

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560466

研究課題名（和文） 砕石切羽内のアルカリ反応性骨材の分布実態調査

研究課題名（英文） INVESTIGATION ON THE ACTUAL STATE OF DISTRIBUTION OF ALKALI SILICA REACTIVE AGGREGATE IN CRUSHED STONE QUARRY

研究代表者

森野 奎二（MORINO KEIJI）

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：20064933

研究成果の概要：わが国のアルカリシリカ反応性骨材岩種には火山岩系の安山岩と堆積岩系のチャート・珪質粘板岩などがあり、いずれも全国各地に分布する。安山岩は、その中に反応性鉱物として火山ガラス、クリストバライト、トリジマイトなどを含み、それらの含有量は砕石切羽内の近隣でも変化した。チャート、その他の珪質堆積岩に含まれる反応性鉱物は潜晶質石英、玉髄、オパールなどであり、切羽の1m²内でも岩種と鉱物種の分布や含有量に変化した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：アルカリシリカ反応、反応性骨材、反応性鉱物、砕石切羽、モルタルバー膨張、ASR化学法、珪質堆積岩、安山岩

1. 研究開始当初の背景

(1) アルカリシリカ反応（ASR）は1983年9月にわが国で顕在化して以来、各地で多数の被害構造物が発見されてきた。それらの構造物は発生したひび割れの補修がなされ、再補修が数回に及ぶ構造物も少なくない。2003年4月には、ASRによるコンクリートの膨張によってコンクリート構造物中の鉄筋が破断している事例が報道され、それまで注目されていなかった構造物の安全性が問題視されるようになった。今後のASRによる劣化防止・抑制、鉄筋破断に伴って低下した構造物の性能の回復、補修・補強工法の選

定などが注目されるようになった。このように最近では、1980年代のASRのメカニズムや防止対策から、劣化構造物の維持管理、補修・補強、モニタリングなどへと移ってきている。(2) しかし、ASRには種々の要因が複雑かつ複合的に影響を及ぼすため、その反応挙動や劣化進行は一様ではなく、引き続き基礎的研究をすることは重要である。特に岩石・鉱物学的知見を含めたデータの蓄積は重要である。

(3) 研究代表者は1971年に、当事の通商産業省の骨材資源調査に関わり、調査地のチャート砕石をASR反応の可能性が高いとし

て、コンクリート用骨材としては不適切とした。そして、その砕石を使用して研究を実施した。1983年のASR顕在化以降は、毎年連続して研究を実施しており、ASR膨張率測定用のモルタルバーやコンクリート供試体などを湿潤貯蔵状態で1万本以上保存しており、また、反応性骨材の偏光顕微鏡用薄片も300枚以上保有している。

(4) ASR骨材の反応性の試験・研究結果においては、ばらつきが著しい。骨材を生産している砕石工場の切羽での岩石の分布は複雑であり、当然、ばらつきが生じる。しかし、使用者は、ほとんどの場合において切羽の状況を見た事がなく、その情報を読んだこともないので理解していない。そこで、ばらつきに対する誤解が発生する。これを無くするには、切羽の状態を明らかにして公表する必要がある。一方、ばらつきが原因で、データの選別・捏造が発生し、使用者側には不信感が生じる。このことから、ASR抑制対策が2002年8月に抜本的に改正され、土木構造物には反応性骨材であっても抑制対策（アルカリ総量規制、高炉水砕スラグ粉末などの混和材）で対処できるようになった。しかし、生コン製造や建設現場施工上での問題等があり解決したとは言えない。また、建築物では無害骨材の使用を対策の一つとして残していることから、ASRの対応では依然として混乱や解決しなければならない問題がみられる。

(5) 骨材生産者側においては、使用者側以上に反応性骨材の分布状態を把握する必要があるが、正確に把握している工場は極めて少ない。一方、要望としては、化学法で「無害でない」となった場合には、従来の「モルタルバー法」での対応を希望している。モルタルバー法は結果が出るのに6ヶ月を要する。この点からも、切羽を分類して事前に反応性を把握しておくことが極めて重要になっている。

