

# ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法に関する評価

## Evaluation on Aggregate Testing Method for ASR Potential Evaluation

三菱総合研究所	江藤 淳二	Junji ETOH	Member
エムアールアイリサーチアソシエイツ	落合 孝正	Takamasa OCHIAI	NON - Member
太平洋コンサルタント	小川 彰一	Shoiti OGAWA	NON - Member
太平洋コンサルタント	渋谷 和俊	Shibuya KAZUTOSHI	NON - Member
名古屋大学	丸山 一平	Ippei MARUYAMA	NON - Member
国立環境研究所	山田 一夫	Kazuo YAMADA	NON - Member
三菱総合研究所	滝沢 真之	Masayuki TAKIZAWA	Member

### Abstract

Test method has not been maintained for late-expansive aggregates (which cause cracks in concrete after 10 years or more), in addition to the early-expansive aggregates which have been considered as the major cause of ASR in Japan. In order to confirm the effectiveness of the aggregate test method of JNES flow (the method mainly composed of international methods RILEM AAR - 3 and AAR - 4) and to prepare applicable aggregate test method, we conducted comparative tests using domestic and foreign aggregate test methods, examined test methods applicable to late-expansive aggregates, compared and analyzed the results of the tests.

**Keywords:** ASR, RILEM AAR-3, RILEM AAR-4, Aggregate, CPT

## 1. 諸言

これまで日本ではアルカリ骨材反応 (ASR) によって劣化を生じた構造物の事例は、急速膨張性を示す骨材によるものが多数報告されてきたが、近年では遅延膨張性骨材<sup>1)</sup> (10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。) による劣化事例が報告されている<sup>2),3)</sup>。

このような背景のもと、旧独立行政法人原子力安全基盤機構 (旧 JNES) が、RE レポート (以下、JNES レポート) とし、国内外の最新知見に基づき、急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材に適用できる骨材の ASR 試験方法を提案している<sup>4)</sup>。Fig.1 に提案されている骨材の ASR 試験フローを示す。骨材が急速膨張性の場合、従来の試験方法 (JIS 化学法、JIS モルタルバー法) で概ね判定できるが、遅延膨張性骨材やペシマム現象 (骨材が全量ではなく特定割合含まれる場合に膨張量が最も大きくなる現象) を有する急速膨張性骨材に対してはアルカリシリカ反応性を見逃す可能性があるため、促進条件の高い海外の試験方法 (RILEM AAR-2, RILEM AAR-4) を用いることが提案されている。

一方、欧米では RILEM の規格試験が利用されているが、日本の骨材では限られたデータしかないことが課題であった。したがって、海外において提案されている各種試験方法の適合性を我が国の骨材で検証する必要がある。そこで、本研究では、国内の骨材を用いて RILEM の規格試験を実施し、特に、遅延膨張性骨材の反応性検出法に関して、国内外の ASR 試験方法を評価した。

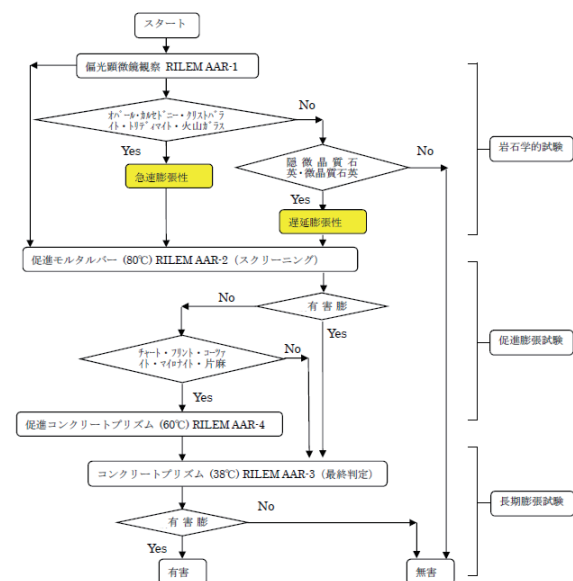


Fig.1 Aggregate Testing Flow for ASR ( proposal )<sup>4)</sup>

連絡先:江藤 淳二、株式会社三菱総合研究所、  
〒100-8141 東京都千代田区永田町 2-10-3、  
E-mail: junji\_eto@mri.co.jp

