

穀物由来飼料の地盤工学的物性評価

元 広島工業大学 フェロー会員 ○熊本 直樹

1. はじめに

石炭、穀物などのいわゆるバルクマテリアルを貯蔵する設備のひとつに、サイロと称される貯槽がある。港湾地域では船舶から陸揚げされた大量のバルクマテリアルを一時貯蔵するために大型の貯槽が設置される。

この貯槽の設計には土質力学や地盤工学と共通する技術が用いられている。その代表例は貯槽内の圧力や貯槽壁面に作用する圧力の算定方法で、土質力学の教科書では「サイロ作用」としてその理論が紹介されている¹⁾。また溝の中に埋め戻して設置された埋設管に作用する圧力の算定式²⁾は、この理論を用いて導出されている。

土質力学と共通の技術が用いられている貯槽のもうひとつの設計技術として貯槽の排出口におけるバルクマテリアルの閉塞の検討技術があり、この技術を用いて排出口の寸法が決定される。排出口の閉塞は一般には「アーチ作用による架橋（ブリッジ）」と総称されているが、その検討手法は「非付着性粒体」の閉塞を対象としたものと、「付着性粉粒体」の閉塞を対象としたものに分けられる。前者は粒子間の摩擦やかみ合いによる架橋を対象としたもので、基本的には排出口の寸法、粒子の寸法及び粒子の形状を用いて閉塞するか否かを検討する。後者ではバルクマテリアルを粒状体ではなく連続体として取り扱い、地盤工学の分野で用いている試験法で物性値を求め、土質力学とほぼ同じ理論で排出性を検討する。前者の手法は碎石のような塊状の材料に用い、一般には後者の手法を用いる材料が多い。

港湾地域で取り扱うバルクマテリアルは、石炭、鉄鉱石、小麦など、多種多様であるが、配合飼料の原料として「大豆かす（Soybean meal : SBM）」や「トウモロコシかす（Dried Distiller's Grains with Solubles : DDGS）」も輸入されている。前者は製油メーカーが食用の大豆油を搾油した搾り粕であり、年間の輸入量は 150 万トン～200 万トン程度である。後者はトウモロコシから燃料エタノールを製造するときの副産物であり、年間の輸入量は 50 万トン程度である。SBM 及び DDGS ともに

製造過程に乾燥工程があり、手で触った感触ではサラサラとしている。しかし物性試験を実施したところ、サラサラした材料にもかかわらずある条件下で固結するという興味深い性質がみられた。以下で SBM の物性について紹介する。

2. 付着性粉粒体の排出性検討手法

本報は飼料原料の物性の紹介を目的としているが、物性試験の目的を明確にするために貯槽からの排出性検討手法について簡単に触れる。

付着性粉粒体の閉塞性に関する評価手法は古くから研究されており、最も著名な理論は Jenike 理論³⁾である。Jenike の閉塞性判定の考え方は次のとおりである。排出口が閉じられているときは排出口付近の粉粒体には最大主応力 σ_1 が作用している。排出口が開放されると排出口垂直応力はゼロになり、アーチ内の応力 $\bar{\sigma}_1$ がアーチ部の粉粒体強度 f_c を超えるとブリッジが崩壊して粉粒体が排出されるという考え方である⁴⁾。（図 1 及び図 2 参照）

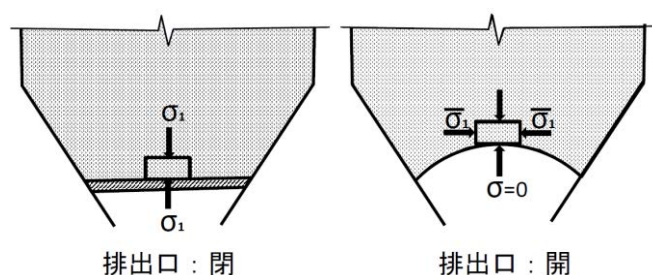
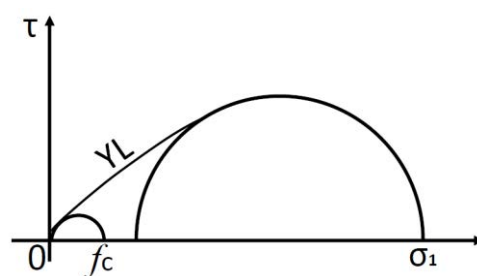


