

個別要素法によるサイロ内粒状体の挙動に関する研究

吉 田 順
(大崎研究室)

§ 1. はじめに

サイロ内に貯蔵される材料は、通常粒状体あるいは粉体で、その払出し時の挙動はすべり破壊の繰り返しであり、特にサイロ壁面に加わる動圧力の変化は予測し難いものである。そのため、サイロ問題を通常の連続体理論で表現することは難しく、従来の研究ではあまり解析的な取り扱いはなされなかった。そして、設計の際に用いられる壁面荷重等は古典的な理論解および実験、観測などの経験的な結果から導かれていた。一方、個別要素法は分離した剛体の集合の挙動を取り扱うことを目的として開発された手法であり、サイロ内の粒状体の挙動を取り扱うのに適した手法と考えられる。そこで、本研究では個別要素法をサイロ内粒状体の挙動解析に用いて、その適用性を示すとともに、従来実験的にしか取り扱えなかったサイロ壁面に加わる荷重の変化等について検討したものである。

サイロ、バンカーなどと呼ばれる構造物は粉粒体の貯蔵のためのものであり、近年の輸送力増大とともに大型のサイロが建設されるようになってきている。サイロは、通常上部より投入された貯蔵物をビン内部に収納し、重力により下方に排出するものであり、投入時、静置時および払出し時にサイロ構造体に加わる荷重が設計時の問題となる。これらは粒状体(粉体)力学の問題であるが、理論的には解明されておらず、既知の理論を基に経験的な知見を考慮することにより設計されているのが通例である。サイロの設計内圧の算定には様々な式が提案されているが、各国の基準では静的内圧には Janssen 式を用い、動的な内圧にはそれに修正係数を乗じるような形が用いられているようである¹⁾。しかし、現実にはサイロ内圧、特に動圧力は様々な要因に影響され、サイロ下部での局所的な荷重の増大はしばしばサイロの破壊等の事態を招いている。

そのため、実験的研究あるいは実サイロにおける計測は各所で実施されており、払出し時における急激な荷重

の増加が報告されているが、これらの計測結果等に対する理論的、あるいは解析的な説明はほとんどなされていない。当社においても模型実験あるいは計測の結果が報告されており²⁾³⁾、サイロ内の粒状体の挙動についての知見が示されている。

個別要素法のサイロ問題への適用については、木山ら⁴⁾により基本的なモデルへの適用が示されているが、要素数も少ないためほとんど圧力変化等の問題には触れられていない。その後、これまで計算機能力の限界によりあまり進展が見られなかった。しかし、ここ数年の計算機の飛躍的な進歩により、かなりの大容量計算が高速で実行可能となり、個別要素法においても地盤を粒状体として取り扱うモデル⁵⁾や、コンクリート構造を剛体要素の結合として表わすようなモデル⁶⁾が解析されるようになってきた。

本研究は、従来の個別要素法プログラムを改良し大容量化、高速化することにより、サイロ内粒状体の挙動の定性的な検討を可能とするとともに、将来的には定量的な把握を可能とすることを目的としている。

本報告では、まず個別要素法概念およびプログラムの改良点について述べ、次に模型実験の諸元を考慮したシミュレーションにより個別要素法の適用性を示す。そして、個別要素法の解析結果に基づくサイロ内粒状体の静置時における壁面圧力および払出し時の動圧力に関する検討結果を示すものとし、最後に今後の課題について述べることにする。

§ 2. 個別要素法

2.1 従来の研究

個別要素法(以下、DEMと略す)は、Cundall⁷⁾により1971年に提案された手法であり、不連続体の挙動をシミュレートできる解析法として近年計算機の発達に伴って注目されている手法である。DEMではその特徴とし

て、大変形および動的問題を静的釣り合い条件からそのまま表現できることがあり、地盤・岩盤の破壊問題あるいは粒状体の静的・動的解析などに用いられている。

最近では、国内でもDEMに関する様々な報告がなされており、特に土質の分野では粒状体解析の新しい手法として数多くの研究が報告されている。その中でも、伯野らによる研究⁹⁾¹⁰⁾ではスーパーコンピュータを用いて大容量の計算を行っており、今後のDEMの数値解析としての一つの方向性を示しているものと考えられる。一方、Cundallは主に岩盤への適用においてDEMに様々な修正あるいは機能追加をしており、現在では元来剛体要素であったものを変形を考慮できる手法とし、三次元問題への拡張なども行っている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

筆者も、従来よりDEMの適用に関していくつかの検討を行っているが、これまでのところDEMの実問題への適用に際しては計算機の能力不足およびパラメータの設定が課題であると考えており¹¹⁾¹²⁾、今回の検討においてはそれらを留意点としている。

2.2 DEMの基本概念

DEMは以下のような基本的仮定に基づいて、分離した剛体の挙動を個々に捉え、要素間の相互作用を考慮することにより全体系の挙動を求めようとする手法である(図-1参照)。

- 1)要素は剛体であり、変形は要素の表面(要素間)で生じるものとする。
- 2)変形は要素間の接触点で代表させるものとし、要素間の力は接触点のみで働くものとする。
- 3)各要素の挙動は要素重心を代表点として、重心まわりの運動方程式に従うものとする。
- 4)各要素毎の力の釣り合いは、接触点における外力を重心まわりの合力として求め、その不釣り合い力を要素の加速度に変換する。

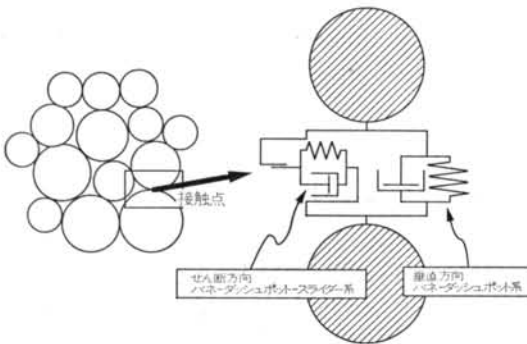


図-1 DEMの基本概念

5)要素間の接触点では、垂直方向にバネ-ダンパ-ボルトのVoigtモデルを仮定し、せん断方向にはVoigtモデルにスライダ-を加えたものを仮定して、要素間の変形を接触力に置換する。

これらの仮定に基づき、進行性の破壊等を解いていくのが元来のDEM解析である。そのアルゴリズムは、初期加速度に基づく速度・変位を求め、その速度・変位から要素間のVoigtモデルに働く力を求める。その力を重心まわりに合計して次のステップの加速度を求めていくものであり、構造解析において動的緩和法と呼ばれる手法がDEMの基礎となっている。また、前のステップの加速度から速度・変位を求めるところ、すなわち数値積分の部分では最もシンプルなEuler法を用いている。

このようにDEMの解法は比較的単純であり、結局は不釣り合い力を徐々に減じていく、あるいは加速度に変換して進行性の破壊を追跡するような繰り返し計算となっている。しかし、局所的な釣り合いは求めるが、全体系の釣り合いは結果的に得られるような手法となっているため、1ステップ毎の時間増分は小さくする必要がある。通常の解析では 10^{-3} ~ 10^{-5} sec程度のかなり小さい値を用いているため、1秒間の計算をするにもかなりのステップ数を取らなければならない、多大な計算時間を要することが多い。また、記憶容量に関してはFEM等と比較すると、全体剛性マトリクスを必要としないためその部分では容量を必要としないが、接触点の情報など他の部分でかなりの量となるため、全体としてはあまり小さな記憶容量では収まらない。特に、粒状体解析では土質材料のような実問題を取り扱おうとした場合、非常に多くの粒子数を必要とし、その粒子数がそのまま要素数となるため、逆に大きな記憶容量が必要となる場合もある。

2.3 プログラムの改良点

前章で述べたように、粒状体解析にDEMを適用する際にはプログラムの高速化、大容量化が必要となる。今回の検討で用いたプログラムは、従来のCundallのプログラミングに準拠していたものを基にして、高速化のために主に次の2点の改良を加えたものである。ただし、大容量化に関してはFORTRAN77の拡張領域の利用によりかなりの記憶容量の使用が可能となったため、特に改善を必要としなかった。

- 1)従来、記憶容量を節約するために、それぞれの変量毎に番地を与えて配列を詰めた形で設定していたものを、拡張領域の利用により大容量の利用が可能となり配列の節約の必要がなくなったため、直接各変量を配

列に置くものとし、DO ループの内の置き換え、再計算などの無駄をなくした。

2) DEM プログラムの中で最も計算時間を必要とする接触点の走査および判定の部分で、従来のボックスングと呼ばれる全体領域のグループ分けに加えて、各要素毎の隣接要素の情報を常時持たせることにより、判定の回数および対象となる要素の数を低減した。

