

b) 変状に対する調査事例

港湾コンクリート構造物を例にすると、点検は「目視・簡易計測による実施」と「高度な方法による実施」に分類することができ、それぞれの項目は図-2.3.8のように整理できる。

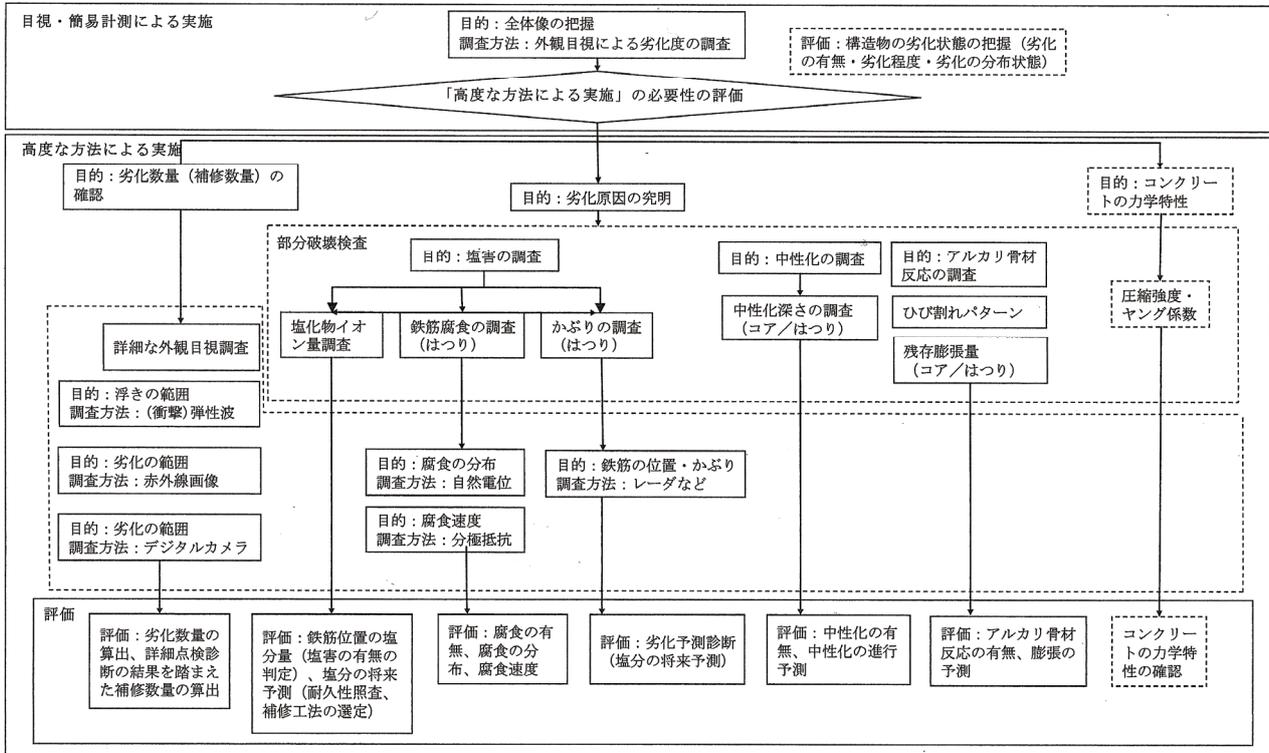


図-2.3.8 港湾コンクリート構造物の点検の流れ<sup>4)</sup>

「目視・簡易計測による実施」は、構造物全体の劣化状況を把握することが目的であり、外観目視を基本に劣化状態を調査して劣化度の判定を行う。具体的には、技術者 2~3 人がボートに乗って構造物の劣化状態を確認し、部材ごとに劣化度を判定し記録に残す方法である。「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」(沿岸技術研究センター)では、劣化度を a, b, c, d の 4 段階で表記し、維持管理を行う上で構造物全体の劣化状況を容易に把握できるようにしている。この調査の特長は、ボートなどを使用することによって、足場を使わずに構造物全体の劣化状況を把握できることである。よって、上部工が海面より高い位置にある場合は手が届かず、たたき調査によって表面に見えない浮きなどを把握することはできないため、補修範囲や数量を算出する場合には詳細な外観目視調査を行う必要がある。

