

令和 5 年度 弘前大学大学院 地域共創科学研究科 修士論文

# コンクリート用表面含浸剤を塗布 したコンクリートの中酸化特性

地域リノベーション専攻

レジリエンステクノロジー領域

22GC110 古枝 志織

1 章 序論	1
1-1. 背景	
1-2. 試験目的	
1-3. 含浸剤について	
1-4. 中性化について	
1-4-1. 中性化のメカニズム	
1-4-2. 二酸化炭素の侵入	
1-4-3. 炭酸化反応	
2 章 中性化深さ試験の概要	4
2-1. 試験のフローチャート	
2-2. 試験体の作製	
2-2-1. 試験体の概要	
2-2-2. 試験体の作業工程	
2-3. 各含浸剤について	
2-4. 含浸剤の種類	
2-5. 含浸剤の施工方法	
2-6. 促進中性化試験	
2-7. 中性化深さ測定試験	
3 章 中性化深さ試験の結果	13
3-1. 早強セメントを使用した場合の中性化深さ試験の結果	
3-2. 普通セメントを使用した場合の中性化深さ試験の結果	
3-3. 中性化深さ試験を比較した結果と考察	
4 章 乾燥収縮試験の概要	23
4-1. 試験目的	
4-2. 乾燥収縮のメカニズム	
4-3. 試験概要	
4-3-1. 試験のフローチャート	
4-3-2. 試験体の作製	
4-3-3. 含浸剤の施工方法	
4-3-4. 乾燥収縮試験	

5 章 乾燥収縮試験の結果と考察	28
5-1. 乾燥収縮試験の結果	
5-2. 乾燥収縮試験の考察	
6 章 結論	32
参考文献	33
謝辞	35

## ■ 1 章 序章

### 1-1. 背景

近年、人口減少また高齢化による労働生産人口が減少しており、その影響で技術者不足の問題が深刻化しつつある。そこで、この問題を緩和させるためにコンクリート構造物の長寿命化が注目されている。これにより、コンクリート構造物の耐久性確保や補修を行うために表面含浸剤(以下から含浸剤と呼ぶ)の塗布による対策が有力視されている。

含浸剤は、施工作業が容易で、かつ施工費用が安価であり、塗装しても無色透明なため構造物の外観を損なわないという利点がある。そのため、実際に施工される機会が増えている。また、含浸剤には複数の種類があり、それぞれの材料や工法について提案がされており、含浸剤の性能に関しても様々な研究がなされている。既往の研究からも、含浸剤は特に塩害への対策として高い効果を発揮することがわかっている。その一方で中性化は種類によって抑制する効果が確認されているが、逆に含水量の低下により中性化が進行するという結果も確認されている。このように、含浸剤は多くの種類があるにも関わらず、どの系統の含浸剤にどれほどの性能があるか不明瞭であり、また比較もあまりなされていない。性能が明確にわかることによって、どの含浸剤の製品を使用することが最適なのか判断することができる。さらには、コンクリート構造物の長寿命化に貢献することができる。

そこで本研究では、劣化現象の 1 つである中性化に着目し、コンクリート試験体に複数の含浸剤を塗布した上での中性化の特性について比較・検討することを目指す。

### 1-2. 試験目的

本研究では中性化に対する特性について比較・検討をすることを目的とする。昨年度(村田、守屋(2022))の研究結果を踏まえ、同じ含浸剤を使用したうえでセメントの種類による比較をするために 2 種のセメントを使用した試験体を作製する。それらに対してセメントの種類による含浸剤の効能について調べるために中性化深さ試験を行う。

### 1-3. 含浸剤について

鉄筋コンクリート構造物の劣化原因は、いずれもコンクリート表面より何らかの物質が浸透、拡散することが大きく関係している。そこで、コンクリート表面に含浸剤を塗布することにより劣化因子の侵入防止、または鉄筋腐食作用を抑制することができる。

含浸剤にはシラン系、ケイ酸塩系、そしてその 2 種類を複合または混合した高分子系の 3 つの系統があり、そこから種類が分かれるため多くの含浸剤がある。

## 1-4. 中性化について

### 1-4-1. 中性化のメカニズム

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。また中性化は、水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、鋼材の腐食だけでなくコンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もある。このため、中性化の進行を抑制することは鉄筋コンクリート構造物の耐久性にとって重要である。コンクリートの中性化とそれに伴う構造物の劣化は、以下のようなメカニズムで進行する。

最初に細孔中の水分が逸散した空隙に、二酸化炭素が侵入する。侵入した二酸化炭素が細孔溶液内に溶解して、炭酸イオンとなる。炭酸イオンとセメント内で起きる水和反応によって生成された水酸化カルシウムから供給されるカルシウムイオンが反応し、炭酸カルシウムを生成する。カルシウムイオンが反応することで消費され、細孔溶液中のカルシウムイオン濃度が低下する。これにより濃度平衡が働くことでコンクリート固相に存在する水酸化カルシウムが細孔中に溶け出す。これを繰り返すことにより、コンクリート中の水酸化カルシウムが減少する。つまり、コンクリートのアルカリ性が低下する。

pH の低下に伴い、鉄筋表面の不動態被膜が消失して、水分と酸素の供給により腐食が生じる。腐食が進行すると、コンクリートにひび割れが生じる。ひび割れが生じる腐食量は、コンクリートの強度、かぶりコンクリート、鉄筋径等に依存する。ひび割れを通して酸素等の供給量が増加し、さらなる腐食の進展によって、ひび割れの拡大やかぶりコンクリートの剥離が生じる。そして鉄筋の断面欠損により、耐荷力の低下等が発生する。

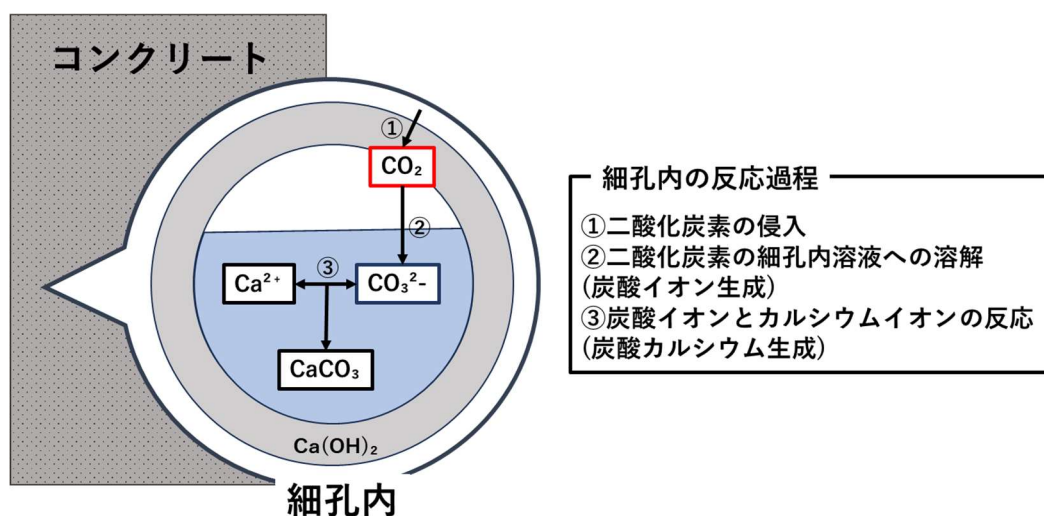


図-1 中性化のメカニズム（細孔内での反応）

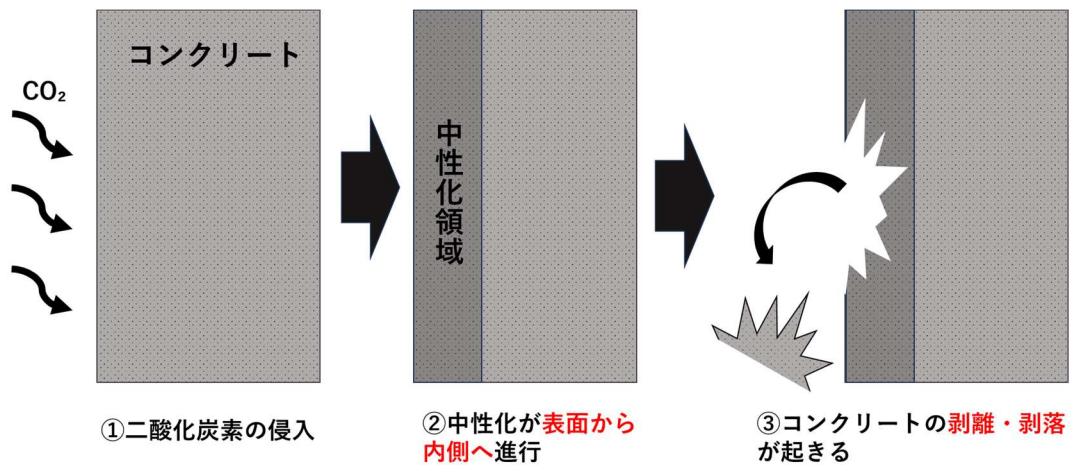


図-2 中性化による劣化

含浸剤を塗布した場合、撥水効果による乾燥により中性化が進むと考えられている。もし、含浸剤を塗布したことで中性化が進行すると、上記のメカニズムに基づいて劣化が進んでしまうため、各含浸剤を塗布した場合の中性化の進行度合を把握することが重要である。

#### 1-4-2. 二酸化炭素の侵入

大気中の二酸化炭素は、コンクリートの空隙内に拡散することによって侵入する。従って、その拡散速度は、セメント硬化体や骨材の空隙量及び空隙構造に依存する。また、コンクリート中における気体の拡散は、実質上水分で閉塞されていない空隙で起こる。このため、コンクリートの含水率は拡散係数に大きな影響を与える。つまり、水分をコンクリート内に捉えておく能力が二酸化炭素の拡散速度、ひいては中性化速度を決定していると言える。含浸剤は、この二酸化炭素の侵入を防ぐことを期待されている。

#### 1-4-3. 炭酸化反応

細孔内に侵入した二酸化炭素は細孔溶液中に溶解し、炭酸イオンもしくは炭酸水素イオンになる。これらイオンと各種セメント水和物との反応が炭酸化反応である。このため、炭酸化反応には水分が必要である。コンクリートは乾燥状態にあり、細孔溶液量が少ない場合には炭酸化反応が起きず、中性化も進行しないことになる。

