

損傷理論によるトンネルの安定性解析

東北大学 学生員 ○下河啓介

東北大学 正 員 岸野佑次

1. はじめに

近年、各種の地下施設、地下資源開発等、地下空間を開発利用する構想が注目されつつある。地下にトンネルや空洞を掘削する際は、周辺地盤の力学挙動の変化が問題となる。特に掘削にともない、以前安定していた地盤がどのように乱されるかを評価することが重要である。本研究は、掘削にともなう地盤の力学挙動の変化を損傷力学の立場からとらえた非弾性解析を通して、トンネル周辺地盤の安定性に関する考察を行ったものである。

2. 解析に用いた構成則の概要

本研究においては地盤の非弾性挙動が地盤内部の微視クラックの発生にともなって生じると考え、応力 σ と歪 ϵ の関係を時々刻々変化する歪ポテンシャルエネルギー w をもとに、次のように仮定する。^{1), 2)}

$$\sigma = \frac{\partial w}{\partial \epsilon} = gD + \lambda (\text{tr} \epsilon) I + 2\mu \epsilon + \alpha [(\epsilon : D) I + (\text{tr} \epsilon) D] + 2\beta (\epsilon \cdot D + D \cdot \epsilon) \quad (1)$$

ここで、 λ 、 μ はラーメの定数であり、 α 、 β は損傷が生じたときの歪ポテンシャルエネルギーの修正に用いる係数である。また、 g は損傷によって発生した残留歪の程度を表す係数である。さらに、 D は損傷テンソルであり、引張歪にともない増加する損傷の程度を表す変数である。

3. トンネル掘削のシミュレーションとその考察

ここでは、トンネルを上下左右対称と仮定して行った解析について示す。解析は式(1)の構成則を用いて有限要素法によって行った。掘削はトンネル壁面の節点力を初期地圧から0になるまで漸次減少させていく方法でシミュレートした。構成式に含まれる諸定数等、解析に用いた値を表1に示す。

図1は最終段階における要素の変形状態と塑性領域の広がりを表したものである。変形は実変位を3倍して表示した。水平土圧係数の値が小さいと塑性域が横方向に広がることが注目される。

図2は内圧の低減率と平均損傷度 $(\sum \Delta A \text{tr} D / A, \Delta A$; 要素の面積、 A ; 全面積)の関係を表したものである。内圧の低減率は初期地圧に対する各掘削時点における地圧の比であり、掘削の進行度と考えることもできよう。本解析においてはこの値が45%を越えると損傷が大きく増加し塑性領域が急速に広がる結果となった。以後、この低減率を遷移低減率と称する。また壁面の変位量と損傷度の関係を図3に示す。これを見ると壁面の変位量がこのモデルで20cmを越えると急速に損傷度が増すことがわかる。このことから実際の施工に際してはこのような塑性領域の、急速な増加に対しては注意を要するといえることができよう。

図4には、トンネル天端、側方の壁面変位量と内圧低減率の関係を示す。初期地圧の差によって最初是天端の壁面変位量が大きく進むが遷移低減率を越えたあたりから側方の壁面変位量が急速に増加し最終段階に至っている。これは、水平方向の塑性領域が鉛直方向に比べ卓越していることと関係していると思われる。水平方向の塑性領域が遷移低減率以降急速に発達してくるので、それに伴って壁面の変位量も大きく増加してくる。

次に塑性域の広がりとともに散逸されるエネルギーに着目し、地盤に対して外部応力のする仕事及び蓄積される歪エネルギーが内圧の低減率に対してどのように変化するかを調べた。結果を図5に示す。掘削が進むに従って歪エネルギーがほぼ比例的に増加するが、遷移低減率あたりから散逸されるエネルギー（外部仕事と弾性歪エネルギーの差）が急速に増え始めることがわかる。したがって、支保工等により原状に復する

