

高性能軽量コンクリートのアルカリ骨材反応抑制手法に関する研究

笹倉 伸晃・舟橋 政司・玉井 譲*¹・鶴田 孝司*¹・佐々木 孝彦*¹

A STUDY ON CONTROL TECHNIQUE OF ALKALI-AGGREGATE REACTION OF SUPER LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE

Nobuaki SASAKURA, Masashi FUNAHASHI, Yuzuru TAMAI, Koji TSURUTA, Takahiko SASAKI

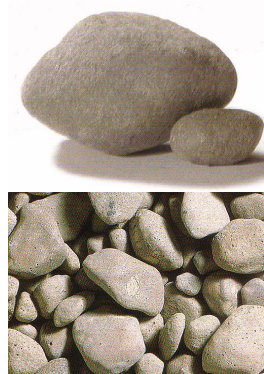


写真-1 高性能軽量骨材

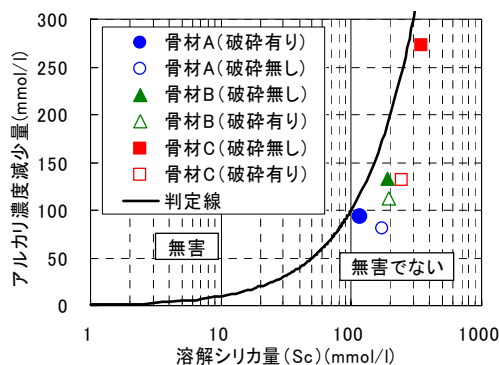


図-1 溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係

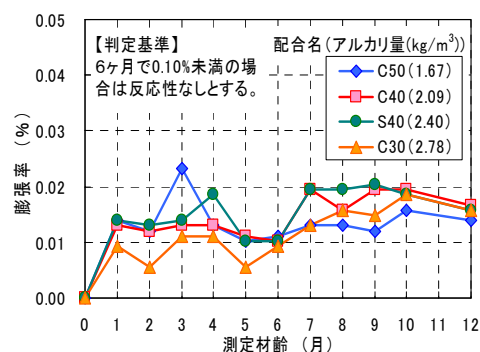


図-2 コンクリート供試体による材齢と膨張量の関係

研究の目的

近年、軽量骨材を用いたPC構造物などにおいてアルカリ骨材反応の兆候がみられる事例が報告されており、高性能軽量コンクリートについても、アルカリ骨材反応に対する安全性を照査しておくことが、普及には不可欠である。

本研究では、高性能軽量コンクリートをセメント量が多い橋梁上部工などのPC部材へ適用することを目的とし、アルカリ骨材反応抑制対策として、骨材からのシリカの溶出を減少させる手法を考案した。また、改質した高性能軽量骨材について、PC部材などで適用される配合を想定したコンクリート供試体によるASR判定性試験を行った。

技術の説明

本研究で考案したアルカリ骨材反応抑制対策は、アルミナ系の改質材を高性能軽量骨材(写真-1)焼成時に骨材表面に付着させることにより、骨材からのシリカの溶出を減少させる手法である。改質型高性能軽量骨材の表面には、改質材を焼成した主成分である Corundum (Al_2O_3) が含まれており、付着させた改質材が、骨材表層部を粉体状で薄くコーティングした状態になっているものと推測される。この安定な Al_2O_3 が、アルカリに対して軽量骨材内部のシリカの溶解を妨げる役割を果たす。

主な結論

いずれの改質型軽量骨材(骨材A)の化学法による試験結果では、溶解シリカ量がアルカリ濃度減少量を上回っており、通常骨材に対する基準では、「無害でない」の領域に位置する(図-1)。しかし、内部および表層部(破砕無し)の溶解シリカ量を比較すると、骨材Aの表層部では、溶解シリカ量が減少する傾向が認められ、改質材の付着によって溶解シリカ量が減少したものと考えられる。また、高性能軽量コンクリートによるアルカリシリカ判定性試験では、PC部材などで適用される単位セメント量が多い配合(C30: 単位セメント量 557kg/m^3)であっても、有害な膨張を生じておらず、いずれの配合も「反応性なし」と判定された(図-2)。

