

高松塚古墳発掘調査による墳丘の地盤特性の評価

三村 衛・吉村 貢*・金田 遙**

* ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社

** 京都大学大学院工学研究科

要 旨

国宝高松塚古墳壁画はカビや細菌、虫類による生物被害、および地震による墳丘地山の亀裂や漆喰の劣化による物理的被害によって危機的状況に陥ったため、恒久保存対策として石室を解体し、壁画を温湿度管理の行き届いた環境下において修復することになった。これを受けて、2006年10月～2007年9月にかけて古墳の発掘調査と石室解体が行われた。本報告では、発掘時に明らかとなった古墳の土構造物としての構造特性と強度特性を原位置強度試験と室内土質試験によって把握するとともに、5mの深さに及ぶ掘削と石材の取り出しに際して問題となる、発掘壁面の安定性と石材吊り上げ時のクレーンベース地盤の支持力特性について検討した結果について報告する。

キーワード：高松塚古墳，地盤調査，版築構造，土質試験，支持力特性

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、墳丘内にある石室内面に塗られた漆喰に極彩色の壁画が描かれていたことから、全国的に有名となった。同年6月には史跡に指定され、翌年には特別史跡に昇格した。1974年には壁画が国宝に、出土遺物が重要文化財に指定され、石室と壁画は古墳南側に空調施設と前室を有する保存施設による環境管理の下で現地保存されてきた。

発掘調査によって、下段が65大尺（23.01m）、上段が50大尺（17.7m）の直径を有する二段円墳で、緩い南向き斜面に築造されていることがわかっている（（独）文化財研究所奈良文化財研究所，2006）。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、北奥と南側前面の閉塞石各1枚の合計16枚から成っている。石室の概略寸法は内法で、奥行き2.66m、幅1.03m、高さ1.13mである。石室内部表面には漆喰が塗られ、その表面に極彩色の壁画が描かれている。

石室内部は外気温変動の影響を受けて外気に対して約3ヶ月のタイムラグをもって15～20℃の温度年変動を示し（三浦他，2005）、相対湿度はほぼ100%

近い値を保持するという環境にある（石崎他，2004）。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、取合部にはあつたがカビの大発生を見た（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，2006）。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え、結果的に石室内部の温度上昇をまねいたり、外部の有機物が石室内部に混入する危険性が増大した。その後も壁画面へ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。こうした生物被害に加えて、墳丘内部には過去の大地震によると思われる無数の亀裂や地割れが見つかり、石室内部精密三次元測量によって石室自体が斜面方向に傾いていることが確認され、壁画が描かれている漆喰層の風化に伴う粉状化や剥落の危険性など、物理的な被害を併せて被っていることがわかった（（独）文化財研究所奈良文化財研究所，2006）。これを受けて国宝高松塚古

墳壁画恒久保存検討会で審議を重ねた結果、石室を解体し、石材を墳丘から取り出して温湿度環境をコントロールできる保存施設に置いて、壁画の修復を行うことが決定された。

本稿では、2004年～2005年、2006年～2007年の2度にわたって実施された発掘調査の結果、特に現地で実施した各種原位置試験結果を中心に、採取試料による室内試験結果を併せて、高松塚古墳の墳丘地盤の構造と強度特性を明らかにする。また、通常の発掘調査とは異なり、石室解体を伴う調査となるため、墳丘頂部からは5mに及ぶ大掘削を行わなければならない。したがって、土木工事としての対応が求められることになり、発掘に伴う大規模掘削による墳丘壁面の土圧と安定性のチェックや石材吊り上げ時のクレーン足場地盤の支持力特性の評価といった地盤工学的アプローチを実施した。また、一連の原位置強度試験、採取試料を用いて実施した安定検討結果に基づいて発掘と石室解体に適切と思われる支保工を設置し、国宝壁画の描かれている石材の取り出しに際して工事の安全性の確保に努めた。

2. 古墳構造と構築時の作業痕跡

高松塚古墳石室解体に伴い、2006年10月2日～2007年9月6日にかけて発掘調査が実施された。発掘調査そのものは、文化庁が主管し、(独)国立文化財機構奈良文化財研究所、奈良県立橿原考古学研究所、明日香村教育委員会の合同チームで行われ、筆者らは必要に応じて現場に出向き、墳丘版築土の現場観察、分析、物理・強度特性の測定などを実施した。今回の発掘調査は石室解体という目的のため、墳丘を大きく掘削し、石室床面下まで掘り下げるようになったため、高松塚古墳の内部構造がはっきりと確認できた。正確な座標値や寸法については正式な報告を待つことになるが、高松塚古墳の内部の構造を概観した模式図をFig. 1に示す。我々が従来目にしてきた古墳外周版築は現地発生と思われる花崗岩起源のマサ土で構築されたものである。以後、この版築

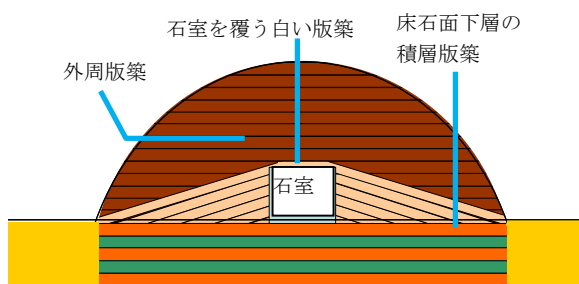


Fig. 1 Schematic View of Structure of the Compacted Earth of Takamatsuzuka Tumulus

