3.3 三次元有限要素法による断層変位計算

(1)業務の内容

(a) 業務題目 三次元有限要素法による断層変位計算

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所	主任研究員	竿本 英貴

(c) 業務の目的

糸魚川-静岡構造線断層帯を対象として、複雑な断層形状を反映させた三次元有限要素解 析を実施し、断層面の相互作用を考慮した上で断層変位分布を明らかにする。すなわち、サ ブテーマ1で得られる断層面情報およびサブテーマ2で得られる広域応力場情報を入力とし、 断層変位を複数のシナリオについて断層変位分布を検討する。なお、複数のシナリオに関す る検討結果は、サブテーマ4におけるシナリオ設定と関連している。

- (d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約
- 1) 平成 29 年度:

糸魚川-静岡構造線断層帯への適用を念頭において、複数の断層面を取り扱うこと ができる有限要素解析プログラムのプロトタイプを構築した。また、松田式を断層面 上物性に反映させることにより、変位解析の信頼性を向上させる工夫を施した。

2) 平成 30 年度:

主としてサブテーマ 1 で得られる予定の断層面の地下形状に関する情報を解析プ ログラムに取り込み、断層帯の三次元有限要素メッシュを生成する。対象地域は、糸 魚川-静岡構造線断層帯の北部区間および中北部区間を予定している。

3) 平成 31 年度:

中南部区間についても有限要素メッシュを生成するとともに、全業務期間を通じ て作成した有限要素メッシュについて変位解析を実施し、断層面周辺の変位分布お よび断層面間の相互作用を明らかにする。また、得られた結果のまとめを行う。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

活断層周辺で地震時に地表で生じる変状を数値解析等の手法で予測することは、変状が 社会基盤に与える影響を考察する上で重要である。変形予測では、断層面形状、地下構造、 広域応力場、岩盤材料特性、松田式に代表されるスケーリング則など様々な情報を積極的 に統合・活用することが肝要である。平成29年度では、これまで有限要素法に基づく地表 変形解析に導入されてこなかったスケーリング則(松田式)を有限要素法に組み込む手法 を提案・開発した。提案手法を汎用有限要素解析プログラム(COMSOL Multiphysics)上で 実装するとともに、2枚の断層面からなる単純なモデルに適用し、最大圧縮軸の方位およ び断層面傾斜角についてのパラメトリックスタディーを実施することで、様々なシナリオ 下における地表面および断層面上での断層変位様式を得た。

(b) 業務の実施方法

複数のシナリオを検討するためには、1回のシミュレーションにかかる計算時間をより 短くする必要がある。この観点から断層面上の構成式の簡略化および広域応力場の設定に 関する簡略化を検討した。一方で数値解析の信頼性を担保するため、断層面上の物性にス ケーリング則(松田式)を組み込み、現実的な変位分布が実現される工夫を施した。これ らに関するアルゴリズムは、汎用有限要素解析プログラム(COMSOL Multiphysics)上で実 装した。

(c) 業務の成果

1) 松田式を考慮した有限要素法による断層変位評価手法について

a) 断層変位評価手法

断層変位量を推定する方法の一つは、動力学的断層破壊計算を通じて断層面内の破壊を 直接シミュレートし、これに伴う地表付近での変位場の経時変化を表層地盤下端の境界条 件とすることである。動力学的断層破壊計算は地震学の分野を中心として広く行われてお り(例えば Aochi et al., 2000; Aagaard et al., 2001;加瀬・他, 2002, Kase and Day, 2006;澤田, 2014 など)、すでにいくつかのベンチマーク問題(Harris et al., 2009) も 設定されるなど、活発に研究されている。動力学的断層破壊計算では、少なくとも岩石の 密度・P波速度・S波速度、断層面の静摩擦係数、動摩擦係数、粘着力、限界せん断変位 が物性値として必要となる。また、断層面に作用する応力場も初期条件として設定する必 要がある。

