

# 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

三村 衛\*・吉村 貢\*\*

## Investigation of Damage to Mural Paintings of Takamatsuzuka Tumulus and Geotechnical Contribution to Dismantling the Stone Chamber

Mamoru MIMURA \* and Mitsugu YOSHIMURA \*\*

### Abstract

The mural paintings of Takamatsuzuka Tumulus have seriously been damaged by various fungi appearing on the lime plaster wall of the chamber stones. It is very urgent to find the relevant measures to restore and conserve them. Based on the discussion among the specialists from various majors, the Takamatsuzuka Tumulus has been determined to be dismantled and the mural paintings are repaired in the conservation room under the control of temperature and humidity. Geotechnical investigation was carried out to evaluate the reasons of this damage. A series of laboratory tests was conducted on undisturbed samples obtained from the Tumulus mound. In-situ tests were also carried out to know the physical and mechanical properties of the Tumulus mound for stability analysis during excavation of the mound and dismantling of the chamber stones. In the present paper, reasons and countermeasures for conservation of the mural paintings of Takamatsuzuka Tumulus are reported. How the procedures from engineering can contribute this national project is also discussed from the viewpoint of countermeasure for geotechnical disasters.

キーワード：高松塚古墳，被災要因，地盤調査，土質試験，石室解体

Key words : Takamatsuzuka Tumulus, Factors of Damage, Geotechnical Investigation, Laboratory Test, Dismantling

\* 京都大学防災研究所  
Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University

\*\* ソイルアンドロックエンジニアリング (株)  
Soil and Rock Engineering Co.

本報告に対する討論は平成21年5月末日まで受け付ける。

## 1. はじめに

高松塚古墳は1972年3月21日に奈良県高市郡明日香村で発見された。墳丘内にある石室内面に塗られた漆喰に男女子群像や星宿図など極彩色の壁画が描かれていたことで一躍有名となった。その後、1972年6月に史跡指定され、1973年4月には特別史跡に昇格し、1974年4月には壁画と出土遺物がそれぞれ国宝と重要文化財に指定され、現地保存されてきた。高松塚古墳は緩い南向きの斜面上に築造された直径23mの円墳であり、壁画が描かれている石室は二上山起源の凝灰角礫岩を組み合わせたもので、東西各3枚の側石、4枚の床石、4枚の天井石、北側奥と南側前面の各1枚の合計16枚から成っている<sup>1)</sup>。石室の概略寸法は、内のりで奥行き2.66m、幅1.03m、高さ1.13mである。石室内部表面には厚さ2~7mmの漆喰が塗られ、東壁、西壁、北壁および天井部分に極彩色の壁画が描かれている。また墳丘東側には排水用の周溝跡が見つかっているが、崩土によって一部閉塞して平坦化し、本来の機能を果たし得ない状態であった。

石室内部は外気に対して約3ヶ月のタイムラグをもって15~20℃の温度年変動を示し<sup>2)</sup>、相対湿度はほぼ100%近い値を保持するという環境にある<sup>3)</sup>。これはカビにとっては非常に良好な生育環境であり、栄養分と酸素が供給されればたちどころに大繁殖につながる危険性を有している。2001年には骨材の防黴処理を行わずに南側取合部天井の崩落止め工事を行い、取合部にカビの大発生を見た<sup>4)</sup>。このため、壁画面へのカビの発生の有無の確認とカビの除去のために、担当者が石室内に立ち入る回数が必然的に増加し、結果的に石室内部の温度上昇を招く一方、外部の有機物が石室内部に混入する危険性が増大した。その後も壁画面でのカビの発生は収まらず、逆に細菌やバクテリアといった微生物の繁殖、それを捕食する虫類の侵入といった生物被害が増大し、虫類の死骸にカビが繁殖するという食物連鎖構造ができあがってしまった。また、平成16年の発掘調査によって、古墳墳丘内に過去の大地震によると思われる多数の亀裂と地割れが発見され<sup>1,5)</sup>、墳丘そのものも

必ずしも安定した構造を保持しているとはいえないこと、また石室内部の三次元レーザー測量により石室自体も地山の斜面方向に少し傾いている<sup>1)</sup>ことが明らかとなり、来るべき東南海・南海地震のような巨大地震に遭遇して古墳そのものが崩壊してしまう可能性があることが指摘された。また石室内部の漆喰層の劣化も著しく、剥落や粉状化の進行など、石材そのものの風化による劣化とあわせて、壁画の保全はまさに時間との戦いであることが明らかとなってきた。こうした調査、研究成果を受けて、文化庁の国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会、および同作業部会において、多様な分野の専門家が繰り返し議論した結果、湿潤状態の地盤内に石室が設置された現地の条件下では、こうした生物被害を抑え込むことが不可能であると判断し、石室を解体し、温湿度環境を適正に管理することができる保存施設に壁画が描かれた石材を格納して修復作業を行うという結論に至った。

