

論文 コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響

鈴木 浩明^{*1}・玉井 謙^{*2}・上田 洋^{*3}

要旨: 雨水や漏水等によるコンクリート構造物への水分浸透は、コンクリート構造物の劣化に大きな影響を及ぼす。そこで、基礎的実験として配合と養生を変えたコンクリートへの水分浸透深さを把握することを目的に検討を行った。供試体の一面を水に浸漬させ、質量変化や目視による割裂面の水分浸透深さを測定したほか、センサーを一定深さごとに埋設し水分の検知を行った。その結果、配合や養生の違いが水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響を明らかにした。加えて、内部含水率の変化から水分浸透深さを推定する手法についても検討した。

キーワード: コンクリート, 水分移動, 水分浸透深さ, 内部含水率, 色差, 水セメント比, 養生

1. はじめに

中性化や塩害による鉄筋腐食,あるいは凍害やアルカリシリカ反応など,コンクリート構造物の劣化の主要かつ共通の原因としてコンクリートへの水分の供給が挙げられる。構造物の表面において,降雨時には構造物の上面に雨が降り,構造物の側面にもしばしば雨が降る。構造物の下面や内部には降雨は直接かからないが,上面や漏水箇所などから水が回るによりコンクリート表面が湿潤状態になる箇所がある。このように水分が供給されるコンクリート表層においては乾燥と湿潤とを繰り返す状態にあり,かぶりが不足しているような箇所では鋼材腐食やかぶりコンクリートのはく落に繋がりがやすい。特に鉄筋腐食に関して,水は化学反応の出発物質であり,劣化原因物質のキャリアーでもあることから降雨等による水分浸透の深さを把握することが重要である。

コンクリート内部への水分浸透に関して,筆者らは実構造物を対象に2電極間の電気抵抗を用いて,相対的に水分量の深さ方向の変化を測定する調査¹⁾や,粗骨材の影響を排除したモルタル供試体における吸水特性の把握²⁾を行ってきた。また,液状水の挙動について解析的検討がなされた事例³⁾も報告されている。しかし,配合および養生方法がコンクリートの水分浸透深さの時間依存性におよぼす影響を検討した例は少ない。

コンクリートは,比較的高密度の多孔体のひとつであるが,その構成素材ならびに配合や養生の多様性のために品質が大きく異なる。そこで本研究では,1回の降雨でのコンクリート表層の水分浸透深さを知るための基礎的な実験として,コンクリート供試体を用い,その水セメント比および養生方法に代表される表層品質が水分浸透深さにおよぼす影響について検討を行った。また,水

分浸透深さを推定する手法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

作製した供試体は,寸法が100×100×100mmおよび200×200×150mmのコンクリートとし,使用材料を表-1,配合と養生および作製数を表-2に示す。200×200×150mmの供試体には内部含水率センサー(電気抵抗式水分計用,長さ:150mm)を埋設した。埋設深さはセンサーの先端が側面から10,30,50mmとなるようにした。センサー先端のブラシ部には同配合のコンクリートをウェットスクリーニングして得たモルタルを塗り込ませた。

表-1 使用材料

材料(記号)	名称等	物性等
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
細骨材(S)	千葉県君津産山砂	表乾密度:2.63g/m ³ , 吸水率:1.88%
粗骨材(G)	粗骨材①	埼玉県両神産砕石1505 表乾密度:2.72g/cm ³ , 吸水率:0.57%
	粗骨材②	埼玉県両神産砕石2015 表乾密度:2.72g/cm ³ , 吸水率:0.64%
混和剤	混和剤①	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
	混和剤②	AE剤 アルキルエーテル系 陰イオン界面活性剤
練混ぜ水(W)	上水道水	-

