

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、主要分木工や末端分木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

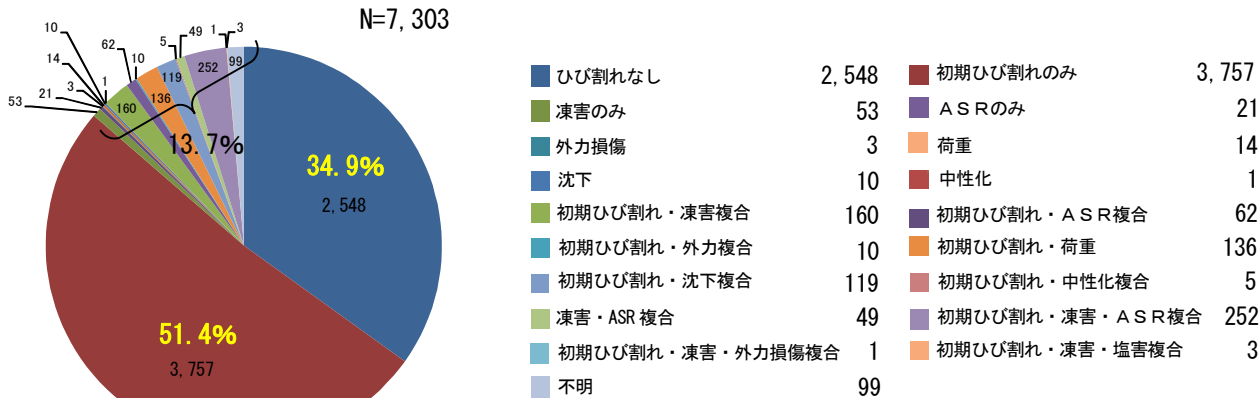
に分類される。

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、及び施設の設計・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。



※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

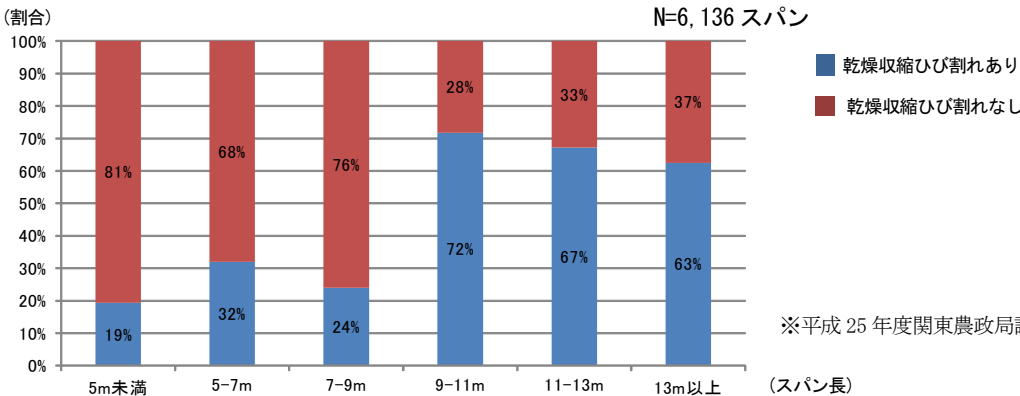
表 3. 1-1 初期ひび割れの内訳

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

【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ち後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。

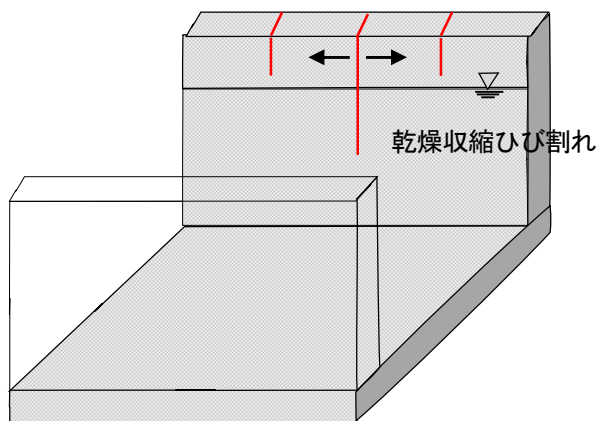


図 3. 2-1 乾燥収縮ひび割れの発生イメージ

【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 コンクリート表面変状	ひび割れ先行型			鉄筋腐食先行型		初期 ひび割れ	外力
	凍害	ASR	化学的腐食	中性化	塩害	乾燥収縮	
亀甲状	○	○	○			○	
細かい不規則なひび割れ	○		○			○	
鉄筋に関係しない軸方向ひび割れ		○					
軸力に対して直角のひび割れ						○	○
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 to 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		- 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。	- 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	- 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。	- 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	- 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。	- 塩害 - 中性化
外力によるひび割れ		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。	- 地震 - 過荷重

