

浸透水圧を考慮した斜面の安定性評価と簡易的な評価手法の提案

Slope Stability Evaluation in Consideration of Seepage Pressure and Proposal for Simple Evaluation

笹井友司 Yuji SASAI (中電技術コンサルタント(株) 原子カプロジェクト室)
 西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学名誉教授)
 西山 哲 Satoshi NISHIYAMA (岡山大学教授 大学院環境生命科学研究所)
 松井章弘 Akihiro MATSUI (中電技術コンサルタント(株) 原子カプロジェクト室)

毎年のように全国各地で集中豪雨による斜面崩壊が発生しており、広域斜面を対象とした安定性評価手法の確立が喫緊の課題となっている。こうした中、降雨時の斜面安定性評価に関する解析技術は、実験を含む多くの既往研究成果と至近 20 年のコンピュータの目覚ましい発展とが相まって大きな進展を遂げた。これにより、大きなモデルを対象とした FEM 解析や 3 次元解析が可能となっているが、実務への適用性に着目した研究事例はこれまであまりない。

本論文では、極限平衡法と浸透一応力連成解析による斜面安定性評価を行い、浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響の評価、広域斜面・実務への適用に着目した簡易的な評価手法の提案を行った。

キーワード：斜面安定、降雨浸透、浸透水圧、浸透応力連成 (IGC : E-1, E-6, E-7)

1. はじめに

降雨時の斜面安定問題は、浸透と安定の複合問題であり、降雨による斜面崩壊の主要因としては、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) 地下水の浸透水圧の発生によるせん断力の増加

これらの評価には、降雨時の斜面内の浸透挙動を把握することが必要不可欠となる。浸透問題については、現状においても FEM 飽和－不飽和浸透流解析¹⁾を用いた予測・再現が一般的になされている。また、西垣ら²⁾は、2次元のみならず3次元まで拡張した解析プログラムを公開している。さらに、これら浸透流解析の側方境界には通常水頭固定が用いられるが、タンクモデルによる水位変動を側方境界に設定することで、実現象の再現性向上を図った研究事例³⁾もある。

次に、斜面崩壊の主要因のうちの(1)、(2)は、浸透一応力連成解析は勿論のこと、地盤を剛体と仮定した極限平衡法（たとえば、Fellenius⁴⁾、Bishop⁵⁾、Janbu⁶⁾）においても、すべり安全率算定時に考慮されている。河川堤防では、設計実務において2次元 FEM 飽和－不飽和浸透流解析と極限平衡法（修正フェレニウス法）による安定計算で、浸透に対する安全性評価がなされている⁷⁾。

(3)について、サクシヨンの減少による強度低下は、内部摩擦角よりも粘着力の方が大きいとされており⁸⁾、見掛けの粘着力の低下を考慮した研究事例⁹⁾はこれまでも多数ある。

(4)については、極限平衡法によるすべり安全率算定

式に、物体力（浮力×動水勾配）として浸透力を考慮した研究¹⁰⁾や FEM 連成解析により浸透流解析で得られる浸透力を直接応力解析に持ち込んだ研究¹¹⁾がこれまでもなされている。

また、至近 20 年のコンピュータの目覚ましい発展により、極限平衡法による安定性評価が主流とは言え、3次元解析による安定性評価事例¹²⁾も増えている。しかしながら、広域斜面を対象とした実務への適用性、つまり高度な解析の必要性に着目した研究事例はあまりない。

そこで、本論文では、図-1 のフローにより、浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響を評価したうえで、広域の自然斜面・実務への適用に着目した簡易的な安定性評価手法の提案を試みる。

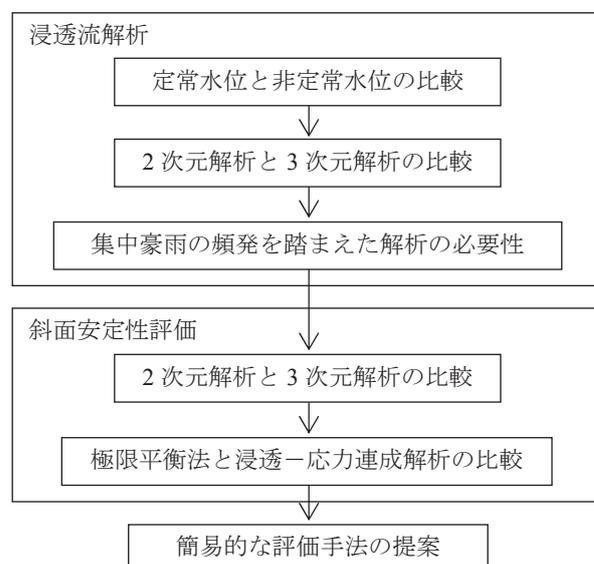


図-1 自然斜面の簡易的な安定性評価手法の検討フロー

2. 浸透流解析

2.1 定常水位と非定常水位の比較

解析モデルは、平成 11 年 6 月の広島豪雨災害における自然斜面の崩壊実績¹³⁾を踏まえ、**図-2** に示す表層厚さ 2m、斜面勾配 30° の一様斜面を対象とした。また、解析手法は、FEM 飽和-不飽和浸透流解析¹⁾とし、地表面を降雨浸透境界、下流側を圧力水頭 0.8m の水頭固定境界とした。解析条件は、**表-1**、**図-3**、**図-4** に示すとおり、飽和透水係数を前記災害における 1 崩壊斜面の試験値¹²⁾とし、一般的な不飽和特性⁷⁾と斜面内に地下水水位面のない無降雨時の初期水位を仮定した。また、定常解析には平成 11 年の広島地方気象台の年平均雨量¹⁴⁾を考慮し、非定常解析には 10mm/hr の降雨を仮定した。

