

研 究 報 告

令和 8 年 3 月 3 1 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

氏 名 : 河野哲也

研究課題名 : 含浸材混入法の実用化に向けた反応安定化による力学特性・劣化抑制効果
の定量的予測手法の開発に関する研究

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

含浸材混入法の実用化に向けた反応安定化による

力学特性・劣化抑制効果の定量的予測手法の開発に関する研究

A Study on the Development of a Quantitative Prediction Method for Mechanical Properties
and Deterioration Suppression Effects through Reaction Stabilization Aimed
at the Practical Application of the Impregnation Method

富山大学 准教授 河野哲也

（研究計画ないし研究手法の概略）

●背景と目的

フーチングや杭等の地下・水中にある部材は、桁などの地上にある部材と異なり、直接観測することができないため、設計耐用年数を通じて点検・補修・補強を行うことが困難である。耐用年数を通じて設計の耐久性を維持するためには、施工段階で対策を講じ、地上構造物よりも高い耐久性を地下・水中構造物に付与する必要がある。そうすることで、耐用期間中にメンテナンスを行うことなく、耐用年数終了時においても設計の耐久性を維持することが可能となる。このような背景に基づき、従来の設計では、かぶり厚さを増大させ、水セメント比を低減し、さらに高炉セメントを使用することによって、構造物の耐久性を高めてきた。しかし、一部の地下・水中構造物において、中性化とアルカリシリカ反応（ASR）に起因する著しい劣化、さらには鉄筋破断が報告されている。このことは、かぶり厚の増加などの従来の対策のみでは、長期的な耐久性要求を十分に確保できない可能性があることを示している。一方で、水セメント比のさらなる低減やかぶり厚のさらなる増加を過度に適用した場合には、部材の延性低下を招き、脆性破壊発生リスクを高める可能性がある。

近年、水ガラス系材料をフレッシュコンクリートに直接混和する方法に着目した研究が進められている。これは、セメント中のカルシウムイオンとの反応によって C-S-H ゲルを生成させ、その結果としてマトリクスの緻密化と空隙率の低下を図ろうとするものである。この方法は、コンクリートの初期強度と劣化の進行を遅延させることが期待される。しかし、この方法では、初期の水和反応が過度に速く進行することにより、コンクリートの流動性が急激に失われ、長期強度のばらつきが大きくなるという課題がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では、水ガラスの代わりに、成分は類似しているが反応速度がより緩やかなけい酸塩系含浸材を用い、これをフレッシュコンクリートに直接混入する新たな「混入法」を提案する。この手法は、含浸材によるマトリクスの緻密化および劣化抑制効果を維持し、コンクリートの初期流動性や力学特性への悪影響を抑制することを目的としており、地中・水中構造物の長期耐久性向上に向けた実用的な新たな方策となることが期待される。本研究は、この手法が、コンクリートの施工性と力学特性を過度に損なうことなく、劣化を効果的に抑制できるかを明らかにすることにある。最終的に、各パラメータと圧縮強度との定量的な関係を整理し、対応する性能評価手法を提案することで、本技術の工学的適用に向けた基礎的な知見を得ることを目的とする。

●実験概要

本研究では、含浸材をフレッシュコンクリートに直接混入する手法を対象として、その適用性を検討するため、多くの実験を設定した。まず、予備実験(Series A)では、混入法の実施可能性を確認することを目的とした。実験パラメータは含浸材の混入量とし、これがコンクリートのワーカビリティに及ぼす影響を考察した。次に、実験 I (Series I)では、含浸材の混入量と水セメント比を実験パラメータとして設定し、これらがフレッシュ特性、力学特性、および中性化劣化抑制効果に及ぼす影響を考察した。さらに、実験 II (Series II)では、含浸材の混入時間を変化させることで、混入時間が力学特性に及ぼす影響を評価した。また、混入法以外に、Series I と II の実験結果との比較を目的として、表面含浸法によりコンクリート表面に含浸材を塗布した実験ケース(Case S)、および含浸材を混入しない実験ケース(Case C、Case C'、Case CA)を設定した。具体的な実験ケースと配合条件を表-1 に示す。

