

Ⅲ - A 328 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

鳥取大学工学部 正 ○西村 強
 韓國海洋大學校 張 元一
 鳥取大学工学部 学 石原 直樹
 鳥取大学工学部 正 木山 英郎

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、ばねと連結した物体の平面上(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、上述のばねと連結し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 $r=1.0$ (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 $\dot{u} = \Delta \bar{u} / \Delta t$ を与える。このばねに生じる力 $K_2(\bar{u} - u)$ 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 $e_s \geq \mu_0 f_n$ なる条件に達すると、動摩擦に移行したとして、

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

と f_s の値が与えられる。ここに、 μ' は動摩擦係数である。そして、刻々と計算される e_s に対して、

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

が成立したときに、再度 $\mu = \mu_0$ が適用されて、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。

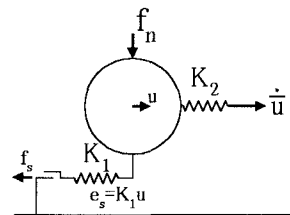
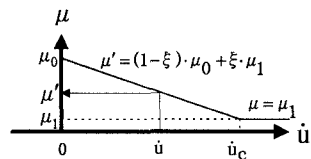


図-1 解析モデル概念図

図-2 移動速度 $\dot{u}$ と摩擦係数 μ の関係

Key words : Distinct Element Method, Stick-slip, Rate-dependent friction law.

連絡先 : 鳥取大学工学部土木工学科 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101, Tel. 0857-31-5297, Fax. 0857-28-7899

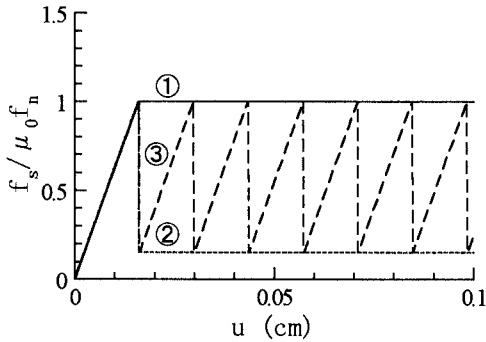


図-3 摩擦力-変位関係

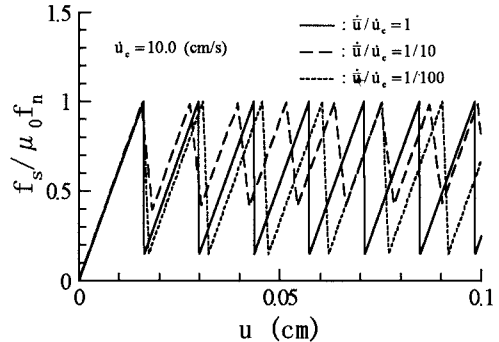


図-4 変位速度の影響

3. 解析結果

図-3に解析結果の一例を示す。この結果は、ばね係数に対して、 $K_1 = K_2$ 、ばね K_2 の一端に与える速度に対して、 $\dot{u} = 1.0(\text{cm/s})$ 、時間増分に対して、 $\Delta t = 10^{-5}(\text{sec})$ なる条件を与え、さらに、

- ①: $\mu_1 = \mu_0$, $\dot{u}_c = 0$
- ②: $\mu_1 < \mu_0$, $\dot{u}_c = 0$
- ③: $\mu_1 < \mu_0$, $\dot{u}_c = 10.0 (\text{cm/s})$

をそれぞれ加えて解析を行ったものである。このうち、①②は、動摩擦力はすべり速度に依存せず、かつ、 $e_s < \mu' f_n$ が成立しても新たなサイクルに移行しないと考えた例である。

①②では、 $f_s = \mu_1 f_n$ のもとで、安定なすべりが再現されている。一方、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 $\dot{u}$ を変化させて、 $\dot{u} / \dot{u}_c = 1, 1/10, 1/100$ とした例を示した。この図より、ばねに与える速度を小さく、つまり、 $\dot{u} / \dot{u}_c$ を小さくすることによってスリップ時の変位量の変化を表現できること、さらに、 $\dot{u} / \dot{u}_c = 1/100$ では f_s の降下量が小さくなること、 $\dot{u} / \dot{u}_c$ が小さければ、 μ_0 から μ_1 への移行区間(式(3))においても、式(2)を満足して新たなサイクルへ移行するためであろう。

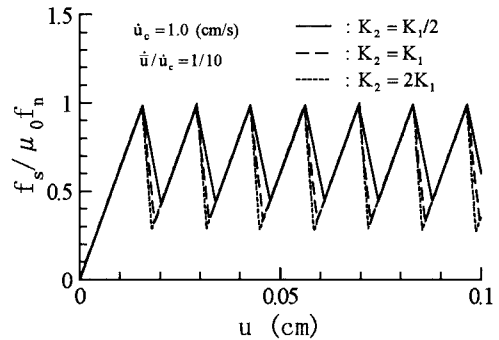
次に、ばね係数比 K_2/K_1 の大小に関する結果を図-5に示す($\dot{u} / \dot{u}_c = 1/10$)。この図より、ばね係数 K_2 が小さいほど、スリップ時の変位量が大きくなる。さらに、 f_s の降下量も小さくなるなどの変化も表現できる。

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、変位とともに摩擦力が変動することを表現できた。また、その変動の形態は、せん断変位速度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スティック-スリップ現象を表現しているとは言い難い。摩擦力の降下量の大小やスティック時とスリップ時の変位量の差に影響を与える因子など、スティック-スリップの機構の理解に役立てばと考えている。

参考文献

- 1) 日本材料学会編：岩の力学－基礎から応用まで，pp.113-127，丸善，1994。
- 2) Cundall.P.A：A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system, Proc. Symp. of the ISRM, Nancy, France, Vol.1, Paper No. II-8, 1971。


 図-5 ばね係数の影響 (K_1 一定)