

橋梁塩害対策検討委員会

塩害橋梁維持管理マニュアル(案)

【マニュアル(案)の目次構成(案)】		page
塩害橋梁維持管理マニュアル(案)の作成の目的	-----	1
1. 総則	-----	3
1.1 適用の範囲	-----	3
1.2 用語の説明	-----	4
1.3 維持管理	-----	5
2. 詳細調査	-----	9
2.1 一般	-----	9
2.2 詳細調査の方法	-----	11
2.3 詳細調査結果の判定	-----	17
3. 劣化予測	-----	22
4. 健全度の評価	-----	26
5. 対策方法の分類	-----	33
6. 維持管理データの保存方法	-----	36
参考文献	-----	36
付属資料	-----	37
		64 END

平成 20 年 4 月

橋梁塩害対策検討委員会

はじめに

コンクリート構造物は半永久的だと信じられて、明治初年以降数多くの構造物が建造されてきました。勿論、いまだに十分な機能を果たしている構造物もありますが、わが国の高度経済成長期に環境の厳しい日本海沿岸部、海岸部に建造された構造物では、建造後 20～30 年しか経過していないにもかかわらず、鉄筋の腐食に伴う構造物の劣化が認められるようになりました。

国土交通省北陸地方整備局では、建設省と呼ばれていた時代から国道 8 号線を中心としたコンクリート構造物の塩害対策に取り組んできており、特に、環境の厳しい上越地域を管轄していた高田工事事務所では、どこよりも早くこの問題に対応しておりました。

塩害を始めとして、コンクリートの耐久性に関わる問題の解決には、幅広い知見と長期にわたる調査検討が必須のことから、北陸整備局では、国道8号の橋梁を対象に、平成12年度に学識経験者8名による「高田工事事務所橋梁塩害対策検討委員会」を組織しました。これまで二十数年にわたって実施してきた塩害対策等の調査結果を含め、種々の検討を総合的に行い、その結果をもとに平成 16 年度に「高田河川国道事務所管内塩害橋梁維持管理マニュアル」を制定しました。

四方を海で囲まれているわが国では、海からの飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害は、実は全国的な問題でありました。そこで、北陸地域での先駆的な塩害対策に関する知見をもとに、塩害環境下にある全国の道路橋を対象を拡げ、各地方整備局などからの参加を得て、平成 16 年度に「橋梁塩害対策検討委員会」(学識経験者 10 名、オブザーバー 11 名で構成)が国土交通省のもとに設置されました。4 年間の審議を経て、この「塩害橋梁維持管理マニュアル」が策定されました。

今日まで塩害に関してさまざまな研究が進められてきていますが、塩害損傷の発生メカニズムやその対策方法と効果については、いまだ未解明な課題が残されています。現在の知見に基づく本マニュアルが運用された後にも、塩害対策の技術的な蓄積を反映させ内容の見直しを図り、本マニュアルを定期的に改訂していくことが望まれます。

本マニュアルの作成にあたり貴重な時間をさいて熱心に審議いただいた委員各位、並びに協力いただいた関係各位に対し、心より御礼申し上げます。

平成20年4月

橋梁塩害対策検討委員会 委員長 丸山 久一

目 次

page

塩害橋梁維持管理マニュアル(案)の作成の目的	1
1. 総則	3
1.1 適用の範囲	3
1.2 用語の説明	4
1.3 維持管理	5
2. 詳細調査	9
2.1 一般	9
2.2 詳細調査の方法	11
2.3 詳細調査結果の判定	17
3. 劣化予測	22
4. 健全度の評価	26
5. 対策方法の分類	33
6. 維持管理データの保存方法	36
参考文献	36
付属資料	37
(1) 他機関の塩害に関するマニュアル類と本マニュアル(案)の特徴について	38
(2) 塩害による劣化メカニズムについて(塩害による劣化, 補修後の劣化状況, マクロセル腐食等)	39
(3) 維持管理データの保存方法について(フォーマット(案))	43
(4) 自然電位法を用いた塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定方法(案)	48
(5) 電気化学的工法について	54
(6) 詳細調査の実施手順	61

塩害橋梁維持管理マニュアル(案)の作成の目的

コンクリート構造物は、メンテナンスフリーで半永久的に供用できるものと考えられてきた。しかしながら、近年、塩害やアルカリ骨材反応、中性化等により比較的早期に劣化したコンクリート構造物が見受けられるようになってきた。特に沿岸地域にあるコンクリート橋の中には、飛来塩分がコンクリート内部に浸透し内部鋼材を錆びさせるため、かぶりコンクリートがはく落する塩害損傷を呈しているものも多く見受けられる。この中には内部鋼材が破断し、安全性が懸念されるコンクリート橋もあり、緊急的に補修・補強対策が講じられている。

このようなコンクリート構造物に発生している塩害等の早期劣化の発生メカニズムについては、各機関で究明されてきている。これらを踏まえて、長期にわたる供用期間中の安全性が確保されるように材料面や設計面、施工面での配慮が道路橋示方書を始めとする技術関連指針等^{※1}に示されている。

したがって、これら技術関連指針等に従い所要の品質で設計・施工されたコンクリート構造物については、供用期間中の早期に劣化現象が現れることは少ないが、これら技術関連指針等より以前に設計・施工されたコンクリート構造物の中には、すでに劣化が生じているものもあり、将来的に進行する可能性が高いものもある。

一方、既設コンクリート橋に対する維持管理では、「橋梁定期点検要領(案) 平成16年3月 国土交通省 道路局 国道・防災課」(以下、定期点検要領)に基づく定期点検等により損傷状況を把握し、橋梁毎に対策が施されてきたのが現状である。

しかし、塩害環境下におかれているコンクリート橋を適切に維持管理していくには、定期点検で判定区分がB^{※2}(状況に応じて補修を行う必要がある)、C^{※2}(速やかに補修等を行う必要がある)、S^{※2}(詳細調査の必要がある)と判定されたもののうち、損傷原因が塩害と考えられる橋梁に対しては、塩害固有の特徴等を踏まえて統一された考え方に基づいた詳細調査および補修・補強対策を実施することが望ましいことから、定期点検要領を補足してより具体の対策検討の考え方を示したマニュアルを作成することとして、塩害橋梁維持管理マニュアル(案)[以下、本マニュアルという]を作成することとしたものである。

図1に各点検の流れ図と本マニュアルの位置づけを示す。

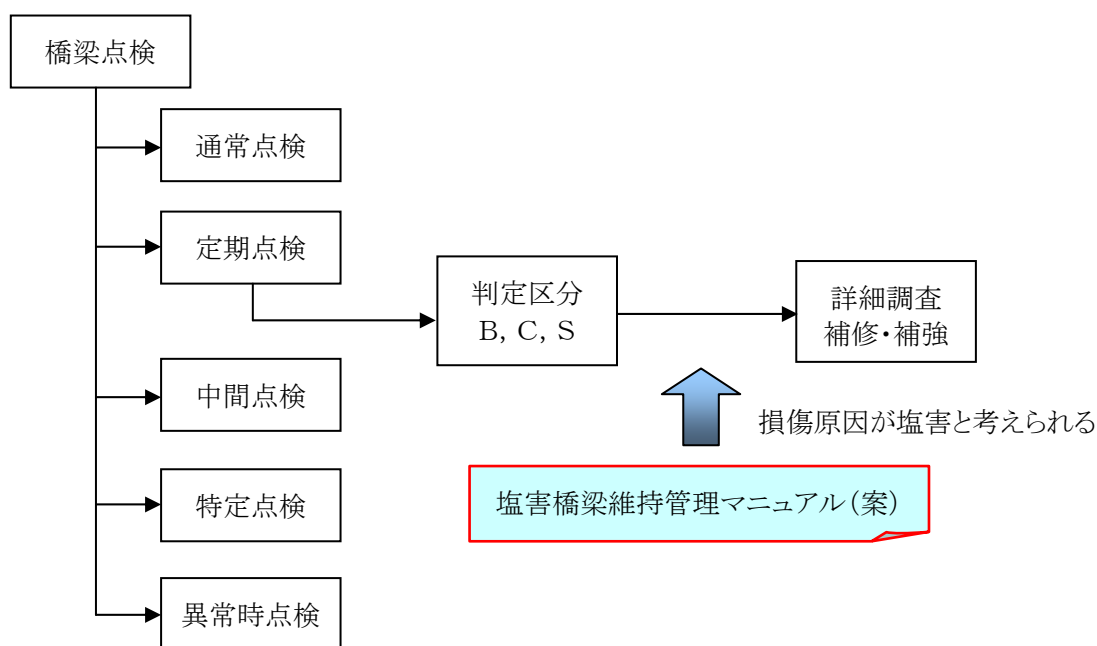


図1 各点検の流れ図および本マニュアルの位置づけ

※1:塩害に関する規定が示されている技術関連指針等の名称および主な考え方を表1に示す。

表1 技術関連指針等の名称および主な考え方

技術関連指針等の名称	主な考え方
道路橋の塩害対策指針(案)・同解説 昭和59年2月 日本道路協会	①鋼材防錆のためかぶりを部材ごとに設定 ②塩害対策を必要とする地域と対策の区分を設定
建設省通達 昭和61年6月 建設省	コンクリート中の塩分総量規制(RC部材, ポス テンション部材は0.6kg/m ³ , プレテンション部材は 0.3kg/m ³ 以下)
道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 平成14年3月 日本道路協会	①耐久性の目標期間を100年と想定した最少かぶ りを設定 ②耐久性の目標期間を100年と想定した影響地 域を設定
コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案) 平成16年3月 国土交通省 道路局 国道・防災課	塩害による損傷が生じる可能性があるコンクリート 橋の維持管理に適用する。したがって, 明らかに 塩害によると考えられる損傷が現れている橋梁に ついては, 本要領(案)によることなく, 早急に補修・ 補強などの対策をとる必要がある。

※2:「橋梁定期点検要領(案) 平成16年3月 国土交通省 道路局 国道・防災課」に示されている対
策区分の判定区分を表2に示す。

表2 橋梁定期点検結果による対策区分の判定区分

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか, 損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から, 緊急対応の必要がある。
E2	その他, 緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

1. 総則

1.1 適用の範囲

本マニュアル(案)は、国土交通省及び内閣府沖縄総合事務局が管理する一般国道の塩害環境下にあるコンクリート橋の上部構造のうち、外観に塩害によると思われる損傷が現れている橋梁の維持管理に適用する。

【解説】

本マニュアル(案)は、塩害により性能低下を生じたコンクリート橋を効率的・効果的に維持管理することを目的に作成したものであり、道路橋のうち国土交通省及び内閣府沖縄総合事務局が管理する一般国道の塩害環境下にあるコンクリート橋の上部構造のうち、外観に塩害によると思われる損傷が現れている道路橋の維持管理に適用するものである。

本マニュアル(案)に示す塩害環境下とは、「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 平成 14 年 3 月 日本道路協会」に規定されている、「表-5.2.2 塩害の影響地域」とする。また、塩害によると思われる損傷とは、塩害環境下にあり「橋梁定期点検要領(案) 平成 16 年 3 月 国土交通省 道路局 国道・防災課」に従った点検で確認される、⑥ひびわれ、⑦剥離・鉄筋露出、⑧漏水・遊離石灰、⑩コンクリート補強材の損傷、⑫うきとした。

本マニュアル(案)の適用の範囲を、「塩害環境下にあり、外観に塩害によると思われる損傷が現れているコンクリート橋の上部構造」としていることから、「塩害環境下にあり、外観に塩害によると思われる損傷が現れていないコンクリート橋の上部構造」については、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案) 平成 16 年 3 月 国土交通省 道路局 国道・防災課」に従って行うこととする。

なお、対象橋梁はコンクリート橋の上部構造としていることから、鋼橋RC床版は適用外とする。

また、冬季に散布される凍結防止剤にも塩化物イオンが含まれていることから、これによる塩害も懸念されているが、未解明な部分も多いことから、適用外とする。

しかし、調査方法や判定方法については、鋼橋 RC 床版や凍結防止剤による塩害についても部分的に適用できると考えられることから、十分検討した上で適用してもよいこととする。

一方、塩害による損傷の進行状況を継続的、客観的に観察したデータ等の蓄積は少なく、塩害による損傷の発生から進行までの劣化メカニズムや対策工法の有効性等については、十分に解明されている訳ではない。

そこで、今後調査・点検結果や補修・補強効果等の定量的なデータや最新の知見、劣化予測手法の精度向上、新しい点検手法、調査手法、各地域での飛来塩分量調査分析結果等により、精力的に研究・開発が各機関で進められると考えられる。そのため、今後の研究・開発の成果を踏まえ、必要に応じて本マニュアル(案)を更新していく必要がある。

1.2 用語の説明

本マニュアル(案)では, 次のような用語を使用する。

補修: 耐久性を回復もしくは向上させること, 第三者影響度を改善すること, を目的とした維持管理対策。

補強: 部材, 構造物の耐荷性や剛性などの力学的な性能を回復, もしくは, 向上させることを目的とした対策。

予防保全: 構造物の性能低下を引き起こさせないことを目的として実施する維持管理。

事後保全: 構造物の性能低下の程度に対応して実施する維持管理。

健全度: 構造物の機能や性能を満足する程度。

【解説】

本マニュアル(案)で使用している用語は, 基本的に「2001年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編 土木学会」に準じているが, 代表的なものについては条文に記述することとした。

1.3 維持管理

1.3.1 維持管理の基本

本マニュアル(案)では、塩害環境下にある橋梁のコンクリート上部構造について、供用期間を通じて要求される性能を保つために、適切な維持管理を行うことを基本とする。

【解説】

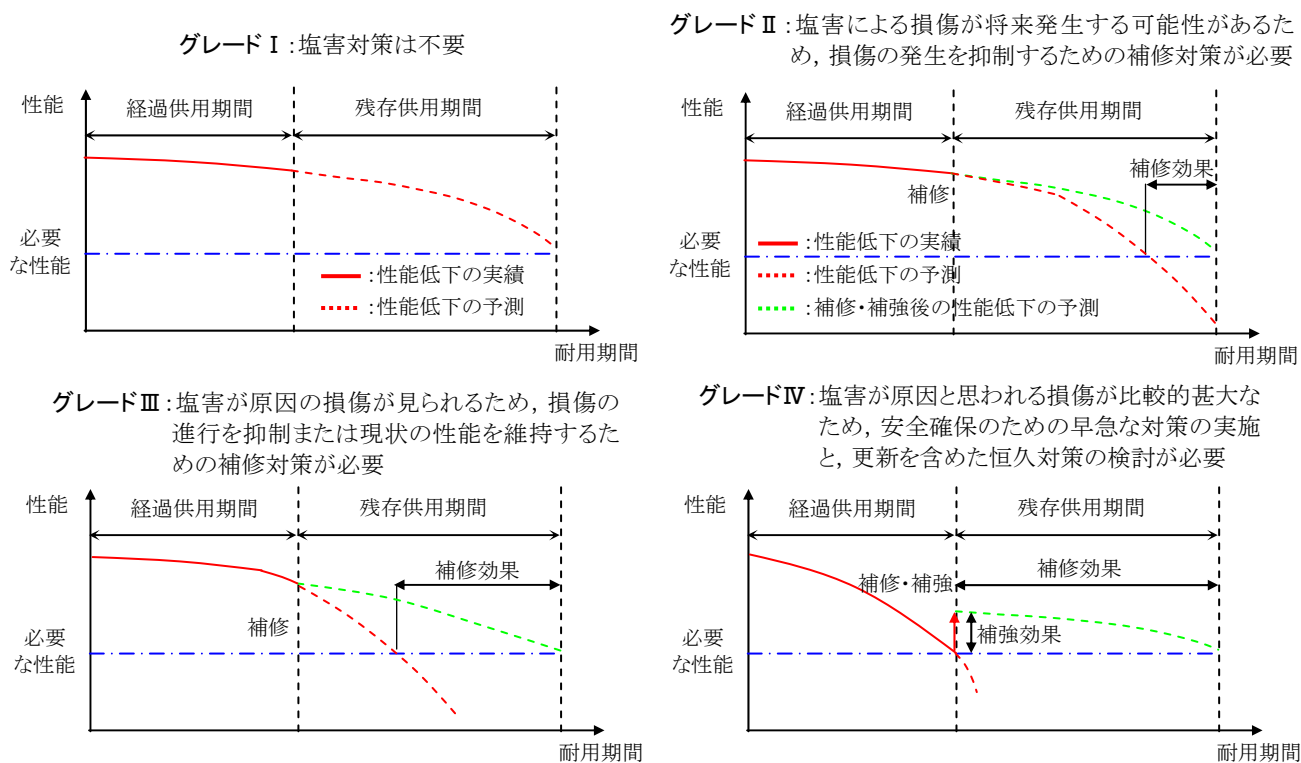
供用期間を通じて要求される性能を保つためには、適切な維持管理が必要である。特に厳しい塩害環境下にある橋梁においては、現在の損傷状況および将来における損傷の可能性を適切に把握し、劣化過程に応じた対策を実施する必要がある。なお、供用期間を通じて要求される性能とは、車両通行および第三者の安全を確保できることとする。

図 1.2 に塩害橋梁の維持管理の基本的な考え方を示す。塩害環境下における維持管理に求められていることは、損傷の早期発見と劣化予測に基づく計画的な維持管理である。このような塩害環境下においては、初期の段階で適切な対策を施せば損傷の進行を抑えることが可能であり、橋梁の長寿命化や耐久性向上を図ることができる。よって、本マニュアル(案)においてはこのような点を考慮し、塩害による損傷の現状を点検・調査により把握し、劣化予測を踏まえて健全度の評価を行うこととした。

図 1.2 に示す橋梁定期点検、コンクリート橋の塩害に関する特定点検については、それぞれ要領(案)が示されていることから、方法等については本マニュアル(案)で特に規定しないこととした。

なお、本マニュアル(案)においては、各橋梁の現在の損傷状況および将来における損傷の可能性を踏まえ、4 章に示すように健全度をグレード I ~IV^{*}に分類し、対策を講じることとした。グレード I ~IV^{*}の対策方法の分類のイメージを図 1.1 に示す。

塩害については、劣化メカニズムが全て解明されている訳ではなくデータの蓄積も少ないことから、維持管理の基本的な考え方の中に塩害による劣化の認識、維持管理データの保存やデータ分析等を含めることとし、今後データを蓄積しながら本マニュアル(案)を必要に応じて更新していく必要がある。



※健全度を示す各グレードは、4 章の表 4.1~4.8 に示す

図 1.1 各健全度の損傷状況および対策方法の分類イメージ図

1.3.2 維持管理の手順

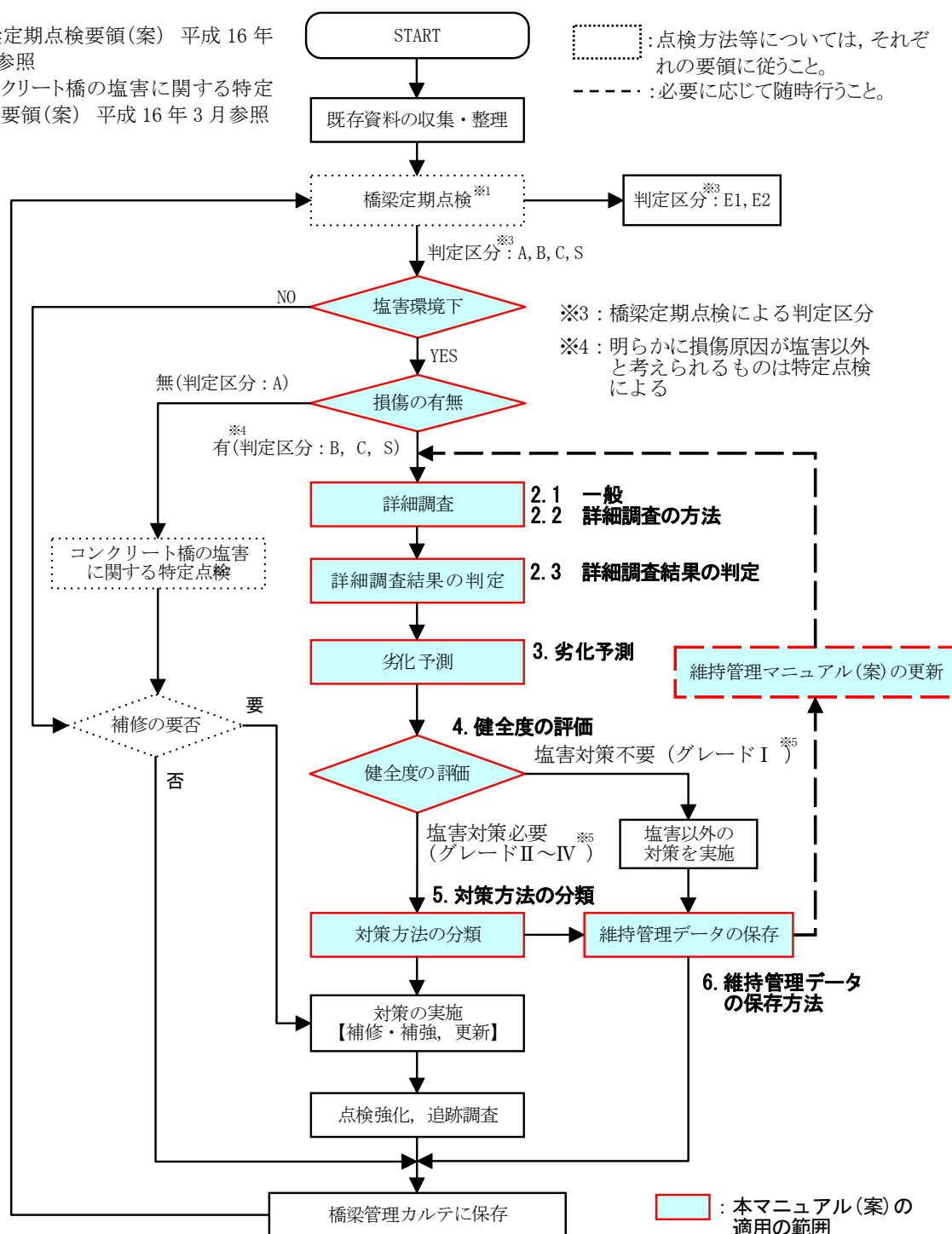
維持管理は、適切な手順により実施する。

【解説】

維持管理は、適切な手順により実施することとした。これは、維持管理の基本に示した点検・調査、健全度評価、補修・補強対策の実施、データの記録・保存等の一連の維持管理の行為が効率的・効果的に行えるようにするためであり、これまで実施されてきた点検・調査の結果や今後蓄積される各種データを有効に活用する上でも重要である。具体的な維持管理の手順を図 1.3 に示す。

