論文　塗布後の養生方法が表面含浸材の改質効果に及ぼす影響の検討

染谷　望[*1]・加藤　佳孝[*2]

要旨：本研究は，けい酸塩系表面含浸材の塗布後の養生方法が，コンクリート表層品質の改質効果に及ぼす影響に関して検討を行った。含浸材塗布後の養生方法は，水中養生 14 日，封緘養生後 7 日後に気中養生 7 日，気中養生 14 日の 3 種類とした。また，表面含浸材の改質効果を高めるため，飽和水酸化カルシウム水溶液を含浸材塗布後に塗布した。表面透気試験，中性化促進試験結果から，反応補助材を用いた場合において，コンクリート表層品質の改質効果が見られた。また，真空吸水試験結果から，含浸材は乾燥状態で浸透しやすいことが分かった。

キーワード：表面含浸材，中性化，真空吸水

1. はじめに

高度経済成長期に大量に構築された構造物の維持管理の重要性が高まることにより，構造物の補修・補強に関して注目が高まってきている。近年，大量の構造物を維持管理するにあたり，作業性，経済性等からけい酸塩系表面含浸工法の施工事例が多くなってきている[1)]。けい酸塩系表面含浸工法は，コンクリート構造物の表面に材料を塗布し含浸させることで，コンクリート中の水酸化カルシウムと含浸材の主成分が反応し，表層のコンクリートを緻密化することで，劣化因子の侵入を抑制することが可能である[2)]。けい酸塩系表面含浸材の特徴として，少ない工程で施工ができ，簡便で安価であること，無色透明の液体であるためコンクリート表面の外観を大きく変えないため，施工後も目視による点検などの維持管理が可能である等の長所があげられる。

既往の研究において，けい酸塩系表面含浸材のひび割れ改質効果や中性化に対する抑制効果は，コンクリートの品質により異なることが分かっている[3)]。また，施工方法や塗布時期に関しての研究も行われており[4)]，塗布するコンクリートの劣化の程度や，含水状態が重要であることが考えられている。しかし，含浸材塗布後の養生方法が改質効果に及ぼす影響についての検討は少なく，定量的な評価に至っていないのが現状である[5)]。

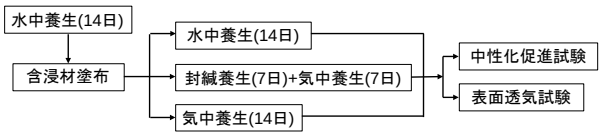
本研究では，表面含浸材（以下，含浸材）の塗布後の養生方法が，コンクリート表層品質の改質効果に及ぼす影響について検討を行った。養生方法として含浸材塗布後の水分供給の違いによる改質効果を把握することを目的とし実験を行った。

2. 実験概要

けい酸塩系表面含浸工法は含浸材の改質機構から，コンクリートの含水状態や，含浸材の施工方法の影響を受ける。施工方法の一つの要因である含浸材塗布後の養生方法の違いが，表層組織の改質効果に与える影響を把握するために，養生方法を水中養生，封緘養生，気中養生と変化させ，含浸材の改質効果の違いを把握することを目的とした。

2.1 塗布後の養生方法が改質効果に与える影響の把握

コンクリートを打設した翌日に脱型し，その後 14 日間の水中養生を行った供試体を用いて，含浸材の塗布を行った。なお，含浸材の水和反応を補助する目的で，飽和水酸化カルシウム水溶液を含浸材塗布後に塗布した実験も行った。塗布後の養生方法は水中養生 14 日，封緘養生後 7 日後に気中養生 7 日，気中養生 14 日の 3 種類とした。その後，表層透気試験，中性化促進試験を行った。中性化促進試験では，含浸材塗布による緻密化の影響と，反応の影響を受ける。そこで，含浸材塗布による緻密化の影響を表層透気試験から把握することで，含浸材塗布による中性化の進行について検討を行った。実験の流れについて**図－1** に示す。



図－1　試験の流れ

2.2 使用材料および供試体概要

図－2 に含浸材の塗布方法を示す。**表－2** に使用した 4 種類の含浸材の種類および塗布量を示す。また，含浸材の反応補助材として飽和水酸化カルシウム水溶液（以下，補助材）を用いた。含浸材の塗布には刷毛を用いて，製品の規定に沿って塗布した。なお，補助材の塗布方法には規定がないため，含浸材のコンクリートへの浸透を抑制させないために，含浸材塗布後に補助材を塗布した。