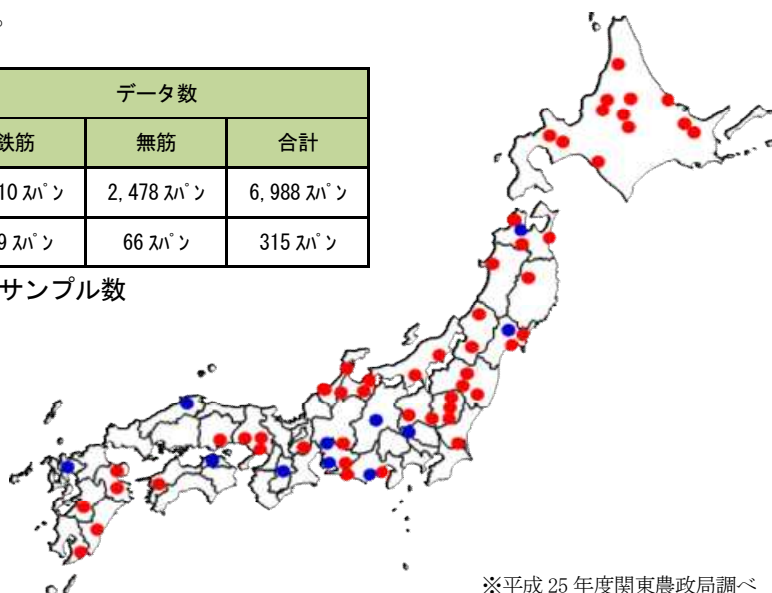
【コラム ～コンクリート開水路の変状実態の分析について～ 】

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

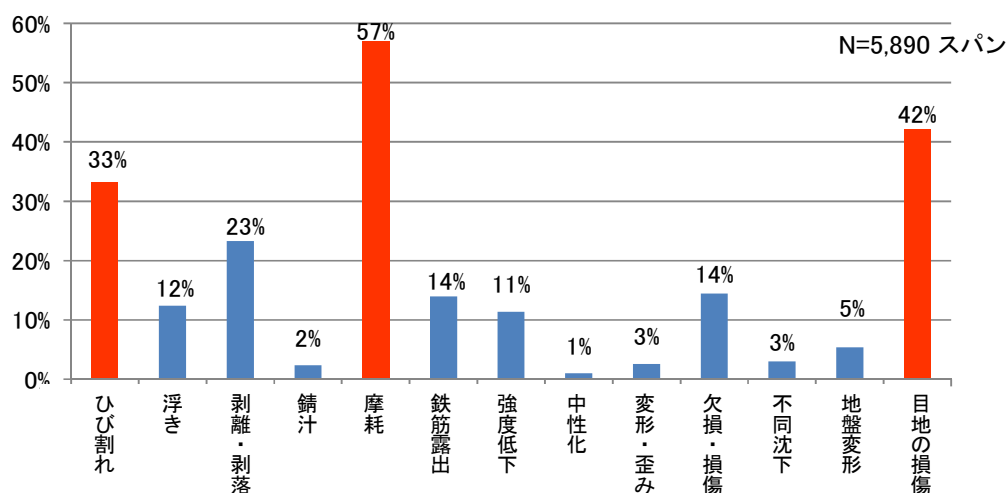
●	更新事業
●	指導事業



※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。

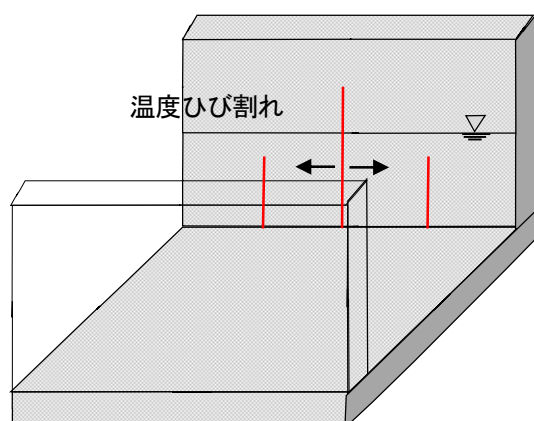
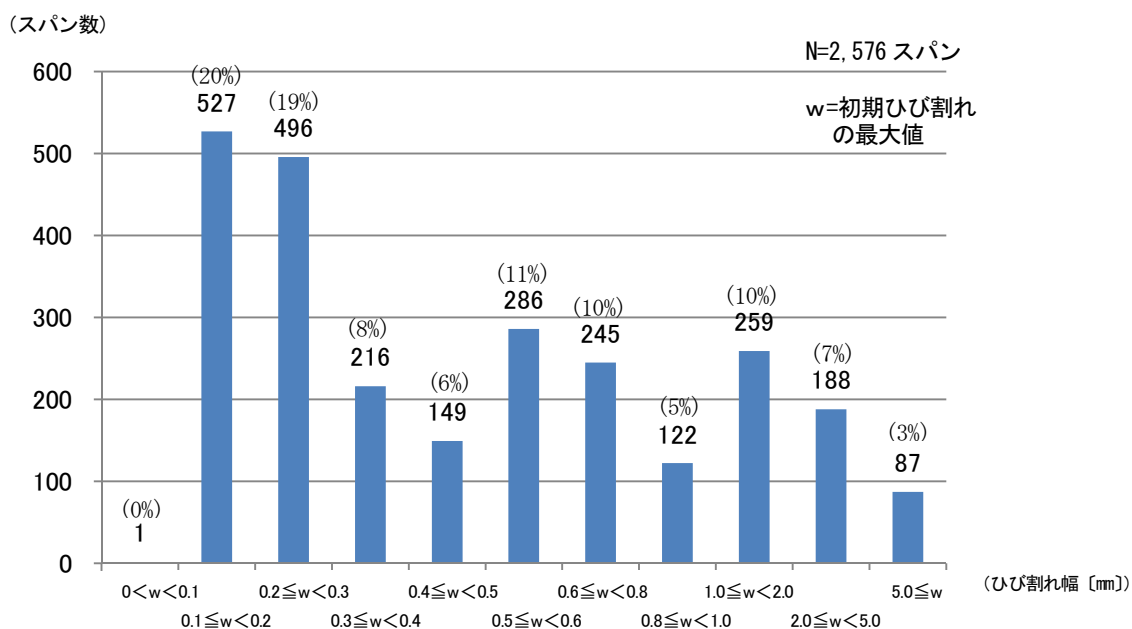


図 3.2-4 温度ひび割れの発生イメージ

【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 $0.1\text{mm} \leq w < 0.2\text{mm}$ 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。

