

(86) 岩盤内不連続面の定量評価と岩盤構造解析モデルに関する考察

㈱ 間組技術研究所 正会員 ○草深守人
 埼玉大学工学部 正会員 浜島良吉
 東京理科大学工学部 正会員 川井忠彦

1. まえがき

近年の岩盤構造物の大型傾向とその重要度の急激な高まりは、岩盤を不連続体として力学的に扱い、設計に反映させる必要を生じてきた。そして、このような力学的問題は、その複雑さから数値解析的手法に頼らざるをえない。しかしそのためには、今後、解決しなければならないいくつかの困難な問題が残されている。著者は、これまでに、これらの問題点のうち岩盤中に分布する不連続面の定量評価手法と、不連続性岩盤の構造解析を効率的に行なう離散化要素について考察してきたので、以下に概要をのべる。

2. 岩盤内不連続面の定量評価手法に関する考察

ここで議論する岩盤とは、断層やシーム等の比較的規模の大きい不連続面によって分断されるブロック (Müller[1] の単位体) の集合体と定義し、この単位体中には節理等の中・小規模の不連続面が方向性をもって分布しているものとする。そして、建設される岩盤構造物のスケールを越えるような大規模な不連続面は、通常の地質調査によってその位置、方向、規模を知ることが出来るものとし、そのような不連続面を含む離散化要素について次章で検討する。一方、中・小の不連続面は、構造物スケールで見た場合、岩盤内に無数に存在するものとして、損傷力学の考え方に基づいて連続体力学の枠内で取り扱うものとする。損傷力学的扱いについては文献 [2] にゆずるとして、以下では、中・小規模の不連続面 (以下、単に節理と呼ぶ) の定量評価手法について考察する。

節理分布の評価手法を検討する際の重要な条件は、必要な情報を経済的で実用的な方法によって調査できること、岩盤構造解析等の利用目的に沿った形で調査情報を客観的に定量化できることである。

調査坑あるいは掘削工事現場において掘削岩盤面を写真撮影し、その写真画像から節理面と掘削面が交わる交線を抽出し、節理マップを作成することは現実的に可能である。このマップ上の節理線の分布密度 $f(\theta)$ はステレオロジーの理論[3] に従って次式のように表わせる。

$$f(\theta) = \frac{C}{8\pi} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} (n^2 - 1) (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \right\} \quad (Z \text{ は偶数項のみの和をとる}) \quad (1)$$

方向 θ の節理線の分布密度を上式によって推定する手順は、①節理マップ上に傾き $\pi k/M$ ($k=1, 2, \dots, M-1$) の多数の平行試験直線を置く、②これと節理線との総交点数 N_k を数え、 $\bar{N}_k = N_k/L_k$ (L_k : k 方向の試験線の総長) を計算する、③係数 C, A, B を次式で計算し、 $f(\theta)$ を式(1)で計算する。

$$C = \frac{2\pi}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k, \quad A_n = \frac{4\pi C}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \cos\left(\frac{n\pi k}{M}\right), \quad B_n = \frac{4\pi C}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \sin\left(\frac{n\pi k}{M}\right) \quad (2)$$

従来のステレオロジーの理論では、平面情報から空間内部の構造を推定するために、対象空間をあらゆる方向の平面でランダムに切断し、内部構造の情報をサンプリングする必要がある。実際の岩盤では、このような切断面を得ることは困難であり現実的でない。そこで、ステレオロジーの理論に、節理面の分布に関する幾何学的関係を付加することにより、必要な観察面を、直交する3つの掘削面のみで十分とした。今、このような3つの掘削面で作成された各節理マップ上の節理線の分布密度 $f_1(\theta_1)$ 、 $f_2(\theta_2)$ 、 $f_3(\theta_3)$ がそれぞれ式(1)、(2)によって決定されたものとする。そして、各掘削面上の節理線方向角を図1のように定義すると、節理面と3つの掘削面との幾何学的関係から、次式の関係が要求される。

$$\begin{aligned}
 f_1(\theta_1)/f_2(\theta_2) &= |\sin\theta_j/\cos\theta_i| \approx C_1 & f_3(\theta_3)/f_1(\theta_1) &= |Q_{ij}/\sin\theta_j| \approx C_3 \\
 f_2(\theta_2)/f_3(\theta_3) &= |\cos\theta_i/Q_{ij}| \approx C_2 & Q_{ij} &= \sqrt{\cos^2\theta_i \cos^2\theta_j + \sin^2\theta_i \sin^2\theta_j}
 \end{aligned} \quad (3)$$

