

農業水利施設の長寿命化のための手引き

平成27年11月

農林水産省農村振興局整備部設計課

第1章	本書の目的と適用範囲	1-1
1.1	本書策定の背景及び目的	1-1
1.2	本書の概要及び適用範囲	1-3
1.3	用語の定義	1-7
第2章	コンクリート開水路の補修・補強に求められる性能	2-1
2.1	コンクリート開水路の種類と構造	2-1
2.2	補修・補強に求められる性能	2-5
2.2.1	コンクリート開水路の機能と性能	2-5
2.2.2	補修・補強に求められる性能	2-11
第3章	コンクリート開水路の変状と要因	3-1
3.1	総論	3-1
3.2	初期欠陥	3-4
3.2.1	乾燥収縮ひび割れ	3-4
3.2.2	温度ひび割れ	3-7
3.2.3	豆板	3-10
3.2.4	コールドジョイント	3-11
3.2.5	鉄筋のかぶり不足（鉄筋露出）	3-12
3.3	劣化	3-14
3.3.1	摩耗	3-14
3.3.2	凍害	3-17
3.3.3	アルカリシリカ反応	3-22
3.3.4	化学的侵食	3-29
3.3.5	中性化	3-31
3.3.6	塩害	3-35
3.4	損傷	3-39
3.4.1	コンクリート部の損傷	3-39
3.4.2	目地部の損傷	3-41
第4章	長寿命化対策の検討のための情報収集・整理	4-1
4.1	基本的事項	4-1
4.2	施設基本条件の整理	4-1
4.3	詳細調査の目的	4-2
4.4	詳細調査の手順	4-3
4.5	共通調査	4-4
4.6	変状発生要因調査計画の策定	4-7
4.7	変状発生要因調査	4-8
4.8	対策範囲設定調査	4-18
4.9	詳細調査に当たっての留意点	4-19

第5章 長寿命対策の検討	5-1
5.1 基本的事項	5-1
5.2 対策方針の検討	5-3
5.3 対策工法の選定の基本的な考え方	5-11
5.3.1 設計・施工条件の整理	5-11
5.3.2 対策工法の要求性能	5-13
5.3.3 対策工法の種類	5-14
5.3.3.1 補修工法	5-16
5.3.3.2 補強工法	5-19
5.4 変状種別毎の対策工法の選定	5-20
5.4.1 初期欠陥に応じた対策工法の選定	5-20
5.4.1.1 初期ひび割れ	5-21
5.4.1.2 豆板	5-23
5.4.1.3 コールドジョイント	5-24
5.4.1.4 鉄筋のかぶり不足（鉄筋露出）	5-25
5.4.2 劣化機構に応じた対策工法の選定	5-26
5.4.2.1 摩耗	5-27
5.4.2.2 凍害	5-31
5.4.2.3 アルカリシリカ反応	5-34
5.4.2.4 化学的侵食	5-37
5.4.2.5 中性化	5-40
5.4.2.6 塩害	5-47
5.4.3 損傷に応じた対策工法の選定	5-50
5.4.3.1 コンクリート部の損傷	5-51
5.4.3.2 目地部の損傷	5-53
5.5 対策工法選定に当たっての留意事項	5-55
5.5.1 多様な劣化要因に応じた対策工法選定	5-55
5.5.2 現場条件に応じた対策工法選定	5-56
5.5.3 その他	5-57

第6章 長寿命化対策後の施設のモニタリング	6-1
6.1 基本的事項	6-1
6.2 基本情報の記録・収集・整理	6-7
6.3 基本調査	6-9
6.4 詳細調査	6-22
6.5 変状要因の究明と再対策の要否判定	6-25

参考資料

参考資料① コンクリート開水路の詳細調査手法について	参①-1
参考資料② コンクリート開水路の長寿命化対策検討例	参②-1

第1章 本書の目的と適用範囲

1.1 本書策定の背景及び目的

「農業水利施設の長寿命化のための手引き」（以下、「本書」という。）は、既設の農業水利施設の長寿命化のための機能保全対策（以下、「長寿命化対策」という。）を実施するに当たり、自然条件、地域条件や設計・施工条件により異なる施設の性能低下状況を踏まえた上で、最適な材料及び工法を選定するための視点や考え方を具体化することにより施設のライフサイクルコスト（以下、「LCC」という。）の低減に寄与する。それをもって、施設機能の監視・診断、補修・補強を機動的かつ確実に行う新しい戦略的な保全管理を推進していくことを目的としている。

【解説】

(1) 背景

農業水利施設を始めとする土地改良施設等は我が国の食料生産に不可欠な基本インフラであり、昭和24年に土地改良法が制定されて以降、大規模な水源開発、頭首工や用排水路、揚水機場・排水機場や管理施設の造成などが本格的に行われ、農業水利施設は32兆円の資産価値（基幹的な施設以外の施設を含めた再建設費ベース）を有している（図 1.1-1）。これらの施設は安定的な用水の供給や排水の改良など、農業生産の基盤であるばかりでなく、地下水の涵養や洪水被害の軽減、地域用水として農村の景観を形成し生態系を保全するなど多面的機能を発揮している社会資本である。しかしながら、これらの施設の多くは戦後の食料増産の時代や高度成長期に整備されており、標準耐用年数の超過に伴い、突発事故や経年変化による変状が進行し施設の機能低下が懸念されている。

そのため、財政的な制約も考慮しつつ、これまで以上に効率的な補修・補強、更新に取り組み、将来にわたり、安定的な機能の発揮を図る必要がある。

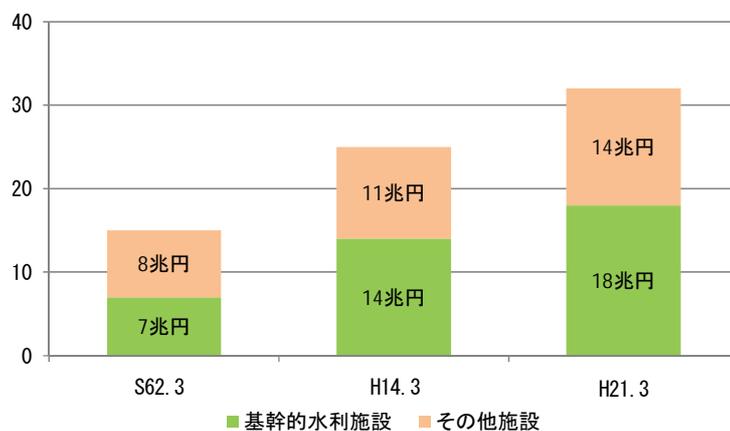


図 1.1-1 農業水利施設の資産価値の推移（上）と耐用年数を超過した用排水路等の延長（下）

このことについて、平成 27 年 3 月に閣議決定された「食料・農業・農村基本計画」において構造改革の加速化や国土強靱化に資する農業生産基盤整備の一環として「老朽化等に対応した農業水利施設の持続的な保全管理」が位置付けられ、また、「土地改良長期計画」（平成 24 年 3 月 30 日閣議決定）においても、「農業水利施設の戦略的な保全管理」が明記されたところである。これらの計画に基づき、これまで国や地方公共団体などは、施設の監視・診断等によるリスク管理を行いつつ、施設の性能低下の状況に応じた補修・更新等を計画的に行うことにより、施設の長寿命化、LCC の低減を図る戦略的な保全管理の推進に努めているところである。

他方、高度経済成長期等に集中的に整備された土地改良施設が今後一斉に耐用年数を超過していくこととなり、これを適切に保全し、また巨大地震等の大規模災害に備える必要性等から、政府全体的な取組として「国土強靱化政策大綱」（平成 25 年 12 月 17 日）が決定された。さらに、インフラの維持管理・更新等の方向性を示す「インフラ長寿命化基本計画」等が策定される中、農林水産省農村振興局においては、所管するインフラの維持管理・更新等を着実に推進する中期的な取組の方向性を示した「インフラ長寿命化計画（行動計画）」を平成 26 年 8 月に策定し、インフラの長寿命化に向けた取組を更に強力に推進しているところである。

このような状況の中、農業水利施設の機能保全に関する基本的な考え方や現場での実施方法の枠組みなどを取りまとめた「農業水利施設の機能保全の手引き」（平成 19 年 3 月策定、平成 27 年 5 月改訂）を整備し、これを土台に各施設の特徴を踏まえた工種別の機能保全の手引き等を順次整備してきた。

一方、農業水利施設の戦略的な保全管理を進める中で、施設の長寿命化対策が増え、かつ多種多様な補修・補強といった対策技術（材料・工法）が開発されていることなどを受け、適切な農業水利施設の長寿命化の実現及び長寿命化対策の品質確保を図るため、最適な材料及び工法の選定や施工管理などの技術的手法の充実を図っていく必要がある。

（2）目的

本書の目的は、農業水利施設の長寿命化対策を実施するに当たり、自然条件、地域条件や設計・施工条件により異なる施設の性能低下状況を踏まえた上で、最適な材料及び工法を選定するための視点や考え方を示すことである。これによって施設の LCC の適切な低減や、施設機能の監視・診断、補修、補強などを機動的かつ確実にを行う新しい戦略的な保全管理の推進を図る。

1. 2 本書の概要及び適用範囲

本書は、農業水利施設のコンクリート開水路を対象に、施設の長寿命化対策の検討のために必要となる情報の収集・整理事項や、対策方針の検討並びに対策工法の選定に関する考え方、また長寿命化対策後の施設のモニタリング調査手法などについて取りまとめている。

コンクリート開水路の長寿命化対策の検討において本書を活用し、施設の性能低下状況等に応じた適切な施設の長寿命化並びにライフサイクルコスト（LCC）の低減を実現する。

【解説】

(1) 本書の概要

農業水利施設の長寿命化を適切かつ効率的に実践していくためには、施設の性能低下状況や変状の発生要因、また施設の使用条件・使用環境などを踏まえて、多種多様にある長寿命化対策技術の中から最適な材料・工法を選定することが重要となる。

本書では、農業水利施設のうち賦存量や補修実績が多いコンクリート開水路を対象に、対策方針の検討並びに対策工法の選定に関する考え方や視点、その手法について、長寿命化対策後の施設状態の情報や検討事例を盛り込むなどしてできる限り具体的に示している。

また、最適な材料・工法の選定に関連し、コンクリート開水路の変状発生実態の調査を通じて得られた変状とその要因の特徴を解説するとともに、施設の長寿命化対策の検討のために必要となる情報の収集・整理事項や、長寿命化対策後の施設のモニタリング調査手法などについて取りまとめている。

なお、本書における対策工法の選定に関する事項については、コンクリート開水路の補修工法を対象としている。これは、コンクリート開水路の長寿命化対策の実績や当該分野の研究成果などを踏まえたものである。今後、本書の運用やモニタリング調査などを通じた技術情報の蓄積、及び技術開発・研究の進展状況などを踏まえて、適宜、本書の見直しや内容の充実化を図っていく。本書の構成を図1.2-1に示す。

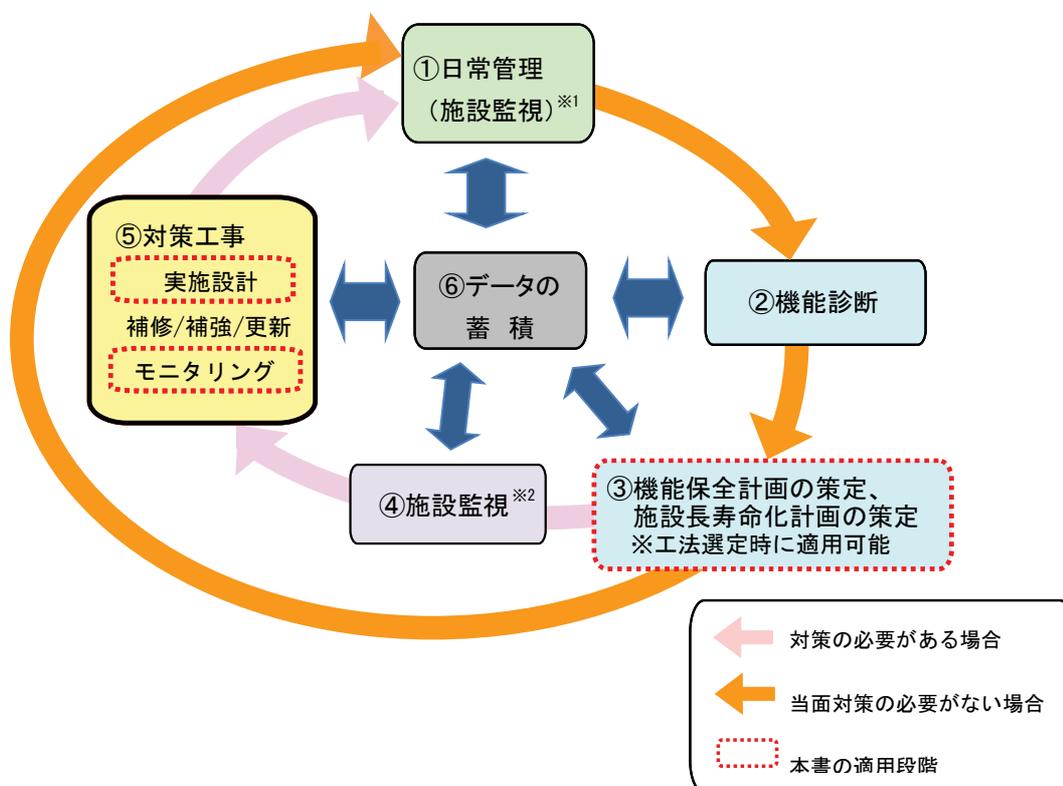
農業水利施設の長寿命化のための手引き	
第1章	本書の目的と適用範囲
第2章	コンクリート開水路の補修・補強に求められる性能
第3章	コンクリート開水路の変状と要因
第4章	長寿命化対策の検討のための情報収集・整理
第5章	長寿命化対策の検討
第6章	長寿命化対策後の施設のモニタリング
参考資料	コンクリート開水路の詳細調査方法について コンクリート開水路の長寿命化対策検討例

図 1.2-1 本書の構成

(2) 本書の適用範囲

本書については、農業水利施設のストックマネジメントの基本サイクル（図 1.2-2）の各プロセスのうち、機能保全計画や施設長寿命化計画の策定並びに計画見直しに係る対策工法の検討時、及び長寿命化対策工事に係る実施設計段階などに適用するものとする。実施設計段階とは、対策工事の設計・施工のために必要となる施設状態や施設使用環境などの施設情報の把握と、それに応じた対策の要否判定や対策方針・範囲の検討、及び対策工法の選定などをいう。

また、近年、補修・補強に係る新技術が多数開発、提案されているが、農業水利施設への適用性や耐用年数などは明確ではなく、設計時に予想できなかった要因により再劣化することも考えられる。そのため、対策直後から変状の発生状況やその進行具合などを継続的にモニタリングし、その情報を対策工法の選定手法の見直し等へフィードバックすることが施設の長寿命化やLCCの低減を適切に行うために重要である。本書では、このモニタリング調査について示しており、その内容は日常管理時においても参考となる。



※1 日常管理の一環として継続的に行う施設監視（結果は機能診断・機能保全計画策定等に活用）

※2 機能保全計画の制度を高め、適期に対策工事を実施するために継続的に行う施設監視

図 1.2-2 農業水利施設のストックマネジメントの基本サイクル

ストックマネジメントのサイクルの各プロセスにおける本書及び他図書との関連性を図1.2-3及び表1.2-1に示す。

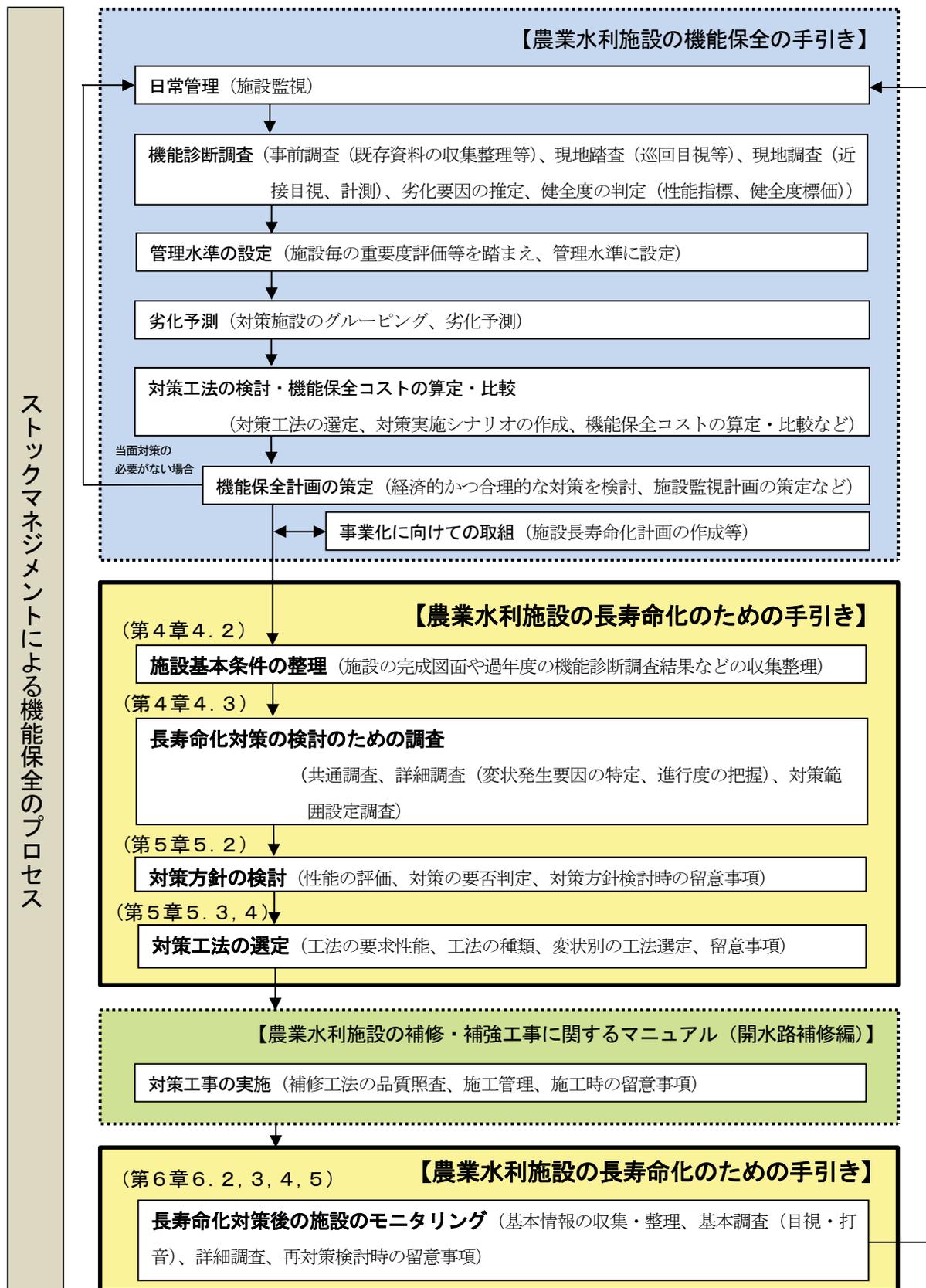


図1.2-3 スtockマネジメントによる機能保全のプロセスと関連図書 (コンクリート開水路)

表 1.2-1 スtockマネジメントに関する技術図書一覧

技術図書		機能保全の手引き(総論編) ¹⁾	機能保全の手引き(工種別編) ²⁾	長寿命化のための手引き	補修・補強工事に 関するマニュアル(開水路補修 編) ³⁾	農業水利施設減 災管理手引き ⁴⁾
ストックマネジメントの プロセス						
主な適用場面		計画段階	計画段階	対策工事 実施段階	対策工事 実施段階	管理段階
日常管理・施設監視		○	△			○
ストックマネジメントの概要や変 状の特徴 (変状の特徴、性能管理、性能指標、性 能低下の概要等)		△	○	○ 初期欠陥、損傷、劣 化の各変状の概要		
機能診断調査・評価 (劣化要因推定、現地調査、健全度評価 等)		△ 鉄筋コンクリート	○			
機能保全計画策定 施設長寿命化計画策定	劣化予測	△	○			
	対策検討	△	△	○		
	コスト算定・比較 計画策定	△	○			
実施設計	変状程度や要因特 定のための補足調 査対策要否判定			○ 補足調査 対策要否判定		
	工法選定 水理設計 構造設計			○ 変状や要因毎の材料 工法選定手法等	△ 工法種類、特徴、要 求性能、性能照査	
対策工事	品質管理 施工管理 出来形管理				○ 品質照査、施工、品 質・施工管理等	
	対策工法評価 (モニタリング調査)			○		
警戒時・災害時の対応						○

【凡例】○：具体的な手法等について記載 △：基本的概念や留意事項等について記載

1) 農業水利施設の機能保全の手引き 平成 19 年 3 月制定、平成 27 年 5 月改訂

2) 農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」平成 21 年 5 月制定

農業水利施設の機能保全の手引き「開水路編」、「頭首工」、「頭首工（ゲート設備）」平成 22 年 6 月制定

農業水利施設の機能保全の手引き「水路トンネル」平成 24 年 4 月制定

農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工（ゴム堰）」、「ポンプ場（ポンプ設備）」、「除塵設備」平成 25 年 4 月制定

農業水利施設の機能保全の手引き「電気設備」、「水管理制御設備」平成 25 年 5 月制定

3) 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】 平成 25 年 10 月制定、平成 27 年 4 月改正

4) 農業水利施設減災管理手引き 平成 26 年 3 月制定

※上記表に記載されていない内容について農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定マニュアル（平成 19 年 4 月策定）に記載されている場合は、当面の間、これを参考としてもよい。

1. 3 用語の定義

本書で使用している各用語の定義を以下に示す。

機能保全	：全施設又は施設系の機能が失われたり、性能が低下することを抑制又は回復すること。 ¹⁾
機能保全計画	：性能指標や健全度指標について管理水準を定め、それを維持するための中長期的な手法を取りまとめたもの。 ¹⁾
機能保全対策	：機能保全計画に基づく工事等のこと。 ¹⁾
長寿命化	：施設の機能診断に基づく機能保全対策により残存の耐用年数を延伸する行為。 ¹⁾
施設長寿命化計画	：施設の機能診断を行い、当該機能診断の結果に基づき、施設の機能の保全を図り、長寿命化に資する事項を定めた施設の長寿命化に関する計画
施設管理者	：施設造成者から管理委託や譲与を受けた農業水利施設を管理する者。 ¹⁾
施設造成者	：当該農業水利施設を造成した者。 ¹⁾
長寿命化対策	：施設の長寿命化のための機能保全対策。
施設の機能	：施設の設置目的又は要求に応じて施設が果たすべき役割、働きのこと。 ¹⁾
施設の性能	：施設が果たす役割（施設の機能）を遂行する能力のこと。 ¹⁾
性能低下	：経時的に施設の性能が低下すること。 ¹⁾
要求性能	：施設が果たすべき機能や目的を達成するために必要とされる性能。 ¹⁾
変状	：初期欠陥、損傷、劣化を合わせたもの。 ¹⁾
初期欠陥	：施設の計画・設計・施工に起因する欠陥。 ¹⁾
劣化機構	：劣化は摩耗、凍害、アルカリシリカ反応、化学的侵食、中性化、塩害に大別され、これらを劣化機構と称す。
劣化	：立地や気象条件、使用状況（流水による侵食等）等に起因し、時間の経過とともに施設の性能低下をもたらす部材・構造等の変化。 ¹⁾
損傷	：偶発的な外力に起因する欠陥。 ¹⁾
再劣化	：長寿命化対策後の施設の劣化。
補修	：主に施設の耐久性、水密性、通水性を回復又は向上させること。
補強	：主に施設の構造的耐力を回復又は向上させること。 ¹⁾
改修	：失われた機能を補い、又は新たな機能を追加すること。 ¹⁾
更新	：施設又は設備を撤去し新しく置き換えること。なお、施設系全体を対象とした場合は、施設系を構成する全施設を更新する場合だけではなく、補修、補強等を包括して行うことも更新という。 ¹⁾
再対策	：長寿命化対策後の施設に対して行う補修・補強・改修・更新の各行為。

維持管理：構造物の供用期間において、構造物の性能を所要の水準以上に保持するための全ての行為。²⁾

ライフサイクルコスト(LCC)：施設の建設に要する経費に、供用期間中の運転、補修等の維持管理に要する経費及び廃棄に要する経費を合計した金額。¹⁾

機能保全コスト：施設を供用し、機能を要求する性能水準以上に保全するために必要となる建設工事費、補修・補強費等の経費の総額。¹⁾

供用年数：施設を供用する年数。¹⁾

予定供用期間：構造物を供用する予定の期間。²⁾

残存予定供用期間：点検時や検討時等から予定供用期間終了時までの期間。²⁾

残存設計耐用期間：点検時や検討時等から設計耐用期間終了時までの期間。²⁾

設計耐用期間：設計時において、構造物又は部材が、その目的とする機能を十分果たさなければならぬと規定した期間。²⁾

耐用年数(耐用期間)：施設の水利性能、水理性能、構造性能が低下することなどにより、必要とされる機能が果たせなくなり、当該施設が供用できなくなるまでの期間として期待できる年数。¹⁾

標準耐用年数：「土地改良事業における経済効果の測定に必要な諸係数について(昭和60年7月1日60構造C第690号)」で示されている施設区分、構造物区分毎の設計時に規定した供用目標年数。¹⁾

性能設計(性能照査型設計法)：構造物の設計耐用期間において、規定された性能を確保する設計手法で、この設計法を用いた場合には、その構造物に要求された性能が所定の期間において確保されることを照査することが必要である。より具体的には、構造物の目的とそれを達成するために必要とされる性能を規定し、規定された性能を構造物の設計耐用期間中確保する設計法。

用語の定義及び用語の解説 参考文献

1) 農業農村整備部会技術小委員会：平成27年5月制定 農業水利施設の機能保全の手引き

2) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書 【維持管理編】

第2章 コンクリート開水路の補修・補強に求められる性能

2. 1 コンクリート開水路の種類と構造

開水路は、農業用水及び農用地などからの排水の流送を主目的として設置する水路施設の中で自由水面を持つ水路であり、その構造材料や安定性から「鉄筋コンクリート開水路」、「無筋コンクリート開水路」、「その他開水路」に大別される。

本書では、その中の「コンクリート開水路」における長寿命化対策について解説しており、「鉄筋コンクリート開水路」、「無筋コンクリート開水路」を対象とする。

また、対策工法の検討に当たっては、コンクリート開水路の多様な使用条件や構造条件、及び変状形態を踏まえた上で工法選定する必要がある。

【解説】

開水路は、図 2. 1-1 に示すように、構造材料や安定性から、擁壁型水路、ライニング水路及び無ライニング水路に大別される。

本書では、その構造材料や安定性に着目し、擁壁型水路のうち鉄筋コンクリート現場打ち水路(フルーム)や鉄筋コンクリート二次製品水路(フリューム)と言った鉄筋コンクリート構造の水路を「鉄筋コンクリート開水路」、コンクリート擁壁水路(重力式、もたれ式)と言った無筋コンクリート構造の水路を「無筋コンクリート開水路」として分類し、これら施設の長寿命化対策の考え方等について解説する。なお、それ以外の擁壁型水路、ライニング水路及び無ライニング水路については「その他開水路」として分類する。

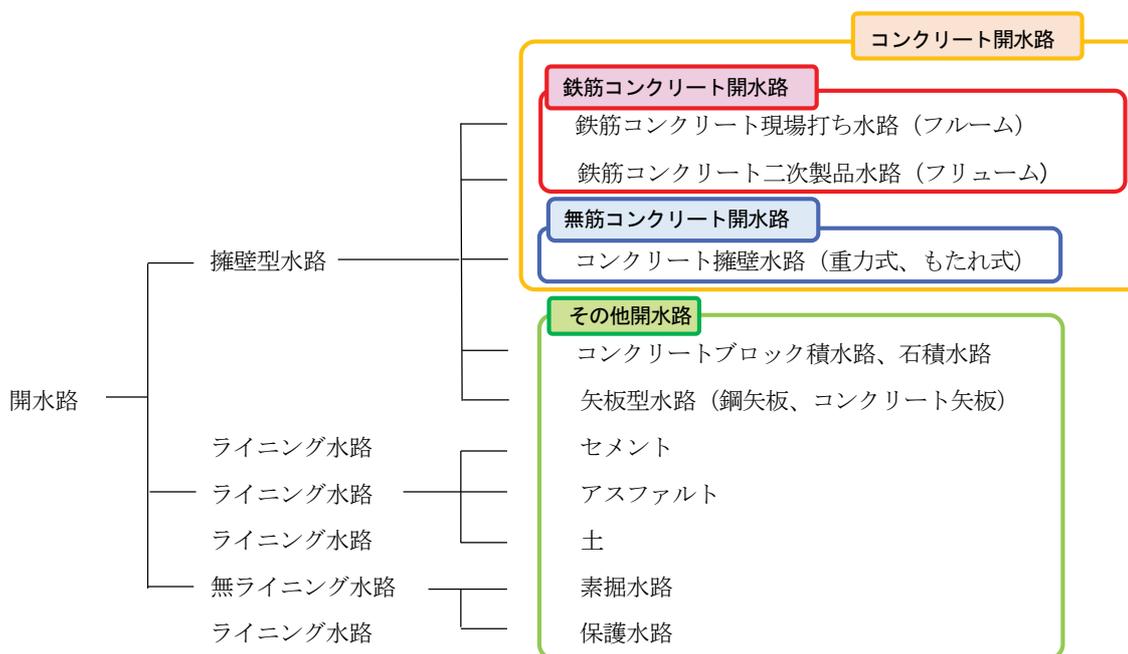


図 2. 1-1 開水路の構造的分類

※構造的分類の詳細は土地改良事業計画設計基準及び運用・解説「水路工」平成 26 年 3 月

P. 422 を参照

(1) 「鉄筋コンクリート開水路」

「鉄筋コンクリート開水路」の代表的な構造であるフリーム水路は、水路側壁と底版が構造的に一体となって土圧、水圧などの荷重を支持する形式の水路である。一方、鉄筋コンクリート二次製品水路は、規定の設計諸元に基づき、工場等で製造された単体、又は工場製品部材をコンクリート材料等で接合するか、あるいは組み合わせたものである。表 2.1-1 に、農業水利施設として利用頻度の高い主な鉄筋コンクリート二次製品水路を示す。

表 2.1-1 鉄筋コンクリート二次製品水路の種類

種 類	規 格
鉄筋コンクリートベンチフリーム (通称：ベンチフリーム)	JIS A 5318
鉄筋コンクリートフリーム (通称：U字フリーム)	JIS A 5318
鉄筋コンクリート排水フリーム (通称：排水フリーム)	—
鉄筋コンクリート大型フリーム (通称：大型フリーム)	農業土木事業協会規格
鉄筋コンクリート水路用L形 (通称：L形ブロック)	農業土木事業協会規格

(2) 「無筋コンクリート開水路」

「無筋コンクリート開水路」を代表する水路形式としては、重力式擁壁水路やもたれ式擁壁水路が挙げられる。

表 2.1-2 「無筋コンクリート開水路」の概要

分 類	安定機構	形 式	概 要
無筋コンクリート 開水路	自立式	重力式擁壁	無筋コンクリート構造で、自重によって土圧に抵抗する形式。壁高が2~3m程度までの排水路及び用排兼用水路に用いられる。転倒や基礎地盤の沈下に留意する必要がある。
	もたれ式	もたれ式擁壁	無筋コンクリート構造で、地山又は裏込め土などに支えられながら自重によって土圧に抵抗する形式。主に切土部に用いられる。

(3) 「その他開水路」

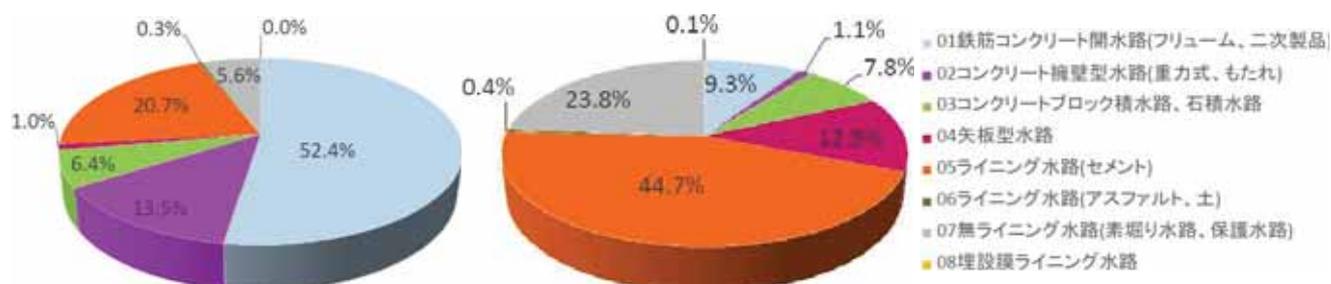
「その他開水路」を代表する水路形式としては、矢板型水路、コンクリートブロック積水路、石積水路、ライニング水路などが挙げられる。

表 2.1-3 「その他開水路」の概要

分類	安定機構	形式	概要
その他 開水路	自立式	矢板型水路	矢板や親杭の根入れ地盤の受働抵抗と矢板の曲げ剛性によって土圧に抵抗する形式。矢板の種類には鋼矢板、コンクリート矢板などがあり、主に水路護岸としては、鋼矢板及びコンクリート矢板が用いられている。
	もたれ式	コンクリート ブロック積水路	コンクリートブロックあるいは間知石を積み重ねた構造。ブロック接合部が構造的な弱点であり、変形部位が他の部位に拡大することもある。主に練積みは用水路に、空積みは排水路や環境に配慮した水路に用いられる。側壁高は練積みの場合 5m、空積みの場合 3m 程度以下の規模が一般的である。
		石積水路	
	基礎地盤等の 安定性に 基づく	ライニング水路	コンクリートブロックやセメントなどの材料によって水路表面をライニングしたもので、水路の安定性は法面及び基礎地盤の安定に基づく構造である。法面勾配は 1:1~1:1.5 の範囲が多く、侵食に対する抵抗や水理条件の向上に適する。
無ライニング水路		自然地盤を掘削するか又は堤防を盛立てただけの素掘水路と、内面通水部分を芝、安定剤、敷砂利などで保護した保護水路がある。	

【 コラム ～開水路形式と延長～ 】

農業水利ストック情報データベースに登録（平成26年9月時点）されている開水路の施設延長は、約7,422kmである。このうち、用水・用排水兼用施設では、鉄筋コンクリート構造とコンクリート擁壁構造（重力式、もたれ式）が約66%を占める。一方、排水施設では、無ライニング（素掘り等）構造とセメント系ライニング構造が約69%を占める。本手引きで扱うコンクリート水路の、鉄筋コンクリート構造とコンクリート擁壁構造（重力式、もたれ式）は、用水・用排水兼用施設の主要な構造となっている。

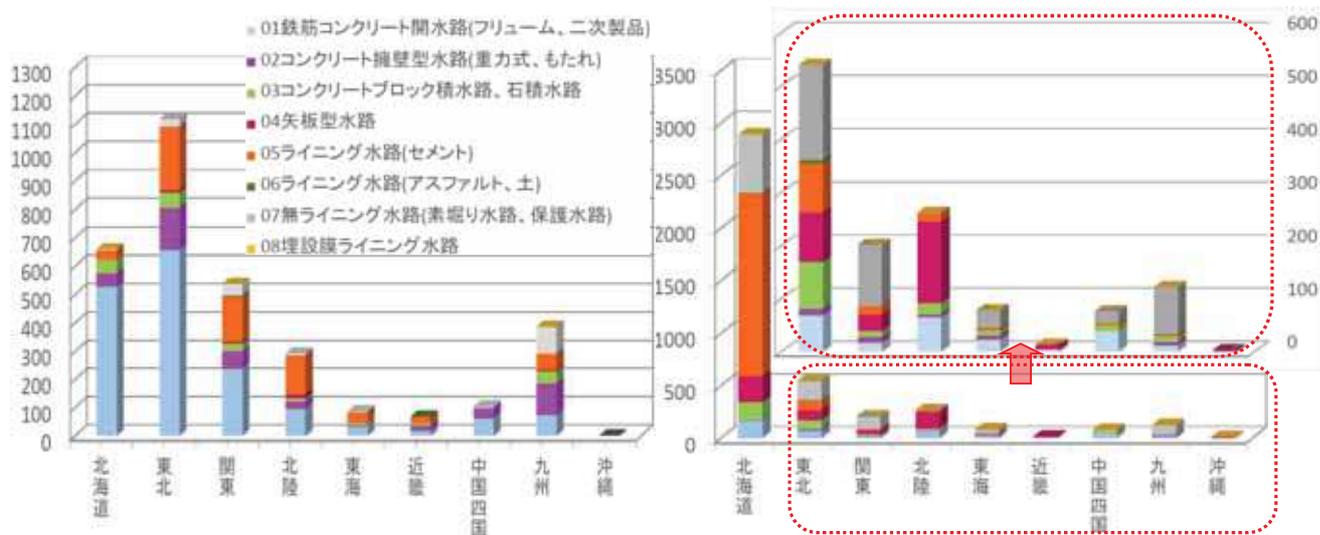


【用水・用排水兼用施設:約 3,242km】

【排水施設:約 4,180km】

図 2.1-2 開水路形式の割合

次に地域性をみると、用水・用排水兼用施設では、北海道・東北局において鉄筋コンクリート構造が大半を占め、その他の局において鉄筋コンクリート構造、コンクリート擁壁構造、セメント系ライニング構造が三分している状態である。一方、排水施設では、北海道局においてセメント系ライニング構造が大半を占めるが、他局においては様々な構造が採用されており、関東局・九州局では無ライニング構造が多く、北陸局では矢板構造が多い傾向がある。



【用水・用排水兼用施設:約 3,242km】

【排水施設:約 4,180km】

図 2.1-3 開水路形式の地域性

2. 2 補修・補強に求められる性能

2. 2. 1 コンクリート開水路の機能と性能

開水路は、農業用水及び農用地などの配水又は用排水を流送する機能を有し、これらの機能は水利用機能、水理機能、構造機能に分類される。また、これらの機能のほかに、安全性・信頼性などといった社会的機能がある。

【解説】

(1) コンクリート開水路の機能と性能²⁾

開水路は、農業用水及び農用地などからの排水を流送する機能を有し、これらの機能は水利用機能、水理機能、構造機能に分類される。これらの機能は重層的に構成されており、水理機能・構造機能は水利用機能の発揮を支える関係にある。また、これらの機能のほかに、自然災害や施設劣化などによる事故時におけるリスクなどに対して農業水利施設全般に求められる安全性・信頼性などといった社会的機能がある。

コンクリート開水路の機能と性能の種類を表 2. 2-1 に示す。

表 2. 2-1 コンクリート開水路の機能と性能の種類例

機能		性能の例	指標の例
本来的機能	水利用機能	送配水性	送配水効率、用水到達時間
		配水弾力性	自由度、調整容量
		保守管理・保全性	保守管理頻度（費用）、容易性
	水理機能	通水性	通水量、漏水量、表面抵抗の大小、水位
		水位制御性	水位・流量の制御
		分水制御性	分水量・水位の制御
	構造機能	水理的安全性	変形量、断面破壊に対する安全性
		耐久性	ひび割れ幅、摩耗量、鉄筋腐食量、目地間隔
		安定性	不同沈下、周辺地盤の沈下や陥没
社会的機能	安全性・信頼性	漏水・破損事故履歴（率・件数）、補修履歴、耐震性	
	経済性	建設費、維持管理経費	
	環境性	景観、親水性、歴史的価値、自然環境、生物生息の有無	

²⁾ 「農業水利施設の機能保全の手引き」平成27年5月（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会）P19及び「農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」」平成22年6月（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会）P8を参考

(2) 性能低下の種類及び要因

コンクリート開水路の変状や劣化、及びその要因は、施設の設置条件、設計条件、水路形式毎に異なることに留意する。詳細については、「第3章 コンクリート開水路の変状と要因」で解説する。以下に機能毎の性能低下の特徴などについて解説する。

1) 水利用機能の性能低下と要因

水利用機能は、供給者である施設管理者が用水を送配水し、受給者である農家はその用水を利用するための性能であり、性能低下は、①均等に分水されない、②計画のとおり用の配水(量、圧力など)が確保できない、③システムの操作・管理に不具合がある、④施設故障が頻発し、信頼性が低下してきているなど、計画のとおり送配水や水利用ができない現象として現れる。

構造機能の低下を及ぼす不同沈下やひび割れなどの変状は、その発生規模が大きい場合、水利用機能及び水理機能の低下につながる。そのため、構造機能の低下に着目する必要がある。

なお、性能低下の要因として、管理者(供給者)や農家(受給者)の水利用機能への要求の変化(施設造成当初の整備水準と異なる水需給要求など)も考えられるが、本書では、「現況施設の機能保全」の観点から性能低下の対象とはしない。

2) 水理機能の性能低下と要因

水理機能は、用水を流送する水理学的な性能であり、性能低下は、①用水を安全かつ確実に流送できない、②側壁から溢水することがある、③計画のとおり水位や分水が制御できない、④貯留容量が低下したなど、計画のとおり水理学的な用水流送、配分、貯留ができない現象として現れる。

性能低下の要因は、摩耗等の施設の老朽化に伴う粗度の悪化やゴミ・堆砂による通水阻害など、構造機能の低下や維持管理の不良に起因する場合が多い。

3) 構造機能の性能低下と要因

構造機能は、水利用機能及び水理機能を確保するための水利構造物の通水断面を保持する性能であり、性能低下は、①たわみ・変形・沈下・浮上、②継目損傷、③ひび割れ、④骨材露出、⑤その他の変状(剥離・剥落、変色、析出物(エフロレッセンス)漏水、錆汁、鉄筋露出など)として現れる(図2.2-1、写真2.2-1~2.2-8を参照)。

性能低下の要因は、①不適切な設計・施工による初期欠陥、②摩耗、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリシリカ反応、疲労などの劣化、③地震や衝突などの短期の過大な荷重などによる損傷である。

開水路における変状の事例及びその要因について、表2.2-2に示す。

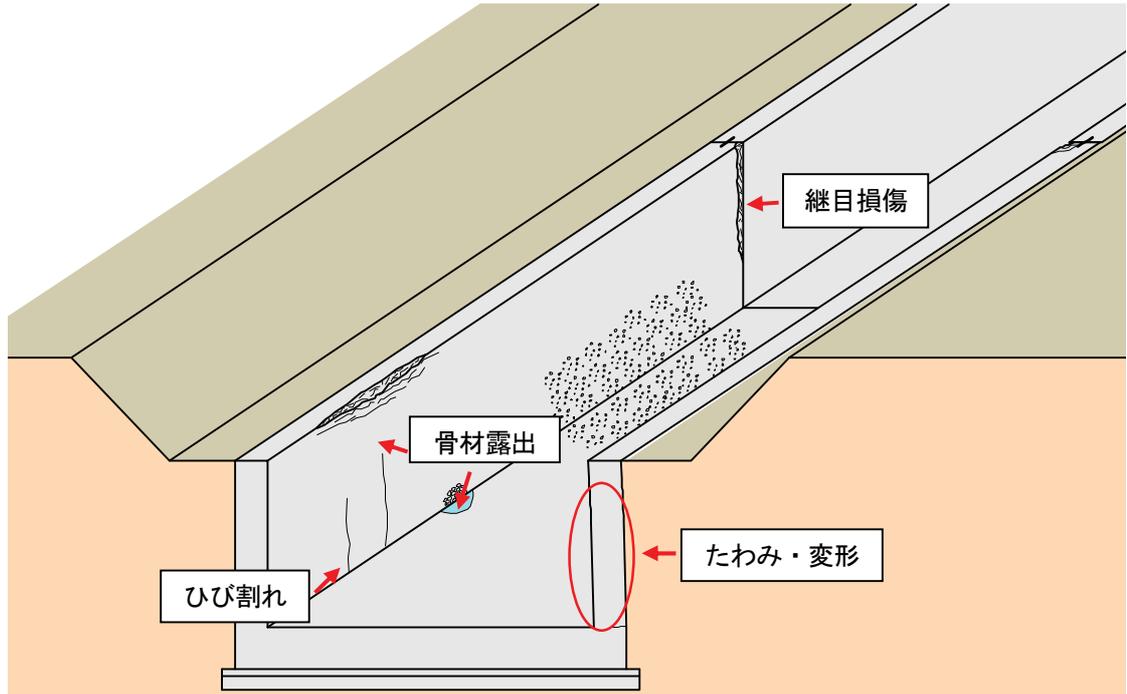


図 2.2-1 開水路の変状発生例

①たわみ・変形・沈下・浮上

たわみは、主に部材の曲げ変形を意味する。水路の使用に支障を来たすような過大なたわみが確認された場合、劣化などによる部材の耐荷力の減少と、過大な荷重が作用し続けているかどうかなどを明らかにし、たわみが進行性である場合は早急に対処する必要がある。

開水路では、側壁背面の土圧、凍上圧などによる過荷重により側壁にたわみが発生する場合がある。また、サイドドレーン、ウィープホールなどの排水能力が低下すると地下水位の上昇により過大な揚圧力が発生し、一部区間での浮上、底版のたわみ・変形、側壁の倒れこみが発生する場合がある。さらに、地盤の圧密沈下などにより、水路の一部区間の傾斜、沈下などが発生する場合がある。



図 2.2-2 開水路底版
(揚圧力による損傷)



図 2.2-3 開水路側壁
(凍上圧に対する補強対策)

②継目損傷

継目損傷は、不同沈下、気温変化による水路スパンの伸縮などの変形が継ぎ目部に集中し、止水板やその周辺コンクリートが損傷する。また、目地材の劣化により、止水機能が低下する変状である。

継目損傷により漏水が発生し、その漏水が周辺地盤を緩め、不同沈下を助長し、更に継目損傷、漏水が進展することがあるため、被害が拡大しないように早急な対策が必要となる。



図 2.2-4 開水路側壁
(継目からの漏水)



図 2.2-5 開水路側壁
(膨張による継目周辺の破損)

③ひび割れ

ひび割れは、コンクリートの配合、施工、構造物の使用状況・環境・構造、構造物に作用する外力などの様々な条件により発生する変状である。

鉄筋コンクリート構造物の場合、ひび割れが発生すると、ひび割れを通じて二酸化炭素、酸素、水などの劣化因子がコンクリート内部に侵入することで鉄筋が腐食し易くなり、構造物の力学的安全性、耐久性を低下させる。また、劣化の進行でひび割れの密度が多くなると、コンクリート自体の組織が緩み、強度低下を生じ、放置しておくとならば部材の力学的安全性を急激に低下させるおそれがある。



図 2.2-6 開水路側壁
(凍害によるひび割れ)



図 2.2-7 水路橋
(せん断力によるひび割れ)

④骨材露出

骨材露出は、すり減り等の摩耗、不適切な施工（豆板、コンクリートの品質不良）、化学的侵食によるモルタル分の溶脱により発生する変状である。

骨材露出により、粗度係数が増大することで、流下能力が低下する。また、鉄筋コンクリート構造物の場合、摩耗などにより部材の厚さが減少すると耐力の低下や鉄筋かぶりの減少により鉄筋腐食に対する耐久性が低下する場合がありますので注意が必要である。



図 2.2-8 開水路側壁
(摩耗による骨材露出)



図 2.2-9 開水路側壁
(豆板)

表 2.2-2 開水路における変状例とその要因

変状例	変状の要因
コンクリートのひび割れ等の変状	<ul style="list-style-type: none"> ・二酸化炭素の侵入に起因した中性化、及び塩害による鉄筋錆の発生やコンクリートの剥離 ・凍結融解による側壁天端、打継目付近のコンクリートの劣化 ・局所洗掘やコンクリート締固め不足、材料分離などによる摩耗の進行 ・温度変化、乾燥収縮によるひび割れの発生（誘発目地の不足や発生ひび割れの放置） ・材料分離、締固め不足による豆板 ・打継ぎ処理不足によるコールドジョイント
不同沈下、目地損傷、止水板破損	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎地盤の支持力不足 ・半切り半盛り部では、盛土部の圧密沈下（施工上の不備及び基礎の不良） ・目地部のズレから止水板破断により漏水が生じ、これが基礎部に水みちを形成し、土砂粒子の流失から不同沈下を助長 ・不適切な打継目及び目地の設計・施工 ・不同沈下時に対応できる目地でないため、スパン間でのズレが生じる。 ・地震動、地盤の液状化
側壁、底版のたわみ・変形	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎地盤の支持力不足 ・凍上圧、背面地山の地すべりなど過大な荷重が作用 ・盛土、建築物による人為的な荷重の増加 ・コンクリートの各種変状による部材強度の低下 ・施工時の打継目処理不良 ・サイドドレーン、アンダードレーン、ウィープホールが目詰まりによる地下水位の上昇 ・地震動、地盤の液状化

4) 社会的機能の性能低下と要因

社会的機能に関する性能項目には、施設の漏水、破損事故の発生による周辺に人的被害や物的被害を与えないための漏水・破損事故履歴、補修履歴を指標とする“安全性・信頼性”、維持管理費、補修費などを指標とする“経済性”、及び、施設が有する景観、親水性などを指標とする“環境性”がある。

社会的機能の低下とは、①突発事故が増加すること、②かぶりコンクリートの剥落等による第三者被害の増加の可能性が高くなること、③対策費用の増加、④施設の汚れや劣化による錆汁、ひび割れなどの発生に伴う景観や美観、親水性が悪化することなどを意味する。

社会的機能の低下の影響については、施設の劣化や自然災害などにより、施設の崩壊や突発事故が起こった場合の周辺施設への社会的被害の度合い（リスク）を勘案し、住宅や道路、鉄道などの公共施設等の立地条件といった要素を考慮して評価する必要がある。また、社会情勢や施設周辺環境の変化などを踏まえた耐震化対策についても考慮する必要がある。

社会的機能については、施設毎に施設造成者や施設管理者を始め、農家や地域住民などの関係者とその必要性能や低下状況などについて確認、共有しておくことが重要である。

なお、農業水利施設のリスク管理の詳細については、農業水利施設の機能保全の手引き（平成 27 年 5 月）にて解説されているため、参照願いたい。

2. 2. 2 補修・補強に求められる性能

コンクリート開水路に要求される性能の低下を補修や補強などの長寿命化対策により回復又は向上させるためには、対策の目的に応じて、補修又は補強の材料・工法が有すべき性能を適切に設定して、要求性能を満たす必要がある。その上で、その性能を満たした材料・工法を選定する。

【解説】

要求性能とは、施設や対策工法が果たすべき機能や目的を達成するために必要とされる性能をいう。

コンクリート開水路の要求性能には、送配水性、通水性、耐久性、力学的安全性などがある。開水路に生じる変状はその程度に応じて、これらの要求性能に様々な度合いで影響し、性能低下を起こす。

コンクリート開水路へ補修や補強などの長寿命化対策を適用する主な目的は、施設に生じる可能性がある、若しくは現に生じている性能低下要因の抑制又は遮断することによって施設の耐久性や水密性を回復又は向上させたり、更に耐力不足や変形構造の改善などによって施設の力学的安全性の回復又は向上させることである。なお、コンクリート開水路の機能は重層的に構成されており、構造機能を回復又は向上すると、それに関連して水利用機能や水理機能も改善される関係にある。

このため、コンクリート開水路へ長寿命化対策を適用する場合には、施設の性能低下状況や使用環境などを踏まえ、対策後のコンクリート開水路の要求性能を明確にした上で、対策の目的に応じて対策後のコンクリート開水路が少なくとも対策工法の効果が期待される期間中、対象となる変状や性能低下要因に対して所要の性能を有する材料・工法を適切に選定する必要がある。

表 2.2-3 にコンクリート開水路の性能低下に関係する変状とそれに対応した補修・補強対策に求められる事項をまとめた。本書では、補修を対象に材料・工法の選定の考え方などについて第 5 章で解説する。

なお、補修・補強の材料・工法に係る要求性能とその性能が確保されていることを照査するための方法（材料・工法の品質規格値の設定と規格値算定のための試験方法など）については、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）平成 27 年 4 月」にて解説されているため、これを参照願いたい。

表 2.2-3 コンクリート開水路の性能低下の回復・向上に求められる事項³⁾

機能	性能の例	関係する変状等	補修・補強に求められる事項	
本来的機能	水利用機能	送配水性	取水量と需給量の不均一	送配水率、用水到達時間の改善
		配水弾力性	自由度の低下 取水量と需給量の不均一	自由度、調整容量の改善
		保守管理・保全性	保全管理頻度の増	保全管理頻度（費用）、容易性の改善
	水理機能	通水性	流量の減、漏水	通水量、粗度の改善、漏水の遮断・抑制
	構造機能	力学的安全性	過大なひび割れ	ひび割れの補修、耐荷性の回復・向上
			変形	剛性の回復・向上
		耐久性	ひび割れ・浮き・剥離	水分の侵入防止と中性化抑制効果の回復、コンクリート片の脱落防止
			コールドジョイント・豆板	中性化抑制効果を回復し、鉄筋を腐食させない
			摩耗	耐摩耗性の回復、部材厚の回復
			凍害	劣化因子の遮断、凍結融解抵抗性の向上
			アルカリシリカ反応	劣化因子の遮断
			中性化	中性化速度の抑制
			塩害	劣化因子の遮断、鉄筋の防食対策
			化学的侵食	腐食因子の除去、表面被覆
	安定性	不同沈下	基礎地盤支持力の回復	
浮上		揚圧力の低下		
社会的機能	安全性・信頼性	震害	目的性能に応じた対策	
	環境性	錆汁	腐食発生要因の除去、仕上げ等による美観の回復	
		変色	変色発生要因の除去、仕上げ等による美観の回復	

コンクリートのひび割れや剥離といった変状状況が似通ったものとして目視観察される場合であっても、変状要因によって選択すべき補修・補強工法は異なる。例えば、鉄筋腐食によるひび割れとアルカリシリカ反応によるひび割れは、同じひび割れではあるが、全く要因が異なり、このひび割れを補修・補強する方法も別のものとなる。

このように、補修・補強工法の選定に当たっては、変状要因、変状の進行過程及び対策工法の特徴を踏まえて検討することが重要である。

なお、補修・補強対策の目的は、耐久性・耐荷性の回復・向上の観点から「劣化因子の遮断」、「変状の進行速度の抑制」、「劣化因子の除去」、「耐荷力・変形性能の改善（構造の改善）」などがある。また、通水性の観点から「粗度の改善」、「漏水の遮断、抑制」が、環境性の観点から「美観回復」等がある。

³⁾「コンクリート診断技術」14（公益社団法人日本コンクリート工学会 2014年度版）P235を参考

【 コラム ～ 補修と補強 ～ 】

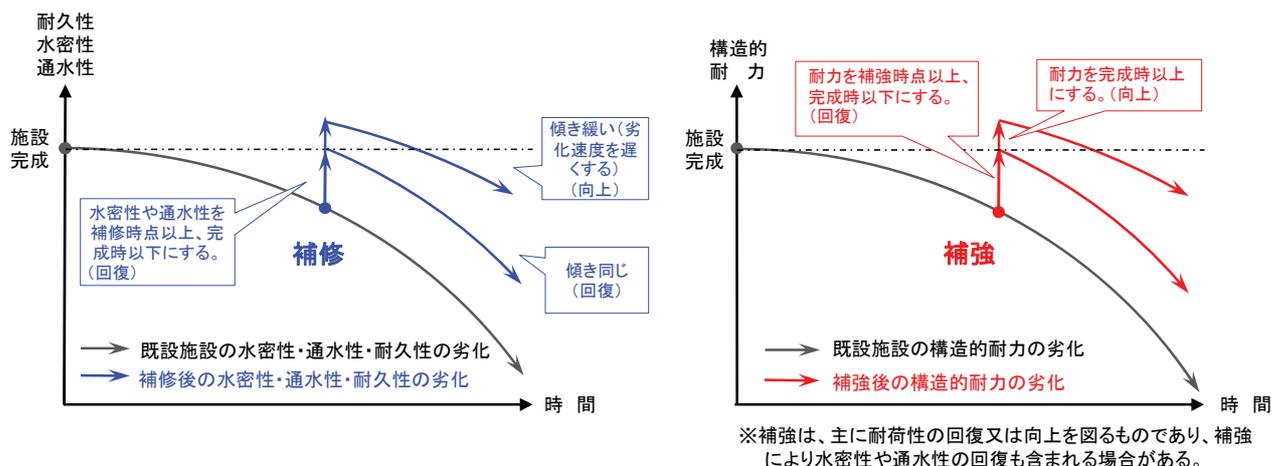
「補修」は主に施設の耐久性や通水性、及び水密性を回復又は向上させることである。

「耐久性」とは、構造物の性能低下の経時変化に対する抵抗性である。「劣化」とは時間の経過とともに施設の性能低下をもたらす部材や構造の変化である。「耐久性の回復又は向上」とは、構造物の時間的な性能低下の進行に対する抵抗性を回復又は向上させることであり、性能低下の具体的な指標として中性化や摩耗など部材の劣化を用いて評価することができる。「耐久性の回復又は向上」つまり「補修」は、劣化の進行に対する抵抗性を回復又は向上させる、すなわち劣化の進行を遅らせることと言い換えることができる。また、摩耗等による通水性の低下や目地部からの漏水などによる水密性の低下の回復についても、「補修」として扱う。

一方、「補強」は主に施設の構造的耐力を回復又は向上させることであり、必ずしも耐久性の回復又は向上を伴うものではない。

しかし実際は、耐久性と構造的耐力はお互いに密接に関係しており、一方を向上させれば他方もある程度向上する。よって補修と補強は、「耐久性」と「構造的耐力」のどちらを主に回復又は向上させるか、その目的によって区別される。

つまり、主たる目的が耐久性の回復又は向上であれば「補修」、構造的耐力の回復又は向上であれば「補強」に分類される。補修・補強の概念を図 2. 2-10 に示す。



●補修の例

- ・鉄筋かぶり不足に対する無機系被覆工法による中性化抑止性や耐摩耗性の向上（耐久性の向上）
- ・摩耗による粗度悪化に対するパネル工法による粗度の改善（通水性の回復）
- ・目地部からの漏水に対する目地補修工法による漏水の遮断（水密性の回復）

●補強の例

- ・鉄筋腐食及び断面減少による部材の耐荷力低下に対する鋼板接着工法による部材曲げ耐力の付加（耐荷力の回復）
- ・荷重条件の変更に伴う耐荷力不足に対する増厚工法による変形構造の改善（耐荷力の向上）

図 2. 2-10 補修・補強の概念

【 補足 ～他分野における補修・補強のイメージ～ 】

コンクリート標準示方書（維持管理編）では、供用開始時の性能を上限とした回復を行うことを補修、供用開始時の性能以上に向上することを補強と定義している。すなわち、補修は耐力の回復も含む概念として整理されている。

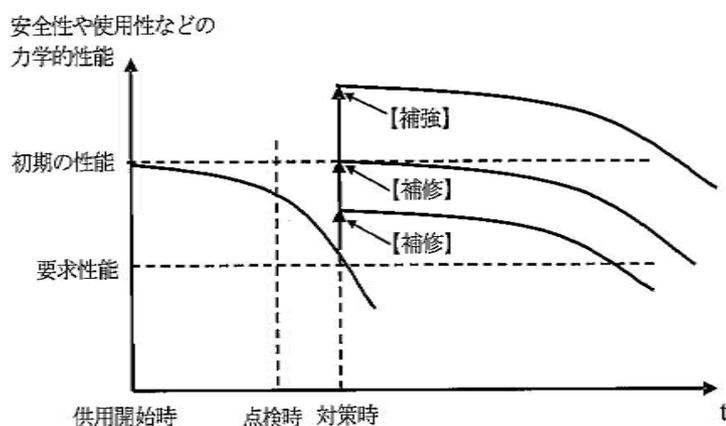


図 2. 2-11 補修と補強の概念（コンクリート標準示方書（維持管理編））

【 補足 ～補修・補強の定義と農業水利施設の特性～ 】

国営事業で扱う農業水利施設は比較的規模が大きく、地域の水利システムにおいて社会的に大きな役割を果たすものも多い。

しかし、農業水利施設には規模の小さなものも多く存在し、橋梁、道路トンネルなどの土木構造物と比較して事故等に対する安全性や信頼性などの社会的機能が強く求められないものも多い。

このことは、耐力が低下した構造物に対して改築工事を実施することが比較的容易で補強による対策事例が少ないことにも繋がっており、農業水利施設の特性ともいえる。農業水利施設のストックマネジメントにおける補修と補強の定義は、農業水利施設のこのような特性に合致していると言える。

第3章 コンクリート開水路の変状と要因

3. 1 総論

コンクリート開水路の変状は、その発生過程や要因により「初期欠陥」、「劣化」、「損傷」に区分される。

また、変状の要因は、「材料・設計・施工の要因（内的要因）」と「環境の要因（外的要因）」に大別される。

【解説】

農業水利施設は、ダムやため池などの水源施設、河川などから用水を取り入れる頭首工、幹線用水路、支線用水路、末端用水路、主要分水工や末端分水工などから構成される用水施設と、末端排水路、支線排水路、幹線排水路、排水樋門、排水機場などから構成される排水施設に大別される。用水施設と排水施設では、使用状況が大きく異なるため、同一地区であっても発生する変状が異なる場合がある。また、農業水利施設は営農と密接に関連して機能を発揮しており、営農時期のみ取水を行う地区、通年で取水を行う地区など、使用状況も様々である。さらに、同一の地区内であっても、例えば、河川から取水直後の幹線水路と末端水路では、流量や流速、流水内に含まれる土砂の量など施設の置かれる状況が大きく異なり、現れる変状も様々である。

これらの農業水利施設の置かれている様々な状況を理解した上で、変状とその要因を把握する必要がある。

コンクリート開水路に生じる変状は、供用年数、施設構造、地域特性、水利用形態などにより変状の内容や形状・発生部位、変状の進行過程が異なる。以降では、国営造成水利施設におけるコンクリート開水路の変状発生実態の分析などを通じて得られた変状の特徴と、その要因について解説する。

(1) 変状区分

1) 初期欠陥

初期欠陥は施工時あるいは竣工直後に発生したひび割れや豆板、コールドジョイントなど、主として不適切な施工に起因する変状である。本書では、コンクリート開水路における発生実態や変状が及ぼす施設への影響を考慮し、①乾燥収縮によるひび割れ、②施工中の初期段階に生じたひび割れ（温度ひび割れ）、③豆板、④コールドジョイント、⑤かぶり不足（鉄筋露出）に分類する。

2) 劣化

劣化は、①摩耗、②凍害、③アルカリシリカ反応、④化学的侵食、⑤中性化、⑥塩害に大別され、これらを劣化機構と称す。コンクリート開水路に最も特徴的な劣化機構は摩耗である。

劣化は初期欠陥や損傷と異なり進行性を有することが特徴的である。また、複数の劣化機構が影響している「複合劣化」が発生していることも多い。そのため、コンクリート開水路の支配的な劣化機構を特定するためには、それぞれの劣化機構の基本的事項を理解する必要がある。

3) 損傷

損傷は、地震や衝突など偶発的な外力、又は過荷重や不同沈下など水路使用環境の変化等により生じる。

本書では、①コンクリート部の損傷と、②目地部の損傷に大別し、目地部の損傷は目地材と止水板（目地材及び止水板に起因する損傷）に分類する。

コンクリート部の損傷は偶発的な外力等が取り除かれれば、その後、進展することはないが、初期欠陥と同様に鉄筋腐食等の劣化を進める原因となることについて留意する必要がある。

目地の損傷が生じると目地部より漏水が発生し、その漏水により周辺地盤の湿潤化や土砂流出により不同沈下を引き起こす。この結果、更に目地の損傷が進展することになる。

(2) 要因区分

1) 材料・設計・施工の要因（内的要因）

コンクリート開水路の変状の内的要因は、

- ①セメント、骨材、混和材料など材料に起因するもの
- ②配合、仕上げ、かぶり、目地構造など設計に起因するもの
- ③不適切な運搬・打ち込み（コールドジョイントの発生）・締固め、不適切なスペーサや型枠配置による鉄筋の移動、かぶり不足及び仕上げ、養生不足、不十分な継目処理など施工に起因するもの
- ④施工年代により設計基準、セメント等の材料の品質、施工方法が異なることに起因するものに分類される。

内的要因を判断するためには、施設の履歴情報を活用することが重要である。履歴情報がない場合には、近傍の類似施設の情報を活用することも検討する必要がある。また、施設の維持管理や長寿命化対策の円滑な実施のため、設計や施工時の情報を保存していくことが必要である。情報の蓄積を通じて、構造物の変状の要因などをより適切に把握することができる。

2) 環境などの要因（外的要因）

コンクリート開水路の変状の外的要因は、

- ①気温、湿度、水分、日射量など自然条件に起因するもの
- ②海からの飛来塩分や凍結防止剤散布の影響など地域性に起因するもの
- ③地震や衝突など偶発的な外力に起因するもの
- ④過荷重や不同沈下などの使用環境の変化に起因するもの

に分類される。

外的要因を判断するためには、施設の置かれている状況を把握することが重要である。使用環境によりコンクリート構造物は、気温の変動、湿度、水分の供給の有無、日射量の違いなどによって、その受ける影響は異なるため、現地の状況を適切に確認することが重要である。このためには、施設管理者への聞き取りなどを実施することが有効である。

【コラム ～コンクリート開水路のひび割れ発生要因の分析について～】

ひび割れ発生要因の割合を図 3.1-1 に、初期ひび割れの内訳を表 3.1-1 に示す。

コンクリート開水路に発生するひび割れの発生要因を分析したところ、初期ひび割れの発生割合が多く、中でも乾燥収縮ひび割れと判断されるひび割れが多数を占める結果となった。なお、ひび割れの発生要因の評価は、収集した機能診断調査に基づく施設状態評価結果や変状写真・展開図におけるひび割れ発生形状、及び施設的设计・施工条件や使用環境条件を踏まえて評価した。これらの情報から判断できない場合は不明としている。また、劣化としては凍害、アルカリシリカ反応（ASR）が比較的多く発生していることがわかる。

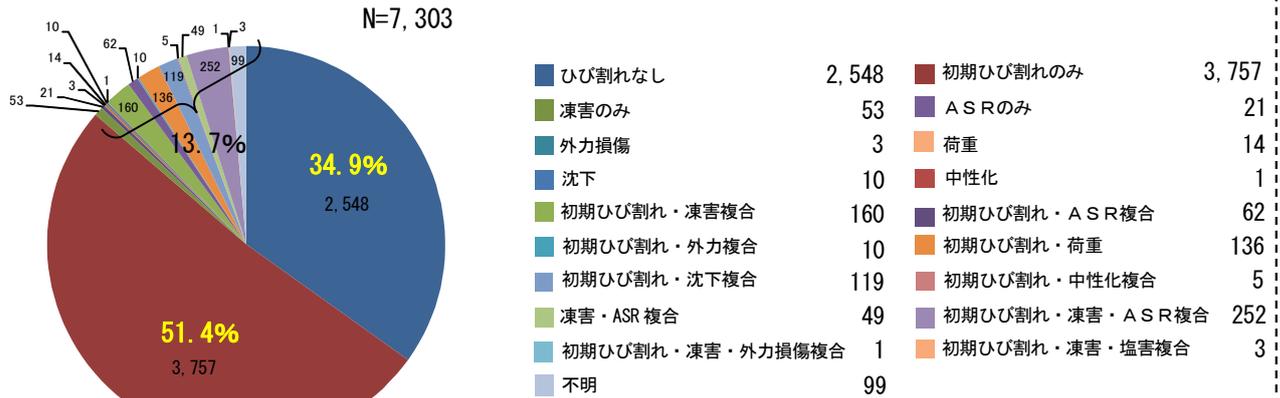


表 3.1-1 初期ひび割れの内訳

初期ひび割れ種別	データ数	割合
温度ひび割れ	69	1.8%
乾燥収縮ひび割れ	3,614	96.2%
温度+乾燥収縮	17	0.5%
その他	50	1.3%
不明	8	0.2%
合計	3,757	100.0%

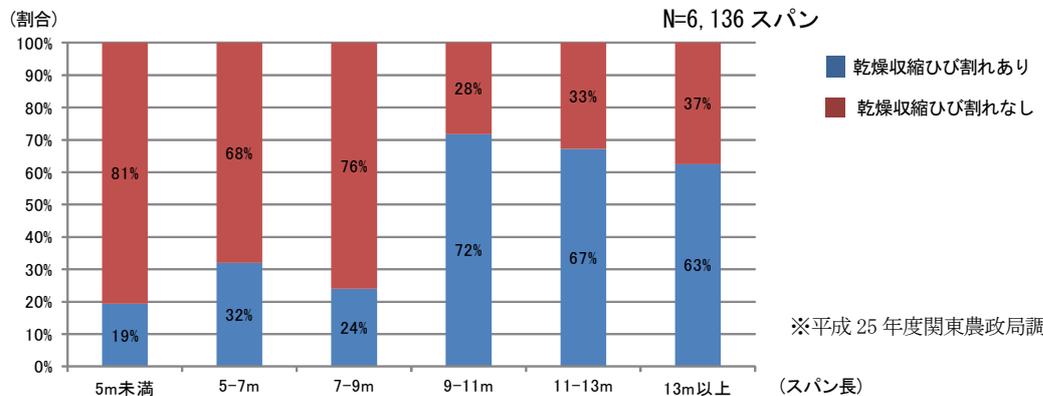
※「その他」は不適切な打継におけるひび割れ等によるもの
 ※平成 25 年度関東農政局調べ

※平成 25 年度関東農政局調べ

図 3.1-1 ひび割れ発生要因の割合

【コラム ～スパン長と乾燥収縮ひび割れ発生の関係～】

スパン長と乾燥収縮ひび割れの発生の関係を図 3.1-2 に示す。乾燥収縮ひび割れとコンクリートの施設構造（スパン長）との関連性を分析したところ、スパン長が長くなるほど乾燥収縮ひび割れの発生割合が高くなる傾向を示した。



※平成 25 年度関東農政局調べ

図 3.1-2 スパン長と乾燥収縮ひび割れの発生の関係

3. 2 初期欠陥

3. 2. 1 乾燥収縮ひび割れ

乾燥収縮ひび割れは、コンクリートの乾燥に伴う収縮により生じる。

【解説】

乾燥収縮ひび割れは、型枠取り外し後又は養生打切り後に発生するものであり、環境条件により施工中（数十日～数箇月後）に発生する場合と、供用が開始され数年経過して発生する場合がある。本書では、乾燥収縮ひび割れはコンクリート打設後の養生期間の不足や、型枠の早期取り外しによる場合が多いことから初期欠陥に分類している。

コンクリート開水路では、側壁天端から鉛直下向きに等間隔に乾燥収縮ひび割れが入ることが多い（図 3. 2-1）。これは、側壁天端から水面までの部分は気中にあることが多く、水面下部位に比べ乾燥収縮が大きくなるためと考えられる。

天端付近の乾燥収縮が底版やスパン両端により拘束されると、まずはスパンを二分割するように中央にひび割れが発生し、次に発生したひび割れと目地部の区間を二分割するようにひび割れが生じる。

なお、側壁天端気中部のみに生じている小規模の乾燥収縮ひび割れは、ひび割れ幅も狭いことが多くコンクリート開水路の力学的安全性、耐久性に影響しないことが多い。

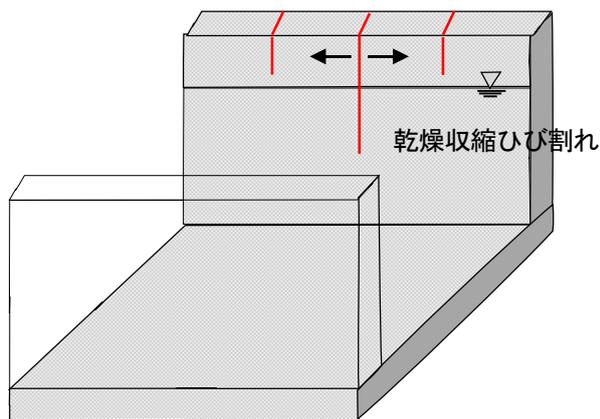


図 3. 2-1 乾燥収縮ひび割れの発生イメージ

【コラム ～ひび割れ形状と発生要因の関係～ 】

ひび割れは、「初期ひび割れ」、「ひび割れ先行型ひび割れ」、「鉄筋腐食先行型ひび割れ」、「外力によるひび割れ」に大別される。これらのひび割れ形状と発生要因との関係を以下(表 3. 2-1、表 3. 2-2)に示す。

表 3. 2-1 コンクリート開水路のひび割れ形状と発生要因の関係

ひび割れ形状 コンクリート表面性状	ひび割れ先行型			鉄筋腐食先行型		初期 ひび割れ 乾燥収縮	外力
	ま書	ASR	化学的侵食	中性化	塩害		
亀甲状	○	○	○			○	
細かい不規則なひび割れ	○		○			○	
鉄筋に平行しない軸方向ひび割れ		○					
軸力に対して直交のひび割れ						○	○
軸力に対して斜めのひび割れ						○	○
鉄筋に沿ったひび割れ				○	○	注-1	
スケーリング	○		○				
コンクリート表層の軟化			○				

