

新しい砂の耐摩耗性評価法

(株)ツチヨシ産業 黒川 豊 天久 裕 樹

新しい鑄物砂（粒形の良い硅砂、セラミックサンドなど）の耐摩耗性を微小強度計試験機を用いて粒子の圧縮強度で評価した。合わせて圧縮強度と予めシミュレーションにより求めた粒子衝突時の応力分布との関係から微粉化率を求め評価した。

1. はじめに

鑄型の高強度化（粘結剤低下によるガス欠陥、ひけ欠陥防止）、鑄型の低膨張化（S/M比低下、割れ系欠陥防止）、鑄型の繰り返し使用時の環境負荷低減（再生時の耐摩耗性改善による産廃物低減、粘結剤低減による省資源）、その他（熱伝導性、比重、流動性、崩壊性などの改善）を目的として最近開発された新しい砂が使用されている。新しい砂とはセラミックサンドや粒形の良い硅砂などである。これらの砂の中には開発され10年以上経過しているものや古くより知られているものがあるが、新しい鑄造法や新しいニーズにより改めて見直され、最近盛んに使用されているものもある。

本報では新しい砂の耐摩耗性は従来の砂と比較して良好であり、環境負荷を低減するとされていることから、物理単位で評価可能な耐摩耗性試験方法とこれを利用した微粉化率判定方法^{1,2)}を用いて新しい砂の耐摩耗性を評価する。

2. 供試試料

表1に本研究で用いた鑄物砂の化学成分を、図1に粒形（SEM像）を示す。供試試料は一般に鑄造用として使用される一般硅砂（島根産硅砂、オーストラリア産硅砂）を比較用として、粒形の良い硅砂（アメリカ産硅砂2種、中国産硅砂）、ムライト系セラミックサンド（日本産セラミックサンド3種、アメリカ産セラミックサンド1種）、アルミナ系セラミックサンド（中

表1 供試した鑄物砂の化学成分（mass%）

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂
一般硅砂	島根産硅砂	87.5	7.3	1.8	2.7	1.0	0.3	1.1			0.2
	オーストラリア産硅砂	99.9						0.0			
粒形の良い硅砂	アメリカ産硅砂-1	99.5	0.2		0.2	0.1		0.1			
	アメリカ産硅砂-2	99.5	0.3		0.0			0.1	0.0	0.1	
	中国産硅砂（内蒙古）	89.5	5.6	1.2	2.8	0.3	0.1	0.3			0.1
ムライト系セラミック砂	日本産セラミック砂-1	63.3	33.7	0.2	0.2	0.2	0.2	1.2	0.1	0.2	0.5
	日本産セラミック砂-2	37.6	58.6		0.2	0.3		1.6	0.1	0.1	0.7
	日本産セラミック砂-3	33.8	59.2		0.2	0.3		1.5		0.1	3.6
	アメリカ産セラミック砂	50.4	44.4	0.2	0.2			1.6		0.2	3.1
アルミナ系セラミック砂	中国産セラミック砂-1	22.4	65.5		1.2	0.8	2.1	2.8	0.6	0.3	4.1
	中国産セラミック砂-2	9.1	78.5	0.1	0.6	0.5	0.5	4.9	0.1	0.2	5.2
	中国産セラミック砂-3	11.9	72.7		1.3	0.5	0.6	7.6	0.1	0.2	4.9
Mg系鑄物砂	日本産Mg系砂-1	48.8	1.8		0.1	1.5	38.3	7.7	1.1		
	日本産Mg系砂-2	52.0	2.2	0.1	0.1	5.0	29.1	9.1	1.3		0.1
	アメリカ産Mg系	42.3	1.6		0.1	0.9	25.8	26.3	1.4		
特殊砂	ジルコンサンド	24.6	0.9					0.1		72.4	0.3
	クロマイトサンド	1.0	12.3		0.1	0.1	9.9	30.1	45.0		0.8

