

論文 しらすを使用した高流動コンクリートに関する実験的研究

奥地 栄祐^{*1}・緒方 直^{*2}・山口 明伸^{*3}・武若 耕司^{*4}

要旨: しらすは発泡状の火山性堆積物で、多くの微粒分を含むものである。このシラスは、南九州に広く多量に存在するものの、一部使用されている他は未だ十分な活用がされていない状況にある。一方、現在研究・開発がされている高流動コンクリートは、微粒分の多い粉体で粘性を付与する粉体系が主流となっている。そこで本研究では、しらすを高流動コンクリート用材料の粉体の一部として活用することを考え、その適用性を実験的に検討した。その結果しらす中に多く含まれる 74μm 以下の微粒分を粉体の一部として取り扱うことにより、十分な自己充てん性を有する、高流動コンクリートを製造することが可能であることが明らかとなった。

キーワード: 高流動コンクリート、しらす、モルタル、拘束水比、変形係数

1. はじめに

しらすは発泡状の火山性堆積物で、その中に多くの微粒分を含む。このしらすは、南九州に多量に存在するものの、一部研磨剤やしらすバルーンなどに使用されている他は未だ十分に活用されていない状況にある。一方、高流動コンクリートは、主に施工欠陥の解消と高品質化を目的に、現在研究・開発が行なわれているもので、粉体を活用した粉体系、増粘剤を使用した増粘系、粉体で粘性を与え、増粘剤でばらつきを抑える併用系がある。

本研究では、しらすを細骨材として使用することにより、その中に多量に含まれる 75μm 以下の微粒分を粉体の一部として活用した高流動コンクリートの開発を試みた。

2. 使用材料

今回の実験で使用した材料の主な特性を表-1 に示す。しらすとしては、75μm 以下の微粒分を約 17.5% 含む “しらす 17.5” と、約 40% 含む “しらす 40” の 2 種類を使用した。ただし、コンクリー

表-1 使用材料

材料	仕様
結合材	普通ポルトランドセメント(密度 3.16kg/cm ³ 、ブレーン値 3300cm ² /g)
細骨材	垂水産しらす 17.5 最大寸法 3mm、密度 2.13g/cm ³ 、吸水率 8.27% 75μm 以下 17.5%
	垂水産しらす 40 最大寸法 3mm、密度 2.11g/cm ³ 、吸水率 11.02% 75μm 以下 40%
	姶良産 3~5mm 砕砂(密度 2.54g/cm ³)
粗骨材	姶良産碎石(密度 2.54g/cm ³)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

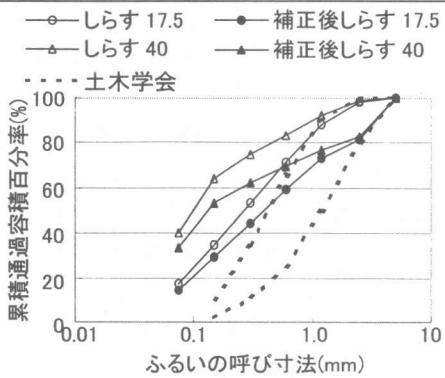


図-1 しらすの粒度分布

トに適用する場合には、これらのみでは 3~5mm の粒径が不足し、粒度の連続性が悪くなる。そこでより良い流動性を得るために、細骨材としてはしらすと 3~5mm 砕砂を容積比 4:1 で混合したものを使用した。図-1 にしらすの粒度分布を示す。以下、“しらす”と書いた時にはしらす全体を示

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻(正会員)

*2 鹿児島大学工学部海洋土木工学科(非会員)

*3 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 工博(正会員)

*4 アジア工科大学院 工博(正会員)

し、“しらす（粗）”は75μm以上ものを、“しらす（粉体）”とした時にはしらす中に含まれる75μm以下の粒子を示すこととする。なお、しらすは、川砂に比べて通常の状態での表面水率が高いため、表面水率の変動幅も大きく、これによってフレッシュコンクリートの性状が変動する可能性が高い。よって、今回の実験ではしらすの表面水率がおよそ $2.5 \pm 0.5\%$ となるようにあらかじめ調整したものを使用した。

