

論文

[1003] 細骨材の粒形の相違がコンクリートの諸性質に及ぼす影響

正会員 田澤米一 (広島大学工学部)

正会員 〇米倉亜州夫 (広島大学工学部)

西岡直樹 (広島県)

石田雅彦 (広島大学大学院)

1. はじめに

近年、良質のコンクリート用天然細骨材が枯渇してきているため、海砂や人工骨材である砕砂の利用が盛んとなっている。骨材の粒子形状は球や立方体に近い多面体状で、丸みを帯びているものが良いとされている。現在使用されている海砂の場合、塩分を含むだけでなく細長や薄片の粒子や貝殻を多く含んでいる。またジョークラッシャーやロードミルによって製造された通常の砕砂の場合、その粒子形状は角張っている¹⁾。コンクリートにおいて単位水量を低減することは良いコンクリートを作る上で最も重要視されているが、これらの細骨材をコンクリートに用いると、所要のスランプを得るために必要な単位水量が著しく大きくなる等の問題を生じることが最大の欠点といわれている。

遠心力を利用した新しい製造方法によって作られた砕砂(以下砕砂Aと称する)は、その製造過程において、ある程度破碎した骨材をミル容器内壁へ衝突させるとともに、骨材粒子を互いに衝突させることによって、骨材表面部の角張りをなくし、従来の砕砂(以下砕砂Bとする)に比べより丸みを帯びた粒子形状となっている。そのため、この砕砂Aを用いることによって、所要のスランプを得るために必要な単位水量を減少でき、その結果コンクリートの種々の品質を改善することが期待できる。

そこで本研究では、細骨材の粒子形状に着目して、砕砂Aを用いた場合のフレッシュコンクリートの諸性質(最適細骨材率、スランプと単位水量、ブリージング)及び硬化コンクリートの強度特性(圧縮強度、引張強度、静弾性係数)を調べ、砕砂Aと同一の母岩から従来の方法で製造された砕砂B、海砂の50%を砕砂A又は砕砂Bで置換したもの、および川砂を用いた場合と比較しながら粒子形状がコンクリートの諸性質に及ぼす影響と砕砂Aの有用性について検討し、配合設計の際の基礎的資料を得ることを目的とした。

2. 試験方法

(1) 使用材料

セメント: 普通ポルトランドセメント(比重3.16、比表面積3,220 cm^2/g)

粗骨材: 碎石1種類(比重2.62、粗粒率6.72、吸水率0.72%)

細骨材: 砕砂A, 砕砂B, 混合砂A(海砂50%+砕砂A50%), 混合砂B(海砂50%+砕砂B50%), 川砂の5種類(物理的性質については表1参照)

混和剤: AE減水剤, AE補助剤

(2) 細骨材の物理的特性の試験

各種細骨材について比重、吸水率、粗粒率、微粒分混入率、単位容積重量、実積率試験を行った。

(3) 最適細骨材率(s/a)決定のための試験

各種細骨材を用いたコンクリートについて、単位水量、水セメント比を一定とし s/a を変化させてスランプを測定した。このとき、スランプは s/a の変化に伴い極大値を持つ曲線の変化を示すが、このスランプが極大値となるときの s/a を最適 s/a とした。

以下の試験は最適 s/a で行った。

(3) スランプと単位水量との関係を決定する試験

各種細骨材を用いたコンクリートについて、水セメント比を50%と一定にし、単位水量を変化させてスランプを測定し、単位水量とスランプの関係を求めた。

(4) フリージング試験

細骨材の粒子形状による影響をみるため、同一の単位水量 ($W=185\text{ Kg/m}^3$) の場合とスランプ $8\pm 1\text{ cm}$ を得るのに必要な単位水量の場合での各種細骨材を用いたコンクリートについて JIS A 1123 に基づいてフリージング率を測定した。また、上と同一条件におけるモルタルについても測定した。さらに、砕砂A、Bについては、コンクリートで同一スランプ時の単位水量となる配合のモルタル部分を想定して、これと同一の割合となるモルタルの配合で水セメント比を40、50、60%と変化したモルタルについても測定した。

