

凍害が疑われる構造物の 調査・対策手引書（案）

平成 23 年 10 月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

目 次

	頁
はじめに	1
1. 凍害のメカニズムと劣化の概要	2
2. 凍害が疑われる構造物に対する対応フロー	5
3. 外観調査	7
3-1 スケーリング	8
3-2 ひび割れ	10
3-3 ポップアウト	13
3-4 その他の凍結膨張による変状	14
4. 詳細調査および簡易現場計測	15
4-1 図書調査	15
4-2 凍害損傷程度等を把握する調査（非破壊試験・破壊試験）	18
4-3 複合劣化の可能性を把握する調査	22
4-4 簡易現場計測	22
5. 凍害劣化の予測および評価・判定	23
6. 凍害劣化に対する対策	26
6-1 対策の選定	26
6-2 補修・補強対策の選定	26
6-3 表面処理工法	27
6-4 ひび割れ注入	29
6-5 断面修復	30
6-6 水分の供給を防ぐ補修対策	31
6-7 補強対策	31
7. 調査結果および補修・補強方法の記録	32
8. 定期的な観察	33

別紙 1：凍害調書の記入例

別紙 2：凍害調書の様式

参考資料 1：凍害の発生メカニズム

参考資料 2：凍害に関する複合劣化

参考資料 3：凍害に対する耐久性照査，配合設計および施工

参考資料 4：凍害の調査

参考資料 5：凍害の劣化予測および耐久性設計

参考資料 6：凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学的性能

参考資料 7：国道橋の橋梁定期点検と本手引書との関係

はじめに

本手引書は、コンクリート構造物の維持管理に際し、現場にて外観目視調査を行い、コンクリートに発生している変状が凍害もしくは凍害に関連する複合劣化を促す危険性があるか否かを評価し、対策要否の判定、適切な補修補強設計を行うために、理解しておくべき基礎知識をとりまとめている。

一方で、凍害が疑われる構造物の調査・対策の現状を把握する観点から、新技術を含む種々の試験方法、診断方法、補修・補強方法を示している。この中には研究途上のものも多く、検討課題も残されており、運用にあたっては構造物管理者と十分打合せして頂くようお願いしたい。

本手引書は、平成17年3月に北海道開発局建設部道路維持課・独立行政法人北海道開発土木研究所監修により示されたものであり、平成23年10月に独立行政法人土木研究所寒地土木研究所監修により改訂を行ったものである。なお、「北海道開発局 道路設計要領 第3集 橋梁 第2編 コンクリート」には、本手引書の適用条件が記されている。

本手引書の構成を以下に示す。

凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）の構成

タイトル	アウトライン
1. 凍害のメカニズムと劣化の概要	凍害のメカニズムおよび特徴的な外観上の変状を解説。
2. 凍害が疑われる構造物に対する対応フロー	凍害による変状を生じた構造物に対する対応フローを示している。
3. 外観調査	外観調査において凍害の可能性を判断することを目的として、凍害に特徴的な変状を事例写真を使い説明。
4. 詳細調査および簡易現場計測	凍害による損傷の可能性がある場合には、詳細調査、簡易現場計測、あるいは経過観察相当の判断を行い対処する。 詳細調査としては、図書調査、凍害劣化程度を把握する調査（非破壊試験、破壊試験）、複合劣化程度を把握する調査を解説。 また、簡易現場計測とは、詳細調査を実施するまでもないが、経過観察が必要と判断された場合、損傷程度に応じて現地にて簡易な非破壊試験を行い、現時点での凍害損傷の指標を数値化する手法を解説。
5. 凍害劣化の予測および評価・判定	凍害の劣化過程、凍害劣化の予測方法、構造物の性能評価および対策要否の判定方法について説明。
6. 凍害劣化に対する対策	評価・判定の結果、対策が必要と判定された場合の対策について説明。
7. 調査結果および補修・補強方法の記録	外観調査または図書調査、詳細調査の結果、さらに実施した対策の記録方法を解説。
8. 定期的な観察	凍害の影響を受けていることが明らかな構造物については、定期的な観察が必要であることを解説。
別紙1：凍害調書の記入例	凍害の可能性のある構造物の凍害調書（その1）～（その7）までの記入例を解説。
別紙2：凍害調書の様式	凍害の可能性のある構造物の集計調書および外観調査、図書調査、および詳細調査結果の記入調書の様式を掲載。
参考資料1：凍害の発生メカニズム	凍害の発生メカニズムの基本的内容を解説。
参考資料2：凍害に関する複合劣化	凍害と他の劣化との複合劣化、特に塩害との複合劣化について解説。
参考資料3：凍害に対する耐久性照査、配合設計および施工	新設構造物の設計、施工において配慮されている凍害対策について解説。
参考資料4：凍害の調査	凍害に関する試験・分析方法について解説。
参考資料5：国道橋の橋梁定期点検と本手引書との関係	本手引書はコンクリート造である道路構造物を対象としている。国道橋においては別途、橋梁定期点検が実施されていることから本手引書との関係を参考資料として解説。

1. 凍害のメカニズムと劣化の概要

凍害とは、コンクリート中の水分が0 以下になった時の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰り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。ここでは、施工初期の「初期凍害」¹とは区別している。

凍害を受けた構造物では、一般にコンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトなどの形で劣化が顕在化する。その後、スケーリング等の劣化の進行に伴い、美観の低下、変位・変形や耐荷力の低下、はく離・はく落、コンクリート断面の現象、鋼材腐食が進行する。

凍害の進行により構造物に求められる性能（安全性、使用性、第三者影響度・美観・景観などの性能）が低下するため、外観上の特徴的な変状や凍害に関する試験から凍害の劣化過程を判定し、必要に応じて補修・補強など適切な対策をとる必要がある。

【解説】

(1) 凍害劣化のメカニズム

コンクリート表面からの温度降下を考えると、セメントペースト内部では、大きい空隙中の水が凍結し、次いで小さい空隙中の水が凍結する。水が凍結する際、自由に膨張できる場合には約9%の体積膨張を生じるが、小さい空隙中の水が凍結する過程では大きい空隙中にできた氷晶により膨張が拘束される。この膨張を緩和するだけの自由な空隙が存在しない場合には、大きい静水圧が空隙の壁に作用し、コンクリートの引張強度に達した時にひび割れが生じる。この現象を水圧説という。空隙に作用する静水圧は、最低温度、凍結速度、飽水度および気泡と気泡の間隔などにより異なると考えられている。²

しかし、AE コンクリートが凍結する際に生じる収縮現象など水圧説により説明できないため、生成された氷晶が周囲から水を吸収し収縮するという浸透圧説が用いられている。

凍害劣化のメカニズムは水圧説、浸透圧説などを中心とした研究がなされており、「参考資料1：凍害の発生メカニズム」にその概要を示している。

(2) 凍害に特徴的な外観上の変状

凍害を受けた構造物では、コンクリート表面に微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウトなどの形で劣化が顕在化するのが一般的である。微細ひび割れとスケーリングは、コンクリートのペースト部分が劣化するものであり、コンクリートの品質が劣る場合や適切な空気泡が連行されていない場合に多く発生し、一方、ポップアウトは骨材の品質が悪い場合によく観察されることが知られている。³

これら凍害に特徴的な外観上の変状は「3章 外観調査」の項を参照のこと。

¹ 初期凍害については「参考資料3-7」を参照のこと。

² 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 10 [基礎編]，p48，2010.2

³ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p121，2008.3

(3) 凍害劣化過程と性能低下

凍害による劣化現象は主に、コンクリート断面の減少であり、その程度によって鋼材腐食が発生する場合もある。凍害による構造物の性能低下は、凍害深さによって異なる。

凍害深さの増大と部材の性能低下の関係は図 1.1 に示す通りモデル化され、また、各劣化過程と期間を決定する要因は表 1.1 のように考えられている。⁴

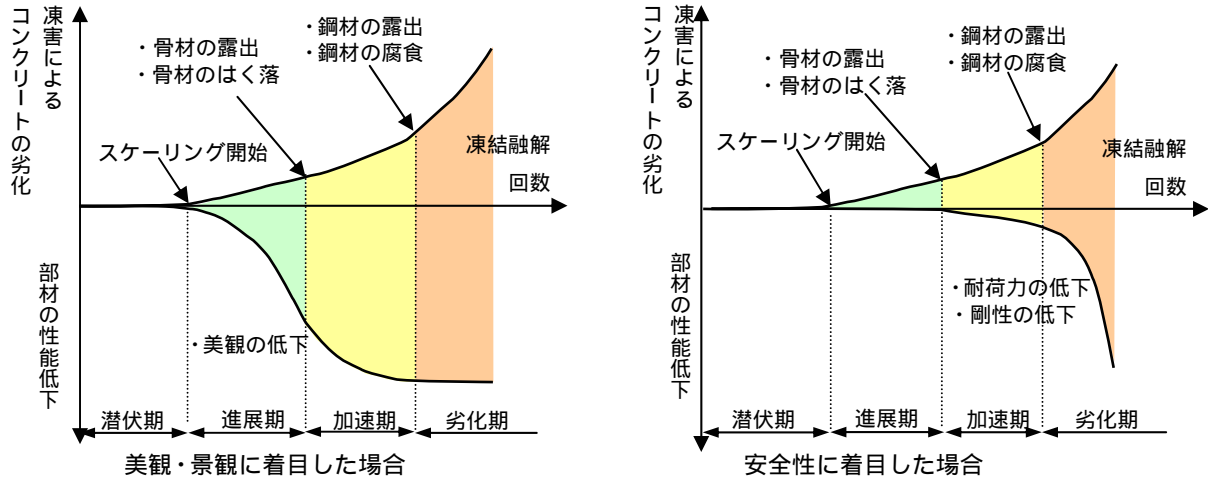


図 1.1 凍害劣化過程の概念図

表 1.1 凍害劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解作用を受けスケーリングが発生するまでの期間	凍害発生の可能性の有無，最低温度，凍結水量，凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化が進行し，骨材が露出，もしくははく離するまでの期間	最低温度，凍結水量，凍結融解回数
加速期	鋼材が露出したり，鋼材腐食が開始するまでの期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度
劣化期	鋼材の腐食が進行し，耐荷性の低下が顕著な期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度

潜伏期は基本的に劣化が顕在化していない期間，進展期になると写真 1.1 のようにコンクリート表面に若干のスケーリングが発生する。この状態は構造物の安全性能や使用性能に影響はないが，美観等において考慮が必要となる場合もある。加速期は写真 1.2 のように骨材が見える程度まで劣化が進み美観上はもちろん，コンクリートのはく離による第三者影響度に対しても考慮が必要となる。さらに，劣化期になると写真 1.3 のように鉄筋かぶり以上まで凍害は著しく進行し，使用性や安全性能に影響を及ぼすこともある。⁵

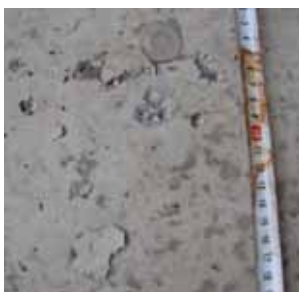


写真 1.1 スケーリングの発生
(進展期の例)



写真 1.2 ひび割れ部が
はく離し骨材が露出
(加速期の例)



写真 1.3 ひび割れ部のはく離
が進行し鉄筋が露出
(劣化期の例)

⁴ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p121-122，2008.3

⁵ 土木学会：コンクリートライブラリー-104，2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編] 制定資料，p53，2001.1

(4) 性能評価，対策要否の判定と対策⁶

凍害劣化の場合には凍害深さ等から性能の低下を予測することが現状の技術レベルでは難しい場合が多く，このため現実的には構造物の外観上のグレードに対応した性能評価を行い，対策の要否を判定することとなる．

次に，性能低下に対する対策が必要と判定された場合には 点検強化， 補修， 補強， 機能性向上， 供用制限， 解体・撤去のいずれかを選定する必要がある．

⁶ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p134-135，2008.3

2. 凍害が疑われる構造物に対する対応フロー

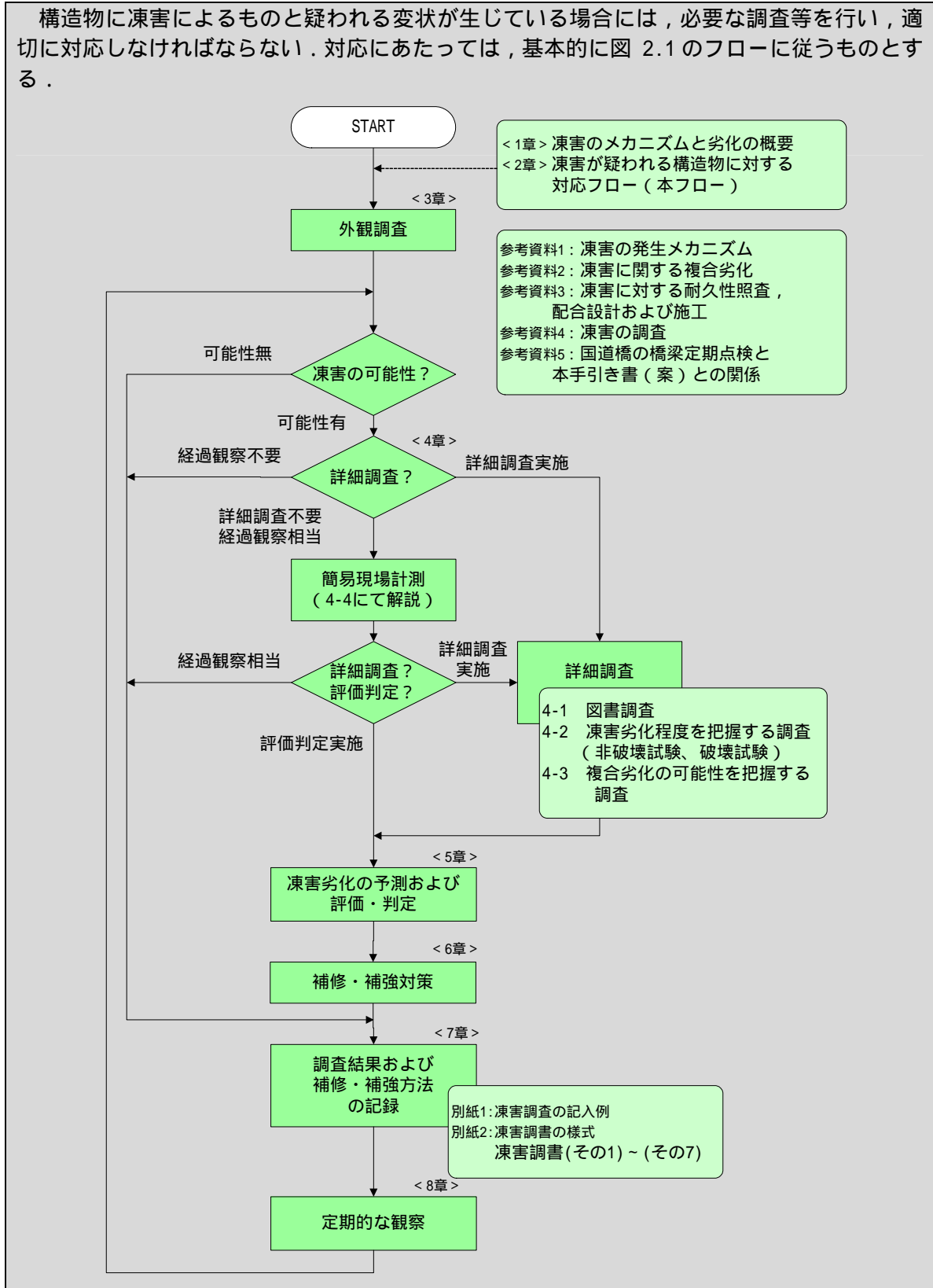


図 2.1 凍害による変状を生じた構造物に対する対応フロー

【解説】

構造物に凍害によると思われる変状が生じている場合には、図 2.1 に示す手順により、調査等を実施することとなる。本書はこのフローに従い、より適切に対応するために手助けとなる手引書であり、フローに従い章立てし内容を解説している。

構成は以下の通りである。

- <3章> 外観調査
- <4章> 詳細調査および簡易現場計測
- <5章> 凍害劣化の予測および評価・判定
- <6章> 補修・補強対策
- <7章> 調査結果および補修・補強の記録
- <8章> 定期的な観察

また、調査結果等の記録の様式を別紙に示している。

別紙 1：凍害調査の記入例

別紙 2：凍害調査の様式

フローに従い対応する場合の理解しておくべき基本的な事項を参考資料に示している。

参考資料 1：凍害の発生メカニズム

参考資料 2：凍害に関する複合劣化

参考資料 3：凍害に対する耐久性照査，配合設計および施工

参考資料 4：凍害の調査

参考資料 5：国道橋の橋梁定期点検と本手引書との関係

3. 外観調査

凍害によるコンクリート表面の変状には、外観上の特徴があるため、まず外観調査を行い凍害による影響を受けているかどうかを判定する。外観調査により次のいずれかの変状が認められた場合、凍害の可能性があると判断する。この際、変状部位の水分の供給、日射条件も参考とする。また、外観調査の際には、打診用ハンマーによりコンクリート表面を打診し、表面の脆弱化、浮き等の範囲を調査する。

- ・ スケーリング
- ・ ひび割れ（白色のエフロレッセンスを伴う場合もある）
- ・ ポップアウト
- ・ はく離、断面欠損や鉄筋露出
- ・ その他凍結膨張による変状

【解説】

(1) 凍害に特徴的な外観変状

定期点検あるいは外観調査結果から凍害の影響を受けているかどうかを判定する場合、表 3.1 に示す凍害に特徴的な変状に着目し、いずれかの変状が認められた場合、凍害の可能性があると判断する。なお、はく離、断面欠損や鉄筋露出については、スケーリング、ひび割れ、ポップアウトのいずれの変状が進行したもののかの判断は難しい。

これらの凍害による変状の内、スケーリング、ポップアウトは凍結防止材などの塩化物と凍結融解との複合作用による劣化が顕在化する。また、ひび割れやはく離、断面欠損、鉄筋露出等の変状は、凍害に限らず種々のコンクリートの劣化（中性化、塩害、アルカリシリカ反応、床版の疲労等）に起因する変状と区別できない場合があり、ここでは凍害の可能性があると判断している。

明らかに他の劣化原因と特定できる場合は凍害の可能性がないと判断してよいが、例えば何らかの原因で生じたひび割れに水分が供給され凍結融解作用を受ける可能性もあり、複合劣化の可能性には十分注意する必要がある。

表 3.1 凍害に特徴的な外観変状

外観変状	各種劣化との関係	
スケーリング	凍害または塩化物との複合作用。 進行するとはく離、崩壊に至る。	
ひび割れ	Dひび割れ	進行するとはく離、崩壊に至る。
	地図状（網目状）ひび割れ	ひび割れの外観から他の劣化と区別することは困難である。
	長手方向のひび割れ	
ポップアウト	低品質骨材の吸水膨張	凍害または塩化物との複合作用。
はく離、断面欠損、鉄筋露出		スケーリング、ひび割れ等の進行に起因する変状であるが、他の劣化要因との区別は困難な場合がある。
その他凍結膨張による変状		

(2) 水の供給、日射条件

水の供給要因には、水の供給源や供給形態がある。すなわち、各々のコンクリート構造物は、雨、雪、川水、海水、湧水などの水の供給源をもち、供給形態として水の供給を直接受ける場合、コンクリート表面を伝わってくる場合、ひび割れなどの欠陥部を経由して来る場合、飛来によって供給される場合などがある。⁷ また、北面より南面の部材は、昼間の日射によって凍結水が融け、しかも融雪水が供給されやすいので厳しい環境下にある。⁸

このため、外観調査の際には構造物への水の供給や日射条件など、構造物の立地条件を合わせて確認する必要がある。

⁷ 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 10 [基礎編]，p50，2010.2

⁸ 土木学会：コンクリートライブラリー109，コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案，p57，2002.12

3-1 スケーリング

スケーリングとはコンクリート表面のモルタル部分がフレーク状に剥げ落ちる症状であり、進行すると粗骨材を含めて表層コンクリートのはく離・崩壊に至ることもある。

【解説】

スケーリングの進行例を写真 3.1 に示す。表面から徐々に深部に進行し、コンクリート組織の崩壊に至る。

なお、scale とは英和辞書によると「(名)うろこ、薄皮」「(動)はげ落ちる」の意味である。



【軽度】
表面のモルタルのみ損失

【中程度】
粗骨材の間のモルタル
損失

【強度】
粗骨材の周りのモルタル
がなくなり、骨材が露出

【激しい】
粗骨材を含むコンクリート
の損失

写真 3.1 歩車道境界縁石のスケーリング進行(例)

スケーリングによる代表的な変状を写真 3.2～写真 3.7 に示す。



写真 3.2 橋台堅壁(日射無し)の
スケーリング



写真 3.3 橋台堅壁側面(日射有り)のスケーリング



写真 3.4 スケーリングが進行している縁石
(プレキャスト2次製品)



写真 3.5 スケーリングが進行し形状を留めない
まで崩壊している地覆(現場打ちコンクリート)



写真 3.6 地覆表面を凍害補修しているが、スケーリング再劣化している状態

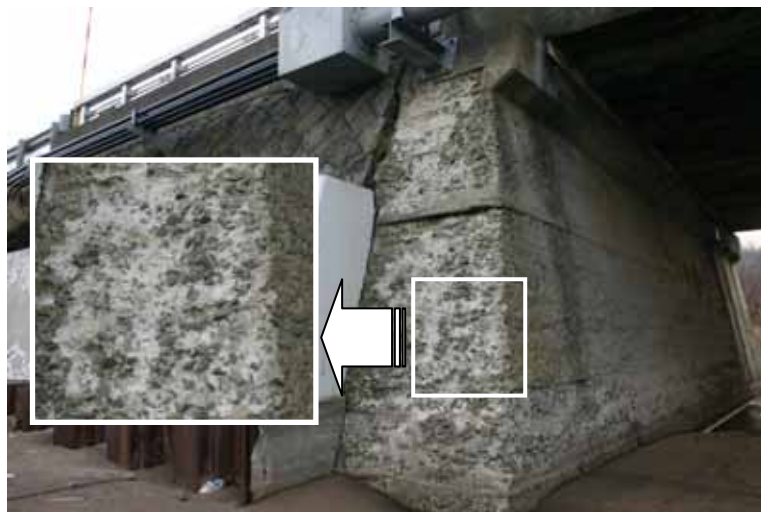


写真 3.7 海岸部橋台縦壁のスケーリング（塩化物との複合劣化）

3-2 ひび割れ

凍結による膨張が大きい空隙中にできた氷晶により膨張が拘束され、大きい静水圧が空隙の壁に作用し、引張強度に達したときにひび割れを生じると考えられている。凍害によるひび割れ形状の特徴はDひび割れ、地図状ひび割れ、長手方向ひび割れ、斜めひび割れの4つであり、ひび割れへの水の供給がある場合にはエフロレッセンスを伴うこともある。

【解説】

(1) Dひび割れ

縁端部やジョイントに平行にそして狭く微細なひび割れが連続的にできる特徴があり、隅角部では「D」の字に回り込む形状となる。隅角部（図 3.1 の青色箇所）は風などの影響を受け周囲に比べ温度が低下し、ひび割れが集中的に発生すると思われる。また、沓座上面から雨水等水分の供給がある場合には、ひび割れがエフロレッセンスで充填される場合もある。

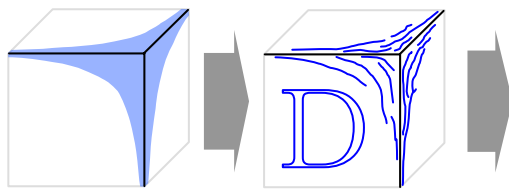


図 3.1 Dひび割れの模式図

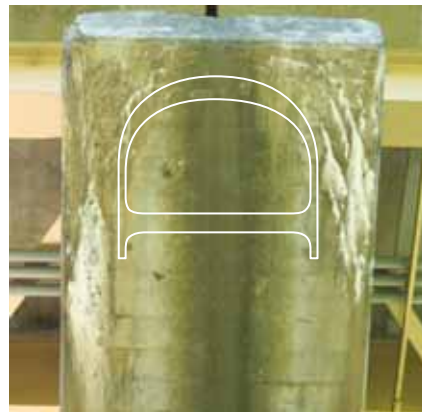


写真 3.8 橋台座部のDひび割れ



写真 3.9 橋脚梁端部のDひび割れが進行し断面欠損に至る



写真 3.10 橋台沓座のDひび割れが進行し鉄筋露出に到る

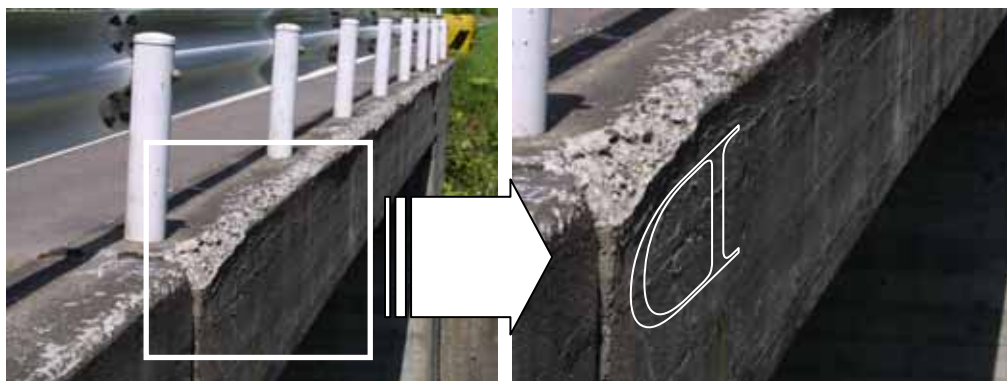


写真 3.11 地覆ジョイント部のDひび割れと断面欠損

(2) 地図状ひび割れ

表面のひび割れの模様が地図状(網目状とも言われる)に細分化されているひびわれであり、日射、環境温度、水の供給等の環境外力を受ける条件が一般的な面部材等に見られる。



写真 3.12 ウイング側面の地図状ひび割れ



写真 3.13 コンクリート表面のひび割れ



写真 3.14 地図状ひび割れが進行しはく離

(3) 長手方向のひび割れ

長手方向のひび割れは、部材の長手方向中心線に平行に現れる直線的なひび割れであり、日射、環境温度、水の供給等の環境外力を受ける面が長く連続している地覆、柱等に見られる。

写真 3.15 は地覆の天端および側面に地覆延長方向に発生したひび割れである。天端あるいは路面側から供給された水がひび割れ内を通り地覆側面下方のひび割れからエフロレッセンスとなって析出している。

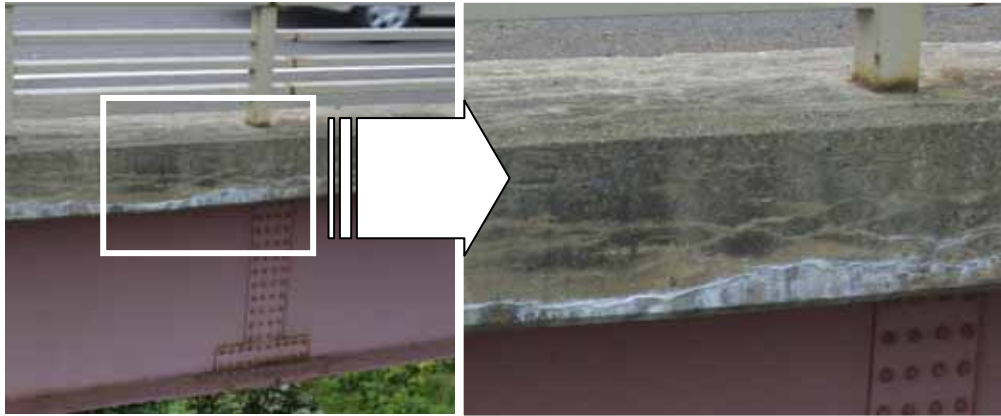


写真 3.15 地覆の側面および天端に生じた長手方向のひび割れ

写真 3.16 は小判形橋脚の南向き面に生じた鉛直方向のひび割れである。ひび割れからのエフロレッセンスの析出⁹と共に表面のはく離も見られる。この部材軸方向のひび割れや白色の析出物はアルカリシリカ反応（以下、A S R）による外観上の特徴とも一致しているが、A S R による変状の場合表面のはく離の報告事例は少ない。このため、凍害もしくは凍害と A S R との複合の可能性も考えられる。



写真 3.16 橋脚柱側面のエフロレッセンスを伴う鉛直方向のひび割れ

⁹ 日本コンクリート工学協会：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，p32,2001.5

3-3 ポップアウト

骨材に起因する凍害現象はポップアウトが代表的であり，骨材中に存在する水分の凍結によって膨張し，表面モルタル層をはく離させることによって生じる．

【解説】

ポップアウトとはコンクリート表面化の骨材粒子の膨張による破壊でできたクレーター状のくぼみであり，吸水率の大きい骨材や品質が悪い場合によく観察される．また，上面部材では初期段階に円錐状の破片が残存する場合がある．尚，pop out とは英和辞書によると「(動)急に外に飛び出す」の意味である．

低品質骨材の場合，図 3.2 の通り，コンクリートの吸水に伴い吸水率の大きい軟石が飽水状態となり，この時氷結温度となると体積膨張による圧力が発生し，表面部分がはく離してクレーター状の穴があく．

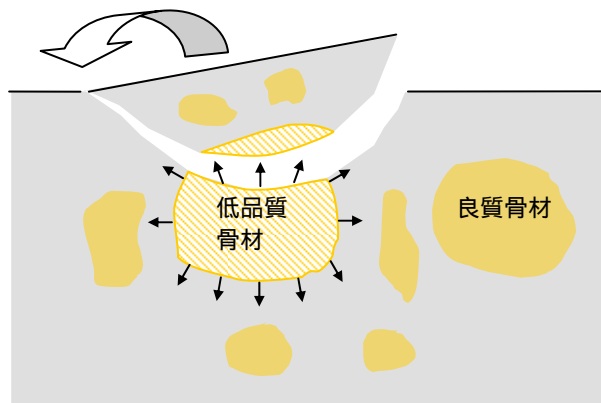


図 3.2 ポップアウトの発生模式図

ポップアウトによる代表的な変状を以下に示す．

写真 3.17 は鋼橋 RC 床版下面のポップアウトである．RC 床版に生じた疲労ひび割れからエフロレンスが析出しており，路面水がひび割れを通り床版内部に浸透しコンクリートの含水比が高まり，低品質骨材が吸水膨張したものと考えられる．