3. 実験概要

3.1 しらすモルタル

モルタルの流動性に関する検討は、しらすのモルタル中の容積比率（以下しらす容積比）を0.1～0.5の場合に水とセメントの容積比率（以下水セメント容積比）を変動させた。

練混ぜは、セメント、細骨材と一次水とを低速で60秒練り混ぜた後、高速で60秒練り混ぜ、ついで、二次水と混和剤を投入して低速で120秒練り混ぜる、という手順で行なった¹⁾。フロー試験は、JIS R5201（セメントの物理試験方法）に定める方法を準用した。落下運動は与えず、フローコーンを取り去った後、ペーストの変形が終了した時点での二方向の直径を測定し、フロー値(Fp)とした。これより、相対フローア面積比 $\Gamma = (Fp/100)^{2-1}$ を算出した。なお、モルタルについては、“しらす17.5”のみを使用した。

3.2 フレッシュコンクリート

しらすモルタルの試験結果に基づき、適当と想定される配合を基に、単位粗骨材絶対容積、高性能A-E減水剤添加量を変動させ、フレッシュコンクリートの検討を行なった。また、しらすの粒度分布の違いの影響を見るため、“しらす40”においても同様の検討を行なった。

練混ぜは、セメント、しらすと3～5mm碎石を30秒練り混ぜた後、一次水を投入して90秒練り混ぜ、さらに粗骨材と二次水および混和剤を投入して150秒練り混ぜる、という手順で行なった。

練混ぜ終了後、スランプフロー試験、U形容器を使用した間隙通過性試験、および空気量試験を

表-2 試験と目標値

試験	目標値
スランプフロー	600～700mm
スランプフロー試験500mm到達時間	3～15秒
U形容器を使用した間隙通過性試験	300mm以上

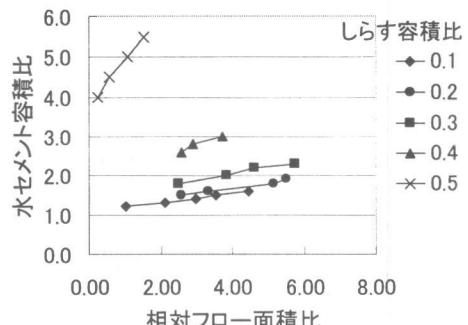


図-2 各しらす容積比での水セメント比と相対フローア面積比の関係

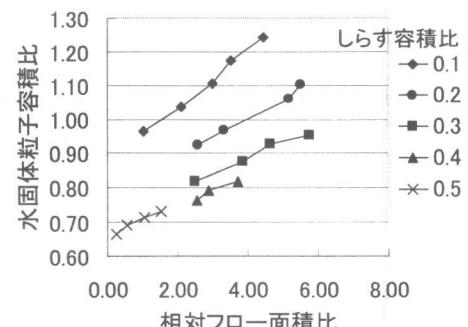


図-3 各しらす容積比での相対フローア面積比と水固体粒子容積比の関係

高流動コンクリート施工指針に準拠し行なった²⁾。なお、上記の試験を実施するにあたって、いずれの場合も容器に詰め込む際の突固めは一切行わなかった。試験の目標値は、一般的なコンクリート構造物を想定したものである高流動コンクリート施工指針のランク2を設定した。ランク2の要因と水準を表-2に示す。また、各配合において、供試体を作製し、各種強度試験を行なった。

4 試験結果と考察

4.1 しらすモルタルの性状

図-2に混和剤を添加していない場合の各しらす容積比における水セメント容積比と相対フローア面積比の関係を示す。各しらす容積比が増加するに従い、相対フローア面積比に与える水セメント容

