

# 地盤工学に基づく降雨時の古墳墳丘 斜面の安定性評価に関する検討

澤田 茉伊\*・三村 衛\*・吉村 貢\*\*

Evaluation of rainfall induced instability of tumulus mounds  
for the conservation of tumuli based on geotechnical engineering

Mai SAWADA\*, Mamoru MIMURA\* and Mitsugu YOSHIMURA\*\*

## Abstract

Rainfall induced instability of a tumulus mound is one of the most serious damages to tumuli. Evaluation of water infiltration and the induced instability of tumulus mounds is an important geotechnical mission for the conservation of tumuli. This paper deals with the evaluation of rainfall infiltration into the unsaturated mound and the induced instability and damage of Kengoshizuka Tumulus. The embrittled structure and physical properties of the mound are investigated by in-situ tests and considered in the evaluation. The factor of safety in terms of slope stability is calculated using the analytically estimated degree of saturation of the mound and the experimentally obtained strength parameters of the sliding surface. The results of evaluation quantitatively show the instability of the tumulus mound induced by rainfall.

キーワード：斜面安定, 歴史的地盤構造物, 雨水浸透, 飽和・不飽和浸透流解析

Key words: Slope stability, Historical geo-relics, Rainfall infiltration,

Saturate-unsaturated seepage flow analysis

## 1. はじめに

わが国の各地に築かれた古墳は、その土地の歴史を後世に伝える歴史的地盤構造物として、重要な役割を果たしている。我々は、近代化の中で宅地開発などを優先した結果、すでにその多くを失ってしまったが、現存するものは、国民共有の財産として、次世代に受け渡していく責任がある。

しかし、現存する古墳の中には、地震や浸食などの自然作用や、近世の削平や盗掘などの人為的な破壊行為によって、著しい損傷を受け、保存が困難な状況にあるものも少なくない。崩壊や削剥による墳丘の損失や、墳丘内に埋葬施設として設置された石室の劣化等の被害が各地で報告されている<sup>1)</sup>。また、装飾古墳とよばれる古墳は、石室内

\* 京都大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kyoto University

\*\* ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社  
Soil and Rock Engineering Co. Ltd

に文化的価値の高い壁画や線刻を有しているが、これらが石室内に発生したカビや菌類で汚損される生物被害も深刻である。昭和47年に極彩色の壁画が発見されたことで知られる高松塚古墳では、発見以後、様々な要因によって石室内の温湿度環境が変化した結果、壁画に大量のカビが繁茂した。壁画を現地で保存するため、様々な努力が続けられたものの、汚損を食い止めることができず、最終的には石室を解体・移設する事態となった<sup>2), 3)</sup>。現在、壁画は環境の整った施設内で、修復が進められているが、未だ現地保存を実現する技術は確立しておらず、墳丘へ戻される目途は立っていない。

これらの損傷を抑制しながら、本来の価値を損なわないよう古墳を保存していくため、考古学から自然科学にわたる幅広い分野の知識を集結した修復・保存技術の構築が求められている。地盤工学もその一部分を担い、大いに貢献できると考える。著者らは、地盤工学の立場から、古墳の修復・保存技術の確立に貢献することを目的に、墳丘土の力学的、水理的、熱的性質の理解と損傷のメカニズムの解明に取り組んでいる。古墳の損傷は、要因によって大きく三つに分類される。すなわち、(1) 墳丘の物理的損傷、(2) 墳丘内の水分移動、(3) 石室内の温湿度環境の変化、である。本稿では、(2)の代表例として、雨水の浸透に伴って不安定化する墳丘斜面の問題を取り上げる。雨水を含むことにより、墳丘の表層部は自重が増加する一方、土のせん断強度は低下するため、斜面の力学的な安定性は低下し、やがて限界に達すると崩壊する。崩壊箇所では、雨水の浸透が進行し、石室内の漏水量の増加や温湿度環境の変化を引き起こすなど、古墳全体に被害が拡大し、深刻化する危険をはらんでいる。

本稿で検討対象とする牽牛子塚(けんごしづか)古墳は、奈良県高市郡明日香村に所在する。壁画等の装飾はないものの、近傍の二上山起源の凝灰角礫岩の巨石を削り貫いて造られた横穴式の石槨(せっかく)を有する点で、考古学的価値の高い古墳である。古墳時代終末期にあたる七世紀に築造され、周囲には、高松塚古墳をはじめ同時代に築

かれた古墳が多数存在しており、これらとともに「飛鳥・藤原宮都とその関連資産群」の構成資産として、2006年にユネスコの世界遺産暫定リストに追加掲載されている。しかし、2012年6月、梅雨時の多雨に曝され、墳丘表層の一部が崩壊し、さらに石室内に大量の雨水の侵入が確認されるなど、著しい損傷が問題になっている(図1)。現在は、被害の拡大を防ぐため、応急対策としてビニールシートで墳丘全体を覆っているが、一方で、墳丘や石室の乾燥による劣化を引き起こす可能性があるため、恒久的な修復・保存対策が急がれる状況にある。

牽牛子塚古墳のような問題を抱える古墳においては、特に崩壊の危険度が増す降雨時を対象に、墳丘斜面の安定性と被害の発生メカニズムを理解した上で、今後の修復・保存対策を練ることが重要と考えられる。墳丘斜面の崩壊については、地震に起因するものは報告<sup>例え4)</sup>がある一方、降雨によるものについては、これまでに報告例がない。本稿では、原位置試験に基づく墳丘構造の把握、数値解析による墳丘内の雨水の浸透挙動の再現、室内試験によるすべり面の強度定数の評価からなる一連の評価方法(図2)を提案し、これに沿って、牽牛子塚古墳を対象に、降雨時の墳丘斜面の安定性を検討する。

## 2. 原位置試験による墳丘構造の把握

### 2.1. 弾性波探査およびポータブルコーン貫入試験による墳丘の密度と強度の分布の把握

牽牛子塚古墳の平面図および断面図を図3に示す。現在の墳丘は、対辺22m、高さ4.5m程度の歪な形状を留めているが、考古学的な調査の結果、築造時は、切石で覆われた複数の段築からなる八角墳であった可能性が高いと考えられている<sup>5)</sup>。墳丘は、撒き出したまさ土を厚さ数センチ程度になるよう緻密に締め固めて築かれている。この工法は、版築と呼ばれ、終末期古墳の墳丘に見られる特徴のひとつである。古墳の保存計画に先立って、現在の墳丘の状態を把握するため、弾性波探査とポータブルコーン貫入試験が実施された。弾性波探査では、地盤中の弾性波動の伝搬特



