

論文 Aso4 火砕流由来の火砕流堆積物の建設材料としての適用可能性に関する基礎的研究

田中 裕祐*1・福永 隆之*2・山本 大介*3

要旨：世界的な都市化により、コンクリートの原材料不足が問題となっている。日本においても、採取規制などにより、良好な天然細骨材の入手が困難であるため、これらの代替材料が求められている。本研究では、火砕流堆積物に注目し、これを建設材料として活用するために、その基礎的物性や鉱物組成、また、モルタルを作製し、その流動性や圧縮強度について検討を行った。その結果、本研究で検討した火砕流堆積物の物性値は横川シラスと似た傾向であること、ポゾラン反応性を示す可能性があること、また、強度は海砂を用いたものより弱かったが、実用化可能な強度を得られることが分かった。

キーワード：火砕流堆積物、細骨材、混和材、物性値、圧縮強度

1. はじめに

近年、世界的な人口増加に伴う急激な都市化が進行している。これにより、コンクリート原材料の需要が高まっており、世界的に原材料不足が問題となっている。日本では、自然環境や水産資源への深刻な影響を防ぐという観点から、天然資源の採取が部分的に禁止の方向へ進みつつある。そのため、天然資源の入手が困難となってきており、これらの代替材料が求められている。

代替材料の一つとして、火砕流堆積物が挙げられる。日本は世界有数の火山大国であり、国内に 111 もの活火山が存在している。これら活火山の噴火により、国内には火砕流堆積物が豊富に堆積している。この火砕流堆積物を建設材料として用いた検討として、武若は、南九州に分布するシラスと呼ばれる火砕流堆積物の建設材料への活用方法について検討し、シラスを細骨材に用いたシラスコンクリートの耐塩害性能が高い¹⁾ことや、シラス微粉末がポゾラン反応を有する²⁾ことなどを報告している。その結果、鹿児島県では、2005年に「シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル(案)」を制定し、同県に広く堆積している火砕流堆積物の一種であるシラスを細骨材として用いたシラスコンクリートが土木構造物や2次製品として実用化された。また、谷口らは北海道に堆積する火砕流堆積物について、ポゾラン反応により通常のコンクリートよりも大きな強度増進が得られる³⁾こと、五十嵐らは伊豆諸島に堆積する火砕流堆積物について、圧縮強度は吸水率を指標として評価できる⁴⁾ことを報告している。また、2020年には、火山堆積物の混和材利用が JIS A 6029「コンクリート用火山ガラス微粉末」として制定された。しかし、国内には未検討の火砕流堆積物も多く存在している。九州地方においても検討されていない火砕流堆積物が多数存在している。

そこで本研究の目的は、九州地方に堆積している未検討の火砕流堆積物を採取し、採取した火砕流堆積物について基礎的物性、鉱物組成、およびこれを使用したモルタルの諸特性を明らかにすることで、火砕流堆積物の建設材料への活用方法を提案することとした。

2. 本研究で検討した火砕流堆積物

図-1に本研究で使用した火砕流堆積物の写真を示す。本研究で検討した火砕流堆積物は、大分県 T 市に堆積しているもので、地質図⁵⁾より9万年前に発生した Aso4 火砕流が由来であると判断した。採取の際は、地山の表面 20cm 程度は風化の影響を受けている可能性があるため、これを削り落とし、採取を行った。採取した試料は粒径が 10mm を超えるものも含まれていたが、本研究では、採取した試料を呼び寸法 5mm の網ふるいに通し、これを通過するものを使用した。図-1は、5mm の網ふるいを通過したものである。本研究では、これ以降、Aso4 火砕流堆積物と呼ぶ。



図-1 採取した Aso4 火砕流堆積物

*1 九州大学大学院 工学府土木工専攻 (学生会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 助教 博士(工学) (正会員)

*3 大分工業高等専門学校 都市・環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

3. Aso4 火砕流堆積物の物性

3.1 試験項目

(1) X線回折法および実体顕微鏡による鉱物組成の把握

呼び寸法 5mm の網ふるいを通過する試料に対し、X線回折法（以下、XRD）を行い、鉱物組成を明らかにした。さらに、粒径ごとの鉱物組成を明らかにするため、ふるい分け試験で得られた粒径ごとに、XRD および実体顕微鏡による撮影を行った。このとき、粒径 75 μm ~5mm の試料については、ふるい分け試験によって得られたもの、粒径 75 μm 未満の試料については、微粒分量試験の際に得られた 75 μm 未満の試料を用いた。また、XRD に用いたすべての試料に対して、内部標準試料として、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を内割で 10mass% 置換した試料を用いた。

