

論文 海洋環境下における反応性骨材含有コンクリートの膨張挙動に関する検討

羽瀨 貴士^{*1}・濱田 洋志^{*2}・鳥居 和之^{*3}・網野 貴彦^{*2}

要旨：反応性骨材を使用して作製したコンクリートブロックからコア試験体を採取し、海水中や飛沫帯などの4種類の海洋環境条件下に暴露するとともに、3種類の促進養生試験を行った。その結果、外部から多くのアルカリが供給される海水中や干満帯においてASR膨張が大きくなる傾向にあること、高炉セメントB種の使用が膨張抑制効果を有すること、海水中や干満帯において反応性の高い骨材が使用された場合には初期アルカリ量が 2kg/m^3 以下の配合であっても長期的に膨張が進行する可能性があること、などが確認された。

キーワード：海洋環境, アルカリシリカ反応, 複合劣化, 反応性骨材, 高炉セメント

1. はじめに

反応性骨材を含有するコンクリートが外部からアルカリの供給を受ける場合、アルカリシリカ反応（以下、ASR）が促進されることが知られている¹⁾。また、構造物におけるASRの進行速度は、骨材の反応性（反応性鉱物の種類とその含有量）、コンクリートの配合（セメントのアルカリ量、混和材料の置換率など）および構造物が供用される使用・環境条件（水分およびアルカリの供給など）によって決まることが指摘されている²⁾。このうちの使用・環境条件に関して、海洋環境下においては水分とアルカリが多く供給されることからASRが促進されやすいと考えられるが、実構造物の調査結果からは海洋環境の中でも海中部や飛沫帯などの環境条件によってASRの進行程度や劣化損傷状況に差が生じることが確認されている³⁾。しかし、このような海洋環境条件の違いがASR膨張挙動に及ぼす影響について詳細に検討された例はない。

そこで筆者らは、ASRの反応性が比較的高いと考えられる粗骨材を使用して作製したコンクリートブロックからコア試験体を採取し、4種類の海洋環境条件下（海水中、干満帯、飛沫帯、

海上大気中）に暴露するとともに、3種類の促進養生試験（JCI-DD2法、デンマーク法、人工海水浸漬法）を行うことにより、海洋環境条件の違いがASR膨張挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類およびコンクリートの配合

供試体の種類およびコンクリートの配合を表-1に示す。試験体の種類は、粗骨材の反応性の有無、セメントの種類、等価アルカリ量およびその調整方法（NaClまたはNaOH）の違いにより設定した。なお、使用した反応性粗骨材は、実構造物においてASRによる大きな損傷が確認された安山岩砕石であり、アルカリが外部から供給される条件では膨張が大きくなることが既往の研究⁴⁾において確認されている。

2.2 試験体の作製方法および実験条件

実験は、コンクリートブロック（ $200 \times 300 \times 300\text{mm}$ ）から材齢10日にて採取したコア試験体（ $\phi 55 \times 200\text{mm}$ ）を材齢28日まで湿空養生した後、促進養生および海洋環境暴露を行った。

促進養生による試験では、表-2に示す3つ

*1 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター主任研究員 博（工）（正会員）

*2 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター研究員（正会員）

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻教授 工博（正会員）

表－1 試験体の種類およびコンクリートの配合

試験体名	粗骨材の反応性	セメント種類	等価アルカリ量(kg/m ³)		単位量(kg/m ³)								
			NaCl	NaOH	W	C	S	GR	GNR	NaCl	NaOH		
(1) R-N	反応性(GR)と 非反応性(GNR) の粗骨材を 1:1 混合 (パシマムを考慮)	普通ポルト ランドセメント (N)	2.0		175	350	721	583	583	—	—		
(2) R-N-5-Cl			5.0	—						5.73	—		
(3) R-N-5-OH			—	5.0						—	3.92		
(4) R-N-10-Cl			10.0	—						15.16	—		
(5) R-N-10-OH			—	10.0						—	10.38		
(6) R-BB		高炉セメント B種(BB)	1.2				175	350	716	580	583	—	—
(7) R-BB-5-Cl			5.0	—								7.18	—
(8) R-BB-5-OH			—	5.0								—	4.91
(9) R-BB-10-Cl			10.0	—								16.61	—
(10) NR-N-5-Cl			5.0	—								5.73	—

