

(12) 大規模地下空洞の情報化施工のための

確率ブロック理論の提案

京都大学工学部 水戸 義忠
菊地 宏吉

Stochastic Block Theory for the Observational Construction of Underground Opening

Yoshitada MITO, Kyoto University
Kohkichi KIKUCHI, Kyoto University

Abstract

Stochastic block theory is suggested for carrying out the observational construction of underground opening. Deterministic rock joint information which is observed on the excavated wall of the underground opening can be available for estimating the probability of existence of key block.

1. はじめに

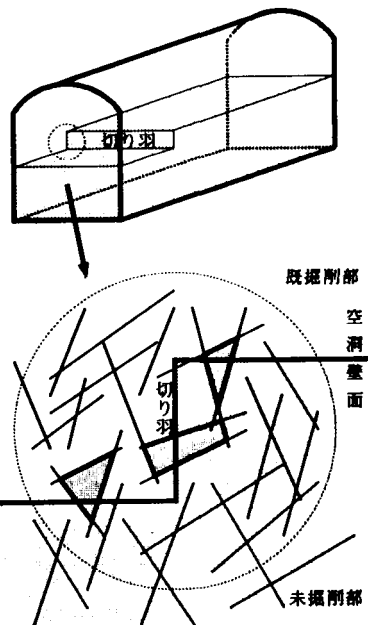
近年、地下発電所地下空洞や燃料貯蔵地下空洞などの大規模地下空洞が多数建設されているが、これに伴って、岩盤内に存在する不連続面の適切な評価が望まれているところである。

大規模地下空洞の断面の寸法は一般的なトンネル断面の寸法と比較して大規模であるため、その安定性に対する不連続面の及ぼす影響はトンネルの場合とは異なってくる。これは、空洞断面の寸法が大きくなることによって、不連続面が壁面に交差する確率が増加し、不連続面で囲まれた不安定なブロックが生じやすくなり、空洞の自立性が低下するためである。

GoodmanとShi¹⁾は、大崩壊の原因となる最も危険な状態にある不連続面(中規模不連続面が主体となる)で囲まれた抜け出し可能(移動可能)な岩塊(岩盤ブロック)を位相幾何学の概念を基に探索し、その岩塊に対し極限平衡解析を行うことによって安定性を明らかにする「ブロック理論(block theory)」を提案している。

大規模地下空洞壁面の安定性を確保するためには、このような移動可能ブロックをできる限り早く探索し、何らかの崩壊防止工を施す必要がある。しかしながら、従来のブロック理論では、地下空洞壁面にブロック全体が露出して移動可能になった時点でのみ移動可能性の探索が可能であり、換言すれば、ブロックが移動可能となる前に移動可能性を評価することは不可能である。このため、探索された時点で、既にブロックの緩みが進行していたり、場合によっては支保工を実施する前に崩壊が生じることも十分に予想される。

このような実状を踏まえ、本論文では、移動可能ブロックとして存在する可能性を有するブロックが一部露出した時点で、そのブロックの抜け出し確率を求める手法(確率ブロック理論)を提案する。本手法は、抜け出しブロックの探索手法に、確率統計学的なアプローチを加えた新たな手法であり、従来より定性的な検討にのみ用いられていた空洞壁面の不連続面情報を十分に活かす情報化施工の実現を意図するものである。



2 移動可能ブロックとそれを形成する節理の幾何学的関係

空洞の掘削の際(図-1)に、掘削によって出現する移動可能ブロックを掘削前に予測できれば、それらの移動可能ブロックのうち岩盤全体の安定性に特に問題となるブロックに対して適切な処理を迅速に行うことができ、有用であると考えられる。

ここで、空洞の任意の掘削段階で得られる不連続面のトレース図(空洞壁面展開図)をもとにして、次段階の掘削により形成される空洞壁面に移動可能ブロックが出現する確率を求めることを考える。なお、本論文で主として取り扱う不連続面は節理であり、①節理面は岩盤内で十分な広がりを持つ完全な平面である、②節理面および掘削面は走向・傾斜により表現できることを仮定する。

