

積雪寒冷地の沿岸域における コンクリート構造物の複合劣化について —既往研究・調査の現状把握と劣化対応策の概略検討の報告—

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○増田 亨
木岡 信治
本間 大輔

コンクリート構造物は、気象作用、化学的浸食作用、物理的摩耗（疲労）などの複合的な作用を受け、劣化が進行する。特に積雪寒冷地の沿岸構造物は、凍害、海氷等の作用が加わり、過酷な環境に曝されるが、その複合的な劣化メカニズムは、未だ詳細には解明されていない。本報告では、特に寒冷海域のコンクリート構造物の劣化現象に着目した試験研究の現状を調査し、実務や今後の研究に資する知見を得た。さらに、過去に北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する調査データを概略分析し、大局的な傾向特性を調べた。最後に、これまで得られた知見より、劣化対応策について概略検討を行い、今後の課題について整理した。

キーワード：海氷、摩耗、複合劣化、沿岸構造物、積雪寒冷地

1. はじめに

コンクリートは、公共施設やその他施設の根幹を支える製品・資材のひとつであり、我々が快適かつ安全に社会生活を営む上で必要不可欠なものである。コンクリート構造物は、原材料などの製造・生産及び施工過程において良好な状態にあっても、設置された箇所における気象作用、化学的浸食作用、物理的摩耗（疲労）などの作用によって複合的に劣化が進行する。特に、積雪寒冷地の沿岸域におけるコンクリート構造物は、凍害、海氷等の作用が加わる過酷な環境下にあるが、それらが相互に関与し相乗的に劣化が進行するいわゆる複合劣化のメカニズムは、未だ詳細には解明されていない。加えて、鉄筋コンクリート構造物は、複合劣化により最終的に鉄筋の劣化（腐食）が進行した場合、鉄筋の断面減少を引き起こすことから、構造物としての耐荷性の低下を招き、施設の要求性能として求められる耐久性・安全性・使用性・復旧性等¹⁾の保有に支障をきたす。（写真-1）コンクリート構造物としての長寿命化を図るため、これら複合劣化の要因を分析・メカニズムを解明し、複合劣化の予防や補修対策技術並びに点検・診断・評価技術を開発することは、極めて重要な課題である。

本報告では、その前段として、一般的な沿岸域のコンクリート構造物の劣化要因やその発生環境等について整理したのち、特に海氷作用による寒冷海域の構造物の劣化現象に着目した試験研究の現状を調査し、これまでの知見と今後の課題を整理した。さらに、北海道開発局が

過去に北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する調査データを概略分析し、大局的な傾向特性を調べた。最後に、複合劣化の対応策について概略検討を行い、今後の研究課題について整理した。

2. 個々の劣化現象の要因と複合劣化との関連性

複合劣化を引き起こす個々の劣化現象は、多種多様であるが、次章でも取り上げる積雪寒冷地の沿岸構造物に特化して起こり得る劣化現象²⁾、並びにそれらが進行していった場合の潜伏期～劣化期³⁾の鉄筋コンクリート構造物に及ぼす影響を整理すると図-1となる。具体的な劣化現象としては、凍害、波浪・水流摩耗、海氷摩耗、硫酸塩劣化⁴⁾、塩害・中性化の5種類であり、コンクリートや鉄筋の劣化の進行過程や構造物への影響の度合か



写真-1 鉄筋コンクリート構造物の海水等による劣化状況
(サロマ湖漁港 第1湖口)

