

自己治癒コンクリートの 寒冷沿岸構造物への適用性について

留萌開発建設部 留萌港湾事務所 第1工務課
會澤高圧コンクリート株式会社
日本データーサービス株式会社

○阿部 奈緒美
千葉 明雄
天野 誠

土木構造物の長寿命化技術としてバクテリアの作用等によりひび割れを閉塞する自己治癒コンクリートが注目される。しかし波浪・塩害・凍結融解等に晒される寒冷沿岸域での適用性にかかる知見は少ない。本論文では羽幌港・苫前漁港での実証実験を通じて、自己治癒したひび割れの調査・試験を行い、その結果を分析・評価することで、寒冷地港湾・漁港構造物に発生するひび割れに対する自己治癒コンクリートの適用性を確認した。

キーワード：自己治癒コンクリート、寒冷地港湾・漁港構造物、維持管理、
インフラ長寿命化

1. まえがき

北海道の港湾施設は 1990 年前後に集中的に整備され、供用から 30 年を超える施設が増加し、維持管理の重要性が増している（図-1）¹⁾。

特に厳しい冬季風浪に晒される日本海側では、波浪による塩害や凍結融解などの気象海象条件が複合的に作用し、コンクリートの劣化進行が比較的早いと考えられる。

中でも寒冷地沿岸構造物のコンクリートは干満帯において、潮位変動による乾湿の繰り返し、塩分浸透、凍結融解作用、波浪衝撃が同時に作用するため、ひび割れが劣化促進の起点となりやすく、凍害に起因する表層スケールリングは代表的な劣化形成として知られている²⁾。

一方で、施工時の初期欠陥や波浪等による影響から生じる深さのあるひび割れ（以降「深部ひび割れ」と称す）は、コンクリート内部への水分や塩分供給を促進し、凍害劣化を促進させる恐れがある。

特に干満帯は施工条件が極めて厳しく、一般的なひび割れ補修方法等は適用が困難な場合やメンテナンス人材の不足も深刻化しており、寒冷地沿岸構造物の維持管理上の課題として、より効率的な維持管理技術の確立が急務となっている。

そうした背景を踏まえ、近年では、最大1mm程度のひび割れ内に「炭酸カルシウムを析出」（以降、「治癒生成物」と称す）させることで自立的にひび割れを閉塞する「自己治癒コンクリート(Basilisk 配合)」が開発され、道路橋や建築分野では試験導入が進んでいるが、寒冷沿岸構造物、とりわけ干満帯におけるその挙動は十分に検証されていない。

このため、本報告では、寒冷地港湾・漁港構造物に自己治癒コンクリートを適用した場合の効果を確認することを目的とし、苫前漁港及び羽幌港の施設において、ひび割れの表層だけでなく深部の治癒の状況を現場試験および各種室内試験をおこない、その適用性と有効性を評価した。



図-1 国有港湾施設数の整備年次と整備施設数の傾向¹⁾



写真-1 干満帯に発生したひび割れ（苫前漁港）

2. 調査および試験方法

港湾・漁港構造物における自己治癒コンクリートの適用性を検討するにあたっては、陸上・干満帯・海中という大きく異なる暴露環境を評価対象とするため、本調査では、表-1に示す現地試験および供試体による室内試験を実施し、自己治癒に関して①ひび割れの閉塞度、②ひび割れ閉塞の進行速度、③環境要因の影響度、④寒冷地域での耐久性、の観点で整理することとした。

表-1 各種調査・試験と方法

	調査・試験	評価項目	効果検証
現地試験	外観観察	・ひび割れ幅 ・治癒生成物の有無 ・表面劣化の確認	ひび割れ閉塞状況を定性的に評価
	弾性波挙動解析 (AE計測)	・弾性波解析 ・内部密度回復 ・治癒領域の空間分布	内部治癒の進行速度を評価
室内試験	暴露試験供試体による透水試験	・透水量 ・ひび割れ閉塞日数 ・治癒速度	環境差を評価する基軸として実施
	凍結融解試験 (海水) (JIS A 1148)	・動弾性係数低下 ・質量損失 ・劣化速度	海洋構造物に適用するための耐久性を検証

