

論文 埋込みセンサーを用いたコンクリートの表面吸水試験における水分移動の分析

林 和彦*1・Usman AKMAL*2・細田 暁*3

要旨: コンクリートの養生が品質に影響をおよぼす範囲および表面吸水試験の評価指標の物理的意味を明らかにするために、埋込みセンサーを用いた供試体により、コンクリート内部での水分移動を把握する実験を行った。検討の結果、コンクリートが養生期間中に表面からの乾燥の影響を受ける範囲は、20~30mmの深さまでであることがわかった。この範囲が10分間の表面吸水試験中に水が浸入する範囲と重なることが理由で、10分間の表面吸水試験が養生の影響等を敏感に検知できることを明らかにした。

キーワード: 水分移動, 養生, 水分センサー, 表面吸水試験

1. はじめに

コンクリートの表層品質、いわゆる表層の緻密性を高めることは耐久性向上の観点で重要である¹⁾。それを達成するために、材料に関するものとしてセメント種類や水セメント比の変更、施工に関するものとして型枠存置期間を長くしたり、さらには積極的に水を与える湿潤養生も行われているが、これらによる表層品質の向上効果を実構造物で評価する手法の構築のニーズは高い。

原位置において完全な非破壊でコンクリートの表層品質を評価する手法として著者らは表面吸水試験を開発し^{2),3)}、この手法を用いることで液状水の浸入に対するコンクリート表層の緻密性、微細ひび割れの有無などを評価できる。セメント種類、水セメント比が表層品質に与える影響を評価できるだけでなく、特に養生（型枠存置期間および散水養生の有無）の影響について非常に高い感度で検知できることがわかってきている³⁾。

このように表面吸水試験が表層品質を分析できる理由として、コンクリートが養生によって影響を受ける影響範囲と表面吸水試験において水が移動する領域が同様であるためと著者らは考えている。特に、養生の影響を受けやすい高炉セメントを用いたほうが、普通ポルトランドセメントに比較して、養生が表面吸水試験結果に与える感度が高い^{1),3)}ことも、この理由が妥当であることを示唆している。しかし、表面吸水試験においてはコンクリートの外部から水を作用させるため、内部の水分移動の状況は、表面吸水試験から得られる指標に基づく推察にとどまっていた。

そこで本研究においては、コンクリート内部に水分センサーを埋め込んだ供試体を用い、水分移動の詳細な検討を行う。コンクリート打込み後の養生期間におけるコ

ンクリート表面から奥行き方向の含水率の変化、表面吸水試験における奥行き方向の水分移動を実験により把握し、吸水のメカニズムを検討した。

2. 表面吸水試験の概要

著者らが開発した表面吸水試験^{2),3)}とは、図-1に示すような、吸水カップをコンクリート面に設置し、短時間（10秒以内）で注水を行い、時々刻々のコンクリートへの吸水量をセンサーにより連続的に計測を行うものである。真空ポンプを用いた設置方法を採用し、完全非破壊で新設、既設の実構造物の鉛直面や水平面に適用できる。吸水総量だけでなく、任意の時刻の吸水速度(式(1))が得られることから、吸水速度の時間変化から、コンクリート内部の状況を推定することができる。表面吸水速度が小さいほうが、緻密であり、吸水抵抗性が高いことを示す。10分間の測定を標準とし、1回の測定から得られる3つの指標は、(1)10分時点での表面吸水速度(ml/m²/s),

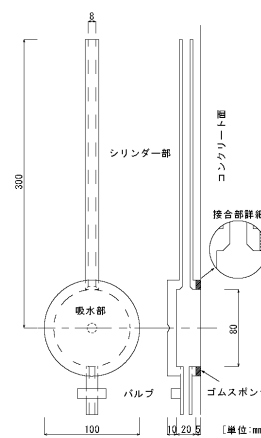


図-1 表面吸水試験装置の概要

*1 香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 博(工)(正会員)

*2 University of Engineering and Technology Lahore, Punjab, Pakistan, Assistant Professor, Ph.D

*3 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)

