

# 大規模地下空洞の掘削シミュレーションによる 確率ブロック理論の適用性の検証

水戸義忠<sup>1</sup>・菊地宏吉<sup>2</sup>・工藤圭吾<sup>3</sup>・小山俊博<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学大学院助手 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>フェロー 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 工修 東京電力株式会社 葛野川水力建設所 所長 (〒409-0617 大月市猿橋町殿上195)

<sup>4</sup>正会員 東京電力株式会社 建設部 課長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)

大規模地下発電所空洞の情報化施工を目的として、空洞壁面に出現する不安定な移動可能ブロック（キーブロック）について、そのブロックが壁面上に一部露出した段階、すなわち移動可能となる前にその存在を予測する手法である「確率ブロック理論」が提案されている。この手法は切り羽後方あるいはベンチ上方における不連続面分布の決定論的データによって特定された危険箇所について、予め求められている不連続面分布の確率論的データを用いて切り羽前方あるいはベンチ下方を予測することにより、次段階の掘削に伴って移動可能ブロックが形成される確率を算出するものである。本論文においては、一般化した理論を説明した上で、既設の大規模地下発電所において建設時に作成された空洞壁面展開図を用いて掘削シミュレーションを行うことにより、確率ブロック理論の妥当性と適用性についての検証を行った。

*Key Words* : block theory, discontinuity, excavation, underground cavern, probabilistic analysis

## 1. 緒言

近年、地下発電所用空洞に代表される大規模地下構造物の建設の増加に伴い、岩盤中に分布する不連続面の適切な評価が重要視されてきている。

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がトンネルの場合と異なってくる。これは、空洞断面の寸法によって、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ることにより、空洞の自立性が低下するためである。また、トンネルの場合にはこのような不安定ブロックを形成する不連続面は主として節理規模の不連続面であるが、大規模地下空洞の場合には、これに加えて、断層・破砕帯規模の不連続面がより大規模な不安定ブロックを形成することが十分に考えられる。このように、大規模地下空洞の場合には、節理・シーム・断層・破砕帯等のさまざまな規模の不連続面が、トンネルの場合とは異なった挙動を示すことになる。このような状況から、従来から実施されている連続

体解析に加えて、不連続体解析が実施されることも多くなってきた<sup>1)</sup>。

一方、地下空間における地盤のモデル化にあたっては、地下という場所的な制約から必ずしも事前に十分な調査を実施することが困難である。例えば、ヘッドタイプの地下発電所は地下深部に位置するために、地表付近の構造物と比較して調査に要する時間、コストが非常に大きくなる。また、長大トンネルのような線状構造物や石油の地下タンクのような広範囲にわたる地下構造物についても自ずと事前の調査量には限界がある。このような状況の克服を目的として、近年実施されているのが情報化施工システム<sup>2)</sup>である。情報化施工とは、施工段階の掘削によって露出した地盤の観察結果ならびに施工の進捗にともなう地盤挙動の計測結果を基に計画段階の地盤の評価結果の確認・修正を行い、これを基に最終的な支保の設計を行うものである。

近年、地下発電所用空洞の情報化施工にあたって導入されつつある岩盤の不連続体解析手法として、Goodman と Shi(1982)<sup>3)</sup>によって提案された「ブロック理論」を挙げることができる。ブロック理論は、

岩盤壁面における不連続面の位置および方向の情報を基に不連続面で囲まれたブロックのうち、抜け出し可能（移動可能）な楔状ブロックであるキーブロック（移動可能ブロック）を抽出し、その個々について極限平衡解析を行うことによって壁面の安定性を検討するものである。

大規模地下空洞壁面の安定性を確保するにあたっては、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、ブロック理論では、ブロック全体が空洞壁面に露出して移動可能となった時点でのみ移動可能性の検討が可能であり、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に過度な緩みが進行したり、場合によっては崩壊防止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。このための方策としては、ブロック全体が空洞壁面に露出して移動可能となる前に適切な初期補強工(initial support)を実施することが望まれる。しかしながら、初期補強工の必要な箇所を事前に理論的に決定することが不可能なため、このような初期補強工の実施にあたっては、管理技術者の推測に頼らざるを得ない状況となっている。

水戸ら(1995)<sup>11)</sup>は、このような状況に鑑み、ブロック全体が空洞壁面に露出して移動可能となる前に、移動可能ブロックの形成を事前予測する「確率ブロック理論」を開発した。確率ブロック理論は、現時点での切り羽またはベンチ面と不連続面によって囲まれた閉領域（移動可能ブロックとなる可能性がある）を対象として、事前に調査された不連続面分布情報を基に未掘削部の不連続面分布を予測することによって、この閉領域箇所が移動可能ブロックとなる確率を算出するものである（図-1 参照）。

本研究においては、既設の大規模地下発電所本体地下空洞側壁部の不連続面トレース図を基に確率ブロック理論による掘削シミュレーションを行い、本理論の妥当性および適用性の検討を行う。

## 2. 確率ブロック理論

一般に岩盤を掘削する場合、トンネル掘削に代表されるように水平方向に掘削が進行するもの（「水平掘削」とする）と、ベンチカット工法に代表されるように鉛直方向に掘削が進行するもの（「鉛直掘削」とする）の2つを考えることができるが、大規模地下空洞の掘削においては、これら水平掘削と鉛直掘削が複合した形で掘削が進行する（図-1 参照）。

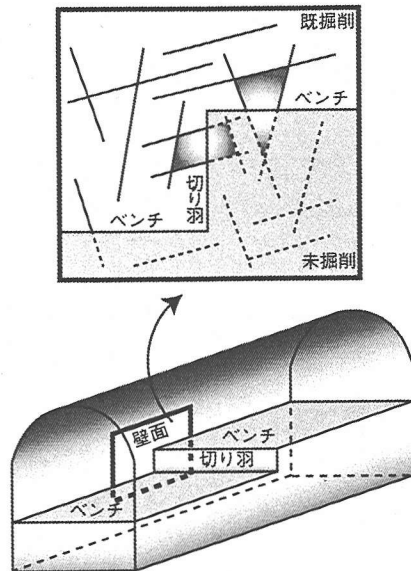


図-1 地下空洞掘削の概念図

確率ブロック理論の構築にあたっては、重力が作用する場におけるブロックの幾何学的な移動可能性を簡潔に表現するため、水平掘削と鉛直掘削の2つの場合に分けて理論構築がなされている<sup>11)</sup>が、本文においてはこれら2つの掘削形式について同時に対処できるように理論を可能な限り一般化した形で詳細に説明する。

### (1) 解析対象多角形とブロック構成不連続面

不連続面で囲まれた移動可能ブロックは、掘削面（「掘削面[E]」とする）上において、不連続面のトレース（不連続面と掘削面の交線）によって囲まれた閉領域（多角形）として現れる。このため、一部露出した状態のブロックについては、特別な場合を除き、一般にブロックを形成する不連続面のうち2つが切り羽またはベンチと交差する。確率ブロック理論では、水平掘削の場合には掘削面[E]に向かって上側の不連続面を「不連続面[A]」、下側の不連続面を「不連続面[B]」とし（図-2(a)(b)、図-3(a)(b)参照）、鉛直掘削の場合には掘削面[E]に向かって右側の不連続面を「不連続面[A]」、左側の不連続面を「不連続面[B]」とする（図-2(c)(d)、図-3(c)参照）。また、一部露出した状態のブロックについては、不連続面[A]と不連続面[B]が、既掘削面上で直接的に、あるいは他の不連続面を介して間接的に連結する。このうち間接的に連結する場合に不連続面[A]と不連続面[B]を連結させる不連続面を「連絡不連続面[C]（ $C=C_1, C_2, \dots$ ）」とする。

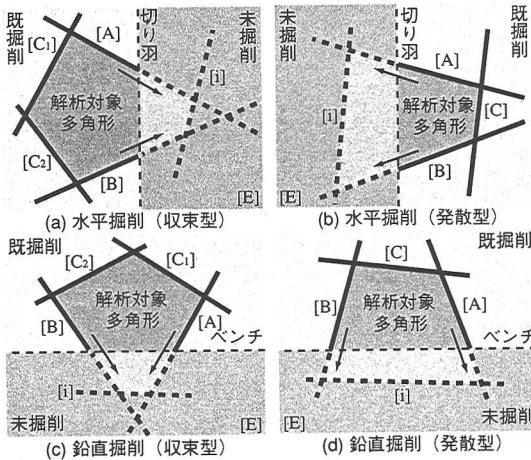


図-2 解析対象多角形

確率ブロック理論では、このようにいくつかの不連続面トレースおよび切り羽またはベンチ面と掘削面[E]の交線によって囲まれた閉領域（「解析対象多角形」とする：図-2参照）が存在する場合にこれを対象として解析を実施する。

解析対象多角形は、既掘削面で実際に観察される不連続面[A]と不連続面[B]のトレース（それぞれ「トレース[A]」、「トレース[B]」とする）が、掘削の進行方向に対して、①次第に近づくような方向関係を有するもの（「収束型」とする）および②次第に遠ざかるような方向関係を有するもの（「発散型」とする）に区分することができる（図-2参照）。

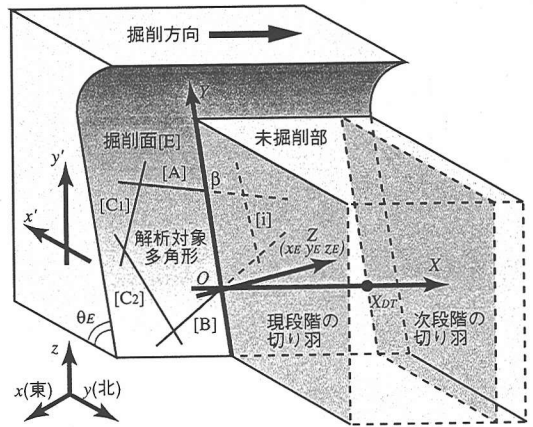
掘削により新たなブロックが形成される条件としては、①未掘削の領域において不連続面[A]と不連続面[B]が直接交差する場合（「直接交差型」とする：収束型に限られる）および②未掘削の領域において潜在する不連続面（「潜在不連続面」とする）が不連続面[A]、不連続面[B]と同時に交差する場合（「間接交差型」とする）の2つが考えられる。

