

改良骨材の製造とV 7 乾式製砂システム からの副産微石粉混入コンクリートの諸性質

橋 本 勝 由^{※)}

1. はじめに

環境保全・資源の枯渇等により砕石・砕砂への転換が増加し、特に良質な砕砂の需要が高まっている。砕砂製造設備においては、主にコスト面での優位性のほか、生産工程で発生する微石粉の有効利用の必要性があり、製造方法は湿式から乾式に移行している。本報告では、『回転式遠心破塊装置（パーマック・ハスラー）を用いて製造した骨材と従来の打撃破砕機（インパクトクラッシャー）による骨材を比較し、骨材の製造方法が骨材の品質に与える影響』、『V 7 乾式製砂システムにより生産された粒形改善砕砂（V 7 砕砂）と天然細骨材との置換率の変化に伴うコンクリートの品質への影響』、『微石粉を多量に用いたコンクリートの性質』について、実証した結果を報告する。

2. パーマック・ハスラーが粗骨材の品質に与える物理的影響

2. 1 実験の目的

本研究の目的は、骨材の加工工程においてパーマック・ハスラーとインパクトクラッシャーが粗骨材に与える物理的影響を調査することにより、骨材が本来もっている性状および強度を極力低下させることのないより良い加工技術を比較検討することである。その結果としてコンクリートの性能向上を目指すものである。

2. 2 調査内容

同一原料を用いて、破碎方式別に以下5項目について比較した。

(1) 骨材の品質

絶対密度、吸水率、安定性、すりへり減量、実績率をJISの試験方法に準じて試験した。

(2) 骨材の形状判定

骨材の偏平度を、形状判定により調査した。

(3) 骨材自体に存在するマイクロクラック

生産工程において骨材に発生するマイクロクラック（破断に至らない微少な亀裂）の存在を調査した。

(4) 骨材表面の性状

構造物を構成する際、骨材はセメントとの接着で成り立っている。したがって、骨材との接着性を左右する骨材表面性状を顕微鏡にて調査した。

(5) 骨材破碎試験

静的圧縮荷重下における骨材の破壊に対する抵抗性を評価した。

2. 3 調査した試料

(1) 試料の岩質

試料の岩質は、国内で最も一般的である砂岩とした。圧縮強度は180N/mm²程度である。

(2) 破碎方式

コーンクラッシャー、インパクトクラッシャー、パーマック・ハスラーの3種類を比較対象とした。パーマック・ハスラーの概略図を図1に示す（他破碎原理の説明は周知のため省略する）。

(3) 試料の加工工程

試料の加工工程を図2に、生産工程におけるそれぞれの機械諸元を表1に示す。

(4) 試料サイズおよび試料の説明

試料は6号砕石（13～5mm）とした。試料の呼び方を

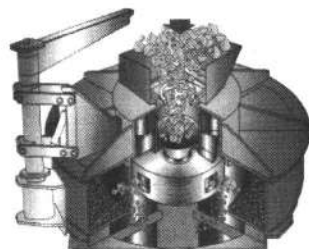


図1 パーマック・ハスラー

※) コトブキ技研工業(株) 技術・製造本部 開発部 開発課

以下のとおりとする。

試料A：コーンクラッシャー通過物

試料B：試料Aのインパクトクラッシャー通過物

試料C：試料Aのパーマック・ハスラー通過物

2. 4 試験方法

(1) 骨材の品質

試料の密度、吸水率、実績率はいずれも JIS に準じ測定した。

(2) 骨材の形状判定

図3に計算方法および形状イメージを示す。試料A、B、Cのサンプル各100個を任意に選び、ノギスにて厚み、幅、長さを測定し、偏平度、偏長度、細長比を計算し、ZINGのグラフにて形状判定を具象化する。また、細長比3以上の細長・偏平石含有率を調査した。

(3) マイクロクラックの調査

直径30mmの筒状の型枠に試料A、B、Cをそれぞれ5～7個入れ、充填剤にて試料を固定し、湿式切断機にて

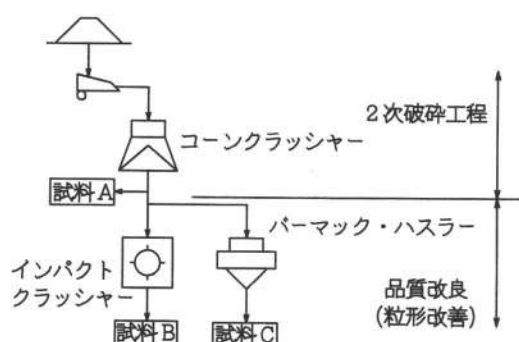


図2 試料の加工工程

表1 機械緒元

項目	圧縮破碎機	打撃破碎機	回転式遠心破塊装置
機械名称	コーンクラッシャー	インパクトクラッシャー	パーマック
型式	マントル径 45"	ロータ径 63"	ハスラー US394H
仕様	CSS28mm 出口スキマ	V=27m/s ハンマースト	V=45m/s ロータスト
試料名	試料A	試料B	試料C
処理量	270～300t/h		

切断後、切断面（図4）を研磨し、すべての観察面での亀裂発生を顕微鏡により調査し、併せて長さ測定から比較検討する。なお、本調査は骨材の一断面の調査で、骨材全域に及ぶものではない。

