

論文 火山性細骨材の海洋コンクリートへの適用に関する研究

池田 正利^{*1}・中澤 隆雄^{*2}・内谷 保^{*3}

要旨：アルカリシリカ反応を起こす火山性骨材の流下土砂を細骨材として用いたコンクリートは、高炉セメント B 種を使用することにより迅速法 (ZKT-206) や JCI AAR-3 法では膨張率が 0.1%以下に抑制され無害の判定となった。また、外部から浸透する塩化物やコンクリートに内在する塩分と膨張率の関係を促進試験で検討した。その結果、デンマーク法では、高炉スラグ微粉末置換率が 50%以上で 0.1%以下に抑制された。また、高炉セメント C 種では、塩化物イオン量が 12kg/m^3 に相当する NaCl を添加しても膨張率が 0.1%以下に抑制された。

キーワード：桜島、流下土砂、アルカリシリカ反応、細骨材、高炉セメント

1. はじめに

鹿児島県では、海砂採取による漁場の環境悪化がクローズアップされるようになり、近年は海砂の採取量が厳しく制限される状況にあり、海砂の代替骨材が望まれるところである。ところで、桜島の河川の砂防堤や河口に流出した流下土砂（土石流土砂）は、埋め立て用土砂として利用される他は利用方法のない厄介物として、鹿児島市有村・赤水地区の処理場に堆積処理されている。この桜島の流下土砂は、細骨材としての密度や粒度分布等の物理特性が良好であり有望な資源と考えられる。そこで、筆者らは、この桜島の流下土砂を海砂の代替骨材として有効利用するための検討を行ってきた¹⁾。

これまでの研究成果より、流下土砂はコンクリート用細骨材として施工性や強度特性において良好な結果が得られた。しかし、流下土砂は火山性の骨材であり火山ガラスを多く含み、アルカリシリカ反応（以下 ASR と略記）を引き起こす骨材であることが明らかになった¹⁾。

反応性の骨材を用いる場合は、平成 14 年に ASR 抑制対策として、コンクリート中のアルカリ総量の抑制または抑制効果のある混合セメン

トの使用を優先し、コンクリートの施工を行うように国土交通省より通達がなされた。

この通達によると、外部から塩分の浸透が懸念されない環境、例えば内陸部の土木構造物や建築構造物などでは、流下土砂を細骨材として用い、コンクリートの総アルカリ量を 3kg/m^3 以下に抑えることにより、普通ポルトランドセメントを使用しても問題はないと考えられる。

しかし、構造物を建設する場合、施工場所によって使用骨材を選択することは経済的とは言えず、外来塩の浸透が起りうる環境でも使用できる骨材でなければならない。反応性の骨材を使用したコンクリートは、海洋環境下では外来塩の浸透による塩害と ASR による複合作用によりコンクリートの劣化が促進されるとする研究が報告されている²⁾。

本論文は、海洋コンクリートへの適用に関する研究の一環として、火山性骨材であり ASR を起こす流下土砂を細骨材として用いたコンクリートに関して、コンクリートの外部から浸透する塩化物やコンクリート中の塩分量の違いによるアルカリシリカ反応性について促進試験を行った結果をとりまとめたものである。

*1 鹿児島工業高等専門学校 土木工学科助手 工修 （正会員）

*2 宮崎大学 工学部土木環境工学科教授 工博 （正会員）

*3 鹿児島工業高等専門学校 土木工学科教授 工博

2. 使用材料

ベースセメントは、密度 3.15g/cm^3 、全アルカリ量が Na_2Oeq 換算で 0.62% のアルカリ骨材反応試験用普通ポルトランドセメント（以下 OPC と略記）を使用した。高炉セメントは、密度 2.88g/cm^3 、比表面積 $4180\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末をベースセメントの一部を置換する方法で、実験項目により置換率を変えて使用した。粗骨材は大分県津久見産の非反応性の石灰石（密度 2.71g/cm^3 ）を用いた。流下土砂（密度 2.51g/cm^3 、粗粒率 2.65）は、鹿児島市行政区にあたる赤水処理場に堆積したものをを用いた。比較骨材として佐多沖産海砂（密度 2.54g/cm^3 、粗粒率 2.13）を用いた。