## ■ 第2章 中性化深さ試験の概要

### 2-1. 試験のフローチャート

図-3 に中性化深さ試験の流れを下図に示す。

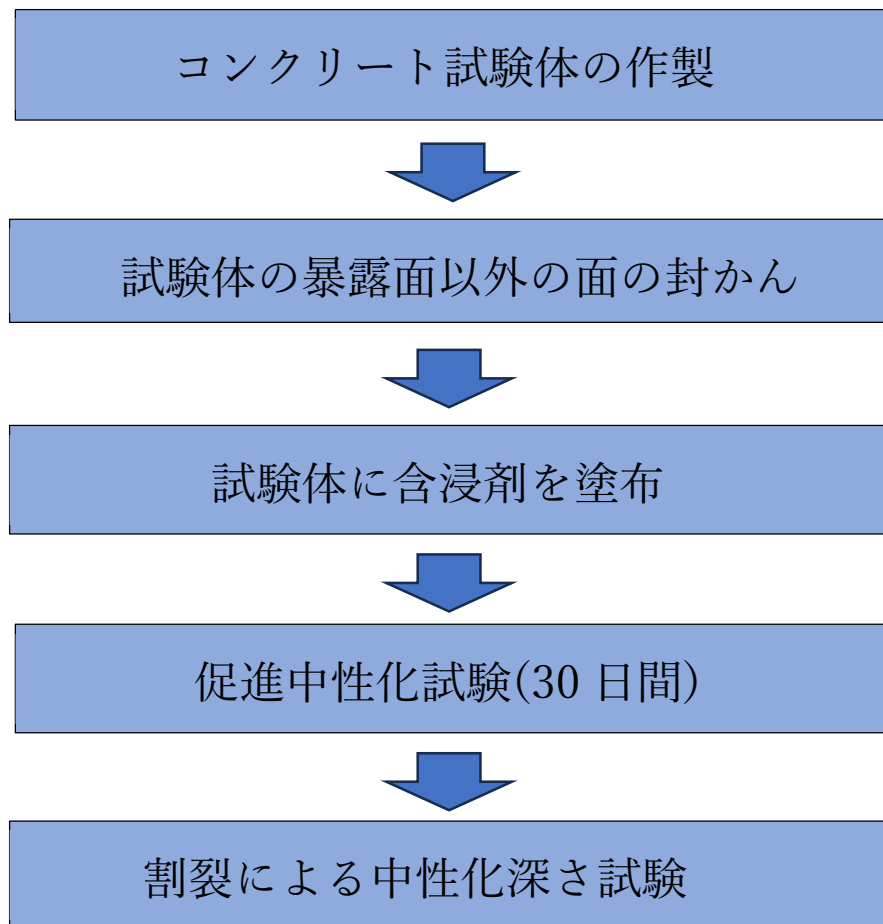


図-3 中性化深さ試験の流れ

## 2-2. 試験体の作製

### 2-2-1. 試験体の概要

表-1、2 に使用したコンクリートの配合を示す（以下から早強ポルトランドセメントは早強セメント、普通ポルトランドセメントは普通セメントと呼ぶ）。本試験では、セメントの種類で比較を行うために早強セメントと普通セメントの 2 種類のセメントを使用した。それぞれのコンクリートを用いて 100×100×100mm の角柱試験体を作製した。試験体は 10 種類の異なる含浸剤を塗装する用途に 10 体、無塗布が 1 体、予備が 1 体になるように作製した。

表-1 試験体の呼び方、配合(早強セメント)

呼び方	コンクリートの種類による記号	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ又はスランプフロー(cm)	粗骨材の最大寸法(mm)	セメントの種類による記号
	普通	24	18	20	N

配合表 Kg/m³											
セメント	混和材	水	細骨材①	細骨材②	細骨材③	粗骨材①	粗骨材②	粗骨材③	粗骨材④	混和剤①	混和剤②
310	－	178	601	267	－	－	947	－	－	3.1	－
水セメント比		57.40%	水結合材比		－%	細骨材率		49.00%	スラッジ固形分率		－%
回収骨材置換率		細骨材		－	粗骨材		－	安定化スラッジ水の使用			無

表-2 試験体の呼び方、配合(普通セメント)

呼び方	コンクリートの種類による記号	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ又はスランプフロー(cm)	粗骨材の最大寸法(mm)	セメントの種類による記号
	普通	24	18	20	N

配合表   Kg/m³											
セメント	混和材	水	細骨材①	細骨材②	細骨材③	粗骨材①	粗骨材②	粗骨材③	粗骨材④	混和剤①	混和剤②
304	－	176	611	270	－	－	947	－	－	3.04	－
水セメント比		57.80%	水結合材比		－%	細骨材率		49.00%	スラッジ固形分率		－%
回収骨材置換率		細骨材		－	粗骨材		－	安定化スラッジ水の使用			無





写真-1 スランプ高さの測定



写真-2 コンクリートの空気量

## 2-2-2. 試験体の作業工程

この試験の目的は、早強セメントの試験体と普通セメントの試験体に含浸剤を塗布し、それぞれの含浸剤の効能を比較することである。そのため、これらを容易に比較できるように試験体の1面を暴露面とした。それ以外の5面からの二酸化炭素の侵入を防ぐため、暴露面以外にエポキシ樹脂を塗布して、その上からアルミテープによる封かんを行った。その後、暴露面にそれぞれの含浸剤を塗布した。塗布した含浸剤の種類を2-4節の表-3に記載する。

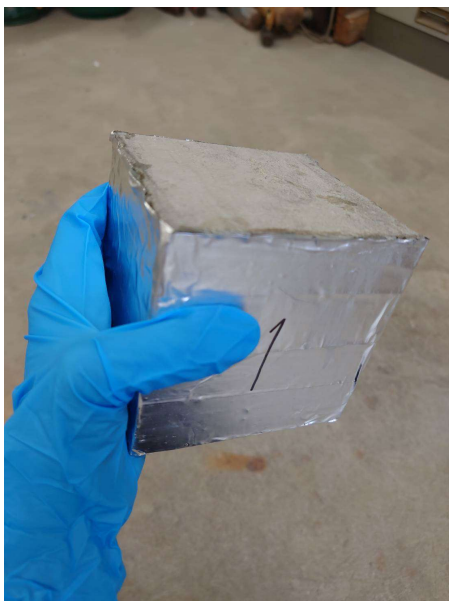


写真-3 暴露面以外を覆った試験体



写真-4 含浸剤を塗布している様子

### 2-3. 各含浸剤について

本試験は早強セメントと普通セメントでシラン系 4 種（その内の 1 種は改良版である）、ケイ酸塩系 3 種、高分子系 3 種の全 10 種類の含浸剤を使用した。まずは、それぞれの含浸剤の特徴について簡単に説明する。

まずシラン系とは、疎水性のアルキル基が含まれている。コンクリート表面に塗布すると表面や空隙壁面にアルキル基が固着して、含浸域が疎水化されて吸水防止層が形成される保護材である。被膜剤とは異なり、空隙が閉塞されないため水蒸気透過性は確保され、内部に滞留する水分の減少効果も見込まれる。シラン系は従来、主成分を有機溶剤で希釈させた溶剤系が主流であった。現在は環境への配慮のため、主成分を水で希釈させた水系や、水や有機溶剤に依存せず特殊な方法で製造された無溶剤系の商品も販売されている。シラン系にはシラン・シロキサン系を含んでいる。シロキサンは、シラン系の弱点である揮発しやすいという点を抑制させる性質がある。そのため、両者を混合させることでシラン系の性質を保ちながら、揮発しにくくさせることができる。よってシラン・シロキサン系の性質はシラン系と変わらないためシラン系に分類した。

次にケイ酸塩系について説明する。ケイ酸塩系とは、ケイ酸塩アルカリ金属塩が主成分である。塗布するとコンクリートの空隙に無機固化物が生成されて含浸域の空隙が充填される。これにより外部からの水、炭酸ガス等の劣化要因の侵入を抑制し、コンクリートの耐久性を向上させることができる。ケイ酸塩系は反応の機構により反応型と固化型に分類できる。反応型はコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して、固化物を生成する。その時に反応しなかった成分がそのまま残存して、水の供給によって再び反応する。そのことで、経年して発生する微細なひび割れを充填する効果が期待できる。反応型の含浸剤の場合、改質効果を出現させるためには、材料を溶解状態にする必要がある。そのため、養生期間中はコンクリートを湿潤状態にする必要がある。固化型も反応型と同様に固化物を生成するが、未反応の成分は乾燥の進行によって難溶性の固化物に変化して空隙を充填することができる。しかし、固化型は改質効果を出現させるためには材料を乾燥固化物の生成を促す必要があるため、養生期間中にはコンクリートを乾燥状態にする必要がある。

最後に高分子系とは、複数の成分が含まれた含浸剤のことである。例えば、シラン系とケイ酸塩系を複合または合成させたものがあり、エステル樹脂や亜硝酸リチウム等を含むことで複数の効果を出現することができる含浸剤である。そのため、1 つの含浸剤でシラン系の疎水性だけでなく、ケイ酸系の緻密化する効果を発揮することができる。また高分子系には表面の性質を改質する以外にも、塗膜を形成することで外部からの侵入や耐久性を保つものもある。

## 2-4. 含浸剤の種類

本論文で使用したシラン系 4 種類、ケイ酸塩系 3 種類、高分子系 3 種類の併せて 10 種類の含浸剤の特徴を表-3 に表す。番号だけではそれぞれの含浸剤の判断が難しいため、含浸剤名をシラン系は A、ケイ酸塩系は B、高分子系は C、無塗布は M0 とし、それぞれに番号を付けた。

表-3 含浸剤の種類と特徴

含浸剤名	外観	成分
A1	無色ないし淡黄色の透明溶液	シラン系オリゴマー
A2	半透明粘性液状	シラン系樹脂
A3	乳白色ペース状	シラン・シロキサン系
A4	淡黄色粘性溶液	シラン・シロキサン系樹脂
B1	無色透明の溶液	ケイ酸ナトリウム
B2	無色ないしわずかに白濁した液体	反応促進剤特殊ケイ酸ナトリウム
B3	無色透明の液体	ケイ酸塩系
C1	乳白色エマルジョン	シリカ含むアクリル酸エステル共重合化物
C2	無色透明水溶液	シラン含むケイ酸リチウム
C3	無色透明	ケイ酸リチウム系
M0	—	—

