論文　硝酸銀水溶液噴霧による水の浸透深さの測定と非破壊試験との相関

横山　勇気[*1]・半井　健一郎[*2]・岸　利治[*3]

要旨：実構造物模擬供試体から採取したコンクリートコアの塩水浸せき試験を実施し，目視，現像剤または硝酸銀溶液の噴霧で測定される水の浸透深さの差異，および非破壊試験結果との相関を分析した。その結果，硝酸銀溶液使用時の浸透深さは，他の測定方法と比べ浸透深さが約 2 割小さいものの，変色領域が明瞭であり，吸水による質量変化率との相関も高いことが分かった。この結果を踏まえ，硝酸銀溶液の噴霧で得られる浸透深さを補正し，現像剤使用時の浸透深さを算出する手法を提案した。さらに，非破壊試験（表面吸水試験，表層透気試験）の測定結果との関係を分析し，材齢 7 年時点では高い相関を示すことを明らかにした。

キーワード：浸透深さ，質量変化率，硝酸銀水溶液，非破壊試験，透気性，吸水性，実構造物模擬供試体

1. はじめに

コンクリート中に埋設された鋼材の腐食には，中性化の進行と水の浸透の両者が影響を及ぼす。実構造物を対象とした調査 [1)]からも，降雨の影響を受ける箇所にて鋼材の腐食が進行している事例が報告されており，2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書[設計編][2)]では，従来の示方書で考慮されていた中性化の観点からの照査方法に加え，水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査方法が新たに導入された。

水の浸透に着目した既往の研究では，浸透深さや質量変化率の時間変化に水セメント比，養生が及ぼす影響 [3)]，空隙構造との相関 [4)]などが検討されてきた。現行の耐久性照査において水の浸透速度を評価するために用いられる土木学会規準 JSCE-G582-2018 に関しても，養生条件や供試体下部の切断の影響 [5)]などに関する検討が行われている。さらに維持管理での本規準の適用を見据え，室内で作製された供試体のみならず，実構造物を対象とした研究 [6)]や，非破壊試験の結果と水の浸透深さや浸透速度の相関の検討 [7)]も行われている。しかしながら，実構造物を対象とした研究では，配合条件や使用材料が極めて限定的であり，非破壊試験に関する検討では，実環境下に曝露されたコンクリートを用いた研究例は見当たらない。加えて，水の浸透深さの測定方法としてこれまで多くの研究で用いられてきた目視と，土木学会規準で推奨されている現像剤の発色領域や，その他の浸透深さの測定手法との相関も十分に明らかになっていない。

そこで本研究では，屋外に暴露された実構造物模擬供試体を検討対象としたうえで，まず，水の浸透深さの測定手法を検討するために塩水浸せき試験を実施し，目視，現像剤または硝酸銀溶液の噴霧を用いた測定結果の差異を分析した。その結果を踏まえ，非破壊試験の結果と浸透深さの相関を分析した。なお，塩水を使用することで硝酸銀溶液の噴霧による浸透深さの可視化を行い，水の浸透深さの評価に関する提案手法の有効性を検討したことが本研究の主な論点である。

2.浸透深さの測定方法に関する実験の概要

2.1 供試体の概要 [8)]

本研究では，RC ラーメン模擬高架橋の一部である柱供試体を検討対象とした。**表－1** に柱供試体の配合およびフレッシュ性状，**表－2** に養生条件を示す。供試体の寸法は，400×300×2800 mm である。供試体に使用した材料の詳細な情報は，他の文献 [8)]に記載されている。使用されたセメントは，普通ポルトランドセメント（N）で

表－1　配合およびフレッシュ性状 [8)]

セメント種類	組骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
N	20	59.5※1	32.0	4.5	47.4	170	532	768	866	8.78※2
		13.0	58.0	4.7	45.2	168	290	826	1019	2.90※3
		22.0	64.8	5.8	45.2	184	284	809	999	2.84※3

※1：スランプフロー，※2：高性能 AE 減水剤，※3：AE 減水剤

*1 日本学術振興会　特別研究員（PD）　博士（工学）　（正会員）
*2 広島大学大学院　先進理工系科学研究科　教授　博士（工学）　（正会員）
*3 東京大学　生産技術研究所　教授　博士（工学）　（正会員）

