

平成 25 年伊豆大島土砂災害を対象とした剛塑性有限要素法による斜面安定解析

早稲田大学 学生会員 ◦岡崎 啓一朗 学生会員 西山 柁克 学生会員 DU NI
 東京地下鉄株式会社 正会員 小西 真治 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

1. はじめに

近年、気象の極端化に伴う短時間での集中豪雨により、各地で土砂崩れによる被害が多発し、その被害を最小限とする目的に関連する研究が急がれている。降雨による斜面崩壊の主な要因として大きく3点あり、降雨の浸透に伴う単位体積重量の増加、サクシジョンの低下による見かけの粘着力の減少、地下水の流動化に伴う浸透水圧の作用が挙げられる。著者らは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により、これらの要因を考慮した斜面安定解析を実施し、避難警報システムに適用出来るようなシミュレーション方法を検討してきた¹⁾。本稿では上述の手法を用いて、平成 25 年伊豆大島土砂災害における斜面崩壊を対象とし、その適用性を検討した。

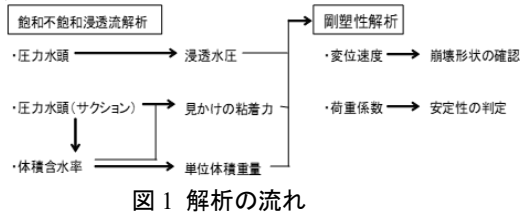


図 1 解析の流れ

2. 剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、塑性状態のみに着目した解析手法であり、地盤が塑性流動しているものと仮定し、関連流れまたは非関連流れ則から導かれる応力のつり合い式を上界定理等で解き、破壊時の応力及びひずみ速度分布や荷重係数 μ を求めるものである。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 μ は斜面の安定解析における安全率に相当し、荷重係数 μ が 1 のときが通常重力場を表している。よって、1 以上で地盤は安定、1 未満で地盤は崩壊と判定できる。

3. 平成 25 年伊豆大島土砂災害概要及び対象斜面位置

平成 25 年の台風第 26 号による猛烈な降雨により、伊豆大島三原山の外輪山西側の長沢、大金沢および八重沢等の上流域において 10 月 16 日の午前 2 時～3 時頃に表層崩壊とそれに伴う土砂流が発生し、下流域の元町地区で大きな被害が発生した。図 2.1 に崩壊発生位置を示す。崩壊斜面は火山砂層(上層)とレス層(下層)で構成され、透水性の悪いレス層を境界として雨水が集水し、傾斜 $30^\circ \sim 40^\circ$ の斜面でレス層上面をすべり面とする表層崩壊が複数発生した。加えて、複数発生した斜面崩壊に伴う土石流が下流

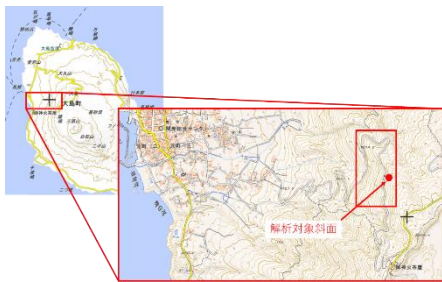


図 2.1 崩壊発生位置 (Google マップに加筆)

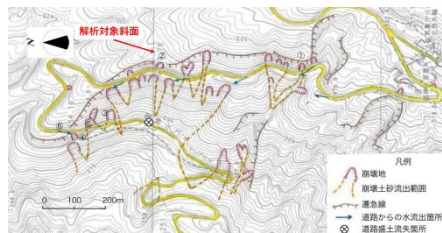


図 2.2 対象斜面位置 (曾根ら²⁾による図表を加筆)

に向かうにつれて合流することで、元町地区(図 2.1 赤枠内)で甚大な被害が発生した。

解析対象とする斜面は、崩壊が集中しており、現地調査が行われている元町地区の崩壊斜面とした。解析対象斜面の詳細な位置を図 2.2 に示す。

4. 飽和不飽和浸透流解析

(a)地盤条件

曾根ら²⁾の現地調査による地盤条件を表 1 に示す。

表 1 現地調査に基づく地盤条件

	火山砂	レス
乾燥重量 $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	10.99	11.49
飽和透水係数 $k(\text{m/s})$	6.9×10^{-5}	2.2×10^{-5}
内部摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	29.9	11.9
飽和時の粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	15.8	22.9
初期体積含水率 $\theta(\%)$	31.7	40.4

(b)解析モデルおよび境界条件

曾根ら²⁾の現地調査をもとに作成した解析モデル及びその浸透流解析における境界条件を図 3.1 及び 3.2 に示す。現地調査の結果を考慮し、表面から 2 要素分は火山砂層、残り 3 要素分はレス層として設定した。

