大型貯槽壁体に加わる非付着性粒体の 圧力変動について*

(その2)——流動パターンと動的圧力——

Flow and Pressure of Noncohesive Granular Materials in Deep Bin

(Part 2)——Flow Patterns and Dynamic Pressures——

杉 田 稔**

Minoru Sugita

1. はじめに

筆者は、前報¹⁾において、粉粒体のサイロ壁体に加わる側圧分布について、大型穀物サイロでの測定結果について述べた。そこでは、従来のサイロ設計において、ほとんど考慮に入れられていなかった。抽出時の動的圧力について報告した。

通常のサイロでは、下部1/3の高さの近傍に最大圧が発生し、その値は、静置時の圧力値の3~4倍に達した。その動的圧力発生の一つの大きな要因として、抽出時のサイロ内粒体の挙動、特に流動パターン(flow pattern)の形成が考えられた。

そこで、さらに本報において、モデル試験により得られた抽出時の流動パターンをもとに、貯槽内の粒体の挙動について、動的圧力値の算定式などについて考察したい。

2. 抽出時サイロ内の流動パターンについて

近年海外においても、抽出時の貯槽内の粒体の挙動に関する研究について2, 3の文献が²⁻³⁾見られる。

George P. Deutschらのモデル実験の論文⁴⁾によると、抽出時に定常な流動パターンが形成され、最大圧力発生部の予測が可能であることを示している。

筆者も、小麦などの非付着性粒体を想定して、抽出時サイロ内の流動状態を研究するため、円筒型サイロを想定して、半円形断面のサイロモデルを用いて実験を行った。モデルは、実物サイロの約1/45の大きさで、直径20cmの半円形断面を持ち、高さ90cmである。一面をガラス張りにした鉄板製のものである(図1)。

実験材料としては、非付着性粒体として、ほとんど完全球体である研磨用ガラスビーズを用いた。実物サイロの径に対する小麦の粒径の比に近似させて、直径177~250 μ の球を用いた。かさ比重は約2.52である。

実験は、ふるいを通して自由落下により堆積させて、ほぼ同じ粒径の鉄粉を用いて、10cmピッチの黒い線状の縞を作り、自然落下による抽出方法で抽出し、流動パターンを観測した。

抽出口の位置、抽出口径の大きさなどを各種変化させて実験を行なった。

2.1 抽出口位置が中央にある場合

図1以下に、抽出口の位置が中央にある場合の抽出時の流動パターンを時間を追って示す。

抽出口径の直径12mmの場合の実験を、図1~図20に示す。

抽出口径の直径6mmの場合の実験を、図21~図38に示す。

図下の数字は抽出開始時からの経過時間を示す。

一般に、粒体の抽出時流動パターンは3種類に分けて考えられる。

〔I〕 抽出開始直後

抽出開始直後に、ほぼ抽出口径の垂直上方に、流動化する部分が伝播していく。伝播していく高さは、抽出口径の大きさ、粒体の充てん度によって異なる。一般に、抽出口径が小さいほど、また、固くしまつて堆積した場合ほど高くにおよぶ傾向を示す(図39)。

〔II〕 定常流動状態

ある任意の高さまで流動化現象が伝播すると、サイロ内に一定流動パターンが形成される。

このパターンは、図40に示されるような図式化で表わされる。

* 昭和45年10月23日受理

** 清水建設(株)研究所 (〒104 東京都中央区宝町2-1-1)
TEL 03-535-4111

Fig. 1 抽出開始前

Fig. 2 抽出開始 0'04''

Fig. 3 0'08''

Fig. 4 0'17''

Fig. 5 0'30''

Fig. 6 0'50''

Fig. 7 1'00''

Fig. 8 1'10''

Fig. 9 2'00''

Fig. 10 3'00''

Fig. 11 4'00''

Fig. 12 5'00''

Fig. 13 5'30''

Fig. 14 6'00''

Fig. 15 7'00''

Fig. 16 8'00''

Fig. 17 8'30''

Fig. 18 9'00''

Fig. 19 9'30''

Fig. 20 11'45''

Fig. 1~20 Flow pattern (orifice diameter 12mm).

