

## 論文 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性

杉山 彰徳<sup>\*1</sup>・鳥居 和之<sup>\*2</sup>・本田 貴子<sup>\*3</sup>・石川 雄康<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、5種類の人工軽量骨材および1種類の天然軽量骨材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と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の判定を実施した。その結果、化学法では、すべての軽量骨材は「無害でない」と判定された。しかし、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ので、アルカリシリカゲルの生成の有無に係わらず、すべての軽量骨材が「無害」と判定された。

**キーワード：**人工軽量骨材，アルカリシリカ反応性，促進モルタルバー法，ASTM C 1260

## 1. はじめに

人工軽量骨材は多孔質・軽量であることから、構造物の軽量化が図れるため、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。軽量骨材には、火山礫を破碎し、粒度調整した天然軽量骨材、工業的に高温焼成して製造される人工軽量骨材、膨張スラグ・石炭灰などの各種産業廃棄物を高温焼成して製造される副産軽量骨材、主として左官用モルタルに用いられる真珠岩・黒曜石等を焼成して発泡させた骨材、など多種多様なものがある。

人工軽量骨材が構造物に利用されてから40年以上経過しているが、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、最近、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<sup>1), 2)</sup>。一方、人工軽量骨材のASRの評価に関しては、いくつかの研究報告があるが、体系的な研究はほとんど行われていないのが現状である<sup>3)</sup>。このため、軽量骨材JIS(A 5002)改正原案作成委員会では、ASRに関する研究成果が不十分であること、ASRの評価方法が不明確なこと、などが懸案事項とし

て指摘されている。

本研究は、5種類の人工軽量骨材および1種類の天然軽量骨材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、軽量骨材の鉱物学的特徴を検討するとともに、一連のASR試験法の比較より判定結果の妥当性を検証したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

使用した軽量骨材(市販品)は5種類の人工軽量骨材と1種類の天然軽量骨材である。それらの仕様および化学成分を表-1および表-2に示す。骨材Eは左官用で用いられる真珠岩系

表-1 軽量骨材の原料および物理的性質

| 骨材名       | 原料   | 絶乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) |
|-----------|------|------------------------------|------------|
| 軽量骨材A: 人工 | 膨張頁岩 | 1.38                         | 15.7       |
| 軽量骨材B: 人工 | 黄土   | 1.45                         | 10.1       |
| 軽量骨材C: 人工 | 石炭灰  | 1.43                         | 22.1       |
| 軽量骨材D: 人工 | 膨張頁岩 | 1.33                         | 18.1       |
| 軽量骨材E: 人工 | 真珠岩  | 0.95                         | 31.8       |
| 軽量骨材F: 天然 | 火山礫  | 1.37                         | 27.6       |

\*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 自然科学研究科環境基盤工学専攻

\*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) 工博 (正会員)

表－２ 軽量骨材の化学成分（％）

|        | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Total |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|-----------------|-------|
| 軽量骨材 A | 66.6             | 20.0                           | 5.3                            | 4.1  | 1.1  | 2.2               | 2.7              | 0.4             | 102.4 |
| 軽量骨材 B | 66.9             | 19.4                           | 2.4                            | 6.1  | 1.0  | 2.7               | 2.9              | 0.1             | 101.8 |
| 軽量骨材 C | 62.3             | 26.9                           | 4.2                            | 3.0  | 1.1  | 1.9               | 2.2              | <0.1            | 102.5 |
| 軽量骨材 D | 69.2             | 19.1                           | 4.6                            | 1.9  | 0.8  | 2.8               | 3.0              | 0.8             | 102.5 |
| 軽量骨材 E | 74.5             | 15.9                           | 0.7                            | <0.1 | <0.1 | 3.7               | 4.5              | <0.1            | 99.9  |
| 軽量骨材 F | 58.2             | 20.2                           | 8.7                            | 3.6  | 1.5  | 3.2               | 0.8              | <0.1            | 96.8  |

