

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

竿本 英貴¹

¹正会員 博(工) 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

活断層周辺で地震時に生じる地表変形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。本論文では、これまで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一手法を提案する。提案手法を上町断層系に適用し、得られた変位量をボーリング調査結果との比較を行い、一定の確度を有することを確認した。次いで、変位場の広域応力状態に対する依存性や断層面間の相互作用について検討し、変位が最大化される圧縮軸の方角や生駒断層と上町断層の相互作用についての知見を得た。

Key Words: *Scaling law, surface rupture, Matsuda's equation, FEM, Uemachi fault system*

1. はじめに

1999年トルコ・イズミット地震、および同年に発生した台湾・集集地震では、地表近くの断層が大きくずれ、地震動のみならず断層変位が地表に現れることによってインフラストラクチャーに大きな被害をもたらした。我が国においても、断層がずれ動くことによって、地表に変状が現れる事例は、たびたび確認されている。近年断層変位が確認された事例として、2014年長野県神城断層地震および2016年熊本地震が挙げられる。勝部ら¹⁾は、2014年長野県神城断層地震で現れた長さ8 km程度の地表地震断層に沿って43地点で変位分布を調査し、最大上下変位量が1.4 m程度であったことを報告している。また、Shirahama et al.²⁾の2016年熊本地震に対する現地調査では、布田川断層に沿う複数の地表地震断層が確認されており、益城町堂園地区では最大2.2 mの横ずれ変位が計測されている。

いずれの地震においても地表で観測された変位量は構造物の機能を失わせるには十分な大きさであり、地震時地表変位について対策を講じておく必要がある。対策を講じるためには、地表でどの程度の変位が生じるかを事前に把握しておくことが肝要である。この課題に対して、数値シミュレーションが地表変位を想定する際のツールとして重要な役割を果たすことは広く認知されており、土木分野ではこれまでに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元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^{3)–13)}。これらの研究の多くは表層地盤を対象とした

ものであり、用いられる有限要素の構成式や個別要素間の力学モデルは弾塑性モデルが標準的に用いられる。また、ほとんどの研究では表層地盤下端に入力される変位を境界条件として設定している。当然ながら、表層地盤下端に入力される変位量は、トレンチ調査によって過去の地震時変位が明らかな場合を除いて、何らかの方法に基づいて変位量を推定することになる。本研究は、表層地盤下部に入力される変位量をシミュレーションによって推定しようとするものである。

表層地盤下端に入力される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 and Fukuyama,¹⁴⁾ Aagaard et al.,¹⁵⁾ 加瀬ほか,¹⁶⁾ Kase and Day,¹⁷⁾ 澤田¹⁸⁾ など)、すでにいくつかのベンチマーク問題¹⁹⁾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、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。

表層地盤下端に入力される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 ANDERSON²⁰⁾, 松田²¹⁾, 松田ほか²²⁾, 武村²³⁾, 入倉・三宅²⁵⁾, Wesnousky²⁴⁾ など)。関係式からは地表で観察される断層長と変位量の関係などが得られるため、簡便に変位量を推定することができ、これを表層地盤への入力と設定できる。

近年、反射法地震探査等によって断層面を2次元あるいは3次元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、一定以上の計算時間が必要となること、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。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、スケーリング則によって地震時地表変位を推定することも重要である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、表層地盤下端に輸入される変位量を推定することおよび複数の断層からなる断層系への広域応力場の影響を簡便に評価することを目的として、動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地表変位簡易評価手法を有限要素法の枠組の中で提案する。次いで、提案手法を複数の断層面からなる上町断層系に適用し、断層系が最もアクティブになる広域応力場を探索する。この応力状態の探索は、土木構造物を設計する場合や動力学計算を実施するにあたり、シビアな応力条件を設定する際の基礎情報となる。最後に、上町断層系を構成する各断層面の相互作用について議論する。

2. FEMに基づく地震時地表変位の簡易評価手法について

今回提案する手法が目指す要件は、次の (a) から (f) のとおりである。

- (a) 設定するパラメータの数をなるべく少なくすること
- (b) 計算時間をなるべく少なくすること
- (c) 複数の断層面をシミュレーションに導入すること
- (d) 広域応力場の設定方法を簡素化すること
- (e) 広域応力場の影響を導入し、断層系をアクティブにする応力条件を探索すること
- (f) 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 (1) から (4) を導入する (図-1)。

- (1) 断層面上の構成関係は線形弾性と仮定する (要件

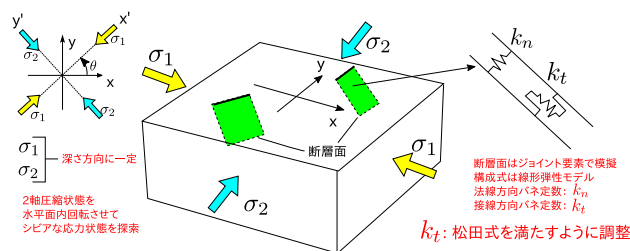


図-1 地表変位簡易評価手法の概要

(a), (b) への対処)

- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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 (f) への対処)

動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 k_n と接線方向バネ剛性 k_t 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 ν とすると、一般化フックの法則から各バネ剛性 $[(N/m)/m^2]$ は次のように近似できる。

$$k_n = \frac{E(1-\nu)}{t(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{G}{t} \quad (2)$$

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章で述べる。

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ケースを想定し、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、断層系がアクティブになる主軸配置を探索することができるようになる。また、重力に起因する応力は考慮しない。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 $[\sigma_0]$ は座標変換によって次式で表される．

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

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

ここで， $[A]$ は座標変換マトリクスである ($A_{11} = A_{22} = \cos \theta$, $A_{12} = -A_{21} = \sin \theta$) ．

次に，2 軸圧縮応力 σ_1 と σ_2 の設定について述べる．まず，地震前後における断層面上のせん断応力の降下量 (応力降下量) は，さまざまな地震について調べられており，おおむね数 MPa から 10 MPa 程度と報告されている (例えば，釜江・入倉²⁶⁾，壇ほか^{27),28)}，Seno²⁹⁾ など)．これらの文献を参考として，2 軸圧縮によって断層面に作用する最大せん断応力を 10 MPa と設定する ($\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 10 \text{ MPa}$)． 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，池田ら³⁰⁾ によって計測されている野島断層の地下 1000 m での応力値 (約 30 MPa) を σ_1 とする．なお，断層面に作用する最大せん断応力を 10 MPa と設定しているので， σ_2 は 10 MPa となる．以降の解析では，常に $\sigma_1 = 30 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 10 \text{ MPa}$ と設定した．パラメータ数の観点では，標準的な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 ($E, \nu, t, k_t, \sigma_1, \sigma_2, \theta$) 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．

