

劣化機構編

北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針

[劣化機構編：目次]

1 章 総則	1
1.1 適用の範囲	1
2 章 凍害	2
2.1 一般	2
2.2 維持管理計画	5
2.3 点検	7
2.3.1 一般	7
2.3.2 初期点検	8
2.3.3 日常点検, 定期点検	9
2.3.4 詳細調査	14
2.4 変状原因の推定および変状の予測	17
2.5 評価および判定	20
2.6 対策	23
2.7 記録	23
3 章 中性化	25
3.1 一般	25
3.2 維持管理計画	27
3.3 点検	28
3.4 変状原因の推定および変状の予測	28
3.5 評価および判定	29
3.6 対策	30
3.7 記録	30
4 章 塩害	31
4.1 一般	31
4.2 維持管理計画	33
4.3 点検	34
4.4 変状原因の推定および変状の予測	35
4.5 評価および判定	35
4.6 対策	36
4.7 記録	36
5 章 アルカリシリカ反応	37
5.1 一般	37
5.2 維持管理計画	41
5.3 点検	42
5.4 変状原因の推定および変状の予測	42
5.5 評価および判定	42
5.6 対策	43

5.7 記録.....	44
付属資料1 凍害に対する耐久性の照査.....	45
付 1.1 一般.....	45
付 1.2 凍害によるスケーリング.....	45
付 1.3 凍害による微細ひび割れ.....	48

1章 総則

1.1 適用の範囲

劣化機構編は、積雪寒冷地において低温環境下特有の劣化作用を受けるコンクリート構造物の維持管理の原則ならびに標準的な方法を示す。

【解説】

劣化現象または劣化機構の影響を受ける土木コンクリート構造物の維持管理は、最新のコンクリート標準示方書 [維持管理編] を基本として行われる。

しかしながら、積雪寒冷地においては、低温環境下特有の凍害、あるいは凍害を中心とした複合劣化が進行している現状にある。積雪寒冷地において低温環境下特有の劣化を受けたコンクリート構造物を適切に維持管理する上で、点検における変状の把握、変状原因の推定、性能評価、対策要否の判定、対策工の検討等の一連の行為の中で凍害劣化に関する最新の研究成果を反映する必要がある。

例えば、凍害劣化に関する最新の既往成果は以下の文献が参考となる。

- ・ 日本コンクリート工学協会北海道支部：凍害の予測と耐久性設計の現状－凍害と耐久性設計研究委員会報告書－，平成 18 年 6 月
- ・ 日本コンクリート工学協会北海道支部：凍害と耐久性設計研究委員会報告書，H20 年 1 月
- ・ 日本コンクリート工学協会北海道支部：積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会，H22 年 3 月
- ・ 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手法に関する研究委員会報告書，H20 年 8 月
- ・ 土木学会コンクリート委員会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，H18 年 9 月
- ・ 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：日本コンクリート工学協会北海道支部凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案），H23 年 10 月

このため本劣化機構編では、劣化機構の内、特に凍害を中心とした最新の具体的な維持管理行為を記載する。

なお、凍害以外の劣化機構または劣化現象については、本指針の共通編、構造物編、劣化機構編、コンクリート標準示方書 [2013 年制定 維持管理編] による他、以下の基準類を参考とすることができる。

- ・ 土木学会：コンクリート標準示方書 [2012 年制定 設計編・施工編]，H25 年 3 月
- ・ 橋梁塩害対策検討委員会（北陸地方整備局）：塩害橋梁維持管理マニュアル（案），H20 年 4 月
- ・ 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 年 3 月
- ・ アルカリシリカ反応に対する対策検討委員会（近畿地方整備局）：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 年 3 月
- ・ 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たな対応－，H17 年 8 月
- ・ 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト・コンクリートの耐久性向上技術の開発，
- ・ 日本コンクリート工学協会：アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書，H 元年 7 月
- ・ 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，H11 年 11 月

2章 凍害

2.1 一般

- (1) この章は、凍害によって性能低下が生じた構造物、あるいは性能低下が生じる可能性の高い構造物の維持管理計画、診断、対策、記録について、その標準的な方法を示すものである。
- (2) この章は、維持管理区分が予防維持管理あるいは事後維持管理の構造物に適用する。

【解説】

(1) について

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結する際、体積膨張を引き起こすことにより発生する劣化である。融解時に水が供給され、凍結時に水の体積が膨張する凍結融解作用が繰り返されることで、コンクリートが徐々に劣化する。凍害を受けた構造物ではスケーリング（写一解 2.1）、微細ひび割れを含むひび割れ（写一解 2.2）、ポップアウト等が顕在化する。スケーリングと微細ひび割れを含むひび割れは、コンクリートのセメントペースト部分が劣化するものであり、ペースト部分の品質が劣る場合や適切な空気泡（エントレインドエア）が連行されていない場合に発生する。ポップアウトは骨材の品質が悪い場合に発生する。床版上面や沓座等の滞水しやすい箇所では、高い含水状態の下で凍結融解作用を受けコンクリート組織が崩壊しグスグスとなる場合がある。これはスケーリング・微細ひび割れを含むひび割れ・ポップアウトの一種と考えられるが、ここではその場に崩壊組織が高い含水状態で留まる場合を砂利化と称することとする。

凍害による劣化の程度は、配合（例えば、単位水量、水セメント比、空気量）や骨材の品質（例えば、吸水率）等のコンクリート材料に関する要因、部材の断面形状やかぶり等の構造体に関する要因、水の供給形態や日射、外気温（最低温度）、凍結融解回数等の構造物がおかれる環境に関する要因等によって決まるとされている。さらには、塩化物系の凍結防止剤の散布や海水飛沫によってコンクリートに塩化物イオンが供給される場合、スケーリングが促進されることが知られている。

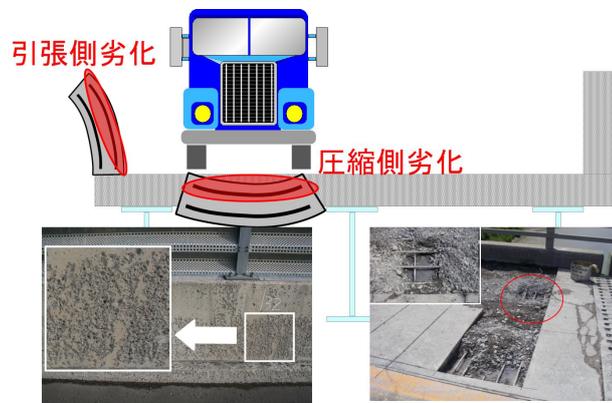
凍結融解作用によってスケーリング、微細ひび割れを含むひび割れ、ポップアウト、砂利化が生じると、構造物の美観を損ねるばかりではなく、コンクリート組織における物質移動抵抗性を低下させる。そのため、塩害や中性化が問題となる構造物では、鋼材の腐食開始時期が凍害の影響によってさらに早まる可能性があり、部材の性能低下ならびにライフサイクルコストの増加が懸念される。さらには、図一解 2.1に示すように、道路橋の壁高欄ではスケーリングにより引張側のかぶりが減少し、鉄筋の腐食が早まることにより、曲げ耐力が低下する。RC床版では床版上面の砂利化により有効版厚が減少し、押抜きせん断耐力が低下する。また、床版上面は支間で圧縮領域、支点上で引張領域となるが、圧縮領域の砂利化が進行すると曲げ耐力の低下が懸念される。



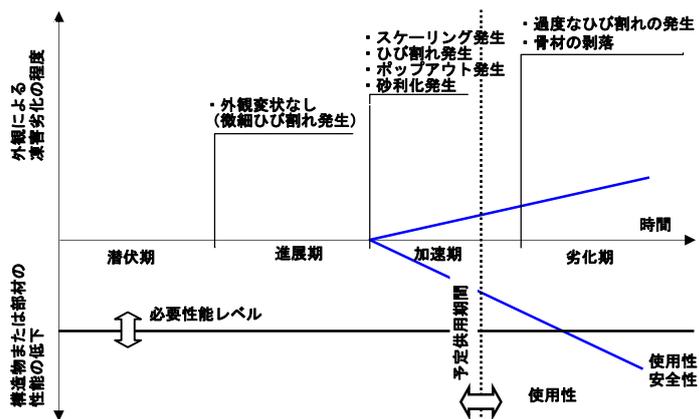
写一解 2.1 スケーリング



写一解 2.2 凍害によるひび割れ



図一解 2.1 力学性能に及ぼす凍害の影響のイメージ¹⁾



図一解 2.2 凍害による劣化進行過程の概念図

図一解 2.2 および表一解 2.1 に示すように、潜伏期は凍結融解作用によって外観上は判断できない程度の微細ひび割れが発生するまでの期間、進展期は微細ひび割れ発生から外観にて判断できるスケーリング、ひび割れ、ポップアウト、砂利化が発生するまでの期間、加速期は凍害による損傷が露見

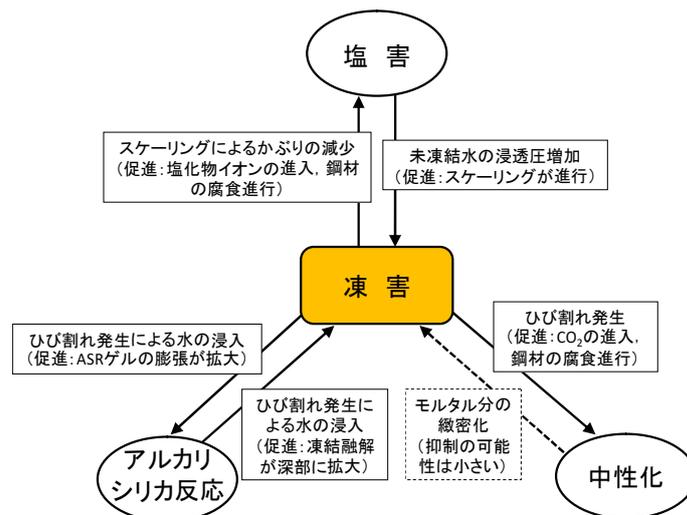
してから骨材の露出・剥離が発生するまでの期間、劣化期は骨材の露出・剥離が発生して以降、コンクリートの有効断面が減少し耐力の低下が顕著となる期間である。

凍害による劣化は、塩害あるいは中性化のように塩化物イオンや二酸化炭素といった物質が鋼材位置に達するまでの潜伏期を経て劣化（鋼材腐食）が開始する形態とは異なり、コンクリート表面から劣化が進行するため、一般に潜伏期は短くなりやすい。

凍結防止剤の散布や海水飛沫によりコンクリート中に塩化物イオンが供給される場合、凍害によるスケールが促進されることが知られているため、このような環境におかれるコンクリート構造物については凍害と塩害、あるいはその他の劣化要因との複合劣化を考慮した維持管理計画の策定、診断（点検、劣化予測、評価・判定）、対策を行う必要がある。凍害を中心とした複合劣化の関係図²⁾を図一解 2.3 に示す。

表一解 2.1 凍害劣化過程の定義

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微細ひび割れが発生するまでの期間（外観からこの期間を判断出来ない）	<ul style="list-style-type: none"> ・最低温度 ・凍結水量 ・凍結融解回数
進展期	微細ひび割れ発生から、スケール、ひび割れ、ポップアウト、砂利化が発生し、凍害損傷が顕在化するまでの期間	<ul style="list-style-type: none"> ・凍害の進行速度
加速期	凍害損傷が顕在化してから、骨材の露出・剥離が発生するまでの期間	
劣化期	骨材の露出・剥離が発生して以降、コンクリートの有効断面が減少し耐力の低下が顕著となる期間	

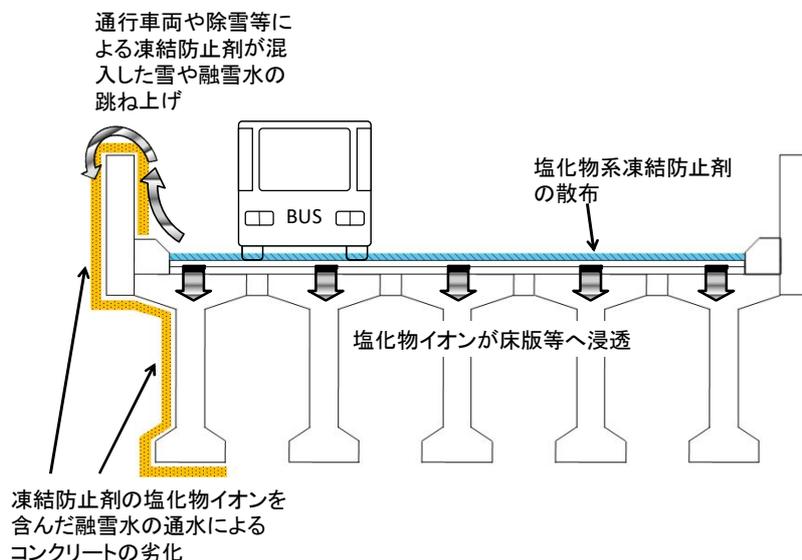


図一解 2.3 凍害を中心とした複合劣化の関係図

また、図一解 2.4 に凍結防止剤散布の影響を示すが、コンクリート床板、雨水の流下する流路や車両の跳ね上げによる飛散を受けるコンクリート表面に対して、塩化物イオンやアルカリ金属を供給することとなる。このため、塩害、アルカリ骨材反応、凍害+塩害が促進される可能性があることから留意が必要である。

(2) について

一般的に既設構造物の多くは事後維持管理に近い形で管理されているが、今後の維持管理においては、ライフサイクルコストを重視し、劣化が顕在化する前に早期の段階で対処を行う予防維持管理の構造物も増加することが予想される。例えば凍害の場合、今後新設される構造物においては、例えば水セメント比を45%以下、空気量を6%に設計する、もしくは、表面処理等の防水対策を適用するなど、予防維持管理の構造物が増加するであろう。したがって、この章は、主として予防維持管理および事後維持管理の両区分の構造物に対して適用することとする。また、観察維持管理の構造物についても、この章の基本的な考え方に沿った維持管理を可能な限り実施する必要がある。



図一解 2.4 凍結防止剤散布の影響²⁾

2.2 維持管理計画

- (1) 凍害を受ける構造物の維持管理を行う際には、構造物の重要度、構造形式、要求性能、維持管理区分、予定供用期間、ならびに水の供給状況や日射の影響、外気温、凍結融解回数等の環境条件を考慮し、あらかじめ維持管理限界を定めた上で、診断、対策、記録を含む維持管理計画を策定しなければならない。
- (2) 維持管理限界は、凍害による劣化の進行過程と、対象とする構造物に適した対策方法を考慮して設定する。

【解説】

(1) について

凍害を受ける構造物の維持管理計画の策定においては、凍害によって構造物の性能が所要の水準以下となることのないように維持管理上の限界状態となる維持管理限界を定め、構造物あるいは部位、部材ごとに点検、劣化予測、構造物の性能評価ならびに対策の要否の判定等からなる診断の方法を定め、それに見合った対策とその選定方法、および実施時期について示すことを基本とする。

コンクリート構造物の形式や規模、環境条件は千差万別である。維持管理計画は、個々の構造物に最も適したものとしなくてはならない。凍害による劣化の進行は、水の供給程度、日射の影響、外気温（最低温度）、凍結融解回数等によって大きく異なるため、これらを考慮した適切な維持管理計画とする必要がある。加えて、新設段階から表面処理等の対策を実施する場合には、対策効果の持続性を考慮に入れた維持管理が必要となる。また、供用途中で対策を講じる場合については、表面処理材料や断面修復材等の補修材料の劣化を考慮に入れた維持管理計画を策定することが重要である。

一般的には、一つの構造物に対して一つの維持管理区分を適用することになると思われるが、場合によっては、一つの構造物内でも部位あるいは部材ごとに環境条件などが異なるような場合には、それぞれで異なる維持管理区分を適用することが合理的となることもあり得る。

一方、維持管理限界については同一構造物、同一部材内であっても、異なった維持管理限界が適用される場合も多いと考えられる。たとえば同一部材内であっても剥離・剥落によって第三者に影響がおよぶ可能性は、部材上面と下面では異なるため、対象とする性能と部位、部材、位置を考慮して維持管理限界をそれぞれ定める必要がある。

また、維持管理計画策定の段階で供用期間を通じての構造物の状況をあらかじめ正確に予想することは、一般的に大きな困難が伴う。そこで、類似の構造物、もしくは類似の環境に置かれた構造物の劣化状況を参考にして、維持管理計画を策定するとよい。

なお、点検の結果や環境の変化などに応じて維持管理計画を見直すものとする。

(2) について

構造物の維持管理上の限界状態として設定される維持管理限界によって、構造物の維持管理計画は大きく変わってくるため、維持管理限界の設定はきわめて重要となる。

凍害を受けた構造物の性能低下は、材料劣化すなわち、スケーリング、微細ひび割れを含むひび割れ、ポップアウト、砂利化の進展によるコンクリートの断面減少や密実性の低下によって引き起こされる。このため、凍害を受ける構造物の維持管理限界は、凍害による劣化の進行過程を考慮し、かつ、対象とする構造物の劣化の状態に応じた対策方法と、構造物の利用状況等を踏まえた対策工の実施の容易性等を勘案した上で、適切に設定する必要がある。

維持管理限界は、構造物に要求される性能を明確にし、それを基に定めることが望ましい。しかし、凍害を受ける構造物の場合、点検時の保有性能についてはある程度の精度で評価できる場合もあるが、将来の性能の低下を予測することは、現状の技術レベルでは困難である。したがって、凍害を受ける構造物の維持管理限界の設定にあたっては、外観上の劣化の程度を指標とすることが合理的となる場合が多い。

一般には、できるだけ早い段階で、すなわち潜伏期・進展期の段階を維持管理限界として対策を実施することが望ましい。加速期・劣化期の段階を維持管理限界とした場合、対策に要する費用が大きくなることが知られている。