「高度な方法による実施」のうち塩害の調査では、表-2.3.2 に示すような調査項目が挙げられる。

① 目視調査

補修範囲や数量を算出するためには劣化図を作成する必要がある。劣化図には、ひび割れの幅や長さ、浮き、はく離・はく落、錆汁などをできるだけ正確に記録しなければならない。外観では正確に確認できない浮きについては、打音検査を行う必要があり足場が必要となるケースもある。また、目視調査の不完全さを補う手法として、赤外線画像やデジタルカメラを用いた調査も開発されている。

② 塩化物イオン濃度の調査

塩化物イオン濃度は、海面からの高さ、岸壁法線からの距離、施工ブロックなどの測定位置によって大きな違いがある。よって、十分な量のサンプルを採取するのが望ましい。しかし、分析費用が比較的高価であることから、採取する場所、位置、個数を厳選する必要がある。

塩化物イオン濃度で劣化進行予測を行うには、鋼材のかぶり深さや腐食状態の情報が必要となる。よって、はつりや電磁波レーダなどのかぶり深さ調査、腐食状態を確認する自然電位や分極抵抗の調査は、塩化物イオン濃度の調査箇所の近傍で行うのが良い。

### ③ 鋼材の腐食状態およびかぶり深さの確認

塩化物イオン濃度を用いて鋼材腐食の可能性を評価する上で、鋼材のかぶり深さは必要不可欠な情報である。最も精度良くかぶり深さを調査する方法ははつり調査であるが、足場が必要であり、構造物を傷めることになるので数多くはつり調査を行うことは難しい。そこで、鋼材の腐食状態およびかぶり深さの確認では、代表的な位置でははつり調査によって定量的なデータを取得し、その周辺を非破壊調査（電磁波レーダ法、電磁誘導法によるかぶり深さ測定、自然電位測定、分極抵抗測定など）によって相対的な情報を取得し、両者の結果を総合して広い範囲の定量的な情報として整理することが重要である。

表-2.3.2 塩害を対象とした調査項目<sup>4)</sup>

項目	方法	結果の整理方法	目的
目視調査	専門技術者が点検ハンマによる打音検査を併用しながらコンクリート表面に現れた変状を確認し、図面を作成する。ひび割れ幅や長さなどの計測も行う。	① 劣化図面（部材ごとの展開図） ② 劣化状況写真	劣化程度の把握 劣化原因の把握 補修方法の検討 補修範囲の検討 補修要否の判定
塩化物イオン濃度 ・コア法 ・ドリル法	コンクリート試料を採取し、表面から鉄筋付近までのコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定する。	① 塩化物イオン濃度分布 ② 表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数の算出	劣化原因の推定 劣化程度の把握 劣化予測 補修の要否
かぶり ・電磁波レーダ法 ・電磁誘導法 ・はつり	非破壊試験にて鉄筋位置を調査し、鉄筋をはつり出してかぶり厚を測定する。一般に、非破壊試験とはつりを併用する。下記の鉄筋腐食調査の位置にてかぶり調査を行うことが多い。	① 最小のかぶり ② かぶりのばらつき	劣化原因の推定 劣化予測
鉄筋の腐食状態 ・自然電位 ・分極抵抗 ・はつり	一部の鉄筋をはつり出して腐食の状態を目視により確認する。はつり出した鉄筋に電極を接続し、自然電位あるいは分極抵抗を測定して部材全体の腐食傾向を確認する。塩化物イオン濃度の測定位置の近傍で実施することが望ましい。	① 腐食状態 ② 電位分布図（腐食箇所・範囲） ③ 腐食速度（分極抵抗） ④ 塩化物イオン濃度と腐食の関係	劣化程度の把握 劣化予測
圧縮強度・ヤング係数	コンクリートからコアを採取し、圧縮強度を測定する。必要な場合にはヤング係数を測定する。	① 圧縮強度 ② ヤング係数	劣化原因の推定 初期欠陥

### c) 調査に基づく診断事例

供用期間中に所要の性能を保持することを目的に、現時点での構造物の腐食状態を把握し、精度の良い劣化予測を行うことが診断をする上で重要となる。

#### ① 目視調査に基づく診断

栈橋における目視調査によって得られた劣化度判定図の一例を図-2.3.9 に、劣化図の一例を図-2.3.10 に示す。これより、劣化度判定は、「さらに詳細な調査が必要か否か」を判定する材料である。図-2.3.9 に示すように平面的に表示することによって、どの箇所の劣化が顕著であるか、代表的な劣化状態であるかなどを確認することができる。劣化図は、補修数量を算定できるほかに、劣化原因の推定や補修方法の検討を行う上でも重要な資料となる。

