

## まさ土斜面内の透水性の違いが斜面の安定性に及ぼす影響に関する研究

## Effect of the Permeability of the Granite Soil on the Slope Stability

笹井友司 Yuji SASAI (中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室)  
 西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院環境生命科学研究科)  
 西山 哲 Satoshi NISHIYAMA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)  
 原田雅也 Masaya HARADA (中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室)

毎年のように各地で集中豪雨による斜面崩壊が多発する中、調査・解析によるまさ土斜面の崩壊メカニズムの解明に向けた多くの研究がなされているが、斜面内の透水性の違いを考慮した研究はあまりない。また、現状の設計実務の多くは、斜面安定問題に二次元極限平衡法が用いられているが、浸透流解析で得られる不飽和域の浸透力は通常考慮されていない。そこで本研究は、斜面内の透水性の違いが自由水面の形成に及ぼす影響評価、不飽和域の浸透力が斜面の安定性に及ぼす影響評価ならびに極限平衡法の適用性検証を行い、透水性の違いを考慮した地下水水位上昇量の把握の必要性和不飽和域の浸透力の影響によって従来法の適用性が低いケースがあることを示した。

キーワード：まさ土，斜面安定，降雨浸透，浸透流解析 (IGC：B05，E06，E07)

## 1. はじめに

花崗岩の風化土であるまさ土は、福岡県北部から中国地方5県の大半、愛媛県北部に加えて、兵庫県と九州南部に広く分布している<sup>1)</sup>。近年、まさ土が分布する福岡県から兵庫県においては、時間最大雨量が60mmを超える1999年6月広島豪雨<sup>2)</sup>、2009年7月山口豪雨<sup>3)</sup>、2010年7月広島県庄原豪雨<sup>4)</sup>、2012年7月九州北部豪雨<sup>5)</sup>、2013年7月山口・島根豪雨<sup>6)</sup>、2014年8月兵庫県豪雨<sup>7)</sup>、2014年8月広島豪雨<sup>8)</sup>によって斜面崩壊が発生している。これを受けて、調査・解析による崩壊メカニズムの解明に向けた多くの研究<sup>たとえ9)~10)</sup>がなされている。しかしながら、まさ土斜面は、崩壊厚が1.0~2.0mと薄い表層崩壊が大半<sup>2) 3) 7) 8)</sup>であること、風化残積土や崩積土が主体であるために地層構成が複雑<sup>11)</sup>で、その把握が困難であることから、通常均一地盤として扱われるのが一般的である。

また、斜面の安定問題については、現在も地盤を剛体と仮定した極限平衡法 Fellenius<sup>12)</sup>、Bishop<sup>13)</sup>、Janbu<sup>14)</sup>などが設計実務で多用されている。これに、物体力として浸透力と浮力を考慮した研究<sup>15)</sup>や、浸透流解析で得られる浸透力を剛塑性有限要素法に持ち込んだ研究<sup>16)</sup>もなされている。しかしながら、極限平衡法の適用性に着目した研究事例はあまりなく、各種設計基準<sup>たとえ17)</sup>で採用されている極限平衡法では不飽和域の浸透力は考慮されていない。

そこで本研究では、残積土上に透水性の異なる崩積土が堆積した2層構造のまさ土斜面を仮定し、各々の厚さを一様とした簡易モデルを用いて、まず二次元FEM飽和-不飽和非定常浸透流解析<sup>18) 19)</sup>により、集中豪雨に

対して斜面内の透水性の違いが自由水面の形成に及ぼす影響評価を試みる。次に、極限平衡法(修正フェレニウス法)と、不飽和域の浸透力を考慮できる弾塑性せん断強度低減法<sup>20)</sup>を用いた二次元FEM浸透-応力連成解析によるすべり安全率との比較により、通常有限要素法に比べて保守性を有しているとされている<sup>21)</sup>極限平衡法の適用性検証を行う。なお、せん断強度低減法を採用した理由は、極限平衡法と同様、一つの安全率によってすべり面全体の安定性を評価する方法であるために、有限要素法などの浸透-応力連成解析を用いた斜面安定性評価に広く用いられていることによる。

## 2. 透水性の違いが自由水面形成に及ぼす影響検討

本検討は、式(1)の支配方程式<sup>18)</sup>による二次元FEM飽和-不飽和非定常浸透流解析により行う。式(1)は、水の連続式とダルシーの法則から導かれ、全水頭を圧力水頭と位置水頭の和として、飽和域は圧力水頭が正、不飽和域は負と仮定している。これより、飽和域と不飽和域の境界である自由水面は、圧力水頭がゼロの点を連ねた面と定められ、モデル内の自由水面が追跡可能となる。

$$\text{div}K(\phi)\vec{\nabla}(\phi+y) = \left(\frac{d\theta}{d\phi} + \alpha \cdot \frac{dn}{d\phi}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $K$ ：透水係数， $\phi$ ：圧力水頭， $y$ ：位置水頭，  
 $\theta$ ：体積含水率， $\alpha$ ：不飽和領域0，飽和領域1，  
 $n$ ：間隙率， $t$ ：計算時刻