2.3 点検

2.3.1 一般

凍害を受ける構造物の点検にあたっては、標準調査の項目と方法、頻度および範囲を適切に定めなければならない。また、必要に応じて詳細調査を実施するものとする。

【解 説】

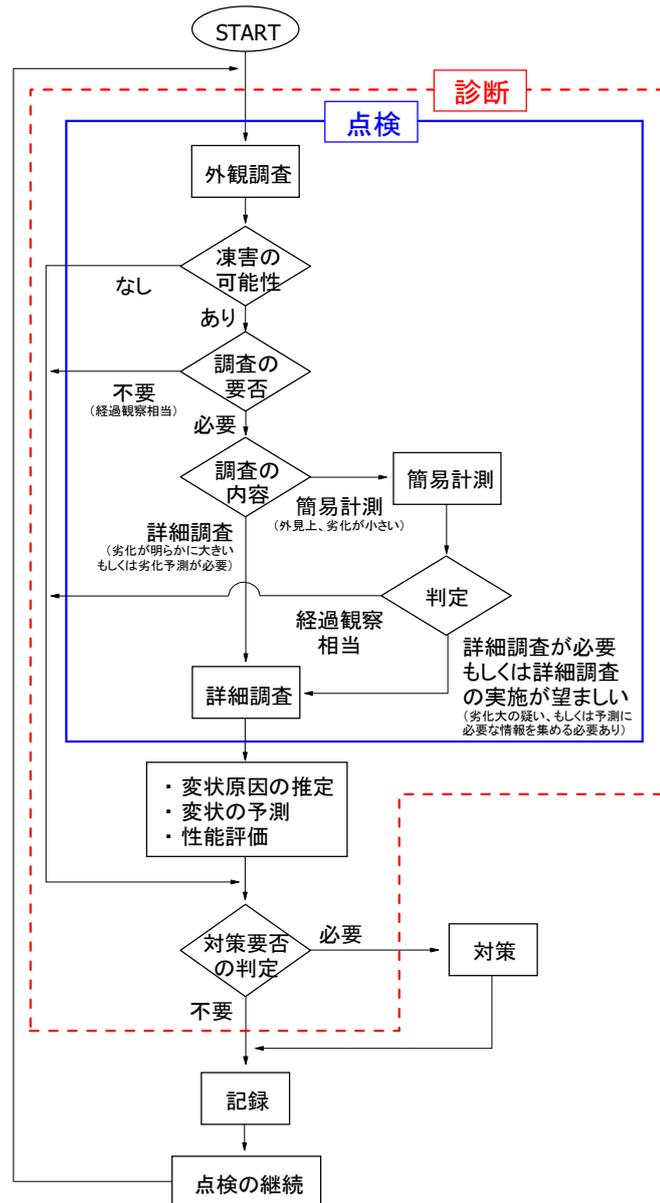
凍害を受ける構造物において、点検により明らかにすべき事項は、外観や内部の変状、含水状態、日射や気温、水分供給等の環境条件、凍結防止剤の散布状況等である。また、劣化がかなり進行している場合には、構造物の性能を直接評価するための点検を実施する必要がある。なお、凍結防止剤については、定量化はされていないもののスケーリングを促進するといわれています。また、微細ひび割れについては凍結防止剤との相関が見られないとの報告もあります。

凍害は、多量の水分が供給され、かつ日射を受ける箇所に生じやすい。また凍結防止剤の散布による影響も考慮すべきである。このため、構造物全体に対して点検を行うことは当然であるが、このような箇所を重点的に点検することが望ましい。劣化予測に関連する劣化の状態や環境に関するデータは、できる限り初期の段階で収集するのが望ましい。

標準調査では構造物の状態を適切に判断できない場合には、詳細調査を実施するのがよい。

点検の結果、凍害によって性能低下が生じた構造物あるいは性能低下が生じる可能性の高い構造物では、変状原因の推定、変状の予測、性能の評価および対策要否の判定を行う流れとなる。

図一解 2.5に示すフローに基づいて、実績をふまえながら維持管理期間中に定期的に診断を行えば、構造物の外観上の変状を予測または早期に発見することが可能となる。また、予防的な対応も含め、補修等の対策を計画的に実施することもできる。



図一解 2.5 凍害が疑われるコンクリートの点検及び診断のフロー

2.3.2 初期点検

- (1) 初期点検では、新設構造物、既設構造物、大規模な補修、補強後の構造物にそれぞれ適した標準調査の項目を選択する必要がある。
- (2) 標準調査で劣化予測、評価および判定が困難な場合には、詳細調査を実施する。

【解説】

(1) について

凍害の影響を受ける構造物に対する初期点検における調査項目を表一解 2.2 に示す。

表一解 2.2 初期点検（凍害）の調査目的，項目の例

調査目的	調査項目
凍害発生の予測 (配合記録と合わせて)	骨材の品質（吸水率，安定性損失質量） コンクリートの配合 フレッシュコンクリートの空気量
劣化の進行予測	硬化コンクリートの気泡間隔係数 コンクリートの含水状態 最低温度 凍結融解回数 水分供給 凍結防止剤の散布
鋼材腐食の開始時期	かぶり
耐久性	初期欠陥

2.3.3 日常点検，定期点検

- (1) 日常点検，定期点検では，スケーリング，微細ひび割れ，ポップアウト等のコンクリート表面の変状や水の供給状況（コンクリートの濡れ具合）等，外観上の変化の確認等を基本とする標準調査を実施する。
- (2) 標準調査で劣化予測，評価および判定が困難な場合には，定期点検の繰り上げもしくは詳細調査を実施する。

【解 説】

(1) について

定期点検は，日常点検よりも詳細な情報を得ることを目的に行う。特に，初期点検や日常点検において異常や劣化の兆候が認められた箇所については重点的に点検を行うことが必要である。凍害は，コンクリート中の水分が凍結する冬季に進行するため，定期点検において劣化の進行を精度よく把握するためには，進行が止まっている時期に定期点検を行うことが望ましい。

調査項目については，日常点検と同様に外観調査が基本となる。

スケーリングについては写一解 2.3 に示す ASTM C 672 に準じた目視評価基準³⁾により行う。原則として，点数が 1 以上の場合，スケーリングに関する詳細調査を行うことが望ましい。要求性能が美観で，点数が管理者の定める許容上限を上回っている場合は詳細調査に加えて，補修に関する検討もあわせて行う。

また，微細ひび割れが確認された場合，もしくは微細ひび割れの発生が疑われる場合は，構造物の外観だけではなく，必要に応じて非破壊検査機器を用いた調査を定期的実施して経時変化を追跡することも大切である。微細ひび割れの程度を表す指標は相対動弾性係数を標準とし，点検については表面走査法⁴⁾により行う。

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

写一解 2.3 ASTM C 672 に準じた目視評価基準

表面走査法は、コンクリートの表面近傍に存在する低品質層の厚さを超音波により非破壊で推定する方法である。図一解 2.6 に示すように、表面に超音波の発振子と受振子を配置し、受振子を一定の間隔（基本的に 50mm）で発振子から遠ざけていくと（最長距離は基本的に 400mm）、超音波は低品質層（A 層）を極力迂回し、品質が比較的良好な層（B 層）を伝播経路に選びながら最短時間で受振子に到達する特徴があるため、発・受振子間の距離がある値以上になると伝播速度が上昇する。このため、発・受振子間の距離と超音波伝播時間の関係は図のような折れ線グラフとなる。このとき、A 層の厚さ t は次の式で表される。

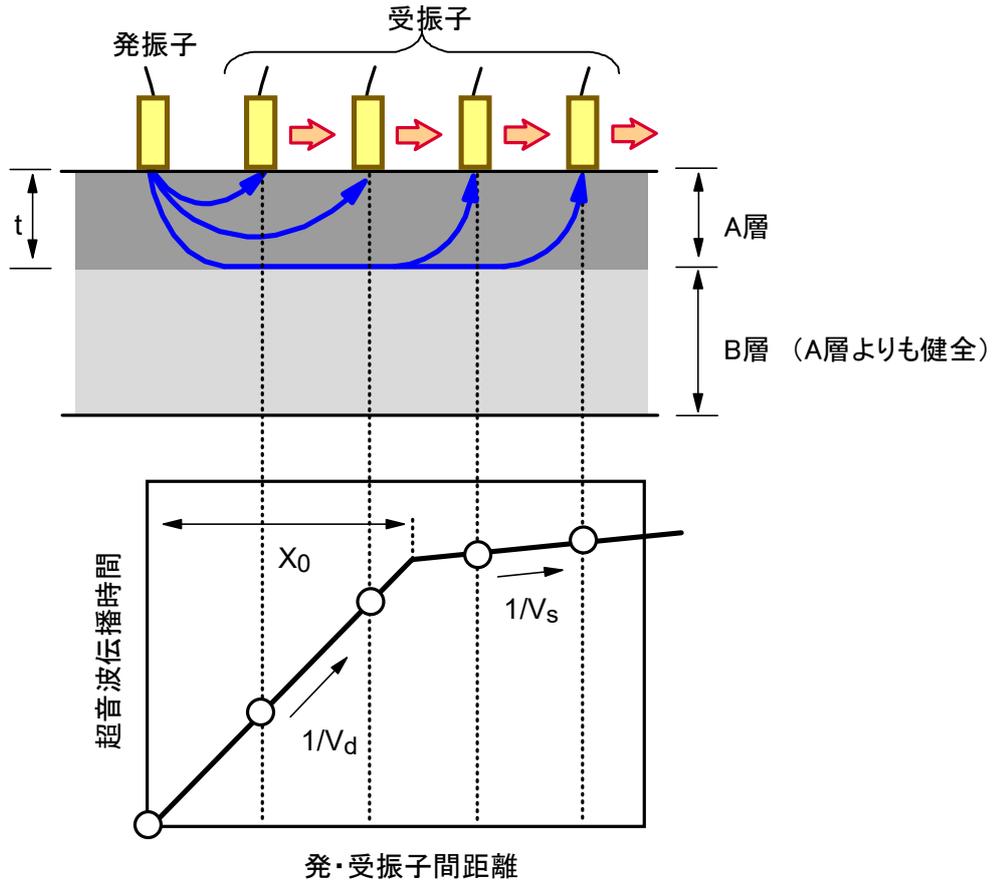
$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (\text{解 2.1})$$

ここに、 X_0 : 原点から直線の傾斜が変わる変曲点までの距離

V_d : A 層の超音波伝播速度

V_s : B 層縁端面の超音波伝播速度

(V_d , V_s はともにグラフの傾きの逆数)

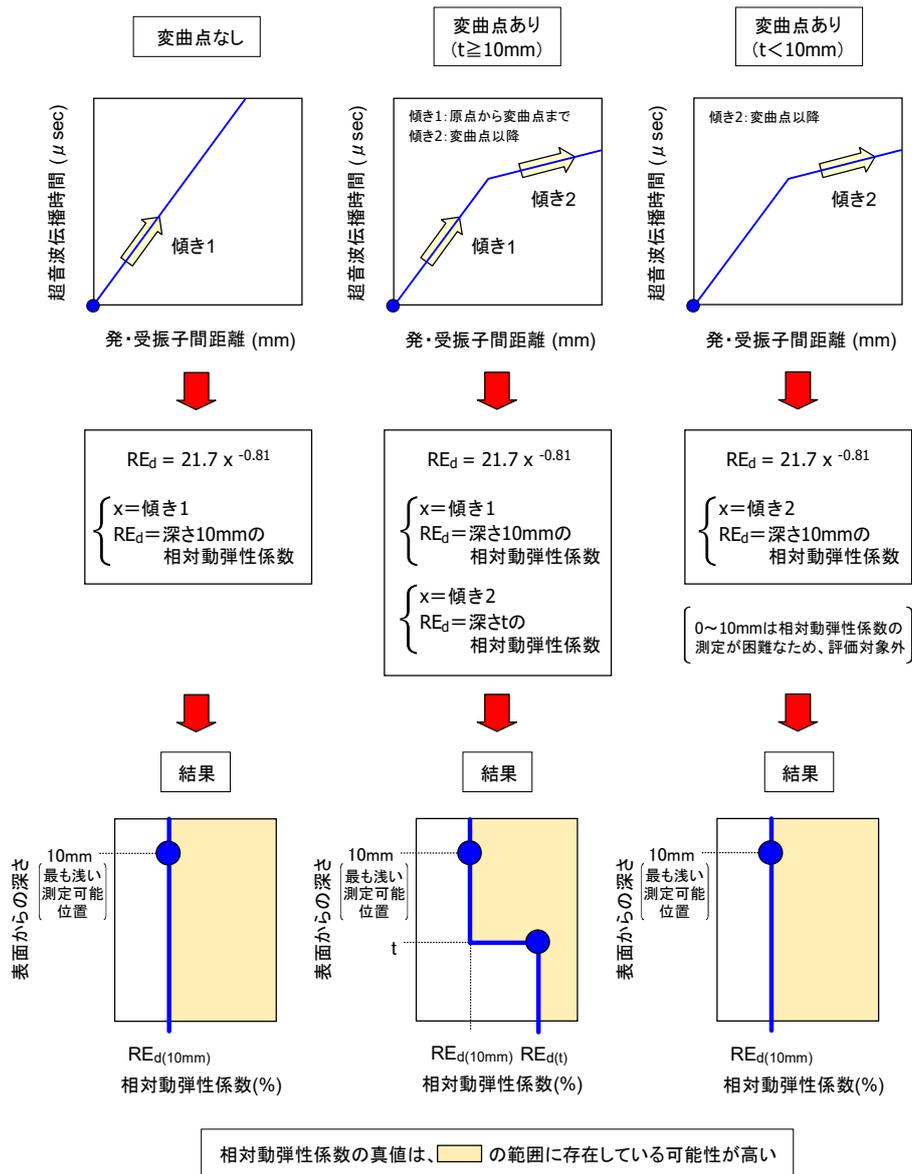


図一解 2.6 表面走査法概念

コンクリートが全体的に健全もしくは劣化している場合は、品質の差がないと判断され、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は折れ線グラフではなく、直線グラフとなる。このときの t は 0 か部材の全厚のいずれかとなる。

なお、凍害が発生しているコンクリートの場合、A層（凍害）とB層の境界に加えて、A層の内部で凍害の程度が大から小に転じる位置（いわゆる、品質の変わり目）までが t と診断される場合がある。このことを考慮して、調査は図一解 2.7 に示す要領⁵⁾で行う。

はじめに、コンクリート表面に約 400mm の直線をチョークで引き、直線上に超音波の発・受振子をあてて超音波伝播時間を測定する。次に、表面水分率の測定を行う。測定後、次式によって超音波伝播時間の補正を行う。



NOTE : 表層ではなく、内部に大きな劣化(層状クラックなど)が発生しているとき、傾き1<傾き2の折れ線グラフが出現する場合がある。その場合は折れ線回帰ではなく、直線回帰を行い、「変曲点なし」の扱いとする。

図一解 2.7 表面走査法による診断の流れ

$$T_r = T_s \times (-0.09W + 1.53) \quad (\text{解 2.2})$$

ここに、 T_r : 補正後の超音波伝播時間 (μsec)

T_s : 超音波伝播速度の測定値(μsec)

W : コンクリートの表面水分率(%)

補正後、発・受振子間の距離と超音波伝播時間 T_r の関係をグラフ化し、原点通過を前提条件に 2 本の直線による折れ線回帰を行う。折れ線が出現した場合は t の算出を行う。そして、折れ線の傾きから、相対動弾性係数の測定が可能な最も浅い深さ 10mm および深さ t の相対動弾性係数を次式により計算する。

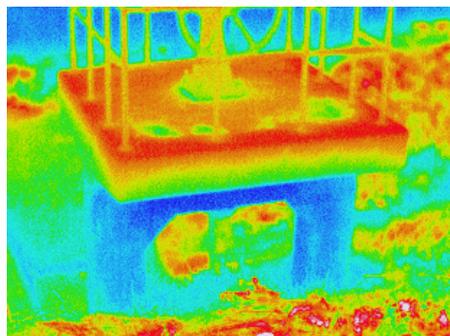
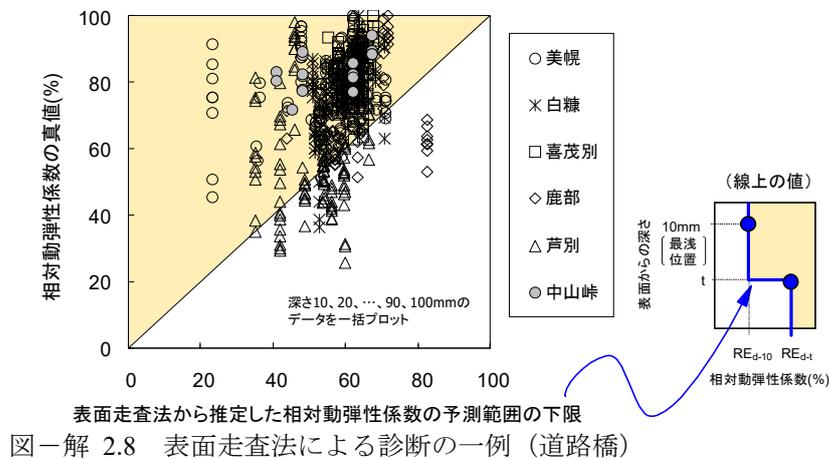
$$RE_d = 21.7x^{-0.81} \quad (\text{解 2.3})$$

ここに、 RE_d : 相対動弾性係数(%)

x : グラフの傾き (評価方法は図を参照のこと).