実験材料として、本研究では市販のけい酸塩系含浸材を使用した。コンクリート材料には、密度 3.16 g/cm^3 の普通ポルトランドセメント、表乾密度 2.65 g/cm^3 の川砂を細骨材として、および表乾密度 2.50 g/cm^3 の川砂利を粗骨材として用いた。さらに、Series A と I では高性能 AE 減水剤を、Series II では AE 減水剤を使用した。

各ケースにおける含浸材の使用量は、表面含浸工法における使用量を基準として設定した。含浸材の使用量は単位面積当たりの質量で表され、JSCE-K 572-2012 に基づき、Case S では、含浸材の使用量を 8 kg/m^3 とした。この使用量を参照して、混入法を適用したケースでは、含浸材の混入量を 1、2、6、10 倍に設定した。水セメント比(W/C)は、56%を基準として、45%、50、56%、60%の 4 ケースを追加した。また、Series II では、含浸材の混入時間を実験パラメータとして、コンクリートの練混ぜ開始直後(0 min)、練混ぜ開始後 15 分、30 分、60 分の各時点で混入する条件を設定した。

表-1 実験ケースと配合表

Experimental case		W/C	Unit weight [kg/m³]					Application of impregnation material		Tests			
Series	Case		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Impregnation material	AE water reducing agent ^a	Application method	Timing of mixing impregnation material	Slump test/Slump flow test ^b	Carbonation test	Compressive strength test
A	CA	0.56	180	320	791	983	0	3.2	No material mixed	–	Slump test only	–	–
	MA17						17		Mixing method	Same time	Slump test only	–	–
	MA35						35		Mixing method	Same time	Slump test only	–	–
	MA156						156		Mixing method	Same time	Slump test only	–	–
I	C	0.56	320	807	931	0	3.2	No material mixed	–	Yes	Yes	Yes	
	S					8		Surface impregnation	–	–	Yes	–	
	M8					8		Mixing method	Same time	Yes	Yes	Yes	Yes
	M16					16			Same time	Yes	Yes	Yes	Yes
	M48					48			Same time	Yes	Yes	Yes	Yes
	M80					80			Same time	Yes	Yes	Yes	Yes
	M16–W45	0.45	177	400	897	778	16	4.0	Same time	Yes	Yes	Yes	
	M16–W50	0.50		360	913	793	16	3.6	Same time			Yes	
	M16–W60	0.60		300	939	815	16	3.0	Same time	Yes	Yes	Yes	
II	C ‘	0.56	320	965	983	0	3.2	No material mixed	–	–	–	Yes	
	M’8–m0					8		Mixing method	Same time	–	–	Yes	
	M’16–m0					16			Same time	–	–	Yes	
	M’16–m15					16			15 min later	–	–	Yes	
	M’16–m30					16			30 min later	–	–	Yes	
	M’16–m60					16			60 min later	–	–	Yes	
	M’48–m0					48			Same time	–	–	Yes	
	M’80–m0					80			Same time	–	–	Yes	

フレッシュコンクリートのワーカビリティを評価するため、JIS A 1101:2020 に基づきスラ

ンプ試験を実施した。力学特性を確認するため、JIS A 1108:2018 に基づき圧縮強度試験を行った。各供試体は所定の配合条件に基づいて打設し、打設後 24 時間で脱型し、水槽中で養生を行った。その後、各材齢において各試験を実施した。

また、劣化抑制効果を検証するため、中性化促進試験を実施した。図-2 に示すように、供試体には一辺 100 mm の立方体供試体を用い、打設後 24 時間で脱型したのち、20℃の水中で 28 日間養生した。その後、JIS A 1153:2012 に基づき、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% の条件下で促進中性化試験を行った。なお、Case S については、水中養生終了後に所定の面へ含浸材を塗布したうえで試験を実施した。所定の促進期間が終了した後、供試体をコンクリートカッターで切断し、切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを計測した。中性化深さは、各断面において角部から 30 mm の位置を含む 8 点で計測した。各ケースにつき 3 体の供試体を用い、1 供試体あたり 2 断面で計測を行ったため、1 ケースあたりの計測点数は計 48 点とし、結果はこれら 48 点の平均値として整理した。