図1 牽牛子塚古墳 (2012年8月撮影)  
 (a) 墳丘北側 (b) 崩壊箇所 (c) 石槨入口

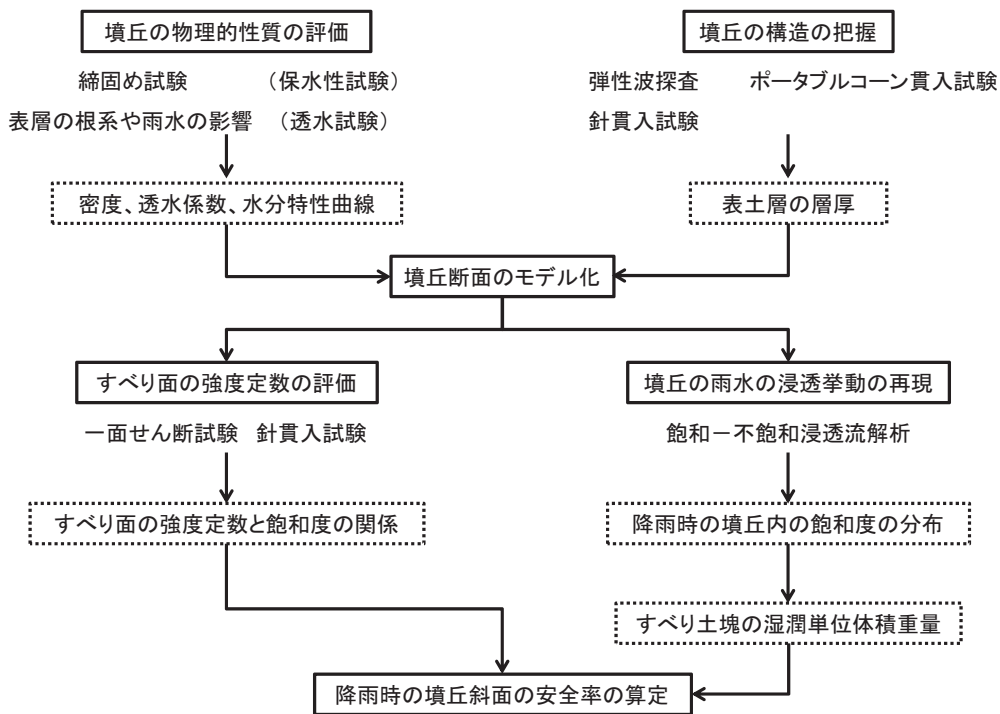


図2 降雨時の墳丘斜面の安定性の評価方法

性を利用して、墳丘を構成する各層の伝播速度と層厚を推定できる。一方、ポータブルコーン貫入試験からは、貫入抵抗と深さの関係を得ることができる。いずれの試験も墳丘の深さ方向の層構造と、その物性の概況を把握するのに有効と考えら

れる。弾性波探査は、図3中に示す測線①②上に概ね1m間隔で計7点の受振点を設け、測線の両端点と中央の計3点の起振点で打撃型の振動が与えられた。測定データは萩原の方法<sup>7)</sup>により解析している。また、各測線上の5点で、測定深度を0.85mとしてポータブルコーン貫入試験が実施された。

図4に、測線①上で実施した両試験の結果を示す。図中のA～Eはポータブルコーン貫入試験の実施位置を示す。弾性波探査試験の結果によると、位置によって異なるが、地表面から50～100cm程度の深さにS波速度の異なる層境界が存在すると考えられる。表層のS波速度は50～100m/s、以深の層では175～200m/sと推定され、表層部が相対的に低速度であり、密度や強度が低いことがわかった。一方、ポータブルコーン貫入試験については、いずれの測定点でも、局所的に貫入抵抗が大きい箇所が見られるものの、深度の増加に伴って、貫入抵抗の増加率が大きくなる傾向にある。また、弾性波探査から得た層境界位置が70cm付近にある斜面中腹に位置するB～Dの3点の結

