

斜面安定解析への量子アニーリングの適用性の検討

Application of Quantum Annealing to Slope Stability Analysis

外里健太¹⁾ Xiao Junsen²⁾ 須郷大地³⁾ 山内翔太⁴⁾ 野村怜佳⁵⁾

森口周二⁶⁾ 高瀬慎介⁷⁾ 金子賢治⁸⁾ 寺田賢二郎⁹⁾

Kenta Tozato, Junsen Xiao, Daichi Sugo, Shota Yamauchi, Reika Nomura,
Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenji Kaneko and Kenjiro Terada

¹⁾八戸工業大学工学部工学科（〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1, E-mail: k-tozato@hi-tech.ac.jp）

²⁾東北大大学院工学研究科（〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

³⁾東北大大学院工学研究科（〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

⁴⁾八戸工業大学大学院社会基盤工学専攻（〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1）

⁵⁾東北大大学災害科学国際研究所（〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

⁶⁾東北大大学災害科学国際研究所（〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

⁷⁾八戸工業大学大学院社会基盤工学専攻（〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1）

⁸⁾八戸工業大学大学院社会基盤工学専攻（〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1）

⁹⁾東北大大学災害科学国際研究所（〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

This study investigates the applicability of quantum annealing in slope stability analysis. In the three-dimensional limit equilibrium method, which assumes an ellipsoid as the shape of the slip surface, the factor of safety is calculated as an index for evaluating stability. Since the factor of safety varies depending on conditions such as the length and depth of the slip surface, it is necessary to search for the critical slip surface shape which gives the minimum factor of safety. In this study, we apply optimization by Factorization Machine with Quantum Annealing and discuss its applicability to efficient slip surface shape search.

Key Words : Slope Stability Analysis, Limit Equilibrium Method, Optimization, Quantum Annealing, Factorization Machine

1. はじめに

近年、豪雨等による斜面災害が頻発しており、全国各地で斜面災害が発生している[1]。そのような斜面災害の危険度を広域的に評価するための手法のひとつとして、極限平衡法をベースとした斜面安定解析がある。安全率として斜面災害の危険度を評価するための手法であり、安全率の計算は様々なすべり面形状を仮定して最小の安全率を探索する形で行われている[4,5]。しかし、すべり面の形状に影響を与えるパラメータが多く存在し、かつ広域を対象とする場合には対象斜面も多くなることから、その効率化が求められている。

また、量子コンピュータの研究開発が近年盛んにおこなわれてきており、大規模な問題に対して高速で解を求める可能性を有していることから、様々な分野での研究開発が応用例が議論されてきている。土木の分野においてもいくつかの適用例がある[2,3]。本研究では、量子コンピューティング技術の1つである量子アニーリング(QA:Quantum Annealing)を斜面安定解析での最小安全率となる臨界すべり面形状を求める問題へ用いることで、斜面災害シミュレーションへの適用性について検討することを目的とする。

2. 量子アニーリング

量子アニーリング(QA)は、量子揺らぎや量子トンネル効果を用いて最小のエネルギー状態を探索する方

法であり、組み合わせ最適化問題に対して適している手法である。本研究では、FMQA (Factorization Machine with Quantum Annealing)を斜面安定解析に適用し、臨界すべり面形状を決定する問題への適用性を検討する。

FMQAは、ブラックボックス最適化手法の1つであり、機械学習と量子アニーリングを組み合わせた手法である。何らかの目的関数 $y = f(\mathbf{x})$ を最小化する変数 \mathbf{x} を求める問題として表され、本研究では、斜面形状等を表現するパラメータに対する安全率の算出の部分がブラックボックス関数に相当する。FMQAでは、変数 \mathbf{x} は0または1を取るバイナリ変数として表現される。具体的な計算の流れは以下のとおりである。

1. 初期教師データの準備: N_0 個の入力データ $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_0}\}$ と出力値 $\{f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_{N_0})\}$ を用意する
2. Factorization Machine によって機械学習モデルを作成する
3. 作成した機械学習モデルに対して、量子アニーリングを用いてその最小値を与える入力値 $\hat{\mathbf{x}}$ を求める
4. その入力値 \mathbf{x} に対応する出力値 $f(\hat{\mathbf{x}})$ を計算し、その入出力データを教師データに追加する。2~4の流れを試行回数分だけ繰り返す。

