

(77) FLEM-DEM解析の動的応答問題への適用性に関する検討

Numerical Simulation of Separation and Sliding during Ground Motion by FLEM-DEM Analysis

西村 強*・木山 英郎**

Tsuyoshi NISHIMURA and Hideo KIYAMA

Abstract

Mechanical behaviors of rock masses are much influenced by existence of joints. Various kinds of numerical model for jointed rock masses have been proposed. FLEM is a one of the numerical methods to analyze large deformation of grounds. This method has coupled with DEM to extend their applicability in rock engineering. A linear line element suitable for two-dimensional analysis with four-noded elements is introduced to the FLEM-DEM coupled method. This is an attempt to model the complex behaviors of jointed rock masses or interaction of structure-ground systems. Proposed method will be applicable not only static problems but also dynamic ones. Formulations for the FLEM-DEM with joint elements and some numerical examples are described in this paper.

1. はじめに

地盤と構造物あるいは不連続性岩盤のブロック間などの相互作用は接触面を通じてのエネルギーの授受の問題であるから、相互作用の特性はそれぞれの固有の力学特性のみならず、接触面の幾何学形状やその状態によっても変動することになる。さらに、境界面や岩盤内の不連続面に剥離や滑動が生じたとき、共に運動すると考える場合に比べ、その状況はかなり異なってくることが予想される。剥離が生じた領域では、力の伝達は行なわれず、残りの面で外力を伝達、あるいはそれに抵抗することになり、接触面の減少に伴って、その面に発生する圧力は増大することになる。接触面の減少と材料の非線型性の相乗効果で、強い非線型挙動を示すことになる。このような問題に対して不連続性を力学量に定量化し、等価な連続体として取り扱う手法、あるいは個別要素法(DEM)のように離散した質点系として取り扱う手法など、統一的な解析手法の開発を目指した模索が続けられてきた。

このような観点から、著者は、連続体の微小な変形から大変形まで解析可能な流動要素法(FLEM)[1]、さらには、不連続面の陽な表現も可能なFLEM-DEM結合解析[2]を提案してきた。しかし、そこで扱われる接触面は剛体間の接触という意味合いが強く、より広範な地盤状態のモデル化を考えると必ずしも十分でない場合も考えられる。そこで、本文では、これにジョイント要素を導入して拡張を行なった。静的な場合に留まらず、運動方程式を基礎とすることから動的な外力の作用下の不連続面や構造物-地盤系の部分的な剥離現象の解析への適用性も併せて検討した。

* 正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

2. ジョイントの導入

2.1 ジョイント要素

ジョイント要素は、構造物と地盤の接触面や岩盤内の断層などあらかじめその存在位置と形状が明かな不連続面に対して、その面に沿うすべりや剥離などによる変位や応力の不連続状態を表現するため考案されたものである[3]。ジョイント要素は、Goodman, Ghaboussi, Zienkiewiczなどによって提案されているが、ここでは、最も基本的なGoodmanのモデルを参考に導入を行なった。

不連続面に対し、その両側をつなぐ4節点長方形要素を考える。ジョイント要素では、厚さを考慮しないことから初期状態において、節点1と4,2と3の座標値は等しいとする。全体座標x-y系に対して、ジョイント要素に関する局所座標s-n系をFig.1のように定義する。この要素の長さl、座標変換マトリクスは以下の通りとなる。

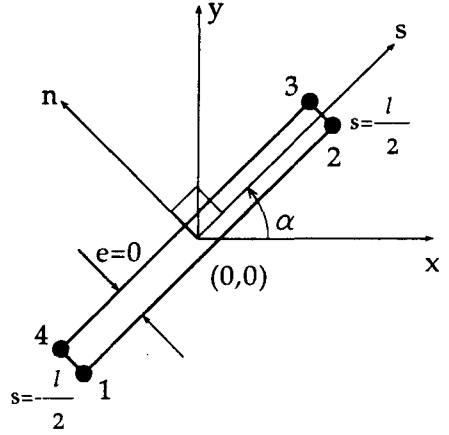


Fig. 1 Configuration of joint element.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\sin \alpha = (y_2 - y_1) / l, \quad \cos \alpha = (x_2 - x_1) / l, \quad l = \{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\}^{1/2}$$

