寒冷地における海岸環境下のコンクリート

佐 伯 昇^{*1}・藤 田 嘉 夫^{*2}

概 要 氷海域へのコンクリート構造物の進出あるいは海岸・港湾構造物の基盤施設の整備・拡充に伴い、寒冷地における海岸環境下のコンクリートの耐久性、性能向上が注目されている。本稿は、このような環境下に置かれているコンクリートの凍結融解、塩分浸透などの環境状況、凍害あるいは塩害状況および、これらに対して耐久性を確保するための方法、新しい試みなどを述べている。

キーワード：海洋コンクリート，凍害，塩害，凍結融解，塩分浸透，表層強度，飽水度，スケーリング

1. ま え が き

コンクリート構造物は陸，海岸からさらに海洋へとその用途を広げ，北海，北極海あるいは北部オホーツク海などの氷海域への需要はさらに活発になる傾向を示している。これらの環境下で基本となるコンクリートの耐久性の性能は，コンクリートに対して最も厳しい環境条件である飛沫帯に対しての性能である。この性能を把握するため，海岸環境下のコンクリートの性状，挙動が注目されている。もちろん，港湾・海岸構造物の拡充・補修が年数を経過するとともに必要となり，耐久性に対するコンクリートの性能の見直し，確認が必要になってきているためでもある。

本稿では，寒冷地における海岸環境状況，凍害・塩害状況および，これらに対して耐久性を確保するための方法あるいは新しい試みなどについて紹介する。

2. 寒冷地における海岸環境

寒冷地の海岸構造物は海水と凍結融解の作用を受け，スケーリングなどの被害を受ける。海岸構造物の凍害による損傷範囲は，図—1 に示すように，海水による水分の供給範囲によって決まり，汀線（LWL）から約 25 m¹⁾ に及んでいる。そのうち特に厳しいのは，汀線から 7 m 以内である。また，風雨，雪などによって塩分が運ばれて塩害を起こす範囲は，海岸線から 300 m も離れた構

図—1 汀線からの距離による凍害損傷

写真—1 寒冷地における海岸環境下のコンクリート（小樽港，北防波堤—明治 41 年竣工，南防波堤—大正 12 年竣工）

*1 さえき・のぼる／北海道大学助教授 工学部土木工学科（正会員）

*2 ふじた・よしお／北海道大学教授 工学部土木工学科（正会員）

図—2 海洋環境によるコンクリート劣化のモデル図²⁾

図—3 寒冷地の海岸におけるコンクリート表層部の温度変化の例

造物に及ぶことが知られている²⁾。さらに、河口から谷を通して塩分が運ばれ、かなり上流の構造物にも影響を及ぼすことがある。これらの環境下で劣化の最も激しい潮汐帯、飛沫帯の状況をモデル化³⁾すると、図—2のようになる。これらの領域では、海水によるマグネシウムイオン、硫酸塩による化学的浸食、あるいは炭酸ガスによる中性化が起こる。また、波、砂、砂利あるいは氷などの物理的な作用による摩耗が起きる。さらに、凍結融解による劣化、鉄筋の腐食によるひびわれが起きる。こ

こでは、凍結融解および塩分浸透、中性化について主に述べる。

2.1 凍結融解

図—3 は、流水が着岸する寒冷地の代表的な地点（オホーツク海に面する紋別市海岸）におけるコンクリート中の温度挙動を示したものである。これは、海岸に暴露したコンクリートブロックの地表面から約 1m の高さの部位におけるコンクリート表面から 1cm の深さの箇所測定した日最高・最低温度で、これにより凍結融解回数を算定⁴⁾すると、一冬で約 100 回となる。凍結融解が始まるのは 10 月の終わりから 11 月の初めで、12 月の終わりから 2 月末までは凍結状態に入る。3 月に入ってからまた多くなり、4 月の終わりから 5 月の初めで凍結融解は終わる。北海道の各地域では、これらとほぼ同じ傾向の凍結融解作用を受け、その回数は 50～110 回程度である。

