

コンクリート構造物の目視困難な
損傷・変状に対する先端技術を用いた
状態把握の適用性と性能評価に関する
共同研究報告書（Ⅰ）

—塩分センサを活用したコンクリート構造物の簡易な塩化物イオン量推定方法—

令和 2 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所
国立研究開発法人物質・材料研究機構

Copyright © (2020) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、この報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コンクリート構造物の目視困難な 損傷・変状に対する先端技術を用いた 状態把握の適用性と性能評価に関する 共同研究報告書（I）

ー塩分センサを活用したコンクリート構造物の簡易な塩化物イオン量推定方法ー

国立研究開発法人土木研究所
先端材料資源研究センター
材料資源研究グループ

グループ長 渡辺 博志
(～2019年3月)

グループ長 西崎 到
上席研究員 古賀 裕久
主任研究員 中村 英佑
(～2019年6月)

研究員 櫻庭 浩樹

国立研究開発法人物質・材料研究機構

若手国際研究センター
センター長 土谷 浩一
構造材料研究拠点
NIMS 特別研究員 西村 俊弥
(～2020年2月)

要 旨

本研究では、現地で測定可能かつ構造物への損傷が少ない塩化物イオン量推定方法として、塩分センサを用いた方法を検討した。活用する場面としては、はつり面の残存塩化物イオン量推定、および、かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定を提案した。

塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の関係を検討した結果、閾値を定めることで、多量に塩化物イオンを含む部位を検出可能なことを示した。塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子として、含水状態や粗骨材等の影響があることを明らかにし、留意点として整理した。

提案した方法を撤去部材の調査に適用した結果、はつり面に多量に残存する塩化物イオン量を検出できること、かぶり深さ方向の塩化物イオンの侵入深さを推定できることを確認した。

キーワード：塩分センサ、塩化物イオン量、塩分センサの測定電位、微破壊試験、補修、コンクリート構造物

目次

1	はじめに	1
1.1	本研究の背景と目的.....	1
1.2	本報告書の構成.....	2
2	塩化物イオン量推定の原理と検証実験	3
2.1	塩化物イオン量の推定原理.....	3
2.2	測定機器.....	5
2.2.1	一般.....	5
2.2.2	基準電極.....	6
2.2.3	塩分センサ.....	7
2.3	塩分センサによる測定の検証実験.....	8
2.3.1	実験方法.....	8
2.3.2	塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係.....	9
2.3.3	塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子.....	10
3	塩分センサを活用したコンクリート構造物調査方法の提案	13
3.1	留意点.....	14
3.2	はつり面の残存塩化物イオン量推定の手順.....	15
3.3	かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定の手順.....	17
4	適用事例	19
4.1	はつり面の残存塩化物イオン量を推定した事例.....	19
4.1.1	測定対象.....	19
4.1.2	実験方法.....	19
4.1.3	実験結果と考察.....	20
4.2	かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例その1.....	22
4.2.1	測定対象.....	22
4.2.2	実験方法.....	22
4.2.3	実験結果と考察.....	23
4.3	かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例その2.....	25
4.3.1	測定対象.....	25
4.3.2	実験方法.....	25
4.3.3	実験結果と考察.....	27
5	まとめ	30
	謝辞.....	32
	参考文献.....	32

1 はじめに

1.1 本研究の背景と目的

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が大きい。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（原則として粗骨材の最大寸法の3倍以上）を採取して切断、微粉碎し、硝酸により抽出した塩化物イオンを定量分析するもので、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）として標準化されている。しかし、コアの採取時に鉄筋を傷つけるなど構造物の耐久性等に悪影響を与えるおそれがあること、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この方法で調査することは、必ずしも容易ではない。

このような背景から、本研究では、銀塩化銀電極を用いたセンサ（以下、塩分センサと称す）に着目した（図 1-1）。塩分センサは、現場ですぐに結果が得られること、および、測定のためのドリル削孔が直径 10mm 程度で構造物への影響が小さいことに利点がある。既往の研究では、塩分センサをモルタルに埋設した供試体を塩水に浸せきし、塩化物イオンが経時的にモルタル中に侵入する挙動を捉えられることも示している¹⁾。しかし、硬化コンクリート中の塩化物イオン量を推定するための評価方法や留意点が明確でないことが課題であった。

本研究では、これらの課題を解決するために、硬化コンクリートを用いた実験や、実環境で供用されていた部材の調査を行い、塩分センサによる塩化物イオン量の推定方法を構築した。

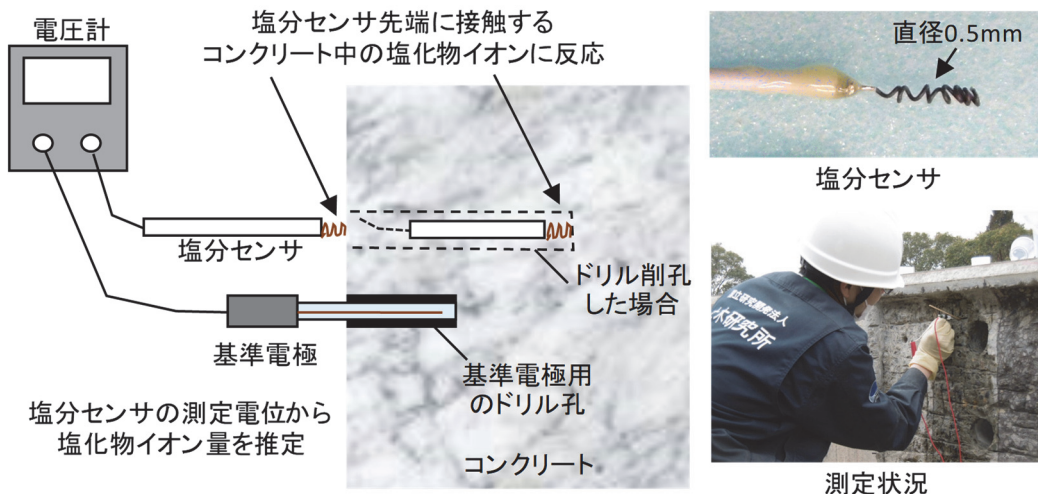


図 1-1 塩分センサによる測定の概要

1.2 本報告書の構成

本報告書の構成を図 1-2 に示す。また、各章の概要を以下に述べる。

第2章では、塩分センサを用いた塩化物イオン量の推定原理と検証実験を行った結果について述べた。硬化コンクリート中の塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係は、指数関数的に変化することを確認し、この関係から、塩化物イオンを多量に含むことを評価するための閾値を検討した。さらに、塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子を整理した。

第3章では、第2章の結果を踏まえて、塩分センサの活用方法として、はつり面の残存塩化物イオン量の推定、および、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定する方法を提案した。現地で測定する際の留意点を整理した上で、測定手順の詳細を示した。

第4章では、第3章に示した方法を用いて、はつり面の残存塩化物イオン量を推定した事例、および、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例を示した。

第5章では、第2章から第4章のまとめを述べた。

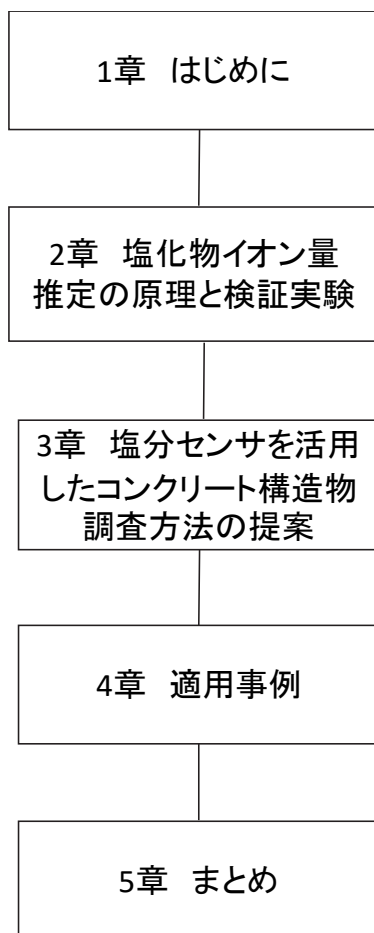


図 1-2 本報告書の構成

2 塩化物イオン量推定の原理と検証実験

2.1 塩化物イオン量の推定原理

塩分センサは、基準電極および作用電極を銀塩化銀電極として電位を測定し、硬化コンクリート中の細孔溶液の塩化物イオン濃度を推定していると考えられる。

塩分センサの測定電位のモデルを図2-1に示す。作用電極および基準電極は、それぞれ、塩化銀を被覆した銀線をNaCl水溶液または飽和塩化カリウム水溶液に挿入したもの（銀塩化銀電極）である。NaCl水溶液は、コンクリート中の塩化物イオンを表すものと仮定する。この時、塩分センサの測定電位は式(1)で与えられる²⁾。

$$U = E_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})} - E_{\text{Cl}^-(\text{KCl})} \quad (1)$$

ここに、 U ：塩分センサの測定電位、 $E_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})}$ ：作用電極の電極電位、 $E_{\text{Cl}^-(\text{KCl})}$ ：基準電極の電極電位

次に、 $E_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})}$ と $E_{\text{Cl}^-(\text{KCl})}$ は、ネルンスト式より、それぞれ、式(2)、式(3)で与えられる²⁾。

$$E_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})} = E^\ominus - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})} \quad (2)$$

$$E_{\text{Cl}^-(\text{KCl})} = E^\ominus - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-(\text{sat. KCl})} \quad (3)$$

ここに、 E^\ominus ：標準電極電位、 R ：気体定数、 T ：絶対温度、 F ：ファラデー定数、 $a_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})}$ ：塩化ナトリウム水溶液中の塩化物イオンの活量、 $a_{\text{Cl}^-(\text{sat. KCl})}$ ：飽和塩化カリウム水溶液中の塩化物イオンの活量

式(1)に式(2)、式(3)を代入すると、式(4)が得られる。

$$U = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{\text{Cl}^-(\text{KCl})}}{a_{\text{Cl}^-(\text{NaCl})}} \quad (4)$$

式(4)より、塩化ナトリウム水溶液中の塩化物イオンの活量が大きくなるほど、塩分センサの測定電位が小さくなることわかる。すなわち、溶液中の塩化物イオン量が大きくなるほど、塩分センサの測定電位は小さくなることを意味する。

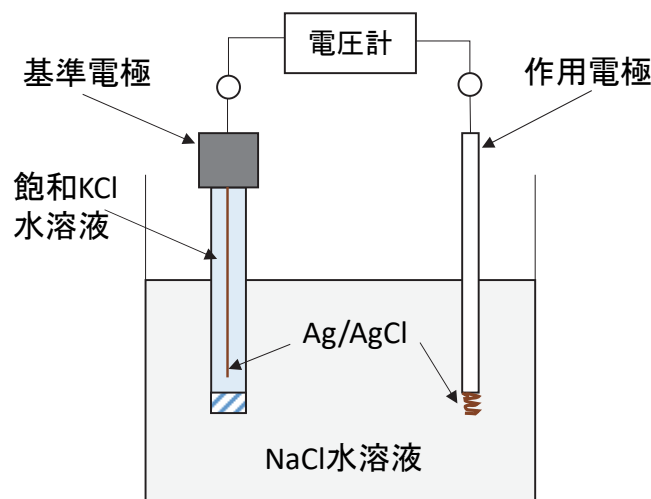


図2-1 塩分センサの測定電位のモデル

活量 $a_{Cl^-(NaCl)}$ と $a_{Cl^-(KCl)}$ は、それぞれ、式(5)と式(6)で与えられる。

$$a_{Cl^-(NaCl)} = \frac{y_{Cl^-(NaCl)} C_{Cl^-(NaCl)}}{C^\ominus} \quad (5)$$

$$a_{Cl^-(KCl)} = \frac{y_{Cl^-(sat.KCl)} C_{Cl^-(sat.KCl)}}{C^\ominus} \quad (6)$$