上記による解析結果を**図-5**、**図-6** に示す。平常時を想定した定常水位は地表面が飽和に至っていないが、10mm/hr の降雨を考慮した非定常水位は降雨開始 10 時間後、すなわち総雨量 100mm で法尻から約 10m 程度まで地表面が飽和に至っている。この法尻への浸潤前線の到達が、**図-7** に示すような斜面外向きの浸透水圧、すなわちパイピングを発生させ、法尻付近の 1 次崩壊を発生させるとされている¹⁵⁾。さらに、この 1 次崩壊が、**図-8** の 2 次崩壊や 3 次崩壊を誘発すると考えられる。

以上より、浸透水圧の発生や集中豪雨による飽和域の進展等の議論には、非定常水位の把握が必要である。

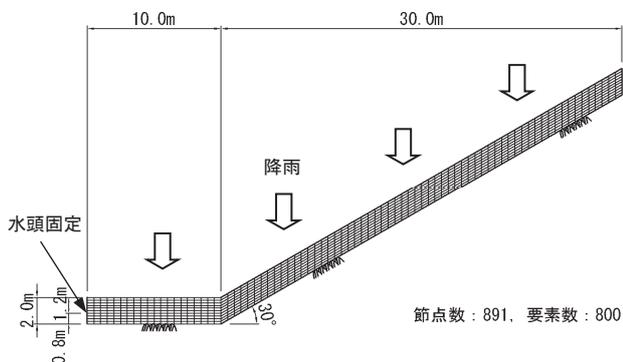


図-2 2次元 FEM 解析モデル

表-1 浸透流解析条件

飽和透水係数	$1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}^{12)}$	
降雨条件	定常解析	0.17mm/hr ¹⁴⁾
	非定常解析	10mm/hr

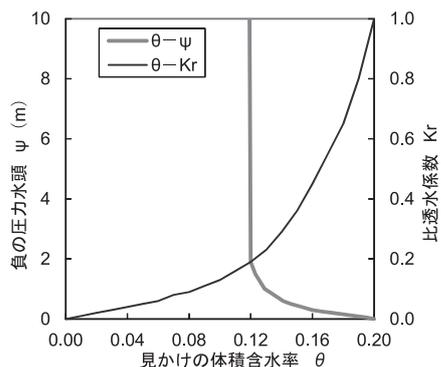


図-3 不飽和特性 (砂質土)⁷⁾



図-4 2次元初期水位

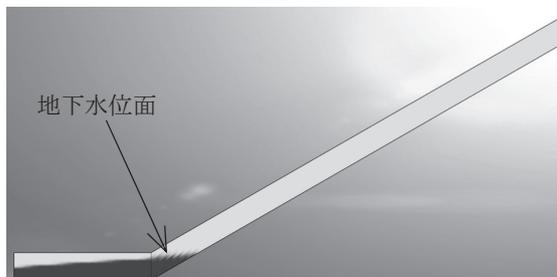


図-5 2次元定常水位 (0.17mm/hr)

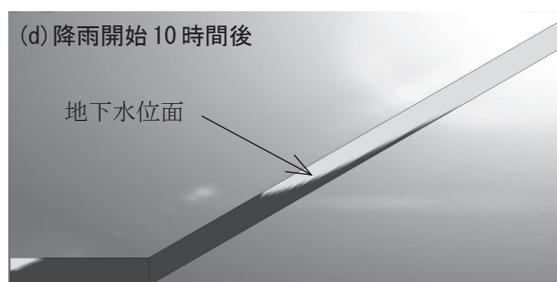
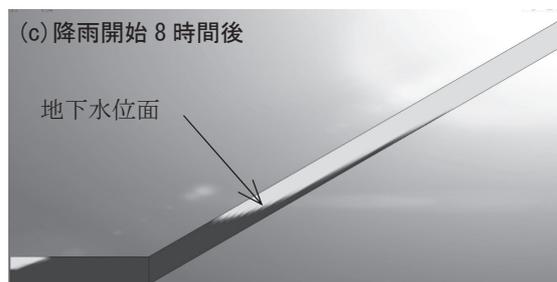
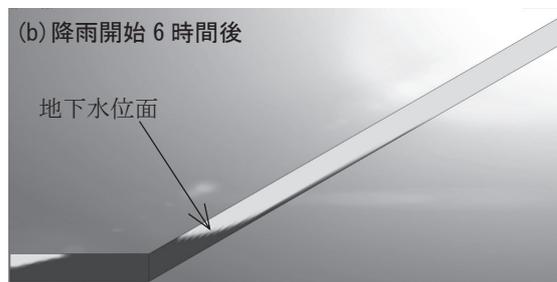
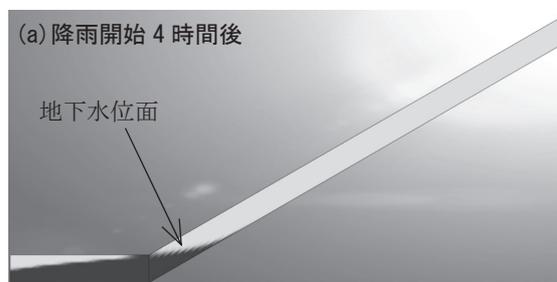