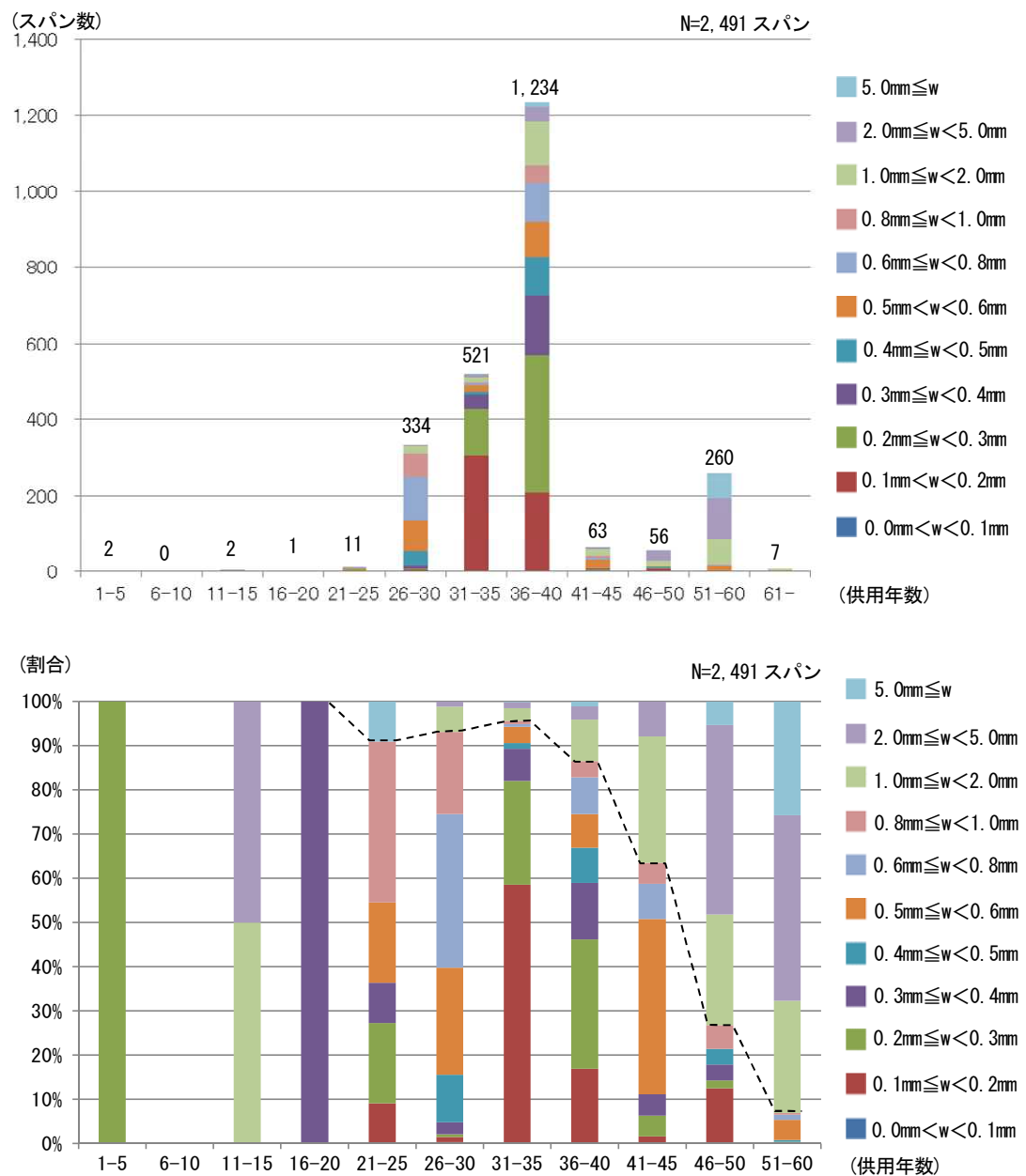


図 3.2-6 コンクリート開水路における初期ひび割れと供用年数の関係

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)

