論文　砕砂を用いたコンクリートの基礎的性状に関する検討

山本　大介[*1]・松下　博通[*2]・鶴田　浩章[*3]・尾上　幸造[*4]

要旨：天然海砂細骨材の採取規制が厳しくなっており，代替細骨材の検討が急務となっている。本検討では，九州地区において採取される代表的な砕砂を5種類取り上げ，高炉セメントB種を用いたコンクリートの基礎的性状を検討した。その結果，砕砂を全量使用するか海砂と混合して使用するかにかかわらず，コンクリートの単位水量には細骨材の実積率および微粒分量が大きく影響していることが確認された。また，コンシステンシーを一定とした配合でコンクリートを作製し，フレッシュ性状および硬化性状について検討した結果，砕砂を全量使用した場合においても海砂を用いた場合と同等以上の品質を確保できることが分かった。

キーワード：砕砂，単位水量，実積率，粒形判定実積率，フレッシュ性状，硬化性状

1. はじめに

近年，コンクリート用細骨材，特に海砂細骨材の採取環境が厳しくなっており，近い将来その需給が逼迫することが考えられる。これに備え，砕砂，産業副産物，建設副産物などをコンクリート用細骨材として使用するための検討が急務となっている。

このうち，砕砂は他の代替細骨材に比べ，低コストおよび安定供給が可能という点で，代替細骨材の主役となることが期待され，さらに高品質の砕砂製造に向けての動きもある[1)]。

砕砂は，一般に粒形が角張っており，微粒分が多いため，同一のコンシステンシーを得るための単位水量が海砂細骨材を用いた場合に比べてかなり増大する。そのため，現状では砕砂を細骨材として全量使用することは困難であり，海砂と混合して使用するのが一般的である。しかしながら，今後西日本地区においては，海砂採取が全面禁止の方向へ向かうことも考えられるため，砕砂を細骨材として全量使用することは十分考えられる。また，砕砂を全量使用したケースでの研究事例[2)]はいくつか報告されているが，九州地区の砕砂を対象にして高炉セメントを用いたコンクリートに関する検討例はあまり見当たらない。

このような背景から，本検討では代替細骨材として九州地区において採取される砕砂のうち，代表的な5種類を取り上げ，フレッシュ性状と硬化性状に関して総合的に検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

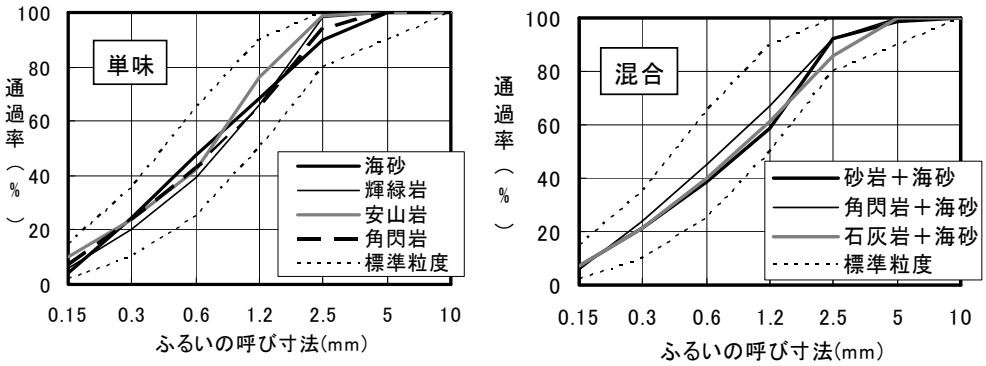
セメントに高炉セメントB種（密度3.02g/cm^3，比表面積3900cm^2/g），粗骨材に北九州市門司区産砕石2005（表乾密度2.72g/cm^3，吸水率1.10%）を使用した。また，混和剤としてリグニンスルホン酸系のAE減水剤およびアルキルアリルスルホン酸系のAE助剤を併用した。

今回検討した砕砂5種類および海砂の物性を**表－1**に，粒度分布を**図－1**に示す。なお，今回取り上げた砕砂は，九州地区で採取される代表的な砕砂である。砕砂のうち，輝緑岩および