(4) 骨材表面の性状比較

試料B、Cの電子顕微鏡による表面性状調査を行った。倍率は500および1000倍とした。

(5) 骨材破碎試験（BS812に準ずる）

内径154mmの容器に各試料を3層に詰め、突き棒で各層25回突き固める（図5）。

容器を荷重機にセットし、一定速度にて10分間で398kNを載荷する。

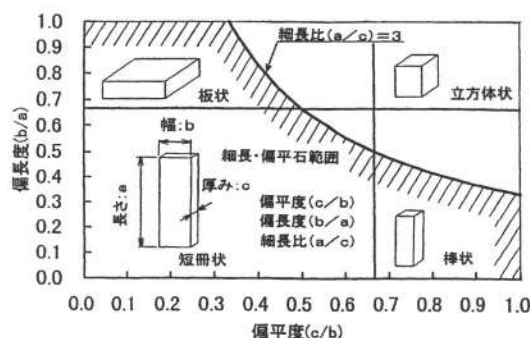
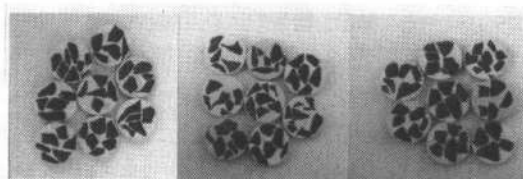


図3 偏平、偏長模式モデル



試料A 試料B 試料C

図4 表面研磨サンプル

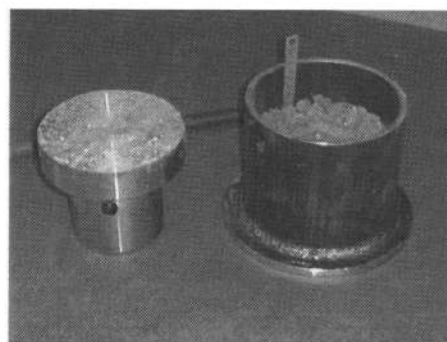


図5 容器の外観

その後、荷重機から容器を取り外し、2.5mmのふるい目
 である。試験は2回行い、評価は下記方法による。

$$\text{骨材破砕値 (CV)} = B/A \times 100 (\%) \quad (1)$$

A：表乾状態の試料重量 (g)

B：2.5mmふるい目を通過する

試料重量 (g)

2. 5 調査結果および考察

(1) 骨材の品質

骨材の物理的性質を表2に示す。試験結果よりパーマック・ハスラーにて加工した骨材の方が、コーンクラッシャー・インパクトクラッシャーにて加工した骨材よりすべてに良好な結果が得られた。

(2) 骨材の形状判定

骨材の形状判定結果を表3に、詳細をZINGのグラフ図6、7、8に示す。

パーマック・ハスラーにより処理されることによって、細長・偏平石含有率42.4%であった原料（コーンクラッシャーで処理された骨材）が4.7%に大幅改善された。一方、インパクトクラッシャーでは27.2%と改善率は低かった。これによりパーマック・ハスラー処理された骨材は高機能舗装の細長・偏平石含有率規格（旧日本道路公団）10%以下を満足することが確認された。ZINGのグ

表2 物理的試験結果

項 目	試料A (コーン クラッシャー)	試料B (インパクト クラッシャー)	試料C (パーマック・ ハスラー)	JISA 5005
絶対密度 (g/cm^3)	2.62	2.62	2.63	2.50 以上
吸水率 (%)	0.74	0.93	0.69	3.0以下
安定性 (%)	—	7.0	4.2	12以下
すりへり減量 (%)	—	17.1	13.8	40以下
実積率 (%)	58.6	60.2	61.9	55以上

表3 骨材の形状判定結果

項 目	試料A (コーン クラッシャー)	試料B (インパクト クラッシャー)	試料C (パーマック・ ハスラー)
偏平度平均	0.534	0.618	0.661
偏長度平均	0.660	0.693	0.738
細長比平均	3.362	2.636	2.179
細長・偏平石含有率 (%)	42.4	27.2	4.7

ラフによって確認出来るようにパーマック・ハスラーにおいては、ほとんどの骨材がほぼ立方体に形状改善されていることがわかる。

(3) マイクロクラックの調査結果

観察結果を表4、マイクログラック分布図を図9に示

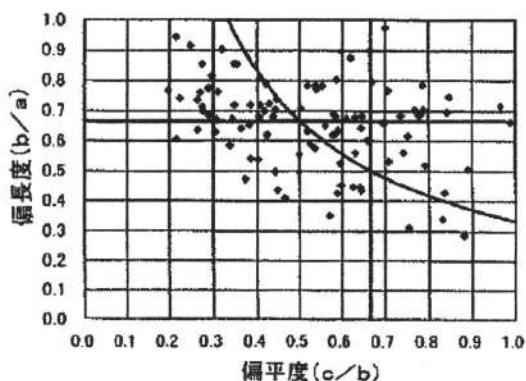


図6 試料A：コーンクラッシャー

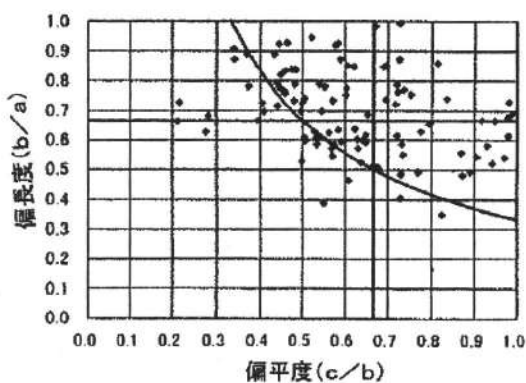


図7 試料B：インパクトクラッシャー

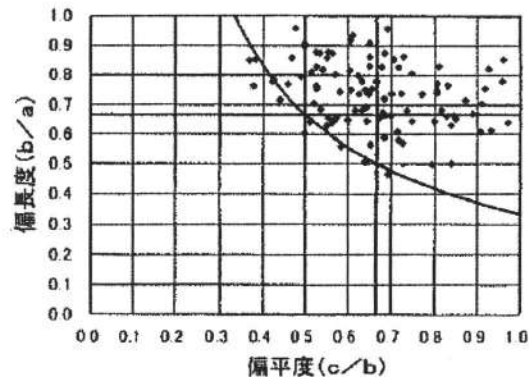


図8 試料C：パーマック・ハスラー

す。観察結果よりマイクロクラック発生率および改善率を表5に示す。コーンクラッシャーで発生したと考えられるマイクロクラックは、インパクトで処理されることで発生率の改善は無かったが、パーマック・ハスラーでは改善が確認された。また、マイクロクラックの総長さでは、インパクトクラッシャーにおける改善率は28.2%、パーマック・ハスラーの場合では61.9%の改善率であり、その差は歴然であった。パーマック・ハスラーは原料同士の衝突により、より弱い脆弱部分が破碎される。また、外部からの強制的な衝撃が無いため、新たなマイクロクラックが発生しない。これらのことによりマイクロクラックが改善されると考えられる。マイクロクラックの一例を図10に示す。