断層変位量を推定する他の方法として、松田式(後述)などに代表されるスケーリング 則を利用する方法が考えられる。断層変位の観測事例は国内外を問わず数多く報告されて いるため、報告結果をまとめることで断層長と地震時に生じた断層変位の関係性、断層長 と地震モーメントとの関係性、などのスケーリング則が国内外で数多く議論され、多くの 関係式が提案されている(Kanamori and Anderson, 1975;松田, 1975;松田・他, 1980; 武村, 1998; Wesnousky, 2008;入倉・三宅, 2001 など)。ここで挙げたスケーリング則は、 松田式(地震規模と地表地震断層長さ、および地表地震断層変位量)と地下の地震断層の モデルパラメータに基づくもの、地表地震断層および地下の地震断層のパラメータの両者 について考察したものの3種類に大別できる。とりわけ、松田の関係式からは地表地震断 層の断層長と変位量の関係が直接得られるため、これを用いることで簡便に変位量を推定 することができる。

近年、反射法地震探査等によって断層面の分布形態を2次元的あるいは3次元的に推定 することが行われるようになったため、推定された断層面形状を利用した動力学的断層破 壊計算には一定の合理性がある。しかしながら、シミュレーションで用いるパラメータが 多いこと、初期応力場を適切に推定する必要があることなどの制約のため、動力学的断層 破壊計算を利用する場合には一定以上の経験が必要となる。また、複数の断層面を考慮し

77

た上で、様々なケースの広域応力場に対する応答を求めるには多大な計算時間が必要とな るため、広域応力場は別途微小地震の発震機構から求まるもの等を導入している場合が多 く、広域応力場に関するバラつきを考慮したパラメトリックスタディーは積極的に行われ ていない。他方、松田式に代表されるスケーリング則は、実際の地震に対する調査結果か ら得られた関係式が一定以上の確度で成り立っているため、シミュレーション結果がス ケーリング則によってある程度拘束されていることも重要である。



図1 断層変位評価手法における仮定 (竿本,2018より引用)

以上の背景を踏まえ、本業務では、断層面間の相互作用を考慮した断層変位分布を推定 することおよび断層系への広域応力場の影響を評価することを目的として、動力学的断層 破壊計算よりも簡便で、スケーリング則を考慮した断層変位評価手法を有限要素法の枠組 の中で提案・開発する。

今回提案する断層変位評価手法が目指す要件は、次の(i)から(vi)のとおりである。

- (i) 設定するパラメータの数をなるべく少なくすること
- (ii) 計算時間をなるべく少なくすること
- (iii) 複数の断層面をシミュレーションに導入すること
- (iv) 広域応力場の設定方法を簡素化すること
- (v) 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

(vi) シミュレーションから得られる地表変位が松田式(後述)に代表される観測事実と整 合的であること

上述の要件を実装するため、有限要素法に次に示す仮定(I)から(IV)を導入する(図1)。

(I) 断層面上の構成関係は線形弾性と仮定する(要件(i)、(ii) への対処)

- (II) 断層面はジョイント要素によって表現する(要件(iii)への対処)
- (III) 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(iv)、(v)への対処)

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

動力学的断層破壊計算では、断層面の構成式にすべり弱化モデルが用いられるが、本研究 ではシミュレーションの安定性と高速性を勘案し、法線方向バネ剛性 kn と接線方向バネ 剛性 kt からなる線形弾性モデルとする。断層面(厚さ t)を構成する岩石材料のヤング率 を E、ポアソン比を v とすると、一般化フックの法則から各バネ剛性[(N/m)/m²] は次の ように近似できる。

$$k_{n} = \frac{E(1-\nu)}{t(1+\nu)(1-2\nu)}$$
(1)
$$k_{t} = \frac{G}{t}$$
(2)

断層変位は、接線方向バネ定数に強く依存していると考えられるが、接線方向バネ剛性に は断層長がパラメータとして入っていないため、断層長に依らず一定のバネ剛性を用いる 限り、観測事実である松田式を説明することはできない。そこで、松田式が満たされるよ うに接線方向バネ剛性を調整する。パラメータ調整の詳細は次節で述べる。

初期応力場は通常、重力による応力成分と造構応力成分の和として定められるべきであ るが、一般に地下の応力状態を推定するのは困難である。ここでは最も単純な場合を想定 し、解析モデルが造構応力を模擬した2軸圧縮応力下にあると仮定する(最大主応力 σ_1 、 最小主応力 σ_2)。ただし、主軸方向は任意であり、断層系の変位の総和が最大となる主軸 配置を探索することができるようにする。本来は重力の影響も考慮すべきであるが、今回 は断層面上にねらいのせん断応力を載荷・制御しやすい2軸圧縮としている。図1左上に 示すように、最大圧縮軸が x 軸から反時計回りに θ [rad] 回転した座標軸(x'-y' 系) を主軸とする2軸圧縮を考えた場合、x-y 系での応力成分(解析モデルに作用させる初期 応力[σ_0]) は座標変換によって次式で表される。

$$[\sigma_0] = [A^T][\sigma'][A]$$

=
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta & (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \theta \cos \theta \\ (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \theta \cos \theta & \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix} (3)$$

