ジェニケセルによる石炭の流動物性測定結果

Flowability of Coals by Jenike's Cell

村田 博之*

Hiroyuki MURATA

若林 稔*

Minoru WAKABAYASHI

江草 忠人**

Tadato EGUSA

1. 緒 言

サイロの設計でまず必要なのは閉塞が生じないようにすることである。これは大形のサイロに石炭を貯蔵しようとする場合特に重要であり、閉塞防止の確実さが要求される。しかし大形サイロでの石炭の挙動は不明なことが多く、しかも石炭の銘柄、粒度、水分なども明確にさだめ難いので、問題は複雑である。

閉塞を防止する設計方法として広く用いられているジェニケの手法¹⁾では、サイロ内の粉粒体の挙動にたいするモデル化と近似がはつきりしている。この手法で検討すれば、大形石炭サイロの問題を従来の技術と新しい技術とにわけて整理できるだろう。そこでジェニケセルによる石炭のせん断試験をおこない、その結果を実サイロにあてはめて考えることにより、今後の研究課題を検討していくことにした。

2. せん断試験の試料

供試炭として、コールバレー、ハンタバレーおよび大同の3銘柄を用い、せん断試験試料の粒度と水分について以下のように取扱った。

原試料を2.38 mm でふるい分け、その網下をせん断試験の試料とした。粒度分布の原試料の測定値およびせん断試験試料の計算値を Fig. 1 に示す。ジェニケセルによる試験において、原試料中の粗粒を除去して細粒のみで試験することの是非は、試験目的とあわせて判断しなければならない。すなわち、閉塞が生じないサイロを設計するには、サイロの操業上予測される最悪条件に対応した流動物性値を用いるべきである。サイロに至る前

Fig. 1 Particle size distributions of coals

工程での粒度偏析などによって細粒のみがホッパ部出口に集まることが考えられる。一般に細粒の方が粗粒よりも閉塞しやすいので、原試料に合せた大粒径の試験を手間をかけておこなうよりも、最悪条件を考えて種々のデータを得ることの方が重要であろう。

試料の水分についても最悪条件の考慮が必要である。サイロに貯蔵される石炭の水分は、それまでのハンドリングや気象の条件によって変動し、これをある水分値以下に抑えるのは困難である。したがって、まず試料の水分を変えた予備試験をおこなって最悪条件を見出し、その水分値で以後の詳細試験をおこなうことにした。

3. せん断試験の方法

ジェニケセルを用いたせん断試験をジェニケの手順通りにおこなった。ジェニケのせん断試験の特色は、セルの形状寸法などの装置よりも、むしろ試験方法にある。これはサイロ内現象についての、以下のようなモデル化に試験をあわせているからである。まずホッパ部でアーチが生じている状態を考え、力の釣合条件から、アーチ

昭和58年3月17日受付

* (株)神戸製鋼所技術開発本部機械研究所

(〒651 神戸市中央区協浜町1-3-18)

TEL 078-251-1551

** 関西熱化学(株)尼崎工場設備部 (〒660 尼崎市大浜町2-23)

TEL 06-416-1331

Fig. 2 Pre-consolidation ①

Fig. 3 Consolidation shear ② and shear ③

スパンの長さ α とアーチ根元の粉体の単純圧縮強度 f_c の関係が求まる。アーチができる前は粉体が定常的に流れていたものとし、その時の粉体の応力成分のうち最大主応力 σ_1 のみが f_c に関係するものとする。ホッパー内の定常流れの応力場は、粉体がトレスカの破壊条件をもとにしたクーロン則にしたがうものとすれば、静定問題の解として得られる。この解が得られる条件はマスフローの条件と一致する。

せん断試験も、定常流れでの σ_1 や f_c などを求めるために、次の3つの操作でせん断する。

①予圧密 (Pre-consolidation) : まず試料を Fig. 2 のようにセルに入れ、垂直荷重 V_i をかけて n 回ツイストする。 V_i と n の選択は②で説明する。

②圧密せん断 (Consolidation shear) : 次に上部の部品を取替えて Fig. 3 のようにし、垂直荷重 V でせん断する。この時、せん断力がせん断変位に対して一定となる定常状態が得られなければならない。この定常状態が得られるまで、①の n または V_i を変えて①～②を繰返す。このような定常せん断の実現が、このせん断試験の最も重要な部分である。定常状態が得られたら、そのせん断力を S として、③に進む。