ある。水セメント比 W/C は, 32.0, 58.0, 64.8 %（W/C58.0 %の打込み時に加水することで作製）の 3 種類である。以降, 本論文中では, 供試体のシリーズ名をセメント種類, W/C の順で示すこととする（例えば，W/C を 58.0 %に設定した場合は，N58 と表記）。養生条件は，N32 では，材齢 1 日に脱型した早期脱型（以下，早期と略す）と材齢 5 日に脱型した示方書相当の養生（以下, 示方書と略す）の 2 種類，N58 では，早期と示方書に加え，材齢 5 日に脱型後，材齢 28 日までフィルムにて密封した密封養生（以下，密封と略す），材齢 1 日に脱型後，材齢 28 日まで養生マットを介して給水した給水養生（以下，給水と略す）の 4 種類とした。なお，N65 の供試体の養生条件は示方書のみである。柱供試体の作製時期は夏季である。供試体の上部はスラブにより覆われており，スラブ下面には水切りが設置されているため，柱供試体の側面は降雨の直接の影響を受けない。柱側面は各方角に向けて配置されており，本研究では北と南の方角の側面を検討対象とした。供試体が曝露されていた場所は，千葉県千葉市稲毛区内の屋外試験場である。

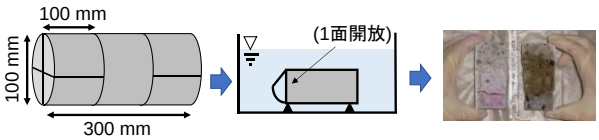
2.2 塩水浸せき試験の概要

目視，現像剤または硝酸銀溶液の噴霧により得られる浸透深さの差異を分析するために，塩化ナトリウム水溶液への浸せき試験を実施した。水溶液中のイオンの種類や濃度は，水の粘性や表面張力に影響を及ぼす [9)10)]。そのため，塩化ナトリウムの混合により水分の浸透が変化する可能性が考えられるが，その影響は大きくないとの報告 [11)]もある。本研究では，水のみの場合と塩化ナトリウムの混合した水では，水の浸透は同じであるという仮定のもと，塩水浸せき試験を実施することで，浸透深さの測定手法である，目視，現像剤または硝酸銀溶液の噴霧により得られる浸透深さを比較した。

図－1 に塩水浸せき試験の概要を示す。塩水浸せき試験に使用する供試体は，柱供試体より採取したコアサンプルをもとに作製した。材齢 1 年の時点で柱供試体の中段（高さ約 1000～1400 mm）からコアサンプルを採取後，約 3 ヵ月間室内で静置させた。その後，乾式の切断機を用い 100 mm の長さに切断し，さらに軸方向に 4 分割した後，1 日静置させ，柱供試体の側面に対応する 1 面以外にプライマーを塗布した。1 日乾燥させた後，さらにエポキシ樹脂を重ねて塗布し，2 日間乾燥させ後に 10% 塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき開始から所定の間隔で質量を測定し，10 日時点で供試体を割裂した。割裂後は，速やかに割裂面を目視で確認するとともに，現像剤と 0.1 mol/l の硝酸銀を噴霧した後，変色領域を確認した。浸透深さは供試体 2 体の平均値を用いて評価した。試験環境は, 温度 20℃, 湿度制御無しの室内である。なお，本研究の一部は，JSCE-G582-2018 の制定前に実施しており，水の浸透深さの測定は本規準には準拠していない。

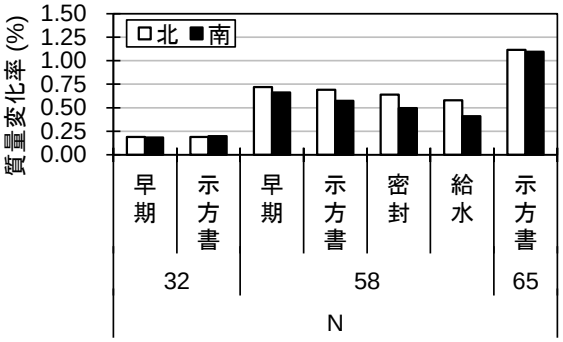
表－2　養生条件

供試体のシリーズ名	セメント種類	水セメント比 W/C (%)	養生条件	脱型時の材齢 (日)	養生終了時の材齢 (日)
N32	N	32.0	早期脱型	1	1
			示方書相当	5	5
N58		58.0	早期脱型	1	1
			示方書相当	5	5
			密封	5	28
			給水	1	28
N65		64.8	示方書相当	5	5



