

論文 遅延膨張性骨材による ASR 劣化事例および骨材の ASR 反応性検出法の検証

西 政好^{*1}・池田 隆徳^{*2}・佐川 康貴^{*3}・林 建佑^{*4}

要旨：反応性鉱物として隠微晶質・微晶質石英を含む骨材は反応速度が遅く、化学法やモルタルバー法では反応性を検出できない可能性がある。欧米においては、このような遅延膨張性のアルカリシリカ反応(以下、ASR とする)について検討した事例は多いが、国内における堆積岩系骨材の ASR 反応性検出法について検討した事例は少ない。本研究では、反応性鉱物として隠微晶質石英を含む泥質片岩に対して各種反応性試験を行い、堆積岩系骨材の ASR 反応性試験法について検討した。その結果、反応性鉱物として隠微晶質石英を含む泥質片岩に対しては ASTM C 1260 による試験が有効であることを示した。

キーワード：ASR, 隠微晶質石英, 岩石学的評価, ASTM C 1260, モルタルバー法, 化学法

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) が我が国で報告されて以降, ASR 対策に関して様々な検討がなされてきている。1986 年には, 旧建設省が ASR 抑制対策について, (1)コンクリート中のアルカリ総量を 3kg/m^3 以下にする, (2)抑制効果のある混和材の使用, (3)無害な骨材の使用, の 3 つの対策を示している。この抑制対策が講じられて以降, ASR により劣化した構造物は減少しており, 上記の抑制対策は, 非常に有効であると考えられる。

これまで我が国において ASR による劣化を生じた構造物の事例は, 安山岩等の火山岩に起因する急速膨張性のものが多く報告されている。これらの火山岩系骨材は, 主にクリストバライトやトリディマイト, 火山ガラスを反応性鉱物として含み, そのほとんどは, ペシマムやセメント以外からのアルカリ供給を除けば, 化学法やモルタルバー法により反応性を検出可能であることが知られている¹⁾。

一方, 近年では我が国においても遅延膨張性の ASR による劣化事例が報告されている^{2), 3)}。先カンブリア紀もしくは, 古生代の堆積岩(グレイワッケ, シルト岩, 粘土岩, 不純物を含む石灰岩), 火成岩(失透した流紋岩), 変成岩(粘板岩, 千枚岩, メタコーツァイト, ひずんだ片麻岩, マイロナイト)は, 主に隠微晶質～潜晶質石英に起因する遅延膨張性の ASR を生じることが知られている¹⁾。

海外では, 遅延膨張性の ASR に対する報告は多く, Katayama *et al.* は, 隠微晶質石英を含む堆積岩系骨材を粗骨材として用いた構造物について調査を行っており, 湿潤環境であれば, セメントのアルカリ量が $0.82\sim0.84\%$ 程度で遅延膨張性の ASR を生じる可能性があることを

示した²⁾。また, Hooton の研究成果によると, アルカリ総量が 1.9kg/m^3 であっても遅延膨張性の ASR を生じることが報告されている⁴⁾。

また, 隠微晶質石英を含む遅延膨張性骨材について, ASTM C 289(化学法)や ASTM C 227 (モルタルバー法)では反応性を適切に評価できず, 南アフリカの National Building Research Institute による 80°C の 1mol/l NaOH 水溶液に浸漬する試験が有効とされ, 後に ASTM C 1260 として規格化されている。

一方, 国内においては遅延膨張性骨材の反応性の検出法についてさほど検討されていないのが現状である。特に, 実際に ASR 劣化を生じた構造物の劣化状況と ASR 反応性試験の結果との相関について調査を行った事例はほとんどない。よって, 現行の JIS 規格の試験法や海外において提案されている各種試験法の適合性を我が国の遅延膨張性骨材で検証することは非常に有意義であると考えられる。

そこで, 本研究では隠微晶質石英を含む泥質片岩により ASR を生じ劣化した国内の構造物を対象とし, 劣化調査を行った。その上で, 反応性骨材である泥質片岩と岩石学的に同型の碎石を対象構造物付近の碎石所より入手し(以下, 入手骨材とする), 現行の試験法である化学法, モルタルバー法に加えて, ASTM C 1260(以下, ASTM 法とする)および 50°C の飽和 NaCl 溶液にモルタルを浸漬するデンマーク法⁵⁾を行うことで, 遅延膨張性骨材の ASR 反応性検出法に関して検証を行った。

