

# 建設から10数年および約40年経過した防波堤での塩害・凍害調査

Field survey on combined deterioration with breakwater which passed from construction for 10-several years and about 40 years

- 北海道開発土木研究所 正 員 遠藤 裕丈 (Hirotake ENDOH)
- 北海道開発土木研究所 正 員 田口 史雄 (Fumio TAGUCHI)
- 北海道開発土木研究所 正 員 嶋田 久俊 (Hisatoshi SHIMADA)
- 北海道開発土木研究所 正 員 渥美 洋一 (Youichi ATSUMI)
- 北海道開発土木研究所 正 員 窪内 篤 (Atsushi KUBOUCHI)
- 日鐵セメント株式会社 正 員 星 俊彦 (Toshihiko HOSHI)
- 日本データサービス 正 員 太田 利隆 (Toshitaka OOTA)
- 第三者社会基盤技術 評価支援機構・北海道 正 員 佐伯 昇 (Noboru SAEKI)

## 1. はじめに

寒冷地の海洋コンクリート構造物は、海水による塩分と凍結融解による複合劣化を受けやすい苛酷な環境下に曝されている。その代表的な構造物である防波堤の多くは、性能低下の程度に対応して維持管理や補修を検討する事後維持管理（コンクリート標準示方書維持管理編の区分B）に近い形で管理されている。しかし、近年はライフサイクルコストの低減が社会的に強く求められていることから、新設時から劣化の予測を行い、管理の目安となる性能水準を定め、経済的かつ効果的な維持管理計画を立てることが望ましい。そのためには、劣化予測データをもとに経時的な性能低下曲線を作成する必要があるが、自然環境下における塩害と凍害との複合劣化の進行性を扱った調査事例は少なく、劣化の予測は極めて難しい現状にある。

そこで、本論では建設から10数年および約40年を経た防波堤で調査を行い、自然環境下における劣化の進行性について検討した結果を報告する。

## 2. 概要

### 2.1 調査場所

調査対象構造物の条件は、高上や補修が行われていない防波堤とした。本論では、この条件に見合う防波堤の中から、石狩湾新港北防波堤、苫小牧東港中防波堤および内防波堤、十勝港南防波堤、釧路港北防波堤、留萌港南防波堤を選定した。図-1に選定した防波堤の位置図を示す。留萌港南防波堤は建設から約40年、その他の防波堤は10数年経過している。使用されているセメントは、いずれの防波堤も高炉セメントB種である。

### 2.2 気象条件

表-1に前項で選定した各地域の冬期（11月～翌年3月）の最低気温、凍結融解日数、凍結持続日数に関するデータを示す。データは、過去5年間（2000～2004年度）の気象庁のアメダスの平均である。凍結融解日数については、コンクリートの凍結温度を-2<sup>1)</sup>としてカウントしている。各地域の凍結融解作用の厳しさについて、本論では、浜ら<sup>2)</sup>が提案した(1)式に示す地域係数で表現することとした。

