

最適化アルゴリズムと有限要素解析による断層面形状探索 —スリップパーティショニングを例として—

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 正会員 竿本英貴

1. はじめに

地震時に活断層周辺で生じる地表変位を予測することは、変位が社会基盤施設に与える影響を考察する上で重要である。2つの断層面が近接する場合、地震時に一方の断層面に縦ずれが、もう一方の断層面に横ずれが生じる事例が報告されており、この現象はスリップパーティショニング(図-1)として知られている¹⁾⁻³⁾。スリップパーティショニングは、その発生条件については未解明な部分が多い。本研究では、最適化アルゴリズムと断層面傾斜角・広域応力場方位をパラメータとする有限要素解析(断層変位評価)を組み合わせることで、スリップパーティショニングの程度が最大となる断層面形状・主応力方位を探索した。

2. スリップパーティショニングを生じさせる断層面形状の探索

図-2は、本研究で用いる最適化システムであり、最適化アルゴリズム部と断層変位に対する有限要素解析部からなる。

最適化アルゴリズムとして、2種類のベイズ最適化アルゴリズム(Tree-structured Parzen Estimator(TPE), Gaussian Process(GP)), 進化戦略に分類される Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy(CMA-ES), 勾配情報不要の Bound Optimization BY Quadratic Approximation(BOBYQA)の4種類についてそれぞれ検討する。ベイズ最適化は計算コストが大きく計算回数が制限される非線形最適化問題に、進化戦略は計算コストが小さく計算回数が稼げる非線形最適化問題に、勾配情報不要アルゴリズムは計算コストが大きく非線形性が比較的弱い問題に用いられることが多い。各アルゴリズムはオープンソースのライブラリを利用して実装した(TPEとCMA-ESはOptuna, GPはBayesian Optimization, BOBYQAはPy-BOBYQA。紙面の都合上、ライブラリ名称のみ記入)。

最適化アルゴリズムから、3つのパラメータ(断層面に対する最大主応力方向 θ (図-2)と断層面の傾斜角 ϕ_1, ϕ_2 (図-3)が断層変位解析コード(COMSOL Multiphysics[®]上で実装)に引き渡され、断層変位が算出される。得られた断層変位分布からスリップパーティショニング強度 I_{sp} (独自に定義した目的関数^{4),5)}で断層面1の断層変位の鉛直方向成分の平均値と断層面2の断層変位の水平方向成分の平均値の積)を算出し、最適化アルゴリズムに返す。最適化アルゴリズムは I_{sp} を最大化するように図-2で示したサイクルを繰り返す。

3. パラメータ探索結果

今回、断層変位解析1回にかかる計算時間は20秒程度であり、各アルゴリズムに対して500回の I_{sp} 評価を実施した。結果、どの最適化アルゴリズムも最適パラメータ値として似通った値を算出しており(表-1)、今回の検討ではアルゴリズム性能の差はほとんどないと言える。ただし、 I_{sp} の最大値(約 0.4 m^2)に到達するまでの解析ステップ数はアルゴリズム毎に異なり、今回の問題に対してはBOBYQAが比較的少ないステップ数で I_{sp} の最大値に到達している(図-4)。この結果より、パラメータ探索においては、まずはBOBYQAの使用を検討するのが1つの方針と考える。

図-5は、CMA-ESによって探索された最適パラメータを断層変位解析コードに入力した場合の断層面上すべり分布を示している。断層面1上では縦ずれ成分が、断層面2上では横ずれ成分がそれぞれ卓越していることが確認できる。

4. まとめ

計算時間が長い有限要素解析についての検討が今後必要となるが、1回の計算時間が20秒程度であれば最適化アルゴリズムを有限要素解析コードと組み合わせることにより自動的に断層面形態を推定できると考え