図-6 2次元非定常水位 (10mm/hr)

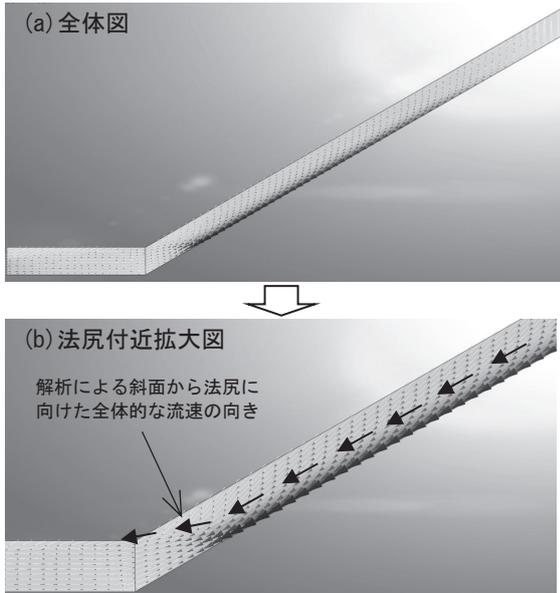


図-7 2次元非定常流速ベクトル図(降雨開始4時間後)

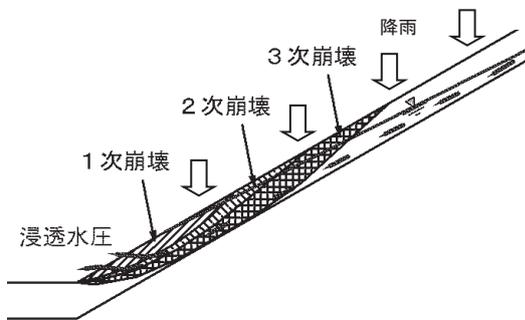


図-8 崩壊イメージ

2.2 2次元解析と3次元解析の比較

谷部には上流側からに加えて側方からの地下水流入があるため、谷部の地下水位上昇は2次元より3次元の方が早く、3次元の方が安全側の評価になる。

このため、本節では、前節の2次元非定常解析と同一の条件・手法により3次元非定常解析を行い、2次元解析との違いを確認する。3次元解析モデルは、図-2の2次元解析モデルと同様、広島豪雨災害の崩壊実績¹³⁾を踏まえた図-9の横断面形状とし、図-2と組み合わせた図-10に示す谷地形モデルを仮定した。また、境界条件は、地表面を降雨浸透境界、下流端は横断方向の全水頭を2次元解析と同一とした水頭固定境界を仮定した。

上記条件による解析結果を図-11に示す。また、図-6と図-11の非定常水位について以下に考察する。

- (1) 降雨開始4時間後には、2次元と3次元ともに浸潤前線が斜面法尻に到達している。また、2次元と3次元とで地下水位分布に顕著な差異はないが、3次元では上流域に向けた飽和域の進展が認められる。
- (2) 降雨開始6時間後には、3次元では横断方向への浸潤面の拡大が認められるとともに、地表面まで飽和した領域の拡大が2次元と徐々に乖離してくる。
- (3) 降雨開始8時間後および10時間後には、上流域への飽和領域の進展速度に顕著な差が認められ、3次

元では降雨開始10時間後、つまり総雨量100mmでほぼ斜面全域が飽和状態になる。

2.3 集中豪雨の頻発を踏まえた解析の必要性

前節までは、2次元解析と3次元解析との地下水位上昇の相違確認を目的としたため、10mm/hrの降雨条件を設定した。本節では、集中豪雨に対する地下水位上昇を2次元解析により検討し、自然斜面の崩壊予測における浸透流解析の必要性について考察する。

降雨条件は、図-12に示す平成11年6月の広島豪雨災害における1崩壊斜面近傍の観測雨量¹⁶⁾を使用した。また、降雨のみ図-12に変更した場合の解析結果は、斜面全域が完全飽和状態となったため、有効間隙率約8%である図-3に示す砂質土の不飽和特性を、有効間隙率約15%である図-13に示す礫質土の特性に変更した。その他の解析条件、初期水位は前節までと同一とした。

以上による解析結果は、図-14に示すとおり、81mm/hrの集中豪雨で飽和域が上流側へ大きく広がっている。また、集中豪雨後の地下水位は、礫質土の不飽和特性を用いても、図-6に示す降雨開始10時間後の地下水位分布と概ね一致する。このことは、3次元解析では、集中豪雨直後に図-11に示す降雨開始10時間後の地下水位分布程度になることを示している。