## (2) ブロックの移動可能性の判定

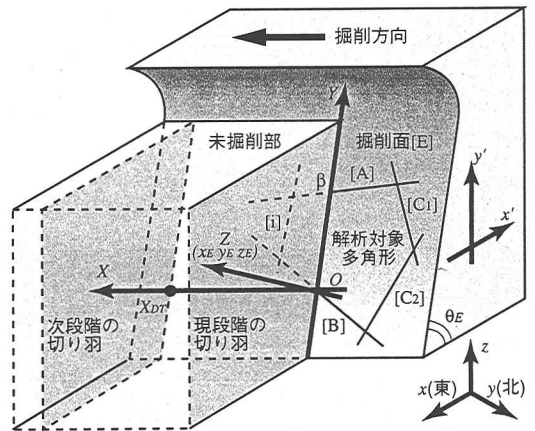
### a) 直接交差型

図-3は、水平掘削および鉛直掘削において確率ブロック理論を用いる際の座標系を示したものである。

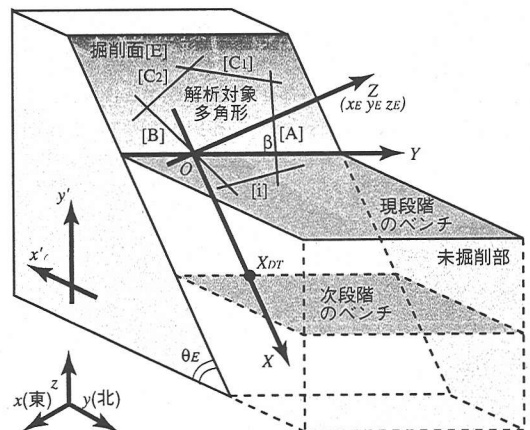
まず、XYZ-座標系は、切り羽面あるいはベンチ面とトレース[B]の交点を原点とし、掘削の進行方向をX軸（進行方向を正とする）、切り羽面あるいはベンチ面と掘削面[E]の交線をY軸（トレース[A]側を正とする）、掘削面[E]の法線をZ軸（空間側を正、岩盤内部を負とする）と設定したものである。このとき、XYZ-座標系においてトレース[A]およびトレース[B]は次のように表すことができる。



(a) 水平掘削(1)



(b) 水平掘削(2)



(c) 鉛直掘削

図-3 確率ブロック理論における座標系

$$\text{トレース[A]}: Y = \alpha_A X + \beta \quad (1)$$

$$\text{トレース[B]}: Y = \alpha_B X \quad (2)$$

但し,  $\alpha_A, \alpha_B$  は  $XY$ -平面におけるトレース[A]およびトレース[B]の傾き,  $\beta$  は  $Y$  軸上でのトレース[A]とトレース[B]の距離である。

不連続面[A]と不連続面[B]の単位法線ベクトルを  $xyz$ -座標系においてそれぞれ  $n_A (x_A, y_A, z_A)$ ,  $n_B (x_B, y_B, z_B)$ , 掘削面[E]の単位法線ベクトルを  $n_E (x_E, y_E, z_E)$  とする。但し, この  $xyz$ -座標系は,  $x$  軸の正方向が東,  $y$  軸の正方向が北,  $z$  軸の正方向が天頂と一致する直交座標系とする。

さて, この場合には, 各面につきベクトルの向きが  $180^\circ$  異なる2種類の単位法線ベクトルが存在する。そこで, 不連続面については,  $z$  成分が正となるものを選択し, 掘削面[E]については, オーバーハング面の場合には  $z$  成分が負, オーバーハング面でない場合は  $z$  成分が正であるものを選択するものとする。このとき, これらのベクトルの値は不連続面および掘削面の走向傾斜から一意に定めることができる。

トレース[A]およびトレース[B]の傾き  $\alpha_A, \alpha_B$  は, 水平掘削ならびに鉛直掘削のそれぞれの場合について次式によって与えられる。

水平掘削:

$$\alpha_A = \frac{x_A y_E - x_E y_A}{x_E (x_E z_A - x_A z_E) + y_E (y_E z_A - y_A z_E)} \quad (3)$$

$$\alpha_B = \frac{x_B y_E - x_E y_B}{x_E (x_E z_B - x_B z_E) + y_E (y_E z_B - y_B z_E)} \quad (4)$$

鉛直掘削:

$$\alpha_A = \frac{x_E (x_E z_A - x_A z_E) + y_E (y_E z_A - y_A z_E)}{x_E y_A - x_A y_E} \quad (5)$$

$$\alpha_B = \frac{x_E (x_E z_B - x_B z_E) + y_E (y_E z_B - y_B z_E)}{x_E y_B - x_B y_E} \quad (6)$$

なお, これらの傾き  $\alpha_A, \alpha_B$  を用いて, 上述した収束型と発散型を次式のように再定義することができる。

$$\text{収束型: } \alpha_A < \alpha_B \quad (7)$$

$$\text{発散型: } \alpha_B \leq \alpha_A \quad (8)$$

さて, ブロック理論によるキープロックの認定<sup>6)</sup> においてはブロックとそのブロックを構成している不連続面の位置関係を表現するブロックコードなる概念が導入されている。ブロックが不連続面上側に位置する場合にはその不連続面のブロックコードは0, 不連続面の下側に位置する場合にはその不連続面のブロックコードは1となる。このブロックコードの概念は, 掘削面[E]にも同様に適用される。掘削面[E]がオーバーハングしているか否かにより, そのブロックコード  $a_E$  は次のように与えられる。

$$a_E = \begin{cases} 0 \cdots \text{overhanging} \\ 1 \cdots \text{descending} \end{cases} \quad (9)$$

次に, 不連続面[A]および不連続面[B]のブロックコード  $a_A, a_B$  について考える。まず, 水平掘削の場合には  $YZ$ -平面に平行, 鉛直掘削においては  $XZ$ -平面に平行な仮想平面上の  $x'y'$ -局所座標を考える。ここで,  $x'$  軸は, 掘削面[E]の走向に直交する水平軸であり, 岩盤内部方向を正とする。また  $y'$  軸は鉛直軸であり, 天頂方向を正とする。

このとき,  $x'y'$ -局所座標におけるトレース[A]とトレース[B]の傾き  $\alpha'_A, \alpha'_B$  は次式によって示される。

$$\alpha'_A = \frac{x_A x_E + y_A y_E}{z_A \sqrt{x_E^2 + y_E^2}} \quad (10)$$

$$\alpha'_B = \frac{x_B x_E + y_B y_E}{z_B \sqrt{x_E^2 + y_E^2}} \quad (11)$$

ここで, 掘削面[E]の傾斜角を  $\theta_E$ , 掘削面[E]のブロックコードを  $a_E$  とし, 以下のような事象を考える。

$$B'_A = B'_A (\alpha'_A | \alpha'_A > \tan \theta_E) \quad (12)$$

$$B'_B = B'_B (\alpha'_B | \alpha'_B > \tan \theta_E) \quad (13)$$

$$B_E = B_E (a_E | a_E = 1) \quad (14)$$

これらの事象が生起するパターン (図-4 参照) によって, 水平掘削の場合におけるトレース[A]および[B]のブロックコード  $a_A, a_B$  を以下のように定めることができる。

$$a_A = \begin{cases} 1 \cdots (B'_A \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B'_A} \cap B_E) \\ 0 \cdots (\overline{B'_A} \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B'_A \cap B_E) \end{cases} \quad (15)$$

$$a_B = \begin{cases} 0 \cdots (\overline{B'_B} \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B'_B \cap B_E) \\ 1 \cdots (B'_B \cap B_E) \text{ or } (\overline{B'_B} \cap \overline{B_E}) \end{cases} \quad (16)$$

一方, 鉛直掘削の場合においては, さらに次のような事象を考える。

$$B_A = B_A (\alpha_A | \alpha_A > 0) \quad (17)$$

$$B_B = B_B (\alpha_B | \alpha_B > 0) \quad (18)$$

これらの事象が生起するパターン (図-5(b)参照) によって, 不連続面[A]および不連続面[B]のブロックコード  $a_A, a_B$  を以下のように定めることができる。

$$a_A = \begin{cases} 1 \cdots (\overline{B_A} \cap B'_A \cap B_E) \text{ or } (B_A \cap \overline{B'_A} \cap B_E) \text{ or} \\ (B_A \cap B'_A \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_A} \cap \overline{B'_A} \cap \overline{B_E}) \\ 0 \cdots (B_A \cap B'_A \cap B_E) \text{ or } (B_A \cap \overline{B'_A} \cap \overline{B_E}) \text{ or} \\ (\overline{B_A} \cap B'_A \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_A} \cap \overline{B'_A} \cap B_E) \end{cases} \quad (19)$$

$$a_B = \begin{cases} 0 \cdots (\overline{B_B} \cap B'_B \cap B_E) \text{ or } (B_B \cap \overline{B'_B} \cap B_E) \text{ or} \\ (B_B \cap B'_B \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_B} \cap \overline{B'_B} \cap \overline{B_E}) \\ 1 \cdots (B_B \cap B'_B \cap B_E) \text{ or } (B_B \cap \overline{B'_B} \cap \overline{B_E}) \text{ or} \\ (\overline{B_B} \cap B'_B \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_B} \cap \overline{B'_B} \cap B_E) \end{cases} \quad (20)$$

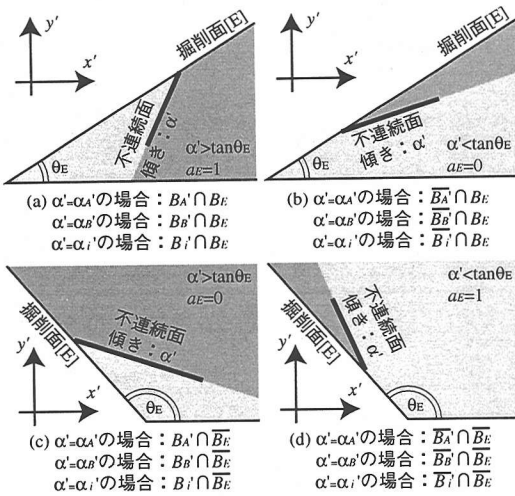


図-4 事象  $B_A, B_B, B_i, B_E$  の生起パターンの例  
 ( $x'y'$ -局所座標系)

なお、連絡不連続面[C]のブロックコード  $a_c$  については、上記方法に準拠することによって決定することができるが、解析対象多角形におけるトレースの相対位置を考慮する必要があるため、やや説明が複雑になる。このような理由から、ここでは説明を割愛し、事前の検討によって既知となっているもの(すなわち、 $a_c$  は入力データとする)として論を進める。

