

## 断層変位・地震動評価のための多段階 FEM 解析

電力中央研究所	正会員	○澤田 昌孝
大成建設	正会員	羽場 一基
東京大学	正会員	藤田 航平, 市村 強
海洋研究開発機構	フェロー会員	堀 宗朗

### 1. はじめに

断層変位に対する構造物の設計・安全評価を行う場合、構造物に入力される断層変位を定量的に評価する必要がある。著者ら<sup>1)</sup>は断層変位評価のための並列有限要素法 (FEM) プログラムの開発を行ってきた。このプログラムを用いて、2014 年長野県北部の地震や 2016 年熊本地震で発生した地表地震断層 (副断層を含む) を対象に数値解析を実施し、その適用性を示した。これらの解析では断層変位にのみ着目したが、断層変位の発生位置にある構造物は、同時に強い地震動を受けると考えられる。断層変位と地震動の重畳を検討するための解析手法について検討を開始した。

### 2. 多段階 FEM による断層変位・地震動の解析

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値モデルが設定される。断層変位評価の解析では、地盤・断層の連続体モデル (平面 5 km×5 km, 地表から深さ 1 km 程度) を構築し、モデル底面に与える入力ずれ変位の伝播・散逸過程を評価することで、地表でのずれ変位を評価してきた。一般に地表地震断層が現れる地震の震源断層の長さは上記の解析モデルのサイズを上回るため、より広域を対象とした解析から境界条件を設定する必要がある。従来は広域の解析に食い違いの弾性論を用いていたが、広域・詳細の 2 段階の解析をともに FEM で実施することにより、断層変位・地震動の重畳を考慮する。図 1 に多段階 FEM の概要を示す。既報<sup>2)</sup>では静的 FEM により広域の解析を実施していたが、本稿では、広域・詳細ともに動的 FEM による解析を実施した試計算を示す。

### 3. 2008 年岩手・宮城内陸地震の断層変位解析

試計算は 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) を対象に実施した。本地震において、余震域東縁に沿って北北東-南南西走向に約 20 km にわたって断続的に地表地

震断層が確認された<sup>3)</sup>。本地震については、震源インバージョン解析により、断層を 19×9 の小断層に区分した各小断層でのすべりの履歴が得られている<sup>4)</sup>。図 2 に最終的なすべり分布を示す。このすべり分布の断層上端を EL-776 m として解析に用いた。

広域モデルでは長さ 38 km の断層全体を含む 40 km×50 km の領域の地表から EL-20 km までを対象とした (図 3)。詳細モデルでは、地表断層と KiK-net 一関西 (IWTH25) を含む 15 km×10 km の領域の地表から EL-776 m を対象とした。防災科学技術研究所が公開する J-SHIS 深部地盤データベースに基づき、地形・地層構造を考慮した。広域モデルでは断層を特に意識せずメッシュを作成し、詳細モデルでは、断層を同一の傾斜で地表まで延長し、ジョイント要素で表現する。

広域 FEM 解析では、図 2 に示したすべり分布から地震モーメント分布を算出し、断層周辺の節点に点震源として作用させた。本来は、破壊開始点からのすべりの進展を解析すべきであるが、ここでは、破壊開始の小断層のすべり関数を全小断層に適用した。すなわち、断層全体が一斉にすべると仮定した計算を実施した。広域モデルは節点数が 13 億以上となる超大規模モデルであり、8192 CPU コアの並列計算を実施し、詳細モデルの底面・側面の節点変位および節点力の履歴を計算した。

詳細 FEM 解析では、半無限吸収境界を設定し、広域 FEM から得られた節点力と節点変位の履歴を与えた。モデル底面からの断層のずれの伝播と地表の地震動を計算した。詳細モデルは節点数が 267 万の大規模モデルであり、120 CPU コアの並列計算を実施した。

図 4 に詳細 FEM 解析から得られたずれの伝播の様子を示す。3 秒経過までにずれ変位は地表に到達している。断層の南側で地下のずれ変位が大きく、地表においてもその影響が見られる。この位置は断層中央付近の浅部のずれ変位が大きい領域に対応しており、地表断層

キーワード 断層変位, 高性能計算, 並列計算, 重畳, 地震動

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6 (一財) 電力中央研究所 TEL 070-6568-9631

