

# (46) 3次元不連続性岩盤の熱と応力の連成解析

埼玉大学工学部 浜 島 良 吉 ○ 船 生 健 一  
 間組技術研究所 草 深 守 人  
 ソフトウェアサイエンス研究所 渡 辺 正 明  
 地質調査所 小 出 仁

## 1. はじめに

岩盤といえば不連続性が想起されるがここ数年の間にこうした不連続体の解析手法が種々アプローチされている。しかしまだまだ問題点が数多く残されており、その主な問題点として (1) 3次元不連続性岩盤の解析、(2) 不連続性岩盤の熱、水、応力の連成解析があげられよう。三原山の噴火にみられるように、深部における割れ目とマグマの発生との関連性<sup>1)</sup>の検討に対して上記(1)、(2)の解析法の解明が必要となる。また高レベル放射性廃棄物地層処分施設に対してもこれら解析手法の解明が必要である。本研究では3次元不連続性岩盤に対しては剛体バネモデル (RBSM) の3次元解析を行い、さらにこれを熱との連成解析へ発展させたものである。熱伝導解析に対しては保存則ベースの解析を行うことにより不連続性を考慮した解析が可能となり、RBSMとの連成解析を容易に行うことが可能であり、これにより3次元不連続性岩盤の熱応力解析をも行うことが可能である。熱と応力との連成解析が可能となれば、熱と水と応力との連成解析への発展も十分可能であるので本研究では第1段階としてまず熱と応力との連成解析のみを扱う。

## 1. 3次元不連続性岩盤の解析

要素 $i$ 内の任意点の変位ベクトル $U_i$ は

$$U_i = Q_i U \quad (1)$$

ただし、 $U_i$ は重心変位ベクトル、 $Q_i$ は重心の座標成分 $(x_i, y_i, z_i)$ と、任意点の座標成分 $(x, y, z)$ から決まる $(3 \times 6)$ のマトリックスである。

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_i & -(y - y_i) \\ 0 & 1 & 0 & -(z - z_i) & 0 & (x - x_i) \\ 0 & 0 & 1 & (y - y_i) - (x - x_i) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に変形後、隣接する要素の要素境界面に生じる相対変位を考える。

図-1で変形前、境界面で一致していた点が変形後 $P, P'$ に移るとする。 $P, P'$ を結ぶ相対変位 $\delta$ と隣接要素 $i$ と $j$ の重心変位  $U = [U_i, U_j]$  の関係は次式となる。

$$\delta = (Q_i - Q_j) \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix} = B U \quad (3)$$

