

# 研 究 報 告

令和 6 年 4 月 22 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 富山大学学術研究部都市デザイン学系

都市・交通デザイン学科

氏 名 : 河野哲也

研究課題名 : けい酸塩系含浸材を混入したコンクリートの特性と劣化抑制効果の評価  
に関する実験的研究

助成金額 : 96 万円

研究実施期間 : 自 令和 5 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 6 年 3 月 31 日

# けい酸塩系含浸材を混入したコンクリートの特性と劣化抑制効果の評価に関する実験的研究

Experimental Study on the Evaluation of Characteristics and Deterioration Inhibition Effects of Concrete Mixed with Silicate-impregnated Materials

富山大学学術研究部都市デザイン学系 河野哲也

## （研究計画ないし研究手法の概略）

### ●背景および目的

表面含浸工法は、含浸材を表面に塗布することでコンクリート表面に C-S-H ゲルを生成させて緻密化し、水や二酸化炭素等の劣化因子の侵入を抑制する効果を発揮する工法である<sup>1)</sup>。表面含浸工法は既に実用化され、実績も多い工法であるものの、「構造物の表面に含浸材を塗布する」という施工法では、場所打ち杭のように表面が露出しない部材には適用できない。また、桁端部などの狭隘部では作業スペースが十分に確保できず、確実な施工が難しい。さらに、表面含浸工法による改質効果が得られるのは表面から数 mm とされており<sup>2,3)</sup>、風雨等によって塗布した箇所が摩耗するため定期的な塗り直しが必要となる場合もある。そのため、足場の設置費用や人件費により、維持管理コストが増大する。そこで、筆者らは、含浸材を塗布するのではなく、骨材、セメント、水、混和剤の練混ぜ時に含浸材も一緒に混入する方法を考えた。以降、この方法を混入法と称する（図-1）。混入法により製造されたコンクリートで建造された構造物は、完成時に既に内部に含浸剤成分を有しているため、完成後に表面に含浸材を塗布する必要がない。そのため、表面が露出しない部材や、塗布するスペースが確保できない箇所にも適用できる。さらに、表面だけでなく内部にも含浸材が含有されているため、表面が摩耗したとしても効果が持続することが期待される。

このように、混入法は部材の耐久性の向上や維持管理の省力化に寄与する可能性がある施工法である。ただし、混入法は通常のコンクリートとはセメントの水和反応が完了していない状態で含浸材を混入するため、含浸材の反応とセメントの水和反応が同時に進行する。そして、含浸材の反応にはセメント中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  や水が消費されるため、混入法により施工されたコンクリートの流動性や力学特性、劣化抑制効果は、一般のコンクリートとは異なる可能性がある。また、これらの特性値や効果は、含浸材の混入量やコンクリートの配合等によって異なると考えられる。しかし、混入法の流動性や力学特性、劣化抑制効果は、明らかにされていない。

そこで本研究では、これらの影響を確認するために種々の実験を行った。本文では、混入法の含浸材の混入量と水セメント比をパラメータとして実施したスランプ試験、圧縮強度試験及び中性化促進試験について報告する。

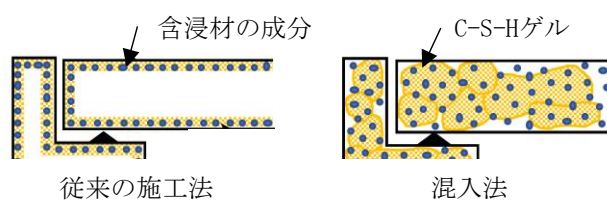


図-1 混入法の概要

## ●実験概要

実験ケースと配合を表-1に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm<sup>3</sup>），細骨材は川砂（表乾密度：2.65 g/cm<sup>3</sup>），粗骨材は川砂利（表乾密度：2.50 g/cm<sup>3</sup>），高性能 AE 減水剤である。なお，圧縮強度試験・中性化促進試験の供試体は，打設後3日で脱型した後，水中養生を行った。

Case 1, 2 は混入法との比較するために作成した供試体であり，Case 1 は含浸材を塗布・混入していない供試体，Case 2 は表面含浸工法により表面に含浸材を塗布した供試体である。Case 3～8 が混入法の供試体であり，Case 3～6 が含浸材の混入量を，Case 7, 8 が水セメント比を変化させた供試体である。

