

高松塚古墳壁画の保存対策

6. 高松塚古墳墳丘の地盤特性と石室解体に対する安定性評価

三 村 衛 (みむら まもる)
京都大学 准教授

吉 村 貢 (よしむら みつぐ)
ソイルアンドロックエンジニアリング㈱ 技師長

6.1 はじめに

本章では、2004年度の発掘調査、および2006年度に実施された石室解体に先立つ発掘調査の過程で実施した、各種原位置試験と、石室を取り囲むように構築された古墳本体盛土（墳丘）から採取した試料に対する室内土質試験結果に基づいて、高松塚古墳墳丘土の力学特性について説明する。また、発掘の過程でわかった古墳に残された地震痕跡と思われる多数の亀裂と地割れの存在、古代の土木技術の痕跡や墳丘版築の密度構造についても紹介する。石室解体、石材の取り出しはまさに土木工事そのものである。しかしながら、取り出す石材には国宝壁画が描かれているため、壁画に影響を与えることなく石室を解体し、石材を取り出すという通常とは異なる重い制約が課せられることになる。こうした問題を解決するために実施した、石室石材の吊り上げに伴うクレーン基礎地盤の支持力評価検討プロセスも併せて説明する。

6.2 墳丘地盤の構造的な特徴と地震痕跡

高松塚古墳の墳丘は、土をまき出し、数 cm の厚みごとに一層ずつ杵で突き固めていく版築と呼ばれる方法を用いて丁寧に築造されている。山内¹⁾によれば、「版築（はんちく）の版は牆（しょう、垣を意味する語）、築は杵（きね、締固め用に用いるタンパー）であり、側方を丸太などで一定の間隔をおいて拘束し、中にいくらかの水を加えながら黄土を入れ、杵で突き固める盛土技術」と紹介されており、元々は古代中国で起こった土木技術であり、我が国の遺跡においても古墳や土塁、寺院や宮殿の基壇などに用いられている。

2006年10月から実施された、石室解体に向けた発掘調査において、高松塚古墳墳丘は墳丘内部の場所によって異なる材料を用いた複合構造で構築されていることがわかった。すなわち、墳丘外周部はマサ土を主体とした赤色および黄色の版築が覆い、その内側に石室を取り囲むような形状で形作られたやや白色の硬質の版築（口絵写真—37）、さらに石室床石設置面下にはマサ土の層間に石室の材料である凝灰角礫岩の削り粉を挟み込んだ積層構造の版築（口絵写真—38）が見いだされた。考古学上の分類では、外周版築を上位版築層、石室周囲の白い版築層と床石設置面下の積層版築層を合わせて下位版築層と呼称する²⁾。マサ土による上位版築層はほぼ 5 cm の仕上げ厚に、下位版築層の石室周囲白色版築はさらに

細かく 3 cm 程度の仕上げ層厚で締め固められており、丁寧に施工されたことがわかる。また、石室周囲の白色版築からは締固めに用いられたと思われるつき棒の痕跡と、むしろ目の痕跡が発見されている²⁾。後者は薄層にまき出して締め固めるにあたり、土がつき棒についてくるのを防止し、所定の構造を得るためにまき出し面に敷いて突き固めたか、つき棒先端をカバーするように装着してまき出し面を突き固めた作業痕跡であろうと予察される。また、床石設置面下の版築はマサ土と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積層した構造となっており、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ばかりの補助として使われた水縄を止める杭の打設痕跡が見いだされており²⁾、石室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。

発掘調査の過程で、墳丘内部に多くの亀裂や地割れの存在が明らかとなり、寒川による調査でこれらは地震によって生じたものであることが報告されている³⁾。ちなみに地震による古墳の崩壊事例^{4),5)}は少なくなく、明日香村に存在する古墳の中にも、カヅマヤマ古墳⁶⁾、真弓籬子塚古墳⁷⁾のように墳丘や石室の一部が崩壊してしまっているものもあり、高松塚古墳の墳丘に地震痕跡が残されていても不思議ではない。口絵写真—39に発掘によって見いだされた墳丘内部の地割れと亀裂の一例を示す。健全な版築層と亀裂部とは顕著な強度差があることが報告されている⁸⁾。また、墳丘頂部に立っていたモチノキの木根が墳丘内の地割れを選ぶように内部に入り込んでいたことが確認されており、亀裂や地割れが墳丘の弱部となっていると同時に、土中の虫類の移動経路や雨水の進入経路になり得ることが予察され、石室内部の壁画の維持にとっては負の要因となっていたと考えられる。

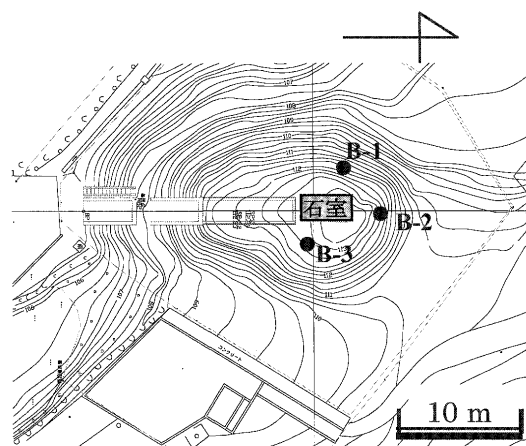
6.3 原位置試験とサンプリング

2004年度に実施された発掘調査に付随して、図—6.1に示す石室まわり 3 ヶ所（●で示す B-1, B-2, B-3）において、石室周囲の墳丘土および版築の不攪乱試料採取を実施した^{3),8)}。採取ポイントはいずれも石室への影響を配慮して石室の位置から水平方向に 2.5 m 離すこととした。通常のボーリングであれば、ボーリングマシンを地面に置き、場合によってはアンカー等で反力の増大を図ることもあるが、今回は版築や封土などの遺構面上へ

