

# 2016 年熊本地震を対象とした 地表断層変位の解析 —地下深部に与える入力変位の影響—

澤田 昌孝<sup>1\*</sup>・羽場 一基<sup>2</sup>・堀 宗朗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>一般財団法人電力中央研究所 原子力リスク研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>大成建設株式会社 原子力本部 (〒160-0004 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

<sup>3</sup>海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

\*E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

近年、地表地震断層の変位によるインフラ施設の被害が懸念されるようになった。地表断層変位の推定のため、著者らは、高性能計算を用いた断層変位解析手法の開発に取り組んできた。震源断層の地表延長にあたる主断層だけでなくそこから離れた位置にある小規模な副断層も評価対象である。地表地震断層が発生した 2016 年熊本地震を対象として、開発した解析手法を適用し、地表断層変位の評価を行った。地下の入力ずれ変位を震源断層上のずれ変位の逆解析結果に基づいて設定した解析において、副断層での変位の発生を良く再現した。また、予測解析を想定した入力ずれ変位の設定を行い、逆解析に基づく設定と近い結果が得られることを確認した。さらに、入力ずれ変位の分布、すべり方向の影響を整理した。

**Key Words:** fault displacement, surface rupture, high performance computing, joint element, the 2016 Kumamoto earthquake

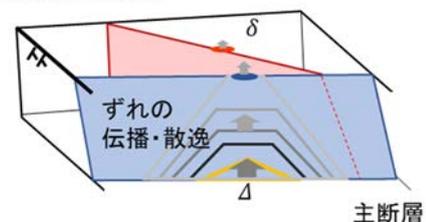
## 1. はじめに

大規模な内陸地震が発生すると、地震動だけでなく、地表に生じる断層変位によっても土木構造物が被害を受ける場合がある。1999年に相次いで発生したトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震以降、特に注目されている。断層変位に対する構造物の設計・安全評価を行う場合、構造物近傍の断層変位の発生の有無、発生する場合はその大きさを評価する必要がある。断層変位の予測・評価手法として連続体力学に基づく数値解析がある。

著者ら<sup>1)2)</sup>は、断層変位評価のための数値解析プログラムの開発を行ってきた。断層面の変位-力関係を精度良く計算するため、厳密に導出された高次ジョイント要素およびエネルギー保存に優れたシンプレクティック時間積分を並列有限要素法 (FEM) プログラムに実装した。さらに、そのプログラムを用いて、2014年長野県北部の地震で発生した地表地震断層を対象に数値解析を実施した<sup>3)</sup>。

本稿では、上記解析プログラムを用いて、2016年熊本地震で発生した地表地震断層を対象に数値解析を実施した結果を示す。特に解析モデル底面に与える入力ずれ変位についてその影響を検討した結果を示す。

## 分岐断層・副断層



δ: 地表面の断層変位量

Δ: 入力ずれ変位量

図-1 地盤・断層の連続体モデル

## 2. 断層変位評価のための高性能計算

連続体力学の観点からは、断層は過去にずれ変位が生じた変位の不連続面と考えることができる。また、断層挙動は新たに断層面にずれ変位が生じる破壊現象である。地盤の応力-ひずみ関係、断層面上の応力-ずれ変位関係を設定し、適切な初期条件、境界条件を与えれば、断層挙動に対する連続体の数理問題が設定される。図-1のように地盤と断層の連続体モデルを構築し、モデル底面に入力ずれ変位Δを与え、ずれ変位の伝播・散逸過程を

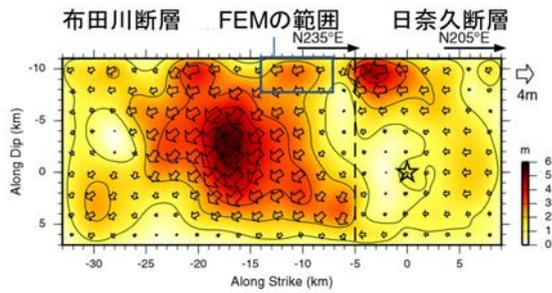
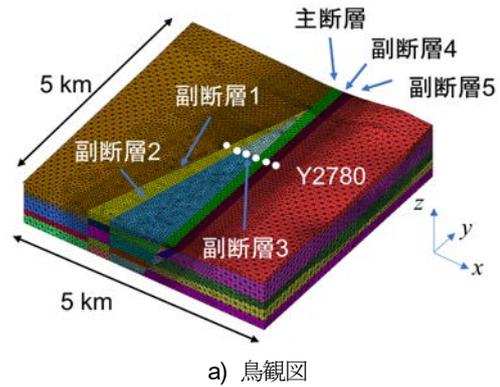