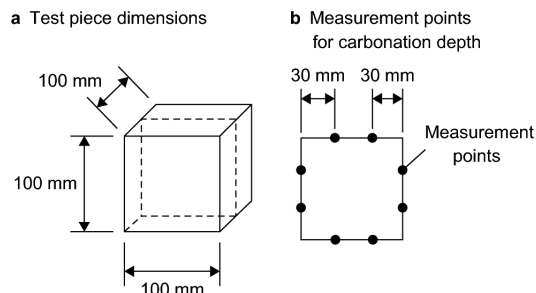


図-2 促進中性化試験用供試体の寸法と計測位置

（実験調査によって得られた新しい知見）

●実験結果

図-2 に含浸材の混入量が混入直後のスランプに与える影響を示す。結果として、混入量が 35 kg/m^3 を超えるとスランプが急激に低下する傾向が確認された。この原因は、含浸材がフレッシュコンクリート中のセメントと反応して C-S-H ゲルを急速に生成し、疑似硬化を引き起こすためであると考えられる。図-3 に混入後の時間経過に伴うスランプの変化量を示す。高性能 AE 減水剤を用いた条件(Series I)においては、10 分後と 40 分後のスランプ変化量は小さい傾向を示した。図-4 は、スランプフロー値とコンクリートの練混ぜから含浸材を混入するまでの時間間隔との関係を示す。高性能 AE 減水剤を使用し、混入量を 16 kg/m^3 以下に抑えた条件では、無添加のコンクリートと同等の良好なワーカビリティを確保でき、練混ぜから 40 分後においても、スランプフローの低下傾向は無添加のコンクリートとほぼ同様であることがわかった。以上より、材料を適切に選定し、混入量を 16 kg/m^3 以下に抑えれば、混入法でも必要な初期流動性を維持できると考えられる。

図-5 に、含浸材混入量と圧縮強度比の関係を示す。圧縮強度比は、含浸材を混入した供試体の圧縮強度を、混入しない時の圧縮強度で無次元化した値である。混入量が多い条件では、

