

トンネル周辺の岩盤の崩落について

東京大学工学部 正員 西松 裕一
東京大学大学院 山口 勉

1. 緒言

トンネルその他の地下空間の掘削に関連する岩石力学的現象の一つとして、天盤の崩落(高落ちないし落盤)がしばしば観察される。この天盤の崩落は、地表から深いところにある坑道、トンネルでも発生するが、いわゆる土被りの小さい、浅いトンネルでよりしばしば発生する。そして、この場合は、地表までの距離が短いため、崩落の規模によっては、地表の陥没という最も望ましくない現象をもたらすことがある。

従来、地下空間の周辺の岩盤の破壊・変形に関する現象は、無限媒体中の空洞周辺の応力分布を、弾性論、ソ性理論、レオロジーなどを用いて解析した結果を用いて、説明されることが多い。^{1~4)}しかし、このような手法で、上記のような地表に近い地下空間の天盤の崩落現象を説明することは、著しく困難である。

本報では、この点に注目し、従来の解析法では、説明困難であった、地表付近のき裂の発達した岩盤内のトンネル周辺の岩盤の崩落現象を、先に岩石の圧縮破壊過程の解析に用いた⁵⁾と同様の手法、すなわち有限要素法による逐次破壊解析法を用いて、説明することを試みる。

2. 岩盤力学的考察

2.1. 地表付近の岩盤の力学的性質

地表付近の岩盤には、多くの場合、風化による強度の低下、き裂の発達が認められる。またその結果として、力学的性質は著しく不均質となる。このようにき裂の発達した岩盤の力学的性質の特徴として、最も重要なことは、引張強度が著しく小さいことである。また、比較的浅い位置で岩盤に作用する力として最も重要なものは、岩盤の自重すなわち物体力の一つとしての重力である。したがって、地表下浅いところにある地下空間の周辺の応力場を考察する場合には、地下深部の場合とは異なって、無限遠点での一様な応力場を仮定することは正しくない。

このように、地表下浅い位置のトンネルその他の地下空間の天盤の崩落を議論しようとするときには、(1)岩盤の不均質性、(2)岩盤内のき裂ないし弱面の発達、(3)境界条件としての自由面の存在と重力の作用に基づく応力分布、を考慮に入れなければならない。

2.2. 重力の作用下の空洞周辺の応力分布

地表付近で重力のみが作用している地下空間周辺の岩盤内応力分布は有限要素法を用いて容易に計算される。本報では、岩盤がYoung率の異なる2種類の部分、たとえば礫部とその間を充てんする土層部とから成る場合などについて、考察する。その場合、礫部と土層部とがランダムに混在している状況を再現するため、前報と同様に乱数を用いて、あらかじめ指定した比率H:Lで各要素に2種類のYoung率 E_h または E_l のどちらかを割り当てた。

このようにして得られた岩盤モデルの例を図1に示す。また、この岩盤モデルについて応力分布を求めた結果を図2に示す。ただし、ここでは岩盤の比重を2.5、トンネル天盤から地表までの深さを12m、トンネル高さを4m、 E_h を 10^5 kg/cm^2 、Poisson比 ν を0.2と仮定し、水平方向の変位は完全に拘束されている。図2から、この場合のトンネル周辺の岩盤にかけた引張応力の最大値は、約 1.8 kg/cm^2 で、被覆岩盤圧力 $\sigma \cdot h = 4$

kg/cm^2 の半分以下であり、
 圧縮応力の最大値は、約
 15 kg/cm^2 であることがわ
 かる。したがって、このよう
 な状況では圧縮応力による
 破壊が発生することはほと
 んど考えられず、天盤が崩
 落する場合にも、岩盤内に
 存在するき裂が、決定的な
 役割を果たすと考えられる。
 また周知のように、天盤の
 崩落は、時間的に次々に進
 行して行くから、このよう
 な状況を解明するためには
 、崩落過程の進行中の各級
 階での応力状態を次々に計
 算すること、すなわち逐次破壊過程の計算が必要である。