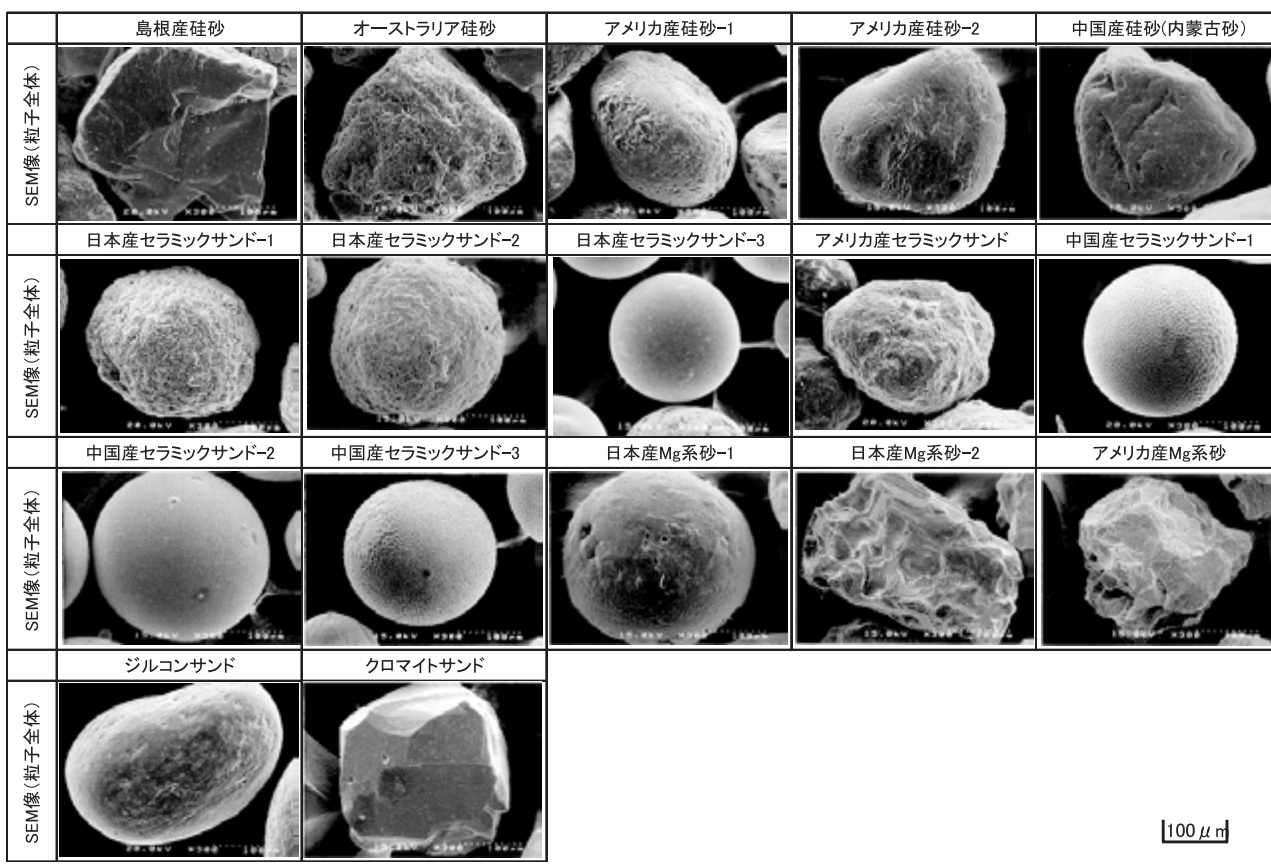


図1 鋳物砂粒子のSEM像

国産3種)、Mg系の鋳物砂(日本産2種、アメリカ産1種：スラグサンドと称されている)を比較用として、及び特殊砂(ジルコンサンド、クロマイトサンド)を比較用として用いた。粒形の良い硅砂は天然に産出される天然硅砂であり、その粒形はラウンドであり粒子表面も清浄である。ムライト系とアルミナ系のセラミックサンドは人工的に製造した鋳物砂であり、成分を調整した後に造粒し焼結あるいは溶融して製造したものである。ムライト系セラミックサンドはムライト(化学組成 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \sim 2Al_2O_3 \cdot SiO_2$)を主成分とし、アルミナ系セラミックサンドはボーキサイト系鉱物を溶融し粒子状としたものである。それぞれのセラミックサンドの粒形は全般的に良好であり真球状態のものもある。

