

塩害を受けたコンクリート構造物の
脱塩工法に関する
共同研究報告書

平成20年3月

独立行政法人土木研究所
電気化学工業株式会社
株式会社富士ピー・エス
東 北 大 学
長岡技術科学大学
徳 島 大 学
九 州 工 業 大 学

Copyright © (2008) 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、独立行政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、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政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。

塩害を受けたコンクリート構造物の 脱塩工法に関する 共同研究報告書

(独) 土木研究所技術推進本部

構造物マネジメント技術チーム

主席研究員 渡辺 博志

主任研究員 古賀 裕久

交流研究員 北野 勇一

交流研究員 竹内 祐樹

電気化学工業 (株)

芦田 公伸

山本 賢司

松久保博敬

(株) 富士ピー・エス

徳光 卓

吉田 光秀

山口 光俊

東北大学

久田 真

皆川 浩

長岡技術科学大学

丸山 久一

田中 泰司

松崎 裕亮

徳島大学

上田 隆雄

九州工業大学

日比野 誠

要旨：

飛来塩分等の影響により塩害が生じるおそれのある構造物の維持管理では、定期的にコンクリート中の塩分量を測定し、鉄筋の腐食が生じ部材の耐荷力が低下する前に補修を行うことが効果的と考えられる。しかし、現状では、このための調査手法や補修工法には、技術的に明確でない部分も残っている。そこで、本共同研究では、塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の効率的な補修方法として期待される電気化学的脱塩（脱塩工法）について、事前調査の方法や補修時の通電条件などを合理的に決定する手法を検討した。その結果を、電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）としてとりまとめた。

キーワード：コンクリート構造物，塩害，補修，電気化学的脱塩，塩化物イオン

目次

電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）	・・・	1
電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）	・・・	3
付属資料A 通電条件の検討例	・・・	30
付属資料B 電気化学的脱塩工法の適用事例	・・・	39
参考資料	・・・	57

電 気 化 学 的 脱 塩 工 法 に よ る
補 修 ガ イ ド ラ イ ン (案)

はじめに

電気化学的脱塩（脱塩工法）は、コンクリート中に電流を流すことによって、その内部の塩化物イオンを移動させ、コンクリート外部に除去する補修方法である。脱塩は、塩化物イオンの影響を受けて鋼材が腐食するおそれのあるコンクリート構造物を補修する手法として、有効な補修方法の一つと考えられる。電気化学的脱塩に関しては、近年、土木学会から脱塩工法設計施工マニュアル（電気化学的防食工法 設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー 107）が示されるなど、注目が集まっている。

一方、現状では、電気化学的脱塩を適用した際の通電による塩化物イオンの除去量を精度よく予測することは困難である。このことから、電気化学的脱塩に関しては、構造物の補修として電気化学的脱塩が適しているかどうかを事前に判定する方法が明確でないこと、通電条件の合理的な設定方法が確立されていないこと、事前の予想通り脱塩できなかった場合の対処方法が明確でないことなどの課題があった。

そこで、独立行政法人土木研究所と電気化学工業株式会社、株式会社富士ピー・エス、東北大学、長岡技術科学大学、徳島大学、九州工業大学の7者は共同研究を行い、補修の計画、設計、施工について、現状で妥当と考えられる手法や、注意点を示した「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）」を作成した。このガイドラインを、塩害の影響を受ける構造物の管理者やコンサルタント、補修工事の施工技術者などの方が補修工法として電気化学的脱塩を検討する際に、少しでも参考にしていただければ幸いです。

目次

1. 総則	6～7
1.1 適用の範囲	6
1.2 脱塩工法による補修の検討手順	6
2. 事前調査	8～12
2.1 基本的考え方	8
2.2 硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布の調査	8
2.3 鋼材位置の調査	9
2.4 鋼材の腐食状況の調査	10
2.5 かぶりコンクリートの状態の調査	10
2.6 アルカリシリカ反応に関する調査	11
3. 概略検討	13～17
3.1 基本的考え方	13
3.2 脱塩工法を適用する範囲の設定	13
3.3 通電の可否に関する検討	14
3.4 通電する材料・構造への影響	16
4. 補修設計	18～22
4.1 基本的考え方	18
4.2 目標とする脱塩量の設定	19
4.3 電流密度の設定	20
4.4 通電期間の設定	21
4.5 補修工法を併用する場合の検討	22
5. 施工計画	23～26
5.1 基本的考え方	23
5.2 通電方法の計画	23
5.3 施工中の安全確保策の計画	24
5.4 施工中の品質管理手法の計画	25

5.5	通電後の補修後の補修効果確認手法の計画	25
5.6	表面被覆工法を併用する場合の計画	26
6.	施工	27～28
6.1	基本的考え方	27
6.2	施工中の品質管理	27
6.3	補修効果の確認	28
7.	記録	29
7.1	基本的考え方	29
付属資料 A	通電条件の検討例	30～38
付属資料 B	電気化学的脱塩工法の適用事例	39～55
参考文献		56

1. 総則

1.1 適用の範囲

この「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）」は、塩化物イオンの影響により鋼材が腐食した、または腐食するおそれのあるコンクリート構造物に対し、電気化学的脱塩工法による補修を行う場合に適用する。

【解説】

この「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）」（以下、ガイドライン（案）は、塩化物イオンによる鋼材の腐食を抑制するための補修として、電気化学的脱塩工法（以下、脱塩工法）を用いる際の考え方を示したものである。

このガイドライン（案）での脱塩工法とは、コンクリート構造物の表面に電解質溶液と陽極材からなる陽極電極を仮設し、コンクリート中に埋設されている鋼材との間に直流電流を一定期間のみ流し、電気泳動の原理でコンクリート中の塩化物イオンをコンクリート外に抽出する方法とする。

1.2 脱塩工法による補修の検討手順

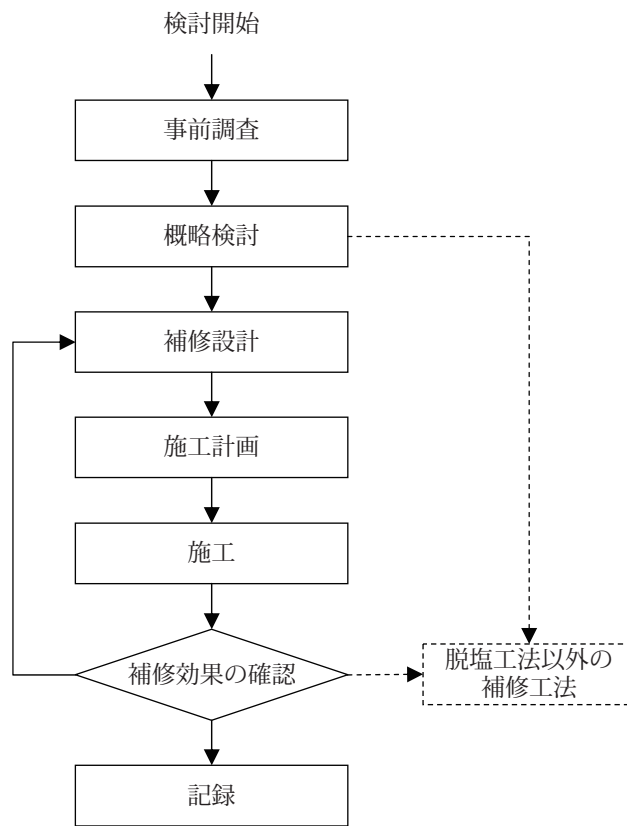
脱塩工法による補修を行う場合は、事前に必要な調査を行った上で補修目標や通電条件を適切に設定し、これらを満足するための施工方法を適切に計画して、その施工計画に沿って施工しなければならない。また、施工後は、補修後の維持管理に必要な記録を作成しなければならない。

【解説】

脱塩工法を検討する際の検討項目を順に示すと解説図－1.2.1のように図示できる。

補修として脱塩工法を適用することが適切かどうかは、通常は、概略検討の段階で判断する。ただし、補修設計や施工計画の段階で困難が発見された場合には、概略検討までもどって、脱塩工法以外の補修方法を検討することもありうる。

また、本補修指針（案）等に従って補修設計・施工計画を行った場合でも、施工後は、補修効果を確認することが必要である。その結果、補修効果が十分でなかった場合には、補修設計にもどって再検討した上で、再び脱塩工法を適用するか、脱塩工法以外の補修方法を適用するものとする。



解説図－ 1.2.1 脱塩工法のフロー

2. 事前調査

2.1 基本的考え方

補修として脱塩工法を適用することを検討する場合には、構造物の状態を適切に評価するため、以下の項目について事前に調査しなければならない。

- ① 硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布
- ② 鋼材位置
- ③ 鋼材の腐食状況
- ④ かぶりコンクリートの状態
- ⑤ 構造物の位置・寸法等
- ⑥ コンクリートのアルカリシリカ反応性

【解説】

概略検討，補修設計，施工計画の検討を行う際には，補修を行う構造物の状態について正確な情報が必要である。そこで，これらに先立ち，調査を行って構造物の状態を把握しておかなければならない。ここに取り上げた①硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布，②鋼材の位置，③鋼材の腐食状況，④かぶりコンクリートの状態，⑤構造物の位置・寸法等，⑥コンクリートのアルカリシリカ反応性，についての情報は，脱塩工法を検討する際には必須のものであるので，必ず調査しなければならない。

ただし，これらの項目について，過去の点検結果等から十分な情報が得られる場合には，あらためて試験等を行う必要はない。新たに試験等を行って確認する場合には，2.2～2.6に従って行うものとする。

2.2 硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布の調査

- (1) 調査数量は，補修を予定する範囲の広さや既往の点検結果などを参考に適切に定めるものとする。
- (2) 構造物表面からかぶりよりも深い位置までの塩化物イオンの分布を調査するものとする。
- (3) コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験は，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）に従って行い，全塩化物イオンを測定する。

【解説】

(1) について

塩化物イオンの影響による腐食の程度は，構造物の部位によって大きく異なることが知られている。また，構造物の外部から侵入する塩化物イオンの量は，一つの構造物や一つの部材の中でも，部位によって大きく異なる場合がある。したがって，事前に，コンクリート中の塩化物イオン量が多い／少ない位置を調査しておき，補修を行う範囲を適切に計画するとともに，補修を行う範囲に含まれる塩化物イオン量を把握してお

く必要がある。

塩化物イオンの分布を調査するにあたっては、過去の点検結果などを参考に、塩化物イオン量が多いと考えられる部位を調査位置とするのがよい。また、塩化物イオン量が少ないと考えられる部位についても、一部これを含むように計画するのがよい。なお、塩化物イオンの量が多い部位を推測する方法としては、鋼材の自然電位分布の測定が有効なので、これを活用するとよい。

(2) について

脱塩工法を適用することの適否を判断するためには、通電前のコンクリート中の塩化物イオンの分布状況を正確に把握しておくことが求められる。特に、かぶりよりも深い位置においては、通電によってコンクリート中に電位差を生じさせて脱塩することが難しいと予想される。したがって、事前調査では、かぶりよりも深い位置からも試料を採取し、塩化物イオンの分布状況を調査する必要がある。

なお、特に海からの飛来塩分などとして塩化物イオンが侵入している場合、塩化物イオン量は、構造物表面からの距離に応じて大きく異なる。構造物表面からの分布を適切に評価するためには、表面からの距離に応じて 10～20mm ごとに試料を分割し、塩化物イオンの試験を行わなければならない。

(3) について

一般に、塩化物イオンの試験を行う際には、コンクリートから硝酸によって抽出された塩化物イオンの量（全塩化物イオン量）を測定するのが一般的である。また、腐食に関する既往の研究結果の多くは、全塩化物イオン量の測定結果を用いて検討している。したがって、塩化物イオン量の試験を行う際には、全塩化物イオン量を対象に行わなければならないものとした。

<参考1：温水抽出塩化物イオンを用いた検討について>

脱塩工法に関する既往の研究では、50℃の温水で抽出した塩化物イオンの量（温水抽出塩化物イオン量）を測定し、この値を指標として整理している事例も多い。これは、コンクリート中に含まれる塩化物イオンには、セメント硬化体に固定化されたものや、細孔溶液中に溶解しているものなどさまざまな状態のものが存在するが、固定化された塩化物イオンは通電によって移動させることが容易ではないと考えられること、固定化された塩化物イオンは鋼材の腐食の原因とはならないので、これを除いた塩化物イオン量の大小で腐食の可能性を評価することが可能とも考えられること、などの理由による。

しかし、脱塩後1年程度が経過すると、全塩化物イオンに対する温水抽出塩化物イオンの割合が脱塩を実施していない場合とほとんど変わらなくなる実験結果もあり、温水抽出塩化物イオン量で脱塩工法の補修結果を評価することの妥当性については、現時点で十分な確証を得られていない。

なお、温水抽出塩化物イオン量を測定する場合は、JIS A 1154 付属書2に従って行うとよい。

2.3 鋼材位置の調査

- (1) 調査範囲は、補修を予定する範囲全体の配筋状況が把握できるよう適切に定めるものとする。
- (2) 鋼材位置は、平面上の位置およびかぶりの双方について調査する。

(3) 鋼材位置の調査は、電磁誘導法または電磁波レーダ法などの非破壊試験により行う。

【解説】

(3) について

鋼材が密に配置されている部材では、非破壊試験による調査に高い精度が期待できない場合がある。この場合は、鋼材のはつり調査を一部箇所で行い、非破壊試験の精度を高めるとよい。

なお、事前調査では、2.4「鋼材の腐食状況の調査」において、鋼材の一部をはつり出すので、この位置で非破壊試験の精度を検証しておくといよい。

2.4 鋼材の腐食状況の調査

(1) 調査数量は、補修を予定する範囲に応じて適切に定めるものとする。

(2) 鋼材の腐食状況の調査は、はつりだした鋼材の腐食の有無や程度を目視により観察することで調査する。

【解説】

鋼材の腐食の程度は、構造物の部位によって大きく異なることが知られている。したがって、補修を行う範囲に応じて適切に調査数量を計画する必要があるが、2.2「硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布の調査」を参考に鋼材腐食の可能性が高いと推定される位置から、最低一箇所は調査するのがよい。

また、鋼材腐食の可能性が高い部位を広範囲に調査する手法としては、鋼材の自然電位分布の測定が有効なので、これを活用するとよい。

2.5 かぶりコンクリートの状態の調査

(1) 調査範囲は、補修を予定する範囲の全てとする。

(2) かぶりコンクリートの状態の調査では、コンクリートのひび割れや浮き、剥落、既存の補修箇所などの有無を外観目視、または打音により調査する。

【解説】

コンクリートにひび割れや浮き、剥落などの変状があると、通電した際に、その部位に電流が集中的に流れ、他の部位に適切に通電することが難しくなるおそれがある。また、過去に断面修復やひび割れ注入によって補修されている部位では、補修材の電気抵抗が当初のコンクリート部よりも著しく高く、通電した際にその近傍に適切に通電することが難しくあるおそれがある。そこで、事前調査では、変状のある箇所または、補修された箇所について調査し十分把握しておかなければならない。

ひび割れや浮き等の調査は、当該構造物に対応した技術規準類に従って行うといよい。また、補修箇所につ

いては、その材料を明らかにしなければならない。補修箇所を残したまま通電を行う場合は、補修材料の電氣的性質を明らかにしておくのがよい。なお、補修材料の電気抵抗を測定する方法としては、JSCE - K 562 - 2008（四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法（案））があるので、これを参考にするとよい。

2.6 アルカリシリカ反応に関する調査

- (1) アルカリシリカ反応（以下、ASR）に関する調査は、補修を予定する範囲の代表的な部位で行う。
- (2) 構造物に ASR によると見られる変状がある場合には、適切な方法でその原因を明らかにしなければならない。
- (3) (2) に該当しない場合、または (2) に該当したが変状が ASR によるものではなかった場合には、骨材がアルカリシリカ反応性を有するかどうかを適切な方法で評価する。

【解説】

(1) について

脱塩工法による補修のため通電を行うと、塩化物イオンがコンクリート表面の方向に移動するとともに、ナトリウムイオンやカリウムイオンなどの陽イオンが、鋼材の方向に（塩化物イオンとは逆の方向に）移動することが知られている。このため、鋼材の周囲では、通電前と比較してアルカリ金属イオンの濃度が大きくなり、ASR が促進されるおそれがある。

アルカリシリカ反応に関する調査は、同一のコンクリートが用いられている部位において、原則として代表的な一箇所を調査すればよい。ただし、同一のコンクリートが用いられている場合でも、部位によって様相の異なる変状が見られる場合には、複数箇所について調査することを検討するのがよい。

(2) および (3) について

事前調査では、通電により ASR が促進される危険性について評価するため、補修を行う構造物を、骨材にアルカリシリカ反応性が無いと考えられる場合、現状では ASR による変状が認められないが骨材はアルカリシリカ反応性を有する場合、ASR による変状が認められる場合の三つに分類する。

構造物に ASR によると見られる変状が生じていない場合でも、通電を行うことで ASR による劣化が新たに生じるおそれがあるので、骨材のアルカリシリカ反応性について評価しなければならない。この通電の影響を模擬する手法については、現状では確立されていないが、ASTM C 1260 が比較的よく用いられているので、これを実施するのがよい。

ASTM C 1260 は、80℃の 1N・NaOH 溶液に試料を浸漬する方法で、鋼材の周囲にアルカリ金属イオンが集積し、細孔溶液中の pH が大きくなる点で、脱塩工法適用時の状況と類似点がある。また、比較的早期に試験結果が得られるという利点もある。ただし、我が国の骨材を用いた研究では、チャートなど一部の岩種において、NaOH 浸漬時の膨張量と実構造物における ASR 発生状況が一致しないとの報告もある。したがって、岩石学的な検討を行うなどした結果、NaOH 浸漬法以外の試験方法で評価することが妥当と考えられる場合には、骨材のアルカリシリカ反応性について別の試験方法で評価してもよい。

<参考2：ASRに配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン（案）について>

電気化学的補修を行った際のASRへの影響を考慮する手法については、(社)日本材料学会から、「ASRに配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドライン（案）」(以下、材料学会ガイドライン（案）)が示されているので、参考にするとよい。なお、材料学会ガイドライン（案）では、コンクリートの残存膨張率を測定する方法として、JCI-DD2法または、デンマーク法(50℃の飽和NaCl水溶液に浸漬する方法)が示されているが、ここでは、ASTM C 1260を用いる方が、ASRを生じる可能性のある骨材をより広く検出することができるものと考えた。

また、材料学会ガイドライン（案）では、模擬通電を実施したり、鉄筋周囲に集積するアルカリ量を推定したりして通電条件を定める手法が提示されている。これらは、材料学会での検討に基づいた新しい提案であり、今後の発展が期待されるが、現状で確立された技術であるとまではいえないことから、構造物に適用する場合には注意が必要である。

<参考3：ASRかどうかの評価について>

構造物に見られる変状がASRによるものかどうかは、目視によってひび割れ等の特徴を把握し、それがASRによるものかどうかを総合的に勘案することによって評価してよい。ASRによる変状の特徴としては、次の①～③の特徴がある。

- ① コンクリート表面の網目状のひび割れ
- ② 主鉄筋やP C鋼材の方向に沿ったひび割れ
- ③ 微細なひび割れ等における白色のゲル状物質の析出

ただし、ASRによるひび割れでも、必ずしも①～③の特徴を全て備えているわけではない。したがって、①～③のいずれか一点でも、明確にASRと見られる性状を示していれば、ASRによるものと判定してよい。また、④～⑥についても参考にできる。

- ④ 過去の点検記録(竣工当初から発生しているひび割れについては、ASR以外の原因があると考えることが妥当である。ただし、ひび割れの幅が大きくなるなど、ASRの影響によって変状の程度が大きくなることも考えられるので注意を要する。)
- ⑤ 周囲の構造物に対する定期点検結果(地理的、時間的に近いときに竣工した構造物にASRによる変状が著しい場合には、判定する構造物についてもASRの影響を受けている可能性が高いと考えることができる)
- ⑥ 水の供給が多い場所での著しい劣化(外部から水の供給がある部位は、供給のない部位と比較するとASRによる膨張が著しくなりやすい)

3. 概略検討

3.1 基本的考え方

- (1) 補修工法として脱塩工法を適用することを検討する際には、2. 「事前調査」の結果に基づき、脱塩工法の適用可能性について検討する。
- (2) 脱塩工法の適用可能性について検討する際には、まず、脱塩工法を適用する範囲を明確にした上で、必要な範囲に通電を行うことの可否、通電による材料・構造への影響について検討し、補修として脱塩工法を適用することが適当かどうか総合的に判断するものとする。

【解説】

(1) について

脱塩工法は塩化物イオンの影響により鋼材が腐食した構造物の補修工法として有用であるが、必ずしも全ての構造物に対して補修効果が期待できるものではない。そこで、詳細な検討に入る前に、補修する構造物・部材等の条件について概略の検討を行い、脱塩工法による補修を適用することが適当か検討を行うものとする。

この検討を行う際には、橋梁定期点検の結果など既存のデータを活用することが望ましいが、十分な情報がない場合には必要に応じて調査を行う。調査の具体的な方法は、2. 「事前調査」による。

(2) について

概略検討の段階で脱塩工法が適用できると評価するためには、塩化物イオンの除去が必要な範囲に適切に通電を行うことができること、通電による材料・構造への影響がないか、あっても許容できる範囲であることを確認しなければならない。

なお、一般に、コンクリートに含まれる塩化物イオン量が多いほど鋼材の腐食速度が大きくなると考えられるので、一部の部位で脱塩が困難と考えられる場合でも、脱塩工法を適用することで鋼材の腐食速度を低減させ、構造物の延命をはかることが考えられる。同様に、通電による悪影響が生じる場合でも、他の補修工法を適用する場合や補修を行わない場合との比較で、脱塩工法を適用することが有利になる場合がある。したがって、これらの場合でも、構造物の維持管理の計画と合致していれば、適切な対策をとった上で、脱塩工法の適用が適当と評価してよい。

3.2 脱塩工法を適用する範囲の設定

脱塩工法を適用する範囲を設定する際には、硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布および鋼材の位置等を考慮し、適切に行うものとする。