※B2 は 2 液混合型である。

## 2-5. 含浸剤の施工方法

以下に、それぞれの含浸剤の施工方法を説明する。

### 【 シラン系 】

#### 【 A1 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 6% 以下であることを確認する。
- ③ 1 回目：使用量 1.0g を塗布する。  
↓ 10 分放置  
2 回目：使用量 1.0g を塗布する。  
↓ 10 分放置  
3 回目：使用量 1.0g を塗布する。

【 A2 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 8%以下であることを確認する。
- ③ 使用量 2.1g を塗布する。

【 A3 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 5%以下であることを確認する。
- ③ 使用量 2.1g を塗布する。

【 A4 】 (No.2 の改良型である)

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 8%以下であることを確認する。
- ③ 使用量 2.1g を塗布する。

【 ケイ酸塩系 】

【 B1 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 使用量 2.1g を塗布する。

【 B2 】 ※2 液混合

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② B 液を攪拌しながら、A 液を入れる。
- ③ 使用量 2.7g を塗布する。

【 B3 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去し、散水する。
- ② 表面含水率 7%程度であることを確認する。
- ③ 1 回目：使用量 1.1g を塗布する。

↓ 30 分放置 ※表面含水率 7%を保つこと

2 回目：使用量 1.1g を塗布する。

- ④ 30～45 分程度、散水養生を行う。

【 高分子系 】

【 C1 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 8%以下であることを確認する。
- ③ 1回目：使用量 1.6 g を塗布する。  
↓ 完全に乾燥した後  
2回目：使用量 1.1 g を塗布する。

【 C2 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 使用量 1.6 g を塗布する。

【 C3 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 10%以下であることを確認する。
- ③ 使用量 1.1 g を塗布する。



写真-5 表面含水率の測定

## 2-6. 促進中性化試験

本試験では、含浸剤を塗布した試験体の中性化進行を確認する必要がある。しかし、大気中の二酸化炭素濃度はわずかで、自然暴露によって短期間に中性化を進行させるのは難しい。そのため、これらの試験体を中性化試験装置に入れ、促進中性化試験を行った。本試験は、JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に基づいて行った。この規格は、試験体の周囲に気体のみがある状態にして、その中の二酸化炭素濃度を高くすることでコンクリートを中性化させるものである。なお、二酸化炭素濃度は5%に設定している。この試験により、中性化がどの程度進行するか不明であったため、試験期間は30日間に設定した。



写真-6 中性化試験装置に試験体を設置



写真-7 中性化試験装置の設定



## 2-7. 中性化深さ測定試験

中性化深さの測定では、フェノールフタレイン溶液を使用した。試験体の測定面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで、元のアルカリ性が保たれている部分は赤紫色に発色し、中性化している部分は発色しないことを利用して中性化深さを測定する方法である。試薬には JIS K 8001 に規定するフェノールフタレイン溶液を用いた。

まず、万能試験機により試験体を割裂して、測定面(割裂した面を測定面とする)に試薬を噴霧器で液体が滴らない程度に噴霧する。2 つに割裂した面のうち、中性化がより明瞭に見られ、深さが測定可能な面を測定面とした。中性化深さの測定は、前回はデジマチックキャリパを用いての測定をしたが、今回は正確性を上げるためにアメリカの NIH が配布しているフリー画像解析ソフトの ImageJ を使用し、測定箇所を 3 か所から 10 か所に増やして行った。



写真-8 万能試験機による試験体の割裂

## ■ 第3章 中性化深さ試験の結果と考察

### 3-1. 早強セメントを使用した場合の中性化深さ試験の結果

写真-9、10 は早強セメントの試験体に含浸剤を塗布した暴露面である。また、表-4 に中性化深さ試験の結果を、表-5、図-4 に早強セメントを使用した場合の無塗布と含浸剤の比較した結果を示す。

シラン系は A4、A3、A1、A2 の順に中性化深さが浅くなっている。また、無塗布とシラン系全体で比較すると 1.2mm 程度の差がある。しかし、深さが±1.0mm 程度は誤差とするため、中性化が抑制されていると考えられる。A1、A3、A4 は無塗布よりも中性化が抑制されている。特に、A4 は無塗布よりも中性化深さが 3.4mm も浅く、他の含浸剤と比べて最も中性化が抑制されていることが分かる。A2 は無塗布よりも中性化が進んでいたが、1.0mm 程度の差であるため、他のシラン系とあまり差がないと考えられる。A3、A4 が残りの 2 種類よりも中性化が抑制された原因としては、A3 と A4 にはシラン系だけでなくシロキサン系も含まれていることから、シラン系の揮発性を抑制することによって含浸剤の効果を長く保つことが出来たと考えられる。

次に、ケイ酸塩系は、B1、B2、B3 の順で中性化深さが浅くなっている。また、無塗布とケイ酸塩系全体で比較すると 2.0mm 程度の差があり、他の含浸剤よりも中性化が進行していることが分かる。また、B1 と B2、B3 で中性化深さに差が出ていることが分かる。この原因としては、ケイ酸塩系には固化型と反応型の 2 種類が有り、B1 が固化型、B2、B3 が反応型にあたるため、抑制効果に差が出たと考えられる。また、B2 は 2 液の混合が十分でなかったことにより反応が見られなかったと考えられる。

そして高分子系は、C1、C2、C3 の順で中性化深さが浅くなっている。また、無塗布と高分子系全体を比較すると 0.1mm 程度の差があり、高分子系もシラン系と同様に中性化を抑制していることが分かる。C1 がシラン系の A4 と同等の抑制効果を示したのは、C1 の成分に特殊アクリル酸エステル樹脂を含んでおり、この成分により塗膜が形成されるからである。これにより、C1 は塗膜を形成する表面被覆剤の性質を持つため高い抑制効果が見られたと考えられる。

以上の結果から早強セメントでは中性化を最も抑制されたのはシラン系、逆に抑制されにくいのはケイ酸塩系であることが分った。このように、同じ系統であっても結果が異なるのは製品によって含まれる成分が異なるため含浸剤によって差が生じることが分かる。



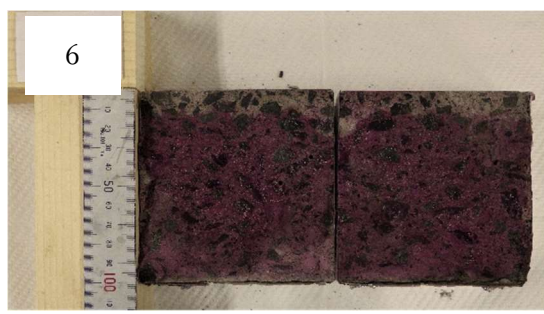
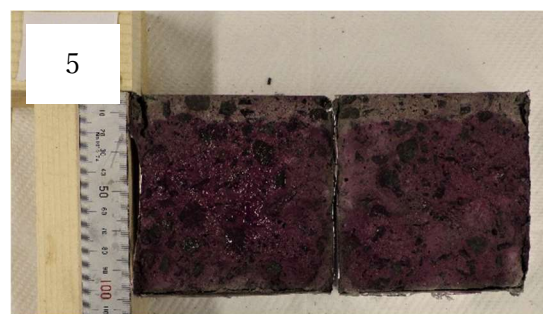
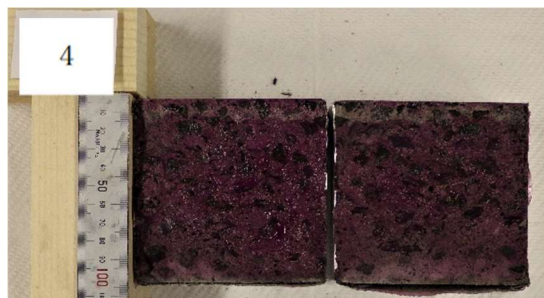


写真-9 フェノールフタレイン溶液を噴射した試験体（試験体番号 1~8）

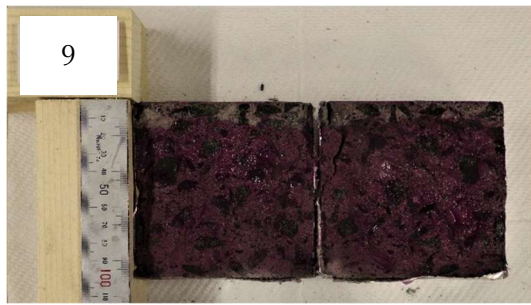


写真-10 フェノールフタレイン溶液を噴射した試験体(試験体番号 9~11)

表-4 各試験体の中性化深さの数値(中性化深さの単位:mm)

試験体番号	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
含浸剤	M0	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	C3
含水率(%)	5.6	5.7	5.7	4.9	5.6	5.3	5.6	5	5.6	4.7	5.6
中性化深さ①	9.72	8.72	17.77	8.20	6.78	11.50	11.97	10.60	1.68	11.50	9.37
中性化深さ②	8.51	7.86	12.85	9.34	6.31	7.72	11.32	9.13	5.29	8.97	13.34
中性化深さ③	10.94	7.79	10.84	5.01	6.24	6.58	12.50	8.64	3.50	6.07	9.46
中性化深さ④	3.65	9.08	7.23	6.76	5.53	8.21	11.38	9.56	5.79	5.50	10.37
中性化深さ⑤	8.20	6.00	4.62	10.41	4.21	8.65	11.56	10.25	5.57	4.38	13.94
中性化深さ⑥	8.81	8.86	7.08	5.58	3.90	8.08	12.44	11.09	4.97	8.61	12.04
中性化深さ⑦	10.64	5.43	5.77	5.77	1.79	11.50	10.49	12.27	5.97	6.78	9.22
中性化深さ⑧	7.98	5.22	4.62	4.94	3.74	10.14	7.35	13.10	3.07	7.77	14.32
中性化深さ⑨	7.37	6.93	8.62	7.75	1.87	4.79	7.82	11.43	5.57	9.95	16.00
中性化深さ⑩	2.81	6.93	7.31	7.52	3.82	5.50	8.00	8.72	4.14	5.29	10.74

表-5 無塗布と含浸剤を塗布した試験体の平均比較（中性化深さの単位:mm）

含浸剤	平均	無塗布差	含浸剤	平均	無塗布差	含浸剤	平均	無塗布差
M0	7.86	0.00	M0	7.86	0.00	M0	7.86	0.00
A1	7.28	-0.58	B1	8.27	0.41	C1	4.55	-3.31
A2	8.67	0.81	B2	10.48	2.62	C2	7.48	-0.38
A3	7.13	-0.73	B3	10.48	2.62	C3	11.88	4.02
A4	4.42	-3.44	ケイ酸塩系全体平均	9.74	1.88	高分子系全体平均	7.97	0.11
シラン系全体平均	6.87	1.23						