2.1 粒形の良い硅砂

図2に硅砂の粒形係数と鋳型の圧縮強度の関係を示す。粒形係数は硅砂の長径/短径であり1.0で真球となる。鋳型は水溶性の無機粘結剤を1.5%添加して造型した。粒形係数が1.2前後の硅砂はアメリカ産の輸入硅砂である。これらの硅砂は粘結剤が僅かでも強度が発現することから、酸化物不良やひけ欠陥などの発生しやすいアルミ合金用鋳型として最近よく

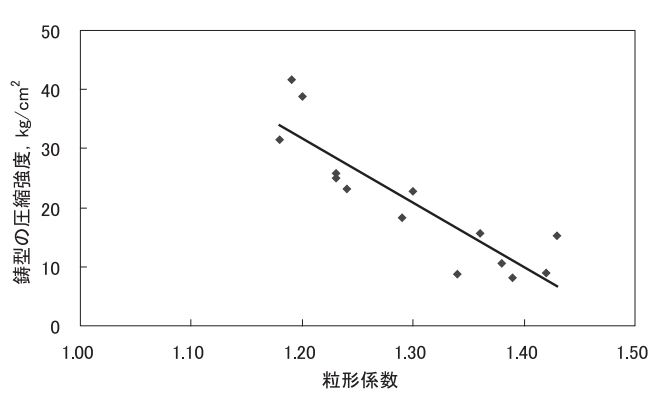


図2 硅砂の粒形係数と鋳型の圧縮強度の関係

使用されている。

2.2 セラミックサンド

セラミックサンドの製法は焼結法と溶融法が一般的である。焼結法はスプレードライヤーやアジテータミキサーで微粒子を造粒した後にロータリーキルンで焼結してセラミックスとする方法である。焼結法は造粒後にその粒子を溶融させる方法とアーク炉で溶融させた後にアトマイジングにより粒子化する方法がある。

図3にセラミックサンドと硅砂の粒形係数と鋳型強度の関係を示す。図3は図2にセラミックサンドのデータを加えたものである。粒形係数が1.10で鋳型の圧縮

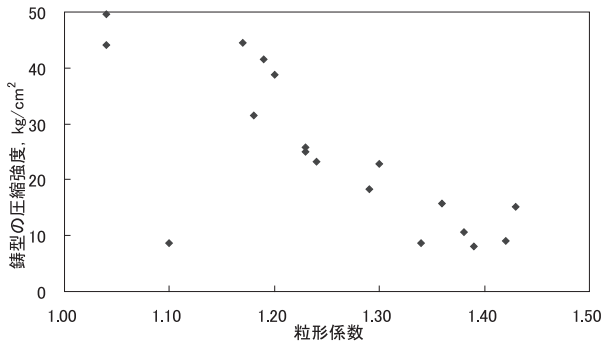


図3 セラミックサンドと硅砂の粒形係数と鑄型の圧縮強度の関係

強度が10kg/cm²のものは空隙率の大きなセラミックサンドであり、粘結剤が内部に浸透したためか鑄型の圧縮強度が低い。これ以外のものは空隙が無いあるいは殆ど無いために、粒形係数と鑄型の圧縮強度に負の相関が認められるとともに硅砂よりも鑄型強度が高い。

3. 耐摩耗性評価方法

砂の耐摩耗性評価方法としては、鑄物砂粒子の圧縮破壊応力（圧縮強度）を測定し物理量で評価した。加えて、物理量である圧縮強度と予めシミュレーションにより求めた粒子衝突時の応力分布との関係から、所定の応力を受けた際に鑄物砂粒子が破壊する比率を求め、これを微粉化率と名付け耐摩耗性を評価した。

