

斜面安定解析結果を用いた 豪雨による広域斜面崩壊の即時予測

Rapid prediction of rainfall-induced landslides for a wide area
using slope stability analysis results

外里健太¹⁾ 野村怜佳²⁾ 森口周二³⁾ 寺田賢二郎⁴⁾
Kenta Tozato, Reika Nomura, Shuji Moriguchi 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⁾東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: nomura@irides.tohoku.ac.jp)

³⁾東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: s_mori@irides.tohoku.ac.jp)

⁴⁾東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp)

This study presents a framework that can rapidly predict rainfall-induced landslides for a wide area by creating a surrogate model for slope stability analysis. By combining infiltration analysis and three-dimensional slope stability analysis, the landslide risk is evaluated as a factor of safety. Using the numerical analysis results considering various rainfall scenarios and combining the mode decomposition technique as well as Gaussian process regression, a surrogate model for predicting the rainfall-induced landslides is constructed. In this study, applicability to the analysis of actual terrain is discussed.

Key Words : Slope stability analysis, Surrogate model, Rapid prediction, Landslide

1. 緒言

わが国では、毎年のように豪雨に起因する斜面崩壊が各地で発生している。近年の例でみても、2018年の西日本豪雨で2081件、2019年東日本台風で952件が報告されるなど、広域において多数の斜面崩壊が発生している。このような広域で発生する斜面崩壊による被害を軽減するためには、斜面の危険度を降雨の状況に合わせて即時的に予測可能な技術が必要である。

豪雨に起因する広域での斜面崩壊の既往研究例としては、過去の斜面崩壊の事例に基づいて、降雨強度と継続時間の閾値関数を設定する例[1]や、過去の斜面崩壊データと地形地質特性、水文的特性、降水量などのデータを組み合わせて、統計的に斜面崩壊危険箇所を予測する例[2]、無限長斜面安定解析などを用いて力学的な評価を実施する例[3]などが挙げられる。

このように、豪雨による広域斜面崩壊の予測について様々なアプローチが存在しているものの、3次元極限平衡法のような、力学的に高度な数値解析結果を用いて即時予測を実施する研究例はほとんど存在しない。そこで本研究では、3次元極限平衡法による斜面安定解析の結果を広域斜面崩壊危険度評価に活用するための枠組みを提案することを目的とする。具体的には、降水量の不確実性を考慮して様々な降雨シナリオで数値解析を実施し、斜面安定解析結果のデータベースを生成する。そのデータを用いて代理モデルを構築することで、降雨データから即時的に斜面崩壊危険度マップを出力可能とする枠組みの提案を行う。

2. 数値解析手法

本研究では、降雨に起因する斜面崩壊の危険度評価を、浸透解析と斜面安定解析の2つを組み合わせることによって行う。

(1) 浸透解析

浸透解析には、Green-Ampt モデル[4]を使用する。Green-Ampt モデルでは、浸潤面より下側で初期の体積含水率が保たれるとして浸潤面より上から地表面までの領域を飽和条件と仮定し、1次元的に浸透挙動を表現する簡易的なモデルである。本研究では、広域を対象とした評価を実施することから、比較的計算コストの小さい本モデルを採用した。また、広域を対象とする場合には、基盤面（不透水面）の空間的な分布の情報が得られないことが多いため、その情報を必要としないという意味でも本モデルにメリットがあると考えて採用した。

Green-Ampt モデルはダルシー則に由来してモデル化がなされており、時間変化を伴う降雨に対する傾斜角 α の斜面について、ある時刻 t_n での累積の浸透量 I_n と浸透率 f_n は以下の式で与えられる[5]。

$$I_n = I_o + K_s \cos \alpha \Delta t + \frac{\psi \Delta \theta}{\cos \alpha} \left(\ln \left(\frac{I_n \cos \alpha + \psi \Delta \theta}{I_o \cos \alpha + \psi \Delta \theta} \right) \right) \quad (1)$$

$$f_n = K_s (\cos \alpha + \frac{\psi \Delta \theta}{I_n}) \quad (2)$$

ここで、 I_o が時間ステップ t_o での累積浸透量、 $\Delta t = t_n - t_o$ であり、 K_s が飽和透水係数、 ψ が浸潤面におけるサクション、 $\Delta \theta$ が初期体積含水率と飽和体積含水率の差で