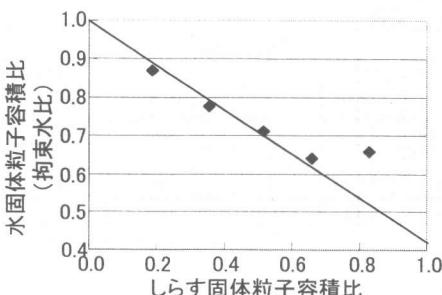


図-4 しらす固体粒子容積比と拘束水比の関係

積比の影響が小さくなっている。しかしながら、この場合単位水量の影響も含んでいるため、しらす容積比のみ違いを比較するには適切ではない。そこで、図-3 に示すように図-2 の縦軸を水固体粒子容積比に換算し直した。この図において、各しらす容積比における近似直線の相対フローフラクチャーパーク比が 0 となる時の水固体粒子容積比をしらすモルタルの拘束水比とし、その傾きをしらすモルタルの変形係数と考えることができる。この拘束水比は、モルタルの固体粒子の粒形や表面積などの材料特性により決まる値であり、変形係数は、水の増減が流動性に及ぼす影響の大きさを示すものとされている³⁾。

図-4 に拘束水比としらす固体粒子容積比（モルタル中のしらす容積をモルタル中のセメント容積としらす容積の和で除した値）との関係を示す。しらすモルタルの拘束水比は、しらす固体粒子容積比が 0.65 までは細骨材容積比が大きくなるに従い、線形的に小さくなり、しらす固体粒子容積比が 0.65 を超えると、拘束水比の変化が無くなっていた。これは、しらすのかみ合わせの影響で摩擦抵抗が顕著になったためと考えられる。この拘束水比が極小となる点でのしらす容積比は、高流動コンクリートの自己充てん性について重要な意味を持つと言える。

枝松らは、図-4 における直線をしらす固体粒子容積比 1.0 まで外挿した場合の拘束水比が材料特性を表すとし、この値を絶対拘束水比と定義している³⁾。図からしらすの絶対拘束水比を求める 0.478 となり、通常の川砂（0.15 程度⁴⁾）に比

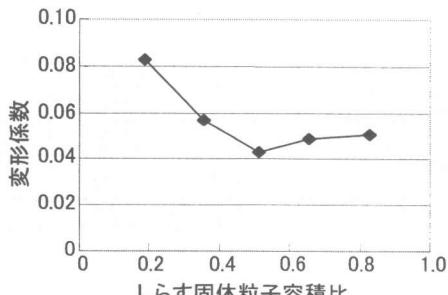


図-5 変形係数としらす固体粒子容積比の関係

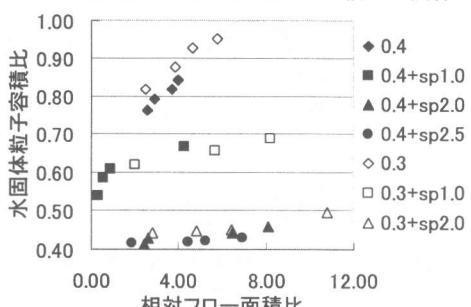


図-6 高性能AE減水剤を添加した場合のしらす容積比 0.3 と 0.4 の比較

べ非常に大きな値になっている。これは、しらすがその中に 75 μm 以下の粒子を多く含んでいるためであると考えられる。ただし、75 μm 以下を取り除いた“しらす（粗）”の絶対拘束水比を算出すると 0.3767 となり、依然として川砂の絶対拘束水比より 2 倍以上大きかった。これはしらすの粒形が荒く、角張っていること、川砂と比較して F.M が 1.55 と小さいために表面積が大きくなっていることが原因と考えられる。

図-5 にしらす固体粒子容積比としらすモルタルの変形係数の関係を示す。いずれのしらす固体粒子容積比場合においてもセメントペーストの変形係数 0.11 より小さくなっています。セメントをしらすで置換することにより、配合の変化が流動性に与える影響が大きくなることがわかる。また、変形係数は、しらす固体粒子容積比 0.18～0.51 の範囲で線形的に小さくなっています。しらす固体粒子容積比 0.51 以上になるとほぼ一定となっている。この場合も、しらすのかみ合わせによる摩擦抵抗の影響が顕著になったことが原因と考えられる。ただし、拘束水比の場合よりも小さいしら