## 2.1 解析条件

解析モデルは、1999年6月広島豪雨における自然斜

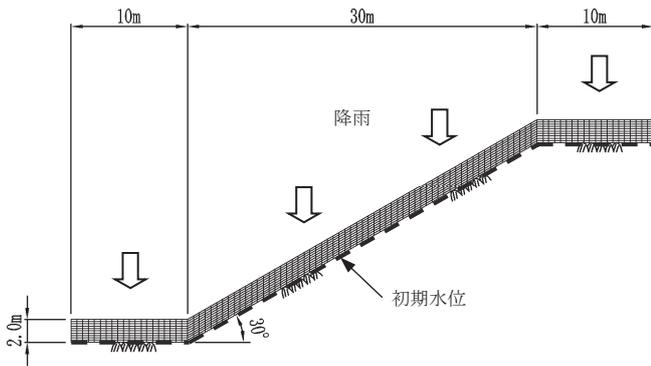


図-1 二次元浸透流解析モデル(その1)【均一地盤モデル】

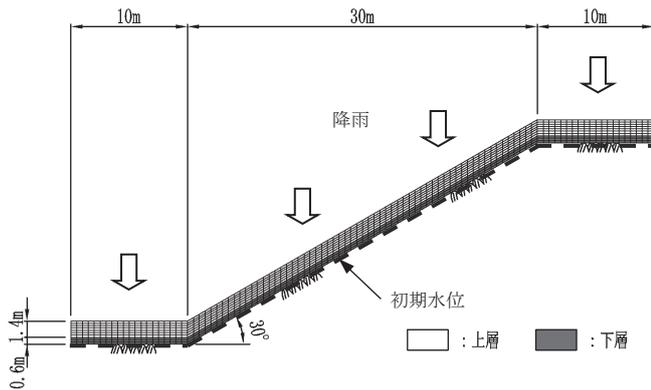


図-2 二次元浸透流解析モデル (その2)

【2層地盤モデル, 上層厚1.4m, 下層厚0.6m】

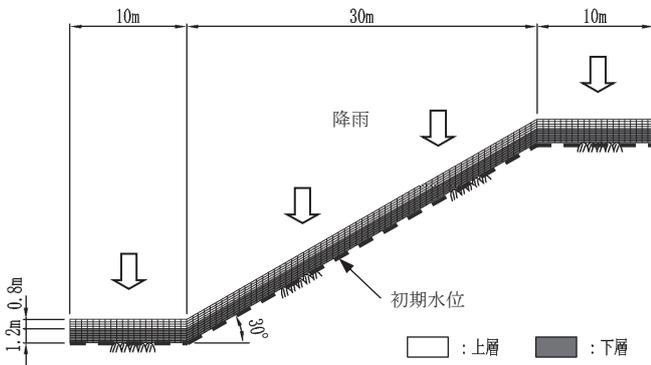


図-3 二次元浸透流解析モデル (その3)

【2層地盤モデル, 上層厚0.8m, 下層厚1.2m】

面の崩壊実績<sup>たとえ9)</sup>より, 図-1~図-3 に示す表層厚さ2.0m, 斜面勾配30°の一樣斜面と, 斜面背後への水平地盤を仮定した. ここで, 図-1 は均一地盤モデル, 図-2, 図-3 は上下層の厚さが異なる2層モデルである.

飽和透水係数は, 図-1~図-3および表-1に示すとおり, 上記広島豪雨による崩壊地の透水試験結果<sup>22)</sup>を参考にした1.8m/hrを基本として, 図-2, 図-3の2層地盤モデルでは下層に1.8m/hrの2倍と1/2倍の飽和透水係数を仮定した. また, 不飽和特性は, 上記広島豪雨において試験値が得られていないことから, いずれの層にも既往の試験結果に基づき設定された図-4<sup>23)</sup>に示す特性を用いた.

境界条件は, 地表面を降雨浸透境界, 側方下流側はモ

表-1 検討ケース

ケース番号	降雨条件	層厚条件	飽和透水係数 $K_s$	
			上層	下層
1	100mm/hr × 2hr=200mm	層厚 2.0m 均一	1.8m/hr	1.8m/hr
2		上層厚: 1.4m		3.6m/hr
3		下層厚: 0.6m		0.9m/hr
4		上層厚: 0.8m		3.6m/hr
5		下層厚: 1.2m		0.9m/hr
6	50mm/hr × 4hr=200mm	層厚 2.0m 均一	1.8m/hr	1.8m/hr
7		上層厚: 1.4m		3.6m/hr
8		下層厚: 0.6m		0.9m/hr
9		上層厚: 0.8m		3.6m/hr
10		下層厚: 1.2m		0.9m/hr

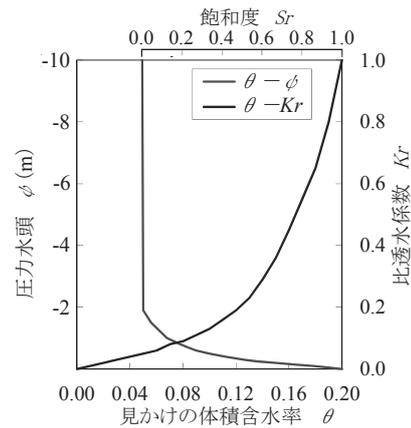


図-4 不飽和特性(礫質土, 砂質土)<sup>23)</sup>

デル下端を水頭固定とした静水圧分布を与え, 側面上流側とモデル底面は不透水境界とした.