層を他の版築層と区別するために、外周赤色版築と称する。2004年～2005年にかけての調査では、墳丘版築土の物性や力学特性を把握するために、Fig. 2に示す石室周りの3ヶ所でボーリングと試料採取を実施した((独)文化財研究所奈良文化財研究所, 2006, 三村・石崎, 2006)。特別史跡の古墳ということで、

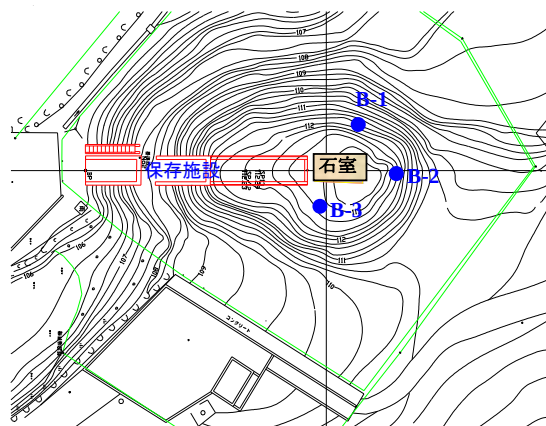


Fig. 2 Plan View of the Tumulus and Location of Sampling

ボーリングマシンを墳丘に直接設置しない、泥水は墳丘内部亀裂を通して石室に水がまわる可能性があるので使用しない、振動の大きなディーゼルエンジンは使用しないという厳しい制約のもとで、仮設覆屋基礎から単管をくみ上げて構築した仮設足場上に電気モーター駆動のボーリングマシンを設置し、泥水の代わりに圧縮空気を送気するという特殊な方法でボーリングと試料採取を実施した(奥田他, 2006)。さらに、採取試料の目視観察ができるようにということで、透明のアクリルサンプラーが採用され、Fig. 2に示す石室西側のB-1孔から7本、北側B-2孔から4本、東側B-3孔から6本の合計17本の試料が採取された。墳丘上部は植物の残骸や根の影響で土壌化が進んでおり、締固めによる版築の明確な構造は目視できない。しかしながら、墳丘深部から採取した試料には層状の版築構造を判別することができる。一例としてB-3孔から採取した版築層の試料のコアをFig. 3に示す。同図に見られる版築は古墳墳丘外周を造っているものであり、赤みがかった花崗岩、閃緑岩起源のマサ土である。版築層には明瞭な横縞が認められ、土を層状に撒き出し、締め固めて構築した時の構造がよくわかる。同図に併せて示したRIコア密度計で測定した密度分布から、搗棒(つきぼう)による打撃面では高密度化しているのに対し、各層の撒きだし下面では打撃エネルギーの分散によって締固め度合いがさほど大きくないために、密度の高低が層厚ごとに交互に現れていることがわかる。このような古墳構築時に形づくられた版築の密度構

造が1300年の時空を超えて残存しているのは驚くべきことである。

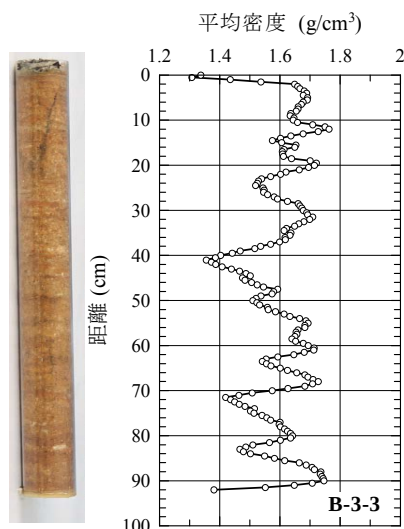


Fig. 3 Example of Compacted Earth Sample and the Distribution of Wet Density Profile Measured By RI Measurement

発掘が進捗し、石室天井近くまで掘り下げた段階で、墳丘外周の赤色版築層とは明らかに異なる白色の版築層が現れた。この版築層は石室の構築と一体的に施工された強固なもので、石室を土饅頭状に被覆するようになっていた（松村，2008）。発掘時に現地で撮影した白色版築層をPhoto-1に示す。XRD分析により、白色版築を構成する土は花崗岩起源ではなく、塩基性鉱物を主体とするものであることがわかり、別の場所から持ち込まれたものであることが予察される。この版築層は外周の赤色版築に比べて硬く、仕上げ層厚も約3cmと薄くなっている。また、締固め面にムシロ目痕跡と細い搗棒（つきぼう）痕跡が見いだされており（松村，2008），石室を保護するために丁寧かつ強固に構築されていたことがうかがえる。Photo-2に示すように、床石設置面以深の版築はマサ土と現地で石室石材を削って寸法調整を行った時に発生した削り粉が層状に13層積層した構

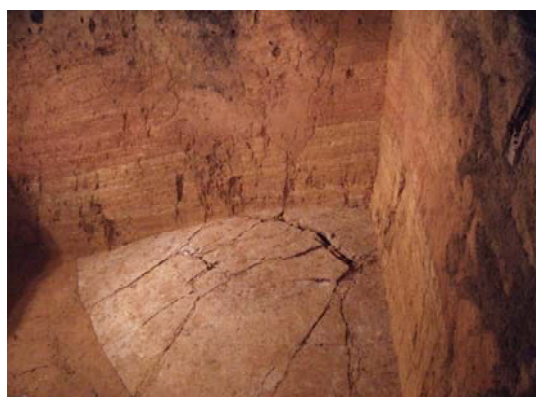


Photo 1 Appearance of Firm White Compacted Earth Surrounding Stone Chamber

造となっており、やはり非常に硬質に仕上げられている。この部分からは、地盤と床石を水平に設置するために用いられた水秤の補助として使われた水縄を止める杭の打設痕跡（Photo-3）が見いだされており（松村，2008），被葬者の安寧と石室の安定性を確保するために、設置地盤と床石を水平に保つことを重視したことがうかがえる。