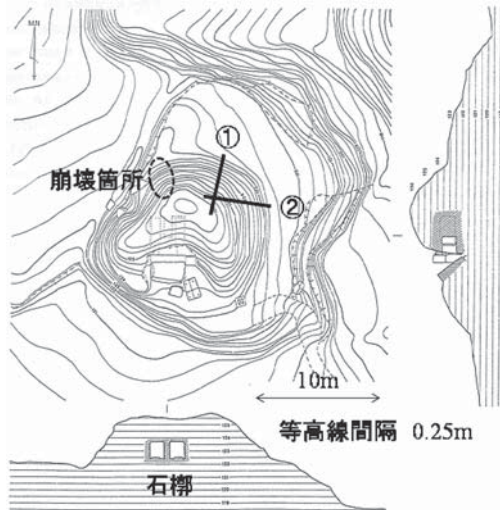


図3 牽牛子塚古墳の平面図と断面図<sup>5)</sup>

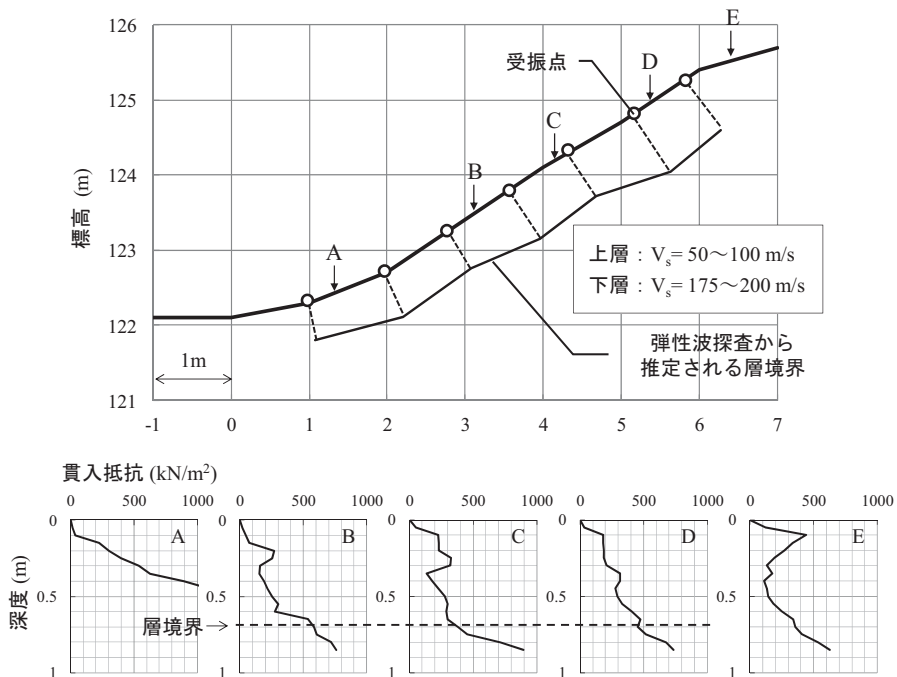


図4 弾性波探査とポータブルコーン貫入試験の結果(測線①)

果に着目すると、層境界位置での貫入抵抗は 500kN/m<sup>2</sup> 前後を示している。なお、測線②上でも両試験の結果は、測線①と同様の傾向を示した。

2.2. 針貫入試験による墳丘断面の強度評価

史跡である古墳は、基本的に破壊や改変が厳しく規制されている。そのため、地盤調査の実施は制限を受けるが、牽牛子塚古墳では、考古学的な調査のために掘削された墳丘の一部で、実質的な非破壊試験である針貫入試験<sup>8)</sup>による強度評価を実施する機会を得た。針貫入試験では、図5に示す試験機先端の突出長 10mm、根元太さ 0.87mm の針を地盤表面に貫入したときの貫入量と貫入力とを測定する。そして、貫入力と貫入量の比で定義される貫入勾配との較正関係を用いて、地盤表面の強度を一軸圧縮強度に換算して評価することができる。ほぼ非破壊である利点を生かして、これまで複数の墳丘の強度評価に利用されている<sup>2), 3), 9), 10)</sup>。

崩壊箇所付近の掘削面で、二つの試験面を設け、試験を実施した。表層に近い試験面 a には、亀裂や伐採された樹木の根系、また根系が枯死した後に残された直径数センチの空洞が多く含まれており、版築の締固めの模様は見られなかった。一方、試験面 b には根系や空洞、亀裂は少なく、なめらかで、目視で明確な版築模様が確認できた。

貫入量は、試験面の含水状態の影響を受けるため、必要に応じて試験面を整える必要がある。試験面が、掘削以降、日射に曝されて乾燥している場合は、試験結果は過大評価となる<sup>10)</sup>。また、掘

削面が雨水に曝されたり、内部から水分が浸みだしたりしている場合は過小評価となる。そのため、試験面に過度な乾燥・湿潤が見られる場合は、試験前に表面を削り取り、これを試験面とするのがよい。牽牛子塚古墳の場合は、墳丘の掘削直後に試験を実施できたため、試験面を整える必要はなかった。測定点は、各試験面に 5cm 間隔で設けた。一軸圧縮強度に換算する際は、式 (1) で表される一軸圧縮強度  $q_u$  (kN/m<sup>2</sup>) と貫入勾配  $\Delta$  (N/mm) の較正関係を用いた。針貫入試験は、本来は軟岩等を対象に開発された試験方法であるため、軟岩よりも低強度の土材料に適用するためには、較正関係の見直しが必要である。式 (1) は、墳丘に適用することを目的に、墳丘土やその他の土材料を用いた試験結果に基づいて導かれた較正関係である<sup>10)</sup>。

図6に得られた換算一軸圧縮強度  $q_u$  の分布を示す。試験面 a では 15 ~ 30kN/m<sup>2</sup> を示す領域が中心であるのに対し、試験面 b では 100 ~ 150kN/m<sup>2</sup> が中心になっており、両試験面には明確な差があることがわかる。針貫入試験からは、層境界の位置は推定できないが、前述の二種類の原位置試験から推定したとおり、墳丘は表層部の密度と強度が相対的に低い二層構造であることを示唆している。一連の原位置試験から得た知見をもとに、以降は、低密度、低強度で、版築構造が失われ、根系、空洞、亀裂が見られる表層部の土層を表土層とよび、以深の高密度、高強度で、版築模様が見られる土層を版築層とよぶことにする。

$$\log_{10} q_u = 1.262 \times \log_{10} \Delta + 2.301 \quad (1)$$

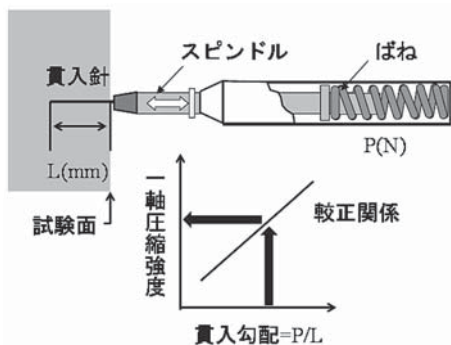


図5 針貫入試験の測定原理

3. 墳丘のモデル化

3.1. 墳丘の層構造の形成過程と物理的性質の変化

表土層と版築層からなる墳丘の層構造や物理的性質は、雨水の浸透や力学的安定性に大きく寄与していると考えられるため、墳丘をモデル化する上で考慮すべき重要な事項である。

