

論文 15年間寒冷地の海上大気中に暴露したコンクリートの表面剥離性状

加藤 利菜^{*1}・鮎田 耕一^{*2}・猪狩 平三郎^{*3}

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、北海道オホーツク海沿岸に15年間暴露したコンクリートを対象に、使用材料（セメント、混和材）や配合（水セメント比、空気量）が耐凍害性、特に表面剥離の発生に及ぼす影響について検討した。その結果、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が45%のコンクリートは表面剥離が生じにくいこと、水セメント比が50%でも空気量を8%にすることで表面剥離の発生を抑制できることが明らかとなった。

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

1. はじめに

海洋コンクリート構造物は海水や波浪の影響を受け劣化しやすいことは知られている。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。寒冷地における海洋コンクリート構造物の劣化対策として空気量を多くすること¹⁾等が提案されてきたが長期間における実気象・環境下での耐凍害性の評価は十分になされていない。

そこで本研究では、使用材料（セメント、混和材）や配合（水セメント比、空気量）を変えた消波ブロックを北海道オホーツク海沿岸に昭和63（1988）年から15年間暴露し、その結果から海洋コンクリート構造物の耐凍害性、特に寒冷地にお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の発生に及ぼす影響について検討した。

方書の海洋コンクリートの環境区分である「海上大気中」に相当する。

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求めた1989年から2003年までの網走の年平均凍結融解回数は約70回、平均降水量は約730mmである。なお、年平均凍結融解回数は海水の凍結温度を -2°C として求めた。



写真-1 暴露供試体

2. 実験概要

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11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環境であり、土木学会コンクリート標準示

2.2 使用材料

使用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。粗骨材は最大寸法25mm（密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率2.22%）

*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 工学部土木開発工学科

表-1 配合

No.	単位量(kg/m ³)										細骨材 率 s/a (%)	目標 空気量 (%)
	セメント ¹⁾		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	陸砂	川砂	25mm	40mm		
1	NN	137	123	44.9	FS50	137	471	310	685	456	40.5	4.5
2	NN	230	115	44.9	SF10	26	492	323	685	456	41.5	4.5
3	NN	218	115	44.9	SF15	38	492	323	685	456	41.5	4.5
4	NN	303	136	44.9	—	—	437	287	685	456	38.7	4.5
5	NN	270	135	50.0	—	—	455	297	685	456	39.6	4.5
6	NN	246	135	54.9	—	—	466	308	685	456	40.3	4.5
7	BB	298	134	45.0	—	—	437	287	685	456	38.7	4.5
8	NN	308	154	50.0	—	—	461	302	685	456	39.9	0
9	NN	261	129	49.4	—	—	445	292	685	456	39.1	6
10	NN	260	122	46.9	—	—	424	279	685	456	38.0	8
11	NN	262	114	43.5	—	—	406	267	685	456	37.0	10

- 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

と最大寸法 40mm (密度 2.57g/cm³, 吸水率 2.13%) の川砂利を容積比 6 : 4 で混合して使用した。細骨材は陸砂 (密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.73%) と川砂 (密度 2.56g/cm³, 吸水率 2.08%) を容積比 6 : 4 で混合して使用した。混和材は高炉スラグ微粉末 (比表面積 6040cm²/g) とシリカフューム (比表面積 20m²/g) を使用した。

2.3 配合及び養生

配合を表-1 に示した。スランプは 5cm, 配合 No.8, 9, 10, 11 の目標空気量はそれぞれ 0%, 6%, 8%, 10% であり, これ以外の供試体の目標空気量は 4.5% である。養生は麻袋を掛け散水を 7 日間行った。

2.4 実験項目

(1) 表面剥離面積

暴露供試体に透明のフレームシートを当て表

面剥離部分を油性ペンでなぞり, 画像処理により剥離面積率を求めた。

(2) 剥離深さ

デプスゲージを用いて暴露供試体の表面剥離部分の剥離深さを測定した。

(3) 圧縮強度

各配合の φ15cm 円柱供試体を標準養生し, 材齢 7 日の圧縮強度を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 セメント, 混和材の影響

図-1 に各種セメント, 混和材を用いた暴露供試体 (W/C=45%, 空気量 4.5%) の剥離面積率の経年変化を示した。混和材を用いず普通ポルトランドセメントだけを使用した場合 (NN) には, 剥離はほとんど発生していない。高炉セ