写真 3.18 は海岸擁壁表面のポップアウトであり，海水飛沫による水分の供給と共に，塩化物との複合の可能性考えられる．

このような骨材に起因した劣化を防止する目的から，骨材の規格が設けられている．「参考資料 3-6 骨材」の項を参照のこと．



写真 3.17 鋼橋 RC 床版下面のポップアウト



写真 3.18 海岸擁壁表面のポップアウト

3-4 その他の凍結膨張による変状

写真 3.19 は防護柵の埋込み式支柱部に雨水等が進入し凍結による膨張を受け地覆部にひび割れが発生している事例である。衝突荷重を受けた場合と同様の損傷であるが、防護柵に衝突に伴う損傷は見られない。

写真 3.20 も防護柵の埋込み式支柱部であるが、支柱内部に溜まった水が凍結し四角支柱が円形に変形し、地覆コンクリートのひび割れ発生からはく離、鉄筋露出に至っている。



写真 3.19 防護柵支柱埋込み部の凍結膨張によるひび割れ



写真 3.20 防護柵支柱埋込み部の凍結膨張によるはく離、鉄筋露出

写真 3.21 は支承アンカーボルト箱抜き部の無収縮モルタルに雨水等が進入し凍結融解作用により劣化している事例である。

また、写真 3.22 は沓座モルタルの補修後の状況である。左の写真は中桁の正常なモルタル補修の状況であり、右の写真は外桁の沓座モルタルの下に溜まった水が凍結により膨張し、補修部がアップリフトを受け変形し、支承が沈下しているように見えている。



写真 3.21 支承モルタルの凍結膨張によるひび割れ



写真 3.22 沓座モルタル補修部の凍結膨張による変形

4. 詳細調査および簡易現場計測

凍害による損傷の可能性がある場合には、詳細調査、簡易現場計測、あるいは経過観察相当の判断を行い対処する。

詳細調査とは、図書調査、凍害損傷程度を把握する調査（非破壊試験、破壊試験）、複合劣化程度を把握する調査をいう。

また、簡易現場計測とは、詳細調査を実施するまでもないが、現地にて簡易な計測を行い凍害損傷等の程度を数値化する計測をいう。

4-1 図書調査

外観調査の結果、凍害の可能性があると判断された場合、気象条件（最低気温、凍結融解回数）、コンクリートの配合等の工事記録や水の供給条件について調査し、詳細調査および対策工検討の資料とする。

【解説】

凍害は最低気温が低いほど、また凍結融解の繰返し回数が多いほど劣化の進行は早くなる。また、コンクリートの含水比（飽水度）が高いほどコンクリート中の水の凍結による膨張圧が大きくなり凍害を生じやすい。¹⁰

一方、近年建設された構造物は耐凍害性を高めるための配慮（骨材の品質、空気量、水セメント比、AE コンクリートの使用等）がなされている。

このため、図書調査では気象条件や水分の供給条件等を含む環境条件、配合等の使用材料を図書調査し、詳細調査および対策工検討の際の資料とする。

図書調査の調査項目を表 4.1 に示し、水色着色部について以下解説する。

表 4.1 図書調査の調査項目¹¹

	調査項目	細目	備考
図書調査	供用期間	竣工後	
		補修・補強後	
	環境条件	内陸部、海岸部	
		寒冷地	
		凍結防止剤の影響	
		最低温度、凍結融解回数	
		水分の供給、日射条件	本編 3 章(2)参照
	使用材料	骨材の品質(吸水率、安定性損失重量)	
		コンクリートの配合	
		空気量(気泡間隔係数)	
かぶり			

¹⁰ 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p64，2001.1

¹¹ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p126，2008.3

注) 示方書の維持管理編および品質管理記録等の工事記録から調査項目、細目を設定した。

(1) 最低気温と凍結融解回数

凍結時の最低温度が低いほど凍害が大きくなり、また、年間の凍結融解回数が多いほど凍害劣化が早く進行する。このため、凍害劣化外力として最低気温、凍結融解回数が必要であるが、一般に対象構造物の立地地点における測定記録はないため、別途信頼できる資料によって定めることとなる。¹²

最低気温は立地地点に最も近接する気象庁のアメダスを参考にすることができる。

なお、アメダスとは地域気象観測システム (AMeDAS:Automated Meteorological Data Acquisition System)の略で、全国1,300箇所(約17km四方に1箇所)で雨量を自動的に観測し、この内約800箇所(約21km四方に1箇所)で気温、風向・風速、日射時間などの自動観測を行っている。

ここでは、長谷川¹³が気温、日射量などに関するデータを用いて算出した凍結融解日数、凍害危険度とその分布図(図4.1)を示す。

また、現在では統計的な気象データの入手が容易となり、建築学会では最低気温、部材条件などから凍結融解作用の強さを算定する方法¹⁴が示されている。

表 4.2 凍害危険度の算出データ(北海道)

	外気温上の		日射による融解日数(日)	全凍結融解日数(日)	凍害危険度
	凍融日数(日)	凍結日数(日)			
旭川	77	71	25	102	4
札幌	87	45	29	116	3
帯広	103	52	39	142	5
釧路	103	40	32	135	4
函館	88	35	23	111	2

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

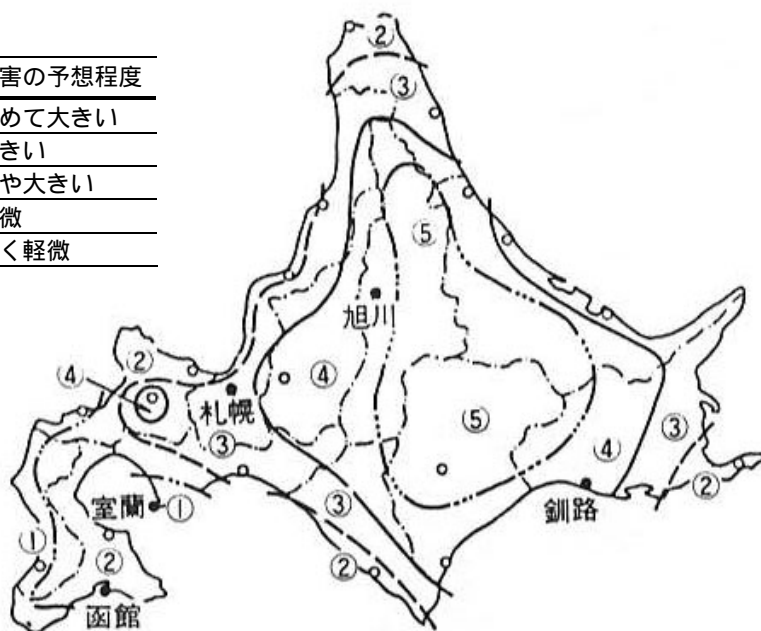


図 4.1 凍害危険度の分布図(北海道)¹⁵

¹² 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針(案)・同解説，p119，2004.3

¹³ 長谷川寿夫：コンクリートの凍害に対する外的要因の研究，北海道大学学位論文，1974

¹⁴ 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS5，鉄筋コンクリート工事，26節凍結融解作用を受けるコンクリート，530-537，1997

¹⁵ 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技報堂出版，p78，1988

(2) 使用材料の調査

使用材料の調査項目とその規格値を表 4.3 に示す。

規格値等の詳細は「参考資料 3 凍害に対する耐久性照査，配合設計および施工」を参照のこと。

表 4.3 使用材料の調査項目と規格値

項目	規格値等	「参考資料 3」参照項
骨材の品質	絶乾密度 砂 2.5kg/m ³ 以上 砂利 2.5kg/m ³ 以上 吸水率 砂 3.5%以下 砂利 3.0%以下 安定性損失重量 細骨材 10%以下 粗骨材 12%以下	3-6 骨材(細骨材・粗骨材)
コンクリートの配合	しばしば水で飽和される一般の部材の場合 開発局では最大 55%	3-2 水セメント比
空気量 (気泡間隔係数)	空気量 3～6% 気泡間隔係数 250 μ 以下	3-3 空気量 3-4 気泡間隔係数
かぶり	凍害深さ以上	

4-2 凍害損傷程度等を把握する調査（非破壊試験・破壊試験）

構造物の評価・判定を行うための基礎資料を得ることを目的として、凍害の損傷程度を把握する調査を行う。調査は非破壊試験を基本とし、必要に応じて破壊試験を実施する。

【解説】

凍害損傷程度の把握は、図 4.2 のフローに従い実施する。

調査の基本は、最初から破壊試験であるコア採取を行うのではなく、破壊試験に先立ち非破壊試験による調査を実施することである。非破壊試験の情報を得て、段階的にふるい分けを行った上で破壊試験が必要と判断される構造物を選定することにより、損傷リスクを低減すると共に、調査コストの縮減が期待される。

例えば、従来の凍害診断では凍害損傷の程度に係わらず無条件でコア採取やはつりによる破壊調査が実施される場合があったが、凍害劣化深さを知りたい場合、第一段階として「表面走査法」による非破壊試験を行い、顕著な凍害損傷が疑われる場合に第二段階として「トモグラフィー法」による詳細な非破壊試験を実施することができる。

次に、コア採取を伴う破壊試験を行うことで、例えばコア採取位置を代表点とする凍害深さを「透過法」による求め、非破壊試験結果の精度の向上を図ることができる。

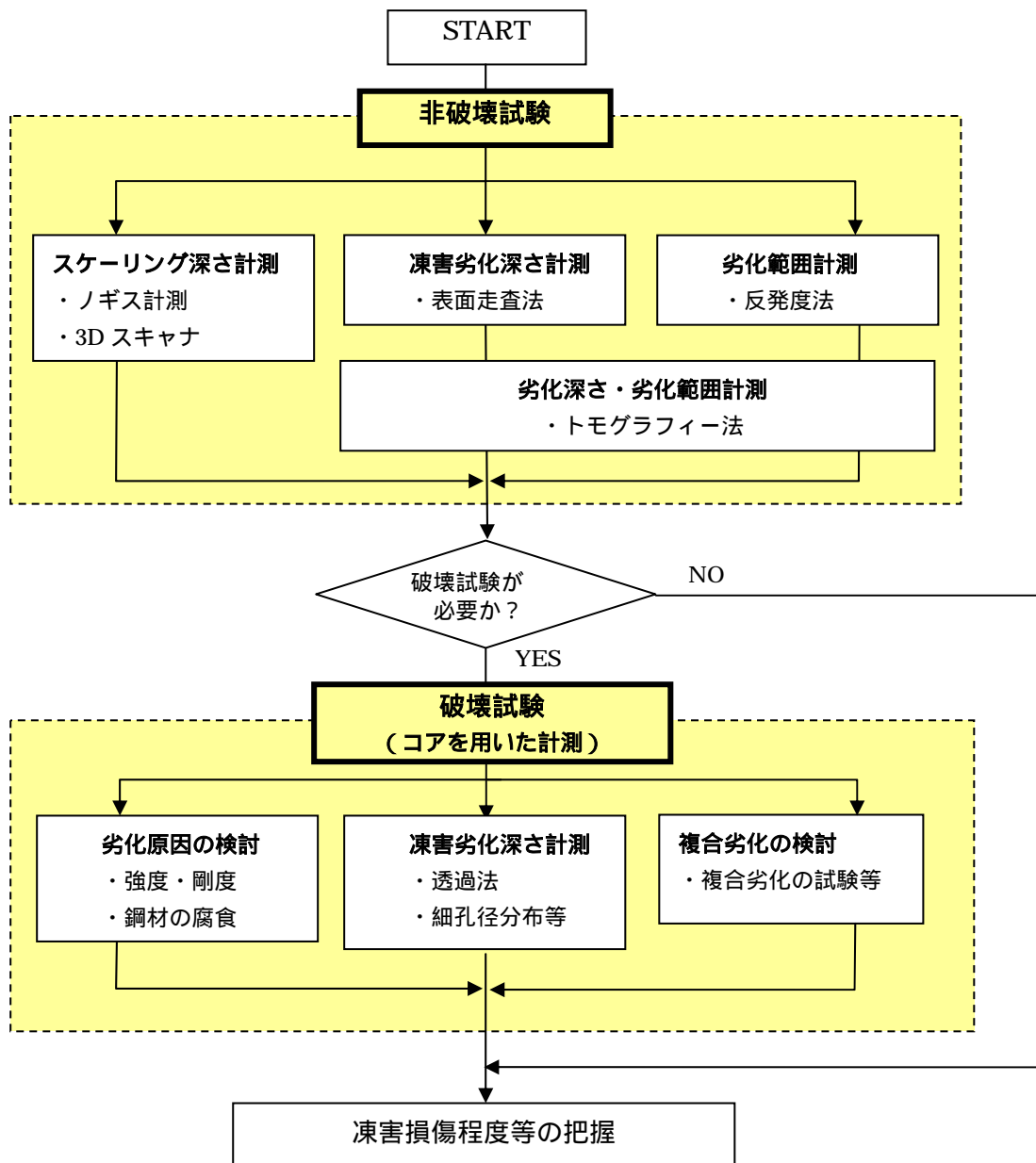


図 4.2 凍害損傷程度の把握フロー

凍害損傷程度を把握する調査は、表 4.4 の調査項目を参考に選定する。

表 4.4 凍害劣化による構造物の評価・判定を行うための詳細調査例

点検・測定項目		損傷有無 損傷範囲	劣化深さ	耐荷力等	複合劣化等
非破壊 試験	スケーリング深 さ計測	・ノギス計測 ・3D スキャナ			
	コンクリート表 面の超音波伝播 速度の計測	凍害劣化範囲の計測 ・トモグラフィ法			
		凍害劣化深さの計測 ・表面走査法			
	劣化範囲計測	・反発度法			
破壊 試験 (コア採 取等)	コア試料を用い た計測	超音波伝播速度の計測 ・コア直径の透過法			
		細孔径分布測定			
	蛍光エポキシ樹脂含浸に よる微細ひび割れ観察				
	コンクリート強度 弾性係数				
	複合劣化関連				
	鋼材の腐食	鋼材の位置と腐食状況			
実橋載 荷試験	変形	たわみ, 変形			

4-2-1 非破壊試験

凍害によって劣化した構造物の外観上の変状は、性能評価のための有力な情報となり得るため、変状のある部位や程度をできるだけ定量的に調査することが必要である。

【解説】

(1) コンクリート表面の打診調査（反発度等による凍害損傷範囲）

凍害を生じていると思われる部分と、健全部分において反発硬度を比較することにより、コンクリート組織の損傷の有無を判定する。打診用ハンマーによる音の違いでは判断できない差でも、リバウンドハンマーによる表面反発強度により定量化することで判断が容易になる。比較対照とする健全部分については、打撃角度、部材厚さ、コンクリートの材齢、湿潤程度などがなるべく測定対象とした部分と同条件になる位置を選定する。

最近の寒冷地における河川樋門を対象とした¹⁶研究によると、反発強度とスケーリング劣化の外観評点および相対動弾性係数とに相関が認められている。また、表面にスケーリングがさほど進行していなくても、コンクリート内部に微細ひび割れが発生している可能性があることから、外観調査に加えて反発強度をも参考にして、凍害劣化範囲を推定することを推奨している。

(2) スケーリング深さ計測（ノギス計測や3Dスキャナ測定による凍害劣化深さ）

凍害深さは、スケーリング深さや微細ひび割れによる劣化深さを測定して総合的に評価する必要がある。ここに、スケーリング深さは構造物表面（採取コア表面も含む）でノギス等により表面からの欠損深さを測定し、その最大値と最小値を求め定量化する。

最近の寒冷地における河川樋門を対象とした研究によると、3次元スキャナを用いた画像解析からスケーリング深さを定量化する方法¹⁷が適用されている。

¹⁶ 土木研究所寒地土木研究所：平成 21 年度 重点プロジェクト報告書（11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究），2010.3

¹⁷ 内藤勲，田口史雄，林田宏：コンクリート実構造物のスケーリング劣化に関する検討，第 52 回北海道開発技術研究発表会，技-42，2009.2

(3) コンクリート表面の超音波伝播速度の計測（トモグラフィー法による凍害劣化範囲）¹⁸

凍害を生じていると思われるコンクリート表面を格子に分割し交点間の超音波伝播速度を測定し、速度の変化点を求めることにより凍害範囲とする手法も提案されている。

最近の寒冷地における被覆補修された河川樋門の調査研究¹⁹によると、トモグラフィー法、採取コアの透過法による超音波伝播速度の測定および付着強度試験の結果から、被覆補修構造物内部の劣化位置を超音波トモグラフィー法による非破壊調査で確認する手法も提案されている。

(4) コンクリート表面の超音波伝播速度の計測（表面走査法による凍害深）

非破壊試験であることや簡便性から図 4.3 に示す表面走査法による超音波伝播速度測定を用いた凍害深さの推定も試みられている。これは、凍害による劣化部を微細ひびわれが発生した範囲とみなすことで、凍害深さを非破壊で測定する手法である。

コンクリートの表層に劣化した部分が存在する場合、超音波は劣化部をなるべく迂回し、健全部を伝播経路に選びながら、最も短い時間で受振子に到達しようとする性質がある。発・受振子間の距離がある値以上になると、超音波の伝播経路は健全部の縁端位置に全て一本化される。その結果、発・受振子間の距離の増加に対する超音波の伝播距離の増加の割合は小さくなり、これに連動して伝播時間が早まりグラフの直線の傾斜が変わる。

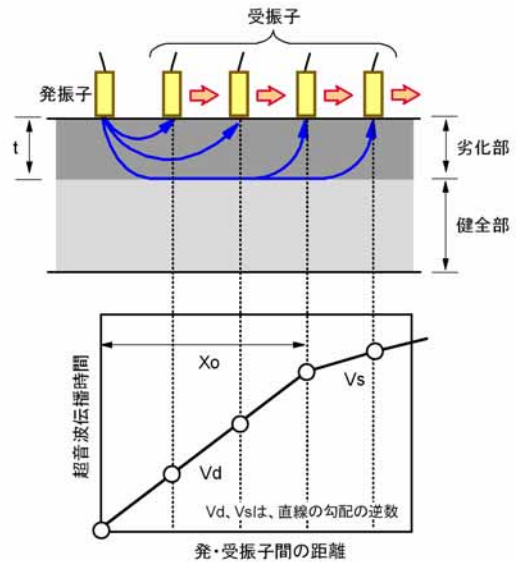


図 4.3 表面走査法による超音波速度測定

4-2-2 破壊試験（コア採取等）

採取コア等による試験では、対象構造物から採取したコンクリートコアを用いた凍害深さの測定、鋼材の位置と腐食状況の把握、実構造物の変形の測定等が有効である。

【解説】

凍害深さ（スケーリング深さ、微細ひび割れによる劣化深さ）の代表的な試験方法を以下に示すが、詳細については「参考資料4 凍害の調査」に示す。

(1) コア試料を用いた計測：コア直径の透過法による凍害深さの計測

凍害深さは、スケーリング深さや微細ひび割れによる劣化深さをいう。後者の微細ひび割れによる劣化深さの計測方法の一つにコア直径の透過法がある。これは、採取コアの直径方向に超音波伝播速度を計測し、震度方向の速度変化から凍害深さを求める方法である。

超音波伝播速度は骨材の種類他に含水率の影響を受けることから、超音波伝播速度を用いて凍害深さをよりの確に評価しようとする場合は、乾燥させたコアを用いることが望ましいとの研究成果²⁰もある。

(2) コア試料を用いた計測：細孔径分布測定による凍害深さの計測

細孔径分布はコアを表面から数 cm 間隔で切断し、細孔径毎の細孔量の変化を求め、凍害による劣化深さを判定する。細孔径分布の測定は広範囲の細孔径分布を比較的簡単に測定できることから水銀圧入法が広く用いられているが、測定結果にばらつきが大きいことなど評価が難しい場合もあり、今後多くのデータの蓄積が必要である。

¹⁸ 山下英俊：コンクリート構造物の凍害劣化評価と予測に関する研究，北海道大学学位論文，p45，1999.3

¹⁹ 内藤勲，田口史雄，石谷隆始，畠秀樹，出合寿勇：河川樋門コンクリートの凍害劣化と再劣化に関する調査，寒地土木研究所月報，No.678，pp.17-26，2009.11

²⁰ 土木研究所寒地土木研究所：平成 21 年度 重点プロジェクト報告書（11.2 コンクリートの凍害，塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究），2010.3

(3) コア試料を用いた計測：蛍光エポキシ樹脂含浸法による凍害深さの観察

コア試料に蛍光染料を添加した超低粘度形エポキシ樹脂（粘度： $130 \pm 20 \text{mPa}\cdot\text{s}$ （20℃））を低真空（1/100 気圧）状態で注入・硬化させ、コア切断面に紫外線を照射して微細ひび割れ等を可視画像として評価するものであり、可視化可能なひび割れ幅は $12 \mu\text{m}$ 程度である²¹。

(4) コンクリートの強度，剛性，変形

構造安全性やたわみ等の評価を行う目的で，採取コアの強度，静弾性係数試験を行う．コアの静弾性係数の低下により凍害による劣化を推定(参考資料 4-2-1 を参照)することもできる．また，必要に応じて実橋載荷試験による変形計測を行い剛性，耐荷力を評価する．

(5) 鋼材の腐食

凍害劣化によるコンクリート組織の緩みやひび割れの発生は，圧縮強度・静弾性係数の低下と共に，塩化物イオン浸透速度，中性化速度の増加を招く．また，凍害劣化によるスケールに代表されるコンクリート厚さの減少は，鋼材かぶりの減少となる．いずれも鋼材腐食を促進する要因であり，鋼材腐食に着目した中性化深さの測定や飛来塩分，凍結防止材等の塩化物イオン環境下では，コアの塩化物イオン含有量試験を行い，鋼材腐食の発生を判定する．

また，鋼材の腐食は構造物の性能に直接影響を及ぼす場合が多いので，必要に応じてはつり調査を行う．鋼材をはつり出し，腐食の有無，位置，面積，重量，孔食深さなどを直接測定する．

²¹ 手塚喜勝，朝倉啓仁，中村眞一，佐々木元茂：蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法，土木学会北海道支部論文報告集，第 61 号，V-10，2005.2

4-3 複合劣化の可能性を把握する調査

凍害損傷の可能性と共に、凍害以外の劣化因子の作用が懸念される場合には、複合劣化の可能性を把握する調査結果を参考に、その可能性を慎重に検討する必要がある。
調査結果を得て原因推定、あるいは評価判定が難しい場合には、専門家から意見を聞くのがよい。

【解説】

凍害損傷は主に特徴的な外観から原因が推定され、損傷の劣化因子が凍害であることを直接判定する試験現在のところ開発されていない。このため、凍害に特徴的な外観上の変状が認められるが、塩害、中性化、ASR等他の劣化の可能性が考えられる場合には、表 4.5 を参考に詳細調査を行い、その結果を参考に複合劣化の可能性を慎重に検討する必要がある。

表 4.5 複合劣化の判定を行うための調査例

調査項目	調査目的	備考
図書調査	使用材料、施工条件、環境条件・使用条件等からの劣化因子の推定	本編 4-1
静弾性係数試験	凍害劣化の可能性を判定 ASR劣化の可能性を判定	「参考資料 4 4-2-1 コアの静弾性係数の測定」
中性化深さの測定	中性化劣化の可能性や中性化との複合劣化を判定 鋼材腐食の可能性を判定	「参考資料 4 4-2-2 中性化深さの測定」
塩化物イオン含有量試験	塩害劣化の可能性や塩害との複合劣化を判定 鋼材腐食の可能性を判定	塩害橋梁維持管理マニュアル(案) ²²
残存膨張量試験等	ASR劣化の可能性や複合劣化を判定	アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案) ²³

4-4 簡易現場計測

凍害による損傷の可能性がある場合には、詳細調査、簡易現場計測、あるいは経過観察相当の判断を行い対処する。ここに、簡易現場計測とは、詳細調査を実施するまでもないが、経過観察が必要と判断された場合、損傷程度に応じて現地に於いて簡易な非破壊試験を行い、現時点での凍害損傷の指標を数値化する計測をいう。

【解説】

簡易現場計測は、詳細調査を実施するまでもないが、経過観察あるいは再点検が望まれる箇所においては、損傷程度を外観上の写真やスケッチ等の記録、のみならず数値データとしても記録することで、損傷程度の経時変化を把握する手法である。

本計測は定点で、継続的に実施する必要からも破壊試験ではなく、非破壊試験である必要がある。前項「4-2-1(1)反発度等による凍害損傷範囲」「4-2-1(4)表面走査法による凍害深さの計測」を参考に計測することができる。

²² 国土交通省北陸地方整備局、橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル(案), H20.4

²³ 国土交通省近畿地方整備局、ASRに関する対策検討委員会、アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案), H20.4

5. 凍害劣化の予測および評価・判定

凍害の劣化予測は、潜伏期，進展期，加速期，劣化期の期間を予測することを基本とし，凍害発生の可能性の有無や凍害深さの予測を行う。

調査結果から性能評価および対策要否の判定を行う場合は，以下によるものとする。

(1) 凍害による構造物の性能低下はコンクリート断面の減少と鋼材腐食に起因するため，構造物の劣化の状態が潜伏期，進展期，加速期，劣化期のいずれにあるかに十分留意して，影響を受ける性能を評価する必要がある。

(2) 点検時および予定供用期間終了時における性能評価は，定量的な性能照査に基づくことが望ましいが，困難な場合はグレーディングによる方法を用いても良い。

【解説】

(1) 凍害の劣化過程

凍害による劣化現象，すなわち凍害劣化は次の2つの劣化現象を総称している。

凍結融解作用によるコンクリート組織の緩み，あるいはコンクリート表面部におけるひび割れの発生。

凍結融解作用や塩化物との複合作用によるスケーリングに代表されるコンクリート断面厚さの減少。

凍害劣化の程度によって鋼材腐食が発生する場合もあるため，凍害深さを評価することにより構造物の性能低下を予測する方法がとられている。

すなわち，凍害による構造物の性能低下は凍害深さによって異なり，凍結融解作用によってコンクリート表面にスケーリング等の劣化が発生するまでの潜伏期，骨材が露出しはく落するまでの進展期，コンクリートかぶりの減少により鋼材腐食が露出するまでの加速期，鋼材の腐食が進行する劣化期に区分される。

凍害によるコンクリートの劣化進行深さ（凍害深さ）の増大と構造物の性能低下の関係は図5.1に示すようにモデル化することができる。また，各劣化過程と期間を決定する要因は表5.1のように考えられる。

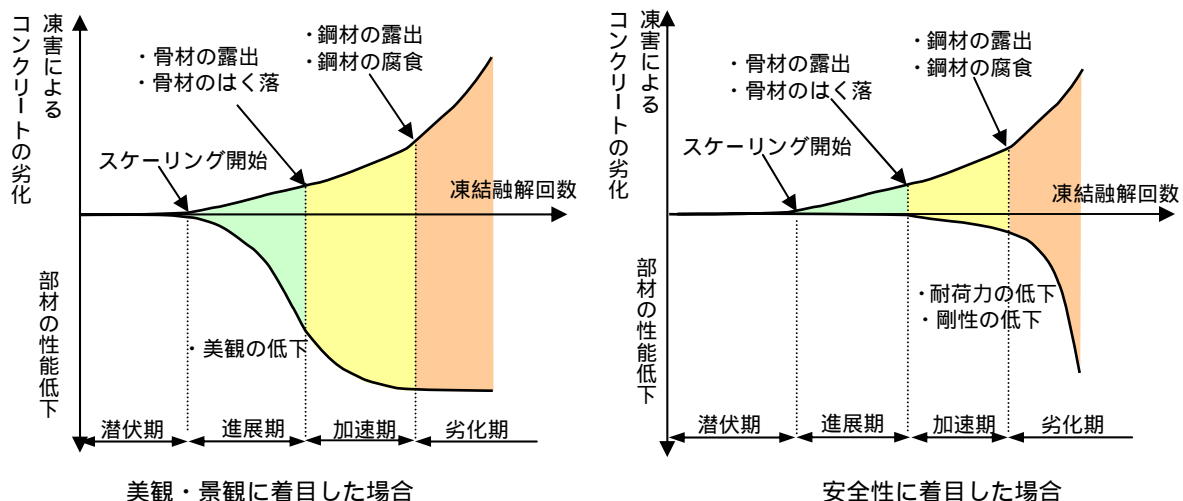


図 5.1 凍害劣化過程の概念図²⁴

²⁴ 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p121，2008.3

表 5.1 凍害劣化過程の定義と期間を決定する要因²⁵

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解作用を受けスケーリングが発生するまでの期間	凍害発生の可能性の有無，最低温度，凍結水量，凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化が進行し，骨材が露出，もしくははく離するまでの期間	最低温度，凍結水量，凍結融解回数
加速期	鋼材が露出したり，鋼材腐食が開始するまでの期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度
劣化期	鋼材の腐食が進行し，耐荷性の低下が顕著な期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度

(2) 凍害劣化の予測

コンクリートは骨材とペーストとの複合体であり，骨材とコンクリートの両方について凍害劣化の予測を行う。

骨材に起因する凍害現象は，ポップアウトが代表的であり，耐凍害性を満足する骨材の物性の限界値がコンクリート標準示方書 [施工編] (参考資料 3-6 を参照) に定められている。

コンクリートの凍害現象のうち，(1) のひび割れについては，対象とするコンクリートを再現したコンクリートの凍結融解試験 (参考資料 4-5-3 を参照) を行うことにより，耐凍害性すなわち凍害を受ける可能性の有無を評価することができる。また，参考資料 5-1 に示す方法により，構造物がおかれている実際の環境条件 (温度，水分等) に応じて，おおまかではあるが，時間軸での凍害劣化予測を行うことができる。

コンクリートの凍害現象のうち，(1) のスケーリングについては，国内においては規準が定められていないため，ASTM をはじめとする諸外国の試験方法を準用した試験 (参考資料 4-5-5 を参照) を行ない，凍害を受ける可能性の有無を評価することができる。また，参考資料 5-2 に示す方法により，おおまかではあるが，スケーリングに対する耐久性設計や時間軸での劣化予測を行うことができる。

(3) 凍害深さの予測

詳細調査により得られた凍害深さとその進行速度をもとに，凍害深さの予測を行う。

凍害深さの測定は，「4-2-2(1)凍害深さ」によるが，コンクリート表面から深さ毎の超音波伝播速度 (参考資料 4-4-5 を参照) の分布や細孔径分布 (参考資料 4-5-2 を参照) の径別の割合から求める方法が検討されている段階である。

(4) 外観上の劣化グレード

潜伏期では，基本的に劣化が顕在化していないので性能の低下はないが，進展期に入り表面の劣化が発生すると美観の低下が考えられる。加速期に入ると凍害深さが大きくなり，コンクリートの断面減少が顕著になるため，鋼材腐食が発生する段階に入り，コンクリートのはく落等による第三者影響度が心配される。劣化期に入ると凍害によるコンクリートの劣化がかぶり以上になるため，変形による使用性能の低下や耐荷力の低下による安全性能の低下が懸念される。