実験で使用した骨材のアルカリシリカ反応性について、化学法（JIS A 1145）で試験を行った結果、桜島の流下土砂（ $R_c : 59\text{mmol/l}$, $Sc : 226\text{mmol/l}$ ）は、佐多沖産海砂（ $R_c : 112\text{mmol/l}$, $Sc : 121\text{mmol/l}$ ）に比べて溶解シリカ量（ Sc ）が多く、アルカリ濃度減少量（ R_c ）は小さく、 Sc/R_c 比は 3.8 であった。また、海砂の Sc/R_c は 1.1 と小さかったが、 Sc が R_c 以上で化学法では「無害ではない」判定結果となった。一方、全アルカリ量を Na_2Oeq 換算で $1.2\pm 0.05\%$ とし、 $40\times 40\times 160\text{mm}$ の角柱供試体を用い、養生条件を温度 40°C 、湿度 95%以上としたモルタルバー法（JIS A 1146）では、流下土砂は材齢 6 ヶ月の膨張率が 0.223% で「無害でない」判定結果であった。海砂は膨張率が 0.030% で「無害」の判定結果となった¹⁾。

3. 実験概要

3.1 海砂を混合した混合砂のアルカリシリカ反応性について

コンクリート用細骨材は、他の骨材と混合して使用されることもある。そこで、反応性の流下土砂と非反応性の海砂との混合砂について、モルタルバー法（JIS A 1146）に準拠してアルカリシリカ反応性を検証した。混合砂は、流下土砂に海砂を 0%～100%まで 20%おきに置換した。

セメントは、OPC と高炉セメント（スラグ置換率 45%）を使用した。

3.2 コンクリートの ASR 抑制効果の確認

アルカリシリカ反応性を短期間で評価する ASR 促進試験手法には、全国生コンクリート工業組合連合会が策定した迅速法（ZKT-206）や日本建築学会（JASS 5N T-603）および日本コンクリート工学協会（JCI AAR-3）等の促進試験がある。

本研究では、アルカリ添加後、2 時間の高温（ 111°C ）で養生し、養生前後の相対動弾性係数を求める迅速法（ZKT-206）とアルカリ量が Na_2Oeq 換算で 2.4kg/m^3 になるように NaOH 粉末を添加し、温度 $40\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 95%以上で養生する JCI AAR-3 法により、流下土砂を細骨材として用いたコンクリートのアルカリシリカ反応性および高炉セメント（スラグ置換率 45%）を使用して ASR 抑制対策を講じたコンクリートの ASR 抑制効果を検証した。コンクリートは、水セメント比を 50%、スランプ範囲を $8\pm 2\text{cm}$ 、空気量を $5\%\pm 1.5\%$ とした。供試体寸法は、迅速法が $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体、JCI AAR-3 法は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体とした。

3.3 高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果

ASR 抑制対策として高炉セメントを使用したモルタル供試体について ASR 抑制効果の検証を行った。実験方法はモルタルバー法（JIS A 1146）を準用した。高炉セメントのベースセメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率は 15%～65%とした。

3.4 外来塩の浸透によるコンクリートの ASR 抑制効果の確認

海洋環境下の実構造物では、塩分の浸透過程は環境条件に大きく影響を受け、コンクリート内部では塩分濃度が一様でないことはよく知られているが、海洋環境下のコンクリートの ASR に関する研究報告の中には、コンクリート中の Na^+ と K^+ の定量分析を行ったところ、水溶性アルカリ量がコンクリートの表面から内部に向かって減少していることより、 Na^+ や K^+ がコンク

リート中に浸透したと推測する報告もある²⁾。ただ、海洋環境下の実構造物がアルカリイオンの浸透により ASR が促進され、コンクリートが劣化するとする明確な結論には至っていない。