3. 松田式を満たす断層面接線方向バネ剛性について

松田²¹⁾ によれば，気象庁マグニチュード M_j と断層トレース長 $L[\text{km}]$ の関係性および気象庁マグニチュード M_j と変位量 $D[\text{m}]$ 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，断層長 $L[\text{km}]$ と変位量 $D[\text{m}]$ の関係は次式となる．

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

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，断層長が 10 ~ 80 km 程度の断層までについて範囲可能と推察できる．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．

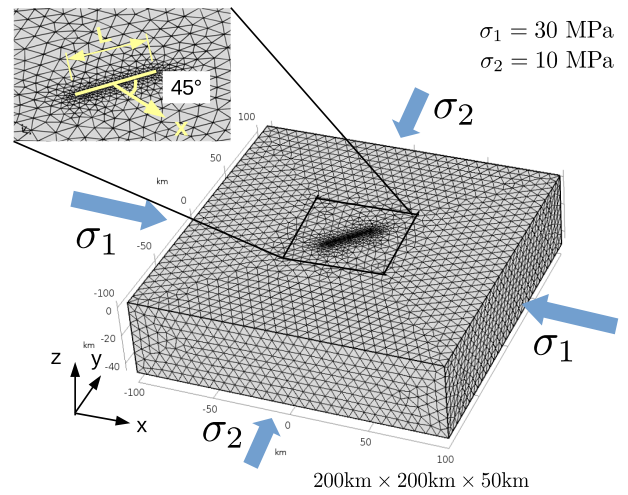


図-2 松田式を満たす接線方向バネ剛性を設定するための横ずれ断層モデル

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 $\sigma_1 = 30 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 10 \text{ MPa}$ (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 10 MPa が作用するように最大圧縮応力 σ_1 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横ずれ変位量 (ネットスリップ) 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 k_t を決定する．なお，断層幅は断層長 L に依らず深さ方向に 20 km (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载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 $L = 80 \text{ km}$ 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 1 km) 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 45 GPa, 0.3 とし，断層面の厚さ t は 0.5 m 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 COMSOL Multiphysics[®] と Okada のディスロケーションモデル³¹⁾ 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 45 GPa のケースの

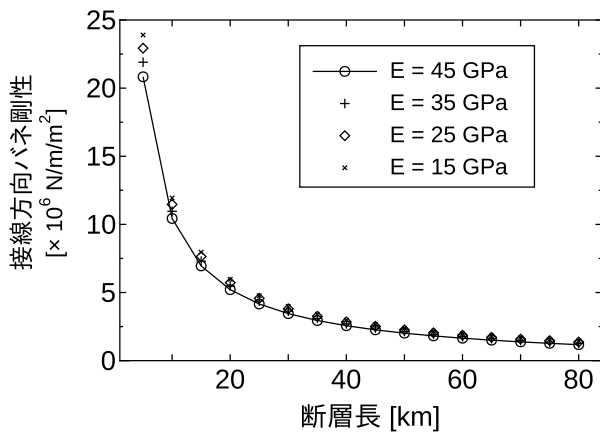


図-3 松田式を満足する接線方向バネ剛性

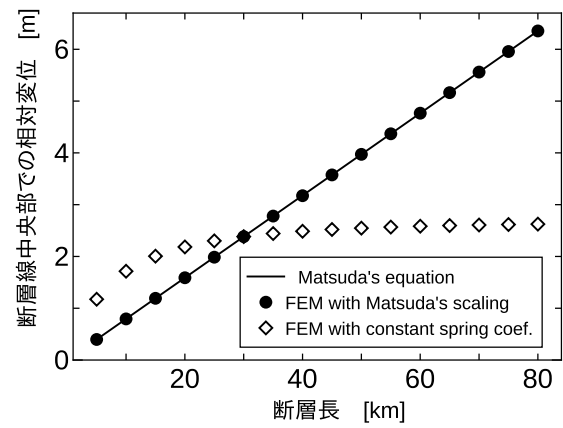


図-5 松田式を満足するバネ剛性を用いた場合と一定のバネ剛性を用いた場合の比較

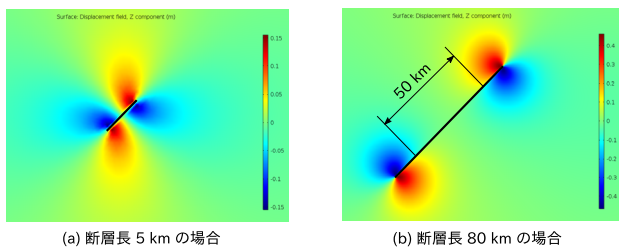


図-4 断層端部の応力集中の影響 (鉛直変位分布を例として)

ほか、15、25、35 GPaとした場合の結果(ポアソン比0.3)も合わせて示している。断層長が30 kmよりも大きい場合、断層長の増加につれて剛性が一様に低下していくことがわかる。松田式では変位量が断層長に比例するため、これに対応して線形的にバネ剛性が低下していると考えられる。一方、断層長が30 kmよりも小さい場合には、変化傾向が線形ではなくなっている。断層端部での応力集中の影響が断層内部にまで及んでおり、線形関係が成り立っていないものと推察できる。また、異なる母岩のヤング率に対する結果から、松田式と整合するバネ剛性の母岩のヤング率依存性はほとんどなく、母岩ヤング率が15 GPaから45 GPaの範囲内では図-3の関係を利用できることがわかる。つまり、母岩の剛性のオーダーに比べて断層面の接線方向バネ剛性は、十分柔らかいと言える。当然ながら、図-3の関係は2軸圧縮応力を $\sigma_1 = 30$ MPa、 $\sigma_2 = 10$ MPaと設定した場合に限られる。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。

断層端部での応力集中がどの程度断層内部にまで影響を及ぼすのかを確認するため、断層長が5 kmの場合と80 kmの場合について断層線近傍における鉛直変位分布を示したものが図-4である。赤い領域は隆起を、青い領域は沈降をそれぞれ表している。断層長が5 km

の場合(図-4(a))は、断層線中央部にまで大きな変位が及んでいる。一方、断層長が80 kmの場合(図-4(b))は、大きな変位は断層端部にて確認できるが、断層端部を除く断層線中央部50 kmの領域では端部の影響は小さい。鉛直変位を用いたラフな見積りではあるが、図-4は断層長が30 km以下で断層両端での応力集中が干渉しはじめることを表しており、応力集中の干渉が図-3で確認された非線形領域(断層長<30 km)の原因となることを示唆している。

図-5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30 km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80 km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)・256 GBメモリである。

以上、本研究では松田式を満たすように接線方向バネ剛性の設定したが、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られる。次章の上町断層系に関する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。