以上の改良によりかなりの効果が見られ、特に2)に関してはグルーピングのみを行なった場合に比べると2倍程度、また当初のプログラムと比較すると10倍以上の高速化が可能となった。

§ 3. サイロ問題への適用に関する基本的な検討¹³⁾

DEM のサイロ内粒状体の挙動への適用性を検討するために、模型実験レベルを対象とした解析を行なった。解析条件としては、杉田らの実験条件を考慮して現状の DEM プログラムで可能な範囲のものを設定している。

3.1 解析条件

解析モデルは杉田らの実験を参考とし、サイロの大きさ(幅20cm, 高さ90cm)等を設定したが、実験では最大粒径 250 μ のガラスビーズを材料としており、粒子数が 100 万個以上となっているのに対し、解析では粒径 6mm の要素を 3000 個詰めたものとしたこと、および二次元と三次元の違いなどから直接的な比較は難しい。また、開口部(オリフィス)の大きさについては実験で 6mm, 12mm の 2 種類が用いられたのに対し、解析では複数個の粒子が同時に通過可能であることが必要と考え 40mm と、これも大きく設定せざるを得なかった。これらの条件の違いから、結果の検討としては定性的なものとなる。

解析の入力物性に関しても、上記のような違いから実験に用いられた材料物性をそのまま反映したものではなく、DEM 解析のパラメータとして比較的好く用いられるオーダーの値とした。表-1 に入力物性を示す。このうち、摩擦係数に関しては粒状体の挙動に及ぼす影響が

入力物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	dyn/cm	1.0×10^7
せん断バネ定数	k_s	dyn/cm	1.0×10^7
比例減衰定数	β	sec	5.0×10^{-5}
摩擦係数	μ		0.1, 0.5, 0.9
単位体積重量	γ	g/cm ³	2.0

表-1 入力物性パラメータ

最も大きいと予測されたため、極端に差のある値を設定し、挙動の違いを見ることとした。

3.2 解析方法

解析は、静置時の状態を求める初期解析と、払出し開始後の流動状態を求める払出し解析の 2 つの部分に分けられる。初期解析では、まず解析領域内に要素をランダムな位置に発生させ、それぞれの要素に重力加速度を適用して自由落下させ、粒子の速度がある程度小さくなるまで解析を継続し、初期堆積状態を作成する。本検討では、初期状態をいったん摩擦係数 0.5 の条件で作成し、その配列状態で摩擦係数を 0.1 あるいは 0.9 に変化させることによって各ケースの初期状態を作った。これにより、初期状態としては粒子配列の違いによる差は比較的小さくなっているものと考えられる。解析に用いた時間増分は 5×10^{-5} sec であり、解析ステップ数は摩擦係数 0.5 で解析した状態から、さらに 5000 step の解析を実施した。

払出し解析は、初期堆積状態の粒子配列および接触力状態を保存した状態で開口部を開き、その後の流動状態を追跡する。ただし、開口部を通過した後の粒子の挙動は解析対象としていない。時間増分は 5×10^{-5} sec、解析ステップ数は 10000 step で、払出し時間としては 0.5 秒間である。

3.3 初期解析結果

摩擦係数 0.1, 0.5, 0.9 の 3 ケースのそれぞれの初期堆積状態を図-2 に示す。ここで、サイロ壁面のひげのように見えている線は壁面と粒子間の接触力である。また、黒く見える縞模様は 10cm 毎の位置を表わしており、払出し時の挙動を分かり易くするためのものである。た
—: 1500×10^5 dyn

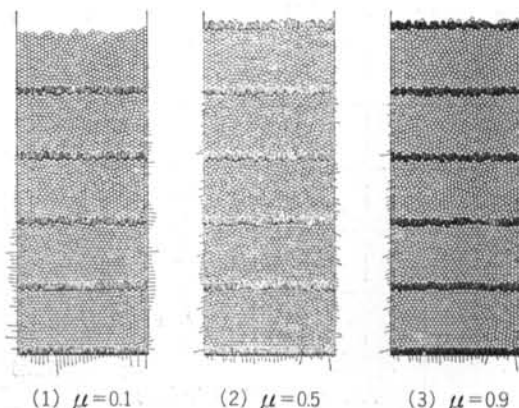


図-2 初期堆積状態における粒子配列と壁面荷重

だし、杉田らの実験では10cm毎に鉄粉を混ぜて縞模様を作っているが、今回の解析では特に物性値の考慮はしていない。この図から摩擦係数の違いによる差を見ると、0.5と0.9の結果はほとんど差が見られず、0.1の場合のみが堆積高さ、あるいは壁面の接触力も異なった結果となっている。これは、初期解析のときにまず摩擦係数0.5で粒子配列を整えた後に、0.1あるいは0.9へと摩擦係数を変化させたため、0.5より係数の大きい0.9の場合には係数を変化させても、0.5ですべりを生じなかった接触点では変化がなく、全体に大きな差が生じなかったのに対して、0.1の場合には新たなすべりが数多く生じたためと考えられる。

初期堆積高さは各ケースとも約50cmであり、壁面の接触力は粒子毎にかなり変化しているため、全体的な壁面荷重の傾向を見るため、高さ10cm毎に側壁に対する水平方向の接触力を平均化して圧力分布に変換したものを図-3に示す。この図においても、0.1のケースだけが大きい圧力を示しているが、分布形状はいずれのケースも最下部よりも少し上の位置で最大となる傾向が見られ、これは従来の実験結果等と一致した結果を示している。粒子間の摩擦角を内部摩擦角と仮定して求めたRankine土圧係数は、0.1、0.5、0.9に対してそれぞれ0.82、0.38、0.20となり、図-3に示した0.1の場合でも解析結果はRankine土圧よりかなり大きくなっている。これは、Rankine土圧と内部摩擦角の関係を正しいものと仮定すれば、解析から得られる壁面圧力に対応する内部摩擦角は粒子間の摩擦係数よりも小さいことになり、従来規則的な配置の場合に対して理論的にいわれている傾向とは逆になっているが、この点に関しては次章で考察するものとする。