また、凍結融解回数は地表からの高さあるいはコンクリート表面からの深さによっても変化し、図—4 に示すように、地表面から 1m の所の凍結融解回数を 1 とすると、地表面では 1/2 に、地中 0.5m では約 1/10 に減少する。コンクリート中の深さによる温度挙動⁵⁾は、図—5 に示すように、コンクリート表面から 1cm 程度までは外気温と同じ挙動を示すが、

深さ 20cm 程度になると、1 日の外気温の変化にはあまり左右されずに一定となり、大きな周期で変化する。

コンクリートは深さ 10cm 程度までが 1 日の外気温の変化を受け、これが、耐久性から考えて重要な部分と考えてよい。このため、施工時において、型わくの密性、締固め、養生あるいは乾燥などの環境条件に対して注意し、表層部コンクリート（表面から深さ 10cm 程度までのコンクリート）を密実なコンクリートにすることが必要である。

Performance of Concrete in Coastal and Cold Environment

By Noboru Saeki and Yoshio Fujita

Concrete Journal, Vol. 25, No. 4, pp. 4~12, April 1987

Synopsis The demand for concrete structure used in coastal and offshore have stepped up and the performance of concrete properties in these environment becomes one of the most important problems to grasp recently. This paper describes the existing state of frost and salt damage of concrete structures in coastal and cold climate and the atmospheric conditions to raise the damages. Also, it is stated that a brief state of arts and new attempts to ensure the resistances of frost damage and corrosion and the importance of the properties of surface layer to maintain the durability of concrete and etc..

Keywords : durability, frost damage, corrosion, scaling, coastal concrete, surface layer

図-4 高さによる凍結融解回数 (高さ 1m を 1 とした)

図-5 海岸擁壁内部の温度分布 (12 月)

2.2 塩分浸透および中性化

4, 10 および 60 年間海岸あるいは潮汐帯に暴露されていたコンクリートの塩分浸透, 中性化の性状をみると, 4 年間海岸 (紋別市) に暴露した供試体の塩化物 (Cl) 量は, コンクリート厚さ 3~4cm でセメント重量に対して 0.2% である。これは, 後述するように, 発錆の開始量と対応している。また, 深さ 3cm 程度まで中性化の影響を受けている。

10 年間海岸環境 (留萌市)⁶⁾ に暴露された場合では, 塩分浸透は 図-6 のようになる。発錆限界を Cl 量で 0.6 kg/m^3 とすると, 普通およびフライアッシュセメント (単位セメント量 300 kg/m^3) でかぶり 7cm 程度, 高炉セメントでは 4cm 程度の深さまでこの濃度に達している。塩分浸透に対して, セメントの種類, セメント量が影響している。

60 年間直接海水の作用を受けたコンクリート (室蘭港のケーソン, 高炉セメント, 火山灰使用)⁷⁾ で表面から深さ 8cm の海中部コンクリートの塩分含有量は, コンクリート 1 m^3 に対し Cl 量で 1.4kg であり, また潮汐帯では, その倍の 2.8kg である。これ以上の深さでも, これらの値は一定値を示している。塩素含有量が 1.4 kg/m^3 で鉄筋 (かぶり 17.5cm) の腐食が起っていない

図-6 コンクリート中の塩分量⁶⁾

図-7 海水面からの深さによる測定 pH 値⁷⁾

ことから, 酸素や水分の供給に関連してかぶりの影響が大きいことが分かる。中性化 (フェノールフタレンによる判定) の深さは潮汐帯で約 4mm, 海中部で約 2mm であり, pH の測定では, 図-7 に示すように, 潮汐帯では深さ 8cm まで中性化の影響を受けている。すなわち潮汐帯では, 塩分浸透, 中性化とも, 海中に比べて約 2 倍も進行する。また, 60 年間海水の影響を受けても, 7~8cm 以上のかぶりがあれば, 塩分浸透, 中性化の影響はかなり少なくなることが分かる。

