

参考資料

参考① エプロン系施設の補修設計に関する取扱いについて

はじめに ー参考①の位置づけと考え方ー

- 1.1 対策検討の流れ
- 1.2 頭首工エプロンの摩耗劣化の補修に関する基本的な考え方
- 1.3 将来的に現場で想定される年間平均摩耗速度の推定と設定耐摩耗層厚の計算
- 1.4 弾性板
- 1.5 対策範囲の設定
- 1.6 その他留意点
- 1.7 取付部の構造細目

参考② パネル工法の諸元等

- 2.1 超高強度繊維補強コンクリートパネル
- 2.2 ポリマー含浸SUS繊維補強コンクリートパネル
- 2.3 高強度コンクリートパネル
- 2.4 レジンコンクリートパネル
- 2.5 パネルに作用する引抜き荷重（グラウト圧）

参考③ エプロン系施設の補修に関する工法選定フロー

はじめに ー工法選定フロー作成に関する考え方ー

- 3.1 劣化要因に対する工法選定フロー
- 3.2 補強工法の選定

参考④ 補強工法の事例紹介

- 4.1 異形鉄筋埋設工法による耐震補強の事例
- 4.2 鋼板巻立て工法による耐震補強の事例
- 4.3 底版上面の補強鉄筋、堰柱の増厚工法の事例

参考⑤ 頭首工関連技術図書の変遷

参考①エプロン系施設の補修設計に関する取扱いについて

はじめに　－参考①の位置づけと取扱い－

頭首工エプロン系施設の補修に関する要求性能および品質規格は本編 3 章を原則とする。一方、エプロン系施設の設置環境、構造は多様であり、基準となる設計体系も異なる。エプロン系施設は、設計・施工された時代背景の影響を受け、多くの経験や実績に基づき施工されてきた構造物である。そのため、本編 3 章に示した基本的な説明のみで個別設計を行うことは実務上難しい場合も多いと考えられる。

本マニュアルの原則をよく理解し、個々の頭首工の環境に適した補修を行うためには、具体的な設計計算例等を示すことが必要と考えた。また、今後の設計の高度化のためにも有益と考え、参考①を作成した。

参考①は、今回の「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【頭首工編】」の策定にあたって収集した主にパネル工法の設計資料を基に、現時点におけるパネル厚さの設定および接合部の構造細目についての考えを取りまとめたものである

設計には一つの方法が正解というものはなく、構造物の環境、施工、コスト等に関して多くの検討を繰り返し最適解を求める作業である。実務設計では、本質を理解した上でできるだけ少ない労力で間違いのない設計を行うことが肝要と考える。個別の頭首工の状況等に応じて適切な設計を行う際の参考として利用していただきたい。

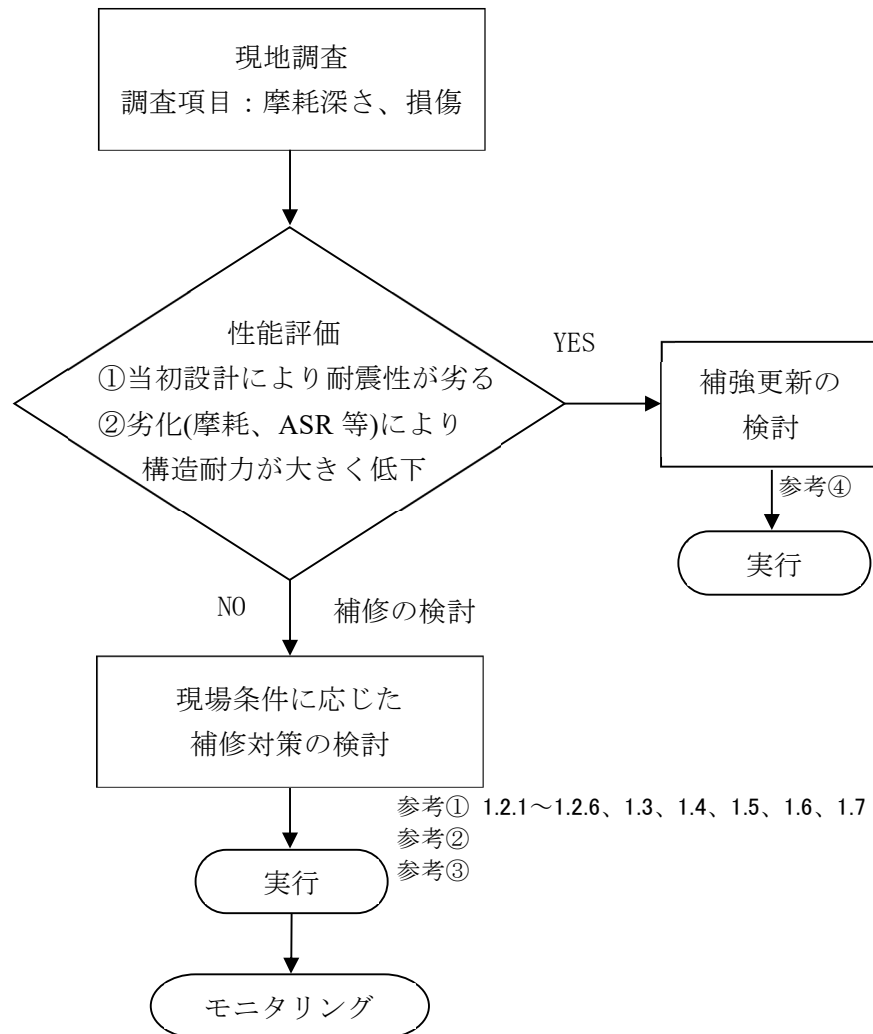
参考①作成のもう一つの目的は、次回改訂に向けた問題点の抽出と整理のためである。計算例には多くの仮定が含まれる。次回改訂までに現場における年間摩耗速度等について仮説検証を行い、より良い設計法に向けた検討資料として活用していただきたい。

1.1 対策検討の流れ

頭首工エプロン系施設の補修・補強では、現地調査に基づく性能評価を行い、対策の方向（補修、補強、更新）を決定することを基本とする。

【解説】

既設エプロン系施設の補修・補強に関する手順を示す。



参図1-1 現地調査と補修・補強工法の選定フロー

1.2 頭首工エプロン系施設の摩耗劣化の補修に関する基本的な考え方

- ① 頭首工エプロン系施設が流水、流砂、転石等にさらされる環境下で、補修後少なくとも50年は、通水表面からの劣化因子の侵入抑制、耐摩耗性、一体性等が確保され、再劣化を発生させないように十分注意して工法選定、設計を行うものとする。
- ② 摩耗劣化に対する補修は、エプロン等の劣化した部分を除去し、耐摩耗性のほか、必要な性能を有した材料を用いて断面修復を行うものとする。
- ③ 鋼材が設置されている場合は、鋼材の目的（構造用鉄筋、用心鉄筋）を十分考慮し、残置する場合は必要な防錆措置を行うことが望ましい。
- ④ 断面修復工の設計・施工に関して打ち継ぎ面が発生するのはやむを得ないが、打ち継ぎ面が発生する場合は打ち継ぎ面を一体化する措置を検討し、適切に施工するものとする。
- ⑤ エプロン系施設に使用する断面修復材料については、既に使用されている材料の耐摩耗性以上のものを用いるか、あるいは本編第3章の表3.1-2示した品質管理基準を満足する材料を用いることを原則とする。
- ⑥ 断面修復部の厚さの検討については、頭首工エプロン系施設の現場における年間平均摩耗速度あるいはその推定値を基に厚さの検討を行うものとする。
- ⑦ ⑤の品質規格を直接照査することが難しい工法に関しては、期待される耐用期間内に要求性能を照査することにより、その適用性を判定するものとする。
- ⑧ 以上は、標準的な摩耗作用にさらされる頭首工エプロン系施設を想定した考え方を示したものであり、特殊環境下のエプロン系施設については別途検討するものとする。また、技術開発の進捗により上に述べた基本的な考え方についても逐次修正を行うものとする。

【解説】

エプロン系施設の劣化に対する補修の基本的な考え方を示す。参考①では補強を直接の対象とはしない。実際の補修対策では、頭首工が置かれた現場環境・条件を十分考慮し、新技術の進展も踏まえた工法選定、設計等を行う。

1.2.1 補修対策の検討について

- ① 本編第1章第7 頭首工に発生する摩耗現象に記述したように、頭首工エプロン系施設の摩耗状況、頭首工の流況、構造及び材料により大きく異なる。
- ② 補修の開始を検討する時期については、頭首工毎に農業水利施設の機能保全の手引き、農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」等を参考に機能保全計画の中で必要な機能診断及び機能診断評価を行い検討するものとする。
- ③ 参考①1.2.2以降では、本編第1章第3 図書の適用範囲及び図1.2-1～1.2-2に示したとおり、頭首工エプロン系施設に変状が生じ、補修（予防保全を含む）が必要な場合を想定する。

【解説】

エプロン系施設の補修に関する検討開始時期については、個々の頭首工の流況、構造、材料並びに摩耗進展による構造性能、水理性能、水利用性能、維持管理性能の低下及び第三者影響度の変化を考慮して決定する。

本編1-32～1-38に示すとおり、エプロン系施設の摩耗の程度は場所によって大きく異なり、平面的な摩耗や石の回転により生じた深いひび割れ、断面欠損等が生じている場合もあるため、摩耗状況によっては、単一工法では対策が難しく、複数の工法あるいは、段階的な対策が望ましい場合もある。そのため、補修時期の選定に際しては、施設保全計画および機能診断評価結果を参考に、頭首工の流況、構造、材料特性を考慮し、補修範囲、補修深さを選定する。また、断面欠損部の連続性、断面欠損部周辺の残存部材厚の状況、施工性、経済性等を考慮し、補修対策の更新を検討することが望ましい。

1.2.2 要求性能

頭首工エプロン系施設が流水にさらされる環境下で、補修後少なくとも 50 年間は通水表面からの劣化因子の侵入抑制、耐摩耗性、一体性等が確保され、再劣化を発生させないように十分注意して工法選定、設計を行うことが望ましい。

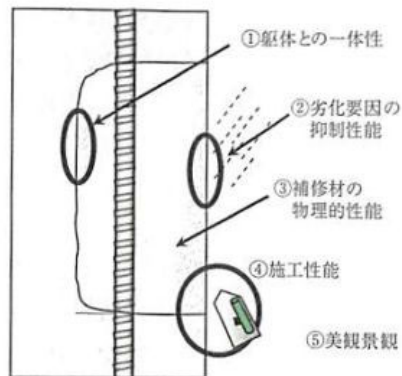
【解説】

頭首工は、設置環境、劣化要因、構造等の個別に異なる条件を考慮し、工法選定及び設計を行うことが望ましい。

補修工法に求められる主な要求性能を参図 1-2 に示す。詳細は本編第 3 章に示す。

- ① 躯体との一体性
- ② 劣化要因の抑制性能
- ③ 補修材の物理的性能
- ④ 施工性
- ⑤ 景観、第三者影響性能

エプロン系施設では、期待される耐用期間 50 年間に上で示した要求性能が大きく低下することがないように工法選定及び設計を行う。特に、エプロン系施設の主たる劣化は摩耗であるため、摩耗劣化に対する検討が重要となる。



参図1-2 補修材料の要求性能

(セメント協会：セメント系補修・補強材料の基礎知識（2011），p131，技報堂出版）

1.2.3 要求性能に関する検討

頭工エプロン系施設の補修対策を計画・立案する際は、対象施設の環境、構造を十分把握した上で、エプロンの安全性、耐久性、施工性、景観、経済性に配慮して、補修工法、使用材料、構造形式を総合的に検討する必要がある。

【解説】

① 期待される耐用期間

参考①で示す設計例では、期待される耐用期間は50年を原則とする。

② 作用

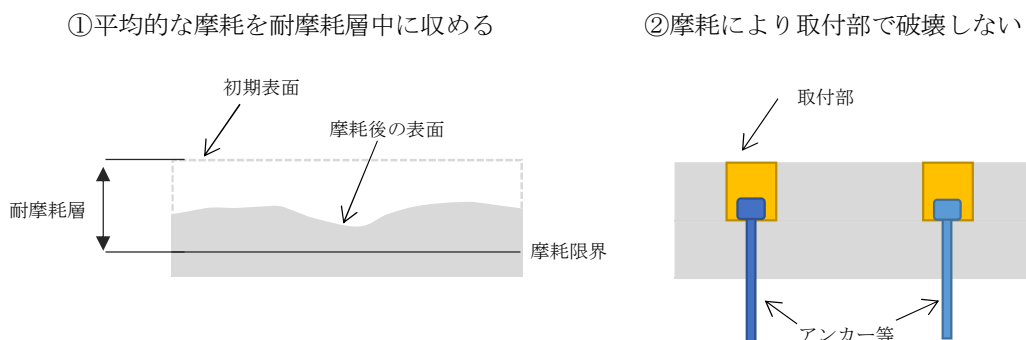
エプロン系施設には様々な作用（例えば死荷重、活荷重、水圧、摩耗作用等）が働くが、今回の設計例では主に摩耗作用を対象とする。

③ 要求性能の照査

エプロン系施設の補修工法に対する要求性能としては、本編第3章に中性化抑止性、耐候性、付着性等9項目の性能が規定されている。ここでは主に付着性、耐摩耗性、耐衝撃性等を照査する。

本編第3章における照査の考え方は、中性化抑止性、耐候性、付着性等々の種々の性能を期待される耐用期間内に確保するため、(1) 期待される耐用期間中にエプロン系施設の補修材料に劣化が生じないようにする、(2) 劣化が生じた場合でも構造物の性能の低下を生じさせない軽微な範囲に留める、という考えを基本にする。(1) 又は(2) の条件を満たすために品質規格を設け、品質規格を満たした材料を用いることを基本としている。

参考①では、品質規格値を満足した材料を用いた場合、付着性、耐摩耗性、耐衝撃性以外の性能については期待される耐用期間中に性能低下は生じないと仮定し照査を行う。すなわち、主たる材料の劣化は摩耗作用、衝撃作用によって生じ、その結果、付着性、耐摩耗性、耐衝撃性が低下すると考える。これらの性能に対しては参図1-3に示す限界状態を想定する。



参図1-3 パネルの想定される限界状態

これは、期待される耐用期間内に次の2つの限界状態を超えないこと意味する。

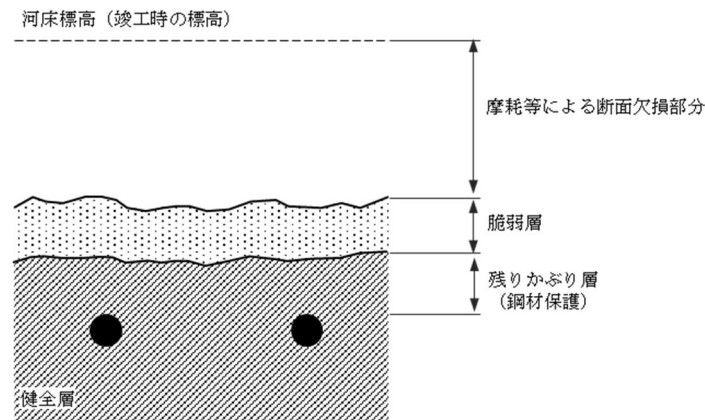
- (1) 補修材料の平均的な摩耗深さが後に述べる耐摩耗層内に収まるようにする。
- (2) アンカー等でパネルと下地を固定する取付部で破壊が生じない。
 - (1) の照査は参考①1.2.6以降に示す耐摩耗層の厚さの計算に基づき照査する。
 - (2) については、取付部の構造形式がメーカー毎に異なることから、今回は各メーカーで使用されている取付部の構造細目を参考①1.7取付部の構造細目に示すのみに留める。

1.2.4 頭首工エプロン系施設の摩耗劣化に対する断面修復の基本的な考え方

- ① 頭首工エプロン系施設の摩耗劣化に対する補修では、エプロン系施設の劣化した部分を除去し、耐摩耗性が高く、その他要求性能を満たす材料を用いて断面修復を行うものとする。
- ② 頭首工エプロン系施設に鋼材が設置されている場合は、鋼材の目的（構造用鉄筋、用心鉄筋）を十分考慮し、残置する場合は防錆措置等の検討を行い、適切な処理を行う。
- ③ 施工上打ち継ぎ面が発生するのはやむを得ないが、打ち継ぎ面は弱部になる可能性もあるため、打ち継ぎ面の処理を検討し、適切に施工するものとする。

【解説】

- ① 断面欠損部の連続性、断面欠損部周辺の残存部材厚の状況、施工性、経済性等を考慮し、補強対策や更新を検討する。
- ② エプロン系施設の摩耗状況の模式図を参図1-4に示す。摩耗等によって失われた部分（断面欠損部分）の下には一般的に止水性や劣化因子遮断性能が低下した脆弱層が存在し、その下に健全部が分布する。エプロンの断面には、図に示すように鉄筋等の鋼材が設置されている場合もある。脆弱化が鉄筋近傍まで進んでいない場合は、鉄筋を保護する機能がある「残りかぶり層」が存在すると考える。脆弱層を除去し、このかぶり層を残す場合、はつり作業および鋼材保護の観点からかぶり層の厚さの最小値は30 mm程度を目安とする。



参図1-4 現場エプロンの模式図

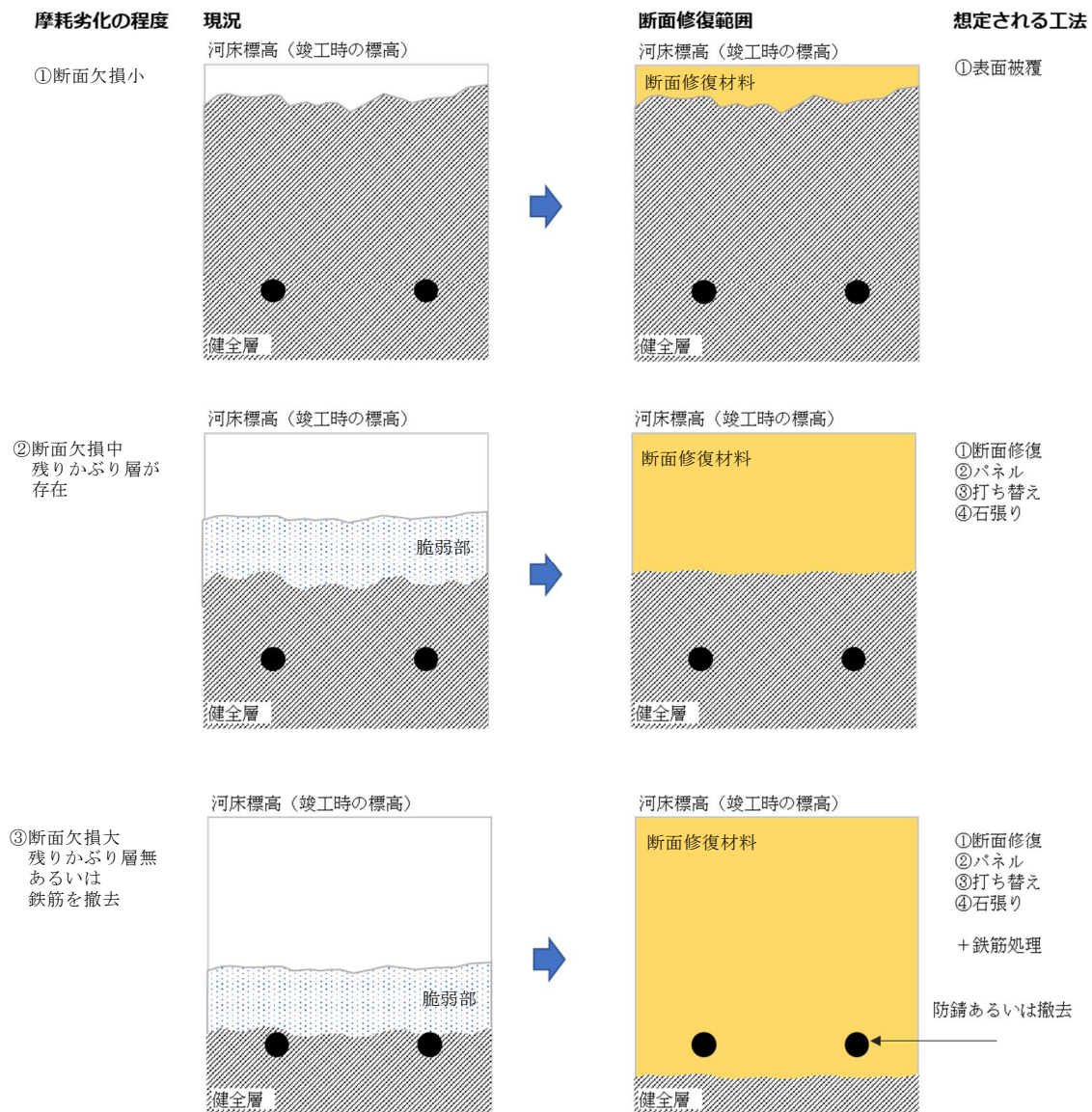
- ③ 断面修復においては、脆弱層を可能な限り取り除き施工することが望ましい。
- ④ 打ち継ぎ面は弱部となるため、打ち継ぎ面が発生する場合は境界面を一体化する等の必要な措置を検討し、適切に施工するものとする。
- ⑤ 修復後のエプロン天端の標高については、河川協議の経緯、河川の通水阻害等を考慮し、通常、河川協議時の河床標高（河川協議資料のエプロンの標高）を原則とする。
- ⑥ 鋼材が設置されている場合は、鋼材の目的（構造用鉄筋、用心鉄筋）を十分考慮し、残置する場合は必要な防錆措置を行う必要がある。

1.2.5 工法及び組み合わせ

本編第2章に示したように頭首工エプロン系施設にはいくつかの補修工法がある。補修に当たっては施設的环境、設置条件、劣化状況、流況等を勘案し、適切な工法あるいは工法の組み合わせを選択する。

【解説】

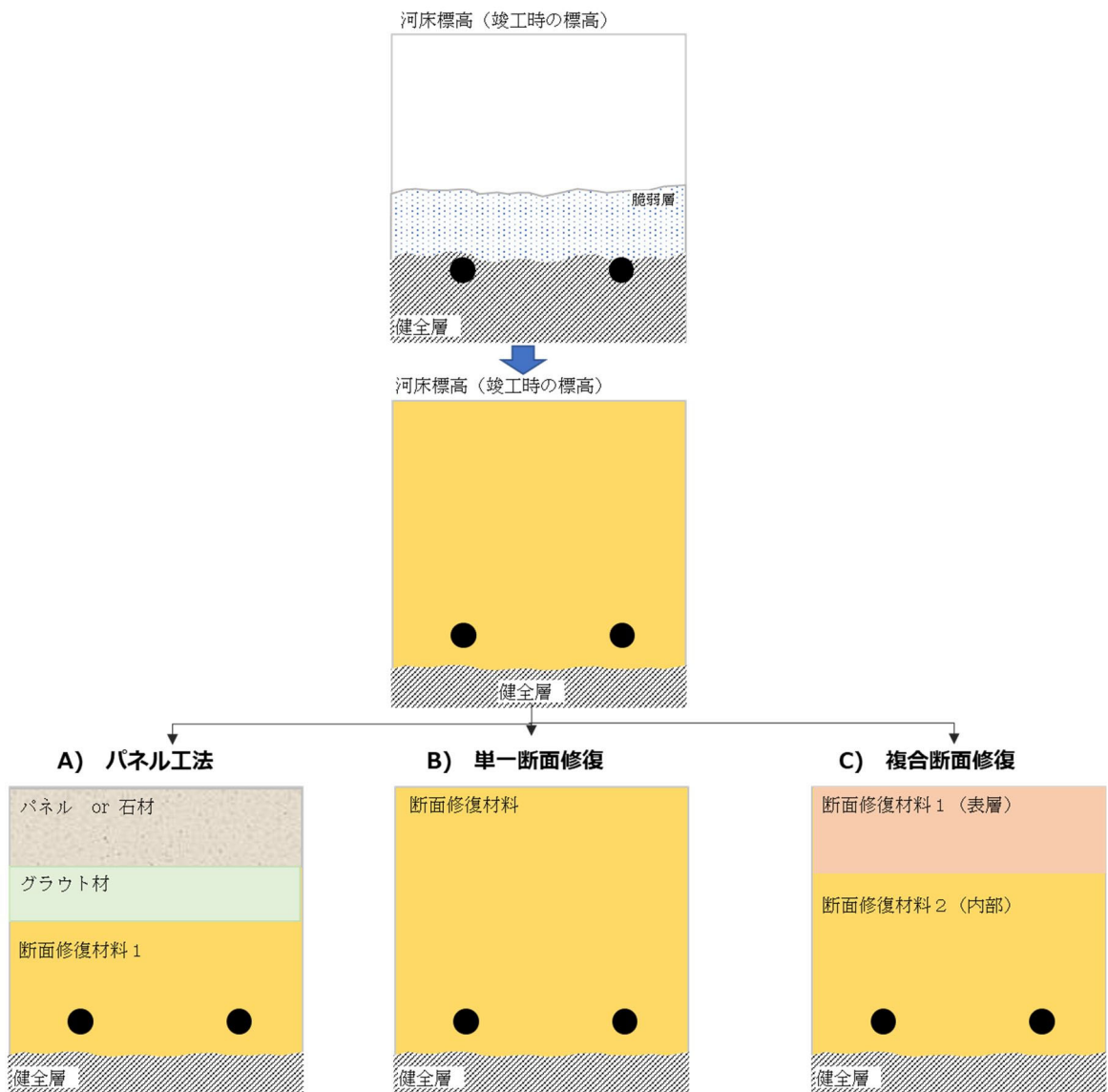
① 現場における摩耗劣化の程度、すなわち断面欠損の範囲（深さ、面積）、脆弱層の分布、鋼材の設置及びその他の劣化状況により補修範囲及び工法を選択する。



参図1-5 摩耗劣化の程度と補修範囲及び工法の関係

② 摩耗劣化の程度が同じでも、頭首工の設置条件に応じた工法及びその組み合わせが想定される。ここでは、**参図 1-5** の③断面欠損大の場合を例に、想定される工法例を次頁に示す。なお、工法により、断面修復部に求められる材料の選択及び厚さの選定は異なることに注意が必要である。

- A) パネル材料を用いた断面修復（石張り工法）
- B) 単一材料を用いた断面修復
- C) 複合材料を用いた断面修復



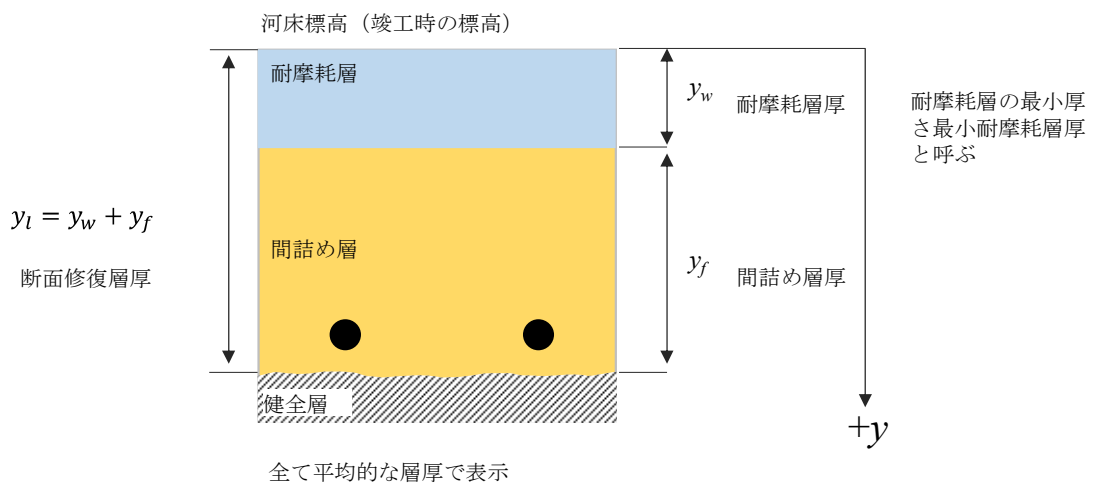
参図1-6 断面修復部の厚さが同じ場合の想定工法（例）

1.2.6 断面修復部に用いる材料と厚さ

- ① 流水にさらされ、特に耐摩耗性が求められる層を「耐摩耗層」と呼ぶ。
- ② 耐摩耗層の材料は、本編第3章の表3.1-2に示した品質管理基準を満足する材料を用いることを原則とする。
- ③ 「耐摩耗層」と下地コンクリートの隙間を充填する「間詰め層」を設ける場合もある。
- ④ 期待される耐用期間内に「耐摩耗層」に発生する平均的な摩耗深さが耐摩耗層内に収まるように耐摩耗層の厚さを設定するものとする。
- ⑤ そのための設計上の耐摩耗層の最小厚さを「最小耐摩耗層厚」と呼ぶ。
- ⑥ 「最小耐摩耗層厚」の計算では、実測あるいは促進摩耗試験の結果に基づき耐摩耗層に発生する年間平均摩耗速度を推定し、この推定値に期待される耐用期間を乗じて「最小耐摩耗層厚」を計算する。
- ⑦ 耐摩耗層以外の部分、すなわち間詰め材料等についても、経済的な条件及び施工条件を考慮しつつ耐摩耗性が高い材料を用いることが望ましい。

【解説】

- ① 耐摩耗層の概念を参図1-7に示す。期待される耐用期間内に流水にさらされ、特に耐摩耗性が求められる層を耐摩耗層と呼ぶ。耐摩耗層と下地コンクリートの間には間詰め層を設ける場合がある。

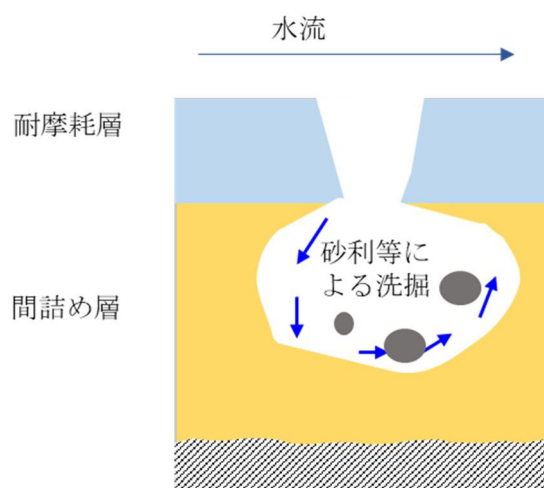


参図1-7 耐摩耗層厚（深さ）

- ② 耐摩耗層は流水による摩耗作用を受ける部分である。エプロンの機能を維持するために、期待される耐用期間内においてエプロンに生じる平均的な摩耗を耐摩耗層内に収めるように材料および工法を選択するものとする。そのため、耐摩耗層には耐摩耗性が高い材料を使用することが望ましい。
- ③ 期待される耐用期間内に「耐摩耗層」に発生する平均的な摩耗深さを耐摩耗層内に収まるように耐摩耗層の厚さを設定する。そのための設計上の耐摩耗層の最小厚さを「最小耐摩耗層厚」と

呼ぶ。「最小耐摩耗層厚」の計算は、実測あるいは促進摩耗試験の結果から現場において発生する可能性がある年間平均摩耗速度を推定し、その値に期待される耐用期間を乗じて求める。最小耐摩耗層厚の計算方法については参考①1.3で述べる。

- ④ 耐摩耗層が剥離、流出した場合を想定すると、耐摩耗層の下にある間詰め層の耐摩耗性が著しく小さいと耐摩耗層が損傷した部分から摩耗が急速に間詰め層に進展する可能性がある（参図 1-8）。このような急激な摩耗の進展を避けるために、耐摩耗層と間詰め層の一体化を図るとともに間詰め材料に耐摩耗性の高い材料を使用することが望ましい。
- ⑤ 将来的に耐摩耗性が高く、経済的な間詰め材が開発される可能性もある。間詰め材料の摩耗特性を十分照査し、必要な要求性能が確保されれば、間詰め材料を耐摩耗層として考慮した設計を将来的には妨げるものではない。



参図1-8 耐摩耗層が損傷した後の砂利等による局所的な洗掘

1.3 現場における頭首工エプロン部で想定される年間平均摩耗速度の推定と最小耐摩耗層厚の計算

- ① 補修材の現場における年間平均摩耗速度 v_f の推定および計算方法を以下に示す。
- ② 補修材の現場において推定される年間平均摩耗速度 v_f に期待される耐用期間 t_d を乗じて最小耐摩耗層厚 y_w を求める。

【解説】

頭首工エプロンの補修後の年間平均摩耗速度の実測データは極めて少ないことから、現状では補修対象となる頭首工エプロンの平均摩耗速度を高精度で推測することは困難である。しかし、将来的には、頭首工エプロンの平均摩耗速度のデータの集積・分析が進み、予測精度は向上すると考えられる。将来的に平均摩耗速度の予測精度が向上することを仮定し、本節では年間平均摩耗速度の推定値を基にした耐摩耗層の厚さの計算方法を示す。

- ① 頭首工エプロン部の年間平均摩耗速度 v_f の推定方法として次の (A) ～ (C) の 3 つの方法を示す。
 - (A) 耐摩耗層に用いる補修材料の現地又はほぼ同一の環境下における信頼できる実測年間平均摩耗速度が入手できる場合は、その値を推定年間平均摩耗速度 v_f に用いてよい。
 - (B) 頭首工エプロンにこれまで一般的に用いられてきたコンクリート（強度：18～30 N/mm²、 G_{\max} ：20～80 mm 程度、「現場標準コンクリート」と呼ぶ）が使用されており、その年間平均摩耗速度が実測されている場合は、補修材の回転式水中摩耗試験^{*1}の結果から式 (1) を用いて補修材料の推定年間平均摩耗速度 v_f を求める。

$$v_f = k\alpha v_{fs} \quad (1)$$

- v_f : 現場における補修材料の推定される年間平均摩耗速度 (mm/年)
 k : 環境, 材料のばらつきを考慮した係数, 当面は 1.0 とする
 v_{fs} : 現場標準コンクリートの現場における年間平均摩耗速度 (mm/年)
 α : 回転式水中摩耗試験による 24 時間後の現場標準コンクリートの平均摩耗深さ v_{ls} と補修材料の平均摩耗深さ v_l の比 (この項の末の補足 1 を参照)

$$\alpha = \frac{v_l}{v_{ls}}$$

- v_l : 回転式水中摩耗試験による 24 時間後の補修材料の平均摩耗深さ (mm/24h)
 v_{ls} : 回転式水中摩耗試験による 24 時間後の現場標準コンクリートの平均摩耗深さ (mm/24h)。試験値がない場合は、**参図 1-11** の回転式水中摩耗試験によるコンクリート材料の試験結果の強度 18-20 N/mm² のコンクリートの試験値を安全側に評価した $v_{ls}=5 \text{ mm/24h}$ ^{*2} を暫定的に用いる。暫定値は回転式水中摩耗試験機の仕様変更や、頭首工エプロンに用いるコンクリートの回転式水中摩耗試験のデータの集積に応じて適宜見直すものとする。

(C) 対象とする頭首工の流況が平均的でありかつ頭首工エプロンに現場標準コンクリートが使用されている条件の下、頭首工エプロンの年間平均摩耗速度の実測値がない場合には、現場標準コンクリートの年間平均摩耗速度 v_f の推定値に 2 mm/年を用いてよい。すなわち、

$$v_f = 2.0 \text{ mm/年}$$

② 1) 補修対象のエプロンに現場標準コンクリート以外のコンクリート材料が使用されている場合、2) 流況が極めて激しく、特定の部分で摩耗進行が大きい場合等については、環境、材料のばらつきを考慮した将来的な安全係数 (k) に個別の状況を反映する。

③ 最小耐摩耗層厚 y_w は式 (2) から求める。

$$y_w = v_f t_d \quad (2)$$

y_w : 最小耐摩耗層厚 (mm)

v_f : 現場において推定される補修材料の推定年間平均摩耗速度 (mm/年)

t_d : 期待される耐用期間 (年)

