

平成30年度

北海道における港湾及び漁港施設の 老朽化に関する取り組み

とりまとめ担当 本局 港湾空港部 港湾建設課
港湾行政課
農業水産部 水産課
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ 寒冷沿岸域チーム

まえがき

北海道内の港湾・漁港施設は高度経済成長期以降に集中して整備され、今後、老朽化施設が急速に増大する。また、特に沿岸域に位置する北海道の港湾・漁港施設では、波浪などの外力、海水に含まれる塩分や積雪寒冷地特有の凍害といった厳しい条件下にあり、施設の劣化を促進させる環境におかれている。このような中、平成25年の港湾法改正において施設の性能を維持するための点検等が義務化され、施設の維持管理、補修、更新等を計画的・効率的に実施していくことが重要な課題となっている。

このため、北海道内の港湾および第3種、第4種漁港を対象に、主要施設である外郭施設および係留施設について建設年次及び構造特性を整理し、構造形式別に老朽化の傾向を分析するとともに、老朽化対策の現状をとりまとめた。あわせて、積雪寒冷地における北海道特有の沿岸構造物の老朽化対策に関する最新の研究状況について報告するものである。

1. 北海道における港湾・漁港施設の現状

(1) 港湾施設の現状

港湾では、港湾管理者が立案した整備計画（港湾計画等）に基づき、国、港湾管理者、民間事業者などが、港湾施設の整備を行っている。

北海道内の国有港湾施設は、港湾の基幹的役割を担う係留施設、港内の水域の静穏度維持や、背後地の防護のために必要な外郭施設、車両等の安全かつ円滑な交通のために必要な臨港交通施設、船舶の安全かつ円滑な航行に必要な水域施設、さらには貨物の安全な荷捌きなどに必要なその他施設（荷さばき地、港湾施設用地）などがあり、これらは直轄事業で整備している。港湾施設の管理は施設設置者が施設管理を行うが、国有港湾施設は、

港湾法第54条に基づき、国と港湾管理者が管理委託契約を締結し、港湾管理者が運営、維持管理を行っている。

維持管理を行う上では、特に干満帯では潮汐の変動により、同一施設でも海水中から大気中と周期的に異なる環境下であることや、凍害によるコンクリートの劣化など、供用期間中에서도想定外の劣化が発生する厳しい環境下におかれるという特徴がある。

また、陸上からの目視による施設点検だけでは、全ての点検が行えず、船舶や潜水土、音響測深機などの機材や人材が必要となるが、多くの港湾管理者は市町であり、港湾に精通する技術職員や、維持補修に要する費用が不足している実態もある。

a) 国有港湾施設の整備現状

国有港湾施設のうち、基幹的役割を担っている係留施設、外郭施設、臨港交通施設は H30.10 現在で、合計1,452施設ある。

これら港湾施設の整備年次を見ると、高度経済成長期から集中的に整備が進められ、現在では係留施設は全体の45%の647施設、ついで外郭施設が41%の602施設と、港湾施設の中でもこれらの施設が大きなウェイトを占めていることがわかる（図-1）。



図-1 国有港湾施設数の整備年次と整備施設数の傾向

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海氷、複合劣化、摩耗

b) 国有港湾施設の構造特性

国有港湾施設のうち、特に基幹的役割を担っている係留施設と外郭施設について、構造特性を見てみると、全体 1,249 施設のうちコンクリート構造物が全体の 71% (884 施設)、鋼構造物が 16% (202 施設) と、コンクリート構造物が全体の大きなウエイトを占めている。

このうち、コンクリート構造物の構造細目別では、ケーソン式構造が全体の34%、プレパックドコンクリート構造が16%、水中コンクリート構造が14%、直立消波構造が7%と、さまざまな構造形式で施設整備が行われていることがわかる (図-2)。

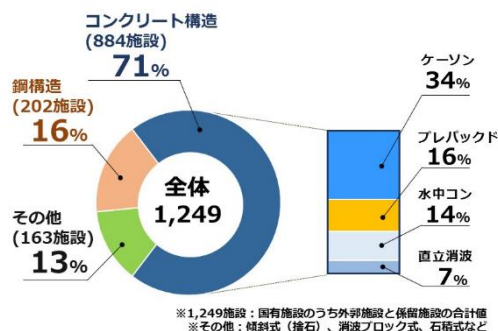


図-2 国有港湾施設のうち外郭・係留施設の構造特性の割合

c) 国有港湾施設の建設経過と老朽化の現状

港湾施設は、建設初期から鋼構造やケーソン構造が多く用いられているが、コンクリート構造のうち単塊式の構造形式としては、高度経済成長期から1990年代まで、プレパックドコンクリート構造が主体的であったが、その後、1990年代からは新たに水中コンクリート構造や、直立消波構造等が用いられるようになり、現在に至っている。

港湾施設の耐用年数50年を経過する施設数を見てみると、平成30年10月時点では、全体の18%程度が50年を超える状況にあるが、25年後には全体の半数以上となる69%で耐用年数を超過することが判明している。このため、今後急速に増大する老朽化施設の早急な補修・改良対応が必要となっている (図-3)。

(2) 直轄漁港施設の現状

漁港漁場整備法で定める北海道の第3種漁港18港及び第4種漁港20港では、直轄事業として北海道開発局（以下、「当局」という）が漁港施設の整備を実施している。当局が整備可能である漁港施設は、漁港施設のうち基本施設（外郭・係留・水域施設）と機能施設（輸送・漁港施設用地（公共施設用地に限る））であり、これら漁港整備財産（国有財産法第2条の国有財産であるもの）（以下、「直轄漁港施設」という。）の管理、保全及び運営等の日常の維持管理は、漁港管理者（北海道）（以下、「道」という。）が担っている。なお、道内には

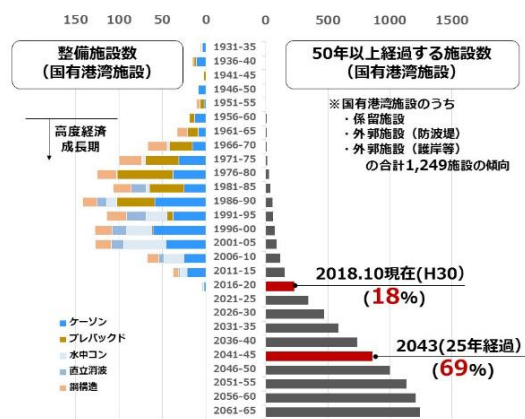


図-3 国有港湾施設のうち外郭施設と係留施設の整備年次と建設後50年以上経過する施設数の推移

243漁港（平成30年4月時点、全国第2位の漁港数で第1種漁港167港、第2種漁港38港、第3種漁港18港、第4種漁港20港）が存在し、その全てを道が管理している。

a) 漁港施設の整備状況（1951～2017年度末）

当局が整備した漁港施設は、漁港法（現、漁港漁場整備法（昭和25年5月2日法律第137号））制定後、計画的に整備が進められ、直轄特定漁港整備事業にて整備した施設（外郭・係留・輸送施設に限定）（一部、道が整備した補助事業含む）は、図-4に示すとおり、外郭施設391施設（延長約71km）、係留施設424施設（約53km）、輸送施設174施設（約89km）の合計989施設（総延長213km）あり、特に高度経済成長期以降に建設（ピークは第9次漁港整備長期計画）された施設が多いことがわかる。

