

論文 コンクリートのアルカリシリカ反応性評価方法に関する研究

疋田 奈緒也^{*1}・鈴木 宏信^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*3}

要旨：4 種類の骨材について，岩石学的試験，化学法およびモルタルバー法を実施し，骨材のアルカリシリカ反応性を評価した。また，同じ骨材を用いた無筋コンクリートから採取したコンクリートコア供試体を，3 種類の促進膨張環境下（ 40 ± 2 R.H.95%以上，50 飽和 NaCl 溶液，80 1mol/l NaOH 溶液）に貯蔵し，膨張特性について検討した。コンクリートの膨張特性は，骨材の種類，W/C，促進環境条件によって異なることが明らかとなった。

キーワード：骨材，アルカリシリカ反応，モルタルバー，コンクリートコア，促進膨張試験

1. はじめに

現在，わが国では骨材のアルカリシリカ反応性判定試験として，化学法（JIS A 1145-2001）とモルタルバー法（JIS A 1146-2001）が採用されている。しかし，化学法，モルタルバー法は，骨材のアルカリシリカ反応性の有無を評価する試験であり，骨材をコンクリートに使用した場合，コンクリートの配合や使用材料の相違によって，骨材のアルカリシリカ反応性は異なる。従って，化学法およびモルタルバー法による骨材のアルカリシリカ反応性判定結果と，コンクリートの膨張特性との相関性を把握することが重要である。

本研究では，4 種類の粗骨材について，岩石学的試験，化学法およびモルタルバー法により骨材のアルカリシリカ反応性を評価するとともに，配合を変化させたコンクリートコア供試体による促進膨張試験を実施し，骨材のアルカリシリカ反応性判定結果とコンクリートの膨張特性からコンクリートのアルカリシリカ反応性について総合的に検討した。

2. 実験概要

2.1 実験項目および方法

4 種類の粗骨材を用いて，以下の 4 項目のアルカリシリカ反応性評価実験を行った。

骨材の岩石学的試験（目視観察，偏光顕微鏡観察，粉末 X 線回折試験）

化学法（JIS A 1145-2001）

モルタルバー法（JIS A 1146-2001，ASTM C 1260-94¹⁾，修正デンマーク法²⁾）

コンクリートコア供試体による膨張試験（JCI-DD2 法³⁾，80 1mol/l NaOH 溶液，50 飽和 NaCl 溶液）

骨材中のアルカリシリカ反応性鉱物の有無を確認するために，岩石学的試験方法として，骨材の目視観察，偏光顕微鏡観察，粉末 X 線回折試験により，骨材の岩種判定およびアルカリシリカ反応を起こす可能性のある有害な鉱物の有無を確認した。

化学法（JIS A 1145-2001）およびモルタルバー法（JIS A 1146-2001，以下，JIS モルタルバー法と称す）を実施するとともに，ASTM C 1260-94 に規定されている促進モルタルバー法（以下，ASTM 促進モルタルバー法と称す）および既往の研究²⁾を参考にし，JIS モルタルバー法と同じ配合と供試体寸法の供試体を 50 飽和 NaCl 溶液に浸漬する方法（以下，修正デンマーク法と称す）を行なった。

また，4 種類の骨材を用いた無筋コンクリート供試体（寸法：24×15×50cm）からコンクリートコアを採取し，膨張促進試験を行った。促

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻（正会員）

*2 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修（正会員）

*3 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博（正会員）

表 - 1 実験要因

種類	供試体寸法(cm)	Na ₂ Oeq.	W/C (%)	貯蔵条件	備考
モルタルバー	4 × 4 × 16	1.2(%)	50	40 ± 2 R.H.95%以上	JIS A 1146-2001
				50 飽和 NaCl 溶液	修正デンマーク法
	2.5 × 2.5 × 28.6	0.62(%)	47	80 1mol/l NaOH 溶液	ASTM C 1260-94
コンクリートコア	直径 6.8 × 長さ 15	6.0 (kg/m ³)	45,55,65	40 ± 2 R.H.95%以上	JCI-DD2 法
				50 飽和 NaCl 溶液	
				80 1mol/l NaOH 溶液	

進試験は、モルタルバー法と同様の 40 ± 2 R.H.95%以上, 80 1mol/l NaOH 溶液, 50 飽和 NaCl 溶液の 3 種類の貯蔵条件下で行った。