なお，鋼材に腐食が生じていて動的荷重により疲労を受けている場合には，進展期などの比較的早い段階からコンクリートのはく落に代表される第三者影響度が問題となることがある。

鋼材腐食までを対象とした場合の構造物の外観上のグレードと劣化の状態との関係は表 5.2 に示す通りである。

²⁵ 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p122，2008.3

表 5.2 鋼材腐食までを対象とした場合の構造物の外観上のグレードと劣化の状態の関係²⁶

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態 (潜伏期)	凍結融解作用を受けるが、性能低下がなく初期の健全性を保持している段階
状態 (進展期)	凍害深さが小さく剛性にほとんど変化はなく鋼材腐食もないが、美観等に影響を及ぼす段階
状態 (加速期)	凍害深さが大きくなり、剥落等の第三者への影響が起こり鋼材腐食が発生する段階
状態 (劣化期)	凍害深さが鋼材以上になり、腐食が著しくなり、使用性能や安全性能へ影響を及ぼす段階

(5) 構造物の性能評価と対策要否の判定

構造物の性能を定量的に評価するには、凍害によるコンクリートの劣化とそれに伴う鋼材の腐食程度から性能低下の影響を定量的に評価する手法が必要となる。しかし、現状の技術レベルでは凍害深さから性能の低下を予測することが難しい場合が多く、現実的には構造物の外観上のグレードに対応した性能評価を行い、対策の要否を判定する方法がとられている。

すなわち、点検時における構造物の評価は、外観上の劣化の状態から表 5.2 に示すグレーディングを行い、表 5.3 を参考に性能低下を半定量的に評価する。また、予定供用期間終了時の評価は、詳細調査等で求まる供用期間と凍害深さの関係から評価を行う。

なお、安全性能の評価については、参考資料 6 に示すように、超音波伝播速度測定から得られた調査データから推定される強度等を用いて、FEM解析により、おおよその耐荷力評価が可能であるが、変形等については適切に評価できていないため、今後、更なる検討が必要であるとされている。

表 5.3 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下²⁷

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度	美観・景観
状態 (潜伏期)	-	-	-	
状態 (進展期)	-	-		
状態 (加速期)	耐荷力の低下 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材腐食	剛性の低下 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材とコンクリート間の付着劣化 ・鋼材腐食	第三者への影響 ・はく離 ・はく落	美観の低下 ・スケーリング、ポツアウト ・ひび割れ
状態 (劣化期)				

²⁶ 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p129，2008.3

²⁷ 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p133，2008.3

6. 凍害劣化に対する対策

凍害による性能低下が生じ対策が必要と判定された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、構造物の外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。

【解説】

6-1 対策の選定²⁸

性能評価の結果、対策が必要と判断された場合には対策工を選定する必要があるが、定量的な評価に基づく判定が困難な場合には、外観上の劣化グレードを基準として行うことができる。構造物の種類や重要度、劣化の進行速度、維持管理区分によって対策が異なるが、標準として表 6.1 に従うことができる。

表 6.1 構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強**	供用制限
(潜伏期)	()	()	()	
(進展期)				
(加速期)		*		
(劣化期)		*		

：標準的な対策〔 *：力学的性能の回復を含む〕

：場合によっては考えられる対策〔 *：力学的性能の回復を含む〕

：外観上のグレード以外の基準により実施される対策

**：力学的性能を初期の性能より向上させる場合

6-2 補修・補強対策の選定

補修とは、第三者への影響の除去あるいは、美観・景観や耐久性の回復もしくは向上を目的とした対策である。ただし、建設時に構造物が保有していた程度まで、安全性あるいは使用性のうち、力学的な性能を回復させるための対策を含む。また、補強とは、建設時に保有していたよりも高い性能まで、安全性あるいは使用性のうち、力学的な性能を向上させるための対策²⁹である。

凍害に対する補修、補強の目的は、劣化した部分の除去、さらに劣化が進行した場合の耐荷力および剛性の回復にある。凍害による劣化は、コンクリート自体の劣化が主となるため、凍害を受けた部分のコンクリートの物性値は大きく低下している場合が多く、水の供給を防ぎ、凍害を受けた箇所を取り換える対策が有効である。対策時期として、構造物ができるだけ乾燥していることが望ましい。

劣化の程度に応じて対応する工法を表 6.2 に示す。

表 6.2 補修・補強に期待する効果と工法の例（予防を含む）³⁰

期待する効果	工法例	補修	補強
水の供給を抑制	表面処理，ひび割れ注入，排水処理		
劣化部を取り除く	断面修復，ひび割れ注入		
耐荷力の向上	増厚，打換え，巻立て		

次に、期待する効果と劣化過程毎の補修・補強工法の選定例を表 6.3 に示す。

²⁸ 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p134，2008.3

²⁹ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編] p6,2008.3

³⁰ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編] p135，2008.3 に補修・補強の別を加筆。

表 6.3 凍害と塩害を対象とした場合の構造物の外観上の劣化グレードと標準的な工法の例³¹

構造物の外観上のグレード	標準的な工法	補修工法	補強工法
(潜伏期)	表面処理 (予防的に実施される工法)		
(進展期)	表面処理		
(加速期)	表面処理		
	ひび割れ注入		
	断面修復		
(劣化期)	ひび割れ注入		
	増厚		
	打換え		
	巻立て		

6-3 表面処理工法

(1) 工法概要³²

凍害劣化対策として使用される表面処理工法としては「遮水・遮塩系」(ここでは表面被覆材という)、「撥水系」(ここでは表面改質材という)の2種類があり、これら表面処理の概要を表 6.4 に示す。

表 6.4 表面処理工法の概要

	工法の概要
遮水・遮塩系 (表面被覆材)	外部からコンクリート中に侵入する劣化要因を遮断することを目的として、コンクリート表面に塗装材料やポリマーセメントモルタルを塗布する方法や、フィルム状やシート状の材料を貼り付ける方法、さらには成形パネル材料を取り付ける方法などがある。
撥水系 (表面改質材)	シリコーン系、非シリコーン系あるいはそれらの混合系の材料をコンクリート表面に塗布含浸させ、コンクリート表面に吸水防止層を形成することによって、外部からの水や塩化物イオンなどの劣化因子の浸透を抑制し、劣化速度を抑えることを目的とした工法である。

(2) 表面被覆材

表面被覆材は、潜伏期において凍害の原因となる水分を遮断して耐久性を向上する目的で予防的に使用される。進展期においては、微細なひび割れやスケーリングなどの現象が見られるため、水分の遮断に加え美観の向上や落防止を目的に使用される。また、塩害環境下では塩化物が凍害を促進する可能性があるため、遮塩性が要求される。

表面被覆材自体の耐久性および凍害劣化を抑制・防止する性能に関する評価指標を表 6.5 に示すが、様々な機関において仕様が定められている。³³

³¹ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編] p135, 2008.3 に補修・補強の別を加筆。

³² 日本コンクリート工学協会：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, p107, 2001.5

³³ 土木学会：コンクリート技術シリーズ 58, コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状, p95-96, 2004.2

表 6.5 表面被覆材に対する要求性能に関する評価指標

要求性能		評価指標
表面被覆材自体の耐久性能	耐候性	付着強度，色調，光沢，テクスチャー 白亜化，はくり，われ，はがれなど
	温度変化抵抗性	ふくれ，われ，はがれ，付着強度
	凍結融解抵抗性（塩分環境）	ふくれ，われ，はがれ，付着強度
	耐アルカリ性	ふくれ，われ，はがれ，軟化，溶出，付着強度，色調
コンクリート構造物の劣化を抑制・防止する性能	防水性（遮水性）	透水量
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量
	塩分遮断性（遮塩性）	塩素透過量，塩化物イオンの拡散係数
	水蒸気透過性（透湿性）	水蒸気透過性
	凍結融解抵抗性（塩分環境）	相対動弾性係数，質量減少率

(3) 表面改質材

表面改質材は建設時もしくは建設後の初期欠陥や初期の劣化などに対して，凍害の原因となる水分を遮断して耐久性を向上する目的で予防的に使用される．表面被覆材に比べ凍害環境が穏やかな地区などに限定的に使用されるものと考えられている．表面被覆材と同様に塩害環境下では塩化物が凍害を促進する可能性があるため，遮塩性も要求される．

表面改質材自体の耐久性および凍害劣化を抑制・防止する性能に関する評価指標を表 6.6 に示す．しかし，表面改質材自体の凍害劣化に関してはその試験・評価方法は確立していないようであり，耐候性，耐アルカリ性など，コンクリート表面の外観評価とならざるを得ないと思われる．また，コンクリート構造物の劣化を抑制・防止する性能に関しては基準を示している機関は少ない状況にある．³⁴

写真 6.1 は新設橋梁の地覆に表面改質材を塗布している試験施工の状況である．



写真 6.1 表面改質材施工状況

表 6.6 表面改質材に対する要求性能に関する評価指標

要求性能		評価指標
表面改質材自体の耐久性能	耐候性	浸透深さ，色調，コンクリート表面の変状
	耐アルカリ性	浸透深さ，色調，コンクリート表面の変状
コンクリート構造物の劣化を抑制・防止する性能	撥水性	吸水量，水の接触角
	防水性（遮水性）	透水量
	塩分遮断性（遮塩性）	塩素透過量，塩化物イオンの拡散係数
	水蒸気透過性（透湿性）	水蒸気透過量
	凍結融解抵抗性（塩分環境）	相対動弾性係数，質量減少率等

³⁴ 土木学会：コンクリート技術シリーズ 58，コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状，p136-137，2004.2

6-4 ひび割れ注入

(1) 工法概要³⁵

ひび割れ補修工法は一般に、ひび割れ幅やひび割れの動きに応じて、ひび割れ部の表面処理工法、注入工法、充填工法に分けられ、これらの概要を表 6.7 に示すが、凍害劣化対策としてはひび割れ注入工法が採用されている。

表 6.7 ひび割れ補修工法の概要

	工法の概要
(ひび割れ部の)表面処理工法	一般的には 0.2mm 程度未満の微細なひび割れを対象として、ひび割れ表面をシールする工法である。 ひび割れ幅の変動がない場合はパテ状エポキシ樹脂を用い、変動がある場合には可とう性エポキシ樹脂を用いる。
ひび割れ注入工法	概ね 0.2mm を越えるひび割れを対象にして、ひび割れ内部に樹脂やセメント系材料を注入充填する工法であり、最も多用されているひび割れ補修工法である。 注入材料には主にエポキシ樹脂やセメントスラリーが用いられ、ひび割れ幅やその変動の有無、使用環境(季節、湿潤の度合い)、注入工法、経済性などを考慮して選定される。
充填工法	ひび割れ幅が 0.2mm 程度を越えるものやひび割れ幅の変動が大きいものを対象として、表面を U カットしてカット部分を充填する工法である。 充填材はひび割れ幅とその変動が大きい場合にはシーリング材を用い、動きが小さいが変動しない場合には可とう性エポキシ樹脂やポリマーセメントを用いる。

(2) 補修を必要とするひび割れ幅

補修を必要とするひび割れ幅は、表 6.8 の鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅などを参考に設定する。例えば、一般の環境の場合純かぶりを 70mm とすると許容ひび割れ幅は $0.005 \times 70\text{mm} = 0.35\text{mm}$ となる。

表 6.8 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 w_a (mm)³⁶

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件(表 6.9 参照)		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
PC 鋼材	0.004 c	---	---
注)	適用できるかぶり c は 100mm 以下を標準とする。		

表 6.9 鋼材の腐食に対する環境条件の区分³⁷

一般の環境	塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の場合、土中の場合等
腐食性環境	1. 一般の環境に比較し、乾湿の繰返しが多い場合および特に有害な物質を含む地下水位以下の土中の場合等鋼材の腐食に有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で海水中や特に厳しくない海洋環境にある場合等
特に厳しい腐食性環境	1. 鋼材の腐食に著しく有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で干満帯や飛沫帯にある場合および激しい潮風を受ける場合等

³⁵ 日本コンクリート工学協会：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，p107，2001.5

³⁶ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p113，2008.3

³⁷ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p113，2008.3

(3) ひび割れ注入材の特徴

ひび割れ注入材は有機系，無機系に区分され，材料の性質や施工上の留意点が異なるため注意が必要である．表 6.10 に代表的なひび割れ補修材の特徴を示す．

表 6.10 代表的ひび割れ補修材の特徴

	有機系ひび割れ補修材料		無機系ひび割れ補修材料
	エポキシ樹脂	アクリル樹脂（MMA樹脂）	超微粒子セメントスラリー
熱による性質	熱で溶けないビスケット型 <熱硬化性樹脂>	熱で柔らかくなるチョコ型 <熱可塑性樹脂>	熱しても焦げない
反応の種類	主剤と硬化剤が架橋反応し，共有結合して徐々に硬化する	硬化剤，促進剤の混合により発生したラジカルの連鎖反応（ラジカル重合）により急激に硬化する	水和反応によりC-S-Hを生成して硬化する
長所	接着性に優れる 充填性に優れる 硬化収縮が0.1～1.0%と小さい ひび割れ幅の変動に対応： 硬質形・軟質形 ひび割れ幅に対応： 低・中・高粘度形 揮発性なし	接着性に優れる ゴム状から高弾性まで 耐候性に優れる 低温下（-10～-20）で硬化 湿潤面の接着可 ラフな量比・攪拌で硬化	湿潤面への適用可 取り扱いが容易，安全 熱収縮量が小さい 鉄筋防錆作用有り
短所	湿潤面の接着不可 （湿潤面の接着には湿潤面用） 低温下（+5）で硬化不良 正確な量比・攪拌が必要 紫外線により白亜化（チョーキング）	硬化収縮がエポキシより大 高温時の可視時間が短い 空気（酸素）面は硬化が遅い 揮発性があり特有の臭気	乾燥面ではドライアウト ^{注）} 接着性に劣る 有機系より強度が小さい 充填性に劣る

注)ドライアウトとはモルタルなどの練り材料（セメント系補修材を含む）が，直射日光，風，下地の吸水などによる水分の急減で正常な凝結硬化をしないことをいう．このため，ひび割れ注入に無機系材料を使用する場合にはひび割れ内部が湿潤な状態で施工する必要がある．

6-5 断面修復

(1) 工法概要

断面修復工法は，既に劣化が顕在化した部分に対しては補修範囲が外観上明確であり，補修後には劣化損傷部がきれいに修復されることから，様々な劣化損傷に適用されている．

凍害により劣化したコンクリートにおいては，劣化損傷を受けた範囲（面積および深さ）を明確にして適切な範囲を補修する必要がある．

(2) 補修工法および補修材料

劣化範囲のはつり除去方法は，人力はつりやウォータージェット工法などがある．

断面修復の方法は補修範囲の大きさによって，型枠を組んで充填やプレパックドコンクリートとする方法，吹き付けによる方法，左官による方法などがある．

補修材料としては，母材のコンクリートと置き換わるために，

- ・ SBR系ポリマーセメントモルタル（コンクリート）
- ・ アクリル系ポリマーセメントモルタル（コンクリート）
- ・ 無収縮セメントポリマーセメントモルタル（コンクリート）
- ・ 軽量エポキシ樹脂パテ

等が用いられ，母材コンクリートと同等あるいはそれ以上の物理的性質や耐久性が求められる．

6-6 水分の供給を防ぐ補修対策³⁸

凍害は水分の供給により劣化が進行するため、特に橋台・橋脚などの橋梁下部構造物などでは、上部構造から流下する雨水の通りみちなどで、著しい変状が見られることが多い。このため、変状が見られる箇所への水分の供給を防ぐことを目的とした次の対策が重要である。

- 1) ジョイント部の漏水対策工
 - ・非排水型伸縮装置の採用
 - ・ジョイント部周辺への防水シートの採用
 - ・排水桝，配水管の補修・更新
- 2) その他，上部構造からの漏水防止

6-7 補強対策

(1) 増厚

既設コンクリート部材にモルタルやコンクリートなどのセメント系補強材を打設し，部材断面を増加させることにより補強を行う工法³⁹であるが，凍害劣化部材への適用事例は多くないと思われる。

(2) 打換え

打ち換え工法には，損傷している部分だけを取り除いて新たにコンクリートを打設して損傷を受けていない部分と同程度の機能に回復させる部分打ち換え工法と，部材を全面的に撤去して新たに打ち換える全面打ち換え工法とがある。いずれの工法も，耐荷力やたわみ性の回復に対する効果は確実である。⁴⁰

道路橋の床版等の適用事例が多い工法である。

(3) 巻き立て

巻き立て工法では，一般に既設コンクリート部材に鉄板や連続繊維シートなどの補強材を接着剤あるいは充填材を介して巻き立てることにより補強を行う工法⁴¹であるが，凍害劣化部材への適用事例は多くないと思われる。

³⁸ 国土交通省：「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)，H15.3」7.補修対策工の検討，解説(6)」

³⁹ 土木学会：コンクリートライブラリー95，コンクリート構造物の補強指針(案)，付属資料 補強工法マニュアル，p67，1999.9

⁴⁰ 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，p207，1998.10

⁴¹ 土木学会：コンクリートライブラリー95，コンクリート構造物の補強指針(案)，付属資料 補強工法マニュアル，p62，1999.9

7. 調査結果および補修・補強方法の記録

外観詳細調査や詳細調査の結果，実施した補修・補強の方法等について適切に記録しておかなければならない。

【解説】

(1) 調査結果および補修・補強方法の記録

補修後も凍害によるコンクリートの膨張が続き，再度の補修が必要となる事例もある．そこで，補修前の状況や補修時に使用した材料・工法等について，詳細な記録を残しておくことが有効である．また，検討の結果，補修を行わなかった場合でも，今後の維持管理の参考にするために，外観詳細調査等で得られた結果を適切に記録しておくものとする．

(2) 記録の項目

以下の項目について，特に記録を残しておく必要がある．

- ・ 外観詳細調査時のひび割れ図，ひび割れ幅，ひび割れ密度
- ・ 変状が見られた箇所の写真
- ・ コンクリートコア試料を用いた各種試験の結果
- ・ 鉄筋調査箇所の状況図
- ・ 選定した補修，補強工法
- ・ 補修，補強に使用した材料
- ・ 施工の内容や品質管理結果

各記録の様式については，本手引書「別紙 2：凍害調書の様式」を参考とすることができる．

8. 定期的な観察

凍害の影響を受けていることが明らかな構造物に対しては、補修・補強の実施の有無にかかわらず、定期的な観察（外観調査）を継続的に行うものとする。

特に着目すべき点を以下に示す。

- ）新たに発生したひび割れの有無
- ）ひび割れ幅が比較的大きなひび割れの進展状況
- ）補修（ひび割れ注入工）を行った箇所のひび割れ再発の有無
- ）外部からの水分の供給状況の変化

【解説】

(1) 定期的な観察

凍害の影響を受けていると判断された構造物は、通常の定期点検により定期的な観察を行うものとするが、変状が著しい構造物については、これよりも高い頻度（1～3年程度に一回）で定期的に調査することとする。

(2) 外観調査の留意事項

外観調査では、前回の外観調査結果との比較を行い、凍害が進行していないか点検する。したがって、ひび割れ図などを記入する場合には、以下の点に留意する。

- 1) 既存のひび割れと新たに発生したひび割れが区別できるように記入する。
- 2) ひび割れ幅が大きなひび割れについては、そのひび割れ幅を記録し、点検時に幅が増加していないかどうか確認する。
- 3) ひび割れ箇所からの、錆汁、漏水、遊離石灰やゲルの滲出状況なども記入する。

(3) 外観調査が困難な箇所の留意事項

上部にコンクリート桁がある天端、掛違い部、ピルツ連結部など外観調査が困難（場合によっては不可能）な箇所についてもできるだけ調査する。また、周辺の調査できる部位や面の状況から、これらの部位の損傷状況を推定する。

別 紙

別紙1：凍害調書の記入例

凍害調書の記入方法の説明

	様式の名称	記入方法の説明
凍害調書(その1)	凍害調査対象構造物の集計	<ul style="list-style-type: none"> 調査に先立ち調査対象構造物(重要構造物)をリストアップする。その後、調査の進捗に応じ凍害調書(その2)～(その8)を参考に記入・集計する。
凍害調書(その2)	外観目視調査による変状	<ul style="list-style-type: none"> 外観目視調査の結果、凍害の可能性有の場合に外観上の変状を部位毎に記入する。 状況写真は変状部位の全景、変状箇所の写真を貼り付ける。
凍害調書(その3)	図書調査 (構造物の諸元・履歴・位置図)	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その2)に記載された構造物について、図書調査を行い、その結果を記入する。
凍害調書(その4)	図書調査 (形状図・全景写真)	
凍害調書(その5)	図書調査 (コンクリートの品質記録)	
凍害調書(その6)	詳細調査と凍害の判定	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その1)の「凍害の可能性の総合判定」にて可能性有と記載された構造物について実施した詳細調査の結果及び凍害の判定の結果を記入する。
凍害調書(その7)	補修・補強の必要性や対策工の検討	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その1)の「凍害の判定」にて凍害有と記載された構造物について、補修・補強の必要性、対策工法の検討結果を記入する。

凍害調査（その1） 記入例

凍害調査（その1）凍害調査対象構造物の集計

作成年月：平成 年 × 月

更新年月：平成 年 月

更新年月：平成 年 月

部局名	事務（業）所名	号線名	構造物名	凍害の可能性の判定		凍害の判定		補修・補強の検討
				外観調査	図書調査	詳細調査	判定結果	補修補強の必要性 対策工の検討結果
				【記入例】 可能性有・無 判定年月 【参照】 凍害調査(その2) 橋梁定期点検調査	【記入例】 可能性有・無 ---（調査対象外） 判定年月 【参照】 凍害調査（その 3,4,5)	【記入例】 可能性有・無 判定年月 【参照】 本凍害調査(その1)	【記入例】 凍害有・無・未判定 ---（調査対象外） 判定年月 【参照】 凍害調査(その6)	【記入例】 補修補強の必要 有・無・未検討 対策工 ---（検討対象外） 【参照】 凍害調査(その7)
	×××	一般国道号	A橋	可能性有:H 年×月	可能性有:H 年×月	可能性有:H 年×月	凍害有:H 年×月	補修の必要有 補修対策工 ひび割れ注人工 伸縮装置の取替 : H 年×月
			B橋	可能性有:H 年×月	---	---	---	---

凍害調査（その2） A橋記入例

凍害調査（その2）外観調査による変状

号線名	一般国道 号	構造物名	A橋
管轄	北海道開発局 開発建設部 × × 道路事務所		
外観調査年月	平成 年 × 月		
点検員氏名（所属）	× × × × （ ）		

外観調査部位 （注1）	凍害に特徴的な 変状 （注2）	変状の説明 （注3）	状況写真（注4）	
			変状部位の全景写真	変状箇所の写真
P2橋脚 張出式橋脚のはり	Dひび割れ エフロレッセンス の析出	張出しはり下面の先端コーナ 一部周辺にエフロレッセンスを 伴うひびわれが発生している。 雨水の影響を受けやすい箇所の ひび割れである。		

注1：外観調査部位 記入例

- 橋梁：主桁，床版，横桁
- 橋台（縦壁，バラペット，沓座ウイング）
- 橋脚（柱，はり，沓座）等
- 函渠工：側壁，頂版，底版，ウイング等
- 擁壁：縦壁，ウイング等
- トンネル：坑門，覆工等
- 覆道：上部構造，山側・谷側受台等

注2：凍害に特徴的な変状 記入例

- ・スケーリング
- ・ひび割れ（Dひび割れ，地図状，長手方向，）
- ・ポップアウト
- ・エフロレッセンスの析出
- ・水の供給を受ける箇所のひび割れ
- ・凍結膨張による変状

注3：損傷状況 記入方法

添付した写真の損傷状況，雨掛かり，漏水，日射の影響などの環境条件を記入する。

注4：状況写真

凍害と疑われる変状部位のわかる全景写真，損傷状況を認識できる写真などを貼り付ける。

凍害調査（その2） B 橋記入例

凍害調査（その2）外観調査による変状

号線名	一般国道 号	構造物名	B 橋
管轄	北海道開発局 開発建設部 × × 道路事務所		
外観調査年月	平成 年 × 月		
点検員氏名（所属）	× × × × ()		

外観調査部位 （注1）	凍害に特徴的な変状 （注2）	変状の説明 （注3）	状況写真（注4）	
			変状部位の全景写真	変状箇所の写真
第1径間 橋台	断面欠損，鉄筋露出	雨掛かり部において網目状ひび割れが進行し，断面欠損，鉄筋露出に至っている．		

注1：外観調査部位 記入例
 橋梁：主桁，床版，横桁
 橋台（豎壁，パラペット，沓座ウイング）
 橋脚（柱，はり，沓座）等
 函渠工：側壁，頂版，底版，ウイング等
 擁壁：豎壁，ウイング等
 トンネル：坑門，覆工等
 覆道：上部構造，山側・谷側受台等

注2：凍害に特徴的な変状 記入例
 ・網目状のひび割れ
 ・方向性のひび割れ
 ・白色のゲル状物質の析出
 ・水の供給を受ける箇所のひび割れ
 ・ひび割れ部の段差や目地材のはみ出しなど
 ・コンクリート表面の変色
 ・はく離，断面欠損，鉄筋露出

注3：損傷状況 記入方法
 添付した写真の損傷状況，雨掛かり，漏水，日射の影響などの環境条件を記入する．

注4：状況写真
 凍害と疑われる変状部位のわかる全景写真，損傷状況を認識できる写真などを貼り付ける．

凍害調査（その3） A橋記入例

凍害調査（その3）図書調査（構造物の諸元・履歴・位置図）

号線名	一般国道	号	構造物名	A橋
管轄	北海道開発局 開発建設部 × × 道路事務所			
図書調査年月	平成 年 × 月			
担当者氏名（所属）	× × × × （ ）			

項目	調査結果 注1)該当するチェック欄を に塗りつぶす 注2) 数値や記事を記入	調査方法
構造形式	橋梁上部工形式：鋼合成桁	橋梁等現況調書 点検橋梁調書 工事記録など
	橋梁下部工形式：張出式橋脚	
	トンネル	
	覆道形式：	
架設年月	昭和 平成 36年10月	
適用示方書	S31 建示	
設計荷重	TL-14 TL-20 A活荷重 B活荷重	
補修履歴	S60 歩道添架	
	H4,5 増桁，床版打換，下部工補強	

構造物の位置図

（道路現況図等のコピーを貼付け，構造物位置をマーキング）



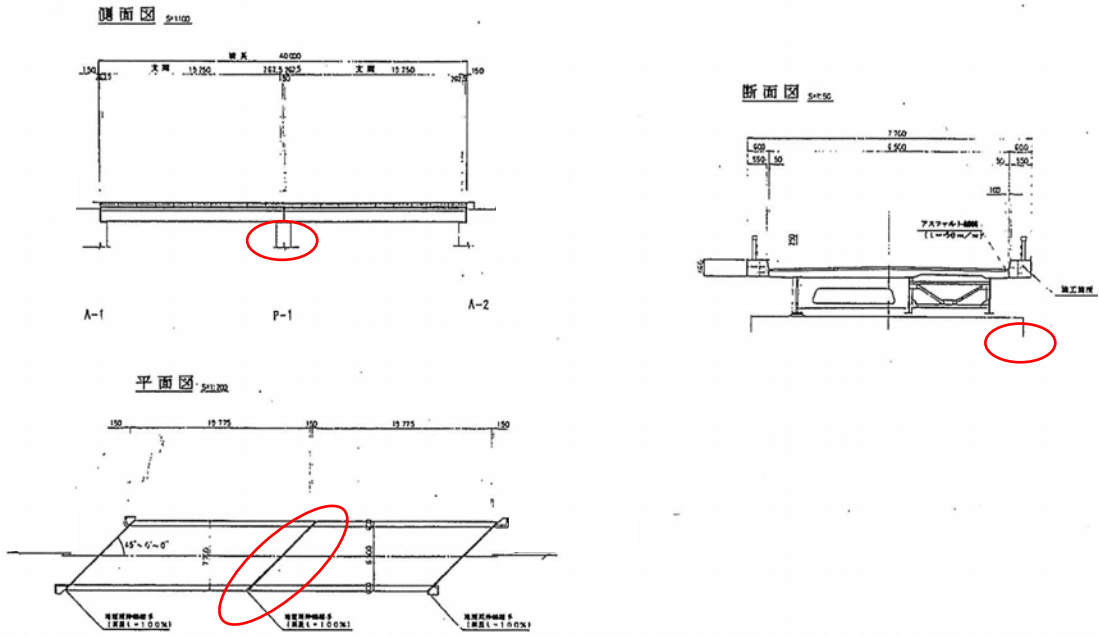
凍害調査(その4) A橋記入例

凍害調査(その4) 図書調査(形状図・全景写真)

号線名	一般国道	号	構造物名	A橋
-----	------	---	------	----

構造物の形状図

(橋梁・函渠工・トンネル・覆道等一般図を貼付, 損傷部位にマーキング)



全景写真

(上記形状図の全景が分かる写真)



凍害調査(その5) A橋記入例

凍害調査(その5) 図書調査(コンクリートの品質記録)

号線名	一般国道	号	構造物名	A橋
項目	調査結果 注1)該当するチェック欄を に塗りつぶす 注2) 数値や記事を記入			調査方法
凍害の可能性のある部位	P 2 橋脚 張出式橋脚のはり			凍害調査(その2)の外観調査部位に同じ
施工年月	昭和 平成 35 年 月			対象部位
環境・使用条件	内陸部 海岸部			位置図,維持管理記録等
	寒冷地			
	海水 波浪, 飛来塩分の影響 凍結防止剤散布 有(主成分:塩化ナトリウム) 無			
アルカリ骨材反応抑制対策	安全と認められる骨材の使用			コンクリートの耐久性向上対策,生コンクリートの品質記録表など工事記録
	低アルカリ形セメントの使用			
	抑制効果のある混合セメント等の使用			
	コンクリート中のアルカリ総量の抑制			
	不明(S61年以降の架設) 無対策(S60以前の架設)			
細骨材条件	種類	海砂 川砂 山砂 砕砂	不明	本手引書「4-1」参照 注)セメントの種類 普通ポルトランドセメント:N 普通ポルトランドセメント(低アルカリ形):NL 早強ポルトランドセメント:H 早強ポルトランドセメント(低アルカリ形):HL 高炉セメントB種:BB 高炉セメントC種:BC フライッシュセメントB種:FB フライッシュセメントC種:FC その他別途記入
	原石名	不明		
	産地	不明		
	密度	g/cm3	不明	
	吸水率	%	不明	
	安定性	%	不明	
	骨材のASR試験	試験方法: 化学法 Ⅱ/Ⅲ法 判定: 無害 無害でない 不明		
	当該地域でASRの発生が過去報告	有 無	不明	
粗骨材条件	種類	砂利 砕石	不明	
	原石名	不明		
	産地	不明		
	密度	g/cm3	不明	
	吸水率	%	不明	
	安定性	%	不明	
	骨材のASR試験	試験方法: 化学法 Ⅱ/Ⅲ法 判定: 無害 無害でない 不明		
	当該地域でASRの発生が過去報告	有 無	不明	
セメントの種類とアルカリ量	セメントの種類: 不明			
	セメントの等価アルカリ量: kg/m3 不明			
コンクリートのアルカリ総量	コンクリートのアルカリ総量: kg/m3			
	規制値	3.0kg/m3 2.5kg/m3		
塩化物含有量	kg/m3(規制値0.30kg/m3)			
	判定: 可 不可 不明			
配合	設計基準強度	ck=21 kg/cm2	N/mm2	
	工事記録	推定	不明	
	水セメント比W/C=	%	工事記録 不明	
	単位セメント量 C=	kg/m3	工事記録 不明	
その他特記事項				

