

# 墳丘の雨水浸透挙動の解析的評価に基づく降雨時の墳丘斜面の安定性検討

京都大学大学院

京都大学大学院

ソイルアンドロックエンジニアリング

学生会員

フェロー会員

正会員

澤田 茉伊

三村 衛

吉村 貢

## 1. はじめに

古墳は、歴史的地盤構造物として次世代へ保存されなくてはならないが、著しい損傷を受けているものが少なくない。その損傷例のひとつとして、雨水の浸透に伴う墳丘斜面の崩壊が挙げられる。墳丘の損失に加えて、崩壊箇所からさらに内部へ浸透が進み、石室への漏水量の増加や壁画の汚損等にまで被害が拡大するおそれがある。本稿では、梅雨時に墳丘の一部が崩壊した奈良県明日香村の牽牛子塚（けんごしづか）古墳を対象に、降雨時の墳丘斜面の安定性を検討する。特に、一連の検討のうち、飽和—不飽和浸透流解析による墳丘の雨水の浸透挙動の評価に焦点をあてる。

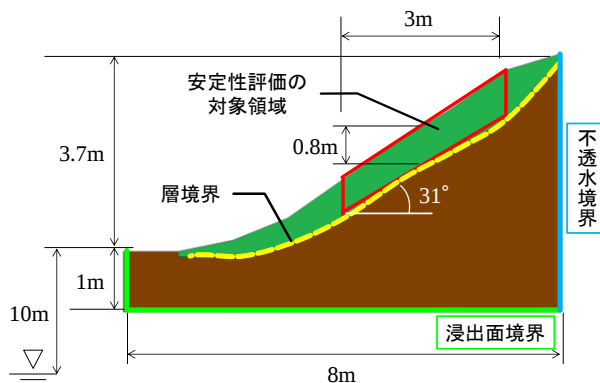


図1 検討断面のモデル

## 2. 墳丘斜面の安定性の評価方法とモデル化の概要

本検討では、解析から得られる降雨時の墳丘内の飽和度分布をもとに、すべり土塊の自重とすべり面の強度定数を評価し、降雨時の斜面の安全率を算定する。牽牛子塚古墳は、保存計画に先立ち、墳丘内部の状態を把握するため、弾性波探査等の原位置試験が実施された。その結果、表層が内部に比べて密度・強度が低い二層構造であることがわかった。図1は、試験結果をもとに、層境界位置を決定した墳丘の検討断面のモデルである。

墳丘は、まさ土を締め固めた堅固な版築で築かれているが、表層は植生の繁茂により経年的に土壌化したと考えられる。草根で乱され、有機物が混入した表層は、雨水が侵入し、細粒分が流出しやすいため、密度が低下した可能性が高い。また、密度低下に伴い、浸透特性にも変化が生じていることが予想される。変質した表層の物理的性質は、墳丘の雨水の浸透や力学的安定性に影響するため、これを適切に考慮することが重要である。本検討では、土壌化した表層と内部の版築層を密度と透水性で区別することにした（表1）。実際には、保水性の面でも両層に差があると予想されるが、ここではこれを考慮せずに水分特性曲線を仮定した。不飽和透水係数は、関数モデルを用いて、設定した水分特性曲線をもとに推定した。密度は、墳丘が人力で締め固められたことを考慮し、試験から得た締め固めエネルギーと密度の関係に基づき、人力のエネルギーレベルの範囲内で仮定した<sup>1)</sup>。

## 3. 墳丘の雨水浸透挙動の解析的評価

解析は、初期条件を設定する事前解析と降雨時を再現する本解析からなるが、本解析で適切な評価結果を得るためには、事前解析で初期条件（自然含水状態）を正確に再現することが重要である。ここでは、事前解析の一例として、定常状態を再現する過程と先行降雨を与える過程の二過程からなる方法を採用する。定常状態は、地下水と墳丘内の水分移動が平衡状態に達した状態を意味する。これが自然含水状態に一致すれば、先行降雨は必要ないが、一致しない場合もある。その理由のひとつとして、自然環境下にある墳丘は、降雨の浸透や蒸発等の水分移動が常に活発に生じている非定常な状態にあり、解析上の定常状態とは異なることが挙げられる。そのため、先行降雨の利用は、初期条件を正確に設定する上で有効な方法と考えられる。

キーワード 古墳墳丘, 斜面安定, 雨水浸透, 飽和—不飽和浸透流解析

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2 京都大学大学院工学研究科 TEL 075-383-3306

具体的には、まず定常状態を再現した後、所定の先行降雨を与える。そして、降雨後の浸透の様子を観察しながら、目標の飽和度分布（土壌化層：65%、版築層：71%）に近づく時間断面を見つけ、これを初期条件とする。先行降雨の条件は、いくつかの条件を試した結果、適当なものを選定した。総降雨量 2400mm、降雨日数 30 日、降雨強度 3.33mm/h とした場合の飽和度分布の変化を図 2 に示す。浸透に関するモデルの境界条件は、底面と墳丘裾野側は飽和時のみ流入出を許し（浸出面境界）、地表面は飽和透水係数を超えない範囲で、降雨が流入する（図 1 参照）。定常状態では、両層とも目標の飽和度よりも低いが、先行降雨後 200 日目にはほぼ目標値に達したと判断できるため、これを初期条件として、次に降雨時を再現する。