## 2. 試験方法

### 2.1 国内外の骨材試験方法の比較

骨材試験方法の比較試験として、国内の骨材を用いて、従来から行われている試験方法（JIS 化学法、JIS モルタルバー法）と、JNES レポートで提案されている海外の試験方法（RILEM AAR-2, RILEM AAR-3, RILEM AAR-4）を比較し、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材に対する有効性を確認した。Table 1 に比較試験を行った国内外の骨材の ASR 試験方法、各試験方法の概要と課題を整理した。

Table 1 Aggregate Testing Method for ASR

試験方法・概要	課題
JIS 化学法 <sup>5)</sup> ： 骨材を 150~300 $\mu$ m に粒度調整し 80°C NaOH 溶液に 24 時間浸漬	<ul style="list-style-type: none"> <li>急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には適さない。</li> </ul>
JIS モルタルバー法 <sup>6)</sup> ： モルタルバー (40×40×160mm) 40°C、湿空養生 促進養生 6 ヶ月で判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には適さない。</li> <li>ベシマム現象を検出できない。</li> </ul>
RILEM AAR-2 (ASTM C1260 相当) <sup>7)</sup> ： モルタルバー (25×25×285mm) 80°C NaOH 溶液に浸漬 促進養生 14 日で判定 (AAR-2 は ASTM C1260 とほぼ同等の試験方法である)	<ul style="list-style-type: none"> <li>促進条件が厳しく、多くの骨材が反応性となる。</li> <li>ベシマム現象を検出できない。</li> <li>チャート、プリントは検出できない。</li> <li>用いる試料の粒度、試験体サイズに選択枝があるが、その評価が明確となっていない。</li> <li>試験の詳細が規定されていない</li> </ul>
RILEM AAR-3 <sup>7)</sup> ： コンクリートブリズム (CPT) (75×75×250mm) 38°C 湿空養生 アルカリ量: 5.5kg/m <sup>3</sup> 促進養生 52 週で判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>判定に 1 年要する(混合材を含む、材齢 1 年でも膨張が継続している条件では 2 年を推奨)</li> <li>試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。</li> <li>骨材試験であり、試験におけるコンクリート調合が国内で用いられている調合と比べて、単位水量が多い。</li> </ul>
RILEM AAR-4 <sup>7)</sup> ： コンクリートブリズム (CPT) (75×75×250mm) 60°C 湿空養生で工夫された養生層/容器を使用 アルカリ量: 5.5kg/m <sup>3</sup> 促進養生 15 週で判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。</li> <li>骨材試験であり、試験におけるコンクリート調合が国内で用いられている調合と比べて、単位水量が多い。</li> </ul>

### 2.2 骨材及びコンクリートの調合

試験に供した国内の骨材の岩石学的特徴を Table 2 に示す。急速膨張性骨材は、安山岩でアルカリシリカ反応性の高い鉱物が含まれていることを偏光顕微鏡観察及び粉末 X 線回折によって確認した。また、遅延膨張性骨材は、砂質ホルンフェルス、砂質片岩、緑色片岩であり、いずれの骨材も隠微晶質石英が含まれていることを確認した。

RILEM AAR-3 及び AAR-4 の調合条件は、日本における標準的な調合を考慮し、Table 3 に示す通りとした。また、RILEM AAR-3 及び AAR-4 は、試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題があり、試験期間中における水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で、膨張を過小評価している可能性が指摘されている<sup>8), 9), 10)</sup>。Fig.2 にアルカリ溶脱の概要を示す。そこで、本試験では、アルカリ溶脱を抑制するために、アルカリラッピング (以下、AW) を採用した。AW は、アルカリ溶液を含ませた不織布を試験体に巻き、フィルムラッピングして養生する方法である<sup>11)</sup>。AW の濃度 (NaOH 濃度) は、公益社団法人日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」(2014 年 7 月)<sup>11)</sup>で示されている方法に準じて、1.5mol/l とした。

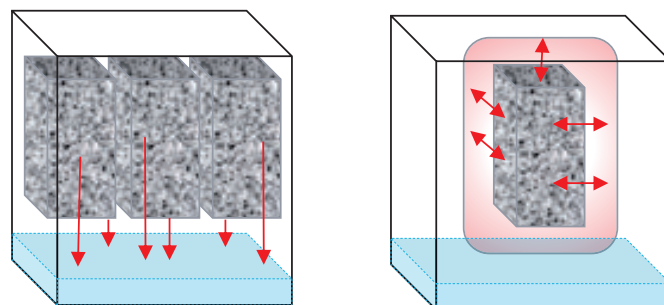


Fig.2 Schematic diagram of alkali leaching during CPT

(Left : Alkali leaching from specimen)

