個別要素法による容器内粉粒体の 力学的挙動に関する研究

吉 田 順*

Jun YOSHIDA

1. 研究を始めた動機

元来、著者が個別要素法 (DEM) と係るきっかけは岩盤斜面あるいは空洞の崩壊問題であり、本論文で示した容器内粉粒体の問題とはかけ離れたものでした。土木をバックグラウンドとする著者が粉体関係の研究を始めることになったのは、DEM のサイロ問題への適用性を清水建設㈱・杉田稔室長より示唆していただいたことです。その後、サイロ問題への適用性を検討する過程において、粉体工学に関する手ほどきそして本研究のご指導を頂いたのが京都大学・増田弘昭教授で、本論文のタイトルの容器内粉粒体の各種の挙動に対する DEM の適用性を検討することとなりました。

2. 研究遂行上感じたこと

本研究を遂行するにあたり最も強く感じたことは実証性という問題であり、解析的研究を主としているものにとっては最も重要な点ではないかと考えます。著者も学生時代に携った研究においては実験的研究を主体としていたため、条件あるいは設定に間違い (誤差) があつたとしても出てきた結果は事実であり、基本的にその事実をどのように解釈するかということが問題でした。ところが、数値解析を用いた研究を行う場合に出てくる結果はどのような正しい仮定や条件を設定しても模倣 (シミュレーション) あるいは仮構 (フィクション) であり、いかにしてそれが事実と同じあるいは近いものであるかを実証することが必要です。ただし、近年のコンピュータの進歩は画期的なものであり、10 年前と比べると速度で 1000 倍、価格で 1/100、寸法で 1/10 程度になっています (私見)。し

たがって、実証さえできれば、シミュレーションは有力な武器となるところまでやってきており、今後も数値シミュレーションの役割はさらに大きくなるものと期待しています。

3. 研究の内容

3.1 個別要素法

DEM の基本概念を示すとともに、モデル作成方法、入力物性の評価、解析結果の表示方法などを示している。一例として、接触力について基準線を用いて応力を求める方法を提案し、鉛直応力が適切に評価されることを示した。また、DEM の入力パラメータについて、垂直ばね定数はヤング率と同様に弾性波速度の 2 乗に比例すること、せん断／垂直ばね定数の比が解の収束性に与える影響が大きく 0.3 以下程度に設定した場合に収束性がよいことなどを示した。

3.2 貯槽内の圧力分布

貯槽内粉粒体の静置時の圧力分布について、2 次元モデルを用いてパラメータスタディを行い、Janssen 式等と比較した。得られた粉粒体の圧力分布は、Janssen 式にほぼ対応しており、解析結果および提案した応力の評価方法が妥当であることを示した。Janssen 式の適用において、入力条件から推定した分布はずれが大きかったのに対し、解析結果から算定した圧力分布は妥当であり、Janssen 式の仮定が成り立つ場合には分布形状も一致した (Fig. 1 参照)。また、粒子配置、壁面摩擦係数、粒子間摩擦係数、粒径の違いによる貯槽内圧力および側壁圧力への影響について検討し、摩擦係数の影響に関してはある一定値以上では影響が表れないことを示した。

次に、貯槽モデルの排出解析を行ない、貯槽内の粒子挙動および側壁圧力の変動の相関を示した。粒子挙動は、実験等と同様に上部のマス・フローの領域の粒子は脈動現象を示し、その周期と側壁圧力変動の周期は一致しており、排出時の圧力増加には粒子全体の静止が関連し、粒子の再移動が圧力減少に係わっている。貯槽下部の空隙率は排出に伴って増減し、空隙率が小さくなるときに側壁圧力のピークが生じ、アーチ

1997 年 11 月 4 日受付

*清水建設㈱和泉研究室

(〒100 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F)

TEL. 03-3508-8101 内線 264

(著者紹介)

昭和 55 年 3 月京都大学工学部卒、昭和 57 年 3 月大学院修士課程修了、同年 4 月清水建設株式会社入社。同年 10 月同社大崎研究室。

平成 6 年 7 月同社和泉研究室。現在、地圏・環境グループ主任研究員。工学博士。

専門：粉体工学、地盤工学。サイロ内粉粒体の挙動、基礎・地盤の静的挙動について研究している。

Fig. 1 Janssen 分布とDEM 解析結果の例

形成による圧力増加を示した。

また、排出解析において、粒子配置、比例減衰係数、粒径をパラメータとして、解析結果に及ぼす影響について検討した。全体的に、過大な動的圧力を示した場合には偏った流動パターンが見られるのに対し、滑らかな流動を示す場合は、壁圧の変動も小さい。また、圧力変動の周期が長い場合に大きい圧力増加を示すような傾向が見られた。このように、排出時の壁圧変動の原因は杉田らの研究でも示されている粒子流動のパターンの変化にあるものと考えられ、排出による流動を一様かつ滑らかにすることにより、動的圧力の低減を図ることが可能と考えられる。

3. 3 粉粒体の 3 次元挙動

2 次元・3 次元モデルの基本的な違いを把握するために、粒子配置、流動性について簡易な解析例で 3 次元解析が実験に対応するのにに対し、2 次元ではかなり異なる結果となることを示した。また、アーチ形成は 2 次元で 3 次元に比べて容易で、オリフィスの閉塞等が生じやすいこと、貯槽からの排出時に壁圧の脈動現象は 3 次元モデルでも見られ、粒子挙動との関係も確認されたが、2 次元に比べて変動幅は小さく、流動パターンの変化が小さいことを示した。

後藤らによって行われた投入時の粒度偏析現象に関する実験のシミュレーションを試み、全体モデルを用いた 2 次元解析では粒度偏析現象を再現できなかった。部分モデルを用いた 3 次元解析は実験で示された反発層の堆積過程を再現すると共に、粒度偏析の傾向についても一致した結果が得られたが、2 次元モデルでは実験結果に対応した粒径分布は得られなかった。また、反発層形成のメカニズムは実験で観察された粒子の循環によることが確認されるとともに、反発層内に鉛直方向の粒度偏析も見られた。

Ehrichs らによって行われた振動時の対流現象に関する実験のシミュレーションを 3 次元モデルを用いて

Fig. 2 鉛直振動時の対流現象

行い、対流現象のメカニズムを検討し、解析結果は実験結果とよい一致を示すこと、2 次元解析で表現が難しいとされていた小山状の盛り上がりも再現できることを示した (Fig. 2 参照)。対流現象は 1 サイクル毎の粒子層の移動の繰り返しであり、その蓄積として現れる現象であることを示した。対流のメカニズムは、振動方向の変化によって容器内外の粒子挙動の差が見られ、壁面近傍粒子は速く下降するのにに対し、中央部では下降が遅くなるため、底面・側壁近傍の粒子が中心方向に押し出され、外側の粒子が内側に入り込むことにより、対流現象が生じるとともに中央部が盛り上がる小山形成が見られる。このメカニズムは田口の推定したものと対応している。

4. 研究を終えて

今回、論文としてまとめることはできませんでしたが、DEM を用いた解析はまだ実用的なものと断言できる領域までは来ておらず、DEM 研究の発展とともにさらなるコンピュータの高速化・大容量化が期待されます。ただし、最近のコンピュータの発達・展開は急激で、そろそろ中高年域に入ったものとしては徐々にいついけなくなりつつありますが、今後ともできるかぎり頭をリフレッシュさせていきたいと、自分の未来をシミュレーションしきれていない今日この頃です。

(学位取得は 1997 年 5 月、京都大学)