

論文 軽量骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性

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

要旨：本研究は、人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート 1 種、2 種および軽量細骨材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、骨材の鉱物学的試験、化学法、モルタルバー法およびコンクリートバー法により評価を行なった。その結果、反応性の川砂利とともに人工軽量細骨材を使用することによりコンクリートの膨張を抑制できることが確認された。

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

人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートは、構造躯体の所要の強度を十分に満足することができるため、普通コンクリートと同等の断面で自重を軽減することが可能である。この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)}。一方、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⁾。

筆者らはこれまでに人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性に関して鉱物学的試験、化学法、モルタルバー法およびコンクリートバー法により評価を行ってきた。その結果、人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性は、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こと⁴⁾、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においてもひび割れの発生をとまなう、有害な膨張は発生しなかったこと、などが確認できた⁵⁾。

一方、軽量コンクリートは、細骨材に普通骨材、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が、細骨材および粗骨材に軽量骨材を用いた軽量コンクリート 2 種や細骨材に軽量骨材、粗骨材に普通骨材を用いた軽量細骨材コンクリート(仮称)も使用されることがある。

本研究は、人工軽量細・粗骨材を用いた軽量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、一連の ASR 試験(鉱物学的試験、化学法、モルタルバー法およびコンクリートバー法)により軽量骨材のアルカリシリカ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

使用した軽量骨材は 2 種類の人工軽量細骨材と 1 種類の人工軽量粗骨材である。また、比較用

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

*2 人工軽量骨材協会 (太平洋セメント(株) CS チームリーダー) 博(工) (正会員)

*3 戸田建設株式会社 (正会員)

*4 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)

表－１ 骨材の原料および物理的性質

種類	骨材名	原料	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
細	骨材A	膨張頁岩	1.91	18.5
	骨材B	ガラス	0.70	0.1
	非反応	石灰石砂	2.69	0.7
粗	骨材A	膨張頁岩	1.66	29.4
	反応性	川砂利	2.63	1.3

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(反応性鉱物：クリストバライト, 火山ガラス)が 30%含有されている), 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。それらの仕様および物理的性質を表－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)を用いた。

2.2 実験方法

(1) 骨材の化学成分と内部組織の特徴

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。

(2) 骨材のアルカリシリカ反応性の評価

骨材のアルカリシリカ反応性試験は, 化学法(JIS A1145-2001), 2 種類の促進モルタルバー法(ASTM C1260(温度 80℃の 1N・NaOH 溶液に浸せき)およびデンマーク法(温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸せき))および 2 種類の促進コンクリートバー法(ASTM 法およびデンマーク法)である。

表－２にコンクリートの配合を, 表－３に試験水準を示す。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, ASTM 法およびデン

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

表－３ 試験水準

No.	コンクリート種類	細骨材	粗骨材
1	比較	石灰石砂	川砂利
2	軽量1種	石灰石砂	骨材 A
3	軽量2種	骨材 A	骨材 A
4		骨材 B	骨材 A
5	軽量細骨材	骨材 A	川砂利
6		骨材 B	川砂利

注) 網掛け・ゴシックは軽量骨材を表す

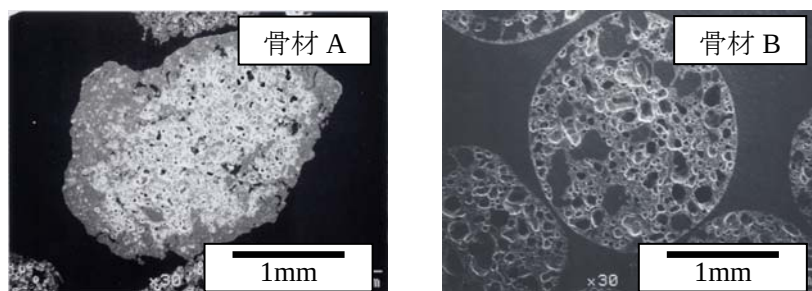
マーク法⁶⁾の 2 種類の促進養生試験法とした。ASTM 法は, モルタルバー法の ASTM C 1260 を参考にして, 供試体脱型後温度 40℃の 1N・NaOH 溶液中に浸せきした。デンマーク法は, 供試体脱型後温度 50℃の飽和 NaCl 溶液中に浸せきした。ASTM 法およびデンマーク法は外部よりアルカリが常に供給される厳しい養生条件下の試験である。なお, コンクリート供試体の寸法は溶液の浸透性を考慮し 75×75×400mm の角柱とし, 各水準 3 本作製した。

