極端に養生期間が短い場合は、その影響は大きい。つまり、15 時間で型枠を取りはずしても、その後給水養生を実施することで所定の品質を確保できる。

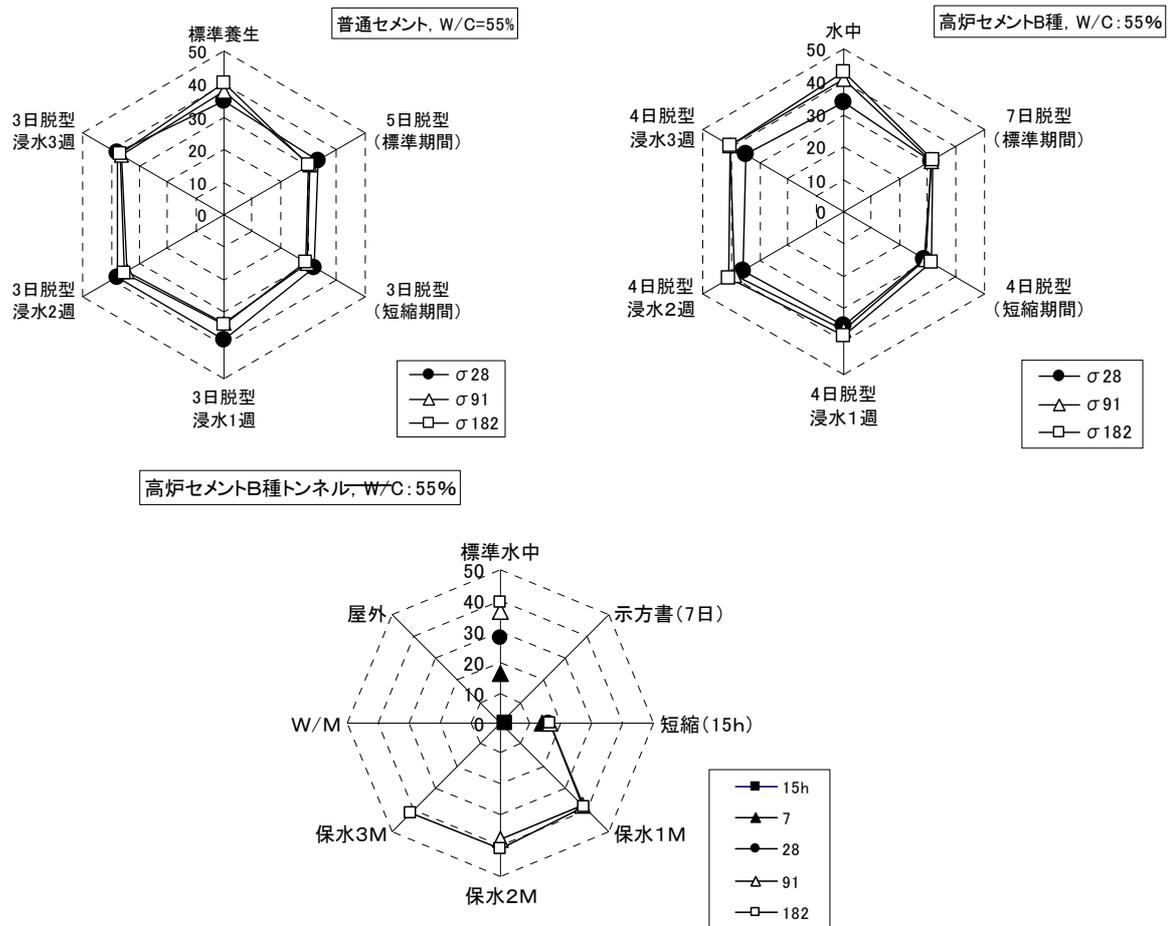


図-3.5 各セメントの養生効果特性

3) 質量変化測定結果

図-3.6 に材齢と質量変化率の関係を示す。なお、材齢とともに吸水が生じる標準水中養生の保水率を100%として、質量変化率から保水率を算定した。

図-3.7 に材齢と保水率の関係を示す。なお、保水率の算定にあたって水和に伴う自由水量の低減は考慮していない。いずれの場合も、示方書および短縮養生では、比較的早い段階で水分逸散が進行し、大きな質量減少が生じている。給水養生の延長により、若材齢における保水率が高くなるとともに、長期的な低下も抑制されている。質量変化率、保水率の変化は、セメントの種類により差が見られ、高炉 B の方が質量変化は小さく、保水率も高くなっている。示方書および短縮養生では材齢 28 日以降、強度増加はほぼ停止することから、保水率 60%程度まで水分が逸散すると、セメントの水和は、見かけ上停止するものと推察される。

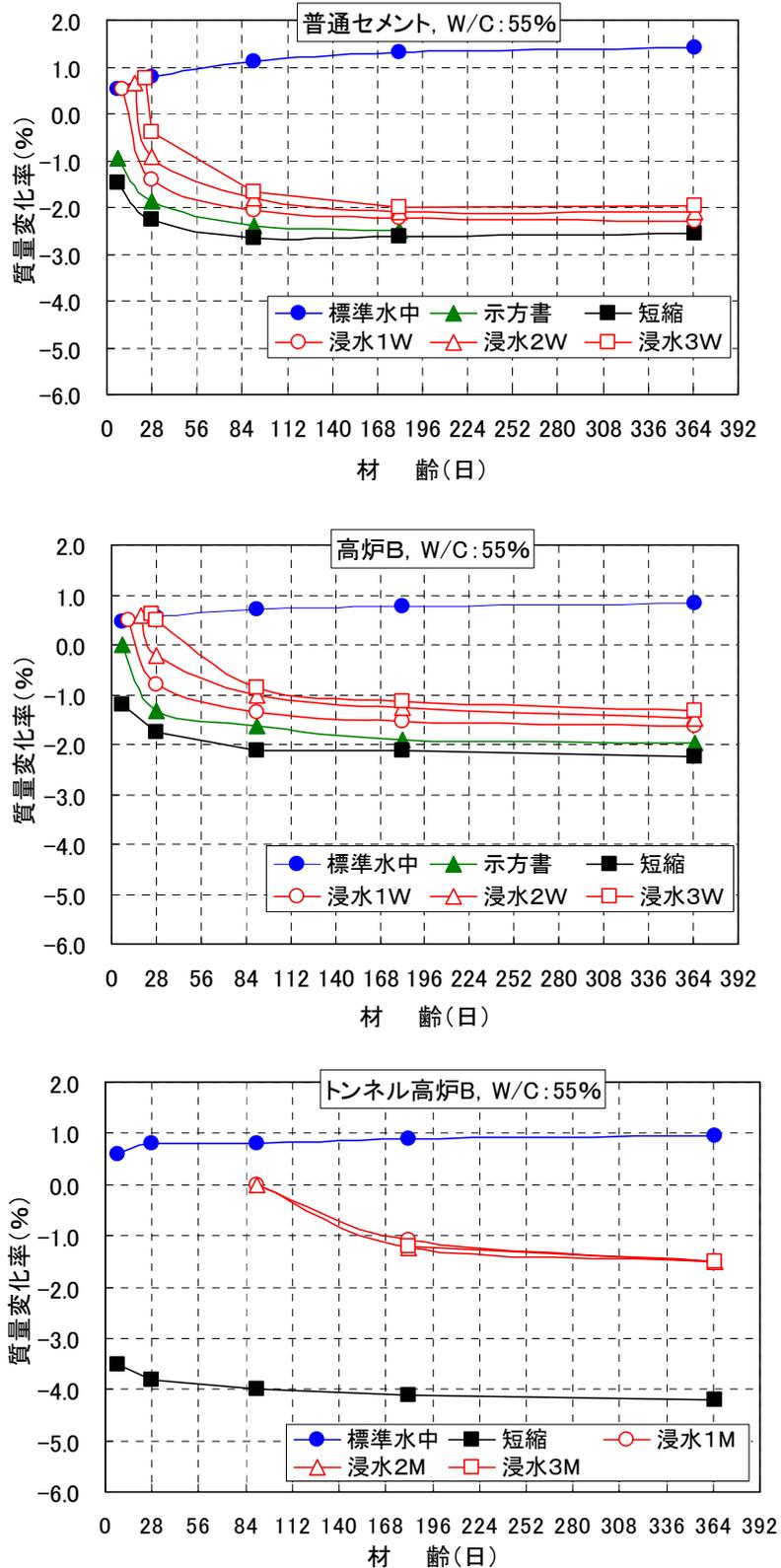


図-3.6 質量変化率と材齢

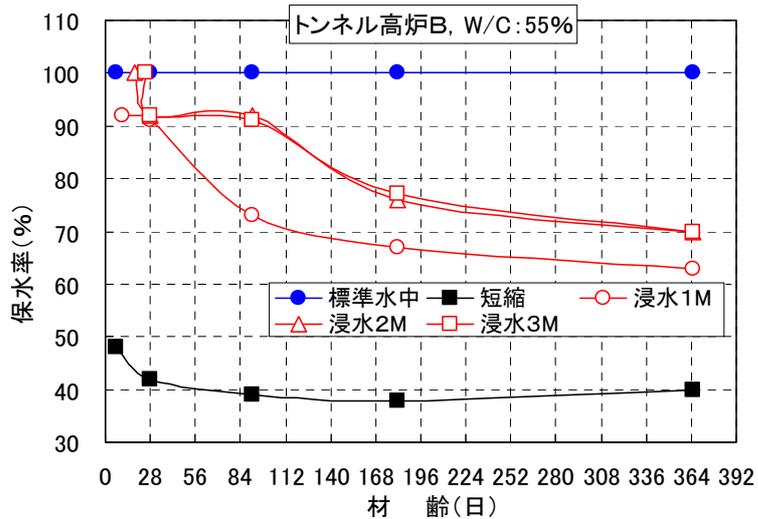
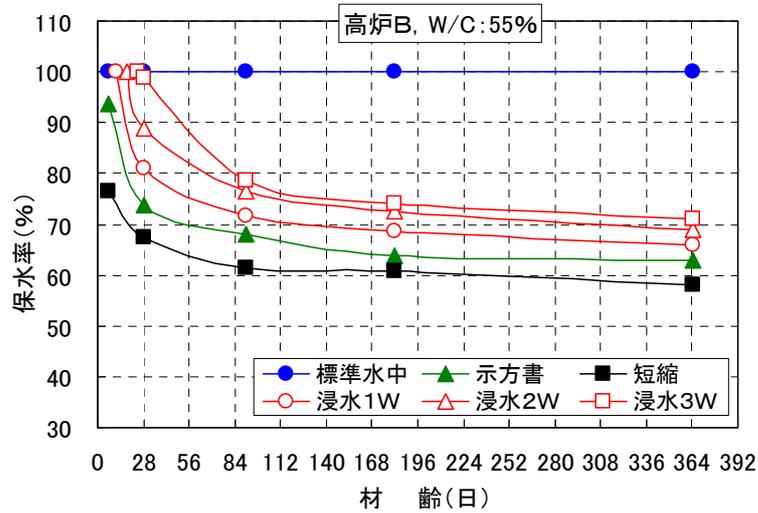
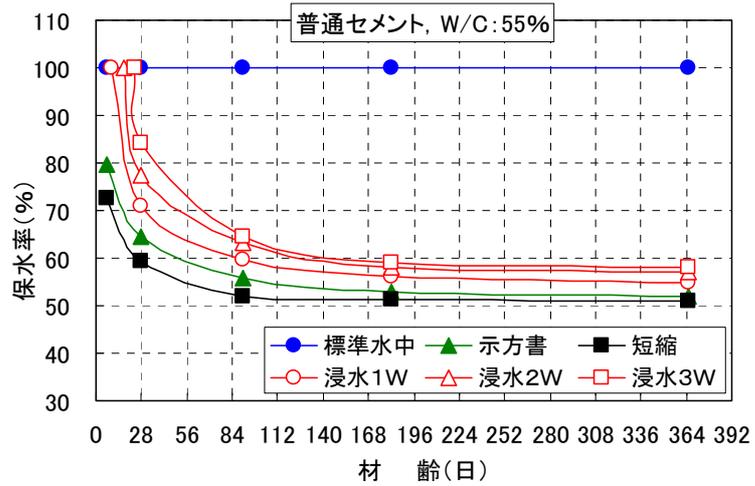


図-3.7 各セメントの保水率と材齢

(5) 吸水率試験の評価

型枠取りはずし後の側面の部材に対して給水養生を可能にする工法（アクアカーテン工法）を開発した。この工法による給水養生はコンクリート表面に水膜を形成し水に浸された状態を保つため“給水養生”と名づけた。型枠取りはずし後から給水養生を実施する場合の給水量および給水期間を実験室レベルで検討した⁷⁾。

1) 実験方法

直径 10cm×高さ 20cm の圧縮強度試験用の供試体を作製し、実構造物で想定される型枠の取りはずし時期に供試体の型枠を取りはずした。その後、供試体の底面を写真-3.3 のように深さ 10mm の水に浸した。供試体は、表面からの水分の逸散を防ぐために図 3.8 に示すように側面および上面（打込み面）を薄いビニールシートで密閉した。

2) 使用セメント

供試体は、普通、早強、高炉 B 種、中庸熟、フライアッシュセメントの 5 種類のセメントを使用した。仕様を表-3.6 に示す。また混和材として膨張材を使用した。



写真-3.3 供試体の吸水状況

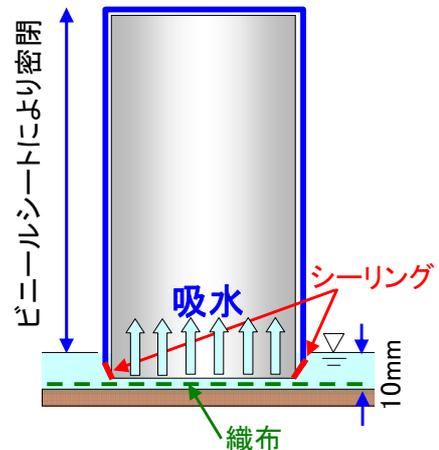


図-3.8 供試体の養生状況

表-3.6 使用セメントおよび混和材の仕様

| 項目 | 仕様 | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|------------|--------------|-----------------|-------|
| | 普通 (N) | 早強 (H) | 中庸熟 (M) | 高炉 B (BB) | フライアッシュ (FB) | 膨張材 |
| 密度 (g/cm ³) | 3.16 | 3.16 | 3.21 | 3.04 | 2.25 | 3.05 |
| 比表面積 (cm ² /g) | 3,300 | 4,470 | 3,150 | 3,830 | 4,150 | 2,840 |

3) 配合

各配合は、水セメント比または水粉体比を55%一定とした。配合表を表-3.7に示す。

4) 型枠の取りはずし時期

表-3.8に示す型枠を取りはずす標準時期は、2007年制定コンクリート標準示方書（以下、示方書）施工編の外気温15℃以上の場合の湿潤養生期間を基本に設定した。中庸熱セメントについては、圧縮強度が他のセメントと同程度になる9日間とした。普通セメントと高炉セメントB種を使用したコンクリートでは、型枠の取りはずし時期がコンクリートの吸水に与える影響を確認するために標準時期よりも早期に取り外すこととした。

5) 吸水量の測定方法

型枠取りはずし後、すぐに側面および上面を密閉した後に供試体の質量を測定し、初期値とした。以降は、水に浸漬した供試体を1回/日引き上げ、表面水をよく拭き取って質量を測定し、初期値との差を吸水量とした。

表-3.7 配合表

| セメントの種類 | 単位質量 (kg/m ³) | | | | | | 混和剤 (ℓ) |
|---------|---------------------------|------|-----|-----|-------------|-------------|---------|
| | 水 | セメント | 混和材 | 細骨材 | 粗骨材 1505 | 粗骨材 2015 | |
| N | 165 | 300 | - | 834 | 681 | 342 | 3.00 |
| H | 167 | 304 | - | 829 | 677 | 340 | 3.04 |
| BB | 168 | 305 | - | 824 | 672 | 337 | 3.05 |
| M | 164 | 298 | - | 838 | 684 | 343 | 2.98 |
| FB | 159 | 231 | 58 | 837 | 683 | 343 | 2.89 |
| N+膨張材 | 165 | 280 | 20 | 834 | 681 | 342 | 3.00 |
| BB+膨張材 | 168 | 285 | 20 | 824 | 673 | 338 | 3.05 |

表-3.8 型枠の取りはずし時期

| 取りはずし時期 | セメントの種類 | | | | | | |
|---------|---------|----|------|-----|--------|--------|--------|
| | 普通 | 早強 | 高炉B種 | 中庸熱 | フライッシュ | 普通+膨張材 | 高炉+膨張材 |
| 標準 | 5日 | 3日 | 7日 | 9日 | 7日 | 5日 | 7日 |
| 早期 | 3日 | — | 4日 | — | — | — | — |

6) 実験結果

型枠を標準時期に取りはずした場合の供試体の吸水量を底面積で除した単位面積当り吸水量の経時変化を図-3.9 に示す。膨張材を使用していない供試体の単位面積当り吸水量は0.48~0.65L/m²となった。また、膨張材を混入した配合の単位面積当り吸水量は、同じセメントで混入しない場合に比較して、普通セメントで1.8倍、高炉セメントで1.4倍増加している。

型枠の取りはずしを早期に行った場合と標準時期の場合の単位面積当り吸水量の比較を図-3.10 に示す。早期に型枠を取りはずして浸漬した方が、普通セメントでは1.2倍、高炉セメントでは1.8倍程度多く吸水していることが確認できた。

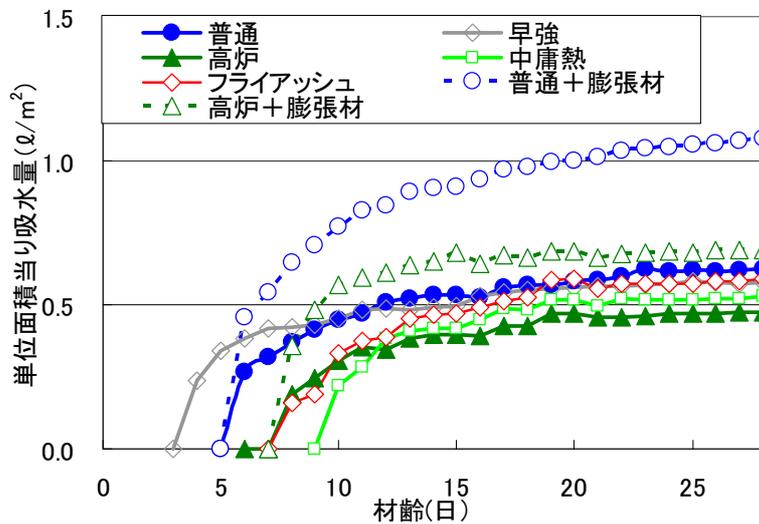


図-3.9 材齢と単位面積当り吸水量

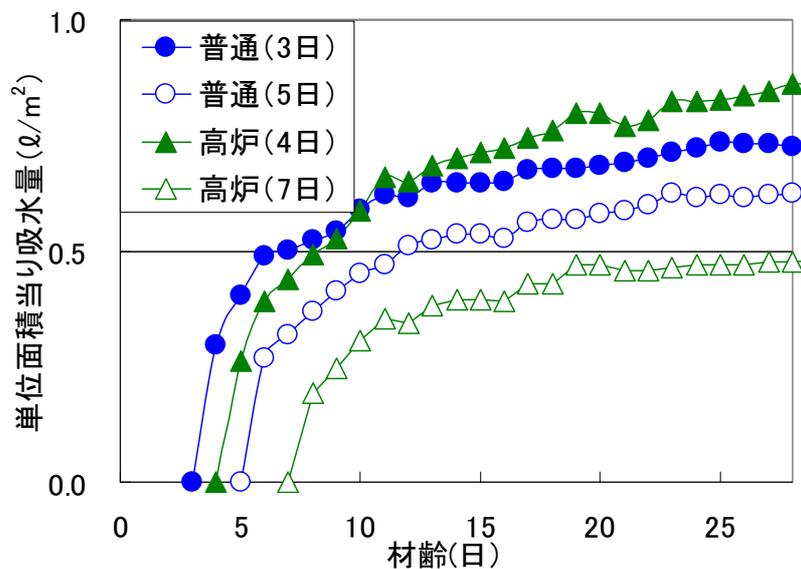


図-3.10 材齢と単位面積当り吸水量

浸漬1日目の吸水量を100%として、各配合の浸漬開始からの日吸水量の割合を図-3.11に示す。ほとんどの配合で7日目では20%以下、14日目以降では5%以下となっており、コンクリートの吸水が有効である期間は、浸漬後7~14日程度であることが確認できた。

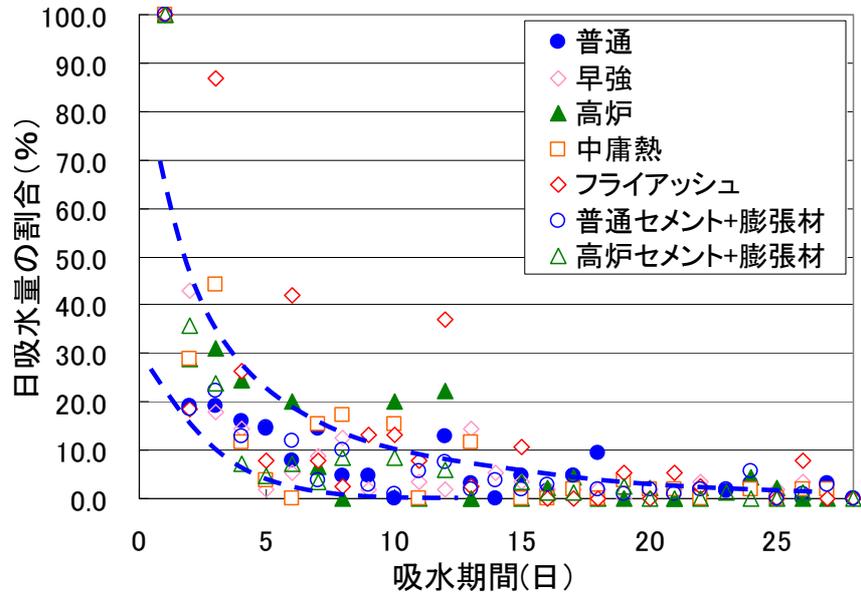


図-3.11 吸水期間と日吸水量の関係

(6) 中性化促進試験の評価

本研究では、給水養生によるコンクリート表層部の品質改善効果を評価するために、促進中性化試験を実施し養生による影響を検討する⁸⁾。なお、本試験は大型試験体から材齢 26 週でコア供試体を各面から 1 本採取し、以降、促進期間 13 週まで促進中性化試験(JIS A 1153)を実施する。

セメントと養生方法の違いによる反発度および中性化深さについて、**図-3.12** および**図-3.13** に示す。なお、本検討では高炉セメント B 種を用いてトンネルの施工条件に基づいた養生期間を設定したのも追加する。

普通ポルトランドセメントや高炉セメント（トンネル）では、**図-3.12** に示すように標準期間のケースよりも、給水養生を行ったケースの方が反発度は小さくなる。一方、中性化促進試験結果では、**図-3.13** に示すように標準期間のケースよりも、給水養生を行ったケースの方が中性化深さは小さくなる。覆工コンクリートの養生条件を反映した“短縮”の場合と、給水養生 2 週間を実施した場合の促進中性化深さを比較すると、給水養生を 2 週間実施することで、促進中性化深さが 37%低減できる。中性化抵抗性の低い混合セメントである高炉セメント B 種に関しても、十分な給水養生を実施することで、中性化抵抗性を向上できることが確認された。豊村らの実験結果⁹⁾でも、養生により高炉セメント B 種の中性化抵抗性の向上が望めることが確認されており、自動車の排気ガス等による炭酸화가懸念される覆工コンクリートにおいて、アクアカーテンにより給水養生を実施することは、非常に効果的であると考えられる。

日平均気温が 15℃以下となる場合、必要な湿潤養生期間は**表-3.8** よりさらに長くなり、柱や壁の湿潤養生が困難な現状では型枠の存置期間が必然的に長くなる。しかし、型枠の脱型に必要な強度が得られた後、給水養生を実施することで早期脱型が可能となり、しかも、コンクリート表面の緻密化がさらに図れる。

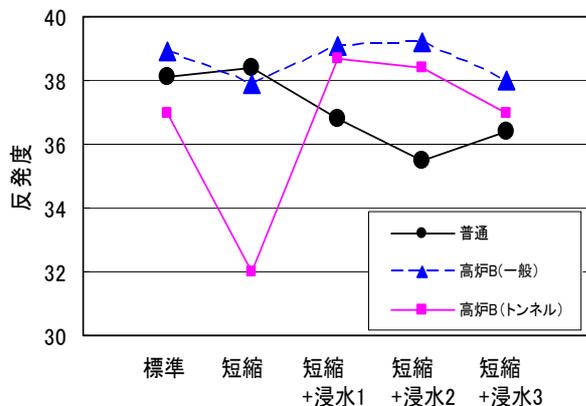


図-3.12 養生条件による反発度の比較

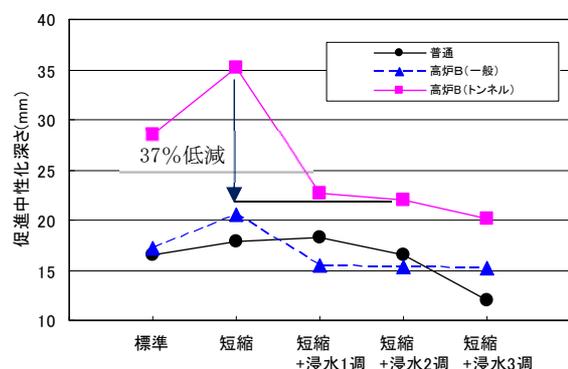


図-3.13 養生条件による中性化深さの比較

(7) 凍結融解試験の評価

凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法に準じて行い、試験開始材齢は 28 日とする¹⁰⁾。標準水中養生以外の気中養生を行った試験体は、吸水させることなく、恒温恒湿室から取り出した状態で初期値を測定し、直ちに凍結融解試験に供する。測定は、30 サイクル毎に行い、300 サイクルまで実施する。