式(5)と式(6)を、式(4)に代入し、表 2-1 に示す係数^{3,4)}を用いて整理すれば、式(7)が得られる。

$$U = 0.110T - 0.0862T \ln \frac{C_{Cl^-(NaCl)}}{C^\ominus} \quad (mV) \quad (7)$$

ここに、 $y_{Cl^-(NaCl)}$: 塩化ナトリウム水溶液中の塩化物イオンの活量係数、 $y_{Cl^-(sat.KCl)}$: 飽和塩化カリウム水溶液中の塩化物イオンの活量係数、 $C_{Cl^-(NaCl)}$: 塩化ナトリウム水溶液のモル濃度、 $C_{Cl^-(sat.KCl)}$: 飽和塩化カリウム水溶液のモル濃度、 C^\ominus : 基準モル濃度 (=1mol/L)

表 2-1 活量係数^{3,4)}

種類	数値	備考
$y_{Cl^-(NaCl)}$	0.781*	20°C、0.1mol/L
$y_{Cl^-(sat.KCl)}$	0.676*	20°C、4.16mol/L

*文献 3)、4)の文献値から補間して算出

なお、塩害橋の実態調査の結果を見ると、特に劣化が著しい構造物でも全塩化物イオン量は 30kg/m^3 程度である。全塩化物イオン量 30kg/m^3 のうち、50%が可溶性塩化物イオン量として存在すると仮定し⁵⁾、これを塩素の分子量(35.45g/mol)で除すと、 0.4mol/L 程度である。本来、活量係数は濃度にも依存するが、この程度の濃度であれば、厳密に算定してもほとんど影響がないことおよび関係式が簡便になることを考慮し、表 2-1 の値を用いることとした。

さらに、基準モル濃度に塩化物イオンの分子量を乗じて塩化物イオン量が基準となるように変換し、自然対数を常用対数にすれば、式(8)の塩分センサの測定電位と塩化物イオン量の関係式が得られる。

$$U = 0.418T - 0.198T \log_{10} \frac{C_{Cl^-}}{C^\ominus} \quad (mV) \quad (8)$$

ここに、 C^\ominus : 基準塩化物イオン量 (=1kg/m³)、 C_{Cl^-} : 塩化物イオン量 (kg/m³)

2.2 測定機器

2.2.1 一般

塩分センサによる測定には、基準電極、塩分センサおよび電圧計が必要である（図 2-2, 2-3）。電圧計には、入力抵抗が $100\text{M}\Omega$ 以上で、目量が 1mV 以下の直流電圧計を使用する。

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測定対象に接触させることで、塩分センサの測定電位が計測できるようになる。



図 2-2 調査に用いる主な機器

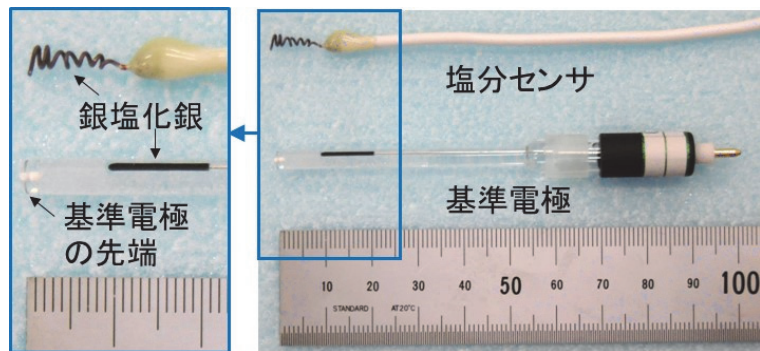


図 2-3 基準電極と塩分センサの細部

2.2.2 基準電極

基準電極には、電極内が飽和塩化カリウム水溶液で満たされた銀塩化銀電極を用いる（図 2-4）。基準電極の先端には、液絡部と呼ばれる外部と接触するための部品があり、測定時には、液絡部を測定対象に接触させる必要がある。なお、液絡部の保護のため、キャップが装着されていることがあるため、使用前にキャップが着脱しているか確認も必要である。

本研究では、なるべく削孔径を小さくするために、直径 4mm 程度の基準電極を使用する（図 2-3）。このような細い電極では、使用状況によっては、液絡部付近に気泡が発生することがある（図 2-5）。気泡が発生すると、正しく測定できなくなるため、使用前に液絡部付近に気泡がないか、確認が必要である。

使用を繰り返すと液絡部が損傷したり、塩化カリウム水溶液の濃度が低下したりすることがある。調査前には、校正用の基準電極を用意し、校正用の基準電極と使用予定の基準電極を突き合せて電位差を測定し、ほぼ一致することを確認する必要がある。なお、本研究の実施においては、この差が 1mV 以内であることを確認した。電位差がほぼ一致しない場合には、メンテナンスを行うか、新しい基準電極を用意し、電位のずれがない基準電極を使用することが必要である。

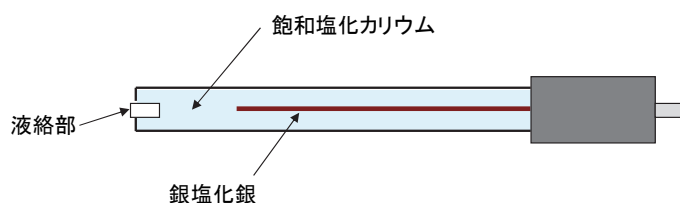


図 2-4 基準電極の概要



図 2-5 基準電極の液絡部近傍に気泡が混入した場合の例

2.2.3 塩分センサ

基準電極の電位に問題がないことを確認した上で、使用する塩分センサの品質を確認する必要がある。塩分センサの品質の確認は、0.01～0.10mol/L の範囲で2水準のNaCl水溶液を調整し、これらに基準電極と塩分センサを挿入して、塩分センサの測定電位を計測することで行うとよい(図2-1)。測定機器およびNaCl水溶液は、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ となるようにあらかじめ調温しておき、基準電極と塩分センサをNaCl水溶液に挿入後、10秒後の塩分センサの測定電位を読み取る。式(7)による算定値(表2-2)と比較して10mV以内の範囲であれば、塩分センサの品質は問題ないと考えられる。

表 2-2 塩分センサの検証に用いる値の例 (20°C)

濃度 (mol/L)	塩分センサの測定電位 (mV) *
0.01	149
0.03	121
0.10	90

*表中の塩分センサの測定電位に対して計測値が $\pm 10\text{mV}$ の範囲であることを確認

2.3 塩分センサによる測定の検証実験

2.3.1 実験方法

NaCl を混入したコンクリート円柱供試体（以下、供試体）を用いて塩分センサによる測定の検証実験を行った。実験に用いたコンクリートの配合を表 2-3 に示す。配合は、セメントの種類と水セメント比が異なる 3 種類（N、B、H）とした。混入した塩化物イオン量は 1.2、2.5、5.0、10.0kg/m³ で、供試体の養生条件は封緘養生で 28 日以上である。

図 2-6 に供試体を用いた塩分センサの検証方法を示す。割裂した片方を塩分センサの測定に使い、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 および附属書 B に準じた全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量の測定に用いた。これらを比較して、塩分センサの測定電位と塩化物イオン量の関係を検討した。

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測定電位が得られるため、供試体の割裂面において、確実にモルタル部に接触させて測定を行った。全ての供試体の測定において、測定時間の影響を確認するために、塩分センサの測定電位を 60 秒間計測し、10 秒毎に計測値を記録した。また、測定のばらつきを確認するために、各供試体で 5 回繰り返して測定した。測定は、気温 20℃ を目標に制御された室内で実施した。また、配合 N の供試体については、含水状態、測定温度、中性化、粗骨材の影響を確認した。

表 2-3 コンクリートの配合

名称*	W/C (%)	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	47	165	330	827	968	1.2, 2.5, 5.0, 10.0
B	50	47	165	330	827	968	
H	36	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

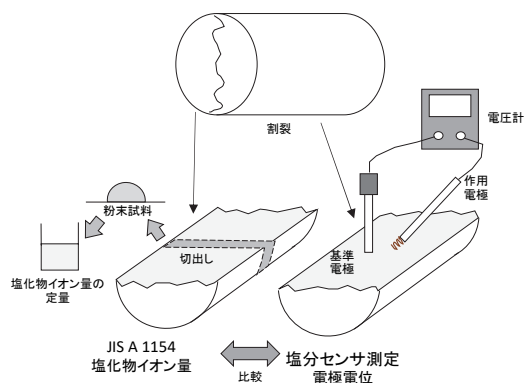


図 2-6 円柱供試体を用いた塩分センサの検証

2.3.2 塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

可溶性塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係を図 2-7 に示す。塩分センサの測定電位は、測定時間 10 秒で、それぞれ 5 回測定した結果の平均値である。式(8)による算定値の結果も合わせて示す。いずれの配合においても、可溶性塩化物イオン量が多い供試体ほど、塩分センサの測定電位が小さくなる傾向が確認され、式(8)による算定値と傾向は概ね一致した。このことから、塩分センサでは、可溶性塩化物イオン量に応じた値が計測されると考えられる。

塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の関係を図 2-8 に示す。上述のとおり、塩分センサの測定電位は可溶性塩化物イオン量と関係があるが、実務では全塩化物イオン量を指標として鋼材腐食に対する評価を行うことが一般的であるため、全塩化物イオン量との比較も行った。ここで、塩分センサの測定電位 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⁹⁾、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。

以上から、本報告書で提案する方法（第 3 章）では、塩分センサの測定電位 130mV を閾値として、塩分の侵入状況（全塩化物イオン量 2.4kg/m³ 程度を超える範囲）を調査することとした。