- ・普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm³, 比表面積 3300cm²/g
- ・高炉セメント B 種: 密度 3.04g/cm³, 比表面積 3800cm²/g
- ・細骨材(S): 千葉県君津市産山砂, 表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.53%, 化学法(JIS A 1145)で無害
- ・反応性粗骨材(GR): 能登産輝石安山岩砕石(火山ガラス, クリスタライト, 長石, モノクリノイト等の反応性鉱物を含む), Gmax=15mm, 表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 2.42%, 化学法で無害でない(Rc=233mmol/L, Sc=609mmol/L),
- ・非反応性粗骨材(GNR): 鳥羽産カンラン岩砕石, Gmax=15mm, 表乾密度 2.98g/cm³, 吸水率 0.74%, 化学法で無害
- ・NaCl および NaOH によりコンクリートの等価アルカリ量を調整した。

表－2 試験体の暴露条件

	暴露方法/場所	暴露条件
促進養生	JCI-DD2 法	40°C, R.H.100%湿気槽養生
	デンマーク法	50°C, 飽和 NaCl 溶液浸漬
	人工海水浸漬法	50°C, 人工海水浸漬
海洋環境暴露	海水中	L.W.L.より 1.0m 下方
	干満帯	M.W.L.
	飛沫帯	H.W.L.より 0.1m 上方
	海上大気中	H.W.L.より 2.25m 上方

※ 海水中～飛沫帯は棧橋下側, 海上大気中は棧橋上側
 ※ 海洋環境暴露は, 7月中旬より開始

の促進条件(JCI-DD2法, デンマーク法, 人工海水浸漬法)にてコア試験体を91日間養生し, その間の膨張率(基準長100mm)の変化を測定した。また, 実施工では比較的早期の材齢にて実環境に暴露される場合が多いことから, 添加アルカリを用いない試験体(1), (6)についてのみ, 材齢5日まで湿空養生したブロックから採取したコアの促進養生(デンマーク法, 人工海水浸漬法)を行い, 約300日まで膨張率の変化を測定し, 初期養生期間の違いが膨張率に及ぼす影響について検討した。

一方, 海洋環境曝露は, 表－2に示すように, 港湾コンクリート構造物を想定して東京湾内に位置する棧橋上部工の下側の海水中, 干満帯, 飛沫帯および上部工の上側の海上大気中にコア試験体をすべて横向きに設置して行った。暴露は7月中旬より開始し, 膨張率の測定は約400

日まで継続的に実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 促進養生におけるコアの膨張挙動³⁾

コア試験体の促進養生試験の結果を図－1に示す。同じ配合条件の試験体の比較では, 試験体(9)を除き, デンマーク法>人工海水浸漬法>JCI-DD2法の順に大きな膨張率を示しており, 外来塩分(または外来アルカリ)の量および濃度が大きいものほどコアの膨張率は増大していた。

また, 今回のように長期材齢にまで至らない測定期間(91日間)の場合には, デンマーク法の試験結果において明らかのように, コア試験体の養生期間91日における膨張率は調整アルカリの量が多いものほど大きく, 他の2つの養生方法と比較しても, 外来塩分(または外来アルカリ)の量の違いより内在塩分(または初期混入アルカリ)の量の違いの影響が大きくなる傾向が認められた。つまり, 配合条件の違いによって膨張率の値が大きく異なっており, その影響は養生条件の違いよりも大きいようであった。