飽和・不飽和の浸透流解析は、特定の斜面を対象とする場合には有効であるが、無数にある自然斜面全てを対象に実施するのは困難である。このため、今後も増加するとされる集中豪雨や広域斜面への適用性に着目すると、実務では浸透流解析は実施せずに斜面内は完全飽和するものと考えて、安定性評価や対策工の検討を行うことを提案したい。しかしながら、斜面の安定性評価に浸透水圧の考慮が必要であれば、浸透流解析を行う必要があるため、次章の結果を踏まえて判断する。

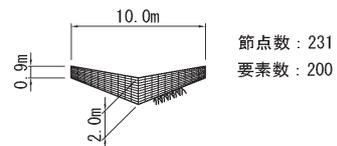


図-9 横断方向の要素分割図

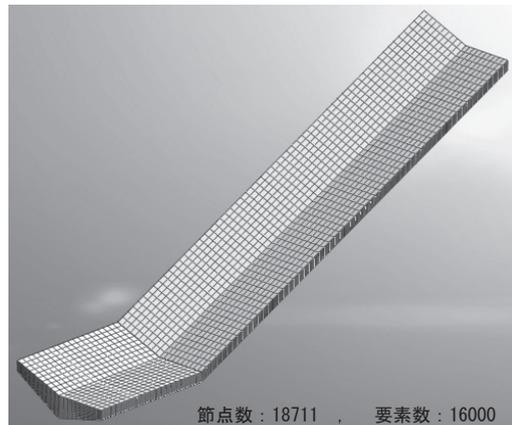


図-10 3次元FEM解析モデル

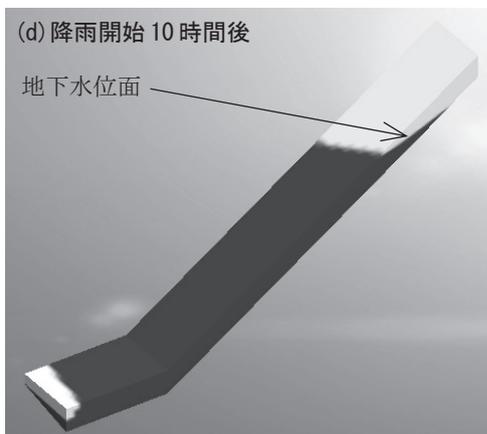
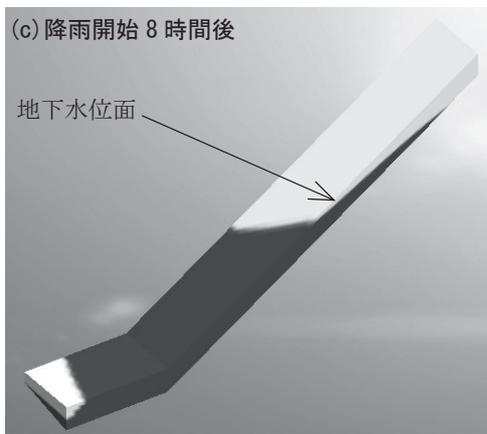
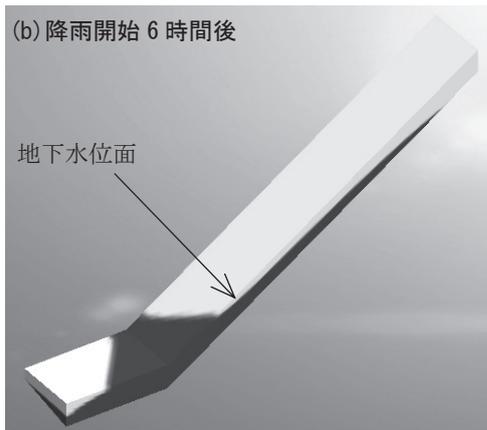
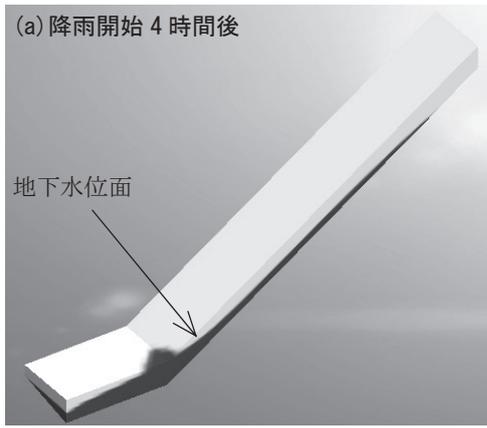


図-11 3次元非定常水位 (10mm/hr, 谷部で切断表示)

