

[1096] 高強度軽量コンクリートの凍結融解特性について

正会員 ○橘 大介 (清水建設技術研究所)
 正会員 今井 実 (清水建設技術研究所)
 正会員 岡田武二 (清水建設技術研究所)

1. まえがき

高強度軽量コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす主要因は、既に報告したように¹⁾²⁾、軽量粗骨材の含水率ならびにコンクリートの水分飽和度である。含水率5%程度以下の軽量粗骨材を使用するか、プレウェッチング軽量粗骨材を使用した場合でも乾燥によりコンクリートの水分飽和度を5%程度以下に低減すれば、優れた耐凍害性が確保できることが明らかになっている。これらの研究結果は、ASTM-C666 A法(急速水中凍結融解試験方法)に準拠した方法で300回の凍結融解作用後にその耐凍害性を評価したものである。しかしながら、北極海のような苛酷な気象条件下に暴露されるコンクリートは年間に数10回もの凍結融解作用を受けるので、構造物の耐用年数期間中には試験で一般に定められる回数をはるかに上回る凍結融解作用を受けることになる。それと同時に最低温度も-50℃程度まで下降することが予測され、さらにコンクリートが海水にさらされるため劣化が促進される³⁾⁴⁾ことが危惧される。また、耐凍害性の評価を供試体の重量変化や相対動弾性係数といった非破壊試験方法で判定してきたが、実際のコンクリート強度や非破壊試験による諸係数と強度との関係について論じた報告が殆どないのが現状である。

本研究は、上記事項を踏まえて、極寒の海洋環境下で構造用材料として供用される高強度軽量コンクリートの長期的な凍結融解作用に対する抵抗性に関して実施したものであり、耐凍害性に影響を及ぼす要因として、軽量粗骨材の含水率、コンクリートの空気量、養生方法、さらに水結合材比、混和材およびセメントの種類についてもとりあげ、スケーリングによる重量減少量(%)ならびに耐久性指数(%)を特性値として、実験検討したものである。また、併せて耐凍害性を評価する指標の1つである相対動弾性係数とコンクリート強度との相関についても若干の検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料は表-1に示すとおりである。セメントおよび混和材は各々2種類ずつ選定したが、主に普通ポルトランドセメントおよびシリカフェウムを用いた配合を中心に実験を行なった。人工軽量粗骨材は、造粒型のもので含水率が0、27.4、28.2%の絶乾か充分にプレウェッチングしたものを使用した。

コンクリート配合は、表-2に示す15種類とした。配合No. ①~

表-1 使用材料

使用材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重=3.16, 比表面積(ブレン値)=3170cm ² /g
	高炉セメント (B種)	比重=3.00, 比表面積(ブレン値)=3780cm ² /g, スラグ量=56%
混和材	シリカフェウム	比重=2.19, 比表面積(BET法)=198400cm ² /g
	フライアッシュ	比重=2.20, 比表面積(ブレン値)=2770cm ² /g
粗骨材	造粒型人工軽量粗骨材	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.26, 粗粒率=6.49
細骨材	川砂(鬼怒川産)	表乾比重=2.59, 吸水率=2.03%, 粗粒率=2.78
混和剤	高性能減水剤	比重=1.20, 主成分-ポリアルキルアリルスルホン酸塩
	空気連行剤	主成分-天然樹脂酸塩
	流動化剤	比重=1.14, 主成分-ポリアルキルアリルスルホン酸塩
水	水道水	-

⑬の13配合は、海洋環境下での長期的な耐凍害性の検討を主目的としており、配合No. ⑭および⑮の2配合は、相対動弾性係数と強度との相関を検討することを目的としている。前者の13配合は、表-3に示す耐凍害性に影響を及ぼすと考えられる要因に基づき選定した。すなわち、軽量粗骨材の含水率、空気量、養生方法の3要因に関しては各2水準をとり実験計画法によりこれら因子をL₈直交表に割り付けた8配合（No. ①～⑧）と、さらに混和材の種類と有無、セメントの種類および水結合材比を変えた5配合を加えて13配合とした。なお、これら15配合のフレッシュコンクリートの物性と凍結融解試験開始前の圧縮強度は表-4に示すとおりである。