*1　東京理科大学大学院　理工学研究科　土木工学専攻　（学生会員）
*2　東京理科大学　理工学部　土木工学科　准教授　博（工）（正会員）

塗布工程													
補助材無し	下地処理	→	含浸材塗布	→	散水	→	含浸材塗布	→	散水				
補助材有り	下地処理	→	含浸材塗布	→	補助材塗布	→	散水	→	含浸材塗布	→	補助材塗布	→	散水

＊含浸材塗布，補助材塗布，散水の後に 1 時間の乾燥期間を設けた

図－2　表面含浸材の塗布方法

実験に用いたコンクリートは，結合材に普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3，比表面積 3440cm^2/g），細骨材に富士川産川砂（表乾密度 2.66 g/cm^3, F.M.2.82），粗骨材に骨材最大寸法 20mmの両神産砕石（表乾密度 2.73g/cm^3，F.M.6.62）を用い，**表－3** に示す示方配合でスランプ 10±2.5cm，空気量 4.5±1.5%のコンクリートを作製した。

実験に使用した供試体寸法および塗布面を**表－4**，供試体概要を**図－3** に示す。供試体は 150×150×200mm の角柱供試体を用いて，試験体打設後の水中養生 14 日が終了した後に含浸材を打設側面（2 面）に塗布した。含浸材塗布後，水中養生 14 日，封緘養生後 7 日後に気中養生 7 日，気中養生 14 日の 3 種類の養生を行った後に，含浸材を塗布した面以外をアルミテープでシールしたものを供試体とした。

2.3 実験方法

(1) 表面透気試験

Torrent法による表面透気試験を行った。Torrent法では，チャンバー内の圧力を真空ポンプで減圧し，その後の復圧過程の計測結果を用いて，コンクリートの表層透気係数kTを算出することができる[6]。また，無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体のkTの比をkT比とした。本実験における表面透気試験は，中性化促進試験を行っている供試体を用い，中性化深さの計測期間（中性化期間 56 日）に計測した。なお，中性化促進試験機内の湿度は 60%となっているため，表面透気試験における含水率の影響は小さいと考えられる。

(2) 中性化促進試験

土木学会規準JSCE-K 571-2004「表面含浸材の試験方法（案）」に準拠して試験を行った。試験面を打設側面とし，その他の 4 面はアルミテープでシールを行った供試体を用いた。実験条件は温度 20℃，相対湿度 60%，CO_2濃度 5%とし，試験期間（56 日）に試験体を割裂し，割裂面にフェノールフタレイン法を用いて中性化深さを測定した。中性化深さの計測は，試験面（打設側面）2 面の中性化深さを各 6 点計測したものの平均値とした。また，無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体の中性化深さの比を中性化深さ比とした。

表－2　使用した表面含浸材の種類

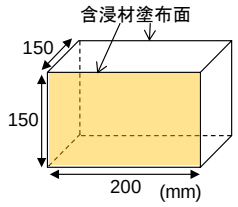
略称	主成分	塗布量 (g/m^2)
Na	けい酸ナトリウム	120
Li	けい酸リチウム	120
Na+K	けい酸ナトリウム＋カリウム	120
Li+K	けい酸リチウム＋カリウム	120

表－3　示方配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	AE
N	60	45	175	292	804	1025	C×0.6%

表－4　供試体寸法および塗布面

試験項目	供試体寸法(mm)	含浸面
中性化促進試験	150×150×200	打設側面 (2 面)
表面透気試験		



図－3　供試体概要

3. 実験結果および考察

(1) 表面透気試験結果

図－4，**図－5** に補助材無し，補助材有りのkTを示す。なお，補助材有りにおける無塗布のkTは，補助材を塗布しない無塗布のkTを用いている。補助材無しのkTは含浸材塗布供試体と無塗布を比較して，同程度か大きな値となった。含浸材の種類による改質効果の違いは，けい酸ナトリウム（Na），けい酸リチウム（Li）を塗布した場合にkTが 0.05～0.10×10^{-6}m^{2}となり，無塗布と比較して大きな値となった。けい酸ナトリウムとカリウムの混合（Na+K），けい酸リチウムとカリウム混合（Li+K）では，無塗布と同程度のkTとなった。