ブラックボックス関数の近似に用いる Factorization

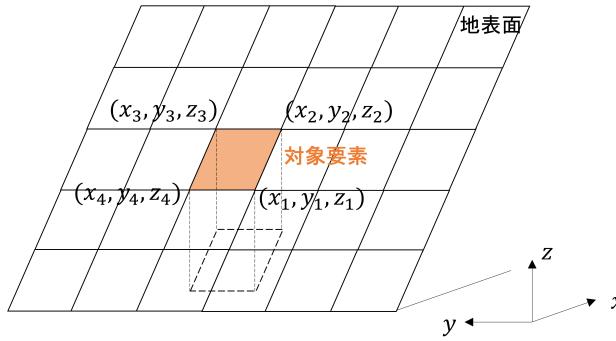


図-1 計算対象要素の抽出

Machine は以下の式で表される.

$$\hat{y}(x|\mathbf{w}, \mathbf{v}) = w_0 + \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + \sum_{i=1}^d \sum_{j=i+1}^d \langle \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j \rangle x_i x_j \quad (1)$$

ここで, $w_0, \mathbf{w}, \mathbf{v}_i (i = 1, \dots, d)$ はそれぞれモデルのパラメータであり, w_0 はスカラー, \mathbf{w} は n 個の要素を持つベクトル, \mathbf{v}_i は k 個の要素を持つベクトルである. また, $\langle \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j \rangle$ は内積を表しており, k はハイパーパラメータである.

本研究で対象とする入力変数は実数であることから, バイナリ変数に変換をする必要がある. いくつかのエンコーディング手法の中から, 本研究では代表的な手法である One-Hot Encoding を採用した. One-hot Encoding では, ある入力変数の取りうる解の候補のベクトル \mathbf{r} と, 同じ長さの q なるバイナリ変数を持つベクトルを用意する. そのベクトル \mathbf{q} は, \mathbf{r} の中の表現する値に対応する要素のみ 1 を取り, その他では 0 を取るような変数として表現される. ある i 番目のパラメータ x_i について, 式として表現すると以下のようになる.

$$x_i = \langle \mathbf{r}_i, \mathbf{q} \rangle \quad (2)$$

3. 極限平衡法による斜面安定解析

本研究では, 3 次元極限平衡法に基づく斜面安定解析における安全率の算出での FMQA の適用性について検討する. 計算手法については, Tozato et al. [4] や須郷ら [5] で用いられている, すべり面に橿円体を仮定して安全率を計算する手法を用いる. その中では, 対象とする評価地点に対して様々なすべり面形状 (橿円の三軸・すべり深・すべり方向など) を変化させて臨界すべり面を探索しており, その問題に対して FMQA を適用する.

(1) すべり面形状の設定

本研究では, 地形データを格子状の標高データとして表現し, ある 1 つのセルを対象として安全率の評価を行う. まず, 図-1 に示すような対象要素について, x, y 方向の平均標高差を以下の式で表現する.

$$\Delta z_x = \frac{(z_2 + z_3) - (z_1 + z_4)}{2} \quad (3)$$

$$\Delta z_y = \frac{(z_3 + z_4) - (z_1 + z_2)}{2} \quad (4)$$

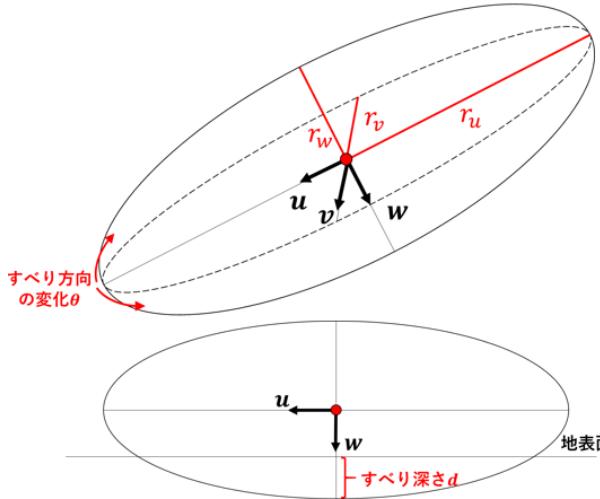


図-2 橿円体の 3 軸方向とすべり深さ

これらの値を用いて, 図-2 に示す橿円体の 3 軸方向 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ を単位ベクトルとして以下の式により表現する.