注-1：かぶりの薄い部材では、乾燥収縮の場合であっても鉄筋に沿ってひび割れが発生する。

「鉄筋コンクリート構造物耐久性調査・診断及び補修指針（案）・同解説」日本建築学会を参考に作成

表 3. 2-2 ひび割れと状態

ひび割れ種別		定 義	発生要因
初期ひび割れ		<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮や温度ひび割れなど施工中や施工直後に現れるひび割れで、初期の段階で適切な対策を施せば、劣化が進行しない（あるいは緩慢）タイプのひび割れ。 目地間中央や部材拘束部、部材開放部に鉛直に生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 不適切な施工 不適切な材料の使用 不適切なスパン長
進行性のひび割れ	ひび割れ先行型ひび割れ	<ul style="list-style-type: none"> 部材表面から劣化が進行するもので、先にひび割れ症状が現れ、鉄筋腐食はひび割れがある程度進行してから起こるタイプのひび割れ。 格子状や亀甲状の不規則なひび割れが生じることが多い。 開水路の天端及び側壁上部に発生することが比較的多く見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> アルカリシリカ反応 凍害 化学的侵食
	鉄筋腐食先行型ひび割れ	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋腐食により鉄筋が膨張し、コンクリート表面に錆び汁等を伴ったひび割れなどの表面劣化がその後に現れるタイプのひび割れ。 かぶりの薄い場所から鉄筋に沿った形状で発生するが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 塩害 中性化
外力によるひび割れ		<ul style="list-style-type: none"> 外力により部材が変形して生じるひび割れ。ひび割れ方向と直交する方向に引張り力が作用していると想定できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 地震 過荷重

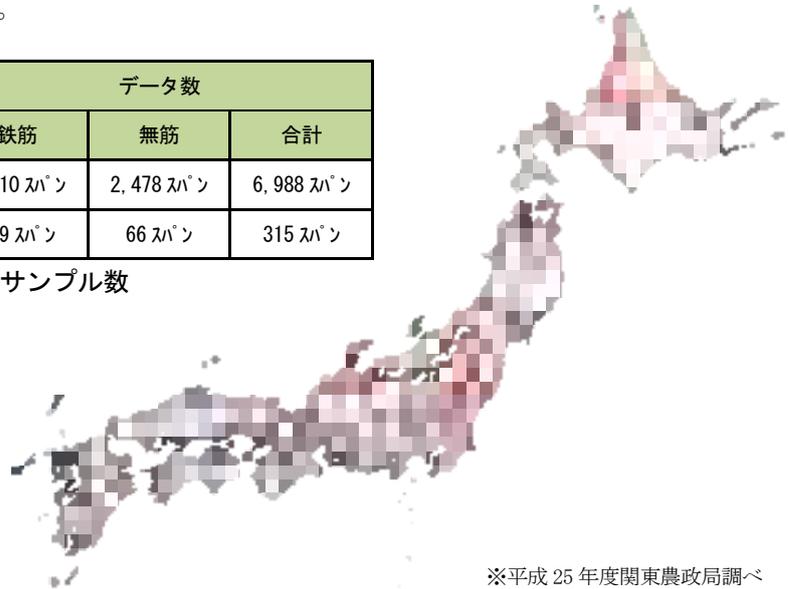
【コラム ～コンクリート開水路の変状実態の分析について～ 】

コンクリート開水路の変状実態やその発生要因の特徴を把握するため、国営造成水利施設のコンクリート開水路（鉄筋・無筋）を対象に実施された長寿命化対策工事(更新事業)及び国営造成水利施設保全対策指導事業における機能診断調査結果のうち、変状が確認されたデータを用いて、変状の発生状況や要因の特徴について分析を行った。その結果をコラムで紹介する。対象地区位置図を図 3. 2-2、全体サンプル数を表 3. 2-3 に示す。

事業	地区数	路線数	データ数		
			鉄筋	無筋	合計
更新事業	11 地区	33 路線	4,510 スパン	2,478 スパン	6,988 スパン
指導事業	52 地区	89 路線	249 スパン	66 スパン	315 スパン

表 3. 2-3 全体サンプル数

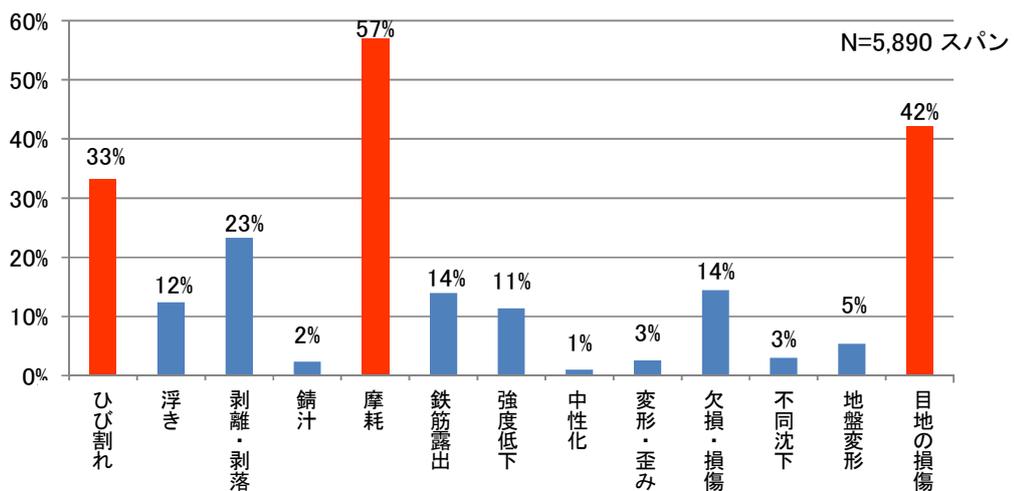
●	更新事業
●	指導事業



※平成 25 年度関東農政局調べ

図 3. 2-2 対象地区位置図

なお、平成 19～23 年度に実施された国営造成水利施設保全対策指導事業における機能診断調査結果によると、コンクリート開水路において、躯体に発生する変状としては摩耗が半数以上を占めており、ひび割れは 3 割程度となっている。また、躯体以外に発生する主な変状としては目地の損傷が多い傾向にある。指導事業におけるコンクリート開水路の変状発生割合を図 3. 2-3 に示す。



※重複して発生している変状があるため各変状割合の合計値は 100%を超過している。

※平成 25 年度関東農政局調べ

図 3. 2-3 指導事業（平成 19～23 年度）におけるコンクリート開水路の変状発生割合

3. 2. 2 温度ひび割れ

温度ひび割れは、コンクリートの温度変化に伴う収縮が拘束されることにより生じる。

【解説】

打設初期のコンクリートはセメントの水和熱により温度が上昇し、時間とともに外気温に近付きながら低下していく。コンクリートの温度が低下するとコンクリートの体積は収縮する。その収縮が底版や隣接する水路スパンに拘束されると、温度低下時にコンクリート内部に引張応力が生じる。この引張応力（外部拘束応力）により生じるひび割れを温度ひび割れという。セメント量が多いコンクリートほど温度上昇が大きく、躯体が厚い部材ほど熱の発散効率が悪いいため、大きな貫通ひび割れを起こすことがある。また、部材断面内の温度差が生じると部材の内部が外側の収縮を拘束する（内部拘束応力）ため、表面に微細なひび割れが発生する場合もある。

コンクリート開水路では、一般に先行して打設した部材（底版）が後で打設した部材（側壁）の温度収縮を外部的に拘束することによって、図 3. 2-4 のようにひび割れが側壁下端部からほぼ垂直に発生するケースが多いが、事例としては少ない。また、温度ひび割れは、通常貫通ひび割れとなるため、ひび割れ幅が大きなものに対しては漏水に注意する必要がある。

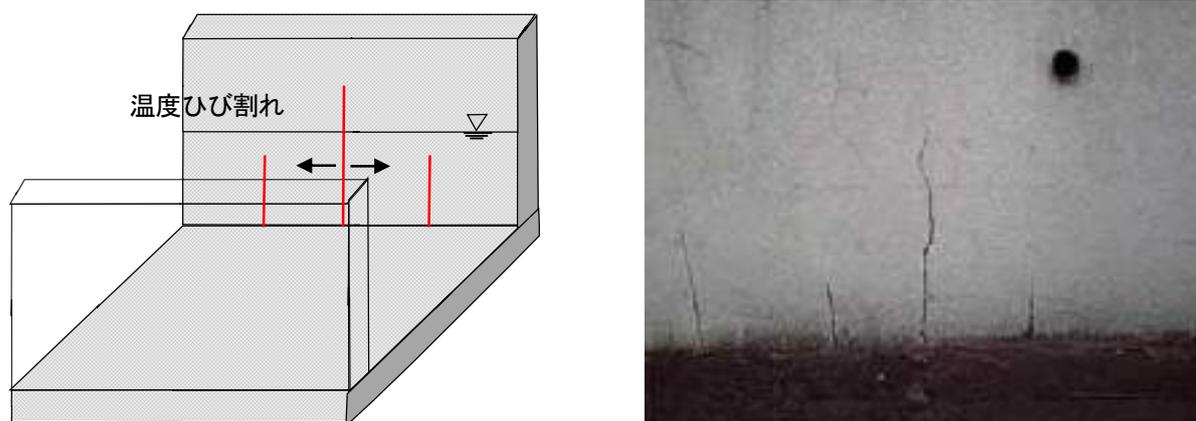
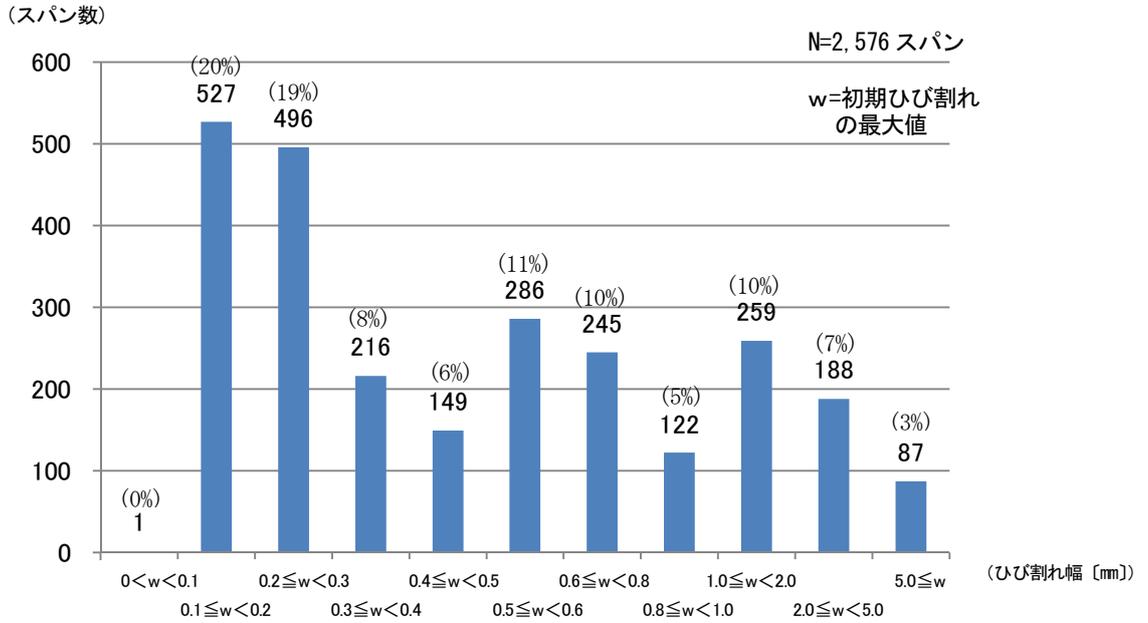


図 3. 2-4 温度ひび割れの発生イメージ

【コラム ～初期ひび割れのひび割れ幅の分布傾向～ 】

初期ひび割れのひび割れ幅の分布傾向を分析したところ、発生している初期ひび割れの最大幅は、図 3. 2-5 に示すようにバラつきがあるが 0. 1mm \leq w<0. 2mm の割合が最も多く全体の 20%を占めた。



※平成 25 年度関東農政局調べ

図 3. 2-5 コンクリート開水路における初期ひび割れの最大幅

初期ひび割れそのものは非進行性と言われており、コンクリート開水路の性能低下に与える影響は小さいことが想定されるが、ひび割れ幅が 1. 0mm 以上の鉄筋腐食に影響を及ぼすおそれのあるひび割れも少なからず発生していることに注意するべきである。

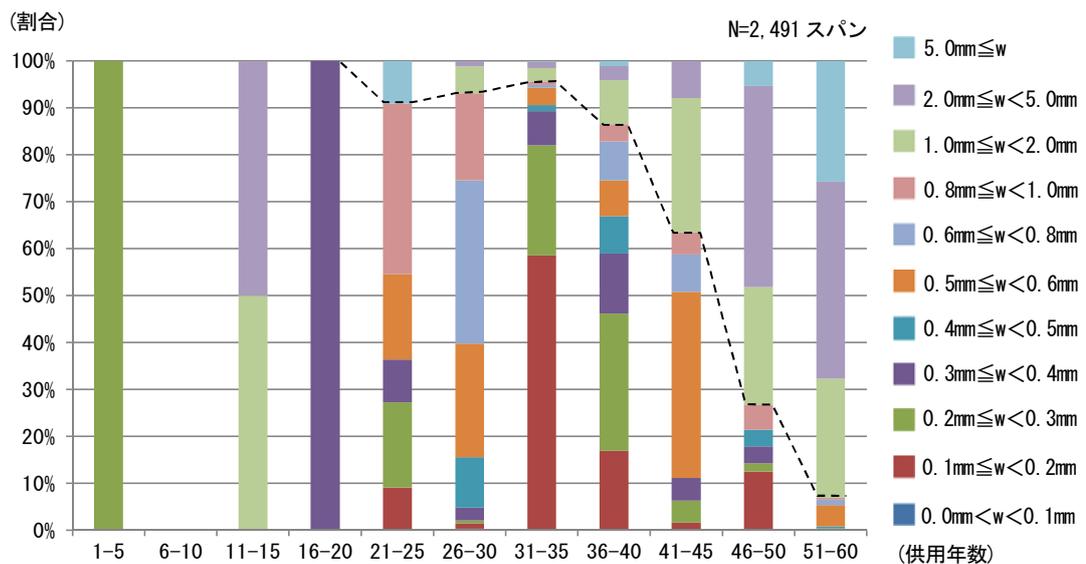
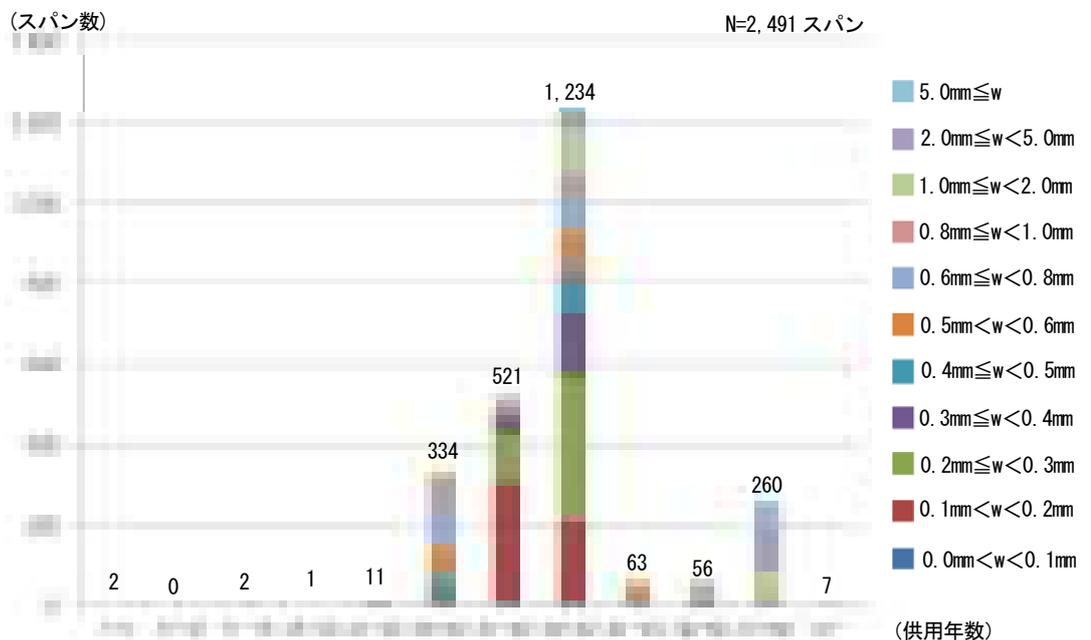
さらに、ひび割れ幅が 1. 0mm 未満であってもひび割れが貫通している場合は（特に温度ひび割れにおいて貫通ひび割れが発生している可能性がある）、水密性を低下させること、またひび割れから水分や二酸化炭素などの劣化因子が侵入し、鉄筋腐食や関連する劣化の進行促進に繋がるおそれがあることに注意する必要がある。

なお、ひび割れからコンクリート表面に錆汁が多量に滲み出している場合には、ひび割れ幅に関係なく鉄筋腐食に対する検討が必要である。ただし、コンクリート表面の錆び汁には、構造物に設置した金具（フェンスの支柱等）から錆び汁が流れ出すものもあるが、景観上の問題となっても、構造物の安全性を損なうものとはならない。

【コラム ～初期ひび割れと供用年数の関係～ 】

初期ひび割れと供用年数の関係を分析したところ、供用年数が長い施設ほど、ひび割れ幅が大きい傾向を示した。コンクリート開水路における初期ひび割れと供用年数の関係を図 3.2-6 に示す。初期ひび割れそのものは非進行性であることから、劣化因子の侵入等の他の要因により経年的にひび割れ幅が拡大したものと考えられる。

そのため、初期ひび割れについても、経過観察を行い、水密性の低下や鉄筋腐食の観点から状況に応じて対策を講じる必要があることに留意する。



※図中の破線は1mm未満のひび割れが占める割合を示す
 ※平成25年度関東農政局調べ

図 3.2-6 コンクリート開水路における初期ひび割れと供用年数の関係

3. 2. 3 豆板

豆板は、コンクリート打設時の材料分離、締固め不足などにより生じる。

【解説】

豆板は、コンクリート打設時における材料の分離、締固め不足、型枠下端からのセメントペーストの漏れなどによりモルタル分が少なく粗骨材が多く集まって生じた不良部分をいう。

豆板が生じるとコンクリート中に空隙が多くなり、水密性や中性化抑止性の低下の原因となる。

コンクリート部材厚が薄く側壁高が高いコンクリート開水路では側壁下部の締固めが難しく側壁下端部に豆板が生じやすくなる。開水路側壁の豆板を図 3.2-7 に示す。



図 3.2-7 開水路側壁の豆板

3. 2. 4 コールドジョイント

コールドジョイントは、コンクリートの打設時に打継されたコンクリートが一体化されないことにより生じる不連続面である。

【解説】

コールドジョイントは、先に打設したコンクリート部の硬化が進行し、後から打設されたコンクリートと両者が一体化せず、その打継部分に不連続面が生じる現象であり、設計段階で考慮する打継目とは異なる。この部分は、ひび割れの発生、力学的安全性、耐久性、水密性の低下の原因となる。開水路側壁のコールドジョイントを図 3.2-8 に示す。



図 3.2-8 開水路側壁のコールドジョイント

3. 2. 5 鉄筋のかぶり不足（鉄筋露出）

鉄筋のかぶり不足は、かぶりに関する規定が無かった昭和44年以前の施設、あるいは不適切なスペーサの配置などにより生じる。

【解説】

鉄筋かぶりが土地改良事業計画設計基準「水路工」に規定されたのは1970年（昭和45年）であり、それ以前に施工された鉄筋コンクリート開水路では、これらの考え方が反映されていないため、かぶり不足が生じている場合がある。また、かぶりや鉄筋径に見合う適切なスペーサが配置されなかった場合、締固めの際の鉄筋の移動等の不適切な施工に伴いかぶり不足が生じる場合もある。かぶり不足は、摩耗、中性化などによる鉄筋の腐食を助長する原因となり、鉄筋の腐食による鉄筋断面積の減少は部材の力学的安全性の低下の原因となる。土地改良事業計画設計基準による鉄筋のかぶりを表3.2-4、かぶり不足による鉄筋露出を図3.2-9に示す。

表 3.2-4 土地改良事業計画設計基準による鉄筋のかぶり

鉄筋径	昭和 29 年度	昭和 45 年度	昭和 61 年度	平成 13 年度	平成 25 年度
D13 以下	規定なし	80mm(床) 50mm(他)	—	—	—
D16～D22	〃	90mm(床) 60mm(他)	—	—	—
D25 以上	〃	100mm(床) 70mm(他)	—	—	—
D16 未満	〃	—	40mm	—	—
D16 以上	〃	—	50mm	—	—
D13 以下 (小規模)	〃	—	—	50mm	50mm
D19 以下	〃	—	—	60mm (t<300mm) 70mm (t≥300mm)	60mm (t<300mm) 70mm (t≥300mm)
D22 以上	〃	—	—	70mm	70mm

※上記表の昭和 61 年度はコンクリートの表面から鉄筋表面までの距離である。また、昭和 45 年度、平成 13 年度、平成 25 年度はコンクリートの表面から鉄筋中心までの距離である。

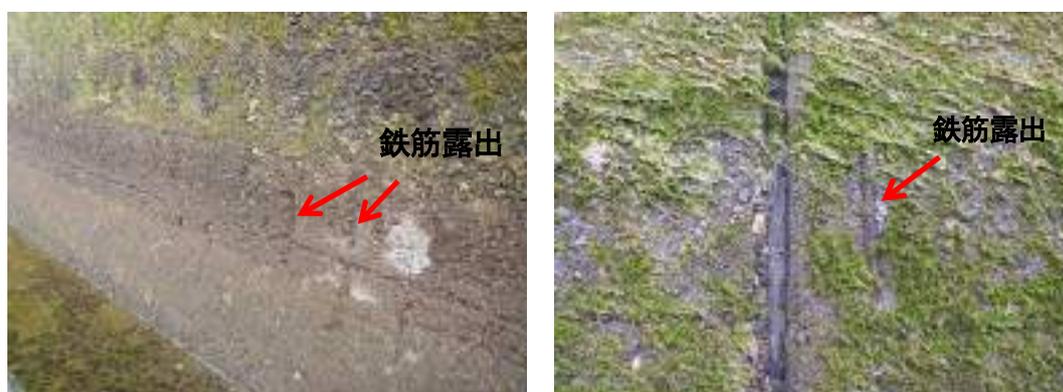


図 3.2-9 かぶり不足による鉄筋露出

【コラム ～鉄筋腐食の照査～ 】

鉄筋コンクリート開水路は、与えられた環境のもと、施設に期待される耐用期間中に中性化や塩害などによる鉄筋腐食によって構造物の所要の性能が損なわれてはならない。中性化や塩害に対しては、次のような耐久性の照査手法がある。

- ① 中性化深さが、施設に期待される耐用期間中に鉄筋腐食発生限界深さに達しないこと
- ② 鉄筋位置における塩化物イオン濃度が、施設に期待される耐用期間中に鉄筋腐食発生限界濃度に達しないこと

【コラム ～鉄筋のかぶり～ 】

「かぶり」は鉄筋表面からコンクリート表面までの最短距離である。(図 3.2-10 参照)
耐久性の評価等には一般に「かぶり」を用いる。(土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」P358 (8) 鉄筋のかぶりを参照)

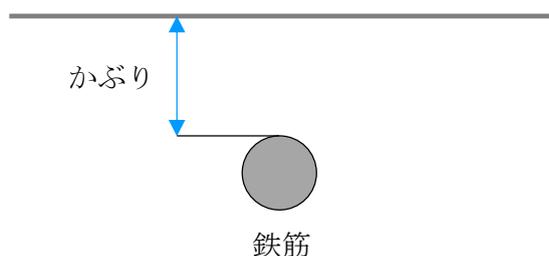


図 3.2-10 鉄筋のかぶり

3. 3 劣化

3. 3. 1 摩耗

摩耗は、外部からの物理的作用によりコンクリートの断面が欠損していく現象であり、コンクリート中のセメント水和物の溶脱により促進される。

摩耗は、流水及び流水中に含まれる土砂などを要因として生じる。

【解説】

(1) 摩耗の特徴

摩耗は、流水中の土砂による研摩作用や落差による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(図 3. 3-1 を参照)。また、水に接することでセメント水和物中のカルシウムイオン等が溶出し、組織が粗になる溶脱現象が発生し、その進行が促進される。

摩耗を受けるコンクリート構造物では、初期の変状として、表面のセメントペースト部の欠損により粗骨材が露出する現象が見られ、摩耗が進行すると粗骨材を支えきれなくなり粗骨材の剥落が発生する。更に摩耗が進行すると鉄筋の露出や腐食、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要因となる。

摩耗の進行速度は、コンクリートの配合や強度、使用される骨材の種類、水の流速や流水中の土砂、落差のある水叩き部の衝撃の有無などにより異なる。

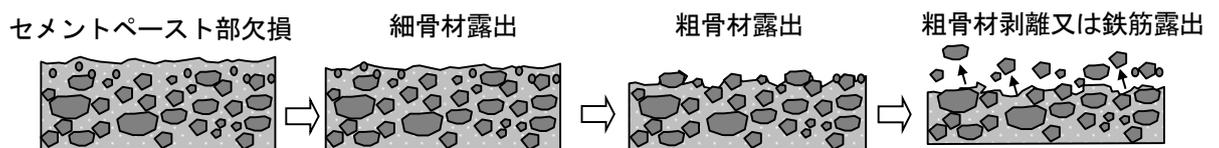


図 3. 3-1 摩耗の進行過程

コンクリート開水路では、水面変動が見られる喫水線下部や砂礫が流下しやすい底版に摩耗が顕在化する。摩耗は、周辺地形の条件(山間部等)や水路勾配などの条件に関わらず広く全国的に生じている。その多くは粗骨材の露出又は一部の剥落が認められる程度の進行に留まっており、鉄筋の露出に至るような大きな断面欠損は、一部の落差工、急流工、不適切な施工の箇所などにより限られた条件の場合に見られる。かぶりが十分に取られ、部材厚も確保されている開水路では、摩耗による性能の低下は主として通水性の低下として顕在化する。(図 3. 3-2～図 3. 3-4 を参照)



図 3. 3-2 喫水線下部に生じた摩耗



図 3.3-3 落差工に生じた物理的作用による摩耗



図 3.3-4 急流工に生じた物理的作用による摩耗

(2) 摩耗の要因

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しコンクリート表面を保護したこと、②強度が低いコンクリートを使用したこと、③コンクリートの打設不良・養生不足による耐摩耗性の低下がある。なお、高炉セメントを使用したコンクリートは、セメント水和物の組織構造が緻密になるため一般のコンクリートに比べて耐摩耗性が高い。

2) 環境等の要因 (外的要因)

①物理的な影響

研摩作用や衝撃力などによる摩耗は、「流速」、「流水中の土砂」、「落差のある水叩き部」などにより生じる。流速が速い、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

水中に設置されたコンクリートでは、セメントペースト部からのカルシウムの溶出に伴って組織構造が脆弱化することや、乾湿繰返し作用を受けた場合にセメントペースト部の組織が粗くなり、こうした現象(溶脱)が摩耗を促進させる一因となっている。なお、カルシウム濃度の低い軟水が乾湿繰返し作用を受け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など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は、健全なコンクリート構造物に比べ大きく、耐久性への配慮が必要となる。摩耗の要因を図 3.3-5 に示す。

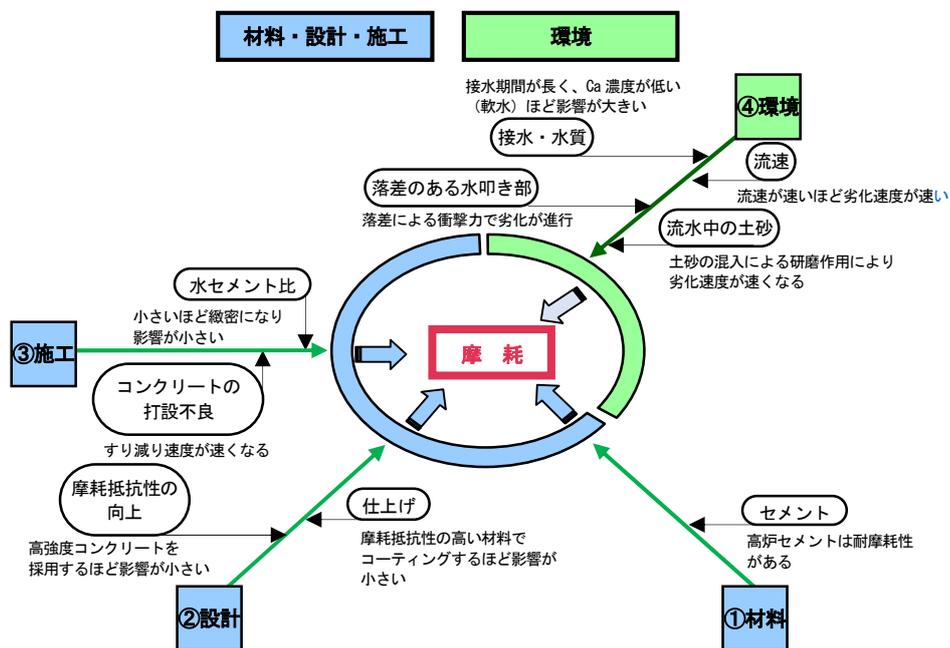


図 3.3-5 摩耗の要因

3. 3. 2 凍害

凍害は、コンクリート中の水分が凍結温度になった時の凍結膨張によって発生するものであり、長期間の凍結と融解の繰返しによってコンクリート組織が徐々に劣化する現象である。

凍害は、最低気温、水分供給、日射条件、凍結防止剤の使用などの環境条件の影響を受ける。また、コンクリートの配合、骨材の品質（吸水率）、空気量（気泡組織）などの使用材料の影響も大きい。

【解説】

(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。凍害による劣化の進行は、最低気温が低いほど、また凍結と融解の繰返し回数が多いほど早くなる。コンクリートの空隙を通じて内部に侵入した水分は、凍結する際に約9%の体積膨張を起こす。コンクリートの内部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。凍害による劣化の進行過程を図3.3-6に示す。

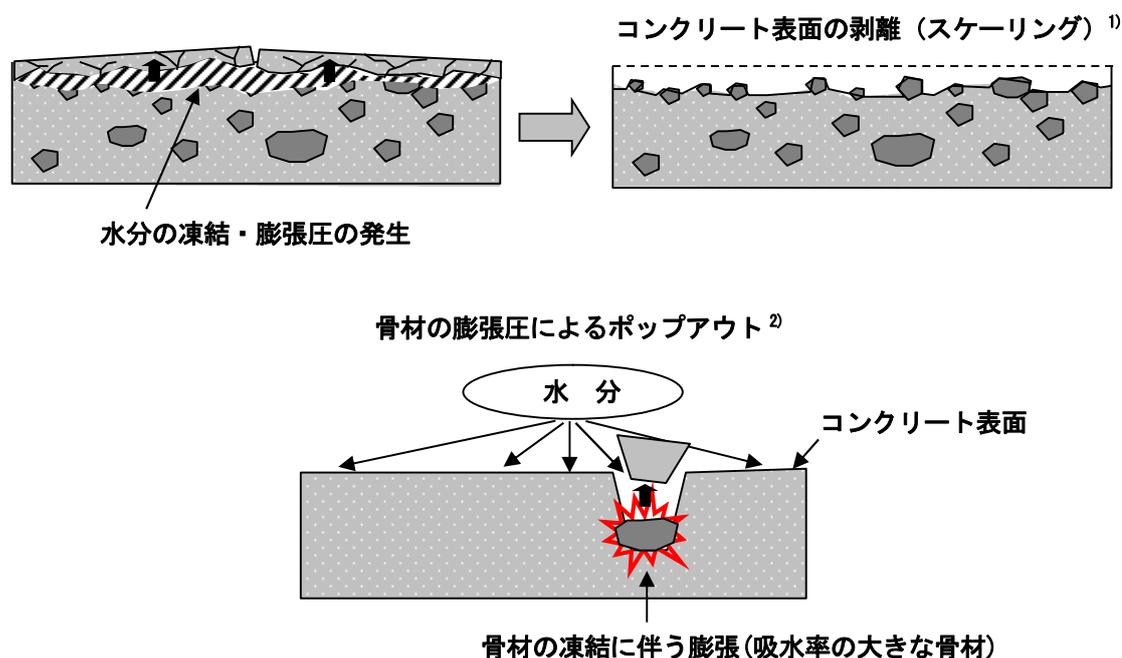
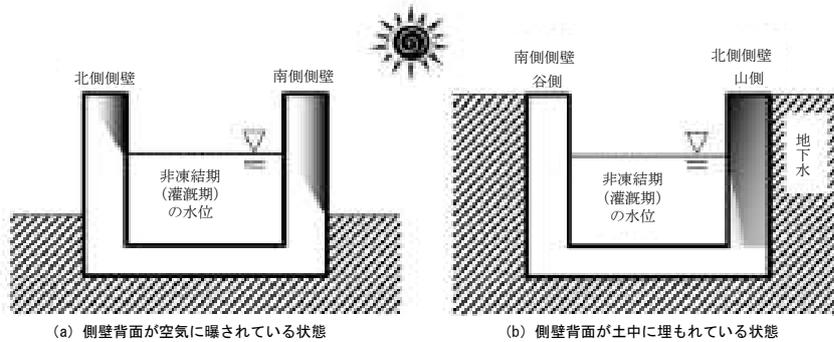


図 3.3-6 凍害による劣化の進行過程

¹⁾ スケーリング：コンクリート表面がフレーク状に剥げ落ちること。

²⁾ ポップアウト：コンクリートの表面が飛び出すように剥がれてくること。

コンクリート開水路では、図 3.3-7(a)に示すように日射の影響を受け凍結融解を繰り返す側壁天端（特に南面に位置する隅角部）、図 3.3-7(b)に示すように背面から水の供給を受けるような北側側壁背面に凍害が生じやすい。微細ひび割れが進行すると、コンクリート表面からコンクリートが徐々に劣化し、水平方向のひび割れや表面のモルタル部分がフレーク（薄片）状に剥げ落ちるスケーリング等の症状が顕在化し、このときコンクリート内部には部材方向に複数の層状ひび割れが発生している事例が多い。



出典：「RC開水路の凍害」（緒方英彦ほか 2008 年）

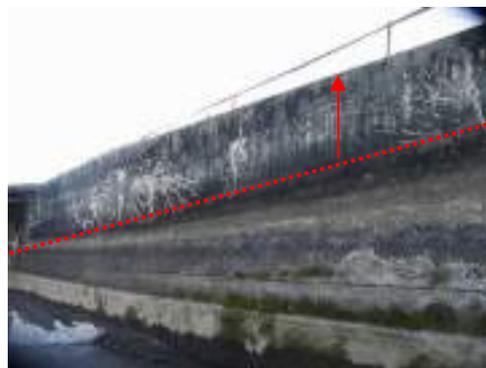


図 3.3-7 コンクリート開水路側壁喫水線上部に生じた凍害

また、目地周辺においては、気温による外壁の体積変化の影響によりコンクリート組織が膨らみやすく水分が浸透しやすい状況にあるために凍害が顕著に発生し、目地部下部から上部に向けて流線上のひび割れやスケーリングが発達しやすい。さらに、吸水率が大きな骨材等を用いた場合は、コンクリート表面から骨材が抜け出し、クレータ状のくぼみが生じるポップアウトが発生する場合もある。（図 3.3-8、図 3.3-9 を参照）



図 3.3-8 側壁天端に生じたスケーリング



図 3.3-9 目地部に生じる特徴的な凍害

なお、AEコンクリート標準化（JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の規格改正：1978年）以降のコンクリート開水路においては、凍害に対する耐久性は従前に比べ向上している。

表 3.3-1 凍害による変状の類型図

劣化機構	劣化進行過程	定義	特徴的な変状の状態	ひび割れ・スケーリングの状態
凍害	進展期	<p>スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生し、骨材が露出するまでの期間。</p> <p>(コンクリート表面の劣化は進行するが、鉄筋腐食がない時期。 凍害深が浅く、剛性を保っている段階)</p>	<p>喫水線</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.2mm～0.3mm 程度の亀甲状のひび割れが喫水線上部に顕在化する事例が多い。 • スケーリングが側壁天端部に顕在化する事例が多い。
	加速期	<p>スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが進展し、骨材の露出や剥落が発生する期間。</p> <p>(コンクリートの劣化が大きくなり、鉄筋腐食が発生し増大する)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 凍害深さが大きくなり、水分の滲み出し、剥離が激しい。 • 側壁天端や目地部周辺での発生が顕著となる。
	劣化期	<p>かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋の露出や腐食が発生する期間。</p> <p>(凍害によるコンクリートの劣化が鉄筋かぶり以上になり、耐荷力の低下が顕著になる)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • コンクリートも浮き上がり、剥離も激しい。 • 凍害深さが鉄筋かぶり以上になり、水分の滲み出し、ひび割れ、剥落などが多数発生する。 • コンクリート開水路では劣化期に至る事例は少ない。

(2) 凍害の要因

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、骨材の品質、空気量などが凍害に影響を与える内的要因となる。水セメント比が大きなコンクリートは凍害の影響を受けやすく、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

表面仕上げを行い水分の侵入を防ぐほど凍害の発生は抑制される。凍害は養生とコールドジョイントなどの初期欠陥の影響を受ける。寒冷地における冬期施工では、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著しく低下するため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多く発生しているほど水分の侵入が促進されるため凍害の影響が大きくなる。

2) 環境等の要因 (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となる。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。凍害の要因を図 3.3-10 に示す。

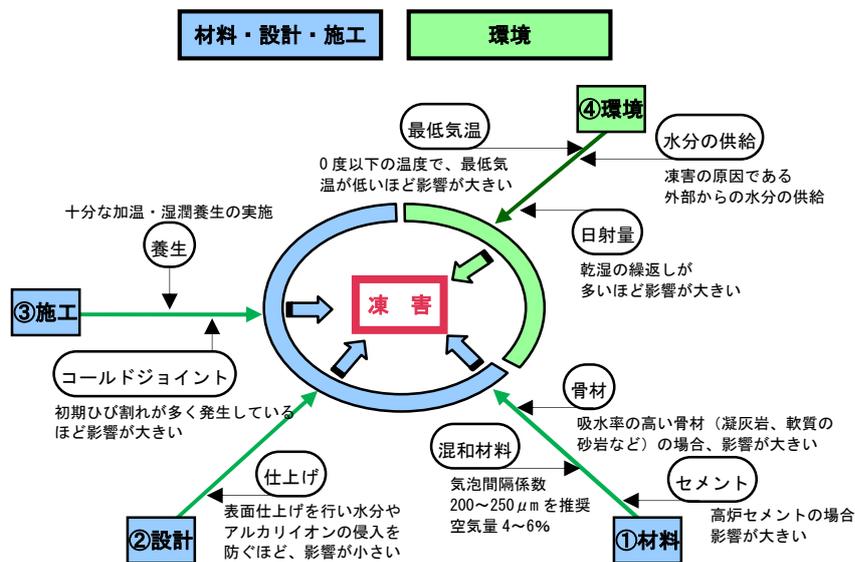


図 3.3-10 凍害の要因

3) 凍害危険度の分布

各地域の凍害危険度は、年間凍結融解繰返し日数・凍結融解時の氷点下の温度差・凍結融解時の湿潤程度（含水程度）によって算出し、1～5度の5段階に分けて示されている。（図 3.3-11 を参照）

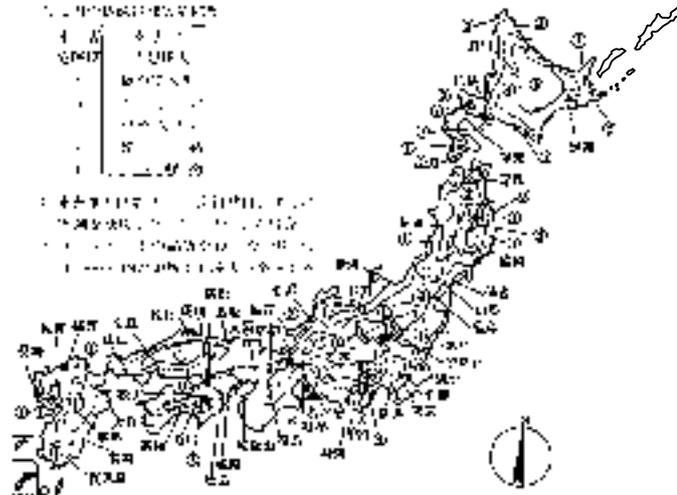


図 3.3-11 凍害危険度の分布図

出典：「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会 報告書」（2001年）
（社）日本コンクリート工学協会P. 34

4) 凍害とアルカリシリカ反応の複合劣化の可能性のある地域

凍害とアルカリシリカ反応の複合劣化は、東日本と中部、北陸地方の山間部で生じる可能性が高いと考えられる。

アルカリシリカ反応と凍害による劣化は初期にひび割れを発生させる。このひび割れはコンクリート内部に水分を容易に供給し、水分移動による複合劣化を促進することが考えられる。（図 3.3-12 を参照）



図 3.3-12 凍害とASR¹⁾の複合劣化の可能性のある地域

出典：「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会 報告書」（2001年）
（社）日本コンクリート工学協会 P. 64

¹⁾ ASR：アルカリシリカ反応の略称。

3. 3. 3 アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応（略称はASR）は、コンクリート中の骨材に含まれるシリカ鉱物とアルカリとの反応によりアルカリシリカゲルが生成され、アルカリシリカゲルが吸水し膨張することで発生する。

【解説】

(1) アルカリシリカ反応の特徴

アルカリシリカ反応は、コンクリート細孔液中のアルカリ成分と骨材中に含まれるオパール、カルセドニー、クリストバライト、トリジマイトに代表されるシリカ鉱物や火山ガラスとの間に生じる化学反応であり、この反応によりアルカリシリカゲルが生成される。

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・剥落が発生する。アルカリシリカ反応の膨張機構概要を図 3.3-13 に示す。

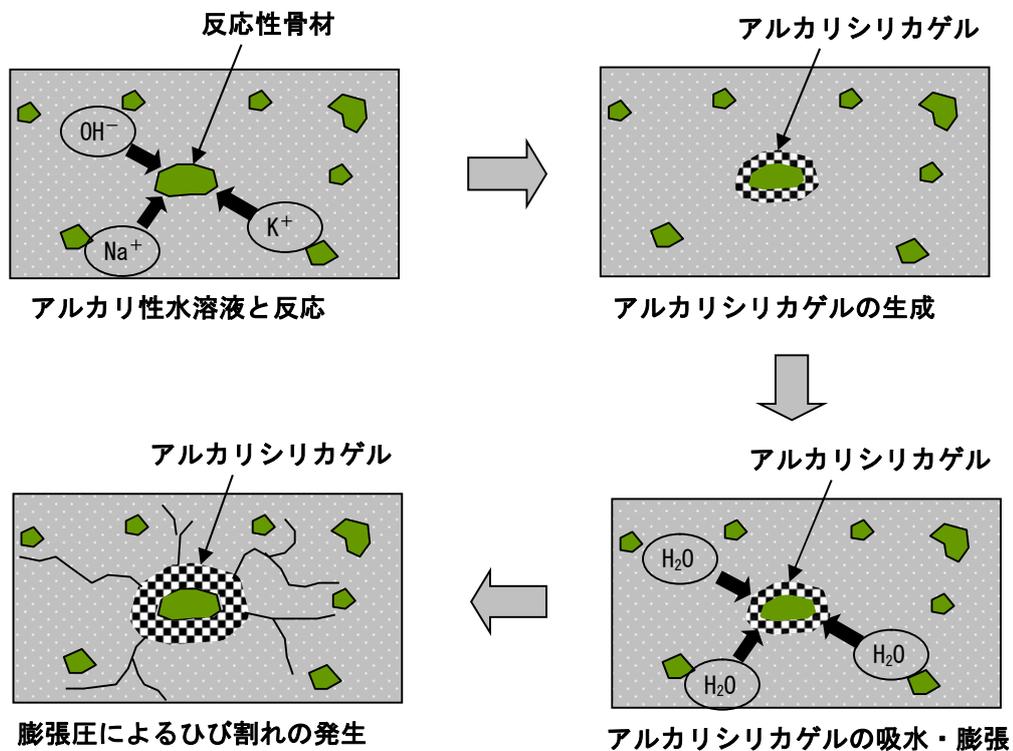


図 3.3-13 アルカリシリカ反応の膨張機構概要

アルカリシリカ反応に起因するひび割れは、格子状や亀甲状に不規則に発生し、比較的劣化の早い段階でゲルの滲み出しが見られる。(図 3.3-14 を参照)また、鉄筋コンクリート開水路の側壁では、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張が軸方向鉄筋により拘束されることで、軸方向鉄筋に沿った方向性のあるひび割れが発生することがある。アルカリシリカ反応に起因するひび割れは、農業水利施設において四国や関東、北陸管内の一部で発生事例が報告されている。



図 3.3-14 アルカリシリカ反応による亀甲状のひび割れとゲルのしみ出し

また、アルカリシリカ反応の発生が認められる地域では、複合劣化として顕在化している事例が多い。

アルカリシリカ反応と凍害は、水の供給を受ける環境下で劣化が進行するという共通する環境要因を有する。また、アルカリシリカ反応と塩害の場合は、アルカリシリカ反応によって生じたひび割れにより塩化物イオン等の腐食因子の供給が過大となり塩害が促進される。アルカリシリカ反応に関する複合劣化現象を図 3.3-15 に示す。

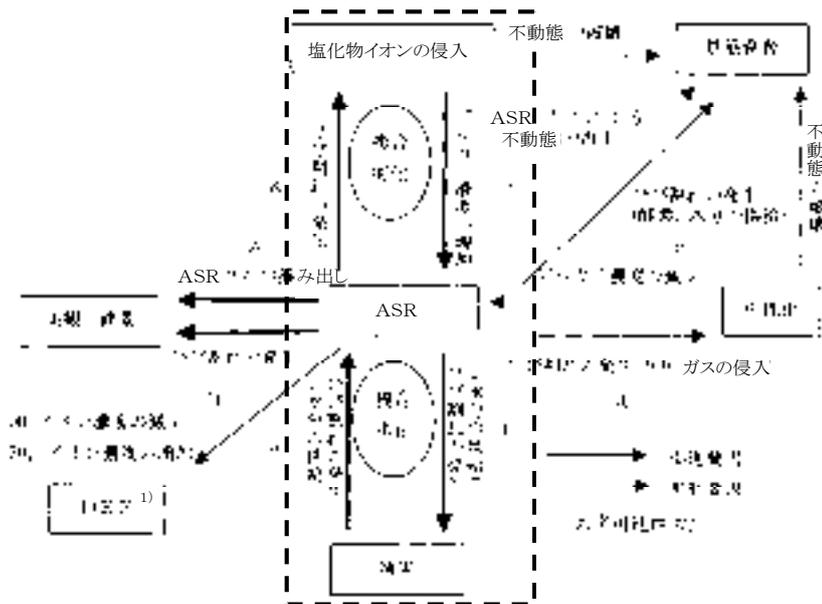


図 3.3-15 アルカリシリカ反応に関する複合劣化現象

出典：「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書」（2001年5月）
 (社)日本コンクリート工学協会 P.42 を参考

¹⁾ DEF：コンクリートが硬化後に数箇月～数年で膨張崩壊する現象。

(2) アルカリシリカ反応の要因

1) 材料・設計・施工の要因 (内的要因)

アルカリシリカ反応は、反応性骨材が存在する中国四国地方の瀬戸内海沿岸、北陸から東北地方の日本海沿岸で多く報告されている。

① 材料の要因

アルカリシリカ反応は、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系が含まれていることにより生じる。

② 設計・施工の要因

表面仕上げを行い、水分やアルカリイオンの侵入を防ぐほどアルカリシリカ反応を抑止できる。コールドジョイント等により初期欠陥が発生しているほど、水分やアルカリイオンの侵入が助長されるためアルカリシリカ反応が促進されやすい。

また、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平成 14 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ことから、アルカリシリカ反応が発生する可能性が高い。

2) 環境等の要因 (外的要因)

アルカリシリカ反応は、水分のアルカリ及び凍結防止剤に含まれる塩分の供給及び温度の上昇により促進される。アルカリシリカ反応の要因を図 3.3-16 に示す。

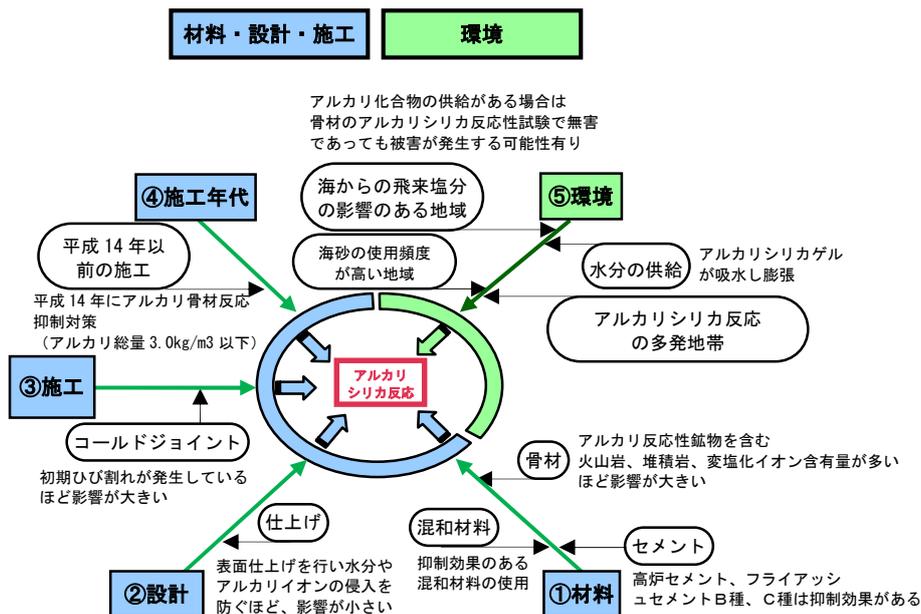


図 3.3-16 アルカリシリカ反応の要因

3) アルカリシリカ反応性の骨材分布

アルカリシリカ反応性の骨材は、全国に広く分布している(図3.3-17を参照)。レディーミクストコンクリートに使用される骨材のうち、細骨材で約9%¹⁾、粗骨材で約15%¹⁾の割合が無害ではないと判定されている。骨材のアルカリシリカ反応性試験結果を図3.3-18に示す。(平成16年時点)

北海道・東北・北陸の各地域はそれ以外の地域と比べるとアルカリシリカ反応性の骨材の割合が多い。関東地方でも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、アルカリシリカ反応による構造物の著しい劣化事例も報告されているが、アルカリシリカ反応性の骨材の割合は比較的小さい。

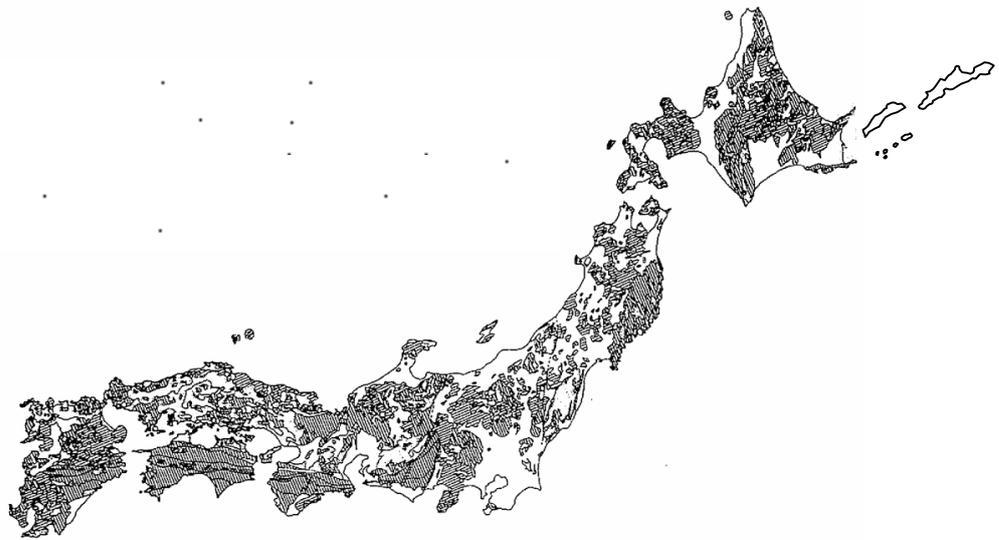


図 3.3-17 アルカリシリカ反応性の骨材分布

出典：「コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）」1989年
(財)土木研究センターP. 294

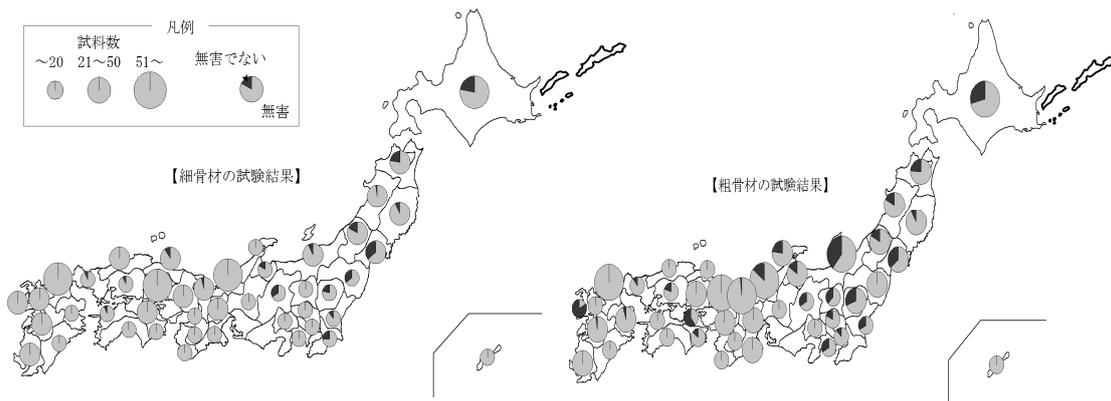


図 3.3-18 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果

出典：「骨材のアルカリシリカ反応性に関する全国調査結果」2004年
(独)土木研究所P. 2

¹⁾無害ではない細骨材、粗骨材の割合：「骨材のアルカリシリカ反応性に関する全国調査結果」（2004年（独）土木研究所P.2）より。

4) アルカリシリカ反応と塩害による複合劣化の可能性がある地域

アルカリ反応性骨材は、安山岩、流紋岩などの火山岩系チャート、硬質砂岩等の堆積岩系など多種多様であり、全国各地に存在する。(図 3.3-19 を参照)

このため、塩害の可能性がある地域などでは、アルカリシリカ反応で生じたひび割れによってコンクリート中の塩化物イオン等の腐食因子が増加することで塩害が促進されたり、凍結防止剤等の外来塩分の侵入によりアルカリ濃度が上昇してアルカリシリカ反応が促進されるなど、相乗的複合劣化が生じる可能性が高くなる。



図 3.3-19 ASR¹⁾と塩害による複合劣化の可能性がある地域

出典：「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会 報告書」2001年
(社)日本コンクリート工学協会P. 63

アルカリシリカ反応と塩害による複合劣化は、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や、中国四国地方の瀬戸内海沿岸に位置する、特に海岸沿いに設置された農業水利施設では注意する必要がある。

なお、凍結防止剤等の外来塩分だけでなく初期塩分の影響によりアルカリシリカ反応が促進される問題も指摘されている。初期塩分の濃度に影響を及ぼす一つの要因として海砂の使用が挙げられる。

【参考】

西日本（特に中国・四国・九州）は、海砂の採取量が他地域よりも多いため、アルカリシリカ反応による劣化が増幅されている可能性があるとの報文もある。

骨材への海砂使用量は、1964年（昭和39年）の東京オリンピック開催の年を境として増加傾向にあり、2000年（平成12年）以降減少傾向を示している。一方、コンクリート中の塩化物総量の規制は、1986年（昭和61年）にコンクリート標準示方書に規定されている。このため、1964年（昭和39年）から1986年（昭和61年）に施工されたコンクリート構造物は、骨材に塩分を除去していない海砂が使用されている可能性を指摘しているものもある。(図 3.3-20～図 3.3-23 を参照)

¹⁾ ASR：アルカリシリカ反応の略称。

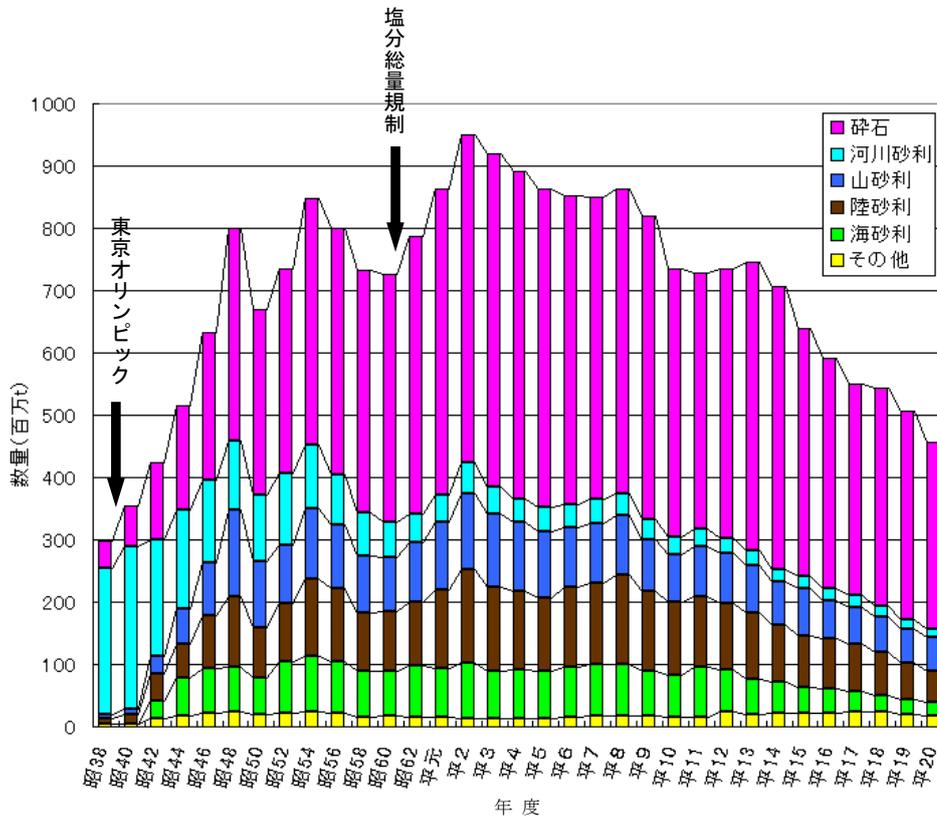


図 3.3-20 骨材供給構造の推移

出典：(社)日本砕石協会ホームページ「骨材需給の推移」より抜粋

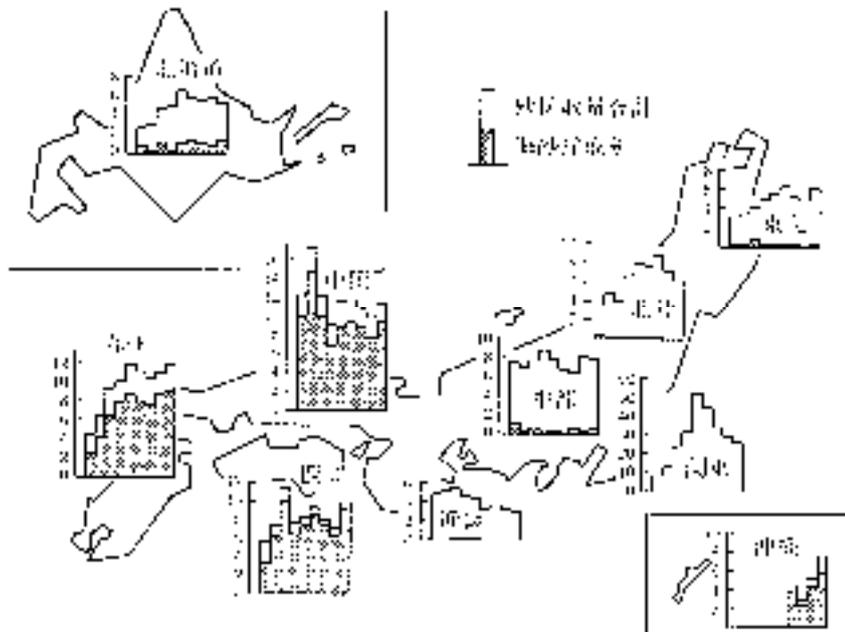


図 3.3-21 海砂の地方別採取量の推移 (単位は 10^6m^3 、1969~1977 年度調査)

出典：「コンクリートが危ない」小林一輔 1999 年岩波新書 P. 4



図3.3-22 アルカリシリカ反応の多発地域
 出典：「コンクリートが危ない」小林一輔
 1999年岩波新書P.83



図 3.3-23 年間 10 万 m³ 以上の海砂
 を使っている地域
 出典：「コンクリートが危ない」小林一輔
 1999 年岩波新書 P.82

アルカリシリカ反応が発生している場合は、現状のコンクリートの膨張率並びに今後の膨張速度及び膨張量について予測することが対策工法の検討の基礎資料となり重要である。(図 3.3-24 を参照)

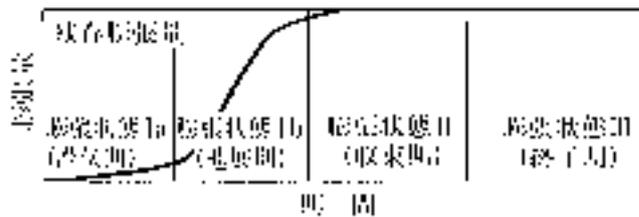


図 3.3-24 コンクリートの膨張過程

出典：「コンクリート診断技術」14 基礎編 (公社)日本コンクリート工学会 2014年度版 P.202

農業水利施設においてアルカリシリカ反応の事例は少ないが、発生している事例はいずれも長期供用施設である。このことから、長期供用施設においては「膨張量が収束期に至っていない」可能性があることを理解しておく必要がある。

3. 3. 4 化学的侵食

化学的侵食は、コンクリートが外部からの化学的作用を受け、セメント水和生成物の分解又は、膨張性化合物の生成により、すり減り・欠損やひび割れが生じる現象である。

アルミネート¹⁾を含有した骨材の使用、外部からの硫酸、硫酸塩などの作用に起因し発生する。コンクリート開水路の場合、温泉地や酸性河川流域など特殊な事情がない限り化学的侵食による劣化は極めて少ない。

【解説】

(1) 化学的侵食の特徴

化学的侵食は、侵食性炭酸、硫酸、硫酸塩及び動植物性油の成分による化学反応に伴うセメント水和物の分解及び膨張性化合物の生成による膨張圧によって、コンクリート表面から次第に劣化が進行する現象である。(図 3.3-25 を参照)

硫酸による劣化は、下水や温泉地の土壤に含まれる硫黄分が空气中で酸化し、細菌の作用によって酸化が促進されて硫酸が生成され、セメント水和物を分解することで骨材を露出させる。更に劣化が進行すると骨材が脱落する。

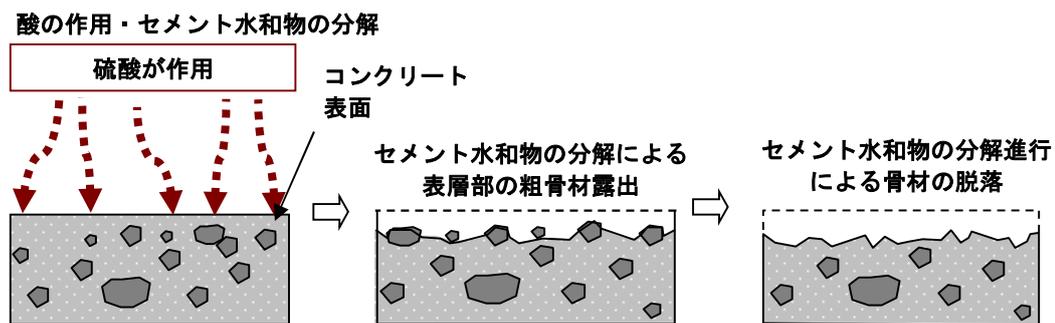


図 3.3-25 硫酸による劣化の進行過程

硫酸塩による劣化は、海水の越波や飛沫による外来塩分が作用する海岸保全施設や、硫酸塩を多く含む土壌²⁾に接する構造物などに見られ、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応することでエトリンガイト³⁾を生成し、生成の際に発生する膨張圧によりコンクリートにひび割れや剥離・剥落を引き起こす。(図 3.3-26 を参照)

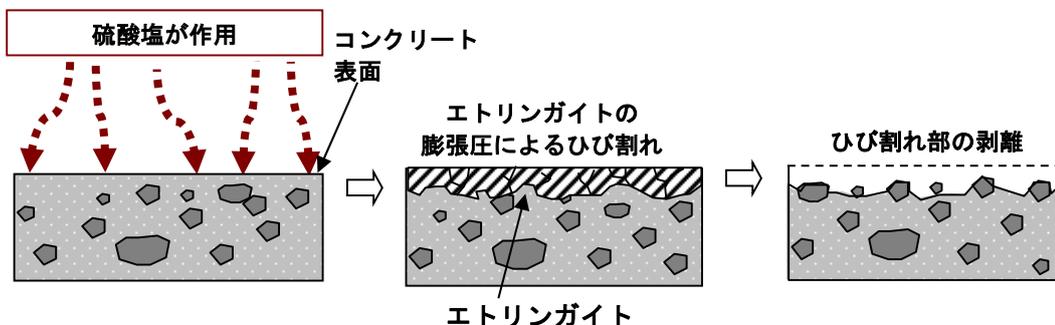


図 3.3-26 硫酸塩による劣化の進行過程

¹⁾ アルミネート：コンクリートの強度発現に作用する鉱物の一種。

²⁾ 硫酸塩を多く含む土壌：強酸性（pH4 程度）を示す土壌。

³⁾ エトリンガイト：強度の発現に作用するアルミネートの一種。

(2) 化学的侵食の要因

1) 材料・設計・施工の要因 (内的要因)

①材料の要因

化学的侵食は、「セメント」、「骨材」に起因して発生する。セメントのアルミネート含有量が多いほど膨張性のエトリングタイトの生成量が増えるため、化学的侵食の影響が大きくなる。石灰岩による骨材を使用した場合、酸類に溶解するため化学的侵食の影響が大きくなる。

②設計・施工の要因

表面仕上げを実施する場合やかぶりが大きいくほど、侵食性物質の侵入が抑制されるため、化学的侵食の影響は小さくなる。豆板及びコールドジョイントがあるほど、化学的侵食性物質の侵入が促進されるため、化学的侵食の影響が大きくなる。さらに、侵食性物質はコンクリート中の空隙（孔径 $2\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ ）より侵入する。水セメント比が大きいくほど侵入速度が大きくなる。

2) 環境などの要因 (外的要因)

侵食性物質の「濃度」と「温度」が高いほど化学的侵食の速度は速くなる。また、「温泉地」、「酸性河川」、「酸性・硫酸塩土壌」などを有する地域では、化学的侵食が発生しやすい。化学的侵食の要因を図 3.3-27 に示す。

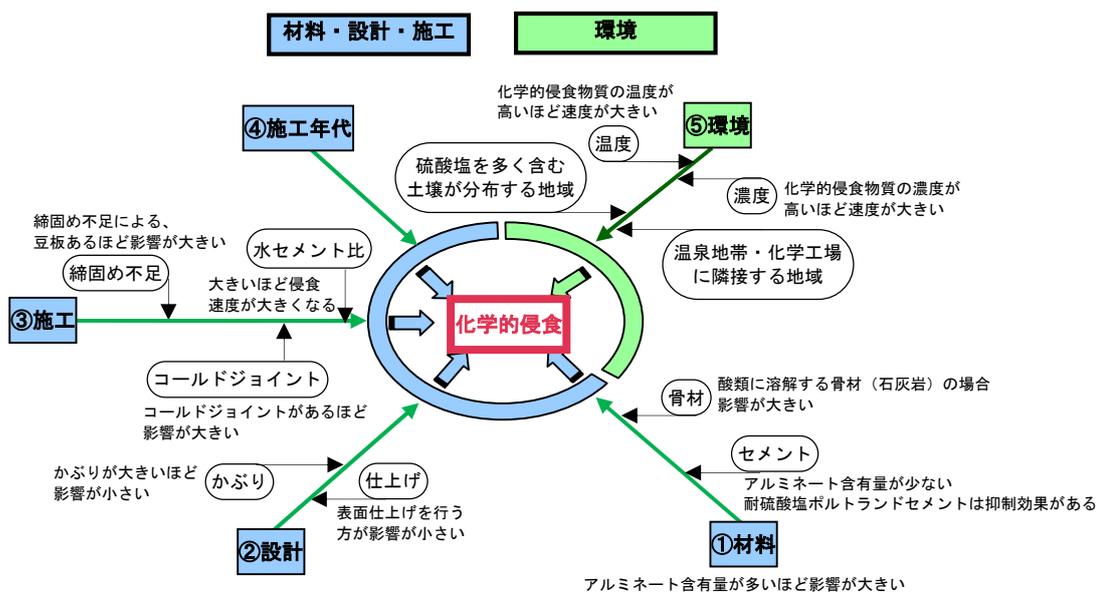


図 3.3-27 化学的侵食の要因

3. 3. 5 中性化

中性化は、コンクリートが外部からの二酸化炭素の侵入によってアルカリ性を失い、そのためコンクリート中の鉄筋が発錆・腐食し、鉄筋コンクリート構造物に変状が発生する現象である。

中性化は、コンクリート自体の品質、気温・湿度や、凍結防止剤の散布などの要因により影響を受ける。

【解説】

(1) 中性化の特徴

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、水酸化カルシウム等のセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリートの空隙¹⁾中の細孔溶液の pH を低下させる現象である。中性化の進展概要を図 3.3-28 に示す。

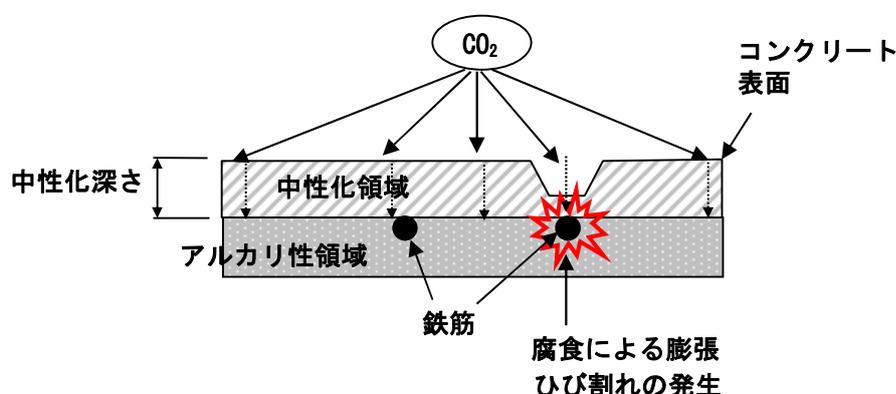


図 3.3-28 中性化の進展概要

コンクリート中の細孔溶液の pH は 12~13 程度を示し、このような高アルカリ下では、コンクリート内部の鉄筋表面は、不動態皮膜に覆われ鉄筋の発錆・腐食は生じない。しかしながら、二酸化炭素がコンクリートに侵入し続け、コンクリートの pH が低下すると、不動態皮膜は破壊され、鉄筋の腐食が始まり、腐食生成物により鉄筋が膨張し、コンクリートのひび割れ、剥離・剥落、鉄筋断面の減少が発生する。なお、コンクリート中の水分と酸素の量により、鉄筋の腐食進行速度は異なる。(図 3.3-29 参照)

なお、コンクリートが水中に位置する場合は、二酸化炭素の侵入による中性化は発生し難いとされてきたが、近年の研究において、セメントペースト部のカルシウムイオンの溶出によりアルカリ性が低下する事例が報告されている(図 3.3-30 参照、2013 年(長谷川雄基ほか))。そのため、コンクリート開水路においてもコンクリート表面に pH 低下領域が存在することに留意する必要がある。また、コンクリート自体が中性化しても、コンクリートの力学的性能(強度、弾性係数)や物質透過性(透水、透気性)は大きく変化しないことに注意すべきである。無筋コンクリートについては、鉄筋が無いことから、このことについて憂慮する必要はない。