#### ② はつり調査および非破壊調査に基づく診断

はつり調査および非破壊調査では、現時点での鋼材の腐食状況を把握できるとともに、塩化物イオンの浸透予測に用いるかぶり深さのデータを取得でき、測点数にもよるがかぶり深さの平面的分布を見ることによって、どの位置の鋼材の腐食発生が早いかを評価することも可能である。また、自然電位や分極抵抗において、測定値から直接腐食の可能性を推定することは難しい場合が多い。しかし、数回の測定によりその変化を確認したり、広い範囲での測定結果を比較して腐食速度を相対的に評価することは可能である。

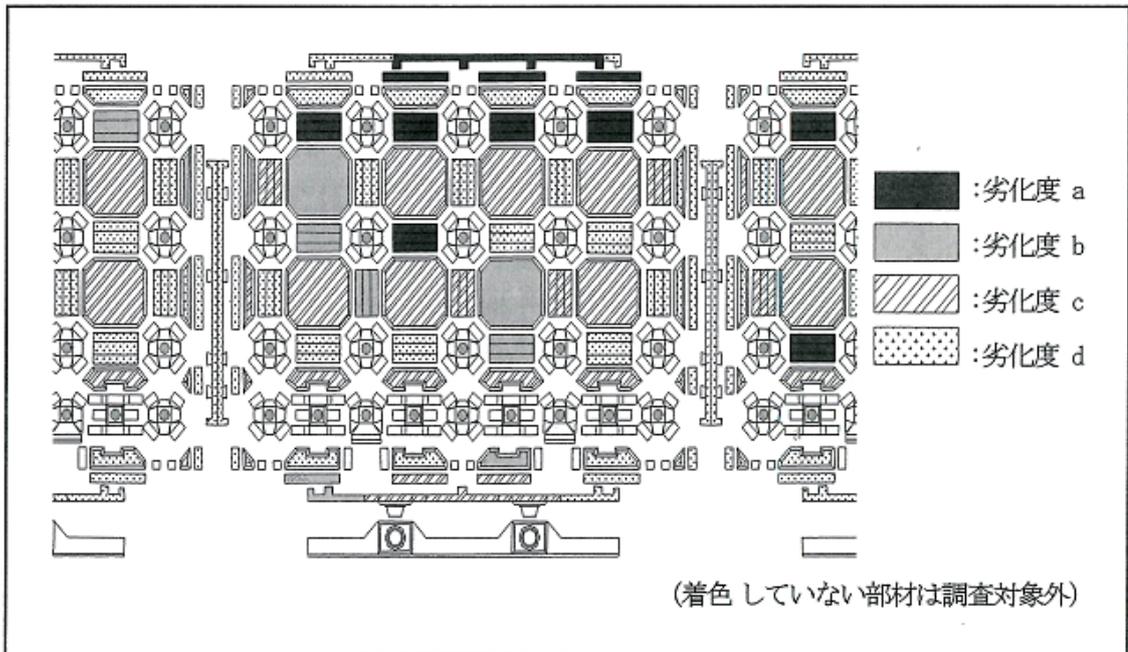


図-2.3.9 目視調査による劣化度判定図<sup>4)</sup>

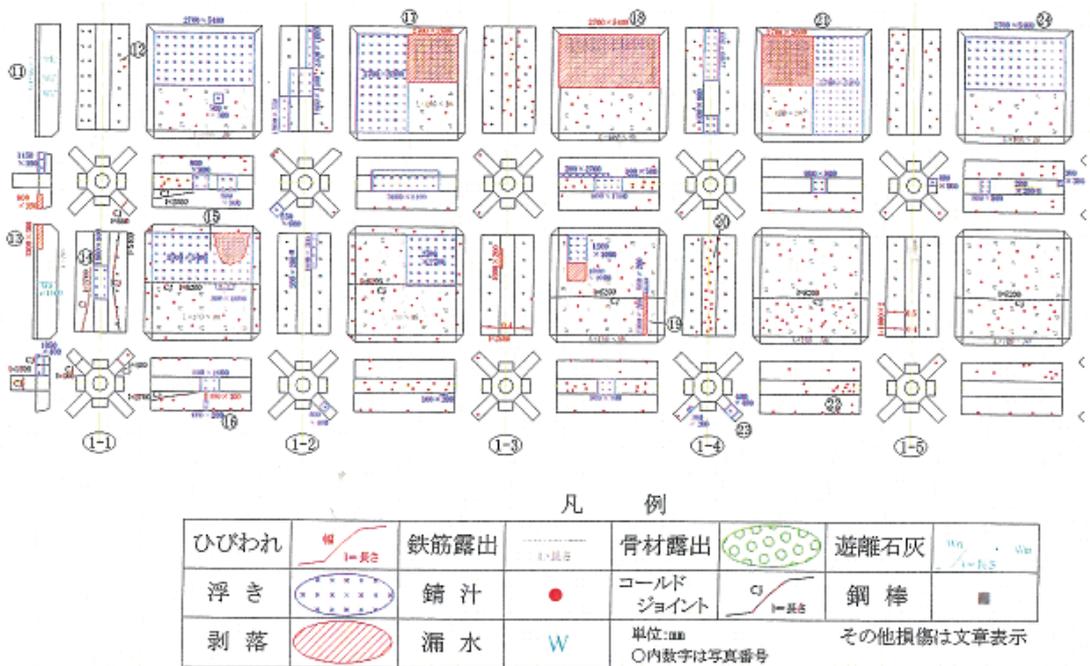
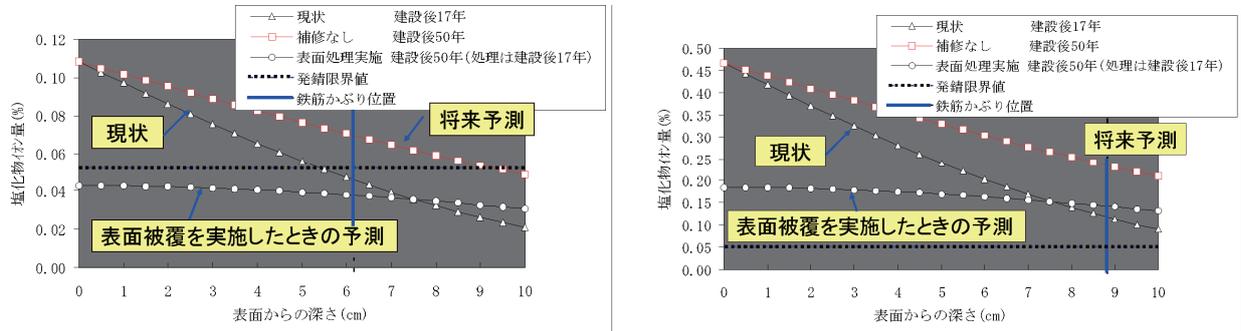


図-2.3.10 目視調査による劣化図<sup>4)</sup>

