サイロの閉塞限界寸法に関する実験的研究*

— その 1 : 粗粒材料の流動特性 —

田村 富雄**, 土師 秀人**
加藤 正利**, 山田 武正***

Experimental Research on the Critical Bridging Span for a Silo —Part 1: The Flow Characteristics of Coarse Granular Materials—

by
Tomio TAMURA[†], Hideto HAZE[†], Masatoshi KATO^{††} and Takemasa YAMADA^{††}

There are many storage systems for coarse granular materials, such as coal and limestone. These systems include open piles, silos, domes, and storehouses. The silo system is better than other existing systems from the view point of environmental protection, effective use of a site, centralized control, and maintaining the quality of storage materials. For the silo system, however, the most important problem in design is to decide the hopper geometry parameters of the outlet provided at the bottom part of the silo. Blockage and arching in a silo never take place when the hopper geometry parameters are designed appropriately. For use in the theoretical analysis of the hopper section, there are a number of test methods for grasping the properties of fine granulars, but a test method suitable for coarse granulars, such as coal and limestone have yet to be established. This report shows the results of the flow characteristics by means of static compaction and the uniaxial compression test methods. Therefore, the flow characteristics of coarse granular materials, and those at the time of long-term storage are studied here.

1. 緒 言

石炭の貯蔵方式として、サイロ方式、ドーム方式、建屋方式等がある。サイロ方式は、環境汚染の防止、貯炭設備の専有面積の節約、石炭の先入れ先出しが可能、運転が集中管理できる等の点で従来の貯蔵方式よりも優れている。しかし、サイロ方式ではサイロ底部に設けられた排出口より払出しを行うため、その付近での閉塞が問題となる。当社は、石炭はじめバラ物の払出しに数多くの実績を持つ西独 Louise 社製の R D M (Rotary Discharge Machine) を組み込んだ新しいサイロ貯炭システムを開発し、実大規模の実験サイ

ロにより閉塞現象をはじめ種々の実験を行った。

サイロにおける閉塞現象は、貯蔵材料の力学的性質の把握及び排出口の設計が適切であれば起こり得ない。本報告は、粗粒材料の流動特性を把握する目的で行った静的加圧締固め試験および一軸圧縮試験の結果である。またサイロ内圧の設計に必要な諸定数として、大型一面せん断試験と摩擦力試験を行った。以上の結果、若干の知見が得られたので報告する。

2. 室内試験の概要

2.1 実験の背景

ホッパー部の理論解析に用いるため、粉粒体の性状を把握する試験方法は色々と提案されている¹⁾が、石炭のような粗粒材料に適した試験方法は現在確立されるまでには至っていない。サイロ貯蔵材料の流動試験としては、Jenike セル²⁾、定容積型せん断試験装置³⁾が粉粒体用に開発されているが、筆者らは圧縮強さを直接的に把握できる一軸圧縮試験法を採用し、また大型供試体 ($\phi 300 \times h 600 \text{ mm}$) を用いて、実際に貯蔵する材料粒径での試験を行った。

この試験方法は、静的締固め及び一軸圧縮試験法に

昭和 59 年 6 月 27 日受理

* 昭和 58 年度春期研究発表会で一部発表

** 三井建設(株)技術研究所(〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)
TEL 0471-55-4611

*** 三井建設(株)土木技術部(〒101 千代田区岩本町 3-10-1)
TEL 03-864-3415

† Technical Research Institute, Mitsui Construction Co., Ltd.

†† Civil Engineering Department, Mitsui Construction Co., Ltd.

よって流動特性を定量的に示したものである。一見、圧縮試験は概念を表示するのに大変役に立つが、色々な理由から実際的でないと言われている⁴⁾。例えば、締固め試験用モールドを摩擦の無い物に作ることは出来ない。また、円筒供試体を一樣の湿潤密度に作成することは難しい点など挙げられる。しかし、貯蔵する材料そのものの粒径で流動特性を確認するには、我々の試験方法は前述の問題点を残しているが、意義のある試験方法である。最大粒径の小さな粒径（最大粒径10 mm以下）で流動特性を求め、ホッパー形状を設計することは過大設計となり経済的でない。なお、これらの点を中心に粗粒材料の流動特性及び長期貯蔵時の流動特性を取上げた。