柱供試体より採取したコアサンプルを切断　エポキシ樹脂の塗布後，塩水へ浸せき　浸せき開始から10日後に割裂

図－1　塩水浸せき試験の概要



図－2　質量変化率 (材齢 1 年時点)

3. 浸透深さの測定方法に関する実験の概要

3.1 質量変化率と浸透深さ

図－2 に塩水浸せき試験より得られた質量変化率の測定結果を示す。質量変化率は，浸せき直前の質量を基準として，浸せき開始から 10 日後に測定した質量差を変化率（質量分率）で表している。はじめに，W/C に着目すると，W/C の低下に伴い質量変化率が減少していることが確認できる。これは，W/C の低下により緻密な空隙構造が形成されたことが要因である。次に，養生条件に着目すると，N58 では養生条件による明確な差異を確認することができる。一方, N32 では質量変化率が少なく，養生の違いは見られない。これは，W/C の減少により緻

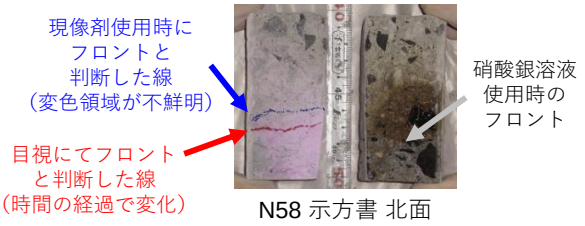
密な空隙構造が形成されたことなどが要因として考えられる。続いて，北面と南面の差異に着目する。配合や養生条件により差はあるものの，多くの供試体で北面に比べて南面の質量変化率が小さい傾向となった。柱供試体は夏季に作製されており，南面は日射の影響を受けやすいと想像される。そのため，北面に比べ，南面では温度が上昇することで水和が促進され，空隙構造が緻密化したことが一つの要因として考えられる。

図－3 に浸透深さの測定結果を示す。硝酸銀溶液の噴霧により測定された浸透深さのフロントは，他の測定方法と比べ鮮明に確認できた（**写真－1**）。W/C や養生条件が浸透深さに及ぼす影響は，いずれの測定方法であっても質量変化率とおおむね同様の傾向を示している。一方，北面，南面の差異は測定手法により異なる。まず，**図－3** (a)，(b)に示す目視または現像剤を使用して浸透深さを測定した場合に着目すると，北面と南面の間には明確な傾向は確認できなかった。このような結果が得られた要因の一つとして，浸透深さのフロントが明瞭ではない場合（**写真－1**）に測定精度が低下したことが考えられ，検討でこの傾向が見られた例としては，N58 の示方書が挙げられる。割裂した後，速やかに浸透深さを測定したものの，僅かな時間で浸透深さが変化することや，現像剤の噴霧量が影響していると考えられる。また，質量変化率が小さい N32 では，浸透深さが測定できないことが多かった。続いて，**図－3** (c)に示す硝酸銀溶液を用いて浸透深さを評価した場合に着目する。N32，N58 では，北面に比べ南面の浸透深さが減少しており，質量変化率とほぼ同様の傾向を示している。質量変化率の考察で言及したように，日射等の影響により水和反応が促進されたことに加え，浸透深さのフロントが明瞭であったことも方角の影響が見られた理由として挙げられる。なお，いずれの測定方法でも N65 では，北面に比べ南面の浸透深さが大きい。これは，N65 にて測定された浸透深さのフロント部分（表層から深さ 40~50 mm）では，日射の影響が及ばなかったことが要因として考えられる。

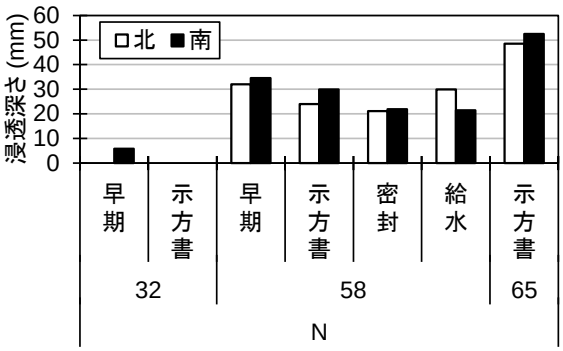
3.2 各測定手法で得られた浸透深さの関係

図－4 に測定手法による浸透深さの違いを示す。図中には 2 本の近似直線を示している。実線の近似直線は，各測定結果より算出した。点線の近似直線は，浸透深さが 10mm 以上の結果のみを用い，かつ原点を通るようにして算出したものである。点線の近似直線を示した理由は，後述するように浸透深さが 10 mm 以下において各指標間の相関が取れていないことに加え，水が浸透していない状況では指標間の関係は原点を通るべきものだと考えられるためである。