凍害調査（その6） A橋記入例

凍害調査（その6）詳細調査結果と凍害の評価・判定

号線名	一般国道	号	構造物名	A橋
管轄	北海道開発局 開発建設部 × × 道路事務所			
調査年月	平成 年 × 月			
担当者氏名（所属）	× × × × （ ）			

項目		調査結果等	調査方法
外 観 詳 細 調 査	調査方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 梯子による近接目視により外観詳細調査を実施した。 	本 手 引 書 「5-1」参照
	調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ひび割れは雨掛かり部の梁先端付近に集中している。 ・ 排水設備の不良によると見られる耐水跡が梁天端に見られる。 ・ ひび割れは白色の析出物により充填されている。尚、外観上はエフロレッセンスかASRゲルが特定できない。 ・ ひび割れ幅は最大で0.2～0.3mm程度である。 	
	評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ はりの同一部材の中で水の供給を受ける箇所でひび割れが生じていること、ひび割れから白色の析出物がを伴っていることから、凍害またはASRによる劣化と判断する。 	
	備考	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「A橋調査報告書（外観詳細調査）」参照。 	
採 取 コ ア に よ る 試 験	調査方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ オーバーフェンス式高所作業車により梁側面の劣化部と健全部からコアを採取し、コアの試験を実施した。 	本 手 引 書 「5-2」参照
	調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 強度-静弾性係数の関係から、劣化部では静弾性係数の標準値を下回り、凍害またはASRの可能性があった。また、健全部では標準値内であった。 ・ 膨張量試験（JCI-DD2）の結果、劣化部・健全部ともASRと認められなかった。 ・ 採取コアの超音波伝搬速度をかぶり深さ方向に計測した結果、表面部約5cm程度まで音速の低下が認められた。 ・ 局部的に鉄筋をはつりだし目視観察した結果、腐食は認められなかった。またかぶりは80mmであった。 	
	備考	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「A橋調査報告書（コンクリートコア試験）」参照。 	
性能評価 対策要否の判定		<ul style="list-style-type: none"> ・ ASRとは認められなかったため、凍害劣化と判断する。 ・ 凍害深さ（微細ひび割れ深さ）が約5cmであり鉄筋かぶりに達しておらず、現在進展期にある。将来加速期となる可能性がある。 ・ 現在進展期であるが、加速期となる可能性も考えられるため、適切な時期に補修が必要である。 	

凍害調査（その7） A橋記入例

凍害調査（その7）凍害劣化に対する対策

号線名	一般国道 号	構造物名	A橋
管轄	北海道開発局 開発建設部 × × 道路事務所		
調査年月	平成 年 × 月		
担当者氏名（所属）	× × × × （ ）		

項目	調査結果等	検討方法
補修の検討を行う 必要性の判断	<ul style="list-style-type: none">・ 対策要否の判定より補修が必要であると判断された。・ 現在進展期に当たり表面処理工法を選定する。・ 表面処理工法としては水の供給を 방지凍害を抑制することを目的として表面被覆工を採用する。	本手引書「7」 参照

別紙2：凍害調書の様式

凍害調書の記入方法の説明

	様式の名称	記入方法の説明
凍害調書(その1)	凍害調査対象構造物の集計	<ul style="list-style-type: none"> 調査に先立ち調査対象構造物(重要構造物)をリストアップする。その後、調査の進捗に応じ凍害調書(その2)～(その8)を参考に記入・集計する。
凍害調書(その2)	外観目視調査による変状	<ul style="list-style-type: none"> 外観目視調査の結果、凍害の可能性有の場合に外観上の変状を部位毎に記入する。 状況写真は変状部位の全景、変状箇所の写真を貼り付ける。
凍害調書(その3)	図書調査 (構造物の諸元・履歴・位置図)	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その2)に記載された構造物について、図書調査を行い、その結果を記入する。
凍害調書(その4)	図書調査 (形状図・全景写真)	
凍害調書(その5)	図書調査 (コンクリートの品質記録)	
凍害調書(その6)	詳細調査と凍害の判定	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その1)の「凍害の可能性の総合判定」にて可能性有と記載された構造物について実施した詳細調査の結果及び凍害の判定の結果を記入する。
凍害調書(その7)	補修・補強の必要性や対策工の検討	<ul style="list-style-type: none"> 凍害調書(その1)の「凍害の判定」にて凍害有と記載された構造物について、補修・補強の必要性、対策工法の検討結果を記入する。

凍害調書（その2）外観調査による変状

号線名		構造物名	
管轄		北海道開発局	開発建設部 道路事務所
外観調査年月		平成	年 月
点検員氏名（所属）			

外観調査部位 （注1）	凍害に特徴的な 変状 （注2）	変状の説明 （注3）	状況写真（注4）	
			変状部位の全景写真	変状箇所の写真

注1：外観調査部位 記入例

- 橋梁：主桁，床版，横桁
橋台（縦壁，パラペット，沓座ウイング）
橋脚（柱，はり，沓座）等
- 函渠工：側壁，頂版，底版，ウイング等
- 擁壁：縦壁，ウイング等
- トンネル：坑門，覆工等
- 覆道：上部構造，山側・谷側受台等

注2：凍害に特徴的な変状 記入例

- ・スケーリング
- ・ひび割れ（Dひび割れ，地図状，長手方向，）
- ・ポップアウト
- ・エフロレッセンスの析出
- ・水の供給を受ける箇所のひび割れ
- ・凍結膨張による変状

注3：損傷状況 記入方法

添付した写真の損傷状況，雨掛かり，漏水，日射の影響などの環境条件を記入する．

注4：状況写真

凍害と疑われる変状部位のわかる全景写真，損傷状況を認識できる写真などを貼り付ける．

凍害調書（その3）図書調査（構造物の諸元・履歴・位置図）

号線名		構造物名	
管轄			
図書調査年月	平成	年	月
担当者氏名（所属）			

項目	調査結果 注1)該当するチェック欄を に塗りつぶす 注2) 数値や記事を記入	調査方法
構造形式	橋梁上部工形式：	橋梁等現況調書 点検橋梁調書 工事記録など
	橋梁下部工形式：	
	トンネル	
	覆道形式：	
架設年月	昭和 平成 年 月	
適用示方書		
設計荷重	TL-14 T L-20 A活荷重 B活荷重	
補修履歴		

構造物の位置図

（道路現況図等のコピーを貼付け，構造物位置をマーキング）

凍害調書（その４）図書調査（形状図・全景写真）

号線名		構造物名	
-----	--	------	--

構造物の形状図

（橋梁・函渠工・トンネル・覆道等一般図を貼付，損傷部位にマーキング）

全景写真

（上記形状図の全景が分かる写真）

凍害調書（その5）図書調査（コンクリートの品質記録）

号線名			構造物名				
項目	調査結果 注1)該当するチェック欄を に塗りつぶす 注2) 数値や記事を記入				調査方法		
凍害の可能性のある部位	P 2 橋脚 張出式橋脚のはり				凍害調書(その2)の外観調査部位に同じ		
施工年月	昭和	平成	年	月	対象部位		
環境・使用条件	内陸部		海岸部		位置図,維持管理記録等		
	寒冷地						
	海水 波浪, 飛来塩分の影響						
	凍結防止剤散布 有(主成分:) 無						
アルカリ骨材反応抑制対策	安全と認められる骨材の使用				コンクリートの耐久性向上対策, 生コンクリートの品質記録表など工事記録		
	低アルカリ形セメントの使用						
	抑制効果のある混合セメント等の使用						
	コンクリート中のアルカリ総量の抑制						
	不明 (S61 年以降の架設)						
細骨材条件	種類	海砂	川砂	山砂	砕砂	不明	本手引書「4-1」参照 注)セメントの種類 普通ポルトランドセメント:N 普通ポルトランドセメント (低アルカリ形):NL 早強ポルトランドセメント:H 早強ポルトランドセメント (低アルカリ形):HL 高炉セメントB種:BB 高炉セメントC種:BC フライッシュセメントB種:FB フライッシュセメントC種:FC その他別途記入
	原石名	不明					
	産地	不明					
	密度	g/cm3		不明			
	吸水率	%		不明			
	安定性	%		不明			
	骨材のASR試験	試験方法: 化学法 エルカルバ-法 判定: 無害 無害でない 不明					
	当該地域で ASR の発生が過去報告 有 無 不明						
	粗骨材条件	種類	砂利	砕石	不明		
原石名		不明					
産地		不明					
密度		g/cm3		不明			
吸水率		%		不明			
安定性		%		不明			
骨材のASR試験		試験方法: 化学法 エルカルバ-法 判定: 無害 無害でない 不明					
当該地域で ASR の発生が過去報告 有 無 不明							
セメントの種類とアルカリ量		セメントの種類: 不明					
	セメントの等価アルカリ量: kg/m3 不明						
コンクリートのアルカリ総量	コンクリートのアルカリ総量: kg/m ³						
	規制値	3.0kg/m ³	2.5kg/m ³	不明			
塩化物含有量	kg/m ³ (規制値 0.30kg/m ³)						
	判定: 可 不可 不明						
配合	設計基準強度 ck=	kg/cm ²	N/mm ²				
	工事記録	推定	不明				
	水セメント比W/C=	%	工事記録	不明			
その他特記事項	単位セメント量 C=	kg/m ³	工事記録	不明			

凍害調査（その6）詳細調査結果と凍害の評価・判定

号線名		構造物名	
管轄	北海道開発局	開発建設部	道路事務所
調査年月	平成 年 月		
担当者氏名（所属）			

項目		調査結果等	調査方法
外観詳細調査	調査方法		本手引書 「5-1」参照
	調査結果		
	評価		
	備考		
採取コアによる試験	調査方法		本手引書 「5-2」参照
	調査結果		
	備考		
性能評価 対策要否の判定			

凍害調書（その7）凍害劣化に対する対策

号線名		構造物名	
管轄	北海道開発局	開発建設部	道路事務所
調査年月	平成 年 月		
担当者氏名（所属）			

項目	調査結果等	検討方法
補修の検討を行う 必要性の判断		本手引書「7」 参照

参 考 资 料

参考資料

参考資料 1 凍害の発生メカニズム	1-1
1-1 セメントペースト内部の水の凍結	1-1
1-2 水圧説と浸透圧説	1-2
1-3 凍結融解作用による飽水過程	1-3
参考資料 2 凍害に関する複合劣化	2-1
2-1 凍害に関する複合劣化の関係	2-1
参考資料 3 凍害に対する耐久性照査，配合設計および施工	3-1
3-1 耐久性照査（凍結融解作用の照査）	3-1
3-2 水セメント比（相対動弾性係数の照査に代わる水セメント比）	3-2
3-3 空気量	3-2
3-4 気泡間隔係数	3-3
3-5 細孔径分布	3-3
3-6 骨材（細骨材・粗骨材）	3-4
3-7 初期凍害	3-5
参考資料 4 凍害の調査	4-1
4-1 凍害の調査方法	4-1
4-2 凍害の可能性および複合劣化の調査	4-2
4-3 凍害環境の調査	4-3
4-4 凍害による損傷程度の調査	4-4
4-5 耐凍害性に関する試験・分析	4-10
参考資料 5 凍害の劣化予測および耐久性設計	5-1
5-1 凍害の劣化予測	5-1
5-2 凍害と塩害との複合劣化予測および耐久性設計	5-6
参考資料 6 凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学的性能	6-1
6-1 凍害劣化を受けたコンクリート部材の材料および部材特性の変化	6-1
6-2 凍害劣化を受けたコンクリート部材の部材特性解析	6-4
参考資料 7 国道橋の橋梁定期点検と本手引書との関係	7-1
7-1 橋梁定期点検，橋梁管理カルテと本手引書との関係	7-1
7-2 参考：「橋梁定期点検要領（案）」における凍害が疑われる構造物の点検例	7-2

参考資料1 凍害の発生メカニズム

凍害の発生メカニズムは水圧説と浸透圧説により説明されており、細孔構造に応じてこれらが同時に作用すると考えられている。

【解説】

1-1 セメントペースト内部の水の凍結

大気圧下の純水は0°で凍結するが、圧力、細孔溶液の半径や濃度により氷点が低下する。氷が形成されることなく、氷点よりも低くなることを過冷却と呼ぶ。

細孔径による氷点の降下

セメントペースト内部では、温度降下に伴い大きい空隙中の水が凍結し、次いで小さい空隙中の水が凍結する。すなわち、細孔の径が小さくなると氷点が降下し、凍結温度が低いほど小さい細孔中の水まで凍ることとなる。

通常のコンクリートでは数十～数百nmの半径を持つ細孔が多いため、最低温度の違いにより劣化の程度が異なることになる。

溶液濃度による氷点の降下

細孔溶液にはアルカリ金属元素等が溶解しており、溶解物質の濃度によっても氷点降下が生じる。これはモル凝固点降下¹と呼ばれ、溶液の凝固点降下度は溶質（ここでは細孔溶液にとけているアルカリ）の種類には関係なくそのモル数に比例し、下式で表される。

$$\text{モル凝固点降下} \quad T = k \cdot m$$

ここに、

k：モル凝固点降下（度・kg/モル）

m：溶液の質量モル濃度（モル/kg）

¹ 東久保克彦：理解しやすい化学，p116，1977，文英堂

1-2 水圧説と浸透圧説

図 1.1 に水圧説と浸透圧説の概要を示す²。

水は凍結するときに自由に膨張できるものとするると約 9%の体積膨張を生じる。Powers は 1945 年にコンクリートの凍害を水圧説で説明した。しかし水圧説は、低温が持続した場合における膨張現象や AE コンクリートが凍結する際に観察される収縮現象を説明できないことから、その後、浸透圧説³で説明されている。

水圧説と浸透圧説のメカニズムは以下のとおりである。

水圧説

- ・細孔中の水が凍結し、その膨張分の水の移動圧（静水圧）によりコンクリートの組織が破壊
- ・圧力の大きさは、凍結速度、飽和度、透水性、および空気までの距離による

浸透圧説による膨張現象

- ・コンクリートの温度降下により、まず粗大径側の毛細管中の水が凍結
- ・微小な細孔にある水は凍結しないため、未凍結水のアルカリ濃度が増加
- ・周囲の未凍結のゲル水との間に浸透圧が発生
- ・ゲル水が毛細管の未凍結水中へ拡散し凍結が開始
- ・氷の成長による膨張圧でコンクリートの組織が破壊

浸透圧説による収縮挙現象

- ・気泡に拡散された水は直ちに凍結
- ・毛細管中の氷晶とともに周囲の水を吸収する
- ・気泡中の氷晶が周囲の組織から水を吸収する場合、気泡が水で満たされるまで吸収する水の量だけ収縮

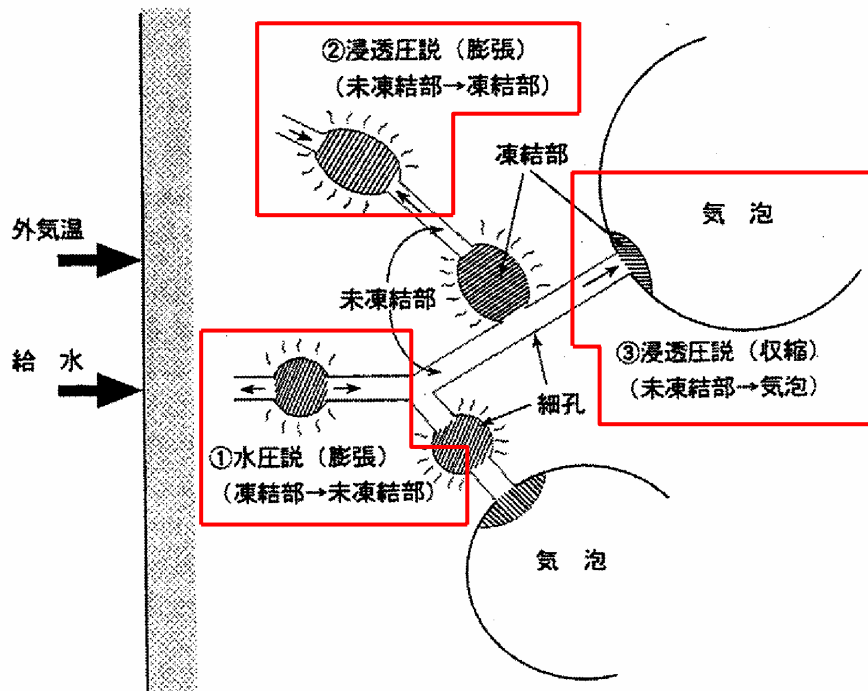


図 1.1 水圧説と浸透圧説の概要
(は、著者にて加筆)

² 山下英俊：コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究，北海道大学学位論文，p5，1999.3

³ 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，p25，1999.11

1-3 凍結融解作用による飽水過程

凍結融解時作用によりコンクリートが飽水する状況を SETZER⁴はマイクロ氷レンズポンプのモデルで説明している。

これは、温度の降下と上昇、すなわち凍結融解の繰返しによりゲル空隙は収縮と膨張を繰り返すポンプの役割を担いコンクリートを飽水させる。この結果、一定の限界飽水に達するとコンクリート組織の破壊に至る。

マイクロ氷レンズポンプの概要を図 1.2 に示す。

図 1.2 はゲル空隙と毛細管空隙縁端部を示し、20 で部分的に飽水している状態である。すなわち、毛細管空隙は蒸気で満たされ、毛細管空隙の表面およびゲル空隙が飽水している。

温度が低下し凍結時（図 1.2 ）には、最初に毛細管空隙にマクロ氷が形成する。過冷却に応じて未凍結水との間に圧力差が生じゲル空隙中のゲル水を毛細管空隙のマクロ氷へ移動させると共にゲル空隙は収縮する。

温度上昇時（図 1.2 ）には、最初にコンクリート表面で氷が融け、未凍結水と氷との圧力差は減少し、ゲル空隙は膨張する。この時毛細管空隙内部のマクロ氷はまだ融けていないため、外部からゲル空隙に水が供給されコンクリートは飽水する。

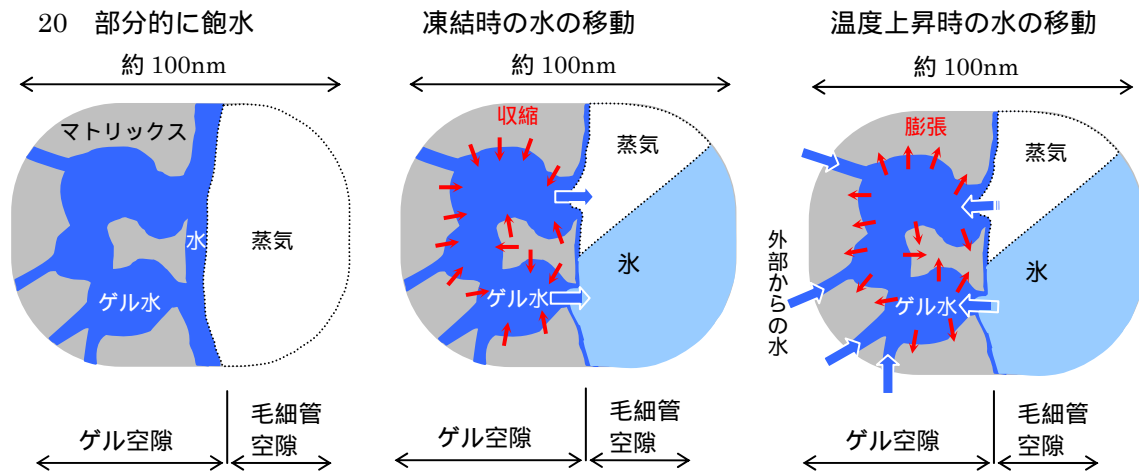


図 1.2 ミクロ氷レンズポンプの概要

⁴ Prof. Dr. - Ing. habil. Jochen Stark, Dipl. - Ing. Bernt Wicht 著；太田利隆，下林清一，佐伯昇訳：コンクリートの耐久性第 2 版，p175，2003.10

参考資料2 凍害に関する複合劣化

塩分環境下で凍結融解作用を受けた場合には非常に激しいスケーリングが発生することが知られている。

ASRによる微細ひび割れが生じ湿潤状態に保たれた条件では、水の進入による凍害の進行が複合劣化として作用する。

凍害が先行し微細ひび割れが生じた状態では中性化の進行、水・塩化物イオンの進入による鉄筋腐食が複合劣化として作用する。

【解説】

2-1 凍害に関する複合劣化の関係⁵

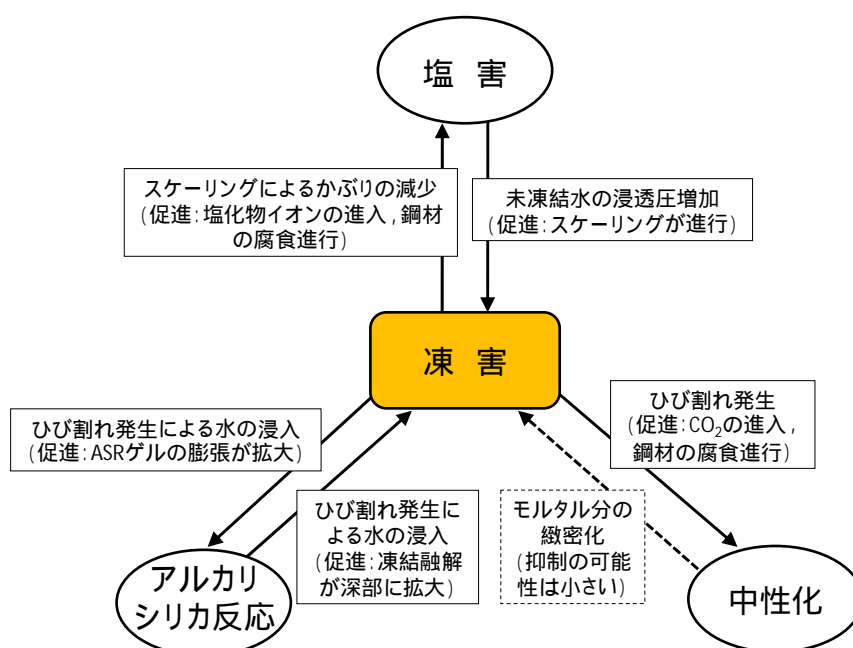


表 2.1 凍害による複合劣化の可能性

	複合劣化の可能性
塩害と凍害の複合 ⁶	<p>コンクリート中の水が凍結融解を繰り返すことにより、塩化物イオンが凍結部から未凍結部に移動し、塩化物イオンの移動が促進される場合や、塩化物イオンの濃縮によって塩害が促進される可能性がある。</p> <p>また、凍結融解作用により組織がポーラス化したり、スケーリング、ポップアウトによりかぶりが減少し、塩化物イオンや酸素などの腐食因子の供給が促進され、塩害が促進する可能性がある。</p>
ASRと凍害の複合 ⁷	<p>ASRと凍害とは水の供給を受ける環境下でコンクリートの損傷が促進されるという共通の環境要因がある。ASRまたは凍害によりコンクリートにひび割れが発生すると、ひび割れを通して水分がコンクリート内部に供給されると共に、コンクリートの水持ちが増加する。このため、ASRと凍害とが複合することにより、ASRにより生じたひび割れの影響でコンクリートに著しい損傷が生じ、耐力にも影響を与えることが予想される。</p> <p>しかし、現在のところASRと凍害による複合劣化の事例報告は少ない。</p>
中性化と凍害の複合 ⁸	<p>凍害によってコンクリートにはひび割れが発生するため、ひび割れ部での物質移動性が増大し、中性化の進行が早まる可能性がある。</p> <p>一方、凍害はコンクリートが飽水状態に近い場合に起きるため、凍害被害を受ける環境条件で中性化が進行する可能性は低いと考えられる。</p>

⁵ 日本コンクリート工学協会：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，p31，2001.5

⁶ 日本コンクリート工学協会：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，p19，2001.5

⁷ 日本コンクリート工学協会：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，p44，2001.5

⁸ 日本コンクリート工学協会：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，p31，2001.5

凍害と塩害との複合劣化

北海道においては海岸地域における海水飛沫やスパイクタイヤの使用禁止⁹に伴う凍結防止剤散布の増加など、塩害と凍害との複合劣化が促進される環境下にある。

一方、塩化物の作用と凍結融解が複合することにより凍害の劣化が顕著となることが知られている。

写真 2.1 に示すコンクリート表面がフレーク状に剥がれるスケーリングは凍結防止剤により供給された塩化物イオンと凍結融解との複合により、劣化が進行しているのと考えられている。



写真 2.1 分離帯（高規格幹線道路）コンクリートシールのスケーリング劣化状況

塩化物の作用と凍結融解が複合することにより凍害劣化が顕著となる現象に対して、浸透圧、温度差による層間凍結、塩の発熱（吸熱）による熱衝撃、復塩生成による結晶圧など多くの説が提唱されており、以下に概説する。

(1) 浸透圧説

浸透圧説は図 2.1 の概念図を用いて以下の様に説明されている。

空隙中に氷の結晶が生成すると塩化物水溶液の濃度が増加
氷が形成されなかった細孔中溶液との間に濃度差が発生
細孔溶液が塩水へ引き寄せられる浸透圧により氷の生成を助長

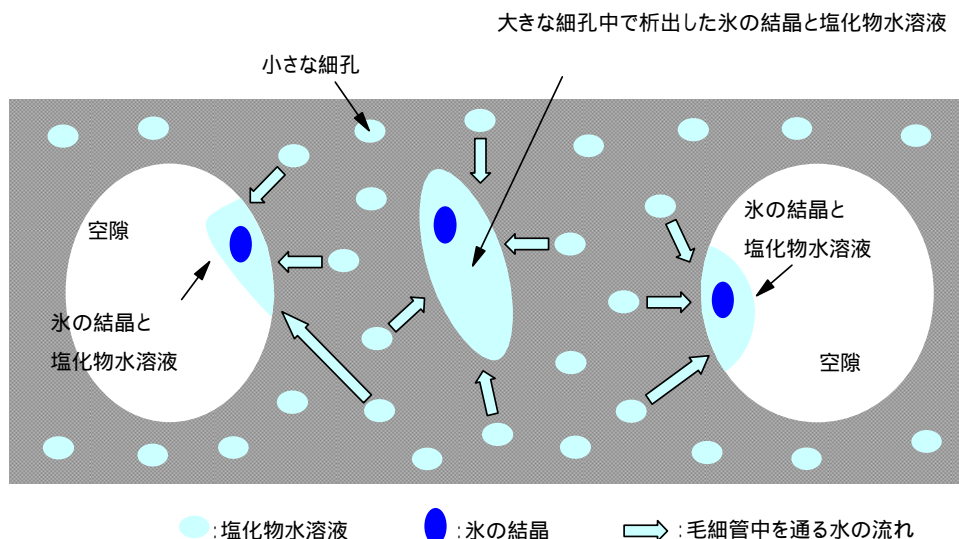


図 2.1 塩水存在下での浸透圧の影響

⁹ スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律（平成 2 年 6 月 27 日法律第五十五号）、第 7 条「スパイクタイヤの使用の禁止」は平成 3 年 4 月 1 日の施行。 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H02/H02H0055.html>

(2) 層間凍結説

雨水等の影響を受ける現場においては、図 22 の通りコンクリート中へ浸透した塩分濃度は表層において流出する傾向にあり、塩分濃度の低い表面と深部で氷が形成され、中間層は塩分濃度が高く氷は形成されにくいと考えられる。表層における氷の形成は余剰水の流動を妨げ、応力の発生を助長する可能性がある。

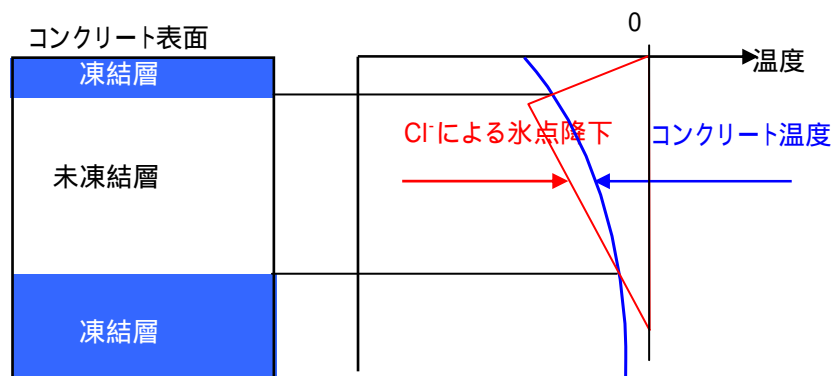


図 22 現場の濃度分布による層間凍結

(3) 熱衝撃説¹⁰

凍結防止剤（NaCl）は水溶の際にコンクリートから熱を吸収する吸熱反応を生じ、凍結防止剤の影響を受けたコンクリート表面の温度は急激に低下する。この際発生した引張応力が、コンクリートの引張強度を上回ると、微細ひび割れが生じると考えられている。

¹⁰ 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，p30，1999.11

(4) 化学的な影響による説

塩化物が作用する場合の化学的な影響は図 2.3 の模式図を用いて以下の様に説明されている。
コンクリート中に浸透した塩化物イオンが組織中のモノサルフェート（六角板状の結晶）と反応
反応によりフリーデル氏塩が生成
この際、モノサルフェートから遊離した SO_3 が別のモノサルフェートと反応
膨張性を有するエトリンガイト（六角形柱状の結晶）を生成
エトリンガイトの結晶膨張圧により組織を破壊