3.4 払出し解析結果

図-4および図-5に払出し解析結果を示す。図-4

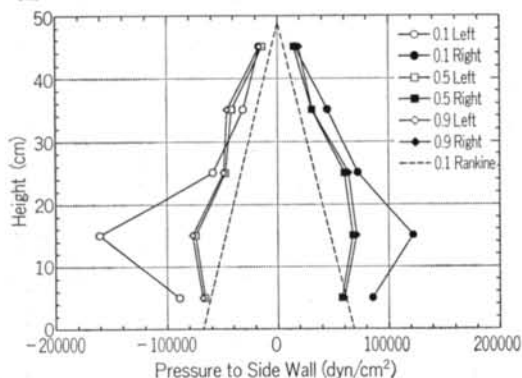


図-3 初期堆積状態における側壁圧力分布

は、各摩擦係数毎に0.1、0.3、0.5秒後の粒子配列および壁面接触力を示している。また、図-5はそれに対応した粒子速度の分布を示したものである。

摩擦係数の違いによる払出し時の挙動の差を見ると、摩擦係数の小さい0.1の場合にはオリフィス上部の粒子

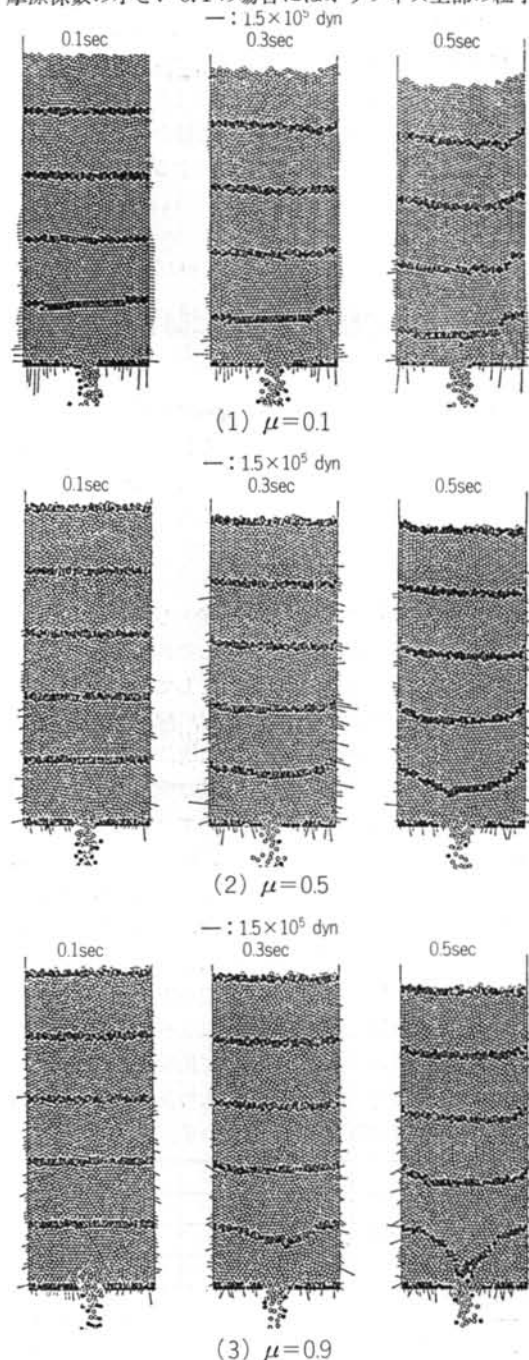
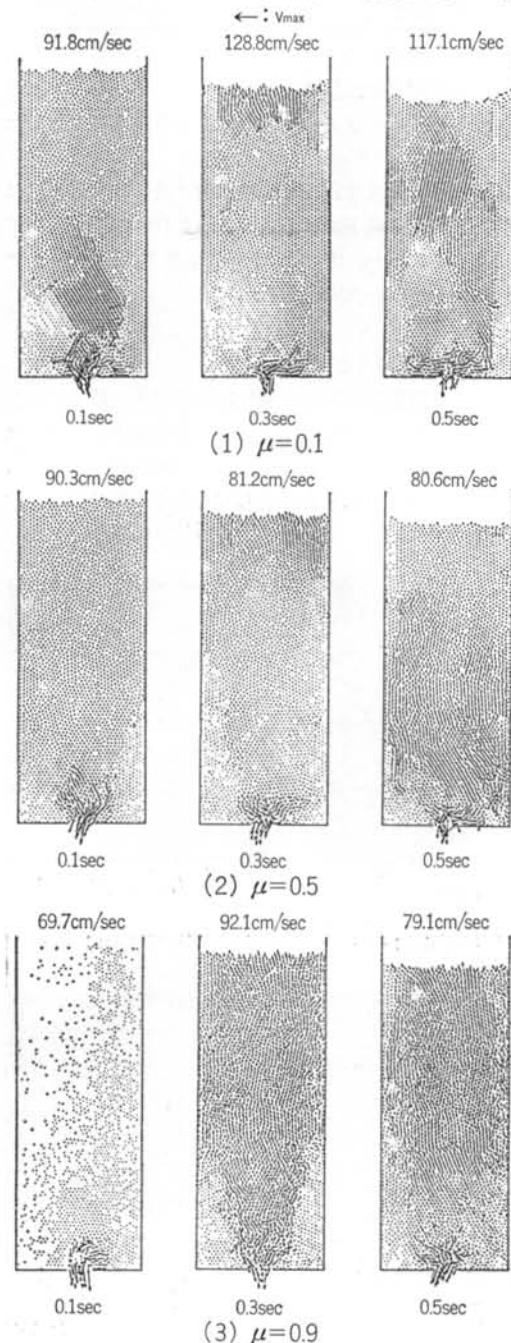


図-4 払出し時における粒子配列と壁面荷重の変化

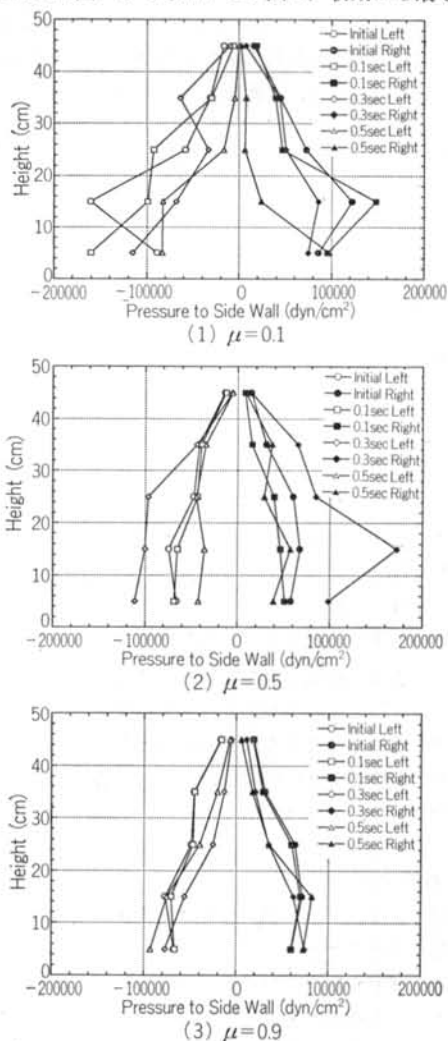
とともにオリフィスの左右の粒子も移動し、サイロ内のほとんど全ての粒子が何らかの形で移動していることが分かる。これに対して、0.9の場合には0.1 sec後の結果に見られるように払出し初期にはオリフィス近傍の粒子だけに動きが見られ、その後上部へと変化は進んで行く



図一五 払出し時における粒子速度の変化

ものの、サイロ下部の側壁に近い部分ではほとんど動きが見られない。これらの傾向は杉田らの模型実験の結果とよく対応しており、今回の3ケースのうちでは摩擦係数0.9の場合が最も実験結果に近い。また、0.5の結果は他の2ケースの中間的な挙動を示しているが、全体的な流動速度は摩擦係数の小さいものの方が速くなっている。これは、摩擦係数が小さい場合には個々の粒子間の滑り出しが早いことを考えれば妥当な結果と考えられる。粒子速度分布はサイロの上下で差が生じているが、その傾向はサイロ内の粒子の脈動現象に対応するのではないかと考えられ、側壁部での連続的な荷重変化に影響しているものと推測される。

側壁に加わる水平荷重分布の変化を、摩擦係数毎に示したのが図一六である。この図で、初期から最も大き



図一六 払出し時における側壁部圧力分布の変化

い変化を示しているのは摩擦係数0.5の右側壁0.3 secの場合であるが、その荷重増加は初期状態の2.5倍程度である。また、摩擦係数0.1, 0.9の場合には全体にあまり大きな荷重増加は認められず、この点においては従来の実験あるいは計測などで示されている静置時の数倍あるいは10数倍にもなるという払出し時の内圧とは少し異なった傾向となっている。この原因は、側壁部の荷重を10 cm毎に合計しているため変化が平均化されてしまったこと、あるいは粒径が大きく実問題等に比べて条件が少し異なっていることなどが考えられるが、他の条件にも課題があることから今後さらに検討を進める必要がある。

3.5 まとめ

模型実験の条件に基づいて、3000個の円形要素を用いたサイロの静置時および払出し時の解析を行ない、定性的にはDEMによる解析結果が実験とよく対応することが確認された。また、摩擦係数による挙動の差が結果に現われ、動圧力の増加についてもある程度表現できたことより、サイロ内の粒状体解析にDEMが適用可能であることが示された。

§ 4. 静置時圧力分布に関する検討

前章の検討により、DEMを用いたサイロ内粒状体の挙動解析が可能であることが示された。本章では、払出し解析を行なうときの初期条件ともなる静置時の状態についての解析を行ない、特にその壁面圧力分布に着目して検討を行なう。

サイロはその内径と高さおよび貯蔵物の息角の関係から浅槽と深槽に分類され、静置時におけるサイロ内の圧力分布は、浅槽の場合では Rankine の土圧論に比較的好く合うといわれており、深槽の内圧は Janssen 式で表わされるとされている。

今回の解析では、摩擦係数の変化により浅槽と深槽の条件になるようなモデルを設定し、摩擦係数による側壁および床面に加わる圧力の変化について検討した。

4.1 解析条件

解析モデルは、摩擦係数により浅槽・深槽の両方の条件となることを考慮して幅40cm、高さ50cmのサイロ（ビン）に直径6mmの円要素5000個をランダムに配置することとした。物性に関するパラメータは摩擦係数以外は§3.の解析と同じものを

入力物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	dyn/cm	1.0×10^7
せん断バネ定数	k_s	dyn/cm	1.0×10^7
比例減衰定数	β	sec	5.0×10^{-5}
摩擦係数	μ		0.3, 0.5, 0.7, 0.9
単位体積重量	γ	g/cm ³	2.0