3. 海岸コンクリートの凍害状況

寒冷地の海岸・港湾コンクリートに, 従来から化学的浸食に対して強い混合セメント (高炉セメント B 種, フライアッシュセメント B 種) が多く使用されて, 省資源の一端を担っている。これを有効に利用するためには, 混合セメントの特性を知っておく必要がある。その 1 つは, 初期強度の発現が遅いことから, 乾燥などの環境条

図—8 淡水中と海水中の凍結融解作用による劣化性状の違い⁹⁾

件を受けやすく、表層部コンクリートの強度低下や海水の影響などによって表層部の細孔構造が変化し、AE 効果が影響を受ける。すなわち混合セメントは、打込み後の環境あるいは養生に対して敏感である。また一般に、海水環境では淡水環境より凍害の劣化が促進される。図—8 は、空気量 4.5%，水セメント比 0.51~0.52 の場合の淡水中と海水中の劣化の違い⁹⁾を示している。海水の方がより大きな劣化を示している。その要因として、表層部の細孔構造の粗大化と、それに伴う凍結可能水量の増加⁹⁾、凍結融解中の浸漬水の塩分濃度が劣化に関係すること、また、温度条件が同じであれば海水中では淡水中より細かい空隙中の水が凍結すること^{9), 10)}、凍結融解の初期段階で Cl イオンによる化学的劣化が見られること¹¹⁾、あるいは、コンクリート中の水に塩分が加わると浸透圧が生じ、水を呼び込んで水圧を高めること¹²⁾などが挙げられている。海岸に起る凍害の特徴¹³⁾は、粗骨材表面のモルタル部が 1 ないし数 cm の径で剝離するスケーリングの損傷が最も多く、また、骨材の凍害によって起こるポップアウトの損傷もある。写真—2 に、消波ブロックが損傷を受けた一例を挙げる。

次に、暴露実験からスケーリングの進行状況について、暴露ブロック（普通セメント、混合セメントを使

写真—2 スケーリング損傷

用、空気量 4.5%) の各部位の損傷と現場養生の 28 日強度 (σ_{28} 現) との関係を経過冬数によってみると図—9 のようになる¹⁴⁾。天端面（地表から 1.5 m）において、1 冬経過時点ではスケーリングの発生はなく、2 冬目で多少発生し、7 冬目では、 σ_{28} 現が 240 kgf/cm^2 以下で新たに損傷が発生している。垂直面（地表から 1.0~1.5 m）では、雪などが積もらず、水分の供給も少ないため、損傷は小さい。斜面（地表から 0.5~1.0 m）では、雪などによる水分供給が比較的多く、 240 kgf/cm^2 以下の強度では損傷が多くなっている。垂直面（地表から 0~0.5 m、秋から冬の波で砂が運ばれ、供試体は埋まっている）は砂からの海水の供給が多く、 240 kgf/cm^2 以下では大きな損傷を受けている。 280 kgf/cm^2 以上であれば損傷は比較的小さく抑えられている。すなわち、海水の供給のほとんどない部位では 240 kgf/cm^2 程度の強度でも凍害は抑えられているが、雪や海水からの水分の供給が多くなるに従って、 280 kgf/cm^2 あるいはそれ以上の強度の大きい高性能のコンクリートが必要になる。

4. コンクリート構造物の塩害状況

鉄筋コンクリート (RC) 部材の塩害の発生は、鉄筋の腐食によって鉄筋の断面積が減少し、耐荷力が低下するのではない。それ以前に、発錆によって約 2.5 倍の

図—9 スケーリング損傷の進行¹⁴⁾

体積膨張が起こり、鉄筋のまわりのコンクリートに圧縮力が働き、かぶりコンクリートには引張応力が生じて、鉄筋に沿って縦ひびわれが発生することによって塩害が生ずるのである。この時点において、補修などの処置を講ずる必要がある。写真—3 に、鉄筋の腐食によってかぶりコンクリートが破壊された様子を示している。腐食が部分的であれば、ポップアウトのような円錐形の剝離を引き起こす。また、海岸構造物の主鉄筋に一樣に腐食が進行すると、主鉄筋に沿って縦ひびわれが入り、その破片が落ちることもある。写真—4 は、海岸から数十 m