ここで、[A] は座標変換マトリクスである(A11 = A22 = cos θ 、A12 = -A21 = sin θ)。

次に、2軸圧縮応力 σ_1 と σ_2 の設定について述べる。 σ_1 および σ_2 の大きさについては、 どのように定めても松田式を満たすように断層面上の接線方向バネ剛性を調節するため、 任意性がある。今回は、 σ_1 = 30 MPa、 σ_2 = 10 MPa と設定した。パラメータ数の観点 では、動力学的断層破壊計算が11 個程度であるのに対し、提案手法では7 個(E、 ν 、 t、 kt、 σ_1 、 σ_2 、 θ) となり、半数とまではならないが一定レベルの削減となった。

最後に、提案する簡易評価手法と動力学的断層破壊計算との比較を行い、簡易評価手法 の立場を明らかにしておく。動力学的断層破壊計算では、地殻応力が断層面上の岩石材料 の破壊強度に達した際、その位置の岩石材料はすべり変位をともなって残留強度に応力が 降下し、やがて運動が静止するまでの状態を時々刻々求める。運動が静止した際、地表で 観察される永久的なすべり変位が観測される。なお、後述の松田式によれば、この地表で のすべり変位の大きさが経験的に地表で観察される断層長に比例するとされる。一方、提 案手法では断層面上の岩石は線形弾性と仮定しているため、応力降下は表現できない。言 い換えれば、断層面上の岩石要素のせん断応力-すべり変位関係は無視し、運動静止後の地 表における変位分布のみを松田式を援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、応力-変位関係に注意を払っていないことに加え、断層周辺の初期応力分 布についても2軸圧縮という仮定で簡単化している。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困難であると考えており、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。すべり変位の駆動 カとなる断層面へのせん断応力として、10MPa を2軸圧縮によって断層面に載荷するが、 このせん断応力値についても任意性があり、せん断応力値が変化すれば断層面上のせん断 剛性を松田式がほぼ満たされるように再調整することになる。また、後述のように断層面 上のせん断剛性を完全な横ずれ断層でキャリブレーションしているが、設定する断層面の 走向・傾斜角、2軸圧縮の方向に応じて断層面に作用するせん断力が変化するため、横ず れ断層でキャリブレーションした剛性を用いた場合、松田式が完全には満たされない場合 がある。ただし、オーダが異なるほど大きくずれることはない。このような松田式からの ずれは、断層面配置および広域応力場の方位の影響を反映しているものと解釈する立場を とる。

b) 松田式を満たす断層面上のせん断剛性の決定

松田(1975)によれば、気象庁マグニチュード M_Jと地表地震断層トレース長L[km]の関係性および気象庁マグニチュード M_Jと変位量D[m]の関係性がそれぞれ次のように提案されている。

 $\log L = 0.6M_J - 2.9 \quad (4)$ $\log D = 0.6M_J - 4.0 \quad (5)$

これらの式より、地表地震断層長L[km]と地表地震断層の変位量D[m]の関係は次式となる。

$$D = \frac{L}{10^{1.1}}$$
 (6)

なお、松田式の適用範囲は関係式の作成に用いたデータセット(明治以降に生じた気象庁 マグニチュードが 6.2 以上となる 14 の内陸地震)から、地表地震断層長が 10~80km 程度 までの断層について適用可能と推察できる。本研究では観測事実を重視し、シミュレーショ ンから得られる地表変位が松田式と整合するように断層面上の接線方向バネ剛性を決定す る。

