

高性能軽量コンクリートの耐海水性に関する研究

笹 倉 伸 晃^{*1} 山 本 和 範^{*1}
舟 橋 政 司^{*1} 横 田 弘^{*2}

要 旨

近年，従来の軽量骨材に比べて，高強度で低吸水性の独立空隙型高性能軽量骨材が開発され¹⁾，凍結融解抵抗性に優れた高性能軽量コンクリートの製造が可能となってきた．また，海洋構造物の大型化に伴い，喫水などの制限から，これらに用いるコンクリートを軽量化することは大きなメリットがある²⁾．しかしながら，高性能軽量コンクリートを海洋構造物に適用するためには，耐海水性を把握しておく必要がある．そこで，高性能軽量骨材として，真珠岩と堆積粘土を原料とする２種類の人工軽量骨材を用いて，高性能軽量コンクリートの耐海水性を把握することを目的として，耐海水性促進試験を実施した．その結果，いずれの骨材を用いた高性能軽量コンクリートとも優れた耐海水性を有していることが分かった．

キーワード 高性能軽量コンクリート / 高性能軽量骨材 / 耐海水性 / 促進試験 / 全塩分量

目 次

- | | |
|-------------|-----------------|
| １．はじめに | ４．耐海水性促進試験の促進効率 |
| ２．実験概要 | ５．まとめ |
| ３．実験結果および考察 | |

A STUDY ON THE DURABILITY TO THE SEA WATER OF HIGH EFFICIENT RIGHTWEIGHT CONCRETE

Nobuaki SASAKURA Kazunori YAMAMOTO
Masashi FUNAHASHI Hiroshi YOKOTA

Synopsis:

The artificial super lightweight aggregate (SLA) with isolated voids has recently been developed, which has higher strength and lower absorption than a conventional artificial lightweight aggregate. SLA makes it possible to manufacture SLA concrete that has high freeze-thaw resistance. Use of lightweight concrete to build port or marine structures is of great advantage in this regard as it releases some of the restrictions such as draft restrictions imposed by enlargement of structures. It is necessary, however, to verify the resistance of SLA concrete to seawater, before applying SLA concrete to marine structures. The accelerated test is undertaken to evaluate the resistance of SLA concrete to seawater by using two kinds of SLA made of a pearl rock or deposition clay. As a result, it is concluded that both of SLA concrete have enough resistance against seawater.

1. はじめに

近年、海洋構造物の大型化に伴い、喫水の制限から、海上でコンクリートを打継ぐケースが少なくない。このようなケースにおいて、軽量コンクリートを用いることは、施工の合理化と経済性を追及する上で、有望な手法であると考えられる。しかしながら、港湾あるいは海洋構造物に軽量コンクリートを適用することは、きわめて限られた使用実績に留まっている。これは、厳しい海洋環境下において、従来型の人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートの耐久性や骨材自体の強度に対する懸念が主要因であると考えられる。

これに対し、新しい材料や製造方法により開発された造粒型で独立空隙を有する低吸水性の高性能軽量骨材は、従来の人工軽量骨材に比べて高強度で、吸水率が著しく改善されている。そのため、これを用いた高性能軽量コンクリート(SLA コンクリート)は、同一の単位容積質量の従来型人工軽量骨材コンクリートよりも高強度が得られ、凍結融解抵抗性などの耐久性能を著しく向上させることが可能となってきた。しかし、高性能軽量コンクリートを海洋構造物に適用するためには、海洋環境下における材料性能を把握しておく必要がある。

コンクリートの耐海水性を評価するためには、実際にコンクリートが曝される環境下に試験体において、その物性の変化の測定を行う方法が最も適切であるが、このような方法では結果を得るまでに長期間を要することとなる。したがって、コンクリートの耐海水性を短期間で評価するために促進試験を行う必要がある。しかしながら現時点では、耐海水性を短期間で評価する試験方法として確立されたものはなく、本研究では、西林らが提案

