

脆性塑性遷移域における内部変形をテンソルとして扱った剪断帯モデル
 Shear Strength of a Shear Zone in Brittle-Plastic Transition Based on Tensorial Strain Partitioning

○野田博之
 ○Hiroyuki NODA

A constitutive law of shear zones in the brittle-plastic transition (BPT) is of great importance to understanding loading at the bottom of the seismogenic layer preceding large earthquakes. Previous microphysics-based models are based on the partitioning of slip and dilation normal to the shear zone into different deformation mechanisms. Here, I account for the remaining 2-D strain component, inelastic extension of the shear zone, and associated stress buildup parallel to the shear zone, and investigate the steady-state behavior in which slip on inclined planes and bulk plastic flow coexist. The results show that the inclination of slip planes causes weakening relative to the friction law. Whereas a previous two-mechanism model yields a larger strength than the friction law for a rate-weakening slip element in the BPT, the present model qualitatively resolves this problem. This study illuminates the importance of fault-parallel stress in understanding the fabrics and strengths of shear zones.

1. はじめに

Sibson (1982) らにより、全てではないが多くの大地震は地震発生層の下限近くより破壊が開始することが指摘されている。そのため、地震発生層の下限域に対する応力载荷は大地震の発生機構を考える上で重要であると考えられる。この部分を载荷するためには、遠方からの応力擾乱よりも、断層の下部延長、脆性塑性遷移域 (BPT) や延性剪断帯における滑りが有効に働くだろう。故に、例えば数値シミュレーションなどを用いて大地震の発生プロセスや地震サイクルを考える際に、BPT の断層の力学的性質が重要となる。

BPT では、剪断帯内の滑り面における摩擦滑りと全体的な塑性流動が共存する。これまでの断層帯の構成則 (例えば Reinen et al. (1992) による two-mechanism model、Chen and Spiers (2016) の CNS model) では、剪断帯の単純剪断歪や剪断帯の幅の変化を複数の変形機構に分配する事が考慮されている。しかし変形には他にも成分があり、単純な inplane の状況では剪断帯の伸長/短縮の歪成分についても考慮が必要である。本研究では、変形をちゃんと 2 階のテンソルとして扱い、その上で摩擦と流動の両要素への配分を考慮した。

BPT で生成される特徴的な岩石は、全体的な流動変形と内部に局所化した滑り面を持つ S-C マイロナイトである (Shimamoto, 1989)。その中でも、剪断帯と斜交した滑り面 (C' 面) を持つ S-C-C'

マイロナイトを考える。本研究では、BPT における剪断帯の剪断強度のみならず、滑り面の角度や全体の歪に対する流動変形の寄与など、岩石の内部構造に関しても示唆を与えるモデルを目指す。

2. モデル

図 1 に、本モデルの幾何学的制約を示す。剪断帯に単純剪断を加える剪断実験を考える。剪断帯中に散らばる角度 θ で傾いた滑り面 (Riedel 剪断面の R 面を想定) での滑りにより、剪断帯は伸びてしまい、その姿勢も整合しなくなってしまう。これを元の姿勢に戻すための剛体回転が必要となり、さらに剪断帯の長さと同幅を不変とするために純粋剪断変形が必要となる。ここに、実験で加えた単純剪断変形を実現するために追加で単純剪断歪が必要となる。これらの変形のうち、純粋剪断歪速度と追加の単純剪断歪速度は流動変形が賄う。R 面に相当する滑りの場合、純粋剪断歪速度は剪

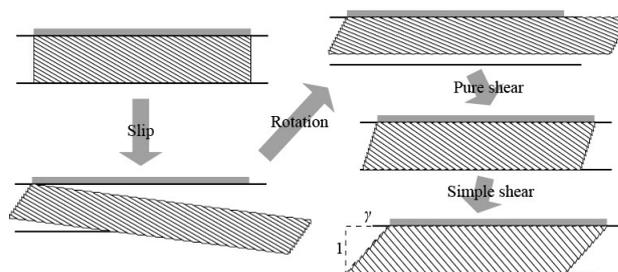


図 1. 本研究のモデルの変形の幾何。

断帯を短縮させる向きに働くので、剪断帯と平行方向に圧縮の力が生じる事を示唆している。

剪断帯内での応力状態と、滑りと流動の構成則が与えられれば、剪断帯の歪速度を計算できる。その上で定常状態の仮定を置くと、歪速度の総和が実験的に与える歪速度と一致しなければならない。(そうでない場合は、応力変化が生じる。) その様な状況について数値的に Newton-Raphson 法を用いて解を求め、剪断帯の強度、応力状態、滑り面の角度について調べた。

