

実地震を対象とした地表地震断層変位の シミュレーション

澤田 昌孝^{1*}

¹一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）
*E-mail: sawada@cripi.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。断層変位に対する施設の安全・性能を評価するためには施設近傍に分布する地表断層の地震時の変位量を推定・評価することが必要である。このとき震源断層の地表延長に当たる主断層だけでなく、そこから離れた位置にある副断層も評価対象である。変位の推定手法の一つとして数値解析が考えられ、断層変位推定のための数値解析手法の開発に取り組んでいる。地表地震断層が発生した2011年福島県浜通りの地震を対象として、三次元ブロック体個別要素法により、断層破壊のシミュレーションを実施し、地表断層変位の評価を行った。副断層も含め、地表断層変位の発生再現性を確認した。

Key Words : *fault displacement, surface fault, secondary fault, distinct element method, characterized source mode*

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においても、地表に生じる断層変位により多くのインフラが被害を受けた¹⁾。2011年の東日本大震災後に施行された原子力発電所の新規制基準²⁾でも、重要施設の基礎地盤について、震源として考慮すべき断層（以降、主断層と称す）に加えて、敷地に分布する小規模な断層（以降、副断層と称す）や地すべり面についても将来の変位の有無を検討することが求められている。

断層変位に対する構造物の設計を行う場合、構造物近傍の断層の変位を定量的に評価し、それが施設の安全機能・性能に重大な影響を与えるかどうかを検討する必要がある。断層変位の予測・評価手法として数値解析が考えられる。発電用原子炉施設の耐震安全性に関する審査やバックチェックの評価では、断層変位による支持地盤の変位・傾斜について数値解析による検討を行っていた。数値解析手法としては、食い違いの弾性論による断層変位理論解とその結果を利用して境界に強制変位を与える静力学的な二次元有限要素法解析による検討が主として行われていた³⁾。Fälth et al.⁴⁾は震源から等速度で破壊フロ

ントが断層面上を進展するというモデルにより、断層周辺の地下に分布する破砕帯の変位量予測を行った。用いた解析手法はCundallら^{5,6)}が提案した三次元ブロック体個別要素法である。著者^{7,8)}は同じ解析手法を用い、断層の動力学的破壊進展解析により主断層の周辺に分布する副断層の変位を推定する計算例を示した。また、著者らは2011年4月11日に福島県浜通りで発生した地震（M7.0）を対象に特性化震源モデル⁹⁾に基づく三次元ブロック体個別要素法による解析を行い、地表断層変位の再現性を確認した¹⁰⁾。

この地震では、主断層の周辺に多数の副断層が確認された¹¹⁾。本稿では、副断層での断層変位発生を含む断層変位シミュレーションについて述べる。

2. 解析手法

(1) ブロック体個別要素法

用いた解析手法はCundallら^{5,6)}によって開発された三次元ブロック体個別要素法である。本手法では、一つの要素は任意の多面体ブロックであり、ブロック同士の接触、衝突、すべりに対して緻密な接触判定を行っている。ブロック境界は平面、あるいは平面の集合体でモデル化することになり、本研究で対象とする断層などのモデル化

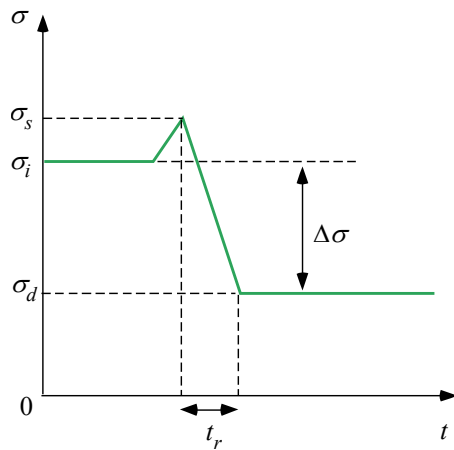


図-1 断層の破壊モデル

に適している。

ブロックは剛体のみならず、ブロック内部を四面体差分格子で離散化することによりブロックの変形を考慮することもできる。

ブロック間の力学的相互作用は接触点で評価する。面で接触している場合、その接触面に含まれるブロック隅角点や差分格子点が接触点となる。接触面上の力学挙動は与えた構成モデルに従う。準静的解析、動的解析ともにブロックの挙動に関する方程式は運動方程式であり、これを陽解法によって解く。

