

論文 桜島における土石流土砂をコンクリート用細骨材として用いるための基礎的研究

池田 正利^{*1} 中澤 隆雄^{*2} 内谷 保^{*3} 鎌田 政人^{*4}

要旨：本論では、桜島の土石流土砂のアルカリシリカ反応性や高炉セメントの反応抑制効果の検証、さらには骨材中に含まれる軽石がコンクリートの強度特性に及ぼす影響を検討した。その結果、土石流土砂の混合砂では、ペシマム現象はみられず混合割合に伴って膨張率が変化した。また土石流土砂の微粒分は、ポゾラン効果による反応抑制効果を示さなかった。高炉セメントB種の反応抑制効果は、全アルカリ量が 5kg/m^3 でも顕著であった。軽石量の検討では、大小の軽石が混入する場合よりも、大きい軽石のみを含む細骨材がコンクリートの施工性や強度に影響することが分かった。

キーワード：桜島、土石流土砂、アルカリシリカ反応、細骨材、軽石

1. はじめに

著者らは、桜島の土石流土砂として河口に流出し、桜島の有村・赤水地区の処理場に利用方法のない厄介物として野積みされている土石流土砂を、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。その結果、この桜島の土石流土砂をコンクリート用細骨材として用いたコンクリートは、フレッシュコンクリートや硬化コンクリートにおいて、施工性や強度、さらには耐久性でも優れていることが確認された。しかし、土石流土砂は、アルカリシリカ反応を示す骨材であり、さらに、黒神川砂防堤内に堆積している土石流土砂のように、火山性の軽石を10%前後含む土石流土砂も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、既往の研究から、コンクリート中のアルカリ総量を 3.0kg/m^3 以下に抑えるか、高炉セメントなどの混合セメントを使用することにより、アルカリシリカ反応を抑制できることが明らかになっている²⁾。しかし、反応を起こす具体的な火山性細骨材を

用いたコンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究データは少ない。また、細骨材中に多くの軽石を含む場合、コンクリート特性に及ぼす影響を検討した文献は見あたらない。

本研究は、土石流土砂のアルカリシリカ反応性を知るために、他の骨材を混合した混合砂の反応性や高炉セメントB種の反応抑制効果等の評価試験を実施した。加えて、細骨材中に含まれる軽石が、コンクリートの施工性や強度に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 桜島の土石流土砂堆積地および処理場

桜島には大きな河川はないが19の小河川がある。流域面積は、最大の黒神川で 9.80km^2 と小さく、平均は 3km^2 程度である。降雨時には山腹に堆積した降灰が浸食され土石流となって河川を流下し、山麓部や河口に多量の土砂となって堆積する。堆積した土石流土砂は、桜島の有村・赤水地区の処理場に集積されている。図-1に土石流土砂の堆積地および土石流土砂が集積されている処理場を示す³⁾。

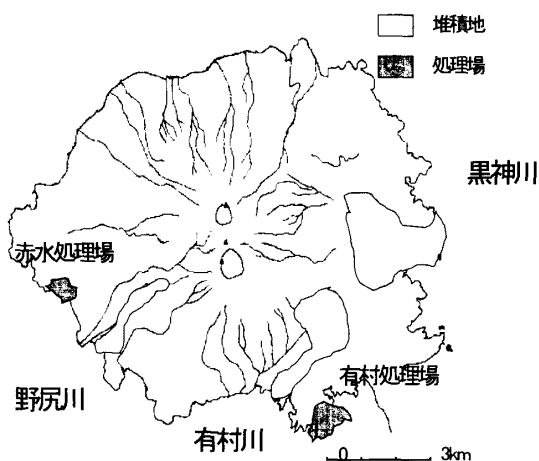
*1 鹿児島工業高等専門学校 土木工学科助手 工修 (正会員)

