

# 論文 コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響

鈴木 浩明\*1・上田 洋\*2

**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ため、その浸透性状を知ることが重要である。コンクリートへの水分浸透は、コンクリートの品質によって変化するため、水セメント比と養生を変えたコンクリートを用い水分浸透深さの時間依存性について検討を行った。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て水分の検知を行い、水セメント比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。さらに、圧縮強度と水分浸透深さとの関係についても示した。

**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, 水セメント比, 養生, 圧縮強度

## 1. はじめに

中性化や塩害による鋼材腐食、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<sup>1)</sup>。例えば、中性化が鋼材近傍に達した構造物において、コンクリートが乾燥していれば鋼材腐食がほとんど進まないのに対し、雨水等が鋼材位置にまで浸透する場合には鋼材腐食が進みやすい。これらの違いは、コンクリート構造物に対する対策の要否や対策方法の違いにも繋がる。したがって、コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、コンクリート表層における水分浸透深さを知ることが求められる。

コンクリートの水分浸透については古くから報告されており<sup>2)</sup>、筆者らもコンクリート供試体の一面を水に浸漬させ、コンクリートへの水分浸透深さや内部含水率の変動を検討する一面浸透試験を行った結果、水セメント比および養生方法がコンクリートへの水分浸透深さに影響することを示した<sup>3)</sup>。

本研究では、前報の結果をもとに養生条件やセンサー数、測定回数を増やし、コンクリートの水セメント比や養生方法が水分浸透深さにおよぼす影響について検討を行った。さらに、圧縮強度と水分浸透深さとの関係についても検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製

作製したコンクリート供試体の使用材料を表-1、配合と養生および作製数を表-2 に示す。供試体の寸法は100×100×100mm, 200×200×150mm, φ100×200mmとし、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, 50, 70mm

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。

### 2.2 養生

供試体は、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、表面を業務用ラップおよびビニールで被覆し、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90日まで気中養生を行った。

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 <sup>3</sup>
細骨材(S)	千葉県君津産山砂	表乾密度:2.63g/m <sup>3</sup> , 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 <sup>3</sup> , 吸水率:0.57% 最大寸法:15mm
	粗骨材② 埼玉県両神産砕石2015	表乾密度:2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.64% 最大寸法:20mm
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 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						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		①	②	100x100x100(mm)				200x200x150(mm)	φ100x200(mm)			
					①	②											
60	47	155	259	886	623	415	0.25	0.00050	気中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3			
												封緘	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3
												水中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3
50	45	155	310	831	631	420	0.25	0.00075	気中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3			
												封緘	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3
												水中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3
40	43	155	388	765	631	420	0.25	0.00200	気中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3			
												封緘	8±2.5	4.5±0.5	8	1	3
												水中	8±2.5	4.5±0.5	8	1	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 研究室長 博士 (工学) (正会員)

## 2.3 浸漬試験および圧縮強度試験

養生後に図-1に示すように供試体の打設側面が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の供試体では0, 3, 6, 12時間および1, 2, 3, 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て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の供試体では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。また、圧縮強度は28日間の各養生後に測定している。

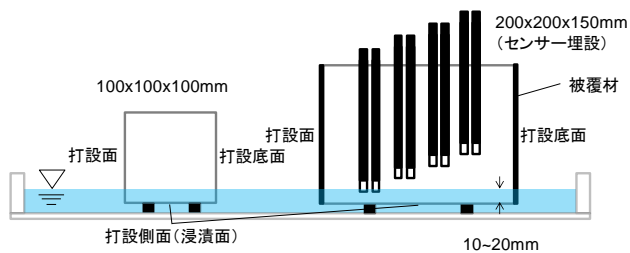


図-1 一面浸漬試験の概念図

## 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、1日から7日間までは伸びが小さくなる、または変化しなくなる傾向がみられた。また、水セメント比が低くなるほど、養生方法では気中養生、封緘養生、水中養生の順で質量変化率が低くなる傾向にあった。一般に、水セメント比が低いほどセメントペースト中の空隙が少なくなる。また、養生方法として水分供給が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十分に進行しその結果空隙が少なくなる。これらを踏まえ、水セメント比および養生方法において品質の良いコンクリートへの水分浸透量が少なくなった本実験の結果は妥当であると考えられる。