Fig. 21 抽出開始 0'20''

Fig. 22 3'00''

Fig. 23 4'00''

Fig. 24 6'00''

Fig. 25 12'50''

Fig. 26 15'50''

Fig. 27 23'50''

Fig. 28 24'50''

Fig. 29 29'20''

Fig. 30 23'50''

Fig. 31 36'20''

Fig. 32 39'50''

Fig. 33 43'50''

Fig. 34 49'20''

Fig. 35 52'20''

Fig. 36 53'50''

Fig. 37 55'50''

Fig. 38 60'20''

Fig. 21~38 Flow pattern (orifice diameter 6 mm)

Fig. 39
soon after discharge
start.

Fig. 40
steady-state flowing.
Fundamental flow patterns

Fig. 41
final-state of
discharge.

Fig. 42
soon after discharge start.

Fig. 43
steady-state flowing.

Fundamental flow patterns when materials are compacted.

(F 1)部 サイロ壁面との境界部に残留する部分を除いて、粒体は様な速度で沈降する。すなわち任意断面上の粒体は、同一水平面を保持しつつ沈降していく。

(F 2)部 これに達した粒体は、中央線方向の求心速度を持って中心部に向かって流れ込む。

(F 3)部 粒体が垂直に抽出口に向かって落下する部分である。

(F 4)部 全然流動しない部分、不動部分。

先に、前報の図11で示した(A)域は(F 1)部に相当し、(B)域は(F 1)部と(F 2)部の境界部が含まれ、上部より沈降してきた粒体が崩壊し、衝撃圧を生じ、塑性流動化する部分であって、常に衝撃的な圧力が繰り返して発生する部分である。

ここで筆者は(F 1)部と(F 2)部の境界面を「崩壊面」(collapse plane)と名付ける。

〔Ⅲ〕 抽出終了時

抽出が進み、粒体の自由表面がある高さまで下ってくると、崩壊面が徐々に高くなって落下してきた自由表面に達し、(F 1)部はなくなり、崩壊面は消滅する(図41)(図17)。

崩壊面にて発生する衝撃圧の大小はあるが、その衝撃圧の発生する部分の崩壊面の高さは、流出形態によって、すなわち、抽出総重量によって移動するものであると考えられる。しかし、移動するといっても、先に述べた(B)域を出ることはないものと考えられる。

粒体をタッピングなどにより締め固めた場合の流動パターンは、抽出開始直後が異なる。図42に示すごとく、流動化する部分が自由表面まで貫通し、この表面は終了時と同様、固有の安息角で円錐状のくぼみとなる。この状態で壁面部の粒体は動かない。しかし、やがて通常の流動パターンが形成される(図43)。

2.2 抽出口位置が偏心している場合

サイロの抽出口が偏心している貯槽例は多くみられる。そこで、偏心抽出口の場合の一例を示す。

筆者らのモデル実験において、抽出口を偏心させた場合も、先に述べた3つの流動パターンが順次表われた。

図44に示すように、定常流動状態における流動パターンは、崩壊面が傾斜し、抽出口と反対側の壁面で高くなっている。

また、通常の粒体の投入の仕方では、(F 1)部は、2.1節と同様、様な水平面を保持しつつ沈降してき

Fig. 44 Fundamental flow pattern of steady-state with an eccentric orifice.

Fig. 45 section & plan of silo[B].

Fig. 46 Lateral pressures at the wall.

