

論文 ASR に無害でない砕石粉が ASR 膨張に与える影響に関する研究

宮田 佳和^{*1}・澤田 大武^{*2}・服部 篤史^{*3}・河野 広隆^{*4}

要旨: 砕石・砕砂の製造の際に副産される砕石粉は年々増加している。砕石粉をコンクリートへ利用するため、JIS A 5041 が策定されたが、そこでは ASR に「無害」な岩石の砕石粉のみ使用を認めている。一方で既往の研究で ASR に「無害でない」岩石の砕石粉には ASR 抑制効果が期待できることが報告されている。そのため、本研究では膨張性モルタルに対し ASR に「無害でない」岩石の砕石粉を砂置換材として用いた場合の膨張特性を調べた。その結果、砕石粉による膨張抑制効果は十分には見られなかった。そこで、そのような配合への実用的な ASR 膨張抑制方法として高炉 B 種セメントの使用を想定した実験を行った結果、高炉スラグ微粉末をセメント置換で用いた供試体では膨張が抑制された。

キーワード: 砕石粉, アルカリシリカ反応, モルタルバー法, 反応性骨材の粒径・表面積, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

現在、コンクリート用骨材の供給は多くを砕石・砕砂に頼っているが、砕石・砕砂を製造する際に副産される粒径 0.15mm 以下の微粒分、すなわち砕石粉は年間 1200 万トン¹⁾ 発生しており、その処理の問題はいまだに解決されていない。

砕石粉の有効利用のためにコンクリート用材料としての利用が研究されており、2009 年、砕石粉の品質が JIS A 5041 として規格された¹⁾ が、アルカリシリカ反応（以下 ASR）に「無害でない」と判定される岩石から副産される砕石粉は利用の対象外となっている。「無害でない」岩石から副産される砕石粉がコンクリートの性状に及ぼす影響は、「無害」である岩石から副産される砕石粉を利用した場合と比べて強度などの性状には差はないと推測されるし、ASR 膨張の抑制効果が期待できる可能性も指摘されている²⁾。しかし、この ASR 抑制効果に関しては十分な検討がなされていない。

そこで、本研究では、ASR に「無害でない」（以下、「反応性」）と判定される岩石から副産される砕石粉が ASR 膨張に与える影響を明らかにすることを目的とし、反応性骨材種やその混合割合、また、砕石粉種やその置換率を要因としたモルタルバー法による実験を行った。

加えて比較的小さい粒径の反応性骨材の粒径・総表面積が ASR 膨張に与える影響を検討した。

また、反応性砕石粉を用いた場合でも、高炉 B 種セメントを用いることによって ASR 膨張の抑制が可能かどうかを調べた。

2. 反応性砕石粉が反応性モルタルの ASR 膨張に与える影響

表-1 使用した反応性骨材・砕石粉の X 線回折分析結果

骨材	珪酸塩鉱物		シリカ鉱物		
	長石	輝石	クリストバライト	トリディマイト	石英
北海道産	◎	○		○	○
長崎県産	◎	○	○		

◎:多い, ○:少ない, 空欄:微量

2.1 実験概要

(1) 使用材料

セメントには、アルカリシリカ反応性試験用普通ポルトランドセメントを用いた。セメントの全アルカリ量の調節には、試薬一級の水酸化ナトリウム (NaOH) を水溶液として用いた。

骨材には、非反応性骨材として、野洲川産川砂を用いた。反応性骨材・砕石粉には北海道産安山岩、長崎産安山岩を用いた。それらの X 線回折分析結果を表-1 に示す。北海道産骨材を化学法 (JIS A 1145) により試験した結果、溶解シリカ量 (S_C) が 592mmol/l, アルカリ濃度減少量 (R_C) が 142mmol/l となり、ASR に「無害でない」となった。この骨材はモルタルバー法 (JIS A 1146) によっても 0.173% の膨張を示し「無害でない」と判定された。また、長崎産骨材についても、既往の研究³⁾で「無害でない」と判定されている。

(2) 実験方法

モルタルバー法 (JIS A 1146) に従い実験を行った。

また、モルタルバー法の期間 (26 週) 終了後、供試体を飽水状態から炉乾燥させ、乾燥時間ごとの質量減少率からモルタル供試体の緻密さを間接的に求めることを試みた。