図 1 Jenike 理論の考え方

図 2 アーチ部の粉粒体強度 f_c ⁴⁾

キーワード SBM, 流動性, 一面せん断試験, 一軸圧縮強さ, 密度

連絡先 n.kumamoto.wr@theia.ocn.ne.jp

貯槽内の応力を算定するためには、粉粒体のせん断特性（内部摩擦角，粘着力），壁面せん断特性（壁面摩擦角，付着力），単位体積重量，が必要である。このため，せん断試験，壁面せん断試験，圧密試験などが実施される。応力の算定方法はいくつか提案されており，壁面のせん断特性の考え方などが異なっている。我が国では綱川の方法⁵⁾を用いることが多い。

一方，アーチ部の強度 f_c は粉体工学の分野では図2に示す方法で求められている。すなわち，直接せん断試験機を用い，垂直応力に貯槽内粉粒体最大主応力 σ_1 を与えてせん断を開始し，垂直応力を徐々に減らして破壊包絡線を求め，最小主応力 $\sigma_3=0$ のときの最大主応力 σ_1 を f_c として求めている⁷⁾。最小主応力 σ_3 がゼロ付近の力のレベルは小さくて計測値の中に試験機の摩擦が占める割合が相対的に大きくなって計測誤差が多いので特殊な試験機が考案されている。特殊な試験機を使えない場合は，供試材料を粉粒体最大主応力 σ_1 で圧縮したあと応力を開放して一軸圧縮試験を行い，その一軸圧縮強さを f_c としても特殊な試験機で求めた f_c と比較して大差がないことが報告されている⁷⁾。また，一軸圧縮試験から f_c を求めた例が文献8)に報告されている。

3. 大豆かす SBM の物性

(1) 外見，色

試験に使用した SBM を写真1に示す。色は黄色または黄褐色である。大豆から油分を抽出したあと，脱溶剤，加熱乾燥，冷却，粉碎整粒等の過程を経て製造されるので，手で触った感じではサラサラとしており，表面は濡れていない。タンパク質が45%以上含まれており，単なる「かす」ではなく，貴重なタンパク資源である。



写真1 試験に使用した大豆かす SBM

(2) 水分

穀物由来材料の水分を土質材料と同じ方法で計測して良いかという迷いはあったがこの方法の採用例があった¹²⁾ので，圧縮試験やせん断試験など，試験のたびに含水比を JIS A 1203 に基づいて計測した（ $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，24 時間）。その結果，計測された含水比の範囲は

$$w=13.5 \sim 14.8\%$$

であった。これを含水率に変換すると，11.9～12.9%であり，SBM の含水率の例は文献9)では12.9%，文献10)では11.2～12.5%であるので，計測値は文献値とほぼ同等である。なお，写真1に示すように SBM 色は黄色または黄褐色であるが，炉乾燥後は焦茶色に変色した。

(3) 内部摩擦角 ϕ 及び粘着力 c

広島工業大学の一面せん断試験機を用いて内部摩擦角 ϕ 及び粘着力 c を求めた。使用した試験機は地盤工学会基準に準拠した改良型一面試験機（垂直力下面載荷，上箱可動型）で，試験方法は定圧試験とした。圧密時間は15分としたが，2時間及び72時間の試験も実施した。

試験結果は図3に示すとおりであり，この試験では圧密時間の影響はみられなかった。この試験からは

$$\phi=42.3^\circ, \quad c=0.607\text{kN/m}^2$$

と求められた。文献11)では $\phi=37.1^\circ$ ， $c=0.55\text{kN/m}^2$ ，文献12)では $\phi=34.1 \sim 35.5^\circ$ ， $c=0.128\text{kN/m}^2$ とでているので，図3の値は ϕ がやや大きめの値となっている。