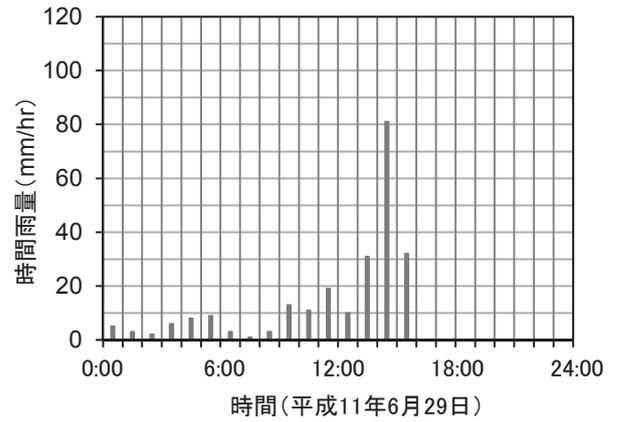


図-12 八幡川気象観測所 (日本道路公団) 雨量記録

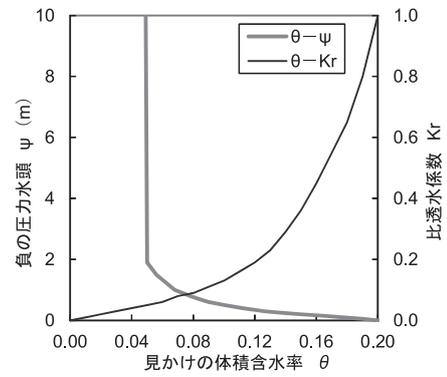


図-13 不飽和特性 (礫質土) 7)

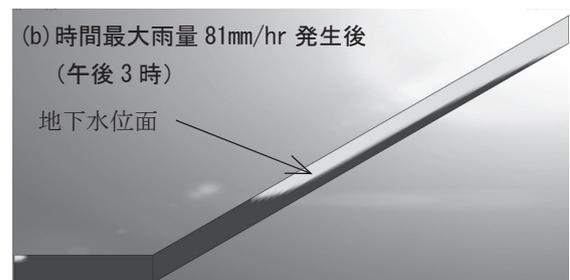
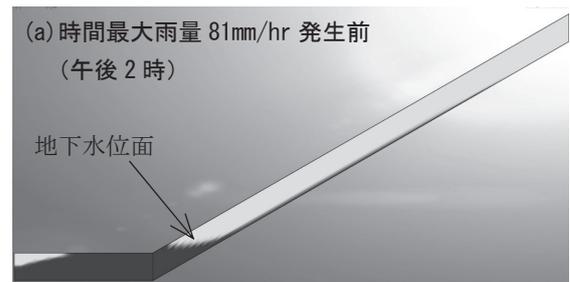


図-14 2次元非定常水位 (集中豪雨を考慮)

3. 斜面安定性評価

3.1 2次元解析と3次元解析の比較

図-15に示すように谷部の斜面安定性評価における3次元の滑動力①は、2次元と同様の斜面上流側から下流側に向けた分力②とその直交方向の分力③に分けられる。この斜面上下流方向への分力②は、2次元の滑動力に比べて小さくなる。また、それに直交する左右側部から谷側に向けて作用する分力③は、すべりに対する抵抗力として寄与する。このため、2次元による安定性評価は、3次元に比べて安全側となる。また、3次元的な崩壊形状の把握や不均一な地盤の物性評価が解析技術の進展に追いついていないこと等から、コンピュータが発展した現在も各種基準類の安定性評価手法は、2次元から3次元への移行がなされていないものとする。

以上より、実務への適用性に着目している本論文では、以降2次元による安定性評価に限定して議論を進める。

3.2 極限平衡法と浸透-応力連成解析の比較

極限平衡法と浸透-応力連成解析の比較は、図-2に示す表層厚さ2m、斜面勾配30°の一樣斜面を対象とし、図-6に示す2次元FEM飽和-不飽和浸透流解析結果を用いる。また、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¹²⁾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同一物性を用いている。

1章に示した降雨による斜面崩壊の主要因を以下に再度記載する。

- (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) 地下水の浸透水圧の発生によるせん断力の増加

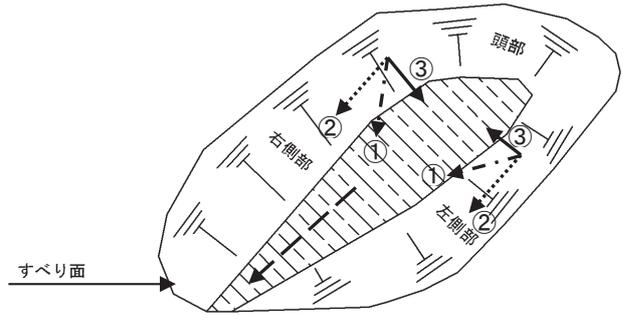
実務で一般的に用いられている極限平衡法では、このうちの(1)、(2)が考慮されている。(3)は安全側に飽和状態の試験結果を用いることで考慮されている場合もあるが、通常(4)の浸透水圧の影響は考慮されていない。

このため、本論文においても極限平衡法では浸透水圧を考慮せずに、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連成解析の安全率との比較で、浸透水圧の影響を評価する。

極限平衡法は、下式の修正フェレニウス法を用いる。

$$F_s = \frac{\sum \{c' \cdot l + (W - U \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