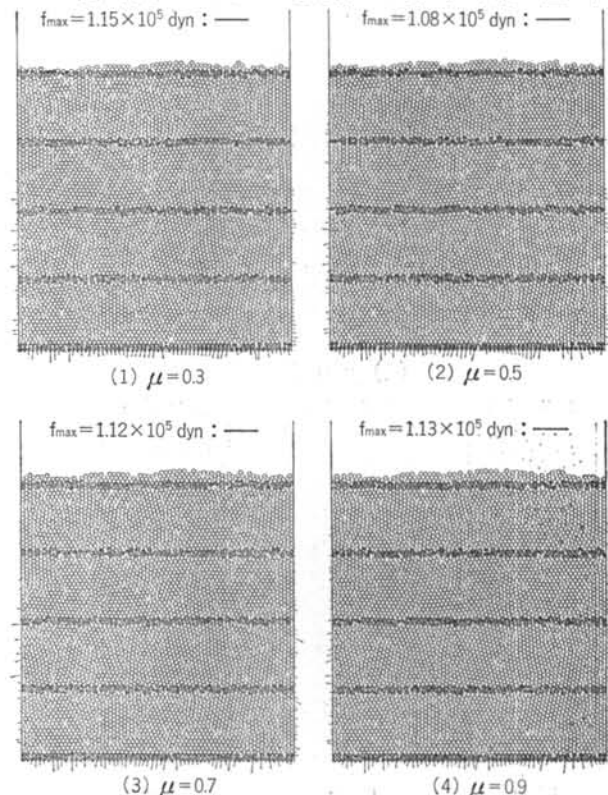
表一 入力物性パラメータ

用い、粒子間の摩擦係数としては0.3, 0.5, 0.7, 0.9の4種類を用いてパラメータスタディを行なうこととした(表一参照)。

解析方法としては、ほぼ接触状態に近い形で配置した要素を重力加速度下で落下させ、静止状態に近づくまで計算するものとし、実際には時間増分 5.0×10^{-5} secで10000 stepの解析を実施した。

4.2 解析結果および考察

図一七に各摩擦係数毎の解析結果を示す。粒子配列を見ると、係数が大きくなるにつれて堆積高さが大きくなっていることが分かるが、その差は比較的小さく、最も差の大きい0.3と0.9を比較しても粒子一列分の差、す



図一七 静置時における粒子配列と壁面荷重（摩擦係数の違いについての比較）

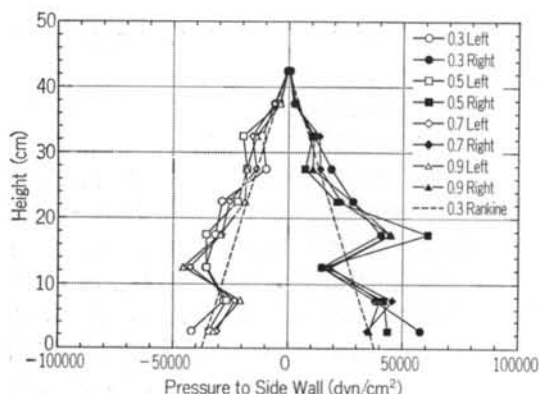


図-8 静置時における側壁部圧力分布（摩擦係数の違いについての比較）

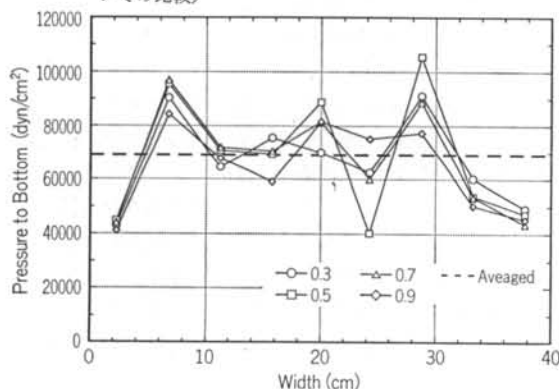


図-9 静置時における底面圧力分布（摩擦係数の違いについての比較）

$f_{max} = 2.05 \times 10^5 \text{ dyn}$: —

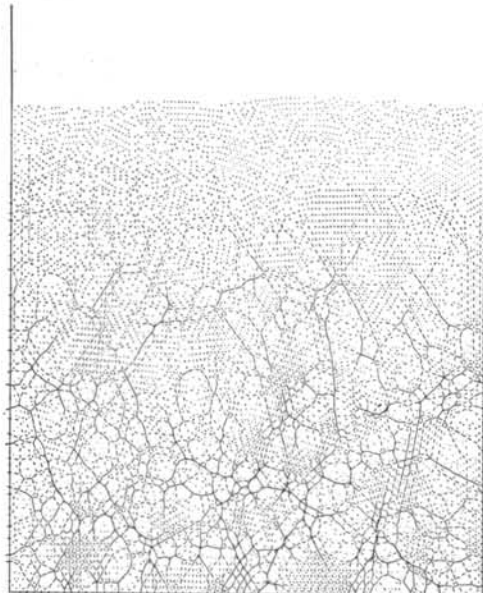


図-10 静置時における粒子間接触力分布（ $\mu=0.5$ の場合）

なわち6mmよりも高さの差は小さい。壁面における接触力の分布に関しては、摩擦係数の大きいケースでは壁面に垂直な方向だけでなく、せん断方向の力もかなり働いているため、係数の小さい場合と少し異っているものと考えられる。しかし、図の左上に示した最大接触力の値は4ケースであまり差が見られず、最大接触力が発生している底面では摩擦係数による差は比較的小さいものと推測される。

側壁および底面に加わる荷重を4~5cm毎に合計し、単位長さ当たりの圧力を求めたのが、図-8の側壁部の水平圧力分布と図-9の底面の垂直圧力分布である。これを見ると側壁、底面のいずれの場合も、摩擦係数の変化による顕著な差あるいは変化の様子は見られず、どのケースも同じような圧力分布の傾向を示している。この圧力の大きさの妥当性を示すために、図-9に破線で示した全粒子の重量に対する平均圧力 69272 dyn/cm^2 と比較すると、各ケースとも平均的に見ればそれに近い値を示しており、全体としての釣り合いは満足されているとともに底面圧力としてもほぼ妥当な値と考えられる。側壁下部の圧力を底面平均圧力と比較すると側圧比0.4~0.6程度となっているが、摩擦係数から求めた Rankine 土圧係数はそれぞれ0.3, 0.5, 0.7, 0.9に対して0.55, 0.38, 0.27, 0.20であり、図-8には0.3の場合の Rankine 土圧のみを表示している。これを比較すると、§3の場合と同様に DEM 解析結果の方が全体に大きい圧力となっている。圧力分布から判断すると、どの条件でもほぼ深槽ということになるため Janssen 式と比較すべきであるが、Janssen 式では Rankine 土圧よりも小さい値となることから、全体的に解析結果が大きい値を示していることは摩擦係数による差が小さいこととともに特徴的な結果である。しかし、分布形に関してはサイロ上部の側壁では圧力が三角形分布に従って比較的ばらつかずに増加しており、サイロ下部ではかなり増減が激しいような一定の傾向が見られる。この原因としては、粒子配列のばらつきによる応力集中が考えられ、図-10の粒子間の接触力を示した図（摩擦係数0.5）ではサイロ上部の粒子間接触力は比較的一様に分布しているのに対して、サイロ下部では接触力間の連鎖（偏り）が見られ、分布にばらつきがあることが分かる。これが壁面における応力集中の原因と考えられ、今回の解析で設定したような粒径（サイロの大きさに対する相対的なもの）では、ランダム配置されることによってかなり極端な応力集中が生じ、特に境界に挟まれているような領域ほど力の偏りが大きいことが分かった。

4.3 粒子配列の影響に関する検討

前節で述べたように、今回の解析条件においては静置時壁面圧力に対する摩擦係数の影響はあまり見られず、粒子配列の影響による接触力の偏在が全体的な応力集中

を引き起こしているものと考えられる。そこで、他の条件をすべて同一とし、粒子配列だけを少し変化させたモデルを比較することによって、粒子配列の壁面圧力に及ぼす影響について検討することとした。