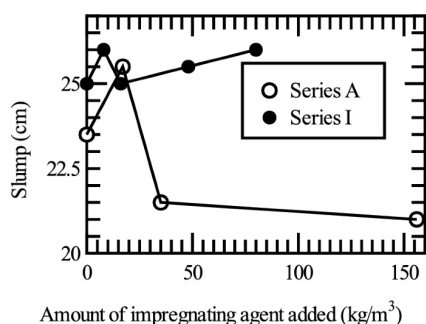


図-2 混入量とスランプの関係（混入直後計測）

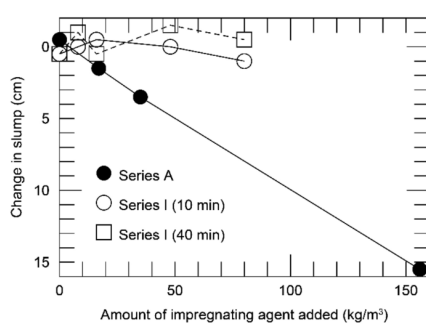


図-3 混入量とスランプの関係（違う計測時間）

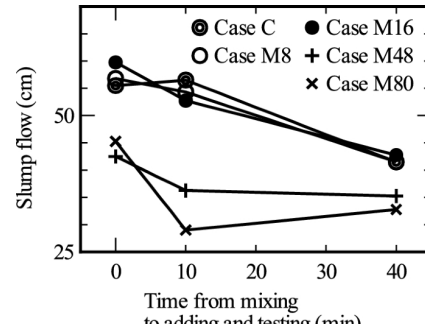


図-4 混入時刻がスランプに与える影響

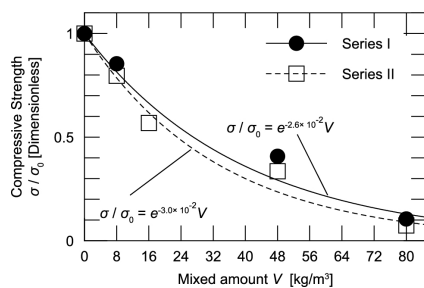


図-5 混入量が圧縮強度比に与える影響

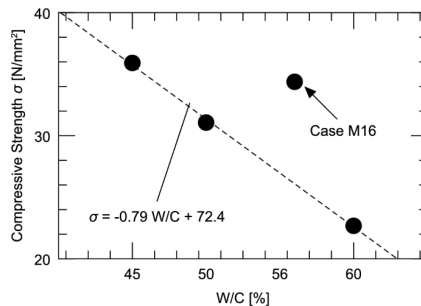


図-6 水セメント比が圧縮強度に与える影響

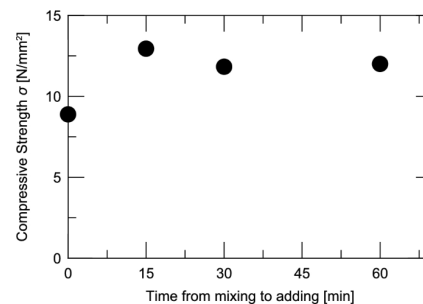


図-7 混入時刻が圧縮強度に与える影響

圧縮強度が著しく低下する傾向を見られた。これは、含浸材の反応によってコンクリート内部の空隙が増加し、荷重に耐え得る構造を形成できなくなったと考えられる。図-6 は、水セメント比と材齢 28 日のコンクリート圧縮強度の関係を示している。混入量においても通常のコンクリートと同様に、水セメント比が低いほど強度が高くなる線形関係が確認された。図-7 は、含浸材の混入時刻が圧縮強度に与える影響を示す。含浸材の混入を練混ぜ開始から 15 分遅らせることで、圧縮強度は同時混入時より高くなり、約 1.3 倍に改善することがわかった。これは、含浸材が反応を始める前に、セメントの初期水和反応がある程度進んだためと考えられる。以上より、圧縮強度は含浸材混入量の増加により低下するが、水セメント比の低減と混入時刻の調整により改善できることが確認された。

図-8 は、含浸材の混入量がヤング係数比に与える影響を示す。ヤング係数比は、含浸材を混入した供試体のヤング係数を、混入しない時のヤング係数で無次元化した値である。圧縮強度と同様に、混入量が増加するに伴ってヤング係数は大きく低下する傾向が確認された。

図-9 により、水セメント比がヤング係数に与える影響は、線形的な低下関係が見られた。また、図-10 は、混入時刻がヤング係数に与える影響を示す。結果より、含浸材の混入を 15 分以上遅らせることで、同時混入時と比べてヤング係数は約 1.63 倍に向上した。以上より、ヤング係数は圧縮強度と同様に、含浸材混入量の増加に伴って低下するが、混入時刻を遅らせることでその低下を抑制できることが分かった。

図-11 は、含浸材の混入量が中性化深さに与える影響を示している。結果として、混入量を 8 kg/m³ に抑えた場合は従来の表面塗布(Case S)と同等以上の抑制効果を示したが、16 kg/m³ 以上では無添加(Case C)より中性化が促進された。その理由の一つとして、含浸材の反応によりセメント中の水酸化カルシウムが消費され、マトリクスの緻密性が低下したことが考えられる。また、暴露 28 日から 84 日の間は、無添加(Case C)、表面塗布(Case S)、および 8 kg/m³ 混入(Case M8)の間で中性化の進行に有意差は見られなかった。しかし、180 日時点