普通ポルトランドセメントにおける、凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-3.14 に、凍結融解サイクルと質量変化率の関係を図-3.15 に示す。ここで、質量変化率は、打込み時の時の質量を基準とした。凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下は、湿潤養生期間が短い条件ほど小さくなっている。これは、湿潤養生期間が短いほど供試体の乾燥が進行し、飽水度が低く、凍結融解による劣化を受けにくくなったことが一要因と考えられる。

標準水中養生を行った試験体以外は、最初 30 サイクル時には、吸水による質量増加が生じている。30 サイクル時の質量変化は、水中養生より若干低いものの、いずれも試験体打込み時より増加しており、ほぼ飽水状態にあると考えられる。30 サイクル以降の質量変化は、養生条件による差がみられ、湿潤養生期間の短いものほど質量変化は、大きくなっている。湿潤養生のみの養生条件では、300 サイクルにおいて 3~5% と大きな質量減少が生じており、水中養生、給水養生を行ったものに比べて凍結融解抵抗性は低い。

一方、共鳴振動数、試験体質量から JIS A 1127 に準じて動弾性係数を算定した結果を図-3.16 に示す。湿潤養生条件によって相対動弾性係数は、大きく異なっており、コンクリートの性能は、相当に差がある。湿潤養生期間が短いものほど、初期の凍結融解サイクルにおいて動弾性係数の増加が見られる。これは、初期の水和が不十分な試験体では、水和の進行によるものと考えられる。

凍結融解 30 サイクル以降、直線的に質量変化が生じていることから、それぞれ直線回帰し凍結融解サイクルに伴う質量変化速度を算定した。図-3.17 に湿潤養生期間（湿潤養生を終了した材齢）と質量変化速度の関係を示す。湿潤養生期間の延長とともに質量変化速度は、大きく低減している。給水養生の効果も大きく、1 週間の延長により水中養生を 28 日間実施したものと同程度まで質量変化速度が低減されている。

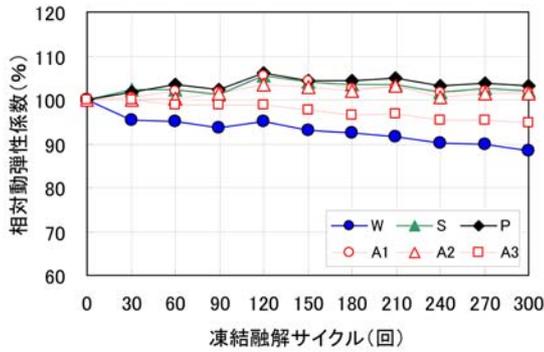


図-3.14 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

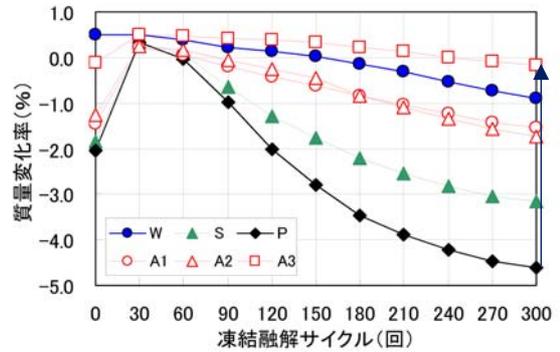


図-3.15 凍結融解サイクルと質量変化率の関係

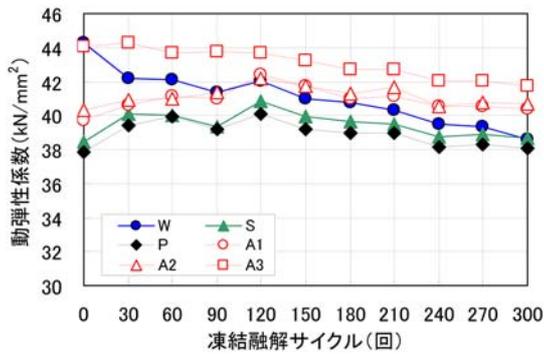


図-3.16 凍結融解サイクルと動弾性係数の関係

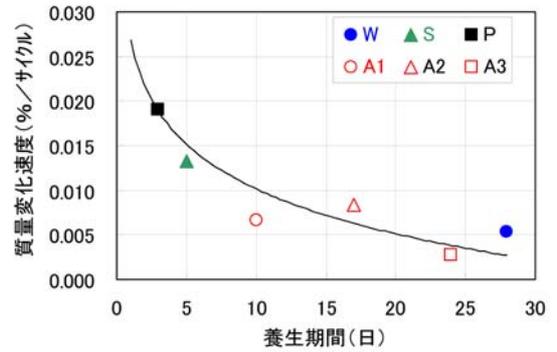


図-3.17 湿潤養生期間と質量変化速度の関係

(8) 細孔径分布試験の評価

1) 養生条件の相違による細孔径分布

給水養生がコンクリートの細孔構造に及ぼす影響を検討するため、各種条件下での圧縮強度および細孔径分布（水銀圧入式ポロシメータ）の測定を行う¹¹⁾。ここで、粗骨材の影響を排除するために、細孔径分布の測定には、5mmふるいによりウェットスクリーニングしたモルタル供試体（φ5×10mm）を5mm以下に粉砕した試料を用いる。

図-3.18に細孔径分布の測定結果を示す。いずれのケースにおいても、給水養生期間の延長とともに、細孔径分布は、微小径側にシフトし、緻密な細孔構造となった。セメント種別N、BBの給水養生では、細孔直径100nm付近に分布のピークがあり、給水養生や水中養生と比較するとかなり粗な細孔構造となった。また、養生時間が極端に短いトンネル（BT）においては、細孔直径1000nm付近になり、その傾向が顕著である。

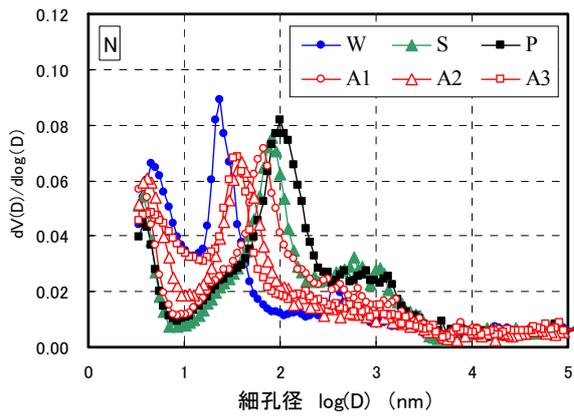
2) 養生条件と細孔容積

養生条件、セメントの種類による細孔径分布の差異を定量評価するために、粗大径側（細孔直径10nmおよび50nm）の細孔容積に及ぼす養生条件の影響を調査する。図-3.19に養生条件と総細孔容積、細孔直径10nmおよび50nm以上の細孔容積の関係を示す。

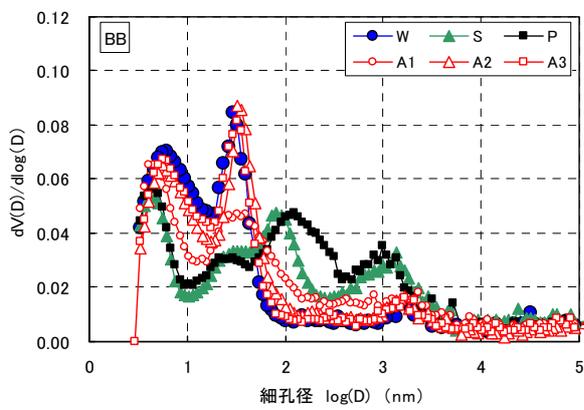
総細孔容積に及ぼす養生条件の影響は、小さいが、細孔直径10nmあるいは、50nm以上の粗大径の細孔容積は、給水養生により顕著な差異が発生した。すなわち、粗大径の細孔容積は、型枠による養生では増加するのに対し、給水養生では養生期間の延長とともに明確に低下した。その増加あるいは低下量は、養生期間あるいは養生条件と明確な相関がある。

3) 細孔直径毎の細孔容積と圧縮強度の相関性

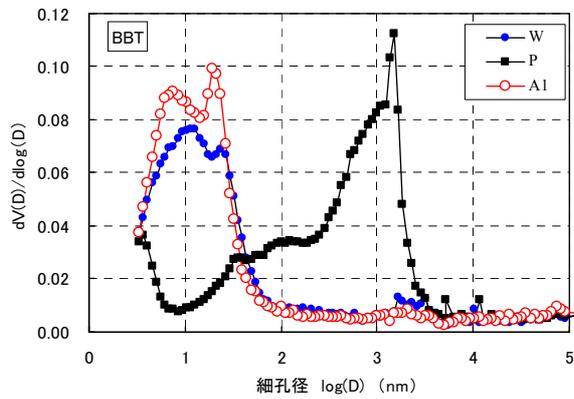
算定した細孔直径毎の細孔容積と圧縮強度の相関性を調査する。図-3.20に細孔容積と圧縮強度の関係を示す。いずれの細孔容積とも相関関係が見られるが、細孔直径10nm以上の細孔容積との相関が高くなった。以上のような養生条件による細孔構造の差異は、セメントの水和の程度に起因していると推察される。



(a) Cement Type N



(b) Cement Type BB



(c) Cement Type BT

図-3.18 細孔径分布

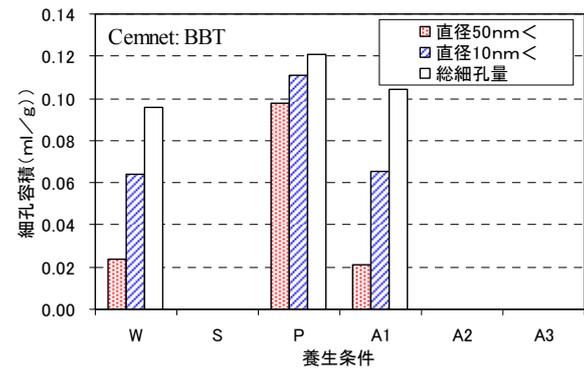
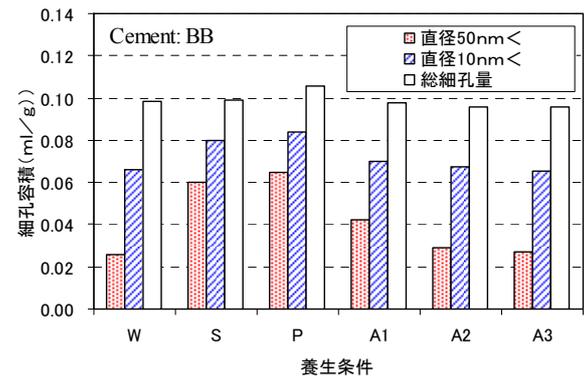
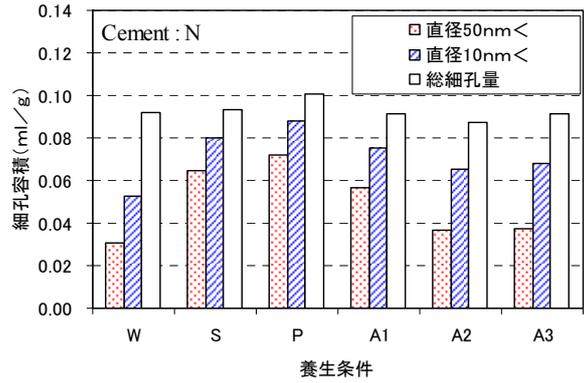


図-3.19 養生条件と細孔容積の関係

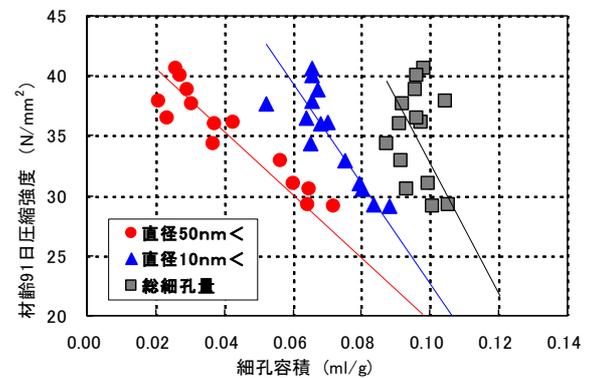


図-3.20 細孔径容積と圧縮強度の関係

(9) 透気試験の評価

1) 試験内容

大型供試体を用いてコンクリート表層部の透気性を検討するため、ダブルチャンバー法 (Torrent 法¹²⁾) による透気試験を実施する。なお、試験体材齢は屋内養生約4ヵ月である。

コンクリート表層の透気性を直接計測することにより、コンクリートの耐久性の向上を評価する。本検討では、コンクリート表面に真空ポンプで二層式チャンバーを吸着させ、チャンバー内圧力によってコンクリート表層の透気性を評価するトレント式透気試験 (トレント法) を行った。トレント法では、計測結果に基づいて、コンクリート表層の透気グレードを5段階に区分・評価する。これまでの報告から計測値は部位によりばらつきがあることから、3回計測の平均値とした。透気試験状況を写真-3.4に示す。

2) 試験結果および考察

トンネル用高炉BBにおける透気試験結果を図-3.21に示す。この結果、短期養生の場合の透気係数が極めて大きく、若材齢での型枠取り外しの影響が確認される。しかし、その後、給水養生を行うことで透気係数は大幅に改善されている。透気性のグレードで1~2、コンクリート表面の緻密性が向上することがわかった。



写真-3.4 透気試験状況

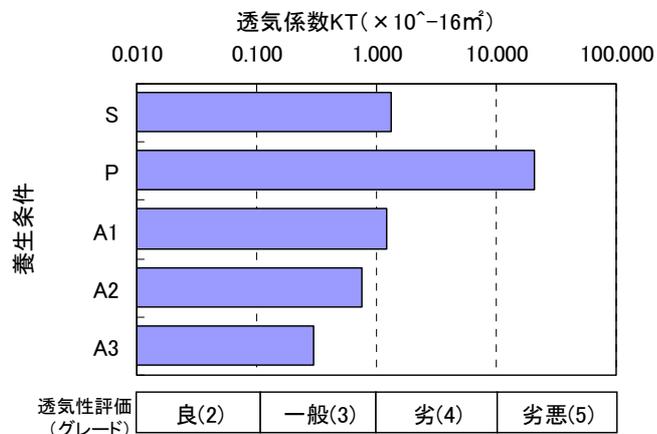


図-3.21 透気試験結果 (トンネル用高炉BB)

3.4 現場適用時のシステム検討

(1) 施工方法

1) 適用範囲

アクアカーテン養生システムは、トンネル覆工やアーチカルバート内面だけでなく、コンクリート構造物の鉛直面（壁、柱部材）のコンクリートに対して給水養生を行う場合に適用するものである。吸引口、吸引管、吸引機の運転目的は、養生シートをコンクリート表面に押し付け固定させるとともに、自然流下水がコンクリート面全体に均等に行き渡らせること、養生シート端部からの養生水の漏水を防止するために、養生シートとコンクリート面を低圧に保持することにある。したがって、吸引機は養生実施期間中常に稼働させることが原則である。

2) 施工手順

アクアカーテンによる養生の基本的な施工手順を以下に示す。

- ① 型枠および支保材や緊結材を取りはずす。
- ② 給水ホースを上端部に取付け、養生シートを仮留めする。
- ③ 養生シートの下端部に約4m間隔で吸引口を取付ける。
- ④ 吸引機と吸引管を接続する。
- ⑤ 養生シートの周囲端部の気密性を確保した後、吸引機を稼働する。
- ⑥ 給水ポンプに接続した給水ホースから養生水を供給し、給水養生を開始する。

3) 給水管理

給水管理は、コンクリートの吸水速度に応じて養生開始から終了に到るまで一定量を間欠的に給水する。留意点を以下に示す。

- ・ 1回の給水量は、対象範囲のコンクリート表面全体が濡れるのに必要な量を施工により確認し決定する。
- ・ 給水の時間間隔は、コンクリート面が乾燥しない間隔とし、現場での実施状況によって判断する。

(2) 主要設備

1) 養生シート

養生シートの部材は、写真-3.5 に示すように表面に凹凸をもつ負圧部と、表面が滑らかな気密部の2つの部位から構成される。養生シートの特徴を以下に示す。

- ・ 低圧領域を広げるためには空気の流路の確保が重要である。そのため、図-3.22 に示すように、シート表面形状は凹凸形状としている。
- ・ シート材料は、軽量、安価で保温性にも優れる気泡緩衝シートを採用する。
- ・ 気泡緩衝シートのコンクリート側に親水性の不織布を付けることで保水能力を向上できる。

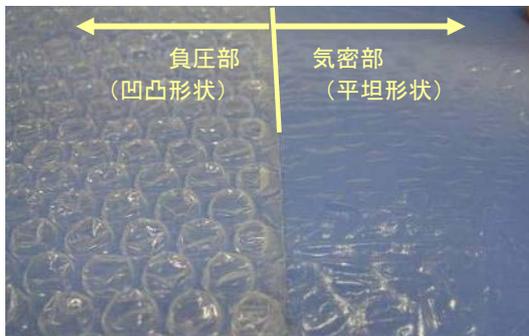


写真-3.5 養生方法の分類

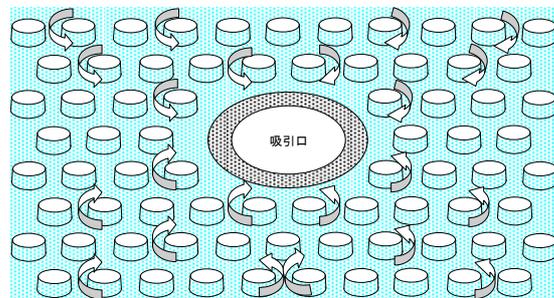


図-3.22 養生シート表面の凹凸形状による
空気流路の確保

2) 吸引ファンおよび給水ポンプ

吸引ファンは安定した吸引力を長期間維持させるため、ターボファンを採用する。ターボファンの仕様は、養生面積を考慮し必要な風量と風圧を確保できるものを選定するが、標準的には表-3.9 に示すものを使用する。養生水用の給水ポンプの仕様は、集水タンクから給水ホースまでの高さの揚程を確保できるものを選定する。吸引装置および給水装置の配置例を写真-3.6 に示す。

表-3.9 吸引ファンおよび給水ポンプ

| 種別 | 名称 | 仕様 |
|-------|--------|---|
| 吸引ファン | ターボファン | 電 源: 三相200v, 60Hz, 0.4KW 最大風量: 6.0m ³ /min, 最大静圧: 4.3kPa, 重 量: 16.5kg/台 |
| 給水ポンプ | 水中ポンプ | 電 源: 三相200V, 60Hz, 0.48kW 吐出口径: 50mm |



写真-3.6 吸引装置および給水装置配置例

3) 給水ホース

給水ホースは、延長 70~100m 程度まで均一に給水 (100~200cc/m・分) することができるものを使用する。給水システムとして、**図-3.23** に示すように2つの基本システムがあるため、以下の設備条件の有無、可否によって判断する。

給水ホース (エバーフローA100) の散水量は 0.1 L/m・分であるため、給水ポンプから直接給水管に直結させる方式であれば、100m の給水ホースの全長にわたって、一定の吸水が可能となる。実際には 60m を上限とする。

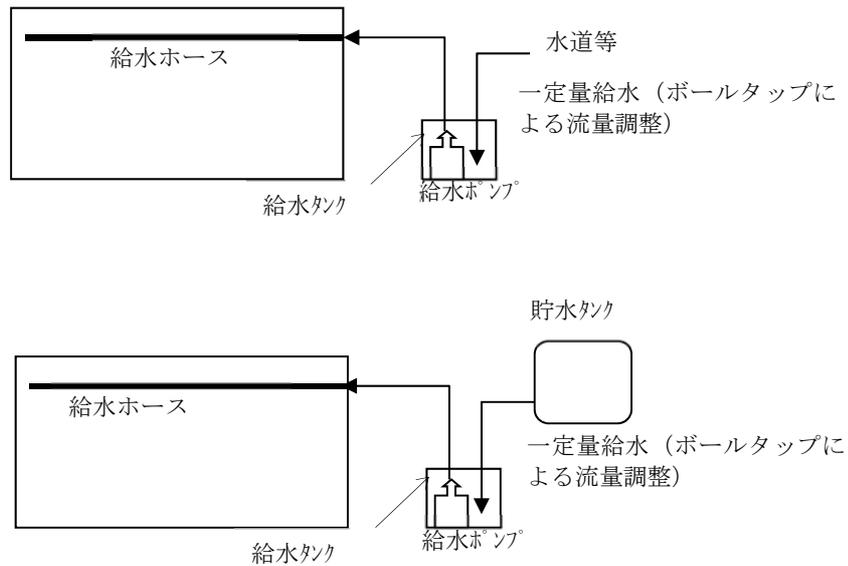


図-3.23 給水方式の分類

(3) 各現場での適用状況

1) 葛原トンネルの事例

アクアカーテンの開発初期のタイプで、養生シートを塩化ビニールパイプで受けている(写真-3.7)。

養生期間は、最も効果的な2週間である。



写真-3.7 全景

養生シートと覆工コンクリートとの間の空気を吸引することで、養生シートは覆工コンクリート面に均一に貼り付いている。軸方向の赤い帯が給水ホース(写真-3.8)。

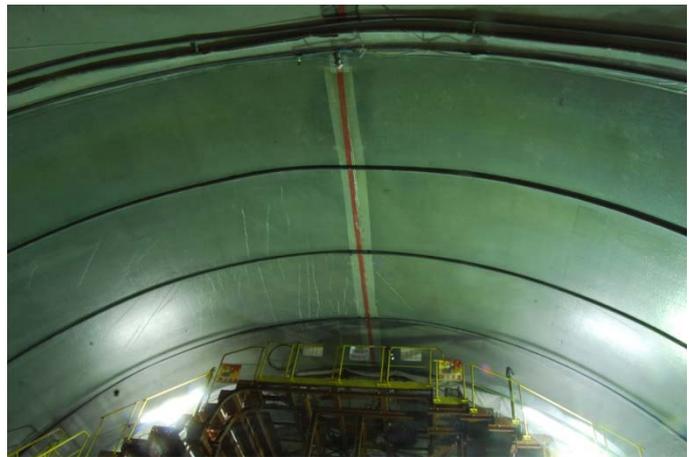


写真-3.8 マルチフレーム初期型

左側に設置しているファンが吸引ファン、右側の青い箱が吸引による養生水を回収するための除水・除塵器(写真-3.9)。



写真-3.9 吸引ファンおよび除水除塵機

2) 天狗山トンネルの事例

10 スパンにわたってアクアカーテンを適用した最初の事例。養生期間は4週間である。全体を同時に移動させるため、養生シートの支えをバルーンによった。バルーンで養生シートを支えてはいるが、あくまでも吸引ファンによる負圧によって養生シートを覆工コンクリート面に押し付けている（写真-3.10）



写真-3.10 全景

バルーンは、送風機を停止させると萎むので覆工コンクリートから離れる。中央の緑の管は送風管（写真-3.11）



写真-3.11 バルーン押し付けタイプ

10 スパン各所の移動台車に取り付けた吸引ファンと除水・除塵器（写真-3.12）。



写真-3.12 吸引ファンおよび除水除塵機

3) 神谷内トンネルの事例

トンネル内空断面が 84m^2 と大きく、通常のトンネル断面よりも、路盤から天端までの高さに比べてトンネルの断面幅（SLの長さ）を延長した扁平断面であることから、塩ビ管を補強している（写真-3.13）。



写真-3.13 全景

吸引を停止した状態の養生シート（写真-3.14）。



写真-3.14 マルチフレーム改良型

左右側壁表面に取り付ける吸引口と路盤上に配置した吸引管と給水用タンク（写真-3.15）。



写真-3.15 吸引、給水設備

3.5 現場適用効果の確認

(1) 現場透気試験

調査では、現場透気試験（トレント法）を採用し、透気係数と測定深さを計測した¹³⁾。透気試験は、コンクリート表層の品質を簡易に定量的に測定できる試験方法として、多くの機関で測定されている方法の1つであるが、国内ではJIS規格や土木学会基準で測定方法が規定されていない。本報告では、トレント法による透気係数の評価基準は、表-3.10に示すスイス規格（SIA262/1-E）に従った。

本報告で使用している透気係数は、1測定箇所あたり5回程度測定し、最大および最小の値を棄却した3回の測定結果の対数平均値を基本とした。また、透気係数は含水率の影響を大きく受けるため、含水率も合わせて計測したが、覆工コンクリートにおいては、降雨等の気象による変動が非常に小さいため、含水した状態が定常状態と判断し、含水率による補正は実施していない。（本計測での含水率と透気係数の関係は、参考資料2参照。）

