

断層破壊の動的解析と破壊停止のメカニズム

○東京大学 学生会員 川端 航
 東京大学 学生会員 中川 善典
 東京大学 正会員 井上 純哉

1. 背景・目的

現在、地震動を引き起こす個々の断層の破壊過程は未だに解明されていない部分も多い。特に地震の規模予測において重要であると考えられる断層破壊の停止については複数のメカニズムが提案されている。線形破壊力学を用いると静的な破壊停止の条件は求めることができるが、破壊を動的に捉えたときの破壊停止の条件は明らかではない。

そこで本研究では断層破壊過程の動的な解析を行う。そしてバリアによる破壊停止、断層近傍における密度欠損に起因する破壊停止という二つの破壊停止メカニズムにおける破壊停止の定量的条件を得ることを目的とした。

2. 境界積分方程式法による解析

無限弾性体内部にひとつの平面断層がある状態を考える。モードⅢの破壊を考えると断層面上の点は z 軸方向のみに変位する。 β をせん断波速度として弾性体内部の変位場 $u(x, y, t)$ は運動方程式

$$\frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla^2 u \quad (1)$$

を満たす。また境界条件としての断層面上ではたらく応力は、摩擦構成則の Deitrich-Ruina model(式(1))を満たすものとする。

$$\begin{cases} T_0(x) + T(x, t) = T^*(x) + a \log \frac{v(x, t) + v_0}{v(x, t) + v_\infty} + b \log [1 + q(x, t) \frac{v_\infty - v_0}{L}] \\ \frac{dq(x, t)}{dt} = 1 - q(x, t) \frac{v(x, t) + v_0}{L} \end{cases} \quad (2)$$

ただし θ は状態変数と呼ばれ、摩擦面の磨耗状態を表すパラメータである。 T_0 は断層面上の初期応力、 $T(x, t) = \partial u(x, y, t) / \partial y|_{y=0}$ は T_0 からの変化量を表す。 $v(x, t)$ は点 x での滑り速度で、 $\Delta u(x, t) = u(x, 0^+, t) - u(x, 0^-, t)$ と定義すると、 $v(x, t) = \partial \Delta u(x, t) / \partial t$ である。 a, b, v_0, v_∞, L は定数である。未知数は $u(x, y, t), v(x, t), \theta(x, t), T(x, t)$ である。

しかし、本研究では断層面上の変位・応力のみが分かればよいので、境界積分方程式法を用いこの問題を解いた。これは境界面上での応力と速度の関係を表すもので、(1)から導かれる。 Γ は断層の領域である。

$$T(x, t) = -\frac{m}{2p} \int_{\Gamma} \int_0^{t_m} \left[\frac{t-t}{x-x} \frac{\partial}{\partial x} v(x, t) + \frac{1}{b^2} \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) \right] \frac{1}{\sqrt{(t-t)^2 - (x-x)^2/b^2}} dt dx \quad t_m = \max(0, t - \frac{|x-x|}{b}) \quad (3)$$

バリア(断層面上のせん断強度が強い部分)による破壊停止を考えるとときには、 $T^*(x)$ に分布を与えることでバリアを表現する(図2)。

一方、断層近傍の密度欠損がある場合には、断層破壊で生じるせん断波が弾性体の密度の変化面において反射するため、等価なモデルとして無限弾性体内部に無限に断層が並んでいる状態を考えればよい(図3)。異なる密度を持つ弾性体間でせん

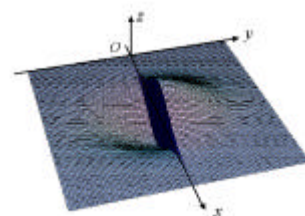


図1 座標系と破壊モード

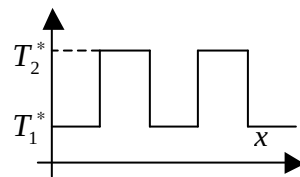


図2 断層面上の強度

キーワード：地震、断層、破壊進展、境界積分方程式

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL：03-5841-7455 FAX：03-5841-7496