ここで、養生方法の違いが水分浸透量に及ぼす影響を定量的に調べるため、各試験時間において封緘養生とした供試体の質量変化率を基準とし、気中養生および水中養生の質量変化率と比較した。例えば、W/C=40%とした供試体を7日間一面浸漬させた際の質量変化率を、養生ごとに比較すると、封緘養生では0.67%、気中養生では1.2%、水中養生では0.52%であり、気中養生は封緘養生の1.8倍、水中養生では0.78倍となった。他の配合および試験時間を含めた全体では、気中養生で1.4～2.6倍(平均1.9倍)、水中養生で0.58～0.96倍(平均0.78倍)となり、養生方法によってコンクリートへの水分浸透量が異なることがわかった。

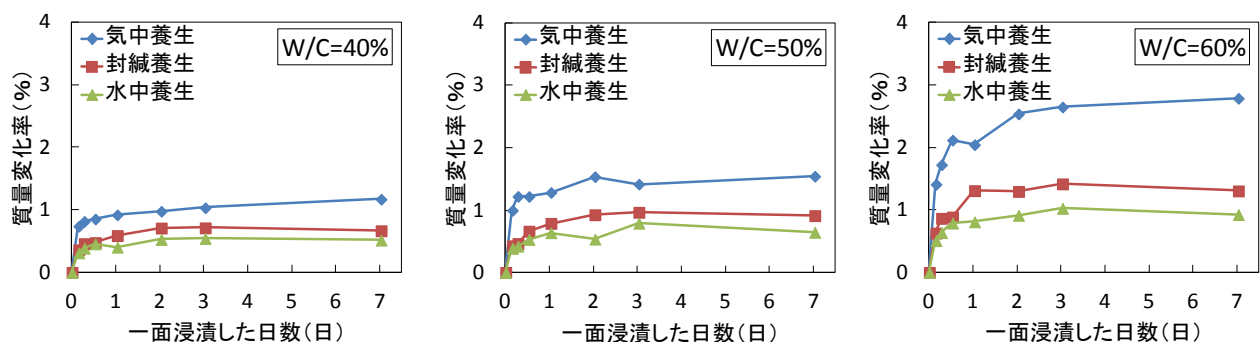


図-2 水セメント比および養生方法と質量変化率との関係

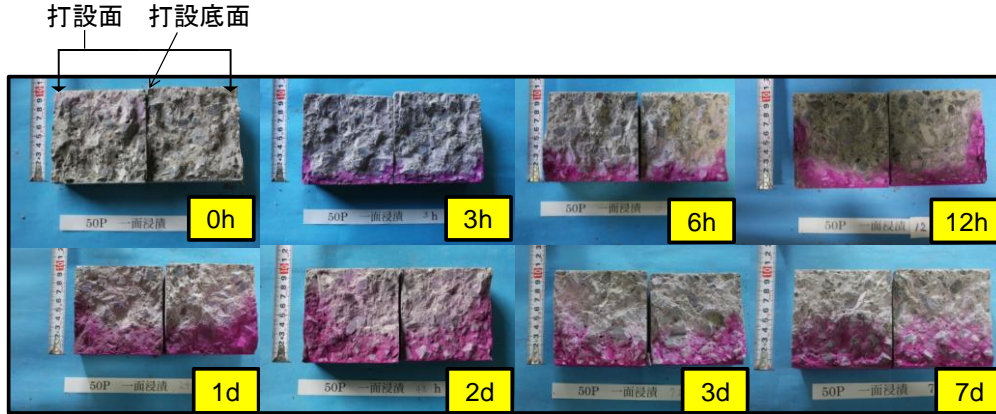


図-3 水漏れ検査剤噴霧後の状況 (W/C=50%, 封緘養生)