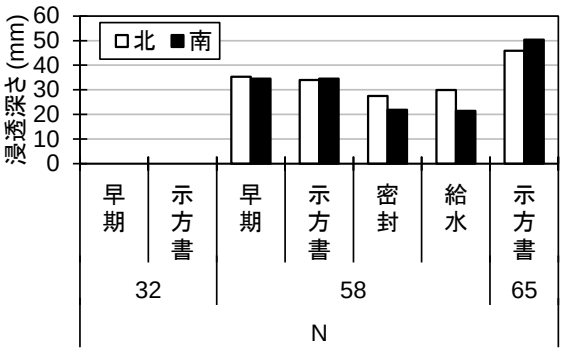
本検討結果により，いずれの測定手法で得られた浸透深さの間にも高い相関を確認することができる。**図－4**



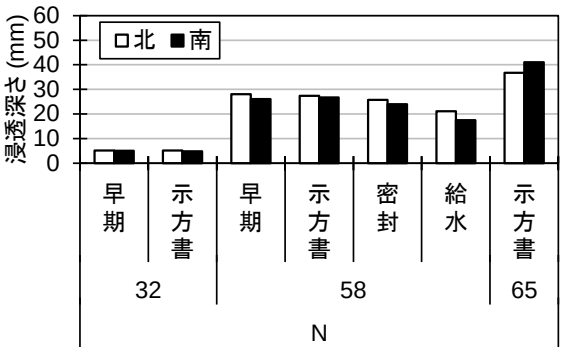
写真－1　割裂後の供試体断面の例



(a)　目視



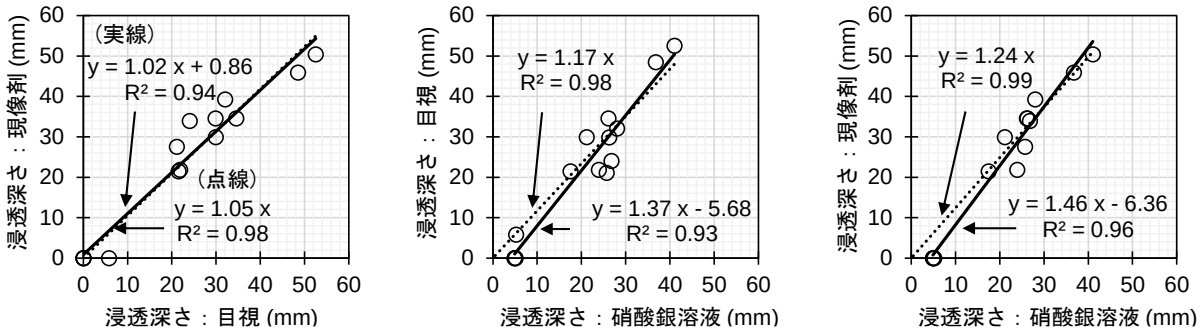
(b)　現像剤



(c)　硝酸銀溶液

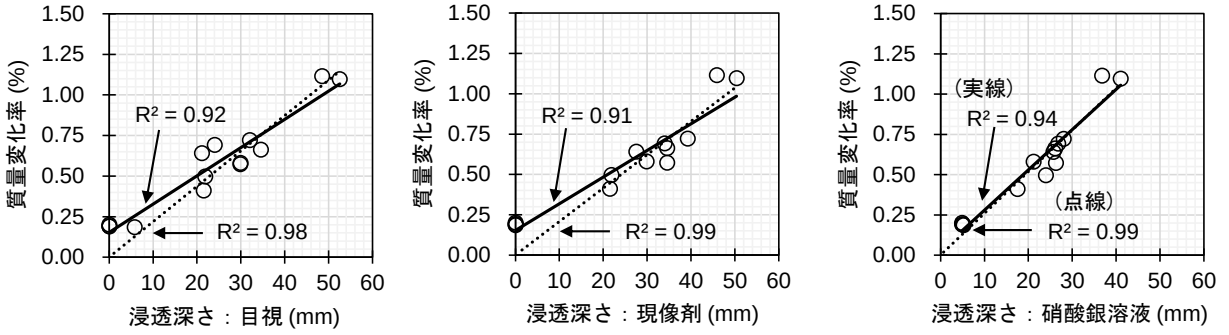
図－3　浸透深さ（材齢 1 年時点）

(a)に着目すると，目視と現像剤の噴霧で得られた浸透深さはおおよそ 1:1 の関係にあることが確認できるが，一部の供試体では，目視と比較して現像剤使用時の浸透深さが大きい。これは，現像剤の噴霧量の僅かな違いにより，発色領域が変化したことが要因と考えられる。次に，



