研究報告

定容積一面剪断試験による粉粒体の内部摩擦係数*

Internal Friction Factors of Powder by Constant Volume Shear Test

寺 下 敬次郎**

Keijiro Terashita

宮 南 啓**

Kei Miyanami

矢 野 武 夫***

Takeo Yano

山 本 宣 之**

Yoshiyuki Yamamoto

1. 緒 言

従来からよく用いられている定荷重一面剪断試験（以後、定荷重剪断試験と略す）で内部摩擦係数を求めるには、粉粒体層に載荷する荷重すなわち載荷垂直応力を種々変化させて剪断試験を行なわなくてはならない。この場合、各載荷垂直応力における初期空隙率の調整が容易でなく、一本の破壊包絡線を得るのに相当の時間がかかる。われわれはすでに、定荷重剪断試験で粉粒体層を剪断すると、層は剪断初期に収縮する場合もあるが、水平変位が大きくなれば、微粉の場合を除いて、膨張することを報告している^{2,4)}。したがって、このような粉粒体層を一定容積で剪断すると剪断面に応力が発生する。この応力を剪断応力と垂直応力に分けて同時に測定すれば、一回の剪断試験で簡単に破壊包絡線が得られ内部摩擦係数も求められる。この方法は定容積一面剪断試験（以後、定容積剪断試験と略す）と呼ばれており、すでに青木—綱川^{1,8-9)}および梅屋—原¹⁰⁾の研究が報告されている。しかし、定荷重剪断試験との比較は十分でなく、また、剪断面近傍における垂直応力とその分布は調べられていない。

本研究では、剪断面上下付近の垂直応力とその分布を測定できる定容積一面剪断試験機により、数種類の粉粒体を対象に圧密応力（初期空隙率）を変化させて剪断試験を行ない、粉粒体の種類による垂直応力分布の偏りの大きさを調べるとともに、その平均の実測垂直応力ある

いは垂直応力を用いた破壊包絡線を求め、定荷重剪断試験による測定値と比較検討した。その結果、両試験方法による内部摩擦係数は一致することがわかったので、報告する。

2. 実験装置、実験方法および粉粒体試料

実験に用いた定容積型一面剪断試験機の概略を Fig.1 に示した。この試験機は定荷重型剪断試験機⁴⁾を定容積で剪断できるようにするため、支柱④を取りつけ、ねじで保持されているクランプ⑪によって竿③を水平に押え込み、ストッパー②で固定し、剪断状態において粉粒体層の体積が一定、すなわち空隙率が一定に保てるようにした。

剪断により粉粒体層が膨張しようとする力の一つとして垂直応力 $\bar{\sigma}_z$ 、 w が発生するが、これはピストンの上部に取り付けた圧縮型荷重変換器（容量：500Kg）⑦で、もう一つの力である剪断応力 $\bar{\tau}_x$ はプルービングリング（容

Fig. 1 定容積一面剪断試験機

昭和55年1月30日受付

* 粉体工学会にて発表（1979.5 大阪）

** 大阪府立大学工学部化学工学教室

(〒591 堺市百舌鳥梅町4-804) TEL 0722-52-1161

*** 現在、矢野化学技術研究所（〒550 大阪市西区西本町2-5-24 昭和ビル内）TEL 06-531-0723

Fig. 2 剪断面近傍における圧力変換器の配置

量：100Kg) ⑧によって変位に変換し、その変位をダイヤルゲージ式変位変換器⑨でそれぞれ測定して、両者をX-Y記録計上に記録した。なお、剪断応力 $\bar{\tau}_x$ については、水平（剪断）変位 δ_x に対して記録した。

定荷重剪断試験における粉粒体の内部摩擦係数は、剪断面近傍での平均の実測垂直応力対定常剪断応力の関係より算出すれば測定条件の影響を受けないで一義的に求められることがわかっている^{5,6)}。そこで試作した定容積剪断試験においても、剪断面上下付近における垂直応力とその分布を測定するために歪ゲージ式圧力変換器（容量2Kg/cm²，受圧面：0.6cm²）をFig.2に示す位置に取りつけてある。これら上下6箇所の垂直応力 $\sigma_{z,m}$ ($m=F, O, R$)， $\sigma_{z',m}$ ($m=F', O', R'$) は剪断応力 $\bar{\tau}_x$ とともに、水平変位 δ_x に対して多ペン記録計上に連続記録した。