モルタルバー法およびコンクリートの膨張試験の実験要因を表 - 1 に示す。

2.2 使用材料

試験に使用した骨材は、砕石 3 種類(骨材 A, C, D), 山砂利 1 種類(骨材 B) の合計 4 種類の粗骨材である。これらのうち骨材 D を除く、他の 3 種類の骨材は実構造物において ASR による損傷が確認されている。

モルタルバー供試体用セメントは、(社)セメント協会のアルカリシリカ反応性試験用普通ポルトランドセメント(全アルカリ量: 0.62%, Na₂O: 0.28%, K₂O: 0.52%, Na₂O: K₂O=1: 1.86)を使用した。練混ぜ水には水道水を使用した。JIS モルタルバー法、修正デンマーク法における全アルカリ量の調整は、市販の 1mol/l NaOH 溶液を使用した。

コンクリート供試体用セメントは、普通ポルトランドセメント(全アルカリ量: 0.56%, Na₂O: 0.26%, K₂O: 0.45%, Na₂O: K₂O=1.73)を使用した。細骨材は、化学法で無害(Rc=61, Sc=33mmol/l)と判定された川砂を、練混ぜ水には水道水を使用した。なお、全アルカリ量の調整には、実構造物より採取したコンクリートコアを模擬するために NaCl を使用した。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの基本配合は、骨材 D を用いた配合であり、目標スランプを 8 ± 2cm, 目標空気量を 4.5 ± 1.5% として試験練りによって決定し

た。その他の組み合わせにおける配合は、基本配合を骨材の密度により補正した。また、コンクリート中の全アルカリ量を同じにするために全ての配合において、コンクリート中の全アルカリ量が等価 Na₂O 量で 6.0kg/m³ になるように NaCl を添加して調整した。

2.4 コンクリートコア供試体の作製

24 × 15 × 50cm の無筋コンクリート供試体を各配合につき 1 体作製した。28 日間の散水養生後、直径 6.8cm, 長さ 15cm のコンクリートコアを採取した。その後、採取したコアにステンレス製バンドを 10cm 間隔で 2 つ取り付け、バンド上に膨張量測定用のコンタクトゲージ用ポイントをハンダ付けし、膨張量測定用供試体とした。

2.5 膨張量の測定方法

貯蔵条件が 40 ± 2 R.H.95% 以上および 50 飽和 NaCl 溶液の供試体については、コア供試体作製後、20 ± 2 R.H.95% 以上の湿気槽中に 24 時間保ち、精度 1/1000mm のダイヤルゲージで基長を測定した。その後、供試体を各貯蔵条件下に各配合につき 2 体ずつ貯蔵した。

膨張量の測定は、測定前に 20 ± 2 R.H.95% 以上の湿気槽中に 24 時間保った後、ダイヤルゲージを用いて測定した。測定は、1 日、3 日、1 週、以降貯蔵開始 9 週までは 1 週ごとに、それ以降は 2 週ごととした。

貯蔵条件が 80 1mol/l NaOH 溶液の供試体については、温度による影響を避けるため、80 の温水中に 24 時間保ち、80 における基長を測定した。その後、供試体を 80 1mol/l NaOH 溶液に各配合につき 2 体ずつ貯蔵した。膨張量の

測定は、供試体を 80 1mol/l NaOH 溶液から取り出した後、直ちにダイヤルゲージを用いて測定した。測定は、2～3 日間隔とし、貯蔵後 28 日間測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 岩石学的試験

使用した 4 種類の粗骨材の岩石学的試験（目視観察、偏光顕微鏡観察および粉末 X 線回折試験）結果を表 - 2 に示す。骨材 A はすべて火山岩系の安山岩である。骨材 B および骨材 C はチャート、泥岩、シルト～泥岩等、堆積岩系の複数の岩種から構成されている。骨材 D は、すべて堆積岩系の石灰質砂岩から構成されている。

各骨材中に含まれる ASR を起こす可能性のある鉱物としては、骨材 A ではガラス、クリストバライトが、骨材 B と骨材 C ではカルセドニー質石英、微晶質石英が認められた。また、骨材 D からは、ASR を起こす可能性のある鉱物は確認されなかった。