したがって、単位セメント量が多い配合であっても、高性能軽量骨材製造時に改質材を骨材表層に付着させることで、アルカリ骨材反応を生じることなく、PC構造物などの実構造物への適用が可能であると考えられる。

* 1 財団法人 鉄道総合技術研究所

高性能軽量コンクリートの アルカリシリカ反応抑制手法に関する研究

笹 倉 伸 晃 舟 橋 政 司
玉 井 譲^{*1} 鶴 田 孝 司^{*1}
佐 々 木 孝 彦^{*1}

要 旨

高性能軽量コンクリートを橋梁上部工などへ適用することは、死荷重を低減でき、有効であるが、近年、軽量骨材を用いた単位セメント量（アルカリ総量）の多いPC構造物などにおいてアルカリ骨材反応の兆候がみられる事例が報告されている。したがって、高性能軽量コンクリートについても、アルカリ骨材反応に対する安全性を照査しておくことは、不可欠である。

そこで、著者らは、アルミナ系の改質材を高性能軽量骨材製造時に骨材表面に付着させることにより、骨材からのシリカの溶出を減少させる手法を考案した。本研究では、この手法で製造した高性能軽量骨材を用いて、骨材表面の改質効果を確認し、改質した高性能軽量骨材について、PC部材などで実際に適用される配合を想定したコンクリート供試体によるASR判定性試験を行った。その結果、PC部材などで実際に適用されるセメント量が多い配合であっても、「反応性なし」との結果が得られた。

キーワード 高性能軽量骨材 / アルカリ骨材反応 / コンクリート法 / 改質材 / 改良化学法

目 次

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. はじめに | 4. 改質材の成分と付着性状 |
| 2. アルカリシリカ反応 | 5. 改質材による効果確認 |
| 抑制手法の概要 | 6. まとめ |
| 3. 実験概要 | |

A STUDY ON CONTROL TECHNIQUE OF ALKALI-AGGREGATE REACTION OF SUPER LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE

Nobuaki SASAKURA Masashi FUNAHASHI
Yuzuru TAMAI Koji TSURUTA
Takahiko SASAKI

Synopsis:

Taking advantage of the feature that super lightweight aggregate (SLA) concrete can decrease the dead weight of structure, it is effective to apply SLA concrete to prestressed concrete (PC) members, such as the superstructure. However, It was reported the symptom of alkali-aggregate reaction on the PC structure with applying lightweight aggregate, in recent years. Therefore, it is necessary to verify the safety of alkali-aggregate reaction (AAR) for SLA as well.

Then AAR control technique is proposed, which a method of reducing amount of silica melted from SLA with using improved SLA. The improved SLA is attached the improving quality material (IQM) on the surface of SLA, when it is baked in the kiln.

This paper describes the improved effect of IQM attached on the SLA and the resistance of SLA concrete to AAR was verified by AAR test carried out with concrete bar, which has higher alkali content than that provided in the test method.

* 1 (財) 鉄道総合技術研究所

1. はじめに

近年、軽量で高強度のコンクリートを製造できる高性能軽量骨材の長所を活かし、高性能軽量コンクリートを土木構造物へ適用することが期待されている。特に、プレストレストコンクリート（PC）橋梁上部工への適用は、自重軽減によるコスト的メリットが得られるため有望な対象と考えられる。