した方法³⁾を参考に、海水浸漬と乾燥を繰り返す劣化促進試験方法を採用した。高性能軽量コンクリートを製造するために、主原料の異なる2種類の高性能人工軽量骨材を用いた。ひとつは、真珠岩を主原料とした高性能軽量骨材(SLA-P)であり、他方は堆積粘土を主原料とした高性能軽量骨材(SLA-C)である。これらを用いてSLAコンクリートの耐海水性促進試験を実施し、耐海水性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) シリーズ1(真珠岩：SLA-P)

実験に使用したコンクリートの使用材料およびコンクリートの配合を表-1および表-2に示す。SLAコンクリートに使用した人工軽量骨材は、真珠岩を主原料とする造粒型の高性能人工軽量骨材(以下、SLA-P:写真-1参照)であり¹⁾、形状は球形である。配合としては、粗骨材に全てSLA-Pを使用した配合(L)、SLA-Pと碎石を混合(体積比で4:1)して使用した配合(B)、および普通コンクリート(N)の3種類とし、SLA-Pは絶乾状態で使用し、練混ぜ水にSLA-Pの24時間吸水量を加えた。また、コンクリートの設計基準強度は24N/mm²とした。

(2) シリーズ2(堆積粘土：SLA-C)

実験に使用したコンクリートの使用材料およびコンクリートの配合を表-3および表-4示す。使用した人工軽量骨材は堆積粘土を主原料とする高性能人工軽量骨材(以下、SLA-C:写真-2参照)(以下、骨材密度の違いにより、SLA-C0.85およびSLA-C1.2)であり、形状は非球

表-1 使用材料(SLA-P)

使用材料	種 類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.15g/cm ³
細骨材	陸砂	S	表乾密度:2.59g/cm ³
粗骨材	高性能軽量骨材	SLA-P0.85	絶乾密度:0.82g/cm ³ , 24h 吸水率:2.61%
		SLA-P1.2	絶乾密度:1.21g/cm ³ , 24h 吸水率:0.93%
	碎石	G	G _{max} =20mm, 表乾密度:2.72g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	特殊分離低減型ポリカルボン酸塩系
	空気量調整剤	AD	リグニルスルホン酸化合物ポリオール複合体

表-2 コンクリートの配合条件および配合(SLA-P)

配合種別	記号	スラング ¹⁾ （スラング ¹⁾ ） （mm）	水セメント比 W/C （%）	空気量 （%）	細骨材率 s/a （%）	単位量（kg/m ³ ）						混和剤	目標単位容積質量 ²⁾ （kg/m ³ ）
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				
									SLA-P 0.85 ¹⁾	SLA-P 1.2 ¹⁾	G		
高性能軽量 コンクリート	L	400	45.0	5.5	54.2	170	378	919	-	363	-	S P	1833
	B					170	378	919	197	-	163		1832
普通 コンクリート	N	120	57.0	4.5	47.0	160	281	860	-	-	1017	A D	2318

1) SLA-P は絶乾質量

2)SLA-P の24h 吸水量を加算した値。



(a)外観 (b)骨材断面 (c)コンクリート断面

写真 - 1 高性能軽量骨材 (SLA-P)



(b)骨材粒

写真 - 2 高性能軽量骨材 (SLA-C)

表-3 使用材料(SLA-C)

使用材料	種 類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	S	表乾密度:2.61g/cm ³
粗骨材	高性能軽量骨材	SLA-C0.85	絶乾密度:0.83g/cm ³ , 24h 吸水率:2.74%
		SLA-C1.2	絶乾密度:1.15g/cm ³ , 24h 吸水率:2.69%
	碎石	G	G _{max} =20mm, 表乾密度:2.72g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	特殊分離低減型ポリカルボキシル酸塩系
	空気量調整剤	AD	リグニル硫酸化合物ポリオール複合体

表-4 コンクリートの配合条件および配合 (SLA-C)