(1) 外観観察

外観観察は、環境条件が異なる場合における治癒の状況を把握し、ひび割れ閉塞状況を定性的に評価するため、表-2および写真-2に示す施設、部位において自己治癒コンクリートを配合した施工を行い、経時的なひび割れ発生状況を記録するとともに、環境条件（潮位変動・凍結融解など）の影響程度を把握した。

表-2 調査対象施設と設置部位の関係

現場条件	苫前漁港	羽幌港
適正部位	船揚場止壁コンクリート ・プレキャスト ・無筋コンクリート	物揚場上部コンクリート ・現場打ち ・有筋コンクリート
設置位置	干満帯 ・常時海水供給あり ・乾湿サイクルが激しい	陸上部 ・海水の直接作用は少ない ・多少の越波あり



写真-2 施工箇所：苫前漁港（左）、羽幌港（右）

(2) 供試体暴露試験

暴露試験は、自己治癒コンクリートの基礎的な劣化因子の浸入防止性能およびその速度を把握し、実構造物との治癒挙動を照合するために実施した。

苫前漁港では、船揚場斜路の陸上・干満帯・海中に、

羽幌港では物揚場上部コンクリート（陸上）と海中に、それぞれ自己治癒コンクリート（Basilisk 配合）と通常コンクリート（Basilisk なし）の供試体を設置し、実構造物に近い環境に暴露することとした。これにより、干満帯や海中のように水分と酸素の供給が豊富な環境では本試験の再現性が高く、水分供給が限定される陸上との比較により、暴露環境が治癒速度に及ぼす影響の定量化が可能となるよう行った。

試験は表-3に示す供試体について、あらかじめ 0.1～0.4 mm程度のひび割れを発生させ、写真-3に示す現地環境下に暴露し、ひび割れ箇所からの透水量が 0 g になるまで定期的にひび割れの目視観測および透水量測定を行い、透水量、ひび割れ閉塞日数、治癒速度について評価することにした。

表-3 暴露試験 供試体本数

暴露試験箇所	供試体本数				
	夏季(2022年9月・10月開始)		冬季(2023年1月開始)		計
	Basilisk配合	Basilisk無し	Basilisk配合	Basilisk無し	
苫前漁港 【干満帯・海中・陸上】	6	0	4	2	12
羽幌港 【海中・陸上】	6	0	4	2	12



写真-3 供試体暴露試験：干満帯と透水試験（右上）

(3) 弾性波挙動解析(AE 計測)

自己治癒の効果は表層に限定されず、深部ひび割れを閉塞する重要な役割を果たすが、コア採取による深部の観察は治癒生成物の剥離を招き、真の治癒状態を正しく捉えられない恐れがある。

このことから、深部ひび割れの閉塞状況を非破壊で把握するため、静的にひび割れの密度回復を定量的に評価する方法として、弾性波挙動解析(以降、「AE 計測」と称す)を採用した。

a) 実験概要

日時：2025 年 9 月 8 日（水）および 9 日（木）

場所：羽幌港および苫前漁港（写真-4）

測定項目：AE（アコースティック・エミッション）計測



計測箇所（AEセグ設置）



計測機器

写真-4 AE計測状況写真

b) AE計測の概要

AE（アコースティック・エミッション）計測は、材料内部で発生する微小な破壊現象に伴って放出される弾性波を検出・解析する非破壊評価手法の一つ³⁾である（図-2）。

当該手法は、計測対象に複数の発信点（鋼球打撃点と送信側センサ）と受信点（受信側センサ）を設けることで、多方向の走査線情報、すなわち弾性波到達時間を取得し、対象領域をそれらの走査線情報をすべてに整合する有限要素モデルで表す手法である。

鋼球打撃に伴ってコンクリート表面で生じる弾性波をAE計測することで、コンクリート表面および内部に発生しているひび割れを介して伝搬する弾性波の応答解析に基づき、ひび割れの有無や自己治癒に伴う閉塞を評価でき、振幅や周波数をパラメータ（図-3）として弾性波の伝搬特性が自己治癒コンクリートのひび割れ閉塞の評価手法に用いられている⁴⁾。

