

論文 風化度の異なる安山岩骨材の ASR 膨張挙動の評価

川端 雄一郎*¹・松下 博通*²・山田 一夫*³・林 建佑*⁴

要旨: 本研究は同一碎石場から風化度の異なる安山岩骨材を採取し、各種試験によりアルカリシリカ反応(ASR)の特性(ASR 反応性)を評価した。化学法では風化の進行に従ってアルカリ濃度減少量(Rc)が多く、溶解シリカ量(Sc)が少なくなった。また、Rc, Sc の大きな安山岩骨材はペシマムを生じ、現行 JIS のモルタルバー法では ASR 反応性を適切に検出できなかった。一方、飽和 NaCl 溶液に浸漬するデンマーク法や 1mol/l の NaOH に浸漬する ASTM C 1260 に準拠した促進膨張試験では風化した安山岩骨材の ASR 反応性を適切に検出でき、これらの試験法はペシマム現象を生じる安山岩骨材の ASR 反応性についても検出可能と考えられた。
キーワード: 安山岩, 岩石学的评价, 風化, ペシマム, 促進試験, 潜在的有害

1. はじめに

アルカリシリカ反応(ASR)に関する研究は既によく行われ、我が国では、1980 年代において骨材の ASR 判定試験方法の規格化やアルカリ総量規制等で ASR 抑制対策を講じてきた。しかしながら、近年の研究結果から、規格に反映されなかった要因による ASR 劣化の報告がなされており、早急な対応が必要不可欠となっている¹⁾。

我が国の主要な反応性骨材である安山岩は、岩石学的な多様性から ASR の特性(ASR 反応性)も複雑である²⁾。同一岩体であっても風化の影響や岩石の本質的成因によって ASR 反応性は変化しえる。しかし、風化が安山岩骨材の ASR 反応性および各種促進試験における膨張挙動に及ぼす影響については十分には議論されていない。

風化を受けた安山岩はアルカリ濃度減少量(以下、Rc)が大きくなることが知られており、溶解シリカ量(以下、Sc)および Rc とともに大きい値を示す骨材はペシマムを生じる。現行 JIS 規格のモルタルバー法ではペシマムを生じる安山岩骨材を適切に検出できないことが指摘されている。一方、ペシマムを生じる骨材に対しての飽和 NaCl 溶液に浸漬するデンマーク法や ASTM C 1260 に準拠した促進膨張試験(以下、ASTM 法)の適用性については十分に議論されておらず、各種試験における風化安山岩骨材の膨張挙動については不明な点が多い。

ASR 反応性に及ぼす風化の影響を明らかにするためには、鉱物組成が近いと考えられる同一岩体における風化の進行による岩石学的特徴の変化と ASR 反応性の関係を明らかにすることが有効と考えられる。

そこで本研究では、同一碎石場における安山岩の風化度に着目し、風化度の異なる安山岩骨材を現地で試料採取し、各種促進膨張試験によるモルタルの膨張挙動について評価し、適切な試験方法の選定について考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 安山岩骨材

ある碎石鉱山から安山岩砕石試料11試料を採取し、それぞれについて偏光顕微鏡観察(組織観察及びポイントカウント約2000点)、粉末X線回折(XRD)分析を行った。本論では、そのうちの特徴的な7試料について報告する。表-1に使用骨材の蛍光X線分析(XRF)による化学組成および物理的性質を示す。また、表-2に使用骨材の鉱物組合せを示す。岩石種類は、偏光顕微鏡観察とXRFによる全岩組成により決定した。

偏光顕微鏡観察の結果より、No.1~No.7の安山岩は両輝石安山岩である。斑晶鉱物として斜長石が顕著でありその他は主に斜方輝石、単斜輝石及びカンラン石が認められた。また多少の石英斑晶が存在し、稀に斜長石、単斜輝石、斜方輝石及び磁鉄鉱からなる集斑状組織が認められた。石基率は63.7~72.4%(表-2)で、石基はインターサタル組織を示し主に長柱状の斜長石、柱状および粒状の輝石類、粒状の磁鉄鉱などからなり少量の火山ガラス及びクリストバライト、トリディマイト等のシリカ鉱物がそれら鉱物の間を充填している。No.1~5及びNo.7には石英パッチが認められNo.4で顕著であった。No.6, No.3, No.1は程度の異なる変質作用を受けており、火山ガラスの粘土鉱物化が認められた。

