

岩塊崩落解析に基づく大深度トンネルの設計法

○ 東京大学 学生員 江間 智広
東京大学 正 員 堀井 秀之

1. はじめに

高レベル廃棄物処分施設は地下数百～千 m に建設が予定されているが、このような深度での施工実績はほとんどなく、それゆえ過去の施工実績に基づいて設計を行う現行の設計体系をその設計に適用することは出来ない。そこで本研究では、そのような新しい条件下での設計を対象として、解析に基づく設計法の提案を目的とする。設計で考慮すべき限界状態は地山の特性に応じて異なるが、ここでは限界状態として不連続面の破壊によるトンネル天端からの岩塊の崩落を取り上げる。実際の設計にあたっては、考慮すべき全ての限界状態に対して設計が必要となり、岩塊の崩落以外の限界状態に対しても、ここで提示する方法と同様のアプローチを採用することが求められる。

2. 大深度トンネルの岩塊崩落解析

トンネル掘削は切り羽の進行という三次元的現象であるが、これを図 1 に示す二次元問題として解析を行い、以下のようにくさび型の岩塊が崩落する限界状態における応力解放率を求める。

本研究では岩塊崩落という現象の支配的メカニズムである不連続面の挙動を次のようにモデル化する。不連続面に作用する応力が Mohr-Coulomb の破壊基準 ($\tau = \sigma \tan \phi + c$) を満たすと破壊が生じその後応力は破壊基準線に沿って変化していく。またすべり量が増えるにしたがって内部摩擦角が減少するとしたが、今回は簡単のためすべりが生じて内部摩擦角は一定であるとして解析を行う。解析にあたってはインターフェイス要素を用いて不連続面の条件を満足させる。

このモデルを用いて次のような問題を解く。まず解析領域の外縁およびトンネル壁面に初期応力を作用させる。次にトンネル壁面に作用させた応力を減少させ岩塊が崩落した時の応力の低減率を限界応力解放率として求める。

図 2 のように不連続面の右边下端を 0、頂点を 1、左辺下端を 2 とした時の不連続面上の各点における破壊時の応力解放率を図 3 に示した。不連続面上のすべての場所で同時に破壊が起きるのではなく、不連続面上のある点において生じた破壊が徐々に進展する進行性破壊となっている。

まず土被り 50m のもとで岩塊位置を変化させて限界応力解放率を求め、図 4 に示した。横軸はトンネル中心と岩塊頂点を結んだ線が鉛直軸となす角度を表す。本論文では $c = 0.1\text{MPa}$ 、 $\phi = 20.6^\circ$ に対する結果を示す。側圧係数が 0.5, 0.75 の場合は岩塊位置が 90° 即ち岩塊がトンネル側面にある場合に最小の限界応力解放率をとることが分かる。

側圧係数が同じであれば土被り厚を変化させても限界応力解放

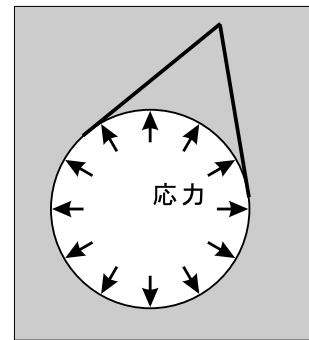


図 1 円形トンネルとくさび型岩塊

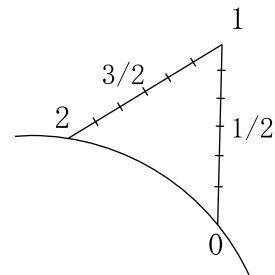


図 2 不連続面上の位置

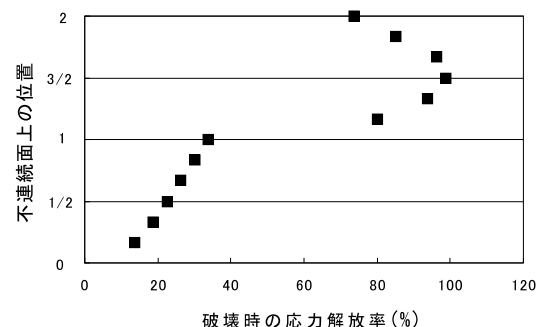


図 3 不連続面上の各点における破壊時の応力解放率

率が最小となる岩塊位置はほとんど変化しない。それぞれの側圧係数に対して限界応力解放率が最小となる岩塊位置のトンネルの土被り厚を変化させて岩塊の崩落解析を行った結果を図5に示す。いずれのケースでも限界応力解放率は深度が大きくなるにつれて減少していることが分かる。ここで求められた限界応力解放率を用いて式1より設計時に覆工が負担しなければならない支保内圧率が求められる。

$$\text{必要支保内圧率} = \text{設計応力解放率} - \text{限界応力解放率} \dots\dots\dots (1)$$

ここで設計応力解放率とは岩塊崩落に対して確保すべき応力解放率とする。例えば設計応力解放率120%というトンネルの掘削を完了したとき岩塊崩落までまだ20%の応力解放が可能であるように設計を行うということを意味する。