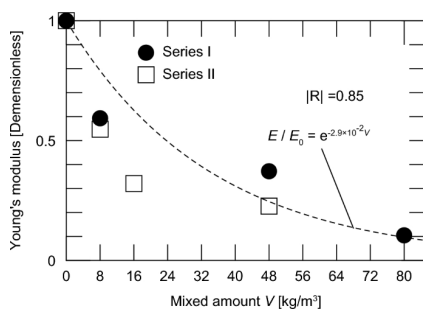


図-8 混入量がヤング係数比に与える影響

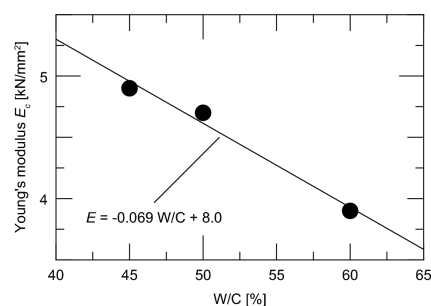


図-9 水セメント比がヤング係数に与える影響

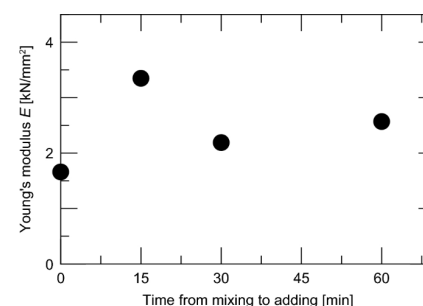


図-10 混入時刻がヤング係数に与える影響

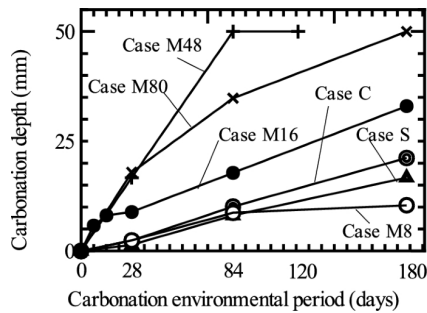


図-11 混入量が中性化深さに与える影響

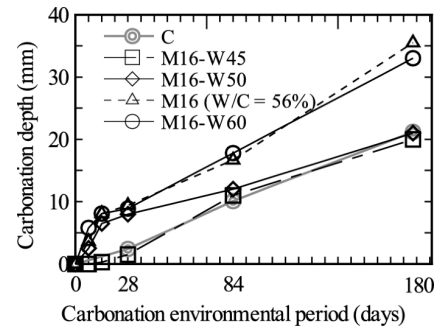


図-12 水セメント比が中性化深さに与える影響

では Case C の中性化が最も進行しており、次いで Case S であった。一方、Case M8 の 180 日時点での測定結果は 84 日時点からほぼ変化しておらず、中性化が著しく抑制されていることが確認された。図-12 は、含浸材の混入量を 16 kg/m^3 に制御した場合に、水セメント比が中性化深さに与える影響を示している。いずれの条件でも中性化深さは材齢とともに増加するが、全体として水セメント比が低いほど中性化深さが小さくなる傾向が確認された。以上より、含浸材の混入量を 8 kg/m^3 とし、水セメント比を 56% に設定することで、従来の表面含浸工法と同等以上の中性化抑制効果が得られることが確認された。

以上の実験結果から、圧縮強度とヤング係数は、含浸材の混入量の増加に伴い低下し、水セメント比に対して低下する関係があることが明らかになった。この関係性に基づき、実験結果から圧縮強度の推定式とヤング係数の推定式を提案した。提案した推定式による計算値と実験での実測値を比較した結果、推定された圧縮強度は実測値と極めて近い値を示し、推定式が高い推定精度を有することが確認された。

●得られる知見

本助成を受けて実施した研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 含浸材をフレッシュコンクリートに混入すると流動性は低下するが、高性能 AE 減水剤を用い、混入量を 8 kg/m^3 以下に抑えることで、初期ワーカビリティを確保できる。
- (2) 含浸材の混入量が増えると、圧縮強度とヤング係数は低下するが、練混ぜ開始から 15 分以上遅らせて混入することで、その低下を抑えることができる。
- (3) 中性化抑制効果は混入量の影響を受け、過剰に混入すると逆効果となる。一方 8 kg/m^3 程度とし、水セメント比を適切に設定することで、高い耐久性向上効果が得られる。
- (4) 実験結果に基づき、含浸材の混入量、水セメント比、混入時間を用いた圧縮強度とヤング係数の推定式を構築し、これらを一定の精度で予測できることを示した。

以上の知見を踏まえると、混入法は、材料条件と施工方法を適切に設定することで、ワーカビリティや力学特性を大きく損なうことなく、地下・水中構造物の耐久性を向上できることが考えられる。構築した予測モデルと併せて、本技術が実務における高耐久化設計の有効なツールとなることが期待される。

(発 表 論 文)

1. Kouno, T., Qiu, Y. & Ichihashi, T. Experimental study on improving the durability of underground/underwater structures by mixing impregnating agents into unhardened concrete. Sci Rep 15, 32148 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16991-6>.