



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 30-7

研究テーマ

養生技術・混和材料を活用した各地域の
コンクリート構造物の品質・耐久性確保システム
についての研究開発

研究代表者： 横浜国立大学教授 細田 暁
共同研究者： 八戸工業大学教授 阿波 稔
岩手大学准教授 小山田 哲也
長岡工業高等専門学校教授 井林 康
電力中央研究所 小松 怜史
香川高等専門学校准教授 林 和彦
広島大学教授 半井 健一郎
九州大学准教授 佐川 康貴
岩手大学准教授 小山田 哲也
琉球大学教授 富山 潤

令和 3 年 6 月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式 3 を挿入）	*
第 1 章 はじめに	24
第 2 章 東北地整の寒冷期における高耐久床板の適切な養生に関する研究	25
第 3 章 東北地整の一般構造物・トンネル覆工コンクリートの品質確保のための表面吸水試験の研究	29
第 4 章 東北地整のトンネル覆工コンクリートの点検データの分析	32
第 5 章 東北地整の高耐久床版のひび割れ抑制のための混和材料技術に関する研究	35]
第 6 章 山口県の施工記録のデータベースの機械学習による分析	37
第 7 章 北海道開発局の品質確保の試行工事の効果の検証	40
第 8 章 品質確保システムを全国展開する際に検討が必要となる事項の整理	43
第 9 章 まとめ	45

第1章 はじめに

本研究は、これまでに申請者らが産学官の協働で構築し、効果が検証されたコンクリート構造物の品質・耐久性確保システムを、全国的に展開する過程で、**特に各地域の多様な環境条件や、骨材等の材料事情に適應するために**拡張、改善するものである。試行工事での研究を通して、各地域で耐久性を確保するために必要な**標準的な養生のあり方**、地産地消を基本とした持続可能な社会のために**厳しい材料事情においても混和材料を適切に活用して品質・耐久性を確保する方法**を研究開発し、地方整備局や自治体等の品質・耐久性確保に関する**手引き類に実装**する。

1.1 研究の背景

研究代表者らはこれまで、産官学の協働で山口県のひび割れ抑制システム（2007年度から公式運用、2014年度から品質確保システムへ拡張）を構築し、東日本大震災以降の東北復興道路における品質・耐久性確保システムに応用し、最新の研究成果と実構造物の耐久性向上をつなぐ実践的研究を行ってきた。2016年度には、この取組みが土木学会の重点研究課題として採択され、「コンクリート構造物の品質・耐久性確保マネジメント研究小委員会」（研究代表者が幹事長）として1年間の活動を行った。実務的な研究成果として、東北地整の品質・耐久性確保に関する各種の手引き類を作成した。

本研究の採択時の段階では、学術的な組織としては、土木学会コンクリート委員会の「**コンクリート構造物の品質確保小委員会**」において、上記の実践的研究に関わる産官学のメンバーを委員とし、基礎研究と現場での実践をつなぐ活動を続けている。このような経緯のもと、**2017年7月に国土交通省からの通知により、全国の地方整備局において、東北地整で申請者らが構築した施工状況把握チェックシートと目視評価法を活用した品質確保手法の試行工事が行われ**、全国的な展開が図られることとなった。

我が国の環境は地域によって極めて多様であり、またコンクリートの特性に大きな影響を及ぼす骨材の事情が地域により大きく異なっており、真に構造物の長期耐久性を確保するこ

とは容易でなない。実際に、これまでに建設された構造物で早期劣化が多発しており、実効性のある品質・耐久性確保システムを全国で構築することの必要性は極めて高い。真の耐久性確保を達成するためには、**表層コンクリートの緻密性を達成するための養生方法・期間についての地域ごとの標準を明らかにすることや**、品質の劣る骨材であっても**フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材や種々の化学混和剤を適切に活用するための研究**が不可欠である。試行工事での研究を通じて得られた知見を実効性のある手引き類に反映することの意義は学術的にも極めて大きい。

1.2 研究の目的

本研究の採択時の段階で、すでに構築されている実績のあるシステムとして、山口県の品質確保システム、東北地方整備局の品質・耐久性確保システムがある。これらの改善と、研究期間内に新たに、少なくとも四国地方整備局でのトンネル覆工コンクリートの品質確保の手引き、群馬県と沖縄県で品質確保の手引き類が、申請者らが深く関与する形で制定・改善される予定であった。

養生技術については、土木学会コンクリート委員会の「**コンクリート構造物の養生効果の定量的評価と各種養生技術に関する研究小委員会**」（研究代表者が委員長）と連携し、特に寒冷地で凍結防止剤を散布する環境での、橋梁上部工、下部工、トンネル覆工コンクリート等において耐久性を確保するために必要な養生のあり方を研究し、東北地方整備局の各種手引き類の改善に反映することを目標とする。

本研究で材料事情に着目する地域としては、**骨材供給事情の厳しい四国・沖縄や、凍結防止剤による骨材のアルカリシリカ反応促進が懸念される東北・新潟等**がある。上記の地域でフライアッシュ、高炉スラグ微粉末、膨張材等を適切に活用した品質・耐久性確保、さらにひび割れ抑制対策の方策を各種手引き類に反映することを目標とする。地産地消と環境負荷低減も達成するサステナビリティに資する成果となる。

第2章 東北地整の寒冷期における高耐久床板の適切な養生に関する研究

2.1 研究の目的

寒冷期にコンクリートの水分が凍結する事に対して、初期凍害を防止して耐久性を確保する適切な養生方法を検討するための実験を行う。具体的には、東北地方整備局管内等の寒冷地の温度条件を模擬し、養生方法を変化させて、硬化コンクリートの耐久性の違いを実験で確認する。実験結果を分析して、適切な養生方法を提案する。

2.2 実験による検討

(1) 令和元年度の実験の概要

令和元年度の研究において、寒中施工がなされるべき時期における合理的で適切な養生条件の提案につなげるため、東北地整仕様の高耐久床版を模擬した複数の配合のコンクリートを用いて、2種類の寒中施工を模擬した温度条件において養生方法が膨張ひずみの発現とスケーリング抵抗性に及ぼす影響を分析した。令和元年度の寒中施工を模擬した打込み後の環境条件、養生方法およびコンクリート配合などの試験条件を表2-1に示す。この実験で与えた+5~-5°Cを一日で与えるサイクルは、東北地方の1月の厳冬期の外環境に相当すると言える。また、+5°C一定の環境条件は、寒中施工で規定されている最低の温度を模擬している。

表2-1 令和元年度の供試体の作製条件

供試体 No.	環境条件	養生方法	コンクリート配合
1	温度+5~-5°C サイクル	断熱材10cm + 不織布散水	27-15-25-BB (膨張材あり)
2		ブルーシート + 不織布散水	27-15-25-BB (膨張材あり)
3	温度+5°C	ブルーシート + 不織布散水	27-15-25-BB (膨張材なし)
4		ブルーシート + 不織布散水	27-15-25-BB (膨張材あり)

その結果、コンクリート標準示方書に準拠した保温養生がなされる場合には、十分なスケーリング抵抗性が確保されることが、促進試験の結果から明らかとなった。また、必ずしもコン

クリート標準示方書に準拠した保温養生がなされず、コンクリートの打込み後の温度が低い条件においても、十分なスケーリング抵抗性が確認されたため、寒中施工期に保温養生を簡素化する検討も可能とは思われるが、本研究の成果としては、コンクリート標準示方書に準拠した保温養生を実施することを提案とする。

令和2年度には、複数の高耐久仕様床版が東北地整管内で施工されたが、その中で、三陸国道事務所管内の普代川大橋(鋼4径間連続桁橋)において、研究代表者らのアドバイスにより、膨張材の使用量を標準的な20kg/m³から25kg/m³に増やして、より積極的なひび割れ抑制に挑戦した現場があった。単位膨張材量の増加は、ひび割れ抑制の観点からはより高い効果が期待できるが、凍結融解によるスケーリングへの抵抗性にはマイナスとなる。そのため、本研究では、令和元年度に実施した凍結融解の促進試験方法を活用して、普代川大橋のRC床版に用いられるものと同じコンクリートを使用して作製したRC床版模擬試験体を作製し、スケーリング抵抗性に及ぼす単位膨張材量の影響を検討した。

なお、普代川大橋のRC床版に用いられるコンクリートは、令和元年度に研究を行った新柳渕橋のRC床版に用いられたコンクリートを出荷した同じコンクリート製造工場で作られたものであり、セメント、膨張材、骨材、混和剤等が共通であるとみなせる。

(2) 令和2年度の実験の概要

普代川大橋のRC床版に用いられるものと同じ配合のコンクリートも含み、表2-2に示す配合で、図2-1に示す配筋でRC床版を模擬した供試体を作製した。

図2-1に、RC床版模擬供試体の養生の様子と、供試体作成後の外気温の計測結果、そしてRC床版模擬供試体の中心部におけるコンクリートの温度の計測結果を示す。低い外気温で屋外に暴露された供試体中のコンクリート温度は最高温度で40°C程度まで上昇していることが確認された。RCスラブ模擬供試体は、コンクリート製造工場内の敷地で作製された後、横浜国立大学の構内へ移送され、図2-2に示すように屋外暴露で保管した。材齢が約9ヶ月となった時点で、図2-2に示すように供試体をカッターで切断し、図2-2中のAの部分を用いてスケーリング試験を行った。凍結融解の繰り返しによるスケーリング試験は、令和元年度に実施した方法を踏襲した。供

試体上面に3%NaCl溶液を6mmの深さで張るように土手を作り，図2-3中に示す温度履歴を与えて凍結融解試験を行った。

表 2-2 スケーリング試験のための供試体のコンクリート配合

No.	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	B (kg/m ³)	Fiber (kg/m ³)	Expansive Additive (kg/m ³)
1	43	40	6.0	170	375	-	20
2	43	40	6.0	170	370	-	25

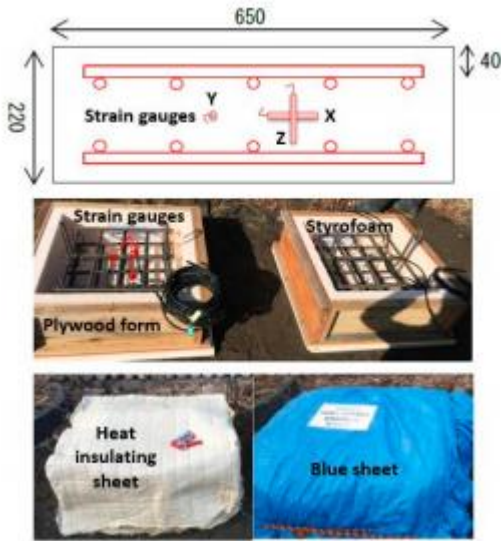


図2-1 RCスラブ模擬供試体の養生の状況と温度の計測結果

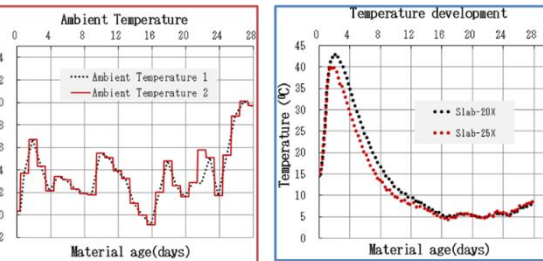
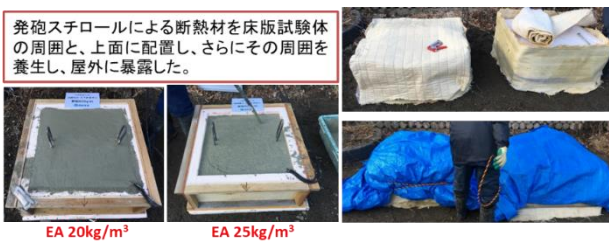