*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

*4 (株) 鎌田工業 代表取締役社長

黒神川砂防堤内には、有村処理場の数十倍の土石流土砂が堆積している。ただし、この土石流土砂は、採取場所にもよるが 2.5～5mm の軽石を多く含んでいる。



図－１ 土石流土砂の堆積地および処理場

3. 実験概要

本研究は、以下の 2 つのテーマについて検討を行う。

3.1 アルカリシリカ反応性について

土石流土砂は、アルカリシリカ反応を示す骨材である¹⁾。ここでは、土石流土砂とアルカリシリカ反応性試験の迅速法 (JIS A 1804) で無害と判定される海砂、また迅速法で無害でないと判定される砂岩砕砂を混合した混合砂の反応性を迅速法により検討した。

また、土石流土砂を用いたコンクリートは、長期強度の伸びがポゾラン効果によると考えられる強度発現が見られた¹⁾ことから、骨材試料に 0.075mm 以下の微粒分を置換し、モルタルバー法 (JIS A 1146) の試験条件でアルカリシリカ反応抑制効果を検討した。

さらに、アルカリシリカ反応抑制対策として、高炉セメント B 種を用いて、コンクリートに対する抑制効果を検証した。セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用い、全アルカリ量が Na_2Oeq 換算で 9kg/m^3 、 5kg/m^3 になるように NaOH を添加した。供試体

は、 $100\times100\times400\text{mm}$ を用い、養生条件は $\text{RH} \geq 95\%$ 、 40°C とし、養生期間は 6 ヶ月間とした。

3.2 軽石量とコンクリート特性について

表乾状態の砕砂に、同じく表乾状態の軽石を質量比で 3%、6%、9%、12% と段階的に混入した混合砂を準備し、モルタルの圧縮、曲げおよび引張強度試験用供試体を作製した。各強度試験の材齢は 28 日とした。なお、圧縮および引張強度試験用供試体は直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体、曲げ強度試験用供試体は $40\times40\times160\text{mm}$ の角柱供試体とした。モルタルの引張強度試験は、コンクリートの割裂試験と同様に行った。混入する軽石は、シラスから洗い選別したもので、土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入る軽石である。なお、モルタルの配合は、セメント 800g、水 400g と一定とし、細骨材の容積は同一にした。練ったモルタルに関しては、フロー値を測定した。

次に、モルタルと同様の混合砂を準備し、コンクリートの圧縮、曲げおよび引張強度試験を行った。配合は、水セメント比を 50% とし、水、セメント、粗骨材の単位量を一定とした。また、細骨材容積は同一とした。圧縮および引張強度試験用供試体は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体とし、曲げ強度試験用供試体は、 $100\times100\times400\text{mm}$ の角柱供試体とした。なお、各フレッシュコンクリートにおいてスランプ試験を行った。

さらに、混入する軽石として黒神川砂防堤内に流出した 2.5～5mm の範囲の軽石を用い、上記実験と同一の配合で作製したコンクリートについて圧縮、曲げおよび引張強度試験を行った。各強度用供試体は、上記実験と同一とした。

4. 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm^3 、全アルカリ量 0.68%)、高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm^3 、全アルカリ量 0.56%、高炉スラグ混入量 40%) である。土石流土砂は、有村処理場から採取し

た。比較骨材は県内の佐多沖産海砂 A と吹上産海砂 B また蒲生産川砂を用いた。他に、財部産砂岩砕砂（密度 2.59g/cm^3 ，吸水率 1.35%，粗粒率 2.60，迅速法でのモルタルバーの膨張率 0.137%），桜島の溶岩を破碎し作製した溶岩砕砂（密度 2.60g/cm^3 ，吸水率 1.90%，粗粒率 2.60），黒神川産軽石（密度 1.33g/cm^3 ，吸水率 40.0%），国分市芦谷産シラスから選別した軽石（密度 1.51g/cm^3 ，吸水率 34.0%，粗粒率 3.19），シラスのアルカリシリカ反応性を調べるために軽石，微粒分をある程度除いた火山ガラスを多く含むシラス洗砂（密度 2.40g/cm^3 ，吸水率 4.79%，粗粒率 2.21，軽石量 11.8%）を用いた。粗骨材は、大分県津久見産の非反応性の石灰石を用いた。