(3) 塩分浸透深さの測定

コンクリートバー法(デンマーク法)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 0.1N の硝酸銀溶液を噴霧し, 供試体への塩分浸透深さを測定した。

(4) 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 ゲルの生成状況を酢酸ウラニル蛍光法⁷⁾により調べた。



写真－１ 軽量骨材粒子(1.2～2.5mm)の破断面の SEM 像

表－４ 軽量骨材のガラス相の主要な化学成分 (wt%, SEM-EDX 分析)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	ZnO	CuO	Total
骨材 A	59.1	17.0	1.7	0.1	3.2	10.4	1.9	0.3	1.6	0.3	3.0	98.6
骨材 B	50.4	20.2	0.0	4.6	2.1	14.9	0.6	0.1	1.0	0.2	5.8	99.9

3. 実験結果および考察

3.1 骨材の化学成分と内部組織の特徴

写真－１に軽量骨材の切断面の形状を、表－４に使用骨材の化学成分を示す。軽量骨材の内部組織は多孔質であるが、空隙(気孔)の形状や連続性は骨材により大きく相違していることが認められる。また、軽量骨材の化学組成は、原料の種類や焼成方法により相違するとともに、軽量骨材の内部は均一ではなく、微量成分(P₂O₅, ZnO 等)が偏在することも確認できた。軽量骨材の主要な成分は、シリカ(SiO₂)およびアルミナ(Al₂O₃)であり、10%程度のアルカリ(Na₂O+0.658K₂O)を含有していることが特徴である。

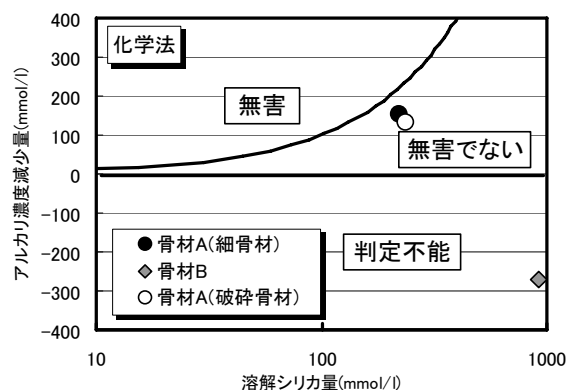
3.2 化学法によるアルカリシリカ反応性の判定

化学法の試験結果を図－１に示す。化学法では、いずれの軽量骨材も「無害でない」と判定された。また、骨材 B はアルカリ濃度減少量が負の値となり、現行の判定基準によると「判定不能」の結果となった。この結果は、化学法の試験中に ASR により消費されるよりも多いアルカリが骨材から溶出していることを示している。また、骨材 A は細骨材本来の状態の試料と粗骨材を粉碎して粒度調整した試料において、ほぼ同一の値を示した。

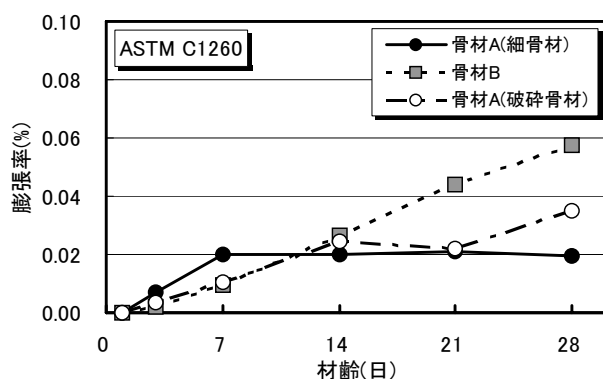
3.3 モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性の判定

