

火山噴出物を活用した新素材の開発と実用化研究(第3報)

—微粉碎シラスを用いる高強度コンクリートへの展開—

窯業部 袖山研一, 神野好孝, 中重 朗, 藺田徳幸

Development and Practical Study of New Materials Using of Volcanic Eruption (III)

—Utilization of Finely Pulverized Shirasu for High-strength concrete—

Ken'ichi SODEYAMA, Yoshitaka KAMINO, Akira NAKASHIGE and Tokuyuki SONODA

微粉碎シラスの利用研究として、前報では水熱処理によりカオリン鉱物が生成すること、及びその生成量が原料の比表面積に比例することを述べ、微粉碎化による反応性の向上を確認した。

近年、シリカフェームを用いた高強度コンクリートが内外で注目されているが、今回は、この充填材として用いられているシリカフェームの代替として、充填効果とポズラン反応が期待できる微粉碎シラスを用いた高強度コンクリートの試作を行った。

1. はじめに

近年、硬化後の構造材料としての力学的特性や耐久性、フレッシュ時の施工性等の改善やコンクリート構造物の信頼性を回復するためにコンクリートの高性能化が図られている。これらの内容としては「高強度コンクリート」「水中不分散性コンクリート」「ハイパフォーマンスコンクリート」等が挙げられる。通常の無筋コンクリートや鉄筋コンクリートの圧縮強度の範囲は $150\sim 400\text{kgf/cm}^2$ 程度であり、プレストレストコンクリートの場合には $350\sim 500\text{kgf/cm}^2$ 、近年の超高層RC建物は $400\sim 600\text{kgf/cm}^2$ が用いられている。従って、現段階で高強度コンクリートとは $500\sim 600\text{kgf/cm}^2$ 以上の圧縮強度を有するものと考えることが出来る。

高強度コンクリートとしてはDSP¹⁾ (Densified systems of homogeneously arranged ultrafine particles) 材料が良く知られているが、これは図1に示すように高性能減水剤と超微粒子を組み合わせて緻密化したものである。このDSP材料に用いられているシリカフェームは、セメン

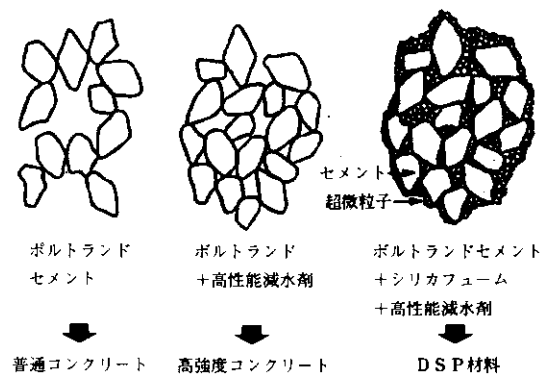


図1 混練時のペースト構造

トの水和に伴って放出された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応して、カルシウムシリケート水和物を生成(ポズラン反応)し、これが水和反応に次いで結合に寄与し高強度を発現する。この超微粒子としては、セメント粒子よりも細かいこと、ポズラン活性²⁾であること即ち、シリカ、アルミナ成分に富み非晶質に近い不安定な鉱物相を含むものが適している。

