

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剝離損傷

SCALING DAMAGE OF COASTAL CONCRETE STRUCTURE IN HOKKAIDO

佐 伯 昇*・鮎 田 耕 一**・前 川 静 男***
By Noboru SAEKI, Koichi AYUTA and Shizuo MAEKAWA

1. ま え が き

北海道の海岸あるいは港湾コンクリートにおいて、従来から混合セメントが多く使用され、省資源の一翼を担い、有効に利用されている。現在これらは AE 剤を用いたコンクリートが主体であり、製造は設備の整ったレデーミクスト工場で行われて、均等質のものが容易に得られることなど、耐久性のすぐれたコンクリートを作るうえで好ましい状況になっている。事実、AE 剤を含まないプレーンコンクリートを用いていた時代に比較すると、コンクリートの品質、耐久性の向上は著しく、コンクリートの凍害の事例は減少しているといつてよい。しかしながら、冬期間における海水と凍結融解の作用を受ける厳しい環境条件に置かれている消波ブロック、防波堤、海岸擁壁などの海岸および港湾コンクリート構造物において、しばしば、これまでの被害と異なった凍害の損傷がみられる。損傷の特徴は粗骨材表面のモルタル部が1ないし数センチの径で剝離する形式のものが最も多いこと、それがさらに広範囲に広がって、全面的に剝離する場合もあること、いずれの場合も剝離深さは数ミリ程度であり、この剝離はコンクリートが一冬経過した時点ですでに発生し、融雪直後に発見されることが多いこと、北海道以外ではこのような剝離による損傷は報告されていないことなどである。現象としてはポップアウトに類似しているが、広義にみてスケリングの一種¹⁾と考えられる。ここ数年、この種の剝離に関する研究^{2)~9)}が進められているが、その発生原因など不明な点も多い。

海水の作用を受ける無筋コンクリートの耐凍害性を確保するための基準をみると、わが国の海洋コンクリート

の基準（土木学会コンクリート標準示方書）の場合、ポルトランドセメントを用いて耐久性から定まる水セメント比の最大値は最も厳しい環境条件（凍結融解がしばしば繰り返される地域で、潮の干満作用を受ける部分あるいは海水で洗われる部分）の場合、断面が薄い場合で55%、普通および厚い場合で60%程度であり、AEコンクリートを用いることになっている。米国（ACI, 613-54）¹⁰⁾では海水と凍結融解の作用を受ける海岸コンクリートの場合、最大の水セメント比は断面が薄い場合で40%、普通および厚い場合で44%でAEコンクリートを用いることになっている。現行の規定（ACI, 201.2R-77）¹¹⁾では断面が薄い場合で45%、その他の場合では50%のAEコンクリートにすることに改められている。英国（CP 110-1972）¹²⁾では無筋コンクリートで最少セメント量270 kg/m³（最大骨材寸法40 mmの場合）、西ドイツ¹³⁾では最大の水セメント比は non AEコンクリートで60%、AEコンクリートでは70%、ただし骨材および透水性に関する規定がさらに加わっている。このように各国でかなりの違いがみられる。それぞれの国でセメント、骨材などの使用材料、施工および環境条件が異なり、それぞれに適合した耐凍害性についての基準が定められていると考えられる。すなわち各地域の特性に合った基準が定められる必要があり、凍害の調査の意義もここにある。

海水の作用を受けるコンクリートの凍害の資料^{14)~21)}および北海道における凍害の実情についての報告^{22)~25)}が過去になされているが、剝離を主体とした調査はない。そこで、今回の調査は海岸および港湾コンクリートのうち、施工後一冬経過したもののみ限定し、北海道沿岸全域にわたって凍害による表面剝離について調べ、凍害の地域特性についての一資料を提供するものである。本報告は昭和53年11月に北海道土木技術会コンクリート研究委員会（委員長：藤田嘉夫）の中に設けられ

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部

** 正会員 工修 北見工業大学助教授 工学部

*** 正会員 苫小牧工業高等専門学校教授

た海岸コンクリート構造物の凍害調査小委員会^{注1)}が行った調査の結果²⁶⁾を取りまとめたもので、材料、配合、施工方法などの実態、剝離状況、発生要因の整理および多変量解析による要因と剝離損傷との相関性について明らかにしたものである。

2. 調査の範囲と項目

調査の対象は施工後一冬経過し、環境条件として感潮部および飛沫部にある海岸および港湾のコンクリート構造物とした。調査箇所を選定にあたっては、北海道開発局、北海道土木部および国鉄に、昭和53年度に施工した海岸、港湾のコンクリート工事箇所と、その概要についての資料の提出を依頼した。その中から現地調査が可能で、かつ施工時の状況が現場の工事担当者から聴取できるような箇所を選んだ。調査箇所数は合計で194、構造物の内訳は、消波ブロック65、防波堤・岸壁80（そのうち、胸壁付きのもの25か所）、擁壁・覆道49である。調査項目の第1は調査対象の海岸および港湾コンクリートにおける使用骨材の物理的性質、配合、材令28日の圧縮強度、打込み方法、養生方法などの材料、施工に関する実態調査、第2は昭和54年7月から8月にかけて実施した北海道沿岸全域にわたる剝離状況の現地調査、第3は凍結融解の回数を推定するための気象資料調査である。

3. 表面剝離状況の調査方法と表示方法

(1) 調査方法

剝離状況をより能率的に、精度よく調査するために2つの段階によって観察、測定を行った。一つは目視の判定による剝離の概況調査、もう一つは、その判定に基づいて選定した箇所の剝離の深さおよびその面積の測定である。これによって剝離調査に客観性をもたせた。

a) 剝離の概況調査

この概況調査では、対象とする構造物のすべてについて目視により剝離を観察し、剝離程度を判定する。防波堤、岸壁、擁壁などの場合には、各打上がりブロック幅（通常は長さ5~10m程度）を1単位（以下、単位ブロックという）として、構造物の上面（型枠に接しない面）

注1) 委員長：藤田嘉夫（北海道大学）、幹事：佐伯昇（北海道大学）、委員：岩淵俊次（日鐵セメント）、長島弘（札幌アサノコンクリート）、戸島英之（北海道開発局）、黒川義雄（北海道開発局）、水野雄三（北海道開発局）、太田利隆（北海道開発局）、佐藤英行（北海道）、神山勝博（北海道）、橋本恒郎（日本国有鉄道）、鮎田耕一（北見工業大学）、前川静男（苫小牧工業高等専門学校）

表-1 剝離程度の段階

剝離面積程度	0	1	2	3	4
剝離面積率(%)	0	25未満	25~50 未満	50~75 未満	75~100
剝離深さ程度	0	1	2	3	4
剝離深さ(mm)	0	5未満	5~10 未満	10~15 未満	15以上

