

極寒の山間部において覆工・坑門工コンクリートの長寿命化を目指した創意工夫 —北海道横断自動車道、カラマン別トンネル—

齊藤 寛治*1

北海道横断自動車道根室線は、本別 JC から白糠 IC を経て、釧路 IC (仮称) へ至る国土開発幹線自動車道であり、本路線の供用により釧根圏～道央圏間における物流の効率化や観光支援など、地域の活性化が期待されている。また、本路線は主要幹線である国道 38 号の代替路として、安全で安心な釧根地域の社会形成に資する路線としても期待されている。カラマン別トンネルは、平成 26 年度に供用開始が予定されている浦幌 IC～白糠 IC[延長 26km]のうち、極寒の山間部に位置する延長 520m の山岳トンネルである。

近年、社会資本ストックの維持管理費の増大が懸念されており、重要インフラであるトンネルの新設時において、高品質で耐久性に優れたコンクリート構造物の構築が社会的に要求されている。本稿では、トンネル構造物のライフサイクルコスト低減を図るため、覆工・坑門工コンクリートの長寿命化を目指した創意工夫への取組みを報告する。

キーワード：ライフサイクルコスト低減、極寒の山間部、耐凍害性の向上、品質向上教育、生コンの長距離運搬、ひび割れ対策、かぶり部の鉄筋、水平打継目の処理、コンクリート養生、表面透気性試験

1. 工事概要



図 1.1 カラマン別 TN 位置図

工事名：北海道横断自動車道 釧路市
カラマン別トンネル工事
発注者：北海道開発局 釧路開発建設部
施工者：伊藤・田中・堀口 特定 JV
工期：H23.12.1 ～ H25.10.28
トンネル延長：L=520m, 内空断面積：66.4 m²
覆工厚：35cm (坑口区間), 30cm (標準区間)
坑門工：両坑口とも 1 スパン、突出型、厚さ 60cm



写真 1.1 カラマン別 TN 起点側坑口

2. 現場の課題

本トンネルは、例年の最低気温が -20°C 以下となる極寒の山間地に位置する高規格道路トンネルである。そのため、供用後の坑門工及び覆工の坑口部分は、凍結融解の繰返し作用や、道路凍結防止材から塩分の供給を頻繁に受ける厳しい環境下に曝される。また、生コン工場から現場までの運搬に約 90 分要し、材料分離やコールドジョイントが発生ししやすい条件下での施工となった。

以上より本工事では、施工に起因する初期欠陥を防止し、凍害や塩害の劣化作用に対して十分な抵抗性を具備する【高品質で耐久性に優れた覆工・坑門工の構築】を課題として考えた。