写真—3 鉄筋の腐食によるスポーリング

写真—4 RC橋の腐食損傷

写真—5 PC橋の腐食の損傷

離れた RC 橋（北海道日本海側、24 年経過）の鉄筋腐食の一例である。また写真—5 は、ポストテンション PC 橋（北海道日本海側、17 年経過）の例である。悪条件によって、RC 橋、PC 橋とも、比較的早く塩害を受けている。国鉄のコンクリート橋の塩害調査¹⁵⁾では、鋼材の腐食は飛沫する塩分の影響を受ける橋りょうで観察され、特に主げたの下縁で損傷が著しく、かぶりの不足、豆板などの密実性を欠いた箇所を起こっていることが指摘されている。また、北方圏諸国では主に融氷剤による塩害が起こっているが、これは海水による塩害にも対応しており、各国の対応方法は参考¹⁶⁾となる。

5. コンクリートの耐凍害性

土木学会では、環境条件に応じて、海洋コンクリートの最大水セメント比の標準を 45~50%（無筋の場合は 10% 増）、空気量の標準値を 4~6% の AE コンクリートとし、さらに単位セメント量を 280~330 kg/m³ 以上とすることが望ましい、と規定している。凍害を防ぐには、コンクリート中に水が入るのを遮断することであり、また一方、浸透した水あるいは初めから存在していた水分の凍結融解作用によって引き起こされる水圧をエントレンドエアの分布で吸収することが効果的である。具体的には、前者は密実なコンクリートを造り水分の浸透を抑えることであり、後者は、4~6% の空気量を分布させて気泡間隔係数を 200 μ 以下にすることである。

密実なコンクリートの 1 つの評価法として、表層強度がある。これは、水セメント比あるいは空気量をコントロールしても、表層部ではブリージングなどの影響を受けて水セメント比が大きくなったり、表層部の組織、性質が表面からの深さによって変化したり¹⁷⁾、施工時の締固め、養生あるいは乾燥などの環境条件によってコンクリートの密実性が失われているおそれが高い。このため、表層強度¹⁸⁾によって密実性を評価しようとするものである。また、先に述べたように、厚さ 10 cm 以内の表層部が凍結融解、塩分浸透、炭酸化などの影響を受けやすく、この部分のコンクリートの強度特性を把握することが重要である。

一方、空気量の確保については、見かたを変えてみると、どの程度の水分がコンクリート中に入ると凍害を起こすか、あるいはどの程度以内であれば凍害を起こさないか、コンクリート中に許容される含水量が決まっている。これを限界飽水度¹⁹⁾という。これは、設計からみると終局強度に対応するものであり、これを基準として耐凍害性を評価することができる。これら表層強度と限界飽水度について述べる。

5.1 表層強度

コンクリートの表層部の強度は、施工条件、環境条件

の影響を直接に受け、表層部の密実性、耐久性と深い関係をもっている。表層部のコンクリートは、フレッシュ時においてブリージング、粗骨材、型わく、仕上げの影響を受ける。外的には日射、乾燥などの作用を受ける。この表層強度を調べるには、引抜き法、圧力法、あるいは押し抜き法などがある。圧力法によって表層強度 (P) を求めると、割裂強度 (σ_t)、表面からの深さ (h)、加力断面の直径 (D) によって次のように表される¹⁸⁾。

$$\frac{P}{\sigma_t} = 3.76 \left(\frac{h}{D} \right) \quad (1)$$

モルタルの場合は定数が 4.14 となり、コンクリートに比べて約 1.1 倍となる。圧力法と引抜き法とでは、ほぼ同じ実験値となる。圧力法および引抜き法の実験状況¹⁸⁾を 図-10 に示す。圧力法は、ゴム製加圧部をコンクリート中に埋めてゴム部を膨らませ、表層部を破壊させて強度を測定する。引抜き法は、ボルト状のものを埋めて引き抜くものである。