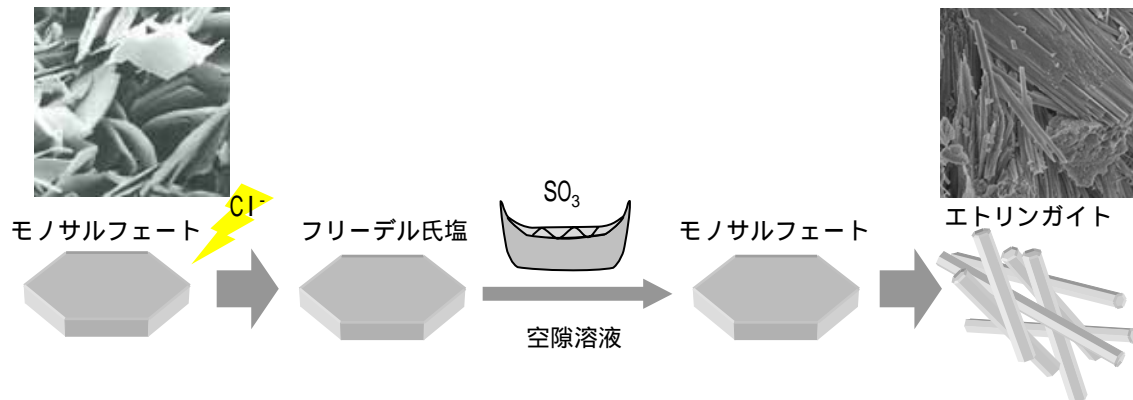


図 2.3 凍結融解塩作用におけるエトリンガイト生成模式図¹¹

エトリンガイト，モノサルフェートの生成過程は次の通りである．アルミネート相（クリンカー化合物の一種である $\text{C}_3\text{A} : 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）が石膏（ $3[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ ）と反応してエトリンガイト（ $\text{Aft} : 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31 \sim 33\text{H}_2\text{O}$ ）を生成し，このエトリンガイトが未水和のアルミネート相と反応してモノサルフェート水和物（ $\text{Afm} : 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）を生成する．

また，フリーデル氏塩はクリンカー化合物の一種であるアルミネート相（ $\text{C}_3\text{A} : 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）とフェライト相（ $\text{C}_4\text{AF} : 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）が，塩化物溶液と反応して生成される．¹²

¹¹ Jochen Stark, Bernd Wicht (太田利隆他訳): コンクリートの耐久性 [第2版], p186-187, セメント協会

¹² Jochen Stark, Bernd Wicht (太田利隆他訳): コンクリートの耐久性 [第2版], p75, セメント協会

参考資料3 凍害に対する耐久性照査，配合設計および施工

構造物の所要の性能が，凍結融解作用によって損なわれてはならないとされており，このために耐久性照査，配合設計および施工の詳細が規定されている。

【解説】

土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」では，コンクリートの劣化に対する照査として，凍害に対する照査を規定している。また，土木学会「コンクリート標準示方書〔施工編〕」においても，コンクリートの耐久性や使用材料について規定されている。

ここでは，これらの規定のうち凍害劣化に関する代表的な規定についての概要を述べる。

3-1 耐久性照査（凍結融解作用の照査）¹³

$$i \times E_{min} / E_d \geq 1.0 \dots\dots\dots \text{式 3.1}$$

ここに，

i：構造物係数 一般に 1.0（重要構造物 1.1）

E_d：凍結融解試験における相対動弾性係数の設計値 E_d=E_k/ c

E_k：凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値

c：材料係数 一般に 1.0（上面部位 1.3）

標準養生供試体との間で品質に差が生じない場合は，全て 1.0

E_{min}：凍害に関する性能を満足するための凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値。

表 3.1 凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値 E_{min}（%）

断面	気象条件	気象作用が激しい場合または凍結融解がしばしば繰り返される場合		気象作用が激しくない場合，氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い場合 （断面の厚さが 20 cm程度以下）	一般の場合	薄い場合 （断面の厚さが 20 cm程度以下）	一般の場合	
構造物の露出状態					
(1) 連続してあるいはしばしば水で飽和される場合 ¹⁾	85	70	85	60	
(2) 普通の露出状態にあり，(1)に属さない場合	70	60	70	60	
注釈	1) 水路，水槽，橋台，橋脚，擁壁，トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分および，これらの構造物の他，桁，床版等で水面から離れてはいるが融雪，流水，水しぶき等のため，水で飽和される部分など。				

なお，コンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値 E_k は，一般にはコンクリートの凍結融解試験法（水中凍結融解試験法）JIS A 1148（A 法）による相対動弾性係数により定めると規定されており，一般のコンクリート材料を選定し，空気量が 4～7%の普通コンクリートの場合には，コンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値は，表 3.2 に示す値を用いて良い¹⁴。

表 3.2 コンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数とそれを満足するための水セメント比（%）

水セメント比(%)	65	60	55	45
凍結融解試験における相対動弾性係数(%)	60	70	85	90

¹³ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p123，2008.3

¹⁴ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p56，2008.3

3-2 水セメント比（相対動弾性係数の照査に代わる水セメント比）

凍害に対してコンクリート標準示方書では、『凍害に対する照査においては、環境条件に応じてコンクリートの空気量と水セメント比の組み合わせを適切に設定するのがよい』と規定¹⁵されており、解説の中で、『一般の構造物の場合で凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値が90%以上の場合や、凍結防止剤や海水などの塩化物の影響を受ける場合に水セメント比が45%以下で空気量が6%以上である場合には、凍害に対する照査を行わなくてよい』と記述されている。

北海道開発局道路設計要領¹⁶では、AEコンクリートの最大水セメント比として平成8年制定(1996)コンクリート標準示方書施工編の「一般の場合の(1)」を参考として、特に気象条件及び凍結融解の影響が大きい地域であることを考慮して「-5%」として最大水セメント比を設定している。

水セメント比と耐凍害性の関係は、水セメント比が小さいほど質量減少量が小さく、耐凍害性が向上する。また、冷却温度と耐凍害性の関係は、冷却温度が低いほど質量減少量が大きく、耐凍害性が低下する。

3-3 空気量

(1) 土木学会

土木学会コンクリート標準示方書に規定される空気量はAEコンクリートを原則¹⁷として、空気量は粗骨材の最大寸法、その他に応じてコンクリート容積の4~7%を標準とし¹⁸、海岸コンクリートの場合には表3.3の通りとしている。¹⁹

表 3.3 海洋コンクリートの空気量の標準値(%)

環境条件およびその区分		粗骨材の最大寸法(mm)	
		20 または 25	40
凍結融解作用を受けるおそれのある場合	海上大気中	5.0	4.5
	飛沫帯および干満帯	6.0	5.5

(2) 北海道開発局

北海道開発局道路設計要領²⁰では、AEコンクリートを原則として上記土木学会コンクリート標準示方書と同様の値を設定している。

(3) JIS

JIS A 5803「レディーミクストコンクリート」では、普通コンクリートの空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ （すなわち、3.0~6.0%）と規定されている。コンクリートの空気量が3%を下回ると急激に相対動弾性係数は低下する。すなわち耐凍害性が低下する。

¹⁵ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p328，2008.3

¹⁶ 北海道開発局道路設計要領，第3集橋梁，第2編コンクリート，「2.3.4 水セメント比の決定資料(p2-12-14)」，2004.4

¹⁷ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，p36，2008.3

¹⁸ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，p85，2008.3

¹⁹ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，p353，2008.3

²⁰ 北海道開発局道路設計要領，第3集橋梁，第2編コンクリート，「2.3.5 空気量の決定資料(p2-15)」，2004.4

(4) AE コンクリートの変遷

レディーミクストコンクリートでは現在 AE 剤により空気量を確保し耐凍害性を確保しているが、その変遷を表 3.4 に示す。

表 3.4 AE コンクリートの変遷

時期	基準・規格等
1949 S24	土木学会コンクリート標準示方書に AE コンクリートが初めて規定
1950 S25	国内で AE 剤製造販売開始（山宗化学） JES 窯業規格に代わり、セメントの JIS 制定
1951 S26	土木学会コンクリート標準示方書 AE コンクリートの施工が規定
1952 S27	北海道で最初に AE 剤使用の工事（恵庭自衛隊の建築工事） 凍結融解抵抗性、ワーカビリティの改善から急速に普及
1953 S28	レディーミクストコンクリート JIS の制定
1956 S31	土木学会コンクリート標準示方書 AE 剤、AE コンクリート、エントレインドエア等の事項を記載 気象作用が厳しい場合や凍結融解作用がしばしば繰り返される場合などには、AE コンクリートの使用を推奨
1967 S42	土木学会コンクリート標準示方書 気象条件が厳しい場合やダムコンクリートでは AE コンクリートを原則
1974 S49	土木学会コンクリート標準示方書 気象作用が厳しくない場合でも、AE コンクリートを用いることが望ましい
1978 S53	JIS 改正．レディーミクストコンクリートの標準品は全て空気量 4%（軽量コンクリート 5%）に規定され、AE コンクリートが通常のコンクリートとして一般に使用されるようになった。

3-4 気泡間隔係数

気泡間隔係数とは、気泡分布の密度を表す指標であり、隣接する気泡と気泡間の距離の平均値を表す数値である。

気泡間隔係数と耐凍害性の関係は、空気量が同量であっても、径の大きな気泡がまばらに存在するよりも、径の小さい気泡が密に存在する方が自由水の凍結による膨脹圧を緩和する効果が大い。このため、気泡間隔が 250 μm 以下の場合には耐久性指数が高く耐凍害性に優れ、450 μm より大きいと耐久性指数が低く耐凍害性が著しく低下する。

3-5 細孔径分布

硬化ペーストの水セメント比が 40% 以下の場合には、劣化が見られない。10² ~ 10⁴ nm 程度の空隙が多い場合に劣化しやすいと考えられているが、水セメント比 40% の硬化ペースト内には、この範囲の空隙がわずかであり耐凍害性に優れている²¹と考えられている。

すなわち、細孔径が小さい空隙が多いほど耐凍害性に優れている²²といえる。

²¹ 岸谷孝一，西澤紀昭：コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害，p58, 技法堂出版

²² 小林一輔他「コンクリートの組織構造の診断」森北出版

3-6 骨材（細骨材・粗骨材）

コンクリートに用いる骨材については、表 3.5 の通り規定されている。

表 3.5 コンクリート用骨材の品質規格

骨材の種類	JIS A 5308 附属書 A レディーミクストコンクリート 用骨材		JIS A 5005 コンクリート用砕石 及び砕砂	
	砂利	砂	砕石	砕砂
絶乾密度 (g/cm ³)	2.5以上	2.5以上	2.5以上	2.5以上
吸水率 (%)	3.0以下	3.5以下	3.0以下	3.0以下
安定性 (%)	12以下	10以下	12以下	10以下
すりへり減量 (%)	35以下	-	40以下	-
微粒分量 (%)	1.0以下	3.0以下	3.0以下	9.0以下
粘土塊量 (%)	0.25以下	1.0以下	-	-
軟らかい岩片 (%)	5.0以下	-	-	-
密度1.95に浮く物 (%)	0.5以下	0.5以下	-	-
塩化物量(NaClとして、%)	-	0.04以下	-	-
有機不純物	-	標準液と同じ、薄い	-	-

また、近年の研究成果²³によれば、骨材がコンクリートの耐凍害性に与える影響として、以下のようない知見が得られている。

細骨材の品質がコンクリートの耐凍害性に与える影響は少ない。

粗骨材の物性とコンクリートの耐凍害性との関係に関しては、同一の岩盤から生産される砕石と様々な岩石の集合体である砂利とは傾向が異なる。

砕石がコンクリートの耐凍害性に与える影響は、砕石の吸水率によって判定することができる（図 3.1）。

砂利がコンクリートの耐凍害性に与える影響は、骨材の簡易凍結融解試験（図 3.2）によって判定することができる（図 3.3）。

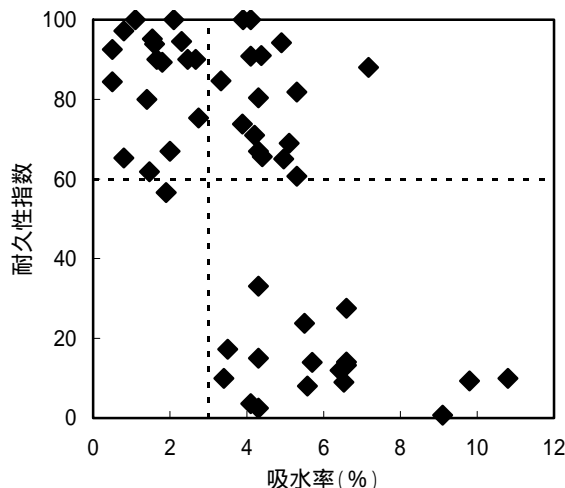


図 3.1 砕石の吸水率とコンクリート(W/C55%, Air4.5%)の耐久性指数の関係

²³土木研究所資料第4199号 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験方法に関する研究, 渡辺博志, 片平博, 伊佐見和大, 山田宏, 2011.3

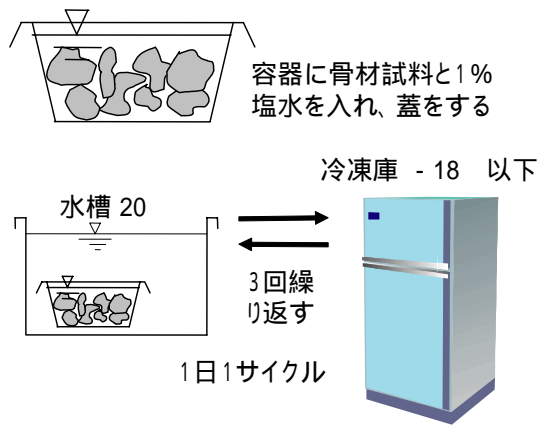


図 3.2 骨材の簡易凍結融解試験方法

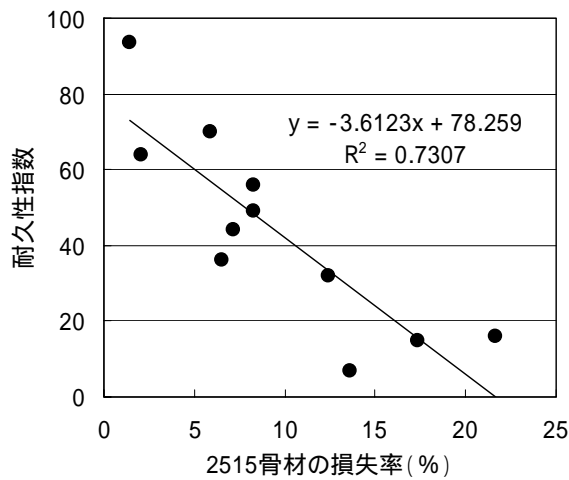


図 3.3 砂利の簡易凍結融解試験結果とコンクリートの耐久性指数との関係

3-7 初期凍害²⁴

硬化前のコンクリートは氷点下に曝されると容易に凍結，膨張し，初期凍害を受ける．コンクリートの凍結温度は，水セメント比，混和材料の種類およびその量によって若干異なるが，およそ-2.0～-0.5 といわれている．

初期凍害を受けたコンクリートは，その後適切な養生を行っても強度を回復することはなく，耐久性，水密性が著しく劣ったものとなる．また，コンクリートは凍結しないまでも 5 程度以下の低温に曝されると，凝結および硬化反応が相当に遅延するため早期に施工荷重を受ける構造物では，ひび割れ，残留変形等の問題が生じやすくなる．

このため，日平均気温が 4 以下になるような気象条件のもとでは，寒中コンクリートとしての考慮が必要となる．寒中コンクリートの施工に際して重要なことは，コンクリートを凍結させないこと，また，寒冷下においても所要の品質が損なわれないように対処することである．その際，以下に示す事項が特に重要である．

凝結硬化の初期に凍結させない．

養生終了後，想定される凍結融解作用に対して十分な抵抗性をもたせなくてはならない．

工事中の各段階で予想される荷重に対して十分な強度をもたせなくてはならない．

一方，耐寒剤を用いたコンクリートは，通常のコンクリートの養生と同じく特別な寒中対策をしないで所要の強度および耐久性を得ることができる．耐寒剤を用いる寒中コンクリートの施工にあたっては，北海道開発局道路設計要領²⁵を参照のこと．

²⁴ 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，p159，2008.3

²⁵ 北海道開発局：平成16年度道路設計施工要領，第3集橋梁，第2編コンクリート，参考資料A，耐寒剤を用いる寒中コンクリートの施工指針（案）

参考資料4 凍害の調査

4-1 凍害の調査方法

本編4章「詳細調査および簡易現場計測」において、外観詳細調査、非破壊検査機器を用いた試験、採取コア等による試験について示した。

ここでは、その他の調査方法を含め凍害の調査方法を表4.1に示す通り、環境、損傷程度、耐凍害性に関する試験に分類して解説する。

表 4.1 凍害に関する調査・試験

目的	調査項目	調査内容	「本編4章」参照項
凍害の可能性および複合劣化の調査	コアの静弾性係数の測定	JIS A 1149	4-2-1
	中性化深さの測定	JIS A 1152	4-2-2
	塩化物イオン含有量試験	JIS A 1154	塩害橋梁維持管理マニュアル(案) ²⁶
	ASRに関する試験	コアの促進膨張量試験等	アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案) ²⁷
凍害環境の調査	気象条件に関する資料調査	最低気温, 凍結融解回数	本編4章 4-1(1)
	水分の供給, 日射条件の調査	外観調査	本編3章 (2)
	含水状態の測定	高周波水分計による含水率測定	4-3-1
凍害による損傷程度の調査	外観調査・外観詳細調査	ひび割れ, スケーリング, ポップアウト 凍害深さ(スケーリング深さ)測定	4-4-1
	赤外線カメラによる損傷調査	表面温度測定による損傷範囲の測定	4-4-2
	打診調査	テストハンマによる打診	4-4-3
	現位置およびコアの強度性状	シュミットハンマによる反発硬度	4-4-4(1)
		小径コアによる圧縮強度試験	4-4-4(2)
	超音波伝播速度試験	凍害深さ(微細ひび割れ深さ)測定 面的な凍害影響範囲の測定	4-4-5
			4-4-6
			4-4-7
	微細ひび割れの顕微鏡観察	凍害深さ(微細ひび割れ深さ)測定	4-4-8
	鋼材の腐食状況	鋼材位置, 腐食の有無, 面積, 重量, 孔食深さ等	本編4章 4-2-2(5)
たわみ, 変形	実橋載荷試験等	本編4章 4-2-2(4)	
コンクリートの耐凍害性に関する試験	骨材の吸水率, 安定性試験	JIS A 1109, 1110, 1122	参考資料3 3-6
	空気量・気泡間隔係数の測定	ASTM C 457	4-5-1
	細孔径分布測定	凍害深さ(微細ひび割れ深さ)測定	4-5-2
	凍結融解試験	JIS A 1148 A法	4-5-3
	スケーリング試験	ASTM C 672, CDF	4-5-4
	配合推定試験	セメント協会法 F-18 等	4-5-5

²⁶ 国土交通省北陸地方整備局, 橋梁塩害対策検討委員会: 塩害橋梁維持管理マニュアル(案), H20.4

²⁷ 国土交通省近畿地方整備局, ASRに関する対策検討委員会, アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案), H20.4

4-2 凍害の可能性および複合劣化の調査

4-2-1 コアの静弾性係数の測定

(1) 試験方法

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」に準拠して実施される。

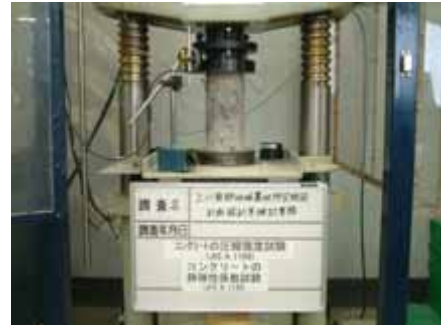


写真 4.1 静弾性係数の試験状況

(2) 試験結果の評価

凍害を生じたコンクリート構造物の場合、健全なコンクリート構造物より採取した同一圧縮強度を有するコアの静弾性係数に比べ著しく低い値を示すという特徴がある。場合によっては1/3～1/5程度にまで低下することがある。このように極端に小さな静弾性係数が得られた場合は、凍害またはASRが生じている可能性がある。

静弾性係数試験結果の評価方法を表 4.2、図 41 に示す。

表 4.2 静弾性係数試験結果の評価²⁸

静弾性係数試験値	評価	備考
すべての供試体の静弾性係数が「表 4.3 静弾性係数の標準値」で示される標準値より大きい場合	健全である	一般的には、静弾性係数の試験結果が標準より高い場合でも、構造物の健全度には影響がないと考えられる。しかし、圧縮強度および静弾性係数の試験方法に問題がなかったかどうか確認することが望ましい。
すべての供試体の静弾性係数が「表 4.3 静弾性係数の標準値」で示される標準値の範囲に含まれる場合	健全である	
静弾性係数が「表 4.3 静弾性係数の標準値」で示される標準値より小さい供試体がある場合	凍害あるいはASRが生じている可能性も考えられ、場合によっては構造的な検討も必要である	

表 4.3 採取コアによる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

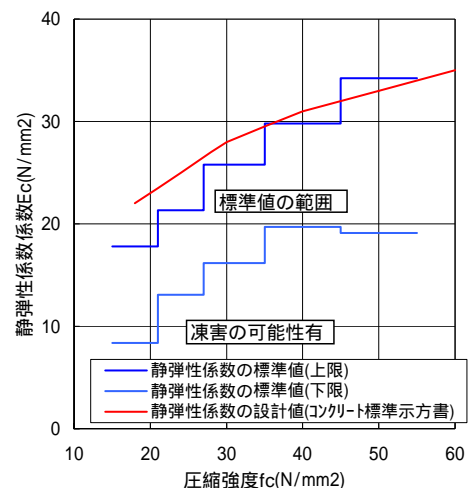


図 41 採取コアによる静弾性係数の標準値と凍害の可能性が考えられる範囲

²⁸ (独) 土木研究所, 日本構造物診断技術協会: 非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, p116, 技報堂出版, 2003.10

4-2-2 中性化深さの測定

凍害によってコンクリートにはひび割れが発生するため、ひび割れ部での物質移動性が増大し中性化の進行が早まる可能性がある。このため、中性化深さの測定により複合劣化の影響を考慮することができる。

打設直後のフレッシュなコンクリートは、セメントの水和により生じる水酸化カリウムの存在により強アルカリ（pH12～13）を示すが、年月の経過により空気中の二酸化炭素の影響を受け、炭酸カルシウムに変化する。この反応を中性化または炭酸化という。

コンクリートの中性化深さの測定は、pH に着目したフェノールフタレイン法が一般的であり、JISに規定されているが、この他にも炭酸化反応による水和生成物の変化に着目したものに示差熱重量分析、粉末X線回折があり、また生成物を2次電子像として可視化する走査電子顕微鏡やコンクリート面の元素の移動をカラーマッピングする電子線マイクロアナライザー分析がある。

これらの試験法の概要を表4.4に示す。

表 4.4 中性化深さ測定

試験方法	概 要
フェノールフタレイン法	<ul style="list-style-type: none"> ・フェノールフタレイン溶液（pH指示薬）はアルカリ性下で赤色を呈するため、pHの低下している領域、すなわち赤色に発色しない部分を中性化深さとして検出する。 ・はつり法、コア法、ドリル法の簡便な測定で定量的な情報が得られるため、比較的多く採用されている。
示差熱重量分析（TG-DTA）	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化によりセメント硬化体中の水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化することに着目し、この変化量を熱重量分析により求める方法である。 ・深さ方向のポイント毎の測定であり、断面を連続的に測定できないこと、高度な専門知識を要するなど問題点もある。
粉末X線回折	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化によりセメント硬化体中の水酸化カルシウム及びC-S-H（カルシウム・シリケート水和物）が炭酸カルシウムに変化することに着目し、水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムを粉末X線回折により検出する方法である。 ・深さ方向のポイント毎の測定で断面を連続的に測定できないこと、高度な専門知識を要するなど問題点もある。
走査電子顕微鏡（SEM・EDS）	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの水和生成物（水酸化カルシウム、C-S-H、エトリンガイト、モノサルフェートなど）や中性化により生成する炭酸カルシウムを、SEMを用い2次電子像としてとらえ、生成物の形状を確認できる。 ・また同時にX線分析装置（エネルギー分光器：EDS）により元素の組成分析を行う。 ・深さ方向のポイント毎の測定で断面を連続的に測定できないこと、高度な専門知識を要するなど問題点もある。
電子線マイクロアナライザー分析（EPMA面分析）	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化の要因である二酸化炭素の浸入によるコンクリート表面での元素移動を電子ビームを照射し検出する装置であり、コンクリート分野では、面分析（カラーマッピング）が有効である。 ・深さ方向のポイント毎の測定で断面を連続的に測定できないこと、高度な専門知識を要するなど問題点もある。

4-3 凍害環境の調査

4-3-1 含水状態の測定

コンクリートの含水率や湿潤状況を測定する。含水率が高ければ凍害を起こすという訳ではないが、含水率が大きく飽水状態になっている方が凍結融解作用を受ける危険性が高いといえる。

高周波水分計を使用すると、現地にて短時間で含水率を測定できる。重量法による測定に比べると測定誤差は大きいですが、簡便に測定できる利点は大きい。測定値は表面から数十mmの間の平均的な値として得られるので、深部の含水率を測定することはできない。

4-4 凍害による損傷程度の調査

4-4-1 外観詳細調査他

ひび割れやスケーリング、ポップアウトなど凍害に特有な劣化現象の有無と程度を観察する。また、飽水状態になっているため、ひび割れにはエフロレッセンスを伴うことも多い。

スケーリングによる劣化度の評価は、表 4.5 に示す目視調査による半定量的なランク付けである外観評点（ASTM C 672 の室内試験における目視判定法）や表 4.6 に示す RILEM のスケーリングの程度²⁹を適用することも可能である。

表 4.5 凍害劣化度の外観評点 (ASTM C 672)







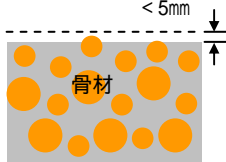
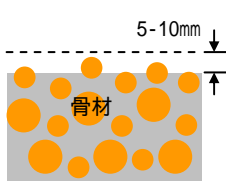
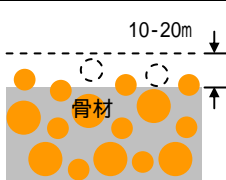
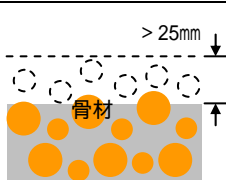
点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0	 なし	1	 粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	 評価1と評価3の中間程度の剥離	3	 粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	 評価3と評価5の中間程度の剥離	5	 粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

表 4.6 スケーリング程度の区分 (RILEM)

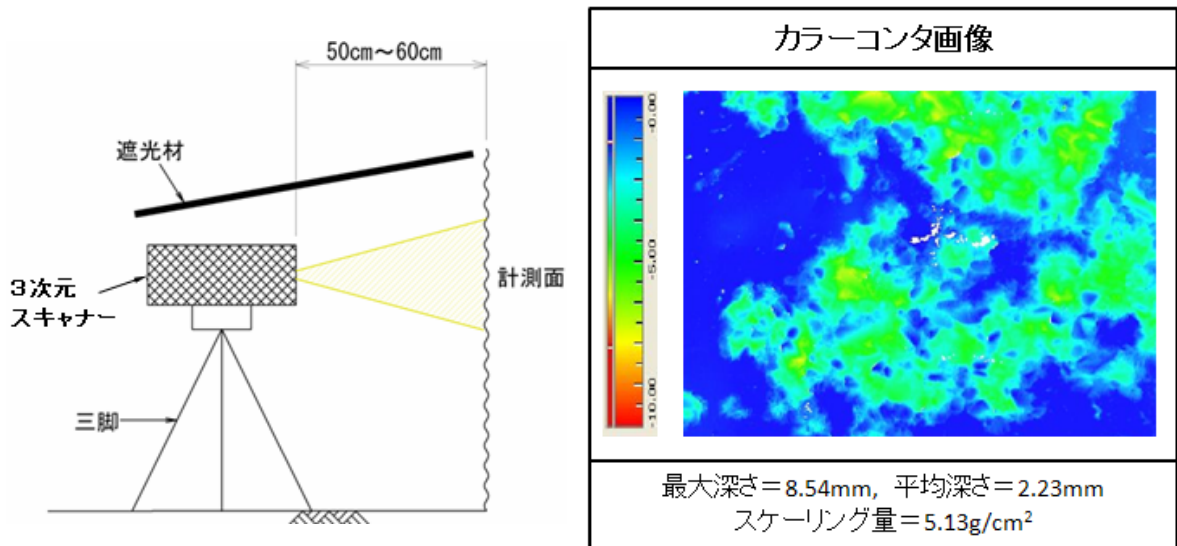
スケーリング程度の区分	解 説	
軽度	表面のモルタルのみの損失の場合 (最大 5mm)	 < 5mm 骨材
中程度	粗骨材間のモルタルも損失する場合 (深さ 5mm ~ 10mm)	 5-10mm 骨材
強度	粗骨材のまわりのモルタルがなくなってコンクリートの表面から骨材が完全に露出している状態 (深さ 10mm ~ 20mm)	 10-20mm 骨材
激しい	粗骨材を含めてコンクリートがなくなった場合	 > 25mm 骨材

スケーリング深さは構造物表面（採取コア表面も含む）でノギス等により表面からの欠損深さを測定し、その最大値と最小値を求め定量化する。最近の寒冷地における河川樋門を対象とした研究によると、3次元スキャナーを用いた画像解析からスケーリング深さを定量化する方法が適用されている。

例えば内藤ら³⁰は、寒冷地の壁式防護柵のスケーリング調査を、外観目視調査と3Dスキャナーを適用した調査を行い、凍害劣化評価を行っている。

²⁹ 洪悦郎：コンクリートの凍害、コンクリート工学，Vol.13， 3，1975.3

³⁰ 内藤勲，田口史雄，林田宏：コンクリート実構造物のスケーリング劣化に関する検討，第52回北海道開発技術研究発表会，技-42，2009.2



4-4-2 赤外線カメラによる損傷調査

赤外線サーモカメラにより表面温度を測定することによって、浮き・はく離の範囲や含水率の異なる範囲を視覚的に把握することができる。写真 4.2 は凍害を生じた樋門の操作台部の温度分布であり、目視により確認できる凍害損傷(写真 4.3)と損傷付近の劣化範囲が概ね確認できる。



写真 4.3 可視画像写真

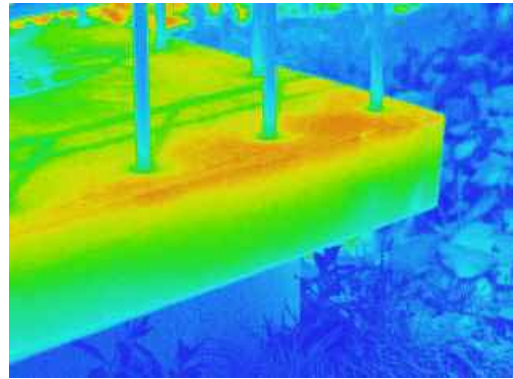


写真 4.2 赤外線画像写真

4-4-3 打診調査

打診用ハンマーによりコンクリート表面を打診し、表面の脆弱化、浮き等の範囲を調査する。進行程度が大きい部分については、打診用ハンマーの鋭利な側で叩くと、層状に損傷部分が剥離する場合がある。