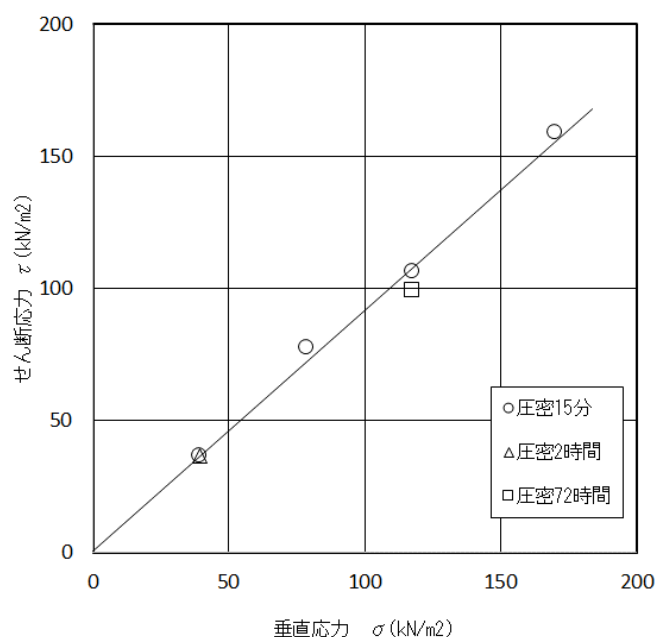


図3 一面せん断試験結果 (SBM)

(4) 壁面せん断特性

黒皮付きの SS400 を壁面材として、壁面摩擦試験を実施した。供試材に垂直応力を 1 時間載荷したあとせん断したときの結果を図 4 に示す。壁面での摩擦角及び付着力は以下のとおりである。

$$\phi_w = 15.8^\circ, \quad c_w = 0.718 \text{ kN/m}^2$$

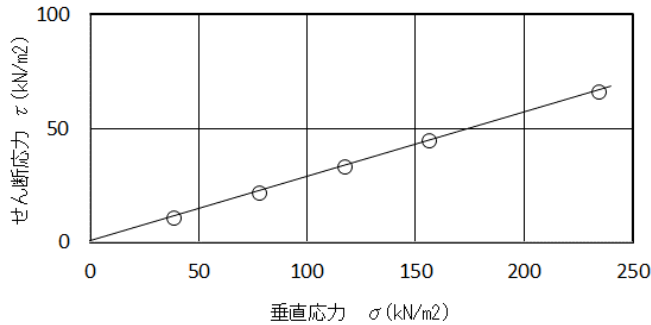


図 4 壁面せん断試験結果 (SBM)

ことに荷重を 24 時間以上保持した供試体は自立した。写真 2 に自立できなかった供試体を、写真 3 に圧縮荷重を保持している状態の供試体及び一軸圧縮試験の様子を示す。

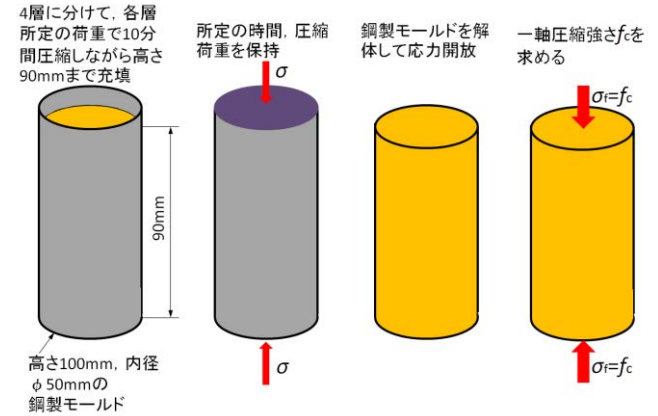


図 5 供試体作成及び試験手順

(5) アーチ部の強度 f_c

2 章で述べたように、アーチ部の強度 f_c は、通常は直接せん断試験機を用い、垂直応力に貯槽内粉粒体最大主応力 σ_1 を与えてせん断を開始し、垂直応力を徐々に減らして破壊包絡線を求め、最小主応力 $\sigma_3=0$ のときの最大主応力 σ_1 を f_c として求めている⁷⁾。すなわち、粉粒体最大主応力 σ_1 という応力履歴を与えたあと、最小主応力 $\sigma_3=0$ のときの最大主応力 σ_1 を f_c として求める。この方法で f_c を求めるためには、Yield locus の微弱な切片の値、すなわち粘着力 c を精度良く計測することができる試験機が必要である。このような試験機を所有していないので、文献 8) で用いている拘束状態で貯槽内粉粒体最大主応力 σ_1 で圧縮し、拘束状態を解いて応力を開放したあと、一軸圧縮を行うという方法を採用した。

