

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. 28-6

研究テーマ 新設コンクリート構造物における 表層品質検査手法の確立

研究代表者:	広島大学・教授	半井 健一郎
共同研究者:	鉄道総合技術研究所・主任研究員	西尾 壮平
	前橋工科大学・准教授	舌間 孝一郎
	東京大学生産技術研究所・教授	岸 利治
	東京大学生産技術研究所 講師	酒井 雄也
	広島大学・助教	小川 由布子
	土木学会関東支部群馬会	

令和元年7月

新道路技術会議

目次	∃次
----	----

第 1	章 はじめに	3
1.1	研究の背景	3
1.2	研究の目的	3
参え	岑文献	4
第2	章 表層品質評価に関連した各種試験	5
2.1	散水試験 ^{1)~7)}	5
2.2	流水試験 ¹²⁾	9
2.3	表層透気試験(トレント法) ⁸⁾	10
2.4	表面吸水試験(SWAT 法) ⁹⁾	11
2.5	吸水試験	11
参え	与文献	12
第3	章 1次検査に用いる非破壊試験(簡易法)	14
3.1	はじめに	14
3.2	散水試験による早期判定の検討	14
3.3	新たな評価指標の検討	14
3.4	測定者の違いが結果に及ぼす影響	17
3.5	まとめ	17
参え	与文献	17
_ 第4	章 2次検査に用いる非破壊試験(詳細法)	18
4.1	はじめに	18
4.2	実構造物および模擬試験体における経時計測	18
4.3	中規模試験体における詳細分析	22
4.4	まとめ	26
参え	与	26
, 第5	章 3次検査に用いる採取コアの耐久性試験	27
5.1	はじめに	27
5.2	採取コアを用いた吸水試験	27
5.3	他の試験結果との比較	32
5.4	小径コアを用いた吸水試験の検討	34
5.5	まとめ	37
参え	~	37
第6	章 まとめ	38
6.1	成果のまとめ	38
6.2	:::::::::::::::::::::::::::::::::::::	39
付録		40

【様式3】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成28年度採択) 研究概要

番号	研究課題名	研究代表者			
No.28-6	新設コンクリート構造物における表層品質検査手法 の確立	広島大学	教授	半井健一郎	

本研究は、非破壊試験を用いた新設コンクリート構造物の表層品質検査システムを実務に展開 し、道路ストックの長寿命化に資するため、複数の試験手法の長所を組み合わせることによって 簡便性と正確性を両立させた新たな検査システムを提案し、室内試験および実構造物調査を通し て試験手法の有効性の実証および改良を行ったうえで検査指針(案)を整備し、現場に実装可能 な検査手法を確立させることを目標とする研究開発.

1. 研究の背景・目的

道路の主要構造物であるコンクリート構造物の表層品質(特に物質移動抵抗性)は、構造物の 耐久性を支配する極めて重要な品質であるにもかかわらず、間接的なプロセス検査のみでしか評 価されず、有効な品質検査が行われてこなかった.これに対して申請者らは、土木学会の研究小 委員会や本 FS などにおいて、新たな品質検査制度の確立に向けた課題の分析と将来像の提案、 手法の実務への適用可能性の検討を行ってきた.表層透気試験などの新たな非破壊試験が実務で 活用可能なレベルとなりつつあり、コンクリート構造物の耐久性を定量的に評価可能であること をもとに明らかにしてきた一方、試験の効率化に関しては、簡易法との組み合わせることによっ て飛躍的な改善が見込まれた.

そこで本研究では、非破壊試験を用いた新設コンクリート構造物の表層品質検査システムを実務に展開し、道路ストックの長寿命化に資することを目的とした。その実現のため、複数の試験 手法の長所を組み合わせることによって簡便性と正確性を両立させた新たな検査システムを提案 する.具体的には、流水試験や散水試験などの簡易法を1次検査、表層透気試験や表面吸水試験 などの詳細法を2次検査、採取コアによる吸水試験を最終検査とする、3段階システムを提案す る.研究期間においては、室内試験および実構造物調査を通して試験手法の有効性の実証および 改良を行ったうえで検査指針(案)を整備し、現場に実装可能な検査手法を確立させる.

2. 研究内容

1 次検査とする非破壊試験(簡易法),2 次検査とする非破壊試験(詳細法),採取検査とする採取コアによる吸水試験について,それぞれの試験手法の有効性や課題を室内試験や実構造物での測定を通して検討し,各手法の効果的な活用方法を検討するとともに,散水試験や表層透気試験に関しては検査指針(案)としての実施要領案を整備した.

具体的には、室内試験として、材料(セメント種)や配合(水セメント比)、施工方法(養生) を変化させたコンクリート試験体を作製し、各種試験によって表層品質を測定し、試験の適用性 や測定値の変化、試験ごとの値の相関などを分析した.現場試験としては、群馬県や山口県、国 土交通省中国地整などの協力を得て、新設コンクリート構造物の調査を行い、表層品質に関する 各種非破壊試験の適用性を検討した.

測定要領案の作成に当たっては、研究担当者で試行を行って内容を検討したほか、散水試験に 関しては実務技術者の協力を得て一斉試験を行い、測定精度向上に寄与することを確認した。

3.研究成果

1 次検査として活用する散水試験に関して表層透気試験との相関から適用性を検証するととも に、実務での活用のため、散水試験装置の個体差や試験実施者による結果のばらつきを軽減する ための方策として、これまでの散水回数ではなく、総噴霧量で評価する新たな手法を提案した。 また、脱型直後の早期判定に活用できることを示すとともに、噴霧量によって簡易なキャリブレ ーションを行う手順を整備し、測定要領案を作成・公開した。

2 次検査として活用する表層透気試験については、スイスの規格を基礎としたうえで、経時的 な測定を様々な条件で行うことによって、長期養生を行うことが多い日本国内の建設事情を踏ま えた適切な測定時期についての検討を行った。得られたデータを踏まえ、スイス規格である SIA262/1:2013を準用するとともに、長期材齢での測定の有用性や降雨の影響を避ける必要が あることの加筆を提案した。

3 次検査として活用するコアの吸水試験については、ASTM 規格を基礎とした検討を進めたが コアへの適用についての課題が明らかとなったため、新たな評価指標の提案を行うとともに、散 水試験や表層透気試験、さらにはスケーリング試験や急速塩分浸透試験との比較を行った。

4. 主な発表論文

- 1. Nakarai, K., <u>Shitama, K., Nishio, S., Sakai, Y.</u>, Ueda, H., and <u>Kishi, T.</u>, Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts. Construction and Building Materials, Vol.198, pp. 777-785, 2019.
- 2. Nguyen, M.H., Nakarai, K. Kubori, Y. and <u>Nishio, S.</u>, Validation of simple nondestructive method for evaluation of cover concrete quality, Construction and Building Materials, Vol.201, pp.430-438, 2019.
- 3. Nguyen, M.H., Nakarai, K. and <u>Nishio, S.</u>, Durability index for quality classification of cover concrete based on water intentional spraying tests. Cement and Concrete Composites, Vol.104, 2019.
- 4. 横山勇気, <u>酒井雄也</u>, <u>岸利治</u>:屋外暴露された中規模柱試験体を対象とした表層品質の継続的計 測および空隙構造分析による養生効果の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.617-622, 2019.

5. 今後の展望

簡易法である散水試験の測定要領案などが整備されたことから、実務で表層品質評価を活用す るための準備が整った.今後は、新設コンクリート構造物におけるデータを蓄積するとともに、 初期品質を維持管理に活用することによって、建設から維持管理までの PDCA サイクルの構築を推 進する.また、すでに建設後数十年が経過して劣化が顕在化した構造物への非破壊試験手法の適 用も見込まれる.

一方,課題として残った雨水の影響を受ける屋外の構造物の表層品質評価に関しては,①含水率の影響を踏まえて表層品質を的確に測定すること,②雨水の影響によって品質自体が施工直後から変化すること,③劣化の進行は含水率の影響を大きく受けること(たとえば雨水によって中性化の進行は遅くなるが鋼材の腐食リスクは高まること)などを踏まえて,検査の目的やタイミングを整理する必要がある.実際の構造物においては部位によっても雨水の影響は異なることから,測定データの蓄積を進めることで,より合理的な非破壊試験の活用法を確立する.

現場打ちのコンクリートに対し、工場で製作されるコンクリートにおいては、水和を促進する ために含水状態についても早期の安定が見込まれ、出荷時の品質管理として本研究の成果を活用 することが可能と考えられる.

6. 道路政策の質の向上への寄与

国内においては,群馬県のコンクリート構造物品質確保ガイドラインに表層透気試験や散水試 験の活用の考え方や散水試験の測定要領案が記載されたことから,今年度からのガイドラインの 本格運用において,品質確保の重要性と散水試験等の有効な活用方法に関する情報提供を継続的 に行い,研究成果を道路行政へ反映させる.あわせて,現場から取得されるデータを分析するこ とで,実務で広く活用され,新設コンクリート構造物の耐久性向上が確実に実現するように,研 究をさらに発展させる.また,群馬県以外の自治体や国交省の地方整備局とも連携し,構造物の 重要度や規模,供用環境などに応じた適切な品質確保や検査,維持管理の在り方を提言し,研究 成果の活用につなげる.

海外展開としては、ベトナムの交通技術大学(University of Transport Technology, UTT)や運輸 交通大学(University of Transport and Communications, UTC)と連携し、途上国であるベトナムで の適用を検討する.

7. ホームページ等

2019年3月末に群馬県建設企画課技術調査係より「群馬県コンクリート構造物品質確保ガイド ライン」が公開され、本編に表層品質確保の重要性とともに表層透気試験や散水試験の活用法が 示され、また、資料編に散水試験の実施要領案が掲載された.いずれも群馬県のホームページに てダウンロード可能である.

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

道路の主要構造物であるコンクリート構造物の表 層品質(特に物質移動抵抗性)は、構造物の耐久性 を支配する極めて重要な品質であるにもかかわらず, 間接的なプロセス検査のみでしか評価されず、有効 な品質検査が行われてこなかった.このことが、必 ずしも耐久的ではない不良構造物の生産や既設構造 物の維持管理費用の増大の一因になってきたと考え られる.

これに対し,研究代表者らは,土木学会に設置され た「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(委員長:岸利治(東京大学)) などにおいて,約7年間の調査研究を行い,新たな品 質検査制度の確立に向けた課題の分析と将来像の提 案を行ってきた^{1,2)}.また群馬県では,土木学会関東 支部群馬会にコンクリート研究会を設置し,コンク リートの品質向上を目指した産官学協働の活動を 2010年よりスタートさせている.この間,先行して 表層透気試験³⁾の基準化を行ったスイスのFrank Jacobs博士やRoberto Torrent博士とも情報交換をし てきた.

これまでの活動を通し、表層透気試験などの新た な非破壊試験⁴⁾が実務で活用可能なレベルとなりつ つあり、コンクリート構造物の耐久性を定量的に評 価可能であること、そして、構造物の耐久性は強度 以上に施工要因に大きく左右されることを、実構造 物の調査データをもとに明らかにしてきた. 国内で の認知も広がり、すでに施工者側からの技術提案と しての非破壊試験の活用も始まっている. しかし、 多くの現場で広く活用して全国の新設道路構造物の 耐久性を向上させるためには、判定基準をはじめと した検査手法の確立や試験の効率化が強く求められ る. 岸や西尾らが開発中の流水試験⁵⁾や散水試験⁶⁾⁻¹³ などの簡易法との組み合わせによって飛躍的に効率 化できる可能性がある.

そこで本研究では,表層透気試験や散水試験など の既存の非破壊試験法について,それぞれの長所を 最大限に活用できるように組み合わせた運用方法を 提案し,それによって実務での活用を推進すること とした.

なお,我が国の重要課題である道路構造物の維持管理に関しても,竣工時に初回の点検を適切に行って 維持管理上のPDCAのスタート地点を明らかにする ことが,その後の維持管理段階における診断精度の 向上に不可欠であると考える.特に予防的な保全を 行うためには,劣化の顕在化を待たずに構造物の耐 久性を診断することが不可欠であり,非破壊試験を 用いた定量的な表層品質評価は,実行性のあるメン テナンスサイクルの構築のためにも不可欠なものと なっていくと考えられる(図-1.1.1).



1.2 研究の目的

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検査システムを構築 し,道路ストックの長寿命化の推進に資することを 最終目的とした.その実現のため,有用と考えられ る既存の非破壊試験を選定し,複数の試験手法の長 所を組み合わせることによって簡便性と正確性を両 立させた新たな検査システムを提案し,その実証を 群馬県内の新設コンクリート構造物を対象に行う. すなわち,流水試験や散水試験などの簡易法を1次検 査, 表層透気試験や表面吸水試験などの詳細法を2 次検査,採取コアによる吸水試験などの耐久性評価 試験を最終検査とする,3段階システムを提案する.

参考文献

- 土木学会:構造物表層のコンクリート品質と耐久性能 検証システム第二期成果報告書およびシンポジウム講 演概要集,コンクリート技術シリーズ97,2012.
- 半井健一郎ほか: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、コンクリート工学、Vol.51, No.2, pp.153-158, 2013.
- Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, V.25, No.6, pp.358-365, 1992.7
- 4) 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.
- 5) 家辺真理子ほか:水の流下試験によるコンクリート表 層の品質評価に関する研究,コンクリート工学年次論 文集, Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012.
- 6) 西尾壮平:コンクリート表層部の物質透過性に関する 非破壊評価技術,鉄道総研月例発表会講演要旨,2014.9
- 7) 西尾壮平ほか:コンクリート表層品質の簡易な非破壊 評価手法の開発,鉄道総研報告, pp.5-10, 2014.2
- 8) 西尾壮平ほか:表面色によるコンクリート表層部の物 質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討,コン クリート工学年次論文集,Vol.33, No.1, pp.1751-1756, 2011.
- 9) 西尾壮平ほか:コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価,セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.303-310, 2013.
- 10) 西尾壮平ほか:コンクリート表面における散水時の明度変化と水分の挙動に関する基礎的検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1807-1812, 2013.
- 11) 西尾壮平ほか:コンクリート表面への散水時の明度変 化に着目した表層品質の簡易評価手法の検討,第56回 日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp.11-12,2012.
- 12) 西尾壮平ほか: 散水によるコンクリート表層品質の簡 易評価,鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016.

第2章 表層品質評価に関連した各種試験

2.1 散水試験 1)~7)

共同研究者の西尾らによって鉄道総合技術研究所 において開発・研究中の試験であり、コンクリート 構造物の表面に手動スプレーで水を吹きかけ、明度 変化や流水までの回数からコンクリート構造物の緻 密さを評価することができる.作業人員やコストが 少なく、簡易的な方法である.コンクリート構造物 が緻密なほど流水までの回数は少ない.本研究にお いては、簡易法の中心として本手法を位置付け、そ の効果的な活用法を検討することとした.

以下に手法の詳細を説明する.

(1) 散水試験の開発コンセプト

実構造物の表層品質に関する非破壊評価技術とし ては,コンクリート表面付近の透気性や透水・吸水 性の直接的な評価を試みた手法である表層透気試験 や表面吸水試験が国内外で考案されている^{8,9)}.表層 诱気試験では、コンクリート表面から空気圧の変化 を発生させて、圧力の変化速度などから透気性が評 価される、表面吸水試験は、名称が示すとおり、コ ンクリート表面から水を吸水させて透水・吸水性を 評価する手法である. これらの手法を実構造物に適 用した事例は複数報告されており、実構造物の検査 の実務に導入することが可能である.しかし、市販 の試験装置では、吸引や吸水器具の固定に外部電源 を利用するため、電源設備や作業スペースの確保な どの事前準備が必要となる. そのため, これらの手 法は、 測定箇所を絞り込んだ後の詳細調査、 精緻な 比較・検証といった場面での利用に適していると思 われる.

一方,主にコンクリートの強度推定を目的とした 既存技術の応用により,表層品質の間接的な評価を 試みた検討例も見られ,例えば,衝撃弾性波や超音 波を利用した手法がある^{10,11)}.コンクリート表面に 衝撃弾性波や超音波を作用させた際の種々の測定値 から圧縮強度を推定する試験装置が市販されており, それを表層品質の推定に用いるものである.これら の手法は実構造物への適用が比較的容易なため,強 度推定目的での実績は相応にあるものと推測される. しかし,測定の実施や測定結果の解釈に専門性を要 するため,調査は専門業者に依頼する場合がほとん どと思われる.また,測定原理が主に弾性体として のコンクリートの物性に立脚した技術であるため, 表層品質の評価への適用性については検討の余地が あり,さらなるデータの蓄積が期待される.