養生の条件によって、コンクリートの表層強度は大きな影響を受ける。特に混合セメントの場合は強度発現が遅いため、十分な養生が必要である。養生日数による表層強度を 28 日間水中養生した場合と比較すると 図-11 のようになる。普通セメント (N) の場合では 5 日間養生すれば十分であるのに対して、高炉セメント B 種

(BB) では、28 日間養生に比べて、5 日間養生では 7 割程度の表層強度となる。また、フライアッシュセメント B 種 (FB) では 8 割程度となる。

表層強度とスケーリング損傷とを比較すると 図-12 のようになる。 D_m は平均のスケーリングの深さを表す。表層強度が 50 kgf/cm^2 ($h=7 \text{ mm}$) 以下であれば、海水と凍結融解を受ける飛沫帯などの厳しい環境条件ではスケーリングの損傷を受ける。表層強度が 70 kgf/cm^2 以上であれば、これらの厳しい条件でも、損傷を受けることはほとんどない。これらのコンクリートは、4~6% の空気量が確保されていることを前提としている。表層強度とスケーリング損傷の間には、よい相関がみられる。

5.2 限界飽水度

海洋コンクリートは、波による水圧や塩分の浸透圧の影響を受けて、海水の浸透が促進される。このような状態における耐凍害性の性能を調べるには、凍害が発生する限界の含水量 (限界飽水度) を基準にして、凍害に対する安全率を求め、これによって性能を評価するのが有効である。一般に飽水度 (S) は次式のように定義¹⁹⁾される。

$$S = V_w / V_p \quad (2)$$

ここに、 V_w : 供試体を 105°C で乾燥した場合の全蒸発量、 V_p : 全空隙量

図-10 表層強度の測定法

図-11 養生日数による表層強度

図-12 表層強度とスケーリング損傷

図-13 圧縮強度 (無サイクル, 10 サイクル)²⁰⁾

限界飽水度 (S_{cr}) を求めた例²⁰⁾を示すと図—13のようになる²⁰⁾。これは、抜気装置などを用いて飽水度を変化させた供試体を用いて凍結融解をかけ、コンクリートの劣化挙動を観察（圧縮強度、曲げ強度、動弾性など）し、急変する点を見つけて限界飽水度としている。一方実際の環境条件下における飽水度 (S_{act}) を測定し、耐久性に対する安全率 (F) を次式で表す。

$$F = S_{act} / S_{cr} \quad (3)$$

$F \geq 1$ であれば損傷を受け、 $F < 1$ であれば損傷を受けない。

6. コンクリート構造物の耐塩害性

コンクリート中の塩分は、材料によって初めから入るものと、後から外的環境によって入るものとに分けられる。前者は人為的なものであり、抑えることが可能であるが、骨材資源の減少から海砂などの使用が必要であり、フレッシュコンクリートの状態で塩化物総量が規定されている。後者は主に海岸環境によるもので、これを防ぐには、配合、施工によって密実なコンクリートを造り、塩分の浸透を少なくすることが必要であり、水セメント比、締固めなどが重要となる。一方、設計上からは、かぶり、ひびわれ幅、鉄筋応力などの制御がなされている。

6.1 フレッシュコンクリートの塩化物総量

鉄筋に腐食を起こさないために、フレッシュコンクリートの塩化物の総量が規制されている。土木学会では、RC および ポステンション方式の PC に対して 0.60 kg/m^3 (Cl 重量/コンクリート 1 m^3) 以下、塩害や電食のおそれのある場合およびプレテンション方式 PC の場合 0.30 kg/m^3 以下とされている。各国の規制値では、イギリスの BS 8110 では、PC でセメント重量に対し Cl 重量で 0.1% (0.45 kg/m^3 , コンクリート 1 m^3 に対する Cl 規制量) 以下、RC で 0.4% 以下、アメリカの ACI 222R では、PC で 0.08% (0.36 kg/m^3) 以下、RC で 0.20% (0.6 kg/m^3) 以下、西ドイツの DIN 4226 では、プレテンション PC で 0.02% (0.59 kg