補助材有りは，けい酸リチウムとカリウム混合（Li+K）を除いて，無塗布よりも小さな kT となる傾向がみられた。含浸材はコンクリート中の水酸化カルシウムが反応

することで，C-S-H ゲルを生成し表層組織を緻密化する。このことから，補助材である水酸化カルシウムを塗布することで，含浸材との反応が促進されたと考えられる。反応型であるけい酸ナトリウム（Na），けい酸ナトリウムとカリウムの混合（Na+K）を用いた場合において，養生方法によらず kT は無塗布よりも小さくなった。

補助材無し，補助材有りにかかわらず，含浸材の塗布により，無塗布と比較して kT が大きくなるものがあった。含浸材の塗布により，セメントの水和が阻害されたと考えられるが，原因については検討が必要である。

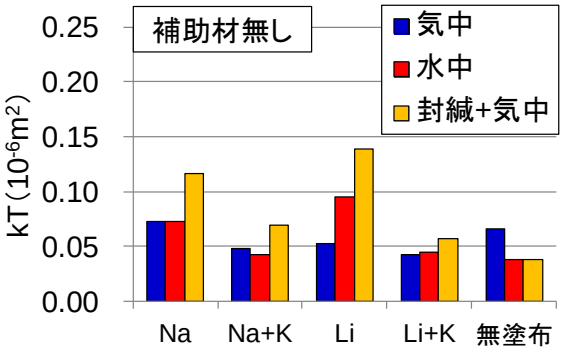
(2) 中性化促進試験結果

図－6，図－7 に補助材無し，補助材有りの中性化深さを示す。ここで，補助材有りにおける無塗布の中性化深さは，補助材を塗布しない無塗布の中性化深さを用いている。補助材無しでは，含浸材塗布供試体は無塗布と比較して同程度の中性化深さとなった。また，含浸材の種類の違いによる改質効果への影響は小さいことが分かる。水中養生を行った場合，無塗布と比較して含浸材を塗布することで中性化深さが大きくなった。水中養生では含浸材の反応が進むため，水酸化カルシウムが消費され，中性化深さが大きくなったと考える。ここで，含浸材を塗布した場合の中性化の進行は，含浸材の反応による組織の緻密化と，水酸化カルシウムの消費のバランスにより決定すると考える。

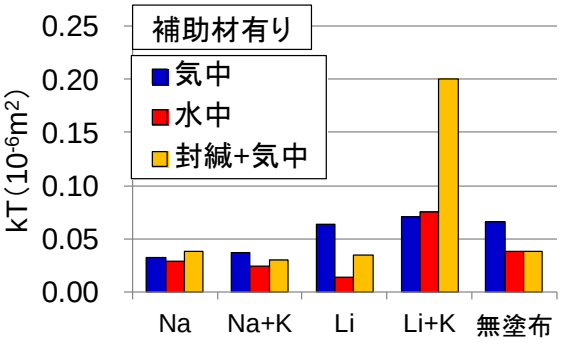
補助材を用いた場合，補助材なしと同様に，含浸材塗布供試体は無塗布と比較して同程度の中性化深さとなった。また，含浸材の種類による改質効果の違いは小さいことが分かる。養生方法による改質効果の傾向は，けい酸ナトリウム（Na）を除いて，無塗布と同様に水中養生を行うことで，中性化深さが小さくなった。中性化深さの差は 3mm 程度以下のため，養生方法の違いによる改質効果への影響は小さいと考える。

(3) 養生方法が改質効果に与える影響の検討

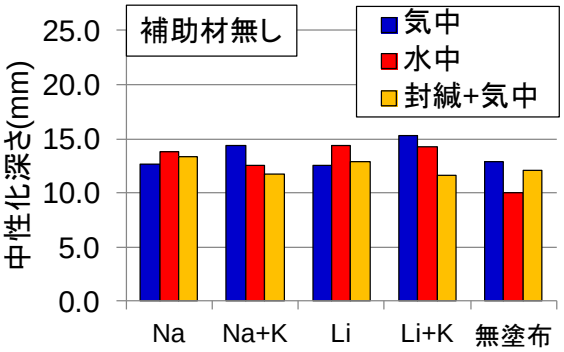
図－8, 図－9 に補助材無し, 補助材有りのkT比を示す。補助材無しでは，含浸材の種類によらず気中養生を行うことで，無塗布よりもkT比が小さくなった。一方，水中養生や封緘養生＋気中養生では，無塗布と比較して同程度か大きくなった。既往の研究において，気中養生と比較し散水養生（気中養生と湛水）を行うことで改質効果が高まることが報告されている[7]。ここで，本研究で用いているkT比は，無塗布に対する効果の程度を意味していることに注意されたい。例えば，無塗布の場合の気中養生ではkTが大きい（**図－4** 参照）が，塗布した場合の気中養生では，他の養生に比べてそれほど大きくないため，結果として気中養生のkT比は，ほとんどの場合で 1 を下回っている。kT比の結果から，気中養生では，無塗布に比べて改質効果が確認できるが，水中や封