※¹ 回転式水中摩耗試験は、巻末資料 1 試験方法 (案) 回転式水中摩耗試験法 (角柱研磨式) (案) による。

※² 令和 2 年度時点の試験機による試験値を評価した値。

補足1 α について

式(1)の α について説明する。 α は回転式水中摩耗試験24時間後の現場標準コンクリートの平均摩耗深さと補修材料の24時間後の平均摩耗深さの比である。これは、現場標準コンクリートの促進摩耗試験における平均摩耗深さを1としたときの補修材料の平均摩耗深さの割合を表し、補修材料の平均摩耗深さが現場コンクリートに較べてどの程度減少するのかを示す指標である。

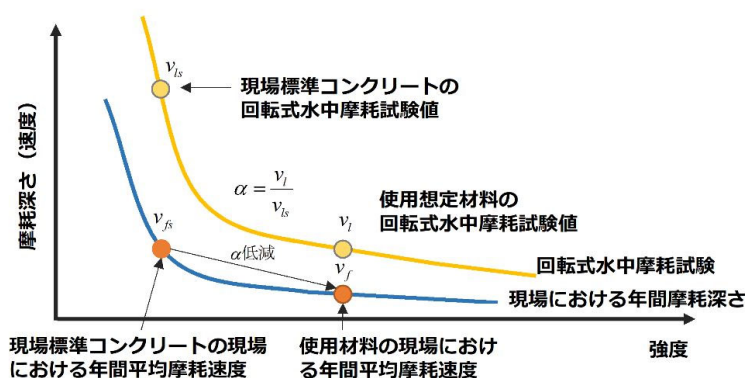
回転式水中摩耗試験の結果(参図1-10)から、補修材料の平均摩耗深さは材料の圧縮強度が増加すると指数関数的に減少する。一般的に補修材料の圧縮強度は現場標準コンクリートより高いため、補修材料の平均摩耗深さは現場標準コンクリートより小さくなる。その比が以下に示す α である。

$$\alpha = \frac{\text{補修材料の回転式水中摩耗試験による24時間後の平均摩耗深さ}}{\text{現場標準コンクリートの回転式水中摩耗試験による24時間後の平均摩耗深さ}} = \frac{v_i}{v_s}$$

一方、促進摩耗試験(回転式水中摩耗試験)と現地で発生する年間平均摩耗速度の関係が明らかになれば、促進摩耗試験の試験結果から現地における年間平均摩耗速度を予測することができる。下式に示すように回転式水中摩耗試験による24時間後の平均摩耗深さ(試験値)に対する補修材料の現場における年間平均摩耗速度の比を促進倍率と定義する。促進倍率が求めれば、促進摩耗試験の試験結果から補修材料の現場における推定年間平均摩耗速度を求めることができる。

$$\text{促進倍率} = \frac{\text{補修材料の現場における年間平均摩耗速度}}{\text{回転式水中摩耗試験による24時間後の平均摩耗深さ}}$$

しかし、現状で促進摩耗試験の結果および現場における摩耗データが得られているのは現場標準コンクリートのみであり、現場標準コンクリートのみが促進倍率を推測することができる。そこで、現場で使用が想定される補修材料の促進倍率が現場標準コンクリートと等しいと仮定し、使用が想定される補修材料と現場標準コンクリートの圧縮強度の違いによる摩耗進行の差異を α により補正したのが式(1)である。



参図1-9 α の概念図

式(1)を用いるためには現場標準コンクリートの年間平均摩耗速度 v_{fs} のデータが必要となるが、実測データは極めて少ない。実務上は v_{fs} にどんな値を用いるかが問題となる。今回は、 v_{fs} の代表値として本編第1章の表1.7-2のエプロン系施設の年間平均摩耗速度(mm/年)のデータを用いて、その値の分布(平均1.6mm/年、95%信頼区間[1.2mm、2.1mm])から、安全側を考慮し平均1.6mm/

年よりやや大きな 2.0 mm/年をエプロン系施設の年間平均摩耗速度の暫定値とすることにした。すなわち、平均的な環境の頭首工で年間平均摩耗速度の実測値がない場合は

$$v_f = 2.0 \text{ mm/年}$$

と仮定してよいことにした。

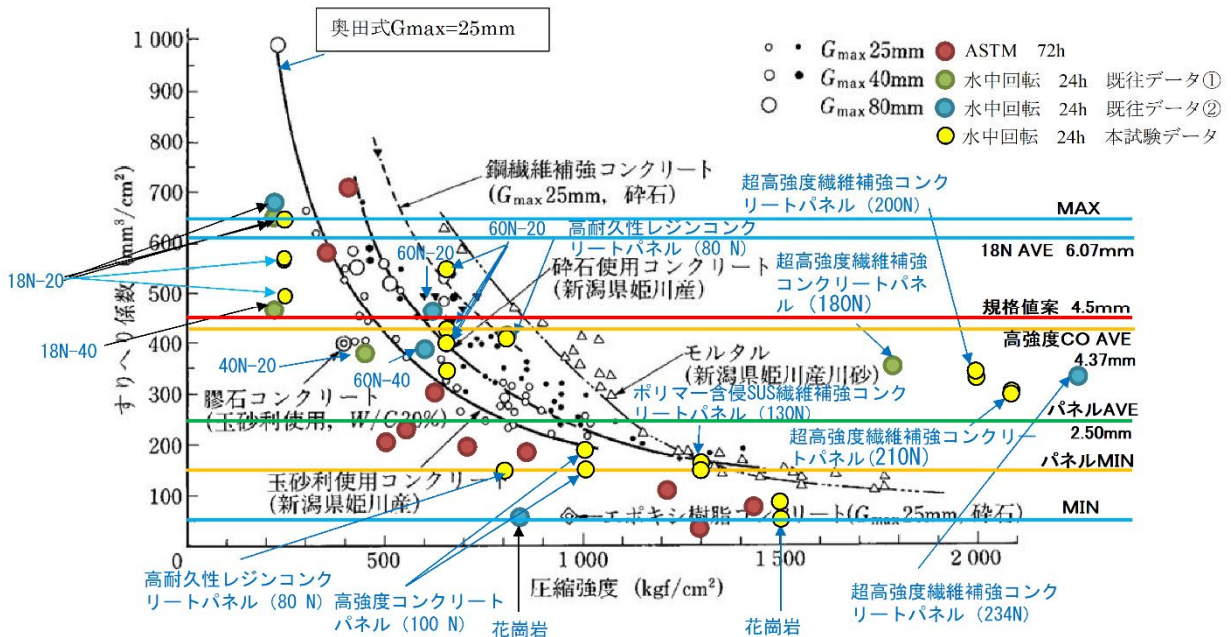
以上まとめると、式 (1) は次の仮定に基づく推測値である。

- ① エプロン系施設の年間摩耗速度 v_f は使用を想定している補修材料の回転式水中摩耗試験の結果 v_l から推測できる。
- ② 補修材料の現場での年間摩耗速度と促進摩耗試験から求めた摩耗速度の比（促進倍率）は、現場標準コンクリートの促進倍率と等しい。
- ③ 回転式水中摩耗試験の結果 v_l に促進倍率をかけることによりエプロン系施設の年間摩耗速度 v_f を求めることができる。

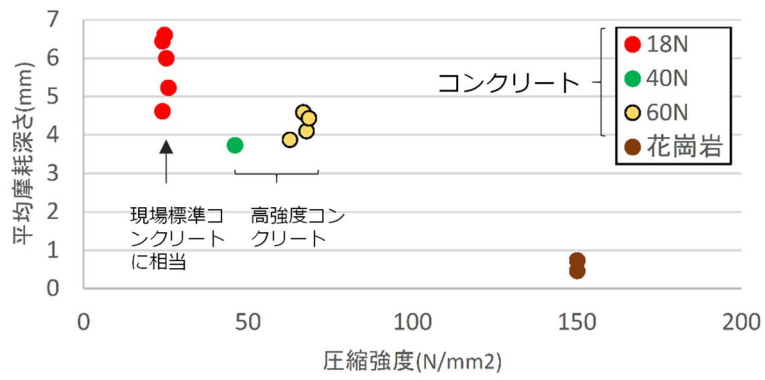
これらの仮定は、継続して仮説検証が必要である。課題を以下に示す。

- ① ②については、補修料により促進倍率が変化する可能性がある
- ② 現場標準コンクリートの現場における年間平均摩耗速度は現場によって異なる可能性がある。
- ③ 強度増加による耐摩耗性の向上については、 α 以外の評価方法も考えられる。

回転式水中摩耗試験と他の促進摩耗試験である奥田式、ASTM の試験結果を比較した結果を参図 1-10 に示す。また、コンクリート材料に関する回転式水中摩耗試験値 (24h) と圧縮強度の関係を参図 1-11 に示す。



参図 1-10 奥田式、ASTM、回転式水中摩耗試験法の試験値の比較



参図 1-11 回転式水中摩耗試験結果（コンクリート）と圧縮強度の関係

(1) 試算 1 (耐摩耗性の品質限界の材料を用いた場合)

品質規格の上限値である補修材料 ($v_f=4.5$ mm) を用いた製品の最小耐摩耗層厚の試算を行う。

1) 計算条件

- ・ 頭首工エプロンの条件：現場標準コンクリートを使用。流況は一般的。現場における年間平均摩耗速度の実測値はなし。
- ・ 使用材料：回転式水中摩耗試験 24 時間後の平均摩耗深さは 4.5 mm/24h (品質限界) の材料
- ・ 期待される耐用期間：50 年

2) 計算

式 (1) において、 $k=1.0$ とする。使用材料の回転式水中摩耗試験値は $v_f=4.5$ mm/24h、現場コンクリートの回転式水中摩耗試験による試験値はないので、参-13 ページに示した暫定値 $v_{fs}=5.0$ mm/24h を用いる。 α は、

$$\alpha = \frac{v_f}{v_{fs}} = 4.5 / 5.0 = 0.9$$

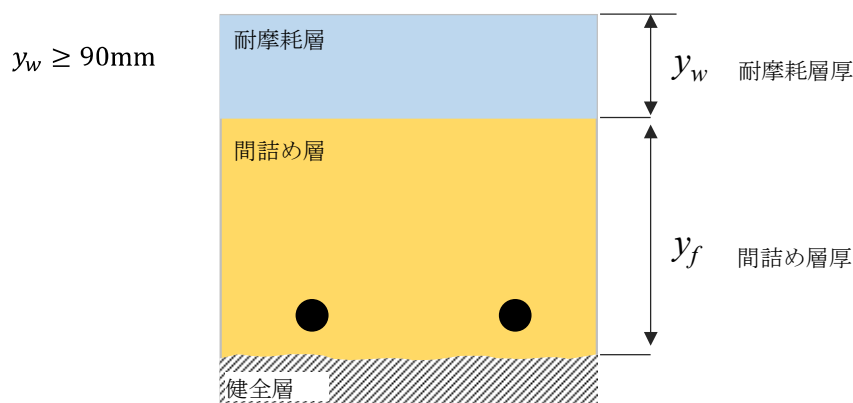
現場における年間平均摩耗速度の実測値がないため、参 16 ページに示す $v_{fs}=2.0$ mm/年とする。補修材料の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から

$$v_f = k \cdot \alpha \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.9 \times 2.0 = 1.80 \text{ mm/年}$$

耐用年数 50 年を想定した場合の最小耐摩耗層厚は、式 (2) から

$$y_w \geq v_f \cdot t_d = 1.8 \times 50 = 90 \text{ mm}$$

となる。すなわち、製品の耐摩耗層の厚さは 90 mm 以上が望ましい。



全て平均的な層厚で表示

参図 1-12 品質限界の層厚

3) 考察

スロベニア国での耐摩耗 PCM (ポリマーセメントモルタル) を用いた洪水吐きでの現場における年間平均摩耗速度は 0.29 mm/年であり、それに較べるとかなり大きな年間平均摩耗速度の推測値 (1.8 mm/年) となるため、推測値は安全側の設定と考えられる。

(2) 試算 2 (耐摩耗性の高い材料 ($v_f=2$ mm/24h) を用いた場合)

回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さが 2 mm (高品質カテゴリー) である材料を用いた場合の設計耐摩耗層厚の試算を行う。

1) 計算条件

- ・ 頭首工エプロンの条件：現場標準コンクリートを使用。一般的な流況。現場における年間平均摩耗速度の実測なし。
- ・ 使用材料：回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さが 2 mm/24h (高品質) の材料
- ・ 期待される耐用期間：50 年

2) 計算

式 (1) において、 $k=1.0$ とする。使用材料の回転式水中摩耗試験値は $v_f=2.0$ mm/年、現場コンクリートの回転式水中摩耗試験値はないので、参-13 ページに示した暫定値 $v_{fs}=5.0$ mm/24h を用いる。 α は、

$$\alpha = \frac{v_f}{v_{fs}} = 2.0 / 5.0 = 0.4$$

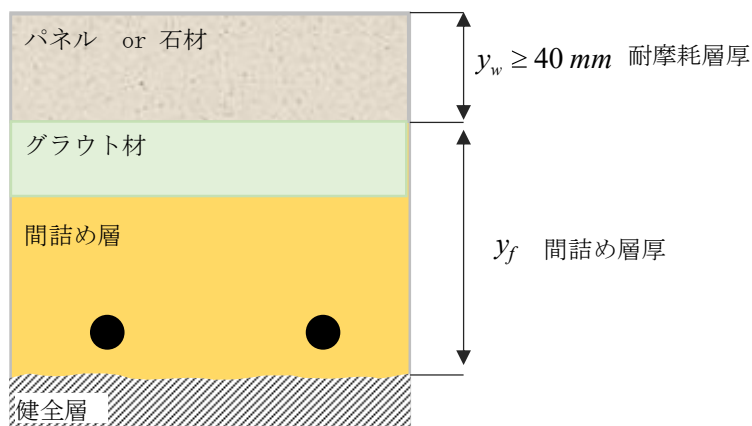
現場における年間平均摩耗速度の実測値がないため、参-16 ページに示した $v_{fs}=2.0$ mm/年とする。使用材料の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から

$$v_f = k \cdot \alpha \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.4 \times 2.0 = 0.8 \text{ mm/年}$$

耐用期間 50 年を想定した場合の最小耐摩耗層厚は、式 (2) から

$$y_w \geq v_f \cdot t_d = 0.8 \times 50 = 40 \text{ mm}$$

となる。すなわち、製品の耐摩耗層厚としては 40 mm 以上が望ましい。なお、パネル工法の場合は、参①1.2.3 要求性能に関する検討に示したように「アンカー等でパネルと下地を固定する取付部で破壊が生じないこと」も限界状態となる。しかし、取付部の構造形式はメーカー毎に異なることから、今回の本資料では照査方法は示さずに各メーカーで使用されている取付部の構造細目等を参①1.7 取付部の構造細目に示す。



参図 1-13 2 mm/24h (高品質カテゴリー) の層厚

(3) 試算 3 (最も耐摩耗性の高い材料 ($v_f=1.6 \text{ mm}/24\text{h}$) を用いた場合)

回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さが $1.6 \text{ mm}/24\text{h}$ (現状で最も高品質) である材料を用いた場合の最小耐摩耗層厚さの試算を行う。

1) 計算条件

- ・ 頭首工エプロンの条件：現場標準コンクリートを使用。一般的な流況。現場における年間平均摩耗速度の実測なし。
- ・ 使用材料：回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さが $1.6 \text{ mm}/24\text{h}$ (現状で最も高品質) の材料
- ・ 期待される耐用期間：50 年

2) 計算

式 (1) において、 $k=1.0$ とする。使用材料の回転式水中摩耗試験値は $v_f=1.6 \text{ mm}/24\text{h}$ 、 v_{fs} は参-13 ページに示した $v_{fs}=5.0 \text{ mm}/24\text{h}$ を用いる。 α は以下のとおり。

$$\alpha = \frac{v_f}{v_{fs}} = \frac{1.6}{5.0} = 0.32 \doteq 0.3$$

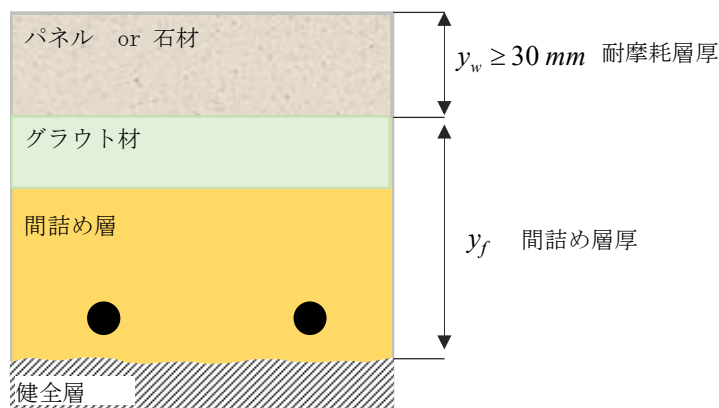
現場における年間平均摩耗速度の実測値がないため、参 16 ページに示した $v_{fs}=2.0 \text{ mm}/\text{年}$ とする。補修材料の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から

$$v_f = k \cdot \alpha \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.3 \times 2.0 = 0.6 \text{ mm}/\text{年}$$

耐用期間 50 年を想定した場合の最小耐摩耗層厚は、式 (2) から

$$y_w \geq v_f \cdot t_d = 0.6 \times 50 = 30 \text{ mm}$$

となる。すなわち、製品の耐摩耗層厚としては 30 mm 以上が望ましい。なお、パネル工法の場合は、前のページにも示したように「アンカー等でパネルと下地を固定する取付部で破壊が生じないこと」という限界状態に対する検討も同時に行うことが望ましい。



参図 1-14 $1.60 \text{ mm}/24\text{h}$ (現状で最も高品質) の層厚

(4) 試算 4 (単一断面修復 (高強度コンクリート打換え) の場合)

高強度コンクリートを使用した単一断面補修をする場合の最小耐摩耗層厚さの試算を行う。

1) 計算条件

- ・ 頭首工エプロンの条件：現場標準コンクリートを使用。一般的な流況。現場における年間平均摩耗速度の実測値は求まっており、年間平均摩耗速度 1.8 mm/年
- ・ 使用材料：高強度コンクリートを使用する。高強度コンクリートの回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さは 4.0 mm/24h であった。
- ・ 期待される耐用期間：50 年

2) 計算

式(1)において、 $k=1.0$ とする。高強度コンクリートの回転式水中摩耗試験値は $v_f=4.0$ mm/24h、現場コンクリートの回転式水中摩耗試験値はないので、参-13 ページに示した暫定値 $v_{fs}=5.0$ mm/24h を用いる。 α は、

$$\alpha = \frac{v_f}{v_{fs}} = 4.0 / 5.0 = 0.8$$

頭首工エプロンの現場における年間平均摩耗速度には実測値 $v_{fs}=1.8$ mm/年を用いる。補修材料の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から

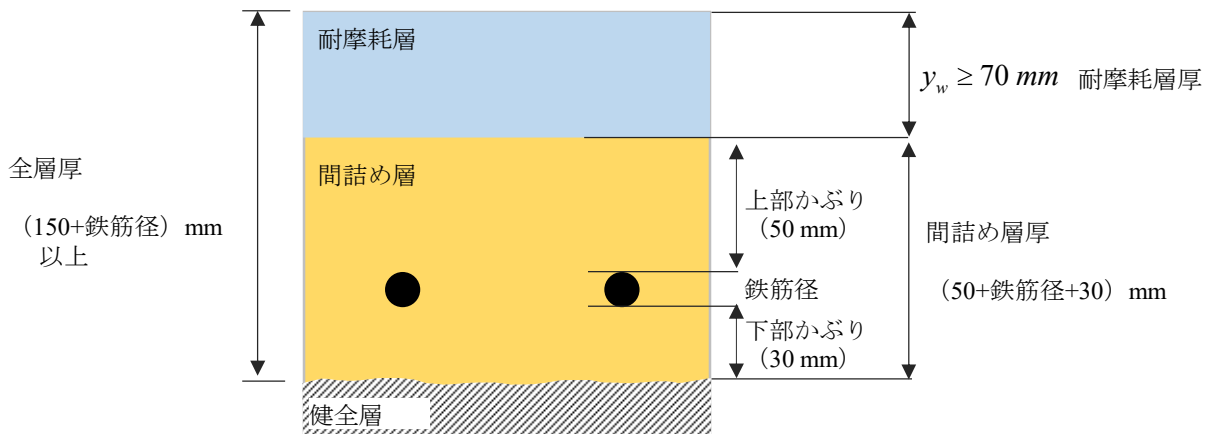
$$v_f = k \cdot \alpha \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.8 \times 1.8 = 1.4 \text{ mm/年}$$

耐用期間 50 年を想定した場合の最小耐摩耗層厚は、式 (2) から

$$y_w \geq v_f \cdot t_d = 1.4 \times 50 = 70 \text{ mm}$$

となる。すなわち、耐摩耗層の厚さは 70 mm 以上となる。

打換え工法では鉄筋補強が必要な場合がある。その際は、鉄筋保護のため下部のかぶり 30 mm、上部のかぶり 50 mm 程度の確保が必要となる。よって、耐摩耗層 70 mm+鉄筋かぶり (30+50=80mm) +鉄筋径=150 mm+鉄筋径以上の断面修復厚さが必要となる。実際の設計では、この計算値を基に、経済性、安全性、施工性等を比較し、打換え層厚を決定する。



参図 1-15 高強度コンクリート打換えの層厚

(5) 試算 5 (複合断面修復の場合)

「間詰め層」に関しても耐摩耗層と同様の耐摩耗性を期待する設計も将来的には想定される。設計条件としては、①期待される耐用期間内に「間詰め層」が流水にさらされる、②局所的な洗掘が発生する可能性、である。このような条件を想定し、最小耐摩耗層厚の試算を行う。試算では、エプロン全体の平均的な摩耗進行を年間平均摩耗速度から推定し、エプロン全体の厚さを決め、局所洗掘に関しては、年間最大摩耗速度を使用して、間詰め層の最小厚さを計算した。

1) 計算条件

- ・ 頭首工エプロンの条件：現場標準コンクリートを使用。一般的な流況。現場における年間平均摩耗速度及び年間最大摩耗速度の実測値は求まっており、以下の条件である。
エプロンコンクリートの現場における年間平均摩耗速度 2.0 mm/年
エプロンコンクリートの現場における年間最大摩耗速度 5.0 mm/年
- ・ 使用材料：以下の補修材料を使用する。
摩耗層：回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さ 2.0 mm/24h の補修材料
間詰め層：回転式水中摩耗試験による 24 時間後の平均摩耗深さ 4.0 mm/24h の補修材料
- ・ 期待される耐用期間：50 年

2) 計算

式(1)において、 $k=1.0$ とする。耐摩耗層の補修材料の回転式水中摩耗試験値は $v_f=2.0$ mm/24h、現場コンクリートの回転式水中摩耗試験の試験値はないので、参-13 ページに示した暫定値 $v_{fs}=5.0$ mm/24h を用いる。耐摩耗層の α_1 は以下のとおり。

$$\alpha_1 = \frac{v_f}{v_{fs}} = 2.0 / 5.0 = 0.4$$

頭首工エプロンの現場における年間平均摩耗速度 $v_{fs}=2.0$ mm から、補修材料の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から

$$v_f = k \cdot \alpha_1 \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.4 \times 2.0 = 0.8 \text{ mm/年}$$

期待される耐用期間 50 年を想定した場合の最小耐摩耗層厚は、式 (2) から

$$y_w = v_f \cdot t_d = 0.8 \times 50 = 40 \text{ mm}$$

間詰め材料の局所的な洗掘については、まずは耐摩耗層厚がゼロとなる期間を求める。

エプロンの現場における年間最大摩耗速度 $v_{fs}=5.0$ mm/年から耐摩耗層の現場において推定される年間平均摩耗速度は、式 (1) から求める。

$$v_f = k \cdot \alpha_1 \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.4 \times 5.0 = 2.0 \text{ mm/年}$$

耐摩耗層の厚さは最小値の 40 mm とする。40/2.0=20 年から、耐摩耗層に期待される耐用期間 (耐摩耗層の一部が消失する) は 20 年となる。

間詰め材料の α_2 を求める。式 (1) において、 $k=1.0$ とする。間詰め材料の回転式水中摩耗試験値は $v_f=4.0$ mm/24h、現場コンクリートの回転式水中摩耗試験による試験値はないので、参-13 ページに示した暫定値 $v_{fs}=5.0$ mm/24h を用いる。間詰め層の α_2 は以下のとおり。

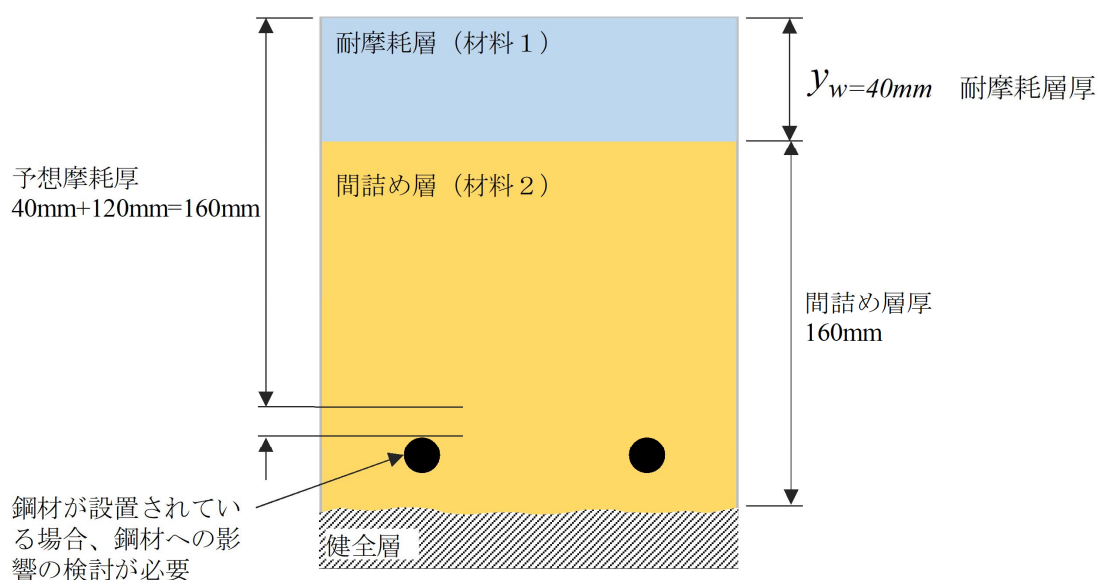
$$\alpha_2 = \frac{v_f}{v_{fs}} = \frac{4.0}{5.0} = 0.8$$

頭首工エプロンの現場における年間最大摩耗速度を $v_{fs}=5.0$ mm/年とすれば、間詰め材料の現場において推定される年間最大摩耗速度は、式 (1) から

$$v_f = k \cdot \alpha_2 \cdot v_{fs} = 1.0 \times 0.8 \times 5.0 = 4.0 \text{ mm/年}$$

期待される耐用期間 50 年に対し、耐摩耗層の最小厚さ 40 mm とすれば、耐摩耗層は 20 年で摩耗すると想定される。その場合、間詰め材料の厚さを 160 mm とすれば、残りの期待される耐用年数 30 年で間詰め材料が摩耗する厚さは、 $30 \times 4.0 = 120$ mm と予想され、期待される耐用年数内で最も摩耗が進行した場合でも $160 - 120 = 40$ mm の間詰め材料が残存する。ただし、間詰め層の中に鋼材が設置されている場合は、鋼材保護の観点から別途検討が必要である。

以上の計算は多くの仮定を含む。実務においては、補修が可能であれば、耐摩耗層に大きな摩耗が生じた時点でスポット的に断面修復する予防保全的な対策が望ましい場合もある。しかしながら、補修の場合は水替えが必要な場合もあり、応急対策的な補修が困難な場合は、上で述べたような考えに基づき対策を立案することも必要と考える。



参図 1-16 複合断面の層厚

1.4 弾性板

弾性板の年間平均摩耗速度 v_f は 0.1 mm/年と設定し、耐摩耗層の厚さを計算する。

【解説】

ゴム引布製起伏堰技術基準（案）によれば、河川内に設置されたゴム堰の年間平均摩耗速度は最大で 0.063 mm/年と報告されている。また、頭首工エプロンに設置された弾性板の年間摩耗速度の実測値も 0.1 mm/年以下である。

以上のデータに基づき、ゴム弾性板の年間平均摩耗速度については 0.1 mm/年を暫定的な推定値とする。期待される耐用期間を 50 年とすれば、最小耐摩耗層厚は 5 mm となる。頭首工エプロンを対象とした弾性板の製品の厚さは 30 mm、50 mm である。どちらも最小耐摩耗層厚の 5 mm が確保されている。ただし、頭首工エプロンに設置された弾性板の年間平均摩耗速度については実測データが少ないことも事実である。今回設定した値はあくまでも暫定値であり、実際の弾性板の摩耗データの収集を行い、弾性板の年間平均摩耗速度の平均値について適宜見直しを行うことが望ましい。

1.5 対策範囲の設定

頭首工エプロンの補修範囲については、摩耗状況、対策工法の特徴、河川協議を考慮し最適な範囲を設定するものとする。

【解説】

対策範囲の設定に当たっては、以下の点に留意する。

- ① 摩耗状況
- ② パネル工法に関しては、パネルと既設躯体との隙間、グラウト厚、パネルの厚さ等を考慮し施工方法、範囲を選定することが望ましい。
- ③ 補修対策の範囲は、河川協議で示した標高や断面を踏まえて設定する。

1.6 その他留意点

その他の留意点としては、①揚圧力、②施工性、③応急対策等がある。

【解説】

エプロン系施設の補修設計におけるその他の留意点としては、①揚圧力、②施工性、③応急対策が考えられる。

① 揚圧力

揚圧力によるパネル、補修材料の浮き上がり等による破損の防止。

② 施工性

河床標高等について河川協議上の制約や現場条件に応じた施工性を重視して極端に薄い材料を用いる等無理な施工を行わない配慮が必要。

③ 応急対策

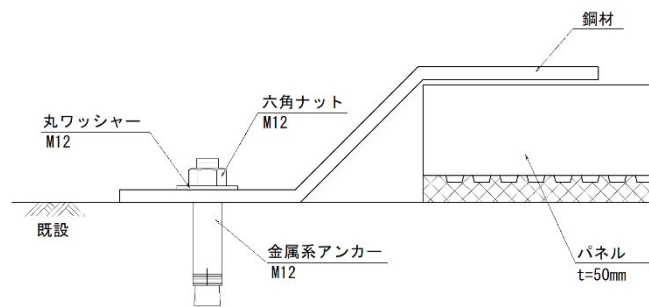
パネルの剥がれ等部分的な変状が発生した場合の応急対策に関する検討が必要。

1.6.1 揚圧力

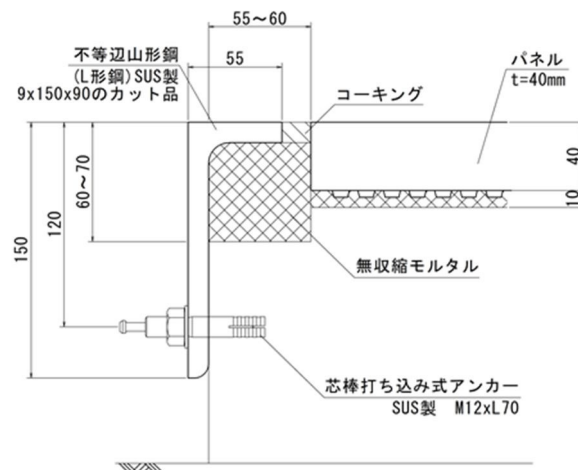
- ① パネルや補修材料をめくり上げようとする揚圧力が発生すると、パネルが剥がれて、破損する可能性がある。
- ② パネル工法では、パネルをアンカー等で既設躯体に固定する。パネルと既設躯体の隙間はグラウト等を充填し、両者を一体化することにより揚圧力の発生を防ぐ。さらに、必要に応じて揚圧力に対して抵抗する処置を講じる。

【解説】

既設エプロンとパネルとの間にはグラウトを充填し隙間をなくす処置を行うが、空隙が残っていると、空隙に水が浸入してパネルをめくり上げようとする揚圧力が作用する可能性がある。空隙をなくすためには、入念にグラウトを充填して既設エプロンとパネル材の一体性を確保することに留意する必要がある。さらに、揚圧力対策として、上流端に補強対策を施す方法がある（参図 1-16、参図 1-17）。



参図 1-16 上流端部補強対策の事例 1



参図 1-17 上流端部補強対策の事例 2

1.6.2 打ち継ぎ面

打ち継ぎ面の一体性を確保するためには、①既設コンクリートの脆弱部をはつり、取り除く、②パネル材は水準器等でレベル調整を行い、水平もしくは一定の勾配で設置する、③パネル間の目地の間隔を一定にすること等に留意する必要がある。

【解説】

① 既設コンクリートはつり

既設コンクリートの脆弱部は、機械や人力によりはつる。

② はつり面の洗浄・清掃

はつりのごみが残っているとグラウトに浮き、空洞及び亀裂が生じる原因になる。このため、はつり面は高圧洗浄機等により丁寧に掃除する必要がある。

③ パネル材のレベル調整

設置したパネルに傾き又は段差が生じると、流水の影響を受けて傾きや段差が大きくなり、パネルの一体性が低下したり、継目部の破損やパネルの裏側への流水の浸入を助長する恐れがある。このため、施工時においてパネル材は、ウォーターレベル(水系)水準器、レベル測定器等を用いて、水平もしくは一定の勾配で設置することに留意することが必要である。

④ パネル間の目地間隔

パネル材の設置は、隣接するパネルとの目地間隔を一定にして段差を生じさせないように留意することが必要である。

⑤ 突合せ目地の処理

パネルの目地を突合せ目地にして、エポキシ樹脂等で処理する方法がある。

1.6.3 施工性

- ① パネルを設置するに当たっては、河床標高や断面等河川協議上の制約や現場条件に応じた施工性に留意して材料及び工法選択を行うものとする。
- ② また、パネルのアンカー固定については、既設コンクリートの状態を考慮して施工する必要がある。

【解説】

既設エプロン部の補修においては、河床標高や断面等河川協議上の規定を遵守する必要がある。また、現場条件に応じて材料の運搬や施工性を考慮する必要がある。一方で、施工性を重視してパネル材の厚さを極端に薄くすると、洪水及び転石等により耐摩耗性及び耐衝撃性に支障を来す恐れがあることから、適切な材料での施工に留意する必要がある。

パネルの固定は、アンカー等を用いて行う場合が多いが、アンカー固定については、既設コンクリートの状態を十分考慮して施工する必要がある。

さらに、パネルと既設エプロン間のグラウト充填は、空隙が生じないように施工する必要がある。

1.6.4 応急対策

近年の集中豪雨による大規模洪水等の増加に伴い、河床砂礫等が頭首工エプロンの補修部分に衝突し、頭首工エプロンが破損する可能性もある。損傷のパターンとしては、①パネルが流失する、②パネルが破損し局所的な洗掘が発生する、等が想定される。このようなパネルの破損が発生すると、破損した部分を起点として損傷が全体に拡大する恐れがある。よって、損傷が全体に波及する前に、パネルの補修、交換などの応急対策を講じ、大規模な損傷の発生を未然に防ぐことが望ましい。

【解説】

① パネルの流失

パネルが流失した場合は、流失の原因を調査し、パネルの補修、交換等の応急対策を講じることが重要である。流失部分の復旧については、隣接パネルの流失等二次的な損傷も考えられることから早めの対応が望ましい。