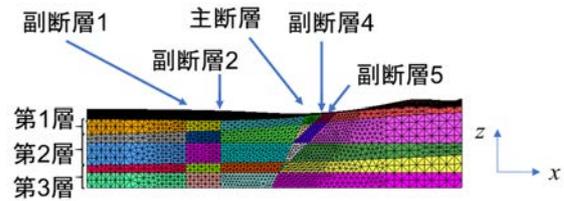
図-2 主断層上のすべり分布 (Asano and Iwata<sup>9)</sup>に加筆)



a) 鳥観図



図-3 地表地震断層 (木山川沿いの低地部) (電子国土Web熊本に加筆)



b) 断面図 (-y側から見る)

図-4 FEMモデル

評価することで、地表面のずれ変位 $\delta$ およびはじめて地表にずれ変位が生じる入力ずれ変位 $\Delta_c$ を評価する。

地盤の三次元解析モデルは一般に自由度が大きくなる。また、断層のずれ変位を表現する必要がある。ここでは、オープンソースの並列 FEM プログラム FrontISTR<sup>4)</sup>に三次元ジョイント要素を実装したプログラム<sup>1),2)</sup>を用いた。

本来は動的解析を実施すべきであるが、著者ら<sup>2)</sup>は、不確実性の定量化のため、入力ずれ変位 $\Delta$ の増加に伴う地表ずれ変位 $\delta$ の変化を 1 ケースの解析で評価可能な準静的解析の利点を指摘し、減衰を考慮した動的解析と準静的解析の結果が近いことを確認した。後述する計算は、準静的解析で実施した。

### 3. 2016 年熊本地震の解析

#### (1) 対象地震の概要

2016 年熊本地震は 2016 年 4 月 16 日に発生した熊本県熊本市を震央とするマグニチュード 7.3 (気象庁) , 最大震度 7 (西原町, 益城町) の地震である。布田川断層沿いで長さ 28 km, 日奈久断層沿いで長さ 6 km の地表地震断層が発見された。布田川断層では、益城町東部の堂園 (どうぞん) 地区で 2.2 m の最大右横ずれを計測した。断層はこの堂園から西に向かって大きく 2 つに分岐する。分岐した断層はいずれも右横ずれであるが、それらを渡

す左横ずれの断層も見られた。

本地震については、複数のグループによって震源インバージョン解析が実施されている。例えば、Asano and Iwata<sup>9)</sup> が図-2 のような断層上のすべり分布を得ている。これによると、布田川断層、日奈久断層がともに正断層成分を伴う右横ずれ断層として破壊している。

#### (2) 解析モデルおよび解析条件

##### a) 解析モデル

益城町での断層分岐部を含む 5 km × 5 km を解析の対象範囲とした。深さ方向は地表から概ね 1 km を対象とし、防災科学技術研究所が公開する地震ハザードステーション (J-SHIS)<sup>6)</sup> の深部地盤データベースの弾性波速度の標高データにより、地形と地盤物性の境界面 2 面を考慮する。主断層とする布田川断層、日奈久断層の走向・傾斜は Asano and Iwata<sup>9)</sup> に基づき設定し、同じ傾斜で地表まで延長した (布田川断層が北傾斜 65 度, 日奈久断層が北傾斜 72 度)。実際に観測された地表地震断層の位置を基に主断層位置を調整した。堂園地区を含む木山川沿いの低地部では、図-3 のように地表地震断層の分岐や主となる断層線から離れた位置での地割れの発生があった (副断層とする)。また、この地域で実施された反射法地震探査の結果<sup>7)</sup> と合わせて、副断層を設定した。この際、2016 年の地震では断層変位の発生しなかった断層 (副断層 1, 副断層 4) も含めてモデルを作成した。解析に用いた FEM モデルを図-4 に示す。