XRD分析はCuK α 管球で管電圧35kV、管電流40mAの条件で行った。石英(以下、qz:2 θ =26.60°)、トリディマイト(以下、tr:2 θ =21.65°)の回折強度には、バックグラウンドを差し引いた値を用いた。クリストバライト(以下、cr:2 θ =21.95°)の回折強度には、斜長石(以下、pl:2 θ =23.65°)の回折強度を差し引いた値を用いた。

また、強熱減量(LOI)で風化度を評価すると、風化は

*1 九州大学大学院 工学研究院 日本学術振興会特別研究員 PD 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 セメント化学チーム 博士(工学) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 セメント化学チーム 修士(理工学) (非会員)

表-1 安山岩骨材の化学成分

sample	LOI	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	total
No.1	0.61	57.54	0.67	15.94	7.88	0.15	3.97	6.89	2.83	1.50	0.14	97.97
No.2	0.23	57.53	0.66	16.36	7.90	0.15	4.28	7.46	2.88	1.41	0.13	98.86
No.3	1.02	57.13	0.72	15.94	8.30	0.15	4.12	6.17	2.67	1.47	0.14	97.68
No.4	0.20	55.29	0.58	15.53	7.02	0.15	3.69	7.35	2.93	1.44	0.13	94.16
No.5	0.29	57.41	0.64	15.92	7.69	0.15	4.38	7.37	2.87	1.40	0.13	98.12
No.6	2.39	56.89	0.72	17.78	7.88	0.15	3.35	4.81	2.32	1.58	0.11	97.86
No.7	0.10	57.07	0.66	16.19	7.98	0.16	4.30	7.67	2.90	1.32	0.13	98.33
No.8	1.34	53.93	1.06	15.01	9.15	0.17	3.84	7.07	3.18	1.33	0.28	96.07
No.9	1.12	64.76	0.84	14.45	5.66	0.06	2.12	5.16	3.52	1.89	0.16	99.74

表-2 安山岩骨材の鉱物組成

sample	qz	cr	tr	pl	pyx	cl	gl	石基率(%)
No.1	◎	△	△	◎	△	+	+	69.1
No.2	△	△	△	◎	△	-	+	71.9
No.3	○	○	△	◎	△	+	+	66.3
No.4	△	○	△	◎	△	-	+	63.7
No.5	○	+	△	◎	△	-	+	72.4
No.6	+	○	◎	◎	△	○	+	70.1
No.7	+	-	△	◎	△	-	+	69.9
No.8	△	-	-	◎	○	-	◎	91.4
No.9	○	○	-	◎	◎	-	+	-

含有量: ◎ > ○ > △ > + > -

qz:石英, cr:クリストバライト, tr:トリディマイト, pl:斜長石, pyx:輝石, cl:粘土鉱物, gl:火山ガラス

No.6, No.3, No.1の順に進行しており, これらには粘土鉱物が認められた。この粘土鉱物は定方位法によると脱水したハロイサイト(7Å)(以下, hal)と同定された。

比較のため, 異なる産地の安山岩(No.8, No.9)も評価した²⁾。No.8は火山ガラス(以下, gl)を多く含み, 反応性シリカ鉱物を含まない。No.9はtrを含まず, crとglを含む。No.8, No.9は既報のAn(N), An(R)に対応している²⁾。

以上, 岩石学的評価のまとめとして, 全ての試料が少なくともcr, tr, glのいずれかを含んでいることから, 全ての試料でASRを生じる可能性が考えられた。

(2) 配合

モルタルの配合は, W/C=50%, S/C=2.125とした。なお, 細骨材粒度はサンプル量の都合上, JIS A 1146の規定粒度のうち, 0.15~0.30mmを除いたものを使用した。

後述する三種類のモルタルの促進膨張試験のうち, JIS法についてはNaOH水溶液を用いてセメントのNa₂O_{eq}量が1.2%となるよう調整して, 40×40×160mmのモルタルバーを作製した。また, デンマーク法, ASTM法においては使用セメントのNa₂O_{eq}量の調整は行わず, 40×40×160mmのモルタルバーを作製した。