【解説】

塩化物イオンの影響で腐食が生じたコンクリート部材を補修する際に、その一部を補修し、一部を補修しないままとすると、未補修の部分において腐食速度が上昇し、結果として構造物としての性能の低下が早まるおそれがあることが知られている。したがって、脱塩工法による補修範囲は、塩化物イオンの影響により鋼材が腐食した、または鋼材が腐食するおそれのある部位の全てを含むように計画することが望ましい。このためには、各部における塩化物イオンの量、および鋼材の位置を把握しておく必要がある。

構造物の形状や周辺環境等によっては、脱塩工法を適用することが困難な部位もあると考えられる。このような場合は、脱塩工法以外の補修方法を併用するなどして、構造物全体の補修が適切に行われるように計画しなければならない。

また、脱塩工法を適用する範囲は、本節以降に述べる概略検討や補修設計、施工計画の検討結果に応じて、適切に変更しなければならない。

3.3 通電の可否に関する検討

塩化物イオンの除去が必要な範囲に通電を行うことの可否を検討する際には、硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布、鋼材の位置、鋼材の腐食、かぶりコンクリートの状態、構造物の位置・形状等について考慮した上で、適切に行うものとする。

【解説】

必要な範囲に対し、通電を行うことが困難な場合、注意を要する場合として、以下のものが考えられる。これらに該当する場合は、脱塩工法による補修が適切かどうかを慎重に検討しなければならない。

- ① 鉄筋のかぶりよりも深い位置から塩分を除去することが必要な場合
- ② 鋼材のかぶりが小さい部位がある場合
- ③ コンクリートにひび割れ等の変状がある場合
- ④ コンクリートに補修箇所が有る場合
- ⑤ 鋼材の腐食が著しい場合
- ⑥ 構造物の表面に電極を設置するのが困難な場合
- ⑦ 気温が特に低い場合

①について

脱塩工法は構造物中の鋼材と構造物表面の電極との間に電流を流すことによって、構造物の外部に塩分を取り除く方法である。したがって、周囲に鋼材が配置されていない部位や、鋼材があっても電流が流れにくい部位からは塩分を取り除くことができない。

構造物の表面に最も近い鋼材（例えば、スターラップ、帯鉄筋など）の近傍にある塩分は、特別な検討を行わなくとも、通電により脱塩することが可能なものと評価してよい。しかし、この鉄筋よりも深い位置では、通電中に十分な電位差が生じず、脱塩の効果が得られないおそれがある。そこで、このような位置からも塩

分を除去することが必要な場合は、通電中の電位分布を推定し、脱塩可能かどうか検討しておく必要がある。

②について

構造物中の鋼材と構造物表面の電極との間に通電すると、通常、電流はある程度の広がりをもってコンクリート中を流れる。しかし、かぶりが小さい場合は、電流の流れる範囲が限定され、塩化物イオン除去の効果がその狭い範囲に限られるおそれがある。したがって、かぶりが極端に小さい部位があることが明らかな場合には、何らかの対策を施すことも検討する必要がある。

③について

かぶりコンクリート部にひび割れやはく離、剥落などの変状があると、当該部位のかぶりコンクリートの電気抵抗が他の部位と大きく異なる。このため変状を含む範囲で通電を行うと、均一に電流を流すことが困難になる可能性が高い。このような場合には、脱塩工法を適用する前に、変状を適切に補修しておくことが必要となる。このとき、補修する範囲が広い場合には、当初のコンクリートと同程度の電気抵抗を有する材料で補修する必要がある。

④について

コンクリート表面に導電性の小さい材料により表面被覆が施されている場合には、脱塩工法を適用する前に、これを取り除く必要がある。

また、かぶりコンクリート部に断面修復が施されている場合には、補修材料の電気抵抗と当初のコンクリートの電気抵抗を比較し、両者が同程度であることを確認しておく必要がある。補修材料と当初のコンクリートの電気抵抗が著しく異なる場合には、通電を行う前に補修箇所をはつとり、当初のコンクリートと同等の電気抵抗を有する材料で補修することも検討しなければならない。

⑤について

鋼材の腐食が著しい場合には、腐食生成物によって鋼材-コンクリート間の電気抵抗が大きくなり、通電が困難になったり、腐食の程度が軽微な一部の部分に電流が集中したりするおそれがある。

鋼材の腐食の程度と脱塩の適用性について検討した事例は少ないことから、これを実施前に判断することは容易ではないが、一般に、鋼材の腐食が表面錆び程度であれば、通電には問題ないものと考えられる。しかし、鋼材の断面が長い区間にわたって欠損している場合には、補修設計や施工計画を検討する際に、特に注意が必要である。また、脱塩工法では、鋼材の腐食により失われた耐荷性能を回復することはできないので、耐荷性能を回復させる場合には、他の補強方法を併用する必要がある。

⑥について

何らかの理由でコンクリート表面に電極を取り付けることができない場合は、脱塩工法を適用することはできないので、概略検討の際に、施工性についても確認しておかなければならない。

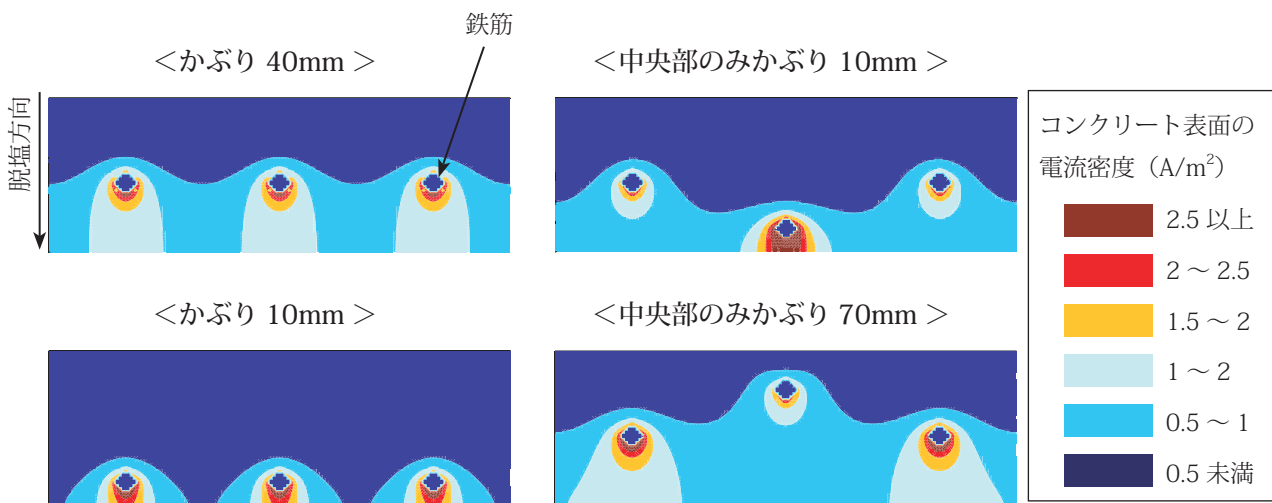
⑦について

コンクリートの電気抵抗はその温度によって著しく変化し、温度が低くなると電気抵抗が大きくなることが知られている。したがって、脱塩工法を適用する時期は、気温が比較的高い時期とするのが有利である。

<参考4：かぶりの変化が電流密度分布に与える影響の検討例>

幅 300mm、高さ 100mm の断面に ϕ 10mm の鉄筋が 3 本入っている断面を想定して、一面から脱塩した場合の電流密度分布を差分法によって求めた。その結果を、解説図－ 3.3.1 に示す。

かぶりが一様に 40mm の場合と一様に 10mm の場合を比較すると、かぶりが 10mm と極端に小さい場合には、鉄筋と鉄筋の間に位置する部位に流れる電流が小さくなっているが、鉄筋の近傍の、 $1\text{A}/\text{m}^2$ 程度の電流密度が確保される範囲はある程度は残されている。一方、断面中央の鉄筋 1 本のかぶりが増えた場合に注目すると、鉄筋によって電流密度が大きくなり、相対的にかぶりが大きい鉄筋の近傍からは、脱塩を行うことが困難となっていた。



※脱塩面の電流密度が平均で $1\text{A}/\text{m}^2$ になるようにした（解析方法については、付属資料 A 参照）。

解説図－ 3.3.1 かぶりの変化が電流密度分布に与える影響

3.4 通電による材料・構造への影響

- (1) 通電による材料・構造への影響を検討する際には、構造物の設計図書等を入手し、構造物に使用されている材料を明らかにした上で、通電の適否を検討するものとする。
- (2) 通電による材料・構造への影響を検討する際には、ASR の危険性を適切に評価し、通電の適否を検討しなければならない。
- (3) プレストレストコンクリート部材に対して脱塩工法を適用する場合には、通電により水素脆化による問題が生じないように適切に検討しなければならない。

【解説】

(1) について

塩分を除去するために通電を行うと、材料によってはその性質が変化するおそれがある。したがって、通

電による材料・構造への影響を検討する際には、まず、構造物に使用されている材料を確認する必要がある。

なお、通電が材料・構造に悪影響を与えるおそれがある場合として、現状では、①通電により ASR による劣化が促進される場合、② P C 鋼材に水素脆化を生じせしめる場合が指摘されているので、特に注意を喚起した。

他に、特に通電量が多い場合にはコンクリートと鉄筋の付着を損なうこともあるとの指摘がある。しかし、このマニュアルで想定している通電条件では起こりにくいと考えられるので、概略検討の段階では省略した。

(2) について

脱塩工法を適用すると、塩化物イオンが構造物外部（陽極）に移動すると同時に、ナトリウムイオンなどのアルカリ金属イオンが構造物中の鋼材（陰極）の周囲に移動することが知られている。このため、鋼材の近傍では、アルカリ金属イオンの濃度が高くなり、ASR が生じやすい環境になると考えられている。しかし、コンクリート中のアルカリ金属イオン濃度とアルカリシリカ反応による膨脹量の関係は単純ではなく、これを正確に予想することが困難である。

したがって、ASR のリスクについては、骨材のアルカリシリカ反応性の大小、仮に ASR による劣化が生じた場合の補修の可否、脱塩工法以外の補修工法が適用可能か、などを総合的に勘案して検討する必要がある。現状で、概ね妥当と考えられる評価方法を、解説表－ 3.4.1 に示す。

(3) について

通電を行うと鋼材の周囲で水素が発生し、高強度材料である PC 鋼材では、水素脆化の懸念があることが明らかになっている。この水素脆化については、通電方法を工夫するなどして避ける方法が検討されているので、適切に計画するとよい。

解説表－ 3.4.1 脱塩工法のフロー

ASR リスク	構造物の ASR 劣化状況	骨材のアルカリシリカ反応性に関する調査結果	脱塩工法の適用
↑小	ASR による変状は認められない	反応性を有しない	適用してよい ^{*1}
		反応性を有する	避けるのがよい ^{*2}
↓大	ASR による変状が認められる		

*1：この場合は、通電を行っても ASR による膨脹が生じる可能性は非常に低いと考えられる。しかし、ASR 発生の可能性を完全に消去することはできないので、構造物の規模や立地等から、万一 ASR による劣化が生じた場合に補修が困難な場合には、脱塩工法以外に適切な補修方法がないか検討するのがよい。

*2：通電によって ASR による膨脹が生じるおそれがあるので、脱塩工法の適用は避けるのがよいものとした。ただし、構造物の条件から他に有効な補修工法がない場合には、脱塩工法を適用することもありうる。脱塩工法を適用する場合には、補修後の経過について、特に注意して点検する必要がある。

4. 補修設計

4.1 基本的考え方

- (1) 脱塩工法による補修を計画する際には、目標とする脱塩量を定めた上で、必要な補修効果が得られるように電流密度、通電期間を定めるものとする。
- (2) 脱塩工法による補修と、それ以外の工法による補修を併用する場合は、あらかじめその目的や求められる性能を明確にしておかなければならない。

【解説】

(1) について

脱塩工法は、コンクリート中の塩化物イオンを除去し、鋼材から腐食を守るコンクリートの機能を回復することを目的とした補修工法である。しかし、脱塩工法を適用した直後の鉄筋の電位はこれを行っていない場合とは著しく異なるので、通電を行った部位の鋼材を調査し、その腐食性状を短期間で評価することは困難である。そこで、コンクリート中に含まれる塩化物イオンの量を指標として用い、補修設計や施工計画、施工を行うのが適当である。

電気化学的脱塩により脱塩できる塩化物イオンの量は、通電中にコンクリート中を移動する総電荷量と、移動する負の電荷の総量のうち塩化物イオンが占める割合（以下、塩化物イオンの輸率）から算出することができる。したがって、ここでは、目標とする脱塩量、電流密度、通電期間の順に検討することを念頭に置いて、これらを検討する上で留意しなければならない点を、4.2～4.4に示した。

ただし、塩化物イオンの輸率は、種々の条件によって異なり、これを施工方法によって大幅に改善することは難しいこと、また、通電中の総電荷量は、通電する部位の電流密度と通電期間から算出されるが、電流密度は、一つの断面の中でも部位によって大きく異なり、また、過大でも過小でも不都合が生じるので、設定できる範囲は、断面形状などによって制約されること、通電による塩化物イオンの移動やその速度については、十分には解明されていない点が多々あり、これを精度良く予測することなど、様々な制約があり、電流密度・通電期間を設定する方法は、現状では確立されているとは言えない。具体的な検討例を付属資料Aに示すので、参考にするとよい。

(2) について

脱塩工法では、既にコンクリートに生じている変状（ひび割れやはく離など）を補修することができないので、このような変状が認められる場合には、通電前に断面修復工法が併用される場合が多い。また、脱塩工法の適用後は、海から飛来する塩分などがコンクリート中に再度侵入することを防ぐため、表面被覆工法が適用される場合がある。

これらの補修工法を併用する場合、補修設計の段階で、その目的を明確にそれに応じた性能を設定しなければならない。また、補修工法の性能を検討する場合には、脱塩工法と併用されるという点についても、留意しなければならない。

4.2 目標とする脱塩量の設定

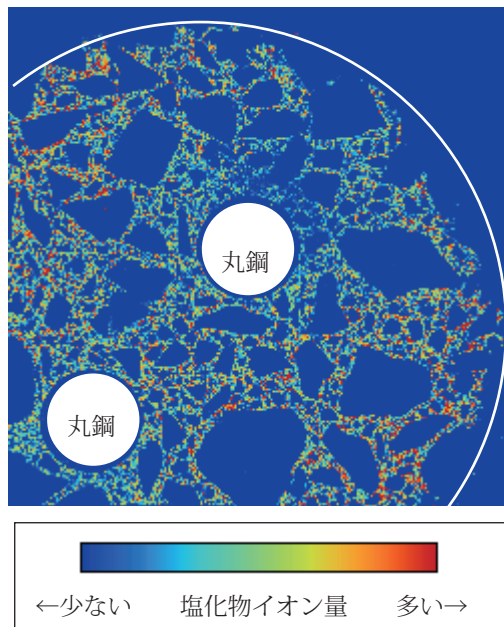
- (1) 脱塩工法の補修設計では、補修後のコンクリート中に残留する塩化物イオン量が一定量以下となるように、目標とする脱塩量を設定するものとする。
- (2) 目標とする脱塩量は、補修後の鋼材近傍における塩化物イオン量が、 $1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ 以下となるように設定するものとする。

【解説】

脱塩工法を適用する目的は、鋼材の塩化物イオンによる腐食を防止（もしくは抑制）することにある。したがって、腐食のおそれがある鋼材近傍における塩化物イオン量を指標として目標とする脱塩量を設定するとよい。

鋼材の腐食が開始する塩化物イオン量については、これまで種々の検討結果があるが、コンクリート体積当たりの量で概ね $1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ と考えられており、脱塩工法に限らず、この範囲を目標に補修が計画されている場合が多いので、この範囲で適切に設定するとよい。

なお、構造物表面の陽極電極とコンクリート中の鋼材との間に電流を流す場合、部位によって電流密度の大小が生じるのは避けられない。このため、補修後のコンクリート中に残留する塩化物イオン量は、部位に



※ $\phi 100\text{mm}$ の円柱供試体に丸鋼 2 本を配置し脱塩した供試体の EPMA 分析事例。かぶりの小さい部位（左図では右上方向）と比較すると、丸鋼にはさまれた部位では残留する塩化物イオンが多い

解説図－ 4.2.1 脱塩後の塩化物イオン分布の測定例

よって異なる（解説図－4.2.1 参照）。特に、構造物の表面付近や、鋼材と鋼材に挟まれた部位では、電流密度が比較的小さくなりやすく、通電期間の終了後も鋼材近傍と比して多量の塩化物イオンが残留する場合がある。

鋼材から離れた部位に残留する塩化物イオンは、腐食にただちに影響を与えるものではないので、通常の脱塩設計では、鋼材周囲に限定して補修設計を行ってもよい。一方、特に長期にわたって補修効果を確保したい場合には、残留した塩化物イオンが長期的に拡散することも考慮し、詳細に検討するとよい。

4.3 電流密度の設定

- (1) 脱塩工法の補修設計では、補修設計を行う部位全体にわたって適切な電流密度が得られるように、これを設定するものとする。
- (2) 通電中の電流密度は、鋼材表面積あたりの電流密度が $5.0\text{A}/\text{m}^2$ を超えないように設定するものとする。

【解説】

これまで、脱塩工法適用時の電流密度を設定する際には、土木学会の「脱塩工法設計施工マニュアル」の解説における記述を参考に、コンクリート表面積 1m^2 当たり 1A の電流密度とされることが多かった。

しかし、一般的な形状の構造物に脱塩工法を適用する場合、コンクリート表面と鋼材の近傍では、電流密度に著しい違いが生じる。このため、コンクリート表面積 1m^2 当たり 1A の電流密度で通電した場合、最も補修効果を得ることが求められる鋼材近傍の位置に着目すると、適用する構造物によって電流密度の条件が異なる結果となっていた。脱塩効果は、電流密度の大小に大きく影響を受けるので、本来は鋼材近傍の電流密度に着目して、電流密度を設定する必要がある。また、通電中の電流密度が小さい部位では、脱塩工法を適用した後も多くの塩化物イオンが残留する可能性が高いので、注意する必要がある。これらのことから、本ガイドライン（案）では、通電を行う部位全体において、電流密度を把握する必要があることを指摘した。

鋼材近傍における電流密度が過大になると、鋼材表面で発生する水素ガスの圧力でコンクリートにひび割れが生じるなど、不測の問題が生じるおそれがある。安全に通電できる電流密度の上限については、十分には明確にはなっていないが、これまでの研究実績から鋼材表面における平均の電流密度が $5\text{A}/\text{m}^2$ 以下であれば、安全であると考えられる。一方、電流密度を小さくした場合には、必要な補修効果を得るための通電期間が長くなる。また、鋼材と鋼材の間に位置する部位やコンクリート表面に近い部位など、電流密度が過小な部位では、通電を行っても脱塩できない塩化物イオンの量が大きくなり、補修の効果が得られないおそれがある。

これらのことから、電流密度は、補修効果を期待する部位全体にわたって適切なものとなるように、慎重に検討することが必要である。

4.4 通電期間の設定

- (1) 脱塩工法の補修設計では、補修効果を得るのに必要な通電期間を適切に推定し、これを設定するものとする。
- (2) 通電を行う期間を設定する際には、適切な余裕をもった計画としなければならない。

【解説】

(1) について

目標とする脱塩量及び通電中の電流密度が定まっている場合、これを達成するために必要な通電期間は、式(4.4.1)から算出できる。

$$t = \frac{W_{cl}}{\alpha \cdot Q \cdot a} \quad (4.4.1)$$

ここで、 t ：必要な通電期間 (sec)

W_{cl} ：目標とする脱塩量 (g)

α ：1 クーロンの電荷が、100%の効率で塩化物イオンの移動に用いられた際に移動する塩化物イオン量で、 3.67×10^4 (g)

Q ：通過電荷量 (C)

a ：塩化物イオンの輸率 (%)、

式(4.4.1)から補修効果を得るために必要な通電期間を推定することは、通電中の塩化物イオンの輸率を推定することに他ならない。しかし、塩化物イオンの輸率は、補修する部位に含まれる塩化物イオン量やコンクリートの品質等により大きく異なることが知られている。また、塩化物イオンの輸率は、通電期間が長くなると共に低下することが知られている。これらの要因のすべてを考慮し、通電を行うことなく輸率を推定する手法は、確立されていないのが現状である。

そこで、輸率については、既往の実験結果などを参考に適切に定めるものとする。また、あらかじめ構造物から採取したコアを用いて試験するなどして、塩化物イオンの輸率を推定してもよい。なお、塩化物イオンの輸率は、通電初期に比較的大きく、通電期間とともに低下することが知られている。しかし、現状では、これを精度よく予測する手法は確立されていないので、通電期間を通して一定であると仮定して考えてもよい。

なお、通電期間が著しく長期になると、鋼材とコンクリートの付着などに悪影響を及ぼすおそれがあることが指摘されている。したがって、通電期間は最大でも8週間程度とするのがよい。

(2) について

通電期間中の脱塩量を正確に予測することは、現状では困難であり、場合によっては、補修設計時に設定した当初の通電期間を見直す必要が生じることも考えられる。このため、適度に余裕を持った計画としなければならない。

4.5 補修工法を併用する場合の検討

脱塩工法とそれ以外の補修工法を併用を検討する際は、併用した場合と併用しなかった場合についてその効果を比較し、その適否を評価するものとする。

【解説】

特に建造物の外部から塩化物イオンが供給される環境では、脱塩工法による補修の効果を持続させるため、脱塩後に補修後の塩化物イオンの侵入を防ぐ表面被覆工法を適用することが多くある。一方、コンクリート表面に遮水系の被覆を形成すると、多くの場合、ひび割れなどのコンクリート表面の変状を観察することが難しくなる。このため、脱塩工法適用後に生じた劣化の兆候を見落とすおそれがある。