*1 齊藤 寛治 伊藤組土建 (株) 土木部工事課所長
カラマン別トンネル工事 現場代理人

3. 課題解決に向けた創意工夫への取組み

上記の課題を克服するため、図 3.1 に示した各工程において、コンクリートの品質向上に資する創意工夫への取組みを以下に報告する。

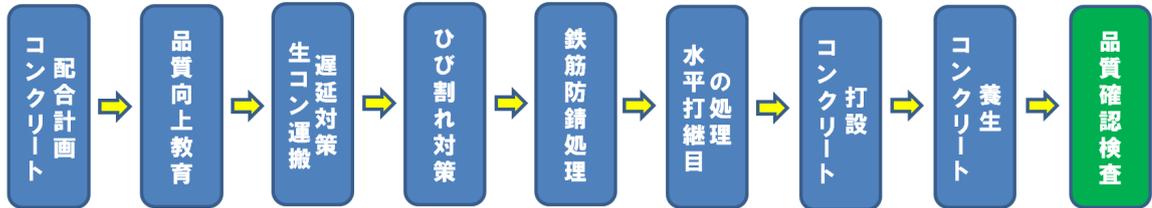


図 3.1 コンクリートの品質向上に取り組んだ工程

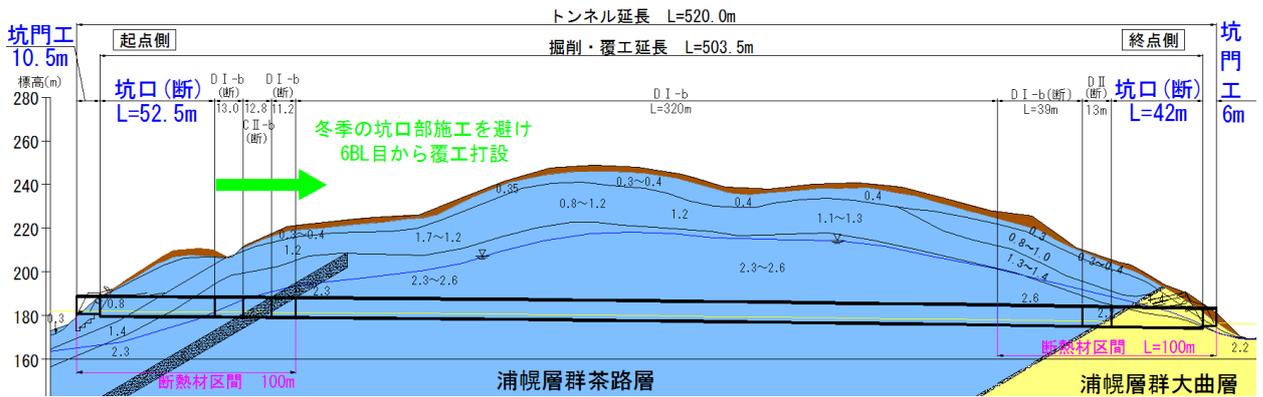


図 3.2 カラマン別 TN 縦断面図

3.1 コンクリート配合計画

コンクリートの配合計画では、耐凍害性の向上とワーカビリティの経時ロスに着目した。

厳しい気象作用を受ける坑口部分の耐凍害性を向上させるため、高性能AE減水剤及び多機能型AE減水剤（遅延型）を添加して、W/Cを50%以下にする高品質配合とした。（表3.1.1） 外気に曝され、塩分の供給を最も受ける坑門工のアーチ部には、コンクリートの緻密性向上と温度ひび割れ抑制効果のある膨張材「デンカパワーCSA：20kg/m³」を添加した。

生コンの長時間運搬の対策として試験練りを行い、練混ぜ120分後でもワーカビリティを確保することができ、且つ性状試験の規格値内におさまる配合を選定した。（表 3.1.2） 遅延性を持たない標準区間の配合（24-15-40N）では、材料分離を防止するとともに仕上りの美観に配慮して、細骨材率を工場の標準値である 40%から 47%に変更している。材料分離に対する抵抗性は、スランプ試験後の平板叩きで確認している。（次頁、写真 3.1.1）

表 3.1.1 コンクリート配合表

| 区分 | 強度 (N/mm ²) | W/C (%) | セメント (kg/m ³) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | Gmax (mm) | 混和剤混和材 |
|---------|-------------------------|---------|---------------------------|-----------|---------|-----------|-----------------------------------|
| D坑 III口 | 標準 | 24 | 60 | 280 | 15 | 40 | AE減水剤 |
| | 提案 | 30 | 47.9 | 324 | 18 | 25 | 高性能AE |
| A坑 I門チ工 | 標準 | 24 | 55 | 280 | 8 | 40 | AE減水剤 |
| | 提案 | 27 | 49.4 | 302 | 18 | 25 | 多機能AE 膨張材: 20kg/m ³ |

表 3.1.2 試験練りの経時変化とりまとめ表

| 打設箇所 | 配合 | 混和剤 | スランプ (cm) | | | | 空気量 (%) | | | |
|----------------|-----------|-------|-----------|-------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|
| | | | 0min | 90min | 120min | 150min | 0min | 90min | 120min | 150min |
| 覆工 坑口区間 | 30-18-25N | 高性能AE | 21.5 | 19.0 | 17.0 | 14.0 | 5.2 | 4.8 | 4.4 | 3.9 |
| 覆工 標準区間 | 24-15-40N | AE減水剤 | 19.0 | 16.0 | 14.0 | 12.0 | 5.2 | 4.7 | 4.2 | 3.7 |
| 坑門工 底版 | 27-18-25N | 多機能AE | 22.0 | 19.0 | 19.0 | 18.0 | 5.1 | 4.7 | 4.6 | 4.4 |
| 坑門工 アーチ部 (膨張材) | 27-18-25N | 多機能AE | 23.0 | 21.0 | 19.5 | 19.0 | 5.8 | 5.1 | 4.7 | 4.4 |