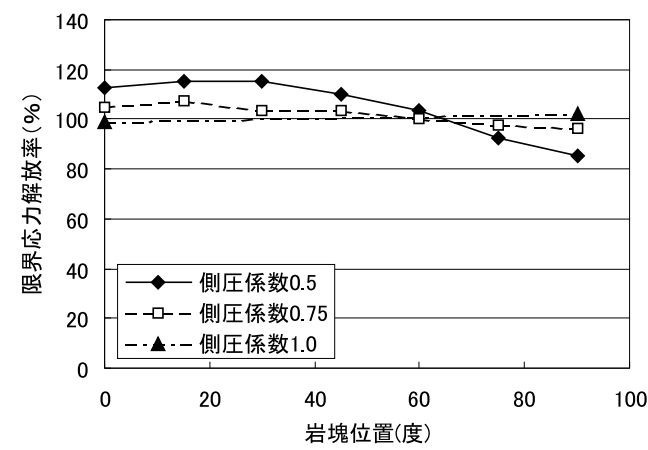


図 4 岩塊位置と限界応力解放率の関係

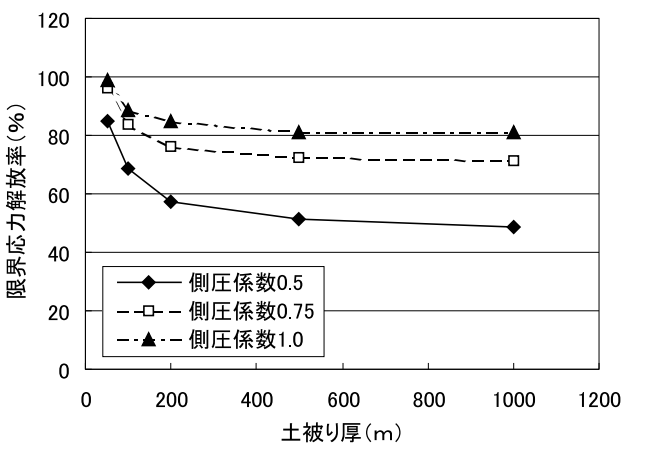


図 5 土被り厚と限界応力解放率の関係

3. 覆工厚の計算

トンネル覆工を設計する際の条件としてここでは(1) 覆工が圧縮破壊しない(2) 岩塊が支保内圧の作用により崩落しない、の二つを考える。(1)の条件を満たすためには覆工内の応力が覆工の圧縮強度以下であることが必要であり、また(2)の条件を満たすためには覆工からトンネル壁面に作用する応力の初期地圧に対する比率が式1で求められる必要支保内圧率以上であることが必要である。

ここでは覆工からトンネル壁面に働く応力および覆工に発生する軸圧縮応力を軸対称問題に対する弾性解を用いて求めた。側圧係数が1.0でない問題に対しては初期地圧の最大主応力を用いたが、軸対称問題の解を近似的に用いることの妥当性、精度の検討を別に行う必要がある。通常の方法に従い、所定の応力解放率に達してから覆工を導入することとし、応力解放率が100%に達した時に覆工からトンネル壁面に作用する応力と覆工に発生する軸圧縮応力を求めた。

図6は側圧係数が1.0の場合のトンネル覆工について覆工の圧縮強度を40MPa、設計応力解放率を120%、覆工導入時応力解放率を40%、岩盤の弾性係数を500MPa、コンクリートの弾性係数を25GPa、トンネル直径を5mとした時に上記の二つの条件をそれぞれ満たす最小の覆工厚を示したグラフである。この図より、土被りが200mまでのトンネルの場合岩塊が崩落しないという条件が覆工設計の決定条件になるのに対し、それ以上の深さのトンネルの場合では覆工の圧縮破壊が決定条件となることが分かる。このように覆工厚を決定することができる。

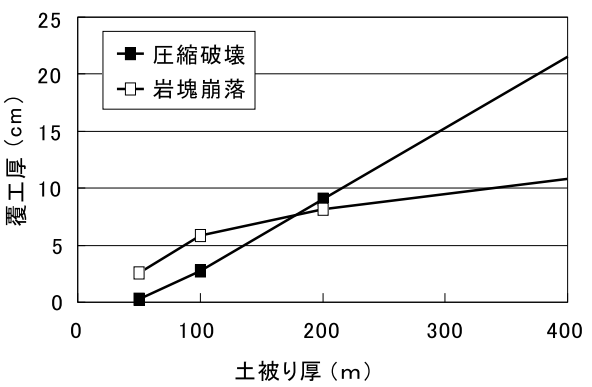


図 6 覆工厚と土被り厚の関係

4. まとめ

本論文では岩盤の崩落と覆工の圧縮を限界状態とした場合の解析に基づくトンネル覆工の設計方法を提示した。この手法の妥当性を示すことが重要であるが、このためには、例えば同じ手法に基づいて施工実績の多い二車線トンネルの解析を行い、変状事例や計測結果との比較を行うことが必要であると考えられる。