

論文 しらすを使用した高流動コンクリートの配合設計に関する研究

奥地 栄祐*1・武若 耕司*2・山口 明伸*3・竹内 一真*4

要旨：火砕流堆積物であるしらすは、未利用資源として南九州に多量に存在している。著者ら、しらすを有効利用するための一方策としてコンクリート用細骨材としての研究開発を進めており、これまでに普通コンクリートおよび高流動コンクリートへの適用が可能であることが確認している。しかしながら、しらすの材料特性は産地や採取時期によって変動するため、特に高流動コンクリートに適用するに際しては、その特性の把握を含む配合設計法を確立する必要がある。モルタル試験による高流動しらすコンクリートの配合決定手法の検討を行ない、その妥当性を確認した。

キーワード：しらす、高流動コンクリート、配合設計、モルタルの流動特性

1. はじめに

川砂、陸砂の枯渇化に伴い、特に九州ではコンクリート構造物に用いる骨材は海砂の使用が一般的になっている。しかし、海洋環境保護の観点から海砂の確保も年々困難になりつつあり、海砂の盗掘が起こるなど、骨材不足の問題が深刻化してきている。著者らは骨材不足の解消と南九州に広く多量に存在し、未だ十分な活用がなされていないしらすの有効利用を目的としてコンクリート材料としてのしらすの細骨材および混和材としての適用性の検討を進めている。

一方、締固め不要のコンセプトで開発された高流動コンクリートは、高い流動性と十分な材料分離抵抗性を両立させることで自己充てん性を実現したコンクリートである。この十分な材料分離抵抗性を実現するためにはフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの粉体鉱物や増粘剤を添加することが必要となる。ところが、しらすを細骨材として使用した場合には、しらすの有する多量の微粒分を利用することにより、これらの粉体や増粘剤を使用することなく高流動コンクリートを製造できると考えられ、すでに

数通りの配合で実現している。

しかし、しらすは川砂や陸砂といった従来の細骨材とは材料特性が大きく異なると同時に、産地や採取時期によるばらつきが大きいいため、これまでに提案されている配合や配合設計法をそのまま適用することが難しい。したがって、特に高流動しらすコンクリートの配合を決定するためには多くの試験練りを必要とする。今後、しらすの利用性を拡大するためには、手間の少ない簡便な配合設計法を確立することが必須の条件となる。

そこで、本研究では、モルタル試験による高流動しらすコンクリートの配合設計法の確立を目的として、実験的検討を行なった。

2. 実験概要

モルタルの評価試験として、流動性の評価はフロー試験によって行なった。各配合の0打フロー値から、相対フロー面積比 Γ_m (式(1))を算出し、流動性の指標とした。

$$\Gamma_m = (\text{フロー値 (s)} / 100)^2 - 1 \quad \text{式 (1)}$$

*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 アジア工科大学 助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 助手 博士 (工学) (正会員)

*4 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (非会員)

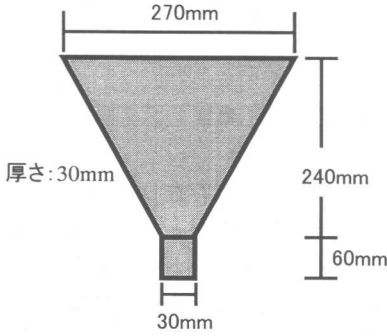


図-1 Vロート試験器概要

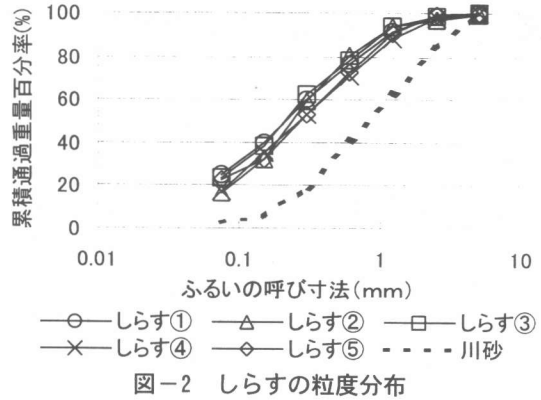


図-2 しらすの粒度分布

表-1 しらすの物理特性

	しらす①	しらす②	しらす③	しらす④	しらす⑤	川砂
表乾密度(g/cm ³)	1.85	2.25	1.85	2.13	2.22	2.64
絶乾密度(g/cm ³)	1.72	2.15	1.74	1.97	2.09	2.57
吸水率(%)	7.53	4.44	6.52	8.27	6.44	2.59
微粉含有量(%)	25	17	23	18	23	2.3
F.M	1.35	1.38	1.29	1.55	1.54	2.88
単位容積質量(kg/l)	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.8
実積率(%)	62	46	58	56	52	68