3.2 品質向上教育

筆者の経験上、品質と美観に優れたコンクリート構造物を構築するうえで重要なのは、現場従事者がコンクリート工事に【情熱・誇り・改善意識】を持って臨むことである。

そのため、覆工・坑門工の施工前に、筆者（コンクリート診断士）による品質向上教育を元請職員・

協力会社の職長・作業員全員に対して実施し、打設時の基本事項を再確認するとともに、「近隣のトンネルの中で一番綺麗なコンクリートにしたい」という目標を共有した。教育後には、品質向上や作業手順に関する創意工夫案、成功・失敗体験談及びトラブル発生時の対応等についてブレインストーミングを行い、作業所全体で品質向上に対する意識高揚を図った。（写真 3.2.1）



写真 3.1.1 材料分離抵抗性の確認

覆工コンクリート
品質向上 作業手順教育
 100年先のコンクリート
 構造物を目指そう！

平成25年3月18日
 伊藤・田中・堀口 JV
 カラマン別トンネル工事



写真 3.2.1 品質向上教育の実施

3.3 生コンの運搬遅延対策

本工事の生コン運搬は、距離 64km で 90 分の時間を要し（図.3.3.1）、これ以上の現着時間の遅延は材料分離によるブリーディングの発生や、打継ぎ時間超過によるコールドジョイント発生など、施工に起因する初期欠陥の要因となる。

そのため、生コン車の運搬経路のうち、他工区と共用している 5.5 km の狭隘な林道（幅員 3.0m）について以下の対策を実施し、運搬遅延による品質低下のリスクを低減した。

- ① 悪天候時の「林道通行不可・迂回路走行」に備えて、可使 3 時間の遅延型配合を準備した
- ② 資機材運搬車の横転・脱輪や、降雨時の浸食などによる通行止めを回避するため、林道の路面・法面の維持補修、排水系統の点検・補修及び敷き鉄板の増設を随時実施した。（写真3.3.1）
- ③ 横断道関連工事が最大15工区稼働している中、大型車両の円滑な通行を確保するため、工事連絡協議会を開催して、生コン車・10tダンプ・資機材搬入車の調整を綿密に行った。



図 3.3.1 生コン車の運搬経路



写真 3.3.1 林道の被災状況と排水整備

3.4 ひび割れ対策

本トンネルの覆工・坑門工において、以下の3種類のひび割れの発生が懸念された。それぞれに対策を実施し、寒冷地など厳しい環境下において、補修が必要とされる幅0.2mm以上のひび割れ発生ゼロを現場の目標とした。

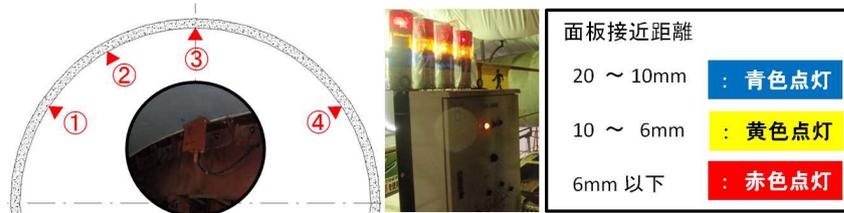
- ① コンクリート水和反応時の温度応力による「温度ひび割れ」
- ② 貫通後の3月から覆工作業を開始するため、若材齢コンクリートが冷たい通気に曝されて発生する「収縮ひび割れ」
- ③ センترل面板のラップ部への過度な押し当てによる「三日月状のひび割れ」

温度ひび割れ対策として、耐アルカリガラス繊維補強材・補強ネットの「スーパーラックノン」・「ハイパーネット60（次頁、写真3.4.1）」を坑門工・覆工の側壁部に使用して、外部拘束に対するひ

ひび割れ抵抗性を向上させた。また、コンクリート内部と表面の温度差を2℃程度にまで縮小させることができる「超音波加湿養生システム」を採用し、内部拘束を緩和させた。（3章8節 参照）

収縮ひび割れ対策として、両坑口を隔壁バルーンと保温保湿効果の高いターポリンシートで閉鎖し、坑内の温湿度を一定に保持した。閉鎖期間は、坑内温度と外気温の差が無くなる6月下旬までとした。（写真3.4.2）