また、ひずみベクトル  $\varepsilon = [\varepsilon_n, \varepsilon_s, \varepsilon_t]$  は

$$\varepsilon = \delta / h \quad (4)$$

ここで、 $h$ は図-2に示される重心間距離 $|g|$ を境界面に立てた法線に射影した長さである。

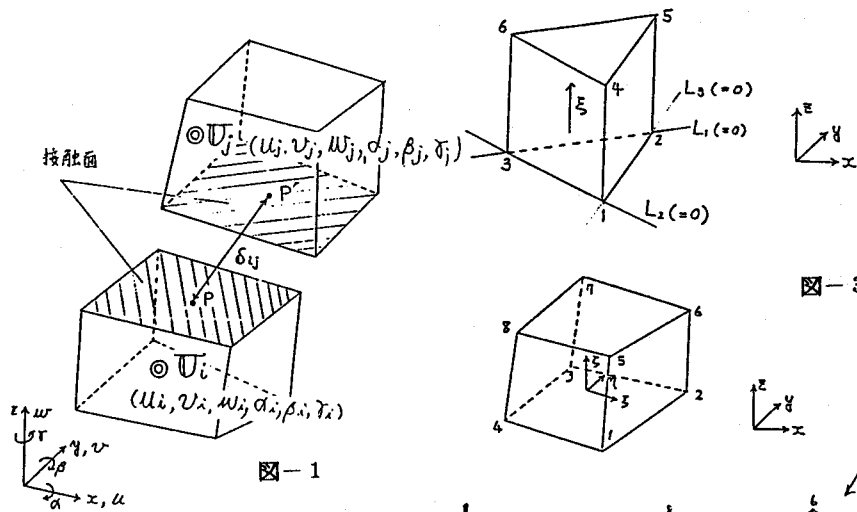


図-1

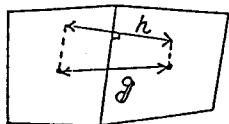


図-2

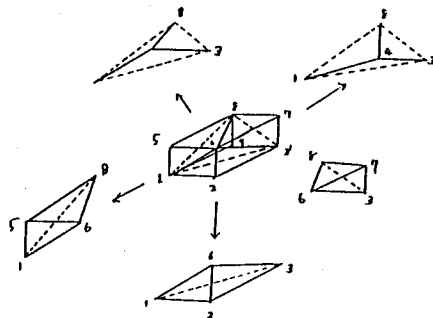


図-3

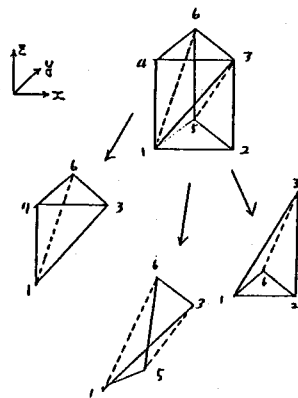


図-4

次に図-3に示される5面体要素、及び6面体要素を表現するために次の要素形状関数を用いる。

#### ・5面体要素

この要素の形状は、 $N_i$  と頂点の座標  $(x_i, y_i, z_i; 1, 2, \dots, 6)$  を用いて次のように表す。

$$x = \sum N_i x_i, \quad y = \sum N_i y_i, \quad z = \sum N_i z_i, \quad N_i = \frac{1}{2} (1 + \xi_0) L_j \quad (5)$$

ここで、 $N_i$  : 補間関数,  $\xi_0$  : パラメータ座標系,  $L_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) : 面積座標

#### ・6面体要素

$$x = \sum N_i x_i, \quad y = \sum N_i y_i, \quad z = \sum N_i z_i, \quad N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi_0) / (1 + \eta_0) (1 + \zeta_0) \quad (6)$$

#### ・要素再分割

5面体要素および6面体要素として入力された要素を図-4に示されるように3個および5個の4面体要素に分割する。分割後の要素は図-4に示されるように入力する要素番号の順序に依存する。

#### ・3角形および4角形要素

式(5), (6)の特別な場合として表され、この2つの要素は使用目的に応じて、境界要素、あるいは通常要素となる。

境界要素： 構造表面に働く荷重と境界での拘束条件を指定するのに用いる。要素自由度は通常要素と同じ。

次に材料の構成則および弾塑性マトリックスを考えよう。

温度の影響を考慮した降伏関数  $F$  を次式で表す。

$$F(\bar{\sigma}_n, T_s, T_t, T) = f(\bar{\sigma}_n, T_s, T_t) - Y(\bar{E}, T) \quad (7)$$

ここで、 $\bar{E}$  は相当塑性ひずみである。

ひずみ増分ベクトル  $d\mathcal{E}$  は、弾性成分  $d\mathcal{E}^e$ 、塑性成分  $d\mathcal{E}^p$ 、熱による成分  $d\mathcal{E}^T$  の和として

$$d\mathcal{E} = d\mathcal{E}^e + d\mathcal{E}^p + d\mathcal{E}^T \quad (8)$$

により表される。このとき増分応力  $d\sigma = [d\bar{\sigma}_n, dT_s, dT_t]$  は

$$d\sigma = D^e (d\mathcal{E} - d\mathcal{E}^p - d\mathcal{E}^T) \quad (9)$$

ここで塑性応力-ひずみマトリックス  $D^e$  および  $\mathcal{E}^T$  は次式で表される。

$$D^e = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{bmatrix}, \quad \mathcal{E}^T = \begin{bmatrix} \beta (T - T_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\beta$ : 熱膨張係数

ここで垂直剛性、およびせん断剛性  $k_n, k_s, k_t$  は連続部 (母材)、不連続部に対して次のようになる。

$$\text{連続部: } k_n = E(1-\nu)/\{(1+\nu)(1-2\nu)\}, \quad k_s = k_t = E/(1+\nu) \quad (11)$$

ここで  $E$  は一軸圧縮試験から得られるヤング係数であり、 $\nu$  はポアソン比である。

$$\begin{aligned} \text{不連続部: } k_n &= 1/(h_i/k_{ni} + h_j/k_{nj} + 1/\bar{k}_n) \\ k_s &= 1/(h_i/k_{si} + h_j/k_{sj} + 1/\bar{k}_s) \\ k_t &= 1/(h_i/k_{ti} + h_j/k_{tj} + 1/\bar{k}_t) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $k_{ni}, k_{nj}, \bar{k}_n$  は、要素  $i, j$  および面の垂直剛性であり、 $k_{si}, k_{sj}, \bar{k}_s$  は要素  $i, j$  および弱面のせん断剛性である。また  $k_t$  は  $k_s$  と同様である。ここで弱面の垂直剛性  $\bar{k}_n$  およびせん断剛性  $\bar{k}_s, \bar{k}_t$  は実験より定められ一般に拘束圧  $\bar{\sigma}_n$  の関数として与えられ、またこれらの値は寸法効果の影響を受ける。