フリージングの測定は、室温 20°C 、湿度約95%の試験室で行いさらに、フリージング試験用の容器をビニール樹脂で被覆することにより、フリージング水の蒸発の影響を無くした。

(4) コンクリートの強度試験

同一スランプ ($8\pm 1\text{ cm}$) において、水セメント比を40、50、60%と変化したコンクリートについて、圧縮試験用、引張試験用それぞれ3本ずつ供試体を作製し、 20°C の水中で標準養生を行い、材令28日の圧縮強度、引張強度、静弾性係数を測定した。

3. 実験結果

(1) 各種細骨材の特性

表1に各種細骨材の比重、吸水率、粗粒率、微粒分混入率、単位容積重量、実積率を、図1に粒度曲線を示す。表1より、砕砂Aと砕砂Bは同一母岩にもかかわらず砕砂Aの方が比重、単位容積重量、実積率は大きく、吸水率は小さい。これは前に述べたように製造方法の違いによって、砕砂Aの場合は骨材の軟弱な部分が破碎され粉体化して、堅硬な部分のみが最終的な細骨材として残るからである。図2～3に示す粗粒率、微粒分混入率と単位容積重量の関係から、砕砂Aは丸みを帯びた良い粒子形状であるため充填性が高くなることがわかる。単位容積重量は微粒分混入率が多くなるほど増大するが、砕砂A、Bの単位容積重量の差は小さくなっている。また、単位容積重量を最大とする粗粒率が存在することがわかる。従って、本研究では最適と思われる $M_s = 2.8$ 付近となるように細骨材を調節した。川砂についても砕砂Aと同様に粒形が良く実積率が大きくなっている。海砂の場合実積率がかなり小さいが、これは細長、薄片状の粒子や貝

表1 各種細骨材の特性

	砕砂 A	砕砂 B	混合砂 A	混合砂 B	川 砂	海 砂
表 乾 比 重	2.89	2.86	2.71	2.69	2.57	2.52
吸 水 率 (%)	1.15	1.83	1.93	2.27	1.63	2.71
粗 粒 率	2.72	3.03	2.56	2.76	3.09	2.46
0.15mm以下 (%)	9.0	5.0	5.5	3.5	4.5	2.0
単位容積重量 (t/l)	1.87	1.80	1.66	1.63	1.67	1.46
実 積 率 (%)	65.4	63.9	62.6	62.1	66.2	59.6