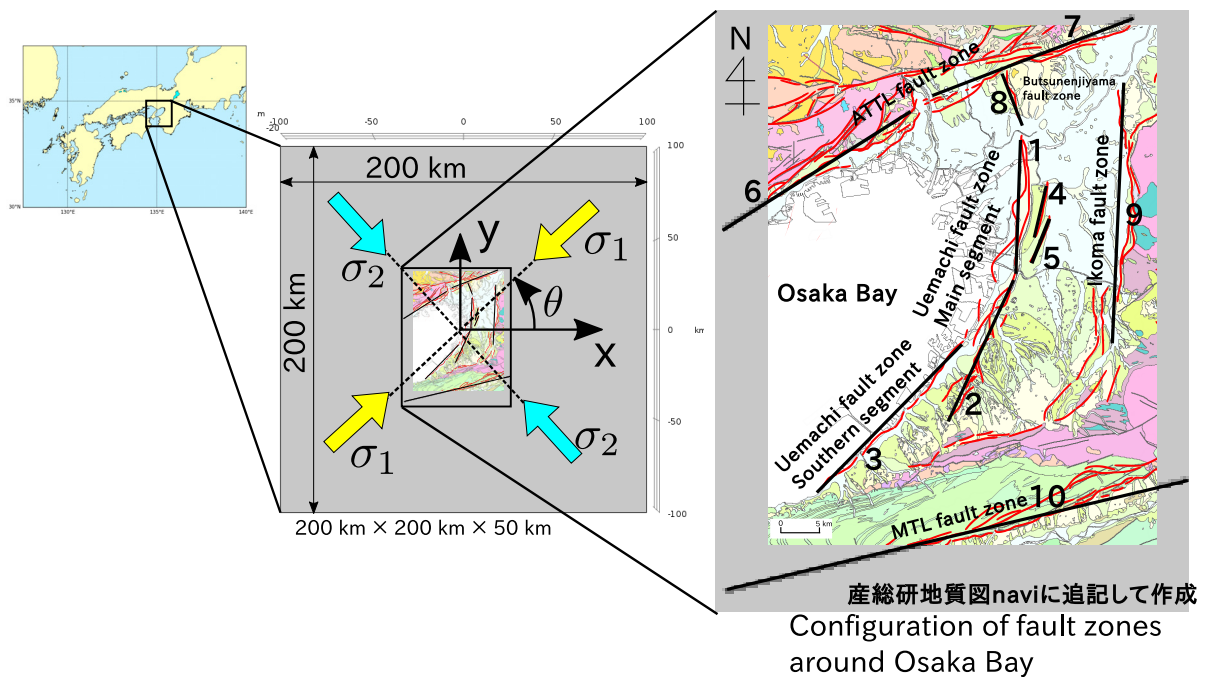


図-6 上町断層系を含む大阪湾周辺の解析領域 (200 km×200 km×50 km) と各断層の位置関係

4. 提案手法の上町断層系への適用

上町断層系は大阪平野に位置し、大阪府豊中市から大阪市を経て岸和田市に至る断層系であり、その断層線はほぼ南北に伸びている。また、断層の東側が隆起する逆断層である。上町断層系はその北部に有馬・高槻構造線および佛念寺山断層、東部に生駒断層、南部に中央構造線が存在している。とりわけ上町断層は反射法地震探査を中心とする調査が精力的に行われてきた(例えば、吉川ほか³³⁾、山本ほか³⁴⁾、大阪市³⁵⁾、杉山ほか³⁶⁾、地震調査推進本部³²⁾など)。上町断層を含む前述の断層群が最も活動的となる広域応力場を推察することや、周囲の断層が上町断層系に与える影響を考察しておくことは、上町断層に関連する防災計画を策定する上で一定の意義があると考えられる。上記に挙げた断層面をすべて考慮し、断層帯に対するシビアな応力状態を推定したり断層面間の相互作用を論じることが筆者の知る限りこれまでにほとんど行われていない。ここでは、提案手法を上町断層系に適用し、上記検討事項について議論する。

(1) 解析モデル

今回考慮する上町断層系および周囲断層面の総数は10であり、各断層面の位置関係を図-6に示す。断層1と2が上町断層系のメインセグメント、断層3は上町断層南部セグメント、断層4と5は上町台地を構成すると考えられる副断層であり、断層1から5を合わせて上町断層系とする。断層6と7は有馬・高槻構造線

表-1 上町断層系を含む大阪湾周辺の各断層のサイズ、傾斜角、走向方位角(断層IDは図6中の番号に対応)

断層ID	断層長[km]	断層幅[km]	傾斜角[°]	方位角[°]
断層1	17.0	20.0	50.0(東落ち)	N2E
断層2	20.0	20.0	50.0(東落ち)	N23E
断層3	26.0	17.0	60.0(東落ち)	N44E
断層4	6.9	1.3	30.0(西落ち)	N12E
断層5	6.1	1.3	30.0(西落ち)	N24E
断層6	28.0	15.0	90.0	N58E
断層7	27.0	15.0	90.0	N69E
断層8	8.0	17.0	50.0(東落ち)	N19W
断層9	33.0	20.0	50.0(東落ち)	N2E
断層10	60.0	15.0	90.0	N77E

であり、断層8は佛念寺山断層である。断層9は生駒断層、そして断層10が中央構造線である。また、各断層のサイズ・傾斜角・走向に関する情報を表-1に示す。断層面に関する情報(特に地下に関するもの)は、現時点での最新の知見³²⁾を勘案して決定した。

上町断層系および周囲断層面を含む200 km×200 km×50 kmの領域を解析対象とし、領域内を有限要素で分割する。また、各断層面はジョイント要素によって表現する。解析モデルは図-7に示すとおりであり、約76万個の4面体2次要素と、約3.4万個の3角形2次要素から成る。断層面4と5は250 mのノード間隔、他の断層面は1 kmのノード間隔でメッシュを生成した。解析に用いたパラメータは、表-2のとおりである。また、境界条件として、地表を除く端面を固定壁としている。座標軸と方位の関係は、図-6にあるとおり、x軸方向

