

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（FS研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	なからい けんいちろう 半井 健一郎		広島大学大学院 工学研究院		准教授
②研究 テーマ	名称	非破壊試験を用いたコンクリート構造物の表層品質検査システムの構築			
	政策 領域	[主領域] 領域8：道路資産の保全	公募	タイプII	
		[副領域] 領域4：コスト構造改革	タイプ	ハード分野	
③研究経費（単位：万円） ※受託金額を記入。	平成26年度 990万円				
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏名		所属・役職			
岸 利治		東京大学生産技術研究所・教授			
酒井 雄也		東京大学生産技術研究所・助教			
舌間 孝一郎		前橋工科大学・准教授			
上田 洋		鉄道総合技術研究所・室長			
西尾 壮平		鉄道総合技術研究所・副主任研究員			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
<p>本研究では、これまで直接的な検査が不可能とされてきた、コンクリート構造物の耐久性を支配する表層品質を、非破壊試験の組み合わせによって定量的かつ合理的に評価する新たなシステムを構築し、耐久的な新設道路構造物の建設に資することを目的とした。</p> <p>本目的を本格研究で確実に達成するためのFS研究として、次項を本年度の目標とした。</p> <p>(A) 新設コンクリート構造物の表層品質に関する基礎データの収集と分析</p> <p>(B) 耐久性ポイントを活用した表層品質の評価の検証の試行</p> <p>これにより、簡易法の有効性を具体的に示すとともに、3段階の検査システムの構成を明確化し、次年度以降の判定基準を含む試験方法の確立の準備とする。</p>					

⑥ F S 研究の結果

A. 新設コンクリート構造物の表層品質に関する基礎データの収集と分析

1. 詳細法における標準的判定基準の決定に向けた基礎データの収集と分析

本研究で詳細法のひとつとして位置付けた表層透気試験(トレント法)を用い、国内の新設構造物を対象に面的に複数のデータの取得を行った。FS研究として、群馬県および国土交通省中国地整の協力を得て、これまでに計9現場の構造物の測定を実施し、本格研究において国内基準値を検討するための基礎データの収集と分析を行った。手法の有効性を示し、FSとしての目的を十分に達成した。

測定は、スイス標準規格SIA 262/1:2013を参考に、材齢約3ヵ月で行った。表面水率が5.5%を超えて乾燥が十分ではなく測定条件を満たさないものを除くと、これまでに、群馬県では7現場17か所(PC上部工4, RC上部工4, 下部工4, ボックスカルバート5)、中国地整では1現場4か所(RC下部工1, ボックスカルバート3)の計測を行った。基本的には高さ1m程度の位置で6点の計測を行い、対数平均値を求めた。1箇所6点の測定には1時間を要したが、平均化処理により精度を向上できることを確認した。

図-1.1に、今回の測定結果を、スイスでの計測値(Jacobs & Hunkeler, 2007)に追加して示す。ここで、一部のコンクリートのW/Cについては情報照会中であるが、暫定的に概算値を示した。今回得られたRC構造物の透気係数の平均値は $0.17 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり、5段階評価の並(moderate)、スイスの平均透気係数から逆算されるW/Cは45%となり、RC構造物としては比較的良好な品質であると評価できた。暫定基準値としては、スイス規格を準用できる可能性がある。一方で、最大値は $4.4 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と大きく、また、構造物によって大きな品質差があることが示された。すなわち、耐久性の観点からは表層品質に大きな差異があることが確認され、表層品質の検査の確立を目指す本研究の重要性が示された。

図-1.2には、2現場のボックスカルバートの内壁で行った測定高さの検討結果を示す。いずれにおいても最下段や上段の一部において、透気係数が大きくなる傾向があった。最下段での締固めの困難さや上段打込み途中での昼食休憩時の作業中断が影響している可能性が考えられた。研究項目Bにおける施工要因の根拠・検証データとして、本手法の測定結果が活用できることを示した。