表-3.10 透気係数の判定基準（SIA262/1-E）

| ランク | 透気係数 (10^{-16}m^2) | 評価レベル |
|-----|--------------------------------|-------|
| 1 | <0.01 | 非常に良い |
| 2 | 0.01—0.1 | 良い |
| 3 | 0.1—1.0 | 普通 |
| 4 | 1.0—10 | 悪い |
| 5 | >10 | 非常に悪い |

表-3.11 調査対象概要（覆工コンクリート）

| No. | 構造物 | 配合 | 確認事項 |
|-----|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 延長 2,978m 内空断面 78m ² | 24-21-20FA | 養生方法の違い 加温養生の影響 |
| 2 | 延長 1,916m 内空断面 78m ² | 21-15-40BB | 養生期間の影響 |
| 3 | 延長 175m 内空断面 88m ² | 27-18-20BB | 養生期間の影響 |
| 4 | 延長 1,194m 内空断面 50.4m ² | 21-15-40BB | 養生方法の違い 型枠材質の違い |
| 5 | 延長 749m 内空断面 65m ² | 21-15-40BB 坑口付近 30-21-20BB | 養生期間の影響 養生方法の違い |
| 6 | 延長 1,838m 内空断面 66m ² | 24-15-40BB | 養生方法の違い |
| 7 | 延長 2,158m 内空断面 72m ² | 普通 21-15-40BB 中流動 24-21-20BB | 中流動コンクリートの影響 |

(2) 養生期間の影響調査

No.2、No.3、No.5 の現場では、脱型までの養生期間の違いが透気係数に与える影響を調査した。

No.2 のトンネル(表-3.12 参照)では、一般的な養生期間 18 時間の場合 $1.757 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 4) だが、42 時間養生の場合 $0.702 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 3)、66 時間養生の場合 $0.255 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 3)、さらに養生時間を 90 時間に延長すると $0.238 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 3) となり、養生期間を長くする程品質が改善することが確認できた。

No.3 のトンネル(表-3.13 参照)では、外気の影響を受けやすい坑口から 20m 部分のみ移動式型枠を 1 週間存置して水分逸散抑制養生を実施した。透気係数は、18 時間養生の場合 $1.470 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 4) だが、1 週間養生した場合は $0.572 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 3) となり品質が改善することを確認した。

No.5 のトンネル(表-3.14 参照)では、中流動覆工コンクリートを使用した。透気係数は、18 時間養生の場合 $0.670 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 2) であるのに対し、90 時間養生の場合 $0.216 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ (ランク 2) となり品質がさらに改善できることが確認できた。

トンネル覆工コンクリートで標準的な 18 時間養生の場合の透気係数は、値が $1.0 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ 以上で品質が“悪い”と評価されるデータもあった。養生期間を 42 時間以上に延長することで、品質は向上し、評価は“普通”となることが確認できた。18 時間程度の若材齢でコンクリートが外気に露出され乾燥するとコンクリート表面の水和が阻害され組織が粗になったと考えられる。

表-3.12 透気試験結果 (No. 2)

| No. | 養生期間 | 測定箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}m^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|------|------|----------------------------------|--------------|------------|
| 1 | 18時間 | SL付近 | 0.664 | 38 | 6.6 |
| 2 | | SL付近 | 4.648 | 86 | 6.2 |
| - | | 対数平均 | 1.757 | 62 | 6.4 |
| 3 | 42時間 | SL付近 | 1.016 | 45 | 6.0 |
| 4 | | SL付近 | 0.381 | 31 | 6.7 |
| 5 | | SL付近 | 0.894 | 42 | 6.0 |
| - | | 対数平均 | 0.702 | 39 | 6.2 |
| 6 | 66時間 | SL付近 | 1.367 | 48 | 6.5 |
| 7 | | SL付近 | 0.118 | 21 | 6.2 |
| 8 | | SL付近 | 0.168 | 21 | 6.0 |
| 9 | | SL付近 | 0.155 | 24 | 6.4 |
| - | | 対数平均 | 0.255 | 29 | 6.3 |
| 10 | 90時間 | SL付近 | 0.138 | 26 | 6.5 |
| 11 | | SL付近 | 0.412 | 41 | 5.9 |
| - | | 対数平均 | 0.238 | 34 | 6.2 |

表-3.13 透気試験結果 (No. 3)

| No. | 養生期間 | 測定箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}m^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|------|--------|----------------------------------|--------------|------------|
| 12 | 18時間 | SL付近 | 7.761 | 83 | 4.0 |
| 13 | | SL付近 | 1.137 | 45 | 4.8 |
| 14 | | SL付近 | 1.530 | 49 | 4.9 |
| 15 | | SL付近 | 1.268 | 48 | 4.9 |
| 16 | | SL付近 | 0.401 | 32 | 4.6 |
| - | | 対数平均 | 1.470 | 51 | 4.6 |
| 17 | 1週間 | 坑口SL付近 | 0.624 | 37 | 4.1 |
| 18 | | 坑口SL付近 | 0.524 | 35 | 5.1 |
| - | | 対数平均 | 0.572 | 36 | 4.6 |

表-3.14 透気試験結果 (No. 5)

| No. | 養生期間 | 測定箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}m^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|------|------|----------------------------------|--------------|------------|
| 19 | 18時間 | SL付近 | 0.670 | 39 | 5.2 |
| 20 | 90時間 | SL付近 | 0.216 | 23 | 5.6 |

(3) 養生方法の影響調査

No.1、No.4、No.5、No.6 の現場では、18 時間で脱型後の養生方法の違いの影響を調査した。

No.1 のトンネル（表-3.15 参照）では、給水養生を材齢 4 週間まで実施している。透気係数は、給水養生の場合は $0.007 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 2）となり、無給水のシートによる水分逸散抑制養生の場合は $0.113 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）であった。

No.4 のトンネル（表-3.16 参照）では、SL から下に脱型後シートを貼り、水分逸散抑制養生を 2 週間実施した。SL から上は、特に養生はしていない。透気係数は、シートを貼っていない SL から 20cm 程度上部では $2.133 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 4）だが、シートにより養生した箇所は $0.491 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）でとなり、品質が改善した。

No.5 のトンネル（表-3.17 参照）では、給水養生を 2 週間実施した。透気係数は、シートによる水分逸散抑制養生を 2 週間実施した坑門壁面部分で、 $0.957 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）であるのに対し、給水養生を実施した覆工コンクリートは坑口から 30m 付近では $0.730 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）、坑内では $0.423 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）とランクは同一であるが品質が向上した。

No.6 のトンネル（表-3.17 参照）では、給水養生および一部ブロックにケイ酸系の含浸材を塗布した。透気係数は、シートによる水分逸散抑制養生を 2 週間実施した壁面部分で、 $0.276 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 3）であるのに対し、給水養生のみ実施したブロックで $0.031 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 2）、さらに含浸材塗布を実施した箇所は $0.013 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ （ランク 2）であり、品質の向上が確認できた。

給水養生を実施することで、覆工コンクリートにおいてもランク 2 を確保できることが確認できた。

表-3.15 透気試験結果 (No.1)

| No. | 養生方法 期間 | 測定 箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}/\text{m}^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|-----------------------|----------|--|--------------|------------|
| 21 | 水分逸散 抑制養生*1 4週間 | SL付近 | 0.113 | 13 | 6.5 |
| 22 | 給水養生*2 4週間 | SL付近 | 0.044 | 10 | 6.9 |
| 23 | | SL付近 | 0.001 | 5 | 6.9 |
| - | | 対数平均 | 0.007 | 8 | 6.9 |

*1：型枠存置

*2：吸引により、給水養生シートをコンクリート面に貼付け給水する養生

表-3.16 透気試験結果 (No. 4)

| No. | 養生方法 期間 | 測定 箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}m^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|------------|----------|----------------------------------|--------------|------------|
| 24 | なし | SL上 | 4.479 | 68 | 5.4 |
| 25 | | SL上 | 1.016 | 44 | 5.6 |
| - | | 対数平均 | 2.133 | 56 | 5.5 |
| 26 | 水分逸散 | SL下 | 0.976 | 43 | 5.4 |
| 27 | 抑制養生* | SL下 | 0.247 | 27 | 5.6 |
| - | 2週間 | 対数平均 | 0.491 | 35 | 5.5 |

* : シート養生

表-3.17 透気試験結果 (No. 5)

| No. | 養生方法 期間 | 測定 箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16}m^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|-----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|------------|
| 28 | 水分逸散 抑制養生* ¹ 2週間 | 壁面 | 0.957 | 35 | 5.1 |
| 29 | 給水養生* ² 2週間 | 坑口SL付近 | 0.670 | 3 | 5.2 |
| 30 | | 坑口SL付近 | 0.797 | 71 | 5.7 |
| - | | 対数平均 | 0.730 | 37 | 5.5 |
| 31 | 給水養生* ² 2週間 | SL付近 | 0.458 | 5 | 6.2 |
| 32 | | SL付近 | 0.195 | 8 | 5.6 |
| 33 | | SL付近 | 0.540 | 15 | 5.8 |
| 34 | | SL付近 | 0.136 | 20 | 6.9 |
| 35 | | SL付近 | 0.266 | 30 | 6.9 |
| 36 | | SL付近 | 0.843 | 40 | 5.7 |
| 37 | | SL付近 | 0.708 | 50 | 5.8 |
| 38 | | SL付近 | 0.979 | 60 | 5.7 |
| - | 対数平均 | 0.423 | 29 | 6.1 | |

*1 : シート養生

*2 : 吸引により、給水養生シートをコンクリート面に貼付け給水する養生

表-3.18 透気試験結果 (No. 6)

| No. | 養生方法 期間 | 測定 箇所 | 透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) |
|-----|---------------|----------|--|--------------|------------|
| 39 | 通常養生 | 坑口壁面 | 0.276 | 23 | 4.3 |
| 40 | 給水養生* +含浸材 | SL付近 | 0.004 | 5 | 5.7 |
| 41 | | SL付近 | 0.039 | 14 | 5.7 |
| - | | 対数平均 | 0.013 | 9.5 | 5.7 |
| 42 | 給水養生* | SL付近 | 0.069 | 14 | 5.9 |
| 43 | | SL付近 | 0.057 | 12 | 5.6 |
| 44 | | SL付近 | 0.018 | 8 | 6.3 |
| 45 | | SL付近 | 0.012 | 6 | 6.4 |
| - | | 対数平均 | 0.031 | 10 | 6.1 |

* : 吸引により、給水養生シートをコンクリート面に貼付け給水する養生

(4) アクアカーテンによる表層品質の向上効果

本節では、明かり構造物 44 箇所、トンネル覆工コンクリート 66 箇所の透気試験の結果を報告する。図-3.25 に明かりとトンネルに分けた透気係数の判定ランクの割合を示す。養生方法や配合等、施工条件は異なる比較だが、ここでは、それらを考慮せずに、割合の分布を比較した。

ランク 3 の“普通”の割合は、どちらも 50%程度であるが、ランク 4 以下の“悪い”の割合は明かり構造物で 5%であるのに対し、覆工コンクリートは 14%であった。また、ランク 1 と 2 の“良い”の割合は、明かり構造物が 45%であるのに対し、覆工コンクリートは 30%であった。これらは、明かり構造物の養生期間が 1 週間以上を確実に確保しているのに対し、覆工コンクリートでは、従来の条件である 18 時間で脱型してその後養生はしない条件があったためと考えられる。

このような多数の構造物に対する現場透気試験結果を整理すると、次のようにまとめられる。

- ①現場透気試験により、コンクリート表層の品質を透気係数によって、評価することができた。
- ②給水養生を実施することで、覆工コンクリートはランク 2 または 3 が確保できることが確認できた。
- ③覆工コンクリートは、養生期間を 42 時間以上とするとランク 3 以上の品質が確保できることが確認できた。
- ④ランク 1 と 2 の“良い”の割合は、覆工コンクリートは 30%であり、明かり構造物の方が品質は高い傾向にあることが確認できた。

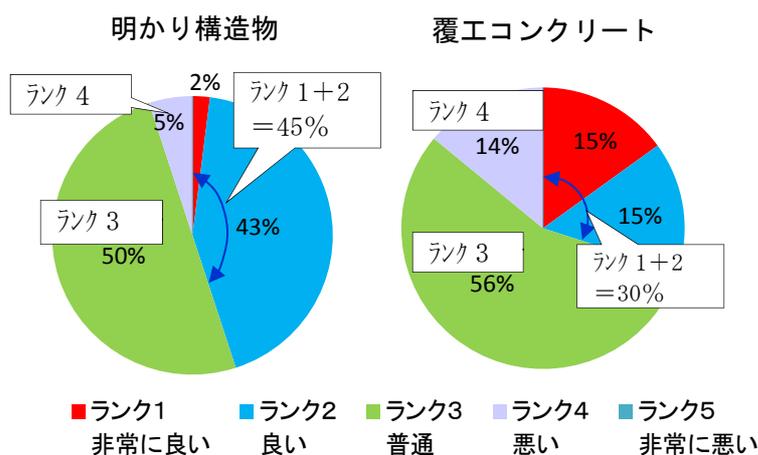


図-3.25 透気係数の判定ランキング

3.6 まとめ

1) 強度発現特性の評価

示方書養生、短縮養生は、長期の強度増進がほとんど見られず、材齢経過とともに給水養生や水中養生との差が大きくなる。給水養生の延長によって長期強度の改善が見られ、水中養生の材齢 28 日と同等以上の圧縮強度が得られる。

乾燥による圧縮強度への影響は、乾燥が進行した材齢 91 日以降は、無視できるものと考えられる。

普通ポルトランドセメントよりも、高炉セメントを用いたコンクリートは養生条件の影響を受けやすい。同様なことが質量変化率についても確認できることから、高炉セメントに給水養生を適用することは効果的である。

大型試験体での反発度試験結果から、過度な給水はコンクリート表面の脆弱化が深化することもあるため、養生水は過度な水を連続的供給するよりも、間欠的に供給するのが望ましい。なお、給水養生の給水量は、対象範囲のコンクリート面全体が濡れることが必要な量を施工によって確認する。給水間隔は、コンクリート面が乾燥しない間隔とし、現場での実施状況によって判断する。

2) 吸水率試験の評価

浸漬 1 日目の吸水量を 100% として、浸漬開始からの吸水量は、7 日浸漬で 20% 以下、14 日浸漬で 5% 以下となっており、コンクリートの吸水が有効である期間は、浸漬後 7 ～14 日程度であることが確認できた。

3) 中性化促進試験の評価

中性化促進試験結果では、標準養生のケースよりも給水養生を行ったケースの方が中性化深さは、小さくなる傾向を示した。反発度の結果では、標準養生の方が、反発度が高くなっていたため、コンクリート表面から給水養生中の流水へのセメント成分の溶脱を懸念したが、中性化深さは逆に小さくなった。給水養生による十分な給水によりコンクリート表面の組織が緻密になったと考えられる。

4) 凍結融解試験の評価

湿潤養生期間が短く養生が不十分でも、凍結融解に伴う相対動弾性係数の低下はさほど大きくないが、質量変化率は、十分な養生を行ったものと大きな差が見られ、コンクリート標準示方書で示されている湿潤養生の標準日数およびそれより短い養生日数では、十分な凍結融解抵抗性は確保されない。

給水養生を行うことにより質量変化速度は大幅に低減され、給水 1 週間の延長で水中養生を 28 日間行ったものと同程度の凍結融解抵抗性を確保できる。

5) 細孔径分布試験の評価

給水養生期間の延長とともに、細孔径分布は、微小径のものが増加し緻密な細孔構造となる。特に養生時間が極端に短いトンネル（BT）においては、細孔直径 1000nm 付近になり、給水養生の効果が顕著である。

6) 透気試験の評価

トンネル用の高炉セメントにおける透気試験は、通常のトンネル施工での養生と比較して、給水養生を行なうことで透気性のグレードで1～2、コンクリート表面の緻密性が向上する。

7) 現場覆工コンクリートの透気係数の評価

給水養生を実施することで、現場の覆工コンクリートは、透気係数のランクが2または3を確保できることが確認できた。また、養生期間を42時間以上とするとランク3以上の品質が確保できることが確認できた。

参考論文

- 1) 後藤幸正、尾坂芳夫監訳：ネビルのコンクリートの特性,技報堂出版株式会社,昭和 54 年,pp235-240
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕2012 年制定
- 3) 岡崎慎一郎、八木翼、岸利治、矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究,セメントコンクリート論文集,No.60,pp.227-234,2006
- 4) 福留和人、庄野昭、古川幸則：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現特性に及ぼす養生の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.32,No.1,2010,pp.1307-1312
- 5) Prince,W.H.:Factors Influencing Concrete Strength,Journal of the ACI,Vol.47,pp.427-432
- 6) 永松静也、佐藤嘉昭、竹田吉紹：あらかじめ乾燥下コンクリートのクリープ性状および乾燥の程度を含んだクリープ関数,日本建築学会構造系論文報告集,No.351,pp.12-21,1985
- 7) 白岩誠史、古川幸則、庄野昭：型枠取りはずし後の給水養生による給水量および給水期間の検討,土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月),V-674,pp.1347-1348
- 8) 喜多達男、古川幸則、庄野昭、福留和人：湿潤養生条件がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響,土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月),V-429,pp.857-858
- 9) 豊村恵理、松崎晋一郎、伊与田岳史：養生方法およびその期間を考慮した中性化速度式に関する一検討,土木学会第 66 回年次学術講演会,V-284,pp.567-568
- 10) Seishi Shiraiwa, Kazuto Fukudome, Atsushi Saito, Toshinari Hayashi : Effects of Improving Endurance of Concrete Structures by Wet Curing System, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, pp.155-162, 2015.
- 11) 齋藤淳、福留和人、古川幸則、庄野昭：湿潤養生条件がコンクリートの細孔径分布に及ぼす影響評価手法に関する研究,土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造),Vol..69,No.3,270-280,2013
- 12) Trent,R.and Frenzer,G.:A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”,International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering,pp.985-992,Spt.1995
- 13) 新居秀一、白岩誠史、川中政美、庄野昭：現場透気試験によるコンクリートの表層品質調査,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016.

第4章 モデル現場での適用事例

4.1 はじめに

NATMにより施工される覆工コンクリートには、図-4.1に示すように様々な劣化が発生しており¹⁾、特にトンネル坑口付近は、鉄道トンネルの調査結果²⁾および道路トンネルの調査結果³⁾から、ひび割れや剥離等の以下のような劣化が発生しやすい傾向にあることが報告されている。

- 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) 外気の湿度低下の影響による乾燥収縮ひび割れ
- iii) 冬期の凍結融解作用による雨掛り部分の剥離、剥落（凍害）
- iv) 融雪剤に起因する塩分の浸透による鉄筋腐食ひび割れ（塩害）

以上のような坑口付近の覆工コンクリートの劣化を抑制し、トンネル構造物全体の耐久性を向上させるために、i)による外部拘束ひび割れの発生を防ぐことを目的として“部分パイプクーリング”⁴⁾、ii)～iv)による乾燥収縮ひび割れや凍害および塩害を防ぐことを目的として“シート吸引方式給水養生工法”⁵⁾、⁶⁾を、“H26-28 金沢東環神谷内トンネル（Ⅱ期線）工事”の坑口付近覆工コンクリートの施工に適用した。

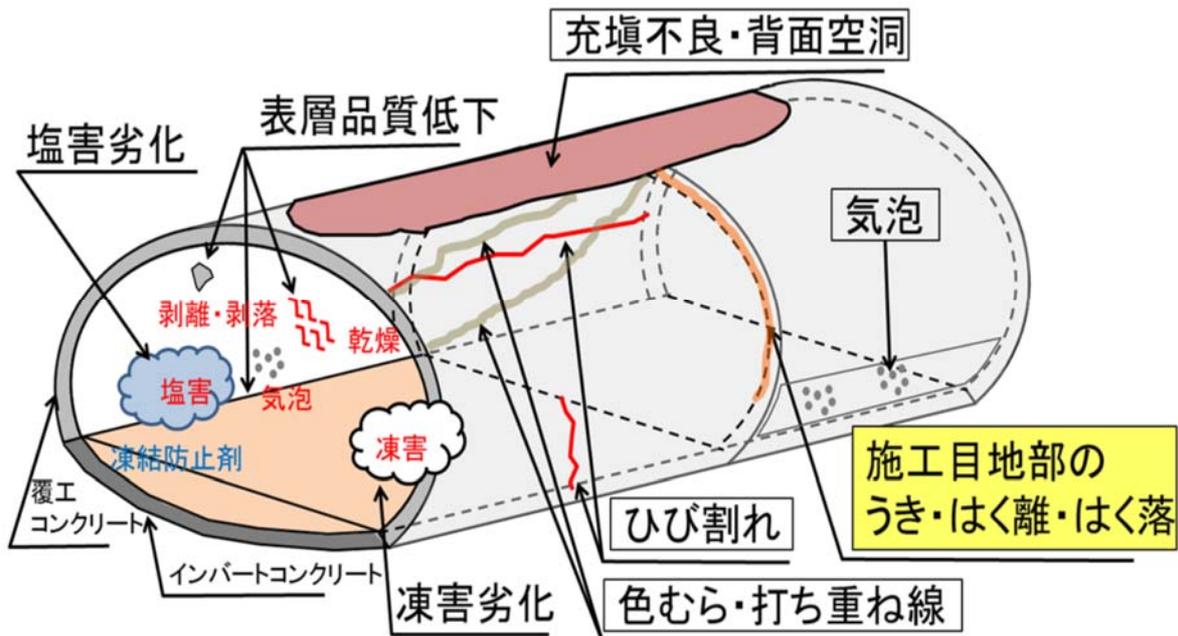


図-4.1 覆工コンクリートの劣化及び不具合の発生しやすい部位¹⁾

4.2 3次元FEM温度応力解析による事前検討

(1) 解析モデルおよび入力条件

部分パイプクーリングおよび膨張コンクリートの計画を行うにあたり、3次元FEM温度応力解析を実施した。解析モデルを図-4.2および図-4.3に示す。解析モデルは、図-4.2においてx方向、y方向とも1/2でモデル化しており、全体として1/4モデルとなっている。

入力条件は、表-4.1（2012年制定コンクリート標準示方書設計編に準拠）、覆工コンクリートの配合は表-4.2に示すとおりである。配合No.Aがクーリング実施箇所、No.Bが膨張コンクリート適用箇所の配合である。また、打設時期は、外気温が最も高くなる8月1日（想定外気温28℃、コンクリート温度31℃）とした。

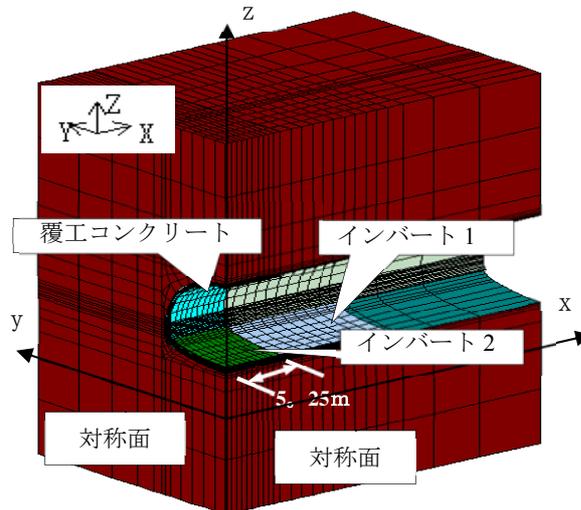


図-4.2 三次元FEM温度応力解析1/4モデル図

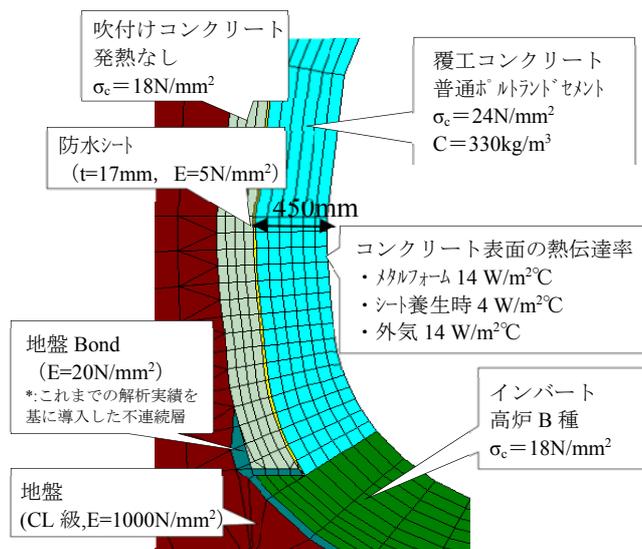


図-4.3 解析モデル詳細図

表-4.1 解析入力値

| 物性値 | 発熱体 | | 非発熱体 | |
|--|---|--|-------|-------|
| | 覆工コン N:普通セメント | インハートコン BB:高炉B種 | 防水シート | 地盤 |
| 熱伝導率 (W/m°C) | 2.7 | 2.7 | 0.5 | 3.5 |
| 比熱 (kJ/kg°C) | 1.15 | 1.15 | 2.60 | 0.80 |
| 断熱温度上昇量 Q(t) | 断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$ $Q_{\infty} = a + b \times T_a$ $r = g + h \times T_a$ | | — | — |
| | 単位セメント量 350kg/m ³ [a=58.15 b=-0.0391 g=0.221 h=0.03525] | 単位セメント量 290 kg/m ³ [a=51.25 b=-0.05794 g=0.1274 h=0.03291] | | |
| 熱膨張 係数 (×10 ⁻⁶ /°C) | 10 | 12 | 12 | 12 |
| ポアソン比 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.25 |
| 有効ヤング 係数 E _c (t) (N/mm ²) | $E_c(t) = \Phi_c(t') \times 6.3 \times 10^3 \cdot f'_c(t')^{0.45}$ Φ _c (t'):最高温度に達する有効材齢まで 0.42 最高温度に達する有効材齢 +1 有効材齢以降:0.65 | | 5 | 1 000 |
| 圧縮強度 f' _c (t) (N/mm ²) | $f'_c(t) = \frac{t'}{a + b(t' - S_f)} f'_c(t) \cdot (t' - S_f)$ | | 18 | 24 |
| 引張強度 f _{tk} (t) (N/mm ²) | $f_{tk}(t) = 0.13 \cdot f'_c(t)^{0.85}$ | | 0.10 | 20 |
| 自己収縮 ε _{ij, ag} (μ) | $\varepsilon_{ij, ag} = -\beta \varepsilon'_{as\infty} [1 - \exp\{-a(t' - t_s)^b\}]$ | | — | — |