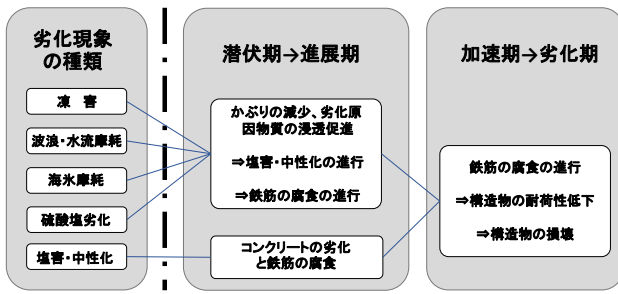


図-1 個々の劣化現象と構造物への影響

ら、塩害・中性化とそれ以外に大別した。図の上段の凍害、凍害、波浪・水流摩耗、海水摩耗、硫酸塩劣化が進行する潜伏期～進展期では、上記の劣化によるかぶりの減少に伴い、塩害・中性化の原因物質の浸透が促進され、鉄筋が腐食しその膨張圧によりコンクリートの劣化も進行し、加速期へ移行する。一方、下段の塩害・中性化が進行する潜伏期～進展期では、鉄筋とコンクリートに同様の劣化が進行し加速期へ移行する。そして、加速期～劣化期では、それぞれの劣化が相乗的に作用することにより、鉄筋の更なる腐食の進行に伴う断面減少で構造物の耐荷性能が低下、最悪の場合は構造物の損壊に至ることがある。また、海氷による劣化現象として、すりへり摩耗の他に海氷の衝突によるコンクリート構造物のひびわれや剥離・剥落が生じる場合があることから、留意を要する²⁾。

図-1に示した劣化現象の要因、原因²⁾から劣化が起きる位置・環境条件を纏めると表-1となる。海水摩耗は氷海域（河口部の結氷河川を含む）、波浪摩耗は砂浜海岸の汀線付近、水流摩耗は河川域内において限定的に発生し、鉛直方向では凍害が海上大気中～干満帯、塩害・中性化と波浪摩耗が飛沫帯～海水中、水流・海水摩耗と硫酸塩劣化が干満帯～海水中で発生する。

これまで述べた積雪寒冷地の沿岸構造物に特化して起

こり得る劣化現象が相互に関与し相乗的に劣化が進行する複合劣化の関連性と複合劣化がコンクリートに及ぼす影響を下記に示す。

- ① 塩害・中性化+凍害
凍害による剥離、ひび割れの拡大に伴い塩害・中性化の原因物質の浸透が促進され、塩害・中性化の進行によるコンクリートの脆弱化に伴い海水等が深部に浸透し、凍結融解が促進される。
- ② 塩害・中性化+海水摩耗または波浪・水流摩耗
塩害・中性化の進行によるコンクリートの脆弱化に伴い氷摩耗または波浪・水流摩耗が促進され、氷摩耗または波浪・水流摩耗によるかぶりの減少に伴い塩害・中性化の原因物質の浸透が促進される。
- ③ 凍害+海水摩耗または波浪・水流摩耗
凍害の進行によるコンクリートの脆弱化に伴い氷摩耗または波浪・水流摩耗が促進され、かぶりが相乗的に減少する。
- ④ 海水摩耗+波浪・水流摩耗
海水摩耗及び波浪・水流摩耗の相互作用によりかぶりが相乗的に減少する。