*1　九州大学大学院　工学研究院　建設デザイン部門　技術職員　修士（理学）（正会員）
*2　九州大学大学院　工学研究院　建設デザイン部門　教授　工博（正会員）
*3　九州大学大学院　工学研究院　建設デザイン部門　助教授　博士（工学）（正会員）
*4　九州大学大学院　工学府　建設システム工学専攻　修士（工学）（正会員）

表－１　使用細骨材の諸物性

細骨材の種類		表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	微粒分量 (%)	粒形判定実積率 (%)
単味	海砂(福岡県)	2.59	0.80	2.65	66.7	1.6	59.6
	輝緑岩(鹿児島県川内市)	2.86	1.56	2.71	67.7	1.7	58.4
	角閃岩(熊本県鹿本郡)	2.95	1.35	2.67	62.1	7.0	55.0
	安山岩(長崎県長崎市)	2.71	1.90	2.48	65.7	3.5	57.4
	砂岩(北九州市門司区)	2.69	1.08	3.01	67.5	4.0	53.8
	石灰岩(福岡県田川郡)	2.65	0.59	2.67	66.9	5.1	57.5
混合	砂岩+海砂			2.83	70.0	2.4	
	角閃岩+海砂			2.66	69.7	4.3	
	石灰岩+海砂			2.85	68.3	3.4	



図－１　細骨材の粒度分布

安山岩については，前者は湿式，後者は乾式で整粒処理を行っており，全量使用が期待できることから,全量を細骨材として使用した。砂岩，石灰岩および角閃岩についてはクラッシャーランにより製造されており，粒度および粒形の改善を目的として，海砂と質量比 1 対 1 で混合したものについて検討を行った。また，比較のため，角閃岩については全量使用した場合についても検討した。また，角閃岩の岩石的特長として,熱変成岩であり片理を持つことが挙げられ,風化をしやすいことが挙げられる。このため微粒分量が多かったと考えられる。

2.2 コンクリートの製造

砕砂の表乾判定は JIS A 1109 に準拠し，微粒分量試験により微粒分を除去した試料を用いて，フローコーンにより表乾判定を行った。細骨材は，表面水を少量含む状態で準備し，打設の直前に JIS A 1111 により表面水率を測定し，これを補正することで使用した。粗骨材は表乾状態に調整して使用した。

コンクリートは，温度 20℃，相対湿度 60%に設定した試験室内にて,容量 50 リットルのパン型強制練りミキサーにより練り混ぜた。練混ぜ量は 30 リットルとした。練混ぜは,まず粗骨材,セメント，細骨材の順にミキサー内へ投入し，30 秒間の空練りを行った後，混和剤を溶解させた水を加え，さらに 150 秒間練混ぜた。なお，総練混ぜ時間が 120 秒の時点で一旦ミキサーを停止し，金コテによるかき落としを行った。

2.3 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合は，目標スランプを 10±2.5cm，目標空気量を 4.5±1.5%とし，水セメント比を 50%とした。配合決定にあたっては，まずスランプが 10cm 前後となるよう単位水量を調整し，続いて細骨材率を変化させ，スランプが最大となる時を最適細骨材率とした。さらに，スランプが 10cm となるよう単位水量を再び調整することで決定した。

2.4 検討項目

(1) フレッシュコンクリート

練上がり直後のフレッシュコンクリートについて，スランプ試験（JIS A 1101），空気量試験

表－２　コンクリートの示方配合

細骨材の種類		W/C	s/a	単位量							スランプ	空気量	練上がり温度
				W	C	S1	S2	G	AE減水剤	AE助剤*			
		%		kg/m^3						ml/m^3	cm	%	℃
単味	海砂	50	40.0	174	348	635	－	1144	1.09	1.75A	10.5	2.4	20.0
	輝緑岩		47.3	175	350	845	－	1006	1.09		9.5	4.4	22.5
	安山岩		45.5	179	358	759	－	1029	1.12		9.0	1.7	19.5
	角閃岩		42.7	185	370	758	－	1065	1.16		10.0	2.5	19.0
混合	角閃岩(S1)+海砂(S2)		41.0	172	344	350	350	1134	1.08		10.0	1.5	22.0
	砂岩(S1)+海砂(S2)		45.1	173	346	372	372	1053	1.08		9.5	2.4	20.5
	石灰岩(S1)+海砂(S2)		46.0	172	344	381	381	1038	1.08		9.5	3.0	22.0