図—14 コンクリート中の塩分濃度と腐食率

$/\text{m}^3$) 以下、RC および ポステンション PC で 0.04% (0.64 kg/m^3) 以下となっている。各国で多少違った値をとっている。発錆の実験結果²¹⁾の一例を示すと図—14のようになる。セメント量の 0.2% (Cl⁻ 量) が発錆点となっている。FHWA (Federal High Way Administration—アメリカ交通省道路局) の実験結果²²⁾においても 0.2% (セメント量範囲 $335 \sim 489 \text{ kg/m}^3$) 程度であり、発錆の塩分量はセメント量によって変化する。セメント量が 300 kg/m^3 であれば 0.6 kg/m^3 となる。

6.2 環境に対する耐塩害性

(1) 配合・施工

海岸環境下に置かれたコンクリートは、塩分浸透と中性化が同時に進行する。図—15に示すように、中性化が進むに従って、低い塩分濃度で腐食が起こる²³⁾。一般には (Cl/OH) の比²⁴⁾によって腐食が決まると言われている。このため、中性化と塩分浸透を同時に抑えることが必要であり、通気性が低く、水密性の高い密実なコンクリートを造ることが必要である。図—16は、830日間塩水の散布を行ったコンクリートの塩素浸透量を示している²²⁾。水セメント比によって、かなり浸透性が抑えられる。図—17は、セメント量 ($355 \sim 447 \text{ kg/m}^3$) による浸透性の影響²²⁾について示している。この範囲のセメント量では、浸透性にあまり差がない。

一方、コンクリートの密実性を改善する混和材としてシリカフューム²⁵⁾が注目されている。これを有効に用い

図—15 pH と塩分 (NaCl) 濃度による腐食率

図—16 水セメント比と塩分浸透²²⁾

図一17 単位セメント量と塩分浸透²²⁾

図一18 ひびわれ幅と腐食²⁸⁾

るのには、シリカフェウムに対する配合、施工の知識が必要である。また一般的に、被害の半分は施工中に生ずる欠陥によるものとされ、施工中の欠陥の半分は配合、打込み、養生の悪さからきている。また、RC、PC構造物の被害の多くは、かぶりコンクリートの密実さの不十分から起きていて、締固めなどの施工には教育された熟練工を採用し、管理体制を整えることが必要であると報告されている²⁶⁾。特にかぶりコンクリートまわりの締固めが重要である。

(2) 設計 (かぶり、ひびわれ幅、非被覆度)

コンクリート構造物の耐凍害性を確保するために、設計上はコンクリートのかぶりとひびわれ幅制御に着眼している。しかし、この2つの値は相反する関係にあり、耐久性を高めるためにかぶりを大きくすると、ひびわれ幅が大きくなる。ひびわれ幅を小さく抑えるには、むしろ、かぶりを小さくした方がよい。このように、かぶりとひびわれ幅制御の関係は矛盾を含んでいる。土木学会では、かぶりとひびわれ幅とを操作する折衷的な手法が採用されている。ひびわれ幅と腐食との代表的な実験例を図一18に示す。

このように、腐食とひびわれ幅の関係ははっきりしない。ここでは、非被覆度²⁷⁾による腐食劣化の制御法を紹介する。腐食という視点からみて、コンクリート構造物の使用限界は、先に述べたように構造物の耐力低下によるものではなく、かぶりコンクリートの破壊にあり、これは補修を考える時点でもある。この使用限界は、主鉄筋に沿うひびわれ発生を問題とするため、曲げひびわれ幅自身よりも、鉄筋まわりの微小なひびわれによる通気