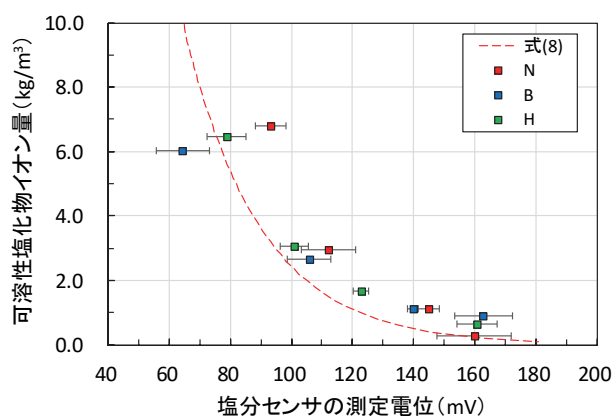


図 2-7 可溶性塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

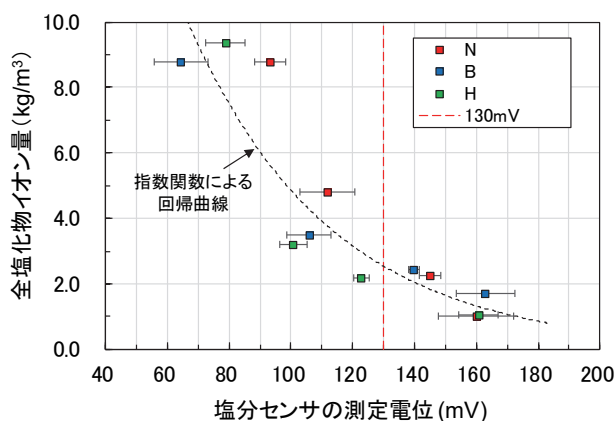


図 2-8 全塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

2.3.3 塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子

(1) 測定時間

測定時間の影響を検討した結果を図2-9に示す。塩分センサの測定電位は、測定時間10、30、60秒で、それぞれ5回測定した結果の平均値である。式(8)による算定値の結果も合わせて示す。

測定時間の違いに着目すると、測定時間が長いほど、塩分センサの測定電位が小さくなる傾向が確認された。これは、塩分センサがモルタル部に接触した後、塩分センサの測定電位が平衡状態に至るまでにある程度時間を要するためと推察される。一方、測定時間10秒とした場合でも、算定値の傾向と概ね対応することがわかる。現場では、多点の測定が想定されるため、測定時間が短い方が望ましいことから、閾値と比較して塩分の侵入状況を調査する方法では、測定時間は10秒でよいと考えられる。

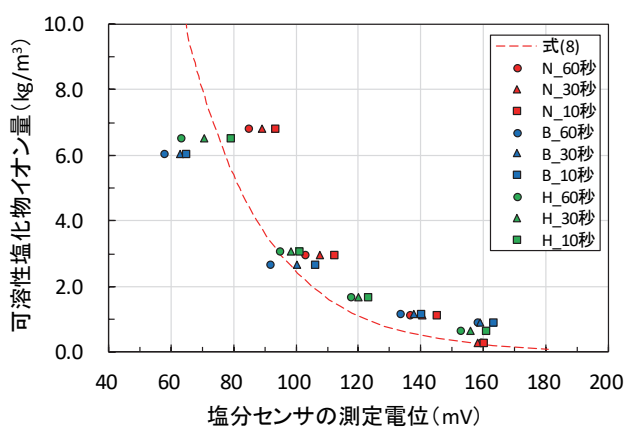


図2-9 測定時間が及ぼす影響

(2) 含水状態

測定面の含水状態の影響を検討するために、散水を行わずに測定した場合（乾燥状態）および散水後の測定面に浮き水がある場合（浮き水有）で、それぞれ、測定時間を10秒として1回ずつ測定した結果を図2-10に示す。湿潤状態の場合は、5回測定の平均値と標準偏差の範囲（ 1σ ）を示す。対象としたのは、配合Nの供試体である。

乾燥状態で測定した場合、湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が30~50mV程度小さい。これは、測定面が乾燥していると、見かけ上塩化物イオン量が大きくなるように測定されることを示している。次に、浮き水有で測定した場合、湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が40~80mV程度大きい。これは、乾燥状態の場合と反対に、見かけ上塩化物イオン量が小さくなるように測定されることを示している。したがって、毎回安定した測定結果を得るためには、含水状態の調整が重要である。

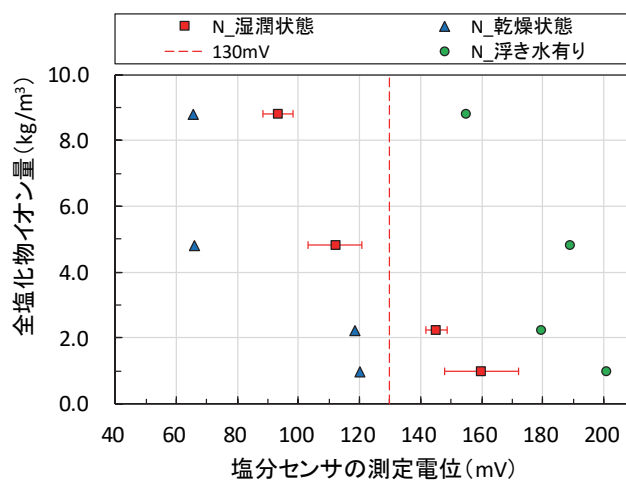


図 2-10 含水状態が及ぼす影響

(3) 中性化

補修の現場では、はつり作業の直後に塩分センサによる測定ができるとは限らない。補修面が露出して日数が経過すると、コンクリートの表層は中性化するため、これが塩分センサの測定電位に影響することも想定される。そこで、この影響について確認するために、供試体の割裂後から 245 日と長期間経過した後にも測定した。この時、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した結果、ほとんど呈色しない状態であった。対象は、配合 N の供試体で、混入した塩化物イオン量が 1.2、2.5、5.0kgm³のものとした。

図 2-11 に割裂後の日数の影響を示す。割裂後 245 日の場合は、含水状態を湿潤状態とし、5 回測定した平均値と標準偏差 (1σ) の範囲を示している。

割裂後 245 日の場合にも、割裂後 2 日の結果と同程度の測定電位を示している。また、閾値を 130mV とした判定も変わらない。よって、塩分センサによる測定では、はつり作業から多少の日数が経過したとしても、測定結果に、直ちには大きな影響がないものと考えられる。ただし、なるべく早期のうちに測定することが望ましいと考えられる。

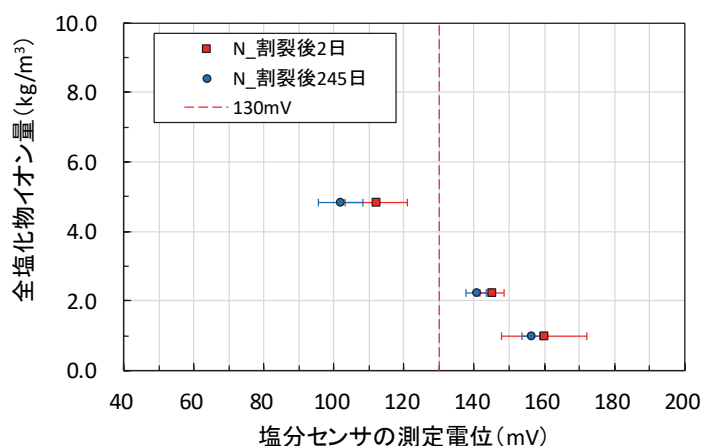


図2-11 中性化（測定面露出後の日数）が及ぼす影響

(4) 測定温度

測定温度の影響を検討するために、測定温度 10、20、30°Cで、測定時間を 10 秒として 5 回ずつ測定した。各測定温度における平均値と標準偏差の範囲 (1σ) および式(8)による算定値を図 2-12 に示す。

測定値は、20°Cの場合と同様の傾向を示した。次に、各測定温度での算定値を比較すると、20°Cを基準にした場合、10°Cで-5mV 程度、30°Cで+5mV 程度の差であった。これらの結果から、測定温度の影響は顕著でないことが確認された。

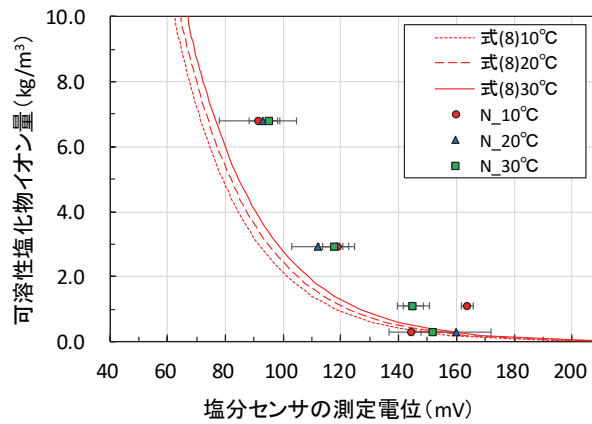


図2-12 測定温度が及ぼす影響

(5) 粗骨材

粗骨材の影響を検討するために、配合 N の供試体を対象とし、粗骨材に塩分センサを接触させて、測定時間を 10 秒として 1 回ずつ測定した結果を図 2-13 に示す。湿潤状態の場合は、5 回測定の前平均値と標準偏差の範囲 (1σ) を示す。

湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が 5~50mV 程度の差があり傾向が異なる。粗骨材に接触させた場合、基準電極との導通が不十分となり、適切に測定できないものと推察される。湿潤状態での測定よりも、塩分センサの測定電位が大きくなる場合があり、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性もある。このため、粗骨材を避けて測定する必要があると考えられる。

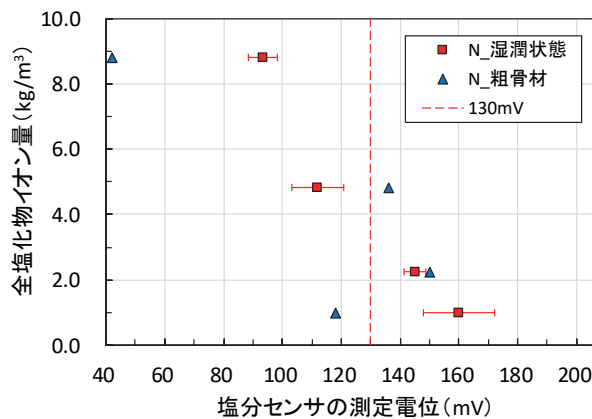
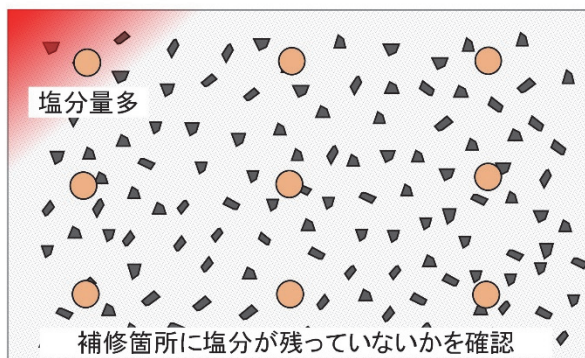


図 2-13 粗骨材への接触が及ぼす影響

3 塩分センサを活用したコンクリート構造物調査方法の提案

第2章で確認した塩分センサの特性を踏まえて、塩分センサを活用し塩害を受けた構造物の補修の確実性を向上させる方法として、はつり面の残存塩化物イオン量を推定する方法を提案した（図 3-1①）。また、塩分センサを活用し塩害による腐食が始まる前に塩分の侵入状況を簡易に確認する方法として、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定し得る方法を提案した（図 3-1②）。本章では、まず、これらの測定上の留意点を整理する。その後、それぞれの測定の手順の詳細を示す。