一般に、凍害の程度は表面が最も大きく、深くなるほど小さくなる傾向にある。そのため、相対動弾性係数の真値は図に示す塗りつぶした範囲にプロットされると予測されることになる。表面走査法は真値が存在すると思われる範囲の推定を目的としており、真値の特定が目的ではないことに注意されたい。原則として、相対動弾性係数が低い(判断の目安は一般に60%以下であるが、実績を尊重して目安を決定してもよい)もしくは凍害が鉄筋位置まで及んでいることが疑われる場合は詳細調査を行う。図一解 2.8 は北海道内の道路橋での調査事例⁵⁾である(N=685)。全測定値の約9割が $y=x$ 線より上の範囲にプロットされており、表面走査法による推定と概ね対応していることがわかる。表面走査法は非破壊で簡易的な試験方法あり、調査時間の短縮や省力化、部材損傷の最小限化(詳細調査が真に必要な箇所の絞り込みが可能となる)を図ることができる。

また、赤外線カメラを使用して劣化が発生している箇所を広角的に把握する方法もある(写一解 2.4)。定性的ではあるが、劣化の有無や範囲を視覚的に捉えることができる。広範な部材面の中から測定を実施する箇所を選定する方法としても有用である。



写一解 2.4 赤外線カメラによる劣化箇所の把握 (河川樋門の例)

2.3.4 詳細調査

- (1) 詳細調査は、初期点検、日常点検、定期点検で実施される標準調査では凍害を受けた構造物の評価および判定が困難な場合、および劣化予測が必要な場合に、構造物のより詳細な情報を得るために実施するものとする。
- (2) 詳細調査の項目、方法および箇所は、調査の目的、得られる結果の精度等を考慮して適切に選定しなければならない。

【解 説】

(1) について

詳細調査では、定量的なデータの取得を基本とする。

スケーリングについては、実験では一般にスケーリング量で表されるが、実構造物では測定が基本的に不可能のため、剥離度⁶⁾で表すことを標準とする。図一解 2.9 に剥離度の測定の要領を示す。測定は最もスケーリングが大きい箇所で行う。コンクリート表面に 50×50cm の枠を設置し、枠内でスケーリングが発生している範囲の面積および剥離深さを測定する。部材寸法が短い等の理由により、50×50cm の枠の設置が困難な場合は、面積が 2500cm² 以下とならないことを条件に、枠の形を適宜変更して測定を行う。剥離深さは枠内で 10 点測定し、その平均を測定値とする。スケーリングの程度が全面的に激しく、深さの測定に必要な基準面が残っていない場合は、最も高い位置にある骨材の頂点を基準面に代用する。そして、次式より剥離度を算出する。

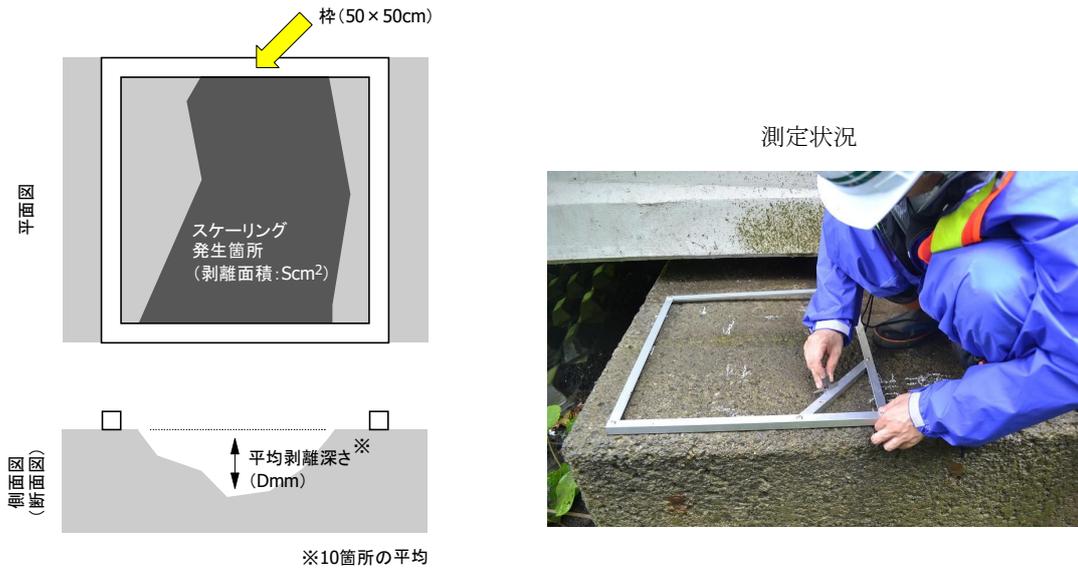
$$D_m = D \times A_s = D \times \frac{S}{50 \times 50} \quad (\text{解 2.4})$$

ここに、 D_m : 剥離度(mm)

D : 剥離深さ(mm)

A_s : 枠内におけるスケーリング面積の割合

S : 枠内におけるスケーリング面積(cm²)



図一解 2.9 剥離度の測定の要領

健全面が残っておらず、全面的にスケーリングが生じている場合は、剥離深さが剥離度となる。

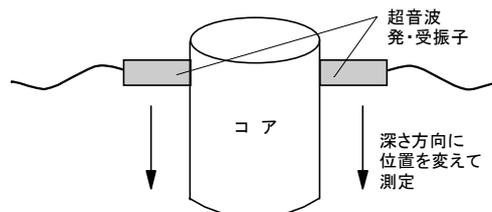
微細ひび割れの程度については、実験では JIS A 1127 に準じ、一般に供試体の一次共鳴振動数から求まる相対動弾性係数で表される。しかし、実構造物の場合は同じ部材でも微細ひび割れの程度は部位や深さによって異なり、凍害を受けている範囲（凍害深さ）が重要な情報となる。JIS A 1127 では凍害深さの把握は難しいため、実構造物ではコアを採取して超音波伝播速度を深さごとに測定し（図一解 2.10）、その値から相対動弾性係数を求める透過法を標準とする。それぞれの深さの相対動弾性係数は、次式⁷⁾により求める。

$$\begin{cases} E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \\ RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \end{cases} \quad (\text{解 2.5})$$

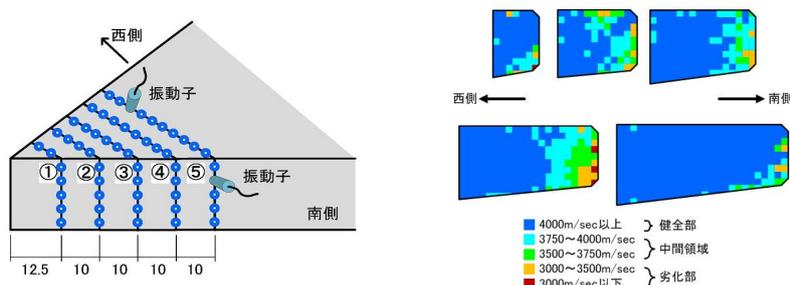
ここに、 E_d ：動弾性係数(GPa)（適用対象は 7.0～41.5GPa）

V ：超音波伝播速度(km/sec)

RE_d ：相対動弾性係数(%)



図一解 2.10 透過法による超音波伝播速度の測定要領



図一解 2.11 超音波トモグラフィによる診断の一例 (河川樋門)

表一解 2.3 詳細調査 (凍害) の目的, 項目と得られる情報の例

調査項目		調査目的
凍害の程度の確認	スケーリング (剥離度)	美観, 断面減少量
	微細ひび割れ (相対動弾性係数)	美観, 幅・深さ・密度, 凍害の進展範囲
	ポップアウト	美観, 骨材の品質
	コンクリート強度, 弾性係数	コンクリート強度, 部材の剛性, 耐力
	鋼材の位置 (かぶり) と腐食状況	腐食量 (劣化グレード), 耐力
	たわみ, 変形	部材の剛性
凍害の進行の予測	空隙構造	コンクリート品質, 凍害進行速度
	温度, 日射, 水の供給	温度, 湿度, 含水率, 凍害進行速度
	凍結防止剤	凍結防止剤の散布量, 凍害進行速度

E_{dn} : 各深さにおける動弾性係数(GPa)

E_{d0} : 部材供用前の動弾性係数(GPa) (なければ, 健全とみなせる箇所の動弾性係数. 一般にコアの最深部の値が使われることが多い)

なお, 部材の形状にもよるが, 近年は超音波トモグラフィを活用し, 劣化が発生している箇所を非破壊で広角的に把握する試みもなされている⁸⁾ (図一解 2.11).

(2) について

凍害を受けた構造物で調査すべき項目とその結果から判断される点検時および将来の構造物の状態について得られる情報の一例を表一解 2.3 に示す. 点検結果から変状が生じている部位ならびに変状の程度等を適切に評価することが重要である. しかし, コンクリートおよび鋼材の状態が必ずしも構造物の性能と直接結びつかない場合には, 外観上の変状が性能評価のための有力な情報となり得る. 劣化の程度をグレードに置き換え, 構造物の性能を間接的に評価することも可能である. 凍害を受けた構造物の外観上のグレードは, 後に示す表一解 2.4 のとおりである.

2.4 変状原因の推定および変状の予測

- (1) 点検において部材あるいは構造物に変状が認められた場合、変状原因を推定するものとする。
- (2) 凍害を受ける構造物の変状の予測においては、点検時の構造物の性能の低下を定量的に評価し、かつ性能の将来予測を定量的に行うものとする。
- (3) 凍害による劣化の進行予測は、詳細調査で取得したデータをもとに、スケーリング深さとその進行速度や、ひび割れ状況とその進展速度を基に行うことが望ましい。
- (4) (3)が困難な場合は、構造物の外観から判断されるグレードの進行を予測することで、凍害による劣化の進行予測を行ってもよい。
- (5) 点検により得られた劣化状況が、事前の予測と異なっている場合には、原因を検討した上で劣化予測の修正を行わなければならない。また、必要に応じて今後の維持管理計画の変更を行うものとする。

【解 説】

(1) について

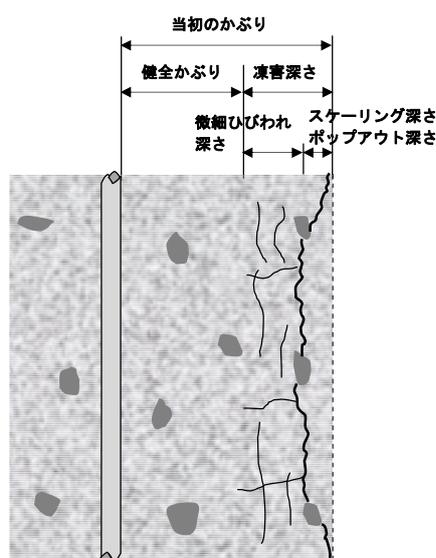
詳細は、共通編を参照のこと。

(2) について

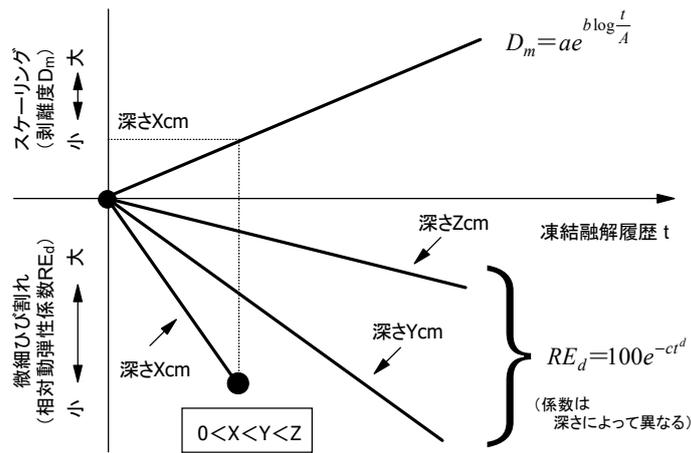
性能照査型の維持管理体系では、本来構造物が保有すべき諸性能の変化（低下）の予測が求められる。凍害を受ける構造物の性能の低下を予測するためには材料の劣化すなわちスケーリングやひび割れの進展によるコンクリート断面の減少や、かぶりの損傷に伴う鋼材の腐食の進行を定量的に予測する必要がある。また、凍結防止剤の散布によりコンクリート中に塩化物イオンが供給される場合、塩害によるコンクリート中の鋼材腐食の進行についても予測する必要がある。

(3) について

凍害の進行はスケーリング深さやひび割れの発生状況を指標とすることで概ね推定が可能となる（図一解 2.12）。劣化予測は比較的簡易な次式で行うことを標準とする^{9), 10)}（図一解 2.13）。



図一解 2.12 凍害による劣化の概念図



図一解 2.13 劣化予測の概念図

$$D_m = ae^{b \log \frac{t}{A}} \quad (\text{解 2.6})$$

$$RE_d = 100e^{-ct^d} \quad (\text{解 2.7})$$

ここに、 D_m ：剥離度(mm)

RE_d ：相対動弾性係数(%) ($0 \leq RE_d \leq 100$)

t ：凍結融解履歴で、一般に供用年数(年)

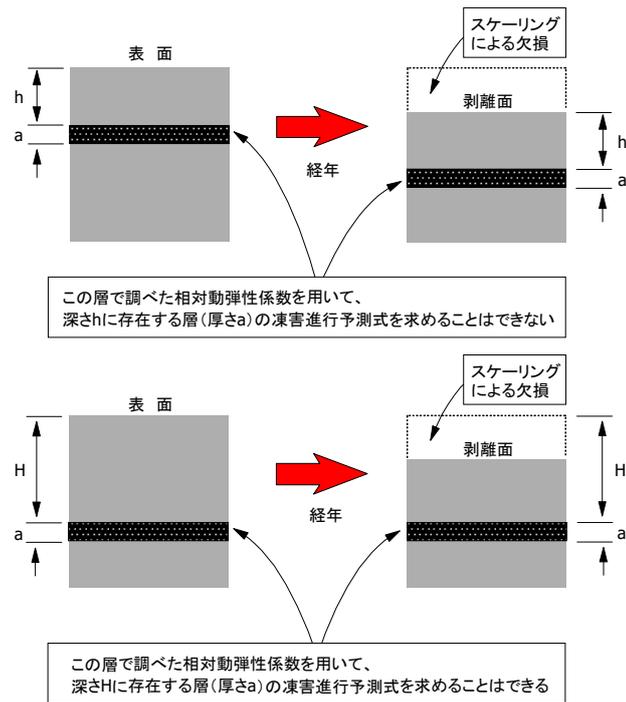
A ： t を無次元化させるための係数で、一般に、供用年数のおおよそ中間年をあてる

a, b, c, d ：係数

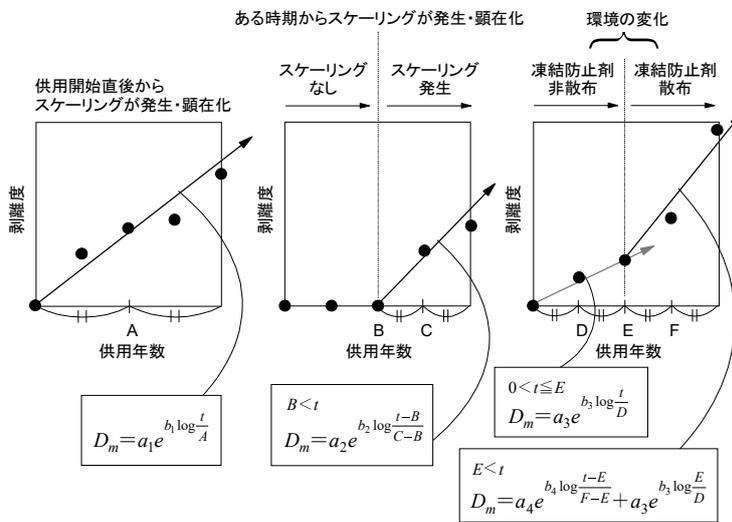
式には係数が2つ存在するため、データは最低2つ(2冬分)以上必要となる。1つ(1冬分)しかない場合は、供用直後は劣化が殆ど発生していないと仮定し、原点($t=0, D_m=0, RE_d=100$)に近い値を代用して暫定的に式を求めて予測を行う($t=0$ は計算ができない)。その際は翌年以降も調査を行ってデータを収集し、予測式の補正を行うことが望ましい。なお、表面保護工等の補修が施されている場合、式の適用性が未だ十分検証されていないため、当面は対象外とする。

相対動弾性係数の予測式の算出は、同一深さのデータを用いて行わなければならない。図一解 2.14に示すようにスケーリングが進行している場合、剥離面を基準に深さを決めてしまうと、同一深さの評価とはならず、予測式に誤りが発生する。そのため、スケーリングによる欠損深さもあわせて把握しておく必要がある。

なお、外観から鋼材腐食の発生が明らかに推察される場合は、すでにコンクリート組織の劣化が大きく進行しており、コンクリートが鋼材の保護層としての役割を果たすことは期待できない。したがって、凍害による鋼材の腐食の進行予測を行う場合は、コンクリートの品質および構造物が供用される環境条件の影響を適切に考慮して行うことが重要である。また、コンクリート中に塩化物イオンが供給される場合、凍害による損傷を受けたコンクリート中の塩化物イオンの浸透速度は、損傷がない場合と比較して著しく大きくなることが懸念されるため、注意が必要である。塩害による鋼材腐食の進行予測については、後述の塩害の章を参照するとよい。



図一解 2.14 相対動弾性係数の予測に際しての留意事項



図一解 2.15 スケーリングの予測に際しての留意事項

(5) について

構造物が置かれている環境条件が供用開始から変わらない場合、基本的に劣化の進行は供用開始時から等速で進行すると仮定し、予測することが可能である。ただし、点検データを吟味し、必要に応じて適切に劣化の進行速度を修正することが望ましい。また、水分の供給や日射等の環境条件が供用期間中に変化する場合、劣化の進行速度が変化するため注意が必要である。例えば、スケーリングの予測においては、図一解 2.15 に示すように、凍結防止剤の散布期間を考慮する必要がある。非散布期

間の係数の設定の考え方については未だ整備されていないが、 a_3 、 b_3 をゼロとすることで散布期間の予測を安全側に行うことはできる。

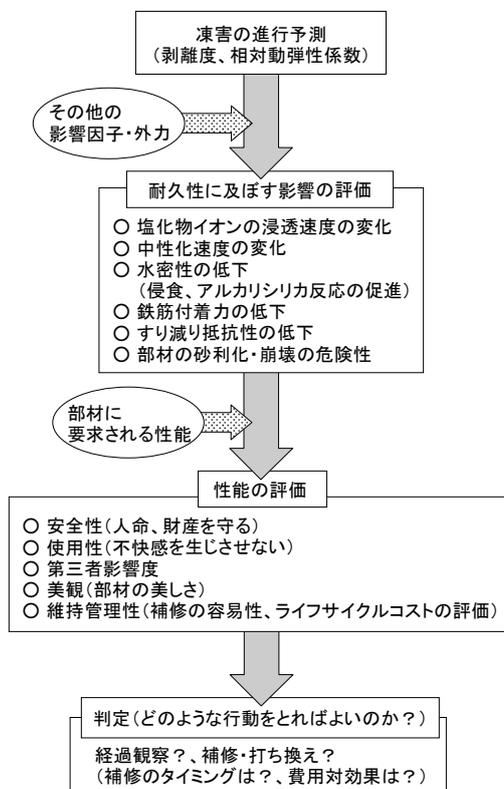
2.5 評価および判定

- (1) 凍害を受ける構造物の性能の評価は、構造物の劣化過程を考慮して評価の対象となる性能を適切に選定した上で、行わなければならない。
- (2) 凍害を受ける構造物の点検時および予定供用期間終了時における諸性能の評価は、定量的な方法で行うことが望ましい。
- (3) 困難な場合には、構造物の点検時および予定供用期間終了時における諸性能の評価を、半定量的なグレーディングによる方法で行ってよい。
- (4) 対策の要否の判定は、凍害による構造物の性能の低下の程度と維持管理限界に基づいて行われなければならない。

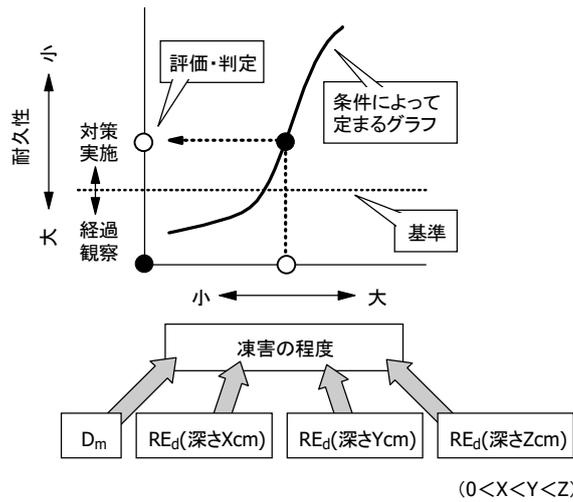
【解説】

(1) について

維持管理のねらいは、単に凍害の進行を予測、および凍害の状況を把握することではなく、図一解 2.16 に示すように、その調査結果をもとに、管理者が求める構造物の要求性能に及ぼす凍害の影響を適切に評価し、今後とるべき対応や方針を決定することである。