供試体作成及び試験手順を図 5 に示す。内径 $\phi 50\text{mm}$ 、高さ 100mm の鋼製モールドに 4 層に分けて、各層 10 分間所定の荷重で圧縮して試料を高さ 90mm まで充填する。そのあと、所定の時間、圧縮荷重を保持する。保持する時間は 10 分、1 時間、24 時間、72 時間、168 時間、240 時間、334 時間である。そのあとモールドを解体して応力を開放して一軸圧縮強さを求めた。供試材はサラサラした材料なのでモールドを解体すると自立しないのではないかと考えていたところ、10 分及び 1 時間の荷重保持時間では自立しなかったが、不思議な



写真 2 自立できなかった供試体

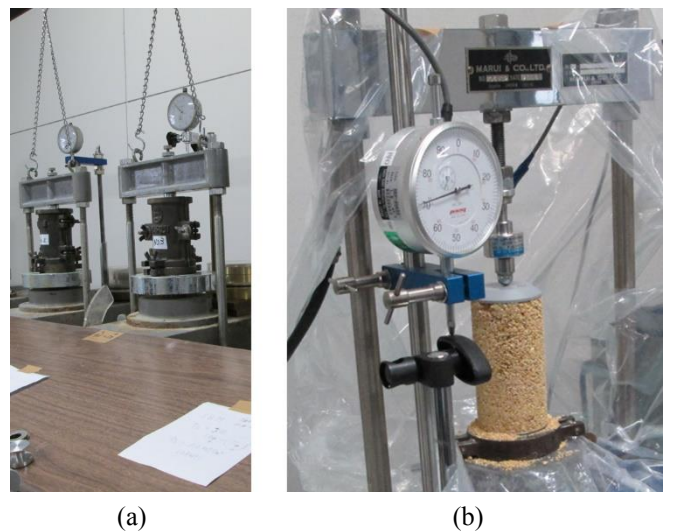


写真 3 圧縮荷重を保持している状態の供試体(a)と一軸圧縮試験の様子(b)

先行圧縮荷重を24時間作用させた試料の一軸圧縮強さ f_c を図6に示す。先行圧縮応力が増えると f_c が増え、この関係を貯槽の設計に用いる。先行圧縮応力を作用させた時間と一軸圧縮強さ f_c の関係を図7に示す。先行圧縮時間、すなわち貯蔵時間が長くなると f_c が大きくなるので、貯槽に長期間貯蔵すると固結して排出が困難になる可能性がある。したがって、設計時には貯蔵期間に対応する f_c を選択する必要がある。

文献12)にはねじりせん断型の一面せん断試験機を用いてSBMの f_c を計測した例が記載されている。先行圧縮時間は不明であるが、それを図6に▲印でプロットした。先行圧縮時間は不明であるが、●に連続しているように見える。

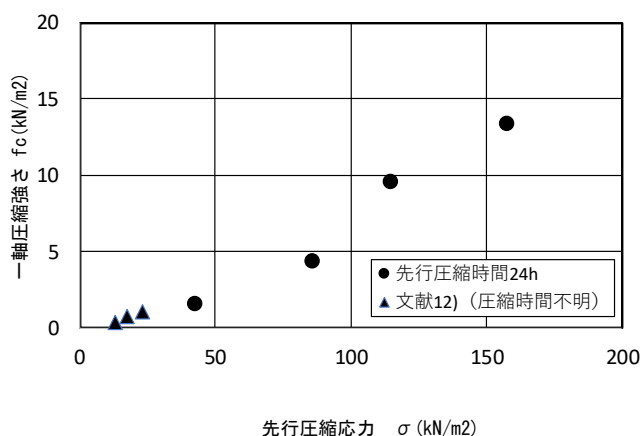


図6 一軸圧縮強さ f_c (先行圧縮時間 24h)

