

論文 コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証

細田 暁^{*1}・小松 怜史^{*2}・中川 恵理^{*3}・佐藤 和徳^{*4}

要旨：国土交通省の南三陸国道事務所管内の復興道路，復興支援道路のコンクリート構造物の表層品質を調査した。品質確保のための種々の施工での工夫がなされている現場において，目視評価，表面吸水試験（SWAT），表層透気試験等の非破壊試験を用いて表層品質を評価した。各種の養生による品質の向上が特に SWAT で顕著に確認された。施工の基本事項の遵守がなされた構造物において，打重ね線の直上で計測した結果，SWAT では一般部と同程度の吸水抵抗性を示したが，表層透気試験では一般部より著しく大きな透気係数を示した。

キーワード：復興道路，品質向上，表層品質，養生，目視評価，SWAT，表層透気試験

1. はじめに

復興道路および復興支援道路において，コンクリート構造物の品質確保の取組み¹⁾が展開されている。2011 年 3 月 11 日以降に建設される 350km の区間に，約 230 の橋梁と約 110 のトンネルが新たに建設される。自動車専用道路であり凍結防止剤が大量散布されることから，コンクリート構造物の耐久性を確保するために，産官学の協働で施工時の品質確保のための様々な取組みが行われ始めている。

山口県のひび割れ抑制システムで開発された「施工状況把握チェックシート」^{2),3)}と第一著者らが開発した「目視評価法」⁴⁾が施工時の品質確保のための基礎ツールとして多くの現場での活用が開始されている。施工状況把握チェックシートは，監督職員が施工状況の把握に活用するツールであるが，同時に施工者の段取りの確認にも活用されており，施工の基本事項について共通認識を持たせる効用がある³⁾。目視評価法は，型枠脱型後にコンクリートの出来栄をを目視で定量評価し，十分な出来でなかった場合に次の施工で打込み方法等を改善することにつなげやすく⁴⁾，PDCA の実践的ツールとして活用されている。

本研究では，南三陸国道事務所の管内の復興道路，復興支援道路の現場の中で，第四著者の主導のもとで品質確保のための積極的な工夫がなされている現場を選定し，コンクリート構造物の表層品質の調査を行う。表層品質の評価法として，各種の非破壊試験を用いた。

目視評価法には，橋梁の下部工やボックスカルバートの壁部材等で活用できる 4 点満点の手法⁴⁾と，田老第六トンネルの品質確保において第一著者らにより開発された覆工コンクリート用の評価項目を整備した 4 点満点の手法⁵⁾を用いた。なお，本研究における目視評価は，第

一著者が一人で実施した結果である。

表層コンクリートの緻密性を調べるため，表面吸水試験（SWAT）⁶⁾とダブルチャンバーの表層透気試験を用いた。SWAT から得られる指標のうち，本研究では 10 分時点での表面吸水速度（ p_{600} ）を用いた。水頭が 200mm 一定であること以外，ほぼ同様の手法である Initial Surface Absorption Test (ISAT)⁷⁾に関して，10 分時点での表面吸水速度で 0.5ml/m²/s と 0.25ml/m²/s を品質評価のしきい値が提唱されており，0.25 以下を緻密，0.25 より大きく 0.5 以下を普通，0.5 より大きいものを粗，と評価する提案がなされている⁷⁾。また，本研究で計測した構造物群において， p_{600} と 10 分間の総吸水量の相関も調べた。表層透気試験の結果として，透気係数を用いた。両試験方法とも，コンクリートの含水状態の影響を強く受けるので，静電容量式（CMEX II）と高周波容量式（HI-520）の接触型の含水計で含水率を測定した。

構造物の品質確保のため，型枠，打込み，コンクリート材料，養生等において様々な工夫がなされ始めているが，出来上がった実構造物の品質を適切に評価することが，それらの効果を検証する上で重要である。用いた非破壊試験の中には実構造物への適用に際して課題を有するものもあるが，複数の評価手法を用いることで各試験方法の特徴も見出し，施工での種々の取組みが構造物の表層品質に与える影響を明らかにすることを本研究の目的とする。

