

V—2 寒冷地海洋環境下におかれたコンクリート表層部の劣化の要因

北見工業大学 正会員 桜井 宏

北見工業大学 正会員 鮎田耕一

北海道大学 正会員 佐伯 昇

北見工業大学 正会員 岡田包儀

1 はじめに

寒冷地海洋環境下に置かれたコンクリート構造物は凍結融解作用や海水による化学作用などによる劣化作用を受ける。特に、このコンクリート表層部は、混和材料や養生条件等の違いにより初期の表層強度特性に大きな影響を受ける事が筆者らの研究により明らかになりつつある¹⁾²⁾。また、劣化機構的には表層部の微細な層構造が剥離の発生に影響していることが解明されつつある³⁾。表面剥離の原因は、内的要因と外的要因とに分けられる。前者は、材料、配合、施工、養生までのコンクリート自体に関するもので、後者は養生時及びその後における気象作用、すなわち気温、湿度、風速、海水の影響等の夏期の環境条件及び冬期間の凍結融解作用、海水と雪による水分の供給などが考えられる⁴⁾⁵⁾。本研究では、ばく露された多種の条件の供試体の7年経過後の表層部の劣化による剥離被害を測定し、測定データより各要因の影響を統計的な手法で比較及び検討し、鉄筋のかぶりに相当するコンクリート表層部の剥離による劣化の主な要因を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 材料及び配合 セメントは普通ポルトランドセメント（記号：N）、フライアッシュセメントA、B、C種（記号：FA、FB、FC）及び高炉セメントB種（記号：BB）を使用した。セメントの性質、及び成分等を表-1に示す。配合はセメントN、FB、BBに対し水セメント比45%と55%の2種類とし、セメントFA、FCに対しては水セメント比を55%のみとした。目標空気量を4.5%として、目標スランプは5cmとした。それらの示方配合及び練り上がり時の性質を表-2に示した。骨材は川砂利及び海砂を使用しそれらの性質を表-3に示した。

2.2 実験供試体 供試体の養生条件は、養生なしの現場放置（記号：F0）5日間の麻袋-淡水散水養生（記号：F5）14日間の麻袋-淡水散水養生（記号：F14）及び5日間麻袋-海水散水養生（記号：S5）の4条件に変化させた。表-4に示したようにこれらの実験供試体を各々1個づつ、ただしN55F5は、温度測定用として2個作製し合計21個作製した。

2.3 ばく露環境 ばく露地点は、北海道紋別市小向のコムケ湖付近のオホーツク海岸である。供試体を、汀線から約30m～50mの荒天時に海水のかかる位置に設置した。1年間の凍結融解回数は気温から推定して約80回である。

ばく露実験地点の供試体打ち込み後の8月上旬から9月上旬までの気象状況を観測した。打ち込み後の日

表-1 セメントの種類と性質及び成分

記号	セメントの種類	比重	混和材料 (%)	セメント 強度 (kgf/cm ²)	化 学 成 分 (%)							
					ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
N	普通ポルトランド	3.17	0	443	0.6	0.0	22.1	5.4	3.1	64.8	1.5	1.9
FA	フライアッシュA種	3.09	8	—	0.3	4.6	21.8	5.2	2.9	61.5	1.4	1.4
FB	フライアッシュB種	2.91	15	344	0.6	12.0	20.0	5.2	2.9	55.5	1.3	1.7
FC	フライアッシュC種	2.49	22	—	0.6	14.0	16.6	5.7	2.4	47.4	1.3	1.8
BB	高炉 B種	3.05	40 ※1	368	0.6	0.1	25.0	9.1	1.8	55.8	3.4	2.6

注 FA,FB,FCの化学成分は、セメント協会 昭和49年 資料による

※1 メーカーによるおおよその値

表-2 コンクリートの配合

配合種類	セメント 種 別	示 方 配 合					練り上がり性状			圧 縮 強 度 (材令28日)				
		W/C	W	C	S	G	スランブ	空気量	温度	標準養生	現 場 養 生 (kgf/cm ²)			
		(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(cm)	(%)	(°C)	(kgf/cm ²)	F0	F5	S5	F14
N 5 5	N	55	136	248	770	1166	6.6	5.6	27	280	198	238	240	270
N 4 5	N	45	135	300	718	1177	3.9	4.5	28	372	—	340	—	316
F A 5 5	FA	55	123	224	790	1194	4.3	6.5	22	298	—	259	—	—
F B 5 5	FB	55	122	222	790	1194	8.5	4.3	22	254	207	250	247	208
F R 4 5	FB	45	123	274	790	1205	8.0	5.0	24	325	—	263	—	288
F C 5 5	FC	55	121	220	790	1194	6.5	4.3	21	231	—	222	—	—
B B 5 5	BB	55	128	233	780	1182	2.9	4.0	25	258	192	225	196	211
B B 4 5	BB	45	130	289	722	1186	6.0	3.0	23	338	—	285	—	311