※1: 橋梁定期点検要領(案) 平成 16 年 3 月参照

※2: コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案) 平成 16 年 3 月参照



※5: 健全度を示す各グレードは、4 章の表 4.1~4.8 に示す

図 1.3 塩害橋梁の維持管理の手順

フローの中で、橋梁定期点検の結果、塩害環境下にあり橋梁定期点検による判定区分が A の橋梁は特定点検を実施し、判定区分が B, C, S の橋梁は、本マニュアル(案)に従った詳細調査を実施することとした。これは橋梁定期点検の調査は主に外観目視によるため、損傷の原因が塩害であるかの特定が必要であると考えたためである。

詳細調査を実施するにあたり、対象とする損傷の種類は、コンクリート部材の損傷(損傷番号⑥, ⑦, ⑧, ⑩, ⑫)とする。表 1.1 に橋梁定期点検の各対策区分の判定区分、それ以降に損傷番号⑥, ⑦, ⑧, ⑩, ⑫における損傷の種類を示す。

表 1.1 橋梁定期点検結果による対策区分の判定区分

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

「橋梁定期点検要領(案) 平成 16 年 3 月 国土交通省 道路局 国道・防災課」に示されている損傷の種類①～⑫のうち、コンクリート部材の損傷でさらにその中から塩害により発生する可能性のある損傷の種類は以下のとおりである。

⑥ひびわれ, ⑦剥離・鉄筋露出, ⑧漏水・遊離石灰, ⑩コンクリート補強材の損傷, ⑫うき

2. 詳細調査

2.1 一般

- 1) 詳細調査は、橋梁定期点検で塩害によると思われる損傷が認められた橋梁を対象に実施する。
- 2) 詳細調査は、以下を行うのに必要なデータを得ることを目的として実施する。
 - ①塩害損傷の特定
 - ②劣化予測
 - ③健全度の評価
- 3) 詳細調査の内容は、以下のとおりとする。
 - ①外観変状調査
 - ②鋼材の腐食度調査
 - ③塩化物イオン含有量調査
 - ④中性化深さ調査
- 4) 詳細調査は、塩害環境下にあるコンクリート橋の上部構造のうち、外観に損傷が現れている場合に上部構造1径間ごとに実施することを原則とする。ただし、多径間にわたる橋梁などで、外部環境および損傷状況がほぼ同程度である場合には、外観の損傷程度により代表径間を選定し、その径間にて詳細調査を実施してもよい。

【解説】

1)について

詳細調査は、橋梁定期点検要領(案)に基づき実施された橋梁定期点検で塩害によると思われる損傷が認められ、判定区分がB(状況に応じて補修を行う必要がある)、C(速やかに補修等を行う必要がある)、S(詳細調査が必要である)と判定された部位、部材があるコンクリート上部構造に対して実施することとした。

2)について

橋梁定期点検は、主に目視により実施されることから、損傷原因が塩害であるか否かの特定はできない。そのため詳細調査は、損傷原因を塩害と特定するのに必要なデータを得るとともに、3章に示す劣化予測、4章に示す健全度の評価を行い、対策方法を分類するのに必要なデータを得ることを目的として実施することとした。

3)について

外観変状調査は、コンクリートの表面に認められるひび割れ等の損傷程度を把握し、4章に示す健全度を評価するために実施することとした。

鋼材の腐食度調査は、かぶりコンクリートを部分的に撤去して鋼材が腐食しているか否かを確認し、4章に示す健全度を評価するために実施することとした。

塩化物イオン含有量調査は、鋼材位置の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値とされている 1.2kg/m^3 を越えているか否かにより「2.3.5 塩害による損傷の特定」を行うとともに、コンクリート表面から深さ方向の塩化物イオンの分布を把握し、3章に示す劣化予測、4章に示す健全度の評価を行うのに必要なデータを得るために実施することとした。

中性化深さ調査は、塩害と中性化との複合劣化の観点から、3章に示す劣化予測、4章に示す健全度の評価を行うのに必要なデータを得るために実施することとした。

ただし、2回目以降の詳細調査では、外観変状調査は必ず行うこととし、鋼材近傍での鋼材の腐食度調査、塩化物イオン含有量調査および中性化深さ調査については、必要に応じて行うこととしてよい。

以下に、参考として外観変状調査のみでよい場合、鋼材の腐食度調査および塩化物イオン含有量調査の必要な場合の例を示す。

外観変状調査のみでよい場合の例

- ①安全確保のための早急な対策が実施され、更新の検討が進められている場合。
- ②前回の詳細調査の結果、「塩害が原因と思われる損傷が見られないため、別途補修対策の検討を行う」と判定され、その後損傷状況に大きな変化が見られなかった場合。

鋼材の腐食度調査が必要な場合の例

- ①前回の詳細調査時の外観変状調査結果と比較して、明らかに損傷が進行していた場合、もしくは新たな損傷が確認された場合。

塩化物イオン含有量調査が必要な場合の例

- ①前回の詳細調査時の外観変状調査および鋼材の腐食度調査結果と比較して、明らかに損傷が進行していた場合、もしくは新たな損傷が確認された場合で、前回の塩化物イオン含有量調査結果が 1.2kg/m^3 未満であった場合。
- ②海岸線が変化した場合や近傍に消波ブロック等が設置された場合など、塩化物イオンの飛来量に影響するような環境の変化があった場合。

4)について

詳細調査は、橋梁定期点検により外観に損傷が現れているコンクリート橋の上部構造(橋梁定期点検の結果、B、C、Sと判定された橋梁)を対象として、1径間ごとに実施することとした。これは、塩害環境下に架設された多径間にわたる橋梁は、外部環境やコンクリートの品質の違いにより損傷状況が径間ごとに異なる場合があるためである。

ただし、多径間にわたる橋梁などでは、外部環境および損傷状況がほぼ同程度である径間が多数存在することも考えられる。そのような場合には、作業の効率化や詳細調査によりいたずらに橋梁を傷つけないために、外観の損傷程度により代表径間を選定し、その径間にて詳細調査を実施してもよいこととした。

2.2 詳細調査の方法

2.2.1 外観変状調査

- 1) 外観変状調査は、「4. 健全度の評価」を行うための資料とすることを目的として実施する。
- 2) 外観変状調査は、適切な方法により実施する。

【解説】

1) について

外観変状調査は、塩害により発生した外観の損傷状況を把握し、「4. 健全度の評価」を行うことを目的として実施することとした。外観変状調査では、①ひび割れのパターン・発生方向・本数、②ひび割れ幅、③ひび割れの長さ、④かぶりコンクリートの剥離・鋼材の露出、⑤錆汁の滲出、⑥遊離石灰・エフロレッセンスの発生状況、⑦ジャンカ・スケーリング・ポップアウト等のコンクリート表面の損傷について調査することを原則とする。

コンクリート表面の損傷の中でも、特にひび割れは、発生位置や形態・発生時期から発生原因を推定できる場合が多く、コンクリート構造物の耐久性能や耐荷性能を評価する上で参考になる。そのため、コンクリート表面の目視調査においては、ひび割れの発生位置や形態を把握するとともに、ひび割れ幅や長さをクラックスケールやスケール等で計測して記録することが必要である。

2) について

外観変状調査では、コンクリート表面の損傷を適切に把握する方法で実施することとした。外観変状調査の方法は、一般的には目視による観察および簡易な点検機械・器具を用いた測定等による。調査にあたっては、損傷の位置や範囲、橋梁の変形状況等を計測するスケール、ひび割れ幅を測定するためのクラックスケールやルーペ、損傷を記録するためのカメラ、コンクリート表面の浮き・剥離を把握するための点検用ハンマー等を携行するのがよい。

また、詳細調査で実施する外観変状調査は、定期点検によりB、C、Sの損傷が確認された橋梁に対して実施することから、全桁を近接して詳細に行うのがよい。特に定期点検により損傷箇所が特定されている場合には、その箇所を重点的に行うのがよい。なお、過去に断面修復などの補修が行われた箇所については、補修部と未補修部の近傍で鋼材にマクロセル腐食が発生する可能性があることから、このような箇所は補修部と未補修部の境界部から錆汁の滲出や補修部の再剥離・剥落等に十分注意して調査を行う必要がある。

なおマクロセル腐食については、付属資料に概要を示す。

2.2.2 鋼材の腐食度調査

- 1) 鋼材の腐食度調査は、「4. 健全度の評価」を行うための資料とすることを目的として実施する。
- 2) 鋼材の腐食度調査は、適切な方法により実施する。
- 3) 調査箇所および数量は、外観の損傷状況等を考慮して適切に定めるものとする。

【解説】

1) について

鋼材の腐食度調査は、外観変状調査では得られない鋼材の腐食状況を把握し「4. 健全度の評価」を行うための資料とすることと、配筋状況(配筋間隔、かぶり)、鋼材の径、種類、中性化深さなどの直接的な情報を得ることを目的として実施することとした。

2) について

鋼材の腐食度調査では、鋼材の腐食度を適切に把握する方法で実施することとした。

コンクリート中の鋼材の腐食状況および腐食範囲は、自然電位法等によりおおよその判断は可能である。しかし、自然電位法は原理的には鋼材の腐食確率を判断するものであり、鋼材の腐食減量・断面欠損の大きさなどの腐食量に関する情報について直接的には得られない。したがって、鋼材の腐食状況は、基本的にははつりにより確認するのがよい。しかし、通常調査対象範囲すべてについてコンクリートをはつり、鋼材の腐食状況を確認することは現実的には不可能であるので、はつりによる目視観察は一部にとどめることとする。

調査では、電磁誘導法あるいは電磁波反射法により鋼材位置を確認した上で対象箇所のコンクリートを30cm角程度の大きさを鋼材位置まではつり取る。はつり深さは、鋼材表面が現れる程度を原則とするが、鋼材の腐食状況などを詳細に調査したい場合など目的に応じて橋梁の損傷を拡大しない程度に鋼材背面まではつってもよい。

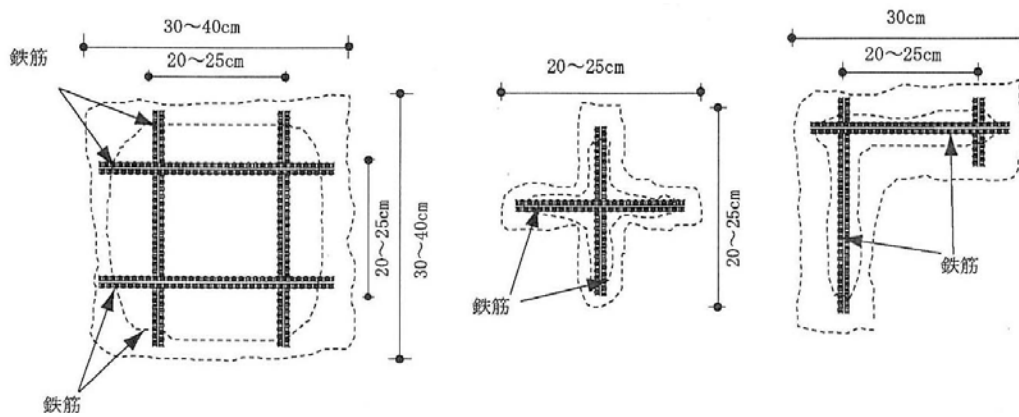
3) について

本来はつりによる鋼材の腐食度調査はサンプル数が多い方が評価の精度は高くなるが、はつり箇所の修復が適切でない場合、その部分から再劣化が進行するといったことも懸念される。したがって、鋼材の腐食度調査箇所と数量は、安全側の評価を行うことと再劣化の進行を防止することを目的として、適切に定めるものとした。

以上のことを考慮して、鋼材の腐食度調査箇所と数量の例を表 2.1 に、鋼材のはつりだし例を図 2.1 に示す。

表2.1 鋼材の腐食度調査箇所と数量の例

鋼材の腐食度 調査箇所	鋼材の腐食度調査箇所は、塩分分析用試料採取箇所のうち、損傷が最も著しいと思われる箇所とする。
鋼材の腐食度 調査数量	1 径間あたりの鋼材の腐食度調査数量は最も著しいと思われる損傷が確認された 1 箇所を基本とし、損傷状況に応じて適宜増加させることとする。なお、はつり面積は 1 箇所当たり 30cm 角程度を目安とする。 ただし、30cm 角程度以下のはつりでも、必要な情報としての鋼材の腐食状況、配筋状況(配筋間隔、かぶり)、鋼材の径、種類、中性化深さ等が得られれば、はつり範囲を広げる必要はない。



はつり範囲の例

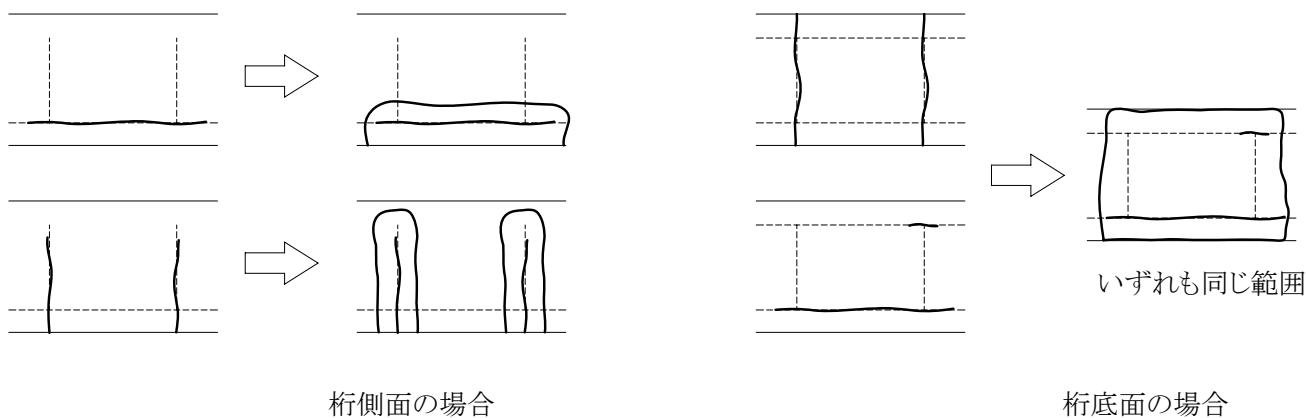


図2.1 鋼材のはつりだし例

なお、鋼材の腐食度調査箇所と数量の例は表 2.1 のとおりであるが、以下のような状況の場合は適宜鋼材の腐食度調査箇所を増加させてもよい。

- ①構造上問題となる箇所に損傷が見られた場合(主桁では支間中央付近の下フランジ等)
- ②過去の点検結果と比較して、新たに損傷が観察された場合
- ③参考として自然電位の計測を行い、その結果、外観に損傷が見られた箇所以外で損傷のある箇所よりも卑な自然電位が測定され、鋼材が腐食しているおそれがあると判断された場合

調査対象部材がプレストレストコンクリートの場合、コンクリートにはプレストレスが導入されており、コンクリートをはつり落とした場合、プレストレスが消失し部材に悪影響を及ぼしかねない。このため、プレストレストコンクリート部材を対象とする場合は、はつり調査の実施の要否、実施箇所、はつる寸法などについて部材に悪影響を与えないよう慎重に判断しなければならない。

また、鋼材の腐食度調査後の補修については、ケレン後防錆処置を施した上で断面修復を施すこととし、材料については適切なものを選定する必要がある。具体的には、将来電気防食工法の適用等の可能性がある場合は、既設コンクリートと同程度の電気抵抗材料である無機系材料もしくはポリマー系材料により補修するのが望ましい。

2. 2. 3 塩化物イオン含有量調査

- 1) 塩化物イオン含有量調査は、「2.3.5 塩害による損傷の特定」、塩害の「3.劣化予測」および「4.健全度の評価」を行うための資料とすることを目的として実施する。
- 2) 塩化物イオン含有量調査は、適切な方法により実施する。
- 3) 調査箇所および数量は、 外観の損傷状況等を考慮して適切に定めるものとする。

【解説】

1) について

塩化物イオン含有量調査は、鋼材位置の塩化物イオン含有量により「2.3.5 塩害による損傷の特定」を行うとともに、コンクリート表面から深さ方向の塩化物イオンの分布を把握し、3章に示す劣化予測、4章に示す健全度の評価を行うのに必要なデータを得るために実施することとした。

2) について

塩化物イオン含有量調査では、コンクリート内部の塩化物イオン含有量を適切に把握する方法で実施することとした。

塩化物イオン含有量調査をより精密に行う場合には、サンプリング誤差を除去するために、できるだけ多くの試料を採取することが望ましい。このため、硬化コンクリート中に含まれる塩分分析用コア試料の採取方法(JIS A 1154 付属書1(参考))では、コア径を粗骨材の最大寸法の3倍以上となるように定めている。

しかしながら、コア径を大きくすると調査のために橋梁を傷つける範囲が大きくなり、耐荷性能の低下に繋がるリスクも大きくなる。そのため、橋梁への影響が少ない方法を選定するのがよいことから、鋼材が密に配置されていて、コアの採取が困難な場合は、小径のコア試料やコンクリートドリルで削孔した際に発生する粉末を試料としてもよい。

なお、小径のコア試料やコンクリートドリル粉末を試料とする場合でも、1箇所あたりの試料を複数採取し分析する試料の量を増やし50～70g以上の試料を用意すれば、φ100mmのコア試料との測定精度はほとんど変わらないと考えられている。φ50mmのコアでは1本、またはφ25mmの小径コアでは3本、φ14mmのドリル削孔粉として試料を採取する場合には8箇所程度の削孔が必要となる。

試料のサンプリングにおいては、上部構造の中の鋼材を切断しないよう、あらかじめ既存資料(図面等)を確認のうえ非破壊検査機器を用いて、鉄筋やPC鋼材の位置を調査しておく必要がある。

塩化物イオン含有量調査では、硬化コンクリート中に含まれる塩分分析用コア試料の採取方法(JIS A 1154 付属書1(参考))に従い全塩化物イオン含有量を分析する。

3) について

本来塩化物イオン含有量調査はサンプル数が多い方が評価の精度は高くなるが、調査時に内部鋼材を傷つける可能性もある。したがって、塩化物イオン含有量の調査箇所と数量は、径間内での塩化物イオン含有量の分布と対策方法の選定のための基礎資料を得ることを目的として、適切に定めるものとした。

コンクリート中に含まれる塩化物イオン含有量は、同一の橋梁でも周辺環境や部位によって大きく異なっている場合があるので、調査箇所と数量は、環境や部位が同一と思われる箇所を調査する橋梁から適宜選定することが望ましい。

以上のことを考慮して、塩化物イオン含有量の調査箇所と数量の例を表 2.2 に示す。

表2.2 試料採取箇所と数量の例

<p>試料採取箇所</p>	<p>1 径間ごとに外観に損傷が現れていない箇所および損傷が現れている箇所付近の塩化物イオンの分布状況について把握することを目的とすることから、以下の箇所を採取箇所とする。</p> <p>①点検により最も著しいと思われる損傷が確認された場所や、新たに観察された損傷（錆汁の滲出、鋼材に沿ったひび割れなど、損傷が顕著に現れている箇所）があれば、その近傍の下フランジ（ひび割れなどの損傷が発生していない箇所）。</p> <p>②径間内で最も健全であると思われる下フランジ。</p> <p>③上記、①、②以外の適当な箇所の下フランジ（ひび割れなどの損傷が発生していない箇所）。</p>
<p>採取数量 (1 径間あたり)</p>	<p>1 径間あたりの採取数量は、上記①～③の各 1 箇所の合計 3 箇所とし、損傷状況に応じて適宜増加させることとする。</p>

また、採取位置は上部構造からとし、当該橋梁を代表する箇所とする。試料の採取は、コンクリートの表面から深さ方向に 1～2cm ピッチで 3 試料以上採取できる深さまでとし、なおかつ最低鋼材位置（スタールラップ）までのコアまたは粉末試料とした。採取した試料は、表面から深さ方向に 1～2cm ピッチで切断し分析する。

なお、試料採取箇所と数量の例は表 2.2 のとおりであるが、以下のような状況の場合は適宜試料採取箇所を増加させることとする。

- ①応力的に問題となる箇所に損傷が見られた場合（主桁では支間中央付近の下フランジ等）
- ②過去の点検結果と比較して、新たに損傷が観察された場合
- ③過去の補修箇所で再劣化が生じた箇所の近傍
- ④参考として自然電位の計測を行い、その結果、外観に損傷が見られた箇所以外で損傷のある箇所よりも卑な自然電位が測定され、鋼材が腐食しているおそれがあると判断された場合

2. 2. 4 中性化深さ調査

- 1) 中性化深さ調査は、中性化の「3.劣化予測」および「4.健全度の評価」を行うための資料とすることを目的として実施する。
- 2) 中性化深さ調査は、適切な方法により実施する。
- 3) 調査箇所および数量は、外観の損傷状況等を考慮して適切に定めるものとする。