3.2 化学法およびモルタルバー法試験

各骨材の化学法およびモルタルバー法の測定結果およびアルカリシリカ反応性の判定結果を表 - 3 に示す。モルタルバー法の膨張率の経時変化を図 - 1 に示す。

化学法では、骨材 A と骨材 B が「無害でない」、骨材 C と骨材 D が「無害」と判定された。

表 - 2 粗骨材の岩石学的試験結果

骨材		岩種の目視観察	偏光顕微鏡観察，粉末 X 線回折試験により同定された反応性鉱物
A	碎石	安山岩	ガラス，クリストバライト
B	山砂利	チャート（含有量約 40％），泥岩，砂岩，珪岩	カルセドニー質石英，微晶質石英
C	碎石	シルト～泥岩	微晶質石英
D	碎石	石灰質砂岩	未確認

について顕微鏡観察および粉末 X 線回折試験を実施した。

表 - 3 化学法およびモルタルバー法の判定結果

骨材	化学法結果 JIS A 1145-2001 (mmol/l)				モルタルバー法結果				
					JIS モルタルバー法 JIS A 1146-2001 (40 ± 2 R.H.95% 以上)		ASTM 促進モルタルバー法 ASTM C 1260-94 (80 1mol/l NaOH 溶液)		修正デンマーク法 (50 飽和 NaCl 溶液)
	Sc	Rc	Sc/Rc	判定	膨張率 (%)	判定	膨張率 (%)	判定	膨張率 (%)
A	197	127	1.55	無害でない	0.036	無害	0.410	有害	0.040
B	81	40	2.03	無害でない	0.006	無害	0.202	有害	0.179
C	44	47	0.94	無害	0.006	無害	0.325	有害	0.136
D	27	48	0.56	無害	-0.001	無害	0.201	有害	0.015
判定基準	Sc が Rc 以上となる場合を「無害でない」、それ以外を「無害」				貯蔵 6 ヶ月で膨張率が 0.1%未満の場合「無害」、0.1%以上の場合「無害でない」		貯蔵 14 日間で膨張率が 0.1%未満の場合「無害」、0.1～0.2%の場合「不明確」、0.2%以上で「有害」		-

膨張率の値は、JIS A 1146-2001 では貯蔵 6 ヶ月のうちの最大値を、ASTM C 1260-94 では貯蔵 14 日の値を、また修正デンマーク法では貯蔵 13 週の値を用いた。

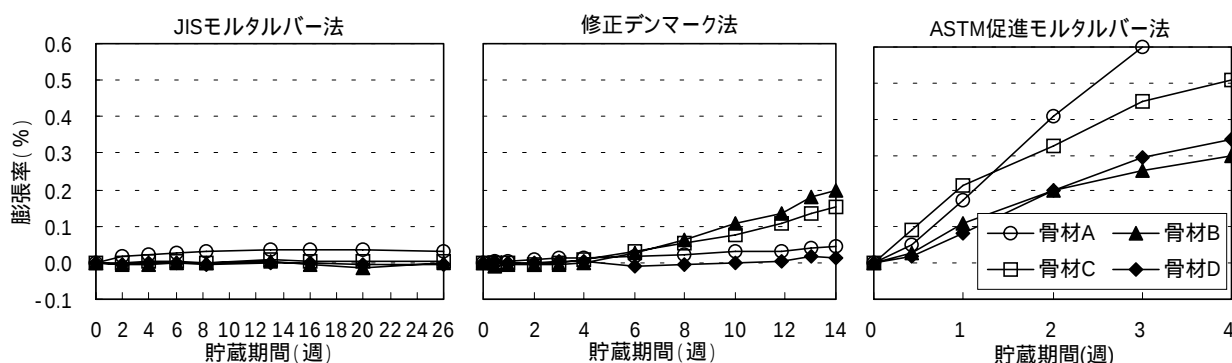


図 - 1 モルタルバー法の膨張率の経時変化

JIS モルタルバー法では、骨材 A～D の全ての骨材が「無害」と判定され、供試体表面にはひび割れの発生は認められなかった。また ASTM 促進モルタルバー法では、全ての骨材が「有害」と判定され、全ての供試体にひび割れの発生が認められた。化学法、JIS モルタルバー法および ASTM 促進モルタルバー法の判定結果は、異なる結果となった。

修正デンマーク法では、骨材 B と骨材 C が貯蔵 4～6 週経過時から膨張傾向を示し、膨張の進行により供試体表面にはひび割れの発生が認められた。いずれの骨材も、貯蔵 13 週の膨張率は ASTM 促進モルタルバー法（貯蔵 2 週）よりも小さな値を示した。