$$\mathbf{u} = \frac{-(\Delta z_x, \Delta z_y, \Delta z_x^2 + \Delta z_y^2)}{|(\Delta z_x, \Delta z_y, \Delta z_x^2 + \Delta z_y^2)|} \quad (5)$$

$$\mathbf{w} = \frac{(\Delta z_x, \Delta z_y, -1)}{|(\Delta z_x, \Delta z_y, -1)|} \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{w} \quad (7)$$

ここで, \mathbf{u} が地表面上の勾配の最も大きい方向を示す単位ベクトルであり, すべり方向を表現する. \mathbf{w} が地表面の単位法線ベクトルである. また図-2 に示すように, これら 3 つの単位ベクトル方向の半径 r_u, r_v, r_w を設定し, 橿円体内部に含まれる土柱に作用する力を求めることで, 安全率の計算を行う. 安全率の計算の流れについては次節に示す.

本研究では, 3 軸方向の半径を様々変化させることで臨界すべり面形状を探索する. また, 橿円体の中心位置を \mathbf{w} 方向に変化させることで, 図 2 のようにすべり深さ d についても変化させるとともに, 対象セルの標高値から計算されるすべり方向 \mathbf{u} も変化させ, 臨界すべり面の探索を行う. \mathbf{u} については, \mathbf{u}, \mathbf{v} 平面上で θ だけ回転させることで変化させる.

(2) 安全率の計算

極限平衡法では, 安全率 F は以下の式により定義される.

$$T = \frac{1}{F} \{cA + (N - uA) \tan \phi\} \quad (8)$$

ここで, T はせん断力, c は粘着力, A はすべり面の面積, u が間隙水圧, N が垂直力, ϕ が内部摩擦角である. 本研究では, いくつか存在する 3 次元極限平衡法の手法のうち, Hovland 法を用いて安全率の計算を行う.

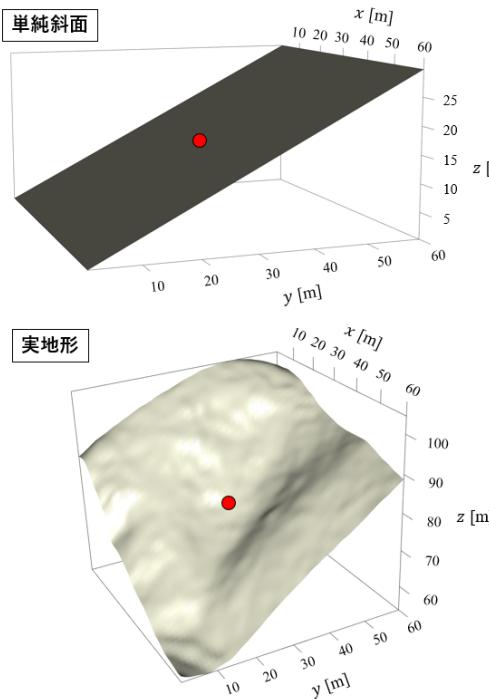


図-3 対象とする地形データ

Hovland 法では、以下の式に示す垂直力方向の力のつり合いと v 方向のモーメントのつり合いを考慮する。

$$(\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{N}_{ij} + \mathbf{W}_{ij}) \cdot \mathbf{n}_{ij} = 0, \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_j (\mathbf{r}_b \times \mathbf{T}_{ij} + \mathbf{r}_b \times \mathbf{N}_{ij} + \mathbf{r}_g \times \mathbf{W}_{ij}) \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{N}_{ij}, \mathbf{T}_{ij}, \mathbf{W}_{ij}$ は、 ij 番目の要素にはたらく垂直力ベクトル、せん断力ベクトル、重力ベクトルであり、 $\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_g$ はそれぞれ樁円体中心からすべり面、重心までの位置ベクトルである。式 (8),(9),(10) より安全率を計算する。