*1 福岡市役所(九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助教 博士(工学) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 建設・資源材料チーム (正会員)

2. 隠微晶質石英による ASR で劣化した構造物の調査

2.1 構造物の概要

図－１に劣化した構造物の外観を示す。この構造物は、全体に亀甲状のひび割れが発生しており、ひび割れ最大幅は 10mm 以上であった。また、図－２に構造物コアの切断面を示す。コアの肉眼観察を行ったところ、粗骨材の周辺に ASR ゲルと思われる白色の滲出物が観察された。また、貝殻が認められたことから、細骨材は海砂あるいは海底に堆積した陸源碎屑物を起源とする山砂などから生産されたものであると考えられる。なお、コンクリートコアを粉碎し、塩化物イオン量を JIS A 1154 により測定したところ、およそ 0.6kg/m^3 であった。

2.2 偏光顕微鏡観察による反応性鉱物の同定

対象構造物より採取したコンクリートコアより、 $20\times 30\text{mm}$ 、厚さ $20\mu\text{m}$ 程度の研磨薄片を作製し、偏光顕微鏡を用いて、反応骨材および反応性鉱物の同定を行った。

図－３に偏光顕微鏡下における粗骨材－セメントペースト界面の写真を示す。粗骨材である泥質片岩内部からモルタル部へとひび割れが発生しており、ひび割れが ASR ゲルにより充填されている状況が観察された。なお、細骨材の反応の形跡は確認できなかった。

また、図中四角で示す部分を拡大した写真を図－４に示す。ゲル脈の周辺には、隠微晶質石英が石英、曹長石、白雲母などの粒間を埋めるように存在していることが確認された。以上の観察結果から、コンクリートに使用された泥質片岩中の隠微晶質石英が ASR を生じたものと推測された。なお、泥質片岩は変成岩であるが、堆積岩である泥岩などの堆積岩を原岩としているため、ここでは堆積岩系骨材と記す。

2.3 アルカリ総量の推定

構造物表面からはアルカリが溶脱し、測定されるアルカリ量が建設時のアルカリ総量の値よりも小さくなることが懸念される。そこで、構造物よりコアを採取し、表層からの距離が 150mm の部位を粉碎し、「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発」（総プロ法）を参考にアルカリ総量を測定した。ここで、総プロ法における抽出溶媒（ 40°C 温水）との比較として、抽出溶媒を 40°C の 1N HNO_3 とした場合のアルカリ量についても測定した。なお、試験値は 2 試料の平均値である。

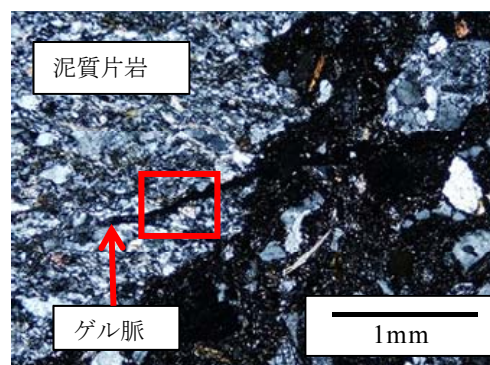
図－５にアルカリ量推定の結果を示す。温水によって抽出できたアルカリ量はおよそ 1.5kg/m^3 であった。ここで、総プロ法におけるナトリウムの回収率は 60%、カリウムの回収率は 80%とされていることから、得られたアルカリ量を補正すると、およそ 2.2kg/m^3 となる。また、硝酸により抽出したアルカリ量は 3.0kg/m^3 程度であった。硝酸によりほぼ全てのアルカリが抽出できると考えられ