そこで、当所で研究中の微粉碎シラスが、DSP材料の充填材として適していることに着目し、

微粉碎シリカを用いた高強度コンクリート材料の試作を行い、普通コンクリート及びシリカフェュームを用いたDSP材料と比較検討したので、その結果を報告する。

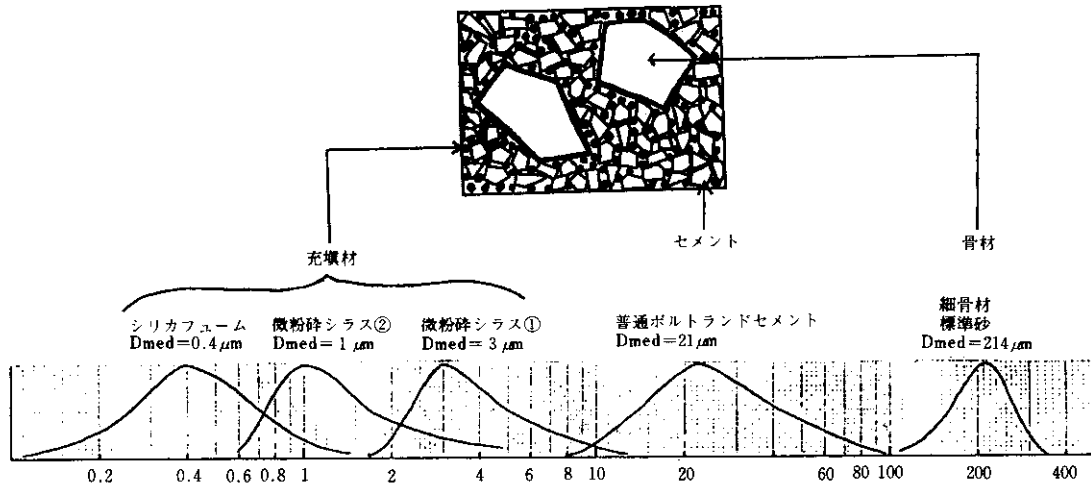


図2 コンクリート原料の粒度分布

表1 使用原料の化学組成 (Wt%) 及び平均粒径

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	平均粒径(μm)	
普通ポルトランドセメント	25.1	5.1	2.27	0.22	63.0	1.69	0.30	0.57	1.42	21.2	
シリカフェューム	94.7	0.9	0.88	0.02	0.29	0.56	0.33	0.77	1.51	< 0.4	
微粉碎シリカ	①	71.8	12.9	1.79	0.33	1.68	0.39	3.65	3.29	4.11	3.0
	②	70.8	13.9	2.56	0.38	1.69	0.47	2.42	3.20	4.70	1.0
標準砂	94.4	2.9	0.39	0.17	0.14	0.08	0.27	1.22	0.44	214	

2. 実験方法

2.1 使用材料

コンクリートの強度向上のためには、空隙率を減らす即ち、構成粒子が粗粒子から微粒子までブロードな粒度分布を持つように原料調整し、コンクリートペーストの充填率を高めることが必要である。

従来は、充填効果をあげるためにシリカフェュームという1 μm以下の超微粒子を用いていたが、これだけでは充填効果が不十分と考えられるので、適正な粒度分布にするために、図2のように微粉碎シリカを組み合わせることでその添加効果を確認した。

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、

充填材として吉田シリカをジェットミルで粉砕した微粉碎シリカ（容器回収分①、バッグフィルター分②）及び市販のシリカフェュームを使用した。

高性能減水剤は竹本油脂(株)製チューボールHP-8 Nを、細骨材は標準砂を使用した。表1に使用材料の化学組成と平均粒径を示す。

2.2 調合

固結材（セメント+充填材）：標準砂を1：1の条件（充填材=シリカ又はシリカフェューム）で、水固結材比0.25~0.37、高性能減水剤固結材比0.5~3.0%、微粉碎シリカ固結材比0~30%の範囲で行った。

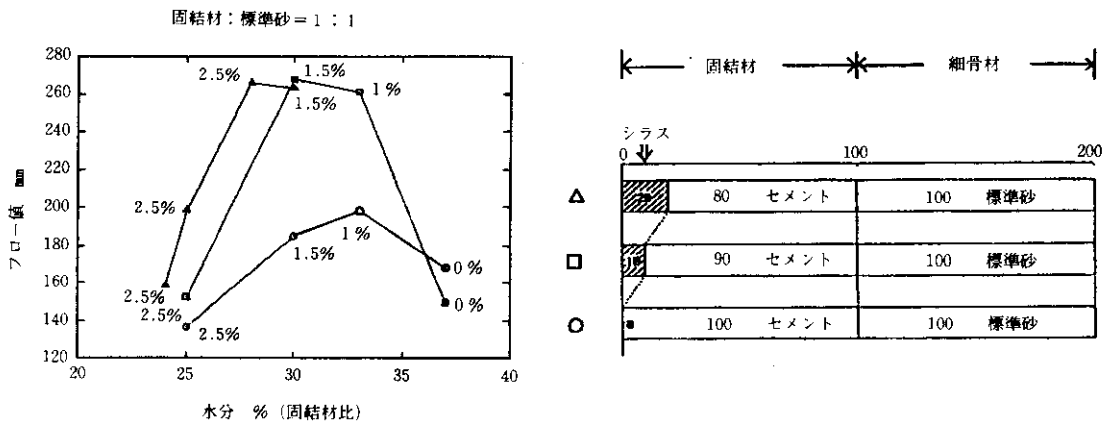


図3 フロー値と水分の関係及び減水剤の添加効果（図中数値＝減水剤固結材比）

2.3 供試体の作成と養生方法

混練りはモルタルミキサーを使用し、供試体は4×4×16cm、打設・締固めはJIS R 5201に準じた。

養生期間は7日（湿気箱中24時間、水中6日間）及び28日（湿気箱中24時間、水中27日間）とした。

2.4 測定

試験は上記JISに準じて、テーブルフロー値の測定、曲げ及び圧縮強度試験を行った。

テーブルフローとは、モルタルの流動性を示す一つの指標で、フローテーブル上でコーンにモルタルを詰め、コーンを取り去った後、テーブルに打撃を15回加えたときのモルタルの広がり（直径mm）であり、値が大きいくほど柔らかいことを示す。

