

(32) 節理性岩盤中に掘削したトンネル壁面の肌落ち領域の推定

東急建設(株) 正会員 ○壺内 達也

Estimation of failure regions around a tunnel in jointed rock

Tatsuya Tsubouchi, Tokyu Construction Co., Ltd.

Abstract

Failure regions around a tunnel in jointed rock are estimated in this paper. Joint distributions, stresses around a tunnel and the failure criterion are simply assumed. A strict estimation can not be performed by this method. However, This method does not need any surveys about joint distributions and stresses. Rough Estimation can be performed by this method using a pocket calculator. So, this method fits for practical use.

We are going to use this method in a design of previously installed systematic rockbolts.

1. はじめに

母岩自身の強度は十分あり力学的に安定するトンネルであっても、節理の多い岩盤中に掘削されたトンネルでは、壁面の肌落ちが問題になる。肌落ちに対しては、ロックボルトや吹付けコンクリートで対処するのが一般的である。しかし、ロックボルトの長さや打設ピッチ、コンクリートの吹付け厚は、過去の実績や経験に基づいて決定されている。この際の理論的根拠は明らかにされていない。

節理の多い岩盤中に掘削された空洞の安定性を評価する手法には、Goodmanによるキープロック理論、カンダールモデル、川井モデル、DEM等が挙げられる。これらの方法は、大規模な斜面や地下空洞を対象に考案されたものであり、大掛かりな調査や、解析が必要となる。

これらの方法を、トンネル壁面の肌落ち評価に用いるのは、あまりにも大掛かりで不経済である。調査、解析にかかる費用とその精度を考えると、過去の実績と経験から判断して、支保を決定する方法が取られてきたのは理にかなっている。

しかし、単純な理論により簡易的に肌落ちの評価ができれば、過去の実績と経験から決定した支保の妥当性を定量的に評価できる。そこで、簡易的に肌落ち評価を行う手法を考え、ここに提案する。

2. 前提条件

問題を単純化するために以下の前提条件を設ける。

- ① トンネル周辺の節理分布状況は、図1に示すように不規則であり、卓越する方向は特定できない。
- ② トンネル掘削前の岩盤に作用している初期応力とトンネルの形状は、図2に示すように左右および上下対称とする。
- ③ 天端および側壁の肌落ちは、節理面が図3のように組み