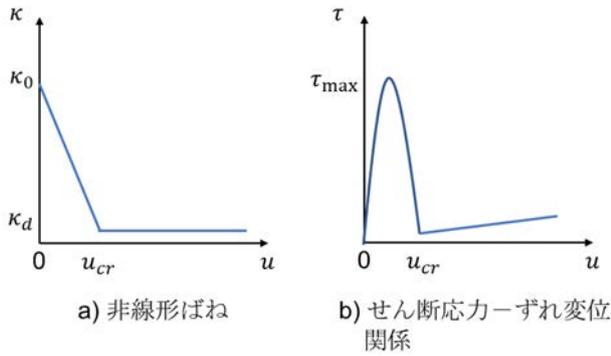


図-5 断層に適用する非線形ばね構成則

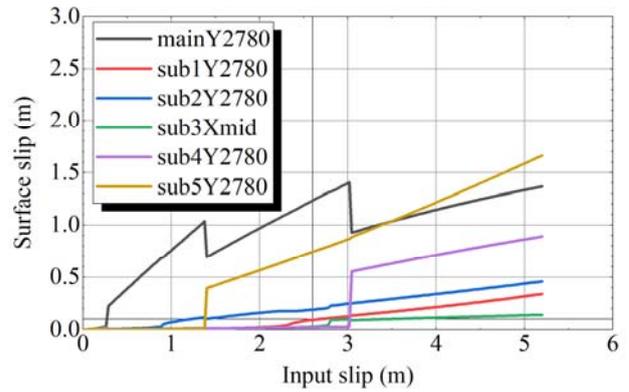


図-6 代表点での入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係

表-1 材料定数

	物性名 (単位)	値
地層1	ヤング率 (GPa)	7.18
	ポアソン比	0.38
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,150
地層2	ヤング率 (GPa)	27.7
	ポアソン比	0.31
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,400
地層3	ヤング率 (GPa)	63.3
	ポアソン比	0.27
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,600
断層	摩擦角 (度)	25
	粘着力 (MPa)	0.025
	せん断剛性比 κ <sub>d</sub> /κ <sub>0</sub>	0.01
	ずれ変位の限界値 (m)	0.1

表-2 各断層におけるずれのセンスとΔ<sub>c</sub>

断層	評価点	観測	Δc (m)	解析
主断層	1	右横ずれ	0.29	右横ずれ 東上がり
	2		0.29	右横ずれ 東上がり
	3		0.29	右横ずれ 東上がり
副断層1	1	出現せず	-	成分なし 成分なし
	2		2.68	右横ずれ 東上がり
	3		2.44	右横ずれ 東上がり
副断層2	1	右横ずれ	1.69	右横ずれ 東上がり
	2		1.22	右横ずれ 西上がり
	3		0.91	右横ずれ 西上がり
副断層3	1	左横ずれ 南上がり	4.32	成分なし 南上がり
	2		3.06	左横ずれ 南上がり
	3		2.83	左横ずれ 南上がり
副断層4	1	出現せず	3.04	右横ずれ 東上がり
	2		3.04	右横ずれ 東上がり
	3		3.04	右横ずれ 東上がり
副断層5	1	東上がり	1.40	右横ずれ 東上がり
	2		1.40	右横ずれ 東上がり
	3		1.40	右横ずれ 東上がり

評価点1~3は、副断層3ではx座標が最小、中間、最大の位置、その他の断層ではy座標が、1780, 2780, 3780 (m) の位置。

### b) 材料定数

地盤は線形弾性体とし、各層の弾性係数はJ-SHIS深部地盤データベース<sup>9)</sup>の弾性波速度と密度から算出した。断層には、ずれ変位 $u$ に依存する単位面積あたりのずれのばね定数(せん断剛性 $\kappa_t$ )を持つ非線形ばねを適用する(図-5a)。

$$\kappa_t(u) = \begin{cases} \kappa_0 - \frac{\kappa_0 - \kappa_d}{u_{cr}} u & (u \leq u_{cr}) \\ \kappa_d & (u > u_{cr}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\kappa_0$ および $\kappa_d$ はそれぞれ初期せん断剛性、最終せん断剛性であり、 $u_{cr}$ はずれ変位の限界値である。ずれ変位 $u$ とせん断応力 $\tau (= \kappa_t u)$ には図-5b)のような関係があり、断層面上のせん断応力がピーク強度 $\tau_{max}$ よりも若干増えたときにずれ変位が大きく増加する。ここでは、ピーク強度が垂直応力 $\sigma_n$ に依存するとしてクーロンの摩擦則 $\tau_{max} = c + \sigma_n \tan \phi$ を仮定する。ここで、 $c$ および $\phi$ は断層面の粘着力および摩擦角である。