(4) 骨材表面の性状比較結果

図11のごとく電子顕微鏡の500および1000倍撮影にて試料B（インパクトクラッシャー）の骨材表面は微少な鱗片状が多く確認されたが、試料C（パーマック・ハスラー）の骨材表面は接着性が良いとされている“なし地

状”の表面であった。

(5) 骨材破碎試験結果

骨材破碎試験結果を表6に示す。骨材破碎値はインパ

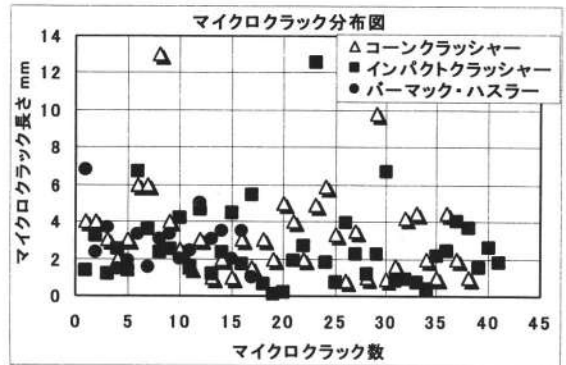


図9 マイクロクラック分布図

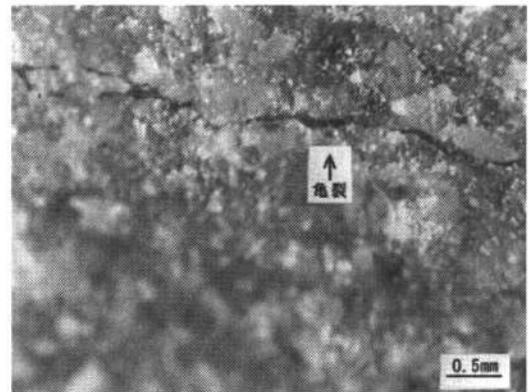


図10 マイクロクラック顕微鏡写真例

項目	試料A (コーン クラッシャー)	試料B (インパクト クラッシャー)	試料C (パーマック・ ハスラー)
試料数	45	53	46
MC*のある 試料数	23	27	15
MC*の本数	38	41	18
MC*の総長さ (mm)	127.4	107.7	49.6

*MC：マイクロクラックを意味する。

表5 マイクロクラック発生率

項目	試料A (コーン クラッシャー)	試料B (インパクト クラッシャー)	試料C (パーマック・ ハスラー)
MC発生率 (%)	51.1	50.9	32.6
MC平均発生 本数 (本/個)	1.652	1.519	1.2
MCの総長さ (mm) *	141.6	101.6	53.9
MCの総長さ 改善率 (%)	—	28.2	61.9

*骨材 50 個当り換算のMC総長とする。

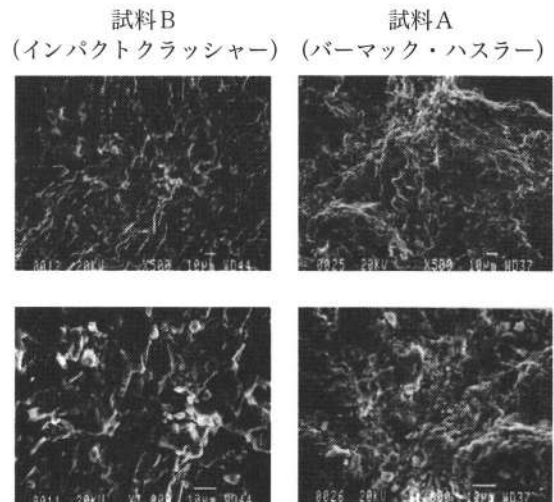


図11 骨材表面性状

クトクラッシャーではほとんど改善されなかったが、バーマック・ハスラーでは26.5%改善された。これは形状改善のほか、マイクロクラック発生率改善効果に影響していると考えられる。

表6 骨材破碎値 (CV)

項 目	試料A (コーン クラッシャー)	試料B (インパクト クラッシャー)	試料C (バーマック・ ハスラー)
CV値 (%)	21.5	22.1	15.8

3. V7乾式製砂システムにより生産された粒形改善砕砂 (V7砕砂) と天然砂適正置換量

3.1 実験概要

河川砂の枯渇・海砂採取禁止に伴い、それらに変わる高品質な代替骨材の開発が望まれている。そこで、バーマック・ハスラーとエアースクリーンを採用したV7乾式製砂システム設備によって生産された粒形改善砕砂(以降、V7砕砂と記す)が、標準配合を変更することなく天然砂代替材として使用可能な置換率について検討した。

3.2 V7乾式製砂システムについて

V7乾式製砂システムのフローを図12に、システム外観を図13に示す。このシステムは、バーマック・ハスラーセブンの消費電力制御による自動運転が可能で製品粒度変化が非常に少ない。また、砂粒度バランスを考慮した粒度調整が可能で、加水混合機にて製品表面水は常時一定に保ち、さらに無粉塵、低騒音で環境に優しいなどの特長を持つ。