なお、山路ら⁴⁾によると、硫酸塩劣化は、100年後の劣化深さの予測値が最大でも8mm程度と極めて表層だけの現象であることから、本報告では詳細に検討しない。

3. 氷海域におけるコンクリートの劣化に関する文献のレビューと技術的課題

(1) カテゴリー別による整理

a) 寒冷地特有の複合劣化要因の研究者の一般的見解

多くの研究者が認める「氷による機械的な摩耗

表-1 寒冷地における沿岸構造物の劣化現象の要因と劣化に影響を与える位置条件

劣化現象名	劣化要因	劣化原因（形態）	劣化が起きる位置・環境条件			備考
			海域	鉛直方向	その他	
凍害	凍結融解を伴う気象	水の氷結による膨張に伴う水圧または浸透圧による膨張・収縮	全海域	海上大気中～干満帯	—	
	コンクリート中の水分及び塩化物	塩化物は凍害を早く進行させる触媒的な役割				
塩害 中性化	塩化物イオン、酸素、水（鉄筋の腐食）と二酸化炭素（中性化）	鉄筋の腐食による膨張とひび割れ	全海域	飛沫帯～海水中	—	
摩耗	波浪	砂、波浪	—	干満帯～海水中	—	砂浜海岸の汀線付近
	水流	砂、水流	—			河川域内
	海水	砂、水流、海水、波浪、潮汐	摩擦、衝突			氷海域
硫酸塩劣化	海水中の硫酸イオンによる膨張とマグネシウムイオンによる脆弱化	化学反応による膨張と脆弱化の複合作用 ³⁾	全海域	—	—	劣化深さが極めて表層のため詳細に検討しない ⁴⁾

(abrasion)」に加え、凍結融解^{5)~9)}、氷の繰り返し作用による疲労破壊^{7) 10)}のほか、Sistonen(2007)⁶⁾は salt-frost scalingを挙げている。特に後者は、凍害と塩害の複合劣化¹¹⁾と解釈され、その機構は諸説ある。Marchand(1994)¹²⁾やVerbeck(1956)¹³⁾も、塩水の存在が表面スケーリング、氷摩耗による劣化を加速させると述べ、海域でも凍害と塩害の複合劣化の可能性を示唆している。Janson(1988)⁸⁾は、氷摩耗、凍結融解、温度勾配の作用、凍着等の様々な複合作用を挙げているが、現地調査等により主な要因は氷の移動によるものと結論づけた。Moen(2007)⁹⁾は、氷摩耗は、主に凍結融解と氷の衝突力による複合的なものであるとし、現地観測・室内実験により、凍結融解は骨材と母体との接着面を弱くする事に起因するとした。

b) 室内実験

Hoff(1988, SIN)¹⁴⁾は、北極域に供する高強度軽量骨材の耐摩耗性を調査したABAM projectをレビューしている。主に、柱状氷にコンクリート試験体が接触して往復運動する摩耗試験(ABAM-III)(図-5参照)より、その総括として、摩耗率は、表面でのセメントペーストの摩耗により初期で高い事、氷の接触圧が高く氷温が低いほど摩耗率は増加する事、等を報告した。Newwar et al.(1988)¹⁵⁾は、回転する中空円筒コンクリートに氷を接触させて実施し、初期で摩耗率が高くその後定常摩耗に移行する事、氷の接触圧の影響が高い事、平均摩耗率は0.003-0.004mm/kmである事などを報告した。Itoh et al.^{16) 17)}は、前述のABAM-IIIに基づく実験により、摩耗進行は、セメントの摩耗である①表面の摩耗、②遷移領域、セメントと骨材の摩耗である③定常領域、の3つのフェーズからなるとし、定常領域の摩耗率が0.05mm/km、骨材や圧縮強度の違いによらず摩耗率が一定であること、等を示した。Hanada et al.(1996)¹⁸⁾は、氷による岩石とコンクリートの摩耗試験を実施し、安山岩や砂岩は耐摩耗性があり、その摩耗率はコンクリートの1/3となる事を示すとともに、様々な材料の摩耗率をまとめた。Fiorio(2005)¹⁹⁾は、コンクリートと淡水氷との繰り返し摩擦試験を実施し、一様に摩耗する初期摩耗(セメントの摩耗)と局所領域での大きな摩耗(粗骨材の脱落)の2つの段階からなる事を示した。

c) 現地調査

Huovinen(1988)⁷⁾は、ヘルシンキの灯台の摩耗量は30年間で最大で300mm、ボスニア湾の灯台では、22-24年間で22-39mm摩耗し、最大は水面下0.1-0.3mで生じ、56mmであったこと等を報告しているほか、劣化原因は氷による摩耗と耐凍害性が低い事に起因していると結論づけた。続くHuovinen(1990)²⁰⁾は、砕氷船の船首部分の水面付近にコンクリート試験体を取り付け、その摩耗量を計測している。40kmの航行で2-15mm、最大で7-30mmであった。また、シリカやスラグが添加されたコンクリートのパフォーマンスが良いこと、軽量骨材は最も劣ること等を示

