

降雨に伴う斜面安定性変化のリアルタイム評価手法の開発

Development of Real-time Estimation Technique in Slope Stability with Rainfall

北村 良介 (きたむら りょうすけ)

鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

1. まえがき

地球温暖化と関連し、世界的規模で異常気象による洪水、干ばつなどの自然災害が発生している。南九州地方においても最近10年余に集中豪雨による各種土砂災害が発生している^{1)~4)}。降雨に伴う代表的な土砂災害は斜面崩壊によるものである。晴天時に安定していた斜面が降雨時に崩壊するということは、降雨が原因の一つであることは自明である。そのため、降雨と斜面崩壊とを直接関連づけるための研究が数多く行われてきている⁵⁾。しかし、これらの研究には降雨と斜面崩壊を関連づける力学的な考え方（土質力学の成果）は入っていない。そのため、このような経験的かつ帰納法的なアプローチには統計的な処理が必要であり、将来の斜面崩壊発生の予知には限界がある。

降雨に伴う斜面崩壊は雨水が斜面に浸透し、崩壊を起こそうとする力が抵抗する力を越えたときに生じる力学現象である。崩壊を起こそうとする力は含水量の増加とともに大きくなる。一方、抵抗する力はサクションの減

少（間隙水圧の増加）とともに小さくなる。これらのメカニズムを定量的に精度よく把握できれば、降雨に伴う斜面崩壊挙動は力学現象として一意的に決定できる。北村らはこのような立場から不飽和土質力学に基づいて降雨に伴う斜面崩壊の予知を目指してきている^{6)~9)}。

図-1は北村らが提案している予知手順のフローを示している。本稿では図-1を用いながら、北村らが開発中の降雨に伴う斜面安定性変化のリアルタイム評価手法を紹介することを試みる。

2. 斜面崩壊メカニズムとその定量的モデル

2.1 間隙モデルと粘着モデル

前述のように降雨に伴う斜面崩壊は雨水が斜面に浸透し、崩壊を起こそうとする力が抵抗する力を越えたときに生じる力学現象である。雨水が斜面に浸透すると土塊の自重が増え、崩壊を起こそうとする力が大きくなる。一方、雨水が斜面に浸透すると飽和度が大きくなり、せん断強度パラメータ（ c （見掛けの粘着成分）、 ϕ （内部摩擦角））の一つである見掛けの粘着成分が小さくなる、