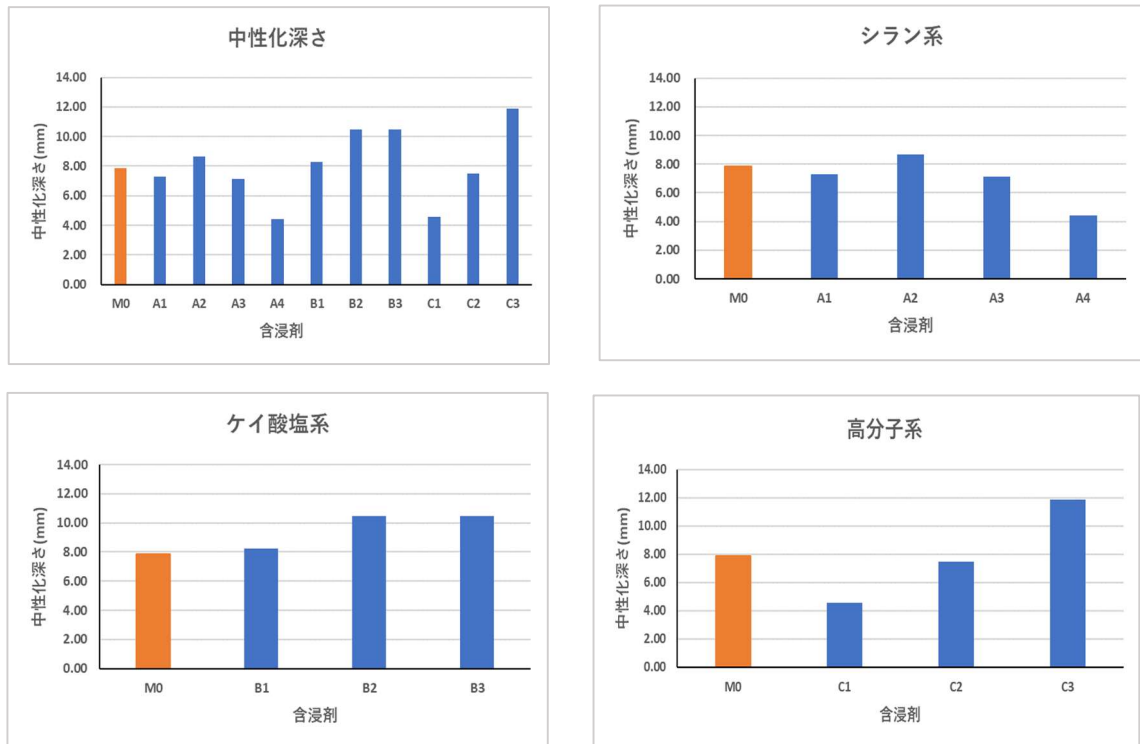


図-4 早強セメントを使用した場合の中性化深さ比較

### 3-2. 普通セメントを使用した場合の中性化深さ試験の結果

写真-11、12 は普通セメントの試験体に含浸剤を塗布した暴露面である。早強セメントの試験体番号の表記が同じになることを避けるために、普通セメントでの試験体番号は数字の上に「(引用符)」を付けたものとする。また表-6 に中性化深さ試験の結果を、表-7、図-5 に普通セメントを使用した場合の無塗布と含浸剤の比較した結果を示す。

シラン系は A2、A3、A1、A4 の順で中性化深さが浅くなっている。具体的には、無塗布とシラン系全体で比較すると 1.2mm 程度の差があることが分かる。また、他の含浸剤と比較すると、含浸剤の中で最も抑制効果が見られたのがシラン系であることが分かる。しかし、早強セメントで最も抑制されていた A4 が、普通セメントでは抑制効果が低下していた。逆に、早強セメントで中性化の抑制効果が見られなかった A2 が、普通セメントでその効果を見ることができた。この結果から、普通セメントではシラン系、シラン・シロキサン系の種類に関係無く中性化が抑制されると考えられる。

ケイ酸塩系は、B2、B3、B1 の順で中性化深さが浅くなっており、無塗布とケイ酸塩系全体で比較すると 5.2mm 程度の差があることが分かる。また、他の含浸剤と比較すると含浸剤の中で最も中性化の抑制効果が見られなかったのがケイ酸塩系であることが分かる。早強セメントの結果を比較すると、早強セメントで最も中性化が抑制された B1 が、普通セメントでは抑制されておらず、全体的に無塗布よりも中性化深さが深いことから抑制効果を確認することが出来なかった。このことから、普通セメントでは無塗布と同等またはそれ以上の中性化が進行することが分った。

高分子系は、C1、C2、C3 の順で中性化深さが浅くなっている。具体的には、無塗布と高分子系全体で比較すると 1.3mm 程度の差がある。この結果から、高分子系はシラン系と同等の抑制効果があることが分かる。これは、高分子系にはシラン系とケイ酸塩系の両方を含んでいるため、シラン系とケイ酸塩系の性質が発揮されることで抑制効果が高くなっていると考えられる。C1 は全体的に抑制効果が高く、早強セメントと同様に抑制効果が高いことから、塗膜を形成する含浸剤であれば抑制効果が高いことが分った。

以上の結果から、全体的に普通セメントでは中性化の抑制効果があまり見られないことが分かる。この原因としてセメントの性質が考えられる。一般的に、含浸剤を塗布する際に含浸剤との反応に必要な水酸化カルシウムが多い長期材齢のものが良いとされる。早強セメントの方が、普通セメントに比べ水和反応が進んでいるため緻密になっていると推定される。このことから、普通セメントでは高い抑制効果を発揮することはできないと考えられる。また、普通セメントで高い抑制効果があった C1 の塗膜を形成する性能は、普通セメントでも確認することができた。



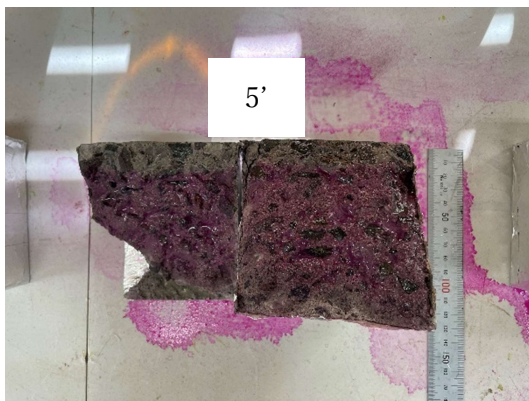
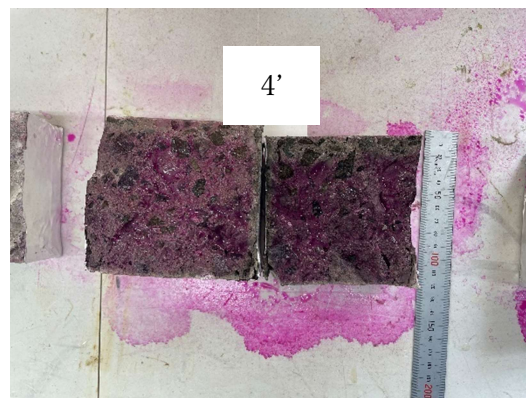
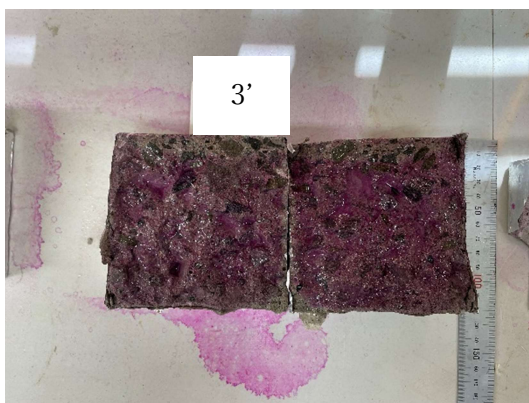
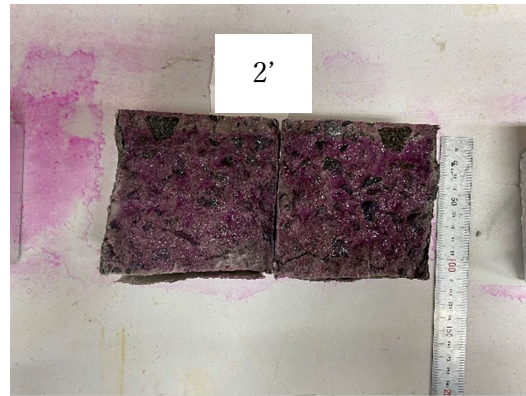
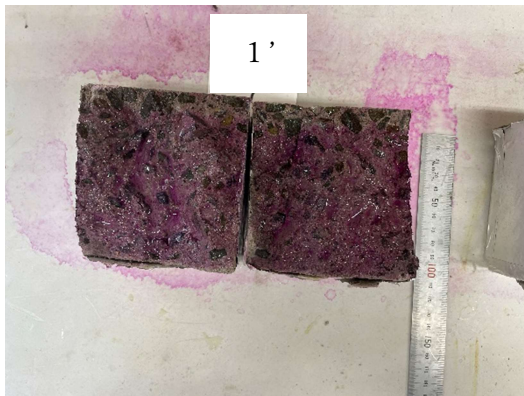


写真-11 フェノールフタレイン溶液を噴射した試験体(試験体番号1'～6')