表-3 しらすコンクリートの配合

シラスの種類	水粉体比%	水結合材比%	単位粗骨材 絶対容積	単位粉体量 m^3/m^3	単位量(kg/m ³)				
					水W	セメントC	シラス	3~5mm碎石	粗骨材G
シラス17.5	30.0	35.0	0.350	0.20	180	514	490	146	893
	29.9	35.0	0.340	0.20	180	514	507	151	867
	29.7	35	0.330	0.21	180	514	524	156	842
シラス40	18.3	40.0	0.340	0.24	180	450	536	161	877

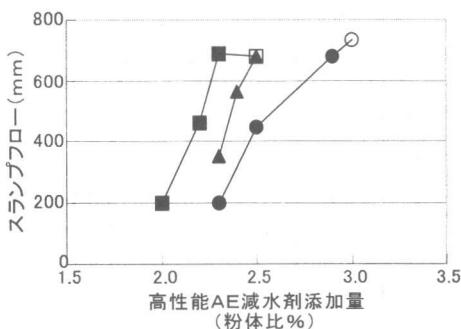


図-7 各単位粗骨材絶対容積におけるスランプフローと高性能AE減水剤の関係

す固体粒子容積比で極小値が観察されており、変形係数の方が摩擦抵抗の増加に敏感であると考えられる。この変形係数が極小値となるしらす容積比も、高流動コンクリートの自己充てん性に重要な意味を持つ。

次にしらす容積比 0.3 と 0.4 の場合において、高性能AE減水剤を添加した場合の相対フローフラッシュ時間と水固体粒子容積比の関係を図-6 に示す。凡例の sp-- とは高性能AE減水剤の添加量を粉体比 (%) で示したものである。しらす容積比を 0.3 と 0.4 としたのは、それぞれが変形係数と拘束水比が極小の値となった容積比であり、良好な流動性を期待できるためである。実際、しらす容積比がこの値より小さい場合には、材料分離を生じやすく、しらす容積比が 0.5 の場合には良好な相対フローフラッシュ時間が得られなかった。

水固体粒子容積比と相対フローフラッシュ時間において、高性能AE減水剤添加量を増加させていくにつれ、流動性が改善されている。ただし、しらす容積比 0.4 の場合、粉体比 2.0%以上では、それ以上の改善は無かった。したがって、2.0~2.5% の間に最適値があるのではないかと考える。

以上のことより、高流動コンクリート用モルタル

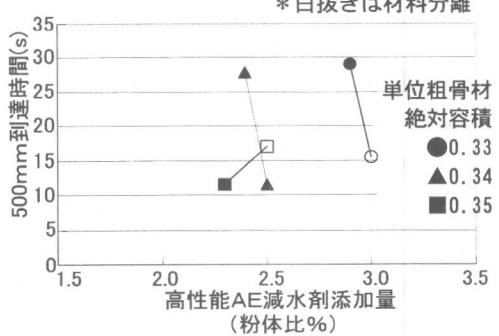


図-8 500mmフロー到達時間と高性能AE減水剤の関係

ルとしてはしらす容積比が 0.3~0.4 程度、高性能AE減水剤が粉体比 2.0%~2.5% が適当であると考えた。

4.2 フレッシュコンクリート性状

表-3 にしらすモルタル試験結果に基づいて、決定した高流動コンクリートの配合を示す。粗骨材量の影響を見るために、単位粗骨材絶対容積を 0.33~0.35 の範囲で行なった。

図-7 に各単位粗骨材絶対容積におけるスランプフローと高性能AE減水剤添加量の関係を示す。どの単位粗骨材絶対容積においても目標とした値を達成している。また、しらすモルタルの試験結果から推定した高性能AE減水剤添加量の範囲 (粉体比 2.0~2.5%) で、スランプフローが大きく変化している。モルタルでは、この添加量の範囲では流動性の変化があまり認められなかったにもかかわらず、コンクリートにおいて大きな変化があったのは、モルタルの場合よりコンクリートの場合の方が水固体粒子容積比が小さい (0.22 程度) ため、十分な流動性を得るために必要な高性能AE減水剤添加量が多くなったと考えられる。なお、粒度分布の異なる “しらす 40” を用いた場合においても同一流動性を得るための高