(3) 実験条件

モルタルの配合を表-2 に示す。反応性骨材種やその混

*1 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 修士 (工学)

*3 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻教授 博士 (工学) (正会員)

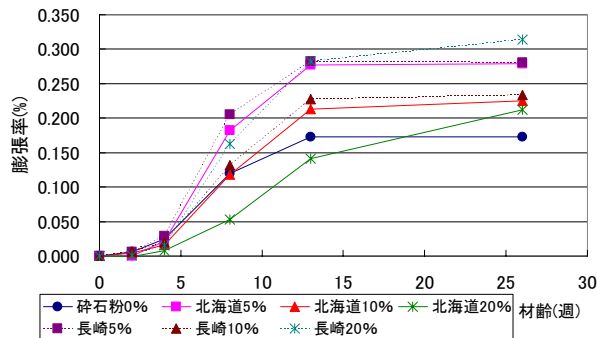


図-1 (1) 膨張率の経時変化（北海道産骨材 100%）

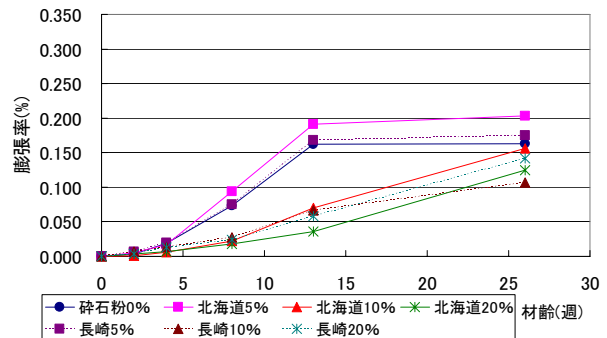


図-1 (3) 膨張率の経時変化（長崎産骨材 100%）

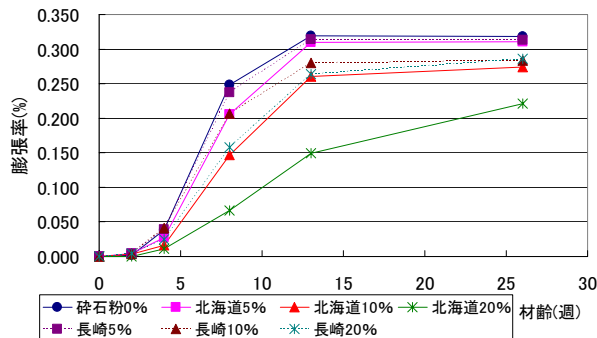


図-1 (2) 膨張率の経時変化（北海道産骨材 50%）

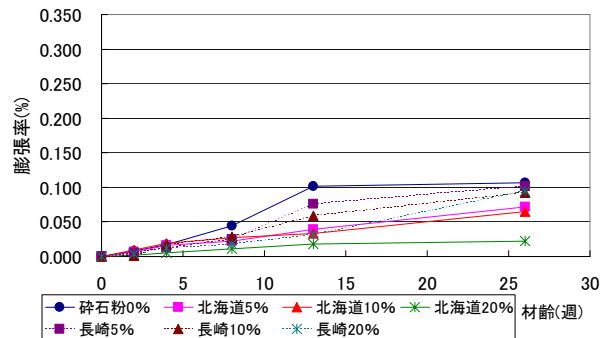


図-1 (4) 膨張率の経時変化（長崎産骨材 50%）

表-2 モルタルの配合

W/C	S/C	W+NaOH(mL)	C(g)	S(g)
0.5	2.25	300	600	1350

表-3 反応性骨材・砕石粉の配合条件

反応性骨材種	北海道産, 長崎産
反応性骨材混合割合(%)	50, 100
反応性砕石粉種	北海道産, 長崎産
反応性砕石粉置換率(%)	0, 5, 10, 20

