

論文 シラン系及び無機系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 12.5 年後の性状

岡田 明也*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨：本研究では、シラン系及び無機系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体を 12.5 年間にわたり屋外暴露を行い、供試体の外観観察試験及び、シラン系表面含浸材については含浸深さ試験を、無機系表面含浸材については中性化深さ試験を行い、それらの試験結果について考察している。その結果、シラン系表面含浸材を含浸させた供試体は屋外暴露によって供試体表面に劣化が生じ、はっ水性は失われるものの、表面を研磨することで水性能が復活する傾向にある。また、暴露期間にかかわらず、無機系表面含浸材を含浸させた供試体は、未含浸供試体に比べて中性化抑制効果に優れる傾向にある。

キーワード：シラン系表面含浸材、無機系表面含浸材、屋外暴露、外観観察、含浸深さ、中性化深さ

1. はじめに

我が国では、昭和 40 年代の高度経済成長期に多くのインフラ構造物が建設された。しかし近年、高度経済成長期に建設された RC 構造物の耐久性の低下が懸念され、そのメンテナンス、維持管理が急務になっている。RC 構造物を補修する材料・工法は数多く存在する。その 1 つである表面含浸工法は表面含浸材をコンクリート表面に塗布含浸させることで、汚れ防止、はっ水性付与、吸水防止、中性化抑制、塩化物イオン浸透抑制など、表面含浸材の種類によって様々な効果が期待できるばかりでなく、作業工程が容易で工期が他の工法に比べて短いといった特徴を持ち合わせている。更に RC 構造物表面の外観を損ねることなく補修でき、他の工法と併用できることなどから、近年、RC 構造物の補修工法として多く用いられている。

一方、表面含浸材の試験方法としては、土木学会の定める JSCE-K-571 [表面含浸材の試験方法 (案)]¹⁾ 並びに JSCE-K-572 [けい酸塩系表面含浸材の試験方法 (案)]²⁾ などが挙げられる。しかし、表面含浸材の耐久性評価についての試験項目は、室内における促進試験が示されているのみである。そこで齋藤らは、表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 1.5 及び 5.5 年後において、表面含浸材の性能評価を行ってきた³⁾。

本研究では、表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 1.5, 6.5 及び 12.5 年後において、外観観察及びシラン系表面含浸材については含浸深さ、無機系表面含浸材については中性化深さ試験を行い、その試験結果について検討している。なお、シラン

系表面含浸材含浸供試体については、その含浸層よりも内部において中性化は認められない。

2. 使用材料

2.1 基材モルタル用材料

(1) セメント

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの物理的性質及び化学成分を **Table 1** に示す。

(2) 細骨材

細骨材としては、セメント強さ試験用標準砂を使用した。細骨材の性質を **Table 2** に示す。

2.2 基材コンクリート用材料

(1) セメント

セメントとしては、基材モルタルで使用したのと同様の普通ポルトランドセメントを使用した。

(2) 細骨材

細骨材としては、阿武隈川産川砂を使用した。細骨材の性質を **Table 3** に示す。

(3) 粗骨材

粗骨材としては、福島県西白河郡表郷村産砂岩砕石を使用した。粗骨材の性質を **Table 4** に示す。

(4) 混和剤

混和剤としては、AE 減水剤を使用した。混和剤の性質を **Table 5** に示す。

2.3 表面含浸材

(1) シラン系表面含浸材

市販のモノマー系表面含浸材 3 種類 (A, B, C) 及びオリゴマー系表面含浸材 3 種類 (D, E, F) を使用した。

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 専任講師 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

(2) 無機系表面含浸材

市販のけい酸ナトリウム系表面含浸材 3 種類 (G, H, I) 及びけい酸リチウム系表面含浸材 1 種類 (J) を使用した。使用した表面含浸材の性質を **Table 6** に示す。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

JSCE-K 571 に従って、**Table 7** に示す調合の基材モルタル (水セメント比 50%) 及び基材コンクリート (水セメント比 45, 55 及び 65%) を作製し、各製造業者の指定する仕様で表面含浸材を含浸させ、供試体を作製した。なお、モルタル供試体は寸法 100×100×100mm に成形し、コンクリート供試体は寸法 100×100×400mm に成形後、寸法 100×100×50mm に切断して、モルタル供試体については型枠に接していた面及び、コンクリート供試体については端部から 50mm の箇所の切断面の寸法