人工軽量骨材が利用されてから 40 年以上経過した現在まで、アルカリ骨材反応による劣化事例はほとんど報告されていなかった¹⁾。しかし、最近、PC 構造物などの単位セメント量が多く、アルカリの総量規制値（ 3kg/m^3 以下）を超えるような配合を用いたコンクリート構造物においてアルカリ骨材反応の兆候がみられる事例も報告されている^{2), 3)}。人工軽量骨材の製造方法としては、頁岩、パーライトなどの鉱物や石炭灰などの各種副産物を高温焼成して製造するのが一般的であるが、この時、使用する軽量骨材の主原料によっては、高温で焼成する際に、高アルカリ性水溶液に溶出しやすい非晶質ガラス相が形成される²⁾。このことが、アルカリ骨材反応の中でも、アルカリシリカ反応（以下、ASR と略記）と呼ばれる劣化を引き起こす要因になっている。一方、軽量骨材の製造メーカーは、ASR 試験として化学法やモルタルバー法を実施することが多い。JIS では化学法で「無害でない」と判定され、モルタルバー法で「無害」と判定された場合には、モルタルバー法の判定結果が優先されるため、この結果を受けて ASR に対して無害と判定していることが少なくない。しかしながら、人工軽量骨材の ASR の評価に関しては、JIS 規格である化学法およびモルタルバー法において、「人工軽量骨材（粗、細）には適用しない」と明記されている⁴⁾。したがって、軽量骨材の ASR 判定に当たっては、実際に適用される配合を想定したコンクリート供試体による ASR 判定性試験を行い、安全性を照査しておくことが、不可欠である。

そこで、著者らは、高性能軽量コンクリートを単位セメント量（アルカリ量）が多い PC 部材などへ適用するために、アルミナ系の改質材を高性能軽量骨材製造時に骨材表面に付着させることにより、骨材からのシリカの溶出を減少させる ASR 抑制手法を考案した。本研究では、この手法で製造した高性能軽量骨材について、化学法および改良化学法による試験を実施し、骨材表面の改質効果を確認した。また、表面を改質した高性能軽量骨材に

ついて、PC 部材などで実際に適用される配合を想定したコンクリート供試体による ASR 判定性試験を行い、改質材による ASR 抑制効果について検討を行った。

2. アルカリシリカ反応抑制手法の概要

本研究で考案したアルカリシリカ反応抑制手法の概念図を図 - 1 に示す。

軽量骨材の ASR メカニズムは、コンクリート中の過剰なアルカリと軽量骨材中の反応性の高いシリカが反応する結果、アルカリシリカゲルを生成し、このアルカリシリカゲルが吸水膨張することにより、コンクリートや骨材にひび割れが生じることとなる（図 - 1(a) 参照）。

本研究で考案したアルカリシリカ反応抑制手法は、軽量骨材表層部からのシリカの溶出が ASR の要因と考え、耐火物や研磨剤等で利用されるアルミナ系の鉱物（以下、改質材と呼ぶ）の性質に着目し、この改質材を骨材焼成時に骨材表層に付着させることで、高性能軽量骨材表面表層をコーティングし、骨材からのシリカの溶出を減少させる手法である（図 - 1(b) 参照）。

3. 実験概要

3.1 高性能軽量骨材および改質材の化学分析

焼成後の骨材表層部に改質材が付着していることを確認するため、高性能軽量骨材の表層部（粗骨材を攪り合わせて採取した試料）および内部（粗骨材を破碎して採取した試料）について X 線回折および蛍光 X 線分析を実施した。また、焼成時の影響を考慮するため、改質材の加熱前後についても同様の分析を行った。なお、改質材の加熱温度は、焼成時に付着させる温度と同一とし、 1100°C で、3 時間加熱した改質材の分析を行った。さらに、蛍光 X 線分析では、骨材製造後、さらに多くの改質材を付着させることを目的として、水溶性高分子内に改質材を混入させた水溶液に高性能軽量骨材を浸漬し、再び焼成して得られた改質材再付着型骨材 A' についても分析を行った。表 - 1 に分析試料および分析項目を示す。