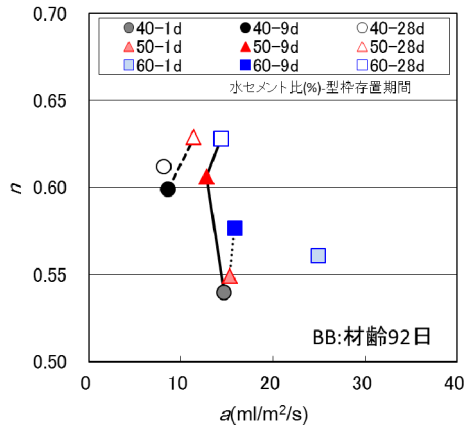


図-2 表面吸水試験による a と n の関係

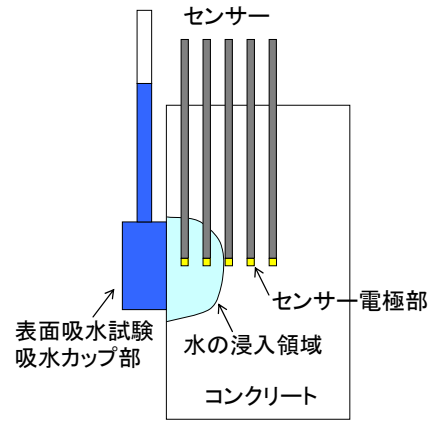


図-3 測定概念図

(2)注水完了後1秒時点での表面吸水速度 $a(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$, (3)吸水速度の時間変化を表す指標 n , であり, それらは式(2)の関係で示される。

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

$$p = at^{-n} \quad (2)$$

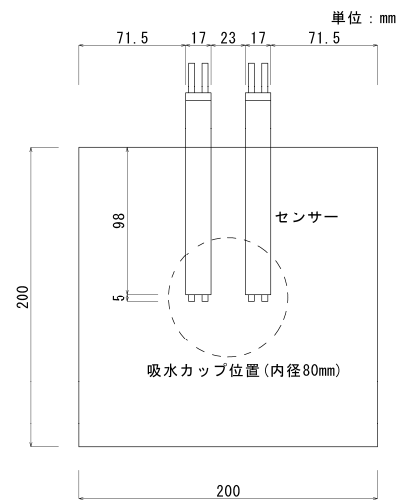
ここで, p は表面吸水速度($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$), w はコンクリート単位面積あたりの累積吸水量(ml/m^2), t は注水を完了(注水を開始してから10秒)してからの時間(s)である。

これら3つの指標の物理的意味とは, a は注水を完了してから1秒時点での表面吸水速度であり表面近傍の状態を表し, n は表面吸水速度の時間変化の程度を表すものであることから奥行き方向の影響を表し, それらの両方の影響を含む10分時点での表面吸水速度は, コンクリート表層の品質を表す指標であると考えている^{2),3)}。

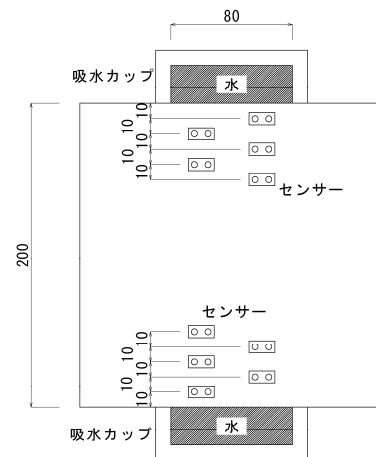
既往の研究において, 高炉セメントB種 (BB) を用いた, 水セメント比を3水準 (40, 50, 60%), 型枠存置期間を3水準 (1, 9, 28日) の9体の供試体実験において, 著者らにより表面吸水試験を実施した^{1),3)}。材齢92日において, 図-2に示すように, 供試体40-1d, 50-9d, 60-28d (水セメント比(%)-型枠存置期間(日)) の3体が, ほぼ同じ a の値を有するものの, n および10分時点での表面吸水速度が異なった。これは, 60-28dの方が40-1dよりも10分時点での表面吸水速度が小さいことを意味しており, 水セメント比が高くても養生期間を延ばすことにより表層品質を高めることができることを示す。特に, 40-1dにおいては, 表面からの水が内部にどのように浸透し続けているのかを明らかにしたい, というのがこの研究の動機である。