図2-2 RCスラブ模擬供試体の養生の状況と温度の計測結果

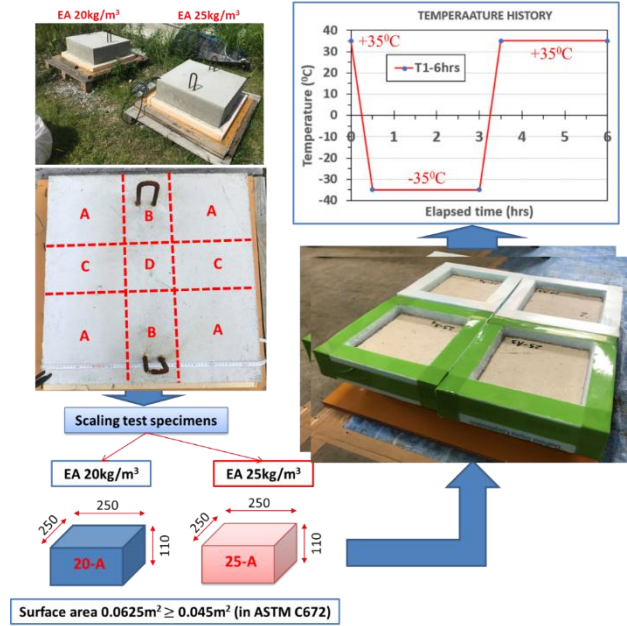


図2-3 RCスラブ模擬供試体の養生の状況と温度の計測結果

(3) 表面吸水試験による緻密性の評価

スケーリング試験のために供試体を切断する前に，RCスラブ試験体に対して，適切な含水状態であることを非破壊の含水計で計測した後，表面吸水試験を実施した．図2-4中のA1～A4の箇所において，本研究で推奨するHI-100の含水計を用い，カウント値が推奨値の210より小さいことを確認した上で，表面吸水試験を実施した．

図4に示すように，10分時点での表面吸水速度である p_{600} は， $0.25\text{ml/m}^2/\text{s}$ を下回っており，3段階の品質評価の最上位である「良」を示した．その中で，単位膨張材量を 25kg/m^3 とした場合に，標準添加量である 20kg/m^3 の場合と比較して， p_{600} が大きくなり，吸水抵抗性に劣る結果となった．単位膨張材量を増やすことは，ひび割れ抑制にはプラスの効果をもたらすと期待されるが，表面吸水試験による吸水抵抗性に対してはマイナスの影響を及ぼすことが確認された．

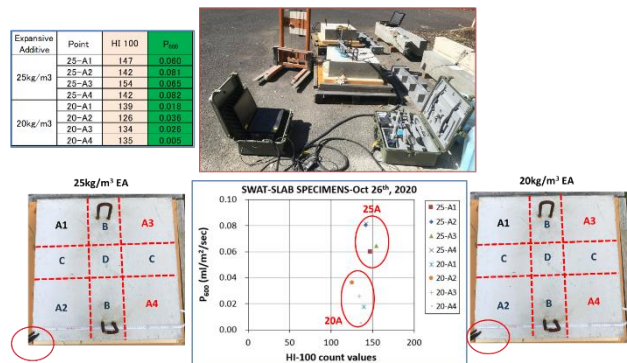


図2-4 RCスラブ模擬供試体の表面吸水試験による緻密性の評価

(4) スケーリング試験の結果

図 2-5 と図 2-6 に、スケーリング試験の結果を示した。単位膨張材量を 25kg/m^3 とした場合に、スケーリング抵抗性に劣る結果となった。しかし、既往の研究により、50 回の凍結融解サイクルで 0.5kg/m^3 程度のスケーリング量であれば、実構造物でのスケーリング抵抗性は十分である、とされており、本研究で実施した 4 つのすべての供試体のスケーリング抵抗性は十分であると言える。

図 2-5 と図 2-6 には、スケーリング劣化の状況を視覚的にも示した。ASTM で定められている目視による評価 (Visual Evaluation) では、単位膨張材量を 25kg/m^3 とした場合に、凍結融解サイクルが 50 回を超えて 80 回以上になると、目視評価のグレード 3 に至り、粗骨材が露出し始める状況となり、目視でもスケーリング抵抗性に劣ることが確認された。しかし、単位膨張材量にかかわらず、凍結融解サイクルが 50 回の時点では目視評価はグレード 2 となり、軽微なスケーリングで収まった。

単位膨張材量 25kg/m^3 とする場合、東北地整の高耐久仕様の配合で使用する範囲では、十分なスケーリング抵抗性を有する、というのが本研究の結果となるが、今後もデータの蓄積により検証を重ねていく必要があると考えている。

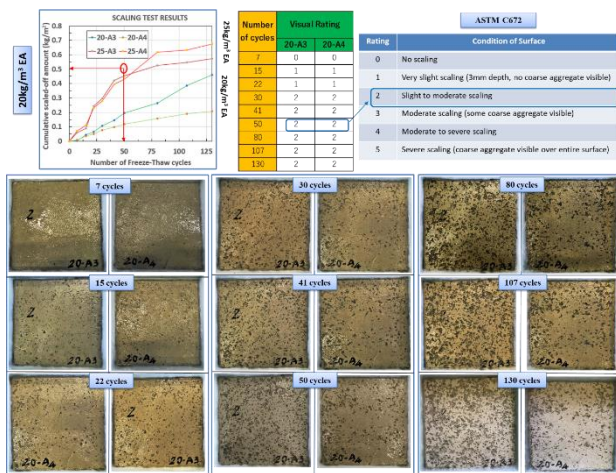


図 2-5 単位膨張材量 20kg/m^3 の場合のスケーリング試験の結果

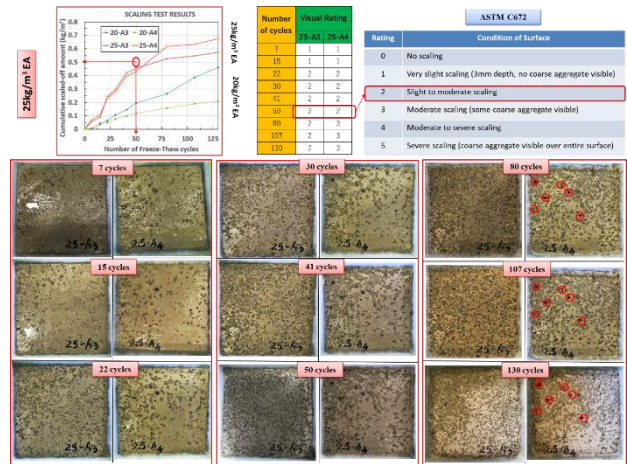


図 2-6 単位膨張材量 25kg/m^3 の場合のスケーリング試験の結果

(5) 気泡間隔係数の結果

図 2-3 に示した C の部分を使用して、気泡間隔係数を計測した。供試体は、湿式ダイヤモンドカッターにより $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ の直方体に整形した。図 2-7 に示す切断面の①と②の部分において計測した。



図 2-7 気泡間隔係数を計測する供試体と計測位置

試験方法は、ASTM C457-16 「Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete」 (顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムによるパラメータと空気量の測定方法) によるリニアトラバース法に準拠した。

気泡間隔係数の測定結果を表 2-3 に示す。

測定の結果、単位膨張材量が 20kg/m^3 の場合の「20①床版コンクリート表面 (モルタル)」は空気量が 1.2% 、気泡間隔係数が $257\mu\text{m}$ 、「20②床版コンクリート断面中央 (一般部)」は空気量

が 1.6%，気泡間隔係数が 275 μm であった。

また、単位膨張材量が $25\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の「25①床版コンクリート表面（モルタル）」は空気量が 4.2%，気泡間隔係数が 196 μm ，「25②床版コンクリート断面中央（一般部）」は空気量が 3.0%，気泡間隔係数が 239 μm であった。

一般に凍害に対して有効であるとされているフレッシュコンクリートの空気量は 4.5% 以上であり、一般に硬化後のコンクリートの空気量はブリーディングによる空気泡の移動等により 1% 程度減少する。今回の測定結果からは、床版試験体「25」の表面（モルタル）およびコンクリート断面中央（一般部）は凍結融解に対する抵抗性を十分に持たせるための気泡間隔係数と空気量を有していることがわかり、床版試験体「20」表面（モルタル）およびコンクリート断面中央（一般部）は床版試験体「25」と比べて劣ることが確認できた。

表 2-3 気泡間隔係数の測定結果

供試体 記号	空気量 A (%)	気泡間隔係 数 \bar{L} (μm)
20①床版コン クリート表面 (モルタル)	1.2	257
20②床版コン クリート断面 中央 (一般部)	1.6	275
25①床版コン クリート表面 (モルタル)	4.2	196
25②床版コン クリート断面 中央 (一般部)	3.0	239

2.3 得られた知見のまとめ

普代川大橋の RC 床版で用いられる高耐久床版用のコンクリートを用いて、ひび割れ抑制の効果を高めるために単位膨張材量を $25\text{kg}/\text{m}^3$ に増加した場合に懸念されるスケーリング抵抗性について検討した。RC 床版を模擬した RC スラブ試験体を作製し、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ への増加により、スケーリング抵抗性がやや低下したものの、既往の知見と照らし合わせて十分なスケーリン

グ抵抗性を持つことが確認された。

標準的な単位膨張材量である $20\text{kg}/\text{m}^3$ の場合に比較して、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ に増加した場合には、表面吸水試験による緻密性がやや低下したものの、十分な吸水抵抗性を示した。また、スケーリング抵抗性に寄与する空気泡（エントレインドエア）については、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ に増加した場合の方が良質な空気泡を有する結果が確認された。コンクリートの細孔径分布も調査したが、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ に増加した場合の方がやや空隙が多い結果となったが、鉄筋による膨張の拘束効果は鉄筋から離れた箇所においても確認され、十分なスケーリング抵抗性を示した理由の一つであると考えられる。

東北地整の高耐久床版においては、単位膨張材量を $25\text{kg}/\text{m}^3$ に増加することは、ひび割れのリスクの高い場合には有効なひび割れ抑制の手段の一つと考えられるが、標準的な対策の一つとするためには、スケーリング抵抗性を含めた他の耐久性の観点からの調査研究を今後も積み重ねていく必要があると考えている。例えば、単位膨張材量を $25\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合に、コンクリート標準示方書の寒中施工で規定されている最低の温度である 5°C 程度で打込み後の養生をした場合にも、十分なスケーリング抵抗性が確保されるのか、というような課題についても調査研究を積み重ね、様々な施工条件においても確実に耐久性が確保される技術へと仕上げていく必要があると考えている。

第3章 東北地整の一般構造物・トンネル覆工コンクリートの品質確保のための表面吸水試験の研究

3.1 研究の目的

養生によるコンクリートの緻密化の効果を定量的に評価するための表面吸水試験は、東北地整の一般構造物の品質確保の手引きや、トンネル覆工コンクリートの品質確保の手引きで活用されている。吸水試験を実構造物で実施する場合に、コンクリートの含水率の影響を大きく受けることは国内外で以前から指摘されていたが、本研究では、コンクリートの含水率が表面吸水試験の計測結果に及ぼす影響を明らかにし、最終的にはコンクリートの含水率の影響を受けない品質評価方法を提案することを目的とする。