て、崩壊面に達した粒体から順次流動化している。これより、抽出口が偏心している場合は、抽出口と反対側の壁面の高い部分に大きな衝撃圧が発生することが流動パターンから想定される。

筆者らが測定した穀物サイロの一例に、前報で報告した円形サイロと違って、図45に示すような鉄筋コンクリート製の角型サイロがある。いま仮に、この角サイロを「B」サイロと呼ぶ。

「B」サイロは、5.9m 角の正方形サイロで、高さ約26.9mのもので、小麦約600tを貯蔵する。平面図に示すように抽出口が3カ所1列に中央に並んでいる。

図45に示すaの抽出口から抽出した場合の圧力分布を図46に示す。

抽出口と反対側のA壁面の高い部分、測点A-5に最大圧力が測定された。最大圧力値は、中央のb抽出口を開いて抽出した場合などの最大圧力値と比較して小さい値であったが、圧力分布の分布形状が異なっており、最大圧力値の発生部がかなり高い部分に変化していることが特徴である。

モデル試験の流動パターンから想定されたように、この測定結果からも、抽出口と反対側の壁面の高い部分に大きい圧力が抽出時に発生することが確認された。

以上述べてきたように、抽出時の粒体の流動パターン

が、サイロ壁面に作用する圧力変動の特性とも良く一致し、崩壊面の形成が、抽出時の最大圧力発生の大きな要因であることが確認できると考えられる。

3. 脈動現象についての考察

3.1 抽出量と脈動現象との関係

前報3.7節にて、抽出時に連続する周期的な、細かい微小圧力変動（脈動現象）の測定について述べた。

サイロ内の粒体の脈動現象は、定常な流動パターンが形成されると表われ、一定の周期を持っていることと、抽出速度が一定であることは、密接な関係があると考えられる。この抽出量と脈動現象との関係について若干考察してみたい。

抽出時の脈動現象の周期、5.7秒～7.8秒の時間内にサイロ内に空隙が生じ、それが沈降する物質によって満たされていくと仮定することができよう。

前報図4に示した、時間と総重量の関係から、抽出速度（単位時間あたりの抽出量）が一定であると考えて良いから、各回の脈動あたりの抽出量をサイロ内の変動量に等しいと考えられる。

先に述べたように、定常な流動パターンができた後は、(F1)部では、粒体が様な水平面を保持しつつ沈降してくるから、脈動中に流動する粒体の面積は、近似的にサイロ断面積と考えて良い。

ここで

小麦かさ比重…………… γ

脈動の周期 T 秒の間に、抽出される小麦の重量 w t とする。

と表わせる。

抽出速度 $W_2=50.0(\text{t/時})$

(1)式より

$$\omega_2 = 50.0 / 630 = 0.0794 \text{ t/回}$$

脈動1回あたりの降下する粒体の高さ h は次式で表わされる。

ここで、小麦の見掛比重はサイロ内で流動していると
きも変化しないものと仮定して、

$\gamma = 0.77$

として算定すると、 $A=38.47 \text{ m}^2$ とを(2)式に代入

$$h_2 = \omega_2 / A \cdot \gamma = \frac{79.2 \times 10^3}{38.47 \times 10^4 \times 0.77} = 0.27 (\text{cm})$$

N. Sorokin⁵⁾の論文によれば、エルツ市のサイロ調査において、直径 6.0m の円形サイロにて小麦を抽出速度 60 t/時 で抽出した際、脈動の一定周期 5 ~ 7 秒で、各脈動時の沈降高を算定すると 0.55 cm である。

したがって、脈動現象は抽出速度による若干の変動があるが、だいたい同様の周期と沈降高であるといえる。

先に述べたように、定常流動化したサイロ内の粒体は（F1）部内では、粒体は水平を保持しつつ一様に沈降してくる。そこで、この（F1）部の粒体が連続したものとして、一様に沈降してくるものとする、この（F1）部においては、Janssen 理論式におけると同様に、堆積高さによる垂直応力の影響が、圧力係数（水平圧力