3. 実験概要

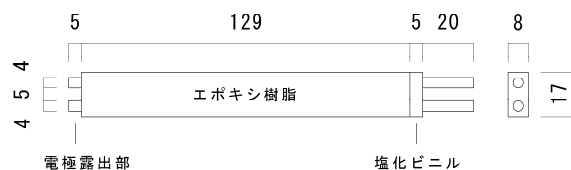
コンクリート内部の水分移動メカニズムや, 表面吸水



(a)供試体側面図



(b)供試体平面図



(c)電極形状

図-4 供試体形状とセンサー配置状況

試験の3つの指標について考察を行うために、図-3に示すようにコンクリート表面から深さ方向に段階に水分センサーを埋め込んだ供試体を作製し、打込み時からの水分逸散の状況および、表面吸水試験時の液状水の浸入を実験的に把握した。

3.1 実験供試体

200mm角の立方体の供試体を作製し、図-4のように相対する側面2面に対し、測定面からの深さ方向に水分センサーを埋め込んだ。1面にはコンクリート表面からの深さが10, 20, 30, 40, 50mmになるよう、かつセンサー間にも骨材が配置される空間を確保するために、センサーを千鳥に配置した。表面吸水試験を実施する際に、水の浸入が3次元方向に入っていくことが予想され、同時に重力の影響で多少下方へ移動することも懸念されたが、吸水カップの水が作用する部分の直径は80mmであり水が多少下方に移動しても浸入深さの測定には影響はないものと考え、センサーの鉛直方向の中心位置を、表面吸水試験の吸水カップの中心に合わせた。

セメントには高炉セメントB種を使用し、実験パラメーターとして、W/Cを40, 50, 60%, 型枠存置期間を1, 9, 28日のそれぞれ3水準から計4つの組合せの4種類の供試体を各1体製作した。供試体の一覧を表-1、配合を表-2に、フレッシュコンクリートの試験結果を表-3に示す。水分逸散挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる単位水量を一定とし、配合間でスランプを合わせるためにs/aや混和剤量を調整した。実際に得られたスランプや練り上がり温度は異なったが、材料分離は見られず、物質移動に及ぼすスランプの差による影響は少ないと考えている。

3.2 埋込みセンサー

センサーは、M4の全ねじステンレス棒を電極として用い、それぞれ5mm離れた位置になるように絶縁体（エポキシ樹脂）に埋め込んだものである。電極先端部の露出長さは5mmである。市販の電気抵抗式水分計に電極を接続し、電極間5mmのコンクリートの電気抵抗(Ω)を計測した。その際、当該水分計による水分(%)の換算式が明らかでないため、電気抵抗に匹敵する出力（カウント値）を読み取った。本測定装置が出力するカウント値と電気抵抗について別途図-5に示す関係を得て、電気抵抗(Ω)に換算した。本論文では、換算した電気抵抗を用いて実験結果を示す。

3.3 水分逸散、吸水の測定実験の概要

(1) 打込み後の水分逸散測定実験

コンクリートの打込み後に表面からどれだけの深さの範囲の水分が逸散するのか、型枠を存置することでどれだけ水分を維持できるのか、について把握することを目的とする。

表-1 供試体の一覧

供試体名	W/C (%)	型枠存置期間(日)
40-1	40	1
50-9	50	9
60-1	60	1
60-28	60	28

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
40	42	160	399	737	1013	3.90	0.39
50	46	160	319	839	980	3.12	0.31
60	51	160	267	953	911	2.27	0.26

Ad1 : AE減水剤, Ad2 : AE助剤

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	気温 (°C)	湿度 (°C)
40	16.5	4.6	20.8	21.0	66
50	17.5	4.3	20.7	20.0	70
60	5.0	4.5	23.8	25.0	80