- ここに、 F_s : すべり安全率、 c' : 粘着力、
 l : すべり面の弧長、 W : 分割片の重量、
 U : 間隙水圧、 b : 分割片の幅、
 α : 分割片で切られたすべり面中点とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角、
 ϕ' : 内部摩擦角



- ← - - 2次元の滑動方向 ← · · · ①3次元の滑動方向
- ← · · · · ②3次元における2次元の滑動方向の分力
- ← ——— ③3次元における2次元の滑動直交方向の分力

図-15 2次元と3次元の滑動力の違い

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 ³
	飽和	20kN/m ³
強度特性	内部摩擦角	28°
	粘着力	3kN/m ²
変形特性	弾性係数	50,000kN/m ²
	ポアソン比	0.333

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^{11),17)}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、粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' による強度 $\tan \phi'$ を低減係数 F で割り、低減した粘着力 c'_F と $\tan \phi'_F$ が下式で表される。

$$c'_F = \frac{c'}{F}, \quad \tan \phi'_F = \frac{\tan \phi'}{F} \quad (2)$$

また、弾完全塑性構成式を用い、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。

$$f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - c' \cdot \cos \phi' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi' \quad (3)$$

$$g = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi \quad (4)$$

ここで、 σ'_1 と σ'_3 は最大、最小有効主応力、 ϕ はダイレイタンシー角で既往の知見¹⁸⁾より $\phi = \phi'$ 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-16に示すとおりで、式(2)の低減したせん断強度を用い、斜面の全自重を外力とした弾塑性計算が、所定の最大繰り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。この手法では、すべり線の定義は不要であり、計算で自動的に決定される。 F が小さな値の場合には、 c'_F と ϕ'_F が大きくなるため弾性応力状態となり、 F を段階的に大きくすると斜面に破壊が生じはじめてモール・クーロン式を満たすようになる。

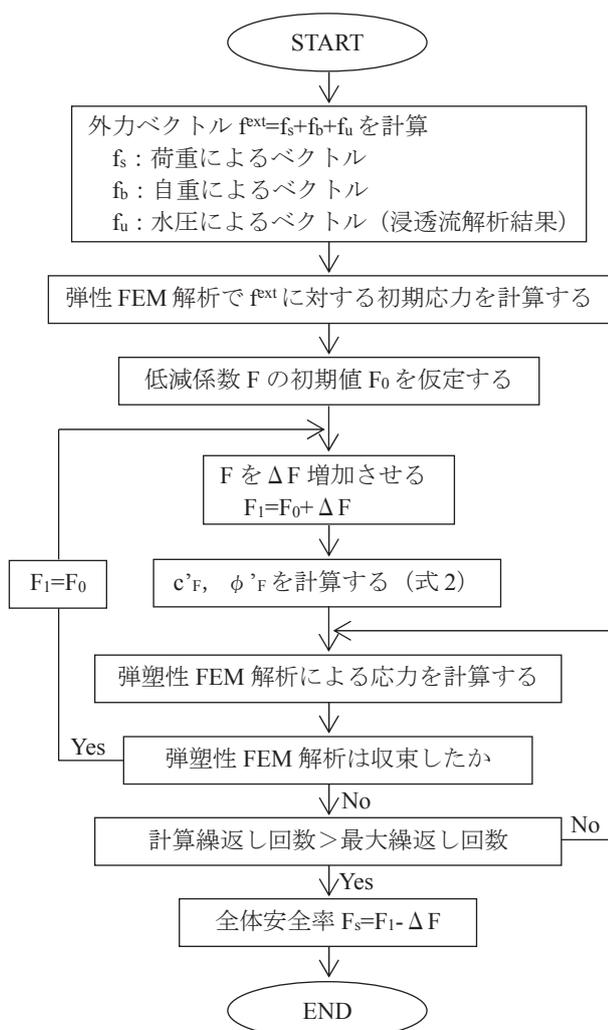


図-16 せん断強度低減法による応力解析フロー

極限平衡法 (修正フェレニウス法) とせん断強度低減法 (浸透-応力連成) によるすべり安全率の比較を図-17 に示す。また、両手法においてすべり安全率が 1.0 を下回る降雨開始 8 時間後について、極限平衡法によるすべり線を図-18 に、せん断強度低減法による臨界すべり線を図-19 に示す。

- (1) 極限平衡法によるすべり安全率は、図-6 の降雨開始 4 時間から 6 時間後にかけた法尻から上流側に向けた飽和域の進展により急激に低下する。一方、せん断強度低減法によるすべり安全率は、飽和域の進展とは無関係に直線的に低下している。この安全率の低下傾向の違いが浸透水圧の影響であり、降雨開始後 4 時間の前後、つまり法尻が飽和に至る前から至った直後のすべり安全率に顕著な違いが見られる。
- (2) 法尻から上流側に向けて飽和域が進展する降雨開始 6 時間後以降のすべり安全率は、ほぼ同様もしくは極限平衡法の方が小さくなる。また、すべり安全率が 1.0 を下回る時刻は、概ね同一である。
- (3) 以上より、斜面内が完全飽和した状態の仮定を前提とすれば、各種基準類¹⁹⁾で採用されている極限平衡