本稿では、高松塚古墳墳丘と国宝壁画を被災した地盤構造物という観点から直視し、貴重な国民共有の国宝壁画をその真正性を冒すことなく保全するために、地盤工学がどのような手法で恒久保存対策検討に関わってきたのかを紹介するとともに、地盤遺跡の保全に対する工学の貢献のあり方について論じるものである。

## 2. 国宝壁画の現地保存か、石室解体・保存施設で修復か

国宝高松塚古墳壁画がカビによる汚染と退色によって損傷を受けているという事実を受けて、2004年に国宝高松塚古墳壁画恒久保存検討会が設置され、壁画の現状把握と将来的にどのようにして保全していくのかについて議論されるようになった。メンバーの考え方は、①「墳墓である以上壁画もその一部であり、すべてを現状のまま現地保存すべきである」という立場と、②「生物被害と風化に起因する物理的な劣化は時間とともに進行する現象であるので、早急に壁画を取り出して温湿度を管理した環境下で修復・保全すべきである」という立場に分かれた。従来の文化財行政

の基本は①であり、考古学関係者の立場もこちらである。これに対して、保存科学、生物学、地盤工学、建築学などのメンバーは、自然地山中に置いて温度と湿度をコントロールし、岩石や漆喰の風化や劣化を防止するのは不可能であること、カビや細菌の発生とそれを捕食する虫類の侵入、その死骸を栄養分としてカビと細菌が繁殖するという連鎖構造ができあがっている環境下で、カビや細菌を完全に抑え込むことは不可能であるという理由から、壁画を保持するのであれば、石室を解体し、温湿度を管理できる環境下で修復、保存を行うべきであると強く主張した。

地盤工学的見地から高松塚古墳石室をみれば、自然地山に風化花崗岩起源のマサ土で締め固めて構築した盛土墳丘内に石組みの石室があり、その内部の環境をどう制御できるかという問題に帰着する。以下に、問題となった現地保存が可能であるかどうかについて、カビの生育に必要な諸条件についてそれぞれ簡単に検討してみよう。

**湿度管理**：既に述べたように、石室内部の相対湿度は100%に近く、温度差が生じれば結露する可能性が高い。結露が起こればカビの発生には好条件となり、栄養さえあれば直ちにカビが繁殖する。三村・石崎<sup>5)</sup>によれば、周囲の墳丘地盤の含水比は15%前後ではほぼ変動していない。この状態は不飽和であり、決して土粒子間の空隙が水で満たされている状態ではない。しかしながら、この条件で石室の内部の相対湿度を下げることはほぼ不可能である。なぜなら水分を取り去る（実際にはどのようにして水分を除去するのかは問題であるが）と、周囲の地盤から平衡状態を維持するように湿度が供給され、石室内部の相対湿度は容易に低下しないからである。一方、たとえ除湿が可能であるとしても、石室内部空気の乾燥は漆喰層の乾燥につながり、漆喰層の乾燥は漆喰の剥落を誘発することになる。すなわち、壁画が漆喰とともに剥落してしまうという危険に直結するという意味で、壁画を現地の状態のまま維持するために石室内部を乾燥させるのは逆効果となる。このように、現地において石室内部の湿度を低下させることは難しく、強制的に強力な空調施設によって

低下させると、壁画が描かれている漆喰層が乾燥して剥落してしまい、本来の目的である壁画の保全ができないということになる。つまり、石室内の湿度という観点からみれば、カビの生育防止と壁画の原位置保全はトレードオフの関係にあることがわかる。

**温度管理**：温度を低下させるという方法について考えてみよう。実際、緊急保存対策として現地ではこの方法が導入されている<sup>6)</sup>。カビは低温では生育速度が落ち、5℃以下になると低温の効果は大きくなる。しかしながら、低温化はカビの生育を遅らせることはあっても停止させることはできない。また、低温に適応するカビが存在することから、石室の低温化は恒久保存対策としては全く不十分であることが指摘されている。結局、この方法は石室解体までの間、少しでもカビの発生活動を低下させるために導入されるにとどまった。

**酸素濃度管理**：次に脱酸素状態を達成できないかという視点で、窒素封入工法が考えられた。酸素濃度0.1%以下でなければ、嫌気性のカビをはじめ、細菌や一部のバクテリアは生育することができるため、石室に求められる性能は酸素濃度を0.1%以下に保つという大変厳しいものとなる。この方法の適用性を検証するため、一定の圧力で一定流量の空気を石室に供給することによって、石室に存在する空隙の等価断面積（無数の空隙を1つの空隙に換算する）を算定するための調査が現地で実施された。石室への空気流入量～流入圧力関係の実測結果にベルヌイの定理を適用して石室の等価有効空隙面積を逆算すると600mm<sup>2</sup>という値が得られた。この条件の下で石室内に窒素を封入して酸素濃度を0.1%以下に保持するのは不可能であることが報告されている<sup>7)</sup>。さらに、周囲を覆っているマサ土は0.6前後の間隙比を有しており、体積比で半分近くが空隙である。実際に、石室を構成する石材は微妙にずれており、漆喰がはずれて目視できるくらいの隙間が空いている。このような劣悪な密封性の下では酸素濃度0.1%以下という所定の条件は得られない。また大量の窒素を封入するために加圧すれば、局所的

