

III-265 連続体力学による不連続性地盤の解析

神戸大学工学部 正 桜井 春輔

同 正 清水 則一

神戸大学大学院 学 ○井根 健

1 はしがき

トンネル掘削後の地山の变形挙動は、掘削によって生じた局所的な滑りの影響を受け不連続的である場合が多い。特に、土被りの浅いトンネルにおいては、その傾向が大きい。このような局所滑りによる不連続的な变形挙動を表現するために、従来の連続体モデルとは異なる解析モデルの開発が必要とされている。ジョイント要素の利用もその一つと考えられる。しかし、ジョイント要素は、物理的、地質的に明確な不連続面に対して提案されているものであり、不連続面が当初存在していないと考えられる砂質地盤等にジョイント要素を用いるのは不自然である。著者らは、荷重載荷や掘削によって生じるこのような变形挙動は連続体モデルでも十分表現できると考えている¹⁾。問題は連続体モデルにおいて、どのような構成式を用いるかにある。以上のことを考慮して、ここでは、連続体力学に立脚する弾性構成式に異方性パラメーターを導入することによって、弾性FEM解析のみで不連続的な变形挙動を求め得る解析手法を提案する。さらに、この構成式を用いれば弾塑性体としての变形挙動も表現できることを示す。

2 異方性材料の応力-ひずみ関係の定式化

本研究で用いる異方性の応力-ひずみ関係(平面ひずみ)は、図-1に示す局所座標系($x'y'z'$)において次式のように表わされる。

$$\{\sigma'\} = [D'] \{\varepsilon'\} \quad (1)$$

ただし、 $\{\sigma'\}$ 及び $\{\varepsilon'\}$ は、それぞれ応力及びひずみベクトルである。また、 $[D']$ は次に示すマトリックスである。

$$[D'] = E_2/(1+\nu_1)/(1-\nu_1-2n\nu_2^2) \begin{bmatrix} n(1-n\nu_2^2) & n\nu_2(1+\nu_1) & 0 \\ n\nu_2(1+\nu_1) & (1-\nu_1^2) & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$(n = E_1/E_2, m = G_2/E_2)$$

ただし、 E_1 、 ν_1 は $x'z'$ 面内の变形に関するもの、また、 E_2 、 ν_2 、 G_2 は y' 方向に関するものである。ここで、 n 及び m を異方性パラメーターと呼ぶことにする。

全体座標系におけるマトリックス $[D]$ は座標変換マトリックス $[T]$ を用いて次のように表わされる²⁾。

$$[D] = [T] [D'] [T]^T \quad (3)$$

なお、本報告では、 $n=1.0$ 、 $\nu_1=\nu_2$ とし、考慮するパラメーターは、 E_2 及び m としている。

3 適用例 1. ジョイントを含むFEM解析に対する等価連続体解析

解析モデル(図-2)は、土被りの浅いトンネルで、トンネル径は、 $D=8\text{m}$ 、土被りは、 $H=8\text{m}$ である。また、地盤は重力場とし初期応力を土被り圧と静止土圧係数を用いて与える。トンネル掘削のシミュレーションは、トンネル壁面で初期応力を解放することによって表現する。

掘削によって生じる滑りを図-2のように4層に分け、この領域において構成式(1)を用いる。なお、図中の $\rightarrow$ は、局所座標の x' 軸方向である。解析によって得られたトンネル掘削による地表面沈下を図-3に示す。ただし、同図には等質等方弾性体に対する解及びジョイント要素を用いた解析³⁾の結果を合わせて示している。

4 適用例 2. 弾塑性FEM解析に対する等価連続体解析

滑り面が最大主応力面となす角を $\pm(45^\circ + \phi/2)$ とみなし、2方向の滑り面の影響を取り入れるため、前述の構成式(1)を以下のように拡張する。 ϕ は、内部摩擦角である。全体座標系における2方向の滑り面の