(2) 断層の破壊モデル

著者^{7,8)}は、断層上の応力と破壊規準をもとに、き裂の発生、進展、停止の過程を解く、いわゆる動力学的モデルによる断層変位解析を示した。しかし、地下における断層破壊過程が複雑な場合（例えば、複数の断層が関与する場合など）、動力学的モデルによる実地震の断層破壊過程の再現は必ずしも容易ではない。そのため、Fialth et al.⁹⁾の断層破壊モデルを基に、断層上の各位置でせん断応力が図-1に示すような時間の関数で表されるモデルを用いた（実際にはせん断強度の関数を定義することによってこれを実現している）¹⁰⁾。縦軸はせん断応力 σ 、横軸は時間 t である。初期応力 σ_i から残留応力 σ_d まで応力降下しているが、この応力降下量 $\Delta\sigma (= \sigma_i - \sigma_d)$ が大きい領域が強震動発生域（SMGA）となり、すべり量が相対的に大きい領域（アスペリティ）と概ね一致する。応力降下に要する時間（以下、応力降下時間）を t_r とする。応力がピーク値 σ_s となる時間が破壊到達時間（破壊フロントが破壊開始点から進展して当該位置に到達する時間）である。モデルにおいて設定するパラメータは、断層上の各位置における破壊フロントの進展速度、 $\Delta\sigma$ 、 t_r である。 σ_i は初期応力解析の結果として決定される。 σ_i から σ_s までの応力上昇（超過応力）は、先に破壊した領域からの応力再配分であり、計算の結果生じるものである。

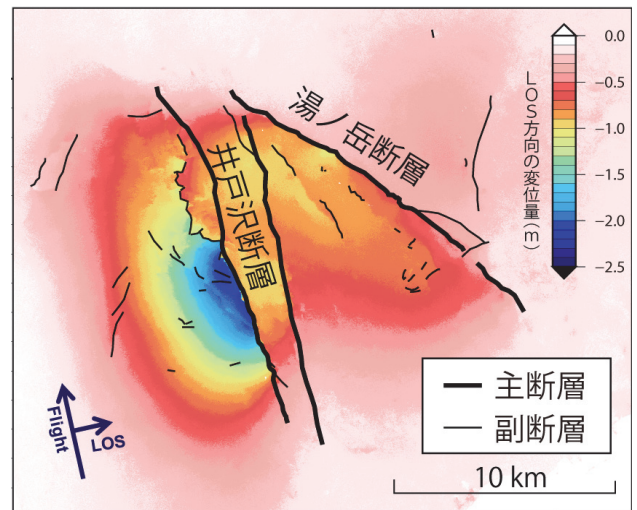


図-2 DInSAR解析結果¹¹⁾

3. 断層変位シミュレーションの解析モデル

(1) 地震の概要

前報¹⁰⁾と同様に、2011年4月11日17時16分頃に福島県浜通りの深さ6km地点で発生した地震（M7.0、深さとMはいずれも気象庁）を対象とする。この地震は同年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（M9.0）の広義の余震とされるが、震源が浅い内陸地震で、かつ正断層型の地震であったことが明らかになっている。また、震源域の井戸沢断層、ならびに湯之岳断層で地表地震断層が確認された。さらに、地震の前後での差分干渉SAR（DInSAR）解析から、図-2のように主要な断層トレースから離れた地域にも多数の微小変位（副断層）が抽出されている。

(2) 特性化震源モデル

芝・野口⁹⁾は、本地震に対して、震源インバージョン解析および震源モデルの特性化を実施した。その概要を記す。

本地震では大きく2つの断層が連続して動いたことが予想され、既存の井戸沢断層、湯之岳断層の走向、発生した地表地震断層、余震分布から図-3に示す断層面モデルを設定した。地震発生層の深さは2kmから16kmの範囲であり、2枚の平面断層は最深部で接触しているとした。

震源インバージョン解析により震源パラメータ（地震モーメント密度、ライズタイム、破壊時刻）の分布を求め、その結果を基に図-4に示すような特性化震源モデルを作成した。また、特性化震源パラメータを表-1に示す。