性、透水性などの雰囲気を表す指標が有効である。この指標として、コンクリート中の鉄筋とコンクリート自身の平均引張ひずみ差 ($\epsilon_s - \epsilon_c$)、すなわち単位長さ当りの非被覆長さ (非被覆度と呼ぶ) を用い、腐食劣化を評価する。非被覆度 (w/l) はひびわれ幅 (w) とひびわれ間隔 (l) で表され、腐食厚さ (δ) との関係が直線で表されている。海岸環境 (10年暴露) では

$$\delta = 14.3 w/l \quad (\delta: \text{mm}) \quad (4)$$

となり、普通の腐食環境では

$$\delta = 9.1 w/l \quad (5)$$

となっている。

限界鉄筋腐食厚さ δ_{cr} (かぶりコンクリートに縦ひびわれが生ずる時の鉄筋の腐食厚さ) は次式²⁹⁾のように表される。

$$\delta_{cr} = 0.00195 C \quad (6)$$

これらの式を用い、 $\epsilon_c = 50 \times 10^{-6}$ 、 $E_s = 2100 \text{ t/cm}^2$ とすると、耐久性から要求される鉄筋応力は、海岸環境および普通の腐食環境の場合、次のようになる。

$$\sigma_{sc} = 286 C + 105 \quad (C: \text{cm}, \sigma_{sc}: \text{kgf/cm}^2) \quad (7)$$

$$\sigma_{sc} = 450 C + 105 \quad (8)$$

δ_{cr} の実験値には幅があり、さらに研究を要するが、耐久性から決まる鉄筋応力がかぶり厚さによって決められることは興味深いところである。

6.3 その他

コンクリートの防食性能に頼らず、エポキシ樹脂塗装鉄筋などの防食鉄筋を用いたり、塩分の浸入を防ぐために表面処理を施したり、鉄筋自身を新素材としての強化プラスチック筋を用いたり、種々の方法が試みられているが、コンクリートかぶり厚さ、鉄筋応力などを所定にとることができ、密実なコンクリートを造ればコンクリートは十分防食性能をもつ。構造上、所定のかぶり厚がとれないようなものに対しては、上述のような種々の工法が考えられる。

7. あとがき

寒冷地における海岸環境下のコンクリートの劣化は凍結融解と塩分の浸透が主因で、それらの影響深さは10cm程度の表層部コンクリートに起こる。このため、この部位での密実性が重要であると同時に、一様な細孔構造が必要である。このため、配合においては水セメント比、空気量、施工においては締固め、養生などに気を配り、さらに設計では、防食のため、かぶり、ひびわれ幅、非被覆度などによって制御する必要がある。

1ページ目に示した写真一1は、明治35年に工事が開始され同41年に竣工した小樽築港の、北防波堤および南防波堤 (M41~T12) などである。長いものではおよそ80年の年月を経ているが、現在もお十分に供用

