

## FEM 解析における断層面の凹凸が断層変位の伝播散逸過程に与える影響

大成建設株式会社 正会員 ○羽場 一基, 篠原 魁  
 一般財団法人 電力中央研究所 正会員 澤田 昌孝  
 海洋研究開発機構 フェロー会員 堀 宗朗

## 1. はじめに

地表に発生する断層変位は近傍の構造物に大きな影響を与える可能性があるため、重要構造物に対する安全性評価の必要性が指摘されている。断層変位の予測方法の 1 つに連続体力学に基づく数値解析がある。この方法では、断層面を不連続面としてモデル化し、断層面深部で発生する滑りが地表に伝播散逸する過程を評価する。これまでに筆者らは、断層変位評価のための高性能計算有限要素法を開発し、実地震を対象とした断層変位解析により、その妥当性を確認した<sup>1)</sup>。

断層面を不連続面としてモデル化する場合、解析モデルの作成方法や誤差により、断層面に微小な凹凸が発生する場合がある。現実の断層面も滑らかな平面ではなく凹凸が存在すると考えられるが、FEM 解析で単純な構成則を用いる場合には、微小な凹凸がずれ変位の伝播散逸過程に大きな影響を与える可能性がある。

本稿では、実地震を想定した解析を例に、断層面の凹凸が断層変位の伝播散逸過程に与える影響を整理する。

## 2. 解析条件

2008 年岩手・宮城内陸地震を想定した解析<sup>2)</sup>を対象に、断層面の凹凸の影響を整理する。解析には E-FrontISTR\*を用いる。図 1 に解析モデル及び断層面の構成則を示す。解析モデルは、地表断層を含む水平 15 km × 10 km, 深さ約 776 m であり、約 800 万自由度である。地形・地層構造は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作成した。断層面は震源逆解析<sup>3)</sup>結果に基づき、dip 51°, strike 209° の平面として地表まで延長し、ジョイント要素でモデル化した。断層面の構成則は、既往研究<sup>1),2)</sup>と同様に、図 1 b)のせん断力・ずれ変位関係を用いる。ピーク強度 $\tau_{max}$ の拘束圧 $\sigma_n$ 依存性としてはクーロン摩擦則 $\tau_{max} = \sigma_n \tan \phi + c$ を仮定する。 $\sigma_n$ はジョイント要素の法線方

向ばねを用いて $\sigma_n = k_n u_n$ で評価し、断層変位における変化も考慮する。 $k_n$ 及び $u_n$ は法線方向のばね定数及び相対変位で、 $k_n$ は十分大きい値とする。なお、物性値は、明記しない限り既往研究<sup>2)</sup>と同一とする。

断層変位解析では、解析モデル境界に強制変位を漸増的に入力する準静的解析を実施する。入力変位は、震源逆解析結果から得られた断層面滑り分布<sup>3)</sup>から、広域 FEM 解析により評価した変位量とする。ここで、広域 FEM 解析の詳細については既報告<sup>2)</sup>を参照されたい。また、断層面の凹凸の影響を明確化するため、上盤・下盤それぞれに一樣な変位を与える解析も実施する。ここで、いずれの解析も解析ステップ数は 200 とする。

図 2 に、断層面の各要素の想定角度からの誤差 $\delta\theta$ を示す。図 2 a)及び b)は $\delta\theta$ のヒストグラム及び断層面上コンター図である。図 2 a)より、断層面には 0.5° 以下の微小な凹凸が多く存在することがわかる。また、図 2 b)から、地表面及び地層境界付近で $\delta\theta$ が大きい帯が確認できる。なお、 $\delta\theta > 1.0^\circ$  の要素が 11 個存在する。

