

高松塚古墳の墳丘は、土を撒き出し、数センチの厚みごとに一層ずつ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。近年の壁画の傷みを受けて、古墳壁画の緊急および恒久保存対策のために実施された発掘調査に付随して、石室周辺の墳丘土および版築の不攪乱試料採取を実施し、室内土質試験による墳丘土の力学特性の把握、および原位置試験による墳丘土の地盤工学的評価を行った。

1. 試料採取

緊急保存対策の一つとして、雨水の浸透を防ぐ目的で行われた遮水シート設置のために、墳丘一面に繁茂する竹を伐採した。したがって試料採取時点では、墳丘上は植生の全くない状態になっていた。不攪乱試料の採取は図-1 に示す石室まわりの3ヶ所で実施した。通常のボーリングであれば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、以下に示すような非常に特殊な方法で作業を進めた。

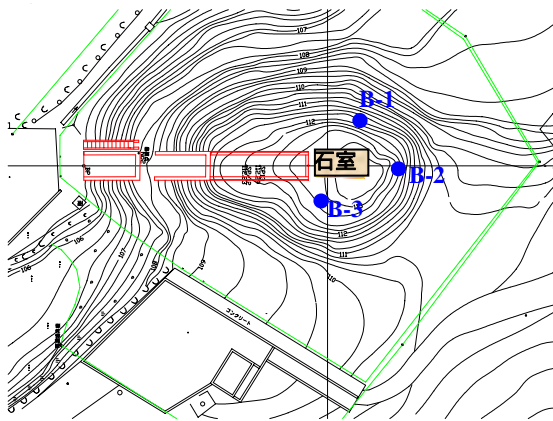


図-1 高松塚古墳の平面図と試料採取、含水比検層の位置



写真-1 試料採取に向けた足場の設営状況（墳丘と石室への影響を避けるために古墳全体を覆う仮覆屋基礎から組み上げている）

古墳保護のために建設された鋼製単管パイプ組の屋根付きの仮覆屋を反力として、鋼製単管を仮覆屋基礎支柱から組み上げ、試料採取位置に一般土木資材として用いられる 35mm×250mm×3000mm の鋼製足場板を片持梁型に構築し、試料採取用のボーリングマシンをその足場上に設置した。つまり、ボーリング作業時に必要とするすべての反力を、仮覆屋の大屋根を支える支柱から得る構造とし、墳丘地山とは全く接しないようにした（写真-1）。このようにして、サンプリング時の重機による墳丘への直接的なダメージを防止する措置を講じた。

試料採取にあたり、版築が土質分類上、細粒分混じりの砂質土であることから、三重管式サンプラーを使用し、外管によって掘削しながら内管に試料を収める方法を採用した。また、掘削時のマシンの振動による漆喰の剥落を防止するため、通常用いられるディーゼルエンジン型ではなく、より振動の少ない電気モーター式のマシンを使用した。さらに、墳丘内部の水みちを通して石室に影響するのを防ぐため掘削時に泥水を使用せず、代替としてエアコンプレッサーによる圧縮空気を用いた。サンプラーは掘削口径がφ105mmの三重管タイプのものを使用し、試料を採取する内管にはφ65mmの塩化ビニル管およびφ75mmの透明アクリル管を用いた。

採取試料の物理特性

図-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-2 に示す。すべての孔で版築層の下位に存在する地山層（風化花崗岩層）を確認している。地山は北東