2.2 実験に用いた粗粒材料

実験に用いた粗粒材料は、3種類の石炭と1種類の石灰石である。最大粒径は、A炭が35 mm、B、C炭が50 mm、石灰石が20 mmであった。粒度の影響を調べるため、元試料から大きな粒径分をふるい分けにより取り除き、調整した12種類の試料を用いた。Fig. 1, Table 1に、試料の粒径加積曲線および諸物性を示した。表中の均等係数 U_c 、曲率係数 U_c' は、粒径加積曲線の通過重量百分率60%, 30%, 10%にそれぞれ相当する粒径 D_{60} , D_{30} , D_{10} (有効径)をとり、下式で示される値である。均等係数および曲率係数は、粒度

$$U_c = D_{60} / D_{10} \quad (1)$$

Fig. 1 Grain size accumulation curve of samples

Table 1 Properties of samples

	A coal			B coal			C coal			Limestone		
Producing district	China			Australia			Australia			Okutama		
D_{max}	35.0	10.0	3.0	50.0	10.0	3.0	50.0	10.0	3.0	20.0	10.0	3.0
U_c	17.6	21.4	18.8	15.5	15.5	11.1	64.1	41.3	25.9	96.0	90.5	74.0
U_c'	2.49	2.38	1.62	2.08	1.72	1.27	1.85	1.36	1.49	2.84	2.41	2.35
G_s	1.45			1.47			1.43			2.78		

$$U_c' = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) \quad (2)$$

分布の広がり数値的に表わす指標であり、これらの値により粒度分布の状態がわかる。4試料とも、粒度分布が広く、特に石灰石の均等係数は最大粒径20 mmで96.0と大きい。また、C炭の均等係数は他の2炭種より大きな値を示した。石灰石の比重は、3炭種いずれも1.45前後であり、石灰石は2.78であった。

試料の水分状態を表現するため、石灰についてはJIS M 8811に規定のある付着水分(湿分)によった。石灰石については、JIS A 1203の含水率を用いた。

2.3 実験装置および実験条件

締固め試験は、水分調整した試料を試験用モールドに3層に分けて充てんし、高さ方向に圧縮力をかけ体積変化を測定した。試験用モールドは、試料の最大粒径から決定した。最大粒径が20 mm以上では、内径300 mm、高さ600 mm、最大粒径が10 mmでは、内径100 mm、高さ200 mmとした。また、最大粒径が3 mmでは、内径50 mm、高さ100 mmとした。モールドの壁面はテフロンでコーティングし、できる限り壁面摩擦の影響を無視できる様にした。圧縮は静的に加圧する方法とし、圧縮応力は0 kPaから最大392 kPaまでとした。

一軸圧縮試験の供試体寸法は、締固め試験用モールドの大きさと同じ寸法にした。水分調整した試料を締固め試験と同様の方法で最大に締固め、モールドのカラーをはずし自立している供試体の一軸圧縮試験を行った。その後、供試体作成時に与える締固めエネルギーを小さくさせて、充てん密度を順次減少させながら供試体が自立しなくなるまで実験を繰返した。1パラメータについて、一軸圧縮試験を3ヶの供試体を用い試験を行ったが、各々の一軸圧縮強さのバラツキはほとんどなかった。締固め試験及び一軸圧縮試験の試験装置は万能圧縮試験機を使用し、XY記録計で自記記録した。

大型一面せん断試験は、改良型一面せん断試験装置

を使用した。本装置は試料の最大粒径(35~50 mm)を考慮して製作(内径 450 mm, 内空高さ 150 mm)したものである。また、試料の充てんが容易にできるようにせん断箱の下部は固定し、上部を移動箱とした。垂直応力は下方からかけるようになっており、上部のガイドローラーを介して載荷棒に伝えられる。水分調整した試料をせん断箱に詰め、静的に予備加圧して所定密度とし、一連のせん断試験(垂直応力 $\sigma_n = 49, 98, 196, 392 \text{ kPa}$)が終了するまで一定とした。せん断速度は 4.5 mm/min (毎分, 供試体径 450 mm の 1% 変位)とし、せん断応力がピーク値を示さない場合、せん断変位 67.5 mm (供試体径の 15%) 時のせん断応力を最大せん断応力とした。