コンクリートの含水率がある一定の範囲内にある場合、含水率が表面吸水試験の計測結果にほとんど影響を与えないことが、令和元年度までの研究で分かってきた。令和2年度には、この含水率が計測結果に影響を与えない範囲を同定する方法を提案し、また、なぜこのような範囲が存在するのかについて数値シミュレーションを活用して分析した¹⁾。

表面吸水試験は完全非破壊の試験であり、供試体や実構造物等での品質評価に広く活用できる。一方で、土木学会規準として制定された水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G 582-2018)は、供試体を用いた破壊試験であるが、表面吸水試験による吸水抵抗性との相関を調べた²⁾。JSCE-G582-2018は手間のかかる試験であるが、表面吸水試験による評価が可能であれば、簡便に水分浸透速度係数を評価することも可能となることが期待できるからである。

また、従来、十分に検討されていなかった、表面吸水試験に及ぼすコンクリートの温度の影響について分析した。検討の範囲では、温度の影響はほとんどないことが分かり、我が国の各地域で表面吸水試験を活用していく際に有用な知見となると考えている。

3.2 含水率の上限値を設定した表面吸水試験方法の提案

平成30年度に作製した供試体を活用して計測を行った。水セメント比は40, 50, 60%の3種類とし、50%についてのみ普通ポルトランドセメントと高炉セメントの2種類のセメントを設定した。それぞれのコンクリートに対して、3種類の養生条件を施し、表層品質を変化させた。

図3-1に、空隙中の飽和度と表面吸水試験の結果の関係を示した。図3-1中のBというゾーンが、コンクリートの含水率の影響を受けない「台地ゾーン」と考えている。この台地ゾーンで計測をすることで、含水率の影響を受けずに表面吸水試験の計測を行うことができ、またコンクリートの品質を適切に評価できるシステムとして提案する。台地ゾーンで計測された結果の意味については後述する。

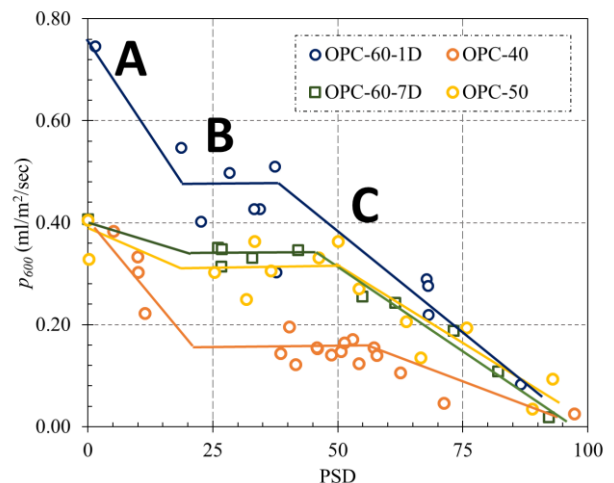


図3-1 PSD (空隙中の飽和度) が表面吸水試験に及ぼす影響

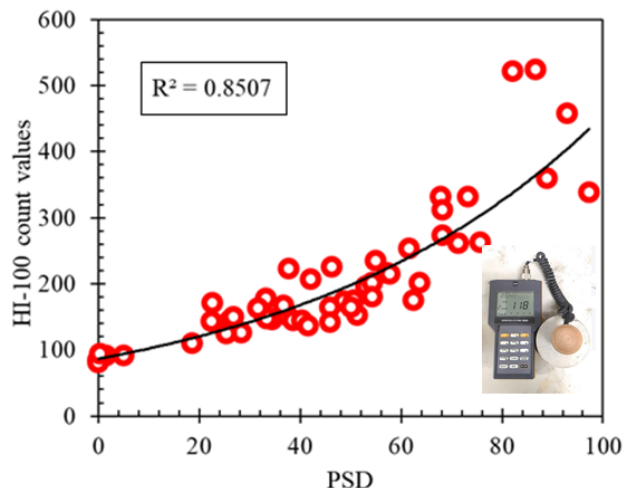


図3-2 PSD と HI-100 のカウント値の関係

図3-2に、コンクリートの空隙中の飽和度と、電気抵抗式の HI-100 によるカウント値との関係を示した。様々な種類のコンクリートに対し

て、高い相関が見られ、HI-100を用いてコンクリートの含水率を事前に計測するのがよい、というのが本研究の提案である。

図3-3に、HI-100によるカウント値と、表面吸水試験の結果を示した。本研究で検討した範囲では、HI-100によるカウント値が135から210の間であれば、様々なコンクリートが台地ゾーンにあることを示している。この具体的なしきい値の値については、今後も検討を深めていく必要があると考えている。

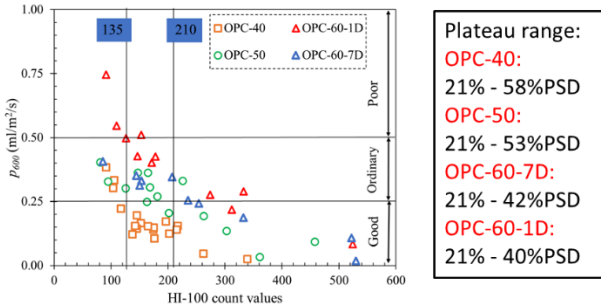


図3-3 HI-100のカウント値と表面吸水試験の結果

図3-1～3-3に示した結果は、供試体中の含水率をなるべく均一になるように調整して計測したものである。一方で、実構造物のコンクリート中の含水率は均一であることはほとんどなく、場所ごとにばらついている場合が少なくない。特に、屋外環境で暴露される土木構造物の場合には、含水率がコンクリート表面から奥行に向かって変化する場合に遭遇することが多い。

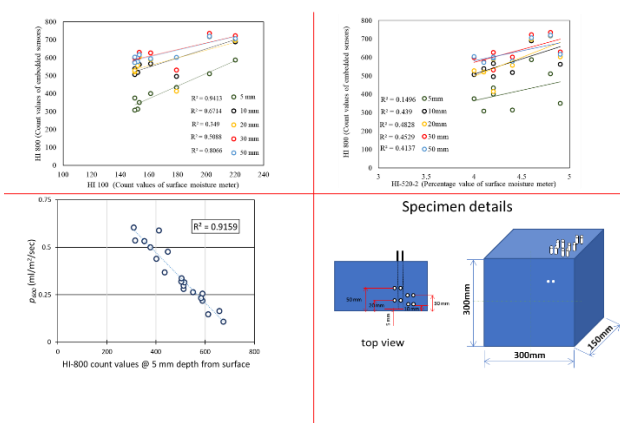


図3-4 各種含水計による計測結果と深さ方向の含水率の関係

図3-4は、供試体に埋め込んだセンサーにより計測したコンクリート表面から各深さにおける電気抵抗値と、各種の含水計でコンクリート表面において計測した結果の関係を示している。HI-100によるカウント値は、深さ5mmの

位置での電気抵抗値と極めて高い相関が認められた。また、図3-4には、深さ5mmの位置での電気抵抗値と表面吸水試験の結果の高い相関も認められている。

そこで、特に、コンクリート中に含水率の分布がある場合には、HI-100によりコンクリートの含水率を評価し、カウント値が135から210の間にあることを確認してから、表面吸水試験を行う、というのが本研究の成果に基づく提案である。

3.3 表面吸水試験と土木学会の試験方法の相関

土木学会のコンクリート標準示方書の設計編では、2017年版の改訂において、鋼材腐食の照査において、水分の浸透速度を表す水分浸透速度係数を用いる方法が示された。また、降雨などの短期の水掛かりによる水分浸透深さを測定する試験方法として、水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G 582-2018)が制定された。

JSCE-G 582-2018の試験方法では、円柱供試体の表面から20mmを除去して48時間の吸水試験を行うことになっているが、この試験により得られた水分浸透速度係数と、別に作製した供試体で計測した表面吸水試験の結果の相関を調べたのが図3-5である。両者の相関は見られるものの、試験の数が十分とは言えず、今後の研究成果の蓄積が期待される。

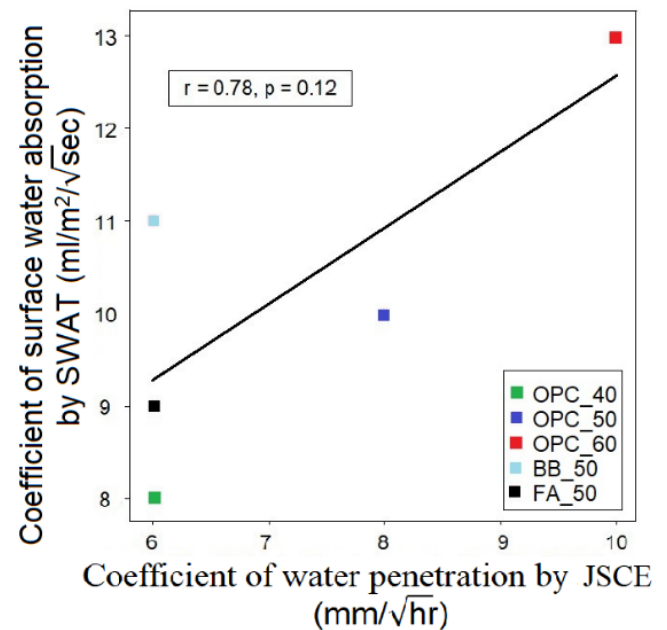


図3-5 SWATによる吸水係数とJSCE試験法による水分浸透速度係数の関係

3.4 コンクリートの温度が表面吸水試験に及ぼす影響

本研究では、コンクリートの温度が表面吸水試験に及ぼす影響を分析した。コンクリートの温度は $30 \pm 2^\circ\text{C}$ と、 $13 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御した。同じ供試体に対して高温と低温で計測を行い、表面吸水試験の計測前に HI-100 で台地ゾーンにあることを確認した。また、ここでの検討では、表面吸水係数 (CSWA) を用いて評価した。CSWA は、図 3-6 に示すように、単位面積当たりの累積吸水量と時間の平方根の直線的な関係の傾きである。CSWA を指標に使うことで、表面吸水試験の計測時間の短縮化も検討できることになる。