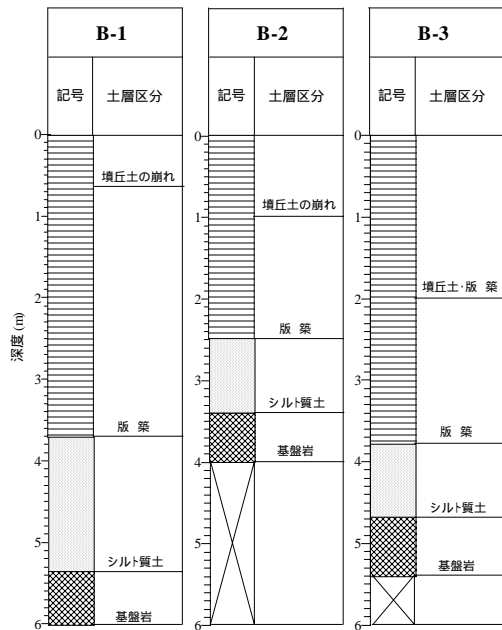


図-2 採取試料から作成した各孔の土質柱状図

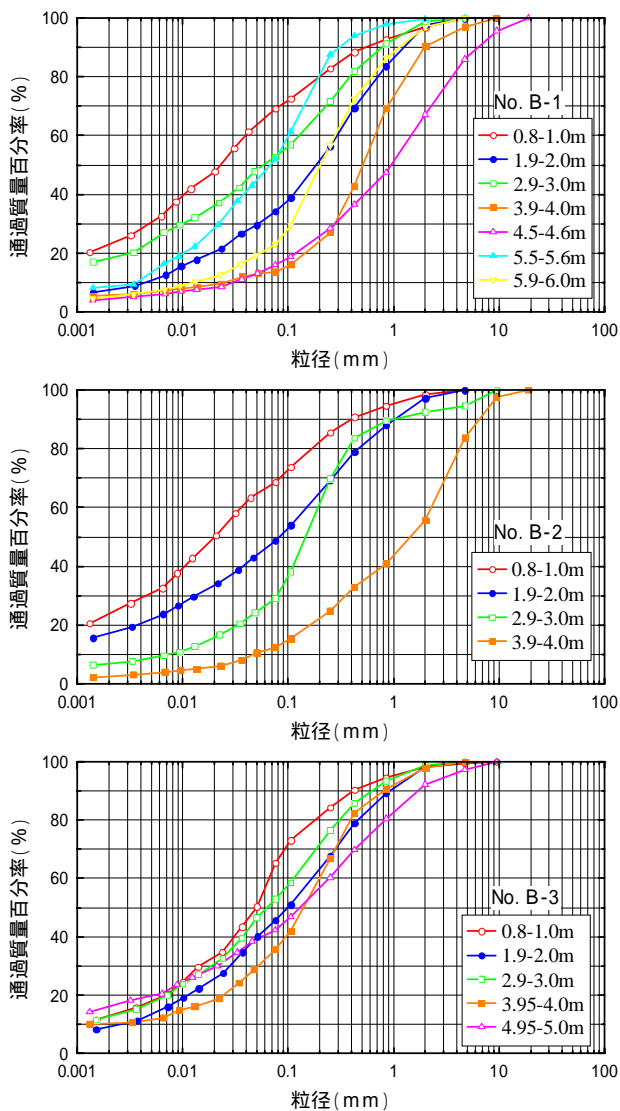


図-3 高松塚古墳墳丘から採取した試料の粒径加積曲線

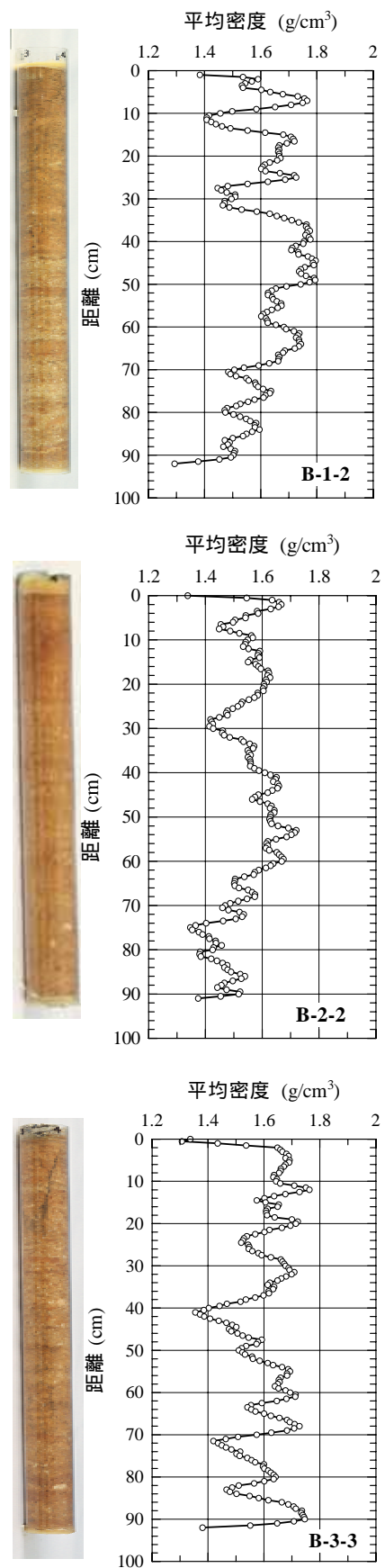


写真-2 高松塚古墳墳丘から採取した版築部の試料とその密度スキャンの結果

から南西に傾斜しており、北側の B-2 孔では版築層厚が小さく、標高の下がる谷側に設置された B-1 孔では墳丘層厚が大きくなっている。図-2 に示す土層判別については、現地における発掘調査結果との整合性を考え、奈良文化財研究所飛鳥藤原宮発掘調査部の所見¹⁾に基づいて決定した。各孔から採取した代表的な版築層のコア試料を写真-2 に示す。3 孔ともに図-2 において“明瞭な版築”に分類された部分を取り出して示してあるが、色調の違いが層状に現れており、数センチ厚に撒き出した土を突き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。それぞれの写真に試料を RI 密度スキャンニングした結果を併せて示しているが、約 5 センチごとの密度の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、撒き出した土を突き固めている際に分級化を起こしたことによって密度差が生じたためと考えられている。一方、版築構築時における突き固めエネルギーの深さ方向への伝播の不均質の影響も考えられ、古墳の版築構造のメカニズムについて今後の検討が必要である。