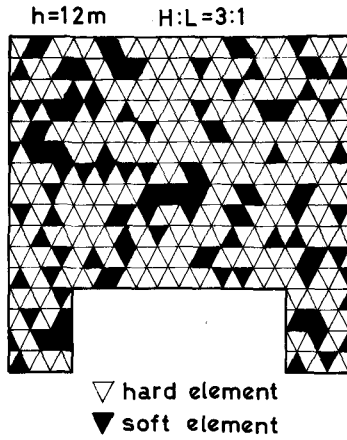


図1 岩盤とトンネルのモデル
の例

$$E_h = 10^5 \text{ kg/cm}^2 \quad h = 12 \text{ m}$$

$$E_l = 0.5 \times \quad H:L = 3:1$$

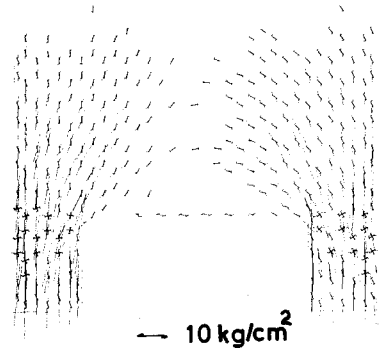


図2 深いトンネルの周辺の岩盤内
応力分布

2.3. 破壊の条件と破壊後の挙動

すでにのべたように、地表付近のトンネル天盤の崩落では、き裂の発生・成長が決定的役割を果たすと考えられる。すなわち圧縮応力による破壊はほとんど問題にならず、引張応力の存在が重要である。

このような場合の破壊条件としては、いろいろ考えられるが、ここでは最も簡単な場合、すなわち引張強度は0であると仮定した。そして有限要素法の計算では、水平方向(X方向)の応力 σ_x 、または垂直方向(Y方向)の応力 σ_y のいずれかが、引張応力であれば、その要素は破壊すると仮定した。

次に、本報のように空洞周辺の岩盤の崩落状況を考察する場合には、すでにのべたように、破壊後にその要素がどのような挙動を示すかを考慮することが、重要な問題となる。そこで本報では、 $\sigma_x > 0$ (引張を正とする)で破壊した要素については、Y方向に破壊き裂が発生し、同じく $\sigma_y > 0$ で破壊した要素については、X方向にき裂が発生すると仮定することにした。

さらに、もし水平方向にき裂が発生した要素は、もしその下方に支持する要素が存在しなければ、崩落して空洞がその分だけ拡大すると仮定した。しかし、垂直方向にのみ破壊き裂が発生した要素は崩落しない。また水平方向に破壊き裂が発生しても、その下方に支持する要素が存在すれば、当然のことながら崩落はあこらない。

3. シミュレーション・システム

3.1. シミュレーションの方法

今までのべたような状況を再現するよう計算システムを作るため、次のような方法を用いた。

- (1) 破壊き裂の発生をモデル化するため、き裂が発生した要素のYoung率とPoisson比を、き裂発生以前の値のそれぞれ $1/100$ にする。
- (2) 水平方向にき裂が発生して崩落した要素は、もはや他の要素に自重を作用させないので、このような要素

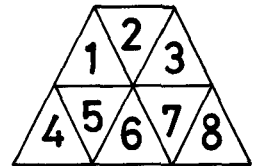


図3 岩盤の各要素の支持
関係の説明図

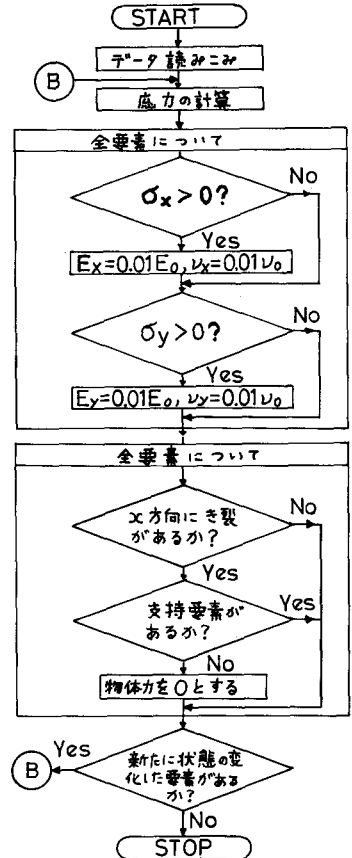
だけ、比重を0に変更する。

(3) 水平方向にき裂が発生した要素を、その下方で支持する要素があるかを判定するため、あらかじめ各要素について、それを支持する要素を指定しておく。

たとえば、図3の要素2については、IHOLD(2,3)とIHOLD(2,1)によって、要素3と要素1を、また要素1についてはIHOLD(1,5)として、要素5も指定する。もし、要素iについて、支持する要素がなければIHOLD(i,0)である。また、今まで存在していた支持要素が崩落した結果として、支持要素がなくなる場合があるが、これは支持要素の比重が0であるか否かによって判定する。なおここでは、要素iの支持要素が2個存在するとき、そのうちの1個が崩落すれば、要素iは崩落し得ると仮定する。