ここでは、養生温度 50℃の NaCl 飽和溶液中にモルタル供試体を浸せきするデンマーク法³⁾により、モルタル供試体表面から塩分が浸透する場合のアルカリシリカ反応性を検討した。供試体は、モルタルバー法に準じた試料を準備し 40×40×160mm の角柱供試体とした。使用したセメントは、OPC およびスラグ置換率が 45%と 65%の 2 種類の高炉セメントである。本来、デンマーク法は ASR が生じているコンクリートから採取したコアを NaCl 飽和溶液中に浸せきすることでコンクリートの残存膨張を求める試験であるが、本実験では、外来塩の浸透を前提して ASR 抑制効果の確認試験に適用した。

予備実験を行ったところ、供試体を脱型した直後に NaCl 飽和溶液中に浸せきすると塩分の浸透量が大きく、ASR による膨張が大きくなる傾向が見受けられた。そこで、実構造物でも最低 1 週間程度の養生を行うことより、脱型後 1 週間は標準水中養生を行い、その後供試体を NaCl 飽和溶液中に浸せきすることにした。

3.5 内在塩分量とコンクリートのアルカリシリカ反応性

OPC を用いた場合、塩化物イオンはコンクリート中に拡散しやすく、なだらかな塩化物イオン濃度分布を示す。一方、混合セメントでは、塩化物イオンはコンクリート内部へ拡散しにくく中性化や固定化の影響もあり表面付近に蓄積され大きな値になる傾向が見られる。海洋環境下にあるコンクリートでは、コンクリート表面から 20～30mm の深さで塩化物イオン量が 12kg/m³ 程度に濃縮される事例が報告されている²⁾。浸透した塩化物イオンが直接 ASR を促進することはないと考えるが、コンクリートの総アルカリ量を 3kg/m³ 以下に抑える抑制対策では、塩化物をアルカリ量に換算することから、ここでは、反応性骨材を用いたコンクリートが

塩化物の含有量を変化させた場合のアルカリシリカ反応性を検討することにした。

実験では、反応性の流下土砂を用いたコンクリートのモルタル部について、NaCl を練混ぜ水に混入し作製したモルタル供試体の膨張量を検討した。実験方法は、モルタルバー法の養生条件を準用し、水セメント比を 50%としたコンクリートのモルタル部分を用いて供試体を作製した。コンクリートの単位水量は、流下土砂コンクリートが 148kg/m³、海砂コンクリートは 156kg/m³である。供試体は 40×40×160mm の角柱とした。混入する塩分量は、塩素イオンに換算して最大 12kg/m³となるように NaCl を混入した。塩化物イオンの混入量は、12kg/m³、6kg/m³、2.4kg/m³、1.2kg/m³および 0.6kg/m³とした。

4. 実験結果

4.1 混合砂のアルカリシリカ反応性

図-1 に、流下土砂に海砂を質量で 0～100%まで 20%おきに置換した混合砂を試料としたモルタル供試体の膨張率を示す。なお、各混合割合での膨張率は、モルタルバー法 (JIS A 1146) に準じて行った材齢 26 週の値である。

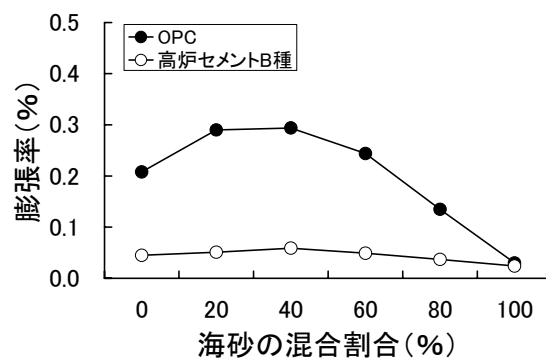


図-1 混合砂の膨張率

OPC では、海砂の混合割合が 40%で膨張率が最大となり、流下土砂単身の膨張率に比べて 1.5 倍程度増加した。加えて、海砂の混合割合が 80%でも膨張率が 0.1%以上あり、混合砂に流下土砂を用いる場合は混合割合が少量であっても必ず ASR 抑制対策を講じなければならないと考え