3.2 化学法および改良化学法による ASR 試験

(1) 使用材料

化学法および改良化学法による試験に使用した人工軽量骨材は、表 - 2 に示すように、骨材 A（高性能軽量骨材）、骨材 B、骨材 C の 3 種類である。

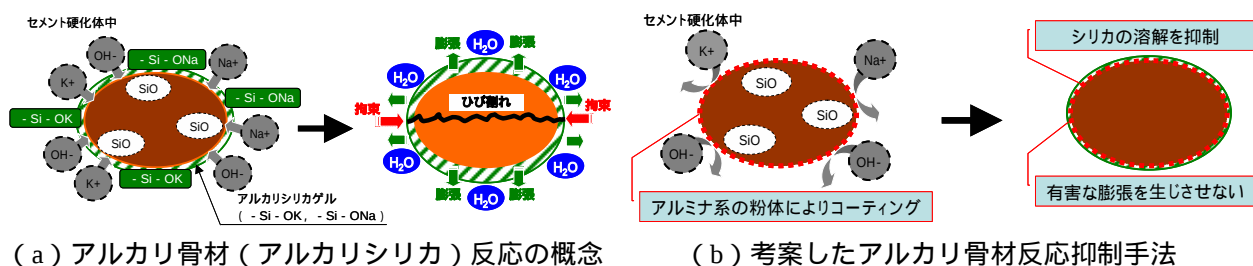


図-1 アルカリシリカ反応抑制手法の概念

表-1 X線回折および蛍光X線分析試料

試料 種別	条件	分析項目	
		X線 回折	蛍光 X線
骨材 A (高性能軽量骨材)	骨材内部	○	○
	骨材表層部	○	○
骨材 A' (改質材再付着型)	骨材内部	—	○
	骨材表層部	—	○
改質材	加熱前	○	○
	加熱後	○	○

(2) 試験方法

化学法および改良化学法による試験は、JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）」⁴⁾およびJSCE-C511-2001「コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性評価試験方法（改良化学法）（案）」⁴⁾に準じて実施した。試料は、骨材表面の改質が ASR 特性に与える影響を検討するため、細骨材を規定の粒度（300 μm～150 μm）に篩い分けた試料を表層部試料とし、粗骨材を破碎して粒度調整した試料を内部試料として、同一骨材に対して2種類の試料を採取した。

3.3 モルタルバー法による試験

(1) 使用材料

軽量粗骨材の ASR 評価の確認を目的として、骨材 A および骨材 C の人工軽量粗骨材を用いてモルタルバー法による ASR 試験を行った。モルタルバー法に用いた軽量骨材の試料条件を表-3 に示す。いずれの人工軽量骨材も規定された粒度の試料を得るために、粗骨材を 5 mm 以下の粒度に破碎して使用した。また、セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³，等価アルカリ量：0.48%）を使用し、アルカリ量の調整には、市販の 1mol/l 水酸化ナトリウム水溶液を用いるものとした。

(2) 試験方法

モルタルバー法は、JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）」⁴⁾に準じて実施した。また、規定のアルカリ量（1.2% = 5.5kg/m³）に加え、アルカリ量が 2.5，3.0，3.5kg/m³ となる供試体を製作し、モルタル中のアルカリ量が膨張特性に与える影響を検討し

表-2 化学法および改良化学法に用いた
軽量骨材の種類および試料条件

骨材名	主原料	骨材種類	粉碎の有無
骨材 A (高性能)	河川 堆積物	細骨材	無し
		粗骨材	有り
骨材 B	膨張頁岩	細骨材	無し
		粗骨材	有り
骨材 C	膨張頁岩	細骨材	無し
		粗骨材	有り

た。

3.4 コンクリートによる ASR 試験

改質材を付着させた高性能軽量粗骨材（骨材 A）を用いてコンクリート供試体（100mm×100mm×400mm）を製作し、高性能軽量コンクリートのアルカリシリカ反応性を検討するために ASR 試験を行った。

(1) 使用材料

使用材料を表 - 3 に示す。セメントは、低熱ポルトラ

表-3 コンクリートの使用材料

項目	記号	種類	物性値
水	W	上水道水	—
セメント	N	低熱ポルトランドセメント	密度 3.22g/cm ³ ，比表面積 3360cm ² /g，等価アルカリ量 0.38%
細骨材	S	木更津産山砂	表乾密度 2.59g/cm ³ ，吸水率 1.53%，粗粒率 2.41
粗骨材	G	高性能軽量骨材(骨材 A)	表乾密度 1.17g/cm ³ ，24 吸水率 1.27%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
	AE	空気量調整剤	陰イオン界面活性剤
水酸化ナトリウム	—	水酸化ナトリウム溶液	1mol/リットル水酸化ナトリウム水溶液