【解説】

1) について

中性化深さ調査は、コンクリート中性化深さを把握し、3章に示す劣化予測、4章に示す健全度の評価を行うのに必要なデータを得るために実施することとした。

2) について

中性化による劣化は、コンクリート内部で進行するため中性化深さで判断するのが一般的である。しかし、現時点では橋梁を全く傷つけず中性化深さを調査する技術は開発されていない。したがって、詳細調査における中性化深さ調査においては、極力橋梁に損傷を与えないことと塩害と中性化の複合劣化であるか否かを判断するために、鋼材の腐食状況確認のためのはつり箇所や塩化物イオン含有量の試験に用いる試料の採取箇所を利用して行うのが望ましい。ただし、鋼材の腐食状況確認のためのはつり箇所や塩化物イオン含有量の試験に用いる試料の採取箇所近傍であれば、適切な方法により新たに試料を採取して中性化深さの調査を実施してもよい。

中性化深さ調査では、フェノールフタレイン法(JIS A 1152[コンクリートの中性化深さの測定方法])に従い中性化深さ調査を行う。

3) について

本来中性化深さの調査はサンプル数が多い方が評価の精度は高くなるが、調査時に内部鋼材を傷つける可能性もある。したがって、中性化深さの調査箇所と数量は、中性化の進行と塩害との複合劣化の有無を確認することを目的として、適切に定めるものとした。

以上のことを考慮して、中性化深さの調査箇所と数量の例は、鋼材の腐食度調査箇所(表 2.1)および塩化物イオン含有量調査箇所(表 2.2)とする。

2.3 詳細調査結果の判定

2.3.1 外観変状調査結果の判定

外観変状調査結果は、5段階に分類して判定する。

【解説】

外観変状調査の結果は、表 2.3 に示すように過去に補修が行われていない部材と過去に補修が行われた部材に分けて 5 段階に分類し、主桁ごとに判定することとした。

過去に補修が行われていない部材の判定区分および損傷状況は、「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 平成元年 5 月（財）土木研究センター」の「3. 塩害を受けた土木構造物の補修指針(案), 3.2 損傷度の判定同解説」を参考とし、判定区分の記号については本マニュアル(案)に合わせて①～⑤に修正した。

一方、過去に補修が行われた部材の判定区分は、損傷状況、補修後の経過年数、損傷の範囲により分類し、過去に補修が行われていない部材と区別した。これは過去に塩害による損傷を受けた構造物の補修として、断面修復や保護塗装などを行った場合、再度損傷が発生する可能性が高いこと^{*1}、再度損傷が発生した場合、損傷の進行が急速に速まることなどが考えられるためである。特に断面修復部にマクロセル腐食が発生した場合には注意が必要である。

表 2.3 損傷状況に応じた判定区分

判定区分	過去に補修が行われていない部材	過去に補修が行われた部材			判定区分
	損傷状況	損傷状況	補修後の経過年数	損傷の範囲	
①	ごく軽微なひび割れや錆汁が認められる	—	—	—	—
②	ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が部分的に認められる	塗装のふくれ・はがれ、漏水、遊離石灰、錆汁の滲出、断面修復部の再損傷等の損傷が生じている	5 年を超える	局部的 ^{*2}	②
③	ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が連続的に認められる			全体的 ^{*2}	③
④	コンクリートの断面欠損が認められ、内部の鋼材の露出が認められる	内部の鋼材の破断が生じている	5 年以内	局部的	④
⑤	コンクリートの断面欠損が認められ、内部の鋼材の破断が認められる			全体的	
		内部の鋼材の破断が認められる	—	—	⑤

※1:コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書 平成 6 年 7 月 建設省土木研究所

※2:局部的とは全体の中のある一部分のみという意味であるため、本マニュアルでは全体的と局部的を以下のような状況を示すこととした。

- 1)橋梁(径間)全体を見てある一部分に損傷が見られる場合や、特定の部位(例えば、外桁のみ)のみに損傷が見られる場合は局部的と判断する。
- 2)損傷が全体的に見られる場合は全体的とする。

2.3.2 鋼材腐食度調査結果の判定

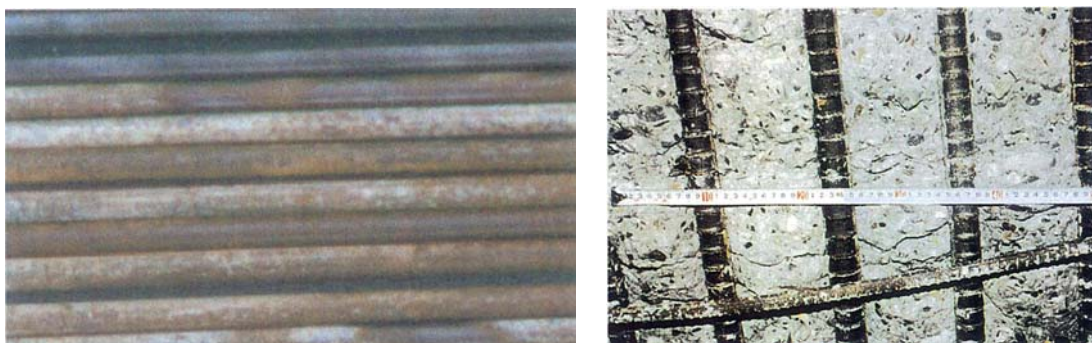
鋼材の腐食度調査結果は、5段階に分類して判定する。

【解説】

鋼材の腐食度調査結果は、表 2.4 に示す 5 段階の鋼材腐食度に分類し、調査箇所ごとに判定することとした。なお、判定区分および鋼材の腐食状況は、「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル:独立行政法人 土木研究所, 日本構造物診断技術協会」を参考とし、鋼材が破断している状況を加え、4 段階の判定区分を 5 段階とした。

表 2.4 鋼材の腐食度に応じた判定区分

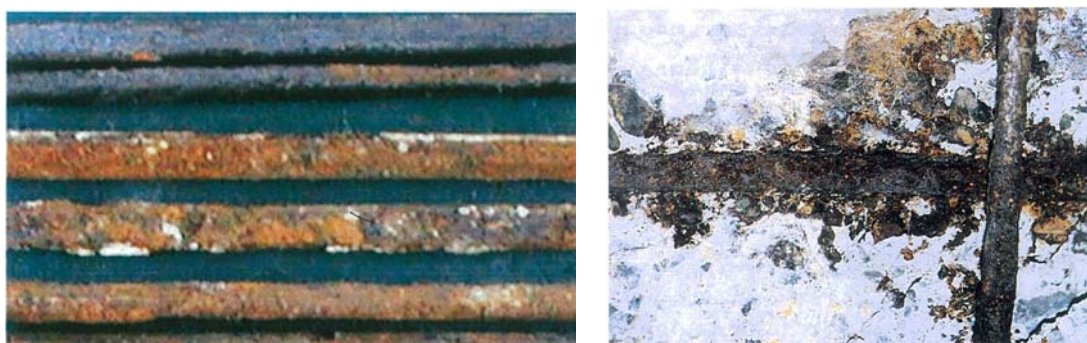
判定区分	①	②	③	④	⑤
鋼材の腐食度	腐食なし	ごく表面的な腐食	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食	断面欠損が著しい腐食	鋼材が破断している場合



写 2.3 判定区分②



写 2.2 判定区分③



写 2.1 判定区分④

2.3.3 塩化物イオン含有量調査結果の判定

塩化物イオン含有量の調査結果は、**2段階に分類して判定**する。

【解説】

塩化物イオン含有量の調査結果は、コンクリート 1m^3 あたりの全塩化物イオン含有量 ($\text{Cl}^- \text{kg/m}^3$)として整理し、調査箇所ごとに塩害による損傷の可能性を判定することとした。

塩害による損傷の可能性を判定する方法としては、鋼材位置(スターラップ)の塩化物イオン含有量が限界値とされている 1.2kg/m^3 を越えているか否かにより行う。なお、判定については耐荷性能に直接影響を及ぼす主鋼材位置との考え方もあるが、最外縁の鋼材はスターラップであり、主鋼材とのかぶりの違いは鋼材径程度であることから、安全側の評価を行うこととしてスターラップ位置とした。

鋼材近傍におけるコンクリート中の全塩化物イオン含有量と判定区分を表 2.5 に示す。表 2.5 に示す鋼材の腐食発生に関する限界値とされている 1.2kg/m^3 については、「平成 11 年版 コンクリート標準示方書—耐久性照査型— 施工編 土木学会」を参考とした。腐食発生に関する限界値を 1.2kg/m^3 とした根拠については、上記示方書の抜粋を以下に示す。

なお、塩化物イオン含有量の調査結果から単位容積あたりの全塩化物イオン含有量を算出する際、コンクリートの絶乾単位容積質量が必要となる。これは試験により求めることを原則とするが、やむを得ない場合は、 2200kg/m^3 と仮定してもよい。

また、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の場合には予測を実施することとなるが、実施条件や予測方法等の詳細については「3. 劣化予測」に示す。

《抜粋》

鋼材位置における塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度は、コンクリート単位容積当りの量として $0.3 \sim 1.2\text{kg/m}^3$ 程度であり、この値は構造物の設置環境条件や鋼材腐食許容量などの条件によって異なる。たとえば、あらかじめ塩化物を混入した供試体による促進試験などでは、 $0.3 \sim 0.6\text{kg/m}^3$ 程度であり、実環境での暴露実験では $1.2 \sim 2.4\text{kg/m}^3$ 程度とされている。促進試験と実環境から得られる限界濃度の差異は、試験供試体と実構造物のかぶりや水セメント比の違い、また促進試験時に設定される高温環境等の温度の影響が考えられる。ここでは、構造物として問題となるレベルの鉄筋腐食発生という観点から、 1.2kg/m^3 を限界値とした。

表 2.5 鋼材位置の塩化物イオン含有量に応じた判定区分

判定区分	①	②
全塩化物イオン含有量	1.2kg/m^3 未満	1.2kg/m^3 以上

2.3.4 中性化深さ調査結果の判定

中性化深さ調査結果は、2段階に分類して判定する。

【解説】

中性化深さ調査結果の判定は、表 2.6、図 2.2 に示すように中性化残りにより調査箇所ごとに判定することとした。コンクリート中へ塩分浸透がある場合、中性化の進行によりセメント水和物に固定化されていた塩化物イオンが解離し、未中性化領域に濃縮するために腐食の開始が早まる可能性がある。したがって、塩害環境下では、鋼材腐食を生じないために通常環境下での中性化残り 10mm より大きな中性化残りを設定する必要がある。このことから、塩害環境下での中性化残りは、10mm～25mm 必要と言われている。

しかし、具体的な中性化残りの値は、環境条件(温度、湿度、塩分供給条件など)やコンクリートの品質に依存し、現時点では必ずしも明らかになっていないことから、安全側の対処として 25mm を境に判定を分けることとした。

なお、判定を行う位置は安全側を考慮してスターラップ位置とする。

表 2.6 中性化残りに応じた判定区分

判定区分	①	②
中性化残り	25mm 以上	25mm 未満

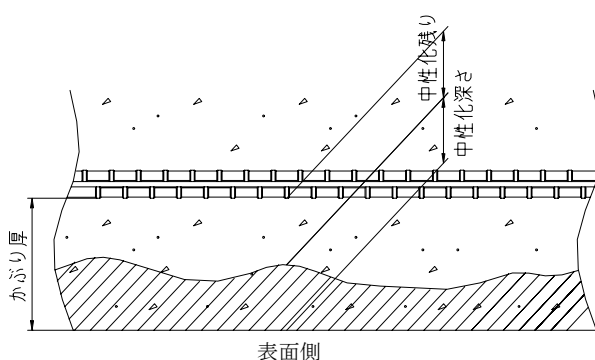


図 2.2 中性化残りのイメージ図

2.3.5 塩害による損傷の特定

詳細調査の結果、以下のような状況が確認された場合は、塩害による損傷と特定する。

- ① 鋼材位置での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超過し、目視調査の結果、外観に損傷が見られた場合。
- ② 鋼材位置での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超過し、はつり調査の結果、鋼材に腐食が見られた場合。

【解説】

塩害は、コンクリート上部構造を劣化させる(橋の寿命に影響を与える)主要要因の一つであり、過去の事例によると損傷が発生すると進行が速いため、補修・補強に多大な費用を要する。したがって、損傷の原因が塩害であるか否かで対策が異なることから、詳細調査の結果により塩害による損傷であるか否かの特定を行うこととした。

詳細調査の結果から、塩害による損傷と特定できる状況は以下のとおりである。

- ① 鋼材位置での塩化物イオン含有量が鋼材の腐食発生に関する限界値 1.2kg/m^3 を超過し、目視調査の結果、外観に鋼材に沿ったひび割れ等の損傷が見られる場合は、塩害による鋼材の腐食が損傷の発生原因と考えられる。したがって、そのような損傷が見られた場合は、塩害による損傷と特定することとした。
- ② 鋼材位置での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超過し、はつり調査の結果、鋼材に腐食が見られた場合は、塩害が損傷の発生原因と考えられる。したがって、そのような損傷が見られた場合は、塩害による損傷と特定することとした。

3. 劣化予測

3.1 劣化予測の種類と実施条件

1) 劣化予測は、健全度の評価および対策方法の分類を行うことを目的として、塩化物イオンの拡散予測と中性化の進行予測を実施する。

2) 塩化物イオンの拡散予測は、鋼材位置の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値である 1.2kg/m^3 を今後 20 年以内に超過するか否かについて実施し、中性化の進行予測は、中性化残りが今後 20 年以内に 25mm 未満となるか否かについて実施する。

3) 劣化予測は、下記の①を満たす橋梁に対して実施することを前提とし、塩化物イオンの拡散予測については下記の②、中性化の進行予測については下記の③を満たすような状況の橋梁および箇所に対して実施する。

①架設後の経過年数が約 30 年未満である橋梁。

②塩化物イオンの拡散予測は、鋼材位置(スターラップ)の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満である全ての箇所。

③中性化の進行予測は、塩化物イオンの拡散予測で今後 20 年以内に鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満で、現状の中性化残りが 25mm 以上である全ての箇所。

【解説】

1)について

塩害の影響を受ける部位の対策は、現在損傷を受けている部位だけでなく、将来塩害による損傷が発生する可能性のある部位に対しても実施することが必要である。したがって、4 章に示す健全度の評価を実施し、5 章に示す対策方法の分類を行うことを目的として、現状を把握する詳細調査に加え塩化物イオンの拡散予測と中性化の進行予測を実施することとした。

2)について

本来、劣化予測は鋼材の腐食進行を直接予測するのが最も適切であるが、現在の技術では鋼材の腐食進行を直接予測することは不可能である。

そこで、鋼材の腐食発生に関する限界値とされている塩化物イオン含有量や中性化残りに何年後到達するのかを予測することで、間接的に鋼材の腐食発生時期を予測することとした。

塩化物イオンの拡散予測については、鋼材位置のコンクリートに含まれる塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値とされている 1.2kg/m^3 を今後 20 年以内に超過するか否かについて実施し、中性化の進行予測については、塩害環境下において鋼材が腐食環境になる中性化残りが今後 20 年以内に 25mm 未満となるか否かについて実施することとした。

なお、劣化予測の「今後 20 年以内に」という設定については、全国的に見て架設後 30 年以上経過しているコンクリート橋の割合が多い(50%以上)ことから、古い基準に従って建設された橋梁の寿命をおおよそ 50 年と考え、残寿命を 20 年として暫定的に定めたものである。したがって、今後新たな知見や予測等の精度向上、塩害発生メカニズムの究明等により、随時見直していく必要がある。

3)について

劣化予測を行う橋梁および箇所は、以下のように設定した。

①架設後約 30 年以上経過した橋梁で、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の場合は、外部環境が大きく変化しない限り、塩化物イオン含有量が今後急激に増加する可能性は低いと考え、劣化予測は架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁に対して実施することとした。

②コンクリート中の鋼材が腐食環境となる塩化物イオン含有量を土木学会コンクリート標準示方書で

は 1.2kg/m^3 としている。したがって、鋼材位置(スターラップ)での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の場合、鋼材は腐食環境下にはないと判断される。しかし、今後外部から塩化物イオンが供給されると、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超え腐食環境になる可能性がある。そのため、詳細調査の結果鋼材位置での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の場合は、塩化物イオンの拡散予測を行い、4章に示す健全度評価に反映させることとした。

なお、塩化物イオン含有量調査は1径間あたり3箇所以上実施されることから、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超えている箇所と超えていない箇所が混在することも考えられる。このような場合、健全度としては塩化物イオン含有量が最も多い箇所の判定区分を採用するため、劣化予測は必要ないこととなる。しかし、対策方法の分類を行う上では、塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の箇所についても重要であることから、調査箇所で鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超えていない箇所は全て劣化予測を行うこととした。

③コンクリート中へ塩分浸透がある場合、中性化の進行によりセメント水和物に固定化されていた塩化物イオンが解離し、未中性化領域に濃縮するために腐食の開始が早まる可能性がある。このようなことから、土木学会コンクリート標準示方書では、塩害環境下における鋼材が腐食環境になる中性化残りを 25mm としている。したがって、中性化残りが 25mm 以上の場合、鋼材は腐食環境下にはないと判断される。

しかし、詳細調査の結果、鋼材位置で塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満で、塩化物イオンの拡散予測で今後20年以内に 1.2kg/m^3 を超えない場合であっても、中性化残りが 25mm 未満となる場合は、中性化の進行により鋼材腐食の開始時期が早まる可能性がある。そのため、このような箇所は全て中性化の進行予測を行い、4章に示す健全度評価に反映させることとした。

表 3.1 に塩化物イオンの拡散予測および中性化深さの進行予測による判定区分を示す。

表 3.1 劣化予測に応じた判定区分

塩化物イオン含有量		中性化残り		判定区分
現状	劣化予測	現状	劣化予測	
1.2kg/m^3 未満	今後20年以内に 1.2kg/m^3 未満	25mm 以上	今後20年以内に 25mm 以上	①
			今後20年以内に 25mm 未満	②
		25mm 未満	—	③
	今後20年以内に 1.2kg/m^3 以上	—	—	④
1.2kg/m^3 以上	—	—	—	⑤

3.2 劣化予測の方法

塩化物イオンの拡散予測と中性化の進行予測は、適切な方法により実施する。

【解説】

塩化物イオンの拡散予測は、健全度の評価および対策方法の分類を行うことを目的として、適切な方法により実施することとした。一般的には「2002年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編 土木学会」に示されているフィックの拡散方程式(式 3.1)で行われている。現地採取試料による塩化物イオンの分析結果とフィックの拡散方程式より算出した予測値を比較することで、塩化物イオンの見掛けの拡散係数やコンクリート表面における塩化物イオン濃度を推定し、その結果を基に将来における塩化物イオン濃度の分布を推定することも可能である。

しかし、橋梁の周辺環境は必ずしも一定ではなく、中性化が塩化物イオンの濃度分布に与える影響等はまだ未解明な部分も多いことから、推定の精度にはばらつきがあることに留意する必要がある。また、このような劣化予測手法では、マクロセル腐食による劣化を予測することはできないことも留意する必要がある。

$$C(x,t) = (C_o - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad \text{----- (式 3.1)}$$

ただし、 $C(x,t)$: 表面からの深さ $x(\text{cm})$ の時刻 $t(\text{年})$ における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_o : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_i : コンクリート材料に当初から含まれていたと考えられる塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D : コンクリート中で塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

なお、誤差関数 $\operatorname{erf}()$ は、式 3.2 の近似式、もしくは『コンクリート診断技術‘03[基礎編] 社団法人日本コンクリート工学協会』に示されている数値表を用いてよい。

$$1 - \operatorname{erf}(y) = 1 / \left(1 + 0.278393y + 0.230389y^2 + 0.000972y^3 + 0.078108y^4 \right)^4 \quad \text{----- (式 3.2)}$$

ドリル法により採取した試料の塩化物イオン含有量の分布および解析例を図 3.1 に示す。図中の表面塩化物イオン濃度 C_o および塩化物イオンの見かけの拡散係数 D は、採取試料の深さ方向の濃度分布をプロットし、これに対してフィックの第2法則に基づく拡散方程式から、 C_o と D を未知数として、最小二乗法で近似することにより得られた値である。

ただし、実構造物では図 3.1 のように必ずしも表面側の塩化物イオン濃度が高く、深さ方向に少なくなるばかりではなく、表面側よりも内部の塩化物イオン濃度が高くなる場合もあり、ばらつくのが現状である。したがって、そのような場合の劣化予測方法については、学識経験者や専門技術者等による判断を踏まえ、検討することとする。

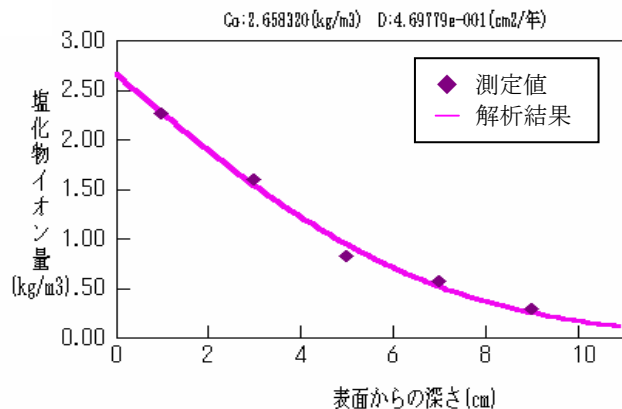


図 3.1 解析例

また、コンクリート保護塗装等により表面からの塩化物イオンの供給が遮断されている場合、コンクリート内部の再拡散は式 3.1 では評価できない。したがって、そのような場合は他の方法により評価するものとする。表面からの塩化物イオンの供給が遮断されている場合のコンクリート内部の再拡散に関する参考資料としては、以下のものがあげられる。