三日月状のひび割れは作業ミスに起因することから、この対策としてセントルセット時の面板接近距離を3色のパトライトで段階的に表示するセンサーを採用し、油圧ジャッキ操作者が容易に距離を確認できるように工夫した。なお、打設方向に向かって左カーブ（R=1600）の線形に配慮し、面板と既打設部分が接触しやすい左側クラウン部にセンサーを増設した。（図3.4.3）



参考文献

- 1) 日本コンクリート工学教会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針

3.5 鉄筋の防錆処理

本トンネル坑口部のコンクリートには凍害・塩害の劣化作用が頻繁に働くことから、トンネルのライフサイクルコストを低減させるうえで、かぶり部鉄筋の品質確保は重要な要素であり、坑門工・覆工では以下の対策を実施した。

- ① 鉄筋組立後に水性エポキシ樹脂系防錆剤「ノックスEW」を、覆工・坑門工の鉄筋に塗布した。
- ② 発錆しやすい折曲げ加工箇所について、錆転化型防錆剤「ラスクリア」を塗布した。（写真3.5.1）
- ③ 鉄筋への水分供給を防止するため、水膨張性キャップ付の止水型セパレータを坑門工の型枠に使用し、コンクリートの遮水性を向上させた。（写真3.5.2）



3.6 水平打継目の処理

覆工とインバートの水平打継目は構造上の弱点となりやすく、レイタンスを残したままコンクリートを打継ぐと、地山の水位によっては漏水の原因となる。寒冷地でこのような現象が発生した場合、

歩道・監査廊の表層コンクリートが凍上により破壊される。

そのため、覆工・坑門工ともに水平打継目の処理として、インバート・底版打設後に遅延剤「デイスパーライト」を散布し、8～10時間後にレイタンスを高圧水で洗浄を行い、上下コンクリートの一体化を図った。（写真 3.6.1）

また、外部から雨水や雪解け水の供給を受ける坑門工底版の背面側は、防水性のポリマーセメントによる打継目処理を行い、コンクリート表面の遮水性を高めた。（写真 3.6.2）



写真 3.6.1 水平打継目の処理



写真 3.6.2 坑門工 打継目の防水処理

3.7 コンクリート打設

打設作業では、覆工天端へのコンクリートの確実な充填に留意した。また、練混ぜから打設までに生じたブリーディング水は覆工コンクリートの角欠けや剥落の原因となる強度低下や、ノロ分流出による美観低下の要因となることから、確実に除去する必要があると考えた。

コンクリートを確実に充填するため、充填検知システム「ジューテンダー」を覆工天端の両端部と中央部の3箇所に設置し、充填・締固めを確認しながら2本の頂部長尺引抜きバイブレータで打設した。（図 3.7.1） また、天端部のエア溜りを防止するため、エア抜き孔を2箇所設置した。

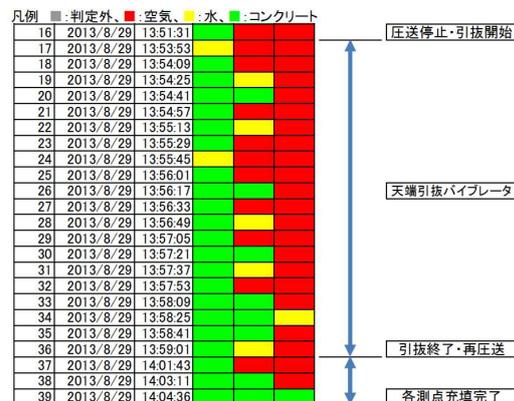


写真 3.7.2 ラップ部の養生とその効果

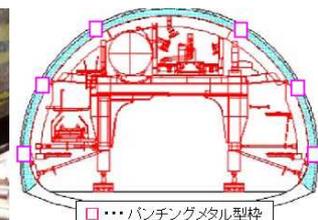
覆工コンクリートのラップ側妻部にはノロ分の付着を防止するため、ビニールシートを設置して打設済みコンクリートの美観に配慮した。（写真 3.7.2） 打設時には、ブリーディング水増大の要因となる先送りモルタルを排出した。（写真 3.7.3） また、覆工妻部にはパンチングメタル型枠を6カ所に設置し、ブリーディング水を排出するとともに（写真 3.7.4）、取りきれないブリーディング水や油脂分はヒシヤクで取り除き、品質と美観を保持した。