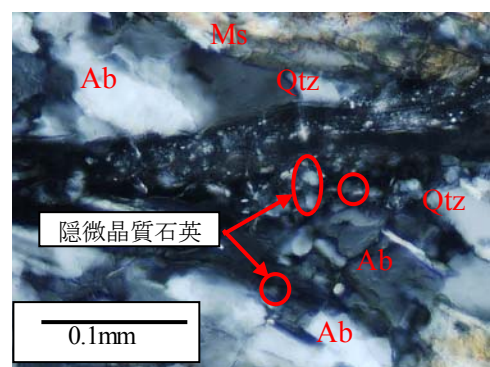
図－１ 構造物の劣化状況



図－２ コンクリートコアの切断面



図－３ 構造物の粗骨材－ペースト界面
(直交ポーラー)



図－４ 隠微晶質石英の偏光顕微鏡写真
(直交ポーラー Ab : 曹長石, Qtz : 石英, Ms : 白雲母)

ることから⁶⁾、対象構造物のアルカリ総量は現行のアルカリ総量規制値と同程度であると推察された。

2.4 残存膨張量の測定

構造物コアを 80℃の 1N NaOH に浸漬し、ASTM 法による残存膨張量の測定を行った。なお、コア径が大きい場合には内部にアルカリが浸透しにくく、残存膨張量を過小評価してしまう可能性があるため、本実験ではコア径は 50mm とし、基長は 50mm とした。

図-6 に残存膨張量の経時変化を示す。試験結果は 2 体の供試体の平均膨張率とした。ASTM 法では、図に示すように、促進期間 14 日における膨張率が 0.1%以下ならば「無害」、0.1~0.2%ならば「不明」、0.2%以上ならば「有害」と判定するが、Katayama *et al.*²⁾は、遅延膨張性の ASR に関しては、判定基準を 21 日で 0.1%にする必要があることを提案している。本実験においては、促進期間 40 日における膨張率は 0.1%以下であり、膨張も収束傾向にあることから、現段階において構造物の ASR による膨張は、ほぼ収束しているものと思われる。

2.5 実構造物に使用した泥質片岩と入手骨材の比較

図-7 に構造物で使用された泥質片岩の、図-8 に入手骨材の偏光顕微鏡写真を示す。いずれの骨材も、縞状構造を示し、白雲母、黒雲母、隠微晶質石英、曹長石からなる 0.05~0.3mm 程度の薄層と、曹長石、石英からなる 0.2~0.5mm 程度の薄層が交互に存在し、少量の不透明鉱物、緑泥石、方解石などを含んでいる泥質片岩であることが明らかとなった。以上より、入手骨材は ASR による劣化を起こした構造物に用いられた泥質片岩と岩石学的に同じであることが分かった。

3. 各種促進試験における遅延膨張性骨材の反応性

3.1 化学法による反応性の検出

JIS A 1145 に基づき、入手骨材について化学法を行った。なお、試験値は 3 試料の平均値を用いた。図-9 に入手骨材の化学法の試験結果を示す。入手骨材は Sc、Rc とともに低く、ほぼ判定曲線上にプロットされている。本実験では、入手骨材は「無害でない」と判定されたが、化学法は試料のサンプリングや試験方法による結果のばらつきが大きいこと⁷⁾を考慮すると、この骨材は「無害」と判定される可能性もある。

3.2 モルタルバー法による反応性の検出

JIS A 1146 に準拠し、モルタルバー法を行った。なお、本実験では ASR を促進させるために、セメントのアルカリ量を $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で 1.2%、1.8%、2.4%の 3 水準として試験を行った。なお、供試体は 3 体ずつ作製し、膨張率はその平均値とした。図-10 にモルタルバー法の試験結果を示す。通常のもルタルバー法(セメントのアルカリ量 1.2%)の場合、試験材齢 182 日におけるモルタルの膨張