さらに, NaOHを添加したものの膨張率は, NaClを添加したものよりも養生初期段階(養生50日程度まで)から大きな値を示した。

また, セメントの種類に関して, アルカリ量5kg/m³の場合のデンマーク法による結果では, 普

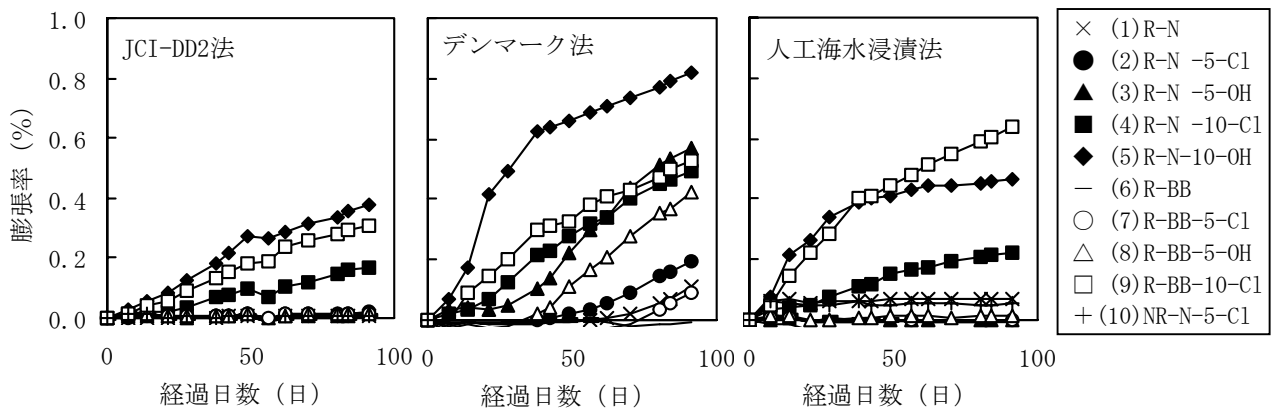
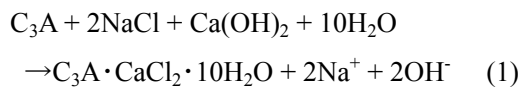


図-1 コア試験体の促進養生試験の結果

通ポルトランドセメント (N) を用いた方が高炉セメントB種 (BB) よりも膨張率が大きくなり、BBの水和組織の緻密さによる外来塩分（または外来アルカリ）や水分の浸透抑制効果によりASR膨張が抑制されることが確認された。しかし、NaClを用いてアルカリ量を 10kg/m^3 とした試験体(9)では、すべての養生条件において、BBの方がNよりも大きく膨張した。これは、NよりもBBにおいて多く含まれる活性の高いアルミナ分が、内在塩分として存在したNaClや外部から供給されたNaClとともに、以下に示すフリーデル氏塩説⁵⁾で説明される水和反応 (C_3A とNaClと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が反応してフリーデル氏塩を生成する際に、OH⁻を生成する反応) を早期から生じさせたためにOH⁻濃度が上昇し、ASR膨張が大きくなったものと考えられた。



3.2 促進養生開始前の初期養生期間が膨張率に及ぼす影響

暴露開始時期（初期養生期間および暴露開始材齢）の異なるコア試験体の、デンマーク法および人工海水浸漬法による促進養生試験の結果を図-2に示す。ここでの結果はすべてNaClやNaOHを添加していない試験体のものであるが、人工海水浸漬法に関しては、図-1に示した結果と同様に91日まではほとんど膨張せず、約300

日間の促進養生によっても図-2に示されるようにいずれの試験体も顕著な膨張傾向を示さなかった。

これに対して、デンマーク法では長期的に明らかな膨張傾向を示した。普通ポルトランドセメント (N) を用いた場合は高炉セメントB種 (BB) よりも早期に膨張を開始して大きな膨張率となり、3.1の結果と同様に外来塩分（または

