

論文 モルタルフローによる研磨砕砂の粒子性状評価

田畑 美紀^{*1}・森 勇介^{*2}・古谷 治昭^{*3}・高海 克彦^{*4}

要旨：良質な天然骨材の枯渇が深刻化している西日本では、海砂の代替材として砕砂の使用が高まっている。しかし、砕砂の品質は天然骨材よりも劣り、砕砂を使用したコンクリートは流動性が低下するといった問題が生じる。そこで本研究では、表面粗さの改善処理を行った研磨砕砂を使用し、研磨砕砂の粒子性状とモルタル流動性の相関性について定量的に評価するため、品質の重回帰分析や、研磨砕砂の変形係数による粒子性状の検証を行った。その結果、変形係数が粒子粗さ、拘束水比が粒子形状に関係することが明らかになった。

キーワード：砕砂、粗さ、形状、流動性、変形係数、拘束水比

1. はじめに

西日本において、細骨材は海砂に依存してきたため、大量採取により海砂の枯渇が進んだ。そこで、環境保全を目的として、平成 17 年度末には、瀬戸内海沿岸の地域を中心に海砂採取全面禁止となった。これに伴い、西日本の細骨材不足は深刻化し、海砂の代替材として、以前は補助砂としての使用が主流であった砕砂の全量使用法の開発が望まれている。しかし、砕砂の粒子形状の粗さは、流動性の低下といった問題を引き起こす。このような状況から、より高品質な砕砂が求められるようになった。

我々はこれまでの研究で、砕砂を研磨することで砕砂表面は滑らかになり、一部の粒径範囲では粒子形状が丸くなり、これが流動性向上に影響したことを報告している¹⁾。しかしながら、この粒子の滑らかさと丸さの流動性への影響評価は、定性的なものにとどまっているため、本研究では先ず重回帰分析によりモルタル流動性に対する粒子特性の影響度の定量化を行った。

粒子性状の評価に、顕微鏡や画像処理装置をその都度使用するのは実務的ではないため、続いて本研究では、研磨砕砂の粒子性状のより簡

易的かつ定量的に評価するため、モルタルフロー試験において、モルタルの流動性と水粉体容積比との関係から拘束水比と変形係数を算出し、これらの指標と砕砂の表面粗さや粒子形状との関連性を考察した。

2. 実験の概要

2.1 使用試料

本研究のモルタルフロー試験で用いた細骨材は佐賀県産安山岩砕砂 (AP)、比較検討用の海砂 (SS)、および製品として市販されている粒子が非常に丸みを帯びた高品質砕砂 (B) の 3 種類である。本文中の試料略称末尾の数字は研磨回数を示し、0 は原砂を示している。なお海砂と高品質砕砂は研磨処理を施していない。使用試料の物性値を表-1 に示す。

2.2 研磨砕砂の製造方法¹⁾

研磨砕砂製造機は、砕砂投入部、円筒形ドラム、排出部で構成されており、円筒形ドラムの内部には定められた粒度 (13~80mm) の媒体石が投入されている。砕砂の研磨過程を、以下に示す。砕砂と水を質量比 4:1 の割合で投入し、円筒形ドラムにて研磨された後、研磨砕砂と水

*1 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (正会員)

*2 山口大学 工学部社会建設工学科

*3 宇部テクノエンジニア (株) (正会員)

*4 山口大学 工学部社会建設工学科助教授 工博 (正会員)

表－１ 使用試料の物性値

試料	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)	粒形判定 実積率 (%)	粗粒率
AP0	2.593	2.51	3.18	1.66	55.91	2.69
AP1	2.621	2.56	2.46	1.67	55.43	2.70
AP2	2.623	2.57	2.02	1.69	55.45	2.69
AP3	2.625	2.59	1.17	1.70	55.00	2.65
SS	2.600	2.56	1.55	1.64	55.28	2.60
B	2.594	2.54	1.95	1.65	55.79	3.38