2004年～2005年にかけての発掘調査で、トレンチ壁面から24ヶ所に及ぶ地震によると思われる版築の割れや亀裂が見つかっている（（独）文化財研究所



Photo 2 Accumulated Compacted Earth with Powders from Chamber Stone Located beneath the Stone Chamber



Photo 3 Trace of Supported Pile for the Level Using Water



Photo 4 Earthquake Induced Cracks in the Tumulus Mound

奈良文化財研究所, 2006, 三村・石崎, 2006)。石室解体に向けて大きく掘削された2006年～2007年の調査では, その広がり三次元的に確認され, 墳丘が予想以上に大きく傷んでいることがわかった。Photo-4に発掘途中に外周赤色版築内で認められた地震による亀裂と地割れの一例を示す。大きなものでは長さ数メートル, 幅30cmに及ぶような大規模なものもあり, 木竹の根の侵入経路になったり, 雨水の流入経路になったりすることから, 石室に対する負の影響要因となっていたものと考えられる。

3. 室内試験による外周版築土（赤色版築）の物理・力学特性の評価

Fig. 2に示した3孔から採取した墳丘土について, 力学試験には使用できないサンプラーシュアの部分に残存した土を用いて調べた各深度ごと墳丘土の粒度分布をFig. 4に示す。いずれも粗粒から細粒にわた

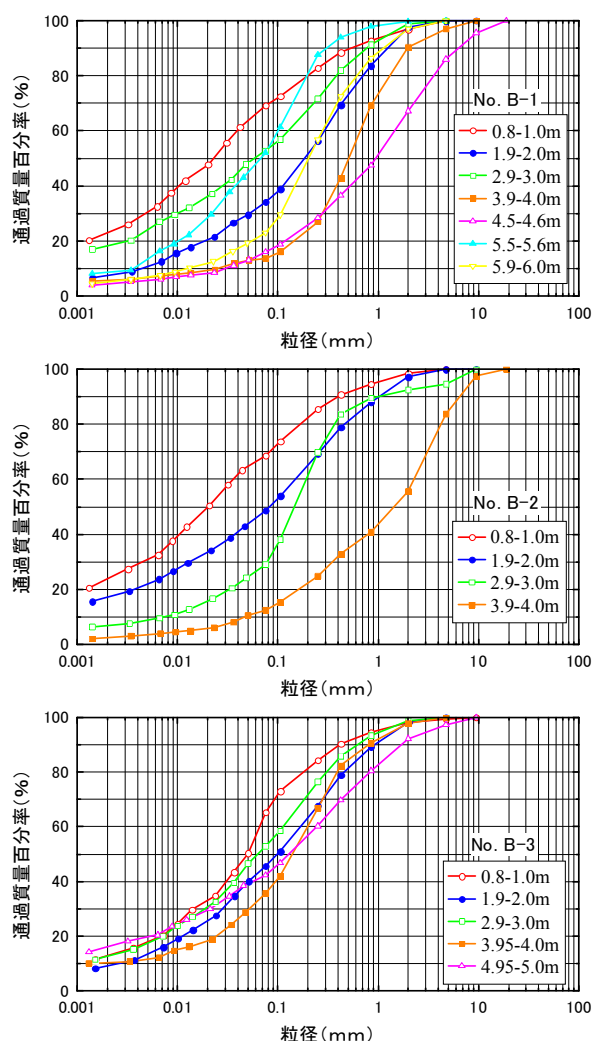


Fig. 4 Grain Size Distribution Curves of Compacted Earths

ってよい配合になっており, 締固めに適した材料であることがわかる。特に地表面近傍の試料は土壌化によって粘土化しており, 細粒分含有率が高くなる傾向が認められる。Table 1に各種試験に使用した試料に対して求めた土粒子密度と自然含水比の値を示す。土粒子密度についてはいずれの孔の試料も2.70前後の値となっているのに対し, 自然含水比についてはB-2孔の試料は他の2孔のものに比べて高くなっている。墳丘北側は全体としてやや粘土質であり, 含水比もそれに応じて高くなっているものと考えられる。

Table 1 Density of Soil Particles and Natural Water Content

	ρ_s (g/cm ³)	w_n ($w_{min} - w_{max}$) %
B-1	2.68	17.6 (16.1 - 18.6)
B-2	2.71	22.8 (21.0 - 25.5)
B-3	2.72	16.6 (15.3 - 18.6)