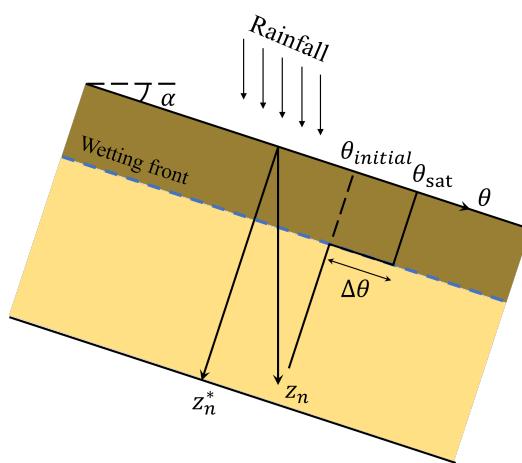


図-1 Green-Ampt モデルによる浸透解析のイメージ

ある。降雨強度がその時刻における浸透率 f_n を下回る場合には、すべての降雨が地中に浸透していくことになるため、累積浸透量は降水量の分だけ加算される形になる。一方で、降雨強度が浸透率 f_n を上回る場合には、すべての水が地中に浸透しきらないため、式(1)によって累積浸透量が求められ、浸透しきらない分が地表水として残ることになる。

次に、浸透深さについて、時間ステップ t_n での斜面垂直方向の浸透深さを z_n^* とするとき、

$$z_n^* = \frac{I_n}{\Delta\theta} \quad (3)$$

となり、鉛直方向の浸透深さ z_n は、以下の式で算出される。

$$z_n = \frac{I_n}{\Delta\theta \cos\alpha} \quad (4)$$

以上の Green-Ampt モデルによる浸透解析のイメージを図-1 に示す。

(2) 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手法の1つである Hovland 法 [6] を採用して斜面崩壊危険度の評価を行う。Hovland 法では、すべり面によって切り取られる崩壊土塊を土柱に分解し、それらの抵抗力と滑動力の合計の値の比から安全率 F を算出する。そのイメージを図-2 に示す。具体的に数式で表すと以下のようになる。

$$F = \frac{\sum_i \sum_j \{cA + (N_{ij} - u_{ij}A) \tan\phi\}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \quad (5)$$

ここで i と j がそれぞれ土柱の x, y 方向の番号、 T_{ij} が土柱のせん断力、 N_{ij} がすべり面上の垂直力、 W_{ij} が土柱重量、 u_{ij} が間隙水圧、 c が粘着力、 A が土柱のすべり面の面積、 ϕ が内部摩擦角を表している。本研究では、すべり面形状を楕円体と仮定して安全率の算出を行う。