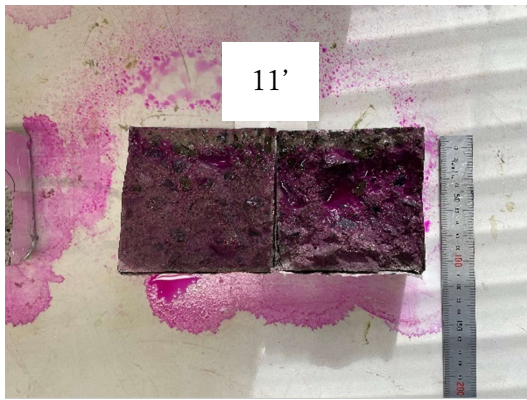
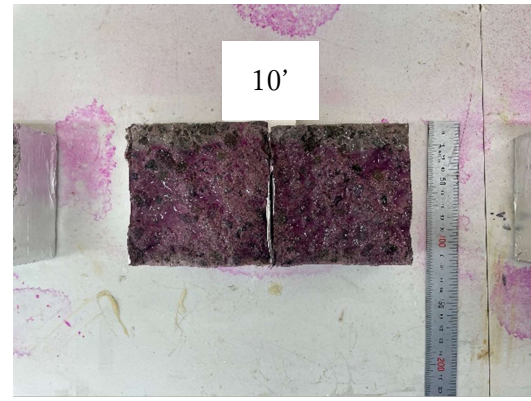
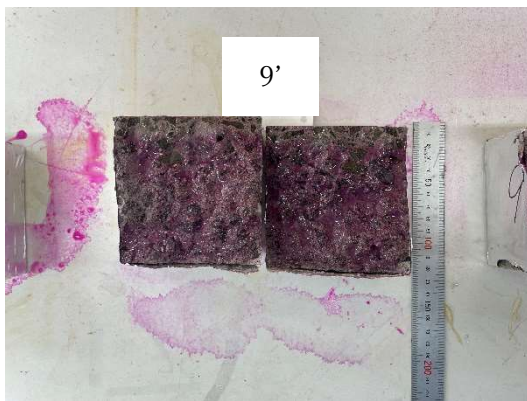
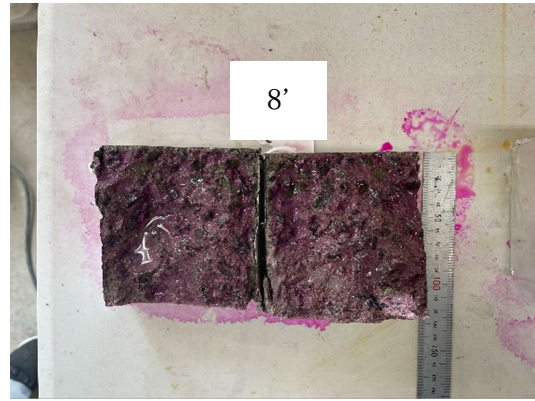
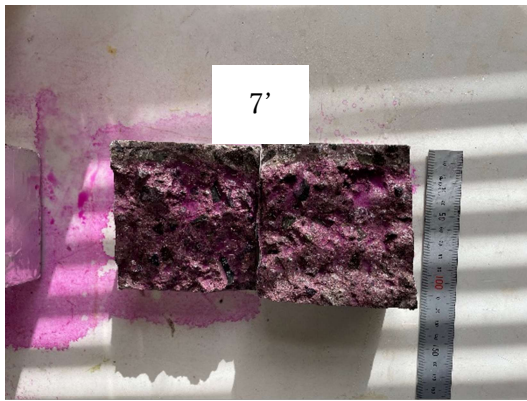


写真-12 フェノールフタレイン溶液を噴射した試験体(試験体番号 7'~11')

表-6 各試験体の中性化深さの数値（中性化深さの単位:mm）

試験体番号	11'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
含浸剤	M0	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	C3
含水率(%)	4.2	4.6	4.5	4.4	3.6	4.2	4.2	4.2	4.3	4.0	4.0
中性化深さ①	6.07	14.86	8.33	7.96	13.83	17.64	17.85	24.53	12.85	13.70	20.13
中性化深さ②	8.69	14.63	9.18	11.24	15.65	18.74	14.75	19.09	1.71	13.40	11.87
中性化深さ③	14.40	13.06	13.13	10.91	16.70	19.73	13.31	15.10	2.57	9.40	13.81
中性化深さ④	15.46	12.36	11.58	11.02	16.61	19.40	10.97	14.23	3.18	16.30	14.59
中性化深さ⑤	12.42	13.17	12.14	9.72	13.21	16.22	9.43	12.74	2.45	17.60	20.00
中性化深さ⑥	12.25	14.23	5.65	9.17	15.30	21.70	11.64	8.91	3.92	12.90	17.03
中性化深さ⑦	7.81	9.58	4.09	12.44	9.13	18.97	11.65	11.14	6.98	17.20	15.88
中性化深さ⑧	13.13	14.02	7.62	8.07	10.26	17.87	11.84	13.98	3.92	14.80	12.39
中性化深さ⑨	7.48	10.53	8.05	8.29	16.61	21.60	13.58	12.25	2.45	11.70	21.29
中性化深さ⑩	5.13	7.48	8.19	11.24	19.13	23.69	8.90	12.75	0.98	14.50	16.78

表-7 無塗布と含浸剤を塗布した試験体の平均比較（中性化深さの単位:mm）

含浸剤	平均	無塗布差	含浸剤	平均	無塗布差	含浸剤	平均	無塗布差
M0	10.28	0.00	M0	10.28	0.00	M0	10.28	0.00
A1	12.39	2.11	B1	19.56	9.27	C1	4.10	-6.18
A2	8.80	-1.49	B2	12.39	2.11	C2	14.15	3.87
A3	10.01	-0.28	B3	14.47	4.19	C3	16.38	6.09
A4	14.64	4.36	ケイ酸塩系全体平均	15.47	5.19	高分子系全体平均	11.54	1.26
シラン系全体平均	11.46	1.17						

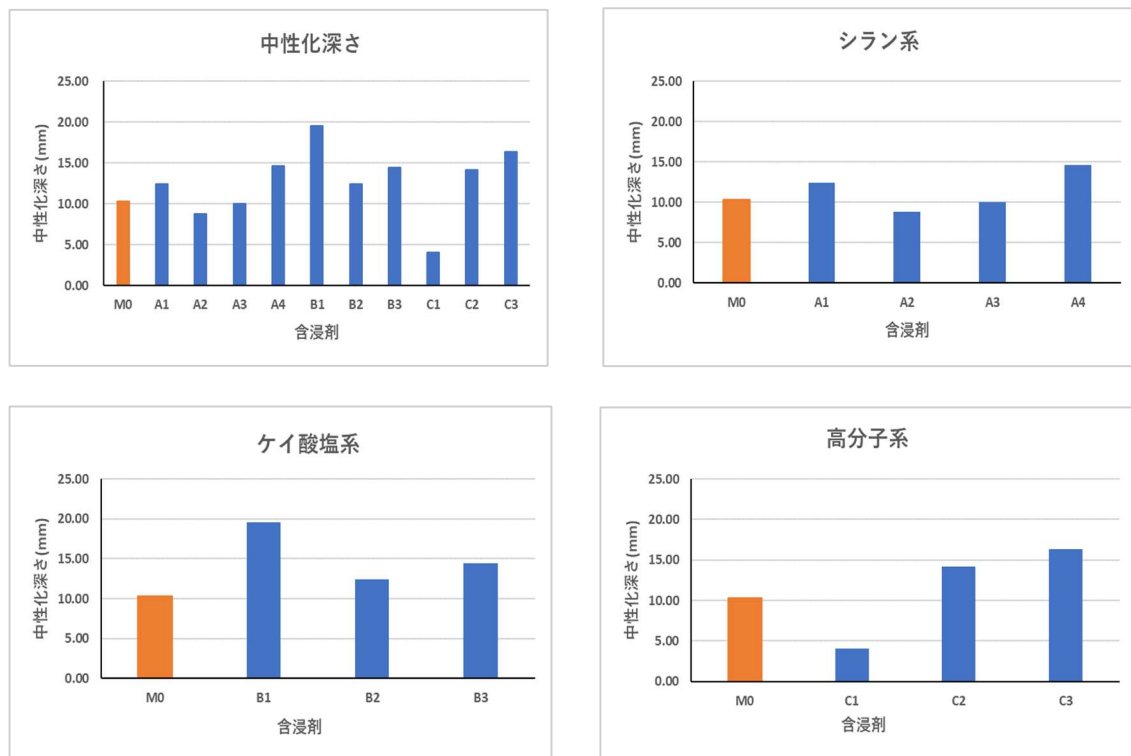


図-5 普通セメントを使用した場合の中性深さの比較



### 3-3. 中性化深さ試験を比較した結果と考察

図-6 に、早強セメントを使用した場合と普通セメントを使用した場合の結果の比較を示す。

まず、各含浸剤に注目するとシラン系は、早強セメントでは全体的に中性化の抑制効果が見られる。しかし、普通セメントでは一部の含浸剤で抑制効果が見られない。次に、ケイ酸塩系は、早強セメントでは反応型が中性化の抑制効果を持ち、普通セメントでは無塗布と同等の中性化深さとなるため、抑制効果が見られない。また、ケイ酸塩系は他の含浸剤よりも中性化の抑制効果が低い。そのことから、ケイ酸塩系は中性化に対する抑制効果が低いと考えられる。そして高分子系は、シラン系と同等の抑制効果がある。C1 が両方のセメントで抑制効果が顕著に見られ、逆に、C3 は両方のセメントで抑制効果を確認することが出来なかった。C1 の結果からセメントの種類に関係無く、塗膜を形成する含浸剤であれば中性化の抑制効果が見られることが確認できた。含浸剤の種類によって結果が異なる原因としては、各含浸剤の性能が関係していると考えられる。含浸剤には中性化に特化した製品だけでなく、塩害に特化したものや塩害に特化しつつ付属として中性化も抑制することができる製品もある。このように、製品によって性能や効果の大きさが異なるため、使用する際には含浸剤の性能をしっかりと見極める必要がある。

次にセメントの種類に注目する。全体的に見ると早強セメントと普通セメントで大きな差が発生している。無塗布よりも中性化が抑制されている製品が早強セメントの方で多数見られる。そのことから、普通セメントよりも早強セメントの方が抑制効果が高いことが分かる。この原因として 3-2 節で述べたように、セメントの性質が関係していると考えられる。早強セメントの方が早い段階で高い強度を発揮し、時間経過とともに強度を上げる。そのため、普通セメントよりも内部が緻密になる。それにより含浸剤と反応に必要な水酸化カルシウムが多くなることから、早強セメントでは高い抑制効果を発揮したと考えられる。また、コンクリートの緻密度に差が生じたことにより細孔の範囲や量が変化して、内部の水分の逸散が抑制されたこともセメントの種類で差が生じたことに関係していると考えられる。

以上の結果から、早強セメントと普通セメントの両方でシラン系が有効であることが分かった。また、中性化の抑制効果を確認する場合は早強セメントを使用するのが良いとする。