実験方法は、粉粒体を剪断セル内に層状に数回に分けて装入し、そのつど粉粒体層表面を押え板で水平になる

Fig. 3 微粉に対する定容積一面剪断試験方法

程度に押え、かつ、層表面が水平であることを水準器で確かめながら、所定の層高まで充てんした。粗粉の場合、剪断すれば常に層が膨張する傾向にあるため破壊包絡線は容易に得られた。しかし、微粉の場合には、剪断を行なうと層が収縮するので²⁻⁶⁾、粗粉と同様な方法では破壊包絡線が得られない。そこで微粉の剪断試験はFig.3に示す綱川ら⁹⁾の方法に准じて行なった。すなわち、粉体層に一旦圧密応力 $\bar{\sigma}_{z,c}$ をかけて圧密（A点）してから、剪断を行なうとAからB点のように剪断応力 $\bar{\tau}_x$ が増大し垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ は減少した。そこで $\bar{\sigma}_{z,w}$ が $\bar{\sigma}_{z,c}$ と同じになるように層の体積を順次減少させて行き、 $\bar{\sigma}_{z,w}$ が減少しなくなると剪断応力 $\bar{\tau}_x$ は最大値を示して一定となる〔剪断応力が一定となることは剪断応力—水平変位関係からも確かめている〕（C点）。この状態より $\bar{\sigma}_{z,w}$ を順次減少させると $\bar{\tau}_x$ も減少するので、両者をX-Yレコーダーに記録することにより破壊包絡線を求めることができる。この剪断方法も定容積剪断試験の中に含めるが、実際にはCからDに至る過程で空隙率が増加することにより破壊包絡線が得られることになる。ここでAからC点までの粉体層の圧密（空隙率の減少）およびCからD点に至る層の膨張（空隙率の増加）は、Fig.1に示す竿③の上に取りつけたダイヤルゲージ式変位変換器（最小目盛1/100mm）⑨で垂直変位 δ_z として測定した。

Table 1 粉粒体試料とその主な物性

Sample	D_p (μm)	(g/cm^3)	(g/cm^3)	$(deg.)$
Glass Powder	210-350	2.69	1.25	36.8
Silica Sand	105-350	2.66	1.46	36.0
Toyoua Sand	105-350	2.73	1.59	35.0
White Alundum	105-350	3.80	2.01	40.0
Zircon Sand	105-350	4.66	2.91	33.0
Glass Beads No. 1	590-1190	2.69	1.57	15.9
Glas Beads No. 3	297-590	2.69	1.59	22.7
Glass Beads No. 4	210-350	2.69	1.61	24.2
Talc	1.50	2.81	0.58	50.3
Magnesium Stearate	1.75	1.03	0.19	43.7
Corn Starch	0.97	1.53	0.37	60.8
Powder Sugar	1.15	1.54	0.41	54.2
Calcium Carbonate (p-30)	1.75	2.70	0.53	51.4
Zinc Oxide	0.73	6.01	0.54	48.5

なお、粗粉の場合の初期空隙率 ε_0 はセル内に試料を装入し所定の圧密応力で圧密した状態での空隙率であるが、微粉の場合は、C点に達した状態での空隙率を初期空隙率 ε_0' とした。

剪断試験は剪断セル径 $D=100\text{mm}$ ，上部粉粒体層高 $H_1=10\text{mm}$ ，下部粉粒体層高 $H_2=5.8\text{mm}$ および剪断速度 $v_x=2\text{mm/min}$ 一定で行なった。

Table 1 に剪断試験に用いた粉粒体試料を示した。ここで粒径 $D_p \geq 105 [\mu\text{m}]$ の試料を粗粉， $D_p \leq 2 [\mu\text{m}]$ の試料を微粉とそれぞれ便宜的に呼ぶことにした。