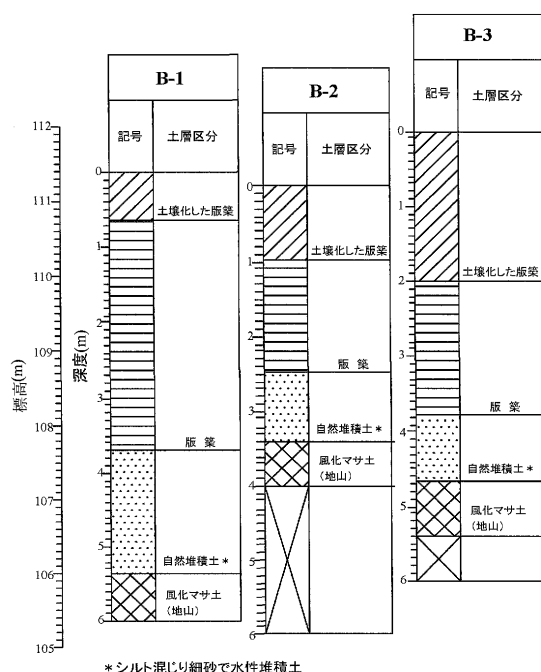
の重量機材の設置による遺構損傷の可能性と、ボーリングマシン動作時の振動が漆喰の剥落を誘起する可能性を勘案して、通常の土木工事におけるボーリングとは異なる方法⁹⁾を採用した。試料採取に際しては、外から試料が目視できるようにφ75 mmの透明アクリルサンプラーを用いた。ボーリング、サンプリングの詳細については文献⁹⁾を参照されたい。

6.3.1 試料採取とボーリングコア

図—6.1においてB-1, B-2, B-3で示す3ヶ所から採取した試料の目視観察によって作成した柱状図を図—6.2に示す。すべての孔で版築層の下位に存在する地山層（風化マサ土層）を確認している。上位版築層の3孔の試料（B-1, B-2, B-3と表示）、石室周囲、および床石設置面下の下位版築層の試料の基本的物性値を表—6.1に、粒度分布を図—6.3に示す。床石設置面下の積層版築は石室石材の削り粉を挟み込んで築造されていて、凝灰角礫岩の岩片が含まれるため、砂粒径の粒子が多く



図—6.1 高松塚古墳の平面図と試料採取、原位置試験実施箇所

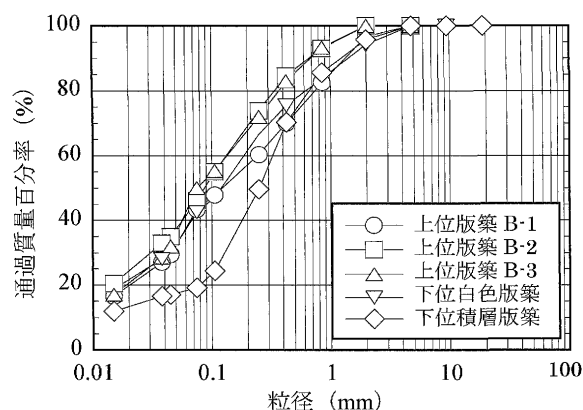


図—6.2 採取試料から作成した各孔の土質柱状図

なっているのが特徴的である。上位版築層、石室周囲の白色版築層については、土粒子密度の値や含水比、粒度分布は非常に似かよっており、74 μm以下の細粒分を約40%程度含んだ良配合の土で、締固めには適した材料であることがわかる。

表—6.1 墳丘版築土の土粒子密度と含水比

	ρ_s (g/cm ³)	w_n (w_{min} - w_{max}) %
上位版築 (B-1)	2.68	17.6 (16.1-18.6)
上位版築 (B-2)	2.71	22.8 (21.0-25.5)
上位版築 (B-3)	2.72	16.6 (15.3-18.6)
下位版築 (石室周囲)	2.74	19.5 (17.0-22.7)
下位版築 (床石下)	2.68	12.7 (12.3-12.9)



図—6.3 高松塚古墳墳丘版築土の粒度分布

各孔から採取した版築層のコア試料の一例を口絵写真—40に示す。同図に示した試料は、図—6.2において版築に分類された部分に相当するが、色調の違いが層状に現れており、数 cm 厚にまき出した土を締め固めたことによって生じる版築の縞模様が明確に判別できる。口絵写真—40には採取試料に対して RI コア密度スキャンニングを実施した結果を併せて示しているが、約 5 cm ごとに密度の山と谷を示す変化が深度方向に繰返し現れていることがわかる。これは、まき出した土を締め固めている際に、締め固めエネルギーが締め固め面では大きく作用してその面では強く締め固まるのに対し、深さ方向には急激に逸散するために、まき出した土の下端面では作用エネルギーが小さくなってあまり締め固まらないためである。三村ら¹⁰⁾は高松塚古墳外周版築に用いられているマサ土と同等の材料を用いて、室内アクリル土層内に仕上げ層厚 6 cm の版築を人工的に作成し、同じく RI コア密度測定装置にかけて密度変化を測定した。その結果、高松塚古墳から採取した試料と同様、締め固め面では密度が高く、まき出した土の下端面では密度が小さくなることを確認している。このように、1300年以上前に構築された古墳墳丘版築の密度構造が、完全ではないにせよ現在まで保持されていることが確認され、古墳墳丘版築構造の一端が明らかとなった。