に壁面に気体圧が作用し漆喰層の痛みや剥落という事態を招くことが懸念される。さらに、窒素封入装置のランニングコストとメンテナンスコストが問題となること、窒素の封入によって生じる石室内部の低酸素状態が、壁画の点検、修復に石室内部に入って仕事をする作業者の健康にも悪影響を与えることなどを勘案すると、この方法をカビ対策として壁画の現地保存対策として採用することは現実的ではないとして見送られた。

以上のように、現地保存のためにいかにしてカビの生育を防止し、漆喰の剥落などの危険性を取り除いた手法について検討したが、温度、湿度、酸素のいずれの要因についても、現地石室内で求められる性能を確保できるような制御は不可能であることが明らかとなった。こうした検討結果を受け、国宝高松塚古墳壁画を保全するためには、石室を解体し、壁画を温湿度の管理できる保存施設で修復するという結論に至った。

### 3. 石室解体に向けた発掘調査における土木・地盤工学の役割

高松塚古墳壁画を現地に置くという前提では、壁画を生物被害から守ることができないことが明らかとなったことを受けて、石室を解体して壁画を石材ごと取り出し、温湿度が管理された保存施設に格納して修復作業を行うことになった。石室解体のためには、特別史跡である古墳墳丘を大きく掘削することになるが、可能な限り改変を小規模なものにする方向で発掘調査を先行して実施することとなった。古墳のような地盤遺跡を調査する場合、その断面構造を調べるためにトレンチを掘ることが多い。通常トレンチは人間が通ることができる程度の幅を確保し、直立壁を出して断面観察を行うといった最低限の調査領域にとどめるように掘削される。また直立壁の形に掘られるが、壁面観察のために矢板や切り梁などのいわゆる支保工は入れないのが普通である。ところが、今回は内部の石室の取り出しという作業があるので、掘削断面が非常に大きく、かつ深くならざるを得ない。また門型クレーンを使用して石材を取り出すことになるので、墳丘の内部にクレーン足

場基礎の反力を持たせる構造になり、掘削壁面の安定性とともに関心基礎地盤の支持力問題を合わせて考慮しなければならず、土木工学・地盤工学の知見を適用することによって安全かつ円滑に作業を進捗させることが求められる。

#### 3.1 墳丘版築土とその構造特性

高松塚古墳壁画恒久保存対策として、現地保存とするか、温湿度を管理した保存施設に移して壁画の修復を行うかについて、科学的に検証する必要があるとして、平成16年度に墳丘の発掘調査が行われた。その際、きわめて例外的に墳丘部でボーリング調査と不攪乱試料採取を実施した<sup>1,5)</sup>。壁画や石室、ならびに墳丘自体への悪影響を防止するため、エアーパーリング<sup>8)</sup>という泥水を使用せず、電気モーター駆動のマシンを使った特殊な方法で調査にあたった。また、採取試料は外から目視できるように、透明アクリルのサンプラーを使用した。ボーリングと試料採取は図1に示す石室端部から西、北、東側にそれぞれ約2.5m離れた地点で、墳丘表面から古墳が構築されている地山を確認する深度まで行った<sup>1,5)</sup>。採取試料はすべてRIコア密度測定にかけて、その密度構造を調べた。採取コアの一例を図2に示す。墳丘土には水平方向に明確な縞模様が認められるが、これは土を撒きだして数センチごとの厚さに杵や搗棒で締めて構築される版築とよばれる構造であ

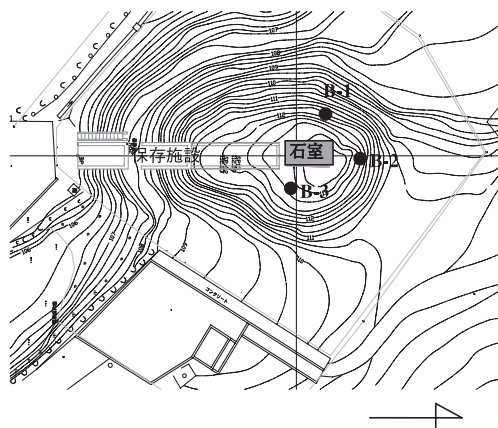


図1 高松塚古墳平面図と調査ボーリング位置

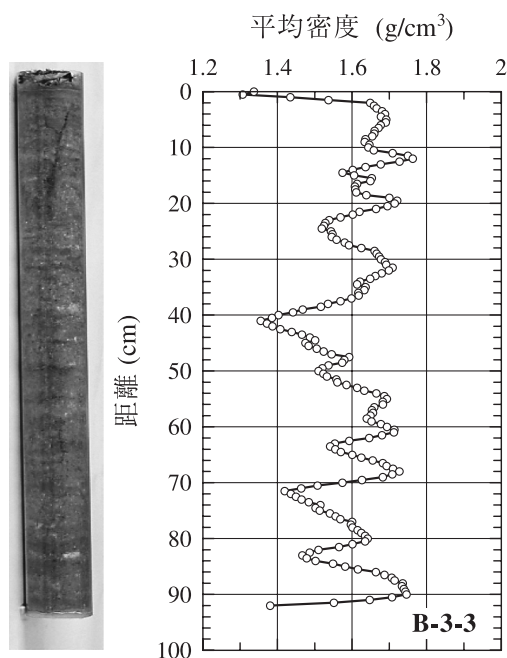


図2 高松塚古墳墳丘版築部から採取した試料とRIコア密度測定結果 (B-3-3は図1におけるB-3孔から採取した上から3番目のコアであることを示す)<sup>1,5)</sup>