2.2 促進試験

(1) 化学法(JIS A 1145)

JIS A 1145に準拠し, 化学法を行った。

(2) モルタルの促進膨張試験(JIS A 1146;JIS法)

モルタルの膨張率測定をJIS A 1146に準拠して行った。脱型時の長さを基長とし, 温度40℃, 相対湿度95%以上の条件下において膨張率を6ヶ月測定した。一部の骨材については, 非反応性骨材として石灰石骨材(以下, LS: Sc=3mmol/l, Rc=23mmol/l)と混合して膨張試験を行った。なお, 測定値は3本の平均値である。JIS A 1146では, 6ヶ月材齢におけるモルタルの膨張率が0.100%未満で「無害」, 0.100%以上で「無害でない」と判定する。

(3) モルタルの促進膨張試験(デンマーク法)³⁾

脱型時の長さを基長とし, 温度50℃の飽和NaCl溶液に浸漬して膨張率を6ヶ月測定した。デンマーク法では, 材齢3ヶ月におけるモルタルの膨張率が0.100%未満で

「無害」, 0.100~0.400%で「不明」, 0.400%以上で「有害」と判定する。

(4) モルタルの促進膨張試験(ASTM法)

ASTM C 1260に準拠し, 温度80℃の1mol/lのNaOH溶液に浸漬して膨張率を28日測定した。ASTM法では, 材齢14日におけるモルタルの膨張率が0.100%で「無害」, 0.100~0.200%で「無害と有害の両者が存在する」, 0.200%以上で「有害」と判定する。なお, ASTM C 1260では, W/C=47%, S/C=2.25として25×25×285mmのモルタルバーを作製することとしている。本研究では各種促進膨張試験における試験条件の比較を行うため, 配合およびモルタルバーのサイズが異なる。

3. 実験結果

3.1 化学法

図-1に化学法の結果を示す。なお, 図中にはASTM C 289の「潜在的有害」領域の区分線も示している。No.6を除く全ての安山岩骨材は「無害でない」もしくは「潜在的有害」と判定された。同一砕石場から採取した安山岩骨材No.1~No.7のうち, 多くの安山岩骨材がほぼ同じ領域にプロットされたが, 風化の影響を受けた安山岩骨材については異なる値を示した。Rcに着目すると, No.6が最も大きく, 次いでNo.3, No.1となっており, その他

のサンプルはほぼ同じ領域に位置している。この傾向は安山岩骨材の風化の度合いの傾向と一致した。風化度が大きくなると、風化の過程で生成した hal の陽イオン交換反応によって Rc が大きくなったと考えられる。また、No.3 と No.4 の cr 量はほぼ同じであるが、No.4 の Sc は No.3 よりも3倍以上大きい。反応性シリカ鉱物の溶解度は pH に大きく依存する²⁾ため、化学法のアルカリ溶液の pH の低下に伴って反応性シリカ鉱物の溶解量が低下する。すなわち、風化の影響によって Rc が大きく、 Sc が小さい領域にシフトする。また、反応性シリカ鉱物を含まないガラス質安山岩である No.8 は Rc が小さい領域に位置し、既往の研究結果と同様の傾向を示した²⁾。

3.2 モルタルの ASR 膨張挙動

(1) JIS 法

図-2 に JIS 法によるモルタルの膨張率の経時変化を示す。化学法においては No.6 を除いて全ての安山岩骨材が「無害でない」もしくは「潜在的有害」と判定されたのに対して、JIS 法では風化の影響を受けた No.1, No.3, No.6 使用モルタルが膨張挙動を示さず、その他のサンプルは膨張挙動を示した。

No.2, No.5, No.7 に着目すると、膨張開始材齢が異なるものの、最終膨張率はほぼ同じ値に収束している。これらの試料はいずれも化学法において Sc , Rc がほぼ同じ値を示している。膨張開始材齢が異なる理由としては反応性シリカ鉱物の溶解速度の差に起因すると考えられる。また、No.4 は Sc が最も大きな値を示した試料であり、JIS 法においても最も高い膨張率を示している。