*AE 助剤の添加量 1A＝セメント 100kg に対し 200ml

（JIS A 1128）を行った。また，試練りにより決定した配合のフレッシュコンクリートについて，ブリーディング試験（JIS A 1123）および凝結試験（JIS A 1147）を行った。

(2) 硬化コンクリート

a) 圧縮強度

供試体は，φ10×20cm の円柱供試体を用い，JIS A 1108 に準拠した。試験材齢は，7，28 および 91 日とした。

b) 静弾性係数

JIS A 1149 に準拠し，静弾性係数を求めた。

c) 促進中性化試験

供試体は, 10×10×40cm の角柱供試体を用いた。打設後，材齢 1 日で脱型し，材齢 2 週まで水中養生を行い, その後材齢 4 週まで温度 20℃，相対湿度 60%の室内にて気中養生を行った。その後，温度 20℃，相対湿度 60%，CO_2 濃度 5%の装置内にて曝露を開始した。中性化深さの測定にあたっては，JIS A 1153 に準拠し，フェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧して未着色部の深さを測定した。測定材齢は, 2, 4, 8，13，26 週としたが，本検討では 8 週までの結果について述べる。

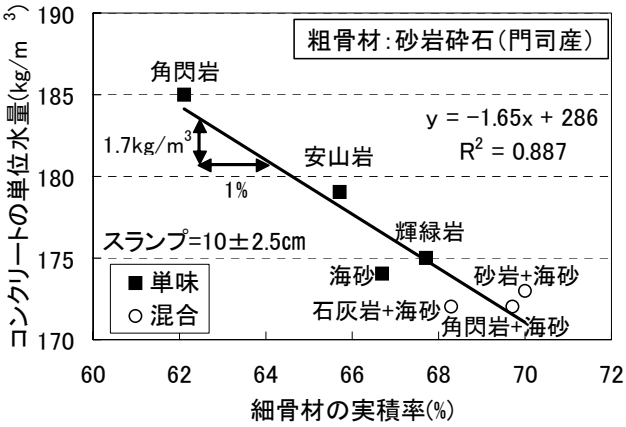
3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

(1) コンクリートの単位水量及び細骨材率

表－2 に試練りにより決定したコンクリートの示方配合を示す。なお，本検討で決定した配合では目標空気量 4.5±1.5%より小さなものもあるが，本検討の趣旨が凍結融解作用の少ない九州地区での海砂代替細骨材の検討を考えたものであり，その為，空気量が目標値に入らない場合でも示方配合として決定した。

細骨材の種類が異なることで，コンクリートの単位水量および細骨材率が大きく異なることが分かる。従来，コンクリートの単位水量に与える細骨材の物性として，粒度，形状および微粒分量などが指摘されている。そこで，本検討においても，これらの細骨材物性とコンクリートの単位水量および細骨材率との関係を調べた。まず, コンクリートの単位水量を目的変数とし，粗粒率，実積率，微粒分量を説明変数として重回帰分析を行った。その結果，コンクリートの単位水量に与える細骨材物性のうち，実積率のみ有意水準 1%で有意と判定された。そこで，**図－２**に細骨材の実積率とコンクリートの単位水量の関係を示す。一定のスランプを得るために必要なコンクリートの単位水量と実積率の間