検討は, 初期水位をモデル底面とし, 事前に広島地方気象台の年平均雨量0.18mm/hr<sup>24)</sup>を考慮した定常解析による平常水位を基に, 表-1に示す10ケースに対する非定常解析を行う. ここで, 近年の豪雨の特徴は, 時間80mm以上の降雨が2時間以上続き, 累積雨量は200mmを超えるとされている<sup>7)</sup>. このため, 総雨量を200mm, 浸透能を100%とし, 時間雨量100mm×2時間と時間雨量50mm×4時間の降雨パターンを対象とした.

## 2.2 解析結果

検討10ケースの総雨量200mm時点における浸透流解析結果を図-5~図-14に示す.

- (1) 今回の解析条件では, 時間雨量を50mmとしたケース6~10の方が, 時間雨量を100mmとしたケース1~5に比べて斜面法尻付近の地下水位上昇量が大きくなる.
- (2) 下層厚が上層厚に比べて薄いケース2, 3とケース7, 8のうち, 下層の透水係数を1/2倍したケース3, 8では, 均一地盤モデルのケース1, 6に比べて斜面法尻付近の水位上昇量が大きくなり, 下層の透水係数を2倍したケース2, 7では逆に小さくなる. これは, 層厚の厚い上層から下層への降雨浸透量が少ないために, 下層の透水性が高い場合には下流側へ

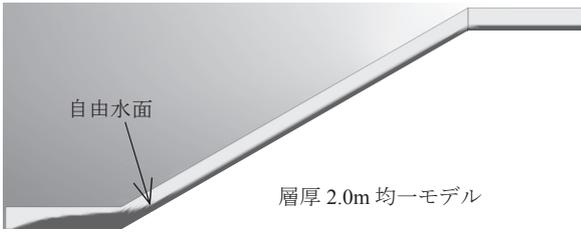


図-5 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 1)  
【100mm/hr×2hr, 上層・下層均一地盤モデル】

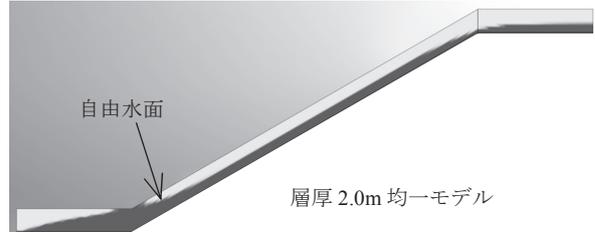


図-10 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 6)  
【50mm/hr×4hr, 上層・下層均一地盤モデル】

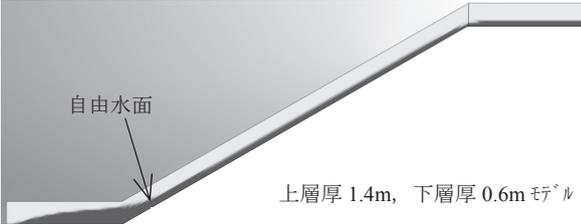


図-6 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 2)  
【100mm/hr×2hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】



図-11 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 7)  
【50mm/hr×4hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

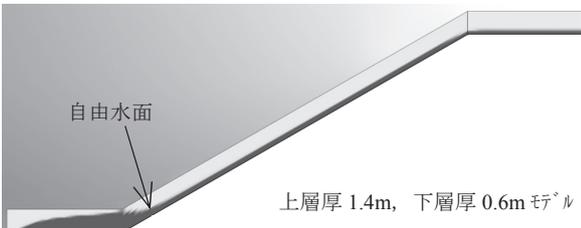


図-7 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 3)  
【100mm/hr×2hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=0.9\text{m/hr}$ 】

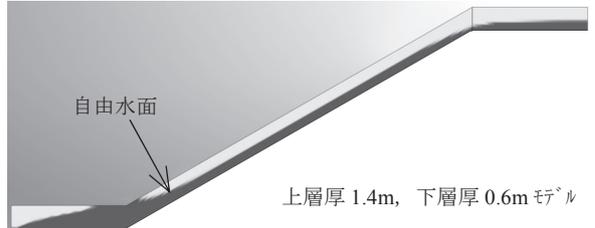


図-12 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 8)  
【50mm/hr×4hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=0.9\text{m/hr}$ 】

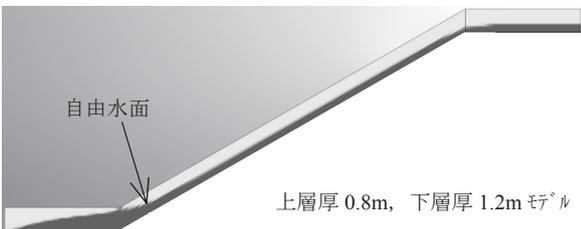


図-8 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 4)  
【100mm/hr×2hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

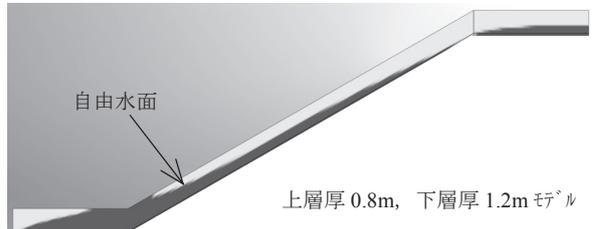


図-13 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 9)  
【50mm/hr×4hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

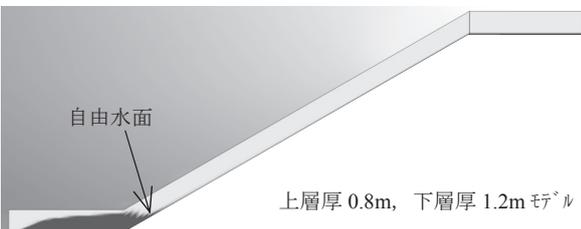


図-9 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 5)  
【100mm/hr×2hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=0.9\text{m/hr}$ 】