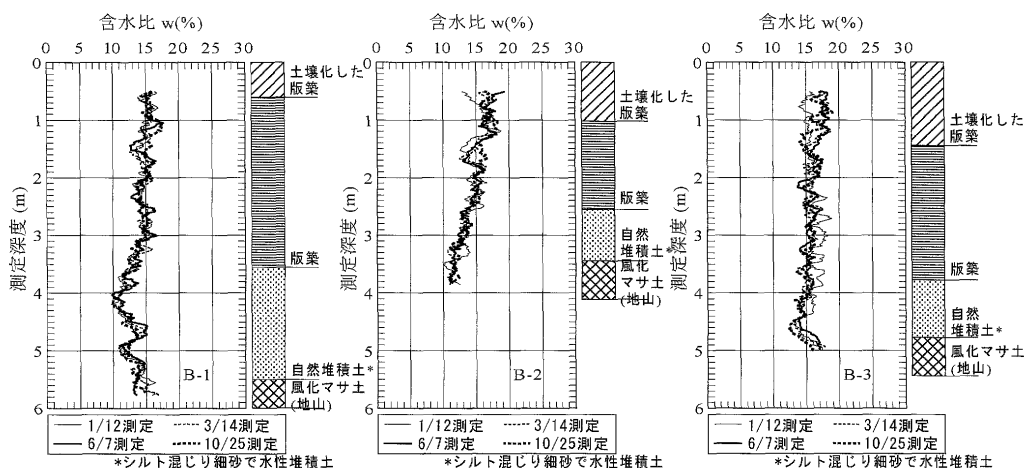
講座

6.3.2 ボーリング孔内 RI 含水比検層と PS 検層

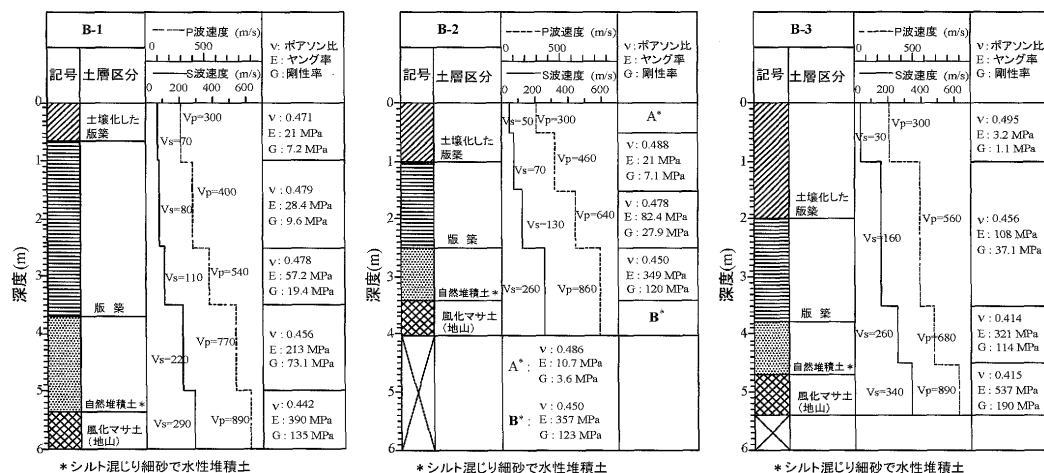
石室の東，北，西側の3ヶ所で試料採取を実施したが，その孔を用いて墳丘の含水比と湿潤密度を継続的にモニタリングすることとなった^{3),8)}。試料採取点 B-1, B-2, B-3 (図—6.1において●で示した3点)に外径114 mmの塩化ビニル管 (VP-100)を設置し，同孔を利用して吊り下げ式の RI 水分計，同密度計による墳丘の原位置含水比，および湿潤密度の検層を実施した。高松塚古墳のある地点の地下水位は低く，塩化ビニル管の内部には孔内水位は認められない。したがって，検層プローブは全工程にわたって非水浸状態で測定が行われた。一例として，図—6.4に各ボーリング孔の含水比の深度方向分布を示す。計測はボーリングと試料採取が終わり，塩化ビニル管を立て込んだ直後 (2005年1月12日)，2004年度の発掘調査終了に間際の墳丘の埋戻時 (2005年3月14日)，入梅直前 (2005年6月7日)，夏を過ぎて石室内部の温度が最も上昇する時期 (2005年10月25日) に実施された。各孔ともに墳丘浅部で含水比が相対的に高く，深くなるにしたがってその値が漸減する傾向を示している。いずれの孔も含水比10～20%の範囲に収まっており，平均的な含水比は15%前後である。墳丘の含水比は，気温の低い冬期から梅雨期，高温となる

夏期を経てもほとんど変化しておらず，墳丘内部は外部環境に影響されることなく，ほぼ一定の状態を保っていることがわかる。

RI 原位置含水比，湿潤密度検層を実施したボーリング孔を利用して PS 速度検層を実施し，墳丘内を伝播する弾性波 (P 波，S 波) 速度の深度方向分布を測定し，RI 湿潤密度検層で測定した密度値を用いて墳丘の剛性率とポアソン比を求めた^{3),8)}。P 波速度，および S 波速度の深度分布と地盤剛性の結果を図—6.5に示す。高松塚古墳の周囲の地下水位は風化マサ土の地山内部にあり，少なくとも今回実施したサンプリング後に設置したボーリング孔内はドライな状態である。したがって，墳丘全体は地下水位以上であり，不飽和状態となっている。このため，図—6.5に示した P 波速度の値は不飽和の影響で非常に小さくなっている。一方，S 波速度についても，3孔ともに風化花崗岩の基盤でかろうじて 200 m/s 以上を記録するが，古墳墳丘本体部では土壌化していない健全な版築部であっても 70～160 m/s とかなり低い値を示す。この低い S 波速度は高松塚古墳墳丘版築土の強度 (後述) に調和しない低い値となっており，6.2で示した墳丘内部の地震由来と思われる亀裂と地割れの影響によるものと予察される。