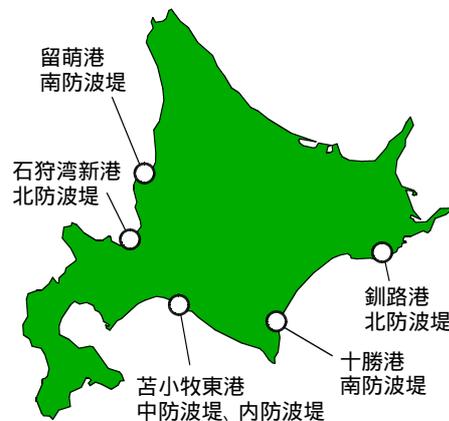


図-1 調査場所の位置図

表-1 各地域の冬期（11月～翌年3月）の環境データ

	石狩湾新港(山口)				苫小牧東港(苫小牧)				十勝港(広尾)			
	tamin	Dw	Df	T	tamin	Dw	Df	T	tamin	Dw	Df	T
11月	0.6	7	0	-0.6	-0.2	9	0	0.2	0.5	8	0	-0.5
12月	-5.5	19	8	3.1	-6.7	23	4	5.5	-7.2	23	4	5.8
1月	-8.4	20	10	4.3	-8.2	25	5	6.5	-9.5	18	11	3.5
2月	-7.5	15	11	2.1	-8.1	21	5	6.2	-9.9	16	12	2.5
3月	-3.8	18	3	3.3	-4.2	20	1	4.0	-4.9	19	3	4.2
平均				2.5				4.5				3.1
	釧路港(釧路)				留萌港(留萌)				備考			
	tamin	Dw	Df	T	tamin	Dw	Df	T	tamin : 日最低気温 Dw : 凍結融解総日数(日) Df : 凍結持続日数(日) T : 地域係数 ( ) : アメダス観測所名			
11月	-0.7	12	0	0.7	1.1	6	0	-1.1				
12月	-8.8	24	4	7.2	-5.3	19	8	3.1				
1月	-10.1	20	8	6.4	-8.4	19	10	3.8				
2月	-10.4	18	8	5.6	-7.4	15	10	2.4				
3月	-4.9	18	2	4.3	-3.9	15	4	2.9				
平均				4.8				2.2				

各月のデータは、過去5年間(2000～2004年度)のアメダスの平均値

$$T = -tamin \left( 1 - \frac{Df}{Dw} \right) \quad \dots (1)$$

ここに、Tは地域係数、taminは日最低気温の極値( )、Dwは凍結融解総日数(日)、Dfは凍結持続日数(日)である。地域係数は、釧路港、苫小牧東港、十勝港、石狩湾新港、留萌港の順に大きい傾向にあった。

### 2.3 調査方法

現地調査は、写真-1に示すような防波堤上部工天端(以

下、天端と記す)で行った。本論では、凍害による表面剥離と塩化物イオン浸透性の2つに主眼を置き、150×400mmのコア試料を採取し、表面剥離の外観調査、セメント協会法「F-18」による配合推定、リニアトラバース法による気泡間隔係数測定、表層組織のEPMA分析、塩分量の測定を実施した。なお、においては、剥離の度合を定量的に表す指標として剥離度<sup>3)</sup>を用いた。剥離度は図-2に示すように、天端に据え付けた50×50cmの方形フレーム枠内の平均剥離深さ(mm)と枠内に占める剥離面積率(%)との積で定義される。本論では、非接触の3次元デジタイザを使用して測定し、データを解析ソフトに取り込んで剥離度の計算を行った。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 表面剥離に及ぼす配合推定W/Cの影響

図-3に配合推定で得た防波堤コンクリートの水セメント比(以下、W/Cと記す)と剥離度の関係を示す。両者の相関は良好であった。建設後10数年と約40年の各々の回帰直線に着目して剥離度の経年変化をみると、W/C=55%は10数年後に約2.5mmに達するものの、その後約30年間は大きな変化が殆どみられない。W/C=65%は10数年後に約8mm、約40年後には25~30mmと継続的に増加している。このことから、剥離の進行性が比較的緩慢から顕著な傾向に転ずるW/Cが55~65%に存在すると推定される。

凍害による剥離の欠損深さの基準について、土木学会の自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針(案)では、粗骨材の剥落を防ぐ観点から、粗骨材の最小寸法の1/2にあたる2.5mm<sup>4)</sup>が提案されている。こ

れに基づいて、図-3で剥離度の上限基準を2.5mmに設定したところ、W/Cの許容範囲は55%以下となった。土木学会コンクリート標準示方書の施工編は、海水などの影響でスケリングが生じるおそれがある場合、W/Cを45%以下にするよう推奨している。配合推定によるW/Cの推定では10%程度の差なども生じている<sup>5)</sup>ことを踏まえると、示方書の推奨値は概ね妥当な値といえる。

#### 3.2 表面剥離に及ぼす空気量の影響

図-4に硬化コンクリートの空気量と剥離度の関係を示す。図には硬化コンクリートのW/Cも併記する。十勝港においては空気量が多い防波堤では剥離度が小さい傾向が概ね見受けられたのに対し、留萌港では空気量が多い防波堤の剥離度が大きい関係を示した。図-5は空気量と気泡間隔係数の関係である。気泡間隔係数は耐凍害性に有効とされる0.25mm以下よりも高い値を示した。気泡構造が最も良好なコンクリートの気泡間隔係数は0.28mm、空気量7.5%であるが、剥離度は30.9mmと高く、本論では剥離度との相関は確認されなかった。

