

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

清水建設大崎研究室 正員 吉田 順

1. はじめに

個別要素法(以下DEMと略す)は不連続体を取り扱うことのできる手法であり、アルゴリズムも比較的簡単で合理的な数値解析手法として注目されている。この手法は不連続性岩盤の安定解析や砂質土などの粒状体解析など通常は土質材料の解析によく用いられており、その特徴の一つとして要素の形状が比較的自由なことから、多角形、円あるいは楕円などのさまざまな形の要素が用いられる。今回の検討では等粒径の円要素を用いたDEM解析によりサイロの払出し挙動のシミュレーションを行い、従来解析的にはあまり取り扱われていなかったサイロ内の粒状体の挙動に関する定性的な傾向を明らかにすることを目的としている。このDEMのサイロの挙動への適用は木山ら¹⁾によりある程度追跡可能であることが報告されているが、そのモデルは粒子を規則正しく配置したものであり、要素数も少ないため基本的な挙動を確認するようなものであった。

今回はより現実的な挙動の再現性を確認することを目的として、過去に行われたサイロのモデル実験²⁾と同じスケールで、ランダムな配置の多要素(3000要素)モデルを用いて検討した。

2. 解析条件および方法

杉田により行われたモデル実験は幅20cm×高さ90cmの半円筒のサイロモデル中にガラスビーズ(最大粒径250 μ)を詰めただけのものであり、そのまま再現するには100万個以上の粒子数が必要となるが、今回の解析では計算機能力の制限からその粒径あるいは粒子数をそのまま再現することは不可能であり、粒径をかなり大きくせざるを得なかった。そこで、サイロ全体の大きさは

20cm×90cmと実験と同じにし、粒径を6mmとして自由落下による堆積解析を行ったところ粒子数3000個で深さ約50cmとなった。開口部(オリフィス)の大きさについては実験では6mm, 12mmの2種類であったが、解析では複数個の粒子が通過できるようにオリフィスを4cmとした。材料定数は表-1のように定めた。この値はある程度現実的ではあるが、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い。摩擦係数については当初より挙動に及ぼす影響がもっとも大きいものと判断されたため、顕著な差が現れるように極端な差を持つ値(0.1, 0.5, 0.9)を設定した。

解析の手順は、領域(20cm×90cm)内に要素中心をランダムに発生させ、それを自由落下させることにより初期堆積状態を作り、その後オリフィス部分の境界を取り除いて払出し解析を行うものである。初期解析では摩擦係数0.5の状態ですべて500要素ずつ徐々に堆積させ、3000要素のモデルとなった段階で、0.1, 0.5, 0.9のそれぞれの摩擦係数でさらに5000stepの解析を行った。したがって、最初からそれぞれの摩擦係数で静止状態を作り上げた場合に比べると摩擦係数による差が少ないものと考えられる。また、払出し解析は10000step実施したが、両解析とも1step当たりの時間増分は 5×10^{-5} secであり、払出し解析の実時間は0.5secである。

3. 初期解析結果

前章に示した方法により作成した初期堆積状態を図-1に示す。(a)~(c)はそれぞれ摩擦係数0.1, 0.5, 0.9に対応するが、図中の粒子配列の縞模様は深さ10cm毎に示されたもので払出し解析の時に粒子の挙動をわかりやすくするためのものである。また、ヒゲのような線は壁面と個々の粒子間の接触力を示している。

表-1 入力物性

入力物性	記号	単位	数値
単位体積重量	γ	g/cm ³	2.0
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
摩擦係数	μ		0.1, 0.5, 0.9
比例減衰係数	β	sec	5.0×10^{-5}

摩擦係数の差による堆積状態の違いを見ると、0.1と他の2ケースでは堆積高さが異なり、接触力の分布にもかなり差が見られることがわかる。これは前述のように3000個のモデルとなりある程度挙動が落ち着くまで摩擦係数0.5で解析したのちに0.1, 0.9に変化させているので、0.5より係数の大きい0.9では0.5の状態安定な粒子間あるいは壁面での接触力はそのまま保存されることとなるのに対して、0.1では新たな滑り等が生じるため0.5の状態からの変化が生じる。したがって、今回作成した初期堆積状態は0.1, 0.5の場合にはその係数を反映したものと言えるが、0.9の状態は少し違ったものと考えなければならない。