Hovland 法では、土柱側面に働く力をゼロとして仮定して安全率を算出する。垂直力方向の力のつり合いと

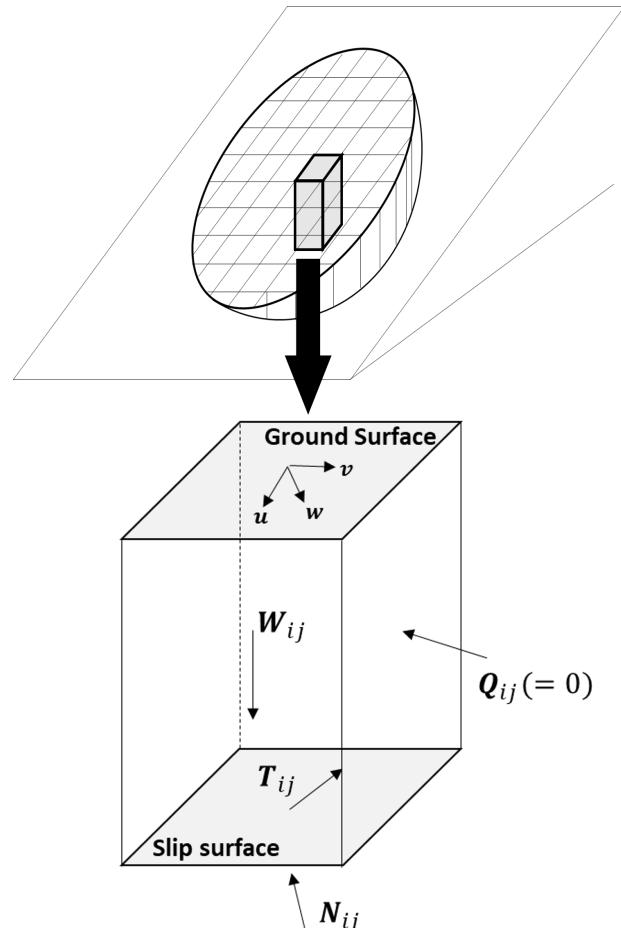


図-2 3次元斜面安定解析のイメージ

すべり体全体でのすべり方向に垂直な方向 v のモーメントのつり合いを考えれば以下のようになる。

$$(T_{ij} + N_{ij} + W_{ij}) \cdot \mathbf{n}_{ij} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j (\mathbf{r}_b \times \mathbf{T}_{ij} + \mathbf{r}_b \times \mathbf{N}_{ij} + \mathbf{r}_g \times \mathbf{W}_{ij}) \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

ここで、方向 v は、 $\mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{w}$ で求められる方向であり、 \mathbf{u} はすべり方向を表現する単位ベクトル、 \mathbf{w} がその方向と地表面に垂直で地中方向を向く単位ベクトルである。また、 $\mathbf{T}_{ij} = T_{ij}\mathbf{t}_{ij}$ 、 $\mathbf{N}_{ij} = N_{ij}\mathbf{n}_{ij}$ 、 $\mathbf{W}_{ij} = W_{ij}\mathbf{g}$ がそれぞれせん断力、垂直力、重力をベクトル表現で表したものであり、 \mathbf{t}_{ij} 、 \mathbf{n}_{ij} 、 \mathbf{g} がそれぞれ方向を表す単位ベクトルである。また、本研究では、すべり面として楕円体を仮定することから、 \mathbf{r}_b と \mathbf{r}_g をそれぞれ楕円体の回転中心から土柱底面中心、土柱重心までの位置ベクトルとして表している。式(5)、(6)、(7)から、安全率は以下の式のように書き換えられる。

$$F = \frac{\sum_i \sum_j (\mathbf{t}_{ij} \times \mathbf{r}_b) \cdot \mathbf{v} [cA - \{W_{ij}(\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_{ij}) + u_{ij}A\} \tan\phi]}{\sum_i \sum_j W_{ij} \{-(\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_{ij})(\mathbf{r}_b \times \mathbf{n}_{ij}) \cdot \mathbf{v} + (\mathbf{r}_g \times \mathbf{g}) \cdot \mathbf{v}\}} \quad (8)$$