図－２　細骨材の実積率とコンクリートの単位水量の関係

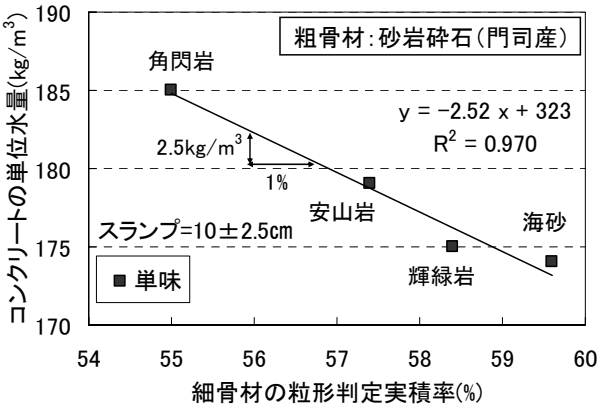
には直線的な関係が認められ，この関係は細骨材の使用条件が単味であるか混合であるかにかかわらず，一定である。本検討で用いた砕石を使用した場合，細骨材の実積率が 1%大きいごとにコンクリートの単位水量を約 1.7kg/m^3 低減できることが分かった。また，砕砂と海砂を混合することにより実積率が向上したものについては，海砂を全量使用した場合よりも単位水量が少なくなった。適度な粒度および粒形を有する砕砂を海砂と混合して用いることによって，海砂を全量使用した場合よりもコンクリートの性状を改善できる場合があるといえる。

細骨材の粒形を表す指標として，粒形判定実積率がある。**図－３**に細骨材の粒形判定実積率とコンクリートの単位水量の関係を示す。両者の間には良好な相関が認められ，細骨材の粒形判定実積率が 1%増加するごとにコンクリートの単位水量が約 2.5kg/m^3 減少することが分かる。混合細骨材の場合，混合する細骨材の粒度分布が異なると,各粒度での混合割合が異なるため，骨材の形状が粒度にかかわらず相似であると仮定している粒形判定実積率は求めることができない。このような場合であっても，粒形および粒度分布の影響をともに考慮している実積率を指標とすることで単位水量のおおよその目安をつけることが可能であると考えられる。

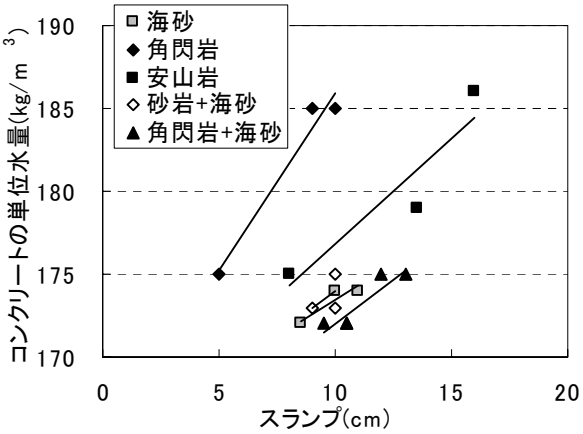
コンクリートの細骨材率に与える細骨材物性の影響であるが，本検討の範囲内においては，いずれの細骨材物性も有意と判定されなかった。この点については，今後追加実験を行うことにより，詳細に検討する必要がある。

次に，試練りのデータを用い，それぞれの細骨材についてコンクリートの単位水量とスランプの関係を調べた。このとき，データとして，各細骨材につき細骨材率が同程度のものを選択した。**図－４**にコンクリートの単位水量とスランプの関係を示す。コンクリートの単位水量とスランプとの間には正の関係があるため，係数 A，B を導入し，式(1)の関係を仮定した。

$$(\text{単位水量})=A\times(\text{スランプ})+B \qquad (1)$$



図－３　細骨材の粒形判定実積率とコンクリートの単位水量の関係



図－４　コンクリートの単位水量とスランプの関係

表－３　スランプと単位水量の関係

(単位水量)＝A×(スランプ)＋B		
細骨材の種類	係数A	定数項B
海砂	0.84	165
安山岩	1.27	164
角閃岩	2.14	165
砂岩＋海砂	1.00	164
角閃岩＋海砂	1.09	161

A，B を最小二乗法により計算した結果を**表－３**に示す。係数 A は，スランプを 1cm 増減させるための単位水量を示している。また，定数項 B は，単位水量を低い方から順次増やしていったとき，コンクリートが初めてスランプするときの単位水量であると考えられるが，これは細骨材の種類によらずほぼ同程度の値となった。