られる。実験の結果、流下土砂と海砂の混合割合には、非反応性骨材の混合割合の増加に伴って膨張率が減少せず、混合割合によっては最大の膨張率を示すペシマム現象が存在することが分かった。一方、抑制対策として高炉セメントを使用した供試体の ASR による膨張は、OPC 同様混合割合が 40% で最も大きな膨張率となったが、全ての混合割合で 0.1% 以下に抑制された。

4.2 コンクリートのアルカリシリカ反応性

(1) 迅速法による ASR 判定

レディーミクストコンクリートの品質保証の立場から行われる迅速法（ZKT-206）による判定試験を行った。コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する判定結果を表－1 に示す。

表－1 迅速法による判定

試験条件	相対動弾性係数(%)	判定
		9kg ≥ 80%: 反応性なし(A) 6kg ≥ 70%: 反応性なし(B)
アルカリ 9kg 普通セメント	62	反応性なし(B)
アルカリ 6kg 普通セメント	76	
アルカリ 9kg 高炉セメントB種35%	85	反応性なし(A)
アルカリ 9kg 高炉セメントB種45%	83	反応性なし(A)
アルカリ 9kg 高炉セメントB種55%	89	反応性なし(A)

反応性骨材である流下土砂を細骨材として用い、総アルカリ量が 3kg/m^3 以下のコンクリートに 9kg/m^3 のアルカリを添加し作製した供試体において、高温養生（ 111°C 、養生時間 2 時間）の後では相対動弾性係数が 62% まで低下した。 6kg/m^3 のアルカリ添加では、低下が 76% に留まり「反応性なし (B)」の判定になった。

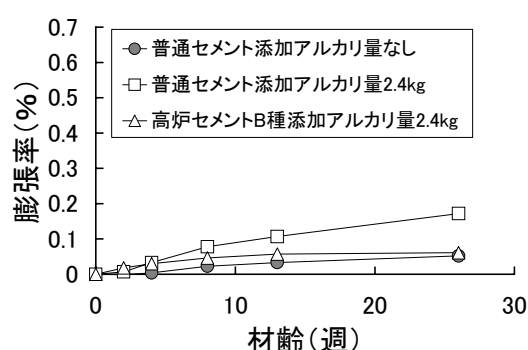
因みに、この判定結果によると、通常的环境下では、ASR による劣化はないが、過酷な环境下では劣化する恐れがあると判定される。

次に、高炉セメントを使用したコンクリートは、いずれのスラグ置換率でも相対動弾性係数は 80% 以上で「反応性なし (A)」の判定になった。結果より、高炉セメント B 種を使用することで流下土砂を用いたコンクリートの ASR を

十分抑制することができる判定結果が得られた。

(2) JCI AAR-3 法による ASR 判定

JCI AAR-3 法に準じて行ったコンクリート供試体の膨張率の実験結果を図－2 に示す。図中には、OPC や高炉セメント（スラグ置換率 45%）を使用したコンクリート供試体の膨張率を示す。参考に総アルカリ量が 3kg/m^3 以下のコンクリート供試体の膨張率を示す。

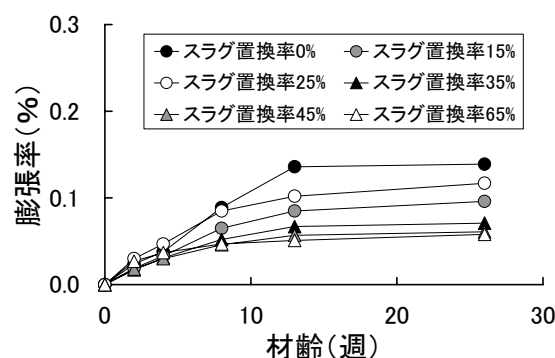


図－2 JCI AAR-3 法による膨張率

OPC は総アルカリ量が 3kg/m^3 以下では ASR による膨張は見られなかった。しかし、アルカリを 2.4kg/m^3 添加したコンクリートは、膨張率が 0.172% に達した。このコンクリートの総アルカリ量は 4.6kg/m^3 である。