①はつり面の残存塩化物イオン量推定



②かぶり深さ方向の塩化物イオン推定

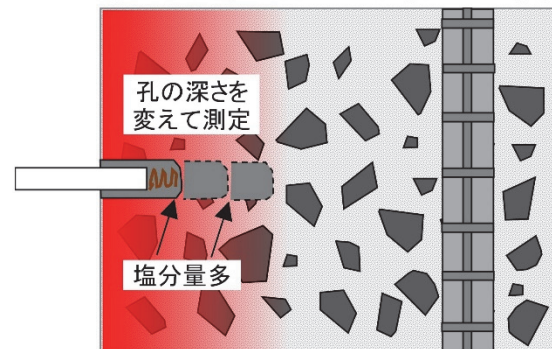


図3-1 塩分センサの活用方法の概要

3.1 留意点

評価のための閾値

塩分センサの測定電位は、小さいほど塩分量が多いことを意味するため、安全側の評価をするために、測定電位の最小値を評価に用いる代表値とする。測定結果の評価は、代表値が 130mV よりも小さい場合、多量に塩化物イオンを含むと判定する。これは、塩分センサの測定電位が 130mV を超えると、全塩化物イオン量でおよそ 2.4kg/m³ を超えることを実験的に確認したためである (図 2-8)。

含水状態

塩分センサは、可溶性の塩化物イオンと関係があるため、塩分センサの接触面が乾燥していると、見掛け上濃度が高くなり、塩化物イオン量を多く推定する。一方、接触させる面に浮き水がある場合は、見掛け上濃度が低下し、塩分量を少なく推定する。このため、測定の直前に、塩分センサを接触させる面に散水した上で、表面をウェスやガーゼなどで拭き取るなどして、含水状態を調整する必要がある (図 3-2)。かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定では、ドリル孔内の含水状態の調整となり、深くなると孔内の浮き水の除去が困難になるため、測定深さは 100mm 以内とするのがよい。

粗骨材

塩分センサは、粗骨材に接触させて測定すると、通常の測定よりも塩分センサの測定電位が大きくなる場合があり、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性があるため、粗骨材を避けて測定する必要がある。

はつり面の残存塩分を推定する場合には、目視で粗骨材を避けて、塩分センサをモルタル部に確実に接触させる必要がある。かぶり深さ方向の塩分量を推定する場合には、ドリル孔の内部を目視等で確認することが困難なため、測定用の孔を 3 箇所設定する (図 3-3)。3 箇所所で測定し最も安全側のデータを採用することで、塩化物イオンを含む部位を見落とすリスクを十分小さくできると考えられる。

基準電極までの距離

基準電極から塩分センサの測定位置までの距離が長くなると塩分センサの測定電位が大きくなる傾向があることが後述の 4.1 の適用事例で確認された。半径 50mm 程度以内であれば影響は顕著でないことを確認しているため、この範囲内で塩分センサの測定を行う必要がある。



図3-2 はつり面での含水状態の調整の例

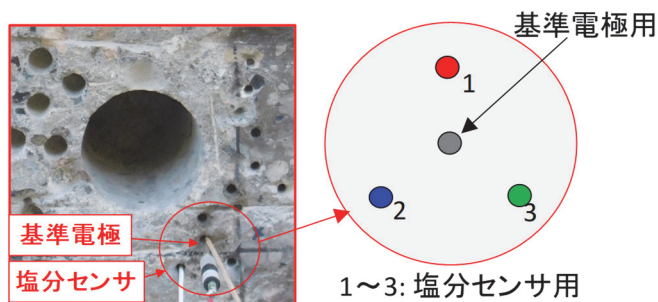


図3-3 かぶり深さ方向の塩分量を推定する場合の測定孔の例

3.2 はつり面の残存塩化物イオン量推定の手順

はつり面の残存塩化物イオン量推定の手順を図3-4に示す。測定手順は、以下のとおりである。

- 1) 基準電極を設置する孔を、直径 5mm 程度のドリルビットを用いて深さ 30mm 程度まで削孔する。削孔粉は、ブローアを用いて除去する。
- 2) 基準電極の液絡部を保護し、コンクリートとの接触抵抗を低減するため、ドリル孔に 10mm 角程度のスポンジを挿入して、飽和水酸化カルシウム水溶液を注入する。
- 3) 基準電極から半径 50mm 以内で塩分センサによる測定位置を決定する。
- 4) 測定面に水道水を散水し、測定面を湿潤状態とする。測定面に浮き水がある場合は、測定直前に、ウェス等で拭き取る。
- 5) 基準電極を挿入し、測定面のモルタル部に塩分センサを接触させて電圧計で塩分センサの測定電位を読み取る。その後、同様の測定を再度行い、合計 2 回測定する。なお、1 回の測定毎に、塩分センサをイオン交換水で洗い流し、ブローアを用いて洗浄する。
- 6) 以上の手順を計画した箇所の測定が完了するまで繰り返す。
- 7) 全ての測定が完了した後、各測定位置の代表値を求める。測定箇所ごとに 2 回測定するため、2 回測定したうちの小さい方を代表値とする。
- 8) 代表値が 130mV よりも小さい場合、多量に塩化物イオンを含むと判定する。

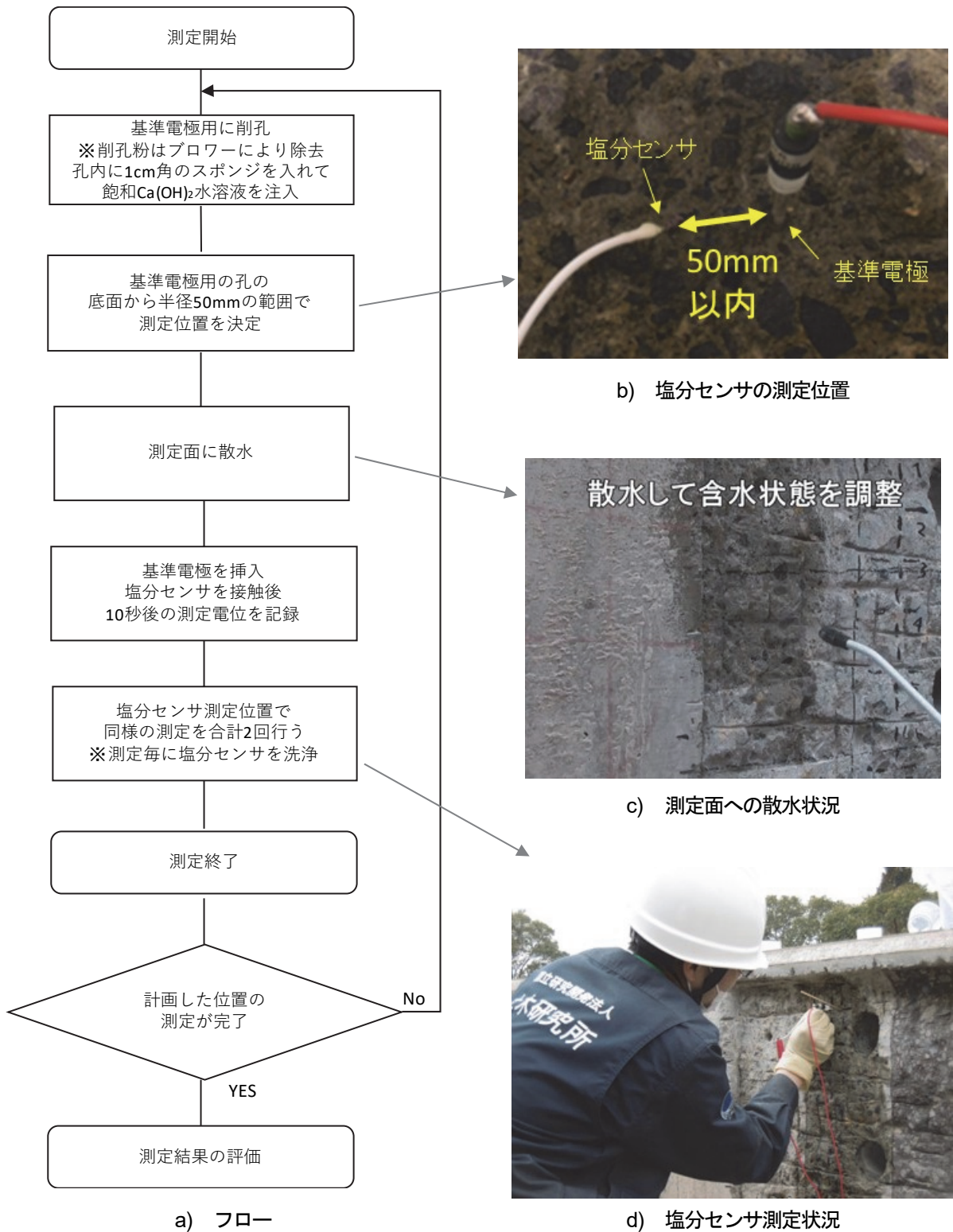


図3-4 はつり面の残存塩化物イオン量推定の手順

3.3 かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定の手順

かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定の手順を図 3-5 に示す。測定手順は、以下のとおりである。

- 1) 基準電極を設置する孔を、直径 5mm 程度のドリルビットを用いて削孔する。削孔粉は、ブロワーを用いて除去する。
- 2) この時、計画した測定深さに対して、基準電極から半径 50mm 以内となるようにする。例えば、かぶり深さ 70mm まで測定する場合は、30mm 程度まで削孔するのがよい。
- 3) 基準電極の液絡部を保護し、コンクリートとの接触抵抗を低減するため、ドリル孔に 10mm 角程度のスポンジを挿入して、飽和水酸化カルシウム水溶液を注入する。
- 4) 基準電極から半径 50mm 以内で、塩分センサ測定用の孔を 3 箇所設定する。
- 5) 計画した測定深さまで、直径 10mm 程度のドリルビットを用いて塩分センサ挿入用に削孔し、圧縮空気でドリル削孔粉を除去する。その後、ノギスを用いて孔の深さを測定する。
- 6) 削孔後、スポイトで水道水を注入する。その後、スポイトで再度水道水を吸い取り、ガーゼを挿入して浮き水を拭き取る。
- 7) 基準電極を基準電極用の孔に設置し、塩分センサを測定孔の底部に接触させる。塩分センサの接触から 10 秒後に電圧計で塩分センサの測定電位を読み取る。その後、同様の測定を 2 回行い、合計 3 回測定する。なお、1 回の測定毎に、塩分センサをイオン交換水で洗い流し、ブロワーを用いて洗浄する。
- 8) 以上の手順を計画した箇所の測定が完了するまで繰り返す。
- 9) 全ての測定が完了した後、各測定位置の代表値を求める。各孔で 3 回ずつ、測定箇所ごとに延べ 9 回測定するため、9 回測定したうちの最小値を代表値とする。
- 10) 代表値が 130mV よりも小さい場合、多量に塩化物イオンを含むと判定する。

