

マサ土斜面の安定性評価と極限平衡法の適用性に関する考察

中電技術コンサルタント(株) 正会員 ○笹井 友司
 岡山大学 正会員 西垣 誠
 岡山大学 正会員 西山 哲

1. 目的

各地で集中豪雨による斜面崩壊が多発する中、設計実務や各種研究の多くは、降雨浸透問題には有限要素法による二次元飽和・不飽和非定常浸透流解析、斜面安定問題には二次元極限平衡法が用いられており、通常浸透流解析で得られる不飽和域の浸透水圧は、斜面安定性評価に考慮されていない。

そこで本研究は、マサ土斜面の簡易モデルを用いて、せん断強度低減法による二次元浸透-応力連成解析を行い、不飽和域の浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響検討を行った。また、極限平衡法による安全率との比較により、実務で多用される従来法の適用性検証を試みた。

2. 飽和・不飽和浸透流解析

解析モデルは、1999年6月広島豪雨災害におけるマサ土斜面の崩壊実績¹⁾を参考に一様斜面を仮定し、図-1の境界条件を設定した。解析手法は、通常有限要素法による二次元飽和・不飽和非定常浸透流解析²⁾とし、初期水位はモデル底面、平常水位は広島地方気象台の年平均雨量0.18mm/hr³⁾を考慮した定常解析により設定した。また、豪雨時の水位は、80mm/hr以上の降雨が2時間以上続き、総雨量が200mm以上となる近年の豪雨の特徴⁴⁾を考慮し、100mm/hrを2時間継続させた非定常解析により設定した。飽和透水係数は、前記豪雨災害による崩壊地の透水試験結果¹⁾を参考に3.6m/hrとし、図-2の不飽和特性⁵⁾を仮定した。図-3に示す総雨量200mm時点の圧力水頭分布より、法尻から斜面上部に向け飽和域が進展している。

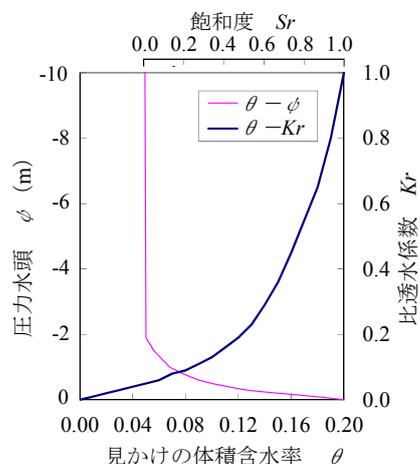


図-2 不飽和特性⁵⁾

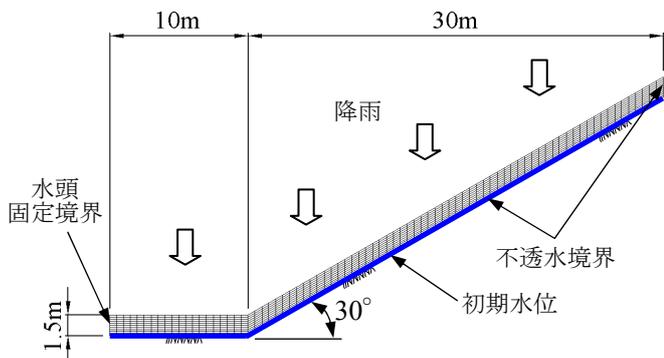


図-1 浸透流解析モデルおよび境界条件

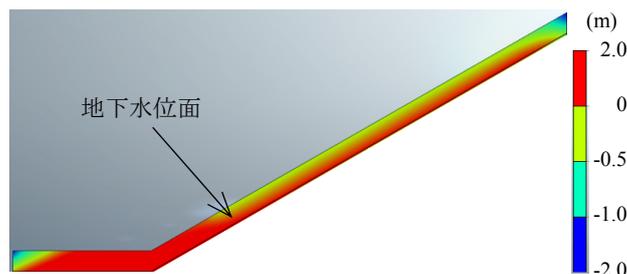


図-3 圧力水頭分布 (総雨量200mm時点)

3. せん断強度低減法による斜面安定性評価

不飽和域の浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響について、浸透流解析結果をもとにせん断強度低減法^{例えば6)}を用いた浸透-応力連成解析により検討を行った。せん断強度低減法は、式(1)の低減係数 F を徐々に増加させて粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' による強度 $\tan \phi'$ を c'_F と $\tan \phi'_F$ に低減し、塑性域を進展させてすべり面を検索する弾塑性有限要素法である。この手法では、崩壊直前の低減係数 F をすべり安全率と定義しており、浸透流解析による水圧ベクトルを考慮することで安全率が低下する。

$$c'_F = \frac{c'}{F}, \tan \phi'_F = \frac{\tan \phi'}{F} \quad \dots (1)$$

キーワード 斜面安定, 降雨浸透, 浸透水圧, 浸透応力連成

連絡先 〒734-8510 広島市南区出汐2丁目3番30号 TEL 082-256-3416

応力解析に用いた解析用物性値¹⁾は表-1のとおりであり、不飽和域の浸透水圧を考慮した場合と考慮しない場合のすべり安全率の比較を図-4に示す。せん断強度低減法では、不飽和域の浸透水圧を考慮することにより降雨開始直後で約25%安全率が低下しており、その後時間の経過とともに斜面内が飽和状態に近づき不飽和域の浸透水圧を考慮しない場合の安全率に漸近する。また、不飽和域の浸透水圧を考慮しない通常の極限平衡法（修正フェレニウス法）による安全率と比較すると、総雨量75mm時点までは1.3~1.4で概ね一致しているが、総雨量100mm~175mm時点ではせん断強度低減法の方が最大で約12%安全率が小さくなり、極限平衡法は危険側の評価となる。