配合種別	記号	スラング 70- (スラング) (mm)	水セメント 比 W/C (%)	空 気 量 (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混 和 剤	目標単位 容積質量 ⁴⁾ (kg/m ³)	
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				
									SLA-C 0.85 ³⁾	SLA-C 1.2 ³⁾			G
高性能軽 量コンクリート	L1	450	45	5.5	47.3	165	367	820	—	403	—	SP	1756
	L2								291	—	—		1644
	L3								232	—	190		1775
普通 コンクリート	N1	120							—	—	948		2300

3) SLA-C は絶乾質量

4) SLA-C の 24h 吸水量を加算した値。

形である。配合としては、粗骨材に全て SLA-C1.2 を使用した配合 (L1)、粗骨材に全て SLA-C0.85 を使用した配合 (L2)、SLA-C0.85 と碎石を混合(体積比で 4:1)して使用した配合 (L3)、および普通コンクリート (N1) の 4 種類とし、コンクリートの設計基準強度は 24N/mm² である。

を 1 サイクルとし、これを 60 サイクルまで合計 420 日間繰り返すこととした。その他の比較試験条件としては、「20 標準水中養生のみ」(以下、淡水のみ)、「20 人工海水浸漬のみ」(以下、海水浸漬のみ)、「20 淡水浸漬 3.5 日～60 炉中乾燥 3.5 日の乾湿繰り返し」(以下、淡水～乾燥)とした。促進試験条件および試験状況を表-5、写真-3 に示す。

2.2 耐海水性促進試験方法

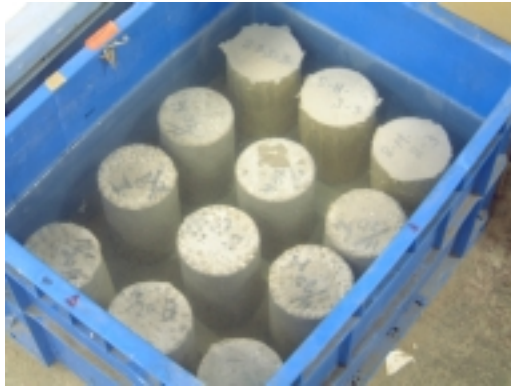
耐海水性促進試験に用いた供試体の寸法は、φ100×200mm の円柱供試体である。塩分浸透量測定用供試体は、側面方向からの塩分浸透を防止するため、供試体側面をエポキシ樹脂によりコーティングするものとし、材齢 28 日まで標準水中養生したのち促進試験を開始した。塩化物イオン量の測定は、供試体を表面から 10mm 毎に切断し、測定用試料を採取して測定するものとした。また相対動弾性係数は、毎回同一の供試体 3 本を用いて 5 サイクル毎に測定を行った。促進試験における乾湿繰り返し条件としては、「20 人工海水 (3%NaCl 溶液) 浸漬 3.5 日～60 炉中乾燥 3.5 日」(以下、海水～乾燥)

表-5 耐海水性保護試験条件

No	促進試験条件(1 サイクル)
1	人工海水浸漬 3.5 日～60 炉中乾燥 3.5 日
2	淡水浸漬 3.5 日～60 炉中乾燥 3.5 日
3	人工海水浸漬のみ
4	標準水中養生のみ

2.3 試験項目

本実験の測定項目及び測定サイクル数は、相対動弾性係数 (縦振動法) (JIS A 1127 準拠) を 5 サイクル毎とし、圧縮強度 (JIS A 1108 準拠) 静弾性係数 (JSCE-G502



(a) 20 海水浸漬



(b) 60 炉中乾燥

写真-3 耐海水促進試験状況

表-6 試験項目および実施サイクル

試験項目	シリーズ	シリーズ	サイクル数													
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
圧縮強度	●	●	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	
静弾性係数	●	●	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	
相対動弾性係数	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
塩分含有量	●	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	