1m ごとの採取試料の先端部分の土を用いて実施した粒径加積曲線を図-3 に示す。写真-2 において明らかのように、同一の版築層であっても密度に高低があり、図-3 に示したものが必ずしも 1m のコア全体を代表するという位置づけではないが、各孔各深度ごとの土のおよその粒度を知ることができる。版築に使用された土は細粒分を多く含み、突き固め、乾燥によって固結度を増して墳丘の安定に寄与しているものと考えられる。いずれの試料も「明瞭な版築」に分類される上部深度から採取されたものに細粒分含有率が多く含まれる傾向があり、B-1 や B-2 では 75 μm 以下の含有率は 20% を超えている。一方深度が増して地山近くになると風化花崗岩系の砂分が卓越する材料になってくる。ただし、既に示したように版築の場合、細かい深度で土質の変化が大きくなっており、詳細な議論をするためには、個別の供試体ごとに改めて調べる必要がある。

2. 墳丘の物性を調査する原位置試験

墳丘の含水比分布 (RI 水分計による含水比検層)

前章で説明したように、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を継続的にモニタリングした。試料採取点 B-1, B-2, B-3 に外径 114mm の塩化ビニル管 (VP-100) を設置し、同孔を利用してつり下げ式の RI 密度計, RI 水分計による墳丘の原位置含水比の検層を実施した。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。図-4, 5 に各ボーリング孔の含水比および密度の深度方向分布を示す。細実線は発掘終了に伴って行われた墳丘の埋戻時 (2005 年 3 月 14 日) に実施された検層結果であり、太実線は入梅直前の 2005 年 6 月 7 日に実施された結果を表している。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。密度は 1.2~1.9t/m³ の値を示している。また 3 月から 6 月までの 3 ヶ月間の含水比, 密度ともにほぼ