図4に微小強度試験機の外観と圧縮強度測定概念図を示す。用いた試験機は電磁式微小強度試験機（以下、微小強度試験機）である。最大荷重容量が50Nであり、一定変位速度1mm/分の条件で負荷を加えた。圧縮強度は試料一粒毎に顕微鏡で撮影して長径と短径を求めた後、微小強度試験機を用いて最大破壊荷重を測定した。

最大破壊荷重から圧縮強度を求めるには試料粒子の断面積を知る必要がある。ここでいう断面積とは圧縮

試験時の加圧板と試料粒子の接触面積である。しかしながら、試料粒子は不整形粒子であるためにその接触面積は一定で無い。そこで、本報告では試料粒子を楕円体と仮定して断面積を求め、圧縮強度を算出する方法を用いる。鑄物砂粒子の長径(2a)と短径(2b)は顕微鏡写真から実測した。鑄物砂粒子高さ(2c)と破壊時の加圧板の位置(2c-2d)は微小強度計の読み値である。圧縮強度(σ_K)は $\sigma_K = P/S$ により算出した。

ここに、 σ_K : 圧縮強度、P: 破壊荷重、S: 変位dにおける楕円体断面積(加圧板と粒子の推定接触面積)である。

微粉化率の算出法としては、動的シミュレーションANSYS-LS-DYNATMを用いて粒子同士の衝突のモデル化を行い、その際に発生する応力分布を得、その応力分布と粒子の圧縮強度分布から微粉化率を算出した。

図5に微粉化率の算出法の概要を示す。算出の流れは以下である。

- ①動的シミュレーションを用い粒子が衝突する際に発生する衝突応力分布（ここでは引張応力）を計算する。
- ②微小強度試験機により鑄物砂粒子の圧縮強度を測定する。静的応力シミュレーションにより圧縮強度を引張応力に換算する。
- ③それぞれの応力分布が正規分布であるかコルモゴロフ・スミルノフ検定法で検定し、確率密度関数とする。
- ④それぞれの確率密度関数から微粉化率を算出する。

4. 微粉化率の算出法

鑄物砂粒子の耐摩耗性を定量的に評価するには圧縮強度と粒径の両方にばらつきが見られるために定量的な評価を行い難い。そこで試験結果において粒径で基準化して評価する方法を提案^{3,4)}している。測定結果より得られた粒径の圧縮強度を σ_x とし、それに対応

