

地下空洞掘削におけるキーブロックの発生予測

大西有三¹・朝川誠²・林真由³

¹正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 関西電力(株) 舞鶴火力建設所 土木工事課 (〒625-0137 舞鶴市大字瀬崎小字奥谷六番地)

³学生会員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

硬岩の岩盤地下空洞では、既存の不連続面によって形成されるくさび状岩塊の滑動や抜け落ちが岩盤の破壊を支配する。本論文では、奥多々良木発電所の空洞掘削現場に発生したキーブロックを例に、事前の不連続面調査から空洞に発生するキーブロックの発生頻度、必要な支保力を算出する手法を示す。

Key Words : keyblock analysis, rock mass, joint, underground structure

1. はじめに

Goodman と Shi¹⁾は、節理の幾何学的条件と力学的条件が与えられれば、掘削で危険となる岩塊を見つけだすことのできるブロック理論を体系化した。この理論を用いると、節理の位置と方向が既知であるならば、危険ブロックの特定が可能になり、局所を重点的に支保することによって安定を得ることができる。従来、掘削中発生した危険な岩塊に対して、追加支保をする事で効率のよい支保設計が試みられてきた。本研究は、事前採取された節理データ生かし、事前に危険な岩塊の傾向をつかもうというものである。

本研究では、兵庫県朝来郡朝来町多々良木に位置している奥多々良木発電所の空洞掘削現場に発生したキーブロックをもとに研究を進めていく。既設発電所の黒川ダム(上部調整池)および多々良木ダム(下部調整池)を現状のまま活用し、平成10年運転開始を目前に、新たに発電所を増設しようというものである。地下空洞は最大長130m、最大幅25m、最大高さ47.5mの大きさを持ち、周辺地質は主に流紋岩類および同質火砕岩類である。また、岩脈としてひん岩・輝緑岩の貫入が認められ、その貫入方向はほぼ南北方向のものが卓越していた。

本研究では、図-1に示した空洞周辺の試掘坑(A1試掘坑、A2試掘坑、B試掘坑)から得られた不連続面のデータから本空洞部分に発生するキーブロックを予測し、実際に発生したブロックと比較することによりこの予

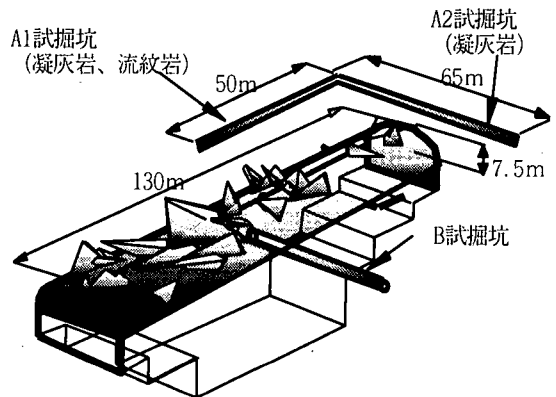


図-1 奥多々良木発電所地下空洞

測の手法の正当性を検討し、支保設計に役に立つようにすることを目的とする。

2. 不連続面(ジョイント)の統計処理

キーブロック解析を行う前に、現場で得られる各種計測パラメータの統計処理を行う。不連続面の表示は傾斜方位と傾斜を用いて行われるが、データ解析では等角ステレオネットが利用され、面の表示はその面の法線方向を示す点(極)で表される。そしてクラスター分割により、それらの極を分割し、不連続面を n 個の卓越方向群に分ける(図-2)²⁾。クラスター分割で得られた各クラスター

の代表値(確定ジョイント)は、最も密度の高い平均方位とする。また平均方位だけでは、不連続面のばらつきを評価することが出来ないので、球面統計学を適用し、クラスター毎のばらつきを計算する。

あるクラスターの中に密集した一群の単位ベクトル(ジョイント法線)の平均的な方位は、そのクラスター内すべての単位ベクトルの合成ベクトルR方位によって決定される。もしすべてのジョイント法線が完全に平行であるならば、Rの大きさは集合N内の法線の総数に等しくなる。ジョイントの方向は分散しているので、Rの長さはNより短くなる。そこで、方位の分散度の指標として次式で定義される方位分散係数Kを用いる³⁾。