と側面（型枠に接する面）とに分けて剝離を調査し、次の方法で各単位ブロックごとの剝離程度を評価し、判定した。すなわち、剝離面積と剝離深さをその程度によって表-1のようにそれぞれ5段階に分け、両者の段階数を乗じて得た数値で剝離程度を表わし、各単位ブロックごとにこれを記録した。

$$\text{剝離程度} = \text{剝離面積程度} \times \text{剝離深さ程度} \cdots (1)$$

剝離面積程度を算出するための剝離面積率は、対象とする面積や位置によって剝離程度が異なるので、当該の1単位ブロックの中で、剝離が最大と思われる50×50cm程度の面積を対象として剝離程度を求めることとした。消波ブロックの場合には、防波堤・擁壁などの場合と同様に剝離程度に応じて分類し、全体の個数中にそれが何パーセントあるかを目視により観察した。

b) 剝離面積と剝離深さの測定

前項の概況調査による単位ブロックごとの剝離程度に応じて、その構造物の中での剝離の最大、中程度、軽程度および剝離なしの単位ブロックを選定し、おのおの剝離深さと面積を実測した。消波ブロックの場合もa)で分類したうちから、上述した単位ブロックを選定し、実測した。測定箇所は、a)の概況調査で対象とした部分と同じで、面積50×50cmの枠内とした。剝離による損傷の深さはダイヤルゲージ式のデプスゲージにより測定し、50×50cmの測定面積中の約10点の平均値を剝離深さと定義した。また、剝離面と健全な面との境は油性インクで形どり、写真撮影をしてその写真から剝離している部分を実測し、これを剝離面積と定義した。

(2) 剝離状況の表示方法

(1)、b)に述べたように当該構造物中で剝離損傷の最大、中程度、および軽程度の単位ブロックを選定し、おのおの実測した剝離深さを H_1 、 H_2 および H_3 mm、おのおの実測した剝離面積を A_1 、 A_2 および A_3 cm²とする。

剝離状況は以下の3つの指標を用いて示した。

a) 最大剝離深さ ($H_{\max} = H_1$)

一つの調査箇所において最大の剝離程度と判定された部分の剝離深さで、0.1mm未満、0.1~1.5mm未満、1.5~3.0mm未満、3.0~4.5mm未満、4.5~6.0mm未満、6.0~7.5mm未満および7.5mm以上の7段階

に分けて整理した。

b) 剝離度 ($D_{1,2,3}$)

$$D_i = \frac{H_i \times A_i}{50 \times 50} \text{ (mm)}, i=1, 2, 3 \dots \dots \dots (2)$$

5. で述べる表面剝離状況の検討では主として、最大の剝離度である D_1 (D_{max}) を用いた。 D_{max} は 0.1 mm 未満, 0.1~0.4 mm 未満, 0.4~0.8 mm 未満, 0.8~1.1 mm 未満, 1.1~1.6 mm 未満, 1.6~2.2 mm 未満, 2.2~3.1 mm 未満の7段階に分けて整理した。また、剝離度の数値と実際の表面剝離損傷の程度を比較するために、 $D_i=2.64, 1.16, 0.68, 0.20$ mm の場合の写真(写真-1, 2, 3, 4)を載せた。

c) 平均剝離度 (D_m)

$$D_m = \sum_{i=1}^3 D_i P_i \dots \dots \dots (3)$$

ここで P_1, P_2, P_3 は一つの調査箇所においておのこの D_1, D_2, D_3 と同程度の剝離と判定された単位ブロックの分布割合(1, a)による概況調査から求めた各単位ブロックの剝離程度を D_1, D_2, D_3 に分類し、その各個数を合計し、それをその構造物の総単位ブロック数で除したものを、ただし消波ブロックの分布割合は目測によった。

D_m は D_{max} と同じく7段階に分けて整理した。

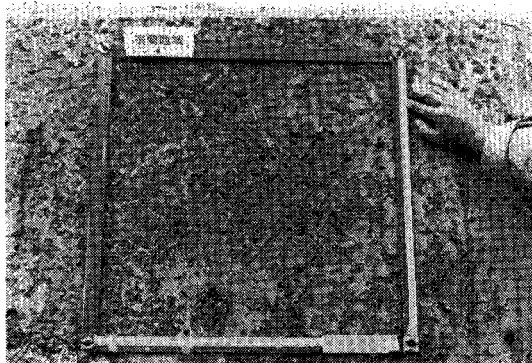


写真-1 防波堤 (胸壁側面 $D_i=2.64$ mm)

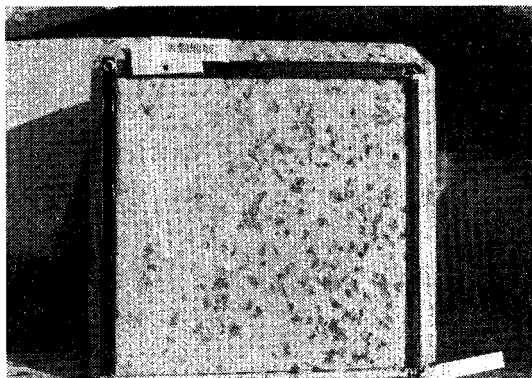


写真-2 消波ブロック ($D_i=1.16$ mm)

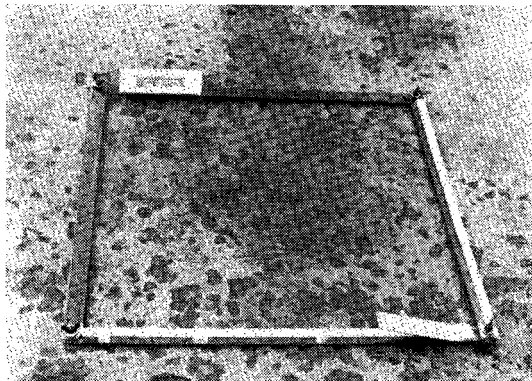


写真-3 防波堤 (上面, $D_i=0.68$ mm)

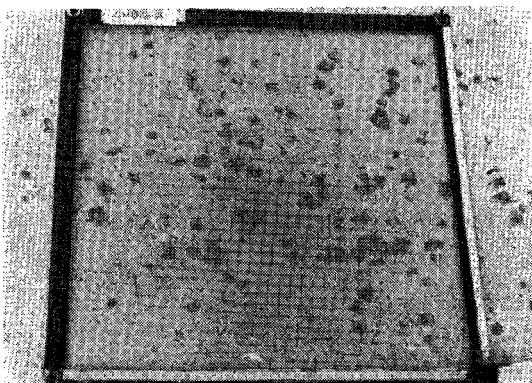


写真-4 防波堤 (上面, $D_i=0.20$ mm)

H_{max}, D_{max} によって局所的な剝離状況, D_m によって構造物全体の平均的な剝離状況を把握することができる。

4. 海岸および港湾コンクリート構造物の材料・施工に関する実態

海岸および港湾コンクリートを構造別に消波ブロック, 防波堤・岸壁, および擁壁・覆道に分類して, 使用セメント・混和剤, 水セメント比, 型枠, 打込み方法, 脱型日数(打込みから型枠を取りはずすまでの日数)および養生方法について, 資料および現地での聴取調査を行った。

(1) 使用セメント

表-2の(a)に示すように, 使用セメントの種類と割合は消波ブロックでは普通ポルトランドセメント(N)が5%, 混合セメントが93%であり, その他は早強セメントであった。防波堤・岸壁では普通セメントが10%, 他は混合セメントであった。擁壁・覆道では7%が普通セメントで他は混合セメントであった。混合セメン