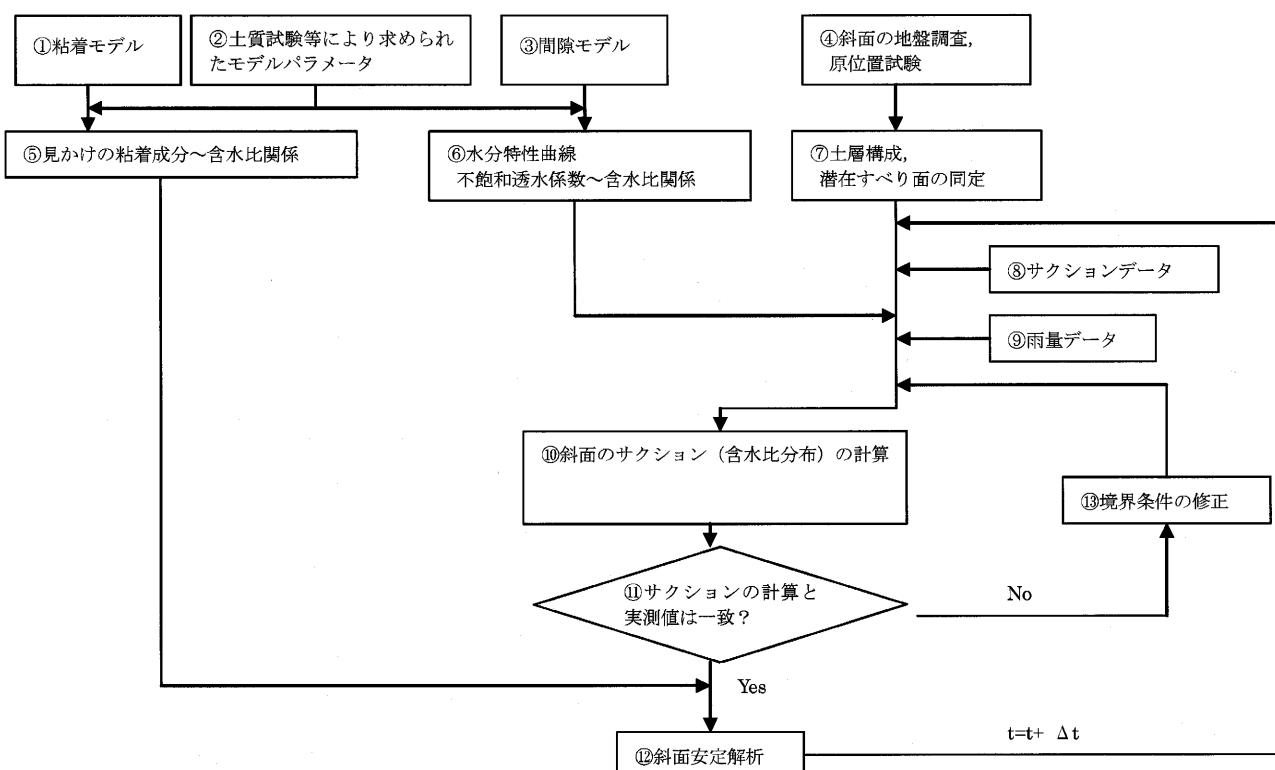


図-1 予知手順のフロー

論 文

すなわち、強度が低下する。崩壊を起こそうとする力が抵抗する力（強度）を越えれば崩壊が発生する。このメカニズムを定量的に評価するため、北村らは雨水の斜面への浸透挙動を評価する数値力学モデル（間隙モデル）¹⁰⁾、浸透に伴う見掛けの粘着成分の低下を定量的に評価する数値力学モデル（粘着モデル）¹¹⁾を提案している（図一1の①、③）。間隙モデル、粘着モデルとも土粒子レベルでの力学的・確率論的考察に基づいており、間隙水の粘性係数、表面張力以外のモデルパラメータは粒度試験、土粒子密度試験、密度試験、含水比試験、せん断試験によって求めることができる（図一1の②）。間隙構造（粒子構造と表裏の関係）の異方性を評価するパラメータ（一つ）の具体値だけはマルコフモデルで採用している接点角分布¹²⁾に基づいて仮定している。

間隙モデルから水分特性曲線、不飽和透水係数～含水比（あるいは、体積含水率、飽和度）関係が求まる（図一1の⑥）。粘着モデルから見掛けの粘着成分の含水比に依存した増減が求まる（図一1の⑤）。間隙モデルの妥当性を調べるために土槽試験を行い、サクションの時系列変化（図一1の⑩）の比較・検討を行っている¹³⁾。

2.2 斜面安定性評価モデル

斜面の安定性を定量的に評価する斜面安定解析には極限平衡法、極限解析法、有限要素法などがある¹⁴⁾。北村らの提案している手法では極限平衡法を適用している（図一1の⑫）。降雨に伴ってしらす斜面で生じる表層すべり型斜面崩壊のはほとんどが非円弧であることからヤンブ法を用い、安全率あるいは崩壊確率¹⁵⁾によって斜面の安定性を評価している。ただし、極限平衡法の中の円弧・非円弧斜面安定解析は不静定問題となっており、静定問題とするための仮定が正しくなければ安全率が正確に1.0ではなく、その前後で崩壊が生じることになる。

ヤンブ法では潜在すべり面をあらかじめ同定しておく必要がある。しらす斜面での表層すべり型の斜面崩壊を対象とする場合、検土杖や簡易貫入試験装置によって貫入抵抗が急変するところを連ねた曲線を潜在すべり面とすることができます（図一1の④）。大野ら¹⁶⁾は、三成分コーンプローブの間隙水圧測定センサーとポーラスストーンを負圧センサーとセラミックに置き換える、サクションを計測できるコーンプローブを開発中である。本コーンプローブを用いることによって精度よく斜面内のサクション分布を同定することができれば、斜面安定性を定量的に評価する計算を開始するサクションの初期分布（図一1の⑩）の同定精度が向上することになる。