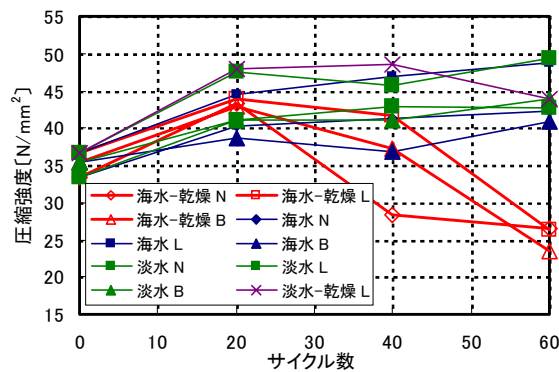


図-1 各サイクルでの圧縮強度の変化 (SLA-P)

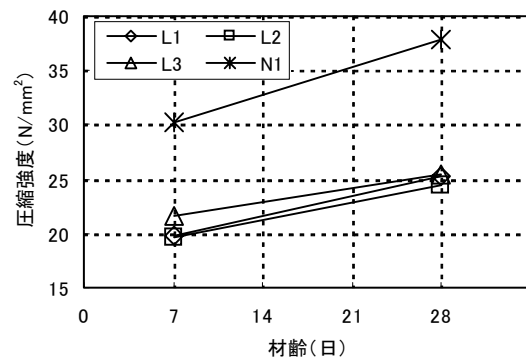


図-2 材齢 7 日および 28 日の圧縮強度 (SLA-C)

準拠)および塩化物イオン含有量(JCI-SC4 準拠)(シリーズのみ)を 20 サイクル毎に測定することとした。試験項目および実施サイクルを表-6 に示す。また、シリーズについては、凍結融解試験(JIS A 1148 準拠)を測定した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

シリーズおよびの耐海水性促進試験開始時である材齢 28 日(0 サイクル)における圧縮強度、単位容積質量を表-7 に示す。また、シリーズの各サイクルでの圧縮強度の変化を、図-1 に示す。「淡水のみ」では圧縮強度の増加が認められるが、「海水～乾燥」では、全ての配合で 20 サイクル以降、圧縮強度の急激な低下が認めら

表-7 耐海水性促進試験開始時(材齢 28 日)における圧縮強度

シリーズ	配合種別	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
	N	33.4	2350
	L	36.4	1740
	B	35.4	1830
	L1	25.2	1764
	L2	24.4	1595
	L3	25.4	1744
	N1	37.9	2334

れる。中でも、配合 N で著しい低下が見られた。また、「淡水～乾燥」の配合 L でも 60 サイクルで圧縮強度の低下が認められた。

シリーズの圧縮強度の強度発現を図-2 に示す。普通コンクリートである配合 N1 と比較して、SLP-C を用

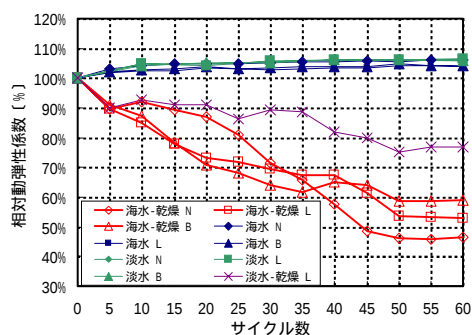
いた高性能軽量コンクリートの圧縮強度は材齢 7 日，28 日ともに小さい値となっている．また，同一水セメント比の SLA-P を使用した SLA コンクリートと比較しても，圧縮強度は小さくなる傾向が見られた．