採取した試料から構造がしっかりと残存している版築層を選択し, 定体積排水排気 一面せん断試験を行った。硬くて脆い不飽和状態の細粒分混じりマサ土ということで, 円柱形へのトリミングや端面成形がほとんど不可能であったため, サンプラーから抜き出しながら標準圧密用のカッターリングで押し抜いて供試体とし, それを再度押し出す形で試験装置にセットした。供試体寸法は直径60mm, 高さ20mmである。高松塚古墳墳丘は地山面から墳丘頂部までの高さがせいぜい6m程度の盛土であり, 拘束圧も小さく, いわゆる低拘束圧下での挙動が問題となる。したがって, 一面せん断試験に際しては, 上載圧として15kPa～120kPaという比較的低い値を用い, この応力領域での強度定数を求めることとした。ボーリング孔B-1, B-2, B-3から版築構造が明確に残っているほぼ中央部から取り出した供試体に対して実施した一面せん断試験結果をFig. 5に示す。版築土は人工構造物とはいっても構築されてから既に1300年あまりを経過し, 地震や生物による影響を受けているということで, 供試体ごとのばらつきは避けられない。Table 1に示すように, 石室の東西から採取したB-1, B-3試料については供試体の平均含水比が16.6%～17.6%で砂質系土であったが, 石室北側のB-2試料については平均含水比が22.8%と高く, 細粒分が多く含まれる材料であった。応力経路に基本的な物性の違いが反映されており, 砂質であるB-1, B-3は $c=105 \sim 120 \text{ kN/m}^2$, $\phi=35 \sim 36^\circ$ と低い粘着力と高い内部摩擦角となっているのに対し, 粘土分が多く含水比の高いB-2試料では, 粘着力 $c=150 \text{ kN/m}^2$ が高く, 逆に内部摩擦角が $\phi=26^\circ$ と小さい値を与えている。

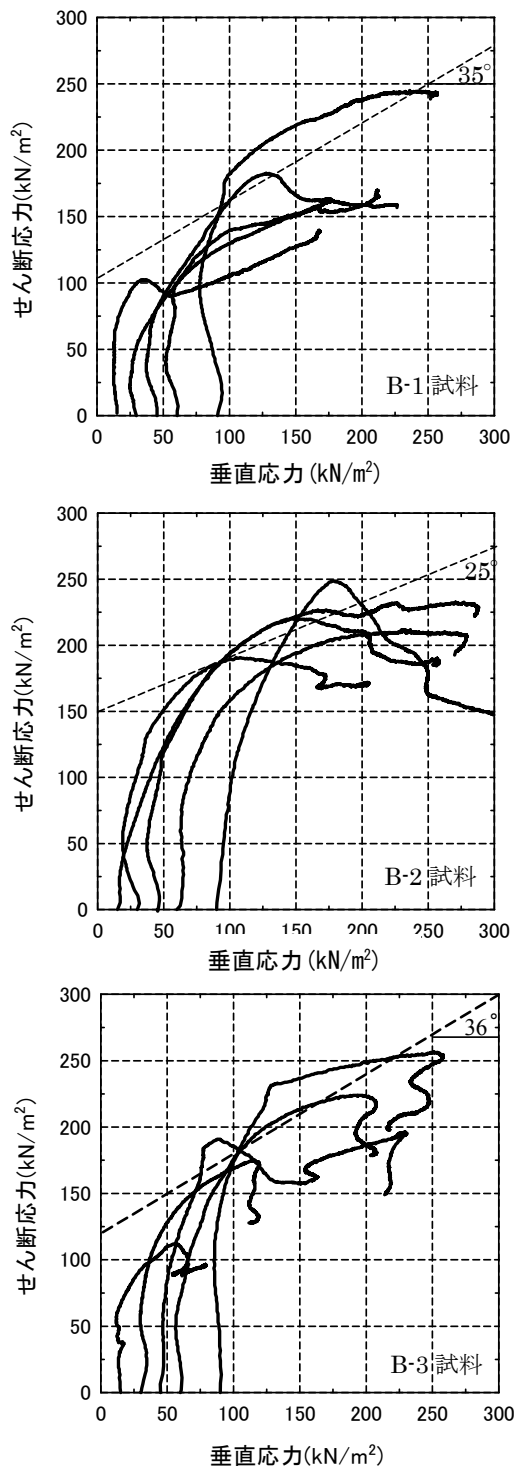


Fig. 5 Experimental Results of Direct Shear Tests on Compacted Earth from the Mound of Takamatsuzuka Tumulus

4. 墳丘版築層の強度測定と強度分布特性

地盤材料の強度特性は、試料を採取し、室内において一軸圧縮試験や三軸圧縮試験といった土質試験を行い、破壊時の応力から算定するのが一般的であ

る。また現場で標準貫入試験やコーン貫入試験を行って、 c , ϕ 値や非排水せん断強さ c_u 値に換算することで直接求めることもできる。ただし、これらはいずれも試料採取に際して地盤を大きく切り取ったり、貫入時に大きな孔を空けたりすることになる。文化財、特に今回の対象である特別史跡の高松塚古墳に対しては、こうした地盤の改変はできないことになっている。したがって、適用できる試験法は遺跡である地盤を傷めることのない、限りなく非破壊に近いものであることが求められる。高松塚古墳の墳丘版築の強度測定には、軟岩硬度計としてトンネル切羽などで使用される「針貫入試験機」を適用することとした。