表層品質の非破壊評価に関する現状を踏まえ,構造物検査の実務への適用性を最重視し,鉄道総研の 西尾らによって考案された手法が散水試験^{1)~7)}である.散水試験の特長となるのが,試験手法の開発に おける次に示す3項目の基本コンセプトである.

- (1) 電源設備不要(測定機材の作動において外部電 源の確保が不要であること)
- (2) 省力(準備段階を含めた各種作業が省力的で1 名で実施可能であること)
- (3) 省スペース(測定機材の設置や測定作業に必要 なスペースが可能な限り小さいこと)

なお、詳細は次節で述べるが、散水試験は「簡易 版」として位置付けられたA法と、「詳細版」とし て位置付けられたB法の2通りの方法が開発されて いるが、本研究においては一次診断的な活用に適し たA法を採用している.本報告に記載された測定デ ータはすべて散水試験のA法を用いた結果である.

(2) 散水試験の測定手順およびA法とB法の特徴

コンクリートは一般に多孔質な材料であるため, 水をかけると吸水する.瞬間的に吸水できない量の 水をかけると,コンクリートの表面では水が溢れて 流れ出すことになるが,吸水しやすいコンクリート ほど水は溢れず流れ出しにくい.また,例えば降雨 後のコンクリート表面がわかりやすいが,乾燥した コンクリートの表面は水で濡れると黒っぽくなり, やがて元の色に戻っていく.水で濡れた後の表面色 の戻り方は,吸水しやすいコンクリートほど速くな る.ここでいう吸水のしやすさの相違はまさに表層 品質の相違であり,吸水しやすい=表層品質が劣る と考えることができる.

このような、「意図的に少量の水を散水した際の

相違」に着目し、「表層品質の非破壊評価に活用で きる情報を取得する」手法が散水試験である。図 -1.2.1に、散水試験の概要¹⁾を示す. 散水試験を工学 的に表現すると、表面における水の消失や流れ出し の挙動を目視あるいは光の反射・吸収特性として計 測機器で識別し、コンクリート表層の吸水現象を評 価する手法、となる、散水試験では、少量の散水を コンクリート表面の同一箇所で繰り返しつつ、水の 状態を繰返し観察あるいは計測する.詳細は既報の で述べられているが、散水以降の一連の流れを所定 の時間間隔で繰り返して実施することにより、散水 試験で得られる情報の確度が向上する. 少量の水分 を付与する以外にコンクリートへの影響はないため、 散水の繰返しが可能であり,繰返しによってさらな る情報を得る点は、他手法にない散水試験の大きな 特長の一つとなっている.

図-1.2.1に示すとおり,散水試験では散水後の水の 状態を「観察する」A法と「計測する」B法の2種類 がある.各手法による表層品質の評価の仕方につい ては次節で後述するが,各手法の位置付けとしてA 法は簡便性を追求した「簡易版」,B法は計測機器 を活用して表層品質に関するさらなる情報を取得す る「詳細版」とされている.

A法では、測定者は目視で散水後の水が流れ出したかどうかを観察する. 散水後に水が流れ出した時点で測定は終了となり、それまでの散水回数で簡易評価を行う. B法では、測定者はハンディタイプの計測機器を利用し、例えば散水後のコンクリート表面の明度変化に関する詳細データを取得する. 明度変化の飽和度を算出することで、飽和度が所定値に到達するまでの散水回数による準簡易評価を行うことができる.

吸水しにくい緻密なコンクリートでは水の流れ出 しや明度変化の飽和までに要する散水回数が少なく なるため、A法とB法のいずれも、良質なコンクリー トほど測定が早い段階で終了となる。例えば、散水 の繰返し時間間隔を60秒とし、1,2回の散水で測定 が終了した場合、所要時間2分程度で測定は終了する。 一方、緻密さに劣るコンクリートの場合では、水が 吸い込まれ続けることで測定の終了までの散水回数 が増加するため、所要時間はそれに応じて増大する。

表-1.2.1は、A法とB法の特徴^{1,7)}を整理したもので ある.A法とB法のいずれも電源設備は不要で、作業 は1名で可能、かつ、使用機材は手荷物として携行可 能なレベルである.特に、A法では同時に近傍で8箇 所程度の測定を実施でき、作業性が非常に優れてい る.

散水試験で使用する散水器具は一般的な手動式の スプレーで、散水の量と面積を専用の器具で調整し て安定化させている.水は温度によって挙動が変化 するものの、散水試験では常温の上水道水であれば 測定に対する支障はないものと見なしている.ただ し、冬季で気温が氷点下になるような場合は凍結に 対する配慮が必要となる.コンクリートに散水する 場合、測定面の方向で水の流れ出し方などが異なる



図-1.2.1 散水試験の概要¹⁾

我~1.2.1 联小码表的有限							
区分	A 法	B 法					
位置付け	【簡易版】,散水だ	【詳細版】,吸水性					
および	けで済む(簡便性に	状の詳細把握,定量					
利点	特化)	的データ取得					
作業性	同時に8箇所程度	同時に2箇所程度					
作業人員	1名(準備,測定,記	録)					
外部電源	不要	不要(電池駆動)					
使用機材	スプレー, タイマー, 筆記具	左記+計測機器					
測定面の 方向	鉛直面に適する	全方向に対応可能					
測定条件	スプレー1回の散水量 散水領域:直径 60mm 繰返し時間間隔:60 種 測定面の凹凸:こて仕 測定面の乾湿:濡れ面 測定環境:冬季は水の	:約 0.3ml かの円内 少 :上げ程度の平面性 iは不可)凍結に配慮					
用途	一次診断, 簡易調査, 調査箇所選定	二次診断,詳細調査					

表-1.2.1 散水試験の特徴^{1)~7)}

ことを考慮する必要があり,現段階ではA法を主に 鉛直面で,B法は鉛直面のほか水平面の上面および 下面で適用することができる.

なお, 表-1.2.1に整理した特徴は現段階で開発者が 使用中の機材等の性能に依存したものであるため, 散水器具,タイマー等の改良でさらに進歩させるこ とが可能であり,機材の開発等が鋭意進められてい る.また,B法で用いる計測機器として,西尾ら^{1)~} ⁷⁾は測定者が目視で得られる情報との感覚的な親和 性を考慮し,可視光が測定対象となる測色機器を利 用している.しかし,例えば赤外線等を利用した機 器を採用することで新たな知見が得られる可能性が ある⁷⁾.



(3) 散水試験で得られる情報

図-1.2.3に、散水試験・B法で測色機器を使用して 得られるコンクリート表面の明度変化に関する測定 結果の模式図を示す7). コンクリートの表面色を広義 に表現するといわゆる灰色であるが、それが散水で 暗色化し,水の吸収によって徐々に明色化するとい う現象を明度の変化として定量的に表現できること が実験的に明らかにされている²⁾. 図-1.2.4では, L*a*b*表色系の明度L*を用い、乾燥したコンクリー ト表面の明度を初期値として, 少量の散水を繰り返 した際の明度の経時変化特性を示した.また、同図 では代表的な明度の測定値をプロットし,各測定値 の差分である明度変化量の主要なものを付記した. 表-1.2.3に、図-1.2.2で示した記号の解説を示す.図 -1.2.2でn = 1と付記した初回の散水時の測定結果を 表す曲線が示すように,明度は初期値である散水前 の測定値L_I(=L_{0.0})が最高値となり、散水によって急 激に低下する(LTS_1).本手法で明度が変動する主

要因は表面に付与した水分の存在に他ならないため, 散水後の明度の変動は表面における水分の挙動に対 応する.散水で付与した水分は,主に内部への拡散 で時間の経過とともに測定領域の表面から徐々に消 失する⁵⁾ため,明度は経時的に初期値へと復元してい く(LTE, 1).続いて,復元段階の途中で2回目の散 水を行ったのち再度測色を開始し,同様の手順を一 定の時間間隔で繰り返す.同図中でn=2以降と付記 した曲線が示すように,散水を繰り返すことで明度 の経時変化曲線は低明度側である下方に推移する. 繰返し回数の増加に伴い,明度の低下は底打ちとな り,経時変化曲線の勾配は鈍化すなわち明度変化が 停滞する.

散水試験で得られる上記のような情報はコンクリート表面における水分消失の挙動を反映したものであり、表層における含水状態の飽和挙動を捉えたものと考えられる.表層品質と関連性を有している可能性が高いと考えられるため、各種コンクリートを対象とした実験的検討により複数の評価指標がこれまでに提案されている⁷.表-1.2.3に、既存の評価指標を示す⁷. これらの指標とコンクリートの諸特性と

表-1.2.3 B法の代表的な測定値⁷⁾

n	散水の繰返し回数(回)
t	各回における散水後の経過時間(秒)
Ts	散水後の測色開始時間(秒),各回で統一
Τ _Ε	散水後の測色終了時間(秒),各回で統一
T_{Ln}	n回目の測色時における明度 L*の最低値が記録され た経過時間(秒)
L _{t, n}	時間 t, 回数 n における明度 L*
L	散水前の明度 L*,測定箇所の初期値(= L _{0,0})
L _{MIN}	全体の明度 L*の最低値(図ー2 では L _{MIN} = L _{TL10,10})
-11	測定箇所における明度 L*の最大変化量
dL MAX	$dL_{MAX} = L_{I} - L_{MIN}$
ما	n回目の経過時間tにおける明度L*の変化量
aL _{t, n}	$dL_n = L_I - L_{t, n}$

表-1.2.3 散水試験に関する既提案の評価指標 7)

表記	説明	表-1.2.2 との対応					
TL	最低明度計測時間: 明度の最低値記録までの 経過時間(秒)	$T_L = T_{Ln}$ (<i>n</i> = 1,2,,10)					
V _H	明度変化速度最大値: 復元段階の時間当たりの 明度変化量の最大値	$V = rac{d(L_{t,n})}{dt}$ $(t \ge T_{Ln})$ の最大値					
S _B	明度変化飽和度: 最低明度(飽和時)に対 する明度変化量の比率	$S_B = \frac{\left(L_I - L_{t,n}\right)}{dL_{MAX}}$					
х	流下距離 : 鉛直面における水の流下 距離(mm)	なし					

の因果関係については未解明な部分が残されている ものの,試験条件の統一が比較的容易な室内試験で コンクリートの吸水抵抗性等との相関を有すること が実験的に確認されているほか⁷⁾,実構造物を対象と した実験で表面性状との関係性を示唆する結果など が報告されている⁶.

一方, 鉛直面で観測される水の流下現象に関して, 流下した水の到達距離がコンクリートの表層品質に 関する評価指標となる可能性が見出されている¹²⁾. すなわち,吸水抵抗性の劣るコンクリートほど水の 流下距離が短くなる傾向にあり,家辺らによる水の 流下試験⁵⁾による知見とも合致している.散水によっ て得られる各種の情報のうち,水の流下現象に特化 して構築した手法がA法で,明度変化に関する詳細 情報を活用した手法がB法となる.

(4) 散水試験による表層品質の判定

前節で示した評価指標は、意図的な散水によって コンクリート表面で引き起こされた吸水現象の詳細 把握,現象解明に繋がる可能性のある指標である. しかし、実構造物の調査や検査の実務における表層 品質の判定に資することを目的として、判定方法と 判定基準の確立に向けた検討が西尾らによって進め られている⁷⁾.

図-1.2.3に、B法の測定結果に水の流下現象の観測



結果を付記したデータの一例を示す". 散水の繰返し 回数nの増加に伴い,明度変化飽和度SBが高くなると ともに、水の流下距離xも長くなる傾向がある. そこ で、水の流下距離および明度変化飽和度が所定値に 到達するまでの散水回数によって表層品質の優劣を 判定する方法が考案された7). ここで,水の流下距離 および明度変化飽和度に関する暫定的な閾値として, 流下距離は20mmで確実に流下が生じたものとして、 明度変化飽和度は0.95でほぼ飽和したと見なすもの として、それぞれ設定すると、A法では流下距離 20mmに到達するまでの散水回数によって判定し,B 法では明度変化飽和度が0.95に到達するまでの散水 回数によって判定することになる.このように、「散 水の繰返し回数」が散水試験における判定指標とな り、表層品質の判定を行うための基準値、すなわち 「何回」という回数を設定し構造物を評価する方法 となる. 図-1.2.3を例にとると、A法での判定は「2 回」,B法での判定が「9回」という結果となる.

散水試験の散水回数に基づいた表層品質の簡易判 定においては、多くの影響要因が存在することが容 易に想定される.しかし、特に流下性状は散水方法 に強く依存することが明白であったことから、各種 影響要因の詳細検討の前に、効率的な散水方法の確 立に向けた検討が進められている⁷⁾.

(5) 簡便性に特化したA法に適した散水方法 散水試験では目視で観察できる流下現象の活用が



図-1.2.5 調査結果⁷⁾

作業性の面でもっとも効率的となる.そこで,散水 試験A法では,流下現象の観察に特化した散水方法 が検討された⁷⁾.当初,西尾らによる散水試験に関す る一連の研究では,B法で使用する測色機器の測定 領域が直径50mmの円形であったことから,散水試験 における基本的な散水形状はそれに5mmの余裕を加 えた直径60mmの円形とし,スプレーの先端に器具を 装着して散水形状を矯正して使用する方式が採用さ れてきた⁷⁾.西尾らは従来の円形での散水と,極端に 形状の異なる逆三角形の散水とで流下性状を比較す ることにより,散水形状に関する以下の知見を得て いる⁷⁾.

(1) 直径60mmの円形の場合は散水領域の最下端以外からも流下が生じるが、逆三角形の散水形状のように散水領域の下縁部を鋭角に近づけることで流下位置を最下端に導くことができる.ただし、その場合でも水は必ずしも真下に流下しない.



- (2) 散水領域の縁部を直線や曲率が一定でない曲線 などとした場合,散水位置のずれの影響が大きい.
- (3) 散水領域の上縁部の形状は、流下にはほとんど 影響しないと考えられる.
- (4) 吸水抵抗性が劣るコンクリートの場合, 滲みに よる散水領域の拡大が生じる.

一方,A法において「流下距離を測定する」ためには、測定者は散水しながらメジャーで測ることなどを求められることになる.つまり、B法で各種の情報を取得するために行う「計測」と同様に測定作業を伴うこととなるため、「流下距離の測定」は作業性の面で簡易とは言えない.そこで、西尾らは流下現象の観察を容易にすると同時に流下距離の測定の省略を可能とする散水方法を提案している⁷⁷.図 -1.2.4に、西尾らによって考案された散水形状と水の流下状況⁷を示す.

流下距離の計測を省略するためには、測定位置周 辺への目印や寸法の書込み、目標物の貼付けなどの 単純な方法が考えられる. 散水試験では同じ箇所で の散水の繰返しを行うため、測定位置のマーキング が不可欠となる. そのため, 目印の書込みなどの作 業を追加することが可能ではあるものの、そのよう な労力は極力抑えることが望ましい. そこで、考案 された方法が図-1.2.4 (a)に示した形状で散水する方 法であり,スプレー先端に装着する器具の形状を工 夫することで, 散水時の余剰な水分によって散水と 同時に目印を付加する方法である. 図-1.2.4 (a)に示 した散水形状の最大の特徴は、円形の散水領域が上 下に分割された点であり、下方の三日月状の領域が 上方のラグビーボール状の領域からの流下距離の目 安となる部分で,両者の距離は最短で20mmとなって いる.つまり,流下距離が20mmに到達しない段階(図 -1.2.4 (c))と20mmを超過した段階(図-1.2.4 (d))を 即座に視認することが可能な形状となっている. な お,図-1.2.4 (d)に示すように、上方から流下した水 が下方の三日月状の領域に到達した場合、下方の三 日月状の領域からさらに下方まで水が流下する状況 が多く見受けられる.一方,流下しにくいコンクリ ートでは滲みによって散水形状が徐々に拡大する (図-1.2.4 (e)). このように、図-1.2.4 (a)に示した 散水形状でのA法によって、流下の完了や流下しな いコンクリートの判定が非常に容易となる.

(5) 表層品質の簡易評価に対する散水試験の適用性 の検証事例

A法の散水回数に基づく簡易判定とB法の散水回 数ならびにトレント法による表層透気試験の結果を 比較した検証事例が西尾らにより報告されている^{1,7)}. 測定の対象は,屋外で施工された高さ約2.4mのRC高 架橋を模した実物規模のコンクリート試験体の柱で ある.20本の柱のうち代表的な4本の柱に対して,非 破壊での表層品質の測定が行われた.また,コンク リートの物質透過性に関する特性値として,材齢1 年程度で柱から採取されたコンクリートコアの一部 を利用し、塩水浸漬試験および促進中性化試験が行われた.