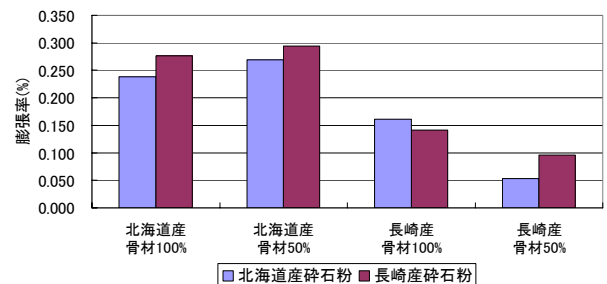


図-2 26 週後の膨張率の砕石粉種ごとの平均値

合割合, また反応性砕石粉種やその置換率が ASR 膨張に与える影響を検討するため, 反応性骨材・砕石粉に関して表-3 に示す配合条件を設定し, 計 84 体のモルタルバーを作製した。

砕石粉で細骨材を置換する場合は骨材全体に対して質量で 5, 10 または 20%を置換した。モルタルバー法の定める他の粒度の骨材はそれぞれの置換率だけ各々の粒径区間ごとに減じた。

2.2 実験結果および考察

図-1 に反応性骨材種とその混合割合ごとに膨張率の経時変化をまとめて示す。

(1) 反応性骨材による膨張特性

まず, 砕石粉による置換のないものの比較から, 北海道産骨材のほうが長崎産骨材より膨張率が大きい。また, 反応性骨材の混合割合に関しては, 本実験においては 2 通りのみの実施であるものの, 北海道産骨材はペシマムが 100%より 50%に近く, 逆に長崎産骨材はペシマムが 100%に近いと言える。長崎産骨材に含まれる反応性鉱物

のクリストバライト (表-1 参照) の特徴として, ペシマムを有することが一般に言われているが, 100%の混合割合の方が膨張率が大きかったことより, 今回用いた長崎産骨材は ASR 反応性が比較的小さいと考えられる。

(2) 反応性砕石粉置換による全般的な膨張特性と岩石種の影響

図-1 (1) ~ (4) に共通して, 砕石粉で置換したものは実験期間である 26 週まで膨張率が増加し続けている。中でも 13 週から 26 週の期間では, 膨張率は砕石粉の置換率が大きくなるほど増加している。それに対して, 砕石粉を加えていないものは 13 週で膨張がほぼ収束している。

26 週後の膨張率の砕石粉種ごとの平均値を図-2 に示す。砕石粉で置換した場合, 長崎産骨材 50%の場合を除き, 骨材と同じ岩石由来の砕石粉を用いた方が, 異なる場合より膨張率が小さくなっている。