(Right : Prevention of alkali leaching by alkali wrapping)

## 3. 試験結果

### 3.1 国内の骨材試験方法

JIS 化学法、JIS モルタルバー法、RILEM AAR-2 (ASTM C 1260 相当)、RILEM AAR-3 及び AAR-4 の結果と併せて、アルカリシリカ反応性に関する判定結果を Table 4 に示す。Table 4 において、RILEM AAR-3 及び AAR-4 は、最新の 2015 年に発刊された RILEM AAR 試験方法 (2015) の判定基準<sup>7)</sup>を記した。なお、RILEM AAR-3 及び AAR-4 の各

試験は AW を施した結果であるため、AW を行わない REILEMAAR-4 の結果も合わせて示す。

Table 4 の判定結果から、急速膨張性骨材は、JIS 化学法、JIS モルタルバー法を実施すれば、有害判定となり、現行の JIS においてこのような骨材を排除することが可能と考えられる。しかし、アルカリシリカ反応性の高い急速膨張性を有する骨材が少量含まれるような場合は、これら JIS の試験で無害判定となる可能性は否定できない。アルカリシリカ反応性の高い骨材はペシマム現象を示すことがあり、石灰石骨材に対して 5%混入された場合にも膨張を生じることが知られており、ペシマム割合は評価する材齢にもよる<sup>4)</sup>。

一方、遅延膨張性として用いた 3 種類の骨材は、JIS 化学法では「無害でない」と判定された骨材もあったが（骨材 WI）、いずれの遅延膨張性骨材も判定閾値に近い値を示したことから、これらの骨材は、同じ産地であったとしても、採取場所や採取時期、あるいはサンプリング方法の違いなどの条件によっては判定が分かれる可能性がある。しかし、これらの骨材はいずれも JIS モルタルバー法で「無害」判定となったことから、JIS では安全と認められる骨材として使用可能となる。これら遅延膨張性骨材のうち、骨材 GK は採取地周辺の構造物に劣化事例が認められ、また骨材 HE は、劣化事例は確認されなかったが JIS による試験方法では、このような遅延膨張性骨材を排除できない可能性があると考えられる。

### 3.2 海外の骨材試験方法

RILEMAAR-2 は、モルタルバーを 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬し、浸漬から 14 日の膨張率でアルカリシリカ反応性を判定する方法である。また、温度及びアルカリ濃度が高いことで、遅延膨張性骨材に含まれる反応性鉱物である隠微晶質石英に対しても反応し、アルカリシリカ反応性を検出できると考えられており、遅延膨張性を含む、すべての骨材で有害判定となった。

一方、チャート、フリントなどの骨材は 1mol/l の NaOH 溶液への浸漬では骨材中の反応性鉱物が溶解し、この試験方法では膨張を生じないことが知られている<sup>12), 13)</sup>。また、この試験方法は NaOH 溶液に浸漬する厳しい試験方法であり、RILEM では、骨材のアルカリシリカ反応性評価として、RILEM AAR-2 試験で反応性ありと判定された骨材に対して、さらに RILEMAAR-3 あるいは AAR-4 で反応性を確認する手順としている。これは、実際に ASR によるリスクが低い骨材までも反応性ありと判定してしまう可能性があるためである。また、2015 年に制定された BS 規格(British Standard, BS 8500-2:2015, Minimizing the risk of damaging alkali-silica reaction in concrete)では、RILEM AAR-2 に該当するような試験は要求されず、BS 812-123 に REILEM AAR-3 及び AAR-4 と同様のコンクリートプリズム試験（以下、CPT）が制定されている。

Table 2 Petrological features of the aggregate used in this research

分類	試料名	岩石名	反応性鉱物
急速膨張性	骨材 TO	安山岩	トリディマイト
	骨材 SI	安山岩	クリストバライト、火山ガラス
遅延膨張性	骨材 WI	砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英
	骨材 HE	砂質片岩	隠微晶質石英
	骨材 GK	緑色片岩	隠微晶質石英

Table 3 Mix proportion of concrete

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				粗骨材(G)		混和剤量 減水剤 <sup>※3</sup> (C×%)
			水 (W)	セメント <sup>※1</sup> (C)	細骨材 <sup>※2</sup> (S)	反応性	非反応性 <sup>※2</sup>		
TO(急速)	50.0	45.0	160	320	821	309	724	1.45	
SI(急速)						306	724		
WI(遅延)						1007	—		
HE(遅延)						1030	—		
GK(遅延)						1042	—		