岩盤中に方向の異なる複数の節理群が存在する場合は、任意の f_1, f_2, f_3 の組み合わせが上式を満足するとき、この組み合わせは一つの節理群を構成する可能性がある。このような節理群の方向を θ, ϕ とすると、単位体積の岩盤中に含まれるこの節理群の面積密度 F は下式によって表わせることを示すことができる。

$$F(\theta, \phi) = f_1(\theta_1) R_{ij} / |\sin \theta_j| + f_2(\theta_2) R_{ij} / |\cos \theta_i| + f_3(\theta_3) R_{ij} / Q_{ij} \quad (4)$$

$$\text{ここに、} R_{ij} = \sqrt{\cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i \sin^2 \theta_j}$$

以上のようにして推定された節理群を含む岩盤の力学モデルを損傷力学の考えに基づいてモデル化するために、式(4)に対応する損傷場を下式の損傷テンソルによって定義した。

$$\Omega = \sum_{i=1}^m \bar{l}_i F_i(\underline{n}_i \otimes \underline{n}_i) \quad (5)$$

ここに、 $\bar{l}_i, \underline{n}_i$ は各節理群の平均節理間隔と単位法線ベクトルである。

次に、本手法の妥当性を検討するため、節理分布が正確に明らかな単純な仮想空間を設定し、本手法によりこの空間中の節理分布を逆に推定してみる。仮定した空間は、半径3mの円形節理面が空間中にランダムに一樣に分布し、かつその方向性は図2に示すように2方向に集中した2つの節理群をなすものとする。

図3、図4は、この空間を直交する3つの平面により切断した場合の各切断面に現れる節理線と、式(1)、(2)で推定したその分布密度を示したものである。

表1～表3は、図4の節理線の分布密度 f_i ($i=1, 2, 3$)のピーク点の値を用いて節理群を判別した過程を示したものであり、表3において式(3)の関係を満足し、2つの節理群が存在することが分かる。なお、表1、表2では式(3)の関係を満足する節理群は判別されない。これは、2つの節理群が図3の X_2 切断面においてほぼ同一方向の節理線として重なり合って現れ、この面を含む式(3)の第1、第2式は使えない。ただし、この2つの式は f_1, f_3 の値を使って両式から計算される $f_2(\theta_2)$ の値が互いに等しくなるような θ_2 を選別するのに利用される。以上の結果、この空間に含まれる2つの節理群によって生じる3つの切断面の節理線は、

A節理群: $f(146^\circ) = 1.14$, $f(122^\circ) = 0.93$
 $f(128^\circ) = 0.85$

B節理群: $f(46^\circ) = 1.19$, $f(122^\circ) = 1.02$
 $f(34^\circ) = 0.83$

表4は、これらの結果を用いて式(4)から推定されたA、B節理群の分布密度と方向を図2で設定した仮想空間のそれと比較したものであり、推定節理群は、先に仮定した節理群を良く説明している。

