

豪雨による広域土砂災害即時予測のための代理モデルの構築

Construction of surrogate model for rapid prediction of rainfall-induced landslide in wide area

外里 健太 (東北大) 森口 周二 (東北大) 寺田 賢二郎 (東北大)

Kenta TOZATO, Tohoku University

Shuji Moriguchi, Tohoku University

Kenjiro Terada, Tohoku University

E-mail: kenta.tozato.t2@dc.tohoku.ac.jp

This study presents a framework for rapid landslide prediction over a wide area using pre-computed results of infiltration analysis, surface flow analysis, and three-dimensional limit equilibrium-based slope stability analysis. Several simulation cases are performed under the different rainfall scenarios, and a surrogate model is constructed with the help of the Kriging method. The proposed framework was applied to a landslide risk analysis in consideration of an actual terrain data. Obtained results indicates that the proposed framework has high potential for rapid landslide risk analysis over a wide area.

1. 緒言

我が国では、豪雨に伴う土砂災害が例年各地で発生しており、多くの人的、経済的被害が発生している。近年の例では、2018年の西日本豪雨で2081件、2019年東日本台風で952件の土砂災害が観測されており、このような土砂災害による被害を最小化するためには、土砂災害が発生を即時かつ詳細に予測可能な技術が必要である。我が国における土砂災害の実用的なリアルタイム被害予測としては、気象庁の土砂災害警戒判定メッシュ情報（キキクルの一部）が挙げられるが、現行の手法では、個別の斜面単位での土砂災害危険度評価までの分解能は有しておらず、また地形・地質や斜面安定性の力学的な性質も十分に考慮されていない。地形条件や力学特性を考慮したリアルタイム予測の試み^{1),2)}も報告されているものの、斜面角度のみで地形特性を表現する無限長斜面安定解析が採用されるなど、高度な数値シミュレーションから得られる情報が十分に広域土砂災害即時予測に活用されていないという現状がある。そのため本研究では、豪雨による広域の斜面リスク評価に関して、地形・地質条件を考慮した水文学的・力学的評価を即時的に可能とする枠組みを構築し、高度な数値シミュレーションから得られる情報を効果的に活用可能な手法を提案するとともに、実地形を対象とした検証を通じて、その有用性を確認する。

2. 数値解析手法

本研究では、浸透解析、地表流解析、斜面安定解析を行うことで、豪雨による広域の土砂災害危険度を評価する。

まず、浸透解析については、Green Amptモデル³⁾を用いて解析を実施する。地中の水分量を飽和含水率と初期含水率の2つで近似的に表現する1次元解析モデルであり、地表面からの浸潤面の深さとして浸透の様子を表現する。地表流解析については、Diffusion Waveモデルを用いた解析を実施する。

斜面安定解析については、3次元極限平衡法の1つであるHovland法⁴⁾を用いた斜面安定解析を実施した。安全率 F は滑動力と抵抗力の比として、以下のように表される。

$$F = \frac{\sum_i \sum_j \{cA + (N_{ij} - u_{ij}A) \tan \phi\}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 i, j が土柱の位置の番号、 T_{ij} がせん断力の大きさ、 N_{ij} が垂直力の大きさ、 W_{ij} が土柱重量、 c が粘着力、 A が

土柱のすべり面の面積、 u_{ij} が間隙水圧、 ϕ が内部摩擦角を示している。本研究では、すべり面を楕円体とし、すべり面の形状をいくつか変化させることで安全率の評価を行う。また、間隙水圧については、先述の浸潤面の深さの値を用い、すべり面の深さが浸潤面深さに比べて小さい場合にすべり面深さ分の間隙水圧を与えることとした。

3. 代理モデルの構築

本研究では、事前に降雨シナリオを複数設定して一連の解析を実施し、浸潤面位置の空間分布 g_i と安全率の空間分布 f_i の入出力関係をデータベースとする。入力である浸潤面位置分布については、次元縮約のため、固有直行分解を適用し、特徴量の大きさ α_i (以降POD係数と呼ぶ)の形で表現する。この $(\alpha_i, f_i)(i=1, \dots, N)$ (N :解析結果数)の入出力データより、任意の降雨シナリオでの安全率の空間分布の代理モデルを、重み付き平均の形で以下のように表現する。

$$\hat{f}(\alpha) = \sum_{i=1}^N w_i(\alpha) f_i \quad (2)$$

ここで、 w_i が重みであり、 $\hat{f}(\alpha)$ が任意の降雨シナリオでの安全率の空間分布である。本研究ではKriging⁵⁾を用いてその重みを決定する。Krigingは、距離の近い観測点のデータが大きな類似性を持つという空間相関構造を利用して空間内挿を行う手法であり、ばらつきと合わせて補間を行うことができるという特徴がある。

本研究では、POD係数空間において平均安全率を出力値として補間を実施し、その重みを式(2)で用いることで安全率分布を算出する。任意の降雨でのデータに対しては、まずリアルタイム計算で浸潤面深さの空間分布を算出し、事前計算の固有直交分解で得られた空間モードからPOD係数を逆解析的に算出した後、式(2)に代入することで即時的に安全率の空間分布を求める。

4. 対象領域

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。領域のサイズは1km×1kmであり、地形データの空間解像度は5mとして設定した。

また、降雨条件については、Fig.1のように、一定の傾きで増加するような8つの時間変化考慮して解析を行い、これらの結果を事前計算のデータベースとして設定した。ま

た、空間分布については一様とした。また、検証用データには、2019年の東日本台風時のアメダス観測データを用い、その解析結果と代理モデルの結果を比較することで妥当性の検証を行う。