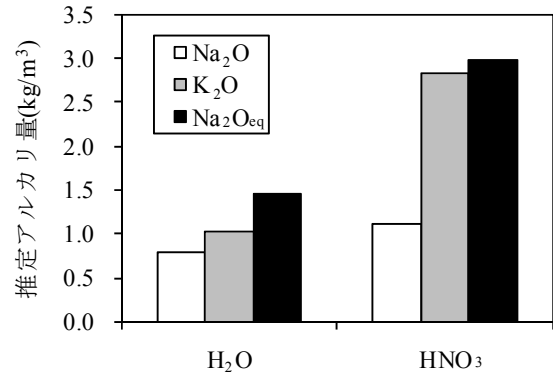


図-5 アルカリ総量の推定結果

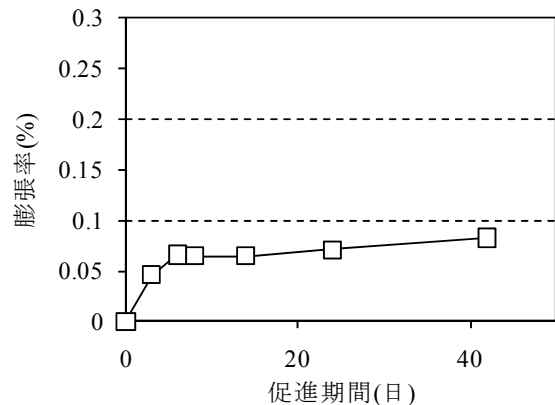


図-6 残存膨張量の経時変化

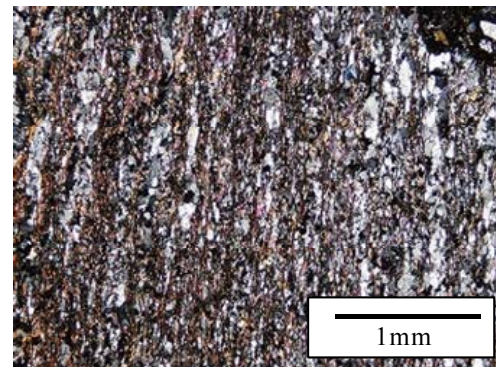


図-7 コンクリート粗骨材の偏光顕微鏡写真(直交ポーラー)

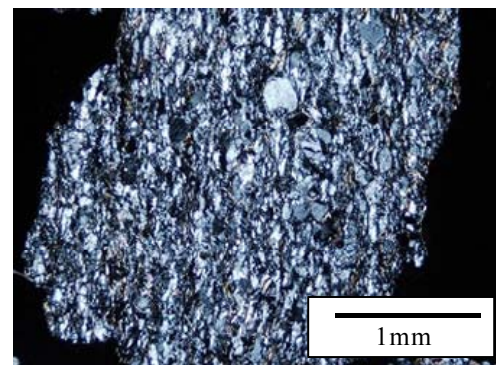


図-8 入手骨材の偏光顕微鏡写真(直交ポーラー)

率は、0.03%程度であり、入手骨材は「無害」と判定された。化学法の試験結果も合わせて考慮すると、実構造物で ASR 劣化を生じた骨材であっても、遅延膨張性の ASR を示す骨材については現行の試験法では反応性を適切に評価できない可能性がある。一方、セメントのアルカリ量を 1.8%, 2.4%とした場合には試験材齢 182 日では約 0.12%となり、膨張も収束していない。このことから、モルタルバー法においてセメントのアルカリ量を増加させ、空隙水の pH を高めることにより、遅延膨張性の ASR を検出できる可能性があると言える。

3.3 ASTM 法による反応性の検出

水セメント比(W/C) 50%, 砂セメント比(S/C) 2.25, 供試体寸法 40×40×160mm のモルタルを 3 体作製し、80℃の 1N NaOH に浸漬して、膨張率の経時変化を測定した。なお、セメントのアルカリ量の調整は行っていない。また、ASTM C 1260 の規格では、供試体の寸法は、1×1×11.25inch であるが、本実験ではモルタルバー法と同じ寸法とした。

図-11 に ASTM 法におけるモルタルの膨張率の経時変化を示す。なお、膨張率は 3 体の供試体の平均値である。促進期間 14 日において膨張率は 0.3%となり、非常に大きな膨張を示した。また、入手骨材は「有害」と判定されていることから、ASTM 法により隠微品質石英を含む泥質片岩の ASR 反応性を評価することができたと言える。