る。RI コア密度測定結果をみると、およそ5 cmごとに密度の山と谷が交互に現れているのがわかる。これは、撒きだした土を締め付けた時に、杵や搗棒があたる面では高密度化し、撒きだしの最下面ではエネルギー分散効果によって締め度合いが落ち、密度の低い部分が現れるためである。古墳構築時にできた施工法に起因する土の密度構造が1400年の年月を超えて現在まで残っているのを定量的に確認したのは初めてのことであり、保存状態によっては盛土の構造は長期間にわたって保持されることがわかる。墳丘土のX線回折による鉱物分析結果と粒度分布をそれぞれ図3、4に示す。使われている土は、明日香村周辺に広く分布する花崗岩、閃緑岩起源のマサ土であり、細粒分から比較的粗い小礫まで幅広い粒径の材料から成っており、締め固めによって高密度化しやすい材料であることがわかる。

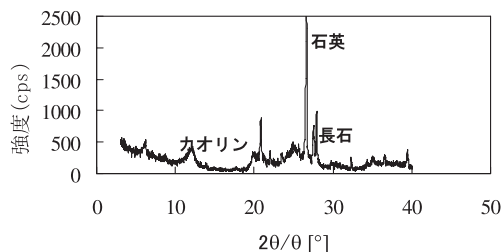


図3 高松塚古墳墳丘版築土のX線回折による鉱物分析結果

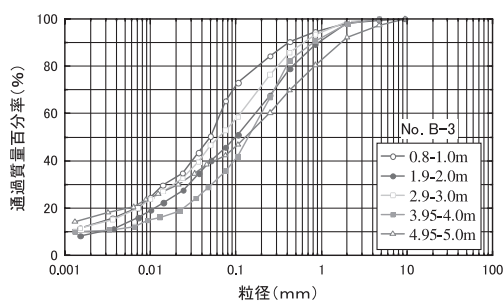


図4 高松塚古墳墳丘土の粒度分布特性 (図1のB-3孔から採取された各1 mサンプルの先端シユールから採取した試料を使用、凡例の数値は試料採取深度を表す)

### 3.2 墳丘版築土の強度

掘削壁面の安定性、クレーン足場の支持力特性のいずれもが、対象となる地盤の強度がわからなければ評価することができない。今回の対象は半乾燥状態の締め固めマサ土であり、ある程度の粘着力を有しているのでブロックサンプリングやボーリングコアの採取は技術的には可能である。事実、前節で示したように、石室周囲では既に3本のボーリングを行い、試料が採取できることもわかっている。ところが、発掘調査と平行して当該箇所のお位置強度に基づいて土圧や支持力を迅速に検討するというとなると、力学試験のためにその部分を大きく掘削することは許されないので、できる限り非破壊に近い条件で原位置調査を実施するということになる。土の強度は破壊時の応力であり、基本的には土を破壊させることによって得られる量であることを考えると、非破壊で土の強度を算定するのは非常に難しい要求であ

ることが理解できよう。今回現場で適用したのは軟岩硬度計（針貫入試験）である。これは、粘着力を有するいわゆる *c* 材料に適用できる原位試験の一種である。図4からもわかるように版築土はシルト混じり砂質土であるが、細粒分を多く含むマサ土であり、図5に示すように、事前のキャリブレーションで与えられている *c* 材料に対する校正関係が十分機能する材料であるということで適用した。現場での試験状況を写真1に、石室解

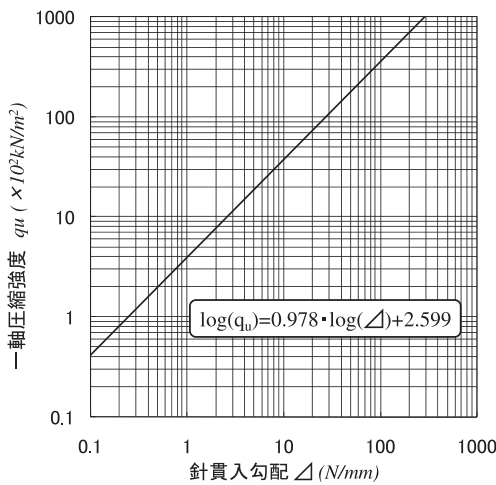


図5 針貫入試験の針貫入勾配～一軸圧縮強度に関する校正曲線



写真1 高松塚古墳墳丘発掘現場における針貫入試験実施状況。透明のナイロンにメッシュを描き、貫入ポイント位置を正確に決めて広範囲に、かつ面的に貫入結果が得られるように試験を実施した

