石炭の流動度の経時変化

Variation of Flowability of Coal with Consolidating Period

綱 川 浩*
Hiroshi TSUNAKAWA

1. 緒 言

最近、石炭の需要増加にともなって屋内貯炭方式の採用が進み、貯炭容量が数万トン級の大型サイロの建設が検討されている。サイロ貯炭の成否を決する問題点の1つは石炭の払出しを円滑に行ないうるか否かである。

一般に、石炭は数%の表面水分を含む。このような水分は石炭粒子間に液橋を形成し、粒子間付着力を誘発する。この結果、サイロ内で石炭の架橋を生じることになる。サイロの機能を維持するためには、架橋形成による石炭払出しの停止を防がなければならない。そこで、サイロの設計段階において、石炭の流動物性を十分に把握しておく必要がある。

大型サイロでは、とくに、長期間の貯炭に備えた設計も要求されるため、石炭の流動物性の経時変化を知ることが重要な問題である。長期貯炭後の払出しは石炭層の初期崩壊現象に相当すると推定される。

本研究では、直接剪断試験機において所定の圧密期間を経過した石炭粒子層の初期崩壊に対する破壊包絡線を定容積直接剪断法¹⁻⁷⁾で測定し、石炭の流動物性の経時変化を検討する。これらの結果により、長期貯炭に対する架橋形成の予測を目的とする。

2. 破壊包絡線の測定結果と考察

粉体は、一般に、圧密されたまま放置されると固結し流動性が悪くなる。実際に、ホッパー内で架橋を形成して流出しないことが知られている。したがって、サイロ貯炭の場合にも圧密期間にともなう石炭の流動物性の変化を検討しなければならない。固結の影響は剪断崩壊の初期段階で顕著に現われるから、破壊包絡線を連続線として測定できる定容積直接剪断法が有利である。

試料炭は太平洋炭で、水分は12.5%（火力発電所から

入手した状態）である。原炭を目開き 5.66 mm で篩分した通過分を剪断試験の試料とした。

剪断セルに試料を充てんし、所定の荷重を加えて圧密したまま放置する。放置中の水分変化は特に管理していない。所定の圧密期間が経過した試料について、剪断崩壊の初期段階（低剪断歪域）における破壊包絡線を定容積直接剪断法で測定した。なお、測定終了直後に試料の水分を測定した結果、水分の減量は10日後で約5%、また21日後で約14%であったが、これらの影響は考慮していない。

破壊包絡線の測定例を Fig.1 に示す。ただし、圧密応力を 60 kPa に固定し、圧密期間を最長21日以内で変化させた。圧密期間が0は10分間の圧密を指す。破壊包絡線は圧密期間が長いほど、 σ - τ 平面でより上方に位置するようになるが、ほぼ並行直線群とみなせる。なお、これらの破壊包絡線はさらに右上方に延びて行くが、この範囲内で固結の影響を知る目的が十分に達せられているので、記録を途中で打切った。

Fig.1 Yield loci for coal at initial failure against various consolidating period; fixed volume direct shear test.

昭和58年2月4日受付

* 横浜国立大学工学部化学工学科 (〒240 横浜市長谷区常盤台156)
TEL 045-335-1451

Fig. 2 Yield loci for coal at initial failure against various consolidating stress; fixed volume direct shear tester.

また、Fig. 2 に示す測定結果は圧密期間を 7 日間に固定し、圧密応力を 20、60 および 100 kPa と変化させた場合である。圧密応力が大きくなるほど、破壊包絡線は τ - σ 平面でより上方に位置し、また、その傾きも大きくなる傾向がある。

Figs. 1, 2 から明らかなように、初期剪断崩壊における破壊包絡線はクーロン則にしたがい、つぎの式で表わせる。

$$\tau = \sigma \tan \delta + C \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 C は付着応力、 δ は内部まきつ角、 σ は垂直応力、 τ は剪断応力である。

したがって、破壊包絡線の測定結果から求まる力学的特性は C と δ となる。圧密応力 σ_c をパラメータとして圧密期間 T に対して C と δ を図示すると Figs. 3, 4 の

Fig. 3 Variation of cohesion with consolidating period.

Fig. 4 Variation of angle of internal friction with consolidating period.

Fig. 5 Variation of bulk density with consolidating period.

ようになる。付着応力 C は圧密期間が長いほど、また、圧密応力が大きいほど大きな値を示す。内部まきつ角 δ は圧密期間が長くなるほどわずかに増加する傾向が見られるが、付着応力の場合ほど明瞭でない。

石炭試料の初期剪断崩壊時に測定した充てん密度 γ を Fig. 5 に示す。充てん密度は圧密応力が大きいほど大きな値を示すが、圧密期間による影響は明瞭でない。

3. 流動度の経時変化

破壊包絡線が(1)式で表わされるとき、試料の力学的物性は付着応力 C と内部まきつ角 δ で規定される。付着特性は前報^{5,6)}で述べたように、単軸崩壊応力 f であるからこの場合、つぎの式で表わせる。

$$f = 2C \cot(\pi/4 - \delta/2) \quad \dots\dots(2)$$

ホッパー内に生じる架橋の強さを考える場合、充てん密度 γ は重要な物性値となる。そこで、流動度を架橋の強さに関連させて表現する場合、つぎの定義が適切であると考え^{8,9)}。

$$\text{流動度, } FI = \frac{f}{\gamma g} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 g は重力速度である。

ここに定義した流動度は石炭の試料柱が外力を受けることなく直立しうる最大の高さを意味する。

流動度は付着応力 C および内部まきつ角 δ がともに大きく、また、充てん密度 γ が小さいほど大きな値となり石炭の流動性が悪くなる。したがって、この流動度の表

Fig. 6 Variation of flowability of coal with consolidating period (The solid lines show results calculated from eqn. (4)).