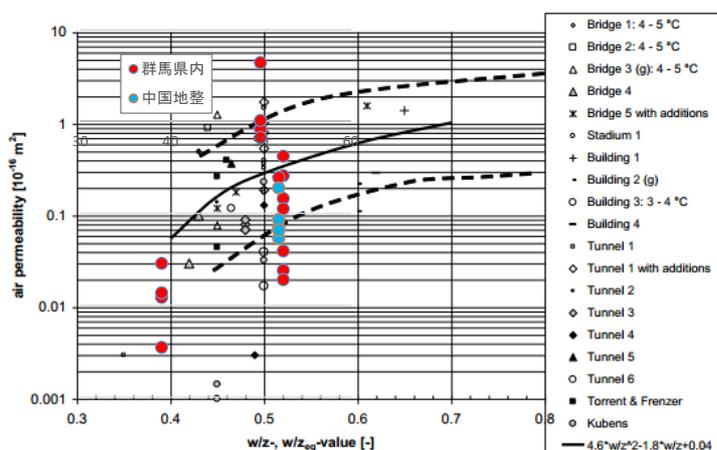


図-1.1 透気係数と水セメント比の関係

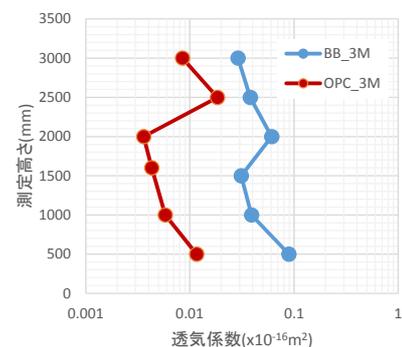


図-1.2 測定高さと透気係数の関係

<引用文献> Jacobs, F and Hunkeler, F: Air permeability as a characteristic parameter for the quality of cover concrete, An International Conference in honour of Prof. A. Long and Prof. J. Bungey, Concrete Platform 2007

2. 簡易法における試験方法の確立に向けた基礎データの収集と分析

表層品質を評価するための簡易法(主に散水試験)を対象に, 1次検査手法としての活用を目指し, 結果への影響要因を検討するための測定を行った. 簡易法としての散水試験の有用性を確認するとともに, 検査手法としての確立に向けた課題を具体的に抽出でき, FSとしての目的を十分に達成した.

館林に新設されたボックスカルバートおよび附属試験体(詳細は後述)および広島大学で作製した室内試験体において, 表層透気試験とあわせて散水試験を実施し, 両者の関係を分析した. 表層透気試験の1箇所6点の測定に対して, 散水試験では, 24点または48点の計測が可能であった. 図-2.1は, 測定された透気係数と流下までの散水回数との関係である. 館林の現場計測および大学での室内試験のそれぞれでは両者に高い相関が確認され, 簡易法としての有効性を示した. ただし, 相対評価ではなく, 数値そのもので評価を行うためには, 試験体種別ごとに異なる近似線が得られた要因の分析が必要である.

館林の現場では, 散水試験の結果に及ぼす影響要因の分析も行った. まず, 2材齢での計測を行い, 脱型後に気中暴露した試験体については, 1か月から3か月の間に, 表面水率が大きく減少して散水回数が増加することを確認した(図-2.3). また, 附属試験体の作製時に, 新品および転用3回目のコンパネを型枠として用いて両者の比較を行い, 今回の測定では型枠の転用回数の影響は大きくないことを確認した(図-2.3).

なお, 現場での実務者からのヒアリングより, 現場の品質管理への導入の期待が高いことを確認した.