長崎産骨材 50%の場合は, 北海道産砕石粉を用いた方が膨張率が小さいが, これは図-1 (4) に見られるように,

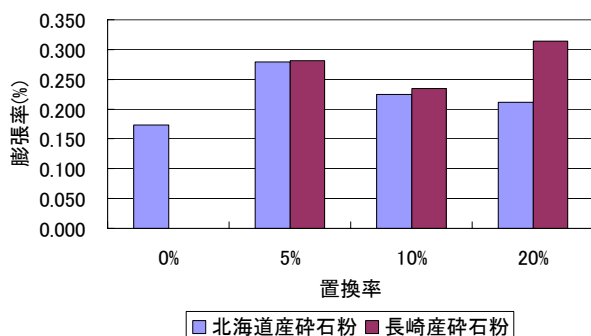


図-3(1) 26 週後の膨張率（北海道産骨材 100%）

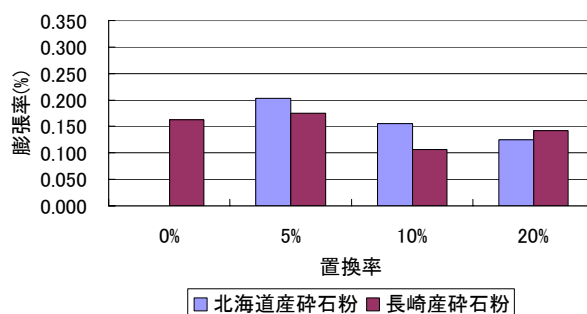


図-3(3) 26 週後の膨張率（長崎産骨材 100%）

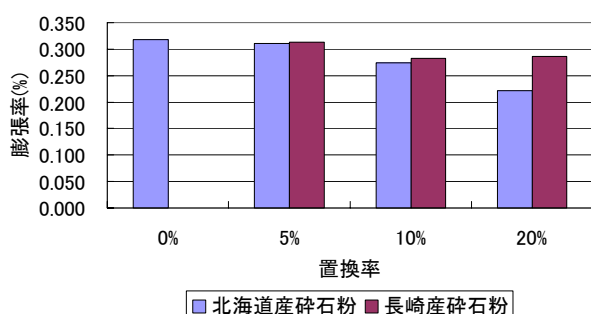


図-3(2) 26 週後の膨張率（北海道産骨材 50%）

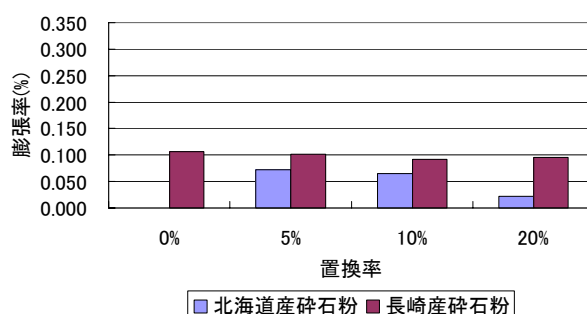


図-3(4) 26 週後の膨張率（長崎産骨材 50%）

膨張がまだ収束していないためであると考えられる。

以上より、今後の結果次第では、砕石粉に膨張抑制効果を期待する場合、骨材と同じ岩石由来の砕石粉を用いたほうが効果が高い可能性がある。このメカニズムとしては、同じ岩石由来の砕石粉を用いた方が、骨材が ASR の反応を起こすのに必要な成分を先駆けて消費できるためと考えられる。

(3) 反応性砕石粉置換による膨張抑制効果

次に砕石粉の膨張抑制効果を 26 週後において配合条件ごとに検討する。

図-3(1)に示す北海道産骨材を 100%の混合割合で用いた場合は、長崎産に比べ北海道産砕石粉の方が膨張は小さいものの、全ての置換率で砕石粉を用いたものは無置換のものに比べ膨張率が増加した。北海道産砕石粉では置換率を上げることにより膨張率の低下が見られるが、長崎産砕石粉では、置換率 20%のものが最も膨張し、次いで 5%、10%という順になった。

図-3(2)に示す北海道産骨材を 50%の混合割合で用いた場合は、砕石粉で置換することによる膨張抑制効果が見られる。この場合も、北海道産砕石粉を用いた際には、その置換率の上昇にしたがって膨張抑制効果が見られる。なお、最も膨張が抑制された置換率 20%のもので、無置換に対し 30%程度の膨張抑制効果が得られた。また、長崎産砕石粉を用いた場合には、膨張抑制効果の大きい順に置換率 10、20、5%となった。

図-3(3)に示す長崎産骨材を 100%の混合割合で用いた場合は、砕石粉種によらず 5%の置換率では膨張が抑制されず、逆に膨張率が増加している。しかし、砕石粉の置換率による膨張への影響としては、図-3(2)の北海道産骨材を 50%の混合割合で用いた場合と同様に、北海道産砕石粉に関しては置換率を増すごとに膨張率が低下し、長崎産砕石粉では 10、20、5%の順に膨張が抑制された。

図-3(4)に示す長崎産骨材を 50%の混合割合で用いた場合は、砕石粉無置換の場合の膨張率が小さかったこともあり、長崎産砕石粉を 5%の置換率で用いたものを除き、砕石粉を用いることで膨張は特に増加せず、26 週後も 0.100%を下回った。特に北海道産の砕石粉を用いた場合には、置換率の増加に伴い膨張抑制効果が高まり、20%では比較的高い効果となった。長崎産砕石粉では置換率 10%が最も膨張が小さく、次いで 20、5%となった。