先にも述べたように、収束型の場合には、未掘削領域において不連続面[A]と不連続面[B]が直接交差することによって掘削面[E]上に閉領域が形成されることがある。ここまでの段階で、①不連続面[A]、②不連続面[B]、③連絡不連続面[C]、④掘削面[E]で囲まれるブロックについての移動可能性を各面の単位法線ベクトルならびにブロックコードを用いて以下<sup>6)</sup>のように判定することができる。

まず、ブロックを構成する全ての不連続面(上記①②③)の単位法線ベクトル( $z$ 成分を正とする)およびブロックコードを  $l, m, n = A, B, C_1, C_2, \dots$  となるように配列化し、以下のように定義される  $I_n^{lm}$  と  $I(a_n)$  を求める。

$$I_n^{lm} = \begin{cases} 1 \cdots (n_l \otimes n_m) \cdot n_n > 0 \\ 0 \cdots (n_l \otimes n_m) \cdot n_n = 0 \\ -1 \cdots (n_l \otimes n_m) \cdot n_n < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$I(a_n) = \begin{cases} 1 \cdots a_n = 0 \\ -1 \cdots a_n = 1 \end{cases} \quad (22)$$

これら2つの量を基に次のような配列を作成する。

$$(T^{lm}) = (I_1^{lm} I(a_1), I_2^{lm} I(a_2), I_3^{lm} I(a_3), \dots) \quad (23)$$

この配列  $T^{lm}$  が正負両方の要素を同時に含んでいるか否かを全ての  $l, m$  の組み合わせについて検査する。

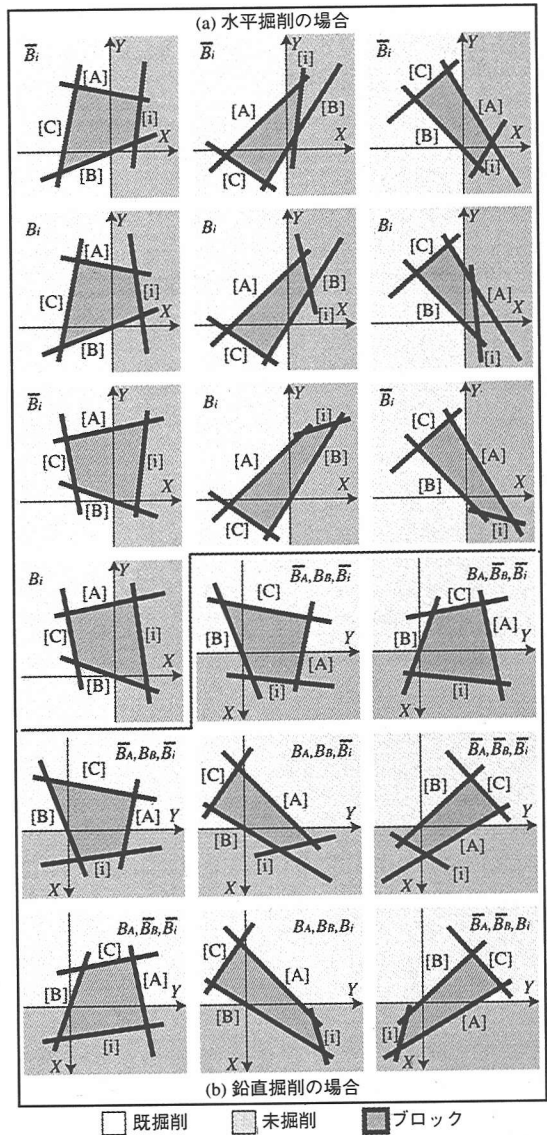


図-5 事象  $B_A, B_B, B_i$  の生起パターンの例  
 ( $XY$ -座標系: 掘削面[E]上)

全ての  $l, m$  の組み合わせについて正負両方の要素を同時に含むことがブロックが移動可能であることの必要条件である。

次に掘削面[E]の単位法線ベクトル(この場合に限る、オーバーハング面であっても  $z$  成分を正とする)およびブロックコードを配列に組み入れて、 $l, m, n = A, B, C_1, C_2, \dots, E$  の条件の基に同様の検査を行う。このとき、全ての  $l, m$  の組み合わせについて少なくとも1つの配列が正負両方の要素を含まないことが、ブロックが移動可能であることの必要条件である。

以上2つの必要条件を同時に満たすことが、ブロックが移動可能であることの必要十分条件となり、これによってブロックの移動可能性を判定することができる。

この判定結果より、不連続面[A]、不連続面[B]、連絡不連続面[C]および掘削面[E]で囲まれるブロックが移動可能な形状となる事象  $R_C$  の生起確率として以下のような値を定義する。

$$P[R_C] = \begin{cases} 0 \cdots \text{not removable} \\ 1 \cdots \text{removable} \end{cases} \quad (24)$$

### b) 間接交差型

ここで、未掘削領域において、1つの潜在不連続面[i]によって掘削面[E]上に閉領域が形成される時、そのブロックの移動可能性を判定することを考える（未掘削領域において、2つ以上の潜在不連続面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）。

未掘削の領域に存在し、不連続面[A]および不連続面[B]を連結させて閉領域を形成させる潜在不連続面[i]のトレース（トレース[i]とする）は次のように表すことができる。

$$\text{トレース}[i]: Y = \alpha_i X + \beta_i \quad (25)$$

但し、 $\alpha_i$  は XY-平面におけるトレース[i]の傾き、 $\beta_i$  はトレース[i]の Y 切片である。

不連続面[i]の単位法線ベクトルを xyz-座標系においてそれぞれ  $n_i(x_i, y_i, z_i)$  とすると、トレース[i]の傾き  $\alpha_i$  は、水平掘削ならびに鉛直掘削のそれぞれの場合について次式によって与えられる。

水平掘削:

$$\alpha_i = \frac{x_i y_E - x_E y_i}{x_E(x_E z_i - x_i z_E) + y_E(y_E z_i - y_i z_E)} \quad (26)$$

鉛直掘削:

$$\alpha_i = \frac{x_E(x_E z_i - x_i z_E) + y_E(y_E z_i - y_i z_E)}{x_E y_i - x_i y_E} \quad (27)$$

但し、収束型と発散型の各型において、 $\alpha_i$  が次のような範囲を満たす場合には、閉領域が形成されることはない。

$$\text{収束型: } \alpha_A \leq \alpha_i \leq \alpha_B \quad (28)$$

$$\text{発散型: } \alpha_B \leq \alpha_i \leq \alpha_A \quad (29)$$

次に、不連続面[i]のブロックコード  $a_i$  について考える。前節の場合と同様に XZ-平面に平行な仮想平面上 ( $x'y'$ -局所座標) におけるトレース[i]の傾き  $\alpha_i'$  は次式によって示される。

$$\alpha_i' = \frac{x_i x_E + y_i y_E}{z_i \sqrt{x_E^2 + y_E^2}} \quad (30)$$

ここで、以下のような事象  $B_i, B_i'$  を考える。

水平掘削:

$$B_i = B_i'(\alpha_i | \alpha_i \leq \min(\alpha_A, \alpha_B)) \quad (31)$$

鉛直掘削:

$$B_i = B_i'(\alpha_i | \min(0, \alpha_A, \alpha_B) \leq \alpha_i \leq \max(0, \alpha_A, \alpha_B)) \quad (32)$$

$$B_i' = B_i'(\alpha_i' | \alpha_i' > \tan \theta_E) \quad (33)$$

これらの事象が生起するパターン（図-4、図-5 参照）によって、不連続面[i]のブロックコード  $a_i$  を以下のように定めることができる。

$$a_i = \begin{cases} 0 \cdots (\overline{B_i} \cap B_i' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (B_i \cap \overline{B_i'} \cap B_E) \text{ or} \\ (\overline{B_i} \cap B_i' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_i} \cap \overline{B_i'} \cap \overline{B_E}) \\ 1 \cdots (B_i \cap B_i' \cap B_E) \text{ or } (B_i \cap \overline{B_i'} \cap \overline{B_E}) \text{ or} \\ (\overline{B_i} \cap B_i' \cap \overline{B_E}) \text{ or } (\overline{B_i} \cap \overline{B_i'} \cap B_E) \end{cases} \quad (34)$$

不連続面[i]のブロックコードが得られれば、①不連続面[A]、②不連続面[B]、③連絡不連続面[C]、④潜在不連続面[i]、⑤掘削面[E]で囲まれるブロックの移動可能性についても前項と同様の方法で判定することが可能となる。すなわち、各面の単位法線ベクトルならびにブロックコードを用いて、①②③④による配列  $(l, m, n=A, B, C, i, C_2, \dots, i)$  および①②③④⑤による配列  $(l, m, n=A, B, C, i, C_2, \dots, i, E)$  を作成することによって前項で示した検査を行えばよい。

この判定結果より、不連続面[A]、不連続面[B]、連絡不連続面[C]、潜在不連続面[i]および掘削面[E]で囲まれるブロックが移動可能な形状となる事象  $R_i$  の生起確率として以下のような値を定義する。

$$P[R_i] = \begin{cases} 0 \cdots \text{not removable} \\ 1 \cdots \text{removable} \end{cases} \quad (35)$$

### (3) 潜在不連続面の存在性

まず、XY-座標系において、X 軸方向の解析範囲を示す  $X_C$  なる値を以下のようにして設定する。

$$\text{収束型: } X_C = \min(X_{DT}, X_{AB}) \quad (36)$$

$$\text{発散型: } X_C = X_{DT} \quad (37)$$

但し、 $X_{DT}$  は掘削面[E]における現段階と次段階の切り羽またはベンチ間の距離であり、 $X_{AB}$  は次式で与えられる収束型におけるトレース[A]とトレース[B]の交点座標である。

$$X_{AB} = \frac{\beta}{\alpha_B - \alpha_A} \quad (38)$$

なお、この  $X_C$  は次段階の掘削までのブロックの危険度を評価することを目的として設定する値である。最終的な掘削線までの危険度を評価するにあたっては、 $X_{DT}$  に現段階と最終的な掘削線との距離を代入すればよい。