粘性の評価はVロート試験によって行なった。Vロート試験器の概要を図-1に示す。Vロート流下時間(s)から、相対ロート速度比 R_m (式(2))を算出し、粘性の指標とした。

$$R_m = 10 / \text{Vロート流下時間 (s)} \quad \text{式 (2)}$$

ここで、小澤らによって、これら相対フロー面積比 Γ_m と相対ロート速度比 R_m が同一であるモルタルであってもモルタル中の細骨材の容積比が異なるとコンクリートの性状が異なることが報告されている。このモルタルの流動性、粘性から独立した細骨材容積比の影響(粗骨材・モルタル粒子間相互作用)を評価するために大内らによって提案されている、模擬粗骨材を用いたVロート試験によって行なった。

コンクリートの試験として間隙通過性試験およびスランプフロー試験を行なった。

今回使用した材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3 , $3280\text{cm}^2/\text{g}$)、粗骨材は始良産砕石(表乾密度 2.55g/cm^3 , 最大寸法 20mm)、および始良産 $3\sim 5\text{mm}$ 砕砂(表乾密度 2.54g/cm^3)、混和剤はポリカルボン酸系

高性能AE減水剤である。

以下の試験においてしらすは、すべて表面水率が $2.5 \pm 0.5\%$ に調整して使用した。

3. しらすの材料特性

3.1 しらすの物理的特性

今回の実験で使用したしらすは、産地および採取時期の異なる5種類のしらす①~⑤(最大粒形 3mm)を使用した。その主な物理的特性を表-1、粒度分布を図-2に示す。なお、比較用として富士川産川砂も併せて示した。

火砕流体積物であるしらすは内部に多くの空隙を含み、荒い粒形を有する。産地や採取時期によるばらつきはあるものの、川砂と比較して、密度が8割程度、吸水率が2倍~3倍となっている。実積率は10%程度小さくなっている。従って、しらすは密度、単位容積質量などから、構造用軽量細骨材(JIS A5002)に分類される。ただし、しらすは、その中に含まれる微粒分(粒形が $75\mu\text{m}$ 以下の粒子)が構造用軽量細骨材に規定されている値を大幅に超えているお

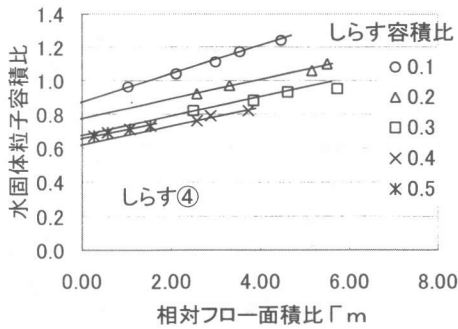


図-3 しらす④における各しらす容積比のフロー試験結果

り、高性能 AE 減水剤のように粉体量にその効果が影響される混和剤を使用する場合には注意を要する。

3.2 しらすモルタルの流動特性

各しらすを使用したモルタルの流動特性を調べるため、混和剤を添加しないしらすモルタルにおいて、しらす容積比を 0.1~0.5 の範囲で水セメント比を変動させて、モルタルフロー試験を行なった。ここでしらす容積比とは、モルタル中におけるしらすの容積割合のことである。

しらす④におけるフロー試験結果を図-3 に示す。縦軸は水固体粒子容積比、横軸は相対フロー面積比 Γ_m である。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面積比 Γ_m が 0 となる時の水固体粒子容積比を各しらす容積比におけるしらすモルタルの拘束水比とした。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って決まる値であり、そのしらす容積比における流動特性を示すものと考えられる²⁾。

以上の方法により、算出したしらす①~⑤、川砂それぞれのモルタルの各しらす容積比ごとのモルタルの拘束水比を図-4 に示す。横軸はしらす容積比、縦軸が拘束水比である。なお、川砂については、モルタル中の川砂の容積比で示してある。

