

論文 コンクリートバー法による人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性の評価

杉山 彰徳^{*1}・鳥居 和之^{*2}・酒井 賢太^{*3}・石川 雄康^{*4}

要旨：本研究は、4種類の人工軽量骨材および1種類の天然軽量骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性を明らかにすることを目的として、コンクリートバー法により骨材の反応性の評価を行なった。その結果、ある種の軽量骨材にはアルカリシリカゲルの生成が観察されたが、すべての軽量骨材を使用したコンクリートにおいてひび割れの発生を伴う膨張は認められなかった。

キーワード：人工軽量骨材，アルカリシリカ反応，コンクリートバー法，酢酸ウラニル蛍光法

1. はじめに

人工軽量骨材は多孔質・軽量である特徴を有することから、構造物の軽量化を図るため、高層建築物のスラブ・外壁、橋梁の桁・床版などに利用されている。

人工軽量骨材が構造物に利用されてから40年以上が経過しているが、アルカリシリカ反応(ASR 略記)による劣化事例はほとんど報告されていなかった。しかし、近年、人工軽量骨材を用いた実構造物においてASRによる劣化の疑いのある事例が報告されている^{1), 2)}。人工軽量骨材のASRの評価に関する研究報告は少なく、体系的な研究はほとんど行なわれていないのが現状である³⁾。

一方、人工軽量骨材および高炉スラグ骨材はJIS A 5308-1998 附属書1「7.アルカリシリカ反応性による区分」において、試験の結果によってA,Bいずれかに区分しなければならない骨材の種類に挙げられていない。これは、人工軽量骨材を破砕して試験に用いると、コンクリート中と異なる条件になるために、現行の化学法およびモルタルバー法の適用範囲外とされているためである。

人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性についての試験結果より、化学法では「無害でない」と判定されるが、モルタルバー法では骨材中の気孔により膨張が大きく緩和されるため、アルカリシリカゲルの生成の有無に係わらず、「無害」と判定されることが多い⁴⁾。

また、軽量骨材を用いた軽量コンクリートは、粗骨材に軽量骨材を用いた軽量コンクリート1種の利用がほとんどである。

本研究は、4種類の人工軽量骨材および1種類の天然軽量骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性を明らかにすることを目的として、コンクリートバー法により骨材の反応性の評価を行なったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した軽量骨材(市販品)は4種類の人工軽量骨材と1種類の天然軽量骨材である。また、比較用として、化学法およびモルタルバー法で「無害でない」と判定された富山県常願寺川産の川砂利(反応性の高い安山岩粒子が30%含有されている)を用いた。それらの仕様および物理的性質

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所建設技術グループサブリーダー 工修 (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*4 人工軽量骨材協会(太平洋マテリアル(株) 建設技術グループリーダー) 博(工) (正会員)

表 - 1 軽量骨材の原料および物理的性質

骨材名	原料	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
骨材A:人工	膨張頁岩	1.66	29.4
骨材B:人工	黄土	1.24	2.3
骨材C:人工	石炭灰	1.71	25.1
骨材D:人工	膨張頁岩	1.70	34.7
骨材E:天然	火山礫	1.47	59.9
反応性骨材	川砂利	2.64	1.7

を表 - 1 に示す。コンクリートバー法には、セメントに普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)、細骨材として非反応性の津久見産石灰石砂(密度: 2.69g/cm³, 粗粒率: 2.70)を用いた。

2.2 実験方法

(1) 骨材のアルカリシリカ反応性の評価

表 - 2 にコンクリートの配合を示す。コンクリート配合は CSA A23.2-14A(カナダ法)を参考にして決定した。なお、粗骨材の粒度分布は、20(15)-5mm となるように調整した。

コンクリートバー法は、CSA A23.2-14A(カナダ法)、ASTM法、デンマーク法⁵⁾の3種類の試験法とした。カナダ法は、コンクリート中に NaOH 試薬を添加することにより Na₂O_{eq}を C × 1.25% と調整して供試体を作製し、脱型後温度 40℃、相対湿度 100% の環境下で養生を行なった。ASTM法は、モルタルバー法の ASTM C 1260 を参考にして、供試体脱型後温度 40℃ の 1N・NaOH 溶液中に浸せきした。デンマーク法は、供試体脱型後温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液中に浸せきした。ASTM法およびデンマーク法は外部よりアルカリが常に供給される厳しい養生条