算出された各細骨材の係数Ａを目的変数とし，

細骨材の粗粒率，実積率および微粒分量を説明変数として重回帰分析を行った。なお，このとき角閃岩のデータについては外れ値と判断し，除外した。その結果，実積率および微粒分量がそれぞれ 5%および 1%で有意と判定された。重回帰分析により得られた関係を式(2)に示す。

$$A = -0.036 \times (\text{実積率}) + 0.25 \times (\text{微粒分量}) + 2.8 \quad (2)$$

式(2)より，実積率が大きいほど，また微粒分量が小さいほど，スランプを 1cm 増減させるための単位水量が小さくなることが分かる。

以上のことより，砕砂をコンクリート用細骨材として使用する際には，単位水量を低減するという観点から，なるべく実積率が大きい細骨材を用いると同時に，材料分離しない範囲で微粒分量の小さい細骨材を用いる必要があることが示された。

(2) ブリーディングおよび凝結特性

表－４に最終ブリーディング量，最終ブリーディング率およびブリーディング終了時間を示す。

角閃岩単味および角閃岩と海砂混合のケースを除き，砕砂単味あるいは砕砂と海砂混合の場合の方が，海砂単味の場合よりもブリーディング率およびブリーディング終了時間が減少している。これは，砕砂に含まれる微粒分の影響と考えられる。角閃岩は微粒分量が 7%と非常に大きいにもかかわらずブリーディング率が大きくなったが，これは単位水量が大きかったためと考えられる。

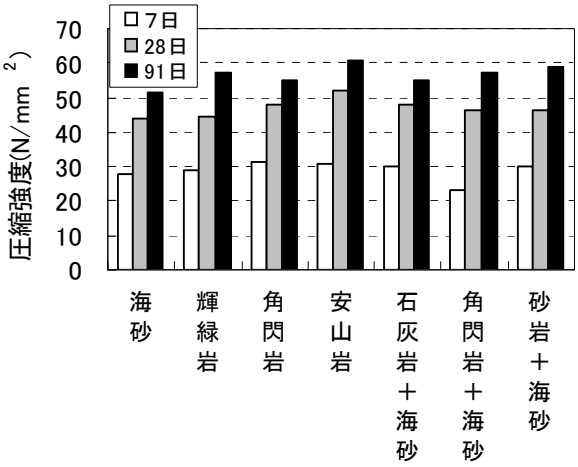
なお，安山岩のブリーディング率とブリーディング終了時間が極端に小さいことが分かる。この原因については，今後検討が必要である。

次に，凝結試験結果について述べる。砂岩と海砂の混合のケースを除き，砕砂を単味あるいは混合で使用した場合には，海砂単味の場合よりも凝結時間は短くなる傾向が認められる。

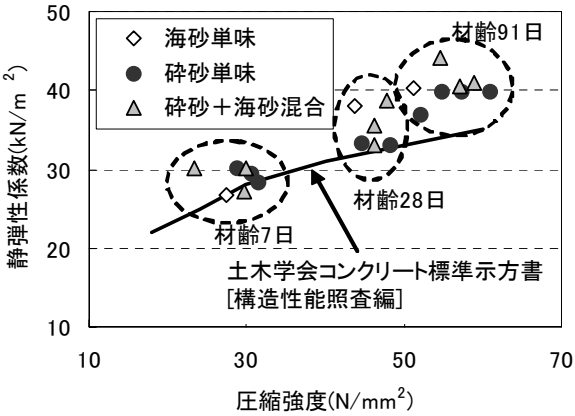
なお，ブリーディング試験と同様に，安山岩の場合のみ凝結時間が極端に短くなった。この原因についても今後検討する必要がある。

表－４　ブリーディングおよび凝結特性

細骨材の種類	最終ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	最終ブリーディング率 (%)	ブリーディング終了時間(分)	凝結時間 (分)	
				始発	終結
海砂	0.22	6.17	390	492	678
角閃岩	0.23	6.33	370	480	638
安山岩	0.11	2.99	240	368	519
砂岩＋海砂	0.14	4.27	300	542	714
石灰岩＋海砂	0.16	5.52	365	459	618
角閃岩＋海砂	0.19	6.66	330	463	625