4.1 針貫入試験機とその適用性

針貫入試験は元来、岩盤中の破砕帯狭在物や軟岩の調査に適用されるものであるが、室内試験に供することができる高品質の試料が採取できないような地盤において威力を発揮するという特長があり、その意味ではまさに土構造物系の文化財に対しても適した試験方法であると考えて導入した。また、版築が、Fig. 2やPhoto 2でも明らかにしたように、深度方向に向かって構造が複雑に変化するため、層構造ごとの強度を調べるという意味でもこの試験方法は理にかなっていると考えたのも採用した理由の一つである。針貫入試験機の構造をFig. 6に模式的に示す。試験方法は、先端の針部分を測定対象地盤に人力で貫入するという簡単なもので、対象土をあまり傷めないという特長がある。貫入時にスプリング部分の圧縮によって生じるスピンドルの変位量から換算される貫入力 $P(N)$ が原位置で求められ、一般に固結力を有する土に適用できる。こうして求められた P を用いて①針貫入量 L が10mmになった時の $P(N)$ 、②最大貫入力 $P(N)$ の時の針貫入量 $L(mm)$ のいずれかを用いて針貫入勾配 $\Delta=P/L$ (N/mm)を算定する。事前の校正試験により Δ と一軸圧縮強さ $q_u(kN/m^2)$ がほぼ一義的な関係にあることがわかっているため、針貫入試験測定結果を換算して一軸圧縮強さ q_u を求めることができる。

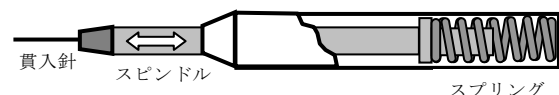


Fig. 6 Schematic View of Needle Penetration Testing Apparatus

4.2 それぞれの版築層の強度分布

発掘調査の進捗に合わせ、重要と思われる地盤面が現れた時点で平面的に針貫入試験を実施した。石室解体というミッションがあるため、まず石材を吊

り上げる門型クレーン基礎の足場が設置される面が十分な支持力を有しているかどうかを検討する必要があった。次に、外周赤色版築層の内部に石室を取り巻くように土饅頭状に構築された白色版築層が、非常に硬く、丁寧に構築されていることがわかったので、石室天井面まで10cmという位置でこの白色版築層を中心とした強度分布を測定した。さらに、石室の床石を取り出した後の石室接地面以下の版築層は、石室石材を現地成形する際に出た石材の削り粉を層状に挟み込んだ特殊な構造を有しており、石室全体を支えるためにやはり非常に強固に構築されていた。この面においても異なる構造を有する版築層ということで強度分布を測定した。

3つの異なる平面において実施した針貫入試験結果から換算して求めた一軸圧縮強さのコンターをFig. 7に示す。Fig. 7では図の上方が北側となり、南に保存施設の一部である前室がある。発掘は古墳墳丘の断面を確認するために東西十字方向に畦と呼ばれる部分を残しながら行われたので、針貫入試験はその部分を除いて平面として現れた部分に対して実施した。クレーンベースにおける針貫入試験から得られる換算一軸圧縮強さ分布をFig. 7(a)に示す。クレーン基礎は上段発掘区と下段発掘区の境界部分に幅93cmのテラスを設け、その上に設置されることになっていたため、同図に示すように、その幅で面的な強度分布を測定した。同図より、換算一軸圧縮強さは $200 \sim 400 \text{ kN/m}^2$ ($c=100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$) となってFig. 5に示す墳丘外周赤色版築土 (Fig. 1参照) の室内一面せん断試験結果と同程度ないしは若干大きめの値を示している。室内試験結果がやや小さめの値となっ

たのは、試料採取から室内におけるトリミングに至る過程における攪乱の影響なども考えられるが、詳細については現段階では原因を特定するに至っていない。強度定数の絶対値は締固めマサ土としては比較的大きなものであり、後述するクレーンベースの石材吊り上げ時の支持力検討は、Fig. 5とFig. 7(a)の結果から得られる値に基づいて実施した。石室天井石から10cmの地点における古墳墳丘平面の針貫入試験による換算一軸圧縮強さ分布をFig. 7(b)に示す。この部分はほぼすべてが石室と一体として築造されたと考えられる白色版築層にあたり、 $q_u=200 \sim 600 \text{ kN/m}^2$ ($c=100 \sim 300 \text{ kN/m}^2$) クレーンベースの強度分布に比べて値が高くなっていることがわかる。この白い版築層は石室を直接覆うもので、墳丘外周の赤い版築とは種類の異なる土で構築されており、一層あたりの層厚が薄く、かつ高い強度を有するように構築されていることがわかる。床石を取り外した後の下部版築層における換算一軸圧縮強さ q_u 分布をFig. 7(c)に示す。床石設置面以深の版築層は、石材を原位置で組み上げる際に成形した時に削り取られたと思われる凝灰岩質の岩片粉を13層挟み込んで築造されているもので、発掘時の印象では石室を支える部分にもあたるため非常に硬質でありながら、潜在的な節理面ともなっているため、容易に層境界で剥がれるような構造特性を有していることがわかった。また、針貫入試験による換算一軸圧縮強さの分布は $q_u=400 \sim 800 \text{ kN/m}^2$ ($c=200 \sim 400 \text{ kN/m}^2$) と上部の版築に比べて高強度であることが確認できた。