図一解 2.16 評価・判定の基本的な流れ



図一解 2.17 凍害を考慮した構造物の諸性能の定量評価のイメージ

表一解 2.4 凍害に対する外観上の劣化グレードと要求性能毎の保有性能例

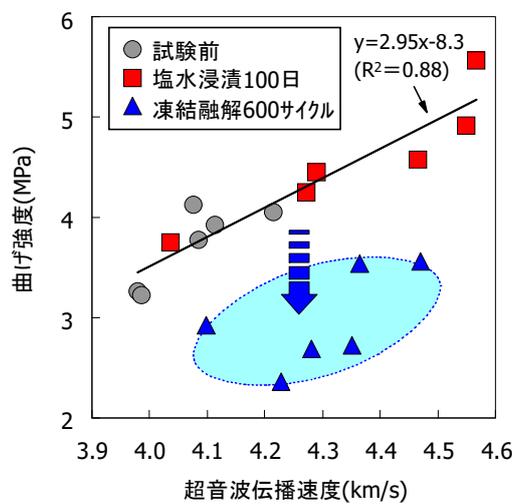
外観上の劣化グレード	劣化過程	劣化の状態	要求性能毎の保有性能			
			安全性	使用性	第三者影響度	美観
グレード I	潜伏期	・外観変状無し	性能の低下は見られない			
		・微細ひび割れ発生				
グレード II	進展期	・外観変状無し	性能の低下は顕著でない			
		・スケーリング, ひび割れ, ポップアウト, 砂利化の発生				
グレード III	加速期	・損傷の進行	性能の喪失 (第三者への影響)			
		・骨材の露出 ・骨材の剥離				
グレード IV	劣化期	・損傷の進行	性能の低下 (変状部位がコンクリートの力学特性, 耐力剛性に影響を及ぼす場合)			性能の喪失 (美観の低下)

(2) および(3) について

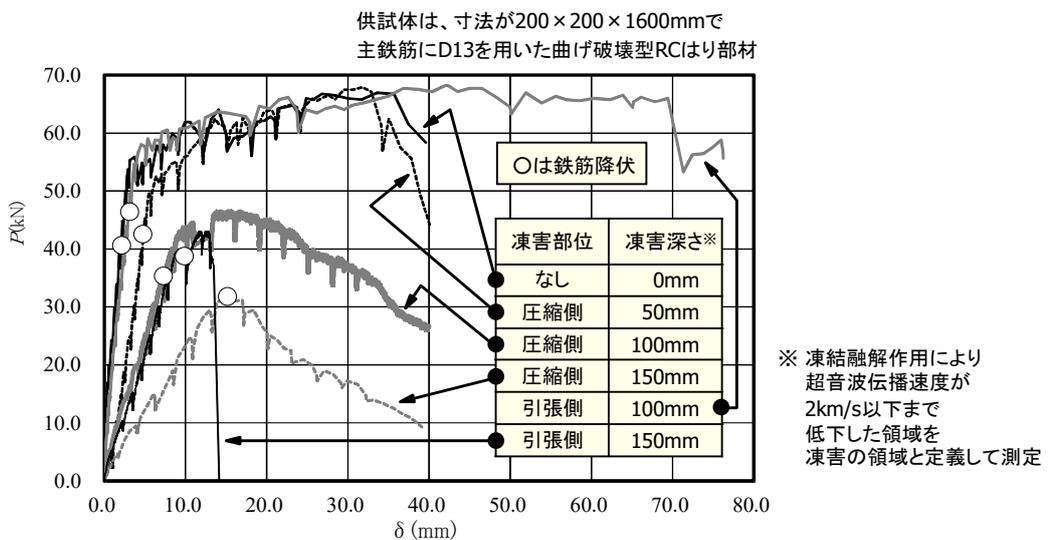
凍害を考慮した構造物の諸性能の定量評価 (イメージを図一解 2.17に示す) は, 性能照査型設計体系の中の性能評価手法としては理想的である. 近年は凍害を考慮した塩化物イオンの浸透速度の評価方法も検討されている¹¹⁾. しかし, 必ずしもこのような手法が適用できないこともある. そこで, 表一解 2.4 を参考に, 構造物の外観変状からグレーディングを行い, 点検実施時における構造物の性能を半定量的に評価してもよいこととした. なお, 評価・判定結果とその時の凍害の程度 (D_m , RE_d) については記録しておくことが望ましい. 維持管理指針の内容の充実, ならびに効率的な維持管理の実践に資するデータベースを構築する上で有益な情報となるからである.

(4) について

(2) および(3) で実施した性能評価の結果，点検時あるいは予定供用期間終了時に構造物や部材の性能が維持管理限界に達している場合には，凍害による劣化の進行を抑えるための対策を検討する必要があります．図一解 2.18 はコンクリート供試体（100mm×100mm×400mm）の超音波伝播速度と曲げ強度の関係を示している¹²⁾．凍害を受けていない場合は比例関係を示しているものの，凍害を受けると関係は成立しなくなり，曲げ強度は低下し，性能の低下が生じていることが読み取れる．凍害の進展は図一解 2.19¹⁾に示すように，部材の力学性能の低下を引き起こすことが懸念されるため，放置せずに適切に対処することが求められる．



図一解 2.18 超音波伝播速度と曲げ強度の関係（凍結融解供試体の状態は剥離度約 3cm，相対動弾性係数約 80%，骨材は全面に露出）



図一解 2.19 凍害を受けた部材の荷重－変位曲線（単純支持・中央一点載荷）

2.6 対策

- (1) 凍害による構造物の性能低下に対して対策が必要と判定された場合には、対策後の構造物が要求性能を満足するような対策を選定する。
- (2) 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よい。
- (3) 補修は、所定の効果が得られるように凍害による性能低下を考慮して工法・材料を選択しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

2.7 記録

- (1) 点検、劣化予測、評価および判定、対策などの記録は、本指針共通編によることを原則とする。
- (2) 凍害特有の項目については、必ず記録しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

【参考文献】

- 1) 林田宏, 佐藤靖彦, 上田多門: 圧縮側と引張側の凍害深さを変化させた曲げ破壊型RCはり部材の構造性能に関する研究, 寒地土木研究所月報, No.715, pp.2-10, 2012.12
- 2) 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, 参考資料C「積雪寒冷地において劣化作用を受けるコンクリート構造物の維持管理に関する留意事項」, 2013.4
- 3) American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (ASTM C 672)
- 4) 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.
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 林田宏: コンクリート部材の凍害診断への表面走査法の適用に関する研究, 第55回(平成23年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集, 2012.2
- 6) 北海道開発局港湾部港湾建設課, 寒地港湾技術研究センター: 海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書, 資 1-10, 2000.3
- 7) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 8) 土木研究所: 平成22年度重点プロジェクト研究報告書, 11.3 土木施設の寒地耐久性に関する研究, 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
- 9) 遠藤裕丈: 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設計法に関する研究, 北海道大学博士学位論文, p.138, 2011.3
- 10) 野口博章: 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基礎的研究, 法政大学博士学位論

文, p.32, 2007.9

- 11) 遠藤裕丈, 田口史雄, 田畑浩太郎: 寒冷環境下での塩化物イオン浸透予測技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.913-918, 2013.7
- 12) 遠藤裕丈, 田口史雄, 田畑浩太郎: 凍結融解と塩化物の複合作用を受けるコンクリートの凍害劣化予測に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集 (V 部門), pp.559-560, 2013.9

3章 中性化

3.1 一般

- (1) この章は、中性化によって性能低下が生じた構造物、あるいは性能低下が生じる可能性の高い構造物の維持管理計画、診断、対策、記録について、その標準的な方法を示すものである。
- (2) この章は、予防維持管理あるいは事後維持管理の構造物に適用する。

【解説】

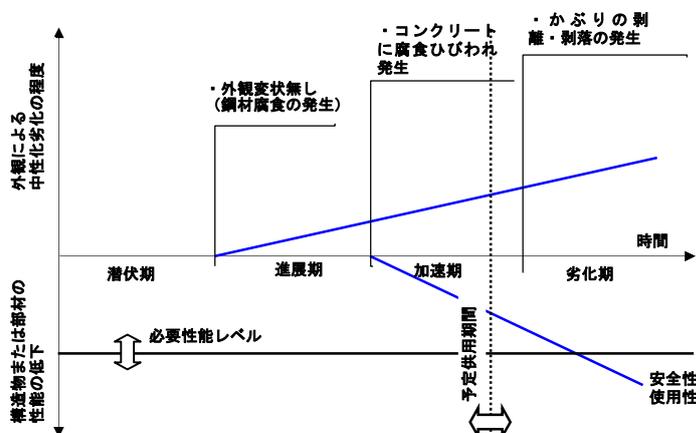
(1) について

コンクリート構造物に生じる中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に浸入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリートの空隙中の水分のpHを低下させる現象である。これにより、内部の鋼材表面の不動態被膜が失われ、酸素と水分の供給により腐食が進行する。さらに鋼材の腐食により、ひび割れの発生、かぶりの剥落、耐力の低下などが起こる。また、炭酸化によってC-S-H（ケイ酸カルシウム水和物）を含めた全ての水和物に変質することに加えて、セメント硬化体の空隙構造の変化が生じることにより、強度の変化や炭酸化収縮と呼ばれる収縮現象も併せて起きることが知られている。

ここで扱う現象は、炭酸化反応により引き起こされるものであることから、「炭酸化」と称すべきとも考えられるが、主として問題となるのは炭酸化の結果としてのpHの低下による鋼材を保護する性能の低下であり、コンクリート表面から内部へのpH低下領域を劣化進行の指標とすることから、一般的呼称である「中性化」を用いている。

中性化の進行とそれに伴う鋼材の腐食による劣化過程は、図一解 3.1、表一解 3.1 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分される。図一解 3.1 では便宜的に書く劣化過程の期間を等しく、劣化程度や性能低下を直線で示している。

それぞれの期間においては劣化現象が構造物の性能に及ぼす影響が異なり、また着目する性能毎に劣化の進展に対応する性能低下の程度も異なるので、劣化過程ごとに診断（点検、劣化予測、評価および判定）、対策の考え方が異なる。



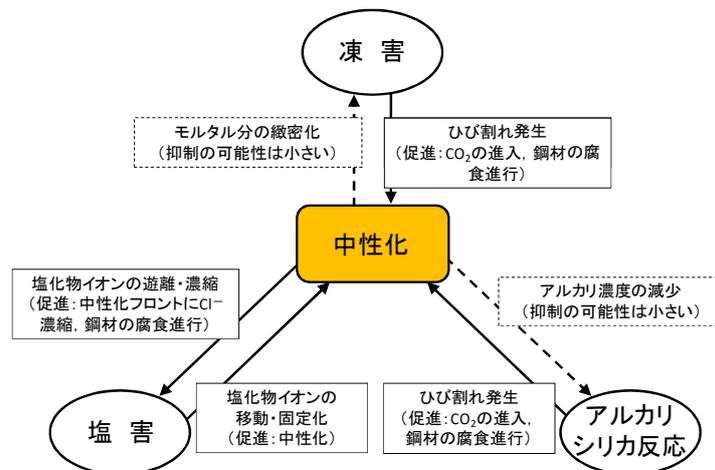
図一解 3.1 中性化による劣化進行過程の概念図

表一解 3.1 中性化の各劣化過程の定義

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	中性化によって鋼材に腐食が発生するまでの期間(外観からこの期間を判断できない)	・ 中性化進行速度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	・ 鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生からかぶりの剥離・剥落までの期間	・ ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	かぶりの剥離・剥落以降, 鋼材腐食量の増加により耐力の低下が顕著となる期間	

なお、二酸化炭素がセメント水和物と反応して pH が低下する炭酸化反応は、比較的乾燥した状態において進行が速くなり、この場合には潜伏期が短縮されるが、その後の鋼材の腐食反応には水が必要であることから、雨掛かりがあったり排水処理が不適切であったりする場合に、進展期以降の腐食速度が大きくなることに留意する必要がある。

また、中性化と塩害の複合劣化については、塩害による劣化が中性化によって加速されている現象であり診断については4章を参照されたい。ここでは、中性化を中心とした複合劣化の関係図¹⁾を図一解 3.2 に示す。



図一解 3.2 中性化を中心とした複合劣化の関係図

(2) について

一般的な既設構造物の多くは事後維持管理に近い形で管理されているが、今後の構造物の維持管理においては、ライフサイクルコストの考え方にに基づき、劣化が顕在化する前の早期の段階で対処を行う予防維持管理の構造物も増加することが予想される。特に中性化の場合には、剥落の防止を目的として劣化の極めて初期に対策を施すことも多いが、このような維持管理の方法は予防維持管理に近い。したがってこの章は、主として予防維持管理および事後維持管理の両区分の構造物に対して適用する。また観察維持管理の構造物についても、この章の基本的な考え方に沿った維持管理を可能な限り実施する必要がある。

3.2 維持管理計画

- (1) 中性化の影響を受ける構造物の維持管理を行う際には、構造物の種類や重要度、構造形式、要求性能、維持管理区分、予定供用期間、ならびにコンクリートの乾燥状況や水分の供給条件などの環境条件を考慮し、あらかじめ維持管理限界を定めた上で、診断、対策、記録を含む維持管理計画を策定しなければならない。
- (2) 維持管理限界は、中性化による劣化の進行過程と、対象とする構造物に適した対策方法を考慮して設定する。

【解説】

(1) について

一般的には、一つの構造物に対して一つの維持管理区分を適用することになると思われるが、一つの構造物内でも部位あるいは部材ごとに環境条件などが異なるような場合には、それぞれで異なる維持管理区分を適用することが合理的となることもあり得る。

一方、維持管理限界については同一構造物、同一部材内であっても、異なった維持管理限界が適用される場合も多いと考えられる。たとえば同一部材内であっても剥離・剥落によって第三者に影響がおよぶ可能性は、部材上面と下面では異なるため、対象とする性能と部位、部材、位置を考慮して維持管理限界をそれぞれ定める必要がある。

また維持管理計画策定の段階で、供用期間を通じての構造物の状況をあらかじめ正確に予想することは、一般的に大きな困難が伴う。そこで、類似の構造物、もしくは類似の環境に置かれた構造物の劣化状況を参考にして、維持管理計画を策定するとよい。

なお、点検の結果や環境の変化などにより、維持管理計画を見直すものとする。

(2) について

予防維持管理を適用する構造物の場合には、構造物の性能低下が生じないようにするために劣化が顕在化しないことなどが求められるため、鉄筋が発錆しない、すなわち、潜伏期までにとどめるよう維持管理限界を設定し、維持管理を行う必要がある。したがって、構造物の状態をできる限り正確に把握しておくことが求められ、次のことが必要となる。

- 1) 中性化深さの定量的把握および将来予測
- 2) コンクリート内部の鉄筋の腐食状況の定量的な把握および将来予測

また、この場合には劣化が顕在化する前に対策を施すことから、大規模な補修を避けることができ、結果的に維持管理費用の抑制につながることも多い。

一方、事後維持管理を適用する構造物の場合には、構造物の性能が要求性能を下回ることはないよう維持管理限界を設定し、維持管理を行うこととなる。具体的には、3.3.4 に述べるように、安全性に着目する場合には劣化期、使用性に着目する場合には加速期後期、剥落による第三者への影響に着目する場合には加速期前期まで劣化が進行することのないよう、維持管理を行うという考え方が一例と言える。

本示方書では、対策の有無の判定は、構造物の性能評価の結果に基づくことを原則としている。したがって、維持管理限界も本来は定量的な性能で設定されるべきである。一方、構造物の外観上のグレードから構造物の残存性能を簡易的、半定量的に判定する場合も多いが、このような方法で維持管理を行なう場合には、維持管理限界も構造物の外観に現れる劣化の状況として設定することが合理的

である。例として、次のような劣化の顕在化を維持管理限界に設定することができる。

- 1) コンクリート内部の鉄筋の腐食が確認された場合
- 2) コンクリート表面にさび汁が確認された場合
- 3) コンクリートの表面に鉄筋軸方向のひび割れが確認された場合
- 4) かぶりコンクリートの剥落が確認された場合

中性化による劣化の場合には、腐食が開始してから短期間の間に安全性、使用性に問題が生じる例は少ない。したがって、中性化による劣化が予想される場合でも、一般的な構造物であれば、3) または 4) の段階を維持管理限界とする場合が多いと考えられる。しかし、一旦鋼材の腐食が開始すると、点検を頻繁に行う必要も生じ、また必要とされる対策もそれ以前と比較して大規模かつ高価となる。したがって、重要度が高い、もしくは予定供用期間が長い構造物等においては、自然電位や埋設センサーによるモニタリングやはつり調査を併用して、1) または 2) の段階を維持管理限界とするのが望ましい場合もある。また、市街地の高架橋等など、第三者影響度が特に重要視される構造物も多数存在する。このような構造物についても、出来るだけ劣化の初期段階で対策を実施するように維持管理限界を設定する必要がある。

3.3 点検

- (1) 中性化の影響を受ける構造物の点検では、設定した維持管理区分に基づき、初期点検、日常点検および定期点検を適切に実施しなければならない。
- (2) 点検にあたっては、あらかじめ維持管理計画において項目と方法、頻度および範囲を定めた標準調査を実施する。また、必要に応じて詳細調査を実施しなければならない。

【解 説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

3.4 変状原因の推定および変状の予測

- (1) 点検において部材あるいは構造物に変化が認められた場合、変状原因を推定するものとする。
- (2) 中性化した、もしくは中性化が懸念される構造物の維持管理においては、点検時の構造物の性能を定量的に把握し、かつ性能の将来予測を定量的に行うものとする。
- (3) (1)と(2)が困難な場合には、中性化の進行と鋼材腐食の進行を考慮して、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の期間を予測することによって換えてもよい。
- (4) 劣化予測は、点検結果に基づいて行うことを原則とする。

【解 説】

詳細は、共通編および土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

3.5 評価および判定

- (1) 中性化した構造物の性能の評価は、評価の対象となる性能を適切に選定した上で、行わなければならない。
- (2) 構造物の点検時および将来における諸性能の評価は、点検結果および劣化予測の結果に基づいて定量的な方法で行うことを原則とする。
- (3) (2)による点検時および将来における諸性能の評価が困難な場合には、構造物の外観上のグレードで評価を行ってよい。
- (4) 対策の要否の判定は、中性化による性能の低下の程度と維持管理限界、および残存予定供用期間を考慮して行わなければならない。

【解説】

(3) について

構造物の諸性能を定量的に評価することは、性能照査型設計体系の中の性能評価手法としては理想的ではあるが、現状では必ずしもこのような手法が適用できないこともある。そこで、現実的には表一解 3.2 を参考に、構造物の外観変状からグレーディングを行い、点検実施時における構造物の性能を半定量的に評価してもよいこととした。

表一解 3.2 中性化に対する外観上の劣化グレードと要求性能毎の保有性能例

外観上の劣化グレード	劣化過程	劣化の状態	要求性能毎の保有性能			
			安全性	使用性	第三者影響度	美観
グレード I	潜伏期	・外観変状なし	性能の低下は見られない			
グレード II	進展期	・鋼材腐食の発生（中性化残りが発錆限界に到達）				
		・外観変状なし				
グレード III-1	加速期前期	・鋼材腐食ひび割れ発生				
		・腐食ひび割れの進行				
グレード III-2	加速期後期	・部分的な剥離，剥落の進行	性能の低下は顕著でない	剛性低下（変形の増大・振動の発生）	性能の喪失（第三者への影響）	性能の喪失（美観の低下）
グレード IV	劣化期	・かぶりの剥離・剥落の発生				
		・鋼材腐食量の増加	耐力・じん性の低下			

