

塩分センサを用いたコンクリート構造物の 簡易な塩化物イオン量調査

櫻庭浩樹・西村俊弥・古賀裕久

1. はじめに

コンクリート構造物中の鋼材は、かぶりコンクリートにより保護されているが、このコンクリート中に多量の塩化物イオンが存在すると鋼材が腐食し、コンクリートのひび割れや剥落の発生、鋼材の断面減少などの塩害が生じる。

塩害は、コンクリート構造物の劣化メカニズムの中でも特に劣化速度が速く、構造物の性能への影響は大きい。また、ひび割れなどの変状が顕在化した後に、確実な補修を行うことが難しい。したがって、海岸近くなど、塩害環境下にあるコンクリート構造物では、定期的に塩分の侵入状況を調査し、必要に応じて予防保全的な対策をとることが望ましい。

硬化コンクリート中の塩化物イオン量を調査する信頼性の高い方法は、コア試料を採取して微粉碎し、JIS A 1154（硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法）により、コンクリート中の塩化物イオン量を定量分析するものである。しかし、コアの採取時に構造物を傷つける恐れがあること、試験室での試料の調整や測定に時間を要することから、多数の箇所について調査することは、必ずしも容易ではない。

近年では、より簡易な調査方法として、試料の採取にドリル削孔粉を用いる方法や塩化物イオン量の測定に近赤外分光を用いる方法等も検討されているが^{1),2)}、特殊な機器や器具が必要であること、測定誤差の要因が必ずしも明確でないことなどの課題がある。

そこで、著者らは、銀塩化銀電極を用いたセンサ（以下「塩分センサ」という。）と電圧計を用いて、コンクリートへの塩化物イオンの侵入状況を簡易に調査する方法を提案した。この方法は、使用する機器が安価であること、現場ですぐに結果が得られること、測定孔の直径が6mm程度で測定による構造物への影響が小さいことに利点がある。

本報では、まず、塩分センサを用いた測定の概

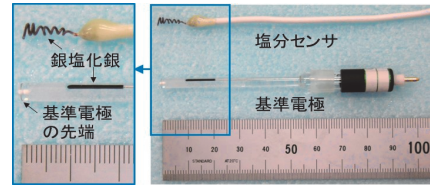


図-1 塩分センサと基準電極

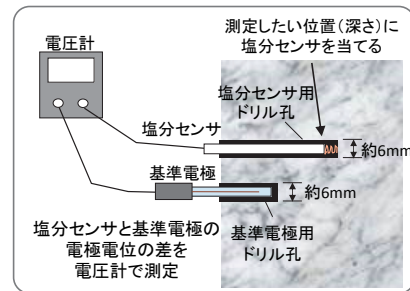


図-2 塩分センサを用いた測定の状況

要を示す。次に、これを塩害を受けた実橋の撤去部材に適用し、多量に塩化物イオンが侵入した範囲の検出を試みた結果を示す。

2. 塩分センサを用いた測定の概要

2.1 塩分センサによる測定の状況

測定に用いる塩分センサと基準電極を図-1に示す。塩分センサは直径0.5mmの銀線を銀塩化銀で被覆した銀塩化銀電極であり、基準電極は内部溶液が飽和塩化カリウムの銀塩化銀電極である。

塩分センサを用いた測定状況のイメージを図-2に示す。まず、電圧計のプラス端子に塩分センサを、マイナス端子に基準電極を接続する。次に、基準電極と塩分センサをドリル孔先端に接触させて電極間の電極電位を測定する。電極電位は、硬化コンクリート中の塩化物イオン量に応じて変化し、その値を推定することができる。

この方法で得られる塩化物イオン量は、塩分センサが接触している近傍のものであるため、塩化物イオンの侵入状況を調査する際には、測定する孔の深さを変えるなどして、測定したい位置に塩分センサを当てる必要がある。

2.2 塩化物イオン量と電極電位の関係

塩分センサによる電極電位と塩化物イオン量の関係は、ネルンスト式から、式(1)で与えられる。

表-1 コンクリートの配合

種類*	W/C (%)	空気量(%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混入した塩化物イオン量 (kg/m ³)
				W	C	S	G	
N	50	4.5	47	165	330	827	968	1.2, 2.5, 5.0, 10.0
B	50	4.5	47	165	330	827	968	
H	36	4.5	44	165	458	721	968	

