

(34) 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 (第2報)

榊奥村組 技術研究所 正会員 ○蛭子 清二 西村 正夫

1. はじめに

岩盤には、通常、岩目や割れ目あるいは層理、節理、断層といった不連続面が含まれている。ここでは、岩盤全体の挙動が主として内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としてとりあげる。このような不連続性岩盤内に円形トンネルが開さくされた場合、不連続面の位置や方向性も、その強度や初期地圧などと同様に、トンネルの力学的な安定性を支配する重要な要因となってくる。

前報^{*})では、円形トンネル横断面の二次元場において、支配要因に初期地圧、不連続面の強度とその傾斜角および支保反力に相当するトンネルの内圧をとりあげ、不連続面に沿ってせん断すべりや分離破壊が発生する可能性のあるトンネル周辺岩盤の力学的な不安定領域を明らかにした。

本報では、トンネル切羽周辺の三次元場において、トンネル形状および初期地圧を軸対称なものと仮定し、切羽周辺に発生する不安定領域の空間的な分布を前報と同様な手順で求める。初期地圧と不連続面の方向性との二つの要因を主眼として、この不安定領域の発生に及ぼす影響について検討を加える。また、トンネル切羽に対する不連続面の方向性には流れ目と差し目とがあり、両者の不安定領域の比較も試みる。

2. 不連続性岩盤の破壊モードと解析条件

不連続性岩盤の破壊モードには、たとえば図-1に示すように、ある応力下で内在する不連続面とは無関係に岩塊内部がせん断されて破壊が発生する場合 (同図(a) 参照)、不連続面に沿ったすべりによって破壊が発生する場合 (同図(b) 参照) および不連続面に発生する引張応力によって不連続面で分離破壊が発生する場合 (同図(c) 参照) が考えられる。ここでは、不連続面間にはさまれた岩塊自体の破壊強度が不連続面のそれに比較して十分に大きいものと考えて不連続面の破壊規準のみをとりあげる。すなわち、破壊面の方向が岩盤に内在する不連続面によって定められることになり、図-1の(b)、(c)に示した破壊モードのみを検討の対象にする。

不連続面に沿って発生するせん断応力を τ 、これに垂直な方向に発生する圧縮の直応力を σ とし、不連続面のすべり破壊規準が、

$$|\tau| = c_j + \sigma \tan \phi_j \quad (\sigma \geq 0) \dots \dots \dots (1)$$
 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。 $\sigma < 0$ (引張り) の場合には、すべり破壊ではなく分離破壊が発生するものとする。

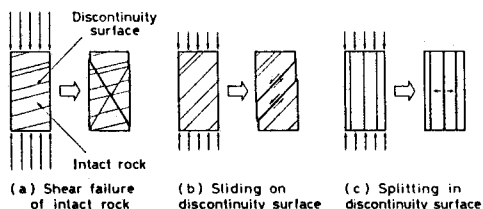


図-1 不連続性岩盤の破壊モード

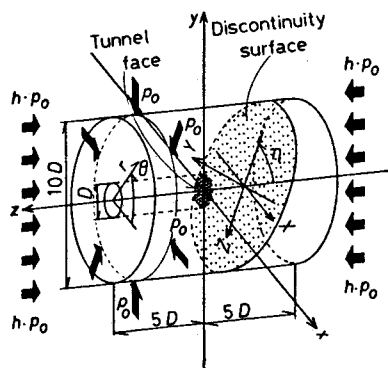


図-2 解析モデル

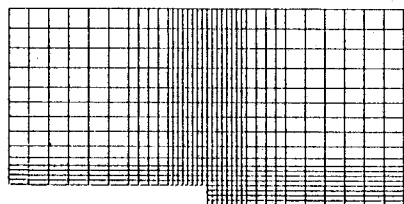


図-3 要素分割

*) 「第17回岩盤力学シンポジウム講演論文集」, pp.241~245

解析モデルを図-2に示す。トンネルの直径をDとし、トンネル軸であるz軸およびこれと直交するx軸は水平面上にあるものとする。トンネル開さく前の初期地圧は、トンネル軸回りに対称な静水圧的な地圧 p_0 とトンネル軸方向地圧 $h \cdot p_0$ とが作用しているものとする。不連続面はその走向がトンネル軸に直交しているものとし、不連続面とトンネル軸（水平面）とのなす角度を η とする。同図の(X, Y, Z)は、Y軸が不連続面の法線方向となるように、基準直交座標(x, y, z)をx軸の回りに角度 η 回転した不連続面に関する局所座標である。