表 - 2 コンクリートの配合

配合条件	配合値
目標スランプ(cm)	15 ~ 20
目標空気量(%)	2.0 ± 1.0
水セメント比(%)	43
単位セメント量(kg/m ³)	420
細骨材率(%)	40

件下の試験である。なお、コンクリート供試体寸法は溶液の浸透性を考慮し 75 × 75 × 400mm とし、各水準 3 本作製した。

(2) ASR ゲルの生成状況と化学組成

コンクリートバー試験の材齢 6 ヶ月および 1 年の時点で、供試体の中央部を割裂し、その破断面における ASR ゲルの生成量を酢酸ウラニル蛍光法⁶⁾により調べるとともに、破断面より試料を採取し、軽量骨材の内部およびその近傍に生成した ASR ゲルの形態および化学組成を SEM-EDX 分析により検討した。

(3) 骨材の化学成分分析

軽量骨材の内部組織および化学組成を調べるために、骨材粒子の鏡面研磨試料(粒子径: 1.2 ~ 2.5mm)の走査型電子顕微鏡とエネルギー分散型 X 線分析との組合せによる SEM-EDX 分析を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの性状および圧縮強度

表 - 3 にコンクリートの性状および材齢 28 日における圧縮強度を示す。

骨材 B を用いたコンクリートの ASTM法およびデンマーク法のスランプは 12.0cm と目標スラ

表 - 3 コンクリートの性状および圧縮強度

実験条件	骨材名	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
ASTM法 および デンマーク法	骨材 A	15.0	1.8	50.3
	骨材 B	12.0	2.3	45.3
	骨材 C	18.5	2.7	43.1
	骨材 D	15.0	2.3	51.9
	骨材 E	19.0	3.5	20.2
	反応性	15.0	0.5	55.3
カナダ法	骨材 A	18.5	2.9	40.1
	骨材 B	19.5	2.3	32.1
	骨材 C	19.5	3.0	37.7
	骨材 D	18.5	1.8	39.2
	骨材 E	20.0	5.4	19.6
	反応性	17.0	0.7	41.6

ンプを下回る結果となったが、それ以外のコンクリートのスランプは目標値の 15~20cm を満足した。フレッシュコンクリートの状態は、軽量骨材の分離もなく、良好なワーカビリティが得られた。

コンクリートの圧縮強度は、天然軽量骨材 E が約 20N/mm² と低い値を示したのに対して、それ以外の骨材は 30 N/mm² 以上と高い値を示しており、骨材強度の影響が現われているものと考えられる。

3.2 コンクリートのアルカリシリカ反応性の評価 コンクリートバー法による長さ変化率および

相対動弾性係数について、図 - 1 および 2 にカナダ法の結果を、図 - 3 および 4 に ASTM 法の結果を、図 - 5 および 6 にデンマーク法の結果をそれぞれ示す。

カナダ法の結果は、いずれの軽量骨材を用いた場合においても膨張をまったく示さなかった。この原因としては、湿度 100% の保持が不十分となったために、供試体が乾燥状態になったことが一因であると推察される。軽量骨材は多孔質であるため乾燥の影響を受けやすく、吸水率が非常に高い天然軽量骨材 E はその影響が顕著に認められた。また、相対動弾性係数は天然軽量骨材 E が 90~100% であるのに対し、その他の骨

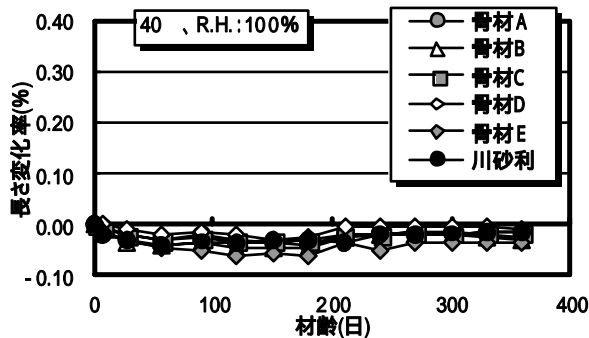


図 - 1 長さ変化率の経時変化(カナダ法)