※N：普通ポルトランドセメントを使用、B：高炉セメントB種を使用、H：早強ポルトランドセメントを使用

$$U = 0.418T - 0.198T \log_{10} \frac{c_{Cl^-}}{c^0} \quad (\text{mV}) \quad \text{式 (1)}$$

ここに、T：コンクリートの絶対温度 (K)、 c^0 ：基準塩化物イオン量 (=1kg/m³)、 c_{Cl^-} ：塩分センサ接触部近傍のコンクリートの塩化物イオン量 (kg/m³)

式(1)より、今回着目する塩化物イオン量の範囲 (全塩化物イオン量で1.2~10kg/m³程度) では、塩化物イオン量が大きくなるほど、電極電位は小さくなる。また、電極電位は温度にも依存するが、10~30℃の範囲では、温度の影響は大きくないことを別途確認している。

NaClを混入したコンクリート円柱供試体 (以下「供試体」という。) を用いて塩化物イオン量と電極電位の関係を確認した実験の概要を図-3に示す。実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。配合は3種類とし、鉄筋コンクリートを想定した普通ポルトランドセメントの場合、同想定で高炉セメントB種の場合およびプレストレストコンクリートを想定した早強ポルトランドセメントを用いて水セメント比が小さい場合とした。各配合において、混入した塩化物イオン量は1.2、2.5、5.0、10.0kg/m³とした。供試体の養生条件については封緘養生で28日以上とした。

塩分センサは、接触した箇所近傍の塩化物イオン量に応じた電極電位が測定されるため、粗骨材を避け、モルタル部に接触させる必要がある。このため、供試体の割裂面を塩分センサの測定面とし、塩分センサを確実にモルタル部に接触させて測定した。割裂した供試体の片方を塩分センサの測定に用いた。もう一方は、中央部から10mm程度の厚さの試料を切り出し、JIS A 1154に準じた全塩化物イオン量の測定に用いた。これらを比較して、全塩化物イオン量と電極電位の関係を検討した。

全塩化物イオン量と電極電位の関係を図-4に示す。いずれの配合においても、式(1)で示したように、全塩化物イオン量が大きいほど、電極電位は小さい値となることが確認された。すなわち、塩分センサによる測定は、セメントの種類と水セメント比によ

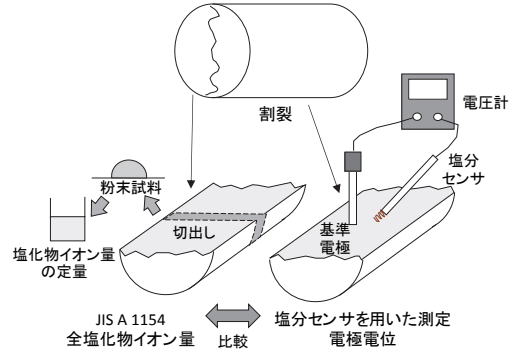


図-3 円柱供試体を用いた塩分センサの検証

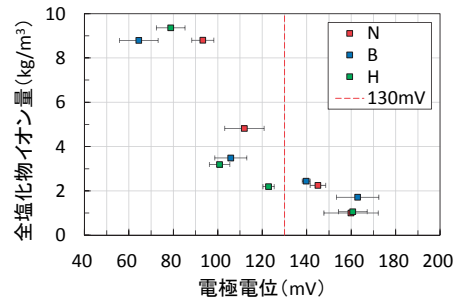


図-4 全塩化物イオン量と電極電位の関係

らず適用できるものと考えられる。

図-4のエラーバーは、測定を5回行った際の標準偏差の範囲 (1σ) を表す。全塩化物イオン量の大きさおよび配合の違いによってばらつきの程度は異なり、最大で12mV程度の標準偏差が確認された。

ここで、電極電位130mVを閾値とすると、配合によらず、全塩化物イオン量がおよそ2.4kg/m³を超える場合を区別できている。全塩化物イオン量が2.4kg/m³を超えると、塩害によって鉄筋が著しく腐食した事例もあるため³⁾、この程度の全塩化物イオン量を検出することは重要である。

3. 撤去部材を用いた適用性の検討

3.1 概要

塩分センサを用いた調査が実構造物に適用可能か検証するため、実橋の撤去部材を対象に測定を試みた (図-5)。この部材は、ポストテンション方式3径間PC単純T桁 (2主桁) の側道橋で、16年間、日本海沿岸の厳しい塩害環境で供用されていたものである⁴⁾。コンクリート表面には、変状は見られなかったが、本線の道路橋の架け替えにともない2005年