¹⁾ 空隙：コンクリートを練り混ぜる際や施工する際に必要なセメントの水和反応以上の水の添加に起因する空隙(孔径 2nm~1μm)。

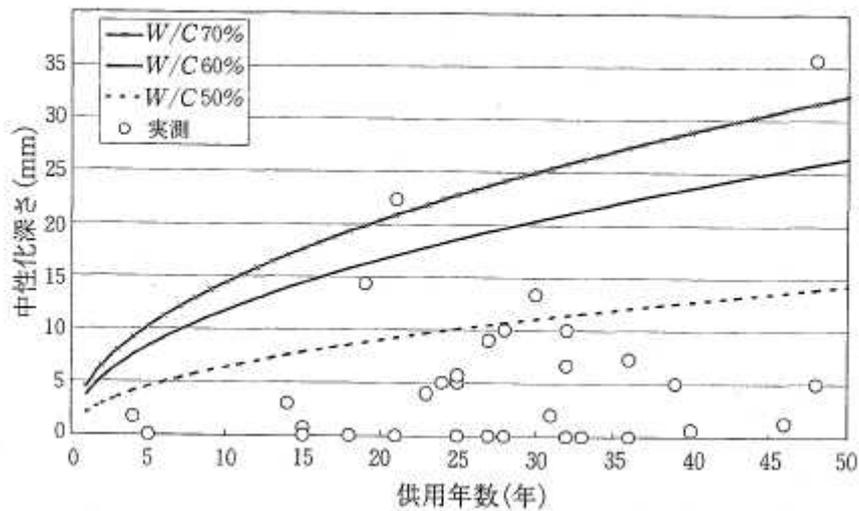


図 3.3-29 中性化深さと供用年数の関係

出典：「農業施設構造物のコンクリート劣化の現状分析と補修の試み」（2001年 藤本直也、長東勇）

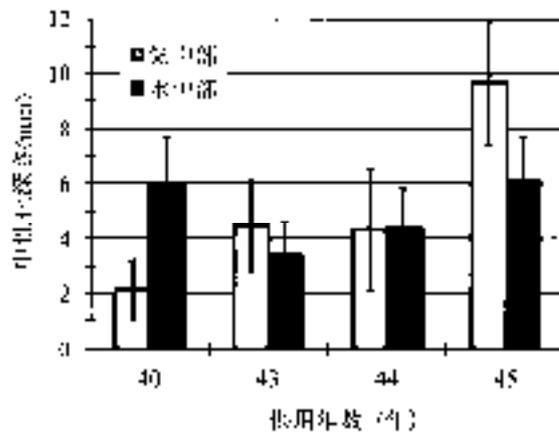


図 3.3-30 コンクリート開水路における中性化深さの事例

出典：「コンクリート製開水路の表面状態が中性化の進行におよぼす影響」（2013年長谷川雄基ほか）

鉄筋コンクリート開水路の場合、昭和 44 年以前に築造された施設では、設計基準「水路工」において鉄筋かぶりが規定されておらず、現行の設計基準のかぶりを満たさない施設も散見される。これらの施設においては、中性化による鉄筋腐食やひび割れが生じやすいため、かぶり厚の調査を行うなど注意する必要がある。また、かぶりが薄い場合、中性化によるひび割れは、鉄筋に沿った形態を示し側壁上部に等間隔に発生するため、乾燥収縮ひび割れと混同しないように留意する。具体的には、目視ではひび割れからの錆汁の滲み出しやコンクリートの剥落、定量的な調査では中性化深さを測定することにより、両者を区別することができる。

(2) 中性化の要因

1) 材料・設計・施工の要因 (内的要因)

①材料による要因

中性化 (中性化速度) は、「配合」、「骨材」、「混和材料」に影響を受ける。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。したがって、水セメント比が小さいほど中性化速度は遅い。また、同一水セメント比では高炉セメントを使用したものほど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¹⁾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速くなるためである。

さらに、空隙率 (吸水率) の高い骨材を使用した場合、炭酸ガスの拡散が促進されるため中性化の速度は速くなる。

②設計・施工による要因

締固め不足による豆板及びコールドジョイントが多いほど、大気中の二酸化炭素の侵入が助長されるため、コンクリートの中性化速度は速くなる。

中性化による鉄筋腐食が始まるのは、中性化深さが鉄筋位置に達する以前であることは多くの研究結果より明らかになっており、「中性化残り (中性化深さと鉄筋表面深さの差分)」を指標とする事例が多い。コンクリートに塩化物イオンが含まれていない場合には、腐食開始の判定を中性化残り 10mm とし、塩化物イオンを含む場合には中性化残り 15~20mm を発生開始とする場合が多いが、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必要である。

2) 環境等の要因 (外的要因)

一般に二酸化炭素濃度が高いほど、温度が高いほど中性化速度は速い。湿度については図 3.3-31 に示すように相対湿度 50~60% で中性化速度は最大となる。したがって、水中条件下や著しい乾燥条件下では中性化は進行し難い。

また、塩化物イオンによりコンクリート中の水酸化カルシウムが消費され、pH が低下するため、海からの飛来塩分が多い地域や凍結防止剤散布がなされている地域では中性化の進行速度は速くなる。中性化の要因を図 3.3-32 に示す。

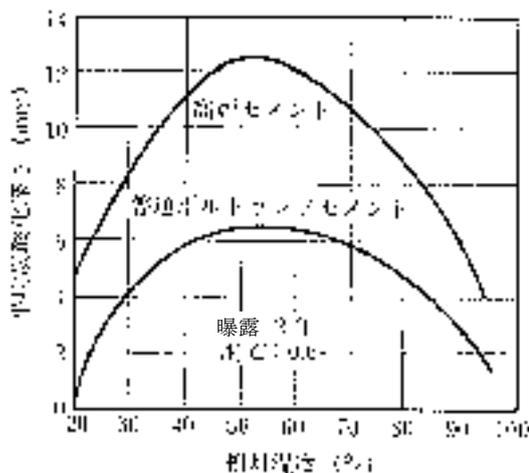


図 3.3-31 モルタルの炭酸化深さに及ぼす相対湿度の影響 (曝露 2年)

出典: 「コンクリート診断技術'14 [基礎編]」(公社)日本コンクリート工学会 2014 年度版 P. 37

¹⁾ポズラン反応: シリカ (SiO₂) とアルミナ (Al₂O₃) を主な組織とするポズランが、水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) と反応し、結合能力を持つ化合物を生成する現象

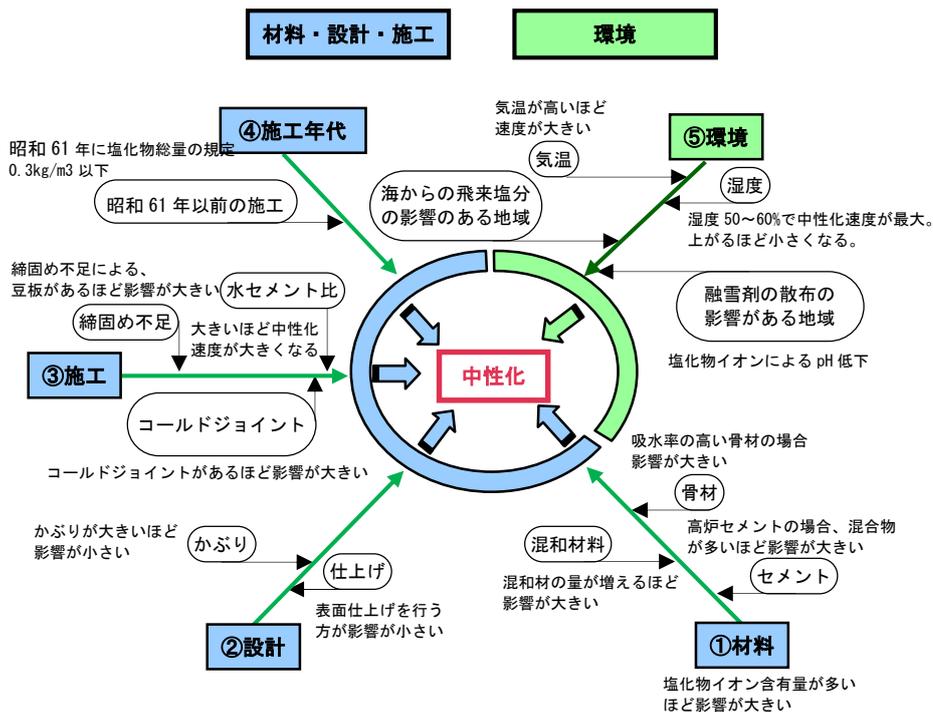


図 3.3-32 中性化の要因

3) 中性化と塩害による複合劣化

中性化の進行により、コンクリート内部の塩化物イオン濃度が濃縮され塩害が促進される。セメント水和物に固定されたフリーデル氏塩¹⁾が、細孔溶液中に塩化物イオンとして解離する。解離した塩化物イオンは、濃度拡散に伴いコンクリート内部へ移動する。内部に移動した塩化物イオンは、アルカリ性領域で再びフリーデル氏塩となる。中性化の進展とともに、この現象が繰り返し起こり、コンクリート内部の塩化物イオン濃度が濃縮され、塩害が促進される。(図3.3-33を参照)

中性化の進行までは細孔溶液中の Cl^- は一様に分布

中性化により中性化領域のフリーデル氏塩が分解し、 Cl^- が細孔溶液中に溶出

濃度拡散により、細孔溶液中の Cl^- が内部へ移動

アルカリ性領域に達すると再びフリーデル氏塩となる

濃度拡散がなくなるまで反応が続く

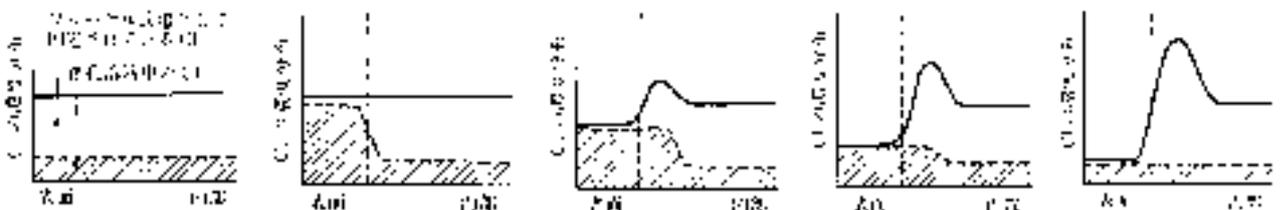


図 3.3-33 塩化物イオンの濃縮現象の概念図

出典：「コンクリート診断技術'14 [基礎編]」2014年版(公社)日本コンクリート工学会 P.38

¹⁾フリーデル氏塩：塩化物イオンがセメント鉱物と反応し生成される代表的な化合物。化合物の状態では塩害に関与しないと考えられているが分解され塩化物イオンを解離することで塩害を促進する。

3. 3. 6 塩害

塩害は、コンクリート中に存在する塩化物イオンにより鉄筋が腐食し、これに伴う体積膨張によって、コンクリートにひび割れや剥離、あるいは、鉄筋の断面減少が生じる現象である。

塩害は、塩化物イオンを含有した骨材のコンクリートへの過度の使用、海からの飛来塩分や凍結防止剤に含まれる塩分などにより生じる。

【解説】

(1) 塩害の特徴

健全なコンクリートの pH は 12~13 とアルカリ性が強いので、コンクリート中の鉄筋表面には、緻密な不動態皮膜が形成されていて錆びないが、周辺に一定以上の塩化物イオンが存在すると不動態皮膜が部分的に破壊され、鉄筋は腐食しやすい状況になる。腐食が始まると錆の膨張圧のため鉄筋に沿った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や酸素、水が供給されるため、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。(図 3.3-34、図 3.3-35 を参照) これらの一連の現象を塩害と呼ぶ。なお、コンクリート中に蓄積される塩化物イオンは骨材や混和剤などに由来する初期内存塩分と、海水や凍結防止剤など外来塩分に分類される。

また、塩化物イオンによる鉄筋の腐食発生限界濃度は、コンクリート 1 m³ 当たり 1.2kg¹⁾ が目安とされている。

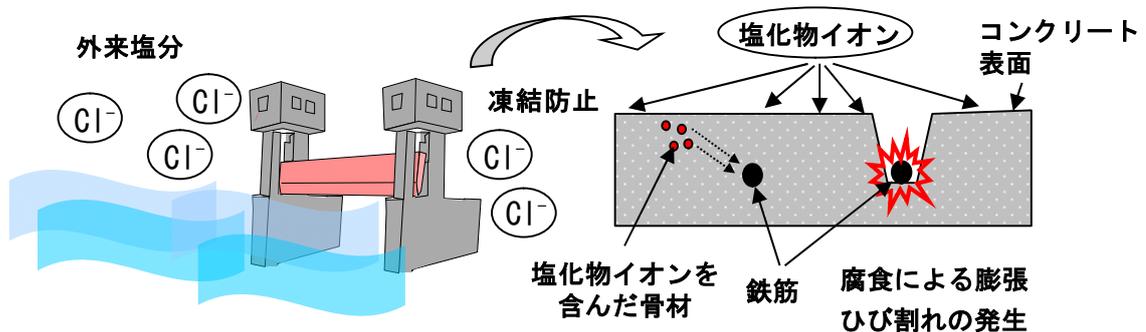


図 3.3-34 塩分による塩化物イオンの侵入

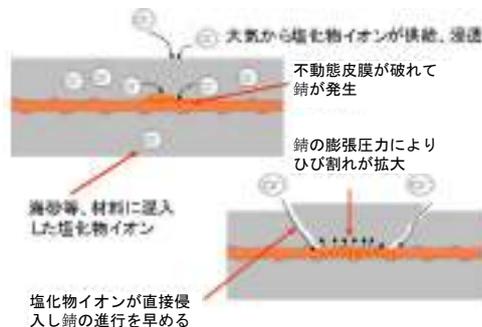


図 3.3-35 塩害による劣化の進行過程

出典：「農業水利施設の機能保全の手引き」平成 19 年(社)農業土木事業協会 P. 参-58

¹⁾コンクリート 1 m³ 当たり 1.2kg：「コンクリート標準示方書 維持管理編」P. 102

コンクリート開水路では、塩害は河口など感潮域に設置された場合や海岸沿いの飛来塩分の影響が強い場合など、ごく限られた環境でしか発生した事例がない。(図 3.3-36、図 3.3-37 を参照)



図 3.3-36 塩害が生じている施設の事例（施設全景）



図 3.3-37 塩害による変状

(2) 塩害の要因

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、塩害の影響が大きくなる。一方で、高炉セメントは空隙構造が緻密になるため塩害には強い。

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の要因であり、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。

コールドジョイント等の初期欠陥が原因の場合では、外部からより多くの塩化物イオンの侵入が促進されるため塩害の影響が大きくなる。養生不足や水セメント比が大きい場合、緻密でないコンクリートとなり塩化物イオンが拡散しやすくなるため塩害の影響が大きくなる。また、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昭和 61 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、塩害が起りやすい可能性がある。

2) 環境等の要因 (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」では塩害が発生しやすい。塩害の要因を図 3.3-38 に示す。

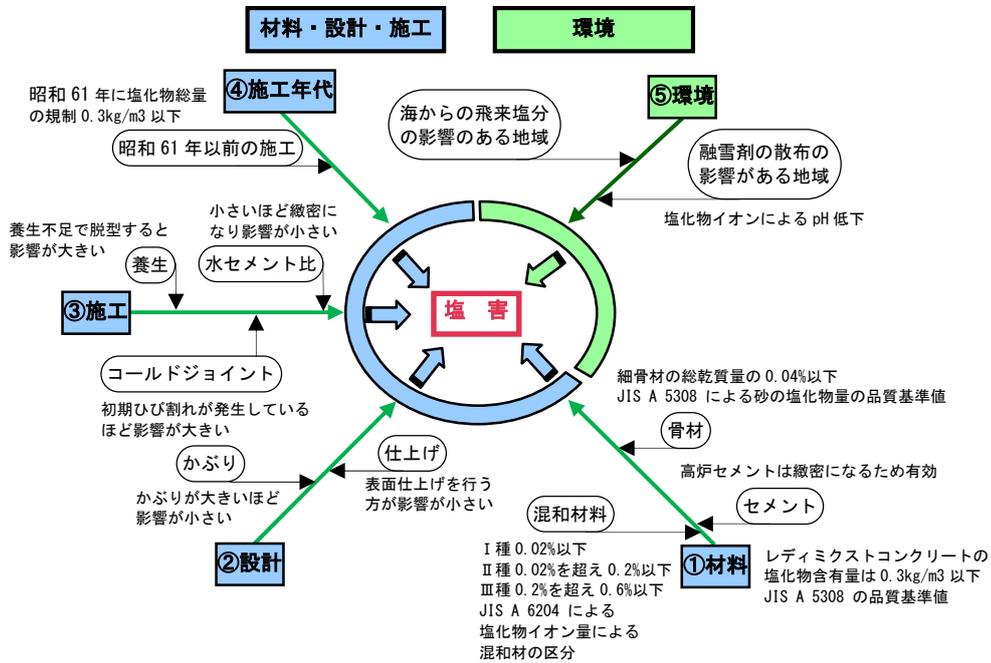


図 3.3-38 塩害の要因

3) 塩害地域

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。塩害範囲地域を図 3.3-39 に示す。



図 3.3-39 塩害範囲地域 (道路橋)

出典: 「道路橋示方書・同解説 I 共通編 III コンクリート橋編」平成 24 年(社)日本道路協会 P.176

塩害の影響地域（道路橋）は、次の範囲である。

地域区分A：沖縄県（海岸から300mまで）

地域区分B：北海道のうち、宗谷総合振興局の礼文町・利尻富士町・利尻町・幌延町・稚内市・猿払村・豊富町、留萌振興局、石狩振興局、後志総合振興局、檜山振興局、渡島総合振興局の松前町・八雲町（旧熊石町の地区に限る。）、青森県のうち、外ヶ浜町、今別町（東津軽郡）、北津軽郡、西津軽郡、五所川原市（旧市浦村の地区に限る。）、大間町、佐井村、むつ市（旧脇野沢村の地区に限る。）、秋田県、山形県、新潟県、富山県、石川県、福井県（海岸から300mまで）

地域区分C：上記以外の地域（海岸から50mまで）

4) 塩害と凍害による複合劣化の可能性がある地域

塩害は、凍害によるスケーリング¹⁾やポップアウト²⁾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侵入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、更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、特に沿岸に設置された農業水利施設では注意する必要がある。塩害と凍害による複合劣化の可能性がある地域を、図3.3-40に示す。



図3.3-40 塩害と凍害による複合劣化の可能性がある地域

出典：「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会 報告書」2001年
(社)日本コンクリート工学協会 P.62

¹⁾ スケーリング：コンクリート表面がフレーク状に剥げ落ちること。

²⁾ ポップアウト：コンクリートの表面が飛び出すように剥がれてくること。

3. 4 損傷

3. 4. 1 コンクリート部の損傷

コンクリート部の損傷は、偶発的な外力や、水路使用環境の変化などに起因するひび割れ、欠損、変形などである。

【解説】

損傷とは、流木や転石などの衝突や地震などの偶発的な外力、地下水や圧密沈下など基礎地盤の変化によって生じるひび割れや不同沈下などの変状である。損傷は、その原因となる外力等が取り除かれればその後の進行はない。しかし、損傷によるひび割れ等から水分や二酸化炭素、塩化物イオンなどの劣化因子が侵入することで劣化を助長し、施設の耐久性を低下させる場合もあるので留意する必要がある。不同沈下による変形が目地部に集中すると、コンクリート躯体のみならず目地部の損傷の原因にもなる。(図 3. 4-1、図 3. 4-2 を参照)

また、側壁埋め込みタイプのフェンス支柱によるひび割れやドレーンの性能不足によるコンクリート躯体の浮上などが生じている事例がある。

外力によるひび割れの多くは、曲げひび割れと不同沈下によるひび割れである。(図 3. 4-6 を参照)

曲げひび割れは、作用荷重により生じる曲げモーメントを原因として発生する。発生パターンは水路内空虚時と満水時で異なる。水路内空虚時には、側壁及び底版の外側に最大曲げモーメントが生じることから、ひび割れは側壁の外側下部及び底版外側両端に水路軸方向にある程度の長さをもって発生する。また、水路内満水時には、側壁及び底版の内側に最大曲げモーメントが生じることから、ひび割れは、側壁及び底版の内側に発生する。(図 3. 4-3、図 3. 4-4 を参照)

不同沈下によるひび割れは、偏荷重が部材に作用して曲げモーメントやせん断力が生じる場合や、沈下量が四方において大きく異なる場合のねじれにより発生する。典型的な発生パターンとして①底版から側壁にわたり発生、②沈下量が大きい側の側壁ではせん断力を主要因とする大きく傾斜したひび割れが発生、③沈下量が小さい側の側壁では曲げモーメントを主要因とする少し傾斜したひび割れが発生、④底版ではねじれを主要因とする底版のほぼ対角を結ぶようなひび割れが発生する。(図 3. 4-5 を参照)



図 3. 4-1 過荷重による変形



図 3. 4-2 不同沈下による目地からの漏水

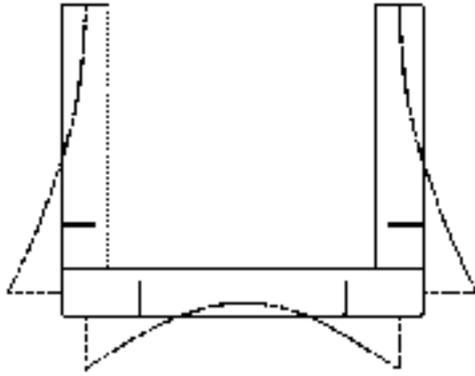


図 3. 4-3 水路内空虚時の曲げひび割れ
曲げモーメント図

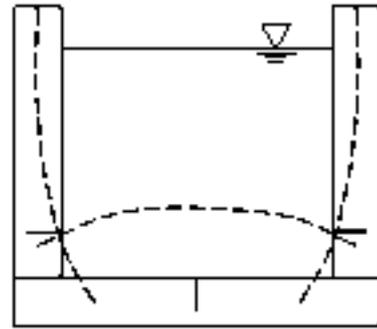


図 3. 4-4 水路内満水時の曲げひび割れ
曲げモーメント図

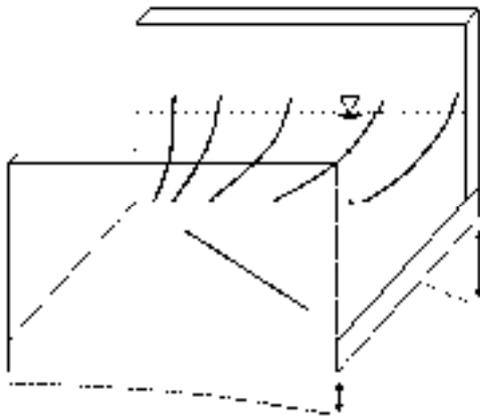


図 3. 4-5 不同沈下によるひび割れのイメージ



図 3. 4-6 開水路に生じた外力によるひび割れ

3. 4. 2 目地部の損傷

目地部の損傷は、目地材の損傷と止水板に起因する損傷に大別される。

【解説】

目地は、施工年代、水路規模により構造が異なる。コンクリート開水路で確認されている構造は表 3.4-1 のとおりである。また、コンクリート開水路における目地の構造を図 3.4-7 に示す。

表 3.4-1 コンクリート開水路における目地の構造

目地区分	目地材	止水板
標準	伸縮目地材等	有
板材	杉板等の木材	有
止水板なし	伸縮目地材等	無
二次製品	コーキング材等	無

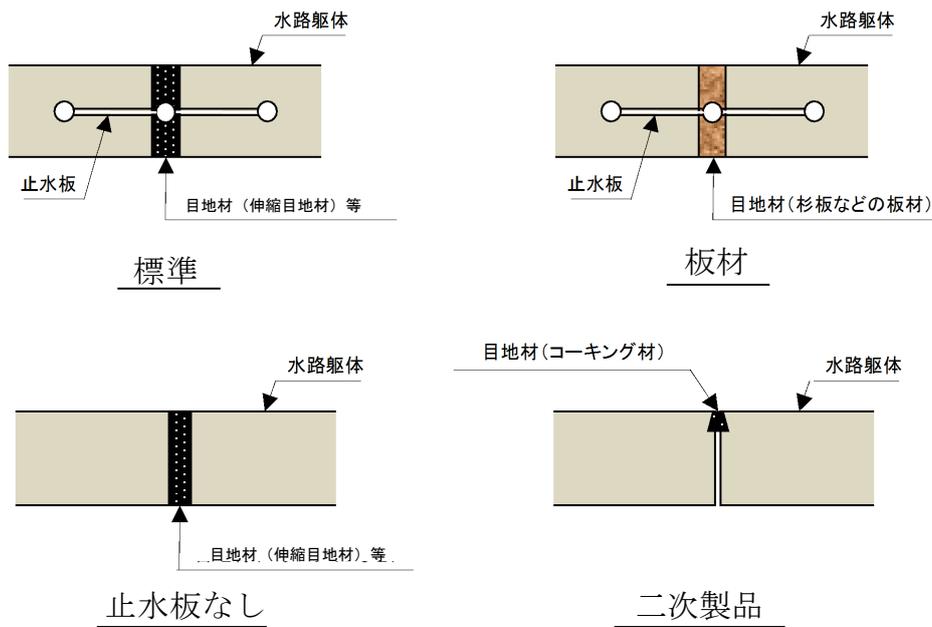


図 3.4-7 コンクリート開水路における目地の構造

(1) 目地材の損傷

目地材は、時間とともに弾力性を失い硬化する。特に供用後 35 年が経過すると硬化が急速に進行することが示されている。(研究論文「農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測」北村浩二ほか 2008 年)。

目地材が硬化すると、コンクリート開水路の膨張・伸縮に追従できなくなり、目地材の欠落、漏水、周縁コンクリートのひび割れ、欠損が生じる。

特に目地材として「板材」を使用すると、板材の腐食により早期に目地が欠落し、漏水を生じている事例が多い。

なお、目地材変状の要因としては以下の項目が挙げられる。

伸縮：コンクリートの伸縮による目地幅の変動に追従できずに目地材が突出・変形する

沈下：不同沈下等により目地部に段差が生じ、目地材が破断・変形する

紫外線劣化：紫外線により目地材が劣化する

外力：地震等の偶発的外力により目地材が破断・変形する

腐食：主として板材の目地材が長期供用中に水掛かりや環境作用によって腐食する

硬化した目地材を図 3.4-8 に、板材系目地の腐食状況を図 3.4-9 に示す。



図 3.4-8 硬化した目地材



図 3.4-9 目地材なし（板材系目地の腐食）

(2) 止水板に起因する損傷

図 3.4-10 に示すように、目地部には長手方向に止水板が埋め込まれ、水路壁は止水板により二分され薄くなっている。また、止水板付近は締固めが困難であり、施工上の欠陥が生じやすい。このように止水板周辺は構造上の弱部となりやすく、偶発的な外力が生じた場合には、周縁コンクリートのひび割れ、欠損が生じる。

コンクリートの膨張や地震動に伴い止水板がコンクリート躯体内にくさびのように押し込まれると、止水板の先端部に応力が集中し、止水板先端部のコンクリートを割裂するように挙動するものと推定される。

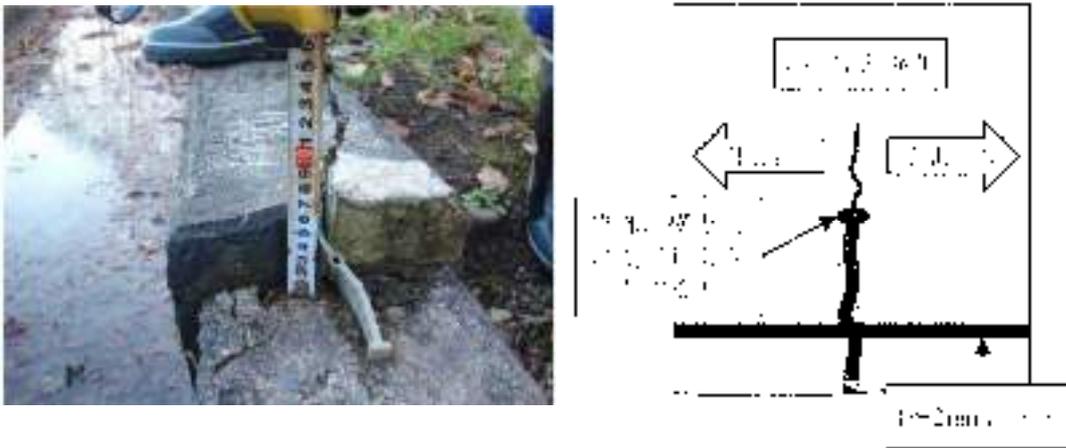


図 3.4-10 止水板から長手方向に生じたひび割れ

出典：「新潟県中越沖地震における現場打ちコンクリート開水路の目地損傷メカニズム」
(森丈久ほか 2009 年)

【コラム ～コンクリート開水路における目地材別の変状の特徴～】

目地材別の変状を分析したところ、主として板材を用いた目地では全体の約 80%に変状が発生していた。これは、腐食による板材の損失によるものと考えられる。なお、板材を用いた目地は、供用年数 50 年を超過したコンクリート開水路で多く見られた。また、その他の区分は目地モルタル等の形式を表し、変状としては欠損や損失が多く見られた。「板材」と「その他」を除けば、目地の変状の発生割合は 10%程度と低い値を示している。(表 3.4-2、図 3.4-11、図 3.4-12 を参照)

表 3.4-2 コンクリート開水路における目地材別の変状の有無

目地タイプ	あり	なし
ゴム系	199	3,740
板材系	1,045	211
シーリング(二次製品)	5	51
その他	34	41
不明	505	1,109
合計	1,788	5,152

(割合) ※平成 25 年度関東農政局調べ

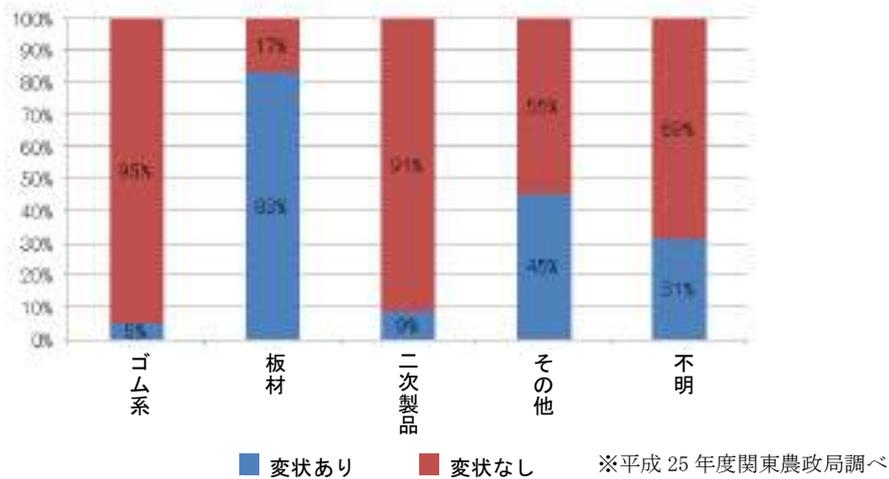


図 3.4-11 コンクリート開水路における目地材別の変状の有無

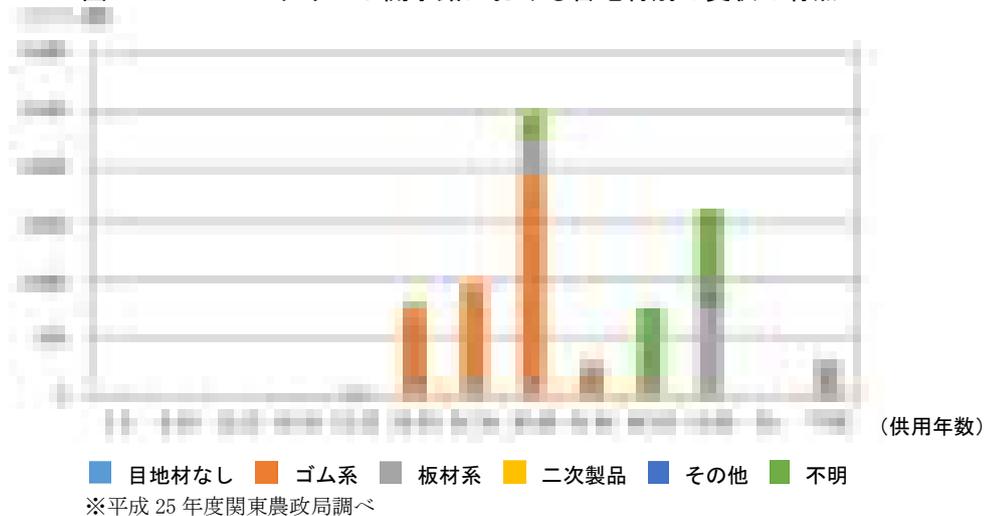


図 3.4-12 コンクリート開水路(鉄筋・無筋)における使用目地材と供用年数の関係

第4章 長寿命化対策の検討のための情報収集・整理

4. 1 基本的事項

長寿命化対策の検討のための情報収集・整理においては、農業水利ストックマネジメントを適切に実施するために必要な農業水利施設の要求性能とその性能低下状況、及び変状発生の実態を適切に把握する。

【解説】

適切な長寿命化対策を検討するためには、既存資料に基づく「施設基本条件の整理」と、現地調査による施設の現況の確認（詳細調査）が不可欠である。

このうち、「施設基本条件の整理」については、農業水利ストック情報データベース等を活用し、施設諸元や過年度の機能診断調査データ及び事故歴、補修歴の収集に努めるとともに、施設管理者へのヒアリングなども行う。

一方、詳細調査は、施設の現状を確認した上で、過年度の健全度評価等についても必要に応じて見直し、具体の対策実施の観点から施設の実態を把握・整理する。

4. 2 施設基本条件の整理

長寿命化対策の検討における基本条件の整理を目的に、施設の基本図面や維持管理履歴・過年度の機能診断結果に関する情報を収集する。また、施設の運用状況について、施設管理者等へのヒアリングを行う。

【解説】

施設基本条件の整理においては、特に以下の事項について確認する。

① 現状における施設性能の過不足

営農状況や社会環境の変化によって、開水路の水利用に係る性能に過不足が生じていないことを確認する。

② 施設の基本諸元・断面構造

長寿命化対策の設計において必要な基本図面を竣工図書等から収集・整理する。既存の図面がない場合は、現地で実測を行い、図面の復元を行う。

また、施設構築時と調査時点との環境の変化について把握する。例えば、施設背面の切盛土、構造物の有無、施設背面の空洞調査、付近の地下水位の変化などである。

③ 既存の機能診断調査・過年度の長寿命化対策の実施状況

既往の資料の収集・整理、施設管理者へのヒアリングにより、対象開水路の過年度の機能診断調査結果・長寿命化対策の実施状況を把握する。

4. 3 詳細調査の目的

適切な長寿命化対策の検討には、変状発生要因や長寿命化対策が必要な変状発生範囲を確定することが重要である。このため、長寿命化対策の実施設計段階においては、これらの確定に必要な調査を実施する。

【解説】

経済的で効果的な長寿命化対策の実施のためには、実施設計段階の施設の状態の把握が重要である。このために必要な詳細調査を以下の観点で実施する。

① 変状発生要因・変状の程度の確認

長寿命化対策を確実に実施するためには、変状発生要因を確定することが重要である。施設の変状発生要因については、過年度の機能診断調査結果等を参考に、可能性を整理する。

また、対象施設の変状発生要因を確定するためには、施工条件や使用環境条件の類似する施設についての情報収集と分析を行うことが有効である。

例えば、アルカリシリカ反応は、反応性の骨材の産地が一定地域に集中する傾向があることから、「対象施設に亀甲状のひび割れや白色の析出物がひび割れから滲み出ている場合は、その周辺地域でアルカリシリカ反応の生じた事例を調査し、事例が見つかればアルカリシリカ反応の調査を検討する。」など周辺情報を調査に活用することが重要である。

② 対策範囲の確定

開水路の変状発生は、施設の立地する環境に依存している。経済的で効果的な長寿命化対策を実施するためには、部位別に変状発生状態を確認し、対策実施範囲を確定する。

③ 施設構造形式等の確認

配筋や鉄筋かぶり、部材厚などの施設の基本諸元が不明な場合には、必要な詳細調査を実施する。

④ 長寿命化対策実施前の状況の記録

長寿命化対策の妥当性の検証や対策後の再劣化の要因検討においては、対策実施前の変状の程度を記録しておくことが重要である。

4. 4 詳細調査の手順

詳細調査には、「共通調査」、「変状発生要因調査」、「対策範囲設定調査」がある。詳細調査は、これらの段階に留意して、対策工実施のために必要な情報収集に努める。

【解説】

詳細調査は、以下に示す段階で実施する。

【共通調査】

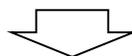
長寿命化対策方針（補修・補強・更新の区分）の検討に資する資料を得るとともに、次段階である「変状発生要因把握のための調査」の調査項目や数量を確定するための調査である。

同時に保全対策前の施設状況の記録調査としても位置付けられる。



【変状発生要因調査計画の策定】

共通調査の結果に基づき、変状発生要因調査を計画する。



【変状発生要因調査】

共通調査の結果を踏まえ、変状の発生要因を把握するための調査を実施し、変状発生要因・変状の程度を把握する。



【対策範囲設定調査】

変状発生要因を検討後に、対象施設（区間）全体に対して調査を実施し、対策工の実施範囲を設定する。

4. 5 共通調査

共通調査は、「対策方針（補修・補強・更新の区分）の検討に必要な情報の取得」、「変状発生要因調査項目の設定」、「対策実施前の施設状況の記録」の3つを目的として実施する。

【解説】

長寿命化対策の検討段階においては、対象地区の機能診断調査から数年が経過している場合もあるため、施設の状況把握を再度行い、経年変化を相対的に評価するなど、対策の実施方針の検討に資する情報を収集する。

また、長寿命化対策の実施においては、変状発生要因の特定が重要であることから、変状発生要因が不明の場合は、変状発生要因の特定に必要な調査計画を策定するための基礎資料を得るものとする。

更に、長寿命化対策の効果測定やモニタリングのためには、対策実施前の状況を適切に記録しておくことが重要であることから、対策実施前の状況を記録する。

(1) 共通調査の実施箇所

共通調査を実施する箇所は、長寿命化対策工法・変状の種類と程度を勘案して実施する。また、実施に当たっては、対策実施後のモニタリング実施位置(第6章)を意識して、設定することが望ましい。

(2) 変状発生要因調査項目の設定

- 1) 目視・打音により変状図（三面展開図）を作成し、主要な変状については写真で記録する。
- 2) 対策工に早期劣化が生じた場合に原因究明に資する既設コンクリートの基本的な情報を得るため、コア供試体を採取し、一軸圧縮試験を行う。コア採取は、JIS A 1107「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法」に準じ、配筋状態、部材の厚さ、骨材の大きさなどを勘案して実施する。
- 3) 採取位置は、1 定点当たり側壁・底版でそれぞれ 2～3 供試体を標準とする。なお、コア供試体の採取においては、電磁波レーダ法もしくは電磁誘導法で配筋調査を行い、鉄筋を傷つけないように留意する。
- 4) はつり試験は、中性化、かぶり、鉄筋腐食状態を把握する目的で実施する。はつり試験は、腐食条件（水中・気中）、構造物としての耐荷性に及ぼす影響を勘案して、試験位置を設定する。

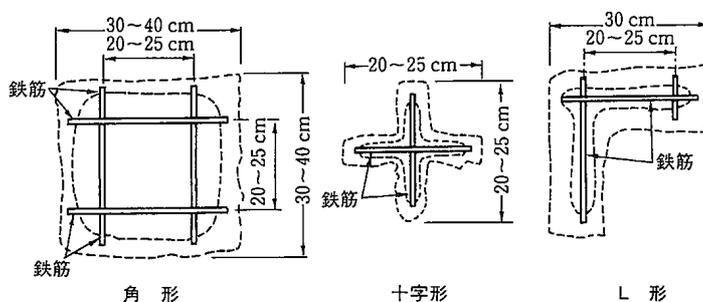


図 4.5-1 コンクリートのはつり方例

5) 鉄筋腐食状況の評価に当たっては、表 4.5-1 の目視による鉄筋腐食度の区分、図 4.5-2 の鉄筋の腐食度評価に関する写真を参考にす。また、表 4.5-2 に示すとおり腐食環境と腐食生成物の錆色に関連性があることから、鉄筋の錆色にも留意し、施設の腐食環境（腐食要因）の把握に活かすものとする。

表 4.5-1 目視による鉄筋腐食度の区分

腐食度区分	腐食状態
腐食なし又は(0)	腐食を認めず (施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない)
A 又は(I)	点錆程度の表面的な腐食 (部分的に腐食が認められる.軽微な腐食)
B 又は(II)	全体に表面的な腐食 (表面の大部分が腐食している 部分的に断面が欠損している)
C 又は(III)	浅い孔食等断面欠損の軽微な腐食 (鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある)
D 又は(IV)	断面欠損の明らかな著しい腐食 (鉄筋の断面が当初の 2/3~1/2 位欠損している)

※ 「国土開発技術センター建築物耐久性向上技術普及委員会編による区分」より

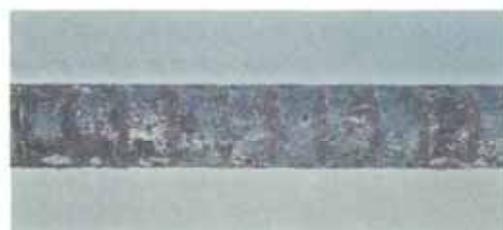
※ () 中は「日本コンクリート工学会：海洋コンクリート構造物による防食指針（案）による分類」より



腐食度区分：腐食なし又は0



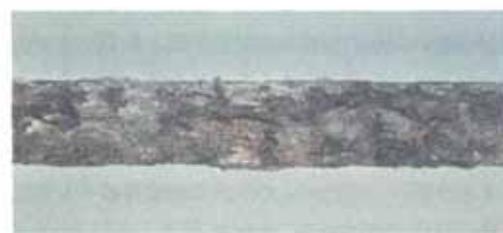
腐食度区分：A又はI



腐食度区分：B又はII



腐食度区分：C又はIII



腐食度区分：D又はIV

図 4.5-2 鉄筋の腐食度評価に関する参考写真

出典：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013- (公) 日本コンクリート工学会 P. 35

表 4.5-2 腐食環境と腐食生成物の錆色¹⁾

腐食環境	腐食生成物	錆色
中性化したコンクリート	Fe ₃ O ₄ (magnetite)	黒
	無定形オキシ水酸化鉄	褐色
塩化物を含むコンクリート	Fe ₃ O ₄ (magnetite)	黒
	α-FeOOH (goethite)	黄
	無定形オキシ水酸化鉄	褐色
塩化物を含み、かつ中性化も進行している場合	β-FeOOH (akaganeite)	淡褐色～白
剥離やひび割れによる鉄筋の露出部	γ-FeOOH (lepidocrocite)	橙
	α-FeOOH (goethite)	黄
鉄筋露出でかつ塩化物が共存している場合	β-FeOOH (akaganeite)	淡褐色～白

(3) 変状要因の推定と初期欠陥に対する対応

共通調査においては、第3章に示す「コンクリート開水路の変状と要因」を参考に、変状を観察し、変状要因の推定を行う。変状は、進行性を有する「劣化」と進行性のない「初期欠陥」、「損傷」に区分する。このうち、「劣化」には対象施設の立地条件等で多様な形態があることから要因の特定が特に重要である。

一方、初期欠陥（初期ひび割れ、コールドジョイント、豆板、かぶり不足に起因する鉄筋露出）は、施工時もしくは竣工直後に発生する変状であり、進行性はない。しかし、施設の耐久性には影響を与えるため、状態を見極め、変状程度に応じた適切な対応が必要である。

過年度の調査によると、過半数のコンクリート開水路において初期ひび割れが発生している。初期ひび割れには、下図に示すとおり、温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れがあり、いずれも側壁のスパン中央部から等間隔で発生する。（図 4.5-3 を参照）

これらの初期ひび割れの進展性はなく、多くはひび割れ幅 0.4mm 未満である。しかし、初期ひび割れの中で、ひび割れ幅 1.0mm 以上のものは内部鉄筋の腐食や漏水を助長する可能性もある。このため、共通調査において、ひび割れ幅 1.0mm 以上の初期ひび割れが確認された場合、若しくは、ひび割れ幅 1.0mm 未満のひび割れからの多量の錆汁が滲み出ている場合は、ひび割れと内部鉄筋が交わる箇所ではつり調査等を行い、内部鉄筋の腐食の状態を観察するものとする。

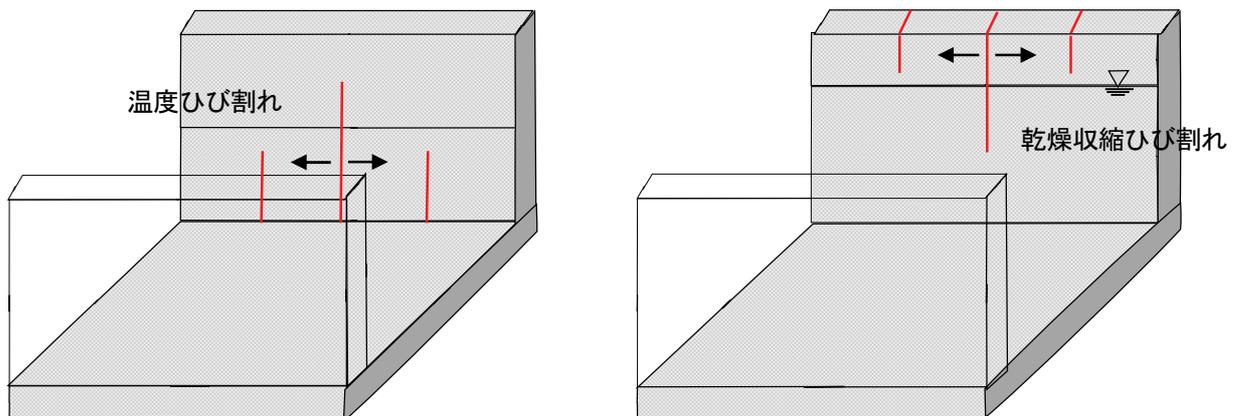


図 4.5-3 初期ひび割れの形態

¹⁾ 'コンクリート診断技術' 14 (社団法人日本コンクリート工学会 2014 年度版) P23 を参考

(4) 対策方針（補修・補強・更新の区分）の検討に必要な情報の取得

鉄筋コンクリート開水路の詳細調査においては、特に主鉄筋の腐食状態の把握が重要である。前述の鉄筋腐食度の評価表において、C～D（Ⅲ～Ⅳ）の状態の場合は、構造物の耐荷性に課題がある可能性がある。このため、設計図書を確認するとともに、専門家の意見を聞くなどの詳細な検討を行い、耐荷性に問題があると判断された場合は、補強対策等を検討する。

このほか、大きな段差を伴うひび割れや構造物の変形・たわみなどが確認された場合も、同様の検討を行うものとする。

(5) 対策実施前の施設状況の記録

対策実施後に再劣化が生じる場合がある。この場合に、「既往コンクリート（母材）の発生変状」、「対策工自体の発生変状」を判断する資料として「対策前の変状の程度の記録」が重要である。

4. 6 変状発生要因調査計画の策定

変状発生要因調査計画は、共通調査に基づき、主な変状発生要因を推定するとともに、変状及びその発生要因に応じた調査項目及び位置などを設定し策定する。

【解説】

凍害、中性化、アルカリシリカ反応、塩害などコンクリートの劣化現象は、表面からの劣化因子の侵入に起因して発生する。このため、変状の発生位置や劣化因子の侵入経路を踏まえて、詳細調査位置を選定し、調査項目を設定する。

(1) 変状発生要因調査の実施箇所

変状発生要因調査を実施する箇所は、長寿命化対策工法・変状の種類と程度を勘案し、対象水路において、代表点（1 スパン/km）若しくは、変状発生が顕著なスパンにおいて実施する。

4. 7 変状発生要因調査

対策工法の選定においては、変状発生要因の特定、変状の程度の把握が重要である。詳細調査では、変状の種類と発生位置に着目して、変状発生要因を推定し、これを確認するための試験・調査を目的に応じて実施する。

【解説】

共通調査で変状発生要因・変状の程度の確認が必要になった場合は、下表に基づいて変状発生要因調査を実施する。

コンクリート開水路の劣化機構としては、「摩耗」、「凍害」、「アルカリシリカ反応」、「化学的侵食」、「中性化」、「塩害」が挙げられる（第3章参照）。これらの劣化機構はその要因や進行過程が異なり、これらの把握のために必要となる情報が異なるため、これに応じた調査を実施する必要がある。

本項では、各劣化機構に対する要因特定や、進行程度を調査する方法について照会する。

表 4.7-1 劣化機構に対応した調査手法の例²⁾

点検方法	原 理 試験項目等	劣 化 機 構					
		摩耗	凍害	アルカリシリカ反応	化学的侵食	中性化 ※1	塩害
はつり試験	中性化深さ 鉄筋腐食状況 鉄筋破断の確認	◎	○	○	○	◎	◎
採取したコア等の 供試体を用いた試験	コア観察（骨材割れ、反応環、空隙析出物）			◎			
	中性化深さ	◎			○	◎	◎
	圧縮強度・引張強度・弾性係数	◎	○	◎	◎		
	配合推定	○	○	○	○		
	塩化物イオン含有量		○	○	○	○	◎
	アルカリ量分析			◎			
	骨材の反応性（岩種判定、偏光顕微鏡観察）			◎			
	膨張量測定			◎			
	細孔径分布	○	◎	○	◎	○	○
	気泡間隔係数試験（リニアトラバース法）		◎				
	透気（水）性試験	○	○		○	○	○
促進劣化試験	○	○					
コンクリートの 化学組織の試験	熱分析（TG・DTA）※2				◎	◎	
	X線回折			○	◎	○	
	EPMMA※3	○		○	○	○	○
	走査型電子顕微鏡（SEM）			○	○		
表面劣化範囲の試験	弾性波法（超音波法、衝撃弾性波法）		◎	◎	◎		
劣化環境調査	開水路の流量観測	○					
	水質・土壌試験（pH、塩分、濁度、濁質）	○			○		○
	凍害危険度算出（気象条件収集・評価）		○				
表面形状計測	表面形状・粗度	◎					

凡例 ◎：劣化程度にかかわらず重要なデータが得られる

○：劣化の程度によっては重要なデータが得られる

無印：参考になることもある

（注）※1：中性化は、コンクリートの中性化による鉄筋腐食を示す

※2：TG（熱重量分析）・DTA（示差熱分析）とも、水和生成物や炭酸化合物等を定性・定量する分析法

※3：電子線マイクロアナライザーの略称。コンクリート中の元素の定性、定量分析を行う。

²⁾コンクリート診断技術' 14（（社）日本コンクリート工学会 2014年度版） P75を参考

(1) 摩耗に対する変状発生要因調査

コンクリート開水路の摩耗は、流水の影響によりコンクリート表面が削れ、鉄筋かぶりの減少や部材の断面欠損、表面凹凸の発生による粗度の悪化が生じる現象である。摩耗は、コンクリート開水路に最も共通してみられる劣化機構である。しかし、流速や土砂の混入によって摩耗速度は異なり、開水路では側壁と底版で摩耗進行が異なる場合もある。摩耗に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

コンクリート表面の摩耗進行の大小は目視で観察可能である。対象路線を踏査し、摩耗の進行状況を把握する。特に、摩耗の要因が特殊と考えられる場合や他地区との比較が必要な場合は、以下の調査を行い、詳細な要因究明を行うことも考えられる。

表 4.7-2 摩耗に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
既設コンクリート母材の耐摩耗性の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・圧縮強度 (JIS A 1107) ・配合推定試験 ・促進摩耗試験 	<p>耐摩耗性は、モルタル部の強度、骨材の強度に依存している。摩耗が顕著な箇所についてコンクリート強度や配合推定を行い、既設コンクリートの耐摩耗性を確認する。</p> <p>また、供試体を採取し促進摩耗試験を行う。</p>
摩耗を促進する環境（水質や流速）の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・流速の測定 ・水質の試験 	<p>流速や土砂の混入状況によって、摩耗の形態が異なることが指摘されている。流速を計測し、摩耗との関係を整理する。</p> <p>また、特殊な摩耗の場合は、Ca 成分の溶脱やすりみがきの効果も考えられるため、pH、濁度、濁質についてもモニタリングや調査を検討する。</p>

2) 摩耗の程度の把握及び対策工の検討のための調査

摩耗の進行を把握するとともに、対策工法の検討に資する情報を得るため以下の調査を実施する。

表 4.7-3 摩耗の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
摩耗による粗度係数の増大の影響の把握	・施設管理者へのヒアリング	施設管理者へのヒアリングで、粗度の悪化による溢水等の悪影響の有無について確認する。
摩耗による表面コンクリートの減少量の把握	・型取りゲージ等によるコンクリート表面の減少量の計測	コンクリート表面の凹凸を「型取りゲージ」・「下げ振り」・「ディプスゲージ」などで計測し、コンクリートの減少量を測定する。
鉄筋かぶりの減少による耐久性の低下の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・はつり試験 ・中性化試験 (JIS A 1152) 	摩耗の進行により、鉄筋かぶりが減少したことで、内部鉄筋の腐食及び腐食の可能性が増大していないかを確認する。
部材断面減少による耐荷性の低下の評価	・摩耗量と部材厚との比較	出来形(設計)図面と現地確認による側壁、底版の部材厚を確認する。

(2) 凍害に対する変状発生要因調査

凍害は、第3章に示したとおり、部材の隅角部等にスケーリング等の特徴的な変状形態を示す。

凍害の対策は、凍結融解作用で生じた微細ひび割れやスケーリングによって脆弱化した部分を除去した後に、断面修復等の対策を行うこととなる。このため、凍害の対策を検討するに当たっては、凍害の進行によって劣化（脆弱化）した範囲を特定することが重要である。凍害に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

凍害の変状発生形態や変状発生部位は、特徴的であるため、改めて要因究明を行う必要性は小さい。しかし、凍害と特定しがたい場合は以下の要因究明の調査を行う。

表 4.7-4 凍害に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
凍害の影響に関する目視の確認	・ 外観目視試験	外観目視により以下の変状の有無、発生位置を確認する。 1) コンクリート表面の微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウト、骨材露出・剥離 2) かぶりコンクリートの浮き・剥離 3) コンクリートの断面欠損、鉄筋露出 ※特に、天端部のスケーリングが顕著な場合や、長手方向の表面ひび割れの分布に凹凸の形状を有する場合は、部材内部にひび割れ等の変状が発生している可能性がある。
凍害の可能性を確認するための試験	・ 静弾性係数試験 (JIS A 1149) ・ 動弾性係数試験 (JIS A 1127) ・ 圧縮強度 (JIS A 1107)	凍害が発生すると微細なひび割れが増加することから、静弾性係数や動弾性係数の低下を確認する。
既設コンクリート母材の耐凍害性の把握	・ 気泡間隔係数試験 (ASTM C 457)	気泡間隔係数が小さいほど、耐凍害性が向上することから、リニアトラバース法等で既設コンクリートの気泡間隔係数を計測する。
凍害を促進する環境（凍結融解回数）の把握	・ 凍害危険度の算出	凍結時の最低気温が低いこと、年間の凍結融解回数が多いほど凍害が進行することから、これらの情報を整理して、凍害の可能性を検討する。

2) 凍害の程度の把握及び対策工の検討のための調査

凍害の進行を把握するとともに、対策工法の検討に資する情報を得るため以下の調査を実施する。

表 4.7-5 凍害の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
凍害の深度の計測 (コンクリート欠損深度)	・ノギス計測	凍害によって生じたスケーリングやポップアップなどの変状の程度をディプスゲージやノギスで計測する。
凍害の深さの試験	・コア採取 ・はつり試験	はつり試験やコア採取を行い、内部のひび割れ状況や中性化試験を行い、凍害の影響深さを把握する。
凍害の深さの計測 (詳細)	・凍害劣化深さの計測 (超音波表面走査法) (コア採取透過法)	凍害により微細ひび割れがコンクリート中に発生すると、超音波伝播速度、動弾性係数が低下する。そこで、コア供試体で超音波計測を実施し、これらの深度を確認する。

凍害は、コンクリート中の水分の凍結膨張に起因しており、通常、開水路では側壁天端から進行する。凍害による微細なひび割れが増加すると、表面からフレーク状にコンクリートが加速的に崩壊する。また、同時に施工された開水路で凍害が発生している場合は、スケーリング等が顕在化していなくても、微細なひび割れが発生している可能性がある。このため、発生部位や変状の程度を勘案して、コア採取やはつり試験を行い、凍害の影響深さを決定する。さらに、工事段階においては、ウォータージェットで数段階に水圧を設定し、はつり深度を確認することも重要である。

(3) アルカリシリカ反応に対する変状発生要因調査

アルカリシリカ反応は、コンクリートに内在する反応性骨材・アルカリ成分と外部から浸透する水分に起因して発生する。このため、抑制するためには水分を遮断することが効果的であるが、開水路の背面から水分が供給されている場合もある。このような場合、表面からの水分を遮断する工法では、水分の発散を妨げるため再劣化する可能性が高く、調査においても水分の浸透経路についても考慮が必要である。

また、アルカリシリカ反応によって、内部鉄筋が破断することもあり、ひび割れ幅が 1mm 以上あるような場合は、はつり試験を行い、内部鉄筋の健全性を確認する。アルカリシリカ反応に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

アルカリシリカ反応の変状発生形態や変状発生部位は特徴的であるが、内部で進行する劣化現象であるため、慎重な判断を要する。

表 4.7-6 アルカリシリカ反応（ASR）に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
ASRの影響に関する目視の確認	・外観目視試験	外観目視により以下の変状の有無を確認する。 1) コンクリート表面の網目状のひび割れ 2) 主鉄筋の方向に沿ったひび割れ 3) 微細なひび割れ等における白色ゲル状物質の析出
ASRの判定	・コンクリートコア採取と観察	コア供試体を採取し、以下の変状を確認する。 1) 骨材が割れている 2) 反応環（リム）がある 3) 骨材の周囲が割れている 4) 骨材の周囲だけが濡れているように見える 5) 空隙に析出物が詰まっている
ASRの判定	・静弾性係数試験（JIS A 1149） ・動弾性係数試験（JIS A 1127） ・圧縮強度（JIS A 1107）	ASRによりコンクリートが著しく膨張すると、コンクリートの静弾性係数や動弾性係数が著しく低下することが知られている。このような著しい低下は、ASRによる変状に特徴的なので、コア試料の静弾性係数又は動弾性係数、及び圧縮強度を測定することで、ASRの判定を行うことができる。

2) アルカリシリカ反応の程度の把握及び対策工の検討のための調査

アルカリシリカ反応の進行を把握するとともに、対策工法の検討に資する情報を得るため以下の調査を実施する。

表 4.7-7 アルカリシリカ反応（ASR）の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
補強の必要性の判定（鉄筋破断の確認）	・はつり試験	コンクリートのひび割れ幅が 1mm 以上で、主筋と直行する方向に進展している場合に実施する。 はつり調査により鉄筋破断の確認をする場合は、鉄筋が破断していると思われる位置からその鉄筋に沿って前後 10cm 程度の範囲をはつるものとする。
今後の ASR の進行性の評価	・残存膨張量試験	コアの残存膨張量は、JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（案）」に従って行う。
ASR のタイプの評価	・岩石学的試験（岩種判定・偏光顕微鏡観察・粉末 X線回折）	ASR については骨材の種類によって、反応までに時間を要するタイプが存在する。コア供試体を用いて岩石学的試験を行い、これらのタイプを確認する。

(4) 化学的侵食に対する変状発生要因調査

農業用開水路においてコンクリート構造物が化学的侵食を受けることは極めて稀である。しかし、温泉地や酸性河川流域などの特殊な環境下では、化学的侵食による劣化が生じる可能性がある。化学的侵食に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

化学的侵食は、セメント水和物の分解や膨張性化合物の生成によって進行し、コンクリート自体の断面欠損と内部鉄筋の腐食の両面で開水路に影響を与える。

表 4.7-8 化学的侵食に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
化学的侵食の影響に関する目視の確認	・ 外観目視調査	外観目視により以下の変状の有無を確認する。なお、原因によって、水路内面（通水側）と水路外面（地盤接触側）の双方で発生する可能性があることに留意する。 1) 表面の欠損・脆弱化の有無 2) 鉄筋の露出の有無
化学的侵食が発生する環境の把握	・ 土壌・水質分析	土壌腐食性試験（硫化物、水分、塩化物イオン・硫酸イオン含有量、pH など）、流水の腐食性試験（pH、電気伝導率、硫酸イオン濃度など）

2) 化学的侵食の程度の把握及び対策工の検討のための調査

化学的侵食の進行を把握するとともに、対策工法の検討に資する情報を得るため以下の調査を実施する。

表 4.7-9 化学的侵食の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
かぶりコンクリートの減少と中性化深さについての確認	・ 中性化深さ試験（JIS A 1152） ・ コア採取 ・ はつり試験	化学的侵食が生じると表面のコンクリートが脆弱化し、かぶりコンクリートが減少する。また、化学的侵食は、硫酸、侵食性炭酸による化学反応であるため、後述の中性化と同様に、表面から酸性化が進行する。このため、フェノールフタレイン溶液で酸による侵食深さを確認する。原因物質別の浸透を把握する場合には、コア供試体を用いたE PMA（電子線マイクロアナライザ）試験により面的な元素分布の把握を行う。
鉄筋かぶり深さの確認 中性化残りの評価	・ 電磁波レーダ法、 電磁誘導法 + はつり試験	電磁波レーダ法、電磁誘導法で主鉄筋の位置を確認し、これらの位置ではつり試験を行い、鉄筋のかぶり深さを確認する。鉄筋の確認の位置は、開水路の耐荷性に与える影響を勘案して決定する。 また、鉄筋が錆びている場合は、腐食の程度を把握する。

(5) 中性化に対する変状発生要因調査

中性化は、二酸化炭素等の侵入により、コンクリート中のアルカリ性が低下する現象であり、進行すると内部鉄筋が腐食しやすい状態になる。開水路では、水中に没している範囲では中性化は進行しにくく、気中条件になっている範囲では中性化が進行しやすい。ただし、条件によっては、水中部でもアルカリ性の低下が発生する可能性があり、これが確認された場合には個別に対応する。コンクリート表面の品質が中性化に大きく影響を及ぼしており、表面透気抵抗性が高いコンクリートほど中性化しにくい。

また、中性化による変状発生の影響は、内部鉄筋の腐食によって顕在化することから、鉄筋のかぶりが特に重要である。したがって、調査では中性化の深さだけでなく、鉄筋かぶり深さも併せて確認する。中性化に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

中性化は、鉄筋腐食により錆汁やかぶりコンクリートの剥落が発生しないかぎり、目視では進行が確認できない。このため、以下の調査を適切に行い、中性化の進行を把握することが重要である。

表 4.7-10 中性化に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
中性化の影響に関する目視の確認	・外観目視調査	外観目視により以下の変状の有無を確認する。 1) 鉄筋位置における錆汁の有無 2) 鉄筋位置に沿ったひび割れの有無 3) 表面コンクリートの剥離と鉄筋露出
中性化深さについての確認	・中性化深さ試験 (JIS A 1152) ・コア採取 ・はつり試験 ・ドリル法 (NDIS3419)	はつり面又はコンクリート供試体の割裂面に 1%濃度のフェノールフタレイン溶液を噴霧し、コンクリートが赤色に呈色しない深度をもって、中性化深さとする。また、ドリル削孔でコンクリート粉末をもって試験を行うドリル法によってもよい。

2) 中性化の程度の把握及び対策工の検討のための調査

はつり試験・コア採取については、共通調査でも実施しているが、特に、中性化の可能性が指摘される場合には、以下の調査を実施し、中性化の進行と対策工法の検討に資する情報を得る。

表 4.7-11 中性化の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
鉄筋かぶり深さの確認 中性化残りの評価	・電磁波レーダ法、 電磁誘導法 +はつり試験	電磁波レーダ法、電磁誘導法で主鉄筋の位置を確認し、これらの位置ではつり試験を行い、鉄筋のかぶり深さを確認する。鉄筋の確認の位置は、開水路の耐荷性に与える影響を勘案して決定する。 また、鉄筋が錆びている場合は、腐食の程度を把握する。

(6) 塩害に対する変状発生要因調査

農業水利施設としてのコンクリート開水路における塩害は、施設の供用環境を勘案すると、ごく稀なケースと考えられる。しかし、塩害は、鉄筋腐食の加速度的な進行により力学的安定性の低下を招くため、適切な対策が求められる。

塩害の進行は、塩分の侵入経路に依存しているため、調査においてはこれらの侵入経路に留意する。また、中性化と同様に塩害の進行もコンクリート表面品質に依存しており、表面透気抵抗性が高いコンクリートほど塩害が進みにくい。また、塩害による変状発生の影響は、内部鉄筋の腐食によって顕在化することから、鉄筋のかぶりが特に重要である。したがって、調査では塩分浸透の深さだけでなく、鉄筋かぶりも併せて確認する。塩害に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 要因を特定するための調査

塩害は、鉄筋腐食により錆汁やかぶりコンクリートの剥落が発生しないかぎり、その進行が確認できない劣化現象でもある。以下の調査を適切に行い、塩害の可能性を適切に評価し、必要に応じて塩害の状況を把握することが重要である。

表 4.7-12 塩害に対する要因特定のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
塩害の影響に関する目視の確認	・外観目視試験	外観目視により以下の変状の有無を確認する。 1) 鉄筋位置における錆汁の有無 2) 鉄筋位置に沿ったひび割れの有無 3) 表面コンクリートの剥離と鉄筋露出
塩害環境の有無	・周辺環境調査	農業用開水路では、塩害の可能性は稀であることから、「海岸からの距離」や「道路からの凍結防止剤の混入等の可能性」などの特殊な環境の有無について周辺調査を行う。
鉄筋位置での塩分量の把握	・コア採取による塩分浸透試験 (JIS A 1154)	配筋深度までコア採取し、部材深さ毎 (目安として、部材表面付近、鉄筋表面付近、その中間位置) に電位差滴定法に代表される塩化物イオン含有量試験 (室内試験) を行い、配筋位置で濃度を測定・評価する。

2) 塩害の程度の把握及び対策工の検討のための調査

塩害の進行を把握するとともに、対策工法の検討に資する情報を得るため以下の調査を実施する。

表 4.7-13 塩害の進行度の把握・対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
鉄筋位置での塩分量の把握	・コア採取による塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験 (JSCE-G 573)	要因究明において実施した塩化物イオン含有量に基づき、部材深度方向の塩分濃度勾配を評価し、見掛けの拡散係数を求めて、今後の浸透予測を行う（劣化予測）。
鉄筋かぶり深さの確認 中性化残りの評価	・電磁波レーダ法、 電磁誘導法 +はつり試験	電磁波レーダ法、電磁誘導法で主鉄筋の位置を確認し、これらの位置ではつり試験を行い、鉄筋のかぶり深さを確認する。鉄筋の確認の位置は、開水路の力学的安定性に与える影響を勘案して決定する。 また、鉄筋が錆びている場合は、腐食の程度を把握する。
マクロセル腐食のための資料収集	・配筋詳細調査	鉄筋が新旧部材を跨ぐことで生じるマクロセル腐食を防止するために、竣工図面が無い場合には、配筋状態を調査する。

(7) 目地部の変状に対する変状発生要因調査

コンクリート開水路の主要な変状の1つとして目地部からの漏水や目地部の破損がある。これらの目地部の変状の要因には目地材自体の劣化と目地周縁のコンクリートの変状に起因して発生する場合の2つがある。目地の変状に対する変状発生要因調査では、目的に応じて以下の項目を実施する。

1) 目地部の変状の程度を把握し対策工の検討を行うための調査

表 4.7-14 目地部の変状程度把握と対策検討のための調査

調査の目的	調査方法	調査の内容
目地部の変状による影響に関する目視の確認	・外観目視試験	外観目視により以下の変状の有無を確認する。 1) 目地からの漏水 2) 目地の開口・段差 3) 目地材のひび割れ・欠損・剥離 4) 目地周縁コンクリートのひび割れ・破損 5) 止水板の破損
目地変状の要因及び目地変状による影響の確認	・周辺環境調査	目地周辺の状況を目視により調査する。この際、以下の点に留意する。 1) 開水路自体の不陸、傾斜、変形の有無 2) 目地周辺部の土砂流失や地盤沈下・陥没の有無 3) 目地周辺部の地盤の湿潤・湧水
漏水の有無及び漏水量の確認	・漏水調査	開水路の目地部の漏水量については、水位条件や周辺地下水位によっても変動するため、定量的に把握することは困難である。このため、通常は、断水時に地盤側から水路内側に生じる漏水や滲みの有無をもって定性的に評価する。 しかし、特殊な条件で、漏水量を把握する必要がある場合は、部分的な締切による水張り試験、目地を塩ビ半割管で囲うなどの方法により、漏水量を測定する。

4. 8 対策範囲設定調査

対策範囲について、具体的な数量を確認するための調査を行う。

【解説】

「共通調査」、「変状発生要因調査」は、対象開水路において代表点（1 スパン/km）若しくは、変状発生が顕著なスパンにおいて実施する調査である。これらの調査では、対象スパンに関する変状発生要因を踏まえた対策方針に資する情報を収集する。

「対策範囲設定調査」では、対象区間全体にわたって、同様の変状の分布状況を把握することを目的として実施する。対策範囲設定調査は、目視若しくは打音を中心に実施し、状況に応じて赤外線サーモグラフィ等の非破壊調査を活用する。また、併せて、対策に必要な施工ヤード、工事進入路等の仮設条件、工事による周辺影響（工事騒音の影響や考慮すべき自然環境の状況）などの検討に必要な情報についても収集する。

4. 9 詳細調査に当たっての留意点

水利用機能及び水理機能の不具合が顕著な場合には、流量観測等の送配水性や通水性などに関する詳細調査を実施する。

【解説】

詳細調査手法は、施設の変状の要因・程度に着目しているが、機能診断調査（問診調査）の結果、送配水性や通水性の低下が著しい場合には、別途これを考慮した調査を実施する。

表 4.9-1 水理機能、水利用機能、社会的機能に関する詳細調査手法（例）

区分	調査方法		調査方法
① 水利用機能に関する詳細調査	送配水性	到達時間	現地調査(流量・到達時間測定) 不定流シミュレーション
		送配水効率	事前調査(流量・到達時間測定) 不定流シミュレーション
	配水弾力性	調整施設	現地調査(設置位置等)
		調整容量	容量計算
		到達時間	不定流シミュレーション
		流量・水位	水位・流量観測 定常水理計算
	分水均等性	分水量	不定流シミュレーション
		末端給水量	末端給水量調査
	保守管理・保全性	維持管理施設	事前調査(維持管理施設の管理状況)
			現地調査(維持管理施設の有無)
② 水理機能に関する調査	通水性	流量・水位	水位・流量観測
			模型実験
			断面・縦断測量
		漏水の有無	目地部、ひび割れ部の近接目視
		粗度係数	型取りゲージ
			レーザー距離計による凹凸測定
		変形歪み	下げ振り、傾斜計による測定 レーザー計測(断面測定)
	沈下量	沈下量測定(縦断測量含む)	
	水位・流量制御性	水位	連続水位計測
	分水制御性	分水量	水位・流量観測
③ 社会的機能調査	安全性・信頼性	事故歴・補修歴	問診調査(傾向分析)
		耐震性	耐震診断
	経済性	更新費用	工事費積算(総費用算出)
	環境性	景観性	アンケート調査(周辺住民対象)
		生物多様性	動植物の調査
妥当性	B/C等	総費用総便益比算定	

第5章 長寿命化対策の検討

5.1 基本的事項

長寿命化対策は、詳細調査の結果に基づいて、「対策方針の検討」、「対策工法の選定」の順に検討する。対策工法の選定においては、変状の発生要因とその進行程度に適合した材料・工法を選定する。

【解説】

長寿命化対策の検討においては、詳細調査の結果に基づいて、コンクリート開水路の水利用機能、水理機能、構造機能、社会的機能の各機能の性能低下の状況を明らかにし、補修や補強などの対策の要否を判断する。

対策を要する場合は、施設の変状の発生要因とその進行程度に応じた適切な材料・工法の選定を行うことが重要である。

なお、本書ではコンクリート開水路の長寿命化対策のうち、補修工法を対象にその選定に当たっての考え方や留意事項などを整理する。

本章で検討する長寿命化対策の検討の流れを図5.1-1に示す。

5. 2 対策方針の検討

コンクリート開水路の対策には、大きく「継続監視」、「補修」、「補強」、「改修」、「更新」があり、施設の性能低下状況や経済性などを踏まえて対策方針を検討する。

【解説】

(1) 施設の性能低下状況の評価

一般的に、対策の要否判定は以下の2項目を指標として実施され、機能診断調査の結果に基づく調査時の性能評価の結果、及び予定供用期間終了時や評価時点としてあらかじめ設定した時点における性能の予測結果が、管理水準に達するか否かを指標として行われる。

- ① コンクリート開水路の現状における性能と管理水準
- ② コンクリート開水路の性能低下予測に基づく予定供用期間内の性能と管理水準

性能評価は、対象のコンクリート開水路の要求性能（水利用機能、水理機能、構造機能、社会的機能の各性能）について実施する。各段階の調査結果（基本調査、詳細調査結果など）を整理し、結果の妥当性、関連性などを検討した上で、変状要因の特定、変状程度の評価を行う。特に、劣化等の進行性を有する変状については、劣化の進行速度を考慮して対策方針を検討する必要があるため、その進行程度を評価する必要がある。また、評価の過程で新たな調査を追加する必要がある場合は、補足調査を検討する。

1) 構造機能の性能低下状況の評価

構造機能の各性能の評価については、下記の手法に大別できる。これらは、評価すべき性能及び現時点における評価技術などに応じて適用する。

- ① 外観上のグレード（変状の程度）による性能評価
- ② 設計での評価式による性能評価

① 外観上のグレード（変状の程度）による性能評価

性能評価は、該当する性能項目について定量的な評価を行うことが望ましいが、必ずしも定量的な評価手法が確立されているとは言えない。特に、予定供用期間終了時の材料強度等の物性値の予測は十分な精度を持っていないことから、定量的な評価は困難であり、結果的に設計段階での評価式による性能評価に用いる定量的データが得られない場合が想定される。そのため、このような場合は、コンクリート開水路の外観変状から変状の進行過程を区分し、性能低下状況を評価することとする。ただし、本手法は変状の発生要因を特定した上で適用する。