ブロックは最終的には空洞壁面において閉領域として現れるので、一部露出した状態のブロックについては、特別な場合を除いて、ブロックを形成する節理のうち、2つの節理(節理A・節理Bとする)が切り羽と交差し、これらの2つの節理は、既に掘削された壁面上で直接あるいは他の節理を介して連結する。

これら2つの節理は、未掘削の岩盤内において、①次第に近づきな

図-1 掘削に伴うブロックの形成

から進展するタイプ（収束型と呼ぶ）および②次第に遠ざかりながら進展するタイプ（発散型と呼ぶ）の2タイプに区分できる（図-2参照）。なお、2つの節理が平行な場合は発散型とする。

掘削により新たなブロックが形成される場合には、未掘削の領域に存在する1つ以上の節理と節理A、節理Bが交差することにより閉領域が形成される。但し、収束型の場合には新たな節理が存在しなくとも、節理Aと節理Bが交差する場合には閉領域が形成されることがある。

ここで、未掘削領域において、1つの節理*i*によって移動可能ブロックが形成されるとき、そのブロックが形成される確率を算出することを考える（未掘削領域において、2つ以上の節理によってブロックが形成されることも考えられるが、最終的には上記の収束型に帰結する）。

いま、空洞壁面に対して掘削が左側より右側に進行しているものとする。ベンチ面を*x*軸、切り羽を*y*軸とすると、図-2における節理A、節理Bの節理トレースの方程式は、

$$\text{節理 A: } y = \alpha_A x + \beta_A \quad (1)$$

$$\text{節理 B: } y = \alpha_B x + \beta_B \quad (2)$$

とそれぞれ与えられる。また同様に、未掘削の領域に存在し、節理Aおよび節理Bとともに移動可能ブロックを形成させる節理*i*（図-2参照）のトレース、およびトレースの壁面における傾き α_i は、*x*軸とトレースとのなす角を θ ($0 \leq \theta < \pi$) とすると、次式によって与えられる。

$$\text{節理 } i: y = \alpha_i x + \beta_i \quad (3)$$

$$\alpha_i = \tan \theta_i \quad (4)$$

（但し、収束型： $\theta_i < \theta_A, \theta_i > \theta_B$ 、発散型： $\theta_i > \theta_A, \theta_i < \theta_B$ ）

次に、*x*軸方向の解析範囲を示す値 X_c を以下のようにして設定する。

$$\text{収束型: } X_c = \max(X_B, X_{AB}) \quad (5)$$

$$\text{発散型: } X_c = X_B \quad (6)$$

X_B : 回目の掘削によって得られる切り羽面の*x*座標、

X_{AB} : 収束型における節理Aと節理Bの交点の*x*座標

X_{AB} は次式で与えられる。

$$X_{AB} = (\beta_A - \beta_B) / (\alpha_B - \alpha_A) \quad (7)$$

ここで、 $0 \leq x \leq X_c$ の範囲において、*n*個の微小区間を設定する。 $dx[k]$ は*k*番目 ($1 \leq k \leq n$)の微小区間を表すものとし、それに対応する節理A ($\theta_i > \pi/2$ の場合)あるいは節理B ($\theta_i \leq \pi/2$ の場合)上の微小区間を $dL[k]$ とする。

以上のように微小区間の設定を行うと次式が得られる。

$$dx[1] = dx[2] = dx[3] = \dots = dx[k] = \dots = dx[n] = dx = X_c / n \quad (8)$$

$$dL[1] = dL[2] = dL[3] = \dots = dL[k] = \dots = dL[n] = dL = X_c \sqrt{1 + \alpha_A^2} / n \text{ or } X_c \sqrt{1 + \alpha_B^2} / n \quad (9)$$

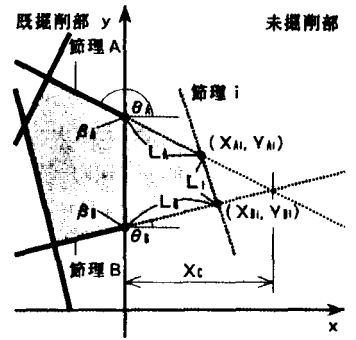
上式より、微小区間*k* ($1 \leq k \leq n$)における節理Aと節理*i*の交点座標(X_{Ai}, Y_{Ai})ならびに節理Bと節理*i*の交点座標(X_{Bi}, Y_{Bi})は θ_i の範囲毎に近似的に以下のように求められ、

$$\begin{cases} (X_{Ai}, Y_{Ai}) = (k dx, \alpha_A k dx + \beta_A) & (\theta_i \geq \pi/2) \end{cases} \quad (10)$$