用いた材料定数の値を表-1にまとめて示す。

### c) 境界条件

基本ケース(ケース1)では、再現解析の位置づけで、Asano and Iwata<sup>9)</sup>のすべり分布を入力データとして、食い

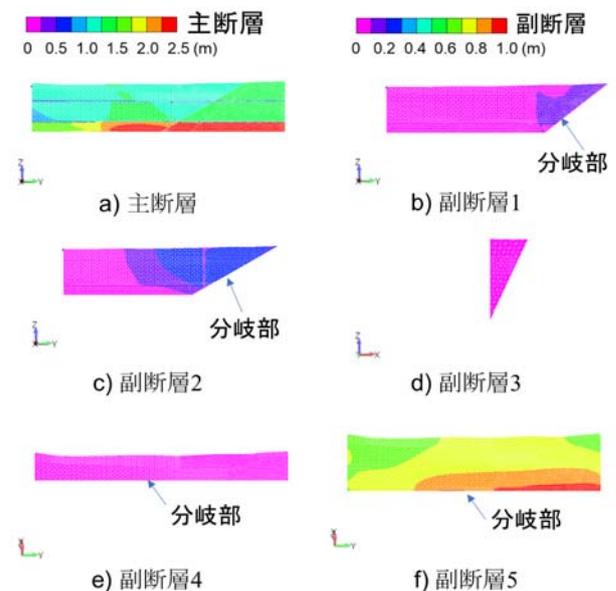


図-7 断層上のずれ変位コンター (Δ= 2.6 m)

違いの弾性論による計算で、FEM モデルの底面の入力変位を決定した。FEM モデル位置での最大ずれ変位は 2.6 m である。FEM 解析では、食い違いの弾性論による計算結果の 2 倍までの強制変位を 200 ステップに分割して漸増的に与えた。底面以外の境界はトラクションフリーとした。

### (3) 解析結果

入力ずれ変位 $\Delta$ に対する各断層での地表ずれ変位 $\delta$ を図-6に示す。凡例のmainは主断層, sub1は副断層1に対応する。また、Y2780はy座標が2780 mの位置(副断層3の延長上)であることを示す(図-4 a)参照)。mainY2780では、 $\Delta=0.29$  mで急激にずれ変位が増加し、0.1 mを超える。また、sub5Y2780, sub4Y2780ではそれぞれ $\Delta=1.40$  m, 3.04 mで急激なずれ変位の増加がある。sub2Y2780, sub1Y2780, sub3Xmidでは急激なずれ変位の増大は発生しないが、それぞれ $\Delta=1.22$  m, 2.68 m, 3.02 mでずれ変位が0.1 mを超え、その後も増加していく。ずれ変位が0.1 mを超える入力ずれ変位を $\Delta_c$ とし、各断層3点での $\Delta_c$ を評価した結果を表-2に示す。2016年の地震で実際に地表地震断層となった副断層2, 5で、ずれ変位が発生しやすい傾向が見られた。 $\Delta=2.6$  mが、2016年熊本地震での逆解析<sup>9)</sup>と一致する。また、各断層におけるずれのセンスについても表-2に示した。観測と解析でずれのセンスがおおむね一致することが分かる。

図-7に $\Delta=2.6$  mにおける各断層上のずれ変位のコンター図を示す。主断層のほか、副断層1, 2, 5で0.1 mを超えるずれ変位の分布が確認できる。副断層上のずれ変位は主断層からの分岐部で大きく、分岐部から主断層のずれ変位が乗り移ったと考えられる。副断層5が副断層4よりも先行してずれ変位が発生するのは、底面のずれ変位入力部により近い位置で分岐しているためと考えられる。なお、2014年長野県北部の地震を対象とした解析では、副断層のずれ変位は主断層からの分岐部よりも地表付近で大きく<sup>3)</sup>、今回得られた傾向はそれとは異なる。

## 4. 入力ずれ変位の影響

### (1) 予測解析での入力ずれ変位の設定

予測解析では、図-2のような主断層上のすべり分布の逆解析結果は利用できない。そこで、著書<sup>8)</sup>は、震源を特定した場合の強震動予測手法(「レシピ」と称される)<sup>9)</sup>および断層長さ<sup>10)</sup>と断層変位量の関係<sup>10)</sup>を参考に、震源断層(主断層)上のすべり量を設定することを提案した。その流れを以下に示す。