牽牛子塚古墳の場合、脆弱な表層部が形成された主な要因は、墳丘表面に繁茂した草や樹木であ

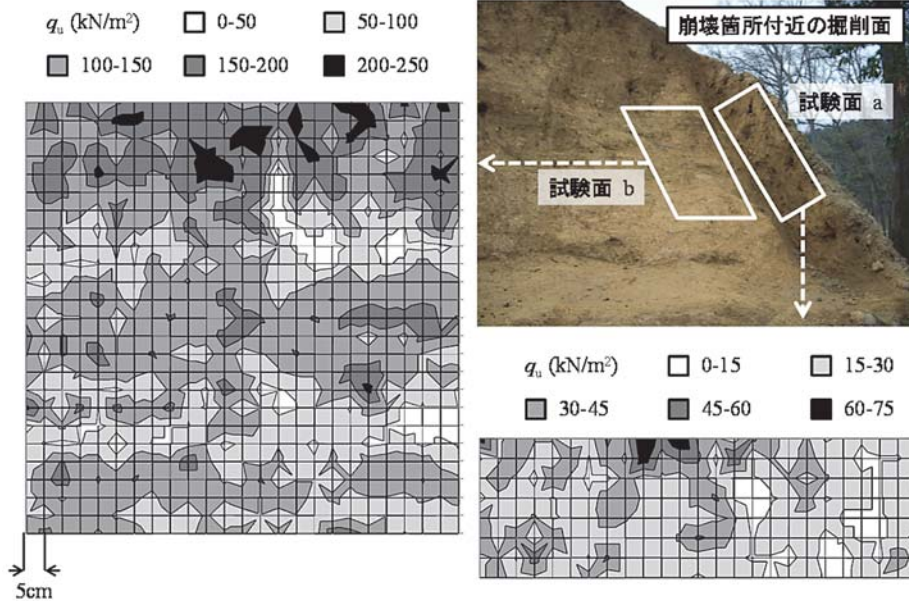


図6 針貫入試験により評価した墳丘掘削面の換算一軸圧縮強度の分布

る可能性が高い。植物の根系は表層部の版築構造を破壊し、枯死の繰返しによって表層部を粗な状態に変化させる。そのため、表層部では雨水の侵入が容易になり、土中の細粒分が失われる。これらの複合的な作用によって、密度は経年的に低下したものと考えられる。また、表層部では密度低下に伴い、浸透特性にも変化が生じていると予想される。

弾性波探査とポータブルコーン貫入試験を実施した測線①の断面を検討断面とし、これらの試験結果をもとに表土層と版築層の層境界の位置を設定した(図7)。つぎに、原位置試験の結果と墳丘表層部における根系、降雨の作用の影響を考慮して、墳丘の密度と浸透特性を設定する。

### 3.2. 墳丘の密度

土の密度は、強度や浸透特性と密接な関係にあることから、種々の問題を検討する上で不可欠なパラメータである。一般に、不攪乱試料を用いて求めることが多いが、史跡である墳丘の場合、不攪乱試料の採取が許されないことが多い。ほぼ非破壊の表面透過型 RI 密度水分計を用いて、原位置で測定する場合もあるが、植生や局所的に含まれる粗礫の影響を受けるため、安定した測定結果を

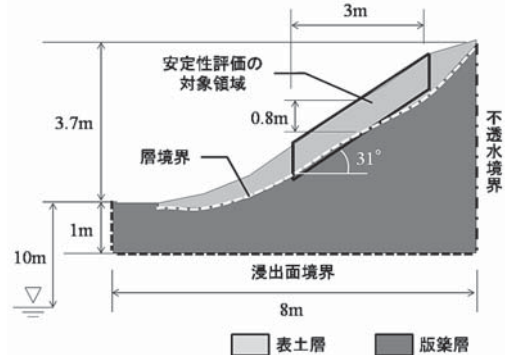


図7 墳丘断面のモデル

得ることが難しい。このような事情から、本検討では墳丘の密度を締め固めエネルギーとの関係に基づいて、仮定することにした。墳丘の密度を仮定する際、墳丘は人力で締め固められていることに配慮しなくてはならない。つまり、仮定値は、人力のエネルギーレベルで締め固められる範囲内で設定すべきである。人力のエネルギーレベルは、他の古墳を対象とした既往の研究<sup>9), 10)</sup>より、Proctorによって定義された締め固め仕事量  $E_c$  ( $=550\text{kJ/m}^3$ ) の10~20%程度であることがわかっている。したがって、対象とする墳丘土に対して、

締固めエネルギーと密度の関係が得られれば、エネルギーを指標に、適切に密度を仮定することができる。

発掘残土を用いて締固め試験を行い、締固めエネルギーと密度の関係を調べた(図8)。締固めエネルギーは、ランマーの落下回数を制御することで、 $0.2 \sim 1.0 \times Ec$ の範囲で調整したが、 $0.2 \times Ec$ 以下の領域については、試料を均一に締め固めることが難しいため、外挿した。この関係図から、 $0.1 \sim 0.2 \times Ec$ に相当する墳丘の乾燥密度 $\rho_d$ は、 $1.23 \sim 1.29 \text{g/cm}^3$ と推定される。根系や降雨の作用による密度低下を考慮して、表土層は下限値の $1.23 \text{g/cm}^3$ 、版築層は上限値の $1.29 \text{g/cm}^3$ と仮定する。なお、試験に用いた試料の含水比は26%であり、採取時に測定した自然含水比 $w_n$ (=29%)よりもやや乾燥していた。締固めエネルギーを $0.2 \times Ec$ に保ち、含水比を変化させた締固め試験を実施したところ、 $w_n$ では $\rho_d=1.33 \text{g/cm}^3$ (最適含水比 $w_{opt}=31\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.34 \text{g/cm}^3$ )であった。したがって、含水比を $w_n$ に調整した試料を用いて試験を実施した場合は、 $w_{opt}$ が $w_n$ よりも高くなる低締固めエネルギー領域では、図8に示す関係図は若干、高密度側(上側)に移動すると考えられる。

### 3.3. 墳丘の浸透特性

墳丘の透水性は、表土層に空洞や亀裂が多く含まれることを加味して、表土層と版築層の飽和透水係数に10倍の差があるものとした(表1)。不飽和透水係数は、van Genuchtenモデル<sup>11)</sup>を用いて、水分特性曲線から推定することにした(図9(a))。

水分特性曲線は、まさ土を含む多様な土の不飽和浸透特性について調べた既往の研究<sup>12)</sup>で取り上げられている四種類の異なるまさ土のうちの一つ( $\rho_d=1.75 \text{g/cm}^3$ )<sup>13)</sup>を参考にする。図9(b)は、この四種類のまさ土A~Dの水分特性曲線を、縦軸を有効飽和度 $S_e$ (= $(\theta - \theta_s) / (\theta_s - \theta_r)$ 、 $\theta$ :体積含水率、 $\theta_s$ :飽和状態 $\theta$ 、 $\theta_r$ :残留状態 $\theta$ )で表したものである。土の保水性は、粒度分布や密度等に依存するため、まさ土に分類される土の間でもサクションに対する $S_e$ には幅が見られる。今回

