

個別要素法による不安定すべり現象の数値モデル化に関する検討

鳥取大学大学院 学生会員 ○石原 直樹

鳥取大学工学部 正会員 木山 英郎

正会員 藤村 尚

正会員 西村 強

1. はじめに

2物体が一定の垂直荷重(f_n)の作用のもとにすべりを継続するとき、摩擦抵抗(f_s)が一定値を示す滑らかなすべりを呈する場合と、 f_s が規則的な振動あるいは不規則な変動をしながら断続的なすべりを呈する場合がある¹⁾。後者はすべり面が固着(スティック)したかのような f_s の増加と、すべりによる急激な f_s の降下を繰り返す現象であり、スティック-スリップと呼ばれる。この現象を表わす簡単なモデルとして、ばねと連結された物体の平面上(すべり面)の挙動が引用されることがある。このすべり面には、①摩擦力は垂直荷重に比例する、②静止摩擦力は動摩擦力より大きいという一般にクーロンの摩擦法則と呼ばれる関係が適用されている。本研究では、上記の①②に、スリップ時の摩擦係数はすべり速度に依存するという仮定を加えて、上述のばねに連結された物体の挙動を個別要素解析法²⁾(Distinct Element Method)により解析した。得られる結果、例えば摩擦力-変位関係は、慣性の効果を含んだものであること、摩擦則の仮定やばねの剛性などに影響を受けることに注意しながら評価する必要がある。

2. 摩擦係数の変化と解析モデル

図1に示すように、平面上に2つのばねが連結された半径 $r=1.0(\text{cm})$ の円形要素を考える。垂直荷重(f_n)を作用させた後、図のようにばねの一端に定速度 $\dot{u} = \Delta u / \Delta t$ を与える。このばねに生じる力 $K_2(u - \bar{u})$ によって、円要素は移動を開始する。これにより要素と平面間にあるせん断ばねにも力 $e_s = K_1 u$ が生じる。ことになる。せん断力 e_s が徐々に増大する過程では、図中のスライダーには静止摩擦係数 μ_0 が与えられ、 $f_s = e_s < \mu_0 f_n$ である。やがて、変位の増大とともに $e_s \geq \mu_0 f_n$ なる条件が満足されると、動摩擦に移行したとして

$$f_s = \mu f_n \quad (1)$$

として f_s の値が与えられる。ここに μ は動摩擦係数、そして、刻々計算されるに e_s 対して

$$e_s < \mu f_n \quad (2)$$

が成立したときに、 $\mu = \mu_0$ が再度適用されて、新たなサイクルが始まる。

式(1)中の動摩擦係数 μ は図2に示すようにすべり速度 $\dot{u}$ に依存すると仮定して、式(3)(4)のように与える。

$0 \leq |\dot{u}| \leq \dot{u}_c$ のとき

$$\mu = (1 - \xi) \cdot \mu_0 + \xi \cdot \mu_1 \quad (3)$$

$\dot{u}_c \leq |\dot{u}|$ のとき

$$\mu = \mu_1 \quad (4)$$

ここに、 $\xi = \dot{u} / \dot{u}_c$ 、 $\dot{u}_c$ は解析上の変数である。 $\dot{u}_c = 0$ とすれば、 μ_0 から μ_1 へ瞬時に切り換わることを意味し動摩擦はすべり速度に依存しないということになる。なお、解析においては、(2)の条件に $\mu = \mu_1$ が満足された時点でも $\mu = \mu_0$ が適用されるという条件も付け加えた。

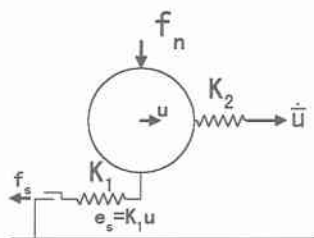


図1 解析モデル概念図

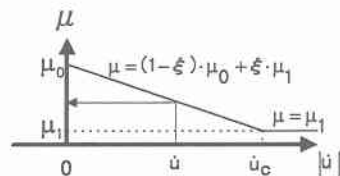


図2 移動速度 $|\dot{u}|$ と摩擦係数 μ の関係

3.解析結果

図3に解析結果の一例を示す.この結果は $K_1/\rho g = K_2/\rho g$,ばね K_2 の一端に与える速度 $\dot{u}=1.0(\text{cm/s})$,時間増分 $\Delta t=10^{-5}(\text{sec})$ なる条件に

$$\textcircled{1}: \mu_1 = \mu_0, \dot{u}_c = 0 \quad \textcircled{2}: \mu_1 < \mu_0, \dot{u}_c = 0 \quad \textcircled{3}: \mu_1 < \mu_0, \dot{u}_c > 0$$