応力については、岩盤を連続体と仮定し、図-3に示す要素分割を用いた有限要素法による軸対称掘削解析結果を利用する。解析結果の応力を(X, Y, Z)座標に変換して応力成分 $\{\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \tau_{XY}, \tau_{YZ}, \tau_{ZX}\}$ が定まる。不連続面に垂直な方向の直応力 σ は、

$$\sigma = \sigma_Y \dots\dots\dots (2)$$

であり、せん断応力 τ は合せん断応力として、

$$|\tau| = (\tau_{XY}^2 + \tau_{YZ}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるものとする。これらと式(1)を用いて、不連続面に沿ってすべり破壊が発生する可能性のある領域および不連続面で分離破壊が発生する可能性のある領域の二種類の不安定領域を求めることができる。

3. 円形トンネル切羽周辺の不安定領域

円形トンネル切羽周辺の不安定領域に影響を及ぼす要因に

は、初期地圧条件 p_0 、 h 、不連続面のトンネル軸に対する傾斜角 η およびその強度条件 c_j 、 ϕ_j がある。応力の次元を持つ要因を p_0 によって除し無次元化すれば、 h 、 η 、 c_j/p_0 、 ϕ_j の四要因になる。このうち、不連続面の粘着力を $c_j/p_0 = 0$ 、内部摩擦角を $\phi_j = 20^\circ$ に固定して、軸方向の初期地圧比 h および不連続面の傾斜角 η が不安定領域の空間的な分布に及ぼす影響を図解して示す。

軸方向の初期地圧比 $h = 0.5$ 、1、2のそれぞれについて、不連続面の傾斜角 $\eta = 0^\circ$ （水平）、 15° 、 30° 、 $\dots\dots$ 、 90° （鉛直）に変化させた場合の不安定領域を、トンネル軸を含む縦断面と横断面とで表わせば図-4～9のようである。各図とも縦方向にパラ