### ③ 塩化物イオン濃度に基づく診断

深さ方向の塩化物イオン濃度は、Fickの第二法則に基づき、表面塩化物イオン濃度やコンクリートの拡散係数を算出できる。表面塩化物イオン濃度は、測定数にもよるが、平面的分布を見ることによって風向きや水面からの距離、構造物の形状などによって異なる腐食環境を整理することができる。また、コンクリートの拡散係数は、平面的に塩化物イオンの浸透しやすさを評価できる。また、同式を用いて塩化物イオンの浸透予測を行うことができ、供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界

濃度に達するか否か、表面被覆工法が有効か否かを評価することができ、補修方法の選択に有意義な情報を得ることができる。浸透予測結果の一例を図-2.3.11に示す。



【表面被覆工法が有効である場合】

【表面被覆工法が有効でない場合】

図-2.3.11 塩化物イオンの浸透予測結果の一例

④ 診断結果による補修工法の選定

診断結果に基づいた補修工法の選定フローの一例を図-2.3.12に示す。代表的な補修工法として、表面被覆工法、断面修復工法（小断面、大断面）、電気防食工法やFRP接着工法や増厚工法などの補強工法が挙げられる。図-2.3.12では、塩化物イオン濃度や劣化状態および範囲、鉄筋の腐食状況などから補修工法を選定するようになっている。

