研究報告

一面剪断試験による湿潤粉粒体の内部摩擦係数 および剪断付着力*

Internal Friction Factors and Cohesions of Wet-Powder by the Direct Shear Test

寺下 敬次郎**
Keijiro TERASHITA

岡嶋 雅資**
Masashi OKAJIMA

宮南 啓**
Kei MIYANAMI

古林 和夫**
Kazuo FURUBAYASHI

1. 緒言

湿潤粉粒体を取り扱うプロセスは、化学工業、飼料、鋳物、窯業および食品工業などをはじめとして、ほとんどの工業で用いられている。したがって、合理的な装置設計やいろいろな現象の解析を行なうためには、湿潤粉粒体の内部摩擦係数や付着力（引張強度、剪断付着力）を調べることは極めて重要である。

湿潤粉粒体の引張強度に関しては、Rumpf ら^{8,9,10)}、井伊谷ら^{6,7)}、篠原ら^{13,14)}、綱川ら¹⁹⁾ および Schubert ら¹²⁾ などによって種々のモデルによる解析や測定が行なわれている。一方、関口ら¹¹⁾ は二面剪断試験結果より粒子1個あたりの凝集エネルギーを推定し、Carr と Walker⁴⁾ は湿潤石炭の単軸破壊応力をリングセル（環状セル）と Jenike セルで求め比較している。また、青柳ら³⁾ は土の三軸圧縮試験および綱川²²⁾ は湿潤粉粒体の定容積一面剪断試験を行ない、内部摩擦係数および剪断付着力（粘着力）と含水率の関係を調べている。しかしながら、湿潤粉粒体の内部摩擦係数と剪断付着力に関する研究は、いまだ十分でなく、また、剪断試験方法によるこれらの測定値の比較ならびに剪断面付近の垂直応力とその分布は調べられていない。

われわれは、さきに、定荷重および定容積一面剪断試験による乾燥粉粒体の内部摩擦係数は、平均の実測垂直応力に基づく破壊包絡線より算出すれば一致することを報告¹⁷⁾ した。ここでは、粉粒体の種類や含水率を変化させた湿潤粉粒体を対象として、定荷重および定容積一面剪断試験を行ない、剪断面上下付近の垂直応力とその分布を調べるとともに、その平均の実測垂直応力あるいは

Fig.1 定容積一面剪断試験機の概略と垂直応力の実測位置

垂直応力を用いた破壊包絡線を求めた。また、湿潤粉粒体の引張破断試験を行ない、引張強度を測定した。これらの結果から、垂直応力分布や内部摩擦係数ならびに付着力に及ぼす含水率の影響をあきらかにするとともに、湿潤粉粒体の流動性を評価できたので報告する。

2. 実験装置、実験方法および粉粒体試料

剪断応力ならびに剪断面近傍における垂直応力とその分布を実測できるようにした定荷重および定容積併用型の一面剪断試験機は前報¹⁷⁾ と同一のものであるが、定容積剪断試験機の主要部を Fig.1 に示した。剪断時に粉粒体層は膨張しようとするが、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^{1,17,20)}。この応力を圧縮型荷重変換器とブルービングリングにより垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ と剪断応力 $\bar{\tau}_x$ に分けて測定し、両者を X-Y 記録計上に記録すれば一回の剪断試験で破壊包絡線

昭和56年6月13日受付

*第18回粉体に関する討論会にて発表(1980.11 豊橋)

**大阪府立大学工学部化学工学科

(〒591 大阪府堺市百舌鳥梅町4丁804) TEL 0722-52-1161

が得られる^{1, 17, 20)}。

定荷重および定容積剪断試験における剪断面近傍の垂直応力とその分布は、固定セルおよび可動セル内に各3個ずつ取り付けた歪ゲージ式圧力変換器（受圧面： $\phi 6$ mm、容量：196 kPa）により測定した。上下6箇所の垂直応力 $\sigma_{z,m}$, $\sigma'_{z,m}$ ($m=F, F', O, O', R, R'$) 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、剪断開始から終了まで同時に連続記録した。