1997年の出水市針原の土石流災害²⁾、2003年の水俣市宝川内の土石流災害³⁾、2005年の台風14号による宮崎県内で発生した土石流災害⁴⁾では深層崩壊型の斜面崩壊がトリガーとなっている。それらの深層崩壊は円弧すべりと見なされる。事前の地盤調査や原位置試験により潜在すべり面が円弧で近似できる場合は非円弧すべり解析を円弧すべり解析（ビショップ法やフェレニウス法）に替えることによって本提案手法の適用が可能となる。ここに、地盤調査とはボーリングによる土層構成の同定、標

準貫入試験による強度の同定、過去に近隣で行われたボーリングデータを収集し、土層構成を推定すること等を意味する。なお、2005年の台風14号によって宮崎県で発生した大規模斜面崩壊（山体崩壊に近い）の発生場所を事前に予知することは困難である。地頭菌ら¹⁷⁾の研究の発展を期待したい。

極限平衡法による斜面安定解析においては潜在すべり面上の土のせん断強度パラメータである c （見掛けの粘着成分）と ϕ （内部摩擦角）が必要である。現在は、潜在すべり面上の土試料をサンプリングし、室内一面せん断試験や三軸試験を排気・排水条件で行うことによってせん断強度パラメータを求めることが一般的である。その際、サクションを測定する必要はないが、破壊時の含水比を測定しておく必要がある。破壊時の含水比がわかれば、粘着モデルを用いることによって、見掛けの粘着成分を含水比の関数として求めることができる。

3. 雨量情報（誘因）

斜面崩壊の原因には素因と誘因がある。本章では雨量情報（誘因）のリアルタイム収集について述べる（図一1の⑨）。

気象庁は雨量観測網（アメダス）を完成させ、リアルタイムのポイントで観測された雨量とレーダアメダス解析雨量、また、6時間後までの雨量（短時間予測雨量）も提供している。全国を1kmメッシュに分け、レーダアメダス解析雨量に基づく各メッシュの土壤雨量指数¹⁸⁾をリアルタイムで計算し、履歴順位を土砂災害警戒情報として発表している。国土交通省、農林水産省、JR、高速道路会社、都道府県、市町村等の機関は独自の雨量観測網を持っており、基本的にリアルタイムでの雨量情報の収集が可能となっている。これらの機関は雨量情報のみを用いて土砂災害の発生危険度を評価している。

このように雨量情報のリアルタイム収集の技術はIT技術の進歩とともに進歩しており、その速度は加速的である。機関横断的な雨量データの共有化が今後の課題である。鹿児島県では鹿児島県内259ヶ所の雨量データ、国土交通省鹿児島国道事務所・大隅河川国道事務所・川内河川事務所、鹿児島市、JR、西日本高速道路㈱の雨量データのリアルタイムでの共有化システムの構築を目指している。

以上のことより、IT技術の多様な分野での応用技術の進歩を勘案すると北村らが提案している斜面崩壊予知システムにおいて、雨量情報の収集は容易である。

4. モニターとしてのサクションの測定

岡田¹⁹⁾によれば、平成9年から17年までの死者の発生時の発生メッシュでの土壤雨量指数の80%が履歴順位は1位であった。雨量情報（誘因）だけでこれだけの精度が得られていることは評価できる。しかし、20%は履歴順位2位以下で発生している。斜面のサクション（含水量）の変化（地盤情報）を考慮することによ

ってこの精度はさらに向上することが期待される。

図-1において、⑧サクション（含水量）データは、モニターの役目を果たしている。図-1に示したフローの各アイテムがすべて正しければ（実斜面の状態を反映しているなら）、サクションの測定は不要となる。しかし、現在の地盤工学のレベルではこのようなことにはならない。そのため、数値計算結果（図-1の⑩）の妥当性を検討（図-1の⑪）するため、モニター値が必要となる。モニター値を参考にし、より多くの降雨パターンに数値計算で得られたサクションが対応できるよう境界条件を修正していかなければならない（図-1の⑫）。