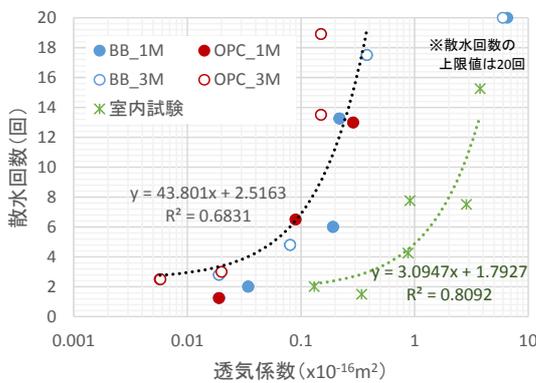


図-2.1 散水回数と表層透気係数の関係

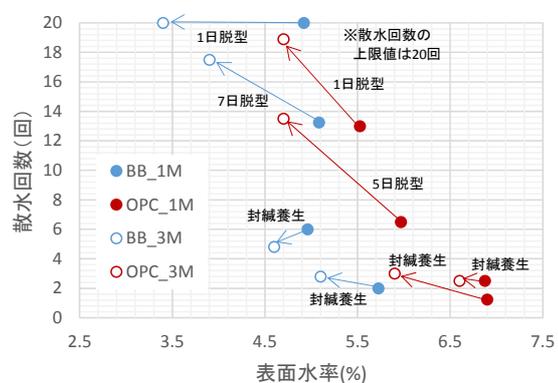


図-2.2 表面水率と散水回数の変化

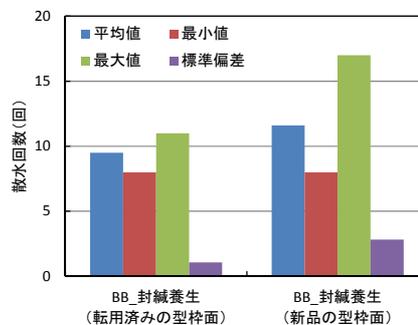
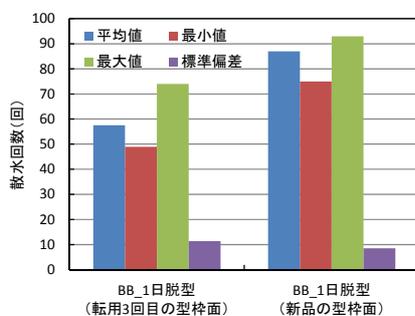


図-2.3 型枠に用いたコンパネの転用回数が散水試験に及ぼす影響

3. 採取コアにおける試験方法の基礎的検討とデータの収集

3.1 吸水試験方法の検討

最終検査としての採取コアを用いた吸水試験手法を確立するため、まず、室内吸水試験方法の検討を行った。すでに規格化されている試験を収集し、表-3.1に示すように比較分析を行った。そのうえで、①ASTM規格を中心に、②RILEM基準、④BS規格を具体的に検討し、ASTM規格による吸水試験を採用することとした。現時点では、直径100mmの試験体を中心とした検討に留まっており、当初に開発目標とした径コアの吸水試験については検討途上にある。試験手法の開発の方向性は明らかになったことから、FS研究の目的はおおむね達成されたと考える。

表-3.1 コンクリートコアまたは試験体等の吸水試験の例

試験名	供試体寸法の標準	前乾燥方法の概要	吸水試験方法の概要
① ASTM C1585-13: Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes	直径100mm, 厚さ50mmの円柱試験体	50℃, 80%RHにて3日間の乾燥。その後、23℃にて15日間の密封。(内部相対湿度が50%程度で平衡となり、実構造物における下限値とほぼ一致)	下面からの鉛直上向き吸水。側面はシール、上面はカバー。6時間までの初期吸水速度係数に加え、その後9日までの2次吸水速度係数を算出。
②RILEM CPC11.2: Absorption of water by capillarity (暫定基準)	角柱の一边または円柱の直径が100mm以上、高さは一辺または直径の2倍以上	40℃にて、14日間の乾燥。	下面からの鉛直上向き吸水。シールはなし。
③ RILEM TC116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability	直径150mm, 厚さ50mmの円柱試験体	50℃にて、あらかじめ設定した質量減少量(20℃, 75%RHに相当)が得られるまで乾燥。その後、50℃にて27日間(または14日間)の密封。	下面からの鉛直上向き吸水。側面はシール、上面はカバー。
④ BS 1881-122: Method for determination of water absorption	直径75mm, 長さ75mm	乾燥炉にて72時間の乾燥。その後、室温にて24時間の密封。	水中に完全浸漬。
⑤JIS A 1404「建築用セメント防水剤の試験方法」	40mm×40mm×160mm (モルタル)	80℃で一定の質量になるまで乾燥	下面からの鉛直上向き吸水。

(1) 円柱供試体を用いた吸水試験の比較検討

比較試験のため、直径100mm×高さ200mmの円柱供試体(高炉セメントB種, W/C=50%)を広島大学で作製した。養生条件は3水準を設定し、材齢1日, 7日, または28日に脱型後、いずれも室内にて気中暴露とした。材齢90日程度で吸水試験前の乾燥を行った後、それぞれの吸水試験を開始した。なお、ASTM規格では乾燥前に高さを50mmに切断した。

各吸水試験の前に実施した乾燥処理後の供試体の単位体積質量は、ASTM規格の $2.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ に対し、BS規格では $2.20 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とほぼ同程度の値になったが、RILEM基準では、 $2.27 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とやや大きな値となり、寸法や乾燥温度・時間の影響が確認された。

