

III-136 砂質地山のトンネル掘削解析

フジタ工業(株)技術研究所 正会員 波田光敬
同 上 正会員 香川和夫

1. はじめに

筆者らは、川井により提案されたRBSM¹⁾を用いて、これまで斜面安定などの解析を行ない、この手法が、すべりなどの不連続現象の解明に有効であることを示してきた²⁾。一方、土被りの浅い地山におけるトンネルに関する足立らの研究³⁾、桜井らの研究⁴⁾および横山らの研究⁵⁾などは、トンネル掘削により、地山が不連続性地盤のような挙動特性をもつことを示唆している。そこで、土被りの浅い砂質地山におけるトンネル切羽周辺の地山の挙動を調べるために、RBSMを用いた三次元弾塑性テンションクラック解析を行った。本文は解析に用いた塑性条件式と解析例について報告したものである。

2. 塑性条件式

RBSMは、図-1に示すように三次要素分割された要素(この図では四面体ABCD)の重心Gの変位 $[u, v, w, \theta, \phi, \chi]^T$ と要素辺ACD上に分布するバネ(せん断バネ K_{sx} 、 K_{sy} と垂直バネ K_d)により伝達される応力(τ_{xz} τ_{yz} σ_{zz})およびひずみ(γ_{xz} γ_{yz} ϵ_{zz})から、要素剛性マトリックス $[K]$ を次式により算定する。

$$[K] = \int_A [B][D][D]^T dA$$

ここに、 $[B]$ は座標の関数であり、 $[D]$ はバネマトリックスと呼ばれ、バネが弾性状態では、次式で定義される。

$$[D_e] = \begin{bmatrix} K_{sx} & 0 & 0 \\ & K_{sy} & 0 \\ \text{sym.} & & K_d \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} K_{sx} &= K_{sy} = E/(1+\nu)/h \\ K_d &= (1-\nu)E/\{(1+\nu)(1-2\nu)\}/h \\ h &: \text{共有面上に各要素重心から降ろした垂線の線形和} \end{aligned}$$

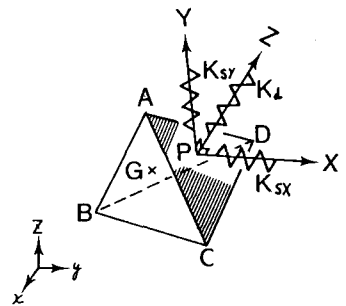


図-1 RBSM三次要素

さらに塑性状態では、次式で表わしたモール・クーロンタイプの破壊規準

$$F = \tau^2 - (c^2 - \sigma_{zz} \cdot \tan^2 \phi) = 0 \quad (\text{ここに、} \tau^2 = \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)$$

を塑性ポテンシャルとする関連流れ則により、塑性状態のバネマトリックス $[D_p]$ を

$$[D_p] = [D_e] - [S]$$

$$[S] = [D_e] \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot [D_e] / \left(\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T \cdot [D_e] \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \right)$$

として、その各成分が計算される。したがって、 $\phi \neq 0$ のときには、 $[D_p]$ の非対角項は零とはならず、せん断による垂直ひずみ増分 $\Delta \epsilon_{zz}$ が発生することになる。なお、掘削時において、切羽周辺の地山のせん断応力が、初期状態から除荷される場合がある。このような場合には、文献6)で報告したように、上式におけるヤング率を載荷過程の E より大きい E_k を用いた。

3. 解析結果

解析したトンネルは、図-2に示すような直径 $D \approx 8.5$ m、土被り $H \approx D$ であり、既報告⁶⁾で用いた解析対象断面(12 m $\times$ 2.1 m $\times$ 2.4 m)の各断面寸法を2.4 m $\times$ 2.4 m $\times$ 1.2 mに変更し、さらにトンネル部の要素分割を少し変えている。解析に用いた定数は、 $\gamma = 1.8$ (t $\cdot$ f/m³)、 $E = 2000$ (t $\cdot$ f/m²)、 $E_k = 10 \cdot E$ 、 $\nu = 0.26$ 、 $\phi = 35^\circ$ 、 $c = 0.1$ (t $\cdot$ f/m²)である。なお、初期応力は $K_0 = 1 - \sin \phi = 0.426$ として計算した。