空気量と剥離度の関係については、W/Cが一律同じ条件下で空気量を6%にすると剥離度は空気量0%の約半分、10%では0%の1/5程度に減少する報告<sup>6)</sup>と、空気量2~5%の条件下では剥離に及ぼす空気量の影響は小さく、W/Cや凍結温度に依存する報告<sup>7)</sup>がある。空気量の設定範囲が前者は10%、後者が3%と異なるため一概に



写真-1 調査した天端の一例 (留萌港南防波堤)

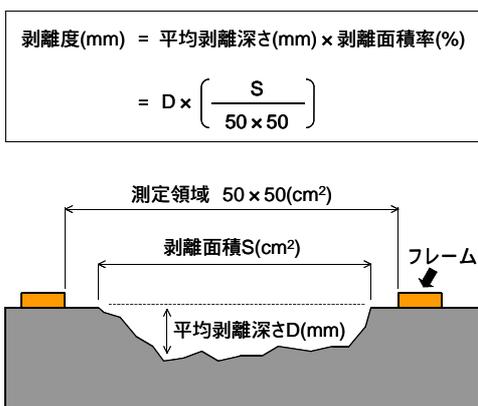


図-2 剥離度の定義<sup>3)</sup>

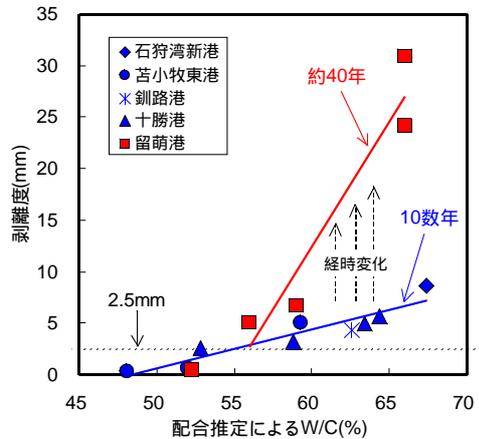


図-3 配合推定W/Cと剥離度の関係

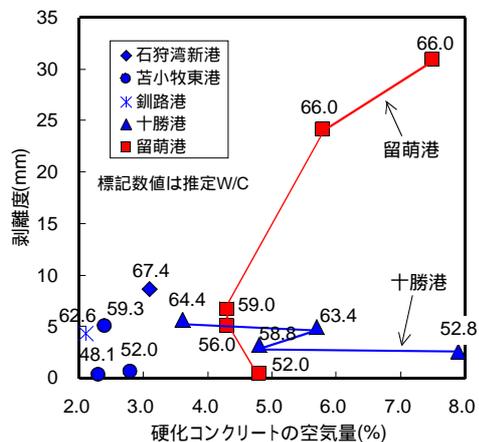


図-4 硬化コンクリートの空気量と剥離度の関係

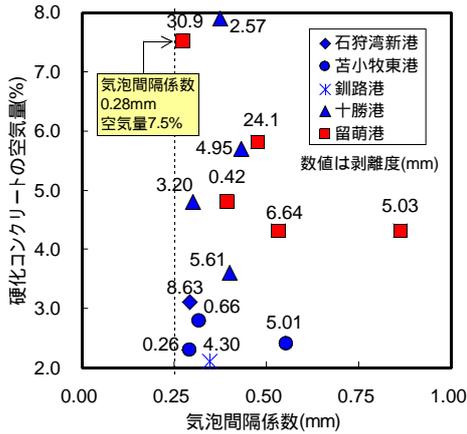


図-5 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係

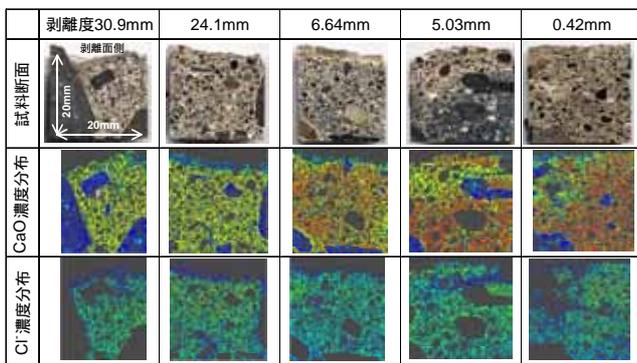


写真-2 EPMA分析結果(留萌港南防波堤)

