

## 論文 微粒珪砂副産物のインターロッキングブロックへの活用に関する研究

桐山和也\*<sup>1</sup>・服部啓二\*<sup>2</sup>・森嶋和博\*<sup>3</sup>・梅原秀哲\*<sup>4</sup>

要旨：愛知県の珪砂産業で粒径  $100\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$  の微粒珪砂が有効な利用方法がないまま年間約 20 万トン廃棄処分されており、資源材料として有効活用することが重要な課題となっている。そこで本研究では、即時脱型方式で製造されるインターロッキングブロックの曲げ強度が  $4.9\text{N}/\text{mm}^2$  以上と規定されている硬練りコンクリートに、微粒珪砂を活用するため配合及び品質について検討を行った。その結果、W/C と強度の関係にとらわれず締固めが最適となるよう水量を調整することが、充てん率の増加と曲げ強度発現に有効であることが明らかとなり、コンクリート用材料として活用が可能であるとの結果を得た。

キーワード：廃棄物、微粒珪砂、充てん率、曲げ強度、細骨材置換、即時脱型

### 1. はじめに

生活水準の向上に伴って、廃棄物の排出量も増大し、既存の廃棄物処理施設、最終処分場の処理能力は限界に達しつつあり、残余容量の不足や処分費の増大が問題となっている。また、廃棄物を再資源化することにより、資源の節約と環境保全の問題を解決する技術の確立が強く求められている。愛知県の場合、愛知県瀬戸市はガラスの主原料である製品珪砂の国内供給量の 3.2% を占める国内最大の供給地であり、珪砂原鉱を年間 230 万トン採掘している。採掘された珪砂原鉱は精製工場へ運搬され、幾つもの水洗い分級による選鉱工程を経てガラス用製品珪砂となる。この選鉱工程においてガラス製造に適していない  $100\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$  の珪砂が年間約 20 万トン取り除かれる。この産業副産物が微粒珪砂とよばれ、産業廃棄物（汚泥）指定を受け採掘場跡地にセメント処理をして埋立て処分されている。ところで、微粒珪砂の混入に関する影響について森野は、微粒珪砂を細骨材の代替品として使用する場合の問題点を指摘

している<sup>1)</sup>。微粒珪砂は粒子が細かいので、使用水量が増大し、またセメントペーストの付着面積が大きいなど、ペーストが希釈される要因が多く、コンクリート強度が著しく低下し、混和材としての利用でも、シリカ成分に富んではいるが、フライアッシュのような活性はみられなく、普通養生での混和材としては不向きであるとしている。また、セメントペーストの量が不十分な場合や硬練りコンクリートで十分に締固めができない場合など、コンクリート中に空げきができるときには、水セメント比で期待する強度とはならず、強度は空げきにより支配されるとされている<sup>2)</sup>。本研究では、曲げ強度が  $4.9\text{N}/\text{mm}^2$  以上と規定され、即時脱型方式により製造されるインターロッキングブロック用硬練りコンクリートへ微粒珪砂を活用するため、コンクリート中の空げきを考慮した充てん率を強度の要因とし、微粒珪砂の使用可能量、及び配合について実験的検討を行った。ここで使用する充てん率<sup>3)</sup>は式(1)に示すように定義した。

\*1 矢作建設工業(株) 技術企画部 技術開発課 (正会員)

\*2 矢作建設工業(株) 技術企画部 技術開発課 課長 (正会員)

\*3 日本コンクリート(株) 技術部 次長 (正会員)

\*4 名古屋工業大学大学院教授 都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-1 微粒珪砂の化学組成

成分名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig-loss
比率 (%)	93.20	3.25	0.10	0.06	0.00	0.02	0.16	2.69	0.26

