

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

三村 衛¹, 吉村 貢², 寺尾 庸孝², 豊田 富士人³, 中井 正幸⁴

- 1 京都大学防災研究所・地盤災害研究部門
- 2 ソイルアンドロックエンジニアリング・技術開発部
- 3 大垣市・都市計画部
- 4 大垣市・教育委員会

概 要

岐阜県最大の前方後円墳である昼飯大塚（ひるいおおつか）古墳の史跡整備の一環として実施された発掘調査に伴い、地盤工学の観点から墳丘盛土の調査を行った。破壊的な調査・試験方法が適用できないことから、本質非破壊調査手法である表面型 RI 密度水分計と針貫入試験を適用した。針貫入試験による力学的な特徴から墳丘盛土がほぼ水平の構造を持つことが明らかとなった。部分的には斜めの層構造も確認され、古墳墳丘の築造材料の掘削・運搬・荷降ろしの過程を考察する資料を得た。また、強度の変動パターンを分析することにより、墳丘盛土が 15~40cm 程度の層厚で築造されたという痕跡が得られ、墳丘試料に対する締固め試験により、墳丘盛土の築造時の締固めエネルギーは、およそ人が足で踏み固めたものに相当する $0.1 \times E_{cJIS}$ 程度であることがわかった。墳丘復元に使用される候補材料についても室内地盤材料試験を行って、現墳丘の性状に近い材料を選定し、墳丘復元工事の施工方法を提案した。

キーワード：歴史的地盤遺跡，古墳墳丘，現場調査，非破壊検査，復元整備

1. はじめに

岐阜県最大の前方後円墳である昼飯大塚（ひるいおおつか）古墳は、中山道沿いに関ヶ原を越えた濃尾平野の西端にあり、古代には揖斐川の左岸という要衝の地として、また中山道の宿場町として栄えた美濃赤坂のはずれに位置している¹⁾。現在の行政区分では岐阜県大垣市の西部である（図 1）。青野原と呼ばれるこの一帯には、この他にもいくつかの古墳が点在している。

昼飯大塚古墳は、長さ 150m（埋積している周壕を含めれば 180m）、後円部の直径 99m、高さ 13m、前方部の高さ 9.5m という規模の 3 段築成の前方後円墳である。



図 1 昼飯大塚古墳の所在 [国土地理院20万分の1地勢図(岐阜)]

築造は古墳時代前期末の 4 世紀末とされ、内部には竪穴式石室、粘土槨、木棺直葬という 3 つの埋葬形式を有している。古墳周囲は宅地や工場用地として利用され、墳丘は削剝により形状が破壊されている。現在の墳丘の平面図を図 2 に示す。なお、図中に後述する調査試験実施位置をあわせて示している。具体的には、過去に一般住居のために、部分的に削剝され墳丘土が欠損し、墳丘盛土が露出している墳丘前方部南西側をはじめ、前方部の最上位、前方部北西側、後円部の外周、および前方部と後円部が接続されているくびれ部において調査を実施した。

図 2 に示される墳丘は 2 段目より上の部分で、1 段目は埋積された周壕の中にある。なお、周壕は掘削して形成

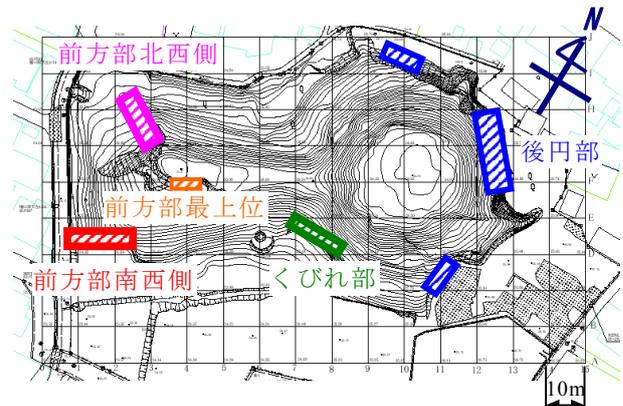


図 2 昼飯大塚古墳の地形と調査位置

されていたことが発掘調査より明らかになっている。墳丘の主体は、2 段目以上で、その最下位には周壕を掘削した土である「黒ぼく」、その上位に粘性土、古墳近傍から採取したと考えられるレキ混じり粘土、砂が積層されている。また、それぞれの境界部には両者の混合材料が認められる。

発掘調査は昭和 54 年に始められ、平成 12 年には国史跡の指定を受け、公園として整備されることとなった。これに伴い、失われた墳丘を復元することとなり、このための発掘調査が削剥部（墳丘破損部）を中心に行われた。本稿では、地盤工学的な観点から、墳丘盛土に対する原位置試験²⁾に加え、室内地盤材料試験を実施し、墳丘盛土の構造と構築過程および復元整備における盛土の施工方法に関する検討結果を報告する。

2. 調査方法と目的

日本国内各地には復元整備された多数の古墳が存在する。しかし、降雨によるガリ浸食や表層部のすべり破壊によって、その形状を維持できていない例が少なくない。これは、墳丘の形状の復元が重要視され、盛土構造物としての安定性の観点からの検討が十分なされていないためであると考えられる。

昼飯大塚古墳では、現墳丘の盛土構造や力学特性など、工学的な観点から墳丘の性状を評価し、復元計画に反映させることになった。墳丘の表層部は植生のための土壤改良対策が施される予定であり、土壤化学的検討は割愛した。また、復元用土として、現墳丘の盛土材料が入手困難であることから、これらに代わる材料を選定する必要もあった。

昼飯大塚古墳は国指定の史跡であることから、墳丘の現状からの改変は著しく制限され、許可された考古学的な発掘調査の範囲から逸脱することはできない。通常の地盤調査であれば、ボーリング+SPT、平板載荷試験などの原位置試験、および不攪乱試料を採取して室内試験を行う方法が一般的である。しかし、これらは破壊を伴う調査試験であり、史跡である昼飯大塚古墳では適用が困難である。そこで今回は、高松塚古墳の発掘調査³⁾⁴⁾において適用した実績のある本質非破壊の針貫入試験と表面型 RI 密度水分計を使用した墳丘土の密度水分測定方法を適用した⁵⁾⁶⁾⁷⁾。両試験ともにメッシュ状に測点を配置して調査面（鉛直に近い掘削面）の盛土物性値の面的な分布を求めた。

2.1 針貫入試験

針貫入試験は、昭和 55 年土木学会「軟岩の調査・試験の指針」⁸⁾に「針貫入試験法」として上げられている。針貫入試験機の機構概要を図 3 に示す。貫入力 P(N)はスプリングの圧縮によって発現し、スピンドルの変位量（=スプリング圧縮量）から換算して求める。

針貫入試験は、貫入が停止した時の貫入力 P(N)とその時の針貫入量 L(mm)または、針の貫入量 L が最大の 10mm になった時の貫入力 P(N)のいずれかを用いて針貫入勾配

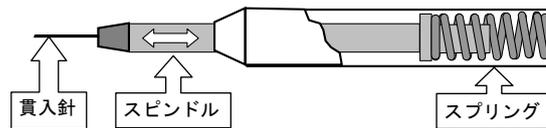


図 3 針貫入試験機

$\Delta = P/L$ (N/mm)を算定する。針貫入勾配と一軸圧縮強さ q_u (kN/m²)の関係は、既往のキャリブレーションで得られている以下の関係式を適用した。

$$\log(q_u) = 0.978 \cdot \log(\Delta) + 2.599 \quad (1)$$

今回の調査では、墳丘土の強度を考慮し、小型の高感度な針貫入試験機を適用した。針貫入試験は、写真 1 に示すように測定対象となるエリアにおいて 5cm メッシュを描いた透明ビニルシートを貼り付けて、換算一軸圧縮強さの分布図（コンター図）を描くことを前提として実施した。なお、ビニルシートを貼り付ける前に、試験面表層を薄く削り取り（5mm～10mm 程度）し、新鮮な試験面を露出させてから試験を実施した。切削した土は攪乱試料として採取を行った。



写真 1 針貫入試験状況

2.2 表面透過型 RI 密度水分測定

表面透過型 RI 密度水分計は、地盤の密度と水分を測定する計器であり、道路盛土工事や宅地造成工事などで広く使われている。本調査では、図 4 に示すように、墳丘の発掘調査断面に設置し、測定を行った。表面透過型 RI 密度水分計は、測定対象（地盤中）に放射線源が封入された鋼棒を挿入し、放射線源から放射されて地盤中を透過して地表に達するガンマ線、中性子線の検出数から地盤の密度