2. 実構造物の調査内容

表-1 に，本研究で調査した構造物の一覧を示す。これらは，国土交通省東北地方整備局の南三陸国道事務所管内の復興道路もしくは復興支援道路の構造物である。トンネルにおける BL はブロックを意味する。調査は，

*1 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院准教授 博（工）（正会員）

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院研究教員 博（工）（正会員）

*3 横浜国立大学 理工学部 建築・都市・環境系学科

*4 国土交通省東北地方整備局 南三陸国道事務所長

表－1 調査した構造物の一覧

構造物名称	調査対象	調査日	打込み日	脱型の材齢	脱型後の養生
鵜住居第二トンネル	覆工コンクリート	2014.11.28	2014.9.5(41BL)	21時間後	SLより上は保湿養生, SL下はなし
			2014.9.10(42BL)	21時間後	SLより上は保湿養生, SL下はシート養生(調査前まで)
八雲第一トンネル	覆工コンクリート	2014.11.28	2014.10.21(58BL)	18時間後	なし
			2014.10.23(59BL)	18時間後	一般部はなし
			2014.10.27(60BL)	7日後	一般部はなし
大畑団地本線Box	側壁	2014.11.28	2014.7.2	26日後	なし
唐丹第二高架橋P1	橋脚たて壁	2014.11.29	2014.8.5(第1リフト)	16日後	シート, 19日間
			2014.10.3(第4リフト)	7日後	シート, 21日間
			2014.10.16(第5リフト)	11日後	シート, 5日間
越喜来高架橋	PC箱桁内部(柱頭部, 張出し部ウェブ)	2014.11.29	2013.9.21(柱頭部)	約2週間後	なし
			2014.3.14(7BL)	2日後	なし
新気仙大橋P4	橋脚たて壁	2014.11.29	2014.3.29(第1リフト)	14日後	なし
			2014.7.3(第2リフト)	34日後	シート, 92日間

2014年11月28～29日に実施した。11月28日には降雨は一切なく、気象庁のデータ（岩手県・山田）で日照時間が7.6時間であった。11月29日は降雨量が10.5mm（1時間の最大雨量が3.0mm）で、調査が降雨の影響を受けた構造物もあった。詳細は各構造物の調査結果において論じる。なお、調査開始前の一週間（11月21～27日）の降雨量は、0, 0, 1.5, 0, 0, 2.0, 1.5mmであった。

2.2 各構造物の概要と非破壊試験による調査内容

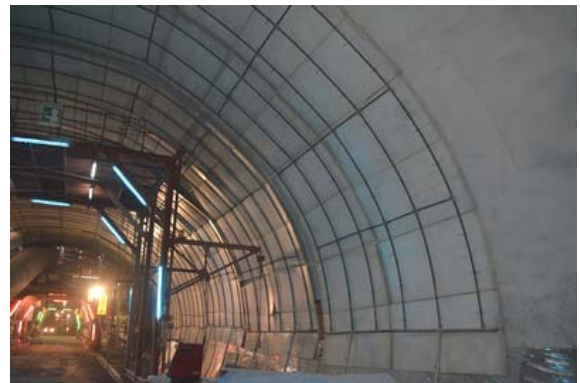
(1) 鵜住居第二トンネル

41BLと42BLの覆工コンクリートで表層品質の調査を行った。調査時にトンネル掘削は完了していない。セメントは高炉B種であり、呼び強度は 24N/mm^2 、W/Cは51.0%、スランプは15cm、 $G_{\max}$ は20mmである。収縮低減型高性能AE減水剤が用いられている。打込み後、21時間程度にて脱型が行われている。スプリングライン(以下、S.L.)より上は覆工コンクリートの養生システムである「うるおい」(写真－1)が適用されている。42BL以降は、表層品質の向上やひび割れ抵抗性の向上を狙って、S.L.より下に厚さ0.2mm程度のシートを貼り付けている。41BL以前にはこのシート養生が用いられておらず、シートの効果についても分析した。

目視評価と、含水率測定、SWAT、表層透気試験を実施した。

(2) 八雲第一トンネル

58BL, 59BL, 60BLにて覆工コンクリートの表層品質の調査を行った。調査時にはトンネルは貫通していた。61BLが坑口であり、東北地方整備局の通達により、坑口2ブロックでは打込み後7日間、型枠が存置された。覆工コンクリートの基本配合は、高炉B種の呼び強度 24N/mm^2 、W/Cは56.7%、スランプは15cm、 $G_{\max}$ は20mmであり、ひび割れ抑制の目的で膨張材が 20kg/m^3 使用さ