本調査においては、AE計測システムを用いてひび割れを介した鋼球打撃により生じる弾性波の検出と弾性波の応答解析を行い、自己治癒材料の有無を条件とした深部ひび割れの閉塞状況の評価を行った。特に、コンクリートの暴露環境における治癒生成物の析出によるひび割れ治癒挙動は、物理的なひび割れ閉塞を把握するために、振幅と周波数成分の減衰を指標として用いることとした。

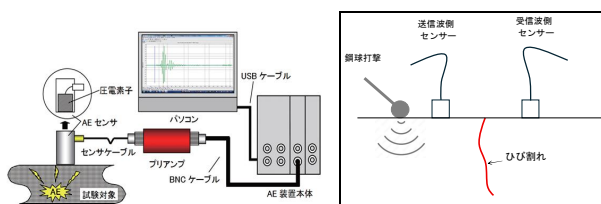


図-2 AE計測システムの概要（左）とイメージ図（右）

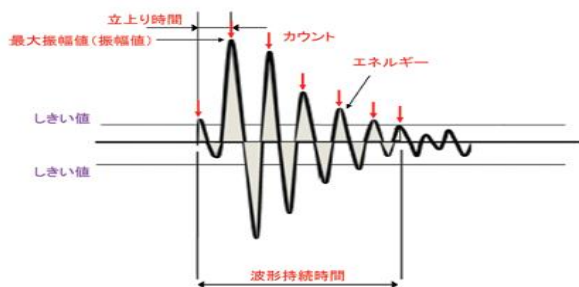


図-3 AEパラメータ（概念図）

(4) 凍結融解試験（海水）：JIS A 1148（A法）

寒冷地の特徴的な劣化である凍害劣化（耐凍結融解性能）について、自己治癒コンクリートは海水では未確認である。そのため、ここでは試験水に海水を使用した凍結融解試験（JIS A 1148）（A法）を実施し、海洋環境における自己治癒コンクリートの耐凍害性を評価した（写真-5）。

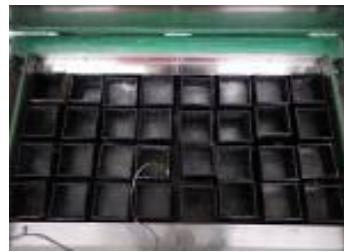


写真-5 凍結融解試験状況（左）試験供試体（右）

3. 結果と考察

(1) 外観観察

自己治癒コンクリートにおける治癒生成物の初期形成と表層部での治癒進行状況を目視で把握した。特に本報告では干満帯と陸上という環境差および寒冷期における治癒反応の遅延・凍害の影響を把握するため、部材表面での治癒生成物の状況やひび割れの閉塞状況および、ひび割れ幅の変化などを詳細に記録し、環境条件が治癒生成物の発現に及ぼす影響を確認した。

調査結果を表-4に示す。苫前漁港（干満帯）は治癒の初期兆候（治癒生成物・閉塞）が強く現れた。一方、羽幌港（陸上）は治癒生成物の発生量や範囲が局部的で治癒の発現が限定的であった。これは暴露環境の違いが治癒の発現に大きく影響することを示唆している。

表-4 外観観察結果

	苫前漁港（干満帯）	羽幌港（陸上）
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> ひび割れ沿いに連続した治癒生成物析出を多数確認 ひび割れ開口部、表面閉塞が明瞭 乾湿サイクルに起因する析出ラインが認められ、治癒反応が継続的に発生 	<ul style="list-style-type: none"> 治癒生成物の発生量は限定的かつ局所的 ひび割れ開口部の閉塞は進まず表層の治癒は乏しい 乾燥が早く、水分供給が継続しない痕跡が明確
総評	治癒生成物の成長が顕著で、干満帯環境が治癒促進に寄与	供給水分不足により、治癒反応が十分に進行しなかった

(2) 供試体暴露試験の結果

ひび割れ治癒の進行を最も直接的に把握できる供試体の透水試験では、図-4に示す自己治癒材の有無による比較、図-5に示す水分供給の違いおよび図-6に示す暴露気温の違いの影響について検証した。試験は全12供