- ①長滝重義他:既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性 (土木学会論文集 No.520/V-28,111-122,1995.8)
- ②土木学会:コンクリート表面保護工法 設計施工指針(案) コンクリートライブラリー 119

中性化は塩害と同様に鋼材を腐食させるだけではなく、塩害の発生にも影響を与えるので、その進行予測は重要である。そこで中性化の進行予測についても、適切な方法により実施することとした。

中性化の進行予測は、一般的には「2002年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編 土木学会」に示されている(式 3.3)で行われており、中性化期間の平方根に比例することが確認されているため、中性化の進行予測は、現地実測による中性化深さより中性化速度係数を算出し、行うこととしている。

$$y = b\sqrt{t} \text{ ----- (式 3.3)}$$

ただし、y: 中性化深さ(mm)

t: 中性化期間(年)

b: 中性化速度係数(mm√年)

4. 健全度の評価

- 1) 健全度の評価は、「2.詳細調査」、「3.劣化予測」の結果を踏まえ径間ごとに実施する。
- 2) 健全度の評価は、各詳細調査項目の判定区分および劣化予測の結果における最も厳しい判定区分をもってその径間の健全度とする。
- 3) 健全度の評価は、架設後の経過年数が約 30 年未満と約 30 年以上の橋梁に分けて実施する。
- 4) 対策方法の分類は、健全度の評価結果を基に適切に行う。

【解説】

1)について

塩害環境下に架設された多径間にわたる橋梁は、外部環境やコンクリートの品質の違いにより損傷状況が径間ごとに異なる場合がある。そのため、健全度の評価は、目視による外観変状調査結果、鋼材の腐食度調査結果、塩化物イオン含有量調査結果、中性化深さの調査結果、劣化予測の結果を踏まえ、径間ごとに総合的に実施することとした。

ただし、多径間にわたる橋梁では、外部環境および損傷状況がほぼ同程度である径間が多数存在する場合もある。そのような場合には、詳細調査で選定した代表径間で健全度を評価してもよいこととした。

2)について

健全度の評価は、各詳細調査項目の判定区分および劣化予測の結果における最も厳しい判定区分をもってその径間の健全度とし、グレード I ～グレード IV に分類することとした。

3)について

健全度の評価は表 4.1～4.7 に示すとおり、架設後の経過年数が約 30 年未満と約 30 年以上に分けて実施することとした。

これは、塩害による損傷が著しく、架設後約 30～40 年で架け替えられている事例^{※1}が多数存在する一方で、架設後約 30 年以上経過しても塩害による著しい損傷が生じていない事例^{※2}も多数存在するためである。

よって、架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁については、現状で塩害による損傷が生じていなくても、今後塩害による損傷が生じ急激に進行することも考えられることから、外観変状調査および鋼材の腐食度調査結果に加え、塩化物イオン含有量および中性化深さとそれぞれの劣化予測も含めて健全度を評価することとした。

一方、架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁については、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 未満の場合、外部環境が大きく変化しない限り塩化物イオン含有量が今後急激に増加する可能性は低いと考えられる。また、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 を超過していても著しい損傷が生じていなければ、今後急激に損傷が進行する可能性は低いと考えられることから、外観変状調査および鋼材の腐食度調査結果により健全度を評価することとした。

しかし 30 年という閾値については、これまでの経験等から暫定的に定めたものであり、地域や環境によっても異なることが考えられる。したがって、今後新たな知見や劣化予測等の精度向上により、健全度の評価方法については随時見直していく必要がある。

なお、表 4.1～表 4.7 による評価が困難な場合は、学識経験者や専門技術者等による判断を仰ぐこととする。

※1:塩害による損傷が架設後 10 年～20 年程度で著しく進行し、架設後 33 年で架け替えられた橋梁の架設から架け替えまでの経緯を示す。

	A 橋	B 橋
架設年	1965 年(昭和 40 年)	
構造形式	単純 PC ポステン T 桁(4 連)+単純 PC 合成桁(1 連) の計 5 連	
損傷状況	1975 年(S50):主桁に小さな錆汁が発生 1977 年(S52):錆汁, ひび割れ, はく離が発生 1979 年(S54):錆汁, ひび割れ, はく離が拡大, はく落も発生	
補修・補強 対策	1981 年(昭和 56 年)～1984 年(昭和 59 年) :脆弱部除去, 断面修復, 表面被覆の補修工 事実施。(第一次補修工事) 1991 年(平成 3 年)～1993 年(平成 5 年) :表面被覆除去, 脆弱部除去, 断面修復, 表 面被覆の補修工事实施。(第2次補修工事) :第 3 スパンを外ケーブル補強, 中間支柱設置 1992 年(平成 4 年)～1998 年(平成 10 年) :第 3 スパンは耐荷力の低下が懸念されたた め, たわみ等を継続的にモニタリング。	
架替年	1998 年(平成 10 年):供用後 33 年	

※2: 架設後 42 年が経過 (2007 年現在) しているが、塩害による損傷がほとんど見られない橋梁の事例を以下に示す。

C 橋	
架設年	1965 年 (昭和 40 年)
構造形式	単純 PC プレテンション 1 桁 (3 連)
外観変状調査結果 (平成 16 年度の調査結果)	ごく軽微なひび割れや錆汁が認められたが、これらは桁製作時に残置された結束線が発錆している箇所もあり、このような結束線が腐食原因となっているものもある。
鋼材腐食度調査結果 (平成 16 年度の調査結果)	スターラップの一部にごく表面的な腐食が見られる程度であり、PC 鋼材に腐食は見られなかった。
塩化物イオン含有量 調査結果 (平成 16 年度の調査結果)	海側の主桁下面で 7 箇所から試料を採取したが、全ての箇所においてスターラップ位置で腐食発生に関する限界値とされている 1.2kg/m^3 を超過していた。 また、スターラップ位置での塩化物イオン含有量が最も高かった箇所では、約 4.8kg/m^3 であった。下図は最も塩化物イオン含有量が最も高かった箇所の鋼材の腐食状況である。
補修・補強対策	これまで、補修・補強対策は実施されていない。

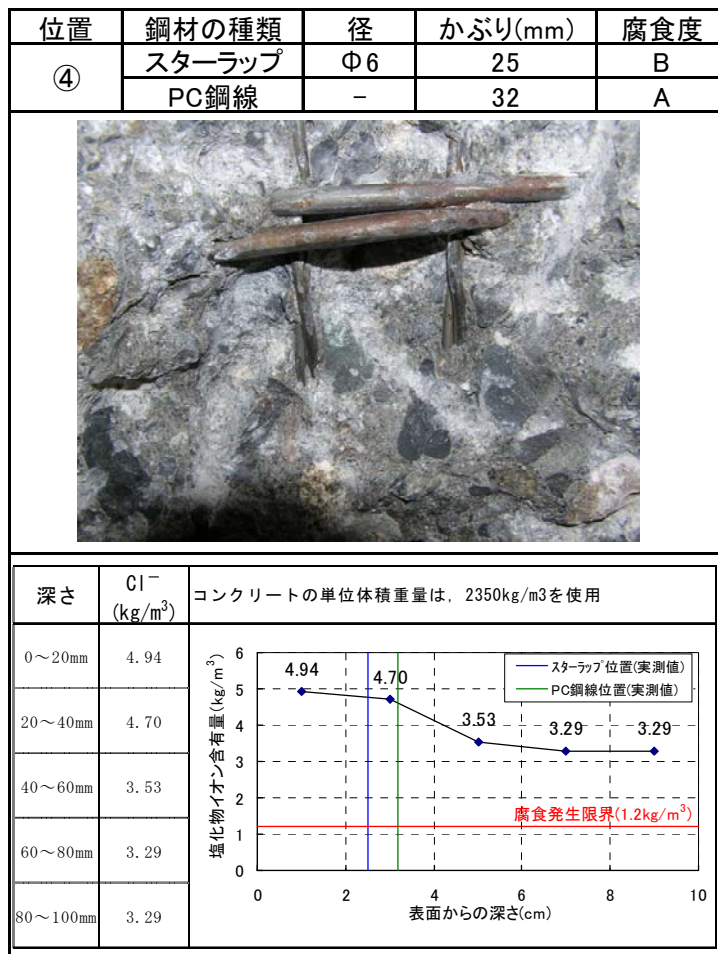


表 4.1 外観変状調査結果の評価: 架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁

健全度		外観変状	
		過去に補修が行われていない部材	過去に補修が行われた部材
グレード I	損傷原因が塩害以外	表 4.3 による評価がグレード I	
グレード II	将来塩害による損傷の発生が懸念される	表 4.3 による評価がグレード II	
グレード III	損傷原因が塩害	①ごく軽微なひび割れや錆汁が認められる	—
		②ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が部分的に認められる	②補修後の経過年数が5年を超えて損傷の範囲が局部的
		③ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が連続的に認められる	③補修後の経過年数が5年以内で損傷の範囲が局部的もしくは補修後の経過年数が5年を超えて損傷の範囲が全体的
		④コンクリートの断面欠損が認められ、内部の鋼材の露出が認められる	④補修後の経過年数が5年以内で損傷の範囲が全体的
グレード IV		⑤コンクリートの断面欠損が認められ、内部の鋼材の破断が認められる	⑤内部の鋼材の破断が認められたとき

表 4.1 の考え方

- 1) 外観変状の健全度は、目視のみの結果でグレード I (損傷原因が塩害以外) およびグレード II (将来塩害による損傷の発生が懸念される) の分類が行えないことから、外観変状の健全度がグレード I なのかグレード II なのかの分類については、表 4.3 の塩化物イオン含有量、中性化深さの調査結果により行うこととした。
- 2) グレード III, IV の分類については、鋼材近傍の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 以上であることを前提とし、外観変状調査結果により行うこととした。

表 4.2 鋼材の腐食度調査の評価: 架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁

健全度		鋼材の腐食状況
グレード I	損傷原因が塩害以外	①腐食なしまたは②ごく表面的な腐食 (表 4.3 による評価がグレード I)
グレード II	将来塩害による損傷の発生が懸念される	①腐食なしまたは②ごく表面的な腐食 (表 4.3 による評価がグレード II)
グレード III	損傷原因が塩害	③浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
		④断面欠損が著しい腐食
グレード IV		⑤鋼材が破断している

表 4.2 の考え方

- 1) 鋼材の健全度は、腐食状況のみの結果でグレード I (損傷原因が塩害以外) およびグレード II (将来塩害による損傷の発生が懸念される) の分類が行えないことから、鋼材の健全度がグレード I なのかグレード II なのかの評価については、表 4.3 の塩化物イオン含有量、中性化深さの調査結果により行うこととした。
- 2) グレード III, IV の分類については、鋼材位置の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 以上であることを前提とし、鋼材の腐食状況により行うこととした。

表 4.3 塩化物イオン含有量, 中性化深さ調査結果の評価: 架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁

健全度		塩化物イオン含有量		中性化残り	
		現状	劣化予測	現状	劣化予測
グレード I	損傷原因が塩害以外	1.2kg/m ³ 未満	今後20年以内に1.2kg/m ³ 未満	25mm以上	①今後20年以内に25mm以上
グレード II	将来塩害による損傷の発生が懸念される		④今後20年以内に1.2kg/m ³ 以上	③25mm未満	②今後20年以内に25mm未満
グレード III	損傷原因が塩害		⑤1.2kg/m ³ 以上	—	—
グレード IV					

表 4.3 の考え方

- 1)現状の塩化物イオン含有量が 1.2kg/m³ 以上の場合は、外観変状と鋼材の腐食度による判定区分で鋼材が破断していた場合をグレードIVとし、それ以外はグレードIIIと分類することとした。
- 2)鋼材近傍での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m³ 以上の場合は、すでに腐食発生に関する限界値を超えていることから、中性化の影響を考慮しない判定とした。
- 3)鋼材近傍での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m³ 未満で、今後 20 年以内に 1.2kg/m³ を超える場合は、中性化の影響に関わらず損傷の発生を抑制するための補修対策を実施(グレード II)することから、中性化の影響を考慮しない判定とした。
- 4)鋼材近傍での塩化物イオン含有量が 1.2kg/m³ 未満で、今後 20 年以内に 1.2kg/m³ を超えない場合でも、中性化残りが 25mm 未満の場合は、中性化の進行によりセメント水和物に固定化されていた塩化物イオンが解離し、未中性化領域に濃縮するために腐食の開始が早まる可能性があることから、グレード II (損傷の進行を抑制するための補修対策の実施)とした。
- 5)上記④を踏まえ、中性化残りが 25mm 以上の場合は、グレード I (塩害が原因と思われる損傷が見られないため、別途補修対策の検討を行う)とした。

表 4.4 健全度の総合評価: 架設後の経過年数が約 30 年未満の橋梁

	外観の健全度	鋼材の健全度	塩化物イオン含有量および 中性化残りの健全度	総合評価 (各健全度の最も厳しいもの)
健全度				

表 4.4 の考え方

- 1)表 4.1～4.3 の各健全度における最も厳しい判定区分をもってその径間の健全度とする。

表 4.5 外観変状調査結果の評価:架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁

健全度		外観変状	
		過去に補修が行われていない部材	過去に補修が行われた部材
グレード I	損傷原因が塩害以外	塩化物イオン含有量調査の結果, 現状の含有量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 未満	
グレード III	損傷原因が塩害	①ごく軽微なひび割れや錆汁が認められる	—
		②ひび割れ, 錆汁, 剥離, あるいは剥落が部分的に認められる	②補修後の経過年数が5年を超えて損傷の範囲が局部的
		③ひび割れ, 錆汁, 剥離, あるいは剥落が連続的に認められる	③補修後の経過年数が5年以内で損傷の範囲が局部的もしくは補修後の経過年数が5年を超えて損傷の範囲が全体的
グレード IV		④コンクリートの断面欠損が認められ, 内部の鋼材の露出が認められる	④補修後の経過年数が5年以内で損傷の範囲が全体的
		⑤コンクリートの断面欠損が認められ, 内部の鋼材の破断が認められる	⑤内部の鋼材の破断が認められたとき

表 4.5 の考え方

- 1)架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁は, 損傷が発生したとしても急激に進行する可能性は低いと考え, グレード II (塩害による損傷が将来発生する可能性があるため, 損傷の発生を抑制するための補修対策)の対策は必要ないと考えた。
- 2)架設後 30 年以上経過した橋梁では, 塩化物イオン含有量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 未満の場合は損傷原因が塩害以外と考えられることから, グレード I とした。また, 塩化物イオン含有量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超過し, 外観にごく軽微なひび割れや錆汁が認められた場合でも, 今後損傷が急激に早く進行する可能性は低いと考えグレード I とした。

表 4.6 鋼材の腐食度調査の評価:架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁

健全度		鋼材の腐食状況
グレード I	損傷原因が塩害以外	①腐食なしまたは②ごく表面的な腐食
グレード III	損傷原因が塩害	③浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
		④断面欠損が著しい腐食
グレード IV		⑤鋼材が破断している

表 4.6 の考え方

- 1)架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁は, 損傷が発生したとしても急激に進行する可能性は低いと考え, グレード II (塩害による損傷が将来発生する可能性があるため, 損傷の発生を抑制するための補修対策)の対策は必要ないと考えた。

表 4.7 健全度の総合評価:架設後の経過年数が約 30 年以上の橋梁

	外観の健全度	鋼材の健全度	総合評価 (各健全度の最も厳しいもの)
健全度			

表 4.7 の考え方

- 1)表 4.5~4.6 の各健全度における最も厳しい判定区分をもってその径間の健全度とする。
- 2)塩化物イオン含有量によって健全度の総合評価は決定しないが, 現状を把握する目的で塩化物イオン含有量の調査は実施すること。

4)について

対策方法の分類は、健全度の評価の結果をもとに適切に行うこととした。

健全度ごとの対策方法の分類を、表 4.8 に示す。対策方法の分類を行うための条件(外観、鋼材の腐食度、塩分量、中性化等の判定区分)については明確になっていない部分もあることから、今後調査を実施しデータを蓄積しながら、橋梁の位置関係や塩化物イオン含有量等の関係も含め、順次見直しを行うこととする。

この中で、グレードⅣと評価された橋梁は、損傷が著しく耐荷性能が低下しており、補修・補強したとしても再度損傷が発生する可能性が高く、補修費用が増大してしまうことが考えられる。したがって、対策方法については、学識経験者や専門技術者等による判断や補修・補強した場合と更新した場合の費用比較等を行った上で決定することとする。

表 4.8 健全度ごとの対策方針の考え方

健全度	対策方法の分類
グレードⅠ	塩害対策は不要
グレードⅡ	塩害による損傷が将来発生する可能性があるため、損傷の発生を抑制するための補修対策が必要
グレードⅢ	塩害が原因の損傷が見られるため、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要
グレードⅣ	塩害が原因の損傷が甚大なため、耐荷性能の確認と評価を行うとともに安全確保のための早急な対策の実施と、更新を含めた恒久対策の検討が必要

表 4.8 の考え方

- 1)詳細調査は、外観に損傷が現れている橋梁に対して実施されることから、本マニュアル(案)の対象橋梁は全て補修対策を行うこととなる。しかし、損傷原因が塩害以外の場合もあることから、そのような場合は塩害対策以外の補修は必要であるが塩害対策は不要(グレードⅠ)と考えた。
- 2)現状で発生している損傷の原因は塩害ではないが、今後塩化物イオン含有量が鋼材の腐食発生に関する限界値を超過し、塩害損傷が発生することにより第三者や車両通行に影響を及ぼすことも考えられる。したがって、そのような場合は、塩害による損傷が将来発生する可能性があるため損傷の発生を抑制するための補修対策が必要(グレードⅡ)と考えた。
- 3)現状で発生している損傷の原因が塩害であり、今後損傷の進行により第三者や車両通行への影響が大きくなることも考えられる。したがって、そのような場合は、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要(グレードⅢ)と考えた。
- 4)現状で発生している損傷の原因が塩害で甚大な場合、早急に第三者や車両通行の安全を確保する必要がある。したがって、そのような場合は、耐荷性能の確認と評価を行うとともに安全確保のための早急な対策の実施と、更新を含めた恒久対策の検討が必要(グレードⅣ)と考えた。

5. 対策方法の分類

- 1) 対策は、健全度およびライフサイクルコストを考慮して適切な方法を選定して実施する。特に耐荷性能の低下が懸念される橋梁に対しては、耐荷性能の確認および判定を実施する。
- 2) 点検強化は、更新を含めた恒久対策が必要と判断された橋梁(グレードIV)に対して実施する。
- 3) 追跡調査は、対策を実施した全ての橋梁に対して実施する。

【解説】

1)について

対策は、健全度およびライフサイクルコストを考慮して適切な方法を選定し、適切な時期に実施する必要がある。

塩害による損傷は発生すると進行が早く、対策の遅れによる性能低下や補修費用の増加が懸念されることから、特に架設後の経過年数が比較的短い(架設後の経過年数が約 30 未満)橋梁では、早期の対策実施が効果的である。

一方で健全度が同程度であっても、対策方法が異なると考えられる場合がある。例えば、

- ① 損傷の発生が構造上問題となる箇所(主桁では支間中央付近の下フランジ等)とそれ以外の箇所の場合
- ② 「塩化物イオン含有量が多いが鋼材の腐食は軽微な場合」と「塩化物イオン含有量は少ないが鋼材の腐食は著しい場合」
- ③ ある特定の箇所に外観の損傷が見られ、その箇所の近傍のみの塩化物イオン含有量が高い場合と、他の箇所も含めた全ての箇所で塩化物イオン含有量が高かった場合等

表 5.1 に各補修・補強・更新工法を、表 5.2 に各補修・補強工法により期待される効果を、各健全度における必要な対策の例を図 5.1 に示す。

今後新たな工法の開発も期待されるため、それらの工法の採用にあたっては、適宜適用性の可否を検討した上で採用してもよいこととする。

各補修・補強工法の詳細については、下記の資料を参考にするとよい。

- ① 土木学会:コンクリート構造物の補強指針(案), コンクリートライブラリー, No.95, 1999
- ② 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(I, II, III), 1992, 1994, 1996
- ③ 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998
- ④ 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, No.107
- ⑤ 土木学会:表面保護工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.119
- ⑥ (独)土木研究所, 電気化学工業(株), (株)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: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, 共同研究報告書第 382 号, 2008 年 3 月

なお、表面塗装については、外部からの塩化物、酸素、水分の浸入を抑制する性能はあるが、すでに塩化物イオンが内在している場合や劣化が進行している場合などは、鋼材の腐食進行を抑制できない場合がある。

したがって、表面塗装の適用は詳細調査の結果を踏まえて十分検討する必要がある。

表 5.1 補修・補強・更新工法

補修	断面修復(防錆処理含む), 桁カバー, 表面塗装, FRP 接着(剥落防止), 犠牲陽極材を用いた電気防食, 電気防食, 脱塩
補強	FRP 接着, 外ケーブル, 中間支柱の設置
更新	架替え

表 5.2 各補修・補強工法により期待する効果

期待する効果	工法例
塩化物イオンの供給量を低減	表面塗装, 桁カバー
塩化物イオンの除去	はつり, 電気化学的脱塩
塩化物イオンによる鋼材の腐食進行を抑制	防錆処理, 電気防食, 犠牲陽極材を用いた電気防食
コンクリート片の剥落防止措置	叩き落とし, FRP 接着(剥落防止)
耐荷力を向上, 断面力の低減	FRP 接着, 外ケーブル, 中間支柱の設置(断面力の低減)