#### a) 震源断層の諸元の設定

震源断層の長さ・幅・深さ・傾斜角の設定する。ここ

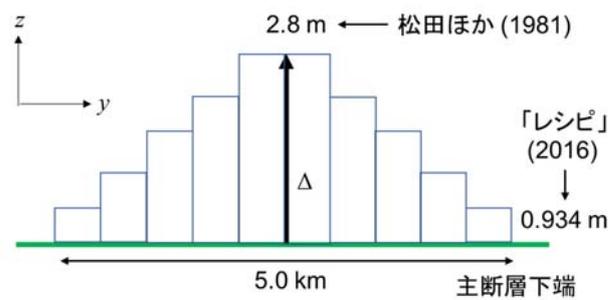


図-8 すべりの大きい領域のすべり分布

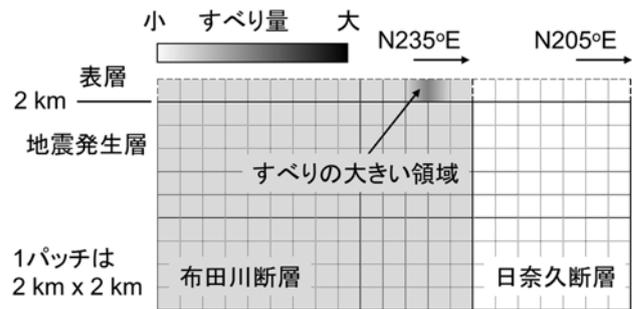


図-9 断層上のすべり分布(イメージ図)

では Asano and Iwata<sup>9)</sup>の布田川断層の諸元を用いる。長さは 28 km, 幅は 18 km であり、面積  $S$  は  $5.04 \times 10^8$  m<sup>2</sup> となる。

#### b) 地震モーメントの計算

地震モーメント  $M_0$  [Nm] を以下の式から算出する。これは地震モーメントが比較的大きい地震に適用する式である。

$$M_0 = \left( \frac{S}{4.24} \times 10^{11} \right)^2 \times 10^{-7} \quad (2)$$

ここでは、 $M_0 = 1.41 \times 10^{19}$  Nm となる。

#### c) 平均すべり量の計算

地震モーメントと断層面積と岩盤の剛性率 $\mu$ から平均すべり量 $D$ を計算する。

$$D = M_0 / (\mu \cdot S) \quad (3)$$

剛性率 $\mu = 30$  GPa とすると、平均すべり量  $D = 0.934$  m が求まる。

#### d) アスペリティを設定する場合

アスペリティの個数・位置の設定と背景領域も含めたそれぞれの平均すべり量を計算する。ここでは、アスペリティの設定は行わない。

#### e) 地表付近での大すべり領域の設定

c) で求めた平均すべり量を入力ずれ変位として与えても副断層でのずれ変位は生じない。また、地表地震断層のずれ変位は一様ではないことが一般的である。そこで、副断層において変位が発生しやすいケースとして、震源断層の副断層周辺にすべりの大きい領域を設定する。この領域での最大すべり量の算定には、松田ほか<sup>10)</sup>で示された以下の式を用いる。

$$D = 10^{-4}L \quad (4)$$

ここで、 $L$ は断層長さ（松田ほか<sup>10</sup>では $L$ は地表地震断層の長さ）である。しかし、この関係式よりも $D$ が大きいデータがあること、断層全体長さと地表地震断層の長さの関係が明確でないために予測解析では設定が難しいことから、 $L$ には断層全体長さを用いる。ここで、 $L$ にAsano and Iwata<sup>9</sup>の布田川断層の長さ（28 km）を代入すると、 $D = 2.8$  mが得られる

また、上記のように算出した $D$ を基にすべりの分布は図-8に示す幅5.0kmの山型分布を仮定する。図-9に断層全体でのすべり分布のイメージ図を示す。

## (2) 解析ケース

ここでは、入力ずれ変位の条件を変えた5ケース（ケース2～6）の解析を行った。ケース2ではすべりの大きい幅5 kmの領域をFEM領域に一致させる。ケース3およびケース4では、すべりの大きい領域をケース2から $y$ 方向に±1 km移動させる。これらのケースでは、すべり角を180度とする（右横ずれ）。また、ケース5、ケース6では、すべり角をそれぞれ210度、240度とした。180度から角度が大きくなるほど正断層成分が顕著になる。

