

(50) 不連続性岩盤内における円形トンネル周辺の不安定領域

(株)奥村組 技術研究所 正会員 ○ 西村 正夫
 " " 蛭子 清二

1. まえがき

岩盤には、多くの場合、岩目や割れ目あるいは層理、節理、断層などの不連続面が含まれている。このような不連続性を有する岩盤の力学的な安定性は、土質や砂質地盤とは異なるとらえ方で検討することが必要になる。すなわち、岩盤の不連続性の規模が比較的小さく、その方向や間隔がランダムであるような場合には、不連続性を含む岩盤全体をこれと等価な均質等方性の連続性岩盤モデルとして取扱うことも許されよう。しかし、節理などのようにその方向が規則的でその間隔も比較的大きな不連続面を含む岩盤になると、不連続面と不連続面との間にはさまれた岩塊の挙動と不連続面自体の挙動をそれぞれ個別に考慮することが必要になってくる。

ここでは、その挙動が主としてその中に存在する不連続面によって支配されるような不連続性岩盤を対象にして、円形トンネル開きに伴う周辺の力学的不安定領域について検討する。なお、符号は圧縮応力を正とする。

2. 不連続性岩盤の破壊モードと破壊規準

不連続性岩盤の破壊モードを検討するとき、たとえば図-1に示すように、与えられた荷重のもとで内在する不連続面(Discontinuity surface)とは無関係に岩塊(Intact rock)内部がせん断されて破壊が起こるのか(同図(a)参照)、不連続面上ですべて破壊が起こるのか(同図(b)参照)を判定しなければならない。このほかに、不連続面に引張り力

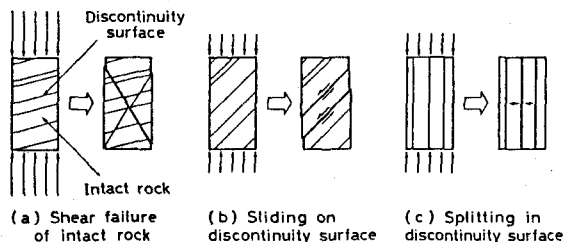


図-1 不連続性岩盤の破壊モード

が働くと分離破壊を起こす場合(同図(c)参照)もある。このように岩盤の応力状態と不連続面の傾斜方向との関係によって破壊モードも異なることがわかる。ここでは、このような岩盤の破壊規準について、図-2(a)に示すように不連続面間にはさまれた岩塊自体の破壊強度は不連続面自体のそれに比べて十分に大きいものと考え、不連続面の破壊規準のみを検討の対象にする。不連続面に沿って生じるせん断応力を τ 、これに垂直な方向に生じる圧縮の直応力を σ とすると、不連続面のすべり破壊規準は、

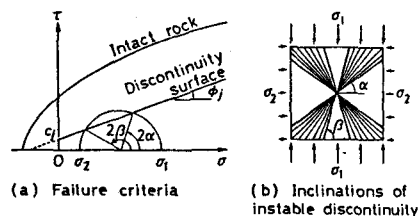


図-2 不連続性岩盤の破壊規準と不安定な不連続面の傾斜角との関係

$|\tau| = c_j + \sigma \tan \phi_j$ (ただし、 $\sigma \geq 0$)
 で与えられるものとする。ここで、 c_j 、 ϕ_j はそれぞれ不連続面の粘着力、内部摩擦角である。 σ が引張り応力($\sigma < 0$)の場合には、せん断すべりでなく、分離破壊を起こすものとする。このような破壊規準である不連続面を含む岩盤において、その主応力が σ_1, σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$)である図-2に示すような応力状態を考えてみる。このときの不連続性岩盤の不安定条件は、同図(b)に示すように、 σ_1 の主面に対して $\alpha \leq \psi \leq \beta$ を満足する傾斜角 ψ の方向に不連続面が存在するときに限られ、このときにすべり破壊を起こす可能性がある。