2 種類の促進モルタルバー法(ASTM C1260(温度 80℃の 1N・NaOH 溶液に浸せき)およびデンマーク法(温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸せき))の膨張量の比較を図－２および３に示す。外部より高濃度のアルカリが供給され、厳しい高温促進環境下における ASTM C1260 では、材齢 14 日で「無害」と判定される 0.1%以下の膨張量であったが、材齢の経過に伴い膨張量は増加傾向にあった。とくに、原材料がガラス起源の骨材 B の膨張量が大きくなることが認められた。また、骨材 A は細骨材本来の状態の試料と粗骨材を粉碎して粒度調整した試料において、化学法の結果と同様にほぼ同一の膨張挙動を示した。

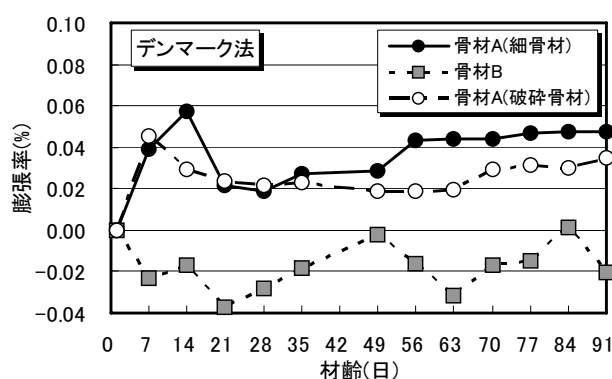
一方、飽和 NaCl 溶液に浸せきするデンマーク



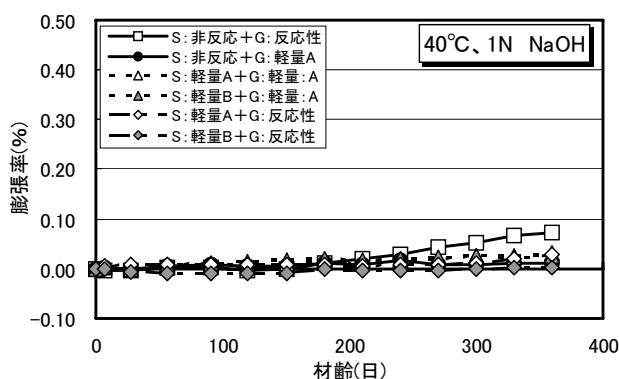
図－１ 化学法の結果



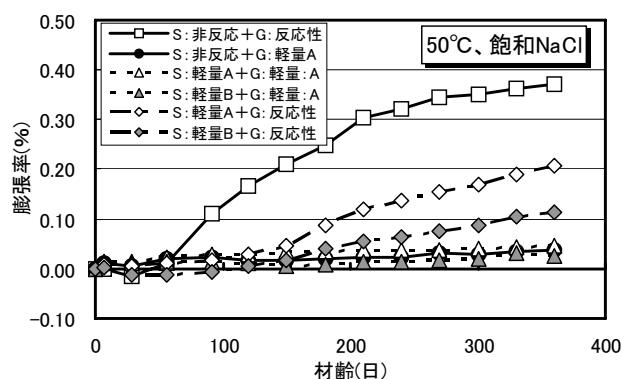
図－２ 長さ変化率の経時変化 (ASTM C1260)



図－３ 長さ変化率の経時変化 (デンマーク法)



図－４ 長さ変化率の経時変化 (ASTM 法)



図－５ 長さ変化率の経時変化 (デンマーク法)

法では、ASTM C1260 の傾向と異なり、ガラス起源の骨材 B のモルタルの膨張量は、若干収縮の傾向となった。また、骨材 A は細骨材本来の状態の試料と粗骨材を粉碎して粒度調整した試料において、ASTM C1260 の試験結果と同様にほぼ同一の膨張傾向を示した。デンマーク法では、材齢 91 日で「無害」と判定される 0.1%以下の膨張量であり、ASTM C1260 と同一の判定結果が得られた。デンマーク法では、NaCl の浸透過程で、フリーデル氏塩の生成と水酸化カルシウムの分解により、ASR が発生するアルカリ雰囲気形成されるとされている。デンマーク法のアルカリ雰囲気は ASTM C1260 ほど厳しい条件とならないことより、ガラス相が主要な反応性鉱物である軽量細骨材にデンマーク法を適用することは適当でないと推察される。

3.4 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について、図－４に ASTM 法の結果を、図－５にデン