② 局所的な洗掘

局所的な洗掘等破損が確認された場合は、部分的な復旧方法等を検討して隣接部に悪影響が出ないように早めに復旧することが望ましい。

具体的には、一部破損したパネルを無理のない形状で剥がし、その剥がした形状に合わせて、パネルをアンカーで固定する方法がある。

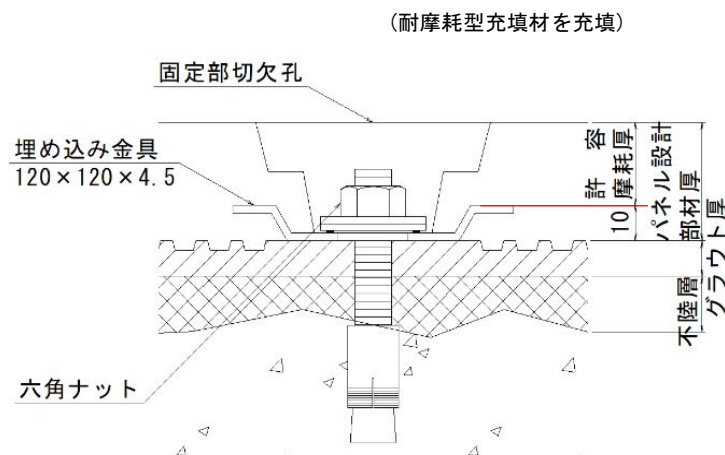
1.7 取付部の構造細目

- ① パネル工法では、パネルを既設エプロンに固定し一体化する必要がある。
- ② パネルを既設エプロンに取り付けるためには、アンカー、金具等によりパネルを既設エプロンに固定する方法が一般的であり、アンカー等でパネルを固定する部分を取付部と呼ぶ。
- ③ パネルと既存エプロンの間に生じる隙間は、グラウト等を用いて充填し一体化する。
- ④ 取付部が損傷する限界状態としては、次の2つの状態を想定する。
 - 1) アンカー等の固定金具の座金等が露出する。
 - 2) パネル内に設置した鉄筋が露出する。
- ⑤ パネルと既設エプロンの一体性を確保するためには、取付部が破壊しないことが重要である。取付部の破壊を防ぐためには、(1) 取付部の耐摩耗性を向上させる、(2) 取付部が損傷した場合は早め早めの補修を行い、限界状態に至らないようにする、等の対策が考えられる。

【解説】

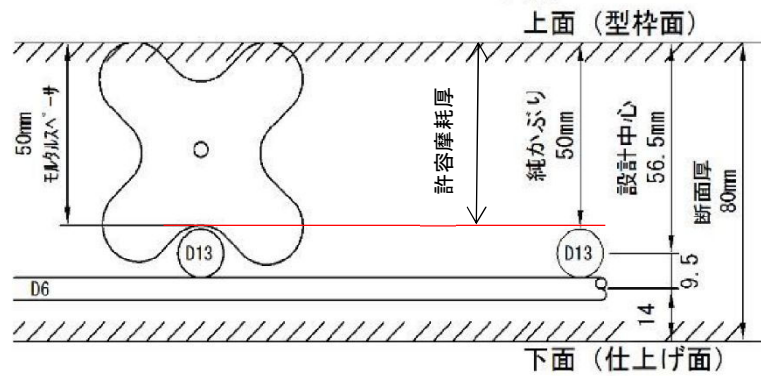
①～③については、**参図 1-18** に取付部の一例を示す。パネルにはアンカー取付孔が設置されている。取付孔にはパネルを固定するための連結ボルトの受け口となる金具が埋め込まれていることが多い。既設エプロンにアンカーボルトを固定した後、パネルを取付け、六角ナット等を用いてパネルの高さを調整した後に固定する。既設エプロンとパネルの隙間は裏込めグラウト等で隙間がないように間詰める。取付孔については、洗掘防止のため、耐摩耗性を考慮した充填材を充填することが多い。

④の限界状態、「1) アンカー等の固定金具の座金等が露出する」については、**参図 1-18** に示すように取付部の埋め込み金具が露出する状態を取付部の破壊の限界状態とした。この局所的な破壊に対する破壊の指標として、パネル表面から金具位置までの厚さを取付部の許容摩耗厚と呼ぶ。



参図 1-18 パネル上面から埋め込み金具までを許容摩耗厚とした事例

④の限界状態「2」パネル内に設置した鉄筋が露出する」については、参図 1-19 に示すようにパネル内に設置された鉄筋が露出する状態を取付部の破壊の限界状態としている。この場合は、パネル表面から鉄筋表面までのかぶり厚が取付部の許容摩耗厚となる。



参図 1-19 パネル上面から鉄筋表面までを許容摩耗厚とした事例

⑤について。今回の参考①では、取付部の破壊を照査する方法について示すことができなかった。今後、取付部の破壊状態についてモニタリング等により破壊メカニズムの解明が進むことにより、照査方法が確立されることを期待する。現段階で想定される照査方法及び対策を以下に示す。

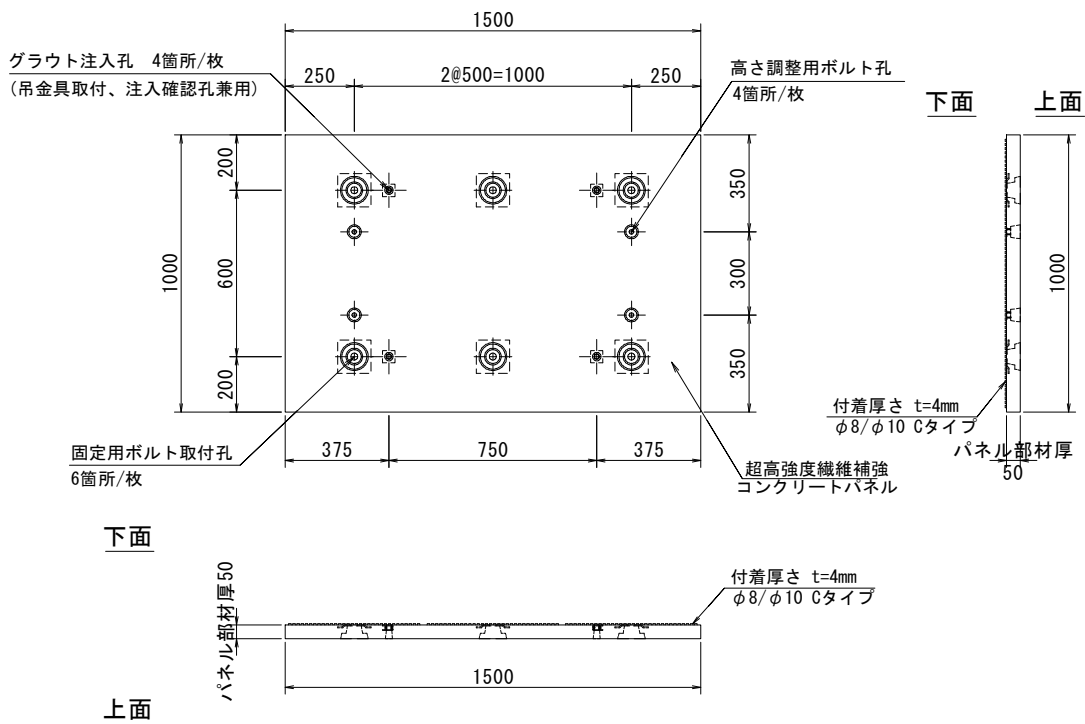
- 1) 取付部の耐摩耗性を向上させる。取付部に耐摩耗性の高い材料（ステンレス等）を用いて限界状態に至らないようにする。
- 2) 取付部のモニタリングを行い、取付部が損傷した場合は早め早めの補修を行い、限界状態に至らないようにする。

アンカー取付部の仕様および許容摩耗厚は、メーカーによって異なる。以下、参考としていくつかのメーカーの取付部の仕様を示す。

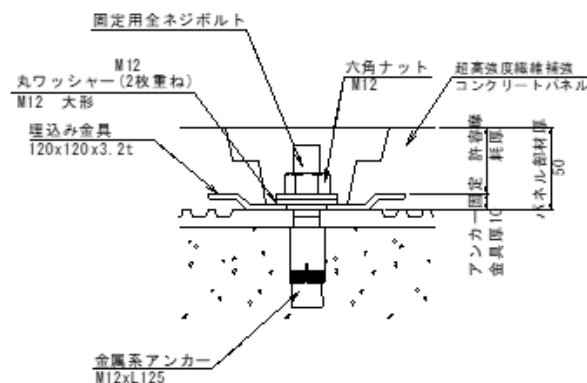
1.7.1 V社 超高強度繊維補強コンクリートパネルの取付部

パネルは既存エプロンに、埋込み金具、アンカーボルト (M12) 及びナットを用いて固定する (参図 1-20、21)。パネル部材厚からアンカー固定金具 (埋込み金具) の厚さを控除した厚さを許容摩耗厚としている。これは、パネル表面からアンカー固定金具の上面までの厚さに相当する。

$$\text{許容摩耗厚} = \text{パネル部材厚} - \text{アンカー固定金具 (埋込み金具) 厚 (10 mm)}$$



参図 1-20 超高強度繊維補強コンクリートパネルの標準図

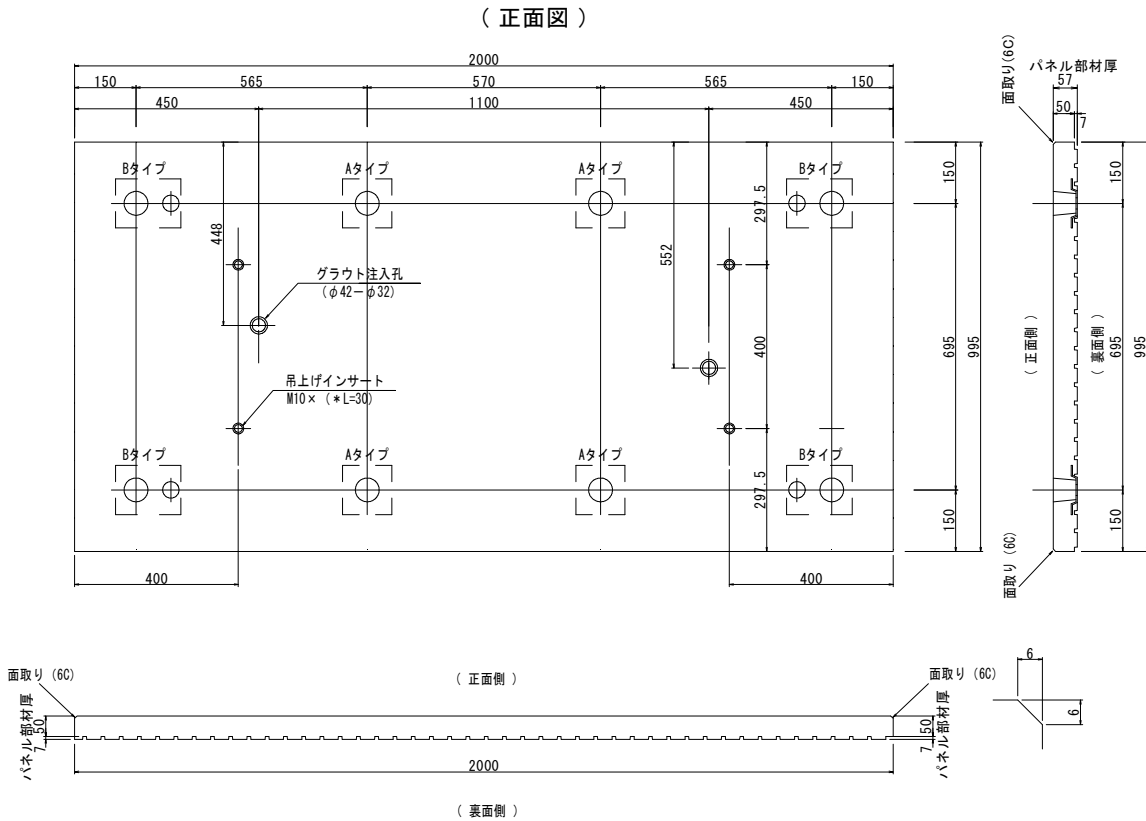


参図 1-21 アンカー固定部詳細図

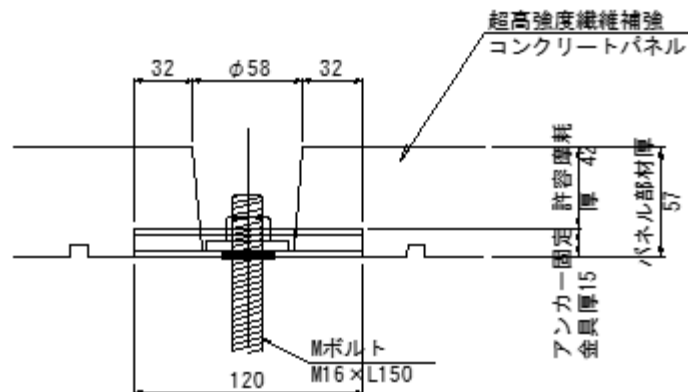
1.7.2 K社 超高強度繊維補強コンクリートパネルの取付部

パネルは既存エプロンに、埋込み金具、アンカーボルト (M16) 及びナットを用いて固定する (参図 1-22、23)。パネル部材厚からアンカー固定金具 (埋込み金具) の部材厚を控除した厚さを許容摩耗厚としている。これは、パネル表面からアンカー固定金具の上面までの厚さに相当する。

$$\text{許容摩耗厚} = \text{パネル部材厚} - \text{アンカー固定金具 (埋込み金具) 厚} \quad (42 \text{ mm} = 57 - 15)$$



参図 1-22 超高強度繊維補強コンクリートパネル標準図

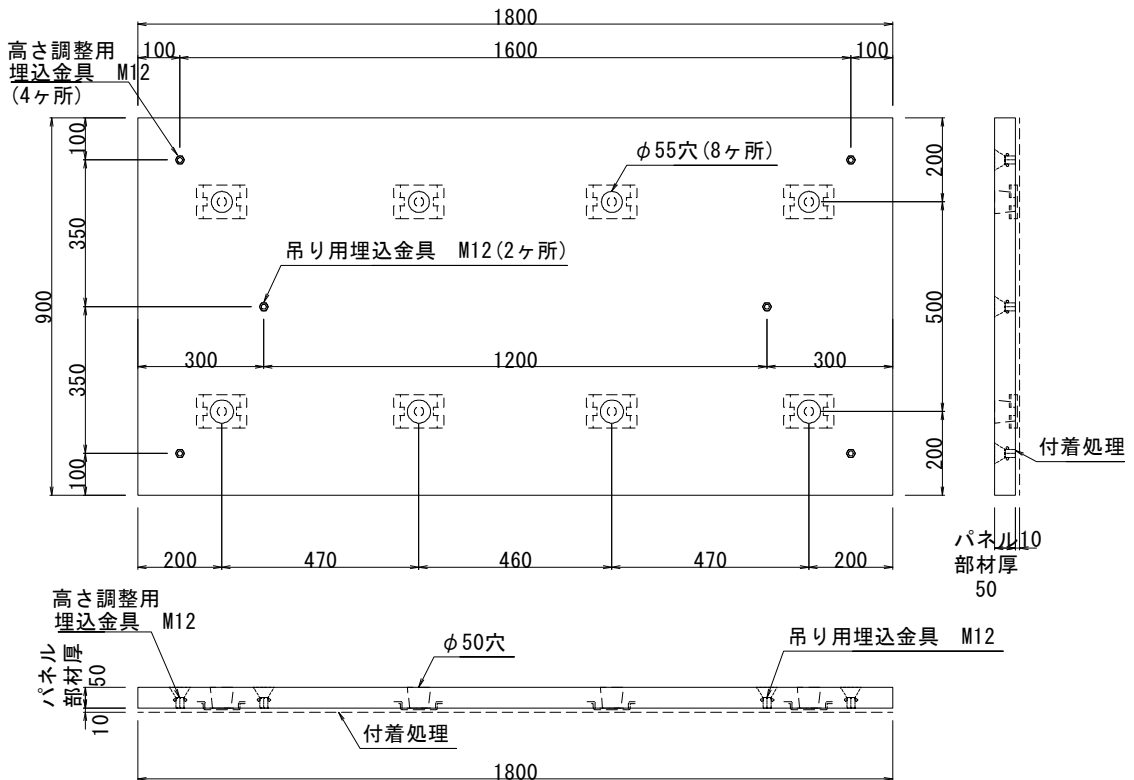


参図 1-23 アンカー固定部標準図

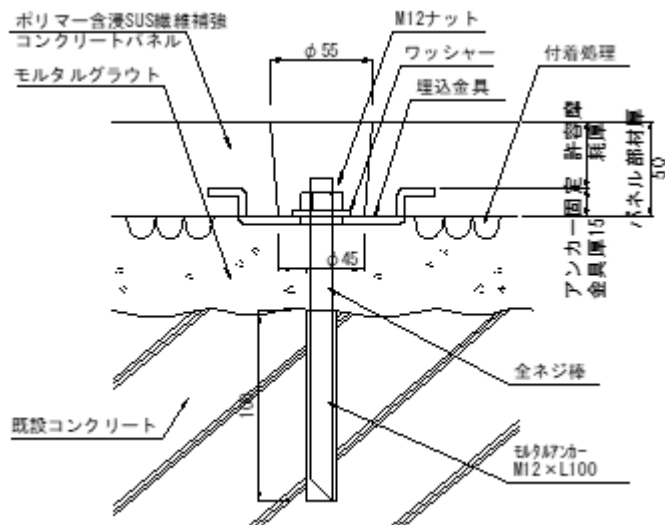
1.7.3 M社 ポリマー含浸 SUS 繊維補強コンクリートパネルの取付部

パネルは既存エプロンに、埋込み金具、アンカーボルト (M12) 及びナットを用いて固定する (参図 1-24、25)。パネル部材厚からアンカー固定金具 (埋込み金具) の部材厚を控除した厚さを許容摩耗厚としている。これは、パネル表面からアンカー固定金具の上面までの厚さに相当する。

$$\text{許容摩耗厚} = \text{パネル部材厚} - \text{アンカー固定金具 (埋込み金具) 厚} \quad (35 \text{ mm} = 50 - 15)$$



参図 1-24 ポリマー含浸 SUS 繊維補強コンクリートパネル標準図

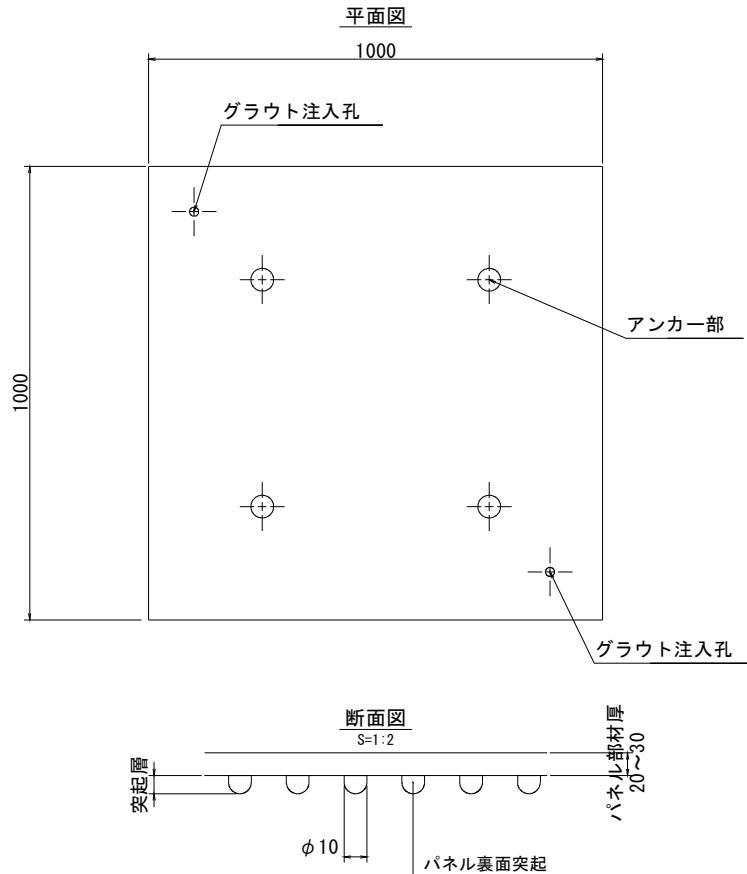


参図 1-25 アンカー固定部詳細図

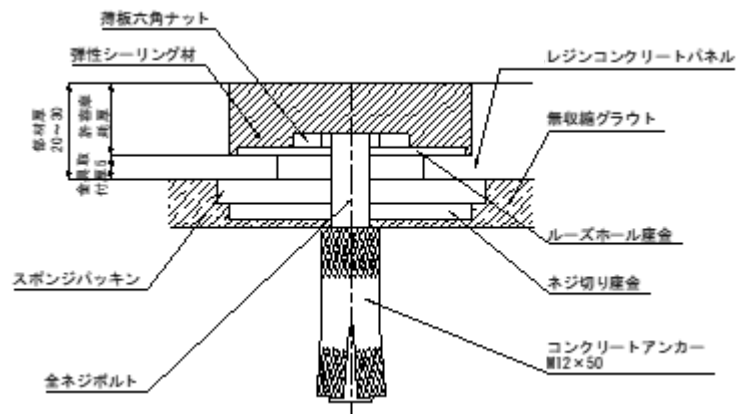
1.7.4 V社 レジンコンクリートパネルの取付部

パネルは既存エプロンに、座金、アンカーボルト (M12) 及び薄版六角ナットを用いて固定する (参図 1-26、27)。パネル部材厚が 20~30 mm であるため、パネル部材厚からアンカー固定金具 (ルーズホール座金) 下の残りパネル厚 5 mm を控除した厚さを許容摩耗厚とする。

$$\text{許容摩耗厚} = \text{パネル部材厚} - \text{アンカー固定金具下残りパネル厚 (20~30 mm)}$$



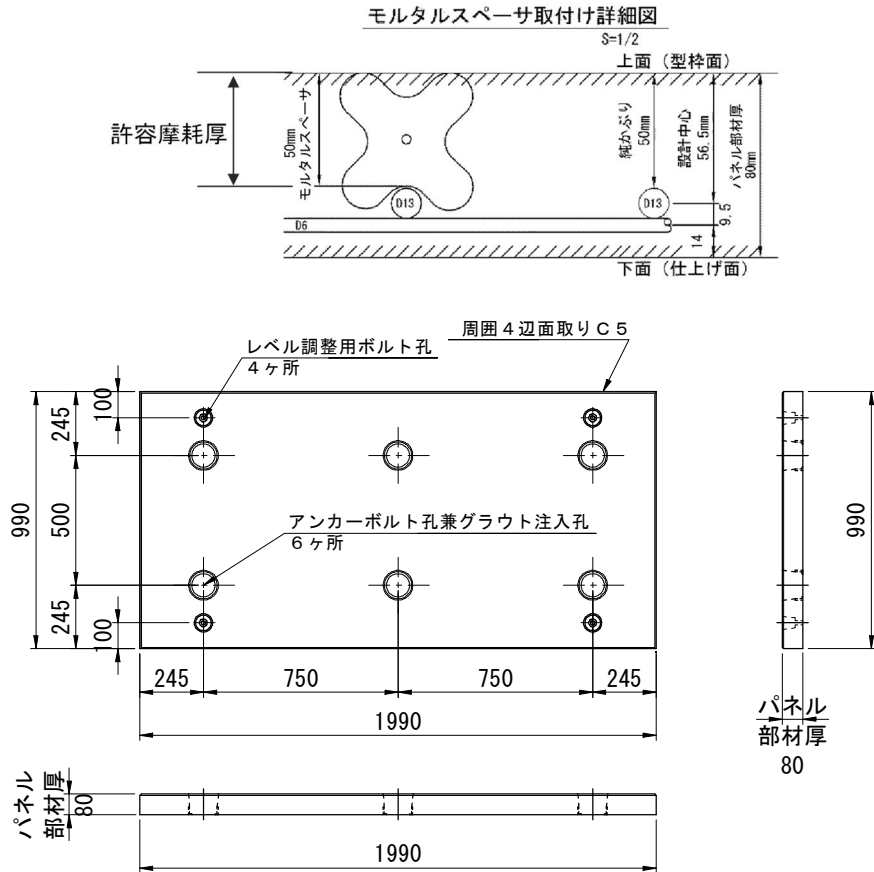
参図 1-26 レジンコンクリートパネル標準図



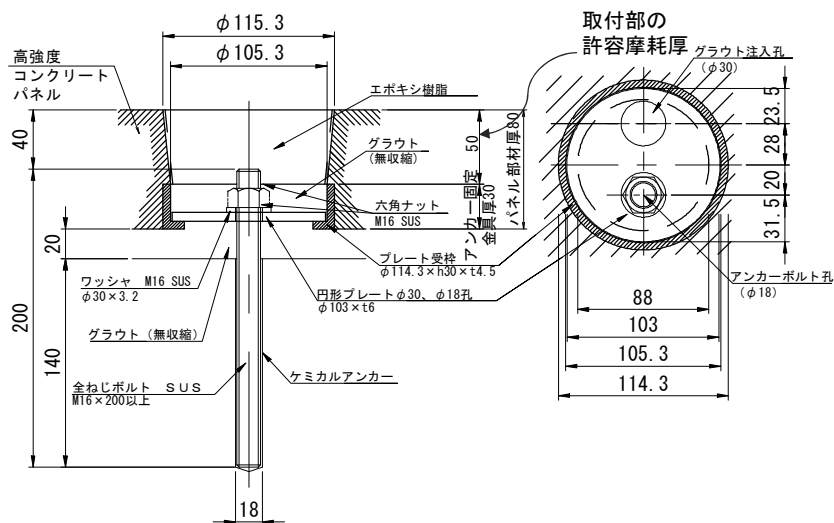
参図 1-27 アンカー固定部詳細図

1.7.5 M社 高強度コンクリートパネルの取付部

参図 1-28 に示すように製品表面から鉄筋の天端までの 50 mm を内部鉄筋の露出に関する許容摩耗厚とする。また、パネルの取付は、埋込み金具、アンカーボルト及びナットで固定する。取付部での許容摩耗厚は参図 1-29 に示すようにパネル表面からアンカー固定金具までの距離 50 mm となる。



参図 1-28 高強度コンクリートパネル標準図



参図 1-29 アンカー固定部詳細図

1.7.6 S社 弾性板の標準寸法

弾性板を固定する方法は、埋込み鋼板、アンカーボルト及びナットで固定する方法。

許容摩耗深さには、①最小許容摩耗厚さ、②ボルトの頭までの許容摩耗厚さ、③通常部の許容摩耗厚さ。

部材厚 30 mm、50 mmの場合(参図 1-31, 1-32 参照)

最小許容摩耗厚 5 mm・・・①

部材厚 30 mmの場合(参図 1-31 参照)

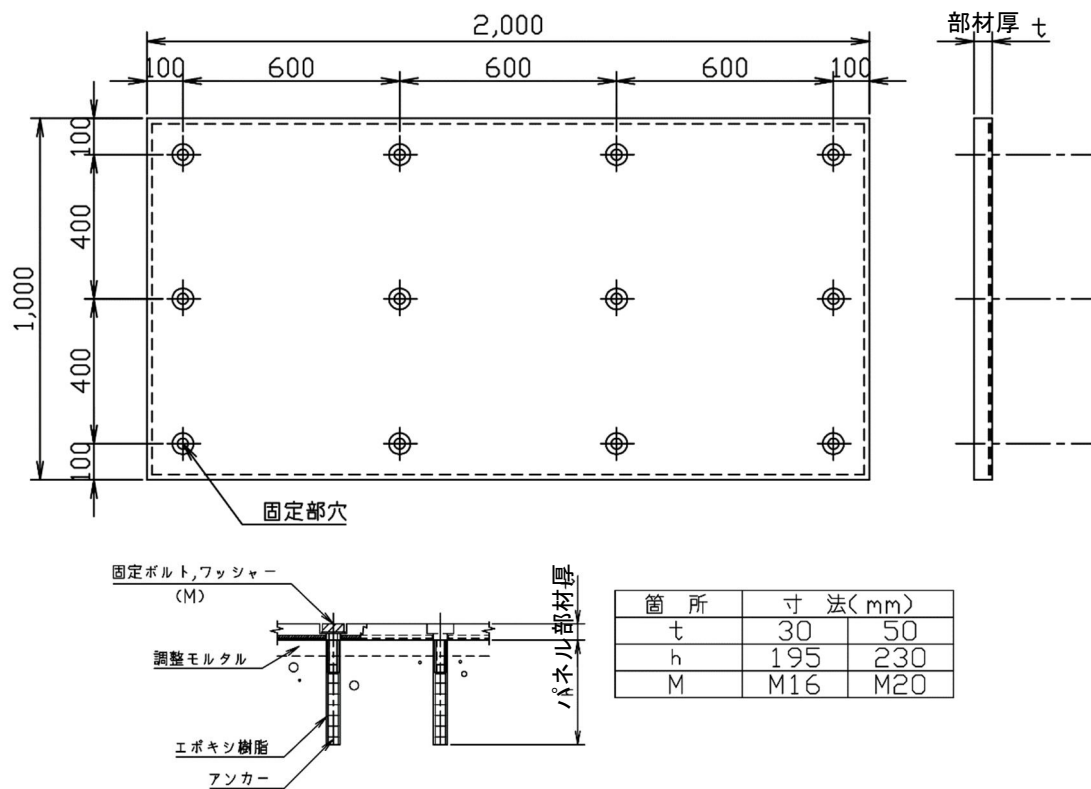
ボルト部 許容摩耗厚 7 mm (パネル表面から差し込み穴を除くボルト頭まで)・・・②

通常部 許容摩耗厚 21 mm (パネル表面から埋設鋼板まで)・・・③

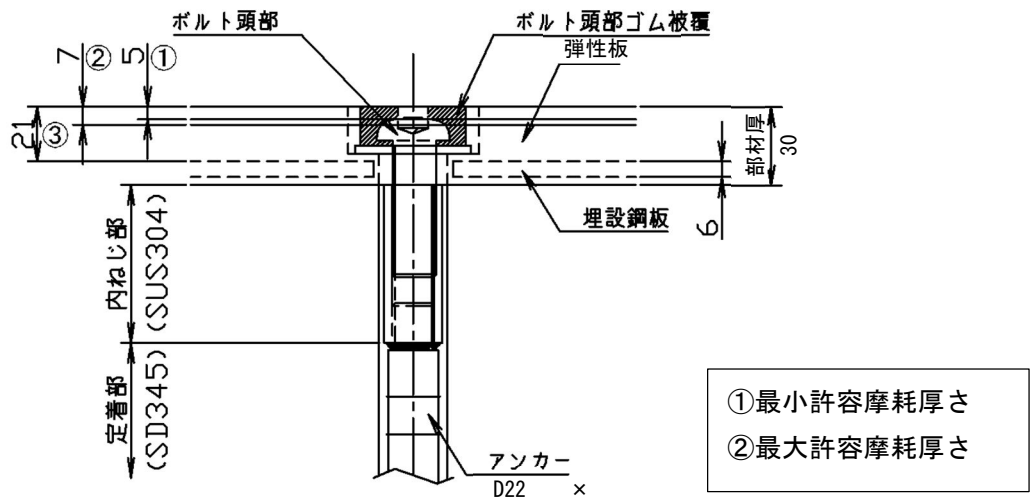
部材厚 50 mmの場合(参図 1-32 参照)

ボルト部 許容摩耗厚 24 mm (パネル表面から差し込み穴を除くボルト頭まで)・・・②

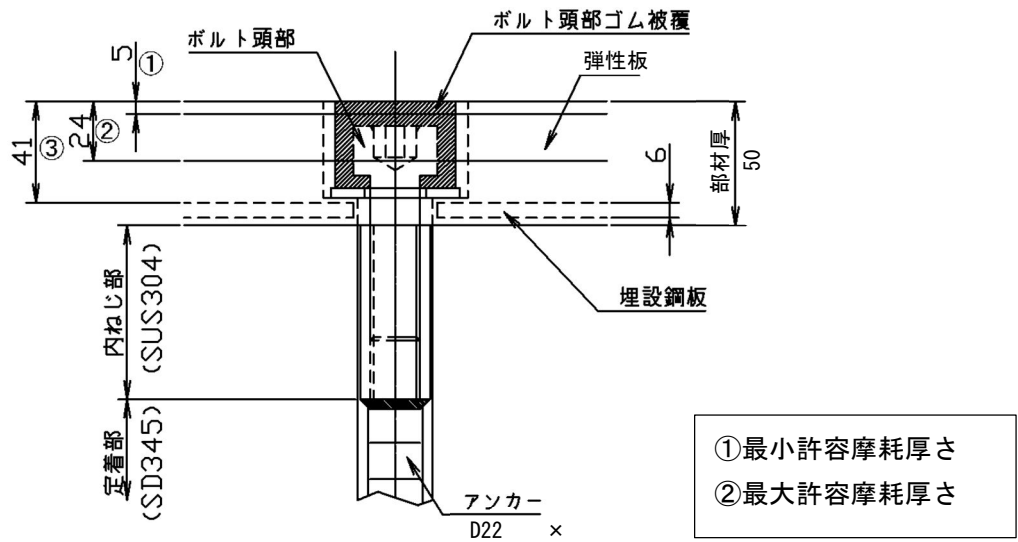
通常部 許容摩耗厚 41 mm (パネル表面から埋設鋼板まで)・・・③



参図 1-30 弾性板標準図



参図 1-31 部材厚 30 mmのアンカー固定部詳細図



参図 1-32 部材厚 50 mmのアンカー固定部詳細図

参考② パネル工法の諸元等

2.1 超高強度繊維補強コンクリートパネル

(1) 工法の概要及び特徴

超高強度繊維補強コンクリートを用いた高耐久性薄肉埋設パネルであり、パネルをコンクリート構造物に被覆することで、構造物の長寿命化、維持管理費の縮減を図ることができる。特徴は、①耐摩耗性・耐衝撃性に優れる、②水理特性（平滑性）に優れる（粗度係数：0.0087）、③パネル裏面突起は凸凹に形成されており、裏込め材との付着性に優れる。④塩害・中性化・凍害等に対する耐久性に優れる、⑤埋設型枠として使用できる等である。

(2) 使用材料

使用材料は、超高強度繊維補強コンクリートパネル、コンクリートアンカー、無収縮グラウト等である。

(3) 試験による特性値の一覧

試験を行い、得られた特性値は、参表 2-1 のとおりである。

参表 2 - 1 特性値一覧表

項目	特性値
粗度係数	0.0087（平滑板）
圧縮強度	210 N/mm ²
曲げ強度	43 N/mm ²
引張強度	10.8 N/mm ²
静弾性係数	54 kN/mm ²

(4) 寸法(例)

板厚（一般仕様）：20 mm 以上

板厚（修景仕様）：25 mm 以上（模様含む）

板厚（特殊）：30～50 mm（頭首工エプロン部等）

2.2 ポリマー含浸 SUS 繊維補強コンクリートパネル

(1) 工法の概要及び特徴

ステンレス繊維補強コンクリートに樹脂を含浸した高耐久性薄肉埋設パネルであり、パネルをコンクリート構造物に適用することで、構造物の長寿命化、維持管理費の削減を図ることができる。特徴は、①耐摩耗性・耐衝撃性に優れる、②水理特性（平滑性）に優れる（粗度係数：0.01）、③パネル裏面は骨材を埋め込みに現場打コンクリートと一体化させる構造で、裏込め材との付着性に優れる。④塩害・中性化・凍害等に対する耐久性に優れる、⑤埋設型枠として使用できる等である。

(2) 使用材料

使用材料は、樹脂含浸コンクリートパネル、コンクリートアンカー、無収縮グラウト等である。

(3) 試験による特性値の一覧

試験を行い、得られた特性値は、参表 2-2 のとおりである。

参表 2 - 2 特性値一覧表

項目	特性値(設計用値)	備考
粗度係数	0.01 (平滑板)	
圧縮強度	130 N/mm ²	
曲げ強度	22.5 N/mm ²	
引張強度	8 N/mm ²	
静弾性係数	35 kN/mm ²	実測値 40 kN/mm ²
線膨張係数	$1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	

(4) 寸法(例)