4. 臨界すべり面の探索

(1) 解析条件

本研究では、図-3 に示す単純斜面と実地形の 2 つの地形データを用いて解析を実施した。実地形については、Tozato et al.[4] で解析を実施した領域の一部を使用しており、解析に使用した地形データの空間解像度は 1m として設定している。また、解析パラメータについては、粘着力 $c = 4.0 \text{ kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi = 34.0^\circ$ 、単位体積重量を 17.3 kN/m^3 とし、空間的に一様な値としている。

まず、本研究で対象とする入力変数については、3 軸の半径 (r_u, r_v, r_w)、樁円体中心のすべり面直角方向の位置 (深さ d)、すべり面方向の変化 θ の 5 つとした。3 軸の半径については、すべり方向の半径 r_u については長さで、 r_v, r_w については、 r_u に対する倍率 (< 1) と

表-1 入力パラメータの取りうる範囲

	最小値	最大値
r_u	10.0 m	20.0 m
$r_v (r_u$ に対する倍率)	0.3	0.7
$r_w (r_u$ に対する倍率)	0.3	0.7
$d (r_w$ に対する倍率)	0.2	0.8
θ	-45°	45°

して与えることとした。また、樁円体中心のすべり面直角方向の位置については、 r_w に対する割合として与え、すべり方向 \mathbf{u} については、式 (5) で示す方向を中心としてプラスマイナスで回転させることとして設定する。各パラメータの具体的な値の範囲については以下の表-1 に示すとおりである。

また、One-hot Encoding での各変数の分割数 (解の候補) についてはそれぞれ 41 とし、探索回数については、初期データ数を 20、臨界円を探索するサイクル数を 180 として設定した。初期の 20 ケースについてはランダムに設定することとしている。また、FMQA で得られた安全率の結果と、同じサイクル数でランダムにパラメータを変化させて臨界すべり面を探索した時の結果、またペイズ最適化を用いて探索を実施したときの結果とで比較を行う。なお、FMQA の計算には Fixstars 社の Fixstars Amplify を用いて検証を実施した。

(2) 結果

ランダムサーチ、ペイズ最適化、FMQA の 3 手法で求められた最小の安全率の結果を表-2, 3 に示す。また、各手法でのサイクル数に対する安全率の変化について図-4, 5 に示す。これらの図では、そのステップ数までの安全率の値のうち最小値を表しており、グレーで網掛けしている部分が初期の 20 ケースを示している。

これらの結果から、単純斜面、実地形の両方の場合において、得られる安全率の値はペイズ最適化で最も小さく、次いで FMQA、ランダムサーチという結果となった。FMQA での安全率がペイズ最適化よりも大きくなった理由として、FMQA では各パラメータを離散的な値でしか表現できず、表現できない実数の部分でより安全率が小さくなるパラメータの組み合わせが存在するためであると考えられる。

次に、単純斜面での結果について FMQA とペイズ最適化の結果を比較すると、深さのパラメータを除いて概ね近いパラメータの値となっていることが確認できる。単純斜面では、すべり方向が $\theta = 0^\circ$ において最小安全率を取るが、FMQA では 0° とという結果が得られていることから、おおむね最小安全率に近い臨界円が求められているといえる。

また実地形のペイズ最適化と FMQA のパラメータの結果をみると、やや異なる値となっていることが確認できる。これは同じようなパラメータでも安全率が大きく異なる場合があることによるものと考えられる。本研究の安全率の計算では、1m メッシュが樁円体内に入っているかを判定し、入っているメッシュを対象に土柱に作用する力を考慮して安全率を計算する。そのため、

表-2 各手法で求められたすべり面パラメータと安全率(単純斜面)

	安全率	r_u [m]	r_v [m]	r_w [m]	d [m]	θ [°]
ランダムサーチ	1.80	19.75	13.23	10.01	2.09	2.64
ベイズ最適化	1.72	20.00	14.00	8.59	2.06	-1.26
FMQA	1.74	20.00	14.00	9.00	3.02	0.00

表-3 各手法で求められたすべり面パラメータと安全率(実地形)

	安全率	r_u [m]	r_v [m]	r_w [m]	d [m]	θ [°]
ランダムサーチ	1.01	14.66	4.44	8.38	2.17	1.03
ベイズ最適化	0.84	20.00	6.00	13.24	2.64	7.99
FMQA	0.89	17.25	5.34	11.73	2.35	11.73