応力-ひずみマトリックスをそれぞれ $[D_1]$, $[D_2]$, ひずみを $\{\varepsilon_1\}$, $\{\varepsilon_2\}$ とすると全体座標系での両滑り面を考慮した平均ひずみ $\{\varepsilon\}$ は,

$$\{\varepsilon\} = 1/2 [\{\varepsilon_1\} + \{\varepsilon_2\}] \quad (4)$$

$$\therefore \{\varepsilon\} = 1/2 [[D_1]^{-1} + [D_2]^{-1}] \{\sigma\} \quad (5)$$

したがって、両滑り面を考慮した応力-ひずみマトリックスは、次式で表される。

$$[D] = [1/2 \{ [D_1]^{-1} + [D_2]^{-1} \}]^{-1} \quad (6)$$

計算手順としては、等方の応力-ひずみ関係を持つ弾性FEM解析を行い、最大主応力面から $\pm(45^\circ + \phi/2)$ の方向に作用するせん断応力の絶対値 $|\tau|$ が、降伏応力 $|\tau_v(\sigma)|$ に達すると、その要素にせん断滑りが生じるものとし、式(6)の構成式を用いて弾性FEM解析を行なった。mの値については、弾塑性FEM解析の変位解と適合するように試行錯誤的にmの値を変化させてみた。(なお、弾塑性FEM解析においては解が発散したため初期応力の解放割合を60%としている³⁾。)解析結果の一例として、トンネル掘削による地表面沈下を図-4に示す。解析モデルは適用例1と同じである。

5 むすび

ここで提案した解析手法によって、ジョイントを含む不連続体の解析及び弾塑性体に対するFEM解析とほぼ同等の変位解が、得られることが明らかとなった。なお、当手法と比較したジョイントを含む不連続体の解析および弾塑性FEM解析の結果は、文献3)のものを引用した。

参考文献 1) 桜井春輔：斜面の逆解析，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，Ⅲ-21,1986 2) Zienkiewicz, O.C: The Finite Element Method, 3rd ed., McGraw-Hill, 1977 3) 八嶋 厚：不連続性地山の力学特性とトンネル掘削問題への応用に関する研究，京都大学学位申請論文，pp.105-127, 1985.

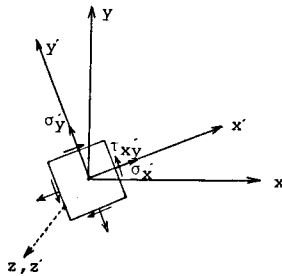


図-1 座標及び応力図

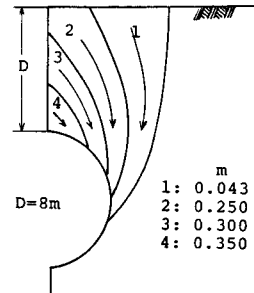


図-2 解析モデル図

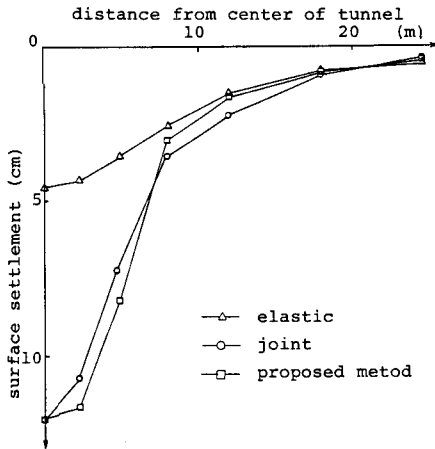


図-3 地表面沈下

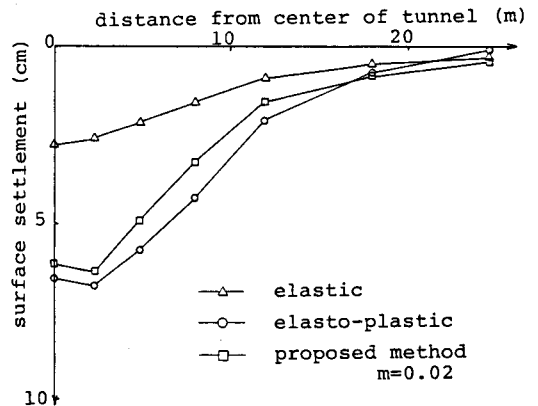


図-4 地表面沈下