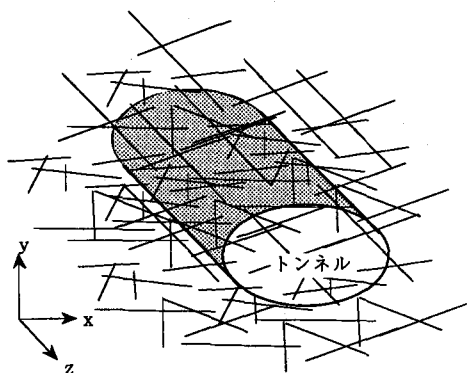


図1 対象とする節理の分布状態

合った場合を考える。

④切羽の肌落ちは節理面が図4のように組み合った場合を考える。

⑤節理面のすべりに対する基準は以下の式で与える（図5参照）。→

$$T > f \cdot N \quad (1)$$

ここで、

T：節理面に作用するせん断力

N：節理面に作用する垂直応力

f：節理面の摩擦係数

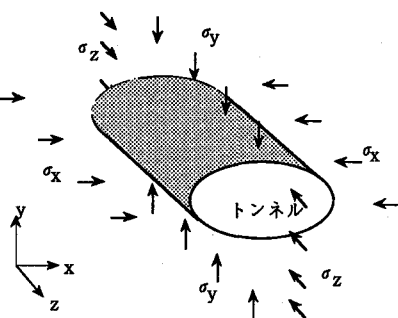


図2 トンネル周辺の初期応力

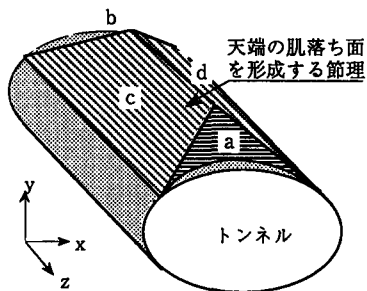


図3 天端の肌落ち形態

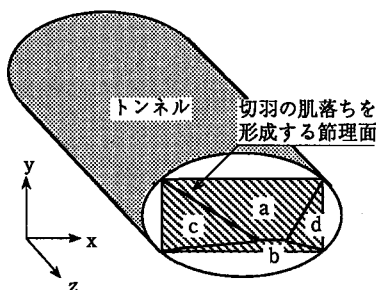


図4 切羽の肌落ち形態

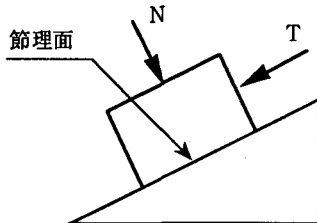


図5 節理面のすべりに対する基準

3. 天端および側壁の肌落ち

図3に示したa～cの節理面全てが式(1)を満たすときに、図3のブロックが崩落し、肌落ちが発生すると考える。

3.1 a、b面の検討

a、b面のすべりを検討するためにy-z平面で見た断面図を図6に示す。②の仮定より荷重およびトンネル形状が対称であるので、肌落ちブロックの半分を図6に示した。また、②の仮定より、図6の対象面に作用する力は、垂直力Pのみである。

図6に示した力の釣り合い図より、次式を得る。

$$\begin{aligned} T &= P \cdot \sin \theta \\ N &= P \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} \sin \theta &> f \cdot \cos \theta \\ \therefore \tan \theta &> f \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)がθの取り得る範囲であるが、トンネル延長は非常に長いので肌落ちの高さを示すhは、無限に取れる。

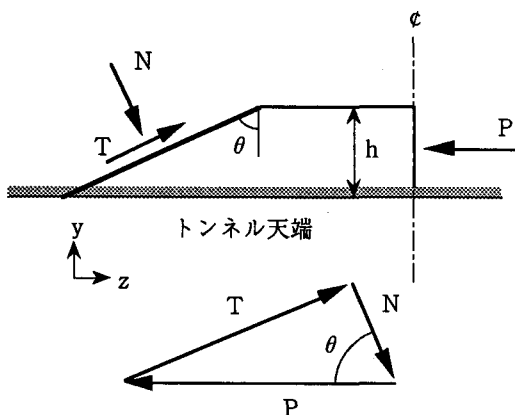


図6 a、b面の崩落の検討（天端）

したがって、 h に関係なく a 、 b 面の様な節理の中には必ず式(1)を満たし、すべる可能性のあるものが存在する。

3.2 c、d面の検討

c、d面のすべりを検討するために $x-y$ 平面で見た断面図を図7に示す。②の仮定より荷重およびトンネル形状が対称であるので、肌落ちブロックの半分を図7に示した。また、②の仮定より、図7の対象面に作用する力は、垂直力 P のみである。

図7に示した力の釣り合い図より式(2)式(3)と同じ式を得る。

図8 bは、考えられるc、d面の中で最大の肌落ち高さを与えるものを示した図である。この時、 θ と肌落ち高さ h の間には次式の関係がある。

$$\tan \theta = \frac{r}{\sqrt{(h+r)^2 - r^2}} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入することにより、次式を得る。