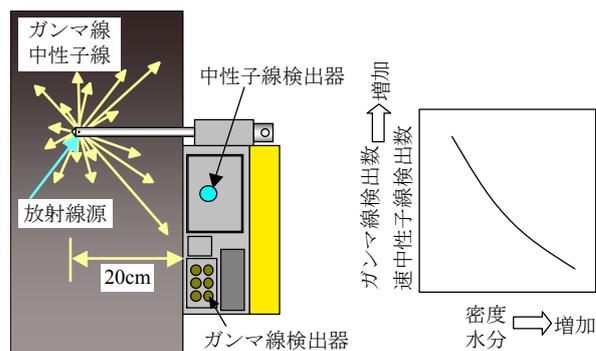


図 4 表面透過型 RI 密度水分計の概要

と水分を測定する計器である（図 4 右図の関係）。

表面透過型 RI 密度水分計の測定位置は、針貫入試験の試験領域と表面透過型 RI の測定領域が重なるよう、水平方向に 40cm 間隔、鉛直方向に 30cm 間隔で設定した。なお、表面透過型 RI 密度水分計は測定面の平滑度（測定面と計器底面の密着度）が測定値に影響を与えるため、可能な範囲で測定面の整形作業を実施した上で測定を行った。整形作業で切削した土も攪乱試料として採取を行っている。

2.3 室内地盤材料試験

針貫入試験および、RI 密度水分測定において、測定面の表面を切削し、採取を行った攪乱試料について室内地盤材料試験を行い、現墳丘材料の性状を把握した。

また、墳丘復元に使用される候補材料についても同様の試験を行い、現墳丘を復元する適切な材料の選定および、施工方法の検討を行った。

実施した試験項目を以下に示す。採取した試料には分量の差があったため、材料によっては実施できなかった項目もある。

- 1) JIS A 1204 粒度試験（ふるい分析、沈降分析）
- 2) JIS A 1210 突固めによる土の締固め試験
- 3) JIS A 1202 土粒子の密度試験
- 4) JIS A 1205 土の液性限界・塑性限界試験
- 5) JIS A 1228 突固めた土のコーン指数試験
- 6) 締固めエネルギーを変えた締固め試験
- 7) 水分保持特性試験

3. 原位置調査

3.1 調査位置

図 5 に示すように、前方部南西側で 4 箇所、前方部北西側で 2 箇所、前方部最上位で 1 箇所、後円部の外周で 5 箇所の調査位置を設定した。

前方部南西側は、近接して建築されていた民家の車庫のためにその隅角部分が奥行き約 15m にわたって削剥され、欠損している。写真 2 に南東側から撮影した前方部南西

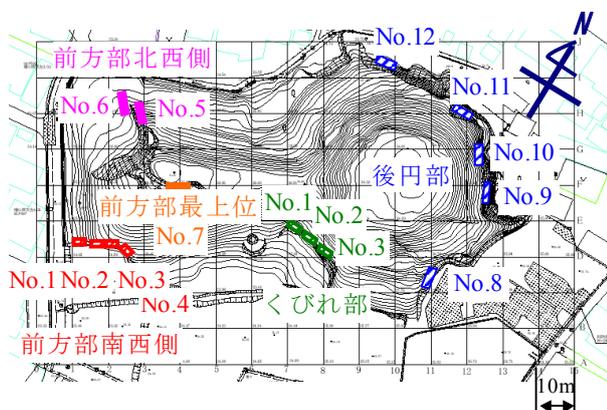


図 5 原位置調査の実施地点

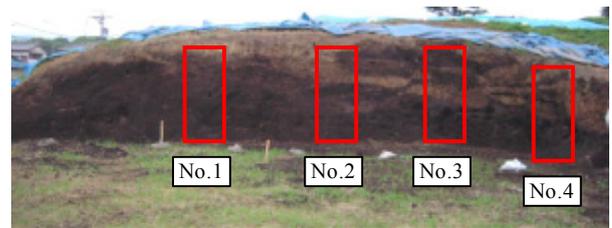


写真 2 前方部南西側調査面

壁の断面を示す。目視観察により、水平方向の構造が認められ、下位より、黒ぼく、黒ぼくと粘性土の混合材、粘性土が積層されている。墳丘端部には積層構造が乏しく、黒ぼくが盛上げられた領域も認められる (No.1 の西側端部)。

この発掘調査面に写真 2 に示す幅 1.2m×高さ 1.8~2.2m の試験エリア (No.1~No.4) を設定した。それぞれの試験エリアにおいて 5cm メッシュで針貫入試験を行い、また、代表的な鉛直方向 1 測線でメッシュ間隔の中間で針貫入試験を行い、2.5cm 間隔のデータを得た。

写真 3 に示した前方部の北西側および、最上位ではトレンチ調査が行われており、その掘削断面において針貫入試験を実施した。

前方部北西側の測定面 No.5 は、前方部の上部に位置し、黒ぼくと粘性土の混合材で構築されている (写真 3 上)。

No.6 は、前方部 (No.5) の下部に位置し、下位は南西側 (No.1~No.4) と同じような黒ぼくで構築されているが、上位には南西側では観察されなかったような礫が多数混入した材料が積層されている (写真 3 下)。前方部の最上位 (No.7) では、粘性土が広がっている (写真 4)。

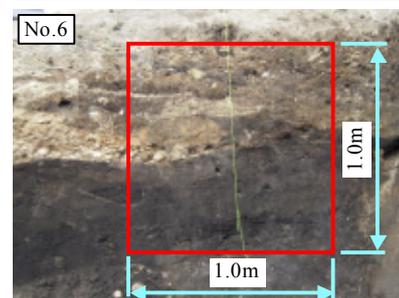
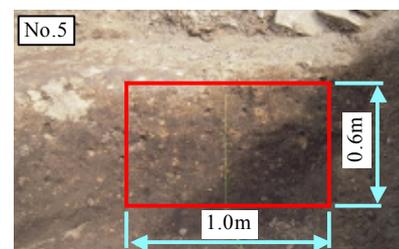


写真3 前方部北西側調査面

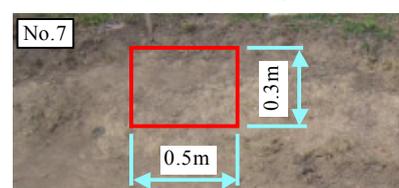


写真 4 前方部最上位

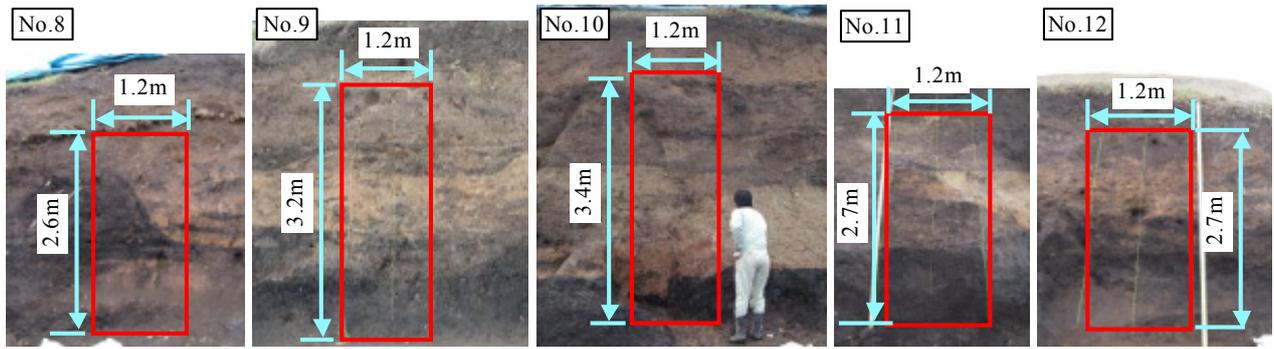


写真 5 後円部断面 (エリア No.は図 5 参照)

写真 5 に示すように、後円部墳丘は呈色が異なる材料で積層されており、その大まかな構造は、下位から、黒ぼく、黒ぼくと粘性土の混合土、淡い色の粘性土、礫まじりの粘性土あるいは礫混じりの黒ぼくのように区分できる。No.8 では、測定面の中位で層の境界が水平ではなく、斜めの方向に境界が形成されているという特徴が見られる。その他のエリアでは大きな層構造は厚さ 50cm 前後となり、No.10、No.11 では測定面の中位に明らかな砂層が混入しており、墳丘を形成していく過程において、排水を行うためなど、意図的に配置された可能性が考えられる。また、No.10 においてはせん断面が観察され、測定面の中心を境に元々は同じ層構造と考えられる層がせん断され、右側の層が滑り落ちた状態となっている。