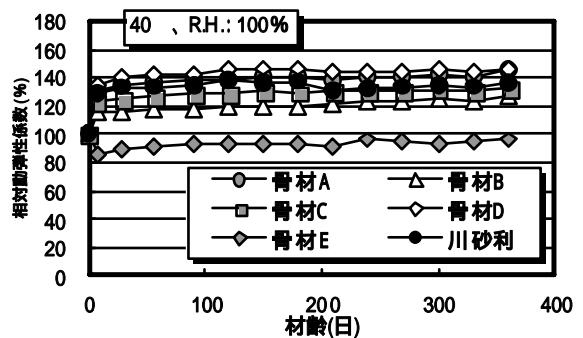


図 - 2 相対動弾性係数の経時変化(カナダ法)

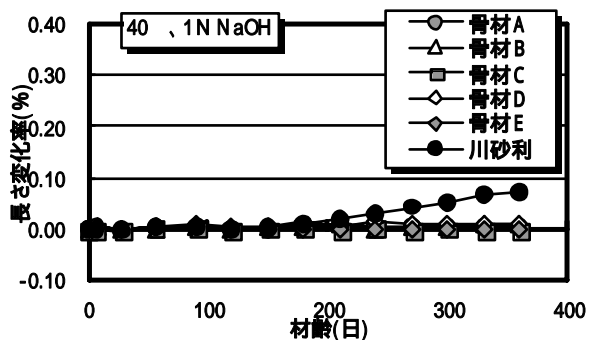


図 - 3 長さ変化率の経時変化(ASTM 法)

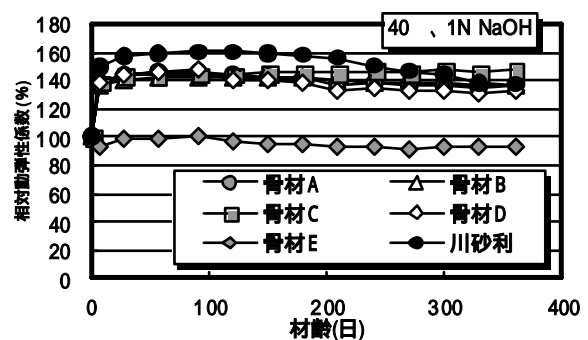


図 - 4 相対動弾性係数の経時変化(ASTM 法)

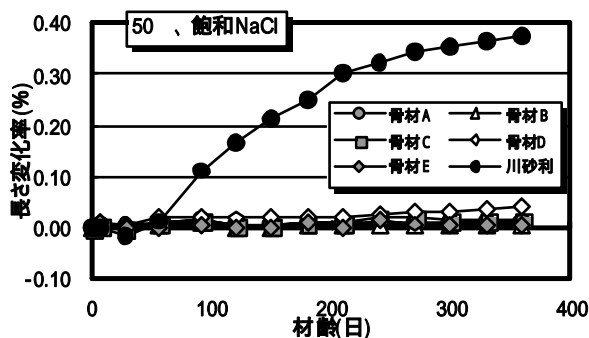


図 - 5 長さ変化率の経時変化(デンマーク法)

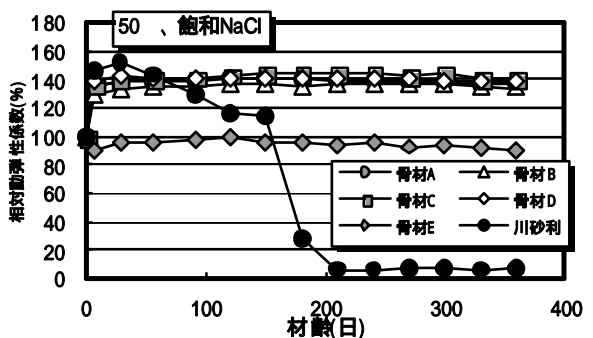


図 - 6 相対動弾性係数の経時変化(デンマーク法)

材は 120～140%であった。この結果は、圧縮強度の値(表 - 3 参照)とも良く対応している。

ASTM 法の結果は、川砂利が材齢 6 ヶ月以後膨張傾向を示したが、いずれの軽量骨材もほとんど膨張は認められなかった。また、溶液の浸透性を考慮し供試体寸法を小さくしたにもかかわらず、材齢 1 年において NaOH 溶液が供試体中心部まで完全に浸透していないことが確認された。