風化の影響を受けた No.1, No.3, No.6 が膨張しなかった原因はペシマム現象によるものと推察される。一般に、ペシマム現象は以下のように説明される⁴⁾。「潜在的有害」領域の Sc , Rc が大きな反応性骨材を全量使用すると、大きな Rc の影響によって空隙水のアルカリが固定され、単位反応性骨材量あたりの反応率が低下し、高い膨張率を示さない。しかし、反応性骨材量をある一定割合とした場合、単位反応性骨材量あたりのアルカリ量が増加するため Sc は大きくなり、高い膨張率となる。

以上の考えに基づいて、JIS 法におけるモルタルの膨張率を化学法の Sc と Rc を用いて整理した。図-3 に化学法における Sc/Rc と JIS 法 182 日におけるモルタルの膨張率の関係を示す。あわせて岩月らの実験データ⁷⁾も示している。図より、 Sc/Rc と膨張率には相関が認められる。 Sc/Rc の大きい No.2, No.4, No.5, No.7 の膨張率が高く、風化を受けた Sc/Rc の小さな No.1, No.3, No.6 は膨張挙動を示さない。以上から、ペシマム現象の本質的機構については Sc , Rc によって説明できると言える。

実際に風化の進んだ安山岩骨材のペシマム現象を確認するため、非反応性骨材の LS と混合し、促進膨張試

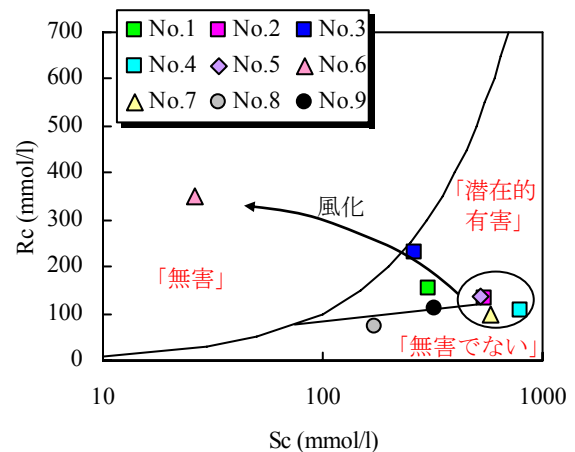


図-1 化学法の結果

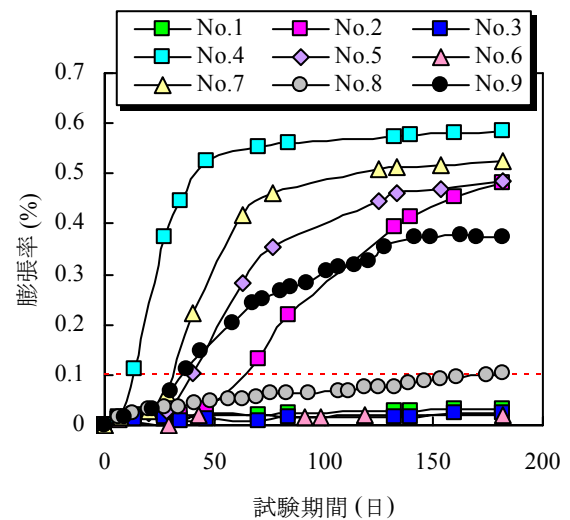


図-2 JIS 法におけるモルタルの膨張挙動

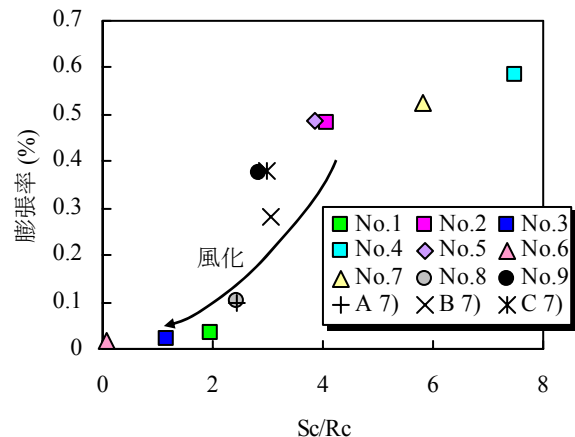


図-3 Sc/Rc と JIS 法 182 日の膨張率の関係

験を行った。図-4 に No.3 に LS を混合した場合の膨張率の経時変化を示す。No.3 混合率 20% において顕著な膨張挙動が認められ、JIS 法の基準値を超えている。岩月らの報告では、ペシマム割合は反応性鉱物量とセメントのアルカリ量との比率によって決定されるとしている⁵⁾。