(a)　目視－現像剤　　(b)　硝酸銀溶液－現像剤　　(c)　硝酸銀溶液－現像剤

図－4　測定手法による浸透深さの違い



(a)　目視　　(b)　硝酸銀溶液　　(c)　硝酸銀溶液

図－5　浸透深さの各測定手法と質量変化率の関係

図－4 (b), (c)に着目すると，目視と現像剤の関係の場合とは異なり，硝酸銀溶液の噴霧によって得られた浸透深さは，他の測定方法と比較して 2 割ほど小さい。コンクリート内部へ侵入した塩化物イオンの一部は，セメント硬化体中により固定される [12]。加えて，硝酸銀溶液の噴霧による変色の境界位置に含まれる自由塩化物のイオン濃度は，単位結合材料の 0.01~0.169 %であることが既往の研究より報告されている [13]。そのため，硝酸銀溶液の噴霧より変色領域と評価されるには，コンクリートの細孔溶液中の塩化物イオン濃度が一定以上の値となる必要がある。目視や現像剤を使用して測定した場合と比べ，硝酸銀溶液の噴霧により得られる浸透深さが小さい理由は，上記の要因によるものだと考えられる。なお，浸透深さが 10 mm 以下の範囲では，目視や現像剤を使用した場合と比較して，硝酸銀溶液の噴霧によって得られた浸透深さは大きい。これは，目視や現像剤の使用では浸透深さを測定することはできなかったが，その一方で，硝酸銀溶液の噴霧による変色領域は確認できたことが原因である。この傾向は N32 にて見られたものである。N32 では，質量変化率の観点からは，吸水が確認されていることを踏まえると，微量の吸水量の場合は，目視や現像剤の噴霧によって浸透深さを測定することは難しいと考えられる。

3.3 浸透深さの各評価指標と質量変化率の関係

図－5 に浸透深さの各測定手法と質量変化率の関係を示す。ここでも 3.2 と同様，図中には 2 本の近似直線を示す。測定手法によらず，質量変化率との間には高い相関があることが確認でき，その中でも図－5 (c)に示す硝酸銀溶液の場合に最も高い決定係数を示した。3.1 で述べたように，浸透深さのフロントが明瞭であったことが要因と思われる。硝酸銀溶液を使用した時の浸透深さは，質量変化率と同様の傾向を示し，かつ浸透深さの測定精度が最も高い一方，3.2 で述べたように目視や現像剤に比べ，浸透深さを過少評価してしまうことが懸念される。

この結果を踏まえ，以降の検討では，測定誤差を可能な限り低減させるべく，まず硝酸銀溶液の噴霧で得られる浸透深さを測定し，その結果と図－4 (c)中の実線で示した近似直線の式より算出される，土木学会規準で採用されている現像剤使用時の浸透深さを評価指標とした。

4. 浸透深さと非破壊試験の評価指標の関係についての実験概要

4.1 供試体の概要

2.2 で説明した RC ラーメン模擬高架橋の一部である柱供試体を検討対象とした。W/C や養生条件，測定面である柱供試体の側面の方角も同様の条件である。

4.2 塩水浸せき試験の概要

本検討では，浸透深さの評価方法として，硝酸銀溶液の噴霧によって得られる浸透深さから予測される，現像剤使用時の浸透深さを用いた。塩水浸せき試験は 2.2 と同様の手順で実施することとし，試験に用いる供試体は，降雨の影響を受けない夏季施工側の柱供試体から採取したコアサンプルをもとに作製した。コアサンプルは，材齢 7 年の時点で柱供試体の中段（高さ約 1000～1400 mm）から採取した。本検討では，硝酸銀溶液の噴霧により得られた浸透深さから，**図－4 (c)**中の近似式から水の浸透深さを算出し，これを評価指標として用いた。