墳丘の崩壊が生じた 2012 年 6 月のうち、まとまった降雨が見られる 7 日間を検討対象とした（日降雨量は図 4 参照）。降雨開始時点で、自然含水状態にあると仮定したときの、評価結果を図 3 に示す。層境界付近の飽和度が徐々に上昇する様子が見られるが、これは両層の透水性の差に起因する現象である。土壌化層を透過した雨水は、相対的に透水性の低い版築層との境界で滞留し、境界面を流下する。そのため、層境界は飽和度が高く保たれる上、流れにより潜在的に構造が乱されるため、すべりが生じやすい箇所と予想される。

#### 4. 降雨時の墳丘斜面の安定性

解析で推定される層境界の状態を鑑みて、層境界をすべり面と仮定して、図 1 中に示す領域を対象に、降雨時の墳丘斜面の安全率を算定した（図 4）。すべり面の強度定数と飽和度の関係は、土壌化層と版築層を模擬した二層構造の供試体を用いた一面せん断試験により評価した<sup>1)</sup>。安全率は、日降水量に同調せず、単調に低下している。図中には、安全率に寄与する土塊の湿潤単位体積重量とすべり面の内部摩擦角の推移も併記しているが、このうち後者は安全率と類似した傾向を示しており、寄与率が大きいことがわかる。なお、すべり面は潜在的に完全に分離していると仮定したため、粘着力は飽和度に関わらず期待していない。

#### 5. おわりに

一連の評価方法に沿って、降雨時の墳丘斜面の安定性を定性的に捉えることができた。古墳の保存に有益な情報として貢献するためには、定量的な妥当性も求められるが、墳丘の状態を再現する

実験や解析は、多くの仮定を要する上、実際の墳丘では草根などの不均一な要因が少なからず安全率に寄与する。しかし、例えば、本稿で取り上げた解析的検討の部分においては、初期条件を正確に設定することや、実験的に評価した浸透特性を適用することで、より信頼性の高い安定性評価が可能になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 澤田茉伊, 三村衛, 吉村貢: 降雨時の墳丘斜面の安定性の評価方法に関する検討, 第 49 回地盤工学研究発表会 (投稿中)

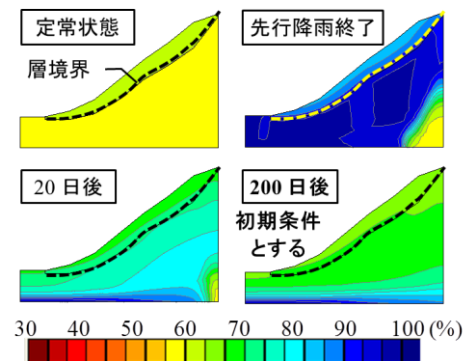


図 2 先行降雨後の墳丘の飽和度分布

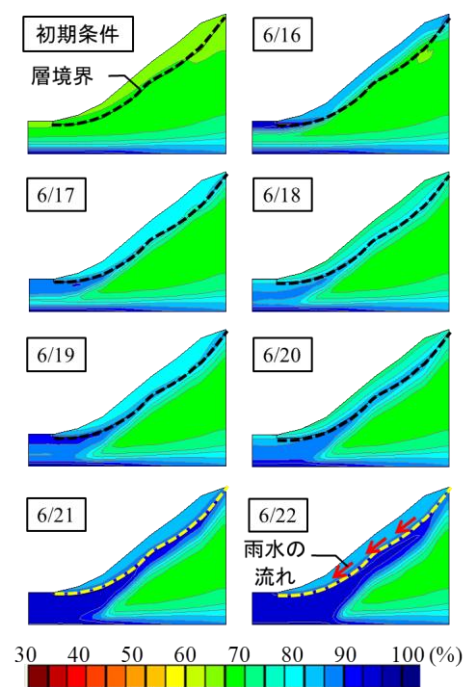


図 3 降雨時の墳丘の飽和度分布

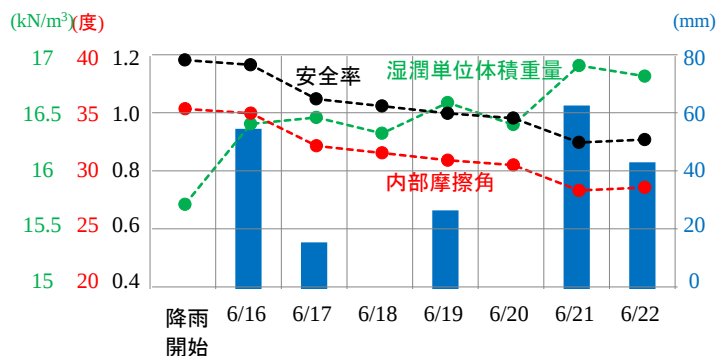


図 4 降雨時の墳丘斜面の安全率