2.2 実験方法

凍結融解試験は以下に示す方法で行なった。配合No. ①～⑬の13配合は、10×10×40cmの角柱供試体を用い、材令28日まで標準水中養生か気中乾燥養生のいずれかの方法で養生した後、凍結融解試験を実施した。ただし、気中乾燥養生は、スチーム養生、標準水中養生した後の24日間を恒温恒湿室（温度20±1℃、湿度60±5%RH）で養生する方法とした。試験方法は、淡水のかわりに人工海水（ASTM-D1141に準拠した人工海水-比重1.028、PH8.2）を使用する他はASTM-C666 A法に準拠し、繰り返し回数は1500回とした。1500回の凍結融解サイクルを終了した後、劣化程度の少ない配合の供試体に関しては、さらに試験条件を厳しくした極低温下の凍結融解試験（凍結最低温度-50℃、融解最高温度10℃）を1回/日で25回実施した。なお、硬化コンクリートの気泡組織の測定は、

表-2 コンクリート配合

NO	配合名	粗骨材の含水率 (%)	水結合材比 W/CC (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (結合材の重量%)		
					水 W	結合材 CC			粗骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤	A E剤	流動化剤
						セメント C	フライアッシュ FA	シリカ FUM SF					
①	DSM	0.0	28.0	38	160	520	-	52	607	482	1.3	0.035	0.45
②	DSS												
③	DLM												
④	DLS												
⑤	PSM	27.4	28.0	38	160	520	-	52	607	482	1.3	0.035	0.45
⑥	PSS												
⑦	PLM												
⑧	PLS												
⑨	DLM-F	0.0	28.0	38	160	520	-	52	573	455	1.25	0.08	0.5
⑩	DLM-N												
⑪	DLM-MC												
⑫	55N												
⑬	55S	28.2	50.0	44	175	350	-	-	757	603	-	0.035	-
⑭	NDT-1												
⑮	NDT-2												

* 配合⑨のみ高炉セメントを使用し、その他は全て普通セメントを使用した。

表-3 凍結融解試験の要因と水準

NO	配合名	軽量粗骨材の含水率 (%)	空気量 (%)	養生方法	セメントの種類	混和材の種類	水結合材比 (%)
①	DSM	0.0	3±1	標準水中養生	普通セメント	シリカフェューム	28.0
②	DSS			気乾養生			
③	DLM			標準水中養生			
④	DLS			気乾養生			
⑤	PSM	27.4	3±1	標準水中養生	普通セメント	シリカフェューム	28.0
⑥	PSS			気乾養生			
⑦	PLM			標準水中養生			
⑧	PLS			気乾養生			
⑨	DLM-F	0.0	6±1	標準水中養生	普通セメント	フライアッシュ	28.0
⑩	DLM-N					無	
⑪	DLM-MC					高炉セメント	
⑫	55N					シリカフェューム	
⑬	55S	普通セメント	シリカフェューム	55.0			

表-4 フレッシュコンクリートの物性と圧縮強度

NO	配合名	フレッシュコンクリートの物性			圧縮強度** (材令28日) (kgf/cm ²)
		スランブ (cm)	空気量* (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	
①	DSM	20.0	3.1	1867	635
②	DSS	16.5	2.8	1865	597
③	DLM	20.5	6.6	1792	576
④	DLS	20.5	5.1	1804	580
⑤	PSM	20.5	2.6	1975	571
⑥	PSS	19.0	2.7	1985	552
⑦	PLM	20.5	5.3	1935	605
⑧	PLS	20.5	5.6	1928	554
⑨	DLM-F	20.0	5.0	1795	500
⑩	DLM-N	23.0	6.9	1769	478
⑪	DLM-MC	21.5	4.9	1808	487
⑫	55N	10.5	5.9	1769	341
⑬	55S	6.0	5.3	1764	418
⑭	NDT-1	19.5	6.4	1927	532
⑮	NDT-2	15.5	6.6	1869	241

