

崩壊斜面における雨水浸透を考慮した剛塑性有限要素法による斜面安定解析

まさ土 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 ○岡崎 啓一郎
早稲田大学 学生会員 竹内 佳成
東京地下鉄株式会社 国際会員 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、集中豪雨による土砂崩れが各地で報告されており、被害を最小限とするための備えが必要となっている。降雨による斜面崩壊は、雨水の浸透によるサクシジョンの減少に伴うせん断強度の低下、自重の増加、地下水位の変動等の複合的な要因で発生するとされている。そこで著者らは、剛塑性有限要素法を用いてこれらの影響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できるような合理的なシミュレーション手法を検討している。このうち本研究では、図-1に示すような飽和・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提案し、平成26年8月20日に発生した広島市安佐北区可部東6丁目の斜面崩壊箇所を対象とした現地調査の実施およびこの解析手法を適用した結果を報告する。

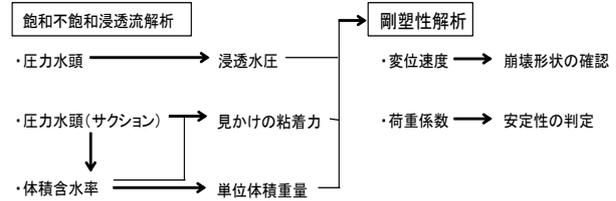


図-1 考案する手法

2.剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、地盤が塑性流動する際の応力の釣合条件、ひずみ速度の適合条件を上界定理等で解き、破壊時の①応力分布、②変位速度分布、③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¹⁾。荷重係数 μ は斜面の安定解析における安全率に相当する。つまり、荷重係数 $\mu=1$ が通常の重力場を表しており、1以上で地盤は安定、1未満で地盤は崩壊と判定することができる。

3.現地調査ならびに物性試験結果

本研究では、広島市安佐北区可部東6丁目に存在する斜面を検討対象とし、現地調査を平成27年9月21~22日の2日間実施した。実施した調査項目は、①軽量動的コーン貫入試験、②簡易測量、③試料のサンプリングである。現地調査により、源頭部の存在を確認し、斜面は崩壊長30m、崩壊幅7~13m、崩壊深さ0.5~1.1mであることがわかった。①軽量動的コーン貫入試験により表層深さを推定した。土田ら²⁾の研究によれば、軽量動的コーン貫入試験により得られる貫入抵抗値が10MPaをこえたところを基盤層とし、基盤層より上部を表層土と推定できることが報告されており、本研究でも同様の判断基準を用いた。また、表-1に③試料のサンプリングにより採取した試料に対して実施した物性試験結果を示す。

表-1 試料の物性試験結果

ω (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	θ
16.6	2.56	1.34	0.91	0.24

4.解析条件および解析結果

4.1 飽和・不飽和浸透流解析による浸透解析 (a)解析条件

現地調査の結果に基づき、崩壊した範囲の表層部分を1mとし対象斜面を図-2に示すように簡易にモデル化した。また、表-2に解析で用いた地盤条件を示す。

降雨時には斜面上面から地盤内へ降雨による浸透流が浸入する。その境界面において流量に見合った水頭変化を考慮しなければならない。そこで境界条件として、図-3に示すように斜面上部に降雨浸透境界を設けた。また、モデル下部への集水の影響を軽減させるため、モデルの端に拡張部分を設けた。この拡張部分を除いた解析対象となる要素数は1000個、節点数は1111個である。

不飽和の浸透特性については、表-3に示すような既往研究のまさ土のパラメータを使用する。このパラメータを用いて式(1)より、図-4に示すような体積含水率とサクシジョンの関係を求めた。

$$Se = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right)^m \quad Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (1)$$

ここに、 Se :有効飽和度、 θ :体積含水率、 θ_r :残留体積含水率、 θ_s :飽和体積含水率、 ψ :サクシジョン (kPa)、 α (1/kPa)、 n, m ($=1-1/n$):実験定数