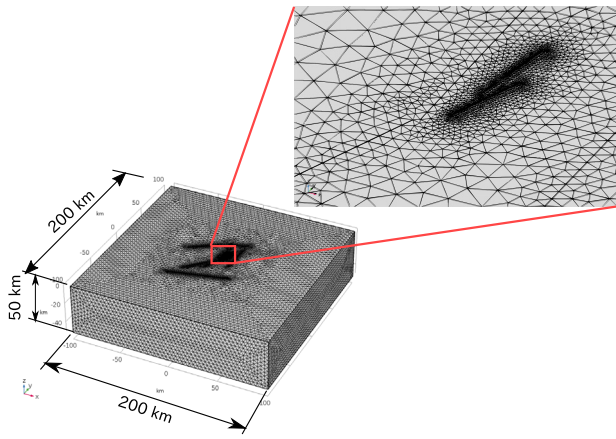


図-7 上町断層系に対する有限要素モデル

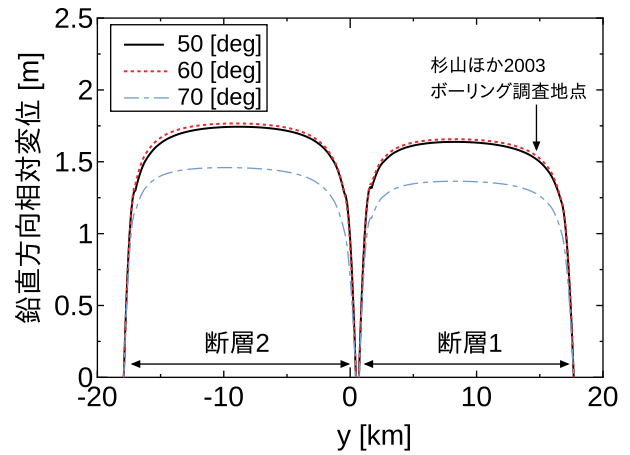


図-8 上町断層メインセグメントに沿う鉛直方向相対変位分布

表-2 解析に用いたパラメータ

地殻のヤング率	45 GPa
地殻のポアソン比	0.3
各断層面の厚さ	0.5 m
断層面の法線方向バネ剛性	式 (1) で算出
断層面の接線方向バネ剛性	図-3 の関係を設定
2 軸圧縮応力 σ_1, σ_2	30 MPa, 10 MPa
圧縮軸角度 θ (東から反時計まわり)	$0^\circ - 180^\circ$

が東、 y 軸方向が真北に対応する．なお、 z 軸方向は鉛直上向きとした．

(2) 上町断層に対する既往の変位評価結果との比較

上町断層 (メインセグメント) に対する地震時変位の推定は、中央防災会議³⁸⁾(Okada のディスロケーションモデル) や加瀬ら¹⁶⁾(動力学計算) によってなされている．両者の断層面の設定は異なっており、傾斜角を例にとれば中央防災会議の資料では 70° となっているが、加瀬らの研究では 60° である．これらの評価のほか、断層 1 (北側メインセグメント) の北端近くに位置する新淀川北岸では、杉山ら³⁹⁾ によってボーリング調査 (深度約 50 m) がなされており、最新活動に伴う鉛直方向相対変位量 (上下変位量) は、1.6 ~ 2.4 m と報告されている．

ここでは中央防災会議での断層変位評価や加瀬らの結果ならびに杉山らのボーリング調査結果との比較を行い、提案手法の妥当性を検討する．上記に挙げた解析では上町断層メインセグメント (本論文の断層 1 と 2 に対応) のみをモデル化しているため、この条件に近づけるように断層 1 と断層 2 以外の断層についてバネ剛性を式 (1) と式 (2) から得られる値とし、断層 1 と 2 のみに松田式にしたがうバネ剛性 (図-3 の関係) をセットする．すなわち、断層 1 と 2 以外の断層面は固着した状態となる．加えて、 $\theta = 0^\circ$ として、東西方向に最大圧縮

応力軸を一致させる．この条件で傾斜角を $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ と変化させ、断層線に沿う鉛直方向相対変位をプロットしたものが図-8 である．

図-8 より、傾斜角が $50^\circ, 60^\circ$ のケースでは、変位分布様式にほとんど差がない．一方、 70° のケースでは他のケースに比べて変位量が減少する．南側のセグメントでの変位量が大きい理由は、断層長が北側のセグメントよりも長く、松田式 (変位量 $\propto$ 断層長) が反映されているためである．中央防災会議資料によれば、断層の東側で最大 1.9 m の隆起、断層の西側で最大 0.7 m の沈降が予測されている．ただし、中央防災会議資料では断層の先端が地下 4 km に埋没しており、地表まで断層面を到達させている今回用いたモデルと条件は異なる．加瀬らの研究でも 2 m 程度の上下変位量が見積られており、中央防災会議資料と同様に断層面先端は地下に埋没 (深度 1.39 km または 0.35 km) している．なお、大阪市街地周辺 (上町断層北部) の領域で上町断層が伏在断層ではなく地表まで到達していることが近藤ら⁴⁰⁾ によって報告されている．傾斜角 50° の場合のシミュレーション結果から得られた、杉山らのボーリング調査地点に対応する箇所での上下変位量は 1.51 m であり、ボーリング調査結果 (1.6 ~ 2.4 m) と整合的である．

図-9 は、傾斜角 50° の場合の鉛直方向変位分布である．本手法から得られる断層線近傍の変位分布様式は、Okada のディスロケーションモデルから得られる分布様式と似通ったものになり、中央防災会議資料中の結果と同様に変位分布から断層線の西側では沈降が確認できる．中央防災会議資料では、最大 0.7 m の沈降が予測されているが、本モデルでは最大 0.4 m となった．この理由は、傾斜角の違いに加え、ディスロケーションモデルがその理論上、地表に到達している断層面を設定できないのに比べ、FEM を用いているため地表のに接する要素をジョイント要素とすることで地表を切

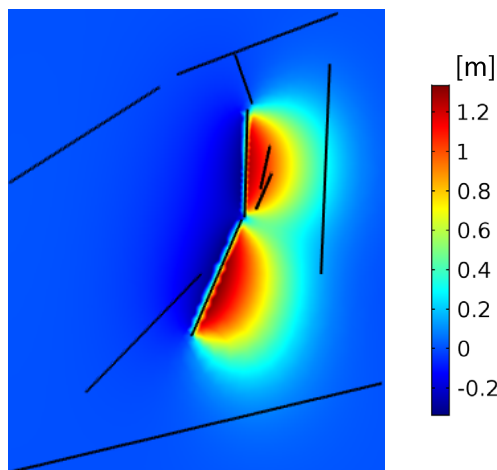


図-9 上町断層メインセグメント近傍における鉛直方向変位分布

る断層を表現していることにありと推察できる．なお、傾斜角を 70° とした場合については、最大沈降量は 0.58 m となり、中央防災会議で示された値に近づく．

松田式から得られる断層長と変位の関係(式(6))より、断層 1 について変位量が 1.35 m 、断層 2 について 1.59 m と求まる．シミュレーションから得られた各断層線中央部での値は断層 1 について 1.64 m 、断層 2 について 1.74 m である．松田式よりもシミュレーションの数値が 10 から 20% 程度大きくなる理由は、これらが逆断層であり断層線(ほぼ南北走向)に直行する方向(東西方向)に最大圧縮応力 σ_1 がしていること、パラメータ調整を横ずれ断層モデルで実施したことに依っている．すなわち、松田式に基づく変位量が常に算出されるわけではなく、広域応力場と断層面配置の組み合わせに応じて変位量が自動的に変化する．この結果は、力学に基づくアプローチと松田式(経験則)に基づくアプローチの融合という観点から一定の意義があると考えられる．