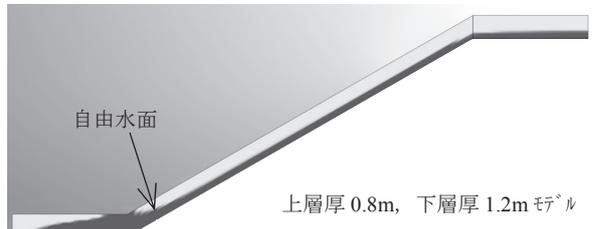


図-14 総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 10)  
【50mm/hr×4hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=0.9\text{m/hr}$ 】

の流出量が多くなり、下層の透水性が低い場合には下流側への流出量が少なくなることによる。

- (3) 下層厚が上層厚に比べて厚いケース 4, 5 とケース 9, 10 では、上記下層厚 0.6m のケースに比べ上層から下層への降雨浸透量が多くなり、下層の透水係数を 2 倍したケース 4, 9 は、均一地盤モデルのケース 1,

6 に比べて斜面法尻付近の水位上昇量が大きくなる。また、下層の透水係数を 1/2 倍したケース 5, 10 では、逆に斜面法尻付近の水位上昇量が小さくなり、透水性の違いが斜面内への自由水面の形成に影響すると評価される。

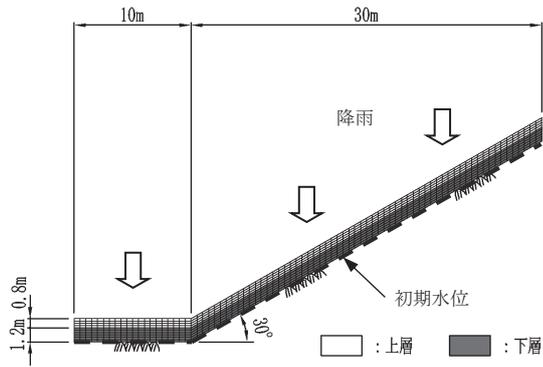


図-15 斜面背後の水平地盤のない二次元浸透流解析モデル  
【上層厚 0.8m, 下層厚 1.2m】

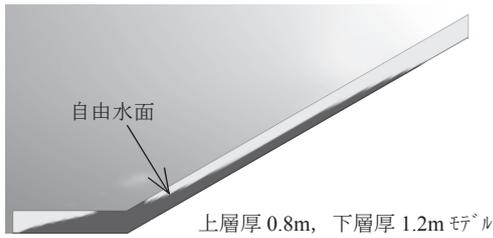


図-16 斜面背後の水平地盤のないモデルによる  
総雨量 200mm 時点の非定常水位 (ケース 9)  
【50mm/hr×4hr, 上層  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

### 2.3 斜面背後の水平地盤の影響

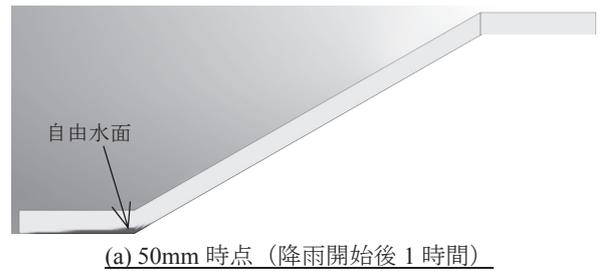
前節までは、斜面の背後に水平地盤の分布を仮定した。本節では、前節で斜面法尻付近の地下水位上昇量が最大となった図-13 のケース 9 を対象に、図-15 に示す斜面背後地盤のないモデルとの水位上昇量の比較を行う。なお、解析モデル以外の解析条件は、前節と同様である。

背後地盤がないモデルの総雨量 200mm 時点における浸透流解析結果を図-16 に示す。自由水面の分布は、図-13 と概ね一致しており、斜面背後の水平地盤の影響はほとんど認められない結果となった。このため、以降の検討は、斜面背後の水平地盤をモデル化した前節の二次元 FEM 飽和-不飽和非定常浸透流解析結果を用いる。

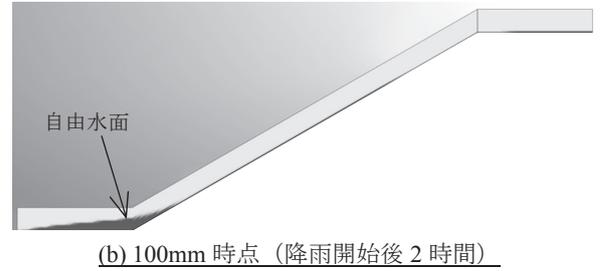
### 3. 浸透-応力連成解析との比較による極限平衡法の適用性検証

極限平衡法と浸透-応力連成解析の比較は、前章で総雨量 200mm 時点の自由水面が最も高くなった上層厚 0.8m, 下層厚 1.2m で、下層の透水係数を上層の 2 倍にしたモデルに時間雨量 50mm を与えた図-13 に示すケース 9 の浸透流解析結果を用いる。総雨量 200mm 時点以前を含めた浸透流解析結果は、図-17 に示すとおりで、累積雨量 175mm 時点で法尻が飽和に至っている。