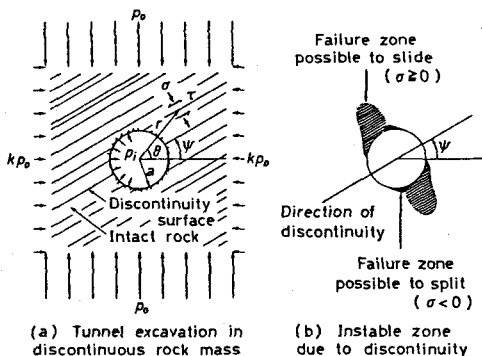
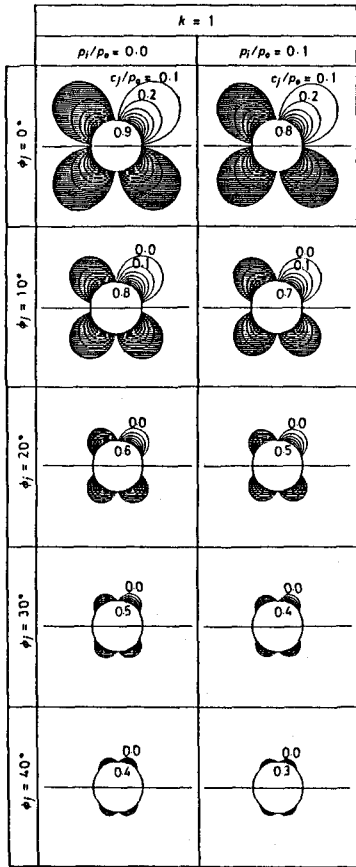


図-3 円形トンネル解析条件とその使用記号



$$\frac{r}{a} = \sqrt{\frac{(p_o - p_i) \sin(2\theta - \psi_j)}{c_j \cos \psi_j + p_o \sin \psi_j}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ただし, } r/a \geq 1 \\ \psi_j \leq \theta \leq \pi/2 \end{array} \right)$$