補修工法の併用を検討する場合は、その得失を考慮し、表面被覆工法を適用するかどうか検討しておくことがよい。なお、表面被覆工法を併用する場合は、5.6「表面被覆工法を併用する場合の計画」を参照するものとする。

5. 施工計画

5.1 基本的考え方

脱塩工法の施工計画を立案する際には、通電方法、施工中の安全確保策、施工中の品質管理手法、通電後の補修効果の確認手法などについて検討し、適切に定めておかなければならない。

【解説】

脱塩工法の施工を行う際には、補修設計で意図したように通電を行うこと、施工中の安全を確保すること、施工中に脱塩の状況を適切に把握すること、通電後に補修効果を確認することが特に重要である。そこで、これらの点について、あらかじめ検討し、適切に定めておくことが必要である。

なお、通電方法や施工中の安全確保策については、土木学会の「脱塩工法設計施工マニュアル」に特に詳しい記述があるので、参考にするとよい。

また、脱塩終了後に、表面被覆による補修を併用する場合には、表面被覆に用いる材料を、適切に選定しなければならない。

5.2 通電方法の計画

脱塩工法の施工計画では、仮設陽極や直流電源、電解質溶液、電気回路の形成など通電に用いる装置・方法などについて、構造物の形状や状態など種々の要因を考慮し、適切に選定しておかなければならない。

【解説】

① 仮設陽極

脱塩工法に使用される仮設陽極の設置方法には、ファイバー方式、パネルの取付け方式、ポンディング方式などに分類される。仮設陽極やその設置に用いる材料、設置方法については種々の提案があり、今後も、新たな提案があるものと考えられる。これらについては、施工実績や性能確認試験の結果をふまえて適切に選定するのがよい。

② 直流電源

電流は、必要な電流量を安定的に供給できるものでなければならないので、商用電源を用いるのが望ましい。

施工面積が大きくなると、一度に多量の電流量が必要となる。また、万一、通電する電流の極性が逆になると、コンクリート中の鋼材が電食作用を受けるので、極性が明確に示されているものを用いなければならない。

③ 電解質溶液

脱塩工法に使用される電解質溶液には、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 LiOH 、 Li_2CO_3 の各水溶液などがある。電解質溶液については、今後も、新たな提案があるものと考えられるので、施工実績や性能確認試験の結果をふまえて適切に選定するのがよい。

なお、コンクリート中にある程度のリチウムイオンが含まれるとアルカリシリカ反応によるコンクリートの膨脹が抑制されていることが知られており、電解質溶液としてリチウムイオンを含む溶液を使用することでASRのリスクを軽減できる可能性があるとされている。現状では、この効果について定量的に評価することはできないが、リチウムイオンを含む電解質溶液を選択することで、構造物の性能に何らかの悪影響が生じるとは考えにくいので、ASRについて特に配慮が必要な構造物では、検討するとよい。

④ 電気回路の形成

構造物の部位によって鋼材の量や配置、含まれる塩化物イオン量が異なるので、脱塩を行う範囲を適切に分割し、それぞれの区画ごとに電気回路を構成することが必要である。電気回路は、必要な場合は、それぞれの区画ごとに通電を停止できるように、適切に計画しておかなければならない。

脱塩を行う範囲に既存の補修箇所（部分的に断面修復が行われている部位など）がある場合（2.5「かぶりコンクリートの状態の調査」参照）は、その範囲や、当該箇所の電気的性質などを総合的に考慮して、その箇所に通電するかどうか検討しなければならない。

5.3 施工中の安全確保策の計画

脱塩工法の施工計画では、通電中の作業者の安全確保策、第三者の安全確保策、通電中の構造物の安全確保策、構造物周辺の設備の安全確保策などについて特に留意し、あらかじめその方法を定めておかなければならない。

【解説】

① 作業者の安全確保策、第三者の安全確保策、通電中の構造物の安全確保策

これらについては、関連する基準などに従って、適切に計画する必要がある。

脱塩工法に関して特に注意すべきなのは、電解質溶液の飛散防止である。電解質溶液の種類やpHによっては飛散した溶液による、周囲への悪影響が懸念される。そのため、飛散防止のために適切な対策を行なうとともに、使用した電解質溶液等は回収し適切に処分しなければならない。また、作業員は、保護メガネや防護服を着用するなど、適切な安全確保策をとらなければならない。

なお、施工場所に雨が当たる場合は、雨水により電解質溶液が漏洩する可能性があるため、屋根を設けるなど適切な対策を取らなければならない。

② 構造物周辺の設備の安全確保策

構造物の内部や周辺には、電気・水道等の配管が存在する場合がある。また、看板などの設備が取り付けられている場合もある。脱塩のために通電を行うと特に鋼製の管きょ類に予期せぬ電流が流れ、電食が生じる場合があるので注意しなければならない。また、これらの設備類が、仮設電極を取り付ける際に支障

となる可能性があるので、注意しなければならない。これらの設備については、場合によっては移設するなど、適切な対策をとる必要がある。

5.4 施工中の品質管理手法の計画

- (1) 脱塩工法の施工計画では、通電状況を常に確認するためのモニタリング手法を定めておかなければならない。
- (2) 脱塩工法の施工計画では、通電期間中に脱塩量の推移を確認するための品質管理手法を定めておかなければならない。

【解説】

(1) について

実構造物の施工においては、計画した電流密度を常に維持することは必ずしも容易ではない。そこで、通電中は、各部の電位差や電流量等をモニタリングし、補修設計において計画した電流密度が得られているように適切に管理しなければならない。また、異常があった場合には一時的に通電を停止するなど、不測の事態に対する対処方法を定めておかなければならない。

(2) について

脱塩工法により除去できる塩化物イオン量を事前に正確に予測することは現状では困難である。そこで、通電期間中に定期的に脱塩量の推移を確認し、必要に応じて通電条件（電流密度、通電期間）を見直すのがよい。

脱塩量の推移を確認するための手法としては、

- ① 試料を採取して、コンクリート中の塩化物イオン量を調査する手法
- ② 構造物外部の電解質溶液に脱塩された塩化物イオンの量を測定する手法

がある。①は、構造物中に残留する塩化物イオンの量を直接評価できるが、試料を採取するために構造物を傷つけることから、測定できる数は限られる。また、補修範囲の中でも部位によって含まれる塩化物イオンの量や脱塩量にばらつきがあることに注意しなければならない。なお、試料を採取する際には、構造物に与える影響を考慮し、小径のコアやコンクリートドリルを用いることも検討するとよい。

②は、①よりも測定の容易さなどの点で利点があるが、ある程度の範囲について脱塩の推移を調査する方法であり、部位による状況の違い（例えば、鋼材近傍での脱塩状況とコンクリート表面付近での脱塩状況の違い）を詳細に把握することできない。また、②の方法でモニタリングを行うためには、電解質溶液の量を正確に把握できるような仮設電極の設置方法を選定しなければならない。

脱塩量の推移を確認するための品質管理手法は、上記の特徴を考慮して、適切に計画するとよい。

5.5 通電後の補修効果確認手法の計画

- (1) 脱塩工法の施工計画では、通電後にコンクリート中に残留する塩化物イオン量を調査する方法を定めておかなければならない。
- (2) コンクリート中に残留する塩化物イオンの試験は、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）に従って行い、全塩化物イオンを測定するものとする。

【解説】

(1) について

通電後には、脱塩工法の補修効果を確認するため、コンクリート中に残留する塩化物イオン量を調査する必要がある。このとき調査する数量や試料の採取方法等は、構造物の条件や補修範囲にあわせて適切に計画しておく必要がある。

また、一般に脱塩による補修効果は、電流密度が比較的大きい鋼材近傍で大きく、鋼材から離れた位置では小さいので、補修効果検証のための試料は、鉄筋の近傍から採取する必要がある。

なお、脱塩による鋼材保護性能の回復を長期的にモニタリングする方法として、鋼材の自然電位や分極抵抗を定期的に測定することが考えられる。また、この際に利用できるように、脱塩後のコンクリート中に埋込み型の照合電極を設置することも考えられる。

5.6 表面被覆工法を併用する場合の計画

脱塩終了後に、表面被覆による補修を併用する場合には、表面被覆に用いる材料・工法について、特に注意して選定しなければならない。

【解説】

一般に、既設構造物に表面被覆が行われる状況では、構造物の建設からある程度の期間が経過しているので、コンクリートの含水率はある程度低下しており、かつ、コンクリート表面では中性化が見られる場合も多い。これに対し、脱塩工法を適用した構造物では、コンクリート表面から十分な量の電解質溶液（一般にpH10以上）が長時間供給されるので、以下のような点で、異なっている。

- ・コンクリートの含水率が大きくなっている。
- ・コンクリート表面付近も pH が比較的大きくなっている。

脱塩工法を適用した直後に表面被覆を行うと、コンクリート中の強アルカリ性の細孔溶液の影響で、塗膜のふくれや変色などの不具合が生じる場合がある。したがって、脱塩終了後、表面被覆工法の適用する際には、十分な期間をとってこれらの不具合を回避するか、含水率が高く、コンクリートの pH が高い状況下でも適用できる材料・工法を選定しなければならない。

6. 施工

6.1 基本的考え方

脱塩工法の施工は、施工計画にしたがって適切に実施するものとする。

【解説】

施工は、5.「施工計画」で定めた方法により行う。構造物の状況等に応じて、計画を変更する必要がある場合には、その適否について慎重に検討しなければならない。

6.2 施工中の品質管理

(1) 施工中には、5.4「施工中の品質管理手法の計画」で定めた調査を行い、施工状況を定期的に確認するものとする。

(2) 通電状況に異常が認められた場合は、速やかに適切な対策をとらなければならない。

(3) 脱塩状況を確認した結果、期待した補修効果が得られていないと考えられる場合には、その原因を明らかにし、早期に補修設計・施工計画の再検討を行うものとする。

【解説】

(2) について

供試体を用いた実験等を行うと、設定した電流密度を得るために必要な電圧が通電期間とともに変化し、著しく大きくなる場合がある。この原因については、十分には明確になっていないが、過大な電圧は作業の安全性を損ない、コンクリートにひび割れが発生する危険性がある。また、必要な電圧が急激に低下する場合もある。この原因としては、かぶりコンクリートにひび割れが生じているなど、通電中の電気回路に短絡が生じている可能性がある。したがって、電圧に著しい変化が見られるなど通電状況に異常が認められた場合は、通電をいったん停止して補修設計・施工計画を再検討するなど、適切な対策をとらなければならない。

(3) について

通電前に検討した補修設計と実際の脱塩状況との間に乖離が生じる原因としては、例えば、以下のものが考えられる。

- ① コンクリート中の塩化物イオン量に部位による違いがあることなどの影響で、事前調査で把握した構造物の状態と実際の構造物の状態が異なること
- ② 施工中に各部を流れる電流量が、当初の設計と異なっていること
- ③ 塩化物イオンの輸率が、当初の設計で推定したものと異なっていること

一般に、通電を行っている間に、これらの問題が解消されるとは考えにくいので、その原因を推定し、早期に補修設計・施工計画を見直すことが求められる。

6.3 補修効果の確認

- (1) 所定の通電期間が終了した後は、ただちに 5.5「通電後の補修効果確認手法の計画」で定めた調査を行い、補修効果を確認するものとする。
- (2) 調査の結果、当初に設定した脱塩量が達成できなかった場合には、その原因を検討し、必要な対策を行わなければならない。

【解説】

(2) について

当初設定した脱塩量が達成できない理由としては、①事前調査の結果、②通電中の電流の流れ、③脱塩の効率、などについてそれぞれ計画と実際の状況の間に差異が生じることが考えられる。これらについて検討した結果、補修設計および施工計画の軽微な変更によって補修効果を得ることが可能と考えられる場合は、脱塩工法を継続してもよい。

何らかの理由で、脱塩工法による補修を継続しても目標とする補修効果を得ることが難しいと考えられる場合には、他の補修工法を併用することも含めて、構造物の補修方法を再度検討しなければならない。

7. 記録

7.1 基本的考え方

施工後は、事前調査、概略検討、補修設計、施工計画、施工の各過程で得られたデータを記録し、保管するものとする。

【解説】

事前調査から施工に至る各過程で得られたデータは、脱塩工法による補修を行った構造物を長期的に維持管理していくにあたって重要なデータとなるので、これを適切に記録しておかなければならない。

特に重要な記録項目については、付属資料Bを参考にするとよい。

付属資料 A 通電条件の検討例

A.1 この資料について

通電による塩化物イオンの移動やその速度については、十分には解明されていない点が多々ある。特に通電時の塩化物イオンの輸率は、補修する部位に含まれる塩化物イオン量やコンクリートの品質、通電期間、電流密度等により大きく異なるおそれがあるが、これを精度良く推定することは難しい。このため、事前に詳細な検討を行ったとしても、通電期間内に脱塩できる塩化物イオン量の推定結果には大きな誤差が含まれることが避けられない。

しかし、通電期間を定めたり、通電中に脱塩効果を検証したりするためには、何らかの手法で事前に脱塩できる塩化物イオン量を推定する必要がある。そこで、付属資料として参考にできる検討例を作成した。脱塩量の推定方法は、現状では確立された方法がないので、これらを参考に、検討の目的や構造物の状態にあわせて、適切なモデルを用いて検討するとよい。

A.2 この資料で検討する断面

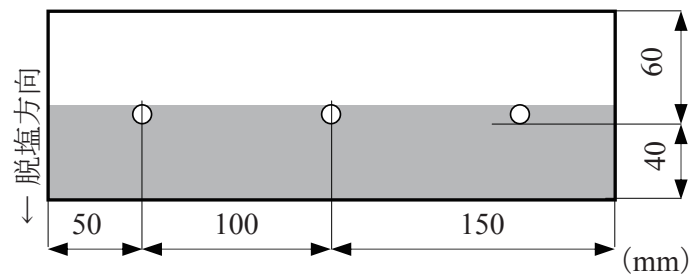
ここで検討例を示す断面を図-A.2.1 に示す。また、検討を行うにあたっての条件として、以下を仮定する。なお、これらの仮定は、比較のため、過去に土木研究所で実験を行った供試体と類似のものとなるように定めたものである。

- ・コンクリートの品質は部位によって異なるものとする。
- ・脱塩工法適用前のかぶりコンクリート（表面から 50mm まで）には、 2.7kg/m^3 の塩化物イオンが含まれており、その量は部位によって異なるものとする。一方、鉄筋よりも奥の部位には塩化物イオンが含まれていないものとする。
- ・コンクリートの電気抵抗は、 $77.6 \Omega \cdot \text{m}$ とする。
- ・塩化物イオンの輸率は、3.3% とする。

表－ A.1.1 検討例の一覧

	考慮する事項	考慮しない事項	備考
検討例 I	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位による電流密度の違い ・ 塩化物イオンの輸率 ・ 塩化物イオンの移動経路 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩化物イオンの輸率の、部位や通電期間による違い ・ 通電中のコンクリートの品質の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検討例 II や III と比較すると、複雑な計算を要する。
検討例 II	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩化物イオンの輸率 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位による電流密度の違い ・ 塩化物イオンの輸率 ・ 塩化物イオンの移動経路 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位による脱塩量の違いを考慮しないので、通電後の塩化物イオンの分布については、検討できない。
検討例 III	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位による電流密度の違い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩化物イオンの輸率 ・ 塩化物イオンの移動経路 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通電期間については、検討できない。

※考慮する／しない事項は、比較のために記載したものであり、必ずしも網羅的なものではない。



※鉄筋径は、10mmである。

※塩化物イオンは、着色部に2.7kg/m³含まれる。

図－ A.2.1 この資料で検討する断面

A.3 検討例 I

A.3.1 この検討例における仮定

- ・塩化物イオンの輸率は、各部位を流れる電流密度の大小にかかわらず一定であるものとする。
- ・塩化物イオンの輸率は、各部位に含まれる塩化物イオン量や、通電期間にかかわらず一定であるものとする。

A.3.2 検討過程

(1) 脱塩目標の設定

- ・検討例 I では、通電前に含まれる塩化物イオン 2.7kg/m^3 を 1.2kg/m^3 まで低減することを目標とする。

(2) 電流密度の設定

- ・検討例 I では、過去の実績からコンクリート表面あたり 1.0A/m^2 の電流密度と設定する。このとき鋼材表面当たりの電流密度は 3.2A/m^2 となり、適切である。

(3) コンクリート中の電位分布の推定

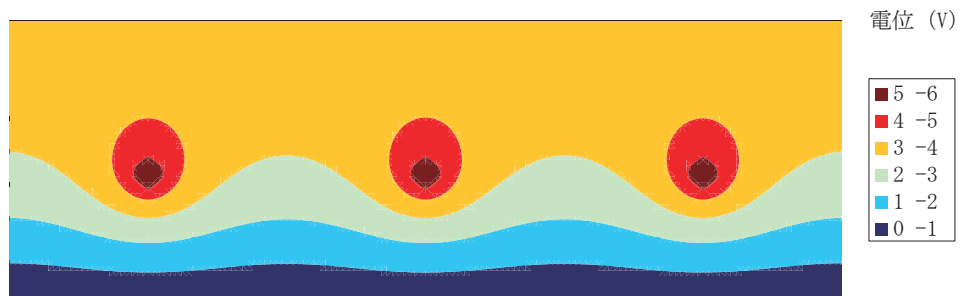
- ・通電中の電流の流れを推定するため、まず、通電中の電位分布を推定する。ここでは、コンクリートの品質が一定であると仮定しているため、部材内の任意の位置における電位は、式 (A.3.1) (ラプラス方程式) を満たす。また、境界条件として、脱塩面での電流密度が 1A/m^2 であること、コンクリートの電気抵抗が $77.6 \Omega \cdot \text{m}$ であること、が与えられているので、差分法や有限要素法により、電位分布を推定することができる。
- ・ここでは、断面を 2mm 間隔のメッシュに分割し、差分法を用いて電位分布を推定した。その結果を、図 - A.3.1 に示す。

(4) 通電期間の推定

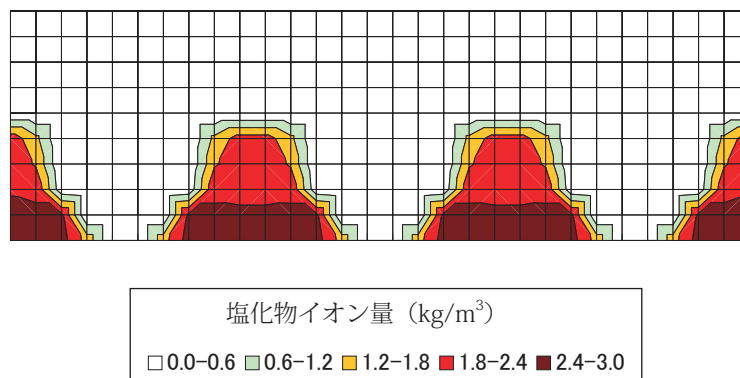
- ・電位分布から各部を流れる電流量を算出し、単位時間当たりに移動する塩化物イオンの量を推定することができる (詳細は検討例 II を参照)。
- ・ここでは、断面を 10mm 間隔のメッシュに分割し、約 1 日ごとのステップで塩化物イオンの移動を推定した。その結果、脱塩目標を達成するためには約 45 日間の通電が必要と推定された。通電 45 日後に各部に残留する塩化物イオン量を推定した結果を、図 - A.3.2 に示す。図に示されたように、このとき鉄筋に近い部位では脱塩が完了している。一方、鉄筋と鉄筋の中間に位置する部位では、比較的多くの塩化物イオンが残留していると推定される。
- ・なお、通電約 28 日後の塩化物イオン量推定結果 (図 - A.3.3) と通電約 45 日後 (図 - A.3.2) を比較すると、鉄筋とコンクリート表面を結ぶ直線上では、比較的早期に脱塩が終了し、その後、鉄筋間に位置する部位からも脱塩されるものと推測される。

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.3.1})$$

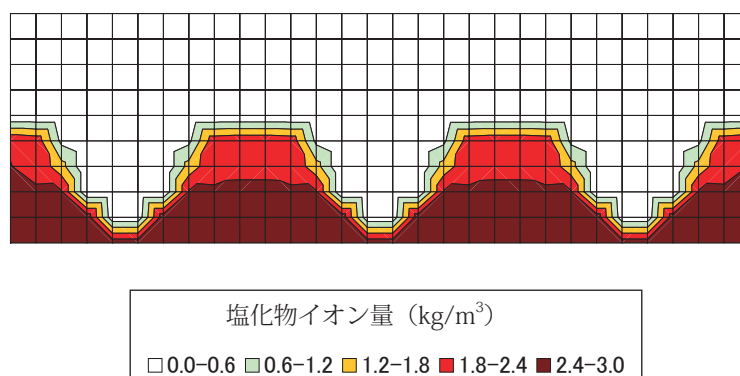
ここに、V：任意の点における電位



図－ A.3.1 電位分布の推定結果



図－ A.3.2 通電後に残留する塩化物イオン量の推定結果（通電 45 日後）



図－ A.3.3 通電後に残留する塩化物イオン量の推定結果（通電 28 日後）

A.4 検討例 II

A.4.1 この検討例における仮定

- ・検討例 II では、通電を行う範囲で一様な効果が得られるものとし、脱塩の対象とする部位の中での電流密度分布や、内部での塩化物イオンの移動経路等を考慮しない。
- ・部材の奥行き方向の長さを 30mm とする。

A.4.2 検討過程

(1) 脱塩目標の設定

- ・検討例 II では、通電前に含まれる塩化物イオン 2.7kg/m^3 を 1.2kg/m^3 まで低減することを目標とする。
- ・通電により断面から脱塩する塩化物イオンの量は、 6.75g と算出される。

$$(2.7 - 1.2) \text{ kg/m}^3 \times (0.3 \times 0.3 \times 0.05) \text{ m}^3 = 6.75\text{g}$$

(2) 電流密度の設定

- ・検討例 II では、過去の実績からコンクリート表面あたり 1.0A/m^2 の電流密度と設定する。このとき鋼材表面当たりの電流密度は 3.2A/m^2 となり、適切である。
- ・この条件で通電を行うと、1日の通電で脱塩面を通過する電荷は、 7776 クーロンと算出される。

$$1\text{A/m}^2 \times (0.3 \times 0.3) \text{ m}^2 \times (60 \times 60 \times 24) \text{ sec} = 7776\text{C}$$