体時に使用する門型クレーンの基礎足場が設置される地盤面において実施した針貫入試験の結果を図6に示す。同図には、針貫入試験測定値から

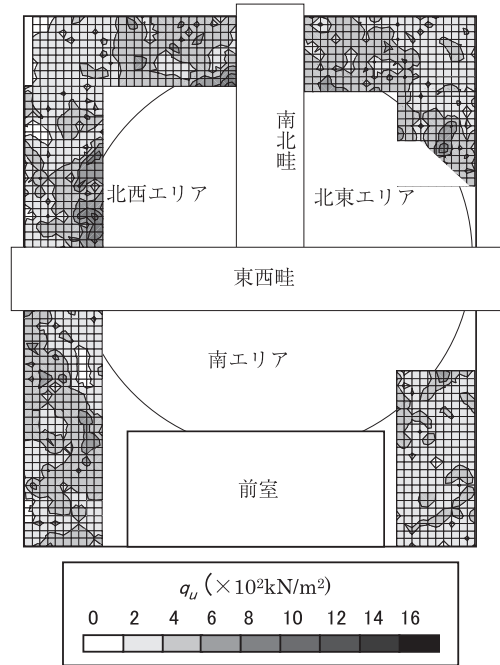


図6 高松塚古墳墳丘内クレーンフレーム基礎接地面における針貫入試験による換算一軸圧縮強度分布

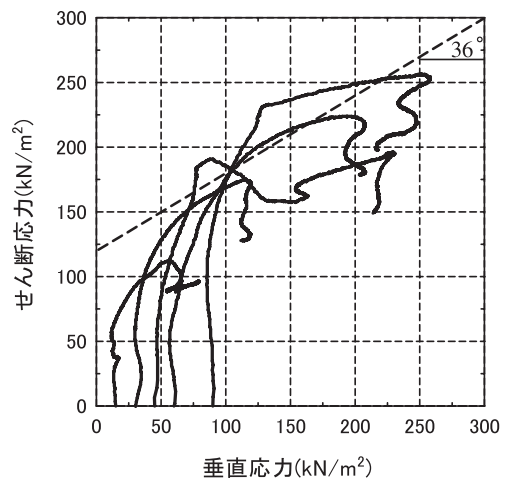


図7 高松塚古墳墳丘版築土 (B-3) の排水排気一面せん断試験における応力経路と破壊線

図5に示す校正関係に基づいて換算一軸圧縮強さに変換した値を示している。クレーンベース足場の換算一軸圧縮強さは  $q_u = 200 \sim 400 \text{ kN/m}^2$  を示しており、締固め版築土は比較的硬質でしっかりとした強度特性を持っていることがわかる。前節で紹介したエアボーリング工法<sup>8)</sup>によって墳丘版築層から採取した不攪乱試料を用いて排水排気一面せん断試験を実施した。一例として、B-3孔から採取した試料に対する排気排水一面せん断試験によって得られた応力経路図を図7に示す。破壊時の応力から高松塚古墳墳丘版築土の力学定数を求めると、粘着力  $c$  ( $q_u/2$ ) として  $120 \text{ kN/m}^2$ 、せん断抵抗角  $\phi = 36^\circ$  が得られることがわかる。

### 3.3 墳丘内部に残る地震痕跡

前節で説明した一連の強度特性に関する結果は、原位置における針貫入試験、採取試料に対する一面せん断試験ともに、いわゆる intact で健全な状態の版築土の強度という位置づけになる。ところが、トレンチ調査や石室解体に向けた墳丘の掘削によって古墳墳丘内部を直接観察できるようになると、写真2に示すような地震によると思われる亀裂が縦横に走っていることが明らかとなった<sup>9)</sup>。また、石室内部における三次元精密測量、石室解体前の石室外部からの測量結果により、石室自体も斜面に沿って南西方向に約  $1.3^\circ \sim 1.6^\circ$ 、北東角と南西角では鉛直方向に約  $6 \text{ cm}$  の標高差が生じていることが確認されており<sup>1,9)</sup>、石室自体も