$$K = \frac{N-1}{N-|R|} \quad (1)$$

さらに、不連続面の密度を球面正規分布形で表す。標準偏差に相当する方向データのばらつき程度は、不連続面群の傾きの広がり角度 Ω として、次式で示される。

$$\Omega = \arcsin \sqrt{2(1 - \frac{1}{K})} \quad (2)$$

以上の方法により、各クラスターの平均方位と標準偏差が計算される。

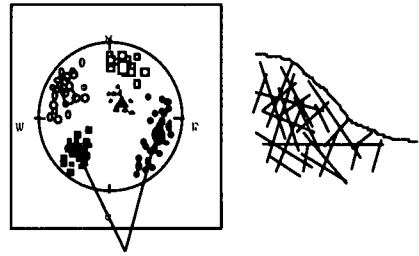
3. 危険指標P(JC)の算出

危険指標とは、各クラスター内に含まれるジョイント頻度がキーブロックの安定に及ぼす影響のことである。この指標はジョイントの組み合わせによる条件ともよばれており、以後P(JC:Joint Combination)と表す。各卓越方向群から選ばれたジョイントの組み合わせによってブロックの出来やすさは異なる。それは、ジョイントとジョイントの間隔が密になっている卓越方向群ほど決められたジョイントと交差する可能性が大きくなりブロックも出来やすく、間隔の広い卓越方向群ほど決められたジョイントと交差する可能性が小さくなりブロックもできにくいからである。

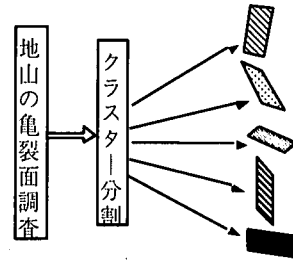
ジョイント頻度による安定性指標を表す式は、以下のよう表される。

$$P(JP) = (\lambda_i \cdot \lambda_j \cdot \lambda_k) |n_i \cdot n_j \times n_k| \quad (3)$$

λ は単位長さあたりにおける不連続面(ジョイント)の平均的な数を表している。 n はジョイントの単位法線



各クラスターの亀裂面群を一つの亀裂面で代表する
亀裂面方向分布のステレオ投影図



n個の亀裂面群と考える

図-2 不連続面のグループ化
(クラスター分割)

ベクトルであり、 i, j, k はn個ある不連続面群の内から任意の3面を選出することを意味する。式(3)はMauldonの方程式とよばれ、式(3)を使ってジョイント頻度による安定性指標を計算することができる。

4. 危険マップの作成

事前の不連続面調査から、危険指標を算出したどのクラスターの組合せが発生し易いかを示した。次に、本研究では、危険指標の概念とブロック理論に基づき、トンネルや地下空洞壁面のどの領域にブロックが発生し易いかを示した危険マップを作成する。以下にその作成方法を示す。

ブロックコードと最大領域について簡単のため、図-3(a)に示した二次元のトンネル断面の例を用いて説明する。不連続面の方向は既知とする。ブロックは2つの不連続面とトンネル壁面で構成されるものとする。図-3(a)に示したように同じ不連続面の組合せでもその位置関係によって複数種類のブロックを形成する可能性がある。ここで、0は不連続面の上半空間を表し、1は下半空間を表すものとする。2つの不連続面によって構成されるブロックは、ブロックコード00, 01, 10, 11の4種類となる。例えば、ブロックコード01は不連続面1の上側かつ不連続面2の下側領域にあるブロックを

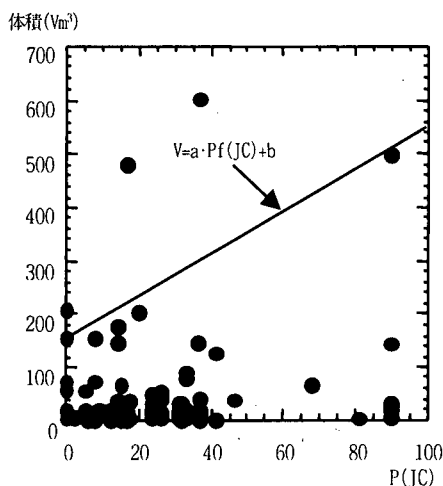


図-6 トンネル危険指標と体積

ブロックの予測ができるのかどうか検討する必要がある。

トンネル危険指標 Pf(JC) の値と実際に発生したブロックの体積の関係を図-6 に示す。ブロックの体積はブロックを形成する亀裂面の方向と位置から多面体の体積を求めることで算出した。図-6 上の右上がり直線は、最小二乗法によってブロックの体積と危険指標の関係を表した直線を平行移動したものである。直線がなるべく多くのブロックを含む包絡線となるように平行移動を行った。図-6 をみると、一部の大きいブロックを除いて体積 V とトンネル危険指標 Pf(JC) の間には次のような関係があることがわかる。

$$V \leq a \cdot Pf(JC) + b \quad (4)$$

定数 a , b は最小二乗法、平行移動の過程で決まる値である。以下の式(5)によって、空洞壁面各領域の Pf(JC) を体積に変換し、破壊形式ごとに、空洞壁面のどの領域にどの程度の規模のキーブロックが発生するかを予測するための体積マップを作成することができる(図-7)。

$$V = a \cdot Pf(JC) + b \quad (5)$$

6. 支保力マップの作成

次に破壊形式ごとに作成された体積マップを用いて、空洞壁面の各領域に必要な支保力を示した支保力マップというものを作成する。ブロックの破壊力 F はブロック重量 W に比例する。