次に、高炉セメント（スラグ置換率 45%）を用いると膨張率は 0.061% にまで抑制された。流下土砂を細骨材として用い高炉セメント B 種を使用したコンクリートは、アルカリシリカ反応性に対する判定は「無害」となった。

(3) 高炉スラグの置換率と抑制効果



図－3 高炉スラグ置換率と膨張率

高炉スラグの置換率と抑制効果の関係を図-3に示す。図より、高炉スラグの置換率の増加に伴って膨張率が減少していることがわかる。材齢12週を経過すると各供試体は、ほとんど膨張率に変化がみられなかった。最終材齢26週では、高炉スラグの置換率が35%以上で膨張率は0.1%以下に抑制された。

迅速法(ZKT-206)およびJCI AAR-3法の両試験法で流下土砂コンクリートのアルカリシリカ反応性は「無害」の判定結果となった。しかし、過酷な環境下に曝されるコンクリートでは、外来塩の浸透による塩害とASRによる複合作用によりコンクリートの劣化が問題視されている現状を考えると、安全側にたったコンクリートの施工が必要と考えられる。

4.3 外来塩の浸透とASR

NaCl飽和溶液に浸せきした海砂、流下土砂を用いOPCおよび高炉セメント(スラグ置換率45%)を使用したモルタル供試体の膨張率をデンマーク法によって検討した。得られた結果を図-4に示す。

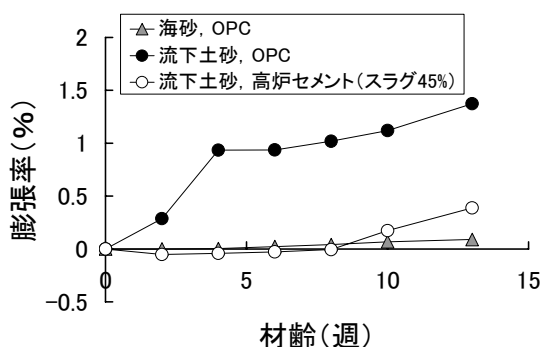


図-4 デンマーク法による抑制効果の確認

海砂を用いた場合には材齢13週経過しても膨張率には変化がみられなかったが、流下土砂を用いたモルタルの膨張率は浸せきを開始した直後より急激な変化がみられ、材齢13週では塩化物がモルタル供試体の表面から内部に浸透するとともに膨張率が1.4%まで達した。なお、供試体表面にはポップアウトがみられ、触手により凹凸が確認できた。

高炉セメントを用いたモルタルの膨張率は、材齢8週までは変化が見られなかったが、以後急激に膨張率が増加した。高炉スラグ微粉末が水和反応過程で緻密な内部組織を形成し塩化物イオンを遮蔽している間は、膨張を抑制するが、膨張によるひび割れが発生すると Na^+ と Cl^- がNaCl飽和溶液から常時供給されるため膨張が増長されると考えられる³⁾。最終的にデンマーク法での高炉セメント(スラグ置換率45%)を使用したモルタル供試体の膨張率は0.388%まで達した。

高炉スラグの置換率が45%の場合、流下土砂を用いたモルタル供試体では最終的に塩化物イオンの浸透を十分遮蔽することができなかった。そこで、高炉スラグの置換率を50%~65%に増加し抑制効果を検証した。実験結果を図-5に示す。

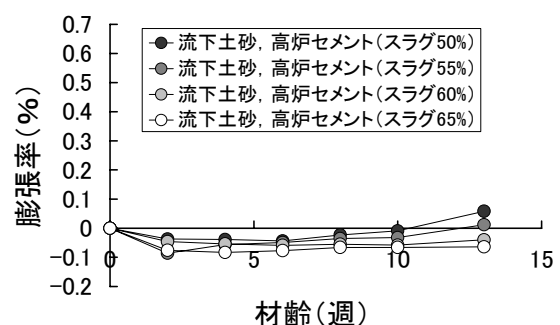


図-5 高炉スラグの置換率と抑制効果

全ての供試体で材齢13週の膨張率が0.1%以下であった。特に、高炉スラグ置換率が50%以上で十分な抑制効果が得られることが確認できた。また、置換率の増加に伴い僅かに膨張率が低下した。デンマーク法では、材齢13週にて0.1%未満(無害)、0.1~0.4%(不明)、0.4%以上(有害)と判定されるが、今回の実験結果は、高炉スラグの置換率が50%以上で膨張率が0.1%未満となり判定基準を引用すると「無害」となる。