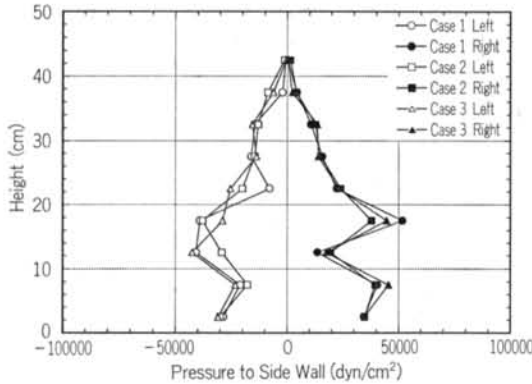


図-11 静置時における側壁部圧力分布（粒子配列の違いについての比較）

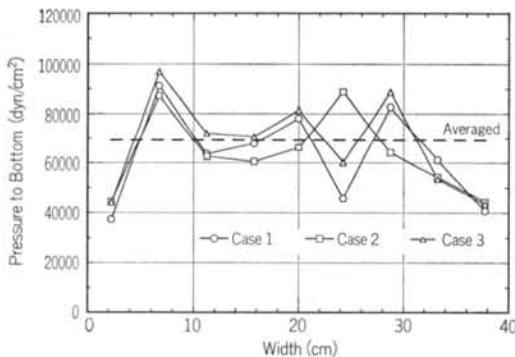


図-12 静置時における底面圧力分布（粒子配列の違いについての比較）

解析条件は先の解析の摩擦係数0.7の場合と同様とし、自由落下前の粒子間隔等を少し変化させて2ケースの解析を実施した。側壁の水平圧力分布と底面の垂直圧力分布を図-11、図-12に示す。極端に大きな差は見られないが、局所的にはかなりの差が生じており、図-8、図-9のばらつきと比較してみると、摩擦係数の違いと同程度の影響が現われているものと考えられる。図-13に示した粒子間接触力の図を見ると、3ケースで分布にさほど極端な差は見られないが、接触力連鎖の状態が微妙に異なっており、これが全体的な解析結果の差になっている。また、接触力の最大値は各ケースで異なり、当初の配置であるCase 1の場合には他の2ケースよりも図-10に示した0.5の場合に近い値となっており、分布についてもそれに近いと判断される。

このように、粒子配列の影響がかなり大きいと推測されたことから、構造欠陥のない規則的な配列のモデルを解析することによりランダムな配列のときとの違いを検討することとし、水平方向に54/55個の要素を千鳥に配置したモデルで解析を実施した。結果を図-14～図-17に示す。

ランダムな配列の結果と比較すると、全体に接触力の分布が一様になっており、局所的な応力集中は見られない。壁面圧力の分布性状としては、全体的にはランダムな場合と近い傾向を示しているが、分布の凹凸は小さい。また、接触力の最大値も他のケースに比較してかなり小さくなっており、応力集中の原因が構造欠陥あるい

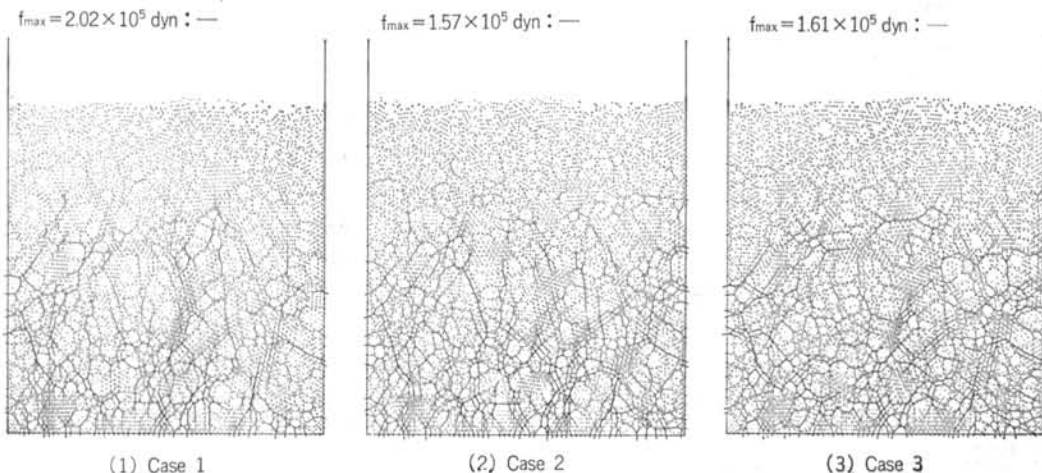


図-13 静置時における粒子間接触力分布（粒子配列の違いについての比較）

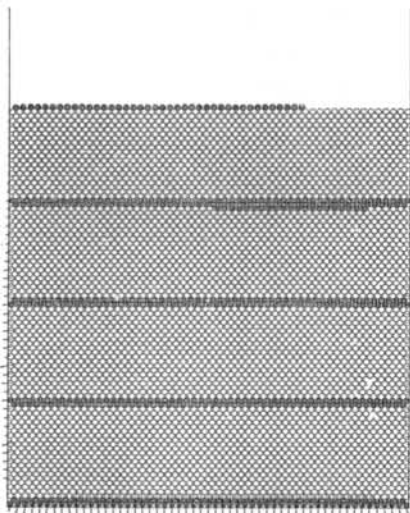
は粒子配列の偏りであることを示している。

ただし、実際のサイロにおいては粒径がサイロの規模から見て無視できる程度に小さいため、このような粒子配列の影響は今回の解析ほどは生じないことが予想され、DEM をサイロ等の実問題に適用していくためには、粒子配列の影響による応力集中を排除あるいは制御することが必要と考えられる。

4.4 粒径の影響に関する検討

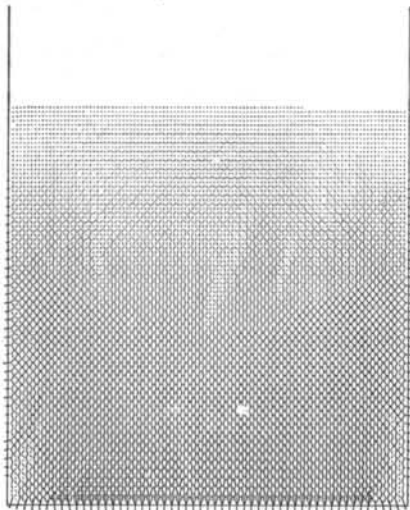
前節での検討により、DEM 解析で求める壁面内圧は

$$f_{\max} = 7.57 \times 10^4 \text{ dyn} : \text{---}$$



図一14 静置時における粒子配列と壁面荷重（規則的配置の場合）

$$f_{\max} = 7.57 \times 10^4 \text{ dyn} : \text{---}$$



図一15 静置時における粒子間接触力分布（規則的配置の場合）

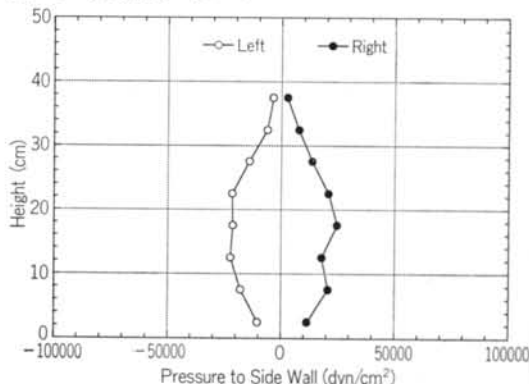
粒子配列によりかなり変化することが分かったが、実サイロの問題と比較した場合にサイロの寸法と粒状体の粒径の比はかなりの差があり、この違いが壁面圧力分布に影響を与えるているものと考えられる。この粒径による差の影響を把握するために次のような解析を実施し、これまでの解析結果と比較した。

解析条件は、前節で粒子配列の影響を比較した場合のモデルと同じものとし、粒径を 4 mm と小さくしてほぼ同程度の堆積高さとするため要素数 10000 個のモデルとした。解析方法はこれまでのものと同様である。ただし、時間増分および比例減衰定数は質量の影響を受けるため $2 \times 10^{-5} \text{ sec}$ と小さく設定した（表一3 参照）。

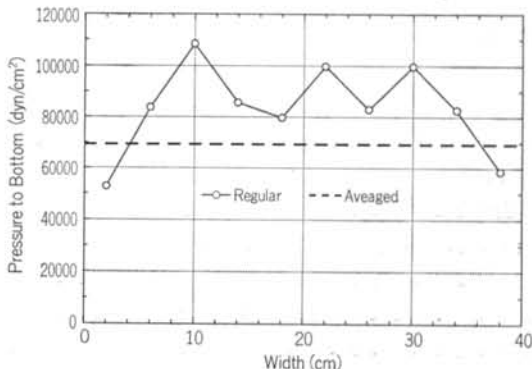
解析結果のうち、粒子配列と壁面接触力を図一18に示す。前節までの結果に比べて、1 粒子当たりの容積的に

入力物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	dyn/cm	1.0×10^7
せん断バネ定数	k_s	dyn/cm	1.0×10^7
比例減衰定数	β	sec	2.0×10^{-5}
摩擦係数	μ		0.7
単位体積重量	γ	g/cm ³	2.0

