

降雨による斜面崩壊メカニズムに関する既往の研究成果の整理と考察

Review of Recent Studies on Slope Failure Mechanism due to Rainfall

田中 昭人 Akihito TANAKA (株)ダイヤコンサルタント)
 竹内 次郎 Jiro TAKEUCHI (株)ダイヤコンサルタント)
 Thi Ha (広島大学大学院工学研究科)
 野村 英雄 Hideo NOMURA (基礎地盤コンサルタンツ(株))
 久賀 真一 Shinichi KUGA (基礎地盤コンサルタンツ(株))

降雨による土砂災害は、毎年どこかで発生し、多くの人命・財産が失われてきた。斜面崩壊予測に関する研究は古くから数多く行われているが、未だ満足できる予測精度は得られていない。崩壊予測精度の向上のためには、まず崩壊メカニズムを明確にすべきとの認識から、本報文では無限長斜面の理論を利用して崩壊要因を抽出し、感度分析により安定性への影響度を検討した。また、最近の既往研究を調査した結果、想定されている崩壊要因は無限長斜面の検討と同様に間隙水圧の増加・自重の増加・サクシジョンの消失による粘着力の低下であった。さらに、斜面勾配により崩壊形態が2つに区分され、各々崩壊要因も異なることが指摘されている。

キーワード：降雨，斜面崩壊，崩壊要因，間隙水圧，サクシジョン，既往文献（IGC：E06）

1. はじめに

降雨による土砂災害は、毎年全国各地で発生し多くの人命や財産を犠牲にしてきた。最近では広島市を中心とする平成11年の6.29豪雨災害¹⁾が記憶に新しく、とりわけ我々地盤工学技術者は、斜面崩壊の予測技術の成熟度を早急に高める必要性を痛感させられた。

これまでの研究から、斜面崩壊の予測精度を上げるためには、土質定数の決定を含めた地盤調査技術の向上や安定解析など解析技術の向上が必要だと指摘されている。

本報文では、前述の予測精度向上のための課題以外に、斜面崩壊メカニズムとそれに及ぼす要因の関係を明らかにすることが先決であるとの認識から、既往の研究成果を整理し、若干の考察を加えた。

2. 斜面崩壊予測技術の現状と課題

斜面防災対策には通常二通りあり、一つは地盤関係の技術者による斜面安定解析に基づく斜面崩壊予測に着目した土質力学的なアプローチがある。一方、住民サービスとして利用される、いわゆる降雨と災害履歴との相関関係に基づき統計的に得られた雨量指標から、警戒・避難情報の伝達などに活用されるアプローチがある(図-1)。

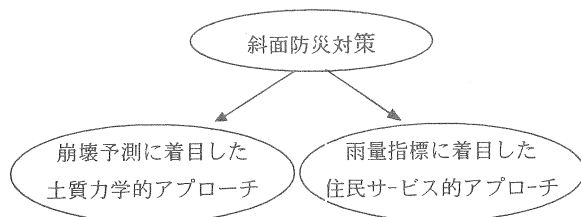


図-1 斜面防災対策のアプローチ

ここでは、地盤工学の技術者にとり、最も立ち後れていると思われる斜面安定解析に基づく崩壊予測を目標とする土質力学的なアプローチの現状や課題について振り返ってみる。

2.1 崩壊予測技術の現状

まず斜面崩壊の予測技術の現状について、斜面防災対策検討のフローから概説する(図-2)。

降雨による斜面崩壊の予測から対策工を検討するにあたり、第一に検討(危険)箇所の選定が必要となる。

そのためには、地形図や航空写真・地質図などの基礎資料と周辺に発生した災害履歴を調査・収集し、また実際に現地調査を行って危険箇所を概略特定する。

次にこれまでの情報を活用して、斜面崩壊の可能性や崩壊形態などをイメージする必要がある。この想定した崩壊要因や崩壊形態に基づいて、地質調査を実施し、土層構成や水理境界など解析斜面のモデル化や地盤定数の設定を行う。続いて、降雨を想定した上で浸透流解析を行い、地下水位や飽和度を求め、その結果を利用した安定解析を行い、最終的に斜面の危険度評価を行うというのが望ましい流れであろう。

しかし実際には、現地調査を中心とした簡易(一次)調査が殆どで、ボーリングや原位置試験・室内力学試験など詳細(二次)調査まで実施されるのは、コスト面の制約もあり崩壊後の事後調査など詳細検討が必要な特殊な場合である。従って、地盤定数の設定では、安定解析で使用する円弧すべり法(修正フェレニウス法)による $c \cdot \phi$ 逆算法のような、適用には問題とされる方法が採用されることも考えられる。