ASTM 促進モルタルバー法と修正デンマーク法を比較すると、ASTM 促進モルタルバー法で最も大きな膨張率（貯蔵 2 週で 0.410%）を示した骨材 A が、修正デンマーク法（貯蔵 13 週）では 0.040%であり、骨材 B（0.179%）、骨材 C（0.136%）に比較して膨張率は小さな値であった。ASTM 促進モルタルバー法と修正デンマーク法では、骨材の相違によって、膨張特性が異なる結果となった。

JIS 化学法および各種モルタルバー法の促進条件下で反応する鉱物、反応生成物の化学組成、生成量の相違が判定結果に影響しているものと推定される。また、ASTM 促進モルタルバー法では、実構造物において ASR による損傷が認められていない骨材 D が「有害（貯蔵 2 週で 0.201%）」と判定された。これは、骨材 D に存

在する反応性の低いシリカが徐々に反応し、膨張したと思われる。

本研究では、ASR による反応生成物の化学組成の分析と生成量の測定は実施していない。骨材のアルカリシリカ反応性の評価にはこれらの影響について検討し、判定方法、判定値の設定を行うことが今後の検討課題と考えられる。

3.3 コンクリートコアの膨張試験

コンクリートコアの各貯蔵条件下における膨張試験結果を図 - 2 に示す。

JCI-DD2 法では、各配合の供試体とも、 20 ± 2 R.H.95% 以上の貯蔵条件から 40 ± 2 R.H.95% 以上の貯蔵条件に移した 4～8 週後に、若干の膨張が確認された。しかし、その後膨張率の増加はほとんどない。膨張率は、骨材 A を用いた W/C=45% の供試体の膨張率が、貯蔵 26 週で 0.065%と、0.05%以上の値を示した。しかし、それ以外の供試体では、膨張率は 0.05% 以下の値であった。コア表面には、骨材 A の供試体でひび割れが認められた。また、骨材 B,C,D の供試体で、微量であるがアルカリシリカゲルと思われる白色析出物の滲出が認められた。

50 飽和 NaCl 溶液の貯蔵条件下では、骨材 C を用いた供試体の膨張率が大きく、貯蔵 26 週で W/C=45% 時に 0.281%、W/C=55% 時に 0.247%、W/C=65% 時に 0.142%であった。ただし、膨張が増加し始めたのは、貯蔵 8～13 週であった。また、骨材 D を用いた W/C=45% の供試体で大きな膨張が観察されたが、骨材 A と骨材 B の供試体の膨張は比較的小さかった。