表面含浸材の塗布量は，単位面積当たりの含浸材の質量で規定されることが多い。そして，JSCE-K572-2012によれば，「含浸材の塗布面は型枠に接していた側面とする」と定められている<sup>4)</sup>。そこで本研究では，Case 2 に関しては，上記に従って供試体のうち型枠の長手方向側面に接していた面積である 0.02 m<sup>2</sup>（一面あたり 0.01 m<sup>2</sup>，型枠接触面は2面）に塗布した。混入法のケースにおける混入量は，表面含浸工法の塗布量と同等（Case 3），塗布量の2倍（Case 4, 7, 8），6倍（Case 5），10倍（Case 6）とした。

スランブ試験は，JIS A 1101:2020に従って実施した。

圧縮強度試験は，直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体に対して実施した。混入法の場合，含浸材の反応がセメントの水和反応を阻害する可能性がある。この影響を確認するために，一般的な設計基準強度を確認する 28 日材齢だけでなく，若材齢での強度や長期的な強度も確認した。

中性化促進試験は一辺 100 mm の立方供試体に対して，複合劣化促進試験装置を用いて，養生4週間後から実施した。促進環境は JIS A 1153:2012に従って温度 20 ± 2 °C，相対湿度 60 ± 5 %，CO<sub>2</sub> 濃度 5 ± 0.2 % とした。中性化深さは，フェノールフタレイン法により計測した。中性化深さの計測面は，供試体を 50 mm に切断した二断面の各辺2点である（計16点）。ただし，表

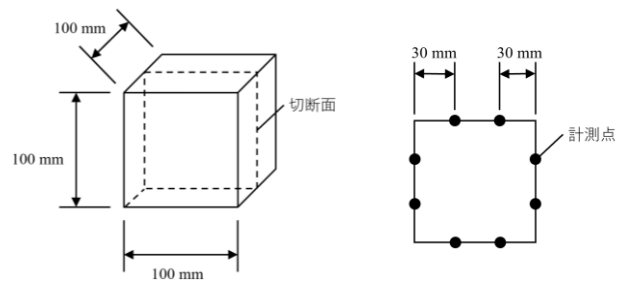


図-2 中性化促進試験の供試体寸法と計測点

表-1 実験ケースと配合表

Case	水セメント比 (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )					施工法
		水	セメント	細骨材	粗骨材	含浸材	
1	56	177	320	807	931	0	(含浸材無し)
2						8	表面含浸工法
3						8	混入法
4						16	
5						48	
6						80	
7	45	177	400	778	897	16	混入法
8	60		300	815	939	16	

面含浸工法を施した Case 2 については、塗布し二辺のみを計測した（計 8 点）。なお、1 ケース当たりの試料数は 3 体であり、本文に示す結果は、Case 2 以外は 24 点、Case 2 は 12 点の平均値である。

### （実験調査によって得られた新しい知見）

#### ● 実験結果

##### ・スランプ試験の結果

図-3 に、スランプ試験の結果を示す。水セメント比が 56%の結果を比較すると、最も大きなスランプが得られたのは無混入の Case 1 であり、スランプが最も小さかったのは混入量が  $16 \text{ kg/m}^3$  の Case 3 であった。含浸材を混入することにより、フレッシュコンクリートの状態で含浸材の反応が進んで疑似硬化した可能性がある。ただし、その差は  $1.5 \text{ cm}$  と大きくはない。また、混入量が  $48 \text{ kg/m}^3$ 、 $80 \text{ kg/m}^3$  のスランプは、混入量が  $16 \text{ kg/m}^3$  の値よりも大きく、含浸材の量とスランプとの相関性も見られない。

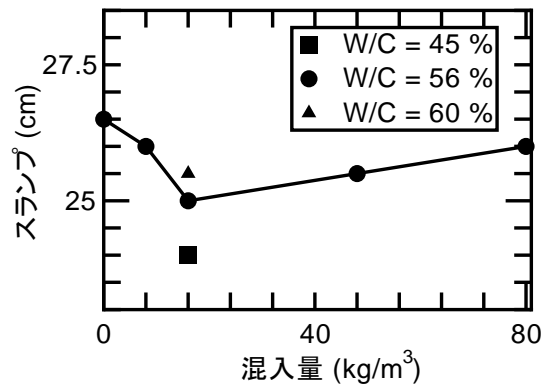


図-3 スランプ試験の結果

水セメント比の違いがスランプ値に与える影響については、水セメント比が小さいほどスランプ値も小さくなっており、流動性が低下していることがわかる。これは一般的なコンクリートと同様の特性であり、混入法においても水セメント比を変化させることで流動性を制御できる可能性がある。