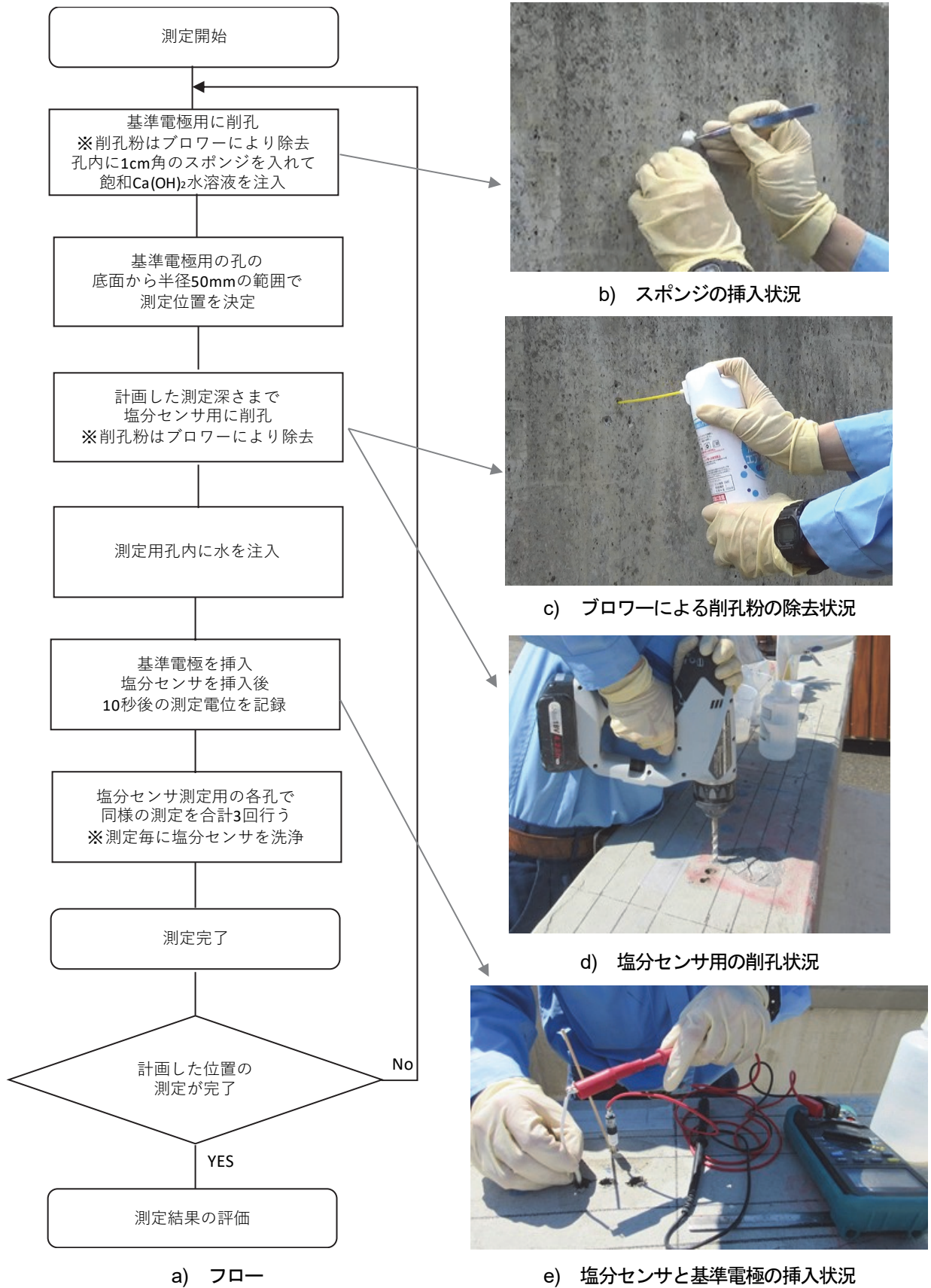


図3-5 かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定の手順

4 適用事例

4.1 はつり面の残存塩化物イオン量を推定した事例

4.1.1 測定対象

測定対象は、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、本線の道路橋と並んで約16年間塩害環境に供用されていた部材である。コンクリート表面には変状が見られず、目視点検では比較的健全と評価されていたが、本線の道路橋の架け替えにより2005年に撤去された。5m程度の長さで側道橋を切断後、土木研究所の実験棟で保管されていたが、2010年頃に雨掛かりのある屋外ヤードに移設した（図4-1）。

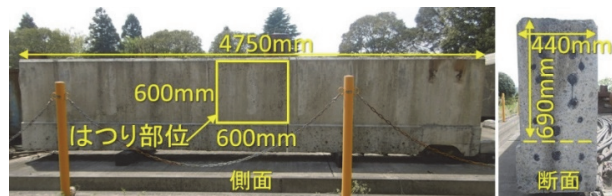


図4-1 撤去部材の概要（桁の上下を反転して設置）

4.1.2 実験方法

図4-1に示す桁側面の600×600mmの範囲をはつり面とし、ブレーカーを用いてはつり作業を行った。第3章で述べた測定方法を検証するために、はつり深さを0～70mmの範囲で変化させた。

塩分センサによる測定位置は、図4-2に示す6点とした。6点のはつり深さをノギスで測定した結果、図4-2の(1)～(6)に示すように4～66mmであった。なお、一部の測定箇所では、約2ヶ月後に追加ではつり作業を行い、再度塩分センサによる測定を行った。

塩分センサによる測定後、測定位置から半径50mm程度の範囲から、直径14.5mmのドリルビットを用いて深さ10mm程度を削孔（各測定位置周囲で6孔）して試料を採取し、全塩化物イオン量の測定に用いた。基準電極は、塩分センサ測定位置から半径50mm以内に設置した。図4-2の測定箇所(2)については、基準電極の距離が塩分センサの測定電位に及ぼす影響を確認するため、基準電極からの距離が50mmを超える場合（120、303、486mm）も測定した。

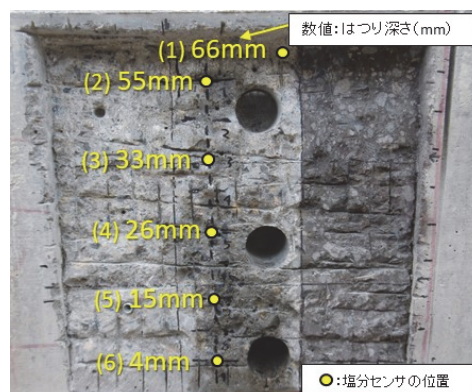


図4-2 はつり深さと塩分センサの測定位置

4.1.3 実験結果と考察

(1) 塩分センサを用いた測定の適用性の確認

はつり深さと塩分センサの測定電位の分布を図4-3、図4-4に示す。図の縦軸は、図4-2に示したはつり面の下端からの距離である。はつり深さについては、はつり面の上部ほど深くなるようにはつりを行った。このはつり深さに対応する塩分センサの測定電位は、はつり深さ55mmまでは130mVを下回り、はつり深さ66mmでは180mV程度であった。

次に、コンクリート表面からの全塩化物イオン量の分布を図4-5に示す。ここで、表面からの距離は、はつり深さにドリル削孔深さの中央までの距離(=5mm)を加えた値である。その結果、60mmまでは全塩化物イオン量 2kg/m^3 程度以上の値を示し、71mmでは全塩化物イオン量は 1.2kg/m^3 程度であった。

塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の分布を比較すると、測定電位が130mVを下回った位置では、全塩化物イオン量は 2kg/m^3 程度以上となった。よって、第3章で提案した方法により、多量に塩化物イオンを含む部位を検出できたと考えられる。

(2) 追加はつりの効果

塩分センサの測定電位が130mVを下回った図4-2の測定箇所(2)、(3)について、追加はつりを行った。図4-5に示した全塩化物イオン量の分布によれば、表面からの距離を50mmより大きくすれば、全塩化物イオン量 2.4kg/m^3 をおおよそ下回ると推察される。そこで、測定箇所(3)では、50mmより大きくなるように追加で15mm程度はつりを行った。測定箇所(2)については、初回のはつり時に既に50mmよりも大きかったが、追加で15mm程度はつりを行った。追加はつり後、再度、塩分センサによる測定を行った。

図4-3、図4-4にその結果(凡例：青丸)を示す。追加はつり後塩分センサの測定電位は、130mVを上回っている。追加はつりの前は、130mVを下回っていたことから、追加はつりの効果を塩分センサによる測定で確認できたと考えられる。

(3) 塩分センサと基準電極の距離に関する検討

図4-6に、図4-2の測定箇所(2)を対象として、基準電極から塩分センサまでの距離の影響を確認した結果を示す。なお、初回のはつり作業後に測定した結果である。

基準電極からの距離が長くなると、塩分センサの測定電位が大きくなる傾向がある。この箇所の場合、基準電極からの距離が35mmの場合は測定電位が107mVであったが、300mmを超えると測定電位が130mVを上回り、評価にも影響した。基準電極と塩分センサの間の距離が広がると、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性がある。基準電極からの距離を半径50mm程度以内に管理することが必要と考えられる。