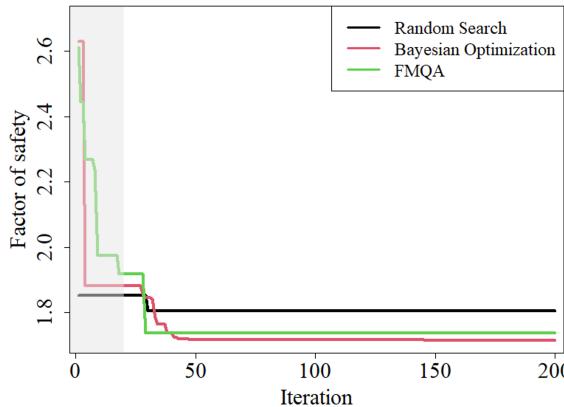


図-4 各手法での繰り返し回数と最小安全率(単純斜面)

少しのパラメータの違いで計算対象の土柱の数が変化する場合があることから、最適値として得られる値に違いが生じるものと考えられる。

最後に、図-4,5の安全率の収束の様子について比較すると、単純斜面ではおおむね同じタイミングで安全率は変化する一方、実地形ではベイズ最適化の方が早いステップ数で収束することが確認できる。収束の様子や得られる安全率、入力パラメータについては初期ケースにも依存していることから、それらのばらつきの影響も考慮した評価が今後必要である。

5.まとめ

本研究では、3次元極限平衡法を用いた斜面安定解析について、臨界すべり面形状の探索に対してFMQAを適用した。得られた結果から、ランダムに探索する場合に比べてFMQAの方が効率的に安全率の小さくなるすべり面形状を探索することが可能であることを確認できた一方で、ベイズ最適化と比較した場合には有効性は確認できなかった。

本研究では、すべり面の形状とすべり方向のみを入力パラメータとしたが、斜面安定解析ではそのほかにも地下水位や基盤面なども安全率に影響を与えるパラメータであることから、それらの影響も考慮に入れた場合の有効性についても今後検討が必要である。

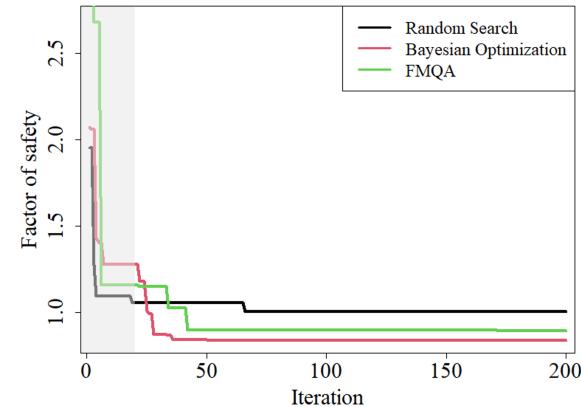


図-5 各手法での繰り返し回数と最小安全率(実地形)

参考文献

- [1] 国土交通省 砂防, 令和5年の土砂災害, <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r5dosha/r5dosyasaigai.pdf>, 2023.
- [2] 石橋 寛樹, 石神 晴久, 濱野 倫弥, 岩城 一郎: 量子コンピュータに関する研究開発動向および土木分野への応用と将来展望, AI・データサイエンス論文集, Vol. 4, No. 3, pp. 310-319, 2023.
- [3] 珠玖隆行, 山本真哉: 量子アニーリングによる地盤構造物の最適設計に関する基礎研究, 土木学会論文集C, Vol. 78, No. 2, pp. 116-127, 2022.
- [4] K. Tozato, N. L. J. Dolojan, Y. Touge, S. Kure, S. Moriguchi, S. Kawagoe, S. Kazama, and K. Terada: Limit equilibrium method-based 3D slope stability analysis for wide area considering influence of rainfall, *Engineering Geology*, Vol. 308, p. 106808, 2022.
- [5] 須郷大地, 藤田真粹, 外里健太, 野村怜佳, 森口周二, 寺田賢二郎: 三次元極限平衡理論に基づく広域斜面安定解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 28, pp. 404-408, 2023.