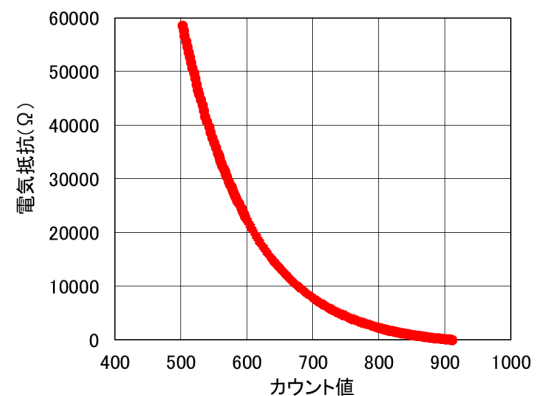


図-5 カウント値と電気抵抗の関係

温度20°C、湿度約60%の環境にて、打込みを行った直後から計測を開始し、所定材齢での型枠の取外しを経て、合計28日間静置した。その間の水分逸散の状況を把握するために、連続的にセンサー間の電気抵抗を計測した。なお、厳密にはセメントの水和による水の消費および硬化体の組織変化によっても電気抵抗が変化することが考えられるが、影響を分離することができないため、水和反応および水分逸散による含水率の変化の両方の影響を含んだ結果を分析する。

(2) 表面からの吸水実験

表面吸水試験や、降雨などによるコンクリート表面からの水の浸入が、内部奥行き方向にどのように行われるのかを把握することを目的とする。

28日間の養生期間が終了した後、測定位置において表面吸水試験を行った。本試験は、通常は10分間の測定を

標準とするが、降雨を想定し、関東における降雨継続時間の最大値を参考に48時間、表面吸水試験を実施した。試験中は吸水とともに、作用水頭が減少するが、初期値300mmから開始し、水頭が200mmを下回らないように、水を継ぎ足すことで管理した。この範囲においては、作用水頭の差異による吸水結果の変化は見られないことを確認済みである⁴⁾。

60-28については、28日目で型枠を取り外した5時間後に測定を行ったところ、コンクリート中に液状水が多く存在する条件であったため、再度乾燥の時間を置き材齢70日目に28日計測時とは反対面にて表面吸水試験を48時間行った。

4. 実験結果と考察

4.1 水分逸散測定の結果

図-6に水分逸散実験の結果を示す。図の凡例は、水セメント比(%)－型枠存置期間(日)－センサーの表面からの深さ(mm)である。図は各センサーの位置におけるコンクリートの電気抵抗の変化を示しており、電気抵抗が大きいほど乾燥していることを表す。

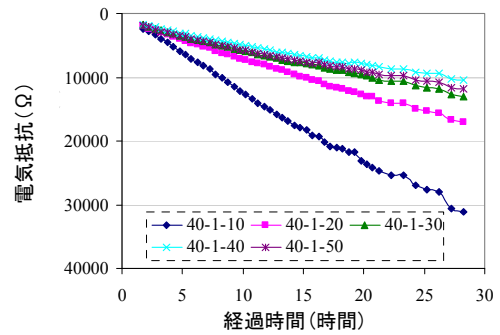
28日間型枠を存置した60-28は、すべての位置のセンサーがほぼ同じ値を示しながら、電気抵抗が増えている。この供試体は表面からの水分逸散がないため、電気抵抗の増加は、水和による液状水の消費および組織変化の影響を示している。すべての位置のセンサーがほぼ同じ値を示すのは、各位置で同様の水和反応が生じており、しかも表面から水分が逸散していないためである。電極間でのある程度のばらつきは有しており、これは、各々のセンサー部において、電極間への粗骨材、細骨材の入り方が異なることなどによる差異と考えている。よって、この程度の誤差は含むものとして考察を行う。

型枠存置期間が1日(40-1および60-1)および9日(50-9)の供試体は、脱型時以後に大きく電気抵抗が増加する傾向が見られ、表面に近いほど電気抵抗の増加量大きい。これは、表面から水分が逸散していることを示している。