100×100mm の面に表面含浸材を含浸させた。

3.2 屋外暴露試験

各種表面含浸材を含浸させた含浸供試体及び未含浸供試体を、次の条件下で **Photo 1** に示すように暴露した。

- (1) 暴露場所：日本大学工学部 (福島県郡山市) RC 造建物西側外部の太陽光・降雨の当たる場所。
- (2) 暴露期間：2004 年 4 月～2016 年 10 月
- (3) 暴露方法：水平な金網製暴露台上にステンレス製針金で緊結。なお、含浸面が上面になるように暴露した。

3.3 外観観察試験

JSCE-K 571 に準じて、屋外暴露前、屋外暴露 1.5, 6.5 及び 12.5 年後において供試体の含浸面にスポイトを用いて水滴を滴下して、その表面の状態を観察した。さらに、暴露後の供試体については、含浸面を 120 番研磨紙を用

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.

Density (g/cm ³)	Blaine Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3330	2-19	3-25	29.7	44.7	61.9
Chemical Compositions (%)						
MgO		SO ₃		ig. loss		
1.58		2.13		1.90		

Table 2 Properties of Standard Sand.

Size (mm)	Fineness Modulus	Bulk Density (kg/L)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
0.08~2.00	2.72~3.14	1.76	2.64	0.42

Table 6 Type of Surface Penetrants.

Classification	Property	Sign of Surface Penetrants	Main Ingredient Density (%)	Viscosity (mPa · s)	Quantity (g/m ²)	Number of Penetration	
Silane	Monomer	Aquatic	A	40	< 10	300	2
		Solvent	B	20	< 10	125	1
		Solvent	C	20	< 10	200	1
	Oligomer	Aquatic	D	75	Paste	200	1
		Aquatic	E	80	Paste	200	1
		Solventless	F	90	Paste	300	1
Silicate	Sodium Silicate	Aquatic	G	—	500	4	
		Aquatic	H	—	300	1	
	Lithium Silicate	Aquatic	I	—	—	250	1
		Aquatic	J	—	—	400	2

Table 7 Mix Proportions of Base Mortar and Base Concretes.

Sign	W/C (%)	s/a (%)	Mix Proportions by Mass (kg/m ³)					Slump (cm)	Air Content (%)	Compressive Strength (MPa)
			Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	AE-WRA*			
M50	50	—	243	486	1461	—	—	18.0	5.9	49.5
C45	45	44.1	170	378	748	978	0.9450	8.5	4.3	43.5
C55	55	46.1	176	320	797	961	0.8000	10.0	5.3	33.2
C65	65	48.1	176	271	851	947	0.6775	10.0	5.6	22.7

Note, *: Air entraining and water-reducing admixture.

Table 3 Properties of Fine Aggregate.

Size (mm)	Fineness Modulus	Bulk Density (kg/l)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
≤2.5	2.56	1.56	2.57	1.29

Table 4 Properties of Coarse Aggregate.

Size (mm)	Fineness Modulus	Bulk Density (kg/l)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
5~20	6.58	1.56	2.57	1.29

Table 5 Properties of Air-Entraining and Water-Reducing Admixture.

Appearance	Density (g/cm ³ , 20°C)	Alkaline Content (%)	Chloride Ion Content (%)
Puce Liquid	1.060~1.070	1.0	0.03

いて人力で 10 及び 30 回研磨後、圧縮空気が付着物を取り除き、同様の試験を行った。なお、水滴落下後の含浸面において、「非常にはっ水する」、「やはっ水する」、「濡れることなく水が広がる」、「やや濡れる」及び「濡れる」の 5 段階で評価した。評価基準を **Table 8** に示す。

3.4 含浸深さ試験

シラン系表面含浸材含浸供試体について、JSCE-K 571 に準じて、屋外暴露 1.5、6.5 及び 12.5 年後において供試体を割裂し、30s 間 20℃ の水中に浸せきさせ、割裂面のはっ水している箇所を 6 箇所測定し、その平均値を含浸深さとした。**Photo 2** には、含浸深さの測定箇所を示す。