摩耗、凍害、アルカリシリカ反応、化学的侵食、中性化、塩害といった進行性を有する劣化については、その想定される変状の程度を基に、変状の進行過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類（図 5.2-1）し、グレードⅠ～Ⅳの4段階で評価し、その結果を踏まえて対策の要否判定や対策方針の検討を行うこととする。詳細は、第5章5.4の変状種別毎の対策工法

の選定で解説する。

なお、変状の発生要因の特定については、第2章で述べているとおり、コンクリート開水路においては様々な要因により変状が発生し、その要因は、①初期欠陥に関するもの、②劣化に関するもの、③損傷に関するものがある。さらに、これらが複合的に関連し合い変状が発生している場合もある。

変状の発生部位・形状、施設の使用材料・設計・施工条件及び使用環境条件、また詳細調査結果などを考慮し、総合的に変状要因を判断する必要がある。なお、各変状とその発生状況や要因の特徴については第3章を参照されたい。

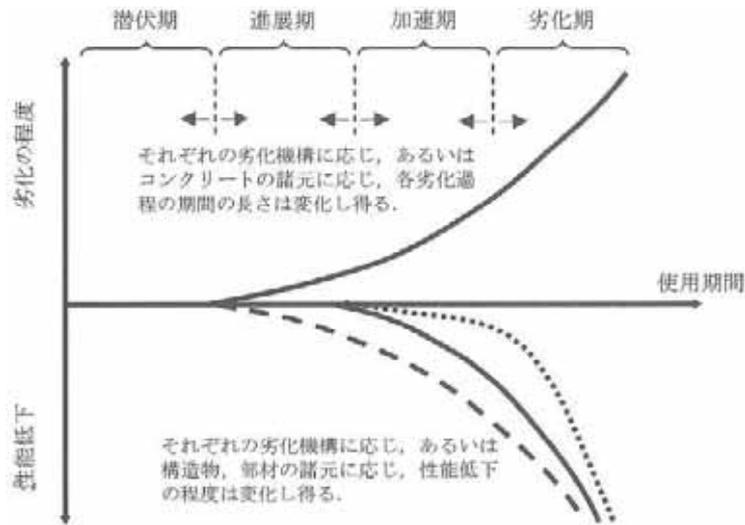


図 5. 2-1 変状の進行過程の概念図

(2013 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】 p112 参考)

【参考】変状の進行過程と対策区分について

変状の進行過程が、潜伏期や進展期の初期段階においては、一般には耐久性に影響が生じていても構造体の強度や剛性にはほぼ影響がない。したがって、変状が生じた構造物を補修する場合は、変状が発生した部材あるいは構造物全体の変状の進行を抑制し、耐久性の回復を目的とした対策を講じる。変状の進行過程が加速期や劣化期に至り、構造物の剛性や強度の回復を図る場合は、補強対策を講じる。

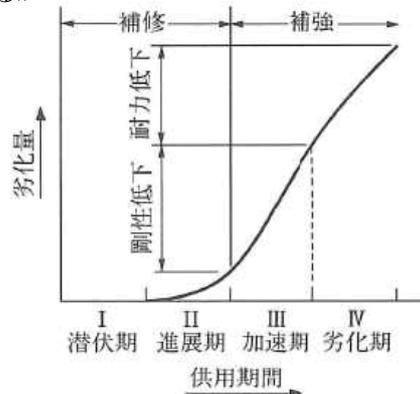


図 5. 2-2 変状の進行過程と対策の概念図

(コンクリート診断技術' 14【基礎編】 p235 参考)

② 設計での評価式による性能評価

開水路の力学的安全性は、設計での性能評価式(限界状態設計法)等を参考として構造耐力(限界状態の設定や部分安全係数などの設定含む)を評価することによって、その評価を行う。

構造耐力の算定に当たっては、対象のコンクリート開水路の変状発生状態を適切に表現する必要があるため、詳細調査によって得られた物理的指標を評価式の要素とする。すなわち、評価に用いる物理的指標は、施設の当初設計時の各種諸元ではなく、詳細調査によって得られたコンクリート強度、部材厚、鉄筋かぶり、土質定数、荷重条件、地下水位、鉄筋腐食状況に応じた鉄筋径などを使用することが基本となる。しかし、調査が困難な諸元については、設計図書や竣工図書などを踏まえて適切な値を使用する。

設定した評価式及び物理的指標による計算結果から、想定される荷重に対して部材断面の破壊、転倒・滑動・沈下・浮上に対する安全性を確認し、さらに、計算結果のみで性能状態を評価するのではなく、施設の外観上の発生変状や変形、沈下などの実際の施設状態や施設の使用状況なども踏まえて総合的に検討した上で現況の施設の性能を評価する必要がある。

2) 水利用機能、水理機能の性能低下状況の評価

水利用機能及び水理機能の性能評価とは、表 4.9-1 に示すような各機能に関する調査の結果に応じて、各性能の低下状況の評価するものである。水利用機能の低下は、受益者、施設管理者などの関係者にとって重要な問題であるため、これら関係者の意向等を踏まえて評価する必要がある。また、水理機能は水利用機能と密接な関係を持つことから、両者について現状を十分に把握した上で評価する必要がある。

3) 社会的機能の性能低下状況の評価

コンクリート開水路の社会的機能の性能項目には、事故の発生による人的被害や周辺施設への社会的影響から、漏水・破損事故履歴、補修履歴を指標とする“安全性・信頼性”、維持管理費、補修費などを指標とする“経済性”、及び景観、親水性などを指標とする“環境性”等の性能が含まれる。これらの各性能の管理水準は、施設の崩壊等による社会的被害の影響を踏まえた施設の重要度(リスク)、社会的要請からの施設の耐震性、施設周辺環境などを踏まえた景観美化や生態系への影響、施設管理体制などを踏まえた維持管理費軽減の必要性等を考慮して、あらかじめ、受益者、施設管理者、地域住民などの関係者と調整した上で施設毎に決める必要がある。

当該施設に必要とされる各性能が管理水準を満たしているか否かについて、基本調査や詳細調査の各機能診断調査の結果及び関係者の意向を踏まえて評価する。

なお、農業水利施設のリスク管理の詳細については、「農業水利施設の機能保全の手引き(総論編)改訂版(平成27年)」にて解説されているため、参照する。

(2) 対策の要否の判定

構造機能、水利用機能、水理機能、社会的機能の各性能に係る機能診断調査・評価結果を踏まえ、対策の要否あるいは継続監視の要否を判断する。

対策が必要な場合は以下のとおりであるが、施設の重要度、残存予定供用期間、地区全体の長寿命化計画、経済性、施設管理者の意向などを総合的に評価して、計画的に対策を行うものなのか、

早急に対策を行う必要があるもののかなどを決定する必要がある。

- ① 現況性能が要求性能より低いと評価された場合
- ② 劣化予測により、予定供用期間内の性能が要求性能より低くなると評価された場合

また、初期の機能診断調査結果に基づいて施設の残存予定供用期間終了時あるいはそれに近い時点での性能を予測する場合は、予測の精度に十分注意を払う必要がある。また、継続的な機能診断調査の結果を踏まえて、性能評価や予測の精度を高めていく必要がある。

以下に、機能別の性能低下に対する対策の要否判定時の留意事項を示す。

1) 構造機能の性能低下に対する対策の要否判定の留意事項

調査・評価結果に基づき、変状要因が明らかになり、かつ変状の程度が確定した後は、施設に要求されている性能を考慮して補修・補強対策の要否あるいは施設監視の強化などについて判断する。

判断のポイントは、①劣化が顕在化した後では対策が困難なものや第三者へ影響を及ぼす可能性がある変状は早い段階で対策を講じる必要があり、②劣化が表面化しても対策がとれるものや施設の重要度等の観点から劣化期等まで使用するとした施設は、変状が進行した段階で対策を講じることとなる。

先に述べた外観上のグレード（グレードⅠ～Ⅳの4段階）による性能評価については、その各グレードの評価指標を変状の種類別にその特性を踏まえて整理し、かつそれに適した対策方法を合わせて提案している。外観上のグレードの性能評価指標を用いた対策工法の選定については、第5章5.4で解説する。

なお、継続監視と判定した場合、施設の性能低下状況や重要度に応じて監視項目や頻度などを設定し、施設監視計画を策定する必要がある。この施設監視中に変状の進行が確認された場合は、その時点から対策の要否判定の再検討や劣化予測の推定を行う。

2) 水利用機能の性能低下に対する対策の要否判定の留意事項

機能診断調査（問診調査や流量の実測調査など）の結果、水利用機能の各性能において要求性能を満足していない項目があった場合、その性能低下の要因に対する改善策が水管理手法の工夫（ゲート操作の改善、ブロックローテーションの見直しなど）等、運営面で解決可能かを検討した上で、補修・補強の要否を判定する。判定結果の例を以下に示す。

- ・水管理操作の変更等を想定した上で水解析を行っても水利用機能を満足することができない状態とは、例えば、営農形態の変化による単位用水量が増加している場合等である。
- ・水管理操作の変更等を想定した上で水解析を行った結果、水利用機能を満足することができる状態とは、例えば、用水到達遅れ時間に対して用水需要変動を適切に予測して取水することや末端分水工の取水開始時間を制限することで解決できる場合である。
- ・水解析の結果、要求性能が満足される状態とは、その水利用機能低下の要因が、ある分水工での過剰取水や水路の堆砂などであり、その改善策を管理組織で対応すべき場合である。

なお、補修・補強対策としては、水理機能の低下を改善することや水管理施設の性能低下（例えば、テレメータ施設の破損等）に対する措置を検討する必要がある。特に、用水需要の変動予測や末端分水工への制限を続けることは難しいので、調整容量を確保する等の抜本的な対策も検討しなければならない。

また、要求性能のレベルが変化している場合（例えば、既存ため池の水質が悪化しているので希釈用に取水が増えている等）は、別途かんがい計画等で検討を行う。

構造機能や水理機能の面から各種の補修・補強を行う場合は、必要に応じて補修・補強後の総合的な水理解析により、水利用機能の各性能が担保されていることを確認する。

3) 水理機能の性能低下に対する対策の要否判定の留意事項

機能診断調査（流量や漏水量の実測調査等）の結果、水理機能の各性能において要求性能を満足していない項目があった場合、その性能低下の要因に対する改善策の検討を行うが、以下の理由から水利用機能と併せて水利システム全体について検討を行う必要がある。

- ・水路表面の摩耗や藻類・雑草の繁茂などによる通水性能の低下に対し、局部的な補修・補強対策を行った結果が水利システム全体に影響を及ぼすことがある。
- ・水理機能の性能低下に影響を及ぼす要因としては、水管理方式と流量制御の適切な整合が図られていないことや、水需要パターンの変化、必要水量の変化など、水利用機能と密接に関連するものが考えられる。

また、水理性能に対する判定に当たっては、以下に留意する。

- ・水路系全体又は水理ユニットを対象として、補修・補強の要否を判断する。特に、水路の一部を改良した時に他の部分に悪影響を及ぼすことがあるので、十分注意する。
- ・水理機能の性能低下には構造機能の性能低下が関係している場合がある（例えば、躯体の変形による縦断勾配の変化等）ので、総合的に判断する。

4) 社会的機能の性能低下に対する対策の要否判定の留意事項

機能診断調査の結果及び受益者、施設管理者、地域住民等の関係者の意向などを踏まえ、所要の社会的機能の性能低下に対する対策の要否とその改善策を検討する。

【参考】劣化予測について

先に述べたように施設の性能低下については施設の外觀変状から劣化過程の区分を行い評価することを基本としているが、LCCの検討等において施設の余寿命を判断する場合には、以下のような外觀変状に依らない評価方法がある。

- ・ **摩耗**：コンクリート開水路では、コンクリート表面においてモルタルが選択的に流出し、粗骨材のみが残存し露出する摩耗現象が多くみられる。この現象は砂礫や流水の物理的なすり減り作用によるものに加え、流水に曝されてカルシウムが溶出することによるコンクリートの変質がそのきっかけ及び加速要因になっている可能性がある。この劣化現象を踏まえて劣化予測する必要があるが、現時点では定期的な水路構造物の壁厚の測定、骨材露出調査などから摩耗の進行速度を評価し劣化予測を行うことが現実的である。
- ・ **凍害**：凍害によりコンクリート組織の変化した部分（凍害深さ）の進行性を予測する必要があるが、凍害深さを時間軸で予測する手法は開発されておらず、構造物から採取したコア試験体を測定・分析して、その後の進行予測や近隣地区の構造物の劣化予測に適用するのが有効である。また、超音波伝播速度を利用して凍害による劣化程度（凍害深さ）を予測する手法も試みられているが、精度よく劣化予測を行うことは容易ではない。
- ・ **アルカリシリカ反応**：コンクリートの膨張及びそれに伴うひび割れの進展を指標とするのが望ましいが、構造物の目視による調査結果より、直ちに構造物の劣化進行がどの段階にあるかを知ることが難しい。また、現時点の技術レベルでは、ASRによるコンクリートの膨張量及びそれに伴うひび割れの進展が調べられた場合でも、構造物の諸性能の変化を正確に予測することは困難である。したがってASRの劣化予測は、詳細調査結果に基づいて行うことを原則とするが、通常は、骨材の反応性、コンクリートの残存膨張、コンクリートの配合と施設の使用環境条件を適切に評価し、安全度を見込んだ予測を行い、その結果より施設の諸性能を評価するのが現実的である。
- ・ **化学的侵食**：酸性劣化では、pHが低い場合（pH=1～3程度）には劣化因子の浸透深さは時間の平方根に比例する場合が多い。そのため、機能診断調査結果より劣化因子の浸透深さの測定値がある場合は、劣化因子の浸透速度係数を測定結果から求め、その後の予測を行う。信頼性の高い予測をするためには、数年おきに2～3回程度測定を行い最小二乗法により算出することが望ましい。
- ・ **中性化**：コンクリート標準示方書等に基づき、 \sqrt{t} 則による中性化進行モデル式（経験式）を用いた照査を行う。
- ・ **塩害**：コンクリート標準示方書等に基づき、塩化物イオンの拡散方程式（経験式）を用いた照査を行う。

いずれの劣化予測方法であっても、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の長さを予測することが基本となるが、以下の点に配慮する必要がある。

※施設の部位・部材によって劣化の進行は異なることが多く、また現実の構造物では複数の劣化要因により劣化が生じていることが多いため、劣化予測には適切な安全度を見込む必要がある。

※劣化の経験式は必ずしも完璧なものではない。継続的な機能診断調査や施設監視の結果を踏まえて実際の施設の劣化進行状況を見極めることが重要である。

※コンクリート標準示方書【維持管理編】（土木学会制定）等の最新の技術資料を参考にする。

(3) 対策区分の検討

長寿命化対策の種類には、補修・補強・更新があり、施設の性能低下状況（変状の発生要因や程度）に応じてこれらの中から適切な対策方針を選択する。

対策の種類は、原則として、対策の水準（図 2.2-10、表 5.2-1 を参照）や回復すべき性能に基づいて選定することになる。

ただし更新は、通常、性能の低下が著しく、補修や補強では経済性の面で不利になる場合に選択するので、本書では補修・補強を取り上げて記述するものとする。

なお、対策の水準は、施設の建設当初を基準として、これを上回る水準（性能向上）、これと同等の水準（性能回復）、これを下回る水準（短期的性能回復・応急対策）がある。

一般的なコンクリート開水路においては、構造機能と水理機能の低下が問題になることが多いが、これらは主に耐久性能の低下（劣化）によってもたらされるものである。

図 5.2-2 で示す劣化の初期段階（潜伏期、進展期）では、耐久性に問題があっても、剛性や耐力などの力学的安全性が低下することは少ない。このため劣化の初期段階では、劣化の進行を抑制する補修により供用期間を延ばすことが可能になる。中期以降（加速期、劣化期）で、劣化により力学的安全性が低下している場合は補強を選択することになる。

なお、施設の性能低下状況や重要度、対策検討段階で想定される予定供用期間などを総合的に検討した結果として、施設管理者による継続監視（目視による監視、点検強化など）を選択することも可能である。

例えば、摩耗対策が必要と判定された施設に対して、営農上の制約から補修工事中の断水が困難で、かつ施設の予定供用期間が比較的短い場合には、対策工事を計画せず施設監視で劣化の進行を監視するという選択もあり得る。継続監視か否かは、性能低下の程度、予想される補修の内容、施設の重要度、施設管理者の意向などによって異なるため、施設毎に適宜判断する必要がある。

表 5.2-1 要求性能に応じた対策の水準と種類

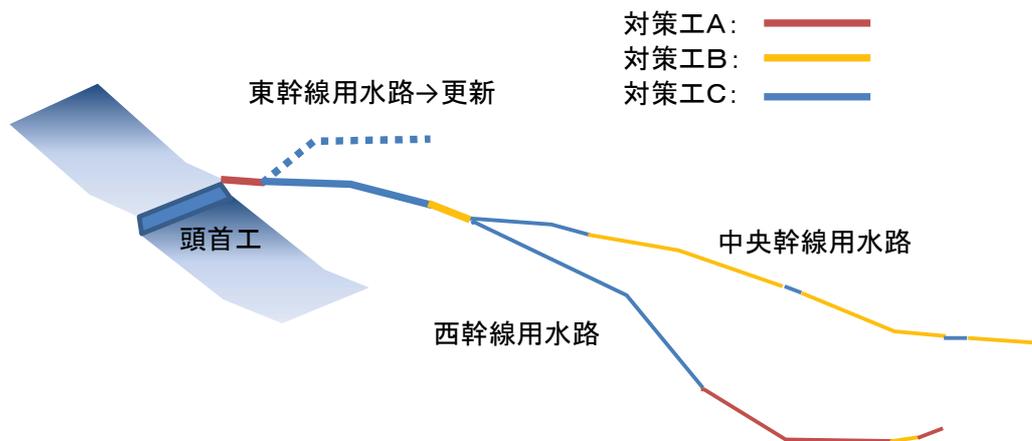
要求性能		対策の水準と種類		
		①建設時の水準以上	②建設時の水準	③建設時の水準以下
構造機能	安定性 耐久性	補修 ^(注1)	補修	補修
	力学的安全性	補強	補強	-
水理機能		-	補修	-
水利用機能		-	補修	-
社会的機能		補強	-	-

(注1) 建設時より高い性能水準を設定しても、力学的安全性の回復につながらない場合は補修とみなす。補修と補強の違いは、力学的安全性の回復を目的としているか否かにあるので、安定性、耐久性能の回復を目指した補修工法が、結果的に力学的安全性を向上させることもあり得るが、本項ではこれも補修として扱うことにする。

【参考】グルーピングの重要性

農業水利施設の長寿命化対策の検討においては、個別の変状発生要因に着目すると同時に水利システム全体の機能の確保と効率的な管理についても考慮する必要がある。したがって、長寿命化対策の検討においては、詳細調査の結果を踏まえ、開水路全体の変状状況や変状発生要因の分布状況を勘案して、区間別に適切な対策方針を検討することが重要である。

上記の検討においては、施設の重要度と管理水準のみならず、現行施設の機能の変更についても考慮して、対策方針範囲のグルーピングを行うものとする。また、グルーピングにおいては、仮設の難易度、同種工種の連続性にも配慮する必要がある。



対策工A: 凍害+摩耗対策+初期欠陥

凍害で天端が欠損している部分については断面修復工

摩耗により一部鉄筋が露出している底版及び側壁下部については表面被覆工

このほか、初期欠陥の乾燥収縮ひび割れ(ひび割れ幅1.0mm以上)についてはひび割れ充填工

対策工B: 凍害(潜伏期)+摩耗対策+初期欠陥

凍害により、天端の微細なひび割れがでているため、表面含浸工法で対応

摩耗により一部鉄筋が露出している底版及び側壁下部については表面被覆工

このほか、初期欠陥の乾燥収縮ひび割れ(ひび割れ幅1.0mm以上)についてはひび割れ充填工

対策工C: 凍害(潜伏期)+初期欠陥

凍害により、天端の微細なひび割れがでているため、表面含浸工法で対応

摩耗については変状がでておらず、鉄筋かぶりも十分にあるため、対策なし

初期欠陥の乾燥収縮ひび割れ(ひび割れ幅1.0mm以上)についてはひび割れ充填工

※東幹線については、施設機能の変更のため、更新

図 5. 2-3 長寿命化対策検討におけるグルーピングのイメージ

5. 3 対策工法の選定の基本的な考え方

機能診断調査・評価により、現況の性能が施設の要求性能より低く、長寿命化対策が必要と判定された場合は、適切な対策を検討する。

対象となるコンクリート開水路の変状から、発生要因とその程度を特定した場合は、これに応じた適切な補修・補強工法を選定する。

【解説】

機能診断調査の結果、長寿命化対策が必要と判定された場合、施設の要求性能が予定供用期間を通じて、所要の水準で保持されるような対策を検討する。

長寿命化対策の種類は、補修・補強・更新があり、当該施設の性能低下の程度を把握して、要求性能が将来的に確保される対策を選定する。

補修・補強の検討においては、施設の性能低下をもたらした変状の要因を十分調査し、これに適切に対応できる対策工法を選定する。

変状要因や劣化過程が異なれば、性能を回復させる方法も異なるので注意が必要である。

例えば、対策工法には、凍害・アルカリシリカ反応では水分の侵入防止、中性化では二酸化炭素（空気に含まれる）の侵入防止、塩害では塩化物イオン（飛来塩分や凍結防止剤）の侵入防止等の効果が要求される。また、劣化過程に応じて、劣化因子の遮断（劣化進行の抑制）だけでなく、劣化因子や劣化箇所の除去、耐荷力の回復などを図ることのできる工法が求められる。さらに、劣化の進行によって部材に膨張等の動きが生じる可能性がある場合は、動きへの追従性を考慮した材料を選定する必要がある。

また、対策工法の選定に当たっては、周辺環境への影響や対策後の維持管理性にも配慮する必要がある。今後の予定供用期間が長い施設については、採用可能な工法について経済性（仮設費を含む工事費、維持管理費など）を評価し、施設のライフサイクルの面から経済性に優れた材料及び工法を選定するのが望ましい。その際に、対策工法の効果が期待される期間のほか、必要に応じて対策後の施設の再劣化に対する再対策についてもその方針や再対策方法の難易等も考慮して検討する。

なお、本書では、コンクリート開水路の発生変状の実態や補修事例が多いことを踏まえて、補修工法を対象に材料・工法の選定に係る考え方や留意事項などを解説する。

5. 3. 1 設計・施工条件の整理

長寿命化対策を検討する際には、長寿命化の対象となる性能、予定供用期間、設計・水理条件、用地上の制約、対策工事の実施可能時期・期間、維持管理の現状などを事前に整理し、それらを考慮した上で、工法選定や施工計画（仮設計画含む）の立案、必要に応じて水理計算や構造計算を行う。

【解説】

コンクリート開水路の長寿命化対策を検討する上で必要となる主な設計及び施工条件について以下に示す。

(1) 長寿命化の対象となる性能、予定供用期間など

長寿命化対策を検討する際には、長寿命化対策が必要と判断された性能、並びにその性能低下を引き起こしている変状の発生要因と程度の把握が重要になる。これに加えて、水利システムにおける当該施設の位置付け（重要性）、予定供用期間、対策の水準等を事前に検討し、対策方針（対策の種類、範囲など）を概定しておくのが望ましい。

(2) 設計条件

コンクリート開水路の構造検討を行う場合は、設計条件の把握が必要になる。基本調査及び詳細調査の結果を整理して、水路の断面形状（水路幅、高さ、部材厚など）、平面・縦断線形、補修履歴などをとりまとめる。

断面形状は、施工図をもとに整理するのが原則であるが、建設後に補修又は改修工事が実施されていることもあるので、現地調査において施工図と実際の断面形状が異なることが確認されたときには、測量等により現況断面を把握することになる。

建設当初の構造計算書を整理し、荷重条件、地下水位、内水位、土圧の考え方、構造計算と安定計算の手法、耐震設計の有無（設計震度等）、コンクリート強度、配筋状況（鉄筋の材質、種類、径、ピッチ、かぶり深さ）など、構造機能及び社会的機能の性能評価に必要な設計条件を把握する。

周辺状況から、建設当初と異なる荷重条件（宅地化、道路化など）、地下水位などが確認された場合には、変更内容についてとりまとめる。特に、荷重が建設当初より大きくなっている場合は、力学的安全性が満足していない可能性があるため構造検討による照査が必要になる。なお、力学的安全性の照査については本章5. 2 (1) の1) ②設計での評価式による性能評価を参照する。

(3) 水理条件

水理機能に係る対策を検討する場合は、建設当初の水理計算書から水理計算に必要な条件（設計流量、水位、粗度、水路勾配、余裕高など）を整理するのが望ましい。設計流量が変わらなければ、通水量に影響を及ぼすのは粗度係数と水路の縦断勾配になるため、現状の内面粗度と水路の縦断線形について調査又は測量を行う。

水路底の縦断的な不陸が大きい場合には、部分的に側壁の余裕高さが不足する可能性があるため注意が必要である。水路内面を補修することで、通水断面が小さくなる場合は、粗度係数の小さな補修材料を検討するなどの配慮が必要になる。

(4) 用地上の制約

用地上の制約（買収、借地が困難な場合など）がある場合は、対策工法の選定や工事の施工計画に影響を及ぼすことになる。このため、用地買収や借地などが必要な対策工を検討する場合は、事前に用地上の制約の有無を確認しておく必要がある。

(5) 対策工事の実施時期、期間

対策工事の実施時期や施工期間は、地下水位等の施工環境や材料・工法の選定に影響を及ぼすことになるので、事前に検討しておくことが望ましい。これについては、対策の緊急性にもよるが、一般的には、工事中の断水の可能性や最小通水量、通水開始時期などを確認した上で、実施時期を決定することになる。

(6) 施設周辺の状況、環境への影響

対策工事の施工計画の検討においては、道路や地形の状況、近接構造物、環境などについて整理する。この情報は、社会的機能の性能評価にも影響を及ぼすことになるため、施設管理者から

の情報や現地調査に基づく正確な状況把握が必要である。対策工法によっては、粉じん、騒音、廃棄物などが発生する可能性もあるので、その対策、処分方法などについても事前に検討しておく。

(7) 維持管理の現状

維持管理作業の頻度、内容、範囲などを調査して、対策工法の選定に反映させることが望ましい。

(8) 環境との調和への配慮

必要に応じて、施設が生み出している景観や生態系などの環境に対する対策工法や工事の影響、さらに、対策で生じる環境負荷の程度を踏まえて対策工法を検討する。

5. 3. 2 対策工法の要求性能

コンクリート開水路の性能の低下を補修や補強などの長寿命化対策により回復又は向上させるために、その対策の目的に応じて、補修又は補強の材料・工法が有すべき性能を適切に設定する必要がある。対策に当たっては、その性能を満たした材料・工法を選定する。

【解説】

補修・補強の長寿命化対策の主な目的は、耐久性・耐荷性の回復・向上の観点から「劣化因子の遮断」、「変状の進行速度の抑制」、「劣化因子の除去」、「耐荷力・変形性能の改善（構造の改善）」などがある。また、通水性の観点から「粗度の改善」、「漏水の遮断、抑制」が、環境性の観点から「美観回復」等がある。

コンクリート開水路に長寿命化対策を適用する場合は、長寿命化の対象となる性能や設計・施工条件等を踏まえ、対策後のコンクリート開水路の要求性能を整理した上で、対策後のコンクリート開水路が対策工法の効果が期待される期間中、対象となる変状や性能低下要因に対して所要の性能を有する材料・工法を適切に選定する必要がある。

補修・補強の材料・工法に係る要求性能とその性能が確保されていることを照査するための方法（材料・工法の品質規格値の設定と規格値算定のための試験方法等）や対策工法の効果が期待される期間については、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）平成27年4月改正」（以下、「補修・補強マニュアル（開水路補修編）」という。）にて解説されているため、これを参照する。

5. 3. 3 対策工法の種類

コンクリート開水路への適用実績や工法・材料の性能を踏まえて、当該施設への適用性が高いと考えられる材料・工法を選定する。

【解説】

施設の性能低下状況や設計・施工条件のほか、コンクリート開水路への補修・補強工法の適用実績や補修・補強マニュアル（開水路補修編）における対策工法の要求性能を踏まえて、工法・材料を選定する。

コンクリート開水路の補修・補強対策工法の分類を図 5.3-1 に示す。また、コンクリート開水路の対策工法に要求される主な効果を表 5.3-1 に示す。

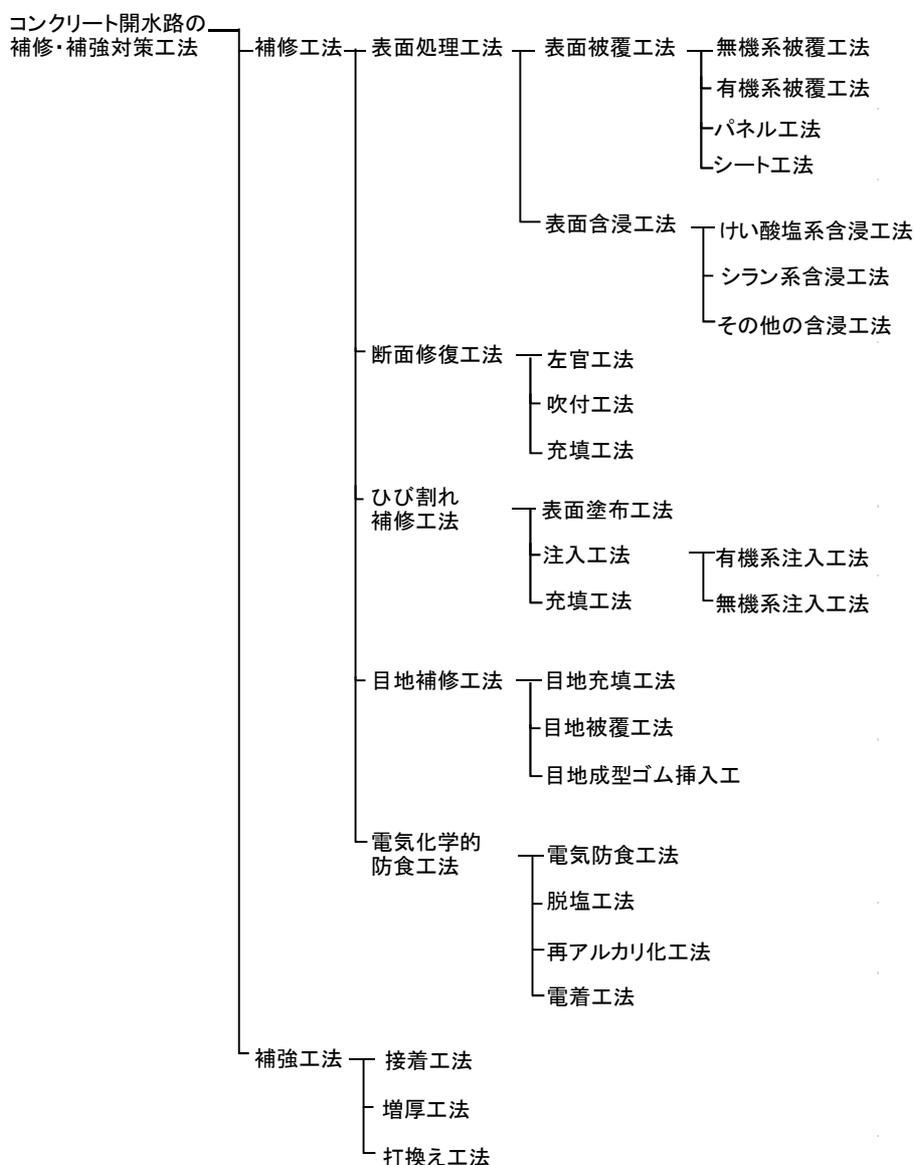


図 5.3-1 コンクリート開水路の補修・補強工法の体系図

表 5.3-1 コンクリート開水路の対策工法に要求される主な効果

目的	工法の要求性能	補修工法					補強工法			
		表面処理工法		断面修復工法	ひび割れ補修工法	目地補修工法	電気化学的防食工法	接着工法	増厚工法	打換え工法
		表面被覆工法	表面含浸工法							
劣化進行の停止・抑制	劣化因子侵入の遮断・抑制	○	○ ※けい酸ナトリウム系等					○	○	
	摩耗の抑制	○						○	○	
	変状発生箇所（劣化因子浸入箇所）の除去・修復		○ ※けい酸ナトリウム系等	○	○	○				○
	劣化因子の除去、劣化速度の抑制		○ ^{注1)} ※シラン系、けい酸リチウム系、亜硝酸リチウム等	○ ※鉄筋防錆処理			○ ^{注2)} ※脱塩工法、再アルカリ化工法、電気防食工法			○
構造安定性の回復	耐荷力、変形性能の確保							○	○	○
通水性の回復	表面粗度の改善	○		○				○		○
止水性の回復	水密確保				○	○				○

注1) 適用実績が多くはないため、現場毎に適用性を検討する必要がある。
 注2) コンクリート開水路における適用事例は確認されない。

補修工法	補修工法の目的及び効果
表面被覆工法	①表面からの劣化因子（CO ₂ 、H ₂ O、Cl ⁻ 、O ₂ 等）の侵入防止
	②摩耗防止
表面含浸工法	①アルカリ性付与による鉄筋の不動態皮膜の保護や再生
	②表面からの劣化因子（H ₂ O）の侵入防止
	③コンクリートの透水阻止性（撥水性）
	④コンクリートの水蒸気透過性（内部の水分蒸発性）
	⑤リチウム系化合物の含浸によるゲルの非膨張化
ひび割れ補修工法	ひび割れからの劣化因子の侵入防止、止水性の回復
再アルカリ化工法	限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復
電気化学的脱塩工法	限界値を超えた塩化物イオン量の低減
電気防食工法	①塩害による劣化の予防保全
	②鉄筋腐食の進行の大幅な低減
断面修復工法	①限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復
	②限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去
	③スケーリングやポップアウト部の除去と断面の修復
	④劣化部分の除去と断面の修復
	⑤鉄筋の防食を目的とした断面修復

5. 3. 3. 1 補修工法

コンクリート開水路の補修工法は、表面処理工法、断面修復工法、ひび割れ補修工法及び目地補修工法に大別される。

【解説】

コンクリート開水路の補修工事では、表面処理、断面修復、ひび割れ補修、及び目地補修を施す作業が単独あるいは併用して行われていることから、これらを補修工法として取り扱う。なお、本項では、コンクリート開水路の補修工法の概要程度を紹介している。詳細については、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」を参照されたい。

(1) 表面処理工法

表面処理工法を表面被覆工法及び表面含浸工法に分類する。

1) 表面被覆工法

劣化因子の侵入やコンクリートの剥落を抑制又は防止する効果を有する被覆材をコンクリート構造物の表面に形成させる工法である。表面被覆工法は、無機系被覆工法、有機系被覆工法、パネル工法、シート工法に区分される。表面被覆工法の概念図(例)を図5.3-2に示す。

なお、既設コンクリート母材にひび割れがある場合は、表面被覆工施工後の被覆表面にひび割れが発生するため、「5.4.1.1 初期ひび割れ」で示すひび割れ幅 1.0mm 以上に限らず、ひび割れ幅やひび割れ変動の有無など既設水路の状況を踏まえた対策の検討が必要である。

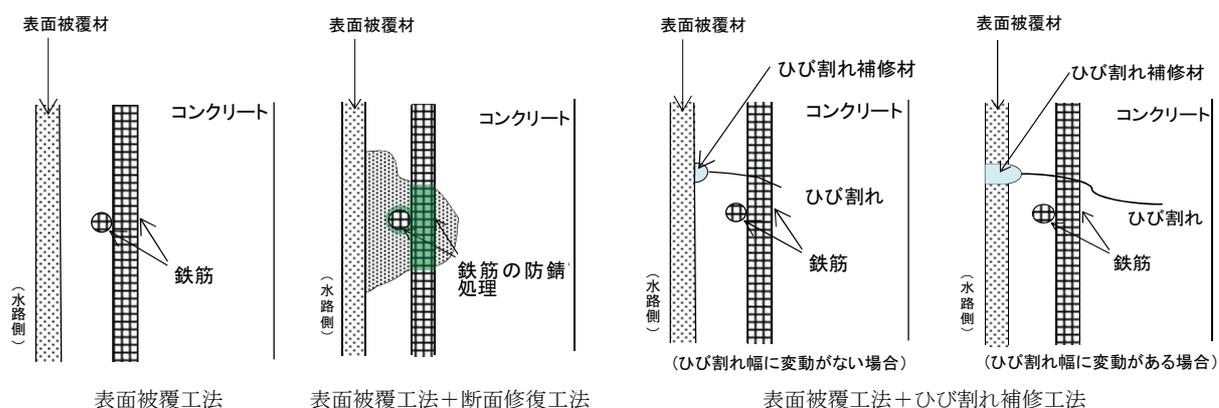


図 5.3-2 表面被覆工法概念図 (例)

【参考】香川用水五條幹線水路における補修工法試験施工のモニタリング結果

平成 13～21 年度にわたり香川用水五條幹線水路（L=290m）において、表面被覆工法等の補修工法が試験施工された。平成 23～26 年度にかけて目視調査及び打音調査によるモニタリング調査を実施し、調査時点での発生変状を定量的な数値で取りまとめたところ、表面被覆工法等に発生したひび割れの約 95%（発生延長比）が、母材ひび割れ部において発生したとの事例報告*がなされている。

*五條幹線水路における補修工法試験施工のモニタリング結果（平成 27 年 農業農村工学会 大会講演会 材料・施工部会）

2) 表面含浸工法

所定の効果（コンクリートに対するアルカリ性や撥水性の付与、水分の逸散、表層の強化、アルカリシリカ反応抑制など）を発揮する材料をコンクリート表面から含浸させ、それぞれの劣化因子の侵入防止又は鉄筋腐食作用を抑制する工法である。一般的には、けい酸塩系、シラン系の材料等が用いられる。表面含浸工法の概念図（例）を図 5.3-3 に示す。

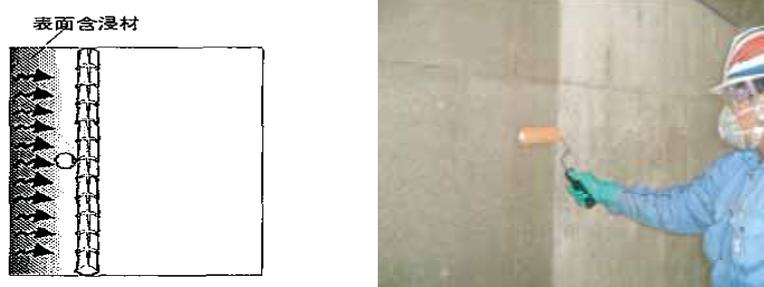


図 5.3-3 表面含浸工法概念図（例）

(2) 断面修復工法

豆板やコンクリートの劣化部等のコンクリートの変状、鉄筋の腐食、その他の要因により欠損したコンクリート断面、又は劣化因子を含むコンクリート部分を除去したあとの断面を当初の性能に戻すために用いられる工法である。断面修復工法には左官工法、吹付け工法及び充填工法がある。断面修復工法の概念図（例）を図 5.3-4 に示す。



図 5.3-4 断面修復工法概念図（例）

(3) ひび割れ補修工法

劣化因子である二酸化炭素、塩化物イオン、水分、硫化水素などの侵入の抑制等を目的とし、ひび割れの発生によって損なわれたコンクリート部材の耐久性を回復させる工法である。ひび割れ補修工法には表面塗布工法、注入工法、充填工法があり、ひび割れの発生要因と状況及び、ひび割れ幅の動きなどを考慮して適切な工法を選択する必要がある。ひび割れ補修工法の概念図(例)を図 5.3-5 に示す。

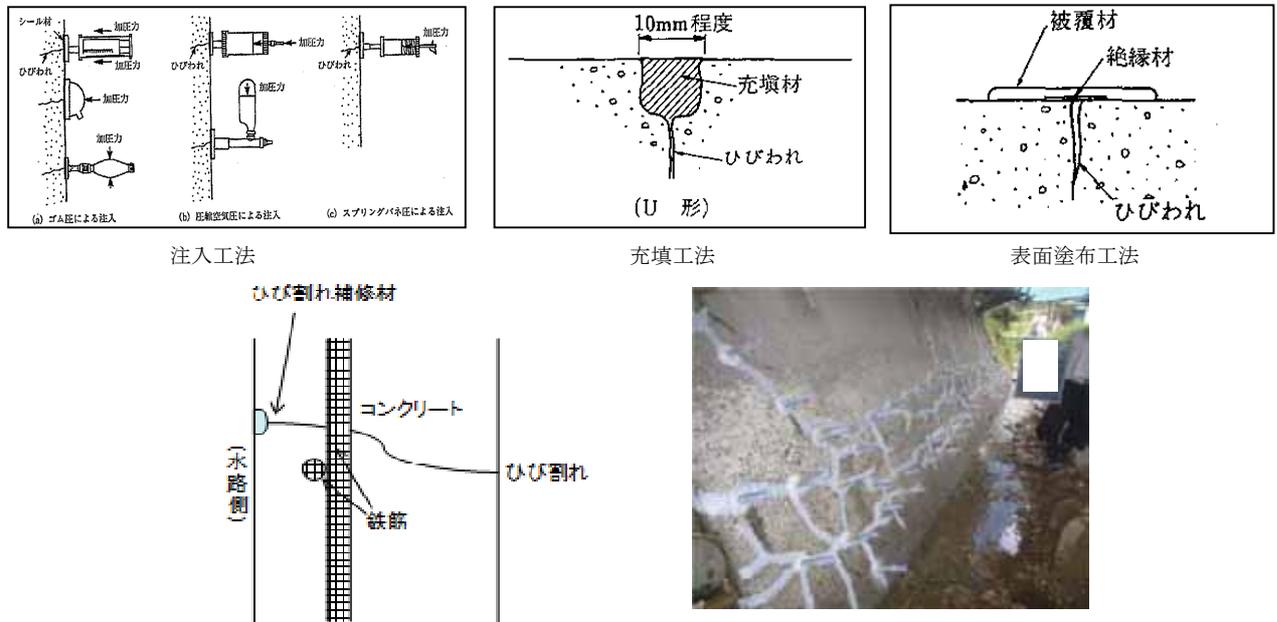


図 5.3-5 ひび割れ補修工法概念図(例)

(4) 目地補修工法

摩耗、脱落等により損傷したコンクリート開水路の目地部を補修する工法で、目地部をカットし、新たな目地材を充填又は挿入して目地の止水性及び伸縮性能を回復する工法である。目地部をカットせず、既設の目地部の表面を被覆する工法である。目地補修工法の概念図(例)を図 5.3-6 に示す。

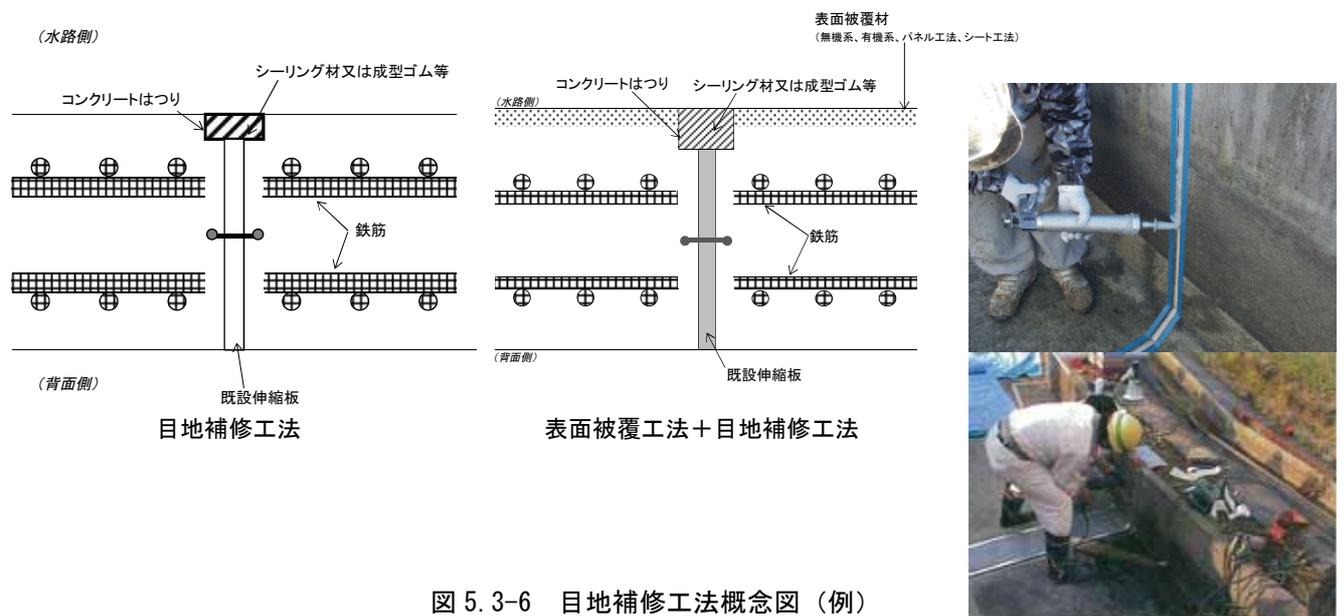


図 5.3-6 目地補修工法概念図(例)

5. 3. 3. 2 補強工法

コンクリート開水路の補強工法には、接着工法、増厚工法、打換え工法などがある。

【解説】

耐荷力を回復又は向上させるコンクリート開水路の補強は、一律に適用できるものではなく、対象とする部材の耐力、施工上の制約条件や対策環境などを考慮して、選定する必要がある。また、補強工法により、水路の内空断面を縮小させる場合には、水理的な検討を十分に行う必要がある。

なお、補強に関する技術はコンクリート開水路において施工事例が限られており、一般化できる段階ではないのが現状であることから、ここでは補強事例の紹介にとどめる。

(1) 接着工法

接着工法は、コンクリート部材の主として引張応力作用面に鋼板、パネル又はシートを取り付け、曲げ耐力とせん断耐力の向上を図る工法である。炭素繊維シートで接着したコンクリート開水路の補強事例を図 5.3-7 に示す。



図 5.3-7 炭素繊維シートの接着による開水路の補強事例

(2) 増厚工法

既設コンクリートの表面にモルタル、コンクリート、若しくは鉄筋コンクリートを接着し一体化することにより、部材の断面や鉄筋量を増加させて補強する工法である。

(3) 打換え工法

耐力の低下した部材を取壊して、必要な耐力を有する部材を再構築する工法である。部材を撤去することで、構造物の安全性が低下するおそれがあるので、その間、仮設部材等で安全性を確保する必要がある。

5. 4 変状種別毎の対策工法の選定

5. 4. 1 初期欠陥に応じた対策工法の選定

コンクリート開水路の初期欠陥は、施工時あるいは竣工後の早い時期に発生するもので、開水路構成部材の耐久性に大きく影響する。また、これらの初期欠陥は、施設の運用中に水利用機能の低下に発展する可能性があるため、欠陥の種類と程度に応じて対策工法を適切に選定する。

【解説】

コンクリート開水路に生じる主要な初期欠陥は、初期ひび割れ（乾燥収縮ひび割れ、温度ひび割れ）、コールドジョイント、豆板、かぶり不足による鉄筋露出などがある。

それぞれの初期欠陥による変状の基本事項と特徴を踏まえた上で、長寿命化対策を検討する。

5. 4. 1. 1 初期ひび割れ

初期欠陥のうち、乾燥収縮ひび割れ、温度ひび割れは、進行性の変状ではないが、鉄筋腐食に発展する可能性があるため、劣化因子の侵入を防止するための工法を選定する。

【解説】

乾燥収縮ひび割れや温度ひび割れなどの初期ひび割れは、いずれも施工中又は、竣工後の早い時点でひび割れが顕在化し、数年以内に収束すると考えられる非進行性のものである。対策工法は、ひび割れ幅とひび割れの状態に応じて、図5.4-1及び図5.4-2を参照して工法選定を行う。図に示すとおり、非進行性のひび割れについては、通常は部材表面において最大幅1.0mm以上のときに対策を行う。ただし、幅1.0mm未満のひび割れであっても、鉄筋に沿ったひび割れの発生や錆汁の滲み出し、漏水などが観察される場合は、対策の必要性について検討を行う。また、曲げモーメントや応力集中によるひび割れが生じる可能性のある部材、開水路が倒壊した時に第三者被害が想定される施設では、補強等の対策を検討する必要がある。

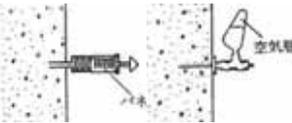
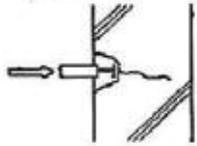
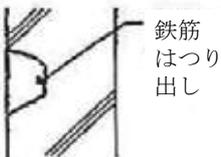
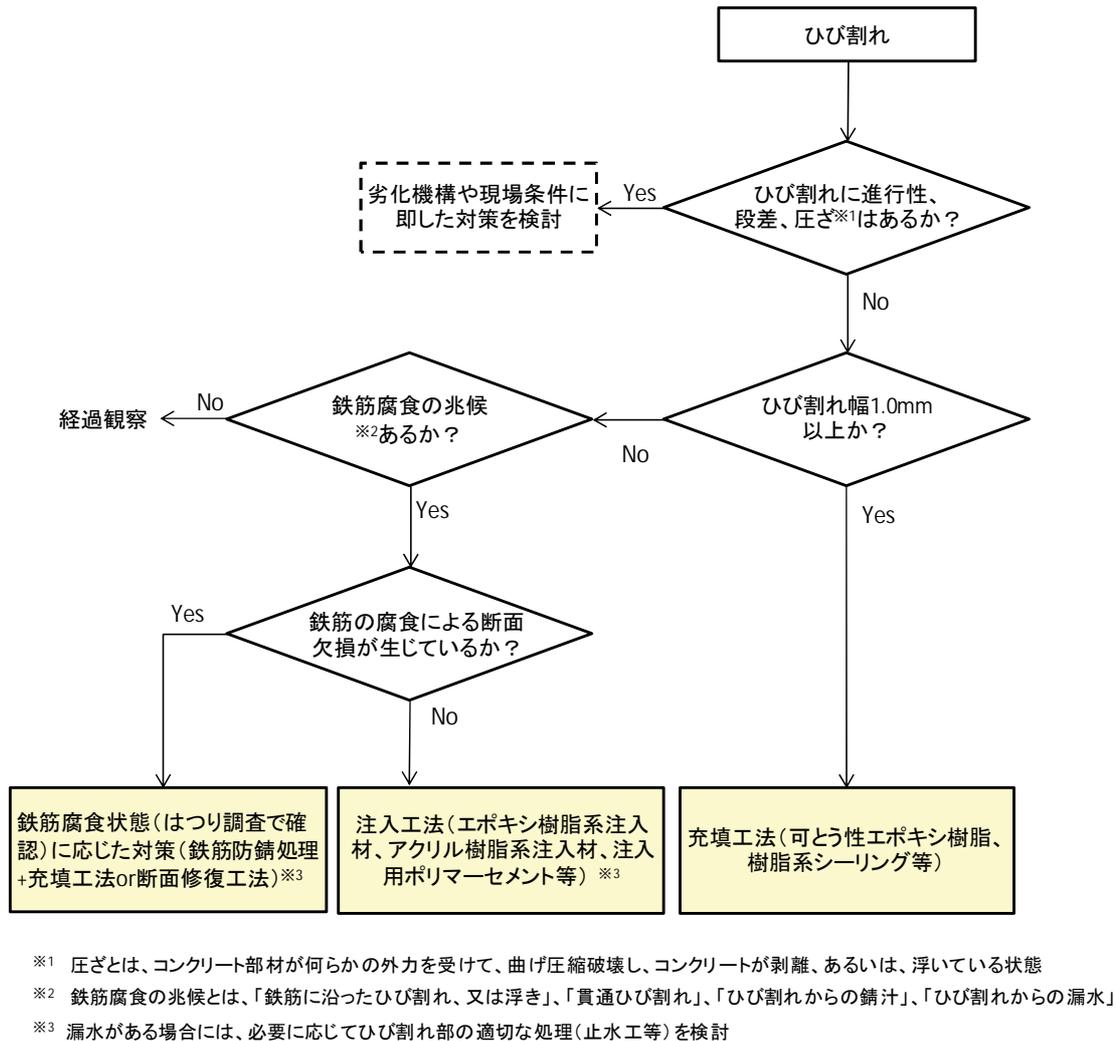
変状の度合い	変状	対策工法
I 軽微 ひび割れ幅が 1.0mm未満	なし	樹脂、アクリル樹脂、ポリマーセメント等の注入 ※鉄筋腐食の兆候が無い場合は、経過観察を基本とする。 
II やや大きい ひび割れ幅が 1.0mm以上	開口ひび割れ	可とう性エポキシ樹脂、樹脂系シーリング等の充填 ※状況に応じて樹脂を充填 ※ひび割れ幅が大きい場合は、可とう性のある材料を選定 
III 大きい 鉄筋の腐食を伴う	鉄筋の露出 剥離剥落	①鉄筋の防錆処理 + ②プライマーの塗布 + ③ポリマーセメントモルタル等の充填 鉄筋はつり出し 

図 5.4-1 ひび割れについての対策工法選定図（例）

【参考】初期ひび割れ幅の評価について（「機能保全のための手引き」における検討経緯）

- ・国営の鉄筋コンクリート開水路40施設、初期ひび割れ601本を対象に部材表面のひび割れ幅と鉄筋腐食の関係を調査、分析
- ・気中の最大ひび割れ幅が1.0mmを超えると断面欠損を伴う鉄筋腐食が半数を超えていた。気中の最大ひび割れ幅が1.0mm未満では、点錆等の表面的な腐食にとどまっていた。
- ・水密性（漏水等の水理機能）に配慮したひび割れ幅（0.2mm）の評価指標について、コンクリート開水路においては、用水管理上、10%のロスを見込んでおり、またロスの大きな要因は継ぎ目からの漏水であることを踏まえ、0.2mmの水密性のひび割れ幅の基準は農業水利施設の開水路には適用しないこととした。
- ・以上の調査結果等より、初期ひび割れの補修を要すひび割れ幅（S-3）を1.0mmとした。



注) ・ ひび割れ幅は、部材表面におけるひび割れの最大幅を示す。

- ・ 通常（鉄筋腐食の兆候が無い場合）は、ひび割れ幅 1.0mm 以上で対策する。
- ・ 鉄筋腐食の兆候がある場合は、ひび割れ幅 1.0mm 未満でも対策を検討する。
- ・ 鉄筋腐食の兆候がなく、ひび割れ幅 1.0mm 未満なら経過観察を基本とする。
- ・ ひび割れ幅が特に大きい場合は、可とう性を考慮した材料を検討する。
- ・ ひび割れに進行性、段差、ひび割れ近傍に圧さが生じている場合は、劣化進行や耐荷力の低下が疑われるため、別途構造計算等を行い、補強等の対策を検討する。特に、曲げモーメントや応力集中によるひび割れが生じる可能性のある部材は重点的に検討する必要がある。
- ・ せん断ひび割れ等耐力に影響を及ぼすひび割れについては、専門技術者等に確認すること。

図 5.4-2 ひび割れ（初期欠陥）に対する対策工法選定フロー（例）

5. 4. 1. 2 豆板

豆板が生じた部分は、空隙部分と同様に炭酸ガスや水に対する抵抗性が小さく、コンクリートの中酸化抑制効果が減少するため、豆板部に鉄筋が存在する場合には、早期に腐食する可能性がある。このため、耐久性を向上させるための工法を選定する。

【解説】

豆板の対策は、鉄筋コンクリート構造を想定するが、無筋コンクリート構造については、豆板の程度（断面に占める割合等）に応じて個別に対応する。

豆板の補修対策は、程度に応じて以下の工法を選定することが望ましい。

深さ 1～3 cm の豆板（粗骨材が露出している状態）は、定着の弱い粗骨材を叩き落とした上で、ポリマーセメントモルタル等を左官により補修する。

深さ 3 cm 以上の豆板は、不良部分（空隙が多い部分、粗骨材が集まっている部分）をはつり取り、無収縮モルタル等の充填により断面を修復する。

また、深さ 3cm 以上の豆板が広範囲に及ぶ場合は、はつり範囲が大きくなるため、はつり後に新たなコンクリートで打換える。

変状の度合い	変状	対策工法
I 軽微 骨材が露出しているが、剥落しない	骨材露出	①表面静寂部の除去(下地処理) + ②ポリマーセメントモルタル等の被覆
II やや大きい 剥落する骨材がある	骨材の剥落	①表層脆弱部の除去(表層部のはつり取り) + ②ポリマーセメントペースト等の塗布 + ③ポリマーセメントモルタル等の充填
III 大きい 鉄筋が露出するほど深い	鉄筋の露出	①豆板部の除去(豆板部全体のはつり取り) + ②ポリマーセメントモルタル充填等 + ③充填後の表層部にポリマーセメントペースト等塗布
IV 極めて大きい 骨材を叩くと連続的に剥落する	鉄筋の露出 剥離・剥落	①豆板部の除去(豆板部全体のはつり取り) + ②コンクリート打設 + ③充填後の表層部にポリマーセメントペースト等塗布

図 5.4-3 豆板についての対策工法選定図（例）

5. 4. 1. 3 コールドジョイント

コールドジョイント部のコンクリートは脆弱であり、打継ぎ面が縁切れしている場合もある。これらのコールドジョイント部は、構造物の耐力、耐久性、水密性を著しく低下させる要因となるため、力学的安全性や耐久性を向上させるための工法を選択する。

【解説】

コールドジョイント発生後の補修対策は、その変状の度合いにより 2 つに区分される。軽微なコールドジョイント（縁切れがはっきりと認められないもの）に対しては、ポリマーセメントモルタル等の塗布を行う。

重度のコールドジョイント（縁切れが明確なもの）、特に外壁面に生じている場合は、ひび割れ補修に準じた対策を選定する。

上記の対策を行うに当たっては、コールドジョイントの位置及び配筋等を確認し、コールドジョイントが及ぼす部材への力学的安全性、耐久性への影響を踏まえ、必要な対策を選択する。

摩耗が激しい環境下では、図 5.4-4 に示す「I 軽微」に対応する対策では早期に対策効果を失う可能性があるため、「II やや大きい」場合の対策も選択肢となる。

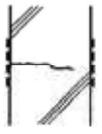
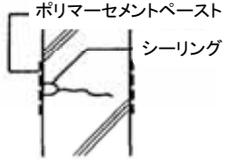
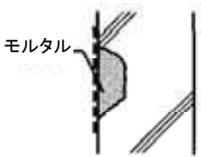
変状の度合い	変状	対策工法
I 軽微 コールドジョイントは見られるが、縁切れがはっきり認められない	コールドジョイント	ポリマーセメントモルタル等の塗布 
II やや大きい 縁切れが認められる	コールドジョイント	①縁切れ部の表面をUカット又はVカット + ②シーリング材充填 + ③可とう性ポリマーセメントペースト等の塗布  ポリマーセメントペースト シーリング
III 大きい 豆板も認められる	コールドジョイント 骨材露出等	①豆板の除去及び縁切れ部の表面をUカット又はVカット + ②無収縮モルタルグラウト等 + ③充填後の表層部にポリマーセメントペースト等塗布 ※充填性が懸念される場合は、断面修復工法を選択する。  モルタル

図 5.4-4 コールドジョイントについての対策工法選定図（例）

5. 4. 1. 4 鉄筋のかぶり不足（鉄筋露出）

コンクリート開水路における鉄筋露出は主としてかぶり不足に起因している。このため、必要なかぶりを確保する等の耐久性向上のための工法を選定する。

【解説】

鉄筋露出箇所は、水分や二酸化炭素、塩分等の劣化因子が侵入しやすいため、鉄筋腐食による施設の性能低下を抑制するために必要な工法を選定する。鉄筋の露出や腐食が確認される場合は、断面修復を主体とした対策を選定する。

かぶりが不足し、鉄筋の露出や腐食が確認されない場合は、中性化による鉄筋腐食の観点からかぶり厚 10mm 未満の箇所について予防保全の観点で表面被覆工を検討する。ただし、二次製品のかぶり厚は、製造段階で現場打ちコンクリートに比べて小さい。しかし、二次製品のコンクリートは密実であるため、一律には評価できないことに留意する。

なお、検討に当たっては機能診断調査結果における当該施設の中性化進行程度を考慮して対策の要否を判断する。

かぶり不足に起因する鉄筋露出対策は、その変状程度により以下のように分類される。

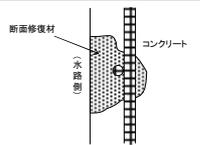
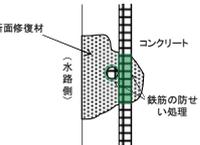
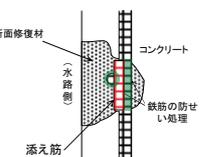
変状の度合い	変状	対策工法
I 軽微 鉄筋が露出しているが腐食は生じていない	鉄筋露出	鉄筋部の断面修復及びかぶりコンクリート打設（表面被覆） ※かぶりが不足する場合は、ポリマーセメントモルタル等により、かぶり厚を確保する。 
II やや大きい 鉄筋が露出し、鉄筋に浮き錆等が認められる	鉄筋露出 浮き錆等	①鉄筋の錆の除去 + ②防錆材塗布 + ③鉄筋部の断面修復及びかぶりコンクリート打設（表面被覆） ※かぶりが不足する場合は、ポリマーセメントモルタル等により、かぶり厚を確保する。 
III 大きい 露出した鉄筋の腐食が進行し、断面が欠損している	鉄筋露出 断面欠損	①鉄筋の錆の除去 + ②防錆材塗布及び新たな鉄筋（添え筋）の追加 + ③鉄筋部の断面修復及びかぶりコンクリート打設（表面被覆） ※かぶりが不足する場合は、ポリマーセメントモルタル等により、かぶり厚を確保する。 

図 5.4-5 鉄筋露出についての対策工法選定図（例）

5. 4. 2 劣化機構に応じた対策工法の選定

劣化については、進行性を有しているため劣化の過程に応じて対策工法を選定する。さらに、施設の使用環境条件（地域特性）によっても様々な劣化機構があるため、それらに応じた材料・工法とする。

【解説】

コンクリート開水路に生じる劣化機構は、摩耗、凍害、アルカリシリカ反応、化学的侵食、中性化、塩害であるが、そのうち主要な劣化機構は摩耗である。また、凍害、アルカリシリカ反応、中性化は、コンクリート開水路のおかれた使用環境条件や、設計・施工条件により発生事例が確認されている。一方で、コンクリート開水路では塩害や化学的侵食による劣化はごく限られた特殊な状況下でしか発生した事例がない。

各劣化機構ともに、劣化の進行過程により適用可能な対策工法が異なるため、コンクリート開水路の劣化の要因の特定とその進行程度を把握し、最適な工法を選定する。

5. 4. 2. 1 摩耗

摩耗による劣化については、劣化程度に応じて、摩耗の進行の抑制、粗度の改善、部材断面の確保、耐荷力の回復に対応する工法を選定する。

【解説】

摩耗による劣化への対策工法は、断面欠損や部分的な鉄筋露出が確認された段階で、断面修復を行うことを基本とする。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、「摩耗が進行しやすい施設や摩耗の進行を許容できない施設」※では、表面被覆工法を選定する。

※「摩耗が進行しやすい施設や摩耗の進行を許容できない施設」の例を以下に示す。

- ・表面粗度が悪化し通水性が低下することが所定の水理機能及び水利用機能と照らして許容できない施設
- ・初期の鉄筋腐食を許容できない重要度の高い施設
- ・落差工や土砂流入が多く摩耗が進行しやすいと想定される施設
- ・鉄筋かぶり厚さの不足や表層コンクリートの低品質により、摩耗の影響が顕在化しやすいと想定される施設

【Ⅱ 進展期の工法選定】

潜伏期と同様の対応とする。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

劣化によりモルタルや粗骨材が欠損した深さまでを対象とした断面修復工法を選定する。断面修復に当たり、断面厚の減少箇所や鉄筋腐食が確認された場合は、鉄筋防錆処理を行う。

さらに、前記の施設※では、その後の摩耗の進行を抑制するために、表面被覆工法を併用する。

【Ⅳ 劣化期の工法選定】

劣化によりモルタルや粗骨材が欠損した深さまでを対象とした断面修復工法、又は施工範囲や施工条件に応じて接着工法を選定する。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、水利用機能及び水理機能と照らして増厚工法が適用可能な場合は選択肢となる。

鉄筋腐食による断面欠損が著しく、耐荷力が大きく低下している場合には、鉄筋の再施工やコンクリートの打換えを検討する。

さらに、前記の施設※では、その後の摩耗の進行を抑制するために、表面被覆工法を併用する。

摩耗による劣化の対策工法選定図

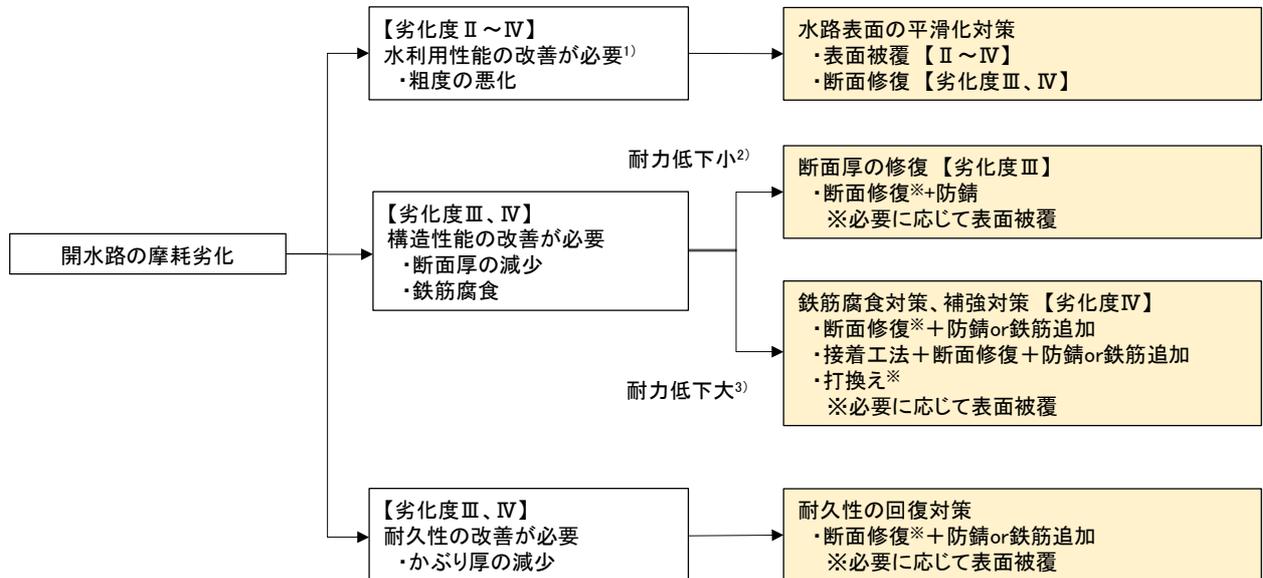
劣化過程、 外観上のグレード	変状	性能別工法			
I 潜伏期 摩耗を生じやすい水 理条件にあるが、目 立った摩耗は生じて いない	なし	原則として継続監視 <small>※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する</small>			
		遮断	○	表面被覆	表面の摩耗抑制
II 進展期 コンクリート表面・モル タル部分の摩耗が生 じている	表面のモ ルタル部 分が摩耗	原則として継続監視 <small>※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する</small>			
		遮断	○	表面被覆	表面の摩耗抑制
		除去	△	断面修復	粗骨材の露出・剥離などコンクリート断面の 一部欠損を欠損前の状態・断面に修復
III 加速期 粗骨材が露出する状 態	粗骨材が 露出	遮断	○	表面被覆	表面の摩耗抑制
			△	ひび割れ 補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止
		除去	◎	断面修復	粗骨材の露出・剥離などコンクリート断面の 一部欠損を欠損前の状態・断面に修復
IV 劣化期 粗骨材が剥離して部 材断面力が不足する 状態。粗度係数が増 大。	粗骨材が 剥離	遮断	○	表面被覆	表面の摩耗抑制
			△	ひび割れ 補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止
		除去	◎	断面修復	粗骨材の露出・剥離などコンクリート断面の 一部欠損を欠損前の状態・断面に修復
			◎	接着	鋼板接着等の補強材料による強度確保
		改善	○	増厚	増厚工法による断面増加、部材増設による 断面剛性回復等
			○	打換え	劣化部材のコンクリート打換え

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術'14」P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-6 摩耗による劣化についての対策工法選定図 (例)

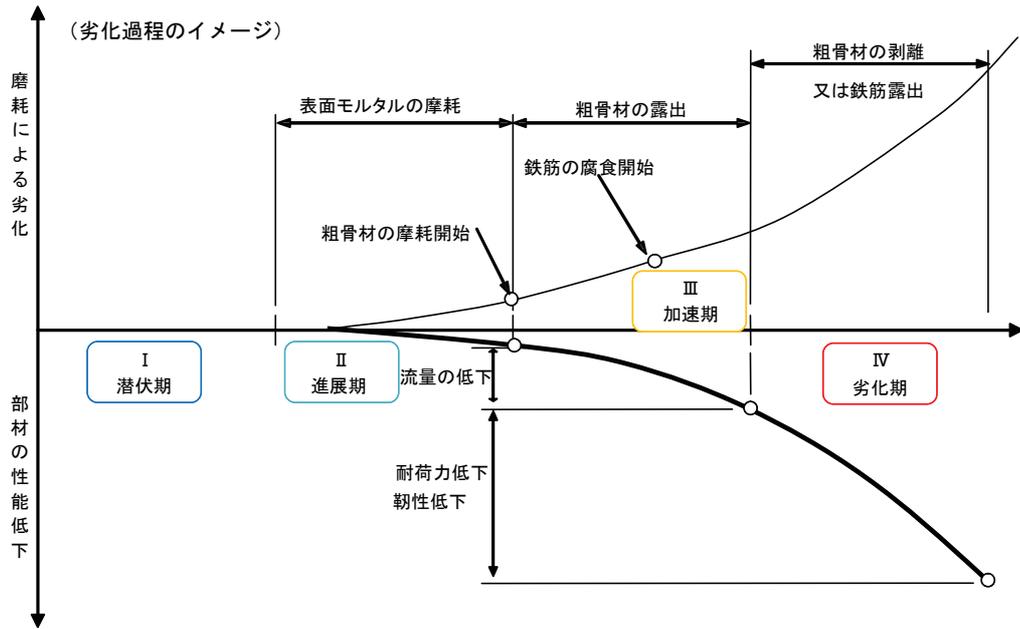
表 5.4-1 摩耗による劣化についての対策工法選定上の留意点

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点	
I 潜伏期	—	—
II 進展期		—
III 加速期	【水理機能・水利用機能に与える影響】 ・表面粗度が悪化すると通水性が低下するが、それが水理システム全体に及ぼす影響(受益地や営農形態の変化等を含む)を考慮し、水管理の工夫で対応できるかを検討した上で、長寿命化対策の可否を判断する。	【構造機能に与える影響】 ・鉄筋腐食による耐力の低下は殆ど生じていないが、粗骨材の露出により部材断面が減少し、摩擦面が部材の圧縮側となる場合は、耐力が低下するため、断面厚の修復(断面修復)を行う。
IV 劣化期		【構造機能に与える影響】 ・かぶりの減少や鉄筋露出により鉄筋腐食が進行して鉄筋断面が減少し、耐力が一層低下するため、防錆処理、鉄筋追加、鉄筋の再施工を行う。
共通	・かぶり厚が十分に確保されていれば、通常は摩耗の進行により部材の耐力が極端に低下することはないが、初期欠陥としてかぶり厚不足の場合やコンクリートの品質が低い場合は摩耗により鉄筋腐食に至る可能性が高いため、劣化初期に予防保全的な対策を検討する。 ・表面被覆工の対策実施時には、脆弱層(付着強度が側壁1.0N/mm ² 未満、底板平均1.0N/mm ² (個々の値は0.85N/mm ²)未満の範囲)をはつり除去する。そして、はつり除去後に部材厚が極端に薄くなる場合や、かぶり厚さが確保できない場合は、部分的な打換えも検討する。	



- 1) 表面粗度が上昇すると通水性が低下するが、それが水理システム全体に及ぼす影響を考慮し、水管理の工夫で吸収できるかを検討した上で、長寿命化対策の可否を判断する。
- 2) III加速期を意図する。この劣化過程では鉄筋腐食による耐力の低下は生じていないが、粗骨材の露出により部材断面が減少し、摩擦面が部材の圧縮側となる場合は、耐力が低下する。
- 3) IV劣化期を意図する。この劣化過程ではかぶりの減少や鉄筋露出により鉄筋腐食が進行して鉄筋断面が減少し、耐力が一層低下する。

図 5.4-7 摩耗劣化に係る性能低下に対応する対策工法の選定概念図



劣化過程	本来的機能			社会的機能*
	構造機能	水理機能	水利用機能	
状態Ⅰ (潜伏期)	—	—	—	—
状態Ⅱ (進展期)	—	—	—	表面凹凸や粗骨材露出による 「環境性の低下(景観悪化)」
状態Ⅲ (加速期)	かぶり厚の減少による 「耐久性の低下」	粗度係数の増大による 「通水性の低下(表面抵抗の増大)」	水理機能(通水性)の低下による 「送配水性の低下(用水到達時間の遅延)」	※状態Ⅲ(加速期)以降は、錆汁による 景観悪化も発生
状態Ⅳ (劣化期)	鉄筋腐食や部材断面欠損による 「力学的安全性の低下」		水理機能(通水性)の低下による 「安全性・信頼性の低下(溢水事故の発生)」	構造機能(力学的安全性)の低下による 「安全性・信頼性の低下(水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」

