

地震間の間隙弾性反発を考慮した動的地震サイクルシミュレーション
Dynamic Earthquake Sequence Simulation Accounting for Interseismic Poroelastic Rebound

○野田 博之
○Hiroyuki NODA

Poroelastic rebound PE following a dynamic earthquake rupture is one of the mechanisms responsible for postseismic deformation. Previous studies for a crack of constant tensile or shear strength in poroelastic medium suggest afterslip driven by PE within a patch of coseismic slip. The fault strength, however, is known to recover with time (healing) after rapid slip ceases, as observed in laboratory experiments, which gave basis for a rate- and state-dependent friction law. Here interseismic PE is implemented in dynamic earthquake sequence simulation with a spectral boundary integral equation method by defining memory variables in to avoid temporal convolution for poroelastic effect. The effect of PE is investigated for various diffusivities for both the aging law and the slip law, which have different characteristics in healing of the fault. The simulation results suggest that the fault healing is so efficient that loading to the fault due to PE hardly contribute afterslip in the middle of the seismogenic patch. A combined effect of PE and long cut-off time observed in natural repeating earthquakes deserves future study.

1. はじめに

岩石は多孔質媒質であり、地震性滑り等の短い時間スケールの変形が流体圧の不均質を生む。その後の流体移動による流体圧の変化は岩石の体積歪の変化を引き起こし、地震の余効変動に寄与する (e.g., Peltzer et al., 1996)。これが多孔質弾性反発 (Poroelastic rebound, PE) である。非排水条件の Poisson 比は排水条件のものより大きいため、一定の応力降下の亀裂が発生した際に即時に変位ギャップが生じた後、PE により徐々に追加の変位ギャップが発生する (e.g., Detournay and Cheng, 1991)。しかし、断層面は滑りの後に徐々に強度を回復する事が知られている。その様な、より現実的な摩擦の性質を考慮した際の PE の影響を調べるのが本研究の目的である。

摩擦強度が滑り速度や固着時間によって変化する実験事実は、速度・状態依存摩擦構成則 (RSF) の定式化の基礎となった。動的地震サイクルシミュレーション (e.g., Lapusta et al., 2000) では、RSF を弾性体中の断層に適用し、地震時の動的破壊と準静的な応力蓄積過程を単一の枠組みで解く。Miyake and Noda (2019) によりこの手法が線形粘弾性体に拡張されたが、同様の手法を用いて PE の実装を行う。その上で代表的な RSF (Aging law と Slip law) 及び様々な流体の拡散係数を用いた数値計算を行い PE の影響を調べた。

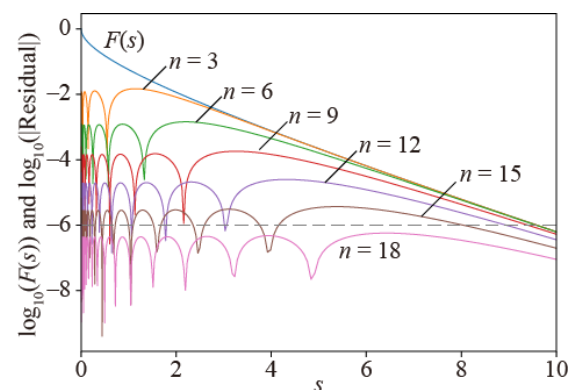


図 1. $F(s)$ と式(3)の最小二乗近似の残差。

2. 手法

断層面での応力は、弾性体の場合はその時刻の滑り分布に依存する静的応力変化と、それからの差の動的な寄与に分けることができる。この静的応力変化に PE を組み込む。平面断層の 1 点 ($x=0$) に永続する集中した滑りが生じた後の剪断応力変化 (Detournay and Cheng, 1998) の Fourier 変換は

$$T^G(k,t) = K_u + (K_d - K_u)(1 - F(ctk^2)) \quad (1)$$

と書ける。ここで k は角波数、 t は滑り発生後の経過時間、 c は流体圧の拡散係数、 K_u と K_d はそれぞれ非排水と排水条件における Stiffness を示し $|k|$ に比例する。 F は両条件間の遷移を表現する関数であり、物性値に依存しない。

$$F(s) = (1 + 2s) \operatorname{erfc}(s^{1/2}) - 2e^{-s}(s/\pi)^{1/2} \quad (2)$$

T^G と滑り速度の Fourier 変換 v の時間畳み込みに

より PE による応力変化を計算できるが、その為には v の履歴の記憶が必要となる。既に動的な寄与の計算の為に短時間の v の記録を行っており、これが問題サイズを規定する要因となっている。本手法では PE の為の積み込は行わず、代わりに

$$F(s) \approx \sum a_i \exp(-s/s_i) \quad (3)$$

と近似する事により、多くの異なる特徴的緩和時間を持つメモリー変数 D_i

$$dD_i/dt = v - D_i c k^2 / s_i \quad (4)$$

を逐次時間積分し、この線形結合で応力変化を表現した。各角波数に対し 18 個のメモリー変数を用いると数値近似の誤差は 10^{-6} 以下となる (図 1)。

本手法を用いて、一つ速度弱化パッチ (長さ $2R$) が速度強化域の内部に存在する比較的単純な系で数値実験を実施した。まずは非排水条件の計算を行い再来周期 T_u を求め、速度弱化パッチに対応する拡散時間 $T_{PE} = R^2/c$ が $10^{-7}T_u$ から 10^1T_u の範囲の拡散係数について PE の影響を調べた。