3.4 デンマーク法⁵⁾による反応性の検出

水セメント比(W/C) 50%, 砂セメント比(S/C) 2.25, 供試体寸法 40×40×160mm のモルタルを 3 体作製し、50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬して、膨張率の経時変化を測定した。なお、セメントのアルカリ量の調整は行っていない。デンマーク法では、促進期間 91 日において、膨張率が 0.1%未満ならば「無害」、0.1~0.4%ならば「不明」、0.4%以上ならば「有害」と判定する。

図-12 にデンマーク法におけるモルタルの膨張率の経時変化を示す。なお、膨張率は 3 体の供試体の平均値とした。図より、促進期間が 200 日を経過しても膨張は収束しておらず、長期的に膨張していることが分かる。しかし、判定基準である 91 日における膨張率は 0.05%であり、「無害」と判定された。このことから、デンマーク法では、遅延膨張性の ASR 反応性を適切に評価することが出来ないと考えられる。

3.5 各種反応性試験結果に対する考察

促進養生試験の種類により判定結果が異なった理由として、各養生条件によりモルタルの空隙水中の pH が異なることが考えられる。ASTM 法におけるモルタルの空隙水の pH は、ほぼ 14 を保つものと考えられ、モルタルバー法におけるそれよりも非常に高い⁸⁾。また、モル

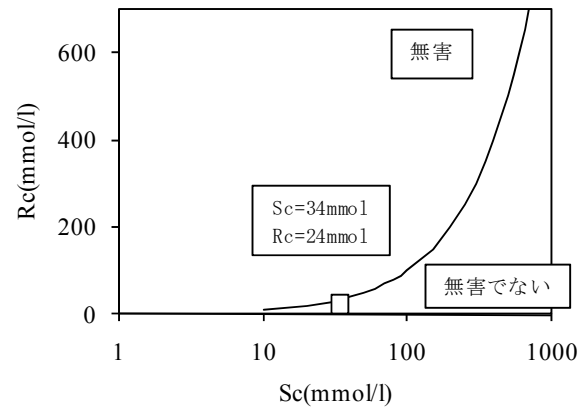


図-9 化学法の試験結果

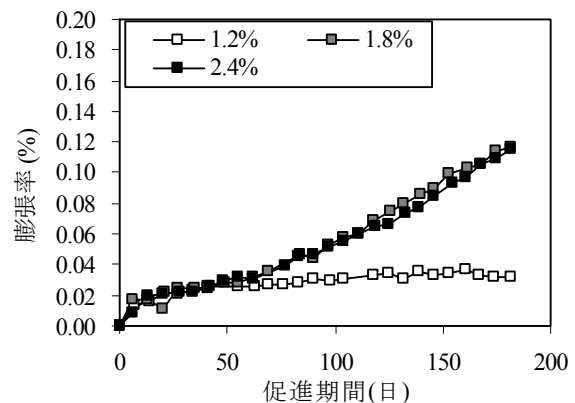


図-10 膨張率の経時変化(モルタルバー法)

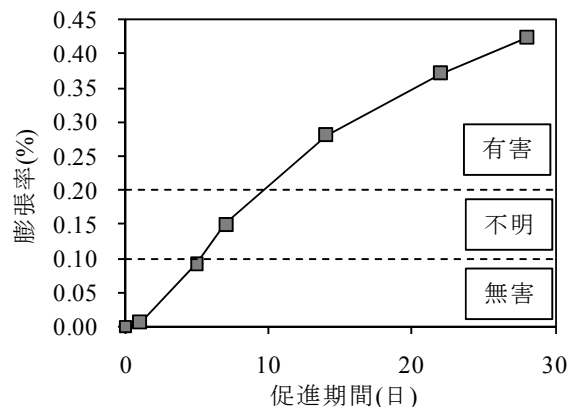


図-11 膨張率の経時変化(ASTM 法)