トの内訳はフライアッシュセメント B種 (FB) と高炉セメント B種 (BB) であり、後者に比べて前者の使用率が高い。平均値は構造別の分布割合を単純に平均したものである (以下同じ)。

(2) 使用混和剤

表-2 の (b) に示すように、構造物の種類に関係なく、ほぼ 70~85% が AE 剤を使用し、その他は AE 減水剤を使用していた。また目標空気量は 4.5% で全構造物で同じであった。

(3) 水セメント比

水セメント比 45~62.5% の範囲を 2.5% 間隔で等分して、そのおのおの分布割合を調べると表-2 の (c) に示すようになる。消波ブロックでは 45~57.5% 未満の範囲に分布し、47.5~50% 未満が 36% で最も多く、次いで 52.5~55% 未満の 27% である。防波堤・岸壁では 45~62.5% 未満の範囲に分布し、52.5~55% 未満が 45% で最も多く、次いで 50~52.5% 未満が 15% である。擁壁・覆道では 45~62.5% 未満の範囲に分布し、52.5~55% 未満が 35% で最も多く、次いで 50~52.5% 未満が 27% である。

(4) 型 枠

表-3 の (a) に示すように、消波ブロックの場合は鋼製が大部分であり、防波堤・岸壁の場合は鋼製、木製が約半々、擁壁・覆道は木製が 85% を占めていた。

(5) 打込み方法

表-3 の (b) に示すように、直接 (トラックアジテーターから直接打ち込むもの) は、構造物の種類によらず最も多い。消波ブロックの場合は直接が 83%、次いでバケットが 15% である。防波堤・岸壁では直接が 55%、次いでバケットが 37%、擁壁・覆道では直接が 42

表-2 セメント、混和剤および水セメント比の概況

	種 類	消波 ブロック	防波堤・ 岸 壁	擁 壁・ 覆 道	平均値
(a) セメント	N	4.9	9.9	6.8	7.2
	FB	59.0	50.7	47.7	52.5
	BB	34.4	39.4	45.5	39.8
	その他	1.6	0.0	0.0	0.5
(b) 混和剤	AE 剤	77.0	85.1	71.4	77.8
	AE 減水剤	23.0	14.9	28.6	22.2
(c) 水セメント 比	以上 未満				
	45~47.5%	17.2	2.7	2.1	7.3
	47.5~50	35.9	9.6	6.3	17.3
	50~52.5	17.2	15.1	27.1	19.8
	52.5~55	26.6	45.2	35.4	35.7
	55~57.5	3.1	11.0	12.5	8.9
	57.5~60	0.0	12.3	14.6	9.0
60~62.5	0.0	4.1	2.1	2.0	

表-3 型枠、打込み方法および脱型日数の概況

	種 類	消波 ブロック	防波堤・ 岸 壁	擁 壁・ 覆 道	平均値
(a) 型 枠	鋼 製	98.3%	45.5%	14.6%	52.8%
	木 製	1.7	54.5	85.4	47.2
(b) 打込み方法	直 接	83.3	55.2	41.9	60.1
	バケツ	15.0	37.3	34.9	29.1
	ポンプ	0.0	6.0	20.9	9.0
	その他	1.7	1.5	2.3	1.8
(c) 脱型日数	3日以内	69.1	55.9	46.3	57.1
	4~5日	25.5	30.9	29.3	28.6
	6~7日	3.6	4.4	12.2	6.7
	8日以上	1.8	0.0	4.9	2.2
	その他	0.0	8.8	7.3	5.4

%、次いでバケットが 35%、コンクリートポンプが 21% で他の構造物に比較してコンクリートポンプ施工が多くなっている。その他はベルトコンベヤー等によるものである。

(6) 脱型日数

表-3 の (c) に示すように、消波ブロックでは打込み後 3日以内が 69%、防波堤・岸壁では 56%、擁壁・覆道では 46% で、約半数が 3日以内である。5日以内とすると 86% が含まれる。

(7) 養生方法

表-4 の (a) に示すように、養生法は麻袋・散水 (麻袋をかけて散水する方法) による養生が 76% 程度で大多数を占め、次いで散水のみによる養生が続く。その他は砂による養生、膜養生などである。表-4 の (b) に示すように、養生日数は 6~7日が多く、全構造物の平均値で 39%、次いで 8日以上の 21% である。6日以上が 60% を占めているが、3日以内が 19% あり、まだ一部において養生がおろそかにされている傾向がみられる。表-4 の (c) に示すように、養生水は消波ブロックの場合、淡水が 75% であるが、防波堤・岸壁では海水が 95% で大部分を占めている。擁壁・覆道は海水、淡水が約半々である。

表-4 養生法、養生日数および養生水の概況

	種 類	消波 ブロック	防波堤・ 岸 壁	擁 壁・ 覆 道	平均値
(a) 養生法	麻袋・散水	66.6%	76.0%	85.4%	76.0%
	散 水	28.1	8.5	7.3	14.6
	寒中・その他	5.3	15.5	7.3	9.4
(b) 養生日数	3日以内	18.2	27.5	11.9	19.2
	4~5日	18.2	8.7	16.7	14.5
	6~7日	38.2	39.2	40.5	39.3
	8日以上	21.8	15.9	23.8	20.5
	寒中・その他	3.6	8.7	7.1	6.5
(c) 養生水	海 水	25.5	95.2	52.8	57.8
	淡 水	74.5	4.8	47.2	42.2

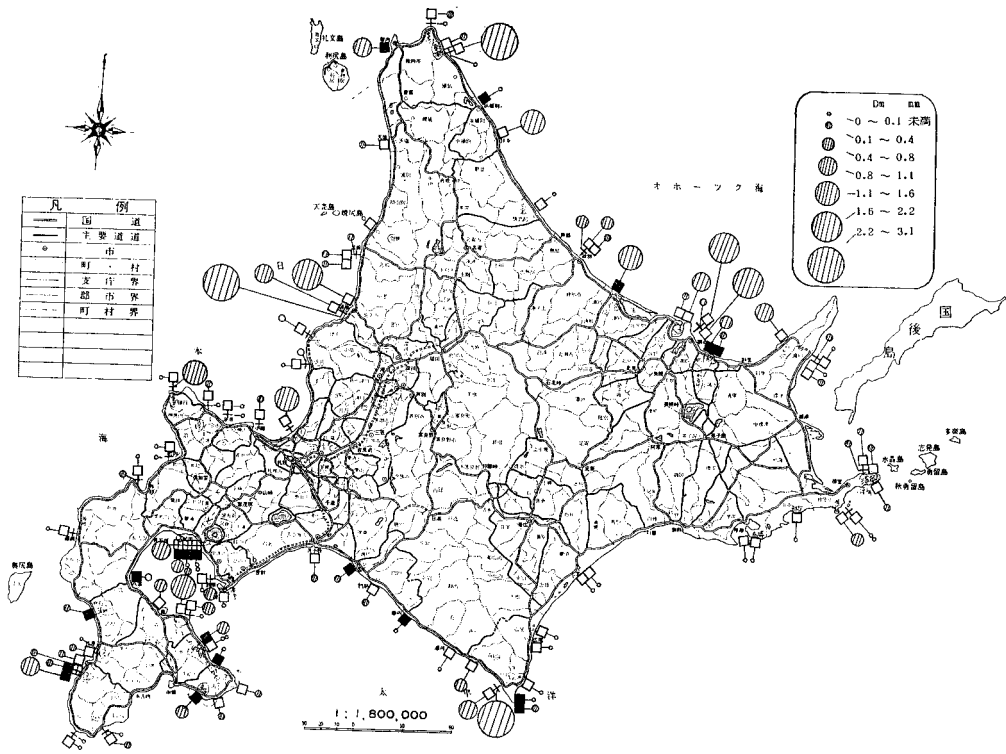


図-2 防波堤・岸壁の平均剥離度 (D_m)