図-4 静水圧的な初期地圧状態下の空洞周辺の不安定領域に及ぼす内圧の影響

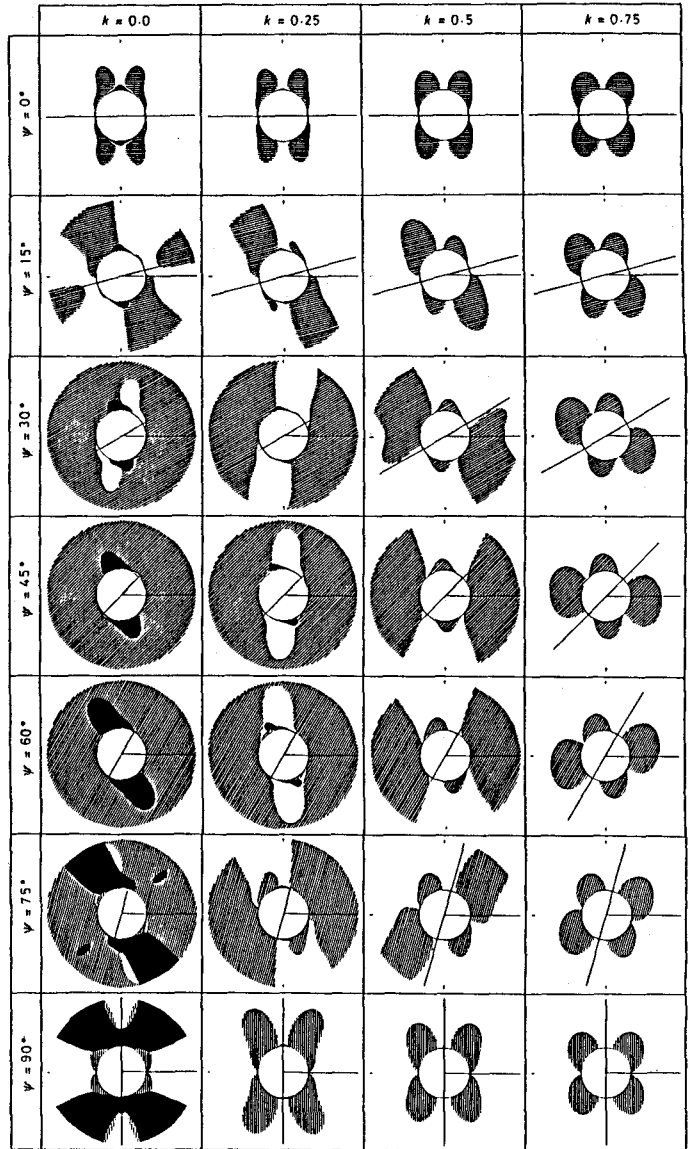
3. 円形トンネル周辺地山の不安定領域

不連続性岩盤内に円形トンネルを開き、
くしたとき、周辺地山の応力状態から不
連続面の破壊規準を満足する不安定領域
を求めてみる。解析条件は図-3(a)

に示すように、鉛直および水平方向にその大きさが p_o, kp_o であるような初期地圧下の岩盤内に半径 a の円形トンネルが開きくされた場合について考える。岩盤内には、その走向がトンネル軸と一致し、水平面との傾斜角が ψ であるような不連続面群が平行して存在しているものとする。トンネル中心を極とする極空標で表わした不連続面上の任意の点 (r, θ) において、不連続面に沿って生じるせん断応力を τ 、これに垂直な方向に生じる直応力を σ とすれば、素掘りトンネル（内圧 $p_i = 0$ ）の場合には、これら応力はそれぞれ次のように表わせる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{p_o} &= \frac{1+k}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \cos(2\theta - 2\psi) \right\} + \frac{1-k}{2} \left\{ \cos 2\psi + 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \sin(\theta - \psi) \sin(3\theta - \psi) + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \cos(4\theta - 2\psi) \right\} \\ \frac{\tau}{p_o} &= -\frac{1+k}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^2 \sin(2\theta - 2\psi) + \frac{1-k}{2} \left\{ \sin 2\psi + \left\{ 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right\} \sin(4\theta - 2\psi) \right\} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ただし、地山を連続} \\ \text{体と仮定した応力解} \end{array} \right) \end{aligned}$$

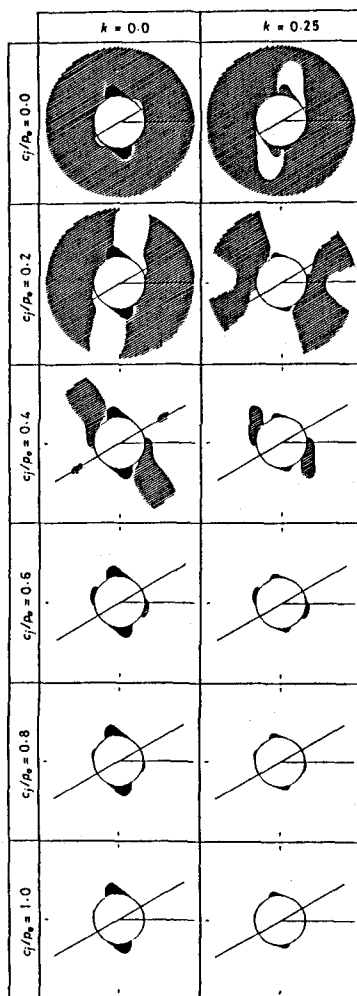
これら不連続面に生じる応力と 2. で述べた不連続面の破壊規準との関係から、図-3(b) に示すように、そ



Note: These results are the particular case for which $p_i/p_o = 0$, $c_j/p_o = 0.1$ and $\psi_j = 10^\circ$.