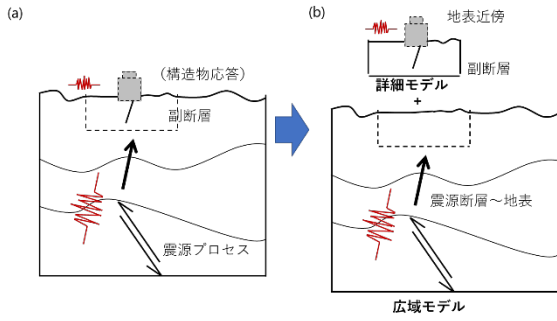


図1 多段階 FEM の概要

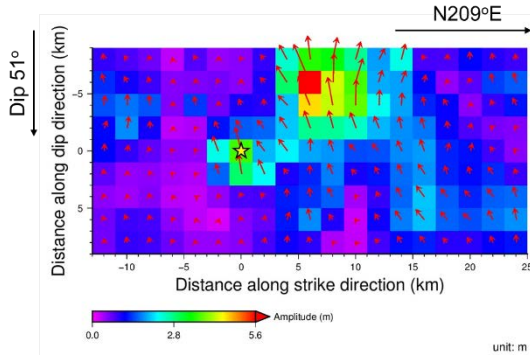
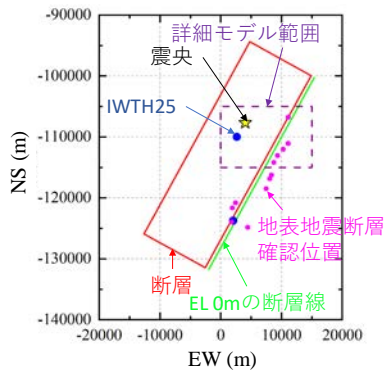
図2 断層上のすべり分布<sup>4)</sup>

図3 解析領域 (広域モデル)

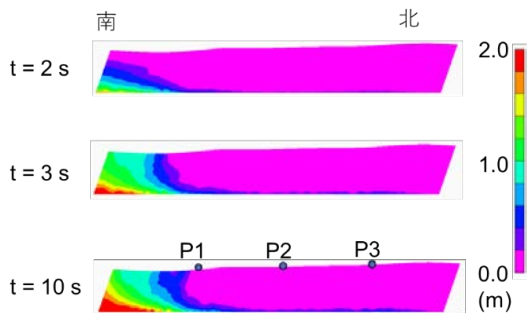


図4 ずれ変位分布の変化 (右側が北)

の発生位置と概ね一致する。図5は履歴最大地表速度のコンター図であり、断層の破壊の有無の影響を比較したものである。P1の南側の地表断層の発生によりその近傍の速度が上昇していることが分かる。一方、断層から離れた位置は両者の違いはほとんどない。

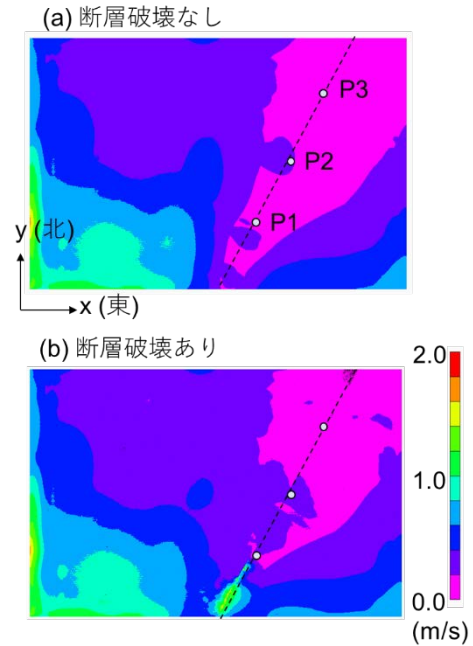


図5 履歴最大地表速度 (断層破壊の有無の影響)

## 5. おわりに

ここで示した多段階 FEM 解析により、広域 FEM 解析において断層の破壊過程を考慮した動的解析を実施することにより、断層変位と地震動をともに計算できる解析手法となり、断層変位と地震動の重畳に関する諸検討に適用できる。FEM を用いることで、複雑な地形・地層構造の影響を考慮できる手法となっている。

## 参考文献

- 1) 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.L627-L638, 2018.
- 2) 澤田昌孝, 羽場一基, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗: 広域・詳細2段階の FEM による断層変位・地震動評価のための数値解析, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会予稿集, CS11-22, 2021.
- 3) 遠田晋次, 丸山正, 吉見雅行, 金田平太郎, 栗田泰夫, 吉岡敏和, 安藤亮輔: 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層, 地震 第2輯, Vol.62, pp.153-178, 2010.
- 4) Asano, K. and Iwata, T.: Characterization of stress drops on asperities estimated from the heterogeneous kinematic slip model for strong motion prediction for inland crustal earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.168, pp.105-116, 2011.