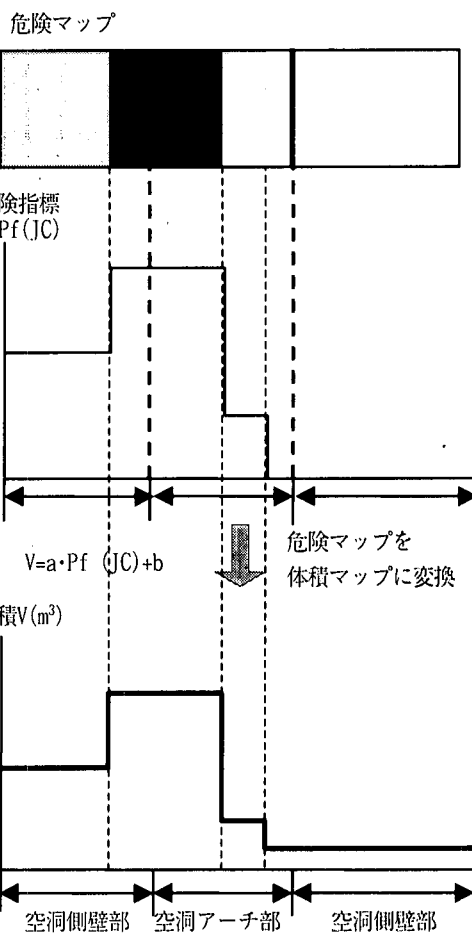


図-7 危険マップから体積マップへの変換

$$F = k \cdot W \quad (6)$$

破壊形式は落下破壊、一面すべり、二面すべりの3つに分けられるが、破壊形式ごとに式(6)での比例定数 k は以下に示すように求めることができる。ただし、 \mathbf{r} は重力(合力)方向ベクトル、 $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j$ は2つのすべり面の法線ベクトル、 ϕ_i, ϕ_j は2つのすべり面の摩擦角である。

$$k = |\mathbf{r}| \quad (\text{落下破壊}) \quad (7)$$

$$k = |\mathbf{n}_i \times \mathbf{r}| - |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{r}| \tan \phi_i \quad (\text{一面すべり}) \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{|\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j|^2} \left\{ |\mathbf{r} \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j)| |\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j| - |(\mathbf{r} \times \mathbf{n}_j) \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j)| \tan \phi_i \right\}$$

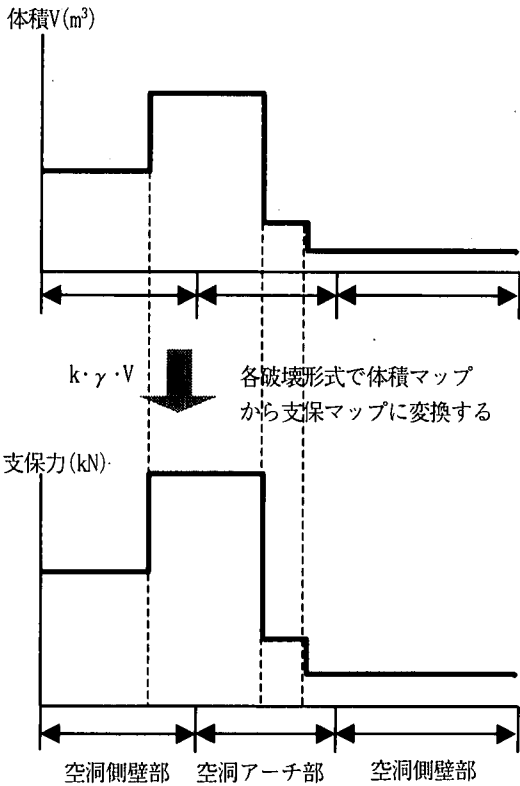


図-8 体積マップから支保力マップへの変換

$$-\left\{ (r \times n_i) \cdot (n_i \times n_j) \tan \phi_j \right\} \text{ (二面すべり)}$$

(9)

さらに、岩盤密度よりブロック重量 W が分かる。よって、式(6)を用いて、体積を破壊力に換算し、各破壊形式ごとに、空洞壁面の各領域の必要な支保力を示した支保力マップを作成することができる(図-8)。最終的な支保力マップは、各破壊形式の支保力マップを重ね合せ、各領域において最も破壊力大きい値を採用し作成される。落下破壊、 i 面、 j 面、 ij 面すべりの支保力マップを重ね合わせた例を図-9に示す。