3.5 中性化試験

無機系表面含浸材含浸供試体について、屋外暴露 1.5、6.5 及び 12.5 年後において供試体を割裂し、割裂面に 1% フェノールフタレイン溶液を噴霧した。赤変しない箇所を中性化域として、3 箇所測定し、平均値を算出し中性化深さとした。**Photo 3** には、中性化深さの測定箇所を示す。

なお、屋外暴露期間 12.5 年後の中性化深さより、次式を用いて、無機系表面含浸材の中性化抑制率を求めた。

$$I_i = 100 - \left(\frac{D_i}{D_o} \times 100 \right)$$

ここに、 I_i : 中性化抑制率 (%)

D_i : 表面含浸材含浸供試体の中性化深さ (mm)

D_o : ブランク供試体の中性化深さ (mm)

4. 試験結果及び考察

Table 9 及び **Table 10** には、モルタル及びコンクリート供試体の外観観察試験の試験結果を示す。基材モルタル及びコンクリート供試体の種類にかかわらず、シラン系表面含浸材を含浸させた供試体については、暴露前及び暴露 1.5 年後にはっ水が確認されたものにおいても、屋外暴露 6.5 及び 12.5 年においては、はっ水は全く認めら



Photo 1 Specimens for Outdoor-Exposure Test.

Table 8 Condition of Surface after Water Spray.

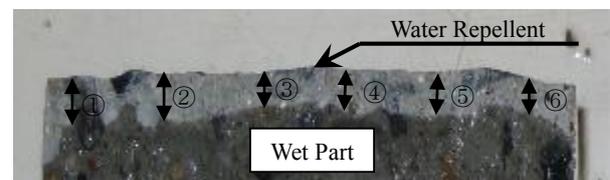
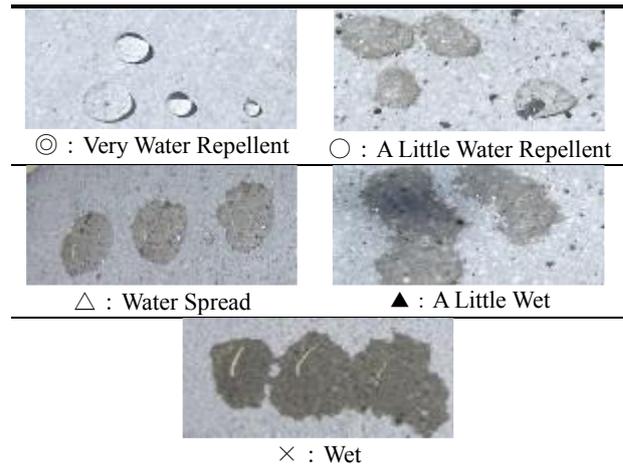


Photo 2 Measurement Points of Penetration Depth.

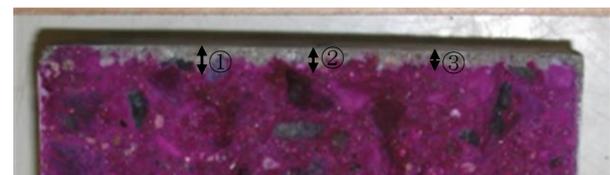


Photo 3 Measurement Points of Carbonation Depth.

Table 9 Result of Appearance Observation Test. (Part 1)

Type	Sign of Surface Penetrants	Before Outdoor-Exposure	Surface with Water Spraying								
			After Outdoor-Exposure (1.5years)			After Outdoor-Exposure (6.5years)			After Outdoor-Exposure (12.5years)		
			Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion	Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion	Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion
	Blank	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	A	▲	▲	△	△	×	▲	△	×	×	▲
	B	◎	◎	◎	◎	×	△	○	×	△	○
	C	◎	◎	◎	◎	×	○	◎	×	○	◎
	D	○	△	△	○	×	△	○	×	▲	○
M50	E	◎	◎	◎	◎	×	○	○	×	△	◎
	F	◎	○	◎	◎	×	△	○	×	▲	△
	G	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	H	▲	▲	×	×	×	×	△	△	×	×
	I	▲	×	×	×	×	×	×	○	×	×
	J	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Notes, ◎ : Very Water Repellent, ○ : A Little Water Repellent, △ : Water Spread, ▲ : A Little Wet, × : Wet.