表-4 コンクリートの配合

配合 名	配合条件				単位量(kg/m ³)				混和剤 SP	空気量 調整剤 AD	総アル カリ量 (kg/m ³)
	粗骨材 最大 寸法	水セメ ント比	空気量	細骨 材率	水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G			
S40	15	40	5.5	48	167	418	806	394	4.18	0.013	2.40
C30	15	30	5.5	47	167	557	737	375	5.57	0.017	2.78
C40	15	40	5.5	48	167	418	806	394	4.18	0.013	2.09
C50	15	50	5.5	49	167	334	856	402	3.34	0.010	1.67

		成分含有率 (%)										
種類	状態	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
改質材	加熱後	15.89	57.63	0.00	1.78	0.84	0.38	0.32	3.11	0.46	5.11	0
骨材 A	内部	68.42	9.81	2.82	6.46	1.64	0.15	2.73	0.34	0.09	0.07	0
	表層部	42.95	24.83	6.16	4.68	1.39	0.51	1.35	1.51	0.22	0.06	0.14
骨材 A' (再付着型)	内部	68.69	9.65	2.85	5.62	1.63	0.25	2.78	0.32	0.09	0.07	0.05
	表層部	36.68	34.40	5.55	4.73	1.25	0.61	1.18	2.01	0.26	0.05	0.04

加熱後の改質材および骨材 A，改質材再付着型骨材 A' の蛍光 X 線分析結果を表 - 5 に示す．骨材 A 内部と表層部を比較すると，内部に比べて表層部は，改質材の主成分である Al_2O_3 を多く含有しており，表層部に改質材が付着していることが確認された．また，骨材 A と再付着型骨材 A' を比較すると，A' では，表層部の Al_2O_3 の含有率がさらに増加しており，より多くの改質材によりコーティングされているものと考えられる．

5. 改質材による反応抑制効果

5.1 化学法および改良化学法による効果確認

(1) 化学法

化学法試験結果一覧および溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係を表 - 6 および図 - 4 に示す．いずれの人工軽量骨材も溶解シリカ量がアルカリ濃度減少量を上回っており，通常骨材に対する基準では，「無害でない」の領域に位置する．しかし，3 種類の骨材の内部試料（破碎有り）による結果を比較すると，骨材 A が溶解シリカ量およびアルカリ反応量ともに最も小さい値となった．また，骨材 B および C では，内部および表層部（破碎無し）の溶解シリカ量の減少はほとんど認められないが，骨材 A では，溶解シリカ量が減少する傾向が認められ，改質材の付着によって溶解シリカ量が減少したものと考えられる．

(2) 改良化学法

骨材 A の溶解シリカ量およびアルカリ濃度減少量と処理時間の関係を図 - 5 および図 - 6 に示す．破碎無しの方が浸漬時間によらず溶解シリカ量は小さくなるものの，アルカリ濃度減少量は大きくなっている．これは，改質材を表面にコーティングしたことにより，骨材から溶解するシリカ量が減少するとともに，表層部の Al_2O_3 が増加したため，アルカリが Al_2O_3 の溶解に多く消費されたためと考えられる．

5.2 モルタルバー法による効果確認

図 - 7 および図 - 8 に測定材齢と供試体の膨張量の関係を示す．いずれの軽量骨材を用いた場合も，モルタル中のアルカリ量の増加に伴い，膨張量は増加する傾向が認められるものの，6 ヶ月の判定結果では，「無害」の判定結果となった．また，長期材齢の 12 ヶ月の試験結果においても，膨張量は，0.035% 程度であった．

しかしながら，モルタルバー法による供試体の配合は，質量比で決定されるため，軽量骨材を用いた場合は，通常の天然骨材を用いた配合と比較して，骨材の容積が極端に多くなる．そのため，写真 - 1 に示すようにモルタル供試体が粗な状態となり，アルカリシリカゲルによる膨張が生じた場合であっても，膨張量が緩和される可能性が考えられる．すなわち，ASR 評価をモルタルバー法で人工軽量骨材に適用することを JIS が対象外としている