相当する。その下、標高 25.8~26.3m には強度がやや小さい領域がある。標高 25.0~25.8m の領域は中間的な強度を示し、この領域の右半分には鉛直方向に連続する傾向を持つ構造が示唆される。この傾向を持つ構造は写真では区別できない塊状の部分である。この構造は元々の堆積状況を反映していると考えられる。つまり、周壕の掘削土が配置されたこの領域では、掘削が塊状~ブロック状に切出すように行われ、その塊状のまま運ばれて配置されたため、堆積構造を残したまま墳丘に取り込まれたものと考えられる。このような細部の構造を別にすれば、全般的に水平方向に連続する帯状の構造が卓越しており、古墳墳丘の築造は概ね、現在の盛土工事と同様に水平積層を基本としていたと考えられる。

3.2 原位置調査結果

3.2.1 針貫入試験結果および RI 密度水分測定結果

前方部、後円部における試験結果の一例として、前方部南西側 No.1、後円部 No.9 の試験結果を、図 6、図 7 に示す。図中では、a) 針貫入試験から求めた換算一軸強さのコンター図、b) 試験エリアの写真、c) 表面型 RI 密度水分測定による乾燥密度および含水比の分布を順に示している。図 6a) に示す強度コンター図には水平方向に連続する帯状の構造が認められる。標高 26.3~26.7m に強度がやや大きい領域があり、同図 b) に示す写真では色がやや薄い部分に

図 6c) に示す乾燥密度は上方の約 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ から下方の約 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ へ変化しているが、締固め程度が下方ほど小さいということではなく、材料の特性の違いを反映していると考えられる。ただし、同じ材料と考えられる標高 26.2~26.8m の中で強度が大きい標高 26.4m を中心とした領域では乾燥密度も大きいことから、締固め程度の差が強度の差に現れていると考えられる。また、含水比にも層毎の違いが見られ、上方から下方にかけて約 50%、70%、90% となっており、黒ぼくで構築されている下方の層の含水比が極端に高いことがわかる。

後円部 No.9 の試験結果を図 7 に示す。後円部において、

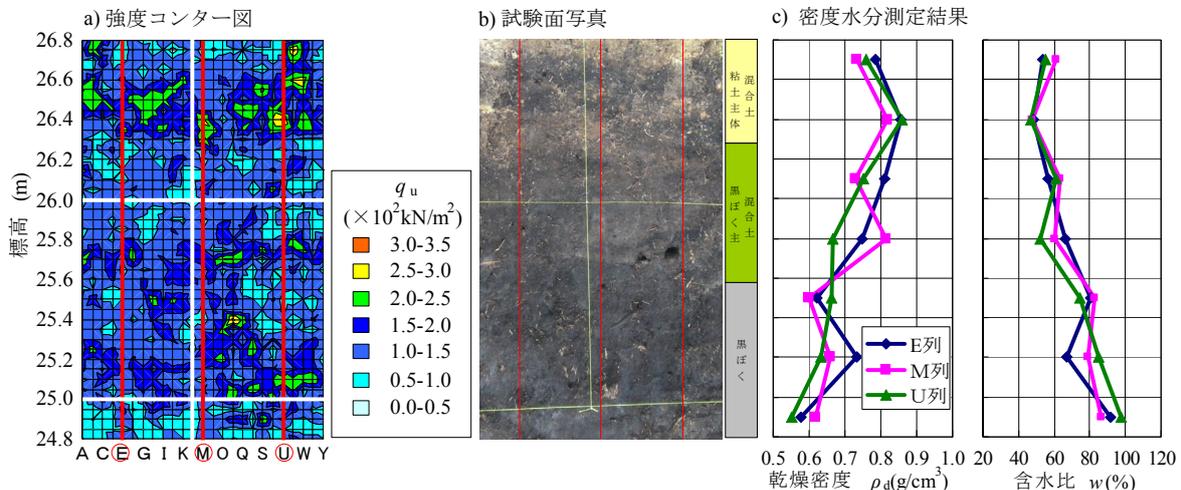


図 6 前方部試験エリア No.1 での調査試験結果

前方部と同様に、水平方向に連続する傾向を持つ強度分布が認められ、これを同図 b)の試験エリア写真と比べると、墳丘の層構造とよく一致していることがわかる。前方部と比較して、後円部では針貫入試験の実施に際し、礫当たりしていると判断される箇所が多く認められた。礫当たりの値は地盤としての強度を表しているとは考えられないため、当該箇所の測定値をはずし、その周辺地層の換算一軸圧縮強さを平均したものをその地点の強度とし、評価した。同図 c)に示す表面型 RI 密度水分測定結果より、この試験ブロックは乾燥密度 $0.6\sim 0.8\text{g/cm}^3$ 、含水比約 80%の標高 26.8m 以下の黒ぼく中心の部分、乾燥密度 $1.0\sim 1.3\text{g/cm}^3$ 、含水比約 25%の標高 27.8m 以上の粘土主体の部分、および、この中間の物性値を示す標高 26.8~27.8m の両者が混合した部分の 3 つに大きく区分できる。密度および水分の測定結果は No.9 以外の 3 エリアでも同様な分布傾向にある。

次に前方部で行った全てのエリアの強度分布図を標高を揃えて図 8 に示す (No.5,7 の標高は別途示す)。写真 2 に示した前方部南西側の目視で確認した水平構造と強度分布は概ね一致していることがわかる。前方部南西側の 4 エリア (No.1~4) と前方部北西側の No.6 の強度分布図を比較すると、同じ標高であっても、両者の強度分布は大きく異なっている。No.6 において、特に中位から上位にかけては、大礫が混入し測定ができない箇所があり、灰色の四角で示している。南西側を構築している材料と同じと考えられる材料、No.5 の粘性土混じりの黒ぼく、No.6 黒ぼく、No.7 の粘性土の強度は前方部南西側と比べて大きくなっている。

図 9 に後円部で行った 5 エリアの強度分布図を標高を揃えて示す。また、礫当たりした頻度を強度分布図に併記する。No.10 には左下に近世の開削による大きくくぼみが