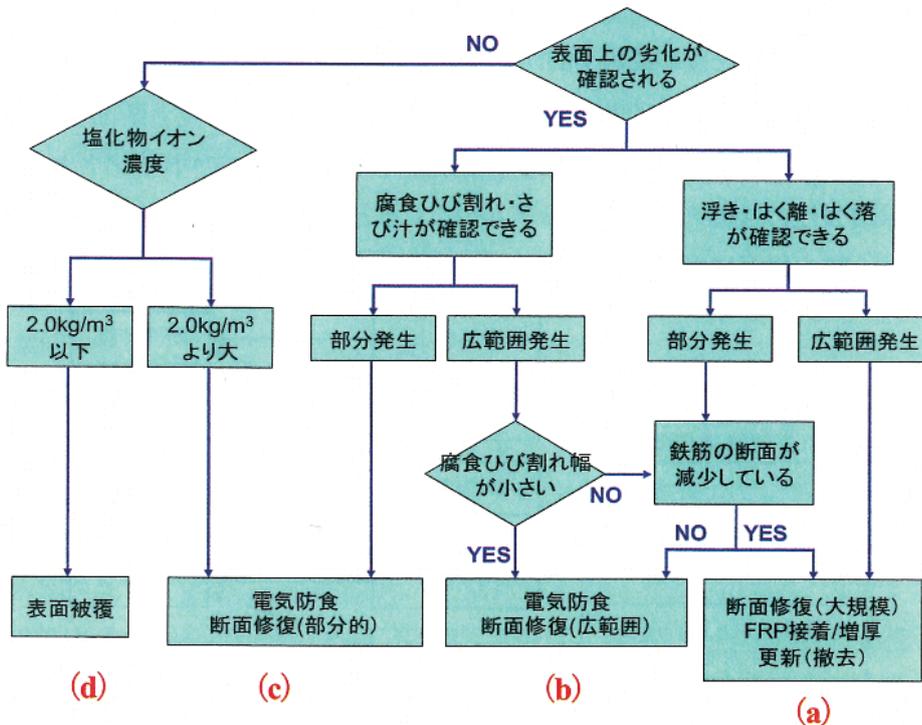


図-2.3.12 診断結果に基づく補修工法選定フローの一例<sup>4)</sup>

## (2) 凍害により劣化した構造物

### a) 調査対象となる変状事例

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによってコンクリートの表面から劣化する現象であり、北海道、東北等の寒冷地や標高の高い山岳地帯に建設されることの多い水力発電施設等に多く見られる劣化現象である。東北電力が供用開始から 50 年以上経過した 9 水力発電所において凍害調査を実施したところ、164 箇所の凍害劣化が見られたことを報告している<sup>5)</sup>。また、北陸電力が富山県内において 65 ヶ所の水力発電所の劣化実態調査を行った結果、全体の 63%にあたる 41 発電所で凍害の発生を確認している<sup>6)</sup>。凍害の進行するメカニズムは、水圧説、浸透圧説、過冷却水圧説などで説明されている<sup>7,8)</sup>が、未だ明確に説明できるには至っていない。

凍害を受けたコンクリートの変状は、①ひび割れ、②ポップアウト、③スケーリング、④断面欠損などであり、ひび割れやスケーリングが進行するとやがては断面欠損が生じる。以下に凍害によるコンクリートの変状事例を示す。

#### ① ひび割れ

凍害のひび割れは、通常天端には亀甲状に、側面には水平ひび割れとして発生することが多い（図-2.3.13、図-2.3.14）。



図-2.3.13 沿岸部擁壁のひび割れ



図-2.3.14 ダム洪水吐側面のひび割れ

#### ② ポップアウト

コンクリート表面が直下の骨材粒子の凍結膨張などにより破壊され円錐状のくぼみを生じる現象である。骨材の品質が悪い場合に起きる（図-2.3.15、図-2.3.16）。



図-2.3.15 橋台前面のポップアウト



図-2.3.16 橋台前面のポップアウト

### ③ スケーリング

コンクリート表面が薄片状にはく離する現象であり、凍害の代表的な変状である（図-2.3.17、図-2.3.18）。



図-2.3.17 擁壁のスケーリング



図-2.3.18 橋梁地覆のスケーリング

### ④ 断面欠損

ひび割れやスケーリングが進行すると断面欠損（崩壊）へと進行する（図-2.3.19、図-2.3.20）。



図-2.3.19 沿岸部擁壁の断面欠損



図-2.3.20 水門の断面欠損

凍害の原因は多岐にわたる要因の影響によるものであり、この要因は内的要因と外的要因に分けられる。内的要因はコンクリートの品質のうち凍害に影響のある品質特性であり、外的要因はコンクリートの設置されている外部環境による影響因子であり、寒地土木研究所の草間らが過去 20 年間に発表された凍害を扱った論文・書籍を分析し外的要因を抽出している。<sup>9)</sup> 表-2.3.3 に凍害の主な要因を示す。