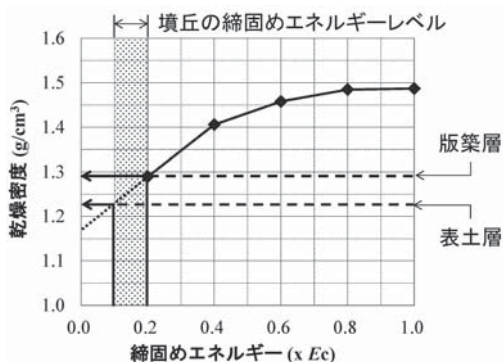


図8 墳丘土の締固めエネルギーと乾燥密度の関係

表1 墳丘の主な物性

	表土層	版築層
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.23	1.29
自然含水比 (%)	29	
飽和度 (%)	65	71
間隙率	0.55	0.53
飽和透水係数 (cm/s)	$3.3 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-4}$

は、四つの曲線の中から中間的なまさ土Dを両層の水分特性曲線とした。縦軸を $\theta$ として描いた両層の水分特性曲線を図9(c)に示す。両層の $\theta_s$ は間隙率と一致するとし、前節で設定した密度を用いて算定した。実際には、表土層の保水性は版築層よりも劣ることが予想されるが、この場合、降雨時の表土層の飽和度は上昇しにくくなるため、斜面の安全率は、本検討の方が安全側の評価になると考えられる。

なお、浸透に関する境界条件は、図7中に示すように設定した。墳丘の裾野側と底面については、解析結果が解析領域の影響を受けないよう、適切な境界条件を設定する必要がある。そこで、モデルの裾野側と底面の解析領域を広げた場合と比較し、同等の解析結果が得られることを確認した上で、裾野側と底面には浸出面境界を適用することにした。浸出面境界は、飽和時は固定水頭境界として機能し、水の流入出が可能で、不飽和時は不透水条件となる境界である。本検討では、墳丘断面を左右対称とした場合の左半分をモデル化しているため、墳丘頂上側の境界における流入出はな

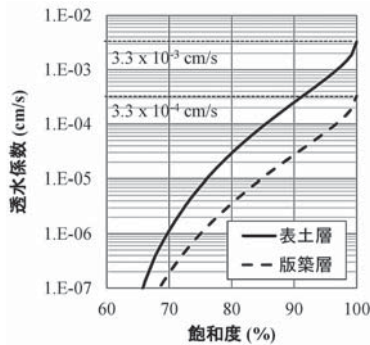


図9 (a) 墳丘の不飽和透水係数

	VGモデルパラメータ			
	$\theta_s$	$\theta_r$	n	$\alpha(\text{cm}^{-1})$
まさ土A	0.348	0.075	2.08	0.111
まさ土B	0.517	0.199	2.13	0.102
まさ土C	0.554	0.270	2.06	0.0349
まさ土D	0.338	0.110	1.82	0.070

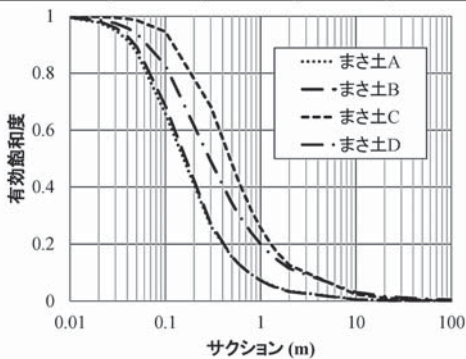


図9 (b) まさ土の水分特性曲線<sup>12)</sup>

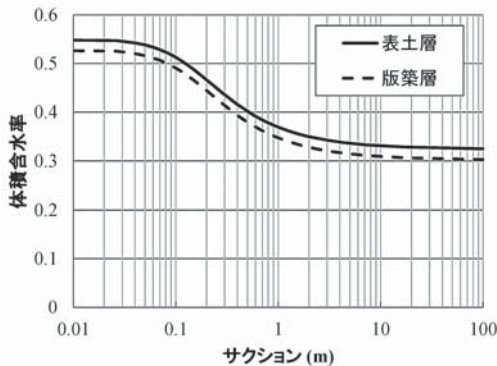


図9 (c) 墳丘の水分特性曲線

した。ただし、墳丘表層の浸透能力（飽和透水係数）を超える降雨は流入しないように設定した。

#### 4. 墳丘の雨水の浸透挙動の解析的評価

##### 4.1. 先行降雨を用いた初期条件の設定

墳丘内の雨水の浸透挙動を、有限要素法を用いた飽和・不飽和浸透流解析<sup>14)</sup>により評価する。解析は、初期条件を設定するための事前解析と、雨水の浸透挙動を再現する本解析からなる。ここで、初期条件は降雨前の自然含水状態の墳丘を指し、本検討では、表土層と版築層の飽和度がそれぞれ65%、71%の状態に相当する。事前解析では、この状態を再現することが目標となるが、初期条件は、本解析の結果に大きく影響するため、これを正確に設定することが重要である。

本検討では、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を事前解析とした。解析における定常状態は、墳丘内の水分と地下水の間の移動が平衡に達した状態に相当する。定常状態が自然含水状態に一致していれば、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、自然環境下にある実際の墳丘は、雨水の浸透や蒸発などの水分移動が活発に生じている非定常な状態であり、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、初期条件を再現するのに有効な方法と考えられる。

初期条件の具体的な設定方法は、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、降雨以降の墳丘内での浸透の様子を観察しながら、目標の飽和度分布に近づく時間断面を見つけ、これを初期条件とする。先行降雨の条件となる総降雨量、降雨日数、降雨強度は、いくつかの条件で試した結果、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/hrとした場合の墳丘内の飽和度の分布を図10に示す。定常状態では、表土層、版築層ともに目標の自然含水状態の飽和度よりも低く、先行降雨が必要なケースであることがわかる。30日間の先行降雨の直後は、墳丘の大部分がほぼ飽和している。以降は、墳丘内の水分が浸出面境界から流出しながら、