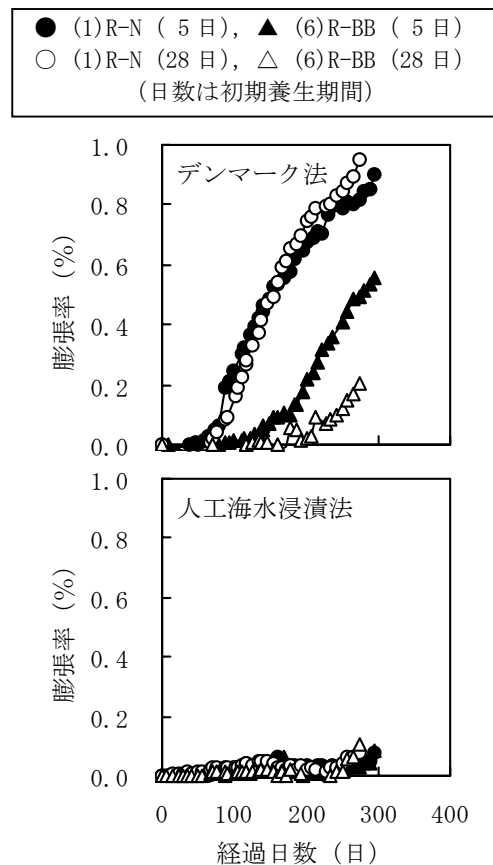


図-2 コアの促進膨張試験における初期養生期間の影響

外来アルカリ) に対しては初期養生期間によらずBBの膨張抑制効果が確認された。

また、初期養生期間が膨張率に及ぼす影響について、BBを使用した場合においては材齢5日で暴露を開始した方が材齢28日まで初期養生を行った場合よりも膨張率が大きくなっていましたが、Nを使用した場合においては両者に顕著な差はなかった。これは、BBを用いた場合の方が初期養生を長く行うことにより暴露開始までに組織の緻密化(細孔容積の減少)がより進むため⁶⁾、暴露開始後の外部からのアルカリの浸透抑制効果を発揮し、ASR膨張をより抑制できたことによると考えられる。Nにおいても同様の傾向となる可能性が考えられるが、BBの場合ほどには初期養生の効果が得られていなかったものと推測される。したがって、セメントに耐海水性に優れるBBを使用し、初期養生期間を長くとることで、ASRの膨張抑制効果をより発揮することができるものと考えられた。

3.3 海洋環境暴露におけるコアの膨張挙動

実際の海洋環境における環境温度とコア試験体の膨張率測定結果を図-3, 4に示す。試験体の暴露された環境温度は、夏季は栈橋上側の気温>栈橋下側の気温>海水温の順に高く、それぞれ2~10℃程度の差はあったが、冬期はこれらの温度に顕著な差はないようであった。

普通ポルトランドセメント(N)を用いてNaOHによりアルカリ量を10kg/m³とした試験体(5)では、すべての暴露環境にて比較的大きな膨張を示したが、概ね干満帯>海水中>飛沫帯≒海上