まず、すべてのしらすにおいて、ある程度しらす容積比が大きくなると拘束水比が直線的な減少傾向から、はずれていることがわかる。こ

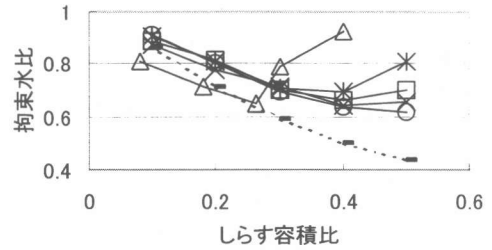


図-4 しらす①~⑤におけるしらす容積比と拘束水比の関係

れは、しらす容積比が増加すると、しらす粒子間のかみ合わせの影響が大きくなるためにモルタルの拘束水比が直線的な減少傾向から、はずれるものと考えられる。

しらす②については、かみ合わせの影響が顕著になるしらす容積比が、他のしらすに比べて小さい。これは、しらす②の実積率が最も小さいことから、他のしらすに比べて、粒形が荒いことが推測され、そのために小さなしらす容積比においてかみ合わせの影響が顕著になったものと考えられる。従って、しらす②を使用したモルタルで高い流動性を得るためには、しらす容積比をかなり小さくする必要があるため、しらす②は高流動コンクリート用細骨材として適用することは難しいと考えられる。

しらす①、③~⑤については、ほぼ同様の傾向が認められ、いずれのしらす容積比においても川砂の拘束水比より大きな拘束水比となっている。これらの結果は、しらす①、③~⑤の流動特性が川砂と比較して悪く、しらすモルタルが川砂と同程度流動性を得るためには、より多くの水が必要となることを示している。これは、しらすがその中に多くの微粒分を含むこと、その粒形が荒いことなどが原因と考えられる。

ここで、しらす①、③~⑤については、流動特性に関してはあまり差異はないが、しらす①、③、⑤については微粒分が 23% 以上と大きく、粒度調整の必要がある可能性がある。

従って、今回使用したしらすの中で、しらす

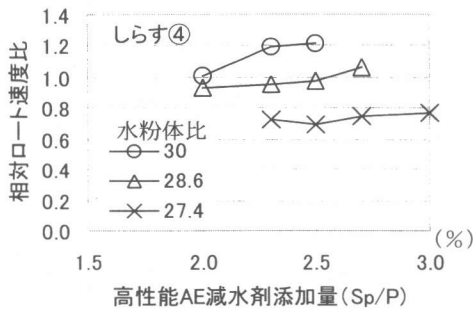


図-5 しらす④モルタルの水粉体比、高性能AE減水剤量が相対フロー速度比に与える影響

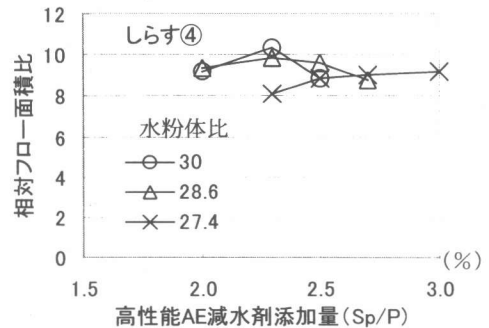


図-6 しらす④モルタルの水粉体比、高性能AE減水剤量が相対フロー面積比に与える影響

④が最も高流動コンクリートに適用性があると考えられる。

4. 高流動しらすコンクリートの配合検討

4.1 しらす容積比の決定

高流動コンクリートには高い流動性が必要であることから、モルタルの流動性が最も良好な時のしらす容積比の決定することが望ましいと考えられる。

そこで、図-4 よりしらす④モルタルにおいて最も拘束水比が小さくなったしらす容積比、すなわち流動性が最も良好な時のしらす容積比は0.4となっている。従って、高流動コンクリート用モルタルのしらす容積比は0.4となる。

4.2 水粉体比、高性能AE減水剤量の設定

4.1において設定したしらす容積比0.4における水粉体比と高性能AE減水剤量について検討を行なった。

図-5にしらす④モルタルのVロート試験結果を示す。なお、これらの図の横軸は、高性能AE減水剤添加量を粉体比(Sp/P)によって示してある。ここで粉体とは、セメントと75 μ m以下のしらす微粒分である。