が排出される。この排水を分離する過程で、微粒分は洗い流される。処理後の研磨砕砂を自然乾燥させて1回の研磨工程が完了となる。以上の工程を研磨回数ごとに繰り返す。

2.3 試験項目と概要

本研究では、研磨効果の比較のために安山岩砕砂を1～3回研磨した研磨砕砂（AP1, AP2, AP3）、安山岩原砂AP0、海砂SS、および高品質砕砂Bの計6種類の細骨材を用いた。研磨回数ごとに粒径を2.5mm～1.2mm, 1.2mm～0.6mm, 0.6mm～0.3mmの3水準に分けて、算術平均粗さ測定試験、粒子形状測定試験および粒径別置換時モルタルフロー試験を行った¹⁾。これらの結果より、粒子形状だけでなく粒子表面の粗さに応じて、モルタルの流動性が異なったことから、この二つのパラメータの流動性に対する影響度を評価するため、重回帰分析を行った。

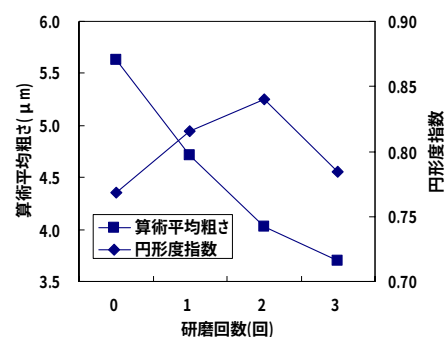
また、算術平均粗さや形状指数による粒子性状の評価は容易でないため、より簡易な評価が必要であると考えられる。既往の研究より、モルタルフロー値に及ぼす産地別の細骨材の特性が、見かけの拘束水比と変形係数とによって一意的に表わせることが報告されている²⁾。この評価法を応用し、安山岩砕砂AP0～AP3、海砂SS、高品質砕砂Bをそれぞれ全量使用したモルタルフロー試験を行い、研磨砕砂の粒子特性が流動性に及ぼす影響を検討した。

(1) モルタルフロー値影響度の重回帰分析

本研究で行った重回帰分析では、表－2に示す粒径別置換時モルタルフロー試験結果¹⁾を目的変数とし、算術平均粗さ、円形度指数¹⁾を説明変数とした。この算術平均粗さとは、粒子表

表－２ 粒径別置換時モルタルフロー値

粒径	2.5-1.2mm	1.2-0.6mm	0.6-0.3mm
AP0	223.0	223.0	223.0
AP1	225.0	237.1	237.7
AP2	226.0	243.3	243.9
AP3	228.0	243.3	242.5



図－１ 粒径1.2mm～0.6mmの算術平均粗さと円形度指数

表－３ データの基準値

	目的関数	説明変数		
	フロー値	A1	A2	A3
AP0	-0.39613	0.52941	0.58821	0.61861
AP1	1.45956	0.02862	0.58821	0.61861
	0.14888	0.52941	-0.62787	0.61861
	0.22864	0.52941	0.58821	-1.24060
AP2	-1.32663	-1.68840	0.58821	0.61861
	0.97304	0.52941	-1.52671	0.61861
	1.05280	0.52941	0.58821	-1.47723
AP3	-1.06077	-2.04611	0.58821	0.61861
	0.97304	0.52941	-1.96291	0.61861
	0.86670	0.52941	0.58821	-1.61244
	フロー値	B1	B2	B3
AP0	-0.39613	0.06066	-0.53142	-0.59886
AP1	1.45956	-1.55705	-0.53142	-0.59886
	0.14888	0.00607	1.34419	-0.59886
	0.22864	0.06066	-0.53142	1.36615
AP2	-1.32663	-1.15262	-0.53142	-0.59886
	0.97304	0.06066	2.28199	-0.59886
	1.05280	0.06066	-0.53142	0.85151
AP3	-1.06077	2.28502	-0.53142	-0.59886
	0.97304	0.06066	0.09378	-0.59886
	0.86670	0.06066	-0.53142	1.97437

面の粗さの指標であり、数値が小さいほど粒子表面が滑らかであることを示す。また、円形度指数は、粒子の丸さを表す指標であり、数値が1に近いほど粒子は丸いことを示す。これらの指標と研磨回数との関係は、粒径 1.2mm～0.6mm に対する図-1に示すように、算術平均粗さは研磨回数増加と共に減少して粒子表面が滑らかになっていることがわかる。また円形度指数は、研磨回数との相関性はみられていない。