(1) バーマック・ハスラーセブン

バーマック・ハスラーをベース機とし破碎比を従来の3倍、又整粒効果の向上も可能にした破碎専用5ポートインパクトロータ採用。構造は図14の如くである。

(2) エアースクリーン

この目的は従来、砕砂を生産する場合粒度調整の為、振動篩機によって3~4mmでカットして、そのオーバーを再度破碎機によって破碎していく方法が一般的であったが、これでは粒度構成上2.5~1.2mmの割合が多い上、0.3~0.15mmの割合が少なく、砂として粒度バランスの悪

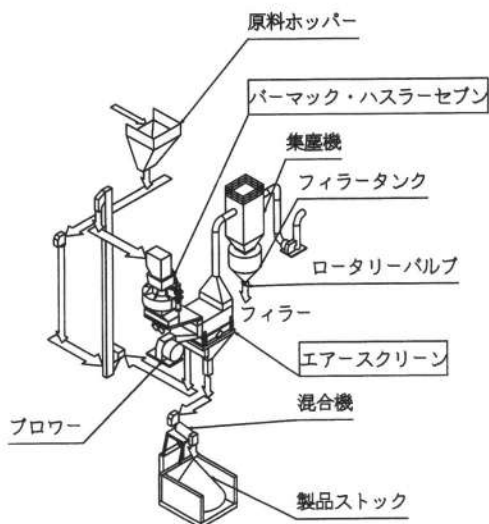


図12 システムフロー

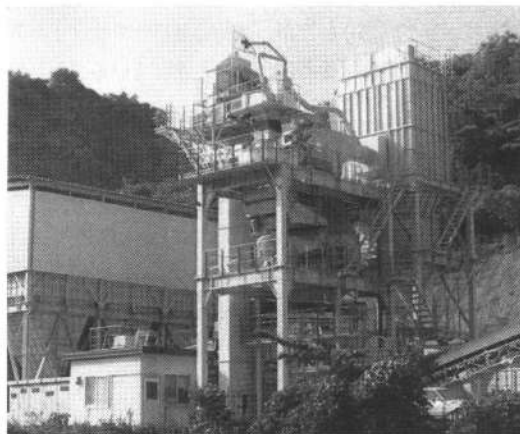


図13 V7乾式製砂システム外観

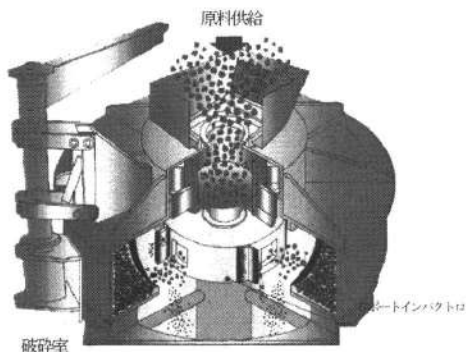


図14 バーマック・ハスラーセブン内部構造

い比較的粗い砂となる。この傾向を改善する為、エアースクリーンを開発した。

エアースクリーンの構造は図15の様な断面構造をしており、投入口より投入された破砕物はブローアの風力選別効果により①～⑤の如く選別される(図16参照)。エアースクリーンはこの粒度バランスを補正する為、ダンパーにより⑤の全量と大幅に2.5～1.2mmが多い④の一部をリターンさせ再破碎する事により粒度バランスを調整する(従来はこの方法を振動篩機にて行っていたが、これでは篩の面積が非常に多く必要で又目詰まりの問題も発生し現実的ではなかった)。そして最も微粉を含む①の微粉はフードの吸引風により分級される。又吸引を逃れた微粉は落下中、製品シュートからの上昇風によりさらに

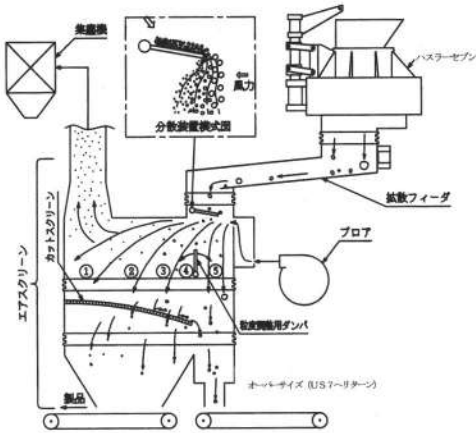


図15 エアースクリーン内部構造

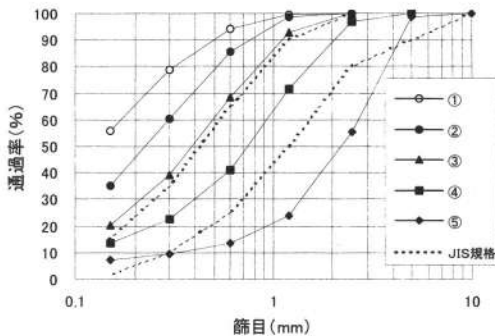


図16 エアースクリーン内領域別粒度
(データは社内実験による)

分離分級され、より精度の高い分級性能を発揮する。更に①、②、③と④の一部はカットスクリーン状に落下し篩われトップサイズを揃える。尚そのオーバーサイズはリターンされ再破碎される。以上の如くエアースクリーンは風力選別による粒度調整、分級、トップサイズのカットと3つの機能を発揮する。

(3) 稼働実績

V7乾式製砂システム第1号機が2001年1月に納入(本格販売開始は2001年の秋)され2006年5月現在で34台納入されている。稼働時間は最も多いユーザーで約10500時間に達している。

3.3 実験方法

製造したV7砕砂が天然砂にどの程度置換することができるかを検討するために、表7に示す標準配合に、置換率30%、70%とした条件で、フレッシュコンクリートの性質および強度を比較した。試料の特性値は表8に示すとおりである。