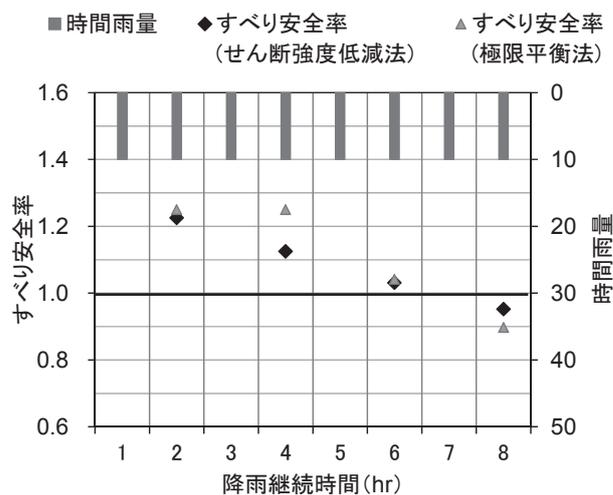


図-17 すべり安全率の比較

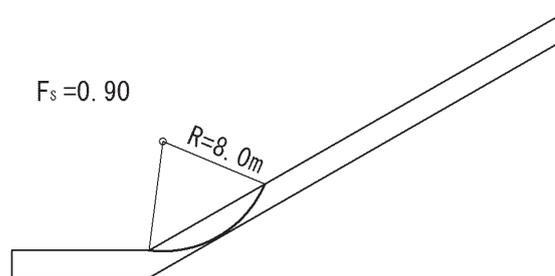


図-18 極限平衡法によるすべり線と安全率

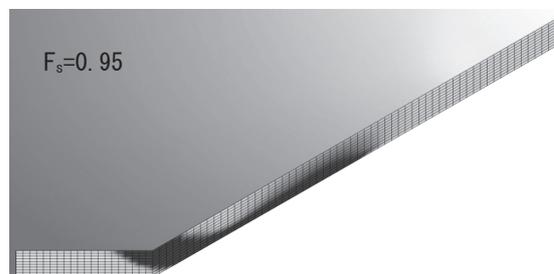


図-19 せん断強度低減法による臨界すべり線と安全率

- 法によるすべり安全率が最小となるため、浸透水圧の影響も含めた安全側の評価ができる。このため、前章で懸案とした浸透流解析の実施の要否について、実務では浸透流解析は実施せず、斜面内は完全飽和するものと考えて安定性評価や対策工の検討を行うことを改めて提案する。
- (4) 図-18 のすべり線は、図-8 に示した 1 次崩壊であり、法先の崩壊が 2 次崩壊、3 次崩壊を誘発させるとされる従来の知見¹⁵⁾を確認できた。
- (5) せん断強度低減法は、せん断強度を低下させていくことで斜面の上部から末端に向けて土塊内の塑性域を繋げ、すべり面を求める手法である。図-19 の臨界すべり線は、図-18 に示す極限平衡法のすべり線に比べて若干大きくなっている。

5. 地下水排除工の効果検討

図-18の極限平衡法、図-19のせん断強度低減法によるすべり線は、いずれも図-8の1次崩壊形状を示した。このため、本章では、地下水排除工による1次崩壊の抑制効果を簡易的に考察する。

斜面表層崩壊の対策としては、アンカー工・杭工等の抑止工と表面被覆工、地下水排除工等の抑制工がある。このうちで広域の自然斜面に対して現実的に適用できる対策工は、経済性・施工性から斜面法尻への地下水排除工の設置であると考えられる。また、地下水排除工は、法尻への浸透水圧の発生を抑制する効果も期待できる。このため、図-20に示すように排水工沿いの節点を圧力水頭固定した2次元浸透流解析を図-3、表-1と同様の条件で簡易的に行い、対策効果の検討を試みた。

図-17ですべり安全率が1.0を下回る降雨開始8時間後に対して、排水工を考慮した地下水水位面を図-21に示す。この水位分布は、図-6に示す降雨開始4時間後の水面形と概ね一致しており、上流域への飽和域の進展を抑制している。このように、斜面法尻への地下水排除工の設置は、1次崩壊の抑制による上流域への進展性崩壊の防止対策として有効であると考えられるが、目詰まりに対する監視が必須となる。

6. 簡易的な評価手法の提案

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や崩壊予測精度の向上を図る必要がある。また、表層の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・評価精度の向上も図っていく必要がある。これと同時に、複雑な地盤条件が想定される場合は例外として、実務へ適用できる安価で簡易な評価手法も求められている。こうした中、至近年のコンピュータの発展を活かした解析技術の高度化によって、大きなモデルを対象としたFEM解析や3次元解析が可能となり、従来の簡易的な手法との比較が容易となった。このような背景を踏まえ、本論文では、FEM解析や3次元解析のように、モデル化や解析に労力と時間を要する高度な解析の必要性について検討した。以下に、本研究で得られた結論を記載する。

