

# コンクリートのアルカリシリカ反応の促進試験方法に関する研究

佐川 康貴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

**概要：**本研究では、コンクリート構造物のアルカリシリカ反応（ASR）の抑制対策方法について検討するため、遅延膨張性の ASR を生じる骨材を対象に各種の促進試験法を行った。その結果、隠微晶質石英を含む泥質片岩の ASR 反応性は、国内における現行の試験法である化学法およびモルタルバー法では適切に評価することが出来ないこと等を明らかにした。

## 1. はじめに

コンクリートのアルカリシリカ反応（ASR）は、岩石の反応速度の観点から、急速膨張性 ASR と遅延膨張性 ASR に大別できる<sup>1)</sup>。岩石の反応速度の違いは、反応性シリカ鉱物の溶解速度の違いによるものである<sup>2)</sup>。環太平洋造山帯に位置する我が国は、火山岩を砕石として利用することが多く<sup>3)</sup>、これらの反応に起因する ASR による被害も多く報告されている<sup>4)</sup>。これらの火山岩骨材は、急速反応性を示す骨材が多く<sup>1)</sup>、これらの骨材の反応性の検出のため、モルタルバー法などの判定試験が提案、JIS 規格化されてきた経緯がある。

一方、遅延膨張性 ASR は、堆積岩中の隠微晶質～微晶質の石英を反応性鉱物とする ASR であり、劣化事例としては海外での事例が多いが、我が国においても数件の報告がある<sup>5)</sup>。北部九州においても写真-1 のようにひび割れを生じた構造物が散見される。これまでの我が国での ASR 調査では、詳細な原因追求が乏しいために、遅延膨張性 ASR であったものを見逃している可能性もあり、今後、調査によるデータを蓄積し、遅延膨張性骨材による劣化の実態を把握する必要がある。



写真-1 防波堤に生じたひび割れ

遅延膨張性骨材の特徴として、現在日本で広く用いられている化学法、モルタルバー法では、その反応性が検出できないことが指摘されている<sup>1)</sup>。このことは、海外では広く認識されていることであり、遅延膨張性を示す可能性のある骨材に対しては、ASTM C 1260（80℃ NaOH 浸漬法）による評価が適当であることが示されている<sup>6)</sup>。

判定試験方法は、岩石学的特徴に応じて適切な方法を選定されるべきものであるから、産出される骨材の岩種が異なる我が国と欧米諸国で異なる試験方法が採用されることは当然であるが、実被害を詳細に分析し、ASR を生じた原因の追求、またそれに応じて規格を変化させていく点では、日本では十分に検討がなされていない。合理的な ASR 抑制に向けて、実構造物における ASR 劣化事例を詳細に分析し、新しい抑制手法としてフィードバックすることが重要である。

本研究では、促進試験方法の確立されていない遅延膨張性 ASR に着目し、実構造物において ASR 劣化を生じたコンクリートに使用された骨材と類似した隠微晶質石英を含む骨材を入手し、それに対して化学法、モルタルバー法、および ASTM C 1260 試験を行い、ASR 反応性の検出に対する各種試験の適用性に関する検討を行った。

## 2. 各試験法による ASR 反応性試験結果

本研究で、実施した促進試験の方法と判定基準の一覧を、表-1 に示す。

### (1) 化学法

JIS A 1145 に基づき、入手骨材について化学法を行った。なお、反応時間と NaOH 濃度が試

表-1 各種促進試験の方法と判定基準

モルタル膨張試験	試験方法	セメントアルカリ量	養生条件	判定基準
	ASTM C 1260	0.55% (無添加)	80°C 1N NaOH 浸漬	14日膨張率が0.2%以上で「有害」、0.1%未満で「無害」
	JIS モルタルバー法	1.2%, 1.8%*, 2.4%* *JIS 規格ではない	40°C 100%R.H.	91日膨張率が0.05%以上または、182日膨張率が0.1%以上で「無害でない」(1.2%の場合)
	デンマーク法	0.55% (無添加)	50°C 飽和 NaCl 溶液 浸漬	91日膨張率が0.1%未満で「無害」 0.1%~0.4%で「不明」 0.4%以上で「有害」
骨材単体の試験	試験方法	骨材粒度 固液比	保管条件	判定基準
	化学法 (JIS A 1145)	0.15mm~0.3mm 25g/25ml	80°C 1N NaOH に 24 時間	溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) よりも大きい場合に「無害でない」

