

# 平成 29 年度九州北部豪雨災害における日田市小野地区崩壊斜面の斜面安定解析

斜面安定解析 飽和不飽和浸透流解析 剛塑性有限要素法

早稲田大学 学生会員 ○渡邊 明日香  
 早稲田大学 学生会員 西山 柁克  
 早稲田大学 国際委員 赤木 寛一  
 東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治

## 1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨の増加に伴う斜面災害が多数報告されており、これらの被害を最小限に抑えるべく、斜面災害に関する研究が急がれている。降雨による斜面崩壊は、主に降雨の浸透に伴う粘着力の低下と単位体積重量の増加、および地下水の流入に伴う浸透水圧の作用が要因となって引き起こされる。そこで著者らは降雨による土砂崩れの発生を未然に予測し、避難警報発令の一助となるようなシミュレーション手法を検討するため、図 1 に示す飽和不飽和浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた手法を用いて、上述の 3 要因を考慮した斜面安定解析を行っている。本研究では平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による大分県日田市小野地区の斜面崩壊を対象に、その適用性について検討した。

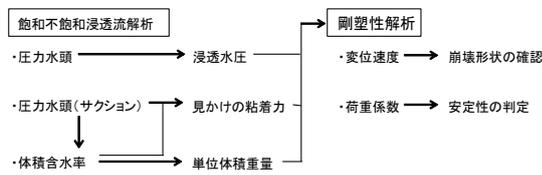


図 1 解析の流れ

## 2. 斜面災害発生の概要及び対象斜面

平成 29 年 7 月 5 日～6 日に、1 時間に 100 mm を超える集中豪雨が発生した。この大雨により、福岡県朝倉市を流れる大小の河川や、大分県日田市を流れる小野川において河川の氾濫や土石流が発生し、両県に甚大な被害をもたらした。

対象斜面は図 2 に示す小野川の柳野地区右岸に位置する。斜面崩壊は豪雨停止後約 10 時間後の 7 月 6 日 10 時ごろに発生したと推定されており、大きな時間遅れで崩壊が発生したことが一つの特徴である。崩壊斜面の地質は高透水性の英彦山火山岩類で礫混じり細粒分質である。また、対象斜面の下部には難透水性の北坂本累層が分布しており、斜面崩壊はこの 2 層を境界として発生している。

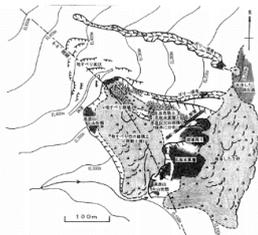


図 2 対象斜面位置

## 3. 飽和不飽和浸透流解析

### ① 解析条件

現地調査<sup>2)</sup>に基づく地盤条件を表 1 に示す。日田市小野川から採取した土壌は赤色土壌と紫色土壌とに分類されているが、両者の明確な地層区分がないことから、比較的透水係数が高く、崩壊要因になったと考えられる赤色土壌を今回の解析では対象とし、物性値として用いた。

表 1 現地調査に基づく各地盤条件

|  | 英彦山火山岩類               |
|--|-----------------------|
| 乾燥単位体積重量 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.6                  |
| 透水係数 $k$ (cm/s)                          | $1.43 \times 10^{-3}$ |
| 内部摩擦角 $\phi_{ca}$ (°)                    | 30                    |
| 比貯留係数 $S_s$ (1/m)                        | $1.0 \times 10^{-3}$  |

Slope stability analysis of collapse slopes in the Ono area of Hita city during the heavy rain disaster in northern Kyushu.

対象斜面の解析モデルを図 3 に示す。解析モデルの範囲は高さ 172m、横幅 425m であり、総節点数は 220 点、総要素数は 172 個とした。現地調査の結果、すべり面は北坂本累層と英彦山火山岩類との境界と判明しているため、解析モデルは英彦山火山岩類の一層のみとした。また、図 4 に示すとおり降雨浸透境界面を解析モデルの法面に、浸出境界面を法面とモデル下部に設定した。

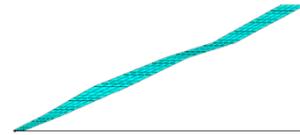


図 3 解析モデル

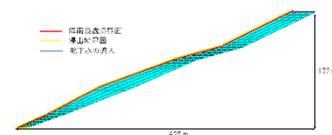


図 4 境界条件の設定

加えて、豪雨停止 10 時間後に斜面崩壊が発生した原因として、豪雨停止後モデル上部に位置する山体に浸み込んだ降雨が斜面に沿って小野川沿いの山麓部に向かって流れ込む地下水の影響が挙げられる。よって、図 4 に示す通り解析モデル上部部に対象斜面の水理解析結果<sup>2)</sup>より推定した地下水の流入を仮定した。