図-1.2.5に、西尾らによる測定結果⁷を示す.中 性化、塩化物の各係数が大きい柱試験体ほど、散水 試験による散水回数ならびにトレント法による透気 係数kTが大きい.物質透過に対する抵抗性が最も低 いS5では顕著に散水回数が多く、A法でも明瞭に判 別することができる.一方、B法およびトレント法 による測定結果はA法と比べて各試験体の物質透過 抵抗性の差異に対する感度が高い傾向が見られる. 西尾ら^{1,7}は、最も作業が簡易なA法を一次診断的に 活用することで耐久性上の問題が生じる可能性のあ るコンクリートを容易に選別できる可能性のあ るコンクリートを容易に選別できる可能性や、作業 性に優れたA法と散水試験のB法などを組み合わせ た実構造物の効率的な調査が実現する可能性に言及 している.

2.2 流水試験 12)

鉛直なコンクリート表面に複数回,水滴を垂らし, その流下距離を測定することでコンクリートの緻密 さを評価しようとする試験手法である.流下距離が 長いほどコンクリートへの吸水が小さかったものと みなし,密なコンクリート,すなわち緻密で表層品 質に優れるコンクリートという評価となる.



写真-1.2.1 流水試験の様子(専用の固定器具使用)

複数回水滴を垂らすことで、ある程度コンクリート内部まで水が浸透する.これにより表面の凹凸な ど、コンクリートの緻密さ以外の要因の影響が抑制 されることを期待している.あらかじめ流下経路を 鉛筆で罫書くことで、鉛筆の撥水性により流下時の 蛇行が抑制される.本研究内では試験の効率化のた め、専用の器具を用いた測定を実施している(写真 -1.2.1).

試験手順は以下の通りである.

- (1) ひび割れ等ができるだけ少ない位置を選定し、 測定位置をウエスで10回程度,強く拭く.
- (2) 鉛筆を用いて30cm程度の垂直線を5mm間隔で2 本引く.これを3回,場所を変えて繰り返す.
- (3) マイクロピペットを用いて、15µℓの水を1分間

隔で同位置に5回滴下する.滴下の際は、ピペットのチップとコンクリート表面が45度の角度となるようにする.それぞれの滴下から50秒後に流下距離を測定して記録する.

(4) 各滴下による流水距離の15データ(3か所×5回) の平均値が,評価に用いる流水距離となる.

2.3 表層透気試験(トレント法)⁸⁾

コンクリート表層部の透気性を非破壊試験により 測定し、かぶりコンクリートの品質を評価するもの である.トレント法の測定部は、内側チャンバーと 外側チャンバーを有する構造からなる.コンクリー トの透気性は、外側チャンバーによって内側チャン バーへの空気の流入が除かれ、圧力差によって算出 される透気係数によって評価される.詳細は、スイ ス標準規格SIA262/1に示されている.以下に内容を 示す.



写真-1.2.2 表層透気試験(トレント法)の様子

(1) 表層透気試験の測定区画

同一の透気係数kTが規定される範囲内を一区画 として扱う.同一区画内では以下が前提となる.

- 同じ区分(強度クラス,環境区分,粗骨材最大 寸法など)のコンクリートが用いられていること
- 同様の施工方法(打込み,締固め,養生)が行われていること。

(2) 表層透気試験の測定数

それぞれの測定区画に対して,暴露面の面積 500m²あたり1つ以上,かつ,コンクリートの打込み 3日間で1つ以上の測定ロット数が必要である.1つの ロットでは,無作為に抽出した6点で測定を行う(図 -1.2.6).ただし,局所的な影響や試験への影響を避 けるため,対象区域の上下端から各150mm,左右端 から50mmは測定対象としない.また,それぞれの測 定点の間隔は200mmよりも大きくする.

測定数を増やすほど検査精度は向上するがコスト が増加するため、これまでの経験から合理的と考え られる必要十分な測定数が設定されている.

(3) 表層透気試験の測定箇所

測定箇所の選定および測定においては,以下を考 慮する.

- 表面保護処理の有無を確認し、保護処理がされている場合には、可能な範囲で除去して、コンクリートそのもの品質と保護処理の効果を測定する。
- 表面から20mm以内には鉄筋などの埋設物がない箇所を選定する.
- コンクリート表面が粗すぎる場合には、平滑にしてから測定する.
- 測定前には、硬いブラシか固く乾いたスポンジ でホコリを除去する。
- 事前にアルコールの噴霧などでひび割れ調査を 行い、ひび割れが確認された場合には測定箇所 をずらす.すなわち、測定対象はコンクリート そのものの品質とし、ひび割れ自体の影響は必 要に応じて別に検討する.
- 測定箇所にはマークングをし、同一箇所での二 重測定を避けるとともに、異常値が出た場合の 分析に使用する。

(4) 表層透気係数の基準値

表層透気係数の基準値kTsは、コンクリートの強度 クラスや環境区分とともに規定されている. 透気係 数の設定は3段階で、①設定なし、②2.0×10⁻¹⁶m²(厳 しい中性化環境や穏やかな塩害環境など)、③ 0.5×10⁻¹⁶m²(厳しい塩害環境など)である. この基 準値は推奨値であり、技術者の判断によって変更が できるとされている.

なお、この推奨基準値は、これまでの実構造物の 検査実績からはほとんどの構造物が満たしていた、 比較的緩い数値である.2006年のJacobsの提案値か らもおおむね緩和されている.これは、まずは実務 への普及を第一に考え、著しく品質の劣るコンクリ ートの排除を当面の目標として設定されたものであ る. 今後、試験の実施が一般化し、データの蓄積が 進んでいけば、基準値などの見直しも進められる.



図-1.2.6 透気試験の測定位置¹³⁾

(5) 表層透気係数の適合性評価

適合性評価のための判定基準は、2段階で与えられている.まず、1ロット6測定点のうち5測定点以上の 透気係数kTが基準の透気係数kTs以下であれば合格 となる.もしも2点以上がkTsを上回った場合には、 同一ロット内において,新たに6点の追加測定を無作 為に行うこととなる.そして,追加測定した6点のう ち5点以上のkTがkTs以下であれば合格となる.追加 測定でも基準を満たさなかった場合には,不合格と なる.

適合性評価において不合格と判定された場合には, 対象のコンクリートの品質に関する情報を収集して 分析するとともに,かぶり厚さの非破壊計測やコア の採取などの追加の調査を実施し,必要な対策を検 討することとなる.

(6) 表層透気試験を実施するコンクリートの状態

透気試験は,温度や含水状態の影響を受けて結果 が大きく左右されることがある.透気試験にあわせ て測定した電気抵抗値による補正の提案もあるが, 本指針では,実務への簡便な適用を第一とし,温度 や含水率が結果に与える影響が小さい範囲内での測 定を規定している.

・試験材齢

材齢28日(反応の遅い粉体では60日)〜90日 ・温度

コンクリートの表面温度が10℃以上であること. ただし,熟練者は,必要であれば5~10℃の範囲でも 測定できる.また,試験装置に直射日光が当たらな いようにすること.

・水分

表面接触電気抵抗試験によって計測したコンクリートの絶対含水率が5.5%以下.これは、養生の終了から3~4週間が経過し、雨や霜などによる水の接触から2~5日以上経過したときにおおよそ満たされるのが標準である.

2.4 表面吸水試験(SWAT法)⁹⁾

ー定時間にコンクリートが吸収する水の量を測定 することで、コンクリートの吸水性状を評価する試 験である.吸水量が少ないほど密なコンクリート、 すなわち緻密で表層品質に優れるコンクリートとい う評価となる.

コンクリート表面に吸水用のカップを設置し、そ の吸水量から吸水性状を評価する.吸水量は水位の 低下量から算定可能であり、水位は圧力センサーに より自動計測され、測定結果はパソコン上に記録さ れる.カップをコンクリート表面に設置するための フレームは、真空吸引により固定される.

測定手順は以下の通りである.

- (1) 真空吸引によりコンクリート表面に固定用フレームを取り付ける.このフレームから反力を取る形で、コンクリート表面にカップを設置する.
- (2) カップ内に注水し、測定を開始する.測定の様 子を写真-1.2.3に示す.カップ内の水はコンク リート表面に吸収され、吸水量はカップから上 部に伸びたパイプ内の水位の低下から評価す



写真-1.2.3 表面吸水試験(SWAT法)の様子⁹⁾

2.5 吸水試験

吸水性状に着目したコアを用いた吸水試験に関し ては、各研究者の独自手法で行われている場合が多 いが、海外では、ASTM規格のほかに、RILEM TC 116-PCD (RILEM規格), BS1881 -122(BS規格)など, 標準化された試験法がある. 試験の詳細は規格によ って異なるが、まず、吸水試験時の水分移動の方向 が規格によって異なっている.BS規格は供試体全体 を浸水させて試験を行う. ASTM規格とRILEM規格 は、供試体の一面のみを吸水させ、試験を行う. こ こで,水の移動に重力が影響する可能性があるが, 古賀は, 鉛直下向き方向の吸水の場合, 供試体内部 に目視では確認できない欠陥が生じている場合に試 験結果に大きな影響を及ぼす可能性があることから, 鉛直上向き吸水を推奨している.BS規格は、重力方 向への吸水も存在するので、重力の影響が考えられ る. それに対して, ASTM規格とRILEM規格は鉛直 上向きの試験を行うので、重力の影響は排除できる と思われる.鉛直上向き吸水の試験において、代表 されるASTM規格とRILEM規格に関して、供試体寸 法や吸水時間に違いはあるものの. 最も試験結果に 影響のある違いは試験前の含水率調整である. ASTM規格は、供試体を真空環境下で飽水させ、気 温50℃±2℃,相対湿度80%の環境で3日間,その後15 日以上23±2℃の環境下で密封容器内に静置する.15 日以上静置することで、供試体内部の相対湿度分布 が50%程度で一様になるとされており、この相対湿 度は屋外構造物の表面付近で見られる相対湿度と同 程度であると報告されている.また、この含水率調 整における飽水処理によって、供試体内部の湿度履 歴を排除できるとの報告がある.また,異なる湿度 履歴の供試体を用いて適切な前処理をせずに吸水試 験を実施した場合には、その湿度履歴が大きく影響 することも報告されている.一方, RILEM規格は, 吸水試験用供試体とは別に供試体を用意し、気温 20℃,相対湿度75%の環境での平衡状態の含水率を 求める.次に吸水試験用供試体を気温50℃の環境下 で,先に求めた含水率相当の質量になるまで乾燥し, その後、供試体をシールし、気温50℃の環境下で14 日以上静置する. RILEM規格は, 吸水試験以外の供

試体を別に用意する必要がある.実務を考慮すると, 他の供試体を用意することは,困難である.また, 吸水試験前に,飽水処理をしないため,湿度履歴の 影響が排除できない可能性がある.

ASTM規格は、RILEM規格と異なり、2013年版で 飽水処理が追記されるなど規格の改定、修正が行わ れており、より詳細な評価が可能であると思われる. また、RILEM規格は評価指標が明確化されていない ため、本研究ではASTM規格を選定し、試験を行う.

ASTM規格の吸水試験は、耐久性指標として初期 吸水速度係数と二次吸水速度係数を定義している. それぞれ、吸水量の増加量と吸水時間の平方根の傾 きであるが、吸水時間の範囲が異なる.初期吸水速 度係数は、1分後から6時間後、二次吸水速度係数は1 日後から7日後までである.次にASTM規格の吸水試 験の詳細を示す.

·供試体寸法

直径100mm±6mm, 高さ50mm±3mmの円柱供試体(も しくは構造物から採取したコア供試体)を少なくと も2体

含水率調整

飽水:ASTM C1202-12に規定された真空飽水処理 を行う.真空デシケータ内に供試体を入れて真空ポ ンプで吸引し,デシケータ内の気圧が6650Pa以下と し3時間放置する.その後,真空ポンプを稼働しなが ら,供試体が水没するまで,水を注入し,1時間放置 し,真空ポンプを停止する.デシケータ内に空気を 戻し,1日放置.

乾燥:上記の飽水後,供試体を気温50±2℃,相対 湿度80±3%の環境下で保管する.使用した乾燥炉を 写真-1.2.4に示す.その後,密封容器に供試体を入れ, 気温23±2度の環境下で15日以上保管する.



写真-1.2.4 乾燥炉

·吸水試験

含水率調整後,供試体寸法を測定する.その後, 吸水試験中に供試体が乾燥するのを防ぐために側面 をアルミテープで覆い,上面はラップをかぶせて, 質量を測定する. その後,下面から吸水させ,吸水 開始から1,5,10,20,30分1,2,3,4,5,6時間, 1,2,3,4,5,6,7,8日後の質量を測定する. 写 真-1.2.5に吸水試験の様子を示す.



写真-1.2.5 吸水試験の様子

参考文献

- 西尾壮平:コンクリート表層部の物質透過性に関する 非破壊評価技術,鉄道総研月例発表会講演要旨, 2014.9
- 2) 西尾壮平ほか: コンクリート表層品質の簡易な非破壊 評価手法の開発,鉄道総研報告, pp.5-10, 2014.2
- 3) 西尾壮平ほか:表面色によるコンクリート表層部の物 質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討,コン クリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1751-1756, 2011.
- 4) 西尾壮平ほか: コンクリート表面における散水時の明 度変化特性および水の流下特性による表層品質の非 破壊評価,セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.303-310, 2013.
- 5) 西尾壮平ほか: コンクリート表面における散水時の明 度変化と水分の挙動に関する基礎的検討, コンクリー ト工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1807-1812, 2013.
- 6) 西尾壮平ほか:コンクリート表面への散水時の明度変化に着目した表層品質の簡易評価手法の検討,第56回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp.11-12,2012.
- 7) 西尾壮平: 散水によるコンクリート表層品質の簡易判 評価,鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016
- Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, V.25, No.6, pp.358-365, 1992.7
- 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.
- 10) 土木学会:構造物表層のコンクリート品質と耐久性能 検証システム第二期成果報告書およびシンポジウム 講演概要集,コンクリート技術シリーズ97,2012.
- 半井健一郎ほか: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、コンクリート工学、Vol.51, No.2, pp.153-158, 2013.
- 12) 家辺真理子ほか:水の流下試験によるコンクリート表 層の品質評価に関する研究,コンクリート工学年次論 文集, Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012.

13) 半井健一郎ほか:かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査--スイスにおける指針--,コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011.

第3章 1次検査に用いる非破壊試験(簡易法)

3.1 はじめに

散水試験¹⁾⁻⁷⁾による簡便な迅速判定手法に関して, 室内試験や新設道路構造物を対象として取得したデ ータを取りまとめ,特に早期判定の有効性を検証す るとともに,判定基準を整理し,検査指針(案)の 作成を行った.

3.2 散水試験による早期判定の検討

室内試験において,散水試験を活用にした早期の 品質判定を検討した.

セメント種や養生を変化させて散水回数の経時変 化を測定した.まず,例として,普通ポルトランド セメントや高炉セメントを用い,水セメント比を 50%または55%,封緘養生期間を1日,7日,28日と した場合の測定結果を図-3.2.1,3.2.2に示す.時間 の経過とともに散水回数は増加し,養生期間の影響 による差も経時的に大きくなっていく傾向が見られ るが,最終的には多くの測定で上限と設定した20回 に到達した.

次に、本研究で得られた結果を整理し、封緘養生を 施したのち、脱型後1日、7日、28日、91日に散水試 験を実施して得られた散水回数を,材齢3カ月におけ る表層透気試験結果と比較した.その結果、脱型直 後においては、低品質のもの(kT>1.0⁻¹⁶m²)に限っ ては散水回数が大幅に増加し、容易に抽出できるこ とが分かった.その後、乾燥期間が増えるにしたが って、中間的な品質(1.0>kT>0.1⁻¹⁶m²)のコンクリ ートの散水回数が増加し、品質差が適切に抽出でき るようになった.特に、脱型後28日時点で相関が高 くなった.しかし、脱型後91日となると、散水回数 の上限として設定した20回に到達するものが多くな り、見かけ上、相関としては低下した.

以上より,低品質のものを抽出するという目的で は,脱型1日などの早期の判定が可能であり,1次検 査としての散水試験の有用性が示された.