また解析においては、詳細検討を必要とする場合以外は浸透流解析を実施することは希で、仮定した地下水位を使用して安定解析を実施しているのが実情である。

このような現実の中で、斜面崩壊を予測し危険度評価を行い最終的に斜面防災対策へと向かうが、これで満足できる予測精度が得られるとは考えにくい。

さらにコスト面の現実問題だけでなく、複雑な地盤条件の適切なモデル化や地盤定数を得るための調査・試験法、また解析方法に何を使用するのかなど崩壊予測の精

度を上げるために必要な技術的課題もある。

しかし、これらの方法論や適用上の問題もさることながら、より重要な問題は、実斜面の崩壊メカニズムの適切な評価であり、さらに言えば崩壊メカニズムを事前に想定することが最も重要だと考えられる。

《崩壊予測に着目した土質力学的アプローチ》

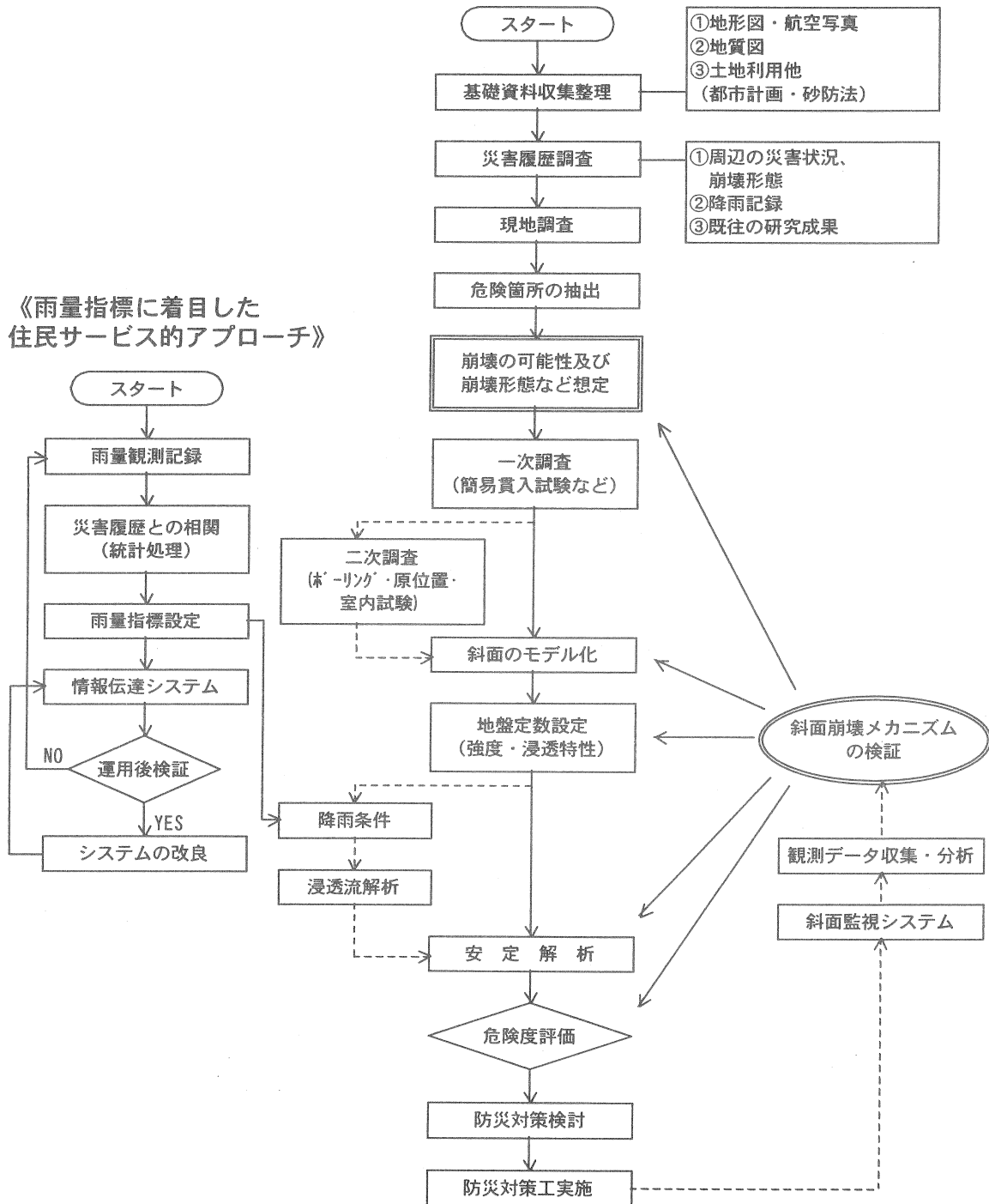


図-2 斜面防災対策の検討フロー

2.2 現状の課題

斜面崩壊の予測精度を向上する上で、考えられる現状の技術的課題と本質的な課題などを整理してみたい。

①斜面のモデル化

解析断面のモデル化に際して、複雑な地形・地質構造を十分把握する必要がある。

特に、岩盤の亀裂状況や走向・傾斜、粘土シームの存在²⁾、風化の程度などの地質情報が解析断面のモデル化に十分反映されていない場合が多い。

このために地質関係者との連携や協力が必要であり、同時に予測という点から往々にして定量化しづらい地質情報を、降雨時の斜面の状況や崩壊後の事後調査の知見から定量化に結びつける研究が必要である。