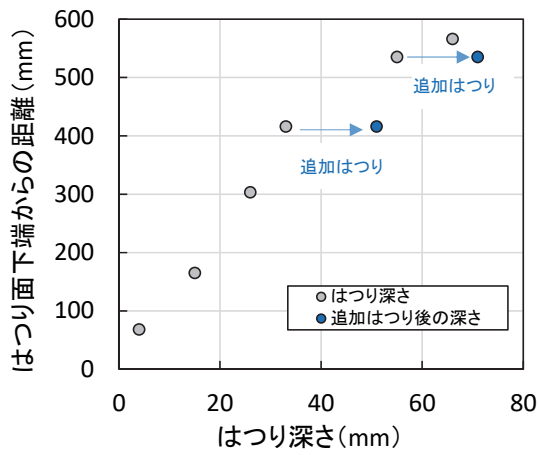


図 4-3 はつり深さの分布

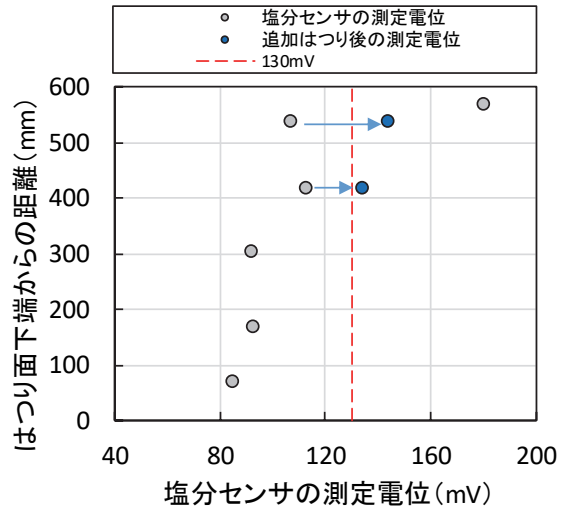


図 4-4 塩分センサの測定電位の分布

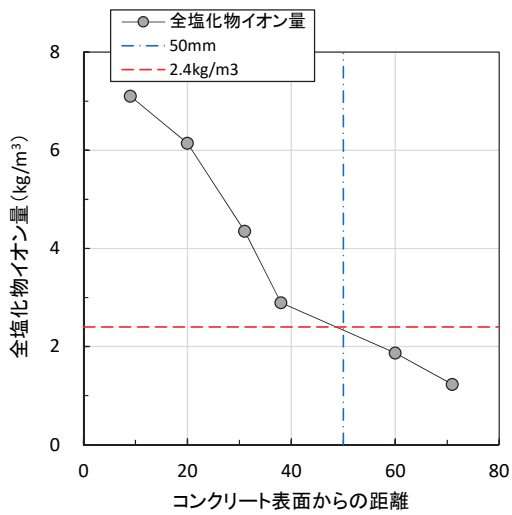


図 4-5 全塩化物イオン量の分布

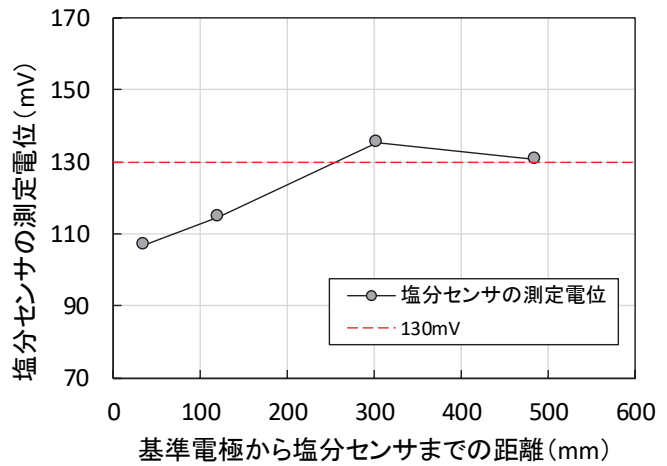


図4-6 基準電極から塩分センサまでの距離の影響

4.2 かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例その1

4.2.1 測定対象

測定対象は、PC ポストテンション方式T桁橋であり、約55年間塩害環境に供用されていたものである。飛来塩分による塩害での主桁の損傷に伴い、2017年に撤去され、現在では部材の一部が切断された状態で、雨掛かりのある屋外に保管されていた。

4.2.2 実験方法

塩化物イオンの侵入状況を把握するために、海側に面した側面（海側面、測定箇所a～c）と山側に面した側面（山側面、測定箇所e、d）を対象に、桁のウェブと下フランジからコアを採取し（図4-7）、深さ方向の全塩化物イオン量を測定した。なお、海側面と山側面は、桁の異なる位置から切り出したものである。塩分センサによる測定は、コア採取位置の近傍で行い、計画深さは、10～20mm、25～35mm、45～55mm、65～75mm、80～100mmの5段階までとした。

海側面では、ウェブからφ75×150mmのコアを1本、下フランジからφ25×120mmのコアを2本採取した。山側面では、下フランジからφ25×120mmのコアを2本採取した。コア表面から厚さ20mmごとに切断して粉碎し、JIS A 1154に準じた全塩化物イオン量の測定に用いた。

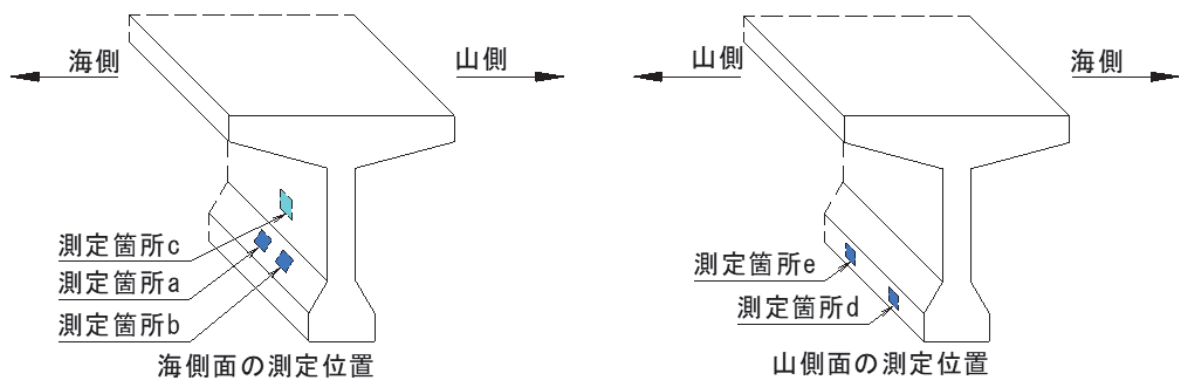


図4-7 測定箇所の概要

4.2.3 実験結果と考察

図 4-8~12 に、深さ方向の塩分センサの測定電位および全塩化物イオン量の分布を示す。なお、全塩化物イオン量の分布と対応するように、塩分センサの測定電位の軸を反転させている。

まず、塩化物イオンが比較的多量に含まれていた箇所の測定結果を図 4-8,9 に示す。塩分センサの測定電位は、深さ 30mm 程度までは 130mV よりも小さいが、それより深い位置では 130mV よりも大きく、多量に塩化物イオンが侵入した範囲は 30mm 程度までと判定された。これらに対し、試料を分析して測定した全塩化物イオン量は、深さ 30mm 程度まで 2.4kg/m^3 を上回り、それ以降の深さでは 2.4kg/m^3 を下回っており、塩分センサによる評価結果とよく合致していた。

次に、塩化物イオンが比較的多量に含まれていなかった箇所の測定結果を図 4-10~12 に示す。塩分センサの測定電位は、いずれも 130mV よりも大きく塩化物イオンを多量には含まないと判定された。これらに対し、試料を分析して測定した全塩化物イオン量は、いずれも 2.4kg/m^3 を下回っており、塩分センサによる評価結果と同様の傾向となった。以上から、かぶり深さ方向の塩化物イオン量の多寡を推定できることを確認できた。

図 4-13 に今回調査した部材の全塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係を示す。測定電位を計測した深さに対応する全塩化物イオン量は、図 4-8~12 において全塩化物イオン量のプロットを線形内挿することで算定した。また、同図には、図 2-8 に示した配合が異なる供試体の結果も示す。その結果、配合が異なる供試体の結果と概ね合致することも確認できた。

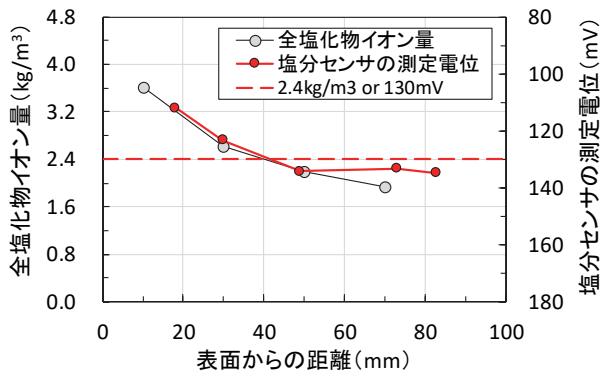


図 4-8 測定箇所 a の測定電位と全塩化物イオン量

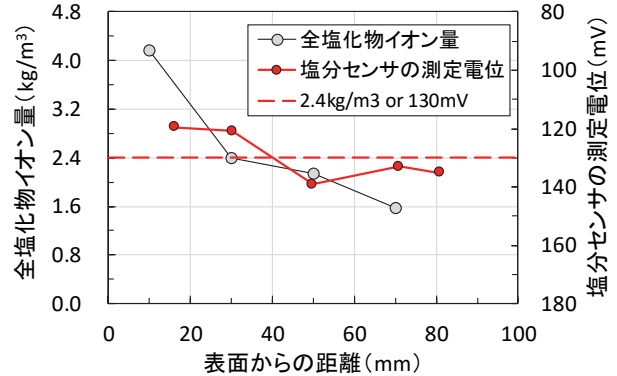


図 4-9 測定箇所 b の測定電位と全塩化物イオン量

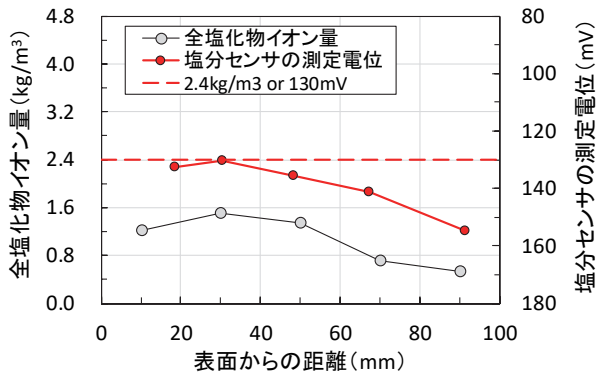


図 4-10 測定箇所 c の測定電位と全塩化物イオン量

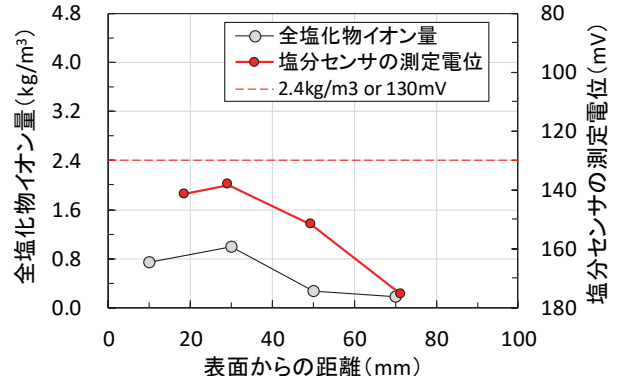


図 4-11 測定箇所 d の測定電位と全塩化物イオン量

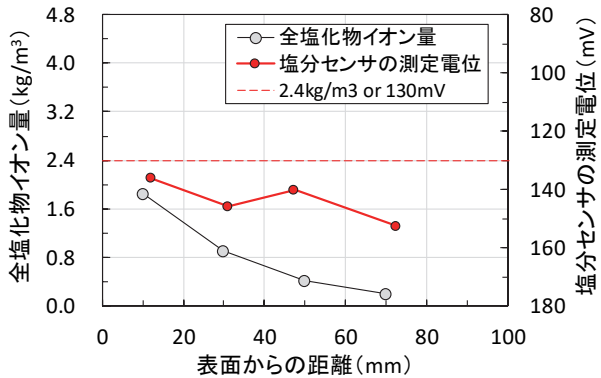


図 4-12 測定箇所 e の測定電位と全塩化物イオン量

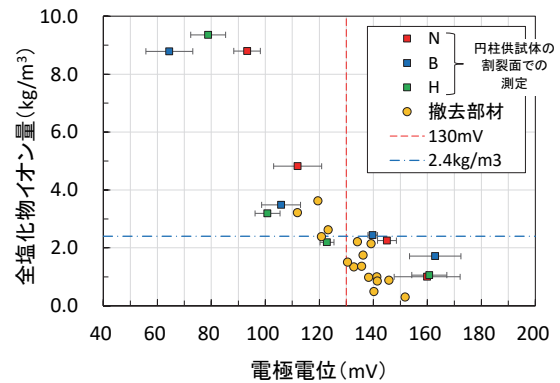


図 4-13 全塩化物イオン量と測定電位の関係

4.3 かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例その2

4.3.1 測定対象

測定対象は、単純PCプレテンション方式T桁橋（17径間、各径間の主桁11本）であり、約47年間塩害環境に供用されていたものである。供用から20年後からは、電気防食工法が試行的に適用された。飛来塩分による塩害での主桁の損傷に伴い、2017年に撤去され、部材の一部が切断された状態で、雨掛かりのある屋外に保管されていた。