3.6 対策

- (1) 中性化による構造物の性能低下に対して対策が必要と判定された場合には、対策後の構造物が要求性能を満足するような対策を選定する。
- (2) 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よい。
- (3) 補修は、所定の効果が得られるように中性化による性能低下を考慮して工法・材料を選択しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

3.7 記録

- (1) 点検、劣化予測、評価および判定、対策などの記録は、本指針共通編によることを原則とする。
- (2) 中性化特有の項目については、必ず記録しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

【参考文献】

- 1) 社団法人 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，p.18-47，2001.5

4章 塩害

4.1 一般

- (1) この章は、塩害によって性能低下が生じた構造物、あるいは性能低下が生じる可能性の高い構造物の維持管理計画、診断、対策、記録について、その標準的な方法を示すものである。
- (2) この章は、予防維持管理あるいは事後維持管理の構造物に適用する。

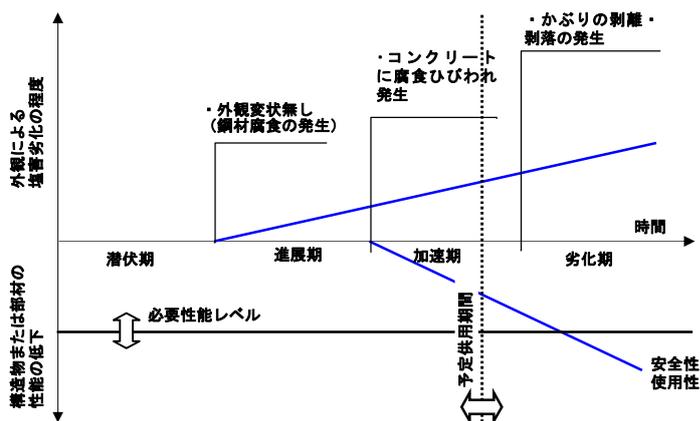
【解説】

(1) について

塩害とは、コンクリート中における塩化物イオンの存在により、コンクリート中の鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によりコンクリートのひび割れや剥離・剥落、あるいは鋼材の断面減少が生じ、ひいては構造物の性能低下につながる現象のことをいう。塩化物イオンは、鋼材の腐食を促進させるだけでなくコンクリートの組織構造を変化させる要因にもなるが、この章においては鋼材腐食にかかわる内容を中心として示す。また、塩化物イオンは海水や凍結防止剤等のように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合とがある。この章は、塩化物イオンが鋼材の腐食を促進する劣化現象であればその供給源にかかわらず適用範囲に含める。

塩化物イオンに起因する鋼材の腐食による劣化過程は、図一解 4.1、表一解 4.1 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分される。図一解 4.1 では便宜的に書く劣化過程の期間を等しく、劣化程度や性能低下を直線で示している。

それぞれの期間においては劣化現象が構造物の性能に及ぼす影響が異なり、また着目する性能毎に劣化の進展に対応する性能低下の程度も異なるので、劣化過程ごとに診断（点検、劣化予測、評価および判定）、対策の考え方が異なる。



図一解 4.1 塩害による劣化進行過程の概念図

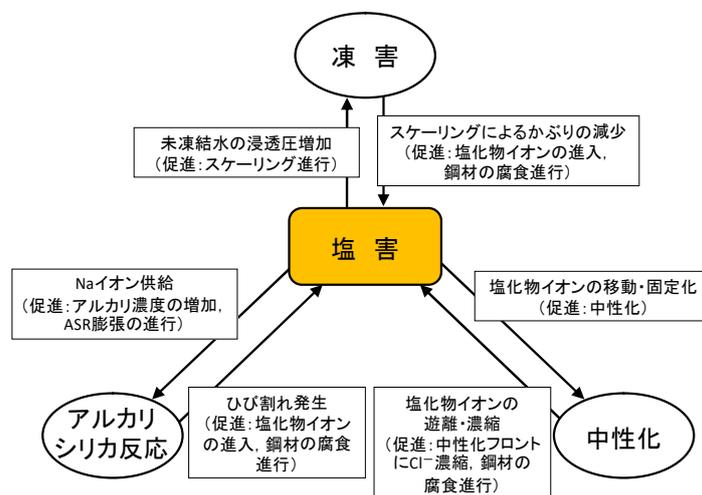
表一解 4.1 塩害の各劣化過程の定義

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	塩害によって鋼材に腐食が発生するまでの期間（外観からこの期間を判断出来ない）	・塩化物イオンの拡散 ・初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	・鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生からかぶりの剥離・剥落までの期間	・ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	かぶりの剥離・剥落以降，鋼材腐食量の増加により耐力の低下が顕著となる期間	

中性化と塩害の複合劣化としては、コンクリートの中性化が進行することにより、コンクリート中の塩化物イオンの移動・濃縮が生じ、鋼材の腐食が促進される現象がある。この場合には、中性化による鋼材腐食よりも塩化物イオンによる鋼材腐食が卓越することから、中性化と塩害の複合劣化に対する構造物の維持管理はこの4章に従うものとする。

また、凍害と塩害の複合劣化としては、凍結防止剤の散布や海水飛沫によりコンクリート表面に塩化物イオンが供給され、スケーリングが著しく進行する現象がある。この場合には、塩化物イオンの影響を考慮したスケーリングの進行を予測する必要があることから、凍害と塩害の複合劣化に対する構造物の維持管理は2章に従うものとする。

このような環境におかれるコンクリート構造物については塩害と中性化、凍害などのその他の劣化要因との複合劣化を考慮した維持管理計画の策定、診断（点検，劣化予測，評価・判定），対策を行う必要がある。ここでは、塩害を中心とした複合劣化の関係図¹⁾を図一解 4.2 に示す。



図一解 4.2 塩害を中心とした複合劣化の関係図

(2) について

一般的な既設構造物の多くは事後維持管理に近い形で管理されているが、今後の構造物の維持管理においては、ライフサイクルコストの考え方にに基づき、劣化が顕在化する前の早期の段階で対処を行

う予防維持管理の構造物も増加することが予想される。したがって、この章は主として予防維持管理および事後維持管理の両区分の構造物に対して適用する。また観察維持管理の構造物についても、この章の基本的な考え方に沿った維持管理を可能な限り実施する必要がある。

4.2 維持管理計画

- (1) 塩害を受ける構造物に対しては、構造物の重要度、構造形式、要求性能、予定供用期間、塩化物イオンの供給条件等の環境条件を考慮して、あらかじめ定められた維持管理区分に基づき適切な維持管理限界を設定した上で、診断、対策、記録を含む維持管理計画を策定しなければならない。
- (2) 維持管理限界は、塩害による劣化の進行過程と、対象とする構造物に適した対策方法を考慮して設定する。

【解説】

(1) について

塩害を受ける構造物では、塩化物イオンが海水や凍結防止剤等によって構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時の使用材料によって供給される場合がある。塩害による劣化の進行は、塩化物イオンのコンクリートへの供給状況やコンクリート中における存在状況によって大きく異なる。そのため、これらを考慮した適切な維持管理計画とする必要がある。また、供用途中で対策を講じる場合については、表面保護材や断面修復材等の補修材料の再劣化を想定した維持管理計画を策定することが重要である。

予防維持管理が設定された構造物では、構造物の性能低下が生じないように劣化を顕在化させないことが求められるため、コンクリート中の鋼材が発錆しない状態（すなわち潜伏期）、もしくはコンクリート表面に腐食ひび割れ等の変状が現れない状態（すなわち進展期）にとどめるように維持管理計画を策定する。したがって、予定供用期間中のコンクリート中の塩化物イオンの状態および鋼材の状態をできる限り正確に把握することが求められ、次のことを維持管理計画に含める必要がある。

- 1) 構造物への塩化物イオンの供給状況の定量的な把握
- 2) コンクリート内部における塩化物イオンの侵入・蓄積の状況の定量的な把握および将来予測
- 3) コンクリート内部の鋼材の腐食発生の有無の確認および将来予測

一方、事後維持管理が設定された構造物の場合、ある程度の劣化の顕在化を許容するが、それにより構造物の性能が要求性能を下回ることのないように維持管理計画を策定する。一般的には、以下の劣化が顕在化した時点で、補修等の対策を検討する維持管理計画を策定する。

- 1) さび汁の溶出
- 2) 鋼材軸方向のひび割れ
- 3) かぶりコンクリートの浮き、剥離、剥落
- 4) 腐食による鋼材の断面減少

ただし、塩害を受ける構造物では、コンクリート中の鋼材の腐食が開始された後の腐食の進行を止めることはきわめて困難となる。したがって、事後維持管理が設定された場合でも、上述の1)、2)もしくはそれ以前の段階で対策を行う維持管理計画とすることが望ましい。3)もしくは4)に至った場合は、断面修復による補修等の比較的大掛かりな対策が必要となるため、結果として維持管理費用の増大につながることが多い。

(2) について

塩害の場合、腐食ひび割れが構造物表面に現れない状態では構造物の諸性能の低下は生じておらず（または顕著ではない）、構造物表面の状態が変化（腐食ひび割れ等が発生）すると構造物の性能は低下し始める。また、かぶりコンクリートの剥落や著しい鋼材の断面減少が生じると、構造物の性能は著しく低下する。これを勘案すれば、コンクリートおよび鋼材の状態や構造物の外観上の変化から構造物の性能を見なしとして評価することもでき、これらを維持管理限界の指標とすることもできる。

なお、塩害の場合、鋼材の腐食が開始された後の劣化進行が速く、その後の腐食の進行を抑制することはきわめて難しくなり、対策工法の選定や実施時期を十分に検討する時間的余裕が得られなくなることもある。

そのため、維持管理計画では構造物に要求される性能のレベルを基準として、塩害による性能の低下がない、または性能の低下が顕著でない安全側の状態、かつ、対策工法の選定や実施時期を検討するための時間的な余裕を見込んだ維持管理限界を設定するのがよい。また、維持管理限界の如何により維持管理計画が大きく異なるため、維持管理限界の設定はきわめて重要と捉える必要がある。

また、実際の維持管理では、劣化の進行に伴う構造物の性能低下の程度が当初の想定よりも緩やかな場合や、利用面や財政面の観点から当初予定したとおりの早期対応が不可能な場合など、様々な状況が想定される。この場合、予定供用期間内の構造物の性能が要求性能の限界値以上に保持されることが確実であれば、構造物の維持管理限界の見直しを検討することができる。たとえば、予防維持管理と設定された構造物において、当初、腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 と想定し、これを維持管理限界として設定していたが、維持管理の実施段階において、構造形式や環境が類似した構造物の調査実績より鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度が 2.0kg/m^3 に達した場合でも鋼材の腐食が開始していないことが明らかとなった場合、かつ、当該構造物における点検の結果、 1.2kg/m^3 に到達していた場合でも腐食の発生が認められなかった場合に、維持管理限界を 2.0kg/m^3 に変更するなどである。なお、維持管理の途中段階に構造物の維持管理限界を変更した場合は、診断、対策、記録を含む維持管理計画の見直しを行う必要がある。

4.3 点検

- (1) 塩害の影響を受ける構造物の点検では、設定した維持管理区分に基づき、初期点検、日常点検および定期点検を適切に実施しなければならない。
- (2) 点検にあたっては、あらかじめ維持管理計画において項目と方法、頻度および範囲を定めた標準調査を実施する。また、必要に応じて詳細調査を実施しなければならない。

【解 説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

4.4 変状原因の推定および変状の予測

- (1) 点検において部材あるいは構造物に変化が認められた場合、変状原因を推定するものとする。
- (2) 塩害を受ける構造物の維持管理においては、点検時の構造物の性能を定量的に把握し、かつ性能の将来予測を定量的に行うものとする。この際、構造物を構成するコンクリートおよび鋼材の劣化状態の変化を定量的に予測するものとする。
- (3) (2)が困難な場合には、構造物の外観上のグレードを用いた半定量的な方法で行ってもよい。
- (4) 劣化予測は、点検結果に基づいて行うことを原則とする。

【解 説】

詳細は、共通編および土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

4.5 評価および判定

- (1) 塩害を受ける構造物の性能の評価は、構造物の劣化過程を考慮して評価の対象となる性能を適切に選定した上で、行わなければならない。
- (2) 構造物の点検時および残存予定供用期間における諸性能の評価は、点検結果および劣化予測の結果に基づいて定量的な方法で行うことを原則とする。
- (3) (2)による点検時および将来における諸性能の評価が困難な場合には、構造物の外観上のグレードで評価を行ってよい。
- (4) 対策の要否の判定は、塩害による性能の低下の程度と維持管理限界、および残存予定供用期間を考慮して行わなければならない。

【解 説】

(3) について

構造物の諸性能を定量的に評価することは、性能照査型設計体系の中の性能評価手法としては理想的ではあるが、現状では必ずしもこのような手法が適用できないこともある。そこで、現実的には表一解 4.2 を参考に、構造物の外観変状からグレーディングを行い、点検実施時における構造物の性能を半定量的に評価してもよいこととした。

なお、劣化過程や外観上のグレードは、点検時の構造物の性能低下の程度を半定量的に分類するものであり、将来の性能低下の進行を評価するものではないが、たとえば、塩化物イオンの見かけの拡散係数、鋼材の腐食速度等の点検結果を基に残存予定供用期間内の劣化過程を推定することで、表一解 4.2 から残存予定供用期間内の構造物の性能を評価することもできる。また、マルコフ連鎖モデル等の確率論に基づく外観上のグレードの予測結果を用いて、残存予定供用期間内の構造物の性能を評価することもできる。なお、類似の構造物（構造形式、材料、施工、環境、供用状態）の詳細な維持管理記録が残されており、かつ、それまでの構造物の外観上のグレードの進行状況が類似している場合には、その構造物の評価結果も参考にすることができる。

表一解 4.2 塩害に対する外観上の劣化グレードと要求性能毎の保有性能例

外観上の劣化グレード	劣化過程	劣化の状態	要求性能毎の保有性能			
			安全性	使用性	第三者影響度	美観
グレード I	潜伏期	・外観変状なし	性能の低下は見られない			
		・鋼材腐食の発生（鋼材表面の塩化物イオンが発錆限界に到達）				
グレード II	進展期	・外観変状なし	性能の低下は顕著でない		性能の低下	
		・コンクリートに腐食ひび割れ発生				
グレード III-1	加速期前期	・さび汁、浮きの発生	耐力やじん性の低下等	変位・変形の増大や振動の発生等	性能の喪失	性能の喪失
		・腐食ひび割れの進行				
グレード III-2	加速期後期	・部分的な剥離、剥落の進行	性能の著しい低下			
		・かぶりの剥離・剥落				
グレード IV	劣化期	・鋼材腐食量の増加				

4.6 対策

- (1) 塩害による構造物の性能低下に対して対策が必要と判定された場合には、対策後の構造物が要求性能を満足するような対策を選定する。
- (2) 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よい。
- (3) 補修は、所定の効果が得られるように塩害による性能低下を考慮して工法・材料を選択しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

4.7 記録

- (1) 点検、劣化予測、評価および判定、対策などの記録は、本指針共通編によることを原則とする。
- (2) 塩害特有の項目については、必ず記録しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

【参考文献】

- 1) 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，参考資料C「積雪寒冷地において劣化作用を受けるコンクリート構造物の維持管理に関する留意事項」，2013.4

5章 アルカリシリカ反応

5.1 一般

- (1) この章は、アルカリシリカ反応によって性能低下が生じた構造物、あるいは性能低下が生じる可能性の高い構造物の維持管理計画、診断、対策、記録について、その標準的な方法を示すものである。
- (2) この章は、主として事後維持管理の構造物に適用する。

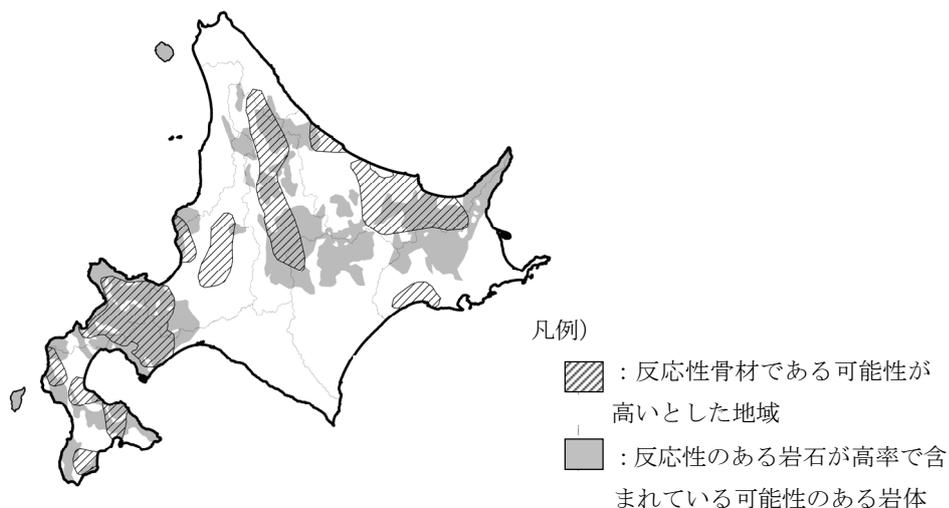
【解 説】

(1) について

アルカリ骨材反応とアルカリシリカ反応 セメントに含有されるアルカリは、セメントの水和反応の過程でコンクリートの空隙内の水溶液に溶解し、水酸化アルカリ (NaOH および KOH) を主成分とする強アルカリ性 (pH=13~13.5) の水溶液となる。ある種のシリカ鉱物もしくはガラス質物質を含有する骨材は、コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させることがある。このような反応は、アルカリ骨材反応と総称されている。岩石中で水酸化アルカリを含む水溶液と反応するものには、オパール、クリストバライト、トリディマイト、隠微晶質もしくは微晶質な石英といったシリカ鉱物や火山ガラス等がある。

わが国では、昭和 50 年代前半に関西、中国および北陸の各地域において、主として安山岩碎石を使用した構造物でアルカリ骨材反応による劣化が発見された。その後、種々の調査により、アルカリ骨材反応による劣化を受けた構造物は全国の幅広い地域に分布し、反応性骨材も安山岩、流紋岩等の火山岩系やチャート、硬質砂岩等の堆積岩系など、多種多様なものが存在することがわかってきた。このようなアルカリ骨材反応には、従来、アルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩岩反応との 2 種類があるとされ、わが国で被害が主に報告されているのはアルカリシリカ反応であった。そこで、この章では、アルカリシリカ反応に対する構造物の維持管理について示すことにする。

北海道内においてアルカリシリカ反応を呈する骨材をコンクリート用骨材として使用している可能性の高い地域を図-解 5.1 に示す。当該地域のコンクリート構造物では使用骨材がアルカリシリカ反応を呈する可能性があることに留意する必要がある。図中の斜線は全道各地で採取した碎石 (砕砂)・砂利・砂について鉱物分析・骨材のアルカリシリカ反応反応性試験 (化学法・モルタルバー法) を実施し、反応性骨材である可能性が高いとした地域¹⁾ である。また、網掛けは碎石骨材 (砂、砂利を含まない) で反応性のある岩石が高率で含まれている可能性のある岩体 (中新世よりも新しい火山岩類)²⁾ を示す。