側壁での荷重分布をわかりやすくするために、深さ10cm毎の接触力を合計して示したのが図-2である。この図からも0.5, 0.9にはあまり差がなく、0.1の場合に下部でかなり大きい荷重を示していることがわかるが、この荷重分布をランキン土圧と比較したとき、平均的に見ると0.1ではある程度荷重レベルが一致しているが、0.5および0.9では解析結果の方が大きい値を示していることがわかる。また、分布形状はJanssen式で示されるような下部で一定となるような傾向が見られ、最下部ではかえって減少している。これらの傾向は壁面摩擦により生ずる上下方向の力の影響ではないかと推測される。

— : $1.5 \times 10^5 \text{dyn}$

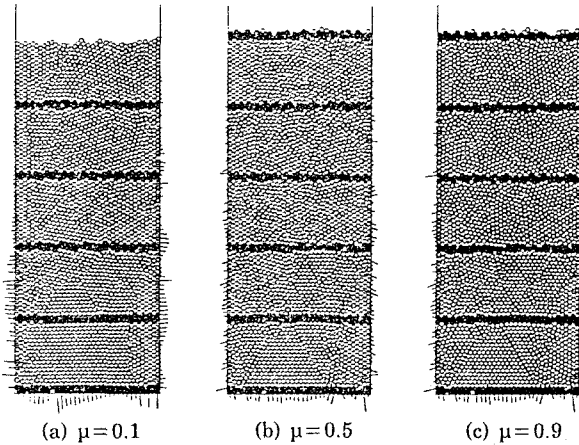


図-1 初期堆積状態

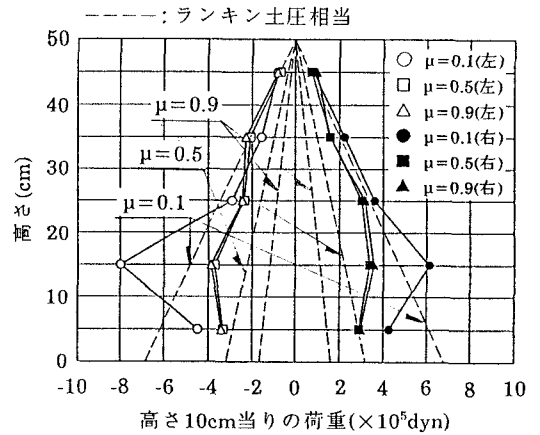


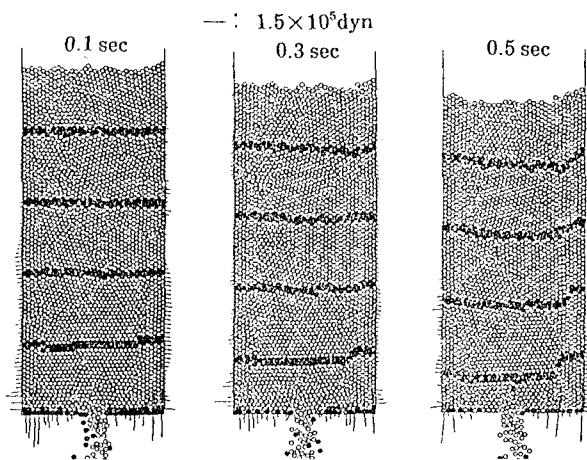
図-2 初期の側壁部荷重分布

4. 抽出解析結果

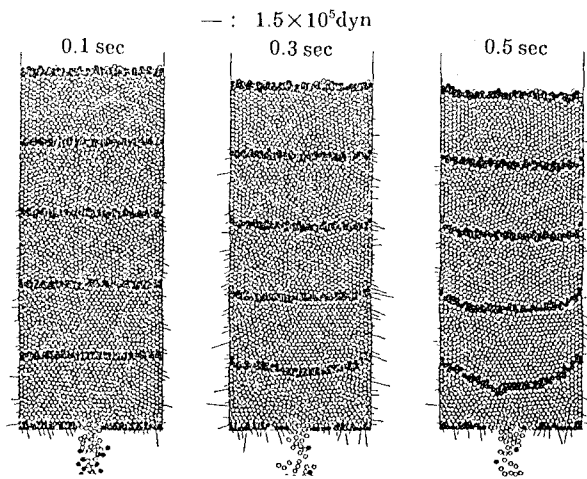
図-3および図-4に解析結果(0.1, 0.3, 0.5秒後)を示す。図-3は図-1と同様粒子配列と壁面の接触力を、図-4は個々の粒子の速度を表しており、これらの図より抽出に伴う時刻歴の変化状態がわかる。