(3) 通電期間の推定

- ・塩化物イオンの輸率が 100% であるとする、1 クーロンの電荷により移動する塩化物イオンの量は、 $3.67 \times 10^{-4}\text{g}$ (塩素の原子量をファラデー定数で除することにより求められる) と算出される。
- ・そこで、今回の事例では、1日の通電で脱塩できる塩化物イオンの量は 0.094g と算出される。したがって、必要な通電期間は 72 日間と推定される。

$$3.67 \times 10^{-4}\text{g/C} \times 0.033 \times 7776\text{C} = 0.094\text{g}$$

$$6.75 / 0.094 = 71.8$$

A.5 検討例 III

A.5.1 この検討例における仮定

- ・過去の検討例から、8週間の期間通電を行うと、通電後に残留する塩化物イオン量は表－A.5.1の通りになるものとする。

A.5.2 検討過程

(1) コンクリート中の電位分布の推定

- ・通電中の各部の電流密度を推定するため、まず、通電中の電位分布を推定する。今回検討する断面では、電位分布の推定結果は、図－A.3.1（検討例I参照）のようになる。

(2) コンクリート中の電流密度分布の推定

- ・電位分布から各部を流れる電流量を算出する。
- ・ここでは、図－A.3.1で電位を算出した2mm間隔のメッシュ上の各点について、その周囲の4点との電位差から、電流密度を求めた。その結果を、図－A.5.1に示す。

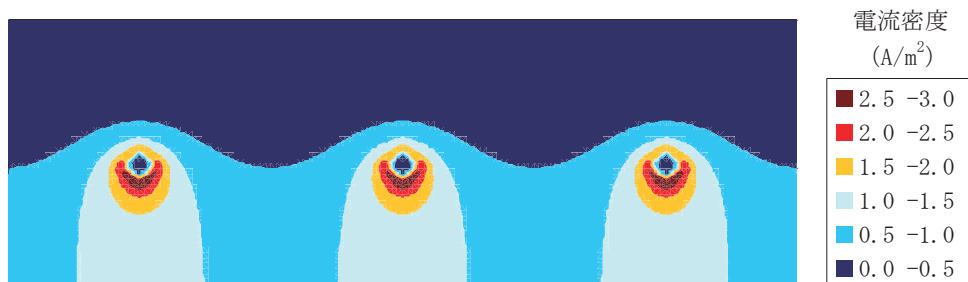
(3) 各部に残留する塩化物イオン量

- ・電流密度分布の推定結果と、表－A.5.1の推定結果から、通電後の各部に残留する塩化物イオン量は、図－A.5.2のようになると推定される（検討例Iとの比較のため、10mmメッシュで整理した）。

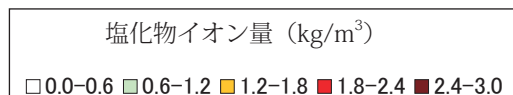
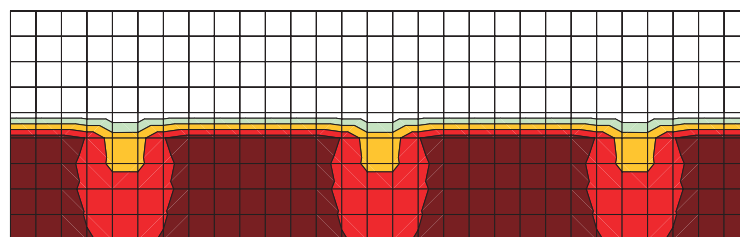
表－ A.5.1 推定される電流密度と残留する塩化物イオン量の関係

各部の電流密度	各部に残留する塩化物イオン量
0.5 ～ 3.0A/m ²	以下の式から算出される塩化物イオン量 (ただし, 2.7kg/m ³ を超えないものとする) $b = -0.83 \times a + 3.3$ ここに, a : 各部の電流密度 (A/m ²) b : 残留する塩化物イオン量 (kg/m ³)
3.0A/m ² 以上	0.81kg/m ³

※配合が同じコンクリートの試験結果から推定したものである。配合が異なる場合には, 上記とは異なる関係になるものと予想される。



図－ A.5.1 通電中の電流密度分布の推定結果



図－ A.5.2 各部の電流密度から推定した通電後の塩化物イオン量

A.6 各検討例と実験結果の比較

A.6.1 実験について

参考事例として、検討例Ⅰ～Ⅲとして検討した断面と類似の供試体を用いた実験結果を示す。主な実験条件は以下のとおりである。

- ・供試体の寸法、配筋間隔、かぶりは、図－A.2.1と同様であるが、供試体内部の鉄筋の径は9mmである（検討例Ⅰ～Ⅲでは、計算を容易にするため10mmとした）。
- ・コンクリートの練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入した。無通電の供試体に対し塩化物イオン量の測定を行い、平均で 2.7kg/m^3 の塩化物イオンが含まれることを確認した（解析では、表面から50mmの部位のみ塩化物イオンが含まれると仮定したが、実験Ⅱ用いた供試体では、全ての部位に塩化物イオンが含まれる）。
- ・供試体に用いたコンクリートの水セメント比は60%で、使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。
- ・電流密度は、コンクリート表面あたり 1A/m^2 とし、常に一定の電流が流れるように安定化電源を用いて制御した。
- ・通電期間は、8週間とした。

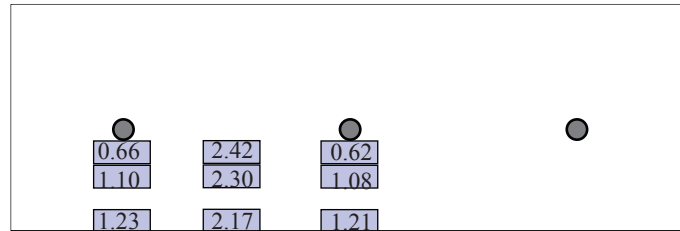
A.6.2 実験結果

- ・通電中にコンクリート表面と鉄筋との電位差を測定したところ4.79Vであった。
- ・通電後、試料を切り出して全塩化物イオン量を測定したところ、図－A.6.1に示す測定結果を得た。

A.6.3 実験結果と解析結果の比較

実験結果と、検討例Ⅰ～Ⅲの結果を比較すると、この検討、および実験の範囲では以下のことが言える。

- ・供試体実験における電位差は、解析結果と比較的よく一致していた（通電中に、供試体に埋め込んだリード線を用いて供試体中の電位差を測定した結果、実験結果が解析結果とよく一致していた）。
- ・検討例ⅠおよびⅢから予測されたように、鉄筋と鉄筋の間に位置する部位では、脱塩量が少なかった。
- ・実験では、鉄筋近傍では、残留塩化物イオン量が 0.6kg/m^3 程度となるまで脱塩できたが、コンクリート表面では、比較的電流が流れやすい部位でも 1.2kg/m^3 以上の塩化物イオンが残留した。検討例Ⅰから、通電期間が不足したためとは考えにくく、検討例Ⅲで仮定したように、通電を行っても脱塩することができない塩化物イオンがあり、その量が電流密度の大きさによって異なるためと考えられる。ただし、検討例Ⅲの結果では、鋼材に比較的近い部位でも 1.5kg/m^3 程度の塩化物イオンが残留するとの推定結果であり、実験結果とは大きく異なっていた。本節で紹介した実験供試体には、表－A.5.1で仮定したよりも脱塩の効果が大きかったものと考えられる。



図－ A.6.2 脱塩後の塩化物イオン量 (kg/m³, 実験値)

A.7 検討事例のまとめ

通電条件の検討例として、検討例 I～III を示した。脱塩量を合理的に、かつ、精度よく推定する解析方法は、現状では確立されておらず、複雑な解析を行っても、そのコストに見合った精度の向上が得られるかどうかは明確ではない。そこで、概略検討や補修設計の段階では、検討例 III や検討例 II のように、ある程度簡略化したモデルを用いて検討し、通電期間や電流密度を設定するのが合理的と考えられる。

通電中や通電後に、事前の検討で予測した補修効果が得られていない場合には、検討例 I のように、通電期間中の塩化物イオン分布を推定できる手法を用いて検討することが有効と考えられる。

今後、この分野における研究が進展し、通電条件の設定手法が確立されることが望まれる。

付属資料 B 通電条件の検討例

B.1 この資料について

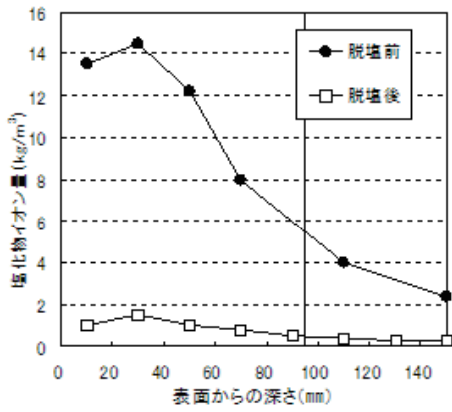
電気化学的脱塩の施工事例は少しずつ増えつつあるが、他の補修工法と比較すると、その数は限られている。そこで、これまでに公表されている事例を整理した。

表－ B.1.1 この付属資料で紹介する事例の一覧

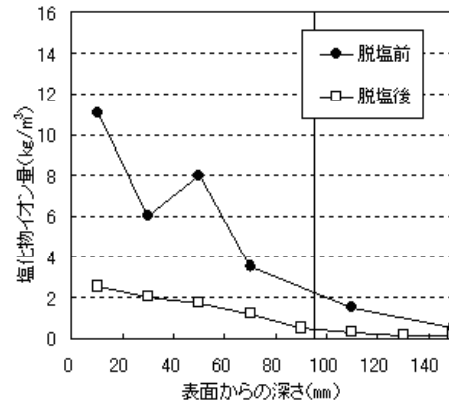
No.	構造物名	部位	電気化学的脱塩の 施工年
1	旧洞川橋	下部構造	1993
2	荒磯橋高架橋	下部構造	1999
3	弁天大橋	上部構造	2001
4	小余綾高架橋	上部構造	2004
5	小余綾高架橋 その2	上部構造	2005
6	親不知海岸高架橋	上部構造	2005
7	西原橋	上部構造	2005
8	青海川橋	上部構造	2006

事例 No.	1			
構造物の概要	構造物名	旧洞川橋		
	構造形式	RC 橋脚		
	竣工年	不明		
	構造概要	RC 橋脚		
	周辺環境	・新潟県の旧国道 8 号線にある道路橋（廃橋）。日本海沿岸から数十メートルに位置し、季節風の影響を強く受ける。		
	補修前の状況	塩化物イオン濃度	表面で約 15kg/m ³ 鉄筋位置で約 5kg/m ³ 程度	
		中性化深さ	10mm 未満	
		かぶり	90mm～100mm	
鋼材の腐食		鉄筋腐食あり		
外観変状（ひび割れ、変色等）		ひび割れ、コンクリートの浮き、はく離、はく落あり		
補修履歴		不明		
その他				
適用工法の選定理由	非常に厳しい塩害環境下にある RC 橋脚に対し脱塩工を適用し、その脱塩効果について継続的に追跡調査を実施している。現状で施工後約 15 年が経過している。			
他工法との併用	部分的に断面修復工法を併用			
施工の概要	対策時期・規模	1993 年		
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.0A/m ²		
	通電期間	積算通電期間 8 週間		
	陽極方式	チタンメッシュ＋セルローズファイバー方法 ・コンクリート表面に栈木を取り付け、その上にチタンメッシュを設置した。 ・電解質溶液はセルローズファイバーに含浸させた。		
	施工手順	①内部電極の設置，②外部電極の設置，③通電， ④通電管理，⑤脱塩量計測，⑥仮設材撤去		
	施工上の留意点	・電解質溶液の pH の低下 ・電流密度の分布 ・アルカリ骨材反応促進の検討		
	脱塩効果の確認方法	・コア試料中の塩化物イオン量の測定， ・目視調査結果の系時変化，鉄筋の腐食状況調査， ・自然電位の系時変化，分極抵抗の系時変化		
脱塩工法の適用結果	塩化物イオン量を約 1.0kg/m ³ 以下に低減できた。			

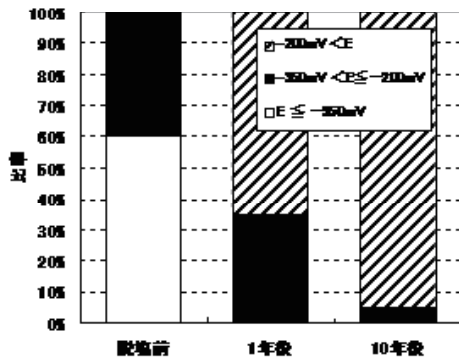
<実施状況等>



脱塩前後の塩化物イオン量 (東面)



脱塩前後の塩化物イオン量 (西面)



自然電位の経時変化



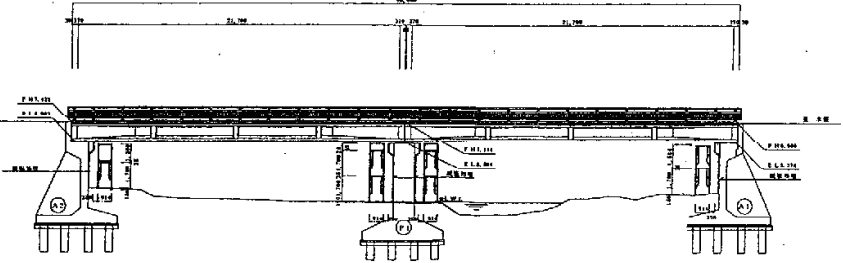
鉄筋の状況 (脱塩施工後 10 年)



構造物の外観 (脱塩施工後 10 年, 左: 脱塩を行った部位, 右: 脱塩を行っていない部位)

参考文献

芦田公伸, 石橋孝一, 七澤章, 松久保博敏: 電気化学的脱塩工法を適用した橋脚の 10 年間の追跡調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.831-836, 2004.6

事例 No.	2	
構造物の概要	構造物名	荒磯橋高架橋
	構造形式	鉄筋コンクリート製橋台
	竣工年	1960 年代
	構造概要	橋長 45 m のポストテンション T 桁橋の下部構造
		
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> 秋田県の日本海沿岸に位置し、海岸線からの距離は約 50 m である。 潮位や波の状態によっては、河川水に海水が混入する環境である。 中央の橋脚は水中に建設されている。 	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	塩化物イオン量は、最大で 4.7kg/m ³
	中性化深さ	9 ~ 10mm 未満
	かぶり	40mm ~ 80mm
	鋼材の腐食	鉄筋の腐食、錆汁が認められた。
	外観変状 (ひび割れ、変色等)	鉄筋の露出、錆汁、多くのひび割れが認められた。
	補修履歴	なし
その他		
適用工法の選定理由	塩害劣化に対する従来の補修方法では、補修箇所が再劣化することが懸念されたので、補修費用は多少大きくなるが長期的な視野で合理的な手法として脱塩工法が採用された。	
他工法との併用	<ul style="list-style-type: none"> 脱塩前に断面補修工法を施工した。 脱塩後は、表面塗装にて飛来塩分を遮蔽した。 	
施工の概要	対策時期・規模	1999 年 206m ²
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.0A/m ²
	通電期間	8 週間 (56 日間)
	陽極方式	チタンメッシュ+不織布 <ul style="list-style-type: none"> 浮き部や断面欠損部を補修した後、チタンメッシュ陽極材をコンクリート表面に設置し、電解質溶液を含む不織布で被覆して電解質溶液を保持した。
	施工手順	<ul style="list-style-type: none"> 内部電極および外部電極の設置 試験通電による導通および短絡箇所の確認、補修 通電管理 (通電量・脱塩溶液の管理等) 内部電極および外部電極の撤去、清掃
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> 三つの箇所と同時に脱塩を行った。箇所によってかぶりや鉄筋量が異なるため、橋台部と橋脚部を別々の電気回路とした。 陽極と鉄筋との導通確認を行った。短絡部分の絶縁処理を実施した。
脱塩効果の確認方法	施工前後のコア採取による塩化物イオン量測定結果の比較	
脱塩工法の適用結果	塩化物イオン量の多い河川内橋脚で鉄筋位置の塩化物イオン量が 3.6kg/m ³ から 1.1kg/m ³ に減少した。	

<実施状況等>



電解質溶液保持材（不織布）



電解質溶液保持材取り付け完了



電解質溶液保持材取り付け完了



電解質溶液タンク



橋脚の脱塩状況



橋台の脱塩状況

参考文献

泉隆士，原与司人：道路橋下部工への電気化学的脱塩工法の適用例，構造物の診断と補修に関する第11回技術・研究発表会論文集，日本構造物診断技術協会，pp.91～98，1999.11

事例 No.	3	
構造物の概要	構造物名	弁天大橋
	構造形式	プレテンション方式単純 PCT 桁橋
	竣工年	1972 年
	構造概要	橋長 340 m (全 17 径間) 有効幅員 10.8 m P3 ~ P4 径間でプレテンション PC 桁の脱塩を試験的に施工した。
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> ・新潟県の日本海沿岸に位置し、冬季は強風の影響で、径間によっては直接海水をかぶる過酷な塩害環境下である。 ・海岸線からの距離は、0 ~ 50 m 程度である。 	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	鉄筋位置で $2 \sim 3\text{kg/m}^3$
	中性化深さ	10mm 未満
	かぶり	31mm (鉄筋), 42mm (PC 鋼材)
	鋼材の腐食	断面欠損を伴う腐食が認められた。
	外観変状 (ひび割れ, 変色等)	コンクリートの浮き、はく落 錆汁が認められた。
	補修履歴	断面修復、表面保護塗装 (1982 年、1991 年の 2 回)
	その他	土木学会コンクリート標準示方書 [維持管理編] によると、進展期に分類される。
適用工法の選定理由	外観目視調査により曲げひび割れが確認されないことや、復元設計の結果から、現時点では耐荷力には十分と考えられた。そこで、今後も構造物を利用していくために、外部からの塩化物イオンの侵入を遮断し、適切な処置を施すこととし、脱塩工法が試験的に採用された。	
他工法との併用	浮き、はく落部は断面修復工法を併用した。 脱塩後は、表面保護工にて飛来塩分を遮蔽した。	
施工の概要	対策時期・規模	2001 年、プレテンション桁 1 本 (P3 ~ P4 径間, G10 桁)
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.0A/m^2
	通電期間	10 週間
	陽極方式	チタンメッシュ+パネル法 ・断面修復工法を適用した後、チタンメッシュ陽極材をコンクリート表面に設置し、さらに主桁の下フランジ部にパネル槽を設置した。電解質溶液はホウ酸リチウムを使用した。
	施工手順	<ul style="list-style-type: none"> ・内部電極、外部電極、パネルの設置 ・試験通電による導通および短絡箇所の確認、補修 ・通電管理 (通電量・脱塩溶液の管理等) ・パネルおよび内部電極、外部電極の撤去、清掃
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・通電は、PC 鋼材の水素脆化対策のため間欠通電とした。 ・間欠通電は、月曜 8:00 ~ 金曜 17:00 の間通電し、金曜 17:00 ~ 月曜 8:00 の間停止した (連続通電より施工期間が延びる)。
	脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> ・施工途中の電解質溶液の塩化物イオン濃度を測定 ・施工前後のコア採取による塩化物イオン量測定結果の比較 ・施工後の照合電極によるモニタリング
脱塩工法の適用結果	鋼材位置のコンクリート中の塩化物イオン量を 2.5kg/m^3 以下に低減した。	

<実施状況等>



施工前の主桁下面状況



断面修復前の状況



P C 鋼材の状況



パネル（電解質溶液槽）設置状況



パネル（電解質溶液槽）設置状況



通電設備

参考文献

徳光卓, 坂上悟, 原与司人, 横山文夫, 宮本正尊: 弁天大橋の電気化学的脱塩前後の塩化物イオン濃度分布とその状態, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, V-579, 2002.9
吉田光秀, 坂上悟, 原与司人, 横山文夫, 宮本正尊: 供用中のプレテンション PC 桁橋に対する電気化学的脱塩の適用, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, VI-124, 2002.9

事例 No.	4	
構造物の概要	構造物名	小余綾高架橋
	構造形式	ポストテンション単純 PCT 桁
	竣工年	1965 年
	構造概要	支間：20.8 m、有効幅員：17.0 m 橋長 1098.65m (50 径間) 終点側の P44 ～ A2 径間に対して脱塩を行った。
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> 本橋の一部は海岸線に隣接しており、海からの飛来塩分の影響で、建設後十数年で塩害による劣化が顕在化していた。 脱塩施工部の海岸線からの距離は、50 m以内である。 	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	表面から 20 ～ 40mm 位置で最大 15.6kg/m ³
	中性化深さ	10mm 未満
	かぶり	
	鋼材の腐食	鉄筋腐食あり。一部は著しい腐食である。
	外観変状 (ひび割れ、ひび割れ、コンクリートの浮き、はく離・はく落が見られる、変色等)	
	補修履歴	1 ～ 2 回の断面修復、表面保護工
その他		
適用工法の選定理由	過去の補修後も残留した塩分により再劣化したと思われる部分が多く見られた。塩害に対する抜本的対策として、最も塩害劣化が進行している終点側の径間に対し、電気化学的脱塩を行うことにした。脱塩後は、ライニング工法により、新たな塩分の侵入を防止した。	
他工法との併用	<ul style="list-style-type: none"> 断面欠損部は断面修復工法を併用した。 脱塩後は、ライニングにて飛来塩分を遮蔽した。 	
施工の概要	対策時期・規模	2004 年
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.0 ～ 2.05A/m ²
	通電期間	19 週間 (1 ～ 10 週：1.0A/m ² 、11 ～ 19 週：1.0 → 2.0A/m ² に段階的に増加)
	陽極方式	チタンメッシュ+ファイバー方法 ・断面修復工法を適用した後、チタンメッシュ陽極材をコンクリート表面に設置後、電解質溶液を含む有機ファイバーにてメッシュを被覆した。
	施工手順	<ul style="list-style-type: none"> 内部電極、外部電極の設置 試験通電による導通および短絡箇所の確認、補修 通電管理 (通電量・脱塩溶液の管理等) 内部電極、外部電極の撤去、清掃
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> 通電は PC 鋼材の水素脆化対策のため間欠通電とした。 (1 週のうち 4.4 日通電、2.6 日休止を繰り返す断続的通電) 陽極と鉄筋との導通確認と短絡部分の絶縁処理を実施した。 陽極に供給する電解質溶液の濃度管理と溶液散布状況の確認をした。
	脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> コア採取による塩化物イオン量の測定 一部で陽極方式としてパネル取付方式を用い、電解質溶液中の塩化物イオン量を測定
脱塩工法の適用結果	コンクリート中の塩化物イオン量が 15.6kg/m ³ から 1.73kg/m ³ まで低下した。	