②地盤定数の設定

地盤定数の設定には、強度特性と透水特性が必要となる。これまでは簡易調査が中心で、そのため試料採取法や試験方法が確立されるに至っていないことが考えられる。

最近では、時間の経過に伴う風化・劣化によって、強度が低下することや浸水により物性が変化することなどが認識されている。

今後は岩の風化進行速度や不飽和～飽和にいたる物性値の変化などについて、現場条件や崩壊現象を反映した調査・試験方法の確立が望まれる。

③解析技術

解析では浸透流解析と安定解析を行う必要がある。この内、浸透流解析については予測精度を上げるためには2次元でなく3次元解析を行うべきだという点以外に問題がないように思われがちだが、水分特性曲線を含めて、地盤中の水の動きや岩盤の亀裂からの水の供給など複雑な実現象を考えると簡単に予測精度を上げられるとは考えられない。

また、安定解析については、解析方法の問題がある。例えば、まさ土斜面のように崩壊のほとんどが表層崩壊である場合、安定解析手法に最も一般的な「無限長斜面の安定解析法」が使用されるが、基盤と地表面がどこまでも平行な斜面や地下水位が定常浸透のように常に平行ということはあり得ない。

現実の斜面を無限長斜面にどうすれば反映させられるか、つまり勾配の変化する実斜面や勾配変化点近傍で地下水位が上がる実現象などを無限長斜面の理論にどう組み込むかが課題となる。一方、三次元を含めて分割法による高度な数値解析法が用意されている。適切なモデル化と地盤定数を用いれば高精度の予測が可能であることが知られているが、前述したように実際には適切なモデル化と地盤定数の

設定が困難であり、高精度の予測が容易でないこと、および解析結果に及ぼす各因子の影響が明確でなく、崩壊メカニズムを把握しにくいという問題を有している。

斜面崩壊の予測精度向上のために、特に斜面のモデル化、地盤定数の設定、解析技術についてそれぞれの課題を述べた。

しかし、いずれにも共通して言えることは、これらの課題を克服するためには、現場でどのような力学的現象が生じているのか、別な言い方をすれば、崩壊メカニズムを適切に想定することが、最も重要な問題であり優先すべきテーマだと考えられる。

最近では、逆解析的に行われる崩壊メカニズムの特定や予測技術の評価などに有効となり得る現地観測情報が収集・蓄積されるようになり（斜面監視システムなど）、この種の情報の利用が崩壊メカニズムの解明に期待されるところは大きい。

3. 崩壊メカニズムに関する理論的解釈

本節では、崩壊メカニズムについて、最も単純な「無限長斜面の安定理論³⁾」を利用して考えてみたい。前述したように、実際の斜面を無限長斜面に近似することにはかなり無理があるのは事実であるが、崩壊メカニズムに及ぼす各要因の影響を考える上では最適である。

3.1 無限長斜面による安定問題

図-3は無限長斜面のスライス片にかかる起動力と抵抗力を示しており、右図は左図の状態から降雨により地下水位が上昇して起動力（T）としての土塊自重（W）が増大し、抵抗力（S）は元の自重から間隙水圧（U）が増大した分、摩擦抵抗力が減少する状況を示している。

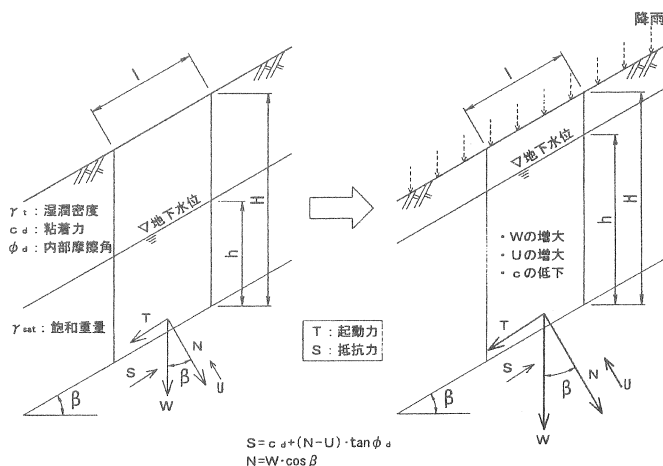


図-3 無限長斜面の安定解析モデル

この図から無限長斜面の安定解析の基本式(1)が得られる。

$$F_s = \frac{c_d + (W \cos \beta - U) \cdot \tan \phi_d}{W \sin \beta} \quad (1)$$

$$= \frac{c_d}{W \sin \beta} + \frac{\tan \phi_d}{\tan \beta} + \frac{U \tan \phi_d}{W \sin \beta}$$