図-5 空洞周辺の不安定領域に及ぼす不連続面の傾斜角の影響

ここに不連続面が存在すれば破壊する可能性のあるトンネル周辺の不安定領域が求められる。ここで、斜線のハッチで示す領域は、その領域内に斜線方向の不連続面が存在すれば必ず破壊規準を満足し、その不連続面に沿ってすべり可能性のある不安定領域を示す。一方、黒塗りで示す領域は、その領域内に同様な方向の不連続面が存在すればその不連続面に垂直な方向に引張り力が働き、その面で分離する可能性のある不安定領域を示す。このような不安定領域算出に影響を及ぼす要因としては、初期地圧条件 p_0 、 k およびトンネル内圧 p_i のほかに不連続面の傾斜角 ψ とそのすべり破壊条件 c_j 、 ϕ_j とがある。応力の次元を持つ要因は p_0 によって除し、無次元化すれば k 、 p_i/p_0 、 ψ 、 c_j/p_0 、 ϕ_j の5要因になることがわかる。



Note: These results are the particular case for which $p_i/p_0 = 0$, $\psi = 30^\circ$ and $\phi_j = 10^\circ$.

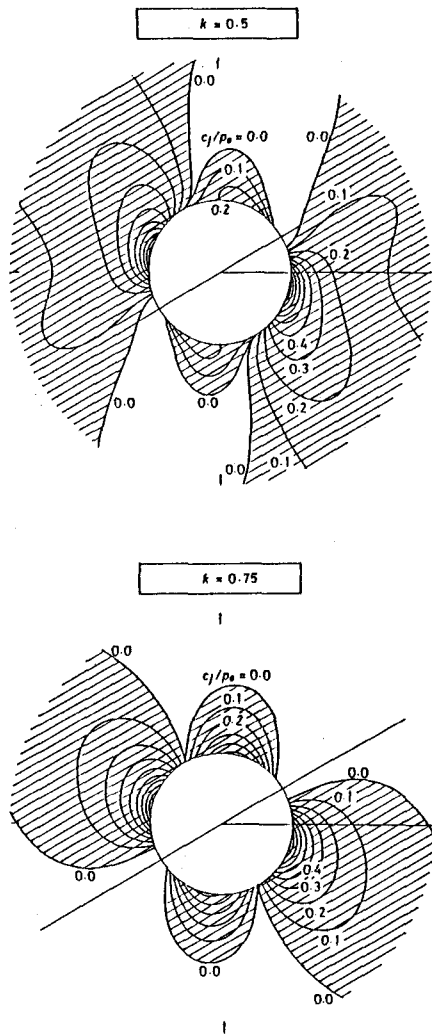


図-6 空洞周辺の不安定領域に及ぼす不連続面の粘着力の影響

不連続性岩盤内に開きくしたトンネル周辺の不安定領域について、具体的な数値例に

よる算出結果を比較対照の便を考え、 $1 \leq r/a \leq 3$ の範囲内で図解して示す。まず、静水圧的な初期地圧状態($k=1$)の事例として支保反力に相当する内圧の有無($p_i/p_0=0.0$ および 0.1 の相違)について、不連続面の強度特性である ϕ_j を変化させた場合の不安定領域をパラメータ c_j/p_0 で示すと図-4のようである。次に、初期地圧条件 $k=0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ のそれぞれについて、影響要因を $p_i/p_0=0$ 、 $\psi=30^\circ$ 、 $c_j/p_0=0.1$ 、 $\phi_j=10^\circ$ と一定にした中で、 ψ を変化させた場合の不安定領域を図-5に、 c_j/p_0 を変化させた場合の不安定領域を図-6に、 ϕ_j を変化させた場合の不安定領域を図-7に示す。なお、図-5~7では $k=1$ の場合を省略したが、これについては図-4の該当するものを参照し、不連続面の傾斜方向が一致するように回転して比較すればよい。以上の図解例を参照して、トンネル周辺の不安定領域に及ぼす影響要因についてその主な傾向を列挙すると、