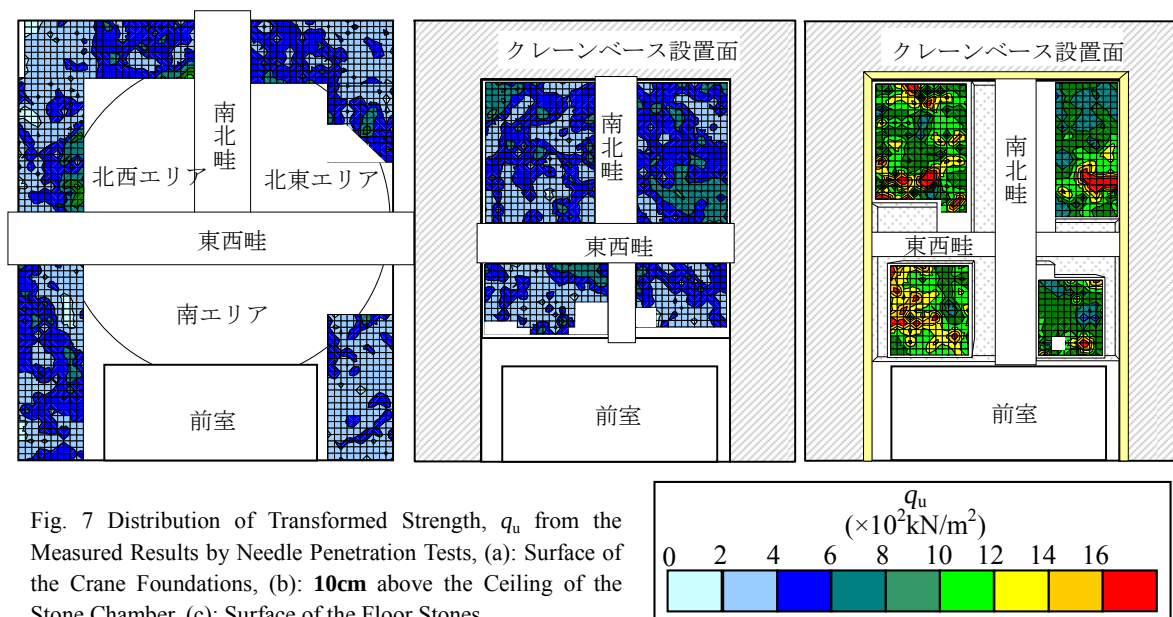


Fig. 7 Distribution of Transformed Strength, q_u from the Measured Results by Needle Penetration Tests, (a): Surface of the Crane Foundations, (b): 10cm above the Ceiling of the Stone Chamber, (c): Surface of the Floor Stones

5. 石室解体工事の概要と墳丘地盤の簡易安定解析

5.1 クレーンベース基礎地盤の支持力

前章で示した原位置地盤強度に基づいて、発掘調査時の墳丘壁面の安定性と石室解体時における門型クレーン足場の支持力検討を行った。石室は古墳の中央に形成され、内のり寸法は奥行き約265cm、高さ約113cm、幅約103cmと判明しているが、石室部材全体の形状と寸法は発掘して周囲の土を取り除いてみないと正確には分からないという状況であった。わずかに南側に露出した閉塞石から厚さは50cm前後、幅と長さがそれぞれ100cm前後と推定されていた。発掘調査はFig. 8のように上下二段掘りで、下段発掘区上面に石室外側想定周囲から93cmの解体作業に最低限必要なスペースとクレーン基礎として、上段に93cm幅のテラスを設けている。墳丘上部から天井石が露出するレベル、壁石が露出するレベル、床石が露出するレベルの3段階に分け、石材の解体を進めながら、基本的には北側→南側へという順序で慎重に発掘調査は進められた。石室の解体は、特殊な固定治具を用いて1つ1つ石材を吊上げするという手順で行われた（肥塚他，2008）。

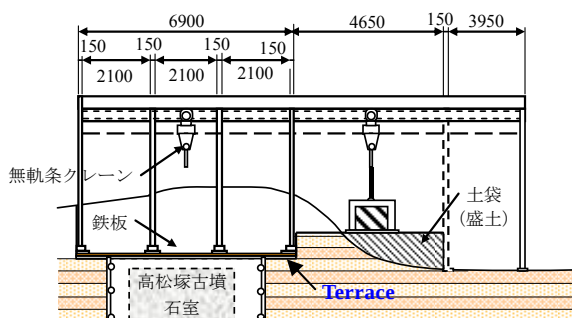


Fig. 8 Schematic Cross-section of Dismantling Site with Crane Foundations

下段発掘区は上段テラスから深さ 2.5m、幅 4m となる。土木開削工事であれば、切ばりを入れる、矢板を打つ、H 型鋼杭を打ち込んでせき板で土留めする、などの対策が必要と考えられる。高松塚古墳墳丘は史跡であり重要な文化財であることから、発掘調査前に破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。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した。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した。Fig. 7 の結果、および別途実施した簡易支持力測定器によるインパクト値といった各種試験による情報から、粘性土（完全 c 材、 $\phi=0$ ）のケース、砂質土（完全 ϕ 材、 $c=0$ ）といったいくつかのケースを想定し、

具体的には、Table 2 に示すように、得られた値をそのまま適用したケース、 c 、 ϕ の測定値のばらつきを考慮して標準偏差 1σ 分を下方に見積もった安全側の地盤定数を仮定したケースの合計 6 つのケースを設定した。ちなみに Fig. 5 に示す室内試験から得られる粘着力 c の値は 1σ 下方値にほぼ一致している。また、版築土の原位置 RI 湿潤密度測定結果に基づいて、対象地盤の単位体積重量を $\gamma=16.43\text{kN/m}^3$ と設定した。クレーンベース基礎地盤に作用する外力としては、クレーンフレーム鉄骨重量と最大石材重量を合わせた 4.5t 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 93cm 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、テルツアギの支持力算定式； $q_a = 1/3 \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c$ 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、それぞれのケースに対して許容支持力が得られる。Table 2 に検討結果を併せて示す。極端なケースとして比較のために実施した、版築マサ土を完全な ϕ 材料としたケース 5、6 では安全率が 1 を下回っているが、現場試験と室内試験に基づいて粘着力 c を設定したそれ以外のケースでは非常に大きな安全率を示しており、基本的には地盤を構成する土が健全な状態であれば、石室吊り上げ時のクレーン足場の支持力は十分であることがわかった。