ここに、

F_s : 安全率, c_d : 粘着力, ϕ_d : 内部摩擦角
 W : 土塊重量, U : 間隙水圧, β : 斜面の角度

上式の右辺第1項は粘着力による抵抗項, 第2項は摩擦抵抗項, 第3項は間隙水圧による減少項を示している。

式(1)にそれぞれ下記に示す記号を代入して変換したものが式(2)である。

$$W = \{ \gamma_t \cdot (H-h) + \gamma_{sat} \cdot h \} \cos \beta \quad U = \gamma_w \cdot h \cdot \cos^2 \beta$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

ここに、

γ' : 水中重量, γ_{sat} : 飽和重量, γ_w : 水の密度

$$F_s = \frac{c_d + \{ \gamma_t \cdot (H-h) \cdot \cos^2 \beta + \gamma' \cdot h \cdot \cos \beta \} \cdot \tan \phi_d}{\gamma_t \cdot (H-h) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \gamma_{sat} \cdot h \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

これから地下水位が地表面まで達した場合 ($h=H$) には式(3)のように表される。

$$F_s = \frac{c_d}{\gamma_{sat} \cdot H \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\gamma' \cdot \tan \phi_d}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta} \quad (3)$$

さらに、浸水により粘着力が低下し、ゼロと見なせる場合は式(4)となる。

$$F_s = \frac{\gamma' \cdot \tan \phi_d}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta} \quad (4)$$

通常、 $\gamma' / \gamma_{sat} = 0.5$ なので、 $\tan \phi_d / \tan \beta > 2$ でなければ安定しない結果となり、地表面まで地下水位が達した場合、安定性が大きく低下することが推定される。

以上の無限長斜面の安定問題から、斜面崩壊を発生させる要因として以下の項目が想定される。

- ① 自重の増加
- ② 間隙水圧の増大 (地下水位の上昇)
- ③ 浸水による (サクシオン消失による) 粘着力の低下

この他、無限長斜面の理論には地下水位の設定にて自動的に考慮されているものの、例えば斜面法尻の浸透流による法先崩壊に見られるような、

- ④ 浸透圧

も崩壊要因としてあげられる。

3.2 無限長斜面による崩壊要因の感度分析

前述した斜面崩壊の4つの要因の変化が、安定性にどの程度影響するのか、無限長斜面の理論を利用して感度分析を試みた (浸透圧については除く)。

試算に使用した無限長斜面を図-4に示す。計算に使用した基本条件は、広島県の6.29災害調査報告書¹⁾を参考に若干の修正を加えて以下のように設定した。

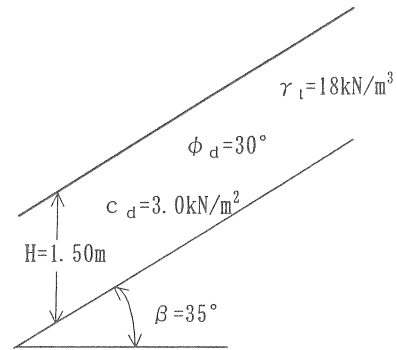


図-4 無限長斜面の基本モデル

表-1 無限長斜面の基本条件

項目	条件
斜面勾配	$\beta = 35^\circ$
層厚	$H = 1.50\text{m}$
地下水位	$h = 0\text{m}$
内部摩擦角	$\phi_d = 30^\circ$
粘着力	$c_d = 3\text{kN/m}^2$
湿潤密度	$\gamma_t = 18\text{kN/m}^3$
初期安全率	$F_s = 1.061$

上記に示す条件を基本に、地下水位・粘着力・層厚などを変化させたときの安全率の変化を計算した。図-5にそれらの結果を示す。

図から安全率には斜面勾配・地下水位・粘着力・層厚・内部摩擦角の変化の影響が大きいことがわかる。例えばこれらの変化により安全率にどの程度違いが生じるのか以下に提示した。

- ① 斜面勾配 $\beta = 35^\circ \rightarrow 30^\circ$: $\Delta F = 0.20$
 $\beta = 35^\circ \rightarrow 40^\circ$: $\Delta F = -0.15$
- ② 地下水位 $h = 0 \rightarrow 0.5\text{m}$: $\Delta F = -0.15$
- ③ 粘着力 $c_d = 3.0\text{kN/m}^2 \rightarrow 0$: $\Delta F = -0.24$
- ④ 層厚 $H = 1.50\text{m} \rightarrow 0.75\text{m}$: $\Delta F = 0.24$
- ⑤ 内部摩擦角 $\phi_d = 30^\circ \rightarrow 35^\circ$: $\Delta F = 0.18$

一方同図から、自重の増加 (γ_t の変化) は安全率にあまり大きな影響がないことがわかる。

また、地下水位と粘着力が安全率に与える影響について、斜面勾配および層厚の違いがどのように関係するのか調べた。その結果を図-6に示す。

図から地下水位については、斜面勾配が急勾配より緩勾配の方が、層厚では厚いより薄い方が安全率への

影響度が大きいことが得られた(図-6.a~b).