$$h < -r + r \sqrt{1 + \frac{1}{f^2}} \quad (5)$$

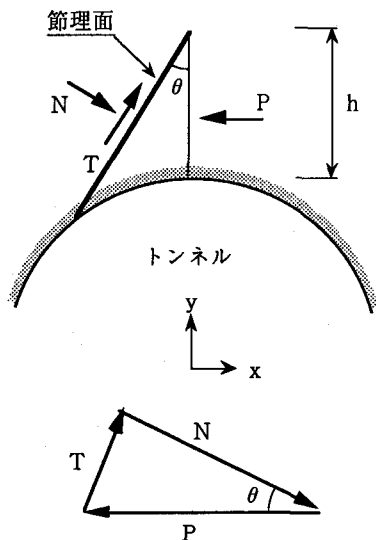
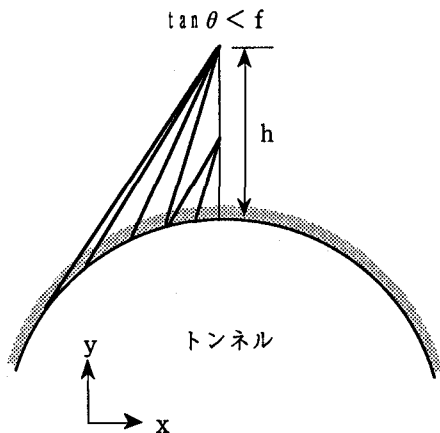
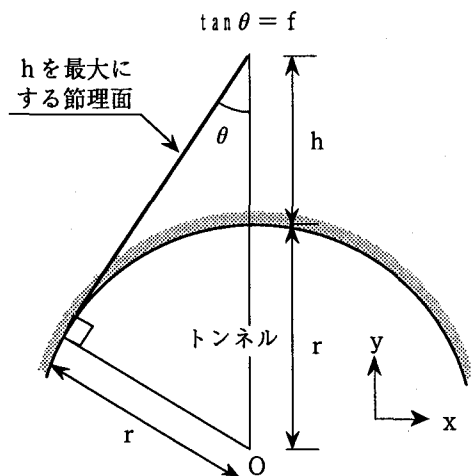


図7 c、d面の検討(天端)



a) 肌落ち可能な節理面



b) h が最大となる肌落ちの形態

図8 肌落ち可能なc、d面と最大の崩落を与えるc、d面

3.3 全体の検討

3.1より h に関係なくすべる可能性のある a 、 b 面が存在する。3.2より h が式(5)を満たすときにすべる可能性のあるc、d面が存在する。

肌落ちブロックが崩落するためには、 $a \sim c$ 面全てがすべりらなければならない。

したがって、図3の肌落ちブロックの中で、一番高い崩落高さは式(5)で与えられる。

4. 切羽の肌落ち

図4に示したa～cの節理面全てが式(1)を満たすときに、図4のブロックが崩落し、肌落ちが発生すると考える。

4.1 a、b面の検討

a、b面のすべりを検討するためにy-z平面で見た断面図を図9aに示す。②の仮定より荷重およびトンネル形状が対称であるので、肌落ちブロックの半分を図に示した。また、②の仮定より、図9aの対称面に作用する力は、垂直力Pのみである。

図9aに示した力の釣り合い図より、3章と同様に次式を得る。

$$\tan \alpha > f \quad (6)$$

式(6)が α の取り得る範囲である。

4.2 c、d面の検討

c、d面のすべりを検討するためにx-z平面で見た断面図を図9bに示す。②の仮定より荷重およびトンネル形状が対称であるので、肌落ちブロックの半分を図に示した。また、②の仮定より、図9bの対称面に作用する力は、垂直力Pのみである。