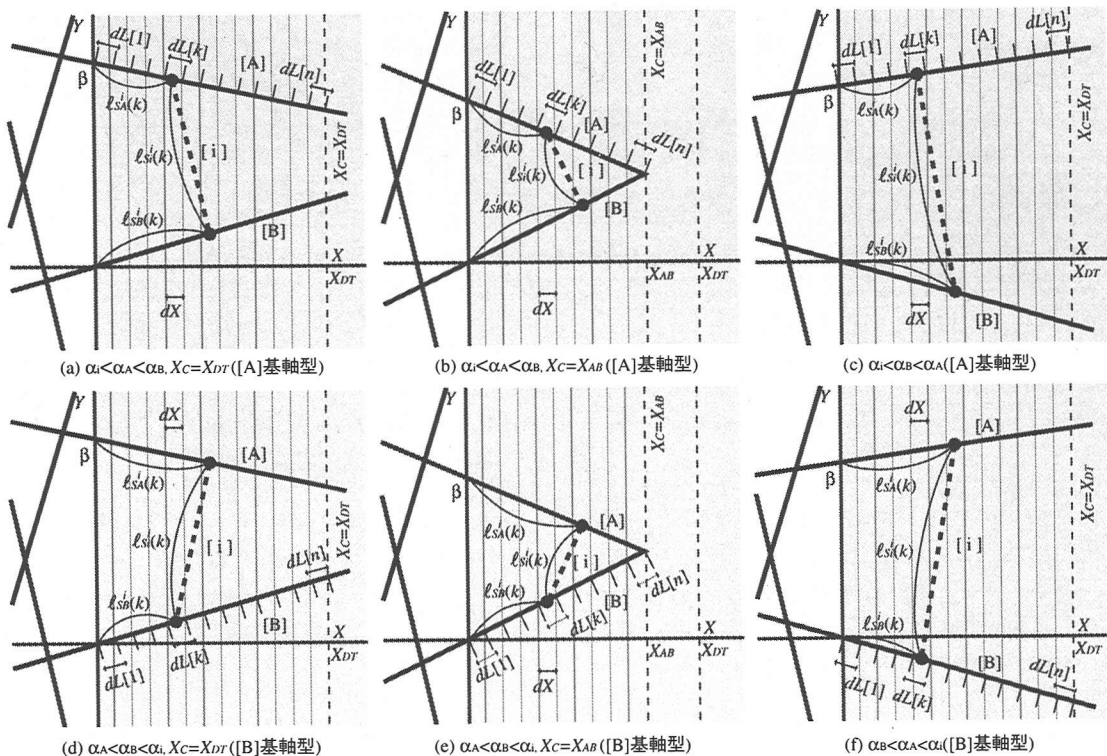


図-6 微小区間

次に、 $0 \leq X \leq X_C$  の範囲において、図-6 に示すように長さ  $dL$  の  $n$  個の微小区間を設定し、切り羽またはパンチから  $k$  番目の微小区間を  $dL[k]$  と表す。トレース[A]上（「[A]基軸型」とする）とトレース[B]上（「[B]基軸型」とする）のいずれかに微小区間を設定するかについては以下のような基準に従うものとする。

$$\text{[A]基軸型: } \alpha_i < \alpha_A \cap \alpha_i < \alpha_B \quad (39)$$

$$\text{[B]基軸型: } \alpha_B < \alpha_i \cap \alpha_A < \alpha_i \quad (40)$$

なお、微小区間の長さ  $dL$  および基軸となるトレースの単位ベクトル  $n_T$  は次式によって与えられる。

$$\text{[A]基軸型: } dL = \sqrt{1 + \alpha_A^2} dX \quad (41)$$

$$n_T = n_E \otimes n_A \quad (42)$$

$$\text{[B]基軸型: } dL = \sqrt{1 + \alpha_B^2} dX \quad (43)$$

$$n_T = n_E \otimes n_B \quad (44)$$

但し、 $dX$  は  $X$  軸方向に解析範囲を  $n$  等分した  $dL[k]$  の  $X$  成分であり、 $n_A, n_B, n_E$  はそれぞれ不連続面[A], [B], 掘削面[E]の単位法線ベクトルである。 $dX$  は次式で与えられる。

$$dX = \frac{X_C}{n} \quad (45)$$

ここで、微小区間  $dL[k]$  に潜在不連続面[i]が存在する確率を求めることを考える。

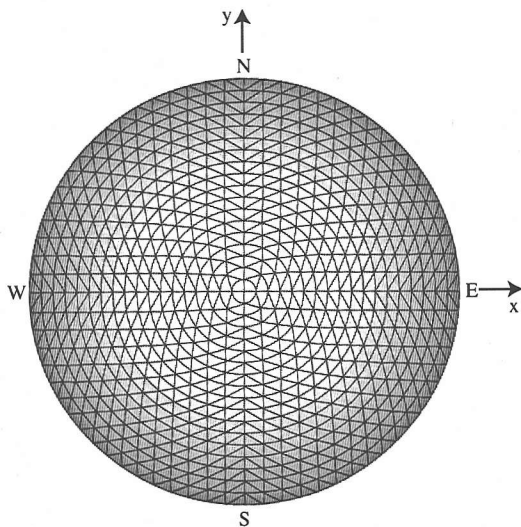


図-7 微小方向領域

不連続面[i]の平均間隔は、調査線や調査平面を用いた不連続面分布の調査<sup>7)</sup>により以下のように推定することができる。

まず、図-7 に示すステレオネットに調査の結果得られた不連続面の極をプロットする。このネットに

おける微小三角形の辺は1つの緯線と2つの大円によって構成されており、頂点の動径および天頂角は一定の距離(角度)で配置されている。これは、基本球面上でそれぞれの三角形が可能な限り等面積となることを図ったものである。三角形の頂点は次式によって与えられる。

$$\begin{cases} \theta = p\eta \\ \varphi = \frac{q\pi\eta}{\pi - |\pi - 2p\eta|} \end{cases} \quad (46)$$

但し、

$$\begin{cases} p = 1, 2, 3, \dots, \frac{\pi}{\eta} \\ q = 1, 2, 3, \dots, \frac{2(\pi - |\pi - 2p\eta|)}{\eta} \end{cases} \quad (47)$$

この他に、

$$\begin{cases} \theta = 0, \pi \\ \varphi = 0 \end{cases} \quad (48)$$

次に、各微小三角形毎に不連続面の平均間隔を求める。具体的には、 $i$ 方向の不連続面( $i$ 微小方向領域に存在する不連続面)の平均間隔 $d(i)$ は次式により推定することができる<sup>7)</sup>。

$$\text{調査線: } d(i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_L} \{L_j(n_i \cdot n_{Lj})\}}{N_i} \quad (49)$$

$$\text{調査平面: } d(i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \{A_j \sin[\cos^{-1}(n_i \cdot n_{Aj})]\}}{\Sigma L_i} \quad (50)$$

但し、 $n_i$ : 不連続面 $[i]$ の単位法線ベクトル

$N_L$ : 調査線の数

$N_A$ : 調査平面の数

$n_{Lj}$ : 調査線の単位法線ベクトル

$n_{Aj}$ : 調査平面の単位法線ベクトル

$L_j$ : 調査線の長さ

$A_j$ : 調査平面の面積

$N_i$ : 調査線と交差する $i$ 方向の不連続面の総数

$\Sigma L_i$ : 調査平面内の $i$ 方向の不連続面のトレース長の合計

微小区間 $dL[k]$ において不連続面 $[i]$ が存在するという事象 $D_i(k)$ の生起確率は、不連続面密度 $1/d(i)$ と微小区間の長さ $dL$ の積を、不連続面 $[i]$ の単位法線ベクトル $n_i$ と微小区間を構成する不連続面トレースの単位ベクトル $n_T$ のなす角によって補正した値であり、次式によって求められる。

$$P[D_i(k)] = \frac{|n_i \cdot n_T|}{d(i)} dL \quad (51)$$

なお、 $P[D_i(k)]$ は $k$ の値とは無関係な値であり、全ての微小区間において等しい値である。

#### (4)未掘削領域における不連続面の連続性

##### a) 間接交差型

ここでは、不連続面の連続性の観点から、不連続面[A]、不連続面[B]および微小区間に存在する潜在不連続面 $[i]$ の各トレースが、未掘削領域内でそれぞれ連結することによって閉領域を形成する確率について考える。

微小区間において、トレース[A]とトレース $[i]$ の交点の $X$ 座標の値 $X_{Ai}(k)$ およびトレース[B]とトレース $[i]$ の交点の $X$ 座標の値 $X_{Bi}(k)$ は、それぞれの基軸型で場合分けすることにより、近似的に以下のように求められる。

まず、微小区間 $dL[k]$ におけるトレース[A]およびトレース[B]とトレース $[i]$ の交点座標(近似)は次式のようになる。

$$\text{[A]基軸型: } X_{Ai}(k) = kdX \quad (52)$$

$$X_{Bi}(k) = \frac{(\alpha_A - \alpha_i)kdX + \beta}{\alpha_B - \alpha_i} \quad (53)$$

$$\text{[B]基軸型: } X_{Ai}(k) = \frac{(\alpha_B - \alpha_i)kdX + \beta}{\alpha_A - \alpha_i} \quad (54)$$

$$X_{Bi}(k) = kdX \quad (55)$$

一方、それぞれの $Y$ 座標の値 $Y_{Ai}(k), Y_{Bi}(k)$ は次式のようになる。

$$Y_{Ai}(k) = \alpha_A X_{Ai}(k) + \beta \quad (56)$$

$$Y_{Bi}(k) = \alpha_B X_{Bi}(k) \quad (57)$$

各不連続面が互いに連結するためには、それぞれの半トレース長が次式に示す値 $l_{SA}^i(k), l_{SB}^i(k), l_{Si}^i(k)$ 以上でなければならない。なお、半トレース長とは、不連続面のトレース上の任意の点から端点までの長さである<sup>8)</sup>。ここでは、トレース[A]とトレース[B]の場合にはベンチとの交点から未掘削領域内の端点までの長さ、トレース $[i]$ の場合には基軸との交点から他方のトレース側の端点までの長さを半トレース長と定義する。

$$l_{SA}^i(k) = \sqrt{1 + \alpha_A^2} X_{Ai}(k) \quad (58)$$

$$l_{SB}^i(k) = \sqrt{1 + \alpha_B^2} X_{Bi}(k) \quad (59)$$

$$l_{Si}^i(k) = \sqrt{(X_{Ai}(k) - X_{Bi}(k))^2 + (Y_{Ai}(k) - Y_{Bi}(k))^2} \quad (60)$$