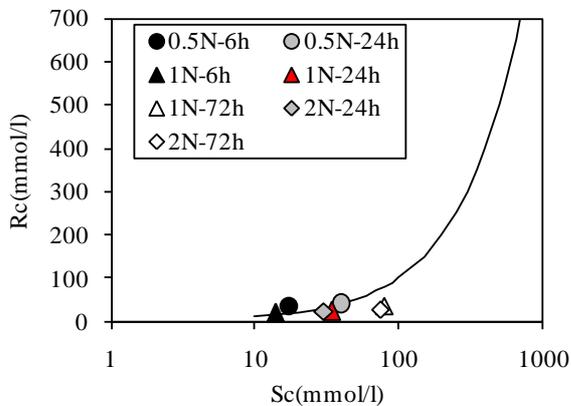


図-1 化学法試験結果

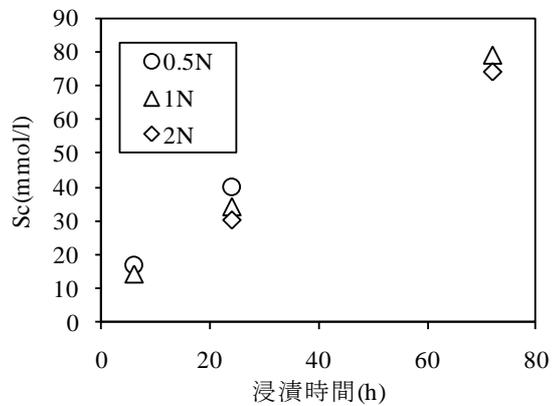


図-2 浸漬時間と Sc の関係

試験結果に及ぼす影響について調べるため、反応時間を 0.5h, 24h, 72h と変化させたもの、また、NaOH 溶液の濃度を 0.5N, 1N, 2N と変化させたものについても測定を行った。図-1 に試験結果を示す。

通常の化学法 (1N-24h) において、入手骨材は溶解シリカ量 Sc, アルカリ濃度減少量 Rc とともに低く、(Sc=34mmol, Rc=24mmol) ほぼ判定曲線上にプロットされている。本実験において、入手骨材は「無害でない」と判定されたが、化

学法は試料のサンプリングや試験方法による結果のばらつきが大きいこと<sup>8)</sup>を考慮すると、この骨材は「無害」と判定される可能性もある。

また、図-2 に NaOH に浸漬した時間と Sc の関係を示す。NaOH の濃度の違いによる Sc の変化はあまり見られないものの、浸漬時間に比例して Sc の値は大きくなる傾向が見られた。このことから、入手骨材は、コンクリートの空隙水中の pH が低い場合においても、経時的にシリカが溶出するために長期的に膨張を示す可能性