各吸水試験の吸水量と時間の平方根の関係から得られた吸水速度係数を図-3.1に、一例とし

て、ASTM規格における吸水量の経時変化を図-3.2に示す。吸水速度係数については、吸水表面積あたりとした。いずれの試験においても、高い相関によって吸水速度係数が算出できた。また、養生期間が長いものほど吸水速度係数が小さくなり、養生条件の違いが評価された。中でもASTM規格による測定結果が最も明確に養生の違いを検出した。これは、相対的に大きな寸法の供試体を乾燥させるRILEM基準やBS規格では、内部の含水状態が不均一であることや高温によるマイクロクラックなどの発生が原因であると考えられた。このため、本研究では、ASTM規格による手法をベースにすることに決定した。

(2) 吸水試験による水分供給が吸水速度係数に与える影響

本研究では、ASTM規格に定められた事前の飽水処理を行わずに計測を行った。そこで、同じ供試体を用い計3回の繰返し吸水試験を行い、吸水試験中の水の供給の影響を検討した。吸水試験前後での供試体の単位体積質量の変化を図-3.3、初期吸水速度係数の変化を図-3.4に示す。28日脱型と養生を十分に行った供試体については、吸水試験回数に関わらず、試験前後の質量および吸水速度係数にほとんど変化がなく、吸水試験の再現性が確認された。一方、1日および7日脱型の供試体については、吸水試験の繰返しによって、試験開始前の質量が増加するとともに、吸水速度係数が小さくなる傾向がみられた。養生が不十分な場合には、吸水試験における水の供給によって、セメントの水和反応が追加的に生じたためと推察できる。ただし、1日脱型のように極端に養生が不足した場合には、水分供給による改善効果は限定的であった。よって、養生の良否を含めた施工を評価するためには飽水処理をしない方が良いと考えられる。なお、本結果は、追加養生を行った場合の品質改善の程度を評価するものとしても活用できる。

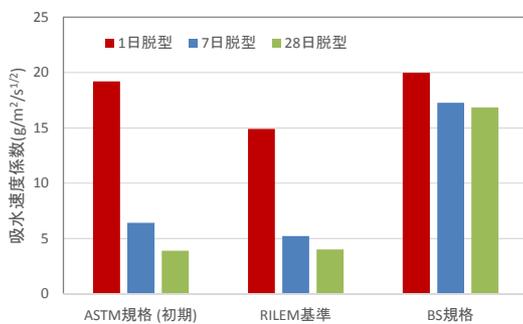


図-3.1 吸水速度係数の比較

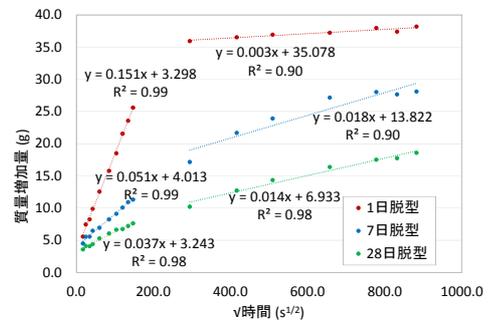


図-3.2 ASTM規格による吸水量の経時変化

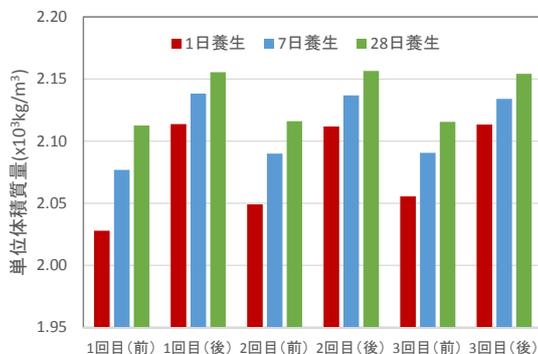


図-3.3 繰返し吸水試験による質量変化

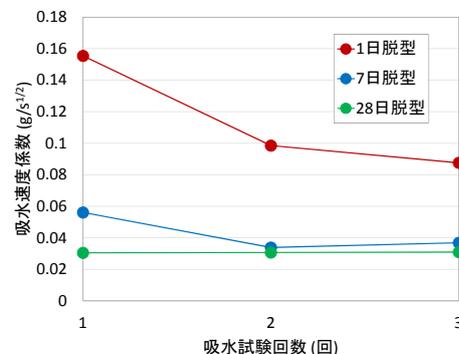


図-3.4 繰返し試験による吸水速度係数の変化

4. 各種表層品質評価手法の相互比較

4.1 室内試験による検討

1次検査(散水試験による簡易法), 2次検査(表層透気試験による詳細法), 3次検査(ASTM C1585-13によるコアの吸水試験)の3段階システムの成立性を検討するため, 室内試験により, 3手法による測定結果の相互比較を行った. ブリーディングによる品質変動やコアの小径化など, システム構築のための課題を明確にできたことから, FS研究としての目的はおおむね達成された.