最後に、すべり面上での間隙水圧の与え方について、既往の研究 [7] で用いられている手法を採用した。間隙

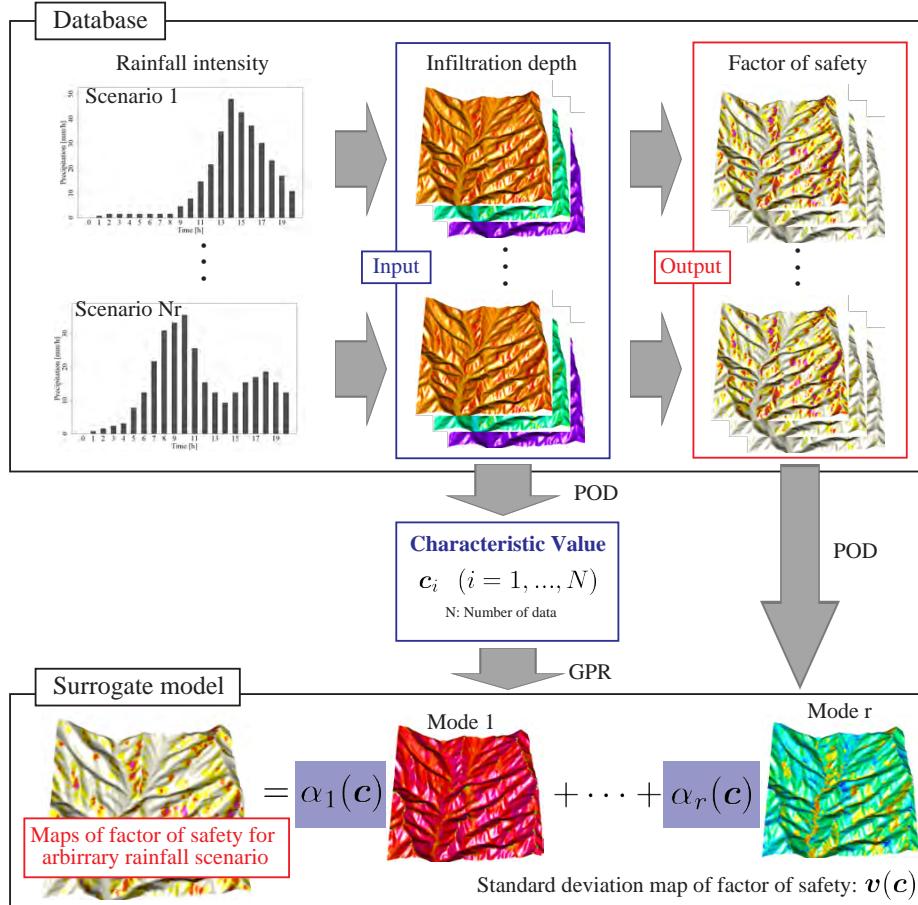


図-3 斜面崩壊危険度評価の代理モデル構築の流れ

水圧は浸潤面の位置とすべり面の位置の関係から2つのケースに場合分けされる。浸潤面がすべり面よりも上側にある場合については間隙水圧はゼロとし、一方すべり面の方が浸潤面よりも上側にある場合では、間隙水圧をすべり深さに応じて与えるものとする。

3. 代理モデルの構築

ここでは、数値解析結果を用いて斜面安定解析を代替する代理モデルを構築する手法について説明する。広域の斜面安定解析には、一般に高い計算コストが必要となることから、時々刻々と変化する降雨の状況に合わせて斜面崩壊危険度評価をリアルタイムに可能とする代理モデルを構築する。代理モデルの構築の流れを図-3に示す。なお、空間モードを用いた代理モデルの具体的な構築の流れについては、津波の代理モデルを構築している研究例[8]を参考にしている。

まず、様々な降雨シナリオを考慮して数値解析を実施することで、数値解析結果のデータベースを浸潤面分布と安全率分布の入出力関係として作成する。得られたそれぞれの空間分布データに対して固有直交分解(POD: Proper Orthogonal Decomposition)[9]を適用することで、浸潤面の空間分布の特徴を定量的に評価するとともに、空間モードを用いた代理モデルを構築する。数値解析から得られる、ある降雨シナリオ、ある時間での空間分布データをデータベクトルとして x_i とすると