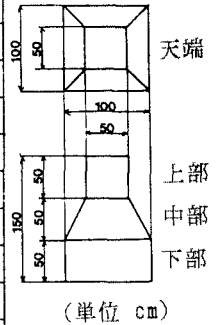


図-1
曝露供試体

表-3 骨材の性質

骨 材 (産 地)	細 骨 材 海 砂 (清 滑 町 川 向)	粗 骨 材 * 川 砂 利 (5-25mm) (清 滑 川)	粗 骨 材 * 川 砂 利 (20-40mm) (清 滑 川)
項 目			
粗 粒 率	2.73	6.91	7.30
比 重	2.60	2.62	2.62
吸 水 率 (%)	1.52	1.81	2.62
単位容積重量 (t/m ³)	1.72	1.67	1.67
実 積 率 (%)	67.2	64.9	67.8
塩 分 含 有 率 (%)	0.026	—	—
すり へ り (%)	—	22.5	23.1
安 定 性 (%)	3.1	6.5	6.7
軟 石 量 (%)	—	2.1	0.0
粘 土 塊 量 (%)	0.0	0.0	0.0
洗 い 試 験 (%)	1.0	0.4	0.3
比重1.95の液体に浮くもの (%)	0.0	6.0	0.0

* 粗骨材の5-25mmと20-40mmの割合を65:35の割合に混合して使用した。

表-4 曝露実験ケース (供試体)

No	セ W 養生 メント C 条件 日 数	No	セ W 養生 メント C 条件 日 数	No	セ W 養生 メント C 条件 日 数
1	N 55 F* 0	8	FB 55 F 0	15	BB 55 F 0
2	N 55 F 5**	9	FB 55 F 5	16	BB 55 F 5
3	N 55 F 14	10	FB 55 F 14	17	BB 55 F 14
4	N 55 S* 5	11	FB 55 S 5	18	BB 55 S 5
5	N 45 F 5	12	FB 45 F 5	19	BB 45 F 5
6	N 45 F 14	13	FB 45 F 14	20	BB 45 F 14
7	FA 55 F 5	14	FC 55 F 5	21	温度測定用

* F:淡水養生, S:海水養生, W/C:水セメント比
** N55F5は、温度測定用として、さらにもう1個作製した。

最高及び日最低気温を求めた結果、それぞれの28日間の平均値は $\overline{T_{\max}}=23.3^{\circ}\text{C}$ 及び $\overline{T_{\min}}=15.3^{\circ}\text{C}$ であった。同様に相対湿度の日最高及び日最低を求めた。それぞれの28日間の平均値の $\overline{H_{\max}}$ 及び $\overline{H_{\min}}$ は91%及び53%であった。日蒸発量求めた結果、その平均値 ($\overline{V}$) は4.7mm/日であった。その傾きの日最大値 ($\overline{V_{\max}}$) 及び日最低値 ($\overline{V_{\min}}$) はそれぞれ0.57mm/hおよび0.07mm/hであった。このようにばく露地点では打ち込み後1日の間で気温は約 10°C 前後、また湿度は約40%の乾湿の差があり、気温の上下、乾湿の繰り返しが1日1サイクルで起こっている。

2. 4 測定方法 図-1のように上部、中部、下部の各々の東西南北の4面と天端の計13面の測定面にスケール及びポップアウトによる剥離箇所をマーキングするとともに剥離の深さを測定する点を示し番号を記入した。深さは20点、剥離の多い面は25点をデプスゲージで測定した。同時に測定面を覆う網目の枠を当て写真を撮影し、剥離面積と深さ測定点の座標を求めた。

(1)剥離度の算定方法 剥離度(平均被害度)の算定方法は各剥離部分の面積と深さをかけそれらを合計したものを測定面の全面積で除して算定する平均被害深さである。

(2)剥離面積率 剥離部分を $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ の網目で半分以上の割合を占める部分の面積を加算し、その面