③せん断 (Shear) : 垂直荷重を $\bar{V}$ に変えてふたたびせん断し、せん断破壊力 $\bar{S}$ を測定する。

以上の操作によって、定常に流れている応力 (V, S) の粉体についての破壊包絡線 YL 上の一点 $(\bar{V}, \bar{S})$ が求まることになる。 $\bar{V}$ を3～4水準 $(\bar{V}=1/4 \sim 3/4 V)$ 程度選んで①～③を繰返せば YL が一本描ける。Fig. 4 に以上の手順による測定記録の例を示す。図のたて軸はせん断力を示し、せん断は右から左に進む。最初の3回のせん断は、ツイスト回数 n を変えて定常せん断の条件を求めたもので、3番目のせん断で定常状態を得た。以下は $\bar{V}$ のみを変えた①～③の繰返しであり、図には②と③のせん断力が記録されている。せん断変位を与えると、②においては粉体が次第に圧密されて定常状態に達し、③では粉体が速やかに破壊しせん断力が低下していく様子が図から読みとれる。

さらに V を3～4水準選んで以上の試験を繰返すことにより、一つの試料に対する YL の群が描けることになる。Fig. 5 に3本の YL と、それぞれに対する単純圧縮強度 f_c と圧密せん断②における定常状態での最大主応力 σ_1 の作図例を示す。図中□印で表した点は (V, S) をセル面積で除した値をプロットしたもので、+印は $(\bar{V}, \bar{S})$ を表しており、これらを結んで YL を描いた。原点

Fig. 4 A typical recorder chart (Hunter Valley, moisture 15.7%)

Fig. 5 Typical yield loci
(Hunter Valley, moisture 15.7%)

Fig. 6 Consolidation bench

を通り YL に接する円を作図して f_c が、また口印の点を通して YL に接する円によって σ_1 が求まる。なお原点を通して σ_1 の円に接する直線を有効破壊包絡線 EYL, この直線が横軸となす角 δ を有効内部摩擦角と呼び、応力場の計算に用いる。

壁面における破壊包絡線 WYL および壁面摩擦角 ϕ' を求めるには、Fig. 2 および 3 の中の Base を壁面サンプルに置き換えてせん断する。

YL および WYL に時間効果を織り込んだ TYL および TWYL を求めるには、②の圧密せん断後セルと試料をそのまま Fig. 6 のかためベンチに移して垂直荷重をかけたまま静置し、所定期間が経過したらふたたび試験機に戻して③のせん断をおこなう。かためベンチで静置している間に、試料の水分が蒸発してセルの外へ出ないよう、セル部にもシールをする必要があった。

4. 試験結果と今後の検討課題

1) 試料の水分、粒度、銘柄の影響

Fig. 7 Effect of moisture content on $\bar{S}$

Fig. 7 に、圧密せん断②の垂直荷重 V を 7.9 kgf, せん断③の垂直荷重 $\bar{V}$ を 0.8 kgf と一定にし、せん断試験試料の水分のみを変えて試験した場合の③におけるせん断破壊力 $\bar{S}$ の測定結果を示す。いずれの石炭でも、 $\bar{S}$ が水分によって変化し、ある水分で最大値を示した。石炭の銘柄について比較すると、大同が最も $\bar{S}$ が大きく、ハンタバレー、コールバレーの順となるが、これはせん断試験試料の細かさの順と一致した。このように、石炭の流動物性が粒度、水分、銘柄によって大幅に変化することが分った。

サイロの閉塞を防止するには、前述のように最悪条件を予測する必要があるが、不特定の海外炭を対象とするサイロの場合予測は難しい。しかし何らかの目安を得るには、まず Fig. 7 の $\bar{S}$ の変化を、石炭の炭化度、粒度、水分などと理論的に関係づけておく必要がある。

2) 最大主応力と単純圧縮強度の関係

せん断破壊力 $\bar{S}$ を最大にする水分値が求まったので、以後はせん断試験試料の水分をこの値に保って試験した。Table 1 はその結果をまとめたもので、最上段の石炭の銘柄別に示してある。次段の水分はせん断試験試料の値であり、これに対応する原試料の水分測定値は、表の値より 2~3% 少なかった。

ホッパー部の出口寸法を直接さだめるのは、圧密せん断の最大主応力 σ_1 と単純圧縮強度 f_c の関係である。Fig. 8 は、Table 1 中の σ_1 と f_c の値を、両対数紙上にプロットしたもので、ハンタバレーの一点を除いて、 $f_c(\sigma_1)$ はほぼ直線となった。同じ σ_1 にたいして f_c の大きい石

Table 1 Flowability of coals

		Coal valley			Hunter Valley			Tatug		
Moisture	[%]	14.2			15.7			12.9		
Major consolidating pressure	σ_1 [tf/m ²]	1.29	2.60	5.25	1.25	2.61	4.73	1.24	2.80	5.05
Unconfined yield pressure	f_c [tf/m ²]	0.31	0.55	1.04	0.46	0.65	1.05	0.45	0.99	1.53
Effective angle of friction	δ [°]	46.2	44.2	41.9	47.4	45.8	44.8	49.4	51.0	45.9
Angle of friction between a solid and a steel plate	ϕ' [°]	27.8	26.4	—	27.1	26.1	—	24.8	24.1	—
Bulk density	γ [tf/m ³]	0.72	0.74	0.78	0.67	0.71	0.73	0.72	0.76	0.79