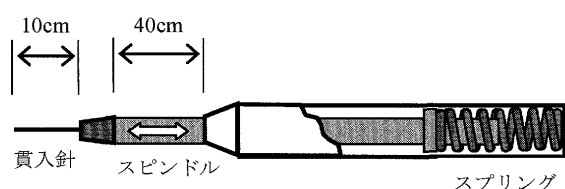
図—6.4 ボーリング孔内 RI 水分検層による墳丘内部の含水比分布



図—6.5 高松塚古墳墳丘部ボーリング孔において実施した PS 速度検層結果

6.3.3 墳丘版築の原位置せん断強さの測定

通常の考古学の調査では、特に地盤の強度を求めるといふ必要がないため、高松塚古墳のような特別史跡の地盤強度を測定したという事例はほとんどない。ところが、国宝壁画恒久保存対策として、石室を解体し、国宝壁画を取り出すことになったため、地盤の安定性や支持力といった工学的問題への対応が求められることとなった。こうした問題に対応するためには、まず対象となる墳丘地盤の強度特性を把握しなければならない。しかしながら、特別史跡など重要な文化財については、掘削や削孔といった形状の改変を伴うような人工的働きかけは禁じられており、発掘調査に必要な部分以外を破壊するような方法は適用できない。そこで限りなく非破壊に近く、かつ実績のある試験法という観点から、針貫入試験を採用した。針貫入試験機は元々軟岩硬度計¹¹⁾というトンネル切羽の強度を現場で測定するために考案されたものであり、試験機がポータブルで、重機などを使用せずに人力で先端針を対象地盤に押し込むだけで原位置強度を測定できるという特長を有している。図—6.6に針貫入試験機の模式図を示す。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、固結力を有する材料に適用できる。こうして求められた P を用いて、1) 針貫入量 L が 10 mm 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/m²) 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^{3), 8)}。



図—6.6 針貫入試験機の構造に関する模式図

石室石材取り出しに使用するクレーンのフレームが設置される上位版築面の換算一軸圧縮強さ q_u の分布を口絵写真—41—(a)に示す。口絵写真—41は上が北側であり、南に保存施設の一部である前室がある。発掘は古墳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。口絵写真—41(a)より、クレーン基礎地盤面の平均的な換算一軸圧縮強さは 200~400 kN/m² ($c=100\sim200$ kN/m²) となっている。強度定数の絶対値という観点からは、締固めマサ土としては比較的大きなものであり、硬質に構築されているといえることができる。同図において中央部に円形で示した領域は石室周りの白色下位版築層が現れている部分で、細かく見れば、クレーン基礎地盤面の外側に比べて、白色下位版築層近傍になる内側ほど強度が高く

なる傾向が見られる。次に、口絵写真—41(b)に示すように、石室天井から 10 cm の地点における石室を覆うように築造された白色下位版築層の換算一軸圧縮強さ q_u 分布は 300~600 kN/m² で、上位版築層に比べて高い値を示している。硬質で高い強度を有するように構築することによって、石室を保護するという目的で丁寧に築造されたものではないかと考えられる。床石設置面下の下位版築層における換算一軸圧縮強さ q_u 分布は、口絵写真—41(c)に示すように 600~1 000 kN/m² となっているが、部分的には 1 000 kN/m² を超えるところも散見され、他の版築層に比べてかなり高い強度を有している。この層の特徴はマサ土の間に石室石材を削った粉をまき出して挟み込み、その上にマサ土を締固めてサンドイッチ状に構築されていることにある（口絵写真—38参照）。石室基盤の安定化を重視した強固な作りになっていると思われるが、石材粉を挟み込んだことが強度増加にどのように寄与しているのかどうかについてはわかっていない。

国宝壁画を古墳から取り出した後に、現地保存のために石室南側墓道部に建設した空調施設を撤去した際に、一時的に墳丘の断面が大きく露出する機会があった。口絵写真—41に示した発掘に伴う針貫入試験結果は、各版築層において平面的に実施したものであるが、石室南側墓道部東壁では上位版築層、石室周囲の白色版築、および床石設置面下の積層版築という下位版築層が鉛直壁面に一面として現れており、それぞれの版築層の強度を同時に測定できるという希有な機会であった。

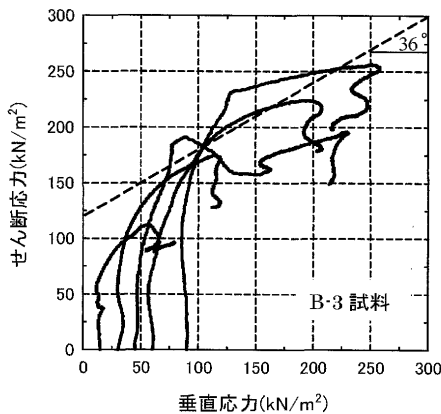
石室南側墓道部東壁における針貫入試験結果に基づく換算一軸圧縮強さの分布を口絵写真—42に示す。同写真中には版築構造の境界面を併せて示してある。口絵写真—42の結果より、版築構造の違いは強度特性に大きく寄与していることがわかる。具体的には、上位版築層ではほぼ 200~400 kN/m² 程度の q_u 値が支配的であり、白色下位版築層になると 400~800 kN/m² 程度の q_u 値が支配的となり、石室設置面下の積層下位版築層では 1 000 kN/m² に達するような硬さへと変化している。一連の試験結果は口絵写真—41に示した個々の版築層の q_u 値のレベルとおおむね調和的であり、高松塚古墳の墳丘が、石室を設置する面を構成する非常に堅固な積層下位版築層と、石室周囲を保護するような形で形成されている硬質な白色下位版築層、それを取り巻く上位版築層という異なる構造を有した版築層によって構成されていることを、強度特性からも確認することができる。

6.4 採取試料に対する室内力学試験¹⁰⁾

6.3.1 で示した採取試料を用いて墳丘版築土のせん断強さを評価することを試みた。墳丘版築土は砂質分が卓越する材料であり、上下端面の仕上げ時に試料がブロック状にはずれてしまったり、潜在亀裂によって割れてしまうなど、直径 50 mm、高さ 100 mm の一軸、三軸圧縮試験用供試体として成形するのは至難であった。試料が限られていることもあり、小型で、カッターリングで拘