- 板厚（一般仕様） : 19 mm 以上
板厚（特殊） : 30～50 mm（頭首工エプロン部等）
製造可能範囲(パネル) : 2000 mm(Max)×1000 mm(Max)、板厚 50(60) mm
厚さは 90 mm 程度まで可能
()は付着面厚を含めた板厚

2.3 高強度コンクリートパネル

(1) 工法の概要特徴

本パネルは、高強度コンクリートを使用したパネルであり、耐衝撃性、耐摩耗性に優れ、また経済性も優れている。アンカーボルトで下地コンクリートに固定され、下地コンクリートとの空隙部にはグラウトを充填し密着させる。

(2) 使用材料

使用材料は、高強度コンクリートパネル、コンクリートアンカー、無収縮グラウト等である。

(3) パネルと普通コンクリートの試験値による性能比較

普通コンクリートと高強度コンクリートパネルの性能を比較した表は、**参表 2-3** のとおりである。

参表 2-3 普通コンクリートと高強度コンクリートパネルの性能比較表

性能	単位	試験方法	普通コンクリート ³⁾	高強度コンクリート ⁴⁾
圧縮強度	N/mm ²	JIS A 1108	35.4	100.9
引張強度	N/mm ²	JIS A 1113	2.72	7.01
弾性係数	kN/mm ²	JIS A 1149	24.5	38.7
耐衝撃性	cm ³	鋼球落下試験 ¹⁾	27.8	15.8
耐摩耗性	cm ³ /cm ²	ASTM C-418 ²⁾	0.139	0.098

1) 供試体(150 mm×150 mm×150 mm)に1 mの高さから直径約70 mm、質量約1.5 kgの鋼球を300回落下させたときの摩耗量。小柳等(小柳他：コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、10-2、1988、pp463-468)の方法に準拠。

2) ASTM C-418に準拠。ただし、砂の噴射時間を5分間、ノズル先端と摩耗面との距離を65 mmとして試験を行った。表中の値は、摩耗した体積を摩耗面で除すことによって得た物性値(すり減り係数と称する)である。

3) 水セメント比：50%

4) 水セメント比：30%

(4) 寸法(例)

板 厚 : 80 mm

標準寸法 : 1990×990 mm

2.4 レジンコンクリートパネル

(1) 工法の概要特徴

レジンコンクリートパネル工法は、様々な優れた特性を活かした既存構造物の補修工法であり、新設構造物の埋設型枠として適用することにより、構造物の耐久性が向上し、ライフサイクルコストの低減を図ることができる。特徴は、①耐摩耗性に優れる、②水理特性（平滑性）に優れる（粗度係数：0.0084）、③パネル裏面突起は凸凹に形成されており、裏込め材との付着性に優れる、④塩害・中性化・凍害・腐食性等に対する耐久性に優れる、⑤埋設型枠として使用できる等である。

(2) 使用材料

使用材料は、レジンコンクリートパネル、コンクリートアンカー、無収縮グラウト等である。

(3) 物性値一覧

試験を行い、得られた特性値は、**参表 2-4** のとおりである。

参表 2-4 特性値一覧表

項目	特性値
圧縮強度	80 N/mm ² 以上
曲げ強度	20 MPa 以上
静弾性係数	15 GPa 以上
耐摩耗性	コンクリートの約 9.4 倍
凍結融解抵抗性	105%

(4) 寸法(例)

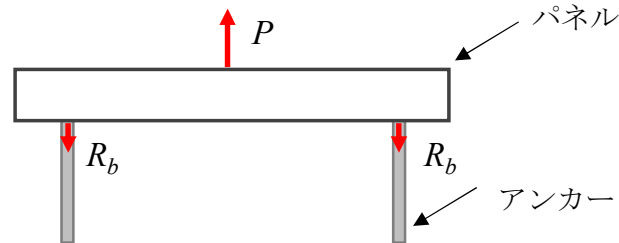
板 厚（突起含む）：10(18) mm～30(38) mm

製造可能範囲(パネル)：2000 mm(Max)×1000 mm(Max)、板厚 30(38) mm

2.5 パネルに作用する引抜荷重

パネル工法は頭首工の躯体コンクリートに付着した状態で、はじめてその性能を発揮することができる。よってパネル工法には、補修の効果が期待される耐用期間中、与えられた環境条件下で躯体コンクリートに付着し続けることが求められる。

パネル工法の付着性については、**参図 2-1** に示すように一枚のパネルに引抜荷重 P が作用しているとき、パネルを固定するアンカーボルト 1 本当たりの引抜力 R_b がアンカーボルトの許容引抜荷重より小さくなることを照査する。



参図 2-1 パネルのアンカー引抜強度の計算概念図

引抜荷重 P としては、短期荷重としては施工中に発生するグラウト圧が見込まれる。また、長期荷重としては、揚圧力、流体からの作用力等が想定される。長期荷重に関しては、その種類及び大きさについては、現状では十分明らかにされていない。よって、特に洪水時の流況が激しく、摩耗作用が激しい頭首工等では個別に長期荷重を考慮した検討を行うこととする。一方、短期荷重としては、グラウト圧を考慮するものとする。グラウト圧による引抜荷重 P については、次式を用いて算定するものとする。

$$P = w_g \cdot H_g \cdot B \cdot L \quad (3.5)$$

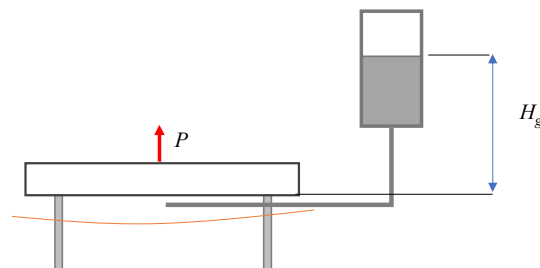
ここで、

w_g : グラウトの単位体積重量 (kN/m³)

H_g : ポッパーのグラウト面からパネル底までの距離 (m)

B : パネルの板幅 (m)

L : パネルの板長 (m)



参図 2-2 パネルに作用するグラウト圧による引抜荷重の概念図

参考③ エプロン系施設の補修に関する工法選定フロー

はじめに ー工法選定フロー作成に関する考え方ー

全国には1,970カ所の頭首工がある。そのうち859カ所(44%)が耐用年数(50年)を超過(2022年3月時点)している。国営の頭首工は381カ所あり、そのうち101カ所(27%)が耐用年数を超過(2020年時点)している。老朽化が進む頭首工を適切に保全管理していくためには、個々の頭首工の条件に合った補修を行う必要があり、そのためには劣化状況に応じた最適な対策工法を選定方法の提示が求められているところである。そこで、参考③では工法選定フローのひな形を作成した。

頭首工の主な変状は、摩耗・骨材露出(断面欠損)、ひび割れである。劣化要因としては、経年劣化、凍害、転石、ASR、中性化、塩害がある。参考③では、頭首工の変状と劣化要因に着目し、摩耗(流水、流砂、転石等)、ASR、凍害、中性化、塩害等の劣化要因に着目した工法選定フローとひび割れの変状に着目したフローを作成した。補強工法の選定フローについては、堰柱と床版のフローを作成した。

参考③の作成に当たっては主に次の文献を参考とした。

- 2022年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】土木学会
- 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成27年11月 農村振興局整備部設計課
- 農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」 令和7年6月 農村振興局整備部
- コンクリートの劣化と補修がわかる本(Update) 和泉意登志・竹田宣典 コンクリート新聞社
- 材料・工法の選定に関する参考資料(案) 平成28年12月5日 一般社団法人建設コンサルタンツ協会 九州支部 道路技術委員会
- コンクリート構造物の維持管理-塩害・中性化・ASR補修の考え方 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

摩耗劣化については、頭首工に特化したフローを作成した。ASRについては、個別施設毎の対策立案が必要と考え、明確な工法選定フローは示さなかった。フローの作成は今後の課題としたい。凍害、中性化、塩害に関しては頭首工にとらわれることなく一般施設を対象とした工法選定フローを作成した。頭首工に適用する場合は、個別の頭首工の環境条件、構造等を十分考慮し、適用していただきたい。

補強工法の選定フローは、設計要領 第二集 橋梁保全編 平成29年7月 東・中・西日本高速道路(株)、橋脚の耐震補強工事事例 2006年6月発行 新日本技研(株)等より情報収集を行い、国営頭首工における耐震補強事例を考慮して作成した。

参考③に示した工法選定フローについては、補修技術の進展に応じて適宜見直しも必要と考える。頭首工の劣化状況は築造年代や流況・気象等の現場条件によって異なること、現場では複数の要因が関係する変状もあることから、参考資料に示す工法選定フローも唯一の正解というものではない。このため、本フローは現場状況に適した補修工法の検討を行う際の参考として活用いただきたい。

3.1 劣化要因に着目した工法選定フロー

工法選定フローは、コンクリート構造物の補修に関する文献、国営頭首工における工法選定事例を参考に作成した。作成した選定フローは以下の通りである。

(1) 補修工法の選定フロー

1) 劣化要因別のフロー

- ① 摩耗劣化に対する工法選定フロー
- ② A S Rに対する工法選定フロー
- ③ 凍害に対する工法選定フロー
- ④ 中性化に対する工法選定フロー
- ⑤ 塩害に対する工法選定フロー

2) 変状別のフロー

- ① ひび割れに対する工法選定フロー

(2) 補強工法の選定フロー

- ① 頭首工堰柱の補強工法選定フロー
- ② 頭首工床版の補強工法選定フロー

3.1.1 摩耗劣化に対する工法選定フロー

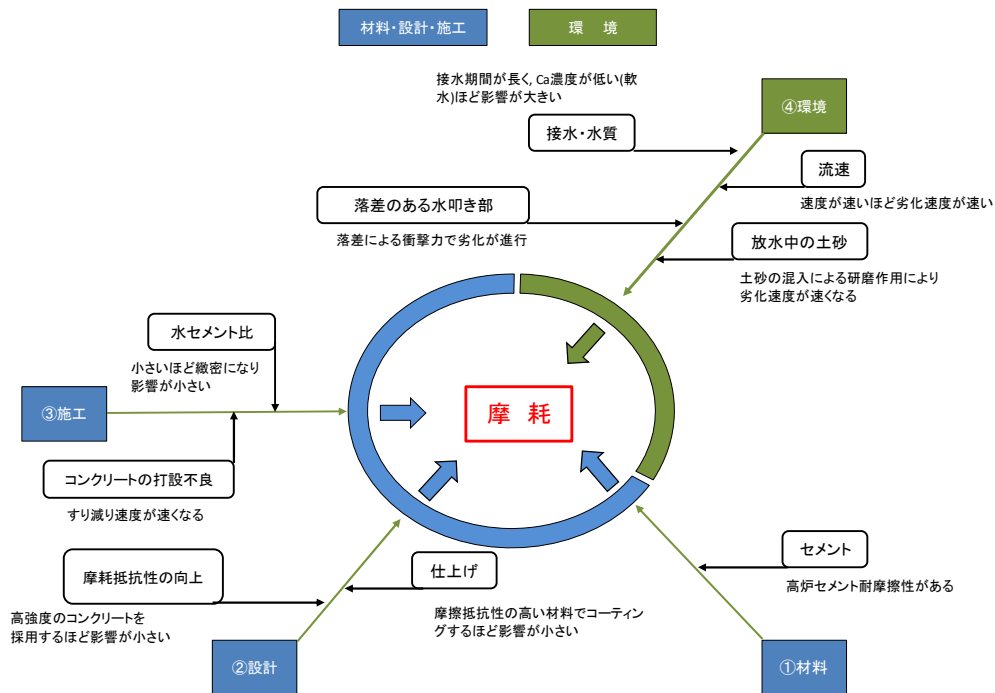
(1) 摩耗劣化の特徴

摩耗は、流水、土砂等による研磨作用や衝撃力などが組み合わさり、コンクリートの表面が欠損していく現象である。コンクリート表面に水に接すると、セメント水和物中のカルシウムイオン等が溶出する現象も加わり、摩耗劣化が促進される。

摩耗の初期には、コンクリート表面のセメントペースト部が剥ぎ取られ細骨材が露出する。摩耗が進行すると粗骨材周辺の組織が削り取れ粗骨材が露出し、やがて粗骨材が剥落する。さらに摩耗が進行すると鋼材露出や腐食、鉄筋断面の欠損が発生し、部材の耐力や耐久性を低下させる原因となる。

(2) 摩耗の要因

摩耗劣化の要因を参図 3-1 に示す。



参図 3-1 摩耗劣化の要因¹⁾

1) 材料・設計・施工の要因 (内的要因)

摩耗の内的要因としては、①摩擦に弱い材料を使用、②強度が低いコンクリートの使用、③コンクリートの打設不良、養生不足による品質低下などがある。

2) 環境などの要因 (外的要因)

① 物理的な影響

摩耗は、「流速」、「流水中の土砂」、「水叩き部における落差」などに影響を受ける。流速が大きく、流水中の土砂量が多い、落差が大きいほど摩耗の影響を受けやすい。

② 化学的な影響

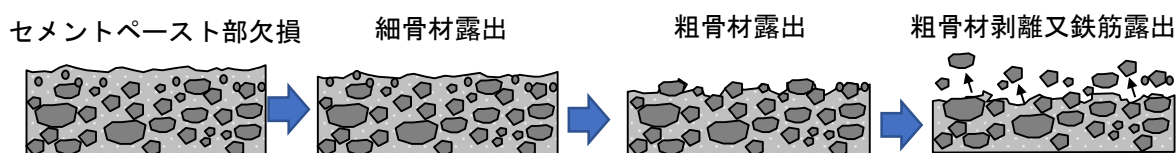
水中部のコンクリートでは、セメントペースト部からのカルシウムの溶出し組織構造が脆

弱化することや、乾湿繰返し作用によりセメントペースト部の組織が粗くなる可能性がある。このような現象（溶脱）が摩耗を促進させる一因となっている。なお、カルシウム濃度が低い水（軟水）が作用するとカルシウムイオンなどが溶出しやすく、摩耗に対しても影響すると考えられる。

鉄筋かぶり不足や塩害等の鉄筋腐食環境下にあるコンクリート構造物では、摩耗による断面欠損が鉄筋腐食に与える影響、健全なコンクリート構造物に比べ大きいため耐久性への配慮が必要となる。

(3) 摩耗劣化の進行

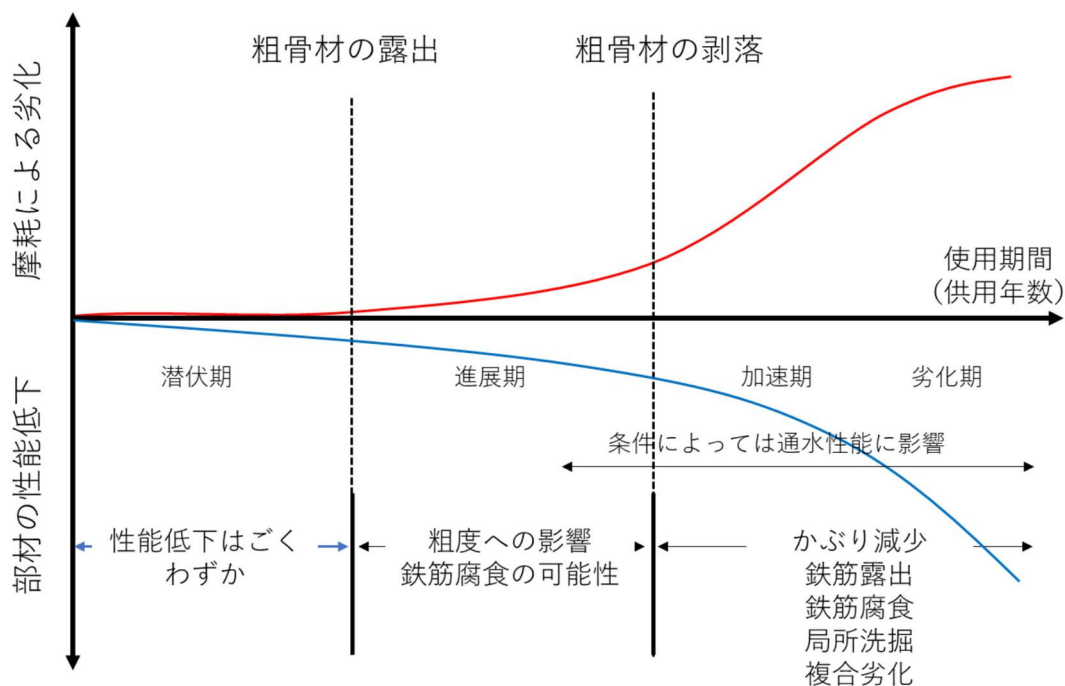
摩耗劣化の進行を参図 3-2 に示す。摩耗進行は、コンクリートの配合、骨材の種類、流速や落差による衝撃の有無などにより異なる。例えば、コンクリート開水路では、水位変動が見られる水面付近や砂礫が流下しやすい底版に摩耗が顕在化する。摩耗は、開水路で普通にみられる劣化であり、劣化の進行は粗骨材の露出又は剥落が認められる程度に留まっていることが多い。ただし、一部の落差工、急流工などは、鉄筋の露出や大きな断面欠損が観察される場合もある。



参図 3-2 摩耗の進行過程

参表 3-1 劣化の過程と劣化の状態

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	表層のセメントペースト部の欠落は見られるが、粗骨材が露出せず、ほぼ完成時と同様の表面状態を保っている期間。
グレードⅡ	進展期	粗骨材の露出が始まり、それが全体に広がるまでの期間。
グレードⅢ	加速期	粗骨材の露出が全体に広がり、粗骨材の脱落が発生し、摩耗が進行する期間。かぶりが小さい場合、ごく一部鉄筋が露出する場合もある。摩耗は主に耐久性に影響を与える。
グレードⅣ	劣化期	粗骨材の露出、剥落が繰返し、摩耗深さが増大する。摩耗深さは、鉄筋コンクリートでは平均的なかぶり厚さが 50% に近づき、部分的に鉄筋の露出、鉄筋の断面欠損が発生する。洗掘による著しい局所的な摩耗が発生し、大きな断面欠損が生じる場合もある。また、継目部などでは止水板等の露出や局所的な摩耗が発生する場合もある。凍害や ASR など他の劣化要因と複合すると劣化が加速される場合がある。延長が長い水路トンネルでは粗度係数の低下による水理機能の低下が問題となる場合もある。このように部材の条件及び環境によっては、耐久性の低下、耐力低下、通水機能の低下が発生する場合がある。



参図 3-3 摩耗進行と性能低下の関係

摩耗劣化の過程を参表 3-1 に、摩耗進行と性能低下の関係を参図 3-3 に示す。

摩耗が水利施設の性能に与える影響は以下のとおりである。

- 1) 水路表面に凸凹が生じると表面粗度が大きくなり、水理性能及び水利用性能が低下する。
- 2) 摩耗により部材のかぶりが減少すると、鉄筋腐食の発生等による耐久性能の低下の可能性がある。
- 3) 摩耗により部材のかぶりがさらに減少すると、部材の有効高さが減り断面耐力が低下する可能性がある。ただし、断面耐力に影響を与えるほどに摩耗が進行することは稀である。

このように、摩耗は、①水理性能、②水利用性能、③構造性能に影響を与える可能性があるが、施設の水理性能、構造性能及び維持管理性に対する影響度合いは施設毎に異なる。例えば、堰柱等の摩耗が進行しても、堰柱の部材厚及びかぶりが十分確保されていれば、断面耐力が極端に低下することは少ない。

(4) 摩耗対策の基本的な考え方

摩耗による劣化については、劣化程度に応じて、摩耗深さ及び摩耗範囲を考慮し、摩耗の進行の抑制、粗度の改善及び部材断面の確保に対応する工法を選定する。

① 潜伏期の工法選定

潜伏期は粗骨材の露出がなく完成時と同様の表面状態を保持している期間である。大きな性能低下は通常発生しないため、対策は継続監視を基本とする。ただし、局所的に著しい摩耗が発生する場合もあり、その際はその原因を明らかにし対策の検討する。

② 進展期の工法選定

進展期とは、粗骨材が露出しはじめ、それが全体に広がるまでの期間をいう。対策としては、

潜伏期と同様である。

③ 加速期の工法選定

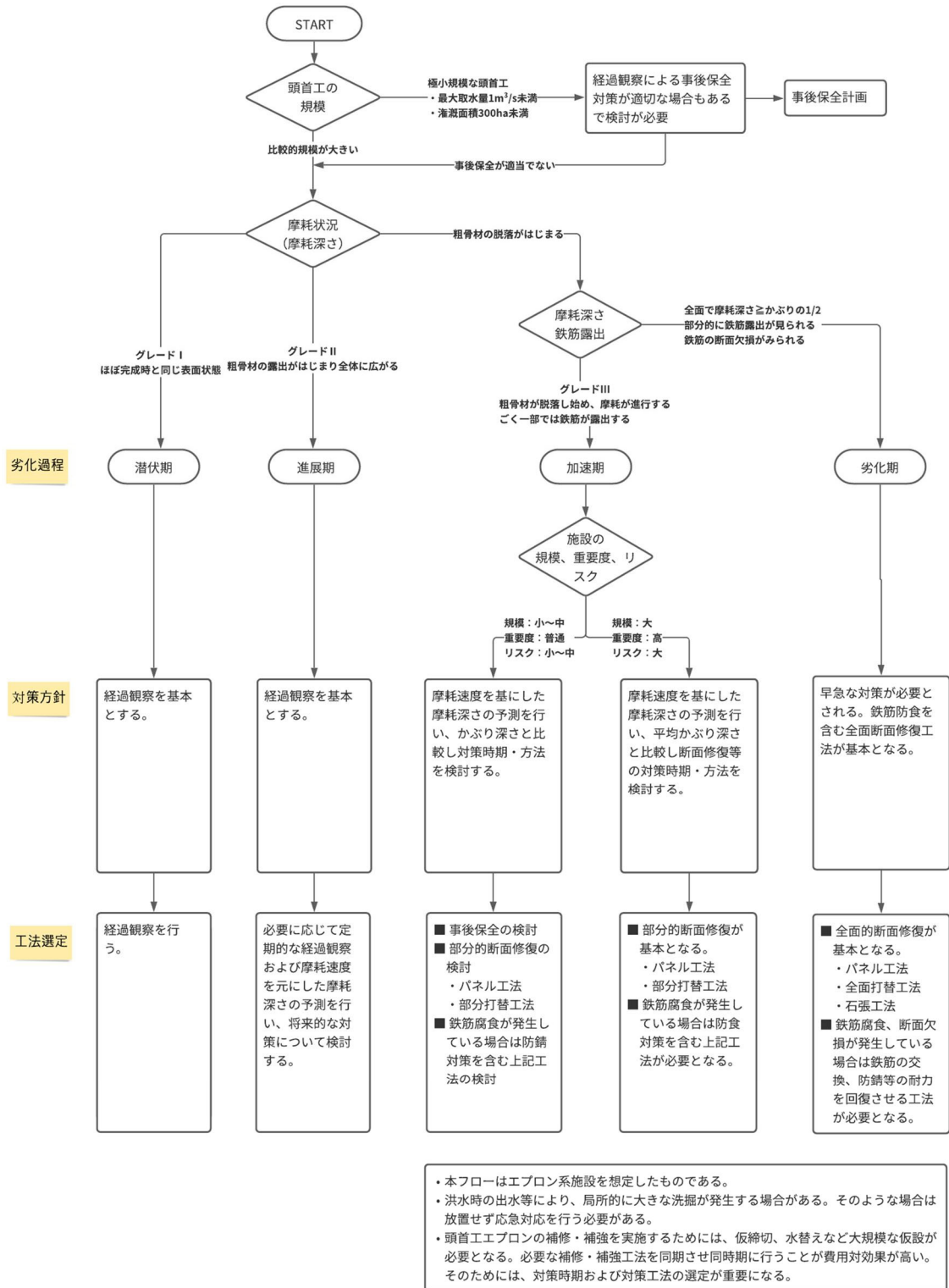
加速期とは、粗骨材の露出が全体に広がり粗骨材の脱落が始まり、断面欠損が進行する期間である。鉄筋コンクリート構造物では、将来的に発生が見込まれる平均的な摩耗深さを予測し、かぶり厚が不十分と予測される場合は、摩耗により脆弱化した部分を十分除去し、断面修復工法、又は表面被覆工法により表層を修復する。断面修復に際して、鉄筋腐食が確認された場合は、鉄筋防錆処理を含めた断面修復が必要となる。また、局所的な摩耗が発生している場合は、部分的な打換え、パネル工法の適用などを検討する。

④ 劣化期の工法選定

劣化期とは、摩耗により粗骨材が剥落し、大きな断面欠損が発生することにより部材の耐力低下や粗度の悪化が顕在化する期間である。劣化期には、加速期と同じく、摩耗が施設に与える通水性、耐久性、力学的性能に対する影響を評価し、摩耗により脆弱化した部分を十分除去し、断面修復工法、パネル工法、石張り、打換え等により断面修復を行う。断面修復に当たり、鉄筋露出箇所や断面厚の減少箇所については、鉄筋防錆処理を行い、鉄筋断面欠損分の鉄筋追加を行う。また、構造機能と照らして増厚工法が必要となる場合もある。

(5) 工法選定フロー

これまでの説明に基づく工法選定フローを参図 3-4 に示す。フローは頭首工のエプロン系施設を想定し作成した。ただし、構造的な耐力が不足するような場合は想定していない。頭首工の堰柱、その他施設への適用は、個々の環境、構造を配慮のうえ参考としていただきたい。



参图 3-4 摩耗劣化に対する工法選定フロー（頭首工エプロン系施設を想定）

(6) 頭首工を対象とする場合の注意点

急流河川で転石が多く、摩耗速度が大きいと想定される頭首工においては、摩耗による断面欠損が発生する可能性があるため、補修を行う場合は、耐摩耗性の高い材料を使用することを検討する。

(7) 参考文献

- 1) 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成 27 年 11 月 農村振興局整備部設計課

3.1.2 ASRに対する工法選定フロー

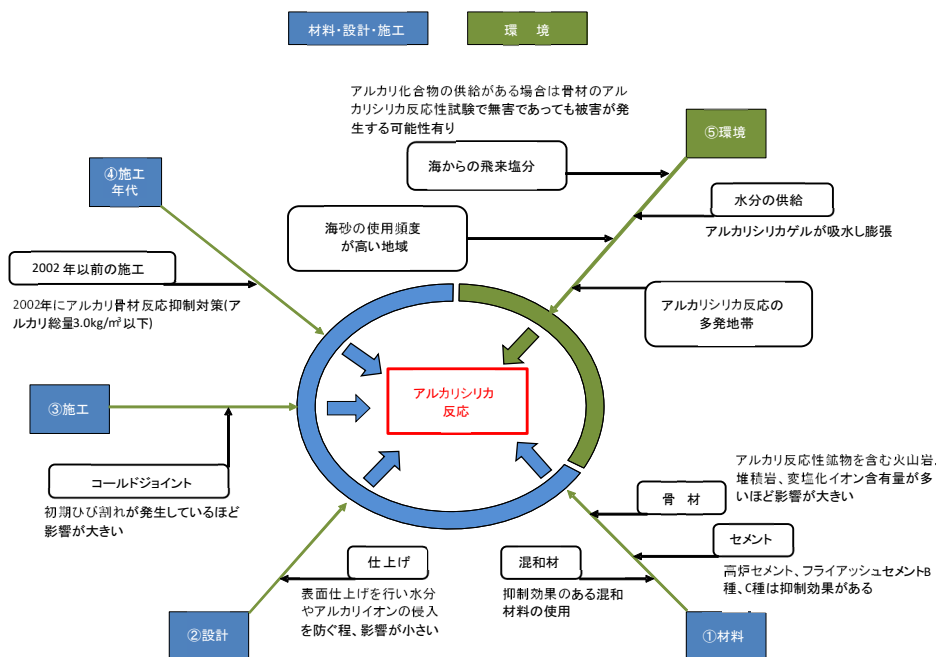
本節末尾の参考文献1)～8)に基づきASRに対する工法選定に関する事項を取りまとめた。「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案)²⁾」及び「アルカリ骨材反応が疑われる構造物に対する調査・対策手引書(案)⁸⁾」を主に参考としている。ASR対策に関する全ての事項を本節で網羅することは困難である。実務では必要に応じて他の文献を参照されたい。

(1) ASRの特徴

コンクリート中の細孔溶液は水酸化アルカリ($\text{Na}(\text{OH})_2$ 及び KOH)を主成分とする高アルカリ水溶液である。コンクリートの骨材中に細孔溶液と反応しアルカリシリカゲルを生じる物質が含まれると、アルカリシリカゲルが生成し、その膨張によってコンクリート内部で局所的な体積膨張が生じ、コンクリートにひび割れが発生する可能性がある。この反応をアルカリシリカ反応(ASR)と呼ぶ。アルカリシリカゲルは吸水性があり、外部から供給された水分を吸水すると膨張し、コンクリートのひび割れ、剥離・剥落の原因となる。

(2) ASRの要因

アルカリシリカ反応によるひび割れの要因を参図3-5に示す。



参図 3-5 アルカリシリカ反応によるひび割れの要因³⁾

1) 材料等の要因(内的要因)

① 反応性を有する物質を含む骨材

ASRは骨材にアルカリ反応性鉱物を含む安山岩、流紋岩などの火山岩系チャート、硬質砂岩などの堆積岩などが含まれていることにより生じる。

② アルカリの供給源

反応にはナトリウムイオン、カリウムイオンなどアルカリ金属イオンが関係する。これらのイオンはセメントに由来するものが多く、セメント中のアルカリ金属イオン量を規制することが有効である。過去には、除塩が不十分な海砂が使用されたこともあり、多量のナトリウムイオンの存在がアルカリ骨材反応の原因になった事例もある。海水や海風による飛来塩分、凍結融解剤などもアルカリ金属イオンの供給源となりうるため注意が必要である。

2) 環境などの要因 (外的要因)

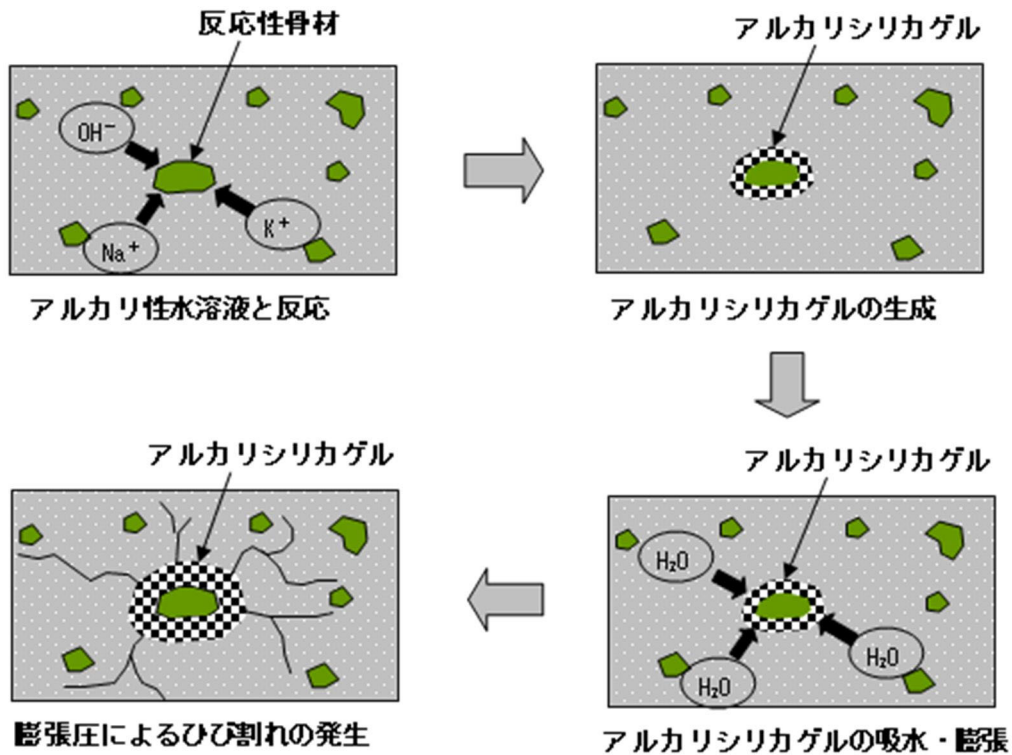
アルカリシリカ反応は、水分、凍結防止剤に含まれる塩分の供給、温度の上昇等により促進される。アルカリシリカ反応抑制対策が、コンクリート標準示方書に規定されたのは2002年である。2002年以前に施工された施設ではセメント中のアルカリ量が規制されていない場合もあり、アルカリシリカ反応が発生する可能性はそれ以降の施設に比べ高い。

アルカリシリカ反応性を有する骨材の分布には地域性がある。北海道・東北・北陸では他の地域と比べるとアルカリシリカ反応性の骨材が多く存在する。関東地方では一定の割合でアルカリシリカ反応性の骨材が含まれる。近畿地方では反応性骨材の割合は比較的少ない。

アルカリシリカ反応と塩害による複合的な劣化も発生している。凍結防止剤の散布頻度が高い寒冷地、アルカリシリカ反応の多発地域の北陸から東北の日本海沿岸地域、中国四国地方の瀬戸内海沿岸の海岸沿いに設置された施設では注意が必要である。

(3) ASR の進行

ASR の進行の概要を参図 3-6 に示す。



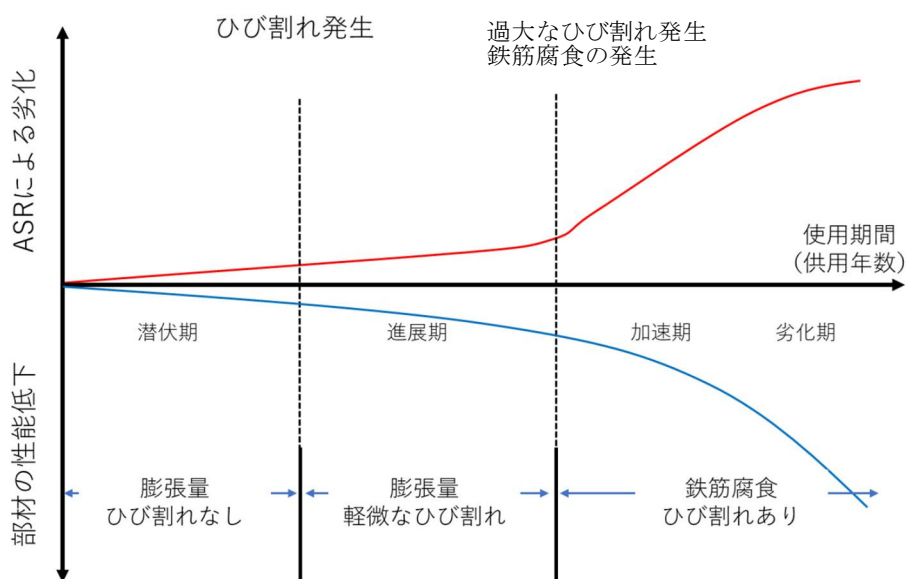
参図 3-6 ASR の進行³⁾

ASR が進行すると、コンクリート施設にはひび割れやゲルの滲出が生じる。ASR によるひび割れの発生は、ASR の膨張がどのように拘束されるかによって異なる。拘束が小さい無筋コンクリートなどでは格子状、亀甲状の不規則なひび割れが見られる。鉄筋コンクリートでは、主筋方向に両端が強く拘束されている場合は、鉄筋により拘束されている方向と直角方向にひび割れが生じる。

ASR による劣化の過程と劣化の状態の関係を参表 3-2 に示す。また、ASR の進行と性能低下の関係を参図 3-7 に示す。参図 3-7 はコンクリートが有する膨張性が大きな場合の例である。膨張性が小さい場合は ASR の劣化も部材の性能低下も小さいことに注意が必要である。