4.4 塩化物のASRに及ぼす影響

0~12kg/m³の塩化物イオン量に相当する

NaCl を練混ぜ水に混入した海砂モルタルと流下土砂モルタルにおいて、混入した塩化物イオン量ごとの膨張率(材齢 13 週時)を図-6 に示す。

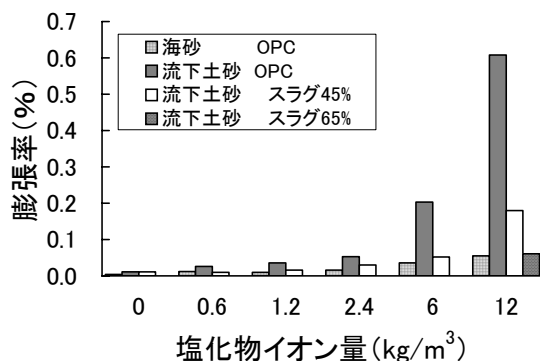


図-6 塩化物イオン量と膨張率

OPC を使用した流下土砂モルタルは、鋼材の腐食発生限界とされる 1.2kg/m^3 を添加しても膨張率は小さい。しかし、塩化物イオン量が 6kg/m^3 以上になると膨張率が 0.2% を越え、 12kg/m^3 添加すると膨張率が 0.6% 以上に達した。

一方、海砂は塩化物イオン量を 12kg/m^3 添加しても供試体の膨張率は 0.1% 以下であった。この流下土砂モルタルに見られる膨張挙動は、NaCl の混入量の増加に伴い膨張率も増加していることより、NaCl の反応性骨材への影響の大きさが分かる。

ところで、抑制対策として高炉セメント（高炉スラグ置換率 45%）を使用した流下土砂モルタルでは、塩化物イオン量を 12kg/m^3 添加しても膨張率が 0.2% 程度に抑制され、高炉セメント C 種（スラグ添加率 65%）を用いた場合には、膨張率が 0.061% まで抑制される結果となった。

5. 結論

本研究で得られた主要な結果をまとめると次のとおりである。

(1) 混合砂に流下土砂を混合して用いる場合は、少量であっても必ず ASR 抑制対策を講じなければならない。流下土砂と海砂の混合割合には最大の膨張率を示すペシマム混合割合が存在することが分かった。

(2) 迅速法（ZKT-206）および JCI AAR-3 法では、高炉セメント（スラグ置換率 45%）使用で、流下土砂を用いてもコンクリートのアルカリシリカ反応性は「無害」の判定結果となった。

(3) デンマーク法では、高炉スラグ置換率が 50% 以上で膨張率が 0.1% 未満となり「無害」の判定結果となった。

(4) 流下土砂モルタルに見られる膨張挙動は、NaCl の混入量の増加に伴い膨張率も増加していることより、NaCl の反応性骨材への影響の大きさが分かる。高炉セメント C 種では、NaCl の反応性骨材への影響を抑制する結果となった。

なお本論は、国土交通省九州地方整備局からの受託研究の一環として行った研究成果の一部を報告したものである。現在、ASR 抑制対策を講じた流下土砂コンクリートについて、海洋環境下での曝露実験を実施しているところである。

謝辞

最後になりましたが、実験の準備、実験、実験結果の整理と積極的にご協力いただいた合田篤子氏、丸田大地氏に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 池田正利，中澤隆雄，鎌田政人：桜島における流下土砂のコンクリート用細骨材への有効利用，セメント・コンクリート論文集，No.57，pp.739-744，2003
- 2) 羽瀧貴士，鳥居和之：アルカリシリカ反応と海水の複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の提案，土木学会論文集，No.774/V-65，pp.149-161，2004
- 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 ASR 試験の適合性，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.185-197，2004