写真 3.7.3 先送りモルタルの除去



写真 3.7.4 パンチングメタル型枠からのブリーディング水排出



3.8 コンクリート養生

コンクリートの初期養生は、厳寒地における構造物の長期耐久性に最も影響を及ぼす工程である。本トンネルでは、セントル部分の保温バルーンに加え、温湿度を自動制御する超音波加湿養生システム「モイストキュア」2スパン型（L=21.0m）を採用して、打設後7日目まで加湿養生を実施し、コンクリートの高品質化を図った。（写真 3.8.1）

夏季の打設となった坑門工の養生では、乾燥収縮防止として日よけシートを設置したうえで、簡易式スプリンクラーで水を供給して湿潤状態を5日間保持し、水和反応の促進を図った。（写真 3.8.2）



写真 3.8.1 覆工コンクリート初期養生



写真 3.8.2 坑門工の初期養生

初冬や春先における、凍結融解の繰返し作用による剥落（スケーリング）を防止するため、表面の撥水機能を向上させる寒冷地用のシラン系表面含浸材「アクアシール 1400H」を坑門工・覆工坑口部の全周に塗布し、耐凍害性能を高めた。（写真 3.8.3）

また、漏水やひび割れの原因となる覆工背面の水分凍結を防止するため、覆工目地の路面から2mの高さまで弾性シーリングを施し、冷気の侵入を防いだ。（写真 3.8.4）



写真 3.8.3 表面含浸材の塗布とその効果



写真 3.8.4 目地部の弾性シーリング

4 創意工夫の効果確認

上述した3.1～3.8の創意工夫等による効果を定量的に把握し、今後の施工に反映させるため、各種の調査・試験を実施した。以下、それらの結果について報告する。

4.1 圧縮強度の検証

圧縮強度はコンクリートの品質を判断する最も一般的、かつ比較的正確な指標である。本工事では、超音波加湿養生システムによる初期湿潤養生について、以下の比較試験で効果を確認した。

供試体を加湿養生の開始までセントル保温バルーン内に置いた後、[加湿養生無し]と[加湿養生7日間]に分けて現場養生を行い、それ以降は同条件で保管し、 $\sigma_7 \cdot \sigma_{28} \cdot \sigma_{56} \cdot \sigma_{91}$ を実施した。

試験の結果、材齢28日以降では加湿養生を実施した供試体の方が、約12%強度が増大しており、初期養生効果による、コンクリートの高品質化を確認することができた。（次頁、写真4.1.1、図4.1.1）

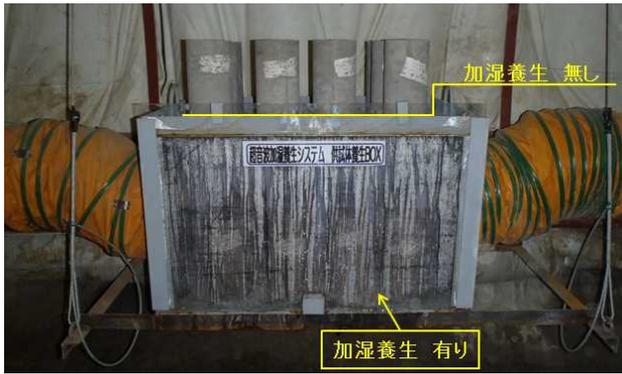


写真 4.1.1 可視化した養生比較ボックス

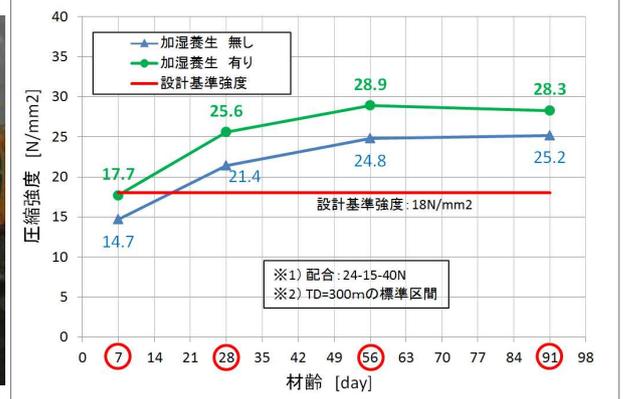


図 4.1.1 圧縮強度比較試験の結果

4.2 コンクリート表面の透気性評価

表面透気性試験は、構造物の耐久性に大きく影響するコンクリート表層部の密実性を評価する試験である。本工事では、配合・表面含浸材塗布の有無・養生方法の違いによるコンクリート表面の品質の差異を確認するため、覆工・坑門工について透気試験機「パーマツール」を用いて、透気性試験を実施した。（図 4.2.1, 写真 4.2.1）試験は測定値のバラツキを排除するため、コンクリートの水分量が 5.5%未満であることを確認し、鉛直面の側壁部で各箇所 3 回測定した平均値で評価した。

