

3次元個別要素法による降下床モデルの解析

鳥取大学大学院 学生会員○潮田 顕士

鳥取大学 中島 博則

鳥取大学工学部 正会員 西村 強 木山 英郎

1. はじめに

我が国のトンネルは、主として鉄道・道路等の交通運輸施設の発展に大きく寄与してきた。特に都市トンネル建設増加に伴い都市部に広く分布する洪積・沖積層が主体の軟弱な地盤では、掘削に伴う応力解放によって、地下埋設物や地表の構造物に悪影響を与える地表面沈下の問題がある。土被りの浅い場合には、グラウンドアーチが形成され難いと考えられており、トンネル掘削とそれに伴う周辺地盤の挙動の解明は重要な問題である。このような問題には、トンネル掘削時の応力解放を模擬した降下床実験が用いられてきた¹⁾。本研究では、砂質系の地山を対象として球要素を用いて3次元個別要素法により降下床モデルのシミュレーションを行った。

2. 球要素を用いた3次元個別要素解析

全体座標系 (X, Y, Z) に対して、要素 i の重心を原点とする局所座標系 (x, y, z) 、そして図1のように (r, θ, ϕ) 方向を定める。このとき、 r, θ, ϕ 方向のベクトルをそれぞれ $(\vec{n}, \vec{s}, \vec{t})$ とする。要素 i が局所座標系 (x, y, z) に対して $(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ の回転速度(反時計回りを正)を持つとすると、図1を参照して回転に伴う接触点における変位増分は、 (x_c, y_c, z_c) を接触点の座標として次の式で求められる。

$$\Delta x_{ci} = (\dot{\omega}_y \cdot z_c - \dot{\omega}_z \cdot y_c) \cdot \Delta t \quad \Delta y_{ci} = (\dot{\omega}_z \cdot x_c - \dot{\omega}_x \cdot z_c) \cdot \Delta t \quad \Delta z_{ci} = (\dot{\omega}_x \cdot y_c - \dot{\omega}_y \cdot x_c) \cdot \Delta t \quad (1)$$

接触相手である要素 j の接触点変位も同様にして求めると、 (x, y, z) 系に対して接触相対変位は、次のように求められる。

$$\Delta x_c = \Delta x_{cj} - \Delta x_{ci} \quad \Delta y_c = \Delta y_{cj} - \Delta y_{ci} \quad \Delta z_c = \Delta z_{cj} - \Delta z_{ci} \quad (2)$$

この $(\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c)$ を、座標交換行列 $[T]$ を用いて、 (x, y, z) 系から局所 (r, θ, ϕ) 系へ変換すれば回転に伴う接触相対変位が求められる。同様に、要素 i の中心が (X, Y, Z) 系に対して、微小時間増分 Δt の変位増分 $\{\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z\}$ を持つとすれば、重心位置の並進移動による接触点での接触相対変位も求められる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta v_s \\ \Delta v_t \\ \Delta v_n \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta y_c \\ \Delta z_c \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta u_t \\ \Delta u_n \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

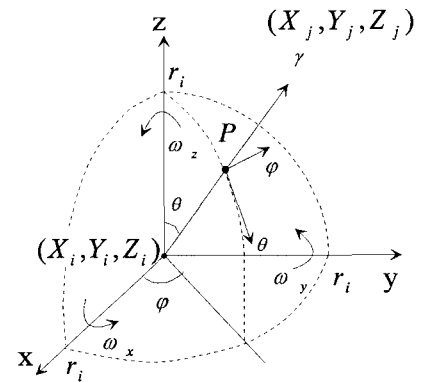


図1 座標系と接触相対変位

要素 i, j の接触面に作用する力を、法線方向に作用する圧縮力 f_n と接線方向に作用するせん断力 f_s, f_t に分けて考える。弾性スプリング(剛性定数 K_n, K_s, K_t)と粘性ダッシュポット(粘性定数 η_n, η_s, η_t)の並列配置を仮定すると、粘性接触力 (d_n, d_s, d_t) 、弾性接触力 (e_n, e_s, e_t) は次の式で求められる。

$$d_n = \eta_n (\Delta u_n + \Delta v_n) / \Delta t \quad d_s = \eta_s (\Delta u_s + \Delta v_s) / \Delta t \quad d_t = \eta_t (\Delta u_t + \Delta v_t) / \Delta t \quad (4)$$

$$e_n := e_n + K_n (\Delta u_n + \Delta v_n) \quad e_s := e_s + K_s (\Delta u_s + \Delta v_s) \quad e_t := e_t + K_t (\Delta u_t + \Delta v_t) \quad (5)$$

接線方向の接触合力 $f_{st} = (e_s^2 + e_t^2)^{1/2}$ が、法線方向の最大摩擦抵抗 $f_{\max} = e_n \tan \phi$ を超えるときは、以下のような条件が適用される。 ϕ は摩擦角である。

$$e_s = e_s \times f_{st} / f_{\max} \quad e_t = e_t \times f_{st} / f_{\max} \quad d_s = d_t = 0 \quad (6)$$