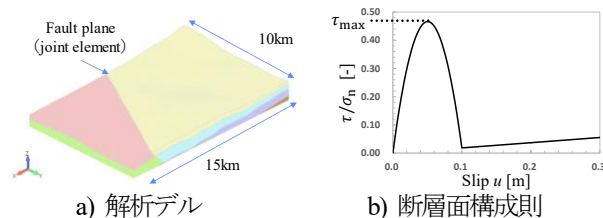


図 1 解析モデル及び断層面構成則

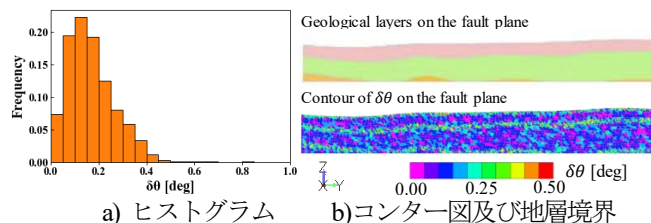


図 2 断層面の想定角度からの誤差 $\delta\theta$

## 3. 断層面の凹凸がずれ変位に与える影響

図 3 に、既往研究<sup>1),2)</sup>と同様に $k_n = 10^8$  kPa/m での、断層面上のずれ変位及び拘束圧コンター図を示す。図

\*E-FrontISTR は大成建設株式会社、一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人東京大学、株式会社アーク情報システム、東電設計株式会社、国立研究開発法人防災科学技術研究所が共同開発する地盤-構造物の非線形解析・活断層評価を目的とした大規模並列 FEM プログラムである。

キーワード 高性能数値計算, 断層変位, FEM, ジョイント要素, 並列計算

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 原子力本部 TEL 03-5381-5315

3 a)より、底部に入力されたずれ変位は、断層面を伝播散逸し、地表まで到達していることがわかる。しかし、図 3 b)より、断層面上の $\sigma_n$ は、ずれ変位の小さい+y境界付近を除き、正負が反転し、ばらついた分布となっている。これは、断層面の凹凸が影響していると考えられる。ピーク強度 $\tau_{\max}$ は $\sigma_n$ に依存するため、この結果はずれ変位の伝播散逸に大きく影響している可能性がある。

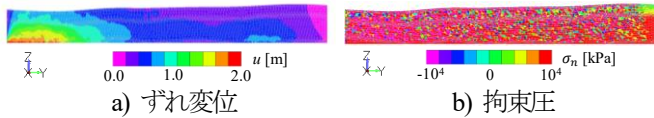


図 3 断層面のコンター図 ( $k_n = 10^8$  kPa/m, step200)

#### 4. 断層面の凹凸の影響の理論的解釈とその緩和方法

ここでは分析のため、上盤・下盤の底面に断層面傾斜方向の変位を $\pm 1.5$  m 载荷する準静的解析を実施する。ここで、地表面及び地層の影響を無視すれば、ずれ変位は水平方向に一定な縦ずれとなり、凹凸部以外では断層変位解析での拘束圧の変化は無視できると考えられる。この時、縦ずれ変位による $\sigma_n$ の変化分は、図 4 a)のように $u \sin \delta \bar{\theta}$ で与えられるため、微小な凹凸に対しては、 $\sigma_n$ は以下のように近似できると考えられる。

$$\sigma_n = \sigma_{n0} + k_n u \delta \bar{\theta} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{n0}$ は自重による初期拘束圧であり、 $\delta \bar{\theta}$ は図 4 a)に示す想定傾斜角からの 2 次元的な角度の誤差である。式(1)の検証のため、図 4 b), c), d)に、各解析ステップでの $\delta \bar{\theta}$ と $\sigma_n$ の関係を示す。この結果は、E.L.-300 ~ -200 mの断層面の要素の結果であり、赤線は近似直線である。また、図には、対象領域のずれ変位の平均値も示している。近似直線は、自重ではほぼ一定であるが、解析ステップが大きくなると、切片はほぼ一定で、傾きが大きくなる。この時、傾きは 100 から 200 ステップで 1.6 倍となるが、ずれ変位の平均値も 1.6 倍となり、傾きがずれ変位に比例していることがわかる。したがって、式(1)が定性的に成立していることがわかる。