半トレース長がそれぞれ $l_{SA}^i(k), l_{SB}^i(k), l_{Si}^i(k)$ 以上となる事象 $S_A^i(k), S_B^i(k), S_i^i(k)$ の生起確率は、 $\Psi$ 不連続面群に属する半トレース長 $l$ の分布関数 $F_S(l|n_\Psi)$ を利用して以下のように求められる。

$$P[S_A^i(k)] = 1 - F_S(l_{SA}^i(k)|n_A \in n_\Psi) \quad (61)$$

$$P[S_B^i(k)] = 1 - F_S(l_{SB}^i(k)|n_B \in n_\Psi) \quad (62)$$

$$P[S_i^i(k)] = 1 - F_S(l_{Si}^i(k)|n_i \in n_\Psi) \quad (63)$$

但し、 $n_\Psi$ は、不連続面 $[i]$ が属する $\Psi$ 不連続面群の単位法線ベクトルの集合の族である。



さて、 $\Psi$ 不連続面群に属する半トレース長の確率密度関数  $f_S(\ell|n_\Psi)$  は  $\Psi$ 不連続面群に属するトレース長分布の分布関数  $F_L(\ell|n_\Psi)$  との間に次のような関係があることが知られている<sup>9)</sup>。

$$f_S(\ell|n_\Psi) = \frac{1}{\ell_{AV}(\Psi)} (1 - F_L(\ell|n_\Psi)) \quad (64)$$

ここで、 $\ell_{AV}(\Psi)$  は  $\Psi$ 不連続面群に属する不連続面群の平均トレース長である。

不連続面のトレース長分布モデルについては、これまで指数分布モデル<sup>10),11),12),13)</sup>および対数正規分布モデル<sup>14),15),16),17)</sup>が提案されているが、工学的問題を対処するにあたっては、平均トレース長のみで分布を規定することができる指数分布モデルを用いるのが簡便であると考えられ、ここでは次式に示す指数分布モデル<sup>7)</sup>を用いることにする。

$$F_L(\ell|n_\Psi) = 1 - \exp\left(-\frac{\ell - \ell_0}{\ell_{AV}(\Psi) - \ell_0}\right) \quad (65)$$

但し、 $\ell_0$  は調査の基準とする最小のトレース長である。このとき、半トレース長の分布関数  $F_S(\ell|n_\Psi)$  は半トレース長の確率密度関数  $f_S(\ell|n_\Psi)$  を積分することによって得られるので最終的に次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} F_S(\ell|n_\Psi) d\ell &= \int_0^\ell f_S(\ell|n_\Psi) d\ell \\ &= \int_0^\ell \frac{1}{\ell_{AV}(\Psi)} (1 - F_L(\ell|n_\Psi)) d\ell \\ &= \left(1 - \frac{\ell_0}{\ell_{AV}(\Psi)}\right) \left\{1 - \exp\left(-\frac{\ell - \ell_0}{\ell_{AV}(\Psi) - \ell_0}\right)\right\} \end{aligned} \quad (66)$$

## b) 直接交差型

ここでは、不連続面の連続性の観点から、収束型でかつ  $X_C > X_{Dr}$  の場合で未掘削領域内において不連続面[A]と不連続面[B]が直接連結することによって閉領域を形成する確率について考える。

未掘削領域においてトレース[A]とトレース[B]が連結するには、それぞれの半トレース長が次式に示す値  $\ell_{SA}^C, \ell_{SB}^C$  以上でなければならない。

$$\ell_{SA}^C = \sqrt{1 + \alpha_A^2} X_{AB} \quad (67)$$

$$\ell_{SB}^C = \sqrt{1 + \alpha_B^2} X_{AB} \quad (68)$$

半トレース長が、それぞれ  $\ell_{SA}^C, \ell_{SB}^C$  以上となる事象  $S_A^C, S_B^C$  の生起確率は、前項の場合と同様にして、半トレース長の分布関数  $F_S(\ell|n_\Psi)$  を用いて以下のよう

$$P[S_A^C] = 1 - F(\ell_{SA}^C|n_A \in n_\Psi) \quad (69)$$

$$P[S_B^C] = 1 - F(\ell_{SB}^C|n_B \in n_\Psi) \quad (70)$$

## (5) 移動可能ブロックの形成確率

### a) 間接交差型

微小区間  $dL[k]$  において潜在不連続面[i]が存在し、間接交差型の移動可能ブロックが形成される事象  $U_i(k)$  が生起するためには、以下の条件を全て具備することが必要である。

- ① 不連続面[A]、不連続面[B]、連絡不連続面[C]、潜在不連続面[i]および掘削面[E]で囲まれるブロックが移動可能な形状である (事象  $R_i$ )
- ② 微小区間  $dL[k]$  に不連続面[i]が出現する (事象  $D_i(k)$ )
- ③ 不連続面[A]の半トレース長が  $\ell_{SA}^i(k)$  以上である (事象  $S_A^i(k)$ )
- ④ 不連続面[B]の半トレース長が  $\ell_{SB}^i(k)$  以上である (事象  $S_B^i(k)$ )
- ⑤ 不連続面[i]の半トレース長が  $\ell_{Si}^i(k)$  以上である (事象  $S_i^i(k)$ )
- ⑥ 微小区間  $dL[1] \sim dL[k-1]$  に存在する不連続面[i]によって移動可能ブロックが形成されない (事象  $H_i(k)$ )

上記のうち、条件①～⑤については、式(35)(51)(61)(62)(63)によって、それぞれの生起確率を与えることができる。

ここで、条件⑥について考える。微小区間  $dL[1] \sim dL[k-1]$  に存在する不連続面[i]によって移動可能ブロックが形成されないという事象  $H_i(k)$  は、微小区間  $dL[k-1]$  に不連続面[i]が存在しない事象  $D_i(k-1)$  と微小区間  $dL[k-1]$  に不連続面[i]が存在し (事象  $D_i(k-1)$ ) かつその不連続面の半トレース長が  $\ell_{SA}^i(k-1)$  未満 (事象  $S_A^i(k-1)$ ) となる事象の結び、と事象  $H_i(k-1)$  の交わりであり、次式によって表すことができる。

$$\begin{aligned} P[H_i(k)] &= P\left[\overline{D_i(k-1)} \cup \left(\overline{S_A^i(k-1)} \cap D_i(k-1)\right)\right] \cap H_i(k-1) \\ &= \left\{P[\overline{D_i(k-1)}] + P[S_A^i(k-1)]P[D_i(k-1)]\right\} P[H_i(k-1)] \\ &= \left\{1 - P[D_i(k-1)] + \left[1 - P[S_A^i(k-1)]\right]P[D_i(k-1)]\right\} P[H_i(k-1)] \\ &= \left\{1 - P[D_i(k-1)]P[S_A^i(k-1)]\right\} P[H_i(k-1)] \end{aligned} \quad (71)$$

また、最初の区間  $dL[1]$  では、それ以前に移動可能ブロックが形成されることはないので次式が得られる。

$$P[H_i(1)] = 1 \quad (72)$$

したがって、条件⑥の生起確率は第1項が1の等比数列となり次式が得られる。

$$P[H_i(k)] = \prod_{m=1}^{k-1} \left(1 - P[D_i(m)]P[S_A^i(m)]\right) \quad (73)$$

さて、式(73)は、各微小区間における確率の積の形で定義してされているが、このような場合、算出される確率は微小区間の大きさ  $dL$  に少なからず影響を受ける。ここで、微小区間の適正な大きさを検討するために、式(73)を  $dL$  の関数で表現する。

まず、式(41)あるいは式(43)および式(45)から微小区間の区間数  $n$  が以下のように得られる。

$$n = \frac{X_C \sqrt{1 + \alpha^2}}{dL} \quad (74)$$

但し、 $\alpha$  は基軸の傾きであり、[A]基軸型の場合は  $\alpha_A$ 、[B]基軸型の場合は  $\alpha_B$  をさす。式(73)中の微小区間の番号  $k$  は  $n$  に比例（比例定数を  $C$  とする）するので、[L]の次元を有する定数  $C_1$  を用いて次式で表すことができる。

$$k = \frac{CX_C \sqrt{1 + \alpha^2}}{dL} \equiv \frac{C_1}{dL} \quad (75)$$

次に、式(73)中の  $P[D_i(k)]$  は、式(51)から[L<sup>-1</sup>]の次元を有する定数  $C_2$  を用いて次式で表すことができる。

$$P[D_i(k)] = \frac{|n_i \cdot n_T|}{d(i)} dL \equiv C_2 dL \quad (76)$$

さらに、式(73)中の  $P[S_i^j(k)]$  は、式(63)(66)から[L<sup>-1</sup>]の次元を有する定数  $C_3$  を用いて次式で表すことができる（簡単のため、 $\ell_0 = 0$  とする）。

$$P[S_i^j(k)] = \exp\left(-\frac{mdL}{\ell_{AV}}\right) \equiv \exp(-C_3 mdL) \quad (77)$$

式(75)(76)(77)を式(73)に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} P[H_i(k)] &= \prod_{m=1}^{C_1/dL-1} (1 - P[D_i(k)]P[S_i^j(k)]) \\ &= \prod_{m=1}^{C_1/dL-1} \{1 - C_2 dL \exp(-C_3 mdL)\} \\ &= \{1 - C_2 dL \exp(-C_3 dL)\} \{1 - C_2 dL \exp(-2C_3 dL)\} \\ &\quad \dots \{1 - C_2 dL \exp(-C_3(C_1 - dL))\} \\ &= 1 - C_2 dL \sum_{m=1}^{C_1/dL-1} \exp(-C_3 mdL) + f(dL) \end{aligned} \quad (78)$$

但し、 $f(dL)$  は、 $dL$  が 2 次以上となる項の合計である。式(78)の指数部分をテイラー級数に展開すると次式のようになる。

$$P[H_i(k)] = 1 - C_2 dL \sum_{m=1}^{C_1/dL-1} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(-C_3 mdL)^N}{N!} + f(dL) \quad (79)$$