に撤去され、現在は土木研究所構内の雨掛かりのある屋外ヤードで保管している。

図-5に示す位置で、塩分センサによる調査を行うとともに、直径75mmのコア供試体を1本採取し、従来の方法（JIS A 1154）で全塩化物イオン量の測定を行い、両者を比較した。また、測定箇所の設定方法や粗骨材の影響等の現場で測定する際の留意点についても示す。

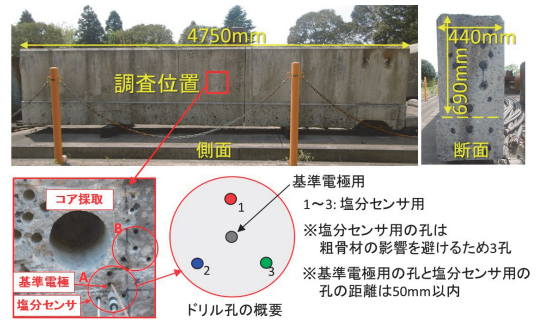
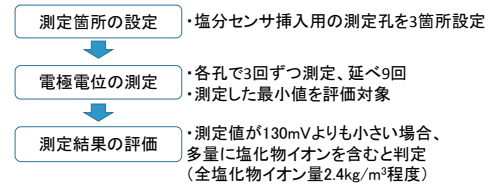


図-5 撤去部材を用いた測定の概要



3.2 塩分センサによる調査方法

塩分センサによる調査方法は以下の通りである。

- 1) 基準電極を設置する孔を直径 5.5mm のドリルビットを用いて深さ 30mm 程度まで削孔し、圧縮空気ですり削り粉を除去する。
- 2) 基準電極の先端（図-1,2）を確実に接触させるために、基準電極用のドリル孔に約 10mm 角のスポンジを挿入する。スポンジとの接触部を硬化コンクリート相当の環境にするために、飽和水酸化カルシウム水溶液を注入する。なお、塩分センサ接触部近傍が中性化している場合でも測定できることを別途確認している。
- 3) 基準電極から半径 50mm 以内の範囲で塩分センサ挿入用の測定孔を 3 箇所設定する。
- 4) 塩化物イオン量を測定したい深さまで直径 5.5mm のドリルビットを用いて削孔し、圧縮空気ですり削り粉を除去する。ノギスを用いて孔の深さを測定する。
- 5) 基準電極と塩分センサをそれぞれのドリル孔の底部に接触させ、接触から 10 秒後に電圧計で電極電位を読み取る。
- 6) 同条件の測定を 3 回繰り返す。なお、1 回の測定毎に、塩分センサをイオン交換水で洗浄する。
- 7) 4~6)を計画した深さに達するまで繰り返す。

塩分センサによる測定位置は、図-5に示すように、採取したコア近傍のA、Bの2箇所（測定孔は合計6孔）とした。今回は、削孔深さのピッチを10~20mm程度として、削孔深さ30~72mmの範囲を測定した。測定時の気温は25~29℃の範囲であった。

塩化物イオンの侵入状況の評価方法を図-6に示す。測定箇所の設定において、塩分センサ挿入用の測定孔を3箇所とするのは、粗骨材の影響を避けて測定するためである。構造物の調査で、ドリル孔先端に粗骨材が存在しているかを確認することは容易ではないため、測定数を増やして対応することとした。