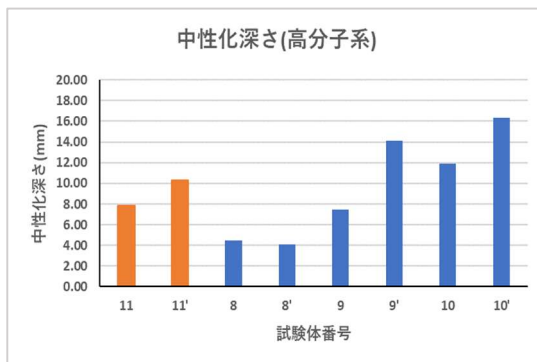
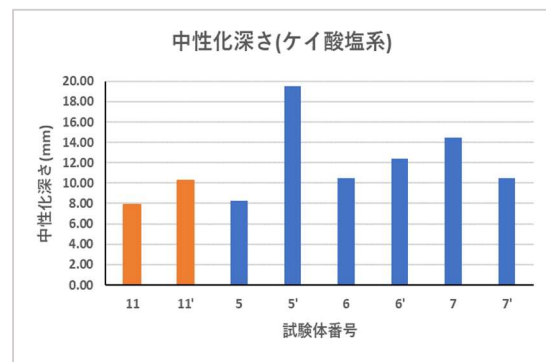
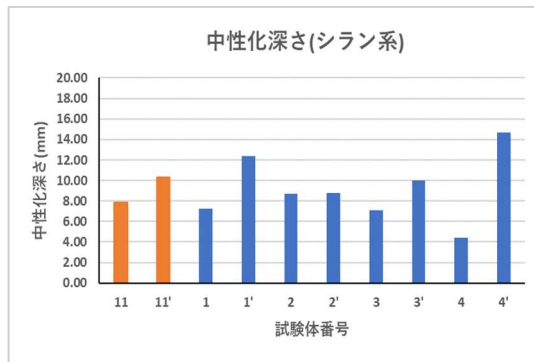


図-6 各含浸剤の中和化深さ比較

## ■ 4章 乾燥収縮試験の概要

### 4-1. 試験目的

中性化深さ試験の結果から含浸剤を塗装することにより塗装部の改質が行われ、外部から物質の侵入を抑制することが確認できた。そこで、中性化深さ試験の結果を踏まえた上で、乾燥収縮試験を行う。乾燥収縮とはコンクリートに含まれる水分が蒸発することで水分が無くなり、コンクリート内部が収縮することで起きる現象である。収縮に付随するひずみの量から含浸剤を塗布することにより、乾燥による影響を確認することができると考えられる。

### 4-2. 乾燥収縮のメカニズム

乾燥収縮はセメントの微細な孔から時間の経過に伴なり乾燥によって水分が蒸発して、コンクリート内部が収縮する現象であり、これによりひずみが生じる。この時に発生するひずみは、コンクリートに荷重が作用しなくても起きる変形の1つである。また、コンクリートが骨材や柱などによって自由に变形出来ないと引張力が生じる。これにより、コンクリートが保有している引張強さを乾燥収縮による引張力が超えることでひび割れが発生する。これを抑制するためには水分を減らす必要があり、具体的にコンクリートの単位水量を減らすことで乾燥収縮ひずみによるひび割れを低減させることができる。

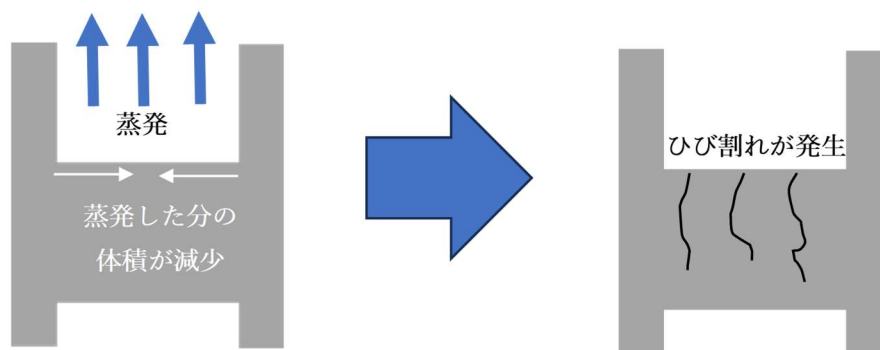


図-7 乾燥収縮によるひび割れのメカニズム

### 4-3. 試験概要

#### 4-3-1. 試験のフローチャート

図-8 に乾燥収縮試験の流れを下図に示す。

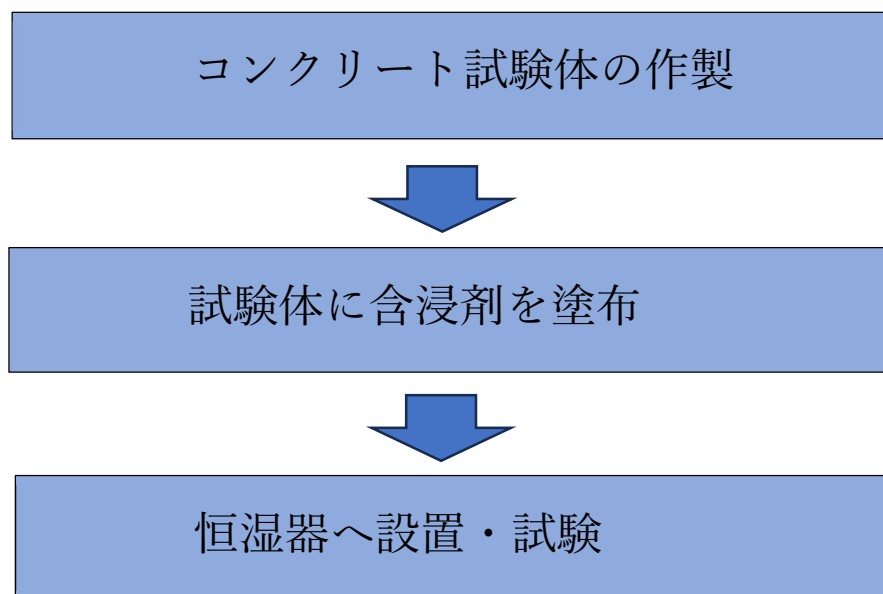


図-8 乾燥収縮試験の流れ

#### 4-3-2. 試験体の作製

本試験では、モルタルを使用した  $4 \times 4 \times 16$  cm の角柱試験体を、予備を含め 5 体作製する。モルタルの配合については表-8 に示す。また、砂の含水率は平均して 4.9% である。

この試験の目的はモルタルの試験体に含浸剤を塗布することによる乾燥収縮の進行度合いを比較することである。そのため、3 体には異なる含浸剤を塗布し、残りの 1 体を無塗布とした。乾燥収縮試験を行うにあたり、閑田ら（2008）の手法を参考にした。ゲージには小型のモールドひずみゲージ（以下からゲージと呼ぶ）を使用した。

表-8 乾燥収縮試験の試験体の配合

	w/c(水セメント 比) [%]	w (水) [g]	c (セメント) [g]	S1 (砂) [g]	SP (混和剤) [g]
試験体 (A4,B1,C2,M0)	60	313	708	2256	5

事前にゲージ部にゲージに対して垂直となるようにビニールタイを使って2本の竹串を取り付ける。試験体を作製するために型枠に半分モルタルを入れてから、ゲージと繋げた竹串を型枠にのせゲージを試験体中央に位置するようにして、残りのモルタルを入れた。翌日脱型して、試験体中の水分の蒸発を防ぐためにラップで覆い、3日間気中養生させた。



写真-13 試験体作製に使用した型枠

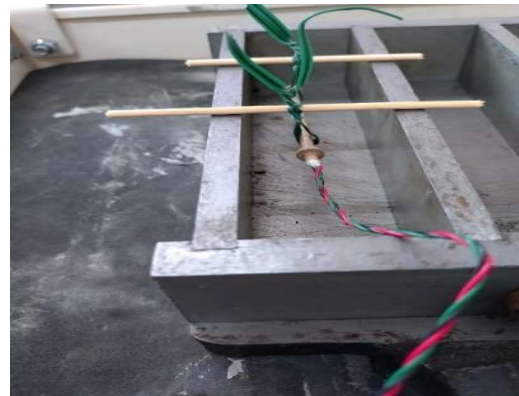


写真-14 モルタルを入れていない状態でのゲージ設置



写真-15 脱型後の試験体

### 4-3-3. 含浸剤の施工方法

この試験ではシラン系、ケイ酸塩系、高分子系の含浸剤を使用し、含浸剤の効果の比較として無塗布を含めた4種を測定した。含浸剤は中性化深さ試験で使用したA4、B1、C2を使用する。この3種類は、それぞれの系統で中性化を抑制する効果が高いものであり、コンクリート内の水分を多く残すことが中性化深さ試験から分かるため使用することとした。含浸剤を塗装する時に、中性化試験の時よりも塗装する面積が多いため、塗装する面積の比から使用量を求め、以下の方法で施工した。

#### 【 試験体 A4 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 表面含水率 8%以下であることを確認する。
- ③ 使用量 5.4g を塗布する。

#### 【 試験体 B1 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 使用量 5.4g を塗布する。

#### 【 試験体 C2 】

- ① 塗布面の汚れや油分を除去する。
- ② 使用量 4.1 g を塗布する。

#### 4-3-4. 乾燥収縮試験の方法

モルタルに埋め込んだゲージとデータロガーを接続してひずみの測定を行った。乾燥条件として恒湿器の設定を温度 20°C、湿度 50% にして、12 時間ごとにひずみを測定した。また、試験期間は 14 日間とした。



写真-16 恒湿器



写真-17 データロガー



写真-18 試験体の設置

## ■ 第5章 乾燥収縮試験の結果と考察

### 5-1. 乾燥収縮試験の結果

表-9、図-9、10、11 に乾燥収縮試験の結果を示す。ひずみ測定を1日に2回行っているため、1回目と2回目を区別するために2回目の方に「”(二重引用符)」を付けている。図-11 は各含浸剤の低減率であり、今原ら(2012)の計算式を参考に求めた。(1)に低減率の計算式を示す。

$$\text{低減率} = \frac{\text{含浸剤を塗布した場合のひずみ量}(\mu\epsilon)}{\text{無塗布のひずみ量}(\mu\epsilon)} \quad (1)$$