表一3 入力物性パラメータ



図一16 静置時における側壁部圧力分布（規則的配置の場合）



図一17 静置時における底面圧力分布（規則的配置の場合）

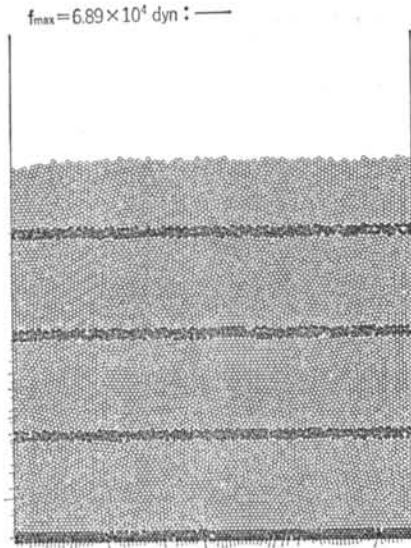


図-18 静置時における粒子配列と壁面荷重 (粒径 4 mm, 要素数 10000 個の場合)

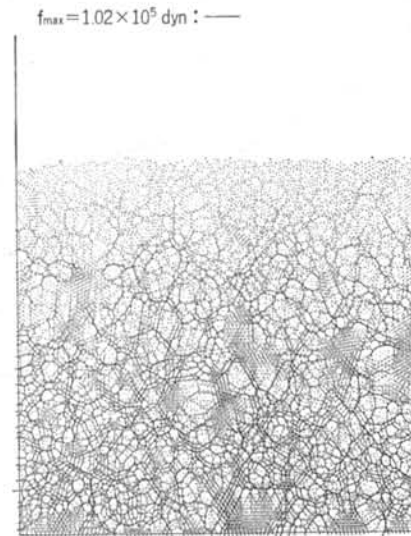


図-19 静置時における粒子間接触力分布 (粒径 4 mm, 要素数 10000 個の場合)

は 4/9 倍となっているため、粒子数は 2 倍になっているが堆積高さは少し低くなっており、壁面圧力も小さくなっている。

図-19 に示した粒子間接触力分布を 6 mm 径の場合と比較すると、力の連鎖が現われていて局所的な応力集中が見られるのは同様であるが、当然その連鎖の大きさが小さくなっているため、全体的なスケールから見れば一様分布に近くなってきているものと考えられ、接触力の最大値も少し小さくなっている。

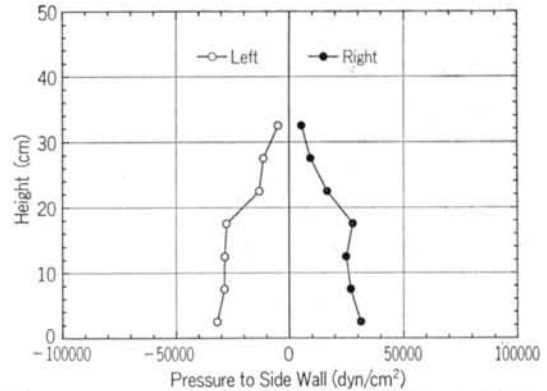


図-20 静置時における側壁部圧力分布 (粒径 4 mm, 要素数 10000 個の場合)

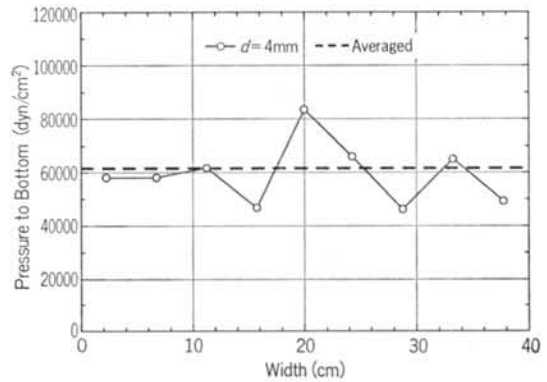


図-21 静置時における底面圧力分布 (粒径 4 mm, 要素数 10000 個の場合)

粒 径	4 mm	6 mm		
		Case 1	Case 2	Case 3
平均値	59439	63112	63553	67918
分散	11754	19015	15915	19089
理論値	61575		69272	

(単位: dyn/cm²)

表-4 底面圧力の平均値と分散

側壁部および底面の圧力分布を 図-20, 21 に示す。粒径 6 mm のランダム配置の結果と比較すると、側壁部については凹凸の少ない比較的バランスのよい圧力分布となっており、定量的には少し大きい而定性的には Janssen 式で求められる分布に近い形となっている。底面の圧力分布は、このケースでも位置による凹凸が見られるが、これを前節の Case 1~3 と比較して平均値と分散で見たのが表-4 である。この表より、粒径の小さい 4 mm のケースの方が、多少ではあるが位置によるばらつきが小さくなっていることが分かる。

4.5 まとめ

DEM 解析を用いてサイロの静置時の挙動に関する検

討を行ない、得られた知見およびこの問題を取り扱う場合の課題を以下に示す。

- 1) DEM 解析で得られるサイロ側壁部の圧力分布形状は Janssen 式で得られる形に近いものであるが、粒子間の摩擦係数を内部摩擦角として得られる理論解よりは大きい値をとる。また、摩擦係数による壁面圧力分布の違いは比較的小さく、粒子間の摩擦係数と内部摩擦角の関係についての検討は今後の課題の一つである。
- 2) 粒子配列の解析結果に及ぼす影響は大きく、特に粒径の大きい場合には配列中の欠陥が応力集中の原因となっている。
- 3) 粒径をある程度小さくすることにより、比較的一様な圧力分布などが得られるが、合理的な解析を行なえる範囲で粒径を設定する必要がある。
- 4) 壁面の圧力分布は側壁下部および底面の左右端で低減する傾向があり、これは壁面摩擦による影響と考えられる。この低減が本来サイロに特有の性質であるかどうか、あるいはそれによる他の部分への影響については今後の検討課題である。

§ 5. 払出し時の挙動解析例

サイロ払出し時の粒状体の流動性状あるいは動圧力の変化については、静置時の問題以上に影響を及ぼす要因が多く、その解明には数多くの検討が必要と考えられる。そこで、今回はその第一歩として払出し解析の一例を示し、今後の課題を抽出することとした。

5.1 解析条件

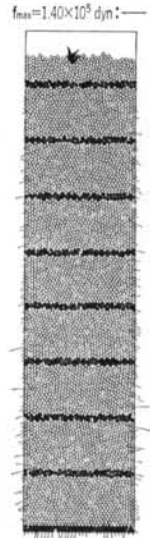
解析モデルとしては、§ 3. の解析の延長ということで模型実験に基づいたものとし、要素数を5000個に増すことによって20cm×90cmの領域をほぼ満すようなものとした。物性は § 3. と同様のものを用いたが、摩擦係数については実験との対応をある程度考慮して0.7を用いた(表一5参照)。解析のステップ数は払出し開始後40000stepとし、実時間で2.0秒間の結果が得られるようなものであり、サイロ内の粒状体の減少状態まで追跡した。解析手順についても § 3. と同様である。

入力物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	dyn/cm	1.0×10^7
せん断バネ定数	k_s	dyn/cm	1.0×10^7
比例減衰定数	β	sec	5.0×10^{-5}
摩擦係数	μ		0.7
単位体積重量	γ	g/cm ³	2.0

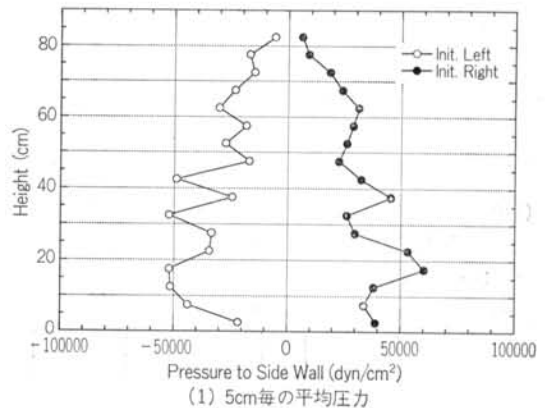
表一5 入力物性パラメータ

5.2 初期解析結果

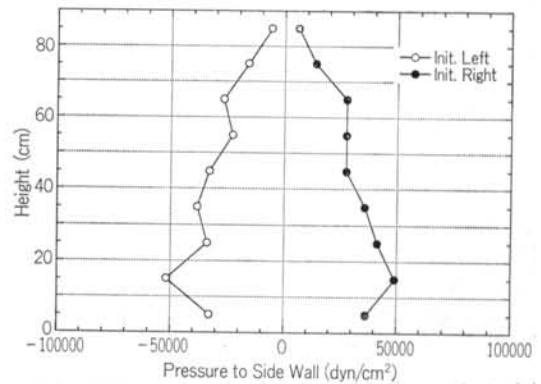
初期堆積状態を図一22に示す。壁面荷重にかなりの凹凸が見られ、前章で示した応力集中の影響が認められる。これを高さ5cmおよび10cm毎に合計し、圧力を求めたのが図一23に示した圧力分布である。いずれも、全体的な傾向としては Janssen 式の分布に従ったものとなっているが、5cmの場合に比べて10cmでは分布形に凹凸が少なく、比較的バランスの良いものとなっている。これは、局所的な影響が平均化することにより減少し、合理的な分布が得られる可能性を示唆しており、前章で示した課題の解決策の一つの方向性を示すものと考えられる。