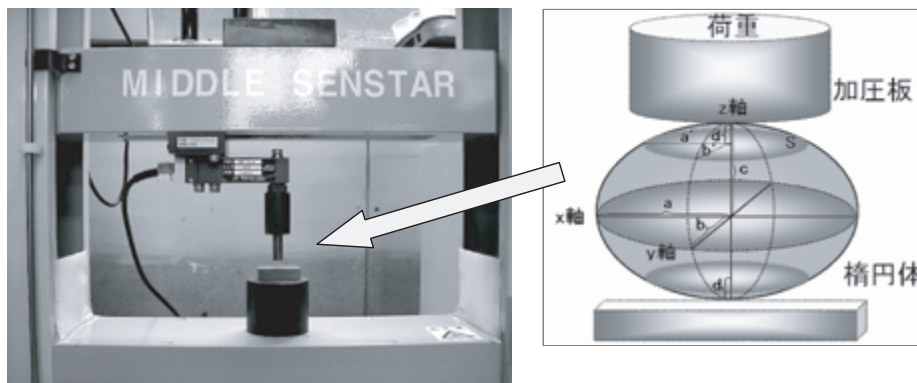


図4 微小強度試験機の外観と圧縮強度測定概念図

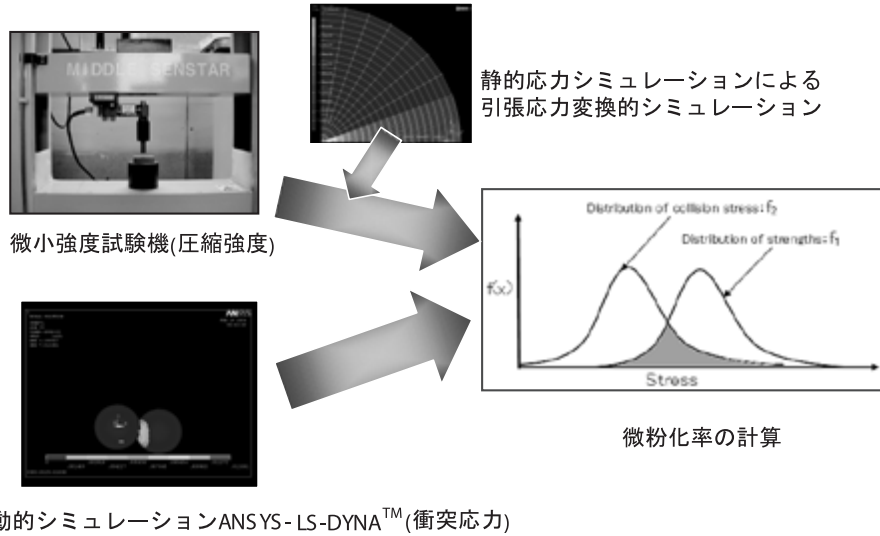


図5 微粉化率算出法の概要

する近似曲線上の圧縮強度を σ_{x0} としてその比を次式のように μ とする。

$$\mu = \frac{\sigma_x}{\sigma_{x0}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この μ を用いて圧縮強度を基準化する。たとえば粒径 0.2mm の圧縮強度を基準化する場合、近似曲線上での強度を $\sigma_{0.2}$ とすると、試験データより考えられる粒径 0.2mm に基準化した圧縮強度 $\sigma_{0.2x}$ は (2) 式により求められる。

$$\sigma_{0.2x} = \mu * \sigma_{0.2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

すべての実験結果を粒径 0.2mm のときの強度に基準化して圧縮強度とする。

セラミックサンドでは粒子サイズが大きくなるに従って圧縮強度が低下する。これはセラミックサンドの強度は体積に依存するためである。そこで、有効体積を用いて更に基準化⁵⁾する。

$$\text{基準化圧縮強度} = \text{圧縮強度} \times V_{\text{eff}}^{(1/m)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{基準化衝突応力} = \text{衝突応力} \times V_{\text{eff}}^{(1/m)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 m はワイブル係数である。

次いで、基準化圧縮強度は静的応力シミュレーションにより引張強度に変換し基準化応力とする。

いま、鋳物砂粒子の基準化応力分布が確率密度関数 $f_1(x)$ 、基準化衝突応力のばらつき分布が確率密度関数 $f_2(x)$ と考える。鋳物砂粒子の強度が x_1 であるとすると、強度が $x_1 \sim x_1 + dx_1$ である確率は (5) 式となる。

$$f_1(x_1) dx_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

発生応力が x_1 を越える確率は (6) 式となる。

$$\int_{x_1}^{\infty} f_2(x) dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

(7) 式は破壊確率 P_f が、鋳物砂粒子が破壊する確率であり、すなわち微粉化率である。

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{x_1}^{\infty} f_2(x) dx f_1(x_1) dx_1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

5. 圧縮強度並びに微粉化率

動的シミュレーションでは3種類の粒子径、3種類の衝突方法、3種類の衝突速度を条件として与えてシミュレーションを行った。衝突方法については正面から衝突させたもの(偏心量0)、半分軸をずらしたもの(偏心量0.5)、完全に軸をずらし擦る感じのもの(偏心量1)を用いた解析、速度 5m/sec、1m/sec 及び 0.5m/sec の解析を行った。アルミナの物性値であるヤング率 406GPa、ポアソン比 0.24、密度 3.99kg/m³ を用いた。また衝突には回転を考慮に入れた。

