

FEMによる断層変位のスリップパーティショニング発生条件の探索

—逆断層と横ずれ断層の組み合わせ例—

竿本 英貴¹

¹正会員 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 (〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)
E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

地震時に活断層周辺で生じる地表変位を予測することは、変位が社会基盤に与える影響を考察する上で重要である。二つの断層面が近接する場合、地震時に一方の断層面に縦ずれが、もう一方の断層面に横ずれが生じる事例が報告されており、この現象はスリップパーティショニングとして知られている。スリップパーティショニングはいくつかの事例報告があるが、その発生条件については未解明な部分が多い。本研究ではスリップパーティショニングが生じやすい条件を把握することを目的として、断層面配置および広域応力場をそれぞれ変化させて 784 ケースにおよぶ有限要素解析を実施した。結果、スリップパーティショニングを発生させ得る断層面傾斜角および応力場方位の組み合わせについての定量的な知見を得ることができた。

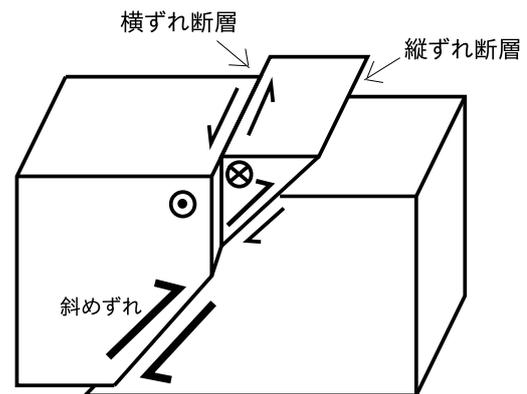
Key Words: slip partitioning, active fault, infrastructure, FEM, parametric study

1. はじめに

地震時に活断層周辺で生じる地表変位を把握することは、変位が社会基盤に与える影響を考察する上で重要であることは論を俟たない。実際、これまでに数多くの調査研究や現象把握または予測を目的とした数値解析に基づく地表変位解析がなされてきている。

近年、国内では 2014 年長野県神城断層地震および 2016 年熊本地震で地表地震断層が出現し、これらについての調査結果が報告されている¹⁾⁻³⁾。2016 年の熊本地震に対する Toda ら³⁾の調査結果によれば、地震断層帯中央部の西原村では、右横ずれ(変位量: 約 1.5m)を伴う主断層と並走するように北西落ちの正断層(変位量: 約 2m)が分布することが報告されている。この現象に対し、Toda らは、地下で 1 面であった断層が地表に向かって伸びる途中で断層が分岐し、地下での斜めずれの横ずれと縦ずれをそれぞれの断層が分担する変位様式(スリップパーティショニング)を推定している。本研究では、断層変位のスリップパーティショニングに焦点を当てる。

断層変位のスリップパーティショニングの模式図は図-1のとおりであり、スリップパーティショニングの本質は、大局的な斜めずれ変位が並走している縦ずれ断層と横ずれ断層で縦ずれ成分と横ずれ成分にそれぞれ分配された結果であると考えられている。スリップパーティショニングに関する事例報告は、Wesnousky と Jones⁴⁾



大局的な斜めずれ変位を

地表近くの縦ずれ断層と横ずれ断層で変位を分配

図-1 断層変位のスリップパーティショニングの模式図

による米国 Owens Valley での調査結果および King⁵⁾ らの中国での Kokoxili 地震(2001 年)に対する調査結果など、国外で数例報告されている。国内では Toda らの熊本地震に関する報告を除けば、糸魚川—静岡構造線活断層系の牛伏寺断層および松本盆地東縁断層のずれ変位関係がスリップパーティショニングで説明できるとする Ikeda ら⁶⁾の報告、牛伏寺断層とその周囲に存在する断層に対する松多ら⁷⁾の示唆等、数例ある程度にとどまっている。以上のように、断層変位のスリップパーティショニングの事例数は、正・逆断層や横ずれ

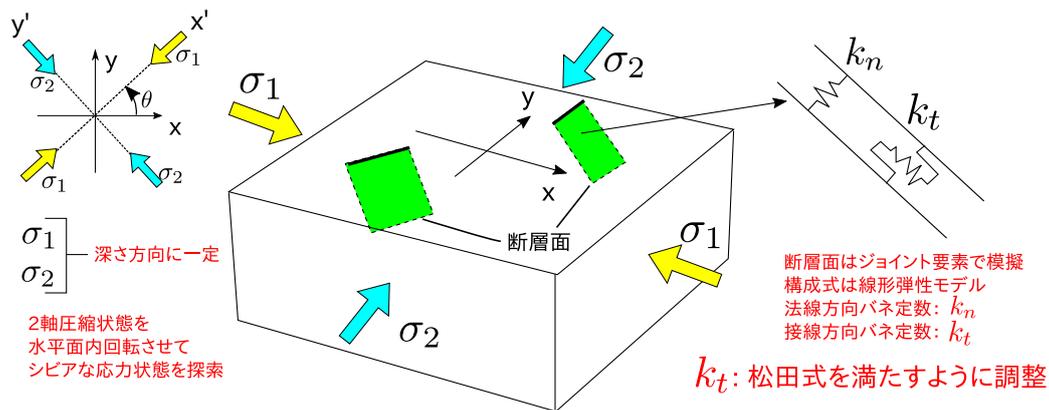


図-2 断層変位簡易評価手法の概要 (竿本, 2018²⁰) より)

断層単体の事例数に比べて極端に少ないため、スリップパーティショニングに対する知見や現象把握の程度は逆断層や横ずれ断層の水準に達していないと考える。このような事情のため、スリップパーティショニングについて考察することは、一定の新規性を有する。また、実際に熊本地震時に発生したと推察されていることから、地震防災の観点からも一定の意義があると考えられる。

本研究は、スリップパーティショニングの現象把握を目的としており、スリップパーティショニングが生じやすい条件を有限要素法を通じて探索しようとするものである。スリップパーティショニングの組み合わせとして、「逆断層と横ずれ断層の組み合わせ」および「正断層と横ずれ断層の組み合わせ」が考えられるが、まずは「逆断層と横ずれ断層の組み合わせ」について検討する。