本研究ではセメントのアルカリ量を 1.2%として検討を行ったが、低アルカリ量でもペシマム混合率となった場合には膨張が生じることが予想される。今後、その他の安山岩骨材についてもペシマム実験を行い、風化がペシマムの挙動に及ぼす影響について検討する予定である。

(2) デンマーク法

図-5 にデンマーク法によるモルタルの膨張率の経時変化を示す。デンマーク法では、風化が著しく進んだ No.6 と反応性シリカ鉱物を含まないガラス質安山岩の No.8 以外の安山岩骨材を使用したモルタルは全て膨張挙動を示した。反応性シリカ鉱物を含まないガラス質安山岩がデンマーク法で膨張しないことは既報で報告している²⁾。No.2, No.4, No.5, No.7 に着目すると、いずれのモルタルも類似した膨張挙動を示したが最終膨張率は異なり、JIS 法とは異なる傾向を示した。

ここで注目すべき点は、JIS 法において膨張挙動を示さなかった No.1, No.3 が膨張していることである。既報で、デンマーク法における空隙水の pH は JIS 法よりも低いことが示されている²⁾。デンマーク法は飽和 NaCl 溶液に浸漬することで大きな Rc にも影響されずモルタル空隙水の pH をある程度一定に保つことができる。そのため、デンマーク法では骨材の ASR 反応に伴う空隙水の pH 低下が生じず、ペシマム現象を生じるような小さな Sc/Rc の安山岩骨材であっても検出することができる。

既往の研究において、tr の X 線強度を 5 倍した値と cr の X 線強度の和は膨張率と良好な相関があることが示されている²⁾。図-6 に(cr+5tr)と膨張率の関係を示す。なお、反応性鉱物ごとに膨張への寄与度が異なると想定されることから、リートベルト法のデータベースから同一含有質量割合の cr, tr の X 線強度の相対回折強度比 2.31, 1.00 をそれぞれ乗じて強度補正を行った。風化の進んだ No.1, No.3, No.6 を除いて良好な相関関係が認められる。すなわち、cr よりも tr の方が膨張に大きく寄与していると考えられる。風化安山岩である No.1, No.3, No.6 については、hal の陽イオン交換反応によって空隙水の pH が他のものよりも低くなっているため、データが回帰直線よりも下方側にプロットされたと考えられる。

(3) ASTM 法

図-7 に ASTM 法によるモルタルの膨張率の経時変化を示す。ASTM 法では、No.6 を除く全てのサンプルにおいて「有害」もしくは「無害と有害の両者が存在する」と判定された。なお、本研究における ASTM 法はモルタルバーのサイズが異なるため、若干膨張率が低い値となっており、実際の判定結果とは若干異なる恐れがある。

No.2, No.4, No.5 に着目すると、No.2 のみが「無害と有害の両者が存在する」と判定されたものの、ほぼ同じ膨張挙動を示している。しかし、No.7 に着目すると、JIS