3.3 新たな評価指標の検討

(1) はじめに

これまでの室内試験や新設道路構造物を対象とし て取得したデータからは、散水回数によって散水試 験結果を評価する場合、散水試験機の噴霧量の違い が結果に大きく影響する可能性が明らかになった. そのため、新たに室内試験を実施し、従来の散水回 数ではなく、総噴霧量(流下までの総吸水量)によ る評価を検討した.



(2) 実験概要

4台の散水試験装置を用意し,異なるセメント種類 や水結合材比,養生条件において,散水試験と表層 透気試験を実施し,散水試験の妥当性を検討した. 使用材料として,普通ポルトランドセメント (OPC)と高炉セメントB種(BBC)をセメントと して用いた.80×30×20cmの角柱供試体を作製し, 養生は,1日,7日,28日の封緘養生とし品質を変動 させた.測定は鉛直面で実施した.いずれもおよそ 半年以上が経過して十分に乾燥が進行し,非破壊試 験による計測値が安定していることを確認した.表 層透気係数と散水回数を測定したが,表層透気試験 を先に実施し,5分以上経過してから散水試験を実施 することで,同じ個所で測定しても両者が影響しあ うことのないように配慮した.

(3) 噴霧量の測定

噴霧量の異なる4台の散水試験装置(A, B, C, D) を用いて散水回数を測定した.噴霧量をWとし,そ れぞれの装置における値を図-3.3.1に示す方法にて 測定をした.測定対象は,流下を決定する上部の楕 円領域として,乾燥した吸水紙にて計測を行った.



図-3.3.1 噴霧量Wの計測

噴霧量Wは、それぞれ装置において10回計測をして、平均値を求めた.また、今回の実験の開始前、 実施中、終了後の3つのタイミングでも計測し、値の 安定性を検討した.その結果、図-3.3.2に示すように、 それぞれの散水試験装置としては計測値が安定して おり、値のずれは非常に小さいことが確認できた.



(4) 個別の散水試験の結果

表層透気試験および散水試験で得られた表層透気 係数kTと散水回数rNの関係を図-2.3.3に示す.なお, 平均値から大きくかい離した異常値はあらかじめ削 除した.それぞれの散水試験機ごとに結果をみると, 散水回数は表層透気係数と極めて高い相関があるこ とが分かる.つまり,安定した噴霧量Wによって測 定をすることによって,散水試験は簡易な方法であ りながら,詳細法として位置づけた表層透気試験の 代替えとなる可能性を示した.

一方で、図-3.3.3に得られた関係性は、散水試験装置に大きく依存した. 散水回数はA, B, C, Dの順に大きくなり、全体を包含する関係性については高い相関係数が得られなかった. 先に示した図-3.3.2とあわせて考えると、噴霧量Wが小さいほど散水回数rNが大きくなっていることが分かる.



(5) 散水試験装置の差異についての分析

散水試験装置によらずに汎用性の高い評価手法の 検討を行うために追加検討を行った.先に示したよ うに,現状の安価な散水試験装置では噴霧量Wに大 きなばらつきがあり,このばらつきが散水回数に大 きな影響を及ぼしている.そこで本研究では,散水 試験装置の差異を考慮した統一的な評価指標として, 総噴霧量rWを用いることを考えた.この総噴霧量rW は以下の式で計算する.

$$rW_i(j) = rN_i(j) \times W_i(j)$$
(1)

ここで, rW_i(j): 散水試験装置jにおける総噴霧量(g), rN_i(j): 散水試験装置jによって測定された散水回数 (回), W_i(j): 散水試験装置jにおける1回当たりの 噴霧量(g), j: 散水試験装置の名称

新たに提案した評価指標である総噴霧量rWは,散 水試験装置の違いによらずに,コンクリートの表層 品質を評価できるとよい.図-3.3.4においては,散水 回数と1回当たりの噴霧量の関係をコンクリートの 品質ごとに示すとともに,総噴霧量の平均値から得 られる両者の比例関係をあわせて示した.測定値は おおむね比例関係にあり,総噴霧量による評価が可 能であることが示された.



さらに図-3.3.5では、新たに提案した評価指標である総噴霧量rWと表層透気係数kTとの関係を整理した. 散水試験装置の違いによらずに、総噴霧量と表層透気係数は高い相関を有することが確認された.



3.4 測定者の違いが結果に及ぼす影響

これまでの検討において散水回数rNと透気係数 kTの間に正の相関が見られ,散水試験の有効性を確認してきたが,昨年度の検討において示したように, 散水試験結果は,噴霧量Wが散水試験装置の個体差 や状態に依存することが明らかになった.散水試験 装置に制御部品を追加することで,Wの変動に伴う 問題を解決する可能性はあるものの,簡便性を失い, コストの大幅な増加につながるため,もともとの思 想と乖離する.ここでWの変動は,それぞれの散水 試験装置と測定者の技術の影響を大きく受ける.そ れぞれの散水試験装置の水量が生産と校正の過程に 依存するのに対し,測定者の技術は,測定者自身の 経験とマニュアルの有用性に依存する.したがって, この方法の研究と開発において、測定者の技術がWとrNに与える影響を評価することが重要である.

よって,測定者の技術がWとrNに与える影響を調 査することとした.3つの異なる散水試験装置につい てWの量を測定し,WとrNの関係性を求めた.測定 は,道路構造物の維持管理を業務とする技術者の協 力を得て行った.なお,この調査と並行して,作成 した測定要領の妥当性を確認することとし,次に述 べる技術向上のためのステップを設けた.

測定者の技術の影響を調べるために,3つの練習段 階を通して,4人の初心者が2つの散水試験装置を用 いて測定し,得られた結果を比較した.得られた結 果は以下のとおりである.

散水試験において,測定者の技術は,WとrNの因 子に多大な影響を与える.熟練測定者と測定要領 (案)を用いて練習をすることで,測定者の技術に よる影響を小さくできる.

もともと散水量Wが多い装置は、Wが少ない装置 に比べて、測定者の技術による影響を受けにくい.

3.5 まとめ

室内試験および実構造物の調査を行い,簡易法と しての散水試験の有効性を検証し,測定要領(案) を作成した.

参考文献

- 1) 西尾壮平: コンクリート表層部の物質透過性に関する 非破壊評価技術, 鉄道総研月例発表会講演要旨, 2014.9
- 2) 西尾壮平ほか:コンクリート表層品質の簡易な非破壊 評価手法の開発,鉄道総研報告,pp.5-10,2014.2
- 3) 西尾壮平ほか:表面色によるコンクリート表層部の物 質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討,コン クリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1751-1756, 2011.
- 4) 西尾壮平ほか:コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価,セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.303-310, 2013.
- 5) 西尾壮平ほか: コンクリート表面における散水時の明 度変化と水分の挙動に関する基礎的検討, コンクリー ト工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1807-1812, 2013.
- 6) 西尾壮平ほか:コンクリート表面への散水時の明度変 化に着目した表層品質の簡易評価手法の検討,第56回 日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集,pp.11-12, 2012.
- 7) 西尾壮平: 散水によるコンクリート表層品質の簡易判 評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016.

第4章 2次検査に用いる非破壊試験(詳細法)

4.1 はじめに

表層透気試験(トレント法)とともに表面吸水試 験(SWAT法)を用い,国内の新設道路構造物を対 象として取得したデータを取りまとめ、測定結果の 経時変化を追跡・分析することにより、適切な実施 時期の検討を行った.

4.2 実構造物および模擬試験体における経時計測

(1) はじめに

群馬県発注で館林にて建設されたボックスカルバ ートの現場において,実構造物のすぐそばに現場の ボックスカルバートと同じコンクリートで附属の試 験体を3体作製し、測定を行った.表-4.2.1にそれぞ れの現場で使用されたコンクリートの配合を示す. 養生条件を3水準設定した.ボックスカルバートと同 様に脱型後にビニールシートによっておよそ3カ月 間の封緘養生(長期養生),示方書相当の養生(標 準的養生, 普通ポルトランドセメントは5日で脱型を 行い, 高炉セメントB種は7日で脱型を行った), お よび1日で脱型後に気中曝露(早期脱型)の3水準で

	W/C	フニンプ	単位量(kg/m3)				
配合名	(%)	(cm)	水(W)	セメント (C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	
現場1 (普通ポルトランドセメント)	55.00	8.0	162	295	816	1029	
現場2 (高炉セメントB種)	52.50	8.0	159	303	795	1042	

表-4.2.1 2ヶ所の現場の配合表





ある. 図-4.2.1に試験体の概略図を示す. 現場2の試 験体の部材厚さは600mm, 現場1の試験体の部材厚さ は400mmで,いずれも実構造物と同じ断面厚さであ る. 配筋も実構造物と同様とした. 材齢1ヶ月から材 齢2年程度まで, 表層透気試験などによる経時的な測 定を行った. また, 材齢2年では,ドリル削孔法によ る中性化深さ計測を行った.

各試験体は,普通ポルトランドセメントを用いた 現場1においては,長期養生をN-3m,標準的養生を N-5d,早期脱型をN-1dとし,高炉セメントB種を用 いた現場2においては,長期養生をB-3m,標準的養 生をB-7d,早期脱型をB-1dとした,また,実ボック スカルバートについては,それぞれN-BoxとB-Box とした.

(2) 測定結果:炭酸化深さ

測定した中性化深さから,次式で示される√t則に 従って中性化速度係数Aを求めた.

 $x = A\sqrt{t}$

ここで, x :時間t (月)の時点における測定した中 性化深さ(mm), A :中性化速度係数(mm/ $\sqrt{1}$)である.



図-4.2.2は、各条件で5つの計測データの平均値に 対する炭酸化進行を、√t則を適用して示している. 現場2の高炉セメントを使用した場合(図-4.2.2(b)) には、従来の研究でも指摘されているように、普通 ポルトランドセメントを用いた場合(図-4.2.2(a)) よりも炭酸化の進行速度が速くなった.本研究にお いては、平均で1.6倍の中性化速度係数となった.養 生の影響に関しては、普通ポルトランドセメントを 用いた場合には、早期脱型の影響によって1.3倍となったものの、長期養生の効果は明らかではなかった. 一方、高炉セメントを用いた場合には、養生の影響 が顕著に表れた.長期養生をした場合の中性化速度 係数は、標準的養生の0.8倍、早期脱型の0.5倍であった.

(3) 測定結果:含水率

非破壊で計測したコンクリートの表面含水率は, 図-4.2.3に示すように,時間とともに低下した.含水 率の低下は,乾燥開始直後の材齢初期で速く,その 後は,緩やかとなった.カルバートの内壁を測定対 象とした実構造物においては,含水率の低下が付属 試験体よりもやや緩やかであった.材齢27カ月時点 ではほぼ安定し,養生の違いも小さくなった.セメ ント種類の違いについては,高炉セメントの方(図 -4.2.3(b))が普通ポルトランドセメント(図-4.2.3(a)) よりも低い値となった.



さらに、付属試験体においては、内部の含水率分 布を2.6カ月時点で微破壊試験によって計測した.そ の結果を図-4.2.4に示す.表面付近では含水率が低下 しており、封緘養生が完全ではなかったことを示し た.一方、1日脱型の試験体N-1dとB-1dにおいては、 表面から50mmの深さまで顕著な含水率の低下が確 認された.セメント種類については、やはり高炉セ メントを使用した場合(図-4.2.4(b))の値が小さく なった.これは単位水量や水セメント比がやや小さ いという配合上の特徴に加え、電気抵抗が増加した ことによると考えられた.



(4) 測定結果:表層透気係数

測定された表層透気係数の変化を図-4.2.5に示す. 透気係数は、時間とともに増加し、特に、材齢2.6カ 月から7.4カ月の間に大きく変化した.この間、養生 の違いによる透気係数の差は小さくなった.透気係 数の増加は空隙中の自由水の逸散によるものであり、 水和による緻密化よりも顕著な影響を与えている. セメント種類に関しては、普通ポルトランドセメン トを用いた場合の方が小さくなる傾向を示した.図 -4.2.6は表層透気係数と表面含水率の関係をまとめ たものである.普通ポルトランドセメントを用いた 場合には、養生によらずにほぼ同一の関係が得られ、 透気係数の変化は含水率の変化で説明された.一方、 高炉セメントを使用した場合には、1日脱型の試験体 B-1dの傾向が乖離し、養生不足によって組織構造に も大きな影響を与えたことが示唆された.





図-4.2.6 表面吸水率と表層透気係数の関係

図-4.2.7は材齢2.6カ月と39カ月における表層透気 係数と図-4.2.2から求められた中性化速度係数の関 係である.測定材齢ごとに近似直線を与えると,い ずれも高い相関係数が得られた.すなわち,表層透 気係数は養生方法やセメント種類によらず,耐久性 を評価するための適切な指標となることがあらため て確認された.なお,相関は材齢が経過するほどに 高くなった.すなわち,スイス規格に規定された1 ~3カ月程度の材齢であっても,おおむね良好な相関 が得られるものの,より乾燥が進行してからの測定 の方が,精度が向上することを意味する.図-4.2.5 からは,材齢6カ月(乾燥3カ月)以降に表層透気係 数は安定しており,耐久性の評価指標としても精度 が向上したと言える.



(5) 測定結果:表面吸水量

吸水特性は,詳細法として検討している表面吸水 試験SWAT,簡易法の散水試験,および採取コアを 用いた室内吸水試験(ASTM C 1585に準拠)の3種類 の試験によって検討した.(4)での検討で,表層透気 試験の有効性が示されたことから,以下では,表層 透気係数と吸水特性の比較を行った.

まず,図-4.2.8には,材齢2.6カ月と39カ月で実施 したSWATで求めた6分吸水量と表層透気係数の関 係を示す.両者は高い相関を示し,SWATの有効性 を確認することができた.詳細に見ると,材齢2.6カ 月ではSWATの測定値は感度がやや低く,物質透過 性が低いコンクリートの細分化が難しかった.材齢 39カ月では,一部の結果が養生の良否と反転したた めに相関係数は低下した.これは,長期養生によっ て表面に微細なひび割れが発生し,ダブルチャンバ ーのような表面の影響を緩和する構造の無いSWAT では測定結果に影響を与えたものと考えられた.



図-4.2.8 SWATで計測した吸水量と表層透気係数の関係 (材齢2.6および39カ月)

次に,散水試験から得られた散水回数と表層透気 係数の関係を図-4.2.9に示す.材齢2.6カ月において は両者に高い相関があり,簡易な散水試験の有効性 を示した.一方,材齢39カ月では相関が大きく低下 し,散水試験は表層品質を適切に評価できなかった. 前述した通り,材齢長期の試験体には表面に微細ひ び割れを生じていたものもあり,表層の数mm程度の 領域を評価対象としている散水試験では,表面状態 の影響を強く受け,長期乾燥による微細ひび割れが 表面に生じてしまう場合には適用が難しいことが確 認された.



図-4.2.9 散水試験回数と表層透気係数の関係 (材齢2.6および39カ月)

材齢2.6カ月時点で採取した標準コアに対して ASTM規格に準拠して求めた初期吸水速度係数と表 層透気係数の関係を図-4.2.10に示すが、良い相関は 得られなかった. 普通ポルトランドセメントと高炉 セメントを使用した場合のそれぞれにおいては、一 定の関係性が示唆されたが、相関は十分に高くなら なかった. この理由は明らかではなく、次章の室内 試験において詳細に検討することとした.



(6) まとめ

館林に建設されたボックスカルバートの内壁および付属試験体について表層透気試験を始めとする各種試験を適用し、データを詳細に分析して試験の有効性を検証するとともに、適切な試験材齢を検討した.その結果、提案する試験手法は耐久性評価のために有効であることが確認できた一方で、材齢とともに精度は異なった.表層透気試験の場合には、スイス規格の1~3カ月程度の材齢でも良い相関が得られたが、半年程度以降の方がより高い精度での評価が可能であった.一方、SWATや散水試験の場合には、長期になると評価精度が低下した.これは、長期の乾燥によって表面に生じた微細ひび割れの影響であることが考えられた.

4.3 中規模試験体における詳細分析

(1) はじめに

別の研究プロジェクトにおいて複数の養生条件・ 材料配合で作製され、屋外に暴露された中規模柱試 験体を用い、94ヵ月間にわたる継続的な計測を実施 することで、降雨の影響の有無も含めた表層品質の 経年変化を検討した.さらに、劣化因子の移動経路 となる空隙構造を分析することで、養生方法や材料 配合がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響に ついて多角的に検討した.

なお、ここに記載の成果は、別の研究助成による 成果を含んでおり、全体を取りまとめて「横山勇気・ 酒井雄也・岸利治:屋外暴露された中規模柱試験体 を対象とした表層品質の継続的計測および空隙構造 分析による養生効果の検証、コンクリート工学年次 論文、2019」として発表された.