また粘着力についても、斜面勾配では緩勾配、層厚では薄い方が、斜面の安定性に与える影響はより小さくなる(図-6.c~d).

以上から無限長斜面という単純化されたモデルでは

あるが、崩壊要因としてあげられた地下水位(間隙水圧)や粘着力が安定性に非常に敏感だと理解される。

さらに、これらの地下水位や粘着力の安定性に与える影響度合いは、斜面勾配や層厚の違いにより異なることも理解された。

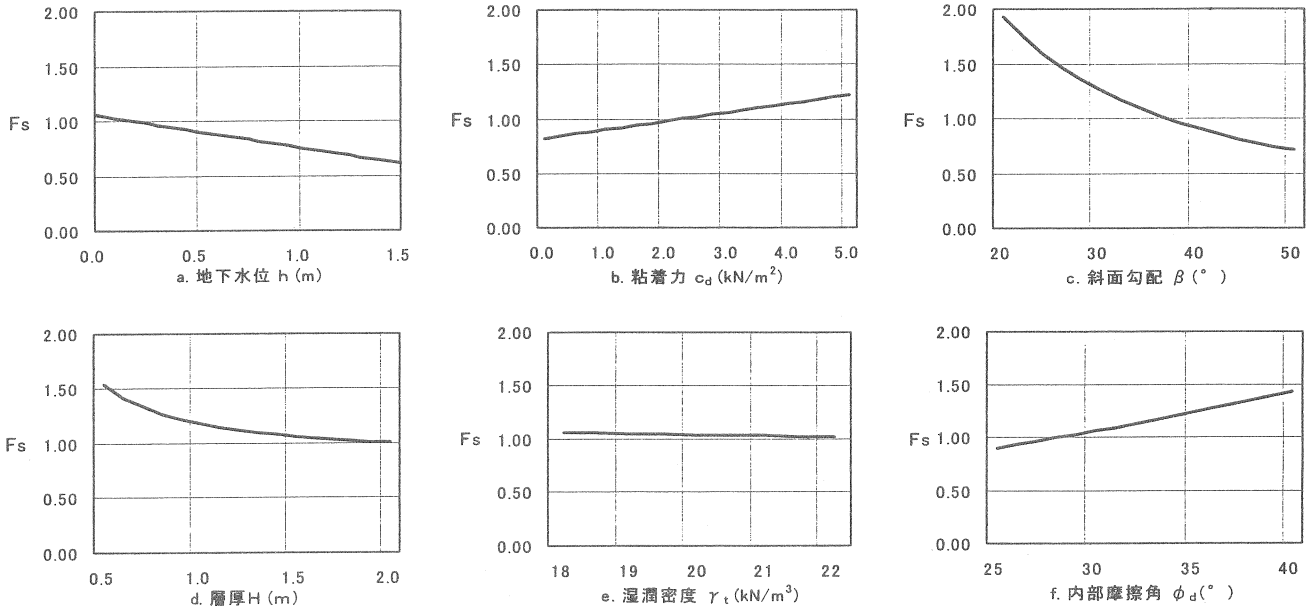


図-5 無限長斜面の感度分析結果(1)

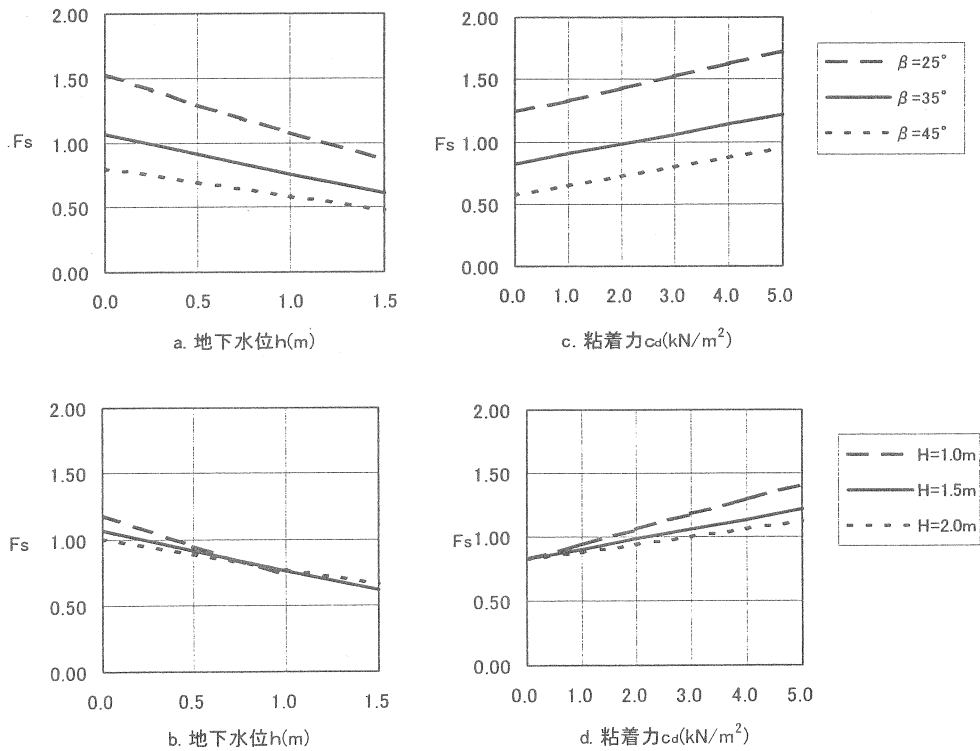


図-6 無限長斜面の感度分析結果(2)

