

高松工業高等専門学校（正） 土居正信

岐阜工業高等専門学校（正） 吉村優治

長岡技術科学大学（正） 小川正二

1. まえがき 土の応力・変形解析を行なう場合、有限要素法に代表されるような手法では、本来、粒状集合体である土質材料を連続体として扱っているのが一般的である。一方、不連続性岩盤の崩壊過程を解析するためにCundall¹⁾が開発した個別要素法（Distinct Element Method、以後、DEMと略称する）は、要素を剛体と考え、要素間の接触境界部に発生する接触力、およびそれに起因して生じる要素の変位を時間差分化表示された運動方程式を繰り返し計算することにより個々の要素および要素集合体全体の挙動を求める方法であり、土のような粒状材料の挙動を解析するのに適していると考えられる。

本報告では、上述のDEMを用い、二次元的に配置した円板集合体を一次元圧縮した場合の解析結果について述べている。DEMでは要素間の法線方向接触力を求めるために弾性スプリングを採用しているが、本解析は、その弾性スプリングに若干の修正を加えたものを用いており、従来の弾性スプリングによる解析結果と修正弾性スプリングによる解析結果の比較も行なっている。

2. 解析対象と材料定数 図-1は圧縮開始前の大小2種類47個の円板と4枚の境界壁の配置を示している。大きい円板（17個）の半径および小さい円板（30個）の半径はそれぞれ0.01mおよび0.005mであり、境界壁は鉛直壁、水平壁ともに約0.1mである。計算に必要な材料定数は、表-1にまとめている。 ρ は円板の密度（Kg/m³）、 K_n および K_s は要素間の法線方向および接線方向の弾性スプリング係数（N/m）、 D_n および D_s は同じく法線方向および接線方向の減衰係数（N/sec）であり、境界壁も円板も同じ値を用いている。 β はレイリー減衰係数、 ϕ は円板要素間の摩擦角（度）である。なお、境界壁と円板の摩擦は無いものとし、円板要素個々には鉛直下方に重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ を考慮している。また、表中の k_n' は後述する修正弾性スプリングに必要な係数を表している。

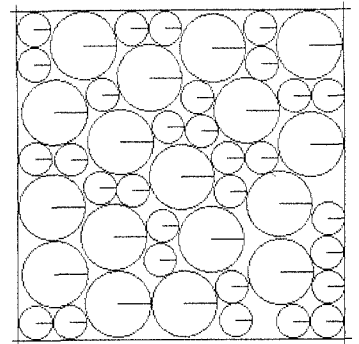


図-1 圧縮前の境界と円板

表-1 材料定数一覧

記号	材 料 定 数
ρ	2700 (Kg/m ³)
K_n	10000000 (N/m)
K_n'	25000000 (N/m)
K_s	2500000 (N/m)
D_n	10000 (N/sec)
D_s	2500 (N/sec)
β	0.001
ϕ	25 (度)

3. DEMの手順と解析結果 DEMはCundall¹⁾によって詳述されているので、ここではその手順について大略を述べることにする。まず、一つの境界壁あるいは円板要素に着目しこれと接触状態にある円板要素との相対速度を求める。次に、時間増分 Δt の間は相対速度が一定として接触状態にある要素間の相対変位を求める。ここまで求めた要素間の相対速度および相対変位とそれぞれ減衰係数および弾性スプリング係数を考慮することによって要素間に作用する接触力とモーメントを計算する。最後に、ニュートンの運動第二法則の時間差分式より各要素に生じる加速度および角加速度を計算して各要素に対する新しい速度および角速度を設定する。以上の手順を繰り返し適用することによって解析が進められる。

上述の手順に従って、図-1に示す系について上部水平境界壁を鉛直方向のみに移動させることによって一次的に圧縮する。他の境界壁は固定させている。ただし、圧縮過程

については一般に行なわれている圧密（圧縮）試験にない載荷－除荷－再載荷－載荷を考えた。上部水平境界壁の移動速度は載荷（鉛直下方）、除荷（鉛直上方）ともに0.01m/sec一定とし、時間増分 Δt は0.00001secとして計算する。従来の弾性スプリングを用いた場合の解析結果を図-2に示す。図示した各点は、載荷および再載荷については5000回の繰り返し計算毎に、除荷については1000回毎に間隙比 e と上部および下部水平境界壁に作用する垂直応力の平均値 p の対数（ $\log_{10} p$ ）の関係を表している。除荷に対する4個の点に注目すると、これらの点は載荷曲線上にあり、再載荷点もこの曲線の延長線上にあり、非線形弾性体的な挙動を示してはいるが、常識的な土質材料の除荷特性を表現できない。すなわち、従来の弾性スプリングでは載荷による塑性変形を考慮できないということになる。