(2) 試験体概要

本検討では屋外に暴露された中規模RCラーメン 模擬高架橋を用いた(写真-4.3.1).この模擬高架橋 は,複数の養生条件・材料配合で作製された柱試験 体20本から構成されている.柱試験体の概要を表 -4.3.1,配合,スランプ,空気量の試験結果を表-4.3.2, 形状・寸法を図-4.3.1に示す.試験体の半分(写真

試験体名	セメ ント 種類	水セ メン ト比 (%)	養生 方法	養生終了時の 材齢(日)
N32 早期	N	22.0	早期脱型	1
N32 標準	1N	32.0	示方書相当	5
BB57.5 早期	DD	57 5	早期脱型	1
BB57.5 標準	BB57.5 標準		示方書相当	7
N58 早期			早期脱型	1
N58 標準	N	58.0	示方書相当	5
N58 密封			密封	28
N58 給水			給水	28
N64.8 標準		64.8	示方書相当	5

表-4.3.1 柱試験体の概要



-4.3.1の左奥側)は夏季に、半分(写真-4.3.1の右手 前側)は冬季(2010年3月4日)に施工されており、 上部はスラブで覆われている.夏季施工分のスラブ 下面には水切りが設置されており、冬季施工分には 水切りがない.本検討では、同一の柱試験体で降雨 の影響の比較検討が可能である冬季施工の柱試験体 を検討対象とした. セメントには、普通ポルトラン ドセメント (N, 密度: 3.15g/cm³) または高炉セメ ントB種 (BB, 密度: 3.04g/cm³) が使用されている. 水セメント比(W/C)は、Nを使用した試験体では 32.0%, 58.0%, 64.8% (W/C58.0%の打込み時に約 20kg/m³加水)の3種類, BBを用いた試験体では57.5% の1種類に設定されている. 柱試験体の高さは 2800mm, 断面は300×400mmである. かぶり厚さは 47mmであり、主筋はD13を6本、配力筋にはD10を15 本配している.Nを使用しW/Cを32.0%とした柱試験 体においては,目標スランプフローが60cm,その他 の柱試験体では目標スランプが12cm、目標空気量に ついては全ての試験体で4.5%に設定されている.細 骨材には茨城県神栖市産の砂S1(表乾密度2.60g/cm³, FM2.20)と栃木県佐野市産の砕砂S2(表乾密度 2.70g/cm³, FM3.20) を7:3で混合した砂, 粗骨材G には茨城県笠間市産の砕石G1(表乾密度2.65g/cm³, 実積率60.0%)と栃木県佐野市産の石灰砕石G2(表 乾密度2.70g/cm³,実積率60.0%)を1:1で混合した ものを使用した. 混和剤Adlにはリグニンスルホン 酸とオキシカルボン酸の複合AE減水剤, 混和剤Ad2 にはポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤 を用いた.

柱試験体の作製にはレディーミストコンクリート を使用し、ポンプ圧送による打込み後、振動締固め を実施している.打込み時のコンクリートの温度は 11.2~13.6℃、外気温は7.6~9.6℃であった.養生方 法は、早期脱型(材齢1日にて脱型)とコンクリート 標準示方書相当の養生(Nでは5日脱型,BBでは7日 脱型)の2水準を基本とした.Nを用いW/Cを58%と した柱試験体は、養生による影響を比較するため、 密封養生(材齢5日にて脱型後、フィルムにより材齢 28日まで密封)や給水養生(材齢1日にて脱型後、養



写真-4.3.1 中規模RCラーメン模擬高架橋

生マットにより材齢28日まで水を供給)の条件も加 えている.なお後述するように、この柱試験体では 過去に表層品質に関する複数の試験が実施されてい る^{1,2}.



図-4.3.3 降雨の影響がある箇所のkTの経年変化

(3) 測定概要

本検討では表層透気試験(Torrent法)³⁾と林,細田 らによって開発された表面吸水試験(Surface Water Absorption Test)⁴⁾を用い,柱試験体の表層品質を評 価した.

透気性の観点から表層品質を評価するため、表層 透気試験を実施した.本検討では、表頭透気試験に よって得られる表層透気係数kTを評価指標とした. 試験は材齢の1~6,9~10,56,94ヵ月時点にて,試 験体の外側に面した降雨の影響がある箇所と、試験 体の内側に面した降雨の影響が無い箇所で実施した. なお、降雨の影響が直接作用しない箇所でも夜間に 気温が下がり,試験体表面に露が付着する可能性が ある. 測定位置の高さは1000~1350mmとし、1~3 点の測定点数の平均値を用いて評価した. 検討対象 となる冬季施工の柱は、材齢半年までの降雨の影響 が無い箇所におけるkTの経時変化が蔵重ら¹⁾, 材齢 10ヵ月時点でのkTが家辺ら²⁾により報告されている. 測定を実施する季節によりkTの値が変動すること も予想されるが、材齢9~10ヵ月、56ヵ月、94ヵ月の 測定は11~1月の期間で実施している.

吸水性の観点からも表層品質を評価するため、表

面吸水試験を実施した.本検討では,注水完了時から10分間の吸水量⁵⁾を評価指標とした.試験は材齢95 ヵ月の時点にて実施し,測定箇所は,表層透気試験 と同様に降雨の影響のある箇所と降雨の影響のない 箇所とした.測定位置の高さは1000mm,1350mmの 2か所とし,2点の測定点数の平均値を用いて評価した.

本検討では空隙構造を分析するため、水銀圧入ポ ロシメトリー(MIP)を用いた.MIPで使用するコア サンプルは、各柱試験体の高さ1000mmの箇所より材 齢96ヵ月の時点で採取した.コアサンプルの採取後、 表層から深さ50mmまでを10mm間隔で切断し、粗骨 材が含まれていないことや、細骨材が大半を占めて いないことに注意しつつ5mm角程度の立方体となる よう整形した.その後、試料をアセトンに24時間浸 漬し、D-dry法により24時間乾燥させ分析した.細孔 径が10nmに相当する圧力を超えると細孔が破壊さ れる可能性が指摘されているための、本検討で測定す る空隙の最小径は10nmとした.また、細孔空隙の中 でも物質移動に関与すると考えられている閾細孔径 ⁷を算出するに当たり、本検討では酒井らの手法⁸を 参考とし、セメントペースト体積の16%に相当する

粗骨材	+7 ×	7 =	水セ	空	- 単位量(kg/m ³)								
の最大	25	ヘノ	メン	気	和自	74	セメン	細骨材	細骨材	粗骨材	粗骨材	混和剤	混和剤
寸法	ゴー	(cm)	ト比	量	17 4	W	۲	1	2	1	2	1	2
(mm)	作主大只	(em)	(%)	(%)	(70)	vv	С	S_1	S_2	G_1	G ₂	Ad ₁	Ad ₂
20	N	59.5*	32.0	4.5	47.4	170	532	530	238	429	437	-	8.78
		13.0	58.0	4.7	45.2	168	290	572	254	506	513	2.90	-
		22.0	64.8	5.8	45.2	184	284	560	249	496	503	2.84	-
	BB	14.5	57.5	5.1	44.9	167	291	567	251	506	513	2.91	-

表-4.3.2 柱試験体の配合, スランプ, 空気量の試験結果

*:スランプフロー値



水銀が圧入された時点の細孔直径を閾細孔径とした.

(4) 測定結果:表層透気係数

図-4.3.2に降雨の影響が無い箇所,図-4.3.3に降雨の影響がある箇所の各柱試験体のkTの経年変化を示す.N32の場合(図-4.3.2(a),図-4.3.3(a)),多少の変動があるものの,養生による明確な差は見られない.これはW/Cが低く,緻密な空隙構造であったためと考えられる.降雨の影響は僅かな差であるが確認することができ,降雨の影響が無い箇所に比べ降雨の影響を受ける箇所のkTは小さい.

BB57.5の場合(図-4.3.2(b),図-4.3.3(b)),材齢1, 2ヵ月の時点では養生方法によるkTの差異が顕著で あるが,材齢の経過とともに標準養生のkTが増加し, 養生による差異は縮小している.また,降雨の影響 が無い箇所に比べ,降雨の影響を受ける箇所は僅か であるがkTが小さい.BBはNに比べ養生による影響 を受けやすいため⁹,材齢1,2ヵ月時点ではコンクリ ート中の含水率や空隙構造に差が生じ,kTにも違い が表れたと考えられる.しかし材齢が経過するにつ れ,コンクリート中の水分の逸散や乾湿繰り返し等 の影響により,養生による含水率や表層部の空隙構 造の差が縮小したと推察した.

58, 64.8の場合, 降雨の影響が無い箇所(図 -4.3.2(c)) に着目すると、材齢1,2ヵ月の時点では、 早期脱型の柱試験体より得られたkTを除き、その他 の養生方法や打込み時の加水による違いはkTには 見られない.試験体の作製から時間が経過していな いため、コンクリート中の含水率が比較的高い状態 であったことが要因の一つとして考えられる. その 後、材齢3ヵ月の時点からkTが増加し始め、材齢3~ 6ヵ月においては密封または給水養生を施した場合 に比べ、標準養生や打込み時に加水をした試験体の kTが大きくなるなど、材齢の経過に伴い養生や加水 による差異が見られる.このkTの増加は水分逸散の 影響によるものと考えられる. 材齢94ヵ月に至るま で若干変動があるものの、材齢94ヵ月時点では養生 によるkTの差は最大で約13倍となり、降雨の影響が ない箇所では、養生や加水による影響の差異が確認 できる. 降雨の影響がある箇所(図-4.3.3(c))にお いては、材齢1ヵ月の時点ではkTに養生方法や打込 み時の加水による明確な差異は見られない. 降雨の 影響が無い箇所と同様に、コンクリート中の含水率 が高い状態であったことが影響したと考えられる. 材齢2ヵ月以降から養生や加水による違いがkTに表 れ、材齢6ヵ月までkTが増加している.しかし材齢6 ヵ月以降はkTが減少し、94ヵ月の時点では養生方法 や加水などの試験体の作製方法の違いによらずkT の差は最大でも約2倍となった.このような結果が得 られた原因は定かではないが,試験体作製から1年以 内はコンクリート中の水分の逸散により含水率が低 下し,kTの値は増加するが,材齢が1年ほど経過す ると,水分逸散に伴う含水率の変化に比べ降雨がkT に及ぼす影響が強まり,柱試験体の曝露条件ごとに kTが異なる傾向を示した可能性が考えられる.

(5) 測定結果:表面吸水量

図-4.3.4に材齢95ヵ月時点における各試験体の10 分間の吸水量を示す.N32の場合(図-4.3.4左),他 の材料配合の試験体と比べ吸水量は少ない.水セメ ント比が低く,緻密な空隙構造が形成されたことが 原因として考えられる.また,降雨の影響が無い箇 所に比べ,降雨の影響がある箇所の吸水量は少ない. 降雨の作用を直接受けることで,コンクリート中の 含水率や水和反応の進行程度が変化し,より緻密な 空隙構造が形成されたことが要因の一つと考えられ る.

BB57.5の場合(図-4.3.4中央)においても,N32 と同様に降雨の影響が無い箇所に比べ,降雨の影響 がある箇所の吸水量は少量である.降雨の作用によ りコンクリート中の含水率が増加し,空隙構造が緻 密化したことが影響していると考えられる.また, 降雨の影響の有無に関わらず,標準養生を施した試 験体は,早期脱型した試験体に比べ吸水量が減少し ている.本検討では,材齢1年以内に吸水試験を実施 しておらず,吸水量の経年変化は不明であるが,kT の結果を踏まえると,材齢の経過に伴い養生方法に よる吸水量の差異も縮小した可能性が考えられる. この点については今後,他の屋外暴露試験体を用い 検討する予定である.

N58, 64.8の場合(図-4.3.4右),降雨の影響が無い箇所では、早期脱型と打込み時に加水した試験体の吸水量は2.5ml以上であるのに対し、給水養生の試験体は、他の養生方法に比べ吸水量は少なくなるなど、養生方法や加水による影響を確認することができる。一方、降雨の影響がある箇所においては、打込み時に加水した試験体は、他の試験体と比較して吸水量が多い傾向にあるが、それ以外の全ての試験体には養生による明確な差異は見られない。N32やBB57.5で述べたように、降雨の影響によりコンクリート内部の含水状態や空隙構造が変化したことが、このような結果が得られた要因として考えられる。



(6) 測定結果:空隙構造

図-4.3.5、図-4.3.6に、材齢96ヵ月時点における各 柱試験体の表層から深さ5cmまでの閾細孔径を示す. なお、各図の縦軸は対数で表記している.N32の場 合(図-4.3.5左),早期脱型と標準養生の閾細孔径は 同程度、もしくは早期脱型に比べ標準養生を施した 試験体の閾細孔径が大きくなるなど、閾細孔径には 養生による影響が明確に見られない.また表層から2 ~3cmの深さでは、降雨の影響がある箇所の闌細孔 径は20nm以下と緻密であるのに比べ、降雨の影響が 無い箇所の閾細孔径は84~201nmと粗大である.こ の結果より、極めて緻密な空隙構造が形成される. N32の場合でも、降雨が直接作用しない条件では、 表層から2~3cmの深さまで乾燥の影響が及んだこ とが考えられる.一方,降雨の影響がある箇所では、 吸水量は少量であるが定期的に液状水が浸透し、表 層から数センチの深さでは相対湿度が比較的高い状 態に保たれたため、乾燥の影響が低減されたと考え られる.なお、コンクリート内部の相対湿度が80% を下回ると水和が大幅に低減¹⁰⁾されるため、2~3cm の深さでは80%以上の相対湿度が長期間維持されて いたと予想される.標準養生を施した柱試験体の表 層から4~5cmの深さでは、 閾細孔径の値が得られな かった.これは酒井らの方法⁸⁾において闌細孔径に相 当する、セメントペースト体積の16%に相当する水 銀が圧入された時点の細孔直径が、本検討における 最小の空隙径である10nmを下回ったためである.

BB57.5の場合(図-4.3.5右),降雨の影響が無い箇 所では、表層からの深さによらず養生方法による差 は残存している.しかし、降雨の影響を受ける箇所 では、降雨の影響が無い箇所に比べ閾細孔径は小さ い傾向にあり、表層から4~5 cmを除き、養生方法の 差は減少している.0~1cmの箇所では、高炉スラグ 微粉末が有する長期反応性の影響により,乾湿を繰り返す中で養生の差が縮小したと考えられる.また 表層から2~3cmの箇所では,N32の場合と同程度の 閾細孔径であり,緻密な空隙構造が形成されている. 上述した通り,直接降雨の影響を受ける場合,表層 から2~3cmの箇所では比較的高い相対湿度が維持 されたと予想される.これにより乾燥の影響が低減 されるとともに,セメントの水和の進行や長期にわ たり反応が継続する高炉スラグ微粉末の効果によっ て空隙構造が緻密化し,材齢の経過に伴い養生方法 による差が縮小したと推察した.

N58, 64.8の場合, 降雨の影響が無い箇所 (図-4.3.6 左) では、表層からの深さによらず、おおむね養生 による差異や打込み時の加水による違いが閾細孔径 に表れている. 一方, 降雨の影響がある場合(図-4.3.6 右)は、0~1cm、2~3cmの深さにおいては、降雨の 影響が無い場合に比べ養生や加水による差異は減少 している.特に表層から2~3cmの深さに着目すると、 降雨の影響が無い箇所における養生や加水による閾 細孔径の差は、最大で約4.9倍であるのに対し、降雨 の影響を受ける場合は最大で約1.6倍である.本検討 では、材齢28日時点の結果は得られておらず、閾細 孔径の経年変化については明らかになっていないが. 数年にわたり乾湿繰り返しの作用を受けることで空 隙構造の差異が縮小した可能性が考えられる.表層 から4~5cmの深さでは、試験体により閾細孔径は顕 著に異なっており,明確な傾向は見られない.既往 の研究により、表層透気試験は表層から3cm程度、 表面吸水試験は表層から2cm程度の深さを測定範囲 としていることが報告されている^{5,8)}. このことから, 材齢94,95ヵ月時点におけるN58,64.8の表層透気試 験や表面吸水試験の結果に,養生や加水による差が 確認されなかったのは、表層から2~3cmまでの含水

率や空隙構造に,養生や加水による違いが見られな くなることが原因として考えられる.なお,BB57.5 では表層から2~3cmの深さで緻密な閾細孔径が確 認されたのに対し,N58,64.8ではそのような傾向は 見られない.使用材料の違いにより,乾燥や降雨に よる乾湿繰り返しの作用が,含水率や空隙構造の変 化に及ぼす影響の程度が異なることが要因の一つと して考えられるが,詳細なメカニズムは明らかにな っていないため,今後室内試験にて検討する予定で ある.

