

凍害と海水摩耗を受けるコンクリート構造物の 摩耗抑制に関する研究

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 ○長谷 一矢
平野 誠治

氷海域にある港湾や漁港のコンクリート構造物は、凍害や塩害の他、海水による摩擦が加わった複合劣化により摩耗すると考えられる。この複合劣化環境における摩耗抑制に有効な方法を見出すため、凍害と海水摩耗を対象とした複合劣化試験法により、特徴の異なるモルタル材料の耐久性を試験し、得られた結果から考察を行った。その結果、複合劣化メカニズムとしては、凍害によりコンクリート表面が脆弱となり、そこに海水が接触することで摩耗が促進されること、摩耗抑制には材料の耐凍害性を高めることが有効であることを明らかにした。

キーワード：凍結融解、摩耗、モルタル、流水

1. はじめに

社会基盤構造物（インフラ）は我々の生活を支える重要な役割を担っているが、高度成長期以降に建設された多くのインフラが老朽化の問題に直面している。写真-1はオホーツク海沿岸（氷海域）にあるコンクリート構造物の劣化状況である。海面付近のコンクリートが劣化している状況から、この劣化要因は、凍害、塩害に加えて海水による摩耗である可能性が高い。そして、各要因による劣化は同時進行することから、複合劣化であると考えられる¹⁾。これら要因の複合作用による劣化メカニズムについては解明すべき点が多く、経験的な対策は行われているものの、合理的な対策方法は未だ体系化されていない。

このような状況の中、筆者らは、この複合劣化メカニズムを解明するため、ひとつの方法として複合劣化試験法の開発に取り組んでいる²⁾。開発した複合劣化試験法



写真-1 氷海域におけるコンクリート構造物の劣化事例

は、①氷が摩擦する面における凍害を想定した凍結融解試験 ②海水摩耗を想定した氷とコンクリート等との摩耗試験からなり、これら①②を交互に繰り返すことで複合劣化を模擬する試験法である。

本稿は、合理的な複合劣化対策の体系化に資することを目的に、特徴の異なるいくつかのモルタル材料で複合劣化試験を実施し、そこから得られた結果に基づき、複合劣化のメカニズム、複合劣化対策（摩耗抑制）について考察したものである。

2. 補修工法の事例

写真-1に示すようなコンクリート構造物の場合、その補修工法³⁾として表面処理工法（表面被覆工法）や断面修復工法（充てん工法）などが考えられ、適用する材料についても様々な材料を選択することが可能である。海洋構造物の補修事例を写真-2に示す。写真-2のa)は、写真-1に示した構造物の劣化部位をステンレス埋設型枠によって被覆し、補修した事例である。写真-2のb)は、摩耗が進行した無筋コンクリート防波堤の側面を鉄筋コンクリート製の埋設型枠で補修した事例であり、その施工状況を示している。写真-2のc)は、摩耗が進行した無筋コンクリート防波堤の一部を切削し、同種のコンクリートを打設して断面修復した事例である。写真-2のa)は鋼材を使用した補修であるが、b)、c)には標準配合のコンクリート（RC-7S、C-5Sなど）が使用されている。複合劣化環境におけるコンクリート材料の耐久性について明らかとなれば、b)やc)に適用する材料を選択すること



a) ステンレス埋設型枠による補修事例 b) 鉄筋コンクリート埋設型枠による補修事例



c) 断面の一部切削とコンクリート充填による補修事例

写真-2 コンクリート構造物の補修工法の事例

で、ライフサイクルコストを考慮した設計や維持管理が可能になると考えられる。以降、どのような材料を使用することが複合劣化環境における摩耗抑制に有効であるのか、複合劣化試験を用いて考察する。

3. 複合劣化試験法

凍害と海氷摩耗の複合劣化試験法は、コンクリートやモルタル等を供試体とした凍結融解試験および氷と供試体の摩耗試験から構成される。一つの供試体に対してこの二つの試験を交互に繰り返し、供試体の摩耗特性を調べるものである。以降、供試体の詳細、凍結融解試験と摩耗試験の方法、供試体の測定方法について順に説明する。

(1) 供試体

図-1は複合劣化試験で使用する供試体の形状寸法と供試体および型枠の写真である。供試体は台形状をした四角柱であり、その一面を試験面としている。図に示す型枠で供試体を製作しており、型枠の側面が試験面となる。これは、実海域における海氷の接触位置が主に構造物の側面であることに基づいている。