本震源インバージョン解析は強震観測記録を対象観測量とし、対象とする周波数帯域は0.1～2Hzである。したがって、必ずしも変位を対象に実施されたものではないが、表-1のパラメータを解析でも用いた。表中の実効応

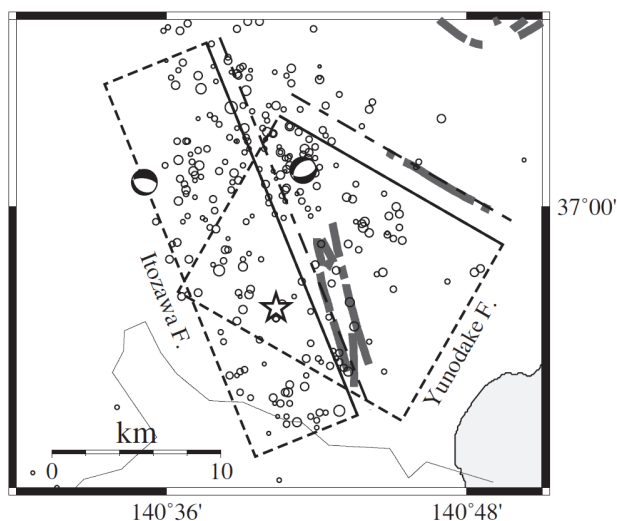


図-3 余震分布と設定した断層面モデル⁹⁾

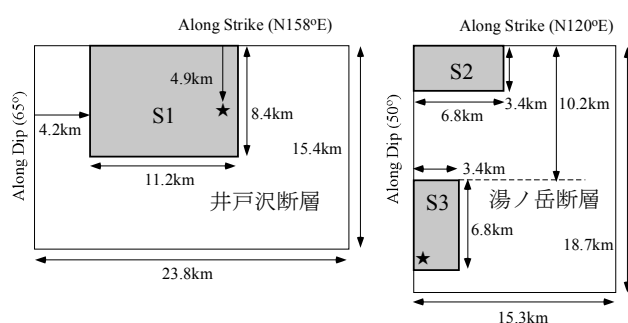


図-4 特性化震源モデルの模式図⁹⁾

表-1 特性化震源パラメータ⁹⁾

SMGA	S1	S2	S3
断層	井戸沢	湯之岳	湯之岳
長さ×幅 (km)	11.2×8.4	6.8×3.4	3.4×6.8
実効応力 (MPa)	8.0	16.9	16.9
地震モーメント (Nm)	2.77×10^{18}	7.49×10^{17}	7.49×10^{17}
ライズタイム (s)	0.7	0.4	0.4
破壊伝播速度 (km/s)	2.6	2.6	2.6

力が各アスペリティにおける応力降下量 $\Delta\sigma$ にほぼ相当し、ライズタイム（すべりの立ち上がり時間）が応力降下時間 t_r に相当すると仮定した。この他のパラメータとして断層の垂直剛性とせん断剛性があり，ここでは， 1.0×10^4 MPa/mを用いた。

(3) 解析モデル

本稿では，2ケースの解析結果を示す。ケース1では，副断層を配置せず岩盤物性を全領域共通とする。ケース2では，副断層を配置し，表層2kmと深部の岩盤物性を区別する。

解析モデルの一例（ケース2）を図-5に示す。73km×71km×46kmの直方体の解析領域を設定した。外側境界は主断層から30km以上離して設定した。東西南北はそれぞれ+x, -x, -y, +y方向に対応し，+zが鉛直上向き