積の合計を全体の面積で除して百分率として表す。

(3)剥離深さ 1つの測定面の中で測定された全ての深さを平均する。

2. 5 測定結果の整理と解析方法 表面剥離被害とその要因を明らかにするため剥離度と実験の要因との相関係数を求めた。また相関係数の高い要因を抽出して重回帰分析を行い重相関係数の算出とF検定を行った。

剥離の要因を内的要因と外的要因に分けた。内的要因としてセメントの種別による影響を明らかにするためセメント中の成分である CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 の重量百分率を用いた。また、配合条件では水セメント比、練り上がり性状としては空気量、スランプ、養生条件としては養生水の塩分量と養生日数、強度特性としては標準養生材令28日圧縮強度、同91日圧縮強度、現場養生材令28日圧縮強度、同91日圧縮強度、シュミットハンマーによる強度を用いた。また、外的条件として日射の影響を検討するため真南からの測定面の角度を取った。さらに、波や積雪、砂中からの水分供給の影響を明らかにするために地面から測定面の中心までの距離を取り測定面の地面からの高さとした。

3. 実験結果及び考察

3. 1 実験結果

(1)剥離の発生状況

図-2に0.05mmごとの階級で分けた剥離度の度数分布を示す。これによると0~0.05mmのところ被害が集中している。セメントの種類による違いを見ると普通ポルトランドセメントは剥離度が全般的に小さく、高炉セメントは剥離度が大きい。そしてフライアッシュセメントはその中間である。図-3に剥離面積率の1%ごとの度数分布を示す。これによると剥離面積率は、0~1%の度数が最も多く、また剥離面積率の度数分布形状は剥離面積率が大きくなるにしたがって度数が小さくなり図-2の度数分布形状に近い。図-4は、剥離深さの度数分布を示す。剥離被害を受けたものの剥離深さの平