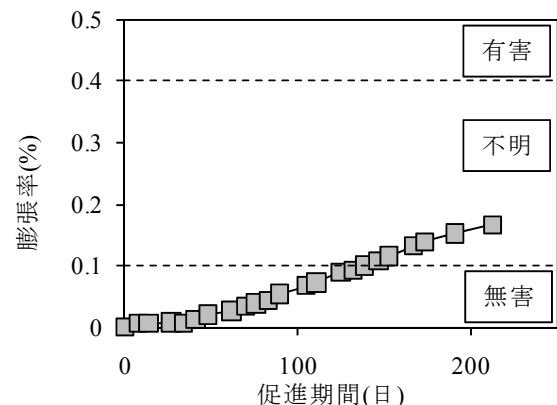


図-12 膨張量の経時変化(デンマーク法)

タルバー法では供試体からのアルカリ溶脱等の影響により、空隙水の pH は、促進試験早期から低下することが指摘されている⁹⁾。そのため、セメントのアルカリ量が1.2%の場合ではモルタルバー法では膨張を示さなかったものの、セメントのアルカリ量を1.8%以上添加した場合には空隙水の pH が上昇し、膨張挙動を示したものと考えられる。また、デンマーク法におけるモルタルの空隙水の pH はモルタルバー法におけるそれよりも低いため、促進材齢91日における膨張量は小さく、「無害」と判定された。しかし、アルカリ溶脱の影響がないため、長期にわたり膨張が継続したものと考えられる。

3.6 各種反応性試験の適合性に関する考察

遅延膨張性の ASR を示す骨材については ASTM 法による試験が有効であることを示したが、ASTM 法では反応性を検出できない骨材も存在するため、注意が必要である。本研究で用いた泥質片岩と同じ堆積岩系の骨材に属する骨材として、例えばチャートがあるが、そのチャートの反応性は、モルタルバー法により検出できるが、ASTM 法を適用した場合には骨材が溶解し、反応性を過小評価してしまう可能性が指摘されている¹⁰⁾。また、実構造物において、実際には劣化の認められない骨材についても有害と判定してしまう場合があるなど¹¹⁾、適切に反応性を評価することができない骨材も存在するため、使用骨材の岩石学的特徴を把握した上で試験を行わなければならないと言える。

4. 結論

本研究では、遅延膨張性の ASR により劣化したと考えられる実構造物の調査ならびに、対象構造物で ASR を生じた骨材と同型の砕石を用いて、各種アルカリ反応性試験の適用性を検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 分析を行った構造物は、偏光顕微鏡観察の結果、隠微晶質石英による ASR で劣化していたことが確認された。また、アルカリ総量を推定したところ、およそ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 3\text{kg/m}^3$ 程度であった。
- (2) 隠微晶質石英を含む泥質片岩の ASR 反応性は、国内における現行の試験法である化学法およびモルタルバー法では適切に評価することが出来なかった。
- (3) ASTM 法では反応性を検出できたが、JIS モルタルバー法およびデンマーク法では検出することが出来なかった。これは、各種反応性試験の養生条件におけるモルタルの空隙水の pH が異なるためと考えられる。

参考文献

- 1) 片山哲哉：土木学会コンクリート標準示方書改定小委員会 材料部会報告書 3 骨材の耐久性, pp.1-35, 1995
- 2) T. Katayama *et al.*: Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures, Central Japan, Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004
- 3) T. Katayama: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.862-873, 2008
- 4) D. Hooton: The Kingston Outdoor Exposure Site for ASR- After 14 Years What Have We Learned?, Proceedings of Marc-Andre Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, pp.171-194, 2006
- 5) S. Chatterji: An accelerated method for detection of alkali-aggregate reactivities of aggregates, Cement and Concrete Research, Vol. 8, pp.647-650, 1978
- 6) 池田隆徳, 川端雄一郎, 佐川康貴, 濱田秀則：セメントペーストおよびモルタルのアルカリ量推定に関する基礎的研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.765-766, 2009
- 7) 松下博通, 田中慎一郎, 山田一夫：骨材のアルカリ反応性判定法に関する問題点－ASR 抑制を目指した九州基準に向けて－, コンクリート工学, Vol.43, No.10, pp.9-17, 2005
- 8) 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
- 9) P. Rivard *et al.*: Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.1147-1153, 2003
- 10) 岩月英治, 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
- 11) 鳥居和之, 野村昌弘, 山戸博晃, 本田貴子：促進養生試験による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.29, No.1, pp.945-950, 2004