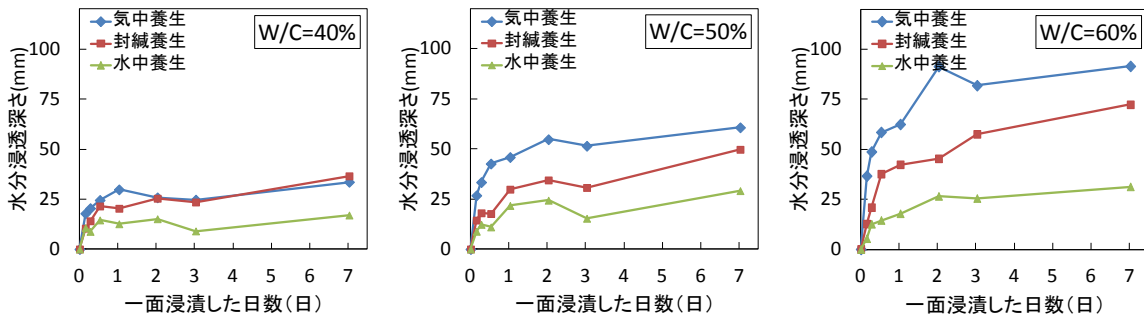


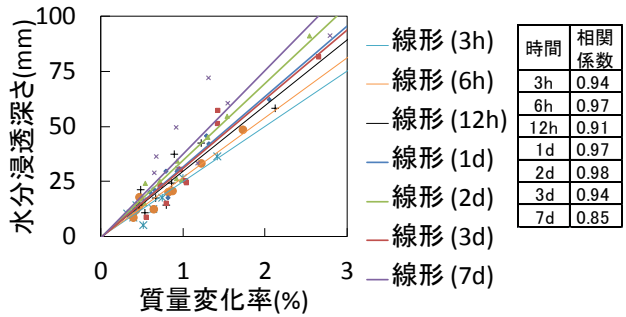
図-4 供試体中央部の水分浸透深さ

### 3.2 水分浸透深さ

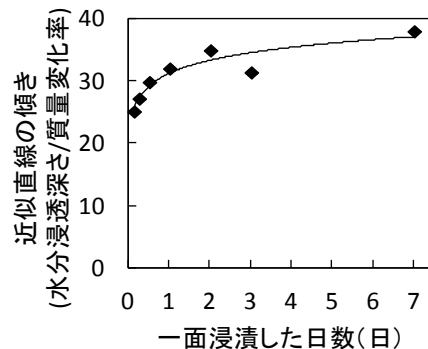
水セメント比 50%, 封緘養生とした供試体を一面浸漬試験後に割裂し、水漏れ検査剤を噴霧した後の発色域の状況を図-3 に示す。打設面付近の発色域が深くなる傾向が全体的にみられる。これは、ブリーディング等の影響を受け、打設面付近に粗な層が形成されているためと考えられる。また、打設底面でもコンクリート表面を伝った水の影響等がみられることから、ここではこれらの影響を受けにくいと考えられる打設面と打設底面の中間部分における発色域深さを水分浸透深さとし、ノギスを用いて測定した。

次に、水分浸透深さの測定結果を図-4 に示す。水分浸透深さは全体として一面浸漬時間とともに大きくなる傾向があるが、W/C=40%の水中養生のように7日の時点で伸びが少ないもしくは止まっているものとW/C=60%の気中および封緘養生のように伸び続けているものがある。

ここで、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(a)を見ると、それぞれの浸漬時間における水分浸透深さと質量変化率とは比例関係にあり、これらの相関係数は0.85~0.98と高い。その一方で、図-5(b)に示したとおり、これらの近似直線の傾きには時間依存性があり、同じ質量変化率でも浸漬時間の経過とともに水分浸透深さが大きくなるのがわかった。