(2) 凍結融解試験法

写真-3は、使用した空冷式の凍結融解試験機を示している。試験の温度管理についてはJIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法を参考とした。劣化させる供試体の部位は、図-1に示した試験面のみとしている。これは、一面の凍結融解試験が現地条件に近いためである。試験

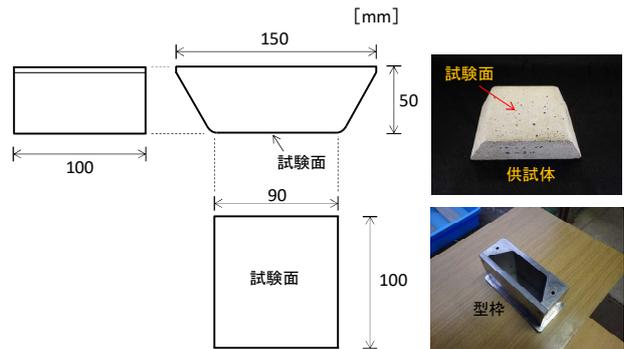


図-1 供試体の形状寸法と供試体・型枠の全景



写真-3 空冷式の凍結融解試験機の全景と
その内部の供試体及び銅製トレー

方法は、写真-3に示す深さ15 mmの銅製トレーに淡水を張り、そこに供試体の一面を浸漬する。銅製トレーと供試体の間には高さ5 mmのスペーサーを挟んでいる。この状態で2日間静置し、供試体試験面の水分量を安定させてから、凍結融解試験を開始する。試験条件としては、1サイクル4時間で-18℃から+5℃の温度変化を与えている。

(3) 摩耗試験法

摩耗試験法は佐伯ら⁴⁾が提案する面接触の滑動式摩耗試験法による。摩耗試験機の全景を写真-4に示す。試験機に供試体と氷柱を設置し、装置上部にある油圧ジャッキにより鉛直荷重を作用させている。そして、ACサーボモーターとリニアレールにより氷柱を設置した架台を等速で往復運動させ、氷と供試体の接触面が摩擦する仕組みとなっている。本試験では、供試体と氷柱の接触圧を0.3 MPa、摩擦速度を5.0 cm/sになるように設定している。氷柱と供試体はアクリル製水槽の中に収まるよう設置しており、水槽内にはフロリナートFC-43 (3M社) と濃度10%の塩水が満たしてある。これにより、供試体接触面における氷膜の形成を抑制し、氷柱の昇華も防止することができ、長時間の摩耗試験を可能としている。摩耗試験はオホーツク海沿岸における1月から2月の平均気温を想定し、-5℃に管理された低温室内で実施している。

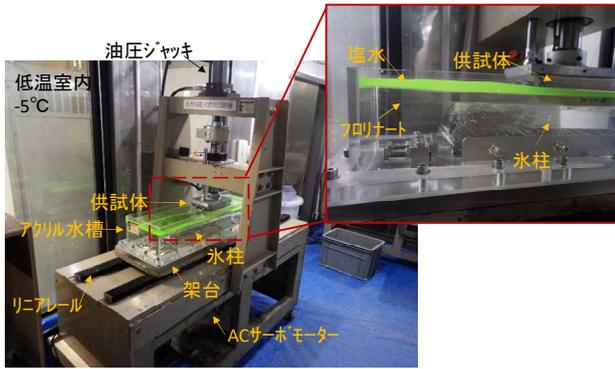


写真4 摩耗試験機の全景とアクリル水槽内部

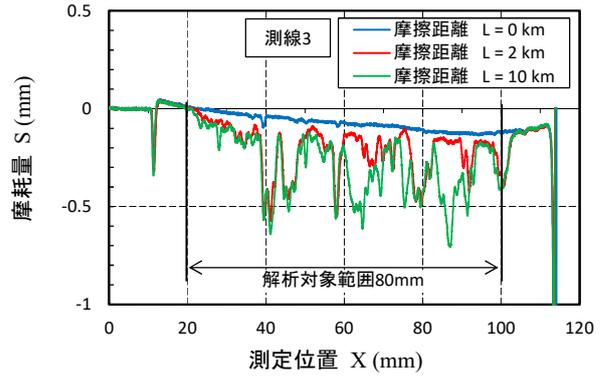
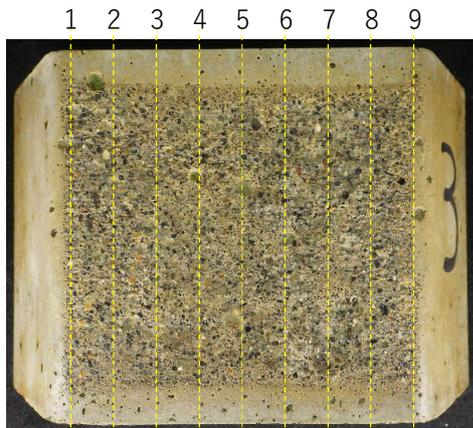
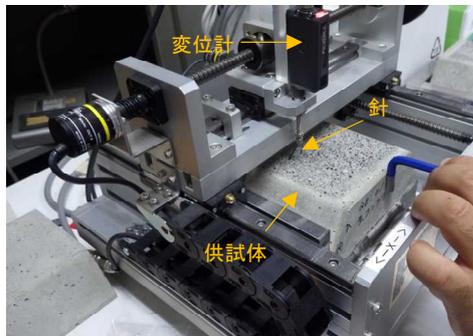