の垂直圧力に対する比) 分だけ水平圧力に表われてくることとなる。

すなわち、抽出量の増加にともなう、粒体の堆積高さが減少していくにつれて、各測点（特にF1部内の）の水平圧力は減少していくことになる。

しかし、前報にて報告した、今回の 2 回の実験および筆者らの行なった過去の実験における連続記録においても、この (F 1) 部に相当する点の側圧値は低減しなかった。抽出量が増加し、堆積高が減少するにもかかわらず、側圧は低減せずある一定の圧力値の近傍を変動しつづける現象を示した。

また、多くの測点は、粒子の自由表面が測点近くに沈降してきてから、逆に圧力上昇を示し、急激に減少する傾向を示している(前報、図10参照)。

以上の連続記録の定性的な性状から、抽出時に粒体の流動パターンが定まり、定常流動となった時の(F1)部を以下に述べるように考えることができる。

(1) 粒体の自由表面から数メートル下がった部分にそれから上部の粒体の垂直圧力成分を支持する、アーチ作用をする不連続部があって、それが粒体の堆積高が減少しているにもかかわらず、逆に圧力の上昇を生む原因と考えられること。

(2) (1)に述べた、不連続部から崩壊面までの（F1）部の間は、図47に示すように、いくつかの不連続面によって上下両境界面で他の粒体と不連続になり、水平に輪切りにされたようなピース状になって一様に沈降していくと考えられる。すなわち、この部分では、垂直方向の応力が不連続となって、上部の圧が下方に伝わらず、脈動の mass の単位で壁の摩擦力だけによって支えられると考えられる。

以上の実験結果に基づく2つの仮定から、この(F1)部内での自由表面からある高さ下った部分以下のサイロ

Fig. 47

壁に作用する平均的水平圧力を算定する。

図47に示した、上下の境界 ab, cd で不連続となり、平行に輪切りにされた粒体のブロックとなって落下するものとする。

ここで、

$\Delta\omega_x$: 粒体のブロック abcd の重量

Δh_x : 落下する粒体ブロック abcd の高さ

$\Delta\omega$: 脈動1周期あたりの粒体の抽出量

Δh : 脈動1周期あたりの粒体の沈降量

A: サイロ断面積

L: サイロ周長

γ : 粒体かさ密度

μ : サイロ壁面との摩擦係数

P_x : サイロ周壁 Δh_x 幅当りの摩擦力

P_y : サイロ壁面 Δh_x 幅当りの水平圧

とする。

落下する粒体の輪切りにされたブロック abcd の重量は(3)式で示される。

$$\Delta\omega_x = \gamma \cdot \Delta h_x \quad \dots\dots(3)$$

ところで、 $\Delta\omega_x$ と Δh_x の間には

$$\Delta\omega_x = \Delta\omega \frac{\Delta h_x}{\Delta h} \quad \dots\dots(4)$$

(4)式が成立する。

いま、ブロック abcd の力のつり合いを考えると、粒体の重量はサイロ周壁の摩擦力とつり合い(5)式で示される。

$$P_x = \frac{\Delta\omega_x}{L \cdot \Delta h_x} = \frac{\Delta\omega}{L \cdot \Delta h} \quad \dots\dots(5)$$

$$\text{また、} P_x = \mu \cdot P_y \quad \dots\dots(6)$$

(5), (6)式より

$$P_y = \frac{\Delta\omega}{\mu \cdot L \cdot \Delta h} \quad \dots\dots(7)$$

定常流動状態における(F1)部内の不連続部でサイロ壁に作用する水平圧力として P_y を考えることができる。

脈動するブロック粒体の動きは stick and slip flow であり、前節で示したように、一回の脈動の変動量は非常に微小量の変動であるので、次のように考える。