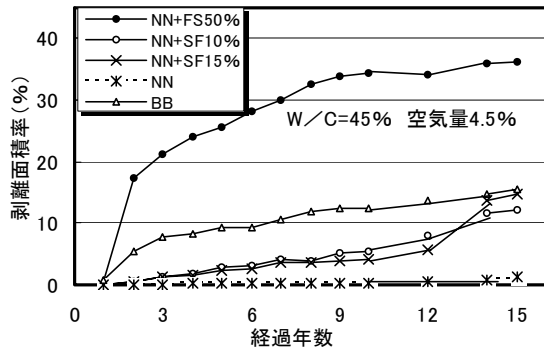


図-1 各種セメント，混和材を用いた暴露供試体の剥離面積率の経年変化

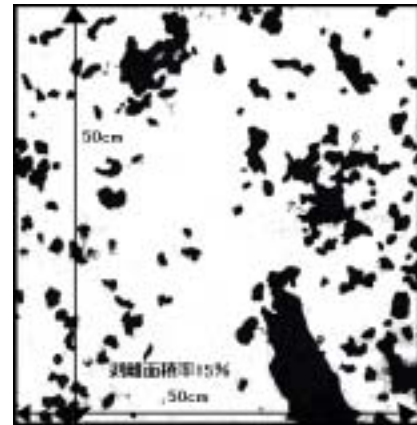


図-3 剥離面積率が15%の剥離状況

メント B 種を使用した場合 (BB) の剥離面積率は，暴露開始から 2 年目ですでに 5% 程度となり，その後徐々に増加し 15 年経過後には 15% に達している。図-2 に 5% の剥離面積率，図-3 に 15% の剥離面積率の状況を示す。

使用した高炉セメント B 種の高炉スラグ微粉末の分量は 40% 程度であるが，分量の影響を明らかにするために普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 混合した供試体 (NN+FS50%) を作成し比較したところ，高炉セメント B 種を使用した場合に比べ，剥離面積率がかなり大きくなった。この要因として高炉スラグ微粉末の分量ほか，使用している普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の化学成分の相違などが考えられる。

普通ポルトランドセメントにシリカフェームを 10%，15% 混合した場合 (NN+SF10%，NN+SF15%) は，シリカフェームの分量に関わ

らず表面剥離は年数の経過とともに増加し，15 年経過後は高炉セメントを用いた場合と同程度の剥離面積率を示し，期待したシリカフェームの混合による表面剥離の抑制効果は得られなかった。

図-4 に各種セメント，混和材を用いた暴露供試体 (W/C=45%，空気量 4.5%) の剥離深さの経年変化を示した。剥離深さは普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 混合した供試体 (NN+FS50%) が最も大きく，普通ポルトランドセメント (NN) を使用した場合に最も小さかったが，セメントの種類に関わらず経過年数が増加してもほとんど変化しなかった。剥離深さが増加しなかったのは表面のモルタルが剥離し粗骨材が露出した後，粗骨材が剥落するような深い表面剥離にほとんど進展しなかったためである。