3.2. 計算モデルのフローチャート

このように基礎仮定とそれを具体化した方法とを用いて構成された計算モデルのフローチャートを図4に示す。これからわかるとおり、この計算モデルでは、まず有限要素法によって各要素の応力を計算した後、全要素について、破壊がおこっているかをチェックして、破壊した要素については、き裂が発生した方向と直角方向のYoung率とPoisson比を1/100に減少させる。次に、再び全要素について、崩落する要素があるかをチェックして、崩落した要素については、比重を0にする。そして再び有限要素法による応力計算を行なうというサイクルをくり返すのである。



4. 計算結果

4.1. 種々のパラメータの影響

以上に述べたような計算モデルを用いると、岩盤を構成している強固な部分と軟弱な部分の体積比、両者のYoung率の比など、岩盤の状態の差が崩落状況におよぼす影響について知る事ができる。

図5は、計算結果の1例で、軟弱な部分の弾性率が異なる場合の崩落状況を比較したものである。同図(a)は強固な部分と軟弱な部分のYoung率の比 $E_h : E_l = 2 : 1$ の場合であり、風化していない硬岩

$E_h = 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $h = 12 \text{ m}$
 $E_l = 0.5 \times \text{ "}$ $H:L = 9:1$

$E_h = 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $h = 12 \text{ m}$
 $E_l = 10^3 \text{ "}$ $H:L = 9:1$

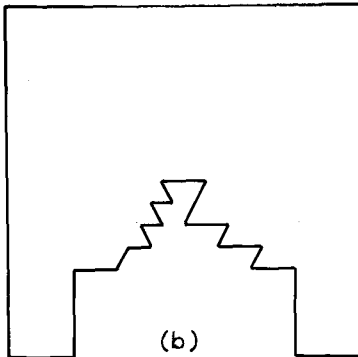
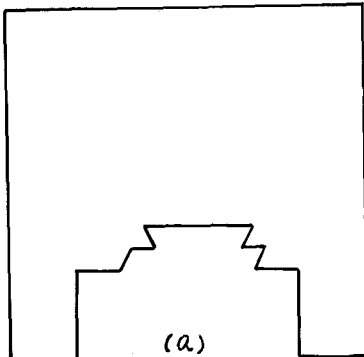


図4 計算モデルのフローチャート

図5 岩盤の軟弱部分のYoung率が異なる場合の崩落状況

などには対応している。これに対して (b) は $E_h:E_l = 100:1$ の場合で、10%の空隙を含んだ砂岩などに対応するものである。これから、後者の場合の方が崩落がおこりやすいことがわかる。

他方、図5(a)と図6(a), (b)を対比すると、 $E_h:E_l = 2:1$ の場合には、強固な部分と軟弱な部分の体積比を変化させても、崩落状況には大きな差異は生じないことが言える。なお図6(a)は、図2に示した応力分布の場合の崩落状況を示したものである。