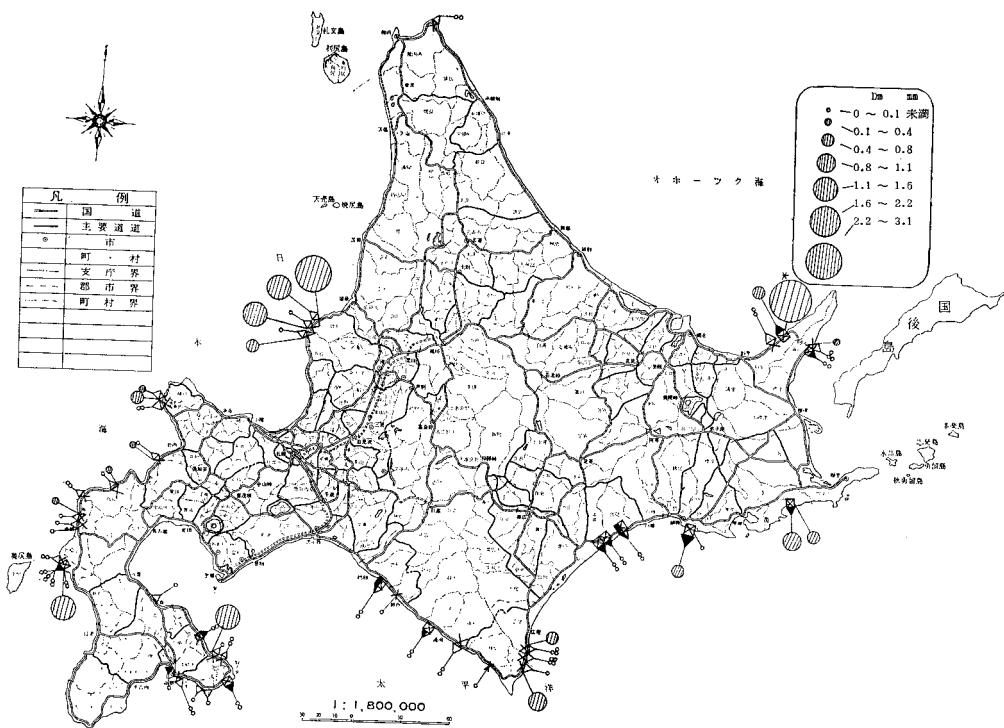


図-3 擁壁・覆道の平均剥離度 (D_m)

が比較的大きい傾向を示した。平均剝離度の大きい 1.6~3.1 mm 未満が約 6%, 0.8~1.6 mm 未満が 11%, 剝離度の小さい 0.1~0.8 mm 未満が 41%, 0.1 mm 未満の剝離度のごく小さいものおよび剝離なしが 42% であった。

(3) 擁壁および覆道の表面剝離状況

最大剝離深さ (H_{max}) は, 7.5 mm 以上が 2 か所 (8.8 mm と 13.2 mm), 3.0~6.0 mm 未満が約 14%, 0.1~3.0 mm 未満が約 27%, 0.1 mm 未満および剝離なしが約 55% であった。最大剝離度 (D_{max}) は, 剝離度の大きい 1.6~3.1 mm 未満が約 12%, 0.8~1.6 mm 未満が約 5%, 剝離度の小さい 0.1~0.8 mm 未満が約 14%, 0.1 mm 未満および剝離なしが約 69% であった。図-3 は平均剝離度 (D_m) を示したもので, 2.2~3.1 mm 未満が 2 か所, 1.6~2.2 mm 未満の発生はなく, 0.8~1.6 mm 未満が約 7%, 0.1~0.8 mm 未満が約 13%, 0.1 mm 未満および剝離なしが約 78% を占めていた。擁壁の上面の剝離は少なく, 側面の剝離発生の割合が顕著であった。

6. 表面剝離発生の要因

海水と凍結融解の作用を受けるコンクリートには氷の膨張による水圧と海水による浸透圧が働き, 凍害のメカニズム²⁷⁾をより複雑にしている。凍害の防止対策上から考えられる表面剝離発生の要因としては, 材料, 配合, 施工あるいは養生方法など計画的に変えることが可能な要因と, 施工時およびその後の気温, 湿度, 海水作用, 凍結融解作用など計画的に変えることが困難な環境要因とに分けられる。これらの多数ある要因を整理して検討する。これらのうち材料, 配合関係では粗骨材の品質, セメント量, セメント水比 (あるいは水セメント比), 強度では標準養生による材令 28 日の圧縮強度, 海水の影響としては汀線からの距離, 凍結融解作用としては気温から推定される凍結融解回数を要因として挙げ, 剝離との相関性を検討した。

(1) 粗骨材の品質

表面剝離の形態は骨材の界面から剝離する場合が多数みられ, モルタルマトリックスと骨材の物理的な不連続性が凍結融解に対する弱点部を形成すると想定され, 粗骨材の性質が重要なファクターと考えられる。凍害に対

する骨材の性質の影響²⁸⁾は, 骨材の空隙, 透水性および飽水の程度などに関係^{29), 30)}し, 吸水率, 骨材寸法³¹⁾, 比重, 軟石量, 安定性試験による損失量などによって評価^{32), 33)}されている。ここでは粗骨材の品質を総合的に評価するために, セメント協会コンクリート専門委員会で行った結果^{34), 35)}を準用した。これによる骨材の品質評価は, 粗粒率, 絶乾比重, 吸水率, 粒形判定実積率, 洗い試験で失われるもの, 粘土塊, 安定性試験損失量, すりへり減量, 軟石量および破砕値から成っている。そのうち, 粗粒率, 絶乾比重 (ここでは表乾比重を代用した) および吸水率は調査の資料を用い, その他は資料がない場合が多いので北海道の代表的粗骨材の平均値³⁶⁾および全国的な平均値を用いた。これらの数値は, 粒形判定実積率 64%, 洗い試験で失われるもの 0.51%, 粘土塊 0.32%, 安定性試験損失重量 4.94%, すりへり減量 17.1%, 軟石量 3.82%, 破砕値 12% である。これらを代入すると, 粗骨材評価係数 (A) は次式のようになる。

$$A = -1.47 (\text{粗粒率}) + 4.42 (\text{絶乾比重})$$

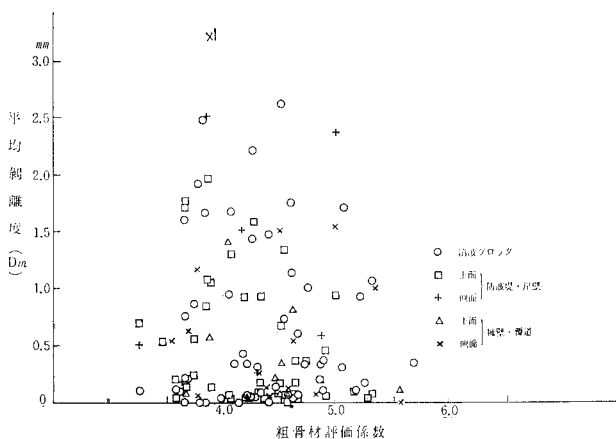


図-4 粗骨材評価係数と平均剝離度 ($D_m > 0$)