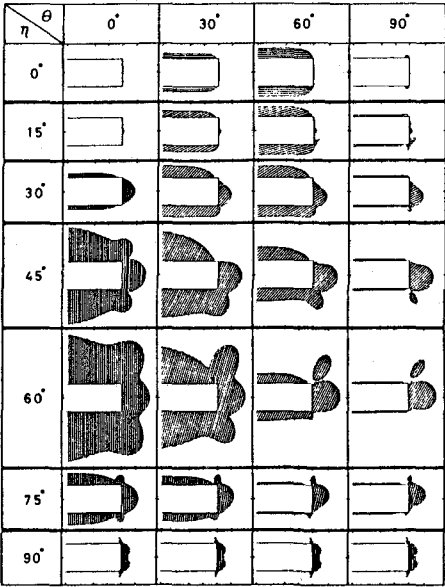


図-4 不安定領域（縦断， $h=0.5$ ）

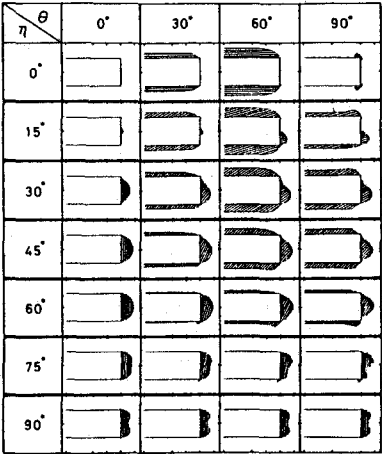


図-5 不安定領域（縦断， $h=1$ ）

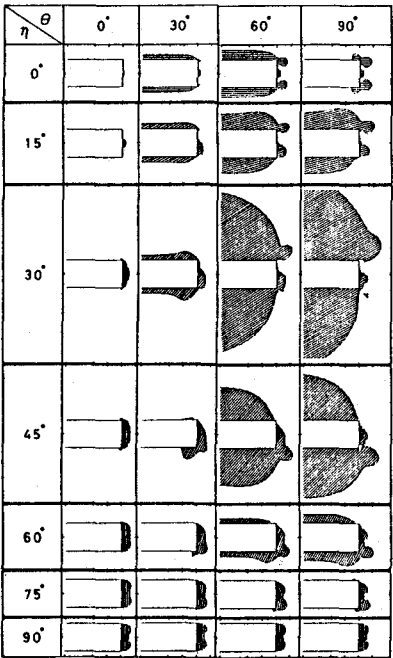


図-6 不安定領域（縦断， $h=2$ ）

メータである不連続面の傾斜角 η をとってある。横方向には、不安定領域の空間的な分布を二次元表示するため、図-4～6の縦断では、水平面からの傾角 θ がそれぞれ $\theta=0^\circ$ （水平面）、 30° 、 60° 、 90° （鉛直面）の傾斜縦断面の変化をとり、図-7～9の横断では、トンネル軸方向の切羽からの距離がそれぞれ $z/D=2$ 、 1 、 0.5 、 0 、 -0.5 の横断面の変化をとってある。図中のハッチ部分は、そこに斜線方向の不連続面が存在すれば、応力が式(1)の破壊規準を満足し、不連続面に沿ってすべり破壊が発生する可能性のある領域を示す。一方、黒塗り部分はそこに同様な方向の不連続面があれば、それに引張力が働き、その面で分離破壊が発生する可能性のある領域を示す。なお、図-4～9では不連続面の傾斜が $\eta>0$ であり、トンネルの切羽に対して不連続面が流れ目の場合に相当する。不連続面の傾斜が $\eta<0$ なる差し目の場合の不安定領域は、前掲の図-4～9の上下を逆にして見ればよい。

不安定領域の大きさについて、切羽前方への最大進展距離を z_f 、半径方向の最大進展距離を r_f とし、 z_f および r_f と不連続面の傾斜 η との関係を軸方向初期地圧比 h をパラメータにして図-10、11に示す。また、図-12は鉛直縦断面について流れ目と差し目の比較を試みたものである。図中の黒塗り部分は、求めた不安定領域の中で不連続面に沿ってトンネル内へ移動できる領域（移動可能領域）を示している。

以上の結果から、不連続面の方向性（ η ）および軸方向初期地圧比（ h ）が切羽周辺の不安定領域に及ぼす影響をまとめると次のようになる。

- i . 初期地圧がトンネル軸方向も含めて静水圧的な場合（軸方向初期地圧比 $h=1$ ）、切羽前方における不安定領域の進展距離は不連続面の傾斜角 η が $45^\circ \sim 60^\circ$ 付近で最大となる。一方、トンネルの半径方向の不安定領域は不連続面が水平（ $\eta=0^\circ$ ）のときに最大となり、 η が傾斜するにつれて徐々に小さくなる。

（図-5,8,10,11参照）

- ii . 軸方向初期地圧比 h が1よりも小さくなると、トンネル半径方向の不安定領域は大きくなり、切羽前方の不安定領域も不連続面の傾斜角が $\eta=0^\circ \sim 15^\circ$ 付近を除いて大きくなる。特に、不連続面