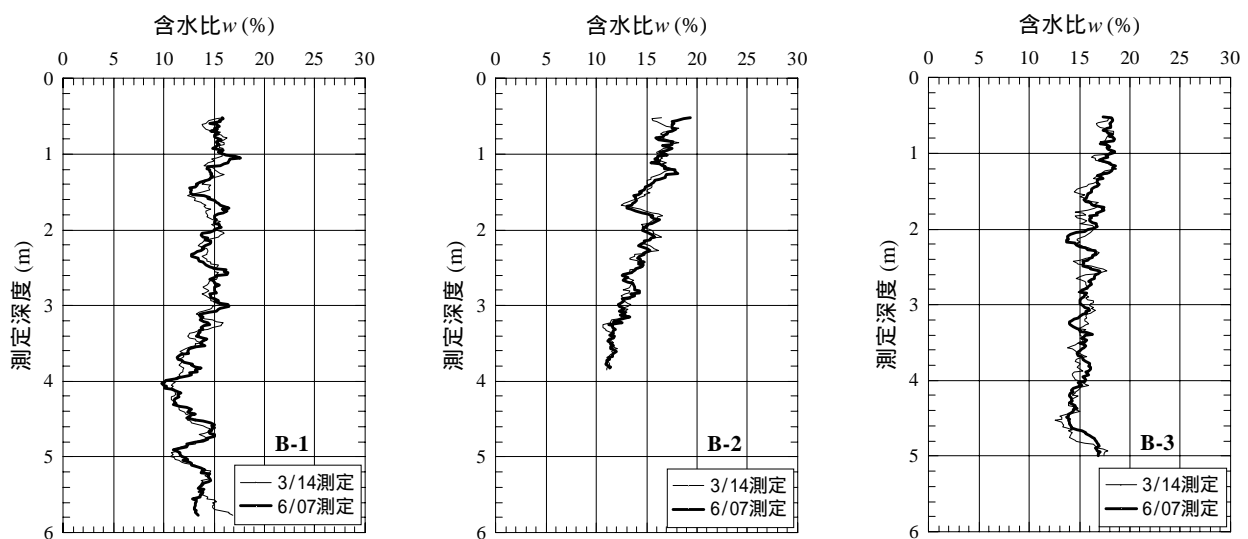


図-4 ボーリング孔内 RI 検層による墳丘の含水比分布

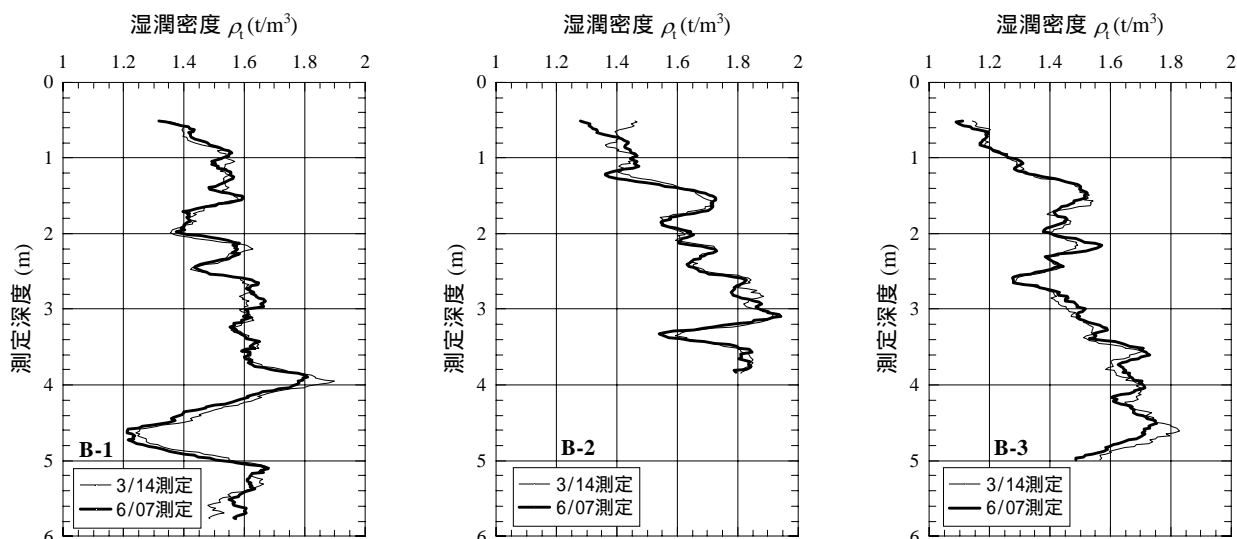


図-5 ボーリング孔内 RI 検層による墳丘の湿潤密度分布

定に保たれており、変化していないことが分かる。

墳丘トレンチにおける地震の痕跡と版築の原位置強度（軟岩硬度計による貫入試験）

2004 年度に実施された発掘調査において、墳丘トレンチ壁面に多くの亀裂が発見された。その一部を写真-3 に示す。写真において版築の水平方向の層がはっきりとわかるが、それを突き破るように割れ目が縦に入っている。今回調査したトレンチにおいて合計 24 ヶ所に及ぶ同様の地割れが認められた。古墳が地震によって被災している事例は多く²⁾、高松塚の墳丘の地割れも地震によるものであると結論づけられた³⁾。目に見える地割れはある断面での切り取りであり、通常こうした地割れは三次元的に墳丘内部に走っていると考えられる。写真-3 でもわかるように、地割れ内部には割れ目に周囲から落ち込んだと思われる土が詰まっている。写真-4 は昭和 47 年当時の発掘時に石室南側前面、現機械室の位置で撮影された東壁断面である。当時はこの箇所について「断層風の陥没がある」と記載されている⁴⁾ものの、その原因については特に検討されていなかった。今回の発掘調査によって墳丘内部に多くの地震痕跡が発見されたことにより、この地層の段差も地震によって生じた可能性があることが指摘されている。