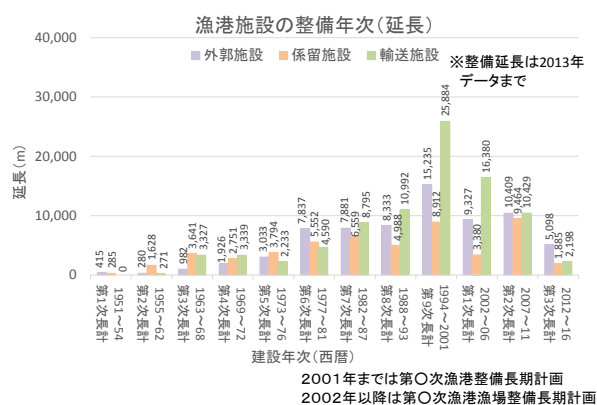


図-4 直轄漁港施設の整備年次と整備延長の推移

b) 直轄漁港施設の構造特性

直轄漁港施設のうち、基本施設である外郭施設と係留施設について構造特性を見てみると、全体 815 施設（延長 124km）のうち、コンクリート構造 82%（延長 102km）、鋼構造 10%（延長 12km）であり、主たる構造がコンクリート構造であることがわかる (図-5)。



図-5 直轄漁港施設のうち外郭・係留施設の構造特性の割合

c) 直轄漁港施設の建設経過と老朽化の現状

整備後 30 年程度経過した直轄漁港施設においては、コンクリート部材の欠損・破損、鋼製部材の腐食等の老朽化による支障が目立ってきている。

本稿では、長寿命化対策を施さない条件の下で、今後、漁港施設の耐用年数である50年を超過する施設延長を試算（図-6）したところ、第4次漁港漁場整備長期計画（2017～2021）時点で約16km（現有ストック量の約8%、2013年度から直轄特定漁港漁場整備事業にて機能保全対策工事を実施した施設延長は除外）であるものの、現時点から約25年後の2045年度時点において、現有するストック量の約半数が耐用年数を超過することとなる。このため、今後、施設の長寿命化対策について、中長期的な維持管理・更新等に係るライフサイクルコストの縮減や予算の平準化等を見据え計画的に保全対策を実施する必要がある。

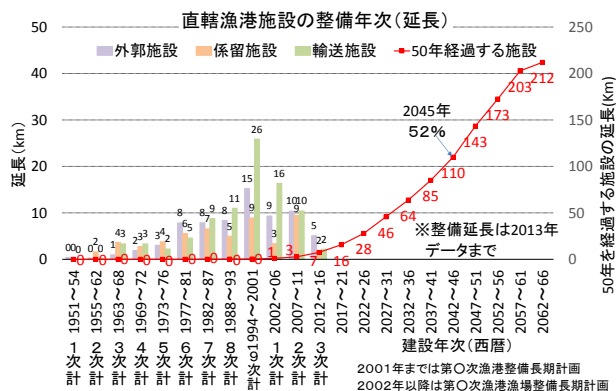


図-6 直轄漁港施設のうち外郭施設と係留施設の整備年次と建設後50年以上経過する施設数の推移

2. 港湾・漁港施設の老朽化対策の取り組み

(1) 港湾施設の老朽化対策の取り組み

a) 港湾施設の維持管理計画

港湾の施設における維持管理計画は、施設が供用期間にわたり要求性能を満足するよう、適切に維持するための方法を、具体的に明示した計画である。

港湾施設の維持管理に関しては、構造物の性能評価と

して、各部材の劣化度を判定し、施設のパフォーマンスに及ぼす影響等を総合的に勘案した上で、施設の総合評価を4段階で定めている（表-1）。

施設管理者は維持管理の手順に沿った形で、計画的かつ適切に実施すべき維持管理上の事項について、維持管理計画書に明確化し、適切な点検を行うことと港湾法に規定されており、技術基準対象施設であれば全ての施設で維持管理計画を策定し、維持管理計画に基づく適切な法定点検を行うことが必要となっている（図-7）。

表-1 港湾施設の点検診断における性能低下度の評価基準

性能低下度	性能低下度の評価基準
A	施設の性能が相当低下している状態
B	施設の性能が低下している状態
C	変状はあるが、施設の性能の低下がほとんど認められない状態
D	変状は認められず、施設の性能が十分に保持されている状態

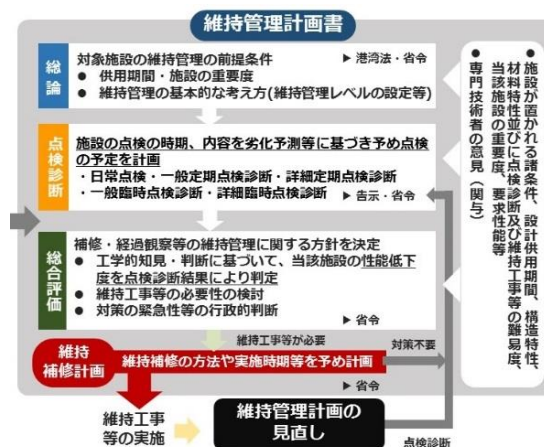


図-7 港湾施設の維持管理計画構成例

(2) 直轄漁港施設の老朽化対策の取り組み

a) 漁港施設の機能保全計画

水産庁は、水産基本計画（平成 29 年 4 月）に総合的かつ計画的に取り組むべき施策として漁港機能の保全対策（長寿命化対策）の推進を位置づけるとともに、漁港漁場整備長期計画（平成 29 年 3 月）において、漁港機能の適切な保全を図るため、既存の漁港施設の計画的な補修・改修を目標として掲げ、機能保全計画に基づく老朽化対策を推進している。この機能保全計画とは、施設の機能を保全するために必要な日常管理や保全・更新工事を盛り込んだ計画であり、効率的な維持管理、既存施設の長寿命化、ライフサイクルコストの縮減及び対策コストの平準化を図ることを目的として取り纏めた計画である。直轄漁港施設の機能保全対策は、道と協議を調えた上で、直轄特定漁港漁場整備事業にて、施設の機能診断、機能保全計画の策定・更新（道と協調）及び機能保全計画に基づく機能保全工事（漁港管理者が行う維持補修は除く）を実施している。