いものとした。また、墳丘表面は、降雨の浸透を表現するため、降雨量を流入量とする流量境界と



時間の経過とともに飽和度が低下していく。先行降雨終了時から 200 日目に、表土層、版築層ともにほぼ目標の飽和度に達したと判断できるため、これを初期条件として、つぎに示す本解析を実施した。

4.2. 降雨時の墳丘内の飽和度分布と雨水の流れ

墳丘斜面の崩壊が生じた 2012 年 6 月のうち、まとまった降雨が見られる 16 日から 22 日の 7 日間（日降水量は図 13 (c) 参照）を対象に、本解析を実施した。ここで、16 日以前は、自然含水状態を維持しているものと仮定する。

本解析で得られた 7 日間の墳丘内の飽和度分布を図 11 に示す。表土層は日降水量に敏感に反応して増減を繰り返しているが、版築層との層境界では、徐々に飽和度が上昇していく様子が見られる。これは、二層の透水性の差に起因する現象である。表土層を浸透した雨水は、相対的に透水性の低い版築層との境界で滞留し、境界面に沿って流下する。表土層と版築層は、互いに密度と強度が異なる上、解析から推測される降雨時の層境界における高い飽和度や水分移動を鑑みると、層境界は潜在的に他の部分に比べてすべりが生じやすい箇所と考えられる。この結果を踏まえて、墳丘斜面のすべりは、層境界で生じると仮定して、以降の検討を進める。

5. 雨水浸透時のすべり面の強度低下の把握

5.1. 試験方法

墳丘の各層の強度は、二章で述べた針貫入試験で評価したが、降雨時の墳丘斜面の安定性を評価するため、雨水が浸透した際の強度についても調べる必要がある。雨水が浸透した墳丘のすべり面では、サクシヨンの低下に伴い、自然含水状態のときよりも強度が低下していると予想される。この強度低下の程度を室内試験で評価する。せん断試験の方法には、いくつかの選択肢があるが、ここでは、墳丘の層境界でのすべりを模擬するため、予めせん断面が決定される一面せん断試験を適用する。また、一面せん断試験は、他のせん断試験と比較して、供試体寸法が小さいため、十分な分量の試料を採取できない場合が多い墳丘土に適用

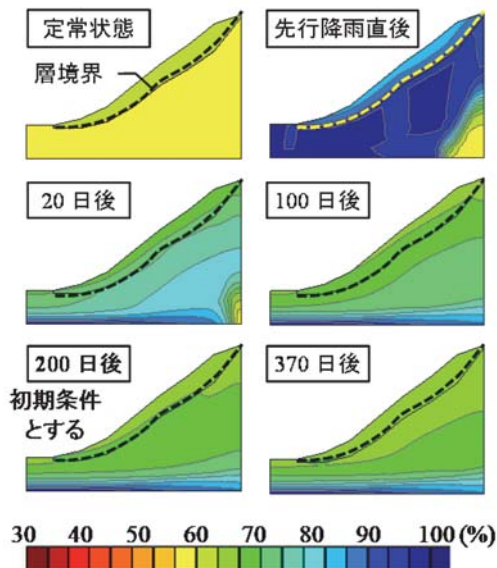


図 10 定常状態と先行降雨後の墳丘の飽和度分布

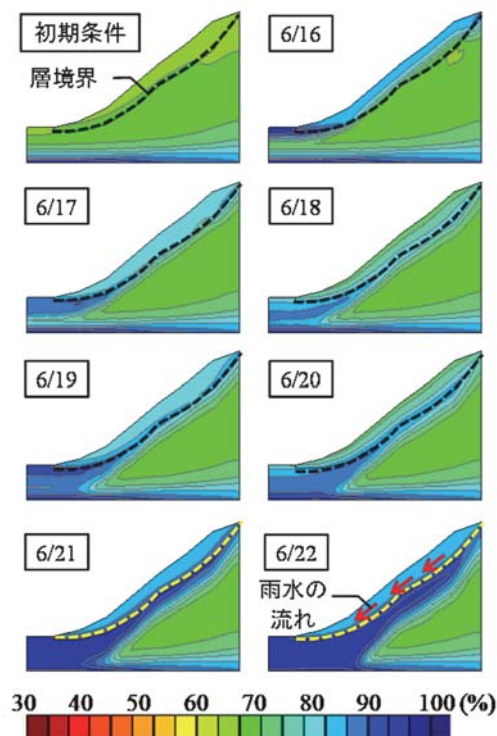


図 11 降雨時の墳丘の飽和度分布

しやすい方法である。

層境界でのすべりを模擬するため、供試体（直径60mm, 厚さ20mm）は密度の異なる二層構造<sup>15)</sup>とした。採取した墳丘土を自然含水比になるよう含水比調整したものを締め固めて作製した厚さ10mmの下層の上に、厚さ10mmの上層を下層と同様に作製した。上下層の密度は、それぞれ三章で仮定した表土層と版築層の密度とした。本試験では、1供試体につき3回のせん断試験を行った。まず、15, 30, 60, 90, 120kPaで圧密した後、0.2mm/minで定圧せん断し、せん断変位が7mmに達するまでせん断した。次に、変位を元に戻して、再び同条件で圧密・せん断を行った。これは、潜在的にすべりが生じやすいと予想される墳丘層境界を、予めせん断面が形成されている供試体で模擬するためである。2回目のせん断変位が7mmに達した後、変位を元に戻して、供試体上面から10ccの水を加えた。そして、前の2回と同条件で3回目の圧密・せん断を行った。加水量は、供試体の飽和度を100%にするのに必要な分量を計算して決定した。ただし、供試体の間隙空気を完全に取り除くことはできないため、加水量の一部は、供試体に吸収されずにせん断箱の隙間から排出され、加水後の飽和度は100%を下回る。3回目のせん断変位が7mmに達した後、試験を終了し、取り出した供試体の含水比を測定した。