発掘調査期間中、トレンチ掘削による垂直断面が露出する状況がしばらくの間継続する。この状況において原位置強度を最も効果的に把握できる方法として、軟岩ペネトロメータを用いた針貫入試験⁵⁾を選択した。針貫入試験は元来、岩盤中の破碎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適用した。



写真-3 高松塚古墳墳丘部新東トレンチ西壁に見られる地震による地割れ（2005年3月撮影）



写真-4 昭和 47 年発掘時に見つかった石室前面東壁の断層（奈良文化財研究所提供）

また、写真-2でも明らかなように、版築の構造が深度方向に複雑に変化するため、層構造ごとの強度を調べるといふ意味でもこの試験方法は理にかなっていると考えられる。

人工的に突き固められた版築とその割れ目にこぼれ落ちた土との強度比を調べるために、あるトレンチの断面において針貫入試験を実施した。トレンチ内で割れ目を含む領域を決め、その領域内にメッシュを切って、そのメッシュ交点の貫入抵抗をすべて測定し、等強度線の形で図-6に示す。貫入抵抗は一軸圧縮強さと一義的な関係にあり⁶⁾、図ではその関係に基づいて一軸圧縮強さで等強度線を作図している同図より明らかなように、版築部分の換算一軸強さが250~750kN/m²程度であるのに対し、割れ目内部の土の一軸圧縮強さは250kN/m²以下となっており、明らかに版築部分に比べて低くなっていることがわかる。目視による調査によっても地表面から伸びる木の根がこの割れ目に入り込んでいるのが多くのポイントで確認されており、こうした地割れ内部の土は密度が低く、やや緩い状態にあり、版築部に比べて透水性が高くなっている可能性がある。実際に雨水や地下水の流路となっていたかどうかについては断定できないが、版築内部の水分移動特性についてはさらに十分調査する必要がある。