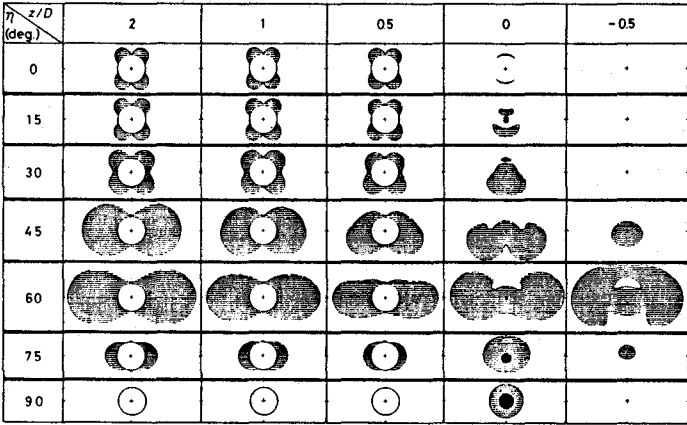


図-7 不安定領域（横断, $h=0.5$ ）

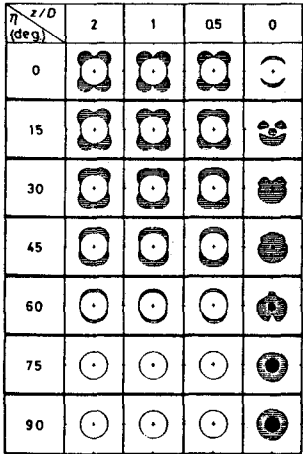


図-8 不安定領域（横断, $h=1$ ）

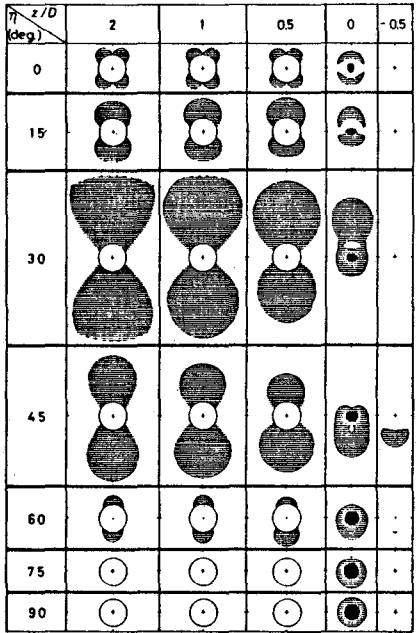


図-9 不安定領域（横断, $h=2$ ）

の傾斜角が $\eta = 60^\circ$ 付近で不安定領域の両方向への進展距離が最大となる。(図-4,7,10,11参照)

iii. 軸方向初期地圧比 h が1よりも大きくなると、切羽前方およびトンネル半径方向の両方向の不安定領域が大きくなる。特に、不連続面の傾斜角が $\eta = 30^\circ$ 付近で不安定領域の両方向への進展距離は最大となる。

(図-6,9,10,11参照)

iv. 軸方向初期地圧比 h が1よりも小さくなると、不安定領域は不連続面の走向(水平)方向に卓越して発生するようになる。逆に、 h が1よりも大きくなると、不安定領域は不連続面に直交する(鉛直)方向に卓越して発生するようになる。(図-4,6,7,9参照)

v. 引張応力により不連続面で分離破壊する可能性のある領域は切羽近傍にのみ発生し、その領域は小さい。(図-4~9参照)

vi. 不安定領域の中でトンネル内へ移動可能な領域は、切羽では流れ目の場合にのみ発生している。

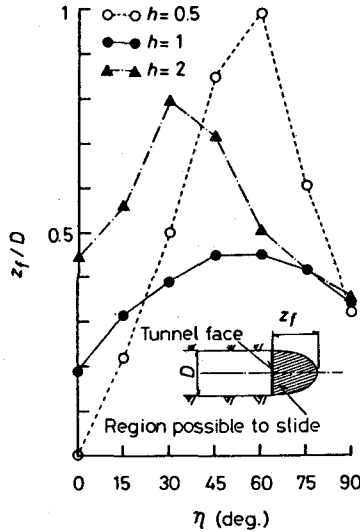


図-10 切羽前方の不安定領域

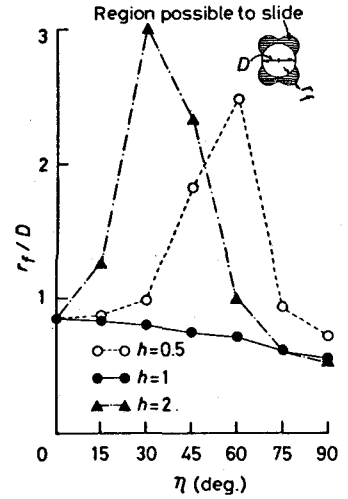


図-11 半径方向の不安定領域

しかし、差し目の場合でも切羽近傍に引張応力が発生していることから、不連続面で分離破壊が発生して崩壊の可能性が考えられる。(図-12参照)

vii. トンネル天端の移動可能領域は、流れ目で切羽の斜め前方からの移動可能領域を除けば、流れ目と差し目でその大きさに差異は認められない。

(図-12参照)