(a) 質量変化率と水分浸透深さの関係



(b) 近似直線の傾きの時間依存性

図-5 質量変化率と水分浸透深さの時間依存性

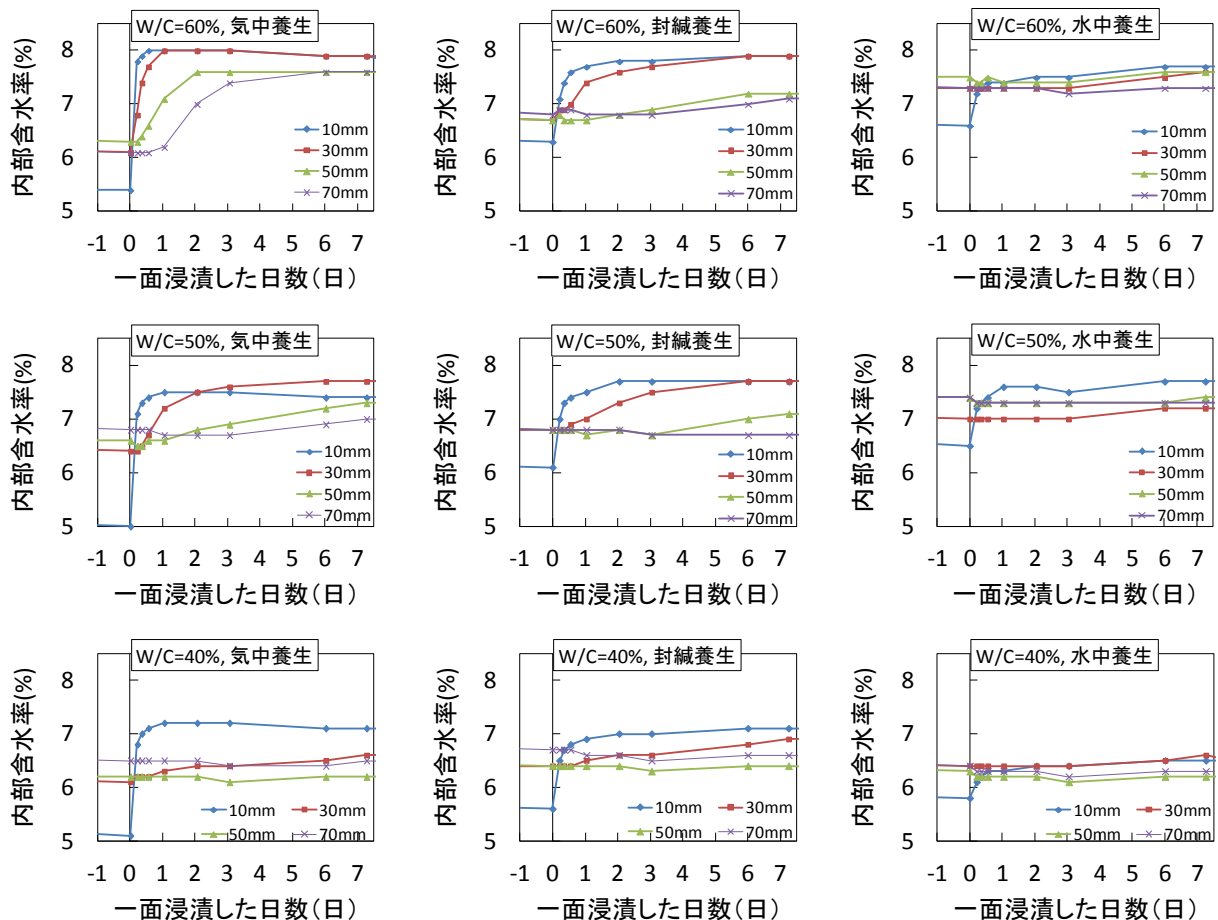


図-6 水セメント比および養生方法と内部含水率との関係

### 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。なお、試験日数として-1日から表記したが、一面浸漬試験開始前の気中養生中にも内部含水率の測定を行っており、内部含水率の推移が比較的安定したことを確認した旨を表している。浸漬開始時点ではいずれの供試体においても深さ10mmの内部含水率が低いが、これは各養生後に共通して行った気中養生期間中にコンクリートの表面側で乾燥が進行したためである。また、いずれの供試体も深さ10mmでは浸漬から間もない時間で内部含水率が高くなっており、水分が到達していることがわかる。

ここで、養生方法の違いに着目すると、水中養生、封緘養生、気中養生と養生中に水分供給が多い順に内部含水率の上昇が抑えられる傾向がある。例えば、W/C=60%の気中養生と水中養生を比較すると、気中養生では50mmおよび70mmの内部含水率が上昇しているのに対し、水中養生では深さ30mm以深において変化がほとん

どみられない。ここで、水中養生とした供試体ではいずれの水セメント比でも深さ30mm以深では内部含水率はほとんど変化せず、7日間の浸漬でも水分が深さ30mmに到達していないことから、水分浸透を抑制する点で養生が重要であるといえる。