剪断試験および引張破断試験における湿潤粉粒体試料には、一定質量の粉粒体に蒸留水を少量ずつ注入し均一に攪拌混合して調整したものを直ちに用いた。両剪断試験は、湿潤粉粒体試料をスパチュラで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水平にする程度に押え、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、そのうち、予圧密 $\bar{\sigma}_{z,p}$ （基本的には9.81および98.1 kPa）を加えてから行なった。剪断条件は剪断セル径 $D=100$ mm、上部粉粒体層高 $H_1=10$ mm、下部粉粒体層高 $H_2=5.8$ mm および剪断速度 $v_x=3.33 \times 10^{-3}$ m/s である^{16, 17)}。

湿潤粉粒体層の引張破断試験には、引張応力 $\bar{\sigma}_x$ と水平変位 δ_x の関係を測定できる吊り下げ式粉体層付着力測定機（コヒテスタ：ホソカワミクロン[®]製）を用いた^{5, 18)}。実験方法などは前報¹⁸⁾と同様であるので、ここでは省略する。

容積基準含水率 φ_v は、剪断試験および引張破断試験終了後、それぞれのセル内より試料を数箇所サンプリングし、乾燥法により求めた。

実験に用いた粉粒体試料を Table 1 に示した。

Table 1 粉 粒 体 試 料

Powder	d_p [μ m]	$\rho \times 10^3$ [kg/m ³]	$\rho_a \times 10^3$ [kg/m ³]	φ_r [rad]
Toyoura sand	105~350	2.72	1.95	0.611
Zircon sand	105~350	4.61	2.91	0.576
Poly vinyl chloride	63~177	1.43	0.58	0.600
Alumina	0.5~3	3.23	0.78	0.873

3. 実験結果および考察

3.1 剪断応力、垂直応力および実測垂直応力とその分布

剪断面上下付近の垂直応力 $\sigma'_{z,m}$ および $\sigma_{z,m}$ 、剪断応力 $\bar{\tau}_x$ 、垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ と水平変位 δ_x の関係を調べた代表例として定容積剪断試験の結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示した。Fig. 2 に示す乾燥豊浦砂の場合、剪断面各

Fig. 2 乾燥粉粒体の剪断過程および垂直応力分布(豊浦砂)

点における垂直応力は、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面のF点および上面のR', O' 点が大い値を示すという垂直応力分布を示して増大した。また、下面における平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ は荷重変換器で巨視的に観測された垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ よりも大きい値を示していることがわかる。Fig. 3 の湿潤豊浦砂では、O' およびO点が大い値を示すという垂直応力分布が剪断面上に生じており、かつ、 $\bar{\sigma}'_{z,m} > \bar{\sigma}_{z,m} > \bar{\sigma}_{z,w}$ となっている。

これらの実験結果から、含水率 φ_v によって、垂直応力分布の偏りに大小があり、また、平均の実測垂直応力

Fig.3 湿潤粉粒体の剪断過程および垂直応力分布(豊浦砂)

$\bar{\sigma}_{z,m}$ と垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ の大小関係が変化することが推察できた。そこで剪断面付近における垂直応力分布の偏りの大小ならびに $\bar{\sigma}_{z,m}$ と $\bar{\sigma}_{z,w}$ に基づく破壊包絡線を考察することにした。

Fig.2および3に示したような実測垂直応力 $\sigma_{z,m}$ および $\sigma_{z,w}$ 対水平変位 δ_x の関係を検討した結果、定容積剪断試験における垂直応力分布の偏りの大小は模式的に Fig.4に示す三つの型A, BおよびCに大別できることがわかった。ここでの垂直応力分布の偏りの大小は、後述する終点 (Fig.5) および Fig.6中のD点付近のものである。また、図中の矢印の大小は各位置における $\bar{\sigma}_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$ に対する比の平均値であるので、矢印の長さが等しいと、垂直応力分布は剪断面近傍で一様で

ある。さらに、垂直応力分布の偏りの大小は、剪断セル内における粉粒体層の充てん状態の疎密の程度を表わすもので、矢印の長さが短いほど疎充てんであることがわかっていてる。

Fig.4からわかるように、乾燥粉粒体 ($\phi_o=0$) では、剪断面上部よりむしろ下部に垂直応力分布の偏りが見られる (A型)。特に豊浦砂の場合、F点付近が密充てん状態であり、R点付近が疎充てん状態となっている。また、下部セル内の粉粒体層が密充てん状態であると上部セル内の粉粒体層は疎充てん状態であることがわかる。つぎに、funicular 域*における湿潤粉粒体では、剪断面の上下共に垂直応力分布の偏りが生じている (B型)。さらに含水率が増加し funicular 域と capillary 域の混在状態*付近になると、剪断面上下にはほぼ対象な凸状の垂直応力分布の偏りが生じていることがわかる (C型)。なお、pendular 域*における垂直応力分布はA型よりむしろC型に近いが、各位置における $\bar{\sigma}_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$ に対する比の平均値は funicular 域よりも小さいことを確かめている。