混合比 粗骨材①:粗骨材②=質量比6:4

表-2 配合と養生および作製数

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)			混和剤添加量 Cx%		養生	スランブ(cm)	空気量 (%)	作製数(個)			
		W	C	S	G					100x100x100(mm)	200x200x150(mm)		
					①	②							
60	47	155	259	886	623	413	0.25	0.00050	気中	8±2.5	4.5±0.5	3	-
									封緘	8±2.5	4.5±0.5	3	1
									水中	8±2.5	4.5±0.5	3	-
50	45	155	310	831	631	419	0.25	0.00075	気中	8±2.5	4.5±0.5	3	1
									封緘	8±2.5	4.5±0.5	3	1
									水中	8±2.5	4.5±0.5	3	1
40	43	155	388	765	631	419	0.25	0.00200	気中	8±2.5	4.5±0.5	3	-
									封緘	8±2.5	4.5±0.5	3	1
									水中	8±2.5	4.5±0.5	3	-

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 修士(工学)(正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 博士(工学)(正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士(工学)(正会員)

2.2 養生

打設後1日で脱型し、20℃、60%R.H.環境下で静置する気中養生、コンクリートから水分が逸散しないようにその表面を被覆し、20℃環境下に静置した封緘養生、および20℃の水中に浸漬して静置した水中養生の3種類の養生を行った。各養生を材齢28日まで行い、さらに20℃、60%R.H.環境下で材齢69日まで静置した。

2.3 実験

養生後に図-1に示すように打設側面が10~20mm程度浸漬するようにした一面浸漬試験を行った。一面浸漬試験は、雨がかりや漏水などがコンクリート表面から毛管浸透により作用する場合の水分の浸透深さを検討する試験である。なお、寸法200×200×150mmの供試体について、浸漬面とその反対側の面は開放し、残り4面をビニールテープで被覆した。測定項目としては、寸法100×100×100mmの供試体について、12時間、24時間、7日間それぞれ浸漬した後に、供試体の質量を測定し質量変化を調べるとともに、割裂を行い目視による色の変化と水分に触れると赤色に発色する市販の水漏れ検査剤を用いた発色域を調べることで水分の浸透深さを測定した。また、寸法200×200×150mmの供試体について、内部含水率を測定した。なお、内部含水率の測定には市販の電気抵抗式水分計を用いた。測定は各一点とした。

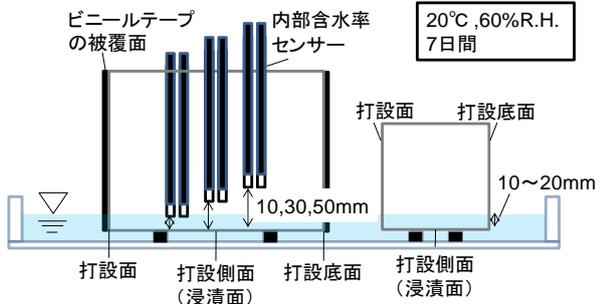
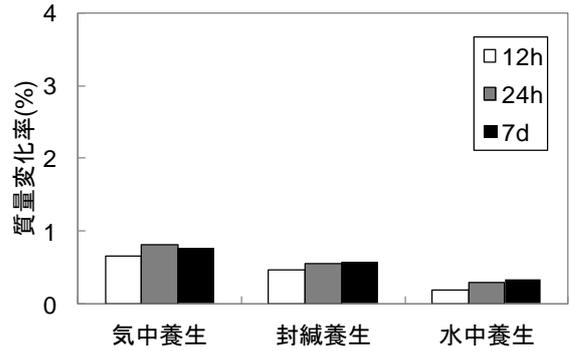