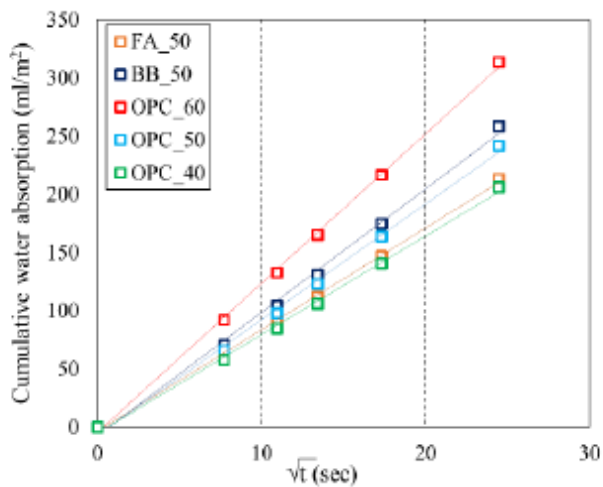


図 3-6 SWAT による CSWA

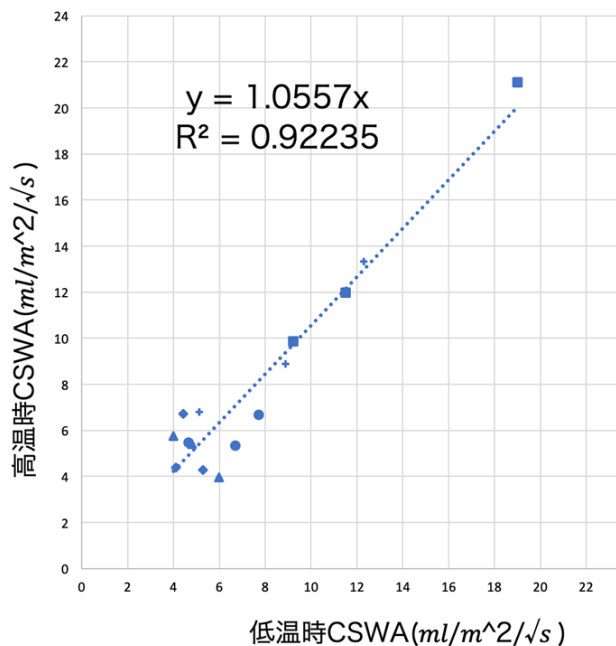


図 3-7 表面吸水試験に及ぼす温度の影響

図3-7に、計測結果を示した。本研究では、 13°C と 30°C での比較であるが、温度の影響は無視し得る程度の小さなものであることが分かった。さらに温度の範囲を広げた検討も行う必要があると思われるが、一般的な環境で表面吸水試験を使用する場合、温度の影響は、実用上は無視して構わないと言えるであろう。水が凍結するマイナスでは使用が困難と思われるが、我が国の多様な温度環境において、表面吸水試験でコンクリートの品質評価を実施できると考えている。

第4章 東北地整のトンネル覆工コンクリートの点検データの分析

4.1 研究の目的

東北地方整備局管内で、2014～2018年度に点検されたトンネル255本分の定期点検データを分析した³⁾。そのうち、NATMトンネルは134本である。点検データを分析することにより、品質確保の取組みの効果を検証するとともに、今後のNATMトンネルの覆工コンクリートの施工における課題を明らかにする³⁾ことを目的とした。

4.2 分析の方法

トンネル定期点検データ上の個々の変状に位置情報を与えて、場所ごとに変状の発生頻度を算出する方法を用いて、品質確保の取組みによる試行工事によって建設されたNATMトンネルと、試行工事以前のNATMトンネルとの間の変状の発生頻度を比較した。

本研究では、表4-1に示すように変状を種類分けし、国土交通省の健全度の判定区分に従った。

表 4-1 変状の種類と健全度の判定区分

種類	変状の説明
ひび割れ	点検調査において「ひび割れ」と記載されていたもの
うき・はく離・はく落	点検調査において「うき」「はく離」「はく落」と記載されていたもの
濁音	点検調査において「濁音」と記載されていたもの (分析内ではうき、はく離、はく落に含めた)
叩き落とし	点検調査において「叩き落とし」と記載されていたもの (分析内でははく離・はく落に含めた)
目地不良	点検調査において「目地不良」と記載されていたもの (分析内ではうき・はく離・はく落に含めた)
豆板	点検調査において「豆板」と記載されていたもの

図4-1に、覆工コンクリートの点検データに位置情報を付与した詳細分析の手法を示した。この手法は、岩間・細田によって考案されたものであり、この手法で変状の状況を分析した結果が、現行の東北地方整備局の「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)」にも掲載されている。トンネル1スパンの展開図を縦断方向に6分割、横断方向に10分割の合計で60分割をし、それぞれの変状に位置情報を与えた。この手法により、トンネル天端付近の変状や、施工目地近傍の変状などをデジタルデータとして抽出すること



図 4-1 点検データに60分割の位置情報を与えた詳細分析手法

表 4-2 母集団と選定したトンネルの平均スパン数およびうき・はく離・はく落の発生数

トンネルの分類	平均スパン数	うき・はく離・はく落発生総数	1スパンあたりのうき・はく離・はく落発生数
2014年以降に完成したトンネル(41本)	99.7	1299	0.31
A1-A10トンネル	58.4	218	0.37
1992年-2007年に完成したトンネル(42本)	84.1	2353	0.68
B1-B7トンネル	45.3	223	0.70

が可能となる。複数の座標にまたがる変状には、複数の座標の位置情報を与えた。位置情報を与えた展開図の模式図を図4-1に示す。例えば、図

18内において、ひび割れが発生した座標は「4」「25」「26」「30」「52」「58」となる。この手法を用いた詳細分析には膨大な労力がかかるため、表4-2に示したように、品質確保の試行工事が開始された2014年以降に完成したトンネルから10本（A1～A10）、品質確保の試行工事の始まる以前のトンネルから7本（B1～B7）を選択して、詳細分析を行った。その際に、母集団から偏り無くトンネルを選択するため、施工の良否を最も適切に表す変状と筆者が考えた1スパンあたりのうき・はく離・はく落の発生数が母集団の平均と大きく異ならないように選択した。

4.3 分析の結果

図4-2に、品質確保の試行工事の開始前後での変状の状況を比較した。試行工事の開始後のトンネルにおいては、施工目地近傍のうき・はく離・はく落、豆板、トンネルの天端付近のひび割れが顕著に抑制されている傾向が見られる。一方で、インバート拘束によると思われる側壁のひび割れの発生頻度は顕著に抑制されているとは言えない。

図4-3に、すべてのトンネルの1スパンあたりの天端部近傍のひび割れと施工目地近傍のうき・はく離・はく落の発生状況を示した。図4-3の縦軸は、60分割の座標（マス）に変状が発生していたマスの数を1スパンあたりで示したものである。例えば、ひび割れで4個であった場合は、1スパンあたり、60マスのうち天端近傍の24マス中、4マスでひび割れが記録されていたことを意味する。例えば、施工目地近傍のうき・はく離・はく落で3個であった場合は、1スパンあたり、60マスのうち施工目地近傍の左右20マス中、3マスでうき・はく離・はく落が記録されていたことを意味する。

図4-3からは、トンネルによって変状の発生状況が大きく異なることが分かる。特にA群ではばらつきが大きく、ひび割れやうき・はく離・はく落がほとんど発生していないトンネルが複数ある一方で、B群とあまり変わらない変状の発生が見られるトンネルもあることが分かった。

ひび割れ(A1-A10トンネル)

0.01	0.029	0.077	0.046	0.012	0.017
0.009	0.005	0.05	0.034	0.005	0.009
0.01	0.009	0.005	0.005	0.003	0.007
0.017	0.034	0.015	0	0	0.002
0.033	0.058	0.031	0.009	0.005	0.005
0.043	0.058	0.022	0.009	0.014	0.01
0.022	0.019	0.007	0.002	0.003	0.007
0.015	0.009	0.003	0.003	0	0
0.009	0.014	0.043	0.022	0.003	0.01
0.015	0.024	0.074	0.026	0.01	0.002

ひび割れ(B1-B7トンネル)

0	0.038	0.063	0.054	0.025	0.013
0.028	0.032	0.054	0.063	0.016	0.006
0.032	0.019	0.009	0.009	0.009	0.019
0.028	0.025	0.032	0.028	0.038	0.025
0.155	0.129	0.142	0.186	0.189	0.151
0.18	0.183	0.211	0.199	0.205	0.189
0.044	0.022	0.032	0.035	0.022	0.016
0.025	0.003	0.006	0.006	0.006	0.016
0.032	0.054	0.088	0.066	0.025	0.009
0.019	0.066	0.085	0.057	0.047	0.028

うき・はく離・はく落(A1-A10トンネル)

0.015	0.005	0.009	0.007	0.002	0.026
0.005	0	0	0	0	0.021
0.024	0	0	0	0	0.036
0.026	0.003	0.002	0.003	0.003	0.033
0.029	0.009	0.002	0.003	0.005	0.033
0.039	0.005	0.003	0.005	0.007	0.015
0.022	0	0	0	0	0.024
0.009	0.002	0	0	0	0.033
0.003	0	0.002	0.002	0	0.027
0.01	0.002	0.005	0.005	0	0.014

うき・はく離・はく落(B1-B7トンネル)

0.022	0	0	0	0	0.038
0.025	0	0	0	0	0.063
0.022	0.003	0	0.006	0.003	0.047
0.054	0.003	0.006	0.009	0.003	0.057
0.028	0.028	0.019	0.003	0.016	0.145
0.054	0.028	0.028	0.022	0.009	0.123
0.016	0.006	0.009	0.003	0.013	0.104
0.028	0	0.003	0.006	0.006	0.142
0.028	0	0.003	0.003	0.003	0.06
0.006	0	0	0	0	0.016

豆板(A1-A10トンネル)

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0.002	0.005	0.007	0.009
0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005
0.007	0.003	0	0.005	0	0.009
0.005	0.002	0.003	0.002	0	0.009
0.005	0.003	0	0	0	0.002
0	0	0	0.002	0.002	0.002
0	0	0	0	0	0.002
0	0	0	0	0	0.002

豆板(B1-B7トンネル)

0	0	0	0	0	0
0.003	0	0	0	0.003	0.003
0	0	0	0	0.003	0.003
0.022	0	0.013	0.009	0.003	0.022
0.032	0.009	0.022	0.006	0.003	0.044
0.05	0.013	0.009	0.009	0	0.047
0.019	0	0.006	0.006	0	0.016
0.003	0	0	0	0	0.003
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

図4-2 位置情報を与えた詳細分析の結果

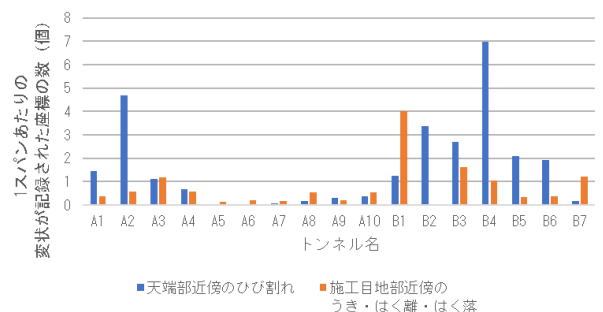


図4-3 各トンネルの天端部近傍のひび割れと施工目地近傍のうき・はく離・はく落の発生状況

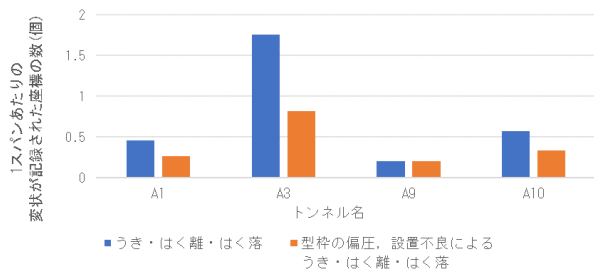


図4-4 型枠の偏圧, 固定不足が原因と記録されたうき・はく離・はく落の発生状況

点検調書において、Aのトンネル群のうちのA1, A3, A9, A10の4トンネルについては、施工時における型枠の偏圧や固定不足が原因のうき・はく離・はく落が記載されていた。それらのトンネルにおける、1スパンあたりのうき・はく離・はく落が記録された座標の数および型枠の偏圧, 固定不足が原因のうき・はく離・はく落が記録された座標の数を図4-4に示す。図4-4に示した4トンネルでは、発生しているうき・はく離・はく落のうち、型枠の偏圧や固定不足に起因するものの割合が高いということが分かる。