マーク法の結果をそれぞれ示す。

ASTM 法の結果は、粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートは材齢 6 ヶ月以後に膨張が始まったが、それ以外の軽量骨材を用いたコンクリートはほとんど膨張が認められなかった。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 年においても 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酢酸ウラニル蛍光法により確認された。

一方、デンマーク法の結果は、粗骨材に反応性骨材を用いたコンクリートが材齢 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た。しかし、軽量コンクリート 1 種および 2 種は ASTM 法と同様にほとんど膨張は認められなかった。細骨材に軽量骨材を用いた軽量細骨材コンクリートは、材齢 6 ヶ月以後膨張が始まったが、その膨張量は反応性の川砂利を用いたコンクリートよりも小さくなり、膨張抑制効果が認められた⁸⁾。

3.5 塩分浸透深さ

表－5に塩分浸透深さの結果を示す。材齢 6ヶ月経過時点においては、細骨材に骨材 B を用いたコンクリートおよび軽量細骨材コンクリート(No.4, 5, 6)の塩分浸透が不十分であったが、材齢 1 年経過時点においては、すべてのコンクリートにおいて NaCl 溶液が供試体中心部まで浸

表－5 塩分浸透深さ 単位：cm

No.	細骨材	粗骨材	6ヶ月	1年
1	石灰石砂	川砂利	全浸透	全浸透
2	石灰石砂	骨材 A	全浸透	全浸透
3	骨材 A	骨材 A	全浸透	全浸透
4	骨材 B	骨材 A	1.63	全浸透
5	骨材 A	川砂利	2.30	全浸透
6	骨材 B	川砂利	1.95	全浸透

注) 網掛け・ゴシックは軽量骨材を表す。

全浸透：供試体の中央(3.75cm)まで完全に塩分が浸透

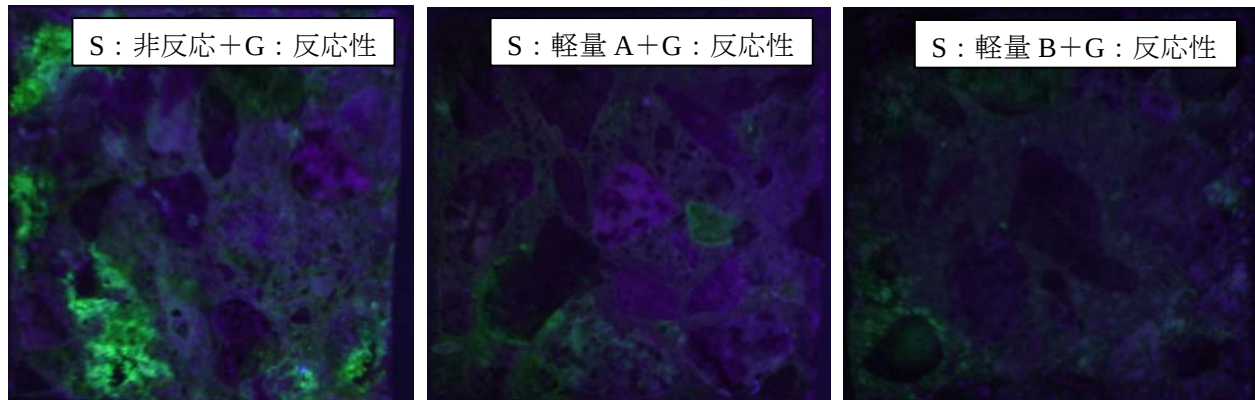
透していることが確認できた。また、軽量細骨材はポーラスな内部組織となっており、浸透した NaCl 溶液が吸着されることにより、溶液の浸透が遅れ、膨張の発生が遅れる可能性があった。