説明変数のデータ単位をそろえるために基準化した値を表-3に示す。説明変数の記号は、算術平均粗さより、粒径 2.5mm～1.2mm の粗さを A1、粒径 1.2mm～0.6mm の粗さを A2、粒径 0.6mm～0.3mm の粗さを A3、円形度指数より、粒径 2.5mm～1.2mm の丸さを B1、粒径 1.2mm～0.6mm の丸さを B2、粒径 0.6mm～0.3mm の丸さを B3 とした。

(2) モルタルの配合とフロー試験の方法

本研究では、表-4に示すように細骨材容積比を 0.2, 0.4, 0.5, 0.53 の 4 ケースごとに、水粉体容積比を 4 種類に変え、1 つの試料につき 16 種類の配合とした。ただし、粒度分布の違いが流動性に影響を与えないようにするため、この試験で用いた細骨材はすべて、粗粒率が 2.7 になるように粒度調整を行った。

モルタルフロー試験は、JIS A 5201「セメントの物理試験方法」に規定されている方法で行い、モルタルに振動を与えない水平な広がりをも 2 回測定し、その平均値をフロー値とした。

(3) 拘束水比と変形係数の算出方法²⁾

細骨材容積比を一定のまま、水粉体容積比を変化させたモルタルフロー試験を行うと、図-2のようにモルタルの変形係数 E_m と拘束水比 β_m は、モルタルフロー面積比と水粉体容積比関係の一次回帰直線の傾きと切片として求められる、これらは式(1)で表される。

$$V_w/V_p = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (1)$$

表-4 モルタルフロー試験配合
(全試料共通)

細骨材容積比	細骨材質量(g)	水粉体容積比
0.2	320	1.1
		1.2
		1.3
		1.4
0.4	640	1.4
		1.6
		1.8
		2.0
0.5	800	1.9
		2.2
		2.5
		2.8
0.53	848	2.0
		2.3
		2.6
		2.9

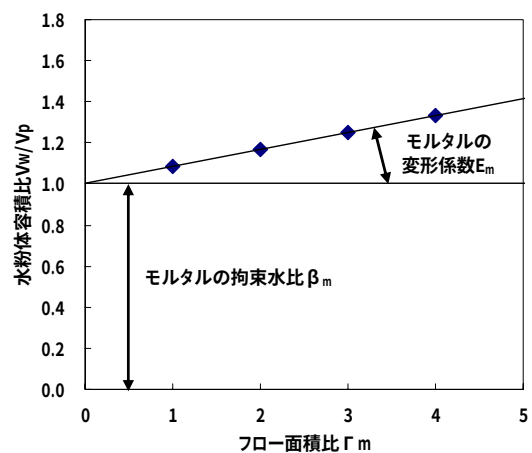


図-2 モルタルフロー面積比と水粉体容積比の関係

V_w/V_p : 水粉体容積比

E_m : モルタルの変形係数

Γ_m : モルタルのフロー面積比 $= (F_m/100)^2 - 1$

F_m : モルタルフロー値

β_m : モルタルの拘束水比

式(1)を基本式として、式(2)から細骨材の拘束水比 β_s が、式(3)から細骨材の変形係数 E_s が算出できる。

$$\beta_s = \{(\beta_m - \kappa_{pm} \cdot \beta_p) / (1 + \beta_m)\} \cdot \{(1 - V_s) / V_s\} \quad (2)$$

κ_{pm} : ペーストとモルタルの練り混ぜ性能の違いによる補正係数

本研究では 1.05 の一定値を用いた。

β_p ：粉体の拘束水比

本研究で用いた粉体は 1.00

V_s ：細骨材容積比

$$E_s = E_m \{1 - V_s(1 + \beta_s)\} / (1 - V_s) - E_p \quad (3)$$

E_p ：粉体の変形係数

本研究で用いた粉体は 0.13

なお、細骨材の変形係数 E_s や拘束水比 β_s は値が小さい程、流動性が良く、細骨材の特性が良いことを表している。

3. 実験結果

3.1 重回帰分析結果

重回帰分析の結果を表－5に示す。なお、説明変数相互に高い相関性があることが分かり、粒径 0.3mm 以下の丸さの説明変数である B3 を除いて重回帰分析を行っている。

表－5 より、分析の精度を表す尺度となる決定係数 ($R^2=0.9472$) が 1 に近いこと、有意水準におけるF分布の値 ($F=0.0116$) が 0.05 より小さいことがわかる。このことから、分析の精度は良いと判断することができる。