(6) 多様な品質の骨材を多様な用途のコンクリートに効率良く適応させるには、切羽の岩石・鉱物の分布状態（地質状態）と反応性骨材分布状態の関係を明らかにし、的確な対応を可能にする必要がある。

2. 研究の目的

(1) コンクリートでアルカリシリカ反応（ASR）を起こす可能性のある骨材の生産現場である砕石工場切羽での反応性骨材原石の分布状態を明らかにすること、

(2) 切羽・産地別のASR反応性の特徴を把握・分類するモデルを確立すること、である。

3. 研究の方法

初めに近隣で被害を発生させた反応性チャート・珪質粘板岩などの堆積岩の砕石切羽

の地質状況、原石の岩石学的特徴、骨材製品の品質などを調査し、採取試料の反応性を実験室内で偏光顕微鏡(PM)観察、JIS A1145 化学法、JIS A1146 モルタルバー法などにより調べた。

(2) 次に、実構造物のASR被害を関西・中国地方で多数発生させた香川県豊島安山岩砕石の砕石場跡地の切羽の調査と岩石・骨材の入手、実験・観察を行い、1983年頃の結果と比較した。また、北海道の安山岩砕石も入手し同様の室内実験を行った。

4. 研究成果

(1) 堆積岩砕石場切羽の地質状態とASR試験結果

岐阜県と愛知県の砕石2工場の例について述べる。両工場とも砕石・砕砂製品の対象岩種は堆積岩（中・古生層）である。

写真1は、岐阜県内の砕石工場切羽の一部分である。なお、この地域の珪質粘板岩砕石と、愛知県産山砂利（チャート粒子から成る）の併用でコンクリート橋梁基礎にASR劣化の発生した事例がある。

この地層は、砂岩・粘板岩互層であり、走向・傾斜は大略N85W、傾斜85Sである。しかし、当地の地質は複雑にもめており、小さな褶曲もあり、局所的にはかなり変動する。この互層中の珪質粘板岩の偏光顕微鏡観察結果を表1、化学法及びモルタルバー法の結果を表2に示す。

この岩石の偏光顕微鏡観察では、チャートと見間違ふほど微細な石英（潜晶質石英）からなる。微量の硫化鉄（黄鉄鉱）、炭質物（石墨）、粘土鉱物などが含まれていることからチャートではないと判定した。この地域のチャートにはしばしば放射虫化石を置換したシリカ成分が球顆状玉髓になっている状態が見られる。この岩石にも球顆状が随所にみられたが、その内部には玉髓はみられず石英の集合になっていた。しかもそれらの集合石英中の個々の石英には波動消光を示すものが多数みられた。

化学法試験結果では、 $S_c/R_c > 1$ であり、「無害でない」と判定される。しかし、モルタルバー法では6ヶ月の膨張率が、0.1%を僅かに下回っているため、形式的には「無害」と判定される。しかし、膨張挙動や偏光顕微鏡観察結果も含めて総合判断すると、実質は反応性岩石であると評価した方が正しいように思われる。

表1及び表2の石英質岩の破断面は、目視では白色～灰色のチャート状あるいは石英の集合状態をなすものである。その化学法の結果では1.42であり、「無害でない」と判定される。しかし、モルタルバー法の6ヶ月の結果では、0.025%であり、全く膨張してなく、明らかな無害岩石である。化学法とモ

ルタルバー法の結果が一致しない典型例といえる。

表 1 及び表 2 の頁岩(岩種を粘板岩と称してもよい)は、切羽から直接採取したのではなく、砕石切羽付近に集積されている大きな岩塊から試料を得たものである。上記と同様に両試験結果が一致しない。表中の砂岩については、普通の硬質砂岩である。化学法の結果は「無害でない」であり、モルタルバー法で「無害」となる。当地の砂岩にはこのように両試験法の結果が一致しない場合が多い。