直轄漁港施設の健全度は、施設の安定性に及ぼす影響

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海水、複合劣化、摩耗

度を踏まえ、施設の総体的な老朽化状態を評価するもので、A、B、C及びDの4段階（表-2）で評価することを基本（水域施設以外）としている。

表-2 健全度における施設の状態

健全度	施設の状態
A	施設の主要部に著しい老朽化が発生しており、施設の性能が要求性能を下回る可能性のある状態。
B	施設の主要部に著しい老朽化が発生し性能の低下が認められ、予防的対策施さないと将来要求性能を下回る恐れがある状態。
C	軽易な老朽化は発生しているものの施設の性能に関わる老朽化は認められず、性能を保持している状態。
D	施設に老朽化は認められず、十分な性能を保持している状態。（当面、性能の低下の可能性がない状態）

3. 北海道における港湾・漁港施設の老朽化状況

(1)港湾施設における構造形式別の老朽化状況

a) 港湾施設の性能低下度

国有港湾施設のうち、係留施設及び外郭施設 1,249 施設の性能低下度を見てみると、平成 30 年 10 月現在では、性能低下度 A 又は B の施設数は、全体の 32%程度にとどまっている。

一方で、構造細目別の性能低下度の傾向を見てみると、鋼構造物では全体の半数以上となる 55%で性能低下度が A 又は B となっており、コンクリート構造物では、プレパックドコンクリートが 34%、ケーソン式が 33%、水中コンクリートが 11%程度において性能低下度 A 又は B と

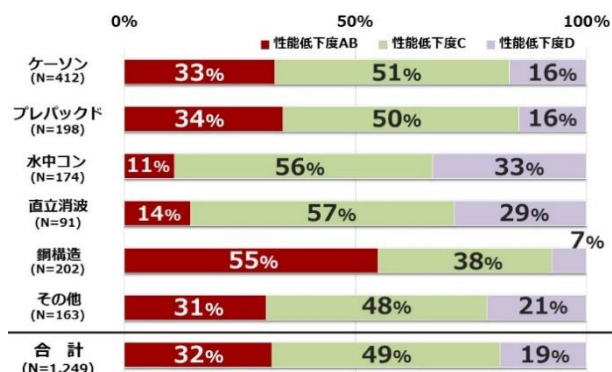


図-8 国有港湾施設のうち構造形式細目別の性能低下度の傾向（係留・外郭）

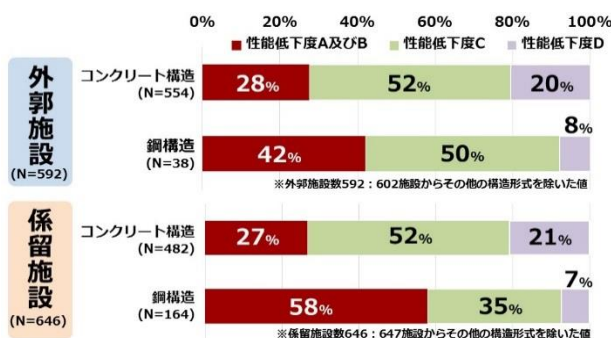


図-9 国有港湾施設のうち外郭施設と係留施設の構造形式別の性能低下度の傾向

なっており、構造形式の違いによって老朽化の進行状況が異なっていることがわかる（図-8）。

また、外郭及び係留施設別に構造形式の性能低下度の傾向を見てみると、いずれもコンクリート構造では 30%程度が A 又は B 判定であり、鋼構造物では、外郭施設が 42%、係留施設が 58%と、コンクリート構造物に比べ、鋼構造物の老朽化が進行していることもわかる（図-9）。

b) 港湾施設の老朽化事例

鋼矢板を用いた係留施設などは、腐食対策として被膜防食や電気防食が一般的であるが、このような腐食対策が一般的に用いられる以前は、供用期間中の腐食を考慮（腐食代）した設計がなされており、干満帯の集中腐食が想定以上に進行している場合は、孔食が発生する等の状況がみられている（写真-1）。

ケーソン式構造（鉄筋コンクリート）では、塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食などにより、供用期間中に機能を損なうような劣化は見られていないものの、ケーソン背後の目地板や防砂シートの劣化損傷による土砂の吸い出しにより、小規模な陥没などが頻発している（写真-2）。

プレパックドコンクリートなどでは、沿岸の寒冷地にある環境条件などから、凍害や塩害の影響を受けやすく、本体工の水際部や海底面に局所的な欠損等が生じること

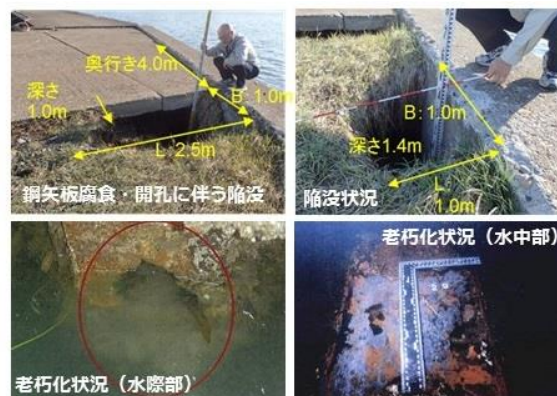


写真-1 国有港湾施設の鋼構造物の老朽化状況



写真-2 国有港湾施設のコンクリート構造物（ケーソン式）の老朽化状況

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海氷、複合劣化、摩耗



写真-3 国有港湾施設のコンクリート構造物
（プレパックドコンクリート）の老朽化状況

で、土砂の吸い出しによる陥没などの被害も発生している（写真-3）。

また、外郭施設のうち護岸部の水叩き舗装や、係留施設のエプロン舗装は、コンクリート舗装が広く用いられているが、空洞化が小規模な場合には、空洞化を予見しづらく大規模な陥没に発展する事例も多い。

c) 港湾施設の老朽化対策に関する課題

各港湾管理者は、維持管理計画などを基に、日々施設点検を行うこととしているが、老朽化に起因する不具合は増加傾向にある。

現在のところ、人命等に被害が及ぶ不具合は発生していないが、重大事故につながりかねない事案でもあり、老朽化等に起因する事故を未然に防止すべく、定期的な点検診断と施設の利用制限による安全対策の実施など、確実な施設点検の実施と安全確保が急務となっている。

(2) 漁港施設における構造形式別の老朽化状況

a) 直轄漁港施設の健全度

当局が整備した漁港施設のうち、外郭・係留施設（傾斜・石積式構造除く）の各構造特性毎の健全度A及びBの施設割合（延長換算：施設の断面毎に算定）は、外郭施設：コンクリート構造 48%、鋼構造 32%、係留施設：コンクリート構造 23%、鋼構造 25%となる（図-10）。これを、外郭・係留施設の全体スト