このグラフより、Vロート試験においては、水粉体比および高性能AE減水剤量の影響が表れていることが確認できる。

また、これらのしらす④モルタルのフロー試験結果を図-6に示す。この図では、水粉体比および、高性能AE減水剤添加量の影響が認め

られない。これは、しらす④モルタルの流動性が、フロー試験の測定範囲を超えていることが原因と考えられる。以上のことから、しらすモルタルにおいて、適切な水粉体比、高性能AE減水剤量は、Vロート試験結果から判断することが適当と考えられる。

ここで、高流動コンクリートとしての流動性、粘性を確保するためのモルタルの性状は(Γ_m , R_m) = (5, 1)と報告されているが、これをしらすモルタルにおいて実現しようとする、コンクリートの耐久性に悪影響を及ぼすと考えられる程度まで単位水量を増加させなければならなくなる。これは、しらすモルタルの拘束水比が大きいたことが原因と考えられる。したがって、しらすモルタルにおいては、水量をある程度抑えた状況でしらすモルタルの相対フロー速度比 R_m を1程度にするためにはフロー試験の測定可能な値を超えるほど高い流動性が必要となる。

以上のことから、しらす④モルタルの相対フロー速度比 R_m が1以上となった水粉体比30%かつ高性能AE減水剤量2.3~2.5%の場合、および水粉体比28.6%かつ高性能AE減水剤量を2.5~2.7%を高流動コンクリート用モルタルとして設定した。

4.3 粗骨材・モルタル粒子間相互作用の評価

4.1, 4.2において、設定されたモルタル配合で、大内らによって提案されている粗骨材・モルタル粒子間相互作用の評価を試みた。

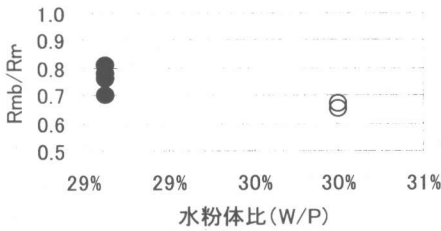


図-7 設定したモルタルの粗骨材・モルタル粒子間相互作用の評価

表-3 高流動しらすコンクリート試験配合

No.	単用量(kg/m ³)					SP量 (Sp/P)
	W	C	しらす	3~5mm 砕砂	G	
I	180	514	490	146	893	2.3
II	176	529	489	146	893	2.5

その手順を以下に示す。

- ①任意の配合のモルタルを製造する。
- ②V ロート流下時間，フロー値を測定し，相対フロー面積比 Γ_m (式 (1))と相対ロート速度比 R_m (式 (2))を計算する。
- ③このモルタルにガラスビーズ (粒径 10mm)を混合する。ガラスビーズの量はモルタル容積の20%とする。
- ④ガラスビーズを混合したモルタルのVロート流下時間を測定し，相対ロート速度比 R_{mb} (式 (3))を計算する。
- ⑤ R_{mb} と R_m の比 R_{mb}/R_m をとる。

粗骨材・モルタル粒子間相互作用の程度は R_{mb}/R_m によって評価する。 R_{mb}/R_m が小さいほど，粗骨材・モルタル粒子間相互作用が大きいと評価される。この R_{mb}/R_m がコンクリートの間隙通過性試験における自己充填高さと同関があることが確認されている^{3), 4)}。

その結果を図-7に示す。横軸は水粉体比，縦軸は粗骨材・モルタル粒子間相互作用の指標とされている R_{mb}/R_m である。この R_{mb}/R_m の値が，一般構造物を対象とした場合 (高流動コンクリート施工指針におけるランク 2)，0.65以上で，コンクリートにおける間隙通過性試験の自己充填高さ 300mm以上が得られることが確認