摩擦力試験は、前述の大型一面せん断試験装置を使用し、各粗粒材料とサイロに使用する壁面材料との摩擦力を測定した。試験に使用した壁面材料は、SS-41, SUS-304, コンクリート, 超高分子量ポリエチレンシートの 4 種類である。試験方法は、下部せん断箱に試料を充てんした後、壁面材料を上部せん断箱のせん断面位置に固定し、上部せん断箱に水平加力(変位速度 4.5 mm/min)を行った。摩擦力試験中は、一定の速度で垂直応力を増加させ、試料と壁面材料間の破壊包絡線を求め、これより壁面摩擦角を求めた。なお、せん断試験及び摩擦力試験時の応力、変位は XY 記録計で自記記録した。

3. 流動特性について

3.1 締固め試験結果

粗粒材料をサイロに貯蔵する場合、上部に積み付けられた材料の自重により垂直圧を受け圧縮されていく。本試験は、締固めエネルギーを静的な加圧により行い、締固めたときの締固め密度と水分の関係を定量的に評価した。この条件下では、まず比較的小さい圧力で粒子が再配列し、間げきの不均等性が消失する。このときの圧縮量は相当大きく、粒子が詰まってくると接触点の数が増え、大きい圧力に対し弾性的な縮みが起こり、さらに大きな圧力を加えると粒子の破壊を来すと考えられる。

Fig. 2 の丸印は、最大粒径 3 mm の各材料における水分と締固め乾燥密度の関係である。乾燥密度は水分に依存しており、各材料において乾燥密度が極小値となる水分の存在することが判った。乾燥密度に極小値を与える付着水分は、A, B 炭では 5~10% であった。C 炭で 10~15% と高かったのは、他の炭種と較べて多孔質であることが原因と考えられる。また、石灰石

では約 3~5% であった。このような現象は粗粒材料の締固め試験でよく報告されており、乾燥密度が極小となる含水率(付着水分)を危険含水率と称している。楠見, 谷口ら⁵⁾は不飽和砂の振動締固めについて、ある含水比で最小乾燥密度の生ずることを確認した。この現象は、筆者らが扱った粗粒材料でも同様の結果を示した。つまり、極小の乾燥密度を与える水分が存在するのは、その含水状態で試料粒子間の毛管水によって生じるメニスカスの曲率半径が大きくなっており、試料粒子間の接触面積が最も小さくなる。このことから、非常に多くの間げきが生じ、乾燥密度が極小になったと推察できる。また、3 炭種を比較してみると、B 炭が大きな締固め乾燥密度を示した。これは、B 炭では細粒分が他と比較して少なく、真比重が若干小さくなっている。そのため、密度が他の炭種よりも小さくなったと考えられる。石灰石の比重は 3 炭種の約 2 倍であり、締固め乾燥密度も約 2 倍の値となった。

図中に、同垂直応力時($\sigma_n = 98 \text{ kPa}$)で締固めたときの最大粒径別による水分と乾燥密度の関係も同時に示している。その結果、最大粒径が大きい程、乾燥密度が増加するが、これは、粒径が小さくなると表面積が増えるから、結合力を与えるに必要な水分が多くなり、同時に細粒分ほど空気を追い出しにくいことを意味している。空気が出にくいのは、含有空気と水分間に働く表面張力などの界面抵抗によるものと考えられる。また、反対に粒径が大きい程、その表面積が小さいため、わずかな水分の変化によって締固め機構が大きく影響されると言える。

3.2 一軸圧縮試験

水分、湿潤密度をパラメータとして試験を行った。Fig. 3 に試験結果を示したが、一軸圧縮強さは、それらのパラメータに依存していることが判った。湿潤密度が増加すると、一軸圧縮強さもほぼ単調に増大した。