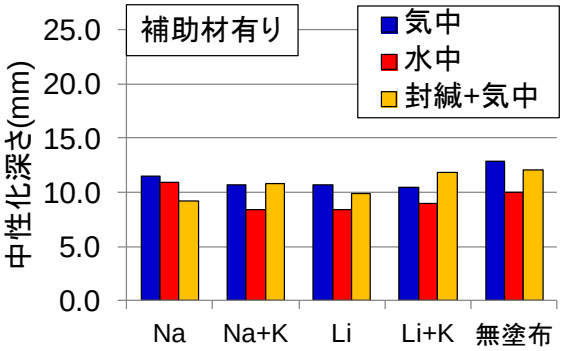
図－4　補助材無しの kT（中性化期間 56 日）



図－5　補助材有りの kT（中性化期間 56 日）



図－6　補助材無の中性化深さ（中性化期間 56 日）



図－7　補助材有りの中性化深さ（中性化期間 56 日）

緘養生では，無塗布に比べて改質効果があまり期待できないことがわかる。

補助材有りにおいて，けい酸リチウムとカリウム混合

（Li+K）を除いて，補助材無しとは異なり，含浸材の種類によらず水中養生を行うことで，無塗布よりも kT 比が小さくなった。補助材である水酸化カルシウムを塗布することにより，含浸材の反応が促進され，表層組織が緻密化したことが考えられる。よって，水中養生においても含浸材の溶出が抑えられ，改質効果が見られたのではないかと考えられる。含浸材の種類に注目すると，けい酸ナトリウム（Na），けい酸ナトリウムとカリウム混合（Na+K）では，水中養生と気中養生という水分供給の異なる養生方法において，改質効果が見られた。先ほどと同様に，補助材を用いたことによる，反応が促進されたためであると考えられる。

図－10，**図－11** に補助材無し，補助材有りの中性化深さ比を示す。中性化深さ比は，無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体の中性化深さの比を中性化深さ比とした。

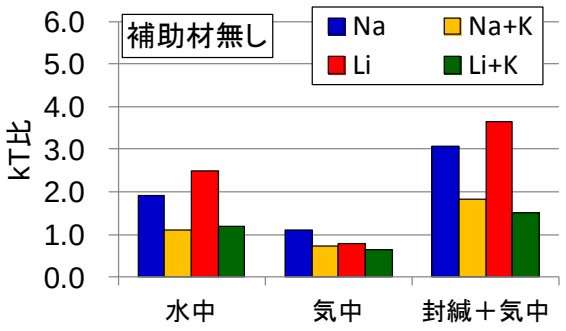
補助材無しでは，水中養生や封緘養生＋気中養生では無塗布と同程度であり，気中養生では無塗布よりも大きくなることが分かる。含浸材の種類によらず，養生方法は，無塗布と比べた含浸材の改質効果にそれほど大きな影響は及ぼさないと思われる。

補助材有りでは，気中養生のけい酸ナトリウム（Na）を除いて，無塗布よりも小さくなった。補助材を用いることで，含浸材の種類によらず塗布後の養生方法の影響は小さかった。けい酸リチウム（Li）について，**図－7** の補助材有りの中性化深さ結果と，**図－11** の補助材有りの中性化深さ比の結果比較する。気中養生や封緘養生＋気中養生のような，乾燥期間を設けることで含浸材の改質効果が大きくなったことが分かる。ここで，無塗布の中性化深さは，気中養生や封緘養生＋気中養生では水中養生よりも大きくなった。このことから，けい酸リチウム（Li）において水中養生では含浸材の改質効果が小さくなり，気中養生や封緘養生＋気中養生では改質効果が大きくなった。よって，けい酸リチウム（Li）を塗布することで，無塗布の 8 割程度の一定の改質効果となったと考えられる。