以上より、本研究で対象とした配合・混入量であれば、含浸材の混入がフレッシュコンクリートの流動性に与える影響は小さいものと考えられる。

##### ・中性化促進試験の結果

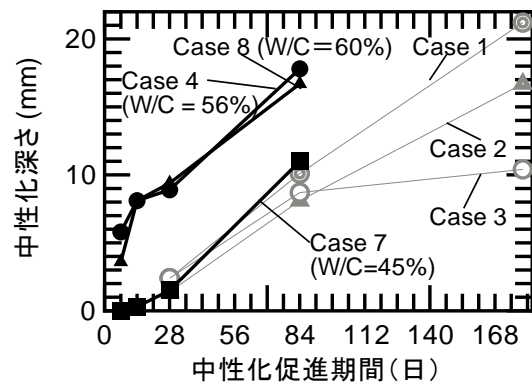
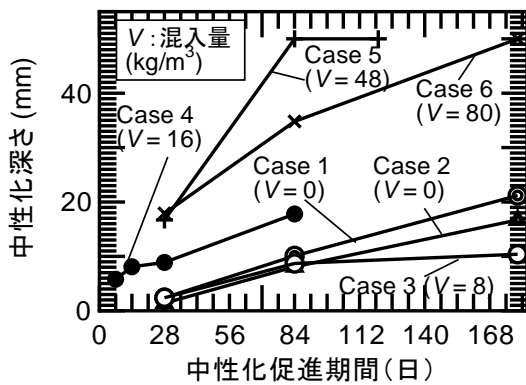
図-4 に、中性化深さ（縦軸）と中性化促進期間（横軸）の関係を示す。図-4 (a) が混入量の違い、(b) が水セメント比の違いに着目して整理したものである。

(a) の中性化促進期間が 28 日～84 日の結果を見ると、Case 1～3 では中性化深さに大きな違いはない。一方、Case 4～6 の中性化深さは Case 1～3 よりも大きく、中性化が進行していることがわかる。この一因として、含浸材によってセメントの水和反応を阻害し、緻密性が低下したことが考えられる。なお、Case 5 では 84 日以降の中性化深さの増加が認められないが、これは中性化が抑制されたわけではなく、供試体の全面が中性化し、アルカリ性部分が消失したため（中性化が進む余地がなくなったため）である。

Case 1～3 の 84 日以降の結果を見ると、180 日時点で最も中性化が進行したのは無処理の Case 1 であった。次いで中性化が進行したのは表面含浸工法の Case 2 であり、最も中性化が抑制されたのは混入法で含浸剤混入量を  $8 \text{ kg/m}^3$  とした Case 3 であった。

以上より、含浸材を過度に混入すると中性化を促進させる一方で、混入量を一定程度に留めれば、混入法は表面含浸工法以上の中性化抑制効果を発揮することが明らかになった。

(b) の水セメント比の違いによる中性化抑制効果の違いを見てみると、水セメント比をパラメータとした Case 4, 7, 8 の中で、最も中性化が抑制されたのは水セメント比を最小の 45% とした Case 7 であった。Case 7 において 84 日までに計測された中性化深さは、Case 1, 2, 3



(a) 混入量が中性化深さに与える影響

(b) 水セメント比が中性化深さに与える影響

図-4 中性化試験の結果

とほぼ同程度である。これは、セメント量を増加したことによって水和反応が促進し、緻密性が向上したためと考えられる。以上より、混入法においても、水セメント比を低めに設定することで、中性化抑制効果が向上する効果が期待できると考えられる。

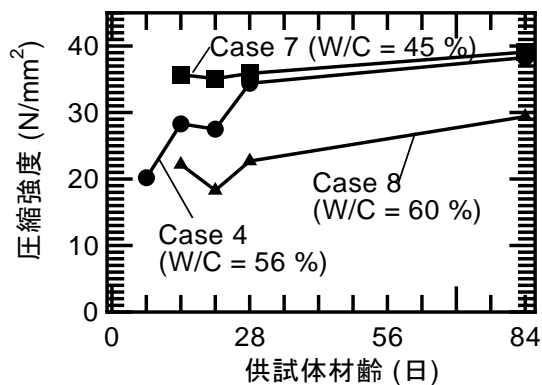
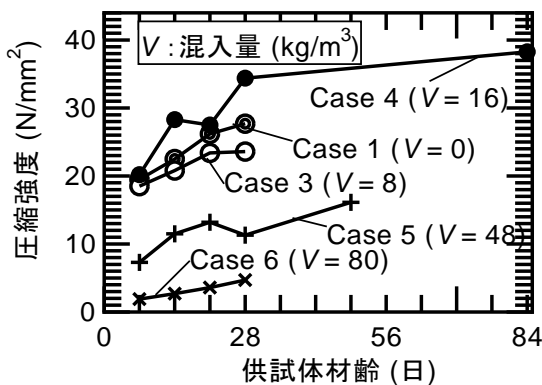
・圧縮強度試験の結果