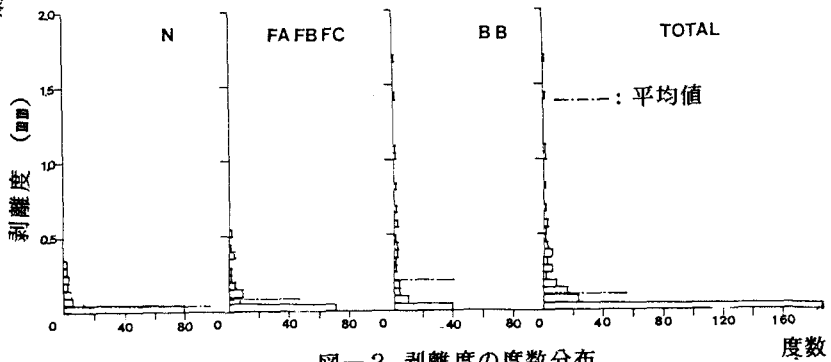


図-2 剥離度の度数分布

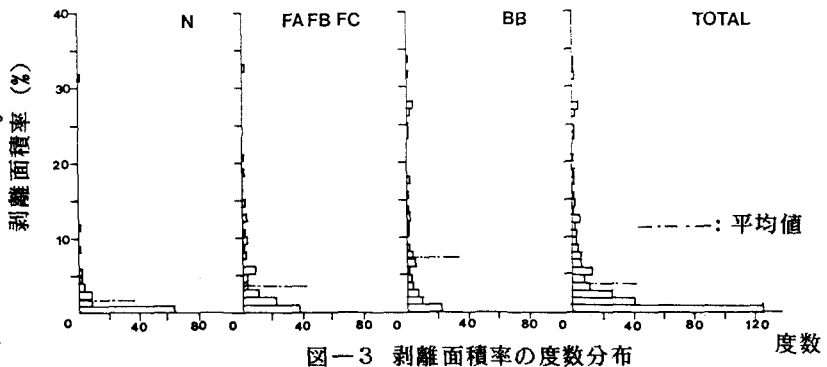


図-3 剥離面積率の度数分布

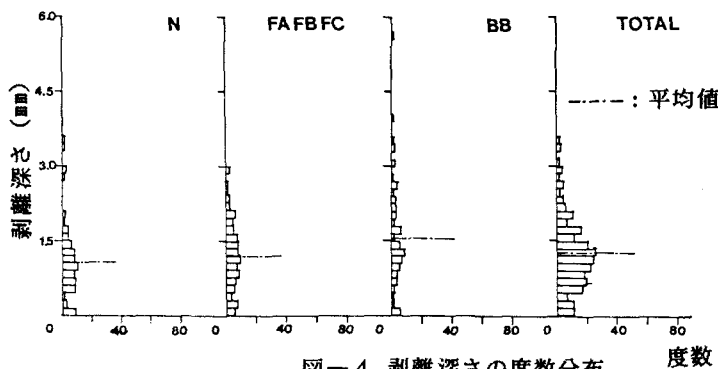


図-4 剥離深さの度数分布

均は1.26mmであった。高炉セメントは剥離深さの度数分布の幅が標準偏差で0.75mmと広く、フライアッシュセメントにおいては平均値が1.17mmで標準偏差が0.67mmであり度数分布の幅が狭い。また、普通ポルトランドセメントでは平均値は1.05mmと小さいが分布の幅はフライアッシュセメントに比べて広い。表一5に剥離度と剥離被害の測定項目とした剥離面積率及び剥離深さの相関係数を示した。各々の相関係数は、0.882, 0.560であった。これより剥離度に対しては剥離面積率が剥離深さより影響が大きいことを示している。

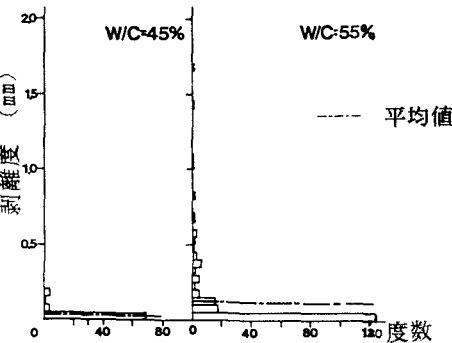
(2) 各要因と剥離度の関係 各要因との相関係数を求めてこれらの結果を表一5に示した。内的要因として、セメント中の成分と剥離度の関係を相関係数で求めた結果、 Al_2O_3 , MgO , SO_3 の増加と剥離度は正の相関を示し同様に、 CaO と Fe_2O_3 は負の相関を示した。

配合では図一5に示したように水セメント比の増加とともに剥離度が大きくなる傾向を示している。また練り上がり性状においては図一6に示したように空気量の増加とともに剥離度が減少する傾向を示している。養生条件については図一7に示したように海水を使用すると剥離が増加する傾向を示している。また強度で

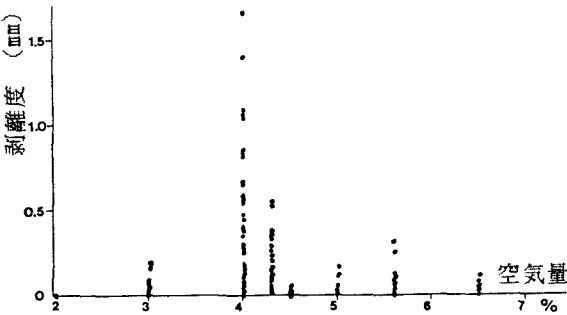
表 - 5 剥離度と各要因との相関係数

剥離度	剥離面積率	剥離深さ	内 的 要 因								
			セメントの成分						配合	練上がり性状	
			CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)			
1.000	0.882	0.560	-0.237	0.194	0.331	-0.356	0.318	0.297	0.215	-0.179	-0.294
内 的 要 因										外 的 要 因 (環境要因)	
養生条件		強 度									
養生水	養生日数	σ28標※1	σ91標※1	σ28現※1	σ91現※1	シュミットN※2		面の方位	面の高さ		
0.227	-0.059	-0.273	-0.203※2	-0.308	-0.326※3	-0.070		0.072※4	-0.313		

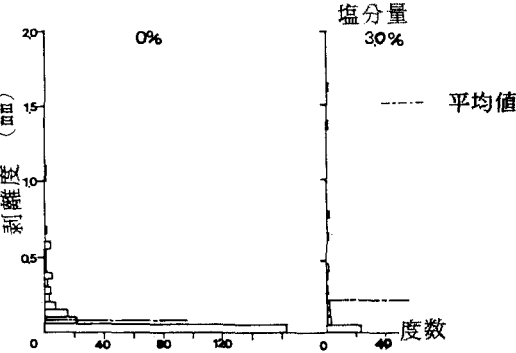
※1 標：標準養生、現：現場養生
 ※2 B845 は、実験せず
 ※3 N45F14、FB45F14、BB45F14、BB45F14、BB55F0、BB55S5、BB55F14 は、実験せず
 ※4 天端を除く