水分と一軸圧縮強さの関係において、A 炭は付着水分 5% 以下では自立しないが、それ以上の付着水分で自立し、約 8.5% で一軸圧縮強さの極大値を示した。B 炭では、付着水分が約 7.5%, C 炭では約 14.5% で一軸圧縮強さが極大値となった。また、石灰石では約 4% の含水率で極大値が現われた。これら一連の結果から、締固め試験において乾燥密度の極小値を示す水分が、一軸圧縮強さの極大値を示す水分とほぼ等しくなることが判った。これは、粒子間に存在する毛管水が粒子間の引張り力として働き、その力が一軸圧縮強さの極大値を示す水分で最も強くなっているため、外力が加わっても粒子構造の破壊されにくい現象が起

Fig. 2 Results of static compaction tests (Relationship between moisture content and dry density)

きていると考えられる。

試料別で比較すると、石灰石が3種類の石炭より大きな一軸圧縮強さを示した。また、石炭では同一湿

潤密度での一軸圧縮強さの大きさは、C炭が非常に大きく、A炭、B炭の順となった。これから、細粒分を多く含んでいる試料程、または均等係数が大きい程、

Fig. 3 Results of uniaxial compressive tests (Relationship between moisture content and uniaxial compressive strength)

一軸圧縮強さは大きくなると言える。

各材料において、同一湿潤密度に対する最大粒径別の一軸圧縮強さを比較すると、最大粒径が大きい程、一軸圧縮強さは著しく小さくなっている。

3.3 流動特性の評価

締固め試験および一軸圧縮試験結果より、F F曲線(垂直応力と一軸圧縮強さの関係)が描ける。Fig. 4 は、

各試料における最大粒径別の F F 曲線である。これは、締固め試験から垂直応力に対応する湿潤密度を求め、一軸圧縮試験の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係からプロットしたものである。垂直応力と一軸圧縮強さの関係は水分ごとに得られるが、ここでは一軸圧縮強さが極大値を示す水分での関係を示した。この図から、サイロの規模、ホッパー形状で決まる垂直応力より、そ

Fig. 4 FF Curves (Relationship between normal stress and uniaxial compressive strength)

の状態に置かれた粗粒材料の一軸圧縮強さが読みとれる。

最大粒径別については、粒径が小さい程、FF曲線の一軸圧縮強さが大きくなる傾向を示し、流動特性が悪いと言える。低垂直応力域で若干粒径別にバラツキが生じているのは、試験の困難さに起因していると考えられるが、試料の粒径別における均等係数にも関係すると考えられる。特にA、B炭では、最大粒径10 mm、3 mmの均等係数がほぼ同程度の値であり、垂直応力200 kPaまで同じような曲線を示した。C炭は最大粒径50 mm、10 mm、また石灰石では20 mm、10 mmの均等係数に大差がないので、曲線に大きな開きはなかった。このように、FF曲線から最大粒径別における流れ特性を考えてみると、非常に違いのあることが判明した。従来⁶⁾、細粒分だけの試験で求められたFF曲線を用いて設計する方法が採られていたが、今回の試験結果より、最大粒径のFF曲線に与える影響は大きく、ホッパーの最適設計を行うには、サイロに貯蔵する材料そのものよりFF曲線を求める必要がある。

試料別では、石灰石が他の3炭種に比べて最も一軸圧縮強さが大きな値となり、流動特性の悪い材料であることが判る。これは、石灰石が非常に細粒分が多く、また粒子形状が石炭に比較して角ばっており、粒子の

かみ合わせ効果(インターロッキング効果)が大きい材料であるためと考えられる。なお石炭の中では、C炭が比較的大きな値を示した。

Fig. 5に、A炭の付着水分別のFF曲線を示した。明らかに、FF曲線は付着水分によって変化する。これは、他の2炭種及び石灰石でも言える。図から、A炭では付着水分が8.3%のとき、各垂直応力に対する一軸圧縮強さの最大値を示し、流動性が最も悪くなる。つまり、ホッパー部で最も閉塞しやすい付着水分である。この原因は、前述したように粒子間に存在する毛管水(付着水分)による影響であると考えられる。

以上の結果から、貯蔵サイロやホッパーの設計には

Fig. 5 FF curve (A coal, $D_{max}=35$ mm)