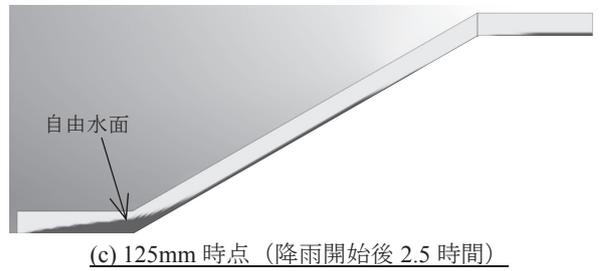
応力解析および安定性評価の解析条件は、表-2 を仮定した。なお、表-2 の強度特性は、平成 11 年 6 月の広島豪雨災害における 1 崩壊斜面の試験結果<sup>22)</sup>を参考に設定しており、変形特性も含めて不飽和域と飽和域とで



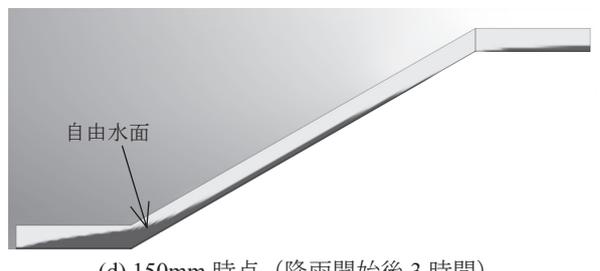
(a) 50mm 時点 (降雨開始後 1 時間)



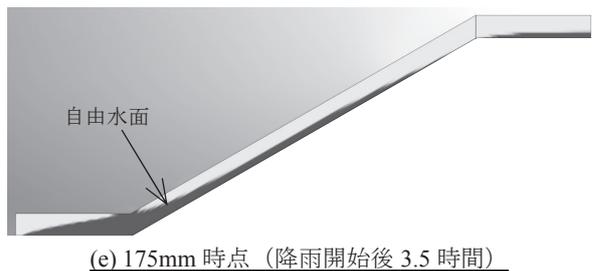
(b) 100mm 時点 (降雨開始後 2 時間)



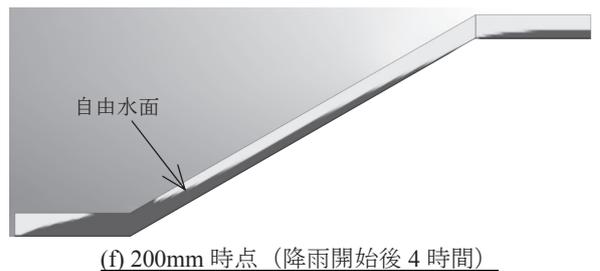
(c) 125mm 時点 (降雨開始後 2.5 時間)



(d) 150mm 時点 (降雨開始後 3 時間)



(e) 175mm 時点 (降雨開始後 3.5 時間)



(f) 200mm 時点 (降雨開始後 4 時間)

図-17 非定常水位 (ケース 9) 【50mm/hr×4hr=200mm, 上層:厚さ 0.8m,  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層:厚さ 1.2m,  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

同一物性を用いている。また、前記広島豪雨災害の試験結果は、崩積土や残積土等に分類されていないこと、設計実務<sup>たとえ17)</sup>においても風化土の強度定数は、堆積岩類、変成岩類等の岩盤分類と地質年代を参考に、設計対象箇所でも同一物性が用いられることから、変形特性も含めて2層の地盤物性値は同一としている。

降雨時の斜面安定問題は、浸透と安定の複合問題であり、斜面崩壊の主要因として以下が挙げられる。

- (1) 降雨浸透による土塊重量の増加
- (2) 間隙水圧の上昇による有効応力の低下
- (3) 飽和度の上昇による土の強度低下
- (4) 不飽和域への浸透力の発生によるせん断力の増加  
あるいは有効応力の低下

各種研究や設計実務で一般的に用いられている極限平衡法では、このうちの(1)、(2)が考慮されている。(3)は安全側に飽和状態の試験結果を用いることで考慮されている場合もあるが、通常(4)の不飽和域の浸透力の影響は考慮されていない。

このため、本研究においても不飽和域の浸透力を考慮しない極限平衡法と、浸透流解析で得られる水圧を直接応力解析に持ち込めるFEM連成解析によるすべり安全率の比較を行い、浸透力の影響を評価する。

極限平衡法は、地盤を剛体と仮定しモーメントのつり合いのみを考慮する簡便法であり、式(2)の円弧すべりを対象とした修正フェレニウス法を用いて、斜面法尻に抜けるすべり線を対象に最小すべり安全率を算定する。

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

ここに、 $F$ : すべり安全率、 $c'$ : 粘着力、  
 $\phi'$ : 内部摩擦角、 $l$ : すべり線長  
 $W$ : 土塊重量、 $U$ : 間隙水圧、 $b$ : 分割幅、  
 $\alpha$ : 円弧中心とすべり線を結ぶ線の鉛直角