### ② 降雨データ

解析に用いた降雨データを図 5 に示す。降雨データは資料<sup>2)</sup>より得られた XRAIN 雨量データを用いた。なお、解析対象期間は 7 月 5 日 10 時～6 日 13 時の 27 時間である。

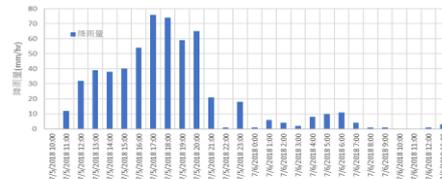


図 5 降雨データ

### ③ 飽和不飽和浸透特性

図 6 に小野地区崩壊跡地で採取した土壌の水分特性曲線を示す。資料<sup>3)</sup>より体積含水率とサクシジョンの関係及びサクシジョンと透水係数の関係を実験値より読み取り、解析に用いた。

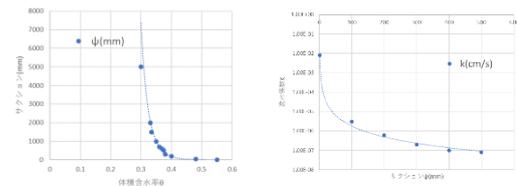


図 6 小野地区崩壊跡地で採取した土壌の水分特性曲線

Asuka Watanabe, WASEDA University  
 Hirokazu Akagi, WASEDA University

④解析結果

図7に飽和不飽和浸透流解析によって得られた粘着力、単位体積重量の経時変化を示す。これにより、降雨量の増加に伴い粘着力の減少と単位体積重量の増加が見られる。また、斜面の傾斜が緩くなっているくぼみの部分や法先においては、周囲より粘着力および単位体積重量の変化が顕著に現れていることが分かる。

加えて、地下水の流入を考慮している斜面上部は顕著に粘着力の減少及び単位体積重量の増加が見られる範囲が拡大していることが分かる。しかし、崩壊発生推定時刻である6日10時の時点で、くぼみの部分までの地下水の浸透は確認できなかった。一方で降雨のピーク時である18時の時点では、降雨の浸透は表層部に留まっており、降雨終了後時間をかけて浸透し、全体的に粘着力の低下と単位体積重量の増加が起きたと考えられる。

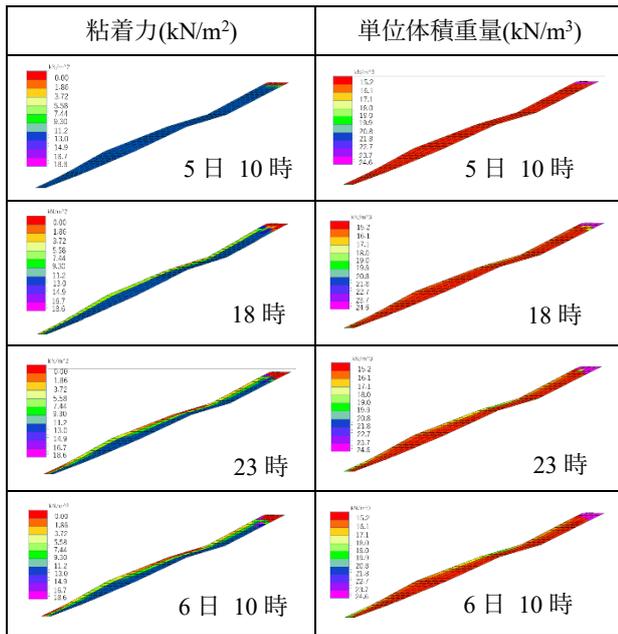


図7 粘着力と単位体積重量の経時変化

4. 剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、地盤が塑性流動していると仮定し、関連流れ則より導かれる応力のつり合い式を上界定理で解き、破壊時のひずみ速度分布や応力分布、荷重係数 $\mu$ を求める解析手法である。著者らの手法では、降伏基準にはMohr-Coulomb則、塑性流れにはDrucker-Prager則を適用している。荷重係数は斜面の安定解析における安全率に相当するため、 $\mu \geq 1$ で地盤は安定、 $\mu < 1$ で地盤は崩壊と判定可能である。