の細骨材である。骨材 E 以外のものは構造用軽量コンクリート用の粗骨材であり、ロールミルで粉砕した後、細骨材として使用するために 5mm 以下の粒度に調整した。また、モルタルバー法には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm<sup>3</sup>，等価アルカリ量：0.68％）を使用した。

## 2.2 実験方法

### (1) 骨材の化学成分、鉱物組成と内部組織

湿式化学成分分析により骨材の化学成分を調べた。また、骨材粒子の粉末試料を使用して、X 線回折分析 (XRD) を実施し、骨材に含まれる構成鉱物およびガラス相の同定を行なった。さらに、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

骨材のアルカリシリカ反応性を化学法 (JIS A 1145-2001) およびモルタルバー法 (JIS A 1146-2001) により実施した。また、外部よりアルカリが常に供給される厳しい養生条件における評価法の適否を調べるために、ASTM C 1260<sup>4)</sup>（温度 80℃の 1N・NaOH 溶液に浸漬）およびデンマーク法<sup>5)</sup>（温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬）を実施した。ただし、ASTM C 1260 の供試体寸法は 25×25×285 mm であり、供試体の脱型との関係で打設 4 日後から溶液に浸漬した。

### (3) ASR ゲルの生成状況と化学組成

モルタルバー試験の終了後の破断面における ASR ゲルの生成量を酢酸ウラニル蛍光法により

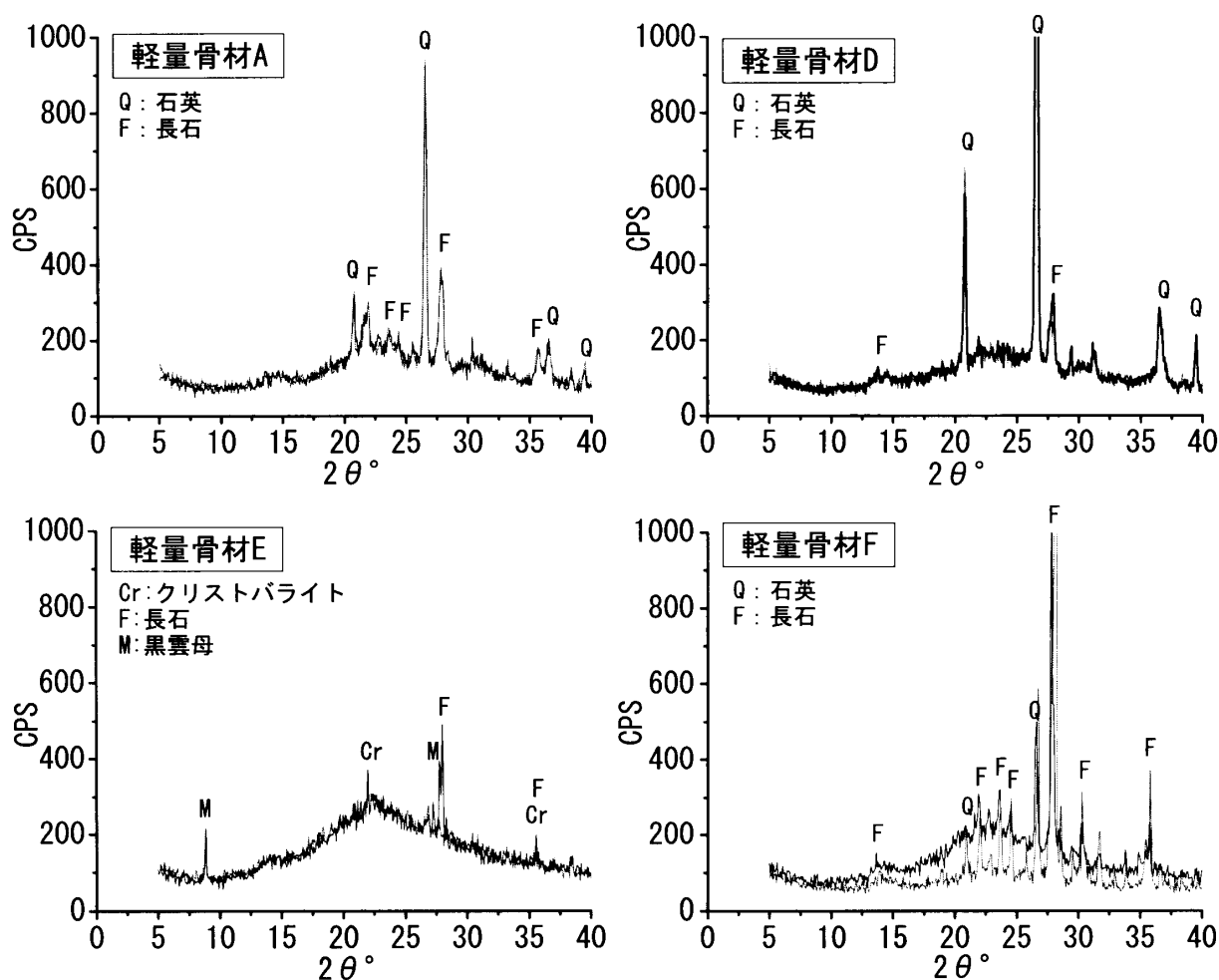
調べるとともに、モルタルの破断面より試料を採取し、軽量骨材の内部およびその近傍に生成した ASR ゲルの形態および化学組成を SEM-EDX 分析により検討した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 骨材の化学成分および鉱物組成