試験結果（表4.2.1）と評価の目安（表4.2.2）に基づいて、得られた結果を考察する。

- ① 全ての測定箇所「Low」判定以下であり、特に坑口～100m地点の9BLでは、透気係数が0.007の「Very Low」判定となった。これは、加湿養生システムによる7日間養生後、両坑口閉鎖により坑内の温湿度を一定に保持した結果、コンクリート表面の品質が向上したと考える。
- ② シラン系表面含浸材・膨張材添加の有無による差異は、今回の試験結果では表面の緻密性と関連付けることは出来なかった。
- ③ 圧縮強度の低い箇所の方が透気性に優れているなど、逆転現象起こしている箇所もあり、圧縮強度と透気性相関は見られなかった。

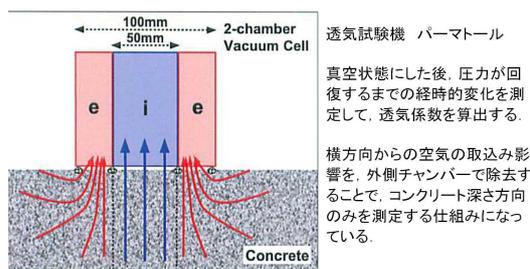


図 4.2.1 パーマツール 試験原理図

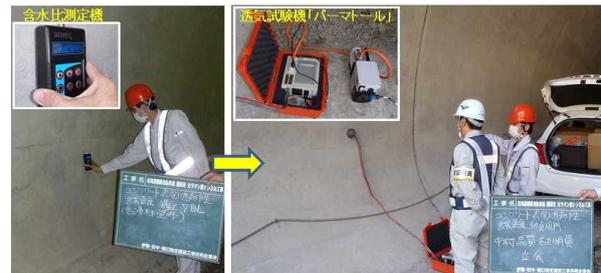


写真 4.2.1 コンクリート表面透気性試験

表 4.2.1 コンクリート表面透気性試験の結果

| 測定箇所 | 打設日 | 配合 W/C・セメント量 | 含浸材塗布 | 初期養生方法 | 測定値 | 判定 | σ_{28} [N/mm ²] |
|--------------------------------------|----------|--------------------------|-------|----------------------|-------|----------|------------------------------------|
| 覆工 7BL | H25.3.23 | 24-15-40N 51.3%・303kg | 有り | 加湿養生7日間 (モイストキュア) | 0.018 | Low | 29.6 |
| " | " | " | 無し | " | 0.012 | Low | " |
| 覆工 9BL | H25.3.28 | 27-18-25N 49.4%・322kg | 無し | " | 0.007 | Very Low | 36.8 |
| 覆工 48BL | H25.7.13 | 30-18-25N 47.9%・324kg | 有り | " | 0.082 | Low | 35.9 |
| 坑門工 側壁部 (膨張材20kg/m ³) | H25.8.1 | 27-18-25N 49.4%・322kg | 有り | 散水養生5日間 | 0.086 | Low | 35.2 |
| 坑門工 底版部 | H25.6.24 | 27-18-25N 49.4%・322kg | 無し | " | 0.081 | Low | 32.6 |

表 4.2.2 透気性試験の評価目安

| 階級 | 透気係数KT値 (10 ⁻¹⁶ m ²) | 透気性評価 |
|-----|--|------------|
| PK1 | <0.01 | Very Low |
| PK2 | 0.01-0.1 | Low |
| PK3 | 0.1-1.0 | Moderate |
| PK4 | 1.0-10 | High |
| PK5 | 10-100 | Very High |
| PK6 | >100 | Ultra High |