した。また、Swedish offshoreの灯台の摩耗量は、最大で140mm、鉄筋の露出や変形の所見等も報告された⁸⁾。続くJanson(1989)²¹⁾はボスニア湾の氷象が厳しい灯台に設置された耐凍害性のコンクリートパネルの暴露試験より、その性質よりも氷の状態の違いの方が摩耗率に及ぼす影響は大きい事、特に氷の移動方向について、構造物接線の方が法線方向よりも摩耗率が大きい事を示した。Hara et al.(1995)²²⁾は、河川氷による橋脚の摩耗調査から、摩耗率は1.0~5.0mm/yearで、氷の速度と圧力とともに増大すること、氷内の砂の含有量も重要である事を報告した。

d) 氷による摩耗量推定式の提案

Huovinen(1990, 1991)^{20) 23)}は、摩耗量は、砕氷船を用いたセメントペーストの摩耗量の実測値と、そのコンクリート表面からの骨材の剥離量の計算結果との総和で推定できることを示した。その一部の提案式²¹⁾と、砕氷船での観測結果や有限要素モデルにより、供用期間の簡単な推定式が提案された²⁴⁾。Janson(1988)⁸⁾は、ボスニア湾での観測結果や理論的考察から、氷の速度 V と氷厚 h を用いて、摩耗率 $S(\text{mm/year})$ を次式のように提案した。

$$S = \int 0.0015Vhdt$$

Itoh et al.(1988&1994)^{16) 17)}は、前述の実験結果より、摩耗率 $S_r(\text{mm/km})$ は、氷の温度 T と接触圧力 p から推定できるとし、次式を提案した。ボスニア湾での灯台の摩耗の調査結果と比較してその算定式の妥当性が示された。

$$S_r = p(9.708T + 129.7) \times 10^6$$

e) 氷海域におけるコンクリート構造物の摩耗対策案

氷の摩耗対策として、鋼材被覆は今日唯一の方法であり⁵⁾、サハリンIIのGBSのice zoneでも採用されている^{5) 10)}。我が国でもオホーツク海に面したコンクリート構造物の一部にステンレス鋼板やチタンクラット鋼が被覆されている。また、Hanada et al.(1996)¹⁸⁾は、耐摩耗性や美観にも優れる岩石による被覆を提案している。これらの被覆工法に対し、耐摩耗性骨材の使用、セメントペーストと骨材との良好な接着性に加え、圧縮強度の増強が最も良い方法^{6) 24)}とするほか、4%の空気量と低W/Cの使用は耐凍害性に有効²⁴⁾とする案などがある。特にHuovinen(1990, 1991)^{20) 23)}は圧縮強度が70MPa以上、W/Cは最大でも0.3-0.35とすべきこと等を具体的に提案し、大きな粗骨材の使用、シリカフュームやスラグの添加は氷による耐摩耗性が向上すること等も示した。また超強度のかぶり厚が大きなコンクリートの使用⁶⁾や、表面での低摩擦材料によるコーティングが有効であるとされる案もある^{17) 18)}。

(2) レビューの総括

寒冷地特有の劣化要因に限定しても、様々な可能性が

ある中、氷による摩耗現象ひとつとってみても、研究者による試験結果は必ずしも一致せず、それだけ複雑であることを示唆している。しかし、レビューした文献はいずれも、氷はコンクリートを摩耗するという結論を得ている。その主なメカニズムは、表面層のセメントペーストの摩耗と骨材とペーストとの剥離による幾つかのフェーズからなるとする文献が多く見られた。凍結融解との複合劣化であるとする文献も複数見られたが、繰り返しの凍結融解により表面にクラックが形成し脆弱になったところに氷の作用が重畳し、劣化が加速するという機構が考えられる。また、幾つかの摩耗量の推定式が提案されているが、凍結融解など他の複合劣化が考慮されたものではなくその適用には注意が必要である。最後に、氷の摩耗対策を示したが、金属被覆が経験的にも有効であるほか、よく知られる凍害抑制や強度向上の試みが氷の摩耗対策にも有効である事が分かった。