表-2 微粒珪砂の粒度分布

ふるい寸法 (μm) , 各ふるい残留率 (%)						
300	150	106	75	53	32	Pan
0.1	1.2	8.3	20.5	28.6	39.3	2.0

$$\text{充てん率(\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

A: 実際の供試体の質量, B: 単位量より求められる空気量 0%とした供試体 1個の質量

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び微粒珪砂

セメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.15), 細骨材は長良川水系川砂 (密度: 2.57, F.M.: 2.98, 記号: S), 粗骨材は内津産碎石 (最大寸法: 5mm, 密度 2.64, F.M.: 4.91, 記号: G1, 及び, 最大寸法: 13mm, 密度 2.63, F.M.: 6.19, 記号: G2), 混和剤はポリカルボン酸系高性能減水剤 (密度: 1.07) を用いた。また, 使用した微粒珪砂 (平均粒径: 68μm, 密度: 2.65, 記号: K) の化学組成を表-1に, 粒度分布を表-2に示す。ここで, 微粒珪砂の排出過程を図-1に示す<sup>4)</sup>。珪砂産業では原鉱を水洗いふるい分してまず砂利を除き, 次いで珪砂部分を粗粒子と細粒子とに分離する。次に, 粗粒子をミルにより粉砕し, 再びふるい分けて細粒子と合流し, ガラス原料, 鋳物材料等に適する粒径 (5~0.1mm) の珪砂を採取する。この工程で 0.1mm (100μm) 以下の微砂が廃棄される。一方, 水洗に使用した水には粘土と微砂が含まれるが, これを沈殿槽に送りそこで微砂を沈降させる。浮遊している粘土を次の沈殿槽に水流で運び, そこで凝集剤を加えて粘土を沈降させ, フィルタープレス等で締固めて水分を除き, 粘土原材料製品とする。ここでは 5μm 以上の粒子が廃棄物となる。従

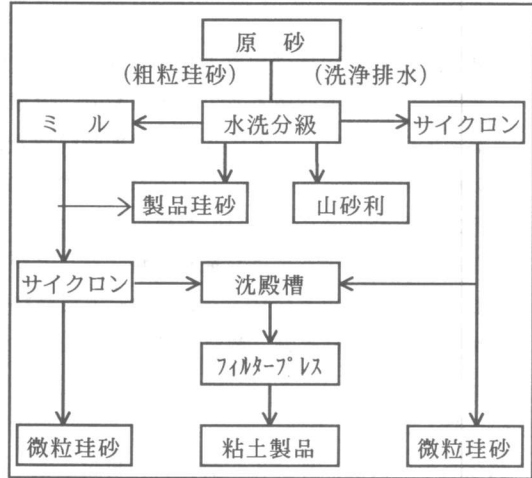


図-1 微粒珪砂排出概念図

って以上の選鉱工程により 100μm~5μm の粒子が廃棄される。廃棄される微粒珪砂は自然放置, 真空脱水, 遠心脱水等の脱水方法が取られ, 自然放置による方法では含水率が排出直後で 30~33%, 放置後 23~27%, 真空脱水では 24~26%, 遠心脱水では約 12%である<sup>5)</sup>。

### 2.2 供試体成形及び養生方法

供試体の作製は, 実製品の製造ラインを用い 1 バッチを 0.6m<sup>3</sup>とした。供試体の寸法は平面寸法で 198mm×98mm, 厚さ 80mmとし, 材料の練混ぜは, (G1+G2+S+K)投入→C 投入→1 分間空練り→W 投入→5 分間練混ぜ→排出の順序で行った。供試体の成形は, 十分な剛性を持った型枠にテーブルバイブレーターを用い, 供試体に 0.03N/mm<sup>2</sup>のプレス圧を 9 秒加えて締固め, 締固め終了後即時脱型を行い, 材齢 14 日まで屋内で気中養生を行った。