摩擦係数の違いによる挙動の特徴を見ると、0.1の場合には抽出初期よりオリフィスの両サイドから流入が見られ、粒子の動きはサイロ全体に及んでおり、ほとんど全ての粒子が何らかの動きを見せているようである。これに対して0.9の場合には抽出初期にはオリフィス直上部の粒子だけが移動し、その後欠落した部分に対してその周辺の領域から粒子が移動してくるような挙動であり、オリフィス両サイドのサイロ下部ではあまり粒子の移動が見られない。また、上部の粒子の移動は0.1, 0.9の両ケースとも垂直に落下する傾向が見られ、この両ケースと比較すると0.5のケースはその中間にあることがわかる。これらの結果を杉田が実験より示した抽出時の挙動と比較すると0.9のケースが実験と同じような傾向を示している。

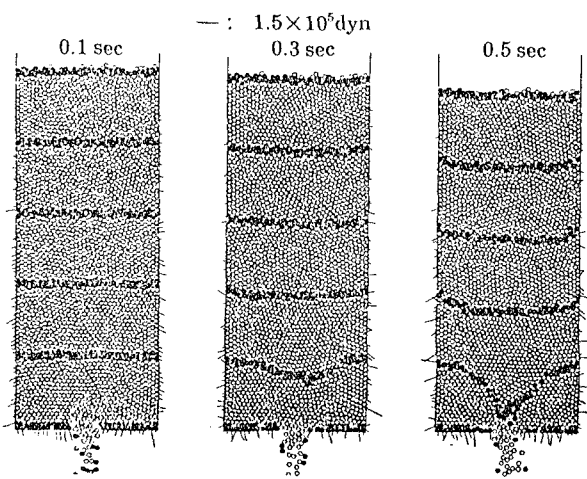
次に、各ケース毎の側壁荷重分布の変化(図-5参照)を見ると、0.5の場合が増加が大きく、右側壁の下方10~20cmの位置で初期状態に比べて2倍弱の荷重となっている。これは一般言われる静止時の数倍以上の動圧力よりはかなり小さなものである。荷重が小さいことの一因としては局所的にはもう少し大きな変化が見られるが荷重を見る時にかなり幅を大きくとって平均化していることが考えられる。また、荷重の時間的な変化が0.1および0.5の場合には初期に増加し、0.5秒ではすでに減少しているのに対し、0.9の場合には初期にあまり



(a) $\mu = 0.1$

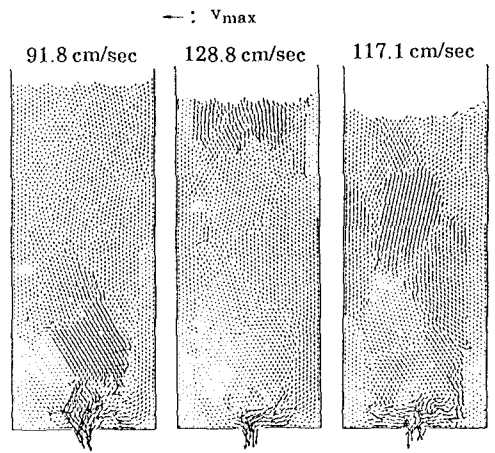


(b) $\mu = 0.5$

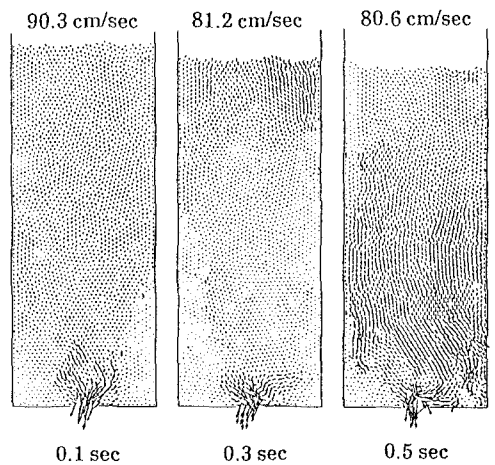


(c) $\mu = 0.9$

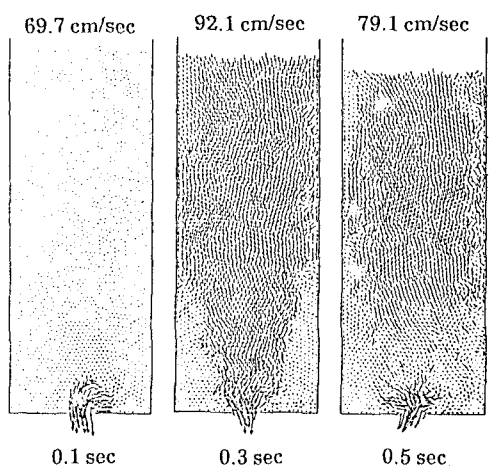
図-3 払出し時の粒子配列



(a) $\mu = 0.1$



(b) $\mu = 0.5$



(c) $\mu = 0.9$

図-4 払出し時の粒子速度

変化が見られず、下部では0.5秒に最大値が見られており、摩擦係数が大きいほど変化が遅くなっていることがわかる。これは粒子の移動速度が遅いこととも一致しており、このことから0.9の場合にはさらに大きな荷重が発生することも考えられるが、10000stepまでの結果からはあまり大きな変化はないものと予想される。