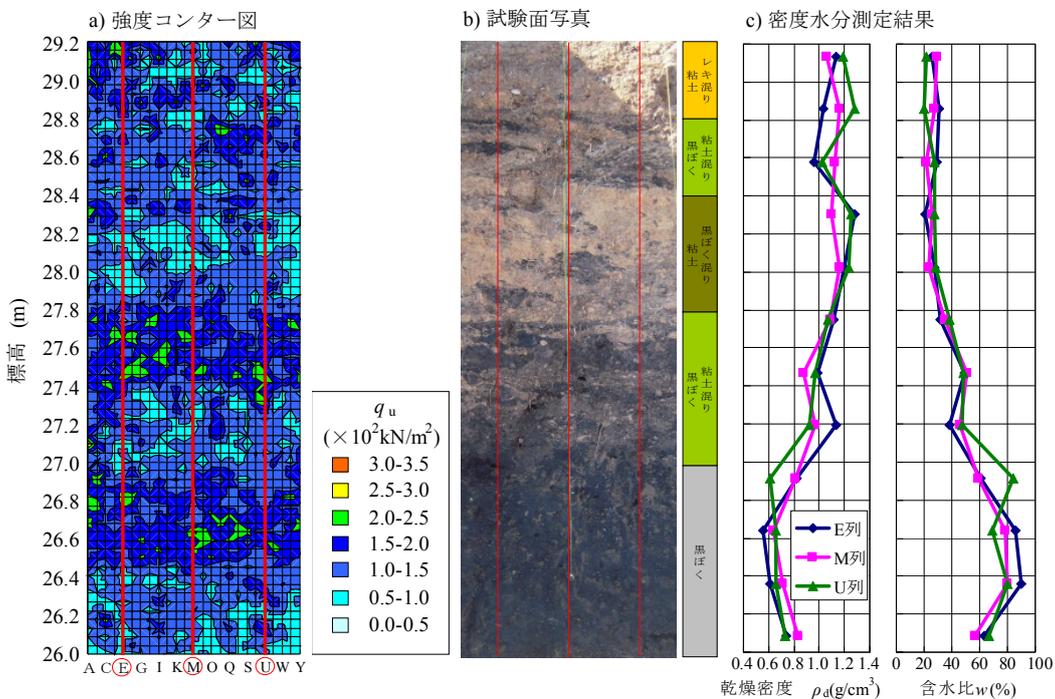


図 7 後円部試験エリア No.9 での調査試験結果

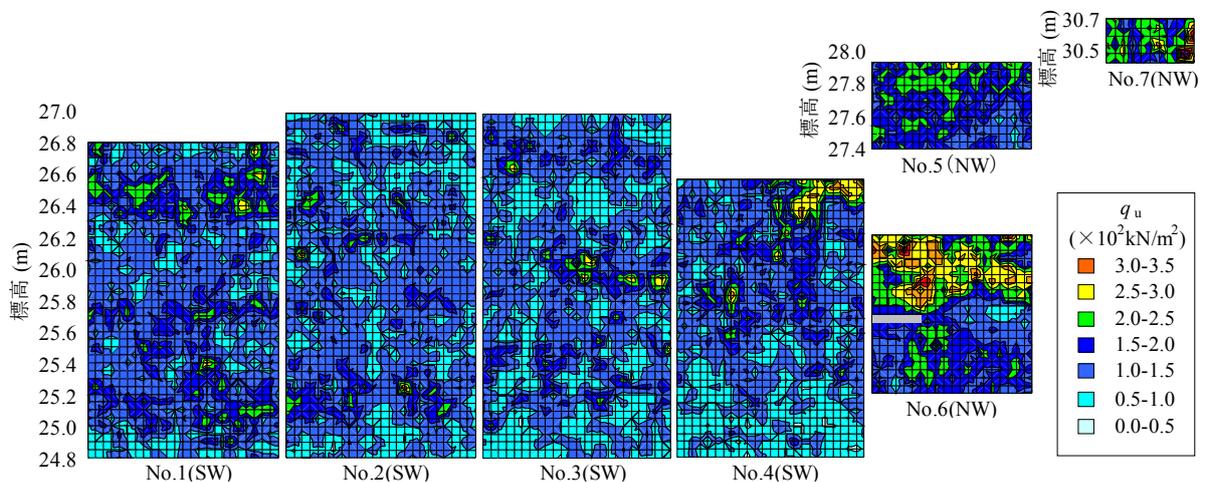


図 8 前方部南西側および北東側断面における換算一軸圧縮強さ分布

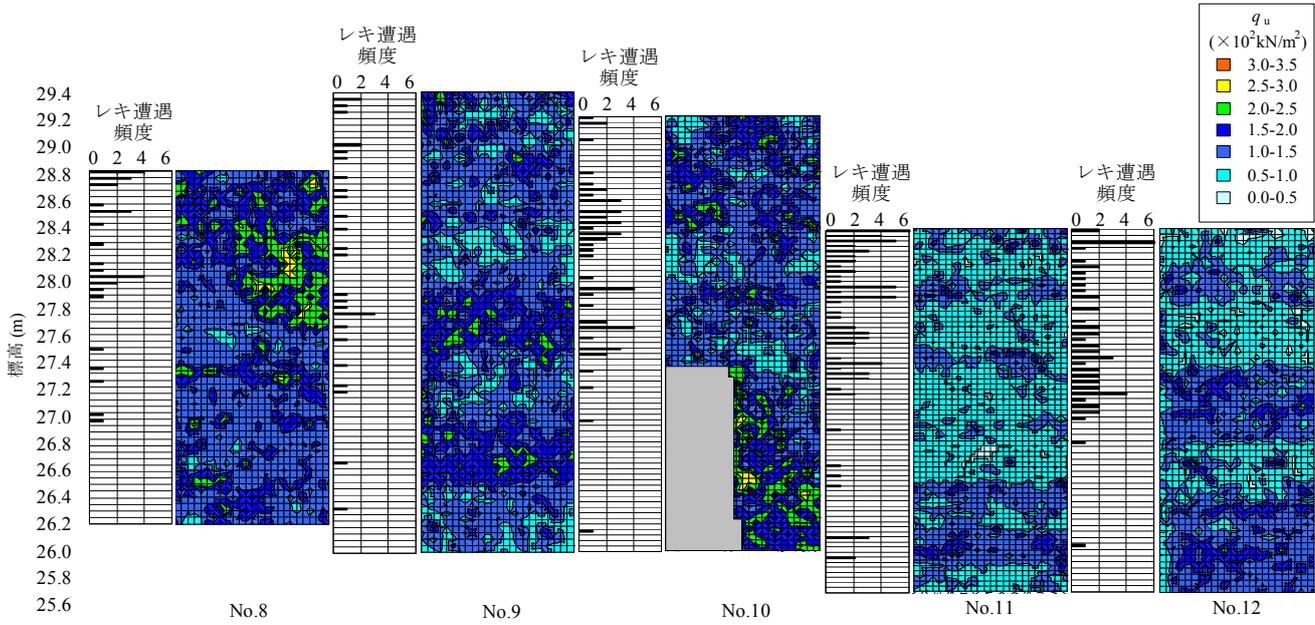


図9 後円部の強度分布

あり、データ欠損部として灰色の四角で示した。図9より、後円部南側のNo.8～No.10と比較し、後円部北側のNo.11、No.12の換算一軸圧縮強さは全体に小さい傾向にあることがわかる。また、試験時の礫当たりの頻度をみると、後円部北側の方が頻繁に礫当たりしており、粒度が粗い材料で構築されていることがわかる。粒度が粗く細粒分が乏しい材料から成る層では、針貫入に伴って粒子が移動するため、抵抗、つまり換算一軸圧縮強さが小さくなると考えられる。

次に墳丘前方部と後円部の強度比較を行う。黒ぼくで構築された層は、共通して存在する層であり、その層の換算一軸圧縮強さをヒストグラムで比較したものを図10に示す。この結果より、黒ぼくの換算一軸圧縮強さは同程度であり、墳丘前方部と後円部は、近傍から取り出した同じ黒ぼくを用いて同じ構築方法で築造されていると考えられる。

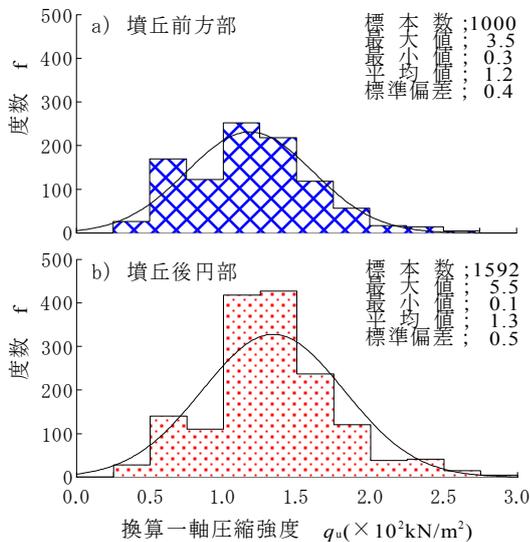


図10 墳丘前方部と墳丘後円部の強度比較(黒ぼく)

3.2.2 針貫入試験結果のスペクトル解析(層厚の推定)

前方部No.1～No.4、後円部No.8～No.12の鉛直方向の代表測線で実施した、2.5cmピッチで行ったより詳細な針貫入試験の結果の一例を図11に示す。

一般に土を締め固めて盛土を構築すると、エネルギーの拡散伝播により、締め固め面で密度が最も大きく、下方へ向か

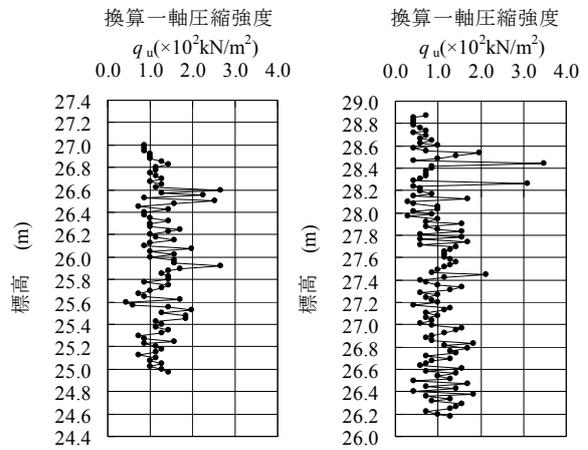


図11 鉛直方向の一軸圧縮強度の変動(前方部No.1, 後円部No.12)

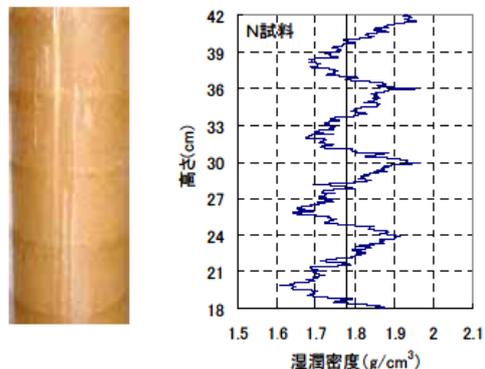


図12 高松塚古墳の版築再現試験結果⁷⁾

って密度が低下する「密度勾配」が存在する³⁷⁾。これは、締固めエネルギーが与えられた表面から離れるのに従って拡散伝播することによる。この繰返しにより、盛土内部の密度分布は鋸歯状（または波状）になる。図 12 は高松塚古墳の版築を土槽内に人為的に再現したもので、その鉛直方向の密度分布を測定した結果、版築作製単位の層厚に相当するおよそ 6cm 間隔の周期的な密度勾配があることが確認されている。土の密度と強度には正の相関関係があることから、強度においても同様の分布形状を示すと考えられる。