$C_1/dL - 1 \equiv M$  とおき、式(79)をさらに計算すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} P[H_i(k)] &= 1 - C_2 dL \sum_{m=1}^M \left( 1 - C_3 mdL + \frac{(C_3 mdL)^2}{2} - \frac{(C_3 mdL)^3}{6} + \frac{(C_3 mdL)^4}{24} - \dots \right) + f(dL) \\ &= 1 - C_2 dL \left[ M - C_3 dL \sum_{m=1}^M m + \frac{(C_3 dL)^2}{2} \sum_{m=1}^M m^2 - \frac{(C_3 dL)^3}{6} \sum_{m=1}^M m^3 + \frac{(C_3 dL)^4}{24} \sum_{m=1}^M m^4 - \dots \right] + f(dL) \\ &= 1 - C_2 dL \left[ M - C_3 dL \left( \frac{M(M+1)}{2} \right) + (C_3 dL)^2 \left( \frac{M(M+1)(2M+1)}{12} \right) \right. \\ &\quad \left. - (C_3 dL)^3 \left( \frac{M^2(M+1)^2}{24} \right) + (C_3 dL)^4 \left( \frac{M(M+1)(2M+1)(3M^2+3M-1)}{720} \right) - \dots \right] + f(dL) \end{aligned} \quad (80)$$

ここで、式(80)の極限をとり、概算すると、

$$\begin{aligned} \lim_{dL \rightarrow 0} P[H_i(k)] &= 1 - \left( C_1 C_2 - \frac{C_1^2 C_2 C_3}{2} + \frac{C_1^3 C_2 C_3^2}{6} - \frac{C_1^4 C_2 C_3^3}{24} + \frac{C_1^5 C_2 C_3^4}{120} - \dots \right) \\ &= 1 - \sum_{N=0}^{\infty} \frac{C_1^{N+1} C_2 (-C_3)^N}{(N+1)!} \end{aligned} \quad (81)$$

となり、 $dL$  に依存しなくなる。以上のことから  $dL$  の大きさは式(81)の概算が成立するように十分小さく設定する必要がある。

以上より、事象  $U_i(k)$  の生起確率は条件①～⑥の生起確率によって次のように示される。

$$\begin{aligned} P[U_i(k)] &= P[R_i \cap D_i(k) \cap S_A^j(k) \cap S_B^i(k) \cap S_i^j(k) \cap H_i(k)] \\ &= P[R_i] P[D_i(k)] P[S_A^j(k)] P[S_B^i(k)] P[S_i^j(k)] P[H_i(k)] \end{aligned} \quad (82)$$

ここで、事象  $U_i(1), U_i(2), \dots, U_i(n)$  は互いに排斥する事象となっており、 $dL[1] \sim dL[n]$  において潜在不連続面[i]が存在し、間接交差型の移動可能ブロックが形成される事象  $U_i$  の生起確率は次式のようになる。

$$\begin{aligned} P[U_i] &= P[U_i(1) \cup U_i(2) \cup U_i(3) \cup \dots \cup U_i(k) \cup \dots \cup U_i(n)] \\ &= \sum_{k=1}^n P[U_i(k)] \end{aligned} \quad (83)$$

## b) 直接交差型

収束型でかつ  $X_C > X_{Dr}$  の場合で直接交差型の移動可能ブロックが形成される事象  $U_C$  が生起するためには、以下の条件を全て具備することが必要である。

- ① 不連続面[A]、不連続面[B]、連絡不連続面[C]および掘削面[E]で囲まれるブロックが移動可能な形状である（事象  $R_C$ ）
- ② 不連続面[A]の半トレース長が  $\ell_{SA}^C$  以上である（事象  $S_A^C$ ）
- ③ 不連続面[B]の半トレース長が  $\ell_{SB}^C$  以上である（事象  $S_B^C$ ）

これらの条件については、式(24)(69)(70)によって、それぞれの生起確率を与えることができ、事象  $U_c$  の生起確率は次のように示される。

$$P[U_c] = P[R_c \cap S_A^c \cap S_B^c] \quad (84)$$

$$= P[R_c] P[S_A^c] P[S_B^c]$$

### c) 移動可能ブロックの形成確率の算出

確率ブロック理論による解析において最終的に求める確率は移動可能ブロックが形成される確率である。ここで、移動可能ブロックが形成される事象は、以下の2つの事象のうち1つでも生起するときに生起することとなる。

①未掘削領域内に存在する任意方向の潜在不連続面によって間接交差型の移動可能ブロックが形成される事象 ( $i$  方向の潜在不連続面  $[i]$  が関与するときの事象を  $U_i$  とする)

②未掘削領域内において、直接交差型の移動可能ブロックが形成される事象 ( $U_c$ )

したがって、 $\Omega$  を微小方向領域の総数とすると事象  $U$  は事象  $U_i$  と事象  $U_c$  を用いて次のように表現することができる。

$$U = U_c \cup U_1 \cup U_2 \cup U_3 \cup \dots \cup U_\Omega \quad (85)$$

また、ド・モルガンの法則より事象  $U$  の余事象である移動可能ブロックが形成されない事象  $\bar{U}$  は次のようになる。

$$\bar{U} = \overline{U_c \cup U_1 \cup U_2 \cup U_3 \cup \dots \cup U_\Omega} \quad (86)$$

$$= \bar{U}_c \cap \bar{U}_1 \cap \bar{U}_2 \cap \bar{U}_3 \cap \dots \cap \bar{U}_\Omega$$

これより、掘削に伴って移動可能ブロックが形成される事象  $U$  が生起する確率  $P(U)$  は次式によって与えられる。

$$P[U] = 1 - P[\bar{U}]$$

$$= 1 - P[\bar{U}_c] \prod_{i=1}^{\Omega} P[\bar{U}_i] \quad (87)$$

$$= 1 - (1 - P[U_c]) \prod_{i=1}^{\Omega} (1 - P[U_i])$$

### (6) 確率ブロック理論の入力項目

ここで、確率ブロック理論を用いて実際に解析を行う場合の入力項目を纏めておく。入力項目は、次の2つに大別される。

- ①解析対象多角形に関する幾何学的データ
- ②解析対象多角形周辺の不連続面分布データ

まず、①のデータは、既掘削部の状況を与える決定論的情報であり、その内容は以下の5項目である。

- ①不連続面[A]の方向
- ②不連続面[B]の方向
- ③連絡不連続面[C]の方向とブロックコード

④掘削面[E]の方向とオーバーハングの有無

⑤切り羽またはベンチ面と掘削面[E]の交差線における不連続面[A]と不連続面[B]の距離

一方、②のデータは、未掘削部の不連続面分布を予測する確率統計学的情報であり、その内容は以下の3項目である。

- ①各不連続面群の平均方向と分布範囲
- ②各不連続面群の平均トレース長
- ③方向別の不連続面の平均間隔

これらについては、既掘削面の不連続面分布によって決定されるものであるが、掘削の進行に伴って新たに不連続面情報を得ることができるので、各掘削段階で再評価を行うことによって適宜新たな値を設定すべきと考えられる。

### 3. 地下空洞の掘削シミュレーション

ここでは、既設の大規模地下発電所本体空洞において実際に行われた掘削を忠実に再現した掘削シミュレーションを行い、実際の施工において、移動可能ブロックをどの程度事前予測できるかについて検討を行う。すなわち、各ベンチの掘削が行われる前(ステージ管理時)にその時点で得られている不連続面情報のみを用いて、掘削に伴い移動可能となるブロックを確率ブロック理論によってどの程度推定できるかについて検討(マスキング・テスト)を行うものである。

#### (1) 対象空洞の概要

シミュレーションの対象とした空洞は、わが国最大級の規模を有する。空洞の建設にあたっては、天井部の切上げ掘削完了後、計15段ベンチ(ベンチ高さ:2.5m)の盤下げ掘削が行われた。

本空洞の周辺岩盤は古期堆積岩類によって構成されており、当該地域一帯の地質構造を支配する褶曲構造の影響を受けて、互いに直交する3つの不連続面群が卓越している。

- ①層理面方向の不連続面群: 空洞軸と垂直方向の走向を有する急傾斜の不連続面群であり、連続性が高い。壁面上には縦に長いトレースとして現れる。
- ②褶曲軸に平行な方向(走向節理)の不連続面群: 空洞軸と垂直方向の走向を有する緩傾斜の不連続面群であり、連続性が低い。壁面上には横に短いトレースとして現れる。
- ③褶曲軸に垂直な方向(傾斜節理)の不連続面群: 空洞軸と平行方向の走向を有する鉛直傾斜の不

連続面群である。空洞壁面とほぼ平行であるため、トレース図上にはほとんど現れない。

## (2) 掘削シミュレーションの手順

本研究で掘削シミュレーションの対象としたのは15段ベンチの盤下げ掘削（鉛直掘削）である。シミュレーションの手順は以下の通りである。

### a) 不連続面トレース図の作成

まず、0ベンチから15ベンチまでの両側壁面において、不連続面トレース図を作成した。不連続面トレース図を作成するにあたっては、空洞壁面展開図を参照し、不連続面トレース図上に描いたすべての不連続面（計1091面）の走向傾斜を決定した。

ここで、空洞壁面展開図に記載されている連続性の高い不連続面は、必ずしも唯一の走向傾斜によって記載されておらず、しばしば複数の局所的な走向傾斜によって記載されている。しかしながら、ブロック理論による解析を行う前提条件として、一つの不連続面は唯一の走向傾斜で表現されていなければならない。このため、本研究においては、複数の走向傾斜データが存在する場合には、不連続面トレースの見かけの傾斜角とより一致するものを選択するなどして個々の検討を行い、唯一の走向傾斜によって代表させた。さらに記載データと壁面の方向の関係によって理論的に描かれる不連続面トレースの見かけの傾斜角と実際に観察された不連続面トレースの見かけの傾斜角がやや異なり矛盾が生じた場合には、実際に観察された不連続面トレースの見かけの傾斜角を重視し、適宜調整を行った。

### b) ブロック理論による解析

不連続面トレース図中に存在する不連続面で囲まれた閉領域の全てを対象として、ブロック理論による解析を行い、幾何学的に移動可能となるブロックの抽出を行った。

解析の結果、移動可能ブロックを合計104個抽出されたが、その空間的分布は一様ではなく、いくつかの特定の箇所集中して分布する傾向が認められた。また、これらの箇所は、空洞の施工時に変位の収束が遅れた箇所とほぼ一致している。

### c) 不連続面の分布性状の評価

先にも述べたように、確率ブロック理論による解析を行うにあたっては、事前に解析対象多角形周辺における不連続面の分布性状(2.(6)節の②に示した3つのパラメータ)を把握しておく必要がある。本研究においては、これらのパラメータを算出するにあたって、各掘削段階（ベンチ）で以下のように不連続面の分布性状を評価することによって検討を試みた。