4.3 非破壊試験の概要

表層透気試験（Torrent 法）[14]と表面吸水試験（Surface Water Absorption Test : SWAT）[15]を用い，コンクリート表層部の透気性と吸水性を非破壊で把握した。表層透気試験は，材齢 1 年と 7 年の時点で実施し，透気性の評価指標として表層透気係数 kT を用いた。表面吸水試験は，材齢 7 年の時点で実施し，吸水性の評価指標として 6 分間の吸水量を採用した。各試験の測定箇所は，柱供試体の中段（高さ約 1000～1300 mm）である。

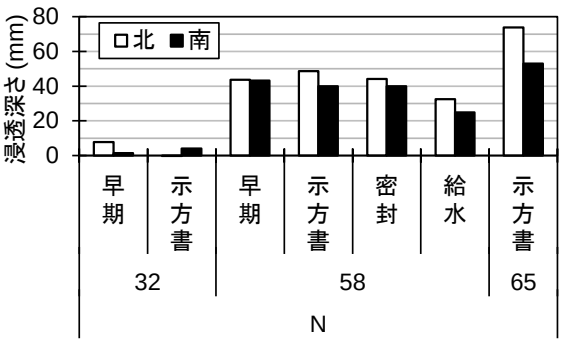
5. 浸透深さと非破壊試験の評価指標の関係についての実験結果

5.1 水の浸透深さ

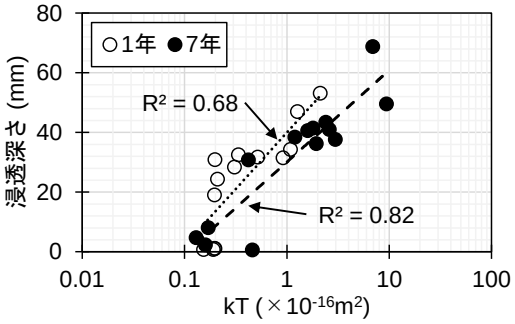
図－6 に材齢 7 年時点の水の浸透深さを示す。**図－3 (b)**で示した材齢 1 年時点の結果と比較すると，W/C の影響は材齢が 7 年の時点でも確認でき，養生条件の影響も，N58 の給水が他の養生条件に比べ，浸透深さが小さいことから，その影響が残存しているといえる。北，南面の差異に関しても，おおむね北面に比べて南面の浸透深さが大きい結果が得られた。

5.2 表層透気試験の結果との相関

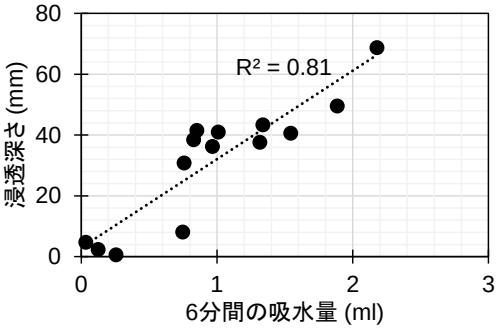
図－7 に kT と浸透深さの関係を示す。いずれの測定材齢においても，kT が大きくなるほど浸透深さが大きくなったが，両者の相関は，材齢が 7 年と長い方が高くなった。既往の研究[16]では，kT と含水率の間に高い相関が確認されているとともに，材齢が進行することで，乾燥の影響により含水率が低下し，それに伴い kT が増加することが報告されている。本研究でも，測定された kT は材齢 1 年から 7 年の間に，平均で約 4 倍増加した。この実環境下での材齢の経過に伴う乾燥に加え，塩水浸せき試験で用いた供試体は，室内で約 3 か月静置した後に試験を実施しているため，コアサンプルの採取前に非破壊試験を実施した時点と比べコンクリート内部の乾燥は進行している。この室内での追加的な乾燥によって生じる，非破壊試験実施時と塩水浸せき試験開始時のコンクリート中の含水率の差異は，明らかに乾燥途上にあった材齢



図－6　浸透深さ (材齢 7 年時点)



図－7　kT と浸透深さの関係



図－8　6 分間の吸水量と浸透深さの関係 (材齢 7 年時点)

1 年時点よりも，乾燥が進行した材齢 7 年時点で減少したと考えられる。その結果，材齢 1 年に比べ，材齢 7 年の kT と浸透深さの相関は増加したと推察される。