き、データ行列 X を以下のように定義する。

$$X = \begin{pmatrix} | & & | \\ x_1 & \cdots & x_N \\ | & & | \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで、 N が POD の対象となるデータ数、 $x_i (i = 1, \dots, N)$ は n 個の要素を持つベクトルであり、 n は評価地点数である。この行列の共分散行列 $C = XX^T$ に対して固有値解析を適用することで、データベクトル x_i は以下のように、算出されたモード $u_k (k = 1, \dots, N)$ の線形結合として以下のように表現される。

$$x_i = \sum_{k=1}^N \alpha_{ik} u_k = \alpha_{i1} u_1 + \cdots + \alpha_{iN} u_N \quad (10)$$

ここで、 α_{ik} が i 番目のデータ、第 k モードに対する POD 係数であり、データ行列の特異値分解の結果から算出される。この係数が空間モードの特徴量の大きさを表現しており、空間分布の特徴を表現する指標となる。ここでは、浸潤面分布データ、安全率分布データのそれぞれについて POD を適用することで、以下の式のように代理モデルを表現する。

$$\hat{x}(c) = \sum_{k=1}^r \alpha_k(c) u_k \quad (11)$$

ここで、 c が浸潤面分布の特徴量 (POD 係数) が並ぶベクトル、 r が代理モデルに用いる空間モード数、 $\hat{x}(c)$ が任意の浸潤面分布条件での安全率の空間分布、 $\alpha_k(c)$ が安全率の POD 係数についてモードごとに補間を行い、浸潤面分布の特徴量の関数として表現したものである。その POD 係数の補間の部分については、ガウス過程回帰 (GPR: Gaussian Process Regression) を用いている。ガウス過程回帰を用いることで、回帰の結果だけでなくそのばらつきについても定量的に評価が可能であることから、予測の信頼度を表現可能である。実際の降雨が観測された場合には、浸透解析を行うことで浸潤面分布を算出し、以下の式によって特徴量を算出した後に式 (11) に代入することによって広域の斜面崩壊危険度を評価する。

$$\hat{c} = U_{wf}^T x_{wf} \quad (12)$$

ここで、 U_{wf} が浸潤面分布データの空間モードが列方向に並ぶ行列、 x_{wf} が浸潤面分布データである。

4. 対象地域と解析条件

本研究では、2019 年の東日本台風で斜面崩壊が確認された岩手県釜石市の一部の領域を対象領域として選定し、一連の解析を行う。対象領域は $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ の広さであり、地形データの空間解像度は 5 m として設定した。また、浸透解析、斜面安定解析に必要な地質パラメータについては、同じ地域を対象に解析を実施した研究 [10] で用いられているものを使用している。

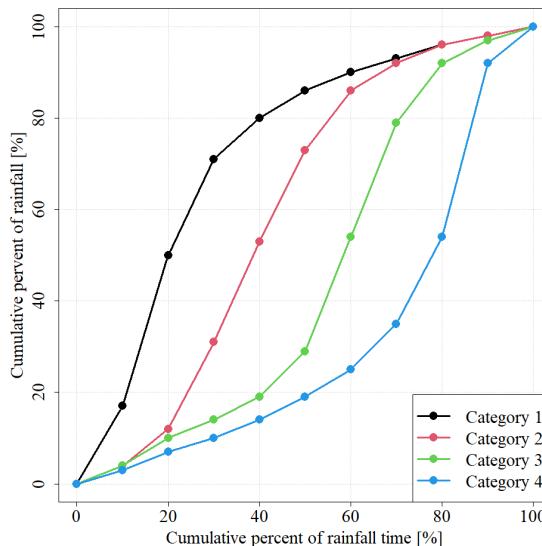


図-4 学習用の降雨シナリオ構築のための降水量の時間変化

代理モデル構築に用いる降雨条件については、図-4 に示す降雨の継続時間と降水量の関係 [11] を用いて降雨シナリオを作成した。図-4 の各軸が 1 降雨イベントの降雨継続時間と総降水量の割合を示していることから、継続時間と累積降水量を与えることで具体的な降雨シナリオを作成することができる。本研究では、対象地域の確率降水量から表-1 に示す 7 つのシナリオを想定し、学習用シナリオとして設定した。これらを入