Table 2 Parameters and Estimated Results of the Stability Analysis for the Crane Foundation

	Cohesion, c (kN/m^2)	Friction Angle, ϕ	Allowable Bearing Capacity	Judgement (Factor of Safety)	Notes
Case 1	200	0	408.0 kN/m^2	○ (9.3)	Needle Penetration Test
Case 2	115	0	234.6 kN/m^2	○ (5.4)	
Case 3	129.4	0	264.0 kN/m^2	○ (6.0)	Simplified Bearing Capacity Test (CASPOL)
Case 4	106.2	0	216.6 kN/m^2	○ (4.9)	
Case 5	0	32.8	40.1 kN/m^2	× (0.9)	
Case 6	0	29.6	23.1 kN/m^2	× (0.5)	

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(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、といった地

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	

Fig. 9 Adopted Earth Retaining Wall Structures for Excavation of Tumulus Mound and Dismantling of the Stone Chamber

盤変状を伴う不測の事態が懸念された。これらのいづ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土留め工を採用し、万全を期すこととなった。

5.2 壁面の土留め工とその安全性照査

既に述べたように、特別史跡である高松塚古墳墳丘には地盤改良やアンカー工など、地盤の改変を伴うような補強は適用できないため、クレーンベースとなる版築土に鋼版を敷き、発掘壁面は矢板によって保護し、壁面土圧に対してはI型鋼の腹起こしで矢板を押さえるとともにクレーン足場の敷鋼版に固定したL型の治具で補強するという方式が採用された。発掘壁面の「土留め」は三つの段階がある。第一段階は素掘り、

第二段階は木製矢板が、第三段階は軽量アルミ矢板が用いられた。各段階の発掘深度はテラス部から、160cm、190cm、250cmである。Fig. 9に各段階を模式的に示す。図中、①～⑫は石材取り出しの順序を示しており、それぞれの石材の取り出しに対応する壁面支保工の設置状況を示している。

石室の石材は特殊な治具に固定され、クレーンで吊上げ解体と移動がおこなわれた。石材の質量は最大3tと見積もられ、下側にある石との付着などにより吊上げ荷重は石材質量の1.5倍と想定された。荷重がクレーンベースに作用する場合、基礎の支持力を確保するために締固めやセメント混合による改良が実施されるが、特別史跡である高松塚古墳墳丘には手を加えられないという事情があり、今回は全く無処理の地盤状態での作業とならざるを得なかった。

Fig. 9に示したように、発掘調査に合わせて三段階の壁面崩落防止処置が実施されている。各段階では吊上げられる石材の重量が異なること、東西両側の壁石はクレーンフレームに対して偏心した状態であることを考慮して、矢板、腹起こし、逆L型治具による複合仮設支保工(Photo 5)を導入し、その断面力を算定した。ただし、矢板については、下端部も特別史跡ということで根入れすることができず、発掘底部に設置し、H型鋼を井桁状に組み上げた部材で押さえることによって発掘孔内部への変状を防止するという方法が採られた。

設計定数としては地盤材料を完全φ材と仮定し、粘着力を無視してTable 2の設定の中で最も安全側であるケース6を適用した。計算に際し、吊り上げ時にクレーンベースが担う荷重を上載荷重として主動土圧を矢板部材に、その分担合力を腹起こし材、および逆L型治具に荷重作用として負荷するという設定とした。Table 3に算定結果を示す。同表からも明らかのように、国宝壁面の描かれている天井石、側壁の吊り上げに際し、矢板の曲げ応力、腹起こしの曲げ応



Photo 5 Layout of Earth Retaining Walls

Table 3 Estimated Stability of Earth Retaining Wall Structure for Dismantling of the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus

Stones	Status of Earth Retaining Wall	Bending Stress of Sheet Piles	Bending Stress of Wales	Bending Stress of L type Reinforced H-steel
		Allowable (kN/m ²) Wooden: 8.50×10^3 Aluminum: 6.00×10^4	Allowable (kN/m ²) 1.63×10^5	Allowable (kN/m ²) 1.63×10^5
Ceiling 4	None	None	None	None
North Wall	Wooden Sheet Pile 1.6m & L type Reinforced H-steel 1.4m	7.52×10^3	6.04×10^4	1.18×10^5
Ceiling 3		8.24×10^3	6.71×10^4	1.32×10^5
West Wall 3		6.16×10^3	4.80×10^4	9.29×10^4
East Wall 3		6.49×10^3	5.10×10^4	9.90×10^4
Ceiling 2	Aluminum Sheet Pile 2.5m & L type Reinforced H-steel 1.4m and 2.0m	2.48×10^4	6.39×10^4	1.44×10^5
West Wall 2		2.31×10^4	5.92×10^4	1.32×10^5
East Wall 2		2.23×10^4	5.73×10^4	1.27×10^5
Ceiling 1		2.50×10^4	6.45×10^4	1.46×10^5
West Wall 1		2.38×10^4	6.12×10^4	1.38×10^5
East Wall 1		2.35×10^4	6.04×10^4	1.35×10^5
South Wall		2.13×10^4	5.42×10^4	1.20×10^5

