

(5) 不連続面に囲まれに岩盤ブロックの安定性評価に関する一考察

大成建設(株) ○ 亀村 勝美 夏 優

1. はじめに

キ裂性に富んだ岩盤や、小断層、層理面が明瞭に表われている岩盤では、これらの不連続面に沿った滑動や剝離が生じ易く、斜面やトンネルの掘削に支障をきたす場合がある。特に不連続面に囲まれ、自由面に対して抜け出し得る岩盤ブロックは、規模の大きい破壊を誘発する可能性があり、充分の注意が必要である。本論文では、このような不連続面に囲まれに岩盤ブロックを、原位置での観察記録より迅速に見い出す手法を示し、併せて、常時、あるいは地震時に於ける岩盤ブロックの安定性を評価する手法を提案する。

2. 岩盤ブロックの安定性について

不連続面(及び自由面)に囲まれに岩盤ブロックの安定性に関する議論は、斜面のくさび状スバリやトップリングを対象に、R.E. Goodman, E. Hoek らによって成されてきた。Goodmanらは、キーブロックの概念を提示するとともに、岩盤ブロックを剛体とみなした場合の静的な荷重のつり合いより、ブロックの安定性を検討している。また、P. Cundallは、同様の立場で、運動論的なモデルを用い、安定性評価を試みている。最近では、S.D. Priestら、傾いた自由面に対して行なったステレオ投影を基に、ブロックの滑動方向や、安定性を調べる手法を提案している。このような評価手法は、大型計算機と数値解析手法が発達しに今日に於いても、原位置に於ける岩盤の世状と大さかに照解する上で、あるいは、他の複雑な数値解析を行なうための基礎資料として重要である。一方、これらの手法は、

i) 自然に存在する幾つかの不連続面より危険なブロックを見い出す操作に、多くの労力が必要である。

ii) 三つ以上の不連続面で囲まれに岩盤ブロックに対して、定量的に安定性評価を下すことが難しい。

等の問題点を有しており、原位置に於ける観察結果より、即座に岩盤の安定性を検討できないのが現状である。本文では、これらの難点を排除するため、計算機を用い、Goodmanらが提案しているキーブロック抽出方法とは幾分異なるアルゴリズムによって、危険な岩盤ブロックを認識する方法を述べるとともに、独自に設定した安定性の指標についても述べる。

3. 危険なブロックの認識について

ここで言う危険なブロックとは、地表(自由面)に対し抜け出し得る岩盤ブロックである。危険なブロックを見い出す手法については、文献(1)に詳細が示されており、ここでは概略を述べるとし、以下の通り。

3. 1 ブロックの認識

自由面、及び不連続面は、慣習的に走向、傾斜で表わされているが(図-1)、計量的には、その単位法線ベクトル IP で表わすのが都合よい。これと面上の一点の位置ベクトル C がわかれば、面を表わすことができる。そこで、自由面や不連続面を次のように表わすこととする。

$$F_i = (IP_i, C_i), \quad IP_i = (\cos \alpha \sin \beta, -\sin \alpha \cos \beta, \cos \beta)$$

ここに、 α , β はそれぞれ面の走向と傾斜である。面 F が与えられると、二つの半空間が定義される。

$$F_{upper} = \{F \text{ の上の空間} \} = \{x | (x - C) \cdot IP \geq 0\}$$

$$F_{lower} = \{F \text{ の下の空間} \} = \{x | (x - C) \cdot IP \leq 0\}$$

UPPER HEMISPHERE PROJECTION

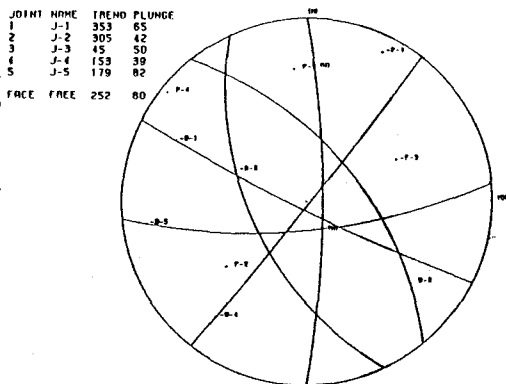


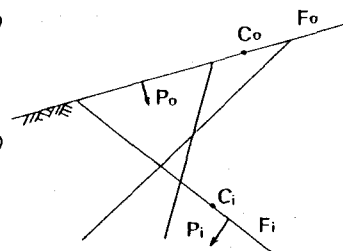
図-1 傾いた面に対するステレオ投影図

いる。自由面 F_0 、及び不連続面 $F_1 \cdots F_n$ が与えられると、ブロックが次のように定義される。

$$F_{\text{ollower}} \cap F_{i1} \cdots \cap F_{i2} \cdots \cap F_{im} \cdots \quad (1 \leq im \leq n)$$