表-2.3.3 凍害の主な要因

区分	主要な要因	詳細
内的要因	水セメント比	細孔量・細孔径に大きく影響する
	空気量	耐凍害性に必要な空気量は3~6%
	気泡間隔係数	耐凍害性を得るための気泡間隔係数は200~250 $\mu$ m 必要 <sup>8)</sup>
	細孔径分布	細孔径が小さいほど耐凍害性が向上する
	飽水度	85~90%以上で耐凍害性が得られなくなる <sup>8)</sup>
	骨材の品質	耐凍害性骨材の限界値：吸水率 3%以下、骨材安定性試験損失重量 12%以下
	初期欠陥	ひび割れ、豆板、砂すじ、表面気泡、コールドジョイントなど
外的要因 <sup>8)</sup>	凍結融解回数	外気温が0 $^{\circ}$ Cをはさんで上下する日数
	最低温度	最低温度が下がると凍結最小細孔直径が小さくなる
	水の供給	コンクリートの飽水度を上昇させる
	乾燥(乾湿繰返し)	乾湿繰返しにより耐凍害性が低下する
	日射(方位)	日射による温度変化と凍結融解回数が関連
	風	部材表面の急冷、さらなる温度低下を起こす
	塩分	海水、路面凍結防止材の塩化物により凍害劣化が促進される