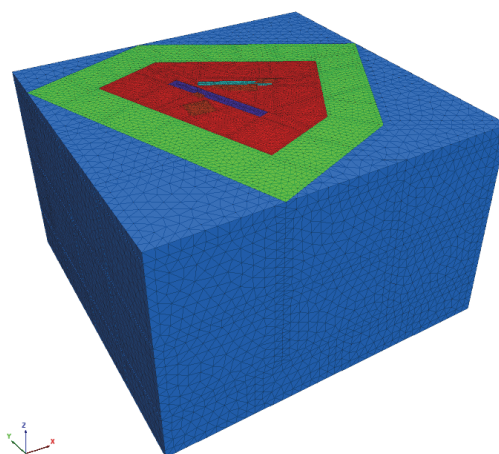


図-5 解析モデル全体（ケース2の例）

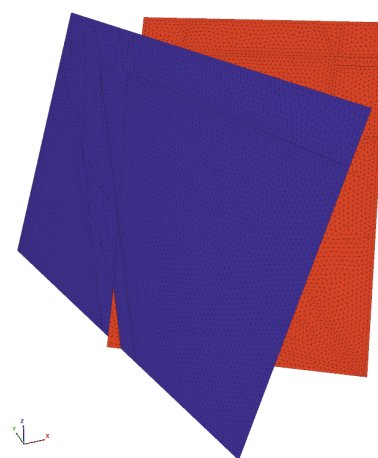


図-6 断層（手前：井戸沢断層，奥：湯ノ岳断層）

である。

図-6に主断層のモデルを示す。断層は2枚の平面とした。図-4に示した特性化震源モデルは深さ2～16kmで定義されているが，浅部を地表まで延長してモデルを作成した。

解析領域を四面体格子に分割する際，格子サイズは主断層周辺で250mとし，断層から離れた外側に行くにしたがって格子サイズを大きくした（最大2km）。ケース2の副断層の周辺は125mと最も小さくした。

岩盤の密度を2700kg/m³，ヤング率を82GPa，ポアソン比を0.24とした。また，ケース2に用いた表層岩盤の物性は，密度を2200kg/m³，ヤング率を17GPa，ポアソン比を0.24とした。

副断層は多数観測されたが，ケース2において，図-7に赤線で示す5つの副断層を抽出し，図-8のようにモデルに含めた。抽出するにあたって，地割れが途切れている場合でも同系統と思われたものは連続させた。副断層は正方形形状（地表長さと同幅が等しい）とし，傾斜は最も近い主断層の傾斜に合わせた。また，クーロンの摩擦則による弾・完全塑性構成式を適用し，物性値には表-2

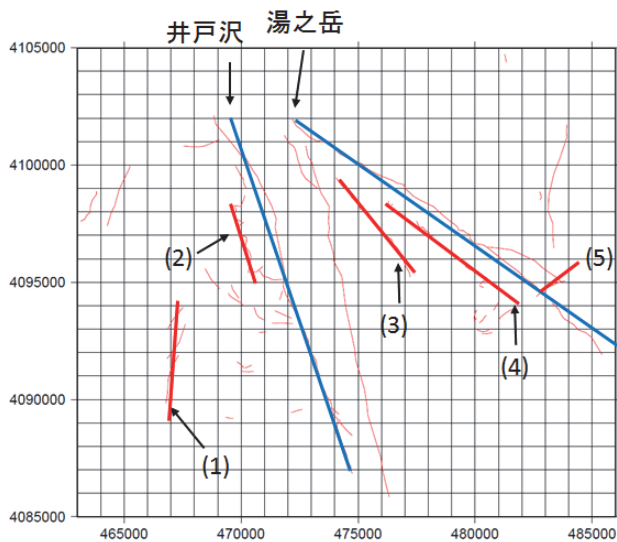


図-7 解析モデルで考慮した副断層（赤線、座標系UTM）

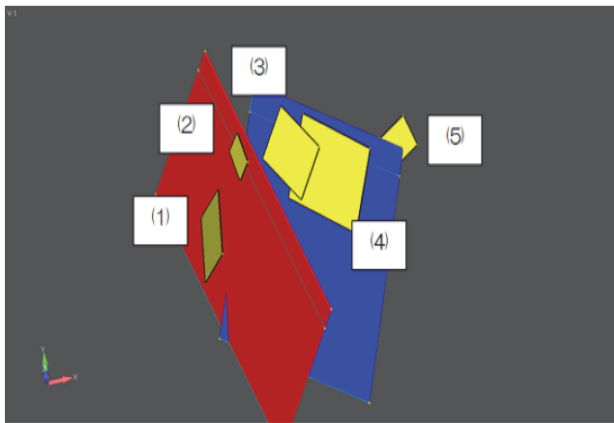


図-8 主断層と副断層

表-2 解析用物性値（副断層）

パラメータ	単位	値
粘着力 c	MPa	0.049
摩擦角 ϕ	deg	20.0
ダイレイタンスー角 ψ	deg	0.0
引張り強さ σ_t	MPa	0.0
垂直剛性 k_n	MPa/m	6.0×10^3
せん断剛性 k_s	MPa/m	1.5×10^3