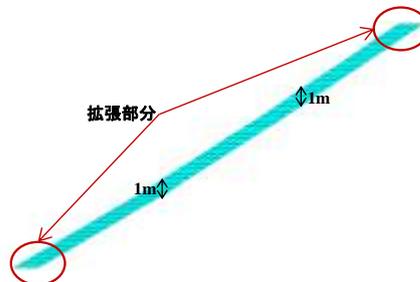


図-2 解析モデル簡略図

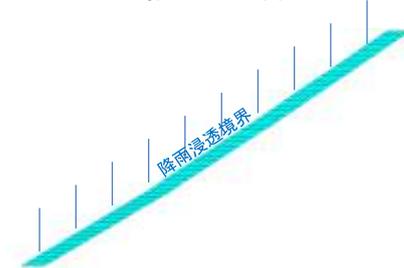


図-3 降雨浸透境界

表-2 地盤条件

水の単位体積重量 γ_w (KN/m ³)	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 γ_s (KN/m ³)	25.09	実験値
地盤の乾燥密度 γ_d (KN/m ³)	13.15	
間隙比 e	0.91	
体積含水率 θ	0.24	
飽和透水係数 k (m/sec)	1.7×10^{-4}	推定値
内部摩擦角 φ (°)	35.2	

表-3 まさ土のパラメータ

α	n	θ_s	θ_r
0.0193	1.78	0.473	0.154

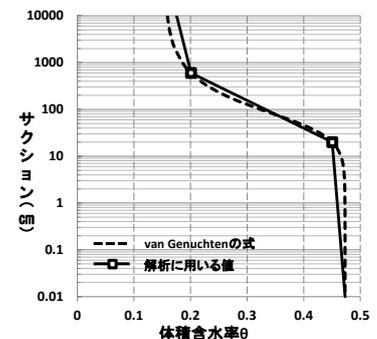


図-4 体積含水率とサクシジョン

また、比透水係数(飽和透水係数と不飽和透水係数の比)と体積含水率の関係を van Genuchten 式から導かれる不飽和透水係数モデルと Mualem モデルから得られる式(2)を用いて求めた。そして、比透水係数と体積含水率の関係を図-5 に示す。

$$k = k_{ws} S_e^\xi (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (2)$$

ここに、 k ：不飽和透水係数、
 k_{ws} ：飽和透水係数、 ξ ：パラメータ

以上より、図-4、図-5 から求められた解析に用いる不飽和浸透特性の値を表-3 に示す。

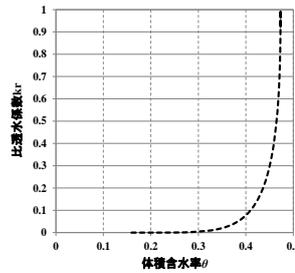


図-5 比透水係数と体積含水率

表-3 解析に用いる不飽和浸透特性

$\Psi(\text{cm})$	θ	kr	θ
100000.0	0.155	0.00000	0.154
600.0000	0.200	0.10000	0.407
20.00000	0.447	1.00000	0.473
0.000000	0.470	---	---

(b)解析結果

モデルの中央部において3個の要素を選定(図-6 参照)し、その要素内における見かけの粘着力と単位体積重量の値の経時変化を図-7、図-8 に示した。

図-7 より、降雨が集中する20日1時から4時の間に見かけの粘着力は大きく減少、図-8 より、単位体積重量は大きく増加していることが読み取れる。また、図-7 より、同時刻における見かけの粘着力は斜面上部(要素番号721)ほど高く、下部(要素番号670)ほど低いことが読み取れる。また、単位体積重量については、図-8 より斜面下部の要素ほど同時刻における高いことも読み取れる。