土木分野ではこれまでに有限要素法や個別要素法等、様々な数値解析手法によって様々な初期条件および境界条件の下で地表変位に関する知見を得るための研究がなされてきた⁸⁾⁻¹⁸⁾。しかしながら、これらは正・逆断層または横ずれ断層を対象とする場合に限定されており、スリップパーティショニングを対象とした数値解析は著者の知る限り実施されていない。一方、国外では、Bowman ら¹⁹⁾による弾塑性解析事例が一例ある。この研究では、San Andreas 断層とその周辺に存在する断層についての実際の変位様式およびチベット北東部の Haiyuan 断層とその周辺に存在する断層についての実際の変位様式の各ケースについて、弾塑性解析から得られる変位様式と比較することが行われている程度にとどまっており、スリップパーティショニングの発生のしやすさを Bowman らの文献から推察することは困難である。これに対し、本研究では並走する2枚の断層面(これらは地下では一体化する)の傾斜角、2面が一体化する深さ、広域的な圧縮応力方位をそれぞれ変化させ、スリップパーティショニングが発生しやすいパ

ラメータの組を探索するとともに、得られたパラメータの組に対する断層面上のずれ変位および地表での変位様式について議論する。

2. スリップパーティショニング発生条件探索のための問題設定と解析条件

(1) FEM による断層変位簡易評価方法の概要

スリップパーティショニングの発生条件を探索するには数多くの解析を実施する必要がある。したがって、解析1回あたりの計算時間を短くすることが肝要である。また、断層変位解析にあたっては、広域応力場情報を考慮しつつ、結果として得られる変位量が松田式等に代表される観測事実と整合的である必要がある。このような観点のもと、著者は下記(a)から(f)の要件を満たす断層変位の簡易評価手法を提案している²⁰⁾(図-2)。

- 設定するパラメータの数をなるべく少なくすること
- 計算時間をなるべく少なくすること
- 複数の断層面をシミュレーションに導入すること
- 広域応力場の設定方法を簡素化すること
- 広域応力場の影響を導入し、断層系の変位量の総和を最大にする応力条件を探索すること
- シミュレーションから得られる地表変位が松田式に代表される観測事実と整合的であること

詳細については既報に譲るが、下記(1)から(4)の特徴がある。

- 断層面上の構成関係は線形弾性と仮定する(要件(a), (b)への対処)
- 断層面はジョイント要素によって表現する(要件(c)への対処)
- 解析モデルは2軸圧縮応力で模擬される造構応力場下にあると仮定し深さ方向への変化は考えない。ただし、主軸方向は変更できる(要件(d), (e)への対処)

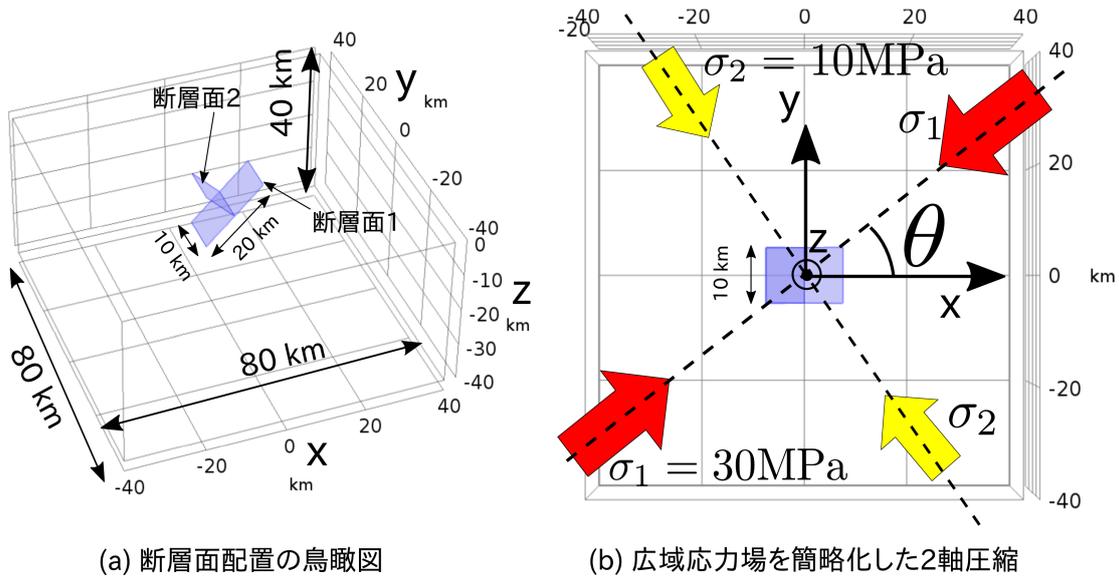


図-3 スリップパーティショニング発生条件探索のための問題設定

(4) 断層面上の接線方向バネ剛性は、松田式(スケーリング則)を満たすように決定する(要件(f)への対処)

端的に言えば、変形終了時の変位分布のみを、松田式(断層線の長さとなずれ量が比例するとする経験則)を採用しつつ静解析に基づいて高速に求めることを目指している。また、初期応力分布についても2軸圧縮という仮定で単純化している。すなわち、提案する簡易評価手法では応力に関する正確な状態を設定することはせず、せいぜい地殻応力の主方向と地表地震断層の変位量の関係性を求めるまでで止めている。この結果、1ケースにかかる計算時間は約40秒程度となっており、十分な数の解析ケースからなるパラメトリックスタディーが実施可能となる。