—の中には、lower、又はUpperが入り、ブロックは「自由面の下、面 i の上(又は下)、……面 im の上(又は下)」にあると書き表わすことができる。

ステレオ投影で表わすと、大田及び基面で囲まれた領域がブロックである。



3. 2 危険なブロック

これらのブロックの内、問題となるのは自由面に抜け出す可能性を持っているものである。これらには、次のような条件が必要である。

- i) 凸の多面体である。
- ii) 各面は、凸の多角形である。
- iii) 一面を自由面上に持つ。
- iv) 自由面と交差するブロックの面は、自由面に対し開いている。

3. 3 危険なブロックの認識

Goodmanらは、3. 1で述べた定義どおり、面の上下でブロックを識別し、3. 2の条件を満たすブロックを幾何学的に抽出する方法を示している。この方法は、ブロックの表現が明快ではあるものの、後の変換解析で必要となるブロック側面の面積や体積の計算が容易ではない。そこで、ここでは、不連続面(及び自由面)のうちの三面の交わりとして点を定め、さらに線分、面と定義し、最終的にブロックを見い出す手法を用いる。

3. 2の条件は、この過程で判別することができ、危険なブロックのみを抽出することができる。

(1) 点

三面の交点として点を定義する。三つの面をそれぞれ $F_1 = (IP_1, C_1)$, $F_2 = (IP_2, C_2)$, $F_3 = (IP_3, C_3)$ とすれば、面の方程式より交点 X が求まる。

$$\begin{cases} IP_1 \cdot (X - C_1) = 0 \\ IP_2 \cdot (X - C_2) = 0 \\ IP_3 \cdot (X - C_3) = 0 \end{cases} \quad X = \begin{pmatrix} IP_1 \\ IP_2 \\ IP_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} IP_1 \cdot C_1 \\ IP_2 \cdot C_2 \\ IP_3 \cdot C_3 \end{pmatrix}$$

さらに、自由面 F_0 に対し、 $IP_0 \cdot (X - C_0) \leq 0$ であれば、交点が自由面の下にあることがわかる。

(2) 線分と面

二つの面の交差線上にある二つの点で線分を定める。さらに、この線分の組が閉じており、凸であり、かつ自由面に対し開いているものを面として抽出する。凸であるための条件は、

面を構成している一辺に対し、他の頂点が、この辺により二分される領域のどちらか一方にのみ存在することである。従って、一辺の頂点を X_i, X_j 、

他の頂点を X_R 、考えている面の法線を IP として、これらのスカラー三重積

$$(X_j - X_i) \cdot (X_R - X_i) \cdot IP$$

の符号が、 i, j 以外の全ての頂点 R について同一であれば、この多角形が

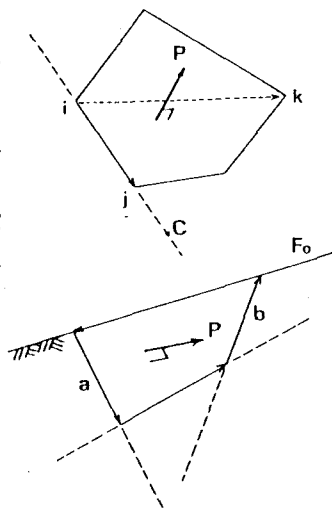
凸であることがわかる。この面が自由面に対して開いているかどうかは、辺

を表わすベクトルの向きを法線に対して左廻りに統一した上で、自由面上に

$$a \cdot b \cdot IP \geq 0$$

であることを判別すればよい。この段階で抽出された各面は、自由面に対し

抜け出す性質を持っているため、あとは、これらの面で構成される多面体を見い出せばよい。

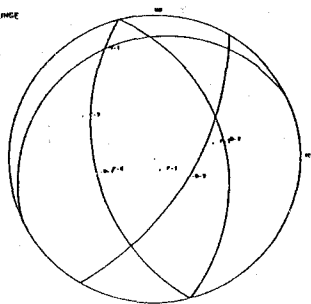


(3) ブロック

自由面と他の幾つかの面を選び、閉じており、凸な多面体を抽出する。凸であるためには、面の場合と同様に、多面体を構成する一面に対し、他の頂点が、この面により二分される空間の一方にのみ存在することが必要である。従って、頂点を X_R とし、スカラー三重積 $(X_R - C) \cdot IP$ の符号が各頂点について同一であることを判別すればよい。