※ 混合砂A：砕砂A 50%+海砂50%
混合砂B：砕砂B 50%+海砂50%

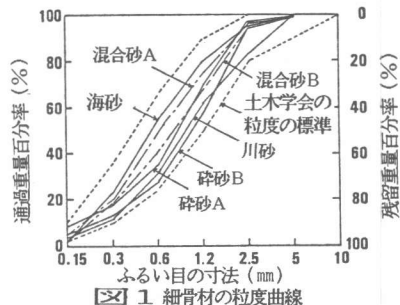


図1 細骨材の粒度曲線

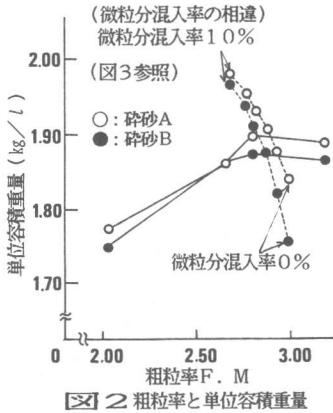


図2 粗粒率と単位容積重量

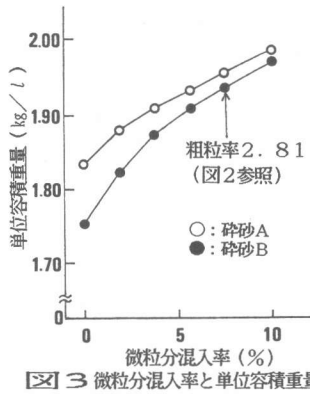


図3 微粒分混入率と単位容積重量

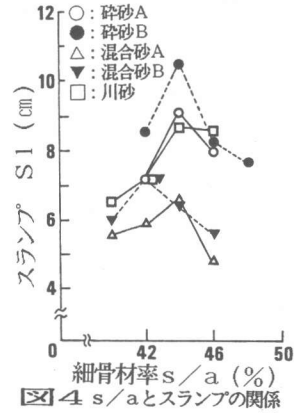


図4 s/aとスランプの関係

般を多く含んでいるためである。

(2) 細骨材の粒形がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響

(a) 最適 s/a

図4に s/a とスランプの関係を示す。各種のコンクリートによって最大のスランプが約6～11 cm になっているが、これは細骨材の粒子形状を考慮して単位水量を別々に定めたためである。その結果、砕砂A、B、混合砂A、川砂を用いたコンクリートの最適 s/a は4.4%、混合砂Bは4.2%となり、粒子形状の相違による影響はほとんどみられなかった。

(b) スランプと単位水量との関係

図5に水セメント比50%のコンクリートにおける単位水量とスランプとの関係を示す。砕砂Aコンクリートでは同一スランプを得るための単位水量は砕砂Bに比べて約20 kg/m³、川砂に比べて約5 kg/m³ 少なくできる。砕砂Bの場合には川砂の場合より約15 kg/m³ 多くする必要がある。砕砂Aコンクリートの場合、砕砂Aは丸みを帯びた粒子形状であることと、0.15 mm以下の微粒分が9%とやや大きかったために川砂コンクリートよりも単位水量を減少できたと考えられる。また海砂の50%を砕砂Aで置き換えた混合砂Aを用いた場合の単位水量は、砕砂Bよりも同一スランプにおいて約10 kg/m³ 減少でき、川砂の場合と同程度まで改善された。

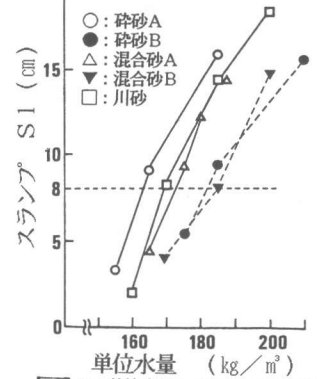


図5 単位水量とスランプの関係

以上のことより、本実験で使用した砕砂Aは、所要のスランプを得るのに必要な単位水量を大幅に低減できることで、コンクリートの品質改善のために極めて有効であるといえる。

(C) フリージング

図6、7にそれぞれ同一単位水量 (W=185 kg/m³) の場合と単位水量は異なるがスランプ8 cmの場合のコンクリートのフリージング率の経時変化を示し、また、図8、9にそれぞれ上記のコンクリートと同一の水、セメント、砂の比率になっているモルタルの場合のフリージング率の経時変化について示す。同一単位水量における砕砂Aを用いた場合のフリージングは砕砂Bの場合よりコンクリートでは約6.5%、モルタルでは2倍以上大きくなっている。一方、同一スランプ時のフリージングを比較すると、スランプ8 cmの時の単位水量は砕砂Aの方が砕砂Bよりも約20 kg/m³ 少ないにもかかわらずコンクリートでは約10%、モルタルでは約30%大きくなった。さらに、川砂の場合、同一単位水量では砕砂Aに類似している。これは、細骨材の粒

子形状が丸みを帯びている場合、フリージング水の移動に対する抵抗が小さく、フリージング水が細骨材粒子の下に溜らずに上昇しやすいこと、角張った細骨材の場合はフリージング水の流れに対する抵抗が大きくなること、骨材の下にフリージング水が溜りやすいことなどのためコンクリートやモルタル上面に出てくるフリージング水が少なくなったものと思われる。

