

海洋コンクリート表層部における粗骨材露出現象の再現のための基礎的実験

Research for reproduce phenomenon of exposed a coarse aggregate in a marine concrete surface

苫小牧工業高等専門学校専攻科環境システム工学専攻 ○学生員 瀧脇 正広 (Masahiro Fuchiwaki)
 苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科 正会員 廣川 一巳 (Kazumi Hirokawa)

1. まえがき

海洋コンクリート構造物は、海洋環境において様々な気象作用やそれに伴う温度変化、乾燥や水の浸透による水分変化、海水の作用、空気中の炭酸ガスなどを表層部に受け、冬季には表面水およびコンクリート内部水による凍結融解作用を受ける。特に寒冷地のコンクリート表層部はこれらの作用を直接受ける一層厳しい環境下におかれるため、凍害を起こすことがある。ここで言う凍害とは、コンクリート構造物が水分の凍結融解作用によって起こる、ひび割れ、スケーリングなどにより表層部から劣化していく現象の総称である。この現象は、月平均気温が 0°C 以下となる地域で問題となり、日本では沖縄を除く国内全域が対象となる。本研究のテーマである粗骨材露出現象とは、凍結融解の繰り返し作用によりコンクリート表面から深さ 2mm 付近のモルタルが粗骨材上面で剥離し(写真-1)、年数の経過とともに剥離面積は広がるが、剥離深さは進行せず、粗骨材自体が剥落することはないという現象¹⁾(写真-2)で、先に述べた凍結融解作用によってコンクリート表面が広範囲で剥離し続け、やがて粗骨材も剥がれる表面剥離(スケーリング)とはこの点で異なる。この粗骨材露出現象については、いまだどのようなメカニズムによって引き起こされているかは不明であり、今後の研究によるところが大きい。次のような点については実態調査²⁾や、曝露試験³⁾などの結果から明らかになっている。計画的に変えることが可能な要因(水セメント比、養生方法、材料、配合)や、計画的に変えることが困難な環境要因(気温、湿度、海水作用、凍結融解作用)によって発生するとされている。また、この現象は施工後一冬でも剥離することがあるが、対策として湿潤養生 5~7 日後乾燥させることで、同水セメント比でも剥離が少なくなるといったことが明らかにされている。また、粗骨材露出現象については、鮎田¹⁾、佐伯²⁾らの報告があるもののあまり研究されていない。しかし、廣川の研究⁴⁾により、試験方法として室温 20°C の恒温室と -10°C の冷凍室を利用し、凍結融解作用の供試体の表面温度を $+10^{\circ}\text{C}$ ~ -10°C にすると、粗骨材露出現象の再現が可能であることがわかっている。

そこで本研究では、粗骨材露出現象の要因ともいえる凍結融解作用に着目し、温度環境を一定の空間内で自動制御できるユニット型温湿度供給装置を用いて、コンクリートが曝される環境により適した緩速凍結融解作用を、様々な温度勾配によるプログラム運転をすることにより、廣川の研究⁴⁾による供試体の表面温度条件 $+10^{\circ}\text{C}$ ~ -10°C を再現し、その温度勾配条件での粗骨材露出現象の再現、

粗骨材露出現象の再現のための温度自動制御による試験方法の確立を目的として研究を進めた。

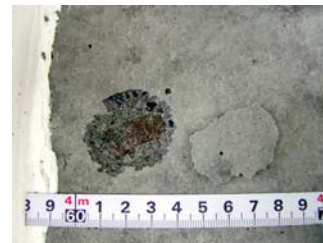


写真-1 剥離したセメントペースト

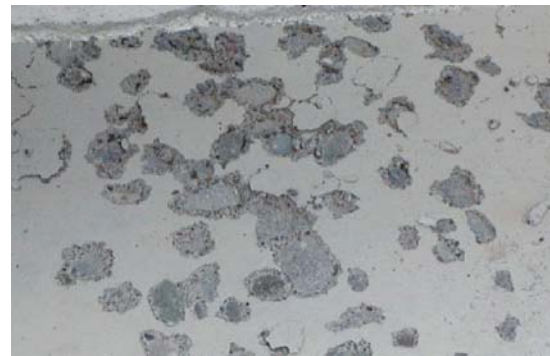


写真-2 海岸コンクリートの例

2. 試験方法

2.1 使用材料及び配合

使用材料としてセメントは普通ポルトランドセメント(密度 $=3.15\text{g}/\text{m}^3$)、粗骨材は静内産(密度 $=2.74\text{g}/\text{m}^3$)、細骨材は浜厚真産(密度 $=2.77\text{g}/\text{m}^3$)を用い、混和剤は AE 減水剤(変形リグニンスルホン酸化合物)、AE 助剤を用いた。