(2) 表乾判定試験

物性を測定するためには測定対象の試料を表乾状態に調整する必要がある。本研究では、竹内ら⁶⁾が報告した直立フローコーンによる表乾判定試験方法により試料の表乾状態の判定を行った。本研究で使用した直立フローコーンは内径 75 \pm 3mm、高さ 75 \pm 3mm で厚さ 4mm 以上の円柱形状のものである。直立フローコーンを用いた試験では、試料をコーンに充填する際に予め十分に余盛りをすることや、突き固め後に試料が不足した場合、試料の追加は行わずやり直すことなどの点において通常の表乾判定試験と異なる。これらの試験器具および試験方法は、「シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル（案）」の中で、「規準-3 シラス細骨材の密度及び吸水率試験方法」⁷⁾に規定されているものである。加えて、JSCE C 506-2023⁸⁾に基づき、電気抵抗法による表乾状態の判定の検討も行った。

(3) 密度及び吸水率試験

呼び寸法 5mm の網ふるいを通過する試料に対し、JIS A 1109-2020 に基づき、密度及び吸水率試験を行い、密度および吸水率を算出した。

(4) 単位容積質量及び実績率試験

呼び寸法 5mm の網ふるいを通過する試料に対し、JIS A 1104-2006 に基づき、単位容積質量及び実績率試験を行い、単位容積質量及び実績率を算出した。

(5) 微粒分量試験

呼び寸法 5mm の網ふるいを通過する試料に対し、JIS A 1103-2014 に基づき、微粒分率を算出した。

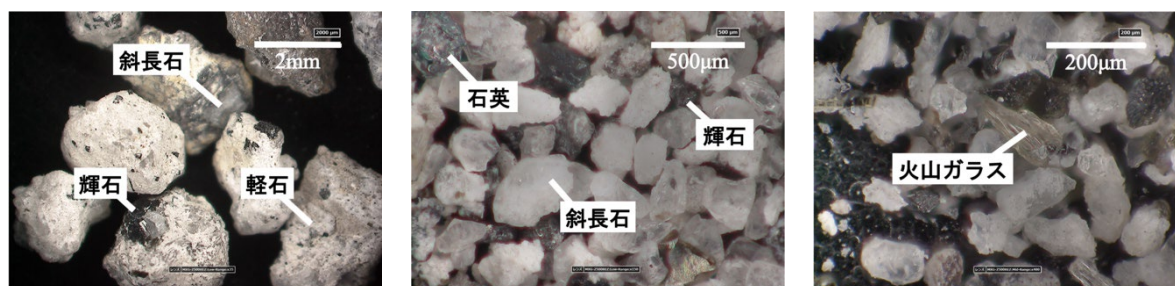
(6) ふるい分け試験

呼び寸法 5mm の網ふるいを通過する試料に対し、ふるい分け試験を行い、その粒度の評価をした。火砕流堆積物に対し、通常のふるい分け試験（JIS A 1102-2014）を行うと、粒径 75 μm 未満の微粒分が粒径の大きな粒子に付着するため、正確な試験結果を得られないことが考えられた⁹⁾。そこで本研究では、微粒分量試験後の 75 μm 以上の試料に対してふるい分け試験を行い、微粒分量試験によって洗われた 75 μm 未満の試料は呼び寸法が 75 μm の網ふるいを通過した試料としてデータ整理を行なった。これは、上記マニュアル（案）中の「規準-2 シラス細骨材のふるい分け試験方法」⁷⁾に規定されているものである。

3.2 試験結果および考察

図-2 に Aso4 火砕流堆積物の実体顕微鏡による拡大写真を示す。図-2 の (a) は粒径 2.5mm~5mm の鉱物、(b) は粒径 150 μm ~300 μm の鉱物、(c) は粒径 75 μm 未満の鉱物の写真を示す。(a) より斜長石、輝石などの鉱物が確認できる。さらに、火山ガスが抜けた細かい孔をもつもの（以下、軽石）も確認された。また、(b) より斜長石、輝石、石英などの鉱物が確認できる。また、(c) より火山ガラスが確認できるため、Aso4 火砕流堆積物はポズラン反応を有する可能性がある。