b) 変状に対する調査事例<sup>10)</sup>

① 凍害の調査フロー

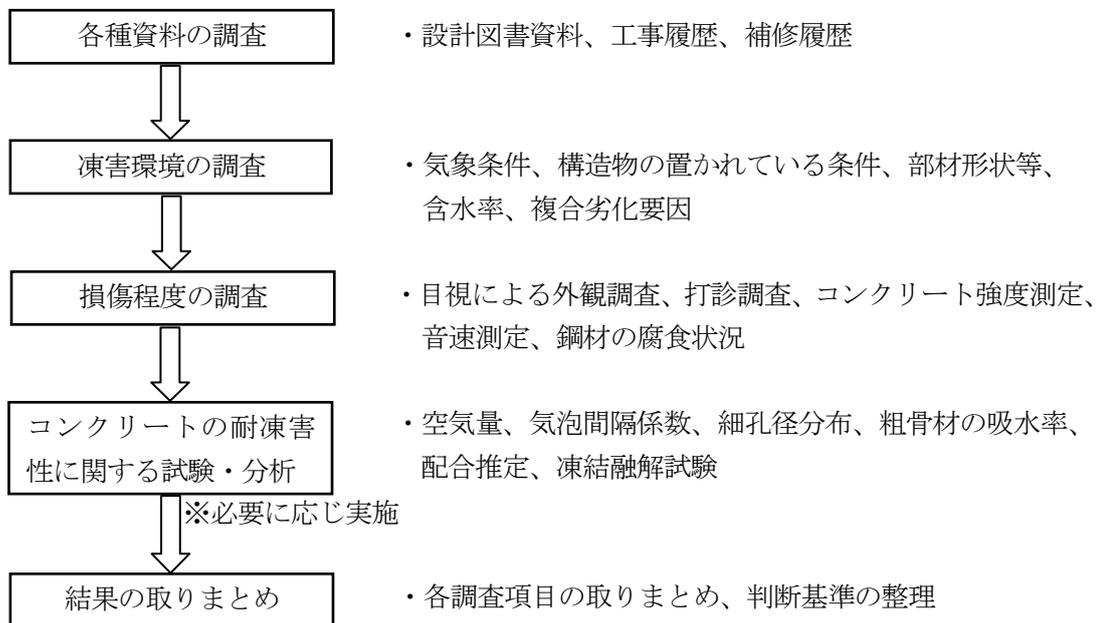


図-2.3.21 凍害の調査フロー

## ② 凍害の調査・測定方法

各調査段階での調査・測定方法を表-2.3.4に示す。

表-2.3.4 凍害の調査・測定方法

調査段階	調査項目	調査・測定方法
各種資料の調査	設計図書資料	竣工年月日※1、配合、空気量、設計基準強度等の資料調査
	工事履歴	施工時の品質試験、施工方法等の資料調査
	補修履歴	施工中の補修履歴、供用中の補修履歴の資料調査
凍害環境の調査	気象条件	最低気温の極値、凍結期間、凍結融解回数、日射量、風向風速の気象台データを調査
	構造物のおかれている条件	水分の供給元、変状箇所の方角、遮蔽物の有無による日当たりの調査
	部材形状等	全体構造物における変状箇所の位置(角部、端部等)の調査
	含水率	・高周波水分計による測定 ・乾燥度試験紙法
	複合劣化要因※2	飛来塩分、路面凍結防止材の影響調査
損傷程度の調査	目視による外観	ひび割れ、スケーリング、ポップアウトの変状程度(範囲、深さ)の調査
	打診調査	テストハンマーによる打診調査
	コンクリート強度	・シュミットハンマーによる表面反発硬度の測定 ・採取コアによる圧縮強度の測定 ・静弾性係数の測定
	音速測定	深さ別の超音波伝播速度の測定
	鋼材腐食度	はつり法
コンクリートの耐凍害性に関する試験・分析	空気量	高水圧法
	気泡間隔係数	顕微鏡法
	細孔径分布	・水銀圧入法 ・気体(窒素)吸着法
	粗骨材の吸水率、安定性損失重量	・骨材の比重・吸水量試験 ・硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験
	配合推定	・セメント協会法 ・ギ酸法 ・フッ酸法 ・グルコン酸法
	凍結融解試験	相対動弾性係数の測定

※1 NonAE コンクリートは凍害劣化が著しく進行するため、竣工年の古い構造物は AE コンクリートの使用を確認する。わが国で AE コンクリートが大規模な工事に使用された例は、昭和 29 年に完成した東北電力上田・本名ダムが最初である。その後、昭和 53 年に JISA 5308(レデーミクストコンクリート)の規格改正で、AE コンクリートが標準的なコンクリートとなった。

※2 海水や路面凍結防止剤に含まれる塩化物の影響により、凍害は著しく促進される。そのメカニズムは、非常に複雑であり今日に至ってもその全容はまだ完全に解明されていない。複合劣化は、ひとつの劣化がトリガーとなって他の劣化を誘引する事象であり、複合劣化を起こしている事例は少なくない。しかし、複合劣化は現段階ではまとまった指針等がなく調査研究途上であり、その対策基準等も整備されていない。ここでは、凍害の単独劣化を促進する塩化物供給の有無を調査する。

c) 調査に基づく診断事例<sup>1), 11)</sup>

変状の調査結果に基づき、凍害の診断を行う。診断は、まず現状を評価し原因を推定する。次に今後の劣化の予測と劣化予測に基づく評価を行い、構造物の性能への影響を踏まえた補修・補強等、対策の要否を判定する。図-2.3.22に凍害の診断フローを示す。

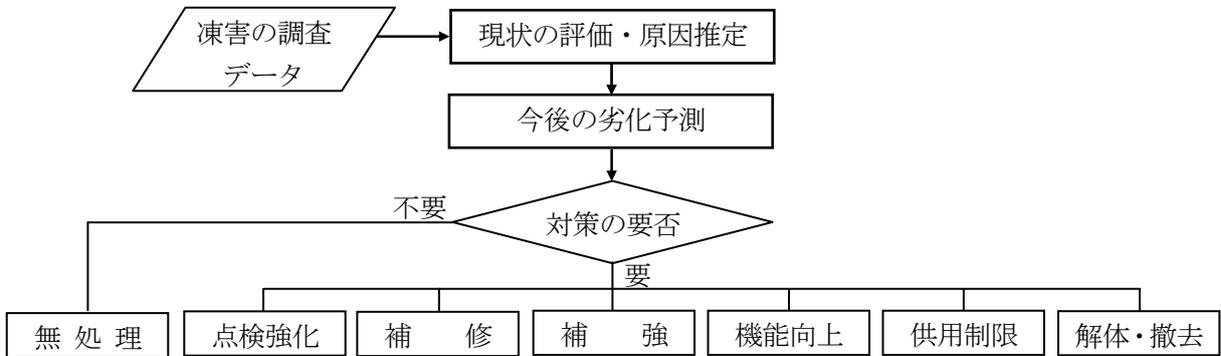


図-2.3.22 診断・対策フロー

① 現状の評価・原因推定

対象構造物の劣化状況の調査結果をもとに、現状の評価を行う。評価の方法は、表-2.3.5の構造物の外観上のグレード手法に基づく定量的な評価方法で行う。この方法は、劣化の状態から外観上のグレード(潜伏期、進展期、加速期、劣化期)で評価するものである。