4. 崩壊メカニズムに関する文献調査

4.1 調査の対象

斜面崩壊メカニズムに関する既往の研究成果を調査し、整理・分析した。

調査対象は、最近の研究成果として1990年以降の文献(一部1980年代も含む)を中心とした。収集した文献は、土と基礎、土木学会論文集、地盤工学研究発表会講演集などが主体であり、これらを発表者の所属機関ごとに整理し、件数が多い場合は研究機関の代表的な論文に絞った。この結果、文献総数は34件⁴⁾、所属機関数は25機関であった(この内大学関係は19機関)。

4.2 分析の方法

降雨による斜面崩壊メカニズムには、前述した要因以外にも関係するものがあると思われるが、前述の4項目に絞りそれぞれの研究で何を崩壊の主要因と考えているのか分析した。

- ①外力の増加
 - ・自重の増加
 - ・浸透力
- ②せん断抵抗力の低下
 - ・サクシジョンの低下による粘着力の低下
 - ・間隙水圧の増加によるせん断抵抗の低下

ここで、サクシジョンの低下は、有効応力の低下と捉える考え方もあるが、ここでは降雨浸透(浸水)によるサクシジョンの低下およびそれに伴う見かけの粘着力の低下として整理した。

また浸透力については、パイピングのように浸透力を特に意識している場合のみ、崩壊要因として整理した。

分析の内容は、崩壊要因として何を主体に考えているかという単なる量的な分析と、土質別および斜面形態による分析も行った。

4.3 崩壊要因の分析結果

既往研究の分析の結果、崩壊要因ごとに整理したものを図-7~図-9に示した。

文献全体では、崩壊要因に外力の増加よりせん断抵抗力の低下が主体だと考えている研究者が多く、さらにこの内訳を見ると、間隙水圧(または地下水位)の上昇が最も多く、続いて自重の増加とサクシジョンの低下と続く(図-7)。

また土質別に見ると、まさ土全体では、間隙水圧の上昇と自重の増加だとしている研究者が最も多く、続いてサクシジョンの低下をあげている(図-8)。

関東ロームとシラスの場合は、間隙水圧の上昇を主要因とする傾向はまさ土と同様であるが、サクシジョンの低下も主要因の一つとする傾向がまさ土に比べて多い(図-9)。

以上から、前節の無限長斜面で解説したように、前述の4項目、とりわけ間隙水圧の増加とサクシジョン低下を崩壊の主要因とする研究者が多いことが明らかとなった。

4.4 崩壊形態との関連性

八木⁵⁾、佐々木⁶⁾、竹村⁷⁾らによれば、崩壊メカニズムは土質の違い(強度特性や透水特性・水分特性など)に加えて、斜面勾配など地形的な素因によっても異なり、崩壊形態との関連性を指摘している。

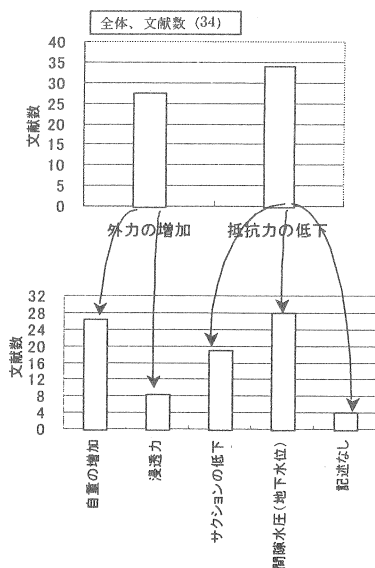


図-7 既往調査全体の崩壊要因の調査結果

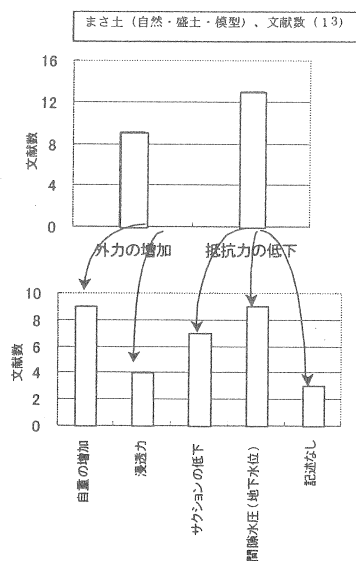
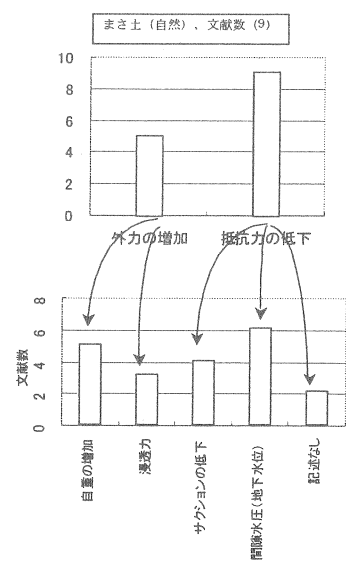