軽量骨材の X 線回折図を図－1 に示す。ここでは、化学法 (JIS A 1145) にて実際に反応している鉱物が何であるのかを調べるために、X 線回折図には元々の軽量骨材（黒色）と化学法終了後のもの（赤色）を重ね合わせて表示している。骨材 A,B,C,D および天然骨材 (F) には結晶性の鉱物として石英および長石が存在したが、骨材 A,B,C および D の石英および長石の両ピークは化学法終了後も変化がまったく認められなかった。一方、骨材 E および天然骨材 (F) にはガラス相の存在を示すハロー (halo) が存在した。化学法の終了後には、骨材 E はクリストバライトおよび黒雲母のピークが消失しており、天然骨材 (F) はガラス相を示すハローが全体に小さくなった。この結果は、80℃の 1N・NaOH 溶液に 24 時間浸漬させるという条件下にて、軽量骨材中にアルカリと反応する鉱物（ガラス相，クリストバライト，黒雲母など）が含まれていることを示唆している。

SEM-EDX 分析より求めた軽量骨材の化学組成図を図－2 に示す。軽量骨材の化学成分は、原料の種類（頁岩，石炭灰，粘土鉱物など）や焼成方法により相違するとともに、軽量骨材の内部組織は均一ではなく、微量な化学成分が局

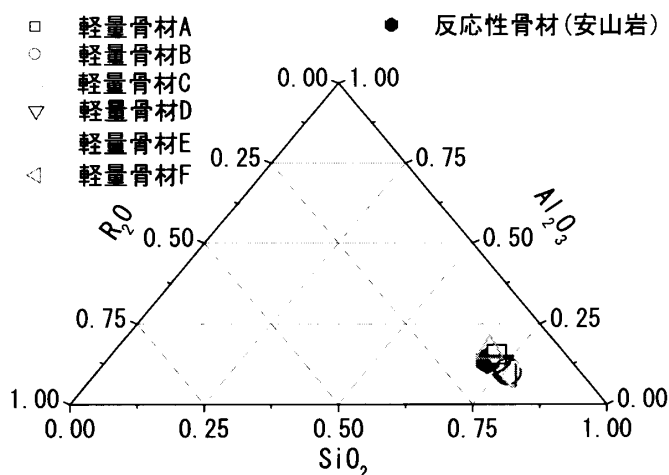


図－1 軽量骨材のX線回折図

部分的に偏在する傾向が確認された。軽量骨材の平均的な化学組成は、シリカおよびアルミナ分の合計が70～80%であり、いずれのものも約10%のアルカリ ( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ ) を含有しているのが特徴である。軽量骨材の化学組成図には代表的な反応性骨材である安山岩の値を併記しているが、軽量骨材のガラス相は安山岩に類似した化学組成のものであることがわかる。したがって、軽量骨材の焼成過程にて骨材の殻表面などにガラス相が形成される場合には、ASRが発生する可能性があると考えられる。