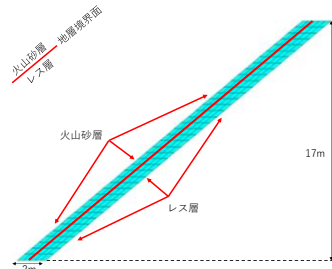


図 3.1 解析モデル

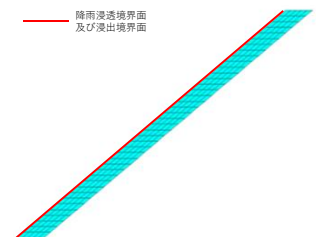


図 3.2 降雨浸透境界面及び浸出面境界

(c)不飽和浸透特性

曾根ら²⁾の現地調査より得られた $\theta-\psi$ 関係(図 4.1)において Van-Genuchten の不飽和浸透特性に関する式を用いて、表 2 に示すパラメータを試行錯誤的に求めた。そのパラメータを用いて $\theta-K_r$ 関係(図 4.2)を推定して解析に用いた。

表 2 Van-Genuchten のパラメータ

	n	$\alpha(1/\text{mm})$	θ_s	θ_r	m
火山砂	2.6	0.0029	0.47	0.14	0.37
レス	2.95	0.0038	0.58	0.35	0.19

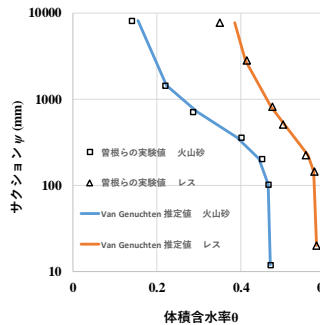


図 4.1 $\theta-\psi$ 関係における Van-Genuchten 推定値と実験値

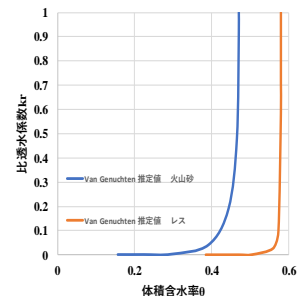


図 4.2 $\theta-K_r$ 関係

キーワード 剛塑性有限要素法, 飽和不飽和浸透流解析, 粘着力, 単位体積重量, 浸透水圧

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院赤木研究室 Tel.03-5286-3405

(d)降雨量および解析対象期間

崩壊当日の時間降雨量の変化を図5に示す。降雨データは崩壊斜面発生現場近傍にある大島町のアメダスのデータを用いた。降雨量は最大時間雨量118.5mm、連続雨量824mmを記録し、共に観測史上最高記録であった。また、住民の聞き込み調査及び現地で観測された揺れの記録から、崩壊は10月16日の午前2時～3時であったと推定される。よって解析対象期間は10月15日の午前8時～16日午前7時までの24時間とする。