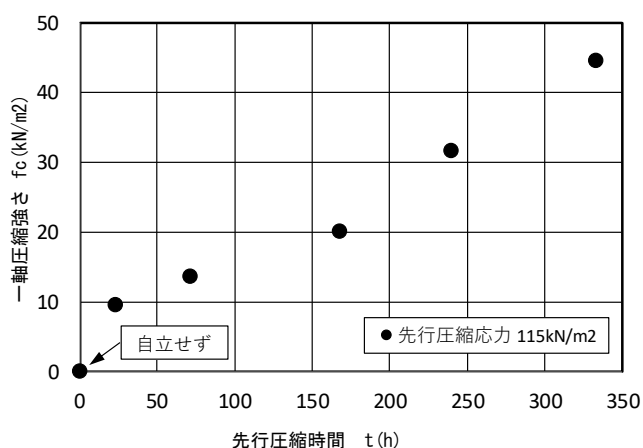


図7 先行圧縮応力作用時間と一軸圧縮強さ f_c

(6) 密度

一面せん断試験及び一軸圧縮試験供試体の密度（嵩密度） ρ を図8に示す。圧縮時間15分の一面せん断試験の場合は σ と ρ の関係が明確に認められたが（○印）

それ以外では0.65～0.7g/cm³付近でばらついた。

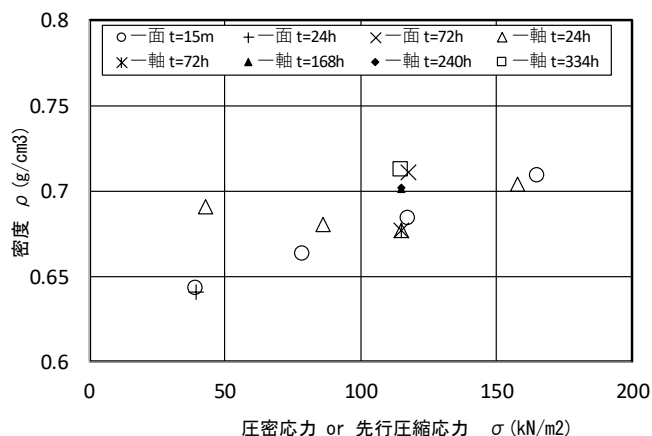


図8 供試体の密度

4. おわりに

穀物由来飼料の試験を行ったところ、サラサラとした材料だが荷重をかけた状態で放置しておくると固結するという興味深い現象がみられたので、紹介した。本報には掲載しなかったが、DDGSはこの現象がさらに顕著であった。DDGSの輸入元では貯槽で保管せず、屋内で保管しているそうである。

また、地盤工学の知識を活かすことができる異分野があることも紹介したいと考えた次第である。

参考文献

- 山口柏樹：土質力学（全改訂）、技報堂出版、pp.240-242、1984
- 澤孝平 編著：地盤工学（第2版）、森北出版、pp.130-132、2009
- Jenike, A. W. : Storage and Flow of Solids, Bulletin of the University of Utah, No.123, 1964
- Jenike, A. W., P. J. Elsey, R. H. Woolley : Flow Properties of Bulk Solids, Proc. Sixty-third Annual Meeting of the Society, June 26-July 1, pp.1168-1190, 1960
- 網川浩、青木隆一ほか：マスフローホッパーにおける粉体の応力とホッパー出口の最小寸法、粉体工学会誌、Vol.15, No.6, pp.336-341, 1978
- 網川浩：粉体の流動性の評価、粉体工学会誌、Vol.19, No.9, pp.516-521, 1982
- 網川浩、他：三軸、一軸圧縮試験および直接剪断試験による粉粒体の力学的物性値の比較、粉体工学会誌、Vol.23, No.9, pp.678-684, 1986
- 土師秀人、他：RDM 貯蔵システムの開発（その2）、粗粒材料の物性試験、三井建設技術研究所報、第7号、pp.49-57, 1983
- 有賀 秀子、他：大豆およびその製品の化学成分とその利用に関する研究、第1報 大豆およびミールの溶解性たんぱく質の含量と消化率、帯広畜産大学学術研究報告、第I部、Vol.5, No.3, 1968
- アメリカ大豆協会日本事務所：アメリカ産大豆ミールの栄養的価値、p.8, U.S. Soybean Export Council, 2013
- Molenda, M., et al. : Mechanical Properties of Corn and Soybean Meal, Transactions of the ASAE, Vol.45, No.6, pp. 1929-1936, 2002
- Neto, J. P. L., et al. : POWDER FLOW CRITERIA FOR DESIGN OF VERTICAL SILO WALLS, Eng. Agric., Jaboticabal, Vol.33, No.3, pp.453-462, 2013