次に昭和47年の発掘時に調査された旧トレンチの再掘削部において同じ針貫入試験を実施した結果を図-7に示す。左図は奈良文化財研究所において作製されたスケッチから各層の土種分類を示したものであり、各層に打たれた番号が右図の縦軸の番号と一致している。同図より、墳丘表面近くに存在する“崩れた版築”、“封土”や平安~鎌倉時代のものと思われる削平跡では低い換算強度を示している。これはきちんとした版築構造ではないこと、トレンチ掘削時の応力解放や表面の乱れによってもはや十分な強度を保っていないことを示している。これに対して、版築とされた部分については、200~1000kN/m²というかなり大きな換算一軸圧縮強さを示しており、突き固めと乾燥によって石室まわりの地山が強い固結力を有していることがわかる。また、同図における版築部の強度の値は図-5に示した新トレンチ南壁の健全な版築部分の強度と調和的である。西田ら⁷⁾は、峯ヶ塚古墳の不攪乱試料による一面せん断試験を実施している。試験結果の $\sigma_n \sim \tau$ 関係からみかけの c を読みとると、160~180kN/m²となり、 $q_u = 2c = 320 \sim 360 \text{ kN/m}^2$ と換算でき、高松塚古墳墳丘土に対する換算一軸圧縮強さと同程度の値を示していることがわかる。峯ヶ塚古墳の試料の粒度分布、自然含水比などは高松塚古墳のものと同様で、土質力学的には類似材料と考えられることから、針貫入試験による原位置せん断強さの推定は有望な手法であるといえよう。

このように、針貫入試験によって原位置における墳丘部の強度を「換算一軸圧縮強さ」によって評価した。これにより、古墳墳丘部の地盤強度が概略把握できたものと考えている。ただし、貫入機構を考えると、壁面の表面部の状態によって貫入抵抗値は影響を受けるので、値の妥当性については、今回採取した版築土の試料による室内力学試験によって検証しなければならない。また表面の乾燥の度合いによっても値が変動することが考えられるので、今後同様の試験を行うにあたっては、同時に壁面の含水率を併せて測定しておく必要がある。