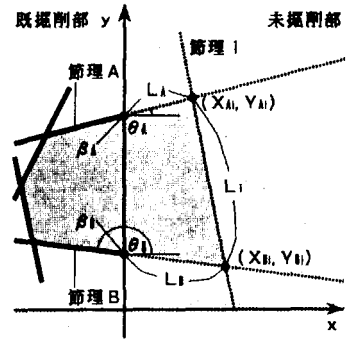
$$\begin{cases} (X_{Ai}, Y_{Ai}) = \left(\frac{(\sqrt{1 + \alpha_B^2} - \epsilon_i) k dx - \beta_A}{\alpha_A - \alpha_i}, \frac{\epsilon_A (\sqrt{1 + \alpha_B^2} - \epsilon_i) k dx - \epsilon_i \beta_A}{\alpha_A - \alpha_i} \right) & (\theta_i < \pi/2) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} (X_{Bi}, Y_{Bi}) = \left(\frac{(\sqrt{1 + \alpha_A^2} - \epsilon_i) k dx - \beta_B}{\alpha_B - \alpha_i}, \frac{\epsilon_B (\sqrt{1 + \alpha_A^2} - \epsilon_i) k dx - \epsilon_i \beta_B}{\alpha_B - \alpha_i} \right) & (\theta_i > \pi/2) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} (X_{Bi}, Y_{Bi}) = (k dx, \alpha_B k dx + \beta_B) & (\theta_i \leq \pi/2) \end{cases} \quad (13)$$