色々な含有水分のもとで貯蔵材料のFF特性を十分に把握しておく必要がある。

3.4 長期貯蔵時の流動特性の評価

一般に、石炭や石灰石が長期的に圧縮された場合、固結現象を起すことが知られている。これらがサイロ内に長期貯蔵されると、上述のように圧縮固結現象を起しサイロホッパー部で閉塞する危険がある。そこで、水分調整した試料(最大粒径3mm)を締め固め試験と同様のモールド(内径50mm, 高さ100mm)を使用して、一定の荷重を与え、所定の期間が達した後に一軸圧縮強さを測定した。なお、試料の乾燥防止のため、モールド内部を十分にシールした。この試験結果から、サイロ貯蔵時における流動性の変化を検討した。

Fig. 6に、A, C炭及び石灰石の試験結果を示した。図中のPは荷重応力であり、最大一軸圧縮強さと初期一軸圧縮強さを比較すると、荷重応力に関係なくA炭で約1.6倍、C炭で約1.4倍、石灰石では約2.5倍の増加率となった。これは、毛管水の移動により互いの粒子間を接着して、かみ合わせが良くなったと考えられる。特に石灰石の場合、粒子形状が角ばっているため、粒子間のかみ合わせが良く、一軸圧縮強さの増加率が大きくなったと推察できる。以上の結果、長期貯蔵時のサイロホッパー部を設計する場合、石炭や石灰石の一軸圧縮強さの増加を考慮して設計する必要がある。

実サイロではほとんど考えられないが、湿潤試料が乾燥することによって固結する場合がある。実験として、所定の密度で締め固めた供試体を恒温室内に放置し、一軸圧縮強さの経時変化を調べた。水分調整したA, C炭試料(最大粒径3mm)を湿潤密度 950 kg/m^3 になるようにモールド(内径50mm, 高さ100mm)内で締め固め、取り出したものを試験供試体とした。恒温室の室温は 20°C 、湿度を30%とした。

Fig. 7に、両炭種における一軸圧縮強さと付着水分

Fig. 7 Result of dry solidity test ($D_{max} = 3\text{ mm}$)

の経時変化を示した。付着水分は、1日で両炭とも約1%に減少し、そのため一軸圧縮強さもピークを示す。これ以後、一軸圧縮強さは一定値になるものと考えられる。なお、最大の一軸圧縮強さを初期値と比較すると、A炭で約1.4倍、C炭では約2倍となった。この結果から、サイロの開放時に側壁やホッパー部に石炭を残して、それを過度に乾燥させることは望ましくない。

4. サイロ内圧の設計上の諸定数について

4.1 大型一面せん断試験結果

石炭および石灰石のような粒状物を貯蔵するサイロ内圧について、色々な理論式が提案されているが、粗粒材料のせん断特性を研究した例は少ない。一般に、せん断強さに影響を与える要因は、単粒子強度、粒子形状、粒度組成、湿潤密度、含水状態などと考えられている。我々は、粒子形状及び粒度組成は密度を規制するファクターと考え、湿潤密度と付着水分をパラメー

Fig. 6 Results of compression solidity test

タとしてせん断試験を行い、密度と内部摩擦角の関係を定量的に把握した。

垂直応力とせん断応力の関係は、垂直応力が増加するとともに両者の関係は凸形にカーブした。これは、垂直応力が大きくなるに従って粒子が圧縮を受け破壊されるため、せん断に対する内部摩擦角が減少すると考えられている⁷⁾。内部摩擦角の求め方は、垂直応力とせん断応力の関係が一次の線形であると仮定し、その直線の勾配を内部摩擦角とした。このようにして求めた内部摩擦角は、垂直応力 49～392 kPa の範囲の平均的な内部摩擦角であると言える。また、粘着力は直線の τ 軸切片として得られる。これは、直線仮定により外挿して求めたものであり、真の粘着力に較べてかなり大きく評価されており、みかけの粘着力と考えるのが妥当である。

Fig. 8 に、せん断時の湿潤及び乾燥密度と内部摩擦角との関係を示した。これは、水分とせん断時の充てん密度をパラメータとして試験を行い、上述の要領でせん断時の密度に対する内部摩擦角を求めたものである。同一水分で湿潤密度と内部摩擦角の関係をみると、湿潤密度が高くなると内部摩擦角も大きくなった。また、乾燥密度と内部摩擦角との間に多少バラツキはあるが、水分に関係なく相関関係が認められる。図中の