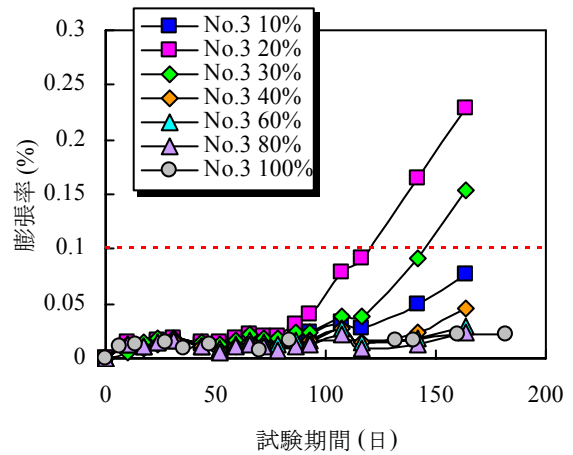


図-4 ペシマム混合におけるモルタルの膨張挙動

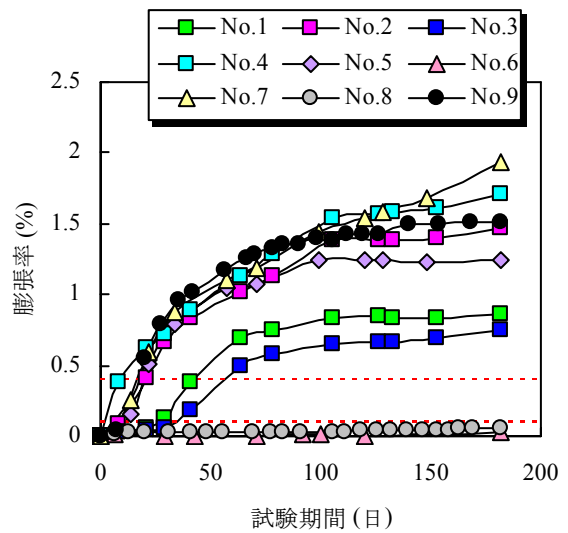


図-5 デンマーク法におけるモルタルの膨張挙動

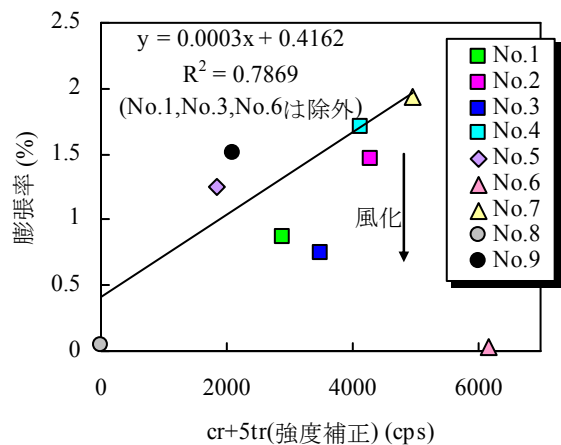


図-6 強度補正した反応性シリカ鉱物の X 線強度と膨張率の関係(デンマーク法)

法、デンマーク法では No.2, No.4, No.5 と同様に大きな膨張率を示していたのに対して、ASTM 法では他の骨材よりも膨張率が低い。ASTM 法は遅延膨張性骨材の検出に有効な試験法であるが、高反応性のチャート質骨材の

場合には骨材が軟化・溶解し、モルタルが膨張しないことが示されている⁶⁾。No.7についてもチャート質骨材と同様の現象が生じた可能性があるが、今後の検討課題である。以上の点を考えると、ASTM法は、非常に高い反応性を有する骨材に対しては適用できない可能性も示唆される。また、反応性シリカ鉱物を含まないガラス質安山岩のNo.8も高いpH条件による試験であるため膨張する傾向が認められた²⁾。

「潜在的有害」領域に位置したNo.1, No.3に着目すると、ASTM法においても膨張挙動を示した。ASTM法もデンマーク法と同様にペシマム現象を生じる安山岩骨材の検出に対して有効な試験法であると考えられる。また、No.6はASTM法では若干膨張したものの、高い膨張率とはならなかった。

No.6は高反応性のtrを多く含有している。halによる陽イオン交換反応は早期に生じるため、ASTM法のような高アルカリ環境下に長期的に浸漬した場合には膨張を生じると予測したが、非膨張性という結果となった。そこで、ASTM法の試験後、モルタルを粗砕し、1mol/lのHNO₃溶液に浸漬してペースト溶解し、その残分について粉砕し、XRD分析を行った。図-8にNo.6のASTM法前後におけるXRDプロファイルを示す。ASTM法を行った後はcr, trが反応している状況が確認された。また、モルタルを割裂した際にASRゲルらしき半透明の生成物が骨材付近に認められ、ASR反応は生じていると推測できた。ASR反応が生じていても膨張率が小さい原因として、骨材自身がポーラスなことが考えられた。本研究で使用した安山岩骨材の吸水率は1.0~2.5%であったのに対して、No.6のみ15.1%と大きな値を示した。よって、ASRゲルの膨張圧が緩和された可能性がある。