(7) まとめ

本研究では、屋外に暴露した中規模柱試体を対象 に表層透気試験(Torrent法)を継続的に行うととも に、表面吸水試験(SWAT)や空隙構造分析を実施 し、それらの結果を分析することで、養生が耐久性 に与える効果を検討した.本研究で得られた結論を 以下に示す.

普通ポルトランドセメントの場合,水セメント比 が高いほど,養生の影響が表層部の品質に表れた. しかし,降雨の影響を受ける箇所では,材齢の経過 に伴い,養生による差異が縮小する現象を確認した. また本検討結果を踏まえると,水セメント比が40~ 50%の場合は,水セメント比が60%程度の場合に比 べ,より短期間で養生の差が見られなくなると考え られる.

高炉セメントを用いた場合においても、特に降雨 の影響を受ける箇所では、材齢の経過に伴い養生に よる表層部の品質の差は縮小した.また降雨の影響 を受ける場合、表層から一定の深さにおいて極めて 緻密な空隙構造が形成された.

4.4 まとめ

室内試験および実構造物の調査を行い,詳細法と しての表層透気試験の有効性を検証した.測定要領 (案)についてはスイスの規格を準用することが望 ましいと判断したが,以下を加えることがよいと判 断した.

・測定材齢:施工の良否を判定する場合にはおよそ 材齢3カ月程度とするが,長期的な耐久性の評価には 材齢半年以上経過してからの測定が望ましい.

・水分:雨水の影響によって施工の影響が緩和されることから、施工の良否に着目した測定は、原則として雨水の影響を受けない部位を対象とする。

参考文献

- 蔵重勲ほか:中規模柱試験体を対象とした非破壊評価 による表層品質の要因分析、コンクリート工学年次論 文集、Vol.33、No.1、pp.1835-1840、2011.
- 2) 家辺麻里子ほか:表層透気試験による養生条件を変化 させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握、コンクリ ート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.659-664, 2011.
- 3) 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.6, pp.358-365, 1992.

- 4) 林和彦ほか: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(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 5) 井川倫宏ほか: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基準に関する基礎的研究,コンク リート工学論文集, Vol.29, pp.101-109, 2018.
- 吉田亮ほか:水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続 性抽出と有効圧力範囲に関する研究,生産研究, Vol.60, No.5, pp.516-519, 2008.
- Mehta, P.K., Manmohan, D.: Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, 7th Int. Congress on Cement Chemistry, Vol.3, pp.71-75, 1980.3
- 8) 酒井雄也ほか:臨界浸透確率に基づく闌細孔径の抽出 とコンクリート中の液状水移動の定量評価,土木学会 論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, pp.83-96, 2016.
- 9) 檀康弘ほか:高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係,土木学会論文集E, Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009.
- Powers, T.C.: A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, Highway Research Board, Vol.27, pp.178-188, 1947.

第5章 3次検査に用いる採取コアの耐久性試験

5.1 はじめに

ここでは、コアを用いた吸水試験結果に関して耐 久性指標としての妥当性を検証するために、コア採 取用試験体を作製して、検討を行った.円柱試験体 とコアの吸水試験結果を比較することで、コアにお ける吸水試験の評価指標の妥当性を検証した.コア サンプルに影響を及ぼす要因として、本章では、試 験体高さと採取高さ、養生期間を変化させて検討を 行った.また、耐久性を評価する室内試験を実施し、 採取コアによる吸水試験結果やと非破壊試験(詳細 法・簡易法)の比較を行い、各試験法の妥当性を検 証した.さらに、小径コアの適用性を検討した.

5.2 採取コアを用いた吸水試験

(1) はじめに

円柱試験体とコア採取用試験体を作製し、それぞ れから吸水試験用試験体とコアを採取した.養生期 間を変化させることで、養生条件がそれぞれの吸水 試験結果に与える影響を比較し、円柱試験体とコア 採取用試験体から得られる吸水特性の違いを検証し た.これにより、コアを用いた吸水試験結果の耐久 性評価指標としての妥当性を検証することとした.

(2) 試験体概要

コンクリートの円柱試験体と採取コアを用いて検 討を行った.表-5.2.1に使用した材料,表-5.2.2に本 研究で作製したコンクリートの配合表を示す.セメ ントには高炉セメントB種を用いた.フレッシュ性 状の目標値は,スランプを8.0cm,空気量を4.5%とし た.

表-5.2.1 材料特性

材料	記号	種類 / 物性					
水	W	水道水					
+ 1 1 1	C	高炉スラグセメントB種					
ピケンド	C	/密度:3.04 (g/cm³)					
		東広島市黒瀬町産砕砂					
細骨材	S	/表乾密度:2.58 (g/cm³),吸水					
		率:1.25(%)					
		東広島市黒瀬町産砕石					
粗骨材	G	/表乾密度:2.61 (g/cm³),					
		吸水率: 0.56 (g/cm³)					

表-5.2.2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

W/C	単	立体積質	t量 (kg/ı	m ³)	スラ ンプ	空気量
	W	С	S	G	cm	%
0.5	170	340	774	977	9.0	4.9

※化学混和剤は以下を使用した. AE剤:フローリックSV10Lを1.87 (kg/m³) AE減水剤:フローリックAE-6を0.68 (kg/m³)

・円柱サンプル

吸水試験用の円柱試験体(以下,円柱サンプル) を採取するために,直径100mm×高さ200mmの円柱 試験体を作製した.打設した試験体は脱枠するまで は封緘養生とし,材齢1日,7日,28日で脱枠後,い ずれも雨掛かりのない屋内で全面気中曝露とした. 円柱試験体は養生期間によらず,材齢28日で底面と 上面から50mmの位置で湿式コンクリートカッター を用いて切断し,吸水試験用の円柱サンプルを2体採 取した.以下,高さ200mmの円柱試験体の上面から 採取したサンプルをC-200,底面から採取したサンプ ルをC-0とする.

・コアサンプル

コアを採取するために,試験体寸法を変化させた3 種類の試験体を作製した.小型の試験体Sでは養生期 間を3水準に変化させ,また,試験体M(高さ300mm) と試験体L(高さ1000mm)によって試験体高さを比 較できるようにした.試験体寸法と養生期間に関し てそれぞれ表-5.2.3に示す.養生期間中は型枠存置の 封緘養生とした.試験体L,試験体Mは脱枠後,全面 気中曝露とした.試験体Sは脱枠後,上面,端面,底 面にはアルミテープを貼り付けることで,脱枠後に 800 mm×300mmの試験面以外からの乾燥を防止し, 養生の影響を試験面のみとした.コア採取用試験体 はおよそ材齢6か月において,表-5.2.4に示すように 湿式ドリルで直径100mmのコアを各条件で2つずつ 採取した.乾燥時の曝露面から湿式コンクリートカ ッターで高さ50mmに切断し,吸水試験用の試験体 (以下コアサンプル)とした.

(3) 吸水試験方法

本研究では、円柱サンプル、コアサンプルともに 以下に示すASTM規格に準拠した吸水試験を行った.

ASTM規格は吸水試験前に所定の乾燥調整処理を 行う.乾燥調整の前に,サンプル内部の含水履歴の 影響を除くためにASTM C1202¹¹に規定された真空 飽水処理を行う.その後,サンプルを器内温度50℃, 器内相対湿度80%の環境に設定した恒温恒湿器内に 3日間静置した後,気温20℃の環境下に静置しておい た密封容器にサンプルを入れ,15日間20℃で密封静 置した.

以上に示した乾燥調整処理後,吸水試験を行う. 吸水試験中にサンプルが乾燥することを防ぐために, 側面はアルミテープで被覆し,コンクリートカッタ ーで切断した面はラップをかぶせた.吸水試験は図 -5.2.1に示すように,下面からの一面吸水とし,円柱 サンプルは打設時の底面から,コアサンプルは型枠 に接していた面から吸水させた.吸水試験には水温 を約20℃にしておいた水道水を用いた.質量の測定 は吸水直前を0分として,吸水開始後から1,5,10, 20,30,60,120,180,240,300,360分で行った. このときの0分からの質量変化量と経過時間の平方 根との関係から初期吸水速度係数を算出した.なお, 質量変化量は吸水面積で除した値を用いた.

試験体名	寸法 (mm) 幅×奥行き×高さ	封緘養生期間 (日)		
試験体S	800 × 400 × 300	1 7 28		
試験体M	$800 \times 600 \times 300$	28		
試験体L	$800 \times 600 \times 1000$	28		

表-5.2.3 コア採取用試験体

試験体名	試 験 体 高さ (mm)	採取 場所	コア採取高さ (mm)
試験体S	300	側面	150
試験体M	300	底面	0
		側面	150
		上面	300
		底面	0
試験体L	1000	側面	750, 500, 250
		上面	1000

表-5.2.4 コアサンプル採取高さ



図-5.2.1 吸水試験概要

(4) 吸水量の経時変化に関する測定結果

吸水試験中の試験体質量の時間の平方根に対する 経時変化を、図-5.2.2に示す.図中には、ASTM規格 に準拠して算出した回帰直線および決定係数をあわ せて示した.ASTM規格ではこの回帰直線の傾き(本 研究ではI360と表記)を初期吸水速度係数としてコン クリートの耐久性評価を行う.図-5.2.3には、I360に ついて、養生期間あるいは試験サンプルの採取高さ との関係として示す.なお、回帰直線の決定係数が ASTM規格の基準を満足していないものが含まれる 点に関しては、あとで詳細に議論する.

まず,養生の影響に関して,養生期間を変化させ た円柱サンプルと試験体Sから採取したコアサンプ ルの吸水試験結果(図-5.2.2(a),(b),図-5.2.3(a)) より分析する.養生期間が短くなるほど,吸水量が 増加し,I₃₆₀が大きくなっていることがわかる.養生 が不十分であると内部構造が緻密にならないため, 吸水量が増加したと考えられる.このことは従来の 数多くの報告^{例えば1,2)}と一致する傾向である.一方で, コアサンプルでも養生期間の影響が確認できるが, その影響程度は小さくなっている.コアサンプルを 採取したコア採取用試験体は円柱試験体と比較して 大きく,また1面(試験面)のみからの限られた乾燥 であったため,脱枠後の乾燥の影響が小さかったと 思われる.

次に,試験体高さとコア採取高さの影響に関して, 寸法を変化させた試験体から採取したサンプルの吸 水試験結果(図-5.2.2(a),(c),(d),図-5.2.3(b))か ら分析を行う.サンプルの採取高さに着目すると, 最も寸法の小さい円柱試験体(高さ200mm)から採 取した円柱サンプルにおいても,底面C-0と比較して 上面C-200の吸水量やI360が大きくなっていることが わかる.C-200は吸水面にブリーディングの影響を受 けるため,表面付近のセメントペーストのコンクリ ートの体積割合が相対的に大きくなり,吸水量が増 加したと考えられる.同様に試験体L(高さ1000mm) や試験体M(高さ300mm)においても,採取高さが 大きくなるほど吸水量やI360が大きくなる傾向が確 認された.

続いて,試験体高さに着目し,各試験体の採取高 さ0mmで採取したサンプル(C-0-28d, M-0, L-0)間 の比較を行う.試験体高さの大きい試験体Lから採 取したコアサンプルが吸水量,I₃₆₀ともに大きくなる 結果であった.試験体底面(採取高さ0mm)はブリ ーディングに伴う骨材沈下の程度が異なったため, 吸水量が変化したと思われる. なお, 試験体の高さ が大きいほどブリーディング量は大きくなることが 報告されており¹⁴, 整合する結果となった.





(c) コアサンプル (試験体M)





(5) 吸水試験結果の直線回帰性

 一次元の吸水挙動では、時間の平方根で整理する と直線関係が得られること(√t則)が多くの研究^{3,4)} で報告されており、ASTM規格においても同様の整 理が行われている.実際に、(1)で示した吸水試験結 果においては、円柱サンプルにおいては、養生期間 やサンプルの採取高さによらず従来の研究と同様に, 高い決定係数による直線回帰ができている.一方, 図-5.2.2(b), (c), (d)からわかるように、コアサンプ ルの試験結果においては、円柱サンプルの試験結果 と比較すると測定値と回帰直線がかい離し,一部は ASTM規格が求める0.96以上の決定係数を満たして いなかった.特に接水後30分までの吸水量の増加が 大きくなっており、全体の直線回帰の傾きとして得 られる吸水速度係数I360では、この部分の評価が過小 になると思われる. そこで吸水速度係数を求めるた めの直線回帰に関して検討を深めることとした.

図-5.2.4に,決定係数と養生期間あるいは採取高さ との関係を示す.養生期間を変化させた試験体Sから 採取したコアと採取高さを変化させた試験体M,試 験体Lから採取したコアについてそれぞれ検討を行 った.

養生の影響

図-5.2.4(a)より,円柱サンプルの吸水試験結果の 決定係数は、いずれの養生においても0.98~1.00と大 きく、高い直線性を有していたが、コアサンプルの 決定係数は0.81~0.93と小さく,円柱サンプルの吸水 試験結果と比較して直線性が大きく低下した.特に 養生期間が十分ではないときに顕著で、コアサンプ ルの表層と内部の材料特性の不均質性によるものと 考えられる.この不均質性の原因としては,脱枠後 の乾燥方向が異なることが考えられる. 円柱サンプ ルは脱枠後全面から乾燥の影響を受けるのに対し, コアサンプルでは型枠面(吸水試験時の吸水面)のみ からの乾燥である.円柱サンプルは全面曝露のため 養生によらず試験体全体に乾燥の影響があるものの, コアサンプルは1面からの乾燥に限られており,表層 から内部にかけての内部構造の差が顕著となり、吸 水挙動の直線性を低下させたと思われる.

・採取高さの影響

図-5.2.4(b)より円柱サンプルの吸水試験結果の決 定係数は,養生を変化させた場合と同様にいずれの 採取高さにおいても0.98~1.00と大きく,高い直線性 を有していた.一方で,コアサンプルの決定係数は 0.91~0.97とやや小さく,円柱サンプルの吸水試験結 果と比較して直線性が高くなかった.コアサンプル における直線性の低下は試験体高さが大きいときに 顕著で,養生を変化させた場合と同様に表層と内部 の材料特性の不均質性によるものと考えられる.採 取高さを変化させた場合には,ブリーディングの影 響が考えられる.フレッシュコンクリートを流し込 むと,型枠界面でブリーディング水が上昇する.結 果として表面付近には,緻密ではない層が形成され る.養生期間が長い場合であっても,試験体高さや コア採取高さを変化させた場合には,表面と内部の 材料特性が不均質となり,直線性を有していなかったと思われる.





10

0

20

30



(6) 吸水速度係数の算定法に関する検討

全体の吸水挙動をひとつの数値に代表させて評価 するためには、√t則以外の関数によって回帰するこ とも考えられるが、本実験結果のすべてを適切に回 帰する関数を得ることができなかった.そこで本研 究では、直線の回帰性を低下させている吸水直後の 挙動に着目することとした.これは、コンクリート の耐久性指標としての適用やコンクリート表面から 劣化因子が浸入する可能性が高いことを考慮すると、 表面近傍の表層部分を適切に評価することが望まし いと考えたためである.

表層部分の評価が適切にされるように線形回帰を 行う際の算出時間を変化させた.図-5.2.5には,最初 の測定となる吸水開始1分後から10分まで,20分まで, 30分まで,60分まで,120分まで,180分まで,240 分まで,300分まで,360分(6時間)までのそれぞれ の範囲で線形回帰を行って算出した決定係数を示す. 最後の6時間までの範囲での計算はI₃₆₀と一致する.

図-5.2.5より、コアサンプルから算出した決定係数 は、算出する時間が長くなるほど小さくなり、180 分(100s^{1/2})程度で,(2)で議論したような小さな決定係 数になった. 逆に, 算出する時間を短期間にすると 決定係数が大きくなり,吸水開始後30分(42.4s^{1/2})ま でで算出した決定係数は、ASTM規格の0.96を満たす 条件が多い. S-7d, S-28dやL-750が規格の0.96を満た さなかったものの、0.92以上と大きくなっており、 測定値が直線性を有している.本研究では1分から30 分までの傾きを起点初期吸水速度係数I30として定義 した. 図-5.2.6に起点初期吸水速度係数と養生期間, 採取高さの関係を示す.円柱サンプルはI360と同様に 養生期間によって変化しているが、I30でも同様の関 係が確認された. I30はI360と比較して表面部分の影響 が特には反映されていると思われる. I30はコンクリ ート表面の乾燥を受けた部分の影響が抽出されたた め養生で変化したと思われる.また、図-5.2.6(b)よ り、I30は吸水量と同様に試験体L> 試験体M> 円柱 試験体の関係であった.ブリーディングも養生の影 響と同様に表面付近に影響があるため、試験体高さ で変化したと考えられる.