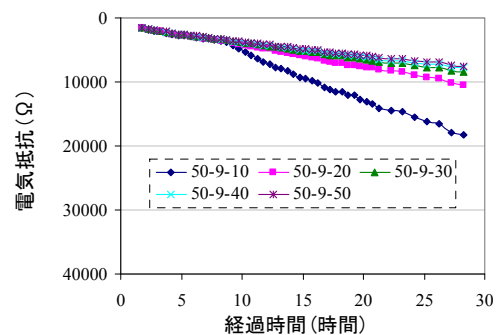
40-1については、奥の方では、型枠を存置し続けている60-28の値と同様のばらつきの範囲に収まっていることから、深さ30、40、50mmの電気抵抗の変化は小さく、28日間の乾燥による影響範囲は30mm未満であったと考えている。

50-9については、9日目の脱型以後、表面から水分が逸散し始めていることを、センサーの値も示している。28日間で乾燥する領域は、20mm以下であることがわかる。

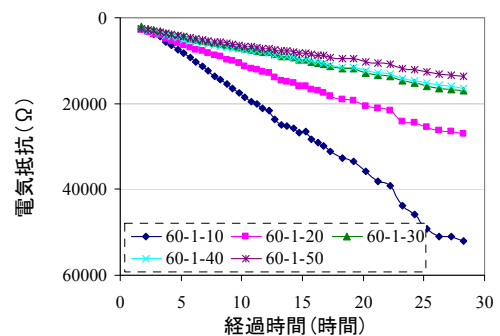
60-1については、深さ30、40、50mmの電気抵抗のばらつきが少ないことから、同様に、乾燥の影響範囲は30mm未満と見ることができ。ただし、60-28と比較すると28日の50mmの電気抵抗はおおよそ8000Ωであることに対し、



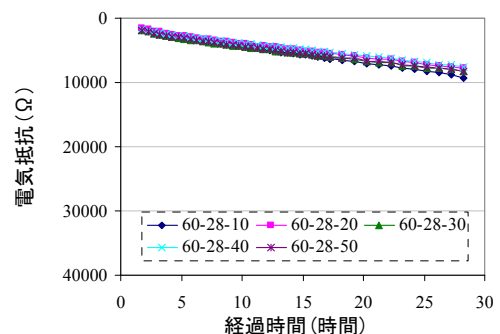
(a) 40-1



(b) 50-9



(c) 60-1



(d) 60-28

図-6 水分逸散時の内部センサーの挙動

おおよそ2倍の値であることから、50mmの深さまで表面からの水分逸散の影響が生じていると考えることもでき

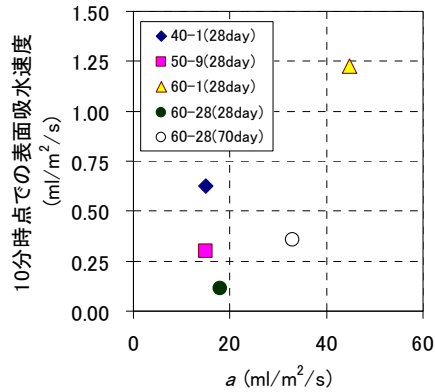


図-7 aおよび10分時点での表面吸水速度

るため、さらなる検討が必要である。

また、型枠存置期間が同じである40-1と60-1の電気抵抗の絶対値を比較すると、水セメント比が高く、緻密でないと考えられる60-1の方がより大量の水分が逸散していることがわかる。