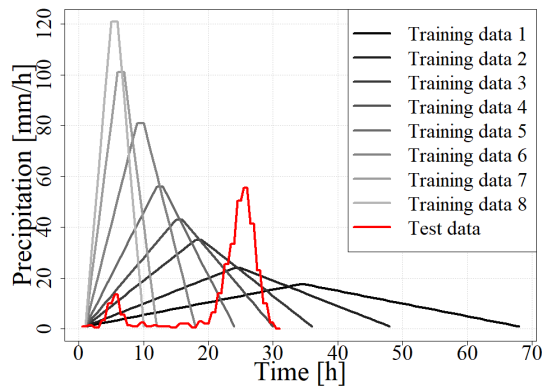


Fig. 1 Time-series rainfall data for training and testing.

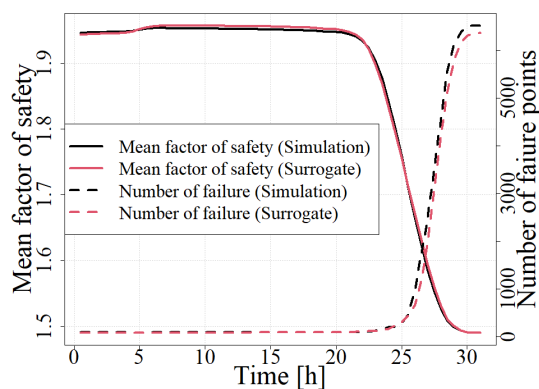


Fig. 2 Comparison of simulation and surrogate model. (Mean factor of safety and number of failure points)

5. 結果

検証用の降雨イベントに対して、構築した代理モデルによる結果と数値シミュレーションによって得られる結果について比較を行う。まず、領域全体の安全率の平均値と安全率1を下回る地点数の時間変化について図-2に示す。また、検証用降雨イベント終了時点での、安全率の空間分布を図-3に示す。これらの結果からわかるように、代理モデルによって数値シミュレーション結果をおおむね表現できていることが確認できる。図-2の安全率1を下回る地点数を見ても、ほとんど一致していることから、時間的な斜面崩壊危険度の変化についても代理モデルによって表現できていることが確認できる。

誤差の時系列的な変化についても、各時間ステップにおいて5%程度となることから、概ね代理モデルによって表現できていることが確認できる。浸潤面位置の空間分布の算出やPOD係数の算出、重みの計算にはほとんど計算コストがかからないことから、代理モデルを用いることでより詳細な斜面安定評価の結果を即時的に算出することが可能である。

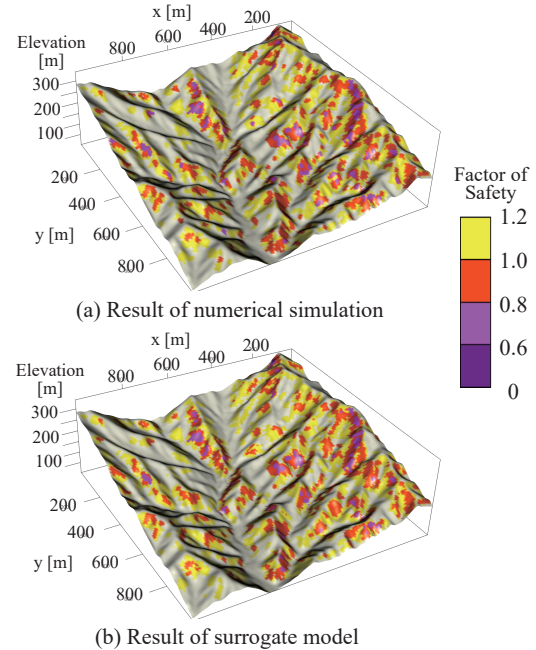


Fig. 3 Comparison of simulation and surrogate model. (factor of safety distribution: Time :31 h)

6. 結言

豪雨による広域の斜面崩壊危険度を即時的に評価する枠組みについて説明した。事前に降雨シナリオを複数仮定して浸透、地表流、3次元斜面安定解析を実施し、その結果を用いて固有直交分解やKrigingを用いて代理モデルを構築することで、計算コストの高い数値シミュレーションの結果を、代理モデルによって低い計算コストで再現することができた。

本研究では、簡単な例として、比較的狭い領域での解析を実施したが、今後は市町村レベルでの広域に応用し、その有用性について確認していく。さらに広域の適用する場合には、降雨の空間分布を考慮して事前計算のための降雨シナリオを作成することが必要があるため、その部分についての検討が必要である。また、降雨シナリオの効率的な設定方法や、効率的にデータベースのデータを増やす手法についても今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 木下 篤彦, 神野 忠広, 岡本 敦, 一言 正之, 小野寺 勝, 桜庭 雅明, 杉山 実: 六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築, 砂防学会誌, 66, pp. 15-22, 2013.
- 2) J. Y. Park, S. R. Lee, D. H. Lee, Y.T. Kim, J. S. Lee: A regional-scale landslide early warning methodology applying statistical and physically based approaches in sequence, Engineering Geology, 260, pp. 105193, 2019.
- 3) L. Chen, M. H. Young: Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces, Water Resources Research, 42, 2006.
- 4) H. J. Hovland: Three-dimensional slope stability analysis method, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103, pp. 971-986, 1977.
- 5) J. P. C. Kleijnen: Kriging metamodeling in simulation: A review, European Journal of Operational Research, 192, 707-716, 2009.