したがって、図 11 のランダムに見える強度変動に卓越する波長があれば、構築された層厚を反映していると考えられ、この変動データを高速フーリエ変換 (FFT) することによって分析した結果を図 13 に示す。前方部の 4 つの試験エリアでの卓越波長は 15~40cm に出現しており、後円部の 5 つの試験エリアでの卓越波長は 11~36cm に出現している。このことより、墳丘前方部、墳丘後円部はともに 20~30cm の層厚で構築されたと推定される。

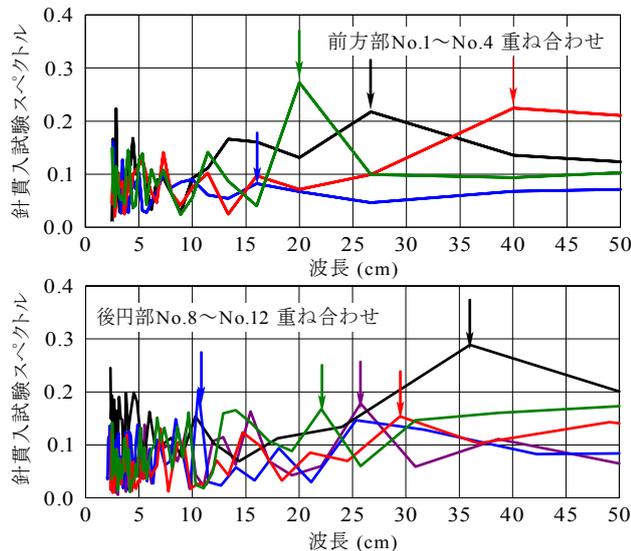


図 13 墳丘の強度変化の FFT 解析結果 (上:前方部, 下:後円部)

4. 室内地盤材料試験

4.1 試験材料

現墳丘の盛土材料と同じ材料を復元用土として入手できないという状況の下で、復元墳丘は現墳丘と同様の力学的、および浸透性を有することを将来にわたって保証し、復元墳丘が現墳丘に対して変形性や透水性で影響を及ぼさないことが必要である。このことを前提にして、墳丘を復元するに際し、墳丘材料および、復元材料の性状を把握することは重要であると考えられる。前方部南西側、前方部北西側、前方部最上位、および後円部で針貫入試験、または RI 密度水分測定の際に、表層部を切削した土を材料区分 (黒ぼく (ブラック), 黒ぼく (ブラウン), 粘土混じり黒ぼく, 粘土, など) 毎に観察して分類しながら採取し、

試験に供した。1 つのエリアでは、ほぼ水平方向に同じ材料が存在していたので、エリア毎に同区分の材料に差異はなく、採取試料にバラツキはないと考えている。また、それら各材料の試料重量は 15~30kg 程度である。今回調査

表 1 採取試料の名称と特徴

材料名	採取エリア	採取標高 区間 EL(m)	特徴
粘土	前方部 No.1~4	26.0 以上	白~黄色の粘性土
粘土混じり 黒ぼく	前方部 No.1~4	25.5 以上	黒ぼくに粘性土が混ざった混合土
黒ぼく (ブラック)	前方部 No.1~4	25.5~25.0	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
黒ぼく (ブラウン)	前方部 No.1~4	25.0 以下	黒ぼくのうち茶色かかったもの
粘土混じり 黒ぼく	前方部 No.5	27.9~27.4	黒ぼくに粘性土が混ざった混合土
レキ混じり 粘土	前方部 No.6	26.2~25.7	白~黄色の粘性土に礫が混じった混合土
黒ぼく (ブラック)	前方部 No.6	25.7~25.2	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
粘土	前方部 No.7	30.7~30.5	白~黄色の粘性土
レキ混じり 粘土	後円部 No.8	28.4 以上	白~黄色の粘性土にレキが混じった混合土
黒ぼく混じり 粘土	後円部 No.8	28.4~27.6	黒ぼくに白~黄色の粘性土が混じった混合土
粘土	後円部 No.8	27.3~26.6	白~黄色の粘性土
黒ぼく (ブラック)	後円部 No.8	28.4~27.1 26.6 以下	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
レキ混じり 黒ぼく	後円部 No.9,10	28.5 以上	黒ぼくにレキが混じった混合土
レキ混じり 粘土	後円部 No.9,10	28.8 以上	白~黄色の粘性土にレキが混じった混合土
レキ混じり砂	後円部 No.9,10	28.5~27.4	砂にレキが混じった混合土
粘土混じり 黒ぼく	後円部 No.9,10	27.0 以上	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
黒ぼく混じり 粘土	後円部 No.9,10	28.4~27.5	黒ぼくに白~黄色の粘性土が混じった混合土
黒ぼく (ブラック)	後円部 No.9,10	27.0~26.2	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
黒ぼく (ブラウン)	後円部 No.9,10	26.2 以下	黒ぼくのうち茶色かかったもの
レキ混じり 黒ぼく	後円部 No.11,12	27.8 以上	黒ぼくにレキが混じった混合土
レキ混じり 粘土	後円部 No.11,12	28.0~27.4	白~黄色の粘性土にレキが混じった混合土
粘土混じり 黒ぼく	後円部 No.11,12	27.4~26.5	黒ぼくに白~黄色の粘性土が混じった混合土
黒ぼく (ブラック)	後円部 No.11,12	26.8~26.0	黒ぼくのうち黒色の色目が特に濃いもの
黒ぼく (ブラウン)	後円部 No.11,12	26.0 以下	黒ぼくのうち茶色かかったもの
粘土	後円部 No.11,12	26.0 以下	茶色の粘性土

表 2 復元用土候補の名称と特徴

材料名	特徴
各務原黒土	昼飯大塚古墳から約 25km 離れた岐阜県各務原市で産出する黒土
スーパークレイサンド	昼飯大塚古墳の北方約 2km で採取されている石灰岩の副産物として生じる石灰岩に挟在する粘性土を主体に調製された埋戻し材料
ジオライム	スーパークレイサンドと同じく調整された材料であるが、これより粒度が粗い材料である
現場流用土	発掘調査に伴って生じた、黒ぼくと粘性土の混合土

では、各エリアで採取した試料とその分類を表 1 のように定義する（表中の材料名は、試料の呼称である）。なお、以降で試験結果を述べるときは、試料の呼称名を「材料名+採取エリア No.」とする。例えば、黒ぼく(ブラック)試料を前方部 No.1~4 で採取した場合の呼称名は「黒ぼく(ブラック) No.1~4」と表記する。

表 2 に墳丘の復元用土として使用される候補材料の名称と特徴を示す。昼飯大塚古墳近傍には石灰岩採取地があり、製品生成時に大量の細粒分が発生する。こうした使用目的のない細粒材料を有効活用するために、表中に示すようなスーパーケイサンドやジオライムと呼ばれる土質材料が埋戻し材料として生産されている。一連の復元に際し、地産製品の有効活用、経済性などの視点から復元用土としての導入が考えられている。

4.2 粒度特性

4.2.1 墳丘材料

現墳丘の材料の粒度特性を把握するため、エリア毎・分類材料毎に粒度試験を実施した。図 14 に前方部を構成する材料の粒度特性を示す。前方部の試料は 4 グループに区分できる（図中では輪で囲む）。前方部南西側にある黒ぼく(ブラック)、粘土混じり黒ぼく、粘土はかなり細粒分を多く含む(グループ A)、黒ぼく(ブラウン)はそれらの 3 材料より砂分が多い材料である(グループ B)。また、墳丘上位(No.7)で観察された粘土および、No.6 の黒ぼく(ブラック)は南西側の材料より粒度が粗く、砂分の割合が高い(グループ C)。No.5, 6 のレキ混じり黒ぼく、レキ混じり粘土は、レキ分を多く含む材料である(グループ D)。

図 15 に後円部 No.8, 後円部 No.9,10, 後円部 No.11,12 の粒径加積曲線を示す。No.8 では、グループ E の粘土及びレキ混じり粘土は、グループ F (他の 3 材料)と比較して、多少レキ分が多い傾向にある。No.9,10 では、レキ分を多く含むレキ混じり砂はグループ I、その他の 6 材料はレキ分が少なく、粒径 0.075mm 以下の細粒分が多い材料をグループ G、その 2 グループの中間的な材料をグループ H と区分した。No.11,12 においては、黒ぼく(ブラック)、黒ぼく(ブラウン)、粘土混じり黒ぼく、粘土の 4 材料は