ここでは、図2に示す横ずれ断層モデルを用いて松田式が満たされる断層面上の接線方 向バネ定数を検討する。なお、用いる初期応力場は σ_1 = 30MPa、 σ_2 = 10MPa(深さ方向 に一定)である。断層面は断層面上に最大せん断応力 10MPa が作用するように最大圧縮応 力 σ₁の軸に対して 45 °回転させている。断層長 L を 5 km から 80 km まで 5 km 刻みで変化 させた際に断層線中央部で得られる相対変位(ずれ変位)ベクトルのノルム(以下、相対 変位ベクトルのノルムをネットスリップと記述)が式(6)で表される関係を満たすように 断層面上の接線方向バネ剛性 kt を決定する。なお、断層幅は断層長Lに依らず深さ方向 に 20km(傾斜角 90°)と設定している。逆断層モデルではなく横ずれ断層モデルを用いて バネ剛性を同定することの理由は、松田式の元となったデータに横ずれ断層の事例が多い こと、2軸圧縮によって断層面上にねらいのせん断応力を載荷しやすいことに依っている。 解析モデルは、最も自由度が大きいL = 80 kmの場合で、約20万個の四面体2次要素か らなっており、断層面については約1.2万個の3角形要素(最大寸法1km)から構成され る。また、地表を除く境界は固定壁と設定している。地殻のヤング率およびポアソン比は、 それぞれ 45GPa、0.3 とし、断層面の厚さ t は 0.5mと設定した。断層面上の法線方向剛性 については、式(1)によって算出した値を用いた。今回、数値シミュレーションの実行には 有限要素法に基づく汎用工学ソフトウェア、COMSOL Multiphysics® を用いた。なお、単純 なベンチマーク問題を通じて COMSOLMultiphysics®と Okada のディスロケーションモデル (Okada, 1985)を比較し、両者から求まる変位分布が十分一致することはすでに確認して いる。

図3に接線方向バネ剛性と断層長の関係を示す。ここでは、断層周辺母岩のヤング率が 45GPaのケースのほか、15、25、35GPaとした場合の結果(ポアソン比0.3)も合せて示し ている。断層長が5kmの場合のみ断層周辺母岩のヤング率が異なることに起因して接線方 向バネ剛性に多少の差異が見られるが、断層長が10km以上のケースではヤング率に起因 する違いはほとんど見られず、接線方向バネ剛性の周辺母岩のヤング率依存性は小さいと 言える。また、断層長の増加に対して、反比例的に接線方向バネ剛性が低下する傾向があ る。この理由は、次のように説明できる。断層長がn倍になると松田式では変位がn倍に なる。断層面上のせん断応力が断層長のn倍操作によらず一定であるとすれば、断層長が n倍された断層面の接線方向バネ断剛性を1/n倍しないと松田式から得られる変位n倍が 満たせない。以上が、接線方向バネ断剛性が断層長に対して反比例する理由であると考え る。当然ながら、図3の関係は2軸圧縮応力を σ_1 =30MPa、 σ_2 =10MPaと設定した場合 (断層面上に作用するせん断応力が10MPaの場合)に限られる。2軸圧縮応力の設定を変 更する場合は、設定した応力に対応する図3の関係を求めておく必要がある。なお、図3 の関係に対するメッシュ分割数依存性(断層線を何分割するか)も別途検討しているが、 分割数依存性は大きくないことを確認している。



図2 松田式を満たす断層面上接線方向バネ剛性を設定するための横ずれ断層モデ ル



3 松田式を満たす断層面上接線方向バネ剛性の断層長依存性 (竿本, 2018より引用)



図4 松田式を満足するバネ剛性を用いた場合と一定のバネ剛性を用いた場合の比較 (竿本,2018より引用)

図4は、接線バネ剛性に一定値を用いた場合と、図3の関係を用いた場合の各ケースに ついて断層線中央部におけるネット変位量をプロットしたものである。当然ながら、図3 の関係を導入した場合は、松田式から得られる変位量と合致する。一方、一定値(断層長 30km で松田式を満たす値)を用いた場合、断層長が大きい場合には変位を過小評価、断層 長が小さい場合には変位を過大評価する傾向がある。また、シミュレーションの計算時間 については、自由度が最も大きい断層長 80km のケース(約84万自由度)で約100秒であっ た。用いた計算機の性能は、Intel® Xeon® E5-2697 (28 コア)・256GBメモリである。

以上、本業務では松田式を満たすように断層面上の接線方向バネ剛性を設定したが、他 のスケーリング則についても、変位量と対応する物理量(例えば断層面の面積など)の関 係が求まる場合は、同様の手続きでシミュレーションに導入可能であると考える。以降の 数値シミュレーションでは、今回の検討を通じて得られた図3の関係を断層面上の接線方 向バネ剛性に導入する。