<実施状況等>



施工前の状況



施工前の断面修復部の再劣化



外部陽極の取付け



ファイバーの吹き付け途中



通電状況

参考文献

猪川充, 澤建男, 徳光卓, 古賀敬之: 小余綾高架橋への電気化学的脱塩の適用とその施工, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, V-170, 2005.9

事例 No.	5	
構造物の概要	構造物名	小余綾高架橋 その2
	構造形式	ポストテンション単純 PCT 桁
	竣工年	1965 年
	構造概要	支間：20.0 m，橋長 1098.65m（50 径間） 終点側の P48 径間，P49 径間に対して脱塩を行った
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> 一般国道 1 号線西湘バイパスにかかる多径間の PCT 桁橋。海からの飛来塩分の影響により，建設後数十年で塩害劣化が顕在化した。過去に，断面修復や表面保護工による補修が実施されていた。 	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	表面から 20～40mm 位置で 8～12kg/m ³ 程度
	中性化深さ	10mm 未満
	かぶり	
	鋼材の腐食	鉄筋腐食あり。
	外観変状（ひび割れ，変色等）	ひび割れ，コンクリートの浮き，はく離，はく落あり
	補修履歴	1984 年，1994 年に断面修復，表面保護工が実施されていた。
その他		
適用工法の選定理由	塩化物イオンが多量に含まれる状況で表面保護工を実施しても鋼材の腐食を防げないので，塩化物イオン量塩分の浸透量が多い主桁部分に対して脱塩工法を適用し表面保護工を実施する。	
他工法との併用	<ul style="list-style-type: none"> 断面欠損やコンクリートの浮き部分は断面補修工法を併用した。 脱塩後は表面保護工を実施した。 	
施工の概要	対策時期・規模	2005 年
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.5A/m ²
	通電期間	積算通電期間 8 週間 (間欠通電を実施，通電休止期間を含むと約 13 週間)
	陽極方式	チタンメッシュ＋セルローズファイバー方法 <ul style="list-style-type: none"> コンクリート表面に栈木を取り付け，その上にチタンメッシュを設置した 電解質溶液はセルローズファイバーに含浸させた。
	施工手順	①内部電極設置，②外部電極設置，③通電， ④通電管理，⑤脱塩量計測，⑥仮設材撤去
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> 通電は PC 鋼材の水素脆化対策のため間欠通電とした。 (1 週のうち 4.4 日通電，2.6 日休止を繰り返す断続的通電) 陽極と鉄筋との導通確認と短絡部分の絶縁処理を実施した。 陽極に供給する電解質溶液の濃度管理と溶液散布状況の確認をした。 アルカリ骨材反応促進への影響を検討した。
	脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> ドリル法による塩化物イオン量の測定 コア採取による塩化物イオン量の測定 一部で陽極方式としてパネル取付方式を用い，電解質溶液中の塩化物イオン量を測定
脱塩工法の適用結果	平均 8kg/m ³ の塩化物イオン濃度が 1.0kg/m ³ 以下まで低下した	

<実施状況等>



チタンメッシュ設置状況



ドリル法試料採取状況



配線状況



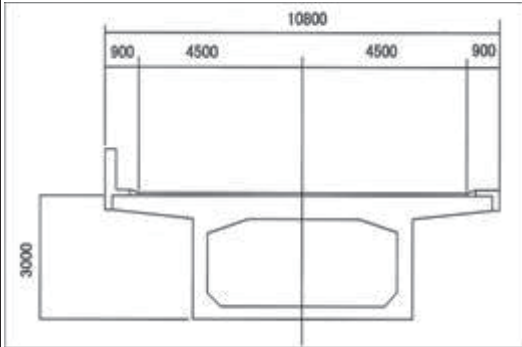
ファイバーの吹き付け状況



断面修復工法（湿式吹き付け工法，脱塩施工前）

参考文献

本間元，澤建男，藤本晋矢，伊藤智之：小余綾高架橋塩害補修工事の施工報告，第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.73-76，2006.10
亀井孝行，澤建男，末吉史郎，蝦名貴之：小余綾高架橋の電気化学的脱塩工法の施工管理について，第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.77-80，2006.10

事例 No.	6	
構造物の概要	構造物名	親不知海岸高架橋
	構造形式	ポストテンション方式 PC 橋（多径間箱桁橋）
	竣工年	1987 年
	構造概要	
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> ・新潟県の日本海沿岸に位置し、冬季間は強風の影響で直接海水を被る過酷な塩害環境下に位置している。 ・海岸線からの距離は、0～50 m以内に位置している。 	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	表面で約 5kg/m ³ 鉄筋位置で約 1kg/m ³
	中性化深さ	10mm 未満
	かぶり	70mm
	鋼材の腐食	腐食は認められない
	外観変状（ひび割れ、変色等）	部分的にひび割れ、浮き
	補修履歴	なし
	その他	
適用工法の選定理由	塩化物イオンの浸透予測を実施し結果、近い将来、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m ³ を超えると考えられるので、予防的な対策として塩化物イオン濃度を低減させ、表面保護工を適用することにした。	
他工法との併用	表面保護工を併用した。	
施工の概要	対策時期・規模	2005 年
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.5A/m ²
	通電期間	積算通電期間 8 週間 (間欠通電を実施、通電休止期間を含むと約 13 週間)
	陽極方式	チタンメッシュ+セルローズファイバー方法 ・コンクリート表面に栈木を取り付け、その上にチタンメッシュを設置した ・電解質溶液はセルローズファイバーに含浸させた。
	施工手順	①内部電極設置、②外部電極設置、③通電、 ④通電管理、⑤脱塩量計測、⑥仮設材撤去
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・通電は PC 鋼材の水素脆化対策のため間欠通電とした。 ・電解質溶液の pH の低下を監視した。 ・積算電流量を管理した。 ・アルカリ骨材反応促進への影響を事前に検討した。
	脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ドリル法による塩化物イオン量の測定 ・コア採取による塩化物イオン量の測定
脱塩工法の適用結果	表面の塩化物イオン濃度 8kg/m ³ が 1.5kg/m ³ 程度まで低下した。	

<実施状況等>



施工現場状況



内部電極設置状況



電解質溶液散布状況

参考文献

南馬越光弘：海岸地域における道路橋の塩害対策－北陸道 親不知海岸高架橋－，EXTEC，No.76，pp.66-68

事例 No.	7	
構造物の概要	構造物名	西原橋
	構造形式	鉄筋コンクリート単純T桁橋
	竣工年	1965年
	構造概要	橋長: 10.276m _間 幅員構成: 0.35(地覆)+2.250(歩道)+4.500(車道)+0.300(地覆)
周辺環境	・長崎県上五島町の海岸から 200m 程度離れた河川橋である	
補修前の状況	塩化物イオン濃度	海側 G4 ウェブ表面付近 5.9kg/m ³
	中性化深さ	
	かぶり	
	鋼材の腐食	鉄筋に腐食が認められる。
	外観変状(ひび割れ, 変色等)	・0.2mm 以下のひび割れが主であるが, 0.4mm 程度のひび割れも見られた。 ・断面修復部の再劣化が認められる。
	補修履歴	断面修復, 表面保護工(施工時期は不明)
その他		
適用工法の選定理由	早期補修対策として, 断面修復・ひび割れ注入はもとより, 電気化学的脱塩工により可能な限りの内在塩分を除去した後, 表面被覆工を施すことにした。	
他工法との併用	<ul style="list-style-type: none"> ・断面修復工, ひび割れ注入を行った後に脱塩を実施した。 ・脱塩後は, ひび割れ追従性の高いアクリル系塗装材で飛来塩分を遮蔽した。 	
施工の概要	対策時期・規模	2005年, 87m ²
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.0A/m ²
	通電期間	
	陽極方式	チタンメッシュ+ファイバー方法 ・断面修復を行った後, チタンメッシュ陽極材をコンクリート表面に設置し, 電解質溶液を含む有機ファイバーにて被覆した。
	施工手順	<ul style="list-style-type: none"> ・内部電極および外部電極の設置 ・通電確認による導通および短絡箇所の確認, 補修, 慣らし通電 ・通電管理(通電量・脱塩溶液の管理等) ・内部電極および外部電極の撤去, 清掃
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・既施工の断面修復部を含めて, 断面修復材の電気抵抗を事前に確認した。 ・施工前の塩化物イオン量の分布から, 脱塩効果の目標値はコンクリート表面から 20mm の深さで 2.5kg/m³, 鉄筋位置となる 20~40mm の深さで 1.2kg/m³ とした。
脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> ・一部で陽極方式としてパネル取付方式を用い, 電解質溶液中の塩化物イオン量を測定 ・施工前後のコア採取による塩化物イオン量測定結果の比較 ・施工中のドリル試料による塩化物イオン量測定 	
脱塩工法の適用結果	表面付近の塩化物イオン量は 5.9kg/m ³ から 2.5kg/m ³ 以下となり, 鉄筋位置でも 2.1kg/m ³ から 1.2kg/m ³ 以下となった。	

<実施状況等>



内部陰極接続状況



電気抵抗の測定



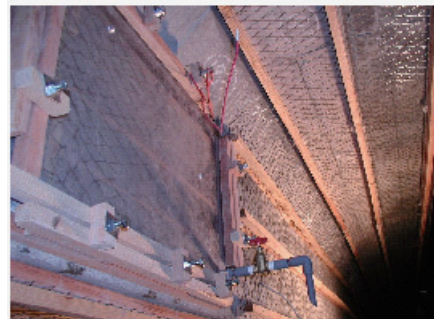
陽極の設置完了



ファイバーの吹付け完了



ファイバーの固定 (プラスチック製ネット)



部分的パネル法システム

参考文献

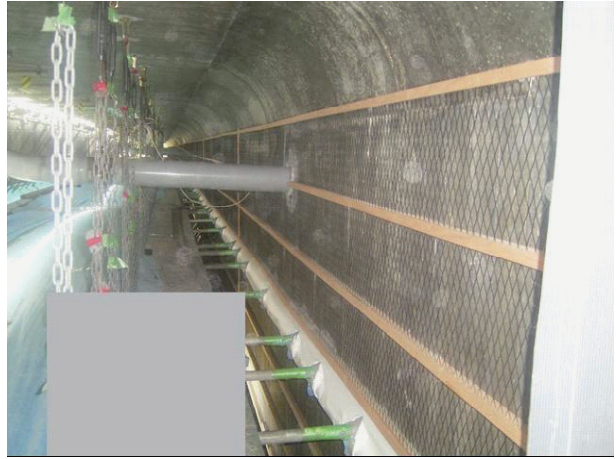
菅谷晃彦, 森内嘉人, 益田秀樹, 猪川充: 西原橋電気化学的脱塩工事の施工報告, 第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.85 ~ 88, 2006.10

事例 No.	8		
構造物の概要	構造物名	青海川橋	
	構造形式	ポストテンション方式 PC 橋 (3 径間連続箱桁橋)	
	竣工年	1982 年	
	構造概要	PC 箱桁橋	
	周辺環境	・新潟県の日本海沿岸に位置し、海岸線からの距離は約 500m である。	
	補修前の状況	塩化物イオン濃度	表面で約 8kg/m ³ 鉄筋位置で約 3kg/m ³ 程度
		中性化深さ	
		かぶり	35mm 程度
鋼材の腐食		点錆程度の軽微な腐食が見られる。	
外観変状(ひび割れ, 変色等)		ほとんど認められない。	
補修履歴		なし	
その他			
適用工法の選定理由	現状では外観に劣化がほとんど認められないが、既に鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m ³ 以上を超えている。この塩化物イオン塩分を残したまま表面保護工を実施した場合、鋼材の腐食による劣化が生じることも予想されるので、予防的な補修として電気化学的脱塩を実施した。		
他工法との併用	<ul style="list-style-type: none"> ・塩化物イオン量が 1.2kg/m³ 以上の範囲では、脱塩工法に表面保護工を併用した。 ・塩化物イオン量が 1.2kg/m³ 以下の範囲では、塩化物イオンの量に応じて、浸透性防錆剤防食工と表面保護工の組合せか、表面保護工のみを実施した。 		
施工の概要	対策時期・規模	2006 年	
	電流密度	コンクリート表面当たり 1.5A/m ²	
	通電期間	積算通電時間 25 日間 (間欠通電を実施, 通電休止期間を含むと 5 週間)	
	陽極方式	チタンメッシュ+セルローズファイバー方法 ・コンクリート表面に栈木を取り付け、その上にチタンメッシュを設置した。 電解質溶液はセルローズファイバーに含浸させた。	
	施工手順	①内部電極設置, ②外部電極設置, ③通電, ④通電管理, ⑤脱塩量計測, ⑥仮設材撤去	
	施工上の留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・PC の水素脆性対策として間欠通電とした。 ・ドリル法による段階的な脱塩量管理を実施した。 ・積算電流量を管理した。 ・アルカリ骨材反応促進への影響を事前に検討した。 ・電解質溶液の pH を管理した。 	
	脱塩効果の確認方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ドリル法による塩化物イオン量の測定 ・コア採取による塩化物イオン量の測定 	
脱塩工法の適用結果	鉄筋近傍の塩化物イオン量を 3kg/m ³ から 1.2kg/m ³ 以下まで低下させた。		

<実施状況等>



橋梁外観



チタンメッシュ設置状況



ファイバー吹きつけ状況



通電状況

参考文献

坂本香, 保坂浩司, 磯谷高嘉: 北陸自動車道青海川橋塩害対策, 橋梁と基礎, pp.14 ~ 18, 2007.10

参考文献

電気化学的脱塩全般について

土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー 107，2001
※脱塩工法設計施工マニュアルを収録

ASR との関連

日本材料学会ほか：ASR に配慮した電気化学的防食工法の適用に関する講習会資料，2007
※ ASR に配慮した電気化学的防食工法の適用に関するガイドラインを収録

自然電位法を用いた事前調査

土木研究所，日本構造物診断技術協会：自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書，整理番号第 357 号，2007

塩化物イオン量と鋼材腐食の関係

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（土木構造物に関する研究成果），1989
※塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）を収録
土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002
※ 2.3「塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査」

参 考 资 料

参考資料

—電気化学的脱塩に関する実験結果—

土木研究所では、塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究を実施するにあたって、「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）」の原案を作成すると同時に、種々の実験を行って脱塩工法に関する技術の検証を行った。ここでは、そこで実権結果の一部を参考資料として紹介する。

ここで紹介する実験は次の三つである。

- (1) 脱塩の効率に関する実験
- (2) 配筋が複雑な場合等に関する実験
- (3) 脱塩後に残留する塩化物イオンの影響に関する実験

参考 1 脱塩の効率に関する実験

参 1.1 検討の目的

脱塩による補修の課題としては、ある通電条件下で脱塩を行った際に除去できる塩化物イオン量（以下、脱塩量）を事前に予測することが難しいことが挙げられる。

脱塩量の予測では、脱塩の効率を表す指標として塩化物イオンの輸率（通過電荷量に対する、塩化物イオンの移動によって運ばれた電荷量の割合）が用いられる場合が多い。しかし、塩化物イオンの輸率は、脱塩を行うコンクリートの配合や塩化物イオン量などによって異なることが知られている。また、輸率は、通電期間の長さなど、通電条件の影響も受ける。

このような理由から、現状では、これまでの経験をふまえ、電流密度はコンクリート表面あたり $1\text{A}/\text{m}^2$ とし、通電期間は 8 週間として脱塩を行う場合が多い。しかし、この通電条件を用いることで常に適切な補修効果が得られるとは限らず、より合理的な脱塩量の予測手法が求められている。そこで、種々の条件が異なる供試体を作製して実験を行い、脱塩量を予測する手法について検討した。

参 1.2 実験方法

(1) コンクリートの配合

表 1 に使用したコンクリートの基本配合を示す。

水セメント比 60% の配合、60A を標準として検討した。これは、より水セメント比が小さい配合を用いた場合と比較して、適切な条件で行えば比較的短時間で脱塩でき、種々の条件を変化させた場合の脱塩の適否をより明確に確認できると考えたこと、外部から塩化物イオンを侵入させた供試体を作製することの容易さなどを考慮したためである。

これに対し、60A から骨材が占める体積を減らした配合 60B（骨材の体積が減少することで電流が流れやすくなると期待されるが、供試体中の塩化物イオンの総量は大きくなる）、水セメント比を 40% とした配合 40 について検討した。いずれの配合でも、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

(2) 供試体の形状

図 1 に供試体の形状を示す。円柱供試体の中心に 1 本の丸鋼を設置したものを標準として検討した。これは、角柱等の形状とする場合と比較して、通電中の電流の流れが明確であると考えたためである。

なお、鋼材間に位置する部位から脱塩することが困難となることをふまえ、複数の鉄筋を用いた供試体も一部作製した。

(3) 塩分の導入と供試体の保管

塩化物イオンの由来の違いによる影響を把握するため、練混ぜ水に NaCl を混入する方法と、コンクリートの硬化後に外部から塩化物イオンを侵入させる方法の二通りの手法で塩分を導入した。以下、前者の方法によるものを初期塩、後者の方法によるものを外来塩と呼ぶことにする。

なお、供試体は、初期塩の場合、製作から3～6箇月間屋内で保管したものをを用いた。また、外来塩の場合は、NaCl水溶液（濃度3%～飽和）への浸漬と気中での乾燥を1週間ごとに約6箇月間繰返して塩分を導入し、その後、約6箇月間、屋外（つくば市）に暴露したものをを用いた。

(4) 実験ケース

表－2に実験ケースの一覧を示す。実験は大きく3回の時期に分けて実施した。初めに実施したS1-A～C4は、特に通電前の塩化物イオン量の大小と脱塩効果の関係に着目して計画した。次に実施したS2-A～Dは、S1-A～Dとの比較で、外来塩と初期塩の違いについて検討することを目的とした。最後に実施したS3-A～Kは、電流密度の影響、水セメント比の影響に着目して計画した。

(5) 通電方法

円筒形の容器に供試体を入れ、一定量の電解質溶液で満たし、供試体の側面にチタンメッシュを設置して通電を行った。通電時は安定化電源を用いて電流量を制御した。電解質溶液には、0.2モルのホウ酸リチウム水溶液を用いた。

(6) 脱塩効果の検証方法

脱塩量を検証するため、脱塩の前後にJIS A 1154に従って、全塩化物イオン量を測定した。試料を採取した位置を図－2に示す。なお、以降の検討では、塩化物イオン量を測定した部位を指す際に、供試体中央からの距離で整理した。この距離は、電流密度との関係を念頭におき、各部位の平均的な距離を算出している。例えば、鉄筋1本の供試体において、鉄筋の近傍で採取した試料は、その図心位置は中心から0mmであるが、中心から8～23mmの範囲に位置する試料と言え、平均的な距離として中心から14mmの部位と表現した。

なお、一時部の実験ケースにおいては、定期的に電解質溶液の一部を採取して、電位差滴定により溶液中の塩化物イオン濃度を測定することにより、通電期間中の脱塩状況の推移をモニタリングした。

参 1.3 実験結果

(1) 通電前の塩化物イオン量と脱塩効果

練混ぜ時に混入した塩分量が異なるS1-A～Hについて、脱塩後の供試体に含まれる塩化物イオン量（以下、残留塩化物イオン量）を図－3に示す。また、外来塩について検討したS2-A～Dについて、脱塩前後の塩化物イオン量を図－4に示す。

これらの実験ケースでは、通電前の塩化物イオン量に関わらず、中央に配した鉄筋近傍の塩化物イオン量を0.4wt% vs C以下まで低下させることができた。また、残留塩化物イオン量は、鉄筋から離れるほど小さくなったが、その量は、通電前から塩化物イオン量が少なかった場合を除き、概ね近い値となった。

(2) 電流密度と脱塩効果

通電中の電流密度が異なるS3-A～Eの残留塩化物イオン量を図－5に示す。通電期間は6週間とやや短

くしたが、供試体表面での電流密度を $1\text{A}/\text{m}^2$ とした S3-E においては、中央に配した鉄筋近傍の塩化物イオン量が 0.4wt% vs C 以下まで低下するなど、残留塩化物イオン量の分布は、8 週間通電した場合（図-3）と類似していた。

一方、電流密度を低下させたケースでは、電流密度が小さいほど鉄筋近傍の残留塩化物イオン量が大きくなった。これらのケースでは、鉄筋近傍の残留塩化物イオン量が 0.4wt% vs C より大きかったことから、脱塩による腐食抑制効果が十分に得られないおそれもある。

なお、供試体中央からの距離が 44mm の部位に着目すると、通電を行わなかった S3-A と通電を行った S3-B ~ D の残留塩化物イオン量が同程度になった。この部位の塩化物イオンの低下には、塩化物イオンが電解質溶液に溶解出したことの影響が大きいものと見られ、必ずしも脱塩の効果とはいえない。

(3) コンクリートの水セメント比と脱塩効果

水セメント比 40% のコンクリートを用いた S3-G ~ I の残留塩化物イオン量を図-6 に示す。残留塩化物イオン量の分布には、水セメント比 60% の場合と同様な傾向が認められた。ただし、水セメント比 40% の場合の方が、60% の場合より残留塩化物イオン量が大きくなった。