* 空気量の測定は、容積法によった。

** 配合⑨、⑮の圧縮強度は、材令14日のものである。

ASTM-C457 リニアトラバース法で行なった。

また、配合No. ④および⑤の2配合は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体（一部、角柱供試体を使用）を用い、材令14日まで標準水中養生した後、淡水による凍結融解試験（ASTM-C666 A法）を行なった。供試体の劣化程度を非破壊試験により測定算出される相対動弾性係数で評価し、それに併せて適宜、供試体を強度試験に供した。

3. 実験結果と考察

3.1 耐凍害性

(1) スケーリングによる重量減少

図-1、写真-1および表-5は凍結融解作用による供試体のスケーリング劣化状況およびスケーリングによる重量減少量の試験結果である。各種要因がスケーリング劣化に及ぼす影響は次のとおりである。

■ 暴露環境および養生方法の影響

絶乾粗骨材を使用し水結合材比28%のコンクリートを標準水中養生した場合（配合No. ①、③、⑨、⑩、⑪の5配合）のスケーリングによる重量減少量は、配合No. ①の結果を除けば、凍結融解サイクル数300および1500回で各々約4~6%および7~13%になった。ほ

ぼ同一配合のコンクリートが淡水中で凍結融解作用を300回受けた時の重量減少量が1%以下であったことと比較して、極めて大きい値になった。このようにスケーリング劣化が助長されたのは、コンクリートが海水にさらされることにより毛細管空隙内の塩溶液濃度が上がり浸透圧を形成したこと、カルシウムシリケート水和物が

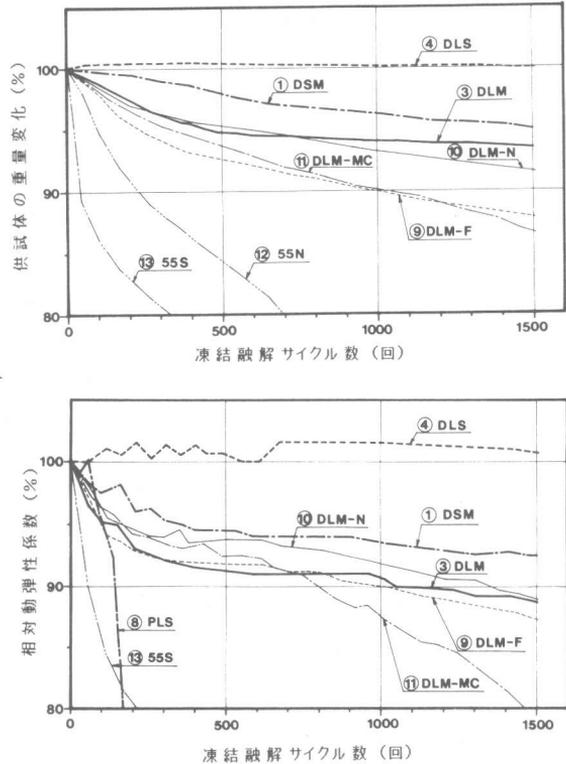


図-1 凍結融解試験結果（凍結融解1500回）



写真-1 凍結融解1500回終了時の供試体

海水により損傷されたこと⁵⁾⁶⁾等の理由によると思われる。

一方、気中乾燥養生したコンクリート（配合No. ②、④の2配合）は、凍結融解サイクル数1500回終了時においても殆ど重量減少は認められず、標準水中養生したものと比較してスケーリング劣化に対する抵抗性は著しく向上した。これは、乾燥によりコンクリートの組織が緻密化したため等によるものと思われる。

■空気量の影響

空気量3±1%と6±1%のコンクリート（配合No. ①と③および②と④の4配合）で比較したところ、凍結融解サイクル数1500回における重量減少量には大差のない結果になった。これは、適正空気量の連行で大幅にスケーリング量を低減できるとする⁷⁾、水セメント比50%程度の普通コンクリートを対象に行なわれた試験結果と異なったものになった。