Fig.4に示す垂直応力分布の型は5~8回の剪断試験結果に基づいたものであり、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ および $\bar{\sigma}_{z,w}$ に対する各位置の垂直応力のばらつきの範囲は、pendular 域が±9%で最も大きく、ついで乾燥状態および funicular 域の±7%であり、funicular 域と capillary 域の混在状態が±5%で最も小さかった。しかし、このように垂直応力にばらつきが見られても、垂直応力分布の型そのものには再現性がある。さらに、定荷重一面剪断試験の定常剪断状態¹⁰⁾ (剪断応力および垂直変位がともに一定の値を示す付近)における湿潤粉粒体の垂直応力分布の型は、定容積剪断試験結果とほぼ同じであることを確かめている。

以上の考察から、垂直応力分布の偏りは乾燥から pendular 域、funicular 域の順に小さくなり、funicular 域と capillary 域の混在状態になると逆に大きくなることがわかった。

3.2 破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$, $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係) に及ぼす含水率の影響

容積基準含水率 ϕ_v を種々変化させて定荷重および定容積剪断試験を行ない、得られた垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ に基づく破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係) の一例として定容積剪断試験の結果を Fig.5 (豊浦砂) および Fig.6 (塩化

* 容積基準含水率を種々変化させた湿潤粉粒体の引張破断試験を行ない、含水率と破断変位の関係より、粒子—液体系の充てん特性を考察した¹⁰⁾。

Fig.4 乾燥および湿潤粉体の垂直応力分布の型

Fig.5 破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係) に及ぼす含水率の影響 (豊浦砂)

Fig.6 破壊包絡線 ($\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係) に及ぼす含水率の影響 (塩化ビニール)

ビニール)に示した。本研究では剪断付着力(粘着力)を求めるために、低応力範囲における $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係も正確に測定しているので、その結果と高応力範囲における $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係を両図に併せて示してある。これらの破壊包絡線はそれぞれ一回の剪断試験で得られたものであり、測定には10分を要しない。

Fig. 5 からわかるように、乾燥および湿潤豊浦砂の $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係はいずれも直線を示し²²⁾、その勾配は乾燥状態に比べて湿潤状態の方が小さい。また、同図における終点は、綱川ら²¹⁾がすでに報告しているように、剪断により粉粒体層の体積増加が飽和し、 $\bar{\sigma}_{z,w}$ と $\bar{\tau}_x$ が平衡状態を保っている限界の応力状態である。Fig. 6 に示す塩化ビニールを剪断すると、粉体層は乾燥状態の場合膨張し破壊包絡線が容易に得られたが、湿潤状態になると収縮したので、綱川ら²¹⁾の方法に基づき、A点から湿潤粉体層の体積を順次減少させてゆき $\bar{\tau}_x$ の最大値(C点)を得たのち、 $\bar{\sigma}_{z,w}$ を減少させる方法により破壊包絡線(C~D)を求めた。 $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係は、含水率 $\varphi_v \leq 5\%$ の場合ほぼ直線を示しているが、 $\varphi_v \geq 30\%$ になると湾曲しクーロンの法則から偏倚していることがわかる。なお、Carr と Walker⁴⁾はリング式剪断試験機を用いた湿潤石灰石あるいは梅屋と関口は²³⁾二面剪断試験機で湿潤石灰石の $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係がクーロンの法則から偏倚することを報告している。

Fig. 7 および Fig. 8 は $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係 (Figs. 5, 6) を平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ に基づく破壊包絡線($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係)に描きなおしたものである。Fig. 7 に示す $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係にクーロンの法則が適用でき、その勾配は乾燥および湿潤状態とも $\bar{\sigma}_{z,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係の傾きより小さいことがわかる。すなわち、剪断面近傍における平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,m}$ は、荷重変換器で巨視的に測定した垂直応力 $\bar{\sigma}_{z,w}$ に比べて大きい。また、Fig. 8 からわかる