参表 3-2 劣化の過程と劣化の状態⁴⁾

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	ASR による膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず、外観上の変化が見られない。
グレード II	進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、軽微なひび割れが発生する。変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる場合がある。しかし、鉄筋腐食によるさび汁は見られない。
グレード III	加速期	ASR によるひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度、範囲が増大する。また、鉄筋腐食によるさび汁が見られる場合もある。
グレード IV	劣化期	ひび割れの幅および密度がさらに増大し、段差、ずれや、かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鉄筋腐食が進行し、さび汁が見られる。外力の影響によるひび割れや鉄筋の損傷が見られる場合もある。変位・変形が大きくなる。



参図 3-7 ASR の進行と性能低下の関係³⁾

参表 3-2 及び参図 3-7 に基づいて ASR の劣化進行を以下に示す。

潜伏期は、アルカリシリカゲル（ASR ゲル）の生成は始まっているが、膨張量が小さく外観上の変化も見られない。

進展期は、ASR ゲルが生成しつつ膨張も始まる期間であり、ASR ゲルの膨張が継続的に進行する。そのため、軽微なひび割れの発生や ASR の滲出が見られる場合もある。鉄筋腐食は始まっていないため、さび汁等は通常は観察されない。

加速期は、ASR による膨張速度が最大を示し、ひび割れ幅、密度が増大し、ひび割れの進行に伴いコンクリート内部への劣化因子（水分、塩分（アルカリ））の侵入が急激に増加する期間である。このため、鉄筋腐食の発生、さび汁が見られる場合もある。鉄筋の腐食、水密性の低下、ASR ゲル及びさび汁等の発生は景観悪化につながる場合もある。

劣化期は、ひび割れの幅、密度がさらに増大し、ひび割れ部分に段差、ずれ、部分的な剥離及び剥落が観察される期間である。鉄筋腐食も進行し、さび汁が多く見られ、場合によっては部材の耐力の低下、大きな変形が発生する。

(4) ASR 対策の基本的な考え方

ASR の対策に関する基本的な事項について示す。

① ASR の診断・予測・対策に関する現状と取り組み方

ASR は中性化、塩害に比較すると研究が開始されてから日が浅く、発生メカニズムは明らかになってきたが、診断、予測及び対策は十分確立されていない。本節では、補修対策の基礎知識を身につけるため対策における基本的な事項のみを示す。実務における詳細調査、補修補強工法の検討では、ASR に関する専門家を交えて検討することが望ましい。

② ASR の診断・予測

施設に対して ASR が疑われる場合の対応フローを参図 3-8 に示す⁵⁾。現場で発生しているひび割れ等の変状から、変状原因が ASR であるか否かを判断するためには ASR に対する経験が必要である。ASR については、地域性、地質・岩石状況、水分供給及び日射等の環境条件、構造的に発生し易い部位と変状の関係、周辺構造物における発生状況などを考慮した総合的な判断が必要であり、対象地域において ASR の調査及び対策経験のある技術者が診断を行うことが望ましい。対象地域において ASR の経験が少ない技術者が目視で ASR の判定を行うことは困難な場合が多い。重要構造物に対しては岩石的診断に基づく詳細診断が選択肢となる場合もある⁶⁾。

③ ASR の発生抑制

ASR の診断、予測、対策について一般的な手法は確立されていないため、ASR の発生を抑制するためには、新設時に適切な材料選択を行うことが重要となる。新設時のアルカリ骨材反応の抑制方法としては、①低アルカリセメント、混合セメントを用いる、②アルカリ反応の骨材を使用しない、の 2 つの方法が中心となる。平成 14 年に国土交通省から通知されたアルカリ骨材反応抑制対策について以下説明する。

1) コンクリート中のアルカリ総量の抑制

アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート 1 m³ に含まれるアルカリ総量を Na₂O 換算で 3.0 kg 以下にする。

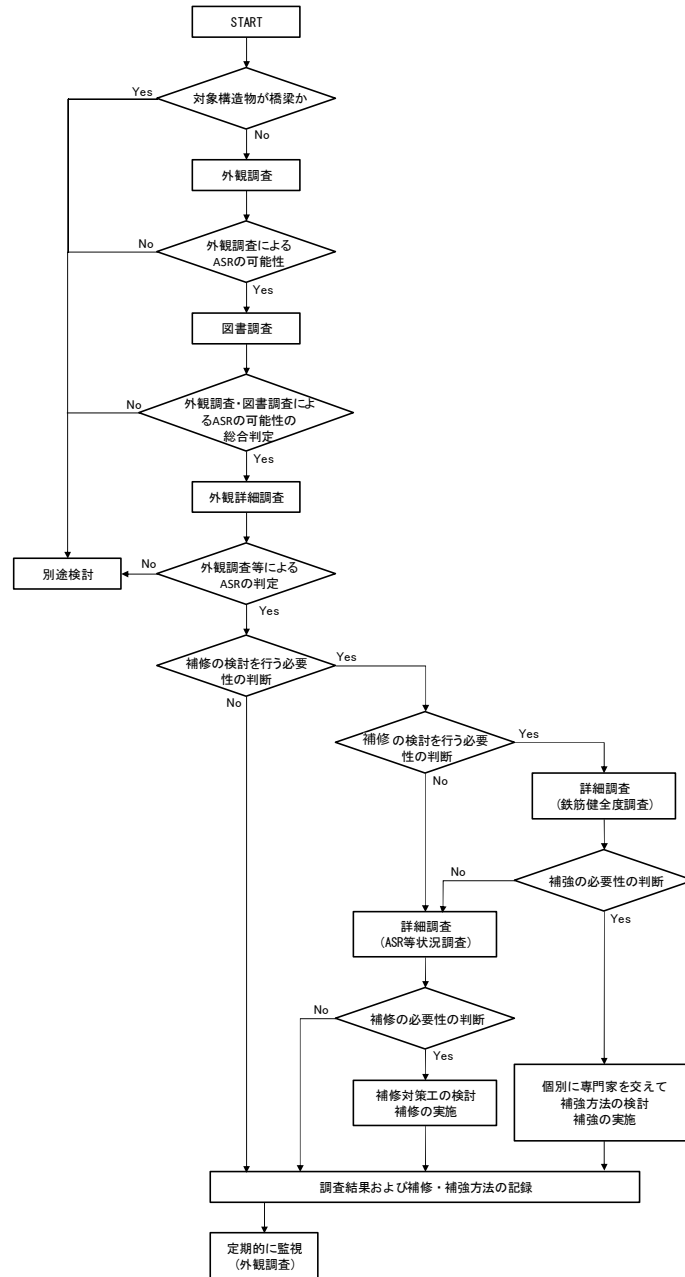
2) 抑制効果のある混合セメント等の使用

JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント[B種又はC種]あるいは JIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント[B種又はC種]、もしくは混和材

をポルトランドセメントに混入したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果が確認されたものを使用する。

3) 安全と認められる骨材の使用

骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法又はモルタルバー法）の結果で無害と確認された骨材を使用する。



参図 3-8 ASR が疑われる構造物の対応フロー⁵⁾

④ 構造物の重要度と ASR の許容リスク

ASR による構造物の変状と機能低下の関係については十分明らかにされていない。これまでの多くの研究からは、ASR が生じた施設に鉄筋破断が生じていなければ構造物の部材の安全性は確保されていると認識されている²⁾。しかし、安全性の低下はないが、ASR によって構造物の機能低下が生じた事例は多い（鉄筋腐食による耐久性の低下、変形による維持管理性の低下）。

ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会⁶⁾では、ASR による変状の程度がどの程度まで容認されるかのアンケート調査を行った結果、重要構造物ではより精緻な対策が必要であるが、一般構造物では ASR の発生を許容するという考えを多くの技術者が持っていることが明らかになった。技術者の多くは、ASR に対しては画一的に厳しい抑制対策を行うのではなく、構造物の重要度やリスクレベルに応じた抑制対策の必要があると考えていることが分かる。参表 3-3 は AASHTO（米国全州道路交通運輸行政官協会）が提示している構造物の重要度に応じた ASR 抑制対策区分である。頭首工の部材は参表 3-3 の中では区分 S3、S4 に相当するものが多いと考えられるが、その重要度に応じた対策の選定が重要となる。

参表 3-3 構造物に ASR が生じた場合の受容リスク（AASHTO PP65）⁶⁾

区分	ASR によるリスク	ASR リスクの受容性	構造物の例
S1	安全性や経済・環境効果が小さいもしくはは無視できる	ASR によるいくらかの劣化は許容する	非構造部材、仮設構造物
S2	ASR により重度な被害が生じても、安全性、経済性、環境的結果が軽微である。	中程度の ASR リスクは許容する	歩道、縁石、排水路、設計供用年数 40 年未満
S3	軽微な被害であっても、安全性、経済性、環境的結果に明らかな影響がある。	低い ASR リスクは許容する	舗装、カルバート、防護柵、地方の小規模橋梁、設計供用年数 40-75 年
S4	軽微な被害であっても、安全性、経済性、環境的影響が重大である。	ASR は許容できない	主要な橋梁、トンネル、調査や補修が困難な重要構造物、設計供用年数 75 年以上

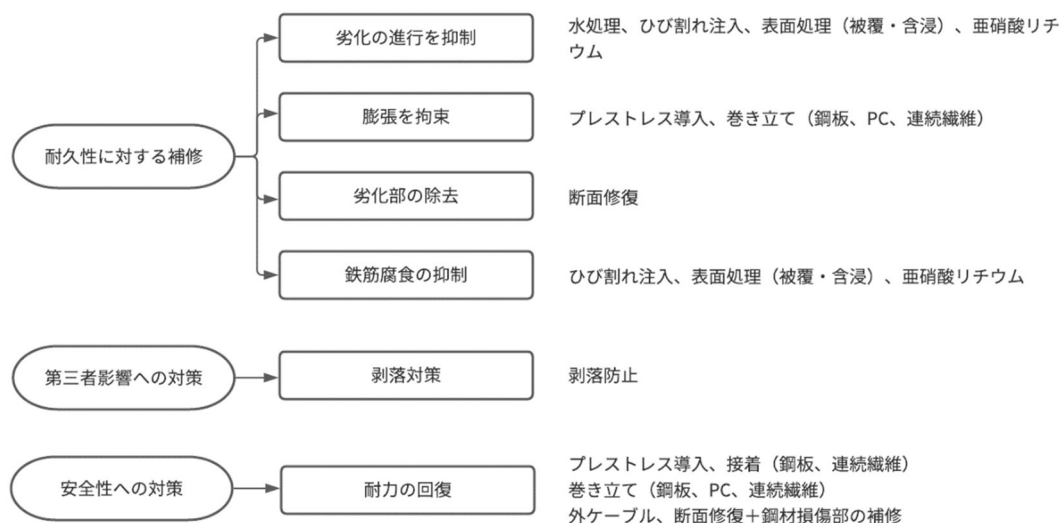
⑤ ASR の補修対策

要求性能に着目して ASR の補修・補強工法を分類した図を参図 3-9 に示す。実務では、参図 3-9 の工法を組み合わせ適用する場合もある。ASR では、鉄筋破断などの現象が生じている場合以外は構造物の耐力に大きな影響を与えることは少ないと考えられる。しかし、施設の変形などの使用性の低下、鉄筋腐食による耐久性低下は発生する可能性がある。現状では、ASR の補修の設計手法は確立されているとは言えず、診断を含めた総合的な対策を行う必要がある。

ASR が生じた構造物への対策としては、まずは膨張の原因となる水分の供給を絶つ工法が選択される。具体的には表面被覆工法、表面含浸工法が選択される。ただし、構造の一部が土中や水中にある水路壁、擁壁などのように全ての面からの水分を被覆により遮断することが難しい構造物も多い。水分の供給が完全に遮断できない場合は、部分的な補修を行っても膨張は継続する可能性が高い。また、ASR では劣化の進行が途中で止まる（外見上は劣化の進行が認められない）場合も多いことから、構造物の重要度と許容リスクを考慮した上で、補修工法を行うか、あるいは点検間隔を短くした経過観察を行うなど費用対効果も考慮した工法選定が必要となる。

なお、重要施設や高い水密性が要求される施設においては、潜伏期の段階で、ASR による膨張を拘束する接着工法や、ASR で生成されたゲルを非膨張性にする亜硝酸リチウム等を用いた

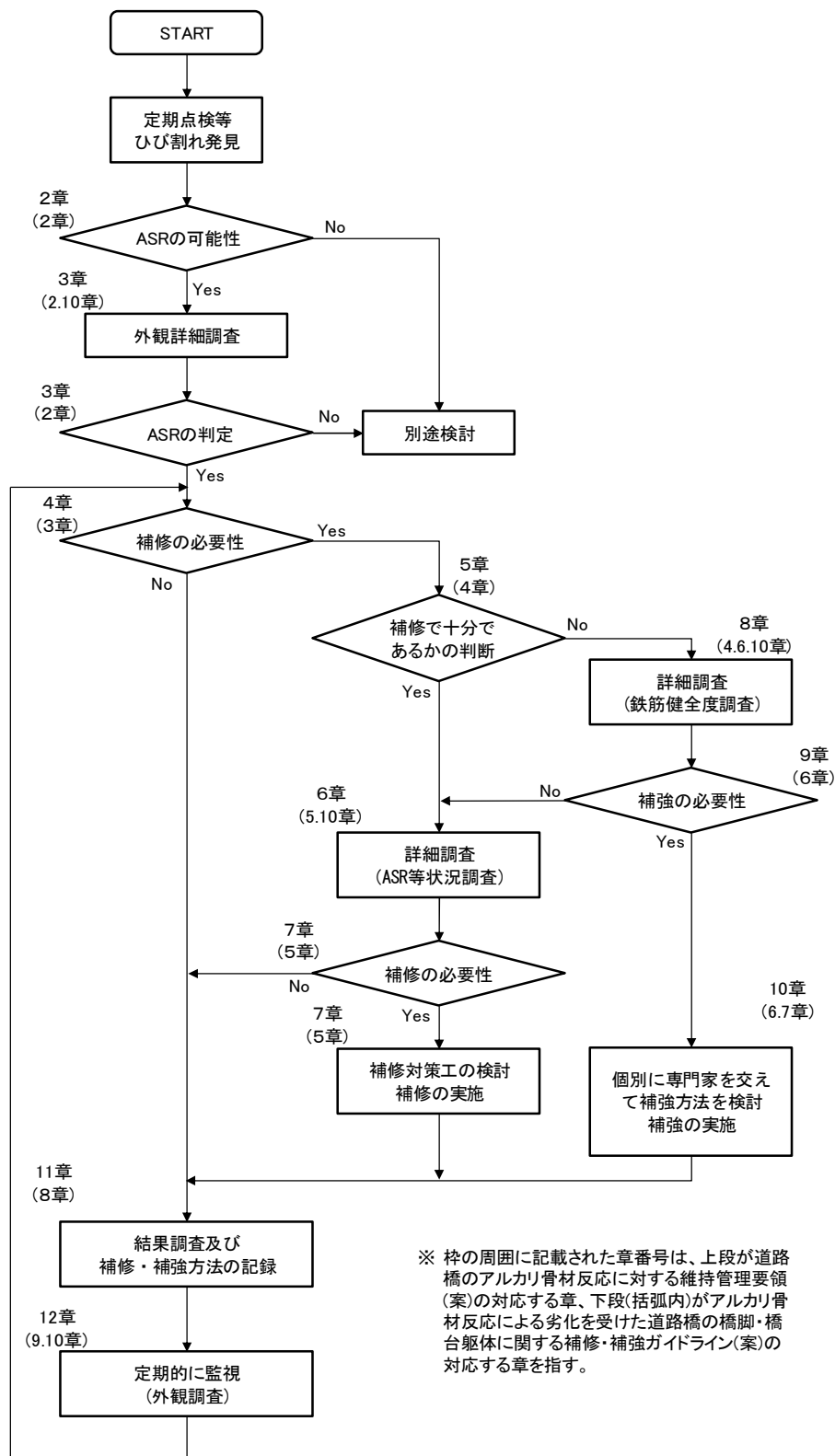
表面含浸工法が適用された事例もある。



参図 3-9 ASR に対する補修・補強の分類⁷⁾

(5) 工法選定フロー

ASR については明確な工法選定フローは作成できなかった。理由は 2 つある。①実際の変状が ASR であるかの診断、判定、劣化進行予測が難しい。②ASR による変状の発生、進行、性能低下については施設毎の違い極めて大きい。よって、一般的な対策フローを作成することが困難であった。本節では、工法選定フローの参考として、道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）¹⁾、アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）²⁾ に示された対策の流れを参図 3-10 に示す。



参図 3-10 ASR に対する劣化構造物の維持管理フロー¹⁾²⁾

参図 3-10 は、道路橋の橋脚を対象としたフローである。頭首工に適用する場合は堰柱の ASR 対策の参考となる。詳細はアルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）²⁾ に詳しく述べられている。ここではガイドラインに述べられている ASR の対策を行う上でのポイントのみを示す。

- ① 参図 3-8 に示すように、対策は対象構造物に ASR が発生している可能性を検討する。外観調査を行い、その結果から ASR の可能性を判定する。
- ② ASR の発生の可能性があり、補修の検討を行う必要性を判定する場合は、施設の種類、重要性、変状の程度を勘案して、補修を行うか判定する。ASR による変状が施設の耐久性に及ぼす影響が小さいと判断された場合は、当面は経過観察を主体とした維持管理を行う。
- ③ ASR による変状が構造物の耐久性等に及ぼす影響の評価は原則は外観調査により行う。外観調査の結果が以下の項目を全て満足する場合は、ASR の耐久性に及ぼす影響は小さいと判定して良く、当面は経過観察を主体とした維持管理の検討を行う。
 - 1) ASR によるひび割れが生じていても、ひび割れ幅が小さく、それらが反応ゲルや炭酸カルシウムにより充填されている場合。
 - 2) コンクリートに浮きや剥離が見られない。
 - 3) 過去に ASR の補修を行っている場合、補修を行っている場所に外観上の変化が認められない。
 - 4) 経過観察中であって、ひび割れなどの ASR による変状が進行していないと判断される場合。上記 1) ~4) の項目の 1 つでも満たさない場合は、補修を行う必要性について検討する。
- ④ ASR による変状が構造物の耐久性、耐荷性に影響を与える外観等の変状としては、鉄筋の破断、鉄筋とコンクリートの付着の喪失、鉄筋腐食の発生、コンクリート強度及び静弾性係数の著しい低下、剥落等によるコンクリートの有効断面の変化、プレストレスの低下が挙げられる。これらの変状がある場合は、補強を含めた対策の必要性を検討する。
- ⑤ 変状の程度に関わらず、ASR の変状が生じている部分に外部から水の供給がある場合、水の供給を防ぐ措置に関して検討することが望ましい。しかし、農業水利施設では水路、擁壁のように背面等から常に水の供給を受け、内部への水の浸入を完全に遮断することが難しい施設も多い。このような場合、一面からの水の供給を表面被覆工法などで遮断しても、背面から水が浸入し、表面被覆が不透水層となり内部に水を滞水させる場合もあるので注意が必要である。
- ⑥ ASR の補修の必要性、特に補強の必要性については個別施設の構造、環境条件によりその判断は難しく、特に補強の必要性については個別に専門家を交えて対策を検討することが望ましい。

(6) 頭首工を対象とする場合の注意点

頭首工の操作台では開閉機を設置しているため、堰柱補強のように補強材を部材断面全周に施すことが困難な場合がある。このような場合には、補強後の構造的耐力について、特に慎重に検討しなければならない。

(7) 参考文献

- 1) 道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案） 2003.3 国土交通省道路局
- 2) アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案） 2008.3 国土交通省道路局
- 3) 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成 27 年 11 月 農村振興局整備部設計課
- 4) 2022 年制定 コンクリート標準示方書「維持管理編」 土木学会
- 5) アルカリ骨材反応を受けたコンクリート構造物への対策 北海道開発土木研究所月報 No. 614 号 2004.07.
- 6) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書 2014.7 日本コンクリート工学会

- 7) コンクリートの劣化と補修がわかる本 (Update) 和泉意登志・竹田宣典 コンクリート新聞社
- 8) アルカリ骨材反応が疑われる構造物に対する調査・対策手引書(案) 平成16年3月 北海道開発局建設部・
(独)北海道開発土木研究所

3.1.3 凍害に対する工法選定フロー

本節末尾の参考文献1)～5)に基づき、凍害に対する工法選定に関する事項を取りまとめた。本節で、凍害対策に関する全ての事項を網羅することは難しいため、実際の対策では必要に応じて(8)参考文献1)～5)を参照されたい。

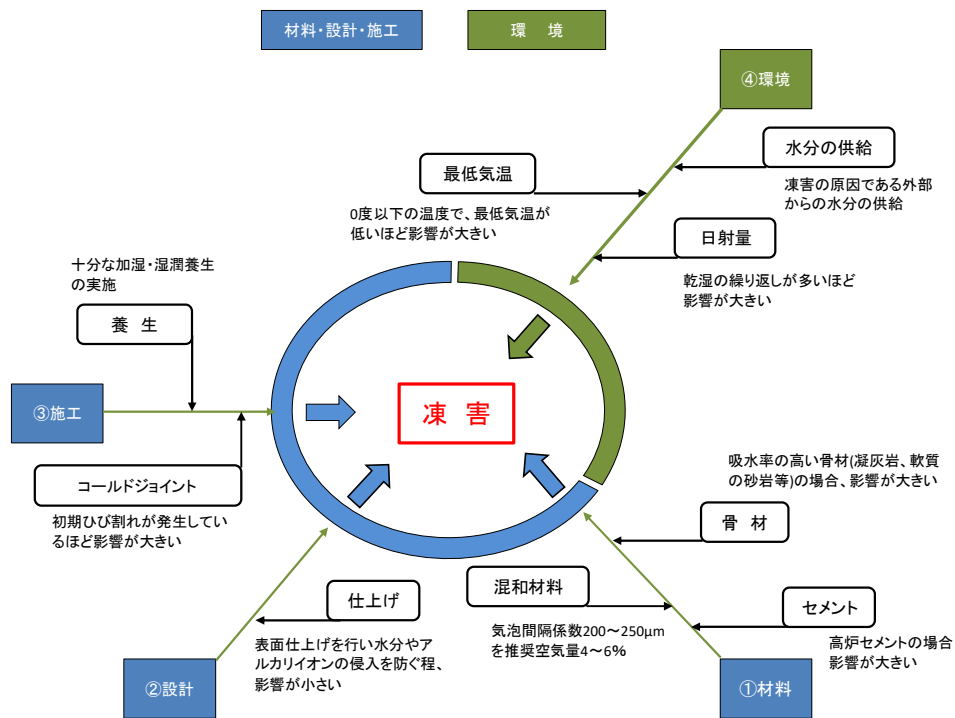
(1) 凍害の特徴

凍害は、寒冷地においてコンクリート中の水分が外気温差や日射による影響を受け凍結と融解を繰り返すことで、水分の凍結膨張圧によりコンクリートにひび割れや剥離が発生する現象である。凍害は最低気温が低いほど、また凍結と融解の繰り返し回数が多いほど劣化の進行が早くなる。

コンクリート内部の水分は、凍結する際に約9%の体積膨張を起こす。コンクリートにその体積膨張を吸収するだけの空隙がない場合、凍結時の膨張が拘束され膨張圧によりコンクリートに引張り応力が発生し、ひび割れ、剥離・剥落が発生する。凍害によるコンクリート表面のひび割れは、コンクリート自体の膨張に起因するため、中性化や塩害で発生する鉄筋腐食に起因するひび割れとはその発生機構が異なる。

(2) 凍害の要因

凍害によるひび割れの要因を参図3-11に示す。



参図3-11 凍害によるひび割れの要因¹⁾

1) 材料・設計・施工の要因（内的要因）

① 材料の要因

コンクリートの配合、骨材品質、空気量などが凍害に影響を与える内的要因である。水セメント比が大きなコンクリートは凍害を受けやすく、骨材の吸水率が大きいとポップアウトなどが発生しやすい。また、混和剤による適正な空気の連行がなかった場合、凍結による膨

張圧を緩和できなくなることから凍害が発生しやすい。

② 設計・施工の要因

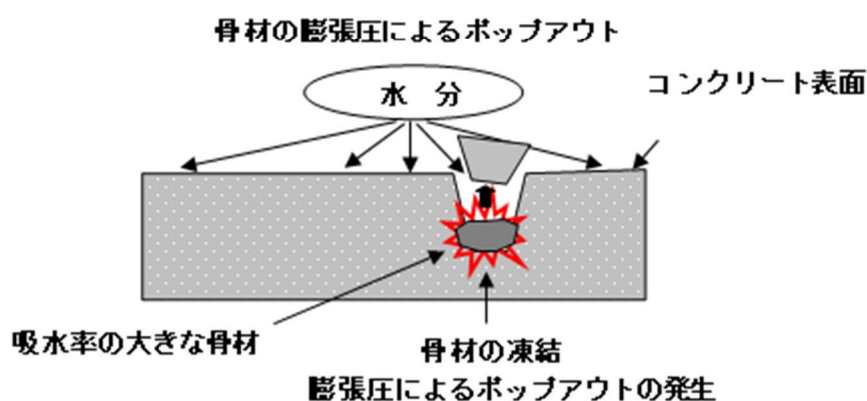
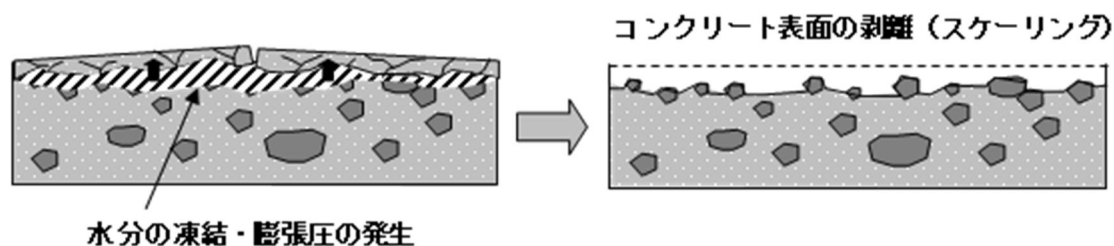
表面仕上げ等により水分のコンクリート内部への浸入を防ぐと凍害の発生は抑制される。凍害は養生及びコールドジョイント等の初期欠陥の影響を受ける。適切な養生が実施されない場合、コンクリート硬化中の温度が低下するため初期凍害の影響が大きくなる。また、コールドジョイント等の初期欠陥が発生すると水分の内部への浸入が促進されるため凍害の影響が大きくなる。

2) 環境などの要因 (外的要因)

「最低気温」、「日射量」、「水分の供給」、「凍結防止剤」などが凍害に影響を与える外的要因である。最低気温が低く、年間の凍結融解回数が多いほど凍害の可能性は高くなるため、北面よりも南面の部材、背面や表面から水が供給されやすい部材ほど凍害発生の可能性は高い。凍結防止剤は、塩化物イオンの供給源となり、凍結融解と塩化物イオンの複合作用によりスケーリング、ポップアウトなどを促進する場合がある。

(3) 凍害の進行

凍害劣化の概要を参図 3-12 に示す。また、凍害による劣化の過程と劣化の状態の関係を参表 3-4、凍害の進行と性能低下の関係を参図 3-13 に示す。



参図 3-12 凍害劣化の概要¹⁾

凍害劣化は次の2つの現象に分類できる。

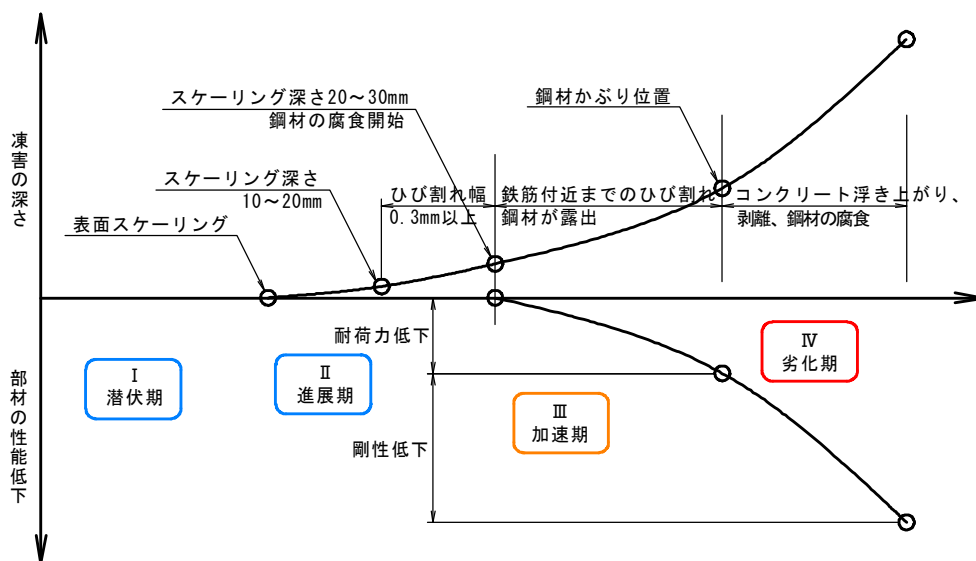
- ① 凍結融解作用によりコンクリート組織に緩み、コンクリート表面にひび割れが発生する。
- ② 凍結融解作用や塩化物との複合作用によるスケーリング、吸水率の大きな骨材が原因となり発生するポップアウト等によりコンクリート表面が剥落し断面厚さが減少する。

凍害による構造物の性能低下は凍害深さによって異なる。潜伏期は凍結融解作用を受けるが劣化が顕在化しない期間である。進展期は、コンクリート表面のスケーリング等の劣化が進行する期間である。ただし、進展期の終わりには、スケーリングによりコンクリートの剥離、骨材の露出が見られる場合もある。加速期は、凍害深さが鋼材位置に達し、粗骨材の剥落やコンクリートかぶりが減少する。劣化期になると、コンクリートの剥落や鉄筋腐食などのため使用性や安全性に影響を及ぼす段階となる。

このような凍害劣化の進行を把握するためには、凍害深さ、スケーリング等による断面欠損、鉄筋腐食の進行が評価の目安となる。

参表 3-4 劣化の過程と劣化の状態²⁾

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、ポップアウトが表面に発生。
グレードⅢ	加速期	スケーリング、微細ひび割れが深さ方向に進行し、粗骨材の剥落が発生。
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。



参図 3-13 凍害の進行と性能低下の関係¹⁾

(4) 凍害対策の基本的な考え方

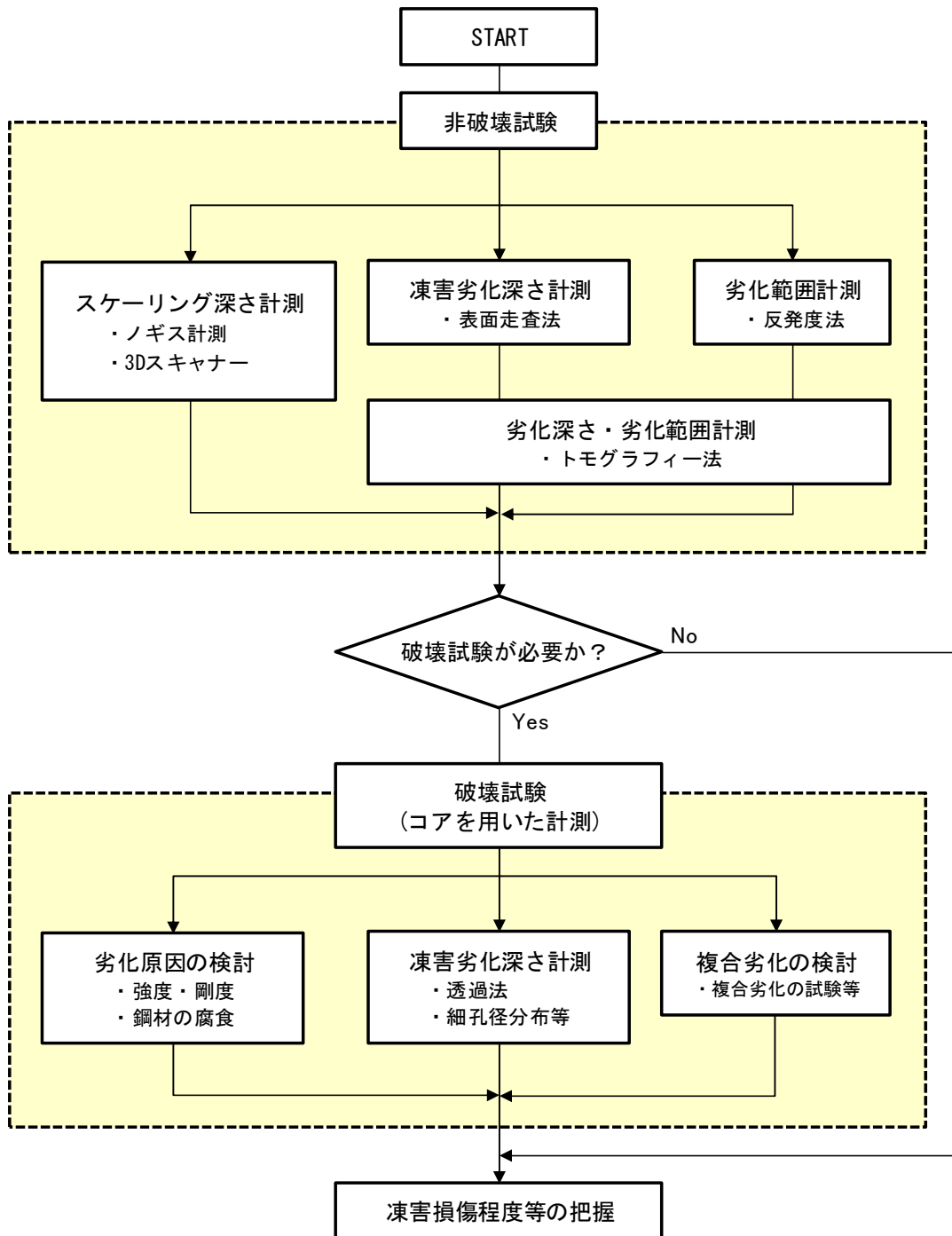
凍害対策に関する基本的な事項について述べる。

1) 凍害の診断³⁾

凍害損傷程度の把握フローを参図 3-14 に示す³⁾。凍害の調査・診断では、最初からコア採取などを行うのではなく、地域の気象条件、部材への水分供給及び日射などの外的要因も含めた概要調査が極めて重要となる。概要調査の後に、凍害に特有な外観調査を進めるとともに、スケーリング深さ、凍害劣化深さ、断面の欠損深さ等をノギス等により調べ、劣化深さ、範囲及び劣化状況の概要を調べるのが重要である。

概要調査の結果、さらに詳細な調査が必要な場合は、コア採取を伴う試験を行い、概要調査

の精度の向上を図る。



参図 3-14 凍害損傷程度の把握フロー³⁾

2) 新設時の凍害の予防対策⁴⁾

現状では、凍害が発生してしまうと、その後の劣化進行評価は難しく、費用対効果に優れた抜本的な補修・補強対策は少ない。凍害対策としては、新設時に凍害を予防する対策を講じることが有効である。新設時の凍害予防対策としては次の3点を示す。

- ① 適正な空気量の確保
- ② 水セメント比を小さくし、養生等により表層品質を向上させる

③ コンクリートの含水量を高めない工夫

ここでは、東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)⁴⁾ に示された 1) 及び 2) に関する凍害対策について**参表 3-5** に示す。詳しくは東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)⁴⁾を参照していただきたい。

参表 3-5 凍害環境に応じた配合対策⁴⁾

種別	凍害環境	対策
S	特に厳しい凍害環境	目標空気量 6% (5~6.9%) 及び水結合材比 (W/B) 45%以下、あるいは目標空気量 7% (JIS 適用外)
A	厳しい凍害環境	目標空気量 5% (4.5~6%) (JIS の空気量の範囲)
B	一般の凍害環境	目標空気量 4.5%±1.5% (JIS の空気量の範囲内)
C	凍害のない環境	凍害対策として空気量を制御する必要なし