## (3) 解析結果

### a) ケース2

予測解析の代表としてケース2の結果について記す。

図-10に代表点における入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係を示す。ずれ変位が0.1 mを超える入力ずれ変位を $\Delta_c$ とすると、副断層1～5における $\Delta_c$ はそれぞれ4.2 m, 2.7 m, 2.5 m, 3.1 m, 1.6 mであった。2016年熊本地震で実際に発生した副断層2, 3, 5では $\Delta_c < 2.8$  mとなっており、この傾向はケース1の結果（図-6, 表-2）と一致する。ただし、ケース1と比較すると地表ずれ変位の値はやや小さい傾向にある。ケース1とケース2を比較すると入力に用いる地下深部でのすべり分布は大きく異なる。それでも副断層での地表ずれ変位の発生に関して概ね近い結果が得られている。本解析で示した入力ずれ変位の条件設定が予測解析としても有効であることを示唆するものである。また、震源断層における地下深部でのずれ変位よりも副断層近傍のずれ変位の影響が大きいことを示すものである。

### b) 大すべり領域の位置の影響

ケース3, 4では、すべりの大きい領域の位置をケース2から移動させている。副断層2, 3, 5の代表点における入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係を図-11に示す。ケース3では、+ $y$ 側に1 km移動しているが、副断層2, 3において、大幅に $\Delta_c$ が小さくなり、ずれ変位が生じやすい条件になっていることが分かる。これは、副断層2

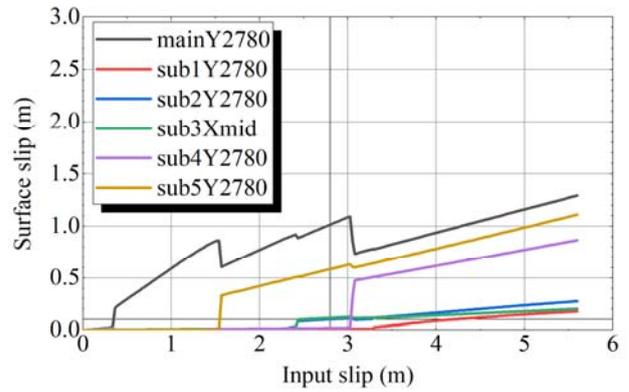


図-10 入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係（ケース2）

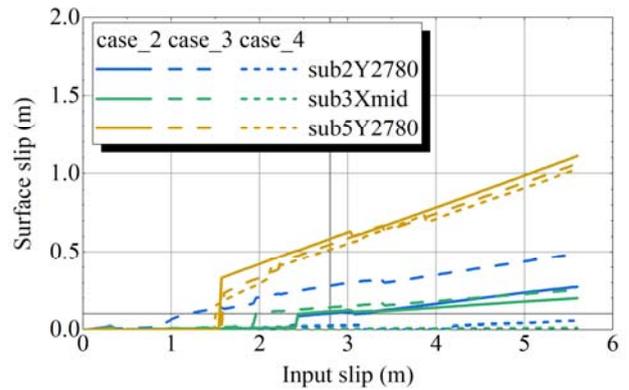


図-11 入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係（ケース2,3,4の比較）

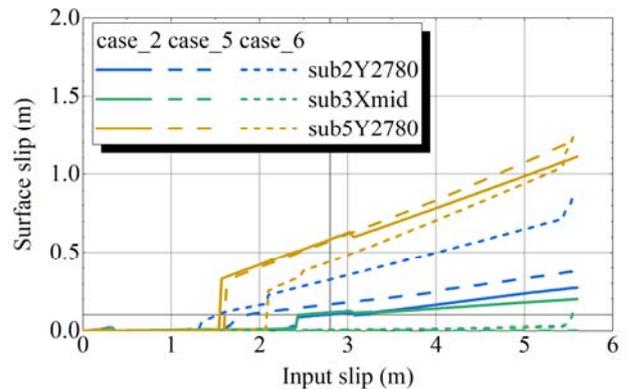


図-12 入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係（ケース2,5,6の比較）

が主断層から分岐する位置での入力ずれ変位が大きくなることにより、副断層2のずれ変位が大きくなり、それに引きずられるように副断層3のずれ変位が大きくなったものと考えられる。ケース4では- $y$ 側に1 km移動しているため、逆に分岐部の入力ずれ変位が小さくなり、副断層2, 3のずれ変位が生じにくい条件となる。