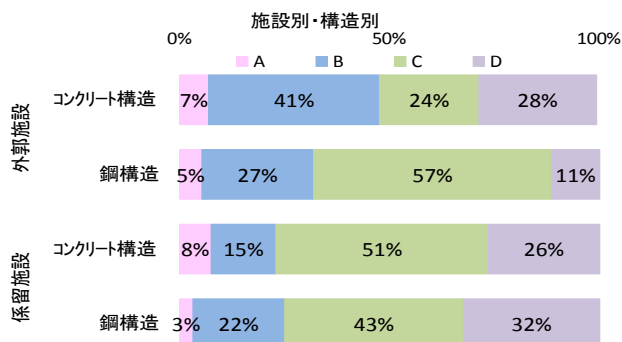


図-10 外郭・係留施設別及び構造形式別の健全度の傾向

ック量（傾斜・石積式構造を除く延長 114km）で割合を見てみると、約 35%程度であった。

b) 直轄漁港施設の老朽化事例

参考までに直轄漁港施設の老朽化状況写真を示す（写真-4）。

鋼構造では、干満帯（平均水面）付近で、集中腐食により発生した腐食穴から土砂等が流出し、鋼矢板背後が空洞化したり、漂砂の影響が大きい漁港では、サンドエロージョンの作用により鋼矢板の海側凸部のみに穴が空いている事象が見受けられた。

コンクリート構造（特にプレパックドコンクリート）においても、干満帯（平均水面）付近で塩害等によるコンクリートの劣化が顕著である事象が見受けられた。



写真-4 漁港施設の老朽化状況

c) 直轄漁港施設の老朽化対策に関する課題

従前、施設の損傷が進行してしまった後に修繕等を行う「事後保全型維持管理」から損傷が軽微である早期の段階に予防的な修繕等を実施する「予防保全型維持管理」への転換を進めることとしているが、将来的な保全対策の実施時期の推定と対策費用の精度向上、施工性の面も含めてより効率的・効果的な対策工法の選定が課題である。

4. 沿岸構造物の老朽化対策に関する研究

港湾・漁港構造物を包含する沿岸構造物は、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。特に積雪寒冷地では、凍害、海水等の作用が加わり、過酷な環境に曝されるが、その詳細な劣化メカニズムは、解明されていない。本報告では、氷海域に曝される構造物のうち、比較的研究例が多い、コンクリートの劣化損傷に関する国外文献を調査し、その研究動向、損傷事例、メカニズム、劣化対策等、実務にも有用な知見を紹介するとともに、特に北海道を取り巻く環境特性とそれに応じた劣化要因等について概説し、積雪寒冷地の沿岸構造物に関する複合劣化事例と特徴を述べる。関連してコンクリートの劣化対策として経験的に有効である鋼板被覆に着目し、鋼構造物の劣化損傷のメカニズムや対策等について北海道内の氷海域に位置する港をフィールドとして行った暴露試験と室内試験等の研究成果並びに氷海域において想定されるコンクリート構造物の複合劣化の研究と今後の取り組みについて紹介する。

(1) 寒冷地における鋼・コンクリート構造物の劣化損傷の事例とメカニズムに関する国外文献のレビュー

a) 既往文献から見る劣化要因

主な劣化要因として、多くの研究者が認める「氷による機械的な摩耗(abrasion)」に加え、凍結融解¹⁾⁹⁾、氷の繰り返し作用による疲労破壊³⁾⁹⁾のほか、Sistonen(2007)²⁾はsalt-frost scalingを挙げている。Marchand(1994)⁷⁾やVerbeck(1956)⁹⁾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)⁴⁾は、氷による摩耗、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、主な要因は氷の移動によるものと結論づけた。Moen(2007)⁹⁾は、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、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) 氷摩耗の室内実験に関するレビュー

次に室内実験に関するものとして、Hoff(1988,SIN)⁹⁾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すべり摩耗試験(ABAM-III)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)¹⁰⁾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である事等を報告した。Itoh et al.¹¹⁾¹²⁾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事、等を示した。Hanada et al.(1996)¹³⁾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)¹⁴⁾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) 氷摩耗の現地調査に関するレビュー

現地調査に関するものとして、Huovinen(1988)³⁾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であった事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)¹⁵⁾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。Hara et al.(1995)¹⁶⁾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事、氷内の砂の含有量も重要である事を報告した。

摩耗量の推定式に関するものとして、Janson(1988)⁴⁾は、ボスニア湾での観測結果や理論的考察から、氷の速度と氷厚を用いた摩耗率の推定式を提案した。Itoh et al.(1988&1994)¹¹⁾¹²⁾は、前述の実験結果より、氷の温度と接触圧力から推定できる摩耗式を提案している。

d) 氷摩耗の対策に関するレビュー

氷の摩耗対策として、鋼材被覆は今日唯一の方法であり¹⁾、サハリンIIのGBSのice zoneでも採用されている¹⁰⁾。わ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)¹³⁾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²⁾⁷⁾とするほか、4%の空気量と低W/Cの仕様は耐凍害性に有効¹⁷⁾とする案等がある。特にHuovinen(1990,1991)¹⁵⁾¹⁸⁾は圧縮強度が70MPa以上、W/Cは最大でも0.3-0.35とすべき事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事等も示した。また超高強度のかぶり厚が大きなコンクリートの使用²⁾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する案もある¹¹⁾¹²⁾。

e) レビューから考えられる劣化のメカニズム

以上から、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（図-11参照）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。氷の摩耗対策として、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。

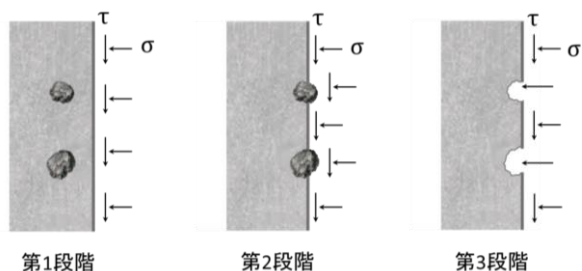


図-11 コンクリート摩耗のメカニズム¹⁵⁾

(2) 積雪寒冷地をとりまく環境特性とそれに応じた劣化要因等について

積雪寒冷地である北海道沿岸がおかれる過酷な環境特性を把握するため、夏期（8月）と冬期（2月）の平均気温、平均水温、平均海水塩分濃度、及び、凍害危険度（冬期のみ）について本州沿岸と比較し、北海道沿岸においてのみ海水の観測期間について整理した結果、表-3のとおりとなった¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾。表-3から、平均気温の北海道沿岸と本州沿岸の平均値の差は、8月が3℃で2月が13℃、平均水温の北海道沿岸と本州沿岸の平均値の差は、夏期が7.5℃で冬期が10.5℃であり、冬期間において気温・海水温とも10℃を越える温度差がある事を確認した。凍害危険度は、日本海南側及び太平洋西側の一部を除く北海道沿岸で2以上であり、本州沿岸と比較して凍害し易