測定対象は, 700×700×200mmの壁状供試体(高炉セメントB種, W/C=50%)で, 養生を3水準とし, 材齢1日, 7日, 28日の脱型後に室内で気中暴露し, 材齢120日程度で計測を行った. なお, 測定高さの影響が無視できなかったことから, 上段と下段の2水準の高さに分けて平均値を算出した.

散水試験で得られた散水回数と表層透気試験で得られた表層透気係数の関係を図-4.1に示す. 全体としては, 図-2.1でも示したように, 両者の高い相関が確認できた. ここでは特に, 上下の品質の差異についても同様に評価されることを確認した. 一方, 標準コア供試体(直径100mm)を用いた吸水試験から得られた初期吸水速度係数と表層透気係数の関係(図-4.2)については, 測定高さごとに高い相関を示したが, 全データを対象とすると相関が低かった. すなわち, 表層透気試験と吸水試験では, ブリーディングの影響程度が異なり, 表層透気試験の方がより顕著な影響を受けた. 表層透気試験(トレント法)ではダブルチャンバー法によってスキンの巻き込み空気の影響を低減しているものの, 完全ではなく, ごく表層の脆弱層が影響したと考えられた. 鉄筋を保護するかぶりコンクリートの物質移動性評価としては, 吸水速度係数がより直接的な物性値であるので, ブリーディングによる品質変動が大きい場合には, 非破壊試験の測定結果の評価には注意が必要と考えられた.

図-4.3には, 小径コア供試体から得た吸水速度係数と標準コア供試体の係数との比較を示した. 小径コアの結果は16倍することによって, 供試体寸法の違いを考慮した. 両者には相関がほとんどなく, 多くの試験体では小径コアの吸水速度係数が大きくなった. これは前乾燥を同一条件で行ったために小径コアの方が乾燥したためであり, ASTM規格を小径コアに準用するためには乾燥条件の見直しが必要であることが明らかになった.

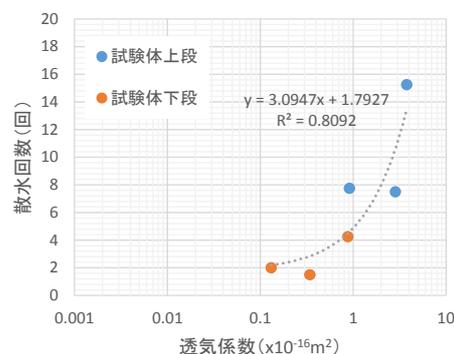


図-4.1 散水回数と透気係数

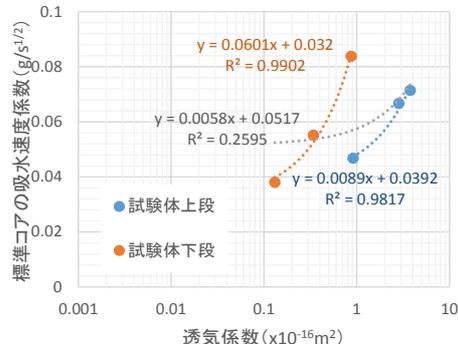


図-4.2 吸水速度係数と透気係数

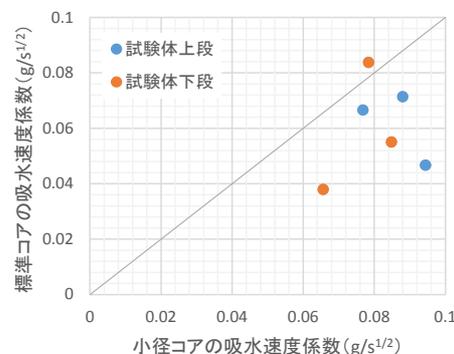


図-4.3 吸水速度係数とコア寸法

4.2 実構造物および附属試験体による詳細検討

群馬県発注のボックスカルバートおよび附属試験体(表-4.1, 写真-4.1~3)に関して, 簡易法(散水試験, 流水試験), 詳細法(表層透気試験, 表面吸水試験), コアの吸水試験を実施し, 各試験手法によって計測される表層品質の比較分析を行った. 耐久性評価を目的とした各種非破壊試験の測定値間には相関があることが確認され, 複数の手法を組み合わせたシステム構築が可能であることを示したが, コアの吸水試験は準備中であり, FS研究としての目的達成は途上である.