図一解 5.1 反応性骨材である可能性が高い地域

アルカリシリカ反応による変状と要因 この章は、アルカリシリカ反応の影響を受ける鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートおよび鋼コンクリート合成構造からなる構造物に適用するが、特に、鉄筋コンクリートへの適用を中心として作成したものである。

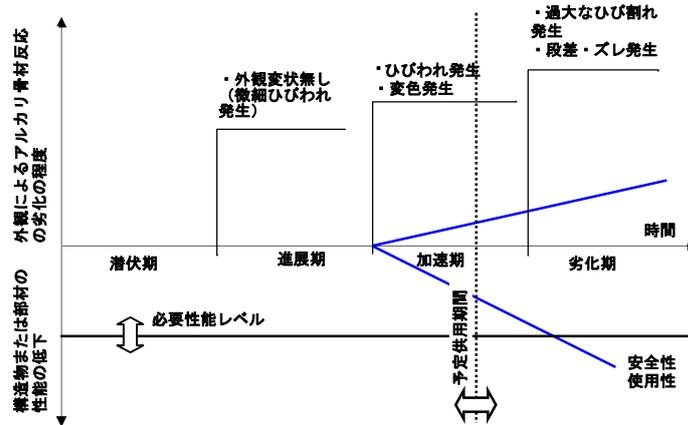
アルカリシリカ反応の影響を受けた構造物では、建設後数年～数十年が経過した後にコンクリートのひび割れの発生という形で変状が顕在化する。アルカリシリカ反応による構造物の変状は、水分およびアルカリが供給される条件下で、長期にわたって進行するのが一般的である。アルカリシリカ反応による変状の程度は、反応性骨材の種類とその含有量、セメントの種類とそのアルカリ量、コンクリートの配合（単位セメント量、水セメント比、空気量、混和材料の種類とその置換率）等のコンクリートに関する要因、部材の断面形状、鋼材量、拘束条件等のコンクリート構造物に関する要因、および水分やアルカリの供給、日射、雨掛かり等の構造物の置かれた使用および環境条件に関する要因によって大きく相違することが知られている。

また、わが国の寒冷地では、平成3年4月にスパイクタイヤの使用が禁止されて以後、道路路面の凍結防止の目的で多量の凍結防止剤が散布されており、その使用量および使用地域は増大している。凍結防止剤として多く使用される塩類（NaCl等）は、アルカリシリカ反応を促進することが知られている。凍結防止剤散布により影響を受ける道路橋の部位については、図一解 2.4 を参照のこと。

アルカリシリカ反応による劣化進行 アルカリシリカ反応の劣化過程は、図一解 5.2、表一解 5.1 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分される。図一解 5.2 では便宜的に各劣化過程の期間を等しく、ひびわれ発生以降の劣化程度や性能低下を直線で示している。

アルカリシリカ反応では、膨張が小さい状態で止まる場合は加速期が長くなり、劣化期に移行する前に予定供用期間を迎える。一方、膨張が大きく進行する場合は加速期が短く、劣化期へと移行することとなる。

それぞれの期間においては劣化現象が構造物の性能に及ぼす影響が異なり、また着目する性能毎に劣化の進展に対応する性能低下の程度も異なるので、劣化過程ごとに診断（点検、劣化予測、評価および判定）、対策の考え方が異なる。

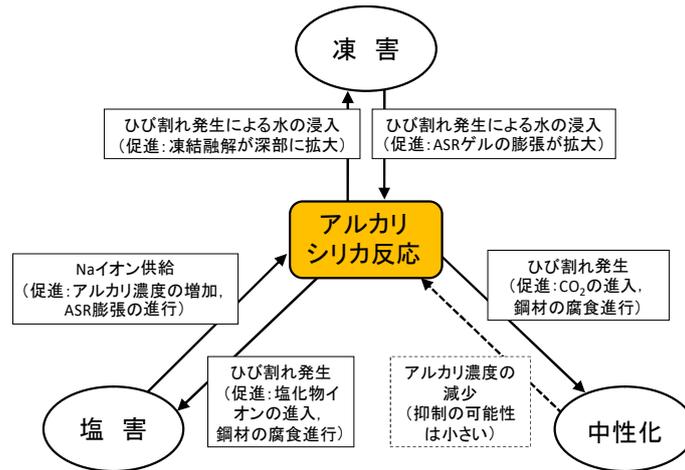


図一解 5.2 アルカリシリカ反応による劣化過程の概念図

表一解 5.1 アルカリシリカ反応の各劣化過程の定義

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	アルカリシリカ反応による膨張により、微細ひび割れが発生するまでの期間	・アルカリシリカゲルの生成速度（反応性鉱物の種類とその量，アルカリ量）
進展期	微細ひび割れ発生以降，コンクリート表面にひび割れや変色が発生するまでの期間	
加速期	アルカリシリカ反応による膨張速度が最大を示す段階で，ひび割れが進展する期間	・アルカリシリカゲルの吸水膨張速度（水とアルカリの供給）
劣化期	過大なひび割れや段差・ズレの発生，部材としての一体性が損なわれ，耐力の低下が顕著な期間	・アルカリシリカゲルの吸水膨張速度 ・鋼材の引張応力度増加率

凍結防止剤として使用される塩類はアルカリシリカ反応を促進すると共に，塩化物イオンの供給源となり塩害による鋼材腐食が促進される．このような環境におかれるコンクリート構造物についてはアルカリシリカ反応と塩害などその他の劣化要因との複合劣化を考慮した維持管理計画の策定，診断（点検，劣化予測，評価・判定），対策を行う必要がある．ここでは，アルカリシリカ反応を中心とした複合劣化の関係図³⁾を図一解 5.3 に示す．



図一解 5.3 アルカリシリカ反応を中心とした複合劣化の関係図

(2) について

アルカリシリカ反応の影響を受けた構造物あるいは受ける可能性の高い構造物とその維持管理に関して、現状では下記が指摘できる。

- 1) モニタリングによっても、劣化が顕在化する前に劣化を明らかにすることが難しい。
反応性を有する骨材が使われていても、アルカリ量が多くても、実際に膨張するかどうかはわからない。
- 2) 何らかの手法で1)が明らかになった場合でも、構造物の状態を潜伏期～進展期のままで留める対策が確立されていない。
- 3) 1) 2) からアルカリシリカ反応の潜伏期～進展期にある構造物（すなわちアルカリシリカ反応の兆候が見られていない構造物の全て）において、将来的にアルカリシリカ反応により劣化が生じる恐れがあるという理由で対策を行うには不確実な点が多い。

これらの特徴のため、通常の構造物を対象とする場合、アルカリシリカ反応による構造物の変状を確認しながら維持管理を行うこととなるのが一般的である。したがって、この章は、主として事後維持管理の構造物に適用するものとしている。

ただし、近隣に建設された、あるいは同種の材料を用いた構造物の実態調査等により、アルカリシリカ反応の影響を受ける可能性が高いと判断される構造物であって、第三者影響度や美観への要求が高い場合や、劣化が顕在化した後に対策を施しにくい場合等では、必要に応じて予防維持管理として維持管理計画を策定することも考えられる。また観察維持管理の構造物についても、維持管理を行う必要が無いわけではなく、この章の基本的な考え方に沿った維持管理を可能な限り実施する必要がある。

5.2 維持管理計画

- (1) アルカリシリカ反応の影響を受ける構造物の維持管理を行う際には、構造物の種類や重要度、構造形式、要求性能、維持管理区分、予定供用期間、ならびにコンクリートの乾燥状況や水分の供給条件などの環境条件を考慮し、あらかじめ維持管理限界を定めた上で、診断、対策、記録を含む維持管理計画を策定しなければならない。
- (2) 維持管理限界は、アルカリシリカ反応による劣化の進行過程と、対象とする構造物に適した対策方法を考慮して設定する。

【解説】

(1) について

アルカリシリカ反応による劣化の進行は、水分やアルカリの供給、日射、雨掛かり等の構造物の置かれた使用および環境条件によって大きく異なるため、これらを考慮した適切な維持管理計画とする必要がある。

また維持管理計画策定の段階で、供用期間を通じての構造物の状況をあらかじめ正確に予想することは、一般的に大きな困難が伴う。そこで、類似の構造物、もしくは類似の環境に置かれた構造物の劣化状況を参考にして、維持管理計画を策定するとよい。

なお、点検の結果や環境の変化などにより、維持管理計画を見直すものとする。

(2) について

アルカリシリカ反応による劣化の進行および性能低下は、表一解 5.2 の通りである。

安全性に着目する場合には加速期以降、使用性、第三者影響度および美観に着目する場合にも加速期以降の性能低下を考慮した維持管理を行う必要がある。アルカリシリカ反応の場合、加速期以降に外観変状が発現するため、これらを参考に維持管理限界を定めるとよい。

- 1) ひび割れの発生、変色、アルカリシリカゲルの滲出
- 2) ひび割れの幅および密度の増大、鋼材腐食の発生によるさび汁
- 3) ひび割れの幅および密度のさらなる増大、段差、ずれや、かぶりの部分的な剥離、剥落
- 4) 外力の影響によるひび割れや鋼材の損傷
- 5) 変位、変形の増大

現状ではアルカリシリカ反応による劣化の進行を確実に抑制できるような補修技術は確立されていないので、上記の1)～5)に至った場合は、断面修復等のきわめて大掛かりな対策が必要となることも考慮しなければならない。対策の実施において困難が予想される構造物（たとえば、規模の大きな構造物や、対策を実施する際に代替経路を確保しにくいような路線の構造物）については、上記の1) もしくは2)の段階で対策を検討することが望ましい。

5.3 点検

- (1) アルカリシリカ反応の影響を受ける構造物の点検では、設定した維持管理区分に基づき、初期点検、日常点検および定期点検を適切に実施しなければならない。
- (2) 点検にあたっては、あらかじめ維持管理計画において項目と方法、頻度および範囲を定めた標準調査を実施する。また、必要に応じて詳細調査を実施しなければならない。

【解 説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

5.4 変状原因の推定および変状の予測

- (1) 点検において部材あるいは構造物に変化が認められた場合、変状原因を推定するものとする。
- (2) アルカリシリカ反応の影響を受けた構造物の維持管理においては、点検時の構造物の性能を定量的に把握し、かつ性能の将来予測を行うものとする。この際、構造物の性能低下は、アルカリシリカ反応の進行を考慮して、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の期間を予測するとよい。
- (3) 劣化予測は、点検結果に基づいて行うことを原則とする。

【解 説】

詳細は、共通編および土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

5.5 評価および判定

アルカリシリカ反応の影響を受けた構造物の評価および判定においては、特に鋼材の損傷の有無や今後の膨張の可能性に着目して、適切に行うものとする。

【解 説】

アルカリシリカ反応により発生したコンクリートのひび割れの深さは、表面のかぶり部分までで、鋼材より内部へのひび割れの進展は少なく、コンクリート中に鋼材が適切に配置されている場合には、アルカリシリカ反応がコンクリート構造物の耐力に与える影響は小さいとされている。コンクリートのひび割れがかぶり部分に限られる場合には、ひび割れによる鋼材腐食の発生、ひび割れや変色等、使用性および第三者影響度、美観の低下が問題となることが多い。

一方で、アルカリシリカ反応により過大な膨張が構造物に発生した場合の最近の調査では、コンクリートの強度低下、鋼材とコンクリートとの付着力の低下、鋼材の曲げ加工部分での損傷が確認されている。このような場合では、構造物の耐荷性状の評価が必要になる。特に、鋼材の曲げ加工部分での損傷が生じると、局所的に鉄筋とコンクリートの一体性が損なわれることも考えられる。このような状態では、一般的な鉄筋コンクリート部材の照査の際に用いられている種々の仮定が成り立たないことも考えられ、その耐荷性状の評価は慎重になされなければならない。このため、鋼材の損傷については特に注意して評価しなければならない。

構造物の諸性能を定量的に評価することは、性能照査型設計体系の中の性能評価手法としては理想的ではあるが、現状では必ずしもこのような手法が確立していない。そこで、現実的には表-解 5.2

を参考に、構造物の外観変状からグレーディングを行い、点検実施時における構造物の性能を半定量的に評価してもよいこととした。

判定は、構造物の性能の評価結果に基づいて対策の要否を決定する行為であるため、劣化要因による違いはないことから、[共通編]を参照するものとする。

表一解 5.2 アルカリシリカ反応に対する外観上の劣化グレードと要求性能毎の保有性能例

外観上の劣化グレード	劣化過程	劣化の状態	要求性能毎の保有性能				
			安全性	使用性	第三者影響度	美観	
グレード I	潜伏期	・外観変状なし	性能の低下は見られない	性能の低下(じん性の低下, 耐力の低下, 剛性の低下)	性能の低下(水密性等の低下, 構造物の変位・変形)	性能の喪失(第三者への影響)	性能の喪失(美観の低下)
		・微細ひび割れの発生					
グレード II	進展期	・水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行					
		・ひび割れの発生					
		・変色の発生					
グレード III	加速期	・アルカリシリカゲルの滲出					
		・アルカリシリカ反応による膨張速度が最大を示す段階 ・ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大					
グレード IV	劣化期	・過度なひび割れの発生 ・段差、ズレの発生					
		・部材としての一体性損失					

5.6 対策

- (1) アルカリシリカ反応による構造物の性能の低下に対して対策が必要と判定された場合には、対策後の構造物が要求性能を満足するような対策を選定することを基本とする。
- (2) 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。
- (3) 補修は、所定の効果が得られるようにアルカリシリカ反応による性能低下やライフサイクルコストを考慮して工法・材料を選択しなければならない。

【解説】

詳細は、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】を参照のこと。

5.7 記録

- (1) 点検，劣化予測，評価および判定，対策などの記録は，本指針共通編によることを原則とする．
- (2) アルカリシリカ反応特有の項目については，必ず記録しなければならない．

【解説】

詳細については，コンクリート標準示方書[維持管理編]を参照のこと．

【参考文献】

- 1) 中井俊英：北海道における ASR 反応性骨材の実態について，開発土木研究所月報 No.425, p.35-40, 1988.10
- 2) 財団法人 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリート耐久性向上技術の開発，アルカリシリカ反応性骨材分布図，p.291, 1989.5
- 3) 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，参考資料 C「積雪寒冷地において劣化作用を受けるコンクリート構造物の維持管理に関する留意事項」，2013.4

付属資料 1 凍害に対する耐久性の照査

付 1.1 一般

新設、打換えの際に行う凍害に対する耐久性の照査では、凍害発生の可能性について評価を行う。

【解 説】

コンクリート構造物のライフサイクルコストの縮減、合理的な長寿命化を図るには、新設や打換えの段階から耐久性の照査を適切に行うことが望ましい。照査は一般に次式により行われる。

$$\gamma_i \frac{SC}{SC_{\max}} \leq 1 \quad (\text{解 付 1})$$

$$\gamma_i \frac{RE_{d\min}}{RE_d} \leq 1 \quad (\text{解 付 2})$$

ここに、 γ_i ：構造物係数

SC_{\max} ：凍結融解試験におけるスケーリング量の最大限界値

SC ：凍結融解試験におけるスケーリング量

$RE_{d\min}$ ：凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値

RE_d ：凍結融解試験における相対動弾性係数

照査は SC_{\max} 、 $RE_{d\min}$ を適切に定め、凍結融解試験によって耐凍害性の照査を行う。 SC_{\max} 、 $RE_{d\min}$ は諸条件を勘案し、合理的な根拠のもとで適切に定める必要があるものの、性能に及ぼす凍害の影響は未だ明確に整理されていない。そのため、当面は凍害発生の可能性について評価を行う。

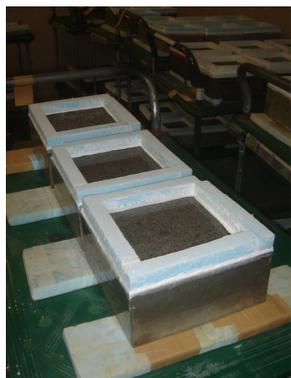
付 1.2 凍害によるスケーリング

- (1) スケーリングに対する耐久性の照査は、実績等をもとにスケーリングの最大限界値を定め、一面凍結融解試験により行う。
- (2) 打設から供用開始までの間、高含水状態が続くと予想される場合、供用開始までに暖気を与えて含水率の低下を図る、もしくは、塩化物イオンとの接触を避けるために表面を保護する対策をとる。
- (3) 凍結防止剤の影響を受けやすい道路橋の地覆や剛性防護柵では、シラン系表面含浸材の適用を標準とする。

【解 説】

(1) について

スケーリング抵抗性を評価する代表的な試験方法として、主に ASTM C 672、RILEM CDF がある。



写一解 付.1 ASTM C 672 に準じた試験状況
(室内の温度を制御)



写一付.2 RILEM CDF 試験機

写一解 付.1 に ASTM C 672 に準じた試験の状況を示す。この試験は、最小試験面積 0.045m^2 、最小深さ 75mm の供試体を作製し、養生終了後、試験面を上方に向けて試験水を深さ 6mm 張り、 $-18\pm 3^\circ\text{C}$ で $16\sim 18$ 時間、 $+23^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ で $6\sim 8$ 時間の凍結融解作用を $5, 10, 15\cdots$ サイクル与えるものである。試験期間については明確な規定がなく、ASTM C 672 では一般に 50 サイクルを目安と前置きした上でサイクルの延長を推奨する旨が述べられている。評価は目視（写一解 2.3）であるが、定量的に評価するため、一般にスケーリング量による評価も行われる場合が多い。

写一解 付.2 に RILEM CDF 試験機を示す。この試験は、高さが $50\sim 150\text{mm}$ の範囲内で試験面の面積が 0.08m^2 以上/ 5 個を満足する供試体を作製し、養生終了後、試験面を下に向け、容器に張られた深さ 15mm の試験水に供試体下部が 10mm 浸かるように 1 週間漬けた後、 $+20\pm 0.5^\circ\text{C}$ から $-20\pm 0.5^\circ\text{C}$ へ 4 時間冷却→ $-20\pm 0.5^\circ\text{C}$ を 3 時間保持→ $+20\pm 0.5^\circ\text{C}$ へ 4 時間加熱→ $+20\pm 0.5^\circ\text{C}$ を 1 時間保持、の凍結融解作用（ 1 サイクル 12 時間）を 28 サイクル行う。評価はスケーリング量で、最大許容限界値は $1500\text{g}/\text{m}^2$ ($0.15\text{g}/\text{cm}^2$) とされている。

なお、この最大許容限界値と部材性能の関係については十分検証されておらず、ASTM C 672 に至っては限界値も規定されていない。そのため、最大許容限界値は現場での実績等を基に設定せざるを得ない。一方、最大許容限界値を極度に厳しく設定すると不経済となることもある。最大許容限界値については、今後の研究の進捗を待たざるを得ない。