3.4 V7砕砂による試験練り結果

従来砕砂をV7砕砂30%に置換し、山砂70%とした試

表7 標準配合

NO.	呼び強度	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材 かさ容積
1	18	68	8	45.5	172	660
2		68	15	45.6	186	640
3	24	57	8	44.7	168	660
4		57	18	45.8	194	610
5	30	49	15	43.1	184	640
6		49	18	44.0	196	610

* 山砂70%, 砕砂30%

表8 試料の特性値

	密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)
セメント	3.15	—	—	—
細骨材 (山砂)	2.57	1.52	2.87	—
細骨材 (V7砕砂)	2.65	1.55	2.79	—
粗骨材 (2005)	2.69	0.86	6.61	58.0
混和剤	1.065	—	—	—

験練り結果を表9に示す。また、V7砕砂70%、山砂30%とした試験練り結果を表10に示す。

4. V7砕砂に微石粉を多量に混入したコンクリートの諸性質

4.1 実験概要

本研究はV7乾式製砂システムによって生産されたV7砕砂をコンクリートに使用した場合と、その副産物である微石粉の多量混入の可能性について既に市販されている砕砂（以降、普通砕砂と記す）や海砂を使用したコンクリートと比較しながらその可能性を検証する。

4.2 使用材料の品質

使用材料の品質を表11に示す。図17はフィラー、細骨材および粗骨材の粒度分布を示したものである。

4.3 コンクリートの配合

表12は、試験練りに用いた配合である。

4.4 試験の結果および考察

(1) スランブ試験結果

図18はW/C=50%、W=180kg/m³の場合のV7砕砂および海砂、普通砕砂を用いたコンクリートのスランブ試験結果を示したものである。この図に示すように、0.15mm以下の微石粉の量がほぼ同じであれば、V7砕砂のス

表9 V7砕砂30%：山砂70%の試験練り結果

NO.	呼び強度	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	フレッシュコンクリートの状態				圧縮強度(N/mm ²)	
				スランブ(cm)	空気量(%)	フロー値(cm)	ワーカビリティ	7日	28日
1	18	68	8	10.0	4.8	—	良好	16.8	26.2
2		68	15	16.5	5.2	26.5×26.0	良好	18.1	27.0
3	24	57	8	9.5	4.6	—	良好	26.3	35.0
4		57	18	19.5	5.1	33.5×34.0	良好	25.8	34.3
5	30	49	15	16.5	4.6	25.5×27.0	良好	30.6	41.2
6		49	18	20.0	4.8	34.0×35.0	良好	31.1	40.6

表10 V7砕砂70%：山砂30%の試験練り結果

NO.	呼び強度	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	フレッシュコンクリートの状態				圧縮強度(N/mm ²)	
				スランブ(cm)	空気量(%)	フロー値(cm)	ワーカビリティ	7日	28日
1	18	68	8	9.5	4.4	—	良好	17.1	27.2
2		68	15	16.0	5.5	26.5×26.5	良好	17.8	28.1
3	24	57	8	10.0	4.2	—	良好	27.3	34.3
4		57	18	19.5	4.9	32.0×34.0	良好	26.5	34.9
5	30	49	15	16.5	4.6	27.0×27.0	良好	31.0	40.3
6		49	18	19.5	4.8	34.0×33.0	良好	32.1	41.2

表11 使用材料の品質

項 目	セメント	粗骨材	細骨材			フィラー
	普通ポルト ランド	砕石 最大寸法 20mm	V7砕砂	普通砕砂 (ローラミル砂)	海砂 (瀬戸内海産)	
絶乾密度 (g/cm ³)	3.15	2.70	2.61	2.61	2.56	2.55
表乾密度 (g/cm ³)	—	2.71	2.65	2.65	2.59	2.59
吸水率 (%)	—	0.45	1.69	1.69	1.88	1.44
粗粒率	—	6.55	2.78	2.78	2.23	—
0.15mm 以下含有率 (%)	—	—	—	—	—	—
粒径判定実績率 (%)	—	—	57.8	57.4	* 1	—
比表面積 (cm ² /g)	3300	—	—	—	—	3281

フィラー：V7砕砂生産時分級回収した0.15mm以下の石粉を示す。* 1：貝殻混入のため測定不可。

ランプ値が最も大きく、海砂、普通砕砂の順に小さくなった。これはV7砕砂の粒形が丸みをおびていることが考えられる。また、V7砕砂に微石粉の混合率を多くす

ると、スランプ値は低下する傾向を示した。この低下量は微石粉混合率を10%増加させると約5cmであった。したがって、微石粉を多量に混合することによりスランプが低下するが、高性能AE減水剤の添加により、ワーカビリティを改善できるものと考えられる。

(2) プリーディング試験結果

プリーディングはコンクリートの耐久性および鉄筋との付着に大きく影響することから微石粉の影響をプリーディング率で評価するためプリーディング率を調べた(この結果、0.15mm以下の微石粉混入率が5%のV7砕砂は材料分離が見られたため、この配合試験は行わなかった)。

図19は、プリーディング試験結果である。海砂、普通砕砂に比べV7砕砂の方が、プリーディング率は小さくなった。また、V7砕砂をベースとすると微石粉量を増

加させるとプリーディング率は低減する傾向を示した。これは、微石粉量が結合材の分散効果とそれによる保水性の向上、水が吸着する濡れ面積の増加につながるためと思われる。