表-9 乾燥収縮試験の結果（ひずみ量の単位:  $\mu\epsilon$ ）

日数	時間(h)	M0	M0変化量	A4	A4変化量	B1	B1変化量	C2	C2変化量
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1'	12	81	81	60	60	59	59	62	62
2	24	130	49	101	41	103	44	107	45
2'	36	169	39	135	34	142	39	143	36
3	48	206	37	167	32	175	33	176	33
3'	60	238	32	196	29	207	32	206	30
4	72	270	32	226	30	237	30	235	29
4'	84	298	28	252	26	264	27	260	25
5	96	326	28	278	26	290	26	287	27
5'	108	353	27	303	25	316	26	310	23
6	120	380	27	329	26	341	25	335	25
6'	132	408	28	356	27	368	27	361	26
7	144	433	25	381	25	392	24	383	22
7'	156	457	24	406	25	416	24	407	24
8	168	479	22	428	22	436	20	426	19
8'	180	498	19	447	19	453	17	441	15
9	192	517	19	467	20	472	19	459	18
9'	204	532	15	484	17	486	14	474	15
10	216	550	18	501	17	502	16	488	14
10'	228	566	16	519	18	517	15	502	14
11	240	583	17	538	19	533	16	519	17
11'	252	603	20	556	18	553	20	538	19
12	264	621	18	574	18	569	16	555	17
12'	276	637	16	591	17	586	17	569	14
13	288	653	16	608	17	600	14	584	15
13'	300	666	13	623	15	614	14	598	14
14	312	679	13	636	13	627	13	610	12
14'	324	692	13	651	15	639	12	622	12
15	336	701	9	659	8	647	8	630	8
平均	348	438.83	24.17	395.59	22.72	398.07	22.31	389.21	21.72
標準偏差	360	199.39	14.75	192.93	10.82	187.88	11.65	181.16	11.93

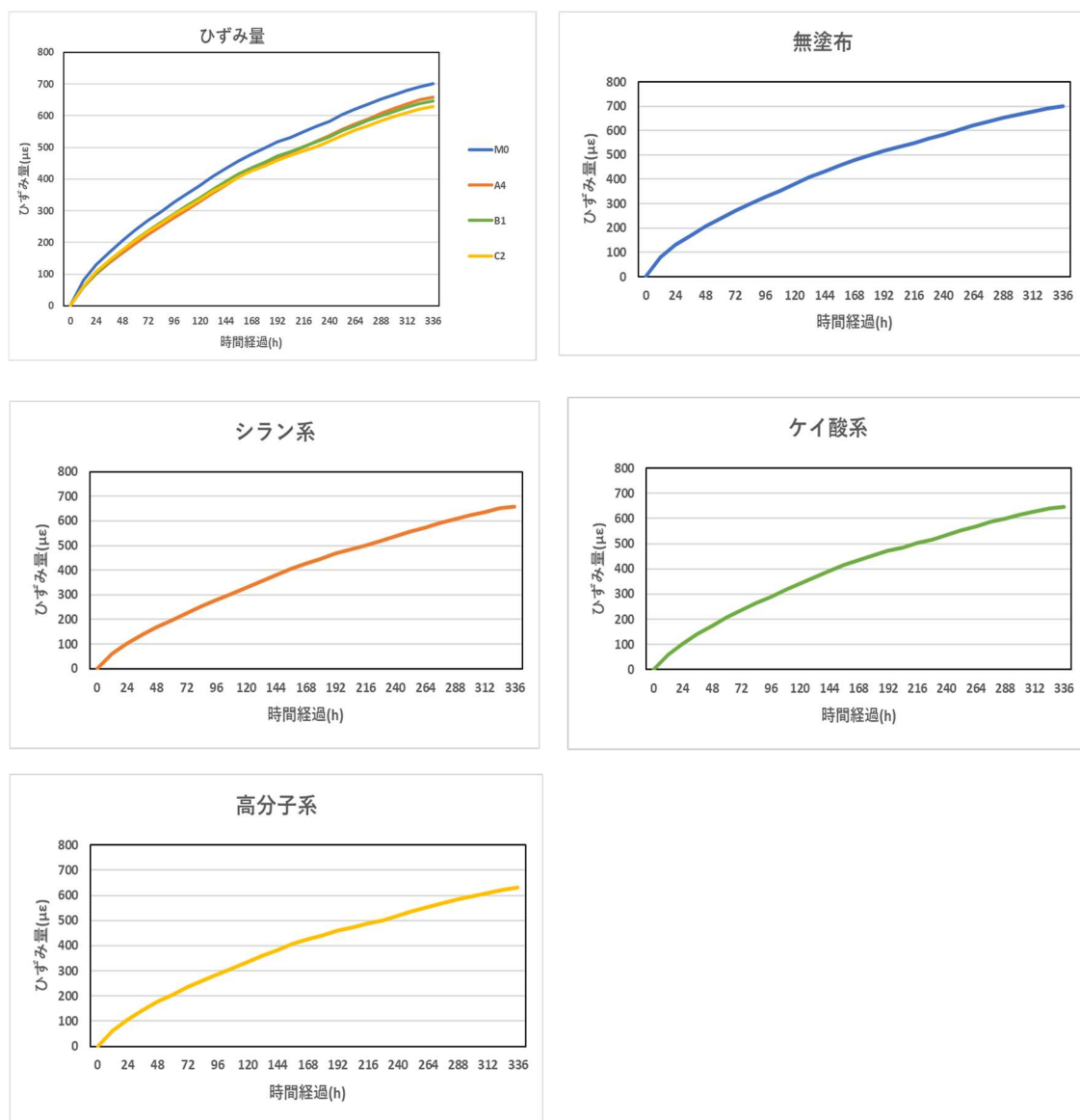


図-9 各試験体の乾燥収縮ひずみ量



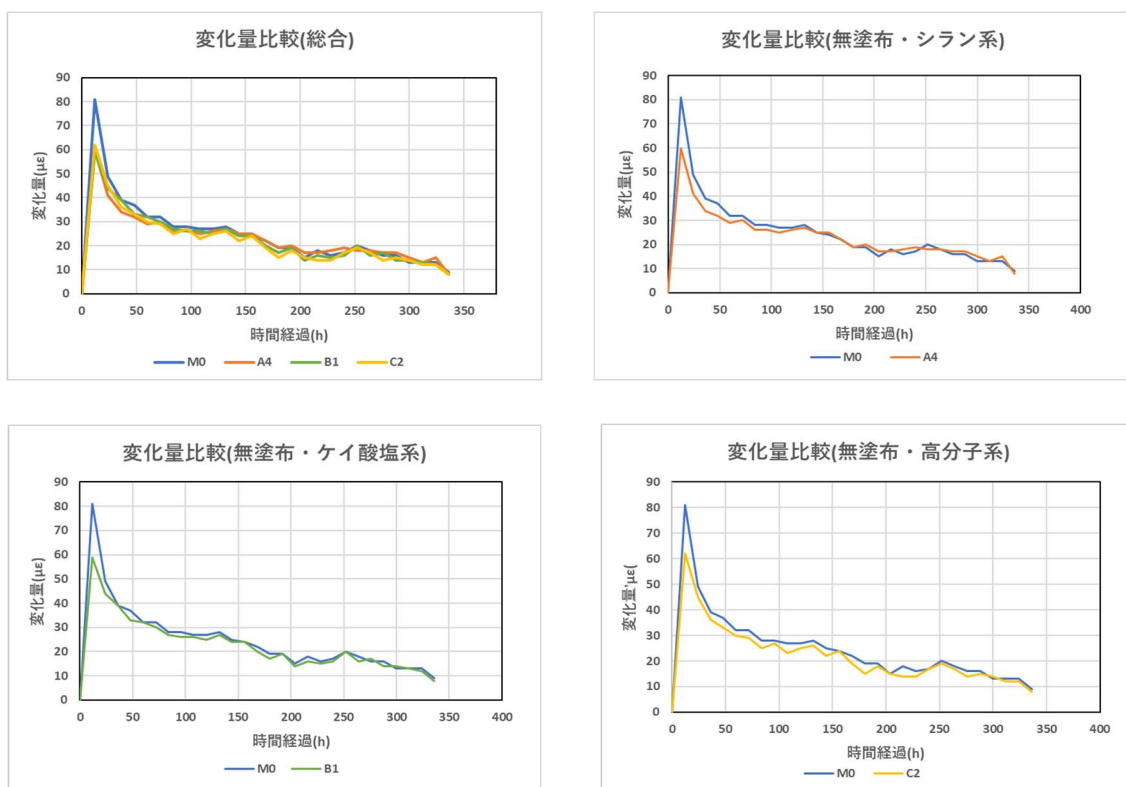


図-10 各含浸剤と無塗布の変化量比較

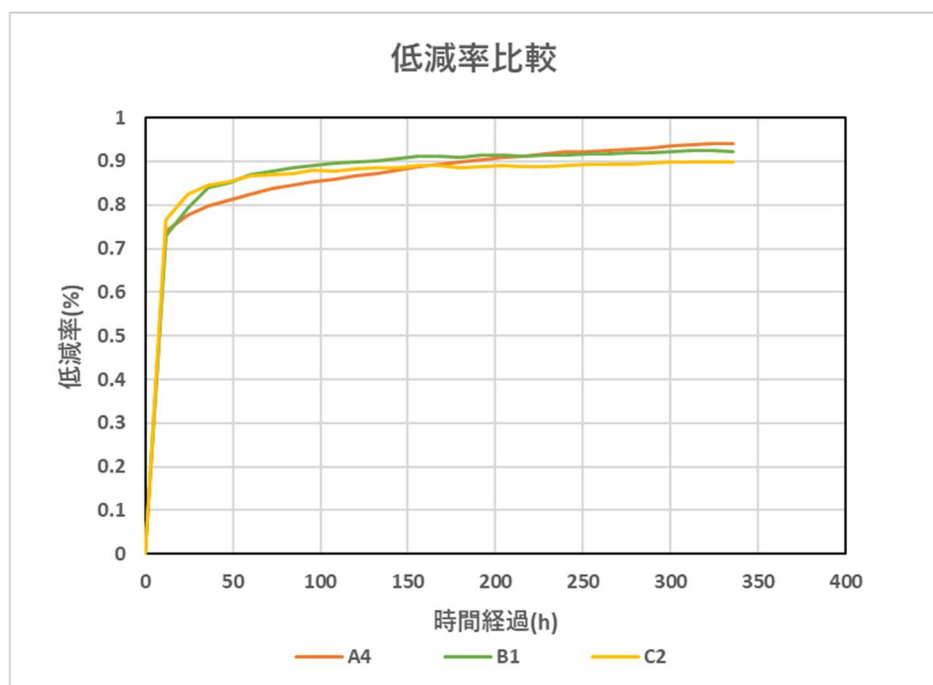


図-11 各含浸剤の時間経過に伴った低減率

## 5-2. 乾燥収縮試験の考察

表-9 と図-9 の結果から、含浸剤を塗布した試験体の乾燥収縮ひずみ量は無塗布よりも少ない。このことから、含浸剤を塗布することで無塗布よりも乾燥収縮ひずみを抑制する効果をもつことが分かる。