Table 10 Result of Appearance Observation Test. (Part 2)

Type	Sign of Surface Penetrants	Before Outdoor-Exposure	Surface with Water Spraying								
			After Outdoor-Exposure (1.5years)			After Outdoor-Exposure (6.5years)			After Outdoor-Exposure (12.5years)		
			Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion	Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion	Before Abrasion	After 10 Times Abrasion	After 30 Times Abrasion
C45	Blank	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	A	▲	△	△	△	×	△	△	×	×	×
	D	○	○	○	△	×	○	△	×	▲	▲
	E	◎	○	○	△	×	△	△	×	▲	△
	F	◎	○	○	△	×	△	△	×	×	▲
C55	Blank	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	A	▲	△	△	△	×	▲	△	×	×	△
	B	◎	◎	◎	◎	×	▲	△	×	×	△
	C	◎	◎	◎	◎	×	○	○	×	○	○
	D	○	○	○	○	×	△	○	×	△	○
	E	◎	◎	○	○	×	○	○	×	△	▲
	F	◎	△	○	○	×	△	○	×	▲	△
	G	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×
	I	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	J	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×
C65	Blank	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	A	▲	○	○	▲	×	△	△	×	▲	▲
	D	○	○	○	○	×	△	○	×	▲	△
	E	◎	◎	◎	◎	×	○	○	×	△	▲
	F	◎	○	○	◎	×	○	○	×	△	△
	G	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	H	▲	▲	×	×	×	×	×	△	×	×
	I	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	J	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Notes, ◎ : Very Water Repellent, ○ : A Little Water Repellent, △ : Water Spread, ▲ : A Little Wet, × : Wet.

れない。これは、長期間の屋外暴露によって供試体表面の雨水による浸食や紫外線による表面含浸材の劣化が生じると共に、汚れ物質の付着により、そのはっ水性が失われたためと推察される。しかしながら、供試体の含浸面を研磨することにより、その表面においては、はっ水性が復活する傾向にある。これは、含浸面を研磨することにより、新たな含浸層が現れることに起因するものと推察される。

一方、無機系表面含浸材は、はっ水性を形成する性質を持ち合わせていない。しかしながら、屋外暴露 12.5 年後において、無機系表面含浸材を含浸させた供試体の一部ではっ水性が確認された。無機系表面含浸材はシラン系表面含浸材のようなはっ水性を有するものではなく、はっ水が確認された供試体表面には藻の発生が確認できた他、若干黒ずんでいることから油性汚れが発生しているものと考えられ、はっ水はその影響によるものと推察される。従って、そのはっ水性は供試体表面を研磨することで失われる。

Fig.1 から Fig.4 には、シラン系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体における含浸深さを示す。シラン系表面含浸材の種類によって含浸深さは異なり、含浸量の多いもの及びオリゴマー系のものは、含浸深さが大きい傾向にある。これは、含浸量が多いこと

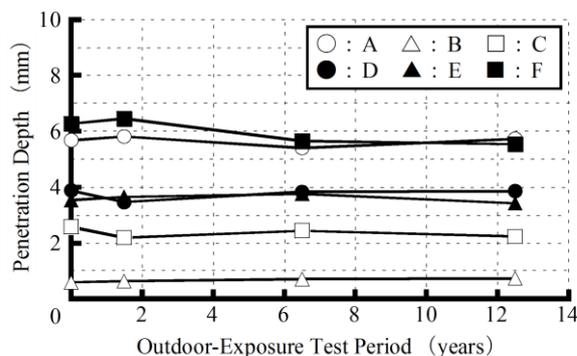


Fig.1 Penetration Depth of M50 Specimen.

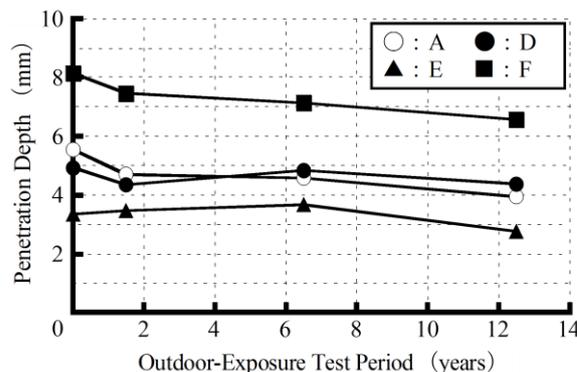


Fig.2 Penetration Depth of C45 Specimen.