摩擦則に関しては対数則、流動則に関しては冪乗則を仮定した。また滑り面は、トラクションの剪断成分と垂直成分の比が最大となる角度に発達すると仮定した。

3. 結果、議論

摩擦が速度弱化的な場合について得られた解を図2に示す。横軸は、摩擦則と流動則の交点で規格化した歪速度である。摩擦係数が Byerlee 則に従

う程度に高い場合以下の結果が得られた。(1)BPTでの剪断強度が摩擦則・流動則両者よりも低くなる。(2) BPT 及び脆性領域では剪断帯に平行な圧縮が顕著になる。(3) BPT での滑り面の角度は 15° から 20° 程度。十分に低速では定常解が存在しないが、ここでは滑り面が完全に固着し、流動則そのものが剪断帯の強度を与える事となる。

過去の two-mechanism model では、BPT での強度が摩擦則より強くなってしまいう問題があった。変形を2次元に拡張した本モデルでは、摩擦面の回転に伴い強度が低下し、前述の問題が定性的には解消したと言える。

剪断帯に平行な圧縮は、剪断帯の垂直応力の倍程度に達する場合がある。断層強度とその内部構造を考える上で、剪断帯の垂直応力は非常に重要な状態変数であると言える。しかし現在の摩擦実験では、剪断帯や断層ガウジの側方の拘束に関してあまり考慮されていない。この測定や制御は実験技術的な新たな課題であろう。

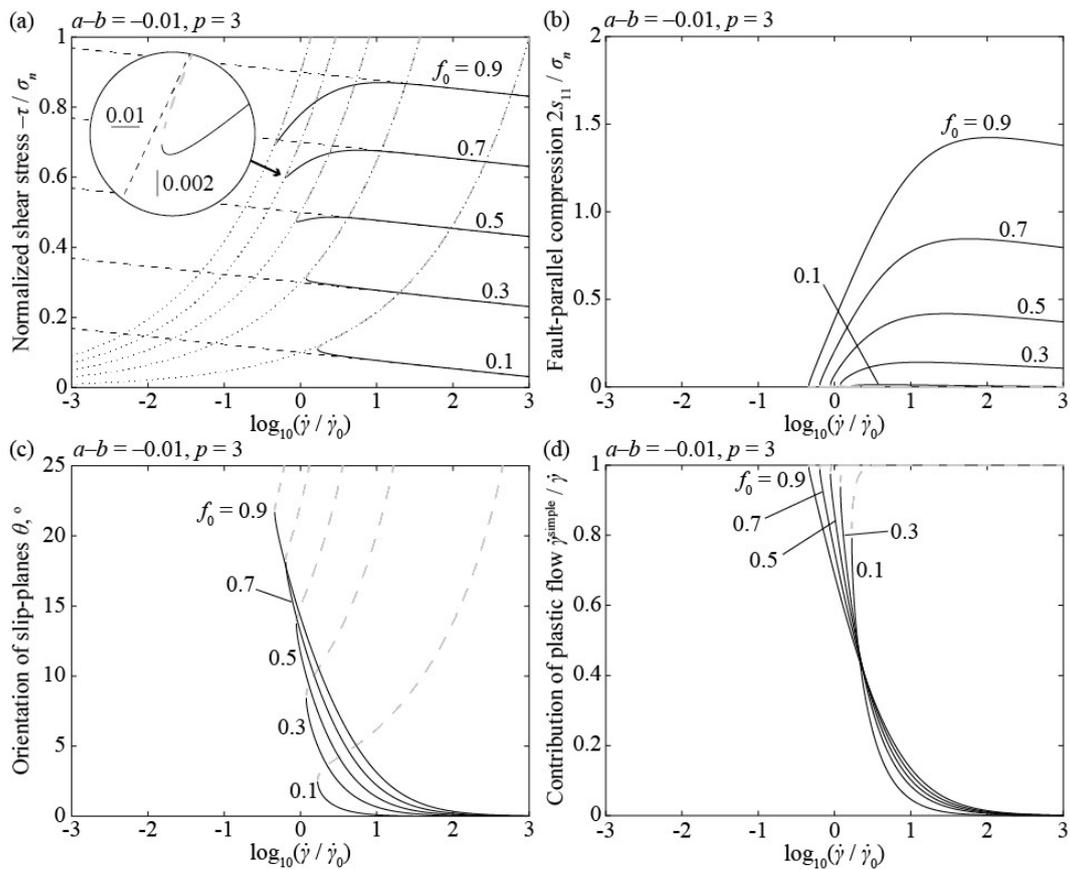


図2. 定常解の一例。横軸は摩擦則と流動則の交点(基準点)で規格化した剪断歪速度。摩擦の速度依存性 $a-b$ は -0.01 、流動則の応力指数 p は 3 を仮定し、基準点の摩擦係数 f_0 が 0.1 から 0.9 のケースを示している。(a) 剪断帯の剪断強度。(b) 剪断帯と平行の圧縮応力と垂直応力の差を垂直応力で規格化したもの。(c) 滑り面の角度。(d) 与えた単純剪断歪速度に対する、塑性流動の割合。