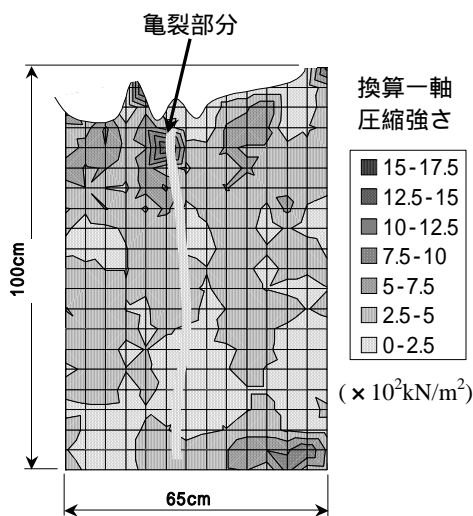


図-6 針貫入試験によって得られた版築断面と地震による地割れ部の換算一軸圧縮強さの分布

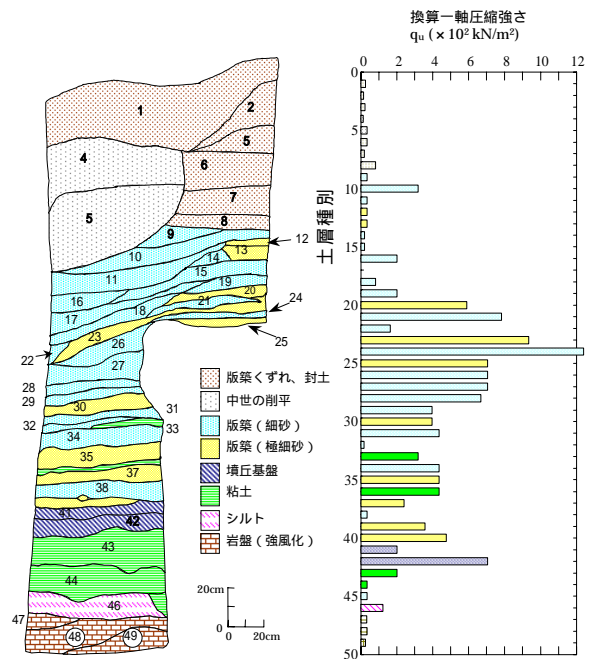


図-7 旧東第一トレンチ西壁セクション針貫入試験結果(層分類は奈良文化財研究所による)

PS 速度検層試験

発掘調査によって古墳内部に地震の痕跡と思われる多数の地割れが見つかったことから、高松塚古墳の恒久保存対策の一部に、耐震性という要因を加えないといけないことがわかった。3ヶ所の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)速度の震度方向分布を測定し、RI検層で測定した密度値(図-5参照)を用いて地盤の剛性率とポアソン比を求めた。弾性波の発生は、P波については地面に置いた鋼板を垂直に打撃することにより、またS波については板叩き法によって行った。

PS速度検層試験によって得られた結果を図-8に示す。高松塚古墳の周囲の地下水位は風化花崗岩の地山内部にあり、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-7に示したP波の値は不飽和の影響で非常に小さくなっている。一方、S波についても、3孔ともに風化花崗岩の基盤でさろうじて200m/sを記録するが、版築部では70~160m/sとかなり低い値を示すことがわかる。石室内部の壁画への振動の影響を考慮して打撃エネルギーを与える標準貫入試験は実施できないため、墳丘地盤のN値はわかっていない。道路橋示方書による砂質土に対する次式⁸⁾を用いてS波速度 V_s (m/s)から換算N値を求めてみる。

$$N = \left[\frac{V_s}{80} \right]^3 \quad (1)$$

B-3孔の版築部では $V_s=160\text{m/s}$ となっており、この部分の換算N値は8となる。またB-1孔、B-2孔上部に現れている $V_s=80\text{m/s}$ の部分は $N=1$ 、B-2孔の下部版築($V_s=120\text{m/s}$)では $N=3.4$ が得られる。

浅香・桂⁹⁾は、セメント改良土のS波速度と一軸圧縮強さの間には次式のような関係が成り立つことを種々の土質材料に対する実験結果に基づいて示している。

$$q_u = a \cdot [\exp(b \cdot V_s) - 1] \quad (2)$$

ここに、 a, b は材料によって決まる定数で、原位置土に対しては、 $a=0.005, b=0.015$ を与えている。この値を用いて q_u を計算すると、 $V_s=160\text{m/s}, 70\text{m/s}$ という高松塚版築で最大、最小のS波速度に対する一軸圧縮強さは、それぞれ $q_u=50\text{kN/m}^2, 9.3\text{kN/m}^2$ と求められる。この値を図-7の針貫入試験による換算一軸圧縮強さ(200~1000kN/m²)と比較すると、オーダーの違う値となっていることがわかる。森岡・網干¹⁰⁾によれば、「バチツル(ツルハシとバチが組み合った発掘用具)も歯がたたなかった」くらいに現地の版築は硬い。針貫入試験による原位置換算一軸圧縮強さの値はそれに調和的であるのに対し、同じ地盤に対するS波速度はかなり低いものとなっている。現段階ではこの原因について確定するだけの