(3) 微石粉混入率の空気連行性への影響

図20は空気量試験結果である。微石粉を多量混合することにより空気量が減少している。これは混和剤のなかの空気連行性の成分を微石粉が吸着したためと考えられる。

(4) 圧縮強度試験結果

図21は材齢と圧縮強度との関係を示したものである。図より、材齢3日、7日では細骨材の相違による圧縮強度の差異はほと

粗骨材、細骨材、フィラーの粒度曲線

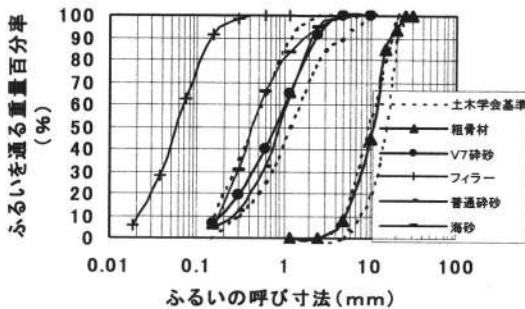


図17 粒度分布図

表12 配合表

水セメント比 (%)	細骨材の種類	FP 微石粉混合率 (%)	単位重量(kg/m³)						
			セメント	水	粗骨材	細骨材	フィラー混合量	高性能AE減水剤	AE剤
35	V7砕砂	10	514	180	1054	544	60	4.1	5.1
		20	514	180	1054	483	121	4.1	5.1
50	V7砕砂	10	360	180	992	707	79	1.8	1.8
		20	360	180	992	629	157	1.8	1.8
		5	360	180	1011	777	0	1.8	0
		9	360	180	1011	746	31	1.8	0
		15	360	180	1011	699	78	1.8	0
		20	360	180	1011	661	116	1.8	0
	普通砕砂	25	360	180	1011	622	155	1.8	0
		7	360	180	1011	738	0	1.8	0
65	海砂	6	360	180	1011	759	0	1.8	0
	V7砕砂	10	277	180	1014	750	83	1.39	1.39
		20	277	180	1014	666	167	1.39	1.39

SP: 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸塩系)

FP: 微石粉混合率は細骨材に対してフィラーを混した後の0.15mm以下の石粉含有率を示す

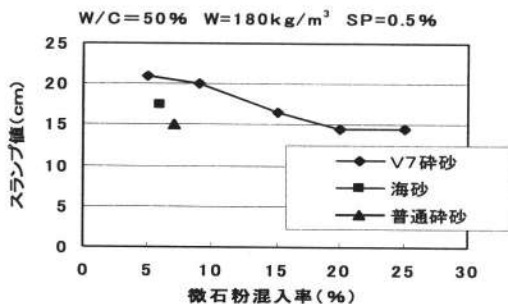


図18 スランプ試験結果

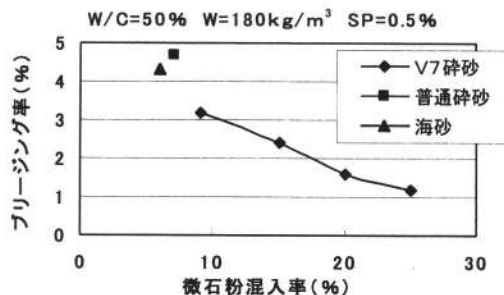


図19 プリーディング試験結果

んど認められなかったが、28日以降の強度発現性は、V7 砕砂を用いたものが最も良好であった。

これはV7 砕砂に含まれる微石粉の平均粒径がセメントの粒子とほぼ同じであるため、セメント粒子の分散および微粉末効果等により、他の細骨材を用いた場合と比べて強度が増進したものと考えられる。

図22はV7 砕砂の微石粉混入率と圧縮強度との関係を、W/C をパラメーターで示したものである。この図より、いずれのW/Cでも微石粉混入率が増えるにつれて圧縮強度が増加している。これらは、微石粉を多量に混入し

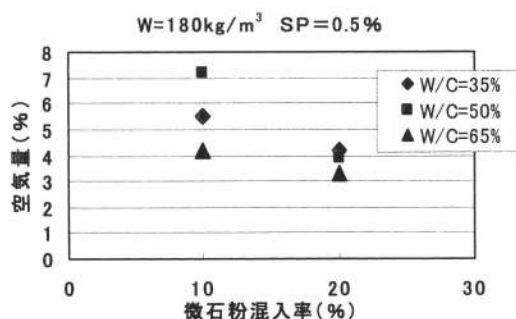


図20 V7 砕砂の空気量試験結果

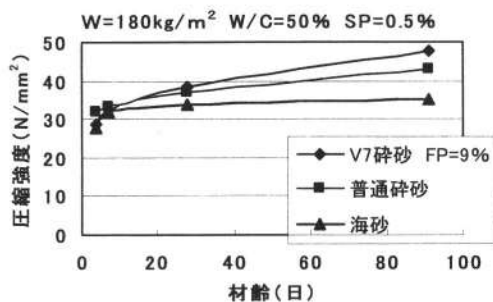


図21 圧縮強度発現性

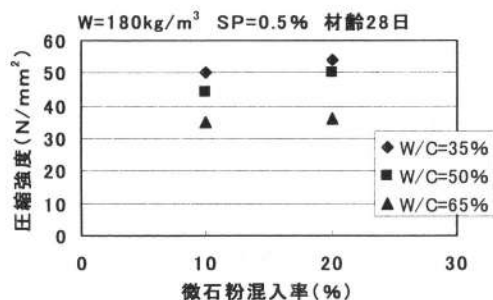


図22 V7 砕砂の圧縮強度試験結果

たことにより、微石粉がセメント粒子連鎖の間に入り込み、セメント粒子を分散させ、水和しやすい状態になったものと考えられる。

以上のことから、土木学会で、洗い試験で失われる微粒子の量を7%以下と規定しているが、V7 乾式製砂システムにより副産される微石粉はほぼ立方体であるため、この量が多くなると、図19に示すようにブリーディング量の低下、さらには前述のような微粉末効果等による強度増加が期待できるものと考えられる。

(5) 乾燥・自己収縮試験結果

図23はV7 砕砂、普通砕砂および海砂使用による乾燥収縮に及ぼす影響を示したものである。図より、試験開始後60日の乾燥収縮ひずみは600~700μであり、細骨材の相違による差異はほとんど認められなかった。