図2 供試体の凹凸測定結果の一例



(a) 供試体の9測線



(b) 凹凸測定状況

写真5 供試体の凹凸測定と測線

摩耗試験の詳細は既報⁵⁾を参照されたい。

(4) 供試体の測定方法

凍結融解試験および摩耗試験後は、針接触式の変位計（精度1 μm）を用いて供試体表面の凹凸を等間隔に9測線測定している。供試体表面の9測線と凹凸測定状況を写真-5に示す。この方法で供試体を測定した結果の一例を図-2に示す。横軸が変位計針先の測定位置、縦軸は摩耗量である。ここでは摩耗試験A-1（後述する表-3参照）の供試体を例に、測線3における摩擦距離L=0 km、2 km、10 km時点の測定結果を示している。各測定結果

を比較すると、摩耗の進行状況がわかる。摩耗試験においては、摩擦距離L=0 kmの凹凸測定値をゼロ値として摩耗後の値との差の平均を平均摩耗量と定義している。図の例では、摩擦距離L=10 kmの平均摩耗量は青ラインと緑ラインの差の平均値となる。凍結融解試験においても同様に凹凸測定を実施しており、差の平均を平均剥離量と称している。なお、複合劣化試験の結果においては、図の横軸が摩擦距離の場合には縦軸を平均摩耗量で、図の横軸が凍結融解サイクル数の場合には縦軸を平均剥離量で表記することとする。

3. 複合劣化試験結果と考察

複合劣化のメカニズムや複合劣化対策（摩耗抑制）について考察するため、前述の複合劣化試験法により、補修材料として一般的に使用されている3種類のモルタルを対象に試験を実施した。以降、試験条件、試験結果と考察の順に説明する。

(1) 試験条件

使用した供試体は、混合セメント（B種）モルタル（供試体A）、高炉スラグ系プレミックスモルタル（供試体B）、ポリマーセメント系プレミックスモルタル（供試体C）の3種類である。ここで、各モルタルの種類名は本報告における呼称である。供試体Aは表-1に示す配合で製作しており、寒冷地で使用される海洋コンクリートの配合を参考に、水セメント比、使用セメント、

表-1 混合セメント（B種）モルタルの配合

W/C (%)	セメント種	単用量(kg/m ³)				A (C×%)
		W	C	S	G	
47.4	高炉B種	228	482	1443	0	4.82

W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, A:AE減水剤, 空気量の目標値は5.5%

表-2 各モルタルの特徴と一軸圧縮強度
および試験実施時点の材齢

供試体	モルタルの種類	配合	耐凍害性	σ_{28} (N/mm ²)	試験実施時点 の材齢 ^{※1} (日)
A	混合セメント(B種) モルタル	表-1の配合表参照	標準的な 寒冷地仕様	38.0	1137
B	高炉スラグ系 プレミックスモルタル	プレミックスタイプ 非公表 微細繊維あり	高い	71.2	77
C	ポリマーセメント系 プレミックスモルタル	プレミックスタイプ 非公表 微細繊維あり	高い	64.9	116

※1 表-3における試験ケースA-1, B-1, C-1の実施時点における材齢

表-3 試験条件

	試験 ケース	試験工程	
		凍結融解試験	摩耗試験
供試体 A 混合セメント (B種) モルタル	A-1	-	88 km
	A-2	120 cycle	-
	A-3	34 cycle	97 km
	A-4	100 cycle	96 km
	A-5	150 cycle	100 km
供試体 B 高炉スラグ系 プレミックスモルタル	B-1	-	56 km
	B-2	120 cycle	60 km
供試体 C ポリマーセメント系 プレミックスモルタル	C-1	-	60 km
	C-2	120 cycle	60 km