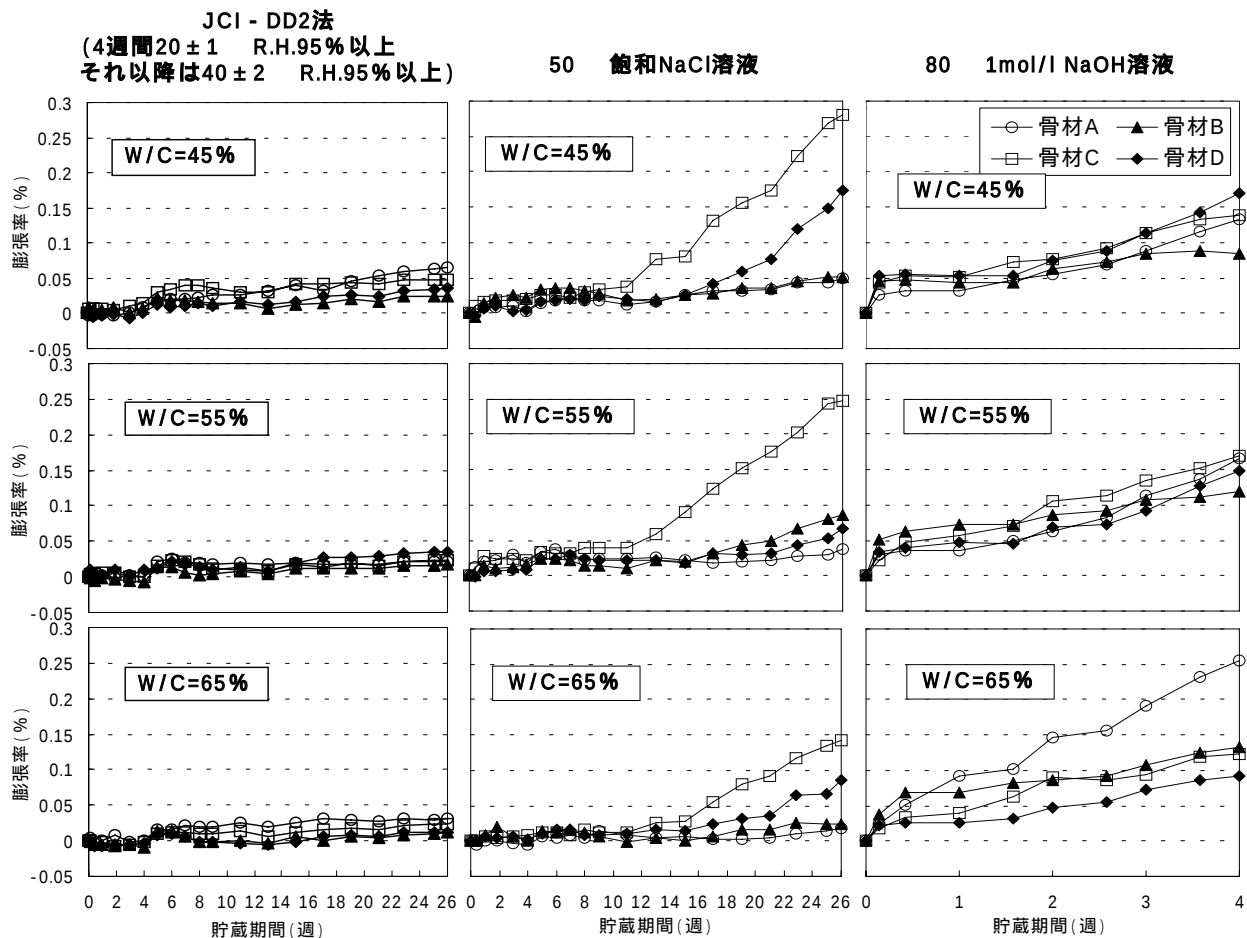


図 - 2 コンクリートコアの膨張試験結果

80 1mol/l NaOH 溶液の貯蔵条件下では、骨材 A を用いた W/C=65% の供試体の膨張率が大きく、貯蔵 4 週で約 0.255% であった。また、骨材 A と骨材 B を用いた供試体は、W/C が大きいほど膨張率が大きい値を示したのに対し、骨材 C を用いた供試体は、W/C=55% で膨張率が最大 (0.170%) となった。一方、骨材 D を用いた供試体は W/C が大きいほど膨張率が小さな値を示しており、骨材の違いにより、W/C と膨張率との関係に違いがあることが確認された。

50 飽和 NaCl 溶液に浸漬した場合と、80 1mol/l NaOH 溶液に浸漬した場合を比較すると、50 飽和 NaCl 溶液に浸漬した場合、膨張は貯蔵 8 週以降に生じていることから、判定は貯蔵開始 8 週以上で行う必要がある。一方、80 1mol/l NaOH 溶液では、いずれの配合のコンクリートも貯蔵初期から徐々に膨張している。また、骨材 C を用いたコンクリートは、JCI

-DD2 法では大きな膨張量を示していないのに対し、50 飽和 NaCl 溶液で特に大きな膨張率を示した。これは、外部から NaCl が浸入する環境下に立地する場合のコンクリートの反応性評価においては有効であると考えられる。

しかし、実構造物で ASR 損傷が確認されていない骨材 D が、80 1mol/l NaOH 溶液と 50 飽和 NaCl 溶液中でモルタルバー試験同様に膨張傾向を示した。50 飽和 NaCl 溶液への浸漬あるいは 80 1mol/l NaOH 溶液への浸漬では、NaCl 溶液、NaOH 溶液のコンクリート供試体への浸透性が膨張に大きく影響しているものと考えられる。浸透性は水セメント比や単位セメント量に影響されるため、今後、さらに多くのデータを蓄積して検討する必要がある。

3.4 モルタルバーとコンクリートコアの膨張特性

50 飽和 NaCl 溶液、80 1mol/l NaOH 溶液

の貯蔵条件下におけるモルタルバーとコンクリートコアの膨張率を図-3に示す。

骨材 A は、モルタルバー、コンクリートコアともに 50 飽和 NaCl 溶液では膨張傾向を示さず、80 1mol/l NaOH 溶液では膨張傾向を示した。骨材 C は、モルタルバー、コンクリートコアと