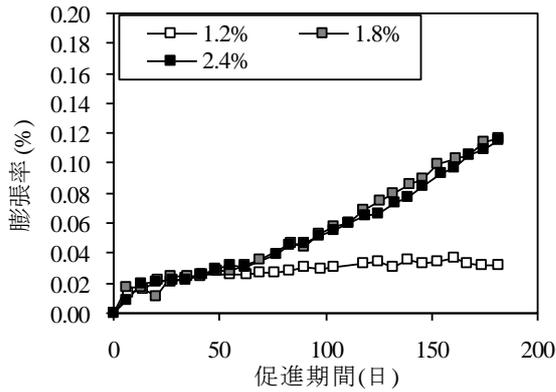


図-3 モルタルバー法試験結果

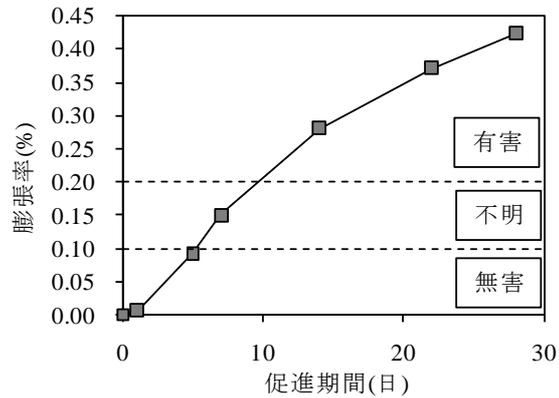


図-4 ASTM 法試験結果

があることが考えられる。

## (2) モルタルバー法

JIS A 1146に基づき、モルタルバー法を行った。水セメント比  $W/C=50\%$ 、砂セメント比  $S/C=2.25$ 、供試体寸法  $40\times 40\times 160\text{mm}$  のモルタルを作製し、温度  $40^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $95\%$  以上の湿気槽において保管し、膨張率の経時変化を測定した。なお、練混ぜ水に  $\text{NaOH}$  を添加し、セメントの全アルカリ量が  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  で  $1.2\%$  となるように調整した。モルタルバー法では、促進期間 181 日において、膨張率が  $0.1\%$  未満ならば「無害」、 $0.1$  以上ならば「無害でない」と判定する。加えて、本研究では ASR を促進させるために、セメントのアルカリ量を  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  で  $1.8\%$ 、 $2.4\%$  に増加させた供試体も作製した。

図-3 にモルタルバー法の試験結果を示す。通常の場合、試験材齢 182 日におけるモルタルの膨張率は、 $0.03\%$  程度であり、入手骨材は「無害」と判定された。化学法の試験結果も合わせて考慮すると、実構造物で ASR 劣化を生じた骨材であっても、遅延膨張性 ASR を示す骨材については現行の試験法では反応性を適切に評価できない可能性がある。

一方、セメントのアルカリ量を  $1.8\%$ 、 $2.4\%$  とした場合には試験材齢 182 日では約  $0.12\%$  となり、膨張も収束していない。このことから、モルタルバー法においてセメントのアルカリ量を増加させ、空隙水の  $\text{pH}$  を高めることにより、遅延膨張性の ASR を検出できる可能性があると言える。

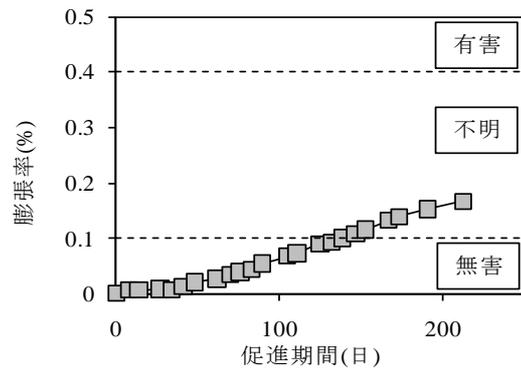


図-5 デンマーク法試験結果

## (3) ASTM C 1260 法

ASTM C 1260 に準拠し、水セメント比  $W/C=50\%$ 、砂セメント比  $S/C=2.25$ 、供試体寸法  $40\times 40\times 160\text{mm}$  のモルタルを作製し、 $80^\circ\text{C}$  の  $1\text{N}$   $\text{NaOH}$  に浸漬して、膨張率の経時変化を測定した。ASTM 法では、促進期間 14 日において、膨張率が  $0.1\%$  未満ならば「無害」、 $0.1\sim 0.2\%$  ならば「不明」、 $0.2\%$  以上ならば「有害」と判定する。なお、 $\text{NaOH}$  によるアルカリ量の調整は行っていない。また、ASTM 法に用いる供試体の寸法は、通常  $1\times 1\times 11.25\text{inch}$  であるが、本実験においてはモルタルバー法と同じ寸法とした。

図-4 に ASTM 法におけるモルタルの膨張率の経時変化を示す。促進期間 28 日において膨張率は  $0.4\%$  を超えており、非常に大きな膨張を示した。また、入手骨材は「有害」と判定されていることから、ASTM 法により隠微晶質石英を含む泥質片岩の ASR 反応性を評価することができたと言える。

表-2 各種促進試験における判定結果一覧

	試験方法					
	ASTM C 1260	化学法	JIS モルタルバー			デンマーク法
			1.2%	1.8%	2.4%	
判定結果	有害	無害	無害	無害でない	無害でない	無害 (長期的には膨張)

表-3 各種促進試験におけるモルタルの空隙水の組成<sup>2)</sup>

		空隙水の組成(mmol/l)						
		Ca <sup>2+</sup>	Si <sup>4+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>
試験方法	デンマーク法	4.0	0.6	3353.4	351.3	2582.7	192.0	508.0
	JIS 1.2	1.8	1.1	662.3	275.2	-	22.1	692.8
	JIS 2.4	1.0	1.8	1089.9	189.9	-	80.8	1528.3

(4) デンマーク法

水セメント比 W/C=50%, 砂セメント比 S/C=2.25, 供試体寸法 40×40×160mm のモルタルを作製し, 50°C の飽和 NaCl 溶液に浸漬して, 膨張率の経時変化を測定した。なお, NaOH によるアルカリ量の調整は行っていない。デンマーク法では, 促進期間 91 日において, 膨張率が 0.1% 未満ならば「無害」, 0.1~0.4% ならば「不明」, 0.4% 以上ならば「有害」と判定する。