3. 不連続面を含む離散化要素に関する考察

ここでは、方向と位置が確定している大規模な不連続面が要素内部に含まれる離散化要素について考察した概要を述べる。

従来、このような不連続面のモデル化として Goodman 系のジョイント要素などが用いられて来たが、これらの要素は全体の計算自由度の増加、場合によって

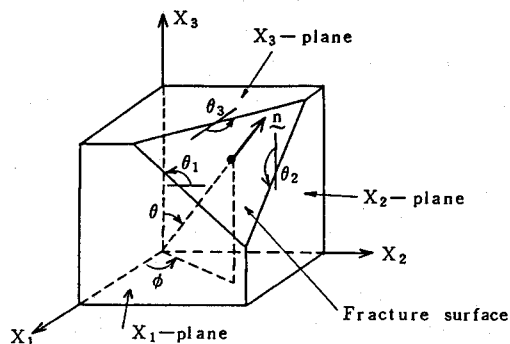


図1 節理面の方向と節理線の方向の定義

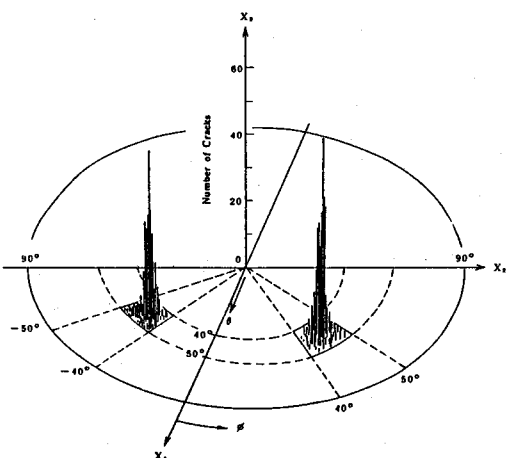


図2 仮定したA、B節理群の分布

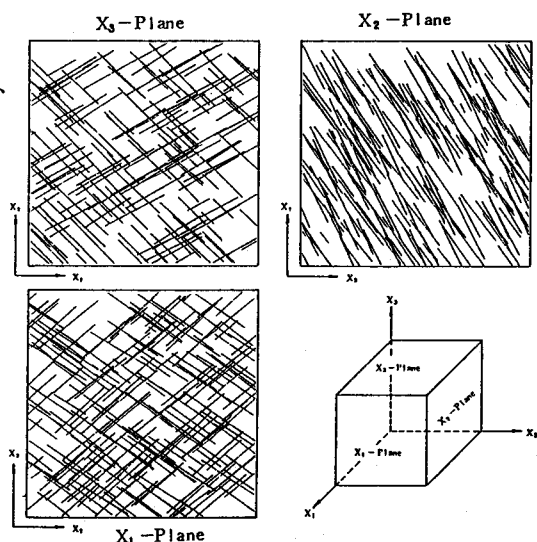


図3 互いに直交する3つの切断面上の節理線

は要素の再分割を必要とし、計算機の負担を大きくしていた。一方、川井モデルは、これらの問題点を解決する要素として注目され、これまでに破壊や不連続材料の構造解析に利用されてきた。しかしながら、このモデルも要素内部の変形や応力の表現性に欠けるという不都合があった。そこで、要素内部の材料の変形を許し、かつ要素内に任意方向の不連続面を含むことのできる修正川井モデルを検討した。

図5はこのモデルの概念を示したものであり、要素の変形は固体部分の変形 δ_s と不連続面の変形 δ_j の和で表わす。要素内部で仮定した仮想応力場に対する補ひずみエネルギー ϕ は、

$$\phi^* = \phi_s^* + \phi_j^* = \frac{1}{2} \int_V \sigma_s D_s^{-1} \sigma_s dv + \frac{1}{2} \int_S \sigma_j D_j^{-1} \sigma_j ds \quad (6)$$

ここで、要素内部の仮想応力場に対し、上式を直接離散化することは、一般的に困難な場合が多い。そこで、図5(b),(c)に共通な任意の静的安定系に対する固体部分と不連続面部分の固有剛性マトリックスから変換されるたわみ性マトリックス F_s, F_j を重ね合わせるにより、修正モデルのたわみ性マトリックス F が与えられるものと仮定した。すなわち

$$\begin{aligned} \delta_f &= \delta_s + \delta_j = (F_s + F_j) P_f = F P_f \\ F &= F_s + F_j = K_{ff}^{-1} + j K_{ff}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、サフィックス f, ff は、要素が剛体変位を生じないように静定支持された場合の任意の静定安定系を表わし、 δ_f, P_f, K_{ff} はその系に対する節点変位、節点力、固有剛性マトリックスを表わしている。

一方、修正モデルの剛性マトリックス K は、上式のたわみ性マトリックス F を、要素の幾何学的形状と静定安定条件のみから決定される釣合条件を表わす式(8)のマトリックス U を用いて式(9)で変換することにより与えられる。ただし、 P_s は静定支持反力であり、 P_f は拘束点以外の節点に作用する力である。

$$P_s = U P_f \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} F^{-1} & F^{-1} U^T \\ U F^{-1} & U F^{-1} U^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

以上が修正モデルの基本概念であるが、固体部分の固有剛性マトリックス $s K_{ff}$ は、有限要素の剛性マトリックスから、静定支持条件を満足するような拘束自由度に対応する行と列を取り除くことによって与えることができる。また、 $j K_{ff}$ は、図5(c)で変形が不連続面のみで生じ、固体部分は剛体と仮定して導かれる川井モデルの剛性マトリックスを利用することにより、上記と同様にして計算するものとする。ただし、この場合は、不連続面を挟む両側のブロックの剛体変位仮定により、独立でない節点自由度が生じるため、その処理に若干の工夫が必要である。詳細については文献[3]にゆずる。次に、提案する修正川井モデルの有効性と収束性について数値計算例を示しながら考察する。例題は図6に示すような一方向の不連続面を複数個含んだ単軸圧縮試験の数値計算である。