■ 複合劣化試験

空気量を設定している。供試体B、Cのプレミックス製品は、一般的に各現場で補修用として使用されている製品の中から無作為に選定したものである。詳細な配合は非公表であるが、メーカーが公表する仕様によると、両者とも耐凍害性が高い性質を有するとされている。表-2に各モルタルの特徴と材齢28日の一軸圧縮強度（本報告における測定値）および試験実施時点の材齢を示す。材齢28日時点の一軸圧縮強度は、供試体AよりもB、Cの方が大幅に高い値を示している。しかし、試験実施時点の材齢には差があり、特に供試体Aは試験実施時点で約3年経過していることから、各供試体の強度差はそれほど大きくない可能性はある。そのため、本稿では、参考値として材齢28日時点の一軸圧縮強度を示している。

表-3に、各供試体における凍結融解試験と摩耗試験の試験条件の一覧を示す。一例として、供試体Bの試験ケースB-2について説明すると、まず凍結融解試験を120サイクル実施し、その次に摩耗試験を60 km実施している。試験途中には凹凸測定を複数回実施しており、凍結融解試験は30サイクルごとに、摩耗試験は4 kmごとに測定した。

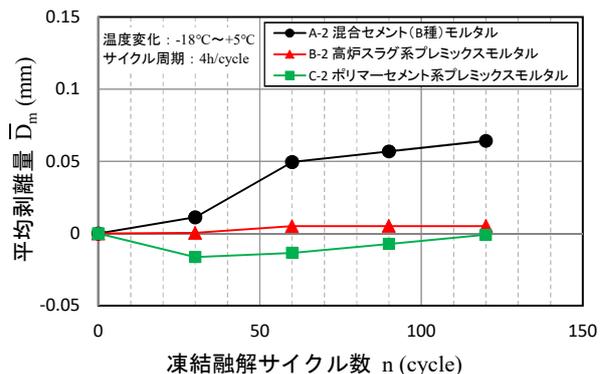


図-3 凍結融解試験結果

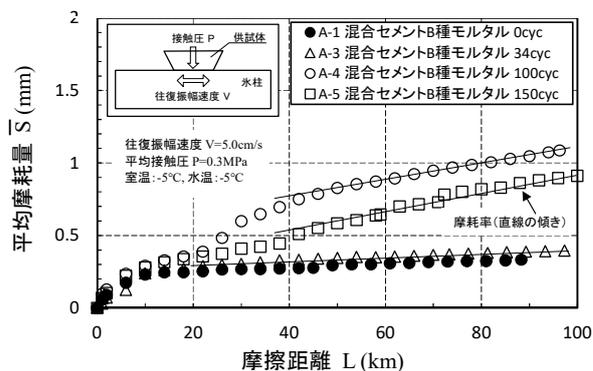


図-4 混合セメント (B種) モルタルの
複合劣化試験結果

(2) 試験結果と考察

図-3は各供試体について凍結融解試験のみを実施した結果である。横軸に凍結融解サイクル数、縦軸に平均剥離量を示している。供試体Aは凍結融解サイクルの増加に伴い平均剥離量も増加する傾向にあるが、供試体B、Cはほとんど増加していない。前述のとおり、供試体B、Cは耐凍害性を高めた製品であるため、その効果が結果に表れたものと考えられる。なお、供試体Cの平均剥離量がマイナス側にプロットされている理由は、凍結融解の過程で供試体が膨張し、剥離とは逆方向に測定結果が現れたものである。なお、試験終了時点においても、供試体Cの表面はほとんど剥離が観察されていない。

図-4は供試体Aについて、複合劣化試験を実施した結果である。表-3のケースA-1、A-3、A-4、A-5のとおり、まず凍結融解サイクルをそれぞれ0サイクル、34サイクル、100サイクル、150サイクル実施した後に、摩耗試験を実施している。横軸に摩擦距離、縦軸に平均摩耗量を示している。全ての供試体について、摩擦距離10 km付近を境に前後の平均摩耗量の増加傾向が異なっている。本稿では、0 kmから10 km付近までを初期摩耗、10 km付近以上を定常摩耗と呼ぶこととする⁹⁾。初期摩耗におい