浸透-応力連成のうちの応力解析は、弾塑性FEM解析によるせん断強度低減法<sup>20), 25)</sup>を用いてすべり安全率を算定する。せん断強度低減法では、下式のとおり、粘着力 $c'$ と内部摩擦角 $\phi'$ による強度 $\tan \phi'$ を低減係数 $F$ で割った $c'_F$ と $\tan \phi'_F$ を用いる。

$$c'_F = \frac{c'}{F}, \quad \tan \phi'_F = \frac{\tan \phi'}{F} \quad (3)$$

また、弾塑性構成式を用い、モール・クーロン式で土の破壊基準 $f$ と塑性ポテンシャル $g$ を定義している。

$$f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - c' \cdot \cos \phi' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi' \quad (4)$$

$$g = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \psi \quad (5)$$

ここで、 $\sigma'_1$ と $\sigma'_3$ は最大、最小有効主応力、 $\psi$ はダイレイタンシー角で既往の知見<sup>26)</sup>より $\psi = \phi'$ とする。浸透流解析各時間ステップのせん断強度低減法による計算フローは図-18に示すとおり、式(3)の低減したせん断強度を用い、斜面の自重や浸透力を外力とした弾塑性

表-2 応力解析および安定解析条件

単位体積重量	湿潤	18kN/m <sup>3</sup>
	飽和	20kN/m <sup>3</sup>
強度特性	内部摩擦角	28°
	粘着力	3kN/m <sup>2</sup>
変形特性	弾性係数	50,000kN/m <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.333

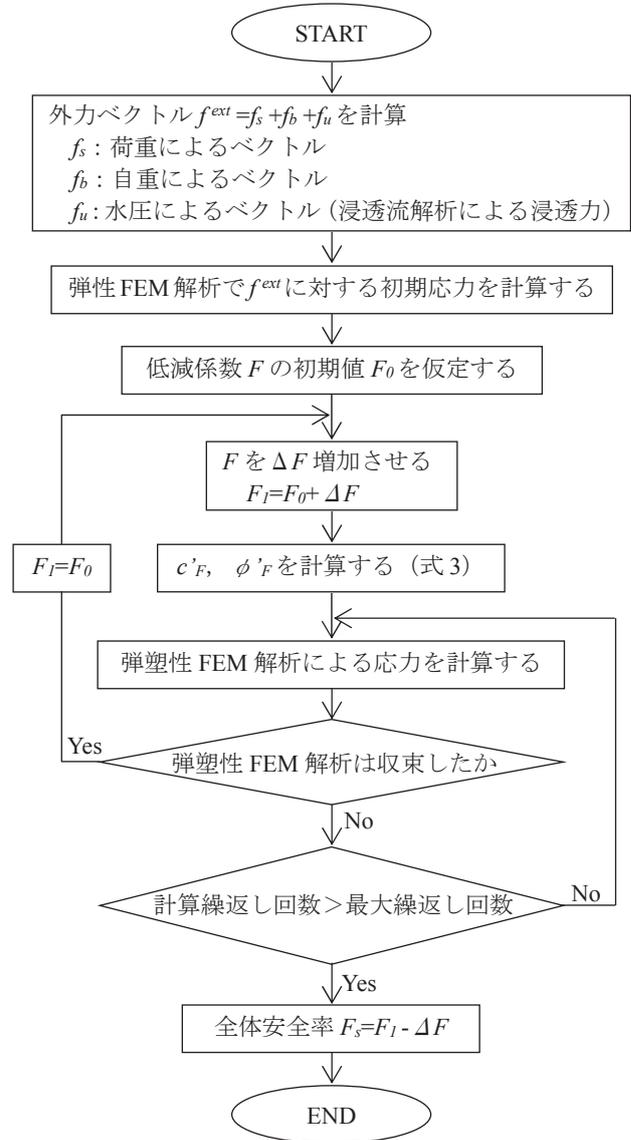


図-18 せん断強度低減法による応力解析フロー

計算が、所定の最大繰返し回数内で収束する最大の低減係数  $F$  を斜面の全体安全率と定義している。この手法は、すべり線の定義が不要で、解析で自動的に決定される。 $F$  が小さい場合、 $c'_F$  と  $\phi'_F$  が大きくなるため弾性状態となり、 $F$  を徐々に大きくすると斜面内に破壊が生じてモール・クーロン式を満たすようになる。なお、不飽和域の浸透力を考慮すると、図-18の外力ベクトルのうち水圧ベクトル  $f_u$  が大きくなり、せん断応力の増加と有効応力の低下によってすべり安全率が低下する。

図-13に示すケース9の浸透流解析結果を用いた極限平衡法とせん断強度低減法とのすべり安全率の比較を図-19に、すべり安全率比を図-20に示す。また、総雨量200mm時点の極限平衡法によるすべり線とせん断強度低減法のせん断ひずみの大きさにより表現される臨界すべり線との比較を図-21に示す。

- (1) 不飽和域の浸透力を考慮しない極限平衡法のすべり安全率は、累積雨量75mm時点から法尻付近が飽和に至る累積雨量150mm時点までは徐々に低下し、累積雨量150mm時点以降に急激に低下する。
- (2) せん断強度低減法では、すべり安全率の下がり始めは極限平衡法よりも遅いが、累積雨量100mmから175mm時点では、不飽和域の浸透力の影響によってすべり安全率が極限平衡法よりも急激に低下する。
- (3) 両者のすべり安全率を比較すると、降雨開始から累積雨量125mm時点までは、極限平衡法の安全率はせん断強度低減法に比べて小さく、通常極限平衡法が有しているとされる<sup>2)</sup>3~5%程度の保守性が認められる。それ以降は、不飽和域の浸透力の影響でこの保守性が失われ、累積雨量175mm時点ではせん断強度低減法の方が4%程度すべり安全率が小さくなり、各種研究や設計実務で多用される極限平衡法の適用性が低くなるケースがあることを示している。
- (4) この結果は、まさ土斜面の安定性評価に不飽和域の浸透力を考慮する必要があることを示唆している。
- (5) 極限平衡法によるすべり線とせん断強度低減法による臨界すべり線を比較すると、若干極限平衡法の方がすべり線が大きくなるが、後者も円弧状のすべりである。このため、本検討結果からは、Janbu法のような非円弧すべりを扱える手法による検討は不要と判断される。