図-10 から初期はシラン系が無塗布との差が大きく、乾燥収縮ひずみを抑制していることが分かる。しかし、水和反応が進むにつれてシラン系よりも高分子系の方が無塗布との差が大きくなり、最初の状態から逆転している。このことは、図-11 の低減率を比較した図からも確認することができる。低減率は、値が小さければ乾燥収縮ひずみの低減効果が大きいことを示している。シラン系はグラフが右上がりになっていることから、時間経過により乾燥収縮ひずみに対する低減効果が小さくなっていることが分かる。この原因は、水和反応が伴った含浸剤の働きであると考えられる。しかし、本試験の範囲で断定することができない。そのため、今後、乾燥収縮ひずみが伴った試験体内部の変化について調べる必要がある。

シラン系と高分子系は変化量に無塗布との差が見られる時が多く、乾燥収縮ひずみに対する抑制効果を確認することができた。シラン系と高分子系でも差が発生しているのは、高分子系にはシラン混合型というシラン系が複数含まれている材料とケイ酸塩リチウムを使用している。それによって、シラン系とケイ酸リチウムの両方の効果を発揮されて乾燥収縮ひずみを抑制することができたと考えられる。

また、ケイ酸塩系は無塗布とほぼ同等の変化量であった。この結果から、ケイ酸塩系は乾燥収縮ひずみに対する抑制効果があまりみられないことが確認出来た。ケイ酸塩系の効果が低いのは今回使用したケイ酸塩系は反応型で塗装してから水分を供給することにより再度溶解されることで水酸化カルシウムと反応するためである。試験では、塗布時に湿潤状態が十分でないことからケイ酸塩系の効果を発揮させることが出来なかったと考えられる。そのため、含浸剤を使用する際に製品によって定められた方法で施工する必要がある。

以上のことから含浸材を塗布することによって乾燥収縮ひずみを抑制する効果が見られた。特に、高分子系で高い抑制効果をもつことが分かる。

## ■ 6章 結論

今回は劣化現象である中性化に着目し、中性化深さ試験と乾燥収縮試験を実施し、含浸剤の抑制効果について比較をおこなった。本試験で得られた結果を以下に示す。

(1) 中性化深さ試験から中性化を抑制する効果が最も高いのはシラン系の含浸剤である。また、塗膜を形成する含浸剤はセメントの種類に関係なく、高い抑制効果を発揮することができる。そして、製品によって含まれる成分や性能が異なるため、使用する場合は目的を見極める必要がある。

(2) 含浸剤は、セメントの性質によって中性化の抑制効果に差が生じる。早強セメントは早い段階で高い強度を発揮する。これは、セメントの内部が緻密になることで水酸化カルシウムが多くなることが原因と考えられる。また、緻密度に差が生じたことにより細孔の範囲や量が変化したことで、内部の水分の逸散が抑制されたことも要因である。

(3) 乾燥収縮試験では、含浸剤の塗布により乾燥収縮ひずみを抑制する効果を確認できた。特に、シラン系または高分子系で高い抑制効果をもつことが分かる。また、ケイ酸塩系で抑制効果をあまり確認出来なかった。しかし、定められた方法で施工することで高い効果を確認できると考えられる。

(4) シラン系は乾燥収縮ひずみを抑制する効果は見られる。しかし、時間経過により乾燥収縮ひずみに対する低減効果が小さくなっている。この原因は、水和反応が伴った含浸剤の働きであると考えられるが、本試験の範囲で断定することができない。そのため、今後、乾燥収縮ひずみが伴った試験体内部の変化について調べる必要がある。

今回の試験を通して、含浸剤の中性化また乾燥収縮に対する抑制効果を確認することができた。このように、含浸剤の性質について確認することは使用する上で重要なことである。さらに、セメントの性質にあった含浸剤を使用することで劣化現象を抑制することができるため、構造物の長期化に繋がると考えられる。しかし、中性化以外にも凍害など劣化現象がある。そのため、今後は中性化以外の劣化現象について検証をする必要がある。また、乾燥収縮は、収束するのに1年程度を要する。そのため、長期の試験を行う必要がある。そして、中性化深さ試験と同様にセメントの種類によって乾燥収縮の抑制効果が異なると考えられる。そのため、セメントの種類による比較をすることも必要である。

## 参考文献

- 1.「日本海沿岸に設置したコンクリート暴露試験体の3年目の性状」(2011)  
向中野友希 平成22年度 弘前大学理工学部地球環境防災学科 卒業論文
- 2.「日本海沿岸に設置したコンクリート暴露試験体の10年目の性状」(2018)  
遠藤匠 平成29年度 弘前大学理工学部地球環境防災学科 卒業論文
- 3.「コンクリート用表面含浸材が中性化の進行に及ぼす影響-シラン系と高分子系との比較検討-」(2023)  
村田芳弥 令和4年度 弘前大学理工学部地球環境防災学科 卒業論文
- 4.「コンクリート用表面含浸材が中性化の進行に及ぼす影響-シラン系とケイ酸塩系との比較検討-」(2023)  
守屋勇輝 令和4年度 弘前大学理工学部地球環境防災学科 卒業論文
- 5.「シラン・シロキサン系表面含浸剤の開発および長期耐久性の実証」  
林大介、坂田昇、松田芳範、遠藤祐介  
収録刊行物：コンクリート工学 Vol.57 p.777-784 (2019) 日本コンクリート工学会
- 6.「シラン系/ケイ酸塩系表面含浸剤の特徴と適切な使用方法」 遠藤裕丈  
収録刊行物：防水ジャーナル 2016年2月号 p25-28
- 7.コンクリートの中性化メカニズム (2022)  
[https://imakike.jp/concrete\\_neutralization/](https://imakike.jp/concrete_neutralization/)
- 8.コンクリートの中性化 (2017)  
<https://emicocolo.hatenablog.com/entry/2017/06/16/104709>
- 9.JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」(2012)
- 10.JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」(2018)
- 11.画像解析ソフト Image J のインストールについて  
[http://web.tuat.ac.jp/~identshi/Japanese%20Files/Seminar\\_Folder/rikakyoin\\_Folder/2023\\_Folder/Archives2023/2023\\_ImageJ.pdf](http://web.tuat.ac.jp/~identshi/Japanese%20Files/Seminar_Folder/rikakyoin_Folder/2023_Folder/Archives2023/2023_ImageJ.pdf)
- 12.Image J の操作方法  
<https://www.ed.ehime-u.ac.jp/~muko-lab/img/file6.pdf>
- 13.Image J ではじめる生物画像解析  
<https://sites.google.com/site/imagejpp/home>
- 14.コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2009」(2009)  
社団法人日本コンクリート工学協会
- 15.「乾燥収縮ひずみ試験法の省力化に関する試験研究」(2008)  
閑田 徹志, 百瀬 晴基, 今本 啓一, 三橋 博三  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/73/628/73\\_628\\_851/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/73/628/73_628_851/_pdf/-char/ja)

- 16.株式会社東京測器研究所 モールドひずみゲージ  
[https://tml.jp/product/strain\\_gauge/mold.html](https://tml.jp/product/strain_gauge/mold.html)
- 17.日本コンクリート工学会 2019年6月号 シラン系表面含浸材について  
[https://www.jci-net.or.jp/j//concrete/technology/201906\\_article\\_1.html](https://www.jci-net.or.jp/j//concrete/technology/201906_article_1.html)
- 18.「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」(2010)  
櫛原 弘貴・武若 耕司・山口 明伸・白澤 直  
[https://data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/32/032-01-1262.pdf](https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/32/032-01-1262.pdf)
- 19.「長期乾燥時におけるコンクリートの含水状態および乾燥収縮ひずみひずみに及ぼす仕  
上げ材の影響」(2012) 今原恵治・長谷川拓哉・千歩修  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/finex/2012/0/2012\\_43/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/finex/2012/0/2012_43/_pdf/-char/en)
- 20.「けい酸塩系表面含浸材がセメントペーストの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響」(2013,3)  
渡辺 晋吾・五十嵐 心一・小出 至也  
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00063/2013/2013-05-0008.pdf>
- 21.「尿素、石灰岩骨材および高濃度シラン系表面含浸材を用いたコンクリートに関する研  
究」(2012)  
田中 博一・宮川 豊章  
[https://data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/34/034-01-1087.pdf](https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/34/034-01-1087.pdf)
- 22.「コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす水セメント比および養生条件の影響」(2003)  
郭度連・國府勝郎・宇治公隆・上野敦  
[https://data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/25/025-01-1118.pdf](https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/25/025-01-1118.pdf)
- 23.「養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価」(2002)  
郭度連・國府勝郎・宇治公隆・上野敦  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2002/718/2002\\_718\\_59/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2002/718/2002_718_59/_pdf/-char/ja)

## 謝辞

本試験と論文作成を進めるにあたり、指導教官である上原子晶久准教授には、大変お忙しい中多くの御助言をいただくとともに、懇切丁寧に御指導いただきました。心より感謝と御礼を申し上げます。

また、今回、建設コンサルタント株式会社キタコンの藤田弘昭さんをはじめ、皆様は、本試験の計画、準備、試験まで大変お忙しい中多くの御助言をいただくとともに懇切丁寧に御指導いただきました。心より感謝と御礼を申し上げます。

そして 2 年間共に過ごした同研究室の皆さんには、大変お世話になりました。特に研究を手伝ってくださった山口悠介さんは上原子准教授のもと、ともに協力し合い試験に取り組むことができました。同研究室の皆さんも公私ともにお世話になりました。本当にありがとうございました。

最後に本試験と論文作成に関わっていただいた多くの方々に、深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。