■結合材の影響

結合材の種類の違い（配合No. ③、⑨、⑩、⑪の4配合）によって重量減少量に差が認められた。重量減少量は、普通セメントにシリカフュームを組み合わせたものが最も少なく、セメントを高炉セメントにした場合が最も多くなった。これは結合材の水和速度や粉末度の相違によるコンクリートの緻密さの差および水和生成物の組成の相違等によるものと推測される。

■水結合材比の影響

水結合材比55%のコンクリート（配合No. ⑫および⑬）の重量減少量は、凍結融解1500回において約50%程度になり、水結合材比28%のコンクリートの6～8倍の値になった。コンクリートのスケーリング劣化は、富配合低水結合材比にすることで著しく向上することが確認された。

■凍結最低温度の影響

1500回の凍結融解試験後に行なった25回の極低温下の凍結融解試験では、凍結最低温度の低下によるスケーリング劣化の増大は認められなかった。

(2) 耐久性指数

凍結融解作用による供試体の相対動弾性係数の変化は図-1、2に、所定試験サイクル終了時の耐久性指数

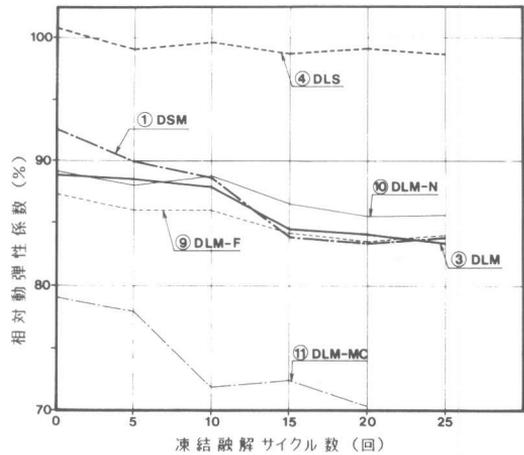


図-2 極低温下の凍結融解作用による相対動弾性係数の変化

表-5 硬化コンクリートの気泡組織と凍結融解試験結果

No	配合名	硬化コンクリートの気泡組織			凍結融解試験					
		比表面積 α (mm ² /mm ³)	空気量 A (%)	気泡間隔係数 L (μm)	300サイクル時		1500サイクル時		試験終了時*	
					重量変化 (%)	耐久性指数 DF ₃₀₀ (%)	重量変化 (%)	耐久性指数 DF ₁₅₀₀ (%)	重量変化 (%)	耐久性指数 DF _r (%)
①	DSM	21.3	3.2	311	99.1	95.3	95.0	92.4	95.2	83.9
②	DSS	14.5	3.1	460	100.6	100.6	100.8	102.2	101.1	91.7
③	DLM	28.7	6.0	172	96.3	92.1	93.4	88.7	93.5	83.3
④	DLS	30.0	4.9	181	100.5	101.3	100.0	100.7	99.9	98.7
⑤	PSM	15.8	2.6	458	100.8	7.2	-	1.4	-	-
⑥	PSS	18.1	3.0	373	101.9	36.7	-	7.3	-	-
⑦	PLM	30.3	6.1	162	99.7	9.8	-	2.0	-	-
⑧	PLS	32.6	5.4	160	101.8	40.4	-	8.1	-	-
⑨	DLM-F	27.6	5.1	194	94.2	91.8	87.9	87.2	87.8	84.0
⑩	DLM-N	-	-	-	96.3	94.1	91.5	89.1	91.7	85.7
⑪	DLM-MC	-	-	-	95.2	93.3	86.6	79.1	86.5	70.4
⑫	S5N	-	-	-	88.1	76.6	47.8	54.6	-	-
⑬	S5S	-	-	-	80.5	77.2	49.4	72.7	-	-

* 1500サイクル終了後、極低温下の凍結融解試験25回を実施して試験終了とした。(ただし、配合No⑫のDLM-MCは20回で試験を終了した。)