図-1 一面浸漬試験の概念図

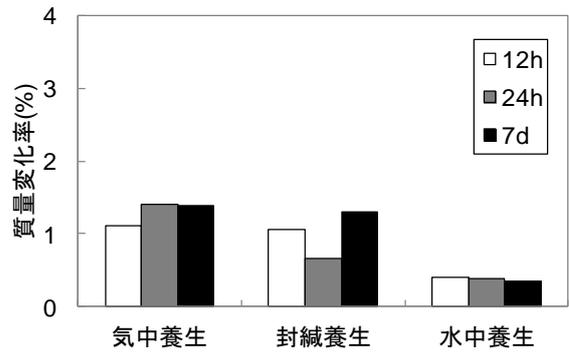
3. 実験結果および考察

3.1 質量変化率

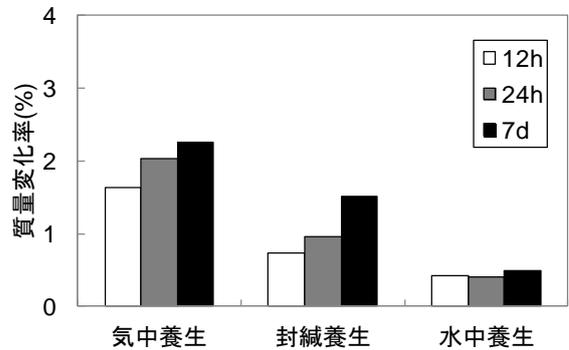
100×100×100mm 供試体の一面浸漬試験における質量変化率の測定結果を図-2に示す。なお、質量変化率は一面浸漬試験直前の質量を基準とし、各試験時間後に測定した質量差を%で表した。はじめに、経時変化に着目すると、質量変化率は12時間までに高くなり、24時間および7日間までは伸びが小さくなる、またはなくなる傾向がある。これは、一面浸漬により12時間までに多くの水分が供試体に供給され、その後は供給量が下がっていることを表している。次に、水セメント比の違いに着目すると、水セメント比が40%、50%、60%と高くなるほど質量変化率が高くなる傾向がある。さらに、養生



(a) W/C=40%, 質量変化率



(b) W/C=50%, 質量変化率



(c) W/C=60%, 質量変化率

図-2 水セメント比および養生方法と質量変化率との関係

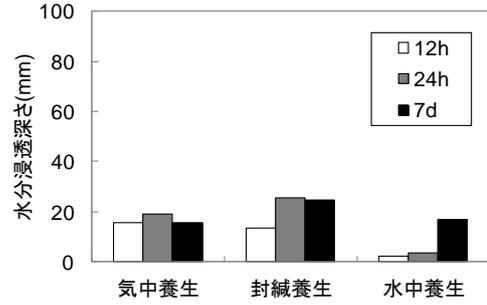
方法の違いに着目すると、気中養生、封緘養生、水中養生の順で質量変化率が低くなる傾向がある。一般に、水セメント比が高いとセメントペースト中の空隙が多くなる、養生方法として水分供給が不十分であるほどコンクリート表層付近のセメント粒子の水和が不十分となり空隙が多くなると考えられ、これら品質が悪いコンクリートの水分吸収量が多くなった本実験の結果は妥当であると考えられる。

また、水セメント比が40%の供試体は養生方法に関わらず、また水中養生を行ったものは水セメント比に関わらず安定して水分浸透量が小さい傾向にある。

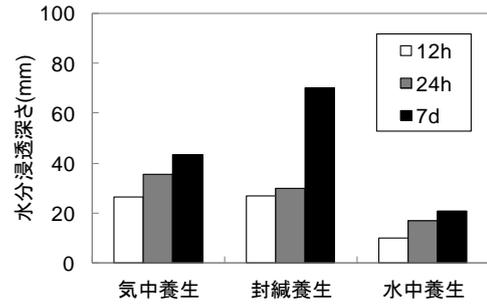
3.2 水分浸透深さ

水セメント比 50%, 封緘養生とした供試体を一面浸漬試験後に割裂し、水漏れ検査剤を噴霧した後の発色域の状況を図-3 に示す。打設面付近の発色域が深くなる傾向が全体的にみられる。これは、ブリーディング等の影響を受け、打設面付近に粗な層が形成されているためと考えられる。逆に打設底面では発色域が浅くなる傾向がある。これは圧密の影響でセメントペースト分が底面に滞留し密となったためと考える。そこで、ここではこれらの影響を受けにくい供試体中央部の発色域深さを水分浸透深さとした。なお、図-3 の(a)において浸漬面の反対側の打設側面まで変色が確認されたが、これは打設面に浸透した水が回り込んだためと考えられる。