に耐えている。

参 考 文 献

- 1) 北海道土木技術会, コンクリート研究委員会: 北海道における海岸コンクリート構造物の凍害による表面剥離について, 資料 91 号, 1984.4
- 2) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針 (案)
- 3) P.K. Mehta: Durability of Concrete in Marine Environment—A Review, ACI, SP-65, pp. 1~20
- 4) 佐伯 昇・高田宣之・藤田嘉夫: 海岸に暴露されたコンクリートの凍害, セメント・コンクリート, No. 464, pp. 6~13, 1985.10
- 5) 佐伯 昇・藤田嘉夫: 混合セメントを用いた沿岸コンクリートの耐凍害性, セメント・コンクリート, No. 432, pp. 2~9, 1983.2
- 6) 太田利隆: 潮風をうける RC 桁のひびわれと鉄筋腐食について, 土木学会第 34 回年次学術講演概要集, 第 5 部, 1979, pp. 23~24
- 7) 尾崎 訓・松谷正憲: 60 年間海水の作用を受けたコンクリートの性状について, 北海道支部論文報告集, No. 42, pp. 487~492, 1986
- 8) 鮎田耕一: 海岸コンクリート構造物の凍害に関する研究, 学位論文, 1983
- 9) 須藤儀一・秋葉徳二・新井和政: セメント硬化体の凍結融解抵抗性におよぼす微細組織の影響, セメント技術年報, Vol. 28 pp. 62~68, 1974
- 10) 須藤儀一・秋葉徳二・新井和政: セメント硬化体の凍結融解に関する DTA 方法による研究, セメント技術年報, Vol. 29, pp. 78~82, 1975
- 11) 藤井 卓: 塩化物の作用を受けるセメントペーストの凍結融解劣化, セメント技術年報, Vol. 36, pp. 345~349, 1982
- 12) W.A. Cordon: Freezing and Thawing of Concrete—Mechanics and Control, ACI Monograph, 3
- 13) 佐伯 昇・鮎田耕一・前川静男: 北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷, 土木学会論文報告集, No. 327, pp. 151~162, 1982
- 14) 高田宣之・佐伯 昇・藤田嘉夫: 海岸に暴露されたコンクリートの耐凍害性; 第 2 回寒地技術シンポジウム, pp. 507~512, 1986
- 15) 小林明夫・高田三郎: コンクリート橋の塩害調査結果, セメント・コンクリート, No. 471, pp. 7~17, 1986.5
- 16) 佐伯 昇・山岡 勲・佐々木晴美・花田真吉: 北方圏諸国にみるコンクリート構造物の塩・凍害とその対応, 土木学会誌, Vol. 70, No. 9, pp. 40~47, 1985.9
- 17) 地濃茂雄・仕入豊和: コンクリート表層部その養生条件と細孔構造, セメント・コンクリート, No. 468, pp. 8~17, 1986.2
- 18) N. Saeki, Y. Fujita, N. Takada: Surface Layer Strength of Concrete as a Measure of Scaling Resistance, ACI, SP-91, pp. 563~590
- 19) G. Fagerlund: The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete, Materials and Structures, Vol. 10, No. 58, pp. 217~253, 1977
- 20) 桑島隆一・藤田嘉夫・高田宣之: 海水と凍結融解作用を受けるコンクリートの強度と変形, 土木学会北海道支部論文集, No. 40, pp. 534~539, 1984
- 21) 大橋 猛・佐伯 昇・根本任宏: 鋼板接着したコンクリート桁の補強効果と耐久性について, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 255~260, 1986
- 22) K.C. Clear: Time-To-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, Vol. 3, Performance after 830 Daily Salt Applications, FHWA-RD-76-70, April 1976
- 23) N. Saeki, N. Takada, Y. Fujita: Influence of Carbonation and Sea Water on Corrosion of Steel in Concrete, Transactions of JCI, Vol. 6, pp. 155~162, 1984
- 24) D.A. Hausmann: Steel Corrosion in Concrete, Material Protection, Vol. 6, No. 11, pp. 19~23, Nov. 1967
- 25) セメント協会 海洋開発専門委員会: シリカフェームを用いたコンクリートに関する調査報告, M-2, 1986
- 26) CEB Task Group Durability (耐久性研究会抄訳): コンクリート構造物の耐久性—技術の現状—, コンクリート工学, Vol. 22, No. 1, pp. 39~53, 1984.1
- 27) 佐伯 昇・藤田嘉夫・太田利隆: ひびわれと鉄筋コンクリートの腐食についての一考察, セメント技術年報, Vol. 40, pp. 111~114, 1986
- 28) P. Schiessl: Zur Frage der Zulässigen Rißbreite und der Erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, DAS, Heft 255, pp. 1~175, 1976
- 29) 森永 繁・野萱勝久・近藤照夫: 鉄筋のさびの許容量に関する検討, 鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム発表報文集, JCI, pp. 17~24, 1975