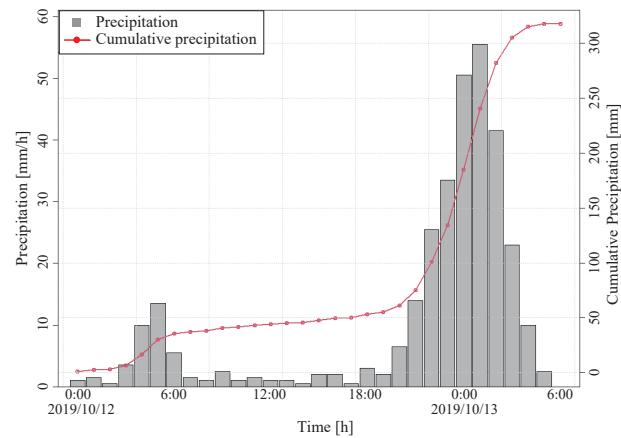


図-5 代理モデルの精度検証のための降雨シナリオ

力条件として一連の解析を実施し、1 時間おきにデータを保持する形とした。なお、降水量データ、地質パラメータ等については、空間的に一様なものとして設定している。また、検証用データには、図-5 に示す 2019 年の東日本台風時の釜石観測所のアメダス観測データを用い、そのときの数値解析結果と代理モデルの結果を比較することで構築した代理モデルの妥当性の検証を行う。

表-1 降雨の学習シナリオ

Case	Cumulative rainfall	Duration	Category
1	310 mm	10 h	1
2	310 mm	10 h	2
3	310 mm	20 h	2
4	310 mm	20 h	3
5	420 mm	30 h	3
6	420 mm	30 h	4
7	420 mm	50 h	4

5. 結果

図-5 を入力としたときの数値解析と代理モデルから得られる安全率について比較した結果を図-6 と図-7 に示す。図-6 は、異なる時間での安全率の空間分布を比較したものである。図-7 については、ある地点での安全率の時間変化の比較を示しており、予測のばらつきについても合わせて示している。予測のばらつきについては、POD 係数のガウス過程回帰から算出される分散をモードの線形和として足し合わせた値に、代理モデル構築の際に省略したモードに含まれる値の分のばらつきを加えたものとして表現している。これらを比較すると、数値解析の結果と代理モデルの結果が概ね一致していることから、代理モデルによって評価したい降水量シナリオでの安全率の時間変化を概ね表現可能であることが確認できる。

また、安全率分布の比較について、平均平方二乗誤差率 (RMSPE: Root Mean Squared Percentage Error) の時間変化を図-8 に示す。降雨イベント前半に比べて後