### 3.2 化学法によるアルカリシリカ反応性の判定

軽量骨材の化学法 (JIS A 1145) による判定結果を図-3に示す。前述したように、軽量骨材のアルカリシリカ反応性は軽量骨材の化学成分および鉱物組成と関係している。図-3に示す



図－2 軽量骨材の化学組成 (SEM-EDX 分析)

ように、化学法の判定結果は軽量骨材の種類により変化するが、いずれの軽量骨材も「無害でない」と判定される。化学法の判定図から、骨材Cは溶解シリカ量およびアルカリ濃度の減少

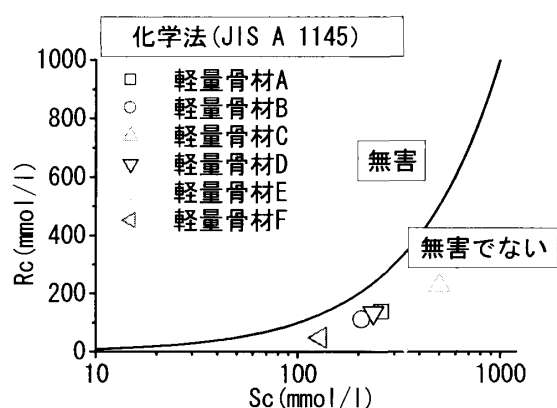


図-3 軽量骨材の化学法の結果

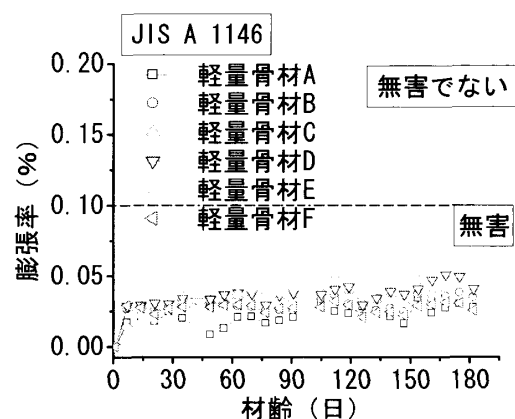


図-4 軽量骨材のモルタルバー法の結果 (JIS A 1146)

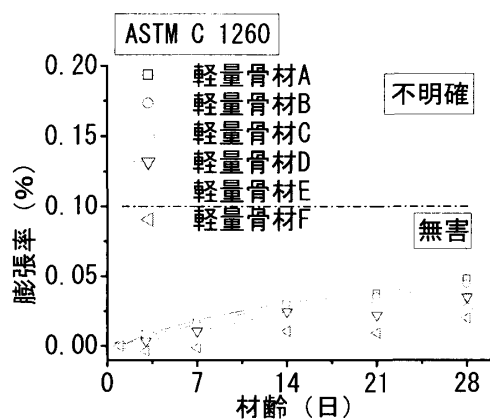


図-5 軽量骨材のモルタルバー法の結果 (ASTM C 1260)

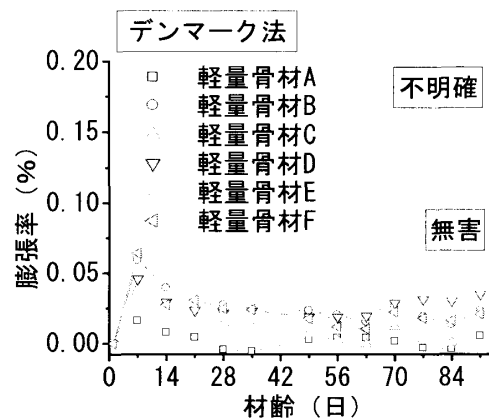


図-6 軽量骨材のモルタルバー法の結果 (デンマーク法)