Aso4 火砕流堆積物の全粒径の XRD パターンを図-3 に、粒径ごとの XRD パターンを図-4 それぞれ示す。また、比較として南九州に堆積する入戸火砕流由来のシラス（以下、横川シラス）と玄海沖で採取した海砂（以下、海砂）の XRD パターンも各図に示す。なお、横川シラスでは、内部標準試料として MgO を内割で 10mass% 置換した試料を用いた。図-3 より、どちらの試料にも斜長石、輝石、石英などの鉱物が含まれていた。また $2\theta=23^\circ$ 付近にブロードが存在することから、火山ガラスや軽石などが含まれている。次に、それぞれの試料の粒径ごとに着目すると、図-4 より、粒径が大きいほど、斜長石や石英が多く含まれている。また、Aso4 火砕流堆積物には角閃石やハロイサイトなどの、横川



(a) 粒径 2.5mm~5mm (35倍)

(b) 粒径 150 μm ~300 μm (150倍)

(c) 粒径 75 μm 未満 (400倍)

図-2 実体顕微鏡図

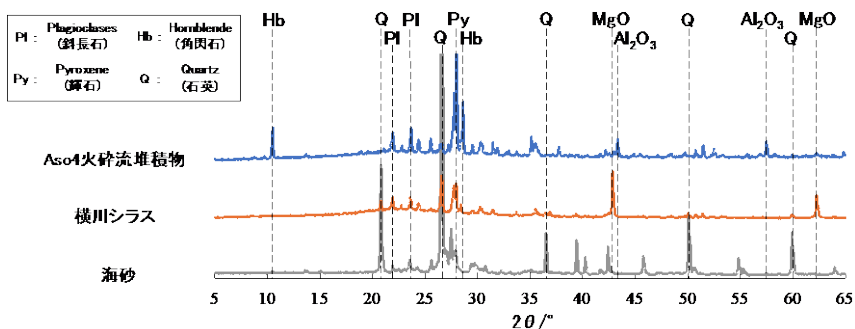
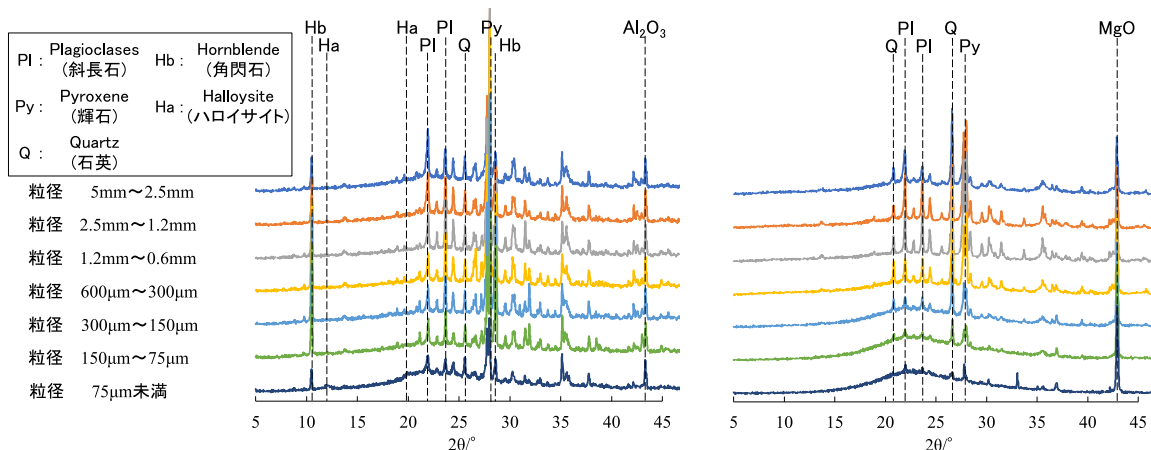


図-3 XRDパターン



(a) Aso4火砕流堆積物

(b) 横川シラス

図-4 粒径ごとのXRDパターン

表-1 物性試験の結果および実験に用いた骨材の物理的性質

| 骨材の種類 | 微粒分量 (%) | 粗粒率 (%) | 表乾密度 (g/cm ³) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/L) | 実績率 (%) |
|------------|----------|---------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------|---------|
| Aso4火砕流堆積物 | 14.01 | 2.02 | 2.22 | 2.04 | 9.23 | 1.30 | 64.16 |
| 横川シラス | 21.77 | 1.53 | 2.16 | 2.04 | 5.81 | 1.18 | 57.69 |
| 海砂 | 1.51 | 2.75 | 2.54 | 2.50 | 1.09 | 1.64 | 65.67 |