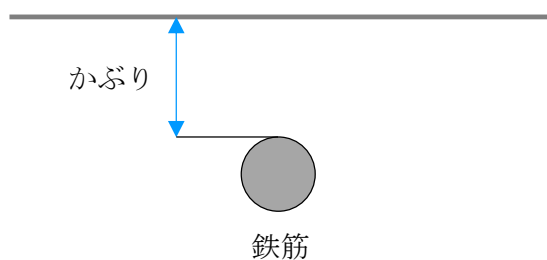


図 3.2-10 鉄筋のかぶり

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。

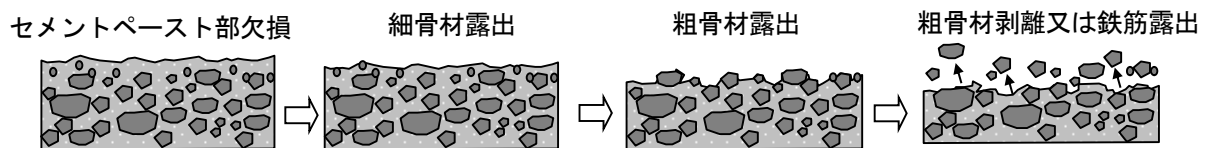


図 3. 3-1 摩耗の進行過程

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。

