

断層変位評価のための広域 FEM 解析 —2014 年長野県北部の地震—

大成建設株式会社 正会員 羽場 一基
 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

大規模な内陸地震において発生する地表断層変位は、近傍の構造物に大きな影響を与える可能性があるため、その安全性評価の必要性が指摘されている。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。著者らは断層変位評価のための並列有限要素法 (FEM) プログラムを開発し、2014 年長野県北部の地震を対象とした数値解析により、その適用性を確認した¹⁾。

近年、断層変位の評価に加え、地震動との重畳に関する検討の必要性も指摘されている。それに対し、著者らは、広域の動的 FEM 解析により地震動を評価し、それを浅部の詳細モデル境界に入力する多段階の断層変位評価を検討している²⁾。本稿では、2014 年長野県北部の地震を対象とした、広域の動的 FEM 解析結果を示す。

2. 解析条件

2014 年長野県北部の地震を対象とした解析を実施する。この地震では震源域南側 9km に渡って地表断層変位が発生し、地表断層北端付近で副断層が観測された。

解析対象領域は、図-1に示す通り、地震断層全域を含む水平方向40km×40km、深さ20km程度とする。図-1には参考に断層変位解析¹⁾で対象とした解析領域を示している。多段階の断層変位評価を行う場合には、広域の動的FEM解析結果を詳細モデル境界に入力する、

本検討では、断層滑りをダブルカップル力で表現し、要素節点に外力として与える。断層面の滑り分布は国土地理院による逆解析結果³⁾ (図-2) を用い、点震源を100m×100m毎に設定した。ただし、滑りの時間依存関数は評価されていないため、引間らの逆解析結果⁴⁾を参考に設定した。解析は0.01秒刻みで20秒まで実施した。

解析モデルの地層形状及び物性値は、せん断弾性波速度 $V_s < 3.4 \text{ km/s}$ で J-SHIS 深部地盤データ、 $V_s \geq 3.4 \text{ km/s}$ で全国1次地下構造モデル(暫定版)を用いて設定し、減衰はQ値に応じたレイリー減衰により設定した。

また、解析モデル側面及び底面に粘性境界を設定した。

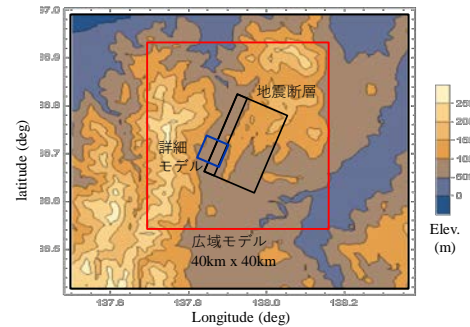


図-1 解析対象領域 (2014 年長野県北部の地震)

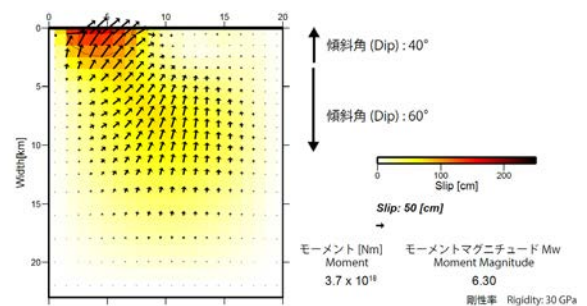


図-2 国土地理院の逆解析結果³⁾

3. 解析モデルの作成

解析モデルは、オクトツリー法により四面体 1 次要素でメッシュ分割し、その後、四面体 2 次要素に修正して作成した。基本的に、オクトツリー法では地表及び地層境界が階段状に表現されるが、特に地表の階段形状は地表付近の応力に大きく影響する可能性がある。そこで本検討では、メッシュ分割に使用する地盤全体のジオメトリを直方体に変換した上でメッシュ分割を行い、その後逆変換を行うことで、地表面を滑らかに表現した。この時、地層境界は階段状になることに注意する。

本検討では対象周波数を 2.5Hz とし、最小節点間距離を 31.25 m とし解析モデルを作成した。図-3 に作成した解析モデルを示す。ここで、+y 軸方向が北方向に対応する。また、参考のため、図には地震断層の想定位置を白点線で示している。解析モデルは 7 層の地層によ

キーワード 断層変位, 重畳, 高性能数値計算, 並列計算, 三次元解析

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 TEL03-5381-5315

り構成され、総自由度数が 228,465,240 である。地表面の大部分は $V_s = 1.0 \text{ km/s}$ の地層（青色部分）で覆われるが、山間部では $V_s \geq 2.0 \text{ km/s}$ の地層が表れる。