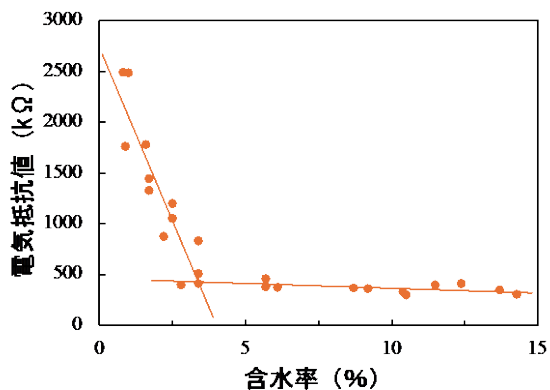


図-5 Aso4火砕流堆積物の含水率と抵抗値の関係

シラスには含まれない鉱物が含まれていることを確認した。粒径が小さくなると $2\theta=23^\circ$ 付近にブロードが確認でき、非晶質が多く含まれていた。これらの鉱物組成は、既

往の火砕流堆積物の報告¹⁰⁾と概ね一致した。

表乾判定試験の結果、直立フローコーンを用いた表乾判定試験方法では、Aso4火砕流堆積物の吸水率は9.23%となった。また、図-5に電気抵抗法によって得られたAso4火砕流堆積物の含水率と抵抗値の関係を示す。電気抵抗法では吸水率は3.4%となり、Aso4火砕流堆積物の含水率は電気抵抗法を適用したときの吸水率の方が小さい判定となった。これは火砕流堆積物の空隙中の水について、直立フローコーンによる表乾判定試験方法では吸水されていると判断するのに対し、電気抵抗法では空隙中の水にも電流が流れ、表面水と判定するためと考えられる。この検討結果と目視による判定により、本研究で用いる試料の表乾状態は、直立フローコーンによる判定とした。

物性試験の結果を表-1に示す。比較として、鹿児島県に堆積する火砕流堆積物である横川シラスと海砂の物理的

性質を合わせて示す。表よりAso4火砕流堆積物は、横川シラスと同じように、海砂と比べて微粒分量や吸水率が大きく、粗粒率や密度は小さい結果となった。また、横川シラスと比較すると、微留分量が小さく、吸水率は大きかった。

Aso4火砕流堆積物の粒度分布を図-6に示す。ここで、図中の(a)は、微粒分量試験後の試料を用いた粒度分布である。これは、75 μ m未満の試料を混和材としてみなした場合の粒度分布と考えることができる。また、(b)は、微粒分量試験によって除かれた75 μ m未満の試料の質量を粒度分布に加えたものである。これは、75 μ m未満の試料も細骨材としてみなした場合の粒度分布と考えることができる。また、点線は、JIS A 5308-2014に記載されている砂の粒度範囲の上限値と下限値を示している。なお比較として横川シラスの粒度分布も示す。図より、75 μ m未満の試料を混和材としてみなした場合、標準粒度分布の基準値を満たした。一方で、75 μ m未満の試料を細骨材として用いた場合、粒径が0.3mm以下の試料で標準粒度分布の上限値を上回り、粒径の小さい試料が多い結果となった。また、これらの粒度分布の傾向は、横川シラスと同じであった。

4. Aso4 火砕流堆積物を用いたモルタルの性質

4.1 実験材料

3.2より、Aso4火砕流堆積物を使用したモルタルを作製した。このとき、使用した材料を表-2に示す。ただし、Aso4火砕流堆積物の75 μ m未満の試料は混和材とみなして使用したが、配合表上などでは75 μ m以上の試料と合わせて細骨材(記号:S)として表記している。また、セメントは普通ポルトランドセメント(記号:C)を使用した。練混ぜ水には水道水(記号:W)を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能AE減水剤(記号:Ad)を使用した。