い環境特性である事を示唆している（図-12）。更に表から、主にオホーツク海等の氷海域では多い地点で毎年、少ない地点でも3年に1回は流水が観測されており、上述の低温な環境に海水による作用も加わる過酷な環境であると言える。一方、平均海水塩分濃度は、それぞれの沿岸において顕著な差は見られなかった。

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、前述の積雪寒冷地をとりまく環境特性等を踏まえたコンクリート沿岸構造物に特化して起こり得る劣化現象を抽出し²²⁾²³⁾、劣化現象の要因や原因から劣化が起きる位置・環境条件や対応策案は増田ら²⁴⁾によって纏められており、更に筆者らが鋼構造物についても追加したのが表-4である。表から、個々の劣化現象に対応する沿岸構造物の劣化形態としては鋼構造物の腐食・摩耗・損傷・疲労・損壊、コンクリート構造物の剥離・ひび割れ・摩耗・欠損等がある。また、積雪寒冷地の氷海域の沿岸構造物において特筆すべきは、海水摩耗との複合劣化であり、他の劣化現象による材料の脆弱化等に伴い複合的かつ相乗的に劣化が進行する場合がある事から留意を要する。

表-3 北海道と本州沿岸の環境特性の比較¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾

沿岸名	環境項目	8月平均 (夏期)	2月平均 (冬期)	観測期間
北海道 沿岸	平均気温	約18～22℃	約-6～-2℃	1951～1980年
	平均水温	約13～22℃	約2～9℃	
	平均海水 塩分濃度	約32～33‰	約33～34‰	1923～1987年
	凍害危険度	—	1～4	—
	海水観測 の年次値	最小期間 18日(10年)	最大期間 81日(30年)	1981～2010年
本州 沿岸	平均気温	約18～28℃	約-2～16℃	1951～1980年
	平均水温	約22～28℃	約9～23℃	
	平均海水 塩分濃度	約31～34‰	約32～34‰	1923～1987年
	凍害危険度	—	0～1	—

表-4 積雪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・環境条件及び対応策²²⁾²³⁾²⁴⁾

構造形式	劣化現象名	各材料の劣化要因	各材料の劣化形態	劣化が起きる位置・環境条件			複合劣化の対応策案	備考
				海域	鉛直方向	その他		
鋼構造物	腐食	酸素、水	鋼材の腐食に伴う断面減少と耐荷性の低下	全海域	飛沫帯～海水中	—	肉厚の追加、防食材料の使用、被覆材による表面保護	
	波浪・水流摩耗	砂と波浪 砂と水流	エロージョン・コロージョンによる摩耗 エロージョン・コロージョンによる摩耗	—	—	砂浜海岸の汀線付近 河川域内	肉厚の追加、被覆材による表面保護	
	海水摩耗	水流、波浪、潮汐による海水の摩擦と衝突	摩擦による摩耗、衝突による損傷・損壊、繰り返し荷重による損傷・疲労	氷海域	干満帯～海水中	—	—	海水には砂が含まれる場合がある
コンクリート構造物	凍害	凍結融解を伴う気象 コンクリート中の水分及び塩化物	水の氷結による膨張に伴う水圧または浸透圧が原因の膨張・収縮による剥離・ひび割れ 塩化物は凍害の進行を促進させる間接的な作用	全海域	海上大気中～干満帯	—	配合設計、超高強度コンクリートかぶりの追加、被覆材による表面保護	
	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）	鉄筋の腐食に伴う膨張による剥離・ひび割れ	全海域	飛沫帯～海水中	—	配合設計、超高強度コンクリートかぶりの追加、防食鉄筋、被覆材による表面保護	
	波浪・水流摩耗	砂と波浪 砂と水流	エロージョンによる摩耗 エロージョンによる摩耗	—	—	砂浜海岸の汀線付近 河川域内	—	
	海水摩耗	水流、波浪、潮汐による海水の摩擦と衝突	摩擦による摩耗及び衝突による欠損	氷海域	干満帯～海水中	—	配合設計、超高強度コンクリートかぶりの追加、被覆材による表面保護	海水には砂が含まれる場合がある
	硫酸塩劣化	海水中の硫酸イオン（膨張）とマグネシウムイオン（脆弱化）	化学反応による膨張と脆弱化に伴う剥離	全海域	—	—	—	

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海水、複合劣化、摩耗

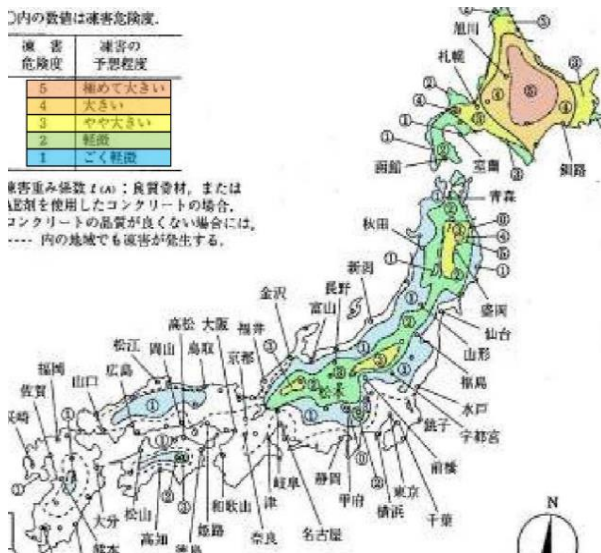


図-12 日本における凍害危険度の分布²⁰⁾

(3) 積雪寒冷地の沿岸構造物（鋼・コンクリート）に関する複合劣化事例と特徴

a) 鋼構造物の劣化事例と特徴

写真-5は、オホーツク海沿岸にある鋼矢板式導流堤の劣化状況である。鋼矢板全体が腐食し、干満帯付近が大きく欠損している。そして、欠損部の矢板は水面付近で内側に押し曲げられている。鋼矢板全面が褐色に腐食していることから、防食工ではなく、矢板の肉厚に腐食代を見込んだ設計がなされていたものと考えられる。

劣化要因としては、腐食に加えて周辺の砂による摩耗（サンドエロージョン）の影響も考えられるが、海水の接触痕からして、海水による摩耗や海水の衝突による変形も劣化を早めた要因である可能性がある。詳細は後述するが、写真-5の劣化は、主に鋼材の腐食、砂による摩耗、海水による摩耗・損傷による複合劣化であると考えられる。

次に、氷海域で防食工を施した場合の劣化事例として、既存の被覆防食工法と電気防食工法の耐氷性能を現地暴露試験で検証した結果を示す。現地暴露試験は、オホーツク海沿岸にある斜里漁港の防砂堤で実施している。