(4) 骨材総表面積の影響

砕石粉置換の影響として、反応性骨材・砕石粉全体の総表面積が増加することが挙げられる。そこで各ケースのおおよその総表面積を計算した。計算方法は以下の通りである。骨材ならびに砕石粉粒子は球と仮定し、それぞれ通過しなかったふるいの公称目開きとそのひとつ上のふるいの公称目開きの中間値を直径と仮定して計算した。具体的には例えば 5mm のふるいを通過し 2.5mm のふるいを通しなかった骨材については、一律に直径を 3.8mm として計算した。砕石粉については、より小径で表面積に与える影響の大きいものを考慮するため、0.15mm 以下の砕石粉

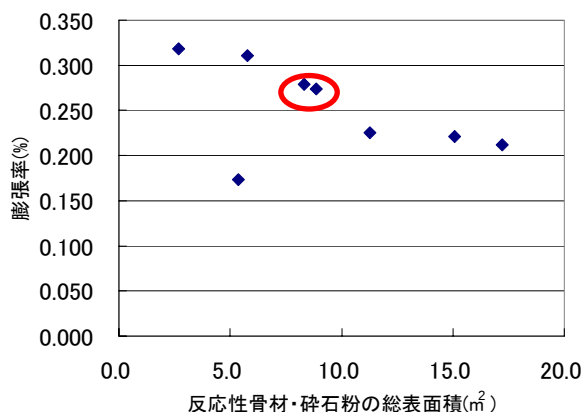


図-4 膨張率と総表面積の関係（北海道産骨材+北海道産砕石粉）

のうち、代表試料を公称目開き 0.075mm のふるいを用いてふるい分けを行い、その通過する割合を調べた上で、0.075mm のふるいを通してものは直径を 0.038mm、通過しないものは直径を 0.11mm として扱った。そしてこれらの直径から密度をもとに骨材の粒の数を概算し総表面積を求めた。

膨張率と総表面積の関係の一例を図-4 示す。丸で囲まれた部分に示されるように、北海道産骨材 100%に北海道産砕石粉を 5%置換したものと同 50%に 10%置換したものは総表面積と膨張率が近い値となっている。また、総表面積が大きくなる（置換率が上がる）ほど膨張が抑制されている傾向が見られる。これらより、総表面積と膨張率にはなんらかの関係があると考えられる。しかし、図-3(1)のように置換率が 0%のものより膨張が大きくなった場合もあり、また、全てが単調な傾向とは必ずしも言えず、さらに無置換時の膨張をぐくわずかまで抑えこめるわけでもないため、反応性砕石粉の置換によって膨張が抑制されるとは一概には言えない。

しかしながら図-3(4)のように膨張率の小さい反応性骨材であれば、反応性砕石粉による膨張抑制の傾向が認められる。さらに、効果的な抑制を期待する場合、より大きな置換率が求められるとも考えられる。フレッシュ性状などを考慮した今後の課題である。

(5) 反応性砕石粉置換により膨張抑制が十分でなかった原因

a) アルカリ量の変化

この原因の比較として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いることにより膨張量が増加してしまう事例⁴⁾について考える。たとえば、高炉スラグ微粉末は一般にセメント置換で用いられるため、アルカリ量が減少する。元々のアルカリ量が多すぎる場合、適度にアルカリ量が減少し反応性骨材のペシマムに近づいてしまう可能性がある。また、高炉スラグ微粉末を添加することにより生成するアルカリシリカゲルの化学組成が変化し、その粘弾性が変化す