さらに、図10、11に砕砂A、Bについて、水セメント比を40、50、60%と変化させたときのモルタルの経時変化を示す。フリージング率は砕砂Aを用いたモルタルの単位水量が砕砂Bより約10%少ないにもかかわらずW/C=60%及び50%では大きく、W/C=40%では同程度であった。両者ともにW/C=60%でフリージング率は大幅に大きくなるが、これはW/C=60%の場合モルタルの粘性が小さくなり流動しやすくなるためと考えられる。表2は粗骨材の下に溜まる見掛上のフリージング率を示したものである。表2の値は、モルタルに生じたフリージング率をコンクリート中のモルタルの容積に換算して求めたフリージング率からコンクリートに生じたフリ

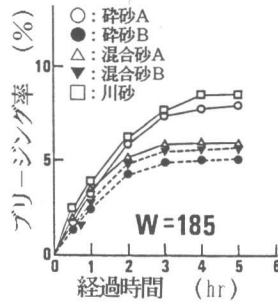


図6 同一単位水量(コンクリート:W=185kg/l)におけるコンクリートのフリージング率の経時変化

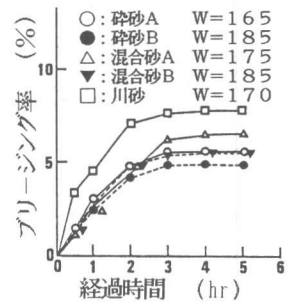


図7 同一スラブ(コンクリート:S1=8±1a)におけるコンクリートのフリージング率の経時変化

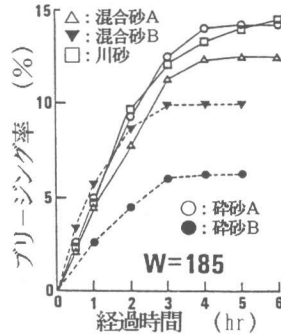


図8 同一単位水量(コンクリート:W=185kg/l)におけるモルタルのフリージング率の経時変化

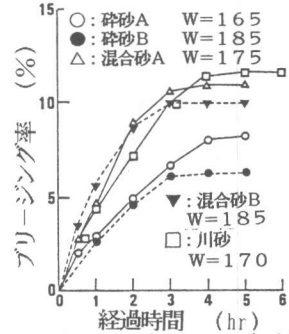


図9 同一スラブ(コンクリート:S1=8±1a)におけるモルタルのフリージング率の経時変化

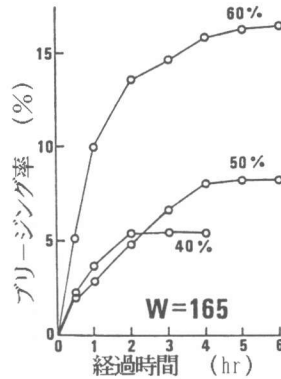


図10 異なる水セメント比におけるモルタルのフリージング率の経時変化(砕砂A)

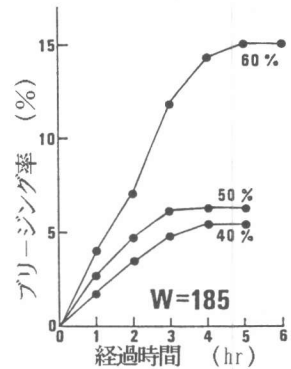


図11 異なる水セメント比におけるモルタルのフリージング率の経時変化(砕砂B)

表2 粗骨材の下に溜まるフリージング率

	W/C	W	モルタルの体積比			Bs =	
			Vm/Vc	Bc	Bm	Vm/Vc × Bm - Bc	
砕砂A	50	165	0.613	5.5	8.25	-0.44	
	50	185	0.617	7.9	14.15	0.83	
砕砂B	50	185	0.632	4.9	6.25	-0.95	
	50	175	0.620	6.45	10.9	0.31	
混合砂A	50	185	0.630	5.9	12.4	1.91	
	50	185	0.617	5.5	9.9	0.61	
川砂	50	170	0.618	7.75	11.6	-0.58	
	50	185	0.632	8.5	14.4	0.60	