(1) 浸透流解析について、定常状態では斜面法尻への浸透水圧の発生や集中豪雨による飽和域の進展を評価できないため、非定常状態を把握する必要がある。また、谷地形を対象とした2次元と3次元の比較では、谷部には上流側からと側方からの地下水流入があるため、谷部の地下水水位上昇は3次元解析で把握する必要がある。さらに、今回の表層厚さ2mの1様斜面では、集中豪雨によって飽和域が上流側へ大きく拡がり、斜面全域が完全飽和状態に近づく。

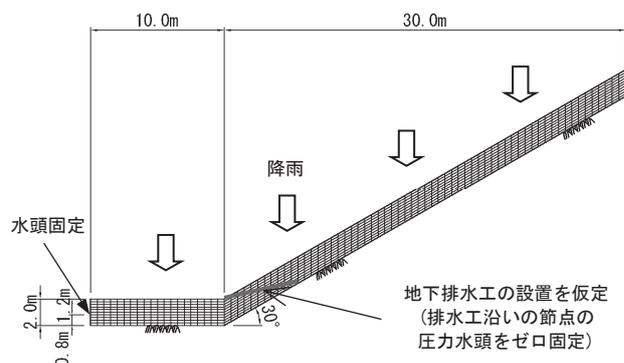


図-20 2次元浸透流解析で考慮した地下水排水工



図-21 地下水排水工を考慮した2次元非定常水位 (10mm/hr, 降雨開始8時間後)

(2) 安定性評価について、3次元ではすべり土塊の左右側部から谷側に向けた作用力が、すべりに対する抵抗力として寄与する。これにより、2次元による安定性評価は3次元に比べて安全側となるため、2次元に限定して浸透水圧が斜面の安定性に及ぼす影響を検討した。浸透水圧を考慮しない極限平衡法と浸透-応力連成のせん断強度低減法によるすべり安全率を比較した結果、法尻が飽和に至る前から至った直後では、浸透水圧の影響によりせん断強度低減法の方が安全率が小さくなる。その後、法尻から上流域に向けて飽和域が進展すると、すべり安全率はほぼ同様もしくは極限平衡法の方が小さくなる。このため、斜面内が完全飽和した状態の仮定を前提とすれば、各種基準類¹⁹⁾で採用されている極限平衡法を適用することで、浸透水圧の影響も含めた安全側の評価ができる。また、斜面法尻に発生する斜面外向きの浸透水圧の抑制はもとより斜面崩壊の防止には、地下水排除工の設置が有効である。

以上より、広域自然斜面の降雨時の表層崩壊に対して、実務への適用を踏まえた簡易的な安定性評価手法を以下に提案する。

- (1) 今後も増加するとされる集中豪雨の発生を踏まえ、浸透流解析は実施せずに斜面内は完全飽和するものと仮定する。
- (2) 安定性評価は、飽和状態の強度特性を用いた2次元の極限平衡法を適用する。

今後、簡易的な評価手法の確立に向けて、本論文で議論できていない以下の課題に取り組み、自然斜面の降雨に対するハザードマップ化に繋げたい。

- (1) 斜面の傾斜角・土層厚、透水性・強度特性等の違いが安定性に及ぼす影響を評価する。
- (2) 斜面崩壊を防止する地下水排除工の規模・配置の基準化に向けた検討，ならびにそれを踏まえた安定性評価の必要性を検討する。
- (3) 地盤条件が複雑な斜面への適用性，ならびに計画安全率の割り増しの必要性を検討する。
- (4) 特に透水性が低い斜面において，間隙空気圧が安定性に及ぼす影響を評価する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 橋翔子，大西有三，西山哲：降雨に対する斜面安定性評価のための浸透流解析の研究，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，pp.369-370，2005.
- 4) Fellenius：Calculation of the stability of earth dams, *Second Congress on Large Dams*, Vol.4, pp.445-462, 1936.
- 5) Bishop, A. W.：The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slope, *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17, 1955.
- 6) Janbu, N.：Slope Stability Computations, Embankment Engineering, *John Wiley and Sons*, pp.47-86, 1973.
- 7) (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.
- 8) たとえば，川崎元，西垣誠：実用的な不飽和土用三軸圧縮試験装置の開発とそれを用いて測定した不飽和土のせん断強度について，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.1, pp.39-56, 2011.
- 9) たとえば，安藤悠，仲山貴司，小西真治，赤木寛一：浸透と不飽和土の特性を考慮した剛塑性有限要素法解析について，第 49 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1775-1776，2014.
- 10) たとえば，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.
- 11) Griffiths, D.V., and Lane, P. A.：Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 12) たとえば，古川智，笹井友司：降雨浸透を考慮した斜面崩壊の 3 次元評価，第 36 回地盤工学研究発表会講演集，pp.2437-2438，2001.
- 13) たとえば，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.40-46, 1999.
- 14) 気象庁 web：http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php (入手日 2016.5.31)
- 15) たとえば，矢田部龍一，横田公忠，須賀幸一，ネトラ・バンダリー，地すべり，Vol.38, No. 3, pp.248-254, 2001.
- 16) 地盤工学会 6 月 29 日降雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査団：6 月 29 日豪雨による広島県の斜面災害に関わる雨量データ，1999.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) たとえば，(社)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.

(2016 年 6 月 20 日 受付)