以上、実務上も有用な情報が得られたが、より適切な設計や維持管理にはさらなる科学的知見や現地実証データの蓄積が必要である。特にまだ例が少ない実海域での長期モニタリングに加え、氷のすべり摩耗試験方法の標準化や特に凍結融解が加わった場合の実験が望まれる。

4. 筆者等の取り組みの紹介および今後の課題

(1) 北海道の港湾・漁港構造物における劣化状況に関する調査データの概略分析

調査データには、北海道開発局が過去に、図-2に示す15港湾・漁港の経過年数が3~61年の38施設において試験体採取して得た中性化深さまたは深さ別の塩化物イオン含有量などの測定結果を用いた。中性化深さ測定試験は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し測定している。塩化物イオン含有量試験は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し測定している。なお、上記の試験結果の全てを取り纏めた表はデータの数が多いため本

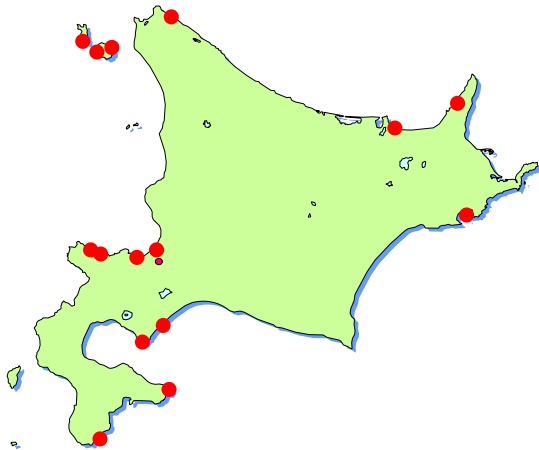


図-2 北海道の港湾・漁港構造物における劣化状況に関する調査位置図

報告では示さないが、ここで特筆したいのは、このように全道の15港湾・漁港構造物に特化して上記の試験結果等を収集し、一元的に分析した事例は無い事である。

図-3には、横軸に構造物建設後の経過年数、縦軸に平均中性化深さの全データを示した。経過年数が30~60年と比較的長い年月が経過しても平均中性化深さが4mm以下と劣化が進行していない構造物がある一方で、経過年数と共に中性化深さが大きい傾向を示す構造物もある。これは、中性化の進行に密接に関係しているコンクリートの配合や緻密性の違いによるものと推測されるが、今後さらに詳細に分析していきたい。

図-4は、横軸に供試体表面からの深さ、縦軸に塩化物イオン含有量の全データをプロットしたものである。供試体表面~10cm程度まではかなりバラツキがあるが、塩化物イオン含有量が多い傾向があり、供試体表面から深くなるに従って塩化物イオン含有量が少なくなる傾向にある。これは、他の原因で発生したクラックから海水が滲入し塩化物イオンの浸透が促進されない状態では、塩化物イオンはコンクリート表面から内部へ時間をかけて浸透していくためである。

一般的に、中性化の進行は経過年数の平方根に比例するとされており、回帰分析によって中性化の進行速度、いわゆる中性化速度を算定することができる^{2,5)}。また、塩化物イオン含有量は、深さ方向の塩化物イオン含有量をもとに式(1a)に示すFickの拡散方程式を用いた回帰分析によって拡散係数を算定し、時間と深さの関数で塩化物イオン含有量を予測することができる^{2,5)}。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \times \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \times t}} \right) \right] + C_i \quad (1a)$$

