

研究成果報告書

研 究 題 目		電気抵抗法によるセメント硬化体内部水分移動の見える化	実 施 年 度 2020年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学 大学院先進理工系科学研究科 先進理工系科学専攻 社会基盤環境工学プログラム	
	氏 名	河合 研至	印
1. 研究の目的・背景 高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が 50 年以上の供用年数を迎えるなか、耐久性の十分でないコンクリート構造物が多く存在することは、事実として否めない。この維持管理・更新費を最小限に抑えるためには、劣化進行の的確な予測が急務の課題となる。 コンクリートの代表的な劣化現象には、鋼材腐食（塩害、中性化）、凍害、アルカリシリカ反応、化学的侵食などがあるが、いずれの劣化現象においても、劣化に重要な役割を果たしているのがコンクリート中の水である。セメント硬化体は、水和反応の進行とともに硬化収縮し、マクロな収縮は自己収縮として表れるが、収縮の大半は硬化体内部に空隙（細孔）を形成することで吸収される。この細孔中に存在する水（細孔溶液）が、上記の劣化を引き起こす物質の移動の場、化学反応の場、電気化学反応の場となる。すなわち、コンクリートの劣化を解明する、また制御する鍵となる場である。さらに、細孔内に空隙と水隙が存在する場合にはメニスカスが形成され、その界面に働く表面張力によりコンクリートが収縮し、鋼材等に拘束された場合に、ひび割れ等の構造的損傷を引き起こすこととなり、コンクリートの化学的な劣化のみならず構造的な観点からも鍵となる場である。 本研究の目的は、このコンクリート細孔中に存在する水分（液状水と水蒸気）の、表面から内部へ、あるいは内部から表面へ向かう移動を、連続的に、かつ経時的に、そして可能な限り簡便な方法によって視覚的に把握できる手法を開発し、実現象と整合するものであることを検証することにある。これまでもコンクリート内部の水分を的確に捉えようとする研究は数多く行われているが、その大半は間接的な測定となっている。近年では、中性子線などを用いて水分の移動が捉えられつつあるが、SPring-8 など実験を行える環境が極めて限定され、また、非常に寸法の小さな供試体しか取り扱うことができない。本研究は、硬化体内部に電極を埋め込み、その電気抵抗値を経時的に測定することにより、内部の水分移動を直接捉え、視覚的に「見える化」しようとするものである。 本研究の着想に至った発端は、東京大学・岸教授が提唱する液状水浸潤限界の存在である。これは、コンクリートの吸水に伴う液状水の移動には深さ方向に限界があるとするものであり、実構造物においてもそれを示唆する測定結果が一部で見られている。もしこれが真実であるとすれば、コンクリートの劣化進行予測に関わる学術研究に大きな変革をもたらす画期的な事実であり、この事実を視覚的に検証できる方法として、本研究の成果は、学術的、工学的に極めて大きな意義を有する。			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

水セメント比 0.35, 0.55 のセメントペーストを材齢 28 日まで水中養生後、温度 20℃、相対湿度 70%の環境下で恒量となるまで静置したのち、一部の供試体については温度 20℃、相対湿度 98%の環境下へ移すことで暴露面から吸湿させ、一部の供試体については暴露面に水槽を固定することで暴露面から吸水させ、このときの表面から内部に向かっての電気抵抗の経時変化を測定した。また、別途、20℃、相対湿度 75.5%, 85.1%, 97.6%の環境下に置いた供試体から、供試体の内部相対湿度と電気抵抗の関係を求め、吸湿、吸水させた供試体にこれを適用することにより、電気抵抗の経時変化を内部相対湿度の経時変化として求めた。吸湿供試体において、水セメント比 0.35 の場合に、28 日間の吸湿にて暴露面から 24mm までの範囲でわずかに内部相対湿度の変化が認められたものの、有意な差とは判断できなかった。また、水セメント比 0.55 の場合には、42 日の吸湿の間に、全体的に内部相対湿度の大きな変化は認められなかった。供試体内部に埋め込んだ市販の湿度センサーとの比較では、水セメント比 0.35 の供試体において暴露面から 8mm, 16mm の位置では、両者がほぼ等しい内部相対湿度を、吸湿開始から 28 日まで示したものの、暴露面から 4mm の位置では、電気抵抗による内部相対湿度と湿度センサーによる内部相対湿度の間に、相対湿度として 10~15%程度の相違があり、また、水セメント比 0.55 の供試体では暴露面から 4mm, 16mm の位置で、両者の内部相対湿度の間に同じく 10~15%程度の相違が認められた。一方、吸水供試体では、水セメント比 0.35, 0.55 のいずれにおいても、吸水に伴う内部相対湿度の上昇を確認することができた。ただし、水セメント比 0.55 の場合に暴露面から 20mm, 40mm の位置で、電気抵抗による内部相対湿度と湿度センサーによる内部相対湿度がほぼ一致したものの、水セメント比 0.35 の場合には、暴露面から 28mm の位置において、電気抵抗による内部相対湿度と湿度センサーによる内部相対湿度の間に 10~15%程度の相違が認められた。また、暴露面から 16mm の位置においても、湿度センサーの表示に変動が見られたものの、数値は電気抵抗による内部相対湿度とややずれる結果となった。本研究で得られた供試体の内部相対湿度と電気抵抗の関係では、電気抵抗のわずかな相違が、相対湿度には比較的大きな相違として現れてくることから、この関係性の精度を向上させること、再現性を向上させることが、この測定手法にとって非常に重要となることが示された。