次に、V7 砕砂をベースとして、W/C および微石粉の混入率の相違が乾燥収縮と自己収縮に及ぼす影響を検討した。図24はV7 砕砂の乾燥収縮、図25はV7 砕砂の自己収縮の試験結果を示したものである。

W/C が大きくなると乾燥収縮ひずみも大きくなるが、微石粉混入率による変化はさほど認められなかった。自

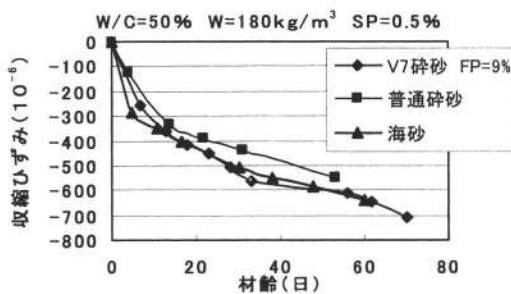


図23 細骨材の違いによる乾燥収縮試験結果

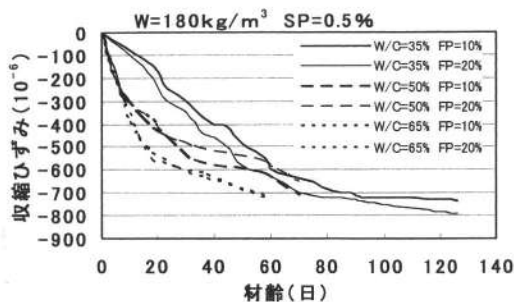


図24 V7 砕砂の乾燥収縮試験結果

己収縮ひずみは乾燥収縮の場合とは逆に、 W/C が小さくなるとひずみが大きくなる一般的な傾向が認められるが、微石粉量による影響はほとんど認められなかった。なお、土木学会では洗い試験で失われる量が多いほど乾燥収縮が大きくなることから、この量を7%以下と規定しているが、V7乾式製砂システムにより副産される微石粉は、この量が多量であっても乾燥収縮ひずみにさほど影響しないことが判明した。

以上の結果から、V7碎砂への微石粉量20%までの混入はコンクリートの収縮に悪影響を与えないものと考え

られる。

(6) 促進中性化試験

硬化したコンクリートは、表面から空気中の炭酸ガスの影響を受け、次式に示す反応式のように水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変わる。



この反応によって、コンクリートの中性化、すなわちアルカリ性の消失が起こる。コンクリート中で鉄筋が錆びないのは、コンクリートが強いアルカリ性を呈しているからであり、アルカリ性が失われるとコンクリート中の鉄筋が腐食し、膨張することによって鉄筋に沿ってひびわれが生じる場合がある。

促進中性化試験結果（炭酸ガス濃度5%、温度20℃、湿度60%）を図26に示す。

この図から、V7碎砂と海砂および普通碎砂とを比較してみると、V7碎砂を用いた場合の中性化深さが最も小さく、微石粉量による影響は材齢32日以降の進展が小さくなるのが特徴的であった。これは微石粉を多量に混入することによりコンクリート内部が緻密になり、図19に示したようにブリーディング率が低下することから、透気性が小さくなるために炭酸ガスが進入しにくくなったものと考えられる。

(7) V7碎砂の細孔径分布

コンクリートの強度や弾性係数、乾燥収縮および中性化などの特性に大きな影響を及ぼす細孔径分布の試験結果について述べる。

細孔径分布は、コンクリート構造物の力学的性質および耐久性を定量的に診断、あるいは評価するというよりも、コンクリートの各種物性の評価を行う際の指標とされている。

図27は微石粉量を変えた場合の総細孔径容積量を示したものである。この図より、微石粉混入率の大きい方が、細孔容積が小さいことが分かる。これは、微石粉の多量混入によりコンクリートが緻密化されたことを示唆している。すなわち、コンクリート内部の空隙が少なくなったことを示している。したがって、V7乾式製砂システムによって副産される微石粉を20%程度混入することは、コンクリートが緻密化する方向に作用するものと考えられる。

(8) V7碎砂の透気性試験結果

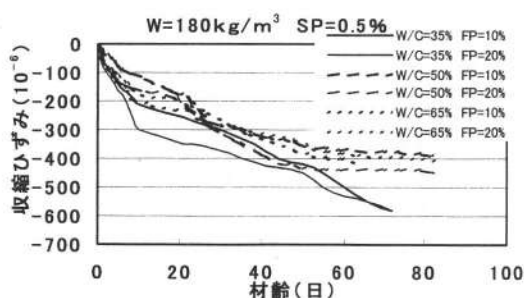


図25 V7碎砂の自己収縮試験結果

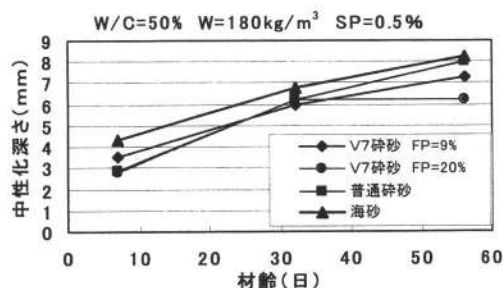


図26 促進中性化試験結果

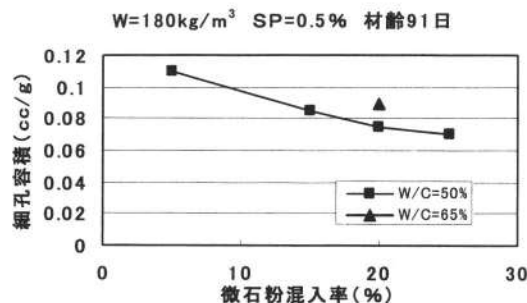


図27 V7碎砂の細孔径分布

透気性試験は圧縮強度や耐久性などに影響を及ぼすコンクリート内部の連続した空隙を調べるためのものである。

透気係数は本来、流体の比重と粘性および試料中の空隙の大きさ、形状、配列などの内部構造によって異なる定数である。

$$K = Q \times \mu \times L / (A \times P) \quad (3)$$

ここでQ：透気量 (cm³/sec) K：透気係数 (cm/sec)