(4) 配筋と脱塩効果

S3-J, S3-K の残留塩化物イオン量を図-7 に示す。既往の検討と同様に、鉄筋と鉄筋の間に位置する部位では電位差が生じにくくなり、脱塩が困難になったものと考えられる。データは省略するが、S1-C2, S1-C4 でも同様の傾向が見られた。

参 1.4 脱塩量予測についての考察

(1) 塩化物イオンの輸率に基づく脱塩量予測

a) 種々の条件と塩化物イオンの輸率

脱塩量は、通過電荷量と塩化物イオンの輸率の積として表すことができるので、脱塩量の予測や、脱塩量の大小を評価する場合には、指標として塩化物イオンの輸率が用いられることが多い。しかし、輸率は、種々の条件により異なることが知られており、脱塩効果の予測方法を確立するためには、塩化物イオンの輸率を精度よく推定する方法が求められる。

そこで、今回の実験結果から、式 (1) により塩化物イオンの見かけの輸率を算出した。なお、ここで「見かけの」輸率としたのは、式 (1) では、通電期間中の輸率の変化について考慮せず、実験ケースによっては、除去できる塩化物イオンが通電中になくなっており、結果として輸率が小さく評価されている場合もあると考えられるためである。

$$E_d = \frac{W_t}{a \cdot Q} \quad (1)$$

ここで、 E_d ：塩化物イオンの見かけの輸率

W_t ：脱塩前後の供試体に含まれる塩化物イオンの総量の差 (g)

a ：1 クーロンの電荷の移動により理論的に取り除ける塩分量で、 3.67×10^{-4} (g/C)

Q ：通電期間中に供給した電荷量 (C)

通電前の塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの輸率の関係を図-8に示す。通電前の塩化物イオンが大きいケースほど、見かけの輸率が大きくなっていった。これは、多量の塩化物イオンが含まれる供試体では、そのうちセメント硬化体などに固定化されている塩化物イオンの割合が比較的小さく、脱塩しやすい状態にある塩化物イオンの割合が大きいためと考えられる。

なお、セメントペーストの割合を増やした配合 60B や、塩分を外来塩として導入した場合も、通電前の塩化物イオン量がほぼ同等であれば、塩化物イオンの輸率は同程度となった。

次に、コンクリート表面での電流密度と塩化物イオンの見かけの輸率の関係を図-9に示す。電流密度が小さい場合ほど、見かけの輸率が大きくなる傾向があったが、この理由については、この後通電期間中の脱塩状況の推移をモニタリングした結果から検討する。配合 40 を用いた場合の見かけの輸率は、配合 60A の場合と同程度か、やや小さくなった。

b) 通電中の脱塩量の推移

塩化物イオンの見かけの輸率について検討した結果、これに与える影響が特に大きい要因として、通電前の塩化物イオン量とコンクリート表面での電流密度があった。そこで、電解質溶液に除去できた塩化物イオン量のモニタリング結果を図-10に示す。

図-10から、通電前の塩化物イオン量が同じケースを比較すると、除去できた塩化物イオン量の伸びは、通過電荷量に比例しておらず、通過電荷量が多くなるほど脱塩の効率は落ちることが確認された。図-9に整理した見かけの輸率は、電流密度が小さいケースほど通過電荷量が小さい時点における評価となっており、これが数値の傾向に現れているものと考えられる。

一方、通電前の塩化物イオン量が異なるケースを比較すると、当初の塩化物イオン量が 3.73wt% vs C と大きい場合は、その約半分の 2.02wt% の場合と比較して、同じ通電条件で除去できた塩化物イオンの量が約 2 倍となった。脱塩が必要な塩化物イオン量が比較的多い場合でも、これを除去するために必要な通電期間は、大きくは増加しない可能性がある。

c) 輸率に関する検討のまとめ

実験結果から塩化物イオンの見かけの輸率を算定したと、見かけの輸率は、通電前のコンクリートに含まれていた塩化物イオンの量と強い関係があり、当初から含まれる塩化物イオン量が大きいケースほど、輸率も大きくなった。このことは、電解質溶液の塩化物イオン濃度をモニタリングした結果からも裏付けられた。

コンクリートの配合や塩分の導入方法の違いについては、今回の実験の範囲では、顕著ではなかった。なお、筆者らが過去に実施した実験では、S2-A～Dに対し塩分の導入後すみやかに脱塩を行った場合は、通電2週間程度と極めて短い期間でも大部分の塩化物イオンを脱塩できた¹⁾。しかし、屋外暴露の期間をとった今回の実験結果から、長期にわたって塩化物イオンが侵入した実構造物では、上記のように速やかに脱塩できるとは限らないものと考えられる。

(2) 供試体各部の電流密度に基づく残存塩分量予測

a) 電流密度分布の推定

筆者らのこれまでの検討では、供試体各部の残留塩化物イオン量は電流密度と密接な関係があり、一つの供試体中でも、鉄筋近傍など電流密度が比較的大きい部位では残留塩化物イオン量が少なく、鉄筋間に位置するなど電流密度が小さい部位では残留塩化物イオン量が多くなっていた²⁾。

この一連の実験で通電条件を定める際には、コンクリート表面あたりの電流密度を指標とした。しかし、供試体内部の鉄筋の表面積は、コンクリートのそれより小さいので、一般に鉄筋近傍における電流密度は、コンクリート表面より大きい。このように電流密度は、一つの供試体中でも部位によって異なるので、まず、供試体中の電流密度分布を推定することにした。

推定では、供試体中のコンクリートの品質は均一で、かつ、通電中に変化しないと仮定した。このとき通電中のコンクリートの電位分布は式(2)を満たす。

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

ここで、V：任意の点における電位

そこで、供試体の断面を2mm間隔の格子で近似し、式(2)を満たすような各格子点の電位を差分法で求めた³⁾。このとき、コンクリートの比抵抗は配合にかかわらず100Ω・mと仮定し、供試体と電解質溶液の境界を通過する電流密度が通電条件と合致するようにした。このように求めた電位分布から、電流密度分布を算出した。

b) 各部位の電流密度分布と残留塩化物イオン量

通電期間8週間、6週間のケースについて電流密度と残留塩化物イオン量の関係を図-11、図-12に示す。

図-11から、電流密度が小さい部位ほど、残留塩化物イオン量が大きくなる傾向が認められた。図から、残留塩化物イオン量を0.4wt% vs C程度まで脱塩するためには、3A/m²程度の電流密度が必要と考えられる。図-12でも、図-11と同様に、電流密度と残留塩化物イオン量の間に関係が認められた。水セメント比60%の配合60Aを用いた場合は、8週間の通電を行った場合と同程度の残留塩化物イオン量であった。

一方、配合40を用いた場合は、残留塩分量が大きくなった。配合40の単位セメント量が大きいうえに、塩化物イオンの見かけの輸率が配合60Aと比較して若干小さいことから、通電期間が十分でなかった可能性がある。

また、鉄筋を5本配置した供試体では、鉄筋が1本の場合より、残留塩化物イオン量が大きくなった。この原因は十分には明確でないが、供試体中の電位分布が複雑になり、塩化物イオンが移動する経路が長くなったことなどの影響が考えられる。

参 1.5 まとめ

今回実施した実験の範囲で、以下の結論を得た。

- 1) 通電前の塩化物イオン量が大きいほど、塩化物イオンの輸率が大きくなった。このことから、通電前の塩化物イオン量の大小は、脱塩に必要な通電期間の長さに大きな影響を与えない可能性がある。
- 2) 脱塩後の供試体各部の残留塩化物イオン量は、その部位における電流密度と関係があった。今回の実験ケースでは、水セメント比が60%の場合、残留塩化物イオン量を0.4wt% vs C以下とするためには、 3A/m^2 程度の度が必要であった。
- 3) 水セメント比40%の場合は、水セメント比60%の場合より脱塩の効率が若干低下し、残留塩化物イオン量も大きくなった。一方、塩化物イオン導入方法による違いは、明確ではなかった。

参考文献

- 1) 北野勇一，渡辺博志，古賀裕久，椎名貴快：NaCl水溶液中に浸せきしたRC円柱供試体の脱塩実験，土木学会第62回年次学術講演会，5-254，pp.507-508，2007.9
- 2) 北野勇一，渡辺博志，古賀裕久：補修条件を変えたRC版状供試体の脱塩実験，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第7巻，pp.253-258，2007.11
- 3) 椎名貴快，渡辺博志，久田真，古賀裕久：脱塩工法におけるコンクリート中の電場特性と塩化物イオンの挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1519-1524，2005.7

表-1 コンクリートの基本配合

配合種類	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
	W	C	S	G	
60A	165	275	828	1036	4.5
60B	198	329	770	962	
40	141	353	827	1042	

※細骨材には大井川産の川砂を，粗骨材には笠間産の碎石（砂岩）を使用した。

※打設時期によって使用骨材の密度がわずかに異なるため，材料の単位量が表の値と若干相違している場合もある。

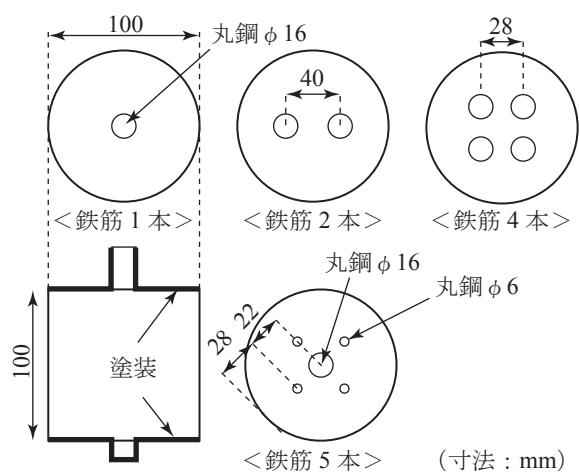


図-1 供試体の形状

表-2 実験ケース

記号	配合	鉄筋	塩分 導入 方法	塩化物 イオン量 (wt% vs C)	電流 密度 (A/m ²)	通電 期間 (週)
S1-A	60A	1本	初期	0.38	1.0	8
S1-B				0.72		
S1-C				1.23		
S1-D				2.36		
S1-E	60B			0.43		
S1-F				0.71		
S1-G				1.44		
S1-H				2.50		
S1-I	60A	2本	1.23	0.5	4	
S1-J				4本	1.0	8
S1-C2					1.0	
S1-C4				1.0		
S2-A	60A	1	外来	1.64	1.0	8
S2-B				2.44		
S2-C				3.87		
S2-D				4.84		
S3-A	60A	1	初期	2.02	0.0	6
S3-B					0.08	
S3-C					0.16	
S3-D					0.32	
S3-E	40			1.0		
S3-F				3.73		
S3-G				0.08		
S3-H				0.16		
S3-I	60A	5本	2.02	0.32	1.0	
S3-J				40		2.02
S3-K						2.33

※配合については、表-1 参照。

※配筋については、図-1 参照。

※通電前の塩化物イオン量は、供試体単位で平均した値を示した。

※ S2-A ~ D の通電前の塩化物イオン量は、塩水への浸漬を終了した時点のものであり、屋外暴露期間中に変化している可能性もある。しかし、試料として利用できる供試体が不足し、通電直前の値を確認することはできなかった。

※電流密度は、コンクリート表面での値を示した。

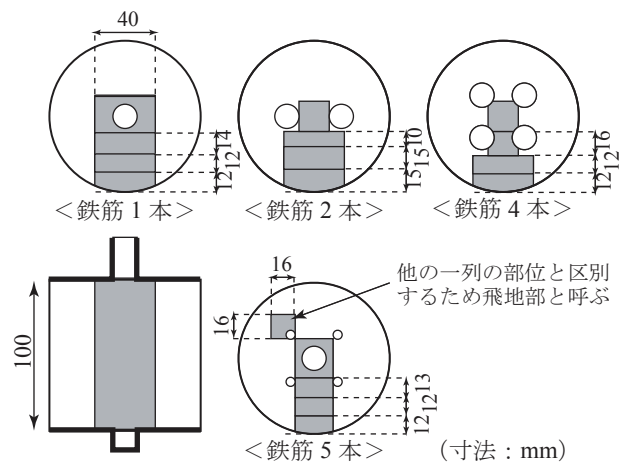


図-2 塩化物イオン量の測定位置

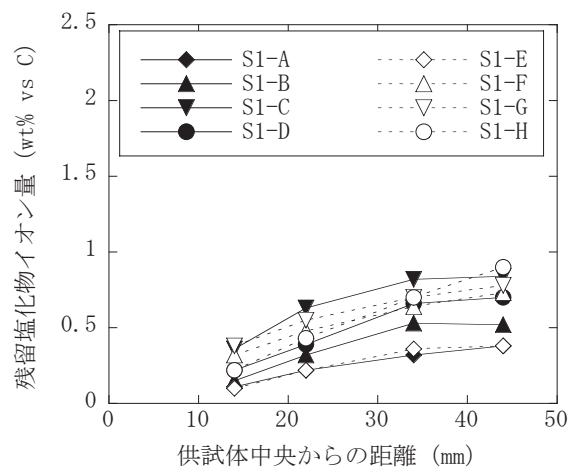


図-3 残留塩化物イオン量の分布 (S1-A ~ H)

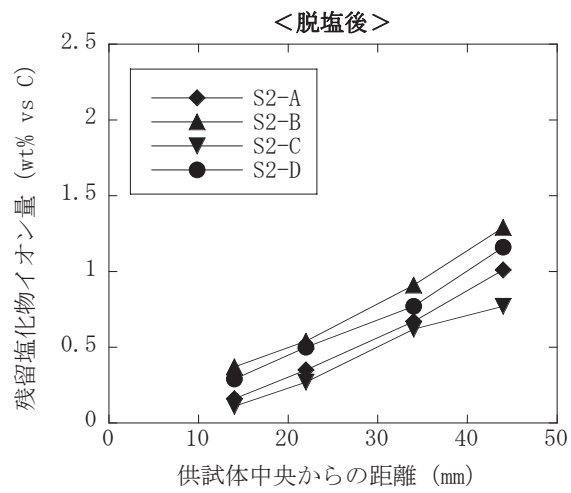
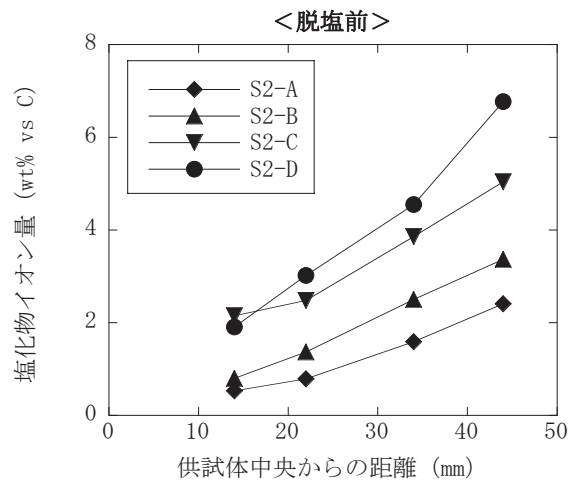


図-4 脱塩前後の塩化物イオン量の分布 (S2-A ~ D)

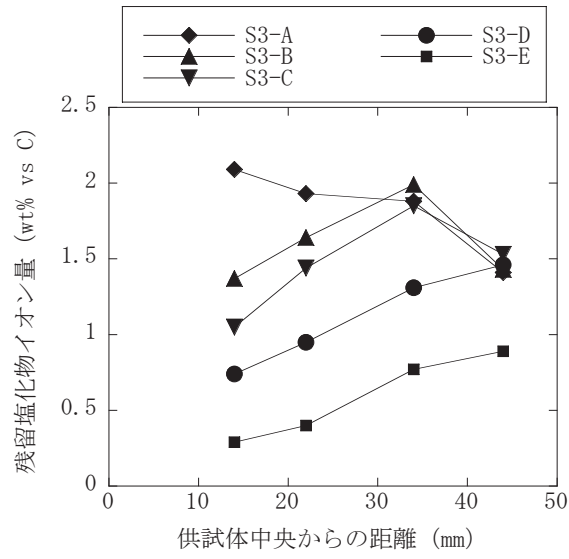


図-5 残留塩化物イオン量の分布 (S3-A ~ E)

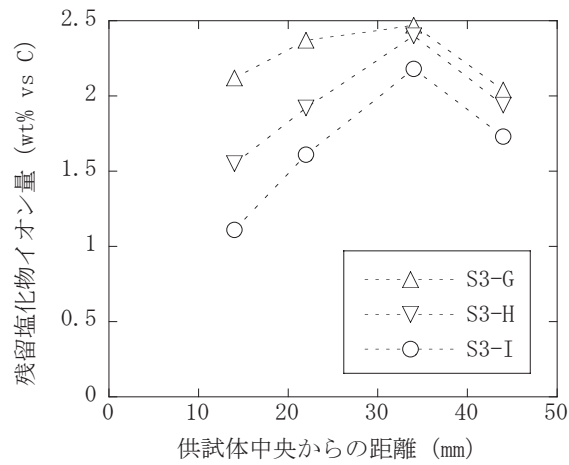


図-6 残留塩化物イオン量の分布 (S3-G ~ I)

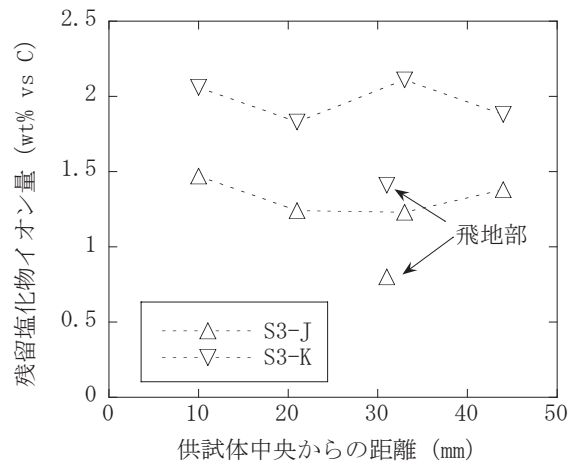
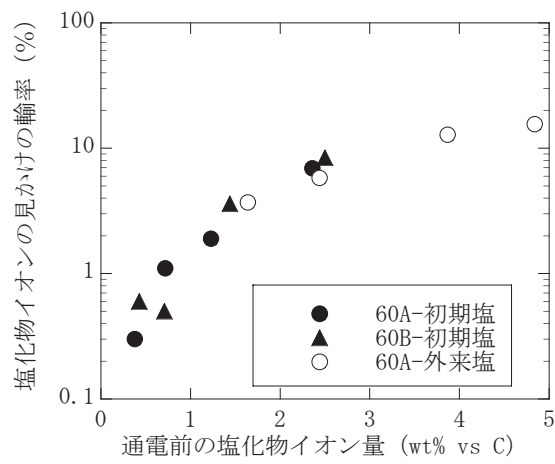
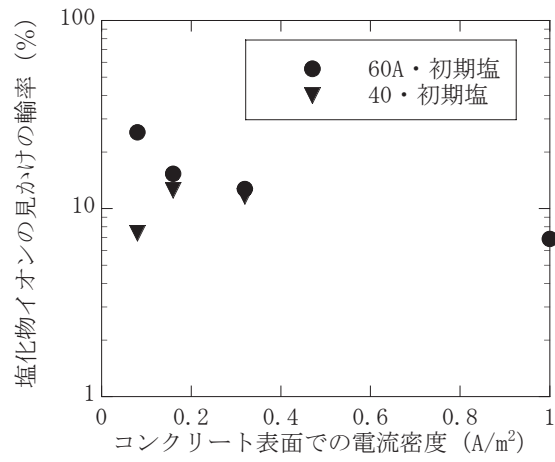


図-7 残留塩化物イオン量の分布 (S3-J, K)



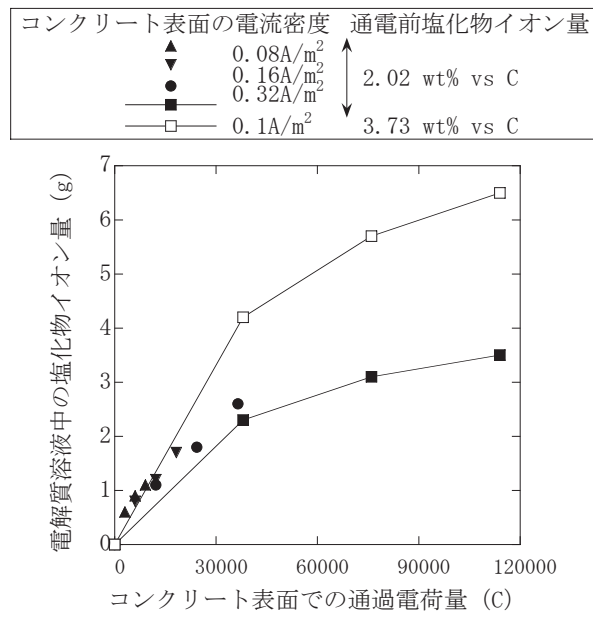
※ S1-A ~ H, S2-A ~ D の結果を示した。

図-8 通電前塩化物イオン量と見かけの輸率の関係



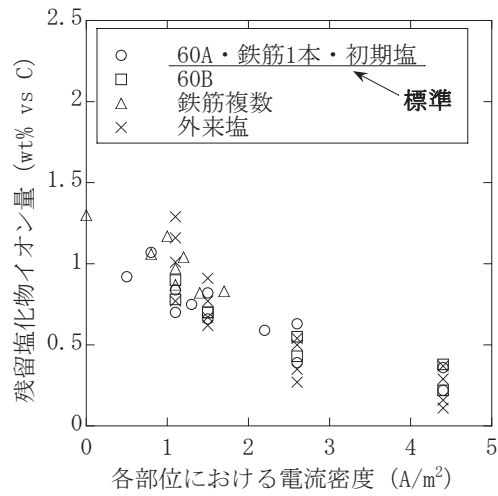
※ S3-B ~ E, S3-G ~ Iの結果を示した。

図-9 電流密度と見かけの輸率の関係



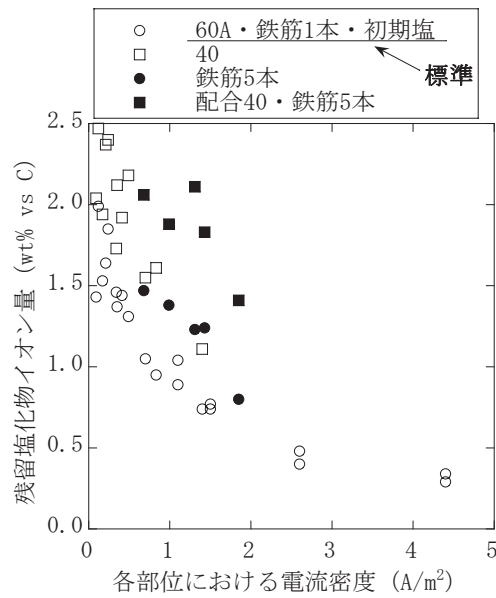
※ S3-B ~ Fの結果を示した。

図-10 脱塩中のモニタリング結果



※ S1-C, D, G, H, I, C2, C4 および S2-A ~ D の結果を示し、脱塩を行う前から塩化物イオンが 1.0wt% vs C 未満であった供試体は省略した。