※ 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-8 摩耗の劣化過程

5. 4. 2. 2 凍害

凍害による劣化については、劣化程度に応じて、水分の供給の抑制、劣化部位の除去・修復、耐荷力の回復等に対応する工法を選定する。

【解説】

凍害による劣化への対策工法は、ある程度劣化が進行した段階で、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。

凍害により発生するコンクリート内部の層状ひび割れは、外部から供給される水により部材内部の飽水度が高まり、外気温が凍結温度以下になった時の部材内部の水分の凍結膨張によって発生する。よって、コンクリート開水路の凍害劣化に対する対策は、部材内部への水分の侵入を抑制することが重要となる。

ただし、安易に表面被覆工法を施工した場合、背面から供給された水分を側壁内部に滞留させてしまい、将来的に凍結融解作用を助長させてしまうおそれがあることが研究より明らかになってきている。このため、凍害地域における表面被覆工法の適用には十分留意する必要がある。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、激しい凍害が想定される地域^{*1}では特に重要度の高い施設において、劣化因子の侵入を抑制する効果のある表面含浸工法や表面被覆工法より選定する。

【Ⅱ 進展期の工法選定】

激しい凍害が想定される地域^{*1}では、進展期の段階で、凍害の影響範囲をはつり取り、耐凍害性を有する断面修復材で修復する工法の適用を検討する。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

凍害の影響範囲をはつり取り、耐凍害性を有する断面修復材で修復する工法を選定する。

【Ⅳ劣化期の工法選定】

原則として、凍害の影響範囲をはつり取り、耐凍害性を有する断面修復材で修復する工法を選定する。

ただし、施工範囲や施工条件に応じて増厚工法の適用を検討する。

^{*1}「激しい凍害が想定される地域」は凍害の危険度 4（凍害の予想程度：大きい）以上を想定（図 3.3-11 凍害危険度の分布を参照）

凍害による劣化の対策工法選定図

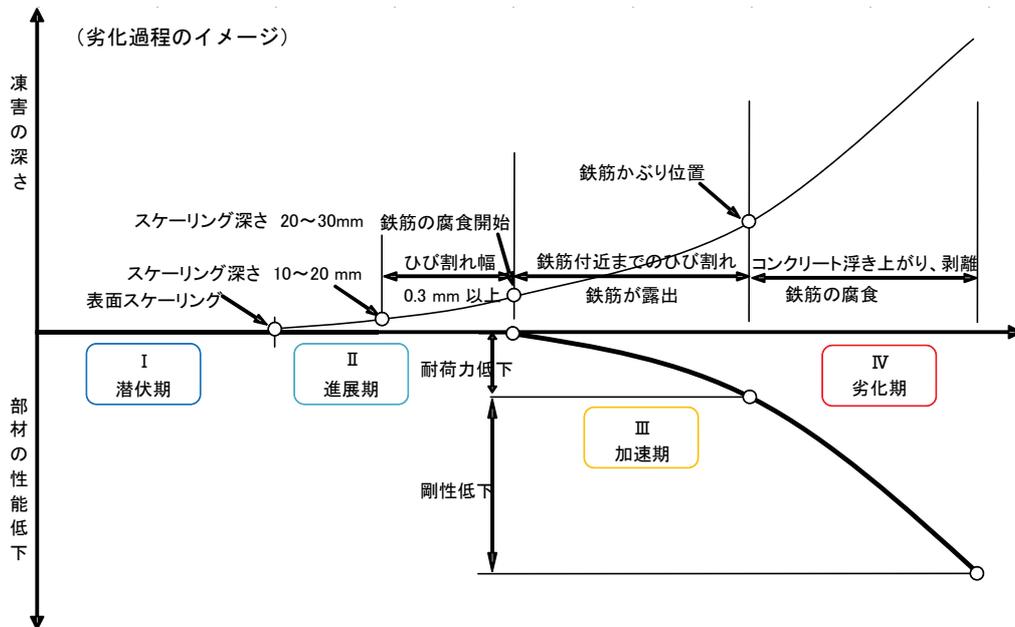
劣化過程・外観上のグレード	変状	性能別工法																											
<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">I 潜伏期</div> スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生するまでの期間。 外観上の変状が見られない。	なし	<div style="background-color: yellow; border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;"> 原則として継続監視 <small>※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する</small> </div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center; width: 20px;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面含浸</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの水分侵入抑制</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの水分侵入防止</td> </tr> </table>				遮断	△	表面含浸	表面からの水分侵入抑制		△	表面被覆	表面からの水分侵入防止																
遮断	△	表面含浸	表面からの水分侵入抑制																										
	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止																										
<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">II 進展期</div> スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが発生し、骨材が露出するまでの期間。	水分の 滲出 スケーリング 微細 ひび割れ ポップアウト	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの水分侵入防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れからの水分侵入防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">○</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面補修</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">スケーリングやポップアウト部の除去と断面の修復</td> </tr> </table>				遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止		△	ひび割れ補修	ひび割れからの水分侵入防止	除去	○	断面補修	スケーリングやポップアウト部の除去と断面の修復												
遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止																										
	△	ひび割れ補修	ひび割れからの水分侵入防止																										
除去	○	断面補修	スケーリングやポップアウト部の除去と断面の修復																										
<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">III 加速期</div> スケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトが進展し、骨材の露出や剥落が発生する期間。	水分の滲出 スケーリング ひび割れ ポップアウト 骨材露出 剥落	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの水分侵入防止、及び剥落防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れからの水分侵入防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">◎</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面修復</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復</td> </tr> </table>				遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止		△	ひび割れ補修	ひび割れからの水分侵入防止	除去	◎	断面修復	スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復												
遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止																										
	△	ひび割れ補修	ひび割れからの水分侵入防止																										
除去	◎	断面修復	スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復																										
<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">IV 劣化期</div> かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋の露出や腐食が発生する期間。	水分の滲出 スケーリング ひび割れ ポップアウト 剥落 鉄筋露出・ 腐食	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの水分侵入防止、及び剥落防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">△</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れからの腐食性物質侵入防止</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">◎</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面修復</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面の修復</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">改善</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">◎</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">増厚</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">増厚工法による断面増加、部材増設による断面剛性回復等</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">○</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">接着</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">鋼板接着等の補強材料による強度確保</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">○</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">打換え</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">劣化部材のコンクリート打換え</td> </tr> </table>				遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止		△	ひび割れ補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止	除去	◎	断面修復	スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面の修復	改善	◎	増厚	増厚工法による断面増加、部材増設による断面剛性回復等		○	接着	鋼板接着等の補強材料による強度確保		○	打換え	劣化部材のコンクリート打換え
遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止																										
	△	ひび割れ補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止																										
除去	◎	断面修復	スケーリングやポップアウト部の除去と鉄筋の防食を目的とした断面の修復																										
改善	◎	増厚	増厚工法による断面増加、部材増設による断面剛性回復等																										
	○	接着	鋼板接着等の補強材料による強度確保																										
	○	打換え	劣化部材のコンクリート打換え																										

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術'14」P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-9 凍害による劣化についての対策工法選定図 (例)

表 5.4-2 凍害による劣化についての対策工法選定上の留意点

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点
I 潜伏期	・劣化因子の侵入を抑制する効果のある表面含浸工法や表面被覆工法は、背面から供給された水分を側壁内部に滞留させ、将来的に凍結融解作用を助長するおそれがあるため、適用には十分留意する。
II 進展期	・はつり取る範囲は、一見して分かる変状発生箇所だけでなく、凍害による微細なひび割れの発生範囲を対象とする。
III 加速期	・激しい凍害が想定される地域では特に重要度の高い施設において、断面修復後に表面含浸工法や表面被覆工法を適用することを検討する。
IV 劣化期	
共通	・水路背面からの水分供給が劣化要因となる可能性がある場合は、現場条件に応じた背面水の排水等を検討する。 ・表面被覆工の対策実施時には、脆弱層(付着強度が側壁1.0N/mm ² 未満、底版平均1.0N/mm ² (個々の値は0.85N/mm ²)未満の範囲)をはつり除去する。そして、はつり除去後に部材厚が極端に薄くなる場合や、かぶり厚さが確保できない場合は、部分的な打換えも検討する。



劣化過程	本来的機能			社会的機能 ^{※2}
	構造機能	水理機能	水利用機能	
状態 I (潜伏期)	—	—	—	—
状態 II (進展期)	スケールリングやひび割れによる「耐久性の低下」	— ^{※1}	— ^{※1}	表面剥離・剥落やひび割れによる「環境性の低下(景観悪化)」 ※状態 III (加速期)以降は、錆汁による景観悪化も発生
状態 III (加速期)	鉄筋腐食や部材断面欠損による「力学的安全性の低下」	— ^{※1}	— ^{※1}	構造機能(力学的安全性)の低下による「安全性・信頼性の低下(水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」
状態 IV (劣化期)		— ^{※1}	— ^{※1}	

※1 凍害は主に気中部や土中部で進行し、水中部では凍害が極めて生じにくいいため粗度係数の増大やひび割れによる水利用機能や水理機能に影響する可能性は低い。

※2 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-10 凍害の劣化過程

5. 4. 2. 3 アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応による劣化については、劣化進行の抑制、膨張の拘束、劣化因子の除去、耐力の向上に対応する工法を選定する。

【解説】

アルカリシリカ反応の劣化への対策工法は、抜本的なもの確立されていないため、劣化の比較的初期に劣化因子の侵入を抑制する対策を行った上で、継続監視により開口ひび割れが確認された時点で、鉄筋深度以深までの断面修復を行うことを基本とする。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、早期にアルカリシリカ反応による劣化が明らかになった場合は、特に重要度の高い施設や高い水密性が要求される施設において、劣化因子となる水分の侵入を抑制し、かつコンクリート中の水分蒸発が可能な表面含浸工法を選定する。また、表面含浸工法としては、アルカリシリカ反応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工法も選択肢となる。

【Ⅱ 進展期の工法選定】

原則として、劣化因子となる水分の侵入を抑制し、かつコンクリート中の水分蒸発が可能な表面含浸工法を適用する。

ただし、残存膨張量が大きい場合には、アルカリシリカ反応による膨張を拘束する接着工法の適用を検討する。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

鉄筋深度以深までの断面修復を行った上で、劣化因子となる水分の侵入を抑制する表面含浸工法を適用する。

ただし、残存膨張量が大きい場合には、アルカリシリカ反応による膨張を拘束する接着工法の適用を検討する。

【Ⅳ劣化期の工法選定】

原則として、鉄筋深度以深までの断面修復を行う工法を選定する。

ただし、施工範囲や施工条件に応じて接着工法や増厚工法の適用を検討する。

また、アルカリシリカ反応による膨張によって部材の一体性が大きく損なわれている場合や、鉄筋の断面欠損が著しい場合には、鉄筋の再施工やコンクリートの打換えを検討する。

アルカリシリカ反応による劣化の対策工法選定図

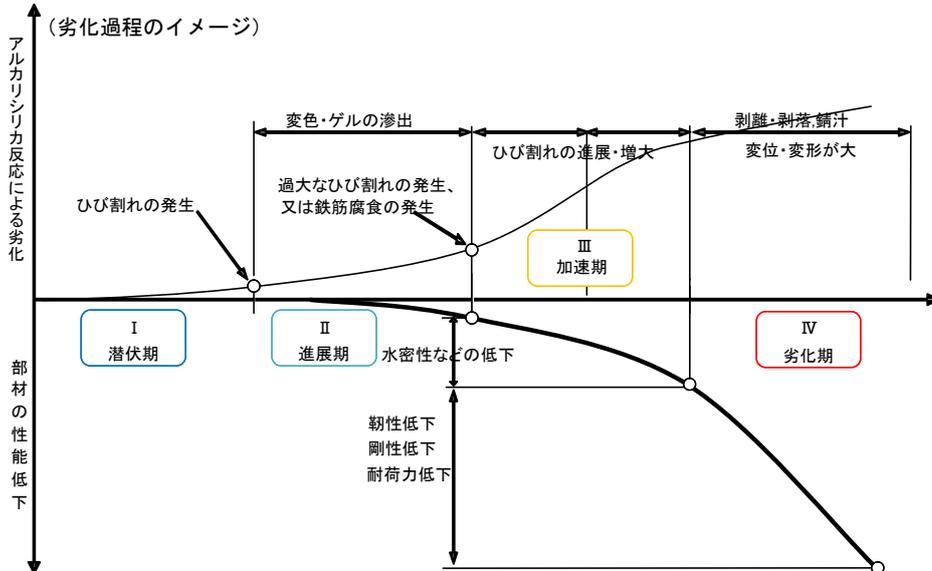
劣化過程・外観上のグレード	変状	性能別工法			
I 潜伏期 膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生していない期間。 外観上の変状が見られない。	なし	原則として継続監視 ※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する			
		遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止
		抑制	△	接着・増設	FRP、鋼板接着等によるASR膨張の拘束等
		除去	○	表面含浸	リチウム系化合物の表面含浸によるASR膨張の抑制
				表面含浸	コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理
II 進展期 水分とアルカリ供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生するが鉄筋腐食がない期間。	ひび割れ 変色、ゲル滲出	遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止
			△	ひび割れ補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止
		抑制	△	接着・増厚	FRP、鋼板接着等によるASR膨張の拘束等
			△	表面含浸	リチウム系化合物の表面含浸によるASR膨張の抑制
		除去	◎	表面含浸	コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理
III 加速期 膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、鉄筋腐食が発生する場合もある期間。	ひび割れ 錆汁	遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止
			△	ひび割れ補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止
		抑制	△	接着・増厚	FRP、鋼板接着等によるASR膨張の拘束等
			△	表面含浸	リチウム系化合物の表面含浸によるASR膨張の抑制
		除去	◎	表面含浸	コンクリート中の水分の蒸発が可能な含浸処理
			◎	断面修復	劣化部分の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復
IV 劣化期 残存膨張量がほぼゼロとなる時期。 ひび割れの幅・密度が増大し、部材としての一体性が損なわれる。 鉄筋の腐食による断面減少が生じ、鉄筋の損傷が発生する等、耐荷性の低下が顕著な期間。	錆汁 段差・ずれ 剥離・剥落 鉄筋の損傷 変位・変形	遮断	△	表面被覆	表面からの水分侵入防止、及び剥落防止
			△	ひび割れ補修	ひび割れからの腐食性物質侵入防止
		除去	◎	断面修復	劣化部分の除去と鉄筋の防食を目的とした断面修復
		改善	◎	接着・増厚	FRP、鋼板接着等の補強材料による強度確保
			○	打換え	劣化部材のコンクリート打換え

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「抑制」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術」14]P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-11 アルカリシリカ反応による劣化についての対策工法選定図（例）

表 5.4-3 アルカリシリカ反応による劣化についての対策工法選定上の留意点

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点	
I 潜伏期	<ul style="list-style-type: none"> ・対策後も、アルカリシリカ反応によるひび割れの発生・進展が目視で確認できることが望ましい。 ・表面被覆工は水路背面等から侵入した水分の発散を妨げるおそれがあるため適用に当たっては留意する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・アルカリシリカ反応による鉄筋破断が、問題となる可能性があるのは水圧や土圧の作用で応力集中する側壁と底版の接合部付近である。そこで、劣化が進行(加速期～劣化期)しており、更に側壁に変位がみられる場合は、変位方向に応じた箇所のはつり調査(水路内面方向に変位している場合は地山の試掘を伴う)により鉄筋破断の有無を確認した上で、鉄筋の再施工、打換えや増厚等の補強工法を検討する。
II 進展期	<ul style="list-style-type: none"> ・アルカリシリカ反応による膨脹が収束していない時期に表面被覆工法を施した場合、施工後に母材の膨脹に表面被覆材が追従できずひび割れ等の変状が発生し、水分侵入抑制効果等が十分発揮されないおそれがある。このため、表面被覆工法の適用及び用いる材料の検討は慎重に行う必要がある。 ・表面含侵工の材料で表面リチウム化合物を用いる場合、リチウム化合物は環境基準や発がん性が否定できない材料であるため、施工に当たっては留意が必要である。 	
III 加速期	<ul style="list-style-type: none"> ・接着工法(拘束効果を期待する場合)の適用に当たっては、開水路は部材が薄く、部材が連続しているため、補強材の巻立て方や固定方法に留意する必要がある。 	
IV 劣化期		
共通	<ul style="list-style-type: none"> ・アルカリシリカ反応の対策にあたっては、母材の残存膨脹量や骨材の反応性、追従性等の工法性能を十分踏まえた上で対策の要否検討や工法選定を行う必要がある。 	



劣化過程	本来的機能			社会的機能*
	構造機能	水理機能	水利用機能	
状態 I (潜伏期)	—	—	—	—
状態 II (進展期)		—	—	ひび割れや表面変色による「環境性の低下(景観悪化)」
状態 III (加速期)	ひび割れによる「耐久性の低下」	貫通ひび割れによる「通水性の低下(漏水発生)」	水理機能(通水性)の低下による「送水性の低下(用水到達時間の遅延)」	※状態 III(加速期)以降は、錆汁による景観悪化も発生
状態 IV (劣化期)	ひび割れの増大や鉄筋破断による「力学的安全性の低下」			貫通ひび割れによる「安全性・信頼性の低下(漏水事故、漏水による周辺地盤陥没の発生)」
				構造機能(力学的安全性)の低下による「安全性・信頼性の低下(水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」

※ 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-12 アルカリシリカ反応の劣化過程

5. 4. 2. 4 化学的侵食

化学的侵食による劣化については、劣化進行の抑制、鉄筋腐食進行の抑制、耐荷力の向上に対応する工法を選定する。

【解説】

化学的侵食は温泉地や酸性河川流域等で発生するため、農業水利施設としてのコンクリート開水路では事例が少ない。

化学的侵食の対策工は、劣化過程に応じて、劣化因子の侵入を抑制する工法、劣化部位を除去して断面修復する工法、耐荷力を回復させるための補強工法より選定する。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、早期に化学的侵食による劣化が明らかになった場合は、特に初期の鉄筋腐食を許容できない重要度の高い施設において、劣化因子の侵入を抑制する表面被覆工法を選定する。

【Ⅱ 進展期の工法選定】

劣化因子の侵入を抑制する表面被覆工法を選定する。また、劣化により脆弱化した層の厚さに応じて断面修復工の併用を検討する。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

劣化により脆弱化した層を除去して、鉄筋防錆処理を行った後に、断面修復する工法を選定する。さらに、その後の劣化因子の侵入を抑制するために、表面被覆工法を併用する。

【Ⅳ劣化期の工法選定】

加速期の対応方法に加えて、施工範囲や施工条件に応じて接着工法や増厚工法より選定する。

また、鉄筋腐食による断面欠損が著しく耐荷力が大きく低下している場合には、鉄筋の再施工やコンクリートの打換えを検討する。

化学的侵食による劣化の対策工法選定図

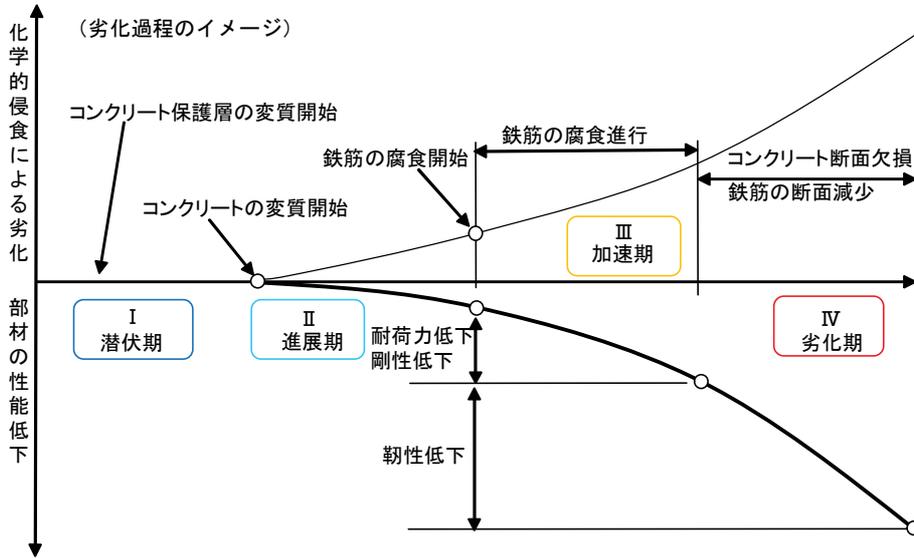
劣化過程・外観上のグレード	変状	性能別工法
I 潜伏期 劣化が顕在化しない期間	なし	<div style="border: 2px solid black; background-color: yellow; padding: 10px; margin-bottom: 10px;"> 原則として継続監視 ※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">○</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの硫酸等の侵入防止</div> </div>
II 進展期 コンクリートにひび割れが発生するまでの期間、あるいは骨材が露出し、剥がれ始めるまでの期間	ひび割れ 表面劣化	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">△</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ部からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">○</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面修復</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">劣化部分の除去を目的とした断面修復</div> </div> </div>
III 加速期 コンクリートの侵食深さが増大し、劣化因子が鉄筋位置に達して鉄筋腐食が開始するまでの期間	ひび割れ 断面欠損 粗骨材が露出・剥離	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">△</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ部からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面修復</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">劣化部分の除去及び鉄筋の防食を目的とした断面修復</div> </div> </div>
IV 劣化期 コンクリートの断面欠損、鉄筋の断面減少等により、耐荷力の低下が顕著になる時期	ひび割れ 断面欠損 鉄筋断面減少 変形・たわみ	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面被覆</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">表面からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">遮断</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">△</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ補修</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ひび割れ部からの硫酸等の侵食性物質の侵入防止</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">除去</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">断面修復</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">劣化部分の除去及び鉄筋の防食を目的とした断面修復</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">改善</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">◎</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">接着・増厚</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">補強材料による強度確保等</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">改善</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; text-align: center; line-height: 20px;">○</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">打換え</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">劣化部材のコンクリート打換え</div> </div> </div>

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術'14」P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-13 化学的侵食による劣化についての対策工法選定図（例）

表 5.4-4 化学的侵食による劣化についての対策工法選定上の留意点

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点
I 潜伏期	・表面被覆前のはつり工は、厚さ数mm程度の脆弱部を除去する程度で良い。
II 進展期	・はつり除去～断面修復の対象範囲は、劣化因子に応じて、ひび割れ、浮き、剥落、粗骨材の脱落、軟化等の変状が生じている、脆弱層(表面被覆工を選定する場合は付着強度が側壁1.0N/mm ² 未満、底版平均1.0N/mm ² (個々の値は0.85N/mm ²)未満の範囲)とする。そして、はつり除去後に、部材厚が極端に薄くなる場合や、かぶり厚さが確保できない場合は、部分的な打換えも検討する。
III 加速期	
IV 劣化期	
共通	—



劣化過程	本来的機能			社会的機能 [※]	
	構造機能	水理機能	水利用機能		
状態 I (潜伏期)	—	—	—	—	
状態 II (進展期)	かぶりコンクリートの変質による「 耐久性の低下 」	変質部の剥離が顕著な場合に粗度係数の増大による「 通水性能の低下 (表面抵抗の増大)」	水理機能(通水性)の低下による「 送配水性の低下 (用水到達時間の遅延)」	水理機能(通水性)の低下による「 安全性・信頼性の低下 (溢水事故の発生)」	表面変質による「 環境性の低下 (景観悪化)」 ※状態 III(加速期)以降は、錆汁による景観悪化も発生
状態 III (加速期)	鉄筋腐食や部材断面欠損による「 力学的安全性の低下 」				
状態 IV (劣化期)				構造機能(力学的安全性)の低下による「 安全性・信頼性の低下 (水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」	

※ 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-14 化学的侵食の劣化過程

5. 4. 2. 5 中性化

中性化による劣化については、劣化進行の抑制、鉄筋の腐食進行の抑制、耐荷力の低下の抑制に対応する工法を選定する。

【解説】

中性化による劣化は、主に気中部で進行することから、対象施設は、側壁が自立している構造あるいは水路橋構造を想定する。ただし、条件によっては、水中部でもアルカリ性の低下が発生する可能性があり、これが確認された場合には個別に対応する。

中性化による劣化への対策工法は、鉄筋が腐食環境となる時点（進展期、中性化残りが10mm未満の場合）で、劣化因子の侵入を抑制する工法を選定し、鉄筋腐食が確認された場合に断面修復工法を選定することを基本とする。なお、無筋コンクリートは鉄筋コンクリートに比べて中性化の影響は限定的で対策が必要となる可能性は小さい。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、耐久性を確保できる期間が予定供用年数を下回るものと予測される場合は、初期の鉄筋腐食を許容できない重要度の高い施設において、劣化因子の侵入を抑制する効果のある表面被覆工法や表面含浸工法より選定する。

【Ⅱ 進展期の工法選定】

原則として、劣化因子の侵入を抑制する効果のある表面被覆工法又は表面含浸工法を選定する。

ただし、初期の鉄筋腐食を許容できない重要度の高い施設においては、鉄筋腐食状態を確認した上で、鉄筋防錆処理を施し断面修復する工法の適用を検討する。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

鉄筋かぶり部分の変状箇所をはつり除去、及びたたき落とし、鉄筋防錆処理の上、断面修復する工法を選定する。

【Ⅳ劣化期の工法選定】

原則として、鉄筋の断面欠損分を補うための鉄筋を追加した上で、断面修復を行う工法を選定する。

ただし、施工範囲や施工条件に応じて打換え工法、接着・増厚工法の適用を検討する。

- 1) C はかぶりである。
 2) 40年は機能保全コストの検討期間と整合を取ったものである。

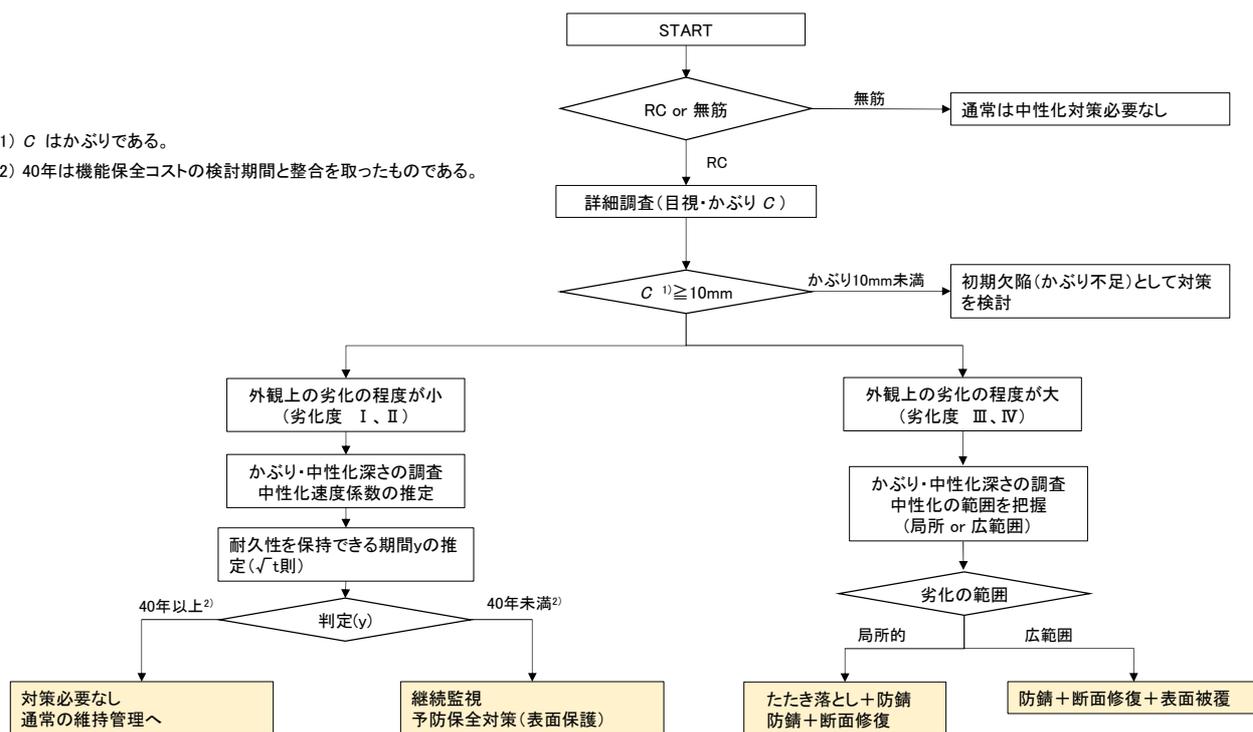


図 5.4-15 中性化についての対策工法選定フロー

中性化による劣化の対策工法選定図

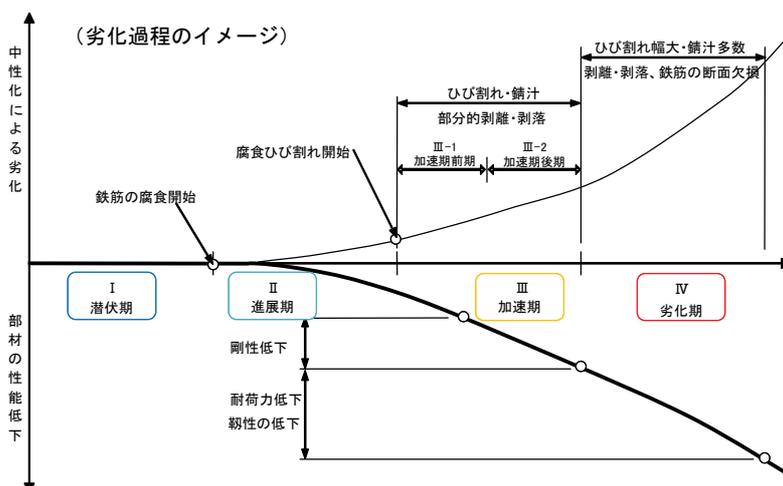
劣化過程・外観上のグレード	変状	性能別工法
I 潜伏期 中性化深さが腐食発生限界に到達するまでの期間 外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界以上。	なし	原則として継続監視 ※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する
		遮断 ○ 表面被覆 表面からのCO ₂ などの侵入防止
		抑制 △ 表面含浸 鉄筋の不動態皮膜の保護(アルカリ性付与材の塗布含浸) 除去 △ 再アルカリ化 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復
II 進展期 鉄筋の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間。 外観上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界未満、腐食が開始。	ひび割れ	遮断 ◎ 表面被覆 表面からのCO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 等の腐食性物質の侵入防止 ○ ひび割れ補修 表面からのCO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 等の腐食性物質の侵入防止
		抑制 △ 表面含浸 鉄筋の不動態皮膜の再生(アルカリ性付与材の塗布含浸)
	錆汁	除去 △ 再アルカリ化 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復 ○ 断面修復 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のコンクリートの除去・修復
III 加速期 腐食ひび割れ発生により鉄筋の腐食速度が増大する期間。 腐食ひび割れの進展とともに剥離・剥落が見られるが、鉄筋の断面欠損は生じていない。	ひび割れ	遮断 △ 表面被覆 表面からのCO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 等の腐食性物質の侵入防止 △ ひび割れ補修
		抑制 △ 表面含浸 鉄筋の不動態皮膜の再生(アルカリ性付与材の塗布含浸)
	剥離・剥落	除去 △ 再アルカリ化 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復 ◎ 断面修復 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のコンクリートの除去・修復
IV 劣化期 鉄筋の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な時期。 腐食ひび割れとともに剥離・剥落、鉄筋の断面欠損が生じている。	ひび割れ	遮断 △ 表面被覆 剥落防止 △ ひび割れ補修 表面からのCO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 等の腐食性物質の侵入防止
		抑制 △ 表面含浸 鉄筋の不動態皮膜の再生(アルカリ性付与材の塗布含浸)
	剥離・剥落	除去 △ 再アルカリ化 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のアルカリ性回復 ◎ 断面修復 限界値を超えたアルカリ濃度低下部のコンクリートの除去・修復
	錆汁	改善 ○ 接着・増厚 鋼板接着等の補強材料による強度確保
		改善 ○ 打換え 劣化した部材のコンクリート打換え
鉄筋断面欠損		
変形・たわみ		

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「抑制」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術」14」P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-16 中性化による劣化についての対策工法選定図 (例)

表 5.4-5 中性化による劣化についての対策工法選定上の留意点

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点
I 潜伏期	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化残りが10mm以上の場合を潜伏期とする。 ・\sqrt{t}則によって中性化残りが10mm未満となるまでの期間を求め、これを耐久性を確保できる期間とする。(【参考①】中性化耐久性保持期間の求め方を参照) 通常、潜伏期は経過観察とするが、重要度の高い施設においては、この期間が予定供用年数を下回る場合に、劣化因子の侵入を抑制する工法の適用を検討する。
II 進展期	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋腐食が確認されない場合であっても、中性化残りが10mm未満、又は鉄筋かぶり厚が10mm未満(初期欠陥)の場合は進展期の対応とする。
III 加速期	<ul style="list-style-type: none"> ・対策範囲は、「鉄筋腐食によるひび割れ、錆汁析出、剥離・浮き、剥落の発生箇所」とする。 ・変状発生範囲が概ねスパンの鉄筋の50%未満の場合は、剥離・浮き部をたたき落とし、鉄筋防錆処理を行った上で、断面修復を行う。 ・変状発生範囲が概ねスパンの鉄筋の50%以上の場合は、中性化深さと鉄筋表面までの深い方の深度まではつり除去し、鉄筋防錆処理を行った上で、断面修復を行う。また、更に耐久性を向上する必要がある場合には、断面修復後に表面被覆を適用することを検討する。
IV 劣化期	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の断面欠損が概ね10%を超える場合に劣化期の対応を実施する。
共通	<ul style="list-style-type: none"> ・再アルカリ化工法は、開水路においては実績が少なく効果が確認されておらず、コスト面でも不利なため、選定しないことが望ましい。



劣化過程	本来的機能			社会的機能 ^{※2}
	構造機能	水理機能	水利用機能	
状態 I (潜伏期)	—	—	—	—
状態 II (進展期)	—	—	—	—
状態 III-1 (加速期前期)	ひび割れによる「 耐久性の低下 」 ※ただし、中性化残りの減少は状態 I (潜伏期)より発生	—※1	—※1	ひび割れ、錆汁、剥離による「 環境性の低下 (景観悪化)」
状態 III-2 (加速期後期)	鉄筋腐食や部材断面欠損による「 力学的安全性の低下 」	—※1	—※1	
状態 IV (劣化期)	—	—※1	—※1	構造機能(力学的安全性)の低下による「 安全性・信頼性の低下 (水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」

※1 中性化は主に気中部で進行し、かつ鉄筋腐食によってひび割れが生じるのはかぶりコンクリート部分のため、ひび割れから漏水が生じて水利用機能や水理機能が低下する可能性は低い。

※2 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-17 中性化の劣化過程

【参考①】 中性化耐久性保持期間の求め方

1) 中性化の将来予測

コンクリート開水路の中性化の将来予測には式 (1) に示す \sqrt{t} 式を用いる。

$$d_c = \alpha\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 d_c : 中性化深さ(mm)、 α : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)、 t : 材齢 (年)、式 (1) はコンクリートの中性化深さが \sqrt{t} という量に比例し進行することを示している。

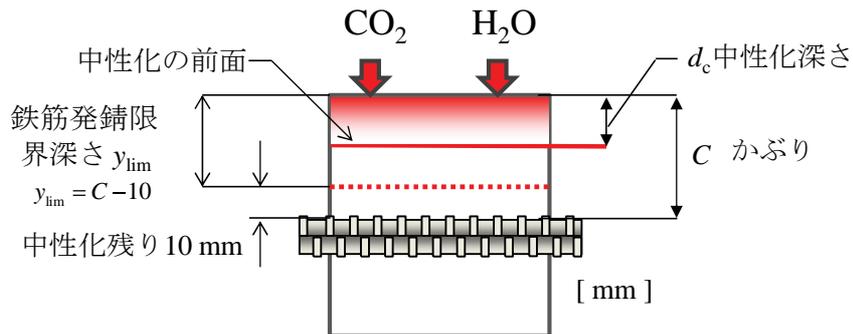


図 5.4-18 中性化深さと鉄筋発生限界深さの関係

中性化の照査は図に示すように、コンクリート表面からの中性化深さが中性化残りまでに達する年数を求めることにより行われる。コンクリートのかぶりの平均 C から中性化残り R を引いた値を y_{lim} :鉄筋発生限界深さと呼ぶ。 R は通常環境では 10mm、塩化物が存在する環境では 10~25mm と大きい値を用いる。

$$y_{\text{lim}} = C - R \quad (2)$$

中性化深さ d_c が以下であれば中性化に対する耐久性は保持されていると考える。つまり、以下の条件である。

$$d_c \leq y_{\text{lim}} \quad (3)$$

(3)式の等号がなりたつ年数 t を (1) 式から求めれば、中性化の耐用年数が保持されると期待できる期間 y を求めることができる。

【参考②】 鉄筋かぶり及び中性化深さの調査方法

開水路のかぶり調査及び中性化深さの調査方法については、それぞれ「既存コンクリート構造物の性能評価指針(2014):日本コンクリート工学会」の付属書Ⅰ-4.1鉄筋かぶり及び鉄筋径、付属Ⅰ-3.3中性化深さに示す方法を基本とし測定すると良い。

ただし開水路は農業用水を運ぶ線的構造物として特徴があり、上記の付属書に記述されていない以下の点に留意して調査を行うのが望ましい。

1. 鉄筋かぶり調査と中性化深さ調査は同時に行うのが効率の点で望ましい。これは、中性化深さの調査には鉄筋位置を把握することが必要だからである。
2. 開水路は線的構造物であるため、区間内でかぶり、中性化深さがスパン毎にばらつく。また、同一スパン内においても水分、日射、部材(底版、側壁)等の条件により中性化深さの分布が空間的にばらつくことが知られている。対象とする全てのスパンに対して詳細調査を行うことはコストの面から現実的ではないため、「機能保全の手引き」等に示されるように開水路をある程度のまとまりを持った「グループ」に分割し、「グループ」毎に平均的なかぶり、中性化深さを代表指標として照査を行うことが現実的と考える(もちろん、工学的な判断で、最大、最小値を用いても良い)。
3. 開水路のグルーピングは連続的に区間を分割するものとし、各グループに関して以下の状態が似通うようにグルーピングを行う。すなわち、建設・供用状態が似通う連続区間をグループとして選定する。これは、ほぼ機能診断調査のグルーピングと同一になると思われる。
 - ①建設年 (建設時期)
 - ②路線 (直線、曲線、分水)
 - ③設計条件 (水路断面、配筋等)
 - ④建設材料 (コンクリート、鉄筋)
 - ⑤施工条件 (施工者、工法、施工条件)
 - ⑥供用条件 (通水期間、流況、管理)
 - ⑦環境条件 (日射、水分状態等)
4. 施設機能調査のグルーピングの水路区間長は1~2km程度と想定される。水路スパン間隔を10mとすれば、1グループ区間には多く見積もって100~200の水路スパンが存在する。このような母集団の中から平均的な鉄筋かぶり、中性化深さを推定するのが調査の目的となるが、今のところ有効な方法は確立されていない。そこで、当面は、1グループに対して5スパンを抽出し計測を行うのが良いと考える。抽出する際は、無作為に決まった区間間隔でサンプリングするのが基本であるが、グループ内に目視にて際だった変状を示すスパンがあれば追加計測を行うのが望ましい。これらの計測を行うことにより、グループに対しての平均かぶり、中性化深さとそれらのばらつきを示す標準偏差を得ることができる。
5. 鉄筋かぶりと中性化深さはスパン内でもばらつく。鉄筋かぶりについては施工に起因するばらつきが多いと考えられるため、かぶりの分布がわかる程度の詳細計測が必要である。最近はややポータブル型の鉄筋探査装置も発売されていることから、高精度ではなくてもスパン全体の鉄筋分布を計測することが重要である。

6. コスト・効率面から現状では、小口径コア法あるいはドリル法（NDIS3419）がコンクリート開水路の中性化深さ測定に対して適用性が高いと考えられる。ドリル法は骨材に当たると精度が低下するが短時間で多くのデータを得られる点が利点である。どの方法においても測定数が増すほど平均値の推定精度は向上するが、コストの面からは、ドリル法はスパン水平方向に1m以下の間隔（スパン長が10mなら、約10点）程度で実施するのが、スパン全体の平均値を捉えるには有効と思われる（図5.4-19を参照）。なお、図では、気中と水中に分けて計測した例を示したが、これは常に水中と気中の測定が必要という意味ではない。常時満流で流れているような水路であれば、水中のみで比較的モーメントが大きい側壁の根元に近い部分（あまり根元に近いとやりにくいので底版から1m程度の高さ）を計測すれば良い。

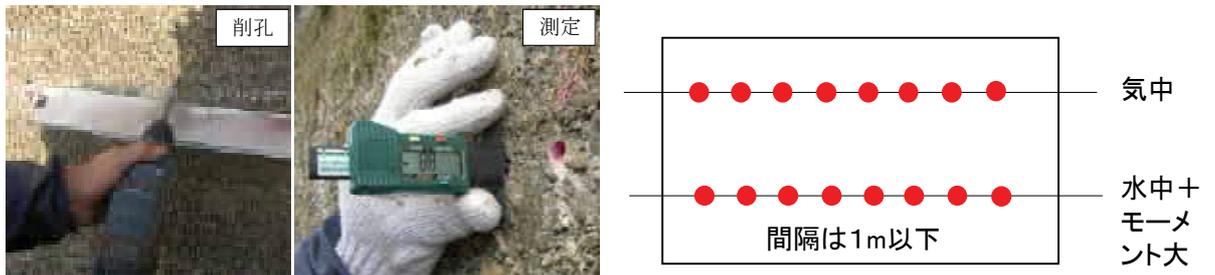


図 5.4-19 ドリル法の測定イメージ

5. 4. 2. 6 塩害

塩害による劣化については、劣化進行の抑制、鉄筋の腐食進行の抑制、劣化因子の除去、耐荷力の回復に対応する工法を選定する。

【解説】

コンクリート開水路における塩害は汽水域や塩分飛来地域等で発生するため、発生事例は少ない。

塩害の対策工は、劣化過程に応じて、劣化因子の侵入を抑制する工法、劣化部位・因子を除去する工法、耐荷力を回復させるための補強工法より選定する。また、対策規模、施設の重要度、管理体制に応じて電気化学的な防食工法（電気防食工法、脱塩工法）も選択肢となる。

【Ⅰ 潜伏期の工法選定】

原則として、継続監視とする。

ただし、塩分の侵入が予測される場合は、特に初期の鉄筋腐食を許容できない重要度の高い施設において、表面被覆工法を選定する。

【Ⅱ 進展期の工法選定】

劣化因子となる塩分を除去することを目的とした断面修復工法を選定する。

【Ⅲ 加速期の工法選定】

高濃度の塩分を含んだコンクリートを除去することを目的とした断面修復工法を選定する。

【Ⅳ劣化期の工法選定】

加速期の対応方法に加えて、施工範囲や施工条件に応じて接着・増厚工法より工法選定する。

また、鉄筋腐食による断面欠損が著しく耐荷力が大きく低下している場合には、鉄筋の再施工やコンクリートの打換えを検討する。

塩害による劣化の対策工法選定図

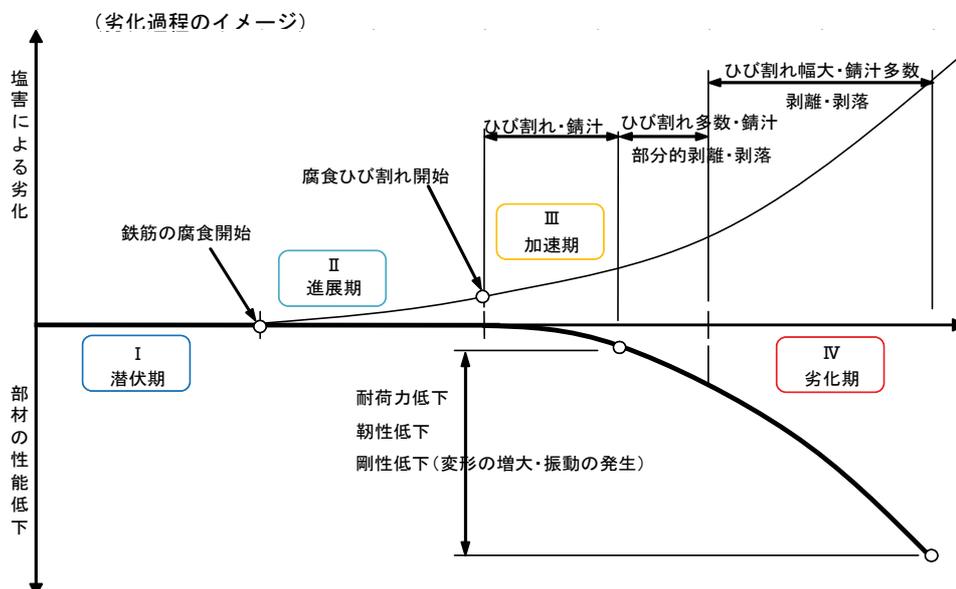
劣化過程・外観上のグレード	変状	性能別工法			
I 潜伏期 鉄筋の腐食が開始するまでの期間。 外観上の変状がみられない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下。	なし	原則として継続監視 ※ただし、必要に応じて以下の対策を実施する			
		遮断	○	表面被覆	表面からの塩化物イオン、O ₂ などの侵入防止
			△	ひび割れ補修	曲げ・乾燥収縮等によるひび割れからのH ₂ O、O ₂ などの侵入防止
		抑制	○	電気防食	塩害による鉄筋腐食のおそれがある部位の予防保全
II 進展期 鉄筋の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間。 外観上の変状がみられない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始。	なし	遮断	△	表面被覆	表面からの塩化物イオン、O ₂ 等の腐食性物質の侵入防止
			△	ひび割れ補修	ひび割れからのH ₂ O、O ₂ などの腐食性物質の侵入防止
		抑制	○	電気防食	鉄筋腐食進行の大幅な低減
		除去	○	電気化学的脱塩	限界値を超えた塩化物イオン量の低減
			◎	断面修復	限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去と修復
III 加速期 腐食ひび割れ発生による鉄筋の腐食速度が増大する期間。 腐食ひび割れや浮き、錆汁が見られる。 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、鉄筋の著しい断面減少は見られない。	ひび割れ	遮断	△	表面被覆	表面からの腐食性物質の侵入防止及び、剥落の防止
			△	ひび割れ補修	ひび割れからのH ₂ O、O ₂ などの腐食性物質の侵入防止
	錆汁	抑制	○	電気防食	鉄筋腐食進行の大幅な低減
		除去	○	電気化学的脱塩	限界値を超えた塩化物イオン量の低減
	剥離・剥落		◎	断面修復	限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去と修復
IV 劣化期 鉄筋の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間。 腐食ひび割れの進展に伴う大規模な剥離・剥落が見られる、鉄筋の著しい断面減少が見られる、変位・たわみが大きい。	ひび割れ	遮断	△	表面被覆	表面からの腐食性物質の侵入防止及び、剥落の防止
	剥離・剥落		△	ひび割れ補修	ひび割れからのH ₂ O、O ₂ などの腐食性物質の侵入防止
		抑制	○	電気防食	鉄筋腐食進行の大幅な低減
	錆汁	除去	○	電気化学的脱塩	限界値を超えた塩化物イオン量の低減
	鉄筋断面減少		◎	断面修復	限界値を超えた塩化物イオンを含むコンクリートの除去と修復
	変形・たわみ	改善	◎	接着・増厚	鋼板接着等の補強材料による強度確保
			○	打換え	劣化した部材のコンクリート打換え

※工法の◎は主工法として適用可能な工法、○は主工法について適用可能な工法、△は施設重要度や劣化状況に応じて検討する工法
 ※上記図の「遮断」、「抑制」、「除去」、「改善」は「コンクリート診断技術'14」P237(1)の補修対策の分類を参考としている。

図 5.4-20 塩害による劣化についての対策工法選定図（例）

表 5.4-6 塩害による劣化についての対策工法選定上の留意点（対策工法選定表の補足表）

劣化過程	対策工法選定に当たっての留意点
I 潜伏期	—
II 進展期	断面修復工法の選定に当たっては以下のことに留意する。 ・断面修復は、塩害に対する耐久性確保の観点で、密実なコンクリートとする。 ・事前のはつり調査や試験施工で鉄筋腐食状態を確認し、鉄筋腐食の対応レベル「錆の除去～追加鉄筋～全面的な鉄筋交換等」を検討する。 ・残置部と断面修復部を跨る鉄筋にマクロセル腐食（著しい腐食）が生じるおそれがあり、はつり除去する範囲に留意する必要がある。また、これが回避できない場合は耐防食性のある鉄筋（エポキシ樹脂塗装鉄筋や亜鉛メッキ鉄筋）の使用や電気化学的な防食工法の適用も検討する。
III 加速期	
IV 劣化期	
共通	・電気化学的な防食工法の適用に当たっては、継続的な維持管理コストや維持管理体制が確保できることを確認する。



劣化過程	本来的機能			社会的機能※2
	構造機能	水理機能	水利用機能	
状態 I (潜伏期)	—	—	—	—
状態 II (進展期)	—	—	—	—
状態 III-1 (加速期前期)	ひび割れによる「 耐久性の低下 」 ※ただし、発錆限界塩化物イオン量未満のかぶり厚の減少は状態 I (潜伏期)より発生	—※1	—※1	ひび割れ、錆汁、剥離による「 環境性の低下 (景観悪化)」
状態 III-2 (加速期後期)	鉄筋腐食や部材断面欠損による	—※1	—※1	
状態 IV (劣化期)	「 力学的安全性の低下 」	—※1	—※1	構造機能(力学的安全性)の低下による「 安全性・信頼性の低下 (水路破損・断水による湛水被害の発生、農業生産への影響等)」

※1 塩害は主に気中部や乾湿繰返しのある箇所で行進し、かつ鉄筋腐食によってひび割れが生じるのはかぶりコンクリート部分のため、ひび割れから漏水が生じて水利用機能や水理機能が低下する可能性は低い。

※2 上記のほか、社会的機能としての経済性(補修費、維持管理費等)や環境性(親水性等)は、劣化の進行に伴い低下する傾向がある。

図 5.4-21 塩害の劣化過程

5. 4. 3 損傷に応じた対策工法の選定

損傷は、地震動、流下物や重機等の衝突、土圧作用、不同沈下等の外力による変状をさし、コンクリート部材の損傷と目地の損傷に区分する。対策工法は各損傷の特性を踏まえた上で、変状の規模、施工条件等を考慮して選定する。

【解説】

損傷は、地震動、流下物や重機等の衝突、土圧作用及び不同沈下等による外力がコンクリート部材の耐荷力を上回った時点で発生する。

損傷は、短時間のうちに発生するものであるが、損傷が発生したことによって部材の一体性が低下している場合や、土圧の増加等の外力の変化によって、時間の経過とともに損傷箇所を起点として構造的な安定性が損なわれる可能性がある。

コンクリート部材の損傷の形態は、ひび割れ、欠損及び変形等である。また、外力の作用で目地部が損傷する場合もある。目地部の損傷は、目地材の損傷と止水板の損傷に区分される。

コンクリート部材の損傷も目地部の損傷も、コンクリート開水路の水利機能及び構造機能に影響を与える可能性があるため、変状の特性及び現場条件等を理解した上で対策工法を選定する。

また、すでに構造的な安定性が損なわれている場合、あるいは将来そうなることが予測される場合や公道や宅地に面していて開水路が倒壊した時に第三者被害が想定されるなどの場合は、別途構造計算を行い、補強等の対策を検討する必要がある。

5. 4. 3. 1 コンクリート部材の損傷

コンクリート部材の損傷については、変状の規模、施工条件等を踏まえて工法選定する。

【解説】

コンクリート部材の損傷としては、ひび割れ、欠損及び変形等が挙げられる。

損傷による変状(ひび割れ、欠損)に対しては、対象となるコンクリート開水路の力学的安全性(耐荷性)を低下させるものであるか否かを判定し、力学的安全性に影響する場合、対策工法として補強を選定する。

変形や段差、傾倒が生じている場合は、躯体の力学的安全性が損なわれている可能性が高い。基礎地盤の対策の要否も含めてコンクリート部材の補強等の対策工を別途検討する。

力学的安全性に影響しない場合は、変状の規模(ひび割れ幅や欠損面積、欠損深さ等)、構造物の置かれている環境、残存予定供用期間、経済性等を考慮し、対策後に必要な性能が得られるように工法選定する。

欠損等の損傷を対象とした補修は、欠損規模に応じて、下図の損傷による欠損に対する対策工法選定例に基づき工法を選定する。

ひび割れの補修は、ひび割れ幅やひび割れの状態に応じて、次頁の損傷によるひび割れに対する対策工法選定例を参照にして工法選定を行う。

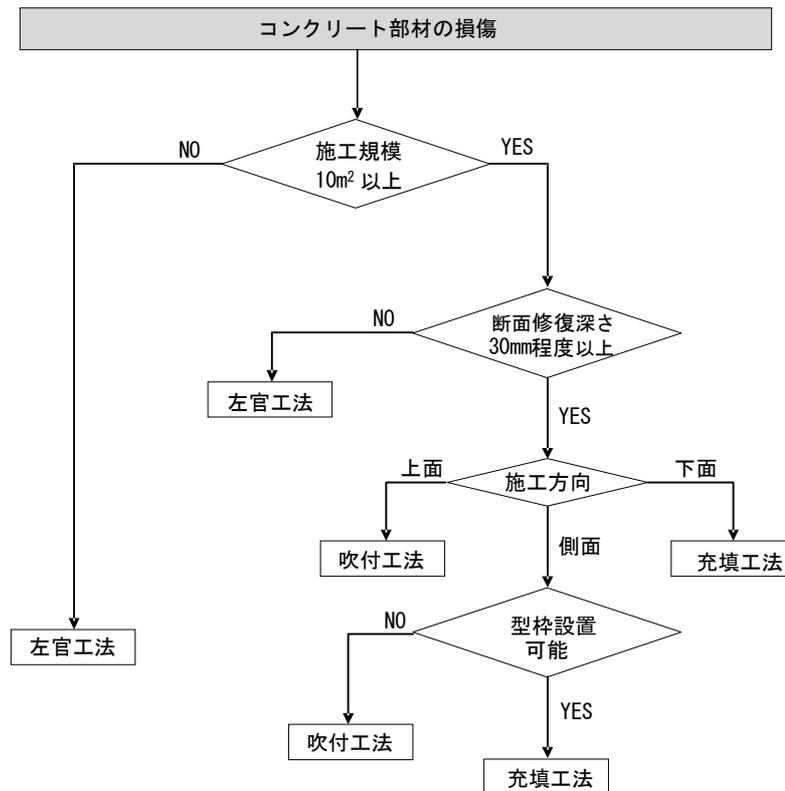
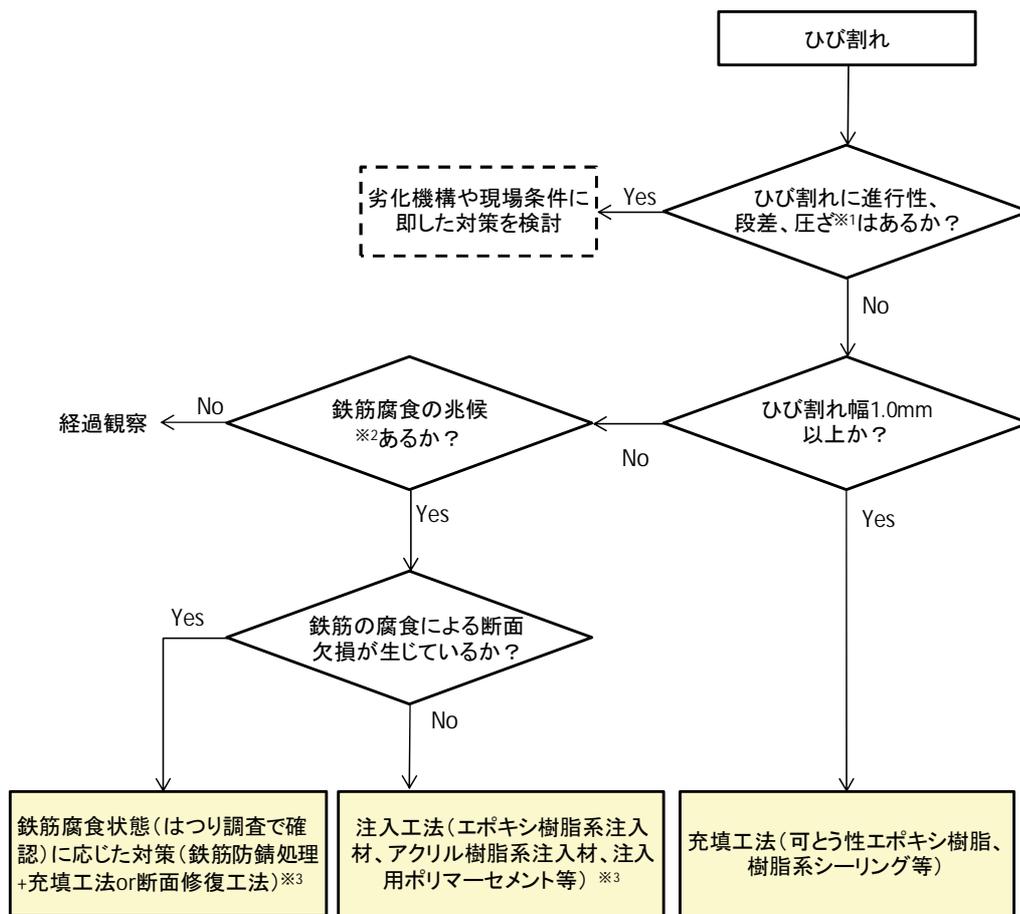


図 5.4-22 コンクリート部材の損傷に対する対策工法選定例



- ※1 圧さとは、コンクリート部材が何らかの外力を受けて、曲げ圧縮破壊し、コンクリートが剥離、あるいは、浮いている状態
- ※2 鉄筋腐食の兆候とは、「鉄筋に沿ったひび割れ、又は浮き」、「貫通ひび割れ」、「ひび割れからの錆汁」、「ひび割れからの漏水」
- ※3 漏水がある場合には、必要に応じてひび割れ部の適切な処理(止水工等)を検討

- 注) ・ ひび割れ幅は、部材表面におけるひび割れの最大幅を示す。
- ・ 通常(鉄筋腐食の兆候が無い場合)は、ひび割れ幅 1.0mm 以上で対策する。
 - ・ 鉄筋腐食の兆候がある場合は、ひび割れ幅 1.0mm 未満でも対策を検討する。
 - ・ 鉄筋腐食の兆候がなく、ひび割れ幅 1.0mm 未満なら経過観察を基本とする。
 - ・ ひび割れ幅が特に大きい場合は、可とう性を考慮した材料を検討する。
 - ・ ひび割れに進行性、段差、ひび割れ近傍に圧力が生じている場合は、劣化進行や耐荷力の低下が疑われるため、別途構造計算等を行い、補強等の対策を検討する。特に、曲げモーメントや応力集中によるひび割れが生じる可能性のある部材は重点的に検討する必要がある。
 - ・ せん断ひび割れなど耐力に影響を及ぼすひび割れについては、専門技術者等に確認すること。

図 5.4-23 ひび割れ(損傷)に対する対策工法選定フロー(例)

5. 4. 3. 2 目地部の損傷

目地部については、目地材及び止水板の損傷に対応する工法を選定する。

【解説】

目地部の損傷としては目地材の変状（変形、破断等）、止水板の破断、周縁コンクリートのひび割れや欠損が挙げられる。これらの変状は、いずれもコンクリート開水路の水密性低下（漏水）に影響するため、目地材を交換する等の対応を行う。

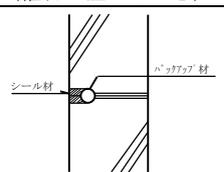
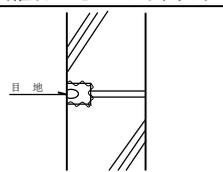
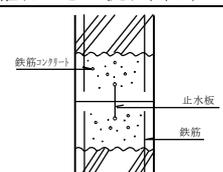
また、安易に目地からの漏水を止水すると、躯体に浮力が生じる可能性がある。このため、背面水の排水不良がある場合は、目地補修の前に排水機能を改善又は回復させる必要がある。

水路周辺の地下水位及び地盤の透水性が高い条件の水路では、ウィープホールの位置と数を確認し、水路の浮上に対する安定性を検討しておくことが望ましい。

(1) 目地材の損傷

従来の目地部の対策は、目地部周縁のコンクリートを取り壊し、次表に示すように、止水板の再設置、躯体コンクリートの部分再打設といった方法が適用されることが多かった。

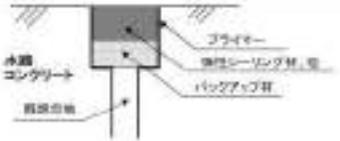
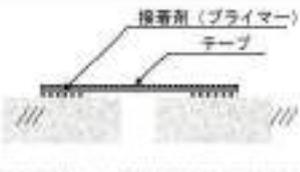
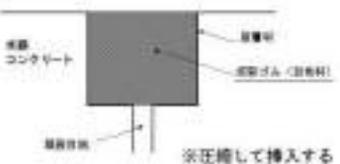
表 5. 4-7 従来の目地補修工法（例）

	軽微なズレ、開き (継目が湿っている)	やや大きなズレ、開き (継目からのしみ出し)	大きなズレ、開き、破壊 (継目からの流れ出し)
継目損傷			
	継目カット（シーリング材充填）	継目改良（カット、目地材挿入）	継目部の改修（止水板）
鉄筋腐食	表面的な腐食がみられる ①鉄筋はつり出し ②鉄筋の防錆処理	腐食が進行 ①鉄筋はつり出し ②鉄筋の防錆処理又は補強鉄筋	腐食による鉄筋断面欠損 ①変状発生部の除去 ②補強鉄筋

近年では、目地材の耐久性、止水性、伸縮性の回復を目的とし、既設目地をカットし、新規目地材を充填（挿入）、又は既設目地材の表面を被覆材で被覆する工法も適用されている。

これらを適用する場合は、各工法の止水性や耐久性を十分に照査した上で選定する。

表 5.4-8 近年の目地補修工法の特徴

工 法	適用断面例	機 要
目地充填工法		<ul style="list-style-type: none"> 他工法と比較して安価で施工性に優れ、施工実績が多い。充填材としては、伸縮性に優れる中モジュラスの土木用弾性シーリング材が多く使用されている。 水中環境に曝されるため、長期耐水性、コンクリートに起因する耐アルカリ性及び青苔水に対する止水性が要求される。
目地被覆工法 テープ貼付方式		<ul style="list-style-type: none"> テープ貼付方式は、比較的新しい工法であり、施工が容易で、品質が安定しているが、伸縮性能や付着耐久性についての課題が残っている。 施工実績としては、目地の伸縮量が比較的小さい剛水路（目地間隔の短い二次製品本館など）での適用事例がある。
シート固定方式		<ul style="list-style-type: none"> 地盤沈下により、水平方向と上下方向の動きが想定される目地や、伸縮量が極端に大きい目地での施工事例が多い。 コンクリートアンカーでシートを機械的に固定するため、比較的高価で施工に手間がかかるが、目地充填工法や他の目地被覆工法より耐久性に優れている。
目地成型ゴム 挿入工法		<ul style="list-style-type: none"> 本工法は、既設水路躯体の目地部にコンクリートカッターを入れぼつり、成型ゴムに接着材を塗布して圧縮した状態で挿し込み、止水を図る目地補修工法である。 成型ゴムの伸縮により、既設水路の躯体の温度変化による挙動に追従する。比較的新しく開発された工法であり、他工法に比べ高価である。また、製品により成型ゴムの材質や形状などが異なる。

各工法は、変形への追従性、耐久性、施工方法が異なるため、検討対象となる製品の適用条件（適用目地幅、伸縮に対する許容値等）や対策前の目地の状態を十分に確認した上で、現場に適した工法を選定する。

（２）止水板の損傷

止水板の損傷は、止水板の破断による漏水、若しくは止水板が外力により変形することで、周縁コンクリートに引張応力が働き、ひび割れや欠損・損傷として顕在化する。

止水板に起因する損傷の対策工法は、止水板の交換を基本とし、コンクリート部材の損傷（ひび割れや欠損）、内部鉄筋の防錆処理を含めた対策選定方法を参照して選定する。（５．４．３．１コンクリート部の損傷 参照）

5. 5 対策工法選定に当たっての留意事項

対策工法は、コンクリート開水路の施設個別の施工条件、使用環境条件に留意し、早期の再劣化、施工時の不具合の生じることのない工法を選定する。

【解説】

対策工法の選定に当たっては、変状発生要因や変状の程度に見合った早期に再劣化することのない工法とする。また、その現場で確実に施工でき品質不良が生じることのない工法とするとともに、施工性、維持管理性、経済性にも留意する。

5. 5. 1 多様な劣化要因に応じた対策工法選定

対策工法は、コンクリート開水路の施設個別の劣化状況を考慮し、必要とする性能を有する材料・工法を選定する。

【解説】

現場の変状形態は様々であり主要な劣化要因が特定できない等、経験を踏まえた判断が必要なことが多い。この場合、対策工法の選定段階ではなく、対策の要否や対策方針の検討段階から必要に応じて学識経験者に意見を求めることが望ましい。

以下に例示する複合劣化が生じている場合は、対策工法の選定時に特に留意が必要となる。

- ・凍害等により断面欠損して鉄筋かぶり厚が減少したところに中性化又は塩害が作用する複合劣化では、第一に鉄筋腐食による施設の性能低下の抑制を考慮し、中性化又は塩害の対策を行う。ただし、凍害等の特殊な劣化により部材のより深部まで脆弱化している可能性があるため、断面修復やひび割れ充填を行う深さに留意する必要がある。
- ・アルカリシリカ反応等によりひび割れが発生したところで中性化又は塩害が進行する複合劣化では、第一に鉄筋腐食による施設の性能低下の抑制を考慮し、中性化又は塩害の対策を行う。ただし、断面修復やひび割れ充填に当たっては、アルカリシリカ反応によるひび割れ発生深さに留意した対策実施深さを設定するとともに、低アルカリの材料や水分の発散を妨げない材料を選定する必要がある。

5. 5. 2 現場条件に応じた対策工法選定

対策工法は、コンクリート開水路の現場条件（施工時期・期間、周辺環境等）を考慮し、性能が確保できる材料・工法を選定する。

【解説】

コンクリート開水路を取り巻く主要な現場条件に対する対策工法選定上の留意点を以下に示すが、現場条件は多様であり、条件に即した対策工法の選定が困難な場合は、学識経験者に意見を求めるものとする。

（１）施工時の施設運用状態（部材の湿潤状態等）を考慮した対策工法

何れの対策工法も、原則として水路を断水状態にして施工することが望ましい。

しかし、実際には、施設運用条件により、断水ができない条件や短期間の断水下で対策を行う必要が生じる。

断水ができない条件では、水路の仮廻し運用、半川締め切りなどの特殊施工を検討する必要がある。

短期断水下では、施工範囲、施工順序などに十分に留意した計画を検討する。また、対策工法としては、母材表面が湿潤状態でも十分な付着力や強度発現が期待できる材料・工法を選定する。例えば、落水後間もない段階での注入は避けることが望ましいが、施工する場合は、水中硬化型エポキシ樹脂、アクリル樹脂系の注入材等の適用を検討する。

（２）施工時の環境条件を考慮した対策工法

外気温が高温又は低温状態で施工しなくてはならない条件下では、高温下でもひび割れや浮き等の生じない材料・工法や、低温下でも硬化不良とならない材料・工法を選定する。例えば、外気温5℃未満の条件下でひび割れ補修を行う場合は、低温でも硬化性を有するアクリル樹脂系材料の適用を検討する。

（３）施設の用排水の送配水性を考慮した対策工法

開水路が用排水を流送するための性能に、対策工法が直接関与するのは、構造物表面の粗度や構造物の断面形状の変化によるところが大きい。

表面被覆工法では、水路断面は縮小することがあるが粗度係数が低下する材料が多いため、通水量は一般に確保されることとなる。しかし、流速が増加することにより分水性能等が低下する場合もあるので、採用の際には水利用機能、水理機能への影響を確認する必要がある。

（４）維持管理に留意した対策工法

同一路線で対策の内容が類似している場合は、施工性、維持管理、経済性の観点から対策工法の種類を少なくする方が良いこともあるため、対策工法の共通化についても検討する必要がある。

維持管理性の観点からは、材料・工法の難燃性（周辺で野焼きが行われた時に容易に劣化しないこと）や滑り難さ（点検・補修時に作業員が転倒し難いこと）についても考慮した工法とする。また、

技術的に未確立であるが、可能な限り、補修材だけでなく母材の変状発生状態の機能診断の容易さ、再補修のし易さにも配慮した工法選定を行うことが望ましい。

対策工法の効果の持続性については不明なことも多く、施工後のモニタリングが重要である。特に、対策工法の早期変状が確認された場合は、要因を検討・究明し、対策工法の改善や設計・施工方法の見直しを行う。

5. 5. 3 その他

対策工法の選定に当たっては、経済性や周辺環境に配慮することが重要であり、また、長寿命化技術の発展のために新技術の活用を積極的に検討することが望ましい。

【解説】

(1) 経済性に優れた対策工法選定

対策工法は、施工単価だけでなく工法の耐用年数を考慮して、適用性が高いと判断される複数工法の中から施設のLCCが最も低減できる工法を選定する。

なお、対策後の施設の耐用年数については、材料・工法自身の耐久性に施設状態や使用環境条件等を考慮し適切に定める必要がある。しかし、対策後の施設の劣化メカニズムやその進行性については明らかになっていないため、対策後の施設の耐用年数を精度よく予測することは困難である。そのため、予定供用期間が長くLCCの算定を要する場合は、補修工法において、補修・補強マニュアル（開水路補修編）に定めている材料・工法自身の耐用期間を参考に用いることとする。

また、対策後の施設の耐用年数については、継続的な機能診断調査や施設監視の結果を踏まえて、実際の施設の劣化進行状況を見極めて、適宜見直していくことが必要であり、かつ類似の対策事例がある場合は、なるべく施設条件や工法特性に適合した対策後の施設の耐用年数を設定することが望ましい。

前記の対策工法の種類を少なくし仮設資材を流用すること等によるコスト低減効果についてもここで検討することが望ましい。

(2) 周辺環境に配慮した対策工法選定

対策工法は、流下する水や地下水等の水質への影響、宅地部でははつり作業時等の騒音および有機溶剤臭の発生や、他区間との外観不一致による美観への影響等、周辺環境に配慮して選定する必要がある。

(3) 新技術の適用について

近年、機能診断や施設の補修・補強に係る新技術が多数開発、提案されている。施設の効率的な長寿命化を図るためには、これらの技術の現場適用性や耐用年数等の効果について適切に評価を行うことが必要である。また、類似工法や調査機器の検証及び適用事例を参考にすることや、必要に応じて学識経験者等に意見を求めることが望ましい。

そして、新工法を適用する前には、適用する構造物の立地環境や施工状況に応じた試験施工を行い、施工性や対策工法の効果・信頼性を確認する必要がある。

第6章 長寿命化対策後の施設のモニタリング

6.1 基本的事項

補修・補強などを実施した施設については、対策工法に期待した効果が持続的に発現しているか、施設の再劣化の進行性等を把握することを目的に、継続的にモニタリング調査を行う。

【解説】

(1) コンクリート開水路の補修・補強工事に関する現状

コンクリート開水路の補修・補強の材料・工法は多種多様にあり、各々の長所・短所や対策工法が持続的に効果を発揮するかについては、明らかにされていない。

また、補修後比較的早期に変状が発生した事例に対して、その要因が材料、設計、施工、環境条件のどの要因に起因するものなのか十分明らかにされていない。加えて、早期変状に対する調査、評価手法も十分に確立されておらず、再劣化した補修・補強工法に対する対策方法についても開発途上の段階にある。

(2) モニタリング調査の目的

長寿命化対策後の施設のモニタリング調査の目的は以下の2つである。

- ・対策工法の効果検証、性能照査手法や工法選定などの設計手法へのフィードバック
- ・個別施設の再対策の要否検討（要否判定基準の整理）のための技術情報の収集

(3) モニタリング調査の流れ

モニタリング調査には、変状の発生状況とその進行性などを把握するために継続的に調査・計測する基本調査と、変状の要因究明や母材変状の進展への影響を確認する際に実施する詳細調査がある。

基本調査は、長寿命化対策後の5年間毎年実施し、その後は施設のモニタリング調査計画に従って定期的な実施することを標準とする。また、基本調査は、目視と打音調査により実施し、必要に応じて定量的な調査を実施する。

詳細調査は、基本調査の結果を踏まえて調査の必要性、項目を検討した上で実施する。調査内容については、対策工法や発生変状の種類、程度に応じて、モニタリング調査計画を個別に検討する。なお、詳細調査の実施の判断や具体の調査方法の検討に当たっては、必要に応じて学識経験者に意見を求めることが望ましい。