(a) 収束型



(b) 発散型

図-2 ブロックの模式図

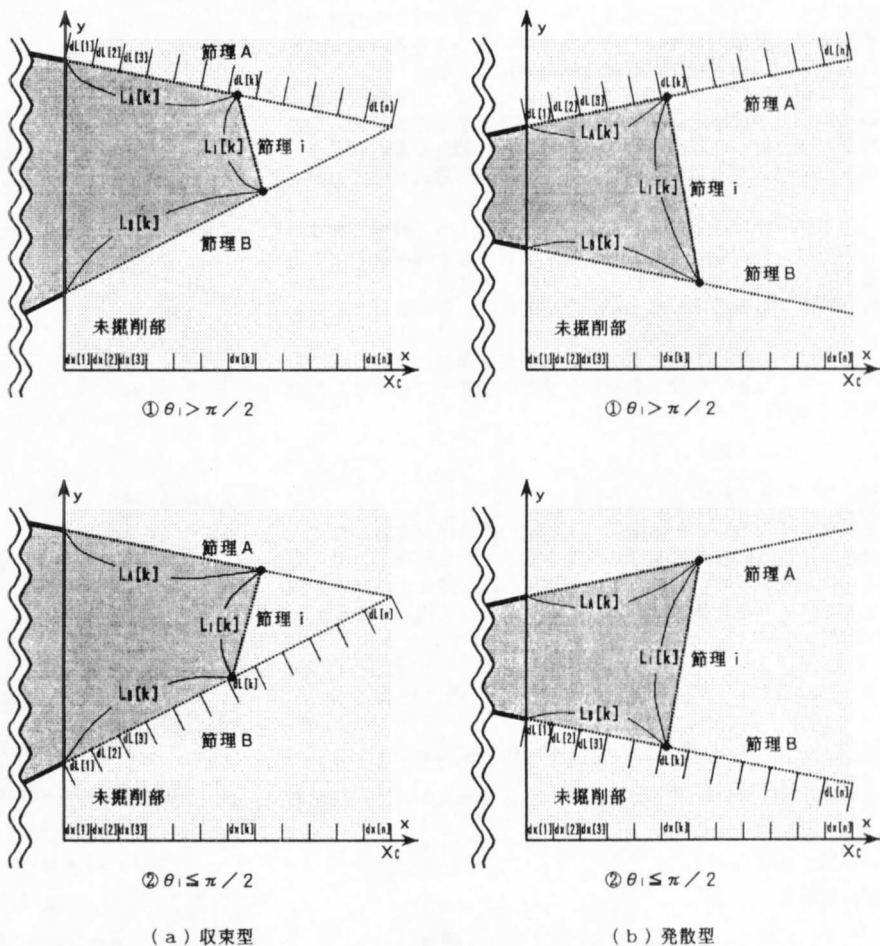


図-3 微小区間の設定

微小区間 $dL[k]$ における y 軸からの節理 A 及び節理 B の長さ $L_A[k]$, $L_B[k]$ は、 θ_i の範囲毎に近似的に次のように求まる。

$$\begin{cases} L_A[k] = \sqrt{1+a_A^2} k dx & (\theta_i \geq \pi/2) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} L_A[k] = \frac{(\sqrt{1+a_B^2} - a_i) k dx - \beta_A \sqrt{1+a_A^2}}{a_A - a_i} & (\theta_i < \pi/2) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} L_B[k] = \frac{(\sqrt{1+a_A^2} - a_i) k dx - \beta_B \sqrt{1+a_B^2}}{a_B - a_i} & (\theta_i > \pi/2) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} L_B[k] = \sqrt{1+a_B^2} k dx & (\theta_i \leq \pi/2) \end{cases} \quad (17)$$

また、節理 A と節理 B の端点間の距離 $L_i[k]$ は、次式で与えられる。

$$L_i[k] = \sqrt{(X_{B1} - X_{A1})^2 + (Y_{B1} - Y_{A1})^2} \quad (18)$$

3 移動可能ブロックの形成確率

ここで、 $dL[1]$ に存在する節理 i により移動可能ブロックが形成されるための条件は、次のようになる。

- 節理 A が $L_A[1]$ 以上の半トレス長を有する
- 節理 B が $L_B[1]$ 以上の半トレス長を有する
- 節理 i が $L_i[1]$ 以上の半トレス長を有する
- $dL[1]$ に節理 i が出現
- ブロックが移動可能

よって、 $dL[1]$ に存在する節理 i によりブロックが形成される確率 $P_i[1]$ は、上記条件を満たす事象が生起する確率の積となり、次式で示すことができる。

$$P_i[1] = \{1 - F_A(L_A[1])\} \{1 - F_B(L_B[1])\} \{1 - F_i(L_i[1])\} p(i) G(i) \quad (19)$$

但し、 F_A, F_B, F_i はそれぞれ節理 A、節理 B、節理 i の半トレス長の分布関数を表すものであり、半トレス長を ℓ 、トレス長の平均値 ℓ_{AV} を、調査を行う最小のトレス長 ℓ_0 をとすると、次式で与えられる²⁾。

$$F(\ell) = (\ell_{AV} - \ell_0) [1 - \exp\{-(\ell - \ell_0) / (\ell_{AV} - \ell_0)\}] / \ell_{AV} \quad (20)$$

また、 $p(i)$ は節理 i の出現確率を示すものであり、節理 A のトレスの方向または節理 B のトレスの方向における節理 i の平均間隔を $d_{AV}(i)$ とすると、次式で与えられる。

$$p(i) = dL / d_{AV}(i) \quad (21)$$

ここで、 $d_{AV}(i)$ は、調査線や調査平面を用いた節理調査の結果から推定することができる。まず、図-3 に示すようなネットに調査の結果得られた節理の方向をプロットし、ネット内部の微小三角領域毎に節理をグルーピングする。このうち、 i 方向の節理 (i 微小領域に存在する節理) について次式³⁾によって $d_{AV}(i)$ を求める。

$$\text{調査線: } d_{AV}(i) = \sum L / \sum_{j=1}^{N_i} (n_j \cdot n_n / n_j \cdot n_L) \quad (22)$$

$$\text{調査平面: } d_{AV}(i) = \sum A / \sum_{j=1}^{N_i} [\ell_j | n_j \cdot n_n | \cos(\cos^{-1}(n_j \cdot n_L))] \quad (23)$$

n_j : j 節理の単位法線ベクトル、 n_L : j 節理と交差する調査線の単位ベクトル
 n_n : 節理 A または節理 B のトレスの単位ベクトル、 $\sum L$: 調査線の全長、 N_i : n_i 方向の節理の個数
 n_w : 調査平面の単位法線ベクトル、 $\sum A$: 調査平面の全面積、 ℓ_j : 調査平面内の j 節理のトレス長