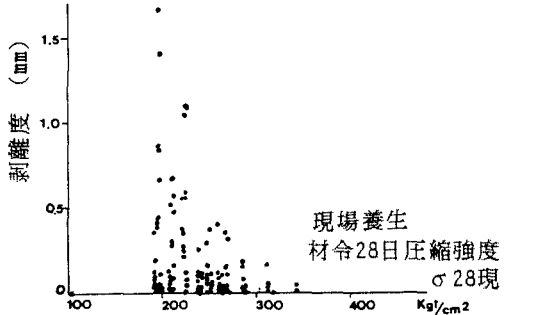
図一5 剥離度と水セメント別の度数分布



図一6 空気量と剥離度との関係



図一7 剥離度と養生水の塩分量別の度数分布



図一8 現場養生材令28日圧縮強度と剥離度との関係

は図一8に示したように現場養生材令28日強度が増加すると剥離度が減少する傾向を示している。

外的要因としては測定面の地面からの高さが高くなると図一9に示したように剥離度が減少する傾向を示している。

3. 2 考察

(1) 内的要因と剥離発生との関係 セメント中の成分の Al_2O_3 が増加すると剥離度が増加するのは、筆者らが既にX線回折試験等で分析したように、表層部にエトリンガイトなどが発生しやすくなり表層部が内部に比べ変状するためであると考えられる。従ってこれらの成分が多い混合セメントの高炉セメントは特に剥離が発生しやすくなっていると考えられる。 MgO, SO_3 の増加に伴って剥離度が増加する傾向が現れているがこれらについては、海水からも供給される成分がありこれらと劣化の関係については今後も検討が必要である。また現場養生強度の方が養生日数に比べ剥離度との負の相関が比較的有るのは現場養生強度が現場の養生の状態をよく表現するためであると考えられる。

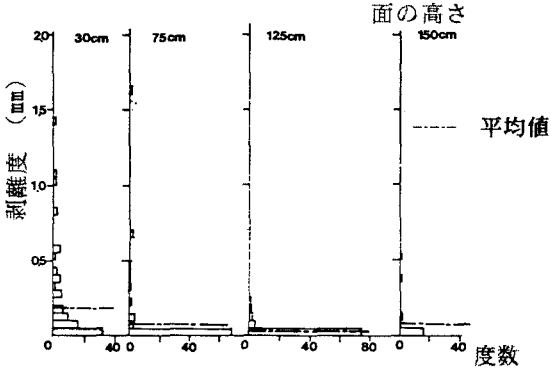
(2) 外的要因と剥離度との関係 外的要因（環境要因）である測定面の地面からの高さとの関係は負の相関になっている。これは特に供試体下部及び中部は波や積雪、砂中の水分の影響を受け水分が補給されやすい状態になり剥離が発生しやすいものと考えられる。面の方位に関しては明らかな傾向が現れなかった。これは日射により凍結融解作用の回数が多くなるのは南側であるのに対し、海が北側に位置するため飛来塩分の影響が北側の測定面に現れるためであると考えられる。

(3) 重回帰分析による検討 実験中の要因のうち、表一5より相関係数の高く、かつ適切と考えられる要因を抽出し重回帰分析を行なった。被害を剥離度で表しこれを目的変数(y)とし、説明変数を内的要因の中からセメント中の成分の中で海水の影響を受けやすい Al_2O_3 （これを説明変数 x_1 とおく）、配合として水セメント比（説明変数: x_2 ）、コンクリートの練り上がり性状として空気量（説明変数: x_3 ）、養生条件として養生水の塩分量（説明変数: x_4 ）、さらに養生の状態を現すために現場養生材令28日強度（説明変数: x_5 ）をとり、外的要因として測定面の地面からの高さ（説明変数: x_6 ）をとった。なお重回帰式は下記のような積の形をとり両辺の対数をとって計算した。また、剥離度 0 ($Y=0$) のデータは除いて計算した。

$$Y = e^{\alpha_0 \cdot x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\alpha_2} \cdot x_3^{\alpha_3} \cdot x_4^{\alpha_4} \cdot x_5^{\alpha_5} \cdot x_6^{\alpha_6}}$$