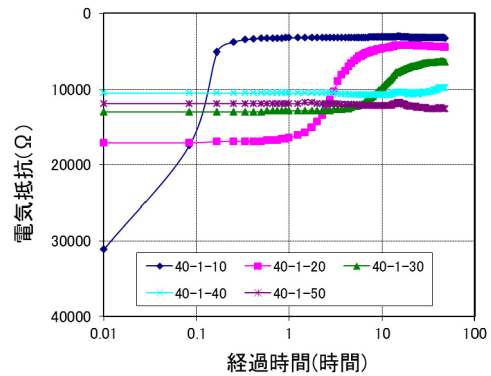
4.2 吸水挙動測定結果

材齢28日目（60-28は材齢70日目も追加）に、表面吸水試験を48時間行い、同時にセンサーでコンクリート内部の電気抵抗の測定も行った。

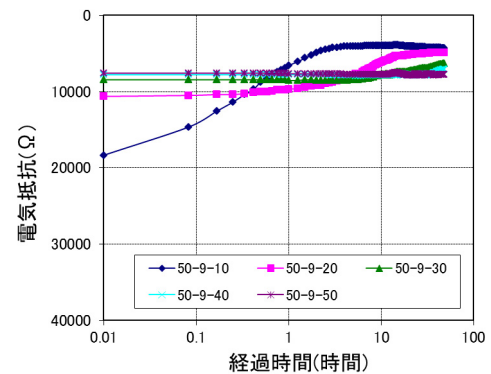
表面吸水試験の開始後10分間について、表面吸水試験から得られる指標である a および10分時点での表面吸水速度を求めたものが、図-7である。 a は、注水完了後1秒時点での表面吸水速度であり、コンクリートの表面近傍の状態を表し、10分時点での表面吸水速度は奥行きも含めた品質を表す^{2),3)}。これより、材齢28日での40-1, 50-9, 60-28は、表面近傍の吸水抵抗性は同等であるが、内部方向の吸水抵抗性は異なることが推察できる。ただし、60-28は材齢28日時点の含水率が高かったため、材齢70日のデータも示すと、28日以後の乾燥により a は大きくなり、10分時点での表面吸水速度も増加している。

図-8に48時間の表面吸水試験時のセンサーの経時変化の結果を示す。40-1において、0.1時間時には水の浸入が深さ10mmに達しており、その後電気抵抗は3000Ω程度で落ち着いている。およそ1時間後から20mmのセンサーも変化が始まり、10時間後には一定値に達してその後収束している。同様に30mmについても3時間後から電気抵抗が減少し、水が30mmに到達したことを示す。40mm以降は、48時間の間には明確な変化は見られなかった。

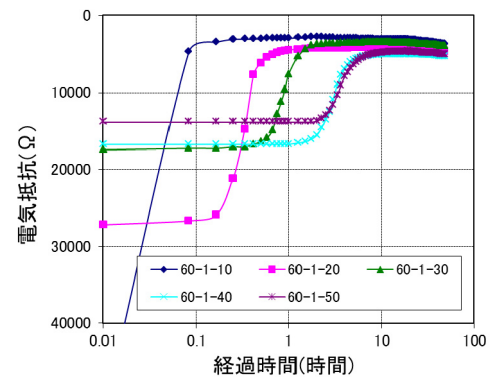
コンクリートへの吸水挙動として、酒井ら⁵⁾はまずは空隙中の中でも粗雑な空間に水が到達し、その後、徐々に細かい空隙にも満たされていくことをモデル化している。本測定においても、電気抵抗が変化し始めた時点が水の浸入深さがセンサーの位置に達した時点であり、さらに電気抵抗が下がり始めて一定値に収束するまで



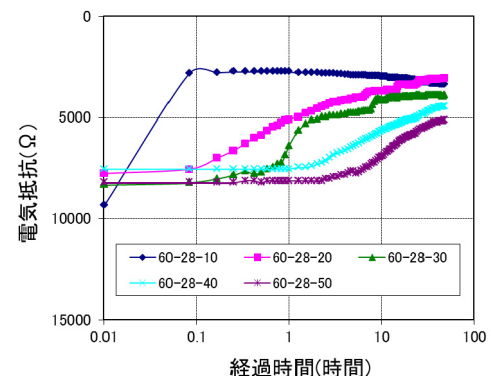
(a) 40-1



(b) 50-9



(c) 60-1



(d) 60-28

図-8 吸水時の内部センサーの挙動(材齢28日)