5.3 表面吸水試験の結果との相関

図－8 に材齢 7 年時点の 6 分間の吸水量と浸透深さの関係を示す。材齢 1 年時の測定結果がないため，材齢の影響は不明であるが，材齢 7 年時点では，kT との関係と同様，6 分間の吸水量は浸透深さとの間に相関を確認できる。これは，**5.2** の表層透気試験の結果で述べたように，材齢の経過に伴い，非破壊試験実施時と塩水浸せき試験開始時のコンクリート中の含水率の差異が減少したことが要因と考えられる。なお，既往の研究[7]では，N のみの場合と高炉スラグ微粉末を混合した場合では，表面

吸水試験の結果と水の浸透深さの間に異なる傾向が得られることが報告されているため，今後は混和材が及ぼす影響を考慮したうえで測定結果を蓄積する必要がある。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 目視，現像剤または硝酸銀溶液の噴霧のいずれかの測定手法で得られた浸透深さは互いに相関が高く，質量変化率との相関も高いことを確認した。目視や現像剤の使用時と比較し，硝酸銀溶液の噴霧で得られる浸透深さは明瞭であり，吸水量が微量でも浸透深さが測定可能であることが分かった。

(2) 目視や現像剤の使用で得られる浸透深さに比べ，硝酸銀溶液の噴霧により得られる浸透深さは過少に評価されることから，硝酸銀溶液の噴霧により得られる浸透深さを用いて，現像剤使用時の水の浸透深さを予測する手法を提案した。

(3) 材齢 1 年の時点に比べ材齢 7 年時点の方が，非破壊試験より得られるコンクリート表層部の透気性や吸水性と，室内試験で得られる水の浸透深さの相関高いことが分かった。この結果が得られた要因として，非破壊試験実施時に比べ塩水浸せき試験開始のコンクリート内部の乾燥が進行していたことが考えられた。そのため，浸せき試験前の乾燥期間により，相関が低下する可能性があることに注意する必要がある。

謝辞

実構造物模擬供試体は，（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構による研究助成「平成 21 年度運輸分野における基礎的研究推進制度」を受けて作製したものである。また，実験結果の一部は，大林組（株）の森麻里子氏により測定されたものである。ここに記して謝意を表す。

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) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.76-80，148-156，2018.

3) 鈴木浩明，玉井譲，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) 鎌田知久，岸利治：乾燥に伴う水分の逸散と空隙構造の変化がセメント硬化体への液状水浸透性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.641-646，2019.

5) 温品達也，三原優大，芦澤良一，渡邉賢三：養生条件がコンクリートの水分浸透性状に与える影響と評価方法の一検討，土木学会第 74 回年次学術講演概要集，V-477，2019.

6) 前原聡，鈴木将充，早川健司：長期間供用された構造物より採取したコンクリートの短期的な水分浸透性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.497-502，2020.

7) Uwazuruonye, R. and Hosoda, A.: Investigation on correlation between surface water absorption test and JSCE sorptivity test, Proceedings of JCI, Vol.42，No.1，pp.1720 -1725，2020.

8) 横山勇気，酒井雄也，半井健一郎，岸利治：異なる配合と養生を与えたコンクリートの表層透気係数の経年変化, セメント・コンクリート論文集, Vol.71，No.1，pp.410-417，2017.

9) Afzal, M., Saleem, M., Mahmood, T. M.: Temperature and concentration dependence of viscosity of aqueous electrolytes from 20 to 50 °C. Chlorides of Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Ba^{2+}, Sr^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, and Cr^{3+}, J. Chem. Eng. Data, Vol. 34, pp. 339-346, 1989.

10) Avbyard, R., Saleem, M. S. : Interfacial Tensions at Alkane-Aqueous Electrolyte Interfaces, J. Chem. Soc., Faraday Transactions 1, Vol. 72, pp. 1609-1617, 1976.

11) 金子泰明，加藤佳孝，江口康平，酒井雄也：海水中のイオン種がモルタル中の水分浸透に与える影響，セメント・コンクリート論文集, Vol.72, No.1, pp.189-196，2018.

12) 石田哲也，丸屋剛，宮原茂禎：異なる鉱物組成ならびにセッコウ量を有するセメント硬化体の塩分平衡特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.849-854，2004.

13) He, F, et al.: $AgNO_3$-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, Constr. Build. Mater, Vol.26, pp.1-8, 2012.

14) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site, Mater. Struct., Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.

15) 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.

16) Nakarai, K. et al.: Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts, Constr. Build. Mater, Vol.198, pp.777-785, 2019.