3. 結果および考察

コンクリートの強度向上は、セメント、充填材の配合比と水分量をいかに減らすかがポイントである。特に、セメントよりも粒径が著しく小さいシリカフェームなどを使用すると、その比表面積が大きいことから大量の水分を必要とする。しかし、水分を減らすだけでは強度の向上は望めず、セメント粒子、充填材がブロックを作ることなく均一に分散し、且つ水分で満たされていなければならない。そのために高性能減水剤を用い、コン

クリートペーストの減水効果と流動性の向上を図っている。

予備試験の結果、減水剤を使用せずセメントと標準砂のみの条件では、水分量を37%程度までしか減らせなかったが、図3に示すように減水剤を2.5%使用するだけで水分量を25%まで減らすことができた。

減水剤を使用しない条件（水分37%）では、シリカ置換によりフロー値が減少するが、水分37%以下で減水剤が存在すると、シリカ置換によってフロー値が著しく向上することが判った。シリカ20%置換では、水分25%でもフロー値が200であり、更に水分を減らすことが可能であった。

図3より、セメントのみの場合、最も強度が期待できる水分25%、減水剤2.5%の条件では、フロー値130以上を示しており、各種充填材でも、130以上のフロー値と高強度が望めることから、この条件で次の比較試験を行った。充填材としては、微粉砕シリカ①、②、シリカフェーム、及びシリカ+シリカフェーム（8：2）を混合したもの（以下「混合」と言う）を使用し、固結材：標準砂 = 1 : 1、水分25%、減水剤2.5%（固結材比）の条件でフロー値、曲げ・圧縮強度を比較した。その結果を図4、図5、図6に示す。

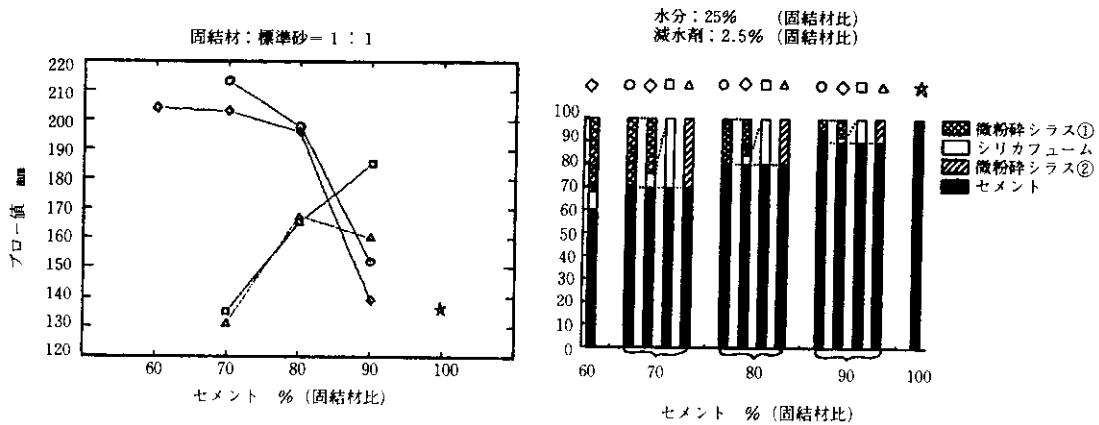


図4 セメントを微粉砕シラス等充填材で置換した場合のフロー値とセメント比の関係

図4で、シラス①及び「混合」で置換したものは、置換量が増えるとフロー値も向上するが、シラス②、シリカフュームで置換したものは、逆に減少する傾向が認められた。

これは、シリカフューム、シラス②の粒子が細かすぎ比表面積が大きいため水分が十分浸透しなかったためと思われる。しかし、シラス①等で置換したものは、その量の増加と共にフロー値も向上している。これはセメント粒子間の空隙にこれらの微粒子が進入して充填し、不必要な水を押し出し、ボールベアリングのごとき作用³⁾をしたために、少ない水分で十分な流動性を発現したものと思われる。よって、フロー値の向上を図るためには、充填材がシラス②(平均粒径1 μ m)以上の大きさではなくてはならず、シラス①程度(平均粒径約3 μ m)でこのような効果が現れることが判った。