写真 4.4 は、打診用ハンマーにてコンクリート表面を調査している状況である。



写真 4.4 打診調査写真

4-4-4 非破壊および局部破壊調査による強度性状

(1) シュミットハンマーによる表面反発強度

シュミットハンマーによる表面反発硬度の試験は、土木学会基準「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」³¹によるものとする。

凍害を生じていると思われる部分と、健全部分において反発硬度を比較することにより、コンクリート組織の損傷の有無を判定する。テストハンマーによる音の違いでは判断できない差でも、反発硬度により定量化することで判断が容易になる。比較対照とする健全部分については、打撃角度、部材厚さ、コンクリートの材齢、湿潤程度などがなるべく測定対象とした部分と同条件になる位置を選定する。



写真 4.5 シュミットハンマーによる反発硬度の測定

最近の寒冷地における河川樋門を対象とした³²研究によると、図 4.3、図 4.4 に示すとおり反発強度とスケーリング劣化の外観評点および相対動弾性係数とに相関が認められている。また、表面にスケーリングがさほど進行していなくても、コンクリート内部に微細ひび割れが発生している可能性があることから、外観調査に加えて反発強度をも参考にして、凍害劣化範囲を推定することを推奨している。

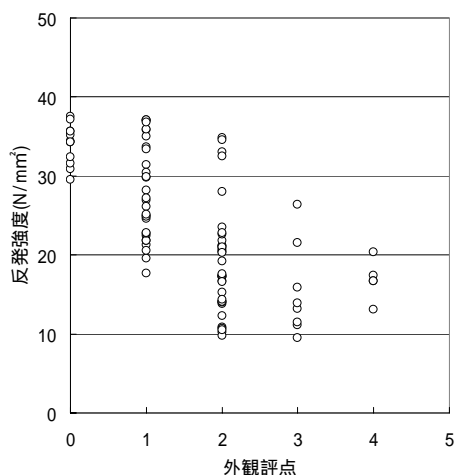


図 4.3 反発強度と外観評点の関係

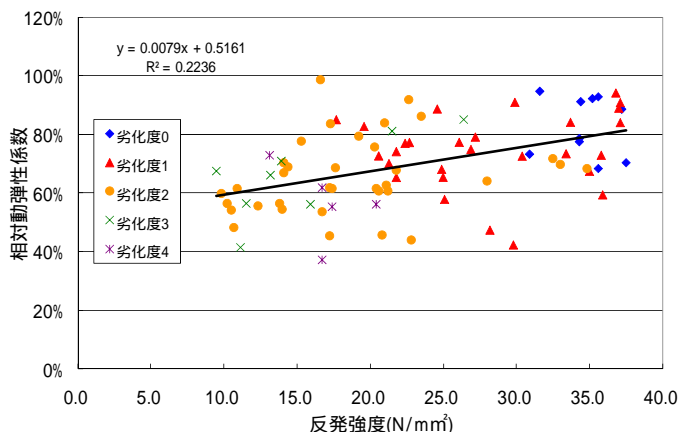


図 4.4 反発強度と相対動弾性係数の関係

(2) 小径コアによる圧縮強度試験：凍害の可能性判定、凍害深さ

凍害が進行するとコンクリートの静弾性係数が低下することが知られており、強度も健全部に比較し低下すると想像できる。コンクリート強度は一般に、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」により実施され、採取コアの直径は粗骨材寸法の3倍以上（粗骨材寸法 20mm の場合はコア径 75mm 程度、粗骨材寸法 40mm の場合はコア径 125mm 程度）が必要となる。圧縮強度試験では標準コア寸法の 1/2 高さ付近が破壊するため、JIS による標準寸法の供試体では凍害により表面側の劣化が大きい場合でも試験値に反映されにくいと考えられる。

このため、表面近くの劣化状態を反映する方法として、小径コアにより圧縮強度試験を行う方法がある。

³¹ 土木学会基準 JSCE-G 504-1999：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法

³² 土木研究所寒地土木研究所：平成 21 年度 重点プロジェクト報告書（11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究）、2010.3

小径コアによる圧縮強度試験は、「微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領(案)」³³によるものとし、測定方法は「小径コア試験による新設構造体コンクリート強度測定要領(案)」³⁴に記載されている。

小径コアによる圧縮強度試験は、直径が25mm程度で高さは直径の2倍の供試体を使用するので、表層部についての圧縮強度を測定することができ、深部までコアボーリングを行えば、同位置について表層部と深部の強度を比較することも可能である。

写真 4.6 は、直径50mmのコアと直径25mm, 10mmのコアの大きさを比較したものである。

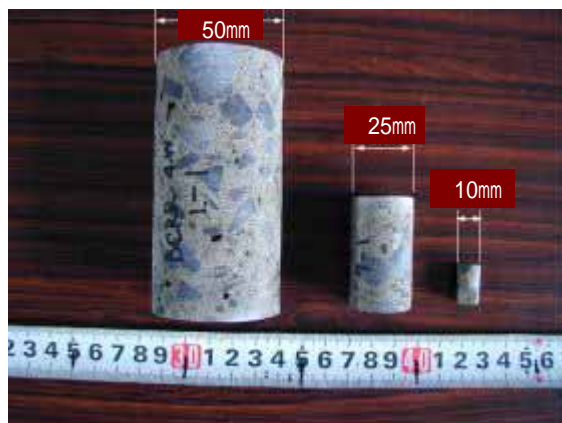


写真 4.6 小径コア

4-4-5 超音波伝播速度試験：透過法による凍害深さの計測

超音波伝播速度は、ひび割れによる損傷が大きいほど伝播経路が長くなることから、遅くなる傾向にある。この原理を応用し、コア直径またはコア孔壁間距離を利用し、コンクリート表面から深さ方向に超音波伝播速度の分布を測定し、凍害深さを推定することが可能である。

既設構造物表面付近の超音波伝播速度の測定方法としては破壊調査であるコア削孔を伴うのが一般的であり、図 4.5 に示す採取したコア側面を直径方向に発振子、受振子で挟み込み透過した波の伝播時間を深さ方向に測定する方法^[35]、図 4.6 に示すコア削孔した孔壁間を挟み込み深さ方向に測定する方法^[36]がある。

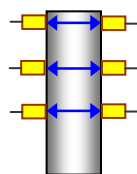


図 4.5 コア側面の超音波伝播速度測定



図 4.6 孔壁間の超音波伝播速度測定

³³ 国土交通省大臣官房技術調査課：微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定試行要領(案)，平成18年9月

³⁴ (株)銭高組・前田建設工業(株)・日本国土開発(株)，(独)土木研究所：小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)，2006.5

³⁵ 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，p.120，2001.1

³⁶ 山下英俊：コンクリート構造物の劣化評価と予測に関する研究，北海道大学学位論文，1999.3

孔壁間の超音波速度を深さ方向に測定した例を図 4.7 に示す。表面に比べ内部に向かうに従い超音波伝搬速度が速くなる様子が分かるが、劣化部と健全部との境界の位置を判定する方法については、技術者の判断に委ねられている部分もあり、客観性の面で課題を有しているのが現状である。

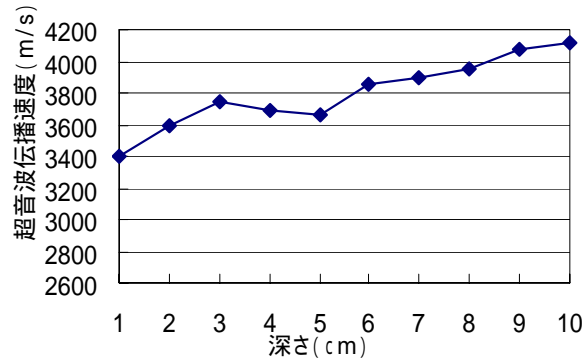


図 4.7 孔壁間超音波速度の測定例

超音波伝播速度をコンクリート構造物に適用して品質を評価する試みは多く行われているが、骨材の品質や配置、含水比などの影響により測定値のばらつきが多いのが一般的である。このため、測定値によりコンクリートの品質を評価することは難しいが、例えば超音波伝播速度が一定値で安定している範囲を健全と考えるものや、3,700m/s 程度以上を健全とする判定基準³⁷などがある。

超音波伝播速度は骨材の種類他に含水率の影響を受けることから、超音波伝播速度を用いて凍害深さをよりの確に評価しようとする場合は、乾燥させたコアを用いることが望ましいとの研究成果³⁸もある。

例えば林らによると、凍害によるスケリングを受けた箇所を劣化部とし、劣化部と健全部から採取したコアを湿潤状態・乾燥状態の2通りについて、図 4.8 に示す方法で直径方向の超音波伝播速度を深さ方向に計測している。その結果を図 4.9 に示す。

劣化部（湿潤）の速度は表面に向かって低下傾向を示しており、乾燥を行うことによりその差が明瞭となった。このことから、湿潤状態では微細ひび割れ中の水分の影響により、劣化部の速度低下が起こりにくいと考えられている。

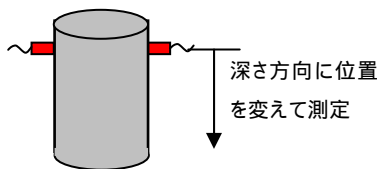


図 4.8 採取コアによる超音波伝播速度測定

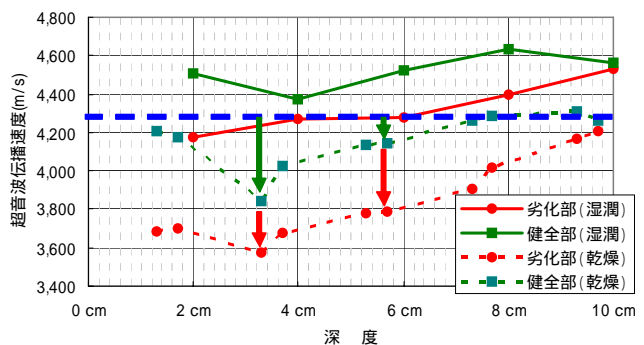


図 4.9 コア深度と超音波伝播速度の関係

³⁷ E.A.Whitehurst:Evaluation of concrete properties from sonic tests,ACI Monograph No.2,ACI,1966,P7

³⁸ 土木研究所寒地土木研究所：平成 21 年度 重点プロジェクト報告書（11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究），2010.3

4-4-6 超音波伝播速度試験：トモグラフィー法による凍害劣化範囲の計測

トモグラフィーとは断層映像法のことです。非破壊試験で対象物の断面構造を可視化する手法である。

具体的には、対称となる領域を取り囲むように、多数の発振子および受振子を配置し、測定した複数の超音波伝播時間を解析することによって断面内の欠陥位置を推定することができる方法である（図 4.10）。

最近の寒冷地における被覆補修された河川樋門の調査研究³⁹によると、被覆補修構造物内部の劣化位置を超音波トモグラフィー法による非破壊調査で確認する手法も提案されている。

写真 4.7 は柱を挟み込んで柱厚方向速度を計測している状況写真である。

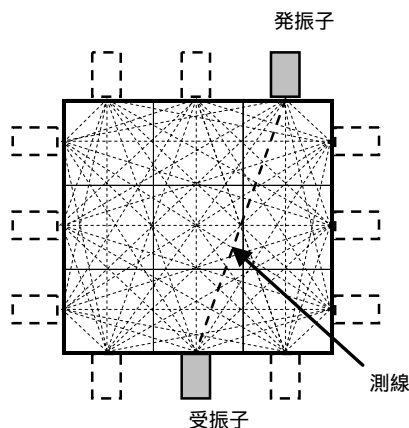


図 4.10 トモグラフィー法の概要



写真 4.7 柱を挟み込んだ測定状況

4-4-7 超音波伝播速度試験：表面走査法による凍害深さの計測

非破壊試験であることや簡便性から図 4.11 に示す表面走査法による超音波伝播速度測定を用いた凍害深さの推定^{40, 41}も試みられている。これは、凍害による劣化部を微細ひびわれが発生した範囲とみなすことで、凍害深さを非破壊で測定する手法である。

コンクリートの表層に劣化した部分が存在する場合、超音波は劣化部をなるべく迂回し、健全部を伝播経路に選びながら、最も短い時間で受振子に到達しようとする性質がある。発・受振子間の距離がある値以上になると、超音波の伝播経路は健全部の縁端位置に全一本化される。その結果、発・受振子間の距離の増加に対する超音波の伝播距離の増加の割合は小さくなり、これに連動して伝播時間が早まりグラフの直線の傾斜が変わる。

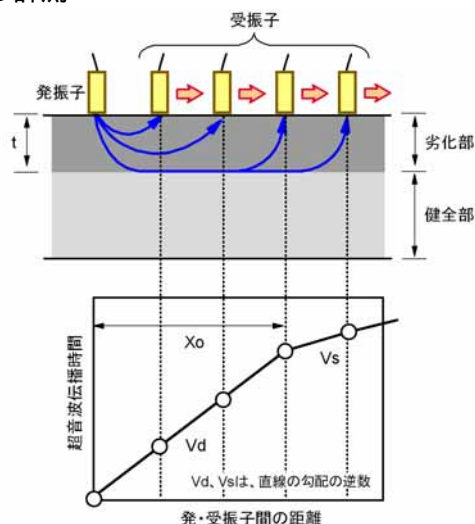


図 4.11 表面走査法による超音波速度測定

遠藤ら⁴²によると、表面走査法は凍害を受けた劣化部の厚さをある一定の精度で非破壊により推定する方法として有効であること、測定で得られるグラフの傾きから耐凍害性の閾値（相対動弾性係数 60%）を下回る部分の深さを推断できること、さらに実構造物においてもデータ数は未だ少ないものの表面走査法の有効性の一端が示されている。

³⁹ 内藤勲, 田口史雄, 石谷隆始, 畠秀樹, 出合寿勇: 河川樋門コンクリートの凍害劣化と再劣化に関する調査, 寒地土木研究所月報, No.678, pp.17-26, 2009.11

⁴⁰ 柏忠二, 明石外世樹, 小阪義夫: コンクリートの非破壊試験法 - 日欧米の論文・規格・文献 -, p.42, 1980

⁴¹ 遠藤裕文, 田口史雄, 林田宏, 草間祥吾: 非破壊試験によるコンクリートの凍害深さの推定に関する基礎的検討, 平成 19 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 64 号, 2008.2

⁴² 遠藤裕文, 田口史雄, 林田宏: 凍害劣化の簡易診断技術に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.839-844, 2010.7

4-4-8 微細ひび割れの顕微鏡観察

凍結融解作用を受けたコンクリートは、内部に多数の微細ひび割れを発生する。コンクリート観察面の微細ひび割れを直接観察するためには顕微鏡による観察が必要とされるが、測定精度を上げるためにはある程度の倍率が必要であるが、逆に観察域が局部的となる欠点がある。このため、低倍率(35~50倍程度)の顕微鏡を用いて観察が可能なメソレベル(500 μ m~100mm程度)⁴³の微細ひび割れに着目し、確率・統計的な手法により広範囲の微細ひび割れを評価する研究が行われている。⁴⁴

また、観察面の微細ひび割れを蛍光顕微鏡により観察する方法も提案されている。⁴⁵

しかしながら、現在のところ凍害深さは、スケーリング深さ(ノギス等の計測)や微細ひび割れ深さ(超音波伝搬速度や細孔径分布の測定)を用いて評価されており⁴⁶、微細ひび割れの顕微鏡観察結果と凍害深さ(微細ひび割れ深さ)とを関連付けた報告は未だなされていないようである。

4-5 耐凍害性に関する試験・分析

4-5-1 骨材の品質

参考資料 3-6 骨材の項を参照のこと。

4-5-2 空気量，気泡間隔係数の測定

硬化コンクリートの空気量・気泡間隔係数の測定方法としては、コア等の試料の研磨面について顕微鏡上で気泡間の距離を測定する顕微鏡法、空気量を測定する方法としては高水圧法がある。

顕微鏡法ではコンクリート試料を数 cm にスライスし、研磨機で平滑に仕上げた供試体表面の空気量、気泡間隔係数を測定する。気泡間隔係数の測定は表 4.7 に示す測定方法がある。

また、高水圧法では加圧装置にて供試体に水を圧入して空気量を測定する方法であり、顕微鏡法に比べ簡便であるが、測定値のキャリブレーションの方法、測定精度に課題がある。

表 4.7 顕微鏡法による空気量・気泡間隔係数の試験方法⁴⁷

	測定方法	留意点
ポイントカウント法	コンクリート表面を一定間隔で移動させて碁盤目状に区切った区切線の交点が気泡断面に合致する割合から気泡量を算出	・両者の測定結果にほとんど差は生じない。 ・研磨作業，測定に熟練を要する
リアトラバース法	区切線によって気泡上を横切る際の気泡断面の弦長の総和から空気量を算出	
画像処理法	コンクリートの試料切片における気泡内に蛍光染料を添加した充填材で染色し、その後試料面に紫外線を照射して気泡組織のみを発光させ、その際の輝度分布を一定の閾値によって二値化し画像処理によって空気量，気泡間隔などの値を算出	・研磨作業に熟練を要する。 ・骨材とペーストとの界面など本来気泡でない部分もカウントすることがあり，気泡間隔係数が少な目に評価されることがある。

⁴³ コンクリートの微細構造解析研究委員会報告：コンクリートのマルチスケール・モデリング，コンクリート工学 2005.3，Vol143, No3

⁴⁴ 最知正芳他：凍結融解作用を受けたコンクリート内部の微細きれつの定量化と損傷度評価への応用，コンクリート工学論文集，第 13 巻第 1 号，2002.1

⁴⁵ 久保ホンベルト洋他：高強度モルタルの体積変化と微細ひび割れ発生機構，コンクリート工学論文集，第 11 巻第 3 号，2000.9

⁴⁶ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p129-131，2008.3

⁴⁷ 日本コンクリート工学協会，コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル，p46-48，2000.5



写真 4.8 画像処理による気泡間隔係数測定装置の例

4-5-3 細孔径分布測定

コンクリートにはエントラップドエア (entrapped air) や AE 剤により連行されるエントレインドエア (entrained air) の気体空隙部分と共に水隙部分として毛細管空隙とゲル空隙が存在する。これらの空隙の大きさは 10^7 の範囲に及び、全空隙分布を測定するためには一つの方法で測定することは困難であり、図 4.12 に示す数種の方法を組み合わせる必要がある。測定方法の一覧を表 4.8 に示す。

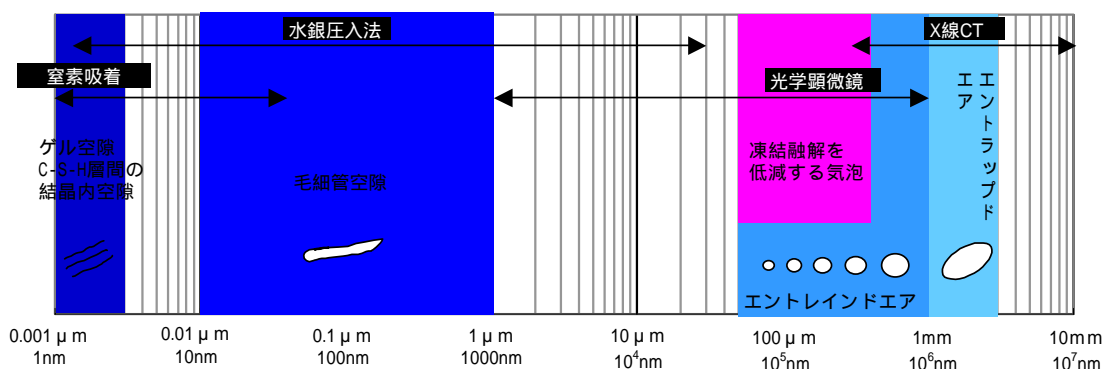


図 4.12 コンクリート中の空隙径の測定方法⁴⁸

表 4.8 コンクリート中の空隙径の測定方法⁴⁹

測定方法	対象とする空隙の種類	分解能 測定領域	備考（試料条件等）
窒素吸着法	ゲル空隙 一部毛細管空隙	1 ~ 40nm	乾燥試料 微細空隙の測定可
水銀圧入法	一部ゲル空隙 毛細管空隙	3nm ~ 30 μm	乾燥試料 広範囲の空隙径の測定可
光学顕微鏡	エントレインドエア	> 1 μm	研磨面の観察
X線 CT 法	一部エントレインドエア エントラップドエア	> 0.3mm	非破壊分析 任意の断面の観察可

⁴⁸ セメント協会：わかりやすいセメント科学，p81 に加筆，2001.2

⁴⁹ セメント協会：わかりやすいセメント科学，p82，2001.2

(1) 水銀圧入法

水銀の表面張力が大きいことを利用して粉体の細孔に水銀を導入させる圧力と圧入された水銀量から比表面積や細孔径分布を測定する方法であり，広範囲の細孔径分布を比較的簡単に測定できる方法である．詳細は脚注⁵⁰等を参照のこと．

(2) 気体吸着法

気体吸着法は表面積を求める方法であるが，細孔径分布の測定にも利用され，吸着気体としては窒素ガス，水蒸気などを用いることが多い．詳細は脚注⁵¹等を参照のこと．



写真 4.9 水銀圧入測定装置 (例)

4-5-4 凍結融解試験

(1) 試験方法

試験は JIS A 1148 (A 法)「コンクリートの凍結融解試験方法 (水中凍結融解試験方法)」による．

1 サイクル 3~4 時間の急速凍結融解 (最低温度 -18 ± 2 ，最高温度 5 ± 2) を繰り返す，300 サイクル後の質量減少率と相対動弾性係数を耐凍害性の目安としている．

試験供試体は $100 \times 100 \times$ 高さ 400mm とされており，採取コアを用いる場合は 150mm でコア採取し整形する必要があるが，コア採取した円柱供試体でも同様の試験が可能である．

試験装置を写真 4.10，試験中および試験終了後の供試体の外観を写真 4.11，写真 4.12 に示す．



写真 4.10 凍結融解試験装置

	0サイクル	30サイクル	60サイクル
供試体状況写真			

写真 4.11 採取コアを角柱に整形した凍結融解試験の例

⁵⁰ 日本コンクリート工学協会，コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル，p125，2000.5

⁵¹ 日本コンクリート工学協会，コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル，p129，2000.5



写真 4.12 円形の採取コアによる凍結融解試験の例

(2) 試験結果の評価

コンクリートの凍結融解試験により構造物の劣化予測を行うことは、構造物が供用されている環境が様々であり制約があることから定量的には困難であるが、凍害を受ける可能性の有無の評価は可能である。

300 サイクル終了後の評価は表 4.9 の通り、相対動弾性係数が 80%以上を保ち、長さ変化率も 200 μ 以下である場合、耐凍害性に優れていると判断できる。

ここに、長さ変化率は JIS 原案「コンクリートの凍結融解試験方法(案)」および現行 JIS A 1148 において付属書(参考)「長さ増加比試験方法」として示されているが、現行の JIS 規定の一部とはされていない。

表 4.9 凍結融解試験結果の評価⁵²

	相対動弾性係数 (%)	長さ変化率 (μ)
健全	300 サイクル終了後 80%以上	300 サイクル終了後 200 μ 以下
要注意(1)	300 サイクル終了後 60 ~ 80%	300 サイクル終了後 200 ~ 1000 μ
要注意(2)	300 サイクル終了後 ~ 60%	300 サイクル終了後 1000 μ ~
要注意(3)	要注意(2)未満	要注意(2)以上

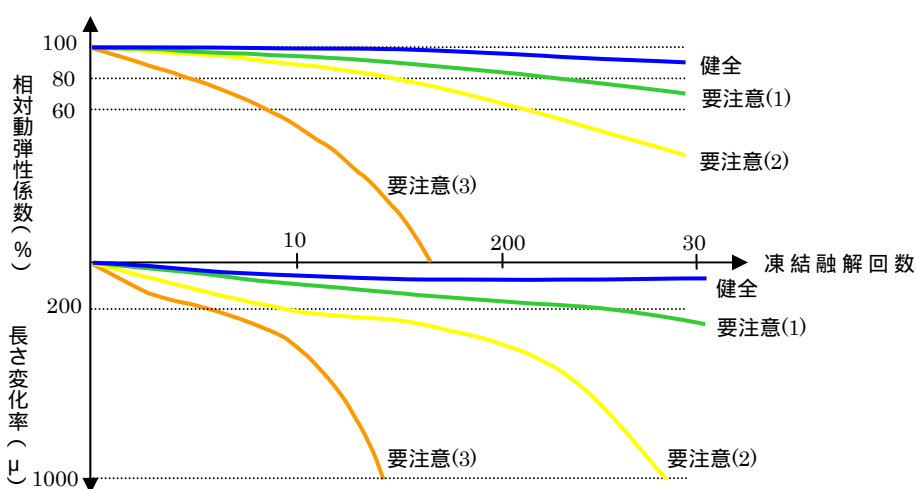


図 4.13 凍結融解試験結果の概念図⁵³

⁵² 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p116-117，2001.1

⁵³ 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p117，2001.1

4-5-5 凍結防止剤の影響を考慮したスケーリング抵抗性試験⁵⁴

凍結防止剤の散布が起因するコンクリートの劣化現象は、表面はく離を伴うスケーリングが特徴的なものであり、国内においては規準が定められていないため、ASTMをはじめとする諸外国の試験方法を準用した試験が行われている。

(1) 湛水法：ASTM C 672（凍結防止剤下のスケーリング抵抗性試験）⁵⁵

図 4.14 に示す供試体を養生後、試験面に濃度 3%塩化ナトリウム水溶液を張り、 -17.8 ± 2.8 で 16 時間凍結、 23 ± 1.7 で 8 時間融解の 1 サイクル 24 時間の凍結融解作用を与え、試験面のスケーリングによる劣化状況に応じて表 4.10 の通り評価している。

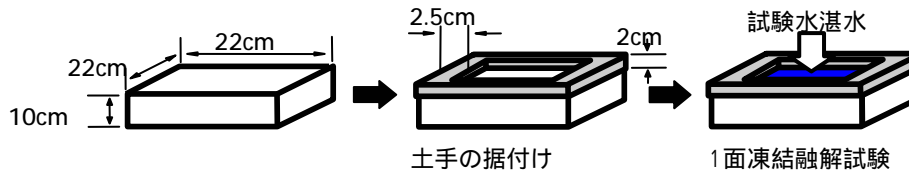


図 4.14 スケーリング試験供試体の例

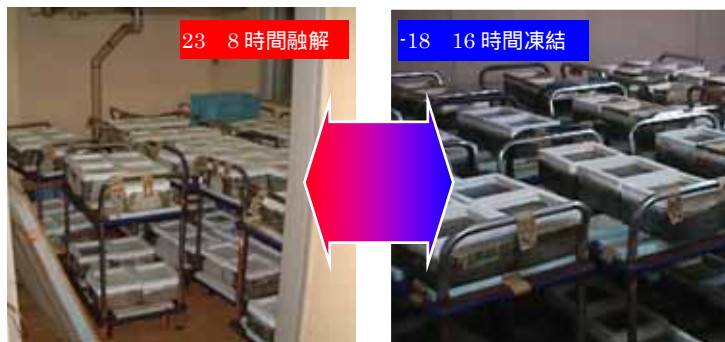


写真 4.13 スケーリング試験状況

表 4.10 ASTM 試験による劣化状況評価

点	試験面の劣化状況
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし、深さ 3mm 以下の剥離
2	評価 1 と評価 3 の中間程度の劣化性能
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価 3 と評価 5 の中間程度の劣化性能
5	粗骨材が前面露出する程の激しい剥離

また、本試験に準拠しスケーリング評価をスケーリング量とスケーリング深さとを測定することにより定量的に評価を試みる研究もなされてきている。

(2) 底面浸漬法：RILEM による CDF 試験⁵⁶

CDF 試験 (Capillary suction of Deicing solution and Freeze thaw test) は、3%NaCl 水溶液に供試体の底面を 5mm 浸漬し、毛管浸透を生じさせた後、1 日 2 サイクル - 1 回の凍結と融解 (+20 / -20) を 12 時間で繰り返す - の割合で凍結融解試験を行うものである。なお、凍結融解試験機の温度制御の精度は $\pm 0.5K$ と高い精度が要求されている。

CDF 試験の結果は、28 サイクル後のスケール量 (損失質量 g) を用いて当該供試体の耐凍害性を評価する。Jochen Stark らによる研究では CDF 法による凍結融解剤抵抗性試験によるスケール限界量は 28 回凍結融解後で最大平均スケール量 1500 g / cm^2 としている。

⁵⁴ 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，p38-41，1999.11

⁵⁵ American Society for Testing and Materials: Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C672, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, pp.341-343

⁵⁶ RILEM TC117 FDC: Draft recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete-Test with water (CF) or with sodium chloride solution (CDF), Materials & Structures, pp.175-182, 1995



写真 4.14 CDF 試験の凍結融解試験機

4-5-6 配合推定試験

レディーミクストコンクリートの性能の一つである水セメント比は耐凍害性の指標の一つとされており、施工時の工事記録が保管されていない場合、配合推定試験を行うことにより水セメント比を推定できる。

試験方法としては、ポルトランドセメントで石灰石骨材を使用していない場合に適用できるセメント協会法、石灰石骨材を用いたコンクリートにも適用できるフッ酸法、ギ酸法、グルコン酸法などの試験方法がある。いずれも事前にセメントの種類（ポルトランドセメントあるいは混合セメント）が既知である必要がある。