(2) 問題設定と解析条件

問題設定として、図-3(a)に示すように、80 km x 80 km x 40 kmの直方体(ヤング率: 45 GPa, ポアソン比: 0.3)の内部に、スリップパーティショニングの模式図(図-1)にある逆断層を想定した断層面1と横ずれ断層を想定した断層面2の2つの断層面からなるy字型の断層面を作成した。直方体の解析領域には、広域応力場を簡略化した2軸圧縮状態を設定しており、最大圧縮応力 σ_1 および σ_2 をそれぞれ $\sigma_1 = 30 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_2 = 10 \text{ MPa}$ とした。最大圧縮応力の大きさ30 MPaは、池田ら²¹⁾によって計測された野島断層の地下1000mでの応力値(30 MPa)を用いた。なお、最大圧縮応力の作用方向 θ はパラメータであり、x軸方向から反時計回りに0°から90°まで、15°刻みで変化させている。

y字型の断層面を拡大したものが、図-4である。今

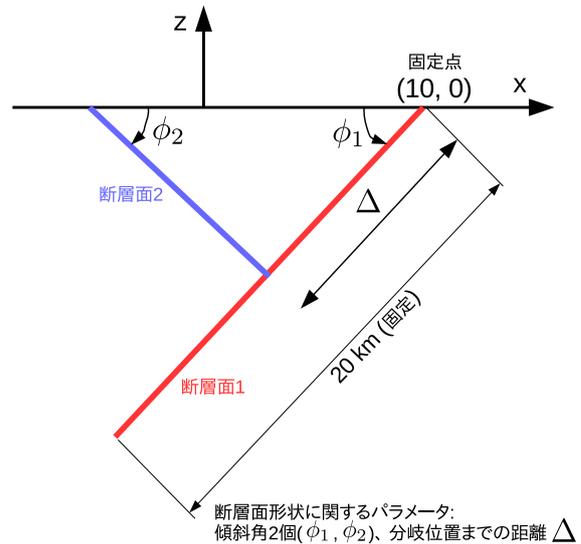
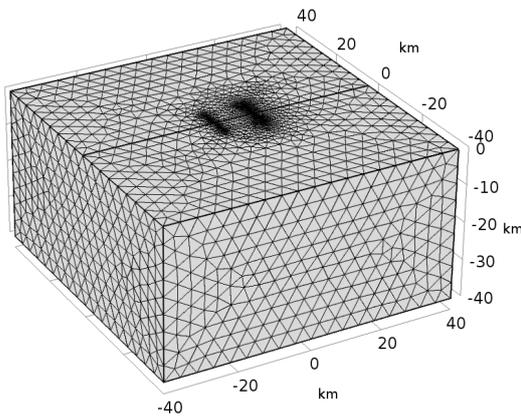
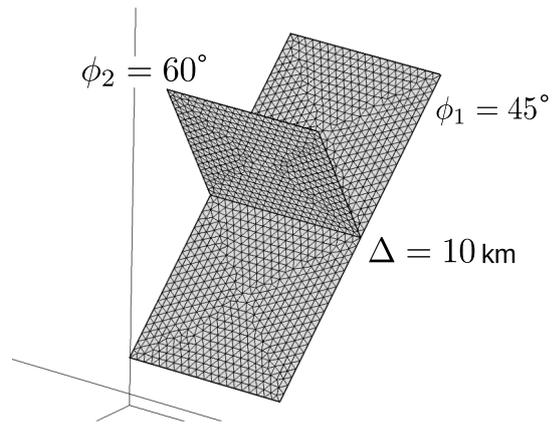


図-4 断層面形状に関する3つのパラメータ(ϕ_1, ϕ_2, Δ)

回、断層面1の地表への到達位置($x = 10, z = 0$)および断層面1の幅を固定している(20 km)。一方、断層面1および断層面2の傾斜角(ϕ_1, ϕ_2)はパラメータとしてそれぞれ変化させる。また、断層面1と断層面2の交点を規定する長さ Δ もパラメータとして変化させる。結局のところ、パラメータは「最大圧縮応力の方位 θ 」、「断層面の交点を規定する長さ Δ 」、「断層面1の傾斜角 ϕ_1 」、「断層面2の傾斜角 ϕ_2 」の4つとなる。各パラメータの取りうる数値をまとめたものが、表-1である。すべてパラメータについて総当たり計算を行うが、 $\phi_1 = 90^\circ$ の場合は ϕ_2 の範囲は、75°までとした。4つパラメータの組み合わせ総数は、784ケースとなる。ス



約10万個の四面体2次要素



各断層面を500 m ピッチで分割

図-5 有限要素メッシュの一例 ($\Delta = 10 \text{ km}$, $\phi_1 = 45^\circ$, $\phi_2 = 60^\circ$)

表-1 4つパラメータ θ , Δ , ϕ_1 , ϕ_2 の取りうる範囲

パラメータ名	数値
θ ($^\circ$)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
Δ (km)	5, 10, 15, 20
ϕ_1 ($^\circ$)	30, 45, 60, 75, 90
ϕ_2 ($^\circ$)	30, 45, 60, 75, 90, 100

表-2 有限要素解析で用いる材料物性

パラメータ名	数値
地殻のヤング率 (GPa)	45
地殻のポアソン比 (-)	0.3
断層面上の法線方向剛性 (N/(m \cdot m 2))	1.21×10^{11}
断層面上の接線方向剛性 (N/(m \cdot m 2))	1.04×10^7

リップパーティショニングは、一方の断層面の傾斜角が90°と想定される場合が多いようであるが、今回は傾斜角90°に限らず様々なケースについて検討する。

有限要素解析では、地殻のヤング率、ポアソン比に加え、断層面上の法線方向剛性および接線方向剛性が必要となる。これらの数値をまとめたものが表-2である。なお、断層面上の法線方向剛性については母岩と同程度となるように、接線方向剛性については、松田式を近似的に満たすようにそれぞれ設定している。断層面上剛性の設定の詳細については、既報²⁰⁾を参照されたい。

図-5に、 $\Delta = 10 \text{ km}$, $\phi_1 = 45^\circ$, $\phi_2 = 60^\circ$ と設定した場合の有限要素メッシュを示す。直方体は約10万個の四面体2次要素で作成している。また、各断層面は500mピッチの3角形2次要素で分割することで作成し

ている。一連のパラメトリックスタディーでは、4つのパラメータ ($\theta, \Delta, \phi_1, \phi_2$) をセットすると自動的にパラメータを反映させた有限要素メッシュを作成するが、断層面はパラメータの数値によらず常に500mピッチの3角形2次要素で分割する設定とした。なお、今回の有限要素解析は、汎用工学シミュレーションソフトウェアCOMSOL Multiphysics®上で実装・実行した。