### 2.3 検討項目及び配合

本研究では, 検討項目別の実験を 4つのシリーズに分けて行った。シリーズ 1 は微粒珪砂混

入時の細骨材率，シリーズ2は微粒珪砂混入量  
の上限，シリーズ3は練混ぜ投入水量，シリー  
ズ4は高性能減水剤使用の検討である。配合は，  
現在製造が行われている製品の配合を基本とし，  
各シリーズとも単位セメント量(C)を  $400\text{kg/m}^3$ ，  
粗骨材の混合容積比率を  $G2/G1=0.8$  と一定と  
した。配合を表-3に示す。水セメント比は，  
微粒珪砂に含まれる水を練混ぜ投入水量に加え  
て計算した値である。微粒珪砂は含水率 20%  
の状態では細骨材と置換して用いた。置換率は，  
シリーズ1，3，4では質量の 40%一定，シ  
リーズ2のみ 40，60，80%の3水準とした。  
ところで，インターロッキングブロックに用い  
るコンクリートは，スランブゼロの多少の湿り  
気を持った土のようなコンクリートを使用する  
必要がある。従って，投入水量に関しては，脱  
型したときくずれたり変形したりしない範囲内  
で適宜決定した。各シリーズでの配合の詳細は  
以下のとおりである。シリーズ1は，投入水量  
(W)を  $67\text{kg/m}^3$  一定とし，微粒珪砂で置換した  
残りの細骨材(S)を粗骨材に一部または全量置

換することにより細骨材率を3水準変化させた。  
シリーズ2は，Wを  $83\text{kg/m}^3$  一定とし，細骨  
材を用いず3水準で置換した微粒珪砂と粗骨材  
のみを用いた。シリーズ3は，投入水量を 59，  
67，75，83， $100\text{kg/m}^3$  と5水準変化させ，微  
粒珪砂と粗骨材のみ用いた。シリーズ4は，シ  
リーズ3で試験を行った配合 No.4，7，8 に高  
性能減水剤を  $C\times 0.5\%$  または  $1.0\%$  添加し比較  
を行った。

#### 2.4 試験項目及び結果の判定

試験項目は，供試体の単位容積質量の測定，  
材齢 14 日における曲げ強度試験である。曲げ  
強度試験は，インターロッキングブロック舗装  
設計施工要領<sup>6)</sup>に示してあるスパン 160mm  
の中央集中載荷方法に準拠した。試験装置を図  
-2に示す。また，試験結果の判定は，工場規  
定を試験規格として採用した。インターロッキ  
ングブロックで定められている品質規格と工場  
で定められている規定を表-4に示す。図-3  
に供試体寸法を表-4に寸法許容差を含む規格

表-3 配合

シリーズ No	配合 No	W/C (%)	s/a* <sup>2</sup> (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				W* <sup>1</sup>	C	S	G1	G2	K* <sup>1</sup>	混和剤
基本配合		28.8	60.3	115	400	1170	434	357	0	—
1	1	36.3	57.9	67(145)	400	702	441	363	468(390)	—
	2		468			572	472	—		
	3		0			836	688	—		
2	4	40.3	20.7	83(161)	400	0	813	669	468(390)	—
	5	50.0	32.9	83(200)			650	535	702(585)	—
	6	59.8	39.6	83(239)			487	401	936(780)	—
3	7	34.3	20.1	59(137)	400	0	848	697	468(390)	—
	3	36.3	20.3	67(145)			836	688		—
	8	38.3	20.5	75(153)			825	678		—
	4	40.3	20.7	83(161)			813	669		—
	9	44.5	21.3	100(178)			788	649		—
4	7	34.3	20.1	59(137)	400	0	848	697	468(390)	0.0
	10									4.0
	8	38.3	20.5	75(153)			825	678		0.0
	11									2.0
	4	40.3	20.7	83(161)			813	669		0.0
	12									2.0

\*1 ( ) 内は微粒珪砂が含む20%の含水量を考慮した値 (Kを絶乾換算した値)