量がともに大きく、アルカリシリカ反応性が高いものと推察される。それに対して、骨材Fは他のものに比べて溶解シリカ量が小さいことから、アルカリシリカ反応性が低いものと推察される。また、骨材Eのように、アルカリ濃度の減少量が溶解シリカ量と比べてかなり小さいものもあり、この場合は化学法の試験中に骨材からアルカリが溶出している可能性がある<sup>6)</sup>。化学法(JIS A 1145)の解説では、「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本骨材は本試験方法の適用範囲外とした」と記載されている。化学法の試験実施上の問題点としては、軽量骨材の気孔中に溶液が吸着されるために、分析用の液量が一

定にならないこと、吸引ろ過の時間を長くする必要があること、などを挙げることができる。

### 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

促進養生試験(JIS A 1146, ASTM C 1260 およびデンマーク法)におけるモルタルバーの膨張挙動を図-4, 図-5および図-6に示す。JIS A 1146 では、軽量骨材は材齢6ヶ月の膨張量が最大でも0.06%であり、いずれの軽量骨材も「無害」と判定された。ただし、軽量骨材の中では、X線回折分析にてガラス相が同定された骨材Eは他のものと比べて膨張量が若干大きくなった。一方、アルカリが外部より常時供給され、高温環境下に置かれるASTM C 1260では、いずれの

骨材も材齢 14 日にて「無害」と判定されたが、JIS A 1146 と異なりモルタルの膨張が漸増傾向を示しており、ASR が短期間に促進された可能性があった。ASTM C 1260 でも、骨材 E は他のものと比べて膨張量が若干大きくなり、JIS A 1146 と同様な傾向であった。また、デンマーク法でも、膨張量は全体に小さく、材齢 3 ヶ月にすべて「無害」と判定された。このように、ASTM C 1260 やデンマーク法のような厳しい促進養生条件でも、軽量骨材を使用したモルタルの膨張量は小さく、現行の判定基準を適用すると、すべて「無害」と判定された。

軽量骨材を使用したモルタルの ASR による膨張挙動は密実な反応性骨材の場合とは大きく異なるものと予測される。すなわち、モルタルバー法では、破碎砂を使用することになるので、内部空隙を多く含む骨材の気孔部分とセメントペーストが接触することになる。このため、生成した ASR ゲルは骨材の気孔中に侵入し、貯留されるので、ASR による膨張圧が緩和されるものと推測される<sup>7)</sup>。これは、AE コンクリートにおいて連行空気が果たす膨張抑制の効果と同様なものといえる。このことから、人工軽量骨材の ASR は、破碎骨材ではなく、実際に使用する状態で試験が実施できるコンクリートによる評価が妥当であると推察される。

### 3.4 ASR ゲルの生成状況と化学組成

酢酸ウラニル蛍光法によるモルタル破断面の発色状況を表-3 に示す。JIS A 1146 および ASTM C 1260 では、すべての軽量骨材に ASR ゲルの生成を示す蛍光発色(緑黄色)が観察された。しかし、ASR ゲルの生成状況は、軽量骨材の種類により大きく相違しており、とくに骨材 A、E および天然骨材(F)の3種類のものには明確な ASR ゲルの痕跡が確認された。軽量骨材の殻近傍に生成した ASR ゲルの代表的な形態を写真-1 および写真-2 に、モルタルの気泡中に生成した ASR ゲルの形態を写真-3 に示す。ASR ゲル(写真-1 参照)の化学組成(重量百分率)は、アルカリ分( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )が 15~18%、シリ

表-3 酢酸ウラニル蛍光法の発色状況

|        | JIS 法 | ASTM 法 | DEN 法 |
|--------|-------|--------|-------|
| 軽量骨材 A | ◎     | ◎      | ×     |
| 軽量骨材 B | △     | △      | ×     |
| 軽量骨材 C | ○     | ◎      | ×     |
| 軽量骨材 D | △     | △      | ×     |
| 軽量骨材 E | ◎     | ◎      | ○     |
| 軽量骨材 F | ◎     | ◎      | ○     |

