

## シラン含有する防せい混和剤の添加によるモルタル中の鋼材の腐食抑制効果

清水建設 正会員 ○齊藤 亮介 京都大学 正会員 高谷 哲  
 清水建設 非会員 清村 俊介

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートの腐食対策手法の1つに防せい剤の利用が挙げられる。防せい剤は、硬化後のコンクリート表面に塗布する浸透型と、コンクリート練混ぜ時に添加する混和型（防せい混和剤）がある。防せい混和剤は簡易にコンクリート全体を防せい雰囲気とすることが可能であり、海外ではその有効性について様々な報告がされている<sup>例えば1)</sup>。日本での防せい混和剤の検討は補修材を対象としたものが主で、コンクリートでの利用方法や適用範囲については十分整理されていない。本研究では、防せい混和剤利用の基礎検討として、シランを含有する粉体防せい混和剤（以下、PS）を混練したモルタル中にて鋼材の腐食挙動を交流インピーダンス法（以下、EIS）により評価した。

## 2. 実験概要

直径13mmの丸鋼（SS400）を内径38mmの型枠内で樹脂包埋し、鋼材の腐食評価面に同径で厚み20mmのモルタル層を設けたものを試料とした。試料の作製方法を次に示す。供試材の端部にリード線を接続し、側面をゴム系樹脂で止水した後エポキシ樹脂に包埋した。その際の底面を腐食評価面とし、 $\#1200$ の研磨板でエタノールとともに研磨して表面を調整し、研磨直後に塩化物イオン量 $10\text{kg}/\text{m}^3$ となるよう練混ぜ時に塩分を添加したモルタルを打込んだ。試料の概要を写真1に示す。

打込み後は1日で脱型し、材齢7日まで封緘養生とした。その後、モルタルとエポキシ樹脂の界面をシリコン樹脂で覆い止水処理をした。その翌日から濃度3.5wt%の塩水を用いて乾湿繰り返しを与え、腐食促進を図った。図1に示すように、乾湿繰り返しの内、湿潤過程はモルタル部が塩水に浸漬した状態で密閉容器に3日間存置、乾燥過程はシリカゲルを入れた密閉容器内に4日間存置とした。使用したモルタルの配合と試料水準の一覧を表1に示す。なお、モルタルに添加したPSの添加量は、コンクリートへの添加時の標準量（セメント量 $\times 1.0 \sim 3.0\%$ ）の中央値であるセメント量 $\times 2.0\%$ とした。

EISの計測は、養生終了直後（0サイクル）、乾湿繰り返し8サイクル後、16サイクル後の計3回実施した。計測は濃度3.5wt%の塩水中で行い、対極には直径6mmの白金メッキチタン棒を、参照電極にはAg/AgCl電極を用い、計測周波数範囲は10mHz $\sim$ 20kHzとした。印加交流電圧の振幅は20mVを基本としたが、Sでは8サイクル以降にインピーダンスが著しく増加し、低周波数帯での計測値にばらつきが大きくなったため、Sの8サイクル以降は振幅を50mVとした。



モルタル打設前 写真1 試料の詳細  
モルタル打設後

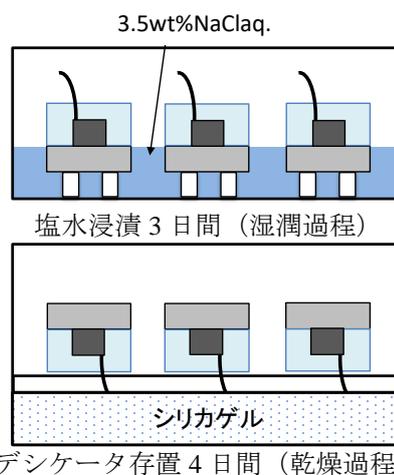


図1 乾湿繰り返しサイクルの概要

表1 試験水準とモルタルの配合表

水準名	W	C	S	NaCl <sup>*</sup>	PS
	(kg/m <sup>3</sup> )				
N	250	500	1500	16.5	0
S					10