- 静水圧的な初期地圧状態($k=1$)のもとでは、支保反力に相当する内圧 p_i を初期地圧 p_0 の1割程度($p_i/p_0=0.1$)以内と考えれば、内圧の有無による不安定領域へ及ぼす影響(図-4参照)は小さい。
- 引張り応力による不連続面の分離破壊領域(黒塗り部)は $k < 1/3$ である一軸状態に近い初期地圧条件のときに発生し、その発生場所は不連続面の傾斜方向にかかわらず、ほぼトンネル上下盤の壁面近傍に限られる。

iii. すべり破壊可能領域(ハッチ部)は不連続面の傾斜角が $45^\circ \sim 60^\circ$ 程度(目安には $\psi = 45^\circ + \phi/2$) のときに最もその範囲が広くなり、周辺地山は不安定になる。

iv. すべり破壊可能領域の発生場所は、一般にトンネル中心を通る不連続面方向を示す案内線に共に斜交するX字型をなす2直線の4方向の地山内へ進展する。

4. あとがき

不連続性岩盤を対象にした円形トンネル開き時の周辺地山の不安定領域について、その影響要因による2次元極限平衡解析を行った結果の概要を図解して示した。ここでは単一の傾斜方向の不連続面群について検討したが、共役節理など複数組の傾斜方向を持つ不連続面群についても以上の結果を重ね合せれば利用できる。また、不連続面の存在を3次元へ拡張することも容易である。ただ、不連続面自体については、不連続面が開口している場合もあれば充てん物で閉じている場合もあり、その強度特性の推定が今後の課題である。しかし、各要因の及ぼす影響の度合いが定量的に把握できたことから、たとえば応用例として図-8, 9に示すように、求めた不安定領域からロックボルト打設パターン(配置, 方向や長さ)やグラウト注入方法(注入孔の配置, 注入範囲や深さ)の検討や浮石, キー・ブロックなどの推定を行う上で簡便な解析法として応用できるものと考えられる。

最後に、有益な御助言を賜った京都大学工学部資源工学教室の斎藤敏明博士、日本アイ・ビー・エムの浅井達雄氏に深く感謝の意を表す。

参考: (株)奥村組「技術研究年報」, No. 10, (1984), pp. 1~15

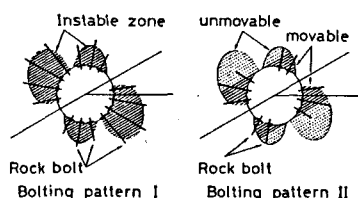
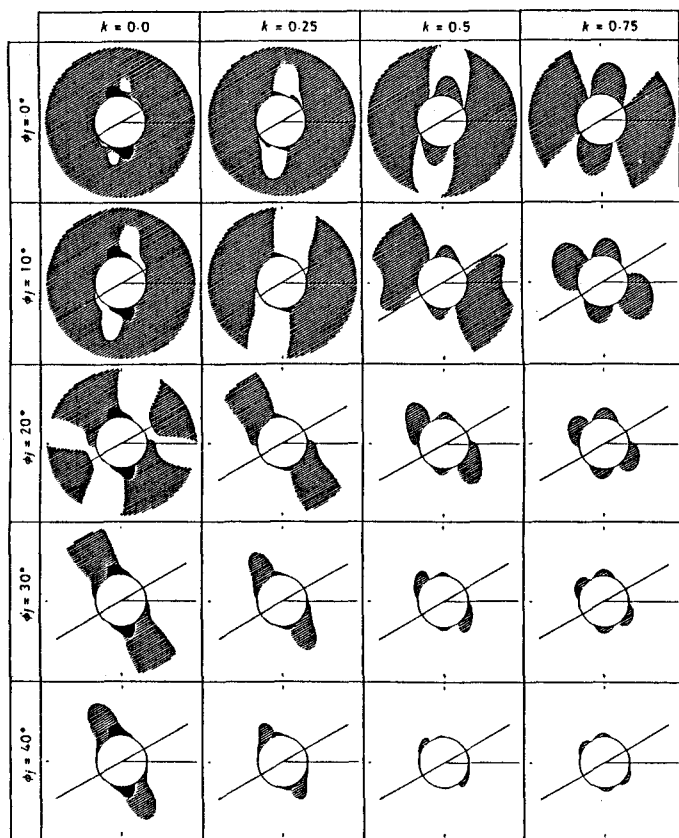


図-8 空洞周辺の不安定領域と支保パターン



Note: These results are the particular case for which $p_1/p_0 = 0$, $\psi = 30^\circ$ and $c_j/p_0 = 0.1$.