3. 結果および考察

3.1 剪断応力，実測垂直応力および垂直応力

剪断面上下付近における垂直応力 $\sigma_{z,m}$ および $\sigma_{z,w}$ 対水平変位 δ_x の関係，荷重変換器で測定した垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 δ_x の関係ならびに剪断応力 τ_x 対 δ_x の関係を調べた結果の代表例を Fig.4 (ガラス粉)および Fig.5 (ジルコンサンド)に示した。

Fig. 4 に示すガラス粉の剪断面付近における垂直応力

Fig. 4 剪断過程および垂直応力分布 (ガラス粉)

は、剪断開始時 ($\delta_x=0$) において零であり、剪断を開始すると下部の F，O 点の $\sigma_{z,m}$ および上部の O' 点の $\sigma'_{z,m}$ が大きい値を示すという垂直応力分布を示しながら増大した。これらの垂直応力の平均値である $\bar{\sigma}_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$ は荷重変換器で巨視的に観測された垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ よりもいくぶん大きい値を示していることがわかる。また，Fig. 5 に示すジルコンサンドにおいても，剪断を開始すれば F，O および O' 点の垂直応力が大きい値を示し，剪断面上で垂直応力分布は一様でなく，かつ， $\bar{\sigma}'_{z,m} \div \bar{\sigma}_{z,m} > \bar{\sigma}_{z,w}$ となっている。このように下部の F，O 点の垂直応力 $\sigma_{z,m}$ が大きい値を示し， $\bar{\sigma}_{z,m}$ が $\bar{\sigma}_{z,w}$ に比べて大きい値を示すという現象は，定荷重剪断試験で剪断による粉粒体層の膨張が大きい場合に認められる現象と同様である⁹⁾。このように平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ が $\bar{\sigma}_{z,w}$ よりも大きい値を示すことは他の粗粉においても確かめた。なお， $\bar{\sigma}_{z,m}$ が $\bar{\sigma}_{z,w}$ に比べて大きくなるのは，剪断状態においてセル壁面が粉粒体層に対して下向きの力を与えることによるものと考えられる。

Fig.6 および 7 は微粉の τ_x ， $\sigma'_{z,m}$ ， $\sigma_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$

Fig. 5 剪断過程および垂直応力分布 (ジルコンサンド)

Fig. 6 剪断過程および垂直応力分布 (タルク)

対 δ_w の関係を調べた場合の代表例として、それぞれタルクと酸化亜鉛の結果を示した。微粉の破壊包絡線を得るために粉体層を圧密した後に膨張させているので、その層の変化を垂直変位 δ_z として測定した結果を、 δ_z 対 δ_w の関係として両図に併せて示してある。また、図中における()内の記号はFig.3中の記号に対応している。

Fig.6に示すタルクの場合、粉体層を圧密応力 $\bar{\sigma}_{z,c}=0.7$ Kg/cm²で圧密したA点($\delta_w=0$)における垂直応力分布は剪断面ではほぼ一様であり、かつ、 $\bar{\sigma}_{z',m} > \bar{\sigma}_{z,m} \approx \bar{\sigma}_{z,w}$ となっている。つぎに $\bar{\sigma}_{z,w}$ を $\bar{\sigma}_{z,c}$ になるように粉体層を圧密している状態では($\delta_w=0 \sim 7$ mm), 下部での垂直応力分布は一様であるが上部に垂直応力分布の偏りが見られ、また、 $\bar{\sigma}_{z,w}$ に対する $\bar{\sigma}_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z',m}$ の大小関係はA点の場合とほとんど同じである。さらに、 $\delta_w=7.3$ mm付近になると $\bar{\sigma}_w$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$ がともに一定の値を示していることから、C点に達していることがわかる。C点より徐々に抜重すると剪断面近傍の各 $\sigma_{z,m}$ および $\sigma_{z',m}$ は一樣に減少し、かつ、 $\bar{\sigma}_{z,m} \approx \sigma_{z',m} > \bar{\sigma}_{z,w}$ となっている。