モニタリング調査の流れを図 6. 1-1 に示す。

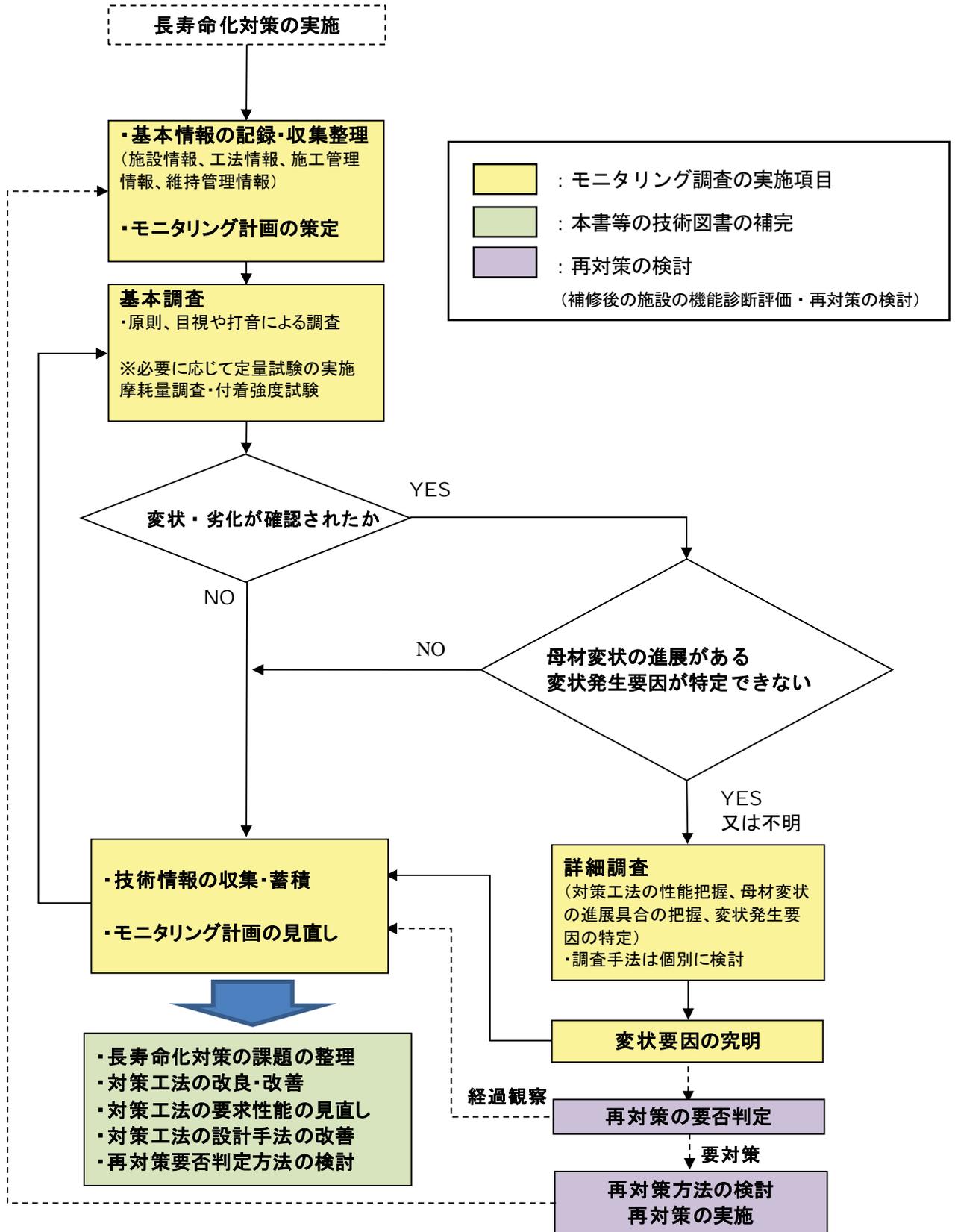


図 6. 1-1 モニタリング調査フロー図

(4) 対象範囲

補修・補強後のコンクリート開水路を対象とし、定点を設定しモニタリング調査を実施する。

定点を設ける際は、対象施設を現地踏査し、水路形式や断面形状などの施設構造形式、対策工法の要求性能や設計条件、施工業者、対策工法の種類、補修施設の変状の程度に着目し、これらの条件が類似した施設状態を代表する標準的な区間及び、変状の著しい区間を最低1スパン選定する。

なお、定点の設定理由や施設全体の状態などが分かるように、現地踏査で確認した変状の位置や特記事項、定点調査箇所などを平面縦断図や展開図に記録する。

(5) 調査時期

モニタリング調査項目の内容に適した時期を選定する。

- ・通水性、止水性：かんがい期（通水期間）
- ・上記以外の性能：非かんがい期（通水停止期間）

また、コンクリート構造物は寒暖差により膨張・収縮するため、前回実施した調査月日・調査時の気温にも留意する必要がある。

特に、ひび割れが発生している場合、温度変化による伸縮の影響は拘束条件の緩やかなひび割れ部分に集まり、ひび割れ幅が変動し、かつその変動幅は施設の使用環境条件に応じて異なる。そのため、ひび割れの進行性を確認するためには、前回測定時と同じ気象・通水条件の下で継続的に測定することが望ましい。また、当該施設の温度変化によるひび割れ幅の変動量を測定することにより、調査時の温度条件を踏まえたひび割れ幅の補正が可能となり、より効率的に調査を行うことが可能となる。

(6) 調査頻度

初期欠陥や初期値の確認、変状の進行性などを確認するため、対策後、5年間は毎年モニタリング調査（基本調査）を実施する。それ以降のモニタリング調査の時期は、原則として5年に1回の頻度とし、対策後5年目の変状の進行状況等を勘案して決定する。

(7) 着目すべき変状の状態

補修工法に生じる変状の形態や想定される発生要因は、工法の使用材料の特性によって異なることが考えられる。既往の補修事例等の情報から、対策工法毎に想定される変状形態と発生要因について表6.1-2、3のとおり整理した。モニタリング調査や変状の発生要因の検討の際の参考にする。

なお、調査やデータ蓄積の精度を高めるため、補修工法の主材料に現れる変状の種類と用語を表6.1-1のとおり定義付ける。

調査に当たっては、母材の変状と関連した変状の発生のほかに、外的要因により発生する変状も想定されることから周辺状況の変化にも注意を払う必要がある。表面被覆工法においては、断面修復材と表面被覆材の境界など、異種材料の境界部に浮きが発生しやすい。また、施工前の事前処理や施工時の温度管理などの施工管理が十分に実施されていない施設において変状が顕著に発生していることがこれまでの調査結果から確認されていることに留意して調査及び変状発生要因の検討を行う。

表 6.1-1 補修工法に発生する主な変状

補修工法発生変状	変状の状態	変状が発生しやすいと想定される補修材料	補修工法の性能に及ぼす変状の影響
ひび割れ	材料表面に生じた割れ目のことで、材料の亀裂までには達していない状態。	無機系塗布材、パネル・シート材、無機・有機系目地やひび割れ補修材、ゴム・テープ材	割れ目より劣化因子が侵入し、付着性や耐久性が低下する
亀裂	材料に裂け目がある状態、若しくは貫通ひび割れのこと。	無機・有機系塗布材、パネル・シート材、テープ材	割れ目より劣化因子が侵入し、付着性や耐久性が低下する 剥離・剥落へ繋がる 母材への劣化因子の侵入
摩耗	流水中の砂や礫などによる摩擦や材料成分の溶脱により、材料表面が削られたり、消失すること。	無機系塗布材、パネル・シート材	中性化抑止性や通水性、耐久性の低下
浮き	材料と母材との付着性が損なわれている状態。	無機・有機系塗布材、パネル・シート材、無機・有機系目地やひび割れ補修材、ゴム・テープ材	付着性の低下 剥離・剥落へ繋がる
膨れ	背面からの外力等により、材料が盛り上がり膨らんだ状態。	有機系塗布材、テープ材	付着性や耐久性の低下 剥離・剥落へ繋がる
剥離・剥落	浮き・膨れの状態にあった材料が何らかの要因で母材から剥がれる状態が剥離。 材料が母材から完全に剥がれた状態が剥落。	無機・有機系塗布材、パネル・シート材、テープ材	母材への劣化因子の侵入
欠損	衝撃等の外力や劣化などにより、材料の一部が欠けて無くなった状態。	無機系塗布材、パネル・シート材、無機・有機系目地やひび割れ補修材、ゴム材	欠損箇所より劣化因子が侵入し、耐久性が低下 剥離・剥落へ繋がる 母材への劣化因子の侵入
錆・腐食	空気や湿気などの作用で鉄筋表面に生じる酸化物や炭酸塩などの皮膜。	鉄筋を使用している補修工法	耐久性や耐荷力の低下
皺（しわ）	材料の表面にできる細かい節目。	シート材	耐久性や通水性の低下
硬化	紫外線の劣化等に伴い材料が硬化すること。	ゴム材、有機系材料	付着性や耐久性の低下 伸縮追従性や止水性の低下

※これまで確認された発生変状を踏まえて整理したものであり、これ以外の変状も起こり得る。

モニタリング調査の結果を踏まえて必要に応じて内容を修正、発生変状の追加を行う。

表 6.1-2 表面被覆工法・断面修復工法に想定される変状形態と発生要因

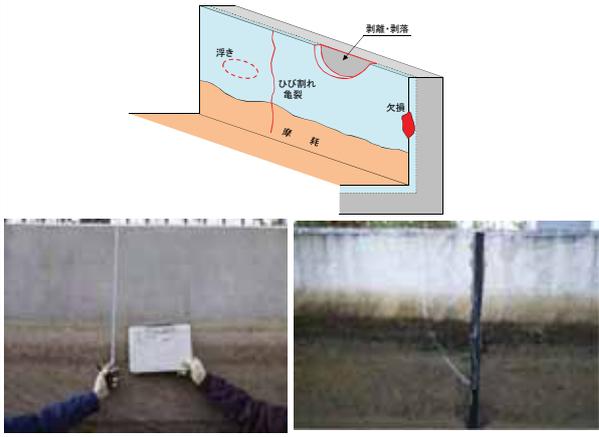
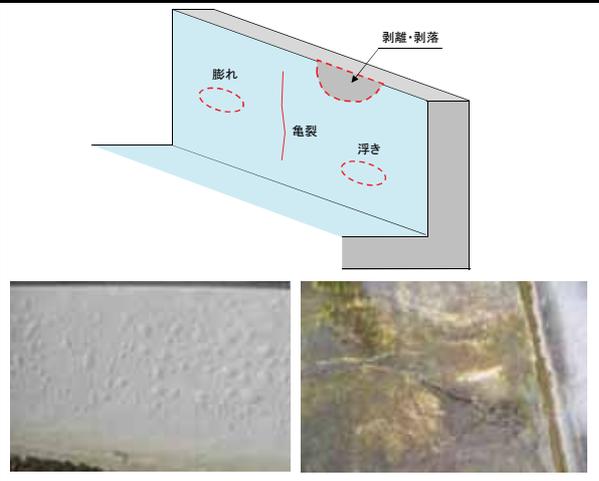
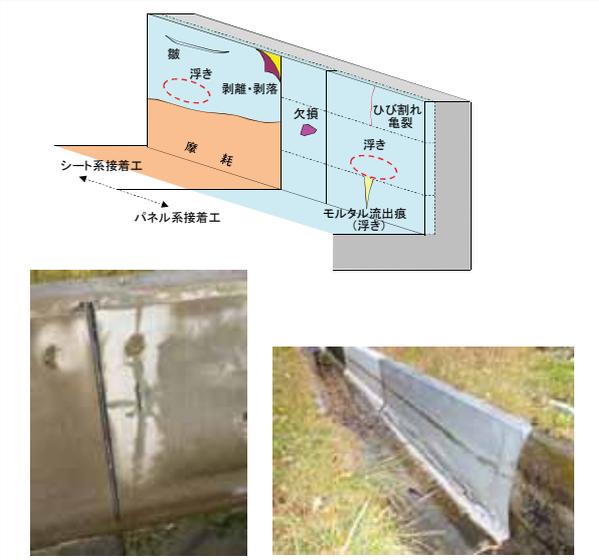
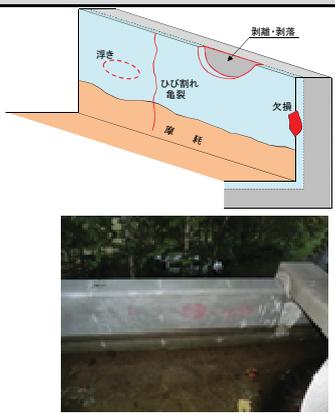
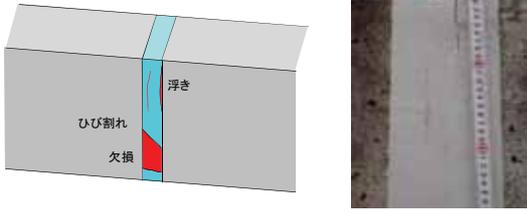
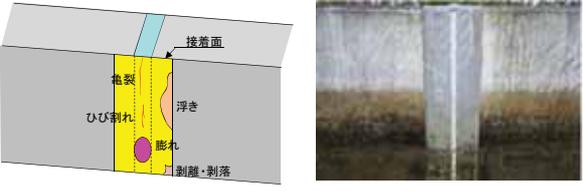
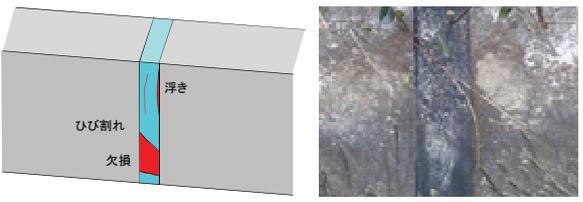
工法		主な変状	想定される要因	変状発生イメージ図・変状写真
表面被覆工法・断面修復工法	無機系被覆工法	ひび割れ	母材コンクリートの挙動、凍害、乾燥収縮	 <p>【左:乾燥収縮ひび割れ、右:浮き】</p>
		浮き	接着不良、母材と補修材料の熱膨張率の差、乾燥収縮	
		摩耗	流水・流砂、表面からのCa成分溶脱	
		劣化因子の侵入	表面被覆効果の低下	
	有機系被覆工法	膨れ	接着不良、施工時の空気の巻き込み、地下水浸透、湿潤面の施工による水分の気化	 <p>【左:膨れ、右:亀裂と欠損】</p>
		ひび割れ	紫外線等による劣化、母材コンクリートの挙動	
		変色	紫外線等による劣化、苔や微生物の付着	
		劣化因子の侵入	表面被覆効果の低下	
	パネル工法	浮き	パネルのそり・たわみ、裏込め材の未充填・収縮・隙間からの流出	 <p>【左:亀裂(無機系パネル)、右:全体的な浮き・剥離(シート)】</p>
		ひび割れ	母材コンクリートの挙動	
		劣化因子の侵入	表面被覆効果の低下	
	シート工法	浮き	接着不良	
剥離・剥落		浮きの進行、材料の劣化の進行		
皺		施工不良等		

表 6.1-3 表面含浸工法・目地補修工法に想定される変状形態と発生要因

工法	主な変状	想定される要因	変状発生イメージ図・変状写真
表面含浸工法	水分の浸透抑制効果の減少	表面からの成分溶脱、化学的な分解	 <p>【浮き】</p>
	劣化因子の侵入	表面からの成分溶脱、化学的な分解	
	摩耗	流水・流砂、表面からの成分溶脱	
目地補修工法	充填工法 充填材の離脱、母材との付着切れ（剥離）、ひび割れ	充填材の劣化による離脱、背面からの水圧による母材コンクリートとの付着切れ、目地の伸縮によるひび割れなど	 <p>【亀裂】</p>
	被覆工法 シート・テープの浮き、剥離、ひび割れ	目地の伸縮や接着材劣化、シート強度不足によるシート・テープ材の浮きや剥離、ひび割れ	 <p>【浮き】</p>
	成形ゴム挿入工法 成形ゴムの離脱、母材との付着切れ（剥離）	ゴムの経年劣化や背面からの水圧、目地の伸縮等による成形ゴムの離脱、母材コンクリートとの付着切れ	 <p>【ひび割れ】</p>

(8) モニタリング調査の留意事項

当該工法の開発業者に変状の発生要因や工法の性能状態などについて見解を聴取することは、変状の発生要因の特定だけでなく、対策工法の改善にもつながり有効である。必要に応じて、モニタリング調査に同行してもらうことも検討する。

調査に当たっては、原則、断水・排水して水路内の残水を極力排除して、天端部・底版部・側壁部・外面側壁部（補修している場合）などの対策した部位を全て対象に行う。また、調査箇所はブラシや高圧洗浄機などにより苔や泥を除去し、表面を洗浄にした上で調査する。

6. 2 基本情報の記録・収集・整理

長寿命化対策の実施段階においては、対策前の施設状態に関する情報、対策工法の要求性能の設定や選定に関する設計情報、対策工法の特徴や性能などの工法情報、施工時の状況や施工管理結果の施工情報を記録、保存することを基本とする。これらの情報がない場合は、担当者や施設管理者へのヒアリングを行い収集する。

また、対策実施後の維持管理情報についても、同様に収集・整理する。

【解説】

長寿命化対策の実施段階においては、対策前の施設情報、対策工法の選定や工法性能に関する工法情報、施工時の状況や施工管理結果などの施工情報を記録し、整理する。

また、モニタリング調査実施前に施設管理者に現況施設の通水条件や施設変状の有無、維持管理上の課題について聞き取り調査を行い、整理する。

これらの基本情報をモニタリング調査の計画立案や対策後の施設の発生変状の要因評価の際に活用する。

基本情報が記録、保存されていない場合は、関係機関（施設管理者等）や対策工事時の担当者に関き取り調査（ヒアリング）を実施し、情報を収集する。

収集すべき基本情報とその収集・整理目的について表 6. 2-2 に示す。

【参考】 対策工法の要求性能と性能照査（品質規格値）の規定状況

補修・補強マニュアル（開水路補修編）において整理されている対策工法の要求性能と性能照査（品質規格値）の規定状況を表 6. 2-1 に示す。各工法の所要性能を踏まえた上でモニタリング調査計画を立案するとともに、その性能低下状況や対策の要否を評価する。

表 6. 2-1 対策工法別の基本的性能と個別的性能

	補修工法											
	表面被覆工法							表面含浸工法	ひび割れ補修工法		断面修復工法	目地補修工法
	無機系	有機系	パネル		シート				無機系	有機系		
			接着方式	アンカー固定方式	ライニング工法	無機系シート工法	FRP工法					
要求性能・品質規格値の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
要求性能項目												
構造機能	中性化抑制性	○	—	—	—	—	—	△	—	—	□	—
	耐候性	—	○	○	○	—	○	△	—	—	—	○
	付着性	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○
	耐摩耗性	○	○	○	○	○	○	△	—	—	□	—
	一体化性	○	—	—	—	—	—	△	—	—	○	—
	寸法安定性	○	—	—	—	—	—	△	—	—	○	—
	耐凍害性	□	—	—	—	—	□	△	—	—	□	—
機水能理	ひび割れ追従性	—	○	—	—	—	○	△	—	○	—	—
	通水性	□	□	□	□	□	□	△	—	—	—	—
	止水性	—	—	—	—	—	—	△	—	—	—	○

○: 基本的性能: 標準的な工事に共通して求められる性能

□: 個別的な性能: 施工条件や環境条件に応じて個々の工事の個別的に求められる性能

—: 十分な性能が確保できているため性能照査が省略できるもの or 工法に期待できない性能 or 必要な性能ではあるが性能照査手法が未確立のもの

表 6.2-2 モニタリング調査に係る基本情報の収集・整理事項

情報項目		整理目的
施設情報	基本情報	都道府県名、水路形式、施設名、施設の経過年数など
	モニタリング対象区間の基本情報	供用開始年、構造形式、設計水深、目地間隔、計画最大通水量、灌漑期・非灌漑期の平均水深など
		地域劣化特性、地下水位などの水分供給状況、日当たり、周辺外部環境の状況、流下物や水質の状況
	モニタリング対象区間の既設構造物の劣化状況	主な劣化変状、主な劣化要因
ひび割れや剥離などの状況、鉄筋露出や錆汁の有無		
コンクリート圧縮強度、中性化深さ、鉄筋かぶり深さ、目地の変状		
工法情報	基本情報	対策工法名、工法に求める性能、工法選定理由（補修目的）
		対策工法の特徴や使用材料、品質試験結果（品質管理項目、試験方法、結果）
施工情報	基本情報	施工期間（工期）、施工延長、施工期間中の主な天候
	下地処理	洗浄方法、母材の付着強度
	仮設	仮囲いや水替えの有無
	他の補修工法の併用	止水・導水処理工、ひび割れ補修工、断面修復工の有無
	各工程の実施状況	使用材料、施工時の環境条件、施工者、施工量（被覆厚）、養生方法など
	施工管理	被覆材の付着強度、被覆厚さ、外観など
維持管理情報	維持管理情報	施設を管理している際に発見した施設、及びその周辺の異常・変状など

6. 3 基本調査

基本調査は、長寿命化対策後に、対策工法の効果の発現性や持続性、施設の再劣化の進行性を把握することを目的に、定期的を実施する調査であり、目視・打音などの簡易な調査を基本として実施する。

【解説】

基本調査は点検技術者が特殊な装置や技能によらず、変状の進行を監視できる範囲で実施する。その際、安価で多大な労力を必要とせず、補修工法の変状や性能低下の早期検出を可能とすることが重要である。

基本調査における調査手法の例を以降のとおり示す。

(1) 目視

変状は、外的要因により発生することもあることから周辺状況の変化にも注意を払う。また、発生変状の位置や範囲がわかるようにスケッチ（三面展開図）を作成し、ひび割れ位置やその他の表面変状は、調査物表面に直接チョークで書き込み、写真により記録する。

変状箇所については、原則可能な限り同じ箇所の変状を全て拡大写真で撮影する。

また、側壁外面が調査できる場合は、これについても調査、記録する。

変状の発生要因や進行性を検討する際は、変状の発生位置と形状、母材の変状の発生状況、対策時の施工管理結果、施設周辺の環境条件などを十分踏まえた上で評価する。また、変状が発生している箇所としていない箇所での条件の違い等にも着目することが重要である。（図 6.3-1 を参照）



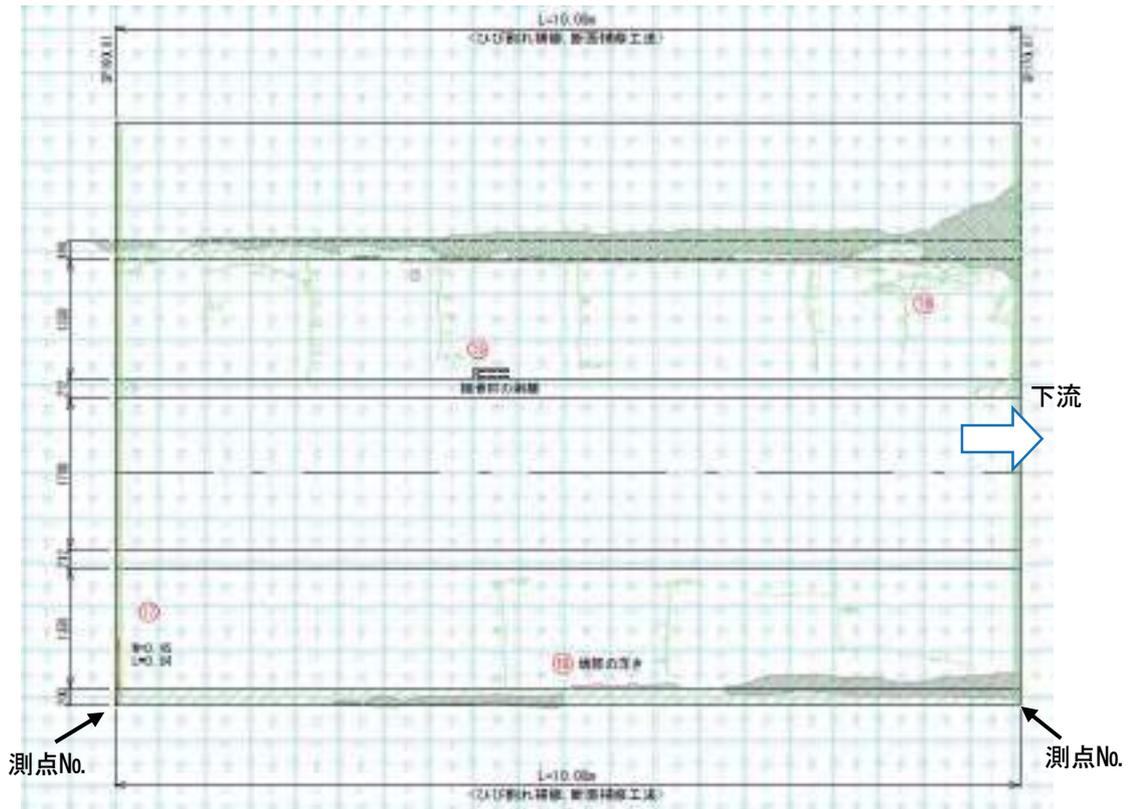
母材に変状があった地点で変状が発生しやすい。母材の変状を確認しておく。



断面修復やひび割れ補修を行った上に表面被覆をした箇所に浮き等の変状が発生しやすい。断面修復等の施工箇所を確認しておく。

フェンスの支柱が既設母材に埋設されており、既設母材に拘束ひび割れが発生。表面被覆工法にも同様に拘束ひび割れが発生。変状発生要因となりそうな施設の周辺状況を確認しておく。

図 6.3-1 目視調査における留意点



凡例			
	写真番号		
新規変状 (H24年度 調査)	①	ひび割れ	剥離・剥落
	浮き	エフロレッセンス	鉄筋露出・錆汁
	粗骨材	細骨材	塗装垂れ
母材変状 (H22年度 調査)	漏水(痕跡)	滞水	その他
	ひび割れ	浮き・剥離・剥落	鉄筋露出
	エフロレッセンス	その他	
補修工 (H23年度 施工)	ひび割れ補修	エフロレッセンスを伴うひび割れ補修	
	断面修復工	目地補修	

※凡例は必要に応じて追加する。

【ひび割れ記載例】
 W(幅) = 〇. 〇〇mm
 L(延長) = 〇. 〇cm



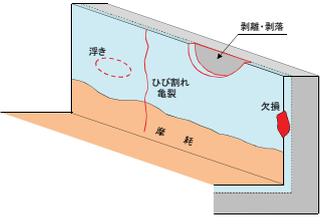
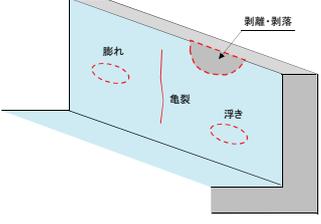
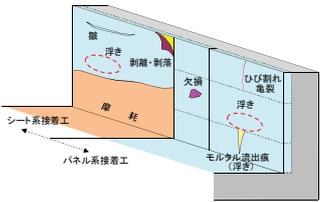
図 6. 3-2 目視・打音調査展開図記入例

(2) 打音調査

施工を行った範囲（定点1スパン10m程度）について、表面被覆工を小ハンマー（200g程度）や打診棒を用いて、打音（反射音）を確認する。打撃間隔は、10～20cmとし、異音があった箇所は細かく打撃して範囲を確定し、チョーク等で範囲を示して写真やスケッチで記録する。

全体目視・打音調査では、下表に示す変状に留意して、写真やスケッチに記録する。（表6.3-1、図6.3-3参照）

表 6.3-1 表面被覆・表面含浸・断面修復工法調査時において着目する変状・留意点

対策工法	着目する変状・留意点	
無機系被覆材 （断面修復工法含む）	<ul style="list-style-type: none"> 目地周辺、ハンチ部におけるひび割れや剥離を確認する。 躯体ひび割れに連動したひび割れや剥離を確認する。 炭酸カルシウム等の被覆材成分の溶脱、析出を確認する。 流水部、水位変動部の摩耗を確認する。 水抜き孔周辺の変状を確認する。 <p>※無機系被覆材の浮きは目視では確認しにくいいため、打音調査により、「既往躯体コンクリートと被覆材」若しくは「断面修復等の重ね塗り境界」で剥離していないか確認することが重要である。</p>	
有機系被覆材	<ul style="list-style-type: none"> 目地周辺、ハンチ部におけるひび割れや剥離を確認する。 躯体ひび割れに連動したひび割れや剥離を確認する。 被覆材表面の微細なひび割れを確認する。 水抜き孔周辺の変状を確認する。 <p>※有機系被覆材の変状は表面の微少なものから生じることが多いため、近接して観察することが重要である。</p>	
パネル・シート材	<ul style="list-style-type: none"> 接合部の隙間や剥がれを確認する。 施工時の切り傷を確認する。 シート、パネルの剥離、剥落を確認する。 <p>※パネルやシートの浮きは目視では確認しにくいいため、打音調査により、確認することが重要である。</p>	



クラックスケール



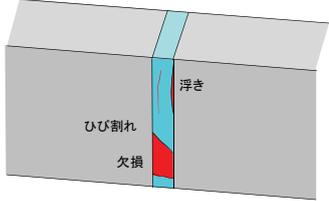
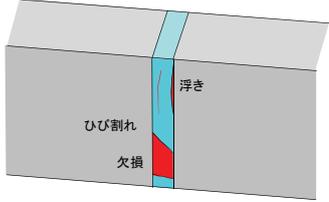
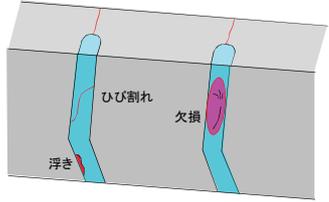
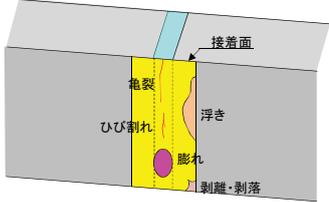
テストハンマー・打診棒



コンバックス

図 6.3-3 使用する主な調査器具

表 6.3-2 目地補修工法・ひび割れ補修工法の調査時において着目する変状・留意点

対策工法	着目する変状・留意点	
<p>成型ゴム工法</p>	<ul style="list-style-type: none"> 成型ゴムの離脱や目地切れについて確認する。 ハンチ部等、成型ゴムの端部からの剥離に特に留意する。 	
<p>充填工法（シーリング・パテ） ※有機系ひび割れ補修材含む</p>	<ul style="list-style-type: none"> 紫外線等の経年的な材料劣化に特に留意する。 表面の細かいひび割れや材料の浮き、変形収縮剥離の有無を確認する。 	
<p>充填工法（止水セメント・モルタル） ※無機系ひび割れ補修材含む</p>	<ul style="list-style-type: none"> 目地の伸縮に対する追従性が低い材料なので、特に目地切れの有無を確認する。 ひび割れの拡大や施工後の乾燥収縮の影響によるひび割れや材料の浮きの有無を確認する。 	
<p>被覆工法（テープ・シート貼付）</p>	<ul style="list-style-type: none"> テープやシートの端部からの剥離を特に確認する。 打音により浮きや膨れの有無についても丁寧に確認する。 	

【参考】 調査時の写真撮影・記録例

ひび割れ等の表面変状は、直接チョークで範囲と測定値を書き込み、写真撮影する。
変状毎にチョークの色を変えると分かり易い。

(例)

- ・ひび割れ：白色チョークで発生位置と幅（支配的なひび割れ幅）と延長を書き込む
- ・浮き：黄色チョークで発生範囲と最大幅と最大長さを書き込む
- ・摩耗、剥離剥落：ピンク色チョークで発生範囲と最大幅と最大長さを書き込む（摩耗 or 剥離剥落が分かるよう書き込む）
- ・漏水：水色チョークで発生位置を書き込む

写真撮影は、なるべくスケールをあてた状態で撮影し、経年的な変状の進行具合を確認できるようにする。

写真は、写真N0、調査月日、測点、測定箇所（左・右岸壁 or 底版）、水位条件（気中部・水位変動部・常時水中部）、変状と測定結果を記録し整理する。

変状発生箇所は、経年的に進行具合を調査できるよう、シールの貼付（変状の始点終点に貼付等）や木杭の設置などの、工法に影響を与えない方法により特定、管理するものとする。（図 6.3-4 を参照）

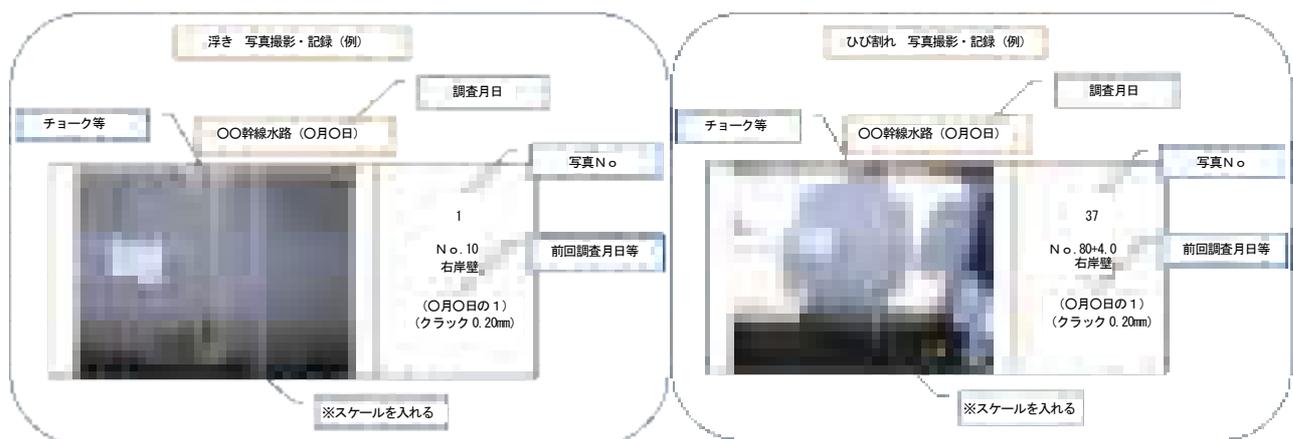


図 6.3-4 写真撮影・記録の例

(3) 定量的調査

基本調査においては、対策工法の経年的な変化を定量的に評価する目的で、以下の計測調査を実施する。

調査したデータについては、対策工法の再劣化の過程や、その要因を究明するために用いるものとする。

1) 摩耗量調査

摩耗量調査は、摩耗による減厚や凹凸の発生の可能性がある「無機系表面被覆工」を対象として実施することを基本とする。

有機系表面被覆工については、摩耗による劣化が少ないため、摩耗量調査は必要に応じて実施するものとする。なお、有機系の表面被覆工で摩耗量調査を実施する場合は、削孔跡が劣化要因にならないように十分に留意する。

摩耗量調査については、コンクリートピンの突出高さの計測や超音波膜厚計による膜厚測定などが実施されているが、精度や適用性に課題があるため、摩耗量調査にはコンクリートピンを2本設置し、2本のピン間の壁面表面の高さを計測する方法で実施する。

コンクリートピンは、ステンレス製のホールインアンカーを利用し、アンカーピンの突出高さが5～10mm程度になるように、電動ドリルで先に穴を空け（ドリルに目印をつけ、所定の深さまで削孔する）、ホールインアンカーを打ち込む。2つの基準ピンの高さはできるだけ同一にし、コンクリートピンの固定は経年的なブレや変化がないように確実に実施する。

なお、調査箇所数は、底版及び側壁で最低各1箇所を基本とし、施設使用環境条件等が異なる場合は、調査箇所数を増やすものとする。開水路壁面への基準点の設置例を図6.3-5に示す。

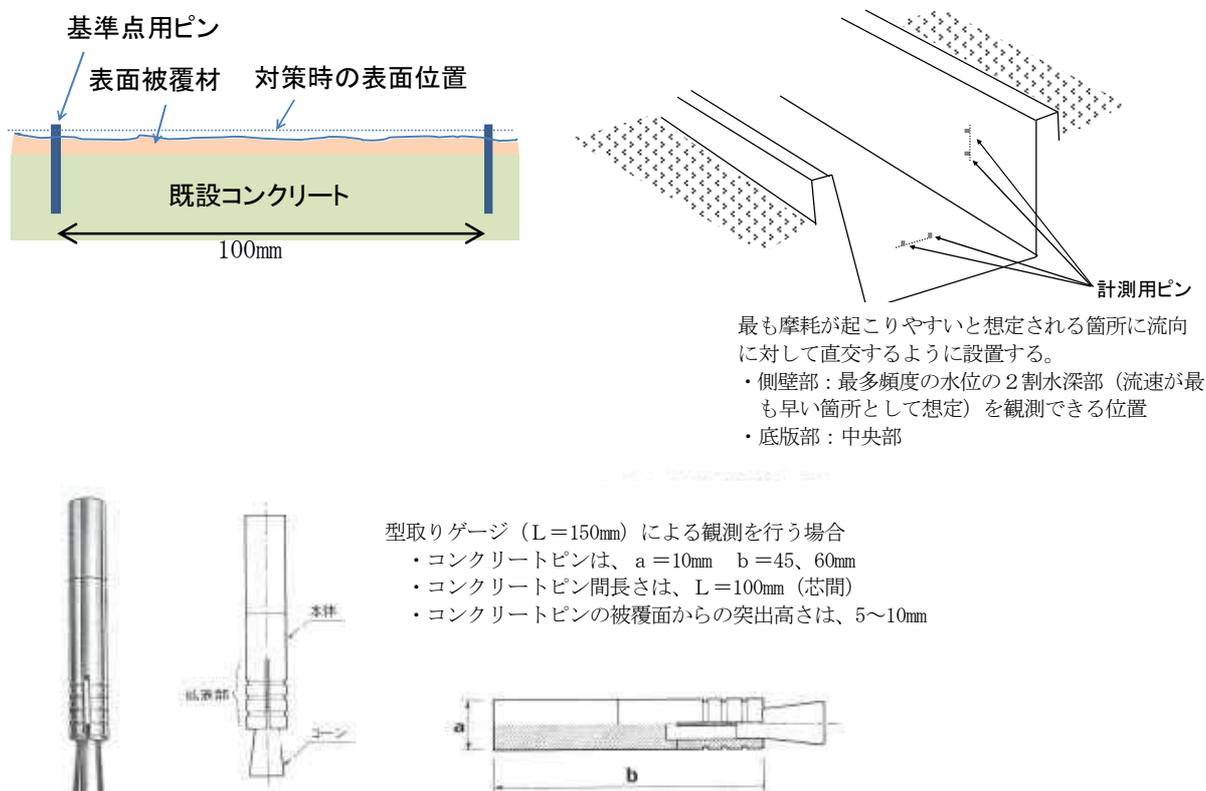


図 6.3-5 開水路壁面への基準点の設置例

アンカーピンを設置した後の摩耗計測方法には2つの方法がある。

①型取りゲージによる摩耗測定

型取りゲージによる摩耗測定は、約1mm間隔（189点計測、測線延長150mm）表面の凹凸を型取ることができる治具を用いて測定する手法であり、型取り後に方眼紙等を当てて、表面の高さの変化を確認する。

摩耗量計測においては、コンクリートピンの高さを基準線として、表面までの距離の平均値を「平均高さ」として経年的に計測、評価する。

型取りゲージを用いた測定方法の概要は図6.3-6に示すとおり、あらかじめ被覆面に埋設した2箇所アンカー頂部の基線と表面被覆工までの距離を測定する。型取りゲージで測定した表面形状をデジタルカメラで撮影し、その画像を市販の画像解析ソフトで処理することにより平均摩耗深さを求める。

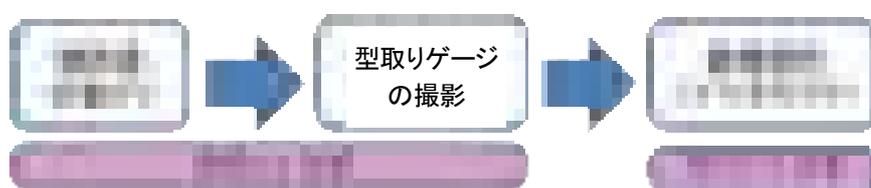


図6.3-6 型取りゲージを用いた表面被覆工の摩耗深さ測定概要

現場作業では、図3.3-7に示すように型取りゲージを2箇所のアンカー間に押し込み、被覆工の表面形状を型取りする。次に、その型取りゲージの下の方眼紙を敷いてデジカメ画像を撮影する。



図6.3-7 型取りゲージの型取り及び撮影

その後、画像データの基線と被覆工表面の面積を市販のソフトを用いて画像解析から求め、基線から表面被覆工表面までの平均距離を計算する。初期計測時からある測定時までの期間に発生した表面被覆工の平均摩耗深さは、ある期間の平均摩耗深さ＝（測定時の表面被覆工までの平均距離－初期計測時の表面被覆工までの平均距離）によって求めることができる。（図6.3-8を参照）

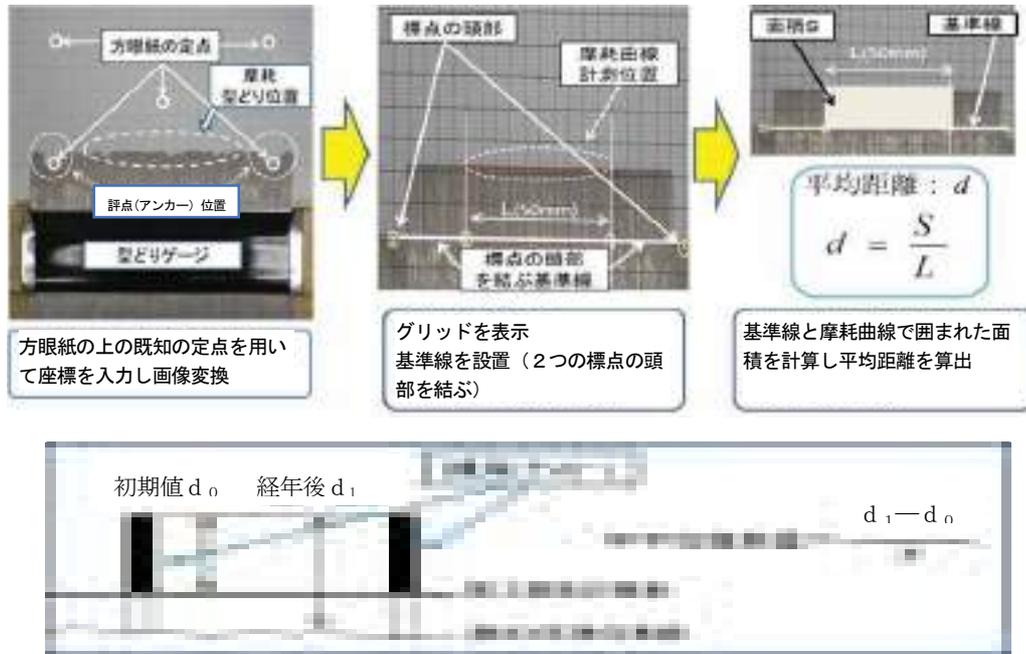


図 6.3-8 画像処理及び摩耗量算出方法

摩耗量計測において精度良く表面の凹凸を計測することにより、粗度係数を評価することも可能である。粗度係数は、図 6.3-9 のとおり、表面の凹凸の程度を示す「算術平均粗さ Ra」若しくは表面の凹凸の高さを示す「最大高さ」を指標として算定する。そして、ここで確認した粗度係数は、水理計算により対策後の施設の通水性を検討する際に活用する。

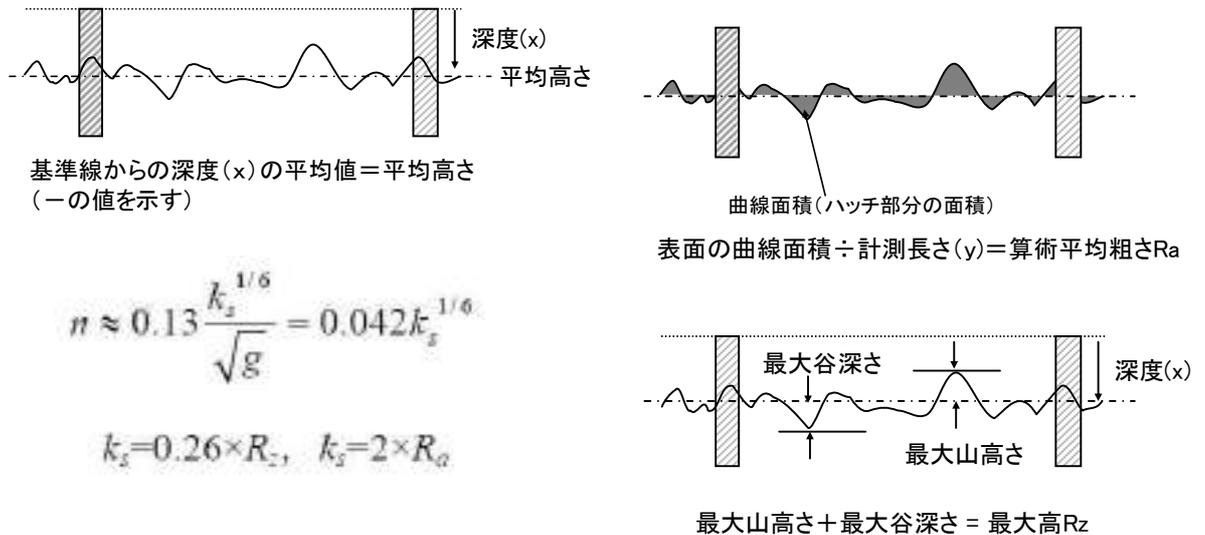


図 6.3-9 表面凹凸から粗度係数を算出する方法

② レーザ距離計による摩耗測定

図6.3-10に示すような「レーザ距離計」を用いてアンカーピン間の摩耗を測定する手法である。計測精度は±0.1mmと高精度であるため、摩耗予測式や基準値を作成することを目的とする、重要な定点観測地点の計測に有効である。計測自体は1点3分程度と短時間で行うことができ、測定値もPCで自動計算される。ただし、水中での計測はできないため、底版等に水がある場合は、適用が難しい。

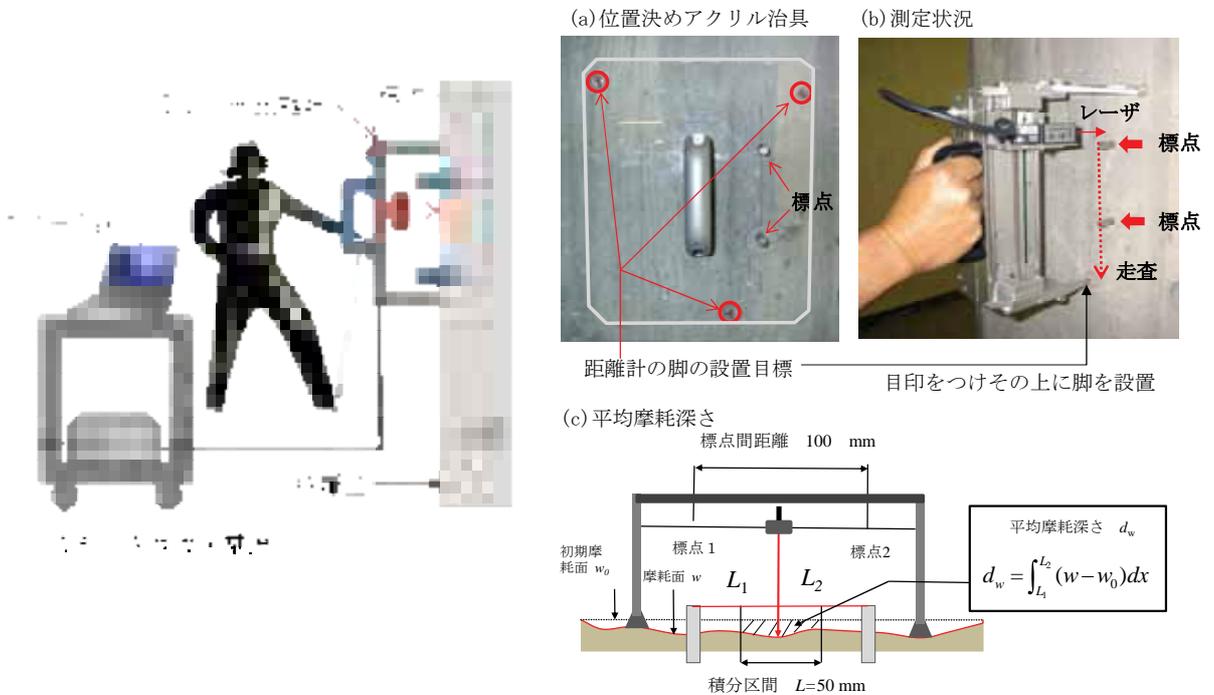


図 6.3-10 レーザ距離計による摩耗計測

2) 付着強度試験（建研式引張試験）

付着性は、表面被覆工法の無機系又は有機系の補修材料と旧コンクリート躯体との一体化性能を確保する重要な性能であり、試験方法としては建研式引張試験が一般的である。付着強度試験は被覆工の一部を破壊する調査であるため、計測頻度は5年に1度を目安として実施する。施工時の付着強度と、5年後の付着強度を比較することにより、時間経過に伴い付着強度が増加するか判定することができる。このため、5年後の付着強度試験はできるだけ施工時の付着試験位置の近くで行うことが望ましい。

表面被覆材の付着強度試験法は、土木学会規準（JSCE-K531）で規定されている。引張用鋼製ジグ（一般に40 × 40mm）を補修材料表面にエポキシ樹脂等で接着する。引張用鋼製ジグの周囲にモルタル基板に達するようにカッター等で切り込みを入れ、引張用鋼製ジグを補修材料に対して鉛直方向に引っ張り、荷重を計測する。（図6.3-11を参照）

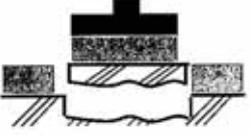
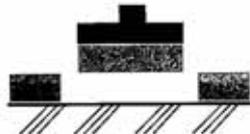
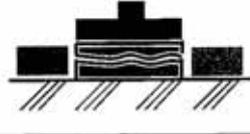
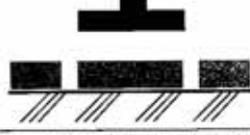
現場での施工管理として付着強度が示されている場合には、現場の補修材料に直接付着子を接着し、建研式引張試験装置により付着強度を測定する。なお、調査箇所数は、底版・側壁で最低各1箇所（1箇所に付き測点は3点以上）を基本とし、劣化状態が異なる場合は、調査箇所数を増やすものとする。

付着強度試験では、破断の状況が表6.3-3に示す例のように、多様であり、破断箇所と破断面の状況の観察が重要である。特に、対策前のコンクリート開水路自体の付着強度が低下している可能性もあることから、これに留意する。

表 6.3-3 付着強度試験における評価方法 (例)



図 6.3-11 建研式引張試験装置

破断状況	設定強度との比較	評 価
既存コンクリートが破壊 	設定強度未満 [※]	既存コンクリートの表層部の引張強度が十分でないために生じたものであり、断面修復材の接着強度が正確に得られてはいないと考えられる。
	設定強度以上	既存コンクリートが引張強度を越えたために既存コンクリートが破断したものであるが、既存コンクリートが健全であれば、得られた値以上の接着強度を有する。
既存コンクリートと断面修復材の界面での破壊 	設定強度未満 [※]	既存コンクリート表面の処理方法に問題があったと考えられ、断面修復材の接着強度が正確に得られていないと考えられる。原因として左官作業時のコテ圧不足、吹付け作業時の吹付け圧不足が考えられる。
	設定強度以上	既存コンクリートと断面修復材界面では所定の接着強度が得られたと考えられる。
断面修復材の破壊 	設定強度未満 [※]	配合、練混ぜ等、種々の原因により断面修復材の強度が十分でないと考えられる。環境条件、例えば、低温環境下での強度発現遅延の原因も考えられる。
	設定強度以上	断面修復材の破壊であり所定の接着強度が得られたと考えられる。
鋼製ジグの剥離 	設定強度未満 [※]	断面修復材の表面状態に影響される場合と試験のためのジグを設置する際に使用した接着剤の硬化不良やアタッチメントの脱脂の不十分が考えられる。
	設定強度以上	得られた値以上の強度が得られる。

※ 設定強度未満の結果が得られた場合、局所的な欠陥や偏心等が原因であることが多いので再試験を実施するのが一般的である。

出典: すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識 第2版(2011年8月) セメント協会 P.49

3) 簡易な中性化試験

表面被覆工法や断面修復工法の中性化の進行を測定するための簡易な調査として以下の2つの方法が考えられる。なお、本手法は、被覆材に生じる中性化深さがmm単位と小さいことを受けて、コンクリート仕様として開発された従来のドリル法やJIS 1152のはつりによる測定方法を改良したものである。

① 小口径コア測定法

現場で被覆工の小口径コア (φ25mm) を採取し、表面被覆部分を切断・割裂し、割裂面にフェノールフタレインを散布し、紫色に変色しない領域 (中性化部分) の面積を画像解析から求め中性化深さを算出する。コア採取のため手間とコストはかかるが、適用条件が広く (コアが採取できれば、側壁、底版、気中、水中どの条件でも測定が可能)、比較的精度の高い方法と言える。小口径コア法の概要を図 6.3-12 に示す。

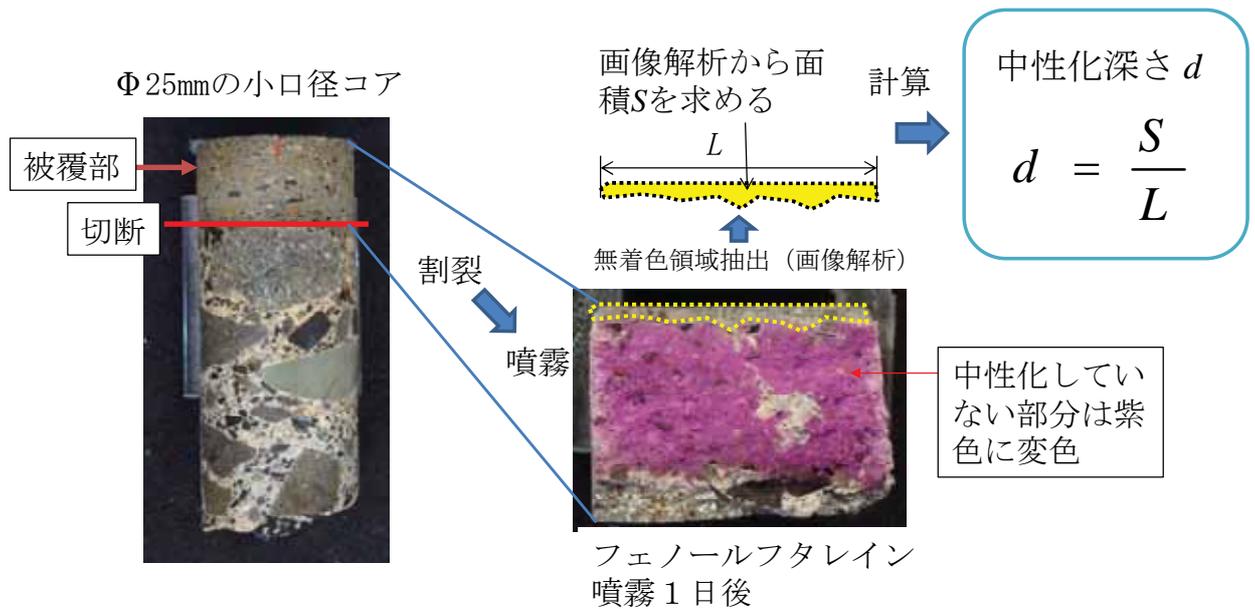


図 6.3-12 小口径コア法の概要

② コアビット法

コア径 25mm 用のコア削孔用ビットを装着させた電動ハンマを用いて、被覆工表面に三日月型の溝を掘る。溝を掘る際に、コアビットの刃先を斜めに被覆工表面に当て、溝の深さがだんだんと深くなるように溝を刻んでいく。溝の端部は浅く、だんだん溝が深くなるような三日月型の溝を作成できる。この溝にフェノールフタレインを散布すると、溝には紫色に発色する部分と発色しない部分の境界ができる。その境界を鉛筆でマーキングし、その地点の溝深さをデプスゲージで測定し、その値を中性化深さとする。この方法は、微破壊であり手軽にできるため、現場で簡易に被覆工の中性化深さを求める方法としては優れているが、被覆工が高い水分状態にある側壁水中部や底版では適用ができない。被覆工が乾燥している気中部での測定に向いている。無機系被覆工の中性化深さの実測事例（側壁気中部）を図 6.3-14 に示す。経年的に中性化深さを測定することにより、被覆工の中性化速度係数を求めることができ、将来的な中性化の進行を予測することができる。

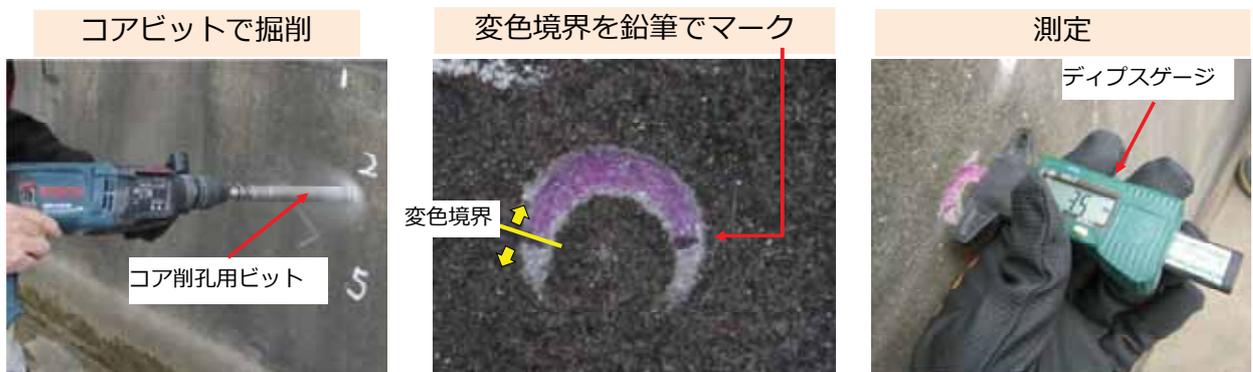


図 6.3-13 小口径コア法の概要

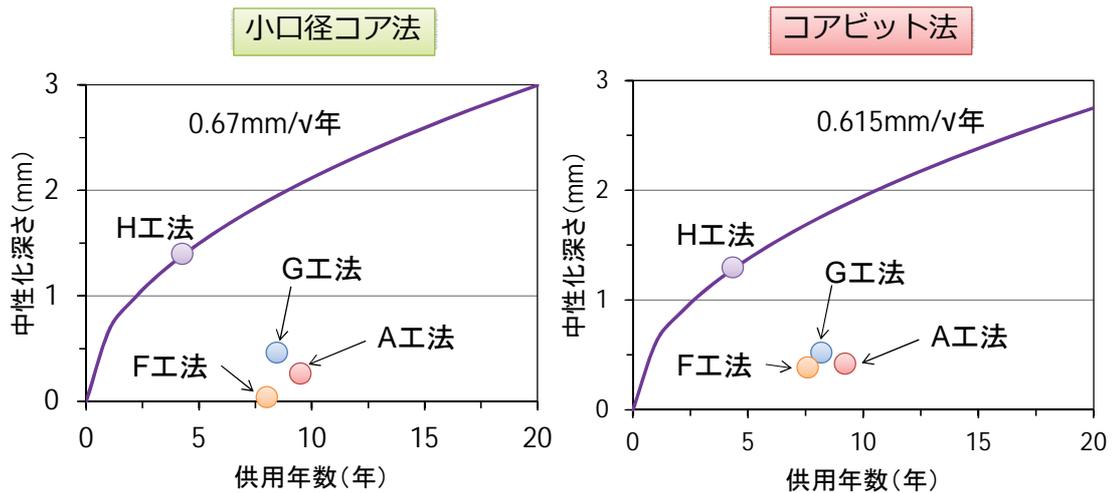


図 6.3-14 無機系被覆水路側壁（気中部）の中性化深さと中性化速度係数（H工法）

なお、母材の中性化の進行が抑制されているかを確認するためには、従来のドリル法により電動ドリルで母材まで削孔を行い、中性化深さを確認する。

4) 高周波容量式水分計による水分率計測

高周波容量式水分計は、コンクリートの補修時の下地処理における水分率管理に広く適用されている。これは、高周波の電磁波（20MHz）を材料に作用させ、誘電率を計測することで、材料の水分率を推定する方法であり、材料の表面付近の水分率を計測することが可能である。（図6.3-15を参照）

表面含浸工法のモニタリングにおいては、表層10mmの水分率を評価し、含浸材が表面付近にどの程度残っているかを計測するものとする。なお、計測は、1スパンで側壁・底版で各3箇所程度実施し、1箇所で5回計測してその平均値と併せて記録する。また、表面含浸工法の施工面と非施工面との比較により性能の持続性を評価することが有効である。



図 6.3-15 高周波容量式水分計の例

5) 通水性や目地補修後の止水性調査

表面被覆工法の通水性は、対策前後の通水性の比較及び継続的に通水性を計測することにより評価する。通水性は、水路の粗度係数又は水位・流量曲線の変化によって把握する。漏水量は分合流の無い区間の上流と下流端の流量差から求める。

通水流量は、マンニング公式から流水断面積と流速の積により求められる。

流水断面積は、スタッフにより計測した水深と水路幅を積により算出される。

流速は、電磁流速計等にて直接測定する。

【マンニング公式】

$$Q = A \times V$$

$$n = (R^{2/3} \times I^{1/2}) / V$$

Q: 流量(m³/s) V: 平均流速(m/s) A: 流水断面積(m²)

n: 粗度係数 R: 径深(m)=(A)/(P) I: 水路勾配 P: 潤辺(m)

また、上式より、水路勾配が分かれば、水路の粗度係数を求めることができる。

水路勾配は、縦断図に記載されているが、不同沈下が生じている水路では縦断測量にて検証を行うことが望ましい。漏水量は、上下流の流量を求め、その差より求める。

目地補修箇所の止水性の調査は、塩ビ製の半割管等のカバーを目地補修箇所に設置し、水路との接合部分を止水材にて一体化させ水密性を確保した後、カバー内に水を充填させ、その減水量から漏水の有無や漏水量を測定する方法などが考えられる。

6. 4 詳細調査

長寿命化対策後に顕著な変状や再劣化が認められた場合に、変状の発生要因の究明や母材変状の進展状況など、再対策の要否を判断するための技術情報の収集を目的として詳細調査を実施する。

【解説】

詳細調査は、変状の発生要因の特定や母材変状の進展への影響具合、工法の性能状態について破壊試験や促進試験などで確認するものである。

補修工法に生じる変状の形態や想定される要因は、工法の使用材料の特性によって異なること、また、施設の使用環境条件や施工条件によっても変状の程度は異なることから、調査項目や手法については施設個別に検討する必要がある。なお、対策後の施設の調査・評価手法については、研究開発段階であることから、研究機関と連携したモニタリング調査の実施も必要に応じて検討するとよい。

以降に詳細調査事例を示す。

●A地区：アンカー固定式FRPM板パネル補修工法の浮きの発生要因の特定と程度の把握

本事例は、打音調査により浮きが確認されたため、その発生要因の特定と程度を把握するために詳細調査を実施。全面的な赤外線調査により顕著に浮きが発生している箇所を特定した後、その箇所のパネルを取り外し、パネル背面のグラウト充填状況や母材の中性化状態を確認。

また、工法開発業者と施工当時の資料や現場状況を確認することによって、充填材の品質不良や施工不良を特定した例である。

●B地区：無機系表面被覆工法のひび割れの発生要因の特定と母材変状の進展の把握

本事例は、目視調査により亀甲状と部材水平方向のひび割れが確認されたため、その発生要因と程度を把握するため詳細調査を実施。付着強度試験や表面被覆材の一部をはつり取り、ひび割れの形状・深さと母材変状との関係を調査。また、当該施設は、アルカリシリカ反応による劣化と凍害の複合劣化が疑われていたため、母材変状の進展調査として圧縮強度・静弾性係数試験、促進膨張試験などを選択。

補修材の変状と母材劣化の関係性や補修後の施設の再劣化を特定した例である。

事例のほかに、表面被覆工法のモニタリング手法として、水分センサを用いた水分侵入抑制効果の確認手法や機械イーピーダンス法を用いた浮きの発生状態・予測の定量的評価手法などについて研究機関において検討が進められている。

●A地区（アンカー固定式FRPM板パネル補修工法・寒冷地区）

【調査内容】

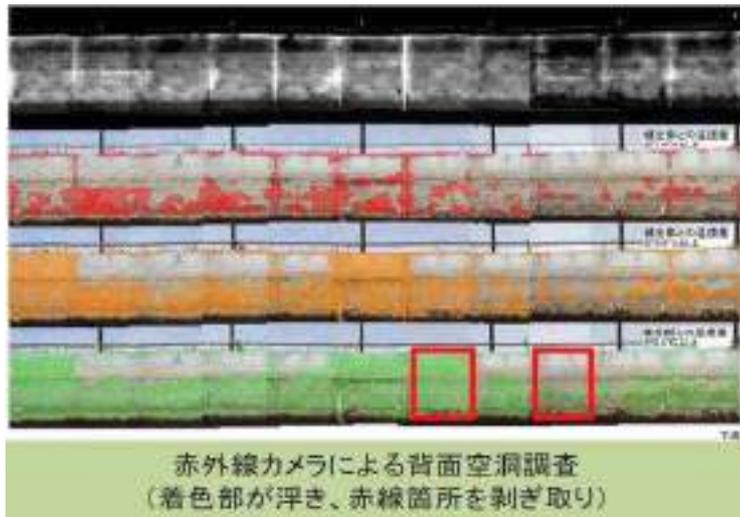
- ・打音調査、赤外線調査で浮きの発生状況を確認。
- ・浮きの顕著な発生部において、パネルの一部を取り外して、背面のグラウト充填状況を調査。
- ・パネルを外した状態で母材表面の中性化状態を確認。

【調査結果】

- ・打音調査及び赤外線調査により浮きが全体的に確認された。
- ・パネル背面には裏込め材がほとんど付着していない状態であった。
- ・開水路側面の天端付近では母材の中性化が進行。

【調査結果に基づく変状発生要因等】

- ・アンカー孔の面取りが過大すぎたためアンカーが埋設し板を十分支持できていない。
- ・工法開発業者が推奨する充填材（高流動性のモルタル）ではなく、セメントペーストを用いていた。
- ・充填方法として、専用ホッパーで天端からモルタル投入していた（落差が大きく材料分離が発生）。
- ・今後も、パネルと充填材の隙間が凍結融解等によりどのように工法性能に影響するのか継続的に調査を行う。



FRPM板には裏込め材がほとんど付着しない



裏込め材の状況天端20cm程度中性化



パネルと充填材の隙間最大0.6mm(パネル端部)



アンカー部の隙間無し(パネルと充填材の密着性)

●B地区（無機系表面被覆工法・寒冷地区）

【調査内容】

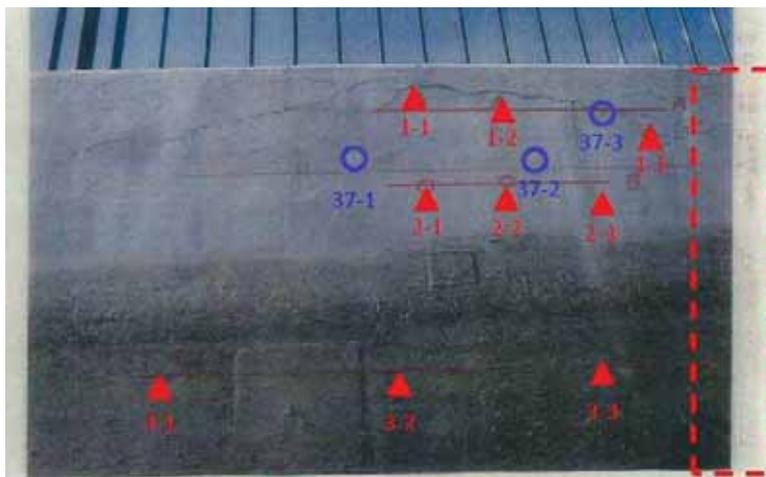
亀甲状と部材水平方向のひび割れが確認されたため、表面被覆工法の一部をはつり、ひび割れの形状や深さ、母材変状の関係性を調査。また、コアを採取し、圧縮強度と弾性波試験を実施。その他、付着強度試験や中性化試験を実施（水中・気中部）し、変状の発生要因と程度を確認。

【調査結果】

- ・付着強度試験：試験位置 1-1～1-3（ひび割れ周辺部）：0～0.8N/mm²
試験位置 2-1～2-3（変状なし、気中部）：0.3～0.8N/mm²
試験位置 3-1～3-3（変状なし、水中部）：2.3～3.8N/mm²
- ・中性化試験：中性化なし
- ・コア観察：層状のひび割れや骨材の周辺が黒く変色している状況を確認（試験位置 37-3）
- ・はつり調査：ひび割れが発生していた被覆上部は容易にはつれた。母体にも同位置の水平方向のひび割れを確認。

【調査結果に基づく変状発生要因等】

- ・当該施設では変状形態より凍害とアルカリシリカ反応による劣化が疑われ、母材のひび割れの動きに表面被覆工が追従できずに、表面被覆工表面にひび割れが生じた。
- ・母体コンクリートの劣化進行過程を確認するため、圧縮強度、静弾性係数、促進膨張試験などを実施。



- : はつり(横0.5m×縦1.0m)
- : コア採取(Φ75mm)
- ▲ : 付着強度試験、中性化試験

母体の劣化機構は凍害とASRの複合要因
水分侵入防止を目的にひび割れ注入工法の上に表面被覆



【はつり調査状況】



【コア観察状況】

6. 5 変状要因の究明と再対策の要否判定

対策工法の変状の進行程度や母材変状の進展状況などを評価し、再対策の要否を判断する。

【解説】

収集・整理した施設、対策工法に係る基本情報、基本調査及び詳細調査の結果により、補修材料の変状の発生要因や変状進行程度、母材変状の進展状況を整理し、対策工法の要求性能が満足しているか否か、今後所定の要求性能を維持することができるか否かを評価する。その上で再対策の要否並びに再対策方法を検討する。なお、対策工法の要求性能は、施設の性能低下状態や変状発生要因調査などを考慮して施設毎に設定されるものであることから、同様の工法であってもその適用目的や要求性能によって、許容できる対策後の変状は異なることに留意する。

再対策方法には、既存の対策工法を除去した後に新たな対策工法を全面的又は部分的に実施する場合や同様の材料により修繕する場合、新たな機能を追加する場合などが考えられる。

これらの再対策の要否や方法の判断は、母材変状の進展状況や施設の予定供用期間、既往及び再対策工法の効果の発現性や持続性、既往対策工法の除去方法、コストなどを勘案し、更新の可能性も含めて総合的に検討する。

なお、コンクリート開水路に関する再対策の事例は十分に蓄積されていないことから、再対策の要否判定及び再対策方法の検討においては、既往の事例を参考にするほか、必要に応じて学識経験者に相談するとよい。

また、今後は事例の整理・蓄積を積極的に行い、その蓄積情報を踏まえて再対策の要否判定時の参考基準や再対策時の留意事項の整理などを行うものとする。

【参考資料① コンクリート開水路の詳細調査手法について】

コンクリート開水路に係る詳細調査項目（以下の13項目）について、その具体の調査方法（概要、原理、試験・測定方法、試験結果の活用、精度・適用限界）を整理する。

1. 鋼材配置・径
2. 鋼材腐食状況
3. 鋼材引張強度
4. 中性化深さ
5. コンクリートの圧縮強度
6. コンクリートの静弾性係数
7. コンクリートの動弾性係数
8. コンクリートの塩化物含有量
9. コンクリートのアルカリ量分析
10. 骨材の反応性
11. コンクリートの促進膨張試験
12. コンクリートの細孔径分布
13. コンクリートの気泡分布
14. 弾性波を利用した内部欠陥調査

1. 鋼材配置・径

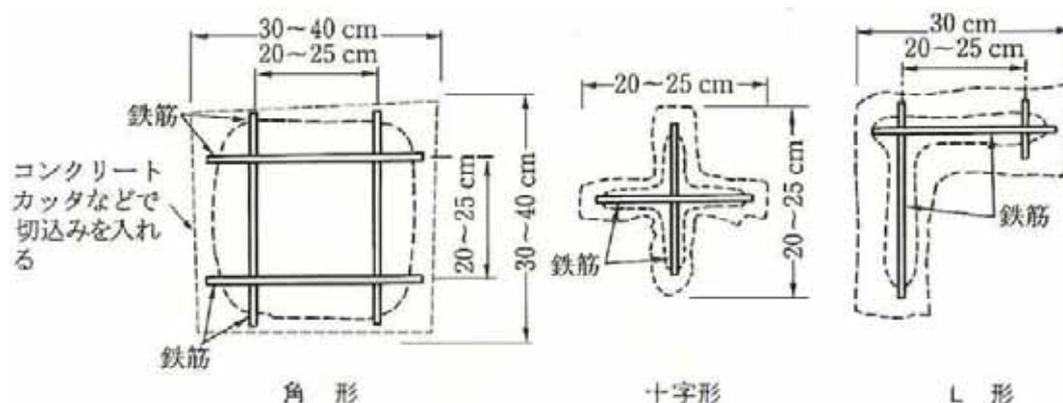
(1) 概要

鉄筋コンクリート開水路における配筋状態・鉄筋径は、かぶりコンクリートをはつり、露出させた鉄筋を直接的に確認する。

(2) 試験・測定方法

調査箇所は、あらかじめはつり出す鉄筋の位置を電磁誘導法や電磁波レーダ法で推定しておくが良い。

調査では、調査箇所のコンクリートを30cm角程度の大きさに鉄筋が現れるまではつり取る。なお、これを簡便に行う方法として、 $\phi 10\text{cm}$ 程度のコア削孔で鉄筋に到達するまで削孔し、鉄筋を露出させる方法もある。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p153 参考)