性能AE減水剤添加量（粉体比）に大きな違いは認められなかった。

図-8に500mmフロー到達時間と高性能AE減水剤添加量との関係を示す。どの単位粗骨材絶対容積においても、適用量の高性能AE減水剤の添加によって、目標値を達成することは可能であった。ただし、単位粗骨材絶対容積0.33で目標値を達成した配合では材料分離が生じていた。なお、しらすを細骨材として使用した場合には、500mmフロー到達時間が長いにもかかわらず、スランプフローの際に粗骨材が中央部に残り、モルタルだけが先走りをしてしまう材料分離を生じることがあった。これは、しらすの密度(2.11g/cm³)が小さいことや粗骨材量が多いことが原因と考えられる。

図-9に自己充てん高さと高性能AE減水剤添加量の関係を示す。自己充てん高さと高性能AE減水剤添加量は材料分離を起こさない範囲では直線関係にある。また、単位粗骨材絶対容積0.34と0.35においては目標値を達成する高性能AE減水剤添加量が存在した。しかし、単位粗骨材絶対容積が0.33の場合、スランプフローが目標値を達成していても粘性が大きいため自己充てん高さが得られなかった。今回実験した範囲では、しらすを細骨材として使用した場合、十分な自己充てん性を得るために、単位粗骨材絶対容積を高流動コンクリート施工指針で定める値(0.30～0.33)よりも大きくする必要があった。これは、単位粗骨材絶対容積を大きくすると自己充てん性が低下するという一般論と矛盾している。本実験では単位水量、単位セメント量一定の条件で比較しているため、単位粗骨材絶対容積を0.35や0.34に増加させた場合、それに伴い細骨材としてのしらすの容積が減少しており、しらすのかみ合わせによる摩擦抵抗の減少による自己充てん性の改善がより顕著だったためと考えられる。

図-10には、“しらす17.5”と“しらす40”的2種類のしらすについて、単位粗骨材絶対容積の等しい場合(0.34)の自己充てん高さと高性能AE減水剤の関係を比較して示す。今回使用した粒

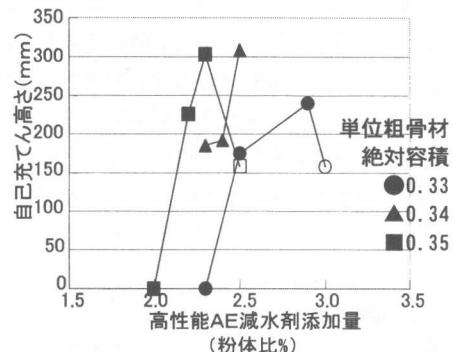


図-9 自己充てん高さと高性能AE減水剤の関係

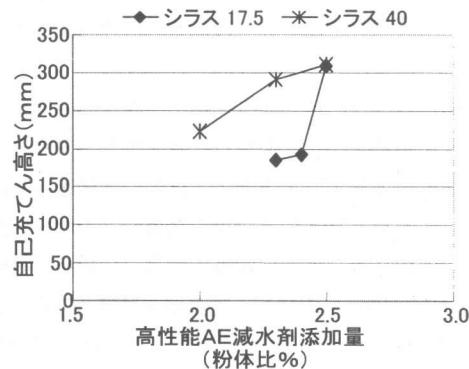


図-10 粒度分布の異なるしらすにおいての自己充てん高さと高性能AE減水剤の関係

表-4 強度試験を行なった配合と試験結果

単位量(kg/m ³)					
水	セメント	しらす 17.5	3～5mm 碎石	粗骨材	高性能AE 減水剤
180	514	507	151	867	15.06
スランプフロー (mm)		500mm フロー 到達時間(s)		自己充てん 高さ(mm)	
680		11.55		310	

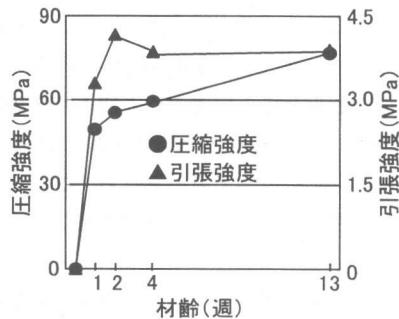


図-11 材齢と強度の関係(しらす 17.5)