Q_∞ : 終局断熱温度上昇量、 r : 温度上昇速度にかかわる定数

t : 材齢 (日)、 t₀ : 温度上昇の原点

s : 温度上昇に関するパラメータ

Φ_c(t) : クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数

f'_c(t) : 有効材齢 t' 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t' : 有効材齢 (日)

c₁、 c₂ : 養生方法等で定まる係数 (c₁=0.13、 c₂=0.85 が標準)

β : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数

ε' _{as∞} : 自己収縮ひずみの最終値 (μ)、

a、 b : 自己収縮の進行特性を表す係数、 t_s : 凝結の始発 (日)

単位セメント量 : 配合 No.B に添加する膨張材はセメントとして解析

表-4.2 覆工コンクリート配合表

| No. | W/C | s/a | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-----|------|------|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | (%) | (%) | C | Ex | W | S1 | S2 | G | Ad |
| A | 52.2 | 49.0 | 330 | 0 | 172 | 574 | 283 | 903 | 3.3 |
| B | 52.2 | 49.0 | 310 | 20 | 172 | 574 | 283 | 903 | 3.3 |

注) C : 普通ポルトランドセメント、Ex : 膨張材

Ad : 増粘剤一液系高性能 AE 減水剤

(2) 解析結果

1) ひび割れ抑制対策未実施の場合

ひび割れ抑制対策を実施しない場合の部材中心の最高温度およびひび割れ指数（以下、指数）分布図の解析結果を図-4.4に示す。部材中心の最高温度が55.0℃、指数は0.90、ひび割れ発生確率は67%となり、ひび割れの発生する可能性が高い結果となった。また、図-4.4に示すように、指数1.0以下となり引張応力がコンクリートの引張強度を上回る範囲は、延長方向6.0m×高さ1.0mの範囲（延長方向は部材延長の60%程度、高さ方向は部材厚の2倍程度）であり、これまでの実績と同程度の範囲であった。

2) 部分パイプクーリング実施の場合

部分パイプクーリングを実施した場合の部材中心の最高温度および指数分布図の事前解析結果を図-4.5に示す。解析および過去の実績を考慮して検討した結果、クーリングパイプは図-4.6に示すように設置し、通水量は12L/分、通水期間は34時間とし、クーリングパイプ表面の熱伝達率は田辺らの式⁷⁾により234W/m²℃とした。冷却部の最高温度が46.3℃、指数は1.18、ひび割れ発生確率は29%となり、ひび割れの発生する確率が無対策と比較して40%程度低減できることが確認できた。

3) 膨張材コンクリート適用の場合

膨張コンクリートを適用した場合の部材中心の最高温度および指数分布図の事前解析結果を図-4.7に示す。膨張量の設定に関する解析への入力値は、示方書設計編に従った。部材中心の最高温度が55.0℃、指数は1.14、ひび割れ発生確率は32%となり、部分パイプクーリングと比較すると僅かにひび割れ発生確率は高いが、無対策と比較すると35%程度低減できることが確認できた。

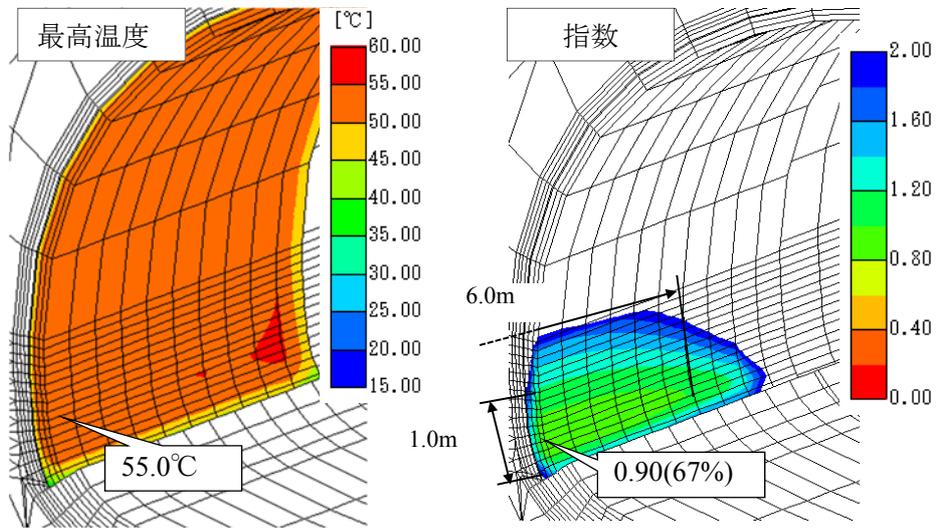


図-4.4 事前解析時の部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(ひび割れ抑制対策未実施の場合)

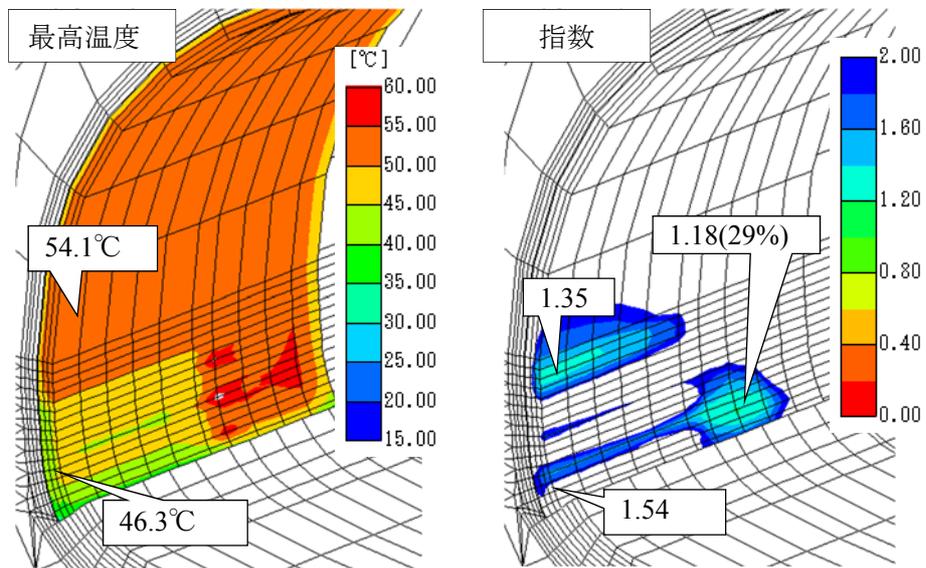


図-4.5 事前解析時の部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(クーリング実施 (12L/分, 34時間) の場合)

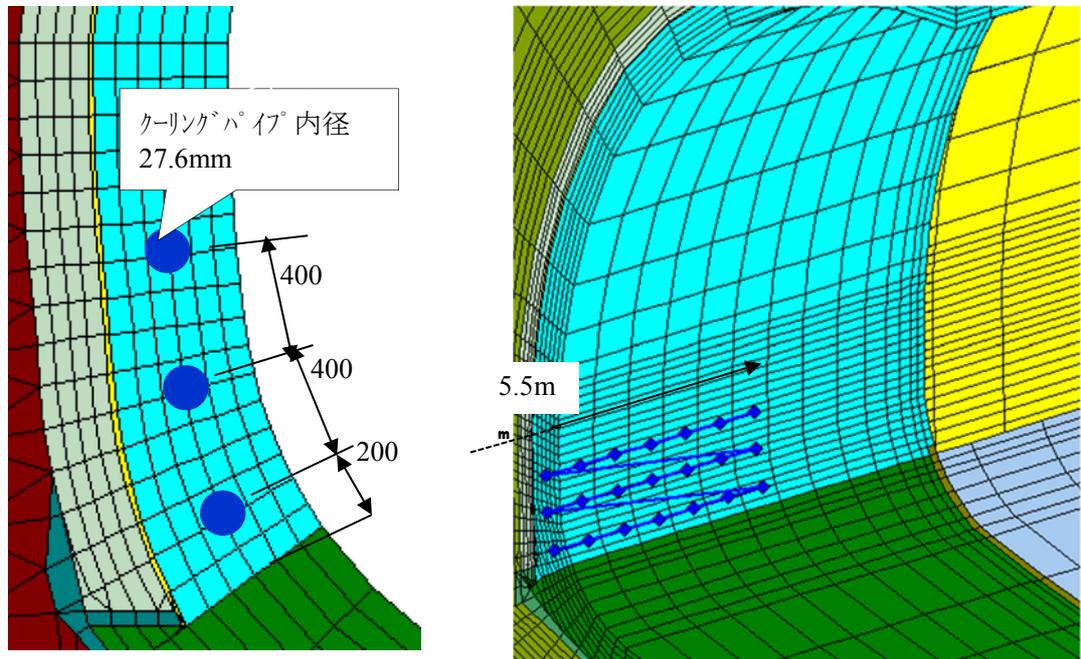


図-4.6 クーリングパイプ配置図

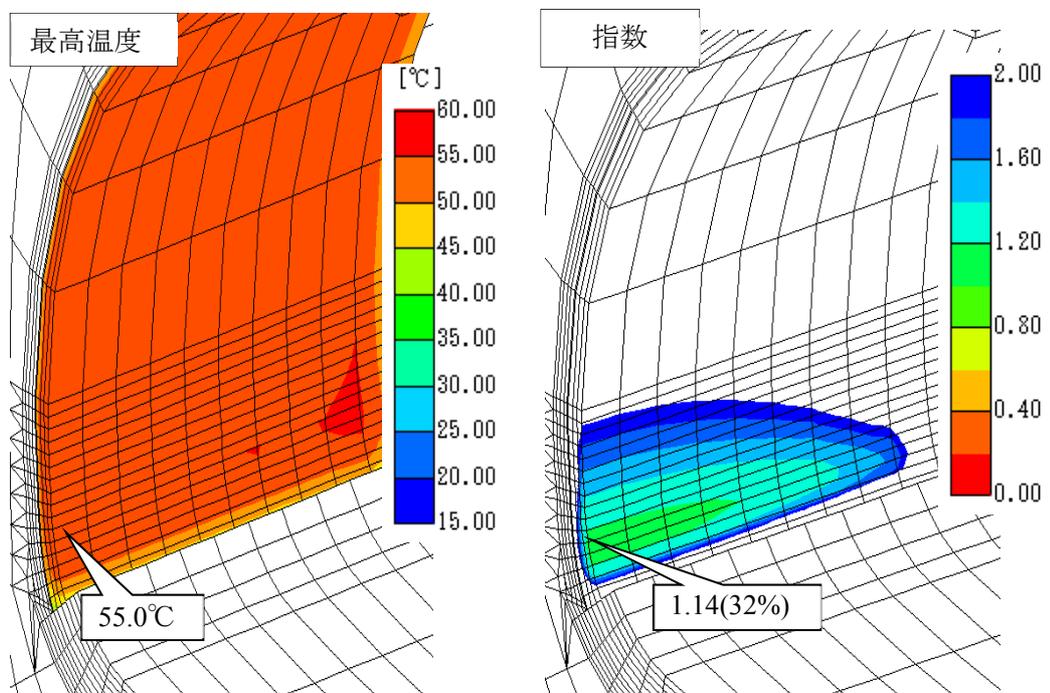


図-4.7 事前解析時の部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(膨張コンクリート適用の場合)

4.3 現場適用時のシステム

(1) 部分パイプクーリング

クーリングパイプの設置状況を写真-4.1 および写真-4.2 に示す。内径 27.6mm の亜鉛メッキ鋼管を 400mm 間隔で側壁中央に配置し、クーリングパイプの流入口および流出口には、グラウトホースを使用した。

打設開始時から通水を開始し、打込まれたコンクリートを即座に冷却し、打設翌日の移動式型枠移動時も連続して通水できるように工夫した。通水方式は、セントルに設置した 200 L の水槽および冷却装置を使用した循環式としているため、通水開始から停止まで、新たな水の補給は必要ない。

また、クーリング終了後、パイプは無収縮モルタルを圧送して充填した。配合は、W/C=23 %とし、フロー値は $18 \pm 1.5 \text{ cm}$ とした。フロー値は、地組みしたクーリングパイプに充填する充填試験により選定した。

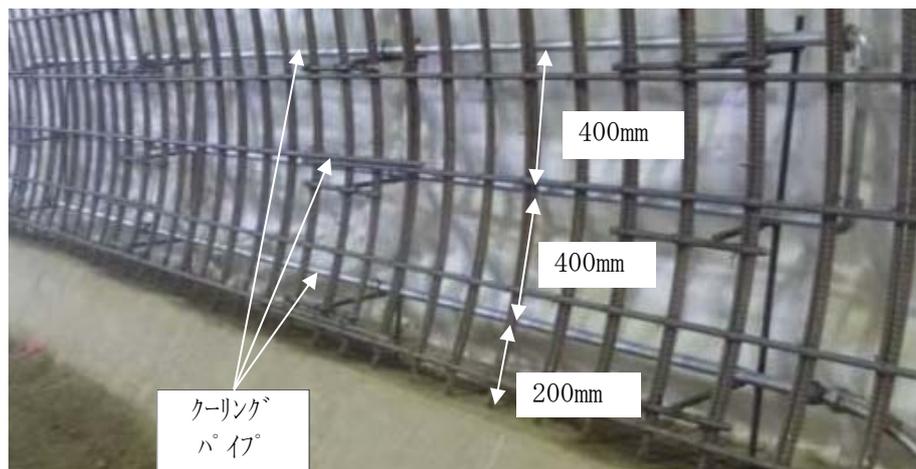


写真-4.1 クーリングパイプ設置状況

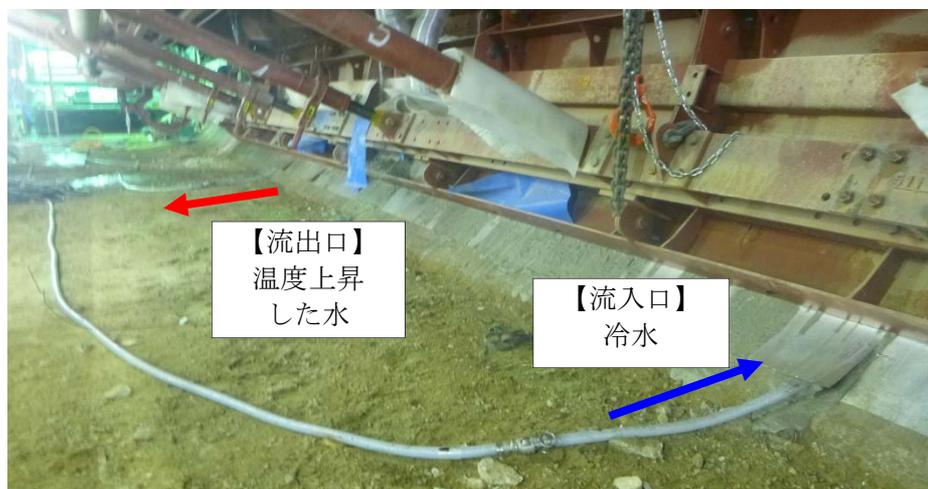


写真-4.2 クーリングパイプ通水状況

表-4.3 現場計測実施ブロックの打設状況

| 項目 | 5BL | 6BL | 7BL |
|----------------|------|-------------------------|-------------------------|
| 打設日 | 9月5日 | 8月30日 | 8月25日 |
| 配合No. | B | A | A |
| 膨張材 | あり | なし | なし |
| 部分パイプ クーリング | 未実施 | 実施 | 実施 |
| 外気温 | 25℃ | 20℃ | 27℃ |
| 打込温度 | 30℃ | 26℃ | 29℃ |
| 通水期間 (通水停止) | — | 30時間 (8/31 14:00) | 34時間 (8/25 18:00) |
| 通水量 | — | 16ℓ/分 | 16ℓ/分 |

(2) アクアカーテン

現場適用状況を写真-4.3に示す。両側の下半部に設置した吸引口から、覆工コンクリートとシートとの間の空気を吸引ファンで排気している。また、給水チューブは、給水ムラを防ぐために天端に3本配置し、4時間程度に1回（タイマーで自動制御）、給水ポンプで送水する。1回の給水時間は2分程度である。



写真-4.3 シート吸引方式給水養生工法適用

4.4 現場適用効果の確認（部分パイプクーリング）

(1) 温度およびひずみ測定結果による効果確認

本現場では、表-4.2 に示すように、配合 No.A により部分パイプクーリングによる対策を実施した 7BL（2016年8月25日打設、通水時間34時間、通水量160ℓ/分）、6BL

（2016年8月30日打設、通水時間30時間、通水量は160ℓ/分）、配合 No.B により膨張コンクリートによる対策を実施した 5BL（2016年9月5日に打設）において、図-4.8 に示す位置の温度および全ひずみを測定した。測点1および2は冷却範囲の内部温度であり、測点1は更に拘束ひずみが最も卓越する箇所である。測点3はクーリングによる冷却効果の影響がない内部温度である。

1) 熱膨張係数の算出

部分パイプクーリングを実施した 6～7BL および膨張コンクリートを適用した 5BL において、無応力計にて測定した温度と全ひずみの関係を図-4.9 および図-4.10、図-4.11 に示す。いずれの場合も“a), 温度上昇初期： α_a （材齢0～7時間程度）”、“b), 温度上昇後期： α_b （材齢8～19時間程度）”、“c), 温度降下期： α_c （材齢20時間以上）”の3区分に分けられ、a)については、既往の論文^{8), 9)}を参考に、コンクリートの凝結が終結前であり、拘束ひずみが生じない期間であるため、以後の温度ひずみや応力等の算出時は、考慮しないこととした。

膨張コンクリートを適用した 5BL の線膨張係数は、温度ひずみに膨張ひずみ加わるため、膨張作用が大きい温度上昇期の線膨張係数は、他の 7BL および 6BL よりも大きな値となっている。これは、張らの試験結果¹⁰⁾でも同様の傾向および値が得られており、膨張コンクリートの打設初期の膨張特性を把握するための貴重なデータと考えられる。（膨張コンクリートの膨張メカニズムは、参考資料3参照。）

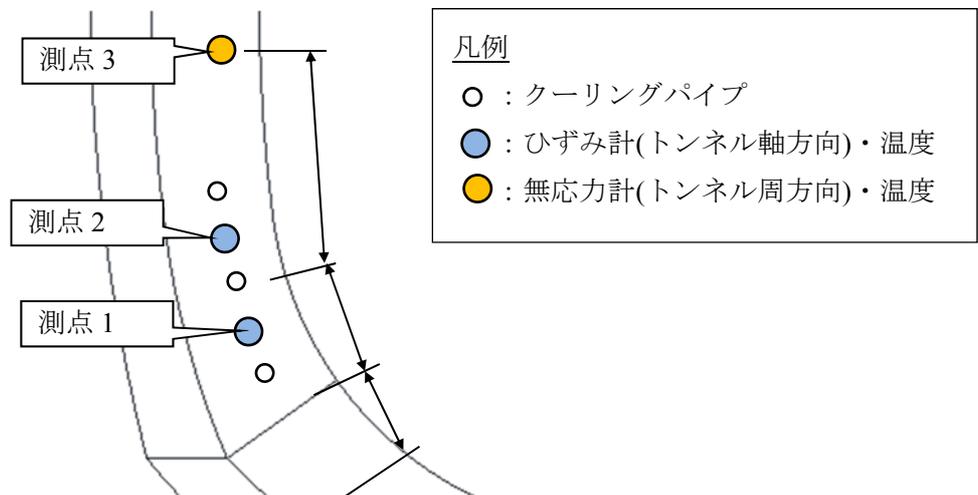


図-4.8 クーリングパイプ配置

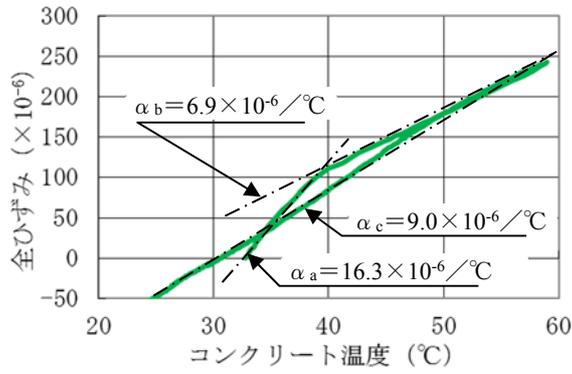


図-4.9 温度と全ひずみの関係
(7BL : 部分パイプクーリング)

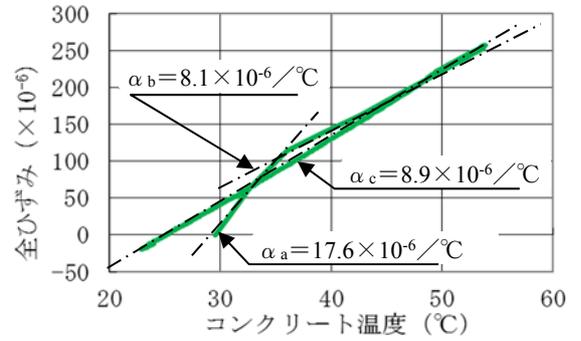


図-4.10 温度と全ひずみの関係
(6BL : 部分パイプクーリング)

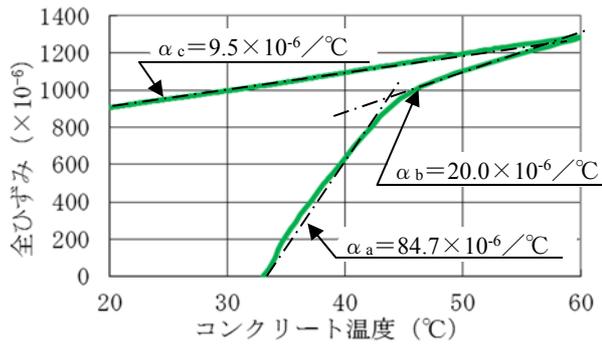


図-4.11 温度と全ひずみの関係
(5BL : 膨張コンクリート)

2) ひずみおよび温度計測結果

5～7BLにおける材齢6ヶ月までのひずみおよび温度の計測結果を図-4.12および図-4.13、図-4.14に示す。全ひずみおよび温度ひずみ（ただし、本論文で扱う温度ひずみは、自己収縮および乾燥収縮、膨張コンクリートを適用した5BLにおいては膨張ひずみも含む。）、拘束ひずみは、高瀬らの提案⁹⁾した式を参考に式(1)～(3)に従い算出した。温度ひずみの計算は、前述の通り α_a は考慮していない。

最大膨張時の温度ひずみは、7BLで 191×10^{-6} （材齢12時間）、6BLで 116×10^{-6} （材齢12時間）、5BLで 1579×10^{-6} （材齢16時間）となった。膨張材の膨張量の温度依存性により膨張ひずみが 1000×10^{-6} を超えることは、東ら¹¹⁾によって報告されており、本計測でも同程度の膨張ひずみが計測された。本計測時の5BLの最大温度は 60°C であった。また、材齢6ヶ月程度での拘束ひずみは、部分パイプクーリングを実施した7BLで -16.8×10^{-6} 、6BLで 10.1×10^{-6} 、膨張コンクリートを適用した5BLで -1207.6×10^{-6} となり、膨張コンクリートを適用した5BLの方が、拘束ひずみが大きく低減できていることが確認できた。

$$\varepsilon_{i1} = C \times \varepsilon_{mi} + \gamma \times (T_i - T_0) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\varepsilon_{i2} = \alpha_b \times (T_i - T_0) + \alpha_c \times (T_i - T_1) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\varepsilon_{i3} = \varepsilon_{i2} - \varepsilon_{i1} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ε_{i1} : 全ひずみ($\times 10^{-6}$), C : 校正係数

ε_{mi} : ひずみ計の指示値($\times 10^{-6}$)

γ : ひずみ計線膨張係数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), T_i : コンクリート温度($^\circ\text{C}$)