試体で実施したが、一部は試験当初から通水量が 100 g 程度と低い供試体もあった。また、供試体運搬による振動等の影響でひび割れ表面の治癒生成物が剥離したことにより、一時的に透水量が増加する傾向が見られた。

自己治癒材が混入された供試体では試験開始当初は最大 4,000 g 程度の通水量が確認されたが、時間経緯とともに通水量は減少した。一方、自己治癒材未混入の供試体については、想定通り試験開始後、270 日経過しても通水量は減少しなかった。

水分が多く供給される苫前漁港（干満帯・海中）では、透水量は試験開始後 25～50 日までに急激に減少し 100 日で概ね 0 g に達した。他方、水分供給が雨水のみの羽幌港（陸上）では、干満帯・海水と比して治癒反応が緩慢であり試験開始後約 300 日で 0 g となった。

自己治癒の進行速度については、夏季は 40 日程度で通水量は 0 g となった。他方、冬季は 70 日以上必要としたことから夏季は冬季よりもやや早い傾向が確認された。

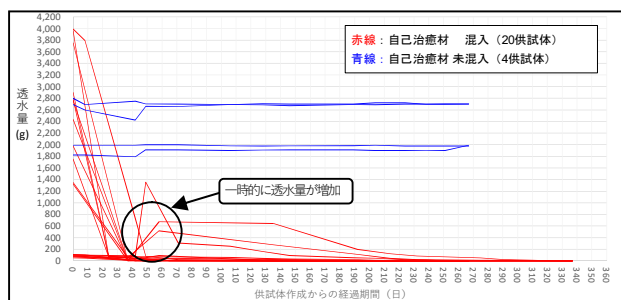


図-4 透水試験結果：自己治癒材の有無の比較

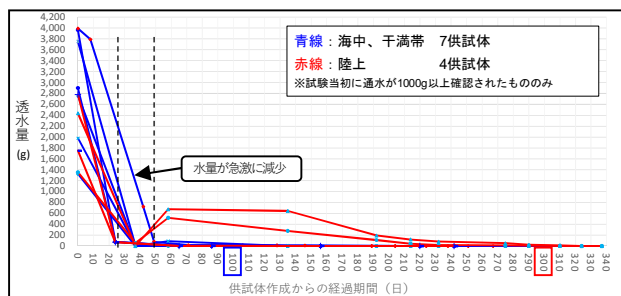


図-5 透水試験結果：陸上と海中干満帯の比較

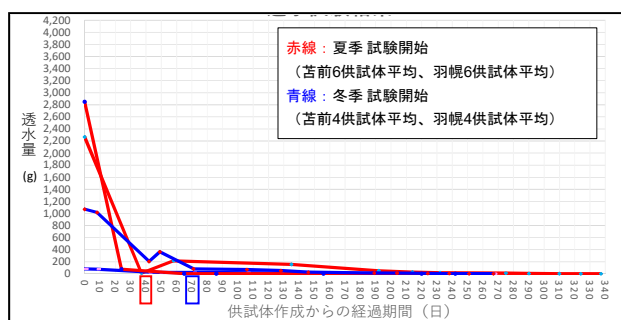


図-6 透水試験結果：夏季と冬季の比較

(3) 凍結融解試験（海水）の結果

本試験は自己治癒材が配合された供試体（以下：Basilisk 配合という）と自己治癒材が配合されていない供試体（以下：ベース配合という）で実施した。Basilisk 配合、ベース配合ともに JIS で規定された 300 サイクルでの質量減少率を図-7に、相対動弾性係数を図-8に、耐久性指数を図-9に示した。

a) 質量減少率

ベース配合の質量減少率は 1.1%まで低下した。一方、Basilisk 配合は 5.5%まで減少しており、ベース配合と比較して質量減少率が高いことが確認された。

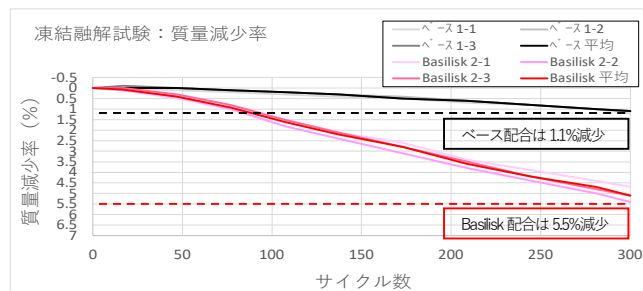


図-7 質量減少率

b) 相対動弾性係数

Basilisk 配合、ベース配合ともに凍結融解 300 サイクルに達した時点でも相対動弾性係数は 60%を下回ることにはなかった。以上より、Basilisk 配合はベース配合と比して若干低いが、耐凍害性を有するものと判断した。