束しながら供試体化でき、その状態で上下端面を成形できるという利点を活かして、直径60 mm、高さ20 mmの供試体を用いた排気排水一面せん断試験を実施することとした。高松塚古墳は基盤から墳頂部までせいぜい6 m程度の小さな盛土であり、低拘束圧下での挙動が問題となる。また、本試験の目的が、原位置試験によって求められる力学定数のチェックと、石室解体時に石材吊り上げ用の門型クレーンの基礎を上位版築層上に築造されるテラス型小段に設置する際の墳丘の支持力を評価するための力学定数を求めることであるので、上載圧力を15 kN/m²～90 kN/m²間で設定し、低拘束圧下における力学特性を把握することとした。

上位版築土に対する排水排気一面せん断試験における応力経路をB-3試料を例として図—6.7に示す。他の孔(B-2, B-1)から採取した試料に対する試験結果と合わせて、上位版築層の強度定数として $c=100\sim120$ kN/m², $\phi=35\sim36^\circ$ が得られた¹⁰⁾。一連の室内一面せん断試験に基づく c の値は、6.3.3で示した外周版築土の針貫入試験結果から得られる値と調和的であり、発掘時、石室解体・石材取り出し時の墳丘地盤の安定性を評価する際の入力値として適用しうる信頼性を有しているものと考えられる。



図—6.7 上位版築土の一面せん断試験結果の一例と強度定数

6.5 石室解体、石材吊り上げ時のクレーン基礎地盤の安定性評価¹²⁾

国宝高松塚古墳壁画の恒久保存対策として、かびの広がりを抑え、傷みを受けた壁画の修復を効果的に行うために、石室を解体し、壁画を古墳から取り出して仮保存施設に保管することになった。このためには、墳丘を大きく掘削し、石室解体と石材の吊り上げのための作業空間を確保することと、石材取り出しにあたって使用するクレーン基礎地盤の支持力とむき出しになる墳丘壁面の安定性を確保しなければならない。これはまさに土圧、支持力問題であり、前節までで述べた一連の土質試験結果は、高松塚古墳の墳丘構造に関する考古学的知見を得ると同時に、石室解体、石材取り出し時における、土圧、支持力問題を解くためのインプット情報として重要な意味を持つものである。

6.5.1 石室石材の強度特性

石室解体と石材の取り出しにあたり、まず、石材自体の強度特性を把握しておく必要がある。そこで、高松塚古墳石室に使用されているのと同種の凝灰角礫岩を用いて物理特性と力学特性を得るために試験を実施した。詳細は文献¹²⁾,¹³⁾を参照されたい。凝灰角礫岩の基本的な物性値を表—6.2に示す。

11×9×5 cmの凝灰角礫岩石材の直方体テストピースに対し、6.3.3で使用した針貫入試験を実施し、石材全体の強度分布を把握した¹²⁾,¹³⁾。凝灰角礫岩は個々の結晶が大きく、異なる結晶間の強度のばらつきが大きい材料であり、黒く見える礫の部分の強度値が高く(20 MN/m²前後)、白い斑晶部は比較的低い値(5 MN/m²前後)を示す。岩石としての強度という点では、点状する黒い礫部ではなく基質となっている白色系の低い貫入値を重要視すべきであろうと考えられる。調査の段階において石室内部で実測された針貫入試験結果¹⁴⁾によれば、平均値として天井石が5.6 MN/m²、石室南壁が7.0 MN/m²、同東壁が7.5 MN/m²となっており、本実験で得られた白い斑晶部の値とはほぼ同等の値となっている。

次に、岩石自体の強度を調べるために、一軸圧縮試験、割裂試験および超音波伝播速度測定を実施した。通常は直径5 cm、高さ10 cmの供試体を用いることになっているが、試料自体の量が十分に確保できないため、一軸圧縮試験については直径2.99 cm、高さ6 cm、割裂試験については直径2.99 cm、高さ3 cmの供試体を用いた。本試験では、せん断箇所の局所的なひずみを正確に測定するため、岩石側面にひずみゲージを貼り、キャップと上下端面の接触誤差(bedding error)の影響を排除した。一連の試験によって得られた凝灰角礫岩の基本的な力学特性値を表—6.3に示す。供試体の圧縮強さは6.39 MN/m²となり、針貫入試験から得られる白色斑晶部分の値と同程度となっていることが興味深い。一方、引張り強度は1.06 MN/m²となった。

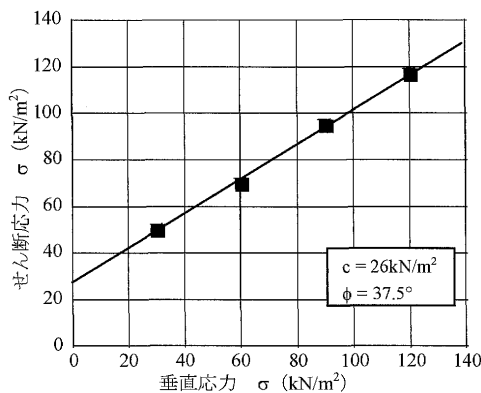
表—6.2 凝灰角礫岩の物理特性値

自然状態の密度 σ_t (g/cm ³)	1.303
表乾状態の密度 σ_{sat} (g/cm ³)	1.595
絶乾状態の密度 σ_d (g/cm ³)	1.274
含水比 (%)	2.315
吸水率 (%)	25.2
有効間隙率 (%)	32.1
飽和度 (%)	9.2

表—6.3 凝灰角礫岩の力学特性値

一軸圧縮強さ	6.39MN/m ²
変形係数 E_{50}	1.46E+03MN/m ²
静ポアソン比 ν_s	0.279
圧裂引張強さ	1.06MN/m ²
P波速度	1.99 km/s
S波速度	0.90 km/s
動弾性係数 E_d	2.90E+03MN/m ²
動ポアソン比 ν_d	0.373