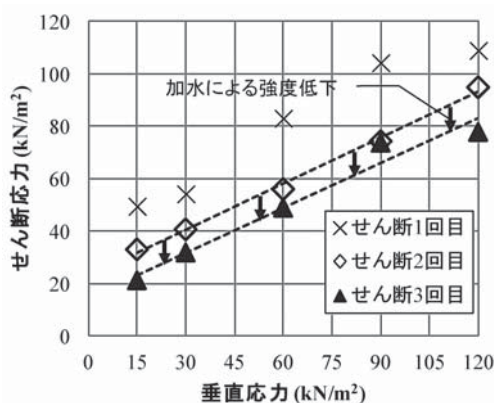


図 12 (a) 3回の一面せん断試験の結果

## 5.2. 試験結果

図 12 (a) に試験結果を示す。1回目のせん断によって、2回目のせん断強度は大幅に低下している。3回目のせん断では、加水によって2回目よりもさらにせん断強度が低下している。2回目と3回目のせん断の同垂直応力条件でのせん断強度を比較すると、平均で9.07kN/m<sup>2</sup>の差がある。これを加水による強度低下分とみなす。せん断時の供試体の飽和度は、含水比とせん断時の垂直変位を用いて算定できる。2回目と3回目のせん断時の供試体の飽和度は、試験に用いた5供試体の平均をとると、それぞれ74.5%, 95.4%であった。

針貫入試験から得た表土層の試験面 a の換算一軸圧縮強度  $q_u$  の分布は、15 ~ 30kN/m<sup>2</sup> に属する面積が最も大きい。そこで、表土層を代表する  $q_u$  をコンターの上下限値の平均値である 22.5kN/m<sup>2</sup> と設定した。したがって、粘着力  $c$  は  $q_u/2=11.25$ kN/m<sup>2</sup> 程度となる。一面せん断試験から得た加水による強度低下の結果を援用することにより図 12 (b) に示すように、飽和度 95.4% では  $11.25-9.07=2.18$  kN/m<sup>2</sup> に低下すると仮定する。粘着力と飽和度の関係を図 12 (b) のように仮定して、次章で降雨時の墳丘斜面の安全率を算定する。

## 6. 降雨時の墳丘斜面の安全率の算定

四章で検討対象とした7日間について、墳丘斜面の安全率を算定する。ここでは、図 7 中に示す

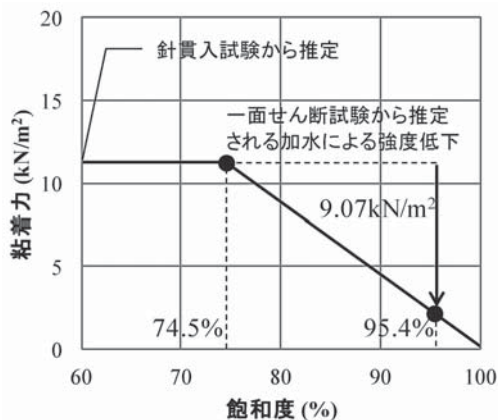


図 12 (b) すべり面の粘着力と飽和度の関係

水平距離が3mの領域を対象とする。この領域では斜面の勾配と層厚が大きく、すべり面は斜面とほぼ平行で、層厚が概ね均一とみなせる。安全率  $F_s$  は、式 (2) に示すすべり面のせん断強度と土塊にはたらくせん断力の比として算定する。ここで、 $c$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$ 、 $H$ 、 $i$  はそれぞれ粘着力、内部摩擦角、土塊の単位体積重量、すべり面の傾斜角である。ただし、本検討では、土塊層厚が薄く、土塊底面にはたらく垂直応力 ( $\gamma H \cos^2 i$ ) は土塊の飽和度が100%に達した場合でもせいぜい  $10 \text{ kN/m}^2$  程度である。すなわち、すべり面のせん断強度は  $c$  が支配的な低拘束圧下を対象とするため、解析にあたっては  $\phi$  の安定性への寄与は期待せず、式 (2) の第二項はゼロとする。降雨に伴う飽和度の変化に起因する  $c$  の変化は図 12 (b) の関係を用いて評価する。なお、解析で評価した層境界と土塊の飽和度は、安定性評価の対象領域内では比較的均一であるため、領域内での平均値とした。

$$F_s = \frac{c}{\gamma H \sin i \cos i} + \frac{\tan \phi}{\tan i} \quad (2)$$

7日間の土塊の飽和度と  $\gamma$ 、すべり面の飽和度と  $c$ 、日降水量と  $F_s$  の推移を図 13 (a), (b), (c) に示す。 $F_s$  に寄与するパラメータのうち、 $\gamma$  は日降水量に敏感に反応して増減を繰り返しているが、 $c$  はすべり面の飽和度の単調な増加のため低下し続けている。 $\gamma$  に比べて  $c$  の  $F_s$  に対する影響は強く、 $F_s$  は低下し続け、6月21日に1を下回り、最小値0.60を示している。これは、降雨により墳丘斜面が崩壊した事実と整合する結果である。

牽牛子塚古墳のように、墳丘表層部に崩壊が生じた場合、本稿で示した降雨時の墳丘斜面の安定性評価は、例えば古墳の修復・保存の方針を決定するための判断材料のひとつになると考えられる。修復方法の一案として、真正性を重視して、崩壊箇所のみを修復し、現墳丘には手を加えない方法が考えられる。しかし、脆弱な表土層を放置した場合に、降雨時に安全率が1を下回る不安定な状態を予想できれば、表土層を取り除いて新たに復元盛土を築く方法も選択肢として挙げられ