写真－1 脱型後の養生システム（鵜住居第二トンネル）



写真－2 脱型後のシート養生（八雲第一トンネル）

れている。

59BLと60BLでは、表面仕上りの向上や、凍結防止剤由来の塩害に対する抵抗性の向上等を目的に、JIS II種相当のフライアッシュが 25kg/m^3 添加されている（細骨材置換）。

フライアッシュの表層品質向上効果、型枠脱型材齢の影響を調べた。59BL, 60BLでは、脱型後に、S.L.高さ近

くに、1×1mのシートを、4辺をテープで貼り付けた(写真-2)。シートはコンクリートに密着はしていないが、シート内はコンクリートからの水分で湿っており、液体の水が多量確認された。脱型後のシート養生期間を、7、14、21、28日と変化させ、表層品質への影響を調べた。

含水率測定、SWAT、表層透気試験を実施した。

(3) 大畑団地本線 Box

写真-3 に示すような、ボックスカルバート構造物の側壁の表層品質を調査した。高さ 8.7m、幅 18.2m、厚さ 1.6m の側壁を 7 月 2 日に打継ぎ無しで打ち上げている。セメントは高炉 B 種、呼び強度は 27N/mm^2 、W/C は 49%、スランブは 8cm、 $G_{\max}$ は 25mm、単位水量は 147kg/m^3 であった。この構造物の施工では、南三陸国道事務所で試行が始まっている施工状況把握チェックシートの試用がなされており、施工の基本事項の遵守を心がけたにもかかわらず、写真-3 に示すように打重ね線がほぼ平行にくっきりと見られた。一層の厚さは丁寧に管理されており、下層にパイプブレータも適切に挿入されたが、夏季の打込みということもあり、打重ね線が残る結果となった。

打重ね線の直上(写真-4)と、打重ね線以外での品質の差異に着目して、目視評価と、含水率測定、SWAT、表層透気試験を実施した。

(4) 唐丹第二高架橋 P1

7.5m×4.5m の中実断面で高さ 25m の橋脚の表層品質を調査した。セメントは高炉 B 種、呼び強度は 27N/mm^2 、W/C は 53.5%、スランブは 8cm、 $G_{\max}$ は 20mm であり、ひび割れ抑制のために膨張材が 20kg/m^3 使用されている。5 リフトに分割して施工されており、第 1 リフト、第 4 リフト、第 5 リフトの調査を行った。施工状況把握チェックシートが監督職員の施工状況把握と施工者の施工管理の双方に活用されている。打込み時に以下の工夫がなされている。

- ・ポンプ車の筒先に材料分離低減用のホースが取り付けられ、型枠内へのコンクリートの落下がコントロールされている。
- ・透明型枠(明かり取り用樹脂製型板)が各リフトの一番下層の型枠に、千鳥配置で用いられた。
- ・フレッシュコンクリート用の改質剤(人工ゼオライト・アクリル酸・界面活性剤・他)が現場でアジテータ車に後添加された。
- ・型枠脱型後に高発泡ポリエチレンシートで養生した。

この現場では、目視評価法も活用して、橋脚を打ち上がっていくにつれての PDCA が実践されていた。PDCA の効果を検証するとともに、第 4 リフトと第 5 リフトの打継目の品質も調査した。

なお、この構造物を調査した 11 月 29 日午前は雨が降っていたが、橋脚の全周に足場があったこと等もあり、



写真-3 大畑団地本線 Box の側壁



写真-4 打重ね線直上での SWAT の計測

調査箇所への降雨の影響は無かった。

(5) 越喜来高架橋(PC箱桁、張出し施工)

張出し施工による PC 箱桁の内部で、柱頭部と 7BL のウェブにおいて表層透気試験と SWAT を実施した。桁のコンクリートは、早強セメントを用いて、W/C は 35.5%、単位水量は 155kg/m^3 であった。柱頭部は 2013 年 9 月 21 日の打込みで型枠は 2 週間程度存置されていた。7BL は 2014 年 3 月 14 日の打込みで、調査したウェブ部は 2 日で脱型されていた。柱頭部における明瞭な打重ね線の直上や、ウェブの鉛直打継目等でも計測を行った。