3.2 相対動弾性係数

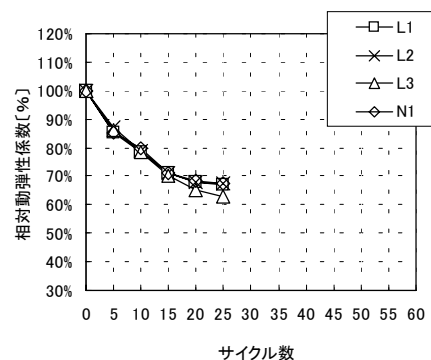
相対動弾性係数の変化を図 - 3 に示す．シリーズ の場合，「海水～乾燥」の試験条件では相対動弾性係数の低下が著しいが，配合 L と配合 B とでは顕著な差は認められない．また，配合 N でも，圧縮強度と同様に，20 サイクル以降の相対動弾性係数の低下が著しく，配合 L，B を下回っている．これらの相対動弾性係数の低下の原因としては，「海水～乾燥」の場合，コンクリートが海水成分と反応し，せっこうやカルシウム クロロ アルミネート ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$) を生成することによって，生成時の膨張圧の発生により，コンクリートの内部組織が破壊されたためと考えられる³⁾．また，配合 L の相対動弾性係数は，60 サイクル終了時において，「海水浸漬のみ」ではまったく低下していないが，「海水～乾燥」では 53%，「淡水～乾燥」でも 77%まで低下している．すなわち，明らかに 3.5 日 60 乾燥が相対動弾性係数の低下に影響を及ぼしていることがわかる．また，これらの相対動弾性係数の結果は圧縮強度と非常に良い相関がある結果となった．一方，W/C がすべての配合で同じであるシリーズ の「海水～乾燥」の相対動弾性係数の測定結果は，25 サイクルの時点でいずれの配合においても同様の低下傾向となっている．また，シリーズ において，25 サイクルの時点では SLA コンクリートの相対動弾性係数は 70%前後であり，今回用いた 2 種類の高性能軽量骨材では，骨材の違いによる耐海水性の差はほとんどないと考えられる．

3.3 塩化物イオン浸透量

耐海水性試験条件として「海水～乾燥」および「海水浸漬のみ」の 20 サイクル，40 サイクル，60 サイクル終了時のコンクリート中の塩化物イオン含有量の分布状況を図 - 4 に示す．深さ 10～50mm の範囲で見ると，配合 N に比べて，配合 L および B の塩分浸透量が小さくなっているが，これは水セメント比が小さいことに起因していると考えられる．「海水～乾燥」と「海水浸漬のみ」を比較すると，深さ 10～50mm の範囲内において，「海水～乾燥」の塩化物イオン含有量が「海水浸漬のみ」のそれより上回っていることが確認できる．また，「海水浸漬のみ」では，各サイクルで塩化物イオン含有量がほとんど変化していないが，「海水～乾燥」では，すべての配合において，サイクルが増加するに伴い，塩化物イオン含有量は増加する傾向が見られた．

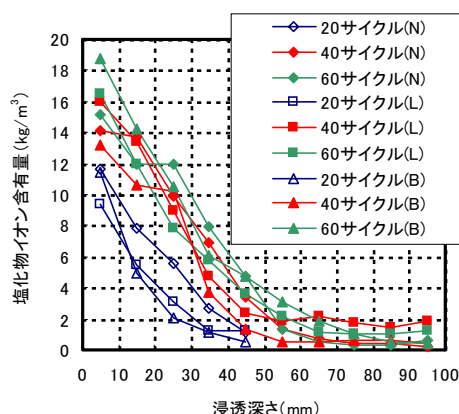


(a) シリーズ 1 (SLA-P)

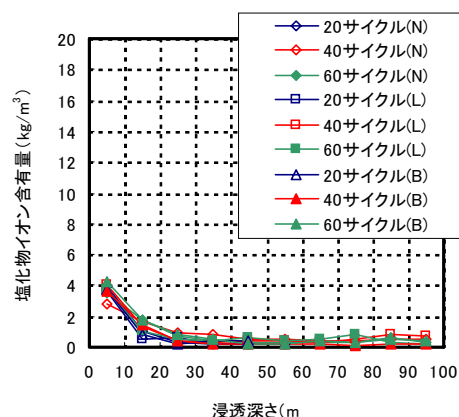


(b) シリーズ 2 (SLA-C)