T_0 : コンクリート打込み温度($^\circ\text{C}$), ε_{i2} : 温度ひずみ($\times 10^{-6}$),

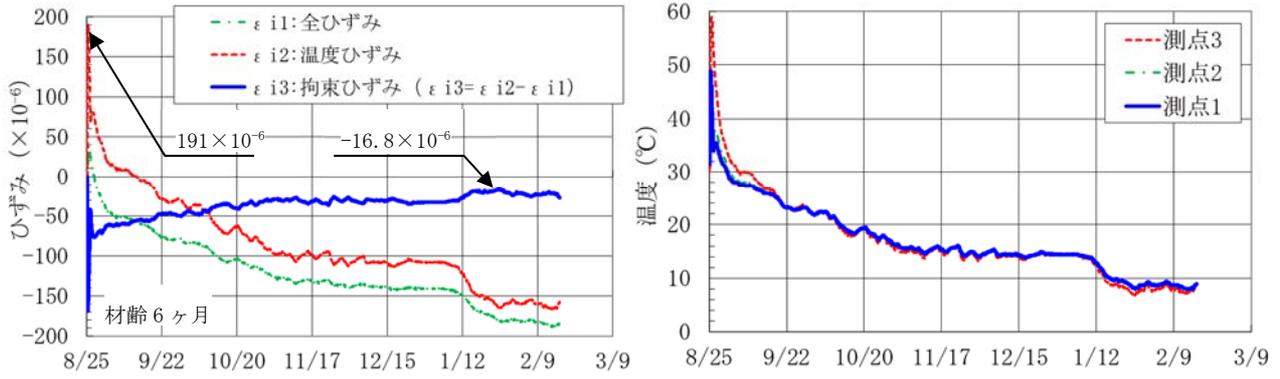


図-4.12 材齢6ヶ月までのひずみ（測点1）および温度計測結果
（7BL：部分パイプクーリング）

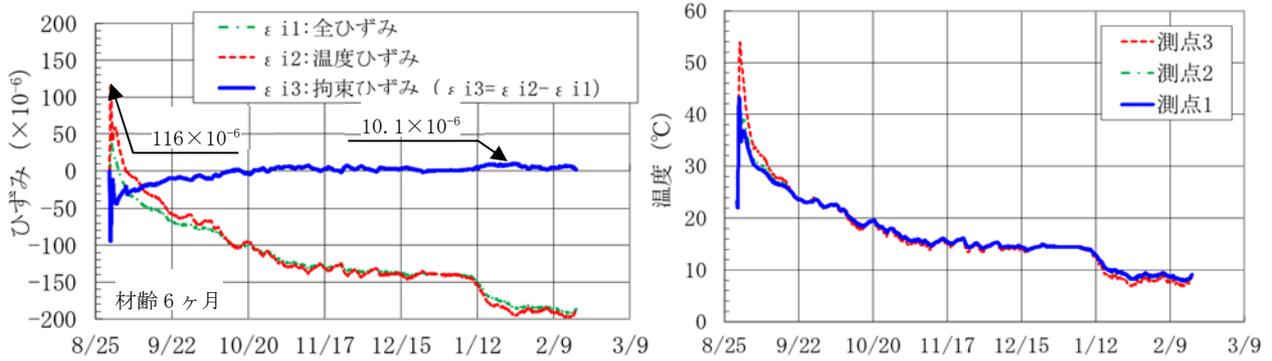


図-4.13 材齢6ヶ月までのひずみ（測点1）および温度計測結果
（6BL：部分パイプクーリング）

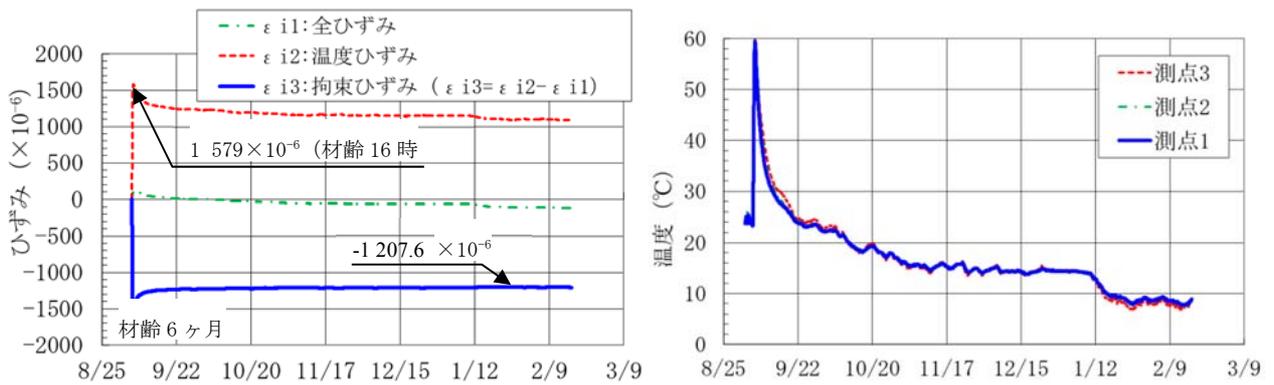


図-4.14 材齢6ヶ月までのひずみ（測点1）および温度計測結果
（5BL：膨張コンクリート）

図-4.15 および図-4.16 にクーリング実施スパンの材齢初期のひずみ計測結果を示す。7BL では材齢 34 時間、6BL では 30 時間での通水停止後の温度上昇により、拘束ひずみがそれぞれ 34×10^{-6} 、 31×10^{-6} 低減できたことが確認できた。また、6BL については、隣接する膨張コンクリートを適用した 5BL 打設時に、5BL 打設時の膨張の影響によると考えられる 10×10^{-6} 程度の拘束ひずみの低減が確認された。

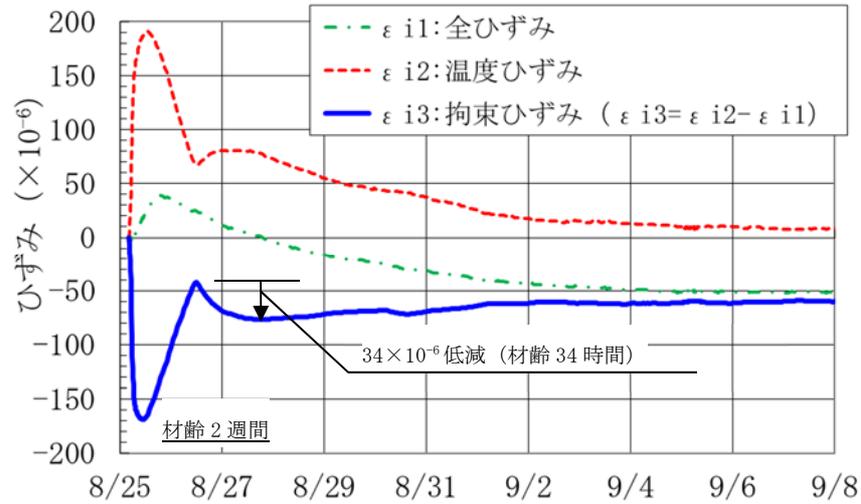


図-4.15 材齢 2 週間までのひずみ計測結果
(7BL : 部分パイプクーリング)

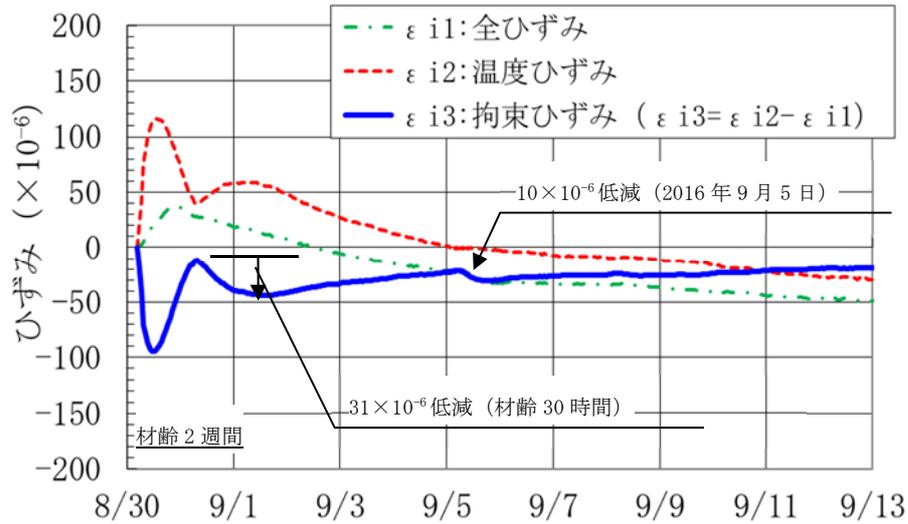


図-4.16 材齢 2 週間までのひずみ計測結果
(6BL : 部分パイプクーリング)

3) 引張応力の推定

部材内部に発生した引張応力の推定は、2012年制定コンクリート標準示方書設計編に従い1時間ごとのコンクリートのヤング係数を算出し、計測された拘束ひずみの1時間ごとの増分を乗じて累計して算出した。その結果を図-4.17および図-4.18、図-4.19に示す。この結果、引張応力の最大値が部分パイプクーリングを実施した7BLで 2.3N/mm^2 、6BLで 1.5N/mm^2 となり、膨張コンクリートを適用した5BLで 3.0N/mm^2 となった。表-4.14に示すように、6BLについては打込み温度が 26°C と他のブロックよりも低いこともあり応力が最も小さくなったと考えられる。5BLおよび7BLについては打込み温度がほぼ同程度であるが、7BLの方が、応力小さく、部分パイプクーリングによる対策の方が、ひび割れ抑制効果が高い可能性がある。これは、図-4.17に示すように、コンクリートの膨張量は材齢16時間で最大値となるが、その期間は拘束ひずみの生じにくい“a)、温度上昇初期：材齢0～7時間程度”および“b)、温度上昇後期：材齢8～19時間程度”にあたるが、部分クーリングの通水停止後の拘束ひずみの減少は、図-4.15および図-4.16に示すように、拘束ひずみの発生しやすい“c)、温度下降期：材齢20時間以上”に起こることが要因と考えられる。

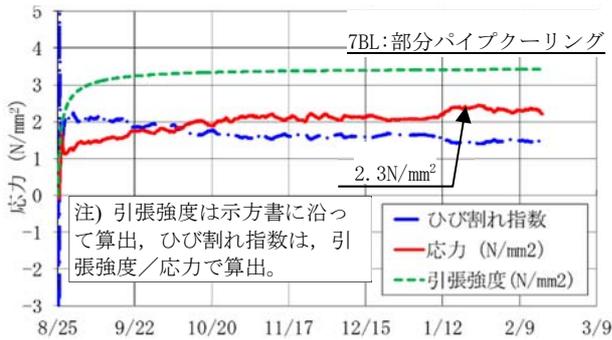


図-4.17 引張応力の推定結果
(7BL：部分パイプクーリング)



図-4.18 引張応力の推定結果
(6BL：部分パイプクーリング)

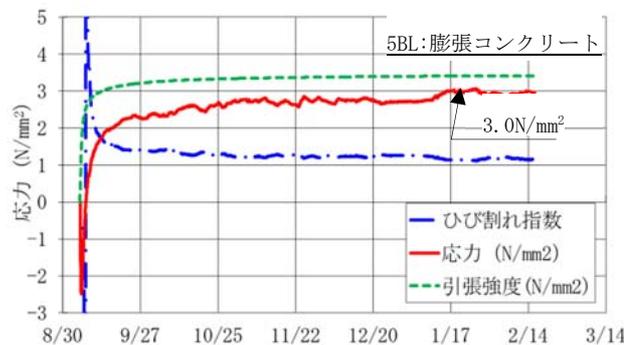


図-4.19 引張応力の推定結果
(5BL：膨張コンクリート)

(2) 事後解析による効果確認

計測された外気温およびコンクリート打込み温度、熱膨張係数、断面計測による余堀を考慮した側壁厚（530 mm）を解析に反映させ、5BL から 7BL の現状を再現した事後解析を実施した。図-4.20 に部材中心の最高温度および指数分布図の解析結果を示すが、全てのブロックについて指数は 1.1 以上となり、ひび割れ発生確率が 30% 以下となった。また、表-4.4 に温度および引張応力の実測値との比較を示す。温度の事後解析値と実測値は概ね一致しているが、引張応力に関しては、5BL および 6BL は概ね近似しているが、7BL は多少乖離している。

実構造物の全ひずみの計測結果から、引張応力を推定し、ひび割れ発生危険度を推定する方法は、有効であると考えるが、全ひずみの実測値から引張応力を精度よく推定する方法、解析値との比較方法については、今後の課題である。

また、事後解析の条件で、無対策の場合および他の対策（7BL および 6BL は膨張コンクリート、5BL は部分パイプクーリング）を実施した場合の解析を実施し、部材中心の指数分布図の解析結果を図-4.21 に示す。それぞれ図中の赤枠が実際に実施した対策における事後解析の結果である。7BL、6BL、5BL とも無対策の場合、指数が 1.0 以下、ひび割れ発生確率が 41～63% となり、ひび割れの発生する可能性が非常に高かったが、部分パイプクーリングまたは膨張コンクリートによる対策を実施したことで、指数 1.1 以上、ひび割れ発生確率 12～28% に低減できたことが確認できた。部分パイプクーリングおよび膨張コンクリートによる対策とも無対策から 30% 程度ひび割れ発生確率を低減できた。また、膨張コンクリートによる対策よりも、部分パイプクーリングによる対策の方が、ひび割れ発生確率を 4% 程度低減できることが確認できた。

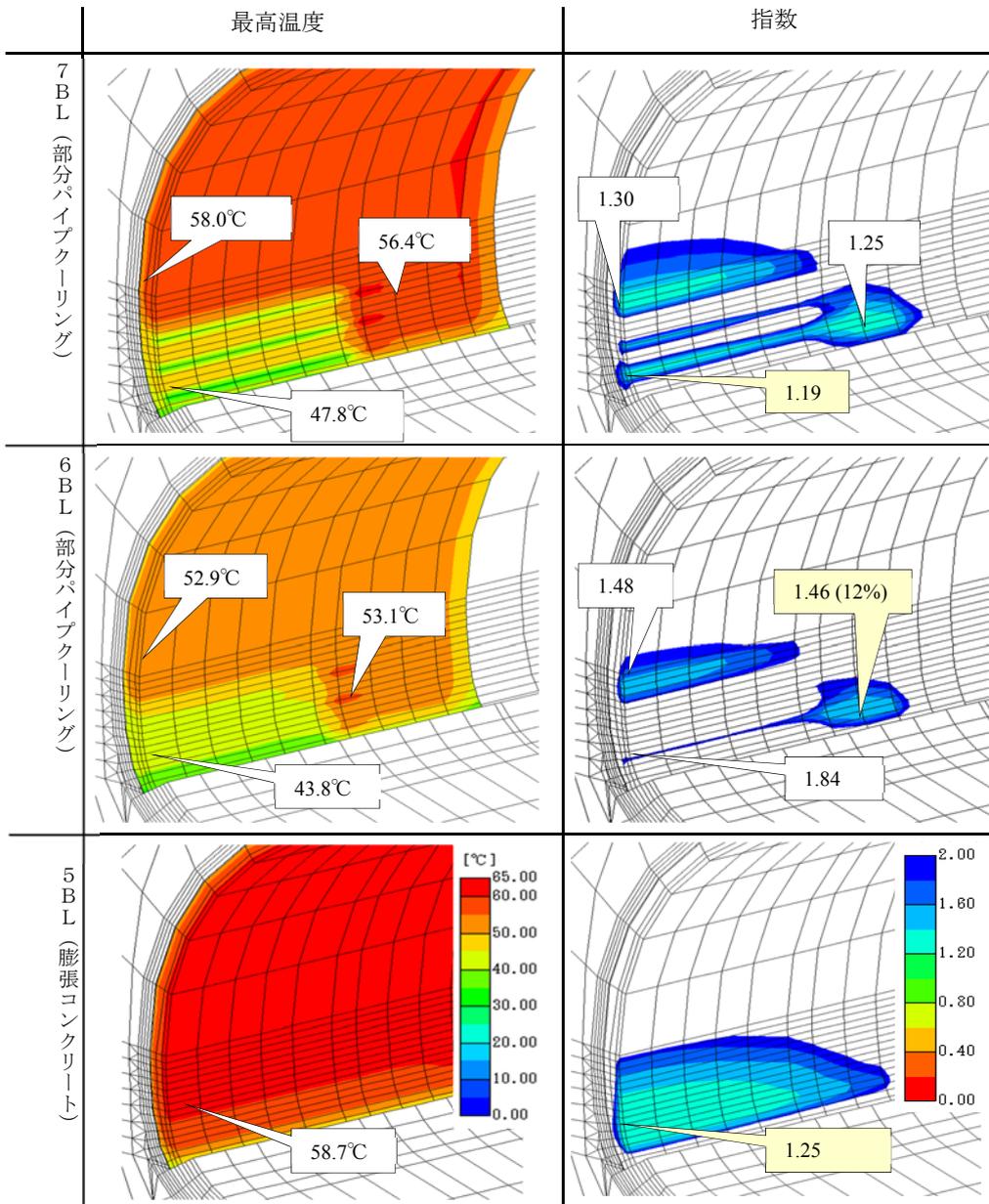


図-4.20 事後解析時の部材中心の最高温度・最小ひび割れ指数分布図
(実際の施工状況を反映した事後解析)

表-4.4 実測値と事後解析の結果

| 項目 | | 5BL | | 6BL | | 7BL | |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 実測 | 事後解析 | 実測 | 事後解析 | 実測 | 事後解析 |
| 最高温度 (°C) | 測点 1 | 59.4 | 58.7 | 43.2 | 43.8 | 48.9 | 47.8 |
| | 測点 2 | — | — | 42.7 | 43.1 | 48.7 | 48.0 |
| | 測点 3 | 60.3 | 58.7 | 52.9 | 52.9 | 59.0 | 58.0 |
| 引張応力 (N/mm ²) | 測点 1 | 3.0 | 2.1 | 1.5 | 1.2 | 2.3 | 1.4 |

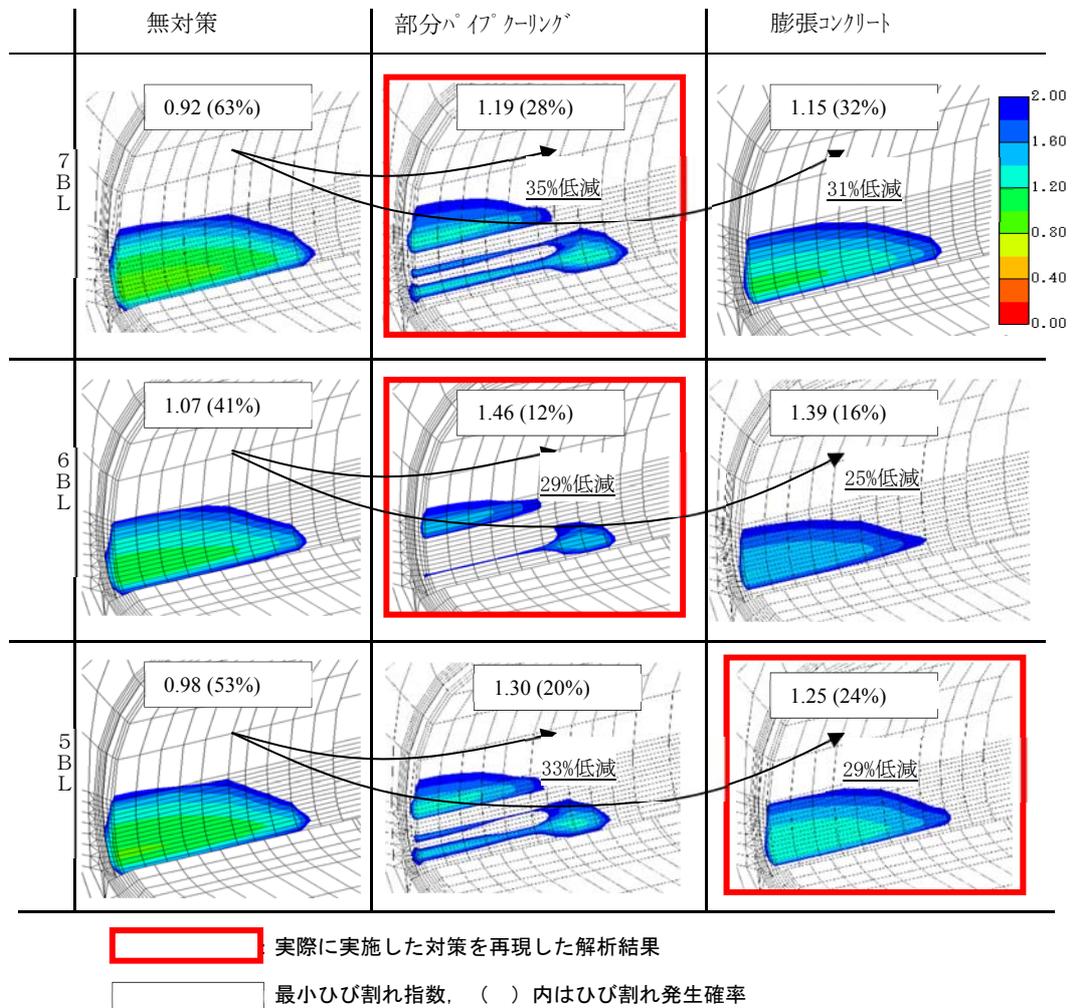


図-4.21 事後解析時の部材中心の最小ひび割れ指数分布図 (無対策の場合および他の対策)

4.5 現場適用効果の確認（アクアカーテン）

(1) 拘束乾燥収縮ひび割れ試験による効果確認

拘束乾燥収縮ひび割れ試験用供試体：JIS A 1151 を 2 配合（A 配合：18-21-25N→中流動覆工コンクリート、B 配合：18-21-25N 膨張材→膨張材を添加した中流動覆工コンクリート）について作製し、写真-4.4 に示すように、供試体作製翌日から養生を実施しない“養生なし”と、実際の現場での 4 週間の給水養生を再現した“給水養生（4 週間）”の 2 とおりの方法で養生を実施した。

供試体中心部の全ひずみの計測結果を図-4.22 および図-4.23 に示す。その結果、材齢 6 ヶ月で、A 配合においては 150×10^{-6} 程度、膨張材を添加した B 配合については 50×10^{-6} 程度、全ひずみが低減できた。次に実構造物で測定した表-6 中の熱膨張係数および図-4.24 に示す供試体の養生温度から式（4）および（5）により拘束ひずみを算出した。その結果を図-4.25 および図-4.26 に示す。

$$\varepsilon_{i2} = \alpha_c \times (T_i - T_0) \dots \dots \dots (4)$$

$$\varepsilon_{i3} = \varepsilon_{i2} - \varepsilon_{i1} \dots \dots \dots (5)$$

ε_{i1} ：全ひずみ($\times 10^{-6}$)

ε_{i2} ：温度ひずみ($\times 10^{-6}$)、 α_c ：温度降下期熱膨張係数

T_i ：コンクリート温度、 T_0 ：コンクリート打込み温度($^{\circ}\text{C}$)

ε_{i3} ：拘束ひずみ($\times 10^{-6}$)

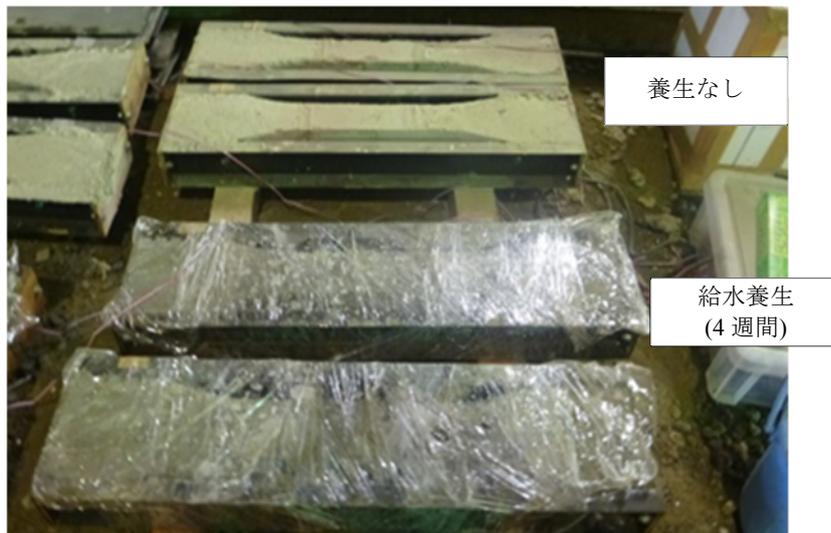


写真-4.4 拘束乾燥収縮ひび割れ試験用供試体

膨張材なしの場合は、養生なしで最大 200×10^{-6} 程度、材齢 6 ヶ月時点で 50×10^{-6} となった。また給水養生を実施した場合は、最大 25×10^{-6} 、材齢 6 ヶ月時点では拘束ひずみはマイナスで圧縮ひずみが 80×10^{-6} 作用している結果となった。11 月末から供試体の養生箇所を坑外に変更したため外気の湿度によりひずみが減少したと考えられる。これらの結果から、コンクリートのひび割れが通常 $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ で発生することを考慮すると膨張材なしであっても、給水養生を確実に実施することで、ひび割れの発生を抑制できる可能性がある。

膨張材ありの場合は、養生なしで最大 50×10^{-6} 程度、材齢 6 ヶ月時点で 25×10^{-6} となった。また給水養生を実施した場合は、材齢 6 ヶ月時点でも拘束ひずみはマイナスで圧縮ひずみが 25×10^{-6} 作用している結果となった。これらの結果から、膨張材を添加した場合は、養生が不十分であってもひび割れの発生を抑制できる可能性がある。