Fig. 7 破壊包絡線($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係)に及ぼす含水率の影響(豊浦砂)

Fig. 8 破壊包絡線($\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係)に及ぼす含水率の影響(塩化ビニール)

ように、湿潤塩化ビニールの $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係はいずれの含水率 φ_v においても直線で表わすことができ、内部摩擦係数が求められる。さらに、湿潤塩化ビニールの $\bar{\sigma}_{z,m}$ は $\bar{\sigma}_{z,w}$ に比べて小さいことがわかる。このことは、微粉のアルミナにおいても同様であった。なお、乾燥および湿潤粉体の $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係にクーロンの法則が適用できることは、定荷重一面剪断試験においても同様であることを確かめている。

3.3 内部摩擦係数、剪断付着力および引張強度に及ぼす含水率の影響

湿潤粉粒体の内部摩擦係数 μ_m ($\bar{\tau}_x^* = \mu_m \cdot \bar{\sigma}_{z,m} + \bar{c}_m$)を Fig. 9 から Fig. 11 に示した。湿潤豊浦砂および湿潤シルコンサンドにおいては見掛けの内部摩擦係数 μ_w ($\bar{\tau}_x^* = \mu_w \cdot \bar{\sigma}_{z,w} + \bar{c}_w$)も得られたので併せて示してある。

Fig. 9 に示す豊浦砂の内部摩擦係数 μ_m および μ_w は、乾燥状態($\varphi_v = 0$)に少量の水分が添加された含水率 $\varphi_v < 5\%$ (pendular 域)で急激に減少していることがわか

Fig. 9 定荷重および定容積一面剪断試験によって求めた湿潤豊浦砂の内部摩擦係数の比較

* 定荷重一面剪断試験の剪断応力 $\bar{\tau}_x$ には、最大剪断応力 $\bar{\tau}_{x,max}$ を採用した¹⁷⁾。

Fig.10 定荷重および定容積一面剪断試験によって求めた湿潤ジルコンサンドの内部摩擦係数の比較

る。含水率 ϕ_v がさらに増加して funicular 域 ($8 < \phi_v < 25$) から funicular 域と capillary 域の混在状態 ($\phi_v \geq 25$) に移行しても内部摩擦係数はほぼ一定の値を示している。これらの傾向は剪断試験方法が異なっても同じであることがわかる。 $\phi_v \leq 5\%$ においては含水率の増加とともに粒子に液体が付着する接触点数が増し、その結果、粒子間同士の摩擦が減少し内部摩擦係数は小さくなると考えられる。また、 $\phi_v \geq 5\%$ になると粒子が液体に濡れるとともに液体が粉粒体層内で連続相となることから、液体の潤滑効果により内部摩擦係数が一定値を示すようになる。なお、綱川²²⁾は湿潤粉粒体（ガラス球、相馬砂）の内部摩擦係数を定容積一面剪断試験で求め、内部摩擦係数は乾燥状態に比べてほぼ同じか若干大きい値を示すが、水分量にはほとんど影響されないことを報告している。

Fig. 10 に示す湿潤ジルコンサンドの内部摩擦係数 μ_m および μ_w は、 $\phi_v \leq 5\%$ で著しく減少しそれ以上 ϕ_v が増加してもほぼ一定の値を示していることがわかる。さらに、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{s,m}$ に基づく定容積一面剪断試験の内部摩擦係数 (▲印) は、定荷重一面剪断試験の測定値 (■印) と含水率の全範囲において良好に一致していることがわかる。このことは、湿潤豊浦砂 (Fig. 9) および湿潤塩化ビニール (Fig. 11) についてもいえる。したがって、平均の実測垂直応力 $\bar{\sigma}_{s,m}$ で剪断応力 $\bar{\tau}_s$ を評価して得られる湿潤粉粒体の内部摩擦係数 μ_m は、乾燥粉粒体¹⁷⁾と同様に試験方法の影響を受けにくいといえる。

Fig. 11 に示す塩化ビニールの内部摩擦係数 μ_m は、 $\phi_v = 10\%$ 付近 (pendular 域と funicular 域の境界領域)

Fig.11 内部摩擦係数に及ぼす含水率の影響 (塩化ビニール、アルミナ)

まで減少するが、それ以上含水率が増加してもほぼ一定の値を示している。また、微粉のアルミナの μ_m は、pendular 域から funicular 域に移行してもそれほど大きく変化しないが、capillary 域になると減少していることがわかる。