を適用した。

(4) 解析手順

a) 初期応力解析

断層周辺の地殻応力については、明らかになっていないことが多いが、ここでは以下のように外側境界およびモデル内部に応力を作用させる準静的解析を行なうことで、断層上の初期応力を設定した。

井戸沢断層、湯之岳断層ともに正断層センスで破壊したとされる。前報¹⁰⁾では、応力の深度依存を考慮しなかつたが、副断層の力学挙動は作用する応力の影響を強く受けるので、次の式に示す深度依存の初期応力を設定した。

$$\sigma_{xx} = 0.01324z$$

$$\sigma_{yy} = 0.01324z$$

$$\sigma_{zz} = 0.02648z$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

ここで、地表は $z=0$ とする。長さの単位はm、応力の単位はMPa（引張りを正）とする。深度8kmにおける断層面上の最大せん断応力は、井戸沢断層で40.6MPa、湯之岳断層で52.2MPaとなる。

b) 動的解析

地表面を除く外側境界を粘性境界に変更し、図-4のS1上の星印を破壊開始点として、表-1に示した破壊伝播速度で破壊フロントが放射状に進行する解析を行った。井戸沢断層と湯之岳断層はその最深部で接触しているが、井戸沢断層上の破壊フロントが接触部に到達したと同時に接触部を破壊開始点として、湯之岳断層に破壊が乗り移るとした。

4. 断層変位シミュレーション結果

(1) 断層面上のすべり変位

図-9、図-10はそれぞれケース1、ケース2のシミュレーションから得られた井戸沢断層、湯之岳断層上のすべり変位分布である。図の上方が北側であり、左側の断層が井戸沢断層である。井戸沢断層、湯之岳断層ともにアスペリティ（S1～S3）において大きなすべり変位が発生している。特に、すべり変位の大きい箇所は、ケース1では井戸沢断層のS1の中央付近で3.5m以上であり、ケース2では井戸沢断層のS1の中央付近から地表にかけて4m以上の変位が見られる。ケース2では地表から2kmに軟らかい地層を設定しており、その影響で地表部の断層のすべりが大きくなったと考えられる。

井戸沢断層で得られた最大すべり変位は、芝・野口⁹⁾による震源インバージョン解析での最大すべり変位の2倍以上である。芝・野口⁹⁾では深さ2～16kmの地震発生層に断層を定義し、0～2kmの浅部でのすべり変位はゼロである。それに対し、ここで用いた解析モデルは、地表まで延長している。そのため深さ0～2kmでもすべりが許容されるため、全体としてすべり変位が大きくなったと考えられる。地表部に軟らかい地層を設定するとその効果が大きくなる。

(2) 地表での鉛直変位

図-11、図-12に井戸沢断層、湯之岳断層の地表での鉛

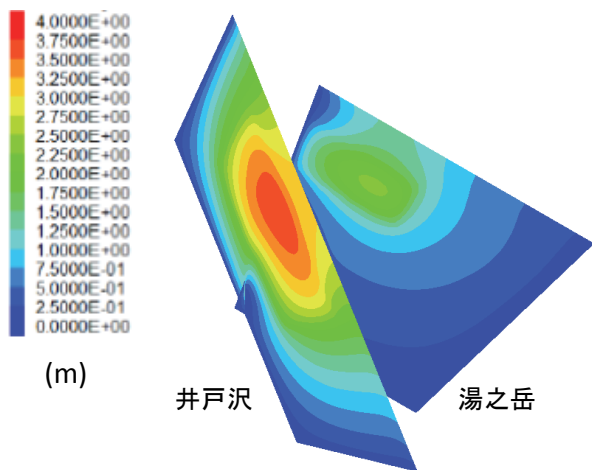


図-9 すべり変位分布 (ケース1)