Fig. 7に示す酸化亜鉛では、A点における垂直応力分布は剪断面で一様でなく、かつ、 $\bar{\sigma}_{z,w} \approx \bar{\sigma}_{z',m} > \bar{\sigma}_{z,m}$ であ

Fig. 7 剪断過程および垂直応力分布 (酸化亜鉛)

ることがわかる。A～C点においては、上部のF'点が剪断面および下部のR点の垂直応力が小さい値を示したことから、剪断面に垂直応力分布の偏りが顕著に見られ、 $\bar{\sigma}_{z,w} < \sigma_{z',m} > \bar{\sigma}_{z,m}$ となっている。破壊包絡線を得たCからD点においても剪断面に垂直応力分布の幅が広く、かつ、 $\bar{\sigma}_{z,w}$ は $\bar{\sigma}_{z',m}$ および $\bar{\sigma}_{z,m}$ に比べて一般に大きい値を示している。このように酸化亜鉛の場合、タルクに比べて剪断面に垂直応力分布の偏りが大きく生じ $\bar{\sigma}_{z,m} < \bar{\sigma}_{z,w}$ となるのは、定荷重剪断試験の場合と同様である⁷⁾。さらにFig.6および7の δ_z 対 δ_w の関係から、 $\bar{\sigma}_{z,w} = \bar{\sigma}_{z,c}$ になるように粉体層をあらかじめ圧密しただけ($\delta_z=0 \rightarrow$ 負の過程)、破壊包絡線を求めるときには層が膨張していることがわかる($\delta_z=$ 負 $\rightarrow 0$ の過程)。このことは、他の微粉および圧密応力においても同様であることを確かめている。なお、タルクをのぞく他の微粉については $\bar{\sigma}_{z,m} < \bar{\sigma}_{z,w}$ となる結果を得た。

以上のことから、定容積剪断試験において正当な内部摩擦係数を求めるには、定荷重剪断試験^{5,6)}と同様に剪断面付近における垂直応力とその分布を測定することが必要であることがわかる。さらに、剪断面付近での垂直

応力分布の偏よりの大小は、剪断試験方法よりもむしろ粉体の種類によるものであることがわかった。

3 2 破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$, $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係) および内部摩擦係数

数種類の粗粉の破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係)をFig.8に示した。これらの破壊包絡線は、それぞれ一回の剪断試験によって求めたものであり、いずれの粗粉においても直線を示していることがわかる。見掛けの内部摩擦係数はこれらの破壊包絡線の勾配より求められるが、正当な内部摩擦係数は平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ を用いた破壊包絡線の勾配から算出しなければならない。

粗粉の定容積剪断試験による破壊包絡線と定荷重剪断試験による破壊包絡線を比較した結果の一例をFig.9 (ガラス粉) および10 (ガラス球) に示した。ここで定容積剪断試験における剪断応力が定荷重剪断試験におけ

Fig. 8 破壊包絡線の測定結果

Fig. 9 定容積および定荷重一面剪断試験の破壊包絡線の比較 (ガラス粉)

Fig. 10 定容積および定荷重一面剪断試験の破壊包絡線の比較 (ガラス球No. 4)

る $\bar{\tau}_{x,max}$ に相当していると考えられることから、定荷重剪断試験の剪断応力には $\bar{\tau}_{x,max}$ を用いて比較してある。また、定容積剪断試験における剪断応力 $\bar{\tau}_x$ は水平変位 δ_x に対しても測定しているので (Fig. 4 および 5 参照), 同一の δ_x における平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ に対してプロットすることにより $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係としての破壊包絡線を得た。

Fig. 9 および10からわかるように、両試験における載荷垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ を用いた破壊包絡線 [$\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ (定容積剪断試験) および $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_{x,max}$ (定荷重剪断試験) の関係] はそれぞれの粗粉においてほぼ一致している。また、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ を採用した破壊包絡線 [$\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ (定容積剪断試験) および $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_{x,max}$ (定荷重剪断試験) の関係] は載荷垂直応力を用いた破壊包絡線よりも小さい勾配で一致していることがわかった。さらに、ガラス粉とガラス球のように材質が同じであっても、ガラス球の破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ および $\bar{\tau}_{x,max}$ 対 $\bar{\tau}_{x,max}$ の関係) の勾配すなわち内部摩擦係数は小さい値を示し、粒子形状の差異が内部摩擦係数に反映されることがわかる。