以上、ボーリング調査結果および既往の研究との比較・検討から、提案手法に基づく変位評価結果は、第 2 章で述べた大胆な簡素化・仮定にもかかわらず上町断層系の断層変位予測に対して一定の確度を有していると推察できる．今後、他断層系にも本手法を適用し、調査結果と比較することにより正確度を確認していく必要があるが、他断層系への適用事例については別稿を期したい．

(3) 上町断層系をアクティブにする応力状態について

大阪平野の広域応力場は、東西圧縮に近いと考えられており、加瀬ほか¹⁶⁾の動力学計算においても最大圧縮主応力の方向は、東西方向に設定されている．また、Matsushita and Imanishi⁴¹⁾は最近の約 10 年間に大阪平

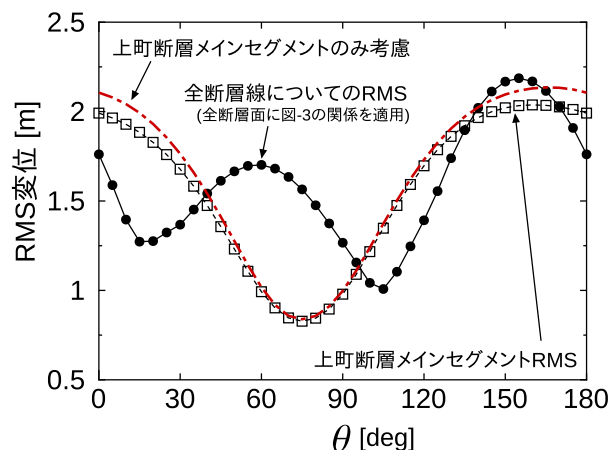


図-10 断層線上 RMS 変位(ネット変位)の圧縮主軸角度依存性

野とその近傍で発生した 238 の微小地震の発震機構解析から、微小地震の圧縮軸はほぼ東西方向(ESE-WNW ~ ENE-WSW)であると推察している．一方、複数の断層面の位置・走向・傾斜が決まった段階で、断層系がアクティブとなる広域応力場(シビアな応力状態)はシミュレーションによってある程度推察できる．したがって、シミュレーションから求まるシビアな応力状態がフィールド調査や水圧破砕法からもとまる応力場とどの程度類似しているかを検討しておくことは、対象地域の地震発生ポテンシャルや防災計画を議論する上で有用である．

2 軸圧縮応力の作用軸の角度 θ を 0° から 180° まで 5° 刻みで変化させた際、断層線上に生じる相対変位(ネットスリップ)の 2 乗平均平方根(以下、RMS 変位と表記)がどのように変化するかを示したものが、図-10 である．図中、赤の一点鎖線は、解析モデルに断層 1 と断層 2(上町断層メインセグメント)のみを考慮した場合を、黒丸は解析モデルに全断層面を考慮して各断層面に図-3 の関係を導入したケースで全断層線について RMS 変位を求めた場合を、白四角は黒丸を求めた解析条件で上町断層メインセグメントの RMS 変位のみを取り出した場合をそれぞれ表している．ここで、 θ が 0° または 180° となるケースは東西圧縮に、 θ が 90° となるケースは南北圧縮に対応する．大局的には、どのケースについても最大圧縮応力軸が東西圧縮からわずかに傾き、西北西-東南東の方向に設定された場合に、大阪湾を囲む断層系としてアクティブとなることが推察できる．また、RMS 変位の最大値と最小値の比は約 2.5 程度であり、圧縮応力の向きが異なることによる変位の変化は決して小さくはない．先に挙げた微小地震発生機構解析から得られる結果が広域応力場を表しているものと仮定すると、上町断層系に作用している応力状態は、シビアな応力状態に近いと考えられる．一点鎖

