

論文 寒冷地における海洋コンクリートの表面剥離に及ぼす気象条件と使用材料の影響

加藤 利菜^{*1}・鮎田 耕一^{*2}・猪狩 平三郎^{*3}・佐藤 大吾^{*4}

要旨：寒冷地における海洋コンクリートの耐凍害性向上を目的として、オホーツク海沿岸と太平洋沿岸に15年間暴露したコンクリートを対象に、気象条件及び使用材料（セメント、混和材）と配合（水セメント比）がコンクリートの耐凍害性、特に表面剥離に及ぼす影響について検討した。その結果、結合材として普通ポルトランドセメントだけを使用した場合では気象条件に関わらず表面剥離が発生しにくいことが明らかとなった。さらに、水分の供給や凍結融解回数が多い気象条件では表面剥離が発生しやすいことを確認した。

キーワード：海洋コンクリート, 気象条件, 暴露試験, 凍結融解, セメント, 表面剥離

1. はじめに

海洋コンクリートは海水や波浪の影響を受け劣化しやすいことで知られている。さらに寒冷地では冬季の凍結融解の繰返し作用が加わるため劣化は促進されやすい。海洋コンクリートの暴露試験に関する研究は塩化物の浸透と鉄筋の腐食¹⁾やひび割れ中の鉄筋の腐食²⁾、鉄筋コンクリートはりの劣化過程³⁾など鉄筋コンクリートを対象としたものが多い。寒冷地におけるコンクリートの暴露試験に関しては、電気防食法⁴⁾に関する研究があるが、耐凍害性に関する研究は少なく、特に凍結融解の繰返し作用を受ける海洋コンクリート構造物の主な劣化現象である表面剥離⁵⁾に関しては十分になされていない。

そこで本研究では、北海道のオホーツク海沿岸と太平洋沿岸に消波ブロックを1988年秋季から15年間暴露した結果を基に、気象条件や使用材料（セメント、混和材）と配合（水セメント比）などの各種要因が表面剥離の発生に及ぼす影響について検討した。

2.1 暴露環境

オホーツク海沿岸の網走港に写真-1に示すように2トン消波ブロックを、太平洋沿岸の十勝港に写真-2に示すように3トン消波ブロックをそれぞれ7個暴露した。暴露箇所は常時潮風を受け、波しぶきをたまに受ける海上大気中である。網走港と十勝港の位置を図-1に示した。

日本気象協会北海道本部発行「北海道の気象」及びアメダスの気象データベースを利用して各年の11月から翌年の10月までを1年間とし、2003年までの各年の推定凍結融解回数と年間降水量を求めた。さらに、暴露開始から10年間の各月における平均降



写真-1 網走港暴露コンクリート

2. 実験概要

*1 北見工業大学大学院 工学研究科物質工学専攻 (正会員)

*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科教授 工博 (正会員)

*3 北見工業大学 技術部技術長

*4 北見工業大学 工学研究科土木開発工学専攻



写真-2 十勝港暴露コンクリート



図-1 暴露実験対象港

表-1 配合

網走港										
単位量(kg/m ³)										細骨材 率
セメント		水 W	水結合材比 W/ (C+F) (%)	混和材		細骨材 S		粗骨材 G		
記号	C			記号 ²⁾	F	陸	川	25mm	40mm	
NN	137	123	44.9	FS50	137	471	310	685	456	40.5
NN	230	115	44.9	SF10	26	492	323	685	456	41.5
NN	218	115	44.9	SF15	38	492	323	685	456	41.5
NN	303	136	44.9		—	437	287	685	456	38.7
NN	270	135	50.0		—	455	297	685	456	39.6
NN	246	135	54.9		—	466	308	685	456	40.3
BB	298	134	45.0		—	437	287	685	456	38.7
十勝港										
NN	145	130	44.8	FS50	145	—	705	862	369	37.1
NN	241	120	44.8	SF10	27	—	723	882	378	37.2
NN	233	123	44.9	SF15	41	—	715	874	375	37.1
NN	283	127	44.9			—	713	871	373	37.1
NN	252	126	50.0			—	757	860	368	38.9
NN	229	126	55.0			—	780	858	368	39.6
BB	278	125	45.0			—	676	899	385	35.2