電極電位の測定は、各孔で3回ずつ、測定箇所ご

図-6 塩化物イオンの侵入状況の評価方法

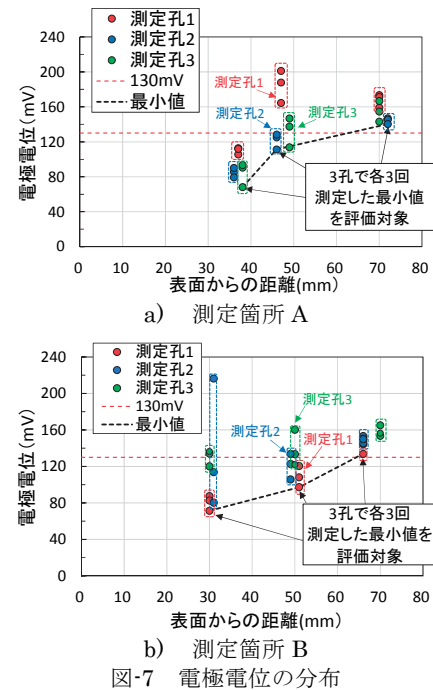


図-7 電極電位の分布

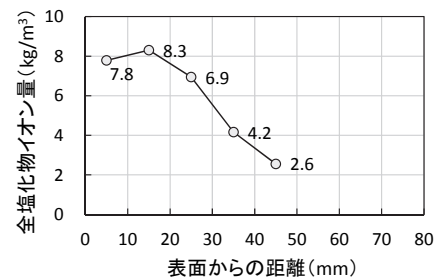


図-8 全塩化物イオン量の分布

とに延べ9回とする。塩分センサが粗骨材と接触した場合、測定される電極電位が大きくなるため、9回測定したうちの最小値を評価対象とする。

測定結果の評価は、測定値が130mVよりも小さい場合、多量に塩化物イオンを含む（全塩化物イオン量で2.4kg/m³程度）と判定する。

3.3 調査結果と考察

塩分センサにより測定した電極電位の分布を図-7に示す。測定箇所Aにおいて、測定孔1~3の電極電位の最小値を読み取ったところ、表面からの距離が50mm程度までは電極電位が130mVを下回り、表面からの距離が70mm程度で130mVを上回る結果となった。よって、前節で述べたように、表面からの距離が50mm程度までは全塩化物イオン量が2.4kg/m³程度を超えると判定できる。測定箇所Bの電極電位の最小値についても、測定箇所Aと同様の傾向となった。なお、図-7a)では測定孔1の測定結果が全て130mVを上回っている。測定時に塩分センサが粗骨材に接触していると電極電位が大きくなることを確認しており、その影響と考えられる。このような粗骨材の影響を排除するためには、今回の調査方法のように複数の測定孔について測定し、その最小値を指標とする必要があると考えられる。

次に、コアを採取して測定した全塩化物イオン量の分布を図-8に示す。全塩化物イオン量は表面に近い方が大きい傾向を示しており、表面からの距離が40~50mmの範囲では2.6kg/m³であった。図-7の結果では表面からの距離が50mm程度で電極電位が130mVを下回る結果であったため、これらは概ね対応していると考えられる。

ただし、塩分センサにより測定される電極電位は、接触した箇所近傍の局所的なものであり、その最小値を評価することは測定した範囲での最大の全塩化物イオン量を推定することになる。一方、図-8の全塩化物イオン量は各深さの平均値を示していることに留意が必要である。

以上から、各測定深さにおける電極電位の最小値を評価対象とし、電極電位が130mVを超えるかを確認すれば、全塩化物イオン量で2.4kg/m³を超える塩化物イオンの侵入範囲を検出できると考えられる。

4. まとめ

塩分センサを用いてコンクリート構造物への塩分の侵入状況を簡易に調査する方法を提案した。

- 1) 塩分センサによる測定は、セメントの種類と水セメント比の違いによらず適用可能であると考えられる。
- 2) 電極電位 130mV を境界とすると、配合によらず、全塩化物イオン量がおおよそ 2.4kg/m³ を超える場合を区別できることを確認した。
- 3) 塩害環境下で供用されていた撤去部材を対象として調査を行い、全塩化物イオン量で 2.4kg/m³ を超える塩化物イオンの侵入範囲を検出できることを示した。

この塩分センサによる調査状況の動画を(国研)土木研究所iMaRRCのホームページに掲載しているため参考にしていただきたい。

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/movie.html>

なお、本研究は、(国研)土木研究所と(国研)物質・材料研究機構との共同研究により実施されたものである。

参考文献

- 1) 湯浅昇他：ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオン量の現場試験方法の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.1303~1308、1999
- 2) 山本晃臣他：近赤外分光法による実構造物の塩害劣化診断法、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.1744~1749、2012
- 3) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発、pp.21~33、1988
- 4) 小松原健他：塩害を受けたコンクリート構造物の塩化物イオン量の分布状況、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.2051~2056、2006

櫻庭浩樹



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
研究員、博士(工学)
Dr.Hiroki SAKURABA

西村俊弥



国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点耐食鋼グループグループリーダー、
博士(工学)
Dr.Toshiyasu NISHIMURA

古賀裕久



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
首席研究員、博士(工学)
Dr.Hirohisa KOGA