並びに、オリゴマー系のシラン系表面含浸材は、溶液系のものに比べて主成分濃度が高いことに起因するものと推察される。また、その含浸深さは屋外暴露前に比べ若干低い値を示す傾向にある。本研究では、外観観察試験後に含浸深さ試験を行っており、供試体表面が研磨された状態で含浸深さを測定しているため、含浸深さは、屋外暴露前に比べ若干低い値を示すものと推察される。しかしながら、含浸深さの減少の程度は一部を除いて屋外暴露 12.5 年後において約 1mm 以内と極めて小さい。従って、シラン系表面含浸材を含浸させた供試体を屋外暴露した場合、供試体外表面のはっ水性が低下する傾向にあるが、供試体内部の含浸層は、健全に維持されているといえる。

Fig.5 及び Fig.6 には、それぞれ、シラン系表面含浸材を含浸させたコンクリート供試体の屋外暴露前及び屋外暴露 12.5 年後の含浸深さと水セメント比の関係を示す。屋外暴露前後共に、基材コンクリートの水セメント比の増加に伴って、シラン系表面含浸材の含浸深さは大きくなる傾向にある。これは、水セメント比の増加に伴いコンクリートは粗な組織構造になり、表面含浸材が含浸しやすくなることによるものと推察される。

Fig.7 から Fig.9 には、無機系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の中性化深さを示す。当然のことながら、基材モルタル及びコンクリート供試体の種類にかかわらず、未含浸供試体及び無機系表面含浸材を含浸させた供試体の中性化深さは暴露期間の増加に伴い大きくなる傾向にある。なお、いずれの暴露期間においても無機系表面含浸材を含浸させた供試体の中性化深さは、未含浸供試体のそれらに比べ小さい値を示す。

Fig.10 から Fig.12 には、無機系表面含浸材の屋外暴露 12.5 年後における中性化抑制率を示す。モルタル供試体においては、本研究で用いたけい酸ナトリウム系表面含浸材は 30~65%、けい酸リチウム系表面含浸材は約 50% の中性化抑制率を示し、けい酸ナトリウム系表面含浸材 (G) が最も大きな中性化抑制率を与える。しかし、水セメント比 55% のコンクリート供試体では、けい酸リチウム系表面含浸材 (J) は、けい酸ナトリウム系表面含浸材 (G) と同程度の中性化抑制率を与えるものの、水セメント比が 65% になると最も小さな中性化抑制率を示す。また、モルタル供試体及び水セメント比 55% のコンクリート供試体において最も小さな中性化抑制率を示したけい酸ナトリウム系表面含浸材 (I) は、けい酸ナトリウム系表面含浸材 (H) に次いで大きな中性化抑制率を与える。なお、これらのことから推察すれば、無機系表面含浸材の中性化抑制効果をけい酸ナトリウム系とリチウム系で明確にするには至っていない。また、本研究では新設のモルタル及びコンクリート供試体を用いており、暴

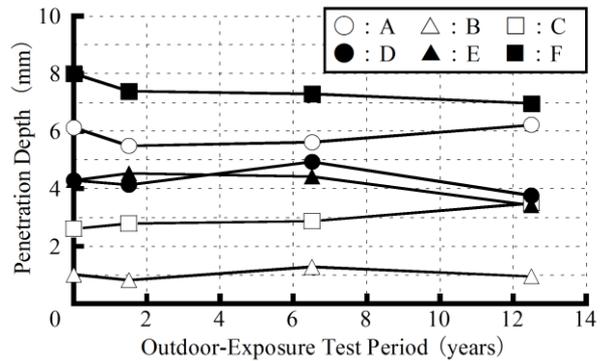


Fig.3 Penetration Depth of C55 Specimen.