1) NN ; 普通ポルトランドセメント

BB ; 高炉セメント B 種

2) 記号の数値はセメント+混和材に対する各混和材の混合百分率

FS50 ; 高炉スラグ微粉末を 50%混合

SF10 ; シリカフュームを 10%混合

SF15 ; シリカフュームを 15%混合

水量と平均日照時間を求めた。なお、推定凍結融解回数は海水の凍結温度を -2°C として求めた。

2.2 消波ブロックの使用材料

(1) 網走港

セメントは普通ポルトランドセメント (NN) (密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$) と高炉セメント B 種 (BB) (密度 $3.05\text{g}/\text{cm}^3$) である。粗骨材 (G) は最大寸法 25mm (密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 2.22%) と最大寸法 40mm (密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 2.13%) の川砂利を容積比 $6:4$ で混合して使用した。細骨材 (S) は陸砂 (密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 1.73%) と川砂 (密度 $2.56\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 2.08%) を容積比 $6:4$ で混合して使用した。混和材 (F) は高炉スラグ微粉末 (比表面積 $6040\text{cm}^2/\text{g}$) とシリカフューム (比表面積 $20\text{m}^2/\text{g}$) を使用した。

(2) 十勝港

セメントは普通ポルトランドセメント (NN) (密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$) と高炉セメント B 種 (BB) (密度 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$) である。粗骨材 (G) は最大寸法 25mm (密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 1.17%) と最大寸法 40mm (密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 2.68%) の川砂利を容積比 $7:3$ で混合して使用した。細骨材 (S) は川砂 (密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 2.02%) を使用した。なお、混和材 (F) は網走港と同じである。

2.3 配合及び養生

配合を表-1 に示した。網走港、十勝港暴露コンクリートともに目標スランプは 5cm , 空気量は 4.5% である。養生は麻袋を掛け散水を 7 日間行った。

2.4 表面剥離面積

図-2 に示すように暴露コンクリートの上面、下面に透明のフレームシートを当て表面剥離部分を油



図-2 表面剥離部分測定面

性ペンでなぞり、画像処理により剥離面積率 (フレームシート部分の面積に対する剥離部分の面積の割合) を求めた。なお、網走港暴露コンクリートに使用したフレームシートは $50\text{cm}\times 50\text{cm}$, 十勝港暴露コンクリートに使用したフレームシートは $50\text{cm}\times 25\text{cm}$ である。

3. 実験結果及び考察

3.1 推定凍結融解回数と降水量

網走港と十勝港の年間推定凍結融解回数を図-3 に示した。図-4 に暴露開始から 10 年間の網走港と十勝港の各月における平均降水量と平均日照時間を示した。

図-3 から推定凍結融解回数は十勝港のほうが網走港より多い。図-4 に示したように、冬季の降水量は十勝港のほうが網走港よりも多く、日照時間も長い。

このことから十勝港では降雪が多い一方で日照による融解の可能性も高いと考えられ、その結果、十勝港では冬季に凍結融解回数と水分の供給が多く網

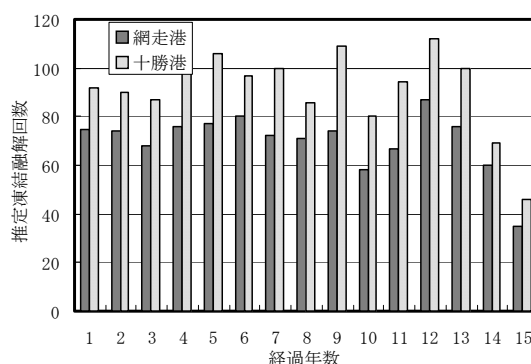


図-3 網走港、十勝港の年間推定凍結融解回数

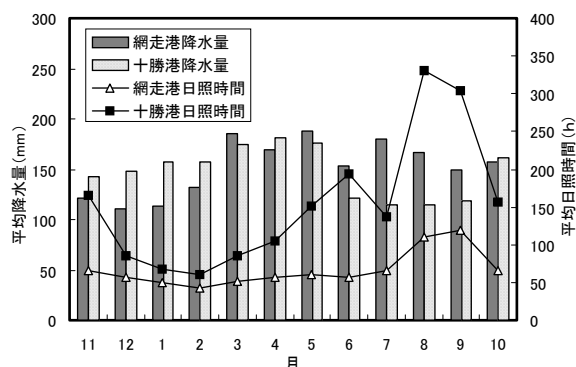


図-4 各月における網走港と十勝港の平均降水量と平均日照時間 (1988 年から 10 年間の平均)