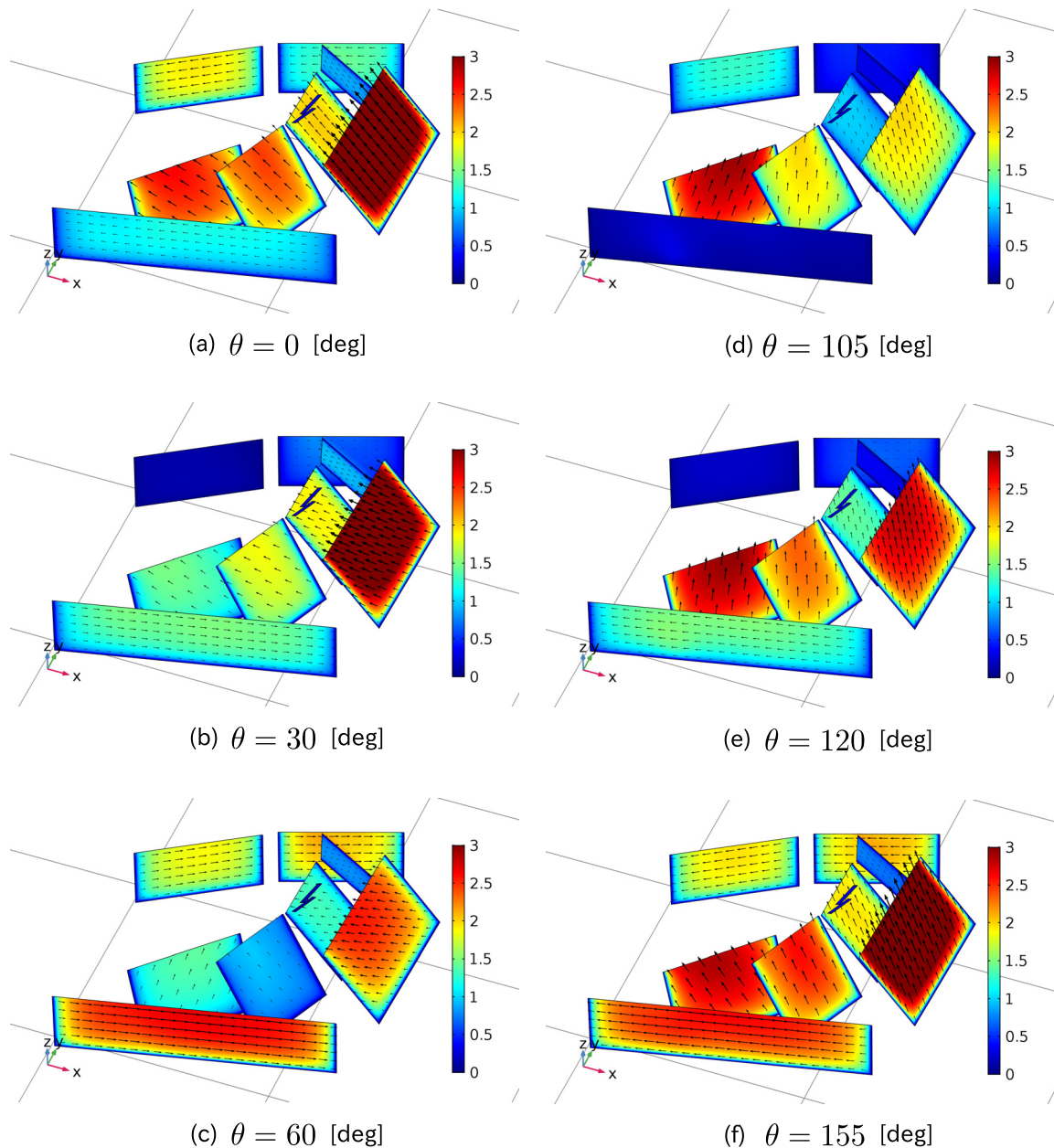


図-11 異なる θ に対応する断層面上すべり分布

線と白四角を比べることで、上町断層メインセグメントのみを考慮した場合と全断層面を考慮した場合の違いを考察できるが、今回のケースでは大きな差異はほとんど見られない。ただし、黒丸のケースのように上町断層系のみではなく、大阪湾周辺を囲む断層群まで考察の対象を広げると、西北西-東南東方向への圧縮のみならず、 θ が 60° となるケースでも一定レベルのピークが確認できる。以下、 θ 毎の断層面上すべり分布を示し、各断層のすべり分布の θ 依存性を検討する。

図 11 は、すべての断層面の接線剛性に図 3 の関係を導入した場合（図-10 の黒丸プロット系列）について、 θ が $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 155^\circ$ の各ケースにおける断層面上の相対変位の大きさ（ネットスリップ）を示し

たものである。 θ が 155° のケース（図-11(f)）は、断層線上の RMS 変位が最も大きくなったケースであるが、断層 4 と 5（いずれも副断層）と断層 8（佛念寺山断層）を除く全ての断層で大きなすべりが生じていることが確認できる。断層 4、断層 5、断層 8 は断層長がそれぞれ 6.9 km、6.1 km、8.0 km と短く、松田式を満たすバネ剛性が急激に大きくなるため、すべり分布は小さくなったものと推察できる。松田式の適用範囲外と考えられる断層長が小さい場合の剛性の設定については、他の経験式とのさらなる比較・検討が必要であり、今後の課題の一つである。バネ剛性を設定する際、断層長が一定以上ある場合は松田式を、断層長が短い場合は他の経験式を考慮すること等も考えられる。

θ が 105° のケース (図-11(d)) は、断層線上の RMS 変位が最も小さくなるケースである。断層 2,3(上町断層系南部) と断層 9(生駒断層) 以外の断層ですべりが小さくなっていることがわかる。特に断層 10(中央構造線) の相対変位量は小さくなっているが、最大圧縮応力の軸の方位が断層面の法線方向に近いためであり、傾斜角が 90° の断層面は逆断層に比べて圧縮する方位の影響を強く受ける。例えば、 θ が 120° のケース (図-11(e)) における断層 6,7(有馬・高槻構造線) についても相対変位が小さい理由は最大圧縮応力の軸の方位が断層面の法線方向に近いことに依っている。なお、 θ が 30° のケース (図-11(b)) でも断層 6,7(有馬・高槻構造線) の相対変位が小さくなっているが、この場合は σ_2 の圧縮軸と断層面法線方向が近いことに依っていると考えられる。断層面の傾斜角が 90° の場合は、圧縮軸の方位と面直方向の関係にすべり量が強く依存することは直感的にもわかりやすい。

θ を変化させていくと、断層面のすべり方向は様々に変化する。例えば、断層 10(中央構造線) にいたっては、 $20 \leq \theta \leq 100$ の範囲内では「左横ずれ」となる。中央構造線は第四紀以降は「右横ずれ」⁴²⁾ とされているため、現実には $20 \leq \theta \leq 100$ の範囲に σ_1 圧縮方向が入ることはないと考えられる。以上のように提案手法は、断層面が複雑に配置される領域の広域応力場を考察するためのツールとしても活用できる。

今回の検討では、各断層面の傾斜角は既知であるとして、断層線上の変位量が最大となる角度を探索した。ここでは θ を変化させて全 37 ケースの計算を行っているが、計算時間については 900 秒 (1 ケースあたり 24 秒) であった。よりシビアな条件を考察したい場合は、断層面の傾斜角もパラメータとして圧縮軸の角度と合わせて最も変位量が大きくなる組合せを探索すればよい。

(4) 断層面間の相互作用についての検討

本手法では、断層面に健全な岩石の物性を与えることで、断層面がロックしている状態を模擬してきた。これを利用して、ある断層面はロック、他の断層面はすべり変位を生じさせる、などの操作によってある断層が着目している断層へどの程度影響を及ぼすのかを検討することができる。モデル化している断層面の総数は 10 であるため、断層面のロック・アンロックの組合せ全てを検討するには約 1000 通りの検討が必要であるが、ここではすべての組合せではなく、上町断層メインセグメントへの周辺断層の影響のみを検討する。すなわち、「断層 1,2,3」のみがアクティブ、「断層 1,2,4」のみがアクティブ、「断層 1,2,5」のみがアクティブ、「断層 1,2,6」のみがアクティブ、「断層 1,2,7」のみがアクティブ、「断層 1,2,8」のみがアクティブ、「断層 1,2,9」のみがアクティ