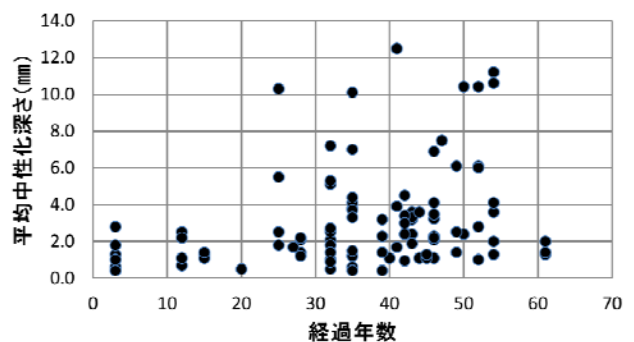


図-3 経過年数と平均中性化深さの関係

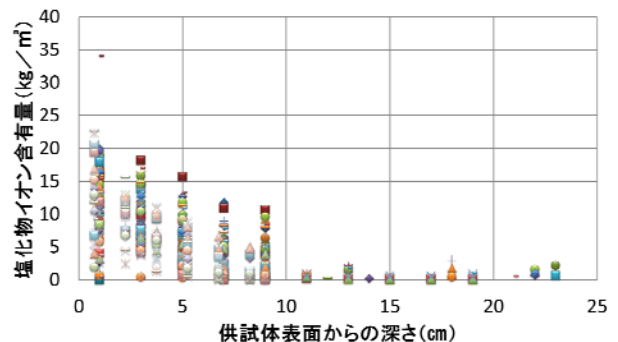


図-4 供試体表面からの深さと塩化物イオン含有量の関係

$C(x, t)$: 深さ x (cm)、建設時からの時刻 t (年) に
 における塩化物イオン含有量 (kg/m^3)
 C_0 : 表面における塩化物イオン含有量 (kg/m^3)
 D_{eff} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
 C_i : 初期含有塩化物イオン含有量 (kg/m^3)
 erf : 誤差関数
 γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数

今後は、収集した調査結果をもとに中性化速度や塩化物イオンの拡散係数を算定し、積雪寒冷地の沿岸域におけるコンクリート構造物特有の塩害・中性化の劣化特性を検証する予定である。

(2) 複合劣化 (海氷摩擦⇔凍結融解) に関する試験予定について

筆者らは、主に海氷摩擦と凍結融解が交互に作用した場合に、コンクリートの劣化の進行度合いについて検証する試験を来年度以降実施する予定である。3章で紹介したように、この氷と凍結融解による重畳は、寒冷(氷)海域の主な複合劣化要因と考えられているにも関わらず検討事例が極めて少なく、今後精力的に実施すべき研究課題でもあった。氷による摩擦・摩耗試験方法は様々な形式があるが、前述のABAM-IIIプロジェクトに基づく面接触の滑動式 (ブロック・オン・プレート) (図-5) を予定している。氷柱ケースに収納された角柱の氷 (幅8cm、高さ5~10cm、長さ70cm) に、コンクリート構造物を意図した供試体を供試体ホルダーに固定し、鉛直下向きに圧力をかけた状態で、氷柱ケースを一定速度の往復運動 (振幅距離30cm) により摩擦させる²⁶⁾。所定の距離 (100km) を摩擦後に精密な凹凸計測機器により平面的な摩耗厚を計測する。また、凍結融解試験は、JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法 (A