表1 解析に用いた諸定数

構成則諸定数	
λ	= 365 (MPa)
μ	= 188 (MPa)
α	= 1417 (MPa)
β	= -1703 (MPa)
g	= -4.1 (MPa)
初期地圧	
p_0	= 4 (MPa)
水平土圧係数	
K_0	= 0.8 (1.0)
ただし()内の結果は図1. b)のみ	

ことを考えた場合、大きな壁面変位を許した後の施工は不利であるということができよう。

4. 結論

本研究においては損傷理論に基づく構成則を用いて、トンネル掘削に伴う周辺地盤の変形挙動のFEM解析を行い各種力学量の相関について考察した。その結果、掘削がある程度進むと、損傷の発生に伴い、塑性領域が急速に広がることをシミュレートすることができた。特に、遷移低減率を調べることで、トンネルの安定解析にとって重要であるということができよう。今後、さらに種々の条件下における解析を通してトンネルの安定性評価の研究を進めることが重要であると思われる。

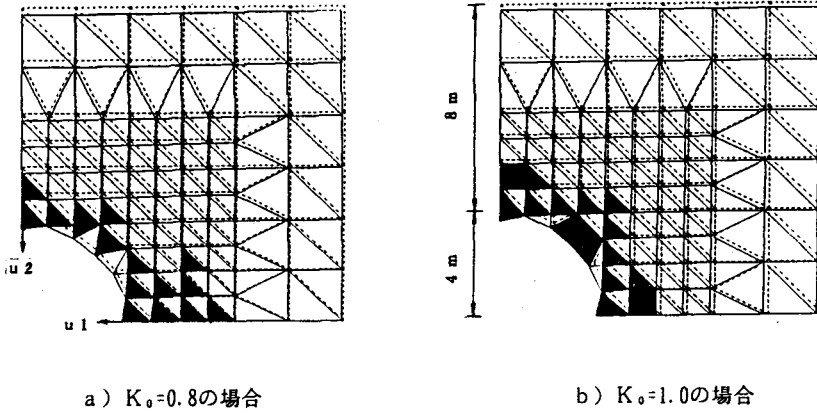


図1 変形状態と塑性領域の広がり

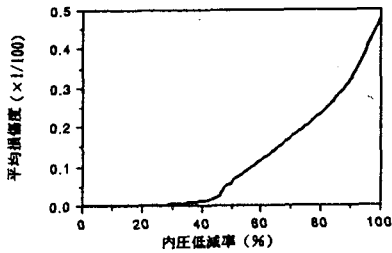


図2 内圧低減率と損傷度の関係

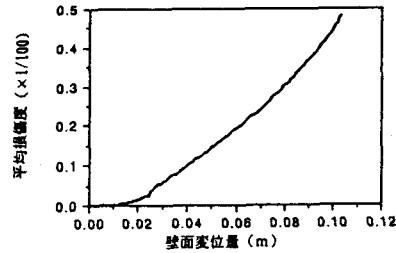


図3 壁面変位と損傷度の関係

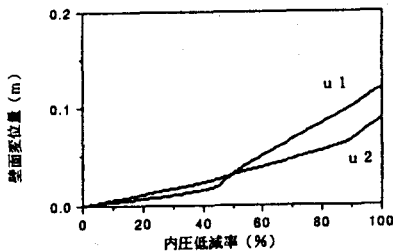


図4 内圧低減率と壁面変位の関係

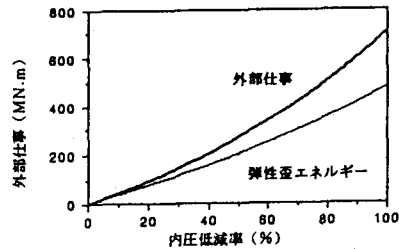


図5 仕事と内圧低減率の関係

参考文献

- 1) A. Dragon, D. pham(1993);A model of anisotropic damage by (micro)crack growth, 第2回国際局所化ワークショップ
- 2) J.W. Ju(1989);On energy-based coupled elastoplastic damage theories:constitutive modeling and computational aspects , Int. J. Solids Structures Vol. 25, No. 7, pp. 803-833