高松塚古墳石室の天井石のうち、石室内部からの目視観察によって少なくとも南側2石には南北方向に明瞭な亀裂があり、石室石材の吊り上げ時に水平面内と鉛直面内のすべり、ならびに鉛直面内における回転による破壊の可能性があるため、亀裂面のせん断抵抗特性を把握しておく必要がある。そこでまず、凝灰角礫岩を直径5 cm、高さ2 cmの円盤状供試体に成形して、これらを2枚重ねた試験体を作成した。この2枚重ねの試験体に所定の垂直応力を作用させ、その状態で2枚の供試体の接触面をせん断面とする一面せん断試験を実施した^{12),13)}。鉛直応力に対するせん断強さの増加傾向を図—6.8に示す。一連の一面せん断試験によるせん断強さ～垂直応力関係は直線関係を示しており、凝灰角礫岩の亀裂面の強度として、粘着力 $c=26\text{ kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi=37.5^\circ$ が得られた。



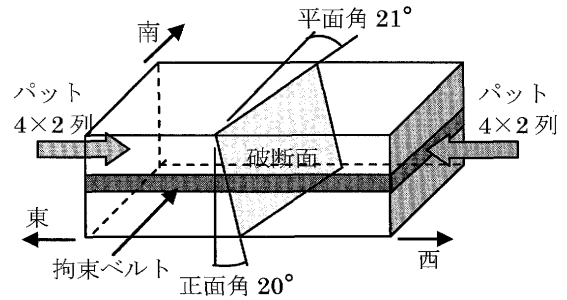
図—6.8 凝灰角礫岩亀裂面の強度特性

6.5.2 石材の力学的安定性評価

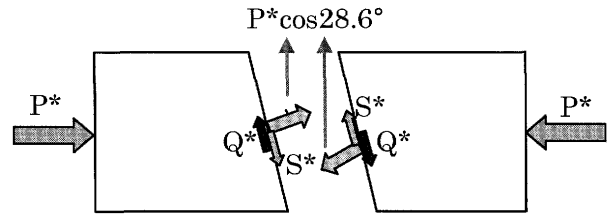
高松塚古墳石室天井石に大きな亀裂が存在していることに留意し、治具ではさみつけてクレーンで石材を吊り上げる際に、亀裂に沿った滑動や回転による破壊に対する安定性について検討した。6.5.1で述べたように、天井石4石のうち、少なくとも南側2石には亀裂が存在していることがわかっているが、本稿ではより明瞭な亀裂を有する南側から2つ目の天井石2を最も危険性の高い石材と考えて検討対象とした。

事前の観察結果に基づき、図—6.9に示すように、石材には長軸直角方向に対して平面角 21° 、鉛直断面には正面角 20° の亀裂が入っているとモデル化した。検討にあたり、治具に着いているウレタンパッド(4×2列)を想定し、パッド一つあたりの押しつけ力を 3.67 kN とした¹⁴⁾。

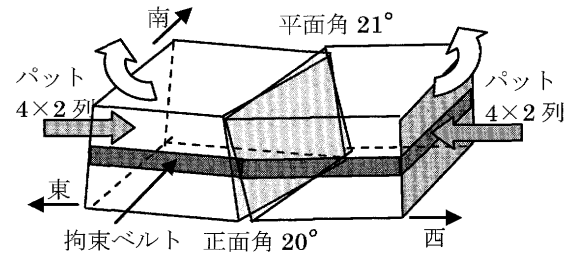
まず、天井石の亀裂に沿った水平面内すべり破壊の可能性について検討する。石材には図—6.10に示すような応力が作用する。パッドを介して石材の両端面に作用する圧縮力を P^* 、亀裂面に沿って石材を水平面で滑らそうとする起動力を S^* 、石材間の摩擦に起因してそれに抵抗しようとする滑り抵抗力を Q^* とする。亀裂の平面角と正面角を合わせた傾斜角 θ は、 $\theta = \cos^{-1}(\cos 20^\circ \times \cos 21^\circ) = 28.6^\circ$ となるので、 S^* 、 Q^* は次式で算定される。



図—6.9 石室天井石の亀裂が安定性に及ぼす簡易検討のためのモデルと諸条件



図—6.10 天井石亀裂に沿った水平面内すべり検討時の応力状態



図—6.11 室天井石吊り上げ時に鉛直面内における破壊検討のためのモデルと諸条件

$$S^* = P^* \times \sin 28.6^\circ = 0.478 P^* \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$Q^* = P^* \times \cos 28.6^\circ \times \tan 37.5^\circ = 0.662 P^* \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

(6.1), (6.2)より、滑り安全率 $F_s = Q^*/S^* = 0.662 P^* / 0.478 P^* = 1.385 > 1$ となり、亀裂面内における水平方向の滑りによる破壊は生じないことがわかる。

次に、鉛直面内における滑りと回転による破壊に対する安全性について検討する。図—6.11に検討する鉛直亀裂面における石材の破壊モードを示す。ここで、平面角については鉛直面内の回転に大きく寄与しないとして考慮せず、正面角 20° で石材中央に亀裂が存在するとするモデル化を行い、治具によるはさみつけはすべりの安定検討と同様、圧縮力を石材東西方向(長軸方向)に作用させることによって外力とした。図—6.12に計算に用いたモデルを示す。荷重作用点の位置は、1) パッドの作用中心は石材上端から42 cm(下端から20 cm)¹⁴⁾、2) 石材の自重は二つのブロックのそれぞれ重心、3) 破断面の反力を R 、その作用位置を回転の中心Aから h (cm)、破断面において発揮される摩擦力を $f (= \mu' R)$ とする。ここで μ' は破断面において発揮される動摩擦係数である。自重 $W_1 = 8.161\text{ kN}$ 、 $W_2 = 6.383\text{ kN}$ 、パッド押し付け力 $P_1 = P_2 = 29.322\text{ kN}$ ¹⁴⁾とする。回転は時計回りを正とし、水平、鉛直方向の力の釣合いと、回転中心としたA点におけるモーメントの釣合いを考えると以