以上の考察より湿潤粉粒体の内部摩擦係数 μ_m は、pendular 域において含水率の増加とともに減少するが、funicular 域および funicular 域と capillary 域の

Fig.12 引張強度の測定値 (塩化ビニール)

Fig. 13 剪断付着力と含水率の関係

混在状態においてはほぼ一定の値を示し、capillary 域になると減少するようになる。

Fig. 12 は湿潤粉粒体の含水率 ϕ_v とその空隙率 $\bar{\epsilon}_0$ を変化させて引張破断試験を行ない、得られた引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ の一例を示したものである。各含水率における引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ は、 $\bar{\epsilon}_0$ の小さい密充てん状態ほど大きい値を示し、かつ、疎充てん状態よりむしろ密充てん状態において $\bar{\sigma}_{x,T}$ の値に差異が見られる。これらの結果は多くの報告と一致する^{10, 12, 14, 15, 19}。

Fig. 13 には定容積一面剪断試験での剪断付着力（粘着力） $\bar{c}_m$ および $\bar{c}_w$ が含水率 ϕ_v によってどのように変化するかを調べた結果の一例を示した。同図において、 $\bar{c}_m$ は $\bar{\sigma}_{x,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係（直線）の $\bar{\tau}_x$ 軸との交点から求められる剪断付着力である（Fig. 7 参照）。また、 $\bar{c}_w$ は、 $\bar{\sigma}_{x,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係が直線の場合 $\bar{\tau}_x$ 軸との交点あるいは $\bar{\sigma}_{x,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係が弯曲した場合は Warren Spring 式²⁾ $[(\bar{\tau}_x/\bar{c}_w)^n = 1 + \bar{\sigma}_{x,w}/\bar{\sigma}_{x,T}]$ より求めた剪断付着力である。ここでの $\bar{\sigma}_{x,T}$ は剪断試験の実験条件下における空隙率 $\bar{\epsilon}_0$ を採用し、Fig. 12 に示すような $\bar{\sigma}_{x,T}$ 対 $\bar{\epsilon}_0$ 関係より読みとった値である。Fig. 13 からわかるように、剪断付着力 $\bar{c}_m$ および $\bar{c}_w$ は、乾燥粉粒体の場合は測定できないほど小さいが、粒子間に液橋が形成されてくる pendular 域（豊浦砂： $\phi_v < 5$ ，塩化ビニール： $\phi_v < 7.5$ ）において急激に増加し、液体が粉粒体層内で連続相となり、かつ、粒子が液体によりある程度皮覆される funicular（豊浦砂： $5 < \phi_v < 25$ ，塩化ビニール： $7.5 < \phi_v < 25$ ）では比較的ゆるやかに大きくなり、さらに含水率 ϕ_v が増加し funicular 域と capillary 域の混在状態になるとほぼ一定の値を示している。このことは定荷重一面剪断試験においても同様であった。さらに、このような剪断付着力と含水率の関係は綱川²²⁾や青柳³⁾の結果と類似である。すなわち、乾燥粉粒体から、pendular 域、funicular 域、funicular 域と capillary 域の混在状態

Fig. 14 剪断付着力と引張強度の関係

の湿潤粉粒体なるほど流動性は悪くなる。このことは経験的な流動性の評価順序と傾向的に一致する。

以上の内部摩擦係数と剪断付着力の結果から、湿潤粉粒体の流動性は、内部摩擦係数よりむしろ剪断付着力（粒子間付着力）によって評価できるといえる。

Fig. 14 には定容積剪断試験から求めた剪断付着力 $\bar{c}_m$ と引張破断試験から得た引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ の関係を示した。同図における $\bar{\sigma}_{x,T}$ は、剪断試験下における空隙率を採用し、Fig. 12 に示すような $\bar{\sigma}_{x,T}$ 対 $\bar{\epsilon}_0$ 関係より読みとった値である。Fig. 14 からわかるように、剪断付着力と引張強度は良好に一致している。

4. 結 言

粉粒体の種類や含水率を変化させた湿潤粉粒体を対象として、定荷重剪断および定容積一面剪断試験ならびに引張破断試験を行ない、得られた垂直応力分布、内部摩擦係数、剪断付着力および引張強度を検討した結果、次の結論を得た。