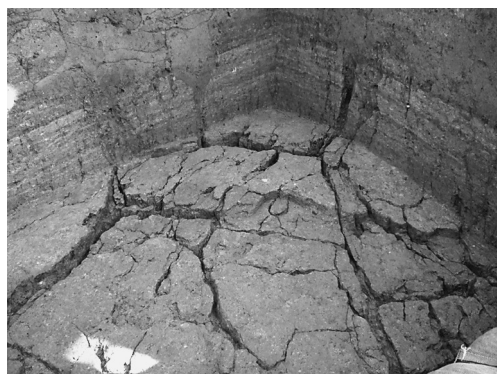


写真2 発掘調査で発見された墳丘版築層内の地震による地割れと亀裂

地震による地盤変状の影響を被っている。3.2で示した針貫入試験をトレンチの壁面で実施した結果から、亀裂以外の健全な部分における強度と比べて、亀裂内部に充填された土の部分の強度は著しく小さく、丁寧に締固められた版築がしっかりとした強度構造を有していること、亀裂部分に落ち込んだ締めかためられていない土は緩く、低強度であることが定量的に確かめられている<sup>5)</sup>。ボーリング、試料採取時に削孔した後にケーシングをたて、孔内でPS検層を実施したところ、墳丘のS波速度は  $70 \sim 160 \text{ m/s}$  と非常に低い値となっていることがわかった<sup>5)</sup>。発掘によって墳丘内部に多数の地震によって生じた亀裂が発見されたことを受け、締固め版築土そのもののS波速度を採取試料に対するベンダーエレメント試験を実施することによって検証した。その結果、同じ版築土に対するS波速度は  $240 \text{ m/s}$  程度であり<sup>10)</sup>、現地のPS検層結果に比べてかなり高い値となった。つまり、締固め版築土自体は比較的硬質で健全な状態であればS波速度もそれなりに高い値を示すが、地震によって生じた亀裂によってブロック状になっている墳丘全体で見るとS波速度が低下しており、地山構造的には決して安定したものとはいえない状態であることが確認された。

### 4. 石室解体に向けた墳丘地山の安定性評価

発掘調査断面と石室取り出し方法の模式図を図8に示す。発掘区は図のように上下二段掘りで、下段は石室外側想定周囲から  $93 \text{ cm}$  の解体作業に

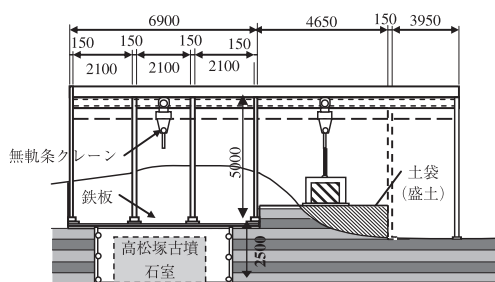


図8 高松塚古墳石室解体におけるクレーン、石室配置の縦断図 (寸法: mm)

最低限必要なスペースを確保するとともに、クレーン基礎設置面として上段に1 m幅のテラスを設けている。石室の解体<sup>11)</sup>は特殊な固定治具を用いて1つ1つ石材を吊上げて解体し、運び出される毎に発掘調査が再開されるという手順である。

石室が設置されている下段発掘区は、クレーン基礎設置面である上段テラスから深さ2.5 m、幅4 mとなる。土木開削工事であれば、矢板を打つ、切り梁を入れる、H型鋼杭を打ち込んでせき板で土留めする、などの対策が行われるが、高松塚古墳墳丘は特別史跡であり、重要な文化財であることから、発掘調査前に損壊することは許されず、発掘調査後の壁面でさえ可能な限り損傷を回避しなければならないという条件が課せられる。そこで、まず支保工のない状態での墳丘地盤の安定性について検討する。

クレーンベース基礎地盤の安定性を検証するために、門型クレーンフレームのベースとなる墳丘版築地盤の許容支持力を算定するための設計値を地盤調査試験結果に基づいて設定する。図6に示したように、クレーンベース基礎地盤において面的に実施した針貫入試験を結果から換算一軸圧縮強さが200~400 kN/m<sup>2</sup> ( $c = q_u/2 = 100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ )と得られている。また、版築土の一面せん断試験(図7参照)から、 $c = 120 \text{ kN/m}^2$ が得られている。室内試験結果は原位置試験に比べてやや小さな値を示すが概ね調和的である。これらの結果を踏まえ、安定解析における版築土に対する安全側の粘着力 $c$ の値として100 kN/m<sup>2</sup>を採用した。また版築土の原位置RI湿潤密度測定結果より対象地盤の単位体積重量 $\gamma = 16.43 \text{ kN/m}^3$ とした<sup>12)</sup>。クレーンフレーム基礎地盤に作用する外力として、クレーンフレーム鉄骨重量と最大石材重量を合わせた4.5 tがすべて1本のクレーン基礎に作用するという安全側の値を採用し、この荷重が敷鉄板幅93 cmのクレーンベースに作用すると仮定することにより、最大載荷圧力として $q_{\max} \approx 44 \text{ kN/m}^2$ を得た。こうした条件に基づき、テルツァギの支持力算定式; $q_a = 1/3 \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c$ によって算定される許容支持力 $q_a$ と $q_{\max}$ から安全率を算定した。方形