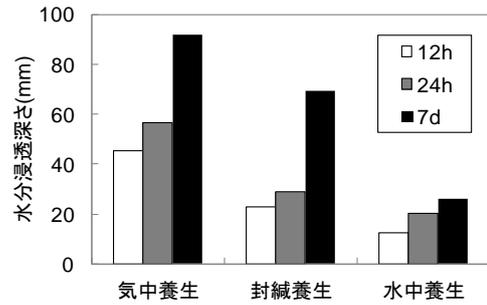
次に、供試体中央部の水分浸透深さの測定結果を図-4 に示す。はじめに、経時変化に着目すると、水分浸透深さは全体として試験時間とともに大きくなる傾向があるが、7 日の時点で伸びが小さいもしくは止まっているものと伸び続けているものに分かれる傾向がある。また、試験時間が長くなるにつれて発色域における発色度合いが徐々に不鮮明となり、発色域と未発色域の境界が判別しにくくなる傾向がある。これは筆者らがモルタル供試体で行った既往の研究²⁾と同様の傾向である。図-2 における質量変化率と図-4 における水分浸透深さを比較し整理した図-5 を見ると、12 時間、24 時間浸漬に比べて、7 日間浸漬させた供試体の質量変化率に対する水分浸透深さが大きいことがわかる。このことから7 日間浸漬させた供試体では発色した部分のコンクリート体積あたりの水分量が少ない状態になっていると考えられ、発色度合いが不鮮明となった原因であると推測される。次に、水セメント比の違いおよび養生方法の違いに着目すると、水セメント比が 40%, 50%, 60% と高くなるほど水分浸透深さが大きくなり、養生方法を気中養生、封緘養生、水中養生とするとその順に水分浸透深さが小さくなる傾向がある。これは質量変化率と同様の傾向である。水分浸透深さは質量変化率と同様に空隙の状況が大きく影響していると考えられ、空隙が多いと予想される水セメント比 60% や気中養生の供試体は、毛管浸透によってより深くまで水分浸透が起きたと考える。



(a) W/C=40%, 水分浸透深さ



(b) W/C=50%, 水分浸透深さ



(c) W/C=60%, 水分浸透深さ

図-4 供試体中央部の水分浸透深さ

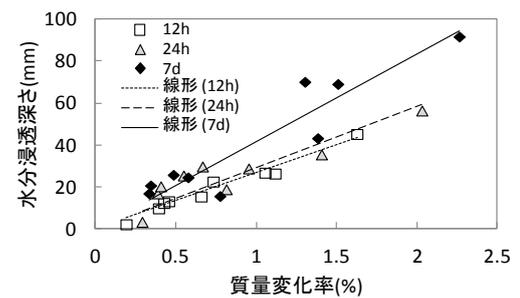


図-5 質量変化率と水分浸透深さの関係

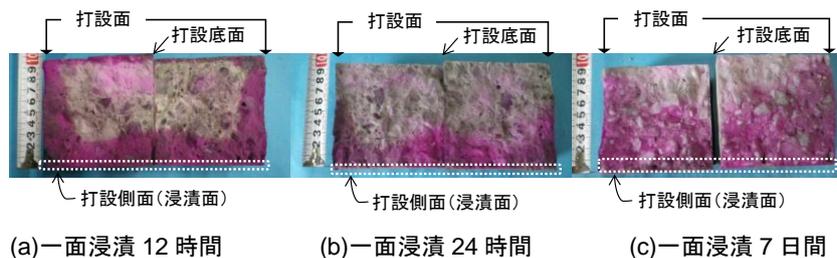


図-3 水漏れ検査剤噴霧後の状況 (W/C=50%, 封緘養生)

3.3 内部含水率

200×200×150mm 供試体の一面浸漬試験における内部含水率測定結果を図-6 に示す。ただし、内部含水率は通常、コンクリートを削孔しセンサーを挿入して測定する。そこで、本実験のようにセンサーを埋設して測定した結果を、通常の削孔による方法で測定した結果と比較したものが図-7 である。埋設して測定した値は削孔と比べて高い傾向があるものの、削孔による方法での測定と同様に内部含水率の変化を捉えていることがわかる。一面浸漬試験開始時の内部含水率は、水セメント比と養生方法の違いにより値が異なる。