Fig. 8 f_c as function of σ_1

Fig. 9 Coal silo for calculation

炭ほど閉塞しやすく、大同、ハンタバレー、コールバレーの順となっている。

閉塞の条件を計算するために、Fig. 9に示すような容量10万トンのサイロを考えた。直径 65 m の円筒下部に

5ケのスリット形ホッパを設け、ホッパ半頂角 $\theta=30^\circ$ 、出口幅 $B=1$ m、ホッパ出口から石炭上表面までの高さ $h=46$ m とする。

マスフローしているものとして、ホッパ出口での最大主応力 σ_1 と、アーチを生じない限界の単純圧縮強度 f' を次式で計算する。

$$f' = \frac{B \cdot \gamma}{H(\theta)} = 0.63 \text{ tf/m}^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$\sigma_1 = f \cdot f' = 0.75 \text{ tf/m}^2 \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $H(\theta)$ はホッパ形状から求まる常数で $\theta=30^\circ$ の場合1.15であり、かさ密度 γ はTable 1中の大同炭の値0.72 tf/m³とした。 f は、 σ_1 の f' にたいする比であって、応力場とアーチの計算から求めた結果を線図化してあり、 $\theta=30^\circ$ の平面对称形ホッパに大同炭を用いた場合、 $f=1.2$ である。

Fig. 8の試験結果を、低応力側に外挿して $\sigma_1=0.75$ tf/m²にたいする f_c を大同炭について推定すると $f_c=0.29$ tf/m²となり、(1)式の f' より充分小さい。

したがって、マスフローで常時石炭を払い出している状態では、石炭銘柄による $f_c(\sigma_1)$ の変動を考慮しても、閉塞はまずないものと思われる。しかし以下のような要因の重なり合いを考慮しなければならない。

3) 壁面摩擦角

サイロのホッパ部壁面に対する破壊包絡線WYLの測定は、壁面サンプルの材料を種々に変えて試験したが、Table 1には壁面摩擦角 ϕ' として鋼板の値のみを示したマスフローの条件をジェニケの線図で求めると、大同炭の場合 $\phi' \leq 23^\circ$ が必要となるので、より ϕ' の小さなライニング材の選定も考えなければならない。

ホッパ部の流れには、原料が壁で滑って流れるマスフ

ローと、壁付近では流れずに死領域ができるファンネルフローの二つがある。後者でも閉塞を防止することが計算上は可能であるが、出口寸法が数mにもなることが多く、ファンネルフローを検討することは事実上無意味である。したがって、閉塞を防止するにはマスフローが必要条件である。現場で閉塞の原因を調べてみても、まずマスフローしていない。ホッパの傾斜が充分でない場合もあるし、また充分であっても排出装置との接続方法が悪い場合もある。そして、まず原料が壁面に付着し、それが成長して流路が次第に狭くなり、遂にはラットホールになったり、アーチができたりするのが共通した現象である。マスフローの条件に直接関係するのが ϕ' であるが、鋼板のままでは ϕ' が大きく他のライニング材にしてやっとマスフローにできることが多い。設計上クリチカルなことから、 ϕ' の方が f_c よりもむしろ重要なパラメータである。なお、石炭のサイロでは自然発火の防止からもマスフローが不可欠である。

ϕ' は粉体と壁面材料の組合せによって変化し、その変化の傾向を一般化するのも困難であるので、ライニング材を適切に選択するには考え得るすべての組合せについて試験せざるを得ない。 ϕ' が定まるメカニズムについて、材料の基礎物性にもとづく理論的な考察が必要である。

4) 時間効果および初期充てん圧力

試料を圧密せん断②しかためベンチで55日間静置後せん断③して得た単純圧縮強度 f_{ci} の値は、Table 1 に示した f_c の値より50~80%程度大きくなった。2)と同じように実サイロにあてはめると大同炭の場合 $f_{ci}=0.29 \times 1.5 \sim 1.8 = 0.44 \sim 0.52 \text{ tf/m}^2$ となり $f'=0.63 \text{ t/m}^2$ に近くなる。大同炭より流れ難い石炭もあり得るので、石炭をそのまま長期貯炭する場合には閉塞の恐れがある。

壁面サンプルに対する付着力も時間とともに増加することが確かめられたが、3)で述べたように粉体と壁面サンプル材料の組合せで変化するし、また水分の保持方法によっても異なる。したがって、壁面摩擦角 ϕ' とともに、付着生長のメカニズムについても理論的な考察が必要である。