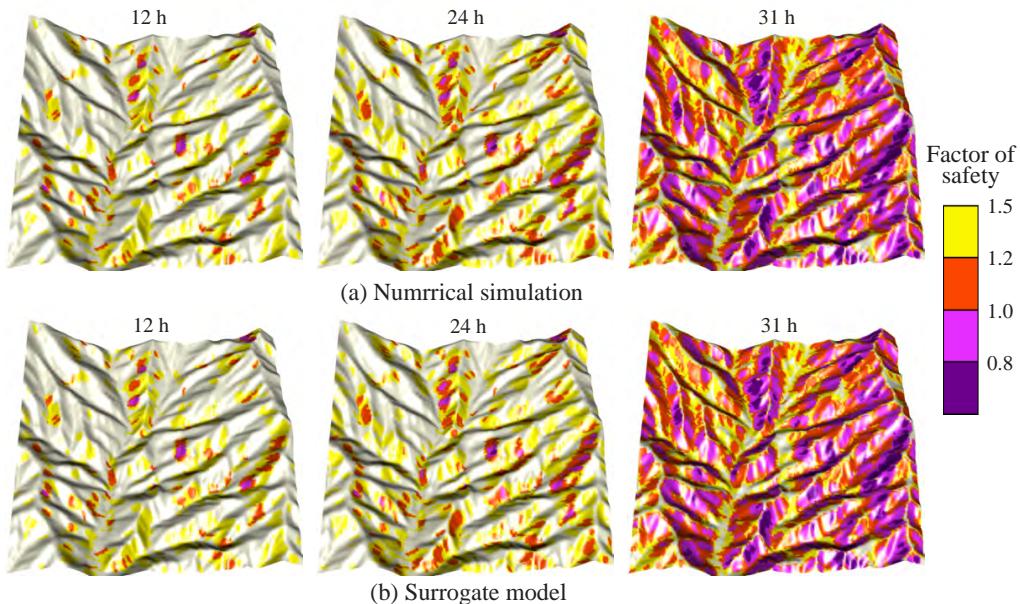


図-6 数値解析から得られる安全率分布と代理モデルによる安全率分布の比較

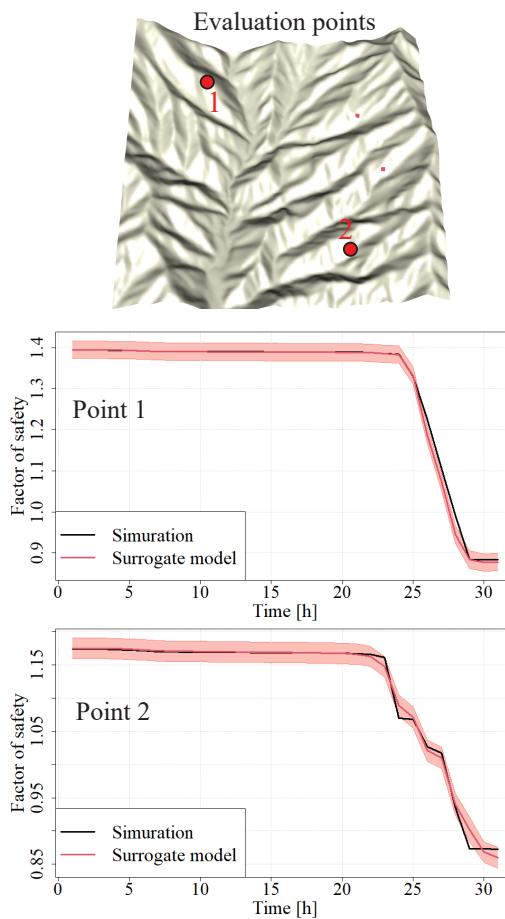


図-7 2つの評価地点での安全率の時間変化の比較

半の時間に大きな誤差が発生しているものの、最大でも 2.5%程度であることから、代理モデルによって数値解析結果が再現できることが確認できる。後半部分の

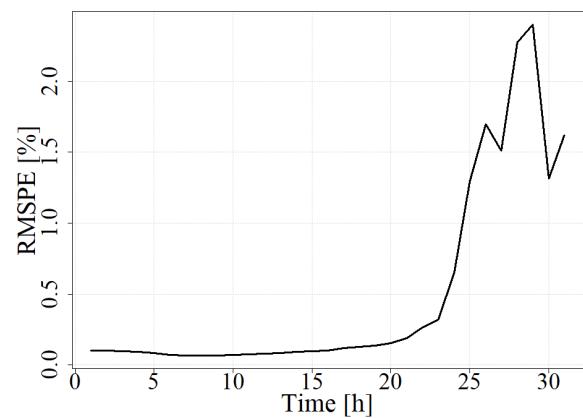


図-8 数値解析結果と代理モデルの誤差の時間変化

誤差が大きくなる要因としては、後半部分は降雨強度が大きくなる時間であり、強い降雨強度のデータが学習データに少ないためであると考えられる。この部分については、データ数を増やすことによって解決可能である。代理モデルに必要なデータ数については、ガウス過程回帰によって得られるばらつきの情報を活用することで効率的に選択できる可能性があることから、この点については今後の検討課題である。