また、P値に着目し説明変数の重要度を検定すると、粒径 1.2mm～0.6mmおよび 0.6mm～

表－5 重回帰分析結果

回帰統計					
重相関係数R	0.9732				
決定係数 R^2	0.9472				
標準誤差	0.3447				
観測数	10				
分析分散表					
	自由度	変動	分散	分散比	有意水準のF
回帰	5	8.5248	1.7050	14.350	0.0116
残差	4	0.4752	0.1188		
合計	9	9			
偏回帰係数標準誤差 P値					
切片	-1E-14	0.1090	1		
A1	0.367	0.1723	0.1968		
A2	-0.636	0.1928	0.0299		
A3	-0.693	0.1681	0.0146		
B1	0.197	0.1290	0.2011		
B2	0.092	0.1777	0.6320		

0.3mmの表面粗さを表す説明変数A2, A3 において 0.05 よりも小さな値をとっていることから、有意水準 5%で有意であり、目的関数（粒径別置換時モルタルフロー値）に対して影響度が大であることがわかる。この結果は、これまでの研究で示している、粒径 1.2mm以下における粒子の表面粗さの改善が流動性に大きな影響を及ぼすという知見¹⁾を裏付けている。したがって、流動性に対する粒径 1.2mm以下における粒子の表面粗さの影響度は高いことが確認できた。

3.2 モルタルフロー試験結果

表－6 に各配合におけるモルタルフロー値とフロー面積比を示す。このうち、SSとAP3 のフロー面積比 Γ_m と水粉体容積比 V_w/V_p の関係を

表－6 モルタルフロー値とフロー面積比 Γ_m

細骨材容積比	V_w/V_p	SS		AP0		AP1		AP2		AP3		B	
		フロー値	Γ_m	フロー値	Γ_m	フロー値	Γ_m	フロー値	Γ_m	フロー値	Γ_m	フロー値	Γ_m
0.2	1.1	115.0	0.323	111.6	0.245	112.8	0.271	112.7	0.270	115.0	0.323	117.4	0.378
	1.2	131.9	0.740	127.3	0.621	130.1	0.691	131.1	0.717	131.8	0.737	133.2	0.774
	1.3	156.4	1.446	155.5	1.418	154.0	1.372	155.1	1.406	162.2	1.631	150.0	1.250
	1.4	182.6	2.334	181.2	2.283	179.7	2.227	180.0	2.240	184.0	2.386	178.1	2.172
0.4	1.4	134.1	0.798	123.7	0.530	132.3	0.750	135.3	0.831	138.6	0.921	141.8	1.011
	1.6	170.9	1.921	156.5	1.449	163.1	1.660	167.6	1.807	173.1	1.996	175.9	2.094
	1.8	205.9	3.239	187.0	2.497	198.8	2.950	205.0	3.203	211.5	3.473	208.6	3.351
	2.0	241.5	4.832	213.5	3.558	223.0	3.973	234.4	4.492	243.0	4.905	243.0	4.905
0.5	1.9	143.9	1.071	134.2	0.801	153.7	1.362	154.0	1.372	155.6	1.421	156.7	1.455
	2.2	171.7	1.948	149.5	1.235	182.7	2.336	184.3	2.395	193.6	2.748	180.5	2.258
	2.5	209.1	3.372	161.4	1.605	209.0	3.368	209.6	3.393	223.6	4.000	218.7	3.783
	2.8	229.3	4.258	186.8	2.489	238.2	4.674	238.9	4.705	248.2	5.160	231.1	4.341
0.53	2.0	110.4	0.219	108.5	0.177	125.2	0.568	126.0	0.586	133.5	0.782	125.8	0.581
	2.3	134.6	0.812	122.7	0.506	142.8	1.038	150.3	1.258	146.9	1.158	143.9	1.071
	2.6	153.7	1.362	141.2	0.994	163.6	1.676	171.6	1.945	165.0	1.723	163.8	1.683
	2.9	168.5	1.839	150.2	1.256	178.5	2.186	180.8	2.267	187.3	2.506	176.2	2.103