3.3 風化した安山岩骨材に対する各種促進試験の適用性

表-3に本研究で使用した安山岩骨材の鉱物組成と促進試験結果の一覧を示す。風化の進んだ安山岩骨材のNo.1, No.3はデンマーク法およびASTM法では膨張が認

められたのに対して、JIS法では膨張挙動が認められなかった。この安山岩骨材はhalの存在によってRcが大きくなるためにASTM C 289において「潜在的有害」と判定され、反応性骨材量を変化させた場合にNo.3は置換率20%で大きな膨張を示した。すなわち、風化の影響を受けた安山岩骨材のASR反応性を判定する際、JIS法はペ

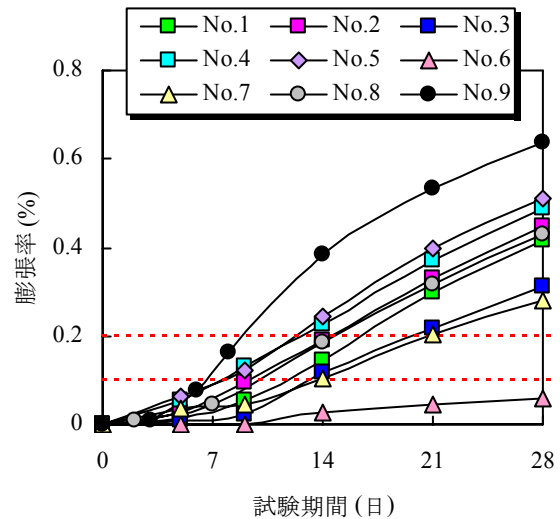


図-7 ASTM法におけるモルタルの膨張挙動

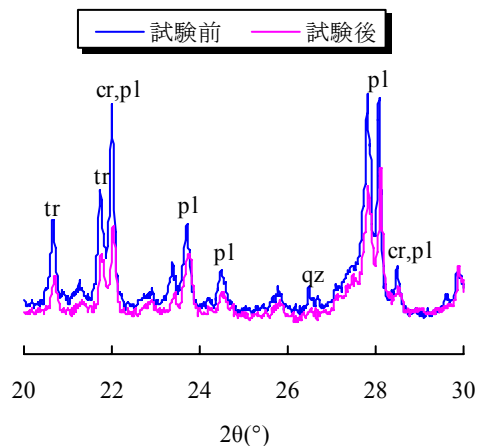


図-8 No.6のASTM法前後のXRDプロファイル

表-3 安山岩骨材の鉱物組成と各種促進試験結果

sample	鉱物組成							各種促進試験結果			
	qz	cr	tr	pl	pyx	cl	gl	化学法	JIS法	デンマーク法	ASTM法
No.1	◎	△	△	◎	△	+	+	無害でない	無害	有害	無害と有害の両者が存在する
No.2	△	△	△	◎	△	-	+	無害でない	無害でない	有害	無害と有害の両者が存在する
No.3	○	○	△	◎	△	+	+	無害でない	無害 (ペシマム時:無害でない)	有害	無害と有害の両者が存在する
No.4	△	○	△	◎	△	-	+	無害でない	無害でない	有害	有害
No.5	○	+	△	◎	△	-	+	無害でない	無害でない	有害	有害
No.6	+	○	◎	◎	△	○	+	無害	無害	無害	無害
No.7	+	-	△	◎	△	-	+	無害でない	無害でない	有害	無害と有害の両者が存在する
No.8	△	-	-	◎	○	-	◎	無害でない	無害でない	無害	無害と有害の両者が存在する
No.9	○	○	-	◎	◎	-	+	無害でない	無害でない	有害	有害

シマム現象の影響で適切に判定できない可能性がある。

それぞれの促進試験結果に着目すると、デンマーク法と ASTM 法の判定結果が類似している。ただし、ASTM 法は No.7 のような高反応性骨材の場合には適用できない可能性も示唆される。図-9 にデンマーク法 182 日における膨張率と ASTM 法 28 日における膨張率の関係を示す。反応性シリカ鉱物を含む安山岩骨材であれば、No.7 を除いて良好な相関関係が認められた。JIS 法については、デンマーク法および ASTM 法における膨張率と良い相関関係が得られなかった。