また、各ケースで上部の粒子速度を見ると粒子が一様に落下しているのではなく、断続的に静止と移動を繰り返しているような傾向が見られ、配列を保ったまま落下している場合にも定常的に移動するのではなく、速度にかなりの変化があることが分かる。これが壁面荷重に大きな影響を与えるものと考えられるが、今回の解析では粒子速度と壁面荷重の変化の間に一定の関係は見出せなかった。

5. まとめ

DEMのサイロ問題への適用性を確認するために、DEMによるサイロの払出し挙動解析を行い、以下のような知見が得られた。

- 1) DEMによる解析結果とモデル実験の結果を比較すると摩擦係数0.9の場合が比較的好い対応を示しており、摩擦係数の小さい場合にはかなり異なる挙動が得られた。
- 2) 払出し時の側壁に加わる動圧力の増加は比較的小さく、最大でも静止時の2倍弱であった。また、その変化速度は摩擦係数が大きいほど遅いことがわかった。

今回の検討では、定性的な検討を少ないケースについて行うに止まったが、今後ケース数を増やすとともに実規模のサイロについても検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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流動の解析, 土木学会論文報告集第333号, 1983, pp.137~146
- 2) 杉田稔: サイロ壁体に加わる粒体の抽出時圧力分布と流動パターンについて, 日本建築学会大会学術講演概要集, 1969, pp.745~746

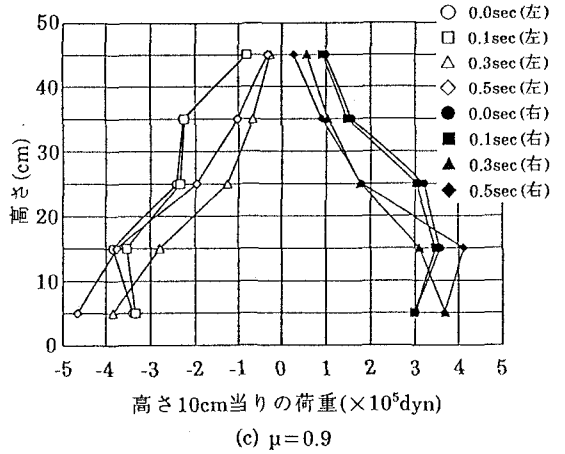
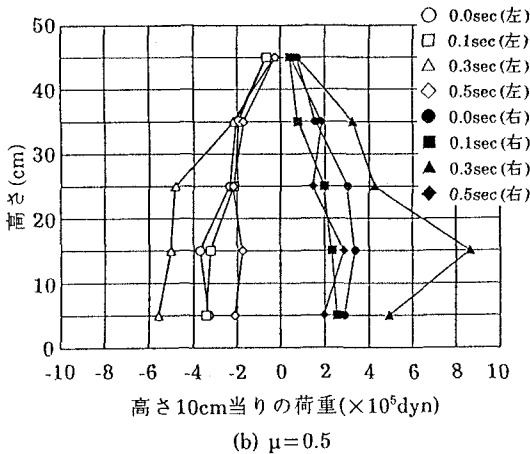
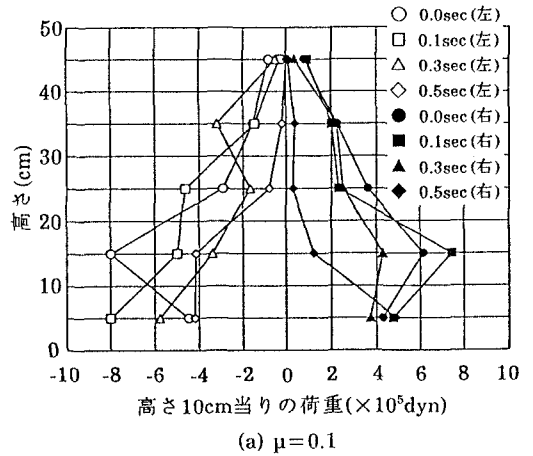


図-5 払出し時の側壁部荷重分布