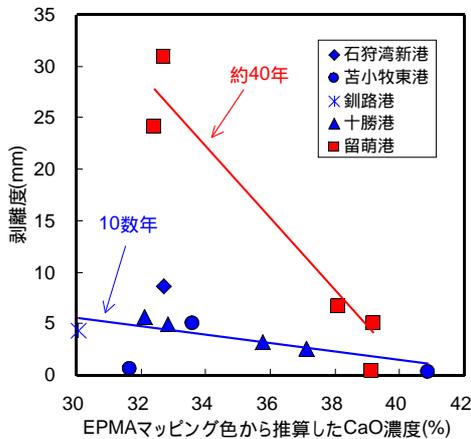


図-6 EPMAマッピング色から推算したCaO濃度と剥離度の関係

比較することは難しいが、本論の結果はどちらかと言うと後者に近い内容であった。

### 3.3 表面剥離に及ぼすコンクリート表層のCaOの影響

写真-2にEPMA分析結果を示す。ここでは代表して留萌港の結果を載せる。左から剥離度が高い順に並べている。

まず、酸化カルシウム (CaO) の結果を述べる。マッピング色は濃度が高い順に白(52.5~60%)、ピンク(45~52.5%)、赤(37.5~45%)、黄(30~37.5%)、緑(22.5~30%)、水色(15~22.5%)、青(7.5~15%)、黒(7.5%以下)で表している。一般にCaO濃度はコンクリート組織がち密なほど高い値を示す。剥離度が30.9mmと24.1mmは全体的に黄を呈し、剥離度6.64mm、5.03mm、0.42mmは赤

表-2 重回帰分析結果

変数	影響因子	重回帰				重回帰			
		建設後10数年		建設後40年		建設後10数年		建設後40年	
		係数	t値	係数	t値	係数	t値	係数	t値
X1	地域係数	-0.467	-0.508	-	-	-0.295	-0.454	-	-
X2	推定W/C	0.387	2.869	1.266	2.723	0.398	3.374	0.937	0.543
X3	空気量	-0.132	-0.437	4.185	(3.186)	-	-	-	-
X4	気泡間隔	-	-	-	-	2.882	0.604	-3.151	-0.167
X5	CaO濃度	0.134	0.654	-0.178	-0.169	0.148	0.761	-2.023	-0.586
	切片	-21.16		-78.15		-24.47		32.44	
	R2	0.912		0.996		0.915		0.953	

重回帰 は、X1、X2、X3、X5の4因子で重回帰分析

重回帰 は、X1、X2、X4、X5の4因子で重回帰分析

建設後約40年経過のデータは留萌しかないため、地域係数を因子から除外して分析

と黄の混在もしくは赤が主体のマッピングを示した。深さ数ミリの極表層では青を呈し、濃度の低下が認められた。これは、海水によるカルシウムの溶脱が考えられる。

図-6にEPMA画像から推算したCaO濃度と剥離度の関係を示す。ここでは全防波堤のデータを載せている。本論では、白を56.25%=(52.5+60)/2)、ピンク48.75%、赤41.25%、黄33.75%、緑26.25%、水色18.75%、青11.25%、黒3.75%(骨材除外)として計算している。CaO濃度が高いほど剥離度は小さくなる傾向がみられ、その効果は建設から約40年を経ても保持されることがわかった。