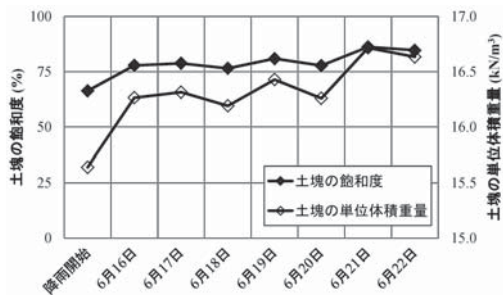


図 13 (a) 降雨時の土塊の飽和度と単位体積重量

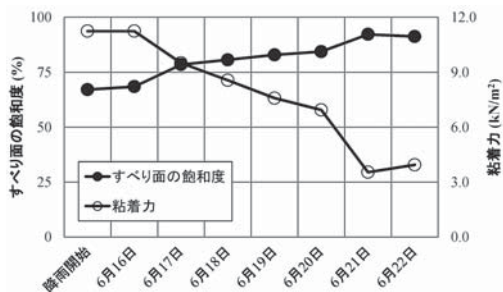


図 13 (b) 降雨時のすべり面の飽和度と粘着力

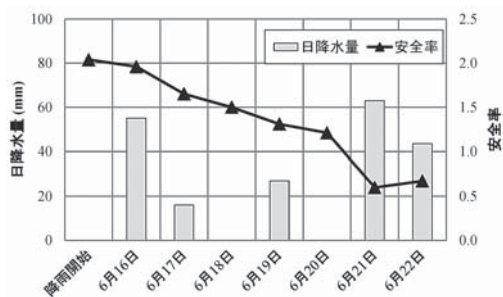


図 13 (c) 日降水量と安全率

る。すなわち、安定性評価によって、真正性と工学の両視点のバランスがとれた最適な方法を選択することが可能になると考えられる。このような貢献ができるよう、安定性評価の定量的な信頼性の向上に努めなくてはならない。具体的には、低拘束圧下のすべり面に雨水が浸透する際の強度定数の評価が重要な課題と考える。本検討で用いたような一般の一面せん断試験機では、 $10 \text{ kPa}$  を下回る垂直応力を精度よく制御することは難しい。しかし、墳丘斜面の表層崩壊の問題では、試験が困難な低拘束圧下の強度定数が必要となる。低拘

束圧下で供試体を浸潤，せん断できる試験方法を検討し，雨水浸透時のせん断強度の低下量のより正確な把握が求められる。

## 7. おわりに

本研究では，歴史的な地盤構造物である古墳を保存する上で，重要な問題のひとつである降雨時の墳丘斜面の安定性について，地盤工学に基づいて検討した。牽牛子塚古墳を対象とした一連の検討では，内部の版築層と根系や降雨により版築構造が失われた表土層からなる墳丘の層構造と物性の違いに着目した。以下に主な結論を示す。

- (1) 数種類の原位置試験を実施した結果，いずれの試験からも墳丘の表層部が内部に比べて密度や強度が低い二層構造を有していることがわかった。表層の表土層と内部の版築層を密度と透水性で区別してモデル化した。
- (2) 透水性に差がある表土層と版築層の層境界では，降雨時に高い飽和度が持続し，境界面に沿って雨水が流れる様子を解析で確認した。この解析結果と二層の密度と強度に差異があることを鑑みると，層境界は潜在的にすべりが生じやすい箇所と考えられる。
- (3) 雨水浸透時のすべり面のせん断強度の低下量を一面せん断試験から推定した。自然含水状態で作製した供試体に加水した場合，平均で  $9.07\text{kN/m}^2$  のせん断強度の低下が見られた。
- (4) (2) および (3) の結果を用いて，降雨時の墳丘斜面の安全率を算定し，雨水の浸透に伴って斜面が不安定化する様子を定量的に評価した。降雨により墳丘斜面が崩壊した事実と整合する評価結果が得られた。

## 謝辞

原位置試験および試料採取に際して，牽牛子塚古墳の発掘調査を担当された明日香村教育委員会・西光慎治氏に現場での便宜をいただきました。また，弾性波探査およびポータブルコーン貫入試験については，(財)地域地盤環境研究所・岩崎好規氏にデータを提供いただくとともに，貴重な助言を賜りました。ここに記して，感謝の

意を表します。本研究は JSPS 科研費 26・2562 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 文化庁，古墳壁画の保存活用に関する検討会装飾古墳ワーキンググループ第一回参考資料，2012([http://www.bunka.go.jp/takamatsu\\_kitora/kentokaito/kofun\\_wg/01/index.html](http://www.bunka.go.jp/takamatsu_kitora/kentokaito/kofun_wg/01/index.html))，2014年6月18日閲覧。
- 2) 三村衛・吉村貢：高松塚古墳壁画の被災要因の調査と石室解体に向けた工学的貢献，自然災害科学，Vol.27，No.3，pp.307-317，2008。
- 3) 三村衛・吉村貢・金田遙：高松塚古墳墳丘の構造と原位置試験および室内試験による地盤特性評価に関する研究，土木学会論文集 C，Vol.65，No.1，pp.241-253，2009。
- 4) 釜井俊孝・寒川旭・守隨治雄：1596年慶長伏見地震による古墳の地すべり，応用地質，Vol.48，No.6，pp.285-298，2008。
- 5) 明日香村教育委員会：牽牛子塚古墳発掘調査報告書，2013。
- 6) 西光慎治：牽牛子塚古墳・越塚御門古墳の調査成果—律令国家形成期の大王墓の実像—，日本考古学，Vol.32，pp.165-179，2011。
- 7) 物理探査学会編：物理探査ハンドブック，pp.131-145，1999。
- 8) 土木学会：軟岩の調査・試験の指針（案）—1991年版—，pp.56-60，1992。
- 9) 三村衛・吉村貢・寺尾庸孝・豊田富士人・中井正幸：史跡 昼飯大塚古墳墳丘の復元と整備に関する地盤工学的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.2，pp.141-155，2011。
- 10) Sawada.M, Mimura.M, Yoshimura.M : Characterization of Geotechnical Properties for Reconstruction of Archaeological Excavations – Case study of Higashinomiya Tumulus –, Workshop ATC19, 18<sup>th</sup> ICSMGE, 2013.
- 11) van Genuchten, M.T: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J, Vol.44, pp.892-898., 1980.
- 12) 竹下祐二，河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について，地盤と建設，Vol.11，No.1，1993。
- 13) 河野伊一郎・西垣誠・竹下祐二・堀謙一郎・清水孝昭：pF 試験における間隙水圧挙動に関する考察，第 26 回土質工学研究発表会，pp.1683-1684，

1991.

- 14) 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，Vol.264，No.8，pp.87-98，1977.
- 15) 山本哲郎・鈴木素之・寺山崇・原田博：斜面崩壊の素因となる不連続面のせん断強度の評価方法，土と基礎，Vol.49，No.7，pp.7-9，2001.

(投稿受理：平成 26 年 4 月 18 日)