7. 適合性の検討

図-6 から得られた a, b を用いて算出した体積マップ、支保力マップをそれぞれ図-10、図-11に示す。実際に発生したブロックは一部を除いて体積マップに含まれることが図-10でわかる。図-10において、体積マップに含まれなかった左上の2つのブロックは図-6で包絡線外になった左上の2つのブロックである。また図-11から、実際に発生したブロックはすべて支保力マップに含ま

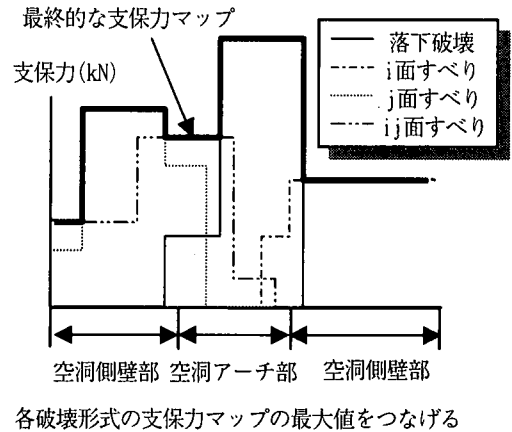


図-9 支保力マップの重ね合わせ

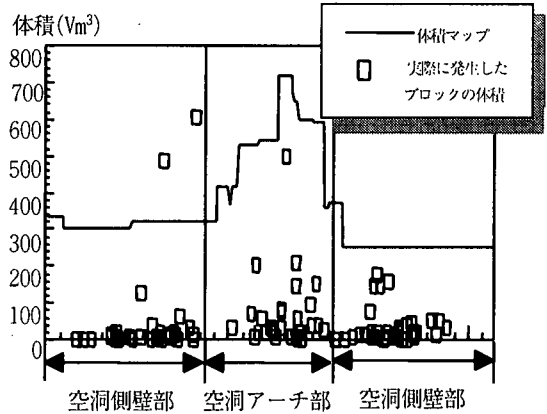


図-10 Pf(JC)から作成した体積マップ

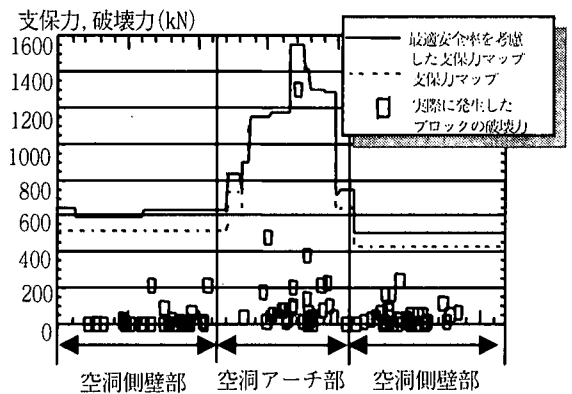


図-11 Pf(JC)をもとに作成した支保力マップ

れていることがわかる。ここで最適安全率とは、信頼性設計⁴⁾を用いて算定したすべり面の安全率である。すなわち、破壊確率の減少に伴う、すべり面の安全率の増加傾向から求まる安全率である。例えば図-12によると不

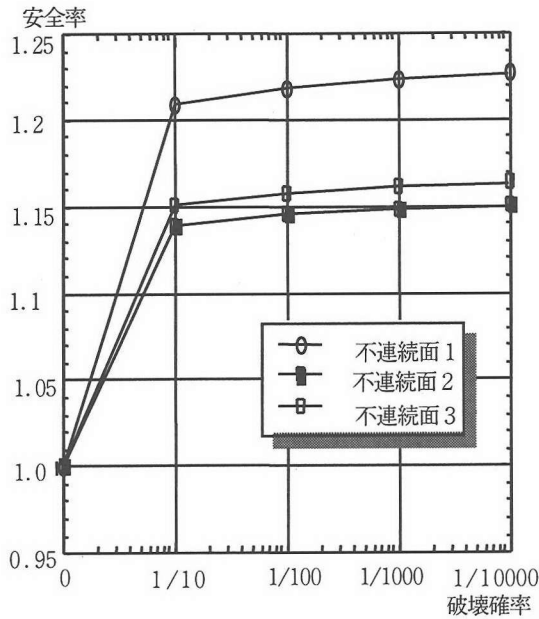
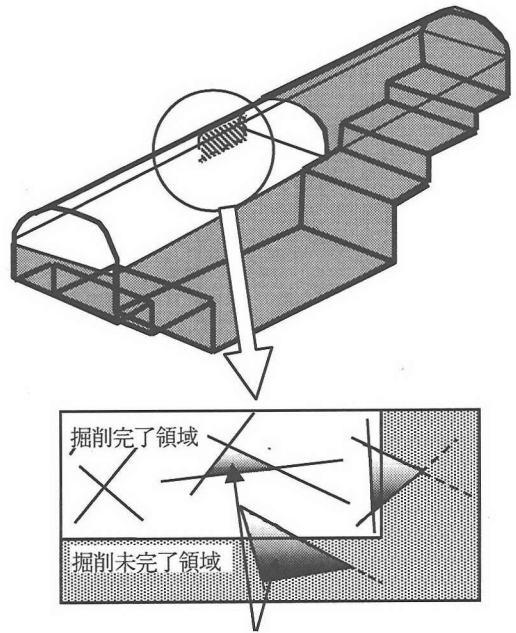