3. 結果・議論

図 2 に Aging law の場合の例を示す。図中で地震時滑りを示す赤い領域の間にギャップが見られない。すなわち、速度弱化パッチ中心部で有意な余効滑りは確認できない。調べたすべての場合についてこの事を確認した。中心部における各変数の時間変化 (図 2 右) を見ると、地震発生後 $0.1T_{PE}$ 程度の時間スケールで、PE による断層への载荷が起こっている事がわかる。この事により断層滑りは非排水条件の結果に比べて早くなるが、精々数倍程度である。断層の時間的な強度上昇に伴う減

速が支配的であり、PE の影響は微々たるものであった。Slip law の場合も同様の結果が得られた。

今回使用した Poisson 比 (非排水時 0.34、排水時 0.25) からは、クラック内部の断層強度が一定の場合、地震性パッチの内部で 10% 程度の余効滑りが期待される。実際の計算結果ではパッチ内部の余効滑りはこれに比べてほぼ無視できる量であり、断層の時間的な強度回復の重要性が強く示唆された。Marone et al. (1998) は天然の繰り返し地震から、100 日程度の非常に長い断層強度回復の cut-off 時間の存在を主張している。その様に長い cut-off 時間の摩擦則への導入と、それによる PE の影響の変化については、今後の課題である。

4. 結論

多孔質弾性反発 (PE) を動的地震サイクルシミュレーションに実装し、その余効滑りに対する影響を調べた。断層に通常速度状態依存摩擦則を用いた場合、地震後の強度回復が PE による载荷に勝り、PE による余効滑りは地震性パッチの内部で有意には発生しない。

引用文献

- Cheng A.H.-D. & Detournay E. (1998). *IJSS*.
 Detournay E. & Cheng A.H.-D. (1991). *IJSS*.
 Lapusta N. et al. (2000). *JGR*.
 Marone, C. et al. (1995). *GRL*.
 Miyake, Y. & Noda H. (2019). *EPS*.
 Peltzer G. et al. (1996). *Science*

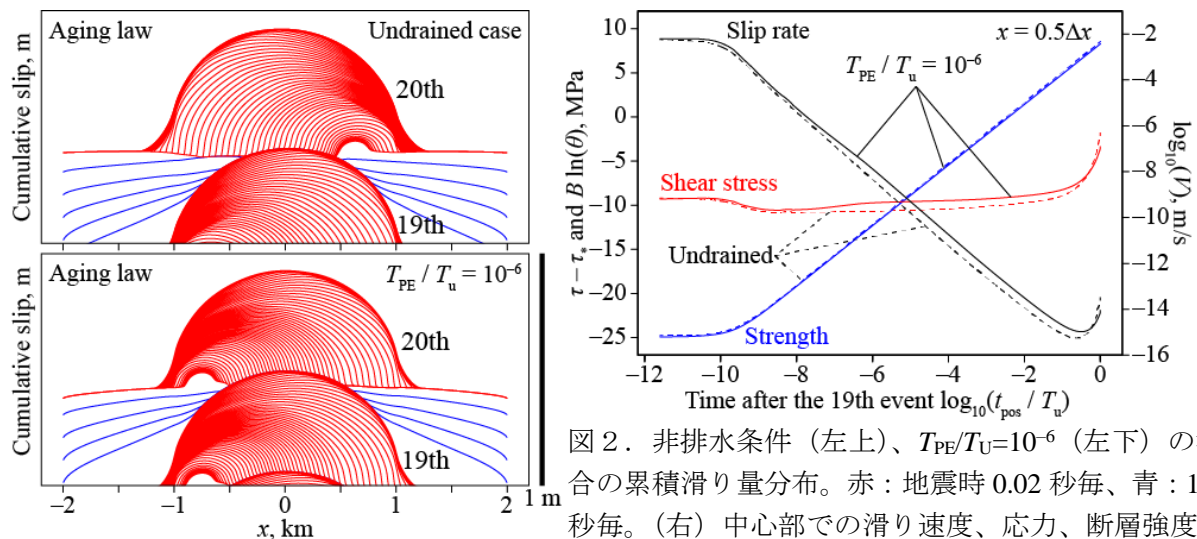


図 2. 非排水条件 (左上)、 $T_{PE}/T_U=10^{-6}$ (左下) の場合の累積滑り量分布。赤：地震時 0.02 秒毎、青：10⁷ 秒毎。(右) 中心部での滑り速度、応力、断層強度。