全体座標x-y系内の節点変位増分($\Delta U, \Delta V$)は、Tにより局所座標s-n系の成分($\Delta u, \Delta v$)に変換後、以下に用いられる。不連続面の両側の壁面変位増分は節点1,2,3,4の変位増分を用いて、

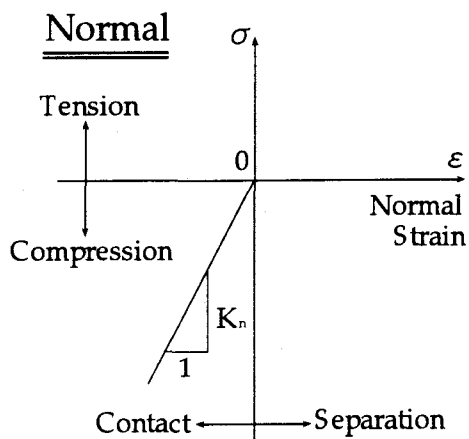
$$\begin{Bmatrix} \Delta u^T \\ \Delta v^T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_2 & 0 & N_1 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 & N_1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_3 \\ \Delta v_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta v_4 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta u^B \\ \Delta v^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta v_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

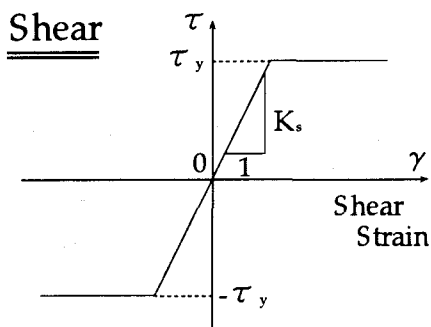
と補間近似できる。ここに、 N_1, N_2 はFig. 1を参考にして、 $N_1 = (1 - 2x/l)/2$, $N_2 = (1 + 2x/l)/2$ で与えられる1次の形状関数であり、添字T, Bは上面、下面を示す。したがって、不連続面上の相対変位増分 Δw は4節点要素の節点変位増分を用いて、

$$\Delta w = \begin{Bmatrix} \Delta w_s \\ \Delta w_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u^T - \Delta u^B \\ \Delta v^T - \Delta v^B \end{Bmatrix} = [N_J] \{ \Delta u \} \quad (4)$$

と表される。ここに、 $[N_J]$ は、節点変位から相対変位を与える形状関数マトリクスである。



(a) Normal direction



$$|\tau_y| = c - \sigma \tan \phi$$

τ_y : Yield Stress

c : Cohesion

ϕ : Angle of internal friction

(b) Shear direction

Fig. 2 Relationships between stress and strain at midpoint of joint element.

ジョイント要素では、一般の有限要素における無次元量であるひずみに対応する量として、上式より

$$\Delta \epsilon = \frac{\partial \Delta w}{\partial s} = \{\Delta \gamma, \Delta \epsilon\}^T$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta \gamma \\ \Delta \epsilon \end{Bmatrix} = \frac{1}{l} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta v_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta v_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta v_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$= \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}$$

これは、ジョイントの上下面間の相対変位をジョイントの長さ l で除した量をジョイントのひずみとしたことを意味する。

このジョイント要素のひずみ増分と応力増分を結ぶ構成式として次式を定義する。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \tau \\ \Delta \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \gamma \\ \Delta \epsilon \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \Delta \epsilon = \mathbf{K} \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (6)$$

これより、ジョイント要素の応力は次式によって更新される。

$$\sigma := \sigma + \Delta \sigma \quad (7)$$

さらに、積分を実施して、ジョイント要素の節点力増分は、

$$\Delta \mathbf{P} = \int \mathbf{N}^T \Delta \sigma \, dl = \int \mathbf{N}^T \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \, dl \quad (8)$$

$$\Delta \mathbf{P} = \{\Delta P_{1s}, \Delta P_{1n}, \Delta P_{2s}, \Delta P_{2n}, \Delta P_{3s}, \Delta P_{3n}, \Delta P_{4s}, \Delta P_{4n}\}^T$$