また、コンクリート表層の品質を定量的に評価するために、現在多くの機関で使用されている現場透気試験（トレント法）¹²⁾を採用し、供試体表面の透気係数を測定した。透気係数の判定は表-3.10 に示すスイス規格（SIA262/1-E）¹³⁾に従った。測定結果は表-4.5 のようになり、膨張材なしの A 配合については給水養生を実施することで透気係数が 0.687 から 0.173 と 1/4 改善し、膨張材ありの B 配合については、0.632 から 0.041 と 1/15 改善した。膨張材を添加した配合については、給水養生することによる改善効果が大きく、膨張コンクリートを確実に給水養生することで密実なコンクリートになることが確認できた。

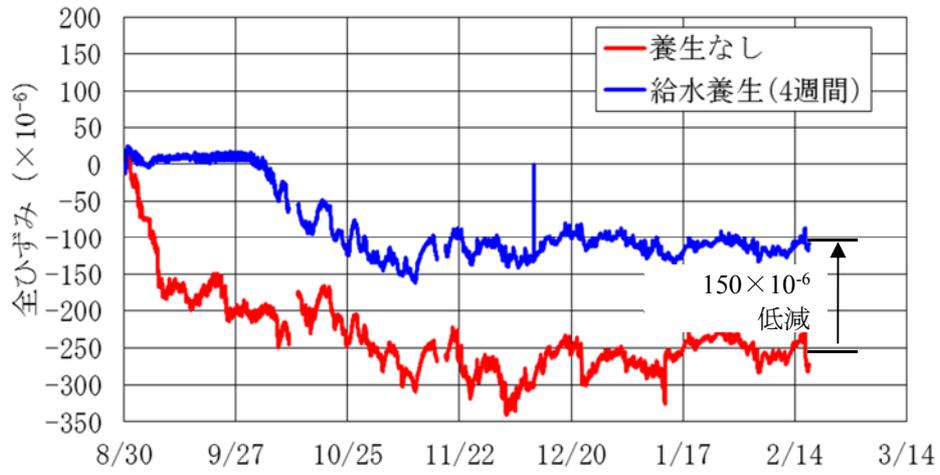


図-4.22 全ひずみ計測結果（膨張材なし）

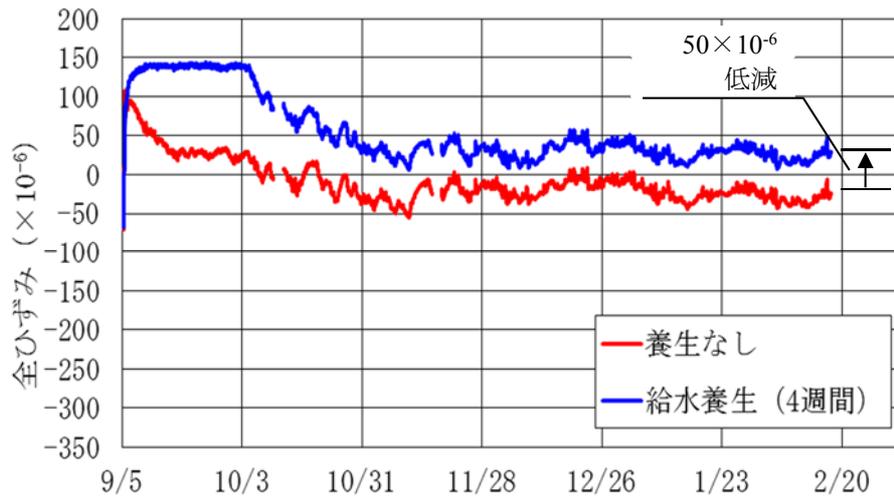


図-4.23 全ひずみ計測結果（膨張材添加）

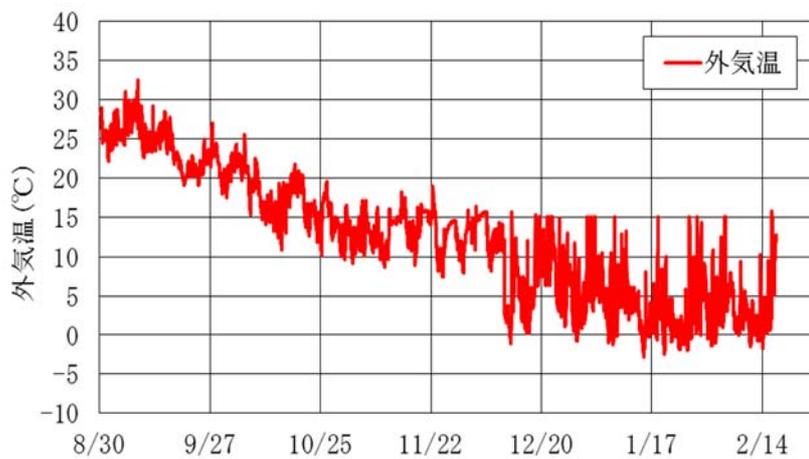


図-4.24 供試体養生温度

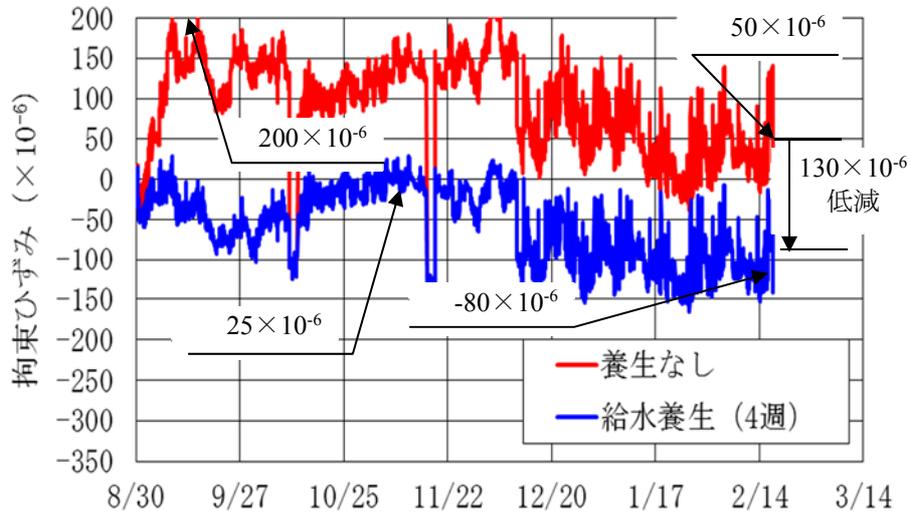


図-4.25 拘束ひずみ計測結果（膨張材なし）

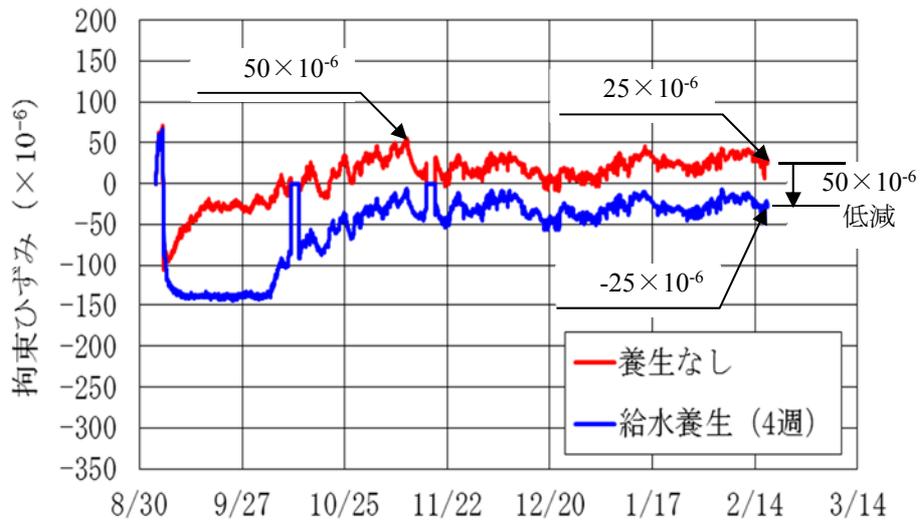


図-4.26 拘束ひずみ計測結果（膨張材添加）

表-4.5 供試体における透気試験結果

| 配合 | 養生 | 作成日 | 透気試験 実施日 | 透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) | ランク |
|----|------------------|-----------|-------------|--|--------------|------------|-----|
| A | なし | 2016/8/30 | 2017/1/12 | 0.687 | 40 | 4.0 | 3 |
| | 給水 ¹⁾ | 2016/8/30 | 2017/1/12 | 0.173 | 25 | 3.9 | 3 |
| B | なし | 2016/9/5 | 2017/1/12 | 0.632 | 39 | 4.0 | 3 |
| | 給水 ¹⁾ | 2016/9/5 | 2017/1/12 | 0.041 | 14 | 3.9 | 2 |

(2) 実構造物による効果確認

供試体と同様の方法で、実構造物においても現場透気試験を実施し、その結果を表-4.6に示す。全40ブロックのうち、1~5および35~40ブロックが膨張材を添加したB配合である。特にA配合とB配合の明確な差は見られなかったが、全ての計測箇所において、透気係数のランクが2(良い)もしくは2に近い3(普通)となり、通常の覆工コンクリートの施工ではランク3もしくは4程度¹⁴⁾であることを考慮すると、実構造物においても表層品質が改善されたことが確認できた。

表-4.6 実構造物における透気試験結果

| ブロック No. | 打設日 | 透気試験 実施日 | 透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) | 測定深さ (mm) | 含水率 (%) | ランク |
|-------------|------------|-------------|--|--------------|------------|-----|
| 1 | 2016/10/5 | 2016/12/6 | 0.091 | 14 | 4.6 | 2 |
| 5 | 2016/9/5 | 2016/12/6 | 0.095 | 16 | 4.7 | 2 |
| 8 | 2016/8/4 | 2016/12/6 | 0.108 | 17 | 5.2 | 3 |
| 10 | 2017/2/10 | 2017/3/8 | 0.099 | 20 | 5.0 | 2 |
| 15 | 2017/1/30 | 2017/3/8 | 0.095 | 19 | 4.7 | 2 |
| 20 | 2017/1/18 | 2017/2/6 | 0.106 | 19 | 5.3 | 3 |
| 25 | 2016/12/23 | 2017/2/6 | 0.064 | 19 | 5.1 | 2 |
| 30 | 2016/12/12 | 2017/2/6 | 0.118 | 14 | 5.0 | 3 |
| 35 | 2016/11/12 | 2017/1/16 | 0.097 | 19 | 5.1 | 2 |
| 40 | 2016/10/28 | 2017/1/16 | 0.080 | 21 | 5.3 | 2 |

4.6 まとめ

本開発および現場への適用により得られた知見を以下に示す。

1) 事前確認時点の効果

事前解析の結果、延長 5.5m、内径 27.6mm のクーリングパイプを、躯体中心に 3 段配置し、通水量 12 l/分、通水期間 34 時間でクーリングを実施することにより、ひび割れ発生確率を 40%程度低減できることが確認できた。

2) 構造物の熱膨張係数

実構造物での熱膨張係数の測定の結果、a)温度上昇初期（材齢 0～7 時間）、b)温度上昇後期（材齢 8～19 時間）、c)温度降下期（材齢 20 時間以上）でそれぞれ異なる値となり、a)は温度ひずみや応力の算出対象外とした。

3) 最大膨張時の温度ひずみの比較

最大膨張時の温度ひずみ（自己収縮、乾燥収縮、膨張コンクリートの膨張ひずみを含む）は、部分パイプクーリングによる対策を実施した 7BL で 191×10^{-6} （材齢 12 時間）、6BL で 116×10^{-6} （材齢 12 時間）となり、膨張コンクリートによる対策を実施した 5BL では 1576×10^{-6} （材齢 16 時間）と非常に大きな値となった。これは、膨張ひずみの温度依存性によるものと考えられる。

4) クーリング停止後の拘束ひずみ低減効果

クーリング停止後に、7BL で 34×10^{-6} 、6BL で 31×10^{-6} の拘束ひずみの低減効果が計測できた。

5) 実測ひずみから推定した引張応力

実測した全ひずみから引張応力を推定した結果、部分パイプクーリングによる対策を実施した 7BL で 2.3N/mm^2 、6BL で 1.5N/mm^2 、膨張コンクリートによる対策を実施した 5BL で 3.0N/mm^2 となり、部分パイプクーリングによる対策のほうが発生する引張応力を低減できたことが確認できた。

6) 事後解析によるひび割れ指数とひび割れ発生確率

実際の施工条件を再現した事後解析により、無対策の場合は指数が 1.0 以下であったが、部分パイプクーリングまたは膨張コンクリートによるひびわれ対策により、指数は

1.1 以上となり、ひび割れの発生確率を 30%程度低減できた。また、部分パイプクリーニングによる対策の方が、膨張コンクリートによる対策よりもひび割れ発生確率を 4%程度低減できることが確認できた。

7) 拘束乾燥収縮ひび割れ試験における給水養生と膨張材の有無の効果

拘束乾燥収縮ひび割れ試験による材齢 6 ヶ月時点での乾燥収縮ひずみ測定は、給水養生を実施することで、膨張材なしの場合は 130×10^{-6} 、膨張材ありの場合は 50×10^{-6} 低減できることが確認できた。

8) 表層透気試験における給水養生と膨張材の有無の効果

表層透気試験により、供試体の透気係数を測定した。その結果、給水養生を実施することで、透気係数は、膨張材なしの場合は 1/4、膨張材ありの場合は 1/15 改善した。

9) 覆工コンクリートの表層透気試験結果

表層透気試験により、実構造物の透気係数を測定した。その結果、全ての計測箇所において、透気係数のランクが 2(良い)もしくは 2 に近い 3(普通)となり、実構造物においても表層品質が改善されたことが確認できた。

参考文献

- 1) 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）トンネル覆工コンクリート編, p.1, 2016.
- 2) 菅藤太郎、伊藤信、鈴木尊、脇山勘治：鉄道トンネルで発生している変状の傾向に関する一考察, トンネル工学報告集, 26 巻, I -20, pp.1-6, 2016.11
- 3) 中島彰吾、海瀬忍、森本真吾、進士正人：TCI を用いた施工方法の違いによる覆工評価の比較, トンネル工学報告集, 26 巻, I -31, pp.1-7, 2016, 11
- 4) 白岩誠史、川中政美、庄野昭、佐藤正、牧剛史：覆工コンクリートひび割れ対策への部分パイプクーリングの適用, トンネル工学報告集, 26 巻, I -4, pp.1-11, 2016.11
- 5) 古川幸則、塩崎修男、白井孝昌：シート吸引方式による覆工コンクリート浸水養生システムの開発, 土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-017, pp.33-34, 平成 22 年 9 月
- 6) Seishi Shiraiwa、 Kazuto Fukudome、 Atsushi Saito、 Toshinari Hayashi : Effects of Improving Endurance of Concrete Structures by Wet Curing System, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, pp.155-162, 2015.
- 7) 田辺忠顕、山川秀次、渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文集, 第 343 号, pp.176, 1984 年 3 月
- 8) 谷田貝敦、宮澤伸吾、廣島明男、大友健：マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメント種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
- 9) 高瀬和男、和田典生、福永靖雄、石川敏之：場所打ち PC 床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 10) 張玉露、寺本篤史、大久保孝昭：膨張材を混和した低水結合比シリカフェュームセメントモルタルの自己収縮及び線膨張係数に及ぼす骨材量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017
- 11) 東邦和、中村敏晴、増井仁、梅原秀哲：膨張材によるマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法と構造物適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008
- 12) Torrent, R.J. : A Two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, July, pp.358-365, 1992
- 13) スイス規格 262/1-E, 2003
- 14) 新居秀一、白岩誠史、川中政美、庄野昭：現場透気試験によるコンクリートの表層品質調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016.
- 15) 白岩誠史、高橋拓真、川中政美、佐藤正：覆工コンクリートへの部分パイプクーリングの適用とその効果確認, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016.

第5章 結論

5.1 本論文の成果

(1) 部分パイプクーリング

今回の部分パイプクーリング工法の開発および現場への適用により得られた知見を以下に示す。

1) 部分パイプクーリングの特長

部分パイプクーリングは、インバートの拘束により発生する貫通ひび割れ対策として、他の工法と比較して、以下の点で優れている。

- ・ クーリングパイプの設置位置や通水条件等の変更によって、ひび割れ抑制効果を調整できるため、所要のひび割れ抑制効果を得ることができる。
- ・ 冷却する部位を縮小できるため、対策費用が経済的である。
- ・ 打設翌日に脱型可能なため、導入による工程への影響は小さい。
- ・ 特別な機材を必要としない。

2) ひび割れ抑制のメカニズム

部分パイプクーリングは、水和熱の上昇時期に応力集中範囲を限定して短期間冷却することで、ひび割れ発生の懸念が高い範囲の引張応力を低減させ、その後の応力発生速度を低減させるメカニズムによって、ひび割れの発生を抑制できる。

3) 部分パイプクーリングの適用仕様

今回の覆工コンクリートの条件に類似する場合、有害なひび割れの発生抑制を目的として、部分パイプクーリングを適用する場合の指標は、以下とする。

- ・ 目標とする指数は、実施工実施前の事前解析時で1.25以上。
- ・ 冷却範囲は、事前解析時に指数1.0以下となった範囲（延長方向はスパン長の60%程度、高さ方向は壁厚の2倍程度）。
- ・ 通水の停止は、部材中心が最高温度に達し、冷却部以外の発熱が継続している時（最高温度到達後24時間以内）。

4) 改善効果

覆工コンクリートの実施工に適用したときのひび割れ抑制効果は、計測された内部温度およびひずみを取り込んだ事後解析の結果、指数が0.2程度改善し、発生確率が20%以上改善した。

5) ひび割れ防止効果

部分パイプクーリングを適用することで、幅0.2mm以上の貫通ひび割れを防止することができた。

(2) アクアカーテン

1) 強度発現特性の評価

示方書養生、短縮養生は、長期の強度増進がほとんど見られず、材齢経過とともに給水養生や水中養生との差が大きくなる。給水養生の延長によって長期強度の改善が見られ、水中養生の材齢 28 日と同等以上の圧縮強度が得られる。

乾燥による圧縮強度への影響は、乾燥が進行した材齢 91 日以降は、無視できるものと考えられる。

普通ポルトランドセメントよりも、高炉セメントを用いたコンクリートは養生条件の影響を受けやすい。同様なことが質量変化率についても確認できることから、高炉セメントに給水養生を適用することは効果的である。

大型試験体での反発度試験結果から、過度な給水はコンクリート表面の脆弱化が深化することもあるため、養生水は過度な水を連続的供給するよりも、間欠的に供給するのが望ましい。なお、給水養生の給水量は、対象範囲のコンクリート面全体が濡れることが必要な量を施工によって確認する。給水間隔は、コンクリート面が乾燥しない間隔とし、現場での実施状況によって判断する。

2) 吸水率試験の評価

浸漬 1 日目の吸水量を 100%として、浸漬開始からの吸水量は、7 日浸漬で 20%以下、14 日浸漬で 5%以下となっており、コンクリートの吸水が有効である期間は、浸漬後 7~14 日程度であることが確認できた。

3) 促進中性化試験の評価

中性化促進試験結果では、標準養生のケースよりも給水養生を行ったケースの方が中性化深さは、小さくなる傾向を示した。反発度の結果では、標準養生の方が反発度が高くなっていたため、コンクリート表面から給水養生中の流水へのセメント成分の溶脱を

懸念したが、中性化深さは逆に小さくなった。給水養生による十分な給水によりコンクリート表面の組織が緻密になったと考えられる。

4) 凍結融解試験の評価

湿潤養生期間が短く養生が不十分でも、凍結融解に伴う相対動弾性係数の低下はさほど大きくないが、質量変化率は、十分な養生を行ったものと大きな差が見られ、コンクリート標準示方書で示されている湿潤養生の標準日数およびそれより短い養生日数では、十分な凍結融解抵抗性は確保されない。

給水養生を行うことにより質量変化速度は大幅に低減され、給水1週間の延長で水中養生を28日間行ったものと同程度の凍結融解抵抗性を確保できる。

5) 細孔径分布試験の評価

給水養生期間の延長とともに、細孔径分布は、微小径のものが増加し緻密な細孔構造となる。特に養生時間が極端に短いトンネル（BT）においては、細孔直径1000nm付近になり、給水養生の効果が顕著である。

6) 透気試験の評価

トンネル用の高炉セメントにおける透気試験は、通常のトンネル施工での養生と比較して、給水養生を行なうことで透気性のグレードで1～2、コンクリート表面の緻密性が向上する。

7) エコンクリートの透気試験の評価

給水養生を実施することで、現場の覆工コンクリートは、透気係数のランクが2または3を確保できることが確認できた。

8) 現場覆工コンクリートの透気試験の評価

給水養生を実施することで、現場の覆工コンクリートは、透気係数のランクが2または3を確保できることが確認できた。また、養生期間を42時間以上とするとランク3以上の品質が確保できることが確認できた。

(3) モデル現場での適用結果

本研究および現場への適用により得られた知見を以下に示す。

1) 事前確認時点の効果

事前解析の結果、延長 5.5m、内径 25.5mm のクーリングパイプを、躯体中心に 3 段配置し、通水量 12 l/分、通水期間 34 時間でクーリングを実施することにより、ひび割れ発生確率を 40%程度低減できることが確認できた。

2) 構造物の熱膨張係数

実構造物での熱膨張係数の測定の結果、a)温度上昇初期（材齢 0～7 時間）、b)温度上昇後期（材齢 8～19 時間）、c)温度降下期（材齢 20 時間以上）でそれぞれ異なる値となり、a)は温度ひずみや応力の算出対象外とした。

3) 最大膨張時の温度ひずみの比較

最大膨張時の温度ひずみ（自己収縮、乾燥収縮、膨張コンクリートの膨張ひずみを含む）は、部分パイプクーリングによる対策を実施した 7BL で 191×10^{-6} （材齢 12 時間）、6BL で 116×10^{-6} （材齢 12 時間）となり、膨張コンクリートによる対策を実施した 5BL では 1576×10^{-6} （材齢 16 時間）と非常に大きな値となった。これは、膨張ひずみの温度依存性によるものと考えられる。

4) クーリング停止後の拘束ひずみ低減効果

クーリング停止後に、7BL で 34×10^{-6} 、6BL で 31×10^{-6} の拘束ひずみの低減効果が計測できた。

5) 実測ひずみから推定した引張応力

実測した全ひずみから引張応力を推定した結果、部分パイプクーリングによる対策を実施した 7BL で 2.3N/mm^2 、6BL で 1.5N/mm^2 、膨張コンクリートによる対策を実施した 5BL で 3.0N/mm^2 となり、部分パイプクーリングによる対策のほうが発生する引張応力を低減できたことが確認できた。

6) 事後解析によるひび割れ指数とひび割れ発生確率

実際の施工条件を再現した事後解析により、無対策の場合は指数が 1.0 以下であったが、部分パイプクーリングまたは膨張コンクリートによるひびわれ対策により、指数は 1.1 以上となり、ひび割れの発生確率を 30%程度低減できた。また、部分パイプクーリングによる対策の方が、膨張コンクリートによる対策よりもひび割れ発生確率を 4%程度低減できることが確認できた。

7) 拘束乾燥収縮ひび割れ試験における給水養生と膨張材の有無の効果

拘束乾燥収縮ひび割れ試験による材齢 6 ヶ月時点での乾燥収縮ひずみ測定は、給水養生を実施することで、膨張材なしの場合は 130×10^{-6} 、膨張材ありの場合は 50×10^{-6} 低減できることが確認できた。

8) 表層透気試験における給水養生と膨張材の有無の効果

表層透気試験により、供試体の透気係数を測定した。その結果、給水養生を実施することで、透気係数は、膨張材なしの場合は 1/4、膨張材ありの場合は 1/15 改善した。

9) 覆工コンクリートの表層透気試験結果

表層透気試験により、実構造物の透気係数を測定した。その結果、全ての計測箇所において、透気係数のランクが 2(良い)もしくは 2 に近い 3(普通)となり、実構造物においても表層品質が改善されたことが確認できた。

5.2 まとめおよび今後の課題

本論文による研究の結果、部分パイプクーリングにより外部拘束ひび割れを抑制し、アクアカーテンによりコンクリート表層を密実化させることで、坑口部の覆工コンクリートの品質を向上できることが、室内試験および現場計測によって、定量的に評価できた。今後は、トンネルの坑口部の覆工コンクリートの品質向上が、具体的にトンネルの耐用年数をどの程度延長できたかを定量的に評価することが求められており、ひび割れの状況や透気試験の値等のコンクリートの物性値と、温度や湿度、飛来塩分等の環境条件から、鉄筋の腐食速度を現場レベルで定量的に評価するための研究や技術の進展が望まれる。

また、設計では、坑口部については、外気の影響による凍結融解や乾湿の繰返し等による覆工の劣化、地震による影響、長期的な地山の劣化による影響を受けやすいため、覆工のひび割れ進展を抑制するために鉄筋等で補強することとなっている。しかし、補強鉄筋量については、設計計算されておらず、これまでの実績を踏襲している例が多い。覆工コンクリートの品質を向上させるためには、補強の目的を踏まえた設計的な観点からのアプローチも必要と考える。