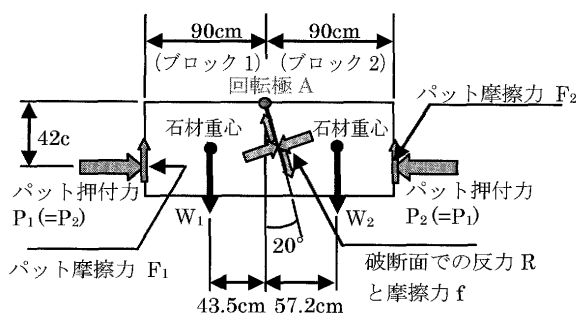


図-6.12 天井石の鉛直面内における滑動と回転による折れ曲がり型破壊検討のためのモデルと力の釣合い

下の五つの式が成り立つことがわかる。

$$P_1 - R \cos \theta - \mu' R \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

$$F_1 - W_1 - R \sin \theta + \mu' R \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

$$F_2 - W_2 + R \sin \theta - \mu' R \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

$$42 P_1 + 43.5 W_1 - 90 F_1 - hR = 0 \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

$$-42 P_2 - 57.2 W_2 + 90 F_2 + hR = 0 \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

$F_1 = P_2 = 29.322 \text{ kN}$, $W_1 = 8.161 \text{ kN}$, $W_2 = 6.383 \text{ kN}$, $\theta = 20^\circ$ は既知であるので、上記連立 5 元方程式を解いて、変数となっている R , μ , F_1 , F_2 , h を求めればよい。若干の演算の後、 $R = 27.447 \text{ kN}$, $\mu' = 0.375$, $h = 32.0 \text{ cm}$ が得られる。ここで、石材間の反力 R の作用位置が $h = 32.0 \text{ cm} < 62 / \cos 20^\circ = 66 \text{ cm}$ となって石材内部に存在すること、発揮される動摩擦係数 $\mu' = 0.375 \doteq \tan 20.6^\circ$ となり、一面せん断試験によって与えられた石材間のせん断抵抗角 37.5° よりも小さい値となることがわかる。一連の検討から、亀裂によって二つに分離している石材は、鉛直方向の力の釣合いと、モーメントの釣合いをすべて満足しており、鉛直面内での石材の亀裂面でのすべり、および回転モードの破壊は生じないことが確認される。一方、吊り上げた石材がパッドで十分支持されるかどうかについては、以下のように検証される。まず、石材の両端での発揮される動摩擦係数をそれぞれ $\mu_1 = F_1 / P = 7.873 / 29.322 \doteq 0.27$, $\mu_2 = F_2 / P = 6.671 / 29.322 \doteq 0.23$ と算定することができる。肥塚¹⁴⁾による実物大模型実験における実測に基づき、石材とウレタンパッドの間の摩擦係数が 0.8 であることが示されているが、 μ_1 , μ_2 ともにこの値を大きく下回っており、石材吊り上げ時に石材とウレタンパッドの間ですべりが生じることはない。つまり、石材はウレタンパッドを介して両端から押さえつけることによって石室石材を安定した状態で吊り上げられることがわかる。

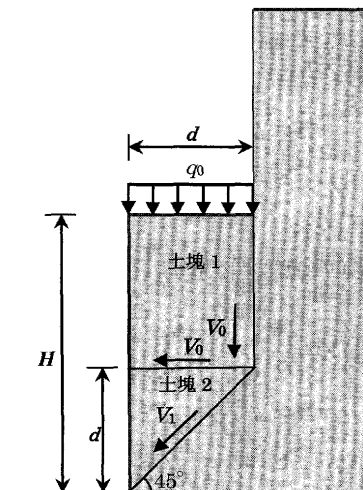
以上の検討により、高松塚古墳石室の天井石は解体に際し、東西方向から治具のパッドを介して所定の力で押さえつけても、水平面内での滑動、鉛直面内での滑動、回転による破壊のいずれもが生じないことが確認されたことになり、計画どおりに治具で挟みつけて加圧しながら吊り上げることが可能であることがわかった。

6.5.3 クレーン基礎地盤としての墳丘の支持力評価

石室石材の吊り上げ，取り出しは，石室が設置されている下段発掘区とその上部の上段発掘区の境界の上位版

築層に構築された幅93 cm のテラスと呼ばれる小段に設置される門型クレーンによって行われる。墳丘版築層は締固められた中間土としては十分大きなせん断強さを有しているが、クレーン本体と鋼製クレーンフレーム、さらには吊り上げる石材の重量が載荷荷重として作用することになるので、その支持力については十分な安全性を担保しておかなければならない。クレーンフレームが設置される墳丘内小段には厚さ2 cm の鉄板を敷設し、載荷の局所性と集中を緩和するようにした。クレーンフレーム基礎地盤の支持力安定検討にあたり、基礎地盤となる版築層の湿潤単位体積重量 γ_t は、表面透過型 RI 密度水分計による壁面の測定湿潤密度の平均値をそのまま適用して $\gamma_t = 16.43 \text{ kN/m}^3$ を用いた。石材吊り上げ時にクレーンフレーム基礎地盤に載荷される外力は、クレーン本体と鋼製クレーンフレームの重量に石材の重量を加えたものであり、実際にはこれらが複数のクレーン支柱によって分担支持されることになる。クレーン基礎地盤の支持力を検討するにあたり、石材重量として最大重量を有する天井石2の値を採用し、この石材重量とクレーン本体、および鋼製クレーンフレームを合わせた総重量が1本のクレーンフレーム基礎に載荷するという条件を設定した。その結果、クレーンフレーム基礎地盤に作用する載荷応力は $q_{\max} \doteq 44 \text{ kN/m}^2$ となる。採用した仮定は、墳丘基礎地盤に対して最も厳しい載荷モードとなり、検討結果は安全側の支持力を与えることになる。