配合は表-1 に示すように、水セメント比(W/C)は 50% とし、スランプ $5.0 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ とした。また、練り混ぜ性状については表-2 に示す。

表-1 配合表

水セメント比 W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
50	5.0±1.0	4.5±0.5	41	136	272	805	1199	2.72	0.816
55			43	136	247	855	1169	2.47	0.741

表-2 練り混ぜ性状

W/C(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	練り混ぜ温度(°C)
50	4.7	4.1	22

2.2 供試体

供試体は、ASTM C 672⁵⁾に準拠し、供試体表面積は最小で 0.046m^2 、最小深さ 75mm とした。供試体作製の手順は以下 1)~6)に示す。

- 1) 図-1 に示すように、内寸縦 180mm×深さ 120mm の発泡スチロール型枠の側面に、縦 80mm×横 160mm のコンクリート打設用の穴を開ける。
- 2) 凍結融解試験の試験面を平坦にするために鉄板を入れ、水溜の枠をつくるために 20mm 厚のスタイロフォームを発泡スチロール上縁と平行にはめ、ふたを閉めガムテープで密閉する。
- 3) 内部の鉄板に予め剥離剤を塗布した後、この穴からコンクリートを打ち込む。
- 4) 1 層あたり 25 回、3 層突き詰め、各層毎にセメントナイフで試験面をスペーシングの後、打ち込み口を閉じてガムテープで塞ぎ、室温 20℃の恒温室にて静置する。
- 5) コンクリート硬化後、材齢 1 日で脱型(鉄板及びスタイロフォーム除去)する。
- 6) 2.3 に示すような各養生期間に従って養生した後、コンクリートと発泡スチロールの隙間からの水漏れを防ぐため、コンクリート表面の接触縁に沿ってコーキングを施す。

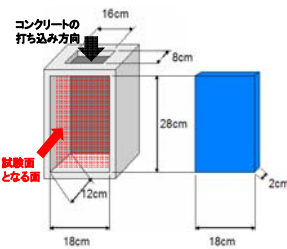


図-1 型枠寸法

2.3 養生条件及び試験水

供試体の養生方法は、材齢 28 日間水中養生したもの(以下、28w と略記)と、5 日間水中養生後、材齢 28 日まで相対湿度 55%の恒温室で空气中乾燥したもの(以下、5w23d と略記)の 2 パターンとし、凍結融解試験に使用する試験水は、錦岡海岸で採取した海水(以下、Sea と略記)、3%塩化ナトリウム水溶液(以下、Na と略記)、3%塩化カルシウム水溶液(以下、Ca と略記)の 3 パターンとして、水セメント比・養生方法・試験水を組み合わせて、計 6 種類の実験パターン(表-3)により実験を行った。

表-3 実験パターン

養生方法	試験水
28w	Sea
	Na
	Ca
5w23d	Sea
	Na
	Ca

2.4 予備実験

凍結融解試験を行うにあたり、供試体の温度分布を調べるため、図-2 に示されるように、

- a) コンクリート表面
- b) 表面からの深さ 5mm
- c) 供試体中央

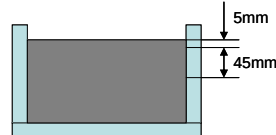


図-2 熱電対の埋設位置

の 3 点にて温度記録表により測定し、供試体の表面温度が -10℃～+10℃に設定できるように、ユニット型温湿度供給装置(温度制御範囲は -30℃～100℃)と接続した試験室(内寸法: W1500mm×H2000mm×D2500mm)で融解時間を 8 時間、凍結時間を 16 時間とした緩速凍結融解作用を行った。得られた結果を示したものを図-3(プログラム 1)、図-4(プログラム 2)