【鉄筋のはつり出し例】



【コア削孔による鉄筋のはつり出し例】

また、調査箇所が構造物の耐久性を低下させないように、はつり調査箇所は確実に補修する。補修材料は一般に無収縮モルタルが用いられる。

(3) 試験結果の活用

試験結果は図面が現存しない構造物の構造照査のほか、中性化や塩害などの劣化因子に対してどれ位の耐久性を維持しているかを評価するために用いる。

かぶりコンクリート厚に対して、別途試験で確認する中性化深さや発錆限界塩化物イオン濃度の範囲を差し引くことで、耐久性の面からの有効かぶりコンクリート厚が明らかとなる。

(4) 精度・適用限界

はつり調査で確認される配筋状態や鉄筋径は、はつり調査箇所においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、配筋状態にはバラツキがあることに留意が必要である。この技術的課題に対しては、はつり調査箇所とそのほかの箇所で広範囲に非破壊検査手法（電磁誘導法や電磁波レーダ法）にてかぶりコンクリート厚を推定し、はつり調査箇所の実測値で非破壊検査手法の調査結果を補正（キャリブレーション）することで概ね解決できる。

2. 鋼材腐食状況（詳細調査）

（1）概要

鋼材腐食状況は、1. 鋼材配置・径で解説したはつり調査を行い、露出させた鉄筋を直接的に確認する。

（2）試験・測定方法

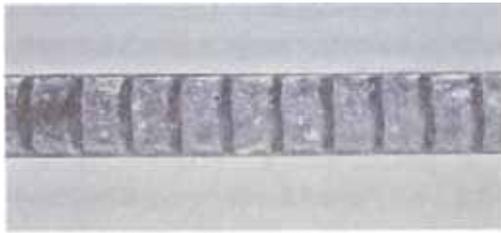
鉄筋の腐食状態は、一般に下表に示す腐食度区分で評価する。

【鉄筋の腐食状況に応じた腐食度区分】

腐食度区分	腐食状態
腐食なし又は(0)	腐食を認めず (施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない)
A 又は(I)	点錆程度の表面的な腐食 (部分的に腐食が認められる軽微な腐食)
B 又は(II)	全体に表面的な腐食 (表面の大部分が腐食している 部分的に断面が欠損している)
C 又は(III)	浅い孔食等断面欠損の軽微な腐食 (鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある)
D 又は(IV)	断面欠損の明らかな著しい腐食 (鉄筋の断面が当初の 2/3~1/2 位欠損している)

※ 「国土開発技術センター建築物耐久性向上技術普及委員会編による区分」より

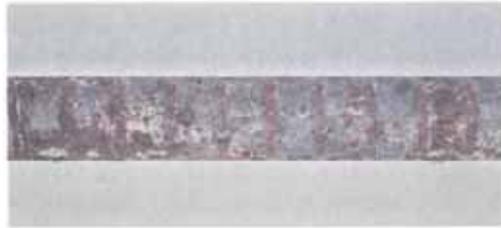
※ () 中は「日本コンクリート工学会：海洋コンクリート構造物による防食指針(案)による分類」より



腐食度区分：腐食なし又は 0



腐食度区分：A又は I



腐食度区分：B又は II



腐食度区分：C又は III



腐食度区分：D又は IV

【鉄筋腐食度の分類】

出典：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013- (公) 日本コンクリート工学会 P. 35

(3) 試験結果の活用

腐食面積を鉄筋の表面積で除して腐食面積率を求め、その後の進展をモニタリングする基礎資料とする。

$$\text{腐食面積率 (\%)} = \text{鉄筋の腐食面積} \div \text{鉄筋表面積} \times 100$$

断面欠損が生じている場合には、断面欠損状態での鉄筋量より構造照査を行い、不足する鉄筋量を補うための補強対策を検討する。

(4) 精度・適用限界

はつり調査で確認される鉄筋腐食状態は、はつり調査箇所における状態であり、水掛かりや乾湿の状態、かぶりコンクリートの性状、豆板や初期ひび割れの有無等によって異なる可能性がある。しかしながら、はつり調査を広範囲に実施することは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、非破壊検査手法（自然電位法等）や部材表面の変状（ほぼ一定間隔の鉄筋に沿ったひび割れや錆汁有無）による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

3. 鋼材引張強度

(1) 概要

鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートのひび割れ発生以後の引張応力は鉄筋によって受け持たれるため、鉄筋の現況の引張強度を把握することは、既設鉄筋コンクリート構造物の補強対策を検討する上で重要である。

(2) 試験・測定方法

- 1) 50～60cm長の鉄筋を切り出し、中心付近で破断時の伸びを計測する標点位置を決め、ポンチ穴を打つ。標点間距離 l_0 は、鉄筋の公称直径 D (例えば D16 鉄筋は 15.9 mm) によって決まり、通常は $8D$ とする。そして、中心部にひずみゲージを貼り付ける。
- 2) 準備した鉄筋の試験片を試験機の上下部のチャック装置に固定し、ひずみゲージを配線する。
- 3) 試験機を稼働させ、荷重とひずみの測定が正確に行われる適度な速度で荷重を加える。
- 4) 試験の経過中、荷重が最初に減少する直前の最大荷重 P_s (N) を読み取る。
- 5) 破断するまでに試験片が耐えた最大の荷重を最大引張荷重 P_{max} (N) とする。
- 6) 破断した試験片の両切断片の中心線が一直線上になるように注意して破断面を突き合わせ、伸びた標点間の距離 l (mm) を標点間距離の $\pm 0.5\%$ に相当する精度で測定する。

(3) 試験結果の活用

- 1) 降伏点 σ_s 及び引張強さ σ_b を以下の式によって計算する。

$$\sigma_s = P_s / A_o \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_b = P_{max} / A_o \quad (\text{N/mm}^2)$$

A_o : 鉄筋の公称断面積 (mm^2) (例えば D16 鉄筋は 198.6mm^2)

- 2) 伸びは以下の式によって計算する。

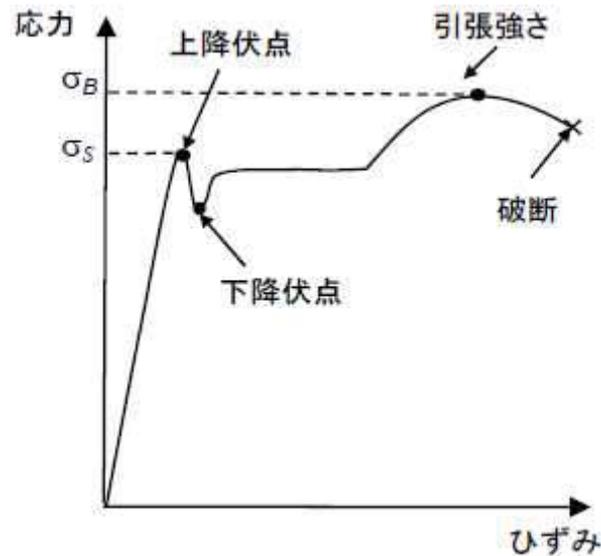
$$\delta = (l - l_0) / l_0 \times 100 \quad (\%)$$

- 3) 引張応力-ひずみ曲線の弾性域における直線部分の傾きを求め、ヤング率を計算する。

$$E_s = (\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) / (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1})$$

σ_{s1} 、 σ_{s2} : 弾性域における引張応力 ($\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$)

ε_{s1} 、 ε_{s2} : 弾性域におけるひずみ ($\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{s2}$)



【鉄筋の引張応力-ひずみ曲線】

(4) 精度・適用限界

鋼材引張試験で確認される鉄筋の引張強度は、鉄筋を切り出した箇所における値であり、水掛かりや乾湿の状態、かぶりコンクリートの性状、豆板や初期ひび割れの有無等によって異なる可能性がある。しかしながら、鋼材引張試験を広範囲に実施することは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、最も安全側の評価となるように、応力が集中しやすい箇所や、非破壊検査手法やはつり試験で鉄筋腐食の著しい箇所を代表箇所（鉄筋の切出し箇所）として選定するのが良い。ただし、事前に鉄筋を切り出した際の構造的な影響を検討し、必要に応じて鉄筋を復旧するまでの間、仮設材で補強することとなる。

4. 中性化深さ（詳細調査）

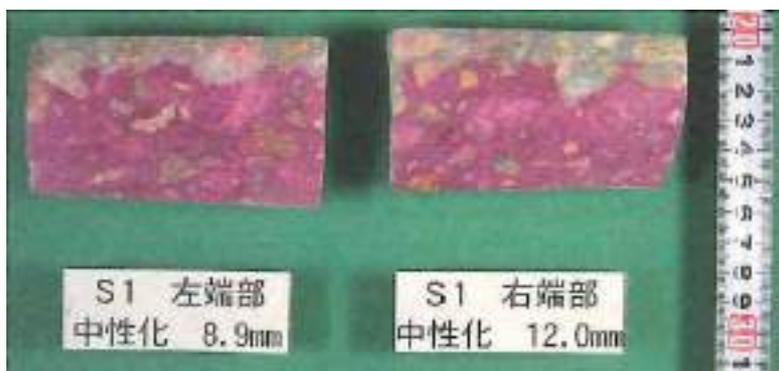
（1）概要

中性化深さの測定は、はつり調査又は採取したコアにより、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行う。

（2）原理

打設直後のコンクリートは、セメントの水和により生じる水酸化カルシウムの存在により強アルカリ性（pH12～13）を示すが、年月の経過により空気中の二酸化炭素等の作用を受け、炭酸カルシウムに変化する。この反応を中性化と呼ぶ。コンクリートの中性化が進行すると、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋が腐食しやすい状態となり、鉄筋が腐食すると、かぶりコンクリートのひび割れ・剥離・剥落といった問題が生じる。

中性化深さは、95%エタノール 90ml にフェノールフタレインの粉末 1g を溶かし、水を加えて 100ml としたフェノールフタレインの 1%エタノール溶液を指示薬として、測定対象面に噴霧し、鮮明な赤紫色に発色（pH10 程度以上のアルカリ性で発色）した部分のコンクリート表面からの距離をコンクリートの中性化深さとする。



（コンクリート診断技術’ 14〔基礎編〕 p152 参考）

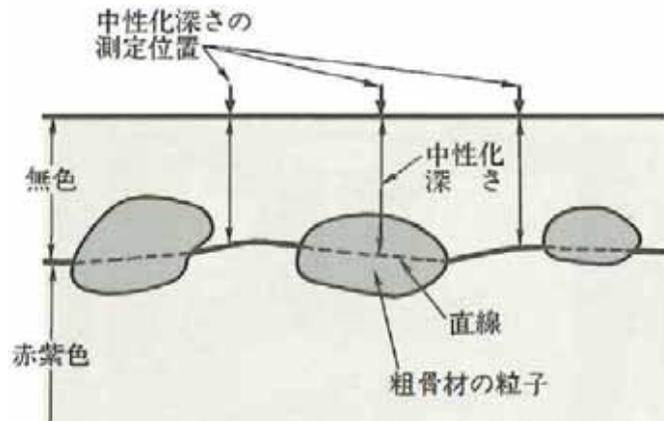
【フェノールフタレイン溶液噴霧による呈色現象例】

（3）試験・測定方法

はつり箇所（φ10cm 程度のコア削孔穴の側面を対象として行う方法もある）又は採取コアの割裂面や側面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、鮮明な赤紫色に発色した部分のコンクリート表面からの距離をノギス等で測定し、コンクリートの中性化深さとする。

測定箇所は、はつり箇所やコア割裂面では 10～15mm 間隔で 4 箇所以上、コア側面では 5 箇所程度とする。

中性化深さは、0.5mm 単位で測定して測定箇所毎の平均値を算出し、mm 単位とし小数点以下 1 桁の値とする。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p154 参考)

【中性化深さの測定位置】

なお、本試験における留意点は以下の通りである。

- ・測定箇所粗骨材がある場合には、粗骨材位置を外して測定する。
- ・採取コア側面で測定する場合には、測定面の中性化の進行を防止するために、採取コアをラッピングフィルム等で密封する。
- ・削孔粉が付着していると中性化している部分が中性化していないものと判定される恐れがあるため、フェノールフタレイン溶液を噴霧する前には、必ず測定面に付着した削孔粉を洗浄する。

(4) 試験結果の活用

中性化残り^{※1}が10mmとなった時点^{※2}で鉄筋腐食が開始することから、中性化残りは、施設の健全度評価や劣化予測を行う上で重要な指標となる。

※1 前記の鋼材配置・径で確認した鉄筋のかぶりコンクリート厚から、中性化深さ測定値を差し引くことで、中性化残りが求まる。

※2 フェノールフタレイン法による中性化深さの測定では、pH8.2～10以下の未着色部分が中性化部と判定される。一方、鉄筋の腐食はpH11以下で開始する。このため、厳密には、鉄筋の腐食可能性範囲は、中性化部分より若干内部まで存在することになる。腐食開始と中性化の関係は、中性化残りが塩化物を含まないコンクリートで約8mm、塩化物を含むコンクリートで約20mmとされている。

(5) 精度・適用限界

中性化深さ測定で確認される中性化深さは、測定位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、部材の湿潤状態やかぶりコンクリートの性状等によって中性化深さが一様ではないことに留意が必要である。また、多点ではつりやコア採取を伴う中性化深さ試験を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、ドリル法による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

5. コンクリートの圧縮強度（詳細調査）

（1）概要

コンクリート構造物はコンクリートの強度、特に圧縮強度に基づいて設計され、また、コンクリート構造物の劣化に関連した物理特性の変化は圧縮強度に関連している。使用されたコンクリートの圧縮強度は施工時の品質管理データでも把握できるが、施工状況や環境状況等により実際の構造物の強度はバラツキが生じる。このため、実構造物に対して強度を把握することが重要である。

コア採取及び圧縮強度試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」に準じて行う。

（2）試験・測定方法

1) コア採取

圧縮強度試験のためのコア採取は、薄い部材やひび割れ等の欠陥部やその近傍は避けて、1調査箇所当たり3本採取することを標準とする。

圧縮強度試験に用いるコアのサイズは、標準コア（ $\phi 100\text{mm}$ ）を基本とするが、配筋の状態等により標準コアを抜くことが困難な場合には、小径コアを用いても良い。ただし、原則として適用するコア径は粗骨材の最大寸法の3倍以上とし、2倍以下とはしない。

コア採取は、鉄筋の損傷を防止するために、配筋状態を電磁誘導法や電磁波レーダ法で推定し、鉄筋位置を避けた位置で行う。

コア採取後は、無収縮モルタル等で速やかに補修する。

2) 圧縮強度試験

採取したコアは、コンクリートカッターを用いて端部を整形し、載荷面を研磨するか、又はキャッピングする等して、平滑に仕上げる。

強度試験は、JIS A 1108「コンクリート圧縮強度試験方法」に従い行うが、コアの高さが直径の2倍より小さい場合には、下表に示す補正係数を乗じて補正する。

【圧縮強度試験における補正係数（JIS A 1107より）】

高さとの比 h/d	補正係数	備考
2.00	1.00	h/d がこの表に示す値の間にある場合は、補正係数は補間して求める。
1.75	0.98	
1.50	0.96	
1.25	0.93	
1.00	0.87	

（3）試験結果の活用

コアによる圧縮強度試験は、直接的に構造体の強度を評価できる方法である。

本試験で確認された強度値は、設計基準強度値や既往の機能診断時の強度値との比較により、強度低下状況が評価できる。

また、本試験で得られる圧縮強度と、別途静弾性係数試験で得られる静弾性係数の関

係からは、アルカリシリカ反応及び凍害による劣化の可能性を評価することができる。

(4) 精度・適用限界

圧縮強度試験で確認される圧縮強度は、コア採取位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、施工時に一様の品質とするのは難しく、骨材や空隙の偏り、微細ひび割れ等の変状によって圧縮強度が一様ではないことに留意が必要である。また、多点でコア採取を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、リバウンドハンマーを用いた反発度法又は機械イーピーダンス法による強度推定によって広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが一般的である。

6. コンクリートの静弾性係数

(1) 概要

コンクリートの静弾性係数は、構造物の固有周期、柱・梁等の軸方向変形及び曲げ・せん断変形、床のたわみ量等を算出する場合に必要な部材剛性を決定する物性である。

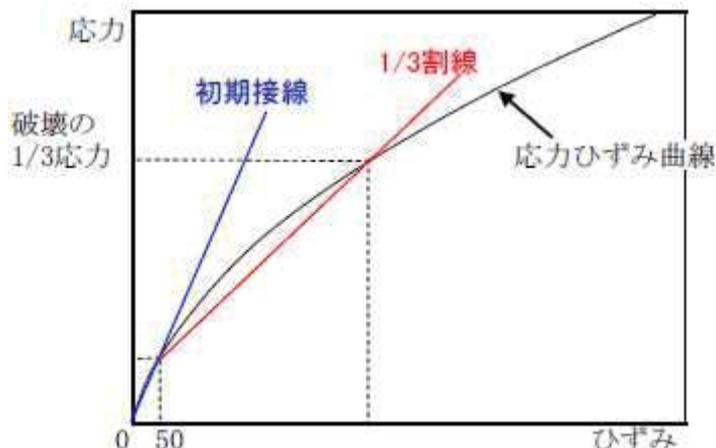
静弾性係数は、コンクリートの強度が高いほど、単位容積質量が大きいほど大きい値を示す傾向があることから、静弾性係数試験は圧縮強度試験と同時に実施すべき試験である。

静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて行う。

(2) 試験・測定方法

JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて、採取コアを対象として圧縮強度試験（JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」準拠）を行う際に、ひずみゲージを取り付け、圧縮試験時の縦ひずみを測定する。そして、圧縮強度の1/3におけるひずみ値を算出し、これを静弾性係数（ヤング係数）※とする。

※ 静弾性係数は、供試体の応力-ひずみ曲線において、最大荷重の1/3に相当する応力と供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力とを結ぶ線分の勾配として与えられる割線静弾性係数のこと。



【応力-ひずみ曲線からの静弾性係数の求め方】

1) ひずみ測定器の取付け

ひずみ測定器は、供試体の軸に平行、かつ、対称な二つの線上で、供試体の高さの1/2の位置を中心に取り付ける。

2) 載荷方法

- ・ 載荷は、供試体に衝撃を与えないように一様な速度で行う。
- ・ 荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ になるようにする。
- ・ 供試体の縦ひずみは、最大荷重の1/2程度まで測定し、その測定間隔は等間隔とし

て少なくとも 10 点以上記録する。

- ・ 供試体が急激な変形を始めた後は、荷重を加える速度の調整を中止して、荷重を加え続ける。
- ・ 供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字 3 桁まで読む。

3) 試験結果の計算方法

供試体毎に応力-ひずみ曲線を作成する。

各供試体の静弾性係数は、次の式によって算出し、四捨五入して有効数字 3 桁に丸める。

$$E_c = (S_1 - S_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 各供試体の静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 : 最大荷重の 1/3 に相当する応力 (N/mm²)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)

ε_1 : 応力によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 : 50×10^{-6}

圧縮強度に対する静弾性係数の標準値は下表のように整理されていることから、試験結果と標準値との照合を行う。

【静弾性係数の標準値】

コアの圧縮強度 (N/mm ²)	コアの静弾性係数の標準値 (kN/mm ²)
15 以上 21 未満	8.4~17.8
21 以上 27 未満	13.1~21.3
27 以上 35 未満	16.2~25.8
35 以上 45 未満	19.7~29.8
45 以上 55 未満	19.1~34.2

出典：既存コンクリート構造物の実態調査結果-1999 年調査結果- 土木研究所

(3) 試験結果の活用

凍害やアルカリシリカ反応の発生したコンクリート構造物では、劣化の進行に伴い圧縮強度に対する静弾性係数が次第に低下することが報告されており、圧縮強度と静弾性係数を照合することが有効である。

(4) 精度・適用限界

本試験は、実際に载荷した時のひずみ挙動を実測するため、信頼性の高い方法である。ただし、供試体の養生状態（含水状態とする）、ひずみゲージの取付け状態、载荷速度（急激に過大な荷重を与えると初期ひずみが増加する）等の誤差要因があるため、試験時に留意が必要である。

静弾性係数試験で確認される静弾性係数は、コア採取位置においては確実な値である。

しかしながら、構造物においては、施工時に一様の品質とするのは難しく、骨材や空隙の偏り、微細ひび割れ（初期ひび割れのほか、アルカリシリカ反応による膨張ひび割れ）等の変状によって静弾性係数が一様ではないことに留意が必要である。このため、外観上の劣化状態が異なる箇所からコア試料を採取することが望ましい。

7. コンクリートの動弾性係数

(1) 概要

動弾性係数は、コンクリート供試体に縦振動又はたわみ振動を与えて一次共鳴振動数(供試体の固有振動)を測定し、供試体の形状・寸法、質量との関係から算出した弾性係数である。

動弾性係数試験は、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び試験方法」に準じて行う。

(2) 試験・測定方法

1) 供試体の作成

供試体は JIS A 1107、JIS A 1114 又は JIS A 1132 によって作製したものをを用いる。ただし、供試体の寸法及び寸法比は、次の①～③によってもよい。

①たわみ振動の場合、供試体の長さで振動方向の厚さとの比は 3~5 とするとよい。

注記 供試体の長さで振動方向の厚さとの比が非常に大きかったり非常に小さかったりすると、一次共鳴振動数(供試体の固有振動)を正確に求めるのが困難となる。6) に示す式は、この比が 2 以上の場合に適用できる。

②縦振動の場合、供試体の断面寸法は 100mm 以上とし、供試体の長さで断面寸法との比は 2 以上とする。

注記 断面寸法は、円柱供試体の場合は直径、角柱供試体の場合は一辺の長さ(長方形断面の場合はその短辺)を示す。供試体の断面寸法が非常に小さかったり、供試体の長さで断面寸法との比が非常に小さかったりすると、一次共鳴振動数(供試体の固有振動)が求めにくかったり、発振器の振動数の範囲外になったりするため、正確な測定ができない場合がある。

③ねじり振動の場合、①に示すとおりとする。

2) 質量及び寸法の測定

供試体の質量は $\pm 0.5\%$ の精度で量る。長さは $\pm 0.5\%$ の精度で数箇所を測定し、その平均から求める。

また、断面の寸法は $\pm 1\%$ の精度で数箇所を測定し、その平均から求める。

なお、同一の供試体を用いる継続的な試験で、供試体の質量及び断面の寸法が変化する場合には、その都度測定する。

3) たわみ振動の場合の共鳴数の決定

たわみ振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

①供試体は、あまり拘束されない両端自由なたわみ振動ができるように、支持台に振動を拘束しないように置く*。駆動力は、供試体にたわみ振動を与える方向に加える。

また、駆動力を与える位置は、振動の節から離れた位置（普通、供試体の中央部）とする。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の他の端面に接触させる。

※ 振動の節の近くでナイフエッジ、又は厚いスポンジゴム等で供試体を支持する。縦振動の場合には、供試体を水平な支持台の上に置き、供試体端面に駆動端子を接触させても良い。また、支持台の寸法は、その固有振動数が、測定する供試体の振動数の範囲外となるよう定める。

②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、増幅されたピックアップの出力電圧を観測する。指示器に明確な最大の振れを生じ、かつ、振動の節を測定した結果一次共鳴たわみ振動であることを確かめたときに、その場合の振動数をたわみ振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。たわみ振動の一次振動においては、振動の節は供試体の端からその長さの 1/4（厳密に言えば 0.224）離れたところにある。したがって、指示器の振れも供試体の両端において最大値を示し、節において最小値を示す。この場合、振動の節及び腹の位置を確かめるには、ピックアップを供試体の長さの方向に移動させて指示器の振れを測定すればよい。節においては、指示器の振れが最小値を示し、腹においては最大値を示す。陰極線オシロスコープを備えた装置であればリサージュの図形が節の前後で位相が変わることを確かめることができる。



【共振測定方法の例】

4) 縦振動の場合の共鳴数の決定

縦振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

①供試体は、あまり拘束されない両端自由な縦振動ができるように、支持台に3) -①に示す方法と同様にして置く。駆動力は、供試体の端面で、端面に直角に加える。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の反対の端面に接触させる。

②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、

増幅されたピックアップの出力電圧を観測し、指示器に明確な最大の振れを生じた振動数を縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。

なお、必要に応じて、ピックアップを供試体の長さの方向に移動させて指示器の振れを測定して振動の節を確かめる。

(注) 縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)においては、振動の節は中央に一つあるだけであり、供試体の両端で腹になり最大の振幅を示す。

5) ねじり振動の場合の共鳴数の決定

ねじり振動の場合の共鳴数の決定は、次による。

- ①供試体は、あまり拘束されないで両端自由なねじり振動ができるように、支持台に3)-①に示す方法と同様にして置く。駆動力は、供試体の一端の近くにおいてねじり振動を与えるように加える。また、駆動力を与える位置は、振動の節から離れた位置(普通、端部に近い位置)とする。

ピックアップは、供試体の振動方向に作動するように供試体の他の端面に接触させる。

なお、たわみ振動の影響を少なくして測定するには、駆動端子を供試体端部から0.10~0.12L、ピックアップを反対面の端部から0.224Lに設置するとよい。

- ②発振器の振動数を変え、これに応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、増幅されたピックアップの出力電圧を観測する。指示器に明確な最大の振れを生じ、かつ、振動の節を測定した結果一次共鳴ねじり振動であることを確かめたときに、その場合の振動数をねじり振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動)とする。

注記 ねじり振動の一次振動においては、振動の節は中央に一つあるだけであり、供試体の両端で腹になり最大の振幅を示す(1)-②参照)。

6) 試験結果の計算方法

動弾性係数は、次の式によって求める。

- ①たわみ振動の場合

$$E_D = 1.61 \times 10^{-3} \frac{L^3 T}{d^4} M f_1^2 \quad (\text{円柱供試体})$$

$$E_D = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{b t^3} M f_1^2 \quad (\text{角柱供試体})$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (N/mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

D : 円柱供試体の直径 (mm)

b, t : 角柱供試体の断面の各辺の長さ (mm)

t は、振動方向の辺の長さとする。

M : 供試体の質量 (kg)

f_1 : たわみ振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

T : 修正係数 (次表(修正係数(T)の値)参照)

回転半径 (K) (円柱供試体に対しては $d/4$ 、角柱供試体に対しては $t/3.464$) と長さ (L) 及びポアソン比 (ν_D) によって求める。

②縦振動の場合

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f_2^2$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (N/mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

A : 供試体の断面積 (mm²)

M : 供試体の質量 (kg)

f_2 : 縦振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

【修正係数 (T) の値】

K/L	T 注)	K/L	T 注)
0.00	1.00	0.09	1.60
0.01	1.01	0.10	1.73
0.02	1.03	0.12	2.03
0.03	1.07	0.14	2.36
0.04	1.13	0.16	2.73
0.05	1.20	0.18	3.14
0.06	1.28	0.20	3.58
0.07	1.38	0.25	4.78
0.08	1.48	0.30	6.07

注) 動ポアソン比を 1/6 として計算した値である。動ポアソン比が ν_D^{*1} である場合には、次の式によって求めた T を用いる。

$$T' = T \left[\frac{1 + (0.26\nu_D + 3.2226\nu_D^2)K/L}{1 + 0.1328K/L} \right]$$

*¹ 動ポアソン比の算定方法

動ポアソン比は、次の式によって求める。

$$\nu_D = \frac{E_D}{2G_D} - 1$$

ここに、 ν_D : 動ポアソン比

E_D : 動弾性係数 (N/mm²)

G_D : 動せん断弾性係数 (N/mm²) *²

*² 動せん断弾性係数の算定方法

動せん断弾性係数は、次の式によって求める。

$$G_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{LR}{A} mf_3^2$$

ここに、 G_D : 動せん断弾性係数 (N/mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

R : 形状係数

円柱供試体の場合 R=1

正方形断面の角柱供試体の場合 R=1.183

長方形断面 (a : 短辺、b : 長辺) の角柱供試体の場合

$$R = \frac{(a/b) + (b/a)}{4(a/b) - 2.52(a/b)^2 + 0.21(a/b)^5}$$

ただし、 $b > a$

A : 供試体の断面積 (mm^2)

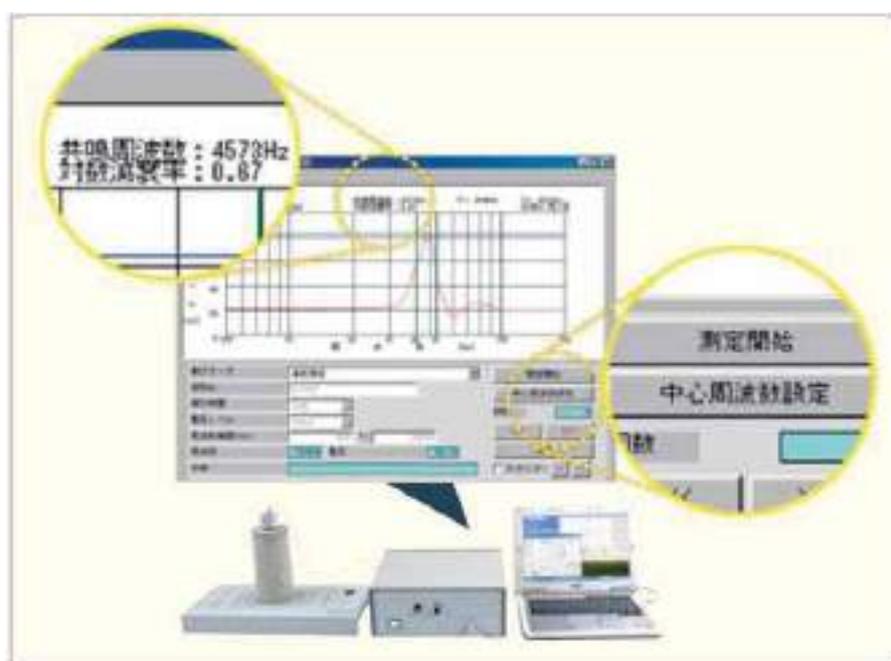
M : 供試体の質量 (kg)

f_3 : ねじり振動の一次共鳴振動数(供試体の固有振動) (Hz)

(3) 試験結果の活用

凍害やアルカリシリカ反応の発生したコンクリート構造物では、劣化の進行に伴い圧縮強度に対する動弾性係数が次第に低下することが報告されており、圧縮強度と動弾性係数を照合することが有効である。

近年は、パソコンで周波数を自動掃引し共振周波数を測定することで、人為的な誤差を低減することができ、パソコン上で各種設定やリサージュ表示する機能を有するシステムも開発・活用されている。



【パソコン画面上でリサージュ表示するシステムの例】

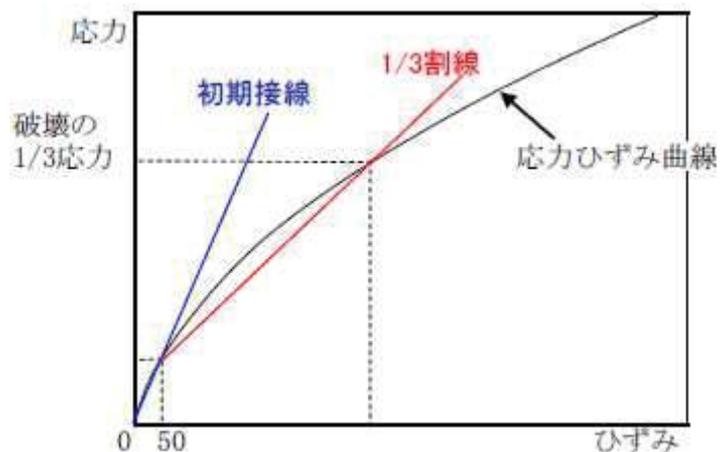
(4) 精度・適用限界

凍害による劣化が進行すると部材内部に層状ひび割れが生じるため部材を弾性体として評価できなくなる。このため、動弾性係数では劣化過程の評価が難しいケースがある。

ここでは、JISに規定される最も一般的な「供試体にたわみ振動又は縦波振動を与え、供試体が共鳴振動する周波数から動弾性係数を算出する手法」を示した。動弾性係数を求めるその他の手法としては、「供試体に超音波を伝搬させ、その超音波伝播速度から動弾性係数を算出する手法」や「静弾性係数として初期接線で示される接線弾性係数が動弾性係数に近似した値を示すことを利用した動弾性係数の推定手法」がある。

超音波伝播速度による方法は、やや危険側の評価となる事例が報告されているが、コア試料によらず実構造物に直接適用できる可能性のある手法として技術確立が期待され

る。静弾性係数の初期接線による推定方法は、荷重が作用するごく初期の弾性係数を使用するため、測定されるひずみ量が小さく、測定の変動誤差を拾いやすい欠点がある。



※動弾性係数は荷重が作用していない状態での弾性係数であるため、供試体の応力-ひずみ曲線において、初期接線で示される接線弾性係数（ごく初期の弾性係数）を動弾性係数とみなすことができる。

【応力-ひずみ曲線からの動弾性係数の求め方】

8. コンクリートの塩化物含有量

(1) 概要

コンクリートの塩化物含有量試験は、塩害環境下や内在塩分が疑われる鉄筋コンクリート構造物を対象として、鉄筋近傍のコンクリート中にどの程度の量の塩化物イオンが含まれているかを把握するために実施するものである。

塩化物含有量の試験に用いる試料の採取は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の付属書 1「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン分析用試料の採取方法」に準じて行う。

塩化物イオンの試験は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて行い、これによって、全塩化物イオン量を求める。

(2) 原理

採取した試料の塩化物イオン量を化学分析により測定する方法には、重量法（塩化銀沈殿法）、モール法、電位差滴定法等があるが、ここでは、最も一般的に適用されている電位差滴定法（全塩化物定量）について解説する。

実際には、コンクリートのセメント水和物に固定化された塩化物イオンは鋼材の腐食に影響しないと考えられている。しかし、現状では水和物に固定化されていない塩化物イオンだけを選択的に抽出する手法は確立されていない。このため既往の技術基準類や各種論文では、鋼材の腐食の可能性を論じるには全塩化物イオン量を評価指標としている。

※重量法（塩化銀沈殿法）：硫酸塩溶液中で、塩化物イオンが銀イオンと反応して生じる塩化銀（沈殿物）の重量を測定することにより、塩化物イオン量を算出する方法。

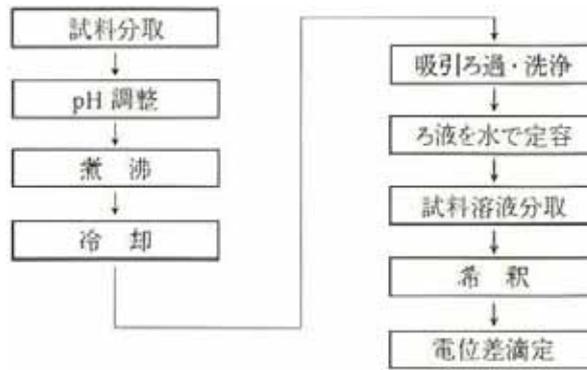
※モール法：指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝酸銀溶液で塩化物イオンを滴定する方法。

※電位差滴定法：重量法と同様であるが硝酸銀溶液を用いる方法。

(3) 試験・測定方法

塩害地域や凍結防止剤が使用される地域で、外部からの塩分の侵入が予想される場合は、塩化物イオンの濃度勾配を把握するために、コンクリート表面から鉄筋位置までのコンクリートを表面から深さ方向に 10～20mm 間隔で切断した厚さ 10～20mm 程度の試料を分析する。なお、少ない試料中に粗骨材が存在すると試験結果に影響するため、試験片をむやみに薄くすることは避ける。

一方、外部からの塩分の侵入が考えにくい場合（建設時からコンクリート中に塩分が含まれていることが疑われる場合）は、原則として鉄筋位置付近から試料を採取する。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p159 参考)

【電位差滴定法の実施フロー】

コアから本試験の試料を加工する際は、塩化物イオンの流出を避けるため、乾式のコンクリートカッターを用いる。そして、切り取ったコンクリート片は、粗骨材を含めて全量を $149\mu\text{m}$ ふるい全通程度まで微粉碎し、分析用試料とする。

試料に硝酸溶液 (2N) を加えて溶液の pH を 3 以下とし、加熱煮沸して全塩化物を溶解した後、不溶分をろ過洗浄する。ろ液を分取し、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定装置にセットし、N/200 硝酸銀標準溶液で電位差滴定する。

試験結果の判断は、次表に示す塩化物イオン量に関する基準等と比較する形で行うことが一般的である。

【塩化物イオン量に関する基準】

出典	塩化物イオン含有量基準等
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」報告書 (平成元年 5 月)	発錆限界塩化物イオン量として、 $1.2\sim 2.5\text{ kg/m}^3$ を示している。
JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」, (2009)	レディーミクストコンクリートの塩化物含有量は、荷降し地点で、塩化物イオン (Cl^-) 量として、 0.30 kg/m^3 以下とする。ただし、この上限値については、必要に応じて協議することと指定することができる。また購入者の承認を受けた場合には 0.60 kg/m^3 以下とすることができる。
土木学会 「コンクリート標準示方書〔施工編〕」	練混ぜ時にコンクリート中に含まれる塩化物イオンの総量は原則として 0.30 kg/m^3 以下とする
日本建築学会 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」, 2009	コンクリートに含まれる塩化物量は、塩化物イオンとして 0.30 kg/m^3 以下とする。 やむを得ずこれを超える場合は、鉄筋防錆上有効な対策を講じるものとし、その方法は特記による。この場合においても、塩化物量は塩化物イオンとして 0.60 kg/m^3 を超えないものとする。

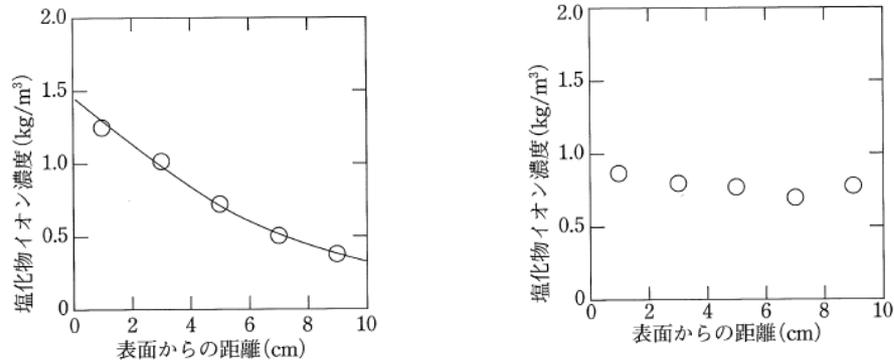
(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p160 参考)

(4) 試験結果の活用

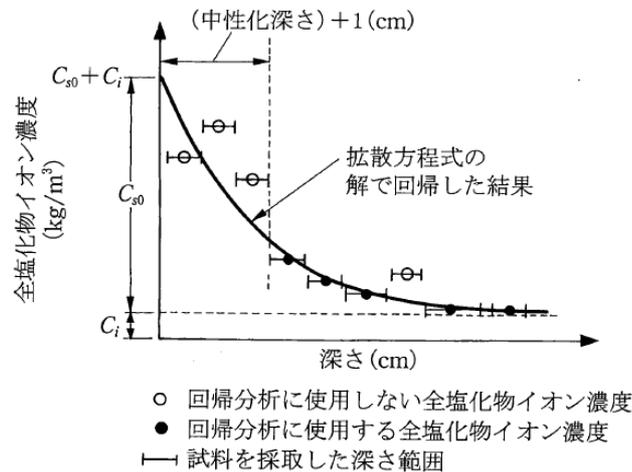
上表に示した発錆限界塩化物イオン量に達する深さが、鉄筋位置に達した時点で鉄筋腐食が開始することから、発錆限界塩化物イオン量に達していないかぶりコンクリート厚*を把握することは、施設の健全度評価や劣化予測を行う上で重要な指標となる。

* 前記の鋼材配置・径で確認した鉄筋のかぶりコンクリート厚から、本試験で求まる発錆限界塩化物イオン量に達する深さを差し引くことで、残りのかぶりコンクリート厚が求まる。

塩化物量の測定結果を用いて、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求める場合には、回帰分析における信頼性の観点から、5箇所以上（少なくとも3箇所以上）の値を用いるのが良い。また、中性化部分では塩化物量が変化するため、表層部の値は用いない。



注) 左図：外部から塩分が侵入している事例、右図：初期から塩分を含んでいた事例
○は、塩化物イオンの試験により得られた結果。曲線は推定ライン。



(上図：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) 土木研究所著) p108 参考)

(下図：コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p160 参考)

【試料採取深さと全塩化物イオン濃度の関係の評価例】

(5) 精度・適用限界

塩化物含有量試験で確認される塩化物イオン量は、測定位置においては確実な値である。しかしながら、構造物においては、方角、水掛かり状態やかぶりコンクリートの性状等によって塩化物イオンの部材侵入状況が様々ではないことに留意が必要である。しかしながら、多点で塩化物含有量試験を行うことは、労力、コスト面、構造物に与える影響から現実的ではない。そこで、施設の供用環境や部材の劣化状況によっては、ドリル削孔粉を用いたフルオレセイン法や簡易塩分測定器法等の簡易試験法*による広範囲の情報を組み合わせて全体評価を行うのが良い。

* 現場での適用性を重視した簡易試験法としては、(社)日本建築学会では JASS 5T-502「フレッシュコンクリート中の塩化物量の簡易試験方法」が定められており、本来はフレッシュコンクリートを対象とするが、硬化コンクリート中の塩化物イオ

ン量も水溶液にすれば適用可能である。塩化物含有量の簡易測定器としても種々のものが実用化されている。測定原理としては、電量滴定法、イオン電極法、電極電流法、硝酸銀滴定法、銀電極法等がある。

9. コンクリートのアルカリ量分析

(1) 概要

アルカリシリカ反応は、コンクリート細孔溶液中のアルカリ性成分と、その成分に対して溶解反応を示す骨材中の有害鉱物との反応である。したがって、コンクリート中のアルカリ量を測定することによって、アルカリシリカ反応の可能性を予測することができる。

(2) 原理

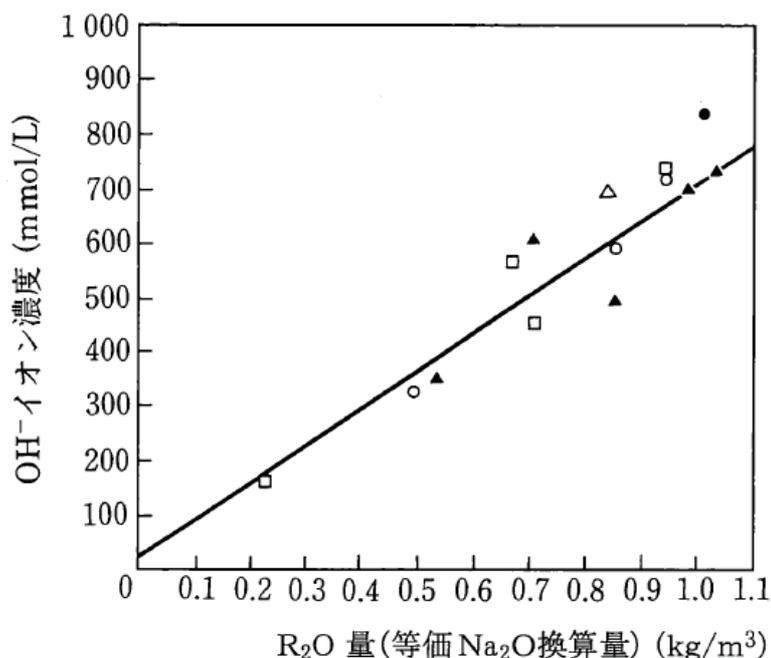
コンクリート細孔溶液の主成分は、 Na^+ と K^+ 並びにそれらの合計とバランスする OH^- である。通常は、硬化コンクリートのアルカリ供給源は、海砂の使用や飛来塩化物の要因を考慮しなければ、セメントに含まれる酸化アルカリである。この酸化アルカリは、 R_2O 量（等価 Na_2O 換算量）で便宜上整理され、以下の式で算定できる。

$$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \times (62/94.2)$$

次図は、使用したセメントの K_2O 量とセメントペースト細孔溶液中の水酸化物イオン(OH^-)濃度との関係を実験的に求めたものである。この図から、 R_2O が増加するに従って、細孔溶液中の OH^- 濃度が上昇することが分かる。

硬化コンクリート中のアルカリは、次表の細孔溶液の化学組成をみても分かるように、 Na や K 等のアルカリ金属と水酸化物イオン(OH^-)の両面からの分析が可能である。

硬化コンクリートにおいて、アルカリを分析する場合、水溶液試料を調整する必要がある。これを行うためには、粉末試料を調整し、強酸処理や熱水抽出する方法と、コアを用いて高圧で細孔溶液を抽出する方法がある。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p173 参考)

【セメントの R_2O 量と細孔溶液の OH^- 濃度の関係 (セメントペースト)】

材齢 (日)	濃 度 (当量/L)				
	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	OH ⁻
1	0.008	0.13	0.32	0.45	0.43
3	0.008	0.25	0.41	0.65	0.58
7	0.006	0.27	0.45	0.72	0.64
28	0.006	0.27	0.45	0.71	0.64
72	0.004	0.20	0.45	0.66	0.59

(注) セメント：普通ポルトランドセメント

Na₂O 等価百分率：0.78%

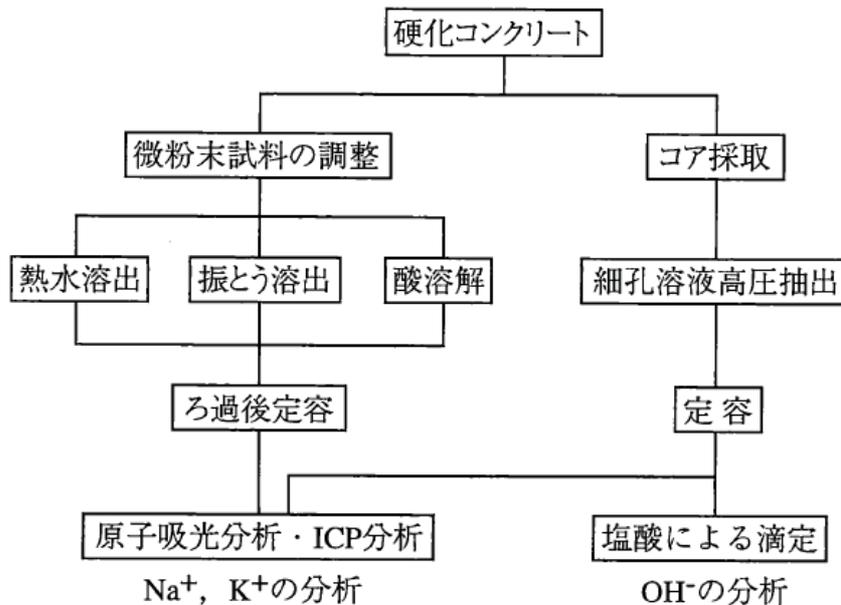
W/C：0.40, 標準砂/セメント：0.75

(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p172 参考)

【細孔溶液の化学組成】

(3) 試験・測定方法

コンクリートのアルカリ量分析は以下の手順で実施する。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p173 参考)

【試験実施フロー】

1) 微粉末試料による分析

まず、微粉末試料を調整する。作業は、コンクリート試料をハンマーで砕き、ジョー・クラッシャーで粗粉碎した後、更にダブル・ロール・クラッシャーで粉碎する方法や、振動ミルを使用して一挙に粉末試料とする方法等がある。そして最終的には、めのう乳鉢を用いて摩砕し、0.15mmふるい全通サンプルとする。このサンプルを 100℃ 乾燥器内で乾燥させ、デシケーター内にて冷却保存する。

次に、サンプル内のアルカリ分を抽出する。熱水抽出法では、煮沸した時に微粉末試料から溶出するアルカリ金属 (Na、K) の分析を行う。ビーカーに入れた微粉末サンプルを砂浴上で、時計皿をかぶせて煮沸する。放冷後、HCl を入れたメスフラスコに

ろ過して、定容したものが水溶液サンプルとなる。

振とう法では、常温で、振とうした時に微粉末試料から溶出するアルカリ金属 (Na、K) の分析を行う。微粉末試料を共栓付き三角フラスコに秤り取り、蒸留水を加え、振とうした後、吸引ろ過装置でろ過を行い、メスフラスコにて定容したものがサンプルとなる。

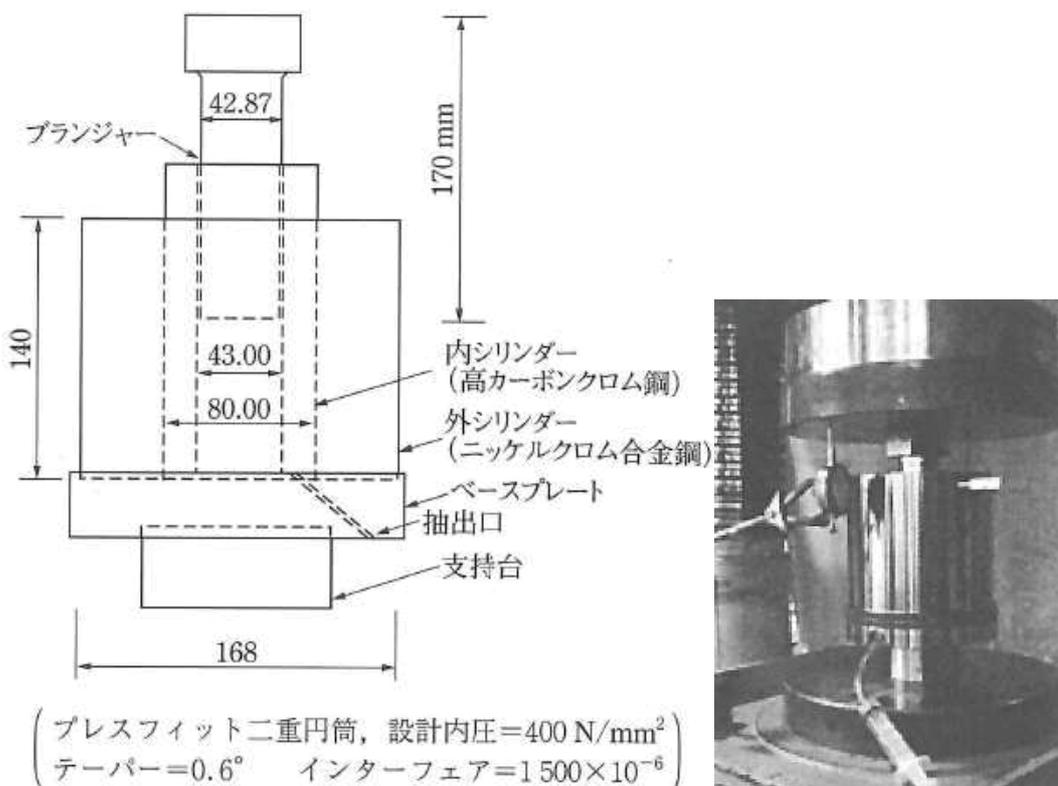
強酸溶解法は、セメントの化学分析法 (JIS R 5202) に準拠して行われるものである。微粉末サンプルをビーカーに秤り取り、過塩素酸を加えて、ガラス棒でかき混ぜて溶解し、砂浴上で加熱し、水分を蒸発させて、過塩素酸の白煙が出始めたらし計皿でふたをして、更に加熱を続ける。ビーカーを放冷した後、時計皿を水で洗って取り除き、塩酸及び温水を加えてかき混ぜ、ゼリー状の物質を溶解する。ろ過後、メスフラスコに洗い移し定容したものが水溶液サンプルとなる。

以上の方法で調整した水溶液サンプルを原子吸光光度計あるいは I C P にかき、Na と K の含有量を計測し、当初採取したサンプル量に対する重量百分率を求める。

2) コア試料による分析

採取した硬化コンクリートコアを密封容器内で加圧し、採取された細孔溶液の化学組織を調べる方法である。

細孔溶液は、下図のような装置を用いて、加圧抽出する。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p174 参考)

【細孔溶液抽出装置】

加圧抽出時には、同心円状二重構造の内部シリンダー内に $\phi 50\text{mm}$ のサンプルを入

れ、500N/mm²程度まで、ゆっくり加圧し、下端の抽出口から注射器を用いて細孔溶液を採取する。シリンダー内には、完全密封するために加圧板とサンプルの間にはテフロンシートを挟み込む。

採取された細孔溶液は、各種分析に供するが、一般的には、Na、K は原子吸光光度計又は I C P 発光分析装置を用いて、OH⁻はフェノールフタレインを指示薬とした塩酸滴定で分析する。

(4) 試験結果の活用

細孔溶液の相対的なアルカリの変化を追跡することによって、アルカリシリカ反応等の解析に有用である。硬化コンクリート中のアルカリ含有量は、サンプルを絶乾状態にした時の自由水量の変化から、アルカリ含有量を求め、分析結果（濃度）をコア全体の含有量に換算して、コア質量に対する百分率を求める。

(5) 精度・適用限界

微粉末試料を分析する場合、骨材を含む硬化コンクリート単位質量当りのアルカリ量を分析することになり、他の化学分析手法と比較して測定精度に劣る。そこで、セメントペースト中あるいは使用したセメントのアルカリ量を推定する場合には、硬化コンクリートの配合推定を行い、換算する必要がある。

細孔溶液抽出法は、セメントペーストやモルタル供試体の分析用として開発されたものであり、硬化コンクリートを対象とした事例は現時点では少ない。誤差要因としては、現場から採取したコンクリートサンプルの場合、大きさ並びに上下端面がシリンダー内にフィットしないこと、粗骨材がセメントモルタル部分の載荷速度を不均一にしまうこと等が考えられる。誤差を最小限にするには、φ50mm×高さ100mmの円柱サンプルを基本とし、サンプルの精度の良いサイズ調整を行うとともに、載荷前に十分な水中養生を行い、サンプルを飽水状態にしておく必要がある。

10. 骨材の反応性

(1) 概要

岩石学的試験は、使用骨材の岩種や骨材に含有される反応性鉱物の種類を調べることで、骨材のアルカリシリカ反応性を間接的に推定するものである。

新設時におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性は、JIS A 1145 に規定される化学法及び JIS A 1146 に規定されるモルタルバー法によって試験することが定められている。

既設構造物に使用された骨材のアルカリシリカ反応性を調べる際には、構造物より採取したコンクリート塊を 5% 程度の希塩酸に浸漬し、骨材に付着したセメントペースト分を完全に溶解させ、骨材のみを取り出して、同様な試験を実施する。

(2) 試験・測定方法

1) 岩石学的試験

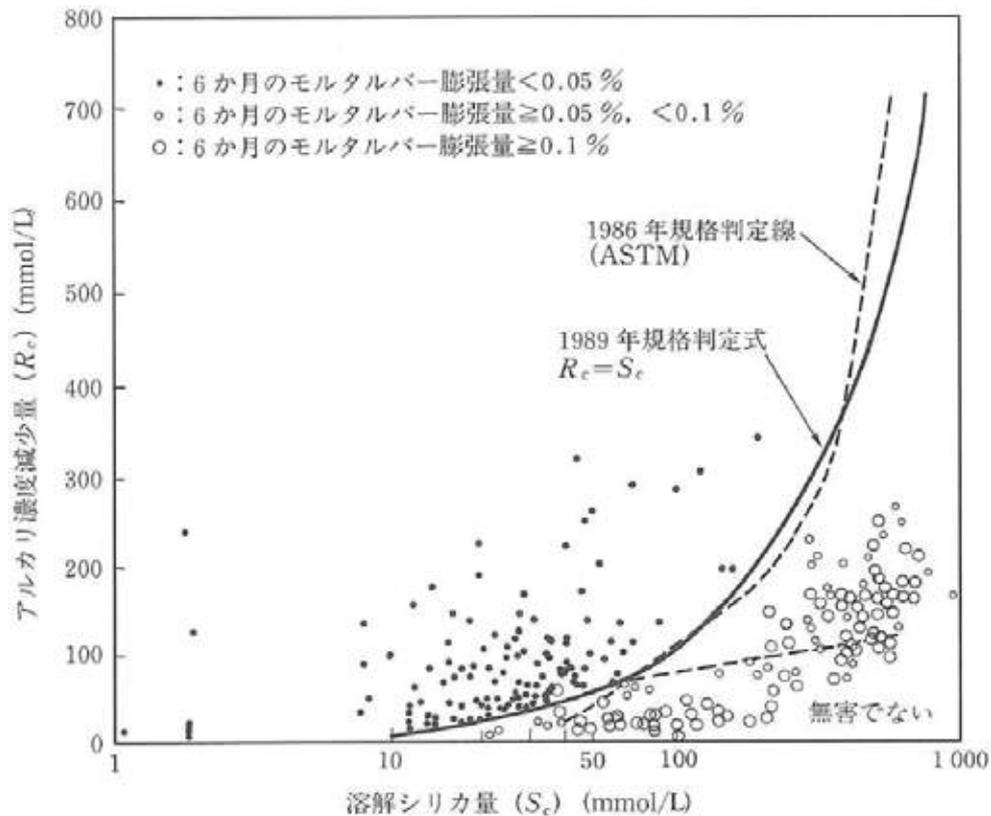
岩石学的試験（偏光顕微鏡観察、粉末 X 線回折、SEM-EDS（走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型エックス線分光器）、赤外線吸収スペクトル分析等）は、使用骨材の岩種（安山岩、流紋岩、チャート等）や反応性鉱物（クリストバライト、ドリデイト、微晶質又は歪んだ結晶格子をもつ石英、火山ガラス等）の種類とその量を調べる際に実施される。

例えば、偏光顕微鏡観察では、鉱物学学識経験者が、コア中の粗骨材の薄片試料を作成して偏光顕微鏡観察を行い、アルカリシリカ反応性鉱物の有無を判定する。粉末 X 線回折では、採取コアから粗骨材を取り出し、粉末 X 線回折法により骨材の構成鉱物を同定し、有害な鉱物の有無を判定する。

2) 化学法

化学法（JIS A 1145）では、粒度 0.15~0.3mm に調整した骨材試料 25g と 1N の NaOH 溶液 25ml を 80℃ の温度条件を 24 時間保持した時に得られるアルカリ濃度減少量 (Rc) と溶解シリカ量 (Sc) の関係を下図のような判定図にプロットして、「無害」又は「無害でない」と判定する。判定基準は、溶解シリカ量 $\geq 10\text{mmol/l}$ かつアルカリ濃度減少量 $< 700\text{mmol/l}$ で溶解シリカ量 (Sc) / アルカリ濃度減少量 (Rc) ≥ 1 の場合に「無害でない」と判定する。

また、化学法（ASTM C 289）の判定図には、「潜在的有害」の領域（Sc と Rc が共に大きい領域）が存在するが、この領域にプロットされる骨材の多くは高いアルカリシリカ反応性と顕著なペシマム現象を示すことが確認されている。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p176 参考)

【アルカリシリカ反応性試験（化学法）の判定図（JIS A 5308-1989 解説）】

3) モルタルバー法

モルタルバー法（JIS A 1146）では、セメントの等価アルカリ量（ $\text{Na}_2\text{O eq.}$ ）が 1.2% になるように、水酸化ナトリウムを添加したモルタル供試体を湿気箱（ 40°C 、相対湿度 95%以上）に保存し、所定間隔でモルタルの膨張量を測定する。判定基準は、6 箇月後の膨張率 $\geq 0.100\%$ （若しくは 3 箇月後の膨張率 $\geq 0.050\%$ ）の場合に「無害でない」と判定する。

なお、化学法で「潜在的有害」（ S_c と R_c が共に大きい領域）と判定された場合は、ペシマム混合率に留意する必要がある。

4) 迅速法

迅速法は、主としてコンクリートの生産工程管理用に適用されるものであり、JIS A 1804 として規格化されている。モルタルバーを高温、高圧下で養生し、超音波伝播速度、動弾性係数、長さ変化を測定することによって迅速に骨材のアルカリシリカ反応性を判定する。

一方、化学法（ASTM C 289）に代わる手法として、判定結果が迅速に得られる促進モルタルバー法（ASTM C 1260）が普及しつつある。本試験法では、温度 80°C の 1N の NaOH 溶液中に浸漬したモルタル供試体の 14 日間の膨張量で、0.1% 以下を「反応性なし」、0.1~0.2% を「不明」、0.2% 以上を「反応性あり」と判定する。促進モルタルバー法により「反応性あり」と判定された場合には、更にコンクリートプリズム法（ASTM

C 1293) を実施し、実際のコンクリート供試体での膨張量を測定する方法が提案されている。

(3) 試験結果の活用

骨材のアルカリシリカ反応性が確認された場合、その骨材を使用した構造物はアルカリシリカ反応を生じる可能性があるものと判定する。ただし、構造物へのアルカリシリカ反応の影響については、反応性の骨材の混入程度によることも考慮する必要がある。

(4) 精度・適用限界

岩石学的試験では、各種分析機器の取扱いや岩種及び反応性鉱物の同定に熟練度が要求されるので、実施できる機関が限定される。また、骨材のアルカリシリカ反応性は骨材の粒径やその混合比率（ペシマム混合率）により異なるので、骨材のアルカリ反応性を正確に判定することは困難とされている。

化学法は、短時間に結果が得られる利点があるが、全ての骨材のアルカリシリカ反応性の判定に適しているのではなく、判定できない種類の骨材もあることに留意する必要がある。

モルタルバー法では、判定までに長期間を必要とするとともに、測定期間中に供試体内部より比較的多量の水酸化物イオンが漏出することが問題となる。また、微細な結晶粒や歪んだ結晶格子をもつ石英が反応性鉱物であるチャート等の骨材では、膨張が非常にゆっくりと進行するので、現行の判定基準では適切に評価できないことが課題である。

1 1. コンクリートの促進膨張試験

(1) 概要

使用する骨材にアルカリシリカ反応性があれば、調査時にアルカリシリカ反応の兆候が確認されなくても、長期の供用期間中には構造物に劣化が生じる可能性がある。

構造物を構成するコンクリートが、調査時までアルカリシリカ反応によってどの程度膨張していたか、あるいは今後どのような速度で、最終的にどの程度まで膨張するかについて、構造物から採取したコアを用いて測定する解放膨張量及び残存膨張量がある。

(2) 試験・測定方法

構造物からコアを採取する際には、ひび割れ等が発生している箇所はできるだけ避けて、少なくとも2本以上のコアを構造物より採取する。JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア採取による膨張率の測定方法」では、「コアは原則として直径100mm、長さ約250mmとする」と規定されている。しかし、RC及びPC構造物からのコアの採取において、鋼材の間隔との関係で所定の直径や長さが得られないことが多い。この際には、直径75mm及び直径50mmのコアが採取されるが、コアの長さは直径の2倍以上を確保する。そして、採取したコアは、乾燥や炭酸化の影響を受けないように、現地で直ちに密封する。

なお、構造物の表面部(50mm程度まで)は、ひび割れの発生、中性化、アルカリの溶出・濃縮の影響を受けている可能性があるため、膨張を測定する対象からは除く必要がある。試験対象のコアには、下図に示すようなステンレス製のバンドを取り付け、恒温室内で膨張量を測定する。膨張量の測定は、コアに接着したポイント間の距離をコンタクトゲージを用いて測定する。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p178 参考)

【促進養生試験体の概要】

(3) 試験結果の活用

下表は、促進養生条件下でコアの膨張量を測定する方法及び判定基準を示したものである。コアによる残存膨張量の測定では、温度40℃、相対湿度95%以上の湿気箱にて実施する方法(JCI-DD2)がよく用いられる。本方法では、コアの膨張量が0.1%以上の場合に「残存膨張性あり」と判定するが、膨張量の測定期間中にゲルの滲出の影響で途中から収縮傾向を示すことがあり、判定基準値を設定することが難しい場合もある。

【コアの促進養生試験における判定基準】

試験法名称	促進養生の条件	判定基準
JCI-DD2法	温度40℃、湿度95%以上の条件下にて養生	建設省(現 国土交通省)総合プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」では、40℃、100%R.H.の条件下に13週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害又は潜在的有害と判定する。 阪神高速道路公団(現 阪神高速道路株式会社)では、全膨張量が0.1%を超える場合、有害と判定する。
デンマーク法	湿度50℃の飽和NaCl 溶液中に浸漬	試験材齢3箇月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上：膨張性あり 0.1～0.4%：不明確 0.1%未満：膨張性なし
カナダ法(NBRI法)	温度80℃の1NのNaOH 溶液中に浸漬	ASTM C 1260-94の判定基準：試験開始後14日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合：無害 0.10～0.20%の場合：有害と無害な骨材が含まれる。 (この場合、14日以降も更に試験を継続する) 0.20%以上の場合：潜在的に有害な膨張率

(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p178 参考)

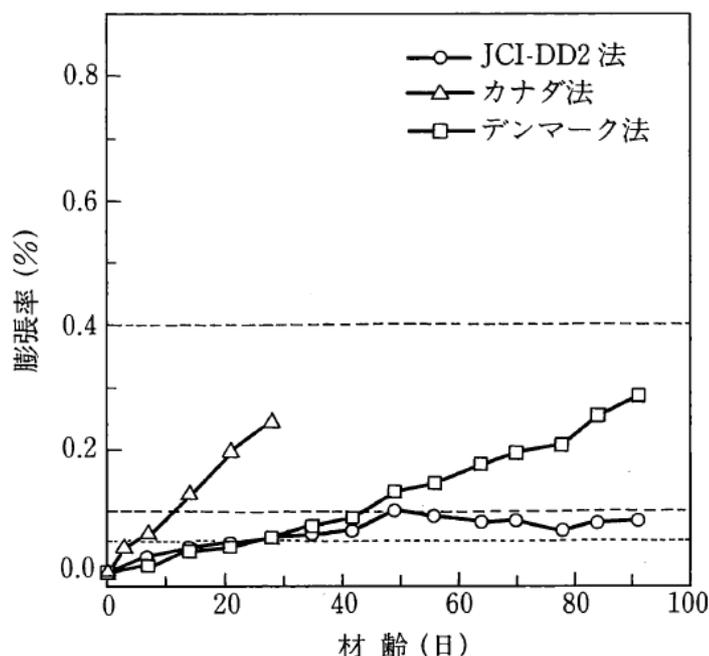
なお、下表に示すように、直径 100mm のコアが示す膨張率に対して、直径 75mm のコアを用いた場合には約 60%、直径 50mm のコアを用いた場合には約 20%程度の値に低下するという報告もあり、安全側の評価とするための参考とすると良い。

【コア径の違いによる膨張率の比の例】

コアの径(mm)	反応性骨材混入率 50%		反応性骨材混入率 100%		範囲(平均)
	拘束なし	拘束あり	拘束なし	拘束あり	
	100	1.00	1.00	1.00	
75	0.45	0.77	0.61	0.53	0.53 ~ 0.77(0.61)
50	0.11	0.28	0.11	0.33	0.11 ~ 0.23(0.21)

(コンクリート構造物からのコア試料の採取方法(案)、日本コンクリート工学協会 耐久性診断研究委員会報告書 p1-3 参考)

この方法以外に、温度 80℃の 1N の NaOH 溶液に浸漬する方法 (ASTM C 1260、カナダ法)、温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬する方法 (デンマーク法)がある。湿気箱にて実施する方法 (JCI-DD2) では、特にコアの直径や長さが小さい場合、コアからのアルカリの溶出の影響で、膨張量の測定結果が小さくなり、正しい評価ができなくなる。これに対して、外部から NaOH や NaCl を供給する試験方法では、下図に示すように、膨張量が伸び続ける傾向となるので、残存膨張性の評価が容易となる利点がある。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p179 参考)

【促進養生試験におけるコアの残存膨張量の比較例】

(4) 精度・適用限界

構造物から採取したコアの解放膨張量は、コア採取時の水や応力解放の影響を複雑に受けており、測定値は厳密にはコアの膨張量を示すものではないこと、また残存膨張量はあくまでも促進環境下におけるものであり、実際の環境下における膨張量ではないことに留意する必要がある。

更に、実際の構造物の膨張挙動は、鉄筋による拘束の影響を受けるので、構造物の拘

束鉄筋比との関係から将来における膨張量を予測することが望ましい。

促進膨張試験の判定基準値（表【コアの促進養生試験における判定基準】参照）は、骨材のアルカリシリカ反応性の試験に準拠したものが使用されることが多い。このため、コアの促進膨張試験における残留膨張性の「あり」「なし」を判定する基準値は、現状では実構造物の将来の膨張挙動との対応関係が必ずしも明確ではないことに留意する必要がある。

なお、同一のコンクリートであっても、水分の供給状況等の供用環境によって劣化進行が偏在する場合がある。したがって、コアを採取する箇所は、供用環境や外観上の劣化状態を区分した上で、各々の代表箇所とする等、試験の目的を十分に考慮して選定する必要がある。

また、骨材の種類によっては、アルカリシリカ反応が緩やかに長期にわたって進行するものもある。そこで、所定の試験期間を経ても、膨張傾向が増加傾向であれば、更に試験期間を延長することが望ましい。

1 2. コンクリートの細孔径分布

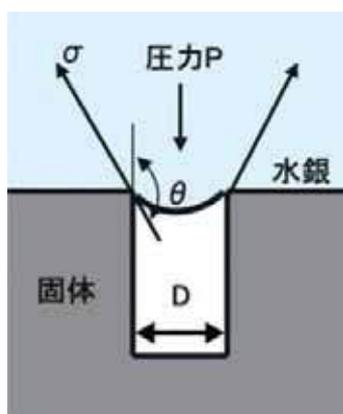
(1) 概要

コンクリートの細孔径分布は、圧縮強度に影響するばかりでなく、コンクリート中の物質透過性に大きな影響を与えるため、コンクリートの耐久性を評価するための指標となる。

コンクリートの細孔径分布試験は、一般に水銀圧入式ポロシメーターを用いて、コンクリートの細孔の大きさ（数 nm～数百 μm ）とその分布状態を測定するものである。

(2) 原理

試料に水銀を高圧で注入し、加えた圧力と注入された水銀の量との関係を基に、細孔径分布を求める。加える圧力 P と水銀が注入される細孔の直径 D の間には式 (1) の関係があり、両者は反比例する。すなわち、圧力を増加させると、それに応じて水銀はより微細な孔に注入される。



$$D = -4\sigma \cos \theta / P \quad (1)$$

D : 細孔の直径、 σ : 水銀の表面張力、 θ : 水銀の接触角、 P : 圧力

力の釣り合いから $-\pi D \sigma \cos \theta = (\pi D^2/4) P$
これより $D = -4\sigma \cos \theta / P$
 θ と σ は定数であるから、 D と P は反比例の関係になる

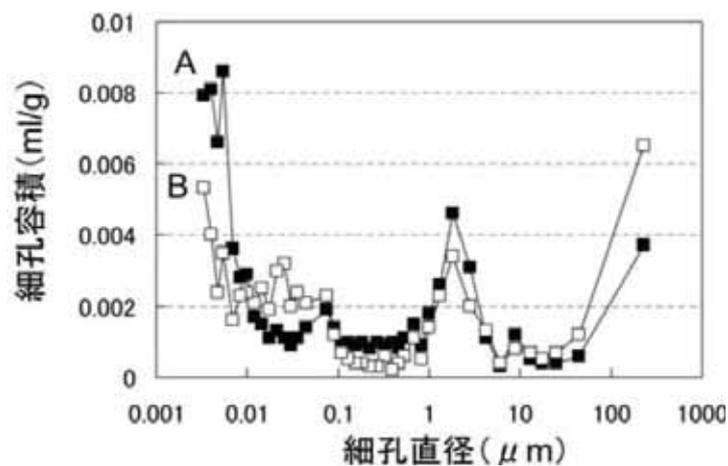
【水銀圧入法による細孔径分布試験の原理】

(3) 試験・測定方法

コアのモルタル部分（1回の測定当たり真空乾燥後の直径 2.5～5mm 程度の粒子）を試料として、水銀圧入式の細孔径分布測定装置を用いて、圧力を段階的に変化させながら水銀の注入量を求め、それをその圧力に相当する大きさの細孔の累積量とする。最終的には、細孔の大きさ毎に存在量が求まる。