図-8 まさ土に関する崩壊要因の調査結果



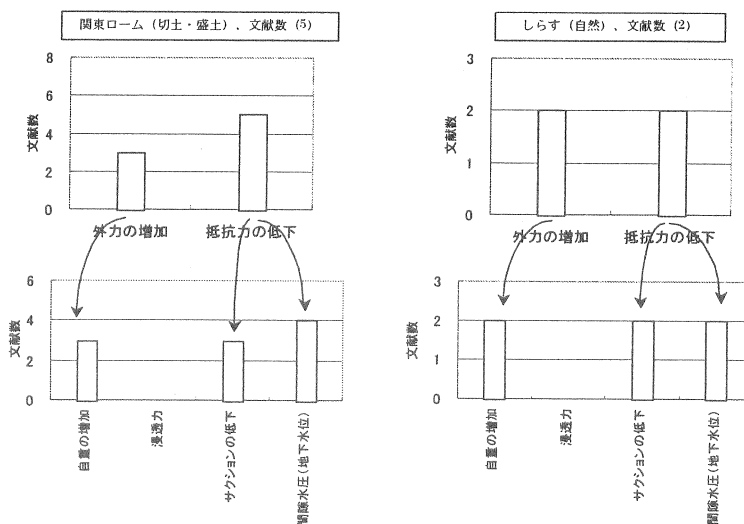


図-9 土質別の崩壊要因の調査結果

図-10に地形的な素因と崩壊形態との関連性について既往の研究を整理した。これらの研究では斜面勾配の違いにより2つの崩壊形態があることを指摘している。

すなわち、斜面が急勾配の場合、地下水面が形成されずに、主にサクシジョン低下に伴う粘着力の低下を主要因とする崩壊が斜面全体で起こる。

一方、緩勾配の場合には、法尻や遷急線のような勾配変化点付近で地下水面の形成・水位上昇が起こり、サクシジョン低下による粘着力の低下があるものの、そのみでは崩壊を説明できないとし、間隙水圧の増大を主要因とする局所的な小崩壊をきっかけに進行性破壊的に斜面

上部に拡大すると指摘している。

この斜面勾配と崩壊メカニズムの関係については、実際の崩壊事例と現地観測データから検証する必要がある。また一方で、飽和度と粘着力の関係や勾配変化点付近の水位上昇がどのような要因（あるいは組み合わせ）で決まるのかなどを究明していく必要がある。

さらにこれらの研究成果から、崩壊が斜面のどこから始まるのかといったことも含めて崩壊メカニズムに関する一歩進んだ知見が得られ、斜面崩壊予測精度の向上に繋がるものと考えられる。