### c) すべり角の影響

ケース4, 5ですべり角（断層上のすべりの方向）をケース2から変化させている。ケース2では、震源断層が単純な右横ずれ断層であるのに対して、ケース4, 5

となるにつれ、正断層成分がより顕著になる。図-12に副断層 2, 3, 5 の代表点における入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係を示す。すべりの正断層成分の比率が高まるにつれ、副断層 2 ではずれ変位が生じやすくなり、反対に、副断層 5 では、ずれ変位が生じにくくなる傾向が得られた。一般に、主断層に縦ずれ成分がある場合は、上盤の方が下盤よりも副断層が生じやすく、地震動による被害も大きいとされており、その傾向と整合的な結果と考えている。

## 5. おわりに

断層変位の評価手法として、連続体力学に基づく数値解析がある。著者らはその数値解析を行うための並列有限要素法プログラムの開発を行ってきた。本稿では、この解析プログラムを用いて、2016年熊本地震で発生した地表地震断層を対象とした数値解析を実施した。

再現解析として、入力ずれ変位は震源インバージョン解析に基づき設定した。また、同じ解析モデルを用いて、予測解析を想定した入力ずれ変位の設定を行った。具体的には、断層全体の一様なすべり変位を与え、さらに、副断層にずれ変位が生じやすい条件として、近傍にすべりの大きな領域を配置するものである。また、すべりの大きな領域の位置およびすべり角が解析結果に与える影響を整理した。

再現解析では、2016年の地震で実際にずれ変位が生じた副断層でずれ変位が生じやすい傾向が見られ、ずれのセンスについても観測結果と整合的であった。

予測解析でも、再現解析に近い結果が得られることを確認した。震源断層における地下深部のすべり分布よりも副断層近傍でのすべり分布が副断層の地表ずれ変位の発生に大きな影響を与えることが分かった。

今後、入力条件の不確実性についてさらに検討を進め、

予測解析における条件設定法の確立を目指す。

謝辞：図面の作成に国土地理院の活断層図（電子国土Web）熊本（改訂版）を用いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗: 断層変位評価のための高性能数値解析手法の開発, 土木学会論文集 A2, Vol.73, No.2, pp.I\_699-I\_710, 2017.
- 2) Sawada, M., Haba, K. and Hori, M.: Estimation of surface fault displacement by high performance computing, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol.12, No.4, 1841003 (22 pages), 2018.
- 3) 澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗: 地表地震断層を伴う実地震を対象とした高性能計算による地表断層変位評価, 土木学会論文集 A2, Vol.74, No.2, pp.I\_627-I\_638, 2018.
- 4) FrontISTR 研究会: <https://www.frontistr.com/index.php>, 2019/03/25 閲覧.
- 5) Asano, K. and Iwata, T.: Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, DOI 10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- 6) 防災科学技術研究所: J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2019/03/20 閲覧.
- 7) 青柳恭平, 上田圭一, 竹本哲也, 末広匡基, 宮脇理一郎: 熊本県益城町の地震断層を横断する反射法地震探査, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.
- 8) Sawada, M., Haba, K. and Hori, M.: Simulation of the surface fault of the 2014 Nagano-ken-hokubu earthquake using high performance computing, *Transactions, SMiRT-25*, Charlotte, NC, USA, 2019.
- 9) 地震調査推進本部: 震源断層を特定した地震動の強震動予測手法（「レシピ」）, 2016.
- 10) 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, 地震研究所彙報, Vol.55, pp.795-855, 1980.

## SIMULATION OF SURFACE FAULT DISPLACEMENT FOLLOWING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE - INFLUENCE OF INPUT DISPLACEMENT AT DEPTH -

Masataka SAWADA, Kazumoto HABA and Muneo HORI

Recently, there have been growing concerns regarding potential damage of infrastructures caused by surface fault ruptures. We have developed a parallel finite element method program for the evaluation of surface fault displacements. In this paper, we applied the numerical method to the simulation of the 2016 Kumamoto earthquake in which surface ruptures were observed. The calculated surface slips on the primary fault and the distributed faults were in good agreement with the in-situ observation. We also applied a method to set slip distributions on primary faults for predictive simulations and investigated the influence of the position of large surface slip zone and rake angle of the slip on the primary fault.