図-12 破壊確率と安全率の関係



キープロックは壁面上では閉鎖多角形を形成

図-14 空洞壁面上のトレースマップと閉鎖多角形

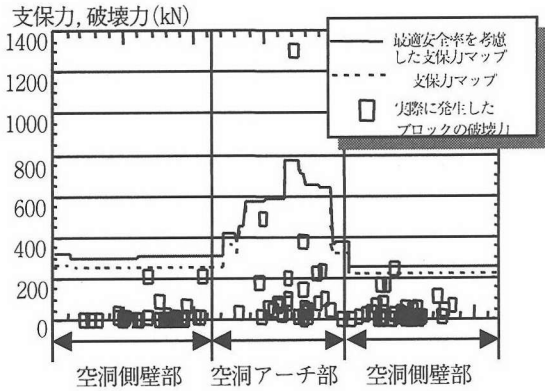


図-13 Pf(JC)をもとに作成した支保マップ (経済性考慮)

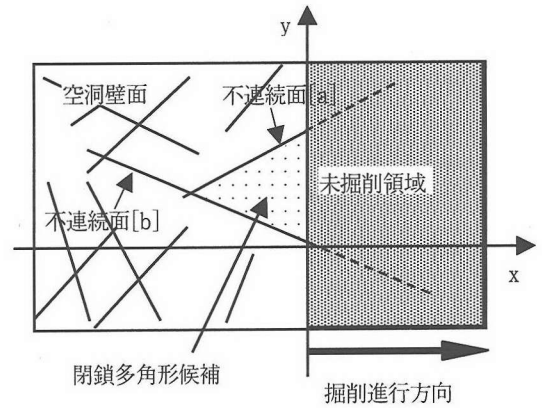


図-15 不連続面と閉鎖多角形候補

連続面 1 の最適安全率は 1.25 程度と見積もれる。最適安全率を考慮した支保力マップも図-11 中に示した。最適安全率を考慮することで、主にすべり破壊が生じる空洞側壁部の支保力マップが増加している。

図-11 では実際に発生したブロックの破壊力に対して十分な支保力が予測された。しかし、空洞アーチ部の破壊力 1300kN ブロックが突出しているため、他のブロックでは支保力が過大評価されている。図-6 右上の 500^m3 ブロックがこの 1300 kN ブロックである。そこで、この 500^m3 ブロックを除いて包絡線を引き直し求めた支保力マップを図-13 に示す。この支保力マップで破壊力が越えてしまうのはアーチ部に発生した破壊力 1300 kN のキープブロックだけで、その他のキープブロックは図-11 より

も過不足のない支保力が予測されている。このような例外的に破壊力が大きいブロックを事前に予測するのは非常に困難であり、またこのようなブロックに対応できる設計を行うと、壁面のほとんどの領域で過剰設計になってしまう。こういったことから、このようなブロックを見つけるにはやはり、切羽観察を行いながら掘削を進めていき、逐次キープブロックを抽出するほうが合理的である。ただし、この場合は非常に大きな不連続面のみを採取すればよい。その手法については次章で述べる。