図-3 各サイクルでの相対動弾性係数の変化



(a) 海水～乾燥



(b) 海水のみ

図-4 各サイクルにおける塩化物イオン浸透量

3.4 凍結融解試験

SLA-P を用いた SLA コンクリートは、優れた凍結融解抵抗性を有することが報告されており⁴⁾、SLA-C についても凍結融解抵抗性を確認した。凍結融解試験における相対動弾性係数の変化を図 - 5 に示す。この図より、配合の違いによる相対動弾性係数の差はほとんどなく、300 サイクルにおいて、すべての配合で 80%以上を維持していることがわかる。したがって、SLA-C を使用した SLA コンクリートは普通コンクリートと同等の凍結融解抵抗性を有していると考えられる。

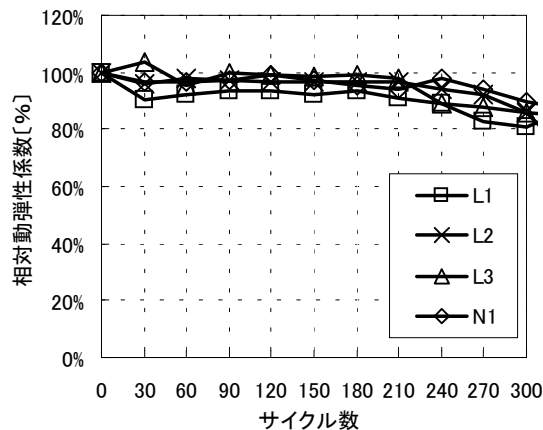


図-5 凍結融解試験における動弾性係数の変化 (SLA-C)

4. 耐海水性促進試験の促進効率

西林は淡水中あるいは海水中（温度 20℃）浸漬 24 時間と乾燥（60℃）24 時間を繰り返す促進試験を 200 サイクル行っている。この試験結果を長期海水浸漬試験結果と比較して、1 サイクルが海水浸漬 50～60 日に相当すると判定している³⁾。高性能軽量骨材として、SLA-P を用いた SLA コンクリートに関して、今回採用した実験方法を西林の実験手法の W/C が 40%、60%の普通コンクリートのデータと比較すると、表 - 8 のようになり、コンクリートの種類に関わらず約 1.9 倍の促進効率がある結果となった。必ずしも実験条件が同一ではないが、今回の促進試験 1 サイクルは、海水浸漬の約 100 日に相当すると言える。

表-8 促進効率

	W/C (%)	相対動弾性係数が 60%となるサイクル		促進効率
		西林	本実験	
西林	60	75	40	1.88
本実験	57			
西林	40	86	45	1.91
本実験	45			

5. まとめ

以上の結果から考えて、今回、耐海水性促進試験を実施した主原料が異なる 2 種類の高性能軽量骨材を用いた高性能軽量コンクリートは普通コンクリートと比べて、同程度の耐海水性を有していると考えられる。また、真珠岩、堆積粘土とともに原料の違いによる顕著な差は認められなかった。したがって今回使用した高性能軽量骨材は、いずれも耐海水性の観点から海洋構造物への適用は十分に可能であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京工業大学大学院教授 二羽淳一郎博士、前港湾技術研究所の山田昌郎氏、太平洋セメント（株）の岡本享久博士、棚木隆氏、石田聡氏に多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡本享久，石川雄康，棚木隆，笹島昌男：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37，No4，pp12-18，1999.4
- 2) 横田弘，山田昌郎，山路徹，横沢和夫，三輪俊彦：高性能軽量コンクリートによる港湾構造物建造に関する考察，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，pp153-158，2000.8
- 3) 西林新蔵：コンクリートの耐海水性・その他の研究の現状と将来，セメント・コンクリート No.410，Apr.1981
- 4) 森寛晃，岡本享久，柴田辰正，石川雄康：超軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No2，pp61-66，1998