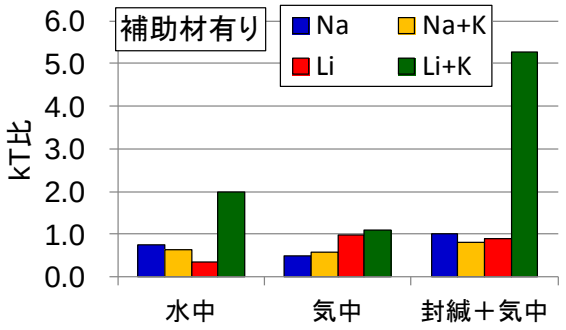
補助材なしの kT 比と中性化深さ比から，kT 比が無塗布よりも小さい場合（緻密化），中性化深さ比は大きくなった。これは，含浸材の反応が進むため，水酸化カルシウムが消費され，中性化が進行したと考える。一方，補助材有りでは，kT 比，中性化深さ比とも無塗布より小さくなり，含浸材の改質効果がみられた．

(4) 既往の研究との比較検討

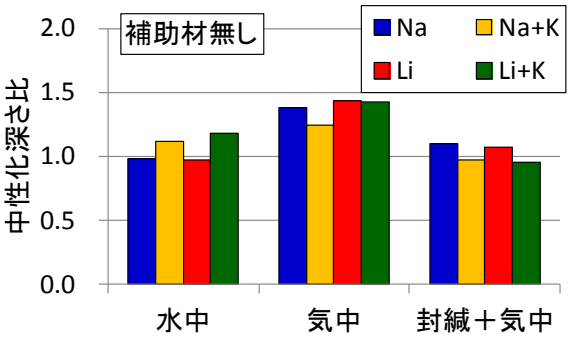
図－12 に既往の中性化促進試験結果との比較[8]を，**表－5** に試験水準の違いを示す。**図－12** は，魚本・高田式[9]を用いて，水セメント比 55%と 60%における中性化深さの予測（予測-55，予測-60）を行った結果も掲載した。既往の実験結果である，水セメント比 55%，けい酸ナトリウム系（Na-55）を塗布した場合において，表層組織が改質されたため，中性化深さが無塗布と比較して小さいことがわかる。直線の傾きが変化している箇所では，中



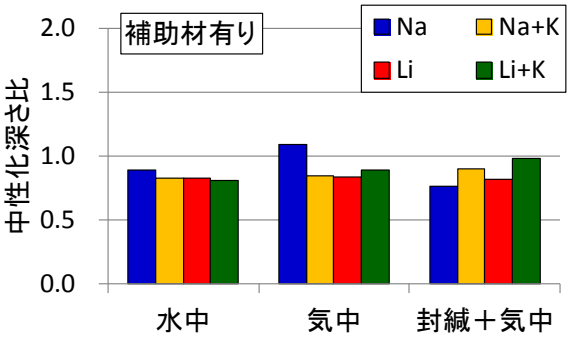
図－8　補助材無しの kT 比（中性化期間 56 日）



図－9　補助材有りの kT 比（中性化期間 56 日）



図－10　補助材無しの中性化深さ比（中性化期間 56 日）



図－11　補助材有りの中性化深さ比（中性化期間 56 日）

性化深さが含浸材の改質深さを超えたため，無塗布の中性化速度係数と等しくなったと考えられる。また，無塗布の中性化深さは概ね予測式と一致していることが分かる。一方，本研究の実験結果である，水セメント比 60%，けい酸ナトリウム系（Na-60）を塗布した場合において，含浸材の改質効果はほとんど見られず，無塗布と同程度の中性化深さの経時変化となり，予測式とも概ね一致していた。kT と中性化深さの関係から，含浸材の改質効果に影響を与えた理由として，W/C の違いによる水酸化カルシウム量と，**表－5** より含浸材塗布時のコンクリートの飽水度が，改質効果に影響しているのではないかと考られる。そこで，本実験ではコンクリートの飽水度と含浸材の浸透量の関係を調べるため，吸水試験を行った。