上記は近似的な検証であるが、実際の断層変位解析においても、 $\sigma_n$ には $k_n \delta \theta$ に比例した誤差が生じ、図 4 b)の結果を導く。その結果、 $\tau_{\max}$ にも、 $\sigma_n$ を通して、 $k_n \delta \theta$ オーダーの誤差が発生すると考えられる。

$$\tau_{\max} = \tau_{\max}|_{\delta \theta=0} + \sigma(k_n \delta \theta) \quad (2)$$

断層変位解析において、拘束圧をジョイント要素の法線ばねで評価する場合、微小な $\delta \theta$ でもずれ変位の伝播散逸過程に有意な影響を与えるため注意が必要である。

断層面の凹凸の影響は、式(2)より、 $\delta \theta$ を十分小さく

するか、 $k_n$ を小さくすることで緩和できると考えられる。しかし、3次元解析モデルにおいて、副断層等を含む複数の断層を考慮する場合、 $\delta \theta$ を小さくするには大きなコストがかかる可能性がある。そのため、実務的な観点からは、 $k_n$ を適切に設定することが必要となる。この時、 $k_n$ は任意に小さくできないことに注意する。図 5 に、既往研究<sup>2)</sup>及び 3 章と同条件で $k_n = 10^7$  kPa/mとした時の解析結果を示す。ここで、自重による拘束圧は $k_n$ の値で変化はなく、 $k_n$ は十分大きな値となっている。一方、ずれ変位分布は図 3 a)に比べ大きく、断層面の凹凸の影響が緩和されていることがわかる。

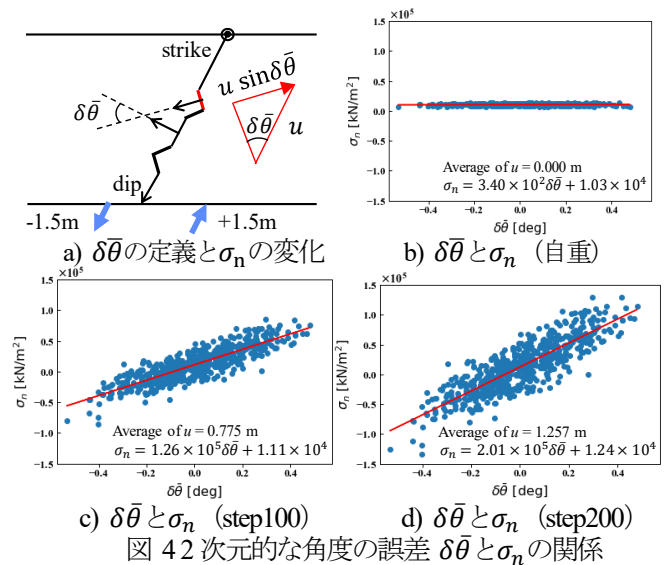


図 4 2次元的な角度の誤差 $\delta \bar{\theta}$ と $\sigma_n$ の関係

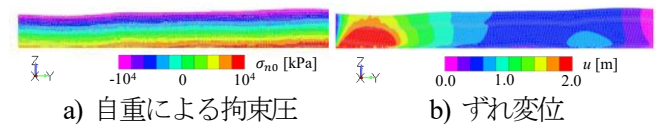


図 5 断層面のコンター図 ( $k_n = 10^7$  kPa/m, step200)

#### 5. まとめ

本稿では、FEM 解析モデルの断層面の凹凸が断層変位の伝播散逸過程に与える影響を整理した。ジョイント要素を用いる断層変位解析では、微小な凹凸がずれ変位に大きな影響を与えるが、法線方向のばね定数の設定値によってその影響を緩和できることがわかった。

#### 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.1-627-1-638, 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 2008 年岩手・宮城内陸地震の断層変位解析, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会予稿集, CS11-16, 2020.
- 3) 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.