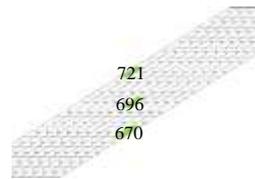


図-6 要素番号と位置関係

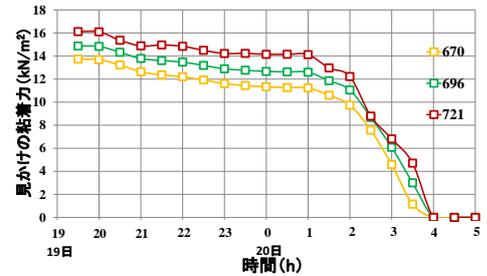


図-7 見かけの粘着力の経時変化

4.2 剛塑性有限要素法による斜面安定解析

(a)解析条件

飽和・不飽和浸透流解析で用いた解析モデルを使用し、変位境界条件は図-9 に示すように底面を鉛直固定、側面を鉛直・水平固定(全固定)とし解析を実施した。そして飽和・不飽和浸透流解析から得られた斜面内要素の見かけの粘着力、単位体積重量および斜面内節点の浸透水圧を剛塑性解析に入力した。

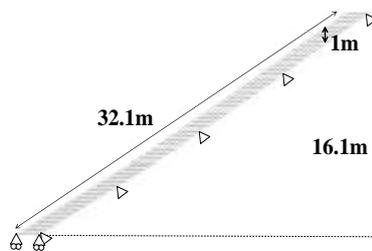


図-9 境界条件

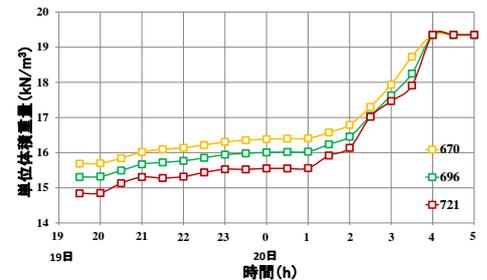


図-8 単位体積重量の経時変化

(b)解析結果

現地での斜面崩壊時刻(8月20日午前3時30分)と、図-10 に示す剛塑性解析で得られた荷重係数 μ の変化を比較する。図-10 より、荷重係数 μ は単調に減少しており、降雨が強くなる20日午前1時以降は荷重係数 μ の減り方が大きくなっていることが読み取れる。なお、解析においては、荷重係数 μ が1を下回るときに崩壊すると判断できる。 $\mu=0.22$ となって初めて1を下回る時刻20日午前3時30分は、現地での崩壊発生時間と対応している。また、図-11 よりこの時刻に法先部分が変形していることから、浸透水圧が法先に作用し、法先崩壊が発生したと考えられる。この法先崩壊によって、法先より上部を支持できなくなり、その後、全体崩壊につながったと考えられる。以上より、解析の有効性が確認された。

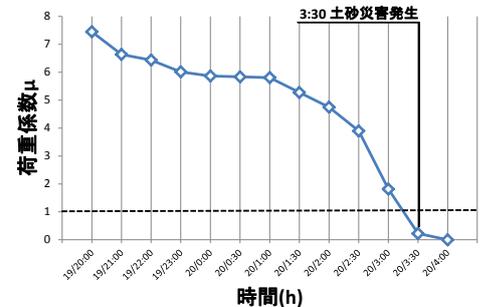


図-10 荷重係数 μ の変化

5.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の安定解析により、平成26年8月20日に広島市安佐北区可部東6丁目で発生した斜面崩壊を再現することができた。今後は当解析を別の斜面等にも適用させ、降雨強度に対応した斜面崩壊時刻を予測することに活用できればと思う。

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)川端昇一, 土田孝, 加納誠二, 由利厚樹, 花岡尚, 中川翔太:地盤調査と斜面安定解析に基づく土砂災害危険渓流の豪雨時危険度評価, 地盤工学ジャーナル, Vo.18, No.1, pp.119-131, 2013

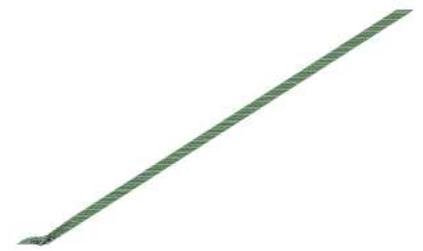


図-11 斜面の崩壊形状 (20日午前3時30分)