被覆防食工法の暴露試験体には、ウレタンエラストマー(2000 μ)を炭素鋼板SS400(寸法：0.5m $\times$ 1m、t13mm)に被覆した重防食試験体を用いた（写真-6参照）。まず、1年目の重防食試験体は、大きな損傷・劣化・破損は破損が見られないが、試験体端部やボルト周辺部に剥離が見られたほか、多数の細かい引つ掻き傷が確認された。その後、端部より剥離が進み、4年目では大きな剥離に進展している。

電気防食工法の暴露試験体には、アルミニウム合金（AL陽極）の試験体を用いた（写真-7参照）。AL陽極の試験体は観察を容易にするため L.W.L.を中心とした位置に設置しているが、通常、海水は積層しているため、

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海水、複合劣化、摩耗

海中であっても AL 陽極と海水の接触状況は同じである。暴露試験は 2012 年及び 2013 年の流水来襲期（1～3 月）の 2 ヶ年実施した。まず、2012 年の試験では、写真-7に示すように、早い段階から取付部が海水により施設側へ押されるように変形し、2013 年にはアルミ陽極が脱落（もぎ取られ）した。

以上のことから、通常海域で使用される重防食被覆工法や電気防食工法は、氷海域に適用する事が困難である。



写真-5 鋼構造物の劣化事例

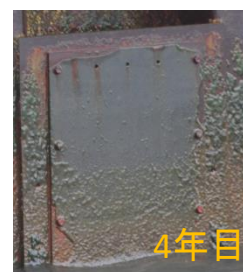
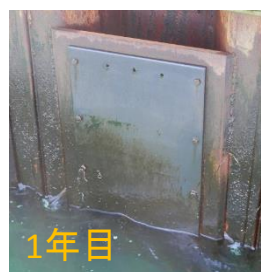


写真-6 重防食の現地暴露試験



設置時

取付部変形

脱落

写真-7 アルミ陽極の現地暴露試験

b) コンクリート構造物の劣化事例と特徴

写真-8は、オホーツク海沿岸に位置するサロマ湖漁港第1湖口アイスブーム支柱の劣化状況である。本施設は鋼管杭式の構造物であるが、写真に示す部分は鉄筋コンクリート構造の上部工である。直柱・曲柱の錆汁がコンクリート表面に見られるものの、上部工の上半分は健全に見える。しかし、下半分の水面付近はコンクリートの劣化が著しい。上部工の色合いから判断して、下半分の含水率はかなり高いと想定される。写真のとおり上部工は気中に露出していることから、高含水状態で冬期の寒冷環境に曝され、凍害により劣化したものと考えられる。また、上部工下面の鉄筋が露出していることから、塩害による鉄筋の腐食・膨張によりコンクリートが欠損している事も想定される。そして、着目すべきはコンクリート側面が部分的に欠損している点である。これは海水が上部工に接触し、コンクリートが損傷した痕跡である可能性がある。氷海域の施設である以上、構造物は必ず海水に接触していることから、海水の作用が劣化要因のひとつであると考えている。以上のことから、写真-8の劣化は、凍害、塩害そして海水による摩耗・損傷の複合劣化であると考えられる。



写真-8 コンクリート構造物劣化事例

(4) 積雪寒冷地の沿岸構造物（鋼・コンクリート）の複合劣化に関するメカニズムの検討

a) 複合劣化メカニズムの検討方法

前述のとおり、氷海域における沿岸構造物の劣化には、海水の摩耗が影響している。そこで、鋼材またはコンクリートと氷の摩耗試験を実施し、海水が関係する複合劣化メカニズムを解明する事とした。以下に鋼材と氷の摩擦・摩耗試験方法について示す。なお、コンクリートの場合も同様である。

図-13はすべり摩耗試験装置の概略図及び全景写真である。図に示すように、氷柱ケースに収納された角柱の水（幅8cm、高さ5～10cm、長さ70cm）に、構造物を意図した金属供試体（幅8cm、長さ10cm、厚さ1.4cm）を接触させ、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で往復運動（振幅距離30cm）させ、氷と金属供試体を摩擦させる。目標の摩擦距離に到達後、金属供試体の質量変化を計測する事により、摩耗（損耗）量を推

定した。

試験は温度制御できる低温室で実施し、雰囲気温度を -10°C に設定した。試験用氷は、淡水氷と人工海水（塩水氷）を用い、必要に応じ、実際の海水を模擬して砂を混入させている。構造物試験体の材質には一般構造用圧延鋼材(SS400)、ステンレス鋼(SUS304)及びチタン(Ti)を用いた。接触圧力は、0.6MPaを標準的な条件とし、0.007～1.6MPaの範囲で試験を実施している。なお、北海道沿岸部で接触圧力（氷の移動方向に垂直な圧力）が計測された例は多くないが、サロマ第二湖口水路側壁で計測された結果²⁾によれば、本実験条件で設定した標準的な条件（0.6MPa）以下と推定され、実用上十分な接触圧力の範囲で実施していると言える。

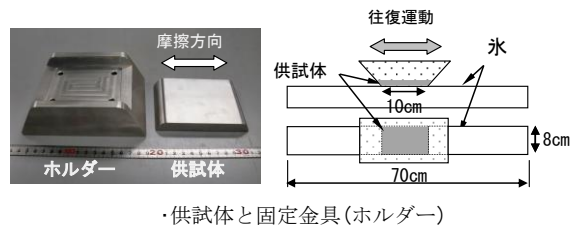
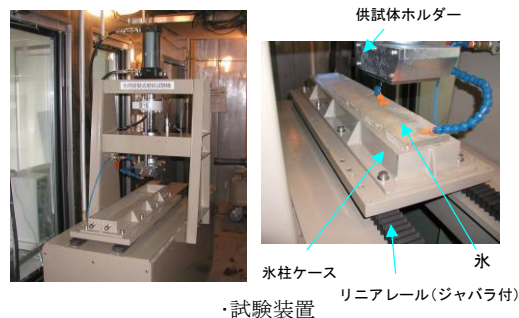
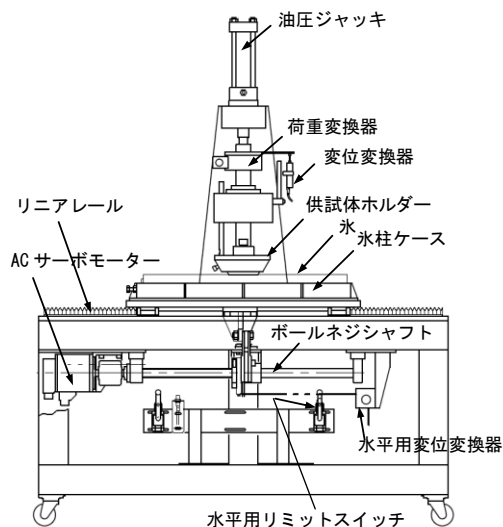