大気中の順で膨張率が大きくなった。干満帯と海水中では外部からの水およびアルカリの供給が多く、干満帯では海水中よりも環境温度が夏

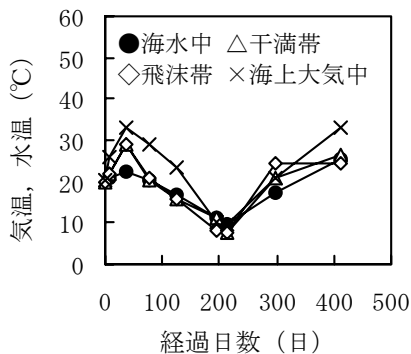


図-3 コアの膨張率測定時の暴露環境温度

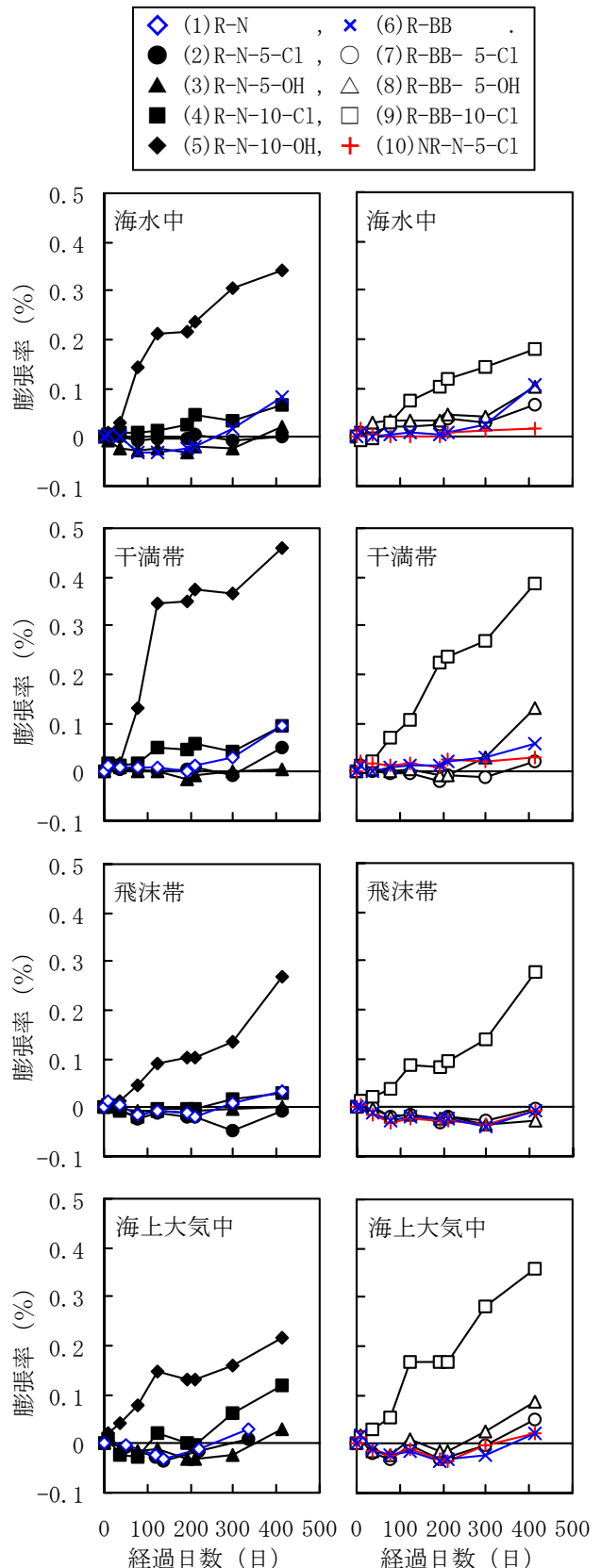


図-4 コア試験体の海洋環境暴露試験の結果

季において高かったことが影響していると思われる。しかし、干満帯と飛沫帯の温度差はそれほどないことから、両者の膨張率の差は水およびアルカリ供給量の違いによるものと考えられた。また、海上大気中は飛沫帯よりも環境温度は高いものの、水およびアルカリの供給量は飛沫帯の方が多くと考えられ、その結果として両者に顕著な差は見られなかった。以上のことから、海洋環境における環境条件が膨張率に与える影響としては、海水中や干満帯のように水およびアルカリの供給量の多い条件において膨張を促進する効果がもっとも大きく、これに加えて環境温度が高い場合にはさらに膨張が大きくなるものと考えられた。

その次に大きな膨張を示したのは、高炉セメントB種（BB）を用いてNaClによりアルカリ量を 10kg/m^3 とした試験体(9)であったが、これは前述のフリーデル氏塩説⁹⁾で説明される水和反応が早期から生じたためと考えられる。この場合は、干満帯と海上大気中に暴露したコアが比較的大きな膨張率を示しており、潜在的に C_3A とNaClと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が反応する条件が揃っている場合には、アルカリ供給量が比較的少ないものの環境温度が高くなりやすい海上大気中において膨張が進行したものと考えられた。

なお、これらの2種類の試験体以外は、暴露約400日までで0.1%程度以下の膨張率であった。その値は海水中や干満帯で大きく、飛沫帯では比較的小さい傾向にあったものの、全体として顕著な膨張率の差を生じていなかったため、各配合要因が各海洋環境においてどのように膨張に寄与しているかを考察するには至っていない。ただし、NaClやNaOHを添加していない試験体（(1)R-N： 2.0kg/m^3 、(6)R-BB： 1.2kg/m^3 ）でも、海水中や干満帯においては、約400日の暴露により0.05～0.1%の明らかな膨張傾向を示していた。このことから、反応性骨材の種類の影響も含めてさらに継続的に検討していく必要はあるものの、海水中や干満帯のように外部から多くのアルカリが継続して供給される条件では、アルカ

リ量が 2kg/m^3 以下のコンクリートであっても膨張する可能性があることが示唆された。

3.4 実環境に対する促進養生の膨張促進効果

初期添加アルカリ量を加えない試験体（(1)R-N、(6)R-BB）に関して、材齢28日まで初期養生を行った場合の促進養生と海洋環境暴露における膨張率を比較したものを図-5に示す。

両者の比較として、例えば膨張率が0.1%となる経過日数をみると、普通ポルトランドセメント（N）の場合はデンマーク法で約90日、人工海水浸漬法で約300日（推定）に対して、実環境において膨張が進行しやすい海水中や干満帯では約420日（推定）となり、海水中や干満帯に対してデンマーク法で約4.6倍、人工海水浸漬法で約1.4倍の促進条件となっていた。また、同様に高炉セメントB種（BB）の場合は、海水中に対してデンマーク法で約1.7倍、人工海水浸漬法で約1.5倍の促進条件となっていた。図-2や図-4でも示したとおり、初期のアルカリ量が