さらに、水セメント比の違いに着目すると、水セメント比が低いほど内部含水率の上昇が抑えられる傾向がある。例えば、封緘養生のW/C=60%とW/C=40%を比較すると、W/C=60%では50mmおよび70mmの内部含水率がやや上昇しているのに対し、W/C=40%では深さ50mm以深において変化がほとんどみられない。ここで、W/C=40%とした供試体ではいずれの養生方法でも深さ50mm以深では内部含水率はほとんど変化せず、7日間の浸漬でも水分が深さ50mmに到達していない。なお、これらの傾向は3.2節で述べた割裂による目視観察結果とおおむね一致しており、水分到達の判断の詳細は3.4節で詳しく述べる。

### 3.4 内部含水率の変化と水分浸透深さの関係

筆者らは前報<sup>3)</sup>において、目視による水分浸透深さの測定結果と内部含水率の変化とを比較し、センサー埋設位置において内部含水率が0.3~0.5%上昇した場合に水分が到達すると推察した。そこで、本試験結果についても同様に検討した結果を図-7に示す。図-7は、浸漬開始時の内部含水率を基準としその差を横軸に、目視による水分浸透深さがセンサー深さに達した割合を縦軸に表したものである。内部含水率が0.3~0.5%上昇した場合に7割以上の供試体で水分浸透を目視で確認できたこ

とより、今回も同様に内部含水率が0.3~0.5%上昇した場合にセンサー位置に水分が到達したと仮定した。

ここで、3.3節の図-6より各センサー深さの内部含水率が0.3~0.5%上昇した時間を水分浸透時間として読み取り、水セメント比および養生方法ごとに整理したものを表-3および図-8に示す。例えば、W/C=60%、気中養生では深さ10mmにおいて内部含水率が0.3%上昇するのに0.6時間、0.5%上昇するのに1.1時間かかったことから、0.6~1.1時間で深さ10mmに水分が浸透したと考える。全体として、深さ10mmではいずれの水セメント