次に、空のサイロに石炭を投入して、いきなりサイロ

をいっぱい充てんした場合も問題がある。サイロの通常の使い方では、ほぼ常に石炭を払い出しているのに、ホッパ部には出口に向う程粉体圧が小さくなる応力場が発達して閉塞が生じ難いのであるが、このような流動時の応力場と初期充てんの応力場はまったく別のものである。初期充てんの応力場は、投入高さ、投入量によって変化する理論的な取扱いが困難であるが、ここでは閉塞を防止する上での最悪条件として Walker²⁾ の積付高さ h に比例した静的粉体圧を用いる。するとホッパ出口での σ_1 は $h=46 \text{ m}$ として $\sigma_1=\gamma h=33 \text{ tf/m}^2$ となる。Fig 8 の試験結果を高応力側に延長して推定すると、大同炭の場合 $f_c=8.4 \text{ tf/m}^2$ となり、(1)式の f' よりはるかに大きくなる。定常流れでの $f_c(\sigma_1)$ をそのまま初期充てんにあてはめるのは正しくないが、初期充てん時の閉塞は充分予測できる。

長期貯蔵および初期充てん時に予想される閉塞にたいして、ブレーカやインサートを取付けたり、ホッパ部の形状や寸法を工夫するなど、装置の方からの防止方法も可能かも知れないが、その効果を理論的に予測するのは困難である。閉塞を確実に防止できる見通しを得るには、貯蔵時の粉体強度の増加および初期充てん時の過大圧の発生そのものを解消する手段の検討が必要である。

5. 結 言

大形石炭サイロでの閉塞を防止するために必要な今後の研究課題を検討するために、ジュニケセルによる石炭のせん断試験をおこなった。その結果、粒度や水分による流動物性の変化、マスフローの確保、および長期の貯蔵と初期充てんについて考慮する必要があることが分かった。これらの問題を解決していくためには、粉粒体の内部および壁面との間で生ずる付着力の発生とその生長のメカニズムについての考察、および長期貯蔵時の粉体強度の増加と初期充てん時の過大圧の発生を解消する手段の検討が今後必要である。

なおこの研究は東京電力株式会社との共同研究の一部であり、発表を許可いただいたことに感謝の意を表す。

使 用 記 号

B	: ホッパ出口幅	[m]	S	: 圧密せん断の定常せん断力	[kgf]
EYL	: 有効破壊包絡線	[—]	$\bar{S}$	: せん断のせん断破壊力	[kgf]
f_c	: 単純圧縮強度	[tf/m ²]	TWYL	: 長時間圧密後の WYL	[—]
f_{ci}	: 長時間圧密後の f_c	[tf/m ²]	TYL	: 長時間圧密後の YL	[—]
f'	: アーチを生ずる限界の単純圧縮強度	[tf/m ²]	V	: 圧密せん断の垂直荷重	[kgf]
n	: 予圧密のツィスト回数	[—]	$\bar{V}$	: せん断の垂直荷重	[kgf]

V_t : 予圧密の垂直荷重	[kgf]	δ : 有効内部摩擦角	[°]
WYL : 壁面での破壊包絡線	[-]	θ : ホッパー半頂角	[°]
YL : 破壊包絡線	[-]	ϕ' : 壁面摩擦角	[°]
γ : かさ密度	[tf/m ³]	σ_1 : 圧密せん断の最大主応力	[tf/m ²]

引用文献

- 1) Jenike, A.W.: Bulletin No. 123 of the Utah Engineering Experiment Station, University of Utah (1964)
- 2) Walker, D.M.: *Chemical Engineering Science*, 21, 975 (1966)

Authors' Abstract

Flowability of Coals by Jenike's Cell

by

Hiroyuki MURATA*, Minoru WAKABAYASHI* and Tadato EGUSA**

(*Mech. Eng. Research Lab., Kobe Steel Ltd.

(**Eng Dept. Amagasaki Works, the Kansai Coke & Chemicals, Ltd.)

Problems of how to ensure a smooth flow of coals from huge silos is discussed using the flowability of 3 coals measured by Jenike's shear cell. The unconfined yield strength f_c varied with the moisture content and particle size of the coals. The flow-function was not so low as to cause doming during flowing, but it became critical after consolidation for 55 days. the Kinematic angle of friction ϕ' between the coals and the walls was also critical to assure a mass flow.

These results lead to the follownig subjects for further investigation :

- 1) Analysis of the effect of the moisture and size of coals on f_c and of the variation of ϕ' with the kind of coals and wall.
- 2) A method of preventing f_c from increasing during storage and of relieving the pressure which increases *greatly* during filling in huge silos and causes an increase in f_c .