4. 極限平衡法への不飽和域の浸透水圧の導入

浸透流解析による各要素の飽和度 S_r を用いて、式(2)に示す修正フェレニウス法式の土塊重量 W と間隙水圧 U' に、表-2の仮定により不飽和域の浸透水圧を導入した場合の極限平衡法の実務への適用性に関する評価を行った。

$$F = \frac{\sum\{c' \cdot l + (W - U' \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \dots (2)$$

ここで、 F は安全率、 c' は粘着力、 ϕ' は内部摩擦角、 l はすべり線長、 W は土塊重量、 U' は間隙水圧、 b は分割幅、 α は円弧中心とすべり線を結ぶ線の鉛直角

不飽和域の浸透水圧を導入したすべり安全率は、図-4のとおり、斜面内への降雨浸透に伴い直線的に低下する。また、不飽和域の浸透水圧を考慮したせん断強度低減法の安全率に対し5%以上の保守性を確保でき、修正フェレニウス法への不飽和域の浸透水圧の導入による実務への適用性を確認できた。

5. まとめ

不飽和域の浸透水圧を考慮しない従来の極限平衡法（修正フェレニウス法）によるすべり安全率は、一般的に有限要素法に比べて小さいとされているが、この保守性が不飽和域の浸透水圧を考慮することで失われていることを示した。また、浸透流解析による不飽和域の各要素の飽和度 S_r を用いた土塊重量の増加と間隙水圧の上昇を仮定・考慮することで、実務で多用されてきた従来法が適用できることを示した。今後、斜面の傾斜角・土層厚、透水係数、強度特性が異なる場合について、不飽和域の浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 地盤工学会緊急調査団：平成11年6月29日豪雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査報告，土と基礎，Vol.47, No.10, pp.40-45, 1999.
- 2) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp.87-96, 1977.
- 3) 気象庁 web：http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php（入手日2018.2.15）
- 4) 鏡原聖史，上田允教，沖村孝：近年の強雨による斜面崩壊の発生メカニズムに関する一考察，建設工学研究所論文報告集，No.57, pp.37-56, 2015.
- 5) 一般財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp.42-68, 2012.
- 6) Griffiths, D. V., and Lane, P. A. : Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 7) 社団法人日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成21年度版），pp.398-399, 2009.

表-1 解析用物性値¹⁾

湿潤重量 γ' (kN/m ³)	18
飽和重量 γ_{sat} (kN/m ³)	20
粘着力 c' (kN/m ²)	3.9
内部摩擦角 ϕ' (°)	28
弾性係数 E (kN/m ²)	50,000
ポアソン比 ν	0.333

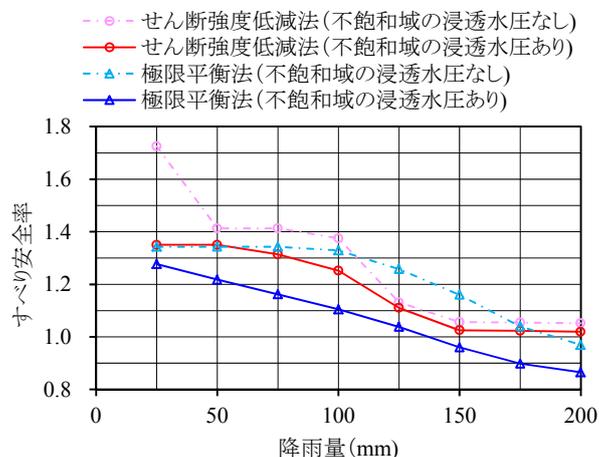


図-4 すべり安全率の比較

表-2 極限平衡法への不飽和域の浸透水圧の導入

項目		不飽和域の浸透水圧を考慮しない場合	不飽和域の浸透水圧を考慮する場合
土塊重量 W 算定用の 単位体積重量	飽和域 ($S_r=1.0$)	γ_{sat}	γ_{sat}
	不飽和域 ($S_r<1.0$)	γ'	$\gamma' + (\gamma_{sat} - \gamma') \cdot S_r$
間隙水圧 U' 算定用の 水の単位 体積重量	飽和域 ($S_r=1.0$)	γ_w	γ_w
	不飽和域 ($S_r<1.0$)	0 (考慮しない)	$\gamma_w \cdot S_r$