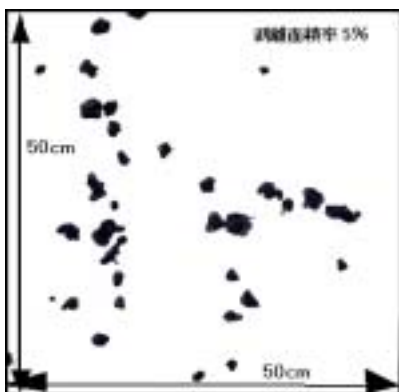


図-2 剥離面積率が 5% の剥離状況

図-5 に各種セメント，混和材を用いた暴露

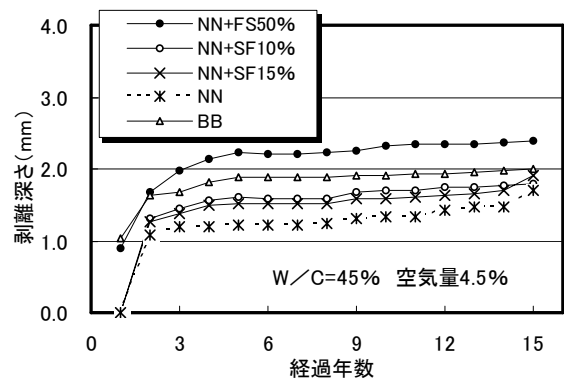


図-4 各種セメント，混和材を用いた暴露供試体の剥離深さの経年変化

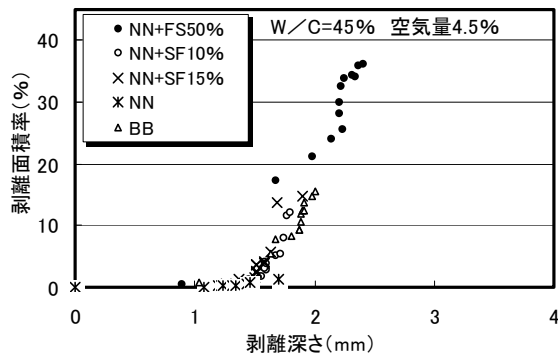


図-5 各種セメント，混和材を用いた暴露供試体の剥離深さと剥離面積率の関係

供試体 (W/C=45%, 空気量 4.5%) の剥離深さと剥離面積率の関係を示した。用いたセメント，混和材の種類に関わらず，剥離深さと剥離面積率には相関が見られ剥離面積が広くなると同時に剥離深さも大きくなっている。

図-6 に各種セメント，混和材を用いた円柱供試体 (W/C=45%, 空気量 4.5%) の材齢 7 日の圧縮強度を示した。高炉セメント B 種を使用した場合 (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% 混合した場合 (NN+FS50%) の圧縮強度が低く，普通ポルトランドセメントを使用した場合 (NN) の圧縮強度が高い。

図-7 に各種セメント，混和材を用いた場合の材齢 7 日の圧縮強度と 15 年経過後の剥離面積

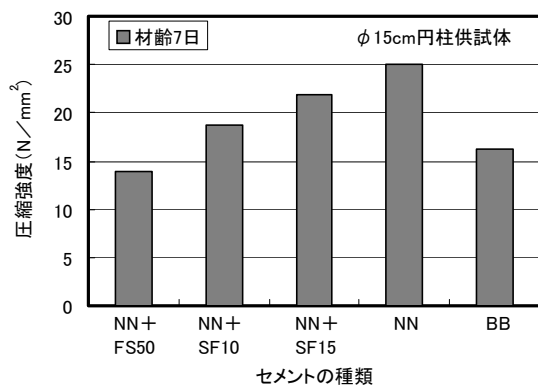


図-6 各種セメント，混和材を用いた円柱供試体の材齢 7 日の圧縮強度

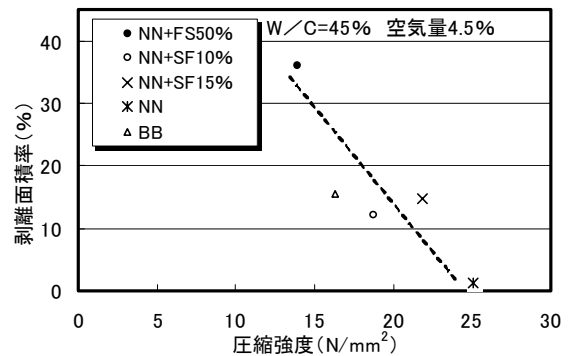


図-7 各種セメント，混和材を用いた場合の材齢 7 日の圧縮強度と 15 年経過後の剥離面積率の関係

率の関係を示した。圧縮強度の増加に伴い剥離面積率は減少した。このことから，暴露開始時の強度が長期間における表面剥離の発生に影響を及ぼしていると思われる。

以上に示した結果をまとめると，混和材を用いない普通ポルトランドセメントの使用が表面剥離の抑制に適していることが明らかになった。

3.2 水セメント比の影響

図-8 に普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が異なる暴露供試体 (空気量 4.5%) の剥離面積率の経年変化を，図-9 に 15 年経過後の剥離面積率を示した。水セメント比が 50% と 55% の場合の剥離面積率が経過年数に伴い増加し，15 年経過後には水セメント比が 50% の場合に剥離面積率は 8% 程度を示し，水