W/C: 水セメント比(%) W: 単位水量(kg/m³)
 Bc: コンクリートのフリージング率(%)
 Bm: モルタルのフリージング率(%)
 Bs: 粗骨材の下に溜まるフリージング率(%)

ーシング率を差引いて求めたものである。ここで負の値があるがこれはモルタルの空気が8~10%とコンクリートの場合よりかなり多いので、その分だけモルタルのフリージング率がコンクリートの場合より小さくなったためと思われる、粗骨材の下に全く溜まらないわけではない。これによると正確な相関関係は明らかにできないが、砕砂Aを用いた場合フリージング率が大きいほど粗骨材の下に溜まる水は多いといえる。

以上のことより、粒子形状の良い細骨材を用いると所要のスランプを得るための単位水量を著しく減少できるが、フリージングは、同一スランプにおいて約10%、同一単位水量において約65%多くなり、粗骨材の下に溜まる水も多くなる。しかし、単位水量を小さくすることで水セメント比を小さくすればそれによってフリージングを著しく低減することが可能となるので良いコンクリートを製造できる。

(3) 細骨材の粒形が硬化したコンクリートの性質に及ぼす影響

(a) 圧縮強度および引張強度

図12, 13にそれぞれ圧縮強度、引張強度とセメント水比の関係を示す。圧縮強度を砕砂AとBを用いた場合について比較するとC/W=2.0以上では同一C/Wにおいて砕砂Aの方が若干小さく、また、C/W=1.67では約100 kgf/cm²も低下している。これは砕砂Aはフリージングが多く、それによって粗骨材の下に溜まる水の量が多くなり、粗骨材とモルタルの付着強度が小さくなったためと思われる²⁾。先に述べたようにW/C=40, 50%においては砕砂Aの場合のフリージングがやや大きく、W/C=60%になるとフリージングが急増し、粗骨材の下に溜まる水量もさらに多くなるため上記のような結果となったと考えられる。

引張強度はC/W=2.0以上では同一C/Wにおいて砕砂Aの場合もBの場合もほぼ同じ値となっている。しかし、W/C=60%の場合は砕砂Aの場合の引張強度が小さくなっている。また、図14は圧縮-引張強度の関係を示しているが、砕砂Aコンクリートの引張強度は同一圧縮強度において砕砂Bの場合よりも大きく、その差は低強度コンクリートほど大きくなっている。