図-7 空洞周辺の不安定領域に及ぼす不連続面の内部摩擦角の影響

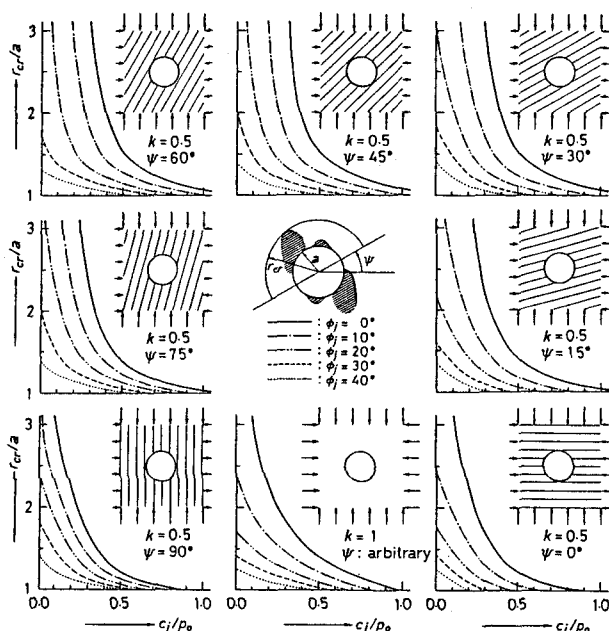


図-9 空洞周辺の不安定領域を示す指標としての最大変位

(50) LIMITING EQUILIBRIUM FOR A DISCONTINUOUS

ROCK MASS AROUND A CIRCULAR TUNNEL

by

Masao NISHIMURA

and

Seiji EBISU

Technical Research Institute
OKUMURA CORPORATION

A rock mass mostly contains discontinuities, such as faults, joints, cracks, and beddings, which have developed through geological activities, mining operations or construction works. The mechanical behavior of a rock mass, affected by these discontinuities, should be analyzed in another way unlike isotropic soil. There are four different failure modes for a rock mass with discontinuities, depending whether the failure is caused by tensile stress or shear stress, and whether the failure occurs along by the discontinuities or across them. The purpose of this paper is to clarify the mechanical effects on a rock mass, of parallel plane joints in the rock mass around a circular tunnel, the axis of which is aligned parallel to the strike of the joints.

The assumptions for analyses are i) a rock mass is composed of intact rock blocks and joints, ii) the strength of the joints is far below in comparison with that of intact rock blocks, and iii) the behavior of joints obeys the linear Mohr-Coulomb failure criterion. The failure conditions of a rock mass, therefore, are based on the mechanical properties of the joints and the orientation of the stress field.

Since stress analyses are exceptionally complicated due to stress discontinuity which takes place in joints, a theory of limiting equilibrium is employed to simplify them by assuming that joint spaces are infinitesimal and that calculation for rock stresses is based on the condition that a rock mass is elastic, continuous, homogeneous and isotropic.

The factors which govern instable zones satisfying the failure criterion are both vertical and horizontal in situ rock stresses, p_o , $k p_o$, internal pressure equivalent to the supporting pressure, p_i , inclination angle of joints, ψ , and strength constants of joints, c_j , ϕ_j . Variations of instable zones are illustrated for nondimensional parameters, k , p_i/p_o , ψ , c_j/p_o , and ϕ_j .

The results of this study, for example, help us make decision in selecting locations effective for rock bolt installation. These are also helpful as a practical standard when applied to design and support for underground excavations.