図-4.3には, 計測した全データの平均値に対する各測定値の比を示す. 図-4.4(左)の附属試験体では, 物質移動抵抗性の観点からは, 養生期間が長くすることによって表層品質が向上することが, 各手法によって概ね良好に検出をすることができた. また, いずれの養生においても, OPCの方がBBよりも表層品質の測定値が良くなった. 一方で, テストハンマーで計測した反発度はほとんど変化しておらず, 養生の違いは力学特性にはほとんど影響せず, 耐久性への影響が大きいことが明確に示された. 今後, 含水状態を制御した室内吸水試験や細孔構造分析によって, 非破壊試験結果の分析を行う. 図-4.4(右)の実構造物については, シートによる封緘養生を継続中で表面水率が平均で5.9%と高く, 養生終了後にあらためて詳細な調査を行う必要があるが, 同一養生条件(シートによる封緘養生)の附属試験体と同程度の高い表層品質であることが示された. 図-4.5

表-4.1 表層品質の測定を行った実構造物および附属試験体の概要

現場	呼び強度	セメント種類	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	実構造物 (ボックスカルバート)	附属試験体 (縦1500×横1500×厚さ400/600mm)
分割11	24	BB	52.5	159	厚さ400mm, 2ブロック, シート封緘養生	1日脱型 7日脱型 1日脱型後からシートによる封緘養生
分割12	24	N	55.0	162	厚さ600mm, 3ブロック, シート封緘養生	1日脱型 5日脱型 1日脱型後からシートによる封緘養生



写真-4.1 施工状況



写真-4.2 附属試験体



写真-4.3 ボックスカルバート

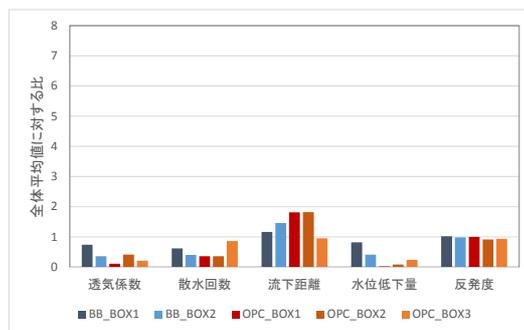
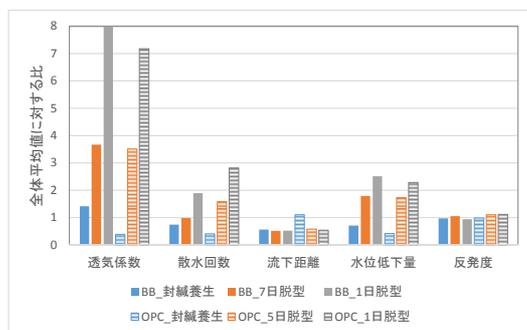


図-4.4 各種非破壊試験の測定結果 (左: 附属試験体, 右: ボックスカルバート)

には、附属試験体を削孔して計測した内部含水率の分布を示す。養生期間が短いものは表面近傍の含水率の低下が大きい、全体として、OPCの含水率が高く、これにより表層品質が高く評価されたと言える。詳細分析により、研究課題Bによる耐久性ポイントの確立に展開する。