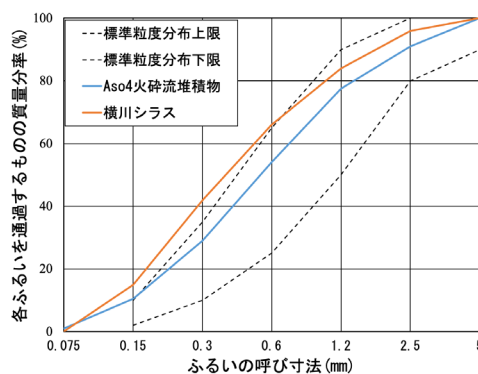
4.2 試験項目

(1) フロー試験

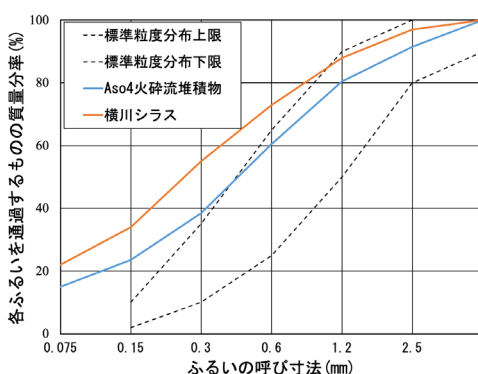
Aso4火砕流堆積物を使用したフレッシュモルタルの流動性、および、高性能AE減水剤の効果を評価するためにフロー試験を実施した。フロー試験の配合表を表-3に示す。水セメント比(以下、W/C)を0.5に固定し、砂セメント比が3.0および2.5の2配合で試験を行った。このときの目標フロー値を150とした。フロー試験は、JIS R 5201-2015¹¹⁾に基づき行なった。高性能AE減水剤を使用する場合は、練混ぜ水にあらかじめ高性能AE減水剤を内割添加したものを練混ぜ水として使用した。

(2) 圧縮強度試験

Aso4火砕流堆積物を使用したモルタルの圧縮強度を評価するために、フロー試験により得られた目標フロー値を満たす配合でモルタルを作製し、圧縮強度試験を実施した。モルタルの寸法は、 ϕ 50 \times 100mmの円柱供試体とした。打



(a) 75 μ m未満の試料を混和材としてみなした場合



(b) 75 μ m未満の試料を細骨材としてみなした場合

図-6 粒度分布

設時の練り混ぜはフロー試験と同様に行い、打設24時間後に脱型を行い、所定の材齢(7日、28日)まで20 $^{\circ}$ C水中養生を実施した。圧縮試験はJISA 1108-2018に基づき行なった。なお、強度の比較として玄海沖で採取された海砂を細骨材に使用したモルタルを作製し、同様に試験を行なった。海砂の物性は表-1に示すものである。

4.3 試験結果および考察

(1) フロー試験

フロー試験の結果、配合No.1では、流動性がほとんどなく、フローコーンに充填することができなかった。これは細骨材中の微粒分が多いため、流動性が低下したためであると考えられる。これは既往の研究¹²⁾と同じ傾向である。た、配合2では、フロー値114を得た。フロー試験の結果、

表-2 使用材料

| 材料名 | 記号 | 使用材料 |
|------|----|-------------------------------|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント |
| 練混ぜ水 | W | 水道水 |
| 細骨材 | S | Aso4 火砕流堆積物 |
| 混和材 | | |
| 混和剤 | Ad | ポリカルボン酸系化合物 主成分の高性能 AE 減水剤 |

表-3 フロー試験の配合表

| 配合 No. | W / C | S / C | 単位量 (kg/m ³) | | | Ad 添加率 (C×%) |
|--------|-------|-------|--------------------------|-----|------|--------------|
| | | | C | W | S | |
| 1 | 0.5 | 3.0 | 460 | 230 | 1386 | 0.0~2.5 |
| 2 | 0.5 | 2.5 | 520 | 260 | 1278 | 0.0~1.0 |