粒体の見掛け比重 γ が変わらないと仮定し、壁面との摩擦係数を静的摩擦係数と等しいものとする。

$\mu = 0.33$ として、前報表3の値を用いて、(7)式より各実験時の値を求める。

$$P_{y1} = \frac{86.6 \times 10^3}{0.33 \times 21.98 \times 0.29 \times 10^2} = 0.424 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{y2} = \frac{79.4 \times 10^3}{0.33 \times 21.98 \times 0.27 \times 10^2} = 0.405 \text{ kg/cm}^2$$

実験中に得られた連続記録から考察すると、脈動時の平均圧力値は、先の仮定に基づく算定値と多少バラツキはあるが、ほぼ一致する。

4. 抽出開始直後の圧力急増に対する考察

抽出開始直後に、サイロ壁全体に作用圧力の急激な変動と増大が表われることについて、前報にて述べた。

また、抽出開始直後に、抽出時の最大圧力値ともいえる大きな圧力が、サイロ円筒部の下部に発生することについても述べた。サイロ設計にあたっては、この最大圧力値を算定することが1つの問題点である。

そこで、実験による結果から以下に述べるような最大圧力算定式を誘導した。

モデル実験にても判明したように、抽出開始時のサイロ内粒体の流動パターンは、上層部では全然みだれずに一様に沈降している。

したがって、抽出開始時には、まず一様に堆積した粒体では、いわゆる「Rat-hall 現象」は生じないものとする。そこで、抽出開始後のサイロ内の粒体の状態を次のように仮定することができる。

図48に示すように、抽出開始直後にある堆積深さ h m の粒体面 A B に、瞬間的な不連続面部分 C D が生ずると

Fig. 48

考えられる。この瞬間的に不連続となるCD部分の面積を $A'(\text{m}^2)$ とする。この A' をサイロ全断面面積 $A(\text{m}^2)$ の α 倍とすると、

$$\alpha = A'/A \quad \cdots \cdots (8)$$

瞬間的不連続の発生する境界CDで、不連続となった時静的な垂直圧 P_V のCD面での成分は、力のつり合いから、瞬間的なアーチ作用を生じて、深さ h における Δh の幅の壁面での摩擦力によってつり合うと考える。

この仮定にしたがって、不連続が生じたための、2次的な摩擦力を算定してみる。

抽出開始前に作用していた静的な垂直圧力値を、先の Janssen 理論式を用いて求める。

ここで、

P_V : Janssen 式による深さ h の単位面積あたりの垂直圧

P_L : Janssen 式による深さ h の単位面積あたりの水平圧

K : Janssen 係数 (圧力係数)

P_V' : CD部の垂直圧

P_L' : Δh 幅当りに加わる瞬間的水平圧

$$P_V' = P_V \cdot \alpha \cdot A \quad \cdots \cdots (9)$$

AB面での Δh 幅当りのサイロ周長 L に加わる瞬間的水平圧力は

$$P_L' = P_V \cdot \alpha \cdot A / (L \cdot \Delta h \cdot \mu) \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで、(8)式の α の値をいかにして求めるかに問題が残る。

そこで、前報の測定結果から、ホッパー部に設置した測定5-2の連続記録に注目すると、抽出時に瞬間的に静圧値より減少し、そのままほぼ一定値を示している。

この測点は垂直圧の成分を受けているので、この圧力減少を不連続面の形成によって減少した垂直圧の割合に等しいと仮定する。

第1回、第2回の測定結果から α の値を定めると、

$$\alpha = 0.3 \sim 0.4$$

瞬間的な不連続の発生する崩壊面の深さを、実験の際抽出開始時に最大圧の発生した測点5-5の深さ $h=17.5\text{ m}$ とし、この位置における P_V は Janssen 式から、 $k=0.5$ 、 $\mu=0.33$ として計算すると以下になる。

$$P_V = 6.6 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

さらに、 $\Delta h=1.0\text{ m}$ として(10)式から求めると

$$\alpha = 0.3 \cdots \cdots P_L' = 10.5 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

$$\alpha = 0.4 \cdots \cdots P_L' = 14.0 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