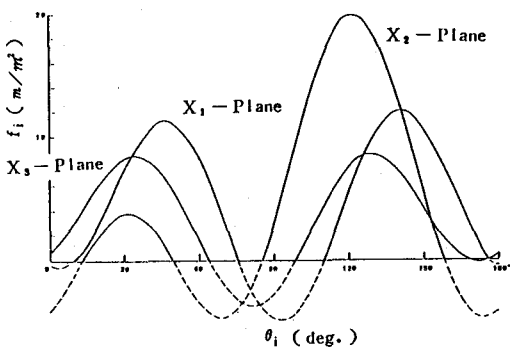


図4 節理線の分布密度の推定結果

表1 式(3)の第1式の適用

X ₂ -PL.	$\theta_2 = 32^\circ$ $f_2 = 0.38$		$\theta_2 = 122^\circ$ $f_2 = 1.99$	
	f_1/f_2	C_1	f_1/f_2	C_1
$\theta_1 = 46^\circ$ $f_1 = 1.14$	3.00	0.763	0.573	1.221
$\theta_1 = 140^\circ$ $f_1 = 1.19$	3.13	0.092	0.598	1.107

表2 式(3)の第2式の適用

X ₃ -PL.	$\theta_3 = 34^\circ$ $f_3 = 0.83$		$\theta_3 = 128^\circ$ $f_3 = 0.85$	
	f_2/f_3	C_2	f_2/f_3	C_2
$\theta_2 = 32^\circ$ $f_2 = 0.38$	0.457	1.457	0.447	1.897
$\theta_2 = 122^\circ$ $f_2 = 1.99$	2.398	1.268	2.341	0.958

表3 式(3)の第3式の適用

X ₁ -PL.	$\theta_1 = 46^\circ$ $f_1 = 1.19$		$\theta_1 = 140^\circ$ $f_1 = 1.14$	
	f_3/f_1	C_3	f_3/f_1	C_3
$\theta_3 = 34^\circ$ $f_3 = 0.83$	0.697	0.696	0.728	0.828
$\theta_3 = 128^\circ$ $f_3 = 0.85$	0.714	0.701	0.746	0.745

表4 節理群の仮定値と推定結果の比較

Joint Set	仮定値		推定値	
	θ ϕ	F m^2/m^3	θ ϕ	F m^2/m^3
A	40° ~ 50°	1.24	46°	1.19
	40° ~ 50°		47°	
B	40° ~ 50°	1.35	50°	1.24
	-65° ~ -55°		-59°	

解析は、修正モデルを用いる場合と有限要素を用いる場合について実施し、両者の比較がなされた。ただし、固体部の材料は、 $E=28000\text{MPa}$ 、 $\nu=0.19$ 、 $K_{nn}=\infty$ （圧縮）と仮定した。

図7は修正モデルによる変形モードの計算結果の例であり、要素内部の不連続面のずれ変位の影響が現れている。また、図8は試験体の軸方向剛性を不連続面の傾斜角 θ との関係で整理したものである。傾斜角 θ が増加するに従って軸剛性は低下し、同時に変形も増大するが、 $\theta=57^\circ$ 付近から急激に剛性を回復しており、このような傾向は過去の実験的経験と一致する。

ジョイント要素を用いた有限要素解の結果は、上記の修正モデルの結果とほとんど一致し、 θ を $0\sim 90^\circ$ の範囲で変えた時、両モデルから計算された変位の最大差は2.5%以内である。さらに、これらの計算に要したCPU時間を両モデルで比較すると、修正モデルでは有限要素の約1/10程度（Prime-9950）であり、計算効率の改善が期待できそうである。

離散化された要素の収束性を保証するためには、その要素に対して、完全性と適合性の条件を満足することが要求される。しかし、適合性の条件はそれほど強い拘束条件ではなく完全性の条件を保証すれば、これがある程度緩和するほうが良い場合が多い。完全性の条件は、要素内部はもちろん要素の集合体についても保証される必要があり、これを試験する方法として、Patch testが広く利用されている。ここで検討した修正モデルについても、種々のPatch testが実施され、全てのケースについて完全に合格し、収束性の保証がなされた。