また、 $G(i)$ は、有限性定理と移動可能性定理によるブロックの移動可能性の判定結果から、

$$\text{ブロックが移動可能な場合: } G(i) = 1 \quad (24) \quad \text{ブロックが移動不可能な場合: } G(i) = 0 \quad (25)$$

となる関数である。なお、移動可能性の判定については、文献¹⁾を参照されたい。

次に、 $dL[k]$ において、節理 i がブロックを形成する場合を考える。 $dL[k]$ に存在する節理 i により移動可能ブロックが形成されるための条件は、次のようになる。

- 節理 A が $L_A[k]$ 以上の半トレス長を有する
- 節理 B が $L_B[k]$ 以上の半トレス長を有する
- 節理 i が $L_i[k]$ 以上の半トレス長を有する
- $dL[k]$ に節理 i が出現
- ブロックが移動可能
- $dL[1] \sim dL[k-1]$ に節理 i が出現しない、または出現しても $L_i[1] \sim L_i[k-1]$ 以上の半トレス長を有しない

ここで、 $dL[k-1]$ で節理 i が出現しない確率は $1 - p(i)$ であり、 $dL[k-1]$ で節理 i が出現し、 $L_i[k-1]$ 以上の半トレス長を有しない確率は $F_i(L_i[k-1]) p(i)$ であるので、 $dL[k]$ に節理 i が存在しブロックを形成する確率 $P_i[k]$ は次式で与えられる。

$$P_i[k] = \{1 - F_A(L_A[k])\} \{1 - F_B(L_B[k])\} \{1 - F_i(L_i[k])\} p(i) G(i) \prod_{j=1}^{k-1} \{1 - p(i) + F_i(L_i[j]) p(i)\} \quad (26)$$

したがって、節理 i が存在することにより移動可能ブロックが形成される確率 P_i は、以下のように求まる。

$$P_i = \sum_{k=1}^{\infty} P_i[k] + P_c \quad (27)$$

ここで、 P_c は、収束型の場合に節理 i の存在に関わらず節理 A と節理 B によってブロックが形成される確率であり、具体的には次式で与えられる。

$$\text{収束型: } P_c = \{1 - F_A(L_A[n])\} \{1 - F_B(L_B[n])\} \quad (28)$$

$$\text{発散型: } P_c = 0 \quad (29)$$

(27)式は、先に示した図-3 における i 微小領域に存在する節理により移動可能ブロックが形成される確率であり、これを全方向に拡張すると、次式により移動可能ブロックの形成確率 P を求めることができる。

$$P = 1 - \prod (1 - P_i) \quad (30)$$

以上は、掘削が空洞壁面に対して左側より右側に進行する場合の解法を示したものであるが、掘削が空洞壁面に対して右側より左側に進行している場合にも、X 軸の正負を代えることによって同様の解法で確率を求めることができる。これらは、同一ベンチ

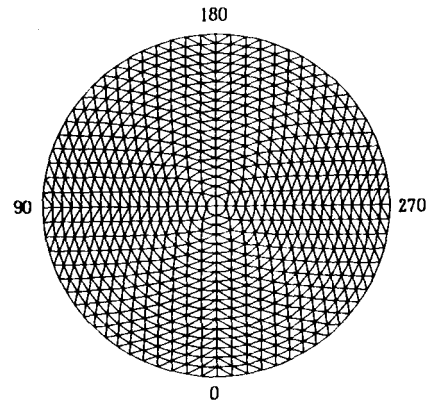


図-4 方向別節理密度計測用ネット

における観察によって大規模地下空洞の情報化施工における日常管理に利用できるものとする。一方、盤下げ時の解析も座標軸の方向を変換することで同様に行うことができるが、これは大規模地下空洞の情報化施工におけるステップ管理に利用できるものとする。