注記) ※1:普通ポルトランドセメント(R<sub>2</sub>O=0.55%)を使用。 ※2:石灰石骨材を使用。 ※3:4 倍希釈液としての添加率を表示。

Table 4 Comparison of judgment results on ASR reactivity

試験方法	無害でない または有害判定 となる膨張率	急速膨張性骨材		遅延膨張性骨材		
		TO	SI	WI	HE	GK
JIS 化学法	—	無害でない	無害でない	無害でない	無害	無害
JIS モルタル バー法	材齢 26 週で 0.100%以上	無害でない (0.415%) <sup>※1</sup>	無害でない (0.216%) <sup>※1</sup>	無害 (0.038%) <sup>※1</sup>	無害 (0.059%) <sup>※1</sup>	無害 (0.022%) <sup>※1</sup>
RILEMAAR-2 (ASTM C1260 相当)	材齢 14 日で 0.2%以上	有害 (0.54%) <sup>※2</sup>	有害 (0.40%) <sup>※2</sup>	有害 (0.23%) <sup>※2</sup>	有害 (0.30%) <sup>※2</sup>	有害 (0.23%) <sup>※2</sup>
RILEMAAR-3 (AW)	材齢 52 週で 0.05%以上 <sup>※5</sup>	有害 (0.242%) <sup>※3</sup>	有害 (0.205%) <sup>※3</sup>	有害 (0.095%) <sup>※3</sup>	有害 (0.097%) <sup>※3</sup>	無害 (0.046%) <sup>※3</sup>
RILEMAAR-4 (AW)	材齢 15 週で 0.03%以上 <sup>※5</sup>	有害 (0.186%) <sup>※4</sup>	有害 (0.182%) <sup>※4</sup>	有害 (0.080%) <sup>※4</sup>	有害 (0.095%) <sup>※4</sup>	有害 (0.066%) <sup>※4</sup>
RILEMAAR-4 (AW なし)	材齢 15 週で 0.03%以上 <sup>※5</sup>	有害 (0.215%) <sup>※4</sup>	—	有害 (0.037%) <sup>※4</sup>	—	—

(注) 括弧書きの判定結果は、判定材齢前に基準値を超えた水準。

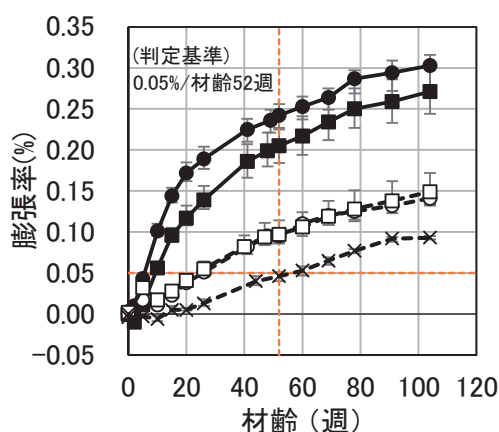
※1：JIS モルタルバー法の欄にある数値は、材齢 26 週における膨張率。

※2：ASTM C1260 の欄にある数値は、材齢 14 日 (2 週) における膨張率。

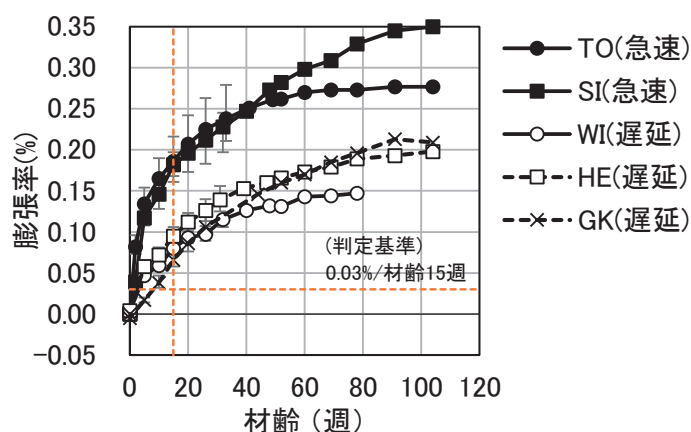
※3：RILEMAAR-3 の欄にある数値は、材齢 1 年 (52 週) における膨張率。