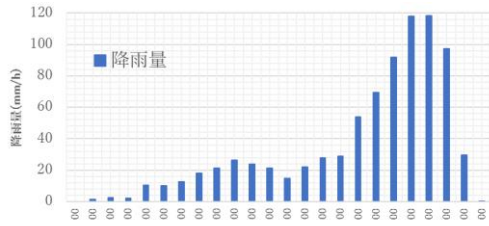


図5 崩壊発生当日の降雨量

(e)解析結果

図6に抜粋した時刻の粘着力と単位体積重量の分布を示す。

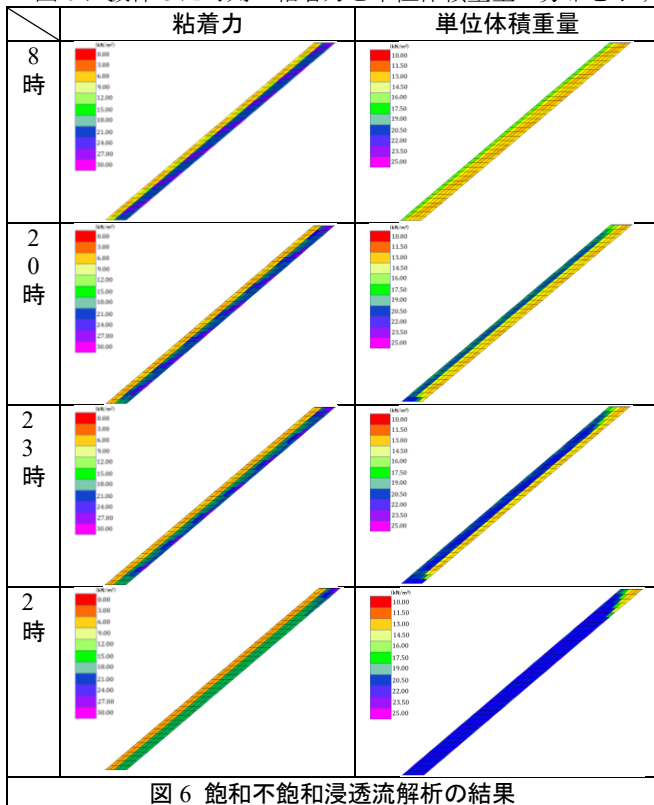


図6 飽和不飽和浸透流解析の結果

図6より、降雨の浸透に伴って斜面内は飽和し、粘着力の低下が見られる。降雨前の8時の斜面内の粘着力は、火山砂層が10～15kN/m²前後、レス層が25kN/m²前後であったが、推定崩壊時刻に近い2時の時点では、火山砂層が4.8kN/m²、レス層が17.3kN/m²とほぼ飽和時の粘着力のみの値を示していることが読み取れる。また、初期の8時の時点から20時までの間では、表層部分への降雨浸透により、火山砂層全体において粘着力が5kN/m²前後まで低下したことが確認される。これは、火山砂層内で体積含水率が上がり、図4.2から火山砂層がレス層より先に飽和透水係数付近に達したことが要因として考えられる。その後、23時付近で降雨のピークを迎え、体積含水率のさらなる上昇に伴ってレス層の透水性が大きくなり、レス層においても大幅な粘着力の低下が見られたと考えられる。

図6より、単位体積重量については、表層である火山砂層から増加が始まり、2時の時点ではレス層を含めた斜面内全体が20kN/m³を超える最大値をとっている。これより、降雨浸透が時間に伴い、斜面内全体まで進んでいることが読み取れる。また、20時に比べ23時の時点では、火山砂層及びレス

層を含めた法先付近の単位体積重量の増加が著しいことから、斜面内に浸透した雨水が斜面下部へと浸透し、法先付近から飽和して体積含水率が上昇したと考えられる。

5. 剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析

浸透流解析で得られた単位体積重量、粘着力、浸透水圧の値を入力し、剛塑性有限要素法を用いて図7に示すような荷重係数の経時変化を得た。なお、変位境界条件の設定に際し、解析モデル底面及び背面を共に鉛直・水平固定とした。

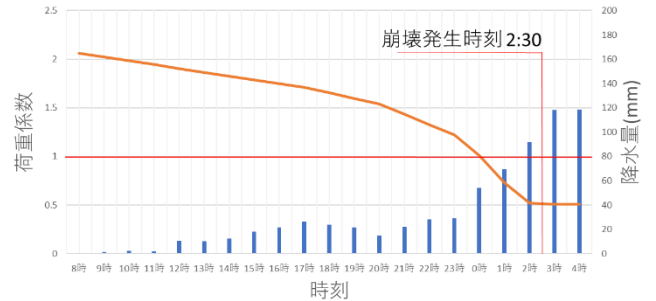


図7 荷重係数の経時変化

図7より、降雨の浸透に伴う荷重係数の減少が見られる。一回目の降雨のピークである17時から荷重係数の低下の割合が若干大きくなり、20時以降から顕著に低下し始め、23時以降から急激に低下していることがわかる。解析の結果、0時過ぎの時点で荷重係数は1を下回ったため、解析上は実際よりも2時間ほど早く崩壊する結果となった。

また、解析上崩壊に至った0時の時点でのひずみ速度分布を以下の図8に示す。図8を参照すると、火山砂層を中心として斜面中腹のレス層を含むように円弧のような形状でひずみ速度が分布しており、円弧のすべり面を確認できた。実際の現地調査では火山砂層とレス層の境界面がすべり面として崩壊していたことが分かっているが、解析上はレス層を巻き込む形で崩壊する結果となった。これは、図6の23時の解析結果に注目すると、火山砂層だけではなくレス層の上層部においても粘着力の低下及び単位体積重量の増加が顕著に見られており、0時の時点でレス層も不安定化が進んでいたためであると考えられる。従って、実際のレス層は今回解析で推定したものよりも透水性が悪いと推察される。

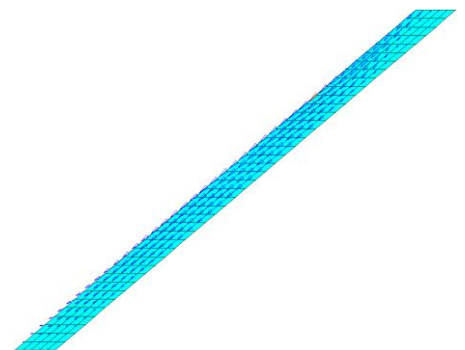


図8 0時のひずみ速度分布

6. おわりに

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斜面安定解析を用いて、荷重係数μの変化及び崩壊時のひずみ速度分布から実災害の斜面崩壊のタイミングと崩壊形状の大枠を捉えることができた。今後も他の崩壊事例を対象として本手法を用いた解析を行い、適用性を確認していきたい。

参考文献

- 1) 安藤悠,竹内佳成,小西真治,赤木寛一: 盛土斜面を対象としたタンクモデル法を用いた降雨時の斜面安定解析,第51回地盤工学研究発表会,pp.1985-1986,2016
- 2) 曾根好徳,飛田健二,寺田悠祐,上野将司,浅見和弘,野並賢,沖津二郎,矢部満: 平成25年台風26号による伊豆大島火山山麓における表層崩壊の発生機構,応用地質技術年報No.34,pp.1-22,2015