図-5 にデンマーク法におけるモルタルの膨張率の経時変化を示す。図より, 促進期間が 200 日を経過しても膨張は収束しておらず, 長期的に膨張していることが分かる。しかし, 判定基準である 91 日における膨張率は 0.05% であり, 「無害」と判定された。このことから, デンマーク法では, 遅延膨張性の ASR 反応性を適切に評価することが出来ないと考えられる。

3. 考察

表-2 に判定結果の一覧を示す。なお, セメントアルカリを 1.8%, 2.4% に増加した場合における判定区分は無いが, ここでは, JIS A 1146 の判定基準と同様に 182 日で 0.1% 以上の膨張率であれば「無害でない」としている。表-7.3 より各種促進養生試験によって判定結果が異なることが分かる。

この原因を各養生条件におけるモルタルの空隙水の pH の違いから考察する。

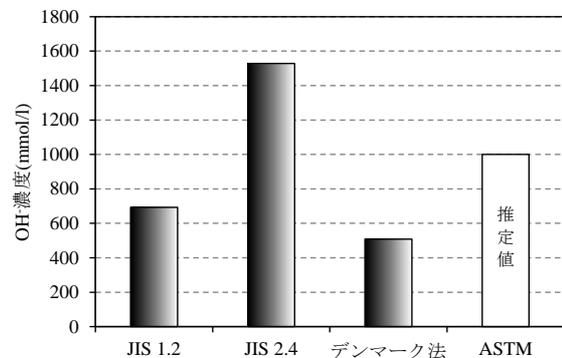


図-6 各種促進試験におけるモルタルの空隙水の OH 濃度<sup>2)</sup>

川端ら<sup>2)</sup>は, 各種 ASR 促進試験環境におけるモルタルの空隙水組成を, 空隙水の圧搾抽出より測定している。表-3 に各種促進試験環境におけるモルタルの空隙水組成<sup>2)</sup>を示す。なお, JIS 1.2 および JIS 1.8 は, セメントアルカリを 1.2% および 1.8% に調整したモルタルを表している。また, 表に示す濃度は, 石灰石骨材を使用した場合であることから, 骨材の反応による OH 濃度低下の影響は無く, 試験環境の違いによる空隙水組成の違いと見なすことができる<sup>2)</sup>。

図-6 に, 各試験でのモルタル空隙水の OH 濃度の比較結果を示す。なお, ASTM C 1260 におけるモルタルの空隙水の OH 濃度は, ほぼ 1mol/l と考えられることから, 推測値として併記している。

図より ASTM C 1260 の OH 濃度は, モルタルバー法 (図中の記号 JIS 1.2) のそれよりも非常

に高い。また、JIS モルタルバー法では供試体からのアルカリ溶脱等の影響により、空隙水の pH は、促進試験早期から低下することが指摘されている<sup>9)</sup>。そのため、セメントのアルカリ量が 1.2% の場合ではモルタルバー法では膨張を示さなかったものの、セメントのアルカリ量を 1.8% 以上添加した場合には空隙水の pH が上昇し、膨張挙動を示したものと考えられる。

また、デンマーク法におけるモルタルの空隙水の pH はモルタルバー法 (JIS 1.2) におけるそれよりも低く、アルカリ無添加に比べて若干高い。Cl- は、AFm 相中の OH<sup>-</sup> とのイオン交換反応を示すことから<sup>10)</sup>、NaCl 溶液に浸漬するデンマーク法でも pH が高まるものと考えられるが、セメントのアルカリ量 1.2% に相当する pH には至らないものと考えられる。ただし、アルカリの溶脱が無いため空隙水の pH は、ほぼ一定に維持される。

このことは、隠微晶質石英の ASR 反応性は、速度が緩慢であるが、潜在的には高い反応性を有していることが示唆される。また、本研究のアルカリ量推定結果および実際に遅延膨張性 ASR による被害を受けた構造物のアルカリ量推定結果<sup>11)</sup>において、現在の総量規制値である 3.0kg/m<sup>3</sup> よりも少ないアルカリ量 (2.2kg/m<sup>3</sup> 程度) で被害を生じていることから、隠微晶質石英は、潜在的に高い反応性を有していることが窺える。