但し α_0 : 定数、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$: 回帰係数

この回帰係数を表一6に示す。この結果よりこの回帰は重相関係数が0.69で、かつF検定で有意であることが認められる。この重回帰式による推定値と測定値の関係を図一10に示す。これによると剥離度が大きくなると実測値が高めに出ている点があるが、これはポップアウトの影響である。



図一9 剥離度と測定面の高さ別の度数分布

表 一 6 重回帰分析結果

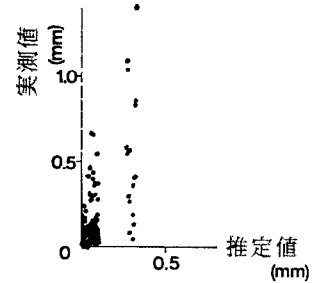
変 数	目的変数	説 明 変 数						定数項	重相関係数	F 検 定
	剥離度 (mm)	Al_2O_3 量 (%)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	養生水塩分量 (%)	σ 28日強度 (kgf/cm ²)	面の高さ (cm)			
対 数	$\ln \bar{y}$	$\ln x_1$	$\ln x_2$	$\ln x_3$	$\ln x_4$	$\ln x_5$	$\ln x_6$	$\ln C$		
回帰係数 α_i	—	1.7814	7.4014	-2.1493	0.0046	-0.7695	-1.7439	-21.7729	0.691	35.20 $\geq F_{0.005}$ (0.005)

4. 結論

寒冷地海洋環境下に7年間ばく露されたコンクリート供試体の表面剥離による劣化を測定した結果以下の点が明らかになった。

(1) 剥離被害は剥離度が0から0.05mmの程度のもが多く、それ以上の剥離度度数の分布は小さくなる。被害を受けた部分の深さの平均値は1.26mmであった。セメントの種類別では高炉セメントの剥離度が大きい。

(2) 剥離度と正の相関を示す因子は、セメント中の成分の Al_2O_3 の含有量、水セメント比、養生水の塩分量である。剥離度と負の相関を示すものは空気量、現場養生強度、測定面の地面からの高さ（水分



図— 10 重回帰式による剥離度の推定値と測定値の関係

の供給の程度)である。
(3) 剥離度を目的変数にとり、説明変数をセメント中成分の Al_2O_3 、水セメント比、空気量、養生水の塩分量、材令28日標準養生圧縮強度、及び測定面の地面からの高さをとって積の形で重回帰分析を行った結果次式のようにになった。

$$Y = e^{-21.7729 \cdot X_1 + 7814 \cdot X_2 + 7.4014 \cdot X_3 - 2.1493 \cdot X_4 + 0.0046 \cdot X_5 - 0.7695 \cdot X_6 - 1.7439}$$

但し x_1 : Al_2O_3 量(%), x_2 : 水セメント比 (%), x_3 : 練り上がりコンクリートの空気量(%), x_4 : 養生水の塩分量(%), x_5 : 現場養生材令28日強度(kgf/cm²), x_6 : 測定面の地面からの高さ(cm)

さらに今後も現象をモデル化するための適切な関数型の検討が必要である。

なお、本研究における測定及びデータの整理に当たっては北見工業大学コンクリート研究室猪狩技官、学生の杵渕、藤木、堀越君他多くの卒研生諸君の協力を得た事を付記する。

参考文献

- 1) 佐伯昇、桜井宏、鮎田耕一：夏期にばく露されたコンクリートの表面剥離耐力に関する2、3の実験：セメント技術年報35、PP.345～348,1980
- 2) 桜井宏、佐伯昇、高田宣之、藤田嘉夫：凍害によるコンクリート表層部の劣化についての2、3の実験、土木学会北海道支部論文報告集、pp.461～466,1980
- 3) 鮎田耕一、林正道：海水にさらされたコンクリート露出面の強度性状：セメント技術年報36、pp.30～33,1982
- 4) 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、第327号、pp.5～16,1982年11月
- 5) 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剥離被害の進行についての二、三の実験、土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集、pp.191～192,1981
- 6) 桜井宏、金子誠二、佐伯昇、鮎田耕一：凍結融解作用を受けた海岸コンクリート表層部の化学特性、土木学会全国大会年次講演会講演概要集、PP.327～328,1982