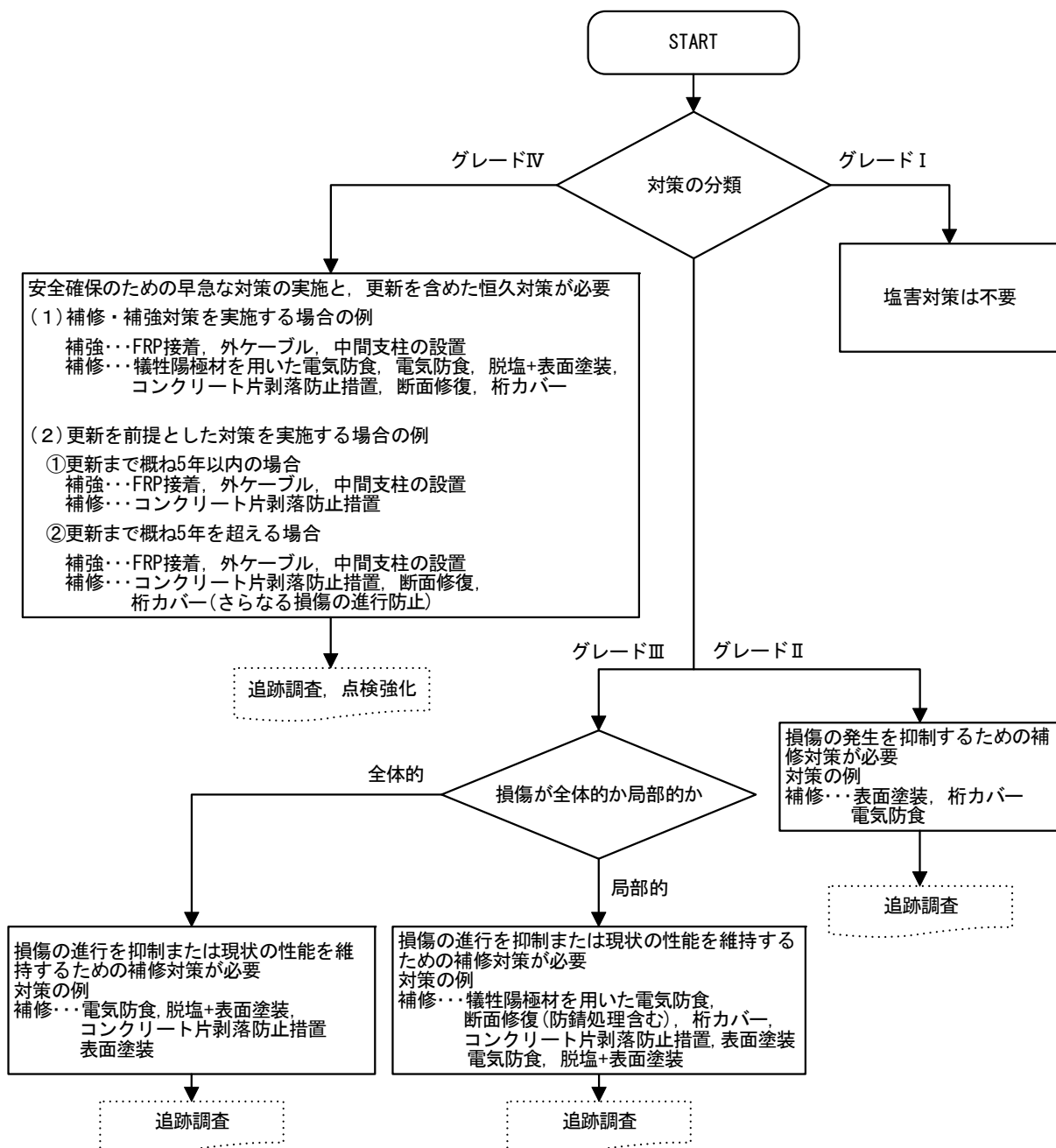


図 5.1 各健全度により必要な対策の例

特に耐荷性能の低下が懸念される橋梁に対しては、耐荷性能の確認および判定を行うこととした。

耐荷性能の低下が懸念される橋梁とは、点検や詳細調査において、目視による判定区分が④や⑤の橋梁(写 5.1)もしくは鋼材腐食状況の調査による判定区分が④や⑤の橋梁が考えられる。これらの損傷が確認された場合には、耐荷性能の確認を行うこととした。



写 5.1 耐荷性能の低下が懸念される橋梁の外観損傷状況の例

既設橋の耐荷性能を確認する方法としては、書類調査と現地調査がある。書類調査では、建設当初の設計図、設計計算書、並びに、補修・補強履歴などを収集・分析することが必要である。現地調査では、鉄筋の破断状況(部位、破断本数)、並びに、鉄筋およびコンクリートの材料特性などを知ることが必要である。

既設橋の耐荷性能を判定する上では、上記に示した書類調査と現地調査の他に現有耐荷性能(曲げ耐力、せん断耐力、ねじり耐力等)の評価と、目標とする耐荷性能(補強レベル)の設定が必要である。既設橋の現有耐荷性能を評価する方法としては、既知の荷重による載荷試験や供用下での応力頻度測定等があげられるが、これらの確認方法および判定については、学識経験者や専門技術者による判断を踏まえて実施することとする。

2)について

点検強化が必要と判断される橋梁としては、更新を含めた恒久対策が必要と判断された橋梁(グレードⅣ)とした。点検方法については、詳細調査での項目を基準として適宜行うこととする。点検の頻度としては、次回の橋梁定期点検、特定点検までの間に適宜行うこととする。

3)について

追跡調査が必要と判断される橋梁としては、効果の確認が必要と考えられることから、対策を実施した全ての橋梁(グレードⅡ, Ⅲ, Ⅳ)とした。

6. 維持管理データの保存方法

維持管理に関するデータは、適切に記録し、保存する。

【解説】

各橋梁における維持管理に関するデータ(点検・調査結果や補修・補強対策の選定プロセスの詳細等)は、対象橋梁の現状を客観的に把握し、効率的・効果的な維持管理を行う上で貴重な基礎資料となることから、これらを実施した際は必ず記録し、データを保存することとした。また、点検・調査が複数回行われている場合は、現状と過去の点検・調査結果を比較することにより、損傷の進行度合いを適切に把握することが可能となり、予測精度も向上することから、対策方法を検討する上では過去の点検・調査結果は非常に重要となる。そのため、過去に実施された点検結果についても、適切に保存し活用する必要がある。よって、点検者や施工者は、これらの情報が管理者や次回の点検実施者へ正確に伝わるように、記録する必要がある。そのためにはどのような項目を記録しておくべきか理解しておく必要がある。特に鋼材の腐食状況については、補修後目視が困難になることから、腐食範囲とともに「全面腐食」「局部腐食(孔食)」「表側(部材表面側)だけ腐食」「裏側(部材内部側)まで腐食」などの腐食状況や画像として記録することが非常に重要である。なお、維持管理に関する情報は、データ共有および相互比較ができるデータベースとして活用されるように保存する必要があるため、記録様式は統一されたものとし、記録様式の(案)については、付属資料に示す。

記録事項は、構造形式、架橋位置等の橋梁の基本的な諸元に関するものおよび以下に示すような損傷に関するものを基本とする。

- ・損傷部位あるいは箇所
- ・損傷の種類、大きさ、範囲(必要に応じてスケッチ、写真記録)
- ・損傷の判定
- ・過去に実施された補修、補強履歴等

参考文献

以下に示す文献を参考に、本マニュアル(案)の作成を行った。

- ①国土交通省 道路局 国道・防災課:橋梁定期点検要領(案) 平成 16 年 3 月
- ②国土交通省 道路局 国道・防災課:コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案) 平成 16 年 3 月
- ③土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編] 2001 年制定
- ④独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会:非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル

付属資料

付属資料としては、以下のものを添付する。

- (1) 他機関の塩害に関するマニュアル類と本マニュアル(案)の特徴について
- (2) 塩害による劣化メカニズムについて(塩害による劣化, 補修後の劣化状況, マクロセル腐食等)
- (3) 維持管理データの保存方法について(フォーマット(案))
- (4) 自然電位法を用いた塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定方法(案)
- (5) 電気化学的工法について
- (6) 詳細調査の実施手順

(1) 他機関の塩害に関するマニュアル類と本マニュアル(案)の特徴について

付表-1 に他機関の塩害に関するマニュアル類と本マニュアル(案)の特徴について示す。

付表-1 各機関の塩害に関するマニュアル類と(仮称)塩害橋梁維持管理マニュアル(案)の特徴

マニュアル類	コンクリート橋 塩害調査・塩害補修設計 マニュアル(案)	コンクリート橋 塩害調査を用いた 土木コンクリート構造物の 健全度診断マニュアル	コンクリート標準示方書維持管理編に 準拠した維持管理マニュアル(その1) および関連資料	コンクリート橋の塩害に関する 特定点検要領(案)	塩害橋梁維持管理マニュアル(案)
概要	平成8年4月 沖縄総合事務局開発建設部 塩害損傷の発生している橋梁をはじめ、また損傷の発生していない橋梁も適切な塩害調査を行うことにより、その進行度合いを把握し、適切な補修工法を選択するためのもの。	平成15年10月 独立行政法人 土木研究所 日本構造物診断技術協会 本マニュアルは、既存コンクリート構造物の維持管理現場で非破壊試験を活用した健全度診断を行う方法を示したものである。	平成15年11月 土木学会 2001年制定のコンクリート標準示方書[維持管理編]にしたがって維持管理するときに必要な各種項目を具体的に示したものである。	平成16年3月 国土交通省 道路局 国道・防災課 塩害の兆候を早期に発見するための点検方法を示したものである。	平成20年4月 土木学会、国土交通省 道路局 国道・防災課、酒田河川国道事務所等で定められている塩害橋梁に対する維持管理に関する考え方や点検・調査手法、対策工法等を参考に、塩害橋の維持管理に関するマニュアルを作成した。なお、これまで実施されてきた補修調査・工事の実績等についても併せて検討し、他機関には未だ記述されないもので、実務上は必要と考えられる事項についても補足した。
適用の範囲 (対象)	沖縄総合事務局管内のコンクリート橋	道路用鉄筋コンクリート構造物	塩害により劣化した構造物あるいは塩害による劣化が予想されるRC、PC構造全般。	塩害環境下において、塩害による劣化が生じる可能性のあるコンクリート橋(主に上部工)。	塩害環境下において、塩害により劣化が生じているコンクリート橋(上部工)。
主な構成(流れ) および特徴	構成 ①定期点検(塩化物イオン含有量調査を含む) ②必要に応じて詳細調査を実施(詳細調査A、Bの選定) ③損傷度の判定 ④補修・補強方法の選定 特徴 ・定期点検時に塩化物イオン含有量調査を行う。 ・定期点検結果により詳細調査AまたはBを設定し、損傷度により調査レベル分ける。	構成 ①定期点検(目視主体の外観調査、非破壊試験) ②詳細調査 特徴 ・定期点検は、コンクリート表面の変状、鉄筋の腐食状態、塩化物イオン、中性化深さ、鉄筋位置・かぶり、コンクリートの品質を調査する。 ・詳細調査は、まず予備調査を行って構造物の劣化原因を推定したうえで、必要な詳細試験調査を実施する。	構成 ①構造物の外観上のグレードの判定 ②維持管理区分(A～D)の設定 ③劣化予測 ④点検 ⑤評価および判定 ・劣化機構の推定 ・今後の劣化予測 ・詳細点検要否の判定等 ⑥記録 特徴 ・コンクリート標準示方書と本マニュアルで一連の維持管理をカバー。	構成 ①点検、調査(外観目視、はつり、塩化物イオン含有量、中性化深さ調査を含む) ②必要に応じて耐荷性能の評価 ③健全度(劣化予測含む)の評価 ④対策 ⑤記録 ⑥更新 特徴 ・塩害補修した後の橋梁の点検・調査方法の記述。 ・損傷が進んでいる橋の具体的な処置・対策の記述。 ・継続調査に基づく検証とこれによるマニュアル更新。	
点検	○	○	△	△	○
詳細調査	○	○	×	×	○
劣化予測	△	○	○	△	○
発錆限界	1.2kg/m ³	2.5kg/m ³	1.2kg/m ³	1.2kg/m ³	1.2kg/m ³
耐荷力評価	×	×	×	×	○
記録	○	○	○	○	○
対策工法	○	×	維持管理編参照	橋梁点検要領(案)による	○

○: 具体的な記述あり, △: 一部記述あり, ×: 記述なし

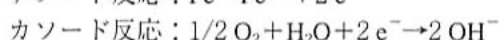
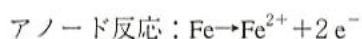
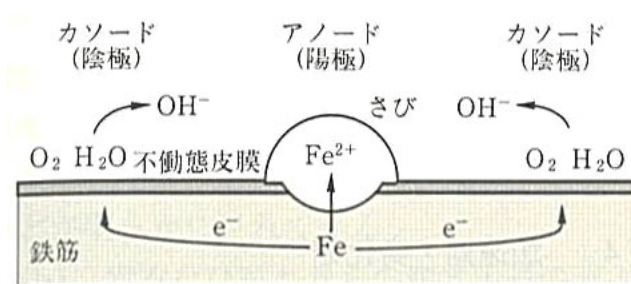
(2) 塩害による劣化メカニズムについて(塩害による劣化, 補修後の劣化状況, マクロセル腐食について)

1) 塩害による劣化

a) 塩害について

コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中の鋼材が塩化物イオンにより腐食を促進され、コンクリートのひび割れ、はく離、鋼材の断面欠損等を生じる劣化現象である。なお、塩化物イオンは、海砂や混和剤の使用によりコンクリート内部に当初から含まれている場合と、海からの飛来塩分や凍結防止剤の散布等により外部から供給される場合がある。

鋼材の腐食反応は、鋼材表面から鉄イオン(Fe^{2+})が細孔溶液中に溶け出すアノード反応と鉄イオンが鋼材中に残した電子イオン($2e^-$)が酸素と水と反応するカソード反応に分けて考えられている。鋼材の腐食はこれらのいずれも起きることにより進行するものであり、アノード反応により溶け出した Fe^{2+} がカソード反応により生成した OH^- と反応することにより水酸化第一鉄($Fe(OH)_2$)を生成する¹⁾。



付図-1 鋼材の腐食反応の模式図¹⁾

1)コンクリート診断技術‘01[基礎編] (社)日本コンクリート工学協会

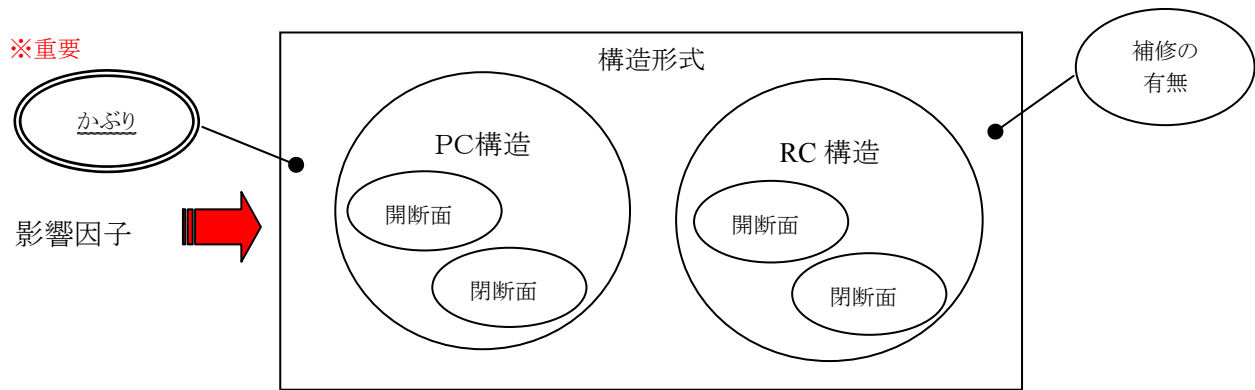
b) 塩害発生に影響する要因

塩害発生に影響する因子を付表-2 に示す。

付表-2 塩害発生に影響する因子

環境条件	コンクリートの品質
<ul style="list-style-type: none"> • 飛来塩分量, 表面塩分量 • 海岸からの距離 • 海面からの高さ • 温度, 湿度 • 風向 • 地形状況(離岸堤の位置, 河川, 山岳の位置等) • 融雪剤の散布 • 年間降雨量など 	<ul style="list-style-type: none"> • コンクリートの強度 • 中性化速度 • 初期塩分量(現状の分布) • 含水率 • 水セメント比 • 空隙構造 • セメントの種類

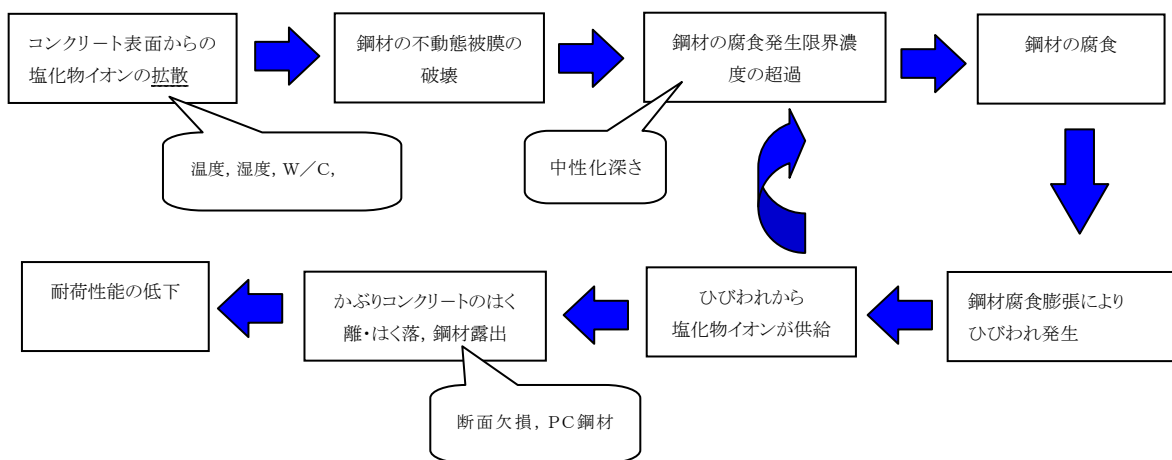
なお、影響因子による塩害の発生状況は「かぶり」、「補修の有無」、「構造形式」等の違いにより異なり、特に「かぶり」は、大きな要因となる(付図-2 参照)。また、開断面においては部位別に着目する等注意が必要となる。



付図-2 構造形式への影響因子および要因

c) 塩害による劣化メカニズム

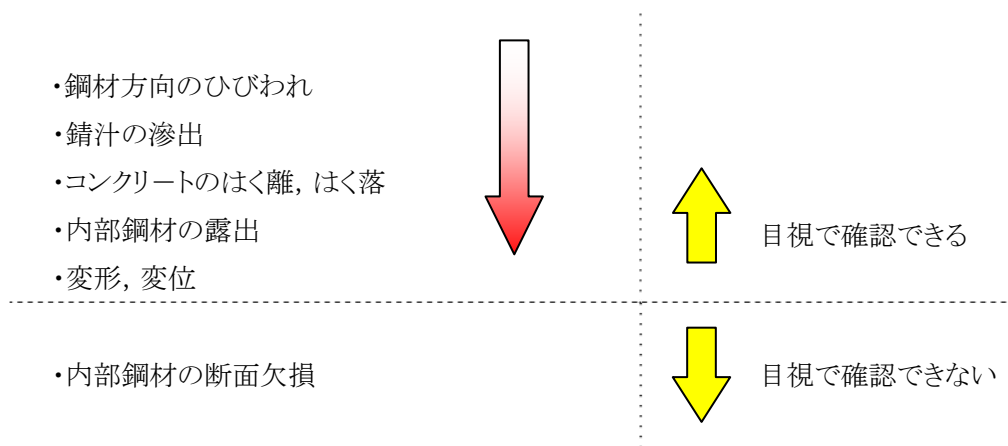
塩害による劣化メカニズムを付図-3 に示す。



付図-3 塩害による劣化メカニズム

d) 塩害による劣化現象

塩害による劣化現象は外観上, 以下に示すような劣化現象となり, 内部鋼材の腐食膨張によるひび割れが確認された時点では, 塩害による損傷はかなり深刻なものとなる。塩害による劣化現象のイメージを付図-4 に示す。



付図-4 塩害による劣化現象のイメージ

2) 補修後の劣化状況

以下に補修後の劣化状況について、「コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書 平成6年7月 建設省土木研究所」からの抜粋を示す。これらの再損傷の発生原因の一つとして、マクロセル腐食が考えられる。