3.6 ASR ゲルの生成状況

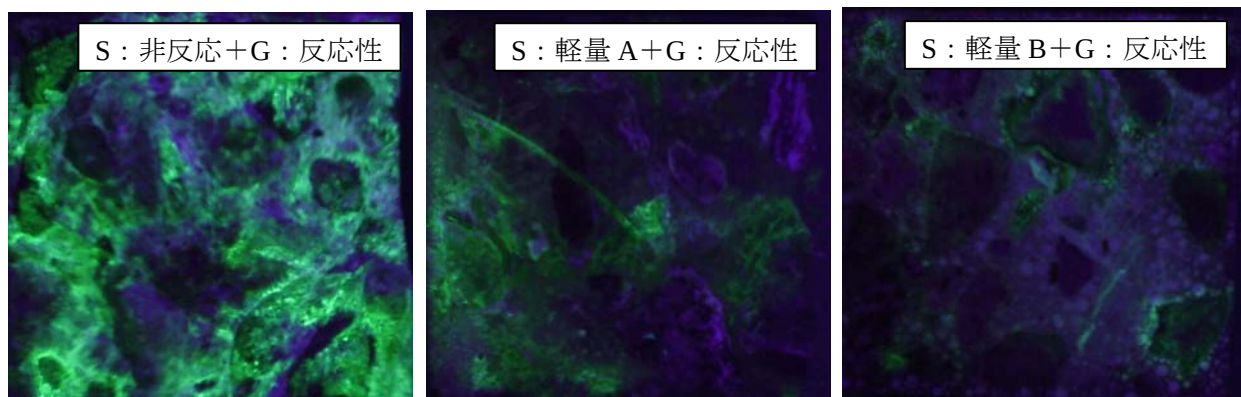
写真－2 および 3 に酢酸ウラニル蛍光法によるコンクリート断面の発色状況の一例を、写真－4 に細骨材に軽量骨材 A を粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートで観察された ASR ゲルの生成状況を示す。

ASTM 法およびデンマーク法では、粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートにおいて、ASR ゲルによる蛍光発色(緑黄色、写真中の白色部分)が観察され、大きな膨張が生じた細骨材に石灰石砂、粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートにおいては明瞭な蛍光色を呈した。

前述(3.2 参照)したように、ASTM 法では材齢 1 年においても NaOH 溶液が供試体中心部まで



写真－2 ASR ゲルの発色状況 (ASTM 法)



写真－3 ASR ゲルの発色状況 (デンマーク法)

完全に浸透していないことが確認された。ASTM 法において供試体内部まで NaOH 溶液を浸透させ、反応させるためには、NaOH 溶液の濃度を高くすることや養生温度を上昇させること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云える。

4. 結論

人工軽量細・粗骨材を用いた軽量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 試験の結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 軽量骨材の主要な成分は、シリカ(SiO_2)およびアルミナ(Al_2O_3)であり、10%程度のアルカリ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)を含有している。
- (2) 化学法の結果より、軽量骨材のアルカリシリカ反応性は、「無害でない」あるいは「判定不能」と判定された。しかし、2 種類の促進モルタルバー法では、いずれの軽量骨材も「無害」と判定された。
- (3) コンクリートバー法(ASTM 法)の結果より、粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートは材齢 6 ヶ月以後に膨張が発生したが、軽量骨材を用いたコンクリートはいずれも膨張が認められなかった。
- (4) コンクリートバー法(デンマーク法)の結果より、粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートは材齢 2 ヶ月以後に急激に膨張し、供試体表面に亀甲状のひび割れが発生したが、軽量コンクリート 1 種および 2 種は ASTM 法と同様にいずれも膨張は認められなかった。
- (5) 細骨材に軽量骨材を用いたコンクリートは、材齢 6 ヶ月以後に膨張傾向を示したが、その膨張量は粗骨材に反応性の川砂利を用いたコンクリートよりも小さくなり、軽量細骨材の使用による膨張抑制効果が認められた。

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構造物の調査報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 4 巻, pp.183-188, 2004.
- 2) Ceukelaire, L.De. : Alkali-silica Reaction in a Lightweight Concrete Bridge, Proc. of the 9th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.231-239, 1992.
- 3) Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V. and Skapin A.S. : 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) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1511-1516, 2006.
- 6) Chatterji, S. : An Accelerated Method for the Detection of Alkali-Aggregate Reactivities of Aggregate, Cement and Concrete research, Vol.8, No.5, pp.647-649, 1978.
- 7) Natesaiyer, K. and Hover, K.C. : Insitu Identification of ASR Products in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.18, No.3, pp.455-463, 1988.
- 8) Boyd, S., Bremner, T. and Holm, T. : Addition of Lightweight Aggregate Reduces Expansion in Concrete Containing a Highly Reactive Normal Weight Aggregate, Proc. of the 11th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.593-602, 2000.