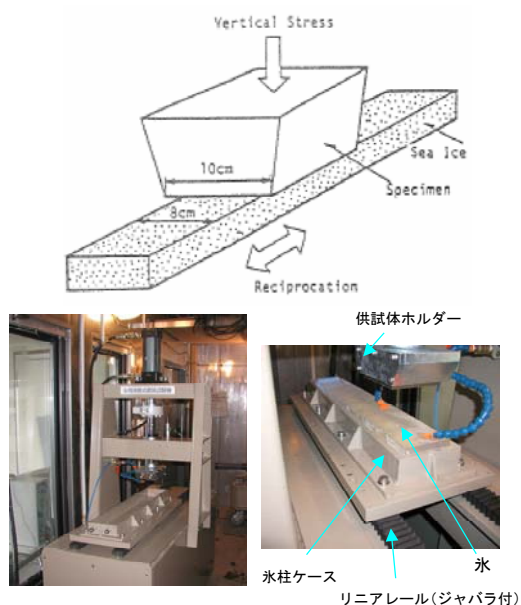


図-5 すべり摩耗試験装置の概要図

法) に準拠し、凍結融解作用を施したコンクリート供試体を用い複合劣化の試験を実施する。なお、実海域における現象により近づけるため、摩擦・摩耗試験と凍結融解試験を数回~十数回程度交互に実施することも考えている。すでに一部の予備実験を展開中であるが、次の機会に報告したい。

(3) 複合劣化に対する対策工案

本節では、第2,3章で紹介した複合的な劣化要因や現状の対策工、そして筆者らによる過去の試験研究²⁶⁾等を踏まえ、各要因に応じた対策工案を概略的に検討した。前述のように、複合劣化は、個々の劣化現象が相互に関与し相乗的に劣化が進行するものである。その対策工としては表-1に示した個々の劣化現象に対する劣化要因・原因の作用を軽減または遮断することで効果を発揮するものと考えられる。具体的には、コンクリートの配合設計の際に緻密性・耐久性を加味 (混和剤・混和材の使用を含む) したり、緻密性・耐久性の高い超高強度コンクリートの使用、コンクリート表面の被覆材保護等が考えられ、下記に要因別に列挙する。

① 凍害

配合設計、超高強度コンクリート、追加かぶり、被覆材による表面保護

② 塩害・中性化

配合設計、超高強度コンクリート、追加かぶり、防食鉄筋、被覆材による表面保護

③ 摩耗 (水流、波浪、海氷)

配合設計、超高強度コンクリート、追加かぶり、被覆材による表面保護

このうち、特に海氷の摩耗や衝突に対しては、前述のように経験的にもそして筆者らの暴露試験等の研究²⁶⁾からも、鋼板による被覆が有利と考えている。ただし、海氷摩擦による腐食促進や特に砂を含んだ海氷によるアブレスブ摩耗等による損耗が考えられるが、その必要板厚 (腐食損耗厚) や更新補修時期などの推定には筆者らの研究成果等²⁶⁾が参考になる。また、鋼材とコンクリートの取り付け方法についても氷の強大な摩擦や衝突力、凍結融解による損傷等に留意する必要があるが、筆者らが取り組む予定となっている研究課題の一つでもある。今後は、複合劣化のメカニズムの解明とともにより効率的かつ経済的な対策工の検討を精力的に行っていく予定である。

4. まとめ

(1) 沿岸域のコンクリート構造物の一般的な劣化要因やその発生環境等を整理した。さらに、氷海域特有の外的環境、とりわけ低温環境や海氷の作用によるコンクリートの劣化損傷機構に着目した国外文献を調

査し、研究現状、複合劣化要因・メカニズム、劣化進行（摩耗量）の推定方法、劣化対策などを整理し、実務や今後の研究に有用な知見を得た。

- (2) 北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する調査データを概略に分析した結果、①経過年数が30～60年と比較的長い場合でも平均中性化深さが4mm以下と劣化が進行していない構造物がある一方で、経過年数と共に中性化深さが大きい構造物もあったこと、②供試体表面～10cm程度まではバラツキがあるが、塩化物イオン含有量が多い傾向にあること、等を確認した。
- (3) 本研究で整理した複合的な劣化要因・機構や、特に海氷等寒冷地特有の要因に着目した国外文献、そして筆者らによる既往の試験研究などを踏まえ、各要因別に有利と思われる対策工案を整理した。