\*2 G1は最大寸法が5mmであるため，一般のコンクリートで用いられるs/aとは異なる。また，微粒珪砂を細骨材に加えて計算した値

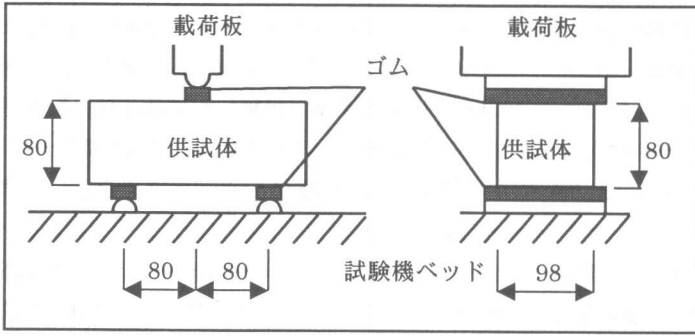


図-2 試験装置

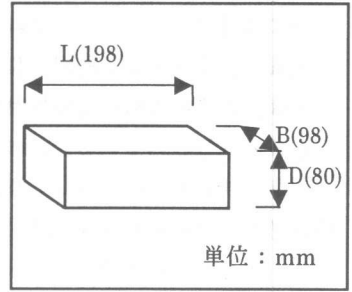


図-3 寸法位置図

を示す。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 シリーズ1

シリーズ1は、微粒珪砂(K)の置換率を40%一定とし、細骨材率変化させ細骨材率の影響について検討を行った。その結果を図-4に示す。細骨材率が減少していくにしたがって曲げ強度が増加し、充てん率も増加していく傾向が確認できる。また、供試体の破壊断面の観察から、細骨材率が57.9%のNo.1では粗骨材が破壊されずに破壊断面に残っているものが確認されたが、20.3%のNo.3では観察されなかった。これより、硬練りコンクリートの場合、微粒珪砂を単純に細骨材と置換して用いると粒子の細かい微粒珪砂の混入によりペーストが不足するという現象が生じると推定される。そのため、充てん率が悪くなり強度低下をもたらす。しかし、細骨材率を低くすることによりペースト不足の状態が改善され、充てん率が増加し、曲げ強度も増加する。従って、Kの置換率が40%の場合は、置換後の細骨材(S')を全量粗骨材(G)に置換することが有効であると考えられる。

#### 3.2 シリーズ2

シリーズ2は、Kの置換率を40, 60, 80%とし、シリーズ1の結果をふまえS'を全量Gに置換し、Kの混入量の上限を検討したものである。その結果を図-5に示す。充てん率に関して、微粒珪砂の置換率が40%のNo.4に

表-4 規格

種別	強度規格	寸法許容差		
	曲げ強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	B (mm)	L (mm)	D (mm)
品質規格	4.9以上	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$
工場規定	5.8以上	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 3$