表－７ 細骨材の変形係数と拘束水比の算定結果

	SS				AP0			
細骨材容積比	Em	β_m	β_s	Es	Em	β_m	β_s	Es
0.2	0.1448	1.0747	0.0476	0.0131	0.1408	1.0893	0.0752	0.0082
0.4	0.1481	1.3004	0.1633	0.0020	0.1972	1.3039	0.1653	0.0455
0.5	0.2704	1.6300	0.2205	0.0808	0.5278	1.5410	0.1932	0.2958
0.53	0.5530	1.8649	0.2522	0.2657	0.7957	1.8667	0.2526	0.4390
	AP1				AP2			
細骨材容積比	Em	β_m	β_s	Es	Em	β_m	β_s	Es
0.2	0.1494	1.0797	0.0571	0.0173	0.1490	1.0774	0.0528	0.0170
0.4	0.1818	1.2758	0.1488	0.0338	0.1608	1.2847	0.1541	0.0143
0.5	0.2722	1.5511	0.1964	0.0887	0.2716	1.5445	0.1943	0.0888
0.53	0.5442	1.7060	0.2150	0.2823	0.5119	1.6751	0.2072	0.2623
	AP3				B			
細骨材容積比	Em	β_m	β_s	Es	Em	β_m	β_s	Es
0.2	0.1385	1.0742	0.0467	0.0069	0.1635	1.0630	0.0252	0.0325
0.4	0.1483	1.2814	0.1521	0.0033	0.1535	1.2639	0.1417	0.0090
0.5	0.2404	1.5490	0.1958	0.0633	0.2860	1.5037	0.1812	0.1042
0.53	0.5100	1.6634	0.2042	0.2625	0.5768	1.6658	0.2048	0.3136

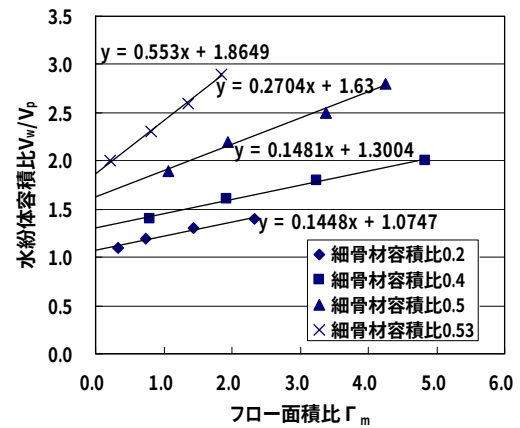
図－３，図－４に示す。なお，図中に各細骨材容積比における実験結果の一次回帰式も併せて示す。いずれも細骨材容積比が大きくなると，モルタルの変形係数 E_m ，拘束水比 β_m は大きくなるのがわかる。

モルタルの変形係数 E_m ，拘束水比 β_m から式（２）および式（３）で算出した研磨砕砂の変形係数 E_s および拘束水比 β_s を表－７に示す。

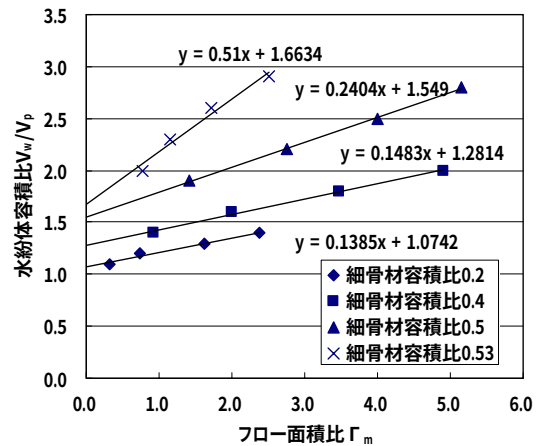
細骨材容積比 V_s と細骨材の変形係数 E_s ，細骨材容積比 V_s と拘束水比 β_s の関係をそれぞれ図－５，図－６に示す。

図－５より，いずれの試料においても，細骨材容積比が 0.5 から 0.53 にかけて細骨材の変形係数 E_s は急激に大きくなるが，原砂である AP0 ではすでに細骨材容積比 0.4 から増加し，この細骨材容積比範囲で，砕砂の研磨の有無が変形係数に表れていることが分かった。

また，いずれの細骨材容積比 V_s においても変形係数の差異が明らかな SS，AP0，AP1，AP3 および B の値を比較すると，大きい順に即ち流動性の悪い順に AP0 > AP1 > B > SS > AP3 の関係が得られる。この関係は，これまでの研究で得られた，粒子の算術平均粗さの大きい順 AP0 > AP1 > B > SS > AP3¹⁾ に対応している。したがって，モルタルフロー試験によって算出した細骨材の変形係数 E_s は，細骨材の粒子表面粗さの指標とすることが可能であると考えられる。