【細孔径分布試験用試料と細孔径分布試験装置（水銀圧入式ポロシメーター）の例】



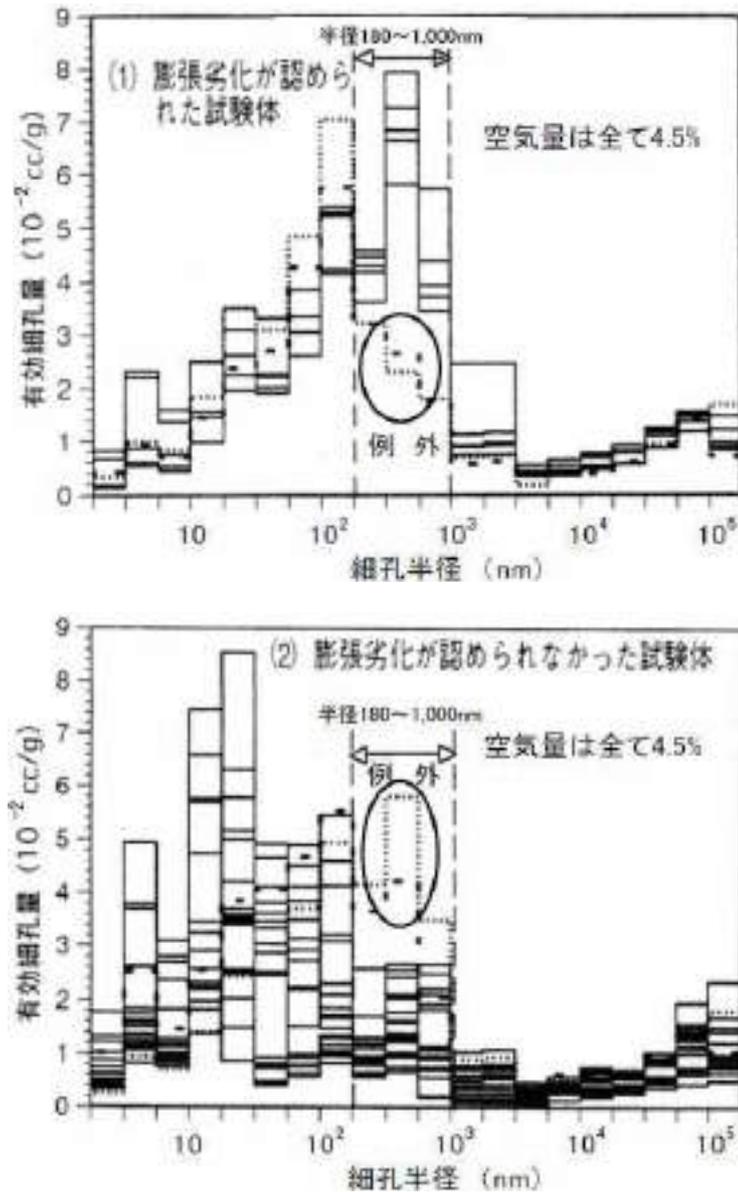
((株) 太平洋コンサルタント、HP 水銀圧入ポロシメーター (MIP) 参考)

【細孔径分布の測定例】

(4) 試験結果の活用

コンクリートの細孔構造を測定することで、凍結融解作用に対する抵抗性を評価することができる。以下に評価例を示す。

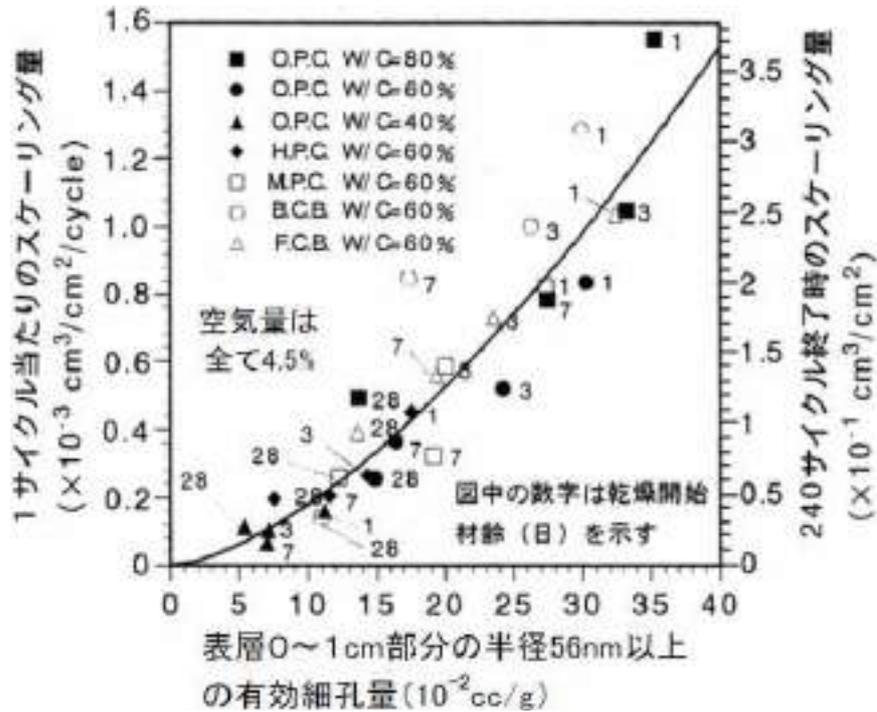
下図は、JIS A 1148 に基づき凍結融解試験を行った結果、図中 (1) に動弾性係数の低下や長さの増加がみられた試験体の細孔径分布を、図中 (2) に動弾性係数に低下がみられず長さも変化しなかった試験体の細孔径分布を示したものである。本図より、凍結融解試験により膨張劣化を生じたコンクリートの細孔径分布 (図中 (1)) は、膨張劣化が生じなかったコンクリートの細孔径分布 (図中 (2)) に比し、半径 180nm~1000nm の細孔量が多いことが分かる。



※図中に例外と示すデータは、コンクリートの材齢初期から乾燥を受けた場合にみられるものである。
 (コンクリートの細孔構造による耐凍結融解性評価、日本大学生産工学部建築工学科建築材料研究室 参考)

【膨張劣化の有無と細孔径分布の例】

下図は、スケーリング量と表層 0~10mm のコンクリートの細孔径分布との関係を示している。本図より、スケーリング量は、有効細孔量 56nm 以上の細孔量と高い相関のあることが分かる。なお、この下限値 56nm は凍結最低温度 (-18℃) の場合の結果であり、凍結最低温度が下がると、更に下限値は小さくなる可能性がある。



(コンクリートの細孔構造による耐凍結融解性評価、日本大学生産工学部建築工学科建築材料研究室 参考)
【半径 56nm 以上の細孔量とスケーリングの関係の例】

(5) 精度・適用限界

細孔径分布試験には、直径 2.5~5mm 程度の非常に小さな試料が用いられる。このことは、少量の試料で試験でき多点のサンプルを得やすいメリットがある反面、練り混ぜ調合等に起因する W/C の僅かな品質のバラツキによる影響を受けやすいデメリットがある。このため、ブリーディング等の影響が出やすいごく表層部からの試料採集は避け、更に複数の試料より試験値を得ることが望ましい。

また、細孔径分布は、セメントの種類（十分には解明されていないが、水和生成物容積等の違い）にも影響を受けることから、異なる材料を横並びで評価することはできない。

水銀圧入法のほかにも、非水銀液体押出法、気体吸着法による測定法がある。水銀圧入法は測定範囲が広いので、大まかな細孔分布特性が未知の場合に有効であり多く用いられている。環境汚染の危険度を考慮すると、水銀を使用しない新しい試験方法の確立が望まれる。非水銀液体押出法の改善により、100nm 前後の細孔分布まで測定できるようになれば気体吸着法の測定結果と合わせることで水銀を使用せず環境に配慮した測定法を確立できる可能性がある。

13. コンクリートの気泡分布

(1) 概要

コンクリートの耐凍害性を確保するためには適切なエントレインドエアの連行が必要であり、一般にはフレッシュコンクリートの空気量を測定することによって品質管理を行っている。しかし、厳密には耐凍害性に重要な気泡特性はその空気の絶対量ではなく、気泡と気泡との間の距離（気泡間隔係数、 $200\sim 250\mu\text{m}$ 以下であれば耐凍害性に優れる）であると言われている。

硬化コンクリート中の気泡組織の測定には、ASTM C 457「顕微鏡によるリニアトラバース法又は修正ポイントカウント法」が従来は用いられてきたが、測定に多大な労力と時間を要する欠点があることから、画像解析技術の発展を背景として昭和55年代後半から画像解析装置を用いて自動的に気泡組織を観察する方法が開発され、現在は主流となりつつある。

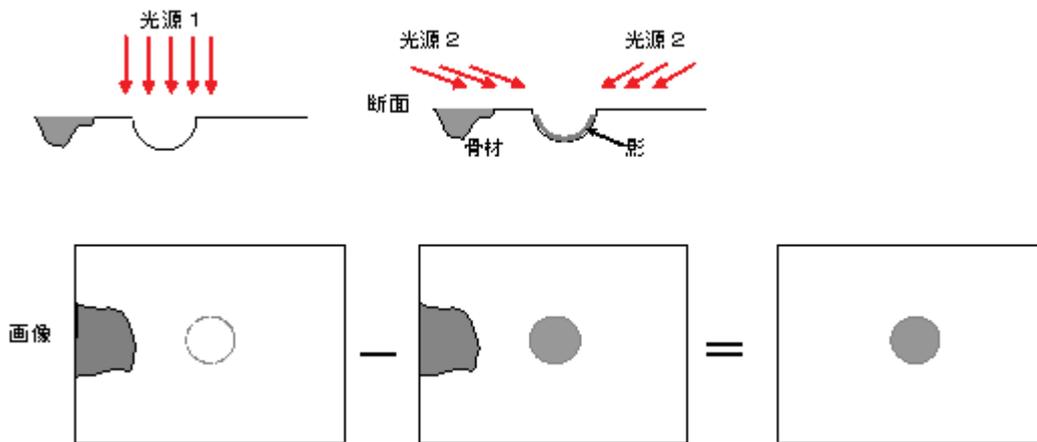
(2) 原理

ASTM C 457に準拠したリニアトラバース法は、硬化コンクリート中の気泡に対して、空気量、気泡間隔係数等を測定するための方法である。本手法では、供試体を横切る平面上に一定間隔で設定された線上を走査して、各成分の区域を横切り通過した距離の総和を求め、固体の体積組織を決定する。

従来の測定方法は、実体顕微鏡下において肉眼で行い手動ステージを操作しながら硬化コンクリート中の 10μ 程度から数mmまでの気泡の分布を測定するため、気泡部分とセメントペースト部分や骨材部分を分けて計測する必要があった。更に、幅広い測定レンジを詳細に観察するため1サンプル数時間という多大な時間と労力を測定作業者に要し、また、測定作業者の熟練度や個人誤差が測定値に大きく影響を与えていた。そこで熟練した測定作業者による肉眼での認識精度と同じレベルでの自動化された手法が求められた。

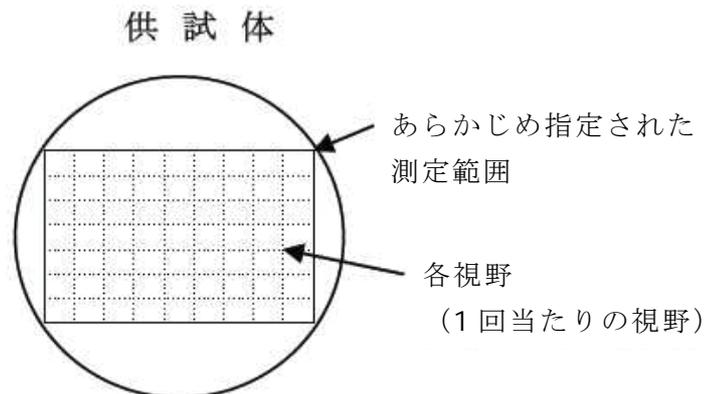
ASTM C 457に準拠したリニアトラバース法による測定を自動的に短時間で行うことのできる画像処理による硬化コンクリート気泡計測装置を活用した気泡分布測定方法について以下に解説する。

この画像処理による硬化コンクリート気泡計測装置は、測定面への光の当て方により気泡部で生じる陰影の違いを利用して気泡を抽出する。



【画像処理による測定原理】

測定時はあらかじめ指定された範囲内において視野を分割して順次撮像し測定を行う。各視野の測定データは画像処理装置に蓄積され全視野の測定終了後に空気量、気泡間隔係数等の出力値を算出する。測定範囲と各視野との関係を下図に示す。



【測定範囲と各視野との関係】

(3) 試験・測定方法

基本的な測定原理は、デジタル画像上の濃度差分法（図【画像処理による測定原理】参照）により気泡を認識し、2値化することにより、リニアトラバース法へと展開し測定を行う。しかし、気泡には浅い気泡と深い気泡の2種類が存在する。浅い気泡とは、薬品等で人為的に硬化コンクリートに発生させた気泡（エントレインドエア）であり微細で形状は球状に近い。一方、深い気泡とは、製造工程上の原因で巻き込まれた気泡（エンラップドエア）であり測定対象面からの深さが穴の入り口の断面の狭い部分の幅より大きく形状は不定形である。浅い気泡に関しては、下図の濃度差分法で抽出する。深い気泡に関しては、濃淡画像のサチュレーション現象（照明の集中による反射強度アップ）により抽出する。

そして、浅い気泡のみを抽出した2値画像と、深い気泡のみを抽出した2値画像との画像論理和を行い、気泡測定画像を作成しリニアトラバース法による測定を行う。

リニアトラバース法の測定から、空気量（硬化コンクリートの体積に対する体積百分

率で表したコンクリート中の空気泡の体積比)、気泡間隔係数(気泡の表面からセメントペースト中の点に至る最大距離)といった気泡組織に関するパラメータを算出する。

(4) 試験結果の活用

一般に、気泡間隔係数が200~250 μm 以下であれば耐凍害性が確保できるとされ、これと照らした評価を行う。空隙中の水が凍結する過程では、凍結による膨張に伴って空隙の壁に静水圧が作用し、これが引張強度に達したときにひび割れが生じる。この静水圧は、気泡の間隔のほか、最低温度、凍結速度、飽水程度によっても異なってくる。また、コンクリート中の細孔の径が小さいほど氷点が降下する現象が確認されており、更に凍結過程では過冷却現象も加わることから、これに対抗するための耐凍害性は一様ではない。以上に示す様々な条件によって影響を受けることに留意が必要である。

(5) 精度・適用限界

本手法における従来法(目視測定)との相関値は、空気量で0.96程度、気泡間隔係数で0.85程度としている。また、測定結果の再現性を標準偏差で示すと空気量で0.16程度、気泡間隔係数で0.007程度としており、一定の精度が確保されているものと判断される。従来法(目視による測定)では測定作業員の違いによる誤差があり、測定時間については従来法で2~3時間のところ画像処理で約2~3分と短縮されたことを勘案すると、十分に実用的な方法といえる。

1 4 . 弾性波を利用した内部欠陥調査

(1) 概要

コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ、これをコンクリート表面の受振子で測定し、内部の欠陥の位置や寸法を測定する方法を弾性波法という。弾性波法は、その利用周波数範囲や弾性波の生じ方、受信方法によって、超音波法や衝撃弾性波法等いくつかの手法に分類される。さらには、コンクリートの打撃音を利用する打音法も弾性波を用いた方法と考えることができる。以下に、各手法の概要を示す。

1) 超音波法

使用周波数が 20kHz 以上の超音波域と呼ばれる周波数帯を主に使用し、発振子からコンクリート中に発射された弾性波を受振子で測定する手法である。到達時間、波形、周波数、位相等の変化を測定装置で読み取ることにより欠陥を検出する。これらはセンサの配置方法により表面法、透過法、反射法、斜角法に分類される。

2) 衝撃弾性波法

ハンマー等によりコンクリート表面を打撃して弾性波を発生させ、これを受振子で測定する手法を衝撃弾性波法と呼ぶ。物理的な打撃によるために、一般的には超音波域よりも低い 20kHz 以下の周波数成分の波を使用することになる。受振子で促えた反射エコーや波の周波数、位相等を分析することにより、部材厚さ、内部欠陥や背面空洞の有無、欠陥までの距離等を推定する。

3) 打音法

基本的には衝撃弾性波法とほぼ同様の原理であり、打撃によりコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波がコンクリート表面から空気中に放射されたものを測定する。打音法では、通常は可聴域と呼ばれる 20Hz~20kHz の周波数域の音（弾性波）を使用する。衝撃弾性波法と比較して、周囲の騒音の影響を受けやすい難点があるが、受振子を用いないためコンクリート表面の性状に影響を受けにくい、測定が簡便等の長所がある。

ただし、上記で述べた 3 つの手法に分類されても、ひび割れ深さや剥離、空洞等、測定対象によって原理が異なる場合があり、弾性波は、他の非破壊検査手法と比べて多様なものとなっている。また、上記以外にコンクリートのひび割れ発生・進展に伴って発生し伝播する弾性波を検出するアコースティック・エミッション法（AE法）も弾性波を用いた手法に分類される。

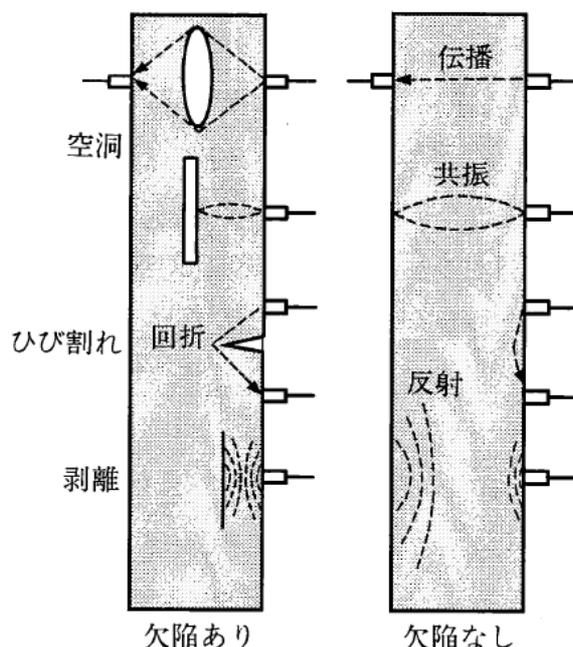
(2) 原理

加振点から発せられた弾性波は、コンクリート中を直進、反射、回折を繰り返しながら散乱、拡散していく。地震波と同じく弾性波には、縦波（P波）、横波（S波）、レリー波等の表面波があり、同一物質内でもそれぞれ伝播速度が異なる。コンクリート

における弾性波伝播速度は縦波が最も速く（通常のコンクリートで 4000～4500m/sec 程度）、横波と表面波はほぼ同じ速度（2500～3000m/sec 程度）である。

このような、弾性波を用いてコンクリート中の欠陥を検知する方法は、基本的にはコンクリート中のひび割れ、剥離箇所、空洞等に存在する空気層との境界で弾性波のほとんどが反射してしまうことを利用している。弾性波は、物性の異なる媒質の境界面でのエネルギーの一部が反射する性質を有している。このときの反射率は、それぞれの媒質の弾性波伝播速度及び密度によって決まり、例えば、コンクリートと空気の間ではエネルギーの 99.98%が反射する。

下図は、弾性波法によるコンクリート中の欠陥の検知状況を概念的に示したものである。



（コンクリート診断技術’ 14 [基礎編] p113 参考）

【コンクリート中の欠陥による弾性波の伝播状態の変化の概念図】

弾性波によって欠陥を検知する原理は、既に述べたとおり細かく分類すれば各種あるが、大まかには下記のように分類される。

1) 透過波や反射波、回折波の伝播時間測定による方法

前図の最上段あるいは3段目のように、内部に空洞がある場合やコンクリート表面に垂直にひび割れがあるような場合、発振子から発せられた弾性波は、空洞やひび割れを迂回せざるを得ず、健全な場合と比較して弾性波の到達時間が遅れることになる。この原理を利用し、伝播時間測定により弾性波の迂回を抽出することで、欠陥を検知する。

2) 共振周波数測定による方法

前図の第2段目のようにコンクリート部材厚さ方向に共振が生じることがある。内部に空洞が存在する場合や、コンクリート表面に水平なひび割れが存在する場合には、

その間で共振が発生するために、共振周波数が変化する。この共振周波数の変化を促えることで空洞等の存在を検知する。

3) 位相変化測定による方法

前図の第3段目のように、コンクリート表面からひび割れが発生している場合に、ひび割れを挟んで弾性波を伝播させると、ひび割れ先端で回折が生じる。このとき回折角度 90° を境に波の性質が変化し、受振点における到達波の位相が変化する。センサの位置を変化させて、回折角度が 90° となるセンサ位置を見つけることで、幾何学的にひび割れ深さを検知する。

4) 振幅等の空間分布の測定による方法

前図の最下段の例のようにコンクリート表面に剥離がある場合には、剥離面での反射によって弾性波が逸散しにくい状態となっているために、その表面を打撃すると大きな振幅の波が得られる。これにより一定エネルギーでコンクリート表面を打撃してその表面振動の振幅分布を測定することで、剥離位置を検知する。

(3) 試験・測定方法

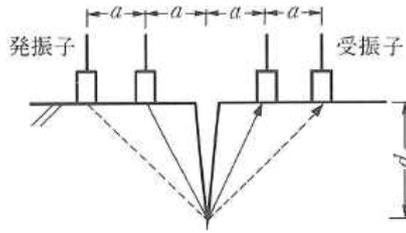
1) 伝播時間測定によるひび割れ深さ測定

弾性波伝播時間は弾性波入力波の立ち上がり時刻と、受振波形の立ち上がり時刻との差から求める。ここで、ひび割れを挟んだ発振子と受振子間の弾性波伝播時間測定により、ひび割れ深さを測定することを考えると、一般的にはひび割れ深さ d と弾性波速度 V_p が未知となる。このとき弾性波速度が既知であればひび割れ深さのみを未知として、①式に示すように幾何学的な計算によってひび割れ深さを求めることができる。もし、弾性波速度も未知であるような場合には、ひび割れのない箇所では弾性波速度をあらかじめ求めてからひび割れ深さを求める方法 (Tc-To 法等) や、振動子の間隔 a を変化させることによって伝播距離 L と弾性波速度 V を未知数とした連立方程式を解く方法 (BS法、修正BS法) 等がある。修正BS法における計算式は②式で示される。

$$d = \sqrt{(V \cdot t / 2)^2 - a^2} \quad \dots \dots \dots \text{①}$$

$$d = a \sqrt{(4t_1^2 - t_2^2) / (t_2^2 - t_1^2)} \quad \dots \dots \dots \text{②}$$

- ここに、
- d : ひび割れ深さ
 - a : ひび割れとセンサの距離 (ただし、修正BS法では $a \leq 100\text{mm}$)
 - V : コンクリートの弾性波速度
 - t : 発振子から受振子までの弾性波伝播時間
 - t_1, t_2 : ひび割れとセンサの距離が a 及び $2a$ の場合の弾性波伝播時間



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p115 参考)

【ひび割れ深さ測定（BS法）の概念図】

弾性波伝播時間測定によるひび割れ深さの測定例及び手順を以下に示す。

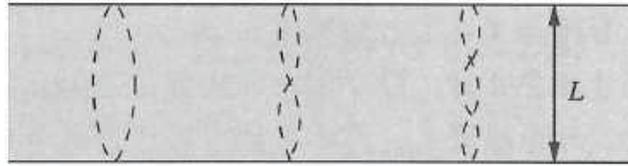
- ①測定準備として、受・発振子を接触させる、伝播速度及び長さが既知の基準試験体を受・発振子で挟む等して弾性波伝播速度を測定する。
- ②対象とするひび割れを挟み、コンクリート表面が平滑で他の欠陥の観察されない箇所を選定する。
- ③センサとひび割れの間隔を設定し（本測定では 150mm）、コンクリート表面の付着物等を取り除き、センサ設置位置の表面を平滑にする。
- ④センサ表面に接触媒質を塗布し、コンクリート壁面と密着させる。接触媒質としては超音波測定用のものが市販されているので、これを使用する。
- ⑤測定器を作動し、伝播時間を測定する。なお、このとき対象構造物が鉄筋コンクリートであるような場合、弾性波が鉄筋を通過して受振子に伝播する可能性があるため、ひび割れ方向にセンサを移動させて複数回の測定を行い、同様の結果が得られることを確認する。

2) 周波数測定による水平ひび割れ位置測定

周波数測定は、通常、波を高速フーリエ変換（Fast Fourier Transfer : F F T）して周波数スペクトルを求めることにより行う。周波数スペクトルを用いた測定の代表的なものとしては、共振周波数の測定がある。次図に示すような例では、コンクリート表面から打撃等により弾性波を生じさせると、コンクリート部材の厚さ方向に半波長の整数倍の共振が生じる。これを利用して、③式を用いてコンクリート内部欠陥までの距離や剥離深さを推定することができる。

$$L = nV_p / (2f) \quad \dots\dots\dots ③$$

- ここに、 L : 欠陥深さ
n : 共振周波数の次数
V_p : 弾性波伝播速度
f : 共振周波数



一次モード 二次モード 三次モード

(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p116 参考)

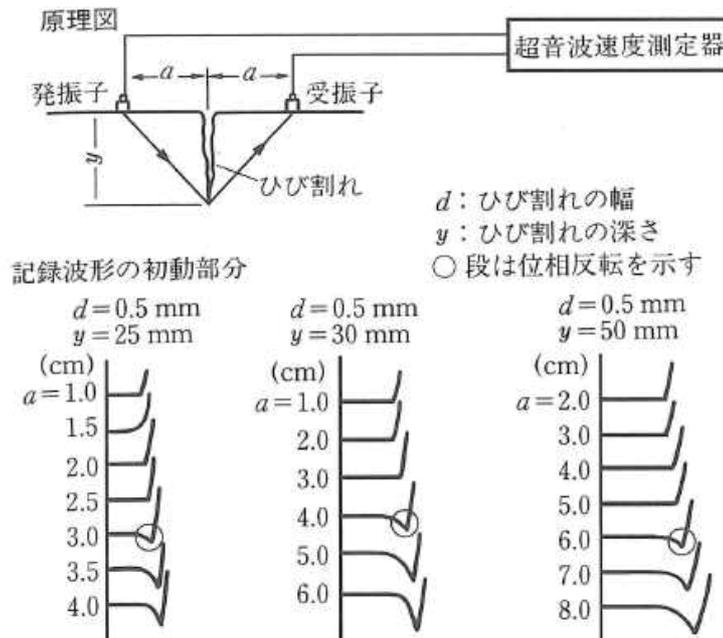
【弾性波の厚さ方向共振の概念図】

弾性波の共振周波数測定による水平ひび割れ位置測定の方法及び手順を以下に示す。

- ①水平ひび割れの可能性のある範囲を選定する。このとき与える衝撃と受振子の位置は同一にはできないが、受振子近傍で衝撃を与えることにより同位置での受・発振とみなす。共振測定ではその位置での深さ方向の共振測定となるので、例えば、200mm 間隔等で測定範囲内に測定点をあらかじめマーキングしておく。
- ②受振子を設置する表面の汚れを取り、必要に応じて表面を平滑にする。
- ③受振子に接触媒質を塗布し、壁面に密着させる。
- ④ハンマーで受振子近傍の壁面を打撃するとともに受信波形を取り込む。インパルスハンマーを用いる場合であれば、インパルスハンマーからの出力をトリガーにして受信波形を取り込むようにする。

3) 受信波の位相変化によるひび割れ深さ測定

ひび割れ深さ測定として位相を利用した場合、次図に示すように、位相が反転する受発振子間隔がひび割れ深さの2倍にほぼ等しいので、受・発振子間隔を変えてこれを求めることによりひび割れ深さを推定する方法である。この手順を以下に示す。



(コンクリート診断技術' 14〔基礎編〕 p117 参考)

【位相変化を利用したひび割れ深さ測定例】

- ①表面に見えるひび割れを挟んで、その直角方向の想定されるひび割れ長さ以上に測線を設ける。これにひび割れからの距離が分かるようにマーキングしておく。
- ②側線上のコンクリート表面の付着物を取り除き、表面を平滑にする。
- ③側線上に接触媒質を塗布し、ひび割れを挟んでひび割れ近傍に受振子、発振子を壁面に密着させる。
- ④発振子と受振子の位置をひび割れに対して線対称になるように保ち、ひび割れから遠ざかるように移動しながら受信波形を観察する。
- ⑤受信波形の立ち上がり部が図のように上向きから下向きに変化する点を探し出し、ひび割れからその位置までの距離をひび割れ深さとする。

4) 振幅分布の測定による方法

一定の打撃エネルギーでコンクリート表面を打撃した時に、条件が同一であればほぼ同様な弾性波が発生する。一方、内部に空洞や剥離が存在するような条件の異なる場合では、弾性波の伝播がこれらによって妨げられるために打撃点近傍の受振波の振幅が大きくなる。ここでは、インパルスハンマー（ヘッド質量 200g）及び打撃音を用いて剥離位置の検出を行う方法及び手順について述べる。

- ①剥離が懸念される範囲を選定し、碁盤目状に測定点をマーキングする。測定間隔は求めたい剥離寸法を目安に定める。
- ②打撃点の表面に付着物があればこれを除去する。打撃音で弾性波を取得する場合は、表面の平滑度はあまり問題にならない。
- ③マイクロフォンをマーキング位置のコンクリート表面に近いところに設置する。
- ④インパルスハンマーにてマーキング位置を打撃し、弾性波を発生させるとともに、これをトリガーとしてインパルスハンマー出力値及び打撃音を波形収録機に取り込む。
- ⑤インパルスハンマー出力値で打撃音入力値を除いたものを振幅比として計算し、各測定点の振幅比から等高線図を作成する。振幅比の大きい箇所を剥離位置と判定する。

打撃音測定波形について、④式に示すようにインパルスハンマーによる打撃入力波形の最大値で打撃音振幅最大値（絶対値）を除いたものを振幅比とする。これは、一定エネルギーの打撃を行う代わりに打撃入力値を既知として無次元化を図るためである。

$$R_A = A_m / A_i \quad \dots\dots\dots ④$$

ここに、 R_A ：振幅比

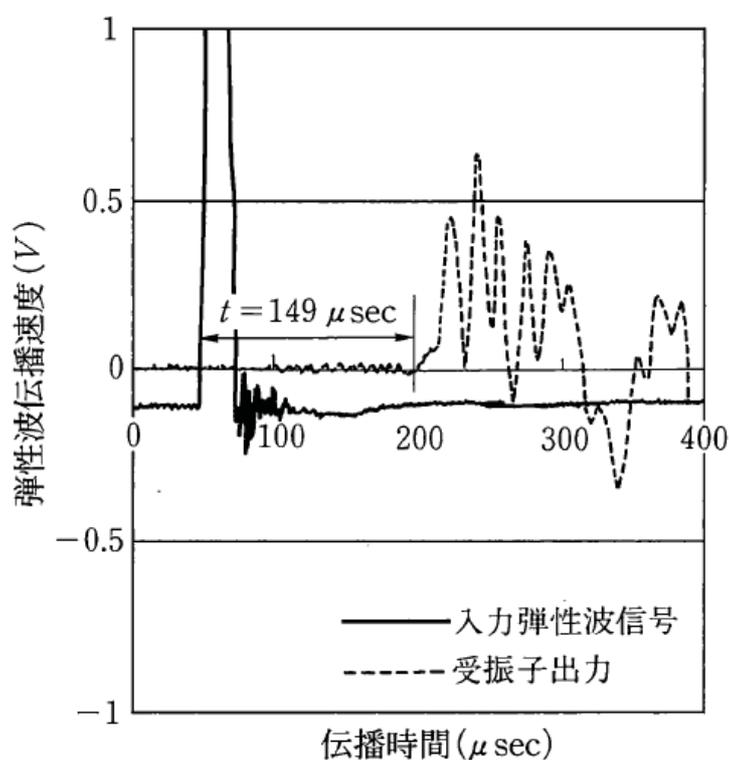
A_m ：打撃音最大振幅

A_i ：インパルスハンマー最大振幅

(4) 試験結果の活用

1) 伝播時間測定によるひび割れ深さ測定

次図は、ひび割れの両側 150mm 間隔でセンサを設置し、パルス波を与えたときの入力波及び受振波を表示した例である。図によれば、弾性波伝播時間 t は $149 \mu\text{sec}$ であった。このときのコンクリートの縦波弾性波速度は 4270m/sec であったので、①式よりひび割れ深さは 281mm と計算された。

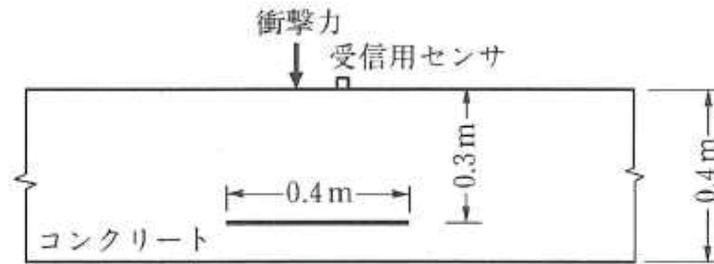


(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p115 参考)

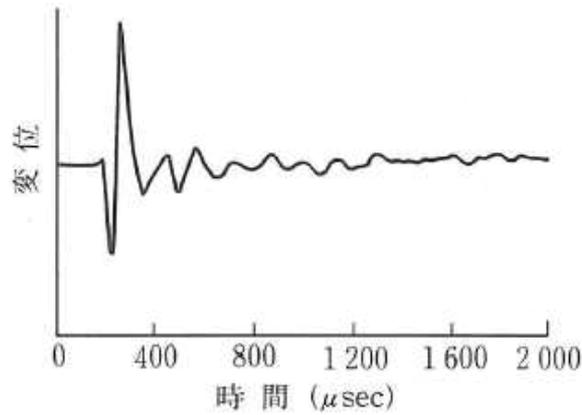
【弾性波伝播時間の測定例】

2) 周波数測定による水平ひび割れ位置測定

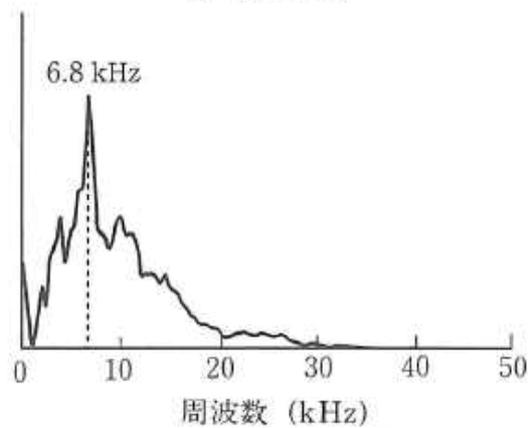
次図は、内部に水平なひび割れを有するコンクリートを衝撃弾性波法によって測定した例を示したものである。測定の結果、 6.8kHz に一次共振周波数と思われる卓越周波数が認められた。縦波弾性波速度 V_p が 3910m/sec であったので、これを③式に代入してひび割れまでの深さは 290mm と計算された。



(a) モデル供試体



(b) 記録波形



(c) スペクトル図

(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p116 参考)

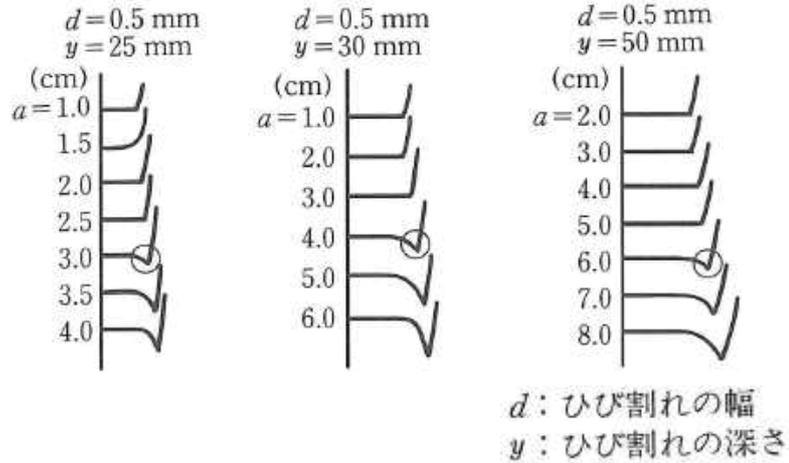
【衝撃弾性波法による共振周波数の測定例】

3) 受信波の位相変化によるひび割れ深さ測定

ひび割れ深さ測定として位相を利用した例を示す。次図の測定例では、ひび割れ深さ 25、30、50mm に対して、位相反転が認められた位置がそれぞれ 30、40、60mm となり、位相が下向きになる直前の距離がひび割れ深さに相当していることが分かる。

記録波形の初動部分

○ 段は位相反転を示す



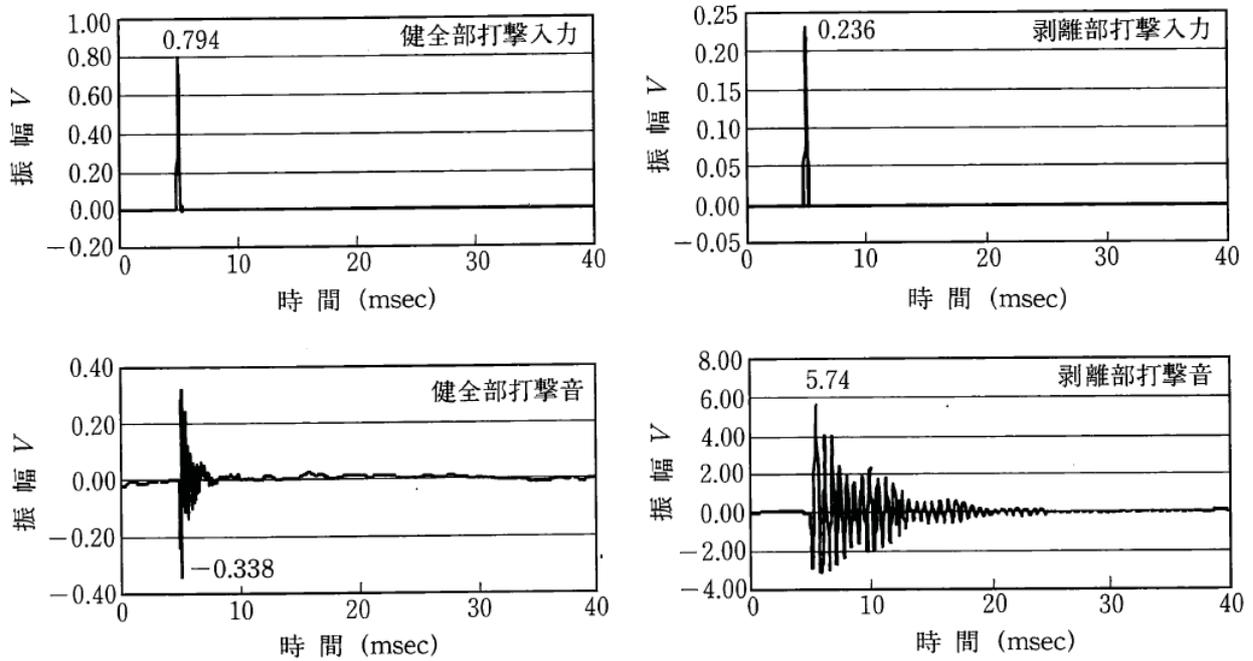
(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p117 参考)

【位相変化を利用したひび割れ深さ測定例】

4) 振幅分布の測定による方法

次図は健全部及び剥離部の打撃音測定波形である（なお、ここでは振幅は特に物理量に変換していない）。この波形について、④式を用いて振幅比を求めた。

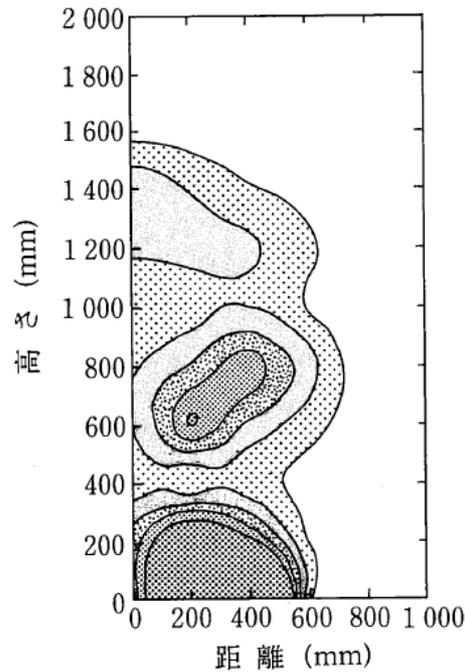
本例では健全部で 0.42、剥離部で 24.3 となり、剥離部で非常に振動しやすい状態となっていることが分かる。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p118 参考)

【健全部と剥離部の打撃入力波形及び打撃音の例】

これらの等高線図を作成したものが下図である。本例では、事後のはつりによって振幅比の大きな箇所に鉄筋腐食による水平ひび割れが観察された。



(コンクリート診断技術' 14 [基礎編] p118 参考)

【振幅比等高線図の例】

(5) 精度・適用限界

弾性波法は、ひび割れ、剥離、空洞（コンクリート内部及び背面）を有するコンクリート構造物を対象とし、適用範囲が広い。利用する周波数範囲が高いものはコンクリート中での減衰が大きいので、50kHz 程度以上の高周波数を利用する場合は、部材寸法や欠陥深さが2~3m程度の範囲が限度となる。逆に数kHz程度以下の低周波数を用いる手法では伝播距離を10m以上とすることができるが、測定精度は低下し、検出可能な欠陥の寸法は大きくなる。

弾性波の伝播速度を測定する手法では、精度は理論的には、測定機器の時間分解能、及び受信波形の立ち上がり部の読取り精度に影響される。測定距離、伝播弾性波の減衰の程度によって精度は異なってくるが、弾性波速度4000m/secで読取り誤差2~3 μ secがあり得るとすれば、10mm前後の測定誤差は生じると思われる。

一方、共振周波数測定においては、理論的には測定機器の周波数分解能に影響される。通常のFFT処理であれば、分解能は読取り周波数範囲1/400~1/1600程度の周波数分解能になるので、周波数範囲を20kHzとして1/400の分解能とすれば、周波数分解能は50Hzとなる。弾性波速度4000m/secで深さ400mmの空洞を検出するとすれば5000Hzの共振周波数が得られるが、25Hzの誤差がこれに生じるとすれば \pm 2mm程度の誤差となる。位相反転、応答振幅に関しては理論的に誤差を論じるのは困難である。

一方、実構造物への適用を考えると、上記の精度は測定条件によって大幅に低下する可能性がある。したがって、測定条件を考慮して必要に応じて削孔等を実施して確認試験を行うことが望ましい。実構造物への適用に当たって、誤差要因となる項目を以下に列挙する。

- ・コンクリートの品質の局部的なばらつき
- ・ひび割れ内のエフロレンス等の充填物
- ・コンクリート表面の劣化
- ・ひび割れ深さ、空洞形状等が一樣でないこと
- ・コンクリートの含水状態
- ・コンクリート中の鉄筋や鋼材の影響
- ・測定環境における振動や騒音等のノイズの影響

弾性波は全ての固体を伝播するので、理論的にはどのような構造物にも適用可能である。例えば、鋼板巻きによる補強を実施した柱の内部コンクリートの調査も可能である。

ただし、現実的な適用限界としては、以下のような項目が考えられる。

①弾性波の減衰による限界

周波数の高い弾性波ほどコンクリートの不均質性の影響を受け減衰が大きい。このため、超音波を用いた手法では伝播距離で2～3mが限界である。これ以上の伝播距離を必要とする測定は困難である。

②周波数による限界

打音法では、測定周波数範囲が20kHzに限定されている。20kHzの波の半波長はおよそ100mmであり、これ以上短い共振が生じる場合には20kHz以上の波を発生、受信しなければならないので、通常のマイクロフォンでは測定不可能である。

③複数の欠陥が重層している場合

コンクリートと空気の間ではそのエネルギーのほとんどを反射してしまうので、更にその背面に欠陥があったとしても、これを検知することは困難である。

④欠陥の寸法に関する限界

振幅分布を測定して欠陥の有無を判断する場合、欠陥が小さいと評価不能になる。一般に欠陥の深さと同等以下の寸法の欠陥の検出は困難とされる。

⑤欠陥の形状による限界

欠陥の形状が複雑なために共振周波数が生じない場合には、明確な卓越周波数が存在せず評価が困難になる。

弾性波を用いた手法の中で比較的早くから研究が行われてきた超音波法では、発振子や受振子を対象に密着させるために表面研磨や接触媒質の塗布等が必要であり調査に時間がかかるという難点があった。しかしながら、最近では、接触媒質を使わず連続的に弾性波を測定する装置や、マイクロフォンやレーザー加速度計を用いて非接触で弾性波を測定する装置の開発が進み、調査の高速化への期待も高まっている。今後、安価で高速な測定手法と、それに対応した分析手法の開発が望まれる。

【参考資料② コンクリート開水路の長寿命化対策検討例】

コンクリート開水路の詳細調査の実施から対策工法の選定までの検討例を作成した。検討例は以下の2例とした。

①通水性の回復

部材表面の粗度改善により通水性の回復を図った例

②耐久性の回復

凍害の進行した部材の断面修復により耐久性の回復を図った例

事例① 通水性の回復のための長寿命化対策検討例

1. 対象施設の諸元

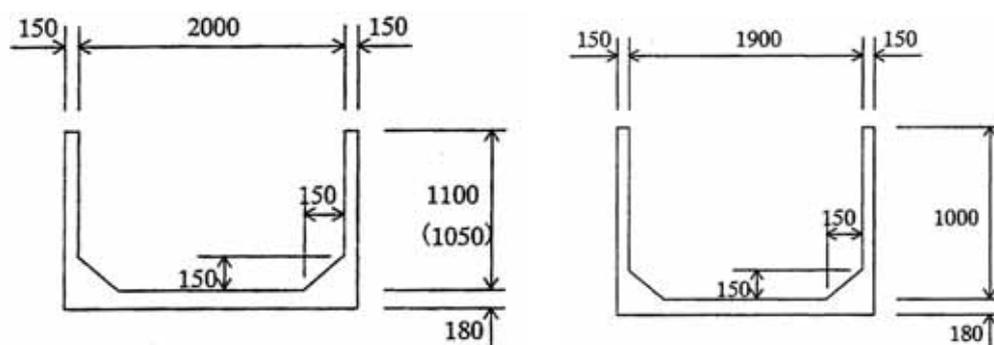
本事例は、昭和40年代に施工され供用後30年を経過したフリーム（現場打鉄筋コンクリート構造、B1,900×H1,000ほか）の補修検討事例である。対象とするフリームは、建設後長期間経過し、水面下には流水による摩耗が見られた。

なお、地盤沈下等によるとみられる逆勾配が発生している区間があったが、水理計算の結果、水理的な問題はないことが判明した。

以下に、対象施設の概要と標準断面図を示す。

【補修検討施設の概要】

施設名	A地区B幹線水路
当初施工年度	昭和45年(1970年)
機能診断等実施年度	平成10年度(1998年)～平成16年度(2004年)
供用年数	35年
構造形式	フリーム(現場打鉄筋コンクリート構造)
施工延長	L=2,712m
施工断面	B2.0m×H1.1m、B2.0m×H1.05m、B1.9m×H1.0m
計画通水量	Q=0.999～0.723m ³ /s
立地環境	幹線水路の周辺は建設当時、田園地帯であったが、都市化の進展とともに家屋が隣接して建設された区間もあり、工事施工の制約となっている。



かぶり厚（設計値）：側壁外側 50mm、側壁内側 100mm、底版 50mm

【補修検討施設の標準断面図】

2. 長寿命化対策検討のための調査

(1) 変状の概要 (着目した変状形態)

水面下部分は流水により 5mm 程度の摩耗が見られ、粗骨材が露出する状況であった。また、目地の損傷や不同沈下によると思われるひび割れ、乾燥収縮による微細ひび割れ等も散見された。ただし、目地部のずれ等はなく、漏水の可能性は認められなかった。既設コンクリートの老朽度判定のために、中性化深さの測定と圧縮強度試験等を実施した結果、コンクリートの中性化の進行が確認されたものの当面は中性化に対する耐久性は保持されると評価された。一方、圧縮強度は、大部分が現行の設計基準強度 21N/mm²を上回り、強度上の問題はなく、構造計算上も安全であった。

(2) 調査方法・調査結果

【調査項目と調査結果】

調査項目	調査内容	調査結果	評価指標	評価結果									
① 外観 (共通調査)	豆板、コールドジョイント、表面気泡、ひび割れ、浮き、剥離、錆汁・鋼材露出、エフロレンセンス、汚れ、すりへり、たわみ、変形、漏水、目地材の劣化などを把握する。	以下の変状が見られた。()内は箇所数を示す。 ひび割れ(14)、浮き(5) 鉄筋の露出(16) 剥離(10) すりへり(13) 欠損(カドカケ)(12) 沈下(2)、段差(1) 止水板外れ(1)、漏水(2)		局所的な鉄筋露出があるが、特に、摩耗(推測)によるコンクリートの断面欠損が著しい。									
② コアの外観 (共通調査-はつり試験)	ひび割れの深さや方向性、骨材の分布や反応環、ゲルの析出状態等を把握する。	コンクリートの粗骨材の最大寸法は 25mm~30mm である。コアには微細ひび割れやゲルの析出は見受けられない。		比較的密実なコンクリートである。									
③ かぶり (共通調査-はつり試験)	はつり調査により露出した鉄筋の配筋状態を測定する。	側壁外側 D=50~80mm (平均 μ 62mm、標準偏差 σ 10.1mm) 側壁内側 D=34~70mm (平均 μ 60mm、標準偏差 σ 13.4mm) 底版 D=61~138mm (平均 μ 83mm、標準偏差 σ 28.6mm)	設計値… 側壁外側 50mm 側壁内側 100mm 底版 50mm	設計値より小さい値があり、施工不良の可能性はある。									
④ 鉄筋腐食 (共通調査-はつり試験)	はつり調査により露出した鉄筋の腐食状態を把握する。	コア削孔の観察からは鉄筋腐食はない。	腐食グレード I (点錆程度) ~ IV (断面欠損が著しい)	腐食グレード I はつり部では、鉄筋は健全である。									
⑤ 中性化 (劣化程度把握調査)	採取したコアで中性化深さを把握する。(JIS A 1152) 中性化残りにより鉄筋の腐食の可能性を判断する。	中性化深さ: 0.8~36.8mm(平均 12.2mm)である。 中性化残り: 21.8mm (最小かぶり 34mm - 平均中性化深さ 12.2mm)	中性化残りの許容値は 10mm	中性化残り 10mm に迫る箇所があり、今後、中性化による腐食が懸念される。									
⑥ 圧縮強度 (要因特定調査)	コンクリートの強度を把握する。(JIS A 1107, 1108)	19.8~43.8 N/mm ² (平均 26.5) 設計基準強度比 94~208%(平均 126%)	設計基準強度 21N/mm ²	設計基準強度をほぼ満足している。									
⑦ 鉄筋引張応力度 (劣化程度調査-耐荷性低下の評価)	構造計算により各部材の応力度を算出する。	<table border="1"> <thead> <tr> <th>場所 荷重</th> <th>計算値 (N/mm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A号開渠 群集荷重 T3</td> <td>103 (OK)</td> </tr> <tr> <td>B開渠 群集荷重 T3</td> <td>85 (OK)</td> </tr> </tbody> </table>	場所 荷重	計算値 (N/mm ²)	A号開渠 群集荷重 T3	103 (OK)	B開渠 群集荷重 T3	85 (OK)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>許容値 (N/mm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>157</td> </tr> <tr> <td>157</td> </tr> </tbody> </table>	許容値 (N/mm ²)	157	157	許容応力度以下にあり、安全と評価される。
場所 荷重	計算値 (N/mm ²)												
A号開渠 群集荷重 T3	103 (OK)												
B開渠 群集荷重 T3	85 (OK)												
許容値 (N/mm ²)													
157													
157													

※「診断内容の基準」、調査時の最新版を適用

コンクリート防食指針(案)、平成9年6月、(財)下水道業務管理センター

コンクリート標準示方書、土木学会

コンクリートの診断技術'04、平成16年1月、(社)日本コンクリート工学協会

土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」、平成13年2月、農林水産省農村振興局

側壁下部と底版部の「摩耗による粗骨材露出・剥離」



【側壁の摩耗状況】

(3) 調査結果と健全度評価

1) 鉄筋腐食環境

現場水路にはコンクリートのかぶり厚不足や中性化の進行が確認されたことから、現場コンクリートの中性化進行に関する評価を行った。

- a. 側壁の中性化深さ(測定値)は 0.8～36.8mm であり、中性化深さの平均値は 12.2mm であった。一方、主鉄筋の最小かぶりは 50mm、配力筋の最小かぶりは 34mm であった。
- b. ルート t 則と中性化深さの平均値を用いて、現場水路の中性化速度係数 α を求めると、

$$\alpha = \frac{12.2}{\sqrt{30}} = 2.23 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$$

となる。

中性化残りが 10 mm で鉄筋の発生の可能性が生じるとする。これは、中性化深さが 34-10=24mm に達した時である。完成から t 年後に中性化深さが 24mm に達したとすれば、

$$2.23\sqrt{t} = 24$$

この式を解くと、t=116年と求まる。よって、116-30=86年から、今後80年程度は中性化に対する耐久性は保持されると評価できる。ただし、コンクリートのかぶりは部分的に小さい部分もあり、大きくばらつくと考えられる。今後の継続監視の段階で錆汁やひび割れの発生が確認された場合は、状況に合わせた補修・補強を行う。

2) 粗度係数と必要水路高の試算

本施設では、特に部材表面の平滑さが損なわれているため、区間の運用時における水深と流速(計測値)に基づきマニング式(水路勾配と断面形状は施設管理図で確認)で求めた概略の現況粗度係数から、水理計算によって水路壁高の過不足を試算した。その結果、現行の粗度では、増水時に水路高が不足する可能性のあることが確認された。

- a. 地盤沈下等により水路底には、凹凸や逆勾配が生じている区間もある。
- b. 各路線・各断面の等流計算と不等流計算を実施した。流量は、設計流量と設計流量の1.2倍した流量に対して行った。(水路工 P200(4)流量比率による余裕高)
- c. 現況の粗度係数を下表に示す。

【現況の粗度係数の設定】

区分	現況		建設当初(想定)
粗度係数	n=0.017		n=0.015

- d. 現況では、5地点で断面不足が生じている。その不足水路壁高は、0.015～0.092mである。

【水理計算による必要水路高の試算】

区間	構造	設計 流量 Q (m ³ /s)	設計流量 Q 時		1.2Q 時	
			水深 (m)	水路高－ 水深(m)	水深 (m)	水路高－ 水深(m)
A 区間	フリーム B2.0m × H1.1m	0.999	0.915	0.185	1.115	－0.015
B 区間	フリーム B2.0m × H1.1m	0.999	0.932	0.168	1.139	－0.039
C 区間	フリーム B2.0m × H1.0m	0.723	0.873	0.127	1.043	－0.043
D 区間	フリーム B1.8m × H1.71m	0.723	1.625	0.085	1.802	－0.092
E 区間	フリーム B1.8m × H1.0m	0.723	0.902	0.098	1.081	－0.081

3. 回復又は向上すべき施設の性能の設定

(1) 変状要因とその程度の分析

1) 中性化

中性化の将来予測からは、本水路では今後 80 年程度は中性化に対する耐久性は保持されると評価できる。ただし、コンクリートのかぶりは部分的に小さい部分もあり、大きくばらつくと考えられる。今後の継続監視の段階で錆汁やひび割れ等の発生が確認された場合は、状況に合わせた補修・補強が必要である。

2) 摩耗

すりへりは、全区間の底版・側壁水中部に見られ、すりへり厚さ 5mm 程度であり、粗骨材が露出している。流水には土砂を混入しており、土砂のすり磨き作用によるものと考えられる。そして、摩耗により今後もさらに断面のすりへりが進行するものと予測される。

(2) 回復又は向上すべき性能の設定

本施設では、摩耗による粗度係数の上昇により通水性が低下しているものと評価されたことから、水理性能を回復することで通水性を確保することが求められる。

また、将来的には中性化による鉄筋腐食が懸念されたことから、次いで耐久性の確保も考慮すべきである。

4. 補修対策方針の設定

本施設の劣化過程は摩耗－Ⅱ進展期後期～Ⅲ加速期前期(粗度悪化による流量低下あり、

ただし鉄筋腐食による耐荷力低下なし)であり、これに対応する工法を選定する。

本施設における補修工時には、部材表面の粗度係数が改善でき、かつ通水断面の縮小を最小限にでき、水理性能を回復する効果が期待できる工法が求められる。

また、中性化の進行を抑制できる耐久性にも優れた工法とする必要がある。

さらには、本水路は、住宅が密集している場所もあることから、新たに迂回路線を設置する方法や拡幅などによる改修は困難である。よって、非かんがい期間内で施工でき、現行の水路断面を変えることのない対策が求められる。

以上を踏まえて、補修対策に求める性能を以下のように設定した。

- ・粗度係数を建設当時の $n=0.015$ (平滑なコンクリート平面粗度の一般値) 以下に改善すること。ただし、 $n=0.010$ を下回ってはいけない (必要水位の確保に支障を来す可能性があるため)。
- ・通水断面の縮小が最小限であること。
- ・摩耗環境下でも一定の耐摩耗性を有すること (水砂噴流摩耗試験 (水砂噴流、水圧 M Pa、10 時間) 後の「被覆材平均摩耗深さ / 標準モルタル供試体平均摩耗深さ」が無機系材料で 1.5 以下)。
- ・密実で中性化因子 (空気中の二酸化炭素) が侵入し難いこと (JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験 (促進期間 4 週間) によって \sqrt{t} 則で算出した中性化速度係数が $18\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以下)。
- ・ひび割れ追従性や耐候性に優れること。
- ・非かんがい期間中で施工できること (施工性に優れること)。

5. 工法・材料の選定

本施設の劣化過程は、図 5.4-6 によれば摩耗Ⅱ進展期後期～Ⅲ加速期前期であり、現時点では大部分で部材表面のモルタル部が欠損している状態であるため*、表面被覆によって機能回復することを基本として具体的な工法選定を行う。また、局所的に鉄筋露出している箇所については、表面被覆の前に断面修復を行う。

※Ⅱ進展期では継続監視による対応がとられるケースが多いが、本施設では粗度悪化による通水機能への影響が大きいと評価されたため、現段階で対策を行う方針とする。

表面被覆工は、無機系被覆工法、有機系被覆工法*、パネル工法*、シート工法*に分類されるが、およそ建設当初の粗度係数が得られ、施工実績が多く品質の安定する無機系被覆工法を選定する。

※有機系被覆工法、パネル工法、シート工法は、効率的に粗度改善を図ることができるが、反面粗度が下がり過ぎて必要水位を維持できなくなることが否定できない (水理検討では水位低下程度が完全には想定しきれない)。また、有機系材料では、母材表面が乾燥していることが施工時の前提となること、太陽光 (紫外線) や外気温

の変化などに対する耐候性にも課題がある。

そして、無機系被覆工法の中から、通水性能が回復（被覆材の粗度係数 $n=0.012\sim0.013$ 程度、塗膜厚は約 10mm）でき、耐摩耗性（被覆材の平均摩耗深さ／標準モルタル供試体の平均摩耗深さ=1.0、要求性能は 1.5 以下）と劣化因子を遮断（被覆材の中性化速度係数 5mm/√年、要求性能は 18mm/√年以下）する効果が期待でき、耐候性や施工性にも優れる工法 A（下表参照）を選定する。

【対策工法の比較】

対策工法	通水性能への影響			劣化因子侵入抑制	ひび割れ 追従性 (抵抗性)	耐候性	施工性 (母材湿 潤状態へ の対応 等)	施工実績	経済性	総合評価	
	粗度回復	断面縮小	耐摩耗性								
無機系被覆 工法A	○1 ○:0.012~0.015 △:~0.012 ×:0.015~	○1 ○:~20mm △:20~35mm ×:35mm~	○2 被覆材摩耗深さ/標準供試体摩耗深さ ○:~1.5(無機系) ×:1.5(無機系)~	○2 中性化速度係数 ○:~18mm/√年 ×:18mm/√年~	△3	○1	○1	○1	△2	○:7個 △:2個	1
無機系被覆 工法B	△2	○1	○2	○2	△2	○1	○1	△2	△2	○:5個 △:4個	2
無機系被覆 工法C	○1	△2	△3	△3	×4	○1	○1	○1	○1	○:5個 △:3個 ×:1個	4
(参考) 有機系被覆	△2	○1	○1	○1	○1	△2	△2	△2	△2	○:4個 △:5個	3

※ 表中の数字は評価順位を示す。

※ 判定基準を満たす場合でも、評価順位が3番目は△、評価順位が4番目は×とする。

事例② 耐久性の回復のための長寿命化対策検討例

1. 対象施設の諸元

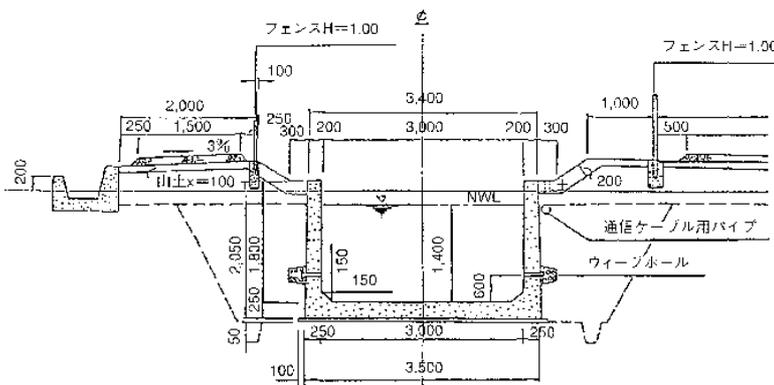
本事例は、昭和 40～50 年代に施工され供用約 20 年を経過したフリーム（現場打鉄筋コンクリート構造、平均 B2,500×H1,800 ほか）の補修検討事例である。

対象とするフリームは、寒冷地に立地し、側壁天端部の隅角部に角落ち、ひび割れ、剥離が確認された。これらの状況から、変状の生じた主原因は、凍害と推定された。

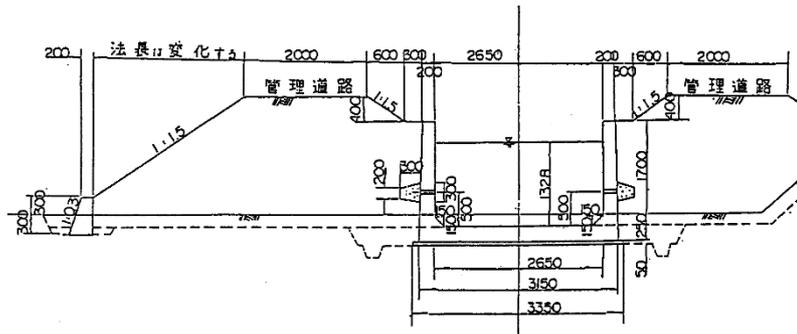
以下に、対象施設の概要と標準断面図を示す。

【補修検討施設の概要】

施設名	B 地区 C・D 幹線水路		
当初施工年度	昭和 43 年度～昭和 55 年度(1968～1980 年)		
機能診断等実施年度	平成 5 年度～平成 8 年度(1993～1996 年)		
供用年数	16～28 年		
構造形式	現場打鉄筋コンクリートフリーム		
施工延長	C 幹線水路 L=3,167m D 幹線水路 L=769m		
施工断面	鉄筋コンクリートフリーム		
	タイプ	内幅(m)	側壁高さ(m)
	開水路タイプ A	2.20	2.10
	開水路タイプ B	3.00	1.80
	開水路タイプ C	2.65	1.70
	開水路タイプ D	2.35	1.45
開水路タイプ E	2.35	1.85	
計画通水量	C 幹線水路 $Q_{max}=14.3 \text{ m}^3/\text{s}$ D 幹線水路 $Q_{max}= 1.5\text{m}^3/\text{s}$		



【補修検討施設－開水路タイプ B の標準断面図】



【補修検討施設－開水路タイプCの標準断面図】

2. 長寿命化対策検討のための調査

(1) 変状の概要（着目した変状形態）

寒冷地に位置し、日射のある面が特に変状が多いこと、スケーリングやポップアウトの特徴を示す粗骨材露出～断面欠損に至る変状が散見され、静弾性係数が低い傾向が確認されたことから、凍害による劣化と推定された。

採取コアの観察からは、材料が脆弱なのは表面近くの部分であり、材料の脆弱性は部材深さ方向に徐々に小さくなることが確認された。局所的に鉄筋腐食は観察されるが、部材の大部分では中性化は鉄筋に到達していないことが確認された。



側壁上部の「凍害によるひび割れとスケーリング」

【側壁のひび割れ等の変状発生状況】

(2) 調査方法・調査結果

【調査項目と調査結果】

調査項目	調査内容	調査結果	評価指標	評価結果
①外観 (共通調査)	部材の隅角部を中心に、断面欠損状況、スケーリング、ポップアウト等の発生状況をスパン毎に把握する。	<ul style="list-style-type: none"> ・日射のある面が特に変状が多い傾向がある。 ・スケーリングやポップアウトの特徴を示す粗骨材露出～断面欠損に至る変状が確認された。 ・かぶり不足により鉄筋が腐食・露出している箇所もある。 		側壁天端の隅角部を中心に断面欠損が発生しており、局所的な鉄筋露出も生じている。
②コアの外観 (共通調査・劣化程度調査)	部材内部のひび割れ状況を把握する。併せてノギス計測により凍害範囲を計測する。	<ul style="list-style-type: none"> ・部材深さ方向に徐々に脆弱部（ひび割れ発生部）が収束する。 		表面から徐々に劣化進行、最大で、およそ鉄筋深度まで脆弱化している。
③中性化 (劣化程度把握調査)	中性化深さを把握する。(JIS A 1152) 中性化残りにより鉄筋の腐食の可能性を判断する。	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化深さは、水面下の開水路面で平均 25.5 mm。 ・想定したかぶりによる中性化残りは、$t=60-26=34\text{mm}$ となる。 	中性化残りの許容値は 10mm	コンクリートは密実ではないため中性化が進んでいるものと評価される。ただし、中性化残りが大きく、(鉄筋露出部を除き)中性化による鉄筋腐食のリスクは小さい。
④静弾性係数試験・圧縮強度試験 (要因特定調査)	静弾性係数が一般値に比して低い傾向があるかを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れの多い部分から採取した試料は静弾性係数の低い傾向が確認された。 	静弾性係数の標準値(土木研究所)を参照	部材浅部のひび割れの多い部分(脆弱部)では、凍害が進行している。

※「診断内容の基準」、調査時の最新版を適用

コンクリートのひび割れ調査、補修、補強指針、日本コンクリート工学協会

コンクリートの診断技術'04、(社)日本コンクリート工学協会

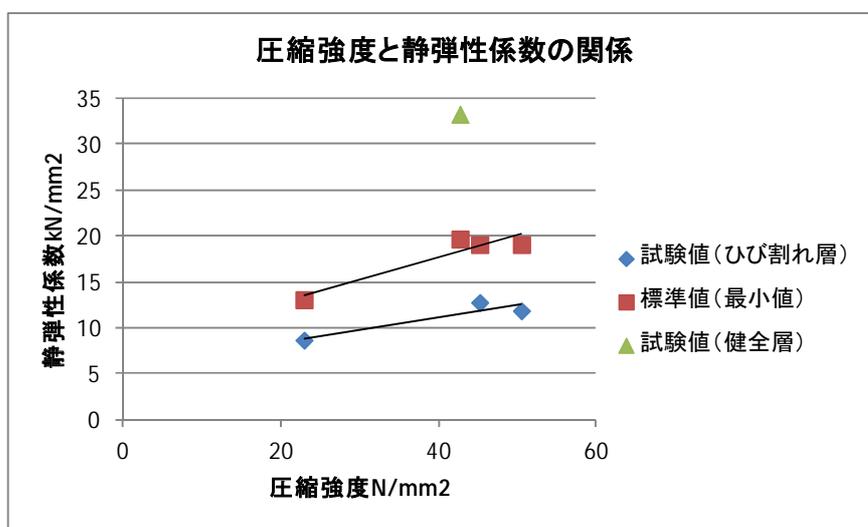
コンクリート標準示方書、土木学会

1) 鉄筋腐食環境

- a. 想定したかぶりによる中性化残り(最小かぶりと平均中性化深さの差)は、 $t=60-26=34\text{mm}$ となり、中性化残りの許容値 10mm を上回る。
- b. かぶり不足により鉄筋が腐食・露出している箇所(すでに腐食環境になっている箇所)も見られた。

2) 弾性係数と圧縮強度の関係にみる凍害の可能性評価

- c. 凍害が発生すると、微細なひび割れが増加することから、弾性係数が低下する。本調査では静弾性係数が標準値よりも低い傾向が確認され、劣化要因が凍害であることが示された。



【一軸圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果】

【静弾性係数の標準値】

コアの圧縮強度 (N/mm ²)	コアの静弾性係数の標準値 (kN/mm ²)
15 以上 21 未満	8.4 ~ 17.8
21 以上 27 未満	13.1 ~ 21.3
27 以上 35 未満	16.2 ~ 25.8
35 以上 45 未満	19.7 ~ 29.8
45 以上 55 未満	19.1 ~ 34.2

出典：土木研究所：既存コンクリート構造物の実態調査結果

3. 回復又は向上すべき施設の性能の設定

(1) 変状要因とその程度の分析

施設の立地環境、変状の特徴、静弾性係数の低い傾向から、凍害による劣化が発生しているものと判断された。

部材深さ方向に徐々に脆弱部が収束していることから、現時点では劣化の途上であり、今後の凍害の進行によって部材の断面欠損範囲が拡大することが予見された。

また、部材の大部分は鉄筋腐食環境にはないが、局所的には凍害による断面欠損により鉄筋露出もみられ、このまま供用すれば、徐々に鉄筋腐食が生じるものと考えられた。

以上より、本施設の劣化過程は、図 5.4-9 から凍害-Ⅲ加速期（骨材の露出や剥離が生じており、鋼材の腐食により耐荷力低下が一部で始まっている状態。）と判定された。

(2) 回復又は向上すべき性能の設定

本施設では、劣化過程は凍害-Ⅲ加速期にあり、断面欠損により耐荷力の低下が始まっている状態と推定された。このまま放置すれば更なる鉄筋露出・腐食により、構造的な安定性を欠くことが想定される。よって、脆弱化した部分を除去するとともに劣化因子の侵入を抑制することで、耐久性を確保する必要がある。

なお、凍害が進行しているのは、凍結融解が作用する気中部（側壁上部）に限られ、通常の運用水位では水理性能への影響は考慮しなくてよいものと判断された。

4. 補修対策方針の設定

本施設における対策工法は、凍害によってひび割れ等の生じた脆弱化部分を除去するとともに、今後の凍害の再劣化を防止するために、劣化要因となる水の侵入を抑制できる耐久性にも優れた工法が求められる。

また、かんがい期間中は、水路内を空水にできないため、非かんがい期間内で施工できる対策が求められる。

以上を踏まえて、補修対策に求める性能を以下のように設定した。

- ・密実で凍害因子（水分）や中性化因子（空気中の二酸化炭素）が侵入し難いこと。
- ・耐凍害性に優れること（JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法（A法、300 サイクル）による相対動弾性係数が 85%以上）。
- ・ひび割れの生じた脆弱部を除去できること。
- ・母材との一体性とひび割れ抵抗性を有すること。
- ・太陽光（紫外線）や外気温の変化に対する耐候性を有すること。
- ・非かんがい期間中で施工できること（施工性に優れること）。

5. 工法・材料の選定

本施設の劣化過程は凍害-Ⅲ加速期であり、断面欠損が生じているため、断面修復によって機能回復することを基本として具体的な工法選定を行う。

これまでの調査では、ひび割れによる脆弱範囲は鉄筋よりも浅部であることから、鉄筋以浅をはつり取った上で断面修復することを基本とする。はつり取る範囲は、凍害による微細ひび割れ部を確実に取り除くために、目視で確認できる脆弱範囲よりも大きく設定する。

また、施工時に鉄筋以深にまで脆弱部が及ぶ箇所が確認された場合、そのスパンについては、施工中の構造安定性、施工性の観点から、部材打ち換えを行う。部材打ち換えに当たっては、新旧部材の一体性を確保するために、打ち継部に差し筋を配置する。

断面修復工法には、無機系材料として、ポリマーセメントモルタル、セメントモルタル、セメントコンクリート、有機系材料として、ポリマーモルタル等がある。

本施設に適用する断面修復工法は、4. 補修対策方針の設定で挙げた要求性能を概ね満足し、凍害に対する対策工としての施工実績も多い無機系材料A（次表参照）による断面修復を選定する。

【対策工法の比較】

対策工法	劣化因子 浸入抑制	耐凍害性	脆弱部除去	母材との 一体性	ひび割れ 追従性(抵抗性)	耐候性	施工性 (湿潤状態への 対応、養生 期間等)	施工実績 (ただし凍害に 特化した実 績)	経済性	総合評価	
材料A (無機系材料)	○2	○1	○1	○1	×2	○1	○1	○1	△3	○:7個 △:1個 ×:1個	1
材料B (無機系材料)	△3	△2		○1	×2	○1	○1	△3	○2	○:5個 △:3個 ×:1個	2
材料C (無機系材料)	△3	△2		○1	×2	○1	○2	△3	○1	○:5個 △:3個 ×:1個	2
材料D (有機系材料)	○1	○1		△2	○1	△2	△3	○2	×4	○:5個 △:3個 ×:1個	2

※ 表中の数字は評価順位を示す。

※ 判定基準を満たす場合でも、評価順位が3番目は△、評価順位が4番目は×とする。

※ 鉄筋以深にまで脆弱部が及ぶ場合、そのスパンについては、部材打ち換えを行う。

施工方法としては、局所的には人力はつり、劣化の著しい範囲が広範囲に及ぶところではウォータージェット工法等の適用を検討する。

断面修復工は、対策範囲に応じて、左官～充填（型枠工を伴う）によって行う。

なお、鉄筋露出箇所は、ハツリ作業時に露出箇所周辺までの鉄筋腐食状態を確認した上で、腐食部に防錆材を塗布する。

最終的な施工方法は、試験施工により確定する。