4 確率ブロック理論に基づくシミュレーション

提案した確率ブロック理論による解析例として、確率統計的手法⁴⁾を用いて2次元節理系モデル図(図-4に解析モデルの一例を示す)を作成し、任意の位置に切羽を設定することによって、移動可能ブロックの形成確率を算出した。モデルは、空洞の掘削のベンチ長さを考慮に入れ、1辺を5mとして多数作成した。各モデル図において幾何学的に移動可能ブロックが形成される確率を求め、確率を算出した各ブロック毎に、トレース図上で実際に移動可能ブロックになっているか否かの判定を行った。

図-5に計算より求めた移動可能ブロックが形成される確率とそのブロックが実際に移動可能ブロックとなった割合を示す。本図より、今回のシミュレーションにおいては、移動可能ブロックが形成される確率と実際に移動可能ブロックを形成している割合とは、確率が50%以上ではほぼ一致するという良好な結果が得られていることがわかる。このことから本手法の妥当性が伺える。

一方、存在確率が50%以下の場合、特に35%以下では実際には移動可能ブロックがほとんど形成されていない。これは、切羽の寸法等の要因にも起因していると考えられる。すなわち、今回のケースの場合には35%以下の存在確率が求められた場合には移動可能ブロックとなる可能性がほとんどないといえることができる。このように、実際に移動可能ブロックとして存在している割合が極めて小さくなる確率を予め把握することができれば、実際の空洞の掘削の際にその確率より高い確率を有するブロックに対してのみ、適切な処理工法を迅速に検討することができるものと考えられる。

5 おわりに

本論文では、ブロック理論における幾何学的移動可能ブロックの探索手法に確率統計学的アプローチを加えて、移動可能ブロックの存在確率を求める新たな手法(確率ブロック理論)を提案し、シミュレーションによって、その手法の妥当性を検証した。

本理論は、確率論を根拠としているものの、実際には、現実に空洞壁面に出現した不連続面を決定論的に扱うものである。また、本理論においては、掘削が進行して節理分布性状の情報が蓄積されるに従い、解析値の推定精度の向上が期待できるが、このことは、情報化施工の考え方に合致している。

なお、本論文においては、水平方向の掘削に論を絞って理論の説明を行ったが、本理論は鉛直方向の掘削にも同様な適用性を有すると考えられ、空洞の盤下げ時における適用は勿論のこと斜面の盤下げ掘削にも適用できるものと考えられる。今後は、実際の現場において、本理論を適用していく所存である。

参考文献

- 1) Goodman & Shi : ブロック理論と岩盤工学への応用; 土木工学社、1992 (吉中龍之進、大西有三訳)
- 2) 水戸義忠: 節理分布性状の確率モデルを用いた節理性岩盤の解析に関する基礎研究、早大博士論文、1993
- 3) 菊地宏吉、水戸義忠: 節理1次元密度ダイアグラムの提案、第24回土木学会岩盤シンポジウム講演論文集、1992
- 4) Kikuchi, Mito & Honda: Geotechnical modelling system of rock joint distribution, Pau, France, 1990

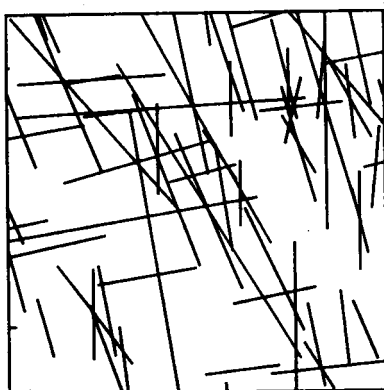


図-5 解析モデルの一例

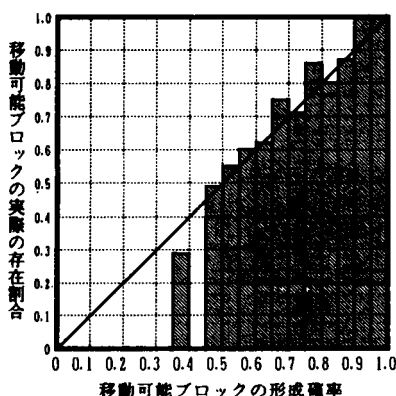


図-6 確率モデルによる解析の結果