各種配合推定試験の概要を表 4.11 に示す。

表 4.11 配合推定試験の概要⁵⁷

	セメント協会法 ⁵⁸	フッ酸法	ギ酸法 ⁵⁹	グルコン酸法 ^{60, 61}
目的	単位セメント量, 単位骨材量 (細骨材 + 粗骨材), 単位水量を推定	単位セメント量, 単位細骨材量, 単位粗骨材, 単位水量を推定	単位セメント量, 単位骨材量, 単位水量を推定	単位セメント量を推定
特徴	ポルトランドセメントで石灰石や可溶成分の多い骨材は不可。セメント, 骨材の分析値が入手出来ない場合, 標準値を使用して推定するため単位水量の誤差大。	石灰石骨材を用いたコンクリートにも適用可。但し単位水量の誤差大。コンクリートが中性化していても推定精度は未中性化の場合と同程度。	石灰石骨材を用いたコンクリートにも適用可。ASRが生じている場合, 中性化域への適応は困難。	石灰石骨材を用いたコンクリートにも適用可。混合セメントについては単位セメント量が小さくなる。中性化域への適応は困難。
概要	試料を希塩酸に溶解した後, CaO, in.sol., ig.loss を定量し単位量を推定。	試料をフッ化水素酸で完全分解し CaO を定量する。別途骨材とセメント硬化体を分離し, それぞれの CaO の定量を行ったものから差し引き, 単位セメント量を推定。	セメント中の SiO ₂ の量に着目しギ酸処理した後, ろ液を ICP (発光分光分析装置) を用いて SiO ₂ の定量分析を行い単位セメント量を算出。	グルコン酸ナトリウム (セメントは溶解するが海砂や石灰岩骨材の主成分である炭酸カルシウムを溶解しにくい) に溶解した後, 不溶残分を用いて単位セメント量を算出。
分析手法	CaO : EDTA 滴定法 ig.loss : 600 強熱減量	細骨材 : モルタルの偏光顕微鏡観察による 粗骨材 : コンクリート表面に見られる粗骨材をトレースし, 容積占有率を推定した後, 取り出して比重, 吸水率を測定後フッ化水素酸で分解し CaO を定量 CaO : EDTA 滴定法	SiO ₂ : ICP 分析	試料の ig.loss : 500 強熱減量 グルコン酸ナトリウム不溶残分の ig.loss : 500, 2 時間の強熱減量

⁵⁷ 日本コンクリート工学協会コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル, p37, 2000.5

⁵⁸ セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18, 硬化コンクリートの配合推定に関する共同研究試験報告, 1967.9

⁵⁹ 吉田八郎他：石灰石骨材を使用した硬化コンクリート中のセメント量推定方法, コンクリート工学年次論文報告集, p347-352, 1990

⁶⁰ 日本非破壊検査協会：NDIS3422, グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法, 2002

⁶¹ 中田喜久他：「グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法」の概要と NDIS3422 の制定の経緯, コンクリート工学 Vol141, No11, 2003.11

参考資料5 凍害の劣化予測および耐久性設計

5-1 凍害の劣化予測

(ASTM 相当サイクル数)

凍害劣化予測手法についてはいくつかの手法が提案されている^{例えは⁶², ⁶³}。しかし、凍害劣化にとって温度条件と並び重要なパラメータであるコンクリート構造物の水分条件は部位条件や地域条件によって異なり⁶⁴、既存の凍害劣化予測手法では、パラメータとして十分考慮されていないものが多い。

その内、外部環境因子をパラメータとして多く考慮している劣化予測手法「ASTM 相当サイクル」⁶²は、ある地域の気象条件下でコンクリートが1年間に受ける凍結融解作用を、式 5.1、表 5.1 を用いて ASTM C-666 A 法の標準条件の凍結最低温度である -18 を基準とした ASTM 相当サイクル数として算出し、耐用年数を推定する手法である。

$$C_y_{ASTM-sp} = C \times F \times Rsp$$

$$= C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \quad \text{式 5.1}$$

ここに、 $C_y_{ASTM-sp}$: ASTM 相当サイクル数(回/年)

C : 養生条件に関する係数

F : 凍結融解条件に関する係数

Rsp : $(-ts/18)$

ts : 凍結最低温度()

: 定数

s : 日照条件に関する係数

p : 劣化過程係数

Ra_{90} : 気温による ASTM 相当サイクル数

表 5.1 ASTM 相当サイクル数算定式の係数

ASTM 相当サイクル数算定式 $C_y_{ASTM-sp} = C \times F \times Rsp$			凍害劣化の過程	
			劣化の兆候 (100% Ed > 90%)	明確な劣化 (90% Ed > 60%)
劣化過程係数 p			1.00	1.64
部 材 係 数	日射条件 s	北面	1.00	1.00
		水平・南面	1.45	1.45
	養生・乾燥条件 C	水中	1.00	1.00
		気中	0.66	1.41
		20 乾燥	0.26	0.80
		30 乾燥	0.14	0.45
	凍結融解条件 F	水中凍結水中融解	1.00	1.00
		気中凍結水中融解	0.21	0.23

⁶² 浜幸雄ほか: 気温因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集 第523号 pp.9-16, 1999.9

⁶³ 石井清ほか: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集 No.564/ -35, pp.221-232, 1997.5

⁶⁴ 日本コンクリート工学協会: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, 2008

(水分等の影響)

一方、寒地土木研究所の成果⁶⁵では、実構造物のコンクリート中の温湿度は積雪等の環境条件や部位によって異なることが分かった。特に、湿度については水平部材のほうが、垂直部材に比べ高湿度の状態となっていた。また、ばらつきはあるものの、コンクリート中の湿度は最深積雪と相関があることが分かった。さらに、水分供給条件の違いなどに起因し、室内促進試験と実構造物とで凍結融解による損傷量に差があり、ASTM 相当サイクルの劣化速度が実際の劣化速度よりも速くなることが分かった。劣化速度の差を補正するため部位毎の水分条件補正係数を以下に示す。なお、補正係数が水平部材と垂直部材とで異なる形となっているのは、水平部材は積雪の影響を大きく受けるが、垂直部材は積雪の影響が小さいためと考えられる。

$$\Delta Ed_{ACT} = \alpha \times \Delta Ed_{ASTM}$$

垂直部材の水分条件補正係数

$$\alpha = 0.4254 \quad (Ed > 90\%)$$

$$\alpha = 0.0751 \quad (Ed \leq 90\%)$$

水平部材の水分条件補正係数

$$\alpha = 0.0025H + 0.0487 \quad (Ed > 90\%)$$

$$\alpha = 0.0004H + 0.0086 \quad (Ed \leq 90\%)$$

ここに、 ΔEd_{ACT} : 実構造物の 1 年当たりの相対動弾性係数の低下量 (%/年)

ΔEd_{ASTM} : ASTM 相当サイクルで算出された 1 年当たりの相対動弾性係数の低下量 (%/年)

α : 水分条件補正係数

H : 最深積雪 (cm)

⁶⁵ 土木研究所寒地土木研究所：平成 22 年度 重点プロジェクト報告書（11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究），2011.3

(凍害劣化予測曲線の算出例)

先の ASTM 相当サイクルに水分等の補正を行って、凍害劣化予測を行った算出例として、札幌にある樋門の操作台と擁壁(南面)についての例を示す。なお、算出に当たっての仮定条件等を以下に示す。

- ・ 樋門のコンクリートは RC-1(W/C=55%, AE 剤なし)とする。同コンクリートの室内促進試験の結果、相対動弾性係数が 90 および 60% に達するのは、それぞれ 3.4 サイクルおよび 13.8
- ・ 温度や最深積雪等の気象データは 1981 ~ 2010 年の平年値を用いた。
- ・ ASTM 相当サイクル算出の際に用いる各係数は、係数 C については養生時の温度を「30 乾燥」、係数 F については操作台端部や擁壁では滞水は生じないため「気中凍結水中融解」、係数 S は「水平・南面」を用いた。
- ・ 前項に示すとおり、 Ra_{90} は凍結最低温度から求められるが、既存の研究から Ra_{90} は地域係数と相関がある⁶² ことが分かっているため、 Ra_{90} は地域係数から簡易的に求めることができる。そこで、この計算例では、温湿度センサーのデータから求めた Ra_{90} と地域係数を用いて得られた部位毎の回帰式を用いて、計算を行う。なお、地域係数は以下のようにして求められる。

$$T = -t_{amin} \left(1 - \left[\frac{D_f}{D_w} \right] \right) \quad (1)$$

ここに、 T は地域係数、 t_{amin} は日最低気温の年間極値()、 D_f は凍結持続日数(日)、 D_w は凍結融解総日数(日)

(1) 地域係数の算出

- 1 で凍結、0 で融解すると仮定し、平年値データ(表 5.2)を用いて、以下のように求める。

日最低気温の年間極値：-7.5

凍結持続日数：38 日(最高気温が 0 を下回っている日数)

凍結融解総日数：120 日(最低気温が -1 を下回っている日数)

地域係数

$$T = t_{amin} \left(1 - \left[\frac{D_f}{D_w} \right] \right) = -(7.5) \left(1 - \left[\frac{38}{120} \right] \right) = 5.1$$

(2) Ra_{90} の算出

以下に示す部位毎の回帰式を用いて、 Ra_{90} の算出を行う。

1) 操作台

$$Ra_{90} = 6.37 \times \text{地域係数} - 0.82 = 6.37 \times 5.1 - 0.82 = 31.67$$

2) 擁壁(南面)

$$Ra_{90} = 1.78 \times \text{地域係数} - 0.30 = 1.78 \times 5.1 - 0.30 = 8.78$$

表 5.2 1981～2010年の札幌の平年値⁶⁶

	最高気温()					最低気温()				
	11月	12月	1月	2月	3月	11月	12月	1月	2月	3月
1日	12.6	4.6	0.5	-0.9	1.6	4.4	-1.7	-5.8	-7.4	-5.2
2日	12.4	4.4	0.4	-0.9	1.7	4.2	-1.8	-5.9	-7.4	-5.1
3日	12.1	4.2	0.3	-0.8	1.8	4	-2	-6	-7.4	-5.1
4日	11.9	4	0.2	-0.7	1.9	3.8	-2.2	-6.1	-7.3	-5
5日	11.6	3.8	0.1	-0.6	2	3.6	-2.4	-6.3	-7.2	-4.9
6日	11.4	3.6	0.1	-0.6	2.2	3.4	-2.6	-6.4	-7.2	-4.8
7日	11.1	3.4	0	-0.5	2.3	3.2	-2.8	-6.5	-7.1	-4.7
8日	10.7	3.1	-0.1	-0.4	2.4	3	-3	-6.6	-7	-4.5
9日	10.4	2.9	-0.2	-0.3	2.6	2.7	-3.2	-6.7	-7	-4.3
10日	10	2.7	-0.2	-0.3	2.8	2.5	-3.4	-6.8	-6.9	-4.1
11日	9.7	2.5	-0.3	-0.2	3	2.2	-3.6	-6.8	-6.8	-3.9
12日	9.3	2.3	-0.4	-0.2	3.2	2	-3.8	-6.9	-6.8	-3.7
13日	9	2.1	-0.5	-0.1	3.4	1.7	-4	-7	-6.7	-3.4
14日	8.6	1.9	-0.5	-0.1	3.6	1.5	-4.2	-7	-6.7	-3.2
15日	8.3	1.7	-0.6	0	3.8	1.3	-4.4	-7.1	-6.6	-2.9
16日	8	1.6	-0.7	0.1	4	1.1	-4.5	-7.1	-6.6	-2.7
17日	7.8	1.5	-0.7	0.2	4.2	0.9	-4.6	-7.2	-6.5	-2.5
18日	7.5	1.4	-0.8	0.3	4.4	0.7	-4.7	-7.2	-6.5	-2.3
19日	7.3	1.3	-0.9	0.4	4.6	0.5	-4.8	-7.3	-6.4	-2.1
20日	7.1	1.3	-0.9	0.5	4.8	0.3	-4.9	-7.3	-6.3	-1.9
21日	6.8	1.2	-0.9	0.6	5	0.1	-4.9	-7.3	-6.2	-1.8
22日	6.6	1.2	-1	0.8	5.2	0	-5	-7.4	-6.1	-1.6
23日	6.4	1.2	-1	0.9	5.3	-0.2	-5	-7.4	-5.9	-1.5
24日	6.2	1.1	-1	1	5.5	-0.4	-5.1	-7.4	-5.8	-1.4
25日	6	1.1	-1.1	1.2	5.7	-0.6	-5.1	-7.5	-5.7	-1.2
26日	5.7	1	-1.1	1.3	5.9	-0.7	-5.2	-7.5	-5.6	-1.1
27日	5.5	0.9	-1.1	1.4	6.2	-0.9	-5.3	-7.5	-5.4	-0.9
28日	5.3	0.8	-1.1	1.5	6.4	-1.1	-5.4	-7.5	-5.3	-0.8
29日	5	0.8	-1	1.6	6.7	-1.3	-5.5	-7.5	-5.2	-0.6
30日	4.8	0.7	-1		7	-1.5	-5.6	-7.5		-0.3
31日		0.6	-1		7.3		-5.7	-7.5		-0.1

(3)ASTM 相当サイクル算出

1) 操作台

30 気中 水平・南

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc90} &= C \times F \times S \times p \times Ra_{90} \\ &= 0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.0 \times 31.67 \\ &= 1.35 \text{ 回 / 年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc60} &= C \times F \times S \times p \times Ra_{90} \\ &= 0.45 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 31.67 \\ &= 7.79 \text{ 回 / 年} \end{aligned}$$

2) 擁壁(南面)

30 気中 水平・南

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc90} &= C \times F \times S \times p \times Ra_{90} \\ &= 0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.0 \times 8.78 \\ &= 0.37 \text{ 回 / 年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc60} &= C \times F \times S \times p \times Ra_{90} \\ &= 0.45 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 8.78 \\ &= 2.16 \text{ 回 / 年} \end{aligned}$$

⁶⁶ 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

室内促進試験の結果とこれらの結果から相対動弾性係数が90%および90%から60%に達する年数を算出すると、以下ようになる。

1) 操作台

$$X_{90} = 3.4 / 1.35 = 2.52 \text{ 年}$$

$$X_{60} = (13.8 - 3.4) / 7.79 = 1.34 \text{ 年}$$

2) 擁壁(南面)

$$X_{90} = 3.4 / 0.37 = 9.19 \text{ 年}$$

$$X_{60} = (13.8 - 3.4) / 2.16 = 4.81 \text{ 年}$$

よって、1年当たりの相対動弾性係数(RDM)の低下量は以下ようになる。

1) 操作台

$$\Delta RDM_{ASTM} = (100 - 90) / 2.52 = 3.97\% / \text{年} (RDM > 90)$$

$$\Delta RDM_{ASTM} = (90 - 60) / (1.34) = 22.39\% / \text{年} (RDM = 90)$$

2) 擁壁(南面)

$$\Delta RDM_{ASTM} = (100 - 90) / 9.19 = 1.09\% / \text{年} (RDM > 90)$$

$$\Delta RDM_{ASTM} = (90 - 60) / (4.81) = 6.24\% / \text{年} (RDM = 90)$$

(4)水分条件補正係数の算出

平均値データの「最深積雪」(札幌は100)を用いて、水分条件補正係数の算出を行う。

1) 操作台

$$\alpha = 0.0025 \times \text{最深積雪} + 0.0487 = 0.0025 \times 100 + 0.0487 = 0.2987 (RDM > 90)$$

$$\alpha = 0.0004 \times \text{最深積雪} + 0.0086 = 0.0004 \times 100 + 0.0086 = 0.0486 (RDM = 90)$$

2) 擁壁(南面)

$$\alpha = 0.4254 (RDM > 90)$$

$$\alpha = 0.0751 (RDM = 90)$$

水分条件補正係数を用いて、補正を行った1年当たりの相対動弾性係数(RDM)の低下量は以下ようになる。

1) 操作台

$$\Delta RDM_{ACT} = \alpha \times \Delta RDM_{ASTM} = 0.2987 \times 3.97 = 1.19\% / \text{年} (RDM > 90)$$

$$\Delta RDM_{ACT} = \alpha \times \Delta RDM_{ASTM} = 0.0486 \times 22.39 = 1.09\% / \text{年} (RDM = 90)$$

2) 擁壁(南面)

$$\Delta RDM_{ACT} = \alpha \times \Delta RDM_{ASTM} = 0.4254 \times 1.09 = 0.46\% / \text{年} (RDM > 90)$$

$$\Delta RDM_{ACT} = \alpha \times \Delta RDM_{ASTM} = 0.0751 \times 6.24 = 0.47\% / \text{年} (RDM = 90)$$

(5)劣化予測式の算出

上記のようにして求めた低下量のうち、安全側の予測とするため、数値の大きいものを採用すると、各部位の劣化予測式は以下ようになる。

1) 操作台

$$RDM = 100 - \Delta RDM_{ACT} \times t = 100 - 1.19 \times t$$

2) 擁壁(南面)

$$RDM = 100 - \Delta RDM_{ACT} \times t = 100 - 0.47 \times t$$

5-2 凍害と塩害との複合劣化予測および耐久性設計

5-2-1 凍害と塩害の複合劣化（スケーリング）予測

（スケーリング予測式）

凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングは，ひび割れの進展が主な一般の凍害とは劣化形態が異なるため，凍害の劣化予測手法をそのまま用いることはできない．寒地土木研究所の成果⁶⁵より，長期的なスケーリングの進行性は，指数関数である式 5.2 を用いることで，評価できることが示された．

$$D_m = pe^{q \log \frac{t}{A}} \quad (t=0 \text{ のときは } D_m=0 \text{ とする}) \quad \text{式 5.2}$$

ここに， D_m は剥離度(mm)， t は供用年数， A は t を無次元化させるための係数， p ， q は現場の条件によって決定される係数である．ただし，劣化抑制対策が施されている場合は，適用対象外とする．

（スケーリング予測式の算出例）

図 5.1，図 5.2 に道路橋地覆垂直面を対象としたスケーリング予測式の算出例を示す．この図では，供用から 4，5，6 年目に剥離度を測定している（剥離度は 4 年目が 1.7mm，5 年目が 1.8mm，6 年目が 2.3mm）． A を 4～6 年の平均をとって 5 とし， $\log(t/5)$ と D_m の関係をグラフ化し，指数回帰を行うと図 5.1 に示す回帰式が得られる．この回帰式から p ， q が定まり（ $p=1.95$ ， $q=1.7$ ），予測式が決定される．供用年数と剥離度の関係（図 5.2）より，実測値と求めた予測式は良く対応していることがわかる．

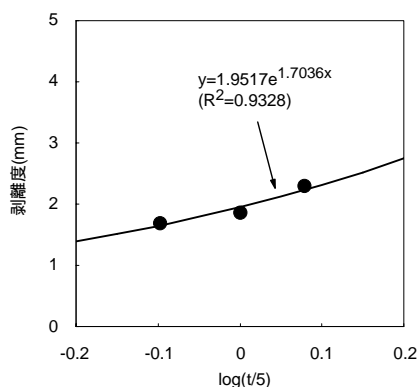


図 5.1 $\log(t/A)$ と剥離度の関係 ($A=5$)

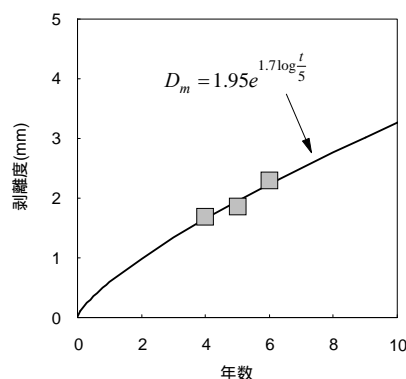


図 5.2 供用年数と剥離度の関係

5-2-2 複合劣化（スケーリング）の耐久性設計

スケーリングは、コンクリートの表層に凍結圧が蓄積されやすい品質（弾性係数が小さく、凍結圧勾配は表面側が大きく、内部で小さい状態）ほど進行しやすい（図 5.3）。例えば、弾性係数と密接な関係にある水セメント比が大きく、凍結圧勾配と密接な関係にある透水係数が小さい（図 5.4、一例として水セメント比が高く、高炉セメント B 種が用いられている場合）状態がこれに該当する。

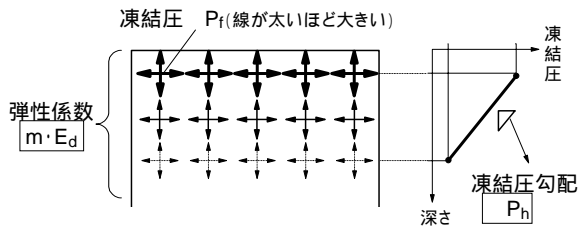


図 5.3 スケーリングの進行速度に及ぼす影響因子

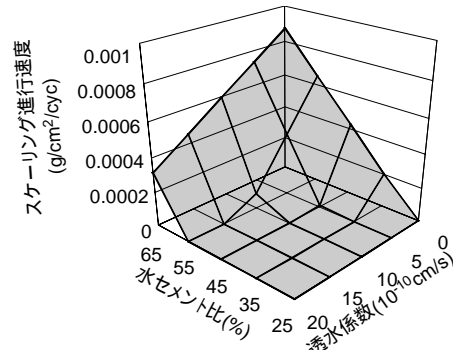


図 5.4 スケーリングの進行速度（試験水：NaCl）と水セメント比・透水係数の関係

寒地土木研究所⁶⁵では、この知見をさらに発展させ、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性の照査式として次式を提案した。

$$\omega_w = \left(\frac{W/C}{45} - 1.67 \right) \left(\frac{k}{3.5 \times 10^{-10}} + 2.31 \right)$$

（ $\omega_w - \omega_{wd} = 0$ であれば、スケーリングが大きく進行する可能性は小さい）

ここに、 ω_w はスケーリングの進行速度を表す指標値、 ω_{wd} はスケーリングの進行速度を表す指標値の設計値、 W/C はコンクリートの水セメント比(%), k はコンクリートの透水係数(cm/s)である。

スケーリングを長期に亘って極力抑える要求性能を満足するには、 ω_w が設計値 ω_{wd} を下回るよう設計するとよい。しかしながら、 ω_{wd} すなわちスケーリングの抑制が期待される ω_w に関する情報は未だ少ない。例えば、北海道の沿岸防波堤（高炉セメント B 種使用）での調査では、水セメント比が 45% 以下になるとスケーリングの進行が大きく抑えられる傾向が確認されている（図 5.5）。ここで、 $W/C = 45$, $k = 0.6 \times 10^{-10}$ （実験により求めた値）を式に代入すると ω_w は -1.7 となり、北海道の沿岸防波堤に関しては、この値を ω_{wd} とすることができる（図 5.6）。各地域・部材毎の ω_{wd} が整備されるまでの当面の間、個々の調査データから ω_{wd} を設定し、照査を行うものとする。

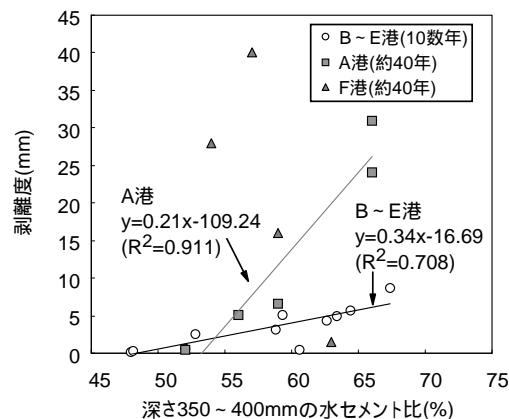


図 5.5 水セメント比と剥離度の関係の例（北海道内の沿岸防波堤）

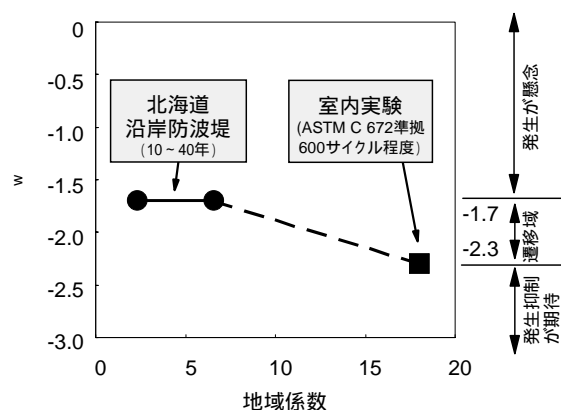


図 5.6 スケーリング抑制が期待される w の例（室内実験の $w = -2.3$ は、600 サイクルにおけるスケーリング最大深さの許容上限を 2.5mm と仮定した場合の値）

参考資料6 凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学的性能

6-1 凍害劣化を受けたコンクリート部材の材料および部材特性の変化

ここでは、凍結融解作用を与えた RC はり部材の静的載荷実験によって得られた、コンクリート部材の材料劣化と力学性能の関係⁶⁵について解説する。

(1) 試験概要

供試体は、凍結融解作用を与える範囲が異なる 2 体の供試体 (A および B 供試体) を対象とし、供試体寸法は、いずれも $200 \times 250 \times 1600\text{mm}$ とし、主鉄筋径は D13 とした。供試体の形状寸法、配筋状況および計測機器の配置を図 6.1 に示す。

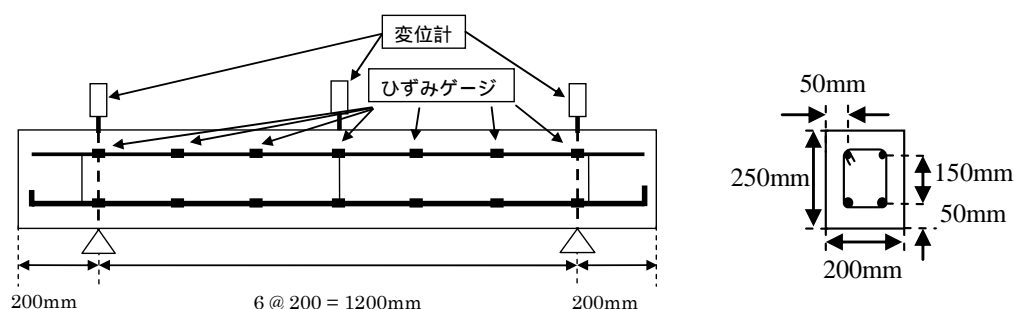


図 6.1 供試体の形状寸法および配筋状況

凍結融解試験に関して、各供試体の水分供給条件は図 6.2 に示す通り、水分の供給を防ぐ範囲にエポキシ樹脂を用いて防水加工を施すことで区別するものとした。よって、A 供試体は引張側面全体、B 供試体は引張側面の中央部のコンクリート表面を露出させた状態としている。一方、温度条件については、ASTM C666 B 法に準拠して気中凍結水中融解とし、最低温度を -18°C 、最高温度を 5°C とし、1 サイクル約 14 時間の凍結融解作用を 430 サイクル与えるものとした。

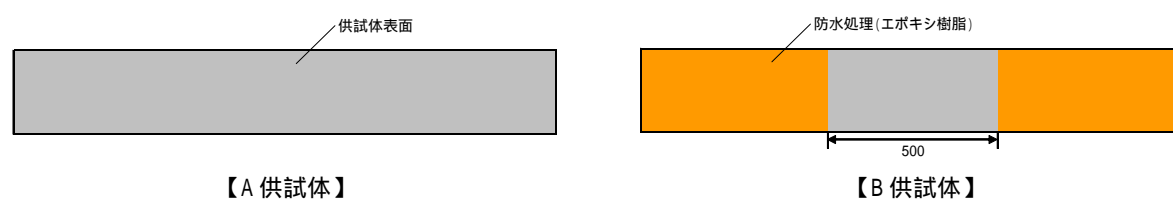


図 6.2 水分供給条件 (供試体下面)

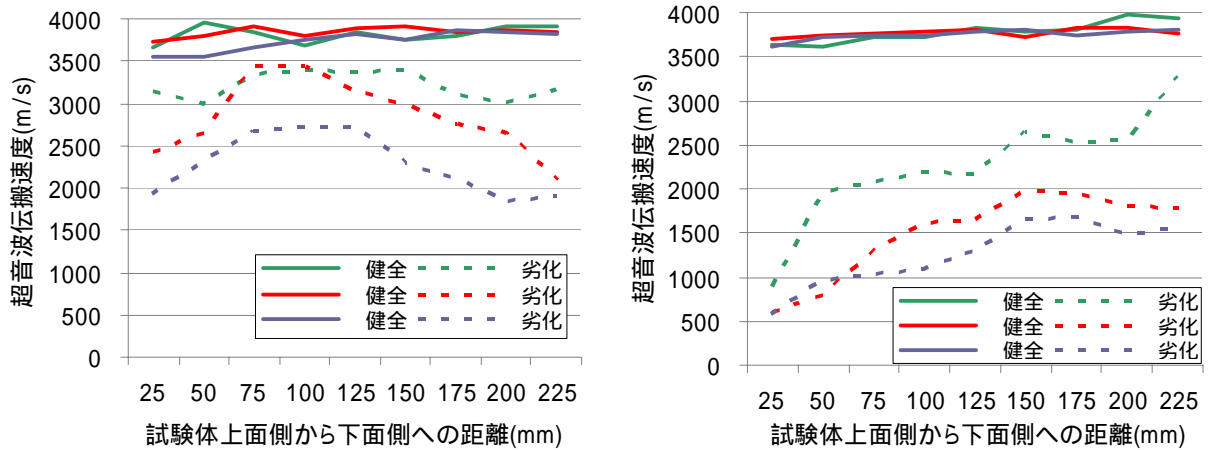
静的載荷実験に関して、単純支持した供試体の中央部 1 点を載荷する方法を採用した。変位計は、支点上および中央点の 3 点に設置し、支点間の主鉄筋には 20cm 間隔でひずみゲージを設置している (図 6.1 参照)。なお、測定項目は荷重、変位および主鉄筋ひずみとした。

(2) 超音波伝播速度測定

凍害劣化の範囲および程度を把握するために、供試体中央位置、中央から 300mm の位置、支点位置の断面において、透過法により超音波伝播速度測定を 25mm 間隔で行った。測定結果を図 6.3 に示す。

これより、A および B 供試体ともに、健全時の超音波伝播速度は 3,500~4,000m/s となった。一方、凍結融解試験後（劣化後）において、A 供試体は供試体上下端の超音波伝播速度が低下しているのに対して、B 供試体は 500~2,000m/s と A 供試体に比べて著しく低い結果が得られた。

また、凍結融解後の B 供試体を観察すると、上面側がスケーリングによって著しく断面欠損したことから、上記の結果と対応していることが伺える。



【A 供試体（凍害劣化程度：小）】

【B 供試体（凍害劣化程度：大）】

図 6.3 超音波伝播速度測定結果

(3) 静的載荷実験結果

図 6.4 に、実験によって得られた載荷点位置の荷重 - 変位関係を示している。図中には、既往の研究⁶⁷ で実施済みである凍結融解作用を受けていない N 供試体の結果も併せて示している。これより、N 供試体の最大荷重が 70.8kN であるのに対して、B 供試体の最大荷重は 50.6kN であったことから、凍結融解作用により約 3 割程度耐荷力が低下したことがわかる。一方、A 供試体は N 供試体よりも最大荷重が 74.7kN と大きくなった。

ひび割れが発生した挙動について、N 供試体は供試体下面側から上面側に伸びる曲げひび割れが発生し、載荷点付近のコンクリートの圧壊により破壊に至った。A 供試体は、変位 5mm 付近までは曲げひび割れが発生し、ひび割れ本数も増加した。剛性勾配が低下した変位 5mm 以降は新たな曲げひび割れは発生せず、変位の増加に対応して既存のひび割れの幅が拡がり、せん断ひび割れによって終局に至った。B 供試体は 50kN 付近まで荷重が増加すると載荷点から支点部の間に斜めにせん断ひび割れが発生し、55kN 直前でせん断ひび割れが大きく開口し終局に至った。