4. 吸水試験

4.1 実験概要

コンクリートの飽水度が，表面含浸材の浸透に及ぼす影響に関して検討するため，真空吸水試験を行った[10]。前処理として湿り気味の供試体（飽水度：83%）は湿度 70%，温度 20℃の環境下で，乾燥供試体（飽水度：38%）は 40℃の乾燥炉で，いずれの環境も 5 日間保管した。吸水面（打設側面）と水分蒸発面を開放し，それ以外の部分をアルミテープにてシールした。試験面から 20mmの位置まで容器に試験溶液を張り，真空デシケータにセットして 0.1MPaの環境下で 3 時間保持した。試験に用いた溶液を**表－6** に示す。ここで，試験溶液Li20 を例に挙げると，けい酸ナトリウム系含浸材の原液濃度の 20%濃度となるように蒸留水で希釈を行った溶液である。測定は，供試体を割裂し溶液の吸い上げられた領域をマーキンングした後，浸透深さ深さを 6 点計測した平均値から，浸透深さを算出した。また，試験前の質量（M_0），飽水質量（M_W），絶乾質量（M_D），浸透量（M_{in}）の計測を行った。これらの計測値を用いて，飽水度（M_i），空隙中の浸透率（M_P）を算出した。

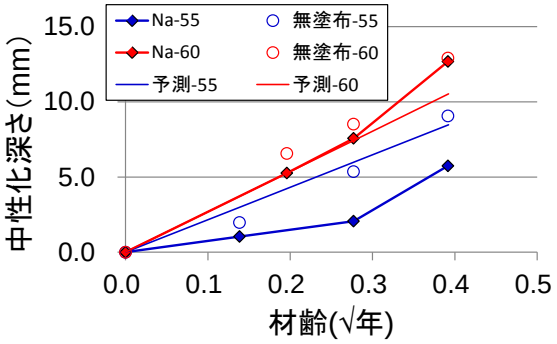
$$M_i = M_0/(M_W - M_D)\times 100 \quad (1)$$

$$M_p = M_{in}/(M_W - M_D)\times 100 \quad (2)$$

ここに，M_i：飽水度(%)，M_P：空隙中の浸透率(%)，M_W：飽水質量(g)，M_D：絶乾質量(g)，M_{in}：浸透量(g)

4.2 使用材料および供試体概要

実験にはモルタル供試体を用いた。モルタルの配合は，容積比でセメント 1，細骨材 3，水セメント比 60%とした。7 日間の水中養生を行い，材齢 12 日経過後に試験を行った。供試体寸法は 40×40×40mm の供試体を用い，試験面は打設側面を用いた。



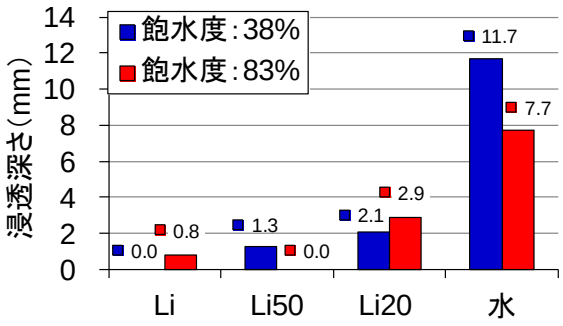
図－12　中性化深さの比較

表－5　実験水準の違い

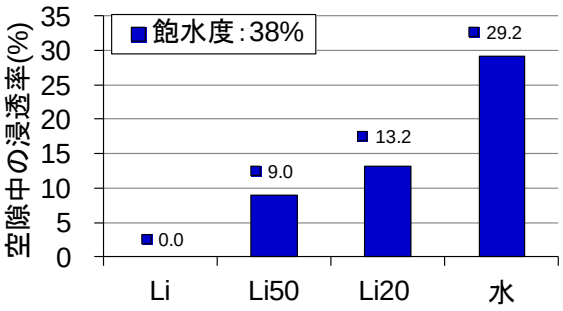
	既往成果[8]	本研究
W/C(%)	55	60
脱型後養生	気中	水中
塗布後養生	気中	気中

表－6　吸水試験の溶液

供試体飽水度	試験溶液
絶乾(40℃) 湿り気味（R.H. 80%）	Li
	Li50
	Li20
	水



図－13　浸透深さ



図－14　空隙中の浸透率－(飽和度 38%)