- ①1ベンチ：0ベンチから1ベンチ間の不連続面分布データから算出
- ②2ベンチ：0ベンチから2ベンチ間の不連続面分布データから算出
- ③3～6ベンチ：0ベンチから3ベンチ間の不連続面分布データから算出
- ④7～9ベンチ：3ベンチから6ベンチ間の不連続面分布データから算出
- ⑤10～12ベンチ：6ベンチから9ベンチ間の不連続面分布データから算出
- ⑥12～14ベンチ：9ベンチから12ベンチ間の不連続面分布データから算出

### d) 確率ブロック理論による解析

1～14ベンチについて、不連続面とベンチ面とで囲まれた全ての閉領域を解析対象多角形として確率ブロック理論による解析を行い、移動可能ブロックの形成確率を算出した。解析対象多角形の個数（解析の対象としたすべての壁面における総計）は4734である。

なお、計算にあたっては、標準的なパーソナルコンピュータを用いたが、平均計算時間は、解析対象多角形1個あたり（1解析ケースあたり）につき1秒弱であり、ステージ管理への適用性はもちろんのこと日常管理への適用性も有していると考えられる。

## (3) 掘削シミュレーションの結果と考察

確率ブロック理論による解析の結果を移動可能ブロック形成確率毎に集計したものを表-1に示す。

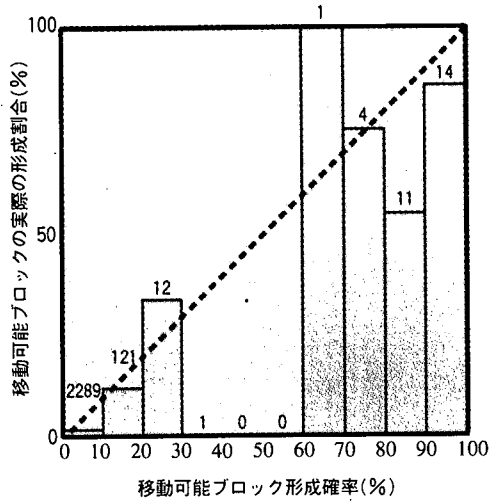
まず、形成確率が0%のブロックが全体の4734ケースのうちの2281ケースに及んでおり、これらのブロックのすべてが実際に安定ブロックとなっており、移動可能となったブロックは認められなかった。このことから、確率ブロック理論は、ブロックの移動という観点からは支保の必要のない安定ブロックを抽出するにあたって、非常に高い信頼性を発揮していることがわかる。

次に、形成確率が100%のブロックについても、ブロック数は6個と少ないものの、これらのブロックのすべてが実際に移動可能ブロックとなっており、確率ブロック理論の有効性が伺える。

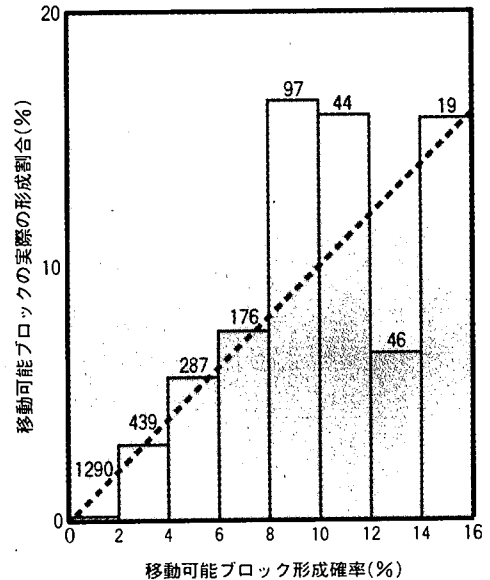
図-8(a)は、表-1を参照することによって、移動可能ブロックの形成確率と実際の移動可能ブロックの形成割合との関係を示したものである。ここで、形成確率0%のブロックは除外した。図中の破線は解析によって算出した移動可能ブロックの形成確率と実際の形成割合とが完全に一致する場合の理想直線である。また、ヒストグラム上に付した数字はその範囲内におけるブロックの数である。

表-1 確率ブロック理論による解析の結果

移動可能 ブロック 形成確率%	解析対 象多角 形数	移動可 能ブロ ック数	実際の 形成割 合%	移動可 能ブロ ック数	実際の 形成割 合%	移動可 能ブロ ック数	実際の 形成割 合%
0	2281	0	0.00				
0~1	941	2	0.21	6	0.17		
1~2	349	4	1.15				
2~3	262	1	0.38	13	2.96		
3~4	177	12	6.78				
4~5	156	5	3.21	16	5.57	64	1.40
5~6	131	11	8.40				
6~7	97	6	6.19	13	7.39		
7~8	79	7	8.86				
8~9	51	8	15.69	16	16.49		
9~10	46	8	17.39				
10~11	27	2	7.41	7	15.91		
11~12	17	5	29.41				
12~13	27	1	3.70	3	6.52		
13~14	19	2	10.53				
14~15	12	2	16.67	3	15.79	14	11.57
15~16	7	1	14.29				
16~17	4	0	0.00	0	0.00		
17~18	5	0	0.00				
18~19	2	1	50.00	1	33.33		
19~20	1	0	0.00				
20~30	12	4	33.33				
30~40	1	0	0.00				
40~50	0	0	-				
50~60	0	0	-				
60~70	1	1	100.0				
70~80	4	3	75.00				
80~90	11	6	54.55				
90~100	8	6	75.00				
100	6	6	100.0				
全体	4734	104	2.20				



(a) 全体



(b) 形成確率16%以下

図-8 移動可能ブロックの形成確率と実際の形成割合

本図を見ると形成確率の各範囲でヒストグラムが理想直線とよく対応していることが分かる。また、図-8(b)は、解析を行ったブロック数が非常に多い0~16%の範囲内で、図-8(a)と同様の関係を調べたものである。本図についても、図-8(a)の場合と同様に形成確率の各範囲でヒストグラムが理想直線とよく対応しており、細かい範囲に分けてみても確率ブロック理論が有効に機能していることが分かる。

以上のような掘削シミュレーションの結果から確率ブロック理論の有効性を推察することができるが、必ずしも理論直線と一致していない範囲も存在している。この原因としては、以下のことが考えられる。

- ①対応性が比較的良好くない範囲は対応性が良い範囲と比較してデータ数が少ない。このため、偶然性に左右されて対応性が低くなった。  
→このことは確率論における基本定理である中心極限定理によって説明することができる(標準偏差は標本数の平方根に反比例する)。
- ②壁面展開図作成時に不連続面の走行傾斜の評価方法が適切でない(不連続面の方向が不連続面トレースの方向とやや異なる)ものがいくつか存在し、これによって解析精度が低まった。

→より正確な不連続面データの調査システムを確立する必要がある。

- ③ブロック理論では壁面に現われた不連続面が1つの走向傾斜で表わされることを前提条件としているが、実際に不連続面は完全な平面ではなく、壁面に線として現われる不連続面トレースも曲線となる。次段階のベンチ面までには収束しないはずの不連続面Aと不連続面Bが実際には収束して移動可能ブロックとなる例がしばしば認められた。

→不連続面の湾曲(undulation)を解析に組み入れる必要がある。

表-2 補強基準値と補強箇所および改善箇所

補強基準値 (%)	補強箇所		改善箇所					
	$N_c$ (個)	$N_c/N$ (%)	相互位置関係を無視			相互位置関係を考慮		
			$N_i$ (個)	$N_i/N_D$ (%)	$N_i/N_c$ (%)	$N_i$ (個)	$N_i/N_D$ (%)	$N_i/N_c$ (%)
100	6	0.1	6	5.8	100.0	20	14.4	250.0
60	30	0.6	22	21.2	73.3	38	36.5	126.7
20	43	0.9	26	25.0	60.5	41	39.4	95.3
10	164	3.5	40	38.5	24.4	71	68.3	43.3
7	340	7.2	63	60.6	18.5	90	86.5	26.5
5	568	12.0	80	76.9	14.1	99	95.2	17.4
3	901	19.0	97	93.3	10.8	104	100.0	11.5
1	1512	31.9	102	98.1	6.7	104	100.0	6.9
0	4734	100.0	104	100.0	2.2	104	100.0	2.2

$N$ : 解析対象多角形の総数,  $N_D$ : 移動可能ブロックの総数  
 $N_c$ : 補強対象箇所数,  $N_i$ : 改善ブロック数

これらの問題点のうち、②③についてはその改良が可能と思われる、今後修正を加えていくことでより理想直線により近いグラフが得られるようになると考える。一方、①については確率論の宿命ともいえる短所であるが、元来頻度の低い箇所については評価の重要性は頻度の高い箇所と比較して低く、安全側の判断をすることで対処が可能であるものと推察される。

**(4) 形成確率の利用方法の検討**

前節の議論は、確率ブロック理論自体の手法の妥当性を主として検討したものであり、現実問題への適用性を詳しく議論したものではない。確率ブロック理論によって算出された形成確率はあくまで妥当性の高い参考値に過ぎず、現実問題への適用に際しては、この参考値を適切に判断し、利用することが必要である。

空洞掘削時に初期補強工 (initial support) を実施するか否かの基準は、「岩盤ブロックの移動が生じた場合の被害の程度」と「初期補強工を実施する労力」との関係によって決定されるものと考えられる。

ここでは、初期補強工を実施する移動可能ブロック形成確率の下限値（「補強基準値」とする）を具体的にいくつか設定し、シミュレーション結果にあてはめて各基準値における安全性や効率性について検討する。

さて、現実の掘削面においては、解析の対象となる閉領域（解析対象多角形）が1つ以上の不連続面を共有することによって隣接していることが多い。このような場合、これらの隣接した閉領域を包含する領域が閉領域を形成することになる。したがって、閉領域が隣接している場合には、それぞれの閉領域が解析の対象となると同時に、これらの閉領域を包含する領域も解析の対象となる。

ここで、ある解析対象多角形が補強基準値を超えて安定領域まで縫合補強された場合、それと同一領域を共有している解析対象多角形については、たとえ補強基準値に達していない場合でも既に補強がなされていることになる。したがって、各補強基準値における安全性や効率性について検討するにあたっては、ブロック相互間の位置関係を考慮する必要がある。

表-2 は、各補強基準値における補強対象箇所数  $N_c$ （補強基準値以上の移動可能ブロック形成確率を有する解析対象多角形数）および改善ブロック数  $N_i$ （補強により改善される移動可能ブロック数）を集計したものである。なお、改善ブロック数については、ブロック相互間の位置関係を無視して純粋に解析対