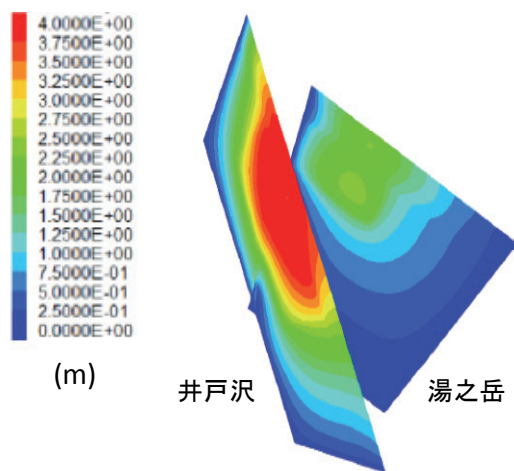


図-10 すべり変位分布 (ケース2)

直すべり分布 (計測データ¹²⁾ およびシミュレーション結果)を示す。横軸は、解析モデルで設定した断層の北端からの距離を表している。シミュレーションで得られた鉛直すべり変位分布は、井戸沢断層、湯之岳断層ともに計測結果を概ね包含している。この結果は、断層全体でのすべり分布が大きめに計算されていることと関係する。大きな変位が発生した位置も概ね一致している。地表地震断層の変位を大きめに評価することは構造物や周辺への影響の観点からは保守的に評価することになる。

ただし、井戸沢断層の北側での変位がケース1、ケース2とも大幅に大きい。観測と近い結果を得るにはアスペリティS1の範囲や実効応力を見直す必要があると考えられる。また、井戸沢断層では、地表近傍で主断層が分岐したため図-2のように大きく2つの地表地震断層が発生したと考えられるが、シミュレーションではこの分岐を考慮しておらず、地表まで一面の断層面を仮定した。それが過大な変位が計算される一つの原因と考えられる。

(3) 副断層の変位

図-13にケース2で得られた5つの副断層でのすべり変

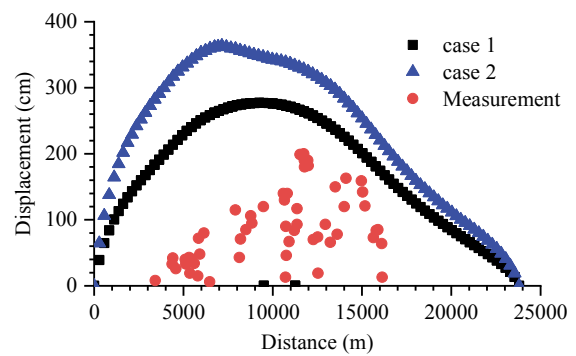


図-11 地表での鉛直すべり変位 (井戸沢断層)

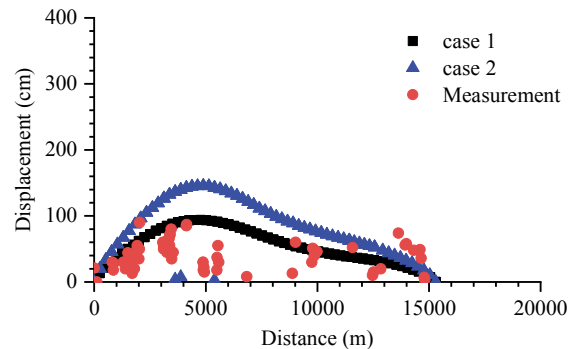


図-12 地表での鉛直すべり変位 (湯之岳断層)

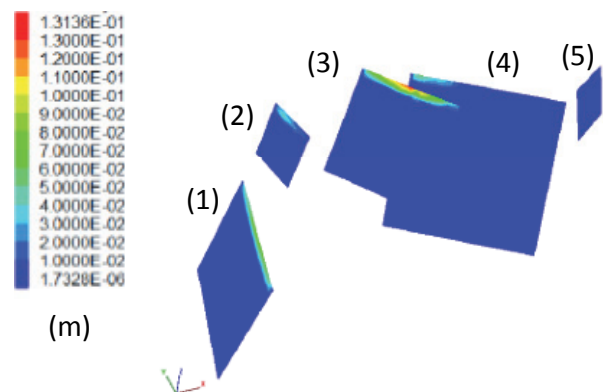


図-13 副断層のすべり変位分布 (ケース2)