力、L型補強鋼の曲げ応力のいずれもが許容応力以下と算定された。一連の検討結果から、地盤に打ち込まず根入れ効果が期待できない矢板式壁面支保工ではあるが、石室石材の吊り上げ、取り出し時における安定性が確認された。

6. おわりに

国宝高松塚古墳壁画がカビや細菌の繁殖とダニや虫類の侵入という生物被害と、墳丘の地震による傷み、石室の傾斜、石材の割れ、漆喰面の劣化や粉状化といった物理被害を受けて、現地で保存することが不可能になったため、石室を解体し、壁画を取り出して室温21℃、湿度55%の保存施設に保管し、修復を行うことになった。石室解体に先立って墳丘の発掘調査が実施されたが、別途、石室石材の吊り上げ、取り出しに際して必要となるクレーン基礎地盤の支持力特性と発掘壁面の安定性の検討が必要となった。このため、特別史跡の高松塚古墳墳丘部の地盤工学的な調査を併せて実施した。

まず、発掘調査により、高松塚古墳の墳丘は花崗岩、閃緑岩起源のマサ土から成る赤色版築層が墳丘外周部を覆い、墳丘内部の石室周囲は塩基性岩片を多く含む白色版築層が石室を土饅頭状に包むように築造されていることがわかった。この白色版築層からは、締固め時に搗棒に土が着かないようにムシロ

を敷いて叩いた痕跡や、その上から細い搗棒でさらに突き固めた痕跡が見つかっており、石室を守るためにより強固な版築層を構築しようとしたことがわかった。また床石設置面以深の版築層は、現場で石室石材を成形する際に発生する凝灰岩の削り粉をマサ土の間に挟むようにして層状に構築されていた。原位置における針貫入試験によって測定された換算一軸圧縮強さも外周赤色版築<石室周囲白色版築<床石設置面下層状版築の順に大きくなっており、石室の安定性と保護を重視した構造になっていることがわかった。また採取した外周赤色版築土に対して実施した排気排水一面せん断試験結果から求めた強度定数は、針貫入試験による換算一軸圧縮強さより若干小さめではあるが、ほぼ調和的な値を示し、一連の原位置、室内試験結果が妥当なものであることが確かめられた。

こうして求めた強度値を基に石室解体に伴う石材吊り上げ時における門型クレーンベースの支持力の検討を行ったところ、版築土が保持する強度は石材を吊り上げに対して十分な支持力を与えることが確認された。ただし、支持力算定にあたっては地盤の強度は版築が無傷で健全であるという前提にたっているが、実際には地震による亀裂や地割れが古墳内部を縦横に走っており、地盤全体としては不安定な状態にあると考えなければならない。一連の発掘調査と石室解体工事を安全に遂行するためには、門型

クレーン足場の安定性が不可欠であり、そのためには地盤の石室側への変位を許さないことが必須条件となる。こうした認識にたち、発掘調査の障害にならないという制約の下で壁面の変状を抑え込むというコンセプトで、板およびアルミ矢板、H 鋼腹起こし、逆 L 型 H 鋼補強鋼による複合仮設支保工を導入した。最も安全側の土圧分布を仮定して石室解体、吊り上げ時の各部材の断面力を算定したところ、部材に発生する応力はすべて許容値以下に収まっており、壁面の安定性が十分確保されていることが確認された。検討結果は発掘現場に反映され、ひび割れなど石材の不安定な箇所には事前に改修・補強が加えられた後、石室石材は大きなトラブルに見舞われることなく解体されて墳丘から取り出され、保存施設に搬入された。

謝 辞

本稿は、平成18年度に国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策としての石室解体、壁画の取り出しに伴って実施された発掘調査における地盤工学的調査に基づいて執筆されたものである。一連の発掘調査にあたり、文化庁、(独)国立文化財機構東京文化財研究所、同奈良文化財研究所の各位に、現地における便宜、貴重な助言など、筆舌に尽くせない協力を賜つ

た。記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 石崎武志・佐野千絵・三浦定俊(2004)：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.
- 奥田 悟・三村 衛・石崎武志(2006)：エアーパ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，第54巻，第4号，pp.10-12.
- 肥塚隆保・高妻洋成・降幡順子(2008)：石室解体と輸送，月刊文化財，532号，pp.22-37.
- 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(2006)：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.
- 松村恵司(2008)：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.
- 三浦定俊・石崎武志・赤松俊祐(2005)：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.
- 三村 衛・石崎武志(2006)：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

Geotechnical Characteristics of the Takamatsuzuka Tumulus

Mamoru MIMURA, Mitsugu YOSHIMURA* and Haruka KANADA**

* Soil and Rock Engineering Co, Japan

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The physical and mechanical properties of the Takamatsuzuka Tumulus mound were investigated through laboratory and in-situ tests. It is true the intact soil of the mound exhibits a high value of strength, but the structure of the Tumulus mound was found to be unstable due to existence of the earthquake induced cracks. In the case of evacuation of the chamber stones, sufficient support structures were constructed to maintain the stability of the excavated Tumulus walls and the bearing capacity of the base of the crane. Finally the evacuation project has successfully conducted without any problems.

Keywords: Takamatsuzuka Tumulus, site investigation, compacted earth (Hanchiku), laboratory test, bearing capacity