

- 6 個別要素法を用いた断層破壊過程のシミュレーションに関する研究

Numerical simulations of fault rupture processes using 2-D discrete element method

(研究期間 平成 13 年度)

国際地震工学センター

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering

芝崎文一郎

Bunichiro Shibazaki

Fault zone structure plays an important role in the mechanical behavior of fault zone and in earthquake generation processes. In this study we develop a numerical model of frictional slip in granular shear zone using two-dimensional discrete element method to investigate how the fault zone evolves with frictional slip.

【研究目的及び経過】 地震発生過程は、断層強度回復、テクトニック応力の蓄積、準静的な破壊核形成、動的破壊の伝播からなる。これらの過程は、断層面に働く摩擦構成則に支配される。これまでの研究では、岩石の摩擦すべり実験の成果を基に、断層摩擦構成則が実験的に提案され、それを用いて地震発生過程のモデル化が主に行われてきた。最近になって、断層帯を粒状要素の集合とみなし、要素の微視的な相互作用や要素間の摩擦を考慮した断層摩擦特性の数値シミュレーションが行われるようになってきた。本研究では、断層の微視のプロセスに基づく、破壊過程のシミュレーション方法を開発する。

【研究内容】 本研究では、断層摩擦構成則における強度回復過程を微視的な過程から明らかにする為に 2 次元個別要素法による数値シミュレーションを試みる。粒子間の静止摩擦係数に対して、 $\log(t)$ の時間依存性を仮定した断層摩擦の物理モデルを提案する。

【研究成果】 本研究では粒子間の接触力は以下の Voigt モデルにより評価した。法線方向と接線方向の接触力はそれぞれ、

$$F_n^{all} = \begin{cases} 0 & \delta_n \leq 0 \\ -(F_n + \mu_n \frac{d\delta_n}{dt}) & \delta_n > 0 \end{cases}$$

$$F_t^{all} = \begin{cases} 0 & \delta_s \leq 0 \\ -(F_n + \mu_n \frac{d\delta_n}{dt}) & \delta_s > 0 \text{ and } |S_t| \leq F_{static} \\ -F_{dynamic} & \delta_s > 0 \text{ and } |S_t| > F_{static} \end{cases}$$

ここで、 F_n 、 F_t は Hertz-Mindlin の弾性接触理論による接触力、粒子中心の法線方向接触量を δ_n 、接線方向

接触量を δ_t 、法線、接線方向に対する粘性係数を μ_n 、 μ_t とした。法線方向及び接線方向の弾性係数は 3 次元球の Hertz-Mindlin の弾性接触理論により評価する。球径がそれぞれ r_1 、 r_2 、ヤング率 E_1 、 E_2 、ポアソン比 ν_1 、 ν_2 である 2 個の球状粒子に圧縮力 F_n が作用し、粒子中心の接触量が δ_n 、接触半径が b であるとする、 δ_n と b の関係は次式で表される。

$$\delta_n = F_n^{2/3} \left\{ D^2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right\}^{1/3}$$

$$b = F_n^{1/3} \left(D \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで D は

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2)$$

で与えられる。数値解析では式(1)、(2)を F_n に対して解いた、次式を用いて法線方向の接触力を評価する。

$$F_n = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \delta_n^3 \equiv K_n (\delta_n) \delta_n \quad (3)$$

ここで K_n が Hertz-Mindlin の弾性接触理論による 3 次元球の法線方向弾性係数である。

(接線方向弾性係数) 接線方向に働く弾性力 F_t は Mindlin による定式化により、

$$F_t = \frac{3}{4} \left\{ \frac{(2 - \nu_1)(1 + \nu_1)}{E_1} + \frac{(2 - \nu_2)(1 + \nu_2)}{E_2} \right\}^{-1}$$

$$\equiv K_t (\delta_n) \delta_t \quad (4)$$

で与えられる。

本研究では、摩擦構成則として Dietrich による摩擦構成則を採用した。具体的な構成則は以下で与えられる。粒子間の接触面積は時間と共に、

$$A_r = A_{r0} [1 + B \log(Ct + 1)] \quad (5)$$

で増加するとする。粒子間の初期の接触面積接 A_{r0} は、Hertz-Mindlin の弾性理論で見積もられる接触幅 b を用いて、

$$A_{r0} = \pi b^2 = \pi \left(D \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)^{2/3} F_n^{2/3} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 F_n は接触面における法線方向の力である。