に示す。また、室温 20℃の恒温室と -10℃の冷凍室で行って得られて結果を示したものを図-5 に示す。

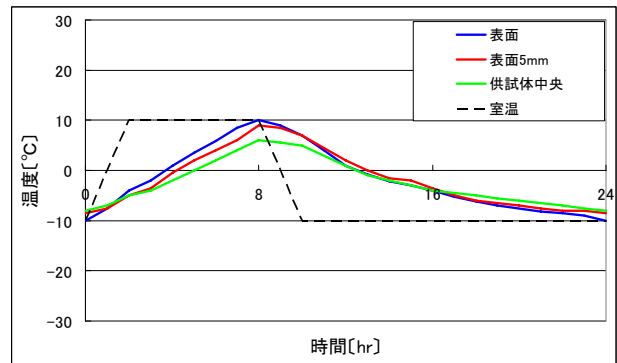


図-3 プログラム 1 による供試体の温度勾配

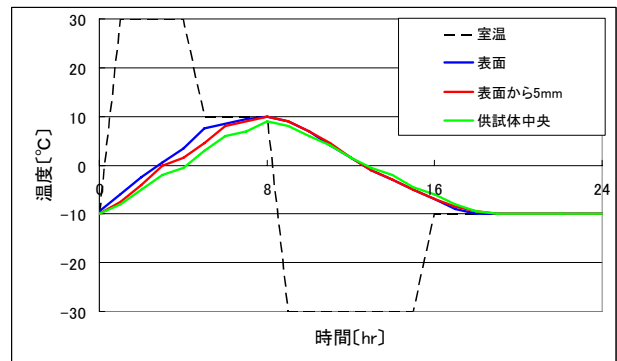


図-4 プログラム 2 による供試体の温度勾配

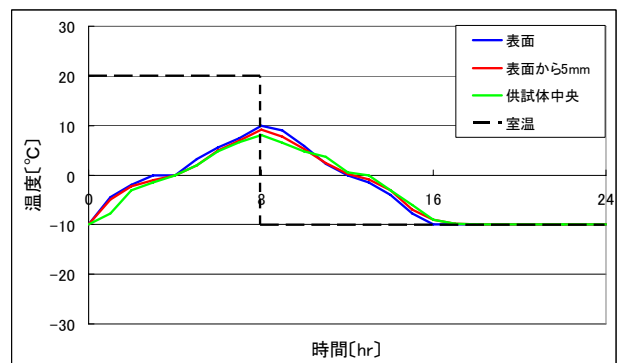


図-5 廣川の研究 4) の供試体の温度勾配

3. 凍結融解試験

凍結融解試験の手順を以下 1)～6)に示す。

- 1) 試験面上に水深が 10mm の高さになるように試験水を満たす。
- 2) 水分の蒸発を防ぐため、試験面をラップで覆う。
- 3) ユニット型温湿度供給装置と接続した部屋内でプログラム運転により、16 時間の凍結作用、8 時間の融解作用を与える。
- 4) 融解後は試験水を毎回新しいものと交換し、3)の凍結融解を 1 サイクル/日として計 20 サイクル行い、1 サイクルごとに試験面を目視観察する。
- 5) 4)の後で供試体表面に剥離が認められた場合は、剥離部分を OHP シートにトレースしてから剥離面積をプランメータにより測定し、累積剥離面積を求め、凍結融解開始時の全露出部分に対する割合を剥離率

とし、剥離ごとに算出し、剥離の程度の評価に用いる。

- 6) 定期的に写真撮影を行い、剥離状況を記録する。

4. 結果及び考察

図-6 は水セメント比 50%で作製した供試体に、図-3の温度勾配条件で凍結融解試験を行って得られた結果を示したものである。図-6 より、28w Na, 5w23d Na の2パターンが剥離しているのがわかるが、それぞれの剥離率をみると 0.2%以下と、20 サイクルではほとんど剥離していない状態であると考えていい(写真-3, 4 参照)。

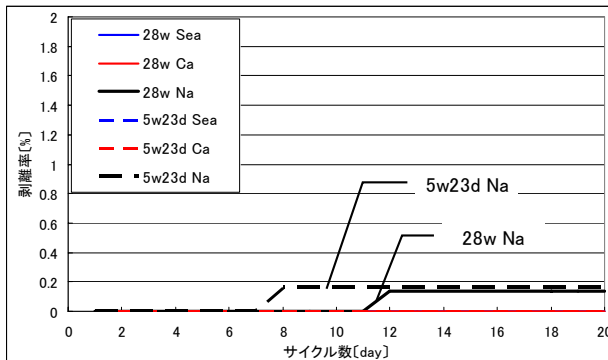


図-6 剥離率 (W/C=50%)