(b) 採取高さの影響 図-5.2.5 1分から各時間までで算出した決定係数



(a) 養生期間による変化



(b) 採取高さによる変化 図-5.2.6 起点初期吸水速度係数

(7) 吸初期吸水速度係数I₃₆₀と起点初期吸水速度係 数I₃₀の関係性

ここでは、初期吸水速度係数I360と起点初期吸水速 度係数I30の関係性について検討する.まず初めにそ れぞれの浸透深さについて検討する.本研究で提案 する30分までの質量変化量から算出する起点初期吸 水速度係数は、360分までの質量変化量から算出され る初期吸水速度係数と比較すると、図-5.2.7に示すよ うに表層部分の評価になっている.そこで吸水試験 時の水の浸透深さを、事前の含水率調整における3 日間乾燥による質量減少量を基に推定した.図-5.2.8 に示すように360分時点での吸水深さL360は、30分時 点での深さと比較して、円柱サンプル(Cyl)の1点 を除いて10mmから20m程度深くなる結果となった. ブリーディングや養生の影響のない部分で吸水開始 後30分以降に浸透する水は、試験体採取方法によら ず同程度になることが確認できる.なお、吸水開始 後30分以降に30mm程度浸透した円柱サンプルは1日 養生の試験体であり,脱枠後の全面曝露によって内 部まで緻密にならなかったためであると考えられる.

30分までに浸透する部分はブリーディングや養生 による影響を受ける部分(緻密にならない部分)が 相対的に大きくなると考えられるため、I30はI360より も大きくなると考えられる.図-5.2.9にI360とI30の関 係を示す.吸水試験結果の直線性が完全である場合 には、I30とI360は等しい値になる(図中の1:1線になる). I30はブリーディングなどの影響を受けているため、 I360よりも大きな値になっていることがわかる.円柱 サンプル(Cyl)は高い直線性を有していたため、I360 が大きくなるとともにI30も大きくなり、1:1線に近 い値になっている.コアサンプルの場合は直線性が 高くなかったため、I30はI360よりもかなり大きな値に なっている.なお、おおむね類似の傾向を示したこ とは、同じ生コンクリートを使用したためであり、 一般性については今後の検討が必要である.

本研究の対象は、図-5.2.7、図-5.2.8に示すように、 I30は表層付近のみの評価であるものの、I360は表面付 近の緻密でない部分、内部の緻密な部分を組み合わ せた全体の平均的かつ総合的な評価であることがわ かる.I30による評価は、コンクリートが表層から内 部にかけて緻密になることを考慮すると評価指標と しては安全側に考慮できていることになる.



図-5.2.7 浸透深さの概要図



図-5.2.8 L360とL30の関係



- 5.3 他の試験結果との比較
- (1) 散水試験結果と吸水試験結果との比較

図-5.3.1に散水試験で得られた散水回数rNを示す. 散水回数rNは養生期間の影響を反映していることが わかり,これまでの研究と一致する結果となった. 試験体高さの影響に関しては,試験体Lに関しては 測定高さによって大きく異なる結果となった.ブリ ーディングによる影響であると思われる.試験体M は試験体高さが300mmであるため,試験体Lと比較 して相当小さく,測定高さの影響が小さくなったと 思われる.得られた散水回数rNから求めた供給水量 をI360,I30と比較する.





図-5.3.2に吸水試験結果から得られる指標と供給 水量の関係を示す.供給水量は起点初期吸水速度係 数I30との関係性が良好であった.ブリーディングや 養生は表層部分に影響を与えるため,表層部分の影 響を反映していると考えられるI30との関係が良好で あったと思われる.

(2) 表層透気試験結果と吸水試験結果との比較

図-5.3.3にトレント法で測定された表層透気係数 kTと養生期間,測定高さの関係を示す.kTは養生期 間が長くなるほど小さくなった.吸水試験結果と同 様に内部構造が緻密になったためであると考えられ る.また,測定高さ,試験体高さが大きくなるほど kTは大きくなる傾向にあった.これはブリーディン グの影響があったためと考えられる.





(D) 起点初期吸小速度保数130 図-5.3.4 吸水試験結果から得られる指標と 表層透気係数kTの関係

測定されたkTと吸水試験結果から得られる指標の関係を図-5.3.4に示す.トレント法の測定深さを表層透気係数kTより算出し,第二軸に示した. I₃₆₀, I₃₀ともにkTと良好な関係性が確認されたものの, I₃₆₀の決定係数がわずかに大きかった. kTの影響範囲はごく表層部分のみではなく,本研究では50mm程度までに影響しており,結果として表層ではなく,内部の影響も捉えているI₃₆₀と良好な関係が得られたと考えられる.

さらに、それぞれの測定深さに着目して検討を行った.吸水試験時の浸透深さは、事前の含水率調整における3日間乾燥による質量減少量を基に推定した.図-5.3.5に示すように吸水試験中に水分浸透は進行するため、360分時の浸透深さが深くなるが、360分時の吸水深さがトレント法での測定深さと同程度であったため、I360とkTの関係性から算出される決定

係数が大きくなったと思われる.



図-5.3.5 吸水深さとkT測定推定深さ

(3) スケーリング試験結果と吸水試験結果との比較

スケーリング試験中のスケーリング量の累積変化 を図-5.3.6に示す.試験体高さ、採取高さによらず、 それぞれ凍結融解サイクル数が増加すると、スケー リング量が増加した.また、スケーリング試験初期 は大きなスケーリング量が観測されたが、やがて落 ち着いた状態になった.採取高さが大きくなるほど、 スケーリング量が大きくなっており、ブリーディン グによって変化したと考えられる.

凍結融解30サイクルでのスケーリング量を吸水試 験結果から得られる指標の関係を図-5.3.7に示す.ス ケーリング量はI360,I30それぞれと良好な関係があっ たが、特にI30との関係性がもっとも良かった.スケ ーリングによる劣化はコンクリート表面に現れる劣 化であることから、より表層の影響を強く反映して いるI30がI360より関係性がよかったと考えられる.





(4) 急速塩分浸透試験結果と吸水試験結果との比較

電気泳動試験終了後の塩分浸透深さを図-5.3.8に 示す.養生期間によ塩分浸透深さが変化しているこ とがわかる.養生期間が長くなると、細孔構造が緻 密になるため塩化物イオンが通過できる経路が少な くなるため浸透深さが小さくなったと考えられる.



図-5.3.8 塩分浸透深さに及ぼす養生の影響

塩分浸透深さと吸水試験結果から得られる指標の 関係を図-5.3.9に示す. I360, I30はそれぞれ塩分浸透 深さと良好な関係性が確認された. 電気泳動試験後 の塩化物イオン浸透深さは15.3~29.1(mm)であった. 塩分浸透深さがごく表層付近のみではなく,ある程 度深い部分まで浸透していた. 塩化物イオンは一定 の速度で浸透するとされており,結果として吸水試 験の傾きである吸水速度係数と良好な関係であった と考えられる.



5.4 小径コアを用いた吸水試験の検討

(1) はじめに

ASTM規格で定められている標準コア(直径 100mm)では、構造物へのダメージが大きい. そこ で、構造物へのダメージを抑制するために小径コア (直径25mm)を用いた吸水試験が検討することとし た.本研究では、ASTM規格において標準コアに必 要とされる2本と同程度の信頼性を得るために必要 な小径コアの本数を明らかにすることに加え、標準 コアの吸水試験結果と比較することによって、小径 コアを用いた吸水試験の可能性を検討することを目 的とした。

検討においては、壁状供試体を作製し、コアを抜き、吸水試験用の供試体を作製した.壁状供試体の 概要は、横800mm、高さ300mmの側面(吸水試験に 使用する測定面)を有し、部材厚さが100mm、400mm、 600mmの3水準、さらに養生期間を示方書相当の7日 (7d)に加え、劣悪な環境を想定した1日(1d)、十分な 養生を想定した28日(28d)の3水準とした.なお、打 込みから脱型するまでの養生期間中は、上面に湿ら せた養生マットを敷き、ラップで覆うことにより、 水分の蒸発を防いだ.所定材齢で脱型後は、測定面 以外からの乾燥を防ぐために、アルミテープを測定 面以外に貼り、屋内で曝露した.材齢約6か月で直径 25mmと直径100mmの円柱コアを抜いた.コアを抜 く様子を写真-5.4.1に示す.その後、採取したコアを 高さ50mmに切断し、吸水試験の供試体を作製した.



写真-5.4.1 小径コアのコア抜きの様子

(2) 前乾燥処理における質量変化

小径コアの吸水試験結果の個体差を検討するため に、小径コアを30本と、標準コアを3本作製し、使用 した.図-5.4.1に飽水処理後の質量から3日間の乾燥 中に変化した単位体積質量減少量の結果を示す.な お、小径コアは30本平均、標準コアは3体平均を示す. 標準コアはASTM規格の3日間(72h)乾燥した後の 結果を示す.小径コアは単位体積質量減少量が、標 準コアの単位体積質量減少量と同程度になるまで、1 時間ごとに質量の測定を行う予定であったが、1時間 で単位体積質量減少量が標準コアと同程度となった ため、この時点で乾燥を終了とした.その後、乾燥 炉から取り出し、密封容器に移し、静置した.

ここで、池田らの研究(研究代表者の半井の指導 のもとで実施した卒業研究)との設定乾燥時間と本 研究での乾燥時間を比較した.池田らの乾燥時間の 結果並びに本研究での単位体積質量減少量を図 -5.4.2に示す.なお、池田らは標準コアと小径コアの 乾燥時間と質量変化の過程を比較、検討するために 小径コアもASTM規格の3日間の乾燥を行っている.

また、池田らの供試体は、使用したコンクリートの 配合が、高炉スラグセメントB種、水セメント比 52.5%で,養生期間7日,材齢約3か月で吸水試験用 のコアを採取している.池田らの単位体積質量減少 量と比較すると、本研究の単位体積質量減少量が大 幅に小さいことがわかる. そこで、単位体積当たり の残存する質量(単位体積質量残存量)に着目し、 飽水時の供試体質量に関する比較を行った.図-5.4.3 に乾燥時間と単位体積質量残存量の関係を示す.池 田らの標準コアの単位体積質量残存量は小径コアの 単位体積質量残存量より大きいことがわかる.しか し,本研究では小径コアの単位体積質量残存量が大 きくなっている. なお、供試体内部のセメントペー ストの割合や,骨材分布によって,単位体積質量残 存量に個体差は出ると思われるが、標準コア同士で 比較を行うと、池田らの単位体積質量残存量が本研 究より大きくなっている.この顕著な違いが,吸水 試験結果に影響を与えるかを次項で検討する.



(3) 小径コアを用いた吸水試験の結果

乾燥処理の静置終了後に、ASTM規格に従い、吸 水試験を行った.図-5.4.4に吸水試験結果の初期吸水 速度係数を示す.吸水速度係数の小さなものから順 に示した.小径コアの初期吸水速度係数が、標準コ アと同程度の個体もあれば、大きく上回っている供 試体もある.小径コアの吸水速度係数が、小さいも のから22番目以降の9本の供試体に関しては、図 -5.4.5に示すように,吸水試験中に上面のラップ部分 に水分が到着していることが目視で確認できた. こ れらの供試体では、アルミテープとの界面より水分 が侵入し、コンクリート内部以外の水分の移動、質 量増加が含まれていた可能性が高い. 今後, 同じ供 試体を用いて再試験を行い,側面のシール状況の影 響を確認する.また、小径コアは吸水面積が小さい ため、界面からの吸水が誤差として大きな要因とな っていることが考えられる.しかし,目視で確認で きた供試体と確認できない供試体に関して大きな誤 差となっているかは明確ではないが、初期吸水速度 係数が小さい個体の2倍以上になっていることを考 慮し、目視で確認できた個体に関しては棄却される べきと考えられる.また,池田らは2体のみでの検討 であり、養生期間(池田らは7日)が本研究と異なる が,初期吸水速度係数は大きく,個体差が大きい. 池田らの結果に大きな個体差が生じた原因は明確に はできないが、単位体積質量残存量と初期吸水速度 係数に関係性はないと思われる、そこで、個体差の 小さかった本研究の供試体についての検討を以下で 行った.

図-5.4.6に、小径コアは全30本の平均と、吸水が過 剰だったと考えられる9本を棄却した21本の平均、過 剰吸水であったと思われる9本の平均の吸水試験結 果を示す.標準コアは3体の平均値を示す.また、初 期吸水速度係数については、図-5.4.7に示す.全平均 では、小径コアの初期吸水速度係数が大きくなって いるが、棄却後の初期吸水速度係数は、個体差はあ るものの標準コアと同程度になっていることがわか る.また、過剰吸水であると思われる初期吸水速度 係数は、大きくなっている.



図-5.4.4 初期吸水速度係数



図-5.4.5 上面の様子の代表例 (左:上面に水分なし、右:水分あり)





図-5.4.8に部材厚さや養生期間を変化させた壁状 試験体から採取した標準コアと小径コアを用いて実施した吸水試験の結果として初期吸水速度係数の関係を示す.部材厚さや養生期間によらず,標準コア の試験結果と比較すると,小径コアの初期吸水速度 係数が大きい,もしくは同程度となっている.しか し,養生の影響は小径コアを用いた場合でも顕著に なっており,小径コアでも耐久性の評価が可能であ ると思われる.また,1d,7dにおいて,小径コアの 吸水試験結果の切片が標準コアの切片より大きくな った.小径コアの切片が,養生の影響を受けやすい 可能性もある.また,切片は吸水試験開始時の表面 に付着した水分の質量の影響を小径コアが受けやす いと考えられ,その影響の可能性もある.



5.5 まとめ

本章ではASTM C1585における吸水試験用のコン クリート試験体の試験体高さと養生の違いに関して 検討した.その結果,円柱サンプルとは対照的に, コアサンプルを用いて吸水試験を行うと、ASTM規 格に準拠して算出した回帰直線と測定値は残差が大 きく、吸水時間の平方根で整理した試験結果の直線 性が十分ではないことが示された. このことは, 360 分間の吸水試験結果から求める初期吸水速度係数 I360が吸水挙動全体を適切に評価できないことを意 味する. そこで本研究では、線形近似が可能な30分 までの傾きを起点初期吸水速度係数I30としてコンク リートの耐久性を評価できる可能性のある指標とし て新たに定義した.コアサンプル,円柱サンプルに おいてI30は、I360と比較して、養生や採取高さなどの 影響を反映していることが示された. I30は表層部分 の影響を反映しているため、表層部分が評価対象と なっているスケーリング量や散水試験結果と相関が 確認された. I360に関しては、内部の評価になってい るため、内部の領域まで影響される表層透気係数や 塩分浸透深さと良好な関係が得られた.

ASTM規格に準拠して算出した360分までの傾き は耐久性指標としてスケーリングや塩害の評価に使 用できるものの,30分間でのIsoを用いた評価は,吸 水試験時間を大きく短縮できることからも有用であ ると考えられる.

一方,構造物への影響を軽減するために小径コア を用いた吸水試験の可能性を検討したが,吸水試験 前の乾燥処理の影響が大きく,含水状態をそろえる ことの難しさが示された.また,小径コアはばらつ きが大きく,標準コア2本と同程度の信頼性を得るた めには,小径コアが21本必要であることが確認され た.よって,小径コアの適用には課題が残った.

参考文献

- Parrott, L. J.: Water absorption in cover concrete, Materials and Structures, Vol.25, No.5, pp.284-292, 1992
- 2) Elawady, E., El Hefnawy, A. A. and Ibrahim, R. A.: Comparative Study on Strength, Permeability and Sorptivity of Concrete and their relation with Concrete Durability, Certified International Journal of Engineering and Innovative Technology, Vol.4, No.4, pp.132-139, 2008
- Dias, W. P. S.: Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation, Cement and Concrete Research, Vol.30, No.8, pp.1255-1261, 2000.
- 4) Liu, X., Chia, K. S. and Zhang, M. H.: Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete, Construction and Building Materials, Vol.25, No.1, pp.335-343, 2011.