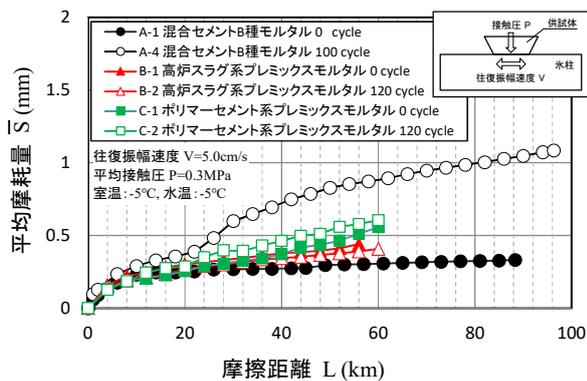


図-5 各種モルタルの複合劣化試験結果

ては各供試体の差は明確ではないが、定常摩耗において平均摩耗量の増加傾向に差が見られる。定常摩耗における直線の傾きが摩耗率（平均摩耗量の増加率）を表し、摩耗率が大きいほど（直線の傾きが大きいほど）耐摩耗性は低い。図より、0サイクルや34サイクルの供試体に比べて100サイクルや150サイクルの摩耗率は大きく、凍結融解の履歴（サイクル数）が多い供試体ほど摩耗率が大きくなる傾向にある。これは、凍結融解作用によってモルタル表面が脆弱となり、摩耗が促進されたためと考えられる。

図-5は供試体A、B、Cについて、複合劣化試験を実施した結果である。付録に試験過程の供試体表面写真を示す。図-4と同じく凍結融解試験を実施した後に摩耗試験を実施している。供試体Aの凍結融解サイクルは100サイクル（A-4）、供試体B、Cの凍結融解サイクルは120サイクル（B-2、C-2）であり、供試体B、Cの方が凍結融解の履歴が多い。また、図には凍結融解作用の有無による平均摩耗量の差を比較するために、摩耗試験のみを実施したデータ（A-1、B-1、C-1）も併せてプロットしている。供試体Aは凍結融解作用の有無により平均摩耗量の差が大きい、供試体B、Cについてはその差は小さい。供試体B、Cは耐凍害性が高い材料であるため、凍結融解作用によるモルタル表面の脆弱化が抑制され、モルタル製作時の耐摩耗性（以降、当初の耐摩耗性と称す）を維持したものと考えられる。

一方で、当初の耐摩耗性は材料によって異なっている。表-2に示すとおり、供試体B、Cは比較的高強度のモルタルに属すると思われるが、供試体Aの方が当初の耐摩耗性が高い結果となっている。試験実施時点の材令が大きく異なることも関係している可能性はあるが、コンクリートの耐摩耗性は、圧縮強度、曲げ強度、弾性係数とは明確な相関がないことが知られている^{例えば}。当初の耐摩耗性については、材料個別に確認する必要がある。