品質確保の試行開始以降、施工目地近傍のうき・はく離・はく落は大幅に低減されているものの、依然として発生している変状は型枠の偏圧や固定不足に起因するものが大部分を占めている可能性があり、さらなる品質向上のための今後の改善が期待される。

また、これらの分析結果は、令和2年度に改訂作業が行われ、令和3年6月に公開された東北地方整備局の「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）」に掲載され、これまでの試行工事の分析結果により一定の品質確保の効果が見られていることと、改善すべき課題があることが記載された。

第5章 東北地整の高耐久床版のひび割れ抑制のための混和材料技術に関する研究

5.1 研究の目的

東北地整では、高炉セメントと膨張材を活用した高耐久床版の試験施工を実施してきた。ここでは、試験施工での計測、数値シミュレーションにより、RC床版のひび割れを抑制するシステムを構築する^{4), 5), 6)}。

5.2 平成30年度の研究成果に基づいて提案したひび割れ抑制対策

本研究のH30年度の研究成果に基づいて、令和元年6月に通知された「東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」の中のひび割れ抑制対策が策定された(図5-1)。基本事項を遵守した施工が行われ、施工由来のひび割れは激減しており、構造上、必然的に発生するひび割れが発生する状況となってきた。

これまでに、竣工検査時点で0.2mm以上のひび割れが床版本体で確認された事例はなかったが、鋼3径間以上の連続桁においては、竣工検査までの段階にひび割れ発生をゼロにすることは図5-1に示すひび割れ抑制対策では困難であった。しかし、令和2年度には、鋼4径間連続の普代川大橋において、ひび割れ発生をゼロにすることに成功した。普代川大橋の成功事例を分析することで、ひび割れ抑制対策の高度化につなげることができたので、報告する。

また、壁高欄の伸縮目地から床版まで進展するひび割れが多数観察されており、この現象は複数の橋梁で確認されているため、高耐久床版の試行工事においては、伸縮目地を止めて、すべて誘発目地にする方向で議論が進めていた。普代川大橋では、壁高欄の目地をすべてひび割れ誘発目地として施工し、床版まで進展するひび割れをほぼゼロにすることに成功した。さらに、壁高欄、伸縮装置の後埋めコンクリートや、中央分離帯のコンクリートについても、高耐久化が必要であり、高耐久床版と同じコンクリートを用いることが望ましいと考えていた。

改善されたひび割れ抑制対策は、令和2年度に改訂作業が行われた「東北地方におけるRC床

版の耐久性確保の手引き(案)」に反映され、令和3年6月に公開された。

手引き(案)のひび割れ抑制の考え方

3.4 ひび割れ抑制対策

- 1) 本手引きによって設計・施工されるRC床版においては、ひび割れを有害でないものに抑制するために、適切なひび割れ抑制対策を行うものとする。
- 2) 単純桁のRC床版においては、本手引きに示す基本事項を遵守した施工を行うことで、ひび割れ抑制対策とみなしてよい。
- 3) 鋼橋の2径間連続桁においては、段階施工により生じる引張応力により、先行して施工した床版にひび割れが発生しないように施工を行うものとする。
- 4) 鋼橋の3径間以上の連続桁においては、有害なひび割れの発生が懸念されるため、床版の橋軸方向鉄筋量が1.0%以上となるように補強鉄筋の配置を検討するものとする。
- 5) この手引きにおけるひび割れ抑制対策は一般的な構造形式を対象としており、特殊な構造形式の場合は、学識経験者を含め適切にひび割れ抑制対策を検討するのがよい。
- 6) 実施したひび割れ抑制対策と、ひび割れが発生した場合のひび割れ状況については、適切に記録・保存するものとする。

図5-1 東北地整の手引き(令和元年6月通知)におけるひび割れ抑制対策

5.3 令和2年度の研究成果により改善されたひび割れ抑制対策

普代川大橋は、図5-2に示すような鋼4径間連続桁橋であり、改訂前の「東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」によりひび割れ抑制設計を検討した。図5-2のSTEP番号に示すようにRC床版の段階施工を行うこととした。そして、段階施工により生じる引張応力が厳しくなるLot8とLot4においてのみ、単位膨張材量を標準添加量の20kg/m³から25kg/m³に増やすこととした。

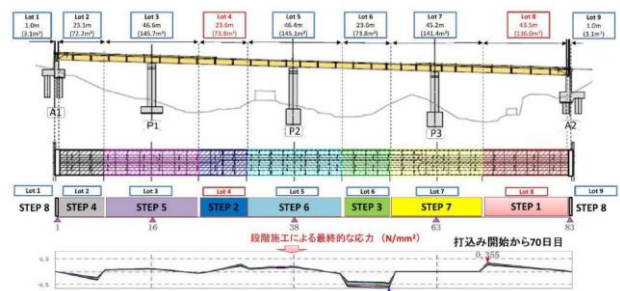


図5-2 普代川大橋における段階施工の順序

結果として、普代川大橋では床版本体にひび割れは発生しなかった。適切な段階施工のやり方により、引張応力(特に最終的な残留応力)を小さく抑制できたことと、単位膨張材量を25kg/m²に増加したことによると考えている。そして、段階施工により発生する応力を数値シミュレーションで多くのケースについて検討したところ、図5-3に示すような原則で段階施工のやり方を設定すると、発生する応力を小さく低減できることが分かった。普代川大橋ではまさ

にこのようなやり方で段階施工がなされていたことが判明した。

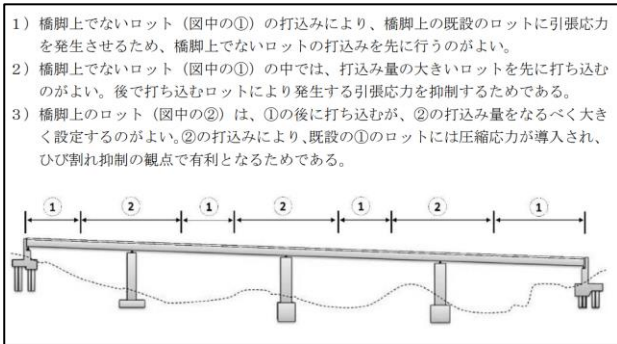


図5-3 発生する引張応力を低減できる段階施工のやり方

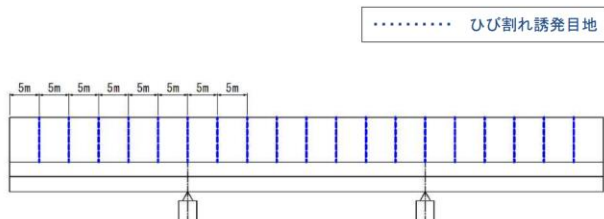


図 5-4 壁高欄の目地の考え方

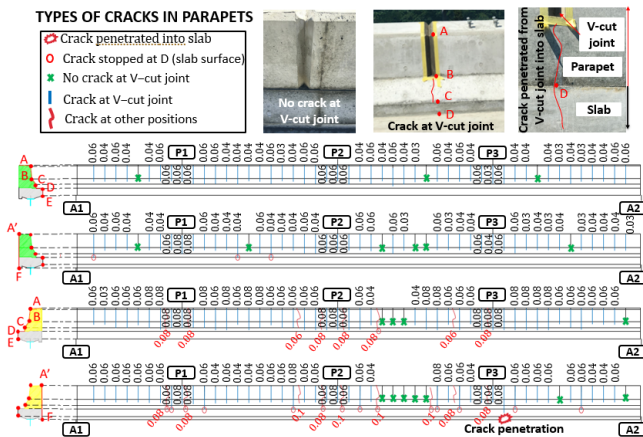


図 5-5 壁高欄の誘発目地の効果

また、普代川大橋では、図 5-4 に示すように、中間橋脚上も含めてすべてひび割れ誘発目地とし、伸縮目地を無くした。壁高欄にも膨張コンクリートを使用した。その結果、図 5-5 に示すように、1 箇所のみ、ひび割れ誘発目地に発生したひび割れが床版に進展していたものの、ひび割れ幅は 0.08mm で無害なものに抑制されていた。この 1 箇所を除いて、誘発目地から床版にひび割れが進展した箇所は無かった。

本研究の成果に基づいて、以下のように東北地方整備局の高耐久床版のひび割れ抑制対

策を改善することを提案した。提案したひび割れ抑制対策が、令和 3 年 6 月に通知された手引きに反映された。

- (1) 壁高欄の目地は、すべて誘発目地とすることが望ましい。また、誘発目地から地覆、さらには床版本体へとひび割れが進展することを防ぐための補強鉄筋を、「東北地方における RC 床版の耐久性確保の手引き (案)」に示されているように配置するのがよい。
- (2) 3 径間以上の鋼連続桁においては、RC 床版の段階施工のやり方を本研究で推奨する考え方で計画するのがよい。
- (3) 3 径間以上の鋼連続桁においては、床版本体でひび割れ発生リスクの非常に高い箇所に対しては、単位膨張材量を 20kg/m^3 から 25kg/m^3 に増やすことも検討の価値があると思われる。本研究では、単位膨張材量を 25kg/m^3 に増やした場合のスケーリング抵抗性についても調査し、十分なスケーリング抵抗性を持っていることを確認した。単位膨張材量を 25kg/m^3 に増やした場合のデータをさらに積み重ね、汎用的な対策の一つにできるか、今後の検討が必要である。
- (4) 壁高欄、伸縮装置の後埋めコンクリートや、中央分離帯のコンクリートについても、凍結抑制剤の影響を受ける環境で供用されるため、高耐久床版と同じ配合のコンクリートを使用するのが望ましい。
なお、壁高欄についても単位膨張材量を 25kg/m^3 に増やすことで、有害なひび割れを根絶できる可能性があり、検討の価値があると思われる。

抑制対策	橋種		
	単純桁の鋼桁 ・PCコンボ桁*	2 径間の鋼桁	3 径間以上の鋼桁
ひび割れ抑制対策① 施工の基本事項の遵守	必須		
ひび割れ抑制対策② 段階施工による応力	-	段階施工による応力で ひび割れが発生しないように配慮	
ひび割れ抑制対策③ (構造形式別の対策)	-	-	・必要に応じて橋軸方向の鉄筋比を 1.0% 程度となるまで補強 ・必要に応じて単位膨張材量を標準使用量よりも増やす

図5-6 東北地整の手引き (令和3年6月通知) におけるひび割れ抑制対策

第6章 山口県の施工記録のデータベースの機械学習による分析

6.1 研究の目的

山口県のひび割れ抑制システムは、平成17年度から正式に運用を開始しており、構造物の打込みリフトごとの施工記録とひび割れ状況がデータベースとして保存されている。コンクリート構造物の施工段階で発生するひび割れの最大ひび割れ幅を精度よく予測する技術は存在せず、最大ひび割れ幅に影響を与える要因も数多い。本研究では、山口県の施工記録のデータベースを用いて、最大ひび割れ幅を精度よく予測できる機械を開発した⁷⁾。この機械にパラメトリックスタディを行わせることによって、各種の要因が最大ひび割れ幅に与える影響を定量的に知ることができ、今後のひび割れ抑制システムの高度化への新たな道が拓けると考えている。

また、本研究プロジェクトの一環で、東北地方整備局においても山口県と同様の施工記録のデータベースの構築に着手しており、将来、東北や群馬県などの施工記録を同様の手法で分析していくことで、ひび割れのリスクの地域特性等も明らかになっていくと期待される。