例えば、写一解 付.1 の場合、予定供用年数を 40 年とすると水セメント比を 45% 以下とすることでスケーリングの抑制が期待され、ASTM C 672 における最大許容限界量は 50 サイクルで $0.10\text{g}/\text{cm}^2$ 以下、 100 サイクルで $0.15\text{g}/\text{cm}^2$ 以下、 300 サイクルで $0.30\text{g}/\text{cm}^2$ 以下が適当となる。

(2) について

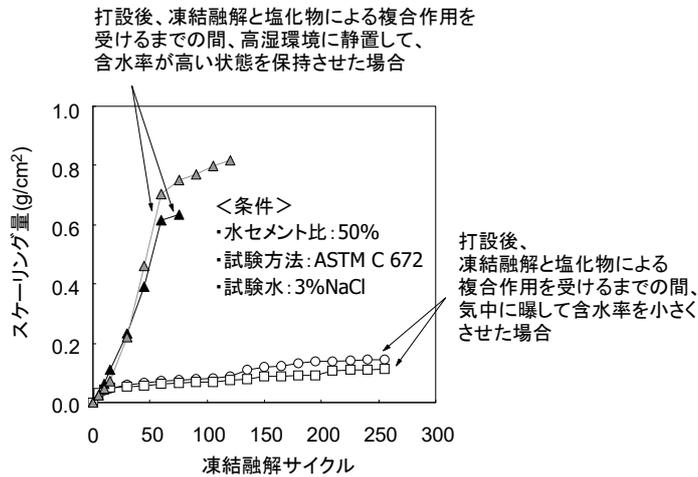
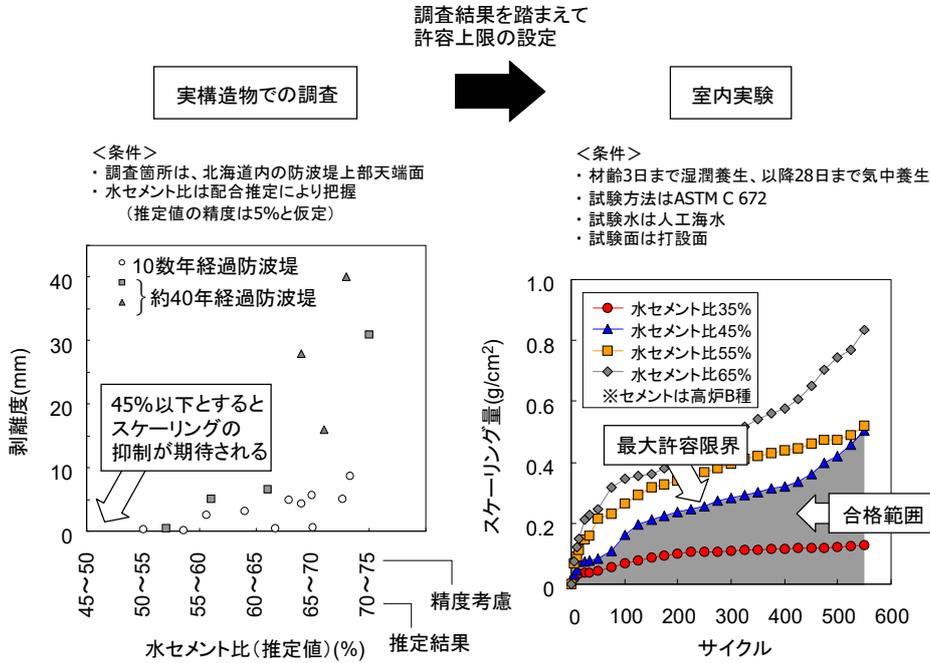
写一解 付.2 に示すように、打設から供用開始までの間、高含水状態が続いた場合、塩水による凍結融解を受けると大きくスケーリングする危険性が高い。次式において δ_{con} が 1 を上回る場合、それが強く懸念される¹⁰⁾。

$$\delta_{con} = \left(\frac{W}{5.1} \right)^{0.3} \times \left(\frac{k}{3 \times 10^{-10}} \right)^{-1.1} \quad (\text{解 付 3})$$

ここに、 δ_{con} : スケーリング促進の危険性を表す指標値

W : 凍結融解を受ける直前のコンクリートの水分率(%)

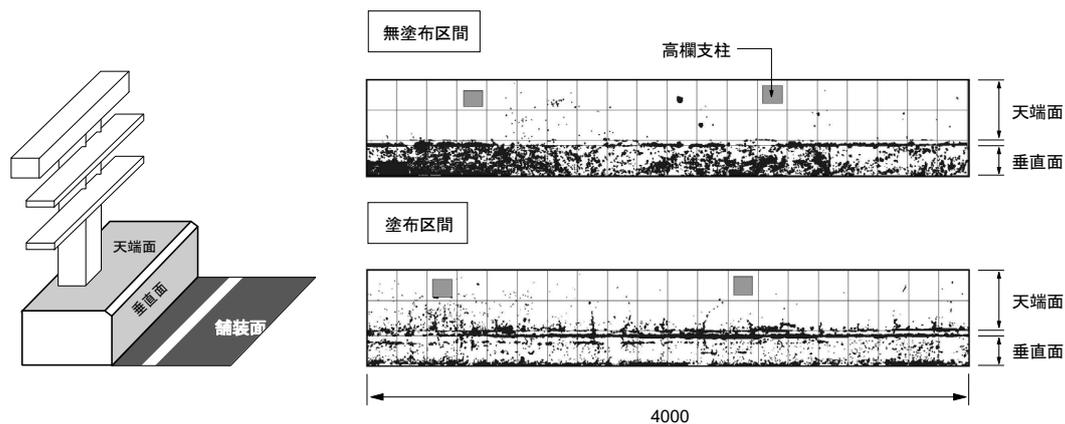
k : 凍結融解を受ける直前の透水係数(cm/s)



$\delta_{con} \geq 1$ が懸念される場合は、供用開始前に暖気を活用した含水率の低下、塩化物イオンとの接触を極力避けるための表面保護（シリル系表面含浸材等）の施工が望ましい。特に、含水率が高くなりやすい冬期においては留意されたい。

(3) について

北海道開発局道路設計要領³⁾では、凍結防止剤の影響を受けやすい道路橋の地覆および剛性防護柵ではシラン系表面含浸材の適用が標準となっているのでこれに準じる。図一解 付.3 に示すように、シラン系表面含浸材を塗布すると一定期間、スケーリングの進行抑制が期待できる。また、塩化物イオンの浸透抑制効果も得られる。さらに定期的に再塗布を行うことで長期に亘るスケーリングの進行抑制が図れる²⁾。耐久性設計の参考にされたい。なお、使用するシラン系表面含浸材の選定は、構造物の管理者が定める仕様に従って行う。



図一解 付.3 5年経過した地覆のスケーリングのスケッチの一例

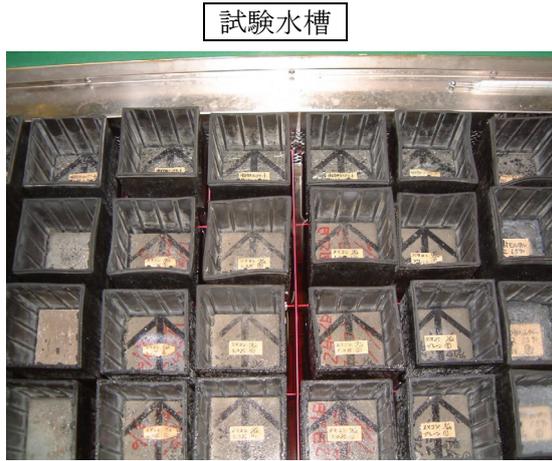
付 1.3 凍害による微細ひび割れ

微細ひび割れに対する耐久性の照査は、所定の規定もしくは過去の調査実績等をもとに相対動弾性係数の最小限界値を定めて、凍結融解試験により行う。

【解 説】

微細ひび割れの程度を表す指標である相対動弾性係数を評価する代表的な試験方法として、JIS A 1148 (A 法) がある。この試験は 100×100×400mm の供試体を作製し、養生終了後、供試体を約 3mm の水で覆うことができるゴム製の容器に供試体を挿入し、容器に水を注いだ後、容器を試験槽に格納して -18±2℃～+5±2℃ の範囲で 1 サイクル 3～4 時間の凍結融解作用を与え、JIS A 1127 に準じて一次共鳴振動数を求め、相対動弾性係数を算出する。写一解 付.3 に試験の様子を示す。なお、凍結融解試験の結果が良好でも、実環境において想定される乾湿繰返し作用を複合的に受けると耐凍害性は大きく低下するとも言われている^{4), 5), 6)}。そのため、合理的な設計を行うには、スケーリングと同様に相対動弾性係数についても実構造物の劣化の進行性をもとに、適切な最小限界値を設定することが望ましいものの、それに資する情報は未だ乏しいのが現状である。そのため、当面は表一解 付.1 を参考に最小限界値を設定することを標準とする。

参考として、ASTM 相当サイクル⁷⁾による凍害予測の事例を紹介する。これは、コンクリートが 1 年間に受ける凍結融解作用を ASTM C 666 (A 法) (JIS A 1148 (A 法) に相当) の凍結最低温度である -18℃ を基準とした ASTM 相当サイクル数に換算し、耐用年数を推定する手法である。ASTM 相当サイクルは以下の式により定義される。



写一解 付.3 JIS A 1148 に準じた試験状況

表一解 付.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 (%)

構造物の露出状態	気象条件 断面	凍結融解がしばしば繰り返される場合		氷点下の気温となることがまれな場合	
		薄い場合※2	一般の場合	薄い場合※2	一般の場合
(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

※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、流氷、水しぶき等のため、水で飽和される部分等。

※2 断面の厚さが 20cm 程度以下の部分等。

$$C_{y_{ASTM-SP}} = C \times F \times R_{SP} = C \times F \times s \times p \times R_{a90} \quad (\text{解 付. 4})$$

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

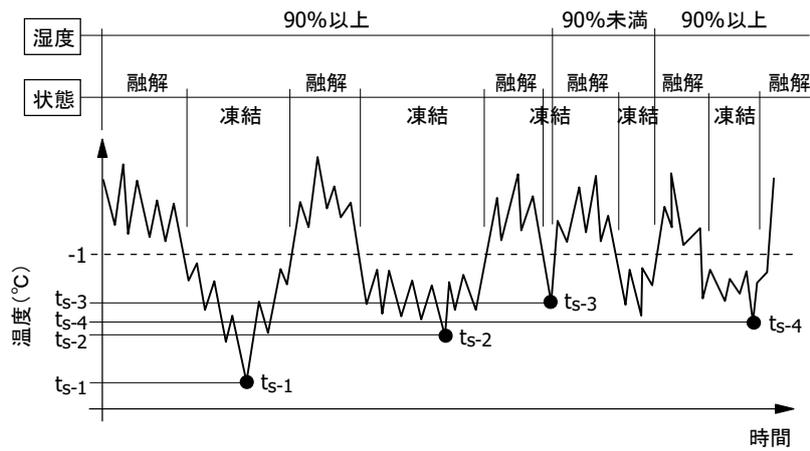
$R_{SP} : \Sigma(-t_s/18)^\beta$ (t_s は凍結最低温度(°C), β は定数(1.15)である) (図一解 付 4)

s : 日照条件に関する係数

p : 劣化過程係数

R_{a90} : 気温による ASTM 相当サイクル数

係数 C , F , s , p を表一解 付 2 に示す。 R_{SP} の添え字 (下付) の S は温度の種類を表し、 S が a であれば気温、 c であればコンクリートを示す。 添え字の P は凍害劣化過程を表し、 P が 90 であれば劣化の兆候が現れる過程、 60 は劣化が明確に現れる過程を示す。 劣化過程および温度の種類異なる R_{SP}



$$\Sigma (-t_s/18)^\beta = \underbrace{\left(-\frac{t_{s-1}}{18} \right)^{1.15} + \left(-\frac{t_{s-2}}{18} \right)^{1.15} + \left(-\frac{t_{s-3}}{18} \right)^{1.15} + \left(-\frac{t_{s-4}}{18} \right)^{1.15} + \dots}_{1\text{シーズン(概ね11~3月)}}$$

図一解 付. 4 $\Sigma(-t_s/18)^\beta (=R_{a90})$ の算出イメージ (凍害が進行しにくい湿度 90%未満は除外⁸⁾)

表一解 付.2 ASTM 相当サイクル数の算定式の諸係数⁷⁾

項目		凍害劣化の過程 (RE_d : 相対動弾性係数)	
		劣化の兆候 ($100\% \geq RE_d > 90\%$)	明確な劣化 ($90\% \geq RE_d > 60\%$)
養生条件 C	水中	1.00	
	気中	0.66	1.41
	20°C乾燥	0.26	0.80
	30°C乾燥	0.14	0.45
凍結融解条件 F	水中凍結水中融解	1.00	
	気中凍結水中融解	0.21	0.23
日照条件 s	北面	1.00	
	水平・南面	1.45	
劣化過程条件 p		1.00	1.64

は係数 s, p を用いることにより, すべて R_{a90} で表すことができる⁷⁾. なお, この R_{a90} は凍結融解の厳しさを表す地域係数 T から求めることもできる.

$$R_{a90} = m \cdot T + n \quad (\text{解 付 5})$$

$$T = -t_{a \min} \left(1 - \frac{D_f}{D_w} \right) \quad (\text{解 付 6})$$

ここに、 T ：地域係数

t_{amin} ：最低温度(°C)

D_f ：凍結持続日数(日)

D_w ：凍結持続日数を含めた凍結融解の開始日から終了日までの総日数(日)

m, n ：現場の環境によって定まる係数

なお、温度、湿度、積雪等の環境条件は部位（水平、垂直）に依存し、実際の劣化速度が ASTM 相当サイクルで求めた凍害の進行速度と乖離する場合があるため、次式により補正する⁸⁾。

$$\Delta RE_{dACT} = \alpha \times \Delta RE_{dASTM} \quad (\text{解 付 7})$$

ここに、 ΔRE_{dACT} ：実構造物の 1 年あたりの相対動弾性係数のおおよその低下量(%/年)

α ：水分条件補正係数

垂直部材： $\alpha = 0.4254 (RE > 90\%)$

$\alpha = 0.0751 (RE \leq 90\%)$

水平部材： $\alpha = 0.0025H + 0.0487 (RE > 90\%)$

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

ただし、 H は最深積雪(cm)

ΔRE_{dASTM} ：ASTM 相当サイクルから求めた 1 年あたりの相対動弾性係数のおおよその低下量(%/年)

そして、相対動弾性係数が直線的に低下すると仮定し、実環境下における相対動弾性係数が 100% から 90% に達するまでのおおよその年数、および 90% から 60% に達するまでのおおよその年数（図－解 付. 5）は次式により求まる。

$$X_{90} = \frac{N_{90}}{Cy_{ASTM-S90}} \quad (\text{解 付 8})$$

$$X_{60} = \frac{N_{60} - N_{90}}{Cy_{ASTM-S60}} \quad (\text{解 付 9})$$

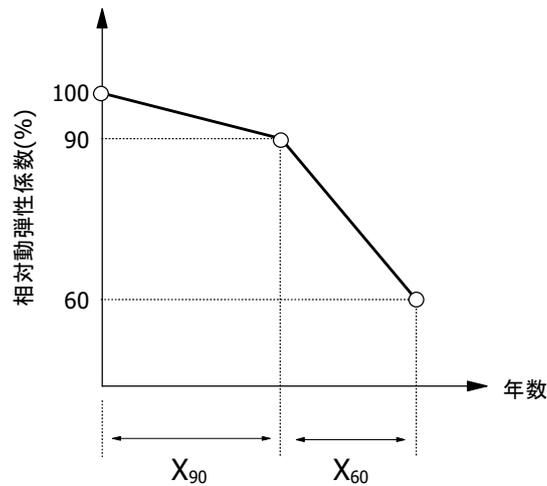
ここに、 X_{90} ：相対動弾性係数が 90% になる年数

X_{60} ：相対動弾性係数が 90% から 60% になるまでの年数

N_{90} ：凍結融解試験において相対動弾性係数が 90% に達するサイクル数

N_{60} ：凍結融解試験において相対動弾性係数が 60% に達するサイクル数

相対動弾性係数が 60% になるまでの年数は、 $X_{90} + X_{60}$ となる。

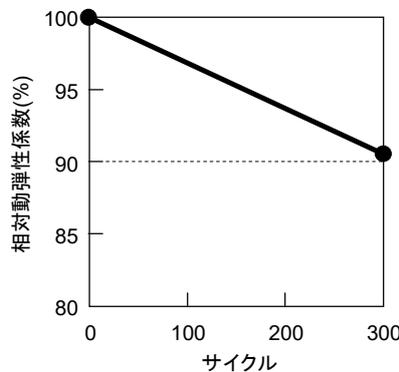


図一解 付. 5 X_{90} および X_{60} の定義

(ASTM 相当サイクルの計算では相対動弾性係数は直線低下と仮定する)

【例 1】

JIS A 1148 (A 法) に準じた凍結融解試験の結果が図一解 付. 6 であったコンクリートを札幌および旭川に適用した場合の相対動弾性係数のおおよその低下率を求める.



図一解 付. 6 凍結融解試験結果のイメージ (相対動弾性係数の特性値 90%以上)

なお, 条件は以下のように仮定する.

- 1) 適用対象の構造物は, 河川樋門の操作台
- 2) 計算に用いる気象データは, 1981~2000 年の平年値
- 3) コンクリートの養生温度は 30℃とする. RE_d が 90% より高いため, $C=0.14$
- 4) 滞水が起きにくいいため気中凍結水中融解状態とし, RE_d が 90% より高いため $F=0.21$
- 5) 操作台は水平部材のため, $s=1.45$
- 6) R_{a90} は, 道内 7 箇所 (鶴川, 千歳, 標茶, 帯広, 江別, 美深, 北見) の河川樋門に温湿度センサーを設置して $\Sigma(-t_s/18)^\beta (=R_{a90})$ を調べ, さらにアメダスから 7 箇所の T を求め, T と R_{a90} を直線回帰式から求める (次式は道内 7 箇所の河川樋門の操作台の調査で得た式⁸⁾).