図-5 に圧縮強度（縦軸）と材令（横軸）の関係を示す。図-5 (a) が混入量の違い、(b) が水セメント比の違いに着目して整理したものである。

(a) で 28 日までの強度を Case 1, 5, 6 で比較すると、含浸剤混入量が 48 kg/m³ の Case 5 は、Case 1 の 1/3 ほどの圧縮強度しか得られていない。また、80 kg/m³ を混入した Case 6 の圧縮強度は Case 5 よりもさらに低い。含浸材を混入したことによって水和反応が阻害され、強度が発現しなかったものと考えられる。一方で、混入量を 8 kg/m³ とした Case 2 や 16 kg/m³ とした Case 3 は、Case 1 とほぼ同等の圧縮強度が得られている。含浸材が反応したことで粒子間の結合力が増加したのと考えられる。

以上より、含浸材を過度に混入すれば圧縮強度が低下するものの、含浸材の混入量を制限することで圧縮強度に与える影響を抑制することができると思われる。

(b) の水セメント比の影響についてみてみると、水セメント比が小さいほど、圧縮強度が大きい。すなわち、混入法の場合においても、水セメント比説が適用できる可能性がある。



(a) 混入量が圧縮強度に与える影響

(b) 水セメント比が圧縮強度に与える影響

図-5 圧縮強度試験の結果

## ●得られた知見

本助成により実施した研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 含浸材を練り混ぜ時に混入することが、フレッシュコンクリートのスランプに与える影響は小さい。
- ・ 混入量や水セメント比を制御することで、混入法により施工したコンクリートに、表面含浸工法と同等以上の中性化抑制効果及び従来と同等の圧縮強度を期待することができる。

以上の知見を踏まえると、混入法は劣化抑制対策として十分に実用化の可能性があり、塗直しに要する維持管理コスト・労力の縮小や地中構造物の経年劣化の抑制等を実現できる可能性を秘めている。今後は、本研究助成により実施した実験・計測を継続するとともに、中性化以外の劣化や実環境・実施工での確認等の新たな調査・実験も行う。これらの知見を踏まえて、混入法により施工されたコンクリートの特性に影響する因子（混入量・配合等）の特定や混入法により製造されたコンクリート特性の定量的評価などを行い、混入法の実用化に向けた取り組みを進める。

## （ 発 表 論 文 ）

- 1) 河野哲也，市橋季也，上出梨央奈：反応型けい酸塩系含浸材の混入によるコンクリートの劣化抑制工法の開発に関する基礎的研究，第4回北陸橋梁保全会議，2023.10.
- 2) 市橋季也，近澤孝也，河野哲也：けい酸塩系含浸材を混入したコンクリートの特性と劣化抑制効果の評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，2024.6. (掲載決定済み)
- 3) Rui TANG, Yu QIU and Tetsuya KOUNO : ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF RUBBER PARTICLES ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CONCRETE, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.46, 2024.6. (掲載決定済み)
- 4) 市橋季也，近澤孝也，河野哲也：けい酸塩系含浸材の混入がコンクリートの特性に与える影響の評価，土木学会中部支部研究発表会，2024.3.
- 5) 近澤孝也，市橋季也，河野哲也：けい酸塩系含浸材を混入したコンクリートの劣化抑制効果に関する研究，土木学会中部支部研究発表会，2024.3.

## 参考文献

- 1) 遠藤裕文：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. pp. 97-100, 2010.
- 2) 宮島英樹，近藤拓也，宮里心一，佃洋一：13年暴露したけい酸塩系表面含浸材の性能に関する一考察，第15回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，pp.7-12, 2015.
- 3) 坂元貴之，高若耕司，山口明伸，樫原弘貴：各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 1. pp. 1625-1630, 2011.
- 4) 土木学会：けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)，JSCE-K572-2012, 2012.