Fig. 7 Relationship between the values of coefficients a and b in eqn. (4) and consolidating stress.

現は経験的観測と矛盾しない。

そこで、圧密応力と圧密期間を変えた破壊包絡線の測定結果から、(3)式にしたがって流動度を求め、これと圧密期間の関係を図示すると Fig. 6 になる。圧密期間が長くなるほど流動度は大きな値となるが、やがて飽和する傾向がある。また、圧密応力が大きいほど流動度は大きくなり、つぎの式が近似的に成り立つ。

$$FI - FI_0 = a(1 - e^{-bT}) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 a 、 b は係数、 T は圧密期間、 FI_0 は $T=0$ の

Fig. 8 Relationship between flowability FI_0 at $T=0$ and consolidating stress.

ときの流動度（実測値）である。

係数 a と b の値を適当に定め、(4)式から算出した流動度を Fig. 6 に実線で示した。

Fig. 7 に示すように、係数 a と b の値は圧密応力によって変化する。とくに、係数 a は流動度の飽和値を規定する性質があり、圧密応力にほぼ比例して大きくなる。

また、 FI_0 と圧密応力の関係を Fig. 8 に示す。 FI_0 は圧密応力とほぼ比例関係にある。

このように、破壊包絡線が圧密期間によって変化する現象は石炭以外にも脱脂大豆に見られるので^{4,7)}、今後他の粉体についても検討することは有意義であろう。

4. 結 言

石炭の流動度を単軸崩壊応力と充てん密度の比で定義し、これにおよぼす圧密期間の影響を定容積直接剪断法によって検討した。流動度は圧密期間に対して指数関数的に増加するが、有限値に飽和する傾向があり、(4)式で表現できた。ここに定義した流動度はホッパーの閉塞限界寸法に比例する量であるから^{9~13)}、サイロ貯炭の期間が長くなるほど、より強い架橋を形成することを意味する。

また、(4)式の係数 a は圧密応力に比例する。したがって、貯炭用サイロやセルフファンローディング式の石炭専用船などのホップ設計にあたって、貯炭規模に応じて発生する圧密応力を正しく評価したうえで流動度の経時変化を十分に検討する必要がある。

使用記号

a : (4)式の係数

b : (4)式の係数

C : 付着応力

f : 単軸崩壊応力

FI : 流動度

FI_0 : $T=0$ のときの流動度

g : 重力加速度

T : 圧密期間

γ : 充てん密度

δ : 内部まきつ角

σ : 垂直応力

σ_c : 圧密応力

τ : 剪断応力

引用文献

- 1) Aoki, R. and H. Tsunakawa: *J. Chem. Eng., Japan*, 6, 462 (1973)
- 2) 網川浩, 青木隆一: 粉体工学研究会誌, 11, 263 (1974)
- 3) 網川浩, 三枝隆: 粉体工学学会誌, 15, 342 (1978)
- 4) 網川浩: 粉碎, 24, 17 (1979)
- 5) 網川浩: 粉体工学学会誌, 17, 61 (1980)
- 6) 網川浩: 粉体工学学会誌, 19, 516 (1982)
- 7) Tsunakawa, H. and R. Aoki: *Powder Technol.*, 33, 249 (1982)
- 8) Jenike A.W.: *Chem. Eng., Dec.*, 175 (1954)
- 9) 網川浩, 青木隆一, 小島健二, 松島弘輝: 粉体工学学会誌, 15, 336 (1978)
- 10) 網川浩, 青木隆一, 小島健二, 松島弘輝: 粉体工学学会誌, 15, 594~601 (1978)
- 11) 網川浩: 粉体工学学会誌, 18, 223 (1981)
- 12) 網川浩: 粉体工学学会誌, 18, 405 (1981)
- 13) Tsunakawa, H.: *Int. Chem. Eng.*, 22, 280 (1982)

Author's Abstract

Variation of Flowability of Coal with Consolidating Period

by

Hiroshi TSUNAKAWA

(Dept. of Chem. Eng., Yokohama National University, 156 Tokiwadai,
Hodogaya-ku, Yokohama 240)

In order to predict the arch formation of coal stored in storage containers with a view to hopper design, the yield locus was measured at the initial failure of the coal tested by means of a fixed volume direct shear tester. The test material was prepared to leave a given consolidating period in the shear cell under a consolidating vertical stress. The flowability of the coal was defined as the ratio of the unconfined yield stress to the corresponding bulk density, and therefore it seemed to be in proportion to the critical span of the arch. The measured values of flowability increased with the increase in both consolidating vertical stress and the consolidating period.

An exponential relationship was established between the flowability and the consolidating period. The relationship was expressed in terms of three parameters. The two of them, which were directly related to the saturated value of the flowability, were found to be in proportion to the consolidating vertical stress. These facts suggested that the stresses on coal which initially filled the storage container had to be correctly estimated in order to predict the minimum size of hopper outlet for ensuring the flow of coal under gravity.