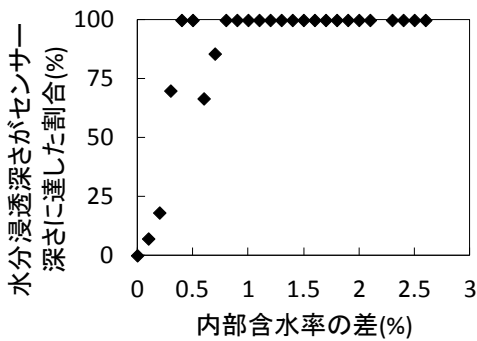
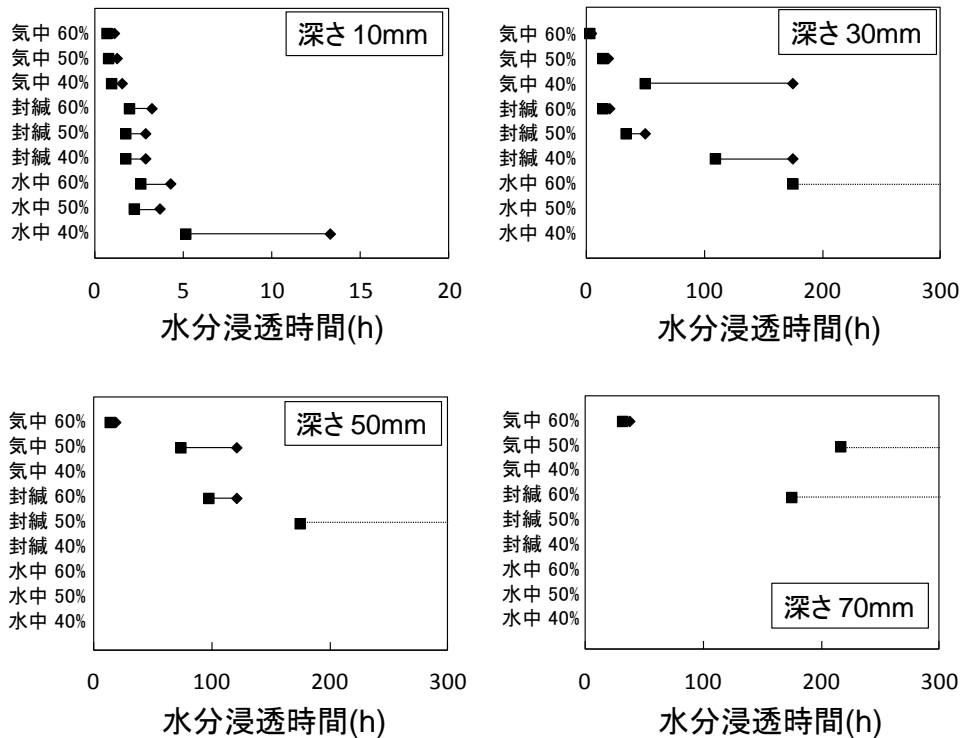


図-7 内部含水率の差と水分浸透深さとの対応

表-3 内部含水率の変化による水分浸透時間

養生方法	W/C (%)	単位:時間(h)							
		10mm		30mm		50mm		70mm	
		0.3(%)	0.5(%)	0.3(%)	0.5(%)	0.3(%)	0.5(%)	0.3(%)	0.5(%)
気中養生	60	0.6	1.1	2.2	3.6	13.2	17.9	31.0	37.0
気中養生	50	0.7	1.2	13.2	17.9	73.1	120.5	215.7	※
気中養生	40	0.9	1.5	49.2	174.3	※	※	※	※
封緘養生	60	1.9	3.2	13.2	19.1	96.8	120.5	174.3	※
封緘養生	50	1.7	2.8	33.0	49.2	174.3	※	※	※
封緘養生	40	1.7	2.8	108.6	174.3	※	※	※	※
水中養生	60	2.5	4.2	174.3	※	※	※	※	※
水中養生	50	2.2	3.6	※	※	※	※	※	※
水中養生	40	5.1	13.2	※	※	※	※	※	※

ただし、※は内部含水率が0.3~0.5%上昇しなかったことを示す



※内部含水率が0.3%および0.5%上昇した時間をそれぞれ■と◆で表し、両点を直線で結んだ

図-8 各センサー深さにおける配合および養生と水分浸透時間との関係



比および養生方法においても水分浸透がみられ、W/C=40%の水中養生を除き、0.6~4.2時間と短時間で水分が到達した。

深さ 30mm について、W/C=60%の気中養生では 2.2~3.6 時間と短時間で水分が到達するが、その他の供試体では 13 時間以上を要した。ここで、東京における 1 回あたりの平均降水時間が 6.3 時間<sup>4)</sup>であることから考えると、平均的な降水では W/C=60%の気中養生以外では深さ 30mm には水分浸透が及ばないと考えられる。ただし、漏水等により平均降水時間に比べてより長時間水分が作用した場合、コンクリートの品質によっては 30mm 以深まで水分浸透が起きることも考えられる。