ここでは、塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) の濃度分析も行ったので、併せて結果を述べる。同様に、濃度が高い順に白(8~10%)、ピンク(6~8%)、赤(5~6%)、黄(4~5%)、緑(3~4%)、水色(2~3%)、青(1~2%)、黒(1%以下)で表している。極表層は青を呈しているが、その直下では緑や黄の高濃度領域が形成されている。極表層はCaO、Cl<sup>-</sup>とも濃度が低いことから、高濃度領域は、CaO濃度が高い密実な組織によって海水の拡散が抑制されたことによる塩化物イオンの濃縮<sup>3)</sup>と考えられる。このことは、極表層は海水が浸透しやすい状態にあることを示唆する。よって、表面剥離機構の一つにカルシウムの溶脱で組織が粗になった表層や骨材界面(剥離度30.9mm、24.1mm)へ浸透した海水による凍結膨脹破壊が推察される。

### 3.4 表面剥離に及ぼす影響因子に関する考察

ここで、剥離度と地域係数、W/C、空気量、CaOの各因子との間で重回帰分析を行い(以下、重回帰 と記す)、影響度の定量化を試みた。表-2に結果を示す。表には、空気量の因子を気泡間隔係数に置換して行った重回帰分析(以下、重回帰 と記す)の結果も併せて示す。建設後約40年については、留萌港しかデータがないため、本論では地域係数を因子から除外して分析している。

回帰式の係数の重要性を表すt値は、建設後10数年と約40年のいずれもW/Cが大きい結果となった。重回帰の建設後約40年は空気量のt値が高いが、これは空気量が多い防波堤ほど剥離抵抗性に劣る既知の通説に矛盾する関係が示された(図-4)影響によるものである。他のデータからは剥離に及ぼす影響は空気量よりW/Cが大きい知見を得ていること、重回帰 では気泡間隔係数のt値が比較的小さい値であることとの整合性を考慮し、このt値を異常値とみなすと、W/Cに次いで大きい影響因子はCaOと言える。地域係数のt値は比較的小さかったが、これは2.5~4.8の差の有意性が小さかったことが理由の一

つに考えられる。分析の結果から、この2.5~4.8は同等の環境と取り扱ってもよいように思われるが、これについては今後、地域係数が大きい防波堤でも調査、詳細な分析を行う必要があると考えられる。

### 3.5 塩化物イオンの浸透性及び表面剥離の影響

図-7に塩化物イオン量の測定結果を示す。深さは剥離面からの距離ではなく、剥離度を加算して剥離が生ずる前の健全面からの距離で表示している。建設後10数年の防波堤の塩化物イオン浸透範囲は概ね深さ100mmであったが、建設後約40年の防波堤は剥離度が最小の0.42mmでも深さ100mmでは0.13% (3.0kg/m<sup>3</sup>)となっており、100mmより深い範囲へも塩化物イオンが浸透していることがわかった。深さ100mm位置の塩化物イオン量は、天端の剥離度が高い防波堤ほど大きい傾向にあり、塩化物イオンの浸透性及び表面剥離の影響が明確に表れている。

表-2に留萌港南防波堤の塩化物イオン拡散係数について実測値から算出した値と土木学会コンクリート標準示方書の推定式から計算した値を示す。計算に必要なW/C、t(経過年数)、Co(表面塩化物イオン量)の部位について、W/Cは配合推定値、tは40年とし、Coは健全面に設定すると計算の精度が低下するため剥離面とした。剥離度24.1mmは示方書推定式で得られる値の1.25倍となり、その他は推定式の値よりも小さい結果となった。通常、建設前に行う塩分の浸透予測は、Fickの拡散方程式から得られる図-8の青線で行われる。しかし、表面剥離が生ずると、表面のレベルが深さ方向へ移動するため、赤線のような分布をなすものと思われる。この欠損後の塩分濃度勾配(赤線)の曲線式に関しては今後検討を行っていきたい。

### 4. まとめ

本調査で得た知見を整理すると、以下ようになる。

- (1)剥離度と地域係数、W/C、空気量(気泡間隔)、CaOの各因子の間で重回帰分析を行い、影響度の定量化を試みた結果、表面剥離の進行性に大きな影響をもたらす主な因子はW/CとCaOであった。この2因子が剥離に及ぼす影響は、建設から約40年を経ても持続する。
- (2)コンクリートの塩化物イオン量は剥離度が高い防波堤ほど多い傾向にあり、塩化物イオンの浸透性調査は表面剥離による欠損量を考慮した補正が望ましい。