この値は、測定によって得られた値にほぼ等しい値を示している。

したがって、以上に述べてきた考察によっても、抽出開始時の最大圧値を、近似的に算定できるものと考ええる。

ここで設計にあたっては、不連続面の自由表面からの深さ h と、 α の値をいかにして求めるかの点が問題として残る。しかしながら、 h の仮定にあたっては、不連続面の発生位置が、前報図11に示した「B」域を出ることはないと考ええる。また、垂直圧 P_V の値は、Janssen 式の特徴から、 h の増大に伴って収束する。したがって自由表面からの深さが大きい所では、 P_V の値はそれほど大きくは変動はしない。

したがって、最大圧値を(10)式から求めるとすると、 α の値をいかにして決定するかが問題となる。サイロ規模、抽出方法、粒体の諸物性などの要因によって異なり今後の数多くの実験により裏付けを必要とするが、ほぼ $0.3 \sim 0.4$ の値を取るものと想定される。

そこで、いくつかの実物サイロの測定例にこの算定式を適応してみる。当研究所で測定した他の二つの小麦サイロと、ソ連の N. Sorokin の論文による測定結果とに適応した。測定した抽出時最大側圧値 $P_{\max}$ と、その測定点の深さ h の値とから(10)式より α の値を求めてみる。

[1] Aサイロ：(当研究所測定)

サイロ規模：内径 5.0m、高さ 20.0m

中央ホッパー式鉄筋コンクリート製円形サイロ

投入物質：小麦

測定結果：抽出最大側圧

$$h=15.0\text{ m} \cdots \cdots P_{\max}=5.6\text{ t/m}^2$$

Janssen 式より、 $\mu=0.33$ 、 $K=0.5$ として

$$h=15.0\text{ m} \cdots \cdots P_V=5.4\text{ t/m}^2$$

(10)式より $\Delta h=1.0\text{ m}$ として、 α を求めると

$$\alpha = 0.38$$

[2] Bサイロ：(当研究所測定)

先の2.2節で述べ、図45に示した角型サイロである。

中央の1個の抽出口から抽出した場合

$$\text{測定結果：} h=16.0\text{ m} \cdots \cdots P_{\max}=7.70\text{ t/m}^2$$

理論式による算定： $\mu=0.33$ 、 $K=0.5$ として

$$h=16.0\text{ m} \cdots \cdots P_V=5.46\text{ t/m}^2$$

(10)式より $\alpha = 0.34$

[3] Bサイロ：(抽出口3個を全開した場合)

$$\text{測定結果：} h=19.5\text{ m} \cdots \cdots P_{\max}=12.9\text{ t/m}^2$$

理論式による算定： $\mu=0.33$ 、 $K=0.5$ として

$$h=20.0\text{ m}\cdots\cdots P_V=5.84\text{ t/m}^2$$

(10)式より $\alpha=0.48$

[4] Cサイロ：(N. Sorokin の論文から，エルツ市の小麦サイロの測定結果)

サイロ規模：内径 6.0m，高さ 30.0m

中央ホッパー式鉄筋コンクリート製円形サイロ

測定結果： $h=23.0\text{ m}\cdots\cdots P_{\max}=8.24\text{ t/m}^2$

理論式による算定： $\mu=0.33$ ， $K=0.5$ として

$$h=23.0\text{ m}\cdots\cdots P_V=5.6\text{ t/m}^2$$

(8)式より $\alpha=0.32$

以上の実物サイロの測定結果に適応した結果，抽出口が大きい場合，すなわち，抽出速度が大なる時， α の値も大きくなるが，通常の規模のサイロでは，ほぼ α の値が0.3~0.4の範囲である結果が得られた。