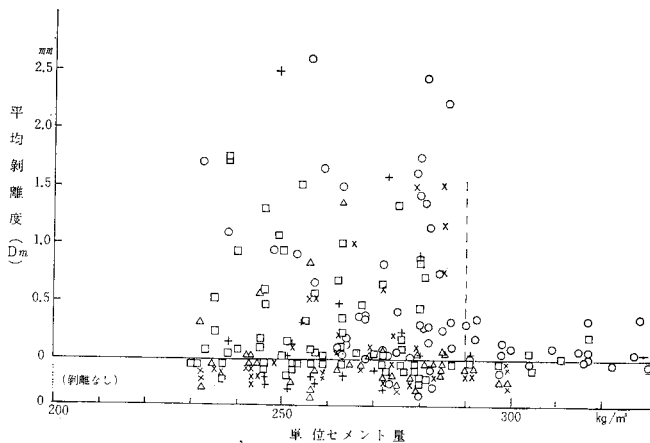


図-5 単位セメント量と平均剝離度

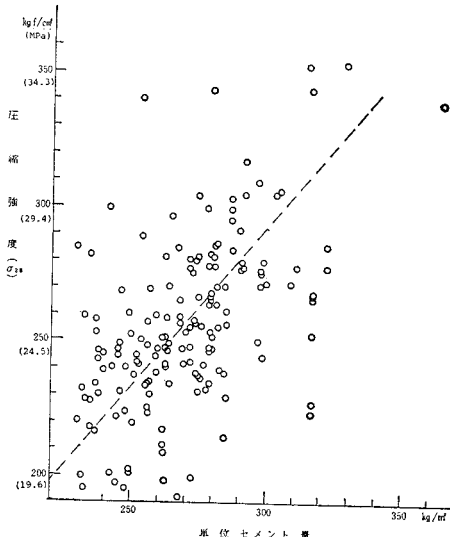


図-6 単位セメント量と圧縮強度

$$-0.54 (\text{吸水率}) + 4.17 \dots\dots\dots (4)$$

図-4 は粗骨材評価係数と平均剝離度 (D_m) との関係を示したものである。評価係数は 3.5~5.5 に分布している。評価係数が 4.0 から大きくなるに従って、ほぼ剝離度が小さくなる傾向を示している。全体的な傾向からみて、評価係数が低いものは剝離度が大きくなる可能性があることが多少認められるが、今後さらに資料の蓄積が必要であると考えられる。

(2) セメント量

モルタルマトリックスの強度を発現するのはセメント量が本体であり、さらにそのセメントの性質^{37),38)}も重要である。ここでは単位セメント量のみ取り上げる。図-5 は単位セメント量と平均剝離度の関係を示したものである。セメント量が 240~280 kg/m³ までは剝離度が大きく発生し、セメント量が 290 kg/m³ 以上では剝離度が小さくなる。図-6 は単位セメント量と標準養生による材令 28 日の圧縮強度の関係

$$\sigma_{28} = 1.2 C - 68 \dots\dots\dots (5)$$

を示したもので、単位セメント量 290 kg/m³ に対応する圧縮強度 (σ_{28}) は 280 kgf/cm² (27.5 MPa) になり、剝離度を小さくするためには、この程度の圧縮強度が必要であることを示している。

(3) セメント水比

図-7 はセメント水比 (C/W) と平均剝離度との関係を示したものである。常時海中に

ない海洋コンクリートという条件から $W/C=55\%$ 以下のコンクリートを対象としたので、図からそれを超えるものを除いた。 C/W が 1.82~2.10 ($W/C=55\sim47.6\%$) までは比較的大きな剝離度を示し、2.10 以上 ($W/C=47.6\%$ 以下) になると剝離の程度が小さくなる傾向を示す。 $W/C=47\%$ はコンクリート標準示方書の海洋コンクリートの一番厳しい環境下での最大水セメント比の規定に、また、まえがきにも述べた ACI の耐凍害性コンクリートの最大水セメント比の規準に近い値になっていた。

(4) 汀線からの距離

凍害発生のメカニズムは、水が凍るときの体積膨張が基本になる。そのため海水がコンクリート露出面に供給される程度³⁹⁾は、剝離の発生および進行に重要なファクター^{40),41)}となる。海水の供給の度合の尺度として、測定位置と汀線との直線距離 (l) を考えた。 l は測定位置の海面 (L.W.L.) からの垂直距離 (l_v) と汀線からの水平距離 (l_h) から

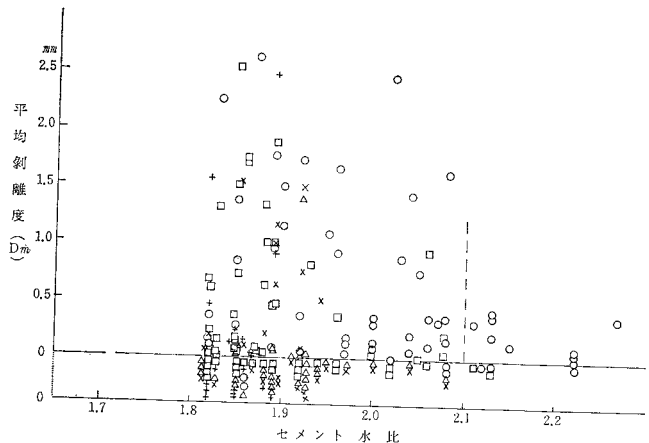


図-7 セメント水比と平均剝離度

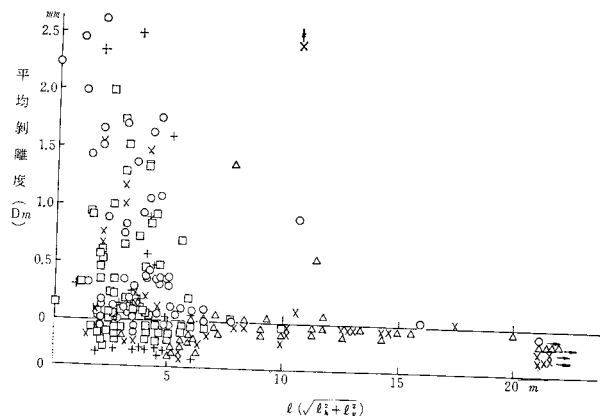


図-8 汀線からの直線距離と平均剝離度

$$l = \sqrt{l_v^2 + l_h^2} \dots \dots \dots (6)$$

によって算定した直線距離を用いた。図-8は汀線からの直線距離 l と平均剝離度 (D_m) との関係プロットしたもので、調査した構造物は $l=5\text{m}$ 以内の海岸構造物が多いと同時に、この距離内で平均剝離度の大きいものが多い。 l が 5m を超えると剝離は少なくなり、 l が 16m 以上になると剝離はほとんど発生しない。海水の供給が剝離発生の大きな要因であることがわかる。図-9の(a),(b)は、調査件数を考慮して、平均剝離度 (D_m) の発生する割合を計算したもので、汀線からの直線距離 l が 16m 以上になるとほとんど剝離が発生しなくなり、比較的大きい $D_m=1.0\text{mm}$ 以上のものは 7m 以内で多く発生する傾向を示した。