図－３ SSのフロー面積比 Γ_m と水粉体容積比 V_w/V_p の関係



図－４ AP3のフロー面積比 Γ_m と水粉体容積比 V_w/V_p の関係

図-6より、いずれの細骨材容積比においても、拘束水比はSSまたはAP0が大きく、AP1からAP3までの拘束水比 β_s はほとんど変わっていない。また細骨材容積比が0.53以外の場合はBの拘束水比 β_s が最も小さい。この特性は、これまでの研究で得られた砕砂粒子の円形度指数は研磨回数との整合性はみられずにほとんど変わらないこと¹⁾、およびBのみが最も粒子形状が円形に近く他の試料と円形度指数に差があること¹⁾に対応している。したがって、モルタルフロー試験によって算定した細骨材の拘束水比 β_s を、細骨材の粒子形状の指標とすることが可能であると考えられる。

4. 結論

研磨砕砂を細骨材に使用するため、より簡易的な粒子性状の評価方法が必要であると考え、重回帰分析および細骨材容積比・水粉体拘束比をパラメータとするモルタルフロー試験を行った。

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 重回帰分析の結果から、モルタルフロー値に対して、粒径1.2mm以下の粒子表面粗さの影響度が高く、粒子表面の粗さがモルタルの流動性に影響を与えることが明確となった。
- 2) 対象とした試料のモルタルフロー試験から算出した変形係数や拘束水比より、海砂と高品質砕砂の差異および砕砂の研磨の有無の判定ができることが確認できた。
- 3) 細骨材の変形係数および拘束水比は、それぞれ過去の研究で得られた粒子表面の粗さ、粒子形状と評価指標との定性的な対応関係が認められたことから、より簡易な手法として研磨砕砂の粒子性状の評価に適用可能であると考えられる。

今後、研磨回数ごとの細骨材粒子の表面粗さおよび粒子形状の簡易な評価法として、拘束水比 β_s ・変形係数 E_s を使用するために、詳細な定量数値分析が必要である。

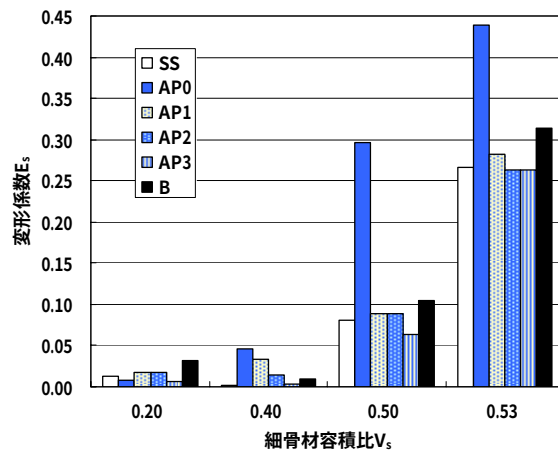


図-5 各細骨材容積比 V_s における細骨材による変形係数 E_s の違い

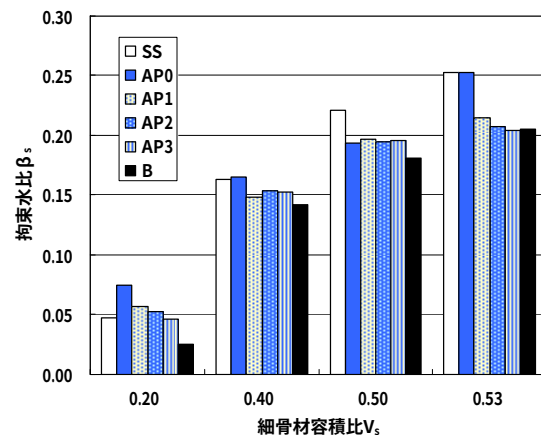


図-6 各細骨材容積比 V_s における細骨材による拘束水比 β_s の違い

参考文献

- 1) 田畑美紀ほか：細骨材用研磨砕砂の品質評価、骨材の品質と有効利用に関するシンポジウム論文集，pp.7-12，2005.12
- 2) 枝松良展ほか：モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.83-88，1994.6