気象庁のホームページにアクセスして、「気象統計情報」-「過去の気象データ検索」-「地点の選択」(ここでは札幌、旭川を選択)-「年・月ごとの平年値を表示」をクリックすると、下表が表示される

要素	気圧 (hPa)		降水量 (mm)	気温 (°C)			蒸気圧 (hPa)	相対湿度 (%)	風向・風速 (m/s)		日照時間 (時間)	全天日射 (MJ/m)	雪 (cm)			霧量	大気現象			
	現地	海面		合計	平均	最高			最低	平均			平均	平均	最多風向		合計	平均	降雪の深さ	
	平均	平均	降雪の深さ				積雪の深さ													
	統計期間	1981 ~2010																		
資料年数	30	30	30	30	30	30	30	30	30	21	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
1月	1009.8	1013.1	113.6	-3.6	-0.6	-7	3.4	70	3.5	北西	92.5	5.9	173	27	77	8	28.8	0	0.3	
2月	1010.1	1013.5	94	-3.1	0.1	-6.6	3.5	69	3.4	北西	104	8.7	147	26	97	7.9	25.4	0	0.2	
3月	1010.3	1013.6	77.8	0.6	4	-2.9	4.3	66	3.8	北西	146.6	12.5	98	18	81	7.4	23.5	0.1	0.5	
4月	1009.4	1012.6	56.8	7.1	11.5	3.2	6.3	62	4.5	北西	176.5	15.8	11	5	22	6.8	6.4	0.5	0.1	
5月	1007.6	1010.7	33.1	12.4	17.3	6.3	9.4	66	4.6	南東	198.4	17.9	---	---	---	7.1	0.1	0.6	0.5	
6月	1006.3	1009.4	46.8	16.7	21.5	12.9	13.7	72	3.9	南東	187.8	19.8	---	---	---	7.3	0	0.4	1	
7月	1005.4	1008.5	81	20.5	24.9	17.3	18.4	76	3.8	南東	164.9	18.9	---	---	---	7.8	0	0.2	1	
8月	1007	1010	123.8	22.3	26.4	19.1	20.3	75	3.8	南東	171	15.6	---	---	---	7.4	0	0.4	1.6	
9月	1010.2	1013.3	135.2	18.1	22.4	14.2	14.9	71	3.3	南東	160.5	13	---	---	---	6.8	0	0.1	0.8	
10月	1012.3	1015.4	108.7	11.8	16.2	7.5	9.5	67	3.4	南南東	152.3	9.6	2	1	1	6.5	1.2	0.1	1.7	
11月	1012.3	1015.6	104.1	4.9	8.5	1.3	6	67	3.6	南南東	100	6	32	12	12	7.4	13.9	0.2	0.8	
12月	1010.8	1014.1	111.7	-0.9	2.1	-4.1	4.1	69	3.3	北西	85.9	4.9	132	29	46	7.9	26.5	0	0.4	
年	1009.3	1012.5	1106.5	8.9	12.9	5.3	9.5	69	3.7	南東	1740.4	12.1	597	37	100	7.3	125.9	2.7	8.8	

これをクリックすると、下表に示す各月の日ごとの平年値が表示される(基本的には11, 12, 1, 2, 3月でよい)

最大積雪(旭川の場合は94)

	札幌										旭川									
	最高気温(°C)					最低気温(°C)					最高気温(°C)					最低気温(°C)				
	11月	12月	1月	2月	3月	11月	12月	1月	2月	3月	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	10.6	1.9	-2.5	-3.7	-0.1	1	-4.9	-10.5	-13.5	-10.1
2日	12.4	4.4	0.4	-0.9	1.7	4.2	-1.8	-5.9	-7.4	-5.1	10.3	1.7	-2.6	-3.6	0	0.9	-5.1	-10.7	-13.5	-9.9
3日	12.1	4.2	0.3	-0.8	1.8	4	-2	-6	-7.4	-5.1	10	1.5	-2.7	-3.5	0.1	0.7	-5.3	-10.9	-13.5	-9.7
4日	11.9	4	0.2	-0.7	1.9	3.8	-2.2	-6.1	-7.3	-5	9.7	1.3	-2.7	-3.4	0.2	0.5	-5.5	-11	-13.5	-9.6
5日	11.6	3.8	0.1	-0.6	2	3.6	-2.4	-6.3	-7.2	-4.9	9.4	1.1	-2.8	-3.2	0.3	0.3	-5.7	-11.2	-13.4	-9.4
6日	11.4	3.6	0.1	-0.6	2.2	3.4	-2.6	-6.4	-7.2	-4.8	9.1	0.9	-2.9	-3.1	0.5	0.1	-5.9	-11.4	-13.4	-9.2
7日	11.1	3.4	0	-0.5	2.3	3.2	-2.8	-6.5	-7.1	-4.7	8.7	0.7	-3	-3	0.6	-0.1	-6.1	-11.5	-13.3	-9
8日	10.7	3.1	-0.1	-0.4	2.4	3	-3	-6.6	-7	-4.5	8.3	0.4	-3.1	-2.9	0.8	-0.3	-6.3	-11.6	-13.2	-8.7
9日	10.4	2.9	-0.2	-0.3	2.6	2.7	-3.2	-6.7	-7	-4.3	8	0.2	-3.2	-2.7	1	-0.5	-6.6	-11.8	-13.1	-8.4
10日	10	2.7	-0.2	-0.3	2.8	2.5	-3.4	-6.8	-6.9	-4.1	7.6	0	-3.3	-2.6	1.2	-0.7	-6.8	-11.9	-13	-8.2
11日	9.7	2.5	-0.3	-0.2	3	2.2	-3.6	-6.8	-6.8	-3.9	7.2	-0.3	-3.4	-2.5	1.5	-1	-7.1	-12	-12.9	-7.9
12日	9.3	2.3	-0.4	-0.2	3.2	2	-3.8	-6.9	-6.8	-3.7	6.8	-0.5	-3.4	-2.4	1.7	-1.2	-7.3	-12.1	-12.9	-7.5
13日	9	2.1	-0.5	-0.1	3.4	1.7	-4	-7	-6.7	-3.4	6.4	-0.7	-3.5	-2.3	2	-1.4	-7.6	-12.2	-12.8	-7.2
14日	8.6	1.9	-0.5	-0.1	3.6	1.5	-4.2	-7	-6.7	-3.2	6	-0.9	-3.6	-2.3	2.2	-1.7	-7.8	-12.2	-12.7	-6.8
15日	8.3	1.7	-0.6	0	3.8	1.3	-4.4	-7.1	-6.6	-2.9	5.7	-1.1	-3.6	-2.2	2.5	-1.9	-8.1	-12.3	-12.7	-6.5
16日	8	1.6	-0.7	0.1	4	1.1	-4.5	-7.1	-6.6	-2.7	5.4	-1.3	-3.7	-2.1	2.7	-2.1	-8.3	-12.4	-12.6	-6.2
17日	7.8	1.5	-0.7	0.2	4.2	0.9	-4.6	-7.2	-6.5	-2.5	5.1	-1.4	-3.7	-1.9	2.9	-2.3	-8.5	-12.5	-12.5	-5.9
18日	7.5	1.4	-0.8	0.3	4.4	0.7	-4.7	-7.2	-6.5	-2.3	4.8	-1.5	-3.8	-1.8	3.1	-2.5	-8.6	-12.6	-12.4	-5.6
19日	7.3	1.3	-0.9	0.4	4.6	0.5	-4.8	-7.3	-6.4	-2.1	4.6	-1.6	-3.8	-1.7	3.4	-2.7	-8.8	-12.7	-12.3	-5.3
20日	7.1	1.3	-0.9	0.5	4.8	0.3	-4.9	-7.3	-6.3	-1.9	4.4	-1.7	-3.8	-1.5	3.6	-2.9	-9	-12.8	-12.1	-5.1
21日	6.8	1.2	-0.9	0.6	5	0.1	-4.9	-7.3	-6.2	-1.8	4.1	-1.7	-3.9	-1.3	3.8	-3.1	-9.1	-12.9	-11.9	-4.9
22日	6.6	1.2	-1	0.8	5.2	0	-5	-7.4	-6.1	-1.6	3.9	-1.8	-3.9	-1.2	4	-3.3	-9.2	-13	-11.7	-4.7
23日	6.4	1.2	-1	0.9	5.3	-0.2	-5	-7.4	-5.9	-1.5	3.7	-1.8	-3.9	-1	4.2	-3.5	-9.4	-13.1	-11.5	-4.5
24日	6.2	1.1	-1	1	5.5	-0.4	-5.1	-7.4	-5.8	-1.4	3.5	-1.9	-3.9	-0.8	4.4	-3.6	-9.5	-13.2	-11.3	-4.3
25日	6	1.1	-1.1	1.2	5.7	-0.6	-5.1	-7.5	-5.7	-1.2	3.3	-1.9	-3.9	-0.7	4.6	-3.8	-9.6	-13.2	-11	-4.1
26日	5.7	1	-1.1	1.3	5.9	-0.7	-5.2	-7.5	-5.6	-1.1	3.1	-2	-3.9	-0.5	4.9	-4	-9.7	-13.3	-10.8	-3.9
27日	5.5	0.9	-1.1	1.4	6.2	-0.9	-5.3	-7.5	-5.4	-0.9	2.8	-2.1	-3.9	-0.4	5.1	-4.2	-9.8	-13.3	-10.6	-3.7
28日	5.3	0.8	-1.1	1.5	6.4	-1.1	-5.4	-7.5	-5.3	-0.8	2.6	-2.1	-3.9	-0.2	5.4	-4.4	-10	-13.4	-10.3	-3.5
29日	5	0.8	-1	1.6	6.7	-1.3	-5.5	-7.5	-5.2	-0.6	2.4	-2.2	-3.9	-0.1	5.8	-4.5	-10.1	-13.4	-10.2	-3.3
30日	4.8	0.7	-1	1.7	7	-1.5	-5.6	-7.5	-5	-0.5	2.1	-2.3	-3.8	0	6.1	-4.7	-10.2	-13.5	-10	-3.1
31日	4.6	0.6	-1	1.8	7.3	-1.7	-5.7	-7.5	-4.9	-0.4	1.9	-2.4	-3.8	-0.1	6.4	-4.9	-10.3	-13.5	-9.9	-2.9

- X <最高気温の欄>最高気温が0°Cを下回っている日、
<最低気温の欄>最低気温が-1°Cを下回っている日(ただし、最高気温が-1°Cよりも低いものは除く)
- X <最低気温の欄>最高気温、最低気温とも-1°Cを下回っている日

	札幌	旭川	
年間極値(°C)	-7.5	-13.5	(最低気温の最低値)
凍結持続日数(日)	38	82	(最高気温が0°Cを下回っている日数)
凍結持続日数を含めた凍結融解の開始日から終了日までの総日数(日)	120	141	(最低気温が-1°Cを下回っている日数)

図一解 付. 7 1981~2010年の札幌と旭川の平年値⁹⁾

$$R_{a90} = 6.37T - 0.82$$

図一解 付. 7に示す気象データから札幌と旭川の地域係数 T を求めると、以下のようになる。

$$\text{札幌) } T = -(-7.5) \times \left(1 - \frac{38}{120}\right) = 5.1$$

$$\text{旭川) } T = -(-13.5) \times \left(1 - \frac{82}{141}\right) = 5.6$$

よって、札幌と旭川の R_{a90} は以下ようになる。

$$\text{札幌) } R_{a90} = 6.37 \times 5.1 - 0.82 = 31.67$$

$$\text{旭川) } R_{a90} = 6.37 \times 5.6 - 0.82 = 34.85$$

劣化の兆候が現れる過程における札幌、旭川の ASTM 相当サイクルは、以下のように計算される。なお、 RE_d が 90% よりも高いため、明確な劣化が現れる過程の ASTM 相当サイクル $Cy_{ASTM-S60}$ は計算しない。

$$\text{札幌) } Cy_{ASTM-S90} = 0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.00 \times 31.67 = 1.35 (\text{回/年})$$

$$\text{旭川) } Cy_{ASTM-S90} = 0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.00 \times 34.85 = 1.49 (\text{回/年})$$

相対動弾性係数が 90% に達するサイクルは 300 サイクル以降であるが、安全側に評価するため $N_{90} = 300$ とすると、相対動弾性係数が 90% に達するおおよその年数は以下ようになる。

$$\text{札幌) } X_{90} = \frac{300}{1.35} = 222 \text{年}$$

$$\text{旭川) } X_{90} = \frac{300}{1.49} = 201 \text{年}$$

すなわち、1 年あたりの相対動弾性係数 ($100\% \geq RE_d > 90\%$) のおおよその低下量は以下ようになる。

$$\text{札幌) } \Delta RE_{dASTM} = \frac{100 - 90}{222} = 0.045\% / \text{年}$$

$$\text{旭川) } \Delta RE_{dASTM} = \frac{100 - 90}{201} = 0.050\% / \text{年}$$

札幌の積雪深さは図一解 付. 7 より 100cm、旭川は 94cm である。操作台は水平部材で、 RE_d は 90% より高いことから、水分条件補正係数は以下ようになる。

$$\text{札幌) } \alpha = 0.0025 \times 100 + 0.0487 = 0.2987$$

$$\text{旭川) } \alpha = 0.0025 \times 94 + 0.0487 = 0.2837$$

よって、補正後の1年あたりの相対動弾性係数 ($100\% \geq RE_d > 90\%$) のおおよその低下量は以下のようになる。

$$\text{札幌) } \Delta RE_{d_{ACT}} = 0.2987 \times 0.045 = 0.013\% / \text{年}$$

$$\text{旭川) } \Delta RE_{d_{ACT}} = 0.2837 \times 0.050 = 0.014\% / \text{年}$$

以上より、相対動弾性係数の特性値が90%よりも高いコンクリートを札幌と旭川の河川樋門の操作台に適用した場合の相対動弾性係数のおおよその変化は次のようになる。

$$\text{札幌) } RE_d = 100 - 0.013t$$

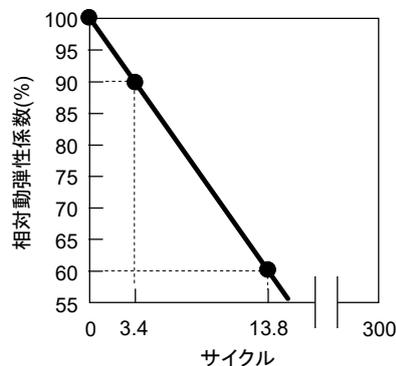
$$\text{旭川) } RE_d = 100 - 0.014t$$

ここに、 t : 年数

相対動弾性係数は100年経過後も98~99%の高い値が保持されると予測される計算結果となる。

【例2】

JIS A 1148 (A法) に準じた凍結融解試験の結果が図一解付. 8であったコンクリートを札幌および旭川に適用した場合の相対動弾性係数のおおよその低下率を求める。



図一解付. 8 凍結融解試験結果のイメージ ($N_{90}=3.4$, $N_{60}=13.8$ で、耐凍害性に劣る)

なお、条件は以下のように仮定する。

- 1) 適用対象の構造物は、河川樋門の擁壁（南面）
- 2) 気象データは【例 1】に同じ
- 3) 養生条件は【例 1】に同じ（ C は劣化の兆候：0.14，明確な劣化：0.45）
- 4) 凍結融解条件は【例 1】に同じ（ F は劣化の兆候：0.21，明確な劣化：0.23）
- 5) 南面のため， $s=1.45$
- 6) R_{a90} の計算の考え方は【例 1】に同じ（次式は道内 7 箇所河川樋門の擁壁で得た式⁸⁾）

$$R_{a90}=1.78T-0.30$$

札幌と旭川の R_{a90} は以下ようになる。

$$\text{札幌) } R_{a90}=1.78 \times 5.1 - 0.30 = 8.78$$

$$\text{旭川) } R_{a90}=1.78 \times 5.6 - 0.30 = 9.67$$

劣化の兆候が現れる過程および明確な劣化が現れる過程における札幌，旭川の ASTM 相当サイクルは，以下ようになる。

$$\text{札幌) } Cy_{ASTM-S90}=0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.00 \times 8.78 = 0.37(\text{回/年})$$

$$Cy_{ASTM-S60}=0.45 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 8.78 = 2.16(\text{回/年})$$

$$\text{旭川) } Cy_{ASTM-S90}=0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.00 \times 9.67 = 0.41(\text{回/年})$$

$$Cy_{ASTM-S60}=0.45 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 9.67 = 2.38(\text{回/年})$$

相対動弾性係数が 90% になる年数 X_{90} ，90% から 60% になるまでの年数 X_{60} は以下ようになる。

$$\text{札幌) } X_{90} = \frac{3.4}{0.37} = 9.19 \text{年}, \quad X_{60} = \frac{13.8-3.4}{2.16} = 4.81 \text{年}$$

$$\text{旭川) } X_{90} = \frac{3.4}{0.41} = 8.29 \text{年}, \quad X_{60} = \frac{13.8-3.4}{2.38} = 4.37 \text{年}$$

よって，1 年あたりの相対動弾性係数のおおよその低下量は以下ようになる。

$$\text{札幌) } \Delta RE_{dASTM} = \frac{100-90}{9.19} = 1.09\%/\text{年} \quad (100\% \geq RE_d > 90\%)$$

$$\Delta RE_{dASTM} = \frac{90-60}{4.81} = 6.24\%/\text{年} \quad (90\% \geq RE_d > 60\%)$$

$$\begin{aligned} \text{旭川) } \Delta RE_{dASTM} &= \frac{100 - 90}{8.29} = 1.21\% / \text{年} \quad (100\% \geq RE_d > 90\%) \\ \Delta RE_{dASTM} &= \frac{90 - 60}{4.37} = 6.86\% / \text{年} \quad (90\% \geq RE_d > 60\%) \end{aligned}$$

擁壁は垂直部材で、水分条件補正係数は積雪深さに依存しない。よって、水分条件補正係数は札幌、旭川ともに以下の値となる。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.4254 \quad (RE_d > 90\%) \\ \alpha &= 0.0751 \quad (RE_d \leq 90\%) \end{aligned}$$

よって、補正後の1年あたりの相対動弾性係数のおおよその低下量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{札幌) } \Delta RE_{dACT} &= 0.4254 \times 1.09 = 0.46\% / \text{年} \quad (100\% \geq RE_d > 90\%) \\ \Delta RE_{dACT} &= 0.0751 \times 6.24 = 0.47\% / \text{年} \quad (90\% \geq RE_d > 60\%) \\ \text{旭川) } \Delta RE_{dACT} &= 0.4254 \times 1.21 = 0.51\% / \text{年} \quad (100\% \geq RE_d > 90\%) \\ \Delta RE_{dACT} &= 0.0751 \times 6.86 = 0.52\% / \text{年} \quad (90\% \geq RE_d > 60\%) \end{aligned}$$

以上より、このコンクリートを札幌と旭川の河川樋門の擁壁に適用した場合の相対動弾性係数のおおよその変化は、安全側の予測とするため、数値の大きい方を採用すると次のようになる。

$$\text{札幌) } RE_d = 100 - 0.47t$$

$$\text{旭川) } RE_d = 100 - 0.52t$$

ここに、 t : 年数

相対動弾性係数は32～33年経過後に60%を下回る計算結果となる。

【参考文献】

- 1) 遠藤裕丈, 田口史雄, 名和豊春: スケーリング進行性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1129-1134, 2009.7
- 2) 遠藤裕丈: 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設計法に関する研究, 北海道大学博士学位論文, p.138, 2011.3
- 3) 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, 参考資料B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」
- 4) 浜幸雄, 濱田英介, 千歩修, 友澤史紀: 高強度・高流動コンクリートの耐凍害性におよぼす凍結融解試験前の養生条件の影響, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.425-430, 2002.
- 5) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 乾湿繰返しコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.731-736, 2003.
- 6) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: 乾燥および乾湿繰返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.921-926, 2008.
- 7) 濱幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富板崇, 鎌田英治: 気象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
- 8) 土木研究所: 平成22年度重点プロジェクト研究報告書, 11.土木施設の寒地耐久性に関する研究, 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
- 9) 気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)