※4：RILEMAAR-4 の欄にある数値は、材齢 15 週における膨張率。

※5：RILEMAAR-3/AAR-4 は、最新の 2015 年発刊の RILEMAAR 試験法<sup>7)</sup>の判定基準に従った。



(a) RILEM AAR-3 with AW



(b) RILEM AAR-4 with AW

Fig.3 Change with time of expansion ratio in RILEM AAR-3 and AAR-4 with AW

RILEM AAR-3(AW)及びAAR-4(AW)では、遅延膨張性の骨材 GK を用いた RILEM AAR-3(AW)の判定結果のみ無害となったが、その他の骨材は何れも有害判定となった。また、骨材 GK は、RILEMAAR-3(AW)では無害判定となったが、膨張率は 0.046%であった。これは、判定基準の閾値である材齢 52 週における膨張率 0.05%に近い値である。RILEMAAR-3 では、疑わしい判定結果の場合には、さらに 1 年間測定を継続し膨張を確認することを推奨している。骨材 GK の膨張挙動は、Fig.3 に示すように、材齢 52 週以降さらに膨張が継続し、膨張率 0.05%を上回ることを確認した。このことから、試験で使用した 5 種類の骨材はすべて有害判定とみなしてもよいと考えられる。すなわち、JIS では検知できない遅延膨張性を有する

骨材も含め RILEMAAR-3(AW)または AAR-4(AW)でアルカリシリカ反応性を検知できると考えられる。

RILEMAAR-3 の膨張の判定材齢は 1 年 (膨張が継続している場合や不明瞭な場合は 2 年) であるのに対し、RILEMAAR-4 の判定材齢は 15 週 と試験期間が短縮できる。試験結果については、RILEMAAR-3(AW)において骨材 GK が材齢 1 年 (52 週) で判定基準に近い膨張率を示したのに対し、RILEMAAR-4(AW)では何れも判定基準を上回るものであった。これらのことから、RILEMAAR-4(AW)は AAR-3(AW)と比較して試験期間の短縮とともに、遅延膨張性骨材についても確実に判定できる可能性があると考えられる。

### 3.3 アルカリラッピングの効果

RILEMAAR-4におけるAW有無による比較をFig4に示す。急速膨張性の骨材TOでは、膨張率は、材齢26週まではAWなしの方がAWを上回ったが、26週以降ではAWの方が上回り、材齢52週における膨張率は、AWなしで0.222%に対し、AWで0.262%となった。この現象は、骨材TOはアルカリシリカ反応性が高く、AWを施すことにより生成したアルカシリカリゲルが不織布に移行し、早期では膨張が生じにくく、AWを施さない条件では、材齢が進むに従ってアルカリが溶脱するため、材齢26週以後の膨張が飽和に達したものと考えられる<sup>14)</sup>。

また、骨材TOの質量変化率は、AWに対してAWなしの質量増加は小さく、また養生期間中の変動も大きい。これは、AWを施さない試験体が乾燥するためと考えられるが、AWなしにおいて試験体が乾燥を生じたにも係らず膨張を生じた理由は、骨材TOはアルカリシリカ反応性が高い急速膨張性を示す骨材であり、内部の水分で十分に膨張を生じたためと考えられる。

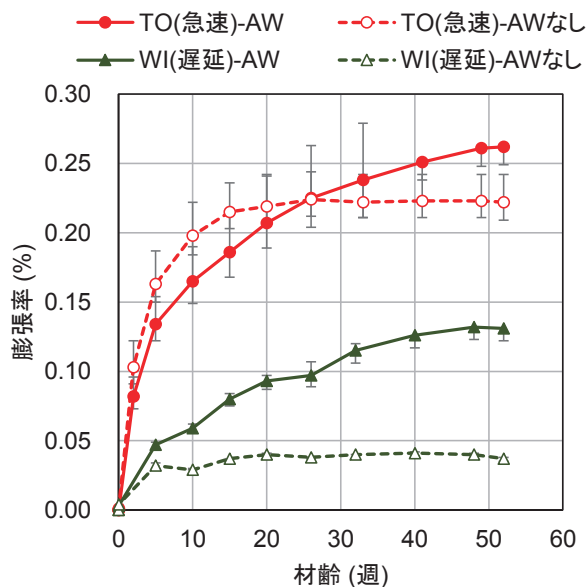
一方、遅延膨張性の骨材WIでは、AWの膨張率はAWなしよりも大きく、材齢52週における膨張率は、AWなしで0.037%に対し、AWありで0.131%となった。また、質量変化率も、AWでは材齢が進むにつれて質量が増加