高松塚古墳石室吊り上げ時のクレーンフレーム基礎の支持力を、図—6.13に示すような土塊が滑り落ちるモードの破壊を想定し、上界法¹⁵⁾によって検討する。発掘調査による掘削空間面底部から側壁内部に向かって45°の破壊線を仮定し、図中に土塊1、土塊2で示した土塊が滑動するという滑動モードを想定する。土塊1、2の外側の領域は静止剛体領域とする。土塊1は鉛直下向きに速度 V_0 で、土塊2は45°方向に速度 $V_1 (= \sqrt{2} V_0)$ で剛体的に滑動するものとし、それぞれの土塊の境界線上で内部消散が生じるものとする。クレーンフ



図—6.13 上界法によるクレーン基礎設置地盤の安定性評価に用いた破壊機構

レーン基礎が設置される墳丘小段に作用する分布応力を q_0 とし、小段の幅を d 、小段から掘削空間の底までの高さを H とする。単位奥行きあたりの外部塑性仕事率 $\dot{W}_{\text{ext}}$ は自重と分布応力 q_0 の寄与から次式のように表現される。

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{ext}} &= \left[q_0 \cdot d + \gamma_t \cdot \left\{ (H-d) \cdot d + \frac{1}{2} d^2 \right\} \right] \cdot V_0 \\ &= \left\{ q_0 + \gamma_t \cdot \left(H - \frac{1}{2} d \right) \right\} \cdot d \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (6.8)\end{aligned}$$

一方、内部消散率 $\dot{W}_{\text{int}}$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{int}} &= (H-d) \cdot c \cdot V_0 + d \cdot c \cdot V_0 + \sqrt{2} \cdot d \cdot c \cdot V_1 \\ &= H \cdot c \cdot V_0 + 2d \cdot c \cdot V_0 = (H+2d) \cdot c \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (6.9)\end{aligned}$$

上界法では、外部塑性仕事率と内部消散率を等値して得られる境界力は破壊荷重を上回ることではない。式(6.8) = 式(6.9)より、

$$\left\{ q_0 + \gamma_t \cdot \left(H - \frac{1}{2} d \right) \right\} \cdot d \cdot V_0 = (H+2d) \cdot c \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

となり、この式を満足する境界応力 q_0 は墳丘地盤が支えうる最大の応力となる。ここで、版築土の湿潤密度は $\gamma_t = 16.43 \text{ kN/m}^3$ 、 $H = 2.7 \text{ m}$ 、 $d = 0.93 \text{ m}$ であり、版築土を完全 c 材料として 6.3 に示す粘着力の最小値 $c = 100 \text{ kN/m}^2$ のみを与え、せん断抵抗角の寄与はないもの ($\phi = 0$) として、安全側の値を算定する。諸値を代入すると $q_0 = 453.6 \text{ kN/m}^2$ が得られる。この値は上界値であり、破壊応力はこの値を上回らないことになる。しかしながら、想定している破壊メカニズムは現実的であり、実際の崩壊挙動と大きく異なることはないと考えられる。一方、墳丘小段に作用するクレーン自重 + 石材による応力は $q_{\text{max}} \doteq 44 \text{ kN/m}^2$ であるので、墳丘小段崩壊に対する安全率は、 $F_s = q_0 / q_{\text{max}} = 453.6 / 44 = 10.3$ となり、十分な安定性が確保されていることがわかる。

以上のように、安定計算の結果は十分な安全率を与えるが、墳丘内部を縦横に走る地割れと亀裂の存在を勘案し、石材取り出し時における壁面の変状を完全に抑え込むために、矢板と H 鋼による補強を行った(建石ら¹⁶⁾の口絵写真—31, 文献12) 参照)。16枚の石室石材は無事取り出され、現在、仮保存施設において国宝壁画の修復が行われている。

6.6 おわりに

国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策として、石室を解体し、国宝壁画を墳丘外部に取り出して修復することにな

った。本章では、それに先だって実施された、発掘調査の過程で採取した試料に対する室内試験、および原位置試験によって明らかとなった古墳墳丘の地盤特性を示し、得られた力学定数に基づいて、石室解体と石材の取り出し時のクレーン基礎地盤としての墳丘地山の支持力検討結果を紹介した。昨今は歴史的地盤構造物の保全とそれらを核として公園整備がなされるケースも多く、歴史的地盤構造物の文化的な価値を大切にするという機運が高まっている。この分野において地盤工学の果たす役割は今後ますます増大するものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 山内豊聰：遺跡の技術と保存、土と基礎、Vol. 40, No. 1, pp. 1~6, 1992.
- 2) 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.
- 3) 縄文化財研究所 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—、2006.
- 4) 寒川 旭：地震考古学、中公新書、1992.
- 5) 寒川 旭：古墳に刻まれた地震の痕跡、檀原考古学研究所論集、Vol. 14, pp. 623~645, 2003.
- 6) 明日香村教育委員会：カヅマヤマ古墳発掘調査報告書、一飛鳥の磚積石室墳の調査—、2007.
- 7) 明日香村教育委員会：真弓鍾子塚古墳発掘調査報告書—飛鳥の穹窿状横穴式石室墳の調査—、2010.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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及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.
- 11) 土木学会：軟岩の調査・試験の指針(案)—1991年版—、1992.
- 12) 三村 衛・吉村 貢：高松塚古墳石室解体に伴う石室石材および墳丘版築地盤の安定性評価に関する研究、土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 3, pp. 597~608, 2009.
- 13) 三村 衛：石材の強度に関する実験による検討、保存科学における諸問題—キトラ・高松塚古墳壁画の保存科学と修理—、pp. 53~54, 2005.
- 14) 肥塚隆保：石室解体に向けた実験、月刊文化財、461号、pp. 10~11, 2007.
- 15) 柴田 徹・関口秀雄：地盤の支持力、鹿島出版会、1995.
- 16) 建石 徹・渡辺丈彦・宇田川滋正：高松塚古墳の概要および保存・管理の経緯と現状、地盤工学会誌、Vol. 58, No. 4, pp. 54~61, 2010.

(原稿受理 2010.1.12)