(3) スリップパーティショニングの強度の定義

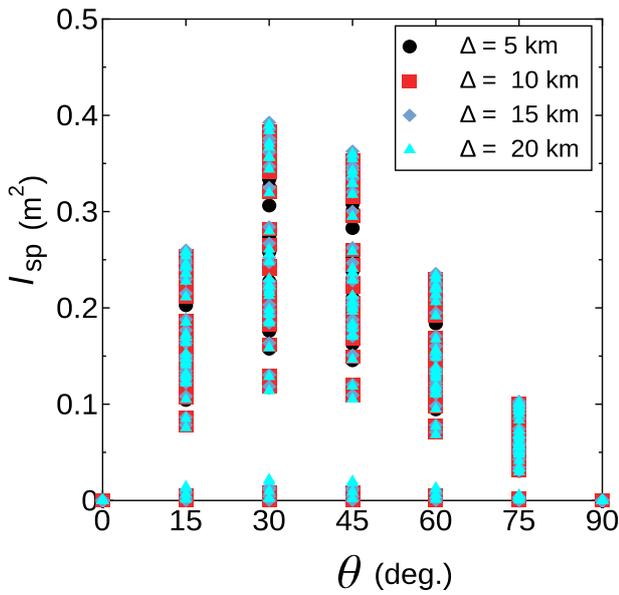
本研究では、スリップパーティショニングの強弱と先に示したパラメータの関係を議論することが重要である。したがって、結果を示す前にスリップパーティショニングの強弱の程度を示す指標を定義しておく。

直感的ではあるが、断層面1で一定レベル以上のずれ変位が算出されたとしても、断層面2でずれ変位がほとんど生じていなければ、断層面1のみが活動したように見えるため、スリップパーティショニングは生じていないと考える。また、最大主応力をx軸に沿って設定した場合も断層面1と2はともに逆断層となることが推察できるため、この場合は逆断層と横ずれのスリップパーティショニングとは言えない。以上の考えの下、ここでは断層面1の平均ずれ変位ベクトルのz方向成分と断層面2の平均ずれ変位ベクトルのy方向成分の積を、スリップパーティショニングの強度を示す指標 I_{sp} として次式で定義する。

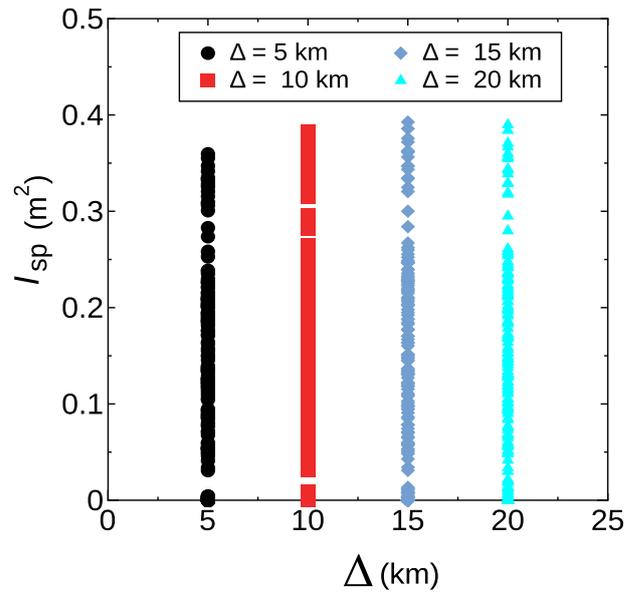
$$I_{sp} = |d_{1z}| |d_{2y}| \quad (1)$$

ここで、 d_{1z} は断層面1上の平均ずれ変位ベクトルのz方向成分を、 d_{2y} は断層面2上の平均ずれ変位ベクトルのy方向成分を表し、これらはそれぞれ次式で算出している。

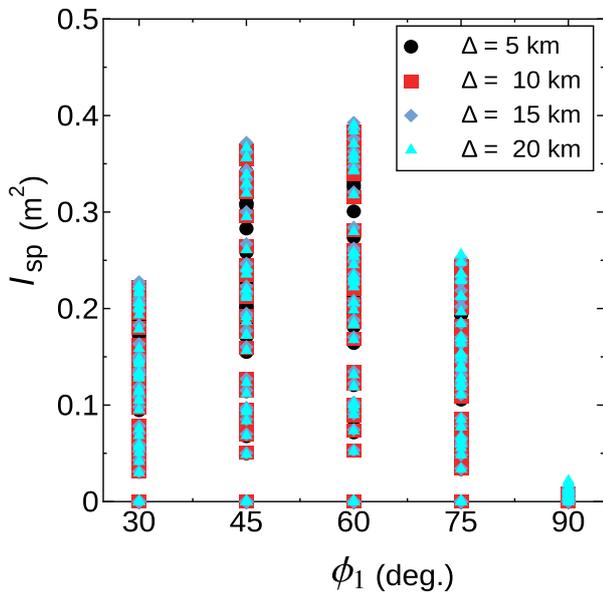
$$d_{1z} = \frac{1}{A_{F1}} \int_{F1} w \, dA, \quad d_{2y} = \frac{1}{A_{F2}} \int_{F2} v \, dA \quad (2)$$



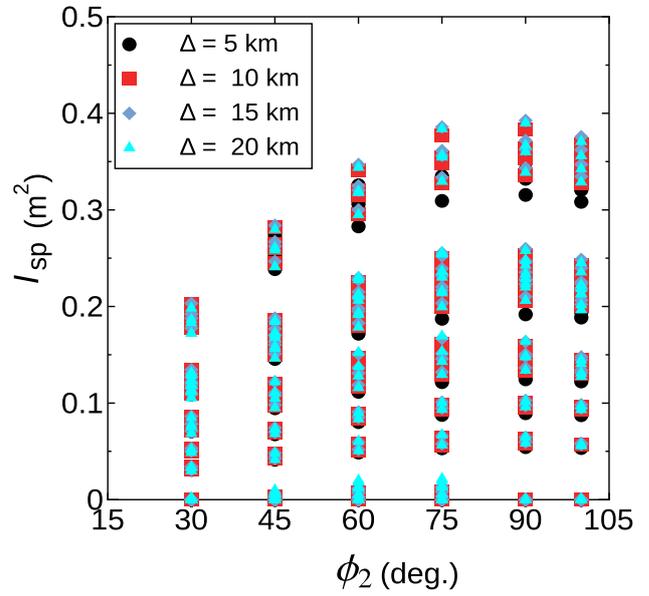
(a) I_{sp} と θ の関係



(b) I_{sp} と Δ の関係



(c) I_{sp} と ϕ_1 の関係



(d) I_{sp} と ϕ_2 の関係

図-6 スリップパーティショニング強度 I_{sp} と各パラメータ (θ , Δ , ϕ_1 , ϕ_2) との関係性

ここに、 A_{F1} は断層面 1($F1$) の面積、 w は断層面 1($F1$) 上のずれ変位の z 方向成分、 A_{F2} は断層面 2($F2$) の面積、 v は断層面 2($F2$) 上のずれ変位の y 方向成分である。