5. 骨材の物理試験結果

有村処理場の土石流土砂と県内のコンクリート用細骨材である海砂および川砂の物理試験結果を表-1に示す。ただし、軽石量は、JIS A 5308 骨材中の比重 1.95 の溶液に浮く粒子の試験方法により求めた。

表-1 骨材の物理試験結果

試験骨材種類	密度 g/cm^3	吸水率 %	粗粒率	実積率 %	軽石量 %
土石流土砂	2.56	2.07	2.52	66.8	0.98
海砂 A	2.57	2.64	2.37	57.6	1.36
海砂 B	2.47	4.36	2.49	59.0	8.43
川砂	2.59	3.04	2.13	59.8	4.22

鹿児島県内の細骨材は、軽石を多く含む⁴⁾ため川砂、海砂 B の吸水率はそれぞれ 3.04%、4.36%と大きい。海砂 B は、密度が 2.50g/cm^3 以下、軽石量は 8.43%と骨材品質が低い。一方、有村処理場の土石流土砂は、表乾密度が 2.50g/cm^3 以上で、吸水率が 3.0%以下であり、実積率は 66%台と大きく、細骨材として良好な値を示している。

6. 土石流土砂のアルカリシリカ反応性

6.1 化学法による分析結果

表-2に化学法（JIS A 1145）による溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の分析結果を示す。

本実験の結果は、全ての骨材において溶解シリカ量がアルカリ濃度減少量以上であることより無害でないと判定される。

表-2 化学法による分析結果

骨材種類	溶解シリカ量 (mmol/l)	アルカリ濃度減少量 (mmol/l)
土石流土砂	226	59
シラス洗砂	242	137
海砂 A	121	112
海砂 B	169	140
川砂	134	125

6.2 迅速法、モルタルバー法による判定

図-2に、迅速法およびモルタルバー法による骨材の膨張率を示す。

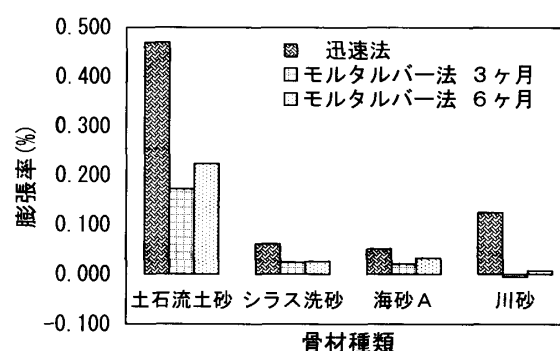


図-2 迅速法とモルタルバー法による膨張率

土石流土砂は、モルタルバー法（6ヶ月材齢）での膨張率が 0.223%となり無害でないと判定される。ところで、化学法で無害でないと判定され、迅速法でも膨張率が 0.1%を上回り無害でないと判定された川砂は、モルタルバー法で膨張率が 0.1%以下であり最終的に無害の判定になる。シラス洗砂は、火山ガラスを多く含む⁴⁾が、実験結果は無害の判定になった。これは、シラス洗砂には多くの軽石（軽石量 11%）が含まれるため、試料の骨材容積が通常の骨材より大きくなり、モルタルのフロー値が小さく硬めのモルタルになることによりモルタルの膨張率が小さくなった可能性がある。

6.3 混合砂のアルカリシリカ反応性

土石流土砂に混合する方法で、迅速法で無害と判定される海砂A、また、迅速法で無害でないと判定される砂岩砕砂（膨張率 0.137%）との混合砂を作製した。混合砂の反応性を迅速法の試験条件で検討し、その結果を図-3に示す。

結果として、混合割合と膨張率の関係にはペシマム現象⁵⁾はみられず、混合割合の増加に伴って膨張率が減少している。ただ、流下土砂の混合割合が質量比で 20%でも膨張率が 0.1%を超えていることから、流下土砂を混合する場合は、必ずアルカリシリカ反応抑制対策をとる必要があると考えられる。