5. ま と め

モデル実験の結果からも，抽出時の流動パターンは3つの違った特性がみられた。この流動パターンは先の測定結果による変動特性とそれぞれ密接に関連すると考えられる。

抽出口が偏心している場合も，同様の3種類の流動パターンが順次表われ，傾斜した崩壊面が形成される。この結果，抽出口と反対側のサイロ壁面に抽出時の動的最大圧の発生が考えられた。これは実物サイロの測定結果からも確認される。

抽出時の粒体の流動パターンがサイロ壁面に作用する圧力変動の特性とも良く一致し，崩壊面の形成が抽出時最大圧力発生の大きな要因の一つであると考えられた。

崩壊面での粒体の沈降による衝撃圧が脈動現象となつてあらわれ，抽出速度によって一定の脈動周期を持つ。

定常流動している，崩壊面より上部の粒体(F1)部では，垂直方向の応力成分を無視して算出した水平圧力値と，測定により得られた圧力値と良く一致を示している。

抽出開始時に発生する最大側圧の算定式を誘導したが，定数 α の値は，抽出速度などにより多少異なるが，実サイロの測定結果から算定して，一般に0.3~0.4の範囲の値を取るものと考えられる。

以上非付着性粒体としての小麦を用いての実物サイロの測定結果とモデルによる流動パターンとを中心に，大型貯槽内の粉体圧，特に，抽出時の動的圧力について述べた。付着性の大きい粉体については，変動圧力も大きく非付着性粒体を貯蔵した場合は大きな挙動の違いがある。小麦粉サイロの測定では，抽出時最大圧力は24~37t/m²ほどの大きな変動圧力を測定している⁶⁾。

したがって，付着性粉体の大型貯槽の設計にあたっては，一層の複雑な設計上の問題があると考えられる。

6. 謝 辞

今回発表の測定にあたっては，株式会社増田製粉所取締役技師長後藤俊夫氏，同工務部長代理中井晃氏，他諸氏の御協力と御指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

また，当研究所 高橋和男氏，磯畑脩氏，三谷勝之氏大阪支店設計部課長 光安明氏，他現場各氏のご協力をいただいたことを付記して謝意を表します。

また，算定式の表記方法その他種々にわたって，助言と校閲をいただいた横浜国立大工学部教授青木隆一博士に厚く感謝いたします。

引 用 文 献

- 1) 杉田：“大型貯槽壁体に加わる非付着性粒体の圧力変動について，(その1)”粉体工学研究会誌，7，513 (1970)
- 2) Turitzin, A.M.: “Dynamic Pressure of Granular Material in Deep Bins” A.S.C.E., 89, ST 2, Apr. (1963)
- 3) Paterson, W.S.: “Pressures in silos” *Civil Engineering and Public Works Review*, p. 497 Apr. (1970)
- 4) Deutsch, G. P.: “Flow and Pressure of Granular Materials in Silos” A.S.C.E., 93, No. EN 6, Dec. (1967)
- 5) Sorokin, N.: “サイロからの排出時の穀物の動圧力の計算”
- 6) 杉田，他：“サイロ壁体に加わる粉体圧力分布の測定”清水建設研究所報，10，(1967)

Abstract

Flow and Pressure of Noncohesive Granular Materials in Deep Bin

Minoru Sugita

In preceding papers, we reported some measurements of lateral pressures acting on the inside wall

of full-sized grain bins. We showed in these works that the pressures which occurred during discharge

are much greater than those of initial static conditions.

The present report mentioned about both the lateral pressure measurements on a full-sized deep bin and the flow patterns of granular materials during discharge from model silo.

According to these tests, the principal results are obtained as follows.

- (1) The fundamental flow patterns which occur during discharge from silo are one of the very important causes for the dynamic

over-pressures.

- (2) There are three different characteristics of this dynamic pressure of materials and these phenomena relate to the fundamental flow patterns.
- (3) Basing on these flow patterns, we present an approximate theoretical solution of these dynamic overpressures acting on the walls of deep bin.

(The Research Laboratory of the Shimizu Construction Co., Ltd.)