4. あとがき

本論分で考察した中・小規模の不連続面の定量化方法、要素材料の変形を考慮した修正川井モデルは、それぞれ単純な仮想モデルについて数値的検討を加えたものであり、今後、実験や実際の問題への適用を通して、その妥当性あるいは改良を重ねてゆく考えである。

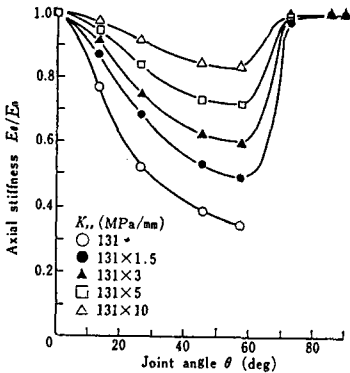


図8 不連続面の方向 θ が軸剛性に及ぼす影響

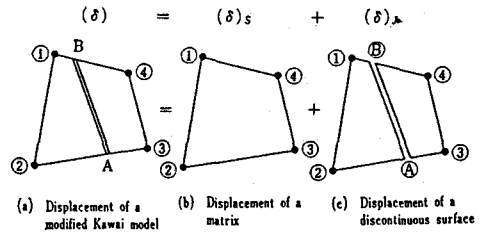


図5 不連続面を含む修正川井モデル

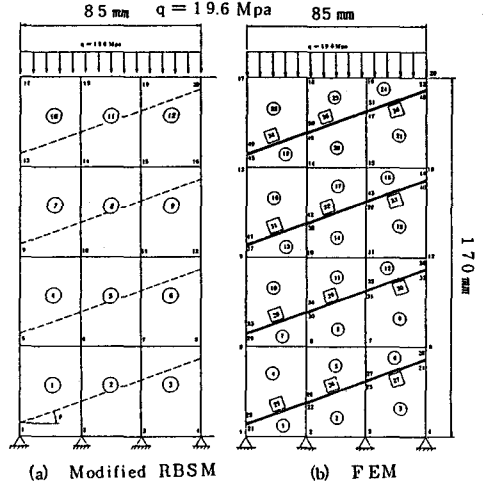


図6 単軸圧縮試験の解析メッシュ

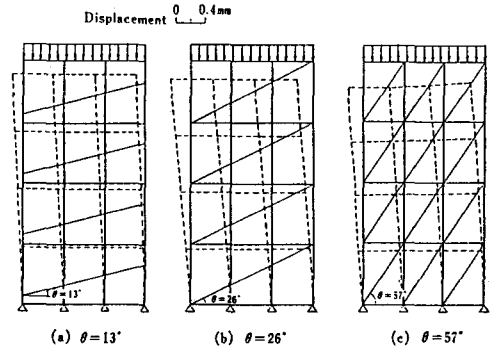


図7 単軸圧縮試験の変形モードの計算結果

参考文献

- [1] L.Müller: Gestein und Gebirge, Festschrift, Leobener Bergmanstag, 1962, pp. 3~12
- [2] 京谷孝史、市川康明、川本眺万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について、土木学会論文集、第358号、III-3、1985、PP. 27~35
- [3] 草深守人: 岩盤中に分布する不連続面の定量評価手法と岩盤構造解析手法に関する基礎的研究、間組社内研究報告書

(86) Quantitative Description of Rock Discontinuities and
Numerical Modeling of Rock Structures

Morito Kusabuka^{*}
Ryokichi Hamajima^{**}
Tadahiko Kawai^{***}

^{*} Technical Research Institute, Hazama-Gumi, Ltd.

^{**} Saitama University

^{***} Science University of Tokyo

Abstract

This paper focuses quantitative description of rock discontinuities and structural analysis method of rock structures among the problems on the numerical analysis method for the discontinuous rock mass.

Rock discontinuities are classified into two groups. One is such a large scale discontinuity as fault, the other is such a small and intermediate scale one as joint. For the first group, the location and orientation can be characterized by the conventional geological survey, because the number is relatively small. As for the second group, alternatively, they can be described practically by means of the stereology theory that considers the geometrical relation of discontinuities, since they are distributed numerously in the rock mass.

For the numerical analysis, small and intermediate scale discontinuities are modeled by the damage theory. On the other hand, large scale discontinuities are modeled by newly developed discrete element, where the discontinuity are treated explicitly.

In the paper some numerical analysis are presented based on the study. These results demonstrate the practical applicability of the developed evaluation and numerical analysis method. Some problems on the methods, to be studied in further detail, are also described.