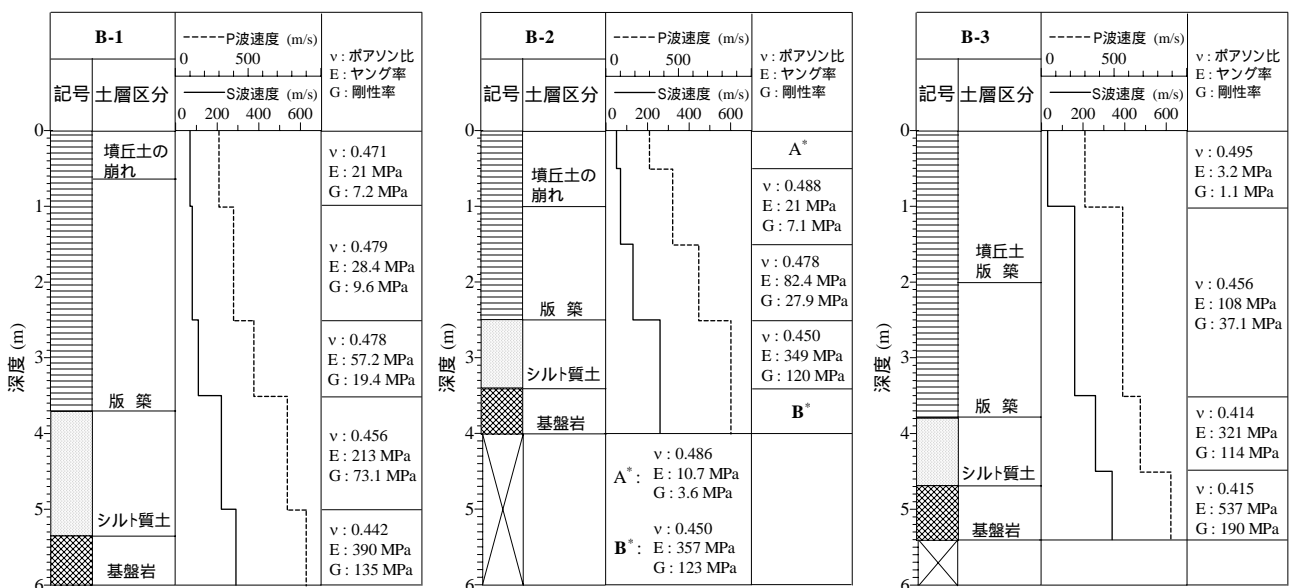


図-8 高松塚古墳墳丘におけるPS速度検層試験結果

材料はない。推定しうる原因としては、写真-3, 4 に示した地震によると思われる地割れが墳丘内に多数存在し、要素としての版築土は硬いとしても、マスとしての墳丘はこうした不連続帯によってS波の伝播を阻害する構造になっていることが考えられる。採取した試料による室内試験を実施し、版築土の要素としての動的力学特性を検証することによってこの原因を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 奈良文化財研究所飛鳥藤原宮発掘調査部：私信, (2005).
- 2) 寒川 旭, 「古墳に刻まれた地震の痕跡」, 橿原考古学研究所論集, 第14号, pp.623-645, (2003).
- 3) 例えば, 朝日新聞2005年3月18日朝刊, (2005).
- 4) 猪熊兼勝, 「特別史跡高松塚保存施設設置に伴う発掘調査概要」, 月刊文化財8月号, pp.30-35, (1975).
- 5) 土木学会, 「軟岩の調査・試験の指針(案)」, (1992).
- 6) 朽津信明, 李 心堅, 関 博充, 「文化財の強度測定法と風化度合いの定量化について」, 保存科学, 第44号, pp.117-126, (2005).
- 7) 西田一彦, 笠井敏光, 荒井仁, 中沢重一, 宋永焜, 中山義久, 「峯ヶ塚古墳の盛土構造と土質工学的特徴について」, 遺跡の保存技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.99-106, (1995).
- 8) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, (社)日本道路橋会, 406p, (2002).
- 9) 浅香美治, 桂豊, 「室内配合試験によるセメント改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの関係」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.20222, pp.443-444, (2003).
- 10) 森岡秀人, 網干善教, 「高松塚古墳 飛鳥人の華麗な世界を映す壁画」, 日本の古代遺跡を掘る6, 読売新聞社編, 209p., (1995).