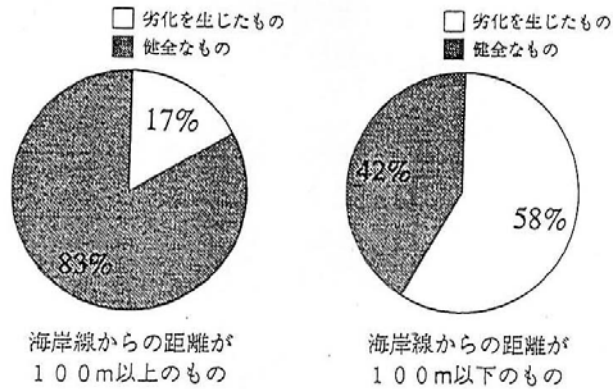
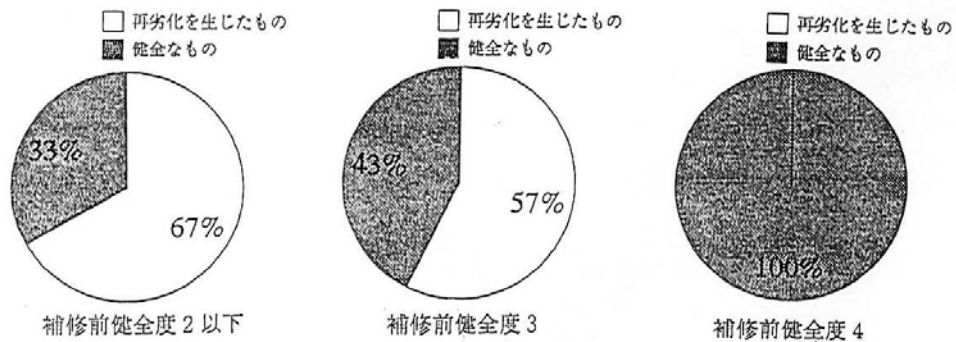
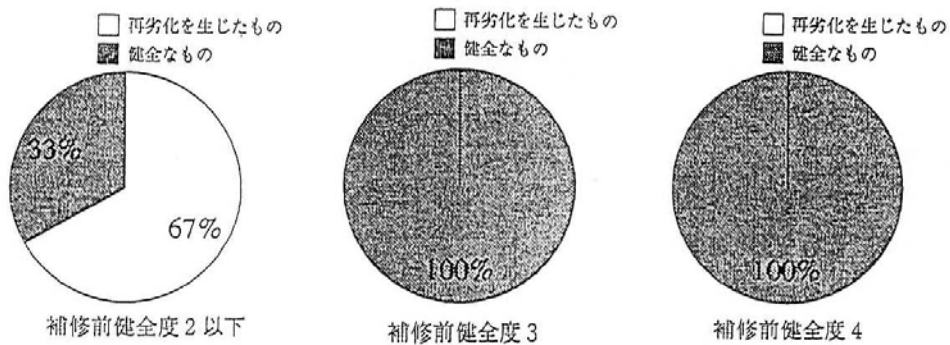


図-1.5 構造物建設地点の海岸からの距離別の補修後構造物状況



1) 海岸線からの距離が100m以下のもの



2) 海岸線からの距離が100m以上のもの

図-1.6 補修前の構造物の健全度と補修後の構造物の劣化の有無について

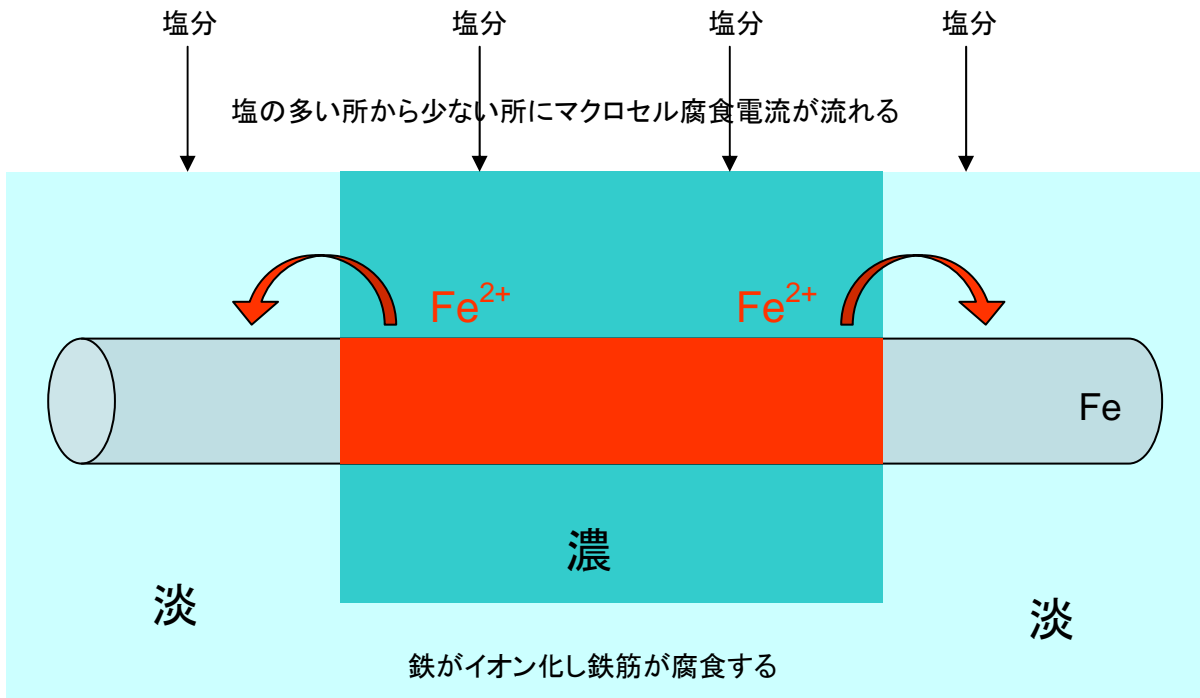
表-1.3 補修後の構造物の状態観察と実施した時点の経過年数

構造物の種類	測定実施年(平均)
補修後変状の認められた構造物	補修後4.5年
補修後変状の認められない構造物	補修後4.9年

付図-5 補修後の劣化状況

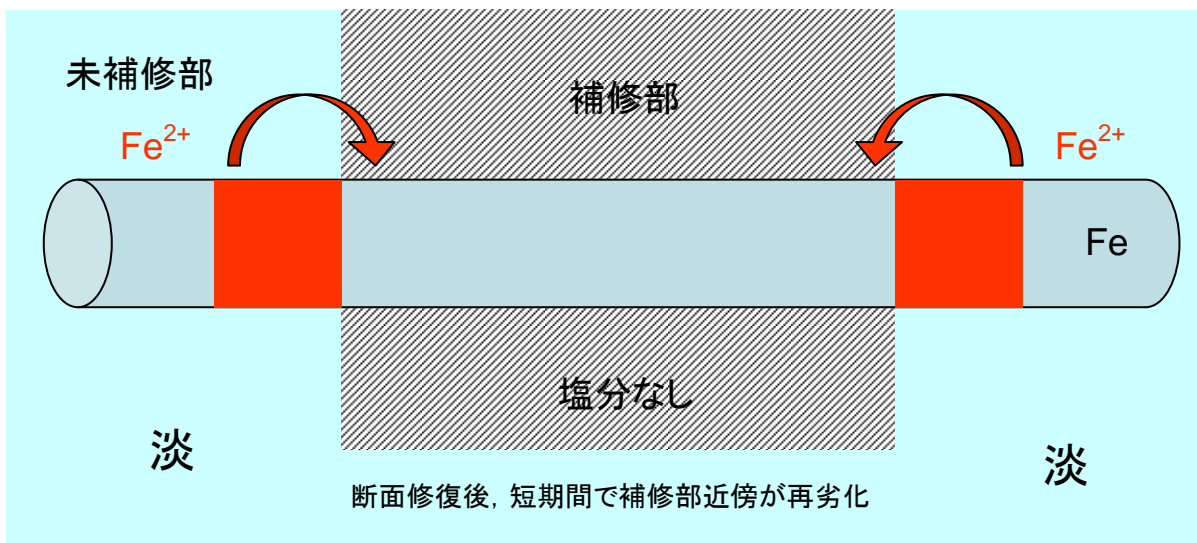
3) マクロセル腐食について

コンクリート構造物の塩害による鋼材腐食は、マイクロセル腐食とマクロセル腐食がある。マイクロセル腐食はアノード反応やカソード反応が鋼材の同位置で起きているのに対し、マクロセル腐食はこれらの反応が離れた位置で起きていると考えられる。マクロセル腐食はマイクロセル腐食と比べて、腐食速度が極めて大きく、激しい腐食を生じるのが特徴である。このようなマクロセル腐食は断面修復部と未補修部付近に発生することが多い。付図-6, 7 にマクロセル腐食の概念図を示す。



付図-6 マクロセル腐食概念図(1)

断面修復したことにより塩分の濃度が逆となり、マクロセル腐食電流が逆に流れる



付図-7 マクロセル腐食概念図(2)

(3)維持管理データの保存方法について(フォーマット(案))

塩害橋 調査・点検記入票 その1 調査年: 平成〇〇年〇月〇日 橋梁名: 〇〇橋

組織名	担当事務所 又は部	連絡先	TEL	FAX
調査担当課	担当者		E-mail	
橋梁諸元 その1				
路線名	橋梁名	構造形式	橋長	径間数
環境条件				
		降雪対策 区分	海岸からの 距離(m)	海面からの 高さ(m)
				凍結防止剤散布 の有無
補修・補強履歴				
実施年	補修・補強方法	実施年	補修・補強方法	実施年
橋梁諸元 その2				

位置図, 構造一般図および断面図, 鋼材配置図(位置, かぶり等), 全景写真等

損傷図, 損傷写真等

損傷図, 損傷写真, 鋼材の腐食度調査位置, 中性化深さの測定位置, 塩化物イオン分析用試料採取位置等

自由記入欄(耐荷性能の照査を行った場合など)

(4) 自然電位法を用いた塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定方法(案)*

本付属資料では、自然電位法の測定結果を参考として、コンクリート橋における塩化物イオン含有量調査およびはつり調査の実施箇所を選定する方法とその適用事例について示す。

一般に、鋼材腐食が進展すると橋梁の外観に錆汁やひび割れなどの損傷が現れるが、損傷が現れていない箇所においてもコンクリート内部で鋼材腐食が進展している可能性がある。自然電位法は、コンクリート表面で測定した鋼材の自然電位をもとに、鋼材の腐食状態を推定する試験方法である。外観上の損傷が比較的軽微なために塩化物イオン含有量調査やはつり調査の実施箇所の決定が困難な場合には、自然電位法の測定結果を参考にすることで、鋼材腐食の進展した箇所を調査対象として選定することが可能である。

自然電位法は、土木学会でも既に測定方法が規準化されている。しかしながら、土木学会規準は自然電位法の基本的な測定方法を定めたものであり、実際のコンクリート橋の測定に即した留意事項や、測定結果を用いた鋼材腐食の評価方法ならびに測定結果の活用方法については十分な記載がなされていない。本付属資料では、コンクリート橋における自然電位の測定方法を示し、得られた結果を用いた鋼材腐食の推定方法ならびに塩化物イオン含有量・はつり調査箇所を選定する方法を示す。また、この適用例として、塩害環境下にあるコンクリート橋での調査事例を示す。

1) 適用の範囲

この「自然電位法を用いた塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定方法(案)」は、大気中にあるコンクリート橋内部の鋼材の自然電位を測定し、その結果から「塩害橋梁維持管理マニュアル(案)」における塩化物イオン含有量調査およびはつり調査の実施箇所を選定する場合に用いる。

自然電位の測定を行うためには、コンクリート橋内部の鋼材とコンクリート表面に接地した照合電極の電気的な連続性が確保されていることが不可欠である。従って、次のような場合には自然電位法を適用することができない。

- ・コンクリート表面が非常に乾燥し電氣的に絶縁体に近い場合
- ・コンクリート表面や鋼材表面に絶縁材料が被覆されている場合
- ・コンクリート表面が完全に水で覆われている場合

2) 測定方法

自然電位の測定は、以下の方法で行う。ここに示されていない事項については、土木学会規準「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E 601-2000)・同解説」に従うものとする。

①測定装置

測定には、照合電極、電位差計、リード線を用いる。

照合電極は、環境条件によらず安定した電極電位を示すものを使用し、使用に先立ち他の照合電極と電極電位の比較を行い、これが適切な電極電位を示すことを確認しなければならない。適切な電極電位を示さない照合電極を使用してはならない。

電位差計は、入力抵抗が 100MΩ 以上で感量が 1mV 以下の直流電流計、リード線は、被覆した軟銅より線を用いる。

②測定前の準備

測定前の準備として、測定点の罫書き、鋼材の導通確認、コンクリート表面の湿潤を行う。

測定点の罫書きでは、配筋図や非破壊検査による鉄筋探查結果を参考とし、鋼材直上となるように測定点を定める。測定点の間隔は、局所的な鋼材腐食を特定できるように、300mm程度とする。測定間隔を狭めるほど詳細な測定結果を得ることができるが、鋼材間隔よりも狭くする必要はない。

鋼材の導通確認は、互いに離れた箇所の鋼材を露出させ、鋼材間の電位差を測定することにより行う。電位差が約1mV以下であれば導通がとれているとみなすことができる。電氣的に連続している鋼材であれば、どの位置に測定用のリード線を接続してもよい。

コンクリート表面の湿潤は、30分程度の間、水道水など清浄な水を断続的に噴霧散水して行う。ただし、測定時に浮き水等がないようにする。

③自然電位の測定

電位差計に照合電極と鋼材をリード線で接続し、照合電極をコンクリート表面に垂直に押し当てて測定を行う。

自然電位は、1mVの単位まで測定する。

測定計画は、測定開始から1時間以内に完了するように立案する。測定範囲が広い場合には、湿潤開始時間をずらすなど測定範囲を分けて測定を行う。

3) 測定値の換算

測定値は、使用した照合電極の種類に応じて、付表-3の換算式を用いて25℃の飽和硫酸銅電極を基準とする値に換算する。

付表-3 照合電極の種類と電極電位

照合電極の種類	自然電位 E (mV:CSE) 25℃ 飽和硫酸銅電極換算
飽和硫酸銅電極	$0+0.9\times(t-25)$
飽和カロメル電極	$-74-0.66\times(t-25)$
飽和塩化銀電極	$-120-1.1\times(t-25)$
鉛電極	$-799+0.24\times(t-25)$

t: 測定時の気温(℃)

付表-3では、25℃を基準として、測定時の気温と照合電極の種類に応じて測定値を換算している。これは、測定時の気温の影響を受けて変化する各照合電極の電極電位を補正するためのものである。一方、コンクリート内部の鋼材周辺の腐食環境も気温や湿度等の影響を受けるため、鋼材の自然電位も変化するが、付表-3の換算式は、このような腐食環境の違いによって生じる自然電位の変化を補正することを目的としたものではない。

また、別途、照合電極ごとに試験を行って換算方法を確認している場合には、その方法を用いてもよい。例えば、現場測定には使用しない補正用の照合電極を準備し、飽和塩化カリウム水溶液中で現場測定に使用する照合電極との電極電位の差を測定し、この値を用いて測定値を換算する方法などがある。

なお、換算した値は、10mVの単位に丸めて報告する。

4) 鋼材腐食の推定

鋼材腐食の推定は、付表-4の鋼材の腐食判定基準に従って行う。

付表-4 鋼材の腐食判定基準

自然電位 E (mV:CSE)	腐食判定基準
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり
$-200 \geq E > -350$	不確定 [※]
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし

※: 等電位線図の結果を踏まえて判定

付表-4では、自然電位の測定値に対する鋼材の腐食確率を示している。自然電位が -350mV:CSE よりも卑であれば「90%以上の確率で腐食あり」、 -200mV:CSE よりも貴であれば「90%以上の確率で腐食なし」と判定する。

また、自然電位が $-200 \sim -350\text{mV:CSE}$ の範囲にある鋼材の腐食状態を「不確定」と判定する。これは、測定時の気温や湿度、湿潤時間、使用した照合電極が異なる場合に自然電位の測定値に差が生じることや、マクロセル腐食やかぶりコンクリートの中性化の影響を受けた場合に必ずしも鋼材の腐食状態に対応した自然電位が測定されないことが報告されていることを踏まえ、個別の測定値のみを用いて誤った判定を下すことを避けるためである。特に、塩化物イオン濃度が局所的に鋼材位置まで浸透している橋梁においてはマクロセル腐食が生じている可能性が高く、腐食環境にある鋼材であっても -350mV:CSE よりも貴な自然電位が測定される場合がある。このため、橋梁全体の測定値のうち最も卑な自然電位が $-200 \sim -350\text{mV:CSE}$ の範囲に収まった場合には、 50mV 単位で作成した等電位線図を参照し、橋梁全体の自然電位の分布傾向を精査して鋼材の腐食状態を推定しなければならない。腐食判定基準で「不確定」と判定された箇所においても、周囲の等電位線の間隔が狭く、橋梁全体で最も卑な自然電位が測定された箇所では、鋼材腐食が生じている場合がある。

5) 塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定

塩化物イオン含有量調査およびはつり調査の実施箇所は、橋梁全体の自然電位の測定値を精査し、4)において鋼材腐食が生じていると推定された箇所か、等電位線図において周囲の等電位線の間隔が比較的狭く、最も卑な自然電位を示した箇所から選定する。4)において鋼材腐食が生じていると推定された箇所においても、等電位線図を参照し、最も卑な自然電位の測定された箇所から選定することが望ましい。

6) 報告

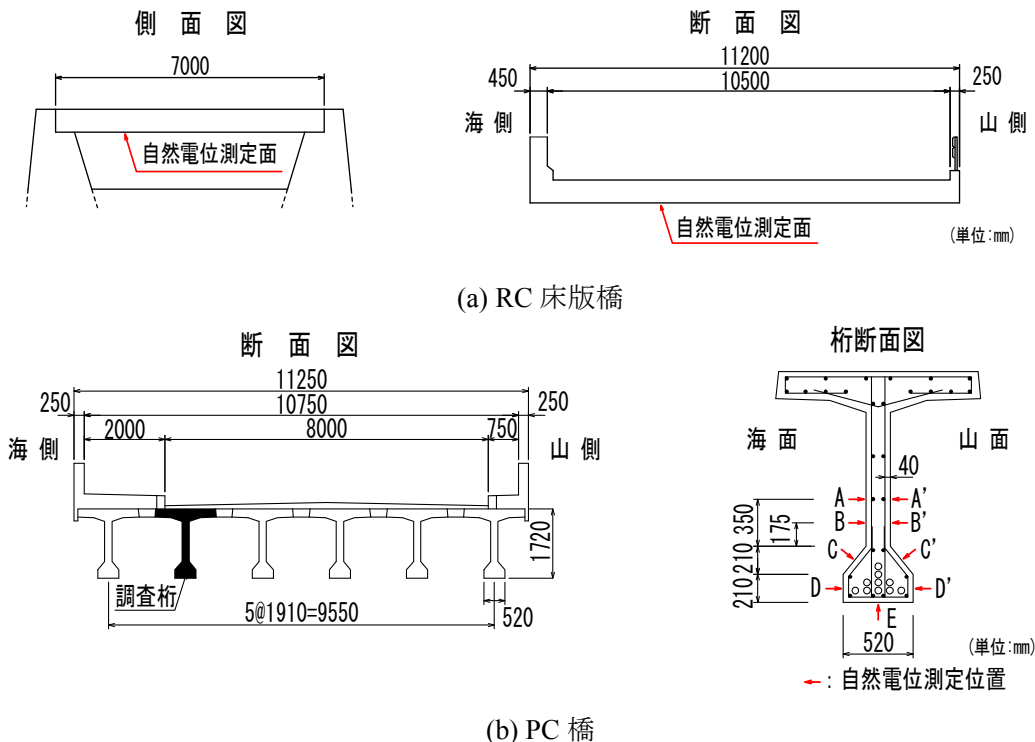
次の事項を報告するものとする。

- ・対象構造物の構造種別
- ・対象構造物のおかれた環境
- ・自然電位の測定位置、測定点間隔、鋼材配置
- ・測定時の日時、気温、天候
- ・使用した照合電極の種類
- ・自然電位の測定値と等電位線図
- ・鋼材腐食の推定結果と推定方法
- ・塩化物イオン含有量調査とはつり調査の結果

7) 適用事例

①対象橋梁

測定は、日本海沿岸に位置し塩害環境下にあるRC床版橋とPCポストテンションテンT桁橋(以下、PC橋)の2つのコンクリート橋を対象として、2006年8月に実施した。RC床版橋は1963年架設、PC橋は1975年架設であり、両橋梁ともコンクリート表面に錆汁や剥離など鋼材腐食によると思われる劣化損傷は確認されなかった。付図-8に、両橋梁の概要を示す。



付図-8 対象橋梁の概要

②測定装置

測定には、飽和塩化銀電極、入力抵抗 100MΩを有する電位差計、被覆した軟銅より線を用いた。

③測定前の準備

RC床版橋は、鋼材が縦方向と横方向に200mm間隔で配筋されていたため、200mmの格子状に測定点を設けた。PC橋では、せん断補強鉄筋が300mm間隔で配筋されていたため、橋軸方向に300mm間隔で測定点を設けた。また、一断面当たり、ウェブとフランジに各9点の測定点を設けることとした。測定点の野書きは、配筋図と電磁波レーダ法による鉄筋探査結果を参考とし、両橋梁とも測定点が鋼材の直上となるようにした。