図-6 より、内部含水率は水セメント比や養生方法によって、異なる値をとりながら変化していくことがわかる。特に、3.1 節および 3.2 節に示した質量変化率や水分浸透深さの変化が大きい配合や養生、例えば図-6 の(c)と(d)に示す W/C=60%、封緘養生や W/C=50%、気中養生において内部含水率の変化が大きい傾向がある。それとは逆に、質量変化率や水分浸透深さの変化が小さいもの、例えば図-6 の(a) と(e)に示す W/C=40%、封緘養生や W/C=50%、水中養生は内部含水率の変化が小さいかほとんど変化しない傾向がある。また、浸漬面に近いセンサーから順に内部含水率の上昇を捉えていることから、深さ方向に対し時間差をもって水分が浸透していることがわかる。さらに、水分が浸透する時期は配合や養生により大きく異なることがわかる。

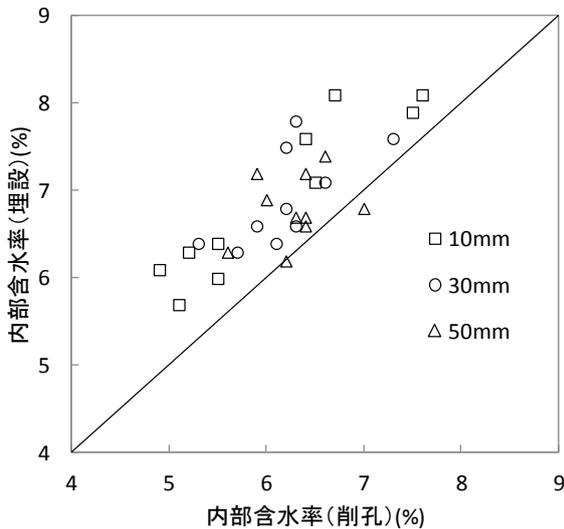
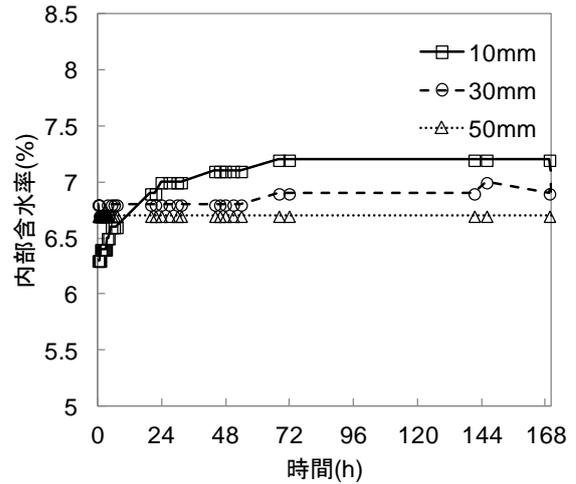
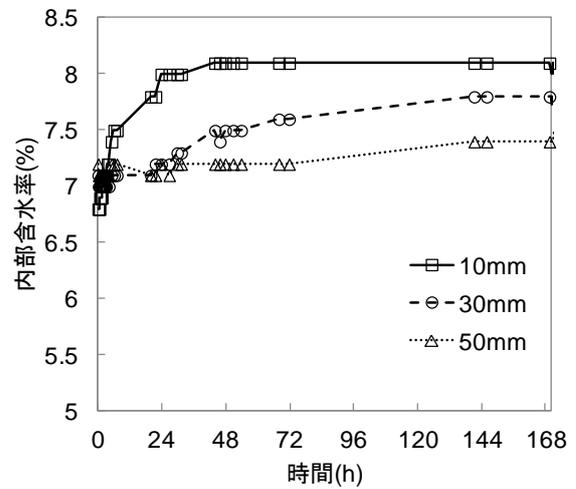