(6) 新気仙大橋 P4

幅 10m×厚さ 3m の小判型中実断面(断面積 28m^2)で高さ 28m の橋脚の表層品質を調査した。セメントは高炉 B 種、呼び強度は 24N/mm^2 、W/C は 51%、単位水量 152kg/m^3 、スランブは 8cm、 $G_{\max}$ は 25mm である。

第 1 リフトは 2014 年 3 月 29 日の打込みであった。この現場の監理技術者が、2014 年 6 月 4 日に南三陸国道事務所で開催されたコンクリート構造物の品質確保の勉強会(第一著者と第四著者が話題提供)に参加したこともあり、7 月 3 日に打ち込んだ第 2 リフト以降は、施工状況把握チェックシートや目視評価を活用し、脱型後の養生にも配慮がなされていた。脱型後は、コンクリート表面に散水後、農業用の簡易シートにてコンクリート表面



写真-5 降雨の影響を受けた新気仙大橋 P4 での計測

を覆い、長期間の養生を継続した。

目視評価と、含水率測定、SWAT、表層透気試験を実施した。

第2リフトは夏季の打込みであり、施工の基本事項の遵守を行ったにもかかわらず、写真-5 に示すように打重ね線が明瞭に見られたため、打重ね線の直上でも調査を行った。

この構造物の調査前に降雨があり、調査の終盤には降雨が激しくなった。降雨が予想されていたため、事前に調査予定箇所に大きなビニールシートを貼ってコンクリート表面が濡れるのを防ぐ努力をした。橋脚の施工足場はすでに撤去されていたこともあり、シートの周辺のコンクリートはすべて濡れていた。調査時にはシートをはがして計測したが、コンクリートの含水率が高めの値を示していた。

3. 調査結果と考察

ここでは、各構造物の調査結果と考察を記載する。また、特筆しない場合、コンクリート表面は雨水の影響を受けておらず、含水率は特に高い値を示していなかった。

3.1 鶴住居第二トンネル

図-1 に、41BL の目視評価の計測結果を示した。SL 下に発生する気泡に苦慮しており、後続のブロックでの打込みにおいても種々の工夫を重ねていた。

図-2 に、SWAT の結果を示した。脱型後に写真-1 に示した養生を行った SL 上部では高い吸水抵抗性を示した。SL 下部については、脱型後にシート養生を施した場合に、SL 上部と同程度の緻密さが確認された。

3.2 八雲第一トンネル

図-3 に、SWAT の計測結果を示した。すべて、SL 付近での2点での計測の平均値を示している。すべての計測箇所、CMEX II による含水率は5.5%を下回っており、最高で5.2%であった。