### 5. おわりに

今後は表面の調査に加えて凍害深さなどコンクリート内部の組織構造の評価も行っていく所存である。最後になりましたが、本調査の実施にあたっては北海道開発局小樽、苫小牧、十勝、釧路、留萌の各港湾事務所の関係各位より多大なご協力を頂きました。また、剥離度の測定では日本データサービス(株)の木村博史氏に大変御世話になりました。末筆ながらここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1)コンクリート技術の要点'99、p.155、日本コンクリート工学協会、1999
- 2)浜幸雄・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

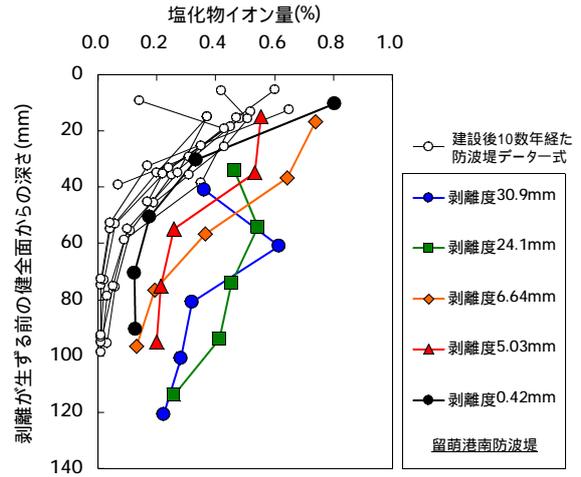


図-7 塩化物イオン量の測定結果

表-2 塩化物イオン拡散係数算出結果

剥離度 (mm)	から		拡散係数 (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)			/	
	推定W/C (%)	10%差引					
30.9	66	56	1.94	3.62	2.42	0.54	0.80
24.1	66	56	4.51	3.62	2.42	1.25	1.86
6.64	59	49	1.36	2.77	1.69	0.49	0.81
5.03	56	46	1.71	2.42	1.41	0.71	1.21
0.42	52	42	0.53	1.99	1.10	0.27	0.48

は実測値から計算した値(網掛けは最も浅い位置のデータを除外して計算)、は、土木学会コンクリート標準示方書の推定式から計算した値(はのW/C、はのW/Cを用いて計算している)

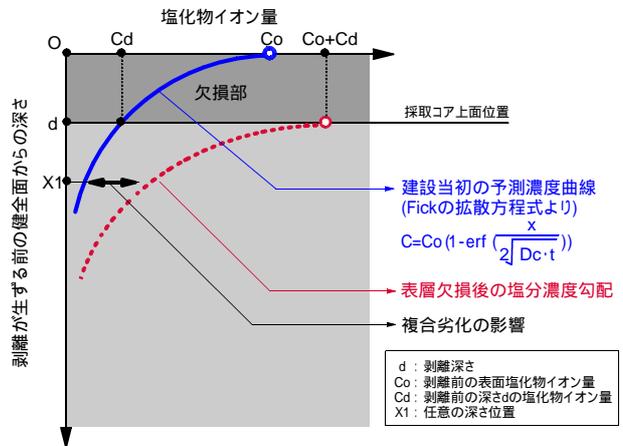


図-8 塩分の浸透性及び表面剥離の影響(イメージ)

- 本建築学会構造系論文集、第523号、p.9-16、1999.9
- 3)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、p.20、北海道開発局港湾建設課、寒地港湾技術研究センター、2000.3
- 4)コンクリートライブラリー105、自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針(案)、p.332-333、土木学会、2001
- 5)コンクリートの診断技術'02、基礎編、p.136、日本コンクリート工学協会、2002.1
- 6)文献3)、p.委-32
- 7)桂修：過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究、p.121、学位論文、1999.9
- 8)J.Stark and B.Wicht：DAUERHAFTIGKEIT VON BETON