デンマーク法の結果は、川砂利が材齢 2 ヶ月以後に急激に膨張し始め、供試体表面に亀甲状のひび割れが発生し、同時に相対動弾性係数の顕著な低下が認められた。しかし、ASTM 法と同様にいずれの軽量骨材もほとんど膨張は発生せず、相対動弾性係数の低下も認められなかった。

3.3 ASR ゲル生成状況

写真 - 1 および 2 に酢酸ウラニル蛍光法によるコンクリート断面の発色状況の一例を、写真 - 3 および 4 に天然軽量骨材 E および骨材 C で観察された ASR ゲルの形態を示す。

カナダ法の試験では、いずれの水準も ASR ゲルの生成を示す蛍光発色(緑黄色、図中の白色部分)は認められなかった。一方、ASTM 法およびデンマーク法では、骨材 C、E および川砂利を用いたもので蛍光発色が観察された。大きな膨張が生じた川砂利はコンクリートの全断面に明瞭な蛍光色を呈した。また、天然骨材 E も川砂利と同様な発色状況を示した(写真 - 1 参照)。写真 - 1 より、コンクリート断面の中央部までは NaOH 溶液が完全に浸透していない状況が確認できる。ASTM 法において供試体内部まで NaOH 溶液を浸透させるためには、溶液濃度を濃くすることおよび養生温度を上昇させることなどが必要であると考えられるが、試験時の安全性の確保からはあまり望ましくないと言える。さらに、骨材 C では骨材の殻の部分にのみ蛍光発色が認められた(写真 - 2 参照)。

SEM 観察より、天然軽量骨材 E では内部空隙

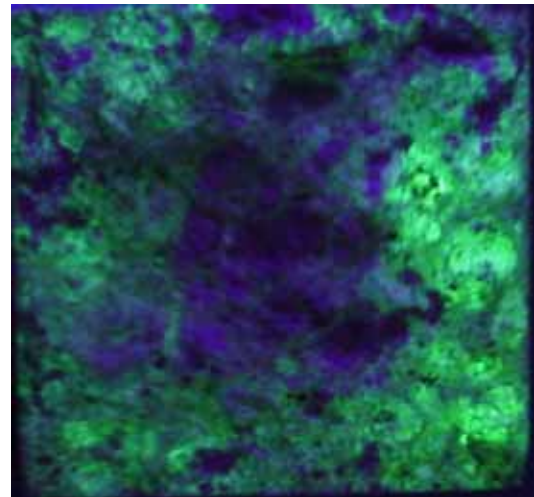


写真 - 1 ASR ゲルの発色状況
(骨材 E, ASTM 法)

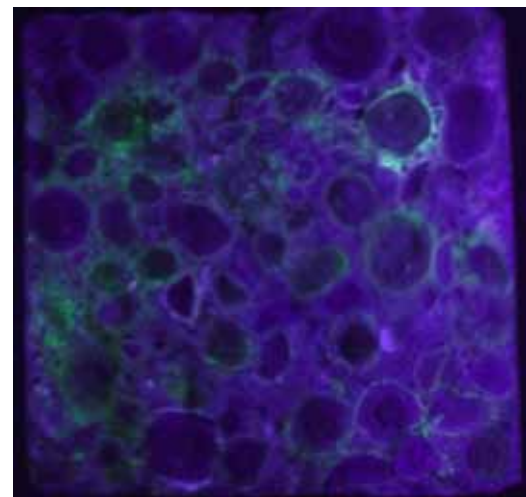


写真 - 2 ASR ゲルの発色状況
(骨材 C, ASTM 法)

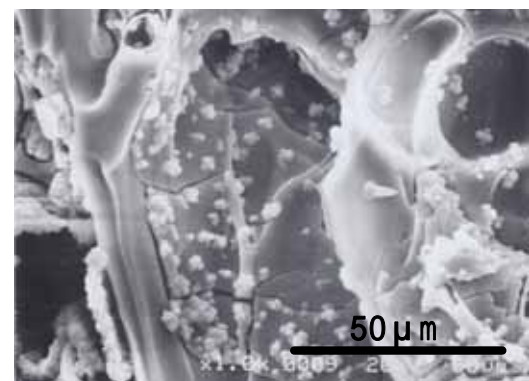


写真 - 3 骨材 E 内部に生成した
ASR ゲル(ASTM 法)