#### 4. ASR 反応性判定試験について

以上の結果より、遅延膨張性の ASR を示す骨材については ASTM C 1260 または JIS モルタルバー法の改良として、セメントアルカリ量を増加させる試験が有効であり、重要な点としては、十分に空隙水の pH を高く保つことが必要であると分かった。

また、本研究の結果は、ASR の反応性判定試験において、岩石の性質に応じて適切な試験方法を用いる必要があることを示すものである。

欧米諸国においては、骨材の ASR 反応性の判断に対し、各種促進試験に先立ち岩石学的評価を行う必要があることを推奨している<sup>12)</sup>ように、我が国においても ASR 反応性の評価に対し岩石学的分析を導入することが望ましいと言える。

簡易的な方法として、「岩種」といったマクロな区分から適用する試験方法を選択する方法も、ある程度は有効であると考えられるが、例えば、本研究で使用した骨材と同じ堆積岩に区分されるチャートは、反応性シリカ鉱物を多く含み、非常に反応性に富んでいるため、ASTM C 1260 のような高いアルカリ濃度での試験では、シリカ鉱物の溶解が非常に早く進行し、拡散するため膨張圧を発生せず「無害」と判定されることも報告されている<sup>13)</sup>。このような骨材に対しては、従来方法である JIS A 1146 によるモルタルバー法が有効とされる<sup>13)</sup>。したがって、「岩種」といったマクロな区分では、判断を誤る可能性もある。したがって、使用する骨材の岩石学的特徴を詳細に分析した上で、適切な反応性試験を選択する必要があるものと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、合理的な ASR の抑制対策の考案を目的とし、劣化要因の 1 つとして遅延膨張性の ASR を対象とした実験的検討を行った。各種の促進試験法を行い、遅延膨張性 ASR を示す骨材に対する反応性判定試験の方法に関する系統的な検討を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 隠微晶質石英を含む泥質片岩の ASR 反応性は、国内における現行の試験法である化学法およびモルタルバー法では適切に評価することが出来ないことが示された。
- (2) ASTM C 1260 またはセメントアルカリ量を増加させた改良モルタルバー法では反応性を検出できることが明らかとなった。
- (3) 各種促進膨張試験の判定結果の違いは、モルタルの空隙水の pH の相違が原因であるものと考えられた。
- (4) 以上より、岩石学的分析を行った後に、適切な ASR 反応性試験を選択することが重要であることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) Katayama, T.: Petrography of Alkali-Aggregate Reaction s in Concrete –Reactive Minerals and Reaction Products-, Proceedings East Asia Alkali Aggregate Reaction Seminar, pp.45-59,

- 1997, Tottori, Japan
- 2) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: 岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.689-703, 2007
  - 3) 経済産業省: 平成 23 年砕石等統計年報, <http://www.meti.go.jp/statistics/sei/saiseiki/result-2.html>
  - 4) 鳥居和之: アルカリシリカ反応にいかに対応するか, セメント・コンクリート, No.696, pp.1-9, 2005.2
  - 5) Katayama, T., Sarai, Y., Higashi, Y. and Honma, A.: Late-Expansive Alkali-Silica Reaction in the Ohnyu and Furikusa Headwork Structure Central Japan, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004, Beijing
  - 6) ASTM C 1260 : Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
  - 7) 松下博通, 田中慎一郎, 山田一夫: 骨材のアルカリ反応性判定法に関する問題点ーASR抑制を目指した九州基準に向けてー, コンクリート工学, Vol.43, No.10, pp.9-17, 2005
  - 8) 建設省: 総合開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」 アルカリ金属の測定方法
  - 9) 例えば, Rivard, P., : Alkali Mass balance During The Accelerated Concrete Prism Test for Alkali-Aggregate Reactivity, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.1147-1153, 2003
  - 10) 米澤敏男, Ashworth, V., Procter, R., P., M.: セメント水和物によるモルタル細孔溶液中の Cl-固定のメカニズム, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.475-480, 1988
  - 11) Hooton, D.: The Kingston Outdoor Exposure Site for ASR- After 14 Years What Have We Learned?, Proceedings of Marc-Andre Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, pp.171-194, 2006
  - 12) RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of Alkali-Reactivity of Aggregates –Petrographic Method-, Material and Structures, Vol.36, pp.480-496, 2003
  - 13) 岩月英治, 森野奎二: NaOH 溶液に浸漬したチャート質骨材使用供試体の ASR 膨張挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.827-832, 2006