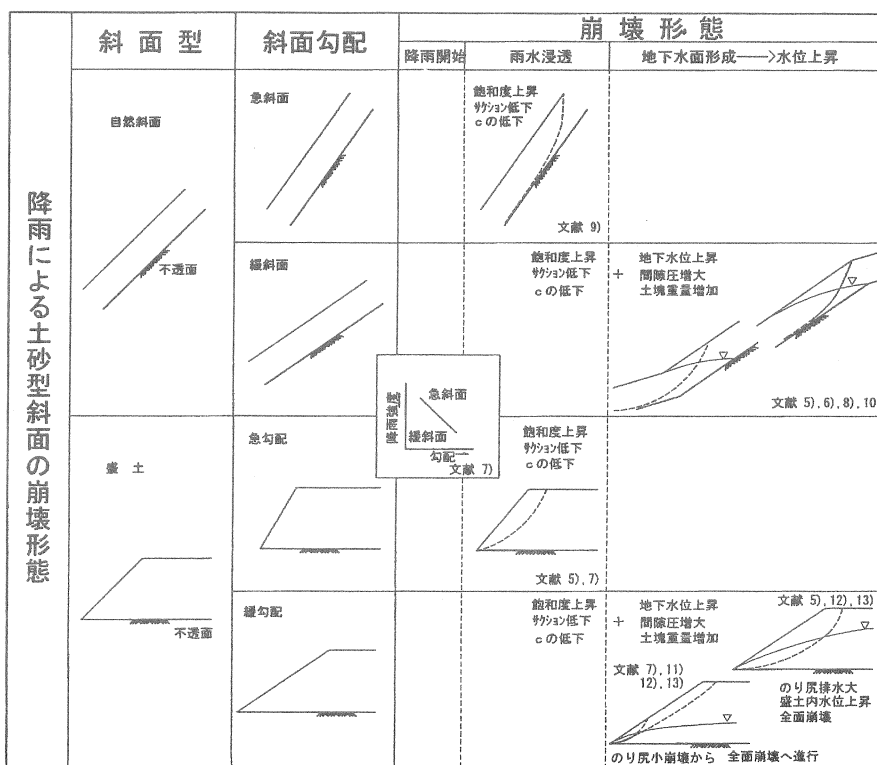


図-10 地形・地質的素因と崩壊形態に関する研究

5. まとめ

降雨による斜面崩壊の予測精度は、現状では十分満足できる状況にはない。そのためには、崩壊メカニズムの研究という根本的な問題から予測精度の改善に取り組む必要があり、文献調査を中心に整理してみた。

以下に本報文のまとめと今後の展望などについて列挙しておきたい。

- 1) 無限長斜面の感度分析から、安定性に地下水位や粘着力の影響が大きいことが明らかとなった。この水位や粘着力の影響度は、斜面勾配や層厚など地形・地質構造的な素因に強く依存する。すなわち、緩勾配になるほど、また層厚が薄くなるほど水位や粘着力による安全率への感度（影響度）が大きくなる。
- 2) 既往の研究を整理した結果、大部分の研究で崩壊要因に間隙水圧の上昇を取り上げ、続いて自重増加・サクシオン消失（粘着力低下）を取り上げている。
- 3) 既往の研究では、斜面勾配と崩壊形態の関係を指摘しており、急勾配では地下水面が形成される前に斜面全体で崩壊し、緩勾配では法尻など地形変化点で地下水位の上昇に伴う小崩壊をきっかけに上部への進行性破壊が起こるとしている。崩壊主要因は、前者はサクシオンの低下による粘着力の低下、後者は間隙水圧の上昇だと指摘している。
- 4) 今後は斜面勾配と崩壊形態の事実関係を追求するとともに、崩壊要因としての間隙水圧やサクシオンが、土質の違い（特に水分特性）や地形・地質構造的な素因の違いとどう関連するのかを明らかにする必要がある。
- 5) 現場における水の挙動、特に地下水位や間隙水圧が異なった降雨条件のもとでどのような振る舞いをするのかについて現場情報を収集する必要がある。

謝 辞

本報文は、地盤工学会中国支部広島地域の土質工学セミナー活動の一環として、平成13年度の研究成果をとりまとめたものである。

とりまとめに際して、ご指導およびご協力いただいた、広島大学大学院工学研究科の佐々木康教授ならびに森脇武夫助教授、また土質工学セミナー広島地域のメンバーの方々に対して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 平成11年広島県豪雨災害緊急調査委員会：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，pp. 4-65, 2000.
- 2) 北川隆司：花崗岩のマサ化のメカニズムと斜面崩壊，粘土科学，Vol. 39, No.1, pp. 37-44, 1999.
- 3) 守随治雄：無限斜面における地質別適用限界，土と基礎，Vol. 39, No.10, pp. 67-68, 1991.
- 4) 森脇武夫，田中昭人，野村英雄：降雨による斜面崩壊の予測技術に関する研究，地盤工学会中国支部土質工学セミナー（広島地域）報告書，pp. 2-29～2-31, 2002.
- 5) 八木則男，矢田部龍一，山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文集，第330号，pp. 107-114, 1983.
- 6) 佐々木康，THI HA：まさ土斜面におけるサクシオンおよび土壌水分量の降雨時変動に関する研究，広島大学大学院工学研究科修士論文，pp. 142-148, 2002.
- 7) 神品英夫，竹村次郎，末政直晃，木村孟：降雨による斜面崩壊に関する研究，第25回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 1611-1612, 1990.
- 8) 西田一彦：風化残積土の工学的性質，鹿島出版会，pp. 114-138, 1986.
- 9) 三木博史，藤井厚企，古田光弘：特定法面・斜面の危険雨量の設定手法の検討，土木技術資料，Vol. 42, No. 2, pp. 50-56, 1999.
- 10) 榎明潔，池田勇司：降雨時の斜面表層崩壊の発生機構の検討，豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集，地盤工学会四国支部，pp. 99-110, 2001.
- 11) 三木博史，山田哲也，藤井厚企，野口典孝：大型模型堤防を用いたのり尻ドレーンの設計に関する検討，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1873-1874, 1997.
- 12) 村石尚，杉山友康，佐溝昌彦，岩崎公俊，成瀬文宏：降雨時の盛土の水圧変動と安定性の検討，第26回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 1615-1616, 1991.
- 13) 小林睦，廣岡明彦：電気探査法を用いた降雨時の盛土斜面内の安定性評価に関する遠心模型実験，第35回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 2457-2458, 2000.