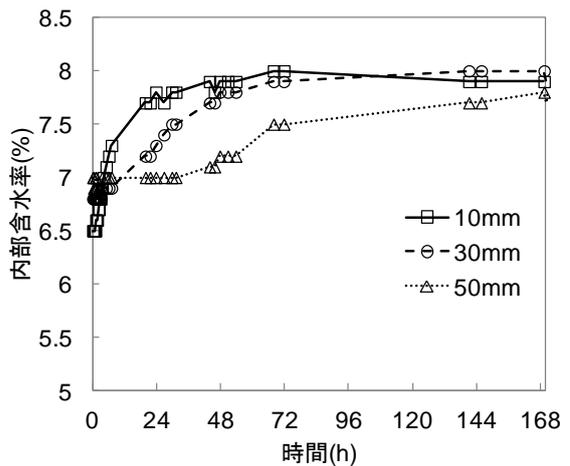
図-7 削孔と埋設との内部含水率の比較



(a) W/C=40%, 封緘養生

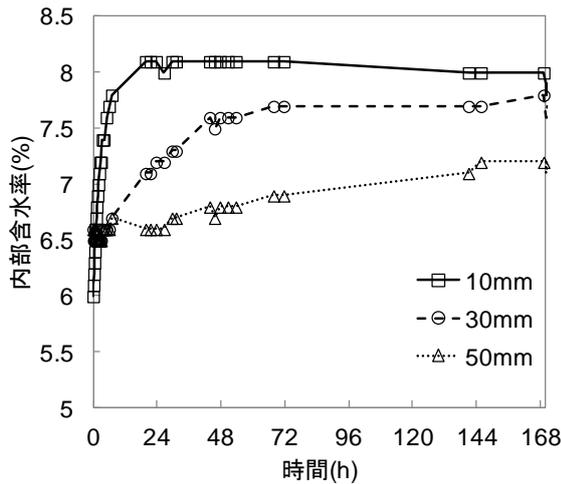


(b) W/C=50%, 封緘養生

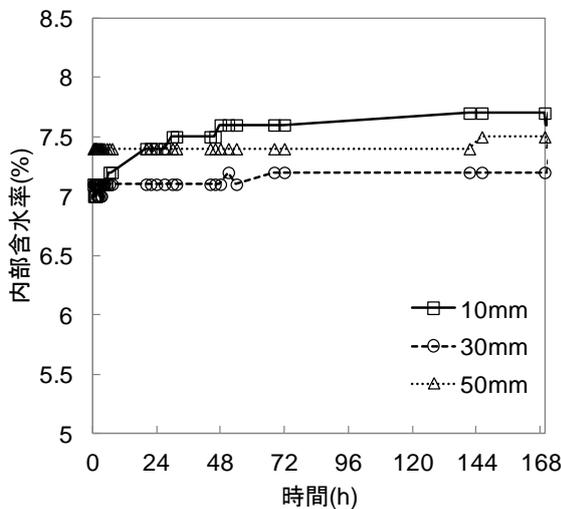


(c) W/C=60%, 封緘養生

図-6 水セメント比および養生方法と内部含水率との関係 (その1)



(d) W/C=50%, 気中養生



(e) W/C=50%, 水中養生

図-6 水セメント比および養生方法と内部含水率との関係 (その2)

3.4 内部含水率測定結果から水分浸透深さへの換算

3.2 節および 3.3 節で示した水分浸透深さと内部含水率の測定に用いた供試体は異なるサイズであるが、配合や養生、試験方法が同じであるので、比較検討が可能であると考えられる。そこでこれらを照会した結果を表-3 に示す。表の見方として例えば、W/C=40%、封緘養生を見ると、浸漬 12 時間では、目視観察より水分浸透深さが 13.3mm となり、深さ 10mm に位置するセンサーには水分が浸透していると考えられることから「浸透 (○)」と表記し、内部含水率の変化は 6.3% から 6.7% で 0.4% の

上昇となっている。表-3 より、各測定時間において目視観察の水分浸透深さがセンサーの埋設深さに達した場合、内部含水率が上昇している傾向があり、対応していることがわかる。また、一部のセンサーでは内部含水率の上昇がほとんどないものもあるが、これは水分未浸透域に対応している。