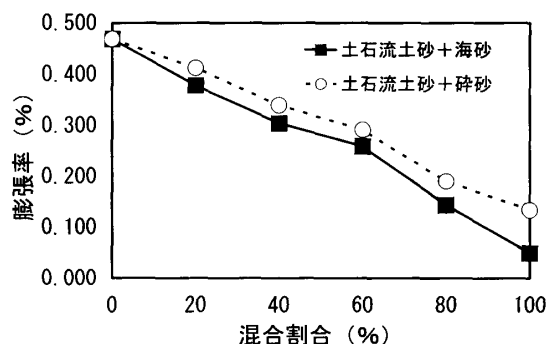


図-3 混合砂のアルカリシリカ反応性

6.4 微粒分のアルカリシリカ反応抑制効果

顕微鏡で観察すると土石流土砂に含まれる 0.075mm 以下の微粒分の多くは、火山ガラスである。既往の文献¹⁾で報告しているとおり、土石流土砂の微粒分は、火山性の火山灰を含んでいることからポズラン反応をおこす可能性がある。

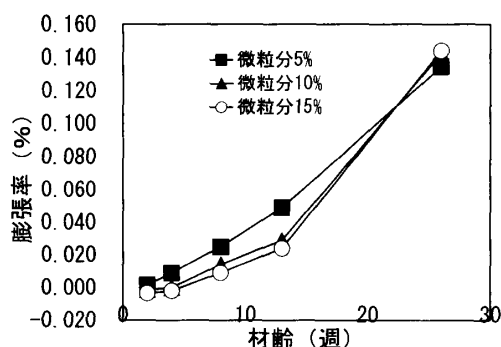


図-4 微粒分混入モルタルの膨張率

そこで、土石流土砂の試料の一部を微粒分と置換したモルタルバーの膨張率を測定した。材齢ごとの膨張率を図-4に示す。その結果、6ヶ月材齢で微粒分を質量比で試料の 5~15%まで混入したいずれの場合も、膨張率が 1.40%前後の値を示した。今回の実験では、混入した土石流土砂の微粒分の細かさではポズラン効果による膨張率の抑制効果は現れなかった。

6.5 高炉セメントB種による抑制効果の検証

高炉セメントB種のアルカリシリカ反応抑制効果は良く知られていることから、高炉セメントB種を用い、土石流土砂を細骨材としたコンクリートに対する反応抑制を実際に検証した。図-5に、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いたコンクリートの各材齢時の膨張率を示す。

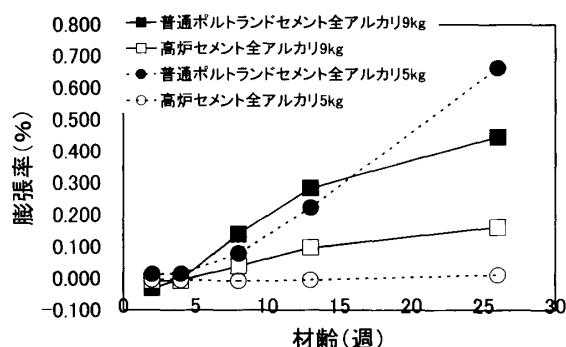


図-5 コンクリートの膨張率

図-5より、高炉セメントB種がコンクリートの膨張を抑制している事が良く分かる。全アルカリ量が 5kg/m^3 の時の膨張は、ほとんど見られず 6ヶ月目の膨張率は 0.011%であった。

7. 細骨材中の軽石量とコンクリート特性

7.1 モルタルにおける軽石の影響

軽石を含まない溶岩砕砂と国産シラスから選別した軽石の粒度曲線を図-6に示す。軽石と溶岩砕砂は、それぞれ表乾状態で混合した。軽石の粒度組成が良いために、混合砂で作製したモルタルのフロー値は、3~12%の軽石量の変動に関係なく $175 \pm 5\text{mm}$ の範囲内であった。