直線は、乾燥密度と内部摩擦角の関係を直線化したものである。このように、粗粒材料のせん断強さは密度に大きく影響され、含水状態には影響されないと考えられる。また、石灰石は石炭に較べて粒子のかみ合わせ効果が大きいため、内部摩擦角も若干大きな値になったと推察できる。

4.2 摩擦力試験結果

粗粒材料と各種壁面材料(SS-41, SUS-304, コンクリート, 超高分子量ポリエチレンシート) との間の壁面摩擦角を求めるため、摩擦力試験を行った。摩擦角の逆正接である摩擦係数には、静止状態から滑り出す瞬間のピーク値としての静摩擦係数と、連続的に滑っている状態の動摩擦係数がある。我々は、予備試験として両者を求める2通りの試験方法を行った。

Table 2 に示すように、両者の間に多少のバラツキはあるが、試験方法の簡単な動摩擦係数を求める方法で行った。

Fig. 9 は、A炭に対する各種壁面材料の摩擦力試験測定結果例を示しており、試験結果の傾きから壁面摩擦角が得られる。

Fig. 10 に、各種壁面材料別による各試料の水分と壁面摩擦角の関係を示した。壁面材料では、コンクリートの壁面摩擦角が約 19° と最も大きく、SS-41, S U

Fig. 8 Results of large size direct shear tests (Relationship between density and angle of internal friction)

Table 2 Results of static friction test and dynamic friction test

Coal name	A coal						B coal					
Test name	Static friction test			Dynamic friction test			Static friction test			Dynamic friction test		
Wall material	Steel											
W_1 [%]	3.1	7.9	11.9	3.7	9.2	14.9	2.0	6.9	11.5	0.5	9.4	16.9
ϕ_w [deg.]	18.4	18.2	17.7	15.2	17.6	17.0	18.0	16.3	16.3	15.7	15.9	15.3
Wall material	Concrete											
W_1 [%]	2.6	7.1	11.5	1.2	7.5	14.1	0.9	7.0	12.3	0.9	5.5	11.2
ϕ_w [deg.]	21.5	22.1	21.6	18.0	18.7	19.2	18.6	22.0	21.0	18.3	18.7	18.6
Wall material	Ultra high molecular weight polyethylene											
W_1 [%]	1.8	6.6	11.3	1.7	9.8	15.3	0.9	6.7	11.6	1.5	7.7	16.5
ϕ_w [deg.]	19.7	19.3	20.8	17.1	17.8	17.7	16.0	16.0	18.2	15.4	16.2	15.3

Fig. 9 Measurement of frictional force test
(A coal, $D_{max} = 35$ mm)

S-304, 超高分子量ポリエチレンシートは $15^\circ \sim 17^\circ$ と小さな値となった。

試料別では、石灰石の壁面摩擦角が他の3炭種より多少大きな値を示した。これは、石灰石が石炭より細粒分が多く、単粒子も硬いことが原因と考えられる。なお炭種間においては、同一の壁面材料に関して壁面摩擦角に明瞭な差は認められなかった。

貯蔵材料をサイロ内に長期間放置していると、貯蔵材料が壁面に付着し、それが成長してホッパー部で閉塞を発生させる原因となることが考えられる。そこで壁面摩擦角の経時変化を測定し、この点を推定した。

(a) against SS-41

(b) against SUS-304

(c) against Concrete

(d) against Ultra high molecular weight polyethylene

Fig. 10 Results of frictional force tests (Relationship between moisture content and wall friction angle)

Fig. 11 Result of wall adhesion test (C coal, $D_{max} = 50\text{mm}$, $W_1 = 14\%$)

試験方法は、初期圧縮応力として392 kPaで加圧し、この状態を所定の期間保持した後、摩擦力試験と同様の方法で行った。放置期間中に石炭の付着水分を変化させないため、供試箱の周りを十分にシールした。

Fig. 11は、C炭における超高分子量ポリエチレンシートとコンクリートの壁面摩擦角の経時変化である。図から、超高分子量ポリエチレンシートの壁面摩擦角の経時変化は少なかった。コンクリートの壁面摩擦角は、7日後で約 2° 増加しており、初期値の1.1倍であった。これから、壁材の表面粗度が粗いほど壁面に付着しやすくなり、壁面摩擦角の経時変化は増加するものと考えられる。