3) 凍害の補修・補強に期待する効果と工法の例⁵⁾

凍害に対する補修・補強の目的を以下に示す。

- ① 水の供給の抑制
- ② 劣化部分を取り除く
- ③ 耐荷力を回復させる
- ④ 鉄筋腐食、剥落、漏水などの 2 次的劣化を抑制する

補修・補強に期待する効果と工法の例を**参表 3-6** に示す。

参表 3-6 補修・補強に期待する効果と工法の例⁵⁾

期待される効果	工法例	補修	補強
水の供給を抑制	ひび割れ注入、表面処理、排水処理	○	
劣化部の除去	断面修復	○	
耐荷力の回復	増厚、打換え、巻き立て、接着工法	○	○
二次劣化の抑制	剥落防止、鉄筋腐食の抑制、劣化因子の侵入抑制	○	○

(5) 凍害の補修・補強工法の選定

工法の選定に当たっては、**参図 3-14** に概要を示した劣化診断結果をもとに、施設がおかれている環境、気象条件、補修・新設の可能性、凍害部位や範囲及び凍害の主要因などを総合的に考慮する必要がある。これは、単に補修工法のみを行った場合、再び同じ箇所に凍害劣化をくり返すことが多いためである。凍害の主要因の内容に応じて、適切な凍害防止対策を行うことが重要になる。

凍害の要因となる水の供給を抑制することは効果的である。具体的な工法としては、ひび割れ注入や表面処理が選択される。

凍害が進行すると、施設の表面にはひび割れが発生し、表層が脆弱化し、剥離等が生じる。このため、外部から内部に水や塩分等の劣化因子が侵入し易くなる。このような劣化進行を考慮すれば、凍害の補修・補強対策の基本的な方針は、①躯体の性能や機能に影響しない程度の軽微な劣化の場合は、水の供給の抑制、ひび割れ補修、表面処理を行う。②損傷の程度が中程度の場合

は、劣化した部分を除去し、部分的な断面修復や打換えを行う。③さらに劣化が進行した場合は、耐力の回復とともに二次劣化の抑制対策を行う。、となる。

以下、劣化過程毎の工法選択の基本について述べる。

1) 潜伏期

原則として、継続監視を基本とする。予防保全的な対応として、水の供給を抑制するための表面被覆工法、表面含浸工法が行われる場合もある。この場合、費用対効果を十分考慮した対応が必要である。

2) 進展期

原則として、継続監視を基本とする。水の供給を抑制するために、ひび割れ注入を施したうえで、表面被覆や表面含浸工法を併用する場合がある。また、ポップアウトがある場合は、脆弱範囲を除去し断面修復を行う場合もある。

3) 加速期

凍害が進行し、鉄筋腐食によるひび割れの増加、浮きなどが比較的広い範囲で見られるようになった場合は、脆弱化した部分を除去し、鉄筋防食を目的とした断面修復を行う。特に劣化が激しい部分では補強の検討を行う。

4) 劣化期

コンクリートに、浮き、剥落、鉄筋腐食による広範囲な断面欠損が生じている場合は、表層の脆弱部を完全に除去し、鉄筋防食あるいは補強を目的とした断面修復を行う。劣化が激しい場合は、部分除去や部材の全面除去による新設も選択肢となる。

(6) 工法選定フロー

これまでの説明に基づく工法選定フローを参図 3-15 に示す⁵⁾。

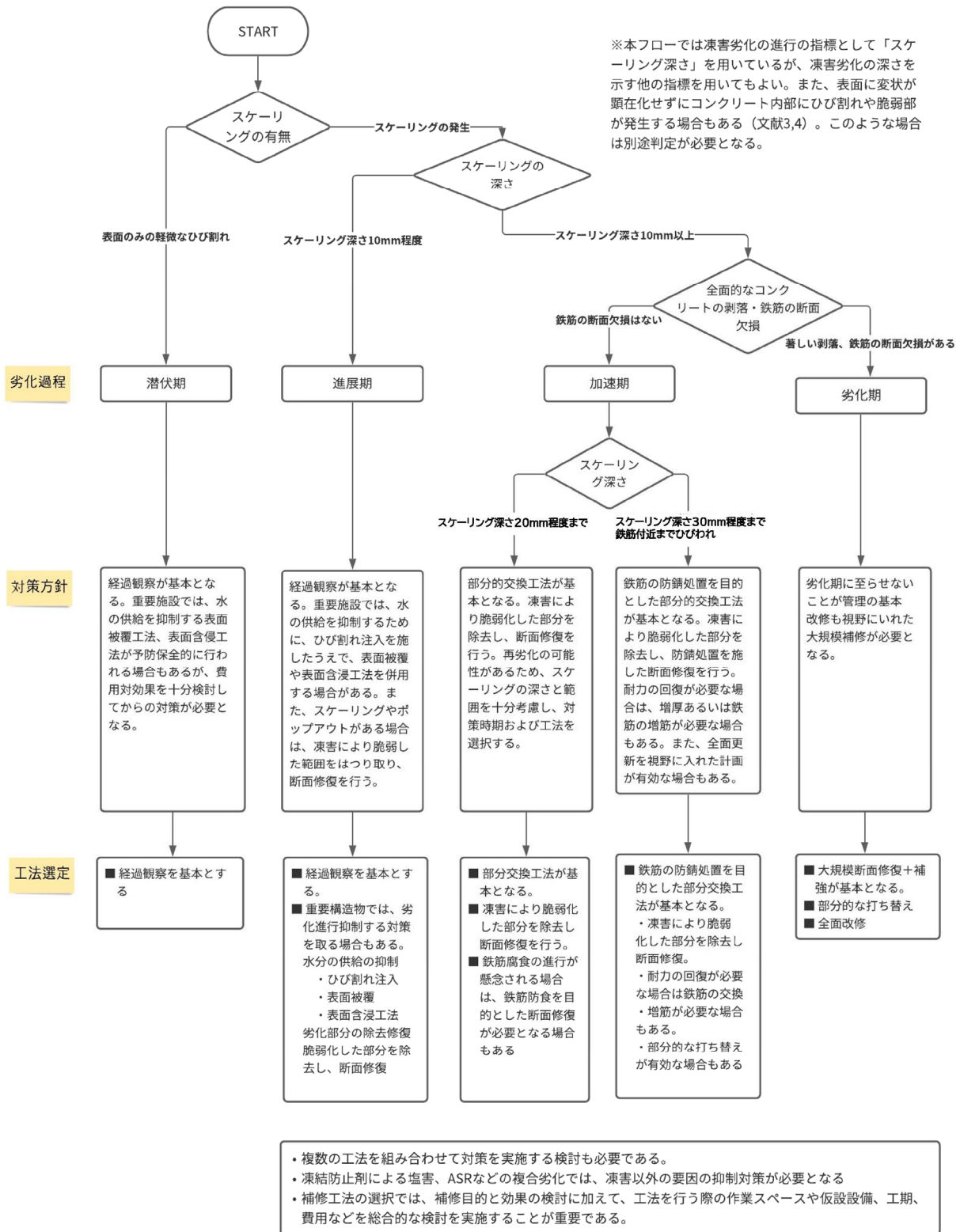
(7) 頭首工を対象とする場合の注意点

凍害による劣化については、劣化程度に応じて、水分の供給抑制、劣化部位の除去・修復、耐力の回復等に対応する工法を選定する必要がある。対策工法は、劣化部位を除去した後に耐凍害性を有する断面修復材で断面修復する工法を選定することを基本とする。

頭首工エプロン部の凍害劣化に対する対策は、部材内部への水分の浸入を抑制することが重要となることから、激しい凍害が想定される地域の頭首工においては、必要に応じて断面修復後に表面被覆工法の適用も検討する。

(8) 参考文献

- 1) 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成 27 年 11 月 農村振興局整備部設計課
- 2) 2022 年制定 コンクリート標準示方書「維持管理編」 土木学会
- 3) 凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案） 平成 29 年 5 月 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所
- 4) 東北地方における凍害対策に関する参考資料（案） 平成 29 年 3 月 国土交通省 東北地方整備局
- 5) コンクリートの劣化と補修がわかる本（Update） 和泉意登志・竹田宣典 コンクリート新聞社



参図 3-15 凍害に対する工法選定フロー

3.1.4 中性化に対する工法選定フロー

本節末尾の参考文献 1) ～4) に基づき、中性化に対する工法選定に関する事項を取りまとめた。

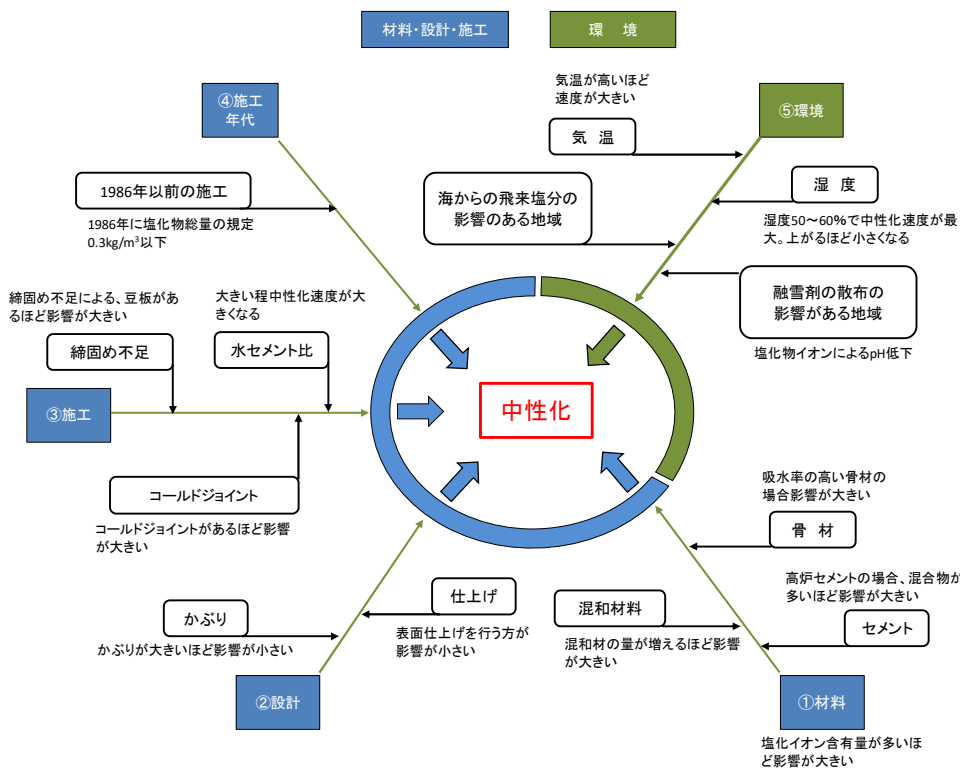
(1) 中性化の特徴

中性化は、二酸化炭素がコンクリート構造物の表面から内部に侵入することによって、本来アルカリ性であるコンクリートがアルカリ性を失って行く現象である。

中性化が進行してもコンクリートの物理的性質はほぼ変化しない。たとえば、中性化によりコンクリートの圧縮強度は低下しない。中性化の進行に伴い、コンクリートのアルカリ性が低下することにより鉄筋腐食が発生することが中性化が耐久性上問題となる。このため、無筋コンクリートでは中性化が問題となることはほぼ皆無である。それに対して、鉄筋コンクリートでは耐久性低下等の影響を及ぼす場合がある。

(2) 中性化の要因

中性化によるひび割れの要因を参図 3-16 に示す。



参図 3-16 中性化によるひび割れの要因¹⁾

1) 材料による要因

中性化は、「配合」、「骨材」、「混和材料」の影響を受ける。コンクリートが密実であれば、二酸化炭素の侵入は抑制されるため中性化の進行は遅くなる。水セメント比が小さいほど中性化速度は遅い。高炉セメントを使用した場合、普通セメントより中性化速度は速くなる。これは、セメントに混合されている高炉スラグのポズラン反応によりコンクリート中の水酸化カルシウムが消費され中性化速度が増大するためである。さらに、品質の悪い骨材を使用した場合、

二酸化炭素の拡散が促進されるため中性化の速度は増大する。

2) 設計・施工による要因

締固め不足等による豆板、コールドジョイントの存在は、二酸化炭素の侵入を助長し、コンクリートの中性化を速める。表層の中性化が進行した領域を中性化領域、中性化領域の平均深さを中性化深さと呼び、中性化による鉄筋腐食は、中性化深さが鋼材位置に達する前に発生する。中性化領域の前面と鉄筋表面までの距離を中性化残りと呼び、この中性化残りが鉄筋発生の指標となる。コンクリートに塩化物イオンが規定以上に含まれていない場合は、中性化残りが10mm以上あれば鉄筋腐食の可能性は少ないと判定する。それに対して、塩化物イオンを含む場合は、中性化残り15～20mmを発生の限界とする場合が多い。ただし、塩化物イオンを含む場合は、この限界値が変動する場合もあるため、調査結果も含めて適切に判断することが重要となる。

3) 環境などの要因（外的要因）

一般に二酸化炭素濃度が高く、温度が高いほど中性化速度は速くなる。湿度については相対湿度50～60%で中性化速度は最大となる。よって、水中や著しい乾燥条件下では中性化速度はかなり遅くなる。

(3) 中性化の進行

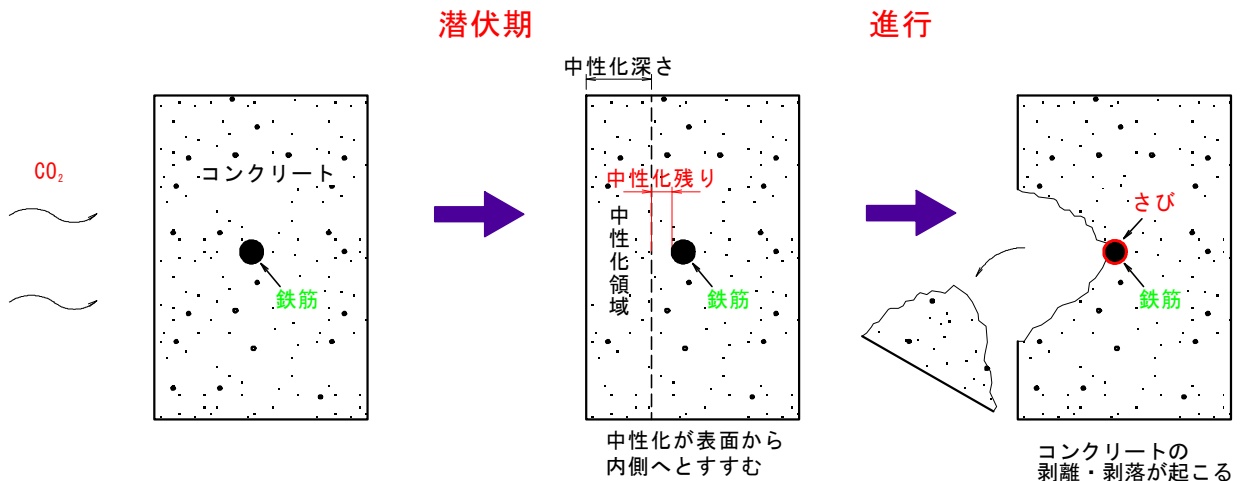
中性化による鉄筋コンクリートの劣化進行の概要を参図 3-17 に示す。劣化過程と劣化の状態の関係を参表 3-7 に示す。

二酸化炭素がコンクリート表面から侵入すると、参図 3-17 に示すように表層からだんだんコンクリートのアルカリ性が低下する。このように中性化は表面から内部に向かって進行する。中性化の前面が鉄筋位置付近まで達すると鉄筋の不動態被膜が破壊され、鉄筋腐食が始まる。環境によって異なるが、中性化残りが通常環境で10 mm程度、塩害環境では15～20 mm程度になると鉄筋腐食の可能性がある。鉄筋腐食が始まると、さびにより鉄筋は膨張し、膨張圧によって腐食ひび割れ及びコンクリート表面の剥離・剥落が生じる。発生した腐食ひび割れにより、鉄筋に酸素や水分が供給され鉄筋の腐食はさらに助長される。

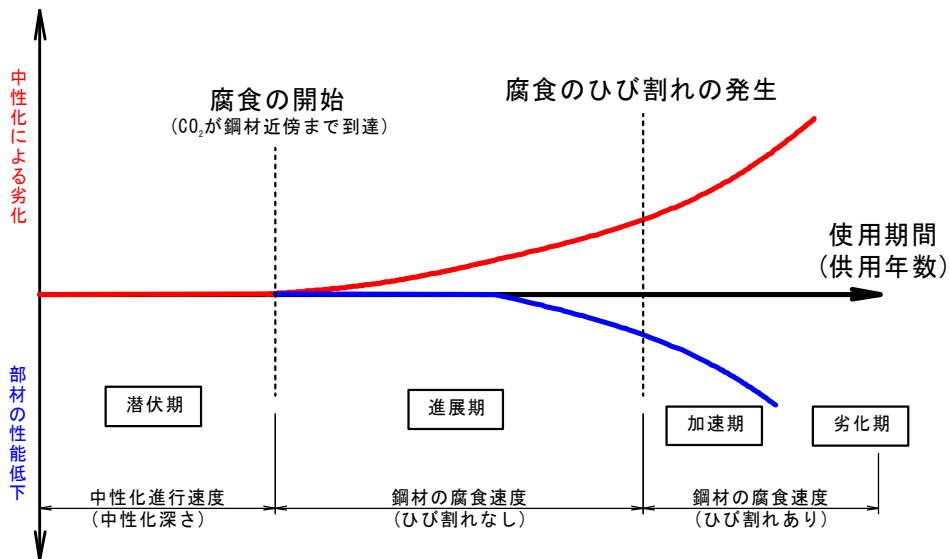
中性化によって低下する性能としては、①安全性：鋼材腐食による耐荷性の低下、②環境性：コンクリートのひび割れ、浮き、剥落、鉄筋露出、さび汁等による景観悪化が考えられる。

参表 3-7 劣化過程と劣化の状態²⁾

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	外観上の変状が見られない。鉄筋腐食開始前。
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない。鉄筋腐食が開始。
グレードⅢ-1	加速期前期	腐食ひび割れが発生。
グレードⅢ-2	加速期後期	腐食ひび割れの進展とともに剥離・剥落が見られる。鋼材の断面欠損は生じていない。
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れとともに剥離・剥落が見られる。鋼材に断面欠損が生じている。



参図 3-17 中性化による劣化の進行



参図 3-18 中性化の進行と性能低下¹⁾

中性化の進行と性能低下を参図 3-18 に示す。劣化過程の外見上の状態を次に説明する³⁾。

1) 潜伏期

中性化は表面から進行しているが、中性化深さは鉄筋の腐食発生限界の深さには達しておらず、中性化残りが確保されている期間。外観上の変状は見られない。

2) 進展期

中性化深さは鉄筋の腐食発生限界の深さに達しており、鉄筋周辺は腐食環境となり、鉄筋に腐食が発生している期間。ただし、さびにより鉄筋が膨張し腐食ひび割れに至るまでは時間がかかるため、外見上変状は見られない。進展期以降の鉄筋腐食の進行は環境によって大きく異なる。特に塩害環境にある場合は腐食進行が極めて速くなる場合もあるため注意が必要である。

3) 加速期前期

鉄筋腐食の進行により、腐食ひび割れが発生する段階。

4) 加速期後期

腐食ひび割れの発生後、ひび割れ幅・長さの進展、部分的なコンクリートの剥離・剥落が発生している期間。ただし、鋼材の断面欠損は生じておらず、主に耐久性能の低下が見られる。急速に腐食が進行する段階。

5) 劣化期

腐食ひび割れが発生とともに大規模な剥離・剥落による著しい鉄筋の断面欠損など変状が見られる期間。構造物の耐久性能のみならず耐荷性能も大きく低下しているため、緊急対策が必要な場合もある。基本的に劣化期に至るまで構造物を放置することは好ましくない。

(4) 中性化の補修工法選定の基本的な考え方³⁾

中性化の対策及び中性化の補修工法選定に関する基本的な事項と中性化の進展毎の工法選定の基本的な考え方を示す。

1) 中性化対策に求められる要求性能

中性化の対策の基本事項は、①二酸化炭素が侵入し難い密実な材料を使用する、②必要なかぶりを確保する（環境毎に必要なかぶりを確保し、中性化深さが鉄筋に及ぶまでの時間を遅らす）、③水分の供給を遮断する（表面保護、ひび割れなどの欠損部の早期補修）

2) 中性化の補修の基本的な考え方

中性化の補修工法については、中性化の進行度合いにより異なるが、次のような方法がある。

① 中性化の遮断・抑制

- ・表面被覆工法
- ・ひび割れ注入工法
- ・含浸工法

② 中性化の除去

- ・断面修復工法
- ・再アルカリ化工法

③ 鉄筋腐食の抑制

- ・電気防食
- ・鉄筋防錆剤の利用

④ 耐荷・変形性の回復

- ・補強工法（補強（FRP・鋼板接着や巻立てなど））
- ・打換え、更新

(5) 中性化の補修・補強工法の選定

劣化過程毎の工法選定の基本的な考え方を以下に示す。また、その一覧を参表 3-8 に示す。劣化過程を考慮した工法選定で重要なことは、参図 3-18 に示した潜伏期と進展期を区別する 2 つの限界状態「鉄筋の腐食開始」と「腐食ひび割れの発生」に着目する。

腐食ひび割れが発生していない潜伏期及び進展期に求められる対策工法の要求性能は、「外部からの劣化因子の遮断・抑制」である。よって、工法選定としては、表面含浸工法、表面被覆工法となり、潜伏期には予防保全的な対策となる。腐食ひび割れ発生後の加速期、劣化期においては、腐食速度の抑制が要求性能となり、ひび割れ注入、表面被覆、断面修復などによる水分等の抑制による鉄筋腐食速度の抑制、電気防食工等による鉄筋防食、劣化期に至っては耐荷性能を補う補強・打換えなどの対策が必要となる。「腐食ひび割れの発生」の前後で補修に関する考え方に変化があることに注意が必要である。

1) 潜伏期

潜伏期は、表面から中性化が進行しているが、中性化は鉄筋の腐食発生限界の深さには達し

ておらず、中性化残りが確保されており、外見上変状は見られない期間である。中性化の予測を行い、その結果に応じて対策を行う。中性化深さが発生限界に達するまでに余裕がある場合は経過観察が基本となる。予定供用期間内に中性化深さが発生限界に達する可能性がある場合は、残存耐用年数、施設の重要度、塩害やASRなどの複合劣化の可能性などを考慮し、予防保全的に表面被覆工法、表面含浸工法等により二酸化炭素の侵入を防止する対策をとる。

2) 進展期

進展期は、中性化深さは鉄筋の腐食発生限界の深さに達しており、鉄筋は腐食している可能性が高いが、腐食ひび割れは発生していない期間である。既に、中性化は腐食発生限界まで達しているため、1) 表面含浸工法、表面被覆工法等により外部からの劣化因子を抑制し鉄筋腐食の進展を抑制する、2) 中性化が進んでいる部分を除去し、鉄筋の防錆処置を施し断面修復を行う等の対策が考えられる。中性化した部分を再アルカリ化する工法等の研究が進み、一部実用化されているが費用対効果の点から課題がある。表面被覆工法などの作業が困難な場合には検討される場合もある。

3) 加速期

加速期は、腐食ひび割れが進展し、部分的にコンクリートの剥離・剥落が発生している期間である。加速期には鉄筋腐食の進行によってひび割れやコンクリートの浮き等が発生しているため、劣化因子の遮断や中性化領域の回復だけでは補修が不十分となる。中性化が鉄筋位置まで達し、ひび割れにより鉄筋腐食が加速した中で鉄筋腐食を抑制し、耐荷性能の低下をできるだけ抑えることが必要となる。

対策シナリオは、頭首工の残耐用年数、規模、重要度などに基づく将来の管理シナリオによって変化する。

頭首工が大規模で、重要度が高く、残存供用年数が長く再補修の頻度が高いと不利益となる場合などは、腐食環境下でも確実に鉄筋腐食を抑制するために、①中性化部分及び鉄筋周辺のコンクリートを除去し、鉄筋に防錆処置を行った後に断面修復を行う工法が基本となる。また、②電気防食工法や内部圧入工法（亜硝酸リチウム）が選択肢となる場合もあるが、初期費用が大きくなるため、頭首工の重要度、劣化要因、劣化予測、費用対効果を十分考慮して適用を検討する必要がある。

一方、頭首工が小規模で、重要度がそれほど高くなく、残存供用年数も比較的短い場合は、ひび割れ注入、表面保護工法、部分断面修復などを組み合わせた最小限の対策を講じ、鉄筋腐食速度をできるだけ緩和し、耐力低下、変状の増大を緩和するという対策も考えられる。しかし、その場合、早期の再劣化等が発生しやすいというリスクに注意が必要である。

以上述べたように、加速期においては、頭首工の規模、重要度、環境、劣化要因、残存供用年数など様々な条件により対策が異なってくるため、十分な検討を行い対策を選定する必要がある。

4) 劣化期

劣化期は、腐食ひび割れの発生とともに大規模な剥離・剥落による著しい鉄筋の断面欠損など甚大な変状が見られる期間である。構造物の耐久性能のみならず耐荷性能も大きく低下しているため、この状態に施設を至らせることは安全上及び費用対効果の上で好ましくない。また、緊急対策が必要な場合もある。

劣化期の対策としては、一般的に大規模な断面修復工法が必要となる。また、耐荷性能を補うために適切な補強工法との組み合わせも必要となる。なお、劣化期の対策は技術的に困難で

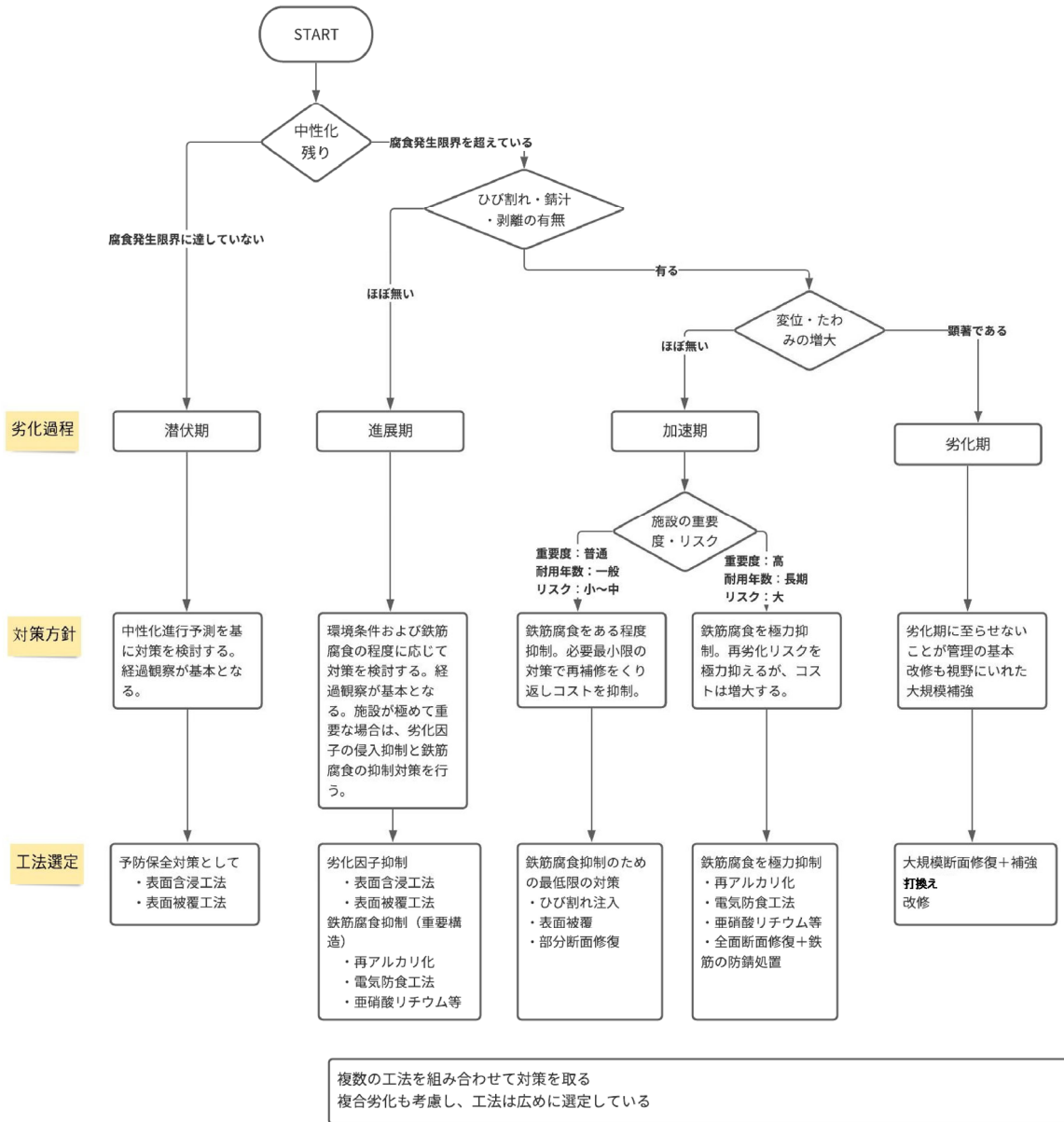
あり、かつ、大きなコストを要することが多いため、撤去、改修対策の検討も必要とされる。

参表 3-8 劣化の進行と対策^{3)、4)}

対策	潜伏期		進展期		加速期		劣化期	
	適用性	対策	適用性	対策	適用性	対策	適用性	対策
経過観察	◎	経過観察	◎	経過観察				応急対策
劣化因子の遮断	◎	表面被覆	◎	表面被覆	△	表面被覆	△	表面被覆 (剥落防止)
			◎	ひび割れ補修	△	ひび割れ補修	△	ひび割れ補修 (剥落防止)
劣化速度の抑制	◎	含浸材塗布	○	含浸材塗布				
劣化因子の除去			△	再アルカリ化 (電気化学的工法)	◎	断面修復	◎	断面修復+補強
耐荷力・変形性能の改善							◎	補強 (FRP・鋼板接着や巻立て等)
							○	打換え
工法選定の理由	ひび割れは発生していない。腐食発生限界深さに達していないので、経過観察が基本となるが、予防保全対策として表面含浸工法又は表面被覆工法について検討する。		鉄筋腐食が始まり、最終的には腐食ひび割れに至る段階。鉄筋腐食を促す劣化因子の遮断、劣化速度の抑制を図るとともに、鉄筋腐食の進行が進みひび割れが生じた脆弱部についてはその除去についても検討する。		腐食ひび割れが発生したあと、急速に腐食が進行する段階。ひび割れ、浮きを生じたコンクリートの除去とともに、かぶりコンクリート片の剥落により第三者への影響が懸念される箇所については、剥落防止を検討する。		鉄筋の腐食に伴う断面積の減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階。劣化した部分の断面修復、剥落防止と共に、部材の耐荷性が懸念される箇所については、補強工も検討する。	

(6) 工法選定フロー

これまでの説明に基づく工法選定フローを参図 3-19 に示す。



参図 3-19 中性化に対する工法選定フロー^{3)、4)}

(7) 頭首工を対象とする場合の注意点

施設のかぶり厚さが薄い場合は中性化による鉄筋腐食が早期に発生する可能性が高く注意が必要である。

(8) 参考文献

- 1) 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成 27 年 11 月 農村振興局整備設計課
- 2) 2022 年制定 コンクリート標準示方書「維持管理編」 土木学会
- 3) コンクリート構造物の維持管理-塩害・中性化・ASR 補修の考え方 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会
- 4) コンクリートの劣化と補修がわかる本 (Update) 和泉意登志・竹田宣典 コンクリート新聞社

3.1.5 塩害に対する工法選定フロー

本節末尾の参考文献 1)～4) に基づき、塩害に対する工法選定に関する事項を取りまとめた。

(1) 塩害の特徴

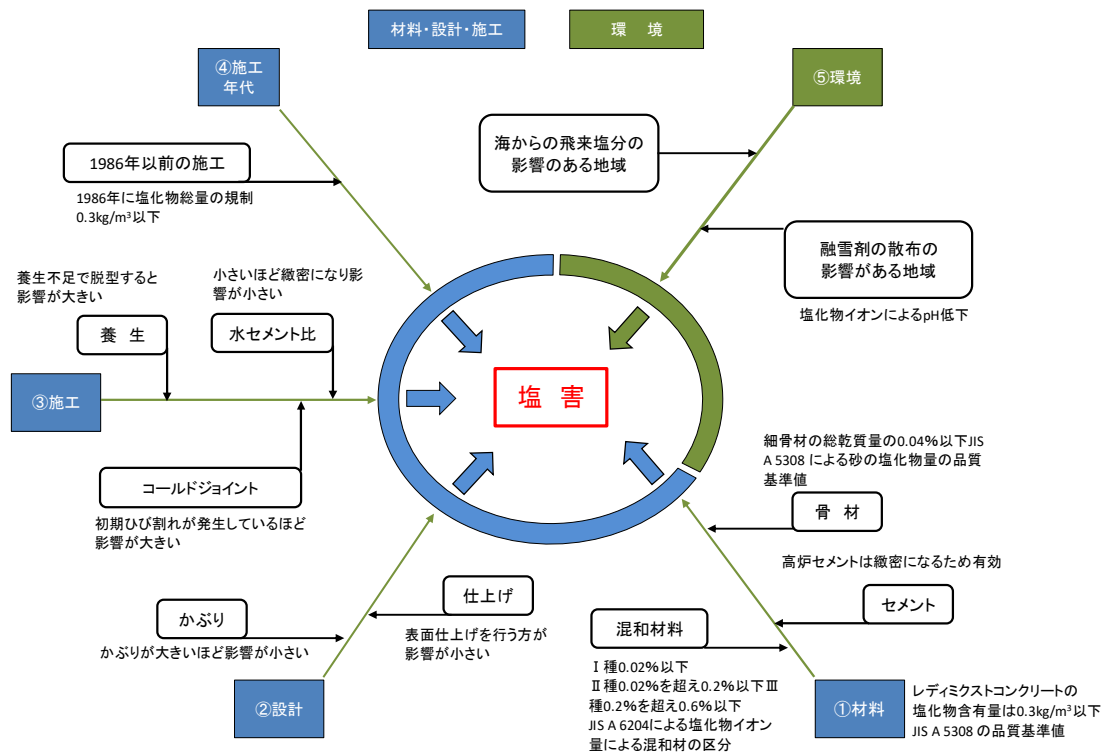
塩害は、コンクリート中の塩化物イオンが原因となり鉄筋腐食が発生し、ひび割れや耐力低下が発生する劣化である。コンクリートに侵入する塩化物イオンは、骨材や混和剤などに初期から含まれる初期内在塩分及び海からの飛来塩分や凍結防止剤など建設後に表面から侵入する外来塩分がある。

健全なコンクリートの pH は 12～13 とアルカリ性が高いため、コンクリート中の鋼材表面には緻密な不動態被膜が形成されており鉄筋は腐食しない。しかし、鉄筋周辺に一定以上の塩化物イオン（一般には 1.2 kg/m^3 ）が存在すると不動態皮膜が部分的に破壊され、鉄筋の腐食が始まる。鉄筋がさびると体積が 2～4 倍に膨張するために、膨張圧が増加しひび割れが発生する。ひび割れが発生すると、外部から塩化物イオン、酸素及び水がより一層供給されるため、鉄筋の腐食は加速され、かぶりコンクリートの剥落や鉄筋の断面積の減少により部材の耐力が低下する。これらの一連の現象を塩害と呼ぶ。

塩害を防止するためには、緻密なコンクリートを用いて、環境に応じた十分なかぶりを取る事が最も重要である。

(2) 塩害の要因

塩害の要因を参図 3-20 に示す。



参図 3-20 塩害の要因¹⁾

1) 材料・設計・施工の要因（内的要因）

① 材料の要因

「セメント」、「骨材」、「混和材料」が材料に起因する塩害の要因であり、これらが塩化物イオンを基準値以上含有していると、塩害発生の可能性が高くなる。一方で、高炉セメントに代表される混合セメントを用いると高炉スラグの潜在水硬性作用により水密性が高まり空隙構造が緻密になり、塩化物イオンの侵入を防ぐため耐塩害性が一般的には向上する。