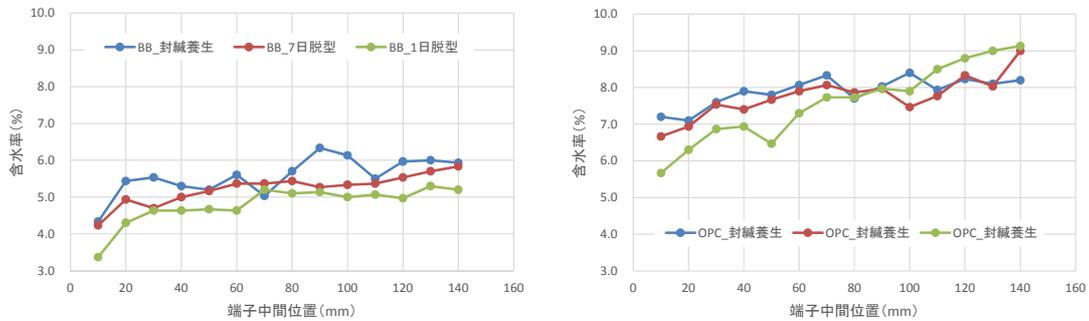


図-4.5 内部の含水率分布（左：分割11（BB），右：分割12（OPC））

B. 耐久性ポイントを活用した表層品質の評価の検証

構造物において達成された表層品質に及ぼす設計や施工の要因を定量的に分析するために、耐久性ポイントを用いることとし、データシートを作成するとともに群馬県内の関係者の協力を得て、内容の検討と試行を開始した。ただし、現時点では十分な情報が集約できておらず、FS研究としての目標達成は必ずしも十分ではない。これは、耐久性ポイントの計算には、工事を担当する実務者の協力が不可欠であるが、業務量の増加となるため、非破壊試験を行ったすべての現場のデータを収集することは難しい。耐久性ポイントの有効性を早期に実証し、協力者に直接的なメリットがあることを明示する必要があるとともに、入力項目の簡素化が要望された。

まず、図-5.1に示す自動計算用データ入力シートを作成した。本シートは、山口県が作成・公開

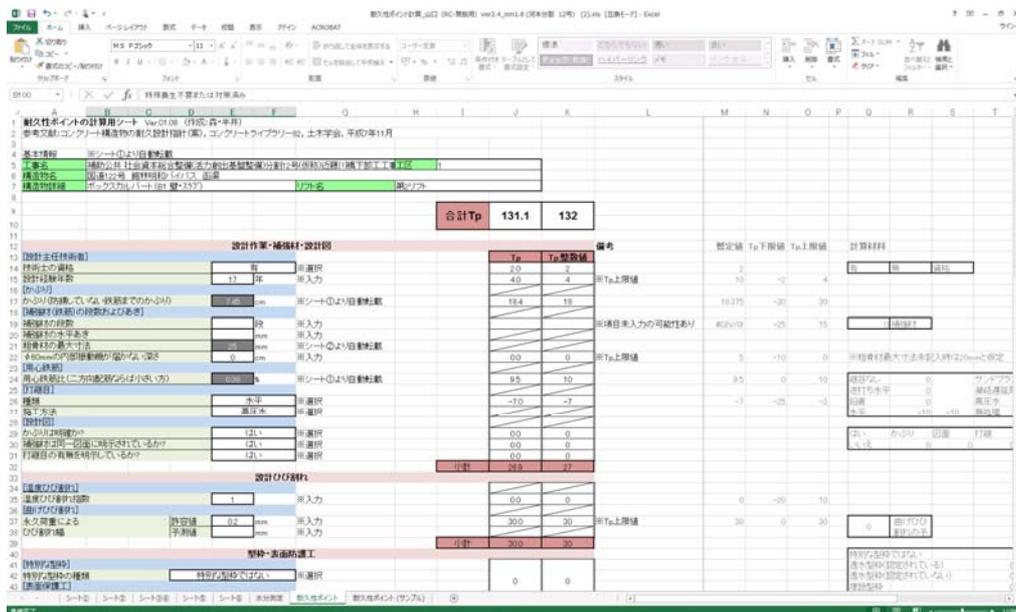


図-5.1 耐久性ポイントの自動計算用データ入力シート

している、「コンクリート施工管理記録」のファイルに新たなシートを追加し、項目を連動させることとした。これにより、温度ひび割れ抑制対策を主目的とした山口県の取り組みを包含した分析へ展開できるようにした。次に、群馬県のコンクリート構造物の品質確保WGに本シートを提供・説明し、発注者（県の土木事務所）および施工者（建設業協会および群馬会幹事）に対し、項目の入力の可否・難易度についての調査依頼を行った（次回、2月のWGにて回答を入手予定）。また、2月に群馬県で実施する群馬会の講習会において、参加者から同様の情報収集を行う予定である。これまでに、館林のボックスカルバートの施工現場にてデータの試験入力が行われ、発注者と施工者の双方による情報の入力が必要ではあったものの、入力に支障がないことを確認した。追加項目として、スランプについては土木学会から新たに示された最小スランプの概念を反映させ、出荷時、受入れ時、筒先でのスランプを区別して記録することなどの提案があり、反映させることとしている。