図－５　圧縮強度試験結果

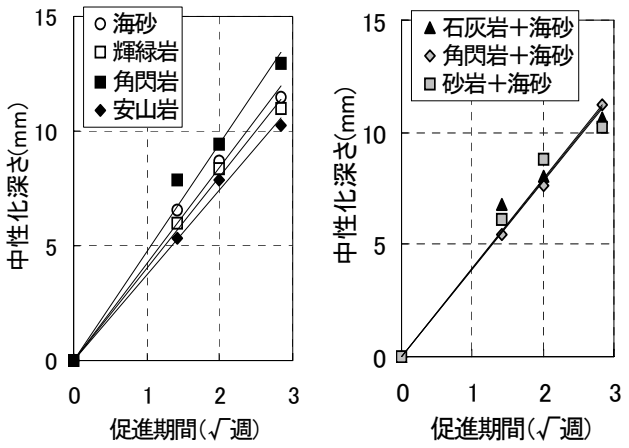


図－６　圧縮強度と静弾性係数の関係

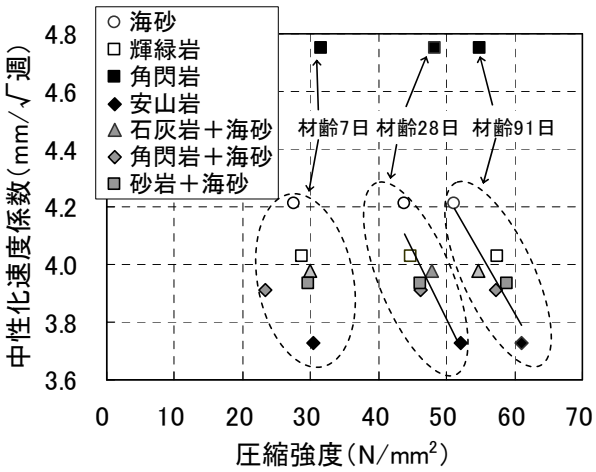
3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度および静弾性係数

図－５に圧縮強度試験結果を示す。海砂単味のケースと比較すると，砕砂単味あるいは砕砂と海砂混合の場合に，圧縮強度が同等かそれよりも高くなる傾向にある。この理由として，使用する細骨材によりモルタル全体の緻密さが異なることが推測され，このことが影響したと考



図－７　促進中性化試験結果



図－８　各種細骨材を用いた場合の中性化速度係数と圧縮強度の関係(W/C=50%)

えられる。

図－６に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお，図中には土木学会コンクリート標準示方書［構造性能照査編］より求められる，静弾性係数の値をあわせて示す。圧縮強度と静弾性係数の関係に対して，細骨材の種類の影響は明確には現れなかった。また，本検討で得られた静弾性係数は，土木学会コンクリート標準示方書［構造性能照査編］による値よりも全体的に高い。これは，材齢によらず同様であった。

(2) 促進中性化試験

図－７に促進中性化試験の材齢 8 週までの試験結果を示す。角閃岩単味の場合を除き，砕砂を全量使用あるいは海砂と混合使用することにより，中性化深さが海砂単味の場合よりも小さくなる傾向が読み取れる。この理由として，圧縮強度の場合と同様に，モルタル全体の緻密さの差異が中性化速度係数に影響したと考えられる。**図－８**に中性化速度係数と圧縮強度の関係を示す。角閃岩を除いて両者の間には直線的な相関が認められる。

角閃岩の中性化速度係数が他の細骨材に比べ若干大きくなった理由としては，角閃岩は風化をしやすく微粒分が多く，この微粒分が硬化コンクリート中のセメントペーストと骨材の界面中に混入し，その微粒分間を通って CO_2 が浸透したと考えられ，その結果，他の細骨材使用コンクリートに比べ中性化速度係数が大きくなったと推測される。

4. 結論

(1) 粗骨材の種類を一定とした場合，細骨材の使用条件が単味であるか海砂との混合であるかにかかわらず，同一のコンシステンシーを得るための単位水量は細骨材の実積率と関係がある。

(2) 細骨材の実積率が小さいまたは微粒分量が大きい領域ではスランプを 1cm 増減させるための単位水量が大きくなる。

(3) 本検討の範囲内において，砕砂を全量使用した場合でも，海砂を全量使用した場合と同等かそれ以上の強度および中性化抵抗性を確保できることが確認された。

参考文献

1) セメント新聞社：コンクリートテクノ臨時増刊号「これからの細骨材」，p.140，2004.12

2) 池田正志，大河原行省，辻幸和，田澤栄一：砕砂の表面形状がフレッシュコンクリートの諸性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.325-328，1994