実際の碎石鉱山を鑑みると、風化した安山岩骨材が不規則・不定期に混入する機会が多いことが予想される。そのような骨材をコンクリートに使用した場合には風化安山岩の少量混入によるペシマム現象によって膨張する可能性を現行の JIS 法では見逃す可能性がある。風化安山岩骨材に対する各種促進試験の適用性および実際の碎石工場の現状を鑑みると、ペシマムを生じる安山岩骨材に対しても適切に検出できるデンマーク法および ASTM 法が ASR 反応性の評価に有効といえる。

4. 結論

本研究は、同一碎石場において採取した安山岩骨材の風化度に着目して各種促進試験を行い、ASR 膨張挙動について検討した。以下に得られた知見の概要を示す。

- (1) 風化の影響によって、安山岩骨材は化学法においてアルカリ濃度減少量 R_c が大きく、溶解シリカ量 S_c が小さくなる領域にシフトする傾向を示した。
- (2) 風化の影響を受けた、 S_c 、 R_c の大きな領域に位置する安山岩骨材は現行 JIS 規格のモルタルバー法では膨張挙動を示さなかった。これは風化に伴い R_c が大きくなったことに起因するペシマム現象によるものであり、現行 JIS 規格ではペシマムを生じる安山岩骨材の ASR 反応性を適切に検出できなかった。
- (3) 飽和 NaCl 溶液に浸漬するデンマーク法および 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬する ASTM C 1260 に準拠した促進試験は、風化の影響を受けた安山岩骨材であっても膨張を示し、ペシマムを生じる安山岩骨材の検出に有効であった。また、デンマーク法によるモルタルの膨張率は安山岩骨材の反応性シリカ鉱物量および風化の程度と対応していた。
- (4) 風化骨材が不規則に混入される実際の碎石鉱山において、適切に安山岩骨材の ASR 反応性を検出するためには、デンマーク法および ASTM C 1260 に準拠した促進試験が有効と考えられた。ただし、ASTM C 1260 に準拠した促進試験は高反応性の安山岩骨材に対して膨張率が低くなる傾向が認められた。
- (5) 反応性シリカ鉱物を含有している安山岩骨材に対し

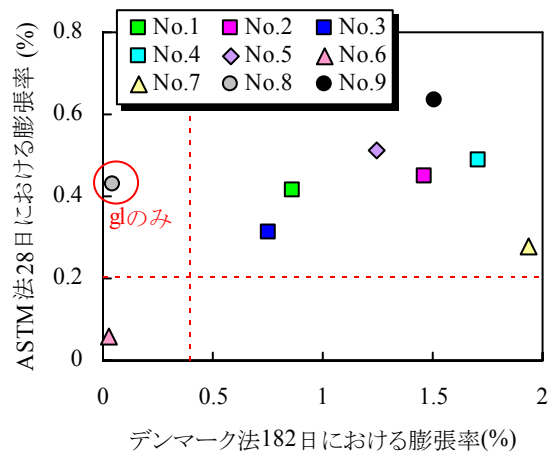


図-9 デンマーク法と ASTM 法の膨張率の関係

て、デンマーク法と ASTM C 1260 に準拠した促進試験の膨張率には相関関係が認められた。

謝辞：本研究を行うにあたり、化学法については太平洋セメント(株)中央研究所の河野克哉氏、偏光顕微鏡観察については弘前大学の柴正敏教授の多大なご指導・ご協力をいただきました。また、本研究で使用した XRD は九州大学中央分析センターの機器を使用いたしました。また、本研究の一部は日本学術振興会特別研究員の助成を受けました。ここに付記し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか、セメント・コンクリート, pp.1-9, 2005
- 2) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通：岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.689-703, 2007
- 3) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.185-197, 2004
- 4) 魚本健人, 古澤靖彦：アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.109-119, 1992
- 5) 岩月栄治, 森野奎二, 皿井剛典：長期間貯蔵した ASR モルタルバーの膨張に及ぼす反応性鉱物の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, pp.943-948, 1998
- 6) 岩月栄治, 森野奎二：NaOH 溶液に浸漬したチャート質骨材使用供試体の ASR 膨張挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.827-832, 2006