

III-564

落し戸実験の数値解析法としてのDEMの適用性と問題点について

日本道路公団 試験研究所

中田雅博, 中野清人

東京都立大学工学部

西村和夫

前田建設工業(株)

森田 篤, 松井幹雄

応用地質(株)川本地盤工学研究所 進士正人

1. はじめに

トンネルに作用する土圧の研究や、ロックボルトなどの補強工の効果を評価するために落し戸実験がよく行われている。著者らも鉛散弾を用いた2次元および3次元¹⁾の落し戸実験を行っている。しかし、実験の結果からは限られたデータしか得られないため、個別要素法(以下、DEMと略す。)等を用いて実験を数値シミュレーションすることにより、不足データを補うことが必要であると考えられる。今回は、DEMの落し戸実験シミュレーションへの適用を試み、その問題点を抽出した。

2. 実験および解析方法の概要

図-1に2次元の落し戸実験装置の概略図を示す。落し戸はトンネル形状を模した円形(直径 $d=100\text{mm}$)とし、地山材料は直径 2mm の散弾とワセリンおよび酸化亜鉛を $200:0.3:1.0$ の割合で混合したものを使用した。地山材料の物性値は、単位体積重量は 6.7gf/cm^3 、 $\phi=27.5^\circ$ 、 $c\approx 0$ である。落し戸の降下速度は 1mm/min で、測定項目は落し戸作用荷重、降下量および地表面の変位量である。

図-2にDEM解析モデルの一例を示す。円形落し戸の直径は実験と等しいが、解析領域は計算容量を考慮して実験の土槽幅よりも小さくした。材料定数は法線方向のばね係数を $K_n=10^5\text{gf/cm}$ (単位奥行き当たり)とし他の定数は式(1)より求めた²⁾。

$$ks = kn \cdot S \quad \eta_n = \sqrt{2mkn} \quad \eta_s = \eta_n \sqrt{S} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 K :ばね係数 η :粘性係数 S :減減率($=0.25$)

m :要素質量 (添字 n, s は法線および接線方向を示す。)

要素の密度は実験の単位体積重量と等しくなるように設定した。

3. 解析結果におよぼす要因

(1)要素数(大きさ)および解析領域:本研究のように多数の要素を扱うDEMにおいては、計算容量や演算時間の問題から、要素数を制限しなければならない問題が生じる。その解決法として、要素直径(d)を大きくする、あるいは解析領域を狭めるなどのモデル化における工夫が必要である。本解析の場合、実験が左右対称の平面ひずみ状態であるため、中心に境界を設け半分の領域のみで解析することが考えられる。その条件で解析を試みたところ、中心での境界の問題が生じてしまった。そのため、今回は、 $d=4\text{mm}$ (実験の2倍)とし、全領域で解析を行うこととした。

(2)落し戸降下速度および時間増分:DEMは、繰り返し数を問わず時間増分を小さくして解くという解析法であるため、演算時間が長くなり、それがDEMの問題点の1つとなっている。本解析において、要素数の他に演算時間に影響するものは、落し戸降下速度(V)と時間増分(Δt)である。 V の影響について比

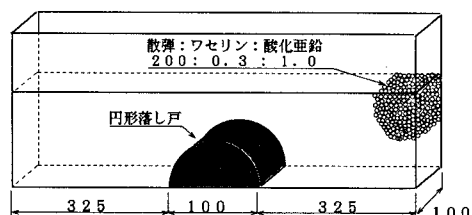
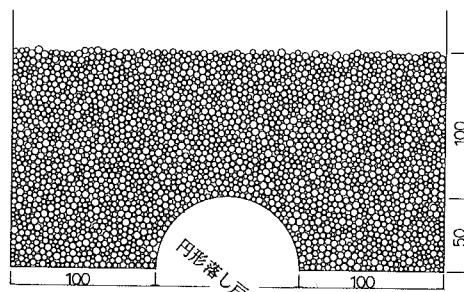


図-1 落し戸実験装置概略図(単位 mm)

図-2 落し戸解析モデル
(CASE B $\bar{d}=4\text{mm}$)

較を行ったところ、 $V=100\text{mm/min}$ （実験の100倍）までは解析結果に影響しないことを確認し、この速度を採用し、演算時間の短縮を図った。また、 Δt については、小さくすることにより計算精度は向上し、良好な結果となるようであるが、今回は、計算効率を考慮して $\Delta t=10^{-5}(\text{sec})$ を用いた。

(3)要素間摩擦角：図-3は、要素間摩擦角（ ϕ_μ ）を変化させた場合の解析結果の比較で、横軸に落し戸降下量、縦軸に落し戸作用荷重をとっている。パッキングデータは同じで ϕ_μ のみ変化したものである。この図より、 ϕ_μ の変化が解析結果に大きく影響を及ぼしているのがわかる。しかし、既往の研究³⁾とは異なるため、 ϕ_μ については再度検討する必要があると思われる。