本研究では、この指標 I_{sp} の値が大きければ大きいほどスリップパーティショニングが生じやすいと考える。なお、スリップパーティショニング強度の定義方法には任意性があるため、ここでの定義よりも本質をより端的に表す指標が存在する可能性はある。以下では、今回定義したスリップパーティショニング強度 I_{sp} と各パラメータの関係性について議論する。

3. 結果と考察

(1) スリップパーティショニング強度と各パラメータの関係性について

図-6 に、スリップパーティショニング強度 I_{sp} と断層面形状を規定する各パラメータについての関係性を示す。各パラメータの意味は図-3 および図-4 に示すとおりであり、それぞれ、 θ : 最大圧縮応力の作用方向、 Δ : 2 つの断層面の交差点を規定する距離、 ϕ_1 : 断層面 1 の傾斜角、 ϕ_2 : 断層面 2 の傾斜角である。図-6 の (a)

表-3 I_{sp} が大きい上位 30 位までのパラメータセット

順位	θ (°)	Δ (km)	ϕ_1 (°)	ϕ_2 (°)	I_{sp} (m ²)
1	30	15	60	90	0.393
2	30	20	60	90	0.390
3	30	15	60	75	0.386
4	30	20	60	75	0.384
5	30	10	60	90	0.383
6	30	10	60	75	0.377
7	30	15	60	100	0.376
8	30	15	45	90	0.372
9	30	20	60	100	0.371
10	30	10	60	100	0.368
11	30	20	45	90	0.367
12	30	10	45	90	0.364
13	45	15	60	90	0.363
14	30	15	45	100	0.362
15	30	15	45	75	0.361
16	45	20	60	90	0.360
17	30	5	60	90	0.360
18	30	20	45	75	0.357
19	45	15	60	75	0.356
20	30	20	45	100	0.356
21	30	5	60	75	0.355
22	30	10	45	100	0.355
23	45	20	60	75	0.355
24	30	10	45	75	0.355
25	45	10	60	90	0.354
26	45	10	60	75	0.349
27	30	5	60	100	0.347
28	45	15	60	100	0.347
29	30	15	60	60	0.347
30	30	20	60	60	0.344

表-4 表-3 で示した上位 30 位の各ケースにおける断層面上平均ずれ変位量および変位量の比 (横ずれ量/縦ずれ量)

順位	$ v_{1z} $ (m)	$ v_{2y} $ (m)	$ v_{2y} / v_{1z} $
1	0.683	0.575	0.842
2	0.687	0.568	0.827
3	0.686	0.563	0.820
4	0.694	0.554	0.798
5	0.683	0.561	0.822
6	0.684	0.552	0.807
7	0.673	0.559	0.830
8	0.643	0.579	0.900
9	0.671	0.553	0.824
10	0.676	0.544	0.805
11	0.644	0.569	0.884
12	0.643	0.566	0.881
13	0.546	0.664	1.216
14	0.639	0.567	0.888
15	0.642	0.563	0.877
16	0.549	0.656	1.193
17	0.682	0.527	0.773
18	0.645	0.553	0.857
19	0.549	0.650	1.184
20	0.637	0.559	0.877
21	0.682	0.521	0.763
22	0.640	0.554	0.866
23	0.555	0.639	1.152
24	0.641	0.553	0.862
25	0.546	0.648	1.187
26	0.547	0.637	1.165
27	0.679	0.512	0.754
28	0.538	0.645	1.198
29	0.680	0.510	0.751
30	0.687	0.501	0.729

から (d) にの各図について、単一パラメータを固定したとしても、他のパラメータとの組み合わせによって、 I_{sp} は大きく変化することがわかる。

I_{sp} と θ の関係 (図-6(a)) および I_{sp} と ϕ_1 の関係 (図-6(c)) では、ピーク位置が他のパラメータに比べて明確であり、今回検討したパラメータの中では感度が高いと言える。一方、 I_{sp} と Δ の関係 (図-6(b)) は明瞭なピークが確認できない上、 Δ の違いによって I_{sp} の分布形態がほとんど変化していないため、感度が低いと言える。 I_{sp} と ϕ_2 の関係 (図-6(d)) では、 ϕ_2 は I_{sp} に対して一定の感度があるが、 ϕ_1 ほど急峻なピークを有していないことがわかる。また、各関係から、 θ が 30° または 45° かつ、 ϕ_1 が 45° または 60° かつ、 ϕ_2 が 75° または 100° の場合に I_{sp} が大きくなることが予想される。表-3 は、 I_{sp} が大きい順に上位 30 位までのパラメータセットをまとめたものであるが、上記予想のとおり、図-6(a), (c), (d) の各図のピーク位置を与えるパラメータの組み合わせが上位を占めていることがわかる。

今回のパラメータスタディーを通じて Δ によらず、 θ が 30° 程度、 ϕ_1 が 60° 程度、 ϕ_2 が 90° 程度の場合に逆断層と横ずれ断層のスリップパーティショニングが生じやすいと推察できる。

(2) 縦ずれと横ずれの変位量比

各断層面上で平均的なずれ変位量が算出されているため、縦ずれ量と横ずれ量の比を求めることができる。地表地震断層の現地調査では縦ずれと横ずれの変位量が計測されるため (例えば Toda ら³⁾、横ずれ:約 1.5m、縦ずれ:約 2.0m)、今回得られた計算結果についてもこれらを整理しておくことは重要である。また、ずれ変位量はトレンチ調査で得られる平均変位速度と関連するため、この観点からも変位量を整理しておく意義がある。