両橋梁とも離れた3ヶ所を任意に選定して鋼材を露出させ、鋼材間の電位差を測定することにより導通の確認を行い、自然電位の測定に用いるリード線を接続した。

手動のポンプ式散水器を用いてコンクリート表面に散水した。湿潤時間は30分間とし、この間、コンクリート表面が乾燥するたびに断続的に噴霧散水を行った。

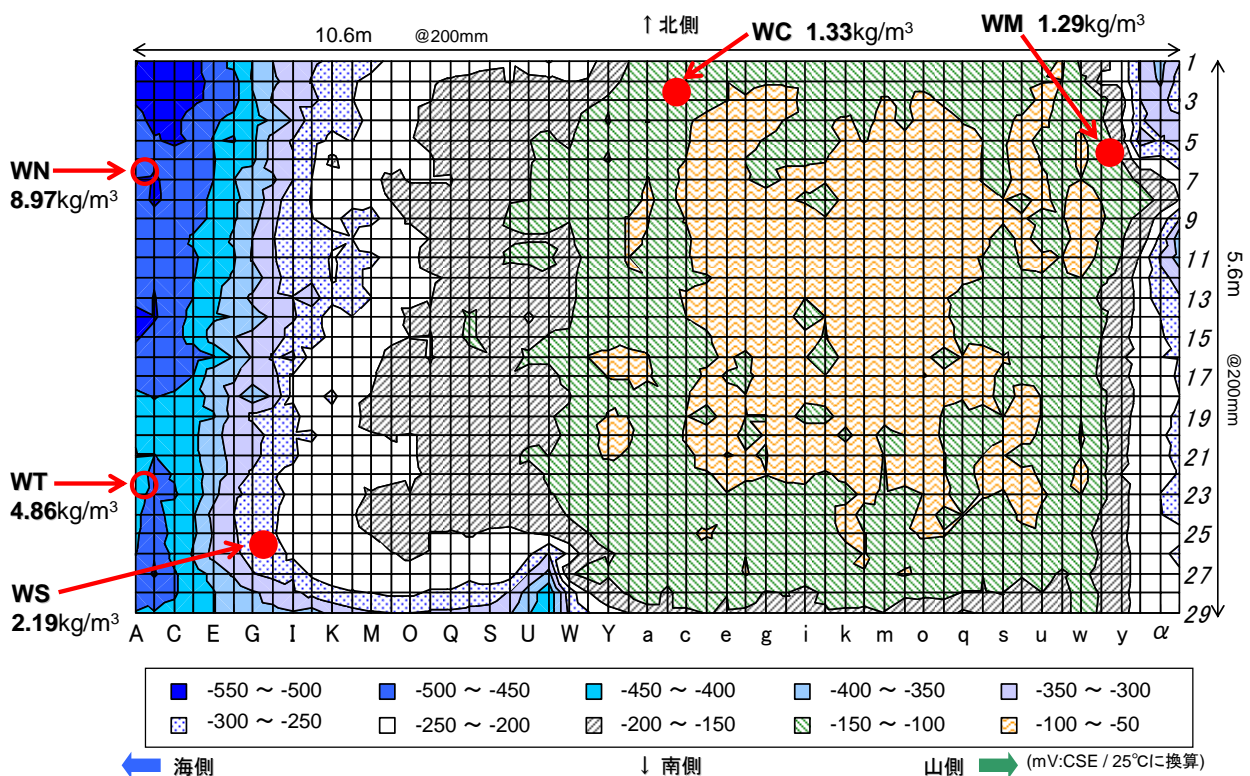
④自然電位の測定

自然電位の測定は、測定開始から1時間以内に終えた。両橋梁とも測定面積が広く、一度に橋梁全

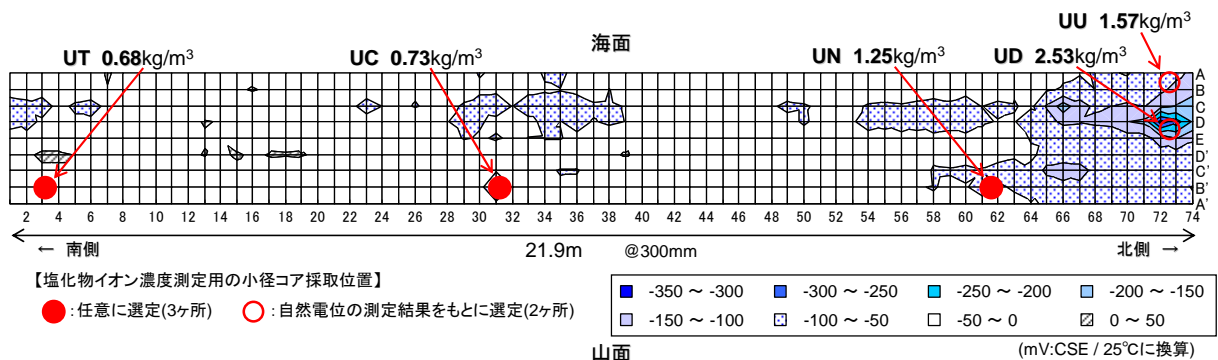
体の測定を行うことが困難であったため、測定範囲を分割してコンクリートの湿潤と自然電位の測定を行った。

⑤鋼材腐食の推定

付図-9に、各橋梁の自然電位の測定結果から作成した等電位線図を示す。RC床版橋では、海側ほど卑な自然電位が測定され、山側の一部でも卑な自然電位が測定された。これらは、広範囲で-350mV:CSEよりも卑な自然電位が測定されたため、「90%以上の確率で腐食あり」と判定した。一方、PC橋では、北側海面の一部で卑な自然電位が測定されたが、-350mV:CSEよりも貴であったため付表-4に従えば「不確定」と判定される。しかしながら、この周囲の等電位線の間隔が狭く、最も卑な自然電位が約-320mV:CSEと比較的卑な値であったことから、鋼材腐食が生じている可能性が高いと推定した。



(a) RC 床版橋



(b) PC 橋

付図-9 自然電位と鋼材位置の塩化物イオン濃度の測定結果

⑥塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の選定

同時に、付図-9には、小径コア(φ25mm)を採取して実施した鋼材位置の塩化物イオン濃度の測定結果も示している。両橋とも、自然電位測定前に任意に選定した3ヶ所と、等電位線図において比較的卑な自然電位を示した2ヶ所の計5箇所における測定結果を示している。RC床版橋の海側(WN)とPC橋の北側海面(UD)で鋼材位置の塩化物イオン濃度が最も高くなっており、これらは等電位線図において自然電位の卑な箇所と一致した。従って、等電位線図を用いて自然電位の分布傾向を把握することで、塩化物イオン濃度の最も高い箇所を調査箇所として選定することができる。

また、RC床版橋のWNとPC橋のUDのはつり調査の結果を付図-10に示す。RC床版橋では鋼材表面に軽微な腐食が生じ、PC橋では赤褐色の腐食が生じていた。表-2の判定基準によると、WNは「90%以上の確率で腐食あり」、UDは「不確定」と判定されるが、実際にはUDにおいても鋼材腐食は生じていた。UD周辺の自然電位は-320mV:CSEであったが、これは、腐食部が局所的なアノード部となりマクロセル腐食を形成していたため、分極の影響を受けて本来の値よりも貴な自然電位が測定されたためと考えられる。従って、鋼材腐食の推定やはつり調査を行う場合には、表-2の判定基準だけでなく、等電位線図における自然電位の分布傾向を精査することが必要である。

このように、外観上の損傷の観察のみで塩化物イオン含有量調査やはつり調査の実施箇所の決定が困難な場合には、自然電位の測定結果から等電位線図を作成し、周囲の等電位線の間隔が比較的狭く、最も卑な自然電位を示した箇所から調査箇所を選定することが可能である。



(a) RC床版橋



(b) PC橋

付図-10 はつり調査による鋼材の腐食状況

※ 出典:共同研究報告書第357号 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
独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会 平成19年1月(2007年1月)

(5)電気化学的工法について

1)電気化学的防食工法

電気化学的防食工法は、コンクリート構造物の表面あるいは内部に設置した陽極からコンクリート中の鋼材に直流電流を流し、電気化学的反応を利用して、鋼材腐食による劣化を抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させるものである。電気化学的防食工法は、現在も積極的に開発が行われており、これまで 1)電気防食工法、2)脱塩工法、3)再アルカリ化工法、4)電着工法の4工法が実用化されており、本管内においても弁天大橋他の橋梁において、電気防食工法および脱塩工法が補修工法として適用されている。さらに名立大橋においては、日本で初めて電気防食工法を新設時より採用しており、現在も継続調査が行われている。付表-5 に各電気化学的防食工法の主な特徴を示す。

付表-5 電気化学的防食工法の主な特徴¹⁾

	電気防食工法	脱塩工法	再アルカリ化工法	電着工法
通電期間	防食期間中継続	約8週間	約1～2週間	約6ヶ月
電流密度	0.001～0.03 A/m ²	1 A/m ²	1 A/m ²	0.5～1 A/m ²
通電電圧	1～5 V	5～50 V	5～50 V	10～30 V
電解液	—	Ca(OH) ₂ 水溶液等	Na ₂ CO ₃ 水溶液等	海水
効果確認の方法	電位または電位変化量の測定	コンクリートの塩化物イオン量の測定	コンクリート中の中性化深さの測定	コンクリートの透水係数の測定
効果確認の頻度	数回/年	通電終了後	通電終了後	通電終了後

1)電気化学的防食工法 設計施工指針(案)

2)電気防食工法

電気防食工法は、コンクリート中の鋼材に外部より陽極を通じて直流電流を流し、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鋼材の腐食反応を電気化学的に制御し、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的とした工法である。うき・剥離などの劣化が発生している場合には前処理として断面修復工法などによる補修を実施した後に、この工法を適用する。なお、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた構造物に対しては適用がむずかしく、表面被覆材料として電気的な絶縁性を持つ材料を使用している場合や、断面修復材として樹脂モルタルやポリマー量の多いポリマーセメントモルタルを使用している場合には電気抵抗性が高いため、その除去が必要となる場合がある。

電気防食工法には、外部電源方式と流電陽極方式に大別され、外部電源方式の場合は、電源装置から陽極を通して直流電流(10～30mA/m²程度)をコンクリート中の鋼材に向かって流す。一方、流電陽極方式の場合はコンクリート中の鋼材よりマイナス側の電位を持った陽極材と鋼材間の電位差を利用し、陽極材が酸化するとき発生する電流が鋼材に向かって流れる。防食電流の供給によって、鉄がイオン化(Fe²⁺)する腐食反応が抑制されるため、電流が供給されている限りは鋼材腐食が抑制される。防食管理の基準は、鋼材の電位をマイナス側に 100mV 以上変化させる方法が一般的である。

本工法は、付表-6 に示すように、陽極材の形状や電源方式によって各種の方式があり、適用にあたっては、環境条件、経済性、電気防食用機材の耐用年数を検討する。陽極材は継続通電に耐えうるものを選定し、陽極材設置後に、防食電流が適切に流れていることを確認することが維持管理の上で最

も重要であり、手間とコストが予想以上にかかる。各電気防食方式の特長を整理し、付表-7～10に示す。

付表-6 電気防食工法の種類

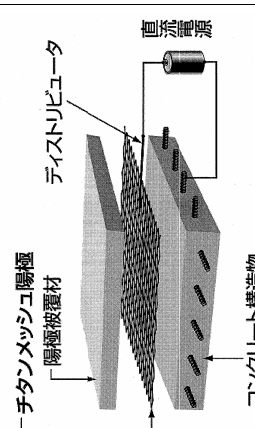
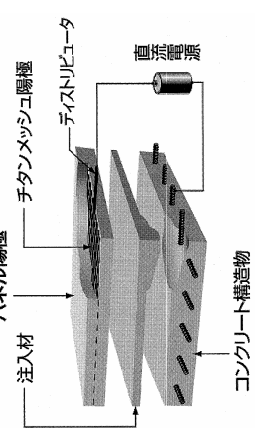
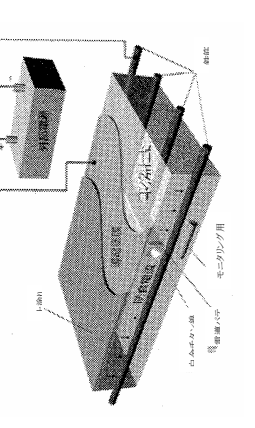
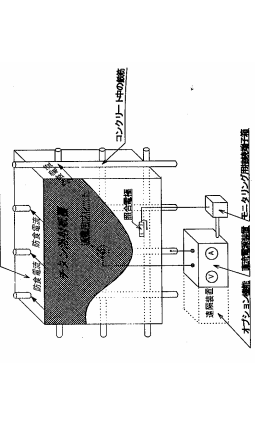
電源方式	陽極材の形状	陽極材の設置方法	電気防食方式
外部電源	面状陽極	防食対象面全体に面状陽極を設置する。	チタンメッシュ陽極方式
			パネル陽極方式
			通電性塗装方式
			チタン溶射方式
			チタン亜鉛溶射方式
	導電性モルタル方式		
線状陽極	防食対象面に一定間隔で線状陽極を設置する。	チタンリボンメッシュ方式	
		チタングリッド方式	
点状陽極	防食対象面に棒状陽極を点状に挿入し、設置する。	チタンロッド方式	
流電陽極	面上陽極	防食対象面全体に面状陽極を設置する。	亜鉛シート方式
			亜鉛アルミ擬合金溶射方式

※電気化学的防食工法 設計施工指針(案)を基に一部加筆。

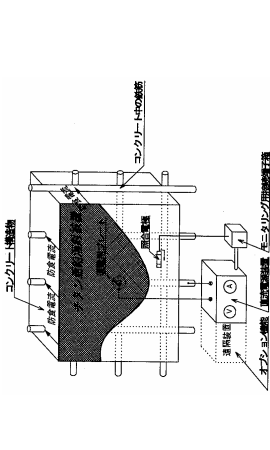
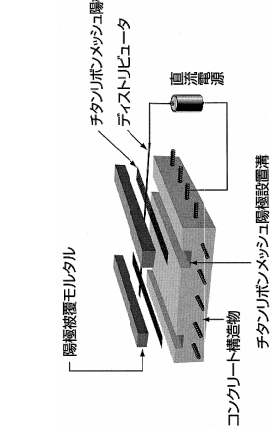
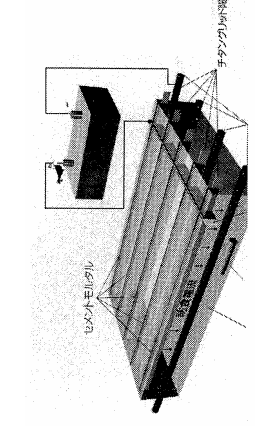
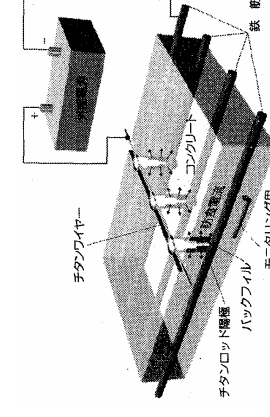
付表-7 各種電気防食工法(陽極材)の一般的な特長

項目	長所	短所	
電源方式	外部電源	電流調節ができる	電源設備が必要
	流電陽極	電源設備が必要ない	電流調節は不可
陽極の材質	チタン系	長寿命	コスト高
	カーボン系	コスト低	短寿命
	亜鉛系(流電陽極)	電源設備が不要	交換が必要
陽極材の形状	面状陽極	電流分布の均一性に優れる	設置全面の下地処理が必要
	線状陽極	部分的な前処理でよい	美観に劣る
	点状陽極	局部的防食	広範囲の防食には不向き

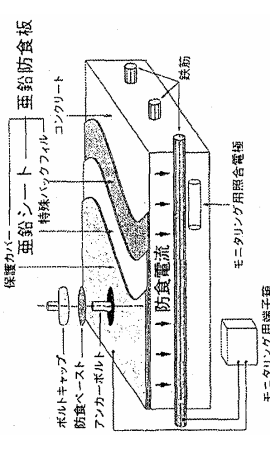
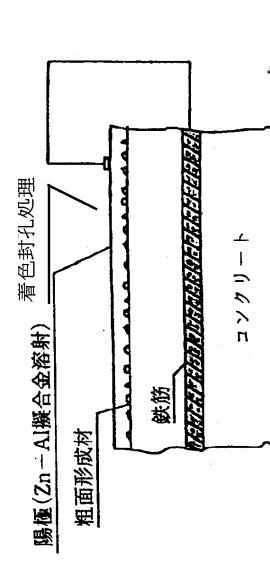
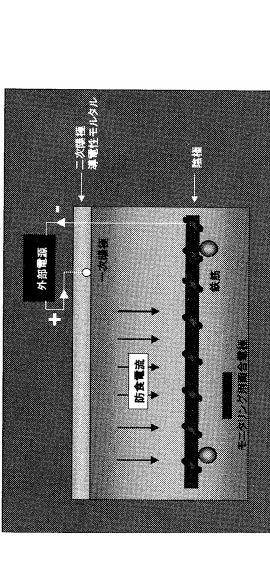
付表-8 電気防食工法比較表

	チタンメッシュ陽極方式	パネル陽極方式	導電性塗料方式	チタン溶射方式
防錆理論	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に設置したチタンメッシュを陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより、鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。陽極材(チタンメッシュ)はモルタルによって被覆される。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリートパネル(内部にチタンメッシュ)を陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。陽極材(チタンメッシュ)はパネル内であり、コンクリートとパネルは注入モルタルで接着される。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に吹きつけた導電性塗料を陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。一次陽極材(白金チタン線)は導電性パテで覆われ、その上に塗付した二次陽極材は陽極被覆材(塗装)で覆われる。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に溶射したチタン線材を陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。陽極材(溶射されたチタン線材)は一般的に被覆材等では覆われない。
工法概念図				
施工方法	① 排流端子設置位置を約250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 防食範囲のコンクリート表面の地下処理をする。 ③ チタンメッシュ陽極を防食対象部位に設置する。 ④ チタンメッシュ陽極全面に無機系の陽極被覆材に約15mm 程度覆う。 ⑤ 施工目地、陽極被覆端部の防水処理を施す。	① 防食範囲のコンクリート表面全体を鋼材が露出するまではつり、コンクリート表面の地下処理。 ② 排流端子を設置する。 ③ パネル陽極を専用固定治具で設置する ④ 無機系セメントモルタルを注入してパネル陽極とコンクリート表面の隙間を充填する。 ⑤ 施工目地、陽極被覆端部の防水処理を施す	① 排流端子設置位置を約250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 防食範囲のコンクリート表面の地下処理する。 ③ コンクリート表面に幅約5mm 深さ約6mm の溝を切り、溝内に深さ約30mm の孔をあけ一次陽極(白金チタン線)を設置する。 ④ 溝内に導電性パテをコンクリート表面まで充填する。 ⑤ 二次陽極(導電性塗料)を全面に塗付する。 ⑥ 二次陽極の上に陽極被覆材を塗付する。	① 排流端子設置位置を約250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 防食範囲のコンクリート表面の地下処理する。 ③ チタン線材を溶射機でコンクリート表面に付着させる。 ④ 触媒液を溶射面に散布する。 ⑤ 10mA/m ² の電流密度でアノード電解してチタン面に触媒層を形成する。 ⑥ チタンボルトとチタンプレートで防食電流を供給するための通電点を10m 間隔で設置する。
特徴	(長所) ① 電流分布の均一性に優れる。 ② 陽極をモルタルで被覆するため美観に優れる。 (短所) ① 設置全面の地下処理が必要になる。 ② 被覆材により若干死荷重が増加する。	(長所) ① 電流分布の均一性に優れる。 ② パネル陽極は工場製品のため高品質、任意形状である。 ③ パネルを永久型枠として用いることができる。 (短所) ① 設置全面の地下処理が必要になる。 ② パネル陽極により死荷重が増加する。	(長所) ① 電流分布の均一性に優れる。 ② 陽極材の吹付けにより施工性に優れる。 ③ 上塗り塗料で仕上げるため美観に優れる。 ④ 陽極材の再補修が容易である。 (短所) ① 設置全面の地下処理が必要になる。 ② 物理的損傷を受けやすい。	(長所) ① 電流分布の均一性に優れる。 ② 重量で死荷重の増加が少ない。 ③ 複雑な形状の構造物にも施工可能である。 (短所) ① 設置全面の地下処理が必要になる。 ② 美観に劣る。(上塗り塗装すれば問題はない)
適用性	・供用期間中、鉄筋周囲の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値以下になるまで脱塩が可能 ・以下の構造物は要検討 ①海洋干満帯、および海中構造物(電流分布) ②アルカリシリカ骨材構造物(残存膨張がある場合のアルカリシリカ骨材反応の促進)	①直流電源装置、モニタリング装置(外観、稼働状態、計測) ②陽極(外観、計測) ③配管(外観) の点検を行う (土木学会コンクリートライブラリー107による)	①直流電源装置、モニタリング装置(種類によって異なる)20年以上	①直流電源装置、モニタリング装置(種類によって異なる)20年以上
維持管理	①直流電源装置、モニタリング装置(外観、稼働状態、計測) ②陽極(外観、計測) ③配管(外観) の点検を行う (土木学会コンクリートライブラリー107による)	貴金属触媒をコーティングしたチタン系陽極材 40年程度	貴金属触媒をコーティングしたチタン系陽極材 40年程度	貴金属触媒をコーティングしたチタン系陽極材 40年程度
耐久性	通電システムにより左右される。	直流電源装置、遠隔監視制御装置 10年程度 配線装置、収納ボックス 20年程度	直流電源装置、遠隔監視制御装置 10年程度 配線装置、収納ボックス 20年程度	直流電源装置、遠隔監視制御装置 10年程度 配線装置、収納ボックス 20年程度
経済性	70 千円～120 千円/m ²	70 千円～120 千円/m ²	200 千円～400 千円/年(1,000m ²)	200 千円～400 千円/年(1,000m ²)
電源方式	外部電源	外部電源	外部電源	外部電源
陽極材形状	面状陽極	面状陽極	面状陽極	面状陽極