図一22 初期堆積状態における粒子配列と壁面荷重



(1) 5cm毎の平均圧力



(2) 10cm毎の平均圧力

図一23 初期堆積状態における側壁部圧力分布

5.3 払出し解析結果

解析結果を図-24および図-25に示す。これらの図では、0.25秒毎の払出し過程を2秒後まで示しているが、0.5秒後の粒子配列を見ると模型実験で示された結果と対応したものとなっている。縞模様の動きのうち、サイロ上部の様に移動する部分を見ると、端部で壁面摩擦の影響と思われるずれが見られる。これに対して、実験結果では壁面の影響を受ける領域が狭くなっており、これは粒径の差がはっきり表われたもので、解析の方では3段目の縞がオリフィスに達する時点には下部の状態にもかなりの影響が現われている。ただし、下部の状態の

f_{max} : -

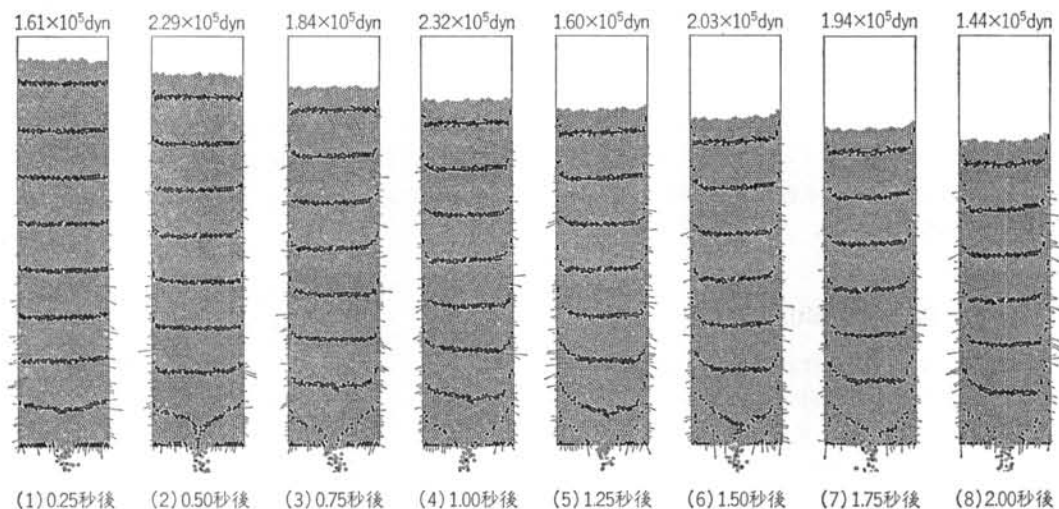


図-24 払出し時における粒子配列と壁面荷重の変化

v_{max} : →

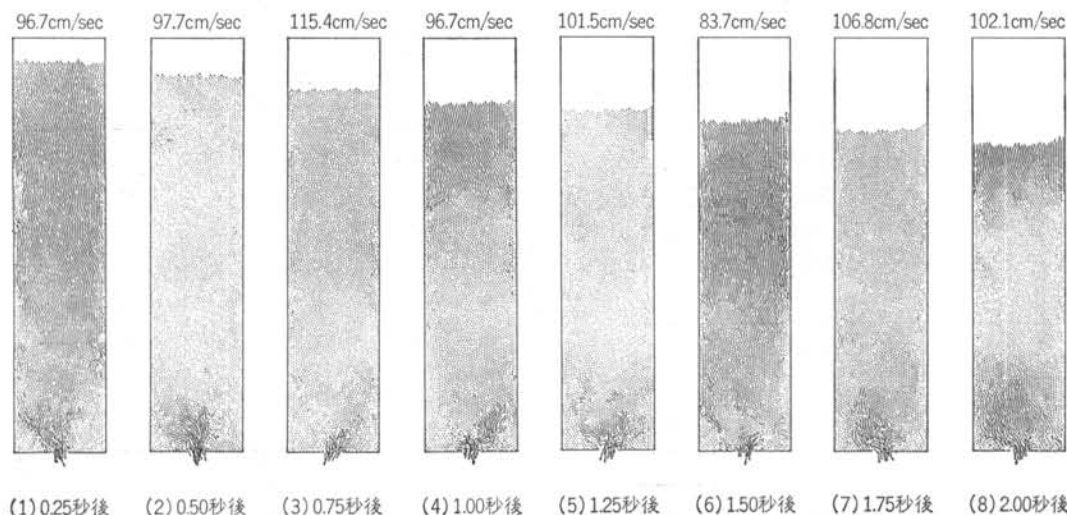


図-25 払出し時における粒子速度の変化

差についてはオリフィスの大きさの違いもかなり影響しているものと考えられる。

速度分布は、オリフィス上部ではオリフィス方向に卓越しており、サイロ下部の左右端では速度が小さく、上部では鉛直方向の速度が卓越したような§3.の摩擦係数0.9の場合に近い結果で、これはある程度実験結果に対応したものである。

サイロ上部の速度に関しては、時刻毎にあるいは上下間で増減が顕著に見られることから、払出し時の内部の速度変化に着目し、いくつかの要素について時刻歴の変化を示したのが図-26である。選んだ要素は、初期状態

でサイロのセンターラインに沿って約20cm(717), 40cm(2370), 60cm(3565), 80cm(4506)の高さのものである。X(水平)方向の速度に関しては下部の要素の方が時刻歴変化が大きく、Y(鉛直)方向に関しては上部の要素の方が変化が大きいような傾向が見られる。これは、下部ではオリフィスまわりの滑りに伴う速度変化が影響しており、上部では払出しによる粒子の全体的な下方へ移動が影響しているものと考えられる。また、Y方向の速度は規則的な波形となっており、特に払出し初期には速度が下部の要素から順に上部の要素へ伝わり増幅している様子が認められる。これらのことより、払出し時にサイロ内部の粒状体はある程度の周期で降下と停止を繰り返しながら排出されているものと考えられ、このことは払出し時に側壁下部あるいは底面にアーチが形成され、その形成と崩壊の繰り返しにより圧力変動が生じるという従来の経験的な見解と一致し、粒子速度の周期が側壁荷重の増幅に関与していることが予想される。

側壁部の動圧力の変化について、0.5秒毎に示したのが図-27である。これは10cm毎に平均化したものであるが、上部に比べて下部での変化が大きく、特に下から10

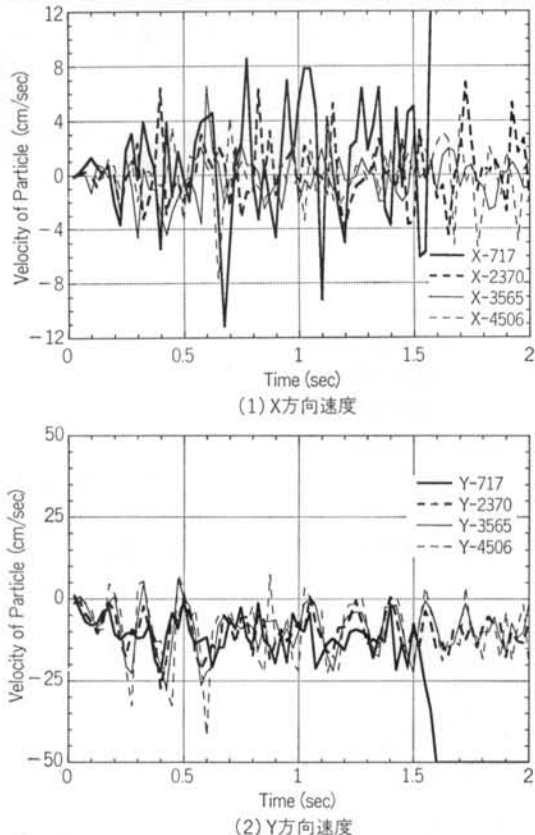


図-26 払出し時における粒子速度の時刻歴変化

~30cmの位置での圧力変化が顕著である。初期状態からの増幅率では、左側壁下部で2.5倍程度となっているのが最大であり、§3の結果と同様に従来のものと比べて小さい増幅率となっている。これは、局所的な荷重増加で見ればもう少し大きなものとなるが、先に述べたような粒径の問題などがあるため、いちがいに平均化する幅を小さくすればよいものではなく、解析の合理性の問題もあるため今後の大きな課題となる。