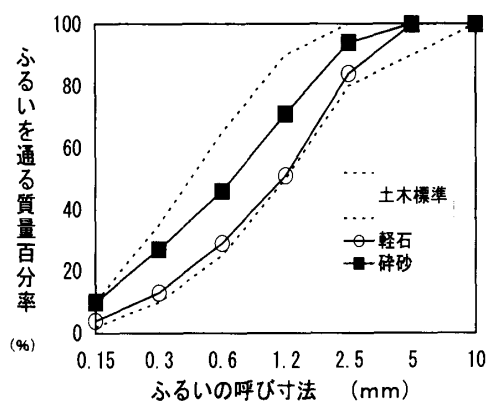


図-6 骨材の粒度曲線

砕砂のモルタルの強度を基準として、混合砂のモルタルの強度を百分率で表した強度比を図-7に示す。

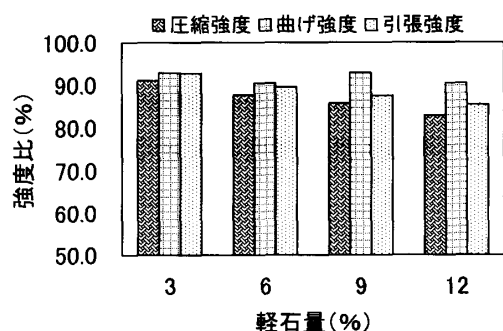


図-7 モルタルの軽石量と強度比

図-7より、モルタルの圧縮および引張強度は、軽石量の増加に伴い顕著な強度低下が現れている。特に、圧縮強度は、軽石量12%で17%の強度低下が見られた。これは、軽石量が1%増加するごとに1.4%ほど強度が低下することになる。一方、曲げ強度については、軽石量による強度の差が明確には現れなかった。

7.2 コンクリートにおける軽石の影響

表-3 コンクリートの配合表

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			細骨材容積 (m ³) S
		水 W	セメント C	粗骨材 G	
50	45	180	360	1019	0.34

モルタルと同様の混合砂を用いて、コンクリートを作製し、圧縮、曲げおよび引張強度を求めた。このときのコンクリートの配合を表-3に示す。なお、コンクリートのスランプは、軽石の混合量に拘わらず8±2cmの範囲であった。砕砂を細骨材として用いたコンクリートの強度を基準として、混合砂を用いたコンクリートの強度を百分率で表した強度比を図-8に示す。

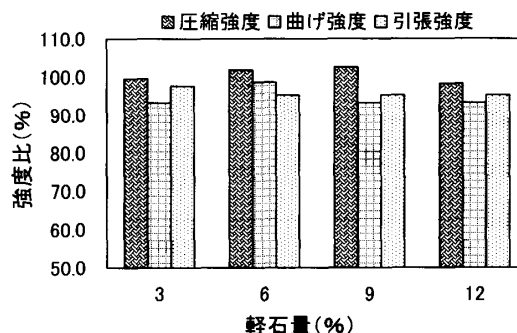


図-8 コンクリートの軽石量と強度比

圧縮および曲げ強度においては、軽石量と強度の間に明確な関係は見られない。引張強度の低下は多少現れているが、軽石量12%で5~6%の低下にとどまっており、モルタルでの影響の3割程度である。コンクリートでは細骨材容積が0.34m³であることから、当然モルタルに比べて軽石量の影響が少ないと考えられる。また、各混合砂を用いたコンクリートの静弾性係数の測定結果を表-4に示す。圧縮強度と同様に、静弾性係数の値も軽石量の影響を受けていない結果を示した。

表-4 軽石量と静弾性係数の関係

軽石量 (%)	0	3	6	9	12
圧縮強度 (N/mm ²)	43.6	43.4	44.9	44.7	42.8
静弾性係数 (kN/mm ²)	35.0	35.5	35.5	33.5	34.1