図-2のトンネルのうち、坑口から2mを対象とし、全断面掘削掘削した場合の解析結果を以下に示す。

図-3は、掘削外力の開放率が0.54になったときの、地山内に生じるすべり面を示す。これによると、すべりはスプリングラインから、ほぼ直上に発達することがわかる。この傾向は、解析巾を1.5Dとした既報告⁶⁾と同じであった。

図-4は、地表面の沈下を示したもので、中心から約1.5D離れた所まで、沈下が急激に変化することがわかる。なお、図中のRminは掘削外力の開放率に相当する。

図中の破線は

$$\delta = \alpha \cdot \exp(-X^2/2i^2)$$

において、 $\alpha = 2.4\text{mm}$ 、 $i = 1.0\text{m}$ とした正規分布曲線を表わす。

4. おわりに

三次元解析を行なうにあたり、解析対象範囲の設定が大きな問題となる。今回の解析から、解析巾として3D程度必要であることがわかった。一方、既報告⁶⁾では奥行を約3D、地山の粘着力 $c = 5\text{tf/m}^2$ として、坑口から2mの全断面掘削した場合について行なった。現在、図-2に示したように奥行約1.5D、地山の粘着力 $c = 0.1\text{tf/m}^2$ として計算を進めている。また、深さ方向の設定などについても、今後検討を行なっていきたい。

参考文献

- 1)川井：A New Discrete Model for Analysis of Solid Mechanics Problems、生産研究、29-4、1977
- 2)Hada, et al.: Application of RBSM analysis to earth reinforcement method、Proc. of IS Kyushu '88
- 3)足立他：被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下、土木学会論文報告集、No. 370、1986
- 4)桜井他：連続体力学による不連続性地盤の解析、土木学会第41回年講Ⅲ、1986
- 5)横山他：トンネル掘削による土かぶりの浅い未固結砂質地山の挙動を特徴づける指標に関する研究、土木学会論文報告集、No. 388、1987
- 6)波田他：土被りの浅いトンネルの3次元RBSM解析について、第21回岩盤力学に関するシンポジウム、1989

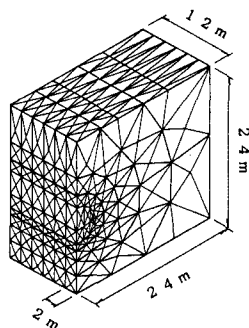
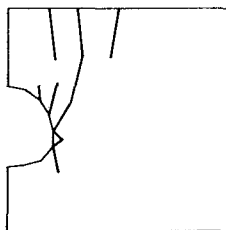
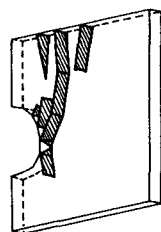


図-2 解析対象トンネル



(A) 坑口から眺めた場合



(B) 坑口の下から眺めた場合

図-3 すべり面 (Rmin=0.54)

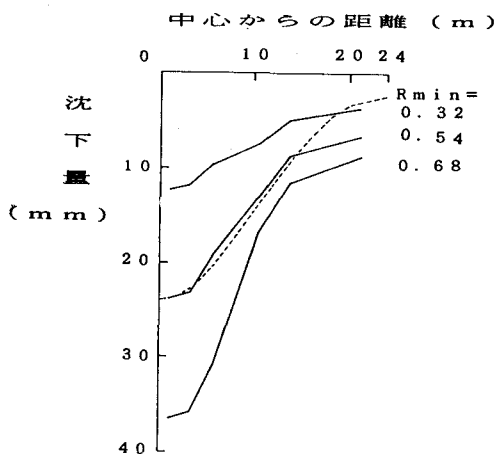


図-4 地表沈下