2) 2枚の断層面に対するパラメトリックスタディーの実施

来年度以降、現地調査結果に基づく断層面情報から複数面の断層面をモデル化し、様々 なケースについての断層変位分布を解析することになる。これに備え、2枚の断層面を仮 想的に配置したモデルについてのパラメトリックスタディーを行い、構築したプログラム から得られる情報について例示する。なお、本業務で用いるプログラム(のベース部分) は、すでに大阪湾周辺の上町断層帯へ適用しており(竿本,2018)、上町断層を含む10面 の断層についての有限要素モデル化および断層変位解析の事例がある。

a) 問題設定

2枚の断層面配置および広域応力場の設定は、図5のとおりである。断層面は、断層面 1 (浅部)および断層面2(深部)から成り、各断層面のサイズは、断層長さ20km,断層 幅 10km である。断層面1の傾斜角は45°、断層面2の傾斜角々は、パラメータであり、 0°から90°まで15°刻みで変化させる。なお、 ϕ が45°の場合は2枚の断層面の傾斜 角が一致し、1枚の大きな断層面(断層長さ20km,断層幅20km)となる。また、広域応力 場の設定は松田式を満たす断層面上接線バネ剛性を定めたときと同じであり、x 軸からの 回転角をパラメータ(θ)としている。今回、 θ は0°から165°まで15°刻みで変化さ せた。結局、7通りの ϕ および12通りの θ について解析しているので、トータルで84 ケースについての結果が得られている(パラメータは、 ϕ と θ の2系列)。

図6に作成した有限要素メッシュの例(ϕ =30°)を示す。モデル全体は61217個の四面体2次要素から成る。断層面は、992個の三角形2次要素から成り、要素間のピッチ(断層面境界部)は、1kmと設定した。なお、断層面2の傾斜角 ϕ を変更した場合は、COMSOL Multiphysics内で与えた傾斜角に対応する有限要素メッシュが自動的に生成されるようにプログラミングしている。

84



図5 2枚の断層面配置およびパラメトリックスタディーのための問題設定



図6 有限要素メッシュの作成例 (ϕ =30°の場合)

b)地表面での鉛直変位分布様式と断層面上すべり変位分布様式

図7から図12は、得られた数値解析結果の一部を抜粋して掲載したもので、 $\theta=0^{\circ}$ の ケース($\phi=15^{\circ}$, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°)、 $\theta=45^{\circ}$ のケース($\phi=15^{\circ}$, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°)、 $\theta=90^{\circ}$ のケース($\phi=15^{\circ}$, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) についての地表における鉛直変位分布と断層面上のすべり変位分布をそれぞれ示している。 $\phi=0^{\circ}$ のケースについては、 θ によらず、断層面2上の変位レベル小さかった。紙面の都 合上 $\phi=0^{\circ}$ のケースは掲載していない。例えば、 $\theta=0^{\circ}$ 、 $\phi=0^{\circ}$ の場合では、断層面1 の最大すべり変位量は 2.5m程度であるのに対し、断層面2の最大すべり変位量は 0.3m 程度であった。

まず、↓=45°のケースについての特徴を述べる。このケースでは、断層面1と断層面2 が1つの平面となり、断層長 20km、断層幅 20km の断層面を1枚設定した場合と等しくな る。この場合は、θの値に依らず断層面1と断層面2の境界線上での変位は連続的である ことが確認できる(図 7(C)、図 9(C)、図 11(C))。これらのケースについての変位分布様 式は、1枚の断層面(20km×20km)を設定して得られる変位分布様式と完全に一致する。 θに応じてすべり変位ベクトルの方向は変化するが、断層面1と断層面2の平均的なすべ り変位ベクトルの向きはほぼ同じであり、断層面間ですべり方向の差異はほとんど見られ ない。地表の鉛直変位分布様式については、 $\theta = 0^\circ$ の場合は y=0のライン(x 軸)について 対称(図7(C))であるのに対し、θ=45°のケースでは、非対称(図9(C))となっている のが特徴である。 θ =90°のケース(断層線走向方向が最大圧縮方向)では、 θ や ϕ に依 らず変位レベルが小さいことがわかる。θ=90°の場合は断層面を劈開するような応力場 であり、断層面上に食い違いが生じにくい状態であると推察できるが、有限要素解析結果 でも同様の結果となっている。θが0°や15°のケースなど、最大圧縮方位が断層線の走 向方向に直交する場合は断層面1と断層面2の接合部(キンク部)でのすべり変位が急激 に小さくなる傾向が顕著である。一方、θが45°~90°の場合は、断層面間の接合部です べり変位が抑制される傾向が緩和され、断層面1と断層面2で変位が滑らかに連結される。 実際の断層面で今回検討したようなキンク部が存在するケースは想定されるため、今回の 報告のようにキンク部における変位抑制機構を検討することは、一定の意味があると考え られる。