(2) 化学法 (JIS A1145) とモルタルバー法 (JIS A1146) の不一致についての考察

化学法で「無害でない」を示すものは、80℃の 1mol/l NaOH 溶液に溶解するシリカ (Sc) が Rc の消費に対して多いことを意味する。モルタルバー法では 40℃の Na₂O 1.2% (7.2kg/m³) の湿潤状態の 6 ヶ月後の膨張率が 0.1% を超える場合を「無害でない」としており、両試験の反応条件が異なる。いずれの判定基準も、経験的・統計的なものであり理論的ではない。前述のように、地質は複雑であり、同一地域であっても、骨材原石の化学法の溶解シリカ量 (Sc) やアルカリ濃度減少量 (Rc)、あるいは、モルタルバー法の膨張率は異なる。採取岩石ごとに反応性鉱物の種類、含有量も多様に変化し、また、反応生成物の SiO₂/Na₂O の比によっても膨張は異なる。したがって、実構造物の被害と一致する試験方法や判定基準をみつけることが重要である。

(3) モルタルバーの長期膨張挙動

上記では両試験方法が一致しないことを明らかにしたが、モルタルバー膨張率が 6 ヶ月で判定基準 (0.1%) 近くの 0.093% の場合の判定では、6 ヶ月を超えた後の膨張挙動の検討が必要のように思われた。そこで、モルタルバー法の膨張率を継続して測定した。その結果を図 1 に示す。図には、ペシマム現象をみるために非反応性骨材を混合したモルタルの膨張挙動をも併記した。図 1 では 6 ヶ月を超えた後に急激な膨張を示している。図の珪質粘板岩混合率 100% の化学法試験結果では、 $Sc/Rc > 1$ であり、「無害でない」と判定された。モルタルバー法の 6 ヶ月の膨張率では、0.1% を下回っているので、形式的には「無害」と判定される。しかし、膨張挙動や偏光顕微鏡観察結果も含めて総合判断すると、実質は反応性岩石であると評価した方が正しいと思われる。なお、図では後述の安山岩のようなペシマム現象は認められないが、混合比率によって膨張率の異なることが明瞭に示されている。また、同一砕石場の切羽から採取した岩石でも、図 2 に示すようにモルタル膨張率には違いがあることも

認識しておく必要がある。

(4) 岐阜県と隣接する愛知県北部の砕石工場切羽の ASR 反応性

この工場の切羽の地質は上述の岐阜県の砕石工場と同様の中・古生層であり、砂岩と頁岩・粘板岩の互層で、走向・傾斜は大略 N 85W、傾斜 85S であり、地質は複雑にもめており、珪質粘板岩やチャート類似の珪質岩層が随所にみられる状態である。原石も ASR 判定では、化学法で「無害でない」、モルタルバー法で「無害」となるものであるが、膨張は急激には起こらず徐々に生じ長期にわたるものであった。

(5) 堆積岩砕石場の ASR 調査のまとめ

- ①砕石工場の切羽での原石の分布は複雑・多様であるから、ASR 試験結果は変動する。
- ②砕石工場によっては、化学法とモルタルバー法の判定結果が、すべての岩種で一致しない場合がある。



写真 1 堆積岩砕石切羽の岩石の分布状態 (石英からなる珪質砂岩 (中央の厚い層) 左右の層状チャート層に見える地層は珪質粘板岩互層)

表 1 偏光顕微鏡観察による骨材の ASR 判定結果 (産地: 岐阜県)

骨材原石岩種: ①潜晶質石英、②玉髄、③非晶質シリカ、④結晶格子に歪を有する石英、⑤反応性の推定、

珪質粘板岩: ①+++、②無、③-、④++、⑤高い
石英質岩: ①+、②無、③-、④+、⑤中程度
頁岩: ①不明、②-、③-、④無、⑤低い
砂岩: ①-、②-、③-、④無、⑤低い