② 設計・施工の要因

「仕上げ」と「かぶり」が設計に起因する塩害を抑制する要因となる。表面仕上げを実施する場合やかぶりが大きいほど、外部からの塩化物イオンの侵入が抑制されるため塩害の影響が小さくなる。

一方、コールドジョイント等の初期欠陥やひび割れが発生すると、局所的に外部からの塩化物イオンの侵入が促進されるため塩害の進行が早まる。また、養生不足及び水セメント比が大きい場合、コンクリート組織の緻密性が低下することで塩化物イオンが侵入しやすくなり、塩害の影響が大きくなる。さらに、塩化物総量の規制が、コンクリート標準示方書に規定されたのは 1986 年であり、それ以前に施工されたコンクリート構造物ではこの考え方が反映されていないため、初期内在塩分による塩害が起こりやすい可能性がある。

2) 環境などの要因（外的要因）

「海からの飛来塩分の影響がある地域」と「凍結防止剤散布の影響がある地域」では塩害が発生し易い。例えば、冬の季節風の影響がある東日本の福井県以北の日本海側と、台風の影響が大きい沖縄では、海からの飛来塩分の影響が他地域に比べて大きい。

塩害と凍害の複合劣化にも注意が必要である。凍害によるスケーリングやポップアウトによってコンクリートが剥離・剥落し、塩化物イオンがコンクリート中に浸透しやすくなることで促進される。また、塩化物イオンは、凍結融解作用によって濃縮されるので、さらに凍害が促進されることとなる。このように劣化は、複数の要因が相乗的に影響し合い複合的に生じることがあるため、特に海岸に近い場所に設置された農業水利施設では注意する必要がある。

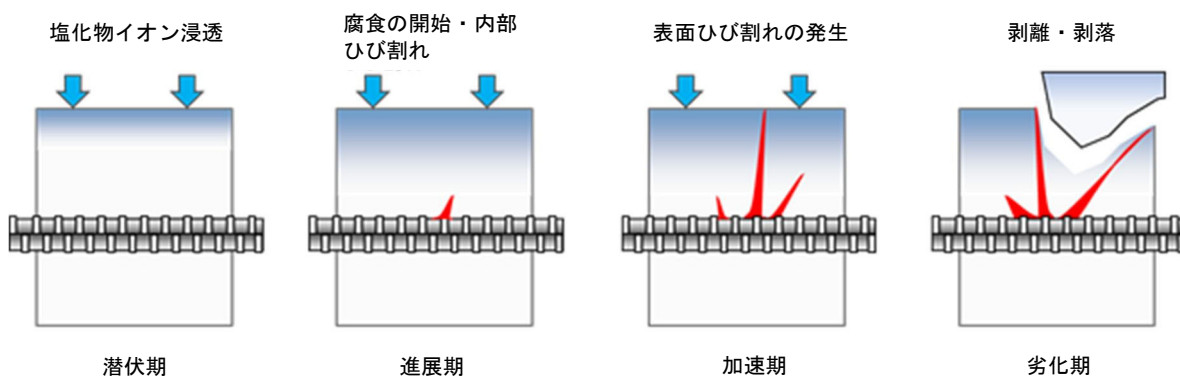
詳細については、農業水利施設の長寿命化のための手引きを参照されたい。

(3) 塩害の進行

塩害による劣化の進行を参図 3-21 に示す。また、劣化過程と劣化の状態を参表 3-9、塩害の進行と性能低下の関係を参図 3-22 に示す。塩化物イオンがコンクリート表面から進入しても、しばらくの間はイオンが鉄筋周辺には到達しないため鉄筋は腐食せず、外観上変化もみられない。鉄筋周辺の鋼材腐食発生塩化物イオンは限界値以下である。塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食が始まるまでの期間を潜伏期と呼ぶ。時間が経過すると、塩化物イオンはより内部に侵入し、鉄筋周辺の塩化物イオン濃度が腐食発生の限界を超えると、鉄筋腐食が始まり、やがて内部ひび割れが発生する。鉄筋腐食の始まりから表面ひび割れが発生するまでの期間を進展期と呼ぶ。進展期においても一般的には外見上の変化は見られない。表面ひび割れが発生し、コンクリートの剥落や剥離、鉄筋の断面減少による耐力低下が発生する期間を加速期と呼ぶ。加速期前期では、表面ひび割れ、浮き、さび汁などの変状が見られる。加速期後期に入ると表面ひび割れの幅や長さが大きくなり、本数も多数発生するほか、コンクリートの剥落や剥離が見られるが、鉄筋の著しい断面減少までは至らない。また、環境によっては鉄筋の腐食速度が急激に速まるため注意が必要

となる。加速期を過ぎると、大規模な剥落や著しい鉄筋の断面減少により耐力が大きく低下する劣化期となるが、基本的には劣化期に至る前に対策を施すことが安全性の確保及び対策コスト面からも望ましい。

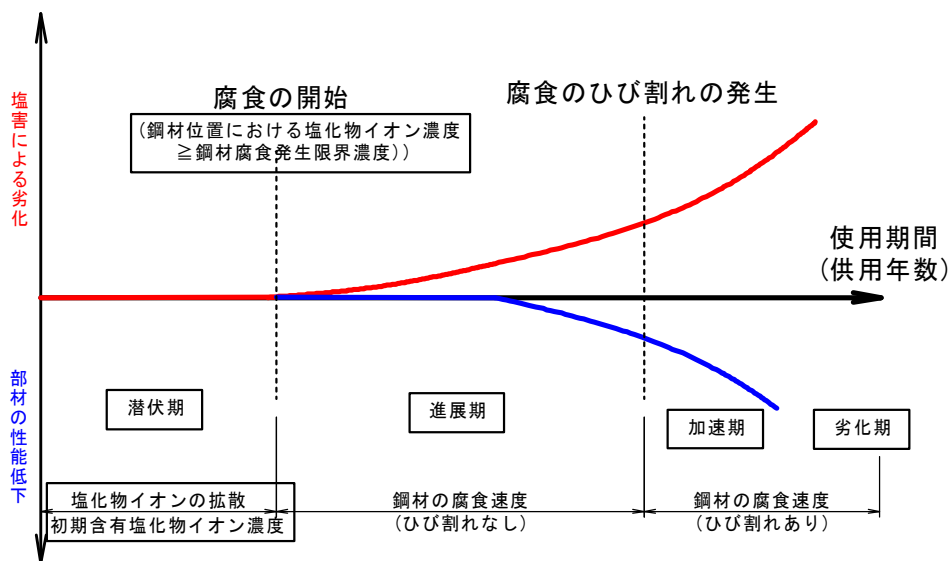
塩害によって低下する性能としては中性化と同じく、①安全性：鋼材腐食による耐荷性の低下、②環境性：コンクリートのひび割れ、浮き、剥落、による景観悪化などが考えられる。



参図 3-21 塩害による劣化の進行

参表 3-9 劣化過程と劣化の状態²⁾

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	外観上の変状が見られない。鋼材腐食発生限界濃度以下。
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない。鋼材腐食発生限界濃度以上、鉄筋腐食が開始。
グレードⅢ-1	加速期前期	腐食ひび割れや浮きが発生。さび汁が見られる。
グレードⅢ-2	加速期後期	腐食ひび割れの幅や長さが大きく本数も多数発生している。腐食ひび割れの進展に伴うかぶりコンクリートの部分的な剥離・剥落が見られる。鋼材の著しい断面減少は見られない。
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れの進展に伴う大規模な剥落・剥離が見られる。鋼材の著しい断面減少が見られる。変位・たわみが大きい。



参図 3-22 塩害の進行と性能低下¹⁾

(4) 塩害の補修工法選定の基本的な考え方^{3) 4)}

塩害の対策及び塩害の補修工法選定に関する基本的な事項、塩害の進展毎の工法選定の基本的な考え方を示す。

1) 塩害対策に求められる要求性能

塩害対策に求められる要求性能は以下の通りである。

- ・劣化因子の遮断
 - ・劣化因子の除去
 - ・鉄筋腐食の抑制
 - ・コンクリート脆弱部の補修
- ① 劣化因子の遮断については、鉄筋腐食の原因となる塩化物イオン、水、酸素などのコンクリート中への侵入を遮断、低減する。
 - ② 劣化因子の除去については、既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する。
 - ③ 既に腐食している鉄筋腐食の進行を抑制する。
 - ④ コンクリートのひび割れ、浮き、剥離、鉄筋露出部分を修復する。

2) 塩害の補修の基本的な考え方

塩害の補修工法については、塩害の進行度合いにより異なるが、次のような方法がある。

- ① 劣化因子の遮断
 - ・表面被覆工法
 - ・表面含浸工法
 - ・ひび割れ注入工法
- ② 劣化因子の除去
 - ・脱塩工法（電気泳動）
 - ・断面修復（塩化物イオン侵入部、劣化部分の除去）
- ③ 鉄筋腐食の抑制
 - ・電気防食工法
 - ・鉄筋防錆剤の活用
- ④ コンクリート脆弱部、腐食鉄筋の修復

- ・部分的断面修復
- ・全面断面修復
- ・エポキシ鉄筋、ステンレス鉄筋

塩害の進行に応じた工法選定の基本的な考え方を以下に示す。また、その考え方をまとめた表を**参表 3-10**に示す。

① 潜伏期

潜伏期は鉄筋周辺での塩化物イオン濃度がまだ腐食発生限界に達していない期間である。潜伏期の対策は塩化物イオンの拡散予測を行い、その結果に基づいて補修対策を選定する。予定供用期間内に鉄筋位置で塩化物イオンが腐食発生限界を超えない場合は、補修は不要であり経過観察が基本となる。将来的に鉄筋位置で塩化物イオンが腐食発生限界を超える可能性がある場合は、劣化因子の遮断等を目的とした表面含浸工法、表面被覆工法等の対策を検討する。

② 進展期

進展期には鉄筋位置で塩化物イオンが腐食発生限界を超え、鉄筋腐食が始まっている可能性が高い期間である。対策としては、外部からの劣化因子である塩化物イオン、酸素、水等ができるだけ遮断し、鉄筋腐食の進行を抑制することである。よって、工法としては表面含浸工法又は表面被覆工法が選択肢となる。

構造物によっては、塩化物イオンの濃度が著しく高い場合や劣化の顕在化を許容できない維持管理が求められる場合（道路として供用されている場合等）もある。進展期には、すでに発生限界を超える塩化物イオンが鉄筋周辺に存在するため、鉄筋は腐食環境にある。そのため、塩化物イオンの存在下でも鉄筋腐食を抑制するための工法として電気防食工法や亜硝酸リチウム塗布工法がある。また、塩化物イオンを含んだコンクリート部分を除去し、塩化物イオンが侵入し難い断面修復材や表面被覆材を用いて除去部分を修復するとともに、必要であれば鉄筋を交換し、防錆措置等を取る工法も抜本的な対策となる。以上の対策は腐食環境を抜本的に改善する工法ではあるが、初期費用は増大するため、構造物の重要性や費用対効果を十分考慮した上で適用の検討を行う必要がある。

③ 加速期

加速期に入ると、鉄筋の膨張圧のために腐食ひび割れが表面に発生する、コンクリートに浮きが発生するなどの現象が見られる。表面ひび割れが発生した段階ではすでに内部での鉄筋の腐食が進行している場合が多い。腐食ひび割れは、鉄筋に沿って発生する場合が多い。ひび割れの幅はかぶりや鉄筋径により様々であるが、小さなものは0.1 mm程度、腐食が進行すると1 cmに及ぶ場合もある。また、内部の鉄筋と鉄筋の間にひび割れが発生し、表面に現れない場合もある。目視ではさび汁及びその分布に注意が必要とされる。

加速期の対策の要求性能としては、すでに進行中の鉄筋腐食反応を抑制あるいは停止させることになる。ひび割れ注入工と表面保護工（表面含浸工法又は表面被覆工法）を組合せた対策をとる場合もある。

一方、劣化の顕在化を許容できない維持管理が求められる構造物では、塩化物イオンの存在下でも鉄筋腐食を高度に抑制するために電気防食工法や亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食の抑制工法も選択肢となる。さらに、塩化物イオンを含んだコンクリート部分を完全除去し、塩化物イオンが侵入し難い断面修復材や表面被覆材を用いて除去部分を修復するとともに、鉄筋の防錆処置を完全に行うことで鉄筋腐食のリスクを低下させる工法もある。このような腐食環境

を改善する工法も抜本的な対策ではあるが、初期費用は増大するため、構造物の重要性や費用対効果を十分考慮した上で、急激な劣化進行の可能性があることも踏まえて適用の検討を行う必要がある。

④ 劣化期

劣化期は、大規模な剥離・剥落による著しい鉄筋の断面欠損など甚大な変状が見られる期間である。構造物の耐久性能のみならず耐荷性能も大きく低下するため、緊急対策が必要な場合もある。劣化期に至るまで構造物を放置することは安全上及び費用対効果の上で好ましくない。

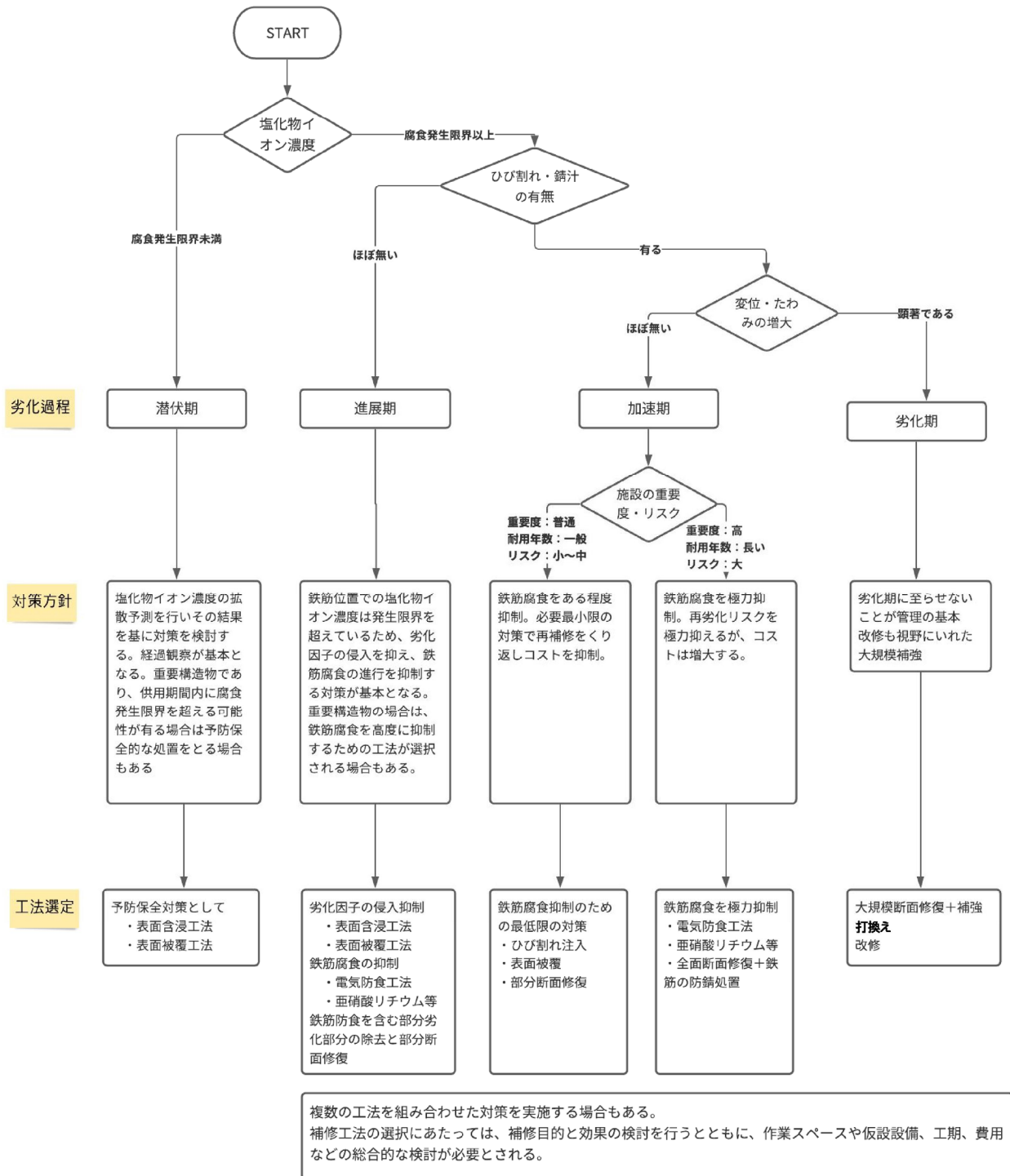
劣化期に至ると大規模な断面修復工法が必要となる。また、耐荷性能を補うために適切な補強工法との組み合わせも必要となる。劣化期の対策は技術的に困難であり、かつ、大きなコストを要することが多いため、撤去、改修対策も視野に入れた総合的な対策の検討が必要とされる。

参表 3-10 塩害の進行と対策^{3),4)}

対策	潜伏期		進展期		加速期		劣化期	
	適用性	対策	適用性	対策	適用性	対策	適用性	対策
経過観察	◎	経過観察	◎	経過観察				応急対策
劣化因子の遮断	◎	表面被覆	◎	表面被覆	△	表面被覆	△	表面被覆 (剥落防止)
			◎	ひび割れ補修	△	ひび割れ補修	△	ひび割れ補修 (剥落防止)
劣化速度の抑制	◎	含浸材塗布	○	含浸材塗布				
劣化因子の除去	△	電気防食工法	△	電気防食工法	◎	断面修復	◎	断面修復+補強
耐荷力・変形性能の改善							◎	補強 (FRP・鋼板接着や巻立て等)
							○	打換え
工法選定の理由	ひび割れは発生していない。経過観察が基本となるが、予防保全対策として表面含浸工法又は表面被覆工法について検討する。		鉄筋腐食が始まり、最終的には腐食ひび割れに至る段階。鉄筋腐食を促す劣化因子の遮断、劣化速度の抑制を図るとともに、鉄筋腐食の進行が進みひび割れが生じた脆弱部についてはその除去についても検討する。		腐食ひび割れが発生したあと、急速に腐食が進行する段階。ひび割れ、浮きを生じたコンクリートの除去と共に、かぶりコンクリート片の剥落により第三者への影響が懸念される箇所については、剥落防止を検討する。		鉄筋の腐食に伴う断面積の減少により部材の耐荷力の低下が懸念される段階。劣化した部分の断面修復、剥落防止と共に、部材の耐荷性が懸念される箇所については、補強工も検討する。	

(5) 工法選定フロー

これまでの説明に基づく工法選定フローを参図 3-23 に示す。



参図 3-23 塩害に対する工法選定フロー^{3), 4)}

(6) 頭首工を対象とする場合の注意点

塩害は他の劣化要因と比較して劣化の進行が早いいため、早期の対処が望ましい。

なお、塩化物イオン濃度 1.2 kg/m^3 以上の場合、塩害によるひび割れが発生する可能性があることから、潮風や塩水の遡上等の影響を受ける頭首工においては、堰柱等の施設は特に注意して

観察する。

(7) 参考文献

- 1) 農業水利施設の長寿命化のための手引き 平成 27 年 11 月 農村振興局整備部設計課
- 2) 2022 年制定コンクリート示方書【維持管理編】 土木学会
- 3) コンクリート構造物の維持管理-塩害・中性化・ASR 補修の考え方 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会
- 4) コンクリートの劣化と補修がわかる本 (Update) 和泉意登志・竹田宣典 コンクリート新聞社

3.1.6 ひび割れに対する工法選定フロー

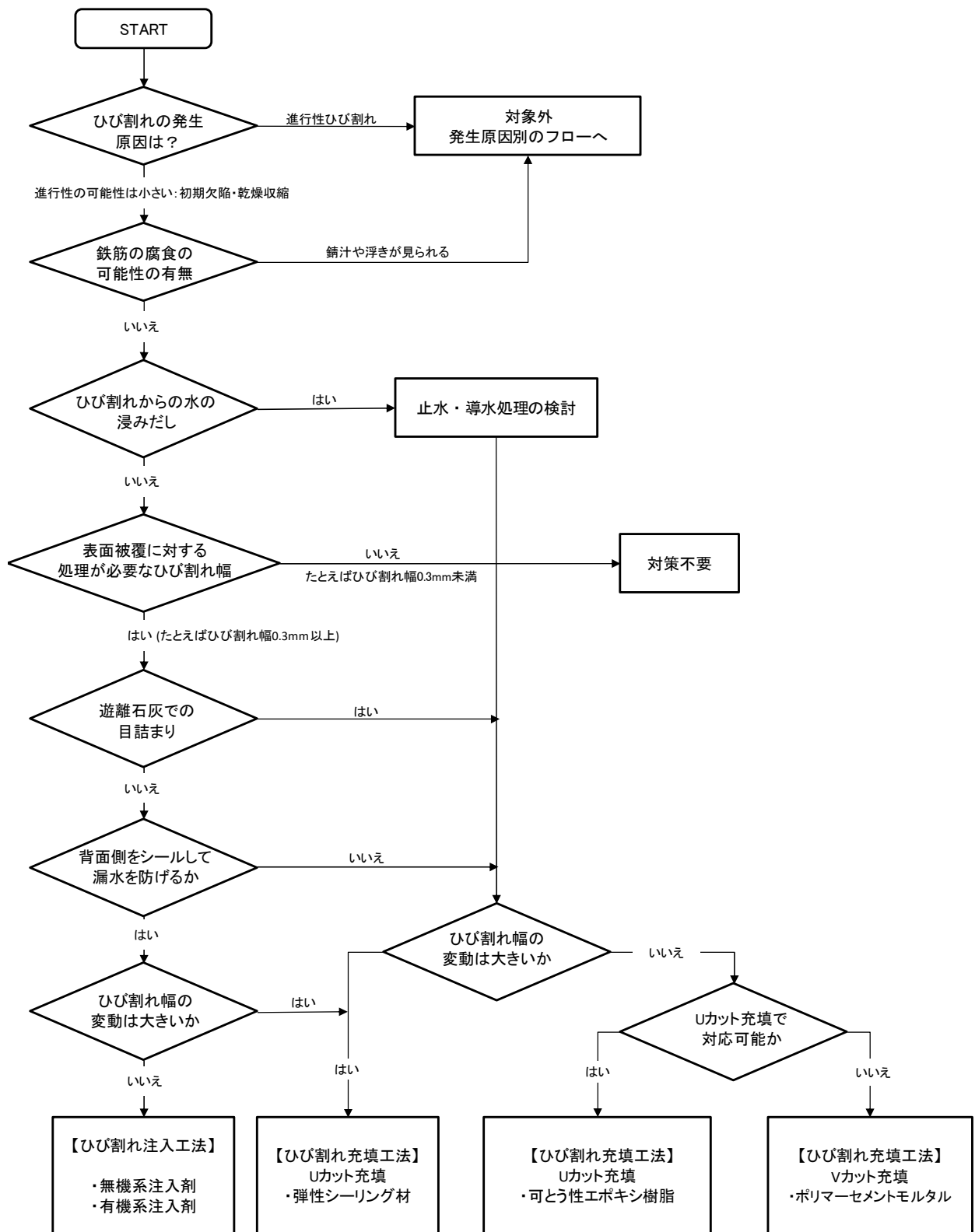
参考③3.1.1～3.1.5では、劣化要因に基づく工法選定を示した。ここでは、施設に発生したひび割れの状態に基づく工法選定フローを示す。工法選定フローは参考文献1)に示された開水路に発生するひび割れを対象としたひび割れ補修工法の選定に関する報告に基づき作成した。頭首工の堰柱、エプロン、取水工、護岸工等は、環境条件が異なるものの構造仕様がよく似た施設が多いため、現時点では、開水路を対象としたひび割れの工法選定フローが参考になると考えた。

ひび割れに基づく対策の検討を行う際には、ひび割れの発生状況とその原因把握が重要となる。これは、ひび割れの発生原因がわからないと有効な対策をたてるのが難しいためである。個別のひび割れの特徴と発生原因を十分配慮した補修が必要となる。

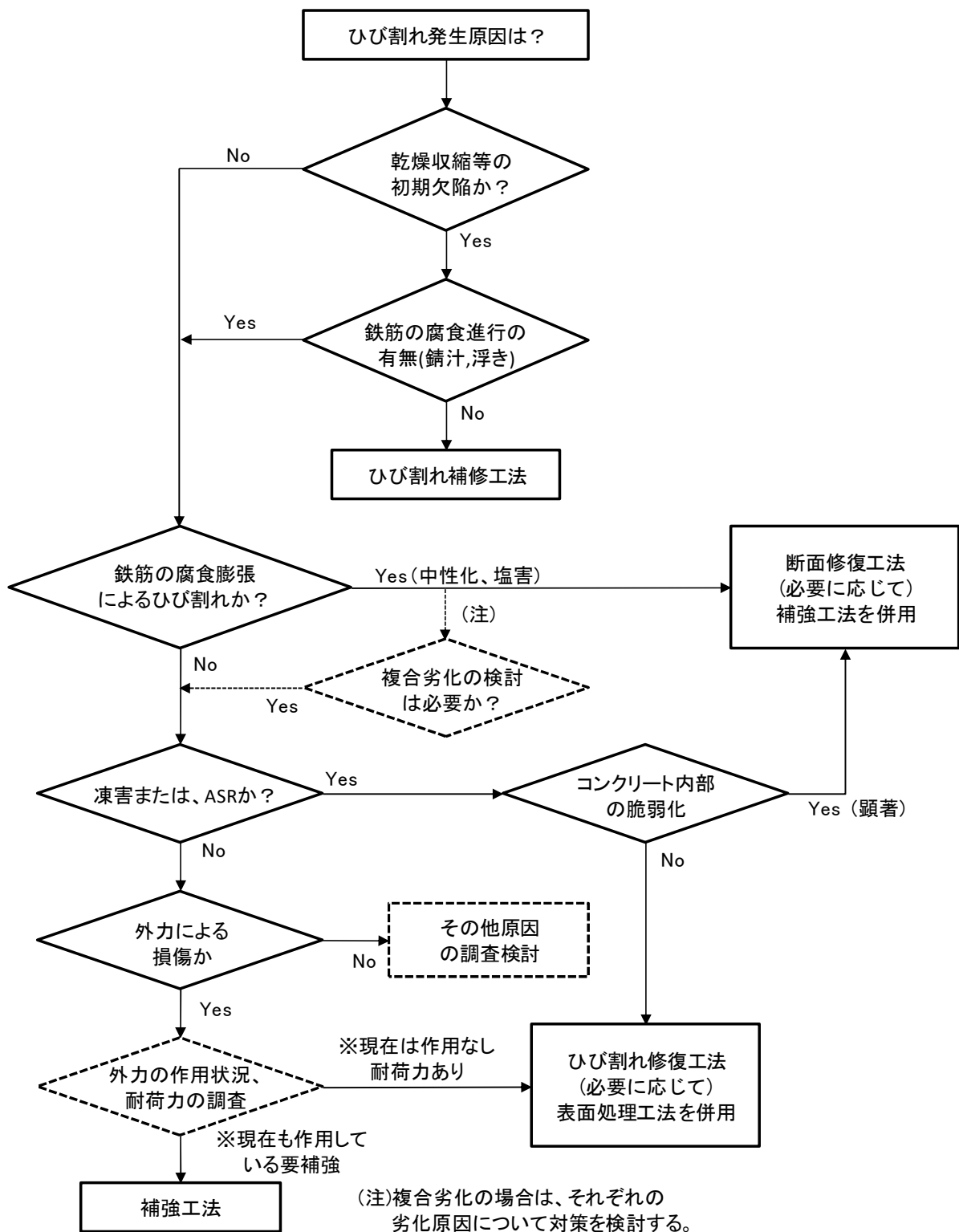
ひび割れの特徴を表す項目を以下に示す。

- ① ひび割れの進行性
- ② ひび割れ幅
- ③ ひび割れからの水の浸みだし（漏水）
- ④ ひび割れ幅の変動
- ⑤ 鉄筋腐食

参図 3-24 に開水路の初期ひび割れを対象とした補修選定フローを示す。ひび割れにそれほど進行性がない場合、これは、乾燥収縮ひび割れや初期欠陥、地震などの偶発作用によるひび割れ、各種劣化が収束した状態でのひび割れなどが想定されるが、上に述べた、ひび割れからの漏水、ひび割れの変動、鉄筋腐食などを考慮した補修対策を講じる。ひび割れに進行性が有る場合は、参図 3-24 の範囲外となり、ひび割れの原因を考慮した工法選定を行う。開水路を対象としたひび割れの発生原因別の工法選定フローを参図 3-25 に示す。



参図 3-24 工法選定フロー（開水路の初期ひび割れを対象）¹⁾



参図 3-25 ひび割れの発生原因別の工法選定フロー

(1) 参考文献

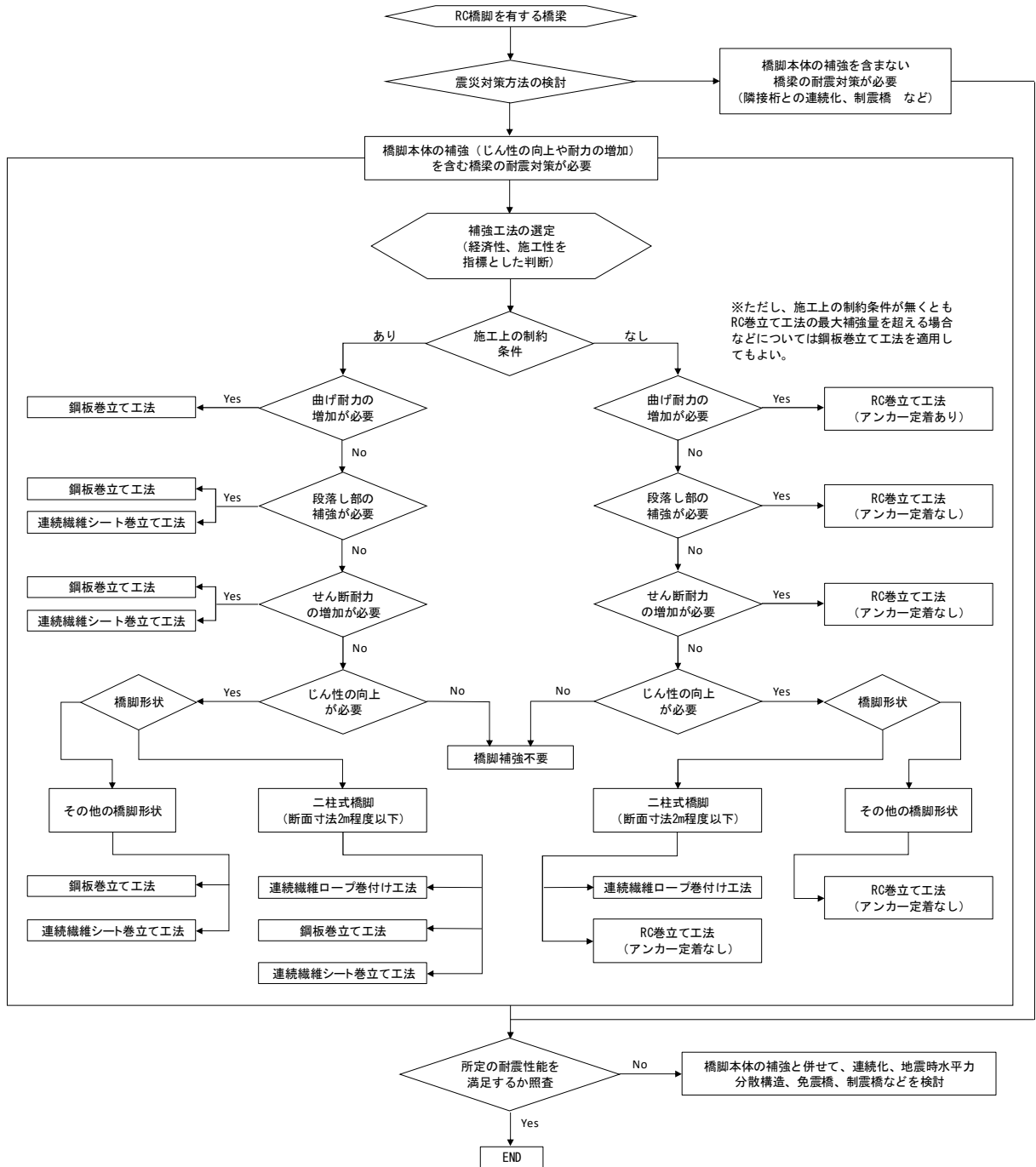
- 1) コンクリート開水路のひび割れ補修における課題と対応策(H30 農業農村工学会大会講演会講演要旨集)
上條達幸・森 丈久・松田展也

3.2 補強工法の選定

頭首工の堰柱、門柱等に類似した柱状構造物である鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強工法の選定については、設計要領 第二集 橋梁保全編 平成 29 年 7 月 に示されていることから、参考として、鉄筋コンクリート橋脚耐震補強工法選定の標準的な流れを**参図 3-26**に示す。

なお、鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強では、増厚工法（RC 巻立て工法）を用いることを標準とし、設計・施工上の制約条件、及び経済性・施工性を十分勘案し、鋼板巻立て工法、連続繊維シート巻立て工法を採用することとしている。^{※1}

※1 設計要領 第二集 橋梁保全編（平成 29 年 7 月）6-1-3 耐震補強工法の選定 P. 8-38



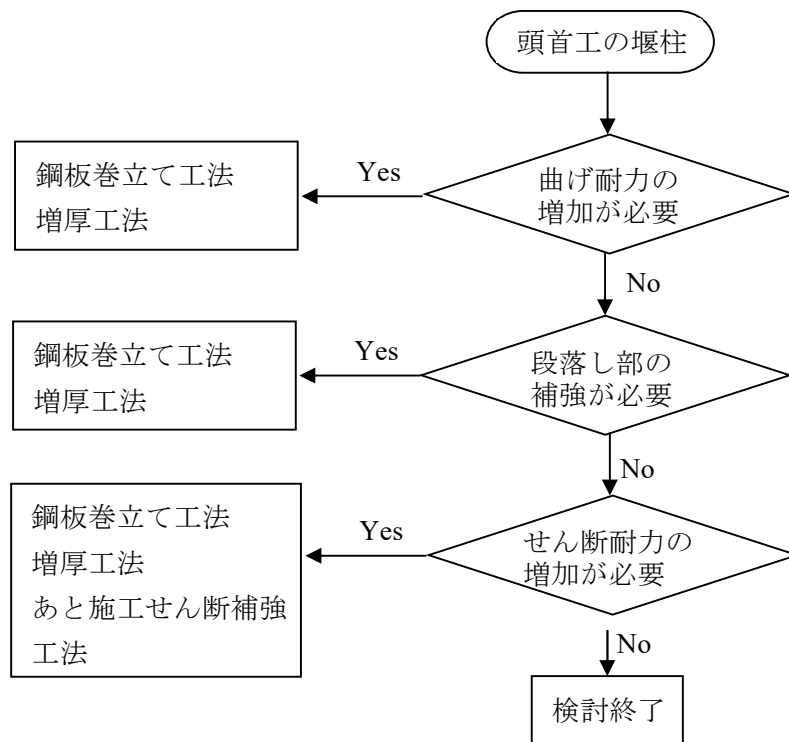
参図 3-26 鉄筋コンクリート橋脚耐震補強工法選定の標準的な流れ

参図 3-26 出典：設計要領 第二集 橋梁保全編（平成 29 年 7 月）（東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社）6-1-3 耐震補強工法の選定 P. 8-40