位分布を示す。最大のすべり変位が得られたのは3番の副断層で0.13m程度であった。その他の副断層では0.1m以下のすべり変位となった。副断層でのすべりはすべて正断層センスで発生した。副断層で破壊判定となった格子点は地表近傍に限定されており、最深部でも地表から断層に沿って250mまでであった。DInSAR解析¹¹⁾では、衛星からの視点方向 (LOS) の相対変位で0.5mの結果も得られている (0.05~0.2m程度の変位は多数得られている)。今回のシミュレーションでは、そのような大きなすべり変位は得られなかった。副断層の変位が大きくなる要因やその再現のために必要な解析条件の設定については更なる検討が必要である。

5. おわりに

本稿では、2011年4月11日に福島県浜通りで発生した地震を対象に、深さ2～16kmで定義された特性化震源モデルに基づいて、深さ0～2kmの地表部に断層を延長して、副断層を含む地表断層変位を評価するための数値シミュレーションを行った。主断層の破壊モデルは、断層上の各位置において、せん断応力と時間の関係を定義するものを用いた。すべりを許容した地表部が追加されたことで特性化震源モデルの基になった震源インバージョン解析よりも大きなすべり変位が得られた。地表部に軟らかい地層を設定した場合はさらに大きなすべり変位が得られた。主断層の地表断層変位分布のシミュレーション結果は実測結果を包含した。

主断層の周辺で発生した副断層の断層変位についてもシミュレーションを行った。最大で0.13mのすべり変位が得られ、副断層の破壊範囲は地表付近に限定されていた。全体的に実測結果よりも小さいすべり変位であった。副断層の変位が大きくなる要因やその再現のために必要な解析条件の設定については更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地震時の断層変位に伴う地震災害に関する調査報告書，地盤工学会 2001 年調査委員会報告書，2002.
- 2) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉及びその附属施設的位置，構造および設備の基準に関する規則，2013.
- 3) 原子力安全推進協会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書，2013.
- 4) Fäth, B., Hökmark, H. and Munier, R.: Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository, Evaluation of modelling results and their implications for layout and design, SKB Technical Report, TR-08-11, 2010.
- 5) Cundall, P. A.: Formulation of a three-dimensional distinct element model – part I: a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.107-116, 1988.
- 6) Hart, R. D., Cundall, P. A. and Lemos, J.: Formulation of a three-dimensional distinct element model – part II: mechanical calculation for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.117-126, 1988.
- 7) 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，第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，CD-ROM，2015.
- 8) 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に関する基礎検討，第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，CD-ROM，2016.
- 9) 芝良昭，野口科子：広帯域地震動を規定する震源パラメータの統計的特性—震源インバージョン解析に基づく検討—，電力中央研究所 研究報告：N11054，2012.
- 10) 澤田昌孝，芝良昭：特性化震源モデルに基づく地表地震断層変位のシミュレーション，第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集，CD-ROM，講演番号 38，2017.
- 11) 青柳恭平，大沼巧：DInSAR と DEM 差分解析による地表地震断層の変位量評価，京都大学防災研究所平成 29 年度一般研究集会「リモートセンシング技術の進展と活断層・内陸地震研究」要旨集，4p.
- 12) Mizoguchi, K., Uehara, S. and Ueta, K.: Surface fault ruptures and slip distributions of the Mw 6.6 11 April 2011 Hamadoori, Fukushima Prefecture, Northeast Japan, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.102, No.5, pp.1949-1956, 2012.

NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE FAULT DISPLACEMENT OBSERVED IN A REAL EARTHQUAKE

Masataka SAWADA

Since the recent outbreaks of huge inland earthquakes, attention has been paid to surface fault rupturing causing damages to various civil engineering structures. It is important to estimate surface displacements not only on primary faults but on secondary faults distributing around the primary faults. Numerical simulation is one of potential tools for the estimation. In this paper, three dimensional distinct element method is applied to the simulation of the surface fault rupturing in Fukushima-ken Hamadoori Earthquake on 11 April 2011. The calculated maximum surface displacement on secondary faults was about 0.13m.