付表-9 電気防食工法比較表

	チタン亜鉛溶射方式	チタンリボンメンッシュ陽極方式	チタングリッド方式	チタンロッド方式
防錆理論	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に溶射したチタン線材、亜鉛を陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑制する。陽極材(溶射されたチタン線材、亜鉛)は一般的に被覆材等では覆われない。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面溝を切り、配置したチタンリボンメンッシュを陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑制する方法。陽極材(チタンリボンメンッシュ)はモルタルで覆われる。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面溝を切り、配置したチタングリッドを陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑制する方法。陽極材(チタングリッド)はモルタルで覆われる。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に孔を空け配置したチタンロッドを陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑制する方法。陽極材(チタンロッド)はモルタルで覆われる。
工法概念図	 <p>チタン線材、亜鉛、コンクリート、コンクリート表面、溶射機、電流計、外部電源、電圧計、電流計、電圧計、電流計、電圧計</p>	 <p>陽極設置モルタル、チタンリボンメンッシュ陽極、コンクリート構造物、チタンリボンメンッシュ陽極設置箇所、直流電源、タイストリヒュータ</p>	 <p>チタングリッド陽極、バックアップ用モルタル、コンクリート、鉄筋</p>	 <p>チタンロッド陽極、バックアップ用モルタル、コンクリート、鉄筋</p>
施工方法	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 防食範囲のコンクリート表面の下地処理をする。 ③ チタン線材を溶射機でコンクリート表面に付着。 ④ 触媒液を溶射機に散布する。 ⑤ 10mA/m²の電流密度でアノード電解してチタン面に触媒層を形成する。 ⑥ チタン面の上に亜鉛溶射を行う。 ⑦ チタンポルトとチタンプレートで防食電流を供給するための通電点を 10m 間隔で設置する。 	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② コンクリートに幅約 25mm 深さ約 20mm の溝を切り、チタンリボンメンッシュ陽極を設置する。 ③ 溝を陽極被覆モルタルで埋め戻す。 	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② コンクリートに溝を切り、チタングリッド陽極を設置する。 ③ 溝を陽極被覆モルタルで埋め戻す。 	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 陽極材取り付け位置にコンクリートドリルでφ12mmの孔をあける。 ③ 各孔間を結び溝(幅 2~3mm 深さ 5~10mm)を切る。 ④ 孔内部にプライマーを塗付してチタンロッド陽極を設置する。 ⑤ 各チタンロッドをワイヤーで結線する。 ⑥ チタンロッド頭部とチタンワイヤーをモルタルで埋め戻す。
特徴	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流分布の均一性に優れる。 ② 軽量で死荷重の増加が少ない。 ③ 複雑な形状の構造物にも施工可能である。 ④ 陽極材がチタン亜鉛であるためチタン溶射方式より低コストになる。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 設置全面の下地処理が必要になる。 ② 美観に劣る。(上塗り塗装すれば問題は無い) 	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流調節ができる。 ② 前処理が部分的でよい。 ③ 新設コンクリート構造物への適用が容易。 ④ 軽量で死荷重の増加が少ない。 ⑤ 鋼材の配置に応じて陽極が適切に配置できる。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電源設備が必要である。 ② 美観に劣る。 	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流調節ができる。 ② 前処理が部分的でよい。 ③ 新設コンクリート構造物への適用が容易である。 ④ 軽量で死荷重の増加が少ない。 ⑤ 鋼材の配置に応じて陽極が適切に配置できる。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電源設備が必要である。 ② 美観に劣る。 	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流調節ができる。 ② コンクリートの下地処理をしなくてよい。 ③ 軽量で死荷重の増加が少ない。 ④ 陽極の加工が容易である。 ⑤ 二重配筋構造に効果的である。 ⑥ 局部、隅各部に効果的である。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電源設備が必要である。 ② 極端に薄いスラブ等には不経済になる。 ③ 広範囲の防食には不向きである。
適用性	<p>・供用期間中、鉄筋周囲の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値以下になるまで塩塩がある場合に適用 ・以下の構造物は要検討 ①海洋干満帯、および海中構造物(電流分布) ②アルカリシカ骨材構造物(残存膨張がある場合のアルカリシカ骨材反応の促進) ①直流電源装置、モニタリング装置(外観、稼働状態、計測) ②陽極(外観、計測) ③配管(外観)の点検を行う(土木学会コンクリートライブラリー107による)</p>			
維持管理	<p>貴金属触媒をコーティングしたチタン系陽極材 40 年程度</p>			
耐久性	<p>通電システムにより左右される。 直流電源装置、遠隔監視制御装置 10 年程度 配線装置、収納ボックス 20 年程度 モニタリング装置(種類によって異なる) 20 年以上</p>			
経済性	<p>70 千円~120 千円/m² (維持管理費用 200 千円/年/1,000m²)</p>			
電源方式	<p>外部電源</p>			
陽極材形状	<p>面状陽極</p>			
	<p>外部電源</p>			
	<p>線状陽極</p>			
	<p>外部電源</p>			
	<p>点状陽極</p>			

付表-10 電気防食工法比較表

	亜鉛シート方式	亜鉛-アルミ合金溶射方式	導電性モルタル方式
防錆理論	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に接した亜鉛シートを陽極として、流電陽極により小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。陽極材(亜鉛シート)は保護カバーで覆われた亜鉛防食板内部にある。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面に溶射した亜鉛-アルミ合金を陽極として、流電陽極により小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。陽極材(亜鉛-アルミ合金)の表面には着色封孔処理が施される。	コンクリート中の鉄筋を陰極、コンクリート表面の白金・ニオブ被膜銅線、導電性モルタルを陽極として、外部電源から小さな直流電流を流すことにより鉄筋の腐食を電気化学的に抑止する方法。一次陽極材(白金・ニオブ被膜銅線)は二次陽極材(導電性モルタル)で覆われ、二次陽極材の表面は上塗り材で覆われる。
工法概念図			
施工方法	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 陽極材取付け位置にコンクリートドリルでφ12mm の孔をあける。 ③ 防食範囲のコンクリート表面の下地処理する。 ④ アンカーボルトを設置する。 ⑤ 防食板を設置する。 ⑥ 防食板の隙間(100mm 程度)を樹脂で間詰する。 	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 防食範囲のコンクリート表面の下地処理する。 ③ 粗面形成材を全面にエアースプレーで塗付する。 ④ 亜鉛アルミ合金溶射する。 ⑤ 溶射皮膜に亜鉛版(アノード排流端子)を固定しその上にも溶射する。 ⑥ 金属溶射皮膜に着色封孔処理を行う。 	<ol style="list-style-type: none"> ① 排流端子設置位置を約 250×250mm 鋼材が露出するまでコンクリートをはつり排流端子を設置する。 ② 二次陽極(導電性モルタル)を吹付ける。 ③ 上塗り材を塗付する。(美観上)
特徴	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電源設備が必要ない。 ② 電流分布の均一性に優れる。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流調節ができない。 ② 設置全面の下地処理が必要。 ③ 陽極材はチタンに比べ短寿命(1mm 厚の場合寿命 15 年)になる。 ④ 防食面積 1m² で約 10kg の死荷重が増加する。 ⑤ 表面に突起物があり美観に劣る。 ⑥ 環境条件によって使用できない。 	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電源設備が必要ない。 ② 電流分布の均一性に優れる。 ③ 複雑な形状の構造物にも施工可能である。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流調節ができない。 ② 設置全面の下地処理が必要になる。 ③ 陽極材はチタンに比べ短寿命になる。 	<p>(長所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 電流分布の均一性に優れる。 ② 陽極材の吹付けにより施工性に優れる。 ③ 部位を選ばず、部分的な補修も容易である。 <p>(短所)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 次陽極(導電性モルタル)を吹付ける。 ② 美観に劣る。(上塗り塗装すれば問題はない)
適用性	<p>・供用期間中、鉄筋周囲の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値以下になるまで脱塩が可能な場合に適用</p>		
維持管理	<p>・以下の構造物は要検討 ①海洋干満帯、および海中構造物(電流分布) ②アルカリシカ骨材構造物(残存膨張がある場合のアルカリ骨材反応の促進)</p> <p>①直流電源装置、モニタリング装置(外観、稼働状態、計測) ②陽極(外観、計測) ③配管(外観、計測)の点検を行う(土木学会コンクリートライブラリー-107による)</p>		
耐久性	<p>亜鉛系陽極材(流電陽極方式) 10～20年</p>		
経済性	<p>通電システムにより左右される。 直流電源装置、遠隔監視制御装置 10 年程度 記録装置、取納ボックス 20 年程度 モニタリング装置(種類によって異なる) 20 年以上</p>		
電源方式	<p>70 千円～120 千円/㎡ (維持管理費用 200 千円～400 千円/年/1,000㎡)</p>		
陽極材形状	流電陽極	流電陽極	外部電源
	面状陽極	面状陽極	面状陽極

3)脱塩工法

脱塩工法は、仮設陽極を設置して通電を行うことによって、コンクリート中に存在する塩化物イオンを電気化学的に除去もしくは低減し、塩害による鋼材腐食の劣化進行を抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的として工法である。電気防食工法と同様に、うき・剥離などの劣化が発生している場合には前処理として断面修復工法などによる補修を実施した後に、脱塩工法を適用する。なお、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた構造物に対しては適用がむずかしい。また、表面被覆材料として電気的な絶縁性を持つ材料を使用している場合や、断面修復材として樹脂モルタルやポリマー量の多いポリマーセメントモルタルを使用している場合には電気抵抗性が高いため、その除去が必要となる場合がある。

コンクリート表面に水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)やホウ酸リチウム(Li_3BO_3)などの電解質溶液を含んだ仮設陽極材を約8週間程度設置し、電気防食工法よりも大きな直流電流(標準的には $1\text{A}/\text{m}^2$)を仮設陽極材からコンクリート中の鋼材に向かって流す。コンクリート中の塩化物イオン(Cl^-)をコンクリートの外(仮設陽極材側)に電気泳動することによって脱塩する。脱塩後は、鋼材位置の塩化物イオン濃度が発生限界値以下となっていることを確認し、仮設陽極材を撤去し、処理完了とする。なお、将来に外部からの塩化物イオンの浸入がある場合は、仮設陽極材の撤去後に、表面被覆工法と併用する必要がある。PC構造物に適用する場合には、PC鋼材の水素脆性が懸念されるため、十分な検討を行う必要がある。最近では、1サイクルの通電期間を調整することにより、耐荷力の影響がなかった研究報告もある。

付表-11 に脱塩工法の取り付け方式による特長を整理した結果を示す
なお、以下に参考図書を示す。1)

参考文献

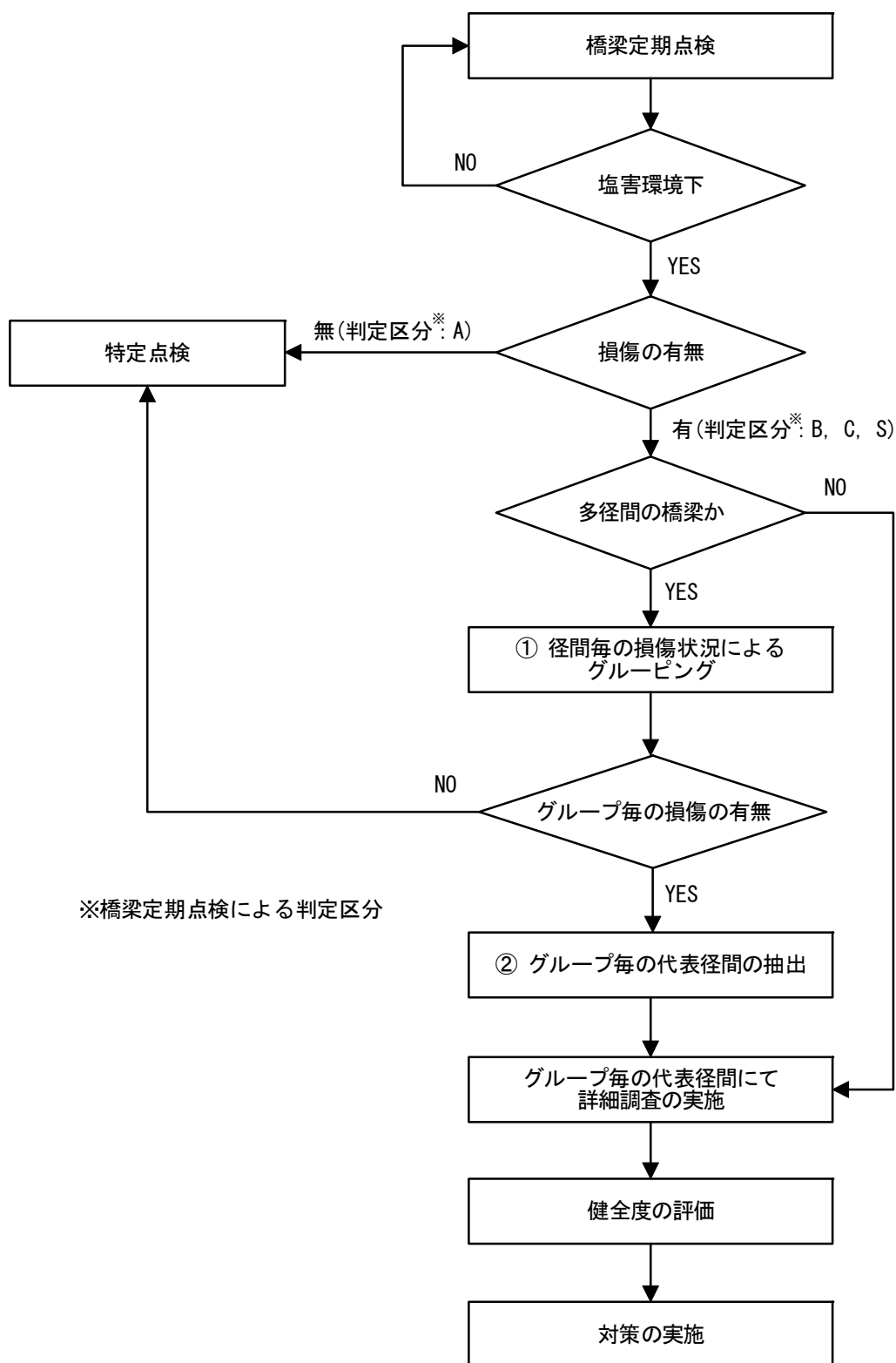
- 1) 土木研究所、東北大学、長岡技術大学、徳島大学、九州工業大学、電気化学工業、富士ピーエス: 塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書、共同研究報告書整理番号382号

付表-11 脱塩工法比較表

	ファイバー方式	パネルの取付け方式
概要	<p>電気化学的脱塩は、コンクリート中の鋼材を陰極とし、コンクリート構造物の外側を陽極として、直流電源を通電することにより、陰イオンである塩素イオンをコンクリート外へ電気泳動し、さらに、水の電気分解によって水酸イオンを生成して、コンクリートのアルカリ度を高めることによって、鋼材に対するコンクリートの防食性能を高めるものである。陽極は電解質溶液とチタンメッシュなどから構成されており、電解質溶液の保持方法により工法が分かれる。</p>	
	<p>ファイバー方式は、電解質溶液をファイバーに含ませて保持する方法である。</p>	<p>パネル取付け方式は、電解質溶液をアクリルパネルで作成した電解質溶液槽で保持する方法である。</p>
工法概念図		
施工方法	<p>コンクリート表面の劣化部の補修、電氣的障害部の処置(短絡防止)を行う。 コンクリート表面から数 mm～数 cm 離れた位置に陽極材を仮固定する。 通電中、適時電解質溶液をファイバーに補給する。</p>	<p>コンクリート表面の劣化部の補修、電氣的障害部の処置(短絡防止)を行う。 平板と構造物の間に電解質溶液を充填する。 通電中、適時電解質溶液を補給する。</p>
特徴	<p>(長所)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートのはつりが少ないため構造物を傷めない。 ・施工後の通電は不要である。 ・パネルの取付け方式に比べ施工が簡単である。 ・コンクリート表面形状が複雑な場合でも施工が可能である。 <p>(短所)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・通電量が電気防食工法に比べ大きいため、鋼材の水素脆化に配慮が必要である。 ・施工時間がコンクリート中の塩化物イオン量の目標とする脱塩率に左右される。 ・電解質溶液の漏れ、蒸発がパネルの取付け方式より多い。 	<p>(長所)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートのはつりが少ないため構造物を傷めない。 ・施工後の通電は不要である。 ・パネルの転用が可能のため、大規模な工事に適用できる。 ・電解質溶液の蒸発や漏れがファイバー方式より少ない。 <p>(短所)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・通電量が電気防食工法に比べ大きいため、鋼材の水素脆化に配慮が必要である。 ・施工時間がコンクリート中の塩化物イオン量の目標とする脱塩率に左右される。 ・電解質溶液槽のパネルの設置がファイバー方式に比べ、大掛かりとなる。 ・コンクリート表面形状が複雑な場合は施工が困難である。
適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・供用期間中、鉄筋周囲の塩化物イオン含有量が腐食発生に関する限界値以下になるまで脱塩が可能な場合 ・PC 構造物では通電サイクルの検討が必要(PC 鋼材の水素脆化) ・脱塩量は通電量と時間、コンクリート中の塩分量により異なる。 ・アルカリ骨材反応の可能性がある構造物では、残存膨張量などの検討が必要。 	
維持管理	目視点検などの一般的な管理(土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]などによる)	
耐久性	表面塗装に依存する	
経済性	80 千円～100 千円/m ² (脱塩のみ)	

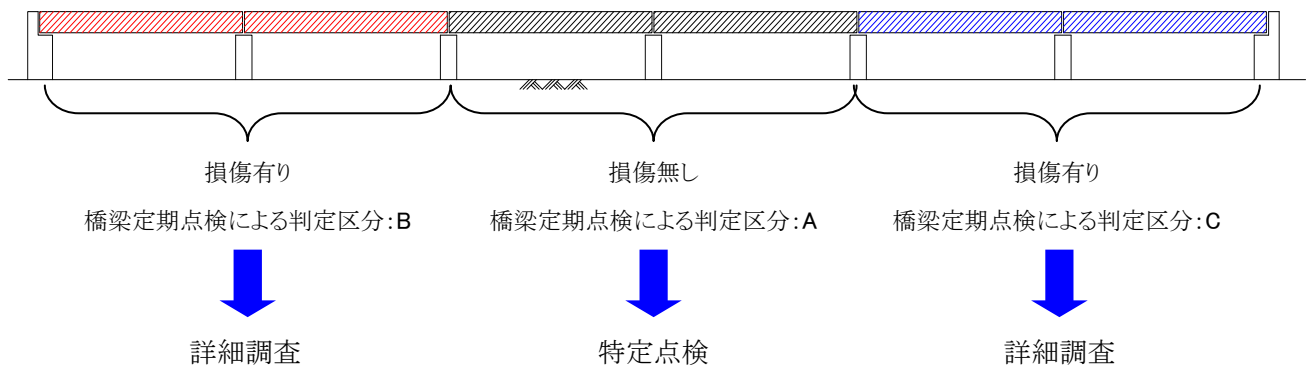
(6) 詳細調査の実施手順

本マニュアル(案)に従った、詳細調査から対策の実施までの具体的な実施手順および例を付図-23, 24 に示す。

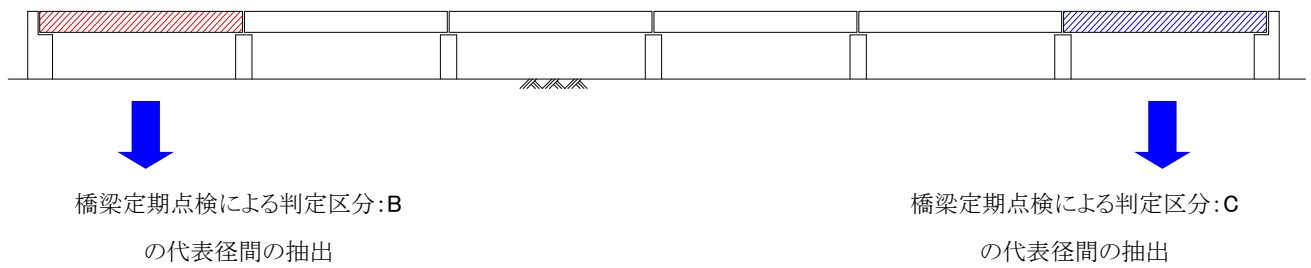


付図-23 詳細調査から対策の実施までの手順フロー

①径間毎の損傷状況によるグルーピング



②グループ毎の代表径間の抽出



付図-24 詳細調査の実施例

橋梁塩害対策検討委員会 委員名簿

委員長	丸山 久一	長岡技術科学大学 理事・副学長
委員	三浦 尚	東北大学 名誉教授
委員	鳥居 和之	金沢大学大学院自然科学研究科 教授
委員	佐伯 竜彦	新潟大学工学部 准教授
委員	下村 匠	長岡技術科学大学 准教授
委員	久田 真	東北大学大学院工学研究科 准教授
委員	森戸 義貴	国土交通省 道路局 国道・防災課 企画専門官
委員	玉越 隆史	国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路構造物管理研究室長
委員	渡辺 博志	独立行政法人土木研究所 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
委員	岡久 宏史	国土交通省 北陸地方整備局 道路部長

(オブザーバー)

北陸地方整備局 道路部 道路情報管理官
関係地方整備局 道路部 道路情報管理官
北海道開発局 道路防災対策官
沖縄総合事務局 企画調整官
北陸地方整備局 北陸技術事務所長
北陸地方整備局 関係事務所長

(事務局) 北陸地方整備局 道路部道路管理課 北陸技術事務所
(財)海洋架橋・橋梁調査会

橋梁塩害対策検討委員会 ワーキンググループ名簿

座長	坂上 悟	北陸地方整備局 道路部 道路情報管理官
	高橋 晃浩	国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路構造物管理研究室 主任研究官
	古賀 裕久	独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員
	宮崎 清隆	北陸地方整備局 道路部 道路管理課長
	上杉 修二	北陸地方整備局 北陸技術事務所 副所長
		関係地方整備局 道路部 道路管理課長補佐
		北海道開発局 建設部 道路維持課 開発専門官
		沖縄総合事務局 開発建設部 道路管理課長補佐
		北陸地方整備局 関係事務所 副所長
(事務局)		北陸地方整備局 道路部道路管理課 北陸地方整備局 北陸技術事務所 (財)海洋架橋・橋梁調査会