最後に計算コストについて比較すると、数値解析では Intel(R) Xeon(R) Processor E5-2690 v3 (2.60GHz), 8 並列で 7 分 15 秒の時間を要したのに対し、代理モデルでは事前にモデルを構築しておくことで、数秒で算出可能であることから、代理モデルによる大幅な効率化が確認できる。この例では比較的小さい領域を対象としていることから、数値計算の例での計算コストも小さいものの、今後広域に拡張することを考慮すると、計算コストのより効果的な削減が期待できる。

6. 結言

3次元極限平衡法から得られる結果を用いて、降雨に起因する斜面崩壊の危険度の即時的な予測を可能とする枠組みについて提案した。降水量の不確実性を考慮して浸透解析と斜面安定解析を実施し、その解析結果に対して固有直交分解とガウス過程回帰を適用して代理モデルを構築した。この代理モデルによって概ね数値解析結果を表現可能であることを確認し、その妥当性を検証した。

本研究では、比較的小さい領域を対象に有用性の検討を実施したが、今後はさらに広域（市町村レベル）での斜面崩壊ハザード評価について検討を実施する。その場合、本研究では考慮しなかった降水量の空間分布についても不確実性として考慮する学習シナリオを検討する必要があるため、対象地域の過去の降水量データから降水量の空間的不確実性の評価を行い、仮想の降雨シナリオを構築している研究例[12]などを参考にしながら効率的な学習シナリオの検討が必要である。また、本研究では、1つの降雨イベントを対象とした解析であり、先行降雨などの影響を評価できないモデルとなっていることから、その影響も考慮可能とするような数値解析手法の改良も今後の課題である。

参考文献

- [1] F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi, and C. P. Stark. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, Vol. 5, pp. 3–17, 2008.
- [2] C. W.W. Ng, B. Yang, Z. Q. Liu, J. S.H. Kwan, and L. Chen. Spatiotemporal modelling of rainfall-induced landslides using machine learning. *Landslides*, Vol. 18, pp. 2499–2514, 2021.
- [3] J. Y. Park, S. R. Lee, D. H. Lee, Y. T. Kim, and J. S. Lee. A regional-scale landslide early warning methodology applying statistical and physically based approaches in sequence. *Engineering Geology*, Vol. 260, p. 105193, 2019.
- [4] W.H. Green and G Ampt. Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 1–24, 1911.
- [5] Li Chen and Michael H. Young. Green-ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resources Research*, Vol. 42, , 2006.
- [6] H. J. Hovland. Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, pp. 971–986, 1977.
- [7] N. Jia, Z. Yang, M. Xie, Y. Mitani, and J. Tong. Gis-based three-dimensional slope stability analysis considering rainfall infiltration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2014 74:3, Vol. 74, pp. 919–931, 2014.
- [8] K. Tozato, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, Y. Otake, Y. Fukutani, K. Nojima, M. Sakuraba, and H. Yokosu. Rapid tsunami force prediction by mode-decomposition-based surrogate modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 1267–1285, 2022.
- [9] Y. C. Liang, H. P. Lee, S. P. Lim, W. Z. Lin, K. H. Lee, and C. G. Wu. Proper orthogonal decomposition and its applications—part i: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, pp. 527–544, 2002.
- [10] 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.
- [11] F. A. Huff. Time distributions of heavy rainstorms in illinois. *ILLINOIS STATE WATER SURVEY CHAMPAGNE*, 1990.
- [12] 外里健太, 佐々木駿, Nilo Lemuel J. Dolojan, 森口周二, 寺田賢二郎. 降雨の空間的不確実性を考慮した斜面安定解析による斜面崩壊ハザードマップの構築. 日本計算工学会論文集, Vol. 2022, pp. 20220018–20220018, 2022.