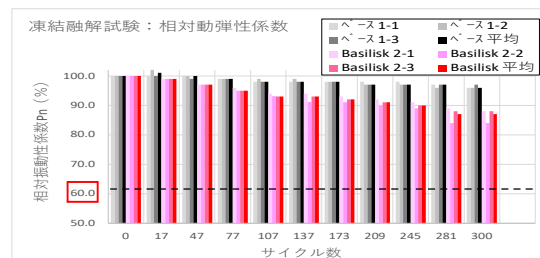


図-8 相対動弾性係数

c) 耐久性指数

Basilisk 配合、ベース配合ともに、耐凍害性に優れた高強度コンクリートの閾値と言われる 80%⁵⁾を下回ることにはなかった。以上より、Basilisk 配合はベース配合と比して若干低いが寒冷海洋環境下においても高い耐凍害性能が確保できることが示された。

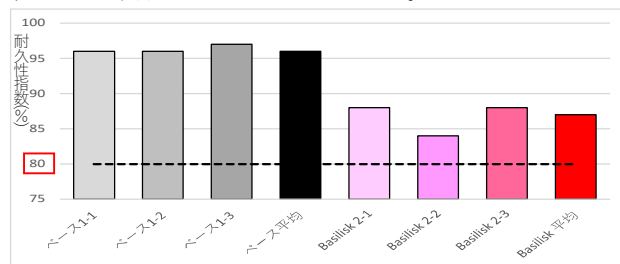


図-9 耐久性指数

(4) AE 計測結果

a) AE 計測によるひび割れ閉塞評価（羽幌港）

羽幌港での計測箇所を写真-6 に示す。また、図-10 は治癒生成物に伴う閉塞が開口部において目視確認できる状況を含めたひび割れの様子を示している。

AE計測では、鋼球打撃（直径6mm：励起上限周波数は約50kHz）により発生した弾性波の送信波と受信波の周波数スペクトル成分に着目した評価を行った。

図-11に送信波の周波数スペクトルに対する受信波の周波数スペクトルの比を示す。ここで、ひび割れ面の閉塞状況は、高周波減衰で識別できるため、周波数スペクトル比が大きい（小さい）方が各周波数成分が持つ振幅エネルギーの減衰が小さい（大きい）ことが理解できる。

これにより、図-10に示す治癒生成物によるひび割れ閉塞が目視で確認できる箇所（測点3'）では、ひび割れ閉塞が目視で確認できない箇所（測点3）よりも高いスペクトル比を示している。このことは、ひび割れを介して伝搬する弾性波の減衰が小さいことが確認できるとともに、弾性波の伝搬挙動からも、深部ひび割れが閉塞したと判断できる。