記号: +++ 多い, ++ 中程度, + 少量有り, - 有無の判別困難
+印の多い岩石ほど ASR 反応性が高い

表 2 JIS A1145 化学法と JIS A1146 モルタルバー法の両試験結果の比較例

産地、岩種
 上段：化学法 (mmol/l) Sc、Rc、Sc/Rc、判定
 下段：モルタルバー法 (%) 3ヶ月、6ヶ月、
 判定、両試験法の一致・不一致 (不)

岐阜県	
珪質粘板岩	207、77、2.69、無害でない 0.045%、0.093%、無害、不
石英質岩	104、73、1.42、無害でない 0.011%、0.025%、無害、不
頁岩	172、85、2.02、無害でない 0.003%、0.004%、無害、不
砂岩	63、43、1.47、無害でない 0.002%、0.004%、無害、不

愛知県

珪質細粒砂岩	111、45、2.47、無害でない 0.005%、0.006%、無害、不
石英質岩	165、45、3.67、無害でない 0.003%、0.003%、無害、不
砕砂製品	86、48、1.79、無害でない 0.006%、0.006%、無害、不

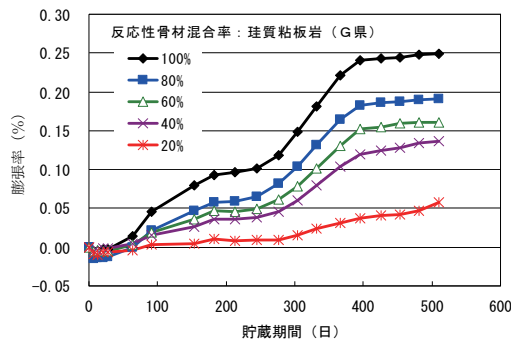


図 1 珪質粘板岩・川砂混合モルタル膨張挙動

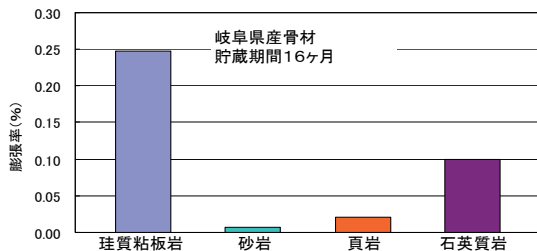


図 2 岐阜県産骨材使用モルタルの膨張率の比較例

(6) 安山岩碎石場切羽の地質と A S R

調査対象とした安山岩碎石場は、香川県豊島である。1980 年頃は当時の最新設備で大量にコンクリート用碎石を生産しており、関

西・中国地方で A S R 被害を起こした反応性の高い碎石が混在していた。現在は廃業状態になっているが、切羽は残っている。なお、同島には、産業廃棄物の不法投棄とその後の産廃処理でも知られ、2008 年で約半分の処理がなされ現在継続中である。この問題と碎石場とは全く無関係であり、異なる場所である。

この地域は、瀬戸内火山岩帯に属するもので、切羽の岩石は斜方輝石安山岩である。偏光顕微鏡観察によると斑晶は、斜方輝石 (古銅輝石、紫蘇輝石) とアルカリ長石 (曹長石、ハリ長石) で、石基は、これらの両鉱物の微結晶と火山ガラス、クリストバライト、スメクタイト及び雲母粘土鉱物である。その他、岩石中にはカルサイト、クロライトなどを含む場合もある。外観は黒色～灰白色で火山ガラスが多いほど黒色になる傾向がある。写真 2 の黒色箇所 (E1) と灰白色箇所 (E2) は入り乱れており、このような場合の選別は不可能である。また、これらの安山岩は E1 が E2 よりも高いモルタル膨張を示した。

(7) 安山岩碎石場切羽の原石の品質性状

碎石原石の品質として、JISA5003「石材」の見掛比重 (供試体：10×10×20 cm 角柱) 及び同供試体による吸水率、強度及びヤング率測定結果では比重 (絶乾密度) がやや小さいが、吸水率は 1% 以下で良好であり、強度は平均値で 155N/mm² (96~203 N/mm²)、ヤング率は平均値 44.4 kN/mm² (32.7~54.1 kN/mm²) であり普通の岩石物性であった。