謝辞：小樽、函館、釧路、網走、稚内開発建設部の関係者の方々には各種の貴重な現場データを提供して頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.13-15、2012.12
- 2) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp.53-55、p.196、p.250、2013.8
- 3) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp.111-112、2013.8
- 4) 山路 徹、濱田 秀典：長期間海水中に浸漬されたコンクリートの劣化状況および簡易な劣化指標に関する検討、港湾空港技術研究所資料 No.1150、pp.4-5、13、2007.3
- 5) K.T.Fossa, Improvement of the ice zone of structure for sub arctic area, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, pp.1-4, 2007.
- 6) E.Sistonen et al., Abrasion of concrete by ice, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, pp.5-15, 2007.
- 7) S. Houvinen et al., The abrasion of concrete in arctic offshore structures, Proc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMA), Vol.3, pp.233-240, 1988.
- 8) J.E. Janson, Long term resistance of concrete offshore structures in ice environment, Proc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMA), Vol.3, pp.225-231, 1988.
- 9) E.Moen et al. Ice abrasion on concrete structures-overview, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, pp.59-103, 2007.
- 10) A.T.Bekker, Problems of the ice cover abrading action on legs of concrete offshore structures, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, pp.45-56, 2007.
- 11) (国) 土木研究所寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）、参2-1-参2-2、2016.
- 12) J. Marchand et al., The deicer salt scaling deterioration of concrete - An overview, ACI-SP-145, pp.1-46, 1994.
- 13) G.Verbeck G. et al., Studies of salt scaling of concrete, HRB Bulletin No.150, p.13, 1956.
- 14) G.C. Hoff, Resistance of concrete to ice abrasion - A Review, American Concrete Institute SP 109, pp.427-455, 1988.
- 15) A.M. Nawwar et al. Development of a test method to determine the resistance of concrete to ice abrasion and/or impact, American Concrete Institute SP 109, pp.401-426, 1988.
- 16) Y. Itoh et al., An experimental study on abrasion of concrete due to sea ice, Proc. of 20th Offshore Technology Conference (OTC5678), pp.61-68, 1988.
- 17) Y. Itoh et al., Estimation method for abrasion of concrete structures due to sea ice movement, Proc. of 4th International Offshore and Polar Engineering, Vol.2, pp.545-552, 1994.
- 18) M. Hanada, Abrasion rate of Various Materials due to the movement of Ice Sheets, Proc. of 6th International Offshore and Polar Engineering, Vol.2, pp.433-437, 1996.
- 19) B. Fiorio, Wear characterization and degradation mechanics of a concrete surface under ice friction, Construction and Building Materials Vol.19, 5, pp.366-375, 2005.
- 20) S.Houvinen, Abrasion of concrete by ice in arctic sea structure, VTT Publications, No. 62, pp.23-34, 1990.
- 21) J.E.Janson, Report No3, Results from the winter season 1988-1989, Conclusion after the three winters 1986-1989. Joint Industry Study, Field Investigation of Ice Impact on Lightweight Aggregate Concrete, VBB.
- 22) F. Hara et al., Prediction of the degree of abrasion of bridge piers by fresh water ice and the protective measures, Proc. of the International Conference Concrete under Severe Conditions, CONSEC' 95, Vc pp.485-494, 1995.
- 23) S.Houvinen, Abrasion of concrete by ice, VTT Publications, No. 3, pp.56-75, 1991.
- 24) S. Jacobsen, Ice Abrasion, Frost, De-Icer, Salt Scaling and Reinforcement Corrosion on Concrete Structures: Interaction and Service-life, CONSEC' 07, Concrete under severe conditions, pp.1137-1152, 2007.
- 25) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp.151-153、pp.170-172、p.196、2013.8
- 26) 中嶋雄一、木岡信治、本間大輔、井元忠博：海氷作用や低温環境に起因する構造物劣化・損傷機構の解明と対策に関する研究、プロジェクト研究報告書、国立研究開発法人土木研究所、2015.