に多数の ASR ゲルの生成が確認された(写真 - 3 参照)。この写真では、ASR ゲルは骨材空隙の壁部に数 μm の厚さで生成していることが観察

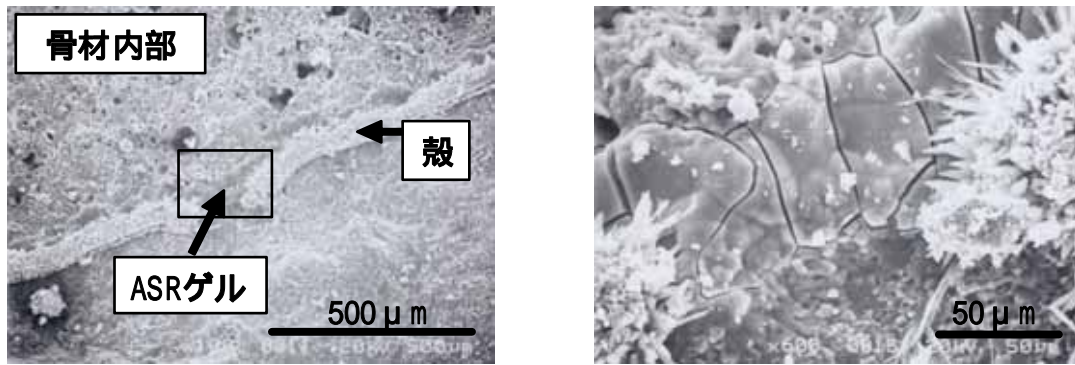


写真 - 4 骨材 C の殻内部に生成した ASR ゲル(ASTM 法)

表 - 4 軽量骨材の化学成分 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Total
骨材 A	52.3	18.6	4.1	3.1	4.0	8.7	2.0	0.1	92.9
骨材 B	65.5	14.1	0.5	2.0	2.3	11.0	1.9	0.3	97.6
骨材 C	55.9	22.4	1.3	0.3	4.0	10.5	1.5	0.3	96.2
骨材 C(殻)	73.4	11.5	1.0	0.9	0.8	3.5	1.6	0.1	92.8
骨材 C(内部)	55.4	23.4	3.5	3.8	2.0	3.6	1.6	0.1	93.4
骨材 D	59.1	17.0	1.7	0.1	3.2	10.4	1.9	0.3	93.7
骨材 E	65.9	12.9	1.1	1.5	2.0	11.8	1.0	0.5	96.7
反応性	61.7	17.2	<0.1	4.6	0.5	7.8	3.0	0.8	95.6

される。天然軽量骨材は吸水率が約 60%であり、多くの空隙を有することから、ASR ゲルの吸水膨張により生ずる膨張圧が大きく緩和されるため、有害となる膨張が生じないことが推測される⁷⁾。写真 - 4 は骨材 C の殻内側に生成した ASR ゲルである。骨材 C は原料の石炭灰に水を添加し任意の粒度に調整した後、高温焼成して製造したものである。その結果、骨材の周囲には内部よりも硬い厚さ約 100μm の殻が生成されている。殻の表面には、写真に示されるように空隙(ピンホール)の存在が認められる。この空隙よりアルカリ溶液が進入し殻内側の境界部に ASR ゲルが生成しているようである。ASR ゲルの生成厚さは約 50μm 程度であり、生成量自体が少ないものであると判断される。

表 - 4 に軽量骨材の化学組成 (SEM-EDX 分析)を示す。軽量骨材の化学成分は、原材料の種類(頁岩、石炭灰、粘土鉱物等)や焼成方法により相違するとともに、内部組織も均一ではなく、微量な化学成分が偏在することが確認できた。

軽量骨材の主要な化学組成は、シリカ(SiO₂)およびアルミナ(Al₂O₃)であり、いずれのものも約 10%のアルカリ(Na₂O+0.658K₂O)を含有している。骨材 C の化学組成は、骨材内部と殻の部分で相違しており、殻の部分は内部よりもシリカ分が多く、アルミナ分(Al₂O₃)、鉄分(Fe₂O₃)、カルシウム分(CaO)が少ないことが判明した。その他の骨材ではこのような化学組成の相違は認