微粉の定容積と定荷重の剪断試験を比較した一例として、タルクと粉糖の結果をそれぞれFig. 11および12に示した。微粉の定容積剪断試験における剪断応力 $\bar{\tau}_x$ としては定荷重剪断試験における $\bar{\tau}_{x,s}$ に相当する応力が観測されているので、定荷重剪断試験の結果については $\bar{\sigma}_{z,w}$ または $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_{x,s}$ の関係で点綴してある。図中において破壊線は $\bar{\sigma}_{z,m}$ を用いた定容積剪断試験の破壊包絡線である。

Fig. 11に示したタルクの定容積剪断試験結果における $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係は空隙率 $\bar{\epsilon}_0$ に応じて上に凸に彎曲シローンの法則から偏倚しているように見えるが、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ を用いた破壊包絡線は、多少ばらつきがあるがほぼ直線となり、かつ定荷重剪断試験の $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対

2. 定容積および定荷重一面剪断試験に よって求めた内部摩擦係数の比較

Fig. 11 定容積および定荷重一面剪断試験の破壊包絡線の比較 (タルク)

Fig. 12 定容積および定荷重一面剪断試験の破壊包絡線の比較 (粉糖)

$\bar{\tau}_{x,s}$ 関係 (●印) の結果とも大体一致していることがわかる。すなわち、 $\bar{\sigma}_{z,m}$ に基づく微粉の破壊包絡線の勾配いわゆる内部摩擦係数は剪断試験方法の影響を受けにくいと考えられる。また、剪断面に実際にかかる垂直応力が $\bar{\sigma}_{z,w}$ によって異なるので $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係はクーロンの法則より偏倚していると観測されているにすぎないといえよう。

Fig.12に示す粉糖の $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係も各 $\bar{\epsilon}_0'$ (圧密応力 $\bar{\sigma}_{z,c}$) に応じた曲線を示している。しかし、 $\bar{\sigma}_{z,m}$ を用いた破壊包絡線はほぼ直線で表わすことができた。このように、 $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ の関係が直線を示しその勾配より内部摩擦係数を求められることは他の微粉においても確かめている。なお、各 $\bar{\epsilon}_0'$ における $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係に基づく破壊包絡線の終点 (Fig.3のC点) は Roscoe 状態図⁹⁾におけるCritical state line (粉体層が膨張あるいは収縮せずに剪断されている) 上の点である。この終点を結ぶと原点を通る直線となり、Critical state line (CSL) と $\bar{\tau}_x$ 軸の角度は炭酸カルシウム (P-30) = 16.5, トウモロコシデ

Powder	Internal friction factor by constant volume shearing	Internal friction factor by constant vertical stress shearing
Glass Beads No. 4	0.40	0.39
White Alundum	0.50	0.45
Glass Powder	0.64	0.57
Zircon Sand	0.83	0.84
Toyura Sand	0.88	0.87
Talc	0.48	0.42
Powder Sugar	0.62	0.55
Magnesium Stearate	0.63	0.67
Calcium Carbonate (P-30)	0.85	0.67
Corn Starch	0.85	0.81
Zinc Oxide	1.19	1.02

ンブロン=18.5, タルク=20, 粉糖=28.3, ステアリン酸マグネシウムおよび酸化亜鉛=28.3であった。しかしこれらの値は、後述の内部摩擦係数の値に比べると、流動性の評価順序とは一致していない。