4.3 ひび割れ調査

完成時に坑門工・覆工のひび割れ調査を行った結果を図4.3.1, 4.3.2 にまとめた。ひび割れは計22本発生し、いずれも0.05～0.10mmの微細ひび割れであった。

これらのひび割れには、「スパン中央付近もしくは3分割した付近で、インバート（坑門は底版）との水平打継ぎ目からトンネル横断方向に向かって生じており、ひび割れの発生は打設後7日目～8日目に確認している」という共通した特徴があり、「温度ひび割れ」とであると推定できる。

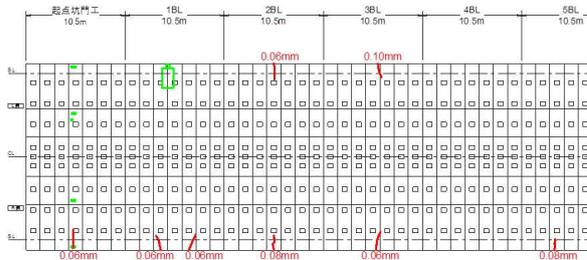


図 4.3.1 ひび割れ展開図（起点側）

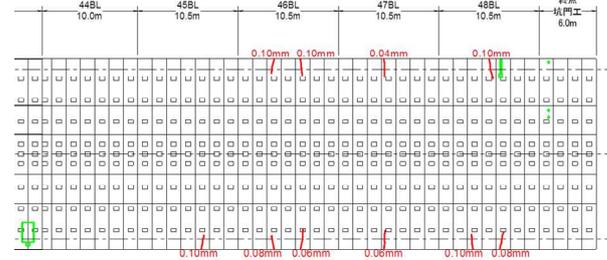


図 4.3.2 ひび割れ展開図（終点側）

ひび割れ箇所への対策は、「補修の要否に関するひび割れ幅の限度」（日本コンクリート工学協会）に則り、0.05mm以上のひび割れ箇所については、高度な撥水性を具備する寒冷地用のシラン系表面含浸材を2回塗りして、防水性を向上させた。

4.4 坑門工 配筋の非破壊検査

かぶり部の配筋精度が品質に大きな影響を与える坑門工では、コンクリート打設後のかぶり部分の非破壊検査（かぶり・配筋間隔）を前提として、施工管理を行った。打設後の検査結果は、かぶり・配筋間隔とも規格値内に収まっていることを確認した。（写真4.4.1, 表4.4.1）

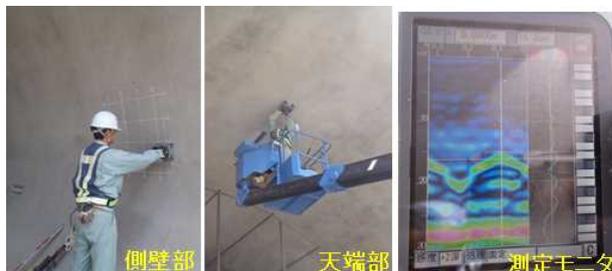


写真 4.4.1 坑門工の非破壊検査

表 4.4.1 非破壊検査の結果（かぶり）

| | 設計値 [mm] | 実測値 [mm] | | *)規格値 [mm] | | 合否 |
|---------|-------------|-------------|-------|---------------|------|----|
| | | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | |
| 起点側 天端 | 121.5 | 138.7 | 132.9 | 165.0 | 84.4 | 合 |
| 起点側 側壁部 | | 139.5 | 135.0 | | | 合 |
| 終点側 天端 | | 117.2 | 117.2 | | | 合 |
| 終点側 側壁部 | | 137.4 | 131.8 | | | 合 |

*)コンクリート非破壊試験の規格値

5 おわりに

本稿で報告した覆工・坑門工の品質向上に対する創意工夫とその効果は、現場従事者が常に改善意識を持ってコンクリート工事に取組んだ結果であり、費用対効果は十分にあったと自負している。

また、圧縮強度比較試験や打設後の非破壊検査の他、新たな品質評価手法であるコンクリート表面透気性試験にも取り組み、創意工夫の効果を評価値として記録に残すことで、寒冷地での施工が多い我が社において、今後の指標とすることもできた。

微細ではあるが温度ひび割れが発生した結果を謙虚に受けとめ、コンクリート配合計画や施工方法について、更なる創意工夫意識を持ってトンネル建設工事に邁進していく所存である。

以上