今回のパラメトリックスタディーで最も特徴的であるのは、図 10(E)や図 10(F)で顕著 に確認できるスリップパーティショニングである。これらのケースでは断層面1に生じて いるすべり変位方向と断層面2に生じているすべり変位方向は明らかに異なっていること が確認できる。次節では、このスリップパーティショニングの評価に焦点を当て、評価指 標の一例を示すとともに、提案したスリップパーティショニング評価指標のθおよびφ依 存性を明らかにする。

86







(B) θ = 0 [deg], φ = 30 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(C) θ = 0 [deg], φ = 45 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

```
図 7 θ = 0 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布
(上からφ = 15, 30, 45 [deg])
```



(D) $\theta = 0$ [deg], $\phi = 60$ [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(E) θ = 0 [deg], φ = 75 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(F) θ = 0 [deg], φ = 90 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

図 8 θ = 0 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布 (図 7 の続き、上から φ = 60, 75, 90 [deg])



(A) θ = 45 [deg], φ = 15 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(B) θ = 45 [deg], ϕ = 30 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(C) θ = 45 [deg], ϕ = 45 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

図 9 θ = 45 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布 (上からφ = 15, 30, 45 [deg])



(D) θ = 45 [deg], ϕ = 60 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(E) θ = 45 [deg], φ = 75 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(F) θ = 45 [deg], φ = 90 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

図 10 θ = 45 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布
 (図 9 の続き、上からφ = 60, 75, 90 [deg])







(B) θ = 90 [deg], φ = 30 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(C) θ = 90 [deg], φ = 45 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

図 11 θ = 90 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布 (上からφ = 15, 30, 45 [deg])



(D) θ = 90 [deg], φ = 60 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(E) θ = 90 [deg], φ = 75 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)



(F) θ = 90 [deg], ϕ = 90 [deg] の場合の地表での鉛直変位分布(左)と断層面上すべり変位分布(右)

図 12 θ = 90 [deg]の場合の地表での鉛直変位分布と断層面上すべり変位分布 (図 11 の続き、上からφ = 60, 75, 90 [deg])



図 13 スリップパーティショニングの評価方法に関する説明(角度βで評 価)

c) スリップパーティショニングの評価

断層面上のすべり変位分布より、断層面1のすべり変位の方向と断層面2のすべり変位 の方向が異なっているケースが確認できる(例えば図10(E)右)。この状態は、スリップパー ティショニングと考えることができる。ここではスリップパーティショニングの評価指標 を提案し、どのような条件下でスリップパーティショニングが生じやすいのかについて検 討した。

図 13 にスリップパーティショニングの程度を評価するための指標(角度 β)の定義を示 す。ここでは断層面1の平均的なすべり変位ベクトルと断層面2の平均的なすべり変位ベ クトルの方向が直交している場合に最もスリップパーティショニングの程度が強いと考え た。今回はすべりの方向のみに着目して評価指標を提案しているが、これ以外にもスリッ プパーティショニングの程度を表しうる評価指標が定義できることに留意されたい。