図-13 摩耗試験装置の概略図と写真

b) 鋼構造物の複合劣化メカニズムの検討²⁶⁾

前項の摩耗試験法による人工海水と金属供試体 SS、SUS、Ti の実験結果を図-14 に示す。横軸は摩擦距離、縦軸は金属供試体表面の平均損耗量である。SS の結果に着目すると、摩耗距離の増加に伴い損耗量はほぼ直線

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海水、複合劣化、摩耗

的に増加している。図中の写真に示すとおり、SS の供試体表面は腐食が進行しており、人工海水との摩擦により、発生した錆が剥離している状況が見て取れる。

一方、SUS と Ti に着目すると、摩耗距離が増加しても、損耗量はほとんど増加していない。SUS の表面を確認すると、腐食は全くなき、摩耗跡もほとんどない。これら 3 つの供試体の大きな相違点は、腐食の有無である。SS は腐食し、SUS、Ti は腐食しない。すなわち、SUS、Ti がほぼ損耗しなかった事は、氷のみで金属を削る事ができない事を示しており、SS が損耗したのは発生した錆が氷で剥がされて損耗した事を示している。この現象を腐食摩耗という。

以上の結果は異物が混入していない氷によるものであるが、海水には通常砂が多く混入している。そこで、摩擦面に砂が介在している場合の摩耗特性を調べる事とした。図-15 の黒丸●SUS/Sand/FW ice は、淡水氷の表面に砂を混入させ、SUS を摩擦させた結果である。図-13 と異なり、摩擦面に砂が介在する事でSUSは損耗している。腐食が発生しない試験条件であるから、この結果は砂がSUS の表面を削った事を意味している。この現象をアブレシブ摩耗という。

次に、腐食摩耗とアブレシブ摩耗が同時に進行する場合の実験結果について説明する。図-15 の青丸●SS/Sand/Saline ice は、人工海水（塩水氷）の表面に砂を混入させ、SS と摩擦させた試験結果で、腐食摩耗とアブレシブ摩耗が同時に発生している。鋼材の損耗は、急激に損耗が進行する初期摩耗と、その後損耗が安定する定常摩耗を示すが、青丸●の定常摩耗率（損耗量/摩擦距離）は黒丸●よりもかなり大きい事が見て取れる。図-14 に示した腐食摩耗と図-15 に示したアブレシブ摩耗（黒丸●）の定常摩耗率を足し合わせても、両者が同時に起こる複合劣化（青丸●）の定常摩耗率には及ばない事を確認している。これは海水中の砂粒子が鋼材の錆を削り、常に材料表面を露出させる事により腐食が加速したためと考えられ、複合劣化には相乗効果があると推定される。

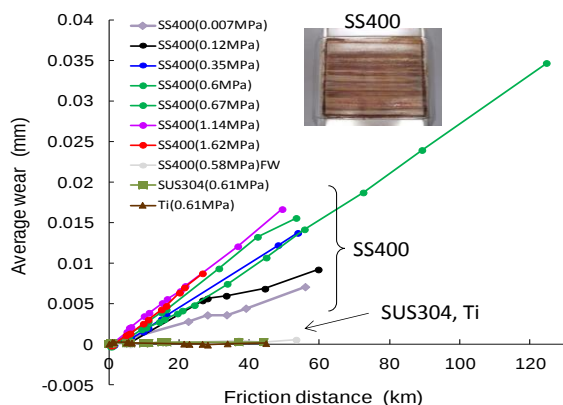


図-14 摩耗距離と平均損耗量との関係（腐食摩耗）

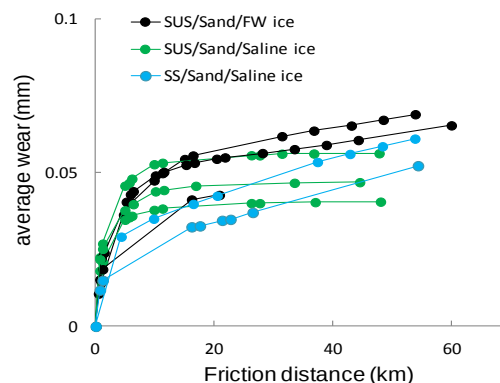


図-15 摩耗距離と平均損耗量との関係（複合劣化）

c) コンクリート構造物の複合劣化メカニズムの検討

氷海域におけるコンクリート構造物の劣化は、凍害、塩害、海水による摩耗、海水の接触による損傷の複合劣化であると考えられる。前述の研究成果のレビューのとおり海水によるコンクリートの摩耗に関する研究事例はいくつかあり、その摩耗メカニズムや摩耗推定方法も提案されている。しかし、凍害や塩害と海水摩耗の複合劣化については、未だ解明されおらず、現在、凍害と海水摩耗の複合劣化に着目し、そのメカニズムの解明に取り組んでいる。

図-16は、本研究で想定している凍害と海水摩耗の複合劣化概念図、そして研究中の複合劣化試験法で再現したコンクリート供試体の劣化状態を示している。以下に、想定される複合劣化のメカニズムについて説明する。
Step.1: コンクリート構造物が凍結融解作用を受ける事により、主に水分の供給が多いコンクリート表面側で微細なクラックが発達する。
Step.2: 脆弱化したコンクリート表面を海水が接触しながら移動する事により、その摩擦力で脆弱化したコンクリート表面からセメント硬化体、細骨材、粗骨材が離脱する。このStep.1とStep.2が繰り返される事により、コンクリートの劣化が促進されるのではないかと考えている。複合劣化の試験方法としては、JIS1148コンクリートの凍結融解試験方法に準じてStep.1の状態を再現し、前述の摩耗試験法によりStep.2の状態を再現する。同図に、各試験後のコンクリート供試体表面の一例を示す。この方法により、海水が関係する複合劣化メカニズムの解明に取り組んでいる。

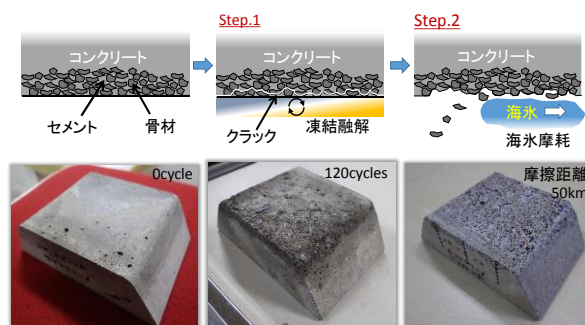


図-16 コンクリート構造物の複合劣化

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海水、複合劣化、摩耗

5. まとめ

今年度は、北海道の港湾・漁港における外郭施設及び係留施設の特徴とこれら施設の老朽化の現状について整理するとともに、北海道特有の積雪寒冷地での老朽化の要因と想定される複合劣化に関する最新の研究状況について報告した。主要な結果は以下のとおりである。