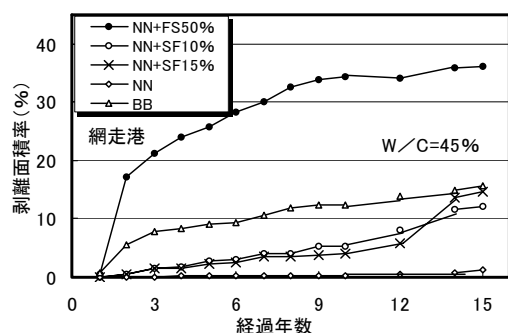


図-5 網走港暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率

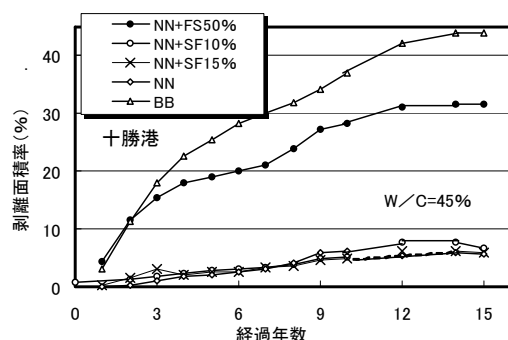


図-6 十勝港暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率

走港より厳しい気象条件下にあるといえる。使用した気象データはそれぞれの暴露箇所における局所的なものではないが、それぞれの暴露箇所における傾向を比較する点においては十分なデータであると考えている。

3.2 セメント、混和材の影響

図-5 に網走港暴露コンクリートの、図-6 に十勝港暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率を水セメント比が45%の場合で比較した。

網走港暴露コンクリートでは普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を50%混合したコンクリート（NN+FS50%）の剥離面積率が経過年数に伴い最も増加し、15年経過後に35%に達している。次いで高炉セメントB種を使用したコンクリート（BB）の剥離面積率が経過年数に伴い増加しており、15年経過後の剥離面積率はおよそ15%である。また、普通ポルトランドセメントにシリカフェームを10%と15%混合したコンクリート（NN+SF10%、SF15%）では経過年数12年位までは剥離抑制効果

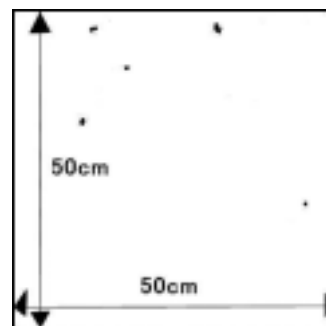


図-7 剥離面積率が1%の剥離状況

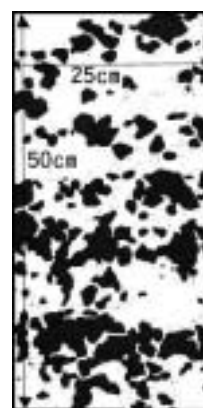


図-8 剥離面積率が40%の剥離状況

が見られたが、15年経過後の剥離面積率はおよそ15%であり高炉スラグB種を用いた場合（BB）と同程度になっている。普通ポルトランドセメントを使用した場合（NN）では経過年数が増加しても剥離面積率は1%程度と少なく、表面剥離はほとんど発生していない。参考までに図-7 に剥離面積率1%の剥離状況を示した。

十勝港暴露コンクリートでは高炉セメントB種を用いたコンクリート（BB）と普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を50%混合したコンクリート（NN+FS50%）の剥離面積率が経過年数に伴い増加している。普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を50%混合したコンクリート（NN+FS50%）の剥離面積率は図-5 で示した網走港暴露コンクリートとほぼ同程度であるが、高炉セメントB種を用いたコンクリート（BB）では15年経過後の剥離面積率は40%を超えている。参考までに図-8 に剥離面積率40%の剥離状況を示した。普通ポルトランドセメントにシリカフェームを10%と15%混合したコンクリート（NN+SF10%、SF15%）と