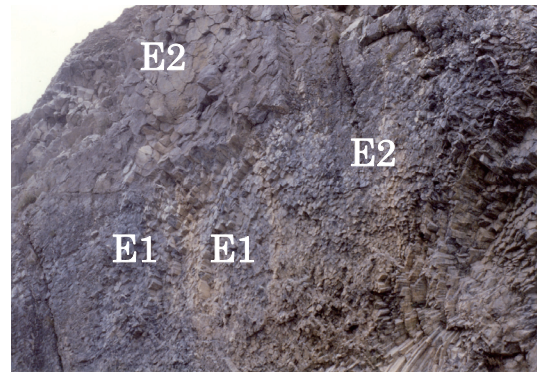


写真 2 安山岩碎石場切羽の状態の一例

(8) 碎石工場切羽内の ASR 反応性の相違

反応性の異なる黒色安山岩 (E1) と灰白色安山岩 (E2) の 2 種類を用いて試験を行った。両安山岩の化学組成を表 3 に示す。いずれの試料も SiO₂ が多いが E1 の方がやや多い。ASR 反応性試験方法は 1982 年では ASTM C289 化学法 (JIS A1145 と類似) と ASTM C227 モルタルバー法 (JIS A1146 と類似) により、2008 年は JIS によった。化学法の結果を表 4 に示す。

表ではE2の溶解シリカ量Scが882mmol/lと多いが、アルカリ濃度減少量Rcも202mmol/lと多いので、判定値Sc/RcではE1の方が高くなっている。このことは、偏光顕微鏡観察によるとE2にはスメクタイトが多量に含まれていたため、この粘土鉱物がアルカリを吸着するためであると考えられる。また、反応性物質の火山ガラス量は表5に示すようにE1の方がE2よりも5倍近く多い。クリストバライトその他の反応性鉱物を合算した比較でもE1はE2の約3倍である。また、モルタルパー膨張においてもアルカリ量(Na₂O等量)が0.65%と低いにも関わらず膨張率、ペシマム現象ともにE1、E2で顕著な相違がみられた。この原因は反応性鉱物量と粘土鉱物含有量の相違から、ASR反応性に相違が生じたものと考えられる。写真2のように両岩石が混在している状態では、安山岩の反応性についても、堆積岩同様に原石の分布状態に注意を払うべきである。

(9) 安山岩砕石場のASR調査のまとめ

- ①安山岩砕石工場の切羽での原石の分布は複雑・多様であるから、骨材品質は変動する。
- ②同一砕石工場内の化学法・モルタルパー法の結果は大きく異なる場合がある。

表3 安山岩の化学組成の一例

骨材	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
安山岩E1	72.3	0.1	16.1	0.3
安山岩E2	69.0	1.2	15.3	2.9
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
安山岩E1	0.9	8.9	1.5	
安山岩E2	2.3	4.0	2.4	

表4 安山岩E1、E2の化学法試験結果

骨材名	採取年	Sc	Rc	Sc/Rc	判定
E1 黒	1982	592	89	6.65	無害でない
E2 白	香川	882	202	4.37	無害でない
E1 黒	2008	321	170	1.89	無害でない
E2 白	香川	321	313	1.02	無害でない

表5 安山岩中の反応性鉱物含有量の一例

安山岩骨材	反応性鉱物の含有量(%)		
	クリストバライト(Cr)+トリジマイト(Tr)	火山ガラス(Vg)	Cr+Tr+Vg
E1	7.3	51.9	59.2
E2	11.4	9.0	20.4

(10) 砕石場切羽のASRの多様性について

砕石原石の採取地は刻々と変化する。同時期に採取した原石でも反応性の異なる岩石粒子が入り混じるので、多様に変化する。また、ASRにはペシマム現象もあるので、その膨張挙動は複雑である。切羽では常時、そのASR性状を把握しておく必要がある。