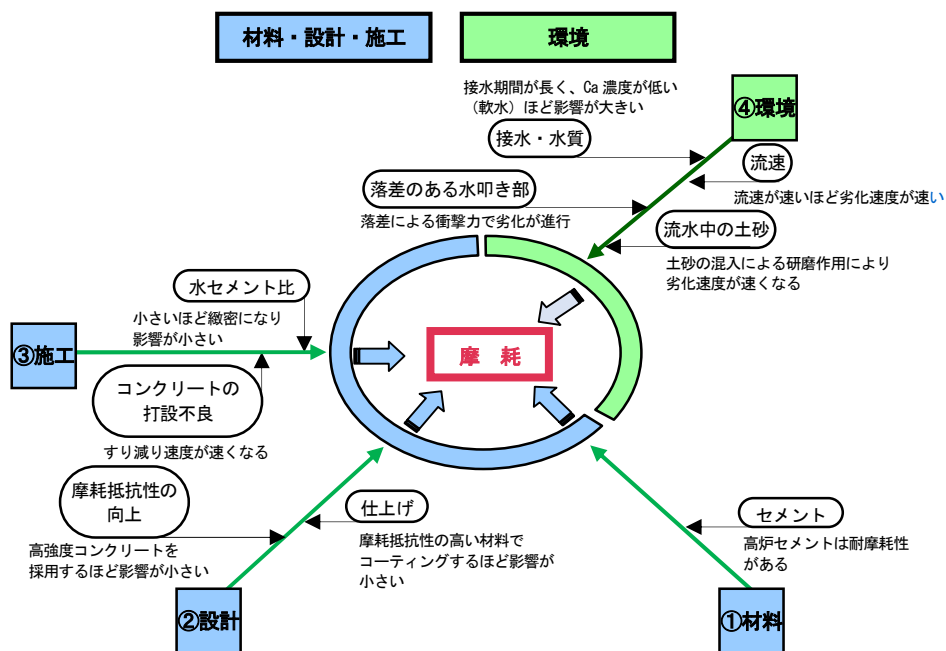


図 3. 3-5 摩耗の要因

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。

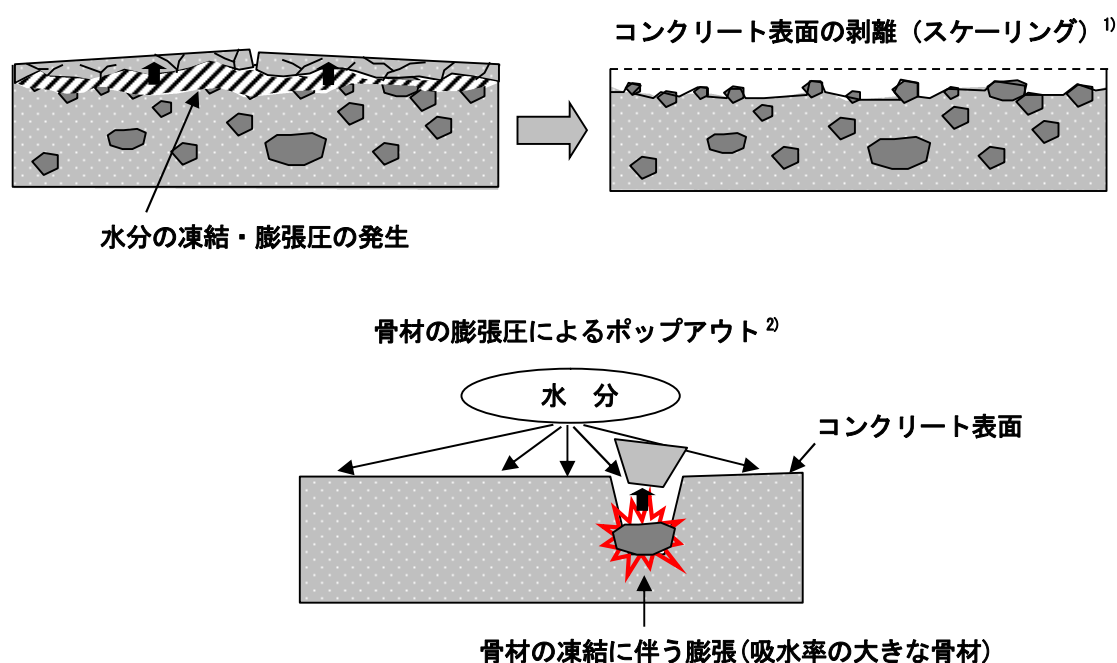
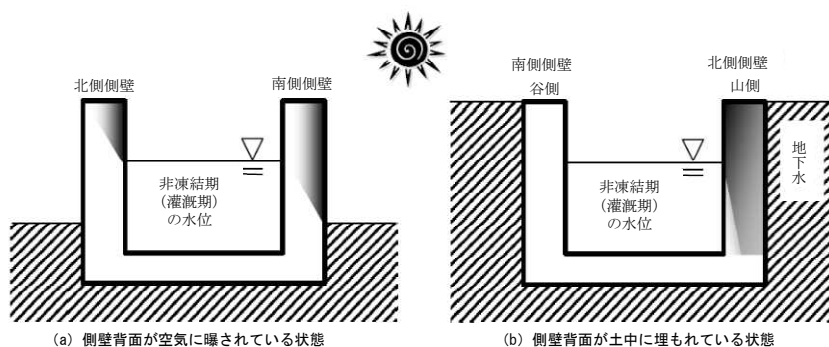