上式から摩擦係数の表式として、

$$\mu = SA_{r0} [1 + B \log(Ct + 1)] F_n^{-1} \quad (7)$$

が得られる。ここで、 S は材料のせん断強度である。本研究では、粒子に働く接線方向の力が、静止摩擦力

$$F_{\text{static}} = SA_r \quad (8)$$

を超えた際に、接線方向にすべりが生じるとした。すべりが生じた際の動摩擦力は、

$$F_{\text{dynamic}} = SA_{r0} \quad (9)$$

とした。

図 1 にシミュレーションにおける周期的境界条件を示す。2 種類の変位速度で、摩擦特性を調べた。本研究で再現した例は、固着すべりが生じている場合であるが、すべり速度を増大させると、固着すべりの際の応力降下量が小さくなるのがわかる。これは、微視的摩擦力に時間依存の強度回復過程が入ったからであると考えられる。実際に、岩石実験では、変位速度が大きくなると安定化に向かい、固着すべりは起きにくくなる。図 2 に変位速度を途中から変えた場合の結果を示す。変位速度を上げた場合に若干、弱化が起きていることがわかる。これは、岩石の摩擦すべり実験の結果と調和的である。

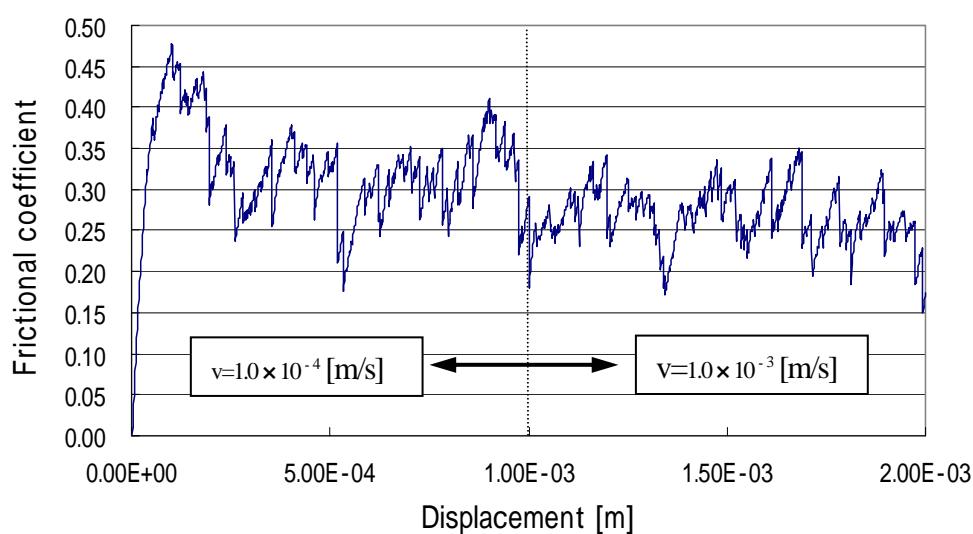
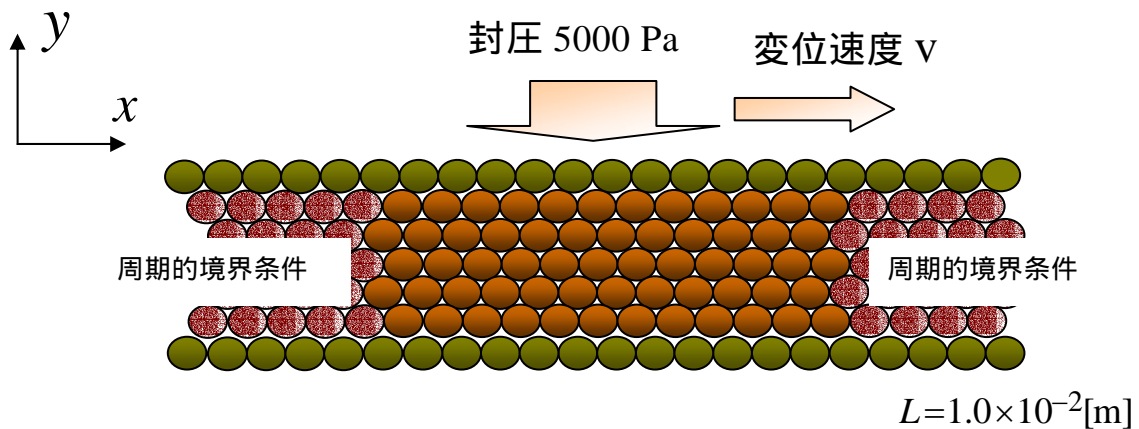


図 2 変位と摩擦係数との関係(変位速度を途中から変えた場合)