断波速度($\beta=(\mu/\rho)^{1/2}$)が等しいと仮定すると、式(1)は次のように変更される。

$$T(x,t)=\sum_N T_N(x,t) \quad (1')$$

$$T_N(x,t)=(R)^N \left[-\frac{m}{2p} \int_0^{t_p} \left\{ \frac{(x-x')(t-t')}{(x-x')^2 + (N_r H)^2} \frac{\partial}{\partial x} v(x',t') + \frac{1}{b^2} \frac{\partial}{\partial t} v(x',t') \right\} \frac{1}{\sqrt{(t-t')^2 - \{(x-x')^2 + (N_r H)^2\}/b^2}} dt' dx' \right]$$

ただし $R(\text{反射率}) = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \quad (m_2 > m_1) \quad m_1, m_2 \text{は弾性体の剛性}$

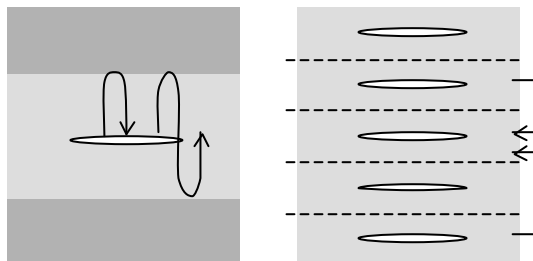


図3 等価なモデル

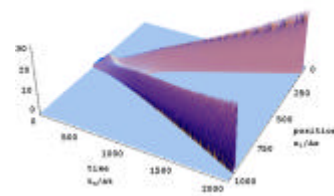


図4 停止しない破壊

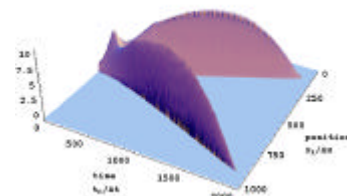


図5 停止する破壊

3. 破壊停止メカニズムとその停止条件

図3のような破壊がいかに停止するかを見る。ここで言う破壊停止とは断層面上の破壊の伝播が停止することを意味しており、断層面上の各点の動きが停止することとは区別される。

a. バリアによる破壊停止

バリア(岩盤中のせん断強度が大きい部分)によって断層破壊が停止するというのは一般的に想定されているメカニズムである。

線形破壊力学では、破壊停止のためにはバリア部分で破壊の伝播が全く起こらないことが必要であるため、破壊停止には非常に大きなバリア強度が求められる一方、バリア幅についてはあまり考慮されなかった。しかし、ここでの結果は動的解析において比較的バリア強度は小さくともある程度のバリア幅をもっていれば破壊が停止し得ることを示している。

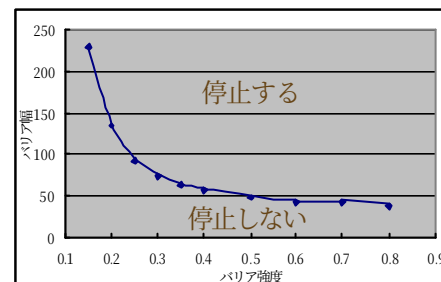


図6 バリアによる停止条件

b. 密度欠損に起因する破壊停止

現実の断層の近傍においては断層破碎帯と呼ばれる領域が存在し、その外部よりも相対的に密度が小さいことがわかっている。その影響で破壊停止が起こる可能性がある。

解析の結果、反射率、境界までの距離などによって破壊の停止が条件的に起こることが分かった。

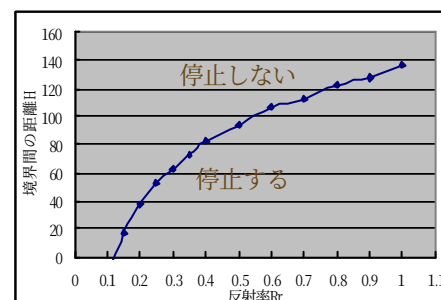


図7 密度欠損による停止条件

4. まとめ

本研究では断層破壊の停止についてふたつのメカニズムを取り上げ、停止条件が定量的に求まることを示した。これらの破壊停止メカニズム及びその破壊停止条件の妥当性は、現実の断層調査によって得られるであろう、過去の破壊履歴・断層周辺の岩盤物性値などのデータをもとに検証される必要がある。

参考文献

- Cochard, A. and Madariaga, R. (1994), Dynamic faulting under rate-dependent friction, *Pure and Applied Geophysics*, 142, 419-445.
- Perrin, G., Rice, J.R. and Zheng, G. (1995), Self-healing slip pulse on a frictional surface, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 43, 1461-1495.