表-4 に、表-3 に対応する断層面上での平均変位量の成分およびそれらの比を示す。ここで、 v_{1z} は断層面 1 上での平均変位ベクトルの z 方向成分であり、縦ずれ変位量に相当する。また、 v_{2y} は断層面 2 上での平均変位ベクトルの y 方向成分であり、横ずれ変位量に相当する。なお、断層面上での平均ずれ変位量の大きさについては、松田式に基づいて剛性を決定しているため、各断層面上でのずれ変位ベクトルのノルムは 1.0m 程度 (断層長 10km の 1/10000) となる。表-4 より、スリップパーティショニング強度が大きいケースの多くについて、横ずれ変位量と縦ずれ変位量の比 ($|v_{2y}|/|v_{1z}|$) は 0.8 から 0.9 の範囲内にあることがわかる。変位量の比が 1.0 を上回る場合がいくつかあるが、これらのケー

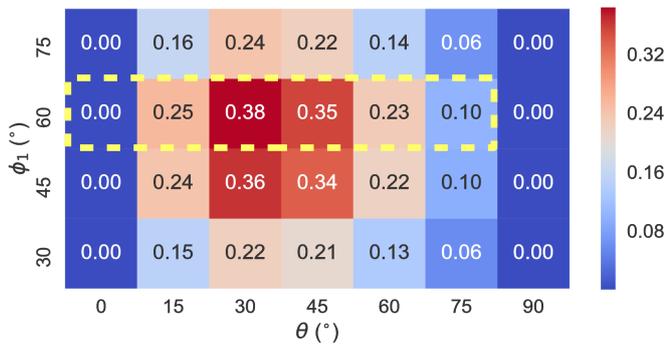


図-7 $\Delta = 10 \text{ km}$, $\phi_2 = 90^\circ$ のケースにおける I_{sp} と θ および ϕ_1 の関係 (色は I_{sp} の大きさ (m^2) を表す)

スでは $\theta = 45^\circ$ という共通事項がある。 $\theta = 45^\circ$ の場合は y 方向に沿って鉛直に配置された断層面 2 について理想的な横ずれを生じさせやすい応力状態にであるため、横ずれ変位量と縦ずれ変位量の比が 1.0 を上回るものと解釈できる。断層面 2 に横ずれを積極的に生じさせるパラメータの組み合わせが最もスリップパーティショニングを生じさせる組み合わせではないことに留意されたい。

本研究で得られた縦ずれと横ずれの変位量の比に関する知見は、現地調査時にスリップパーティショニングが疑われる場合に、スリップパーティショニングかどうかを判断するための基礎情報として活用できると考える。

(3) 断層面上ずれ変位分布および地表での変位分布

図-7 は、 $\Delta = 10 \text{ km}$, $\phi_2 = 90^\circ$ のケースにおいてスリップパーティショニング強度 I_{sp} を θ (横軸) と ϕ_1 (縦軸) の関数として示したものであり、色は I_{sp} の大きさを示している。これまでに示したように、 $\theta = 30^\circ$, $\phi_1 = 60^\circ$ 周辺で I_{sp} が大きくなっているのが確認できる。紙面の都合上、全 784 ケースについての断層面上ずれ変位分布および地表での変位分布を示すことは困難であるため、ここでは $\Delta = 10 \text{ km}$ かつ $\phi_2 = 90^\circ$ のケースのうち、 $\phi_1 = 60^\circ$ に固定して θ を変化させた際の断層面上のずれ変位分布および地表での変位分布を示す (図-7 の黄色破線内のケース)。

図-8 に、図-7 の黄色破線内のケースに対応する断層面上でのずれ変位分布を示す。図-8(a) は、断層面に直交する方向に最大圧縮軸が配置される ($\theta = 0^\circ$) ため、傾斜角が 90° である断層面 2 においては、ほとんど変位を生じていない。他方、断層面 1 では横ずれ成分が全くない逆断層成分のみが確認できる。 θ を増加させるにつれて、断層面 2 で横ずれ成分が増加していく様子が見られる。一方、断層面 1 上では逆断層成分のみであった

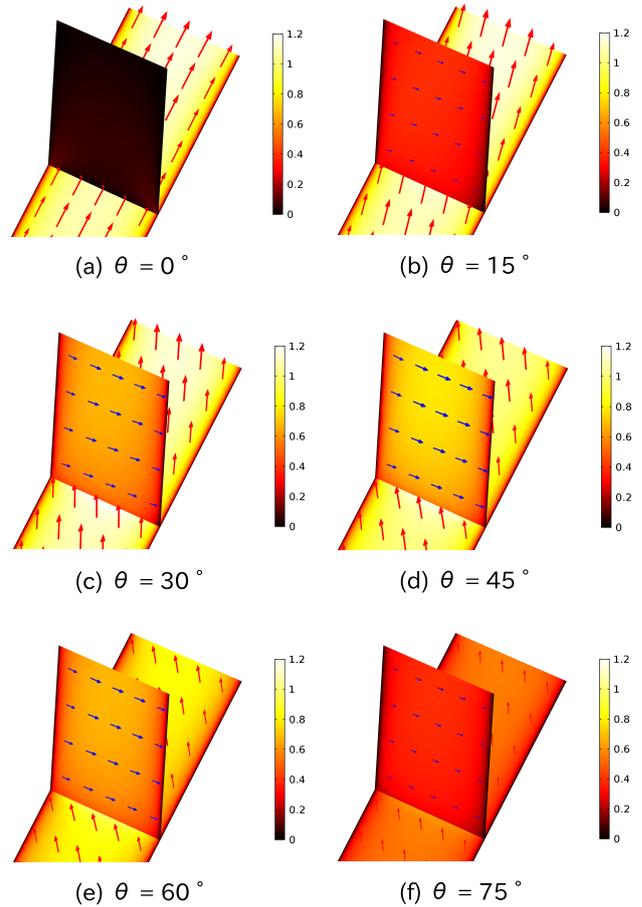


図-8 断層面上ずれ変位の分布様式 (色は変位 (m) の大きさを表す)