58BL と 59BL の比較から、フライアッシュを細骨材置換するのみでは吸水抵抗性は向上しないことが分かる。

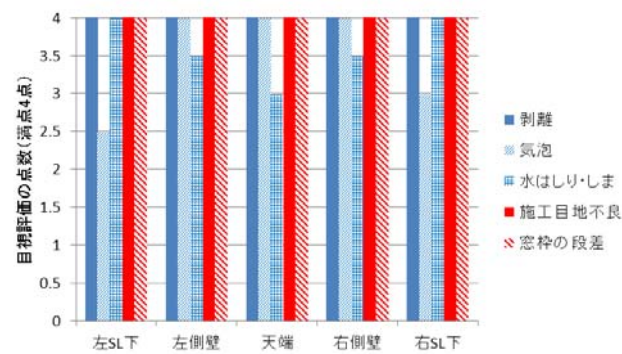


図-1 目視評価の結果（鶴住居第二トンネル 41BL）

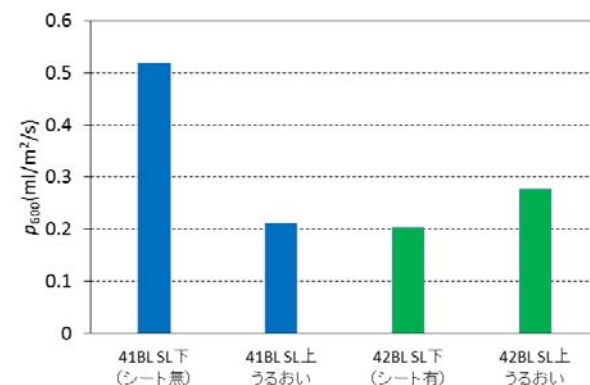


図-2 SWAT の結果（鶴住居第二トンネル）

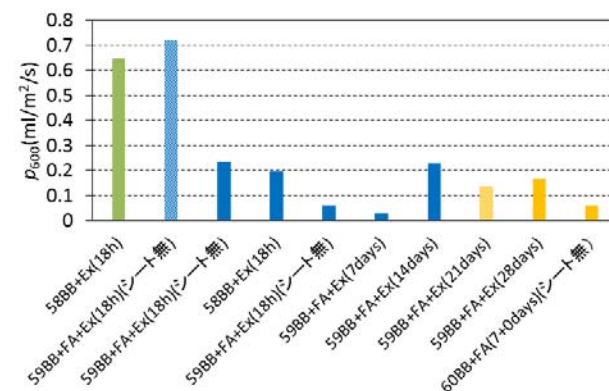


図-3 SWAT の結果（八雲第一トンネル）

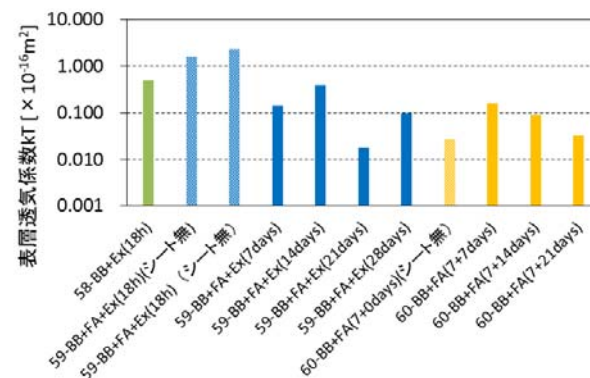


図-4 表層透気試験の結果（八雲第一トンネル）

しかし、フライアッシュを用いた 59BL と 60BL では、養生の効果が顕著に認められる。脱型後にシートを貼り

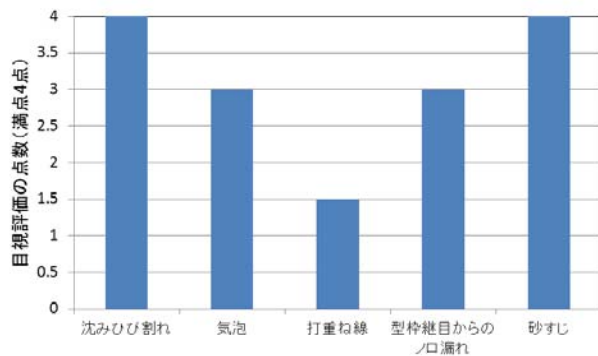


図-5 目視評価の結果（大畑団地本線 Box）



図-6 SWAT の結果（大畑団地本線 Box）

付けることにより、吸水抵抗性は著しく向上した。吸水抵抗性の観点からは、18時間で脱型した場合でもシート養生することにより、型枠を7日間存置する場合と同程度の品質を得ることが可能であった。

図-4に、表層透気試験の計測結果を示した。それぞれSL付近での1点での計測である。18時間で脱型した58BLと59BLの計3つの計測点で透気係数が大きくなった。18時間で脱型後にシート養生した場合や、型枠を7日存置した場合でも58BLとほぼ同程度の透気係数を示している場合があり、養生の効果は全体的には認められるものの、SWATほど敏感に検知はできなかった。

3.3 大畑団地本線 Box

図-5に、側壁の下部で行った目視評価の結果を示した。写真-3でも示した打重ね線により、評価値が低くなっている。その他の項目はすべて3点以上であった。

図-6に、SWATの結果を示した。2点の計測結果の平均であり、それぞれの計測点で2点間のばらつきも小さかった。視覚的には明瞭な打重ね線の直上で計測した場合でも、吸水抵抗性が顕著に劣ることはなかった。吸水抵抗性の観点からは各層は一体化していると判断できる。