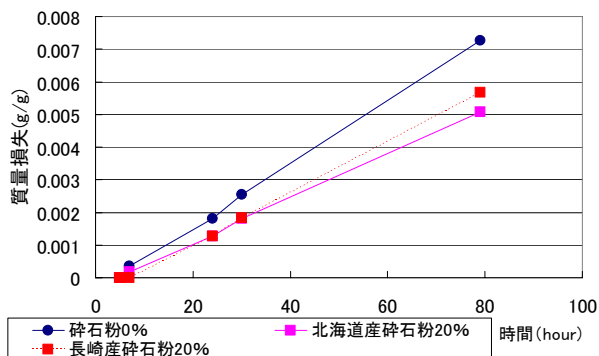


図-5 質量損失の経時変化（長崎産骨材 50%）

る可能性もある。これらの変化による少量の高炉スラグ微粉末による膨張抑制効果を、膨張量の増加が上回り、逆に膨張してしまう可能性がある。

一方、本実験で用いた砕石粉は、セメント置換ではなく、骨材置換で使用している。したがって、砕石粉の添加によるアルカリ量の変化はない。

b) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

次に、アルカリシリカゲルの化学組成の変化を考える。アルカリシリカゲルには膨張圧が最大となるような $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ のモル比が存在する。北海道産骨材では混合割合 50%のときそのモル比に近く、100%では $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ が大きすぎるものと考えられる。ここで砕石粉の添加により膨張率が増加した混合割合 100%の場合を考えると、砕石粉を用いることで表面積が増加し、すなわち反応場が増えると考えられる。これにより見かけ上のシリカの増加、またアルカリの拡散により $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ はますます大きくなると考えられる。したがって骨材と砕石粉全体で考えた時、このようなアルカリシリカゲルの化学組成の変化による膨張率増加も考えがたい。

c) 反応する砕石粉自体の膨張

砕石粉は非常に粒径が小さいため、反応して膨張してもその膨張圧はモルタル中の細孔に吸収されるため、モルタルバーの膨張には寄与しないと考えていた。しかし、骨材種や反応性によってペシマム粒径は異なるとの報告⁵⁾もあり、反応性砕石粉もある程度の膨張を示す可能性が考えられる。また、一般に粒径が小さいほど反応性は高い。したがって、反応性砕石粉が表面積の影響などで反応性が非常に高くなり、骨材に先駆けて反応し、膨張を引き起こした可能性がある。

砕石粉が ASR により膨張した場合、骨材と比較するとより均一にゲルが存在し、供試体内の空隙が充填され緻密化することも考えられる。その場合、モルタル供試体の飽水状態からの水分損失による質量減少が緩やかになると考えられる。そこで、砕石粉無置換の供試体と、20%置換した供試体の計 12 体について、モルタルバー法による実

表-4 反応性骨材の配合条件

反応性骨材種	表面積 (m ²)	反応性骨材粒径(mm)			
		①	②	③	④
北海道産	3.20	○	○	○	○
	12.8	○	○	○	-
長崎産	2.57	○	○	○	○

①0-0.075 ②0.075-0.15 ③0.15-0.3 ④0.3-0.6 -:実施せず

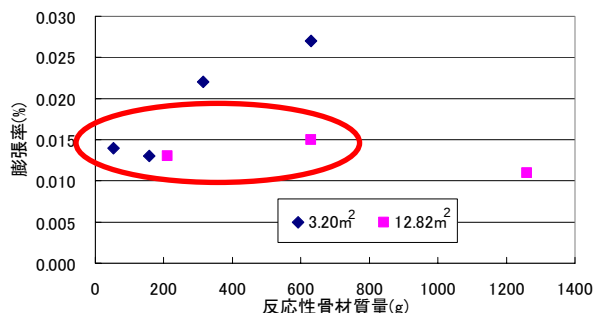


図-6 膨張率-反応性骨材質量関係（北海道産骨材-13 週後）

験後、105℃の乾燥炉で24時間乾燥させ、得られた絶乾状態の質量で質量減少量を除することにより質量損失（g/g）を得た。ただし、乾燥開始直後は供試体内の緻密さとは無関係の表面水の乾燥により大きく質量が減少したため、表面水の乾燥の影響を除去するため乾燥開始から5時間後を初期質量とし20℃恒温で乾燥させた。質量損失の経時変化の一例を図-5に示す。

図に示した長崎産細骨材を混合割合50%で用いた供試体では、砕石粉を用いた場合に質量損失速度が小さい。しかし他の配合では優位な差が見受けられず、砕石粉を添加した方が質量損失が大きい場合もあった。これは、砕石粉がASR膨張により緻密化に寄与しなかった可能性もあるが、供試体に大きなひび割れが入っていたため、測定上有意差が現れなかった可能性も考えられる。