上式は、ジョイント要素内応力を多角形要素の辺上に作用する分布荷重として節点荷重ベクトルを求めたことに相当する。節点力は上記の増分を用いて

$$\mathbf{P}' = \mathbf{P} + \Delta \mathbf{P} \quad (9)$$

と更新される。

以上の誘導からわかるように、 $P_1 = -P_4$ 、 $P_2 = -P_3$ となっており、面を介して作用反作用の法則が成立している。式(9)で求められた局所座標系内の節点力成分を座標変換マトリクスTによって

$$\mathbf{F} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{P} \quad (10)$$

と全体座標に変換後、節点力 $\mathbf{F}$ を節点運動方程式に考慮する。以上の手順は各増分過程ごとにJoint要素構成節点に対して繰り返される。

2.2 ジョイント要素の復元力特性

つぎに、ジョイント要素に付与する復元力特性をFig.2のように仮定する。(a)はジョイント面に垂直な方向、(b)は平行な方向である。垂直な方向に関しては、 $\varepsilon \geq 0$ (剥離) の場合には力の伝達を行なわれず、 $\varepsilon < 0$ の場合には、ばね係数 K_n を介して構成関係は線形関係にあると考える。一方、せん断方向に関しては、発生しているせん断応力の絶対値が降伏応力を超えると滑動が生じ、それ以下であれば線形関係にあるという完全弾塑性体としての挙動を想定する。降伏応力は、 $\sigma \leq 0$ (圧縮) に対して、Mohr-Coulombの降伏条件を適用して次式で与える。

$$\begin{aligned} \tau_y &= c + \sigma \tan \phi & \sigma \leq 0 \text{ (圧縮)} \\ \tau_y &= 0 & \sigma > 0 \text{ (引張)} \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 c は粘着力成分、 ϕ は内部摩擦角である。

3. 解析例とその検討

3.1 解析モデル

解析に用いるモデルをFig.3に示す。モデルは平面上に物体がおかれている場合であり、ジョイント要素

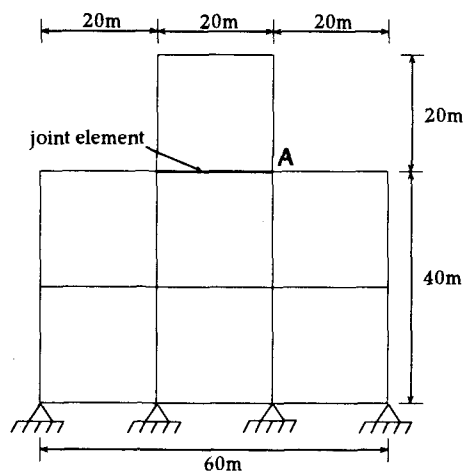


Fig. 3 Analytical model.

Table 1 Physical properties of model.

Ground	Unit weight ρ : 2.65 tf/m ³
	Young's modulus E : 10000 tf/m ²
	Poisson's ratio ν : 0.30
Joint	Shear spring const. K_s : 954 tf/m ²
	Normal spring const. K_n : 954 tf/m ²
	Cohesion c : 5 tf/m ²
	Internal friction angle ϕ : 0° or 30°
Time increment Δt : 1.0×10^{-4} (sec)	

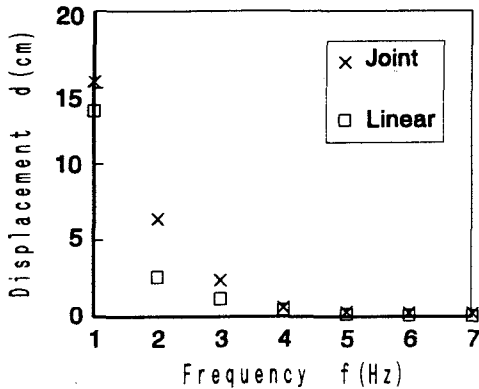


Fig. 4 Frequency dependence of displacement at the point A due to horizontal sinusoidal excitation. ($\phi=30^\circ$, Excitation amplitude: 300gal)