どちらの配合ともに目標フロー値である 150 を得ることができなかった。

目標フロー値を得るため、どちらの配合とも、高性能 AE 減水剤を添加することで目標フロー値を得ることとした。セメント質量に対する高性能 AE 減水剤の添加割合を変化させ、再度フロー試験を行なった。高性能 AE 減水剤の添加率とフロー値の関係を図-7 に示す。図-7 に示すように、高性能 AE 減水剤を加えることでフロー値は線形的に増加した。高性能 AE 減水剤の添加率を 1% 増加させた時のフロー値は、配合 No.1 では 30、配合 No.2 では 50 程度増加した。これにより、火砕流堆積物を細骨材として用いたモルタルについても高性能 AE 減水剤によるワーカビリティの改善が可能であることがわかる。配合 No.1 と配合 No.2 でフロー値の増加量に違いが出た原因として、配合 No.1 の方が配合中の微粒分量が多く、これが流動性を低下させている¹²⁾ と考えた。また、高性能 AE 減水剤をセメント質量に対して配合 No.1 では 2.5%、配合 No.2 では 0.7% 添加した際に、フロー値が目標の 150mm となった。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の配合表を表-4 に示す。このとき、供試体名は「(細骨材名) - (単位水量)」とした。また、Aso4 火砕流堆積物は Aso4 と表記している。比較用の海砂を使用した配合では高性能 AE 減水剤を添加していない。また、同配合にて、細骨材に横川シラスを使用したモルタルに対してフロー試験を試みたが、使用した高性能 AE 減水剤の適正使用量の上限値の 2 倍の添加量である 5.0% を添加した配合でも、フローコーンに充填することができず、フロー値を得ることができなかった。そのため、本実験では、細骨材に横川シラスを使用したモルタルは、作製および圧縮強度試験を行っていない。

作製した供試体の材齢 7 日および材齢 28 日の圧縮強度試験の結果を図-8 に示す。細骨材に Aso4 火砕流堆積物を使用した場合、海砂を用いたものと比較すると、どちら

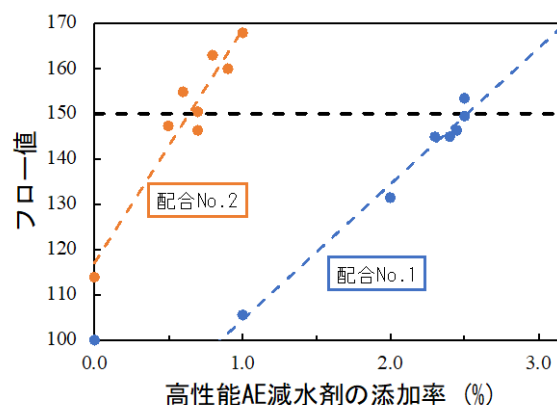


図-7 高性能 AE 減水剤の添加率とフロー値の関係

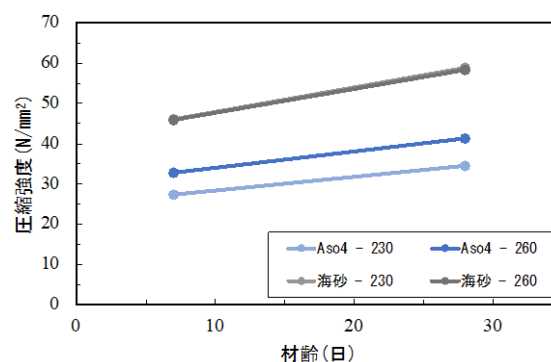


図-8 圧縮強度試験の結果

の材齢とも低い強度となった。これは、シラスを用いた既往の研究¹³⁾と一致する。また、「海砂-230」と「海砂-260」では、どちらの材齢も同程度の圧縮強度であるのに対し、「Aso4-230」と「Aso4-260」ではどの材齢とも「Aso4-260」の方が強い圧縮強度となった。これは「Aso4-230」の方が、細骨材が多いため供試体中の軽石が多くなり、強度が低下したことが原因として考えられる。

表-5 に各供試体の材齢 7 日から材齢 28 日までの圧縮強度増加率を示す。材齢 28 日時点では Aso4 火砕流堆積物

表-4 圧縮強度試験の配合表

| 供試体名 | W / C | S / C | 単位量 (kg/m ³) | | | Ad 添加率 (C×%) |
|----------|-------|-------|--------------------------|-----|------|--------------|
| | | | C | W | S | |
| Aso4-230 | 0.5 | 3.0 | 460 | 230 | 1386 | 2.5 |
| Aso4-260 | | 2.5 | 520 | 260 | 1278 | 0.7 |
| 海砂-230 | | 3.4 | 460 | 230 | 1587 | 0.0 |
| 海砂-260 | | 2.8 | 520 | 260 | 1462 | 0.0 |

表-5 各供試体の材齢 7 日からの圧縮強度増加率

| 供試体名 | Aso4 | Aso4 | 海砂 | 海砂 |
|-----------------|------|------|------|------|
| | -230 | -260 | -230 | -260 |
| 圧縮強度 増加率 (%) | 126 | 126 | 127 | 127 |