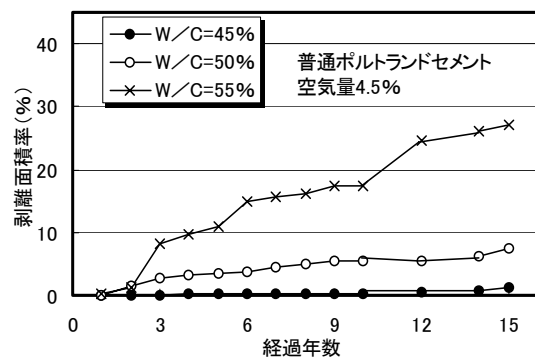


図-8 普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が異なる暴露供試体の剥離面積率の経年変化

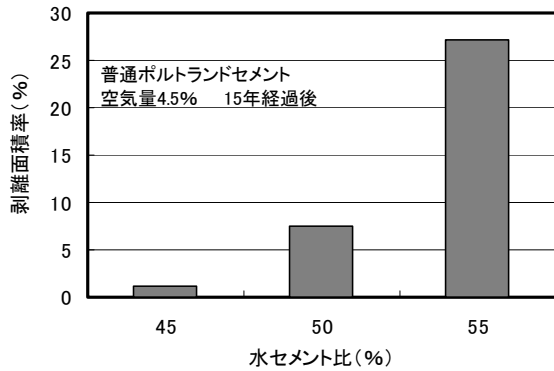


図-9 普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が異なる暴露供試体の15年経過後の剥離面積率

セメント比が55%の場合に剥離面積率は25%を超えた。一方、水セメント比が45%の場合に剥離面積率は年数が経過してもほとんど増加せず、15年経過の剥離面積率は1%程度で剥離はほとんど発生していない。

図-10 に普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が異なる暴露供試体（空気量4.5%）の剥離深さの経年変化を示した。剥離面積率と同様に水セメント比が低いほど剥離深さの進行は抑制されている。

以上の結果から、寒冷地で長期間海水の作用を受けるような厳しい環境でも普通ポルトランドセメントを使用した場合に水セメント比を45%にすればコンクリートに表面剥離の発生が生じにくいことが確認された。

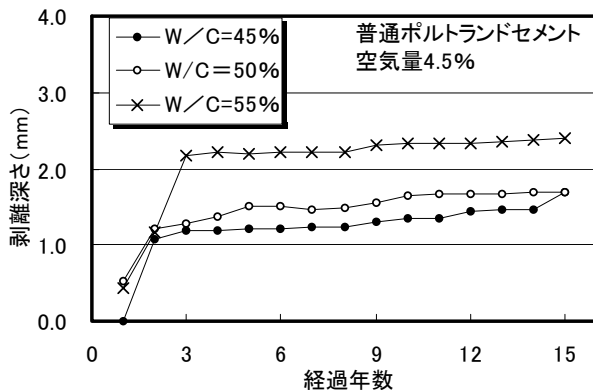


図-10 普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が異なる暴露供試体の剥離深さの経年変化

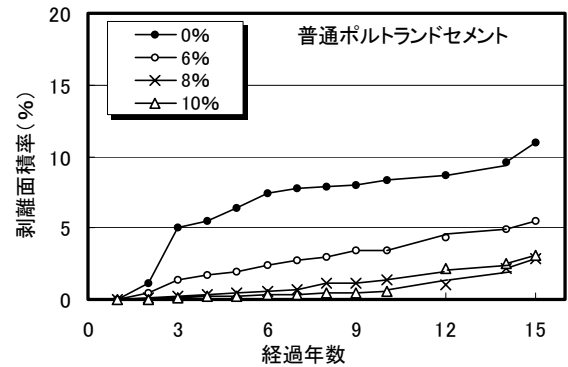


図-11 普通ポルトランドセメントを使用した空気量が異なる暴露供試体の剥離面積率の経年変化

3.3 空気量の影響

図-11 に普通ポルトランドセメントを使用した空気量が異なる暴露供試体の剥離面積率の経年変化を、図-12 に15年経過後の剥離面積率を示した。Non AE コンクリートの剥離面積率が最も高く、空気量が増加すると剥離面積率は減少する傾向にあるが空気量が8%と10%の場合の剥離面積率はほぼ同等の値を示した。空気量が8%と10%の場合の15年経過後における剥離面積率は3%程度で、表面剥離はほとんど発生していない。これは海水の作用を受ける場合には淡水の作用を受ける場合に比べ、セメントペーストが多孔化²⁾し、凍結可能水量が増加する³⁾ので、水圧緩和のための空気量が多いと表面