- 1) 剪断面近傍の垂直応力分布の偏りは乾燥状態から pendular 域、funicular 域の順に小さくなり、funicular 域と capillary 域の混在状態になると逆に大きくなる。
- 2) 湿潤粉粒体の内部摩擦係数は乾燥状態の粉粒体よりも小さい値を示す。さらに、湿潤粉粒体の内部摩擦係数は pendular 域において含水率の増加とともに減少し、funicular 域から funicular 域と capillary 域の混在状態に移行してもほぼ一定の値を示すが、capillary 域になると減少する傾向にある。
- 3) 平均の実測垂直応力に基づく湿潤粉粒体の内部摩擦係数は、定荷重剪断試験および定容積剪断試験とも良好に一致する。
- 4) 剪断付着力は pendular 域において急激に増大

し, funicular 域ではゆるやかに大きくなり, funicular 域と capillary 域の混在状態において飽和する傾向にある。剪断付着力と引張強度は良好に一致し, これらの付

着力の増加とともに湿潤粉粒体の流動性は悪くなる。すなわち, 湿潤粉粒体の流動性は, 内部摩擦係数よりむしろ粒子間付着力の大小で評価できるといえる。

使 用 記 号

$\bar{c}_m$: ($\bar{\tau}_x = \mu_m \cdot \bar{\sigma}_{s,m} + \bar{c}_m$) 剪断付着力	[kPa]	$\bar{\sigma}_{s,p}$: 予圧密応力	[kPa]
$\bar{c}_w$: ($\bar{\tau}_x = \mu_w \cdot \bar{\sigma}_{s,w} + \bar{c}_w$) 剪断付着力	[kPa]	$\sigma_{s,m}$: 剪断面下部付近における実測垂直応力	[kPa]
d_p : 粒径	[μm]	$\sigma_{s',m}$: 剪断面上部付近における実測垂直応力	[kPa]
$\bar{\varepsilon}_0$: 初期空隙率	[—]	$\bar{\sigma}_{s,m}$: 剪断面下部付近における平均の実測垂直応力	[kPa]
δ_x : 水平変位	[mm]	$\bar{\sigma}_{s',m}$: 剪断面上部付近における平均の実測垂直応力	[kPa]
μ_m : $\bar{\sigma}_{s,m}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係より得られる内部摩擦係数	[—]	$\bar{\sigma}_{s,w}$: 垂直応力	[kPa]
μ_w : $\bar{\sigma}_{s,w}$ 対 $\bar{\tau}_x$ 関係より得られる内部摩擦係数	[—]	$\bar{\tau}_x$: 剪断応力	[kPa]
ρ : 粒子の真密度	[kg/m ³]	φ_r : 容積基準含水率	[vol. %]
ρ_b : 見掛け密度	[kg/m ³]	φ_r : 安息角	[rad]
$\bar{\sigma}_{s,r}$: 引張強度	[kPa]		

引 用 文 献

- Aoki, R. and H. Tsunakawa: *J. Chem. Eng., Japan*, 6, 462 (1973).
- Ashton, M. D., D. C. Cheng, R. Farley and F. H. H. Valentin: *Rheol. Acta*, 4, 206 (1965).
- 青柳省吾, 横瀬廣司: 農業土木学会論文集, 80, 17(1979).
- Carr, J. F. and D. M. Walker: *Powder Tech.*, 1, 369 (1967/68).
- 藤井謙治, 横山藤平: 粉体工学会誌, 16, 686 (1979).
- Hotta, K., K. Takeda and K. Iinoya: *Powder Tech.*, 10, 231 (1973).
- Iinoya, K., S. Asakawa and K. Hotta: *ibid.*, 1, 28 (1967).
- Pietsh, W. and H. Rumpf: *Chem. Ing. Tech.*, 39, 885 (1967).
- Rumpf, H.: *ibid.*, 42, 538 (1970).
- Rumpf, H. and H. Schubert: *J. Chem. Eng., Japan*, 7, 294 (1974).
- 関口 勲, 鬼山和彦, 東畑平一郎, 大塚 照: 化学工学, 36, 571 (1972).
- Schubert, H., W. Hermann and H. Rumpf: *Powder Tech.*, 11, 121 (1975).
- 篠原邦夫, 田中達夫: 化学工学, 32, 88 (1968).
- Shinohara, K. and T. Tanaka: *J. Chem. Eng., Japan*, 8, 46, 50 (1975).
- 竹中英雄, 川島嘉明, 菱田 純: 粉体工学会誌, 17, 491 (1980).
- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 矢野武夫, 山本宜之: *ibid.*, 15, 583 (1978).
- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 矢野武夫, 山本宜之: *ibid.*, 17, 427 (1980).
- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 小西孝信, 吉田純二: 材料, 30, 873 (1981).
- 綱川 浩, 青木隆一: 化学工学, 36, 281 (1972).
- 綱川 浩, 青木隆一: 粉体工学研究会誌, 11, 263(1974).
- 綱川 浩, 三枝 隆: 粉体工学会誌, 15, 342 (1978).
- 綱川 浩: 粉砕(細川粉体工学研究所), No. 24, 17 (1979).
- 梅屋 薫, 関口 勲: 化学工学, 37, 704 (1973).