<sup>\*</sup>塩化物イオン量は約 $10\text{kg}/\text{m}^3$ に相当

キーワード 鋼材腐食, 防せい剤混和剤, シラン, 交流インピーダンス

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設株式会社 TEL 090-2559-0268

### 3. 結果

EISにて得られた試料のインピーダンス計測結果を図2に示す。高周波数帯ではモルタルの細孔溶液の電気抵抗を、中間周波数帯ではモルタルの細孔構造や含水状態などに起因するインピーダンス特性を、低周波数帯ではそれらに加えてモルタル/鋼材の界面のインピーダンス特性を反映することが報告されている<sup>2)</sup>。それぞれの周波数帯の境界は明確な定義はないが、本稿では、10kHz~20kHzを高周波数帯、100mHz~10kHzを中間周波数帯、10mHz~100mHzを低周波数帯として以降の内容を記述する。

Nでは、乾湿繰返しサイクルを経ると中間~高周波数帯のインピーダンスが増加し、低周波数帯のインピーダンスが低下した。Sでは、0サイクルと比較して8サイクル以降にて全ての周波数帯でインピーダンスが増加したが、8サイクルから16サイクルにかけて中間周波数帯のインピーダンスは低下した。

NとSのインピーダンスを比較すると、0サイクル時には高周波数帯のインピーダンスに大きな差があるものの、低周波数帯のインピーダンスの差は小さかった。これに対し、8サイクルでは全ての周波数帯でその差が顕著となり、添加したPSが鉄筋に作用するまで数週間を要したことがわかった。また、Sでは、8サイクル以降、低周波数帯のインピーダンスが概ね1MΩとNに比べて非常に高い値を示し、塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>という高塩分環境下においても腐食抑制効果が得られることを確認した。

### 4. 考察

Nで生じたインピーダンスの変化は、低周波数帯では腐食の進行により鋼材の溶解が進んだことが、中間~高周波数帯ではセメントの水和反応が進んで組織が緻密になったことがその原因と考えられる。

Sのインピーダンスは、0サイクル時から8サイクル時にかけて全周波数帯で大きな変化が生じていることから、モルタル層と鋼材表面の双方でPSの作用を受けたと考えられる。前述のとおりPSはシランを含有しているため、モルタル中のアルカリ環境下では、シランの加水分解と脱水縮合を経て細孔にシランオリゴマーが生じる。そのシランオリゴマーが細孔内で撥水層として機能した結果、インピーダンスが増加したと推察される。また、8サイクルから16サイクルにかけての中間周波数帯のインピーダンス低下の原因として、乾湿繰返しによってモルタル内部に微細なひび割れが生じ、独立する細孔が連結された可能性が考えられる。

鋼材表面においてもモルタルと同様にシランオリゴマーの形成が考えられるが、低周波数帯のインピーダンスが最も大きくなっていることから、モルタルへの作用のような撥水層の形成だけでなく、イオン透過膜として機能する保護層が形成されていたと推察される。すなわち、PSの腐食抑制効果は、モルタルへの撥水層の形成と鋼材表面への保護層の形成により得られると考えられる。

### 5. まとめ

シランを含有する粉体防せい混和剤の使用により、塩化物イオン量10kg/m<sup>3</sup>のモルタル中の鋼材に対して高い腐食抑制効果が得られることを示した。その効果は、モルタルの細孔内への撥水層の形成と、鉄筋表面への保護層形成によるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) İlker Bekir Topçu et al.; Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete, Journal of Engineering & Applied Mechanics, Volume 3 Issue2 pp.93-109, 2020.
- 2) Yoshinao HOSHI et al.; Electrochemical Impedance Analysis of Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete, Electrochemistry, 87(1), pp78-83, 2019

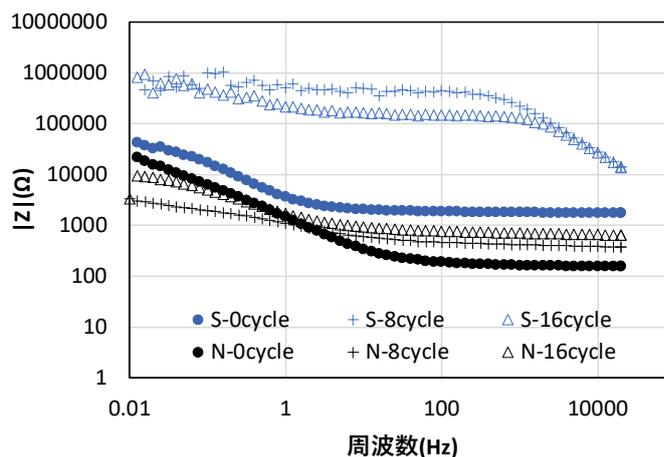


図2 インピーダンス計測結果