JOINT	NAME	COORD	PLUMBE
1	J-1	95	10
2	J-2	108	30
3	J-3	211	60
4	J-4	306	45

FREE HORIZONTAL



UPPER HEMISPHERE PROJECTION ABOUT HORIZONTAL

図-2 不連続面のステレオ投影図

図-2~4は、ここで述べた方法を用い、4つの不連続面と自由面を与えて、危険なブロックを抽出した例である。図-3からわかるように、これら不連続面で三つのブロックが形成される。この内抜け出す可能性のあるブロックは、図-4の二つである。

4. ブロックの安定性評価

求められた岩盤ブロックが不安定なものであることは、これまでの検討により明らかである。しかし、構造物の設計、施工においては、この岩盤ブロックが自重や地盤力により、どのように滑動、あるいは剥離するのかを定量的に把握しておく必要が生ずる。これを次のようにして行なう。

4.1 オバリのモード

まず、“岩盤ブロックは回転せず、ある面に沿って滑動する”と仮定する。この仮定のもとでは、ブロックは単一の面に沿って滑動するか、あるいは、交差線に沿って滑動するかいずれかである。いま、図-5のようないくつの面と、一つの自由面を有するブロックを考える。すなわち、面の交差線ベクトルを、また、 IP は、各面の外向き法線ベクトルを表現している。荷重ベクトル R が与えられると、 R と同じ方向（内積が正又は0）のベクトルが三つ見出せる。この内、二つのベクトルが交差線ベクトルであれば、他の一つの法線ベクトルを持つ単一の面でオバリが生じ、また、二つのベクトルが法線ベクトルであれば、他の一つの交差線に沿ってオバリが生ずる。なぜならば、 R と同じ方向の法線ベクトルを持つ面は、少なくとも圧縮されているからである。逆に R と反対方向の法線ベクトルを持つ面では剥離が生ずることになる。また、三つが全て交差線ベクトル、あるいは法線ベクトルであれば、ブロックがそれぞれ抜け出し、押し込まれるモードとなる。

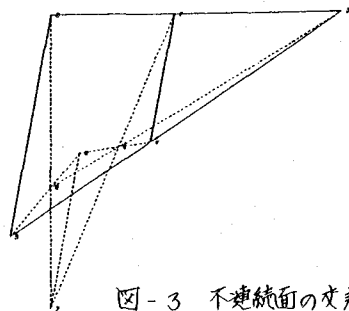


図-3 不連続面の交差線

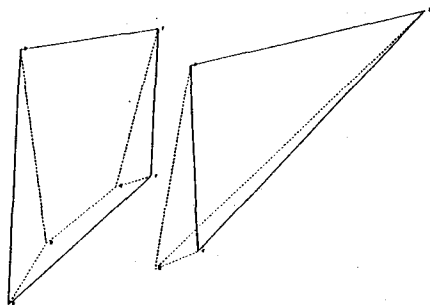


図-4 抽出された危険なブロック

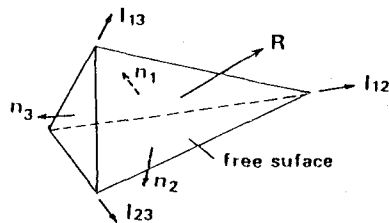


図-5 オバリのモード

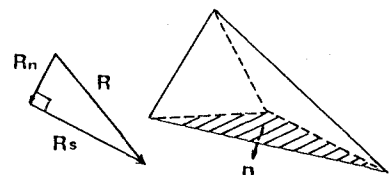
4.2 安定性の指標

オバリのモードが定まったならば、面の粘着力 C と、摩擦角 ϕ より、慣例に従って、次のように安全率を定めることができる。

(1) 単一の面でオバリする場合

$$S.F. = \frac{C \cdot A + |R_n| \tan \phi}{|R_s|}$$

ここに、 A はオバリ面の面積である。



(2) 交差線に沿って、二つの面ですべる場合

すべり面が二つある場合は、各々の面でせん断力が分担される。この分担率の決め方で二つの方法が考えられる。

・ Goodman らの方法

適当な変数を設定し、せん断力の大きさを決めておき、後に二つの面の安全率が等しいと仮定して安全率を決める。

$$S.F. = \frac{C \cdot (A_1 + A_2) + (R_1 + R_2) \tan \phi}{R_3}$$

・ 分担率を決める方法

せん断力 R_3 の各面での分担率は、垂直力 R_1, R_2 の比に等しいと考える。

$$S.F. = \frac{C + \left(\frac{R_2}{A_1} + \frac{R_2}{A_2} \right) \tan \phi}{\frac{R_3}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_1}{A_1} + \frac{R_2}{A_2} \right)}$$