W:67kg/m<sup>3</sup>, K:40%, G2/G1:0.8

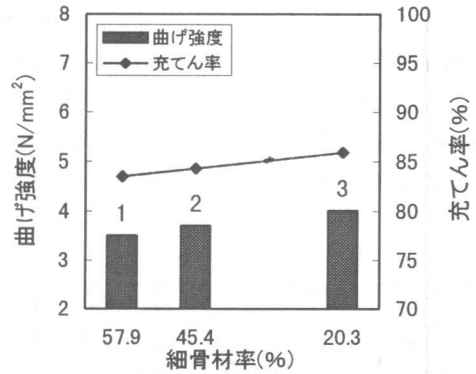


図-4 シリーズ1

W:83kg/m<sup>3</sup>, S:0 kg/m<sup>3</sup>, G2/G1:0.8

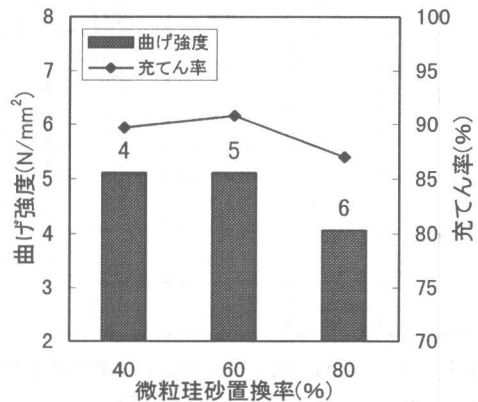


図-5 シリーズ2

比べ置換率 60% の No.5 が若干増加しているが、曲げ強度に関しては同じ値となった。置換率 80% の No.6 に関しては充てん率、曲げ強度とも低下した。また、9 秒プレス圧を加えた後即時脱型を行っているため、No.5, 6 の供試体は脱型時に側面がはらみ寸法許容差を外れた。従って、仕上がり時のはらみを防止するため、微粒珪砂の置換率は 40% ( $468\text{kg/m}^3$ ) を上限とした。

### 3.3 シリーズ 3

シリーズ 3 は、K の置換率を 40% 一定とし、S' を全量 G に置換し、投入水量を 5 水準変化させ影響を確認したものである。その結果を図-6 に示す。練混ぜ時の投入水量の増加に伴い充てん率、曲げ強度とも増加していくのがわかる。従って、インターロッキングブロックの硬練りコンクリートでは、単位セメント量が一定であっても練混ぜ時の投入水量の増加により充てん率が増加し、充てん率の増加が曲げ強度に大きく影響を及ぼしていることがわかる。よって一般のコンクリートのように W/C と強度との関係を重視するよりも、締固めが最適になるように水量を増加させることが微粒珪砂使用の場合には重要であると考えられる。なお、投入水量が  $100\text{kg/m}^3$  の No.9 は曲げ強度で  $6.9\text{N/mm}^2$  を得ることができたが、供試体の側面ではらみが見られ寸法において工場規格を満たさない結果となった。従って、練混ぜ時の投入水量が  $83\sim 100\text{kg/m}^3$  の間に曲げ強度、及び仕上り寸法をともに満足する水量が存在すると予想される。

### 3.4 シリーズ 4

シリーズ 4 は、シリーズ 3 で試験を行った配合 No.4, 7, 8 に高性能減水剤を添加し、高性能減水剤の使用を検討したものである。試験結果を図-7 に示す。まず、No.7, 10 であるが、練混ぜ時の投入水量を  $59\text{kg/m}^3$  一定とし、No.7 は高性能減水剤無添加のもの、No.10 は高性能