今回実施したパラメトリックスタディーの全ての結果について図 13 で示した角度 $\beta を$ 求めてまとめたものが、図 14 である。図 14 より、 ϕ が 45°の場合(2枚が1つの平面を なす場合)、角度 β は、 θ によらず小さい値となっている。 ϕ が 90°の場合は、どの θ につ いても角度 β が最大となることが見て取れる。角度 β は、 θ よりも ϕ 依存性が強く出てい る。以上のように、2面の断層面に生じるスリップパーティショニングは、深部断層面の 傾斜角が 90°となる場合に生じやすいということが、今回のパラメトリックスタディーか ら示唆される。 図 15 は、角度 β が大きく出た 2 ケース (θ =15°、 ϕ =90°のケースおよび θ =30°、 ϕ =90°のケース) について、断層面上のすべり変位分布を示したものである。 θ =15°のケース (図 15(A))の方が角度 β は大きい(67.8°)。ところが、断層面 2 のすべり変位レベル が θ =30°のケース (図 15(B))よりも明らかに小さい。視覚的には、 θ =30°のケースの方 がスリップパーティショニングの度合いが強いようにも見て取れる。この結果は、スリッ プパーティショニングの評価は角度 β のみではなく、他の要素も勘案した上で評価指標を 考案する必要があることを示唆している。例えば、角度 β に加えて各断層面のすべり変位 レベルが一定以上あることも考慮する等。どのような指標が適切であるのかどうかは、今後の課題としたい。角度 β のみでもスリップの方向が異なるかどうかのチェックは可能で あるため、完全とは言えないまでもスリップパーティショニングを評価するための指標と して一定レベル以上は機能していると考える。



図 14 角度 β の θ ・ ϕ 依存性

(色付きタイル内の数値は角度 βの大きさを表しており、色が赤いほどスリップパー ティショニングの度合いが強いことを表す)



図 15 スリップパーティショニングの程度を表す指標(角度β)が大きい場合のす べり変位分布様式: (A) θ=15°、φ=90°、(B) θ=30°、φ=90°

(d) 結論ならびに今後の課題

松田式を考慮した有限要素法に基づく断層変位評価手法を提案・実装した。2枚の断層面 からなる単純なモデルについてのパラメトリックスタディーを実施することで、複数の断層 面が考慮可能であることを示すとともに、数多くの解析条件を検討可能であることを示した。

今回の単純な解析モデルにおいても、深部断層傾斜角が地表変位分布に与える影響や、ス リップパーティショニングが生じやすい断層面配置と最大圧縮応力方位の組合せが定量的に 明らかになる(θ=15°かつφ=90°の場合)など、2枚の断層面の相互作用に関するいくつ かの知見を得ることができた。来年度以降、本手法を糸魚川ー静岡構造線断層帯に適用して いく。

(e) 引用文献

Aagaard, B.T., Heaton, T.H. and Hall, J.F., Dynamic Earthquake Ruptures in the Presence of Lithostatic Normal Stresses: Implications for Friction Models and Heat Production, B. Seismol. Soc. AM., 91, 6, 1765-1796, 2001.

Aochi, H. and Fukuyama, E. and Matsu' ura, M., Selectivity of spontaneous rupture propagation on a branched fault, Geophys. Res. Lett., 27, 22, 3635-3638, 2000.

Harris, R.A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E., Aagaard, B.T., Ampuero, J.-P., Bhat, H., Cruz-Atienza, V.M., Dalguer, L., Dawson, P., Day, S., Duan, B., Ely, G., Kaneko, Y., Kase, Y., Lapusta, N., Liu, Y., Ma, S., Oglesby, D., Olsen, K., Pitarka, A., Song, S., and Templeton, E., The SCEC/USGS Dynamic Earthquake Rupture Code Verification Exercise, Seismol. Res. Lett., 80, 119-126, 2009. 入倉孝次郎・三宅弘恵, シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 6, 849-875, 2001.

Kanamori, H., and Anderson, D.L., Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 5, 1073-1095, 1975.

Kase, Y. and Day, S. M., Spontaneous rupture processes on a bending fault, Geophys. Res. Lett., 33, L10302, 2006.

- 加瀬祐子・堀川晴央・関ロ春子・佐竹健治・杉山雄一,上町断層系の動的破壊過程の推定, 活断層・古地震研究報告,2,325-340,2002.
- 松田時彦,活断層から発生する地震の規模と周期について,地震第2輯,28,3,269-283, 1975.
- 松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文,1896年陸羽地震の地震断層,東京大学地震研究 所彙報,55,795-855,1980.
- Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 4, 1135-1154, 1985.
- 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),印刷中(2018.2.17 受理).
- 澤田昌孝,動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案,電力中央研究所研 究報告,N14007, 2014.
- 武村雅之,日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被

害との関連, 地震第2輯, 51, 211-228, 1998.

Wesnousky, S.G., Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture, Bull. Seism. Soc. Am. 98, 4, 1609-1632, 2008.