載荷による塑性変形をシミュレートする目的で図-3に示すように、載荷時には弾性スプリング係数が k_n であり除荷時あるいは再載荷時には $k_{n'}$ であるような特性を持つ弾性スプリングが要素間にあると考える。このような修正した弾

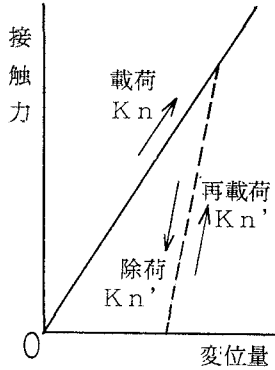


図-3 修正スプリングの概念

性スプリングを用いて前述と同様の解析を行なったところ図-4に示すような結果が得られた。図

2と比較するに、載荷に対応する各点ではほぼ同じような値を示し、似通った載荷曲線を形成しているが、除荷部では載荷による塑性変形が表現されており、再載荷でも除荷曲線上付近の値を取っていることがわかる。したがって、DEMを用いて土の圧縮特性を表現しようとする場合、図-3に示す特性を持つ比較的単純な弾性スプリングであっても効果的である。

4. まとめ 土質材料の圧縮特性を念頭に置き、土を円板集合体としてモデル化し個別要素法を用いて一次元圧縮した場合の数値解析を行ない、載荷－除荷－再載荷といった荷重経路に対する修正弾性スプリングの有効性を示した。除荷時あるいは再載荷時の弾性スプリング係数 $k_{n'}$ と載荷時の k_n との比が解析結果に及ぼす影響、修正弾性スプリングを用いた場合のせん断時における効果等について検討する必要がある。

参考文献 1) Cundall and Strack(1979) A discrete numerical model for granular assemblies.

Geotechnique 29: 47-65

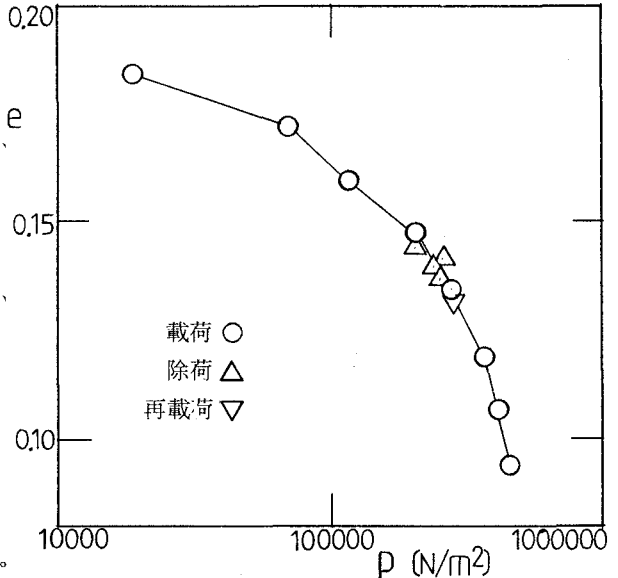


図-2 従来のスプリングによる解析結果($e-\log_{10} p$)

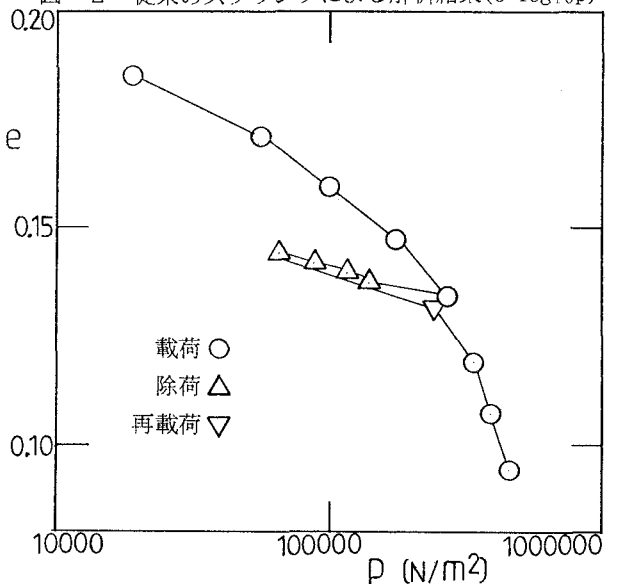


図-4 修正スプリングによる解析結果($e-\log_{10} p$)