状態から横ずれ成分が生じ、結果として断層面 1 において斜めずれが確認されるようになる。なお、 $\theta = 45^\circ$ 時に断層面 2 上での横ずれ成分が最大となる。ただし、スリップパーティショニング強度 I_{sp} が最大となるのは、 $\theta = 30^\circ$ (図-8(c)) の場合である。また、図-8(b) から (f) における断層面 1 および断層面 2 の横ずれのセンスは同じで、両断層ともに「右横ずれ」である。

θ を変化させる図-8(a) から (f) の一連の結果は、主応力軸を $x-y$ 面内で回転させた場合そのものであるが、主応力回転が断層面上の変位の方向・大きさに影響を及ぼしていることは明らかである。この結果は、仮に断層面形状および地表でのずれ分布が確定した場合、断層面周辺の最大圧縮応力の方向を逆問題として推察可能となることを示唆している。

図-7 の黄色破線内のケースについて、地表 x 軸上で算出された x, y, z 方向の各変位成分 (u, v, w) をそれぞれ示したものが、図-9, 図-10, および図-11 である。各図において、 $x = 10$ の位置が断層面 1 の地表到達位置であり、この位置においてどの成分も食い違いが生じている。一方、断層面 2 の地表到達位置は $x = 5$ の位

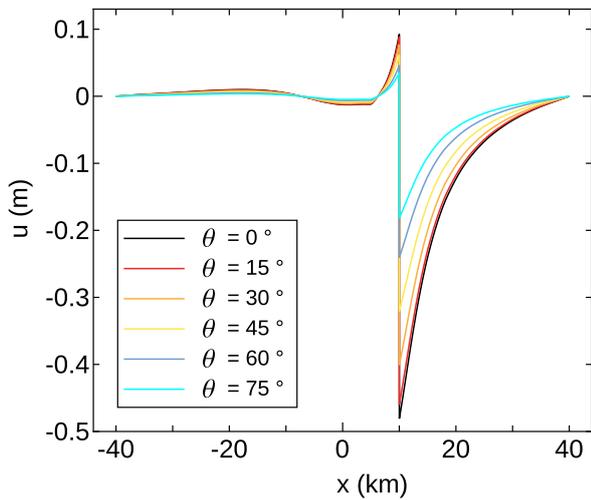


図-9 地表 x 軸 ($y = z = 0$) 上の x 方向変位 u の分布

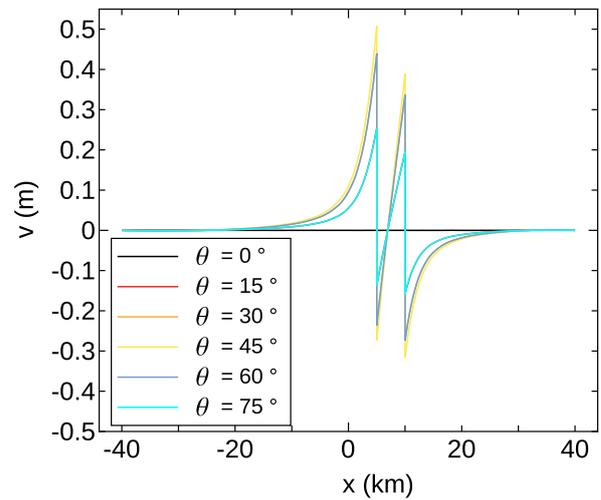


図-10 地表 x 軸 ($y = z = 0$) 上の y 方向変位 v の分布

置であるが、断層 2 は基本的に横ずれ成分のみであるため、顕著な食い違いが確認できる成分は、図-10 の y 方向変位成分のみである。なお、この傾向は今回示した $\phi_2 = 90^\circ$ のケースに限られることを付記しておく。図-9 および図-10 では、 θ が 0° である場合が最もずれ変位量の大きさが大きく、 θ が増加するにしたがってずれ変位量が小さくなっており、 θ による違いが区別しやすい。一方、図-10 では θ による違いが一定レベル以上確認できるが、 θ が 15° の場合と 75° の場合については、ほとんど差異がない。

地表面での変位分布についても、断層面上のずれ変位と同様に主応力の回転の影響が確認できる。一般に、断層面周辺の応力場を事前に高い精度で取得することは困難であるため、主応力を回転させるなどのパラメトリックスタディーは、社会基盤への断層変位の影響を考察する上で一定の意義があると考えられる。今回の取り組みでは、主応力の回転のほか、多くのパラメータの組について断層面上ずれ変位と地表での変位様式等、実に多くの情報を得ることができた。しかしながら、得られた情報を効率的に活用できたとは言いがたい。今後は、得られた結果を効率的に解析・解釈し、重要な知見・特徴を抽出するためのデータマイニングについても検討する必要がある。

4. まとめと今後の展望

逆断層と横ずれ断層の組み合わせについて、スリップパーティショニングが発生しやすいと考えられる条件を有限要素法によって探索した。今回の検討を通じて得られた結果は以下のとおりである。

1. 断層面上の平均ずれ変位を用いてスリップパーティショニング強度を定義した。

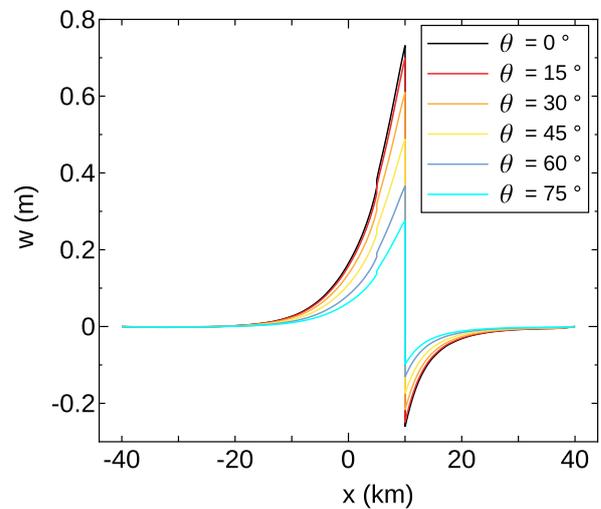


図-11 地表 x 軸 ($y = z = 0$) 上の z 方向変位 w の分布

2. スリップパーティショニング強度が大きくなるパラメータの組を見出した ($\theta = 30^\circ, \phi_1 = 60^\circ, \phi_2 = 90^\circ$).
3. スリップパーティショニング強度に対する各パラメータの感度に関する知見を得た (θ と ϕ_1 の感度が高い).
4. 断層面上の縦ずれ変位量と横ずれ変位量の比を調べた結果、スリップパーティショニング強度が大きいケースのほとんどは、その比が 0.8 から 0.9 程度であった。