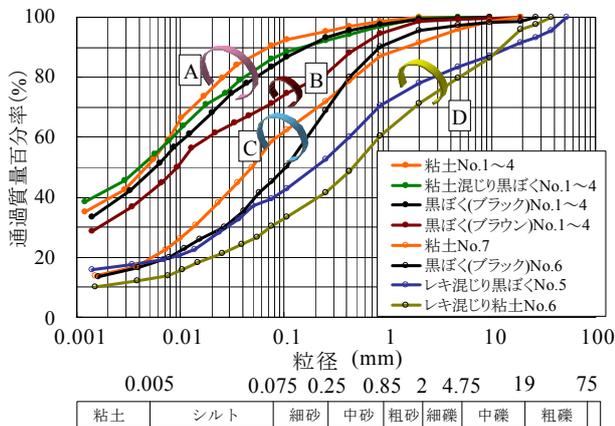


図 14 前方部を構成する材料の粒度特性

粒度分布の傾向が類似している。また、その 4 材料と比較し、他の 3 材料はレキ分が多く粒度分布が異なる材料であることがわかり、それぞれグループ J, グループ K に区分することができる。この調査試験面の中位にあたる標高 27.4m を境として、上層はグループ K, 下層はグループ J の材料で構築されている。

次にこれら墳丘前方部、後円部で採取し、分類した材料の粒度分布を比較した。図 16 では、各エリアで採取した黒ぼく、粘土および粘土混じり材料、レキ混じり材料の粒度試験結果を示した。墳丘前方部南西側(No.1~4)の黒ぼくは、墳丘後円部(No.8~12)の黒ぼくと比較して細粒分を多く含んだ材料であることがわかる。また、同じ前方部でも北西側黒ぼく No.6 は、南西側の黒ぼく No.1~4 と比較し、粒度が粗い材料である。また、粘土および粘土が混合された材料においても同様の傾向を示しており、粘土 No.1~4 は細粒分を多く含み、前方部上位の粘土 No.7, 後円部の粘土 No.8, 粘土 No.11,12 の順で粒度が粗い材料となっている。レキ混じりの材料は、前方部南西側 No.1~4 では見られないが、墳丘の北側に位置するエリアの材料ほ

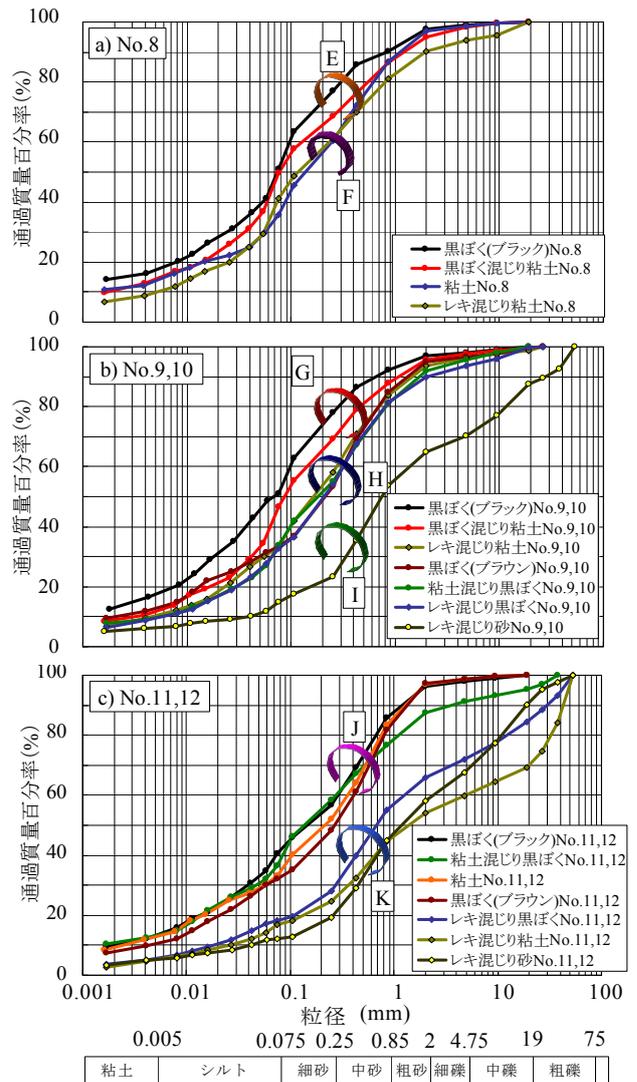


図 15 後円部を構成する材料の粒度特性

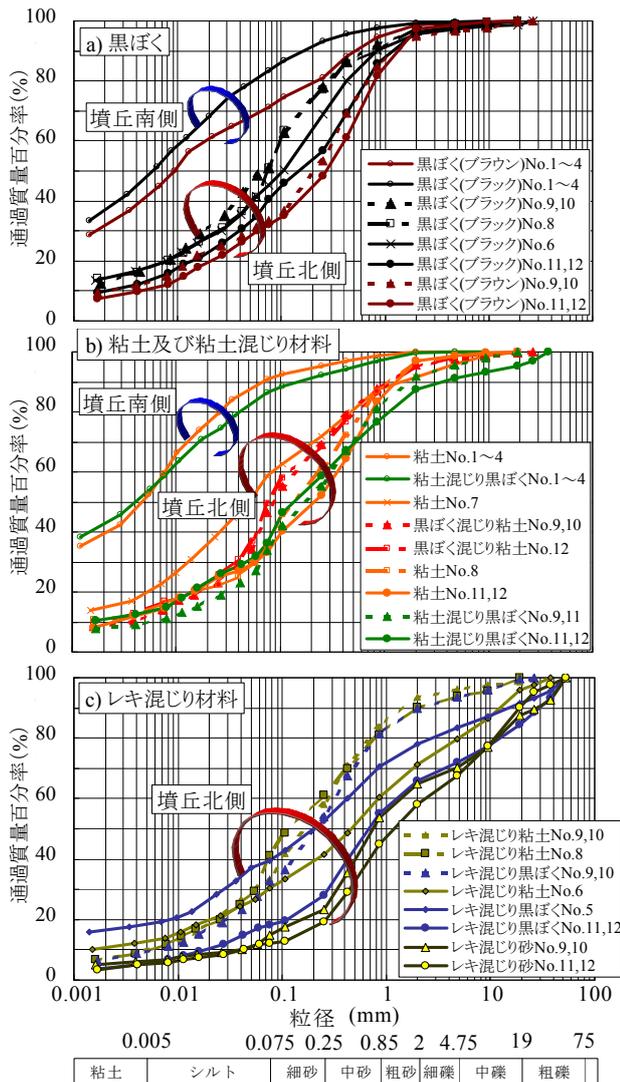


図 16 材料区分毎の粒度特性

どレキ分を多く含む材料であることがわかる。

昼飯大塚古墳周辺の古地形は、北側に段丘の一部があり、これを開析した小河川が古墳のすぐ北側を流れ、南側の低湿地（湖沼）に流入していたと考えられている。このことから、墳丘材料としての黒ぼく層は、南側で厚い堆積構造を持ち、北側は段丘や小河川の自然堤防に由来する砂礫が多く混入することになったと推測される。

4.2.2 復元用土

現墳丘土と復元用土として使用される候補材料の粒度試験結果を以下に示す。図 17 に、先に 4 つにグループ分けした前方部墳丘材料の粒度試験結果を平均したものと、復元用土の粒径加積曲線を比較した。また、それらの材料の粒度組成を図 18 に示す。現場流用土は、観察では黒色を呈しているものの、様々な発掘調査箇所での掘削土が混合されており、粒度は粗い側の材料であるグループ D に近い材料である。ジオライムはグループ D より多少粗い材料である。各務原（かがみはら）黒土は、観察では黒ぼく

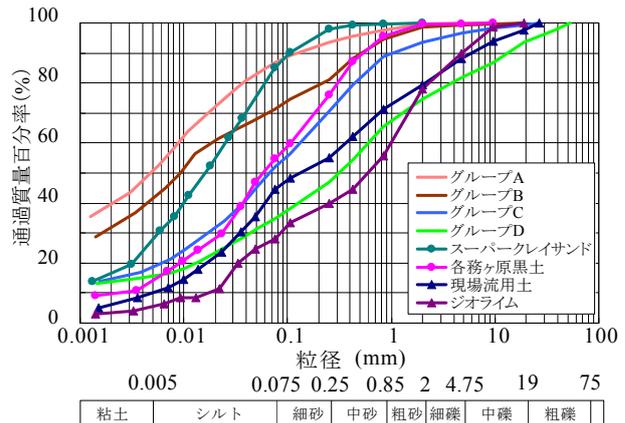


図 17 粒径加積曲線（墳丘土，復元用土）

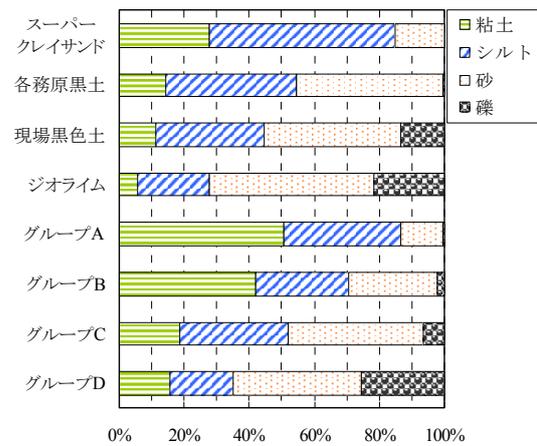


図 18 粒度組成（墳丘土，復元用土）

に近い材料であるが、砂分と礫分を合わせて 50% を占め、現墳丘材料の中では中間的な材料である。スーパークレイサンドは、ジオライムより細粒分が多く 8 割を占め、復元用土の中では、前方南西側の黒ぼく（ブラック）No.1~4 や黒ぼく（ブラウン）No.1~4 に最も近い材料であることが分かった。