原因の推定は、今後の劣化予測を行う上でも重要である。凍害による劣化の程度は、表-2.3.3に示した多くの要因が作用して決まるため、凍害の劣化調査の結果から原因となりうる内的・外的要因を抽出し、劣化の進行に大きな影響を及ぼす要因を推定する。

表-2.3.5 構造物の外観上のグレードと劣化の状態<sup>1)</sup>

構造物の外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	凍結融解作用を受けるが、外観上の変状が認められない
グレードⅡ	進展期	スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生
グレードⅢ	加速期	スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが進展、骨材の露出や剥落の発生
グレードⅣ	劣化期	かぶりコンクリートの剥落、鋼材の露出や腐食の発生

② 今後の劣化予測

凍害においては、わずかな材質の差や環境条件の相違が凍害の発生や進行程度を大きく左右し、その劣化はある段階から急速に進行する。図-2.3.23の縁石の劣化状況を見ると、右側の縁石は断面欠損まで進行した劣化期の状態であるに対して、隣り合った縁石はほとんど変状が認められない。この違いは、環境条件が同一であっても、わずかな材質の差が劣化の進行を大きく左右することを説明している。このため、凍害の進行予測は現在のところ極めて困



図-2.3.23 縁石の劣化状況

難である。

さらに、スパイクタイヤの禁止に伴い凍結防止剤の散布が増加し、凍結防止剤に含まれる塩化物によってスケーリングが著しく進行する凍害と塩害の複合劣化が増大しており、そのメカニズムは益々複雑になっている。

劣化の予測方法は、定期に行う点検の結果をもとに、その後の経年的な劣化の進行を推定する予測法がある。一方、定期的な点検結果がない場合、凍害深さと鉄筋腐食の進行を考慮して、現状のグレード(潜伏期、進展期、加速期、劣化期)から次のグレードへ進行していく期間を予測する手法がある。

## ② 対策の要否の判定

現状の劣化グレード、凍害劣化の外的・内的要因、今後の劣化予測を総合的に判断して、対策の要否の判定を行う。現状の劣化グレードが潜伏期または進展期のうちに対策を講ずることが望ましく、加速期まで劣化が進行してしまうと対策に要する費用が大きくなることも考慮する必要がある。同様に、今後の劣化予測において、近い将来現状の劣化グレードが次段階への進行が予測される時は、安全側の評価として次段階のグレードで劣化の評価をするのが望ましい。なお、凍害を受ける構造物の性能を定量的に評価するために必要な劣化の進行状態の一例を表-2.3.6に示す。

表-2.3.6 性能低下の定量評価のために考慮すべき事項<sup>1)</sup>

性能	考慮すべき事項
安全性・使用性	部材の構造性能の低下 <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート断面の減少</li> <li>・コンクリートの力学特性の低下</li> <li>・腐食による鋼材の断面減少および付着力の低下</li> </ul>
第三者影響度	コンクリートの剥離・剥落の発生
美観	スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトの発生および進展

## d) 診断事例の紹介

### ① 橋台前面の劣化(ポップアウト)

#### 1) 劣化状況

竣工から25年経過した橋梁である(図-2.3.15)。橋梁の橋台前面に、凍害劣化の特徴的な変状のひとつであるポップアウトが認められた。変状は橋台前面と座面に起きており、特に橋座から雨水が垂れている箇所の変状が激しい。側面は変状が認められなかった。また、ポップアウト以外の変状は起きていない。

#### 2) 凍害環境

内陸部の豪雪厳寒地域であり、最低気温は-25℃、11月初旬から3月末まで0℃以下の気温が続く地域である。

#### 3) 調査内容

変状がポップアウトだけの軽微な劣化であるため、骨材の調査を中心に調査を行う。

- ・目視による外観調査・・・変状範囲
- ・骨材の吸水率試験・・・吸水率3%以上でポップアウトの可能性あり
- ・骨材の安定性試験・・・損失重量12%以上でポップアウトの可能性あり