3. 反応性骨材の粒径・表面積がASR膨張に与える影響

3.1 実験概要

2. (5)で反応性砕石粉置換により膨張率が増加した原因として、c) 反応する砕石粉自体の膨張の可能性が残った。また、2. (4)では反応性骨材・砕石粉の総表面積と膨張率に何らかの関係が示めされた。いずれも粒径・総表面積が重要な要因である。そこで本章では、比較的小さい数種の単一粒径の反応性骨材（または砕石粉、以下3.では総称して骨材と記す）を用い、加えて表面積を変化させ、それらの要因がASR膨張に与える影響を検討した。

(1) 使用材料

2.と同様とした。

(2) 実験方法

2.と同様のモルタルバー法によった。実験の都合上、

表-5 反応性骨材・砕石粉と高炉スラグ微粉末の配合条件

細骨材	混和材			
	砕石粉 北海道	砕石粉 長崎産	高炉スラグ 粉末度4000	高炉スラグ 粉末度8000
北海道産 反応性骨材100%	○	×	○	×
	×	○	○	×
北海道産 反応性骨材50%	○	×	○	×
	○	×	×	○
	×	○	○	×
	×	○	×	○

○:置換, ×:置換せず

測定期間は13週までとした。

(3) 実験条件

モルタルの配合は2.と同様に表-2に示すとおりとした。

そのうえで、反応性骨材の粒径・総表面積がASR膨張に与える影響を検討するため、表-4のように配合条件を設定し、計33体のモルタルバーを作製した。表-4中の総表面積は2.を参考に、北海道産骨材に関しては、所定の粒径の反応性骨材の表面積が、5または20%置換する場合の砕石粉の表面積と同等（それぞれ3.20m²、12.8m²）となるよう設定した。また比較のため、長崎産骨材に関しても、所定の粒径の反応性骨材の表面積が、5%置換する場合の砕石粉の表面積と同等（2.57m²）となるように設定した。これらの表面積が得られるよう表-4中の粒径の反応性骨材をそれぞれの単一粒径で使用し、骨材総質量（1350g）のうち反応性骨材で不足する分の質量を非反応性骨材で補った。

3.2 実験結果および考察

図-6に北海道産骨材の13週での膨張率と反応性骨材の質量の関係を表面積ごとに示す。粒径0-0.075mm、0.075-0.15mmでは丸で囲まれた部分に示されるように、その表面積・質量の違いによらずほぼ同じ低い膨張率となっている。したがって北海道産骨材に関しては表面積や質量によらず、それ自体の膨張量がモルタルバー全体としての膨張に与える影響は無視してよいものと考えられる。

長崎産骨材に関しては①、②の両方のケースでは北海道産骨材の倍近い膨張を示した。しかしこの膨張が、砕石粉置換により膨張抑制が十分でなかった原因と断言できるほどの大きな膨張ではなかった。

以上より、砕石粉自体の膨張が直接の原因とは言えず、砕石粉と他の材料との複合的な影響により膨張が増加したことが考えられる。

逆に、反応性砕石粉であっても、非反応性骨材への置換であれば、非反応性砕石粉と同様に骨材置換による混和材として使用できる可能性がある。

4. 反応性砕石粉で置換した反応性モルタルに対する高炉スラグ微粉末によるASR膨張抑制

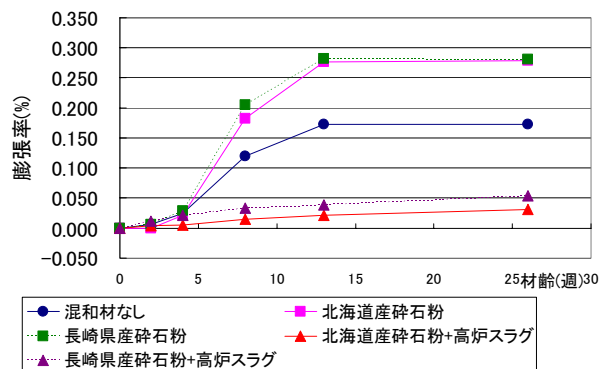


図-7 膨張率の経時変化

(北海道産骨材 100%, 高炉スラグ微粉末粉末度:4000)