○港湾・漁港施設の構造特性

基幹的役割を果たしている外郭施設と係留施設について港湾施設では、全 1249 施設中コンクリート構造物が全体の 71%、鋼構造物が 16%、漁港施設では全 815 施設中、コンクリート構造物が 82%、鋼構造物が 10%とコンクリート構造物が主たる構造となっている。

○港湾・漁港施設の老朽化の現況

港湾施設において性能低下度 A 又は B の施設数は全体の 32%、漁港施設では健全度 A 又は B の施設数は全体の 35%程度であり、港湾施設と漁港施設は同等程度である。同様に構造形式別に比較すると、コンクリート構造については、港湾施設は外郭施設及び係留施設ともに約 30%であるが、漁港施設の外郭施設では約 50%と大きい。また、鋼構造物については、港湾施設は外郭施設約 40%、係留施設約 60%であるが、漁港施設は外郭施設及び係留施設ともに約 30%と小さい値である。この要因としては、建設年次の違いや施設のおかれている海象条件の違い等が考えられるが、詳細について今後分析が必要である。

○港湾・漁港施設の老朽化の特徴

港湾・漁港施設ともにコンクリート構造物のうち、特にプレパックドコンクリートについては、凍害や塩害の影響を受けやすく、本体工の水際部や海底面に欠損が見られ、土砂の陥没などの被害が確認された。また、鋼構造物については、干満帯の集中腐食が進行している状況が確認された。

○寒冷地における構造物の劣化事例とメカニズムに関する国外文献のレビュー

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おり、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、氷の摩耗対策として、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。

○積雪寒冷地をとりまく環境特性と劣化要因等

積雪寒冷地である北海道沿岸がおかれる環境特性は、特に冬期において気温・海水温とも低温な環境に加えて、主にオホーツク海等の氷海域において海氷による作用も加わる過酷な環境であると言える。また、積雪寒冷地の氷海域の沿岸構造物において特筆すべきは、海氷摩耗との複合劣化であり、他の劣化現象による材料の脆弱化等に併い複合的かつ相乗的に劣化が進行する場合がある事

から留意を要する。

○積雪寒冷地の沿岸構造物に関する複合劣化事例と特徴

氷海域における複合劣化事例として、オホーツク海沿岸の鋼・コンクリート構造物の劣化事例を示した。その特徴として、海氷の接触によると思われる鋼材の変形やコンクリートの欠損痕があげられる。氷海域における鋼・コンクリート構造物の複合劣化は、塩害（鋼材の腐食）、凍結融解等に加え、海氷摩耗（衝突）が影響していると考えられる。また、鋼構造物の防食工の劣化事例として、重防食被覆工法と電気防食工法の氷海域における現地暴露試験結果を示し、通常の施工方法のままでは氷海域への適用が困難であることを示した。

○積雪寒冷地の沿岸構造物の複合劣化に関するメカニズムの検討

氷海域における鋼構造物の複合劣化メカニズムを最新の研究成果により示した。通常海域における鋼構造物の劣化は、鋼材の腐食が主な劣化要因であるが、氷海域においては海氷摩耗の影響が加わる。海氷に含まれる砂分が鋼材表面に発生した錆を削り取り、鋼材の腐食を促進しているものと推定される。

6. 今後の課題と次年度以降に向けて

今後、20 年～25 年後には、港湾・漁港施設ともに全施設の半数以上が耐用年数を迎えることとなり、急増する老朽化施設の対応は極めて重要な課題である。このため、港湾・漁港施設の老朽化状況について引き続き把握していくとともに、現在実施している老朽化対策の取り組みの課題とその対応策について検討を行い、より効率的・効果的に施設の維持管理・補修・更新等を行うための方策について検討を進めていく必要がある。また、積雪寒冷地であり海氷等が作用する北海道特有の過酷な条件化におけるコンクリート構造物や鋼構造物の老朽化のメカニズムを明らかにし、今後の課題や老朽化対策について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) K.T.Fossa, Improvement of the ice zon of structure for sub arctic area, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Conrete Structures, pp.1-4, 2007.
- 2) E.Sistonen et al, Abrasion of concrete by ice, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Conrete Structures, pp.5-15, 2007.
- 3) S.Houvinen et al., The abrasion of concrete in arctic offshore structures, Porc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.3, pp.233-240, 1988.
- 4) J.E. Janson, Long term resistance of concrete offshore structures in ice envinment, Porc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.3, pp.225-231, 1988.
- 5) E.Moen et al. Ice abrasion on concrete structures- overview, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Conrete Structures, pp.59-103, 2007.
- 6) A.T.Bekker, Problems of the ice cover abrading action on legs of concrete

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海氷、複合劣化、摩耗

- offshore structures, Proc.of Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, pp.45-56, 2007.
- 7) J. Marchand et al., The deicer salt scaling deterioration of concrete – An overview, ACI-SP-145, pp.1-46, 1994.
- 8) G.Verbeck G. et al., Studies of salt scaling of concrete, HRB Bulletin No.150, p.13, 1956.
- 9) G.C. Hoff, Resistance of concrete to ice abrasion – A Review, American Concrete Institute SP 109, pp.427-455, 1988.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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. 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.
- 13) 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.
- 14) S.Houvinen, Abrasion of concrete by ice in arctic sea structure, VTT Publications, No. 62, pp.23-34, 1990.
- 15) 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 on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95, Vol.1, pp.485-494, 1995.
- 16) 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.
- 17) S.Houvinen, Abrasion of concrete by ice, VTT Publications, No. 3, pp.56-75, 1991.
- 18) 国土交通省：国土地理院ホームページ（新版日本国勢地図（1990年刊行）、pp. 25-39）より
- 19) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技報XXIX, pp. 248-253, 1975
- 20) 国土交通省 気象庁ホームページを加工
http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/seaice/hokkaido/hokkaido_normal.html
- 21) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp. 63-69、p. 167、p. 215、2018. 10
- 22) 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、p. 13、2007. 3
- 23) 増田 亨、木岡信治、長谷一矢：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関する既往研究・調査の概況と対応策の検討、寒地技術シンポジウム論文・報告集、第33回、2017. 11
- 24) 河合孝治・牧田佳巳・木岡信治・寺島貴志・竹内貴弘：鋼矢板護岸に作用する流水の接触圧力に関する現地計測、海洋開発論文集, vol26, 2010.
- 25) 木岡信治・井元忠博・中嶋雄一：海水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、国立研究開発法人土木研究所 平成27年度プロジェクト研究報告書、2016.

キーワード：港湾・漁港施設、老朽化、海氷、複合劣化、摩耗