(5) 凍結融解回数

コンクリート構造物に繰り返される凍結融解回数は、気温はもとより、日照、波、積雪あるいは構造物の方位などの影響を受け、実際には複雑であるが、そのなかで一番重要な要素である気温によって推定される凍結融解回数をその影響度の指標とした。北海道の海岸および港湾コンクリート構造物の年間凍結融解回数は南部では少ないが、北部でも流水の接岸などによって最高気温が氷点下になり、融解することが少ないと凍結融解回数が少なくなる場合もある。凍結融解の回数の算出にあたって

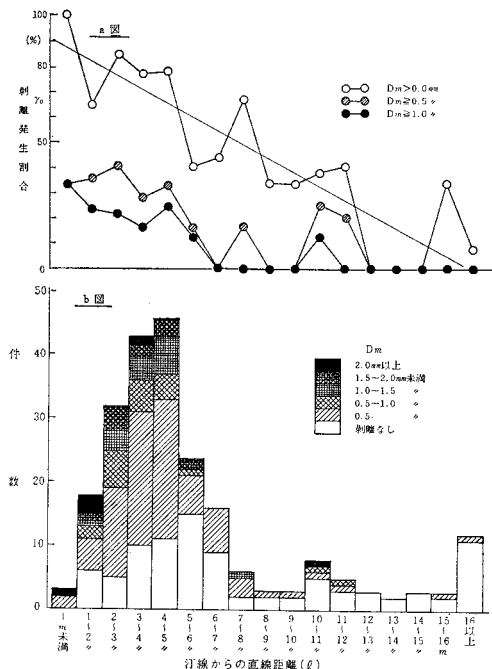


図-9 汀線からの直線距離と剝離発生状況

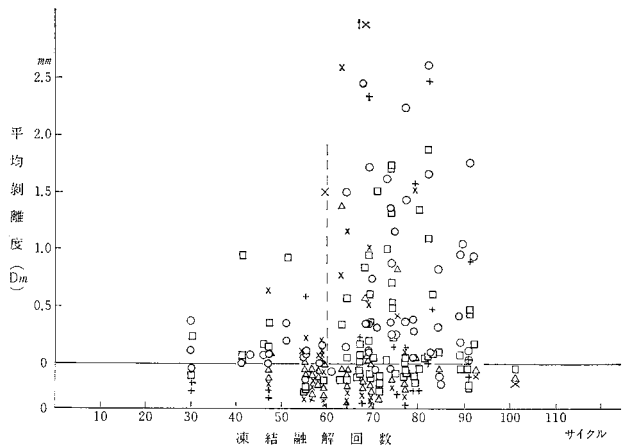


図-10 凍結融解回数と平均剝離度

基準温度を -2°C としたが、これは海水がほぼ -2°C で凍結融解するからである。図-10は凍結融解回数と平均剝離度 (D_m) の関係を示したもので、60 サイクルまでは平均剝離度は小さく、60 サイクル以上になると大きな平均剝離度も発生し始める。

(6) その他の要因

調査項目に挙げている養生日数は表面剝離に対して大きな要因の1つと考えられるが、調査でははっきりとした傾向が現われなかった。その理由としては同じ養生日数でもその養生程度、受ける環境条件が異なり一様に日数だけでは捕らえることができないためと考えられる。セメントの種類はこれまでの室内実験でも表面剝離に対して大きな差異が生じていたが、調査の構造物がほとんど混合セメントを使用していたためセメントの種類による差は明確ではなかった。多少普通セメントを使用した構造物が損傷が少ない傾向を示していた。その他混和剤、打込み方法、脱型日数、養生法、養生水についても剝離に対してははっきりとした傾向が認められなかった。

7. 要因と表面剝離の損傷程度との相関性

海岸および港湾コンクリートにおいて凍害による損傷が大小さまざま、ほぼ全域に発生しているので、これまで凍害発生の危険度から一歩進めて、凍害による損傷の進行程度を評価しようとしたものである。6. に述べたように養生方法あるいは養生後の環境条件など重要な要因^{(42),(43)} が考えられるが、客観的な資料として整理することが難しいため今回は除いた。骨材の品質を決める代表値として粗骨材評価係数 (A) を説明変数に用いた。表面剝離に対する抵抗力としてコンクリートの引張強度

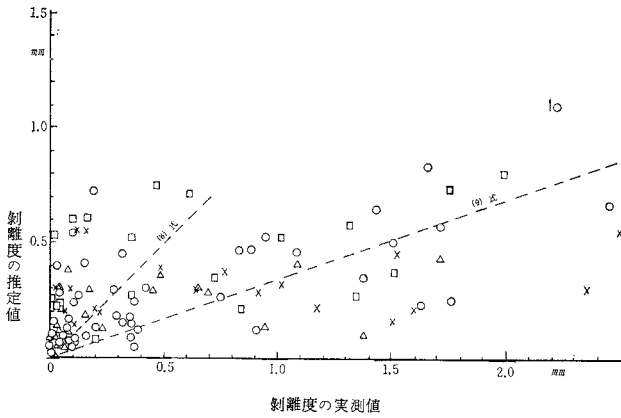


図-11 表面剝離損傷の推定値

あるいは骨材界面との付着強度が大きな役割をしている。この性状を支配するファクターとして単位セメント量 (C) を用いた。単位セメント量は 図-6 に示したように 28 日圧縮強度とも比較的よい相関を示し、剝離に対する抵抗能力を評価する指標として有効である。凍結融解作用が働いてもコンクリート中に水分がなければ凍害は発生しない。水分の供給が重要な要因となる。供給源としては波、しぶき、雨、雪などが考えられるが、ここでは海からの供給を主体に考えて、汀線から対象としている 構造物の直線距離 (l) をその指標として用いた。図-9 の性状から説明変数として a/(l+b) の形を選んだ。凍害の直接の発生要因となる凍結融解作用は 6.(5) に述べたように各種の気象作用が影響するが、気温から推定される凍結融解回数 (N) を用いた。これまでの実験結果⁴⁴⁾より $N^{f(W/C)}$ が剝離の進行を説明する場合のよい関数形となっていたので、これを用いた。以上の説明した結果から平均剝離度 ($D_m > 0$ mm) の推定値 (D_m^*) を次式のように仮定した。

$$D_m^* = \alpha_1 \left(\frac{A}{4}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{C}{290}\right)^{\alpha_3} \left(\frac{a}{l+b}\right)^{\alpha_4} \left(\frac{N}{60}\right)^{\alpha_5 f(W/C)} \dots\dots\dots (7)$$

a, b を 図-9 の形状から仮定して式 (7) に代入し、また $f(W/C)$ をこれまでの実験より $f = \left(\frac{2.10}{C/W}\right)^\beta$ の形に取り、 β を仮定して式 (7) に代入し、多変量解析を行って重相関係数が大きいものを選んだ。その結果、 $a = 4, b = 2, f = \sqrt{2.10/C/W}$ となり、推定値 (D_m^*) は

$$D_m^* = 0.310 \left(\frac{4}{A}\right)^{0.583} \left(\frac{290}{C}\right)^{4.315} \left(\frac{4}{l+2}\right)^{1.853} \times \left(\frac{N}{60}\right)^{1.451 f} \dots\dots\dots (8)$$