4.3 締固め特性

4.3.1 墳丘材料

墳丘前方部と墳丘後部部の材料に対する突固めによる締固め試験結果を示す。

各エリアで採取された黒ぼく（ブラウン）、黒ぼく（ブラック）、粘土を比較すると、墳丘前方部の各材料は、墳丘後部部の材料より最大乾燥密度が大きく、これは墳丘前方部に比べ、墳丘後部部が砂分やレキ分を多く含んでいることに起因すると考えられる。

各エリアの粘土混じり黒ぼくについて比較すると、前方部の材料に比べ、後部部 No.9,10 の最大乾燥密度が大きくなっているが、後部部 No.11,12 の最大乾燥密度は前方部と同程度となっている。これは、後部部 No.11,12 の材料が後部部 No.9,10、前方部の材料に比べ、黒ぼくの含有率が大きいので、密度が小さくなるためである。そのことは土粒子の密度試験結果からも推測できる。後部部 No.11,12 の材料

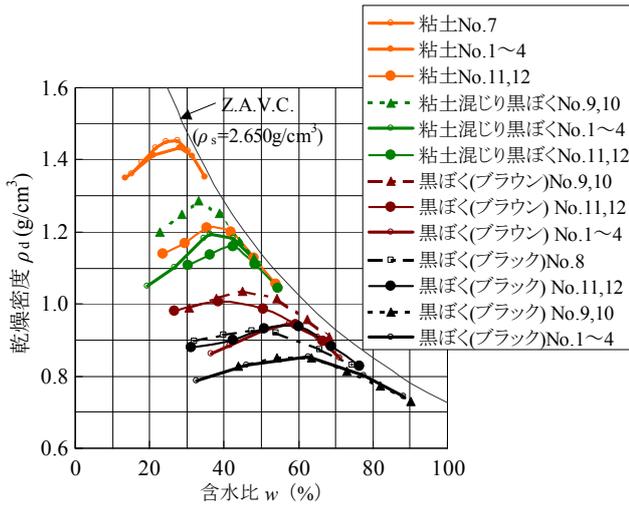


図19 締固め試験結果 (填丘土)

の土粒子密度は $2.56(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、後円部 No.9,10 の材料、前方部の材料の土粒子密度はそれぞれ $2.62(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $2.65(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり後円部 No.11,12 の材料と比較して大きい。粘土の試験結果についても同様の傾向があり、前方部の材料の土粒子密度は $2.73(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、後円部の材料の土粒子密度は $2.67(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり、前方部の材料と比較すると小さく、同様の理由で密度が小さくなると考えられる。

4.3.2 復元用土

填丘の復元に使用する候補材料と填丘材料の締固め試験結果を図 20 に示す。填丘材料の黒ぼく (ブラック) の最大乾燥密度が最も小さく、購入土のスーパークレイサンドの最大乾燥密度が最も大きい。その差は 1.0 以上であり、填丘復元候補材料 (現場流用土、各務原黒土、スーパークレイサンド、及びジオライム) と填丘を構成している土の締固め特性は大きく異なる。填丘材料に比較的近い特性を示す復元候補材料は現場流用土と各務原黒土であり、現填丘の黒ぼくの代用には各務原黒土、粘土や粘土混じり黒ぼくの代用には現場流用土が適用できると考えられる。

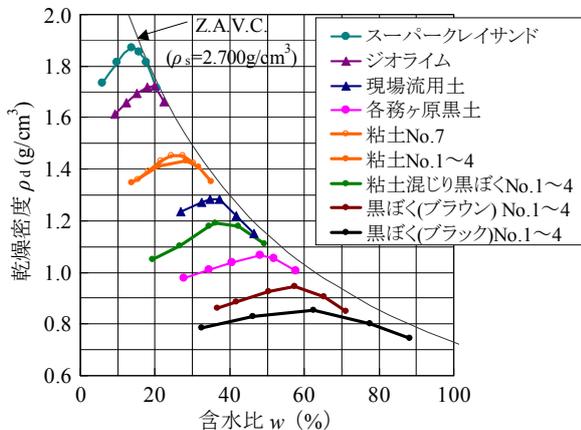


図 20 締固め試験結果 (填丘土、復元用土)

4.4 水分保持特性

填丘を復元するにあたって、填丘土を復元用土で覆うことになるが、この両材料間で水分移動がないように材料の選定を行うことが望ましいと考えられる。

土中のサクシオン (負圧) が異なる土を接触させた面では、水分の移動が発生する。異なった地盤材料で構築された盛土の材料境界における水分移動を防ぐためには、既存の填丘土とほぼ同等のサクシオンを有するよう材料を復元材料として使用する必要がある。

それぞれの材料の体積含水率とサクシオンの関係、すなわち水分保持特性を把握することを目的として、水分保持特性試験を実施した結果を以下に示す。図 21 はその試験装置の概要である。図 21 に示すアクリルモールドに試料を入れて均質に締固め、供試体を作製する。供試体が入ったモールドを挟んで透過型 RI 密度計を取り付ける。ここで用いる透過型 RI 密度計とは、供試体を挟んでガンマ線源とガンマ線検出器を設置し、供試体を透過して検出器に到達するガンマ線の検出数から供試体の密度を測定するものである。試験は、供試体下部の注水口から水を吸水させ、そのときの密度の変化 (体積含水率の変化) を測定する。同時にコア密度計で測定している中心高さに、間隙水圧計を設置し供試体内の負圧 (サクシオン) を測定する。原位置調査における RI 密度水分計の測定結果から、黒ぼく (ブラウン) で構築されている部分における填丘土の体積含水率は $0.5(\text{cc}/\text{cc})$ 前後であることがわかっている。図 22 に示す水分保持特性試験の結果より、黒ぼく (ブラウン) の体積含水率 $0.5(\text{cc}/\text{cc})$ のときのサクシオン ϕ は 2.5kPa 程度である。一方、各務原黒土においてサクシオンを 2.5kPa

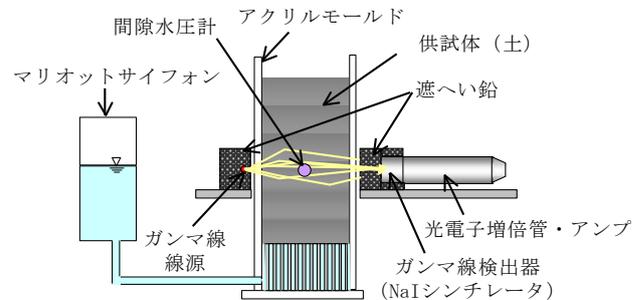


図 21 水分保持特性試験装置

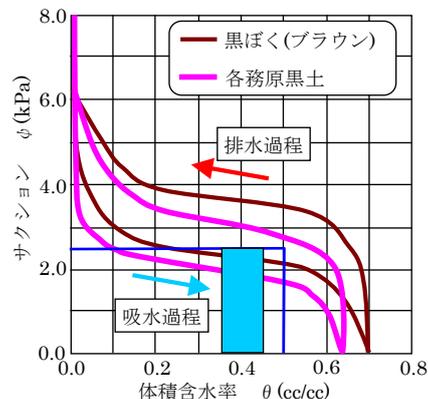


図22 水分保持特性試験結果

とするためには、図中の水色の四角で囲んだように、体積含水率を 0.35~0.45(cc/cc)とすればよい。各務原黒土の自然含水比（入手時の含水比）は 40%前後であり、現填丘土とほぼ同等の締固めをした場合の体積含水率は 0.4(cc/cc)程度（含水比で 48%程度）であるので、やや加水して含水比調整し、使用することにより復元用土と填丘土間の水分移動を防ぐような盛土が構築できると考えられる。