今回対象斜面は高さ172m、横幅425mと非常に広範囲であることからメッシュサイズを細かくすると計算負荷が大きくなってしまうため、本研究では飽和不飽和浸透流解析で用いた解析モデルの1/10縮尺サイズの解析モデルを用いて、斜面安定解析を行った。変位境界条件を図8に示す通り、解析モデルの背面を全固定、底面を鉛直固定としている。飽和不飽和浸透流解析で得られた解析結果を用いて得られた荷重係数の経時変化を図9に示す。

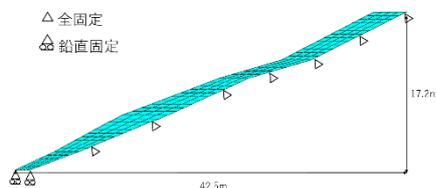


図8 解析モデルの固定条件

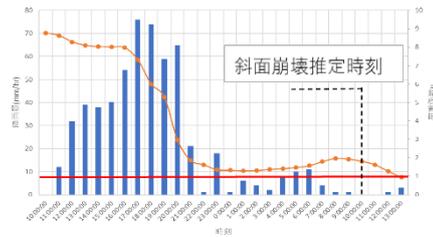


図9 荷重係数の経時変化

図9より、降雨開始から荷重係数 $\mu$ は低下し始め、降雨のピークである17時より $\mu$ が顕著に減少していることが分かる。また、6日1時から6時にかけての降雨による $\mu$ の減少が見られなかった理由については、降雨が弱く反応せず荷重係数は上昇したと考えられる。その後細かい法先に浸透した雨水が集中し、法先から崩壊が始まり斜面下部での斜面崩壊が発生したと考えられる。加えて斜面上部では地下水の流入による単位体積重量の増加が顕著であることから、地滑りが発生していると考えられる。解析上では6日13時に $\mu=0.94$ と1を下回り斜面崩壊するという結果が得られたが、実際の崩壊推定時刻とは3時間の誤差が生じている。これは英彦山火山岩類は高透水性であるため、実際には境界面を流れる地下水の影響がより大きいため、崩壊時間にずれが生じたと考えられる。

さらに、解析において荷重係数 $\mu$ が1を下回った6日13時でのひずみ速度分布を図10に示す。図10より、くぼみから法先にかけて現れたひずみ速度より大きなひずみ速度が法先に集中して現れた。これは上述した通り、斜面の形状が法先にかけて細くなっているため、法先に浸透した降雨が集中したためと考えられる。また、斜面が緩やかになっているくぼみ部分を境として大きく2箇所のひずみ速度分布の塊が見られる。対象実斜面では、斜面上部からくぼみにかけて地すべり、くぼみの部分から法先にかけて大規模な崩壊が発生していたことより、解析において対象斜面の崩壊形状をおおよそ捉えることができたと考えられる。

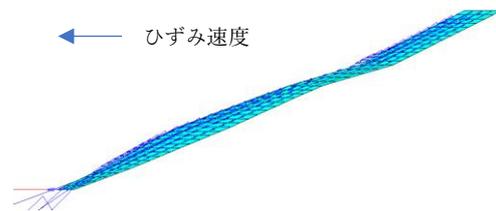


図10 ひずみ速度分布

5. おわりに

飽和不飽和浸透流解析及び剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析により、荷重係数 $\mu$ の経時変化から対象斜面の崩壊時刻を完全に捉えることは出来なかったが、ひずみ速度分布の結果から崩壊形状はおおよそ捉えることができた。今後も今回と同様に広範囲の斜面や、崩壊に時間遅れの伴う斜面崩壊事例を対象として解析を行い、本解析手法の適用性を確認し、避難警報システムの発展に寄与していきたい。

6. 参考文献

- 1) 小西真治, 仲山貴司, 田村武, 豊田浩史, 松長剛, 井浦智実: 地下水圧および飽和度による粘着力の変化を考慮した切羽安定評価法, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.1-9, 2013
- 2) 古川全太郎, 笠間清伸: 平成29年7月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書, 地盤工学会, pp.193-201, pp.225-235, 2017
- 3) 堤大三: 2017年九州北部豪雨災害調査報告書, pp.40-43, 2018
- 4) 竹林亜夫, 三上元弘: 地山の内部摩擦角に着目したトンネルの岩類分類の提案, 土木学会, p110, 2003