図- 11 各部位の電流密度と残留塩化物イオン量の関係 (8 週間通电)



※ S3-B ~ K の結果を示した。

図- 12 各部位の電流密度と残留塩化物イオン量の関係 (6 週間通电)

参考2 配筋が複雑な場合等に関する実験

参 2.1 検討の目的

脱塩工法では、通常、鋼材とコンクリート表面に設置した陽極材との間に電気を流す内部電極方式が用いられるが、この方式では、かぶりよりも奥に位置する部位や、鋼材と鋼材の間に位置する部位に電流を流すことが難しく、これらの位置では十分な補修効果を得られない可能性がある^{1),2)}。この問題点に対しては、脱塩工法の適用前に通電時の電流の流れを解析するなどして、補修効果が得られる範囲を明確にすることなどが考えられるが、現状では、その解析手法は確立されているとまでは言えない。

そこで、鋼材間隔やかぶり、ひび割れの有無など種々の条件が異なる供試体を作製し、これらの条件が脱塩効果に及ぼす影響について実験的に検証した。

参 2.2 実験概要

供試体の形状を図-1に示す。供試体は幅300×高さ100×奥行き300mmの版状とした。かぶり40mm、鋼材間隔100mmの供試体Aを基本とし、鋼材の配置を変えた供試体B1～3や腐食鋼材を用いた供試体C、かぶりコンクリートの厚さや品質（ここでは、粗骨材が充填されていない場合を想定）、ひび割れ補修の有無が一つの供試体中で異なる供試体D～Fを各1体作成した。また、供試体には通電や電位測定用の電線（断面積2mm²の被覆付き銅線）を配線した。

コンクリートは表-1に示す配合とし、練混ぜ水にNaClを混入して、塩化物イオンを導入した。供試体Eのモルタルは、このコンクリートをウェットスクリーニングしたものをを用いた。また、鋼材はみがき丸鋼φ9mmとし、供試体Cでは濃度10%の塩水への浸せきと気乾を繰り返して全面腐食させた丸鋼を用いた。供試体はコンクリート打設後1ヶ月の湿空養生を行い、その後、鋼材の突出部の切断、脱塩面以外の塗装、脱塩面への水槽の設置を行った。水槽は通電中の電流分布を確認するため、幅方向に5分割した（図-2）。供試体D～Fではさらにa、b部（図-1参照）に分け10分割した。

脱塩は、この水槽に電解質溶液（0.2mol/LのLi₃BO₃）を深さ50mmまで入れて1日間浸せきした後、コンクリート表面における電流密度1A/m²、通電期間8週間の条件で行った。

通電中には、安定化電源の電圧と電流、供試体中に埋設した電線等と電源の電位差、分流器を流れる電流を1週間ごとに測定した。なお、電解質溶液のpHは12.1～12.7を維持し、陽極付近での塩素ガスの発生は極めて小さかったものと考えられる¹⁾。通電終了後、電解質溶液を40ml採取し、電位差滴定法で塩化物イオン濃度を測定して、外部に抽出された塩化物イオンの量を求めた。さらに、埋設電線の位置に合わせて幅40×奥行き40×高さ10mmの試料を採取し、JIS A 1154に準じて各部位の塩化物イオン量を測定した。

参 2.3 脱塩中の電流の分布に関する検討

(1) 電場の解析結果

通電中の供試体内部の電場を式 (1) に示す Laplace 方程式を元に差分法により解析した¹⁾。

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

解析モデルは要素を 2.5mm の格子状とし (ただし, ひび割れ部の要素は削除した), 脱塩面以外は外界と絶縁されているものとした。また, 解析は, コンクリートが均質で通電中に電位が変化しないことを前提に脱塩面の電位を 0V とし, 脱塩面における電流密度が $1A/m^2$ となるような鋼材の電位を求めた。その結果を表-2 に示す。なお, 供試体 D ~ F は, a 部の条件は供試体 A と同様であり, b 部を単独で解析し (E), 並列回路とした際の合成した電位 E_{comb} を式 (2) より算出した。解析結果を図-3 に示す。

$$\frac{S}{E_{comb}} = \frac{S_a}{E_a} + \frac{S_b}{E_b} \quad (2)$$

ただし, S: 全脱塩面積 (m^2), S_a, S_b : a, b 部の脱塩面積 (m^2), E_a, E_b : a, b 部の鋼材電位 (V)

(2) 実験結果と考察

通電中に測定した陽極-陰極間の電位差を表-3 に示す。この実験値と解析値 (表-2) を比較すると, 供試体 A ~ C は電位 E と, 供試体 D ~ F は電位 E_{comb} と概ね合致していた。

電線を埋設した位置で電位を実測した結果を図-4 に示す。供試体 A, B1 の実験値は, 鋼材が含まれる断面でも, 鋼材と鋼材の中間に位置する断面でも, 解析値とその傾向がよく一致していた。また, 他の供試体でも同様であった。

参 2.4 脱塩量に関する検討

(1) 供試体全体としての脱塩量と輸率

供試体外部の電解質溶液中の塩化物イオン濃度を測定し, 各供試体から脱塩できた塩化物イオン量を推定した。また, 供試体ごとに (供試体 D ~ F については, a, b に分けて) 式 (3) で求められる塩化物イオンの輸率 t を算定した。その結果を表-4 に示す。

$$t = \frac{Q}{T} \times 100 = \frac{\text{脱塩量(g)}}{1780 \times \text{電流(A)}} \times 100 \quad (3)$$

ただし、Q：定常時の塩化物イオン抽出量 (g)

T：通過電荷量によって理論的に抽出可能な塩化物イオン量 (g) で、
1Aの電流を8週間通電した際にその電荷の移動が全て塩化物イオンによってなされるとすると、1780g。

塩化物イオンの輸率は、供試体Dのb部を除くと3.2～3.8%と供試体や部位による違いはわずかであった。このように、供試体単位で比較すると、脱塩量の違いは大きくなかった。

ただし、供試体Fでは表－2の電流量と異なり、a部よりb部が大きくなった。これは、ひび割れ部からも脱塩されているためと考えられ、コンクリート表面積が増加して、電流が流れやすい状態になっていたと考えられる。

(2) 供試体内部の部位による脱塩量の違い

脱塩後の供試体の各部位に残留していた塩化物イオン量の測定結果と、電場の解析結果より供試体内部の各要素における電流密度を求めた結果を図－5に示す。

これより、鋼材近傍では電流密度が2A/m²以上となり、残留塩化物イオン量は1.0kg/m³を下回った。また、鋼材に近い位置のかぶり部でも電流密度が1A/m²を超え、残留塩化物イオン量も1.2kg/m³程度まで減少していた。一方、鋼材よりも奥の部位や鋼材間では電流密度が1A/m²を下回り、残留塩化物イオン量は概ね2kg/m³を超え、脱塩の効果が明確でなかった。

今回実施したモルタル部を除く全供試体について各部位の残留塩化物イオン量（実験値）と電流密度（解析値）の関係を図－6に示す。図中には塩化物イオンの輸率を3.3%（式(3)により算出した供試体Aの輸率、表－4参照）と仮定した場合の残留塩化物イオン量（Cl⁻_r、式(4)により算出）を併せて示した。

$$Cl^-_r = Cl^-_{ini} - i \times Cl^-_d \quad (4)$$

ただし、Cl⁻_{ini}：内在塩化物イオン量 = 2.73kg/m³

i：電流密度 (A/m²)

Cl⁻_d：塩化物イオンの輸率が3.3%で電流密度1A/m²の場合の
塩化物イオン減少量で0.785kg/m²・A。

図から、電流密度が大きいと推定された部位ほど残留塩化物イオン量が小さくなる関係が認められ、特に鋼材位置の測定結果では、この関係が明確であった。ただし、電流密度が $2\text{A}/\text{m}^2$ を超えると、残留塩化物イオン量は $0.5 \sim 0.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ となり、それ以下には脱塩できなかつた。一方、鋼材間では、電流密度が解析上 $1\text{A}/\text{m}^2$ 程度以下であり、電流密度と残留塩化物イオン量の関係も鋼材位置ほどは明確でなかつた。

なお、鋼材位置の残留塩化物イオン量は、輪率 3.3% と仮定した場合に推定される量よりも多くの場合若干小さくなつた。逆に、鋼材間の残留塩化物イオン量は、若干大きくなつた。

参 2.5 各種条件が脱塩効果に与える影響

(1) 鋼材配置の影響

a) 鋼材より奥の部位

供試体 A の場合、脱塩面から見て鋼材より奥の部位でも、鋼材から約 10mm の範囲までは、電位勾配が生じており、それに見合った脱塩効果が得られていた (図-5)。一方、鋼材から約 10mm を超えた奥の部位では、電位の勾配がほとんどなく、脱塩効果がほとんどないか、あるいはかえって脱塩により塩化物イオン量が増加した。これは、当初、鋼材付近にあった塩化物イオンが電位勾配によってさらに奥へと移動したためと考えられる。

b) 鋼材間の部位

鋼材と鋼材の間でも、脱塩面に向かう電位勾配があるが (図-3, 4)、この部位の脱塩効果は鋼材を含む部位にくらべ、小さくなつた (図-6)。これは、当初、鋼材の近くにあった塩化物イオンが、電位勾配に沿って流入してくるためと考えられる。このように、鋼材位置では十分な脱塩効果が得られている場合でも、鋼材から離れた位置では塩化物イオン量の低下がほとんど認められない場合もあることには注意を要する。

c) 内部にある鋼材の影響

例えば、プレストレストコンクリート部材のように最外縁鉄筋よりも内部に多くの鋼材が配置されている場合、その影響で電位の勾配が変化し、上記 (1)、(2) 項で検討した部位の脱塩効果が改善されることが期待される。実際に図-5 で供試体 B2、B3 の電流密度分布を見ると、鋼材間の部位などで供試体 B1 より電流密度が大きくなっている。しかし、今回の実験では、供試体 B2 や B3 の残留塩化物イオン量は、供試体 A や B1 と比較して、顕著には改善されなかつた (図-5)。これは、通電条件をコンクリート表面当り $1\text{A}/\text{m}^2$ としたことで、鋼材量の多い供試体ほど、鋼材表面付近の電流密度が小さくなつたためである。このように内部に鋼材が多く存在する場合は、鋼材表面の電流密度を適正な範囲で増大させることで脱塩効果を向上できると考えられる。

(2) 鋼材腐食の影響

鋼材を全面腐食させた供試体 C では、同一配筋の供試体 A より 18%ほど陽極-陰極間の電位差が大きくなつた (表-3)。この原因は明確でないが、腐食生成物により、鋼材とコンクリート間の接触抵抗が増大した可能性がある。ただし、本実験では、脱塩量や輪率は供試体 A と同程度であり、脱塩効果への影響は小さかつた (表-4)。

(3) かぶり部の影響

a) かぶりコンクリートの厚さが異なる場合

供試体 D では、かぶりの薄い部位 (b 部) が設けてあり、電流は、かぶりが薄い部位をより多く流れた (表-4)。その結果、供試体 A と同じ形状である a 部では、電流密度が低下し、脱塩できた塩化物イオン量も減少した。ただし、塩化物イオンの輸率には大きな影響はなかった。

したがって、かぶりが部位によって異なる場合には、かぶりが厚い部位で脱塩効果を得られにくいことに留意する必要がある。なお、表-4 より供試体 D の b 部で輸率が低下していたが、この部分のかぶりが小さく通電中に電流が流れる範囲が限定されたためと考えられる。

b) かぶりコンクリートの品質が異なる場合

供試体 E では、粗骨材量が変化する場合を想定し、b 部をモルタルに置換した。その結果、モルタルの方が比抵抗が小さいため、b 部を流れる電流量が大きく、a 部を流れる電流量は小さくなった (表-4)。実測値は、この解析値とよく合致しており、かぶりコンクリートの品質が異なる場合は、その比抵抗の違いを考慮することで適切に解析できるものと考えられる。

c) ひび割れの影響

図-7 にひび割れ近傍の電位 (比較として供試体 A の同位置の電位) 測定結果を示す。これより、供試体 F の b 部では、ひび割れ部に電解質溶液が入り込んだため、ひび割れのない場合と比較して、ひび割れ近傍の電位が低下した。一方、ひび割れ補修を行った a 部では、電位の低下は僅かであった。

参 2.6 まとめ

上記の検討を通じて、以下の知見が得られた。

- 1) 通電中の陽極-陰極間の電位差、ならびに供試体中の電場は、解析によって概ね明らかにすることができた。
- 2) 供試体内部の脱塩量は、解析によって求めた各部位の電流密度と良好な関係があった。ただし、鋼材間に挟まれ、電流密度が小さい部位では、その部位に含まれる塩化物イオン量が脱塩によってかえって上昇する場合もあった。
- 3) 脱塩効果を得るのが難しいと考えられる鋼材より奥の部位や鋼材間あるいはかぶりコンクリートが均質でない場合等について検討し、その影響を定量的に把握した。

参考文献

- 1) 椎名貴快, 渡辺博志, 久田 真, 古賀裕久: 脱塩工法におけるコンクリート中の電場特性と塩化物イオンの挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1519-1524, 2005.7
- 2) 古賀裕久, 渡辺博志, 椎名貴快, 北野勇一: 脱塩工法適用時の配筋の影響に関する基礎的な研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 5 部門, pp.273-274, 2006.9
- 3) 皆川 浩, 守屋 進, 内藤英晴, 川俣孝治: セメント系材料の電気抵抗率測定法の試験条件に関する基礎的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 5 部門, pp.527-528, 2004.9

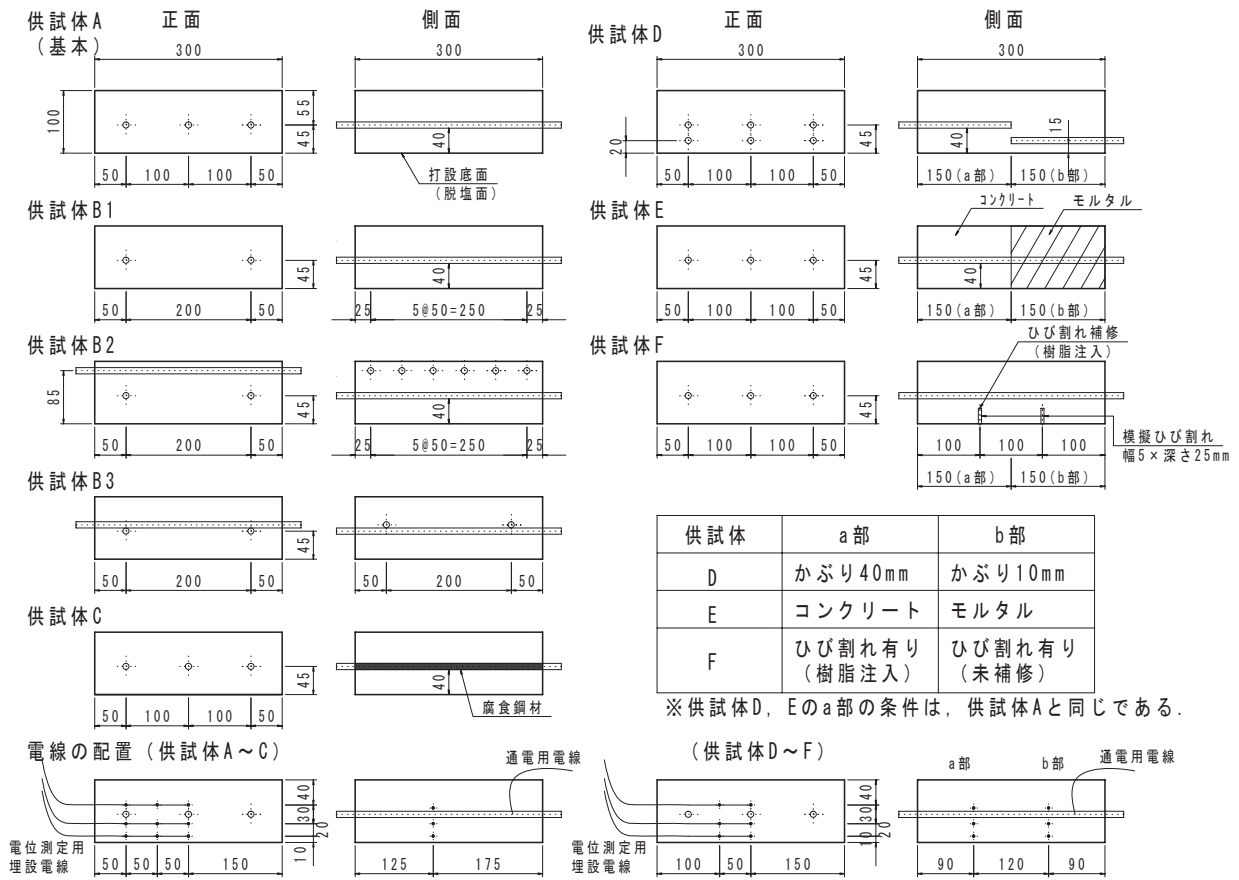


図-1 供試体の形状 (注:脱塩面は、各供試体とも底面とした)

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G*	Cl ⁻ **
60	8	4.5	165	275	828	1036	2.73

* 粗骨材最大寸法は13mm (砕石6号) とした。

** 硬化後に試験を行って確認した値を示した。

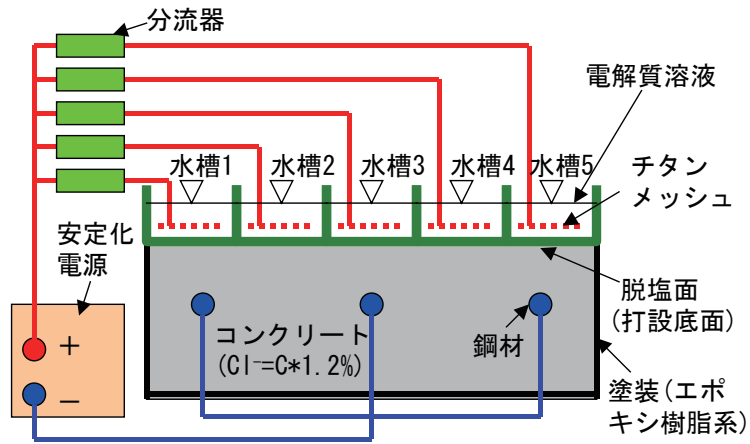


図-2 脱塩状況 (正面から)

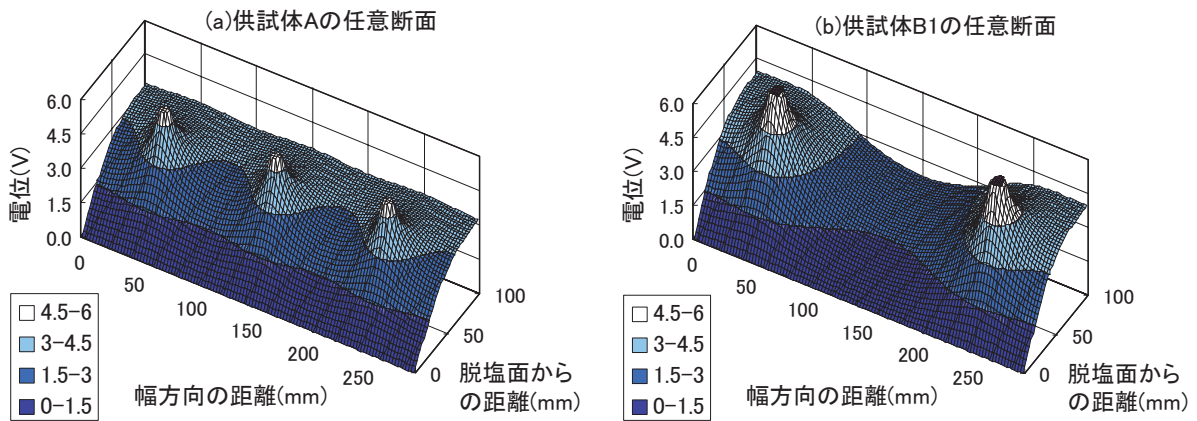


図-3 電場解析による電位分布の算定結果例

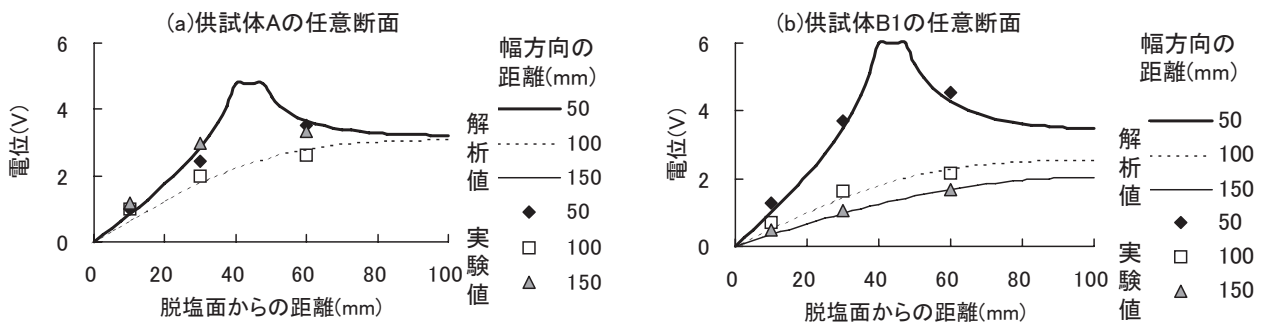


図-4 供試体内部の電位分布の測定結果例

表-2 陽極・陰極間の電位差の解析結果

項目		A	B1	B2	B3	C	D	E	F
E (V)		5.02	6.76	5.08	5.92	5.02	2.76	3.17	6.27
E _{comb} (V)							3.55	3.89	5.58
I(mA)	a部	90	90	90	90	90	32	35	50
	b部						58	55	40