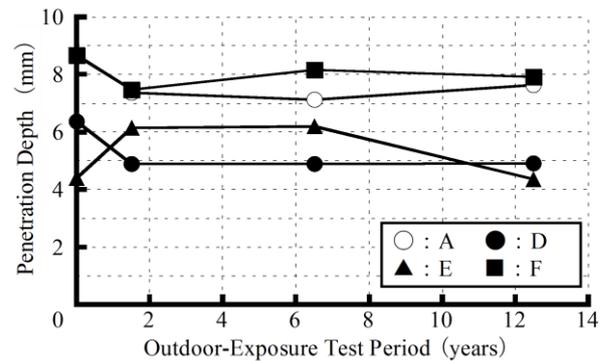


Fig.4 Penetration Depth of C65 Specimen.

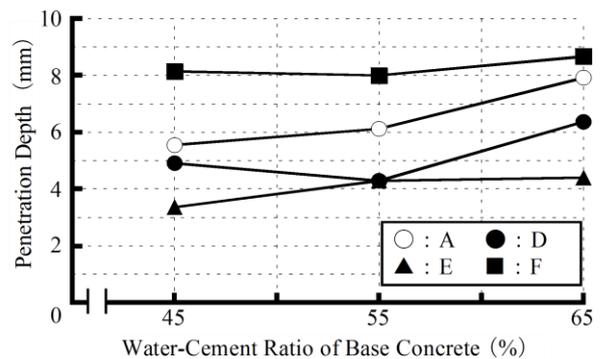


Fig.5 Water-Cement Ratio of Base Concrete vs. Penetration Depth of Surface Penetrants before Outdoor-Exposure.

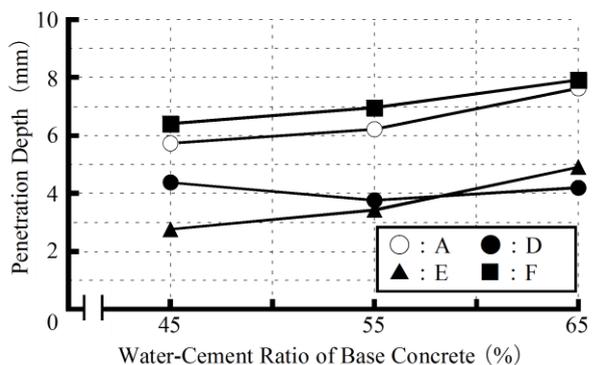


Fig.6 Water-Cement Ratio of Base Concrete vs. Penetration Depth of Surface Penetrants after 12.5 Years Outdoor-Exposure.

露供試体の成分分析や微細組織構造の観察などを行っていないため、けい酸ナトリウム系とリチウム系表面含浸材の性能の違いを明確にするため、より詳細な検討を行うことを今後の課題としたい。

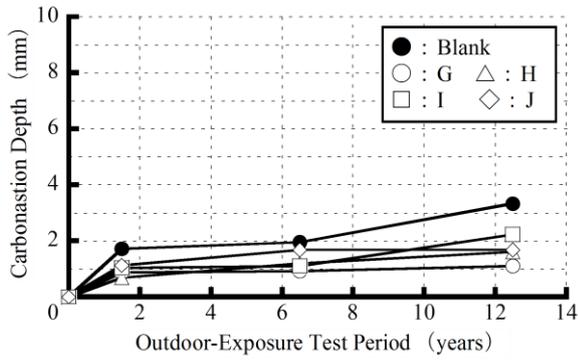


Fig.7 Carbonation Depth of M50 Specimen.

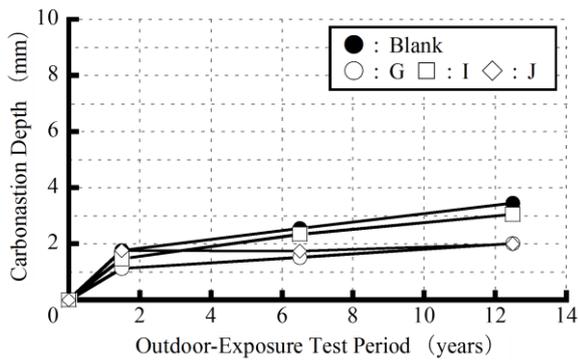


Fig.8 Carbonation Depth of C55 Specimen.