(4)パッキング：図-4は、異なるパッキングデータ（要素の配列のみ異なる）を用いた場合の解析結果の比較である。この図より、初期の要素の配置状態（パッキング）の変化が解析結果に影響を及ぼしているのがわかる。

(5)粒径分布：図-5は、要素直径が全て等しいもの（CASE A）と、要素の直径をばらつかせた場合（CASE B $d=3\sim 5\text{mm}$ 平均 $\bar{d}=4\text{mm}$ 正規分布 図-2 参照）との解析結果の比較であり、参考までに実験結果も一緒に示してある。図-6は、CASE A、CASE Bおよび実験値の落し戸降下量が2mm時の地表面沈下量の比較である。図-5および6より、要素の直径をばらつかせたCASE Bの方が、解の安定性が良く、地表面沈下も実験の挙動と近くなっている。実験よりも大きな要素径で解析する場合、要素径をばらつかせることが有効な手段になると考えられるが、実際の実験の条件（等粒径）とはかけ離れるため、さらに検討が必要であると考えられる。

(6)ロックボルトのモデル化：ロックボルトを線要素でモデル化する場合には、ロックボルトの間隔によりパッキングが困難となる。そこで、通常のパッキングを行った後、ロックボルトに対応する円要素の材料定数を変えることにより、ロックボルトのモデル化についても試みている。

5. おわりに

今回は、円形落し戸実験におけるDEMの問題点を取り上げてみた。特に、物理的に実物大の粒径で解析不可能な時の対処方法が重要であると考えられる。今後は、粒径の影響や材料定数について検討を行い、ロックボルト等の補強工のモデル化についても研究を行っていく予定である。

<参考文献>

- 1) 高橋、進士、西村：逆解析手法に基づく垂直掘地工法の補強効果に関する研究、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.665~670、1994.1
- 2) 木山、藤村、他：カンドルの離散剛要素法を用いた岩盤粒状体の重力流動の解析、土木学会論文報告集、pp.137~146、1983.5
- 3) 木山、藤村、他：せん断モデルを用いた離散剛要素の材料定数の検討、土木学会論文集382号Ⅲ-7、1987.6

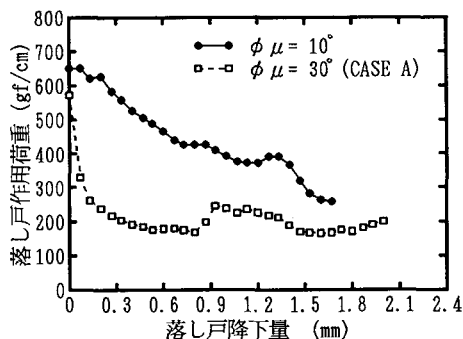


図-3 要素間摩擦角による変化

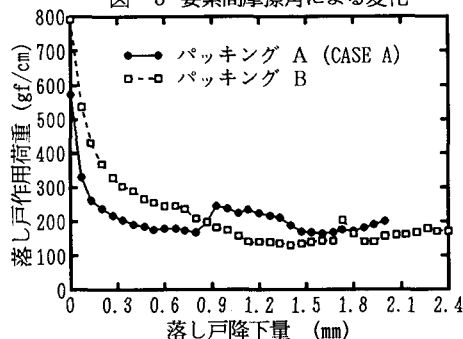


図-4 要素の配置（パッキング）による比較

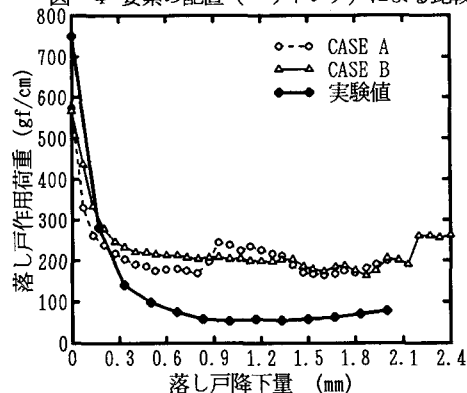


図-5 粒径分布による比較

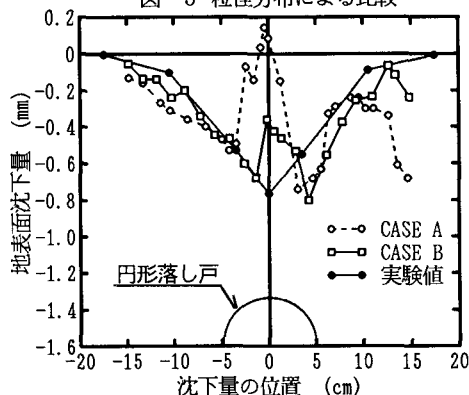


図-6 地表面沈下量による比較