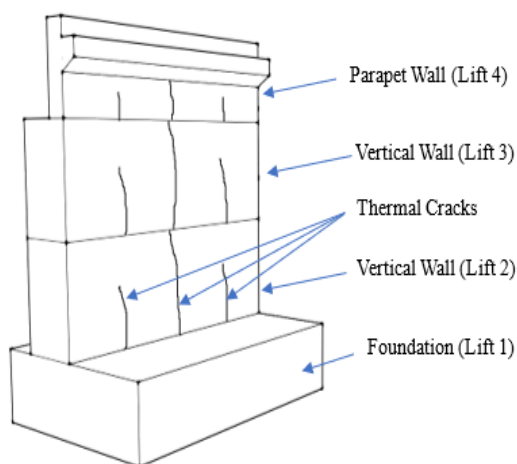


図 6-1 機械学習の対象の橋台たて壁と発生するひび割れの模式図

6.2 最大ひび割れ幅を予測する機械の構築

本研究では、橋台のたて壁を対象とした。なお、山口県では、ほぼすべての橋台に高炉

セメントが用いられており、高炉セメントにより耐久性を向上した上で、有害なひび割れを発生させないシステムとなっている。

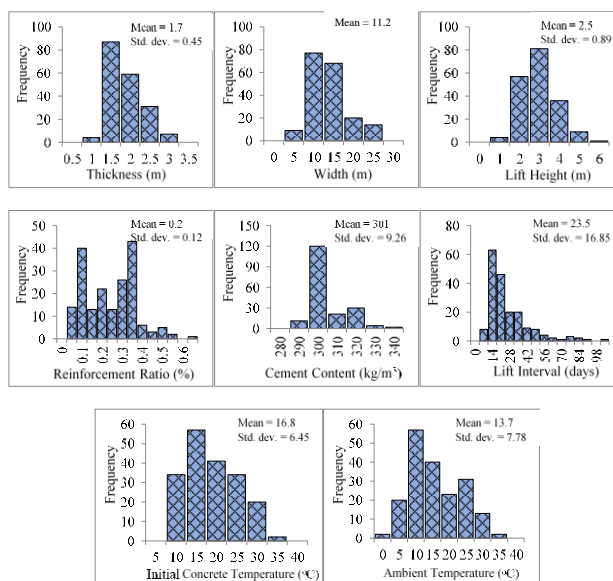


図 6-2 分析に用いたデータの特徴

No. of nodes in hidden layer 1 = 6, No. of nodes in hidden layer 2 = 3

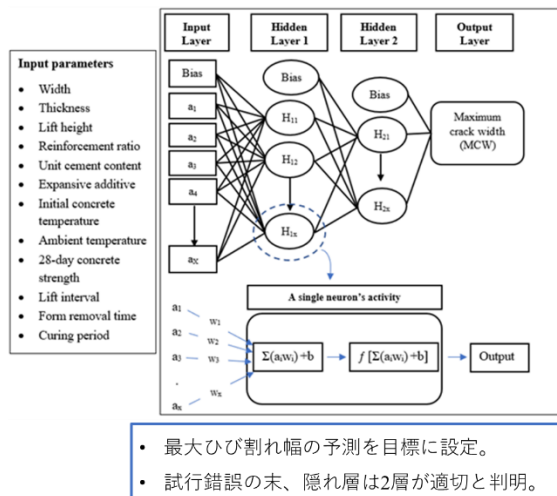


図 6-3 ニューラルネットワークの構造と入力データ

図 6-1 に検討対象の橋台のたて壁を示した。図 6-2 には、分析に用いた山口県のたて壁の各リフトのデータベースのデータの特徴を示した。各パラメータは幅広く分布している。

図 6-3 には、本研究で開発されたニューラルネットワークの構造を示した。本研究の検討の範囲で構築できた最も予測精度の高い機械は、2つの隠れ層を持ち、入力値としては、実際の建設工事で比較的入手しやすい情報のみを用いる機械であった。図 6-4 には、本研究で見い

だされた最も精度よく最大ひび割れ幅を予測する機械による予測値と実構造物のひび割れ幅を比較したものである。さらに予測精度の高い機械の構築は、今後の検討課題である。

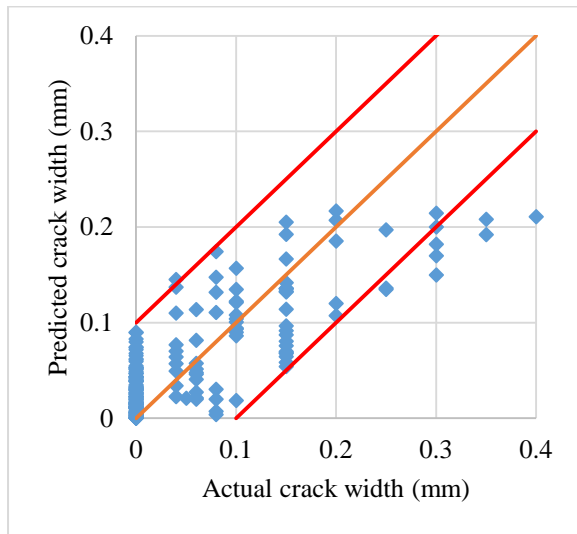


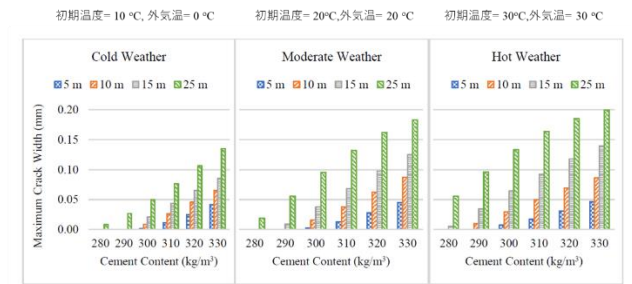
図 6-4 構築した最も精度の高いニューラルネットワークの予測値と実測値

6.3 最大ひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響

実構造物の最大ひび割れ幅に及ぼす要因は極めて多岐に渡っており、実構造物のデータから各要因の最大ひび割れ幅に及ぼす影響を定量的に分析することは極めて困難である。精度の高いニューラルネットワークが構築できれば、自在にパラメトリックスタディを行うことができ、最大ひび割れ幅に及ぼす影響の大きい因子の抽出や、効果的なひび割れ抑制対策の検討に活用することができるであろう。

図 6-5 に、構築したニューラルネットワークを活用して行ったパラメトリックスタディの結果の一例を示す。この検討結果からは、橋台の幅、単位セメント量、季節の影響が明らかにみられており、山口県で標準的とされる鉄筋費である 0.3%の鉄筋を配置しても、0.15mm 以上の有害なひび割れが発生する可能性のあることが示唆されている。

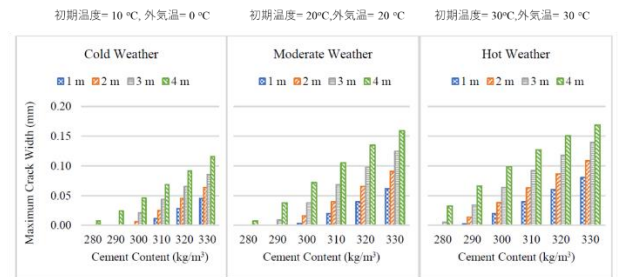
橋台の幅、単位セメント量、季節の影響										
Input Parameters	厚さ	幅	リフト高	鉄筋比	単位セメント量	膨張材	28日強度	打継間隔	脱枠日	養生期間
Values	2 m	x	3 m	0.3%	x	0	25 MPa	14 Day	7 Day	7 Day



・スライド上部の表に示した条件を固定して、橋台の幅、単位セメント量、打込み開始時のコンクリート温度、外気温の影響を示した。

図 6-5 橋台の幅、単位セメント量、季節の影響

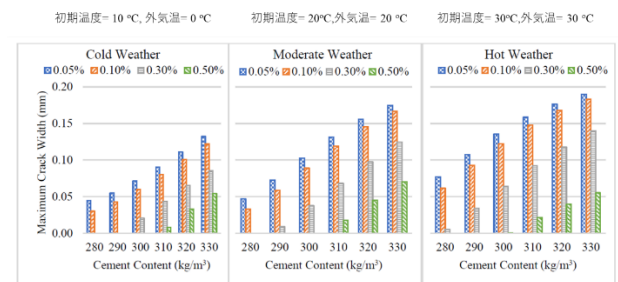
リフト高さ、単位セメント量、季節の影響										
Input Parameters	厚さ	幅	リフト高	鉄筋比	単位セメント量	膨張材	28日強度	打継間隔	脱枠日	養生期間
Values	2 m	15 m	x	0.3%	x	0	25 MPa	14 Day	7 Day	7 Day



・スライド上部の表に示した条件を固定して、リフトの高さ、単位セメント量、打込み開始時のコンクリート温度、外気温の影響を示した。

図 6-6 リフト高さ、単位セメント量、季節の影響

鉄筋比、単位セメント量、季節の影響										
Input Parameters	厚さ	幅	リフト高	鉄筋比	単位セメント量	膨張材	28日強度	打継間隔	脱枠日	養生期間
Values	2 m	3 m	x	0.3%	x	0	25 MPa	14 Day	7 Day	7 Day



・スライド上部の表に示した条件を固定して、鉄筋比、単位セメント量、打込み開始時のコンクリート温度、外気温の影響を示した。

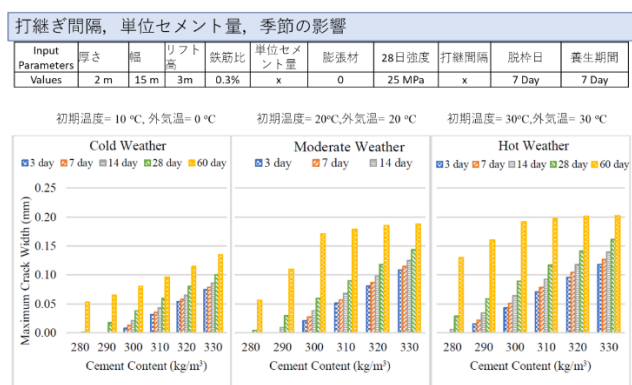
図 6-7 鉄筋比、単位セメント量、季節の影響

図 6-6 には、リフト高さ、単位セメント量、季節の影響を分析した結果を示す。リフト高さも最大ひび割れ幅に大きく影響する結果となり、リフト高さは施工段階で変更することも可能であるため、有効なひび割れ抑制対策となる可能性がある。

図 6-7 には、鉄筋比、単位セメント量、季節の影響を示した。鉄筋比の増加は最大ひび割れ

幅の抑制に有効であるが、コストの増加にも直結するため、適切な鉄筋比や鉄筋の配置方法についての検討が今後も重ねられる必要がある。

図 6-8 には、前のリフトとの打継ぎ間隔（日数）、単位セメント量、季節の影響を示した。打継ぎ間隔が 60 日程度と顕著に大きくなると最大ひび割れ幅への悪影響が顕著にみられるが、28 日以下であれば大きな差はないように見られる。しかし、28 日以下であっても打継ぎ間隔を短くすることでひび割れ抑制の効果が見られるため、施工現場で取り得る対策の一つとして検討の価値があると考えられる。



・スライド上部の表に示した条件を固定して、打継ぎ間隔、単位セメント量、打込み開始時のコンクリート温度、外気温の影響を示した。

図6-8 打継ぎ間隔, 単位セメント量, 季節の影響

ひび割れ抑制対策を提案する場合においても、温度応力による数値解析の結果が無ければ発注者の理解を得られない、などの事態が常態化しており、温度応力解析に頼らないひび割れ抑制対策を全国の各現場で採用できる仕組み作りが求められる。山口県のシステムをモデルとした、東北地方整備局におけるひび割れ抑制対策を、「ひび割れ抑制のための参考資料(案)(橋脚、橋台、函渠、擁壁編)」として平成29年2月に通知しているが、この参考資料の内容の普及と展開が重要であると考えている。