3.2.1 補強工法の選定フロー

前頁の参図 3-26 鉄筋コンクリート橋脚耐震補強工法選定の標準的な流れは、橋脚の耐震補強工法の選定フローである。

この選定フローを踏まえ、国営頭首工における耐震補強事例を基に、参図 3-27 頭首工堰柱の補強工法選定フローを作成した。



参図 3-27 頭首工堰柱の補強工法選定フロー

参考④ 補強工法の事例紹介

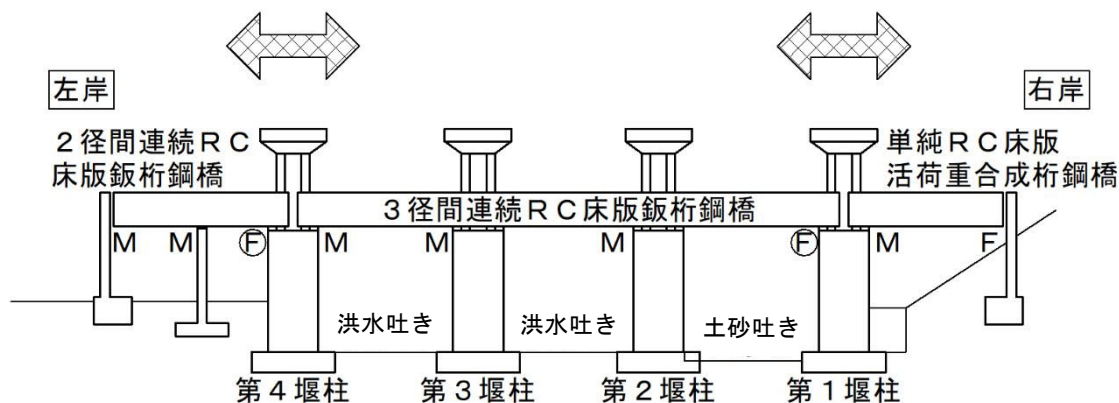
4.1 異形鉄筋埋設工法による耐震補強の事例¹⁾

OK 頭首工は、昭和 57 年に竣工した可動堰と固定堰からなるフローティングタイプ半可動堰であり、一級河川 I B 川に設置されている。計画洪水量は 2,300 m³/s、取水量は最大 21.7 m³/s、堰長は 171.0 m（可動堰 90.0 m、固定堰 69.0 m）である。竣工から約 40 年が経過し、老朽化が進んでいることから平成 21 年から第二期事業に着手した。

(1) 機能診断調査

機能診断調査を実施した結果、OK 頭首工の堰柱のひび割れは、

- ① 全体の約 60%が補修を必要としない 0.2 mm 以下のひび割れである
 - ② ひび割れ幅が大きなひび割れ（最大ひび割れ幅が 0.55 mm）は第 4 堰柱に集中しており全堰柱のひび割れ長の 7%であった。
 - ③ 中性化深さやひび割れ深さからしても十分な被りがある
- 以上から、「堰柱としてのひび割れ補修の必要性はない」と判断された。



参図 4-1 OK 頭首工の耐震上の特徴

(2) 耐震照査

レベル 2 の地震動を想定した動的解析が行われた。その結果、第 1 堰柱と第 4 堰柱の堰軸方向のせん断力が不足していることが明らかになり、これらの堰柱に対するせん断耐力の補強が必要と判定された。

補強対策の検討では、「減衰定数の最適化」及び「ディープビーム効果」を考慮された解析が行われ、これらの効果を適切に評価することによりせん断補強の範囲は当初より小さくなった。補強対策の検討において考慮された点については次項 (3) で説明する。

なお、既存のせん断補強鉄筋の取り扱いおよび動的応答解析時の留意点については、令和 6 年 3 月に改定された設計基準「頭首工」の記述を合わせて参照されたい。

(3) せん断補強の検討に関する留意点

せん断補強に関しては次の 3 点を考慮した。

- a.地震時応答値の部材の減衰定数は、非線形部分では「 $h=2\%$ 」、線形部分では「 $h=5\%$ 」とした。

- b.せん断耐力の評価には「ディープビーム効果を見込む」ことにした。
- c.部材の応答値が他の堰柱よりも大きくなる原因として、「管理橋の支承条件が固定である」ことが挙げられる。そこで、他の堰柱にも荷重を分散させることを考慮した。

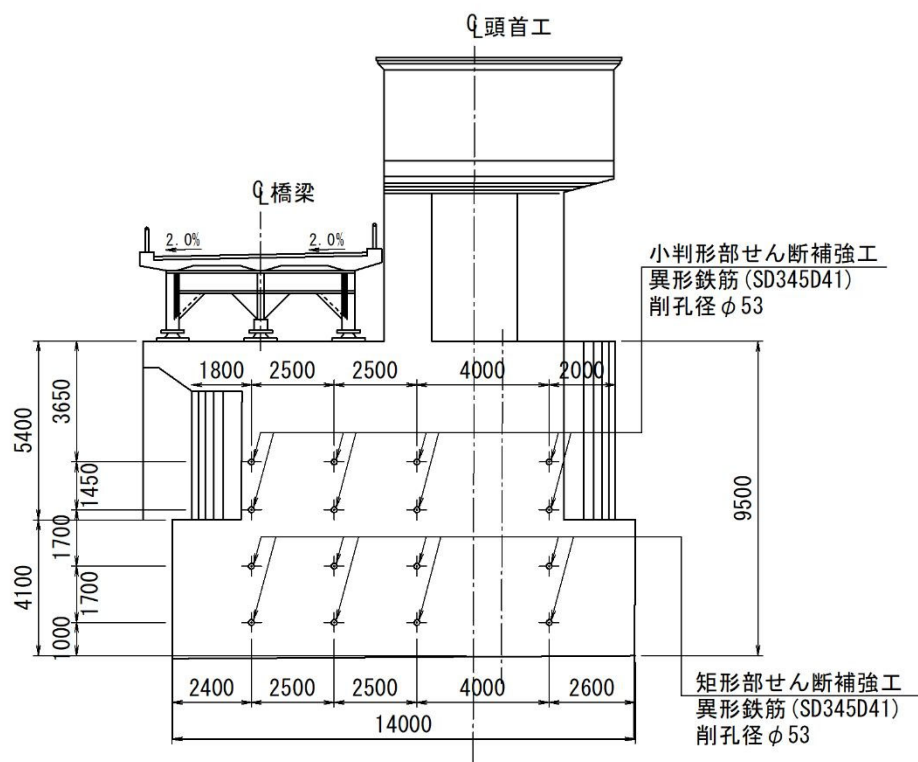
(4) せん断補強工法（耐震補強）の概要

せん断補強工法の選定に当たっては、河川管理者から河川の流下断面に対する阻害率を現況以上に増やさないう条件が付けられたため、①河川の流下断面を現況以上に阻害しないこと、②施工が容易で信頼性が高いこと、③経済的に有利であること、を基本に検討を行っていた。

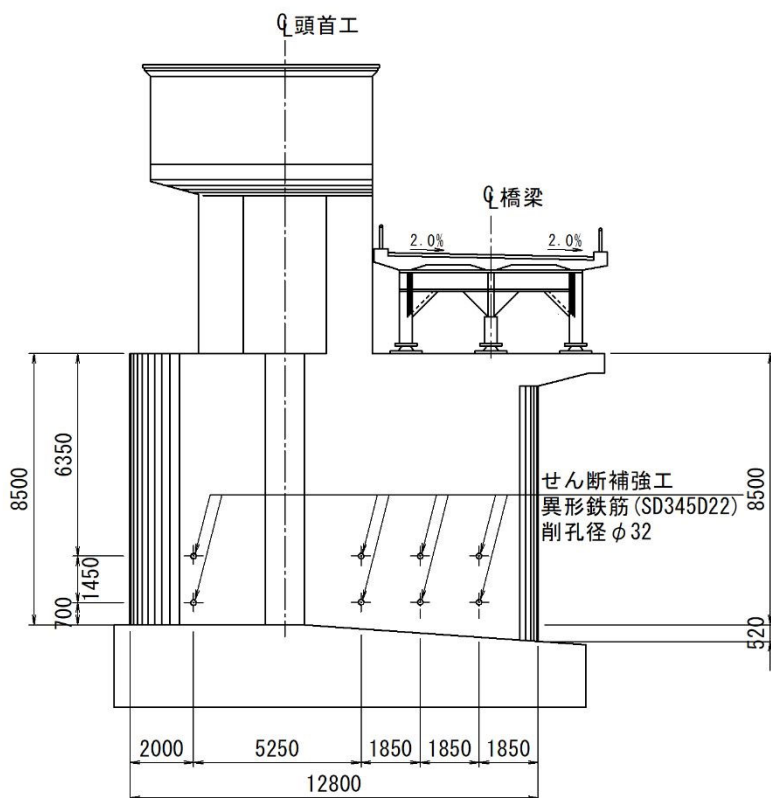
その結果、躯体への定着方法と削孔後の種類により、「ポストヘッドバー工法」と「RMA 工法」を選定し、更に、この中から施工が容易で信頼性と経済性に優れた「RMA 工法」を採用した。

(5) せん断補強の鉄筋

不足するせん断耐力および耐震対策として第 1 堰柱は矩形断面部に D41×8 本と小判断面に D41×8 本、第 4 堰柱は小判断面 D22×8 本のせん断補強工を実施した。



参図 4-2 第 1 堰柱せん断補強工配置図



参図 4-3 第 4 堰柱せん断補強工配置図

(6) せん断補強鉄筋埋設工法の作業内容

- 堰柱内の鉄筋の位置を探查機で調査したが、鉄筋の位置が判りづらく、かぶりも 100 mm 程度と厚かったため慎重に行った。
- 削孔時、手前側の主筋を通過するまでは、コンクリートコアドリルの削孔速度（回転数）を落とし、慎重に行った（主筋への影響を考慮）。
- 削孔時、奥側の鉄筋付近では十分注意しながら削孔を行った（奥側主筋への影響を考慮）。奥側の鉄筋にコアドリルが当たったときは、削孔を直ちに中断し、検測を行い設計長の 90%以上を確認し、監督員の下承のもと鉄筋長を変更して施工した。
- 坑内を清掃し、定着材である無機系セメントモルタルカプセル（以下、カプセルと呼ぶ）を真水に浸漬させた後、孔内に順次塩ビ製パイプを用いて孔底まで確実に挿入した。
- カプセル挿入後、補強鉄筋はハンマードリルを用いて回転させながら挿入した。その際、カプセルがよく攪拌されるように十分な回転を行った。

(7) 困難であった作業内容

主筋および配力筋の位置は探査機にて調査は可能であるが、はば止筋や段取り筋・セパレーターの位置までは判明できず、削孔に影響した。

瀬替工の河川横断部分（幅 30 m 区間内に HP φ 1000 を 20 列設置）での計画は、過去 5 年の該当期間の平均流量を少し上回る通水能力で計画されていた。しかし、過去のデータによるとこの平均流量を上回る日は 40% 以上あり約 2.3 日に 1 回越流する可能性があった。そこで承諾行為として HP φ 1200 を 19 列設置に変更し、約 1.8 倍の通水能力を確保することにより越流する可能性を 15 日に 1 回と低減した。実施工においては、期間中 2 回程越流間際の流量を経験し、横断部分や他部分に被害を受け通行不可となったため、修復が必要となり工程に大きく影響した。大型土のうしか使用できないため、仮締切りからの漏水も多かった。

耐震補強工事を含め頭首工に関連する補修・補強工事を計画するにあたっては、工法選定も重要であるが、施工は河川内作業で、施工期間も短期間であり、河川の増水に伴う危険性や影響を十分に考慮しての工法選定や 1 シーズン当りの施工量および仮設計画も含めた選定（計画）が重要である。これらにより安全性・品質・工程確保の向上に繋がると考える。

(8) 参考文献

- 1) 吉田 知永 (2014) : 岡島頭首工における堰柱の耐震補強工事について、水と土 (172)、37-41.

4.2 鋼板巻立て工法による耐震補強の事例

鋼板巻立て工法は、既設の柱状構造物に補強鋼板を巻き立て、コンクリート構造物のせん断耐力及びじん性の向上を図る耐震補強工法である。

本事例では、耐震照査の結果から現況施設の堰柱及び門柱に対してせん断補強が必要であることが明らかとなり、施設の重要度を考慮し、躯体の剛性が向上し、曲げに対しても変形が少なく、レベル2地震時においても、健全性を損なわない耐震性を確保することができる鋼板巻立て工法を採用した。鋼板表面については、防食のために層厚が2mmと薄く耐久性にも優れる多機能特殊ポリマーセメントモルタルによる処理を行った。

(1) 施設の概要

MI頭首工は、昭和33年に竣工し、その後、昭和53～58年に河床低下、護岸の損傷、取水量の増加に対応する改修工事を行った。

(2) 耐震補強の概要

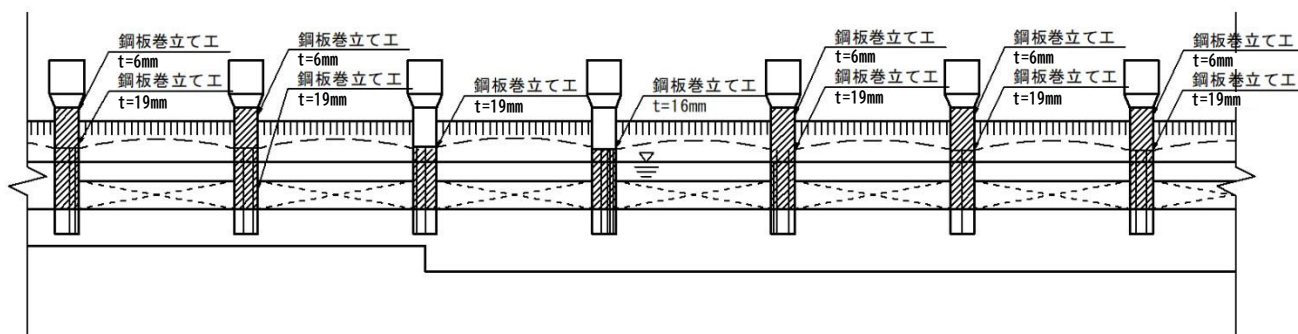
二次元動的解析の結果から、左岸擁壁、右岸土砂吐き左堰柱、右岸土砂吐き右擁壁柱、ケーソンにおいて曲げ応力が許容値を超過したため、それぞれの耐震補強案を提案した。しかし、二次元動的解析では、ケーソンや堰柱、門柱と四連ボックス形状の土砂吐き部の一体的な検討ができない他、堰柱は、それぞれ地盤条件が異なることから、個別の解析が必要であった。このため、次年度に三次元動的解析を追加した。三次元解析の結果から、堰柱、門柱は、せん断補強として鋼板巻立て工を採用した。

(3) 三次元動的解析の採用

二次元(断面)解析と三次元解析を比較すると、三次元モデルは、地盤の連続性の再現等の不確定要素があるものの、三次元的な地震の挙動及び各施設の相互作用が考慮でき、各施設において適切な対策工法の検討が可能であると判断し、三次元解析を採用した。

(4) せん断補強の鋼板巻立て

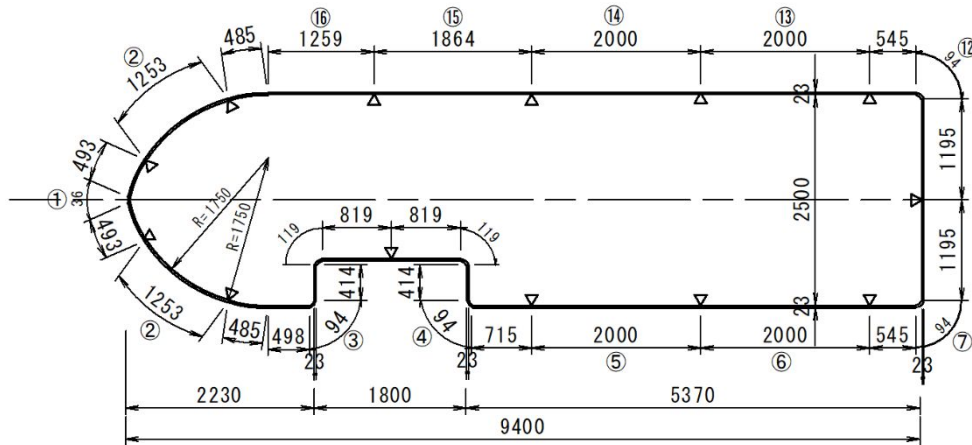
せん断耐力を増加させるために鋼板巻立て工法を採用した。鋼板厚は6～19mm、充填材はエポキシ樹脂(5mm)、防食として多機能特殊ポリマーセメントモルタル工法(2mm)を採用した。参図4-4に鋼板巻立て工の位置図を示す。また、鋼板取付断面図を参図4-5に、鋼板の展開図を参図4-6に示す。



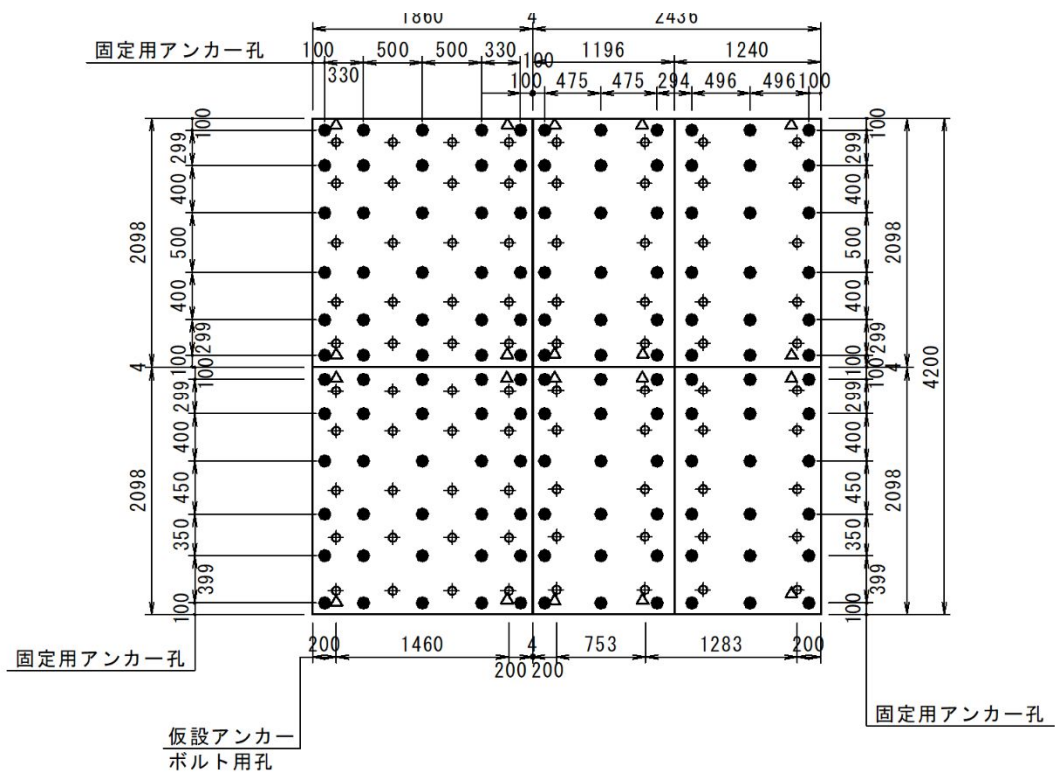
参図 4-4 鋼板巻立て工位置図

(5) 鋼板巻立て工法の作業内容

- ・堰柱の実測寸法及び主筋・配力筋の位置を調査した。
- ・衝撃が小さいスパイクハンマでコンクリートをはつり、その後、高圧洗浄で下地処理を行った。
- ・鋼板を固定するアンカーの位置確認・削孔・設置を行った。
- ・鋼板を加工・搬入・溶接・巻立てを行った。
- ・無収縮モルタルを鋼板と躯体の間に注入し、その後、鋼板の防錆処理を行った。



参図 4-5 堰柱上段 鋼板取付け断面図



- 固定用アンカー孔
- ⊕ 注入孔兼空気抜孔
- △ 仮設アンカーボルト用孔

参図 4-6 鋼板展開図

(6) 困難であった作業内容

- 堰柱の図面は存在したが、実際の主筋、配力筋の位置が明確ではなかった。このため、鉄筋を切断しないようにするため、鉄筋探査とフープ筋等の鉄筋墨出しを行い、削孔位置を決定した。
- 堰柱に巻き立てる鋼板は、分割して持ち込み、現場溶接を行うため mm 単位の精度が要求される。しかし、施工図面からはその精度を確保することが難しかったため、3D スキャンで計測し、3D 図面を作成して鋼板を加工した。
- 堰柱をはつる場合、損傷を与えないようにする必要がある。しかし、通常のはつり作業に使用するブレーカーは、衝撃で堰柱に損傷や大きな凹凸を生じさせる可能性がある。このため、衝撃が少なく平滑にはつることができるスパイキーハンマを用いてはつり作業を行った。
- 固定用アンカーの削孔は、ドリルに鉄筋を感知するとドリルが停止するメタルセンサーリールを採用して、鉄筋の損傷を防止した。
- 鋼板の現場溶接は、通常、気温が 5°C 以下及び湿度が 90% を超える場合は作業を中止する。また、降雨時、風速 5 m/s 以上の場合は溶接作業を行えなくなる。このようなことが起きないようにするため、堰柱 1 基を覆うテントを設置して、塗装完了までの作業を円滑に行うことが可能になった。

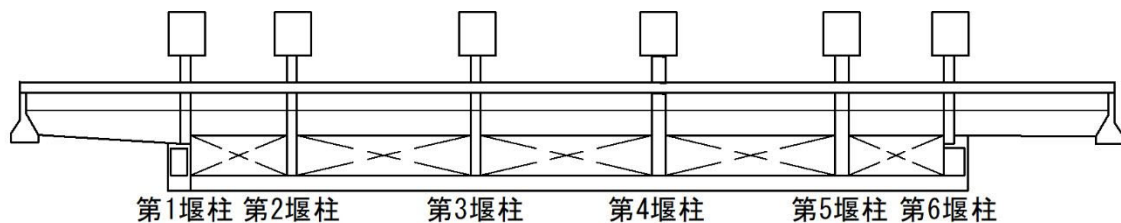
4.3 床版上面の補強鉄筋、堰柱の増厚工法の事例

増厚工法は、堰柱等のせん断耐力の不足を補うために、躯体の表面に補強鉄筋（主鉄筋及び帯鉄筋）を組み立て、ポリマーセメントモルタルを吹付けやコテ均しにより巻き立てる工法である。

本事例では、耐震性能照査の結果、①堰柱の底版上面で曲げ耐力が不足する、②堰柱下部においてせん断耐力が不足することが明らかになった。そこで、①新たに底版上面に曲げ補強鉄筋を配置し曲げ耐力の向上を向上させる、②補強帯鉄筋+ポリマーセメントモルタルによる増厚工法によりせん断耐力を向上させる、補強を行った。なお、せん断耐力の不足に関しては補強帯鉄筋が負担するものとしてその鉄筋量の算出を行った。

(1) 施設の概要

K 頭首工は、昭和 45 年に竣工し、その後、堰柱は ASR によるひび割れを生じ、また、耐震強度不足が確認された（参図 4-7）。



参図 4-7 正面図 堰柱の配置

(2) 耐震補強の概要

床版上面に鉄筋が配置されていなかった。そこで、床版に作用する曲げモーメントが降伏曲げモーメント以下になるように床版上面に鉄筋を配置した。

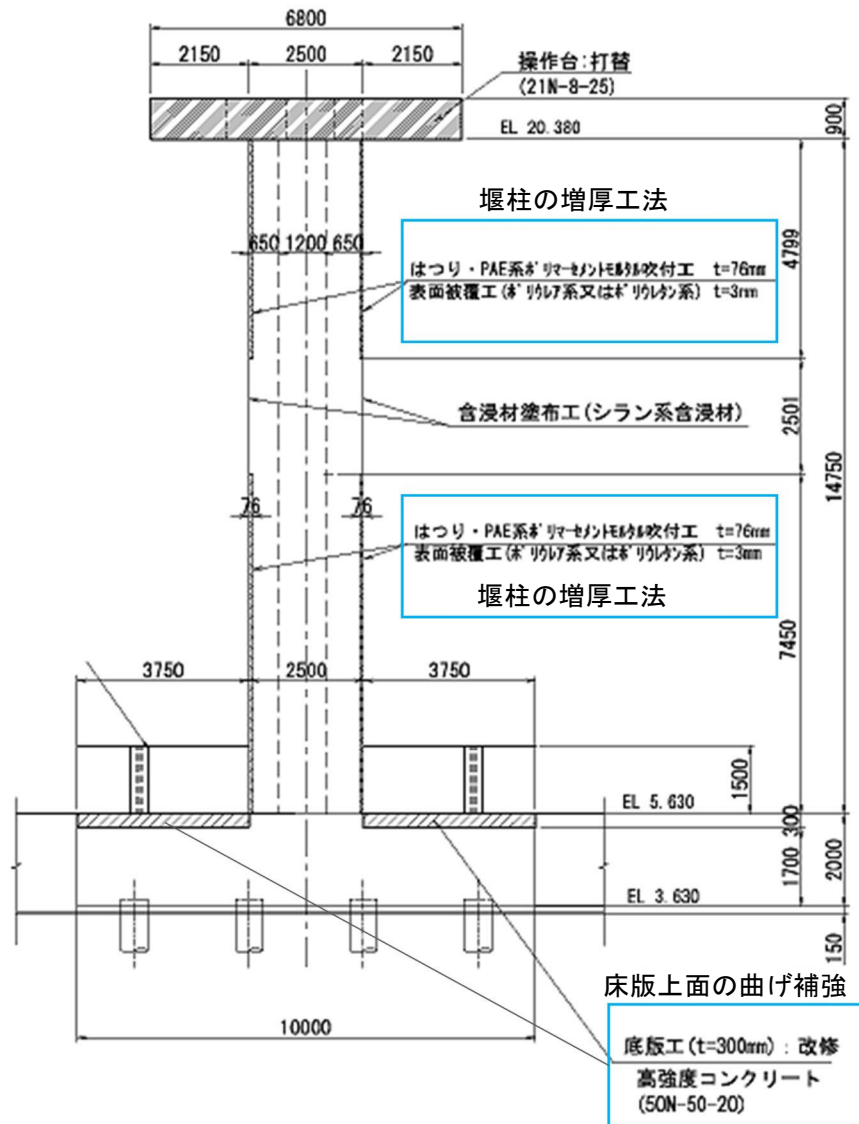
堰柱のせん断補強方法は、経済比較及び ASR に対する影響の比較から、補強帯鉄筋+ポリマーセメントによる鉄筋埋設工法（増厚工法）を採用した。補強の概要を参図 4-8~4-9 に示す。

(3) 曲げ補強の方法

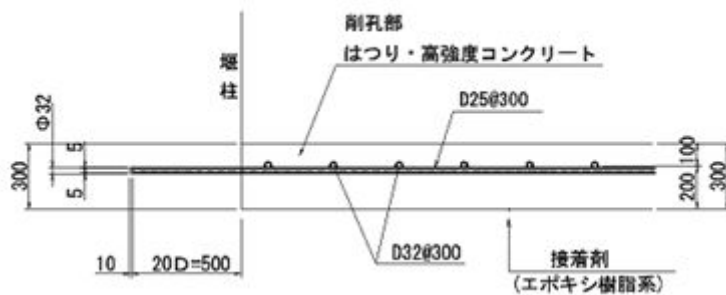
床版上面を 300 mm 厚、エポキシ樹脂塗布、鉄筋（D25@300、D32@300）を配置し、高強度コンクリート（50 N/mm²、厚さ 300 mm）を打設して、曲げ補強を行った。

(4) せん断補強の方法

堰柱は、補強帯鉄筋 D16@300+ポリマーセメントモルタル吹付によって、せん断補強を行った。



参图 4-8 堰柱、床版の補修・補強位置図



参图 4-9 床版上面の曲げ補強鉄筋による耐震補強

(5) 床版上面の補強鉄筋（曲げ耐力の向上）の作業内容

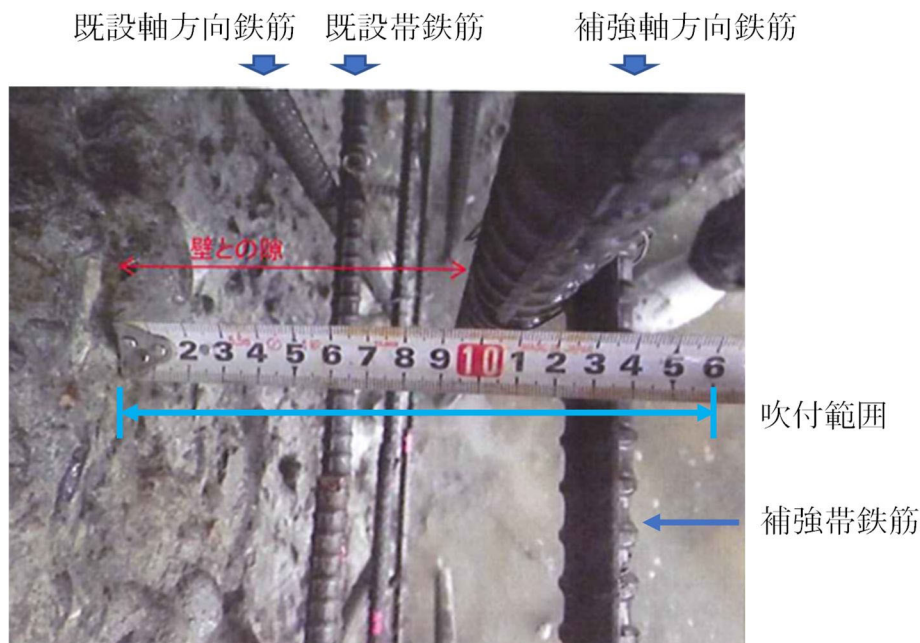
- ・床版上面のコンクリートをはつり、高圧洗浄機を使用し、下地処理を行う。
- ・鉄筋を固定する樹脂系アンカーの位置確認・削孔・設置を行い、鉄筋を組み立てる。
- ・型枠を組み立て後に、コンクリート面にエポキシ樹脂を塗布し、高強度コンクリートを打設する。

(6) 堰柱の増厚工法（せん断耐力の向上）の作業内容

- ・足場組立完了後、高圧洗浄機を使用し、下地処理を行う。
- ・補強鉄筋を固定する樹脂系アンカーの位置確認・削孔・設置を行い、補強鉄筋をアンカー削孔穴に打ち込み、この固定アンカーと取付け金具で補強鉄筋を組み立てる。
- ・既設コンクリート面にプライマーを噴霧器にて塗布する。
- ・吹付け機によるポリマーセメントモルタルの吹付け（一次吹付）を行う。
- ・一次吹付後、帯筋外周部にラス金網をステンレス結束線で取り付ける。
- ・ラス金網取付け完了後、吹付け機によるポリマーセメントモルタルの吹付け（二次吹付）を行う。吹付け完了後、表面コテ仕上げを行う。
- ・コテ仕上げ面にプライマーを塗布し、吹付け機により表面被覆材の吹付けを行う。

(7) 作業に関する留意点

- ・対策を行う前に、ASR のひび割れの範囲や安全性の確認が行われていなかった。このため、堰柱において ASR のひび割れの範囲と深さを確認するはつり調査を実施しなければならなかった。
- ・堰柱では、既設鉄筋が必ずしも設計位置に配置されていなかった。そのため、施工時には、補強対策の設計時と比較してモルタル吹き付け厚さが 20～50 mm増加した箇所もあった。施工計画の立案に際しては既設鉄筋の位置の把握が重要である（参図 4-11）。



参図 4-11 堰柱の既設鉄筋のはつりだしと補強鉄筋の配置及び吹付範囲

参考⑤ 頭首工関連技術図書の変遷

土地改良事業計画設計基準—設計「頭首工」（以下「本基準」という。）は、昭和27年10月に制定され、その後の設計・施工技術の進歩、河川管理施設等構造令の施行等に伴い、昭和42年10月、昭和53年10月に全面改定された。平成7年7月には、農業及び社会情勢が変化し、水資源の有効利用、水管理の合理化等が求められるようになったこと、新技術の導入、他基準との整合等の見直しが必要となったことから、これらの内容を踏まえ改定を行うとともに「基準書」と「技術書」に区分し基準の再編が行われた。現行の設計基準は、平成20年3月に、「耐震設計の手引き」を踏まえた頭首工の設計における耐震設計の考え方及び環境との調和への配慮等に対する設計手法を明記した。

前回の改定から16年が経過し、前回の改定以降、関連技術書である国土交通省の「河川構造物の耐震性能照査指針・同解説」などが改定され、また、「土地改良長期計画（令和3年3月閣議決定）」では、農業・農村の強靱化に向けた防災・減災対策、農業水利施設の機能強化による農業水利施設の長寿命化、戦略的な保全管理が位置付けられ、頭首工の設計においても効果的な耐震対策や機能保全が重要になっている。

さらに、令和4年5月に発生した漏水事故を踏まえ、事故から得られた知見や設計時の留意点等を考慮することが喫緊の課題となっていたため、令和6年3月に本基準の改定を行ったものである。

他方、平成19年3月に「農業水利施設の機能保全の手引き」総論編が制定されてから、これまでに診断・評価・性能低下予測等に関する技術図書が工種別に制定され、機能保全の手引き（工種別編）として「頭首工」が平成28年8月に制定されている。また、対策工の実施に関する「農業水利施設の長寿命化のための手引き」が策改定されており、「土地改良長期計画（令和3年3月閣議決定）」の考え方を踏まえ、「農業水利施設の機能保全の手引き」総論編の全面改定が令和5年4月に行われた。続いて、前述の漏水事故を踏まえ、日常管理で意識すべき点、機能診断調査時に重大な異常が予見（パイピングの予兆など）された場合の留意事項、小規模頭首工の点検チェックシート（表3-2）の追加や構成の見直しなどの「農業水利施設の機能保全の手引き（「頭首工）」の改定が令和7年6月に行われた。

また、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル」の「開水路補修編」（案）が平成25年10月に策定後、順次、主要な工種として5工種が策定されており、「開水路補修編」（案）は、前回の策定から現在までに得られた蓄積データの検証、新たな研究・開発の成果等を基に、新技術の取り込み、品質規格値の見直し等を行い【開水路編】として、令和5年3月に改定されたところである。

参表 5-1 頭首工関連技術図書の変遷

年代	土地改良事業計画設計基準	機能保全関連の技術図書	農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル
昭和20年代～昭和63年	<p>設計基準 第3部 第3編 頭首工 S27.12</p> <p>↓</p> <p>設計基準 第3部 第3編 頭首工 S42.10</p> <p>↓</p> <p>設計基準 「頭首工」 S53.10</p> <p>「溪流取水工」 S53.10</p>		
平成元年～平成15年	<p>設計基準 「頭首工」 H7.7</p>		
平成16年～平成30年	<p>設計基準 「頭首工」 H20.3</p>	<p>農業水利施設の機能保全の手引き H19.3</p> <p>↓</p> <p>農業水利施設の長寿命化のための手引き H23.5</p> <p>↓</p> <p>農業水利施設の機能保全の手引き H27.5(改定)</p> <p>↓</p> <p>農業水利施設の長寿命化のための手引きH27.11(改定)</p> <p>↓</p> <p>農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」H28.8</p>	<p>【開水路補修編】(案) H25.10</p> <p>↓</p> <p>【開水路補修編】(案) H27.4(改定)</p> <p>↓</p> <p>【パイプライン編】(案) H29.4</p>
令和元年～	<p>設計基準 「頭首工」 R6.3</p>	<p>農業水利施設の機能保全の手引き R5.4(改定)</p> <p>↓</p> <p>農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」R7.6(改定)</p>	<p>【鋼矢板水路腐食対策(補修)編】(案) R元.9</p> <p>↓</p> <p>【鋼管等腐食対策編】(案) R2.3</p> <p>↓</p> <p>【水路トンネル編】 R3.6</p> <p>↓</p> <p>【開水路編】 R5.3(改定)</p> <p>↓</p> <p>【頭首工編】 策定</p>