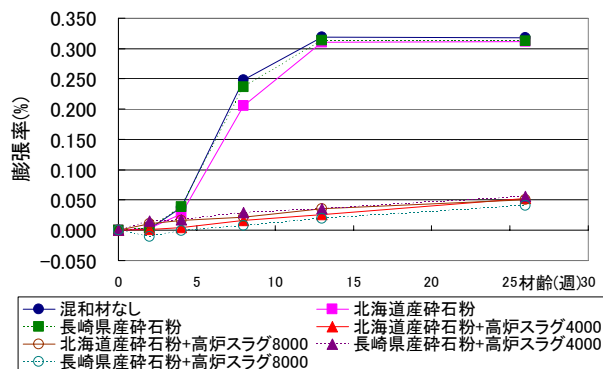


図-8 膨張率の経時変化

(北海道産骨材 50%, 高炉スラグ微粉末粉末度:4000/8000)

4.1 実験概要

反応性モルタルに対して、反応性砕石粉で骨材を置換した場合でも、高炉スラグ微粉末によるセメントの置換（B種相等）で ASR 膨張抑制ができるかどうかを調べた。

(1) 使用材料

2., 3. と同様とした。

(2) 実験方法

2., 3. と同様のモルタルバー法によった。

(3) 実験条件

モルタル配合は 2., 3. と同様に表-2 に示す通りとした。骨材は北海道産の反応性骨材の混合割合が 100% のものと 50% のものの 2 種類とした。砕石粉で置換する場合は、置換率は 2. で比較的膨張が大きかった 5% とし、北海道産または長崎産の反応性砕石粉で置換した。

高炉スラグ微粉末を加えたものは高炉 B 種セメントを想定しているためセメントの 43% を置換した。粉末度は 4000 と 8000 の 2 種類を用い、粉末度 8000 の高炉スラグ微粉末は反応性骨材の混合割合が 50% のもののみ打設した。打設した供試体は表-5 の通りで、計 18 体のモルタルバーを作製した。

4.2 実験結果および考察

図-7, 8 に膨張率の経時変化を示す。

高炉スラグ微粉末で置換していない供試体ではモルタルバー法の判定基準を超えたのに対し、置換した場合はいずれの供試体でも判定基準以下に膨張を抑制できた。

なお、長崎県産の砕石粉と粉末度 8000 の高炉スラグ微粉末で置換した供試体が初期に収縮しているのは、高炉スラグによる自己収縮のためと考えられる。また、高炉スラグ微粉末の粉末度が ASR 膨張抑制効果に与える影響は確認できなかった。

5. 結論

- (1) 反応性砕石粉の ASR 膨張抑制効果が期待されたが、20% 程度までの置換率による骨材置換実験では十分

な抑制効果は得られなかった。13 週から 26 週の期間では、膨張率は砕石粉の置換率が大きくなるほど増加した。

- (2) 膨張率の小さい反応性骨材であれば、反応性砕石粉による ASR 抑制効果が期待できる。その際、置換する砕石粉は骨材と同じ岩石由来のものをういた方が効果が高い可能性がある。
- (3) 比較的小さい粒径の反応性骨材（または砕石粉）のみを用いたモルタルバーの場合、骨材種（または砕石粉種）により 13 週後の膨張率は異なるが、有害となるような大きな膨張は示さなかった。したがって、反応性砕石粉であっても、非反応性骨材への置換であれば、非反応性砕石粉と同様に骨材置換による混和材として使用できる可能性がある。
- (4) 反応性モルタルに対して反応性砕石粉で骨材を置換した場合でも、高炉 B 種セメントを用いることによってモルタルバー法で判定基準以下に ASR 膨張が抑制できた。ただし、今回の実験では高炉スラグ微粉末の粉末度による抑制効果の違いは見られなかった。

参考文献

- 1) JIS A 5041-2009 「コンクリート用砕石粉」
- 2) 田村博, 高橋利一, 五十嵐千津雄: 砕石粉のコンクリートへの有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp.57-62, 1991
- 3) 澤田大武: ASR に無害でない砕石粉が ASR 膨張に与える影響に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 2009
- 4) 日本コンクリート工学協会: 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書 (2008.9), p.68, 2008
- 5) 福島正人, 二村誠二: コンクリート用砕石のアルカリ骨材反応, セメント・コンクリート, No.438, pp.8-15, 1983