となった。このときの重相関係数 (R) は 0.533 であった。この式は $D_m > 0$ mm の測定値を用いたため、式の推定式は損傷が比較的小さいときも適合する式になる。大きな剝離損傷に対しては式 (8) の D_m^* は 図-

11 のように測定値より小さく推定し、危険側となっている。そこで $D_m > 0.5$ mm の場合の測定値を用いて推定値を修正した。 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ は一定で α_1 のみ変化させて修正式 (D_{mu}^*) を求めた。その結果下式のようになった。

$$D_{mu}^* = 2.92 D_m^* \dots\dots\dots (9)$$

重相関係数 $R = 0.530$ で推定値および測定値の D_m を示すと 図-11 のようになる。ほぼよい相関を示し、損傷の小さい場合も安全側に包括し得る。平均剝離度が中の程度の場合 ($D_m > 0.5$ mm) の局所的な剝離度である最大剝離度 (D_{max}) は D_m に対して約 1~3 倍程度であり、それらの平均値を用いると D_{max} の推定値としては D_{mu}^* の 2.2 倍となる。平均剝離度の推定値 (D_{mu}^*) が 0.5 mm 以下であれば損傷程度は小、0.5~1.5 mm で中、1.5 mm 以上で大である。

8. まとめ

北海道の海岸 および 港湾コンクリート 構造物 について、施工後一冬経過の凍害による表面剝離を、ほぼ沿岸全域について調査 (調査箇所総数 194: 消波ブロック 65, 防波堤・岸壁 80, 擁壁・覆道 49) した。その結果、次のようなことがわかった。

(1) 使用セメントは大部分が混合セメントであった。混和剤は AE 剤 78%, AE 減水剤 22% の使用割合であった。水セメント比は消波ブロックで 45~55%, 防波堤・岸壁および擁壁・覆道では 50~60% のものが多かった。

(2) 型枠の種類は、消波ブロックでは鋼製が大部分であり、擁壁・覆道では木製が大部分で、防波堤・岸壁では木製および鋼製が半々である。打込み方法はトラックアジテーターから直接打ち込む方法、型枠を取りはずす時期は 5 日以内が大部分を占めていた。

(3) 養生水は、消波ブロックでは淡水が多く、防波堤、岸壁では海水が大部分で、擁壁・覆道では海水、淡水がほぼ半々であった。養生方法は麻袋をかけて散水する方法が一番多く、養生日数は 6 日以上が約 60% を占めていた。一方 3 日以内が約 20% あり、まだ養生がおろそかにされている傾向がある。

(4) 施工後一冬経過後の表面剝離の発生率は、消波ブロックで 88%, 防波堤・岸壁で 69%, 擁壁・覆道で 45% であった。全体としての剝離発生率は約 69% であった。剝離は北海道の沿岸全域に発生していた。

(5) 消波ブロックの剝離状況を見ると、局所的な凍害の損傷を評価できる最大剝離深さは 1.5~4.5 mm が

大部分を占めていた。また最大剝離度からみると、比較的小さいものが北海道南部に発生していた。構造物全体の剝離状況を把握できる平均剝離度からみると、地域による差異は認められなかった。

(6) 防波堤・岸壁の剝離状況を見ると、比較的大きな最大剝離深さ 3.0~6.0 mm が 40% あり、網走地域に多く、最大剝離深さが小さいものが北海道南部に多い傾向を示した。

(7) 擁壁・覆道の剝離状況を見ると、これらの構造物は比較的汀線から離れるので、消波ブロック、防波堤・岸壁に比較して海水を受けることが少なく、剝離なしが 55% と多い傾向を示していた。

(8) 粗骨材の品質評価係数が剝離度に対して、多少影響がある傾向がみられ、評価係数 4.0 以上になると剝離度が小さくなる。

(9) セメント量はモルタルマトリックス強度に関係して重要なファクターである。単位セメント量が 290 kg/m³ 以上になると剝離度はかなり小さくなる。この単位セメント量に対応する標準養生による材令 28 日の圧縮強度は 280 kgf/cm² (27.5 MPa) であった。

(10) 水セメント比が 47% より小さいと剝離度が小さく、それ以上であると剝離度の比較的大きいものが発生する。

(11) 海水の影響は強く、汀線から離れるに従って剝離度は小さくなる。汀線からの水平距離と垂直距離による直線距離が、16 m 以上離れると剝離はほとんど生じない。また比較的小さいのは 7 m 以内である。

(12) -2°C の気温を基準に算定した年間凍結融解回数が 60 サイクルを超えると剝離度が大きくなる。

(13) 平均剝離度の推定値 (D_{mu}^*) は次式のようになり

$$D_{mu}^* = 0.906 \left(\frac{4}{A} \right)^{0.583} \left(\frac{290}{C} \right)^{4.315} \left(\frac{4}{l+2} \right)^{1.653} \\ \times \left(\frac{N}{60} \right)^{1.451 \sqrt{2.10 W/C}}$$

損傷程度は $D_{mu}^* \leq 0.5$ mm で小、 $0.5 < D_{mu}^* \leq 1.5$ mm で中、 $D_{mu}^* \geq 1.5$ mm で大である。最大剝離度の推定値は D_{mu}^* の 2.2 倍になる。この推定式は (9) で述べたようにセメント量によって大きな影響を受ける。

9. あとがき

海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剝離については、まだまだ未解決の問題が多く残されている。しかし、今回の調査によって北海道全域にわたる実態と表面剝離の発生要因の概要を知ることができた。