今後は、正断層と横ずれ断層のスリップパーティショニングについての検討を実施するとともに、得られる結果を熊本地震の事例等、調査結果と比較・議論する。

謝辞: 本研究の一部は、文部科学省 科学技術基礎調査等委託事業「活断層の評価に関する調査研究」の一

部として実施しました。また、産業技術総合研究所 近藤久雄 博士からスリップパーティショニングの事例について有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 勝部亜矢, 近藤久雄, 谷口 薫, 加瀬祐子: 2014 年長野県北部の地震 (Mw6.2) に伴う地表地震断層の分布と変位量, 地質学雑誌, Vol. 123, No. 1, pp. 1–21, 2017.
- 2) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Eearth Planets Space*, Vol.68, No. 1, pp. 1–12, 2016.
- 3) Toda, S., Kaneda, H., Okada, S., Ishimura, D., and Milodon, Z.K.: Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, *Eearth Planets Space*, Vol.68, 188, doi:10.1186/s40623 016 0560 8, 2016.
- 4) Wesnousky, S.G., and Jones, C.H.: Oblique slip, slip partitioning, spatial and temporal changes in the regional stress field, and the relative strength of active faults in the Basin and Range, western United States, *Geology*, Vol. 22, No. 11, pp. 1031–1034, 1994.
- 5) King, G., Klinger, Y., Bowman, D., and Tapponnier, P.: Slip-partitioned surface breaks for the Mw 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China, *Bull. Seismol. Soc. AM.*, Vol. 95, No.2, pp. 731–738, 2005.
- 6) Ikeda, Y., Iwasaki, T., Sato, H., Matsuta, N., and Kozawa, T.: Seismic reflection profiling across the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line at Matsumoto, Central Japan, *Eearth Planets Space*, Vol. 56, No. 12, pp. 1315–1321, 2004.
- 7) 松多信尚, 池田安隆, 東郷正美, 今泉俊文, 佐藤比呂志, 戸田 茂, 田力正好, 加藤 一, 石山達也, 井川 猛, 松本 反射法地震探査グループ: 糸魚川—静岡構造線活断層系北部・松本地域における反射法地震探査, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 82, pp. 45–55, 2007.
- 8) Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B.: Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 120, No. 3, pp. 562–580, 1994.
- 9) 谷 和夫: ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 215–222, 1994.
- 10) Anders, M. and Hori, M.: Three-dimensional stochastic finite element method for elasto-plastic bodies, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 51, No. 4, pp. 449–478, 1999.
- 11) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 堀 宗朗, 岩下和義, 鈴木崇伸: 逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp. 577–584, 2000.
- 12) 鬼塚信弘, 堀 宗朗, 岩下和義, 鈴木崇伸: 基盤の逆断層運動の数値実験における地盤変形の解析, 土木学会応用力学論文集, Vol. 4, pp. 459–466, 2001.
- 13) 竿本英貴, 吉見雅行, 国松 直: 横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程に関する DEM シミュレーション, 土木学会地震工学論文集, 第 28 巻 (CD-ROM, ISSN: 1880–4624), 2005.
- 14) Johansson, J. and Konagai, K.: Fault induced permanent ground deformations: experimental verification of wet and dry soil, numerical findings ’ relation to field observations of tunnel damage and implications for design, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 27, No. 10, pp. 938–956, 2007.
- 15) Lin, M.-L., Chung, C.-F. and Jeng, F.-S.: Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip, *Eng. Geol.*, Vol. 88, No. 1–2, pp. 70–89, 2006.
- 16) 谷山 尚: 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯—DEM による解析—, 土木学会論文集 C, Vol. 64, No. 3, pp. 48–494, 2008.
- 17) 中川英則, 堀 宗朗: 非線形スペクトル確率有限要素法を用いた地表地震断層のシミュレーション, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 2, pp. 225–241, 2011.
- 18) Albertz, M. and Lingrey, S.: Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 1. Structural analysis, *Tectonophysics*, Vol. 576–577, pp. 133–149, 2012.
- 19) Bowman, D., King, G., and Tapponnier, P.: Slip partitioning by elastoplastic propagation of oblique slip at depth, *Science*, Vol. 300, No. 16, pp.1121–1123, 2003.
- 20) 竿本英貴: 松田式を考慮した FEM による断層変位評価とその上町断層系への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) [特] 地震工学論文集, 印刷中.
- 21) 池田隆司, 小村健太郎, 飯尾能久, 新井崇史, 小林健太, 松田達生, 島田耕史, 田中秀実, 富田倫明, 平野聡: 1995 年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査, 防災科学技術研究所研究報告, 第 61 号, 2001.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SLIP PARTITIONINGS ON ACTIVE FAULTS: DETECTING OCCURRENCE CONDITIONS FOR A COMBINATION OF REVERSE AND STRIKE FAULTS

Hidetaka SAOMOTO

Slip partitioning on active faults is an infrequent slip pattern since the phenomenon always requires two fault planes placing close to each other: one for the normal/reverse fault, the another one for the strike fault. However, investigating the slip partitioning is important in the earthquake hazard assessment because the slip partitioning may have taken place during the 2016 Kumamoto earthquake. This paper investigates the occurrence conditions for the slip partitioning using finite element analysis with several parameters such as the fault dip angles and the compression direction of tectonic stress. On the bases of the results for 784 case studies, the following outcomes were found: (1) the simulation results derived a parameter set that highly activates slip partitionings, (2) the simulation results revealed the sensitivity of the parameters to the slip partitioning, and (3) the ratios, produced by the strike and the reverse slip magnitudes, mostly converge into a range between 0.8 and 0.9 with the higher values of the index for slip partitioning.