* 解析には、四電極法³⁾により比抵抗を測定した結果(コンクリート 77.6 Ω m, モルタル 49.0 Ω m)を用いた。

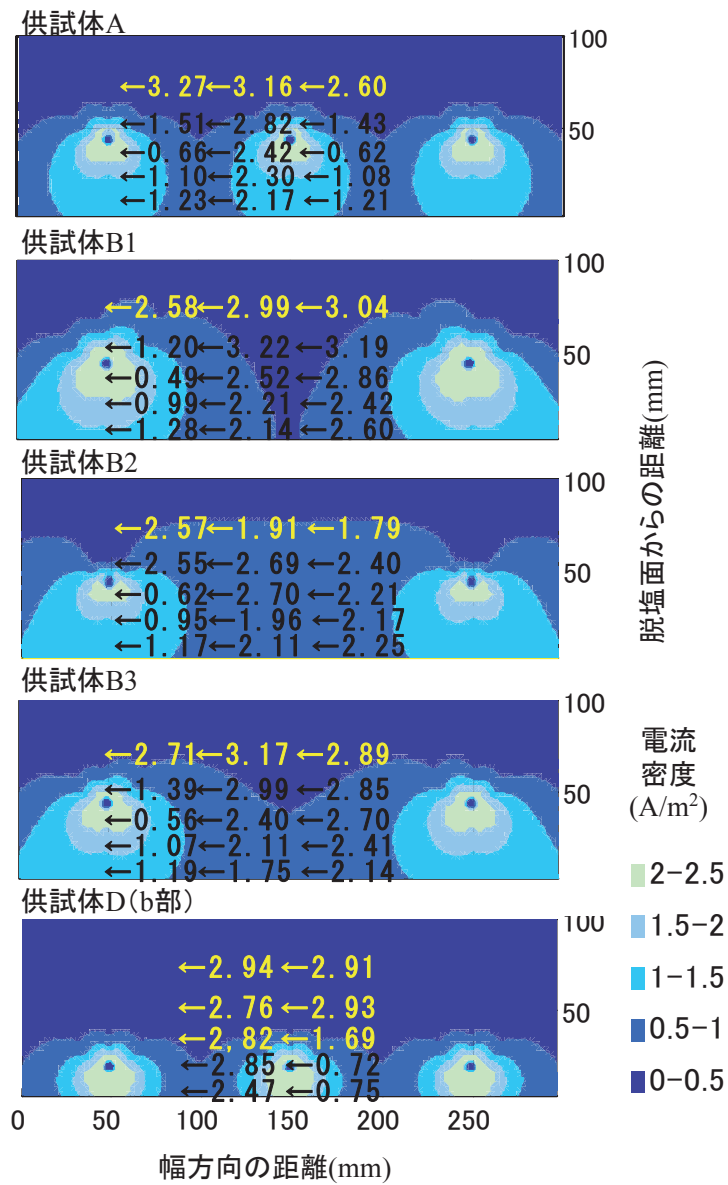
表-3 陽極・陰極間の電位差の測定結果

項目	A	B1	B2	B3	C	D	E	F
E _{ex} (V)	4.79	6.02	5.39	5.13	5.64	3.77	4.06	5.08

表-4 塩化物イオンの輸率の算定結果

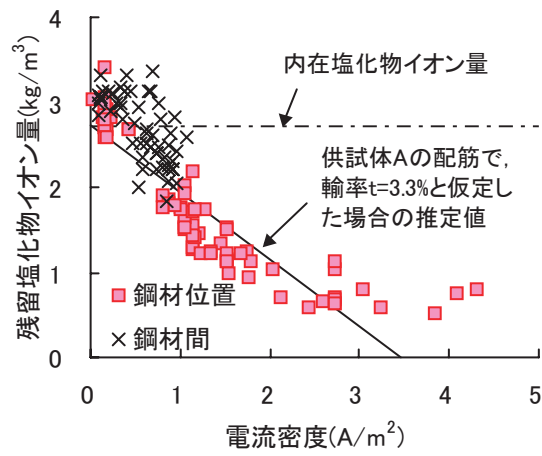
供試体	脱塩量 (g)		電流 (mA)		輸率 (%)	
	a部	b部	a部	b部	a部	b部
A	5.28		90		3.30	
B1	5.26		88		3.36	
B2	6.17		91		3.81	
B3	5.57		91		3.44	
C	5.39		91		3.33	
D	1.78	1.69	31	59	3.23	1.61
E	2.47	2.93	37	50	3.75	3.29
F	2.50	3.39	40	51	3.51	3.73

* 電流は通電期間中の平均値を示した。



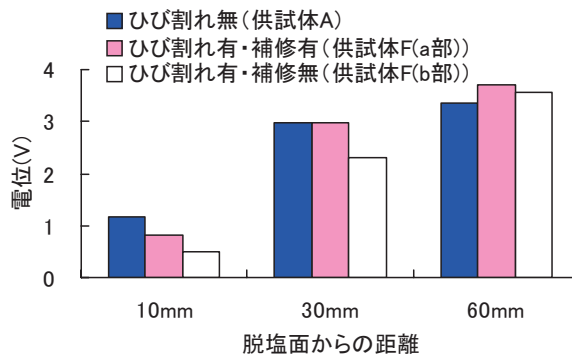
* 図中の数値は残留塩化物イオン量 (単位 :kg/m³)

図-5 残留塩化物イオン量の測定結果と供試体内部の電流密度の解析結果例



※鋼材位置／鋼材間：供試体を脱塩面から見た際に、最外縁の鋼材と重なる／重ならないような部位

図－6 残留塩化物イオン量と電流密度の関係



図－7 ひび割れ近傍の電位測定結果

参考3 脱塩後に残留する塩化物イオンの影響に関する実験

参 3.1 検討の目的

塩害を受けた構造物に電気化学的脱塩による補修を施すこと目的は、塩化物イオンを取り除くことにより、かぶりコンクリートにより鋼材が腐食から守られている状態を回復することにある。しかし、こうした目的を達するために、塩化物イオンをどの程度まで脱塩する必要があるのかは、現在の知見では、十分には明確ではない。このため、現状では、土木学会コンクリート標準示方書や建設省耐久性総プロの成果などを参考に、全塩化物イオン量がコンクリート当たり $1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ 以下となることを目標にするのが一般的と考えられる。

一方、脱塩を行ったコンクリートでは、鋼材周囲でアルカリ金属イオンの集積が見られ、pHが上昇していることから、仮に上記の目標を達成できず、塩化物イオン量が 2.5kg/m^3 を超えた場合でも、ただちには腐食しない可能性があるとの指摘もある。

そこで、あえて通電後も多量の塩化物イオンが残留するような供試体を製作し、残留塩化物イオンが鋼材の腐食に与える影響を検討した。

参 3.2 検討方法

検討ケースを表-1に示す。配合は、これまでに行った検討結果と比較するため、水セメント比60%の場合を中心に検討した(表-2)。供試体の形状は、 $\phi 100 \times 100\text{mm}$ の円柱とし、中心に $\phi 16\text{mm}$ の丸鋼を1本配したものを標準とした(図-1)。

これまで種々の検討を行った結果から、導入する塩分量を増やしても脱塩に要する期間はあまり大きく変化しないこと、コンクリート表面あたり 1A/m^2 の電流を流すと比較的短時間のうちに脱塩できる場合もあること、などが明らかになっていた。このため、電流密度を著しく低下させた供試体を検討対象とした。また、中央の丸鋼の周囲に小径の丸鋼を配し、供試体中央部の電位差を少なくした供試体も用いた。

供試体は、練混ぜ水にNaClを混入することにより塩化物イオンを導入した。打設後約3ヶ月間室内で保管したものを脱塩に用いた。

脱塩の前後に供試体を解体し、全塩化物イオン量を確認した。また、解体した供試体と同時に脱塩した供試体を脱塩後屋外(茨城県つくば市)に暴露した。

参 3.3 検討状況

表-3に通電前の、表-4に脱塩後の塩化物イオン量の測定結果を示す。また、表-5には自然電位の測定結果を示す。

ここで、普通セメントを使用した水セメント比60%の実験ケースに着目して整理すると、電流密度を小さくした実験ケースや鉄筋を複数配置した実験ケースでは、中央の丸鋼周囲の残留塩化物イオンが比較的大きく、鋼材の腐食が生じることも十分考えられる供試体もある(図-2)。なお、図-2で、通電を行っていない供試体や電流密度の小さい供試体でも供試体表面の塩化物イオン量が低下しているのは、コンクリー

ト表面から溶け出したものと見られ、必ずしも脱塩の効果とはいえない。

これに対し、自然電位の測定結果では、通電直後に著しく卑の値であったが、その後は多くの場合で貴な値に転じていた（図-3、コンクリート表面で $1A/m^2$ の電流密度とした場合を除く）ので、鉄筋1本で通電を行った供試体では、残留塩化物の大小にかかわらず、現時点では腐食していないと見られる。しかし、鉄筋の自然電位が今後も比較的貴なままで推移するかどうかは明確でなく、今後も観察を継続した上で結論を求める予定である。

なお、上記のような傾向は、水セメント比を40%とした配合や高炉スラグでセメントの50%を置換した配合でも、同様である。

表-1 実験ケース

記号	配合	鉄筋	塩分量 (wt% vs C)	電流密度 (A/m^2)		通電期間	備考
				コンクリート 表面	鉄筋表面		
A	普通 W/C:60%	1本	2.4	0.0	0.0	8週	電解質溶液に浸漬のみ
B				0.08	0.5		脱塩効果を得るには小さい電流密度
C				0.16	1.0		
D				0.32	2.0		
E				1.0	6.25		一般的な通電条件
F				0.16	1.0	16週	
G			4.8		6.25		
H	5本	2.4	1.0	1.0	8週	中心も短絡	
I						1.0	中心は短絡しない
J	普通 W/C:40%	1本	2.4	0.08	0.5	8週	
K				0.16	1.0		
L				0.32	2.0		
M		5本		1.0	1.0		中心も短絡
N				1.0	1.0		中心は短絡しない
O	高炉 W/C:60%	1本	2.4	0.08	0.5	8週	
P				0.16	1.0		
Q				0.32	2.0		
R		5本		1.0	1.0		中心も短絡
S				1.0	1.0		中心は短絡しない

表-2 コンクリートの配合

配合種類	Gmax (mm)	s/a	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)
			W	C	スラグ	S	G	
普通, W/C=60%	13	45	165	275	—	828	1042	4.5
普通, W/C=40%			141	352	—			
高炉, W/C=60%			163	136	136			

※塩分量の計算をする際には、高炉, W/C = 60%の配合では、スラグとセメントを合算したものを単位セメント量として行った。

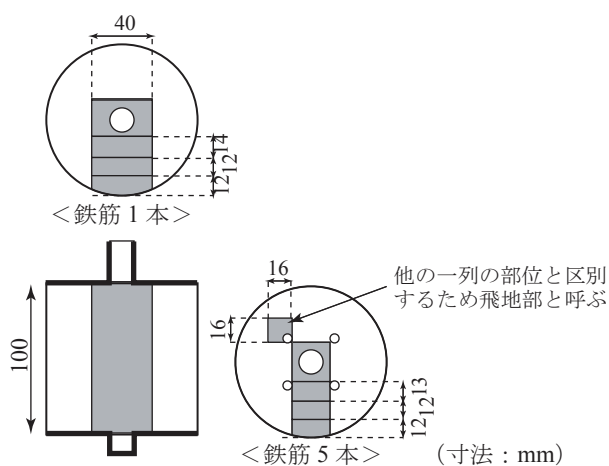


図-1 供試体の形状

表-3 通電前の塩化物イオン量

供試体種類	全塩化物イオン量 (wt% vs C)					温水抽出塩化物イオン量 (wt% vs C)				
	(中央) ←		→ (脱塩面)		飛地部	(中央) ←		→ (脱塩面)		飛地部
普通, W/C=60%, 鉄筋 1本	2.25	1.95	2.07	1.97	—	1.55	1.44	1.51	1.70	—
(同上) 供試体 G のみ	4.19	3.70	3.76	3.58	—	3.32	3.16	3.09	3.20	—
普通, W/C=60%, 鉄筋 5本	2.19	2.02	2.07	2.05	1.92	1.68	1.59	1.60	1.73	1.58
普通, W/C=40%, 鉄筋 1本	2.62	2.50	2.51	2.04	—	2.56	1.93	1.87	1.84	—
普通, W/C=40%, 鉄筋 5本	3.09	2.30	2.25	2.24	2.30	1.87	1.93	1.76	1.74	1.80
高炉, W/C=60%, 鉄筋 1本	2.08	1.95	1.92	2.00	—	1.63	1.47	1.54	1.80	—
高炉, W/C=60%, 鉄筋 5本	未測定									

表-4 脱塩後の塩化物イオン量

記号	全塩化物イオン量 (wt% vs C)				飛地部	温水抽出塩化物イオン量 (wt% vs C)				飛地部
	(中央) ←		→ (脱塩面)			(中央) ←		→ (脱塩面)		
A	2.09	1.93	1.88	1.41	-	1.46	1.40	1.43	1.02	-
B	1.37	1.64	1.99	1.43		1.03	1.26	1.43	1.03	
C	1.05	1.44	1.85	1.53		0.67	1.00	1.30	1.17	
D	0.74	0.95	1.31	1.46		0.39	0.54	0.85	1.09	
E	0.29	0.40	0.77	0.89		0.14	0.21	0.42	0.59	
F	未測定									
G	0.34	0.48	0.74	1.04	-	0.24	0.30	0.48	0.75	-
H	1.47	1.24	1.23	1.38	0.80	1.07	0.94	0.95	1.06	0.53
I	1.80	1.09	1.19	1.19	0.78	1.32	0.84	0.86	0.97	0.44
J	2.12	2.38	2.48	2.04	-	1.43	1.64	1.78	1.50	-
K	1.56	1.92	2.41	1.94		1.09	1.42	1.72	1.51	
L	1.11	1.61	2.19	1.74		0.79	1.30	1.67	1.38	
M	2.07	1.84	2.11	1.88	1.41	1.56	1.40	1.61	1.43	0.99
N	2.10	1.76	2.02	2.01	1.21	1.75	1.39	1.49	1.58	0.81
O	1.72	1.83	1.90	2.04	-	1.35	1.41	1.48	1.65	-
P	1.13	1.39	1.96	2.04		0.93	1.03	1.51	1.60	
Q	1.74	1.85	1.82	1.93		1.30	1.44	1.48	1.62	
R	2.02	1.62	1.72	1.90	1.65	1.54	1.33	1.42	1.56	1.17
S	2.13	1.65	1.84	1.90	1.45	1.65	1.31	1.49	1.55	0.89

表-5 自然電位モニタリング結果

記号	鉄筋 No.	自然電位 (mV, vs CSE)				
		脱塩直後	2 週後	4 週後	6 週後	8 週後
A	1	-363	-307	-273	-275	-262
		-347	-311	-286	-279	-268
B	2	-1123	-216	-153	-142	-143
		-1108	-231	-165	-155	-155
C	3	-1104	-806	-426	-281	-254
		-1122	-815	-438	-295	-263
D	4	-1120	-851	-503	-266	-283
		-1138	-866	-519	-280	-285
E	5	-1185	-1084	-1034	-1024	-1003
		-1199	-1089	-1039	-1033	-1024
F	6	未測定				
G	7	-1202	-1085	-1039	-1022	-1006
		-1205	-1090	-1046	-1026	-1010
J	8	-1116	-174	-142	-156	-126
		-1125	-171	-137	-149	-125
K	9	-1131	-212	-135	-136	-113
		-1134	-221	-148	-148	-112
L	10	-1150	-905	-847	-493	-424
		-1146	-910	-845	-502	-428
O	11	-1140	-247	-198	-168	-169
		-1147	-248	-203	-169	-173
P	12	-1196	-358	-296	-254	-282
		-1209	-364	-304	-270	-293
Q	13	-1255	-1039	-1001	-937	-947
		-1265	-1059	-1006	-970	-960
H	14 (中央)	-1087	-178	-140	-129	-130
		-1095	-183	-136	-126	-127
	15	-1119	-777	-390	-251	-184
		-1134	-797	-398	-260	-199
	16	-1107	-387	-280	-172	-182
		-1129	-395	-288	-172	-186
	17	-1130	-937	-716	-201	-168
		-1136	-941	-725	-192	-171
	18	-1132	-714	-289	-242	-211
		-1144	-728	-289	-242	-223
I	19 (中央)	-567	-518	-471	-461	-436
		-574	-528	-493	-466	-470
	20	-1123	-1044	-642	-253	-220
		-1129	-1041	-643	-249	-208
	21	-1127	-1032	-829	-268	-271
		-1136	-1036	-832	-285	-274
	22	-1127	-682	-329	-156	-133
		-1137	-682	-336	-156	-140
	23	-1078	-895	-351	-157	-156
		-1135	-909	-374	-169	-172

表-5 続き 自然電位モニタリング結果

記号	鉄筋 No.	自然電位 (mV, vs CSE)				
		脱塩直後	2 週後	4 週後	6 週後	8 週後
M	24 (中央)	-1120	-172	-127	-104	-157
		-1129	-193	-146	-97	-178
	25	-1137	-376	-243	-163	-164
		-1135	-383	-245	-171	-186
	26	-1135	-392	-236	-115	-125
		-1133	-411	-243	-120	-124
	27	-1135	-445	-285	-160	-113
		-1123	-453	-281	-155	-123
	28	-1130	-298	-209	-134	-125
		-1128	-305	-209	-141	-134
N	29 (中央)	-566	-562	-526	-517	-513
		-572	-556	-518	-525	-522
	30	-1139	-371	-269	-198	-146
		-1135	-370	-278	-195	-149
	31	-1130	-988	-528	-281	-264
		-1138	-977	-534	-283	-271
	32	-1103	-492	-294	-232	-235
		-1129	-497	-306	-227	-249
	33	-1126	-662	-344	-240	-201
		-1106	-653	-340	-264	-195
R	34 (中央)	-1177	-242	-195	-209	-225
		-1187	-233	-198	-206	-228
	35	-1195	-705	-448	-349	-408
		-1223	-707	-445	-349	-404
	36	-1193	-549	-307	-226	-204
		-1188	-546	-302	-217	-194
	37	-1182	-468	-233	-163	-151
		-1170	-459	-229	-156	-148
	38	-1177	-468	-246	-159	-185
		-1194	-457	-232	-158	-188
S	39 (中央)	-653	-462	-446	-433	-419
		-660	-457	-443	-433	-434
	40	-1170	-433	-320	-215	-366
		-1190	-417	-317	-209	-365
	41	-1179	-371	-267	-196	-214
		-1193	-362	-262	-187	-210
	42	-1174	-703	-424	-274	-308
		-1166	-684	-418	-260	-302
	43	-773	-330	-205	-207	-108
		-787	-340	-212	-203	-106

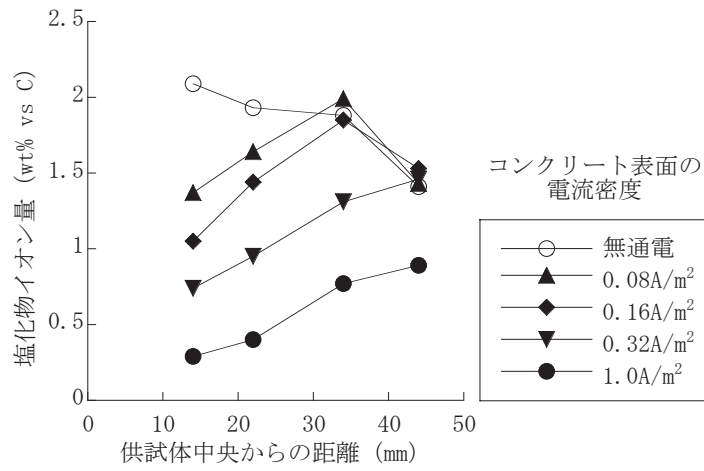


図-2 脱塩後の塩化物イオン量 (普通, W/C = 60%)

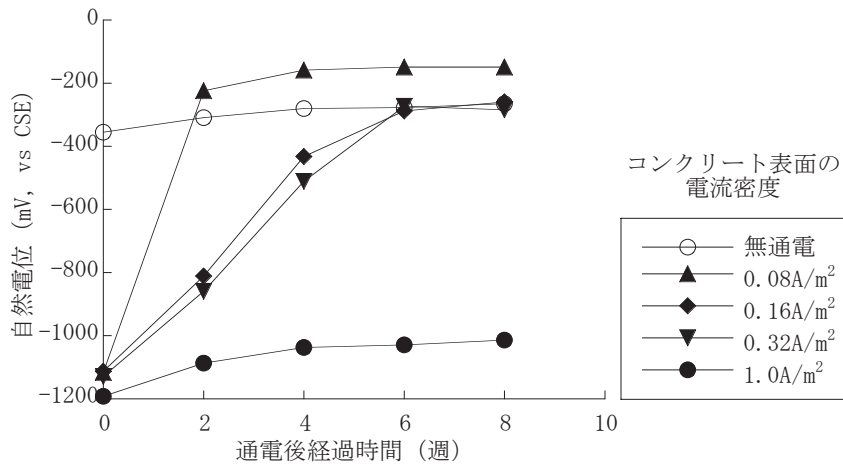


図-3 自然電位モニタリング結果 (普通, W/C = 60%)