普通ポルトランドセメントを使用した場合 (NN) の剥離面積率は15年経過後でおよそ6%を示しており、表面剥離は少ない状態である。

以上示した結果をまとめると、網走港、十勝港いずれの場合も結合材として普通ポルトランドセメントだけを使用した場合には表面剥離が発生しにくく、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合させた場合や高炉セメントB種を使用した場合では表面剥離が発生しやすいことが明らかとなった。高炉スラグ微粉末を混合した場合、コンクリートの海水に対する抵抗性が優れることが知られているが、本実験では表面剥離が多く発生した。これは、網走港と十勝港暴露コンクリートいずれの場合も暴露開始が秋季だったため強度が十分に発現しないうちに凍結融解作用を受けたことが一因と考えられる。

普通ポルトランドセメントにシリカフュームを混合した場合には組織が非常に緻密となることから表面剥離の抑制を期待したが、本実験では普通ポルトランドセメントだけを使用したコンクリートと同程度かそれより多く表面剥離が発生し、効果が十分に確認されなかった。これはシリカフュームを混合することによって組織が緻密化するため、長期間海水の作用と凍結融解の繰返し作用を受ける場合において水分が凍結する際に生じた水圧が他の空隙に移動出来なかったため⁶⁾緩和されずセメントペーストを破壊し表面剥離が発生したと思われる。

これらの結果を踏まえると、水セメント比を45%、空気量を4.5%とした場合では、普通ポルトランドセメントだけを使用し、他の混和材を使用しないほうが暴露開始からただちに凍結融解と海水の作用を受け寒冷地の海洋環境下に長期間暴される場合でもコンクリートの表面剥離が発生しにくいことが明らかとなった。

3.3 気象条件の影響

図-9に普通ポルトランドセメントを使用し水セメント比が45%の場合の暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率を示した。

網走港暴露コンクリートに比べ十勝港暴露コンクリートの剥離面積率が高い。両者に差が生じたのは、

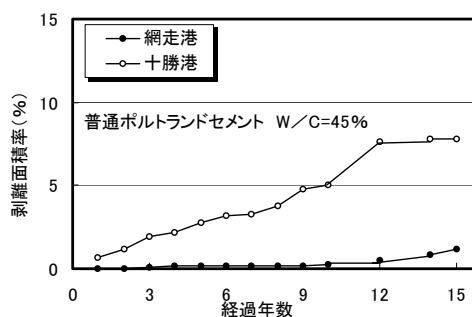


図-9 網走港と十勝港の暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率

図-4に示したように十勝港では網走港に比べ冬季の水分の供給や凍結融解回数が多く、凍結融解の繰返し作用を多く受けるため表面剥離が増加したと考えられる。なお、暴露コンクリート設置場所は海上大気中のため、波しぶきなどの物理的な作用はたまに受ける程度であり、凍結融解の繰返し作用以外の影響は少ないものと考えている。

3.4 水セメント比の影響

普通ポルトランドセメントを使用した場合の図-10に網走港の、図-11に十勝港の経過年数に伴う剥離面積率を、図-12に水セメント比別の15年経過後の剥離面積率を示した。

図-10と図-11に示したように、網走港、十勝港いずれも水セメント比が50%と55%の場合では経過年数に伴い剥離面積率が増加している。一方、水セメント比が45%の場合では経過年数に伴う剥離面積率の増加が少ない。

図-12に示したように、両港に暴露したコンクリートとも水セメント比が45%の場合に表面剥離の発生はほぼ抑制されており、一部を除き水セメント比が高くなるにつれて剥離面積が広がる傾向にある。十勝港暴露コンクリートでは水セメント比が50%の場合に水セメント比が55%の場合よりも大きい剥離面積率を示している。この理由は不明であるが、図-11に示されているように水セメント比が50%のコンクリートの表面剥離は暴露開始2年目から大幅に発生しており、コンクリート作製時に何らかの欠陥が生じた可能性も考えられる。