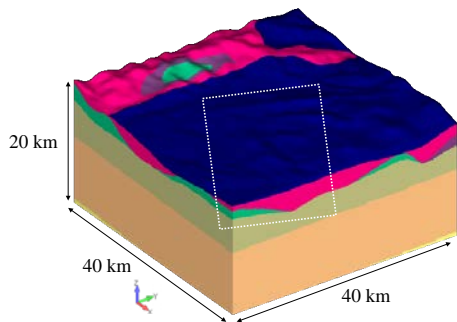


図-3 解析モデル

3. 評価結果

本解析は、2048CPU コアの並列計算を実施し、計算時間は約 7.1 時間であった。

図-4 に地表面の y 方向変位コンター図を示す。地表断層変位が発生した地震断層の南側 ($-y$ 側) で大きな永久変位が発生している。それとは別に、上盤側 ($+x$ 側) で断層から離れた場所に変位が大きい領域が確認できる。分析の結果、5.0 秒のそれは深部のアスペリティからの影響である。一方、10.0 秒以降の結果は、断層浅部の滑りにより、断層面に垂直な方向に変位が伝播し、それが散逸していくためであることが分かった。

次に、地表断層変位の発生領域を確認するため、地表面の局所安全係数 (LSF) を評価した。LSF は斜面の安全率評価で用いられる指標で、各要素の破壊の (せん断) 破壊に対する余裕度を表す指標であり、図-5 で与えられる。図-6 に地表面の局所安全係数のコンター図を示す。この時、粘着力及び内部摩擦角は 1.2 MPa 及び 30 deg とした。この結果から、主断層の南側 ($-y$ 側) で LSF が 1 を切る領域が広がっており、観測結果と一致する。さらに、南側では、主断層の地表断層線に平行に局所安全係数が小さい帯が確認できる。これは、観測されたバックスラストによる副断層に対応すると考えられる。断層変位評価に用いる詳細モデルでは断層面を陽にモデル化する必要があるが、LSF を用いることで、副断層発生領域や副断層の形状を予測できる可能性がある。

4. まとめ

本検討では、2014 年長野県北部の地震を対象とした広域の動的 FEM 解析を実施した。その結果、地表及び地層構造をモデル化することで、食い違いの弾性論で

は評価できない複雑な変位を評価できることが分かった。さらに、局所安全係数を用いることで、副断層の発生位置及び形状を予測できる可能性が示唆された。今後は、本解析で得られた結果を、詳細モデルに入力し、多段階の断層変位評価を実施する予定である。

本解析の一部は、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用して実施したものである。

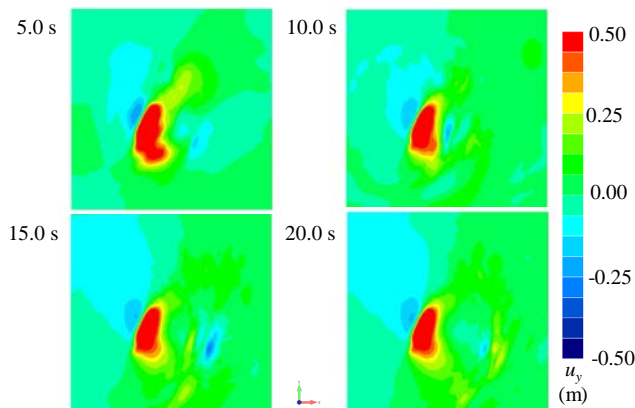


図-4 地表面の y 方向変位 u_y の変化

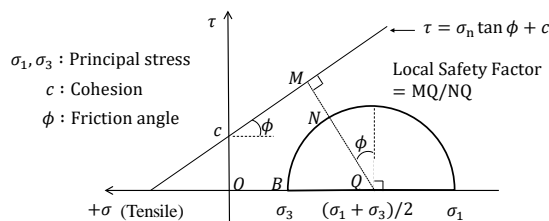


図-5 局所安全係数 (引張強度 0)

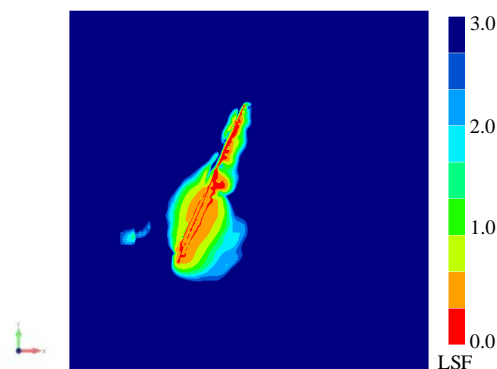


図-6 地表面の局所安全係数 (LSF) のコンター図

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, 土木学会論文誌 A2, Vol. 74, No. 2, pp. I_627-I_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) 国土地理院: 「だいち 2 号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図と滑り分布モデル (暫定), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/14dec_nagano/p29.htm
- 4) 引間和人, 中村亮一, 植竹富一: 2014 年長野県北部の地震 (Mj6.7) の震源過程～震源近傍の広帯域地震波形を考慮した解析～, 日本地震学会講演予稿集 2015 年度秋季大会, S15-14, 2015.