第6章 まとめ

6.1 成果のまとめ

本研究では、非破壊試験を用いた新設コンクリー ト構造物の表層品質検査システムを実務に展開し、 道路ストックの長寿命化に資することを目的とした. その実現のため、複数の試験手法の長所を組み合わ せることによって簡便性と正確性を両立させた新た な検査システムを提案することとした.

具体的には、流水試験や散水試験などの簡易法を1 次検査、表層透気試験や表面吸水試験などの詳細法 を2次検査、採取コアによる吸水試験を最終検査とす る、3段階システムを提案した.提案する全体システ ムのフローを図6.1に示す.なお、検討の結果、本研 究の範囲内では、1次検査には散水試験、2次検査に は表層透気試験を用いることを標準とする一方、3 次検査においては、採取コアを用いた吸水試験にこ だわることなく、対象の劣化事象を踏まえて、中性 化深さの計測や塩分浸透試験、スケーリング試験な どの各種耐久性評価の活用も検討するとよいと考え た.



本研究の成果は、国内外の学術誌に掲載されたほ か、実務においては群馬県においてすでに活用され た.2019年3月末に群馬県建設企画課技術調査係より 「群馬県コンクリート構造物品質確保ガイドライ ン」が公開され、本編に表層品質確保の重要性とと もに表層透気試験や散水試験の活用法が示され、ま た、資料編に散水試験の実施要領案が掲載された. 実施要領案の冒頭には、道路政策の質の向上に資す る技術研究開発『新設コンクリート構造物における 表層品質検査手法の確立(研究代表半井健一郎(広 島大学)』によって検討された、散水試験による新 設の構造体コンクリートの表層品質測定の詳細(案) を示すものである。」と記した.いずれも群馬県の ホームページにてダウンロード可能である.

(http://www.dobokunews.pref.gunma.jp/cgi-bin/ cbdb/db.exe?page=DBRecord&did=406&qid=all&vid= 2496&rid=1200&Head=&hid=&sid=2033&rev=0&ssid=2 -997-3912-g1)

以下では,各段階における各種試験の検討内容の まとめを示す.

(1) 簡易法の検討

散水試験による簡便な迅速判定手法に関して,室 内試験や新設道路構造物を対象として取得したデー タを取りまとめ,特に早期判定の有効性を検証する とともに,判定基準を整理し,検査指針(案)とし て活用する測定要領(案)の作成を行った.この間, スイスにおいてワークショップを開催して本研究で 提案する手法に対する意見を収集するとともに,国 内においては,実構造物における検査の試行(模擬 検査)および道路管理者へのヒアリング調査等を行 い,その内容を測定要領(案)のアップデートに反 映した.

早期判定に関しては、これまでのデータを再整理 するとともに、より幅広い品質領域でのデータ拡充 を行い、脱型後1日であれば低品質のコンクリートを 容易に抽出できること、脱型後7日程度で良質なコン クリートも含めた評価が可能となること、脱型後28 日以降の乾燥が進むとさらに精度が向上することな どが明らかになった. 実務での活用のために問題となっていた散水回数 のばらつきについては、装置固有の噴霧量のばらつ きに起因したものであることが明確になり、総噴霧 量によって評価をすることによて、装置のばらつき によらずに安定した評価ができることが分かった. このことを踏まえて、測定要領(案)では、散水装 置の操作1回当たりの噴霧量に応じた散水回数を判 定基準として活用することとした.

新設の道路構造物における試行では、雨の影響に よって十分な活用ができなかった.よって、測定要 領に「測定箇所は降雨が直接掛からない場所で選定 することを原則とする」と記載し、本手法が適切に 活用できるようにした.

(2) 詳細法の検討

表層透気試験(トレント法)とともに表面吸水試 験(SWAT法)を用い、これまでに取得したデータ を取りまとめ、実施時期の最終確認とともに、長期 材齢における判定基準を整理し、検査指針(案)と なる測定要領(案)の検討を行った.この間,簡易 法と同様に海外先行事例調査などを行った.

長期の影響に関しては、群馬県における実構造物 や付属試験体を活用し、降雨の影響のない条件にお ける長期測定データを詳細に分析した.その結果、 表層透気試験の測定値に及ぼす養生の影響は小さく なっていくものの、中性化速度係数との相関は向上 することが明らかとなり、乾燥の影響が小さくなる 半年程度以降の測定が望ましいものと考えられた.

一方,降雨の影響を受けた構造物においても,施工 時の影響が材齢とともに小さくなるが,場合によっ ては測定値が逆転する場合もあり,長期評価が難し いことが明らかになった.以上を踏まえ,スイス規 格であるSIA262/1:2013を準用するとともに,以下の 2項目の加筆を提案した.

- 測定材齢:施工の良否を判定する場合にはおよ そ材齢3カ月程度とするが、長期的な耐久性の 評価には材齢半年以上経過してからの測定が 望ましい。
- 水分:雨水の影響によって施工の影響が緩和されることから,施工の良否に着目した測定は,原則として雨水の影響を受けない部位を対象とする.

なお,表面吸水試験(SWAT法)に関しては,表 層透気試験(トレント法)と同様に詳細法としての 有効性が確認されたが,本研究の範囲では取得デー タが限られ,また,別の機関において測定要領の策 定が進められていることから,本研究では提案する に至らなかった.

(3) 採取コア試験の検討

室内または現場で作製した試験体から採取したコ ンクリートコアを用いて,吸水試験や耐久性を評価 する室内試験(塩分浸透試験やスケーリング試験等) を行い,採取コアによる耐久性評価にかかる手法を 確立するとともに,非破壊試験(詳細法・簡易法) の評価結果との比較により,各試験法の妥当性を検 証した.特に,実務での活用を念頭に,ASTM C1585 における吸水試験用のコンクリート試験体の試験体 高さと養生の違いに関して検討した.

検討の結果,円柱サンプルとは対照的に,コアサ ンプルを用いて吸水試験を行うと、ASTM規格に準 拠して算出した回帰直線と測定値は残差が大きく, 吸水時間の平方根で整理した試験結果の直線性が十 分ではないことが示された.このことは,360分間の 吸水試験結果から求める初期吸水速度係数I360が吸 水挙動全体を適切に評価できないことを意味する. そこで本研究では、線形近似が可能な30分までの傾 きを起点初期吸水速度係数I30としてコンクリートの 耐久性を評価できる可能性のある指標として新たに 定義した. コアサンプル, 円柱サンプルにおいてI30 は、I360と比較して、養生や採取高さなどの影響を反 映していることが示された. I30は表層部分の影響を 反映しているため、表層部分が評価対象となってい るスケーリング量や散水試験結果と相関が確認され た. I360に関しては、内部の評価になっているため、 内部の領域まで影響される表層透気係数や塩分浸透 深さと良好な関係が得られた.

6.2 課題と今後の展望

今後は、新設コンクリート構造物におけるデータ を蓄積するとともに、初期品質を維持管理に活用す ることによって、建設から維持管理までのPDCAサイ クルの構築を推進することとなる.また、すでに建 設後数十年が経過して劣化が顕在化した構造物への 非破壊試験手法の適用も見込まれる.

一方,課題として残った雨水の影響を受ける屋外 の構造物の表層品質評価に関しては,①含水率の影 響を踏まえて表層品質を的確に測定すること,②雨 水の影響によって品質自体が施工直後から変化する こと,③劣化の進行は含水率の影響を大きく受ける こと(たとえば雨水によって中性化の進行は遅くな るが鋼材の腐食リスクは高まること)などを踏まえ て,検査の目的やタイミングを整理する必要がある. 実際の構造物においては部位によっても雨水の影響 は異なることから,測定データの蓄積を進めること で,より合理的な非破壊試験の活用法を確立する必 要がある.

付録

散水試験による新設の構造体コンクリートの表層品質測定要領(案)

1. はじめに

本要領は、散水試験による新設の構造体コンクリートの表層品質測定の詳細を示すものである. なお、散 水試験とは、(公財)鉄道総合技術研究所により開発された「散水試験A法」に準ずるものである.

2. 適用範囲

この要領は、新設の構造体コンクリートの鉛直面における表層品質を散水試験により測定する方法に適用 する.

3. 試験法の原理と手順の概要

散水試験は、コンクリート表層部の吸水性を非破壊試験により測定し、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性に関する品質を評価するものである.少量の水の噴霧を同一の箇所に対して一定の時間間隔で繰り返し行い、噴霧した水がコンクリートに吸収されずに流下するまでの散水回数を測定するものである.散水の繰り返しの時間間隔は60秒である.

4. 測定装置

4.1. 散水試験装置

コンクリート表面に対して常に一定の距離から、図1に示すような形状での水の噴霧を行うことが可能であり、かつ上部の領域(ラグビーボール状)に対する噴霧量が装置の操作1回当たり0.03~0.12g程度のものであること.

使用前に、図2に示す方法により噴霧性能の点検を行い、測定に支障がないことを確認すること.また、図 1に示す上部領域への噴霧量Wiを計量し、記録しておくこと.噴霧量は5回の計量データの平均値によるもの とし、計量には0.001g以下の単位で計量が可能な電子天秤等を用いること.

使用する水の水温は常温(20±5℃程度)とする.水質に関しては、上水道水を使用する.蒸留水や精製水な ど上水道水よりも不純物の少ない水は使用してもよい.



4.2. 温度計

外気温,コンクリートの表面温度,散水試験装置内の水の温度を±3℃程度の精度で計測できるもの. 直射 日光が当たらない箇所においては,外気温とコンクリート表面温度はほぼ同等であるものと見なして置き換 えてよい.

4.3. タイマー

1秒以下の単位で経過時間を計測できるもの.

4.4. 含水率計

コンクリート表面の電気特性に基づいて0.1%単位で含水率を計測できるもの.

5. 測定方法

5.1. 測定の条件

(1) 実施時期

脱型後1日~28日程度とする.

脱型後にシート養生などを行った場合,養生終了後1日~28日程度とする.

(2) コンクリート表面温度

コンクリートの表面温度が5℃以上であること. 直射日光が当たらない箇所においては、コンクリート表面 温度は外気温と同等と見なしてよい.

(3) 水温および水質

噴霧に使用する水の温度が常温(20±5℃程度)であること.水質に関しては、上水道水を使用する.蒸留水や精製水など上水道水よりも不純物の少ない水は使用してもよい.

(4) 天候

測定箇所は降雨が直接掛からない場所で選定することを原則とする.やむを得ず降雨が直接掛かる場所で 測定を行う場合は、測定時の条件としてその旨を記録すること.なお、降雨以外の要因による水掛かりにつ いても同様の扱いとする.

(5) 日射

測定箇所は直射日光が当たらない場所で選定することを原則とする.やむを得ず直射日光が当たる場所で 測定を行う場合は、測定時の条件としてその旨を記録すること.

5.2. 測定位置および測定数

(1) 測定位置

測定位置の選定においては,以下を考慮する.

- (ア) 部材の端部,コンクリートの打ち重ね部や打ち継ぎ部から50mm以内の領域は測定対象としない.
- (イ) コンクリートの打込み高さの中央付近(1/3程度)から選定するのがよい.
- (ウ) 測定前に,油分や水分等の付着していないウェスやスポンジでコンクリート表面のホコリ等を除去 する.
- (エ) 水の流下を妨げる物理的な要因(コンクリート表面の段差や凹凸,気泡,ひび割れなど)に配慮すること.すなわち,測定の対象はコンクリートそのものの品質とし,ひび割れや表面気泡等の影響が少ない箇所で測定を行うこと.
- (オ) コンクリート表面が一般的な合板型枠による仕上がり表面と比較して粗い場合は、平滑にしてから 測定する.
- (カ) 測定位置にはマーキングをし、同一の位置での二重測定を避けるとともに、異常値が出た場合の分 析に使用する.
- (キ) 表面保護等の処理が行われている箇所に適用する場合は、表面の保護材等を除去した箇所としない 箇所とで測定を行い、コンクリートそのものの品質と表面保護等の効果を測定するのがよい.
- (ク) 測定位置が測定者にとって高すぎる、あるいは低すぎるなどして、測定時の水の噴霧を安定して行うことが困難となる位置は避けること.

(2) 測定数

測定は、1箇所当たり、無作為に抽出した8測定点以上の測定位置で行う.

それぞれの測定位置の噴霧領域が重複することのないように、測定位置の中心間隔は100mm程度を確保する. また、上下方向の配置は下方への水の流下を考慮すること.

5.3. 測定手順

図3に、測定の流れを示す.測定位置の選定とマーキング、測定装置の動作確認、タイマーの計測開始、散水の開始、という手順となる.測定装置は使用前に点検しておくこと.

測定では、「水の流下」が発生するまで、同じ測定位置での散水を60秒間隔で繰り返し行う.「水の流下」 とは、噴霧形状の上部領域(ラグビーボール状)から垂れ流れた水が、下部領域(受け皿状)まで到達また は貫通した状態を指す.図4に、目視による水の流下の判断基準を示す.水の垂れ流れた位置,経路、太さや 分岐は考慮しない.

同じ測定位置における散水の繰り返し時間間隔は60秒とし、タイマーを使用して±1秒程度の正確さを確保 すること.

60秒間の散水繰返し時間を利用して、1箇所当たり最大12点の測定位置で測定を同時に進行してよい. 複数の測定位置で同時に測定を行う場合、「水の流下」は必ずしも測定位置の順に発生しないことに留意するこ

と. なお、「水の流下」が確認された測定位置における散水の繰り返しはそれ以降省略してよい.



5.4. 測定結果の記録

(1) 測定位置の通し番号

1箇所当たり8測定点以上の位置で測定を行い、測定位置ごとに通し番号等を付与して区別する.

(2) 測定位置ごとの散水回数

測定位置ごとに、「水の流下」が確認されるまでに要した散水回数を記録する.

(3) その他

滞留した水への接触などによって流下が誘発された場合など,明らかに測定上のミスが生じた測定位置の 結果は異常値として棄却する.また,ひび割れや表面気泡など明らかな要因により水の流下が阻害された場 合は,当該位置の測定結果を異常値と見なして棄却してよい.なお,合否の判定には1箇所当たり6測定点以 上の測定データが必要となる.

6. 合否の判定

6.1. 判定方法

1箇所当たり6測定点以上の有効な測定データを基に,表1に示す散水回数の判定基準値により合否の判定を 行う.3測定点以上の測定データの散水回数が判定基準値以上となった場合を不合格とする.散水装置の操作 1回当たりの噴霧量Wiについては,0.01g単位に丸めた値を判定に用いる.

脱型後もしくは 養生終了後の経過日	数	1日	2日	3日	4~7日	8~14日	15~28日	29日 以降
散水装置の操作1 回当たりの 噴霧量 W ı(g)	0.03	14回	18回	20回	30回	34回	37回	40回
	0.04	11回	14回	15回	23回	25回	28回	30回
	0.05	9回	11回	12回	18回	20回	22回	24回
	0.06	7回	9回	10回	15回	17回	19回	20回
	0.07	6回	8回	9回	13回	15回	16回	18回
	0.08	6回	7回	8回	12回	13回	14回	15回
	0.09	5回	6回	7回	10回	12回	13回	14回
	0.10	5回	6回	6回	9回	10回	11回	12回
	0.11	4回	5回	6回	9回	10回	10回	11回
	0.12	4回	5回	5回	8回	9回	10回	10回

表1 散水回数の判定基準値

6.2. **不合格時の対応**

不合格と判定された場合には、表層透気試験(トレント法)によって表層透気係数を測定し、合否を判定 すること.

7. 報告

報告する事項は次のとおりである.

No.	報告内容	記載すべき事項
1	構造物名称	工事名,測定対象構造物の概要など
2	測定年月日	試験実施日、コンクリート打込み日、脱型もしくは養生完了日
3	測定条件	天気,外気温,日射の有無,雨掛かりの状況*1
4	測定方法の名称	散水試験
5	測定位置の概要	測定位置図、雨掛かりおよび日射の有無、ひび割れ位置など
6	測定者名	測定者名および所属
7	測定機器の情報	散水試験装置の型式、品番、噴霧量
8	測定結果	含水率,散水回数(全データ),流下時吸水量,判定基準値
9	その他	必要により(コンクリート表面温度、水温 等)

*1:雨掛かりのある箇所では、近傍の観測所において1mm以上の降雨が観測されてからの経過日数などとしてよい.

〔参考文献〕

1) 西尾壮平: 散水によるコンクリート表層品質の簡易評価,鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016.6

2) 西尾壮平・上田洋: コンクリート表層品質の簡易な非破壊評価手法の開発,鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.5-10, 2014.2