深さ 50mm と 70mm については、W/C=60%の気中養生を除き水分の到達まで 70 時間以上かかり、300 時間までの間に水分が到達していないものも多い。

以上より、内部含水率の経時変化から水分浸透深さの時間変化を推定可能であり、水分浸透時間の予測に繋がられると考えられる。

### 3.5 圧縮強度と水分浸透深さの関係

図-9 に、材齢 28 日までの各養生後に測定した圧縮強度と、浸漬試験における水分浸透深さの関係を示す。全体的には、圧縮強度が高いほど水分浸透深さが小さくなる傾向にある。しかし、W/C=60%の水中養生と W/C=50%

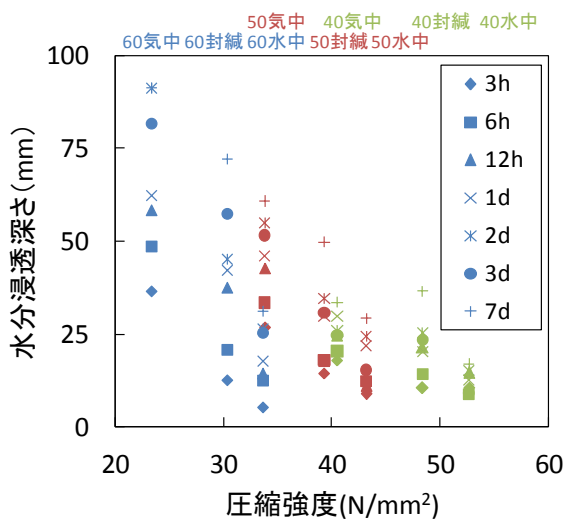


図-9 圧縮強度と水分浸透深さの関係

の気中養生とは同程度の圧縮強度であるにも関わらず W/C=50%の気中養生の方が水分浸透深さが大きく、その差は 2 倍近くになっており、同程度の圧縮強度でも水分浸透深さが大きく異なる場合があることがわかった。この理由として、供試体の含水状態が影響している可能性も考えられるが、W/C=40%の気中養生における浸漬試験開始時の内部含水率が W/C=50%の封緘養生に比べて低く乾燥しているものの、水分浸透深さが小さい傾向にあることを踏まえると、水和反応による組織の緻密化の影響が大きいと推察される。

### 4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートへの水分浸透深さは、浸漬時間が同じ場合には質量変化率と比例関係にある。その一方で、同じ質量変化率でも浸漬時間の経過とともに水分浸透深さが大きくなる。
- (2) コンクリートの配合が同一であっても、養生方法の違いにより水分浸透深さは大きく異なる。
- (3) コンクリートに埋設した内部含水率センサーの測定により得られる内部含水率の経時変化から、水分浸透深さの時間変化を推定することができる。
- (4) コンクリートの圧縮強度が高いほど水分浸透深さが小さくなる傾向にあるが、同程度の圧縮強度でも水分浸透深さが大きく異なる場合がある。

### 参考文献

- 1) 松田芳範：コンクリートの耐久性を定める『水』の制御①コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について、コンクリート工学 Vol.51, No.10, pp.814-818, 2013
- 2) 例えば、H. Gardner : Permeability of Concrete, 1911
- 3) 鈴木浩明, 玉井謙, 上田洋：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.751-756, 2013
- 4) 上田洋：コンクリートへの水分浸透および逸散性状に関する実験的検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, V 部門, pp.253-254, 2012