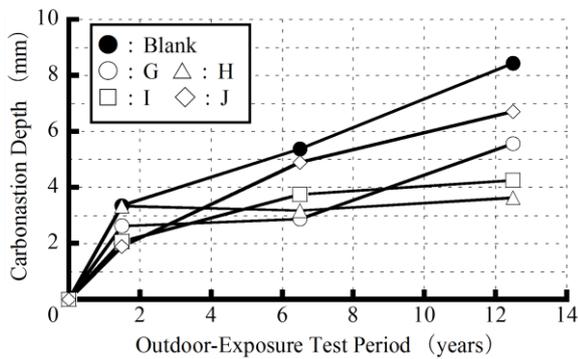


Fig.9 Carbonation Depth of C65 Specimen.

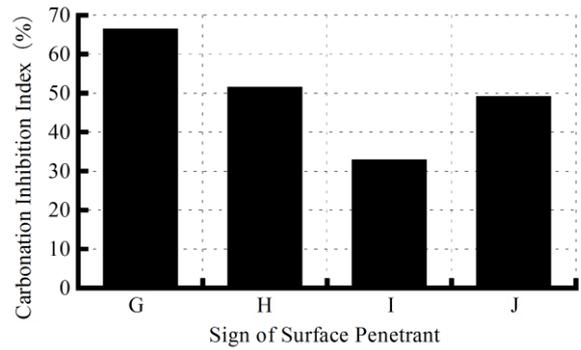


Fig.10 Carbonation Inhibition Index of Silicate-Type Surface Penetrant for M50 Specimen.

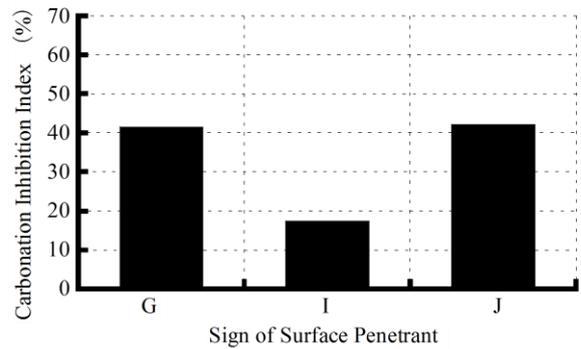


Fig.11 Carbonation Inhibition Index of Silicate-Type Surface Penetrant for C55 Specimen.

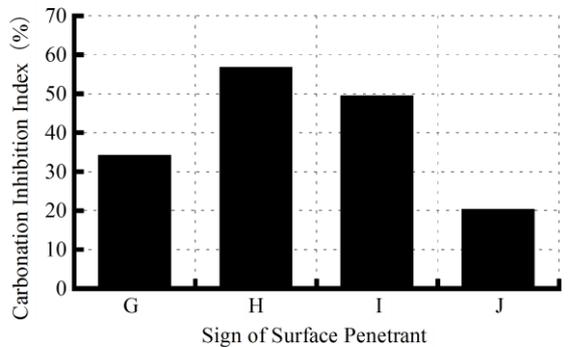


Fig.12 Carbonation Inhibition Index of Silicate-Type Surface Penetrant for C65 Specimen.

5. 結論

本研究を結論つけば、以下の通りである。

- (1) シラン系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリートを 12.5 年間屋外暴露した結果、暴露期間が長くなるにつれ、供試体外表面のはっ水性が失われる傾向にある。しかし、モルタル及びコンクリートの内部に含浸しているシラン系表面含浸材の性能については、長期間にわたって維持されるものと推察される。
- (2) 無機系表面含浸材については、屋外暴露 12.5 年後において、未含浸のものに比べ 20~60%程度の中酸化抑制効果を有する。しかし、本研究で用いた無機系表面含浸材の性能は、基材の種類が異なるとその順位が変化しており、より詳細な検討を行うことを今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、土木学会コンクリート委員会表面保護工法研究小委員会表面保護含浸工法 WG の共通試験時に作製した供試体を屋外暴露した結果である。ここに記して、謝意を表します。

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) 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
- 3) 齋藤耕司，齋藤俊克，出村克宣：表面含浸材を含浸したモルタルおよびコンクリートの屋外暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1637-1642, 2011