#### 4. まとめ

本研究では、まさ土斜面を対象とした簡易モデルを用いて、まず二次元FEM飽和-不飽和非定常浸透流解析により、集中豪雨に対して透水性の違いが斜面内への自由水面の形成に及ぼす影響評価を試みた。次に、極限平衡法(修正フェレニウス法)と、不飽和域の浸透力を考慮できる弾塑性せん断強度低減法を用いた二次元FEM浸透-応力連成解析によるすべり安全率との比較により、通常有限要素法に比べて保守性を有しているとされている極限平衡法の適用性検証を行った。

これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 近年の集中豪雨を考慮した100mm/hr×2hrと50mm/hr×4hrの総雨量200mmに対する二次元FEM飽和-不飽和非定常浸透流解析の結果、斜面内の透水性の違いの有無にかかわらず、後者の降雨条件で斜面法尻付近の地下水水位上昇量が大きくなった。

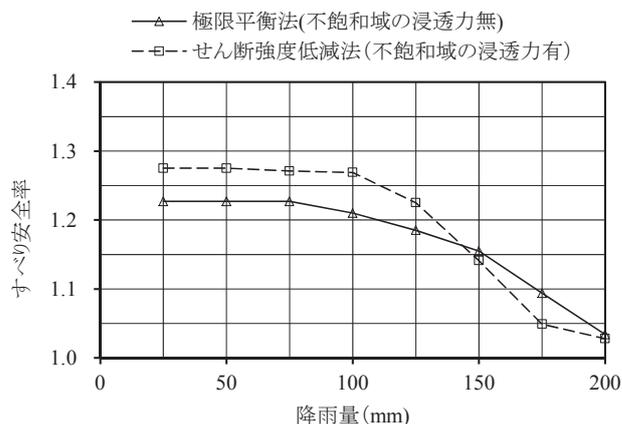


図-19 すべり安全率の比較 (ケース9) 【50mm/hr, 上層:厚さ0.8m,  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層:厚さ1.2m,  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

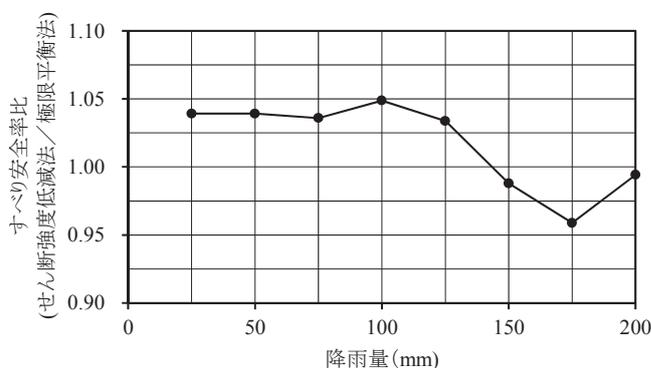


図-20 すべり安全率比 (ケース9) 【50mm/hr, 上層:厚さ0.8m,  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層:厚さ1.2m,  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

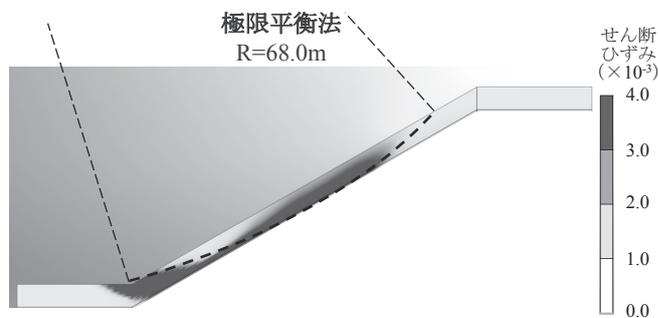


図-21 極限平衡法によるすべり線とせん断強度低減法による臨界すべり線 (ケース9) 【総雨量200mm時点, 上層:厚さ0.8m,  $k_s=1.8\text{m/hr}$ , 下層:厚さ1.2m,  $k_s=3.6\text{m/hr}$ 】

- (2) 2層地盤の層厚と透水係数を変えた浸透流解析の結果、斜面法尻付近の水位上昇量が均一地盤に比べ大きくなるケースがあり、透水性の違いが斜面内への自由水面の形成に影響することが判明した。また、2層地盤の層厚により、水位上昇量が大きくなる上層と下層の透水係数比が異なることが分かった。
- (3) 斜面背後に水平地盤があるモデルとないモデルを対象とした浸透流解析の結果、水位上昇量に大きな差異はなく、今回の検討では斜面背後地盤のモデル化は不要との結論を得た。