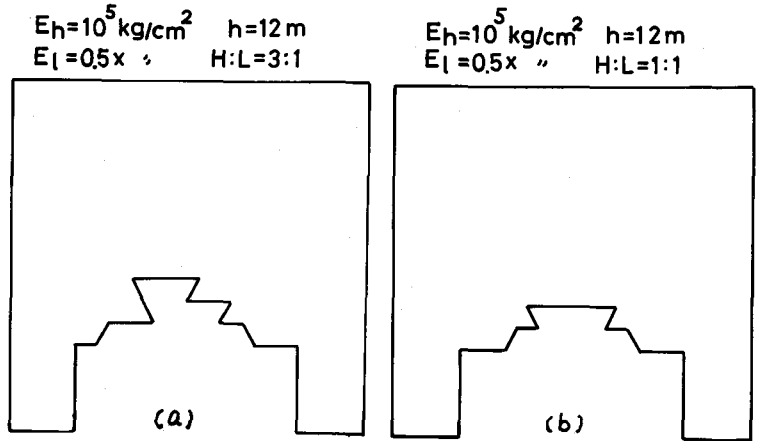


図6 岩盤の精緻要素の体積比が崩落状況におよぼす影響

4.2. 深さの影響

このような岩盤の状態の他に、トンネルの形状や深さが崩落状況に影響をおよぼすことは言うまでもない。

これを再現した例の一つが図7である。図6の(b)も含めて比較すると、他の条件が同じならば、トンネルが浅くなるるとむしろ崩落が著しくなることがわかる。これは被覆岩盤の重量が小さくなる、トンネル周辺の岩盤に発生する引張応力を打ち消すことが困難になるためであると考えることができよう。

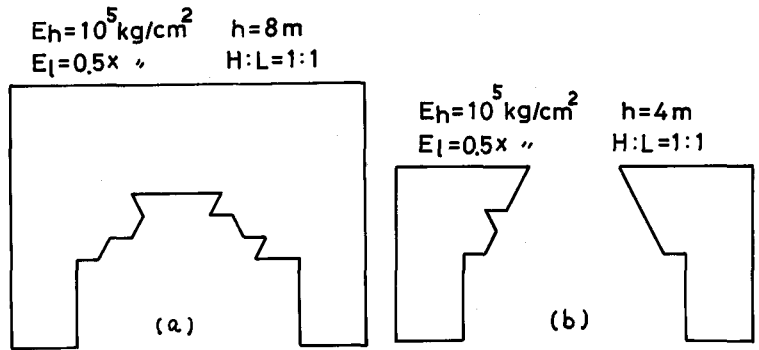


図7 トンネルの深さが崩落状況におよぼす影響

5. 結論

以上のべたような計算モデルで計算した結果は、たとえば地表下の深さが小さくなると、地表の陥没が発生することなど、従来経験的に知られている事実をよく再現している。したがって、本報でのべた計算モデルは、浅い地下空間の天盤の崩落やそれに伴う地表の陥没などの現象をよく再現できると言えよう。

この計算モデルは(1)岩盤の不均質性やき裂の存在などを考慮に入れ得ること、(2)物体力としての重力の影響を考慮していること、(3)崩落が逐次進行して行く状況を追跡し得ること、などの特徴を持っている。もちろん、有限要素法一般の特徴として、境界条件を自由に選択し得るといふ長所も忘れてはならない。

この計算モデルの有効性は、実際の工事例を対象として、実測された結果とこの計算モデルによる計算結果とを対比した後に最終的に判定されるべきであるが、この点については今後を期したい。

参考文献

- 1) 平松良雄, 他: 日本鉱業会誌, 78 (1962) p.182, 2) 平松良雄他: 日本鉱業会誌, 78 (1962) p.505, 3) 桜井香輔: 第4回岩の力学国内シンポジウム (1973) p.151, 4) 林正夫・日比野敏: 第2回岩の力学国内シンポジウム (1967) p.69

A Computer Modelling of Caving around Tunnel
near to the Surface

Yuichi NISHIMATSU
and Tsutomu YAMAGUCHI

The caving or roof fall is frequently observed in the tunnel and other underground openings near to the surface as well as in the deep underground mine. The roof fall in the deep underground mine has been discussed from various points of view. However, the roof fall in the tunnel near to the surface has been scarcely discussed.

Most of rock mass near to the surface are inhomogeneous in their structures, and include frequently joints and/or irregular cracks. The rock stresses near to the surface are induced by the gravity force and not so severe as in the deep underground mine, because of the shallow depth. The progressive failure is characteristic to the failure process observed in the most of roof falls.

Considering these features of roof fall in the tunnel near to the surface, a computer model is developed by means of Finite Element Method. In this model, the joint and crack are simulated by supposing zero in tensile strength, and the growth of fracture crack is simulated by decreasing Young's modulus to one of hundredth of the initial values. Finally, the part of rock wall fallen down is simulated by supposing zero in density.

By means of this computer model, the effect of some parameters such as structures of rock mass, depth of tunnel, etc. are discussed. As the result of calculation agrees with experiences in practice, it is concluded that this computer model would be available to simulate the process of roof fall as well as caving, and useful to design the support and construction of tunnel near to the surface.