度の違う 2 種類のしらすの場合、各配合における自己充てん高さが最も高くなる時の高性能AE減水剤添加量は、いずれのしらすの場合も粉体比で 2.5%程度であった。また今回の実験の範囲では粒度の違うしらすを使用した場合でも 75 μm 以下の微粒分を粉体と考え、水粉体比を 28%程度に調整することで十分な自己充てん性を得ることができた。

4.3 硬化コンクリートの性状

表-4 に強度試験を行なった配合とそのフレッシュコンクリート試験の結果を示す。これは、前述までの試験結果で最も自己充てん性の良かった配合である。

図-11 に表-4 の配合 ($\text{W}/\text{C}=35\%$) におけるしらすを細骨材として使用した高流動コンクリートの圧縮強度および引張強度と材齢の関係を示す。しらすを細骨材として使用した場合でも圧縮強度は時間の経過とともに順調に発現している。材齢 28 日で $60\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧縮強度が発現しており、通常の粗骨材、細骨材を使用した $\text{W}/\text{C}35\%$ のコンクリートに比べても強度に遜色はなかった⁵⁾。

引張強度は、材齢 28 日で圧縮強度の 1/15 程度と一般のコンクリートとほぼ同程度と考えられる。曲げ強度についても材齢 28 日において $7.1\text{N}/\text{mm}^2$ であり、圧縮強度の 1/9 程度と、引張強度と同様に一般のコンクリートと同じ程度であった。

5. まとめ

- 1) しらすの絶対拘束水比は川砂に比べて非常に大きな値 (0.478) である。これはしらすはその中に多くの微粒分を含むこととしらすの粒形が荒く、角張っていることが原因と考えられる。
- 2) しらすモルタルの拘束水比と変形係数の極小値となるしらす容積比 (今回の実験では 0.4 と 0.3) を特定することで高流動しらすコンクリートの配合を推定することが可能であると考えられる。
- 3) しらすを細骨材として使用した場合には高い粘性を保持したまま材料分離を生じることがある。
- 4) 単位粗骨材絶対容積は高流動コンクリート施

工指針の定める値より大きくなるが、しらすを細骨材として使用した高流動コンクリートを作製することができた。

5) しらすを細骨材として使用した場合、十分な自己充てん性を得るためにには、単位粗骨材絶対容積を高流動コンクリート施工指針で定める値 (0.30~0.33) よりも大きな値 (0.34 または 0.35) にする必要があった。これは、単位粗骨材絶対容積の増加の影響よりそれに伴うしらす容積の減少の影響の方が、顕著だったためと考えられる。

6) 今回の実験の範囲では粒度の違うしらすを使用した場合でも 74 μm 以下の微粒分を粉体と考え、水粉体比を 28%程度に調整することで十分な自己充てん性を得ることができた。

7) 自己充てん高さが 300mm 以上である時には $\text{W}/\text{C}=35\%$ で $60\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の強度が得られており、同じ水セメント比の普通コンクリートと比べても何等遜色のないことがわかった。

以上のことでしらすを高流動コンクリート用材料として適用することが可能であることが明らかとなった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、鹿児島大学工学部松本進教授から、終始有益な助言を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅 : ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp. 35-47, pp. 172-176, 1993.
- 2) 土木学会編 : 高流動コンクリート施工指針, 社団法人大土木学会, pp. 39-68, 1998.
- 3) 枝松良展, 山口昇三, 岡村甫 : モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化, 土木学会論文集, No. 538/V-31, pp. 31-46, 1996. 5
- 4) 枝松良展, 山口昇三, 岡村甫 : モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界, 土木学会論文集, No. 571/V-36, pp. 131-147, 1997. 8
- 5) 西村昭, 藤井学, 渡俊 : 最新土木材料第 2 版, 森北出版株式会社, pp. 111-125, 1994