×：発色なし      △：全体的に薄く発色

○：全体的に発色    ◎：空隙、骨材周囲が発色

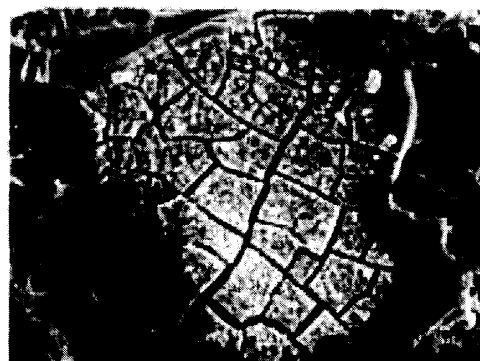


写真-1 軽量骨材 A の殻近傍に生成した ASR ゲル (ASTM C 1260)



写真-2 軽量骨材 F の殻近傍に生成した ASR ゲル (ASTM C 1260)



写真-3 軽量骨材 E の気泡中に生成した ASR ゲル (ASTM C 1260)

カ分 ( $\text{SiO}_2$ ) が 52~64%, カルシウム分 ( $\text{CaO}$ ) が 19~30%の範囲のものであり, ASR 膨張性を有するものであると判断される<sup>8)</sup>。したがって, このような ASR ゲルが軽量骨材の硬い殻部分に多量に生成した際には, ASR による膨張圧が発生し, コンクリートの劣化がもたらされるものと予想される。一方, SEM 観察では, 骨材の空隙内への ASR ゲルの侵入やモルタルの気泡への貯留 (写真-3 参照) も同様に観察されたが, これらの ASR ゲルの化学組成(重量百分率)は, アルカリ分 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) が 12~19%, シリカ分 ( $\text{SiO}_2$ ) が 15~27%, カルシウム分 ( $\text{CaO}$ ) が 55~58%の範囲のものであり, カルシウム分を多く含んでおり, ASR 膨張への寄与は小さいと推測された。一方, デンマーク法では, JIS A 1146 および ASTM C 1260 と比べて蛍光発色が明瞭ではなく, 骨材 E および天然骨材 (F) にのみ ASR ゲルの生成が確認された。

#### 4. 結論

5 種類の人工軽量骨材および 1 種類の天然軽量骨材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, 以下のようなものである。

- (1) 軽量骨材には反応性の鉱物 (ガラス相, クリストバライト, 黒雲母など) を含有するものがあった。
- (2) 軽量骨材のガラス相にはアルカリが 10%程度含有されており, アルカリが溶出する可能性があった。
- (3) 化学法により, 軽量骨材のアルカリシリカ反応性はすべて「無害でない」と判定された。
- (4) モルタルバー法により, 軽量骨材のアルカリシリカ反応性はすべて「無害」と判定された。
- (5) モルタルバー法にて膨張が発生しなかった理由は, 破碎骨材の気孔により ASR による膨張圧が大きく緩和されたためであった。このことは酢酸ウラニル蛍光法および SEM-EDX 分析により実証された。
- (6) 人工軽量骨材の ASR は, 実際に使用する状

態で試験が実施できるコンクリートによる評価が必要である。

謝辞：本研究の実施にあたり, ご協力いただいた, 人工軽量骨材協会並びに金沢大学自然科学研究科酒井賢太氏に感謝いたします。

#### 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) 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. Suput et al. : Alkali-silica Reactivity of Some Frequently Used Lightweight Aggregates, Cement and Concrete Research, 34(9), pp. 1809-1816, 2004.
- 4) ASTM C1260 : Standard Test Method for Potential Alkali-Reactivity of Aggregates Mortar bar Method, Vol. 04.02, pp. 654-659, 1994.
- 5) 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.
- 6) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか, 試験, 診断と対策の課題, セメント・コンクリート, No. 696, pp. 1-9, 2005.
- 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.