この報告書の成果が、表面剝離の進行についての資料をさらに蓄積して発展し、経済的かつ耐久な海岸お

よび港湾コンクリート構造物を造るための一助となれば幸いである。最後に、資料の収集あるいは調査箇所案内、説明などをしていただいた北海道開発局、北海道土木部および国鉄の方々のご協力に対し深くお礼申し上げます。また調査員としてご尽力下さった北海道開発局土木試験所、北海道土木部およびセメント会社の方々に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 洪悦郎：コンクリートの凍害，コンクリート工学，Vol. 13, No. 3, pp. 33~44, Mar. 1975.
- 2) 大原 功・岳上広光・竹内昭治・鈴木 誠：コンクリートの分離が耐凍害性におよぼす影響，セメント技術年報，29, pp. 271~274, 1975.
- 3) 佐伯 昇・藤田嘉夫・鮎田耕一：コンクリートの表面剝離に対する耐力についての 2, 3 の実験，セメント技術年報，33, pp. 306~309, 1979.
- 4) 鮎田耕一・林 正道：寒冷地の海岸コンクリート構造物の表面剝離について，セメント技術年報，34, pp. 310~313, 1980.
- 5) Saeki, N., N. Takada and Y. Fujita : Some Experiments for Sealing Resistance of Hardened Concrete, Trans. of the Japan Concrete Inst. Vol. 2, pp. 101~108, 1980.
- 6) 佐伯 昇・桜井 宏・鮎田耕一：夏期に曝露されたコンクリートの表面剝離耐力に関する 2, 3 の実験，セメント技術年報，34, pp. 345~348, 1980.
- 7) 菅原 隆・藤田嘉夫・佐伯 昇・高田宣之：配合及び養生条件の違いによるコンクリートの表層強度特性，土木学会北海道支部論文報告集，37, pp. 455~460, 1981.
- 8) 林 正道・鮎田耕一・長山裕一：乾湿に伴うコンクリート露出面の強度の変化，土木学会北海道支部論文報告集，37, pp. 443~448, 1981.
- 9) 鮎田耕一・林 正道・猪狩平三郎：乾湿に伴うコンクリート露出面の水和度の変化，土木学会北海道支部論文報告集，37, pp. 449~454, 1981.
- 10) ACI, Committee 201 : Durability of Concrete in Service, Manual of Concrete Practice, Part 1, 1973.
- 11) ACI, Committee 201 : Guide to Durable Concrete, Manual of Concrete Practice, Part 1, 1981.
- 12) BSI, CP 110 Part 1 : The Structural Use of Concrete, Nov. 1972.
- 13) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton : Beton und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, DIN 1045, January 1972.
- 14) Performance of Concrete in Marine Environment : ACI, SP-65, 1980.
- 15) Tyler, I.L. : Long-Time Study of Cement Performance in Concrete, J.ACI, Vol. 31, No. 9, pp. 825~836, Mar. 1960.
- 16) Lyse, I. : Durability of Concrete in Sea Water, J.ACI, Vol. 32, No. 12, pp. 1575~1584, June 1961.
- 17) Idorn, G.M. : A Concrete Jetty with Frost Damage, MCR, Vol. 16, No. 47, pp. 89~92, June 1964.
- 18) Gjörv, O.E., Ivar Gukild and H.P. Sundh : Investigation of Concrete Piles under Varying Conditions in Sea-Water, Bulletin RILEM, No. 32, pp. 305~322, Sept. 1966.
- 19) Gjörv, O.E. : Long-Time Durability of Concrete in Sea Water, J. ACI, pp. 60~68, Jan. 1971.
- 20) 柳田 力：コンクリートの耐久性，被害例と対策-各種土

- 木構造物について，セメントコンクリート，No. 308，pp. 102~107，Oct. 1972.
- 21) Seki, H. : Deterioration of Concrete of Coastal Structures in Japan, ACI, SP-47, pp. 293~315.
 - 22) 林 正道：土木構造物の凍害状況，コンクリートジャーナル，Vol. 4, No. 11, pp. 56~61, Nov. 1966.
 - 23) 林 正道：コンクリートの気象作用に対する耐久性，北海道土木技術会コンクリート研究委員会資料 4, pp. 1~7, Jan. 1974.
 - 24) 今井益隆：コンクリート構造物の凍害調査，コンクリート工学，Vol. 14, No. 11, pp. 16~22, Nov. 1976.
 - 25) 太田利隆：コンクリート構造物の耐久性-凍害の現況と問題点，土木学会昭和 55 年度全国大会研究討論会講演概要，No. 5, pp. 1~5, Sept. 1980.
 - 26) 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剝離について，資料 91 号，1981.4.
 - 27) Cordon, W.A. : Freezing and Thawing of Concrete-Mechanisms and Control, ACI Monograph 3.
 - 28) 洪 悦郎：コンクリートの凍害と骨材，セメントコンクリート，No. 331, pp. 64~69, Sept. 1974.
 - 29) Verbeck, G. and R. Landgren : Influence of Physical Characteristics of Aggregates on Frost Resistance of Concrete, Proc. ASTM, 60, pp. 1063~1079, 1960.
 - 30) 金氏 真：粗骨材の細孔径分布とコンクリートの凍結融解抵抗性の相関関係について，セメント技術年報，33, pp. 302~305, 1979.
 - 31) Cameron Macinnis, Eddie C. Lau : Maximum Aggregate Size Effect on Frost Resistance of Concrete, J. ACI, pp. 144~149, Feb. 1971.
 - 32) 前川静男・岡村 武・今井益隆：北海道各地産骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性試験，セメント技術年報，25, pp. 158~162, 1971.
 - 33) 三浦 忠・石垣 茂：骨材の質によるコンクリートの耐久性に関する研究，セメントコンクリート，No. 317, pp. 8~16, July 1973.
 - 34) セメント協会コンクリート専門委員会：粗骨材の品質調査，セメントコンクリート，No. 371, pp. 12~53, Jan. 1978.
 - 35) セメント協会コンクリート専門委員会：粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響，セメントコンクリート，No. 395, pp. 45~53, Jan. 1980.
 - 36) 太田利隆：北海道における骨材品質の現状，セメントコンクリート，No. 415, pp. 31~36, Sept. 1981.
 - 37) 林 正道・鮎田耕一：フライアッシュセメントコンクリートの諸性質について，セメント技術年報，33, pp. 261~264, 1979.
 - 38) 小林一輔：高炉セメントとその海洋コンクリート構造物への適用，日本鉄鋼連盟，Mar. 1978.
 - 39) 笠井芳夫・柴田修身：早期に海水に接するモルタル・コンクリートの塩分浸透に関する実験，セメント技術年報，25, pp. 274~277, 1971.
 - 40) Technical Committees : An Introduction to RILEM Methods of Testing Resistance of Concrete to Freezing and Thawing and the International Co-operative Tests on the Critical Degree of Saturation Method, Matériaux et Constructions, Vol. 10, No. 58, pp. 205~253, 1977.
 - 41) Cameron Macinnis and J.J. Beaudoin : Effect of Degree of Saturation on the Frost Resistance of Mortar Mixes, J. ACI, pp. 203~208, Mar. 1968.
 - 42) Klieger, P. : Effect of Atmospheric Conditions During the Bleeding Period and Time of Finishing on the Scale Resistance of Concrete, J. ACI, pp. 309~326, Nov. 1955.
 - 43) 前川静男・今井益隆：養生程度がコンクリートの耐久性に与える影響，セメントコンクリート，No. 345, pp. 22~29, Nov. 1975.
 - 44) 桜井 宏・藤田嘉夫・佐伯 昇：海岸コンクリートの凍害による表面剝離被害の進行についての二、三の実験，土木学会講演概要集第 5, pp. 191~192, 1981.

(1982.1.5・受付)