基礎に対しては形状係数 $\alpha = 1.3$ 、 $c$ 材料(安全側をとって $\phi = 0$ と仮定する)に対する支持力係数 $N_c = 5.1$ を適用すると、 $q_a = 204 \text{ kN/m}^2$ が得られた。したがって安全率 $F$ は $F = q_a/q_{\max} \approx 4.64$ となり、地盤の支持力としては問題ないことがわかった。ところが、該当工事は発掘調査と並行して実施されるという一般的な土木掘削工事とは異なる手順で実施されること、発掘の過程で明らかとなった版築層に多数の亀裂があること、石室の側壁吊り上げはフレーム中心では行われないことなどから、石室解体作業完了までに図9に模式的に示すような問題が起こる事態を想定しておかなければならない。すなわち、(a) 版築層内に無数に走る亀裂部分がクレーンと石材の荷重を受けて圧縮し、フレームごとに不同沈下を起こす、(b) 支保のない発掘構内への変位が発生する、(c) 版築層内の亀裂が流れ盤状に走っていた場合、すべり破壊を起こす、といったいずれも地盤変状を伴う事態であり、これらのいずれが発生してもクレーンのバランスが崩れることによって重大な事故に直結し、クレーン構造自体が機能しなくなって石材の搬出は不可能となる。こうした事態を防止するとともに、発掘孔内部の作業者の安全を確実に担保するために、特別史跡に対する配慮を含めた実行可能な支保構造を採用することとした。特別史跡に対する制約から、通常の土留め工やクレーン基礎地盤の補強工は適用できなもので、発掘区壁面に矢板を設置し、H型鋼による腹起こしで矢板の変形を抑えるとともに、鋼板を敷設したクレーンベース基礎に固定した逆L型の治具によって腹起こしを押さえ、矢板ごと地盤変形を拘束する形の支保が適用された。図10に石室石材の取り出しとその時に採用された支保工の概念図を示す。発掘壁面の土留めは3つの段階がある。第一段階は素掘りによる発掘(土留めなし)、第二段階では矢板として木製の足場板が適用され、第三段階では矢板として軽量アルミ板が用いられた。各段階の発掘深度は上段テラスから1.6 m、1.9 m、2.5 mである。支保工設置時の発掘区の状態を写真3に示す。

このような補強を行い、16枚の石材を吊り上



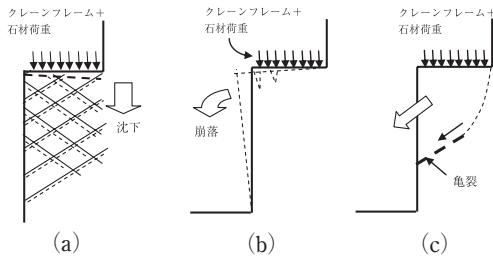


図9 クレーン設置荷重と石材荷重によって起こりうるクレーンベース地盤の変形モード  
 (a)地盤内部亀裂の弱部が上載荷重によって圧縮して地盤沈下する  
 (b)上載荷重によって発掘区側に地盤が変状する  
 (c)流れ盤状の地盤内部亀裂に沿ったすべり破壊が生じる

げ、すべて国立飛鳥資料館敷地内の仮設修理施設に移送された。この間、壁画面の剥落や損傷をはじめ、軽微なものを含めて不測の事態は発生せず、すべての石材が無事仮設修理施設に搬入された。石室解体と移送についての詳細には、文献12)に詳しい。



写真3 発掘孔内の石室、クレーンベース敷鉄板および壁面保護のための仮設支保工の設置状況  
 A: 発掘された石室（保護のためにカバーで覆っている）  
 B: クレーンベースの敷鉄板  
 C: アルミ製波形矢板  
 D: 木製矢板  
 E: 鋼製の腹起こし  
 F: 鋼製のL型抑え治具

	石材	土留工の状態
①	天井石 4	土留工: なし 
②	北壁石	土留工: 足場板(矢板)1.6m、L型金具 1.4m
③	天井石 3	
④	西壁石 3	
⑤	東壁石 3	
⑥	天井石 2	土留工: 軽量矢板 2.5m、L型金具 1.4m+2.0m
⑦	天井石 1	
⑧	東壁石 2	
⑨	西壁石 2	
⑩	南壁石	
⑪	西壁石 1	
⑫	東壁石 1	

図10 石材の取り出し過程とそれに伴う土留め支保工の設置パターン

### 5. おわりに

高松塚古墳石室は解体され、壁画が描かれたものを含め、合計16枚の凝灰角礫岩の石材が無事取り出されて、現在では国立飛鳥資料館敷地内の仮設修理施設に保管され(写真4参照)、気温21°、湿度55%の環境下で修復作業が進められている。現地保存を継続すべきか、それとも解体して壁画を取り出して修復すべきかという問題に直面した時、地下水や雨水による水分移動が起こる土中における温湿度管理が可能であるのか、冷却管を土中と墳丘表面に設置して石室内部を低温下できるのか、泥水を使用せずに不攪乱試料採取が可能であるのか、地震による墳丘内部の亀裂は墳丘の安定性にどのような影響を及ぼすのか、現場試験の結果はどう解釈すべきなのか、石材のクレーンに



写真4 国営飛鳥歴史公園内の仮設修理施設に保管された国宝高松塚古墳壁画。仮設修理施設内部は気温21℃、湿度55%に保たれており、土中にあった時の高湿度環境とは異なり、生物被害の危険性は減少した。今後は国民共有の貴重な財産である壁画を後世に残していくために長期にわたる修理作業が行われる。(この写真は文化庁から提供していただきました)