そこで、内部含水率がどれだけ上昇した場合に水分浸透を検知しているかを考えるために、一面浸漬試験開始前と各測定時間における内部含水率の差を目視観察と対応させたものを表-4 に示す。配合や養生に関係なく内部含水率の差が 0.6% 以上となる場合は全ての供試体において発色していることがわかる。このことをふまえ、センサーの感度から 0.1% および 0.2% の上昇は誤差とみなし、内部含水率が一面浸漬試験開始時の値から 0.3% ~ 0.5% 程度上昇した時にセンサーが水分浸透を検知したと仮定する。この仮定に基づき、図-6 から各センサー深さ位置における内部含水率が、開始時と比べて 0.3、0.4、0.5% 上昇した時の時間を 3 点読み取り、各センサー深さ位置における水分浸透時間の推定値とした。

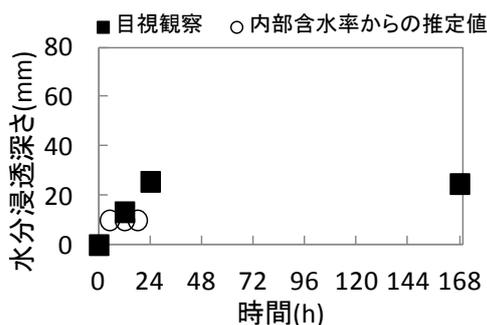
目視による水分浸透深さ (実測値) とともに、推定値を図-8 に示す。この図より、水セメント比および養生方法によって、水分浸透深さが一定となるものや上昇し続けるものが確認できる。図-8 の(a)に示す W/C=40%、封緘養生において、水分浸透深さは 12 時間で 15mm、24 時間で 25mm 程度と上昇し、7 日間 (169 時間) で 25mm 程度の水分浸透深さでほぼ一定となった。図-8 の(b)に

表-3 目視観察と内部含水率測定との対応

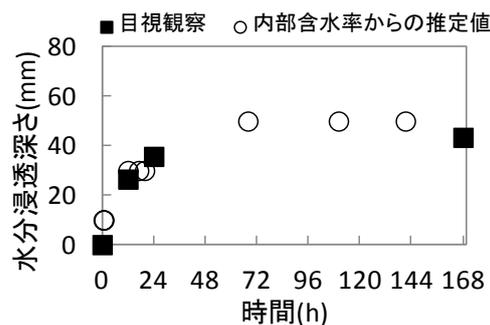
品質	時間	目視観察	10mm センサー		30mm センサー		50mm センサー	
		水分浸透深さ(mm)	内部含水率(%)	浸透○ 未浸透×	内部含水率(%)	浸透○ 未浸透×	内部含水率(%)	浸透○ 未浸透×
W/C=40% 封緘養生	0	0	6.3	-	6.8	-	6.7	-
	12時間	13.3	6.7	○	6.8	×	6.7	×
	24時間	25.6	7.0	○	6.8	×	6.7	×
	7日間	24.7	7.2	○	6.9	×	6.7	×
W/C=50% 封緘養生	0	0	6.8	-	7.1	-	7.2	-
	12時間	26.9	7.6	○	7.1	×	7.2	×
	24時間	29.9	7.8	○	7.1	×	7.1	×
	7日間	70.3	8.1	○	7.8	○	7.3	○
W/C=60% 封緘養生	0	0	6.5	-	6.8	-	7	-
	12時間	22.7	7.4	○	6.9	×	7	×
	24時間	29.0	7.8	○	7.2	×	7	×
	7日間	69.3	7.9	○	8	○	7.7	○
W/C=50% 気中養生	0	0	6	-	6.6	-	6.6	-
	12時間	26.5	7.9	○	6.7	×	6.7	×
	24時間	35.7	8.1	○	7.1	○	6.6	×
	7日間	43.4	8	○	7.8	○	7.1	×
W/C=50% 水中養生	0	0	7.1	-	7.1	-	7.4	-
	12時間	9.9	7.2	×	7.1	×	7.4	×
	24時間	17.1	7.4	○	7.1	×	7.4	×
	7日間	20.9	7.7	○	7.2	×	7.5	×