4.3.2 実験方法

測定対象とした部材の設置状況を図4-14に示す。塩分センサによる測定は、1径間の主桁7本の下フランジにおいて合計13箇所（No.1～13）で実施した。測定の計画深さは、10、30、50、70、90mmの5段階とした。その後、塩分センサによる測定を行った箇所の近傍で（図4-15）、直径18mmのドリルを用いて10mm間隔で試料を採取し（図4-16）、JIS A 1154に準じた全塩化物イオン量を測定した。さらに、塩分センサによる測定箇所から、300～2000mm程度離れた位置で（平均は700mm程度）、φ100×150mmのコアを採取し、塩素についてEPMA分析を行った。



図4-14 測定対象とした部材の設置状況（上下反転して設置）

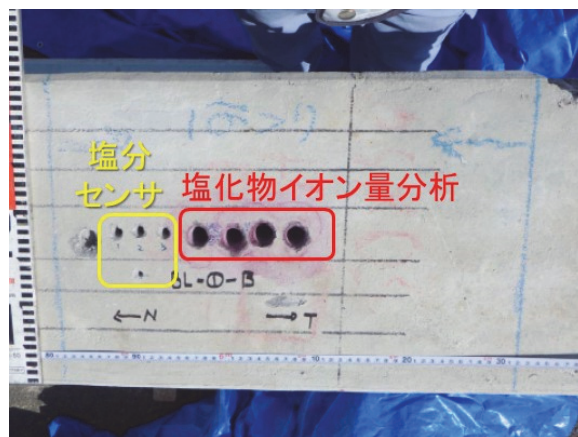


図4-15 塩分センサによる調査の位置の概要

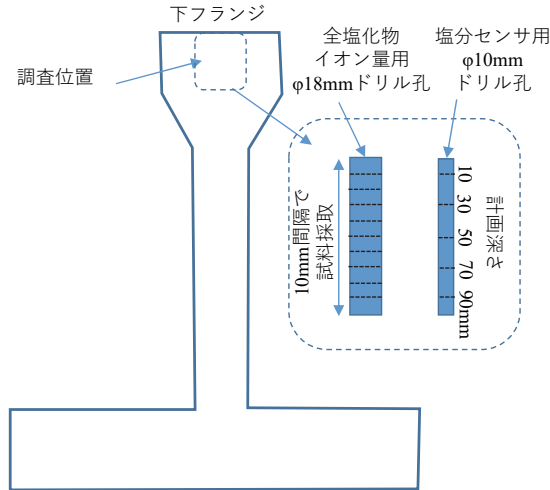


図 4-16 削孔状況の概要

全塩化物イオン量の結果との比較のために、図 4-17 に示すように塩化物イオン侵入深さを算定した。塩化物イオン含有量試験による塩化物イオン侵入深さは、全塩化物イオン量が 2.4kg/m^3 となる深さを線形内挿で算定した。塩分センサ測定による塩化物イオン侵入深さは、塩分センサの測定電位が 130mV となる深さを線形内挿で算定した。なお、調査したすべての深さで 130mV を下回った場合は、最後に削孔した深さを塩化物イオン侵入深さとした。

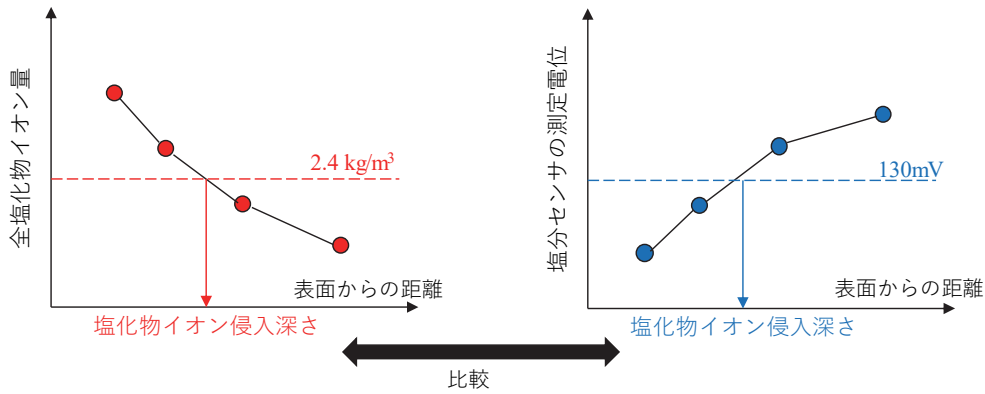


図 4-17 塩化物イオン侵入深さの算定方法

4.3.3 実験結果と考察

塩化物イオン侵入深さを図 4-18 に示す。図中の赤線は両方法が一致していることを示し、二点破線は塩分センサによる測定の方が+20mm、一点破線は塩分センサによる測定の方が-20mmであることを示す。13 箇所の測定のうち、11 箇所では、±20mm の範囲または+20~30mm 程度となる安全側の測定結果となった。一方、No.6 と No.11 では、-20mm を下回り、危険側の結果となった。

塩分センサの調査結果および全塩化物イオン量の測定結果を図 4-19~31 に示す。塩分センサの測定電位の軸は、全塩化物イオン量の分布と対応するように反転させている。全塩化物イオン量の軸は、塩分センサによる測定で着目している範囲が読み取れるように 7.2kg/m³ までの範囲を表示している。

図 4-24 の No.6 と図 4-29 の No.11 以外は、塩分センサによる測定結果は、全塩化物イオン量の測定結果と概ね対応した。No.6 と No.11 については、他の箇所と比較して深部まで全塩化物イオン量が高い傾向にある。

塩分センサによる調査と比較的近い位置（500mm 程度）でコアを採取した EPMA 試験結果の例として、No.4 と No.6 の Cl の結果を図 5-32 と図 5-33 にそれぞれ示す。図 5-32 の No.4 では、表面付近の濃度が高く、深部ほど低い分布となっている。これは、図 4-22 の結果ともよく一致している。一方、図 4-33 の No.6 では、深部も比較的濃度が高く、かつ、局所的に濃度が低い部分がある。塩分センサは、センサ接触部で反応するため、局所的に塩化物イオンが少ない部分を測定して危険側の結果となった可能性が考えられる。このため、塩分センサによる測定を複数の箇所で行い、塩化物イオンの侵入状況の傾向を確認することが望ましいと考えられる。なお、No.11 の EPMA 試験結果については、コアの採取位置が塩分センサによる測定箇所と比較的離れているためか（1100mm 程度）、図 4-33 のような傾向は見られなかった。