S:  $0\text{kg/m}^3$ , K: 40%, G2/G1: 0.8

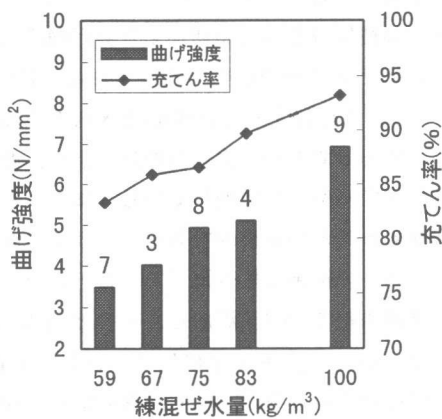


図-6 シリーズ 3

S:  $0\text{kg/m}^3$ , K: 40%, G2/G1: 0.8

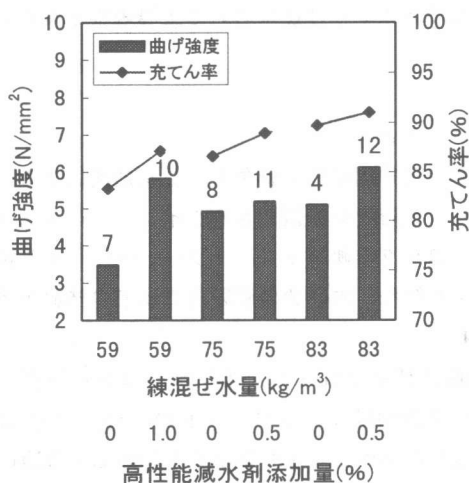


図-7 シリーズ 4

減水剤を単位セメント量×1.0%添加したものである。高性能減水剤の添加により曲げ強度が大きく増加し、充てん率も増加していることが分かる。次に、No.8 と No.11 であるが、投入水量を  $75\text{kg/m}^3$  一定とし、No.8 は高性能減水剤無添加のもの、No.11 は高性能減水剤を単位セメント量×0.5%添加したものである。高性能減水剤の添加により曲げ強度、充てん率ともに増加しているが 1.0%添加のものと比較すると増加の割合は小さい。No.4, 12 は投入水量

を  $83\text{kg/m}^3$  一定とし、No.4 は無添加のもの、No.12 は高性能減水剤を 0.5% 添加したものである。高性能減水剤の添加により曲げ強度及び充てん率ともに増加している。さらに、No.11 と No.12 を比較すると高性能減水剤の添加量が同一であっても投入水量の増加により、曲げ強度、充てん率とも増加している。また、水量を増加することが効果的であるということは、シリーズ 3 の結果とも合致している。しかし、高性能減水剤を 0.5% 添加したものと 1.0% 添加したものととの関係を比較してみると、0.5% 添加のものは曲げ強度、充てん率の増加の割合は小さく、高性能減水剤は 1.0% 添加することが曲げ強度、充てん率の増加のためには適していると考えられる。なお、No.10, 12 は曲げ強度及び仕上がり寸法において工場規格を満たした。

#### 4. まとめ

微粒珪砂副産物を資源として有効活用するために、即時脱型で製造されるインターロッキングブロックの硬練りコンクリートへの利用を検討した結果、本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 微粒珪砂を混入したインターロッキングブロックの硬練りコンクリートの場合、W/C と強度との関係を重視するよりも締固めが最適になるよう水量を調整することが重要である。
- (2) 微粒珪砂の置換率が 40% のとき、置換した後の残りの細骨材を全量粗骨材に置換することは曲げ強度発現に効果がある。
- (3) 即時脱型を行ったときの仕上がり時のほらみを防止するための微粒珪砂の置換率は、基本配合における細骨材量の 40% を上限とすることが望ましく、このときの単位微粒珪砂量は  $470\text{kg/m}^3$  (絶乾質量で  $390\text{kg/m}^3$ ) 程度である。
- (4) ポリカルボン酸系高性能減水剤の使用は、微粒珪砂を混入したインターロッキングブロックの製造に適用可能であり、高性能減水剤の添

加は曲げ強度及び充てん率の増加に効果がある。

今後は、微粒珪砂副産物のさらなる有効活用を進めるため、微粒珪砂の  $100\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$  である特徴を生かすことにより、高流動コンクリートの粉体系材料としての適用に関する研究も進めて行く予定である。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、愛知工業大学 森野奎二教授から貴重な御助言を賜り、また、竹本油脂(株)青山晴洋氏、愛知県珪砂鉱業協同組合三浦明専務理事ならびに組合各企業の方々にお世話になりました。ここに記し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 森野奎二：珪酸質汚泥のオートクレーブ養生製品への活用化について、応用地学の進歩(岩津潤教授記念論文集)，pp.179~195, 1974
- 2) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.338~340, 1981
- 3) 長島玄太郎・松下博通・牧角龍憲・鶴田浩章・古賀源象：下水道汚泥焼却灰を混入したインターロッキングブロックの配合に関する一検討，土木学会第 51 回年次学術講演会，pp.452~453, 1996
- 4) 森野奎二：廃泥のオートクレーブ処理による骨材化，骨材資源，通巻 No.31，pp.163~169, 1976
- 5) 愛知県瀬戸窯業技術センター・愛知県珪砂鉱業協同組合：微粒珪砂等の実態調査報告書，1993.9
- 6) 社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会：インターロッキングブロック舗装設計施工要領(車道編)改訂版，1994.5