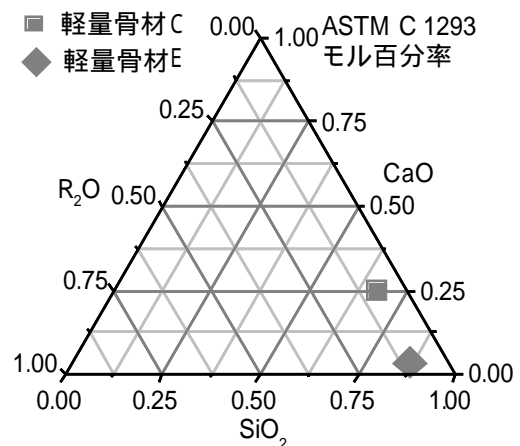


図 - 7 ASR ゲルの化学組成

められなかった。

図 - 7 に ASR ゲルの化学組成(モル百分率)を示す。アルカリ分($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)が 7~10%、シリカ分(SiO_2)が 68~87%、カルシウム分(CaO)が 4~25%の範囲のものであり、ASR ゲルの化学組成から判断すると、膨張性を有するものであると考えられる⁸⁾。しかし、前述したように、ASR ゲルの生成量自体が比較的少ないことや軽量骨材が多量の空隙を有することより、ASR ゲルの吸水膨張時に有害な膨張が生じなかったものと推察される。

4. 結論

4種類の人工軽量骨材および1種類の天然軽量骨材を用いたコンクリートのアルカリシリカ反応性を明らかにすることを目的として実施した一連の ASR 試験の結果を以下にまとめる。

- (1) カナダ法では、いずれの骨材を用いた場合においても膨張を示さなかった。この原因としては、湿度の保持が不十分であったために、供試体が乾燥状態になったことが一因であると推察された。
- (2) ASTM 法では、川砂利が材齢 6ヶ月以後わずかに膨張傾向を示したが、いずれの軽量骨材もほとんど膨張は認められなかった。また、材齢 1年では NaOH 溶液が供試体中心部まで完全に浸透していないことが確認された。
- (3) デンマーク法では、川砂利が材齢 2ヶ月以後急激に膨張し始め、供試体表面に亀甲状のひび割れが発生したが、ASTM 法と同様にいずれの軽量骨材もほとんど膨張は認められなかった。
- (4) ASTM 法およびデンマーク法において、骨材 C、E および川砂利では ASR ゲルの生成が確認された。
- (5) 天然骨材 E では内部空隙の壁部に厚さ数 μm の ASR ゲルの生成が認められた。
- (6) 骨材 C では殻内側に厚さ約 50 μm 程度の ASR ゲルの生成が認められた。しかし、ASR ゲルの生成量は少なく、有害となる膨張は生じ

ないものと推察された。

- (7) 以上のことから、ある種の軽量骨材には ASR ゲルの生成が認められたが、いずれの軽量骨材を使用したコンクリートでも有害な膨張は発生しなかった。

謝辞：本研究の実施にあたり、ご協力いただいた、人工軽量骨材協会に感謝いたします。

参考文献

- 1) 松田芳範, 津吉 毅, 石橋忠良: 軽量骨材コンクリートを用いた実建造物の調査報告, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp.183-188, 2004.
- 2) L.De. Ceukelaire: Alkali-silica Reaction in a Lightweight Concrete Bridge, Proc. of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.231-239, 1992.
- 3) A. Mladenovic, J.S. Supt et al.: Alkali-silica Reactivity of Some Frequently Used Lightweight Aggregates, Cement and Concrete Research, 34(9), pp.1809-1816, 2004.
- 4) 杉山彰徳, 鳥居和之, 本田貴子, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1381-1386, 2005.
- 5) S.Chatterji: An Accelerated Method for the Detection of Alkali-Aggregate Reactivities of Aggregate, Cement and Concrete research, Vol.8, No.5, pp.647-649, 1978.
- 6) K.Natesaiyer and K.C.Hover: Insitu Identification of ASR Products in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.18, No.3, pp.455-463, 1988.
- 7) R.J. Collins, P.D. Bareham: Alkali-silica Reaction: Suppression of Expansion Using Porous Aggregate, Cement and Concrete Research, 17(1), pp.89-96, 1987.
- 8) 川村満紀, S.チャタジー: コンクリートの材料科学, 森北出版, 2002.