以上のように、凍結融解作用を受けることで破壊形態が曲げ破壊型からせん断破壊型に移行した。これは、凍結融解作用によって圧縮側のコンクリートのせん断耐力が大きく減少したためと考えられる。特に、せん断補強筋を用いていない本供試体のせん断耐力は、そのほとんどをコンクリートが分担しているため、せん断耐力への影響が大きかったものと推察される。

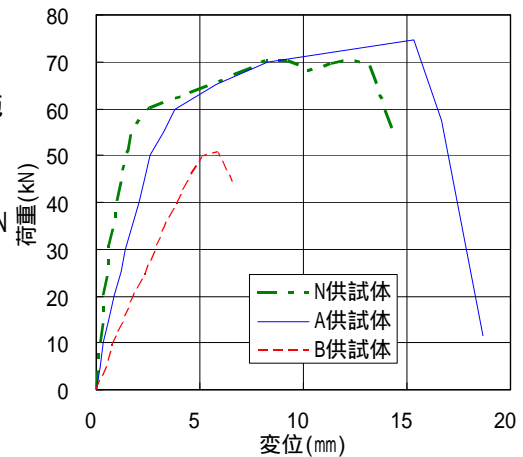


図 6.4 荷重 - 変位関係

⁶⁷ 林田宏, 佐藤靖彦, 上田多門, 針谷龍史, 田口史雄: 凍結融解作用を受けた RC はり部材の構造性能に関する研究, 第 9 回, コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム, 2009.10

図 6.5 には、各荷重段階におけるひずみ分布を示している。これより、N 供試体は荷重の増加に対応して中央部のひずみが突出して増加しているのに対し、A および B 供試体は荷重の増加に対して、ひずみが分散して増加していることがわかる。よって、A および B 供試体のコンクリートと鉄筋の付着力は、N 供試体に比べて大きく低下しているものと考えられる。

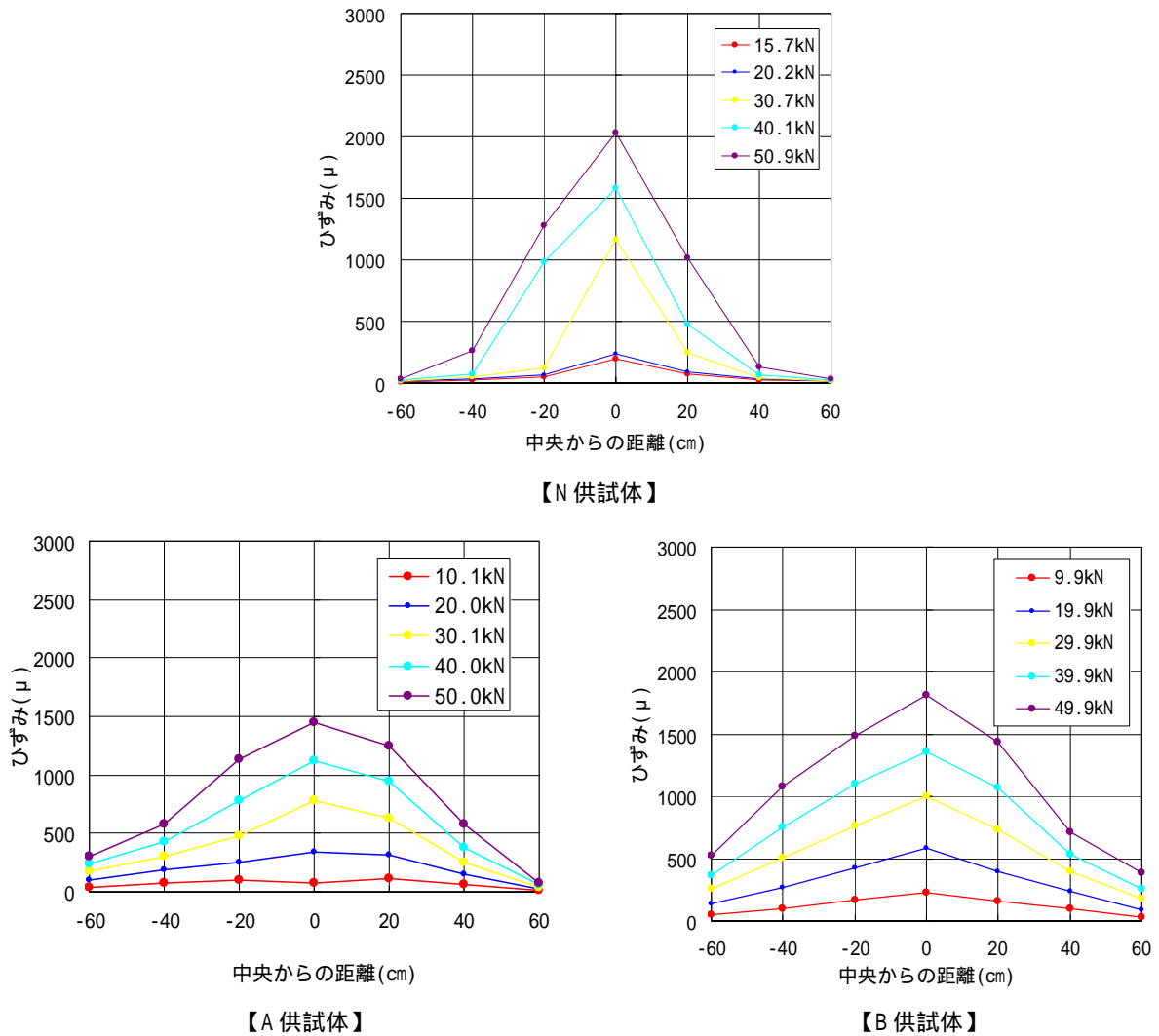


図 6.5 各荷重段階におけるひずみ分布

(4) 凍害劣化を受けたコンクリート部材の材料および部材特性の変化

RC 梁部材に凍結融解作用を与えて静的載荷実験を行った結果を整理すると、以下の通りである。

- ・ 曲げ破壊型の RC 梁に凍結融解作用を与えることでせん断耐力が低下し、せん断破壊型へと移行し、劣化程度が大きい供試体は最大荷重も低下した。これは、本供試体においては、圧縮側のコンクリートも大きく劣化したことによるものと考えられる。
- ・ A 供試体に見られた変形性能（構造性能）の向上は、タイドアーチ機構が形成したためであり、結果的に耐荷力も若干大きくなったものと考えられる。
- ・ 凍結融解を受けた供試体の鉄筋の付着力は、荷重の増加に対し、ひずみが分散して増加していることなどから、凍結融解を受けていない供試体に比べて大きく低下しているものと考えられる。

6-2 凍害劣化を受けたコンクリート部材の部材特性解析

ここでは、前節 6-1 に示した凍結融解作用を与えたコンクリート梁部材の静的載荷実験を対象に実施した FEM 解析⁶⁵ について解説する。

(1) 解析対象

解析対象は、表 6.1 の通り、凍結融解作用を与えていない健全な供試体 1 体 (N 供試体) と、凍害劣化程度の異なる 2 体の供試体 (A および B 供試体) の計 3 体を対象とした。供試体の形状寸法および配筋状況は、図 6.1 を参照のこと。

表 6.1 解析対象一覧

No.	凍害劣化程度	相対動弾性係数 (%)	実測耐荷力 (kN)
N	なし	-	70.8
A	小	24 ~ 87% (平均 56%)	74.7
B	大	3 ~ 69% (平均 22%)	50.6

(2) 解析モデル

解析には、市販されている 2 次元非線形有限要素解析プログラムを使用した。有限要素タイプは 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素を用い、モデル化の範囲は圧縮強度や凍結融解作用のバラツキを考慮するために全スパンとした。また、スケーリングによる断面欠損が見られた B 供試体に関しては、この欠損領域を考慮した梁高区間をモデル化した。図 6.6 に、要素分割図の一例 (B 供試体) を示す。

解析手法には、RC 要素 (鉄筋コンクリート要素) として材料非線形性を考慮した分散ひび割れモデルを適用した。凍害によるコンクリート圧縮強度の低下は、各要素において圧縮強度を個別に設定することで反映した。また、凍害によるコンクリートと鉄筋の付着力低下については、付着パラメータ C (引張硬化 / 軟化係数) によってコンクリートの引張軟化程度を変化させることにより考慮した。鉄筋のモデル化は、各 RC 要素の要素断面積に対する鉄筋比という形で考慮した。

載荷板および支持板のモデル化に関しては、実験時に塑性化を伴うような変形が確認されていないことから、いずれも弾性体要素とした。また、載荷荷重はスパン中央部に鉛直方向強制変位を与え、境界条件は載荷点および支点部に対しては応力集中による局所的な要素の破壊を回避するために、実験時と同様にこれらをモデル化して要素中心部節点の鉛直方向変位成分を拘束した。

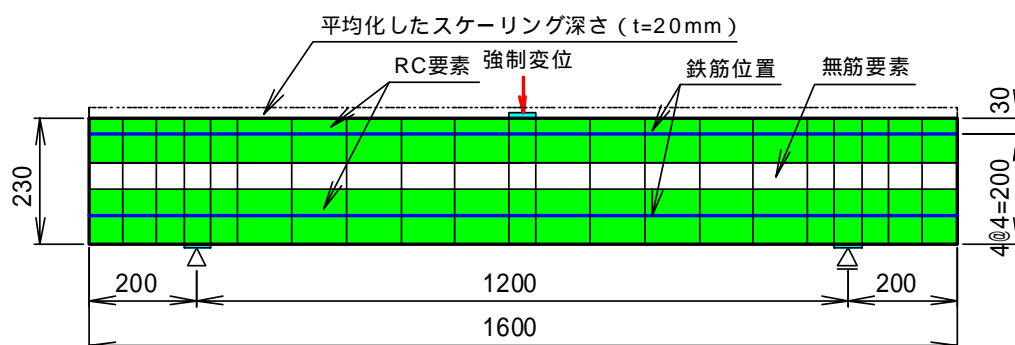


図 6.6 要素分割図の一例 (B 供試体)

(3) 材料物性値

ここで、供試体のコンクリートの圧縮強度は、健全な N 供試体を対象として、載荷実験後に小径コアを採取して実施した圧縮強度試験から求めた。なお、コアは供試体側面の上面側から下面側方向に 6 本採取した。

一方、既往の研究⁶⁸によると、凍害劣化を受けたコンクリートでは、下式に示すように、相対動弾性係数で 10%の低下に対して圧縮強度が約 7%低下することが示されている。

$$R_c = 0.0071 (DM \cdot 100) + 1$$

ここで、 R_c は凍結融解前後における圧縮強度比(%)
 DM は相対動弾性係数(%)

以上のことから、解析におけるコンクリート圧縮強度については、各要素において個別に設定し、N 供試体については小径コアによる高さ方向毎の実測値を、A および B 供試体については N 供試体の実測値を上式の凍害劣化程度に応じて低減した値を、それぞれ設定するものとした。図 6.7 に、設定した圧縮強度分布の一例 (B 供試体) を示す。

コンクリートの引張強度に関しては、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁹に基づいて圧縮強度より推定した。ただし、実際には乾燥収縮等による初期応力の影響によって土木学会式で算定される引張強度よりも小さい可能性がある⁷⁰ため、コンクリートの引張強度が解析結果に与える影響についての検討も行った。

鉄筋の降伏強度に関しては、過去に実施した同種の鉄筋の引張試験結果の経験値として 380 N/mm² を用いた。また、鉄筋の弾性係数は一般的な値である 2.0×10^5 N/mm² とした。

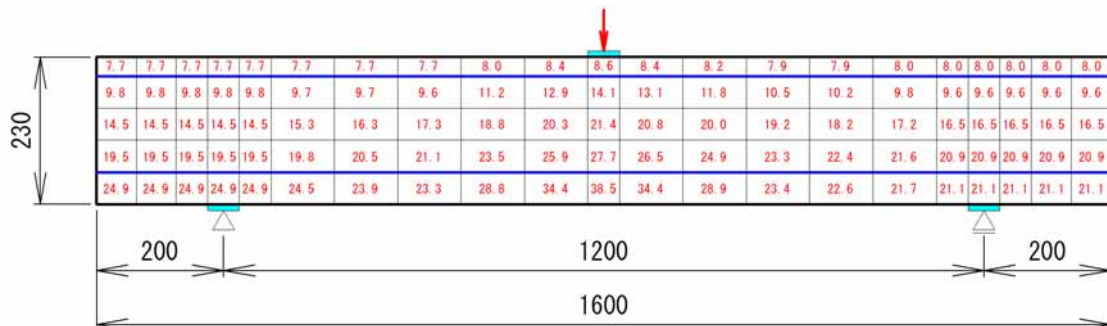


図 6.7 供試体のコンクリート圧縮強度分布の一例 (B 供試体)

(4) 解析ケース

本解析で実施した解析ケースの一覧を表 6.2 に示す。解析パラメータは、コンクリート引張強度、引張軟化曲線における付着パラメータ C の 2 種類である。

表 6.2 解析ケース一覧

Case	凍害劣化	引張強度	付着パラメータ
N1	なし (N 供試体)	示方書値 × 1.0	C=0.4 (異形鉄筋の標準値)
N2		示方書値 × 0.7	
N3		示方書値 × 0.5	
A1	小 (A 供試体)	示方書値 × 0.5	C=0.4
A2			C=1.0
A3			C=2.0
B1	大 (B 供試体)	示方書値 × 0.5	C=0.4
B2			C=1.0
B3			C=2.0

⁶⁸ 桂修：凍害による材料特性の予測手法，凍害の予測と耐久性設計の現状，日本コンクリート工学協会北海道支部，pp.21-25，2006.6

⁶⁹ 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p34-37，2008.3

⁷⁰ 前川宏一 福浦尚之：多方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材・構造挙動からの検証，土木学会論文集 No.634/-45，pp.209-225，1999.11

(5) 解析結果：初期応力による引張強度低下の影響

本解析では、N 供試体を対象に引張強度の低減率の検討を行った。引張強度の低減率を 1.0 倍、0.7 倍、0.5 倍とした場合の解析結果を図 6.8 に示す。

これより、解析によるひび割れ発生荷重や降伏までの剛性等から総合的に判断すると、引張強度の低減率を 0.5 倍とした解析 Case N3 が最も良く実験値と整合する。そのため、以降の劣化させた供試体の解析検討では、Case N3 と同様の低減率を用いて解析を行う。

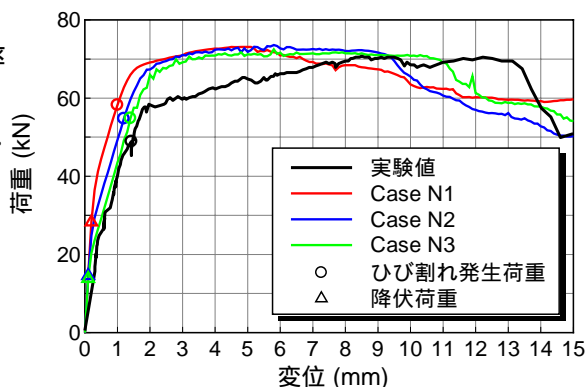


図 6.8 解析結果：荷重 - 変位関係 (N 供試体)

(6) 解析結果：凍害劣化による付着力低下の影響

前節において、凍結融解を受けた供試体の鉄筋の付着力は大きく低下することを確認した。そこで、凍害による鉄筋の付着劣化が RC 構造物の力学性能に及ぼす影響を確認するため、付着パラメータ C (引張硬化 / 軟化係数) をパラメータとして、その影響を検討した。

A および B 供試体を対象に行った解析の結果を図 6.9 に示す。最大荷重を見ると、A 供試体では若干低いものの概ね一致しており、B 供試体では概ね一致している。そのため、最大荷重については、凍害劣化の大小に関わらず FEM 解析によって推定できていると考えられる。一方、荷重 - 変位関係における剛性や、最大荷重時の変位は、A, B 供試体ともに、ほとんど一致していない。また、付着パラメータ C を大きくしても、解析結果に与える影響は微小であった。

解析結果の変位量が小さくなっている原因として、解析で与えたコンクリートの弾性係数が実際よりも大きい可能性が挙げられる。一般に、凍害劣化を受けたコンクリートでは、圧縮強度の低下率よりも弾性係数の低下率の方が大きくなる。しかし、本解析では健全なコンクリートを想定した応力 - ひずみ関係を材料構成則として用いたため、凍害劣化による弾性係数の変化が反映されていない。その結果、解析による荷重 - 変位関係が実験値と整合しなかったと考えられる。

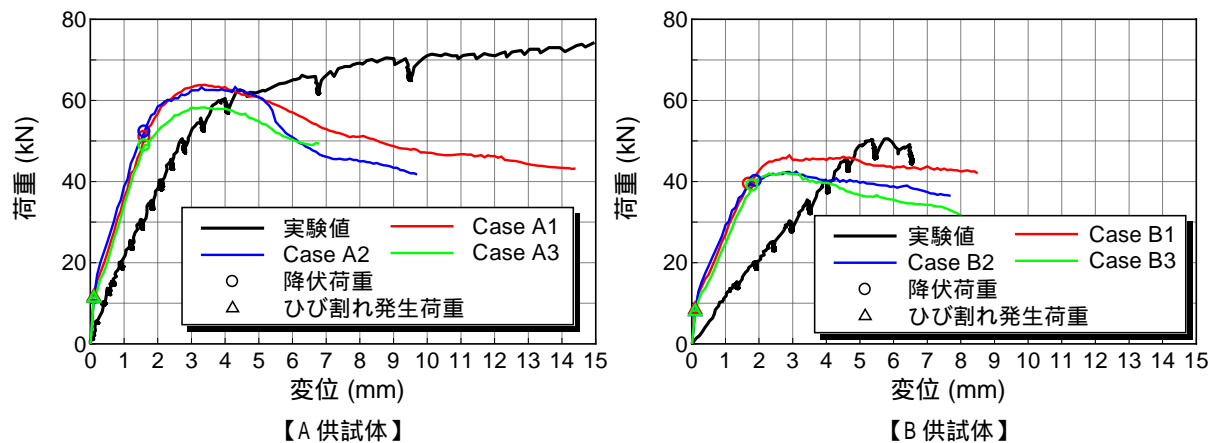


図 6.9 解析結果：荷重 - 変位関係 (A, B 供試体)

(7) 凍害劣化を受けたコンクリート部材の部材特性解析方法

凍結融解作用を与えた RC 梁部材の FEM 解析に関する検討結果から、凍害劣化を受けたコンクリート部材については、超音波伝播速度によって圧縮強度を推定した結果を用いて FEM 解析することにより、およその最大荷重を推定することが可能である。ただし、凍害劣化を受けたコンクリート部材の FEM 解析において、変位量を適切に評価するためには、弾性係数の変化について適切に評価する必要があり、今後の検討が必要である。

参考資料7 国道橋の橋梁定期点検と本手引書との関係

本手引書はコンクリート造である道路構造物を対象としている。
 国道の道路橋では別途橋梁定期点検が実施されているので、凍害が疑われる構造物では、橋梁定期点検結果を有効に活用するのが望ましい。
 また、本手引書に基づく橋梁構造物の調査結果および補修・補強工法の記録は、国道橋の場合には橋梁管理カルテに反映し、構造物の維持管理に有効に活用するのが望ましい。

【解説】

7-1 橋梁定期点検⁷¹，橋梁管理カルテ⁷²と本手引書との関係

橋梁定期点検と本手引書による凍害調査の流れ、および橋梁管理カルテと本手引書に基づく記録との関係を図 7.1 のフローに示す。

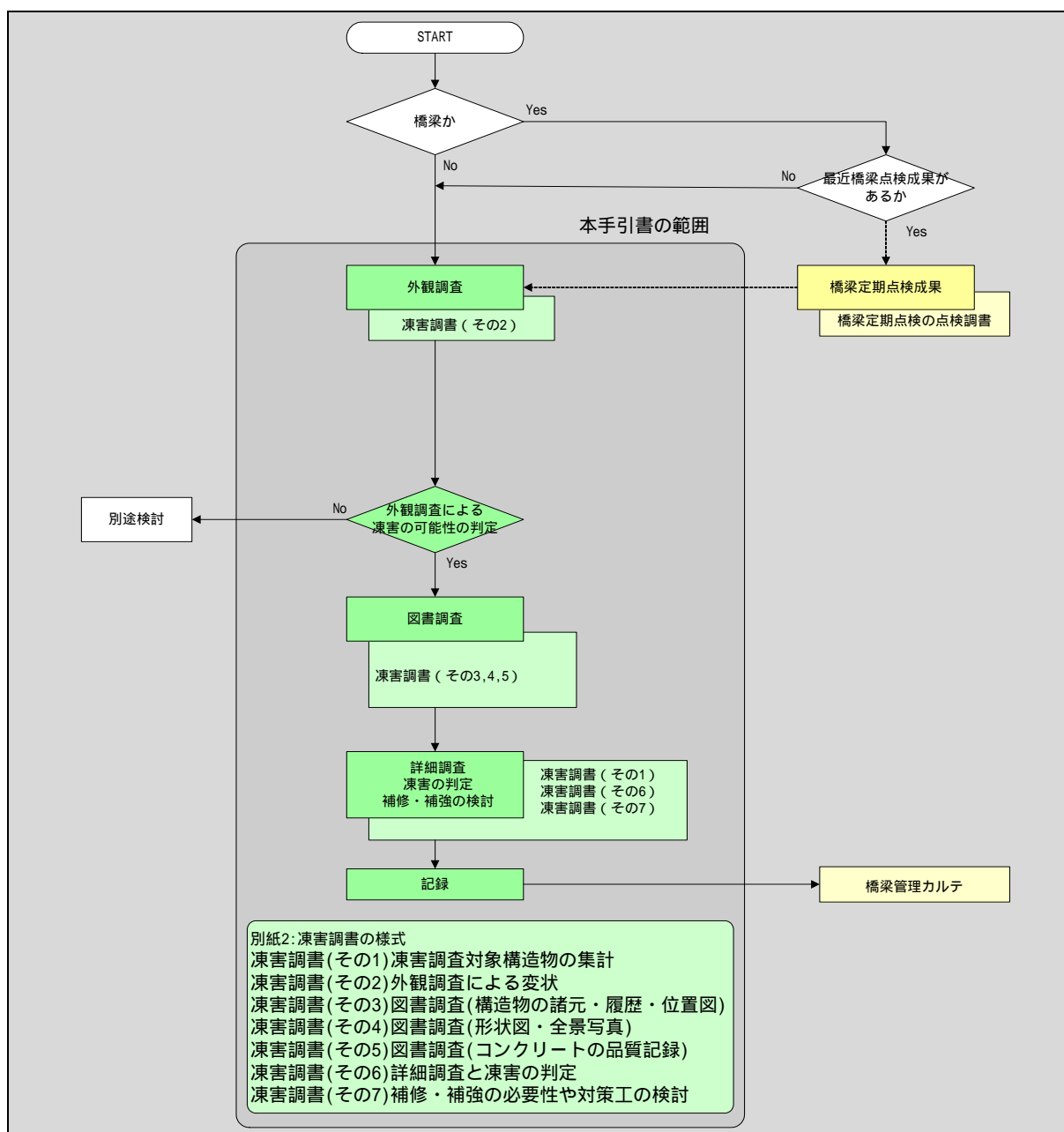


図 7.1 橋梁定期点検と本手引書との関係

⁷¹ 国土交通省道路局国道・防災課，「橋梁定期点検要領(案)平成 16 年 3 月」

⁷² 国土交通省道路局国道・防災課，「橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領(案)平成 16 年 3 月」

- 1) 橋梁以外のコンクリート造の道路構造物では、本手引書に基づき調査・判定・検討等を行う。
- 2) 外観調査を行い凍害の可能性の判定を行う。橋梁定期点検調書がある場合は損傷の進行状況等を確認する際の参考とする。
- 3) 橋梁定期点検に際しては、コンクリート造の損傷状況の把握・損傷程度の評価は、本手引書の「3章外観調査」を理解した上で行うものとし、健全度の評価においては本手引書「6章凍害劣化の予測および性能・評価」を参考とするものとする。尚、凍害が疑われる構造物がある場合においても、作成する調書は「橋梁定期点検要領(案)」による調書のみで十分である。
- 4) 橋梁定期点検の結果、凍害の疑いがあり健全度区分S（詳細調査が必要）となった場合、本手引書を参考とし調査結果を凍害調書（別紙 2:凍害調書の様式）に記録する。ただし、凍害調書(その2)(その3)(その4)は「橋梁定期点検要領(案)」の点検調書(その1)～(その6)に代えることが出来る。本手引書に基づく調査内容と作成する調書を表 7.1 に示す。

表 7.1 本凍害調査・対策手引書に基づき作成する調書の一覧

調査内容	本手引書の調書様式
調査対象構造物の凍害への対応	凍害調書(その1)ASR 調査対象構造物の集計
外観調査	凍害調書(その2)外観調査による変状
図書調査	凍害調書(その3)図書調査 (構造物の諸元・履歴・位置図)
	凍害調書(その4)図書調査 (形状図・全景写真)
	凍害調書(その5)図書調査 (コンクリートの品質記録)
詳細調査	凍害調書(その6) 詳細調査による凍害の判定
補修・補強検討	凍害調書(その7) 補修・補強の必要性や対策工の検討

7-2 参考：「橋梁定期点検要領（案）」における凍害が疑われる構造物の点検例

橋梁定期点検において作成される点検調書は、損傷状況の把握、損傷程度の評価、健全度の判定についてであり、表 7.2 の通りの様式である。

表 7.2 橋梁定期点検により作成する調書の一覧

点検内容	「橋梁定期点検要領（案）」の調書様式
損傷状況の把握	点検調書(その1)橋梁の諸元・履歴
	点検調書(その2)径間別一般図
	点検調書(その3)現地状況写真
	点検調書(その4)部材番号図
	点検調書(その5)損傷図
	点検調書(その6)損傷写真
損傷程度の評価	点検調書(その7)損傷程度の評価記入表（主要部材）
	点検調書(その8)損傷程度の評価記入表（主要部材以外）
	点検調書(その9)損傷程度の評価結果総括
健全度の判定	点検調書(その10)対策区分判定結果（主要部材）
	点検調書(その11)対策区分判定結果（主要部材以外）

コンクリートの損傷要因が凍害による損傷またはその疑いがある場合、損傷状況の把握、損傷程度の評価、健全度の判定は「橋梁定期点検要領（案）」の中では、次頁の表 7.3 の通り記述されており、点検調書の記載例と合わせて示す。

表 7.3 「橋梁定期点検要領(案)」における凍害が疑われる場合の点検例

	橋梁定期点検要領(案)の説明	凍害と疑われるひび割れがある場合の点検調査の記載例
損傷状況の把握	<p>要領(案)の損傷の種類の中では直接、凍害に関連する損傷を列記して記述はしていないが、以下の損傷が該当すると考えられる。</p> <p>6)ひび割れ 7)剥離・鉄筋露出 8)漏水・遊離石灰 9)抜け落ち 10)コンクリート補強材の損傷 11)床版ひび割れ 12)浮き 19)変色・劣化 20)漏水・滞水 22)異常なたわみ 23)変形・欠損</p>	<p>点検調査(その1)橋梁の諸元と総合診断結果 点検調査(その2)径間別一般図 点検調査(その3)現地状況写真 点検調査(その4)要素番号図及び部材番号図 点検調査(その5)損傷図 点検調査(その6)損傷写真 *以上、凍害に限らず記載される項目。</p>
損傷程度の評価	<p>部材毎、損傷毎に以下を記入。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工種 ・材料 ・部材種別, 名称 ・部材番号 ・損傷程度 (a: 損傷なし<b<c<d<e) ・損傷パターン ・材料・材質の分類 	<p>点検調査(その7)損傷程度の評価記入表(主要部材)</p> <p>工種: P(下部工, 橋脚) 材料: C(コンクリート) 部材種別, 名称: 柱部・壁部 部材種別, 記号: P w 要素番号: 0102 損傷程度: d(幅中, 間隔大) (RC 構造物ひび割れ幅 0.2mm 以上 0.3mm 未満, 間隔 0.5m 未満の場合) 損傷パターン: 下部構造 (亀甲状) 損傷の種類: ひび割れ 材料・材質の分類: --- (該当なし)</p> <p>点検調査(その8)損傷程度の評価記入(主要部材以外)</p> <p>点検調査(その9)損傷程度の評価結果総括 工種: P(下部工, 橋脚) 材料: C(コンクリート) 部材種別, 名称: 柱部・壁部 部材種別, 記号: P w 今回定期点検, 損傷の種類(程度) : ひび割れ(d)</p>
健全度の判定	<p><緊急対応必要性の判定> 判定区分 E1: 橋梁構造の安全性の観点から, 緊急対応の必要がある。 判定区分 E2: その他, 緊急対応の必要がある。 <維持工事で対応する必要性の判定> 判定区分 M: 維持工事で対応する必要がある。 <詳細調査の必要性の判定> 判定区分 S: 詳細調査の必要がある。 <補修等の必要性の判定> 判定区分 A: 損傷が認められないか, 損傷が軽微で補修を行う必要がない。 判定区分 B: 状況に応じて補修を行う必要がある。 判定区分 C: 速やかに補修等を行う必要がある。</p>	<p>点検調査(その10)対策区分判定結果(主要部材)</p> <p>工種: P(下部工, 橋脚) 材料: C(コンクリート) 部材種別, 名称: 柱部・壁部 部材種別, 記号: P w 健全度区分, 詳細調査の必要性, 区分 S の損傷: ひび割れ 診断結果, 原因, 推定: (凍害) 診断結果, 所見: 凍害によるひび割れと推定される。詳細調査により凍害の判定を行い補修の要否を検討する必要がある。 点検調査(その11)対策区分判定結果(主要部材以外)</p>

凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）

発行日：平成 17 年 3 月 初版
平成 23 年 3 月 第 1 回改訂
平成 23 年 10 月 第 2 回改訂

監修・発行：独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所
〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号
TEL：011-841-1719（寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム直通）

【ご案内】

- ・本書は、寒地土木研究所もしくは耐寒材料チームの HP からダウンロードできます。
寒地土木研究所 URL：<http://www.ceri.go.jp/>
耐寒材料チーム URL：<http://zairyu.ceri.go.jp/>
- ・本書の著作権は、寒地土木研究所にあります。なお、一部の図表は、社団法人土木学会、技報堂出版株式会社および論文の著者に著作権があり、許可を頂いて本書に転載しております。本書の内容を無断で引用・転載することはお断りいたします。
- ・本書に関するご質問等は、上記電話番号（耐寒材料チーム）へご連絡下さい。