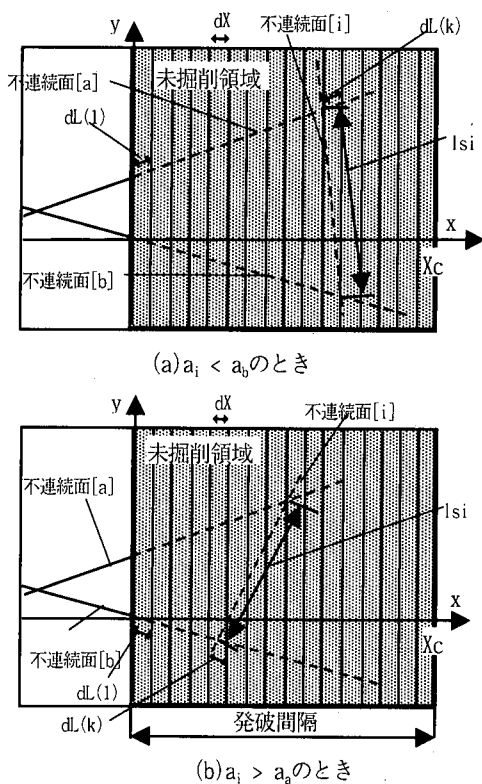


図-16 微小区間の設定

8. 確率キープロック理論と解析例

(1) 概要

本章では、切羽の不連続面観察と事前の不連続面調査結果から、閉鎖多角形(図-14)の全体が空洞壁面にあらわれる前に、キープロックの発生を予測する確率キープロック理論⁵⁾について簡単に述べる。これによって、前述の支保力マップで予測するのが困難な、もしくは対処していると無駄が多く経済的に不利になってしまう例外的に大きなブロックの発生を予測することができる。切羽観察において発見された掘削壁面と不連続面のトレースとによって囲まれる閉鎖多角形候補(図-15)が、確率キープロック理論の解析対象となる。閉鎖多角形候補が次掘削後に移動可能ブロックを形成するための必要事象として次のことが挙げられる。

- (1) 隠れた不連続面[i]が微小区間 $dL(k)$ 上に存在する事象 $D_i(k)$ 。掘削は発破を想定し、1回の発破距離を X_c とする。 $0 < x < X_c$ の区間の中で、不連続面[i]が存在するかどうかの検討である。図-16に示したように区間 $0 < x < X_c$ 内に微小区間 $dL(k)$ ($dL(1) \sim dL(m)$)を設定する。ここで a_1, a_0, a_2 はそれぞれ不連続面[i], [a], [b]の掘削壁面(図-16のx-y座標面)

上での傾きである。

- (2) 隠れた不連続面[i]が閉鎖領域をなすのに十分な長さ l_{si} 以上である事象 $S_i(k)$ (図-16)。
- (3) 不連続面[a], [b], [i], と空洞壁面によって囲まれる領域が移動可能である事象 R_i 。これは通常のキープロック解析によって判定することができる。
- (4) 微小区間 $dL(1)$ から $dL(k-1)$ までの間に閉鎖領域が形成されていない事象 $H_i(k)$ 。これは、微小区間 $dL(k-2)$ までに閉鎖領域が存在しない事象 $H_i(k-1)$ と事象 $D_i(k-1)$, 事象 $S_i(k-1)$ の積の補集合である。

これらの事象に加えて、本来不連続面[a]と[b]が十分な長さ有るかどうかも検討しなければならないが、本章で対象としているブロックは非常に大きなブロックを想定しているため、不連続面[a], [b]も十分な長さのものを用いているものとする。

よって区間 $0 < x < X_c$ に存在する隠れた任意不連続面[i](任意クラスター*i*の代表値; $i=1 \sim n$)と不連続面[a], [b], 空洞壁面で囲まれる領域がキープロックを形成するという事象 U_i は以下ようになる。

$$U_i = \bigcup_{k=1}^m \{D_i(k) \cap S_i(k) \cap R_i \cap H_i(k)\} \quad (10)$$

また、それぞれ確率を $P[D_i(k)]$, $P[S_i(k)]$, $P[R_i]$, $P[H_i(k)]$ とおくと不連続面[i]の出現によって移動可能ブロックを形成する確率 $P[U_i]$ は以下ようになる。

$$P[U_i] = \sum_{k=1}^m (P[D_i(k)] \cdot P[S_i(k)] \cdot P[R_i] \cdot P[H_i(k)]) \quad (11)$$

また、次掘削でキープロックを形成する確率 $P[U]$ は以下ようになる。

$$P[U] = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P[U_i]\} \quad (12)$$

(2) 実際の空洞での解析

本解析手法を用いて、空洞本体部分に発生したキープロックの発生確率を算出し、本手法の適用性について検討する。解析の対象としたのは、図-17に示した側壁ブロックの内2つの不連続面が掘削進行方向に開いた形(図-16のような形)となっている32個のキープロックである。側壁部分は、9段階に鉛直下向きに掘削が進められた。本手法は、掘削が進む前にキープロックの発生