⑦本格研究の見通し

A. 非破壊試験を用いた表層品質検査システムの構築

(1) 詳細法における標準的判定基準の決定と参照データの蓄積【確実に実現可能】

FS研究によって、スイス標準規格を準用した表層透気試験（トレント法）の有効性が示され、検査システムの核である詳細法を確立する見通しが立ったと考えられる。本格研究では、FS研究の継続・拡大によってさらなるデータを蓄積し、日本版判定基準の提案を行うとともに、表層品質検査システムの必要性を示す根拠とする。また、研究課題Bで提案を目指す、表層品質の確保・向上のための設計・施工技術に関しても、詳細法によって達成品質を評価することによって、内容の検証と改良が可能となる。なお、FS研究においては限られた計測しか行えなかったものの、表面吸水試験も有効な手法と考えられるため、あわせてデータの蓄積と手法の検証を進める。最終的には、1次～3次のすべてにおいて水の移動に着目した一気通貫のシステムとする。

(2) 簡易法における試験方法の確立と標準的判定基準の決定【確実に実現可能】

FS研究によって、簡易法としての散水試験の可能性を示すことができた。あわせて明らかになった、表面水率の影響や測定対象による透気係数との異なる相関についての分析を進めることで、試験方法の確立が可能となる見通しである。1次検査としての判定基準の決定においては、散水量によって流下までの散水回数を変化させることができるので、表層透気係数との関係から決まる散水回数を数回程度に設定することができれば、数分で結果判定を行うことが可能となる。ここでの判定基準は、絶対値としての設定が望ましいが、表面水率などの影響が排除・考慮できない場合には、標準試験体との比較などの相対的な評価手法の構築も検討することで、本格研究の3年以内に確実に実務展開を開始できるようにする。いずれの場合においても、達成された表層品質が明らかに合格していることを検査することが1次検査の目的であり、簡便性の保持を優先する。

以上の検査のための研究開発に加え、簡易な品質管理としての活用も期待される。群馬県で平成27年度から開始する品質確保の試行においては、散水試験による計測結果を合わせて記録し、研究課題Bと連動させることで、設計・施工のPDCAサイクルを実現する。

なお、流水試験についても検討を進め、1次検査として、複数の簡易手法の提示を目標とする。

(3) 採取コアにおける試験方法の確立と標準的判定基準の決定【ほぼ確実に実現可能】

FS研究により、直径100mmの標準コアを用いた吸水試験については、ASTM C1585-13規格による実施の見通しが立ったが、今後の本格研究では、実構造物における実効性を高めるため、小径コアを用いた吸水試験手法の確立に重点を移すことが目的達成のために求められると認識した。FS研究で明らかになった前乾燥条件や作業の簡略化を検討することにより、評価精度と実用性を向上させた試験手法の確立が可能になると見込んでいる。あわせて簡易法や詳細法との相関分析を行うことによって、非破壊試験の測定結果の検証を行うとともに、3次検査としての判定基準の決定を行う。

B. 耐久性ポイントを活用した表層品質の確保・向上のための設計・施工技術の提案【課題の解決が必要】

FS研究では、実構造物からのデータ収集が限定され、検証としては十分ではなかったことから、現時点では、課題が多いことが明らかになった。ただし、新設された群馬県のWGとの連携によって、試行での試験導入、入力項目の簡素化の検討が可能となったことから、部分的であっても着実にデータ蓄積を進められることが見込まれる。なお、FS研究で示唆された昼食休憩による作業中断の影響のように、当初の耐久性ポイントにはないが影響が大きいと考えられる項目も積極的に追加する。このために、非破壊試験によるデータの蓄積と分析を先行して進めるとともに、対象構造物の打込みに立会い、第三者の客観的視点により施工上の主要パラメータを明らかにする。

⑧特記事項

本FS研究の実施により、1次検査としての簡易法(散水試験)、2次検査としての詳細法(表層透気試験)、3次検査としてのコア分析(室内吸水試験)の有効性と課題が明確となり、3試験によるシステムの構築の実現性については、大いに自信を得た。

群馬県では、本FS研究と連携し、2015年1月に「コンクリート構造物の品質確保WG」を設置した。県職員が座長を務め、現場・設計・契約・検査・維持管理などの県担当職員、建設技術センター職員、工事を請け負う施工・生コン・材料・ポンプ圧送の各実務者に加え、本研究課題を担当する半井・舌間が委員として参加している。本WGでは、品質確保システムの確立と施工レベルの向上を目的とした具体的な施策の検討を行っている。本申請課題の項目Bで開発する設計・施工技術の知見を反映させるとともに、項目Aで開発する検査手法を(まずは検査ではなく)品質評価手法として活用し、施策の有効性を検証することが期待される。ひび割れや美観の観点からコンクリートの品質を評価した事例はすでに数多くあるが、物質移動抵抗性から表層品質を直接的に評価する初めての本格的な実務展開となる。