Authors' abstract

Internal Friction Factors and Cohesions of Wet-Powder by the Direct Shear Test.

by

Keijiro TERASHITA, Kei MIYANAMI, Masashi OKAJIMA and
Kazuo FURUBAYASHI.

(Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka591, JAPAN)

The normal stress and its distribution for several kinds of solid powders with various amounts of water in the vicinity of the shearing plain have been measured both by a constant volume shear tester and a constant vertical load tester. The yield loci have been calculated

from the measured actual normal stress data. The tensile test of wet powders has been also made.

The distribution of normal stresses in the vicinity of the shearing plane is the narrowest for dry powders and becomes wider with change from the funicular and capillary to the mixed zone. The internal friction factor decreases with increase in the water content of the powders in the pendular zone, while it is almost constant for funicular, capillary and the mixed zones. The internal friction factor calculated from the actual normal stress measured by the constant vertical load tester is agrees well with that obtained by the constant volume tester. Cohesion in the pendular zone increases remarkably with increasing water content in the powders, gradually increases in the funicular zone, and is almost constant in the funicular-and-capillary mixed zone. It is also found that the cohesion coincides well with the tensile strength. Flowability of wet powders is less enhanced as the cohesion or tensile strength becomes larger.

List of Figures and table

- Fig. 1 Measurement of actual normal stress and its distribution in the vicinity of shearing plane (Constant volume shear tester).
- Fig. 2 Shearing Pprocess diagram, actual normal stress distribution and its means for dry powder (Toyoura sand).
- Fig. 3 Shearing Pprocess diagram, actual normal stress distribution and its means for wet powder (Toyoura sand).
- Fig. 4 Classification of wet powders by normal stress distribution.
- Fig. 5 Effect of volumetric water content φ_v on yield loci (applied normal stress $\bar{\sigma}_{x,w}$ -shearing stress $\bar{\tau}_x$ diagrams).
- Fig. 6 Effect of volumetric water content φ_v on yield loci (applied normal stress $\bar{\sigma}_{x,w}$ -shearing stress $\bar{\tau}_x$ diagrams).
- Fig. 7 Effect of volumetric water content φ_v on yield loci (actual normal stress $\bar{\sigma}_{x,m}$ -shearing stress $\bar{\tau}_x$ diagrams).
- Fig. 8 Effect of volumetric water content φ_v on yield loci (actual normal stress $\bar{\sigma}_{x,m}$ -Shearing stress $\bar{\tau}_x$ diagrams).
- Fig. 9 Internal friction factor by constant volume and the constant vertical load testers (Toyoura sand).
- Fig. 10 Internal friction factor by constant volume and the constant vertical load testers (Zircon sand).
- Fig. 11 Effect of volumetric water content on internal friction factors (Poly vinyl chloride, Alumina).
- Fig. 12 Relationship between tensile strength $\bar{\sigma}_{x,T}$ and void fraction $\bar{\varepsilon}_0$.
- Fig. 13 Relationship between cohesion ($\bar{c}_m, \bar{c}_w$) and volumetric water content.
- Fig. 14 Relationship between cohesion $\bar{c}_m$ and tensile strength $\bar{\sigma}_{x,T}$.
- Table 1 Properties of powders tested.

国際会議ニュース

第4回：混合に関するヨーロッパ会議

1982年4月27日～29日

於 Noordwijkerhout, Netherland.

問合せ先

4th Mixing Conference

BHRA Fluid Eng.

Cranfield, Bedford, MK 430 AJ, England.