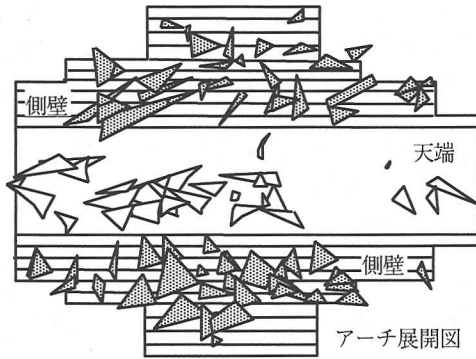


図-17 空洞側壁部に発生したキーブロック

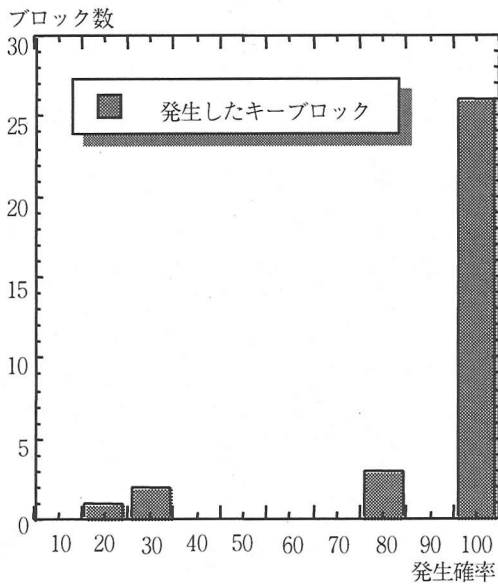
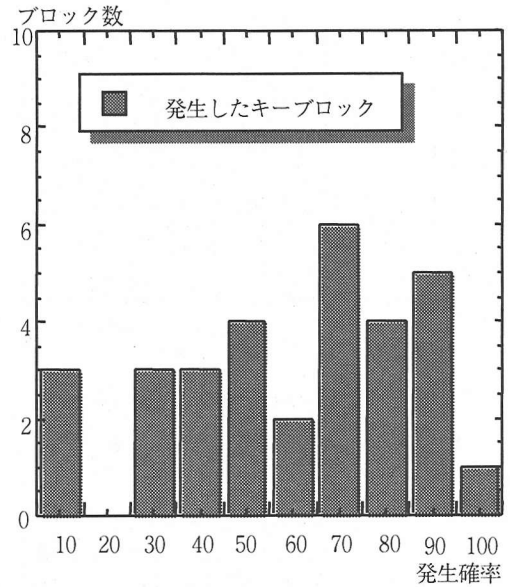


図-18 発生したキーブロックの発生確率

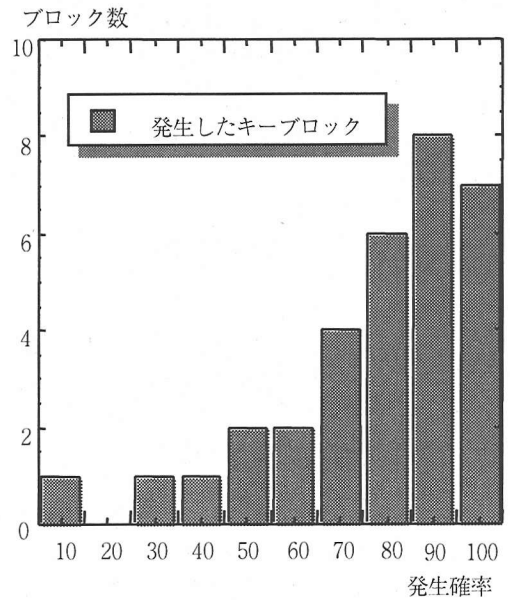
を予測するためのものであるが、実際に発生したブロックに対して、掘削が進む以前の状態に戻し、そのブロックの発生確率を算出した。

キーブロックが発生するという事象 U の生じる確率 $P[U]$ を図-18 に示す。図-18 では 32 個のキーブロックのうち 26 個が 100% の確率で発生すると予測された。実際に発生したキーブロックは本解析によって非常にうまく予測できている。

しかし、支保設計の適用性という観点から考えブロックの形状までうまく予測するためには、出現する不連続面 $[i]$ も考えた確率 $P[U_i]$ を算出しなければならない。この確率 $P[U_i]$ は式(11)で表される。そこで、実際の不連続面 $[i]$ と一致したクラスターを構成面にもつキーブロックの発生確率を図-19(a) に示す。この結果は好ましいものではない。しかし本手法は切羽周辺での亀裂データ



(a) すべての試掘坑データをもとに予測



(b) B試掘坑データをもとに予測

図-19 発生したキーブロックの発生確率
(形状まで予測)

を元にする手法であるので、試掘坑から得られた亀裂の統計データによるこの例では好ましくないのかもしれない。実際、最も本空洞に近い試掘坑(B試掘坑)の亀裂データのみを使った解析では、少しよい傾向が見られる(図-19(b))。図-19が図-18よりも発生確率が低く予測されるのは、実際の形状とは異なった形状のキーブロックとして予測されたからと思われる。しかし図-19(b)