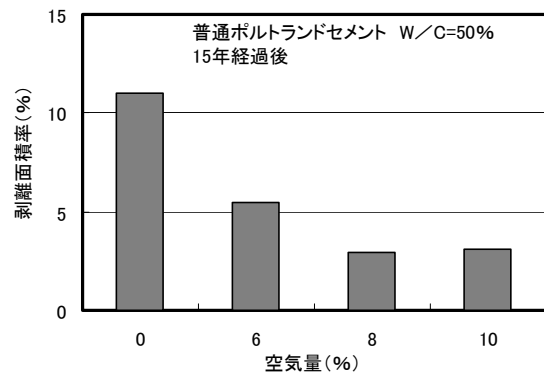


図-12 普通ポルトランドセメントを使用した空気量が異なる暴露供試体の15年経過後の剥離面積率

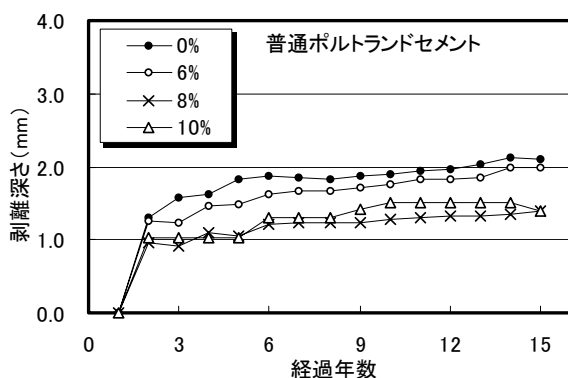


図-13 普通ポルトランドセメントを使用し空気量が異なる暴露供試体の剥離深さの経年変化

剥離の発生が抑制できるのであろう。空気量が8%と10%の場合で剥離面積率の変化はほとんど同程度であった。空気量が4%~8%の場合の強度は同程度であり、空気量が10%の場合で強度は低下する⁴⁾ことを考慮すると、寒冷地の海洋環境下において空気量は8%が適切である。

以上のことから、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比が50%の場合に空気量を8%に確保することで海水と凍結融解の複合作用を15年間受け続ける環境でも表面剥離の発生を抑制できる。

図-13に普通ポルトランドセメントを使用し空気量が異なる暴露供試体の剥離深さの経年変化を示した。空気量に関わらず経過年数の増加に伴い剥離深さが増加する傾向にある。また、Non AE コンクリートの剥離深さが最も大きく、空気量が8%と10%の場合の剥離深さは同程度で、最も小さかった。

以上の結果から、普通ポルトランドセメントを使用し水セメント比が50%の場合には空気量を8%とすることで、表面剥離の発生を防ぐことができるといえる。

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、シリカフュームを使用した

水セメント比と空気量が異なる暴露供試体(2トン消波ブロック)を作成し、北海道オホーツク海沿岸の海上大気中で15年間暴露実験(推定年平均凍結融解回数70回)を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 普通ポルトランドセメントを使用すると高炉セメントや普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末あるいはシリカフュームなどを混和した場合よりも表面剥離の発生を抑制できる。
- 2) 水セメント比が表面剥離の発生・進展に及ぼす影響は大きく、普通ポルトランドセメントを使用し水セメント比が45%(空気量4.5%)の場合には表面剥離の発生を抑制できる。
- 3) 普通ポルトランドセメントを使用し水セメント比を50%にした場合には、空気量を8%にすると表面剥離の発生が抑制できる。

参考文献

- 1) 鮎田耕一, 林正道: 海水の作用を受けるコンクリートの耐凍害性確保のための適正空気量, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.93 - 96, 1986
- 2) 尾野幹也, 永嶋正久, 大塚邦夫: セメント硬化体に与える海水の浸食メカニズム, セメント技術年報34, pp.100 - 103, 1978
- 3) 王欣, 鮎田耕一, 澤田正剛: 海水の作用を受けるコンクリートの凍結水量と細孔構造, セメント・コンクリート論文集 No.52, pp.684 - 691, 1998
- 4) 鮎田耕一ほか: 氷海域海洋コンクリート構造物の耐久設計と耐凍害性向上に関する研究, 北見工業大学地域共同センター研究成果報告書第1号, pp.31 - 36, 1994