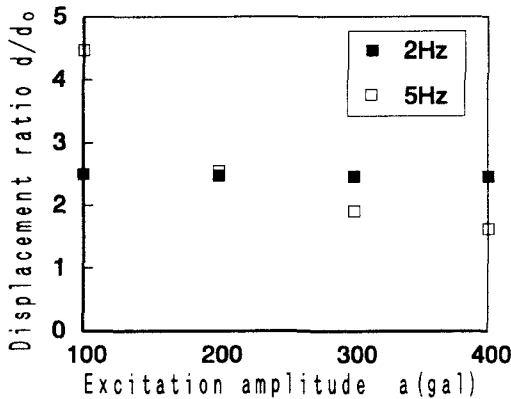


Fig. 5 Displacement at the point A due to horizontal sinusoidal excitation ($\phi=30^\circ$, Frequency: 2, 5Hz).

3.2 調和外力に対する解析例

水平方向の調和波外力を基盤（解析モデル下辺節点）に入力してジョイント要素導入による滑動、剥離の検討を行なった。Fig. 4は、 $\phi=30^\circ$ とした場合で、加速度振幅300galの水平方向の正弦波入力のみに対する最上部要素の下端A点の水平変位量 d を示したものである。ジョイント要素を含まないモデル(Linear)を用いて得られた変位 d_0 もあわせて示した。ジョイント要素を考慮した方が大きな応答変位量を示している。

Fig. 5は、入力振動数を固定して加速度振幅を変化させて実施した例である。横軸は、各入力振幅ごとに、ジョイントを考慮したときのA点の応答変位振幅 d をジョイント要素を考慮しない場合の応答振幅 d_0 で相対化したものである。入力振幅が大きくなれば、応答振幅 d 、 d_0 は大きくなり、ジョイント面での相対変位量も大きくなっている。しかし、その比 d/d_0 は入力加速度振幅が大きくなると減少し、収束する傾向をこの解析ではみせている。

参考文献：[1]木山英郎他：連続体の大変形解析のための流動要素法(FLEM)の提案，土木学会論文集，No.439/Ⅲ-17，pp.63-68，1991.12。 [2]西村 強他：FLEM-DEM結合解析法の開発と積層導坑トンネルの安定性評価への適用，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.61-65，1993.2。 [3]G.N.Pande, et.al: Numerical Methods in Rock Mechanics, pp.97-107, 1990。

は、平面と物体間の接触面上に配置される。解析モデルの諸元をTable 1に示す。ここで、ばね係数は、接触面におけるせん断および圧縮方向の相対運動に関する係数であるが、それぞれの物体固有の力学特性のみならず、接触面の幾何学形状やその状態によっても変動することになる。さらに、境界面や岩盤内の不連続面に剥離や滑動が生じたときをも考えると妥当な値を選定することは難しい問題である。極端に大きい値とすれば、数値解析の収束条件を満足しないことになる。そこで、以下に示す解析例では、解析が安定した条件下で行なわれることを第一条件として、ジョイント要素の剛性マトリクスが、地盤部分要素の剛性マトリクスより大きくならないように K_n 、 K_s の値を設定している。また、Fig.2における降伏条件としては、 $c=5\text{tf/m}^2$ とし、 $\phi=0^\circ$ 、 30° の2通りを仮定している。なお、降伏条件を科せられるのは、ジョイント要素のみであり、地盤要素部分は線形弾性体としている。

一般の動的な解析では、静的つりあい状態を基準として解析を実施すればよいので、重力場による力など初期応力状態を考慮する必要はない。しかし、ジョイント要素のすべり、剥離はFig.2に示すように要素上の垂直応力の大きさに依存して発生することになるので、何らかの外力の作用下での応力状態を考慮する必要がある。本例では、重力の作用下での応力状態を初期状態とした。