図-7に、表層透気試験の計測結果を示した。打重ね線の上では、約2桁大きい透気係数が計測された。この構造物では他の打重ね線でも表層透気試験を行ったが、計測不能とされる箇所もあり、打重ね線上では著しく低

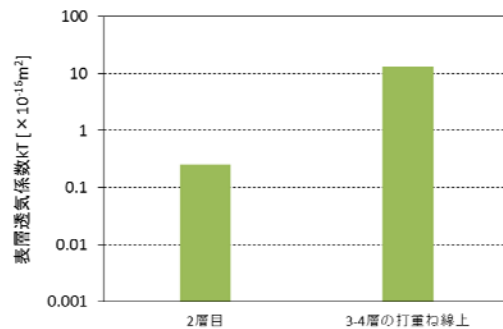


図-7 表層透気試験の結果（大畑団地本線 Box）

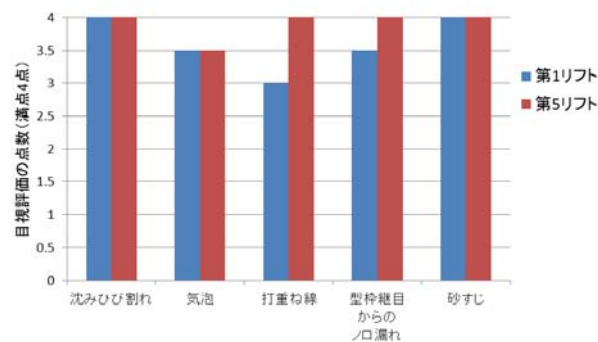


図-8 目視評価の結果（唐丹第二高架橋 P1）

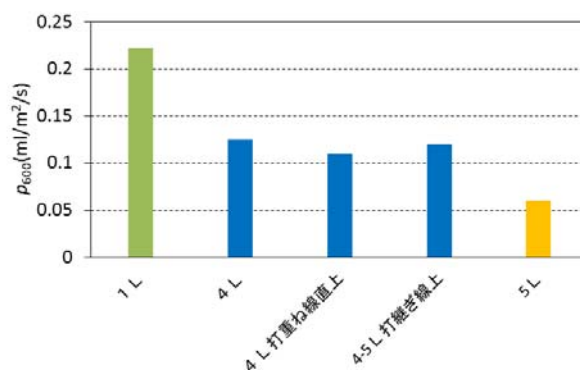


図-9 SWAT の結果（唐丹第二高架橋 P1）

計測不能とされる箇所もあり、打重ね線上では著しく低い透気抵抗性を示した。わずかに一体化していない部分があった場合に敏感に反応する測定方法なのであろう。

毛管張力による吸水が支配的なSWATで十分な吸水抵抗性を示していることから、筆者らはこの構造物の打重ね線は耐久性上問題になるものではないと考えている。

3.4 唐丹第二高架橋 P1

この構造物は、種々の工夫が功を奏して、非常に高い品質を示した。図-8に示すように、目視評価においてもPDCAの効果が見られ、図-9に示すように、吸水抵抗性も極めて高く、打重ね線のみならず、打継ぎの直上でも高い吸水抵抗性を示した。