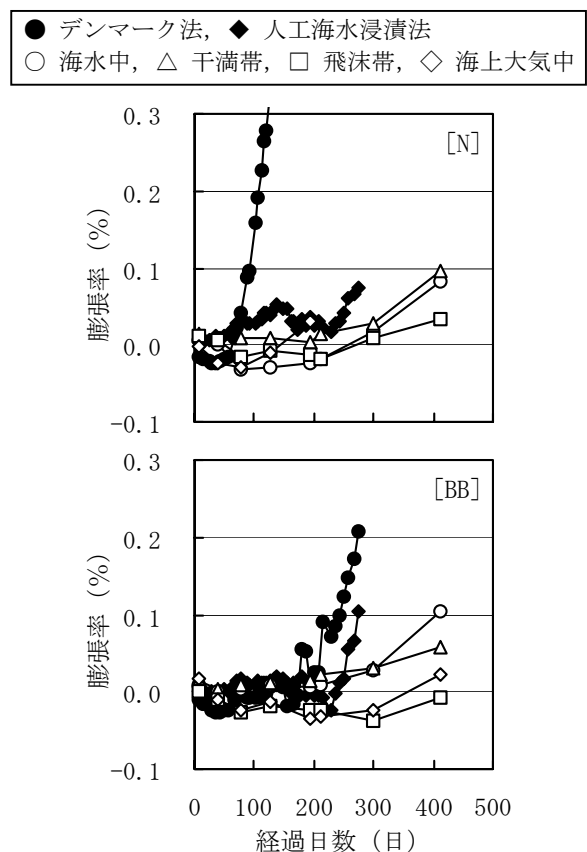


図-5 促進養生と海洋環境暴露における膨張率の関係

2.0kg/m³以下と小さいコンクリート配合の試験体は300～400日程度の促進養生や海洋環境暴露では顕著な膨張を示さなかったことから、さらに長期的な傾向の把握が必要ではあるが、本測定範囲では、デンマーク法は海水中や干満帯に対して1.7倍(BB)～4.6倍(N)程度、人工海水浸漬法は1.4～1.5倍程度の促進条件となっているようであった。

4. まとめ

反応性粗骨材を含有するコンクリートブロックから採取したコア試験体の促進養生および海洋環境暴露実験を行い、海洋環境条件の違いがASR膨張挙動に及ぼす影響について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 促進養生試験の結果より、コアの膨張率は塩分濃度の大きいデンマーク法の方が増大するが、コンクリートの内在塩分または初期添加アルカリの影響をより大きく受けた。また、高炉セメントB種を使用したコンクリートでは膨張抑制効果が期待できるものの、内在塩分量が大きい場合にはASRが発生し、普通ポルトランドセメントの場合よりも大きな膨張率を示した。
- (2) 高炉セメントB種を使用した場合は初期養生期間を長くすることで組織の緻密化がより進むためにASR膨張の抑制効果が認められたが、普通ポルトランドセメントを用いた場合は初期養生期間がその後の膨張に与える影響は明確ではなかった。
- (3) 海洋環境暴露におけるコアの膨張性の比較では、干満帯>海水中>飛沫帯≒海上大気中の順で膨張率が大きくなった。海洋環境条件が膨張に及ぼす影響としては、海水中や干満帯のように水およびアルカリの供給量の多い条件において膨張促進効果ももっとも大きく、これに加えて環境温度が高い場合にはさらに膨張が大きくなるものと考えられた。

- (4) 海水中や干満帯のように外部から多くのアルカリが継続して供給される条件では、反応性骨材の種類の影響も含めて継続的な検討が必要ではあるものの、アルカリ量が2kg/m³以下のコンクリートでも長期的には膨張が進行する可能性が推察された。
- (5) アルカリを添加していないコア試験体の促進養生と海洋環境暴露における膨張率の比較では、デンマーク法は海水中や干満帯に対して1.7倍(高炉セメントB種)～4.6倍(普通ポルトランドセメント)程度、人工海水浸漬法は1.4～1.5倍程度の促進条件となっているようであったが、さらに長期的に傾向を把握する必要がある。

参考文献

- 1) 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.41-47, 2001.5
- 2) 土木学会: 2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.142-156, 2001.1
- 3) 羽瀧貴士, 鳥居和之: アルカリシリカ反応と海水の複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の提案, 土木学会論文集, No.774/V-65, pp.149-161, 2004.11
- 4) 鳥居和之, 友竹博一: アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.251-263, 2003.8
- 5) Helmuth, R. and Stark, D: Alkali-Silica Reactivity Mechanism, Material Science of Concrete III, Edited by Skalny, J, American Ceramic Society, pp.131-208, 1992.
- 6) 米倉亜州夫, 田中敏嗣: 高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響, 土木学会, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの利用に関するシンポジウム論文集, pp.99-106, 1987.