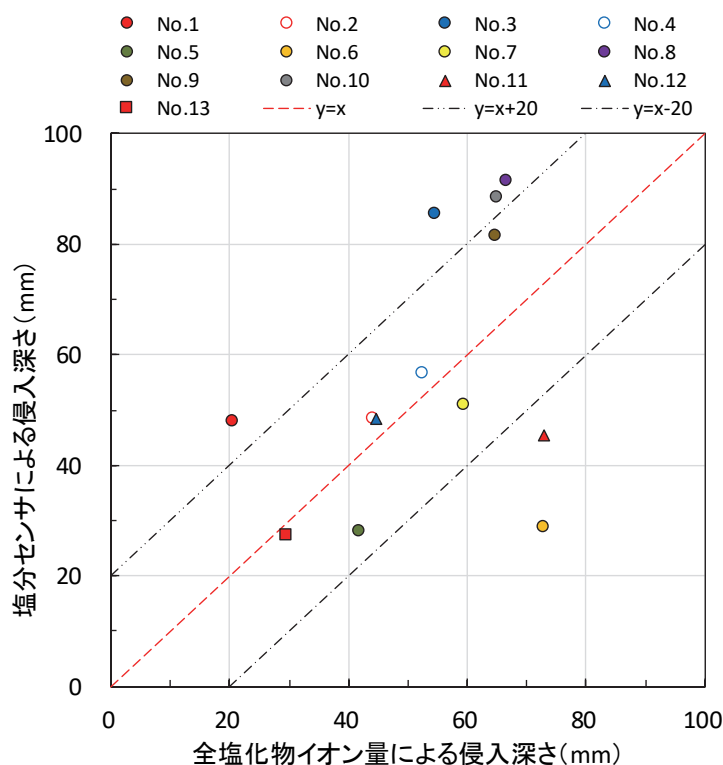


図 4-18 塩化物イオン侵入深さ

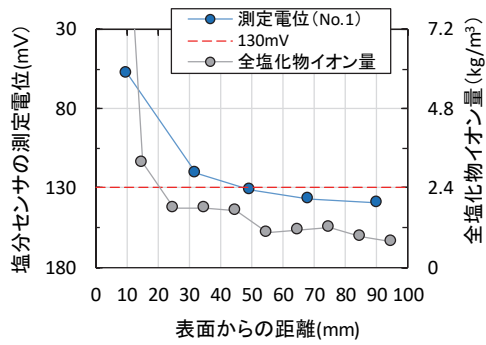


図 4-19 No.1 での調査結果

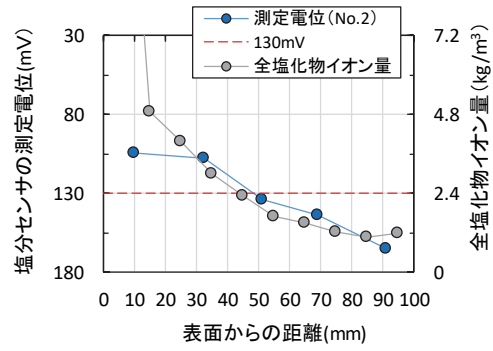


図 4-20 No.2 での調査結果

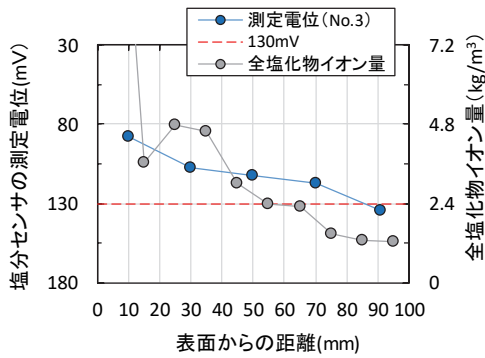


図 4-21 No.3 での調査結果

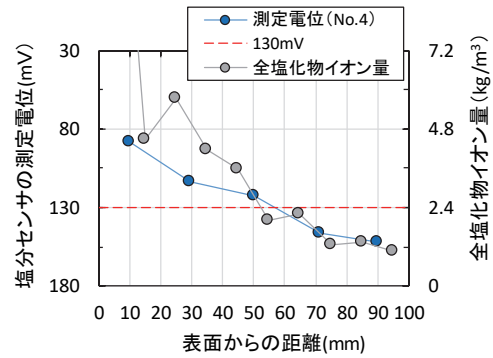


図 4-22 No.4 での調査結果

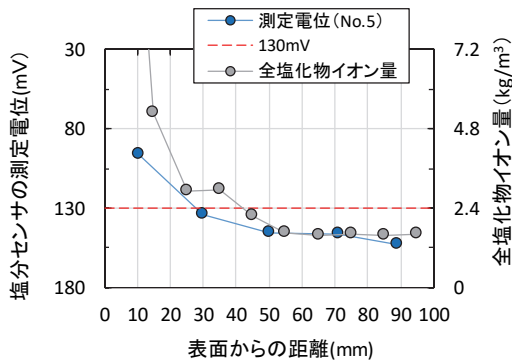


図 4-23 No.5 での調査結果

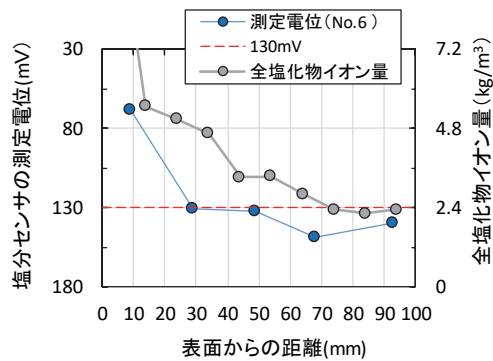


図 4-24 No.6 での調査結果

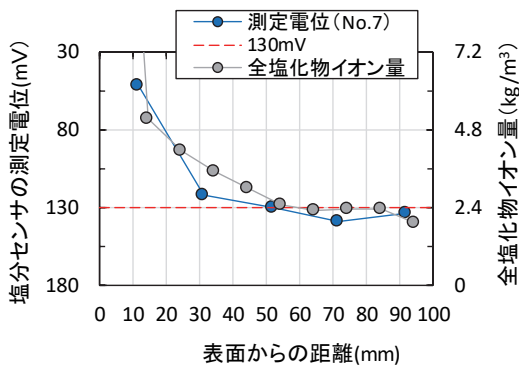


図 4-25 No.7 での調査結果

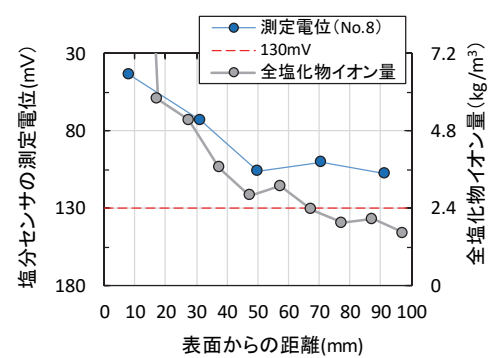


図 4-26 No.8 での調査結果

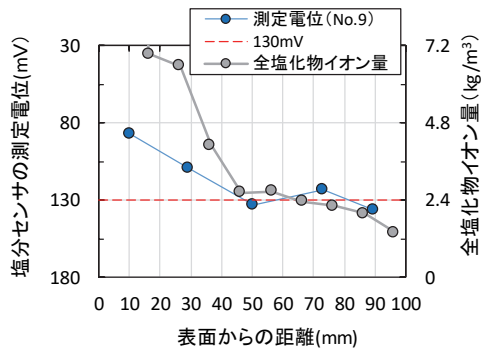


図 4-27 No.9 での調査結果

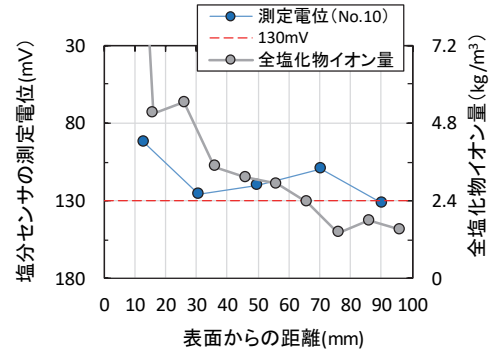


図 4-28 No.10 での調査結果

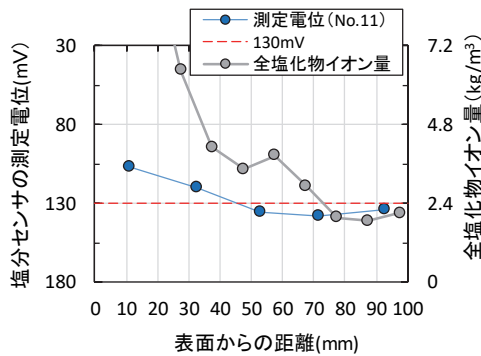


図 4-29 No.11 での調査結果

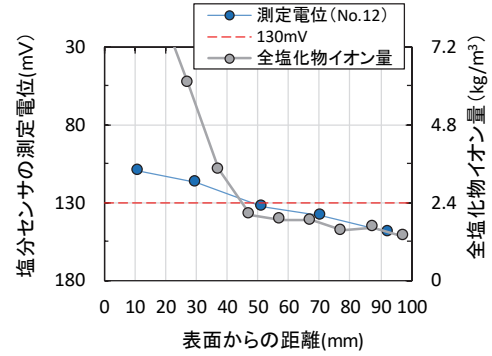


図 4-30 No.12 での調査結果

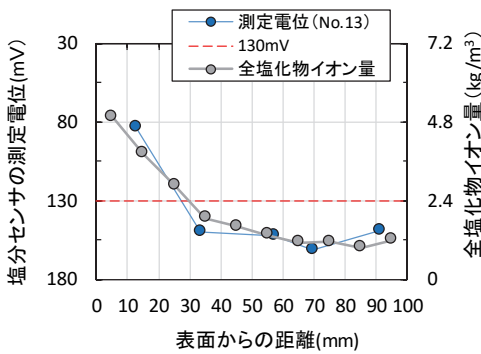


図 4-31 No.13 での調査結果

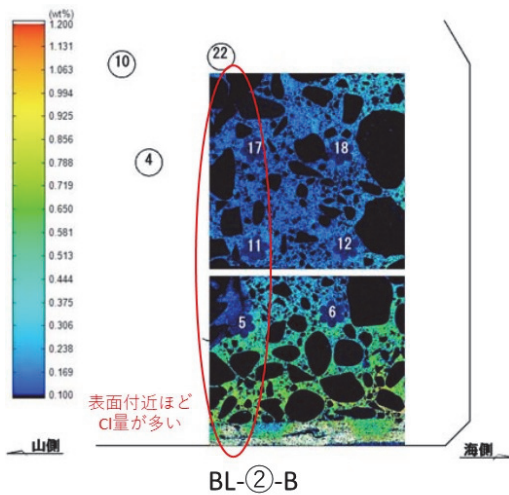


図 4-32 No.4 の EPMA 試験結果 (Cl)

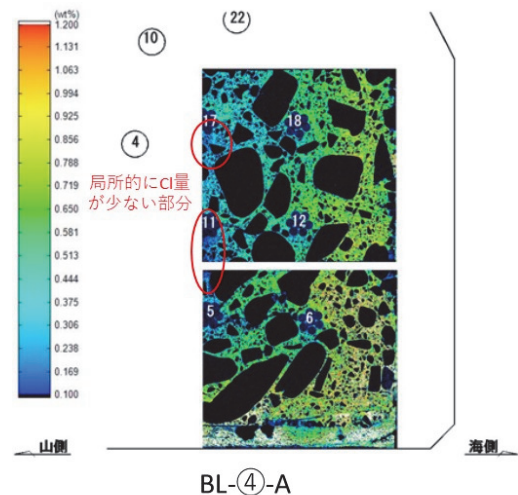


図 4-33 No.6 の EPMA 試験結果 (Cl)

5 まとめ

本研究では、塩分センサを用いて、はつり面の残存塩化物イオン量推定、および、かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定の方法を提案した。以下に、本研究のまとめを示す。

(1) 塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

可溶性塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係を検討した結果、配合によらず、可溶性塩化物イオン量が多い供試体ほど、測定電位が小さくなる傾向が確認され、ネルンスト式による算定値と傾向は概ね一致した。このことから、塩分センサでは、可溶性塩化物イオン量に応じた測定電位が得られると考えられる。

塩分センサの測定電位は可溶性塩化物イオン量と関係があるが、実務では全塩化物イオン量を指標として鋼材腐食に対する評価を行うことが一般的であるため、全塩化物イオン量との比較も行った。塩分センサの測定電位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。

(2) 塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子

塩分センサの測定電位に影響を及ぼす因子として、測定時間、含水状態、測定温度、中性化、粗骨材の影響を検討した結果、特に含水状態、粗骨材の影響を考慮して、測定を行うことが重要であることが分かった。

塩分センサは、可溶性の塩化物イオンと関係があるため、塩分センサの接触面が乾燥していると、見掛け上濃度が高くなり、塩化物イオン量を多く推定する。一方、接触させる面に浮き水がある場合は、見掛け上濃度が低下し、塩分量を少なく推定することが確認された。粗骨材に塩分センサを接触させた場合には、通常の測定よりも塩分センサの測定電位が大きくなり、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性があることが確認された。

(3) 塩分センサを活用したコンクリート構造物調査方法の提案

(1)、(2)を踏まえ、塩分センサを活用し塩害を受けた構造物の補修の確実性を向上させる方法として、はつり面の残存塩化物イオン量を推定する方法を提案した(図3-1①)。また、塩分センサを活用して塩害による腐食が始まる前に塩分の侵入状況を簡易に確認する方法として、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定できる方法を提案した(図3-1②)。

(4) はつり面の残存塩化物イオン量推定の事例

塩害環境下で供用されていた部材を対象に、1件の調査を行った。はつり面における塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の分布を比較すると、測定電位が130mVを下回った位置では、全塩化物イオン量は2kg/m³程度以上となった。閾値を130mVとすることで、多量に塩化物イオンを含む部位を検出できた。

塩分センサの測定電位が130mVを下回った測定箇所を追加はつりを行った結果、はつり後の測定電位は130mVを上回り、追加はつりの効果を塩分センサによる測定で確認できた。

(5) かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例

塩害環境下で供用されていた部材を対象に、2件の調査を行った。塩化物イオンが比較的多量に含まれている箇所と、塩化物イオンが比較的少量に含まれていなかった箇所について調査した結果、塩分センサによる評価結果と全塩化物イオン量による評価結果は同様の傾向であることを確認した。

塩化物イオンがさらに多量に含まれている部材について調査した結果、全塩化物イオン量による測定と同等か安全側の結果が得られた。一方、塩化物イオンが深部まで不均一に侵入したと考えられた箇所では、危険側の結果が得られた。このため、複数の箇所を対象に調査し、傾向を確認することが望ましいと考えられた。

謝辞

本研究の 4.3 節に示した調査は、国土交通省北陸地方整備局橋梁塩害研究会における調査研究活動の一環として実施されたものである。ご協力いただいた関係各位、貴重な意見をいただいた委員各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Vedarajan Raman and Toshiyasu Nishimura: Monitoring of Environmental Factors and Corrosion Analysis of Reinforcing Steel in Mortar, Materials Transactions, Vol.50, No.4, pp.799-805, 2009
- 2) 玉虫伶太、高橋勝緒：エッセンシャル電気化学、東京化学同人、pp.73-110、2000
- 3) 日本化学会：化学便覧 改訂 3 版 基礎編II、丸善出版、pp.II_464-473、1984
- 4) 電気化学会：電気化学便覧 第 6 版、丸善、pp.103-122、2013
- 5) 日本非破壊検査協会：硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法、NDIS 3433、pp.24-26、2017
- 6) 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

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.517 March 2020

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754