は表-5に示すとおりである。海水中で300回の凍結融解作用を受けた供試体の耐久性指数は、淡水中での試験結果と比較して¹²⁾大差なく、ほぼ同等の結果が得られた。プレウェッチング粗骨材を使用した場合、高炉セメントを使用した配合および水結合材比55%の配合のコンクリートを除けば、極低温下での凍結融解試験を25回終了した時点においても80%以上の耐久性指数が確保された。この結果を各種要因別にみると、以下のとおりである。

■ 軽量粗骨材の含水率、空気量および養生方法の影響

L_a直交表に割り付けた8配合のコンクリートに関しては、凍結融解サイクル数300および1500回における耐久性指数への各因子の影響を判定するために分散分析を行なった。その結果、粗骨材の含水状態および養生方法の2因子の各水準間に有意水準1%で有意差があると判定されたが、空気量に関しては有意差なしと判定された。これは文献8)に示されている高強度軽量コンクリートの場合、空気量1~2%、気泡間隔係数500~1000μmのnon-AEコンクリートでも耐久性指数が90%以上になっている(図-3)ことと一致するものである。すなわち、富配合低水結合材比の緻密なコンクリートは、普通コンクリートでも指摘されているように⁹⁾¹⁰⁾空気量および気泡間隔係数は必ずしも耐凍害性を決定する主要因にはならないと考えられる。

■ 結合材の影響

混和材の種類および有無による耐久性指数への影響は殆どなく、極低温下の凍結融解試験終了時においてほぼ同等の耐久性指数が得られた。しかしながら、高炉セメントを使用した場合の耐久性指数は、普通セメントを使用した場合に比較して15%程度小さくなった。高炉セメントは、一般に普通セメントと比較して化学抵抗性が大きく、耐凍害性も遜色がないと言われているが、500回以上の長期にわたる凍結融解作用下ではこのような結果になった。

■ 凍結最低温度の影響

25回の極低温下の凍結融解試験結果から、凍結最低温度が低下すると相対動弾性係数の低下割合がいくぶん大きくなる傾向が認められた。これは、凝固点降下した細孔径内の水が凍結最低温度の低下により凍結するため¹¹⁾と考えられる。

3.2 相対動弾性係数と強度との関係

凍結融解作用を受けたコンクリートの相対動弾性係数と

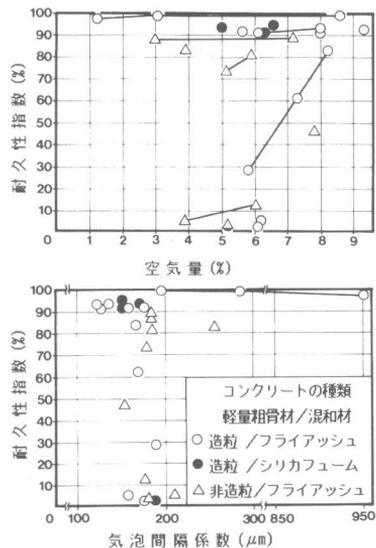


図-3 空気量および気泡間隔係数と耐久性指数との関係(文献8)