表-2 高流動コンクリート用しらすモルタル配合

No.	しらすの種類	しらす容積比	水粉体比
I	しらす④	0.4	30.0%
II	しらす④	0.4	28.6%

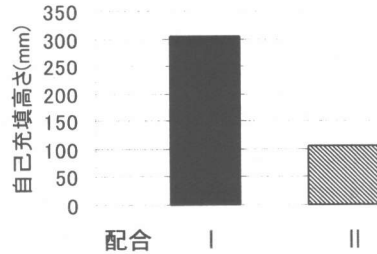


図-8 高流動しらすコンクリートの間隙通過性試験結果

されている。今回設定したモルタルの配合は，いずれも $R_{mb}/R_m \geq 0.65$ となっており，粗骨材・モルタル粒子間相互作用については，問題がないと考えられる。

以上のことから，表-2に示すモルタルの配合を基に，しらすを使用した高流動コンクリートの試験配合を決定した。

4.4 コンクリート試験による確認

モルタル試験により決定した配合のモルタル相を有するコンクリートにおいて，間隙通過性試験を行なった。そのコンクリート配合を表-3，試験結果を図-8に示す。粗骨材量は，既往の研究によって高流動しらすコンクリートの作製が可能であることが確認されている最大の粗骨材容積比である粗骨材容積比 0.35，3~5mm 砕砂を容積比で 0.0575に設定し，コンクリートの配合を算出した⁵⁾。なお，3~5mm 砕砂は，しらすを細骨材としてコンクリートに適用する場合に3~5mmの粒度が不足し，コンクリートの流動性に悪影響を及ぼすと考えられることから，コンクリートに加え，配合の設定を行った。

図-8より，設定した2種類の配合において，十分な自己充てん性をもったのは，No. I 配合の場合であった。これは，No. II 配合では500mm 到達時間が 30 秒以上と非常に長かったことが

ら、しらすを使用した場合には相対ロート速度比 R_m を 1 より増加させる、すなわち粘性を下げる必要があると考えられた。そこで、粗骨材量は異なるが、これまでに十分な自己充てん性を実現した高流動しらすコンクリートのモルタル配合において、V ロート試験をおこなった。その結果、それらのしらすモルタルはすべて相対ロート速度比 R_m が 1.2 程度以上になっていることが確認されたことから、しらすを使用した場合には相対ロート速度比 R_m が 1.2 以上必要であると考えられる。

R_{mb}/R_m はすべて 0.65 以上になっており、粗骨材・モルタル粒子間相互作用の評価法については、ある程度評価ができていていると考えられるが、今後検討を要するものと考えられる。

5. まとめ

以上の結果をまとめると

- 1) 材料特性として、しらすは微粉量は非常に多いが、基本的には軽量細骨材に分類される性質を有している。しかし、産地や採取時期により、その材料特性は異なる。
- 2) しらすモルタルの流動特性は悪く、川砂モルタルと同程度の流動性を得るためには、より多くの水が必要となる。
- 3) 高流動コンクリート用しらすモルタルの水粉体比、高性能 AE 減水剤量の検討を行なうための試験は、V ロート試験が適当であると考えられる。
- 4) 高流動コンクリート用しらすモルタルの相対ロート速度比 R_m は 1.2 以上が適当と考えられる。

以下の手順により、しらすを使用した高流動コンクリートにおいても、モルタル試験によって配合を推定することが可能であり、より少ない試験練り回数で高流動しらすコンクリートが実現できるものとする。その手順は、

- 1) しらす容積比、水セメント比を変動させ、モルタルフロー試験を行なう。

- 2) モルタルフロー試験結果から、しらす容積比ごとのしらすモルタルの拘束水比を算出する。
- 3) しらすモルタル拘束水比が最小となったしらす容積比において、相対ロート速度比 R_m が 1.2 以上になるように、水粉体比と高性能 AE 減水剤量の調整を行なう。
- 4) コンクリートの間隙通過性試験による自己充てん性の確認。

【謝辞】 本研究に際し、鹿児島大学工学部松本進教授には、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) 大内雅博, 日比野誠, 小澤一雅, 岡村甫: 自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.19-24, 1997
- 2) 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.37-46, 1996.5
- 3) 枝松良展, 安本礼持, 西田直樹, 大内雅博: 粗骨材・モルタル粒子間相互作用を考慮した自己充填コンクリートの配合設計法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.409-414, 1999
- 4) 大内雅博, 枝松良展, 小澤一雅, 岡村甫: 自己充填コンクリート中の粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.451-456, 1999
- 5) 奥地栄祐, 緒方直, 山口明伸, 武若耕司: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.877-882, 2000