7.3 軽石の違いによる影響の変化

次に、混入する軽石を粒径の大きい黒神川砂防堤内の軽石(2.5~5mm)とし、表-3の配合でコンクリートを作製し強度試験を行った。

ただし、ここでは、軽石と溶岩砕砂の混合割合は、絶乾状態での混合比である。

軽石量とスランプの関係を図-9に示す。軽石量の増加に伴いスランプが大きくなっている。これは、軽石量の増加に伴い混合砂の粗粒率が大きくなり、加えてコンクリートの細骨材容積が 0.34m^3 と一定であるためにスランプが大きくなったと考えられる。

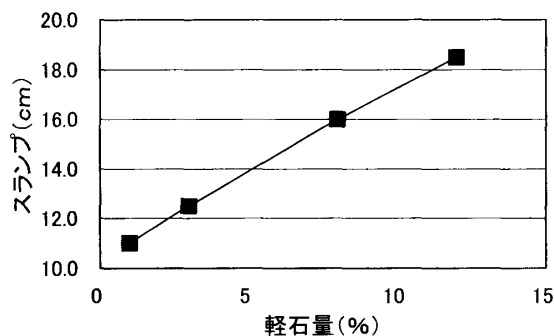


図-9 軽石量とスランプの関係

図-10 に砕砂を用いたコンクリートの強度を基準として、混合砂を用いたコンクリートの強度を百分率で表した強度比を示す。

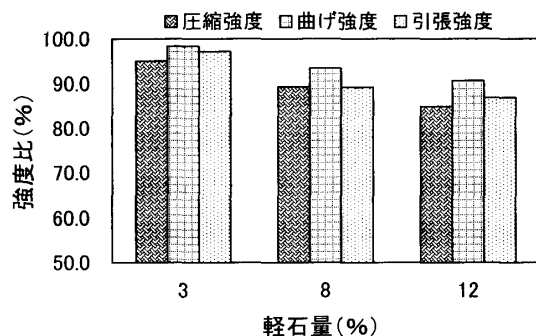


図-10 コンクリートの軽石量と強度比

細骨材中に軽石を含んだ細骨材を使用したコンクリートである点では前の実験と同じであるが、混合する軽石の粒度組成で実験結果に明らかな強度比の違いが現れた。すなわち、軽石量の増加に伴い顕著な圧縮強度の低下が見られ、軽石量12%で15%ほど圧縮強度が低下している。これは、軽石量が1%増加するごとに1.3%程度圧縮強度が低下することになる。このように、

軽石の粒度組成によっては、コンクリートの強度に大きく影響することが分かる。引張および曲げ強度に関しても同様な傾向を示した。

8. まとめ

得られた結果をまとめれば次のとおりである。

- (1) 迅速法の結果ではあるが、土石流土砂に無害の骨材を質量比で80%混合した混合砂であっても膨張率が0.1%を超えており、アルカリシリカ反応抑制対策をとる必要がある。
- (2) 土石流土砂の微粒分を用いても、ポゾラン効果による抑制効果を示さなかった。
- (3) 高炉セメントB種のアルカリシリカ反応抑制効果は顕著であり、全アルカリ量が 5kg/m^3 でも、全くモルタルに膨張が見られなかった。
- (4) 大小の軽石が混入する細骨材より、粒径が大きい軽石のみを含む細骨材の方がコンクリートの施工性や強度に大きく影響を与える。

謝辞：最後になりましたが、適切なご助言をいただいた佐藤技研の佐藤勇一氏、実験全般にわたりご協力いただいた合田篤子氏、丸田大地氏、蛭原大介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，原口誠夫：桜島における土石流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) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発，1988
- (3) オオスミ事業概要 2001 桜島砂防出張所発
- (4) 池田正利，原口誠夫：しらす砂を用いたコンクリートに関する基礎的研究，鹿児島工業高等専門学校研究紀要，No.23，pp.149-156，1989
- (5) 森野奎二ほか：反応性鉱物の種類と異なる各種骨材のアルカリ反応性，土木学会第43回年次講演会，pp.33-39，1988