座標変換行列の逆行列を用いて接触力を求めると、 (X, Y, Z) 系での作用力 (F_x, F_y, F_z) と重心周りのモーメント (M_x, M_y, M_z) は次のように求められる。 m_i は要素 i の質量である。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} e_s + d_s \\ e_t + d_t \\ e_n + d_n \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} F_X := F_X + f_x \\ F_Y := F_Y + f_y \\ F_Z := F_Z + f_z \end{matrix} \quad \begin{matrix} M_x := M_x - f_y \cdot z_c + f_z \cdot y_c \\ M_y := M_y - f_z \cdot x_c + f_x \cdot z_c \\ M_z := M_z - f_x \cdot y_c + f_y \cdot x_c \end{matrix} \quad (7)$$

この作用力と重心周りのモーメントから加速度および回転加速度を求め、これらの並進加速度と回転加速度を時間増分 Δt に関して積分すれば、並進変位および回転角の増分を求めることができる。これらの変位増分を時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの新たな変位増分に仮定して、再び演算を繰り返し、次の時間増分 Δt に対応する変位増分を逐次求める。

3. 降下床モデル

図2に示すような解析領域(高さ 2.0m、幅 2.6m、奥行き 2.6m)を設定し、2種類の球要素をランダムに配置させた。球要素の半径は $r_1 = 0.1\text{m}$ 、 $r_2 = 0.05\text{m}$ とし、それぞれの球要素数は、 r_1 ; 1014 個、 r_2 ; 2704 個である。初期配置における要素は、微小な間隔が存在した状態より、重力加速度の下に静止状態にする。ここで、全要素の変位増分の絶対値平均が Δt 間の自由落下距離の 1/5000 以下になった時点で静止状態とみなす。なお、降下床の大きさは $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ である。本解析では、初期静止状態の後、1 段階の降下床下降幅 0.5cm、計 10 段階降下させた。各降下床段階で降下床を静止させて、全要素を静止に至らせた。

4. 結果と考察

図3は初期静止状態を表しており、要素間に働く法線方向の接触力をベクトル表記したものであり、線分長は接触力の大きさを表している。図3と図4と比較すると、初期静止状態では底面に対して鉛直方向の力の伝達が卓越しているのに対し、降下量が 5cm に達した時、降下床の上部において水平方向の力の伝達が目立つようになる。この過程を、降下床に作用する荷重の変化として捉えると図5のようになる。この図では、初期静止状態における接触力総和 F_0 で相対化を行って縦軸に用いている。これより、降下床下降初期に接触力総和が減少し、その後一定値に収束していることがわかる。これは降下床周辺底部に接触力が分配された為であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地下浅所におけるトンネル掘削の応力解放に伴う、トンネル周辺地盤の応力分布や変形の様子を明らかにする為に、降下床実験のシミュレーションを行い、要素間の接触力分布と降下床に作用する接触力を解析した。

- ・ 降下床下降により降下床部分では接触力が減少し、降下床周辺部に接触力が再配分される様子を示した。

参考文献

- 1) 菊本統・木村亮・岸田潔・足立紀尚：トンネル掘削時の力学挙動に関する 3 次元降下床実験とその数値解析、土木学会論文集、No.750/III-65, pp.145～149, 2003

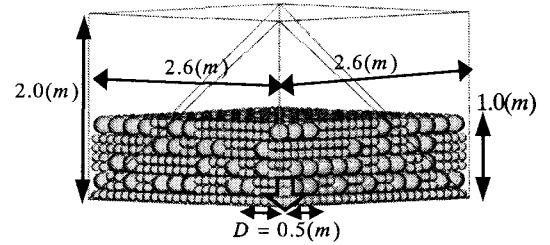


図2 解析モデル (球要素 3718 個)

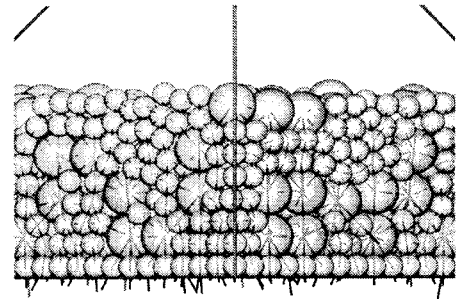


図3 接触力分布 (降下量 0cm)

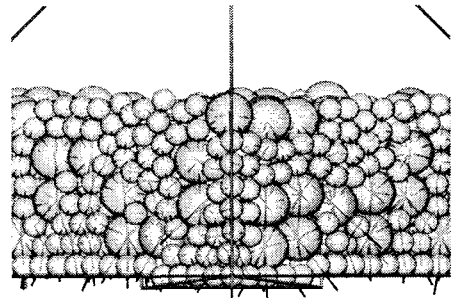


図4 接触力分布 (降下量 5cm)

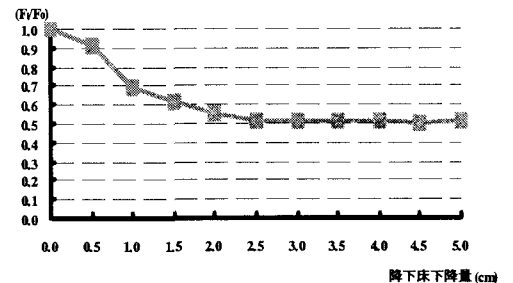


図5 降下床面に作用する接触力総和