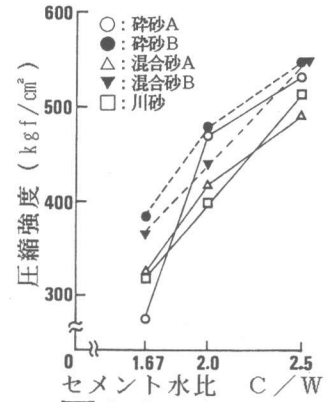


図12 セメント水比と圧縮強度の関係

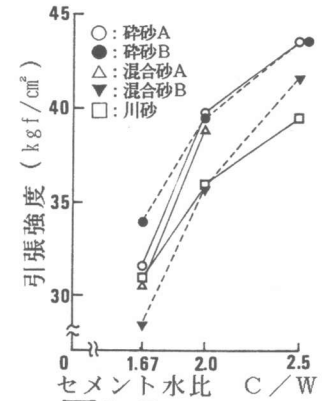


図13 セメント水比と引張強度の関係

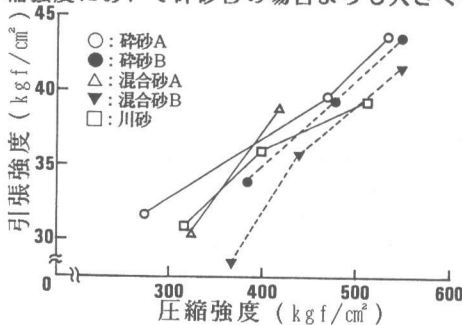


図14 圧縮強度と引張強度の関係

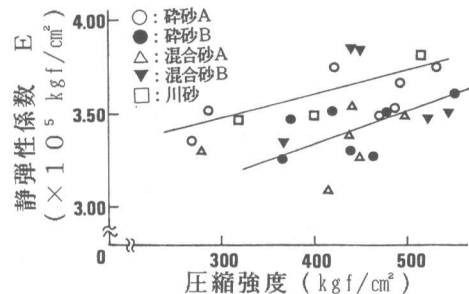


図15 圧縮強度と静弾性係数の関係

これは粒子形状の良い細骨材を用いるとブリージングが多く、それによってモルタルの実質的水セメント比が小さくなり、モルタル自体の強度が大きくなること、JIS規定のコンクリートの引張強度試験ではその割裂面がブリージング水の溜まる粗骨材下面とは異なる面であること等のためと考えられる。

以上のことより、粒子形状の良い細骨材を用いる場合、 $W/C=60\%$ では強度はかなり低くなるが、単位水量を大幅に減少し、水セメント比を小さくすることによってブリージングを著しく低減できるので強度特性を改善できる。

(b) 静弾性係数

図15に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。粒子形状の良い細骨材を用いたコンクリートの方が粒子形状の悪いものの場合より、全体的に同一圧縮強度における静弾性係数は大きくなっている。これは、粒子形状の悪いものは粒形の良い骨材の場合よりも実積率が小さく、最も変形しやすいセメントペースト量が多くなること、コンクリート上面に上昇するブリージング水が小さいことよりセメントペーストやモルタル部分の水分が大で、実質的水セメント比が砕砂Bの場合大きくなっていること等のためと考えられる。

4. 結論

本研究で行なった実験の範囲内で以下のような結論を得た。

1) 水セメント比一定の場合、遠心力を利用して製造した粒形の良い砕砂Aを用いると同一スランプ ($8 \pm 1 \text{ cm}$) を得るための単位水量を、従来の砕砂Bを用いた場合より約 $20 \text{ Kg}/\text{m}^3$ 減少でき、また海砂の50%を砕砂Aで置き換えることによって同一単位水量で川砂に近いスランプが得られ、砕砂Aによる流動性の改善が認められた。

2) 粒子形状が良い砕砂A、川砂を用いると、所要のスランプを得るための単位水量を減少できるにも拘わらず、ブリージング率は大きくなった。しかし、単位水量を減らし、水セメント比を小さくすることによってブリージングを著しく改善できた。

3) 粒子形状の良い砕砂Aを用いたコンクリートの圧縮強度は $W/C=50\%$ 以上では、粒子形状の悪い砕砂Bを用いた場合より全体的に小さくなり、さらに $W/C=60\%$ では約30%低下した。

4) 粒子形状の良い砕砂Aを用いたコンクリートの引張強度は $W/C=50\%$ 以下の場合、粒子形状の悪い砕砂Bの場合と同程度であった。しかし、同一圧縮強度における引張強度では、粒子形状の良いもの程大きくなり砕砂Aの場合は砕砂Bの場合より約0~10%大きくなり、低強度コンクリート程その差は顕著に現われる。

5) 以上のことより、粒子形状の良い細骨材を用いる場合、所要の単位水量を大幅に減少できるので、水セメント比を小さく設定することによってコンクリートの品質を著しく改善できる。

5. あとがき

本研究は、広島県が推奨している産学共同研究の一環として破砕機製造メーカーとタイアップして行なったもので、広島県産業技術振興機構より研究補助金を賜った。記してお礼申し上げる。

<参考文献>

- 1) 岡田 清, 六車 照; 改訂新版コンクリート工学ハンドブック 1981年
- 2) 田澤栄一他; ブリージングを想定したモデルコンクリートの圧縮破壊性状: コンクリート工学年次論文報告集 第九巻 1987年