も、50 飽和 NaCl 溶液、80 1mol/l NaOH 溶液で膨張傾向を示した。一方、骨材 B と骨材 D は、モルタルバーとコンクリートコアの膨張傾向が異なる結果となった。すなわち、骨材 B は、50 飽和 NaCl 溶液において、モルタルバーは膨張傾向を示したが、コンクリートコアでは膨張傾向を示さなかった。骨材 D は、50 飽和 NaCl 溶液において、モルタルバーは膨張傾向を示さなかったが、コンクリートコアは膨張傾向を示した。

このように、50 飽和 NaCl 溶液と 80 1mol/l NaOH 溶液の貯蔵条件下におけるモルタルバーとコンクリートコアの膨張傾向は、骨材の種類によって異なる結果となった。

4. まとめ

本研究は、4 種類の粗骨材を用いて、ASR 判定のための各種試験を行った。明らかとなった点を以下に示す。

- (1) 化学法 (JIS A 1145-2001) とモルタルバー法 (JIS A 1146-2001, ASTM C 1260-94) の判定結果は、必ずしも一致しなかった。
- (2) 修正デンマーク法により骨材のアルカリシリカ反応性を評価する場合、貯蔵 8 週経過

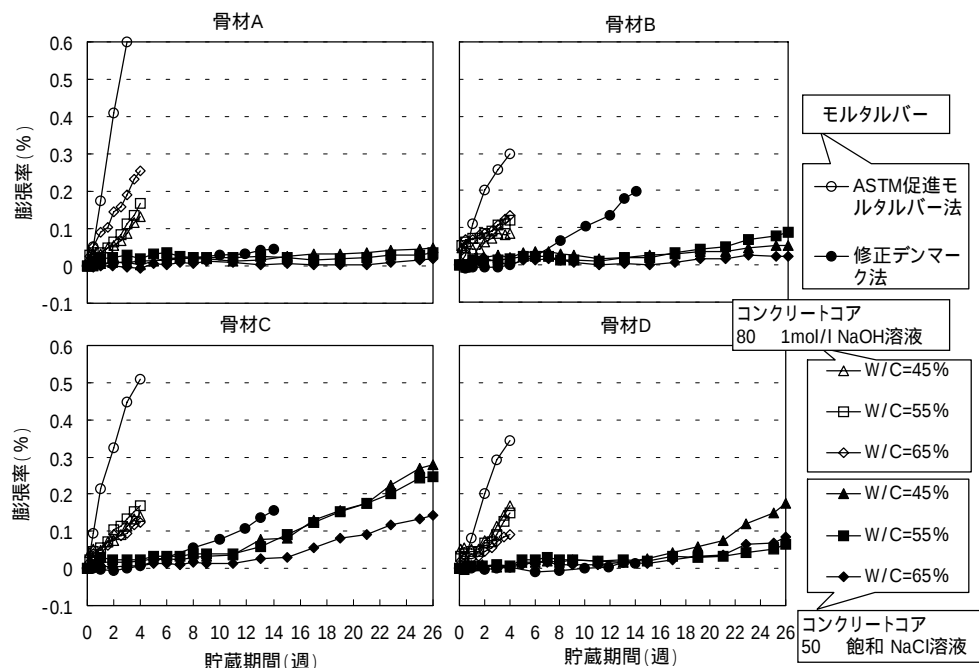


図-3 コンクリートコアとモルタルバーの膨張率

以降に行う必要がある。

- (3) 50 飽和 NaCl 溶液と 80 1mol/l NaOH 溶液の貯蔵条件下におけるモルタルバーとコンクリートコアの膨張傾向は、骨材の種類により異なる。
- (4) 50 飽和 NaCl 溶液で促進試験した場合、大きな膨張率を示す配合のコンクリートコアが存在した。このため、外部から NaCl が浸透する環境下に立地するコンクリート構造物のアルカリシリカ反応性評価は、50 飽和 NaCl 溶液に浸漬する方法においても確認することが必要である。

参考文献

- 1) ASTM C 1260-94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortal-Bar Method)
- 2) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.45-97, 1999.11
- 3) コンクリート構造物の耐久性診断・評価手法に関する基準案, 日本コンクリート工学協会, pp.1-10, 1988.5