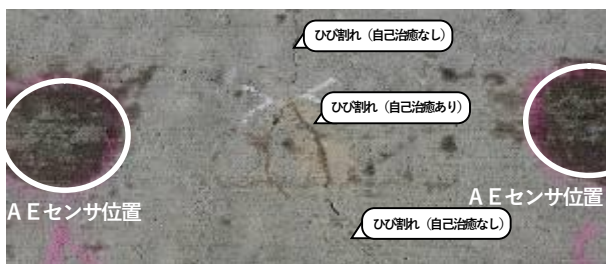


写真-6 自己治癒の様子（測点3'）

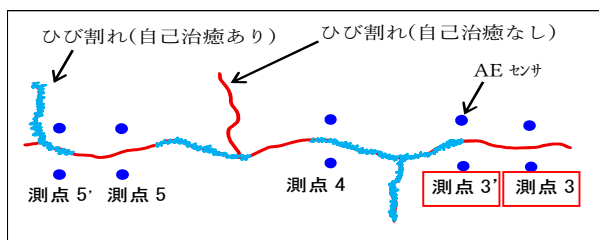


図-10 AE計測箇所の一例（平面図）

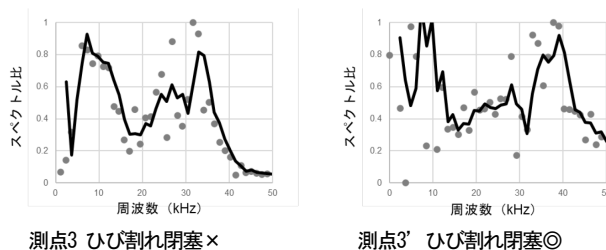


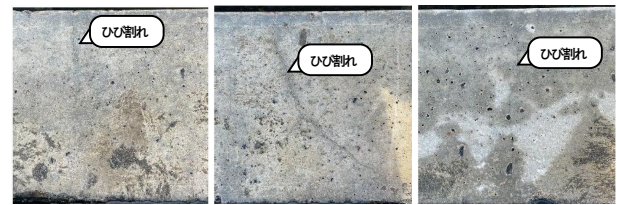
図-11 羽幌港のコンクリートにおける弾性波の伝搬特性

b) AE計測実施箇所の状況（苫前漁港）

対象としたひび割れ箇所を写真-7に示す。なお、苫前漁港においては、自己治癒ありコンクリートのみを対象

とした計測を行った。

なお、ひび割れ開口部におけるひび割れ幅は0.10～0.15mmであることを確認した。



ひび割れ1 ひび割れ2 ひび割れ3
写真-7 苫前漁港のひび割れ部の外観

c) AE 計測によるひび割れ閉塞評価（苫前漁港）

ひび割れを介して伝搬した弾性波の送信波および受信波について各周波数スペクトルの代表例を図-12に示す。

これより、送信波と受信波においてスペクトルに大きな差異は認められない。このことから、ひび割れの開口による弾性波の周波数成分に着目した減衰の影響は非常に小さいことが分かる。

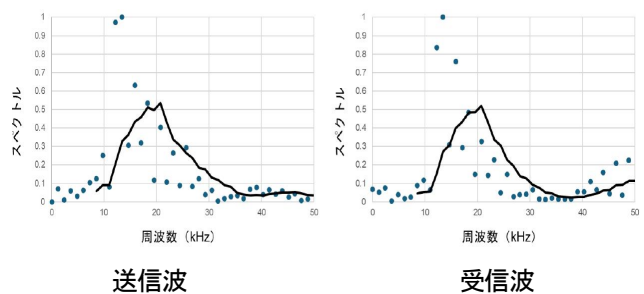


図-12 苫前漁港の送信波と受信波のスペクトル

d) AE計測のまとめ

実証実験の結果から、以下のことが確認できた。

- ・ 治癒生成物によりひび割れが閉塞した測点では、未閉塞の測点よりスペクトル比が高く弾性波減衰が小さいことから、深部ひび割れが閉塞していることが推察できた（羽幌港）。
- ・ 弾性波の周波数成分の大きな変化が見られないことから、表面上治癒生成物が洗い流された箇所でも、ひび割れ深部は閉塞していると判断した（苫前漁港）。

(5) 試験結果の考察

各種試験の結果から、外観観察では苫前漁港（干満帯）は自己治癒の初期兆候が強く現れ、羽幌港（陸上）は自己治癒の発現が限定的であり、環境差が治癒生成物の発現に大きく影響することが確認された。

一方で、干満帯のひび割れに対しては、治癒生成物が深部ひび割れの閉塞に寄与したことが確認できており、塩害・凍害の複合的な劣化に対するコンクリートの耐久性向上が期待できる。また、干満帯のように従来補修が

困難な部位でも本技術により劣化抑制と維持管理の効率化に寄与し得る可能性が示唆されたが、これは浅い表層ひび割れのみを対象としてきた自己治癒コンクリート技術の適用範囲拡大を示すものであり、寒冷沿岸構造物に特有な深部ひび割れ対策への新たな知見でもある。これらの知見から、寒冷地沿岸構造物における自己治癒コンクリート適用の有効性が明らかになった。