写真-3 28w Na



写真-4 5w23d Na

図-7 は水セメント比 50%で作製した供試体に、図-4の温度勾配条件で凍結融解試験を行って得られた結果を示したものである。図-7 より、28w Sea, 28w Na, 5w23d Sea, 5w23d Na の4パターンが剥離しているのがわかる。中でも、海水を試験水として用いた供試体が、養生方法は異なるが剥離率は約 1.9%と、際立って剥離しているのがわかる(写真-5 参照)。

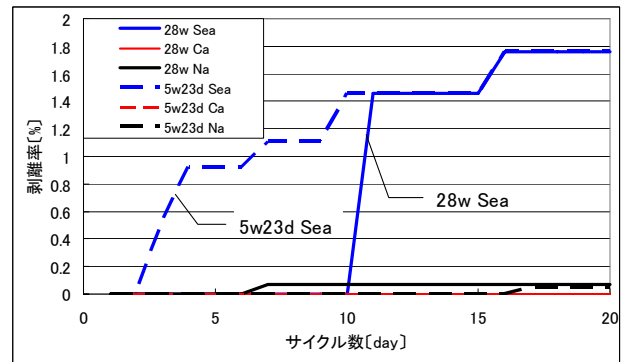


図-7 剥離率 (W/C=50%)



写真-5 28w Sea

図-8 は、廣川の研究⁴⁾によって得られた結果を、剥離率とサイクル数の関係で示したものである。廣川の研究⁴⁾と今回の試験方法の相違点は凍結融解作用を与える装置及び試験室である。その他の条件は同様であるので、凍結融解試験を行う際の供試体の温度勾配、特に凍結速度に何らかの要因があると考えられる。その点について廣川の研究結果と今回の実験結果を比較検討していく。

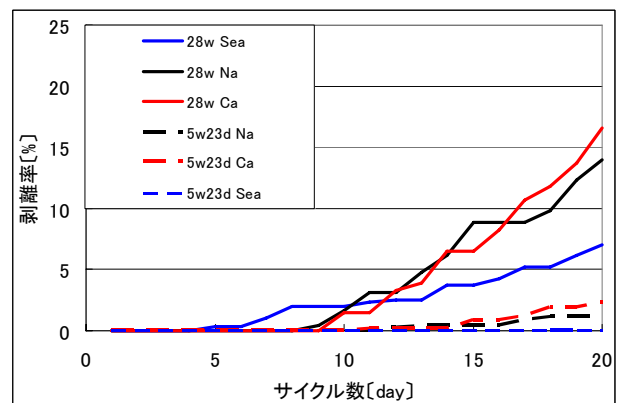


図-8 剥離率 (W/C=50%)⁴⁾

図-9 に各温度勾配条件での表面温度と時間の関係を示し、図-10 に各温度勾配条件で凍結融解試験を 20 サイクル行って得られた W/C=50%, 28w, Sea の実験パターンの剥離率とサイクル数の関係を示した。

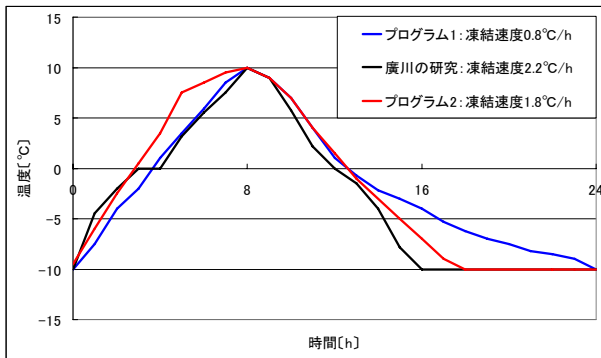


図-9 各温度勾配条件での供試体の表面温度

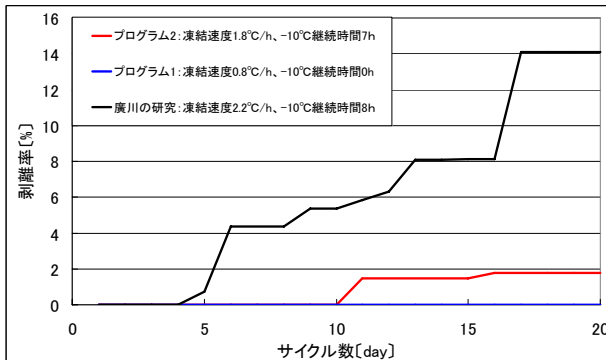


図-10 剥離率(W/C=50% 28w Sea)