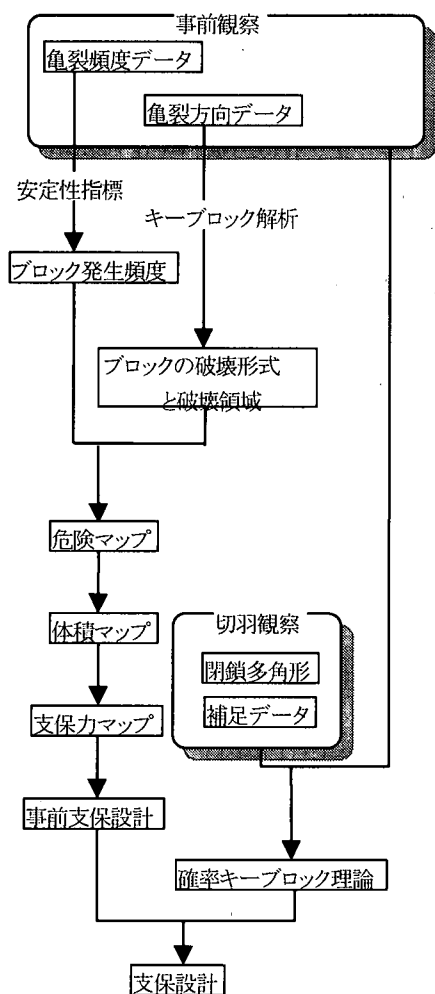


図-20 本研究の流れ

においては、グラフが右上がりの傾向にあり、切羽周辺亀裂データを基に行えばより精度の高い予測ができるものと思われる。

9. 結論

本研究では、危険マップ、体積マップ、支保力マップを作成し空洞壁面に発生するキーブロックを予測し、支保設計を行う手法を示した。前章ではトレースマップから、掘削進行にともなって発生するキーブロックの発生確率について検討した。これら本研究のフローを図-20に示す。本研究で得られた結論を次に述べる。

- (1) 危険指標と体積の間に相関性が見られ、その相関性を用いて体積マップを作成すると、実際に発生したキーブロックの規模の傾向がよく一致した。
- (2) 支保力マップは実際に発生したキーブロックとう

まく適合した。

- (3) 支保力マップを作成することによって空洞壁面の各領域で発生するキーブロックの破壊力を算出でき、合理的な支保設計を行うための有用な手段となり得る。
- (4) 事前の試掘坑調査から空洞の支保設計を行うときは、例外的に大きなブロックに対しては考慮から外して設計するほうが合理的である。
- (5) 例外的に破壊力の大きいキーブロックに対応するには、事前の不連続面データから支保マップを作成し支保設計するよりも、掘削が進行する毎に切羽観察を行い、非常に大きい不連続面だけを採用し、確率論的キーブロック解析のような手法を用いて算出するほうが合理的である。

さらに本文では触れなかったが、より精度のよい予測をするための事項として次の結果も得られた。

- (1) 亀裂データはスキャンラインの方向による偏りの補正を行う。
- (2) 予測に用いるデータは多いほうが望ましいが、それよりも優先して空洞本体により近い位置で得た不連続面データを用いる。
- (3) 掘削進行ごとにデータを蓄積し、次掘削段階でのキーブロック予測に生かす。
- (4) 従来のクラスター分割に空洞軸方向を境にした分割を加える。
- (5) 信頼性設計により最適な安全率と合理的な支保力を算出することができる。

しかしながら、今後の課題として次のことが挙げられる。

- (1) 今後、a, bの決定方法を確立していく必要がある。
- (2) 支保力マップによって空洞壁面のどの領域に重点的に支保を施すべきかを示すことができた。しかし、実際の設計に用いるためには 1m^3 あたりに必要な支保力の密度を算出する必要がある。

参考文献

- 1) Goodman, R.E. and Shi, G.H.: 吉中龍之進・大西有三訳：ブロック理論と岩盤工学への応用，土木工学社，1992。
- 2) 中川誠司：地質情報に基づく地盤内亀裂特性の把握とその応用，京都大学修士論文，1993。
- 3) Hatzor, Y. and Goodman, R.E.: Determination of the 'Design Block' for Tunnel Supports in Highly Jointed Rock, Fractured and Jointed Rock Masses, Comprehensive Rock Engineering, Vol. 2, pp. 263-292, 1993。
- 4) 西山弘之：確率論的手法を用いた掘削面におけるキーブロック安定解析，京都大学修士論文，1995。
- 5) Mito, Y. and Saitoh, T.: Stochastic Block Theory for

the Observational Construction of a large underground
opening, Eurock'96, Barla, 1996.

(1998.3.5 受付)

PREDICTION OF EXISTENCE OF KEYBLOCK IN UNDERGROUND CAVERN EXCAVATION

Yuzo OHNISHI, Makoto ASAKAWA and Masayoshi HAYASHI

In the cavern excavated in hard rock, failure model is dominated by the slip slide or fall of jointed rock. In this paper, it is shown how to predict the frequency of keyblock and to evaluate supporting by joint data got from site investigation data