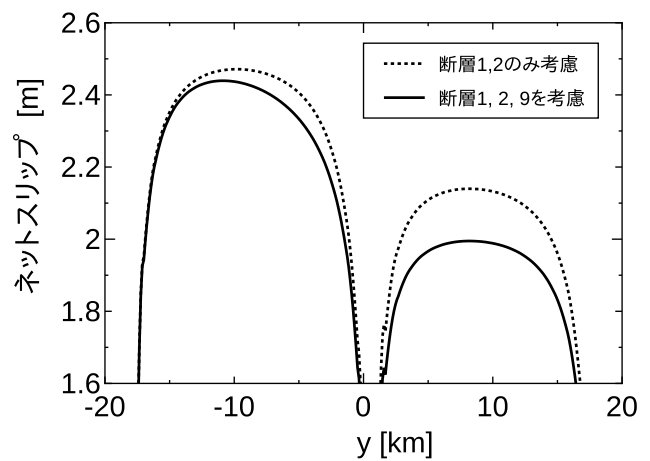


図-12 断層 1, 2 に加え、断層 9(生駒断層) を考慮したケース

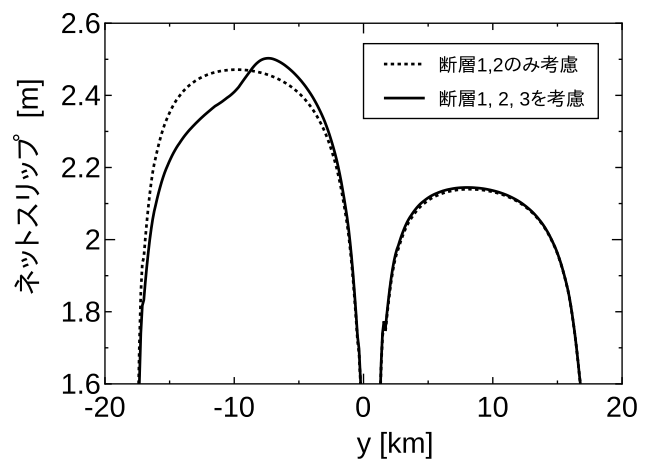


図-13 断層 1, 2 に加え、断層 3(上町断層南部セグメント) を考慮したケース

ブ、「断層 1,2,10」のみがアクティブの 8 ケースである。

シミュレーションの結果、「断層 1,2,9」のケースと、「断層 1,2,3」のケースが断層 1,2 のみを考慮した場合との差異が大きく、断層 1, 2 のみのケースに比べて変位量が小さくなる。なお、変位量が小さくなる傾向はほぼ全てのケースで共通であり、メインセグメントを除く断層面でひずみエネルギーを解放するためであると解釈できる。断層面積が大きく、メインセグメントとの距離が近いほど相互作用は強くなるが、断層面の面積が最も大きい中央構造線が上町断層メインセグメントにおよぼす影響は、ほとんどないことを確認している。

「断層 1,2,9」のケースの変位分布 (ネットスリップ) を図-12 に、「断層 1,2,3」のケースの変位分布 (ネットスリップ) を図-13 にそれぞれ示す。なお、これらの図には、断層 1,2 のみをアクティブにした場合の結果 (点線) も併せて示している。

図-12 の結果は、次のように解釈できる。断層 9(生

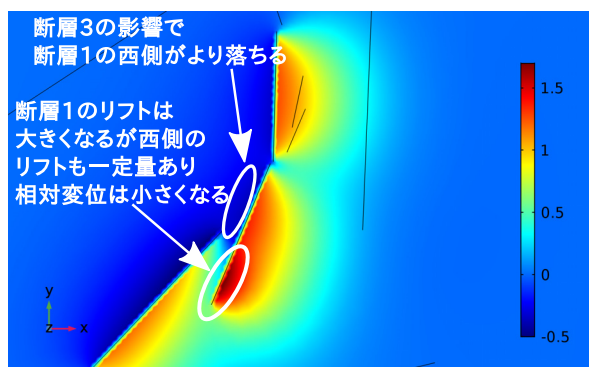


図-14 鉛直方向変位分布による断層3の影響の説明

駒断層)は断層長が一定以上あり、断層線が σ_1 圧縮軸にほぼ直交するため、大きな変位が生じる。この結果、断層1,2を駆動させるためのひずみエネルギーの一部が断層9で解消され、断層1上で生じる変位量が最大で0.14 m程度小さくなる。図-13では、断層3(上町断層南部セグメント)は近接する断層2(上町断層の南側メインセグメント)のみに影響を及ぼしている。 $y \leq -10$ [km]の領域では変位量が断層1,2のみを考慮する場合に比べて小さくなっているが、この領域は断層3と斜交している領域である。一方、 $-10 \leq y \leq 0$ [km]の領域で断層1,2のみを考慮した場合よりも大きな変位量となっている(最大5 cm程度)。

これらの理由を考察するため、鉛直変位分布を描いたものが図-14である。断層2の東側で、断層3と斜交しない領域の鉛直変位は断層1,2のみを考慮した場合とほとんど変化しておらず、隆起量は同程度である。他方、西側では断層3の影響を受けて沈降量が大きくなっているため、断層線上に現れる食い違い量は断層1,2のみを考慮した場合よりも大きくなっている。断層2の東側で、断層3と斜交する領域では隆起量が断層1,2のみを考慮した場合よりも大きくなるが、断層3の影響で西側の隆起も一定量現れる。この結果、断層線上の食い違い量は断層1,2のみを考慮した場合よりも小さくなる。

5. まとめと今後の展望

松田式に基づく断層長と変位量の関係を有限要素法に導入し、スケーリング則に代表される経験的な知見、地形判読・反射法地震探査結果等に基づく断層面情報、そして力学的要素の3項目を考慮した簡易的な断層変位予測手法を提案した。加えて、提案手法を上町断層系を含む大阪湾周辺の断層変位解析に適用した。本研究のまとめは、以下のとおりである。

1. 松田式を満足する断層面上バネ定数の断層長依存

性をパラメトリックスタディーを通じて見出し、有限要素法に組み込んだ。

2. 提案手法を上町断層に関連したボーリング調査結果や既往のシミュレーションと比較し、一定レベルの確度で両者が整合していることを確認した。
3. 広域応力場の圧縮を模擬し、西北西-東南東($\theta = 155^\circ$)に最大圧縮応力が作用する際、上町断層を含む大阪湾周辺の断層系が活発になると予測された。
4. 最大圧縮応力の作用方向が $\theta = 155^\circ$ となる場合(最も活動的)の平均的な変位量は、最大圧縮応力の作用方向が $\theta = 105^\circ$ となる場合(最も変位が小さい)の約2.5倍となった。
5. 上町断層メインセグメントへの他断層面の影響を評価し、生駒断層および上町断層南部セグメント以外の断層面はほとんどメインセグメントに影響を及ぼさないと考えられる。

今後の展望として、断層長が短い場合($L \leq 20$ km)に松田式が適用できるかどうかをさらに検討し、適切ではないと判断される場合は、他のスケーリング則を断層長が短い領域で設定する。併せて他断層帯への本手法の適用を試みたい。