表-6 化学法結果一覧

骨材名	破碎の有無	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)
骨材 A (高性能)	表層部	117	93
	内部	172	80
骨材 B	表層部	187	133
	内部	196	112
骨材 C	表層部	342	272
	内部	244	131

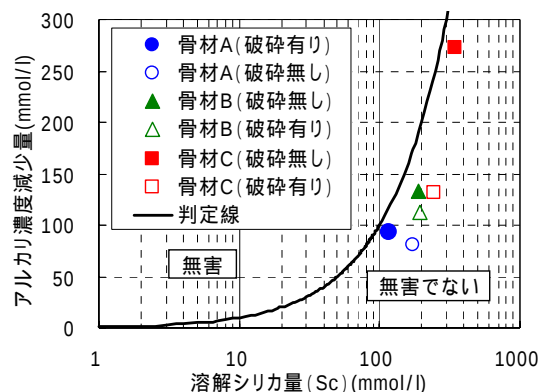


図-4 溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係

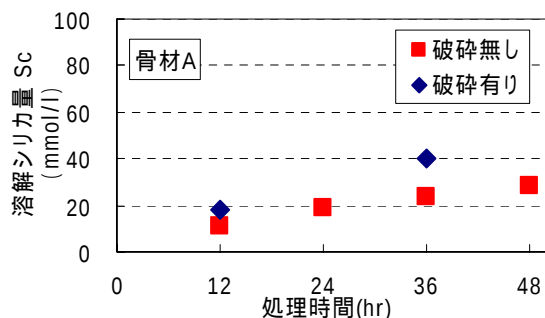


図-5 溶解シリカ量と処理時間の関係

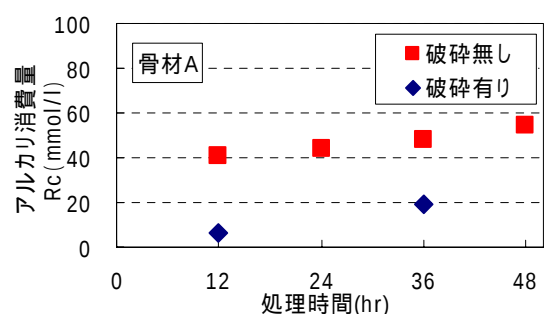


図-6 アルカリ消費量と処理時間の関係

ように，本試験により軽量粗骨材の ASR を判定することは適切でないと考えられる．

また，今回の試料のように粗骨材を破碎して試験を実施した場合には，表層部試料と骨材内部試料が混合された試料となるため，改質材の効果が現れず，骨材種類による差も生じなかった．

5.3 コンクリートによる効果確認

コンクリート法における測定材齢と膨張量の関係を図

- 9 に示す。

試験方法に示される規定アルカリ総量の配合 S40 (アルカリ総量 2.40kg/m^3) では、有害な膨張を生じておらず、6 ヶ月の判定結果は、「反応性なし」であった。また、PC 部材を想定した単位セメント量が 557kg/m^3 でアルカリ総量が S40 よりも多い C30 (2.78kg/m^3) の場合であっても、膨張率は 6 ヶ月で 0.1% よりもかなり小さい値となっており、12 ヶ月経過した時点であっても、有害な膨張は生じていなかった。すなわち、本研究の範囲内では、アルカリ総量の違いによって、膨張量に顕著な違いは認められず、いずれの配合も「反応性なし」となった。したがって、単位セメント量が多い配合であっても、高性能軽量骨材製造時に改質材を骨材表層に付着させることで、アルカリ骨材反応を生じることなく、PC 構造物などの実構造物への適用が可能であると考えられる。

6. まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- (1) 高性能軽量骨材の焼成工程において改質材を添加することで、骨材表面を改質材でコーティングすることが可能であり、骨材表面に改質材を付着させることで、骨材内部試料に比べて、溶解シリカ量が減少する。
- (2) 高性能軽量コンクリートによるアルカリシリカ反応性試験では、PC 構造物などへ適用される単位セメント量が多い配合であっても、有害な膨張を生じておらず、いずれの配合も「反応性なし」と判定された。
- (3) 高性能軽量骨材製造時に改質材を骨材表層に付着させることで、ASR を抑制できる可能性があることがわかった。