図5と図6には、曲げ強度(7日、28日)と圧縮強度(28日)の結果を示した。曲げ強度(28日)で言えば、シラス①10%、20%と「混合」20%、30%で置換したものと及びシラス②の30%置換したものがセメントのみよりも強度がアップし、セメントのみが189kgf/cm²に対して、「混合」30%置換で曲げ強度211kgf/cm²を達成した。圧縮強度は、シ

ラス①、「混合」及びシラス②で置換したものは全てセメントのみを上回り、シラス②で置換したものでも950kgf/cm²以上の値を示した。最高値は、セメントのみの938kgf/cm²に対して、シラス①の30%置換の1,050kgf/cm²であった。

シリカフュームで置換したものは、セメントのみ及びシラス類で置換したものよりも曲げ・圧縮強度は共に下回り、コンクリートペーストの流動性も不良であった。

これは、シリカフュームの比表面積が普通ポルトランドセメントの数十倍で水分を大量に必要とし、高性能減水剤を使用してもコンクリートペーストが粘着質で、分散が困難であり、流し込みの際に気泡を抱き込み易いことから、強度が十分に上がらなかったと思われる⁴⁾。

予備試験の結果として、高強度化のためには、フロー値、曲げ・圧縮強度から、水分を減らすこと、減水剤量を必要最低限にすること、充填材としては、シラス①、「混合」が適していることが判明したので、次に水分を限界まで減らしたときの強度変化を調べた。充填材としては、水分25%で比較的结果の良かった「混合」30%で、水分を24%、23%まで減らして28日強度を測定した。その結果を表2に示す。

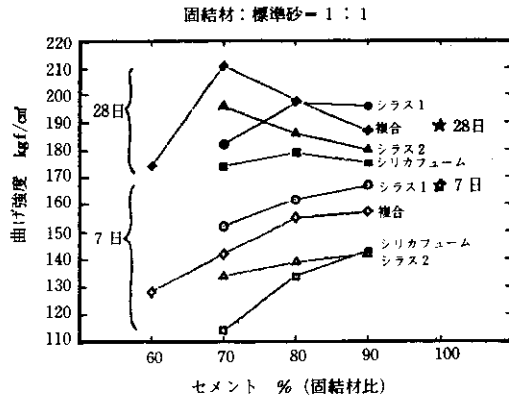
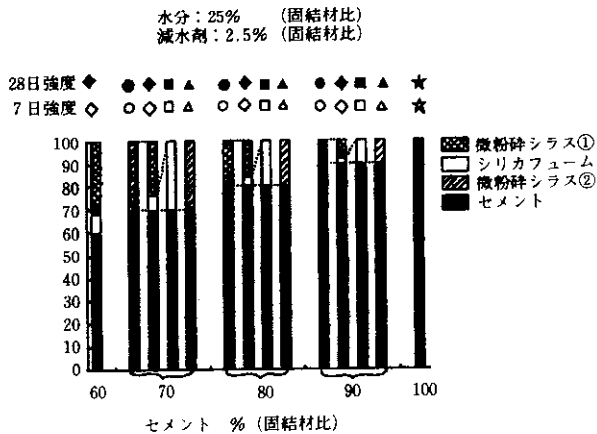


図5 セメントを微粉碎シラス等充填材で置換した場合の曲げ強度とセメント比の関係

フロー値は、セメントのみよりも高かったが、曲げ強度に関しては水分25%のセメントのみに比べて同等以下であった。

しかし、圧縮強度は全てセメントのみの値を上回り水分24%で圧縮強度1,127kgf/cm²を達成した。これは、充填効果が大きく影響したため、曲げ強度は充填効果以外の化学結合性に大きく影響されるためではないかと考えられる。

つまり、セメントのみの場合、充填効果以外の水和反応率が高く、ある程度の強度を発揮するが、シラスなどで置換するとセメント量が減り、この水和反応率が落ちる。この減少分を補うだけのポゾラン反応が起こらなかったために、曲げ強度の向上に限界を生じたものと考えられる。

このポゾラン反応性を確認するために、次の簡単な条件で、シラス①、シリカフェームをそれぞれ20%置換した場合についてオートクレーブ養生を行った。固結材：標準砂=1：1、水固結材比65%で、固結材としては、セメントのみ及びシラス①20%、シリカフェーム20%で置換したものについて、曲げ・圧縮強度を比較した。ここでは、水分が多く流動性が高かったので減水剤は使用し