両港における暴露実験の結果から、水セメント比

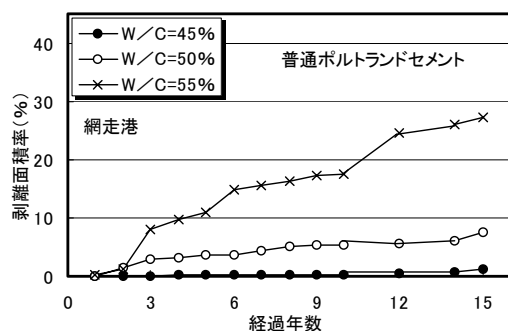


図-10 水セメント比の異なる網走港暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率

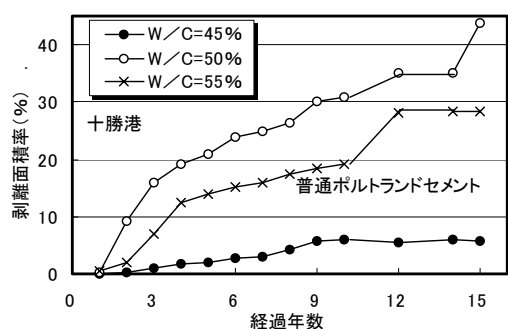


図-11 水セメント比の異なる十勝港暴露コンクリートの経過年数に伴う剥離面積率

が海水の作用と凍結融解の繰返し作用を受けるコンクリートの表面剥離に占める役割は非常に高く、水セメント比を 45%にすることで表面剥離が抑制される。

以上に示した結果をまとめると、暴露初期から海水と凍結融解の作用を受ける環境下では、空気量を 4.5%とし普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を 45%とすることで厳しい気象条件下でもコンクリートの表面剥離が発生しにくいことが確認された。

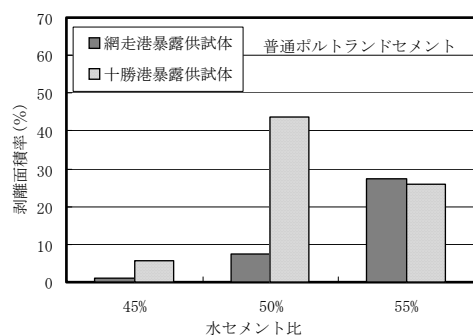


図-12 網走港、十勝港暴露コンクリートの水セメント比別の 15 年経過後の剥離面積率

4. まとめ

普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、普通ポルトランドセメントに混和材として高炉スラグ微粉末、シリカフェームを使用した水セメント比が異なるコンクリートを作成し、北海道オホーツク海沿岸と太平洋沿岸の海上大気中で 15 年間暴露実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 暴露初期から凍結融解と海水の作用を受け、寒冷地の海洋環境下に長期間暴される場合でも普通ポルトランドセメントを使用すると高炉セメントB種や普通ポルトランドセメントに混和材を混合した場合に比べ表面剥離が発生しにくい。
- 2) 冬季の凍結融解繰返し回数や降水量が多いと表面剥離が発生しやすい状態になる。
- 3) 空気量を 4.5%とした場合、普通ポルトランドセメントを使用し水セメント比を 45%とすることで表面剥離が抑制される。

参考文献

- 1) 竹田宣典，十河茂幸，迫田恵三：シリカフェームを用いたコンクリートの海洋環境下における耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.97-102，2000
- 2) 蛭川友司ほか：海水が浸透するひびわれ中の鉄筋の腐食，土木学会論文集，No.466/V-19，pp.31-39，1993
- 3) 川東龍夫，葛目和宏，宮川豊章：海洋環境に長期暴露された鉄筋コンクリートはりの劣化過程と耐久性評価，土木学会論文集，No.613/V-42，pp.71-83，1999
- 4) 川俣孝治，堺孝司，石川光男：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食法に関する研究，土木学会論文集，No.557/V-45，pp.65-75，1997
- 5) 鮎田耕一：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策，コンクリート工学，Vol.32，No.10，1994. 10
- 6) コンクリート便覧，日本コンクリート工学協会，p.103，1996