動的シミュレーションにおいて与えた粒子の衝突速度は 0.5m/sec、1m/sec 及び 5m/sec は、実際の鋳造に当てはめ、ベルトコンベアの搬送速度は 0.5m/sec 前後であり、再生機内の鋳物砂の移動速度は種類により異なるがおよそ 5m/sec 程度と考えられることから設定している。つまり、本研究では鋳物砂の再生工程を想定して衝突応力のばらつき分布を求めた。

動的シミュレーションの計算結果として、基準化衝突応力の分布形を正規分布として考えると、その平均値は 49.8kN/cm²、標準偏差は 14.1kN/cm² であった。

表2に鋳物砂粒子の微粉化率を示す。各鋳物砂の基準化応力と動的シミュレーションの基準化衝突応力として示した確率分布から微粉化率を求めた。

表2 供試鋳物砂の基準化応力と微粉化率

		基準化応力, MPa		微粉化率 %
		平均	偏差	
一般珪砂	島根産珪砂	62.7	24.4	31.8
	オーストラリア珪砂	119.1	48.6	23.4
粒形の良い珪砂	アメリカ産珪砂 -1	100.6	17.8	1.3
	アメリカ産珪砂 -2	116.0	34.6	3.8
	中国産珪砂 (内蒙古砂)	97.7	32.3	8.6
ムライト系 セラミック砂	日本産セラミック砂 -1	125.6	31.7	1.4
	日本産セラミック砂 -2	177.3	55.0	1.2
	日本産セラミック砂 -3	272.0	81.0	0.3
	アメリカ産セラミック砂	101.5	25.9	4.0
アルミナ系 セラミック砂	中国産セラミック砂 -1	235.9	51.4	0.1
	中国産セラミック砂 -2	215.5	60.4	0.4
	中国産セラミック砂 -3	264.6	82.9	0.5
Mg系 鋳物砂	日本産 Mg系砂 -1	188.2	63.6	1.5
	日本産 Mg系砂 -2	94.2	46.8	16.0
	アメリカ産 Mg系	87.4	37.5	16.4
特殊砂	ジルコンサンド	94.1	29.2	8.2
	クロマイトサンド	144.9	51.8	3.6

6. 結言

表2より、新しい砂として最近使用される鋳物砂である粒形の良い珪砂、ムライト系セラミックサンド、アルミナ系セラミックサンドの微粉化率は全般的に低い傾向にある。従って、これらの鋳物砂を使用した場合、微粉の発生量が少なく環境に適応した鋳物砂であると言える。

なお、一般珪砂を再生した際の歩留まりはおおよそ15%から35%であり⁶⁾、表2の一般珪砂の23.4%と31.8%に対応していることから、本研究の微粉化率は鋳物砂の耐摩耗性評価に有効であると言える。

参考文献

1) H. Ameku, H. Kambayashi, Y. Kurokawa, H. Hirata, H. Miyake: AFS. Trans. 113 (2005), Paper 05-048 (04) pdf, p1-12.

2) H. Ameku, H. Kambayashi, Y. Kurokawa, H. Hirata, H. Miyake: AFS. Trans. 114 (2006), Paper 06-045 (04) pdf, p1-10.

3) H. Hirata, H. Morimoto, Y. Kurokawa, H. Kambayashi: "The Evaluation of the compression strength and the wear resistance for a ceramic sand particle," Proceedings of The Fifth Japan Conference on Structural Safety and Reliability, pp149-150 (2004).

4) H. Hirata, H. Morimoto, Y. Kurokawa, H. Kambayashi: Proceedings of 53rd academic conference, The Society of Materials Science, Japan, p417 (2004).

5) Okabe, N., Hirata, H., Matsumura, M., Hamada, H., Materials, Vol. 38 No. 430, pp783-788 (1989)

6) 黒川豊, 松村明彦, 太田英明: 鋳造工学 70 (1998) 579