以上の考察から、定容積剪断試験と定荷重剪断試験において、平均の実測垂直応力に基づく破壊包絡線より算出した粗粉および微粉の内部摩擦係数の値をTable 2にまとめて示した。同表における定荷重剪断試験の内部摩擦係数は粗粉では $\bar{\tau}_{x,m,a,w}$, 微粉の場合は $\bar{\tau}_{x,s}$ にそれぞれ基づいて得た値である。Table 2 から、両試験で得た粗粉および微粉の内部摩擦係数はほぼ一致しているといえる。すなわち、剪断面付近における垂直応力とその分布を測定し、それらの平均値で剪断応力を評価した内部摩擦係数は、試験方法の影響を受けにくいことがわかる。

4. 結 論

一回の剪断試験で破壊包絡線が得られる定容積一面剪断試験を試作し、数種類の粗粉および微粉を対象として、剪断面近傍の垂直応力とその分布を調べ、平均の実測垂直応力に基づく内部摩擦係数を求めて、定荷重一面剪断試験による測定結果と比較した結果、次のような結論を得た。

- 1) 剪断面近傍における垂直応力分布の偏よりの大小は、剪断試験方法よりも粉体の種類によって変化する。
- 2) 定容積剪断試験における剪断応力 $\bar{\tau}_{x,s}$ は、粗粉につ

いては定荷重剪断試験における剪断応力の極大値 $\bar{\tau}_{x,max}$ として、また、微粉の場合は定常値 $\bar{\tau}_{x,s}$ として観測される。したがって、これらの値に基づいて算出される内部摩擦数の意味は、粗粉と微粉とは異なる。

3) 微粉の $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係はクーロンの法則より偏倚するように観測されるが、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ を用

いた破壊包絡線($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係)は直線で表わすことができ、その勾配より内部摩擦係数が求められる。

4) 平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ に基づく破壊包絡線より求めた定容積剪断試験の内部摩擦係数は、粗粉および微粉とも定荷重剪断試験による測定値と一致する。

使用記号

D : 剪断セル径	[mm]	$\sigma_{z,m}$: 剪断面上部付近での実測垂直応力	[Kg/cm ²]
D_p : 粒径	[μ m]	$\bar{\sigma}_{z,m}$: 剪断面下部付近での平均の実測垂直応力	[Kg/cm ²]
H_1 : 剪断面より上部の粉粒体層高	[mm]	$\bar{\sigma}'_{z,m}$: 剪断面上部付近での平均の実測垂直応力	[Kg/cm ²]
H_2 : 剪断面より下部の粉粒体層高	[mm]	$\bar{\sigma}_{z,c}$: 圧密応力	[Kg/cm ²]
V_x : 剪断速度	[mm/min]	$\bar{\tau}_x$: 剪断応力	[Kg/cm ²]
$\bar{\epsilon}_0, \bar{\epsilon}'_0$: 初期空隙率	[—]	$\bar{\tau}_{x,max}$: 最大剪断応力 ($\bar{\tau}_x$ の極大値)	[Kg/cm ²]
δ_x : 水平変位	[mm]	$\bar{\tau}_{x,s}$: 定常剪断応力	[Kg/cm ²]
δ_z : 垂直変位	[mm]	$\bar{\sigma}_{z,w}$: 垂直応力	[Kg/cm ²]
ρ : 粒子の真密度	[g/cm ³]	ϕ_r : 注入角法による安息角	[deg]
ρ_b : 見掛け密度	[g/cm ³]		
$\sigma_{z,m}$: 剪断面下部付近での実測垂直応力	[Kg/cm ²]		

引用文献

- 1) Aoki, R. and H. Tusnakawa : *J. Chem. Eng., (Japan)*, 6, 462 (1973)
- 2) 宮南 啓, 寺下敬次郎, 尾崎 徹, 矢野武夫 : 粉体工学会誌, 16, 173 (1979)
- 3) Schwedes, Jörg : *Powder Technology*, 11, 59 (1975)
- 4) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 吉田元茂, 矢野武夫 : 粉体工学会誌, 15, 515 (1978)
- 5) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 山本孝夫, 矢野武夫 : *ibid.*, 15, 526 (1978)
- 6) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 矢野武夫, 山本宜之 : *ibid.*, 15, 583 (1978)
- 7) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 矢野武夫, 岩沢 哲 : 粉体工学会誌, 17, 374 (1980)
- 8) 綱川 浩, 青木隆一 : 粉体工学研究会誌, 11, 263 (1974)
- 9) 綱川 浩, 三枝 隆 : 粉体工学会誌, 15, 342 (1978)
- 10) 梅屋 薫, 原 隆一, 木村知弘 : 第14回粉体に関する討論会要旨集 p 107 (1976)