この変化の大きかった側壁下部(高さ20~30cm)の圧力の時刻歴変化を示したのが図-28である。ここでは左右側壁の圧力の絶対値を表示しているが、左右の圧力の増減周期は若干のずれがあるものの比較的よい一致を示しており、また最大値あるいは最小値の値も近いものとなっている。ただし、最大値の発生時刻はかなり異なり、左側壁で0.5秒付近で最大となっているのに対して、右では1.5秒過ぎに最大値が現われている。また、一方の壁で最大となっているときには、他方の値はピークとはなるものの小さくなっている。

この圧力の変化を速度変化と比較すると、その増減の周期はY方向の粒子速度と全く一致しており、先に述べた粒子速度と壁面圧力の関係が証明された形となってい

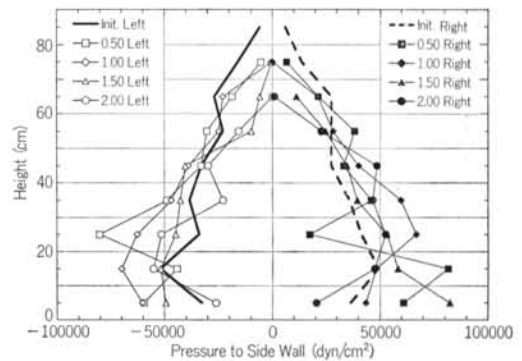


図-27 払出し時における側壁部圧力分布の変化(0.5秒毎)

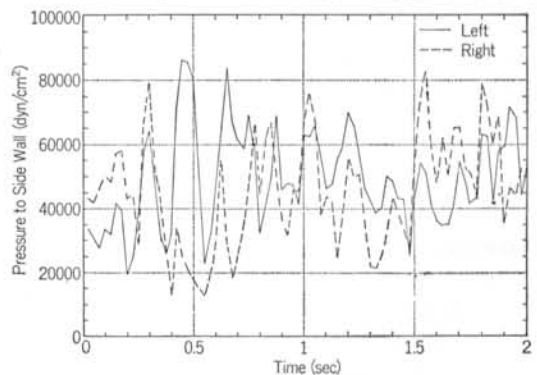


図-28 払出し時における側壁下部の圧力時刻歴変化

る。そして、その傾向としては粒子速度が零か正、すなわち静止状態か上向きを持ったときに壁面に大きな圧力が生じており、アーチ作用による粒子移動の停止のような挙動が考えられ、杭のネガティブフリクションのような効果がサイロ内壁に大きな動圧力を発生させていることが予想される。ただし、その周期は比較的一定しており、このような挙動の原因を明確に把握することにより、払出し時動圧力の制御が可能になるものと考えられる。

5.4 まとめ

模型実験に基づいた払出し解析を実施し、以下のようない知見および今後の検討課題を得た。

- 1) 解析初期の粒子配列の変化および粒子速度の分布は実験結果と対応しているものと考えられ、DEM 解析のサイロ問題における有用性を示すものである。
- 2) 解析結果は払出し初期には実験とよく対応しているが、解析が進むにつれ壁面摩擦の影響範囲が広がり、挙動に差が生じる。今後、少なくとも壁面圧力の最大値が発生するまでは実験に対応した結果が得られるような解析が必要と考えられる。
- 3) 側壁部の圧力変化は粒子速度の変化に対応しており、粒子速度が上向きとなるときに壁面圧力の最大値が発生する。また、粒子の移動と停止を繰り返すような挙動はアーチの形成と崩壊に対応するものと考えられる。
- 4) 壁面圧力の応力集中等に関しては、平均化することによりある程度の改善が見られるため、今後適切な圧力算出法を設定することにより DEM 解析は実用的なものになると考えられる。

§ 6. おわりに

サイロ内粒状体の複雑なメカニズムに従う挙動は連続体理論での説明ができないため、従来解析的な取り扱い

があまりなされなかった。本報告では、この問題に対して不連続体に適した数値解析手法である個別要素法を適用することにより、サイロ内粒状体の挙動を解析的に取り扱える可能性の高いことを示した。また、個別要素法を用いて静置時におけるサイロ内の圧力分布等について検討し、幾つかの知見を得るとともに個別要素法を用いてサイロ問題を取り扱う際の課題を抽出した。さらに、払出し時の挙動に関しても模型実験をシミュレートしたモデルに対して解析例を示し、側壁部の動圧力変化の傾向について検討し、今後の問題点を明らかにした。

個別要素法のサイロ問題への適用に当たっては解決すべき課題が多いが、この問題の今後の方向性について以下に示すこととする。

(1) 個別要素法のパラメータと従来の実験・観測等で得られる物性との対比を行ない、パラメータの合理的な設定法を確立する。

(2) 実問題への適用において、実際の粒子を1個1個要素としてモデル作成することが可能であれば、それが最も現実を反映した結果を与えるものと考えられるが、現状の計算機能力を考えた場合にそれはほとんど不可能であり、その差は物性パラメータにより考慮することが必要と考える。

(3) 解析結果を設計に反映させることを考えた場合に最も必要とされることは、払出し時の最大圧力の静置時に対する増加の割合とその発生位置であると考えられ、それに影響を及ぼす因子を抽出し予測を可能とすること、あるいはどの因子を変えることにより増加を低減することができるかを検討することが重要である。

(4) 個別要素法による解析結果に基づき、その傾向を表現できるような他の簡易な解析手法あるいは計算手法を検討し、設計の合理化へとつなげることが必要である。

最後に、実現象と現状の DEM 解析の間には三次元性の問題あるいは壁面のモデル化の問題など、本報告では述べなかった大きな課題が残されているが、今後の解法の改良および計算機の進歩等により、将来的にはかなりの部分までの解析が可能になるものとする。

<参考文献>

- 1) “建築構造ハンドブック：第9章特殊構造物，9.3サイロ及びバンカー” 建設産業調査会（1978年）pp. 735～754
- 2) 杉田稔，三谷勝之，磯畑脩，高橋和男：“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 第10号（1967年）pp. 79～92
- 3) 杉田稔，三谷勝之，磯畑脩，高橋和男：“サイロ壁体に加わる粉体の抽出時圧力変動について” 清水建設研究所報 第13号（1969年）pp. 75～90

- 4) 木山英郎, 藤村尚: "カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力の流動解析" 土木学会論文報告集 第333号 (1983年) pp. 137~146
- 5) 伯野元彦, 山本直: "個別要素法による埋設管大変形挙動解析" 第45回土木学会年次学術講演会講演概要集 第三部 (1990年) pp. 20~21
- 6) K. Meguro, K. Iwashita, and M. Hakuno: "Fracture Tests of Masonry Concrete Elements by Granular Assembly Simulation" Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.6 (1988) pp. 181~186
- 7) P.A. Cundall: "The Measurement and Analysis of Accelerations in Rock Slopes" Ph.D. Thesis, Imperial College, London (1971)
- 8) J.V. Lemos, R.D. Hart and P.A. Cundall: "A Generalized Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock Mass" Proceedings of Symposium on Fundamentals of Rock Joints (1985) pp. 335~343
- 9) P.A. Cundall: "Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model, Part I: a Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks" International J. of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 25, No.3 (1988) pp. 107~116
- 10) R.D. Hart, P.A. Cundall and J.V. Lemos: "Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model, Part II: Mechanical Calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks" International J. of Rock Mechanics & Mining Science, Vol.25, No.3 (1988) pp. 117~125
- 11) Y. Ohnishi, T. Mimuro, N. Takewaki, and J. Yoshida: "Verification of Input Parameters for Distinct Element Analysis of Jointed Rock Mass" Proceedings of Symposium on Fundamentals of Rock Joints (1985) pp. 205~214
- 12) 吉田順: "個別要素法における力の伝達に関する一考察" 第45回土木学会年次学術講演会講演概要集 第三部 (1990年) pp. 904~905
- 13) 吉田順: "個別要素法によるサイロの払出し時の挙動に関する検討" 第15回土木情報システムシンポジウム講演集 (1990年) pp. 35~38