5. まとめ

以上の結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 水分と締固め乾燥密度の関係において、今回試験に用いた粗粒材料では、乾燥密度がある水分で極小値を示した。また、一軸圧縮強さと締固め乾燥密度の関係において、一軸圧縮強さが極大値となる水分が存在し、その水分は締固め乾燥密度が極小値となる水分とはほぼ一致した。これは、粒子間の毛管水による影響であると考えることができる。
- 2) 締固め試験および一軸圧縮試験からFF曲線を描き、流動特性を評価することができた。特に、最大粒径によってFF曲線に違いを生ずることから、サ

イロに貯蔵する材料で試験する必要があると考えられる。

- 3) FF曲線は、水分によっても非常に変化し、貯蔵材料の流動性を最も悪くする水分の存在することが判った。この水分は各粗粒材料によって異なるため、色々な含有水分のもとで貯蔵材料のFF特性を十分に把握しておく必要がある。
- 4) 圧縮固結試験から、一軸圧縮強さの増加は各粗粒材料によって異なり、A、C炭では初期一軸圧縮強さの約1.5倍、石灰石では約2.5倍の増加となった。また、一軸圧縮試験供試体を乾燥させると、A炭で初期の一軸圧縮強さの約1.4倍、C炭では約2倍となった。このことから、サイロ開放時に側壁やホッパー部に石炭を残し、それを過度に乾燥させることは望ましくない。
- 5) 石炭や石灰石のような粗粒材料の一面せん断試験において、乾燥密度が増加すると水分に関係なく、内部摩擦角も増加することが確認できた。これより、乾燥密度と内部摩擦角には相関性があると考えられる。
- 6) 摩擦力試験において、壁材別では鋼材(SS-41, SUS-304)と超高分子量ポリエチレンシートの壁面摩擦角はほぼ等しく、コンクリートは高い値が得られた。壁面摩擦角の経時変化において、超高分子量ポリエチレンシートの壁面摩擦角には、有異な差が確認されなかったが、コンクリートの壁面摩擦角は7日後で約 2° 増加した。

以上のように、粗粒材料におけるサイロホッパー部の流動特性を評価することができ、またサイロ内圧の設計に必要な諸定数を把握した。今後、これらの試験法を標準化するために、色々検討する必要があると思われる。

最後に、本実験に当っては元東京大学工学部の青木隆一教授、横浜国立大学工学部の綱川浩先生に多くの御指導、御助言をいただいた。本誌を借りて深く感謝の意を申し上げる次第である。

Nomenclature

D_{max} : maximum grain diameter	[mm]	W : moisture content	[%]
U_c : uniformity coefficient	(-)	W_1 : free moisture content	[%]
U'_c : curvature coefficient	(-)	W_2 : water content in percent of total weight	[%]
G_s : specific gravity	(-)	q_u : uniaxial compressive strength	[kPa]
ρ_t : wet density	[kg/m ³]	σ_n : normal stress	[kPa]
ρ_d : dry density	[kg/m ³]	σ_w : normal stress exerted at wall	[kPa]

τ	: shearing stress	[kPa]	ϕ	: angle of internal friction	[deg.]
τ_w	: shearing stress exerted at wall	[kPa]	ϕ_w	: wall friction angle	[deg.]

References

- 1) Otsuka, A., and K. Danjo : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **8**, 591 (1981)
- 2) Jenike, A. W. : "Storage and Flow of Solids", Bulletin of the University of Utah, No. 123 (1964)
- 3) Tsunakawa, H., and R. Aoki : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **5**, 263 (1974)
- 4) *J. Soc. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, : Soil Test Method, Japan (1979)
- 5) Kusumi, H., K. Taniguchi, K. Inoue, and M. Yoshikawa : *J. Soc. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Japan*, No. 9, 9 (1980)
- 6) Tsunakawa, H. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **6**, 405 (1981)
- 7) Iwagata, T. : *J. Soc. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Japan*, No. 4, 41 (1973)