なお、不連続面の走向が任意の方向をなす場合についても、応力分布がトンネル軸に関して対称であることから、軸回りに回転したモデルで考えれば、上述の結果を利用できる。

4. おわりに

本報では、不連続面の強度が小さく、破壊面の方向が不連続面で規定されるような岩盤をとりあげた。今後、不連続面とこれにはさまれる岩塊の強度に大差がない場合、岩盤の破壊が不連続面および岩塊の両方の強度に支配されるとして、岩盤の強度に異方性を組み込んだモデルで検討を予定している。

最後に、貴重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に深く感謝の意を表する。

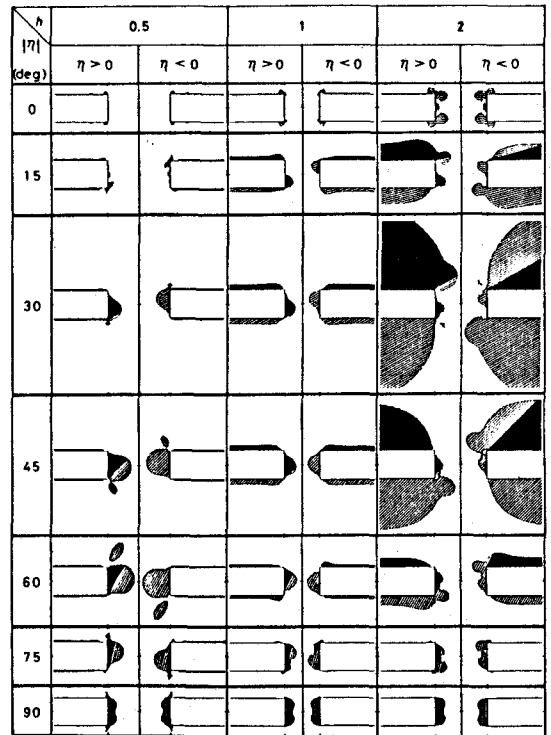


図-12 流れ目と差し目の比較(鉛直縦断面)

(34) LIMITING EQUILIBRIUM FOR A DISCONTINUOUS ROCK MASS
AROUND A CIRCULAR TUNNEL - II A three dimensional case

Seiji EBISU & Masao NISHIMURA
Technical Research Institute
Okumura Corporation

When a circular tunnel is driven through discontinuous rock mass, the rock mechanical stability around the tunnel is significantly influenced not only by the strength of the discontinuity planes and the initial rock stresses but also by the location and orientation of the discontinuities. In this paper, the spatial distribution of the instable zones, which are possible to slide or split along or on the discontinuity planes in the vicinity of the tunnel face, is studied taking into account the factors above.

The following assumptions were employed in the analysis. Firstly, the strength of the discontinuities is so small that the failure of the rock mass can only occur along the discontinuity planes and thus the direction of the failure can be determined by the inherent discontinuities of the rock mass. Secondly, the initial stresses are hydrostatic ground pressure symmetrical around the tunnel axis and horizontal ground pressure parallel to the axis. Thirdly, an elastic axisymmetric finite element technique is used to obtain the stress distribution. Fourthly, the strike of the discontinuity surfaces is assumed to be perpendicular to the tunnel axis so that the dip angle is only considered in the analysis. Lastly, the theory of limiting equilibrium is employed to find out the instable zones where the Mohr-Coulomb failure criterion is satisfied.

Following results were obtained through the analysis. The spatial distribution of the instable zones varies as the initial rock stresses vary and shows a tendency to occur in a certain direction. In both the radial direction in the analytical domain and the axial direction at the tunnel face, the maximum instable zones develop at certain dip angles. The instable zones which are able to move into the tunnel only appear when the angle between the horizontal plane and the discontinuity plane is positive. At the tunnel crown, there is little difference between the extent of movable instable zones at positive dip angles and the one at negative angles, except for the zones in the upper front of the face.

These results can be well applicable to designing of tunnel excavation and supports.