6.4 橋台などのひび割れ抑制システムの高度化に向けて

施工の基本事項の遵守がシステムとして達成されてきた山口県の施工記録のデータベースを活用することで、最先端の技術でも予測が困難である橋台たて壁の最大ひび割れ幅の予測をそれなりの精度で可能なニューラルネットワークを構築した。ニューラルネットワークによるパラメトリックスタディにより、各要因が最大ひび割れ幅に及ぼす影響を定量的に示すことも可能であり、実構造物において効果的であると思われる具体的なひび割れ抑制対策の例をいくつか示した。リフト高さの低減や単位セメント量の低減などの対策は、既存の山口県のひび割れ抑制システムではほとんど検討されていない対策であり、今後、ひび割れ抑制対策の高度化に寄与できると思われる。

また、実際の現場では、ひび割れに影響する因子があまりにも多くて複雑なため、施工者が

第7章 北海道開発局の品質確保の試行工事の効果の検証

7.1 研究の目的

平成 29 年度より、全国の地方整備局等において、研究代表者らが開発した施工状況把握チェックシートと目視評価法を用いた、コンクリート構造物の品質確保の試行工事が実施されている。これらの二つのツールは、本研究で取り組んでいる東北地整の品質・耐久性確保システムや、山口県の品質確保システムでも活用されているものである。しかし、北海道等の他の地域においては、二つのツールを品質確保に活用する意義が十分に理解されていないなどの課題が散見された。そこで、土木学会コンクリート委員会「コンクリート構造物の品質確保小委員会」での活動により、寒地土木研究所の協力を得て、北海道における品質確保の試行工事（令和元年度）における、施工状況把握チェックシートと目視評価法の効果の検証を行った。

7.2 北海道開発局での試行工事の経緯と効果の検証

(1) 試行 3 年目（令和元年度）の試行現場の選定と事前説明会の開催

令和元年度における「コンクリートの品質向上に向けた試行現場の選定（依頼）」の事務連絡が発出されたのが令和元年 10 月 24 日である。試行内容は変わらなかったが、事務連絡の発出時期が遅く、かつ令和 2 年 1 月末までに試行可能なことが選定条件となったため現場選定が極めて限定的であった。結果として、北海道開発局では、トンネル 1 件（小樽開発建設部：選定要件②締固めを行いにくい環境）、橋梁下部 3 件（旭川開発建設部（橋台）、室蘭開発建設部（橋脚）、帯広開発建設部（橋台と橋脚）、いずれも選定要件⑤冬・夏の気温が著しく低下又は上昇が試行対象として選定された。

現場選定から試行工事までの期間が極めて短かったため、TV 会議システムにより北海道開発局本局と各部局の事務所をつなぎ、11 月 29 日に取組みの経緯やチェックのポイント等について説明会を行った。参加部局は旭川と帯広道路事務所、試行内容の説明後に旭川の昨年

の試行担当者から以下の意見が出された。

- ・チェックシートは監督員が何をすべきかわかりやすく、経験が少ない職員もチェック可能
- ・施工を重ねると改善された
- ・目視評価は人によりばらつきがあり、見るべき所を絞って欲しい
- ・施工者は作業員に渡し、全員で事前に施工の段取りを把握することができた
- ・打設が早いので当日朝のチェック対応は難しく、1 日現場にいた（職員の負担）
- ・チェックシートにより改善されるため、普段見ていないところに目が行き評価が低めになった

(2) 試行結果

橋梁下部工の試行は、11 月下旬から 1 月中旬にかけて行われ、全ての現場で寒中コンクリート用のチェックシートを使用していた。なお、工期の関係からか、同様の形状部位における比較では無く、橋台で行われたチェックでも底版と堅壁の比較や、橋台底版と橋脚で比較されていた。施工状況把握チェックシートや目視評価で特記事項が多かった橋台施工現場の目視評価事例を図 7-1 に示す。

当該現場では、試行 1 回目が底盤部の施工、2 回目が堅壁であった。第 1 回目の底版施工は、12 月 16 日曇り、打込み開始時温度が -3.4°C 、コンクリートは 24-8-40 (N) である。施工状況把握チェックシートには以下のような特記事項が記録されている。

- ・「垂直打込み」の項目で、打込み位置はマーキングされていたが、マーキング位置から打ち込まれていなかった。また多くの箇所斜めに打ち込まれていた。
- ・「打込み高さ 1.5m 以下」の項目で、最下層では 2.0m 程度の高さから打っている箇所も見受けられた
- ・「バイブレータの鉄筋接触」の項目で守られていない作業員がいた
- ・「仕上げバイブレータの丁寧な施工」の項目で丁寧に実施されていなかった

これらを反映するように、目視評価点は型枠のノロ漏れの項目が特に低く、評価シートには、気泡が最終打込み部に多く発生している、型枠継目に砂すじも発生、最下段に材料分離の様なものも見られる、といったコメントが記録されていた。次回の施工に向けては、最下段の仕上がりが悪く打込み高さを遵守すること、型枠継ぎ目の砂すじへの対応として型枠を適切に締付ける対策を行うこと、最終打込み部の気泡へ

の対応として仕上げバイブを十分行うことが指示されている。2回目の縦壁施工は12/26雪、コンクリートは27-12-40(N)である。施工状況の把握では、前回の指摘事項が全て守られていることが記録されており、目視評価点は2回目で

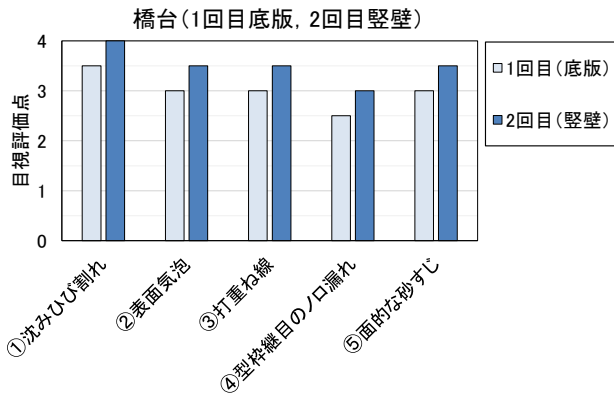


図 7-1 橋台における表層目視評価事例

いずれも改善されていた。このことから、構造物の形状・部位（底版，縦壁）によらず，施工のポイントを抑えて適切に施工することで改善につながる事が確認できる。なお，2回目の目視評価においても，気泡が少し見られる，打重ね線が部分的に見られる，型枠継ぎ目の砂すじが多く見られる，とのコメントが付され，以降，型枠継ぎ目の砂すじ対応として隙間部分への対策を講じるよう指示が出されていた。

トンネルでの目視評価事例を図 7-2 に示す。コンクリートは24-SF60-40(BB)が使われている。表層目視評価は，ベテラン監督員と監督員1年目の職員2名で行われている。施工状況把握チェックシートには，養生方法に関する記述はあ

るものの改善事項等の特記は無かった。1回目の目視評価では，ベテラン監督員の評価は，色むら・打重ね線の評価が他と比べて低かったがそれでも評価は3であり，気泡，色むらは若干発生しているが，総じて良好な出来栄であるとの特記のみであり改善指示はなかった。他方，監督員1年目の職員は，側壁部の各項目が3点とベテラン監督員より低めだったが，特記事項はなかった。2回目の評価では，概ね改善されていたが，側壁部の評価点や色むら・打重ね線の評価については点数が上がりにくい傾向が見られる。色むらについてはコンクリートのスランプフローの影響も考えられるが，ベテラン監督員の2回目の特記には施行目地で前回のブロックより若干劣る箇所もあったが出来栄は特に問題なく指摘する事項はない，と報告されており特段の問題は確認されていない。

(3) 試行後のアンケート調査

チェックシートによる施工状況把握の効果については，発注者から，監督員が現場で確認しなければならない事項が即座にわかる，事前にチェックシートの項目について受注者，作業員へ指導することにより，作業手順等の再確認にも役立つ，監督員にチェックされることで請負者もより一層の取組・注意が必要となり効果があったとする回答があった。また，施工者が丁寧な施工を実施している現場では，指摘事項は無いものの各段階での状況把握は効果的であり，他の工事においても品質向上に寄与する可能性があるという回答もあった。受注者からは，打設作業を行う作業員とチェックシートを使用して打合わせを行い，打設前の段取り(ピッチの印等)も確実にやり，その通りに実施したと

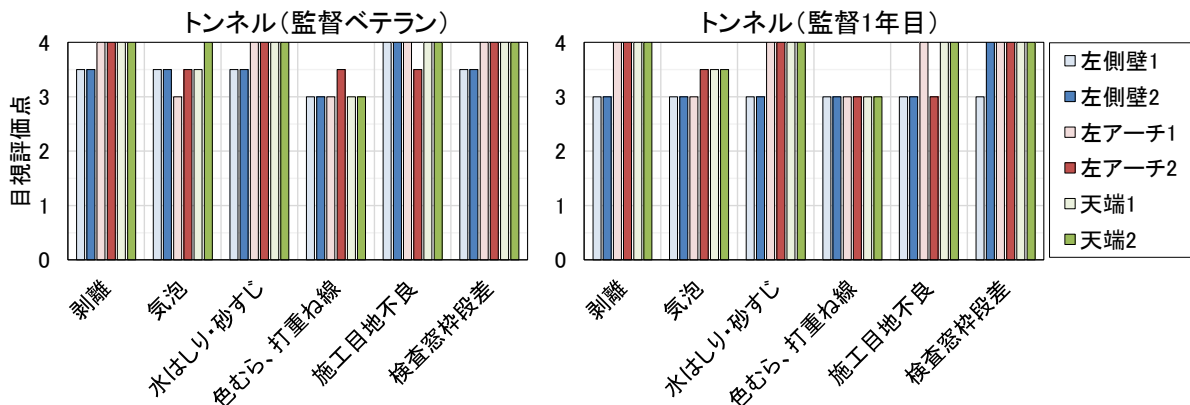


図 7-2 トンネル覆工コンクリートの表層目視評価事例

ころ出来栄への向上が見られたため効果があったとする回答があった。また、東北での施工を経験していたトンネル受注者からは、現時点では効果は明確で無いが、トンネル覆工は狭隘な空間内にコンクリートを打ち込むため充填が難しい等の特殊性があり、かつ将来的に経験不足の施工管理者や技能不足の作業員等の比率が増大することが懸念される中、各施工段階での重要事項を「チェックシート」により漏れなく確実に確認することができるため、品質向上の可能性は認められたとの回答もあった。

目視評価による出来ばえ確認の効果については、発注者から、施工状況と目視の両方を実施することで品質向上を実際に確認できた、次回施工時の注意点がわかり打込み時の品質が向上した等、いずれも効果が有るとの回答だった。また、受注者からは、出来ばえは品質に連動するものであり、日々の施工により構築される構造物をその都度定量的な評価をすることで、どのような施工を行えば出来ばえ（評価点）が向上するのかといったPDCAサイクルをまわすことにつながるとともに、職員・作業員の向上心を促すきっかけになるとの回答や、1回目の目視評価結果について協力業者と打ち合わせを行い、2回目の打設ではより良い結果が得られたため効果があったとする回答があった。なお、評価方法については、目視評価点が評価者により差が生じるため、より細かな評価基準の説明を要望する意見があった。また、評価の実施回数については、いずれの現場も2回の実施であり、それで改善効果が認められるので受・発注者の負担も考慮し2回で十分とする意見があった。