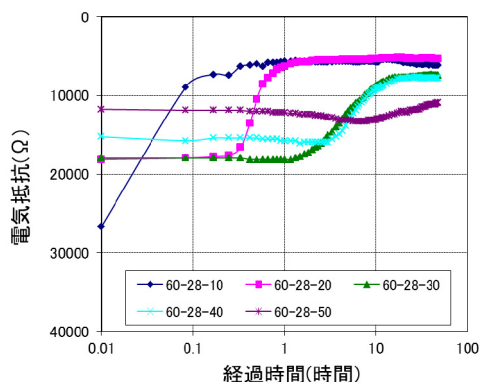


図-9 吸水時の内部センサーの挙動(60-28,材齢70日)

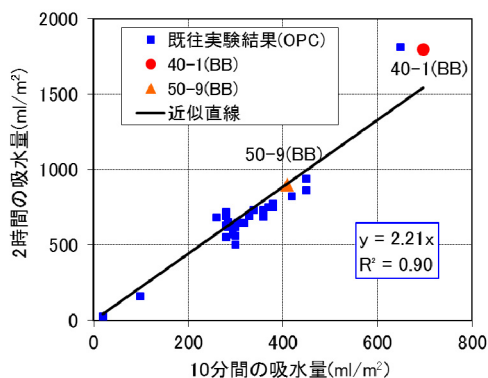


図-10 10分間と2時間の吸水量の比較

が、細かい空隙中に水が満たされていく時間を表しているのではないかと考えている。

50-9は、40-1と比較し、10mm、20mm、30mmのセンサーにおいて、水が各センサーに到達する時間はほぼ同じであるが、その後一定になる時間が遅い特徴がある。深さ30mmまでの範囲において、50-9の方が40-1よりも緻密であることを示していると考えている。

60-28については、図-8(d)および図-9より、ほとんど乾燥を受けていない材齢28日と、その後乾燥を受けた70日において、それぞれ、0.1~0.2時間程度の早期に水の浸入領域が深さ20mmに達しており、材齢の経過による傾向の差はみられない。

4.3 表面吸水試験の継続時間の検討

図-10に、表面吸水試験の開始後2時間での吸水量(吸水面積で除した単位面積あたりの値)と開始後10分間の吸水量を比較したものを示す。図には、著者らがこれまで行ってきた実験結果(セメントは普通ポルトランドセメント)も併せて示す。本供試体を含め、2時間と10分間の吸水量には相関があるため、10分時点の表面吸水試験の結果がその後逆転することなく、10分間の測定で表層品質を評価できることが示唆される。

4.4 指標 n の検討

図-7において、40-1および50-9が同じ値の a をもつに

もかわらず、40-1は50-9に比べ n が小さく変化することにより10分時点の表面吸水速度が大きくなった。図-8(a)(b)の内部センサーによる測定結果より、40-1は50-9に比較し、早期に内部へ水が浸入することや、電気抵抗の減少速度が大きいことから、 n が小さいことは、コンクリートの表面から内部に向かってより速く水が浸入することと関連することが実験において明らかとなった。

5. まとめ

本研究で設定した条件での実験から得られた成果を以下に示す。

- (1) コンクリートが初期に表面からの乾燥の影響を受ける範囲は、表面から20~30mmの深さである。表面から乾燥する深さおよび乾燥の程度は、水セメント比が大きいほど、型枠存置期間が短いほど大きい。
- (2) 10分間の表面吸水試験において、コンクリート中へ水が浸入する深さは10~30mmであった。この深さの範囲は養生の影響を受ける範囲と同程度であり、表面吸水試験が養生の影響を高い感度で検知できる根拠と考えている。
- (3) 表面吸水試験の指標 n は奥行き方向の水の浸入の仕方と関係することを実験的に明らかにした。表面吸水試験において、10分間で得られる吸水量は、2時間の吸水量と相関が高く、10分間の測定で表層の吸水抵抗性を十分に評価できると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335委員会)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No.97, 2012.7
- 2) 林和彦, 細田暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発、コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1769-1774, 2011
- 3) 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
- 4) 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原麻希子：コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案、コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1804-1809, 2012
- 5) 酒井雄也, 岸利治, 中村兆治：微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.730-735, 2012