P：透気圧力(MPa) L：供試体長さ(10cm)

A：断面積 (cm²)

μ ：二酸化炭素の単位容積質量 (1.96×10^{-6} kg/cm³)

上記の式 (3) より透気係数を求める。

図28はV7砕砂を用いたコンクリートの透気性試験結果を示したものである。

どのW/Cでも微石粉混入率が増加すると、透気係数は低下する傾向を示した。これはコンクリート内部に空気のとおり道や空隙がセメントや微石粉により少なくなり、密実になっていることを示している。その結果、図19に示すブリーディング率の低下や図22に示す圧縮強度の増加に関連しているものと考えられる。

(9) V7砕砂を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

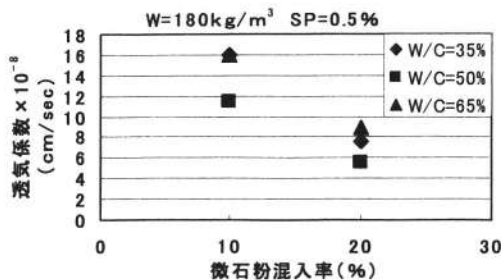


図28 V7砕砂の透気性試験結果

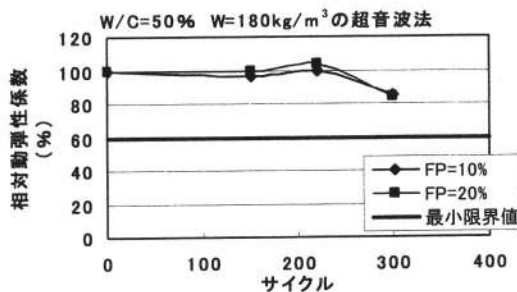


図29 凍結融解試験結果

凍結融解試験とは、毛細管水の凍結により凍結してない水の圧力が増加し、これによってコンクリート内部に生じる微細ひび割れからコンクリートがスケーリングやポンプアウトを受ける程度を調べることを目的としたものである。

図29は、凍結融解試験により相対動弾性係数を求めたものである。この図から、相対動弾性係数は、微石粉混入率の違いに関わらず、ほぼ同等の値を示している。空気量を約4%確保することにより、V7砕砂および微石粉多量混入による凍結融解作用による悪影響は無いものと考えられる。

5. まとめ

5. 1 パーマック・ハスラーが粗骨材の品質に与える物理的影響について

パーマック・ハスラーはインパクトクラッシャーに比べ、密度、吸水率、安定性、すりへり減量、実績率の向上および形状判定の指標である細長・扁平石含有率規格を満足し、高性能舗装用骨材により低いコストで適合させる事が可能である。さらに、骨材の接着性低下の原因になると考えられる骨材表面の鱗片状発生を防止できるとともに、コーンクラッシャー破碎工程で発生したマイクロクラックを減少させ、形状改善効果と合わせ強度的(CV値)にも向上することが確認された。

5. 2 V7砕砂の天然砂に対する置換効果について

試験練りの結果、天然砂の代替材として従来の砕砂では使用比率30%が限界であったが、V7砕砂は70%まで上げてもフレッシュコンクリート性状(スランプ等)、強度とも差が無い結果が得られた。

5. 3 V7砕砂に微石粉を混入したコンクリートの性質について

V7砕砂をベースとして微石粉を多量混入したコンクリートについて以下のような知見が得られた。

- (1) 微石粉混入率10%増につきスランプ25%減少した。しかし、高性能AE減水剤使用量を増すことによってスランプの低下を防止できる。
- (2) ブリーディング率は、微石粉量を多量に混入すると著しく減少した。
- (3) 圧縮強度発現性は、微石粉量20%を混入した場合が最も良好であった。

- (4) 乾燥・自己収縮は微石粉混入率20%までは微石粉量が6%の海砂および7%の普通砕砂を用いた場合とほぼ同等であった。
- (5) 微石粉混入率20%の促進中性化の進展は、促進中性化期間21日以降で、他の配合と比べて最も小さくなった。
- (6) 微石粉を20%混入すると透気係数および細孔容積ともに減少した。
- (7) 凍結融解に対する耐久性には、微石粉量の増大による変化が認められなかった。

以上より、総合的に判断して、微石粉量を20%程度混入してもコンクリートの諸性質は良好であり、V7砕砂製造の際に副産される微石粉は、必要以上に除去する必要は無いことが確認された。

6. おわりに

V7乾式製砂システムから生産されるV7砕砂の粒形は天然砂にかなり肉薄しており、これにより従来の砕砂では困難であった天然砂代替材置換量70%が可能になっ

たとえる。また、これ以上の改善になると表面改質の域に入りコスト的には大幅に高くなる。したがって、コンクリートに対して骨材の品質改良を考えるとコストおよび資源の有効利用から、V7砕砂の更なる品質向上よりも比較的成本の安い粗骨材側の粒形改善・品質向上を選択すべきであると考ええる。バーマック・ハスラーは低コストで粗骨材および細骨材の品質向上に有効な方法である。

これらの研究が限りある資源の有効利用の参考となり、省エネルギーに貢献し、ひいてはCO₂の削減、地球温暖化抑制につながる事ができれば幸いである。

謝 辞

『粒形改善砕砂に微石粉を多量混入したコンクリートの諸性質』の研究は広島工業大学・工学部・建設工学科、米倉亜州夫教授ならびに伊藤秀敏助教授による支援と、財団法人ひろしま産業振興機構殿の補助金より行われた。深くお礼申し上げる。

The Production of Improved Quality Aggregate and The Properties of Concrete with Fine Products produced from The V7-Sand Making System

HASHIMOTO Katsuyoshi