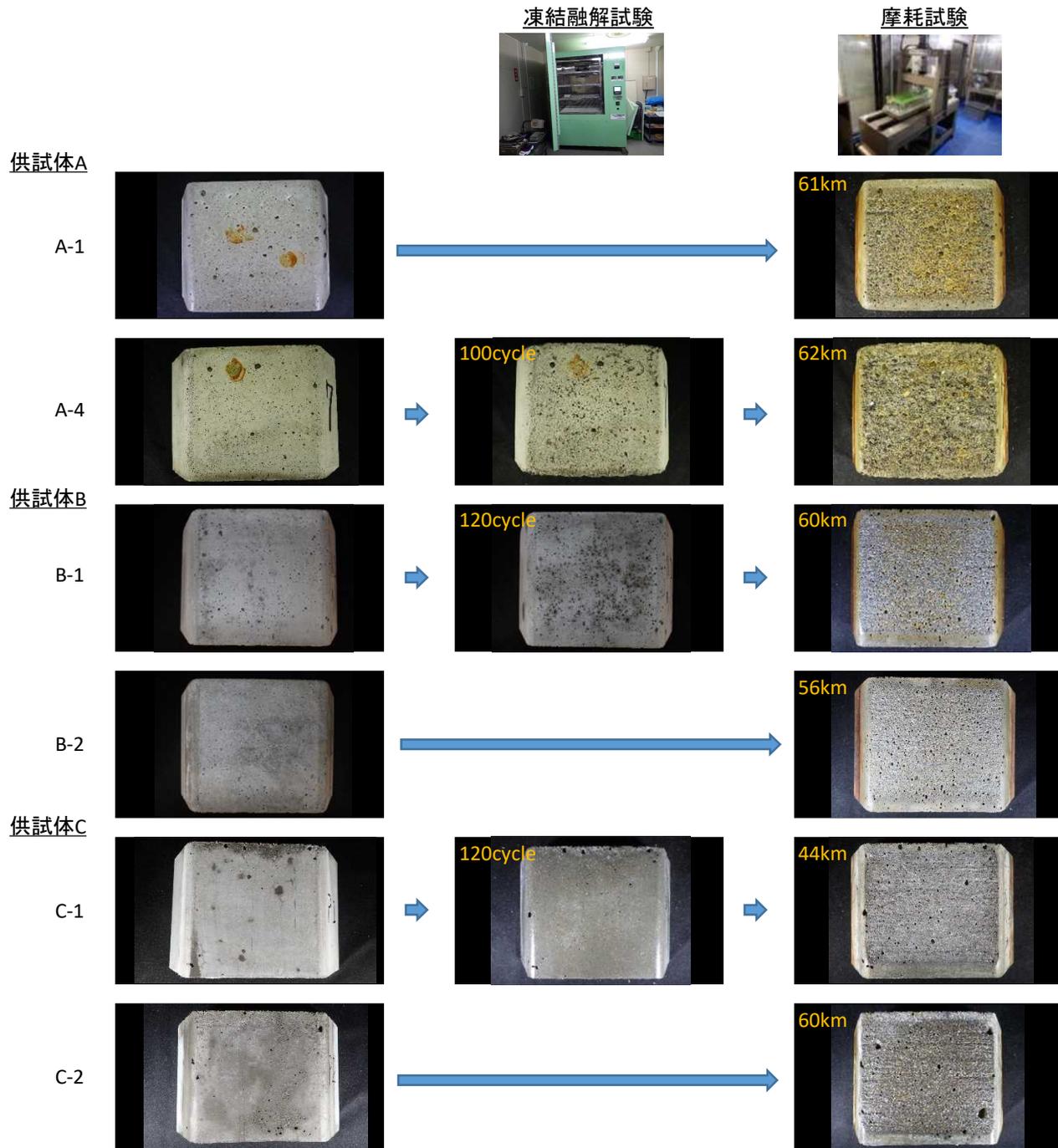
4. まとめ

凍害と海水摩耗を受けるコンクリート構造物の複合劣化メカニズムや複合劣化対策（摩耗抑制）について考察するため、特徴の異なるモルタル材料を使用して複合劣化試験を実施した。この試験結果から、以下の結論を得た。

- (1) 混合セメント（B種）モルタルについて複合劣化試験を行った結果、凍結融解の作用履歴が多いほど氷による平均摩耗量が多くなることが明らかとなった。これは凍結融解によりモルタル表面が脆弱化し、耐摩耗性が大きく低下したためと考えられる。
- (2) 高炉スラグ系プレミックスモルタルおよびポリマーセメント系プレミックスモルタルについて複合劣化試験を行った結果、凍結融解の作用履歴によらず、氷による平均摩耗量はほぼ同じであることが明らかとなった。これは、耐凍害性の高い材料であることから、モルタル表面の脆弱化を抑制し、材料が有する当初（モルタル製作時）の耐摩耗性を維持したためと考えられる。
- (3) 材料が有する当初の耐摩耗性は、圧縮強度等と相関関係にあるとは限らないことから、個別に摩耗試験を実施し、耐摩耗性を確認する必要がある。

最後に、本試験結果は限られた条件下で実施したものであり、各現場で補修方法等を検討する際には、使用する材料について試験条件を適切に設定した上で、個別に試験を実施することが望ましい。

付録 試験過程における供試体表面写真



参考文献

- 1) 増田亨・木岡信治・本間大輔：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，北海道開発局技術研究発表会論文集，第61回，2017.
- 2) 寒冷沿岸域チーム：積雪寒冷地における沿岸のコンクリート構造物の複合劣化特性，寒地土木研究所月報，第821号，pp. 38-42，2021.
- 3) 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. 97，2018.

- 4) 佐伯浩・浅井有一郎・泉洌・竹内貴弘：海水によるコンクリートの摩耗に関する研究，海洋開発シンポジウム講演集，Vol. 10，pp. 68-73，1985.
- 5) 長谷一矢・増田亨・木岡信治：海水を対象としたコンクリート水中摩耗試験法の開発，北海道開発局技術研究発表会論文集，第61回，2017.
- 6) 伊藤喜栄・吉田明・佐々木広輝・泉洌・佐伯浩：海水による各種コンクリートの摩耗特性，海洋開発論文集，第3巻，pp. 155-159，1987.
- 7) 堀口敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol. 31，No. 10，pp. 17-27，1993.