よる吊り上げ時に基礎が置かれる版築層の支持力は十分なのか、その際亀裂はどのように寄与するのか等々、不確実で難解な問題が次々と発生した。墳丘を取り去ることによって乾燥に向かう石室内で壁画が描かれている漆喰面も乾燥に向かうため、時間の経過は漆喰の剥落の危険性を増すということで、実行可能解を可及的速やかに提示することが求められた。各種地盤調査、土質試験、原位置検層によつて的確なデータを採り、土木工学・地盤工学の知見に基づいて十分すぎる安全性を担保した解を現場にフィードバックするという、当たり前の手順を踏んで工事を進めていただ

いた。ただし、無数の地震による亀裂が見えない地盤内部にどのように広がっているのかによって地盤の安定性は大きく変動することを常に念頭に置いて対応した。地盤変位を許さない支保構造を、発掘と石材取り出し作業の障害とならないように設置することができたことによって、石室解体作業の安全性が確保され、無事16枚の石材が古墳から搬出された。高松塚古墳壁画の損傷は、生物被害、物理的な劣化による被害、ヒューマンエラーによる被害などが複合的に重なったものである。現段階では考え得る最良の対策として、墳丘内部から取り出して温湿度管理下の博物館環境で保管され、修復の初期段階にある。今後約10年かけて修復した後、どのような形で復元するのかは、科学技術の進展に大きく委ねられている。古墳など地盤構造物遺跡の保全に対しては、考古学や保存科学だけでなく、土木工学や地盤工学も重い責任を負っていることを自覚し、それぞれの分野の研究成果をもっていかに貢献しうるかについて考えておく必要がある。

## 謝 辞

本稿は、国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会の下で実施された、平成16年度発掘調査、石室解体に向けて実施された平成18年度発掘調査に沿って行った原位置地盤調査および室内土質試験結果に基づいたものである。一連の調査研究に際し、文化庁、(独) 国立文化財機構奈良文化財研究所、同東京文化財研究所の皆様には、現地での便宜や考古学・保存科学分野からのご助言などのご協力を賜った。記して深甚の謝意を表する。

## 参考文献

- 1) (独)文化財研究所 奈良文化財研究所：高松塚古墳の調査－国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討のための平成16年度発掘調査報告－, 82p, 2006.
- 2) 三浦定俊, 石崎武志, 赤松俊祐, 高松塚古墳における30年間の気温変動, 保存科学, 第44号, pp.141-148, 2005.
- 3) 石崎武志, 佐野千絵, 三浦定俊, 高松塚古墳石室内の温湿度および墳丘部の水分分布調査, 保

- 存科学, 第43号, pp. 87-94, 2004.
- 4) 高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査委員会：高松塚古墳取合部天井の崩落止め工事及び石室西壁の損傷事故に関する調査報告書, 121p, 2006.
  - 5) 三村 衛, 石崎武志, 高松塚古墳墳丘の現状とその地盤特性について, 地盤工学ジャーナル, Vol. 1, No. 4, pp. 157-168, 2006.
  - 6) 石崎武志, 三浦定俊, 大塚将英, カリル・マグデイ, 高松塚古墳墳丘部の生物対策としての冷却方法の検討, 保存科学, 第45号, pp. 59-67.
  - 7) 文化庁, 高松塚古墳石室の空気漏洩量調査, 第三回国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会参考資料12, 2005 ([http://www.bunka.go.jp/ihogo/pdf/takamatuduka\\_kentoukai\\_sankou12.pdf](http://www.bunka.go.jp/ihogo/pdf/takamatuduka_kentoukai_sankou12.pdf)), 2008年3月26日閲覧.
  - 8) 奥田 悟, 三村 衛, 石崎武志, エアーボーリングによる高松塚古墳墳丘の地盤調査と試料採取, 土と基礎, Vol. 54, No. 4, pp. 10-12, 2006.
  - 9) 松村恵司, 石室解体修理事業に伴う発掘調査, 月刊文化財, 532号, pp. 16-21, 2008.
  - 10) 金田 遥, 古墳版築土と墳丘の構造に関する実験・調査研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 2008.
  - 11) 肥塚隆保, 高妻洋成, 降幡順子, 石室解体と輸送, 月刊文化財, 第532号, pp. 22-37, 2008.
  - 12) 文化庁, 高松塚古墳石室解体時の墳丘地盤安定検討結果について, 第十回国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会資料7, 2007 ([http://www.bunka.go.jp/takamatsuzuka\\_kofun/kentoukai/kentou\\_10/pdf/siryu\\_7.pdf](http://www.bunka.go.jp/takamatsuzuka_kofun/kentoukai/kentou_10/pdf/siryu_7.pdf)), 2008年3月26日閲覧.

(投稿受理：平成20年4月30日)

訂正稿受理：平成20年8月8日)