キーワード: 活断層, 断層変位, 最適化, 有限要素法

連絡先: 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7 Tel 029-849-1075

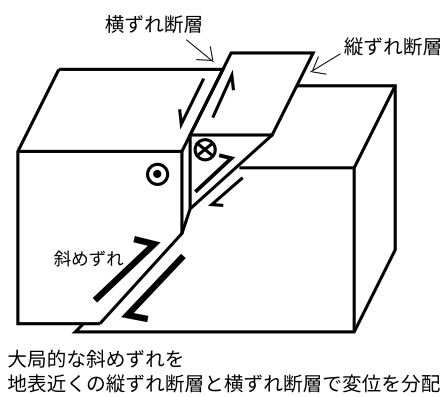


図-1 断層変位のスリップパーティショニングの模式図

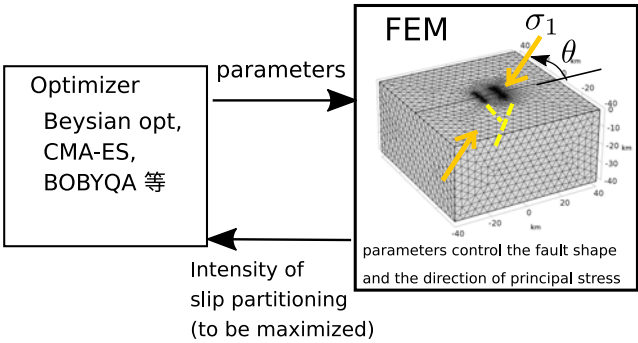


図-2 最適化システムの概要

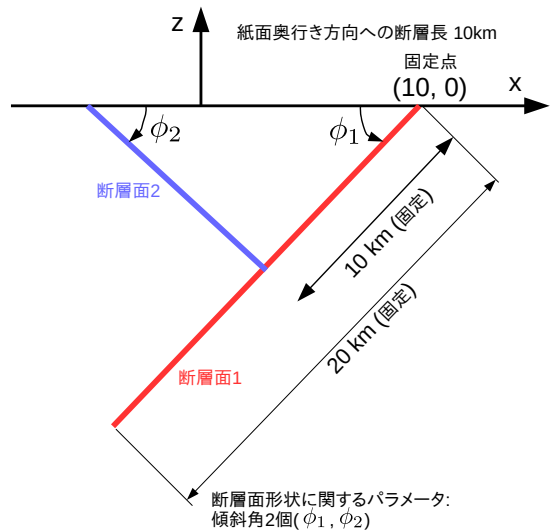


図-3 断層面に関するパラメータ (傾斜角 ϕ_1, ϕ_2)

表-1 各アルゴリズムから求めた最適パラメータ

アルゴリズム	θ (deg)	ϕ_1 (deg)	ϕ_2 (deg)
TPE	34.39	54.49	87.84
GP	34.35	54.33	86.24
CMA-ES	34.19	54.51	86.37
BOBYQA	34.51	54.43	86.82

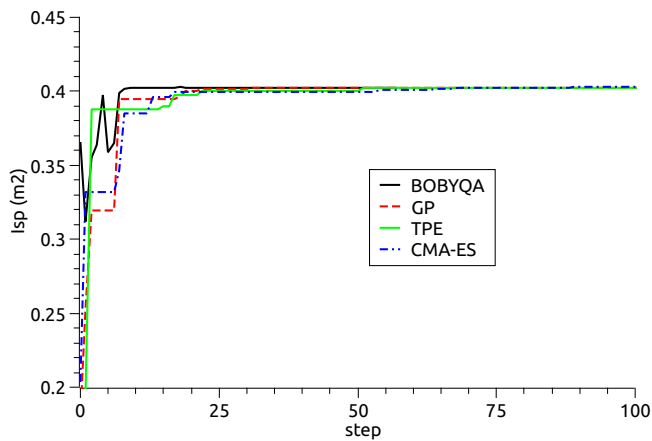


図-4 最適化途中における I_{sp} の変化

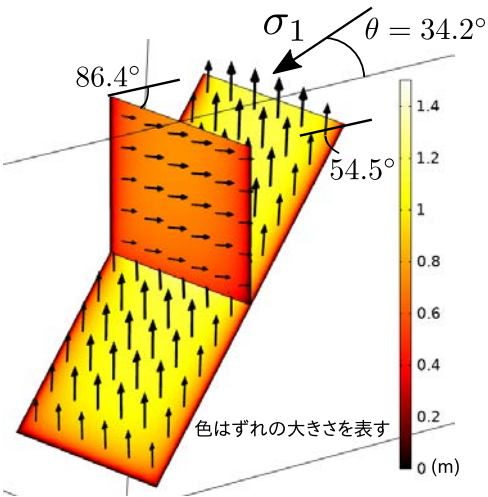


図-5 探索された傾斜角と主応力方位 (CMA-ES)

る。今後は、計算時間が長い場合についての検討を進めるとともに、社会基盤施設に断層変位が作用するシナリオのうちでシビアなケースの探索に本手法を適用したい。

参考文献

1) Toda et al., *Earth Planets Space*, doi:10.1186/s40623-016-0560-8, 2016.
2) Wesnousky et al., *Geology*, Vol. 22, No. 11, pp. 1031–1034, 1994.
3) King et al., *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 95, No.2, pp. 731–738, 2005.
4) 竿本, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, I-25–I-35, 2019.
5) Saomoto, *Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems*, MS08-2-06, 2020.