象多角形が補強・改善される場合のみを計数したものの（相互の位置関係を無視）と補強された隣接ブロックによって結果的に解析対象多角形が改善される場合を含めて計数したものの（相互の位置関係を考慮）の2種類について示している。また、補強に費やす労力・安全性・効率性の程度を検討するために以下の3つの指標値を設定し、表中に併記した。

- ①  $N_c/N$ : 全解析対象多角形数  $N(=4734)$  に対して補強対象箇所数が占める割合であり、補強に費やす労力の程度を示す指標とする。小さい値ほど望ましい。
- ②  $N_i/N_D$ : 全移動可能ブロック数  $N_D(=104)$  に対して改善ブロック数が占める割合であり、安全性の程度を示す指標とする。大きい値ほど望ましい。
- ③  $N_i/N_c$ : 補強対象箇所数に対して改善ブロック数が占める割合であり、効率性の程度を示す指標とする。大きい値ほど望ましい。

さらに、補強基準値と上記指標値の関係を図-9 に示す。これらの図表を見ると以下のような一般的傾向が認められる。

- ① 補強に費やす労力の程度を示す  $N_c/N$  値は、補強基準値の増加に伴って指数関数的に減少する。
- ② 安全性の程度を示す  $N_i/N_D$  値は、補強基準値の増加に伴って減少するが、補強基準値が20%を超えると減少度合いが小さくなる。
- ③ 効率性の程度を示す  $N_i/N_c$  値は、補強基準値の増加に伴って増加するが、補強基準値が20%を超えると増加度合いが小さくなる。
- ④ 改善ブロック数については、相互の位置関係を考慮した場合と無視した場合の比が1:1~2.5程度であり、補強基準値の増加に伴って比の値が大きくなる。



- :  $N_c/N_i$  ; ▲ :  $N_p/N_i$  (ブロック相互の位置関係を考慮)
- :  $N_c/N_c$  (ブロック相互の位置関係を考慮)
- △ :  $N_p/N_i$  (ブロック相互の位置関係を無視)
- :  $N_c/N_c$  (ブロック相互の位置関係を無視)

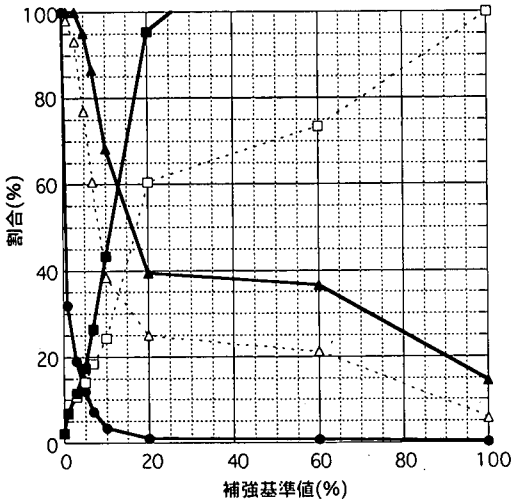


図-9 補強基準値と指標値

ここで、上記のような一般的傾向を考慮した上で、補強基準値を 5%、10%、20%とした具体的な場合について検討する。

まず、補強基準値が 5%の場合、約 12%の解析対象多角形を補強することで約 95% (ブロック相互の位置関係を考慮) の移動可能ブロックが改善され、高い安全性を事前に確保することが可能となる。しかしながら、補強対象箇所が改善される割合は約 17%であり、やや効率性が低くなる。

次に、補強基準値が 10%の場合、約 3.5%の解析対象多角形を補強することで約 70% (位置関係を考慮) の移動可能ブロックを事前に処理することが可能となる。補強基準値が 5%の場合と比較して安全性はやや減少するものの、補強対象箇所が改善される割合は約 43%となり、効率性が増加する。

補強基準値が 20%の場合、1%未満の解析対象多角形を補強することで約 40% (位置関係を考慮) の移動可能ブロックを事前に処理することが可能となる。補強対象箇所が改善される割合は約 95%と効率性が極めて高くなるが、安全性はやや低くなる。

このような観点で 3 者を比較すると、補強基準値 5%の場合は安全性重視型、補強基準値 20%の場合は効率性重視型、補強基準値 10%の場合はバランス型と言えよう。実際の施工における補強基準値の決定にあたっては、掘削の各段階で上記のような検討を繰り返しながら適切な基準値を設定すべきであると思われる。

#### 4. 結 語

空洞壁面の安定化対策を効率的に実施するにあたっては、局所的な危険箇所を適切に評価することが重要となる。既掘削部において得られる「決定論的」な不連続面情報は、局所的な危険箇所の特定の際に最も適した情報であるが、原則的に掘削後の情報であるため、掘削前の検討には用いることができない。一方、「確率統計学的」な不連続面情報は、未掘削部における不連続面分布の全体的傾向を評価するには適しているが、局所的な危険箇所の特定には不向きである。確率ブロック理論は、既掘削部の不連続面分布を記載した決定論的情報と未掘削部の不連続面分布を予測する確率統計学的情報とを同時に解析に組み入れることによって、両情報が持ち合わせた長を最大限活かし、情報化施工という枠組みの中で「局所的な危険箇所を事前予測する」ことを意図したものである。

本研究において得られた結果は以下の通りである。

- (1) 大規模地下空洞における水平掘削と鉛直掘削の 2 つの掘削形式について同時に対処できるように確率ブロック理論を可能な限り一般化した形で詳細に説明した。
- (2) 既設の大規模地下発電所において建設時に作成された空洞壁面展開図を用いて掘削シミュレーションを行った結果、確率ブロック理論によって算出された移動可能ブロックの形成確率は実際の移動可能ブロックの形成確率とよく対応し、確率ブロック理論の妥当性が検証された。
- (3) 上記地点において、移動可能ブロックの形成確率をもとに補強基準値をいくつか設定し、この値が空洞掘削の安全性および効率性に与える影響度合いを示した。

なお、本研究で示した確率ブロック理論は、不連続面の幾何学的分布情報のみから「移動可能となるブロックが形成される確率」を算出するものであり、「ブロックが移動する確率」を算出するものではない。ブロックの移動確率を算出するにあたっては、不連続面の幾何学的分布情報に加えて、岩盤に作用する応力や不連続面の摩擦角などの力学的パラメータを理論に組み入れる必要があるが、これについては、必要支保力の算定を含めて別の機会に紹介する所存である。

また、本研究で示した確率ブロック理論では、掘削面上で観察される不連続面が岩盤内部 (掘削面背部) 方向には無限に広がりを有するといったブロック理論の仮定を用いているが、本研究の理論を 3 次元に展開することによってこの仮定を払拭すること

ができるものとする。すなわち、岩盤内部方向への不連続面の連続性および岩盤内部における潜在不連続面の存在性および連続性を本研究で示した手法に準拠して確率論的に求めれば、移動可能ブロックの形成確率を算出することが可能となる。これについても別の機会に紹介する所存である。

## 参考文献

- 1) 大西有三, 手塚昌信, 田中誠, 西村毅: 地下空洞掘削時におけるキーブロック解析の適用について, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.58-62, 1997.
- 2) 土木学会編: 大規模地下空洞の情報化施工, 土木学会, 1996.
- 3) Goodman, R.E. and Shi, G.H.: Geology and rock slope stability- application of the key block concept for rock slopes, *Proc. 3rd Int. Conference on Stability in Surface Mining (AIME/SME, New York)*, pp.347-373, 1982.
- 4) 水戸義忠, 喜藤剛, 菊地宏吉: 大規模地下空洞の情報化施工を目的とした確率ブロック理論の提案, 電力土木, No.255, pp.130-136, 1995.
- 5) 水戸義忠, 菊地宏吉, 堤直己, 平野勇: 大規模岩盤斜面の情報化施工のための確率ブロック理論の提案, 資源と素材, Vol.112, pp.859-866, 1996.
- 6) R. E. グッドマン, G. H. シー: ブロック理論と岩盤工学への応用, 吉中龍之進, 大西有三共訳, 土木工学社, 359 p., 1992.
- 7) 菊地宏吉, 水戸義忠, 本多眞: 節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究(その2), 電力土木, No.255, pp.130-136, 1995.
- 8) Priest, S.D. and Hudson, J.A.: Estimation of discontinuity spacing and trace length using Scanline surveys; *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp.183-197, 1981.
- 9) 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, 早稲田大学学位論文, 184p., 1993.
- 10) Robertson, A.: The interpretation of geological factors for use in slope theory; *Planning Open Pit Mines- Symp. on the theoretical background to the planning of open pit mines with special reference to slope stability*, pp.55-71, Johannesburg, South Africa, 1970.
- 11) Steffen: Recent developments in the interpretation of data from joint surveys in rock masses; 6th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found., 1975.
- 12) Call, R.R., Savery, J. and Nicholas, D.E.: Estimation of joint set characteristics from surface mapping data: *17th U.S. Symp. on Rock Mech.*, 1976.
- 13) Franklin J.A. and Maerz, N.H.: Photographic measurements of jointing and fragmentation: *Proc. 2nd Int. Symp. on Field measurements in Geomechanics*, pp.1-11, Kobe, 1987.
- 14) MacMahon: Design of rock slopes against sliding on preexisting surface; 3rd International .on Rock Mech. vol 2-B, 1974.
- 15) Bridges, M.C.: Presentation of fracture data for rock mechanics: *2nd Australian-New Zealand Conference on Geomech.*, Brisbane, 1976.
- 16) Barton: Geotechnical analysis of rock structure and fabric in C.S.A mine, Cober, New South Wales: *Applied Geomech. Technical Paper 24*, 1977.
- 17) Baecher, G.B., Larney, N.A. and Einstein, H.H.: Statistical description of rock properties and sampling: *Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 5C1.1-5C1.8, 1977.

(1998.9.14 受付)

## VERIFICATION OF STOCHASTIC BLOCK THEORY BY THE SIMULATION OF THE LARGE UNDERGROUND EXCAVATION

Yoshitada MITO, Kohkichi KIKUCHI, Keigo KUDOH and Toshihiro KOYAMA

The stability of underground cavern is strongly controlled by joint distribution in the case of hard rock mass. Stochastic Block Theory has been suggested for the effective observational construction of large underground caverns. The probability of forming a removable block by the subsequent excavation can be obtained from actual field data for stochastic estimation of discontinuity distribution in the hidden region. In this study, the appropriateness and applicability of Stochastic Block Theory are verified based on the simulation results on one of the largest underground excavations in Japan.