図 3.3-6 凍害による劣化の進行過程

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	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。 (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)		・0.2mm～0.3mm 程度の亀甲状のひび割れが凍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	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。 (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)		・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	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。 (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)		・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。

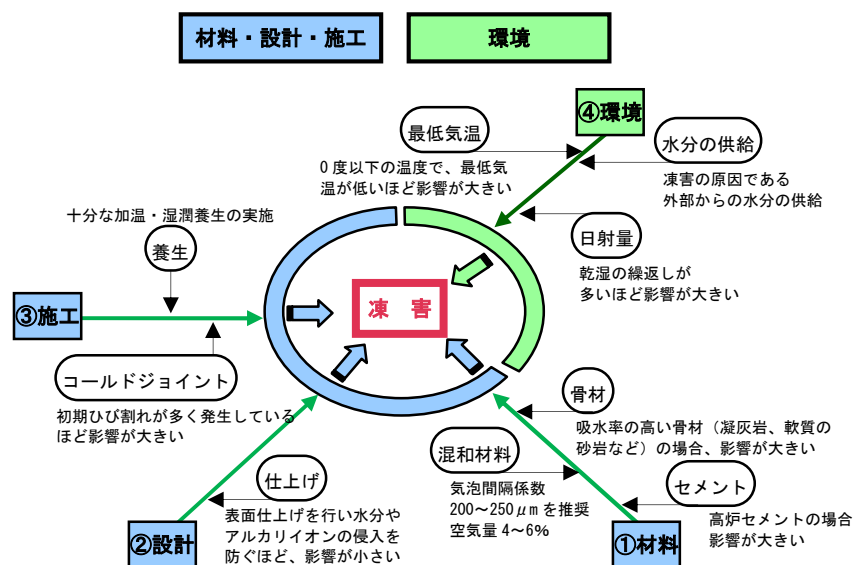


図 3. 3-10 凍害の要因

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）

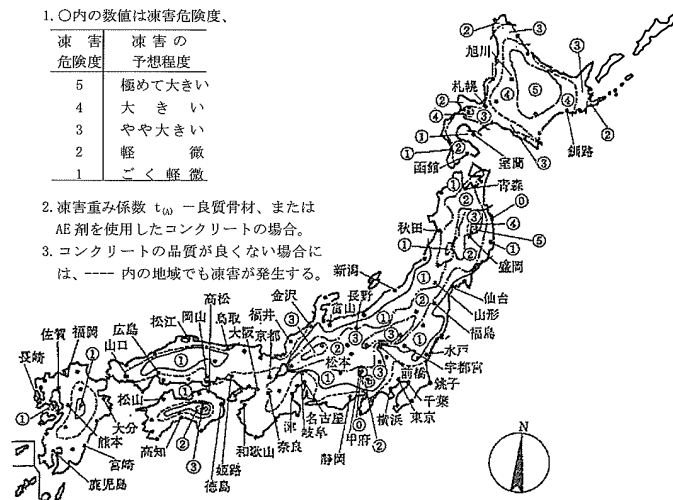


図 3.3-11 凍害危険度の分布図

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 A S R¹⁾ 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⁾ A S R : アルカリシリカ反応の略称。