部分パイプクーリングは、コンクリート打込み後に内部温度が高温となる箇所全体をクーリングするというこれまでの常識に反し、ひび割れの発生が見込まれる部分（引張応力の集中する部分）のみを2日間程度の短期間冷却するのみで、全体を3～5日間程度の長期間クーリングする場合と同程度のひび割れ抑制効果が得られる技術である。本論文では、この部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズムを解析および計測から解明できた。同時に打込まれる部材において、一部分のみにクーリングを実施し、温度差を発生させ、部材内に発生する引張応力を低減させる従来にない世界で初めての発想で得られた技術であり、トンネルの覆工コンクリートばかりでなく、橋台や函渠等の壁状構造物の側壁、開口部の隅角部、耐震補強等の増厚工法等のひび割れ抑制にも応用できる今後の発展が期待される技術である。

アクアカーテンは、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面において、これまで不可能であった給水養生を実現させた世界で初の技術である。本論文では、アクアカーテンによる給水養生の効果を室内試験では定量的に評価できたと考えるが、実構造物の評価については、必ずしも評価できたとはいえない。透気試験の含水

率による補正方法の確立や、全く別の方法により評価できることが望まれる。現在、アクアカーテンを応用した様々な技術が、研究および実用段階である。養生水に様々な溶液を使用して、コンクリート表面の更なる密実化や、再アルカリ化および脱塩工法への応用、セシウム除去への利用等、その用途が広がっているところである。

謝 辞

本論文の執筆に関し、学生時代の恩師である埼玉大学牧剛史准教授に最初に相談に乗っていただいたのは2013年の春でした。その後、なかなか論文の執筆が進まない私に対し、何回もご丁寧なご指導をしていただき、深く感謝しております。また、私のコンクリート技術者としての基礎は、埼玉大学在学中の指導教官であった町田篤彦名誉教授のおかげであることは言うまでもありません。

アクアカーテンの発案者である株式会社安藤・間の古川幸則氏には、アクアカーテンに関する研究において、本論文執筆の最初の動機を与えていただきました。また、株式会社コンクリート養生サービス庄野昭氏、株式会社安藤・間の川中政美氏には、室内試験や現場での計測、論文執筆時の添削、研究の方向性に関する助言等、多大なご指導をいただきました。今後とも相変わらずのご指導をお願いいたします。

部分パイプクーリング発案のきっかけを与えていただいた株式会社安藤・間の佐々木照夫所長には、現場の品質向上に対する熱意や具体的なノウハウについて、非常に多くのことを教えていただきました。実現現場での導入および長期の計測では、馬館山トンネルおよび神谷内トンネル作業所の職員および協力会社の方々に多大なご協力を頂きました。特に、馬館山トンネルでは山根丈氏、高橋拓真氏、神谷内トンネルでは栗原浩彦所長、三沢良太氏には、多大なご協力を頂きました。また、実績のない新技術の現場導入が実現したことは、国土交通省東北地方整備の表康弘氏と佐藤正氏、国土交通省北陸地方整備局の寺田勝一氏らのご理解およびご協力なしでは実現できませんでした。

以上、本研究は、多くの方々の多大なご指導およびご協力のもとで成し得ました。ここに記して感謝の意を表します。

最後に、妻および子供たちのおかげで、仕事および論文の執筆に集中できました。ありがとうございました。今後ともよろしく願います。

参考資料1 トンネル用語

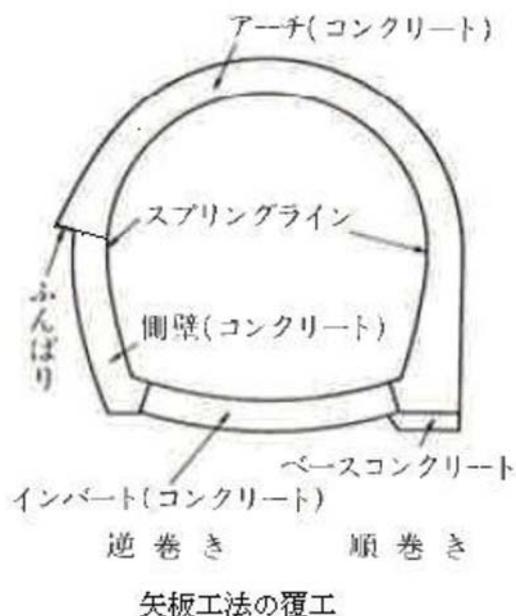
(1) アーチ効果 アーチコウカ 【山岳】 arching effect

アーチ状の構造によって、主として圧縮力によって荷重を伝達させて地山を安定化させる働きのことをいう。

たとえば、砂のような粘着力のない土をアーチ状に切り欠いた場合に、土の自重による応力が周囲に伝達され、アーチ上部の安定が保たれるのもアーチ効果によるものである。水平方向の土圧についても同様で、壁の一部が掘削されると、土圧はアーチ作用によって周囲に分散され、土圧の再配分が起こることで地山が安定化する。

(2) アーチコンクリート アーチコンクリート 【山岳】 arch concrete

トンネルおよび地下空洞のアーチ部分の覆工コンクリートの名称。アーチ部分以外の覆工コンクリートは、側壁(コンクリート)、インバート(コンクリート)などの名称でよばれている。



(3) インバート インバート 【山岳】 invert, invert concrete

トンネルの側壁より下方の底盤に設置される逆アーチ状の構造物をいう。覆工と一体となってトンネル下部にアーチ形状を呈しトンネルとしての必要な機能を与え、長期安定性を保持する。施工時には支保工と一体となって地山の安定性を確保する機能も期待される。

(4) **インバート後打ち方式 インバートアトウチホウシキ 【山岳】 late invert placing method**

覆工コンクリートの打設方式のひとつ。アーチコンクリートを先に打設し、必要に応じてインバートコンクリートを施工する方式で、矢板工法によるトンネル施工、水路トンネルにおける流路形成機能の確保及び近接施工時に対する将来的な耐荷性能を確保する場合に適用される。

(5) **インバート先打ち方式 全巻き方式インバート先打ち方式 インバートサキウチホウシキ 【山岳】 first invert placing method**

覆工コンクリートの打設方式のひとつ。道路および鉄道トンネル等で仕上り断面にインバートがある場合に適用される。インバートコンクリートを先に打設し、その上にアーチコンクリートを全断面または分離方式で打設する。大断面のTBMでは、インバートセグメントが利用される場合が多い。



(6) 坑門 コウモン 【山岳】 portal

トンネルの坑口部に土留め、斜面防護などのために設けられるトンネル構造物である。一般に、坑口はその正面と両側の三方に切取面がある凹地となるため、地質が悪いと崩壊・埋没される恐れがある。また、雪国では雪崩の心配もある。このような傾向のある地形、地質のところでは、坑口はできるだけ地表面から奥に突っ込まずに、むしろトンネルが外に露出するぐらいに地表から浅くする方が好ましい。坑門はトンネルの入口出口にあたり、美観上の配慮も大切である。



(7) 坑門形式 コウモンケイシキ 【山岳】 portal type

坑門の型式は、面壁型と突出型に分類される。面壁型は坑門背面に土圧を受ける構造であり、重力式とウイング式に分けられる。一方、突出型は地山をあまり切り込まないで、トンネルと同一の内空断面がトンネル坑口部に連続して地山から突出した型式で、突出式、竹割式、ベルマウス式等に分けられる。

| 項目 | 面壁型 | | | | 突出型 | | |
|------------|--|--|--|---|---|---|---|
| | 重力式・半重力式 | ウイング式 | アーチウイング式 | 半突出(バラベツ)式 | 突出式 | 竹割(筧)式 | ベルマウス(筧)式 |
| 形状 | | | | | | | |
| 地山条件による適用性 | <ul style="list-style-type: none"> 比較的地形急峻の場合や土留等の構造が必要とする場合 落石が多いと予想される場合 背面の排水処理が容易 | <ul style="list-style-type: none"> 両切土工の場合 背面土圧を全面的に受ける場合 積雪量の多い場合には防雪工を併用 | <ul style="list-style-type: none"> 比較的地形がなだらかな場合 左右の切土工が比較的少ない場合 | <ul style="list-style-type: none"> 尾根状地形や左右に他の構造物との取り合いが少ない場合 積雪地でも可能 | <ul style="list-style-type: none"> 押え盛土を施工した場合 坑口周辺の地質が良くない場合 積雪地でも可能 坑口周辺地形の切り取りなど、整形が比較的可能な場合 | <ul style="list-style-type: none"> 坑門周辺の地形がなだらかな場合 逆竹割式の場合重心位置の関係から基礎の支持力の十分な検討を要する | <ul style="list-style-type: none"> 地形・地質が比較的良く、坑口周辺の開けた箇所が可能 積雪地では吹込み、雪庇が生じ易い |
| 施工性 | <ul style="list-style-type: none"> 不良地山では切土量が多くなるので、背面切土法面の安定化対策としての防護を十分に行う必要がある | <ul style="list-style-type: none"> 不良地山では切土量が多くなるので、背面切土法面の安定化対策としての防護を十分に行う必要がある トンネル本体との一体化が必要 | <ul style="list-style-type: none"> 地形によっては、一部、明り巻き(特にアーチ部)が必要である 多少の保護盛土を必要とする | <ul style="list-style-type: none"> 数mの本体工の明り巻きを必要とし、かつ盛りこぼしに対し多少の土留壁が生ずるが、坑門としては合理的な構造である | <ul style="list-style-type: none"> 地形・地質が安定している場合は最も経済的であるが、地質が悪く押え盛土を必要とする場合は先に明り巻きを必要とする | <ul style="list-style-type: none"> 型枠、配筋等に手間がかかり、経費も多くなる | <ul style="list-style-type: none"> 型枠、配筋等に手間がかかり、経費も多くなる |
| 景観 | <ul style="list-style-type: none"> 壁面積が大きく厚度を下げる工夫(壁面のハブリ等)が必要 重量感はあるが、走行上の圧迫感を感じ易い | <ul style="list-style-type: none"> 壁面積が大きく厚度を下げる工夫(壁面のハブリ等)が必要 重量感はあるが、走行上の圧迫感を感じ易い | <ul style="list-style-type: none"> アーチ部の曲線が、周辺地形とあまり違和感を感じさせないような配慮が必要 | <ul style="list-style-type: none"> 坑門コンクリートの壁面積が少なくなるため、視覚的には違和感を感じさせない 坑口周辺地形と良く適合する | <ul style="list-style-type: none"> 坑門コンクリートの壁面積が少なくなるため、視覚的には違和感を感じさせない 坑口周辺地形と良く適合する | <ul style="list-style-type: none"> 周辺地形を修築することにより坑門との調和が図れる | <ul style="list-style-type: none"> 車両の走行に与える影響が少ない 坑口周辺地形と良く適合する |

(8) シート系工法 シートケイコウホウ 【山岳】 waterproofing membrane method, waterproofing sheet method

防水工は、シート工法、吹付け工法、塗布工法の3工法が代表的であり、山岳トンネルにおいては、シート工法が現在、一般的に用いられている。いずれも漏水防止という本来の目的のほかに、吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの絶縁とこれによる覆工のクラックの発生防止としての効果を期待するためにも使われている。

一般的なシートの厚さは0.8~1.2mmで、都市部などで防水型(非排水構造)とする場合は、トンネル全周を防水シートで巻立て、シートの厚さを2.0mm程度とすることが多い。

(9) シート張り台車 シートバリダイシャ 【山岳】 gantry for installing waterproof sheets

山岳トンネルの防水シートを張るための専用台車である。台車の長さは4m～9m、門型の架台に階段状に作業ステージを取付けたもので自走できるものが一般的である。作業員は台車上のステージで幅2m程度の防水シートを設置する作業を行うことができる。

(10) シート防水 シートボウスイ 【山岳】 【開削】 waterproofing sheet method

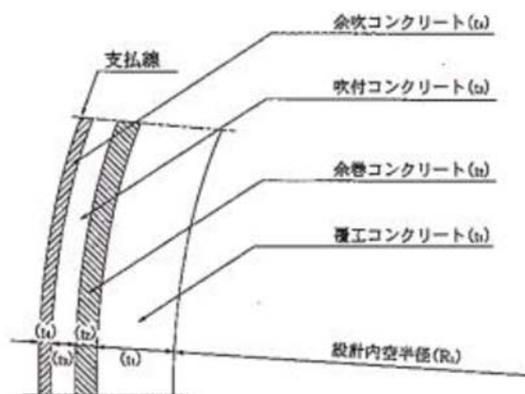


(11) 支払線 シハライセン 【山岳】 pay line, B-line

トンネル工事の実際の掘削量は、覆工の設計巻き厚の確保を考慮して支保工や矢板を入れるために設計巻き厚外に必要な量と、さらにその外側に施工上やむを得ず生ずる量を見込まなければならない。

また、覆工コンクリートの施工量も、設計巻き厚線外に生じた空間に入る量を加える必要がある。これを支払線という。

トンネル工事の請負契約等で必要のある場合にはこれを設計図上に支払線（ペイライン）として表示する。



(12) **スプリングライン** **スプリングライン** 【山岳】 【シールド】 **spring line**

トンネルの内空断面で、上半アーチの始まる線。シールドトンネルでは一般に最も幅の広い箇所を指す。SLと略される。

(13) **セントル** **セントル** 【山岳】 【シールド】 **centering, tunnel lining form**

山岳トンネルでは、従来、荷重を受ける枠（セントリング）に板（上木または幕板）を並べて型枠としていたので、覆工アーチ部の型枠支保工をセントルと称するようになった。

現在では、覆工アーチ部だけではなく、側壁部分も含めた型枠支保工を指す。

セントルには組立式型枠（バラセントル）と移動式型枠（スライドセントル、スライディングフォーム）とがある。組立式型枠は、鋼製型枠パネルと支持骨組み（セントル）とを組み合わせたもので、急いで覆工しなければならない場合に使用され、通常は用いない。

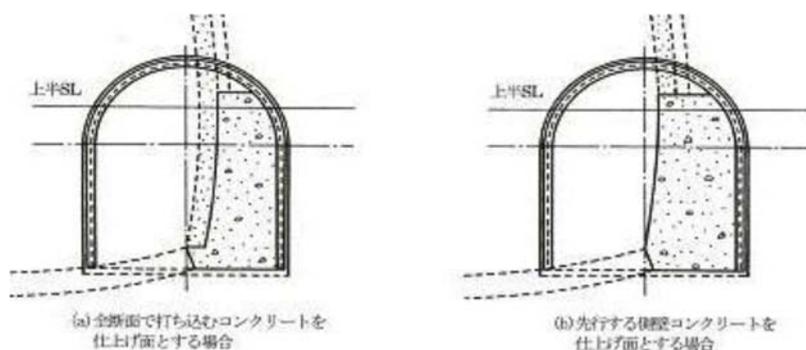
移動式型枠には、ノンテレスコピック型とテレスコピック型とがある。移動式型枠でスキンプレートに鋼板を用い、メタルパネルを使用しないものを特にスチールフォームと呼ぶことがある。

シールドトンネルでは、二次覆工用の移動式型枠を言い、スライディングフォーム、メタルフォームともいう。



(14) 側壁コンクリート ソクヘキコンクリート 【山岳】 side wall concrete

主として地質不良でアーチ基礎の支持力が不足する恐れのある場合やメガトンネルや大断面トンネルでは、本坑掘削に先立って側壁導坑を掘削し、側壁コンクリートを先行して打込み、その後に全断面のコンクリートを打込む場合と、先行する側壁の側壁コンクリートの天端を脚付け部として上半アーチ部のコンクリートを打込む場合があり(下図)、一般には前者が多い。後方で覆工に縦断面方向の打ち継目部ができる場合には、その部分の漏水処理方法を検討せねばならない。矢板工法では覆工のうち側壁部分の覆工をいう。



側壁導坑先進工法の側壁部覆工の例

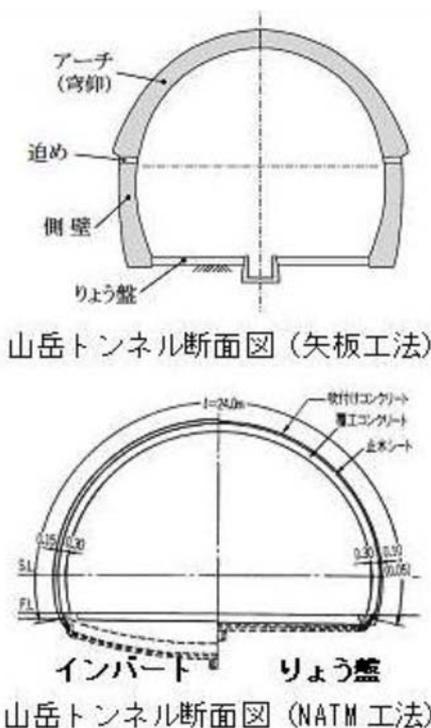
(15) 中流動コンクリート チュウリュウドウコンクリート 【山岳】 middle performance concrete

山岳トンネルの覆工に用いる中流動コンクリートは、スランプ15~18cmの普通コンクリートとスランプフロー50cm以上の高流動コンクリートの中間的な性状を有するスランプフロー35~50cm程度のコンクリートである。流動性は、フライアッシュ(石炭灰)等の粉体を加えることで向上し、軽微な振動により型枠内に均一に充填(締固め)が可能であることなどの特徴を有する。

(16) **覆工**：トンネルとしての必要な形状および機能を与え、長期安定性を保持する手段、処置、漏水や湧水の処理、トンネルの内空の確保や美観などの目的のためにトンネルの掘削断面を被覆する構造体またはその構造体を構成することをいう。

山岳トンネルでは覆工材料としてレンガ、コンクリートブロックなどが使用されたこともあるが、現在では多くの場合に現場打ちのコンクリートが用いられている。この場合、覆工コンクリートは無筋とするのが一般的であるが、強い土圧や偏圧が懸念される場合には鉄筋コンクリートとすることもある。

山岳トンネルの両側壁の間をはりとして連結した底盤部の構造で一般的に良好な地山状況で採用される。インバートと異なりアーチ構造になっていないため、変形抑制効果が小さいことから将来盤ぶくれ等の変状が予見される地質では不適である。



(17) **インバート**：底盤に設置される逆アーチ形状の構造物をいう。おもに支保工や覆工と一体となって地山の変形を拘束し、トンネルの長期安定性を保持する機能を有する。

支保工：トンネル周辺地山の変形を抑制して安定を確保するための手段、処置およびその成果としての構造物をいう。標準的な山岳工法では、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等を支保部材として用いる。

(18) 坑口付け コウグチヅケ 【山岳】 portal-in

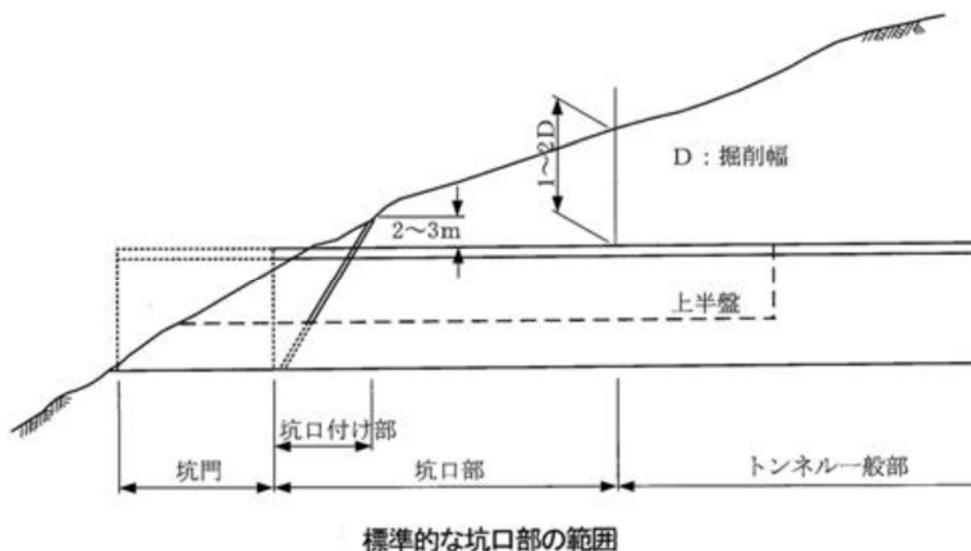
トンネルの坑口に達するまでの坑外の切土と、坑口から若干地山に入る部分までの施工をいう。通常、土被りを2~3m確保した位置で、坑口斜面を急勾配（1:0.3~0.5）で切土するため、その斜面は一時的にゆるみを生じる。さらに、ゆるみの生じた斜面に再度トンネル掘削で周辺地山の応力を解放させるため、通常の切土斜面に比べて不安定状態になりやすく、順次緩みが拡大する傾向にあるといえる。したがって、坑口斜面や地表面に及ぼす地山のゆるみの影響範囲を極力抑制するため、坑口法面や自然斜面の安定化に留意する必要がある。

(19) 坑口部 コウグチブ 【山岳】 portal, portal zone, entrance of tunnel

坑口部とは、トンネルの出入り口付近で、土被りが小さく、グラウンドアーチが形成されにくい範囲をいう。

一般に、坑口はその正面と両側の三方に切り取り面があるため、地質が悪いと落石や崩壊等の斜面災害を生じることがある。また、雪国では雪崩の心配もある。このような危険のある地形、地質のところでは、坑口はできるだけ地表面から奥に位置させずに、むしろトンネルが外に露出する構造にするほうが好ましい。古くはトンネル延長を短くするため、切り込んで施工していたが、近年では、防災上突出して施工される。

坑口部の範囲は通常土被り1~2D以下の範囲で、特別な支保構造・施工法となる。個々のトンネルの地山条件や一般部の施工法などを考慮した合理的な施工法を選定する必要がある。



(20) 土被り

岩盤，または地盤内の考えている位置より上方の岩盤または地盤をいう．この土被りの大きさに，岩盤または地盤の単位体積重量を乗じた値を土被り圧とよぶ，地表が平坦な場合には，一次応力の鉛直成分はほぼ土被り圧に等しい場合が多いが，急峻な斜面の近くや褶曲構造のところでは，一般には等しくなくむしろ大きくなることもある．

(21) NATM ナトム 【山岳】 New Austrian Tunnelling Method

New Austrian Tunnelling Method（新オーストリア式トンネル工法）の略称であり，薄巻覆工の特許を申請したL.v.Rabcewiczにより1962年に命名された．NATM（ナトム）と呼ぶのはオーストリアと日本に限られたことであり，欧米ではConvergence confinement methodなどと呼ばれている．

NATMにおいては，地山に密着して施工できる吹付けコンクリートやロックボルトを用いて，地山の緩みに伴う耐荷能力の低下を防止し，地山の支保機能を積極的に利用する．また，このためには地山挙動をとらえるための計測が重要となる．地山の支保機能に余力があれば，支保部材の経済性を追求し，それが不足すれば，安全な支保の設計を行うなど，計測結果を設計に反映させる．このようにNATMとは，力学的な考え方，用いる支保部材の種類，計測による管理，などが一体となったトンネル設計・施工の概念である．なお，土木学会ではNATMという呼称を使用せず，標準工法として取り扱っている．

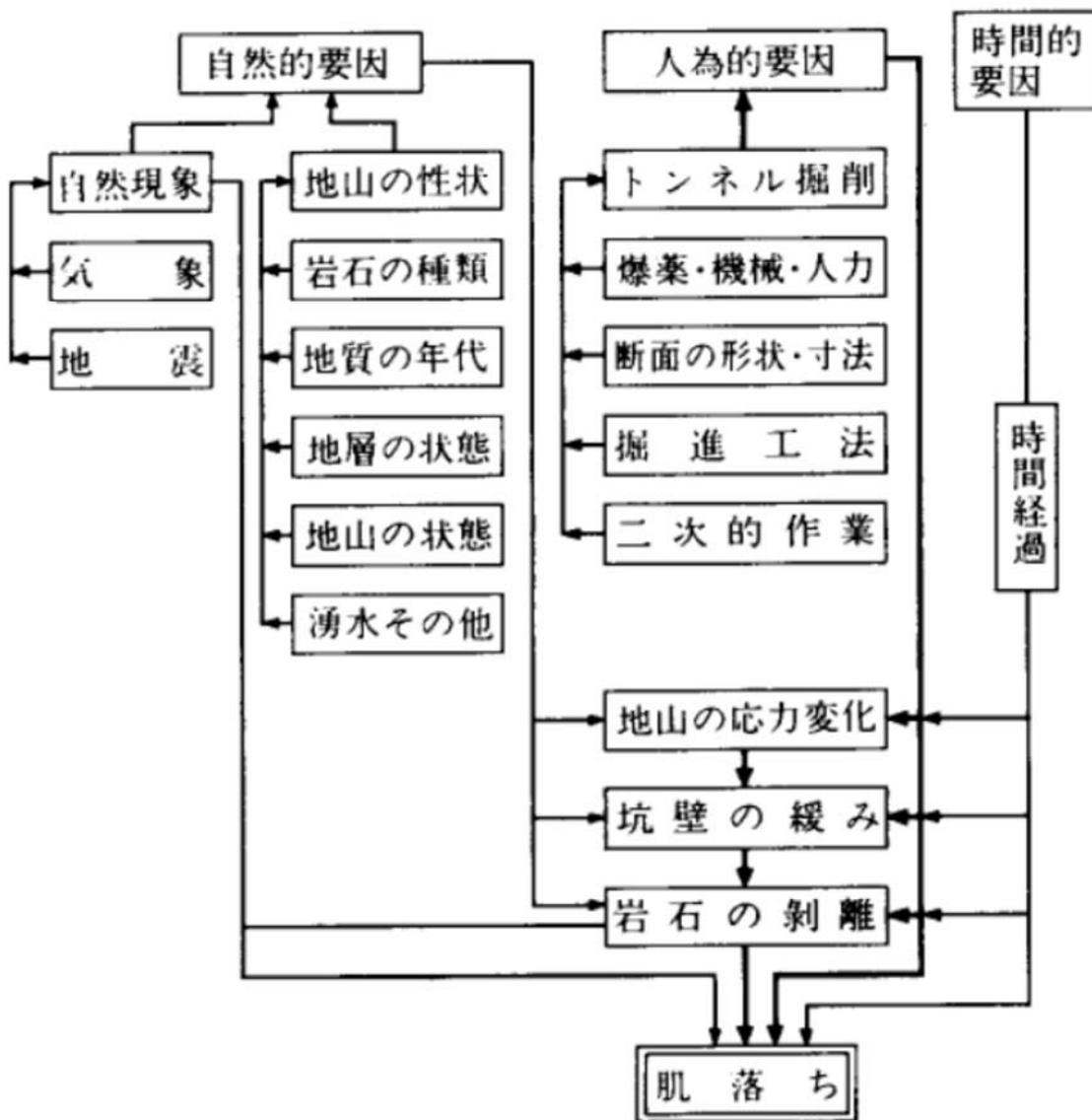
(22) 背面拘束 ハイメンコウソク 【山岳】 restraint of the rear surface, restraint of behind the lining