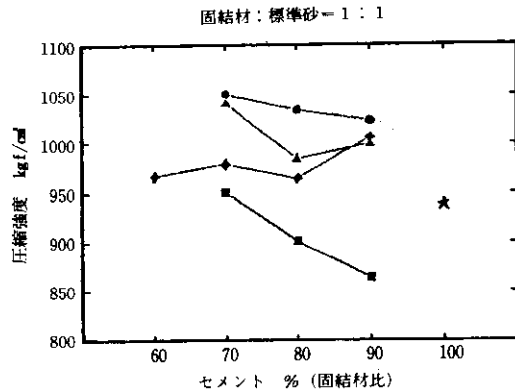


図6 セメントを微粉碎シラス等充填材で置換した場合の圧縮強度 (28日) とセメント比の関係

表2 「混合」30%のフロー値、曲げ・圧縮強度

	水分	減水剤 (%)	フロー値	曲げ強度 (28日) kgf/cm ²	圧縮強度 (28日) kgf/cm ²
セメントのみ	2.5	2.5	136	189	938
「混合」30%	2.5	2.0	186	170	1047
	2.4	2.0	184	187	1127
	2.3	3.0	175	183	1088

なかった。オートクレーブ養生は、40℃/時間で昇温後、180℃、10atmで5時間保持した。その結果を表3に示す。

表3より、シラス①、シリカフェームで置換したものは、セメントのみよりも曲げ・圧縮とも強度が向上しており、シラス①よりシリカフェームの方が高強度を示し、これまでの常温水中養生の結果と異なる傾向を示した。これはセメントのみでは起こらないポズラン反応性に起因し、シリカフェームが、よりポズラン活性であることを示していると思われる。しかし、このシリカフェームは施工性等に問題があり、単独での使用には制限がある。

微粉碎シラスについては、シリカフェーム程ではないがポズラン活性が期待できること、及び施工性の著しい向上と常温水中養生でも高い圧縮強度を発現することより、シリカフェームとの複合も含めた配合や養生方法、減水剤等の検討により高強度化が図れる。

今後の取り組みとしては、ポルトランドセメントの粒径、充填材の種類・粒径を考慮し、更に充填効果の高い粒径制御を行い、配合比を決定する。

また、他の減水剤や結合剤などと呼ばれる水和反応・ポズラン反応の促進剤等を検討し、これら充填材が最も効果的に作用する条件を探索する。

以上述べてきたように、微粉碎シラスを充填材として用いる最大のメリットは、圧縮強度の向上と、著しいワーカビリティの向上であり、シリカフェーム程ではないが、ポズラン反応性も期待できることより、今後これらの利点を活かして高強度コンクリートの多様な展開を図る。

4. おわりに

微粉碎シラス、シリカフェームを用いた高強度コンクリートの試作実験の結果を以下に述べる。

表3 オートクレーブ養生による強度発現

	水固結材比 (%)	曲げ強度 Kgf/cm ²	圧縮強度 Kgf/cm ²
セメントのみ	65	28.7	167
シラス①20%	65	30.7	285
シリカフェーム20%	65	36.9	346

(1) DSP材料における充填材として、微粉碎シラス等でセメントの一部を内割で置換すると、セメントのみの場合より強度が向上することが判明し、その充填効果を確認した。

(2) 高性能減水剤の存在下で、充填剤として平均粒径3 μ m程度の微粉碎シラスでセメントの一部を置換すると、流動性に優れたコンクリートペーストが得られ、その強度もセメントの減少分を十分に補い、高い圧縮強度を持つものが得られた。

(3) セメントのみではそのフロー値から、水分25%が限界で、圧縮強度938kgf/cm²が最高であったが、シラス+シリカフェーム(8:2)で30%置換すると著しくフロー値が上昇し、23%まで水分を減らすことが可能であり、水分24%で最高圧縮強度1,127kgf/cm²を達成した。

本研究を行うに当たり、九州工業技術試験所の神尾 典主任研究官、野間弘昭研究官には懇切なる御指導を賜り深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 養 廉ほか：セラミックデータブック，71，439～450 (1989)
- 2) 日本セラミック協会編：セラミック工学ハンドブック，p966 (1989)
- 3) 米倉亜州夫：粉体工学会誌，26，7，512～519 (1989)
- 4) 長滝ほか：コンクリート工学，23，5，5～15 (1985)