混和材を用いた実験では、水結合材比 0.35, 0.55 のセメントペーストを材齢 56 日まで 40℃で水中養生した後、相対湿度 60%の環境下に置くことで暴露面から乾燥を生じさせた。用いた混和材は高炉スラグ微粉末とフライアッシュであり、それぞれの置換率は 50%, 20%とした。水中養生時の温度を 40℃としたのは、混和材を用いた状態で水和反応を十分に生じさせるためである。水結合材比 0.35, 0.55 のいずれにおいても、乾燥期間が長くなるにつれ、暴露面からの内部相対湿度の低下が徐々に表れた。しかし、混和材の種類によって、同一内部相対湿度を示す電気抵抗は異なることがわかった。したがって、電気抵抗法の適用では、構成材料の性質をあらかじめ把握しておく必要があることが示された。

以上の結果から、計画に対する達成度合は 70%程度と判断する。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

新型コロナウイルス感染拡大の影響により旅費が発生しなかったため、申請時から以下の変更を行った。いずれも当初は、他財源での支出を予定していたものである。消耗品費：コンクリート水分センサー（温湿度センサー）の購入。資料費：最新関連論文の入手。なお、温湿度センサーについては、申請時に設備備品費として計上していたが、経理上消耗品扱いとなり、消耗品費として支出した。また、申請時には資料費を計上していなかったが、研究遂行上必要となったための支出である。

その他に関しては、概ね申請時の予定通りの支出となった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究により、セメント硬化体内部の水分移動を、硬化体を破壊することなく電気抵抗法により見える化できるある程度の見通しは得られたものとする。

今後の発展性を最も期待するのは、コンクリートにおける各種の化学的な劣化現象における水分の関与に対する解明である。コンクリートの化学的な劣化に伴うひび割れ、膨張など、外観に生じる変化をこれまでは定量的に把握することにより劣化の程度が評価され、試験体を破壊して調査することによりその発生原因の探求が行われてきた。したがって、外観上の変化は経時的に捉えられるものの、硬化体内部で生じている変化を経時的には捉えられていない。水分移動の見える化は、内部で生じている変化が外観上の変化としてどのように反映されているのかを、少なくとも水分の挙動に関して経時的に追究できるようにする手法となり得るものと思われる。しかし、問題点も少なからず明らかとなってきたため、今後はその克服を検討していく必要がある。一つは再現性の問題であり、測定される抵抗値の供試体間のばらつきが大きい。供試体によって必然的に細孔構造にばらつきが生じるため、その結果として抵抗値にばらつきが生じる点はやむを得ないが、測定用供試体の作製上の問題点はないのかを明らかとしていかなければならない。もう一つは硬化体の内部相対湿度と抵抗値との関係であり、水結合材比のみならず結合材の種類によっても、この関係は変化することが今回の研究によって明らかとなった。実用的には、内部相対湿度と抵抗値との関係が固定されている方が簡便で取り扱いやすいことから、硬化体内部をモデル化することにより内部相対湿度と抵抗値との関係を解析的に求め、水結合材比や結合材の種類による相違が抵抗値に及ぼす影響を解析的に表現することにより、実用化に資するものとしていきたいと考える。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

Takahiro Aoki, Yuko Ogawa, Kenji Kawai: Applicability of electrical resistance method to moisture transfer measurement in paste using mineral admixture, The Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA) 2021, Ho Chi Minh City, Vietnam