- (4) せん断強度低減法のすべり安全率は、不飽和域の浸透力を考慮することによって、極限平衡法よりも急激にすべり安全率が低下することが分かった。
- (5) 降雨開始直後から累積雨量 125mm 時点までは、極限平衡法のすべり安全率はせん断強度低減法に比べて3~5%程度の保守性を有している。しかしながら、それ以降は、不飽和域の浸透力の影響でこの保守性が失われ、最大で4%程度危険側の結果となり、設計実務等で多用される不飽和域の浸透力を考慮しない極限平衡法の適用性が低いケースがあることを示した。
- (6) 以上より、豪雨時の斜面の安定性評価には、斜面内の透水性の違いを考慮した地下水位上昇量の把握と、不飽和域の浸透力の影響評価が必要と考える。

毎年のように集中豪雨による斜面崩壊が頻発する中、広域斜面の崩壊抑制は待ったなしの状況にある。このため、今後も斜面崩壊メカニズムの究明に向けた表層厚や風化状況の把握、強度特性・不飽和特性等の地盤物性の調査・評価精度の向上を図っていく必要がある。これと同時に、至近年のコンピュータの発展を活かし、解析的なアプローチから崩壊危険度の高い地盤条件・降雨条件を明らかにして、調査ヘフィードバックすることは非常に有用であると考えられる。

このため、今後、本研究で議論できていない以下の課題に取り組む必要がある。

- (1) 斜面の傾斜角・土層厚、透水性・強度特性等の違いが、地下水位面の形成や安定性に及ぼす影響を評価し、崩壊危険度の高い地盤条件を明らかにする。
- (2) 集中豪雨時の不飽和域の浸透力が、斜面の安定性に及ぼす影響度合いを明らかにする。
- (3) 上記に基づき、極限平衡法の実務への適用性に着目した所要安全率の必要割増率の検討や、極限平衡法への不飽和域の浸透力の反映といった課題に取り組む、降雨時におけるまさ土斜面の安定性評価精度の向上を図る必要がある。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所:20 万分の 1 日本シームレス地質図, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (閲覧日 2018.6.11)
- 2) 海堀正博, 石川芳治, 牛山素行:1999 年 6 月 29 日広島土砂災害に関する緊急調査報告(速報), 砂防学会誌, Vol.52, No.3, pp.34-43, 1999.
- 3) 若月強, 石澤岳昂, 植竹政樹, 川田真也:2009 年 7 月防府市・山口市豪雨災害において花崗岩斜面に発生した土石流と斜面崩壊の特徴, 防災科学技術研究所主要災害調査, No.44, pp.39-51, 2010.
- 4) 土田孝ら:2010 年 7 月に広島県庄原市で発生した

- 土砂災害の調査と考察—平行斜面中腹の崩壊メカニズムに関する検討—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.295-309, 2012.
- 5) 福岡管区気象台:災害時気象速報平成 24 年 7 月九州北部豪雨, 2012.
- 6) 小林北斗ら:2013 年 7 月 28 日に山口・島根県で発生した豪雨の特徴と洪水被害の概要, 自然災害科学, Vol.33, No.3, pp.205-220, 2014.
- 7) 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.
- 8) 松四雄騎, 渡壁卓磨:2014 年広島災害における表層崩壊の発生メカニズムと降雨閾値, 京都大学防災研究所年報, No.58A, pp.24-33, 2015.
- 9) 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.
- 10) 笹井友司, 西垣誠, 西山哲:マサ土斜面の安定性評価に用いる降雨条件の提案, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.35, No.1, pp.169-176, 2017.
- 11) 松澤真, 木下篤彦, 高原晃宙, 石塚忠範:花崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与える山地の開析程度の影響, 地形, Vol.36, No.1, pp.23-48, 2015.
- 12) Fellenius: Calculation of the stability of earth dams, *Second Congress on Large Dams*, Vol.4, pp.445-462, 1936.
- 13) Bishop, A. W.: The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slope, *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17, 1955.
- 14) Janbu, N.: Slope Stability Computations, *Embankment Engineering*, John Wiley and Sons, pp.47-86, 1973.
- 15) 酒匂一成, 北村良介:浸透力を考慮した斜面安定解析手法に関する一考察, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, pp.698-699, 2001.
- 16) 八木啓介, 中村孝博, 磯部公一, 大塚悟:剛塑性有限要素解析による河川堤防の浸透崩壊時刻予測手法の提案, 応用力学論文集, Vol.13, pp.391-400, 2010.
- 17) 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.
- 18) 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, No.264, pp.87-96, 1977.
- 19) 西垣誠ら:飽和・不飽和 3 次元浸透流解析プログラム Ver.2013 他, 岡山地下水研究会(仮)HP, 2013.

- 20) Griffiths, D.V., and Lane, P. A. : Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 21) 蔡飛, 鵜飼恵三, 黄文峰 : 斜面安定性の評価—極限平衡法と弾塑性 FEM の比較, 地すべり, Vol.39, No.4, pp.395-402, 2003.
- 22) 地盤工学会中国支部 : 平成 11 年の広島県豪雨災害調査報告書, pp.33-65, 2000.
- 23) (財)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.
- 24) 気象庁 web : <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (入手日 2018.6.4)
- 25) 蔡飛, 鵜飼恵三 : 飽和・不飽和浸透流による降雨時斜面崩壊の予測可能性に関する考察, 地盤工学会中国支部豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集, pp.23-26, 2001.
- 26) 鵜飼恵三, 萩原敏行, 井田寿朗 : モデル化された切土斜面の 3 次元安定解析と留意点, 地すべり, Vol.29, No.4, pp.18-24, 1993.

(2018 年 6 月 19 日 受付)