3.5 越喜来高架橋

W/Cが35.5%のコンクリートにしては、2日での脱型

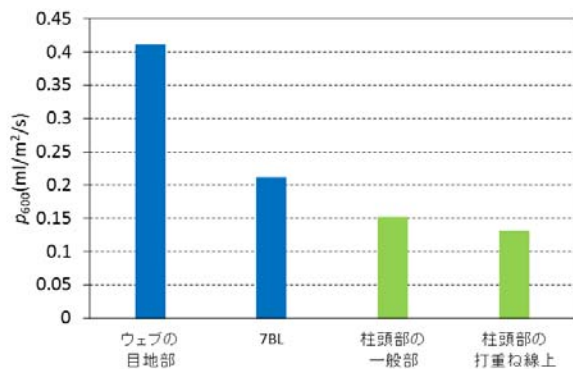


図-10 SWAT の結果（越喜来高架橋）

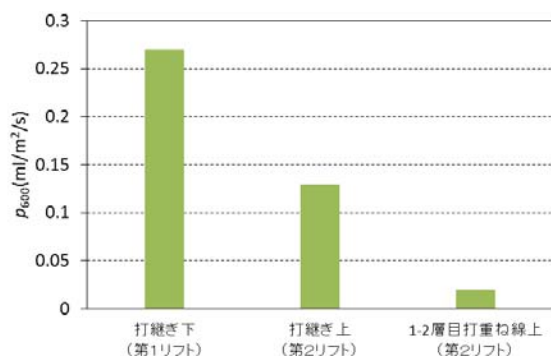


図-11 SWAT の結果（新気仙大橋）

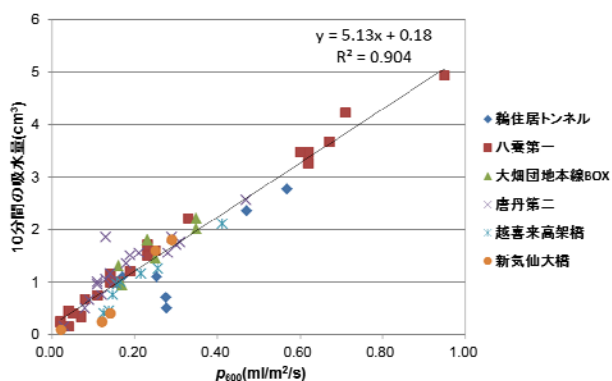


図-12 p_{600} と 10 分間の総吸水量の関係

の影響もあり、図-10 に示すようにウェブ部での吸水抵抗性は高くはなかった。

3.6 新気仙大橋

2.2(6)で詳述したように、この構造物の計測は降雨の影響を受けた。含水率は、CMEX II で 6.0%程度、HI-520 で 6~6.7%程度であった。表層透気試験は CMEX II で 5.5%以下の含水率で実施するのがよいとされており、含水率の高い状態であると考えられる。

しかし、同じ条件で計測した場合に、図-11 に示したように、打重ね線の直上でも、一般部よりも高い吸水抵抗性を示した。パイプレータが適切に打重ね線の下まで適切に挿入されたことの証左であろう。

3.7 表面吸水試験の指標について

図-12 に、 p_{600} と注水開始 10 秒後の計測開始後から 10 分間の総吸水量との関係を示した。 p_{600} は計測開始から 10 分時点での瞬間的な吸水速度であるが、10 分間の総吸水量と良好な相関を示している。

4. まとめ

南三陸国道事務所管内の復興道路、復興支援道路のコンクリート構造物の表層品質を調査した。品質確保のための種々の施工での工夫がなされている現場において、目視評価、表面吸水試験 (SWAT)、表層透気試験等の非破壊試験を用いて表層品質を評価した。

養生による品質の向上が特に SWAT で顕著に確認された。施工の基本事項の遵守がなされた構造物において、打重ね線の直上で計測した結果、SWAT では一般部と同程度もしくはそれ以上の吸水抵抗性を示したが、表層透気試験では一般部より著しく大きな透気係数を示した。

謝辞：本研究の調査に際して、南三陸国道事務所の監督官の皆様および現場の施工者の皆様のご協力を得ました。深謝いたします。

参考文献

- 1) 細田 暁：復興道路での品質確保と人材育成，コンクリート工学，Vol.53，No.1，pp.66-70，2015.1
- 2) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]，pp.114，2013
- 3) 森岡弘道，二宮 純，細田 暁，田村隆弘：地方自治体におけるコンクリート構造物のチェックシートを活用した品質確保の取組み，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1327-1332，2013
- 4) 坂田 昇，渡邊賢三，細田 暁：目視調査に基づくコンクリート構造物の表層品質評価手法の実績と調査結果を反映した表層品質向上技術，コンクリート工学，Vol.52，pp.999-1006，2014.11
- 5) 伊藤忠彦，細田 暁，林 和彦，西尾 隆，八巻大介：覆工コンクリート品質向上の取組みと表層品質の評価，トンネル工学報告集，第 24 巻，I-4，pp.1-9，2014.12
- 6) 林 和彦，細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013
- 7) Concrete Society Working Party: Permeability Testing of Site Concrete - A Review of Methods and Experience, Concrete Society Technical Report, No. 31, pp. 1-95, 1987