山岳トンネルにおける吹付けコンクリートと覆工（コンクリート）が接触した状態にある場合，地圧の作用により覆工にせん断ひび割れを生じることがある．この状態を背面拘束という．

背面拘束を抑制するために，吹付けコンクリートと覆工の間に縁切り用のシート（アイソレーションシート）を用いることがある．

(23) 肌落ち ハダオチ 【山岳】 fall of loosen-rock

トンネル内の露出した地山の土砂，岩石が自然的要因，人為的要因等によって剥離・脱落する現象をいう。肌落ちは，切羽で発生することが多いので，発破後の入念なこそくと常時の切羽の点検が必要である。日本トンネル技術協会発行トンネル工事における肌落ち等による危害防止に関する技術基準の研究報告書によれば，肌落ちの要因として，下図に示すものが挙げられている。



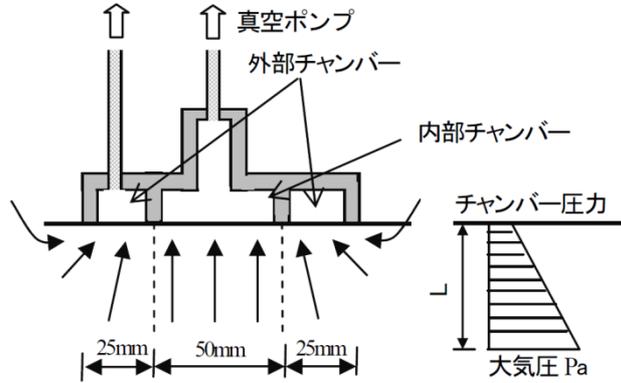
肌落ち事象の要因

参考資料2 透気係数の評価についての一考察

・透気係数の測定概念¹⁾

ダブルチャンバー方式のトレント法による透気試験の概要を右図に示す。図に示すように、本試験は他の透気試験と同様に、チャンバー内の圧力を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止した後の復圧過程を測定する。透気係数 KT は、内部チャンバーへの空気の流入は一方向であり、減圧の影響を受けず大気圧を示す深さ L における圧力とチャンバ内の圧力が直線分布であるとの仮定に基づき、式 (1) によって導かれ、このとき仮定した L は式 (2) によって、計算される。ここで、空隙率 ε は、配合等によって異なるが、実際の構造体での試験を考慮すると、試験時に正確な値は把握できないため、一定値としている。ダブルチャンバー法である本試験方法では、内部と外部の圧を平衡させた状態での内部チャンバーの復圧仮定を測定するため、シングルチャンバー法で問題となる極表層のスキンといわれる脆弱層の品質を排除できると言われている。

測定深さに対する検討では、透気係数が $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲の測定深さは、実測値と計算値が、概ね一致するが、透気係数の増加に伴い、計算により求められる測定深さのほう小さくなる傾向が明らかになった。



$$KT = \left(\frac{V_c}{A} \right) \frac{\omega}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \left[\frac{\ln \left\{ \frac{(P_a + \Delta P_t) / (P_a - \Delta P_t)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right\}}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (1)$$

$$L = 1000 \sqrt{\frac{2KT \cdot P_a \cdot t}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (2)$$

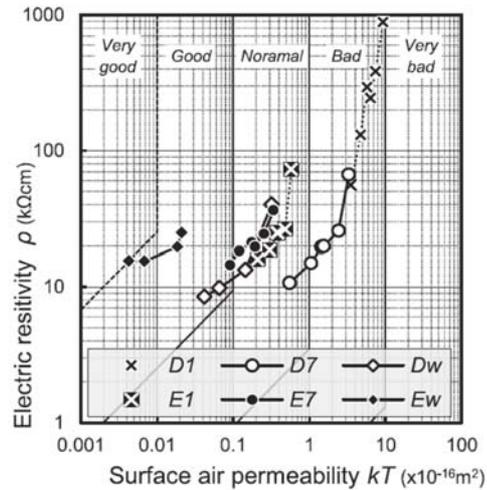
- ここに、 KT : トレント法による表層透気係数(m^2)
 V_c : 内部チャンバーの容積($=2.22 \times 10^5 \text{m}^3$)
 A : 内部チャンバー (仮定した栓流) の断面積 ($=1.93 \times 10^3 \text{m}^2$)
 μ : 空気の粘性係数($=2.0 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)
 ε : コンクリートの空隙率の想定値($=0.15 \text{m}^3/\text{m}^3$)
 P_a : 大気圧(N/m^2)
 ΔP : 試験終了までの復圧量(N/m^2)
 t : 試験終了時間(s)
 t_0 : 試験開始時間($=60\text{s}$)
 L : 試験により減圧の影響を受けると仮定した深さ(mm)

・透気係数の含水率による補正方法

【方法 1：電気抵抗率による補正法 1²⁾】

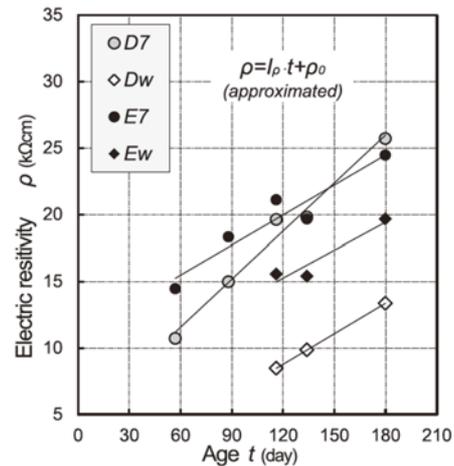
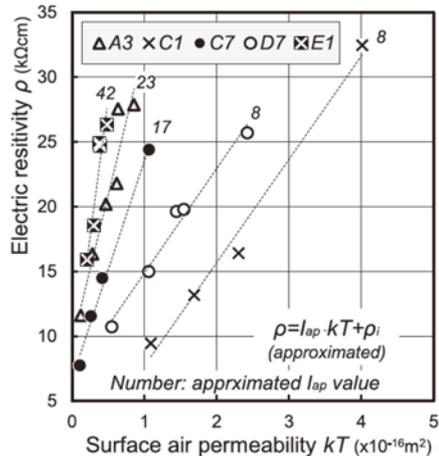
Trennt 氏が提案した補正方法。Wenner 法で電気抵抗率を測定し、右図のようなグラフにプロットして、ランクを決定する。

同じ供試体であっても、コンクリートの乾燥状態によってランクが異なることが確認されており、課題が残る。



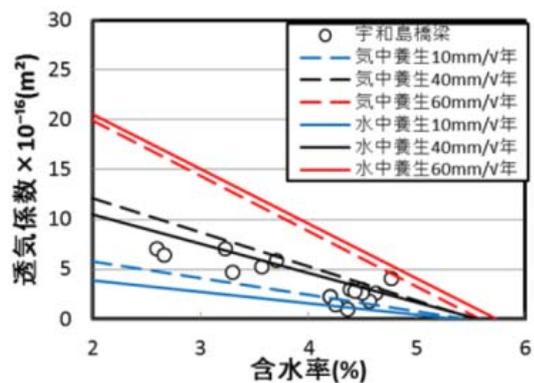
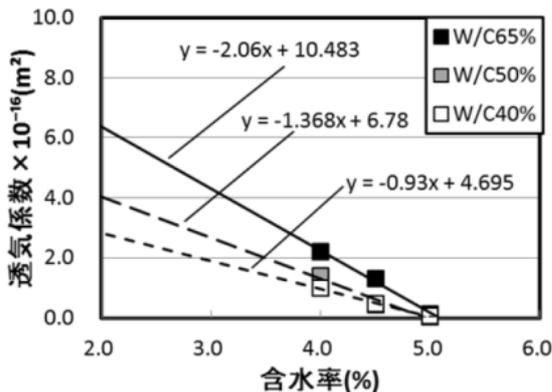
【方法 2：電気抵抗率による補正法 2³⁾】

蔵重らが提案した補正方法。下図に示すように、含水比による補正や、更に材齢による補正についても提案している。



【方法 3：含水率による補正法 4⁴⁾】

河合らは、電極式的水分計によりコンクリート表面の含水率を測定し、含水率と透気係数の関係を調べた。配合ごとに下図のような関係式が作成可能であること、透気係数と中性化の関係についても言及している。



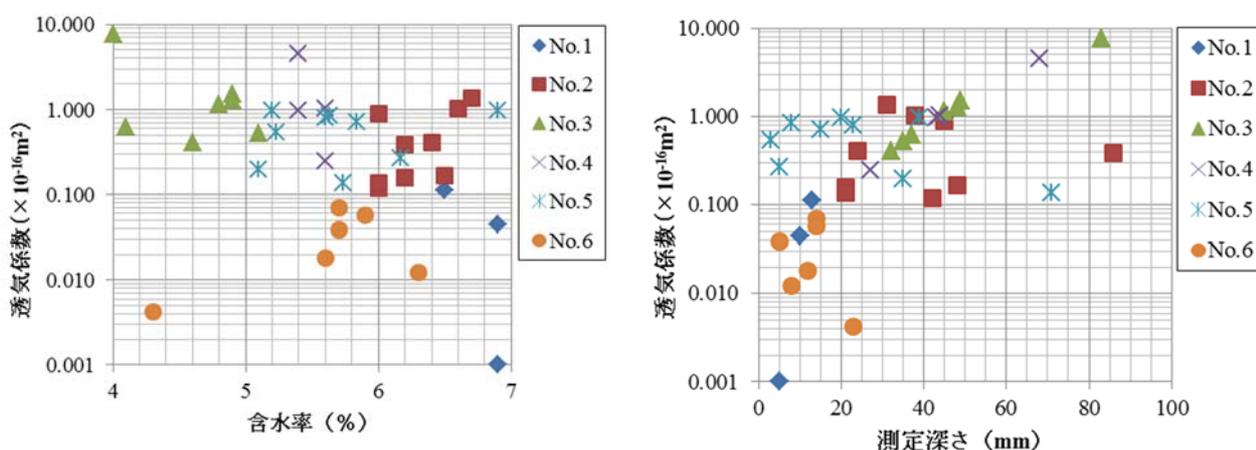
【方法3：無補正】

加藤らは、室内試験において、含水比の影響を排除するために、含水比が4.5%になるまで乾燥させて、計測している⁵⁾。

また、細田らは、積極的に実構造物の計測を実施しているが、緻密なコンクリートほど含水率が高いため、含水率も含めて、そのコンクリート構造物の性能と判断している⁶⁾。そのため、含水率を測定するが、透気係数の含水率による補正は実施していない。

・本論文における計測値

本論文における透気係数と含水率、測定深さの関係を下図に示す。No.1～6の各トンネルごとに、含水率が大きくなると透気係数が小さくなる、測定深さが大きくなると透気係数が大きくなるという相関は見られるが、バラツキが大きい。



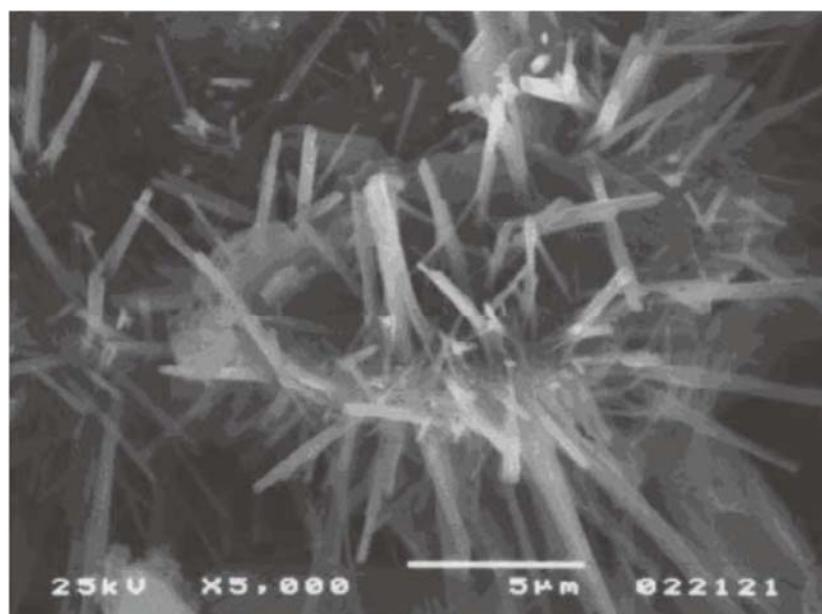
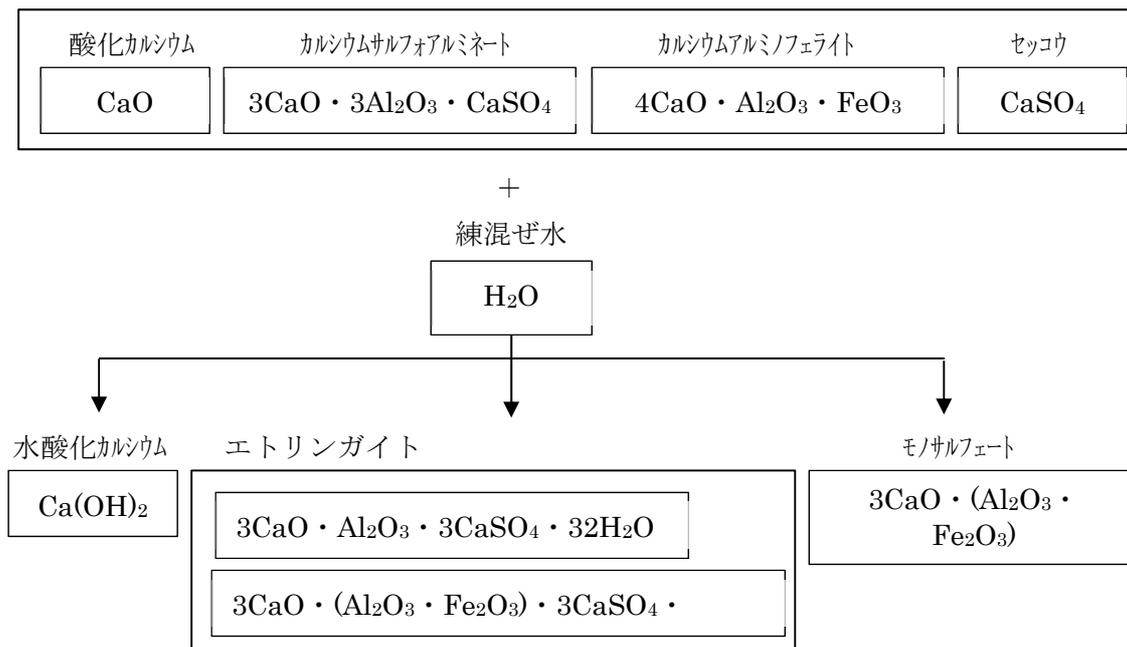
参考論文

- 1) 早川健司、水上翔太、加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.385-398，2012
- 2) R.J.Torrent and G.Frenzer: "A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete", Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE), pp.985-992, 1995
- 3) 蔵重勲、廣永道彦：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案，Cement Science and Concrete Technology，No.65，2011
- 4) 河合慶有、国方翔太、氏家勲：現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性能評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2140-2145，2014
- 5) 西村和朗、加藤佳孝：振動締固めによる材料分離およびブリーディングが硬化コンクリートの表層透気性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1423-1428，2017
- 6) 吉田早智子、細田暁、林和彦、内田晃一：表面吸水試験および透気試験による山口県の構造物の表層品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1823-1828，2011

参考資料3 膨張材の膨張特性とメカニズム

・膨張材の膨張メカニズム

膨張材は、セメントおよび水とともに練り混ぜた場合、水和反応によってエトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) あるいは水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の結晶を生成して、その結晶成長あるいは生成量の増大によりモルタル又はコンクリートを膨張させる作用を有する混和材である。その品質は JIS A6020(コンクリート用膨張材)に定められている。



・膨張材の水和速度

膨張材の水和速度は、セメントと混合した際に有効な膨張量が得られるように、モルタルやコンクリートの凝結終了後から水和が開始し、常温では3～7日で終了するよう調整されている。材齢1日以内に型枠を取り外す覆工コンクリートのうち、乾燥の影響を早期に受ける表層部分では、十分な膨張が得られない。

・膨張材の目的

コンクリートの乾燥収縮を補償し、ひび割れの低減を目的と場合とケミカルプレストレスを導入するものがある。

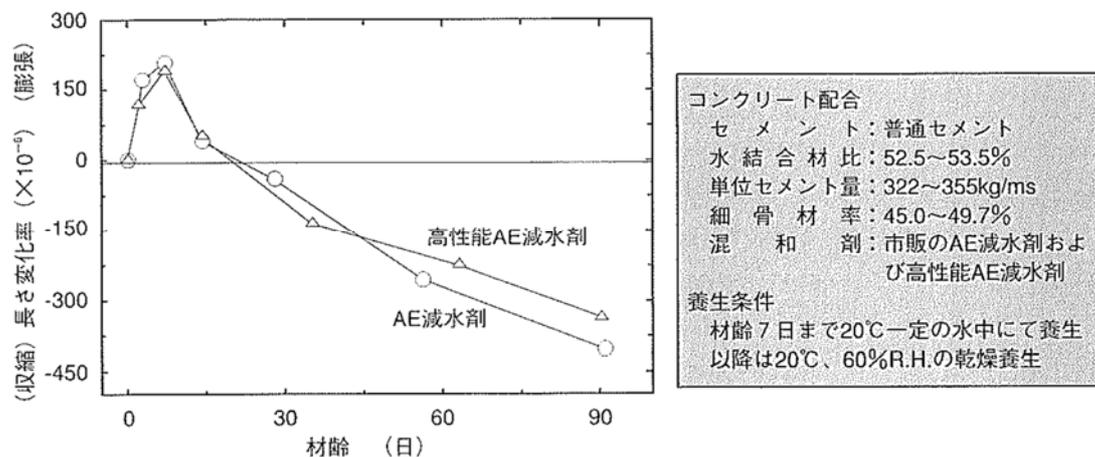
・膨張材の特性

膨張過程におけるエトリンガイトや水酸化カルシウムの生成時には、十分な水分の供給が必要であり、特に材齢初期における湿潤（給水）養生が重要である。アクアカーテンは正に膨張材の性能を十分発揮させるのにきわめて適した養生工法である。

膨張コンクリートの圧縮強度は、収縮補償を目的とした通常の使用量（20～30kg/m³）では、膨張材を使用しない普通コンクリートと同程度である。

【混和剤の種類と長さ変化率の関係】

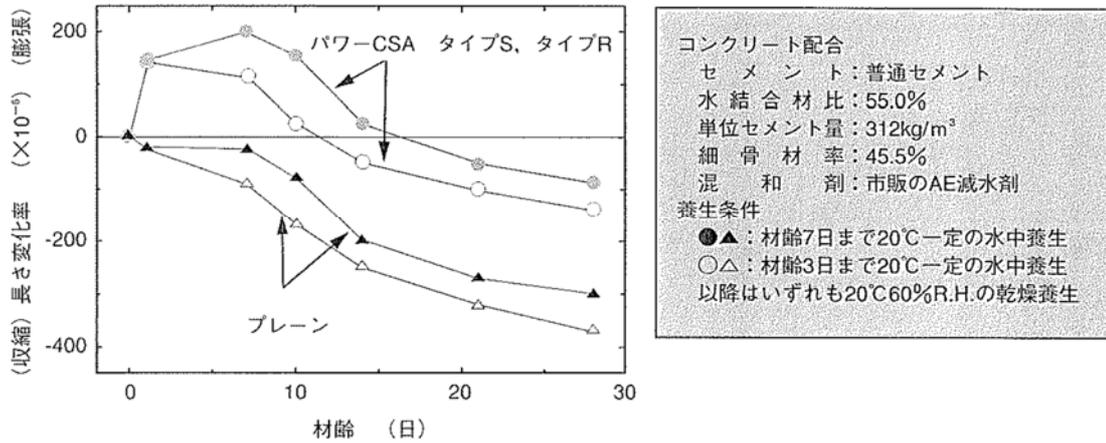
混和剤の種類によって長さ変化率はほとんど影響されない。



混和剤の種類と長さ変化率

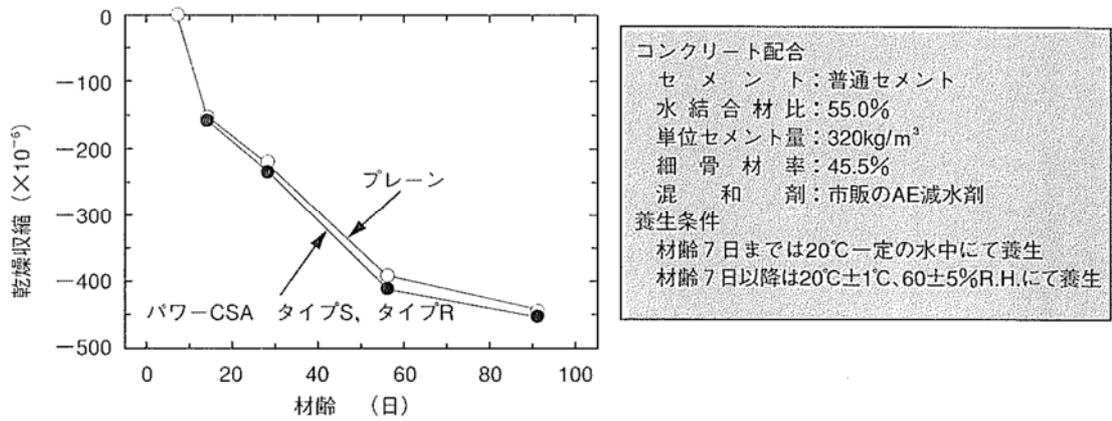
【乾燥開始材齢と膨張ひずみとの関係】

乾燥を開始する材齢が早くなるほど、膨張ひずみの絶対値が小さくなる。



乾燥開始材齢と膨張ひずみとの関係

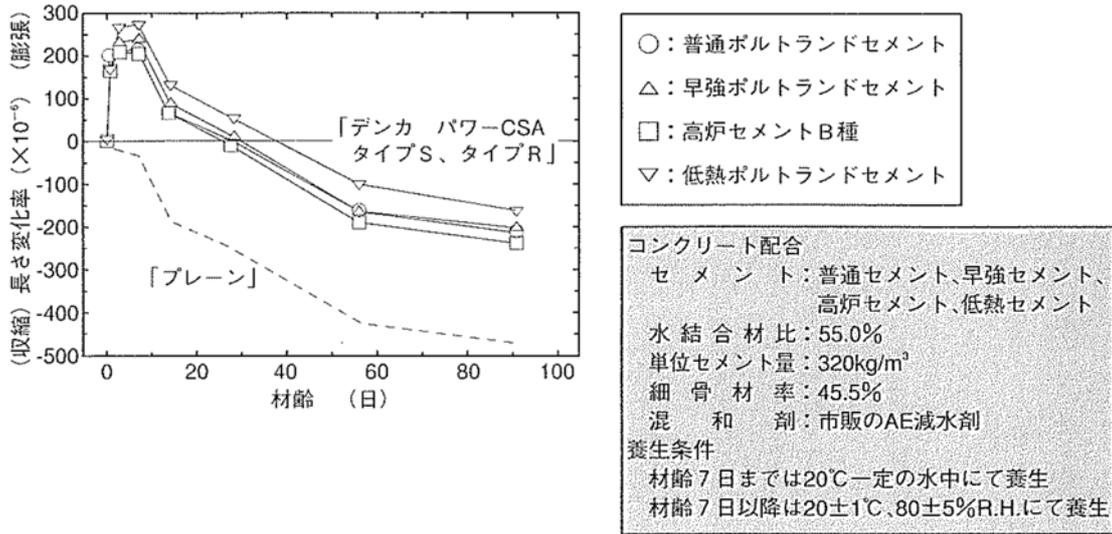
【コンクリートの乾燥収縮】



コンクリートの乾燥収縮

【セメントの種類と膨張量の関係】

セメントの種類によって膨張ひずみに増減が見られるが、いずれのセメントにおいても良好な膨張ひずみを得ることができる。



セメントの種類の影響