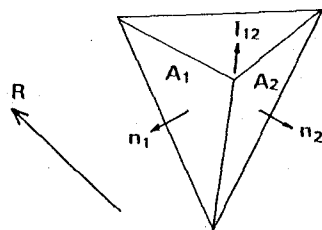
これらの方法を用い、前出のブロック2について安定解析を行なった例を図-6~7に示す。この例では、地震時を想定し、荷重ベクトルは下向き自重成分と水平方向の成分を有していることとした。水平方向の成分は360度回転させ、それぞれの角度について安全率を求めた。また、 $WR = \lambda WR_0$ で基準の荷重に対する倍率を決めそれぞれの倍率について安全率を求めている。このようにすると、ブロックが最も滑動し易い方向、及び想定した荷重に対する余裕度等も、定量的に評価することができる。なお、前述した Goodman の方法では、すべりのモードが変化すると安全率が不連続となり、また値も、二つの面での平均的な安全率を用いるために、幾分高めに評価されることがわかる。

5. まとめ

本論文では、不連続面に囲まれ、不安定と考えられる岩盤ブロックを認識し、この安定性を定量的に評価する手法を提案した。ここでは、岩盤ブロックについての検討だけでなく、幾つかの断層を有する地盤の三次元的安定や、方向性のあるキ裂群を有する岩盤の安定性評価についても、同様の検討が可能である。今後、キ裂ひん度等の概念を取り入れ、岩盤性状の評価方法に対しても、本手法の応用を試みる所存である。

6. 謝辞

本研究の遂行にあたっては、英善情報センター、久保 紳 氏に、理論面、プログラミングともに、多大の御恩恵をいただいた。ここに記して、謝意を表す。



$$R = R_1 n_1 + R_2 n_2 + R_3 I_{12}$$

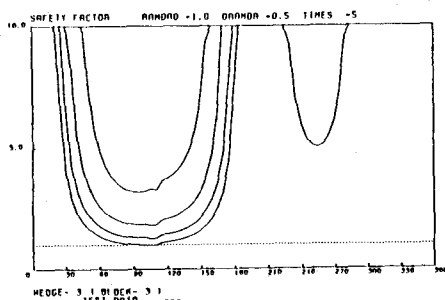


図-6 安全率の分布(Goodmanの手法)

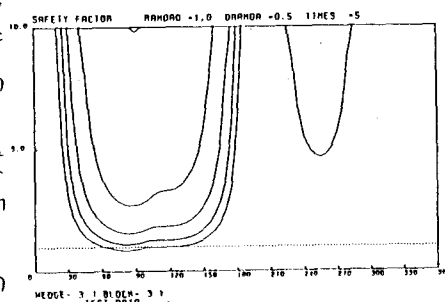


図-7 安全率の分布(分担率を決める手法)

- (参考文献) (1) R.E.Goodman et.al. "Geology and Rock Slope Stability" Chapter 14
(2) S.D.Priest "The Use of Inclined Hemisphere Projection Method for the Determination of Kinematic Feasibility, Slide Direction and Volume of Rock Blocks" Int. J. Rock Mech. Sci. Abs. 1983.

(5) A Study on The Stability Analysis of Rock Blocks
Surrounded by Discontinious planes

M. Sato , K. Kamemura

Taisei Corp.

Summary

A Key Block, an unstable rock block in a discontinuos rock mass, sometimes plays an important role concerning the stability of underground opennings or rock slopes, as R.E. Goodman presented.

This paper explains the selective method of unstable rock block, and the method of a stability analysis.

For the porpose of instantaneous feed back of the results to the site engineer, mathematical algorism is used to select unstable block out of many blocks separated by some discontineous planes, such as faults, cracks, and bedding plane.

New technique related to the slidingsafety of the block is also discussed.

Several test models are examined and it is found that the proposed method gives lower safety rate than the conventional one.