降伏関数が塑性ポテンシャルに等しいと仮定した関連流れ則に従うとすれば、式 (9) は次式となる。

$$\begin{aligned} d\sigma &= \left( D^e - \frac{D^e \{ \partial f / \partial \sigma \} \{ \partial f / \partial \sigma \}^T D^e}{\{ H \}^T \{ \partial f / \partial \sigma \} + \{ \partial f / \partial \sigma \}^T D^e \{ \partial f / \partial \sigma \}} \right) (d\mathcal{E} - d\mathcal{E}^T) \\ &+ \frac{D^e \{ \partial f / \partial \sigma \} \partial T / \partial T}{\{ H \}^T \{ \partial f / \partial \sigma \} + \{ \partial f / \partial \sigma \}^T D^e \{ \partial f / \partial \sigma \}} dT \end{aligned} \quad (13)$$

ここでひずみ硬化率  $H'$  は次式で表される。

$$H' = \frac{\partial Y}{\partial \bar{\varepsilon}^p} \left\{ \frac{\partial \bar{\varepsilon}^p}{\partial \varepsilon^p} \right\} \quad (14)$$

降伏関数  $f$  としてはミゼスの条件、トレスカの条件およびモールクーロンの直線式が与えられる。

また次の条件が成立するとき、破壊が生じるものとする。

$$\varepsilon_n > \varepsilon_t, \quad \varepsilon_n < \varepsilon_c \quad (\text{引張ひずみを正とする}) \quad (15)$$

ここで  $\varepsilon_t, \varepsilon_c$  はそれぞれ限界引張ひずみおよび限界圧縮ひずみである。ここで引張破壊および圧縮破壊を生じた場合、バネを切断しそこに作用している応力を解放するものとする。また再接触するばあいのバネ剛性は不連続部のものを使用する。

## 2) 温度分布および熱応力解析

熱伝導問題の基礎微分方程式は次式で与えられる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda T_{,ii} \quad (16)$$

ここで、 $T$ : 温度、 $t$ : 時間、 $\rho$ : 密度、 $C_p$ : 定圧比熱、 $\lambda$ : 熱伝導率  
式 (5) を保存型で表せば次式のようになる。<sup>3)</sup>

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = - \int \theta_n ds \quad (17)$$

ただし  $q_n$  は境界  $s$  上の法線方向への熱流束であり次式で与えられる

$$-q_n = \lambda T_{,i} n_i \quad (18)$$

これを離散化することにより非定常の熱伝導解析がなされる。本解析手法は熱伝達、および熱輻射も容易に計算することができ、岩盤内に亀裂が生じた場合の解析に便利である。

岩盤の熱応力解析に際し、石塚等<sup>4)</sup>と同様、物

性（弾性係数、ポアソン比、引張強度、せん断強度、熱膨張係数）を温度の関数として定義し、非定常熱分布解析の各時間ステップで求まる温度分布から各要素の物性を逐次評価する。本解析手法は熱分布解析に際しても応力解析に用いられる剛体バネモデル要素と同一要素を用いることができ、さらに亀裂の進展に伴った非定常熱分布、応力解析を行うことができる。

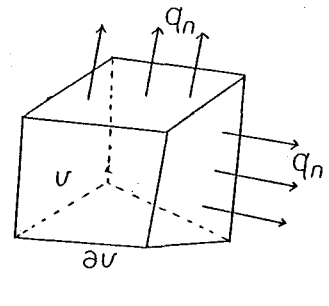


図-5

## 参考文献

- 1) 小出 仁 : 地調研専報 第18号, pp. 87-90, 1984
- 2) Hamajima, R., et al : 5th Int. Conf. of Numerical Methods in Geomech., pp. 207-214, 1985
- 3) 渡辺他 : 第21回土質工学研究発表講演集, pp. 901-902, 1986
- 4) 石塚他 : 土木学会論文集, 第350号 / 3-5, pp. 243-250, 1986

(46) COUPLED ANALYSIS OF STRESS AND HEAT TRANSFER FOR  
THREE DIMENSIONAL ROCK MASSES

Saitama Univ. : R.Hamajima, K.Hunyu  
Technical Res. Inst. HAZAMA-GUMI LTD, : M. Kusabuka  
Software Science Lab Co.,LTD : M.Watanabe  
Geological Survey of Japan : H.Koide

ABSTRACT

Rock masses having cracks and joints show an anisotropic mechanical characteristics and many numerical and experimental studies have been made on them. However, the method of numerical analysis which can fully express a mechanical characteristics of three dimensional anisotropic rock masses have not yet been developed.

The discrete element model used in this study is based on the "Rigid Body Spring Model(abbreviated RBSM) proposed by Kawai. THIS RBSM assumed that the elements themselves are rigid are connected by two types of springs distributed over their interface boundaries. Using the Coulomb's failure criterion and considering the effect of contact as well as separation of interface boundaries of each element, the elasto-plastic thermal stress analysis was carried. The fundamental equation for the problem of heat transfer was introduced from the conservative law in integral form.