4. 結論および今後の課題

本報告では、寒冷沿岸域に位置する苫前漁港および羽幌港において自己治癒コンクリートの現地暴露を行ない、さらに室内試験（透水試験・海水凍結融解試験）と組み合わせで治癒挙動を総合評価した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 干満帯は自己治癒の最適環境（苫前漁港）

干満帯の条件下では、治癒生成物が連続的に発生し、弾性波速度による内部密度の回復も顕著であった。供試体試験の治癒挙動と高い整合性を示し、現地条件下でも効果が発揮されたと考えられる。

また、干満帯における自己治癒箇所においては、表面上、治癒生成物が洗い流された箇所でも、ひび割れ深部におけるひび割れの閉塞が確認されており、海洋環境下での構造健全性向上に寄与する可能性が示唆される。

(2) 治癒生成物の発現環境

現地試験及び供試体暴露試験の結果から、春～秋に治癒が進行、冬季は反応が緩慢となる特徴が見られたが、自己治癒が進んだ場合は凍結抵抗性の向上も期待でき、干満帯では治癒促進と凍害抵抗性の向上が季節的に相乗的に作用する可能性がある。

ただし、今後の技術的検討および適用拡大に向けては以下の課題があることも確認できた。

a) 海中における治癒挙動の解明

現場実証試験では、干満帯および陸上のみを対象としたが、海中での試験データは不足しており、自己治癒挙動が未解明な点も多いため、今後は海中での析出メカニズム、治癒持続性、流速の影響などの検証が必要である。

b) 治癒反応の季節依存性と定量化

寒冷沿岸域では、冬季に治癒が緩慢になったことから、治癒が季節依存性を持つことが推察されるため、気温・水分・含水率の連続モニタリングによる定量分析が望まれる。他方、実構造物では凍害、塩害、海洋作用などの複合的な作用が存在し、今回行った単一要因試験（凍結融解・塩害）だけでは推定は不十分であり、実際の環境下での複合作用試験の開発・調整が必要となる。

c) 長期モニタリングによる治癒の持続性評価

自己治癒は短期のひび割れ閉塞だけではなく、長期の耐久性改善にも寄与するため、継続的観測による経年変化の評価が必要である。

5. おわりに

本報告は、寒冷沿岸域における自己治癒コンクリートの実構造物での適用を明らかにするため、干満帯・海中および陸上における暴露と室内試験を組み合わせ、治癒挙動の環境依存性を体系的に評価した。

これら得られた知見は、寒冷海域を有する北海道をはじめとした港湾・漁港構造物において、自己治癒材料を合理的かつ効果的に適用するための基礎的な知見になると考える。

謝辞：本報告にあたっては、自己治癒材料の提供および技術的助言をいただいた會澤高圧コンクリート株式会社、現地・環境条件の整理、計測支援記録整理にご協力いただいた日本データーサービス株式会社、弾性波伝搬挙動解析(AE計測)にご協力いただいた北海道大学環境機能マテリアル工学研究室の皆様、及び寒地土木研究所（耐寒材料T、寒冷沿岸T）の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 北海道開発局 港湾空港部 港湾建設課・同局 港湾空港部 港湾行政課・同局 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：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，北海道開発技術研究発表会論文集，第62回，2019.
- 2) 長谷一矢・久保純一：寒冷沿岸域にある無筋コンクリート防波堤の干満帯における損耗劣化に関する一考察，北海道開発局技術研究発表会論文集，第64回，2021.
- 3) 中村英之：「AE計測技術の基礎—その1」ハードから計測条件の設定まで，IIC REVIEW，No.56，pp.28-38，2016.
- 4) E. Tsangouri, et al., Detecting the activation of a self-healing mechanism in concrete by acoustic emission and digital image correlation, The Scientific World Journal, ealth Monitoring of Civil Infrastructure and Materials, 423560, 20133.
- 5) 本多大希・金志訓・濱幸雄：「報告 コンクリートの耐凍害性確保のための必要空気量に関する文献調査」，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，2020.