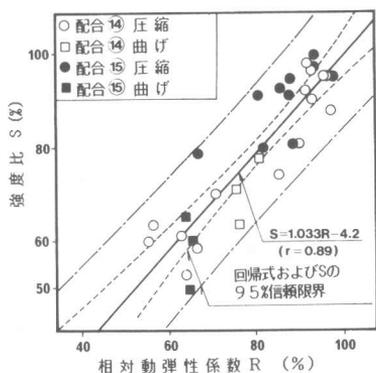


図-4 相対動弾性係数と強度比との関係

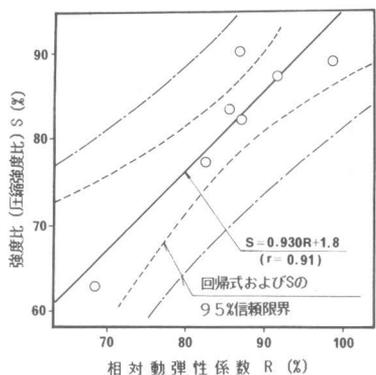


図-5 相対動弾性係数と強度比との関係

強度比(%) (凍結融解作用を受ける前の強度に対する受けた後の強度の比) との間には、図-4に示すような相関があり、相対動弾性係数の低下割合は強度の低下割合とほぼ等しいという結果が得られた。この結果はプレウェッチング粗骨材を用いた早期に劣化が進む場合の結果であるが、図-5に示すように、絶乾粗骨材を用い長期間凍結融解作用を受けたコンクリート(配合No. ①~④および⑨~⑪の7配合)においても同等の結果が得られた。ただし、これら7配合の供試体は、極低温下の凍結融解試験後、立方体に成型して圧縮強度試験を行なったものである。通常、動弾性係数は圧縮強度の平方根に概ね比例するが、凍結融解作用により劣化したコンクリートは、動弾性係数の低下に見合っただけの圧縮強度の低下は起こっていない。これは、共振法による測定がコンクリート表層部の劣化を鋭敏に捕えるためと思われる。

4. まとめ

極寒の海洋環境下における高強度軽量コンクリートの長期的な耐凍害性をスケーリング劣化による重量減少量と耐久性指数を特性値として検討した結果、以下のことが言える。

- (1) 絶乾状態の軽量粗骨材と普通ポルトランドセメントを使用した高強度軽量コンクリートは、本実験で行なった最も苛酷な試験条件において優れた耐凍害性を示した。すなわち、スケーリングによる供試体の重量減少量は、海水にさらされることにより淡水中よりは若干増加するものの、その量は僅かであり、水結合材比55%のコンクリートの重量減少量と比較すれば1/8~1/6であった。さらに耐久性指数は、試験終了時において80%以上が確保された。
- (2) 高強度軽量コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす要因は、軽量粗骨材の含水率、コンクリートの養生方法、および結合材の種類である。空気量に関しては、 $3 \pm 1\%$ と $6 \pm 1\%$ の間で比較したところ、両者に有意な差は認められなかった。
- (3) 凍結融解作用を受けたコンクリートの強度と非破壊試験によって測定算出される相対動弾性係数との間には相関があり、強度の低下割合は相対動弾性係数の低下割合とほぼ一致する結果になった。

参考文献

- 1) 橋 大介他3名:高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp237-240、1984
- 2) 橋 大介、今井 実、岡田 武二:乾燥が高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に与える影響、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp73-76、1985
- 3) 長谷川 寿夫、洪 悦郎:コンクリートの凍害に及ぼす凍結最低温度の影響について、セメント技術年報XXVI、pp361-364、1972
- 4) 藤井 卓、藤田 嘉夫:硬化セメントペーストのスケーリング劣化に及ぼす塩化物の影響、土木学会論文集、第360号、pp129-138、1985
- 5) Cordon, W.A.: Freezing and thawing of concrete-Mechanisms and control, ACI Monograph, No. 3, 1966
- 6) Hochstetter, R.: The pore structure of some building materials and their resistance against the combined attack of frost and salt solutions, Int. Symposium RILEM /IUPAC, No. 6, F51-66, 1973
- 7) 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、pp93-96、1986
- 8) Tachibana, D., Imai, M. and Okada, T.: Qualities of high-strength lightweight concrete used for construction of arctic offshore platform, ASME, Proc. of the 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) Symposium, Vol. II, pp361-367, 1986
- 9) 小林 正凡、田中 弘:高強度コンクリートの凍結融解にたいする抵抗性について、セメント技術年報、XXVIII、pp295-297、1974
- 10) 服部 健一他3名:高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの耐凍結融解性、セメント技術年報、34、pp329-332、1980
- 11) Helmuth, R.A.: Capillary size restrictions on ice formation in hardened portland cement pastes, PCA, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, pp855-869, 1960