をそれぞれ加えて解析を行ったものである.このうち $\textcircled{1}\textcircled{2}$ は,(3)あるいは(4)の条件が満たされた時点での新たなサイクルへの移行を無視したものである. $\textcircled{1}\textcircled{2}$ では, $f_s = \mu_1 f_n$ のもと安定なすべりが再現されている.一方 $\textcircled{3}$ では, f_s の周期的な変動が表現されているが, f_s は $f_s = \mu_0 f_n$ のち瞬時に新たなサイクルに移行しており,いわゆる「スリップ」時の変位量は微小であることがわかる.そこで,図4には $\dot{u}_c$ を一定のもとに $\dot{u}/\dot{u}_c = 1, 1/10, 1/100$ とした例を示した.この図より, $\dot{u}/\dot{u}_c$ を小さく,つまり,ばねに与える速度を小さくすればスリップ時の変位量を表現できること, f_s の降下量が小さくなることがわかる.後者は μ_0 から μ_1 への移行区間(式(1))においても,式(3)を満足して新たなサイクルへ移行するためであろう.

次に,ばね係数比 K_2/K_1 の大小に関する結果を図5に示す($\dot{u}/\dot{u}_c = 1/10$).この図より, $K_2/K_1 = 0.5$ すなわち,引き側のばね係数 K_2 が小さいほどスリップ時の変位量が大きくなる.さらに, f_s の降下量が小さくなることがわかる.

4.まとめ

DEMの接触モデルに,静止摩擦から動摩擦への移行あるいはその逆を許す仮定を導入することにより,変位とともにせん断力が変動することを表現できた.また,その変動の形態は,動摩擦係数のすべり速度依存性やばね係数比によって変化することを示した.当然このような単純なモデルが,すべり面の粗さやガウジの存在に影響される実際の岩石の stick-slip 現象を表現しているとは言い難い.せん断応力の降下量の大小や,stick 時と slip 時の変位量の差などに影響を与える因子や,stick-slip の機構の理解に役立てばと考えている.

(参考文献)

- 1)日本材料学会：岩の力学－基礎から応用まで，pp.113-127
- 2)Cundall.P.A：Explicit Finite-Difference Methods in Geomechanics vol.1 pp132-150.1976

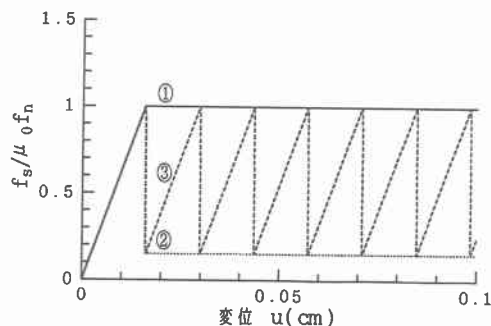


図3 $\textcircled{1}\textcircled{2}\textcircled{3}$

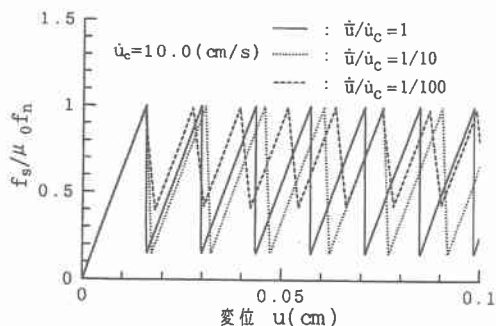


図4 $\Delta \dot{u} / \Delta \dot{u}_c = 1, 1/10, 1/100$

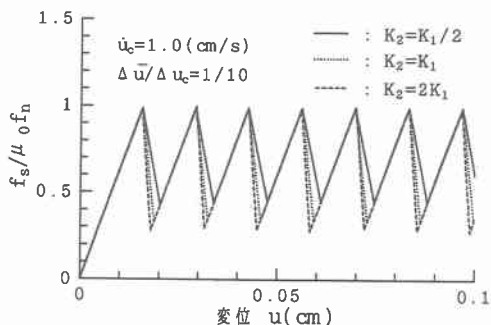


図5 $K_2 = K_1/2, K_1, 2 \cdot K_1$