謝辞: 上町断層系に対する有限要素モデルを作成する際、産業技術総合研究所 近藤久雄 博士から断層面配置について有益な助言を賜りました。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. et al.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.68, No.1, pp.1-12, 2016.
- 3) Bray, J.D., Seed, R.B., Seed, H.B.: Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.120, No.3, pp.562-580, 1994.
- 4) 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.
- 5) Anders, M., Hori, M.: Three-dimensional stochastic finite element method for elasto-plastic bodies, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.51, No.4, pp.449-478, 1999.
- 6) 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.
- 7) 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.3, pp.577-584, 2000.
- 8) 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.
- 9) Johansson, J., Konagai, K.: Fault induced permanent ground deformations: experimental verification of wet and dry soil, numerical findings's relation to field observations of tunnel damage and implications for design, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, No.10, pp.938-956, 2007.
 - 10) Lin, M.-L., Chung, C.-F., Jeng, F.-S.: Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip, *Engineering Geology*, Vol.88, No.1-2, pp.70-89, 2006.
 - 11) 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—, Vol.64, No.3, pp.485-494, 2008.
 - 12) 中川英則: 非線形スベ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.
 - 13) Albertz, M., Lingrey, S.: Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 1. Structural analysis, *Tectonophysics*, Vol.576-577, pp.133-149, 2012.
 - 14) Aochi, H., Fukuyama, E.: Selectivity of spontaneous rupture propagation on a branched fault, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol.27, No.22, pp.3635-3638, 2000.
 - 15) Aagaard, B.T., Heaton, T.H., Hall, J.F.: Dynamic Earthquake Ruptures in the Presence of Lithostatic Normal Stresses: Implications for Friction Models and Heat Production, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.91, No.6, pp.1765-1796, 2001.
 - 16) 加瀬祐子, 堀川晴央, 関口春子, 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, No.2, pp.325-340, 2002.
 - 17) Kase, Y., Day, S.M.: Spontaneous rupture processes on a bending fault, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol.33, L10302, 2006.
 - 18) 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.
 - 19) Harris, R.A. et al.: The SCEC/USGS Dynamic Earthquake Rupture Code Verification Exercise, *Seism. Resear. Let.*, Vol.80, pp.119-126, 2009.
 - 20) KANAMORI, H., ANDERSON, D.L.: THEORETICAL BASIS OF SOME EMPIRICAL RELATIONS IN SEISMOLOGY, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.65, No.5, pp.1073-1095, 1975.
 - 21) 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, Vol.28, No.3, pp.269-283, 1975.
 - 22) 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, Vol.55, pp.795-855, 1980.
 - 23) 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, Vol.51, pp.211-228, 1998.
 - 24) Wesnousky, S.G.: Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.98, No.4, pp.1609-1632, 2008.
 - 25) 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, Vol.110, No.6, pp.849-875, 2001.
 - 26) 釜江克宏, 入倉 孝次郎: 日本建築学会構造系論文集, Vol.62, No.500, pp.29-36, 1997.
 - 27) 壇一男, 武藤真菜美, 石井やよい, 阿比留哲生: 内陸地震の断層タイプ別にみた各種マグニチュードの関係とそれに基づく断層モデルの設定と強震動の試算, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.741-750, 2010.
 - 28) 壇一男, 具典淑, 入江紀嘉, アルズペイマ サマン, 石井やよい: 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティーモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.670, pp.2041-2050, 2011.
 - 29) Seno, T.: Stress drop as a criterion to differentiate subduction zones where Mw9 earthquakes can occur, *Tectonophysics*, Vol.621, pp.198-210, 2014.
 - 30) 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.
 - 31) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
 - 32) 地震調査研究推進本部: 上町断層帯における重点的調査観測, http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/uemachi_juten/index.htm (2017 年 7 月 20 日閲覧)
 - 33) 吉川宗治, 町田義之, 寺本光雄, 横田 裕, 長尾英孝, 梶原正章: 大阪市内における反射法地震探査, 物理探査学会第 77 回学術講演会論文集, pp.114-117, 1987.
 - 34) 山本栄作, 中川康一, 三田村宗樹, 戸田 茂, 西田智彦, 寺田祐司, 宇田英雄, 横田 裕: 大阪平野中央部における反射法地震探査—淀川(十三～柴島)測線—, 日本応用地質学会平成 4 年度研究発表会講演論文集, pp.185-188, 1992.
 - 35) 大阪市: 「平成 7 年度地震調査研究交付金 上町断層に関する調査成果報告書」, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/OsakaCtyfrm.htm> (2017 年 7 月 25 日閲覧)
 - 36) 杉山雄一, 七山 太, 北田奈緒子, 横田 裕: 大阪市内における上町断層の S 波反射法地震探査, 活断層・古地震研究報告, No. 1, pp.143-151, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2001.
 - 37) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質図 Navi: <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> (2017 年 7 月 20 日閲覧)
 - 38) 中央防災会議資料: 上町断層帯の地震による地殻変動等に伴う浸水可能性の評価について, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/pdf/2_kohyo.pdf, 2008. (2017 年 7 月 26 日閲覧)
 - 39) 杉山雄一, 七山 太, 三浦健一郎, 吉川 猛, 横田 裕, 末廣匡基, 古谷正和, 栃本泰浩, 廣瀬孝太郎, 横山芳春, 北田奈緒子, 竹村恵二: 上町断層系の補足調査(その 2)—新淀川北岸における追加ボーリングと S 波反射法地震探査データの再解釈に基づく上町断層の活動性評価—, 活断層・古地震研究報告, No.3, pp.117-143, 2003.
 - 40) 近藤久雄, 杉戸信彦, 吉岡敏和, 堤 浩之, 木村治夫: 数値標高モデルを用いた上町断層帯の詳細位置および分布形状の再検討, 活断層研究, No.42, pp.1-34, 2015.
 - 41) Matsushita, R., Imanishi, K.: Stress fields in and around metropolitan Osaka, Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, Vol.642, pp.46-57, 2015.
 - 42) 岡田篤正: 中央構造線断層帯の第四紀活動史および地震長期評価の研究, 第四紀研究, Vol.51, No.3, pp.131-150, 2012.

(2017. 9. 1 受付)

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SURFACE RUPTURE INCORPORATING MATSUDA'S EQUATION: A CASE STUDY ON THE UEMACHI FAULT SYSTEM IN THE OSAKA BASIN, CENTRAL JAPAN

Hidetaka SAOMOTO

To reliably predict surface rupture around the active fault, we need to compile much knowledge such as fault plane shape, subsurface structure, regional stress field, geo-material properties, and the scaling law represented by Matsuda's equation. This paper presents a basic scheme to incorporate those knowledge into the finite element analysis, especially focusing on the treatment of Matsuda's equation. After the scheme introduction, we performed a case study of displacement assessment on the Uemachi fault system in the Osaka basin and then compared the simulated displacement with that obtained from borehole drilling survey. This comparison showed that the simulated displacement (1.51 m) was almost in good agreement with the field survey result (1.6 m – 2.4 m). In addition, the simulation revealed the severe regional stress condition having ESE-WNW orientation of compressional axis which maximizes the displacement on most fault planes in and around the Osaka basin. Also, the simulation disclosed the interaction effect between the Uemachi fault segments and other fault planes. These results provide new insight in terms of the robust design of infrastructures upon surface rupture assessment.