したのに対し、AWなしでは質量減少を生じた。これは、骨材TOと同様に、AWなしでは養生期間中に試験体からのアルカリ溶脱と乾燥を生じたためであり、特に骨材WIはASR反応がゆっくり生じる遅延膨張性を示す骨材であるため、アルカリ溶脱と乾燥の影響を強く受け、AWなしでは膨張が生じにくくなり、また、質量の増加が抑制されたと考えられる。なお、骨材WIでは、AWなしの条件では、AAR-4による判定基準である材齢15週での膨張率0.03%を下回り、骨材のアルカリシリカ反応性を検知できない可能性があると考えられる。

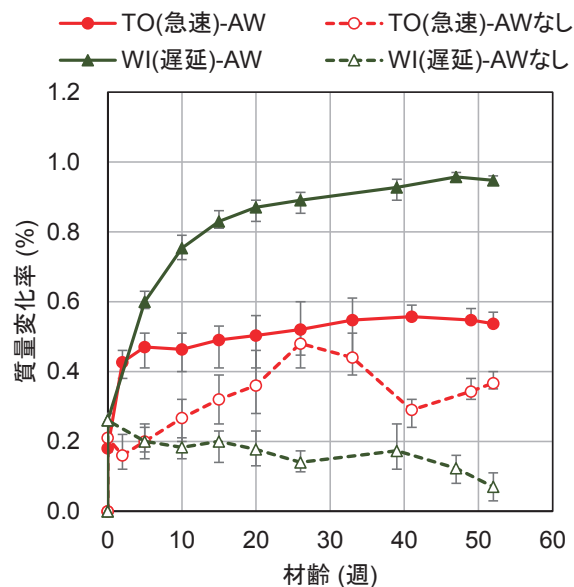
### 4. 結論

JISによる試験方法では、遅延膨張性骨材を排除できない可能性がある骨材でも、RILEMによる試験方法、特にAWを施したCPTで骨材のアルカリシリカ反応性を検知できると考えられる。また、RILEMの考え方を導入することで、遅延膨張性を含め骨材のアルカリシリカ反応性は評価可能になると考えられる。

CPTであるRILEMAAR-3、RILEMAAR-4では、文献等で確認、指摘されているように、AWを施さないRILEMAAR-4の判定基準である材齢15週でアルカリの溶脱と試験体の乾燥によって骨材のアルカリシリカ反応性を検知できない場合があることを確認した。



(a) 膨張率



(b) 質量変化率

Fig.4 Comparison based on the presence or absence of AW in RILEMAAR-4

## 謝辞

本研究は、原子力規制庁「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究）事業）」における成果の一部である。

## 参考文献

- [1] T. Katayama, A review of alkali-aggregate reactions in Asia –Recent topics and future research, S. Nishibayashi, M.Kawamura (ed.), East Asia alkali-aggregate reaction seminar, Tottori, Supplementary Papers, pp. A33-A44, 1997.
- [2] T. Katayama et al., Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures, Central Japan, Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004
- [3] T. Katayama: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.862-873, 2008
- [4] 中野眞木郎、原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案、JNES-RE-2013-2050 (2014)
- [5] JIS化学法：JIS A 1145 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）
- [6] JIS モルタルバー法: JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）
- [7] P.J.Nixon, I.Sims, Editors : RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS、Springer 1st ed.(2015)
- [8] 井上祐一郎, 佐川康貴, 川端雄一郎: “コンクリートのASR促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響”, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, 65巻, pp. 545-546 (2010)
- [9] Yamada, K et al: CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion, Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191 (2014)
- [10] Jason H. Ideker et al: The current state of the accelerated concrete prism test, Cement and Concrete Research 40, pp. 550–555 (2010)
- [11] (社)日本コンクリート工学会: ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書, pp. 272-284 (2014)
- [12] 小石孝浩, 小田聡, 田中暁大, 佐川康貴, 山田一夫, 小川彰一: “隠微晶質石英を含む骨材を用いたモルタル及びコンクリートのアルカリシリカ反応膨張挙動に関する研究”, 平成27年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, V-18 (2016)
- [13] 蟹谷真生, 山戸博晃, 広野真一, 鳥居和之: “遅延膨張型堆積岩系骨材のアルカリシリカ反応性の評価”, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.959-964 (2011)
- [14] K. Yamada, et al.: Exact effects of temperature increase and alkali boosting concrete prism tests with alkali wrapping, Proceeding of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 203 2016