を用いたものと海砂を用いたものの圧縮強度増加率は、ほぼ同等であるが、Aso4 火砕流堆積物はポズラン活性を有する可能性があり、強度の増加が考えられる。しかし、火砕流堆積物を用いた供試体のポズラン反応による強度の増加は、材齢 1 年以降に起こる¹⁴⁾ため長期強度については引き続き検討が必要である。

5 結論

本研究では、未検討の火砕流堆積物を採取し、その基礎的物性、鉱物組成および、これを使用したモルタルの諸特性について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) Aso4 火砕流堆積物には、斜長石、角閃石、輝石、ハロサイト、および、石英などの鉱物が含まれていた。また、75 μ m 未満の試料について、火山ガラスが確認されたため、ポズラン反応による長期強度の増加が期待できる。
- (2) Aso4 火砕流堆積物の物性について、海砂と比較すると、微粒分量や吸水率が大きく、密度や粗粒率は小さい結果となった。また、これらの特徴は同じ火砕流堆積物である横川シラスの特徴と同じ傾向であった。
- (3) 75 μ m 未満の試料には火山ガラスが含まれることや、75 μ m 未満の試料を混和材として用いた場合、JIS の粒度範囲の基準を満足することから、Aso4 火砕流堆積物は 75 μ m 以上の試料を細骨材とみなし、75 μ m 未満の試料を混和材とみなして利用することができる。
- (4) Aso4 火砕流堆積物を細骨材に用いたフレッシュモルタルは高性能 AE 減水剤によるワーカビリティの改善が可能である。しかし、その添加量とフロー値の増加量は微粒分量の影響を受けるため、一定とはならない。
- (5) Aso4 火砕流堆積物を使用したモルタルの圧縮強度は材齢 28 日まで、海砂を使用したものよりも弱い強度となった。

以上より、Aso4 火砕流堆積物はシラスと同様にコンクリート材料として活用できると考える。ただし、Aso4 火砕流堆積物のポズラン活性の有無、およびこれに伴う長期強度増加の有無、また、シラスには見られなかったハロサイトの影響については検討が必要である。

参考文献

- 1) 武若耕司：しらすの利用によるコンクリートの耐久性

改善に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.1, pp.551-556, 1989

- 2) 武若耕司：しらすを利用したコンクリート用混和材の開発に関する研究、材料、Vol.48, No.11, pp.1300-1307, 1999
- 3) 谷口円, 高橋徹, 垣原康之, 佐川孝広：北海道に分布する火山灰の特性とポズラン反応性、コンクリート工学年次論文集、Vol.35, No.1, pp.97-102, 2013
- 4) 五十嵐匠, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆：火山性堆積物細骨材の反応性と吸水率がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、第 73 回, pp.299-300, 2018
- 5) 産総研 地質図表示システム 地質図 Navi : <https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php#9,33.015,131.369> (閲覧日：2025 年 1 月 6 日)
- 6) 竹内一真, 武若耕司, 奥地栄祐, 山口明伸：細骨材の表乾判定試験方法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25, No.1, pp.77-82, 2003
- 7) 鹿児島県 土木部：シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル(案), 財団法人 鹿児島県建設技術センター, 2006
- 8) 土木学会 コンクリート委員会 規準関連小委員会：2023 年制定 コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連規準 電気抵抗法によるコンクリート用スラグ細骨材の密度及び吸水率試験方法(案) (JSCE-C 506-2023), 公益社団法人 土木学会, pp.23-27, 2023
- 9) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸, 湊田和樹：コンクリート用細骨材のシラスの諸物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28, No.1, pp.2069-2074, 2006
- 10) 福永隆之, 武若耕司, 山口明伸, 審良善和：シラスを混和材として利用したセメント系材料の耐塩害性に関する研究、コンクリート工学論文集、29 巻, pp.21-31, 2018
- 11) 公益社団法人 土木学会：2023 年制定 コンクリート標準示方書[規準編] JIS 規格集 セメントの物理試験方法 (JIS R 5201:2015), 一般財団法人 日本企画協会, pp.58-80, 2023
- 12) 奥地英祐, 武若耕司, 山口明伸：細骨材にシラスを使用した高流動コンクリートに関する実験的研究、土木学会論文集、No.781, pp.35-44, 2005
- 13) 武若耕司, 松本進, 川俣孝治：シラスのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.9, No.1, pp.7-12, 1987
- 14) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴-鹿児島県制定マニュアルの内容を基にして-, コンクリート工学, Vol.45, No.2, pp.16-23, 2007