(11) まとめ

主な結果を以下に示す。

①原石から作製した岩石薄片の偏光顕微鏡観察では、堆積岩の珪質部分の多い岩石(チャートなど)では、カルセドニーの量、安山岩ではガラス量が反応性判定に有効である。

②化学法及びモルタルパー法では、安山岩は化学法とモルタルパー法の判定結果が比較的に一致するが、堆積岩では両試験結果の一致しない場合が多い。なお岩種に関わりなく、しばしばペシマム現象が認められる。

③モルタルのASR反応状況を偏光顕微鏡観察にて短時間で判定できるのは、反応性が高い場合であり、通常は困難な場合が多い。実構造物採取コアでは、経過時間が長いので岩石がASR反応により劣化し、ひび割れや反応生成物(ゲル)が発生しており、容易に反応性の有無が観察できる。

④ 総括として、同一砕石工場内でも地質、岩石の微細構造、化学法、膨張挙動等が複雑に変化し変動が大きく、また化学法とモルタルパー法の判定で不一致が多い(評価基準の再検討が必要)。反応性は複雑多岐に亘るのでモデル化には更なる時間を要し、今回は確立できなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 岩月栄治、森野奎二、珪質堆積岩のアルカリシリカ反応の特徴、日本材料学会、材料、第57巻、第10号、pp.967-972 2008.10、査読有り
- ② 岩月栄治、森野奎二、愛知県のASR劣化構造物と反応性骨材に関する研究、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.999-1004、2008.7、査読有り

[学会発表] (計8件)

- ① 岩月栄治、森野奎二、採取時期が異なる各種骨材のASR反応性の検討、第63回セ

- メント技術大会講演要旨、pp. 230-231、2009. 5、査読無し
- ② 森野奎二、岩月栄治、各地の碎石切羽の性状変化、資源・素材学会、春季大会講演集(I)資源編、一般発表、資源開発、pp. 47-48、2009. 3、査読無し
 - ③ 岩月栄治、森野奎二、採取時期が異なるASR反応性骨材のモルタルバー膨張挙動、土木学会中部支部平成 20 年度研究発表会講演概要集、第V部、pp. 467-468、2009. 3、査読無し
 - ④ 森野奎二、岩月栄治、碎石切羽における骨材岩石の品質性状、資源・素材学会、企画発表(B建設原材料の評価・利用技術およびその周辺技術)講演資料 2008(仙台)、pp. 177-178、2008. 9、査読無し
 - ⑤ 森野奎二、岩月栄治、碎石切羽内のアルカリシリカ反応性岩石の特徴、資源・素材学会春季大会講演集(I)資源編、一般発表、資源開発、pp. 53-54、2008. 3、査読無し
 - ⑥ 岩月栄治、森野奎二、愛知県のASR劣化構造物と反応性骨材に関する調査、土木学会中部支部平成 19 年度研究発表会講演概要集 第V部、pp. 419-420、2008. 3、査読無し
 - ⑦ 岩月栄治、森野奎二、各種骨材のASR膨張と化学法結果に関する研究、資源・素材学会、企画発表(B資源開発とエネルギー)資料 2007(名古屋)年次大会、pp. 185-186、2007. 9、査読無し
 - ⑧ 森野奎二、岩月栄治、澤口啓希、骨材採取地の反応性骨材の特徴と実構造物のASR劣化状況、資源・素材学会、企画発表(B資源開発とエネルギー)資料 2007(名古屋)年次大会、pp. 177-178、2007. 9、査読無し

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

<http://www.aitech.ac.jp/~morino/morinoHP.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森野 奎二 (MORINO KEIJI)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号：20064933

(2) 研究分担者

岩月 栄治 (IWATSUKI EIJI)
愛知工業大学・工学部・講師
研究者番号：10278228