4.3 実験結果および考察

(1) 浸透深さ

図－13 に試験溶液の浸透深さを示す。試験溶液に水を用いた場合，飽水度 38%の浸透深さが大きくなった。モルタルの飽水度が大きい場合，試験溶液の浸透を妨げていることが考えられる。一方，含浸材の濃度を変えた試験溶液では，飽水度と浸透深さの関係は見られず，試験溶液の含浸材濃度を薄くすることで，浸透深さが大きくなる傾向が見られた。

(2) 質量変化

試験溶液による浸透深さの違いが大きいことから，飽水度(38%)について考察を行う。**図－14** に空隙中の浸透率を示す。溶液の濃度による浸透率の違いは，含浸材の濃度が下がることにより大きくなることが分かる。含浸材の浸透深さは，水セメント比が 50%のモルタルでは 3～4mmと報告されている[11)]。本実験において，含浸材原液（Li）を用いた場合，真空で保持したにもかかわらず浸透が見られなかった。湿潤状態で含浸材を塗布することで改質効果が大きいということから，含浸材は水の中を拡散することにより，表層が改質するのではないかと考えられる。今後は，水酸化カルシウム量の違いによる改質効果について，検討を行っていく予定である。

5. まとめ

本研究は, 表面含浸材塗布後の養生方法の違いによる, 改質効果の違いについて検討を行い, 以下の知見を得た。

(1) 表面透気試験において，補助材無しの kT は含浸材塗布供試体と無塗布を比較して，同程度か大きな値となった。含浸材を塗布することで，セメントの反応が阻害され，無塗布よりも大きくなったと考えられる。しかし，原因については今後の検討が必要である。また，反応補助材である飽和水酸化カルシウム水溶液を含浸材塗布後に塗布を行うことで，表透気係数が小さくなった。

(2) 中性化促進試験において，補助材なしでは，含浸材塗布供試体は無塗布と比較して同程度の中性化深さとなった。補助材有りでは，気中養生のけい酸ナトリウム（Na）を除いて，無塗布よりも小さくなった。補助材を用いることで，含浸材の種類によらず塗布後の養生方法の影響は小さかった。

(3) 表面透気係数と中性化促進試験の結果から，表面透気試験において含浸材の種類や，塗布後の養生方法，補助材の有無によるコンクリートの表層品質の改質効果の違いが見られた。本研究では，補助材である水酸化カルシウム水溶液を用いることで，含浸材の改質効果が見られた。しかし，補助材を用いない場合では，表層透気係数や中性化深さが無塗布と同程度となり，コンクリートの表層品質の改質効果が見られなかった。

(4)表面含浸材の浸透は，溶液の含浸材濃度を薄くすることで，浸透深さが大きくなる傾向が見られた。このことから，含浸材は塗布により浸透する効果よりも，含浸材の成分が水の中を拡散することにより，表層が改質するのではないかと考えられる。

謝辞

本研究において種々の実験やデータのとりまとめを行って頂いた，東京理科大学理工学部土木工学科 4 年の土屋太一君にこの場を借りて深く感謝いたします。

参考文献

1) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005

2) 遠藤裕丈：表面含浸工法による劣化抑制対策の現状と課題, コンクリート工学, Vol.48, No.5, pp97-100, 2010.5

3) 櫨原弘貴，武若耕司，山口明伸，白澤直：各種表面含浸材の性能把握と効果の違いに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1619-1624, 2010

4) 古賀裕久，青山尚，渡辺博志，木村嘉富：表面含浸材のコンクリート含水率抑制効果に関する屋外暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1939-1944, 2009

5) 山邊勝，井ノ口公寛，伊代田岳史：表面含浸材の施工の違いがコンクリートの耐久性に与える影響，第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会，V-35，2011

6) Torrent,R.:A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992

7) 中村慎，武若耕司，山口明伸，坂本貴之：塗布後の養生の違いが各種表面含浸材の効果に与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1630-1635，2012

8) 染谷望，三上宏之，三田勝也，加藤佳孝：表面含浸材の適用時期がコンクリートの物質移動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1618-1623, 2012

9) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.451/V-17，pp.119-128，1992.8

10) 伊代田岳史，井ノ口公寛，豊村恵理：空隙構造を簡易に計測する真空吸水試験の開発および真空吸水試験を用いた中性化促進予測手法の提案，芝浦工大研究報告理工系 56-2，pp33-40，2012

11) 土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー137，2012.7