今回の試行で現場技術員を同行させたかを発注者に確認した設問では、複数人で確認した方がより正確な判定・判断が可能、施工時間が長時間になるため職員との交代要員もしくは現場技術員がメインとなり状況を把握した等、同行を依頼して良かったとする意見が多かったが、試行では職員の視点での確認を行うこととしたため同行を依頼しなかったとする回答や、現場技術員も業務量が多い時期のため作業負担を軽減する観点から同行を依頼しなかったとする回答もあった。

試行における特筆すべき課題については、発注者から、発注者、受注者、作業者ともに負担が増える、発注者の作業負担の軽減として、支援業務の拡大、2 監督員確認体制の見直し、テレビカメラ等を活用できないか、という意見が

あった。

コンクリートの品質向上以外の効果については、発注者から、監督経験が無い職員や工事案件でも、チェックシートにより施工手順の把握が可能で有り、1つ1つの作業に理由があることを理解することができたという回答があった。また、受注者からは、作業員の品質確保の意識向上や発注者立会により安全に対する意識が向上したとの意見があった。

試行全般についての受注者からの意見や要望については、ソフト面における具体的な施策として本試行は有効であり、細田先生のビデオでも強調されているように点数に固執し過ぎるのでは無く、より良い品質の構造物をつくるためのツール（日常管理・定量的なPDCA）として効果的という意見のほか、コンクリートの品質が向上するので非常に良いが、打込みの準備費の計上や打設の施工費単価のアップを希望するといった率直な意見も出された。

今回の取組みを今後どのように運用すべきかについては、発注者は、全工事で実施すべき、限定的に実施すべき、実施すべきでは無い、の3通りに分かれ、限定的に実施すべきについては、受・発注者の負担が大きいため工事規模や重要構造物等での実施、負担を減らす形にして多くの現場で取り入れてはどうかという意見があり、実施すべきでは無いについては、施工はあくまでも受注者の責任において施工させるべきで有り、品質管理に不具合が生じた場合は、従来通り引き取らず補修をしっかりとさせれば良いという意見であった。また、受注者からは、いずれも限定的に実施すべきとし、品質向上には有効だが受・発注者ともに負担増のためとする理由のほか、要点を絞らずチェック項目ばかり増やすと負担が増えることで形骸化し、継続的な運用が図れないことが懸念されるため、本試行の各様式の項目・内容やその数は妥当であり、あとは現場毎に配合や設備等が異なる部分だけ修正を行い運用することが望ましいとする意見もあった。

第8章 品質確保システムを全国展開する際に検討が必要となる事項の整理

8.1 本章の目的

本研究で提案する品質確保システムを、他の地方整備局や自治体等への全国展開を試みた際に検討が必要となる事項について整理する。

8.2 品質確保の意義の周知

平成 29 年度より、全国の地方整備局等において、研究代表者らが開発した施工状況把握チェックシートと目視評価法を用いた、コンクリート構造物の品質確保の試行工事が実施されてきた。しかし、全国での試行工事の通知を出している国道交通省の技術調査課と、これらのツールを開発した本研究課題の研究者との間にコミュニケーションがほとんどない状況が令和元年度まで続いていた。

令和元年度の終わりに技術調査課に連絡をし、令和2年度の試行工事においては十分に意思疎通をしながら進めていくこととなった。令和2年6月22日にオンラインにて初回の打ち合わせを行い、連携の基本方針について確認し、9月9日に第2回目の打ち合わせをオンラインで実施し、本研究課題に関わる研究者が具体的に技術的なサポートをしていく方針について議論した。

結果として、従来から開設していた「品質・耐久確保チャンネル」のHP (<http://hinshitsukakuhoch.web.fc2.com/>) を改善し、全国での品質確保の試行に関わる関係者に視聴してもらい、品質確保の意義や成功するための骨子を動画教材等で提供することとなった(図8-1)。

品質・耐久性確保チャンネルには、動画による説明や、各種の関連規準、施工状況把握チェックシートや目視評価シート、これらのツールに関連する論文や解説文、品質確保の好例などをコンテンツとして整備し、試行で活用してもらうこととした。また、我が国に特有の各地域の多様な環境条件に対応すべく、暑中施工や寒中施工における品質確保の解説文や教材、我が

国の各地域での品質・耐久性確保の取組みについての解説文をチャンネル内に整備した。



図 8-1 品質・耐久性確保チャンネルの改善

8.3 全国の試行工事の技術的支援

本研究課題には、全国の各地域の研究者が参画しており、これらの研究者を中心とする土木学会の品質確保の研究委員会(研究代表者が委員長)には、ほぼ全国をカバーできる研究者・実務者が参画している。令和2年度は、北海道から沖縄までの研究者・実務者がネットワークを構築し、全国の試行工事の担当者と連絡を取り、品質確保の試行工事を技術的に支援する体制を構築した。試行工事ごとにオンラインを中心とする事前の勉強会を開催し、必要に応じて現場での打込みや目視評価、事前のコンクリートの試し練りなどに立ち会い、技術的なアドバイスを行った。

また、単年度区切りの試行では、充実した取組みができない場合が少なくないため、令和3年度にまたがる工事も試行の対象として選定するように技術調査課に提言をし、その方針で現場選定がなされた。

さらに、品質確保の試行工事に、ひび割れ抑制の着眼点も取り入れるように提言をし、技術調査課からの通知には含まれていないものの、試行工事の現場で我々が技術的支援をしながら試行的に検討がなされている現場も出てきている。

8.4 今後の展開における課題

山口県の品質確保システムは、試行ではなく、正式なシステムとして運用されている。これまでも毎年のように改訂を重ね、講習会を実施し、コンクリート構造物の品質確保に大きく貢献している。

一方で、東北地方整備局の品質・耐久性確保システムは、多くの工事で試行工事として実施されてきたが、まだ正式なシステムとしての運用には至っていない。品質・耐久性確保に関連する各種の規準類も改訂がなされる状況に至っており、正式なシステムへの格上げを検討すべき時期に来ていると考えている。

東北地方整備局以外の国土交通省の現場においては、試行工事を平成 29 年度から重ねてきたが、土木学会による技術的な支援のスキームも活用し、今後も試行工事を重ねて課題を抽出するとともに、各地域における技術的規準の整備も必要になると考えている。本研究課題の期間中に四国地方整備局ではトンネル覆工コンクリートの品質確保の規準が通知された。各地域の環境作用や材料事情等を適切に勘案した規準類の策定と、粘り強い改訂が必要となり、これらは容易ではないが、環境作用や材料事情が多様な我が国において、極めて長期間に供用されるコンクリート構造物の耐久性が確保されるために、本研究課題の成果が活用されることを期待する。

第9章 まとめ

本研究課題では、「養生技術・混和材料を活用した各地域のコンクリート構造物の品質・耐久性確保システムについての研究開発」という題目で、3年間にわたる研究を実施してきた。特に、東北地方整備局が令和元年6月に通知した「東北地整におけるRC床版の耐久性確保の手引き（案）（2019年試行版）」において、本研究の成果が取り入れられ、令和2年度に実施された手引きの改訂作業においても、本研究の成果であるひび割れ抑制対策が取り入れられた。以下には、令和2年度の成果を中心に取りまとめる。

東北地整の高耐久RC床版のひび割れ抑制において、単位膨張材量を標準添加量の 20kg/m^3 から 25kg/m^3 に増加することが有効な場合がある。しかし、 25kg/m^3 への増加により、スケーリング抵抗性が低下する懸念があるため、実験による検証を行った。 25kg/m^3 への増加により、スケーリング抵抗性がやや低下したものの、既往の知見と照らし合わせて十分なスケーリング抵抗性を持つことが確認された。

養生の効果を表面吸水試験により非破壊試験で評価するシステムについては、表面含水計としてHI-100を用いてコンクリートの含水率を計測し、適切な上限値および下限値を設定し、その範囲内で表面吸水試験を実施すると、含水率の影響をほとんど受けずに吸水抵抗性を評価できる評価手法を提案した。

東北地方のNATMトンネルの定期点検データを分析し、品質確保の試行工事の効果が明らかとなったが、さらに品質を向上していくための課題を示した。

三陸国道事務所の普代川大橋で取り込まれた高耐久床版のひび割れ抑制対策の高度化から得られた知見を整理した。引張応力を低減できるRC床版の段階施工のやり方、単位膨張材量を 25kg/m^3 に増加することの有効性と留意点、壁高欄の目地のあり方について提言を取りまとめた。

山口県の施工記録のデータベースを機械学習で分析し、本研究の範囲内で開発された最も予測精度の高い機械を用いて、最大ひび割れ幅に与える各種要因の影響を定量的に示した。

北海道の令和元年度の品質確保の試行工事

における、施工状況把握チェックシートと目視評価法の品質確保への効果についての事後検証を行った。品質が向上したことと、受発注者間の適切なコミュニケーションの促進等についての効果が確認された。

最後に、品質・耐久性確保のシステムを全国に展開する際の課題を取りまとめた。令和2年度に作成したHPでは、動画による説明や、各種の関連規準、施工状況把握チェックシートや目視評価シート、これらのツールに関連する論文や解説文、品質確保の好例などをコンテンツとして整備し、全国の試行で活用してもらうことができた。試行工事から正式なシステムへと移行するための課題についても整理した。

参考文献

- 1) Raphael N. UWAZURUONYE and Akira HOSODA: Numerical Simulation of Water Sorptivity of Concrete Measured by Surface Water Absorption Test, コンクリート工学年次論文集, 2021 (印刷中)
- 2) Raphael N. UWAZURUONYE and Akira HOSODA: Investigation on Correlation Between Surface Water Absorption Test and JSCE Sorptivity Test, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1726-1731, 2020.7
- 3) 馬場崇史, 細田 暁: トンネル覆工コンクリートの定期点検データの分析による品質確保の取組みの効果の検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Vol.20, pp.243-248, 2020.10
- 4) Arifa Iffat Zerín, Akira Hosoda, Satoshi Komatsu and Hironori Ishii, "Full Scale Thermal Stress Simulation of Multiple Span Steel Box Girder Bridge Evaluating Early Age Transverse Cracking Risk of Durable RC Deck Slab", Journal of Advanced Concrete Technology (JCI), Vol.18, pp.420-436, 2020.7
- 5) Arifa Iffat Zerín, Akira Hosoda, Satoshi Komatsu and Nobuyuki Nagata: Utilizing Expansive Additive to Reduce Thermal Cracking Risk of RC Slab on Single Span PC Composite Girder Bridge, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.707-712, 2019.7
- 6) Ngoc T. Phan, Akira Hosoda, Yoichiro Tsujita, Ayana Shirakawa: Mitigation of Cracking in Durable RC Deck Slab on Multiple Span Steel Box Girder Considering Stepwise Construction Method and Utilizing Expansive Additive, コンクリート工学年次論文集, 2021 (印刷中)
- 7) Rasul Mehboob, Akira Hosoda, Koichi Maekawa, "Prediction of maximum thermal crack width of RC abutments utilizing actual construction data and study on influential parameters using neural networks", CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 260 2020.11

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No.30-7

養生技術・混和材料を活用した各地域のコンクリート構造物の品質・耐久性確保システムについての研究開発

2021.6