図9bに示した力の釣り合い図より、同様に次式を得る。

$$\tan \beta > f \quad (7)$$

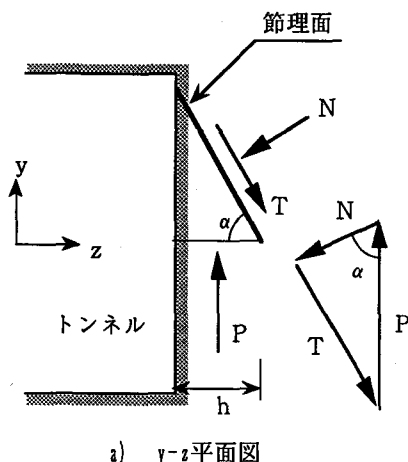
式(7)が β の取り得る範囲である。

4.3 全体の検討

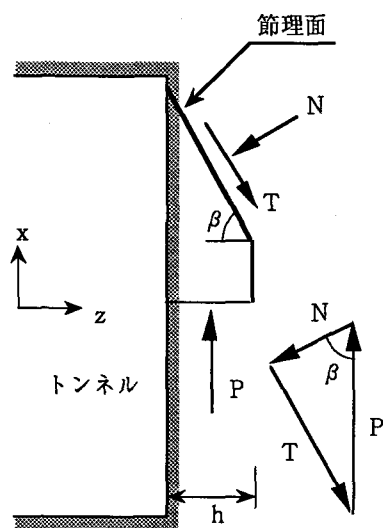
図4の肌落ちブロックが崩落するためには、a～c面全てがすべりなければならない。

したがって、 α 、 β がそれぞれ、式(6)、(7)を満足する必要がある。

このとき、崩落深さhが最大となる状態は図10の状態である。

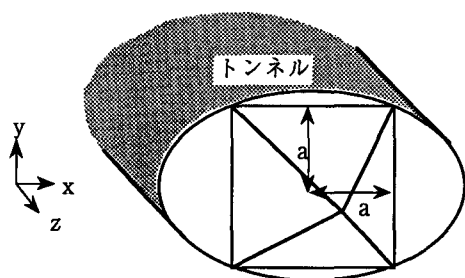


a) y-z平面図

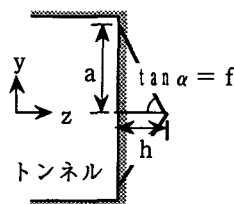


b) x-z平面図

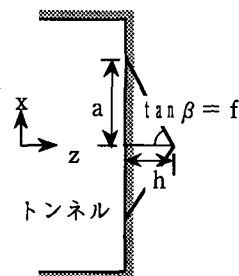
図9 切羽の肌落ちの検討



a) 全体図



b) y-z平面図



c) x-z平面図

図10 最大の崩落を与える切羽の肌落ち形態

図中の a は、トンネル断面に内接する正方形の一辺の長さの半分である。
この時には次式の関係がある。

$$\tan \alpha = \tan \beta = \frac{a}{h} \quad (8)$$

式 (8) を式 (6)、(7) に代入することにより次式を得る。

$$h < \frac{a}{f} \quad (9)$$

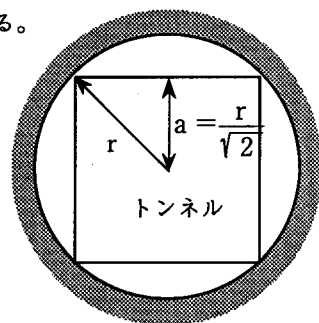


図12 円形トンネル断面と内接正方形の関係

5. 計算例

天端および側壁の肌落ち深さ h は第3章の式 (5) で与えられる。切り羽の肌落ち深さ h は、第4章の式 (9) で与えられる。この2つの式が本書の結論である。

この2つの式を用いて作成したグラフを図11に示す。なお、切り羽の肌落ちに対しては円形断面を考え、 a の値を次式で与えた (図12参照)。

$$a = \frac{r}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

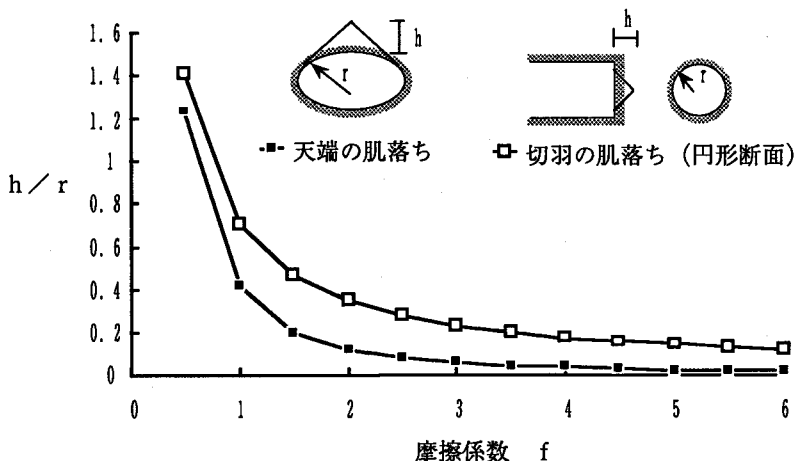


図11 肌落ちの深さ h とトンネル半径 r および摩擦係数 f の関係

6. おわりに

節理の多い岩盤中に掘削したトンネル壁面の肌落ちを評価する方法を示した。ここでは、節理の分布状況とトンネル形状の幾何学的な関係、初期応力分布、節理面のすべり基準等を大胆に仮定した。この大胆な仮定によって、単純な式でトンネル壁面の肌落ちを評価した。

この方法では、考えられる肌落ち形態の大部分を網羅でき、特別な調査を必要としないことから、実用的には有力な方法と考えている。

今後は、節理の多い岩盤中のトンネルに対して補助工法として用いられる先受けボルトの設計等に、本手法を適用して行きたいと考えている。