図9、10から、供試体の表面温度の凍結速度が遅いほど、 -10°C 継続時間が短いほど、剥離率が小さくなっている。これは、凍害はコンクリート中の水分の凍結によって生じる体積膨張による圧力やそれに伴う未凍結水の移動により発生する圧力により発生する⁶⁾ということから、凍結速度が遅くなることにより、コンクリート中の水分の凍結による膨張圧が緩和され、剥離程度が小さくなったと考えられる。また、 -10°C 継続時間が短くなるほど、細孔に侵入した水分(試験水)の凍結による膨張圧を受け続ける時間が短くなることから、剥離が発生しづらくなったとも考えられる。

図-11は廣川、前川の研究⁷⁾の外気温に伴うコンクリート上面から5mmの温度勾配(乾燥状態で、日射時間6.5hの条件)を示したものである。この凍結速度は約 $1.7^{\circ}\text{C}/\text{h}$ となった。

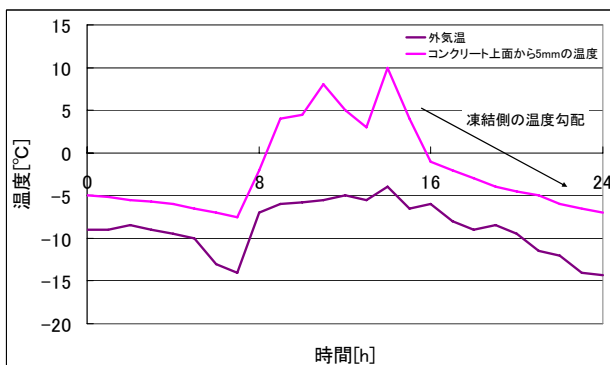
図-11 廣川、前川の研究⁷⁾の外気温に伴う
コンクリート上面から5mmの温度勾配(天候：晴れ)

図-11の凍結速度と、図-9の各供試体の凍結速度を比較すると、今回の実験によって得られたプログラム2が比較的同程度の凍結速度になっていて、廣川の研究⁴⁾の凍結速度はより急となっているのがわかる。図-10に示されるように凍結速度が速いほど剥離が生じていることから、廣川の研究⁴⁾の温度勾配による試験方法は、促進試験として適していると考えられるが、湿潤状態であるのに乾燥状態の温度勾配より急であることから、より厳しい温度環境といえる。また、恒温室と冷凍室を行き来する方法であるので、作業性という面で効率的な条件とはいえない。それをプログラム運転による温度自動制御によって一つの試験室で行う今回の試験方法のほうが効率的な条件といえる。また、プログラム2と図-11の凍結速度が同程度の凍結速度となっていて、その温度条件により剥離を生じていることから、粗骨材露出現象を再現させるための、プログラム2による温度自動制御の試験方法を確立できたといえる。

5. まとめ

以上のことをまとめると、以下のことがわかった。

- 1) 供試体の表面温度の凍結速度が遅いほど、 -10°C 継続時間が短いほど剥離が減少する傾向を示した。
- 2) ユニット型温湿度供給装置で、凍結融解作用の供試体表面温度を $+10^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ としても、粗骨材露出現象の再現がほぼ可能であることがわかった。
- 3) プログラム1では、ほとんど粗骨材露出現象はあらわれなかった。
- 4) プログラム2によって、プログラム運転による温度自動制御による方法で粗骨材露出現象の再現にほぼ成功したことから、粗骨材露出現象の再現のための試験方法として確立できたと考えられる。

参考文献

- 1) 鮎田、桜井、小笠原：流水海域に暴露したコンクリートの耐火性状、セメント・コンクリート論文集、No.47, pp.474~479, 1993
- 2) 佐伯、鮎田、前川：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.151-162, 1982
- 3) 木村、安藤、鮎田、桜井、小笠原：寒冷地海洋環境下におけるコンクリートの劣化防止対策、土木学会北海道支部論文報告集、平成5年度, pp.1024, 1994
- 4) 廣川 一巳：海洋コンクリート構造物における粗骨材露出現象の再現のための基礎的実験、苫小牧工業高等専門学校紀要第40号, pp.53-58, 2005
- 5) American Society for Testing and Materials : Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM C 672, Annual Book of ASTM Standards, part 14, pp.402, 1993
- 6) 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、凍害(その1)、コンクリート工学, Vol.32, No.10, pp.131-136, 1994
- 7) 廣川、前川：コンクリート縁石の乾燥収縮と劣化、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(A), 1998