Authors' abstract

Internal Friction Factors of Powder by Constant Volume Shear Test

by

Keijiro TERASHITA,* Kei MIYANAMI,* Takeo YANO** and Yoshiyuki YAMAMOTO*

(*Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 591, JAPAN)

(**Yano Chem. Tech. Res. Lab., Osaka 550, JAPAN)

A new type of constant volume shear tester has been developed to obtain the yied loci by a single experimental run. By utilizing this tester, the shear stress which is converted in to the internal friction factor was measured for the several kinds of powders.

The tester was attatched with the sensors detecting the normal stress distribution (6points) above and below the shearing plane.

The internal friction factor obtained using constant volume shear tester was compared with that by a constant vertical stress tester.

The findings are as follows :

- (1) Whether the type of tester is constant volume of constant vertical stress does not affect the nor-

mal stress distribution, but it depends on the sorts of powder.

- (2) The shearing stress $\bar{\tau}_x$ measured by the constant volume tester agrees with the peak shearing stress $\bar{\tau}_{x,max}$ observed by the vertical constant stress tester for coarse powders. For fine powders, the $\bar{\tau}_x$ coincides with the steady state shearing stress provided by the constant stress tester.
- (3) Both types of the testers make significant difference in the internal friction factors calculated by the normal stress acting on the shear plane.

List of figures and tables

Fig. 1 "Constant volume,, direct shear tester.

Fig. 2 Measurement of actual normal stress and its distribution in the vicinity of shearing plane.

Fig. 3 Shearing procedure of fine powder.

Fig. 4 Shearing diagram, actual normal stress distribution and its mean (Glass powder as an example of coarse powders).

Fig. 5 Shearing diagram, actual normal stress distribution and its mean (Zircon sand as an example of coarse powders).

Fig. 6 Shearing diagram, actual normal stress distribution and its mean (Talc as an example of fine powders).

Fig. 7 Shearing diagram, actual normal stress distribution and its mean (Zinc oxide as an example of fine powders).

Fig. 8 Typical X-Y record of yield loci for coarse powders measured by the constant volume

shear tester.

Fig. 9 Comparison of yield loci of a coarse powder measured by the constant volume and the constant vertical stress testers (Glass powder).

Fig. 10 Comparison of yield loci of a coarse powder measured by the constant volume and the constant vertical stress tester (Glass bead No. 4).

Fig. 11 Comparison of yield loci of a fine powder measured by the constant volume and the constant vertical stress testers (Talc).

Fig. 12 Comparison of yield loci of a fine powder measured by the constant volume and the constant vertical stress testers (Powder sugar).

Table 1 Properties of powders tested.

Table 2 Internal friction factor by constant volume and the constant vertical stress testers.

研究速報

向流の水流を伴う固液系粒子群のオリフィスからの粒子排出速度*

The Discharge-Rate of Solids-Particles through Orifices with Counter-Current
Flow of Water in Solids-Liquid Systems

油谷 暢悦**
Nobuetsu Yutani

乙竹 直**
Naoshi Ototake

藤田 重文**
Shigefumi Fujita

緒言

オリフィスから粉粒体が流出する現象は粉体の流動の

基礎的問題として、古くから研究されてきた課題である。大気中におけるオリフィスからの粉粒体の流出速度に関する研究については数多くの報告がある¹⁾が、固液系の場合のオリフィスからの流出速度に関するものはきわめて少なく青木ら²⁾やChonら³⁾の報告があるにすぎない。

昭和55年3月10日受付

* 粉体工学会他、第16回粉体に関する討論会にて発表 (1978.11大阪)

** 東京農工大学工学部化学工学科 (〒184 小金井市中町2-24-16)

TEL0423-81-4221