5. あとがき

斜面崩壊予知とは「いつ（時間）」「どこで（場所）」「どのような（規模）」をあらかじめ知ることを意味している。しかし、本稿で示した手法には「どこ（場所）」はあらかじめわかっていることから出発している。場所に関しては、別な手法（踏査、リモートセンシング技術の応用等）が必要である。例えば、土砂災害防止法による警戒地域の同定作業が進められており、それらによって決められた斜面を対象とした「いつ（時間）」と「どのような（規模）」を予知することから着手できればと考えている。

雨量情報のみを用いた予測と本稿で紹介した地盤情報を加味した予知とはそれぞれ現時点では長所・欠点を有している。今後はデータの集積を行うとともに、それぞれの長所を伸ばし、欠点を克服することによって降雨に伴う斜面崩壊予知システムの統合を目指したいと考えている。

地盤工学分野の研究者・技術者が土砂災害に関する防災・減災対策に貢献するためには不飽和土質力学の体系化、不飽和土の各種土質試験法の確立と精度向上、不静定問題となっている極限解析法による斜面安定解析の改良を目指さなければならない。

参考文献

- 1) 土質工学会1993年鹿児島豪雨災害調査委員会編：1993年鹿児島豪雨災害—繰り返される災害—, p. 209, 1995.
- 2) 地盤工学会出水市土石流災害調査団編：1997年7月10日鹿児島県出水市土石流災害調査報告, 地盤工学会, p. 52, 1998.
- 3) 土木学会・地盤工学会九州地方豪雨災害合同調査団：2003年7月梅雨前線による九州地方の豪雨災害調査報告書, 土木学会・地盤工学会, p. 102, 2003.
- 4) Sezaki, M., Kitamura, R., Yasufuku, N., Hirooka, A., Ochiai, H., Yokota, H., Sawayama, S., Imanishi, H., Matsumoto, K.: Geological Disasters in Kyushu Area caused by Typhoon No.14 in September 2005, Soils and Foundations, Special Issue (投稿中).
- 5) 沖村 孝編著：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度評価, 地盤工学会実務シリーズ, No. 26, 7章 豪雨時における危険度予測 pp. 107~136.
- 6) 松尾和昌・酒匂一成・北村良介：斜面崩壊予知戦略—南九州シラス地帯を例として—, 自然災害科学, 21-2, pp. 25~33, 2002.
- 7) 松尾和昌：降雨による斜面崩壊予知システムに関する基礎的研究, 鹿児島大学大学院理工学研究科 学位申請論文, p. 121, 2003.
- 8) 酒匂一成：降雨による斜面崩壊の予知に関する研究, 鹿児島大学大学院理工学研究科 学位申請論文, p. 154, 2004.
- 9) 荒木功平：不飽和土の数値力学モデルに関する基礎的研究, 鹿児島大学大学院理工学研究科 学位申請論文, p. 116, 2006.
- 10) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations Vol. 46, No. 5, pp. 1~, 2006.
- 11) 酒匂一成・山田満秀・北村良介：新しいしらす斜面の安定解析手法, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 3, pp. 497~503, 2000.
- 12) 荒木功平・酒匂一成・北村良介：不飽和土の変形挙動のモデル化, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 6, pp. 585~592, 2003.
- 13) 北村良介・酒匂一成・加藤俊二・水島俊基・今西 肇：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験, 地盤工学ジャーナル (投稿中).
- 14) 柴田 徹編著：地盤力学, 山海堂, pp. 138~197, 2000.
- 15) 荒木功平・酒匂一成・松尾和昌・北村良介・阿部廣史：降雨に伴う斜面崩壊確率について、「豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム」発表論文集, 地盤工学会, pp. 77~84, 2003.
- 16) 大野雅幸・片桐雅明・角南 進・片上典久・北村良介・林健太郎：サクション計測のためのコーン貫入試験装置の試作と現地貫入試験, 第41回地盤工学研究発表会, pp. 175~176, 2006.
- 17) 地頭蘭隆・下川悦郎・迫 正敏・寺本行芳：鹿児島県出水市針原川流域の水文地形的特性と深層崩壊, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 5, pp. 15~26, 2004.
- 18) 岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斎藤 清：土壤雨量指数, 日本気象学会誌「天氣」, 48-5, pp. 59~66, 2001.
- 19) 岡田憲治：土壤雨量指数から見た雨と土砂災害の関係, 第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 105~110, 2006.

(原稿受理 2006.5.8)