表-4 試験開始からの内部含水率の差と発色の有無との関係

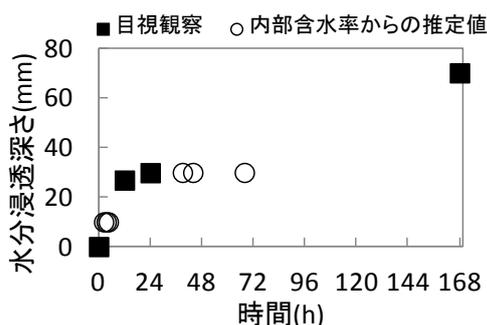
内部含水率の差(%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1
総供試体数	15	8	0	1	2	2	1	3	1	2	1	0	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1
発色した供試体数	0	1	0	1	1	1	1	3	1	2	1	0	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1
発色した割合(%)	0	13	-	100	50	50	100	100	100	100	100	-	100	100	100	-	-	-	-	100	100	100



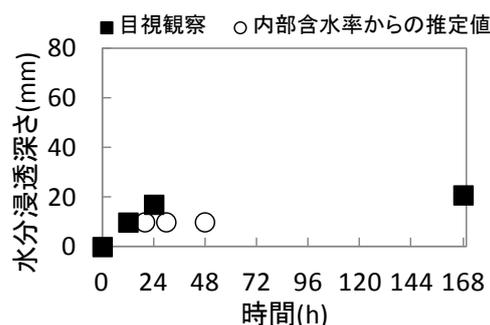
(a) W/C=40%, 封緘養生



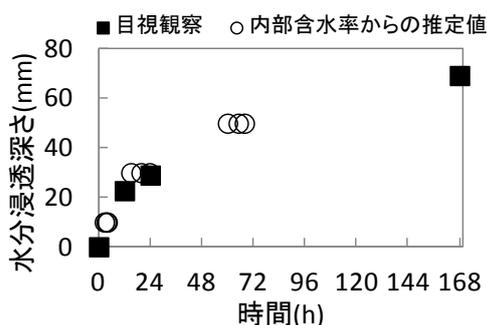
(d) W/C=50%, 気中養生



(b) W/C=50%, 封緘養生



(e) W/C=50%, 水中養生



(c) W/C=60%, 封緘養生

図-8 一面浸漬試験時間と水分浸透深さおよび質量変化率との関係 (その1)

示す W/C=50%, 封緘養生において、水分浸透深さは 12 時間で 25mm, 24 時間で 30mm, 7 日間で 70mm 程度となり上昇し続けている。図-8 の (c)に示す W/C=60%, 封緘養生においても W/C=50%と同様に水分浸透深さは 7 日間まで上昇し続け、70mm 程度まで水分が浸透した。図-8 の(d)に示す W/C=50%, 気中養生において水分浸透深さは 12 時間で 25mm, 24 時間で 35mm, 7 日間で 45mm 程度の水分浸透深さとなった。図-8 の(e)に示す W/C=50%, 水中養生において水分浸透深さは 12 時間で 10mm, 24 時間で 20mm 程度と上昇し、7 日間で 20mm 程度の水分浸透深さとなりほぼ一定となった。一部目視観察と内部含水率からの推定値との間に差があるが、内部含水率の経時変化データがあれば水分浸透深さが推定できる可能性が得られた。

図-8 一面浸漬試験時間と水分浸透深さおよび質量変化率との関係 (その2)

4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 水セメント比が高く、養生方法が乾燥傾向にあるほど、一面浸漬時の水分吸収量が多く、水分浸透深さが大きいことがわかった。例えば、一面浸漬試験を 7 日間行った場合、水セメント比 40%, 封緘養生としたコンクリートへの水分浸透深さは 25mm 程度で止まるが、水セメント比を 60%とした場合には 70mm にまでなることが分かった。
- (2) 内部含水率の経時変化がわかれば、水分浸透深さが推定できる可能性が得られた。

参考文献

- 1) 上田洋, 玉井謙: コンクリート構造物の表層付近における水分分布の検討, 「コンクリート構造物の表層品質評価と耐久性能検証」に関するシンポジウム講演概要集, pp.113-120, 2009
- 2) 玉井謙, 鈴木浩明, 上田洋: 配合および養生がモルタルの水分吸収特性に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.181-186, 2012
- 3) 岡崎慎一郎, 浅本晋吾, 岸利治: 分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集 E, Vol.65, No3, pp.311-321, 2009