今後は、改質材の添加量を増やした改質材再付着型の高性能軽量骨材を用いて改質効果を確認するとともに、外部からアルカリが供給される環境条件を想定して、デนมール法による試験を実施する予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、株式会社ネオマテリアの木村薫氏に多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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報告集，Vol.27，No.1，pp.1381-1386，2005.6
- 2) 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.1-9，2005.2
- 3) 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.183-188，2004.10
- 4) 2005 年制定コンクリート標準示方書【規準編】，土木

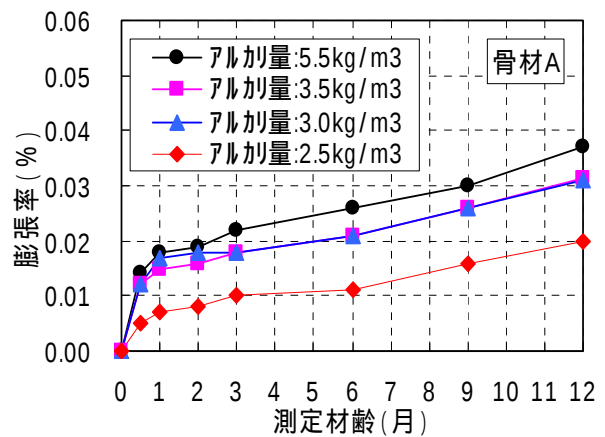


図-7 測定材齢と膨張量の関係 (骨材 A)

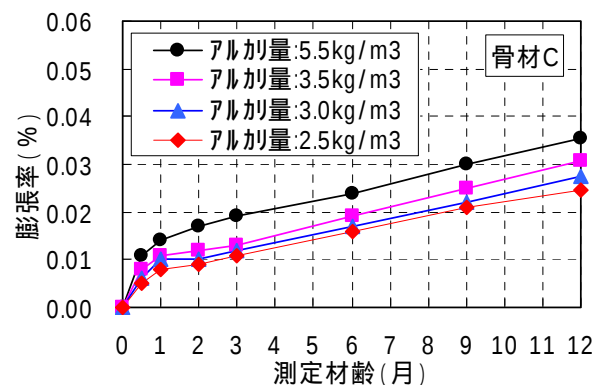


図-8 測定材齢と膨張量の関係 (骨材 C)

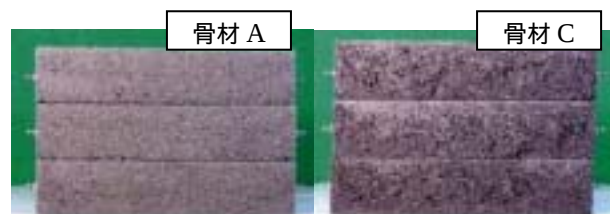


写真-1 モルタルバー法供試体外観

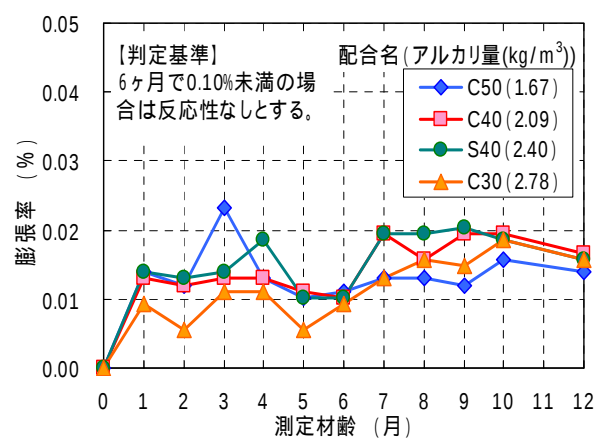


図 - 9 コンクリート供試体による材齢と膨張量の関係

学会，2002