4.5 填丘の締固め程度

4.5.1 現場密度試験結果

今回の調査では表面透過型 RI 密度水分計を用い、原位置での現場密度と水分測定を行った。図 23, 24 に前方部の黒ぼく（ブラウン）No.1~4、後円部の黒ぼく（ブラック）No.11,12 の締固め試験結果図上に、現場の密度水分測定結果をプロットしたものをそれぞれ示す。現場データは、ゼロ空気間隙曲線に平行な帯状の領域に分布している。現在の盛土工事の締固め品質管理データを分析すると、一定の締固め施工仕様で締固められた盛土は、含水比~乾燥密度図上で空気間隙率 $v_a=5\sim 15\%$ の領域に分布することが知られている⁹⁾。図 23, 24 には、ゼロ空気間隙曲線に加え、空気間隙率 $v_a=15\%$ 、 $v_a=30\%$ の場合の曲線も併記した。填丘の密度および水分の測定結果は、前方部の黒ぼく（ブラウン）No.1~4、後円部の黒ぼく（ブラック）No.11,12 とともに

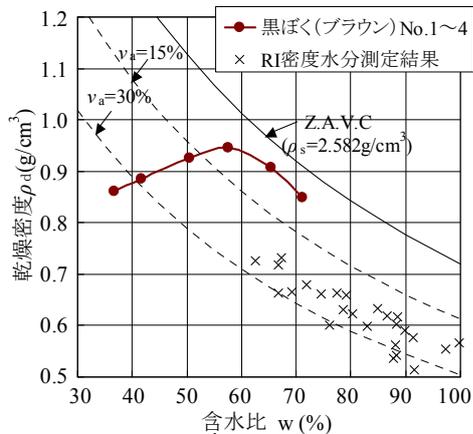


図 23 填丘土の締固め度（黒ぼく（ブラウン）前方部）

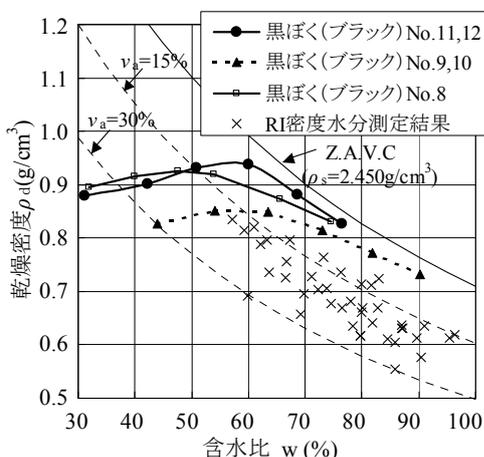


図 24 填丘土の締固め度（黒ぼく（ブラック）後円部）

$v_a=15\sim 30\%$ の範囲に分布している。両材料において、空気間隙率がある範囲に分布しているのは、填丘土がほぼ同じ締固め施工状態になっていることを示唆している。

4.5.2 エネルギーを変えた土の締固め試験

4.5.1 で示した結果より、填丘土はある一定の締固め施工状態になっていることがわかった。ここでは締固めエネルギーと乾燥密度の関係を得るため、プロクターによって定義された締固め仕事量 ($1 \times E_{cJIS} \approx 550 \text{kJ/m}^3$) を基準とし、各エネルギーで締固めた時の土の乾燥密度を求めた。試験法は「JIS A 1228 に準拠する JHS 条件 締固めた土のコーン指数試験」の手順を参照した。自然含水比状態の黒ぼく（ブラック）No.11,12 に対して行った試験結果を図 25 に示す。填丘の黒ぼくの乾燥密度はおおよそ 0.7g/cm^3 程度であることから、填丘構築時の締固めエネルギーは $0.1 \times E_{cJIS}$ 程度であると考えられることができる。これは人が足で踏み固めた程度の締固めエネルギーである。この結果より、現填丘はあまり大きくない締固めエネルギーによって締固めが行われたと考えられるため、復元盛土構築時の転圧は、タイヤローラーや振動ローラーなどの大型重機による締固めなどは行わず、プレートタンパーなどの転圧による施工によるべきであると考えられる。

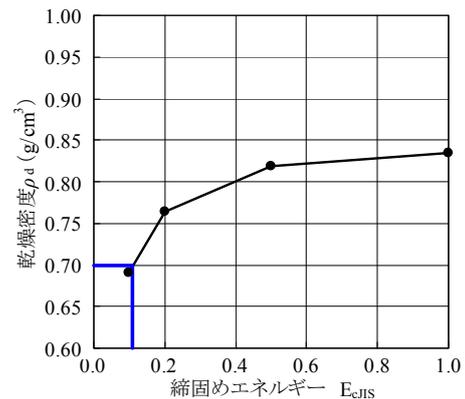


図 25 締固めエネルギーを変えた締固め試験結果

5. 填丘の構築過程

5.1 填丘くびれ部における原位置調査

填丘前方部および後円部の接続部にあたる填丘くびれ部においても、針貫入試験と RI 密度水分測定を行った。調査エリアを写真 6 に示す、幅 1.2m×高さ 1.5~1.9m の 3 箇所に設定した。

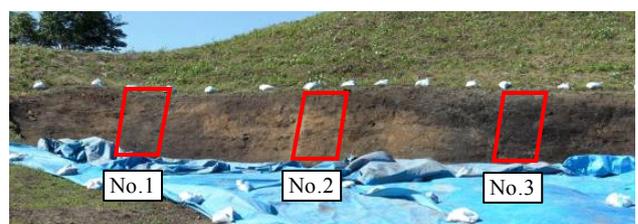


写真 6 前方部と後円部の接続部分（くびれ部）における調査断面

5.1.1 針貫入試験結果およびRI 密度水分測定結果

くびれ部に最も近いエリア No.1 西側(写真左側)は粘性土との混合材料が主体, 中央のエリア No.2 は粘性土主体, エリア No.3 は黒ぼく主体と考えられる。

図 27 に No.1 での試験結果を示す。コンター図では, 水平方向に卓越した構造は認められない。同図 b)に示す試験エリアの写真にも目立った構造は見えない。水平方向の積

層構造が認められた前方部および後円部の調査面とは異なった盛土構造である。エリア No.1 では全層にわたってほぼ均質な材料が配置されていることから, 同図 c) 表面型 RI 密度水分測定結果に標高についての大きな変動はない。乾燥密度は 0.8g/cm^3 , 含水比は 40~60%程度である。くびれ部の 3 つの測定エリア(No.1, 2, 3)の強度コンター図を 図 27 に比較して示す。3 つの異なるエリアの結果を比

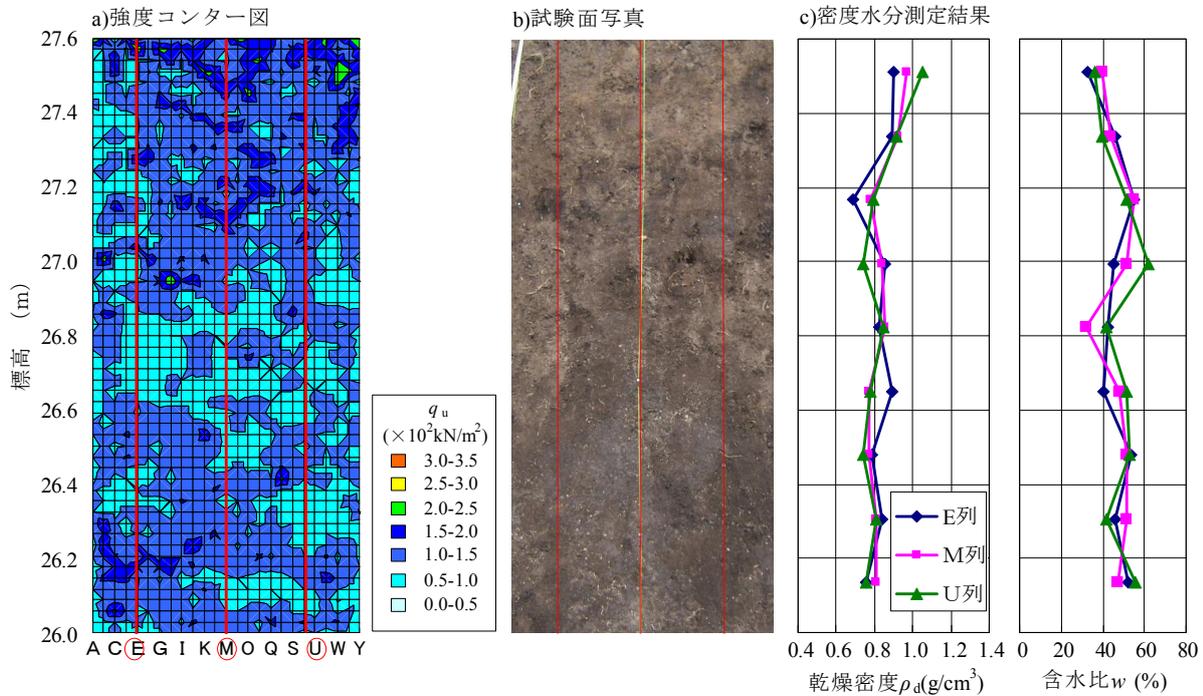


図 26 くびれ部試験エリア No.1での調査試験結果

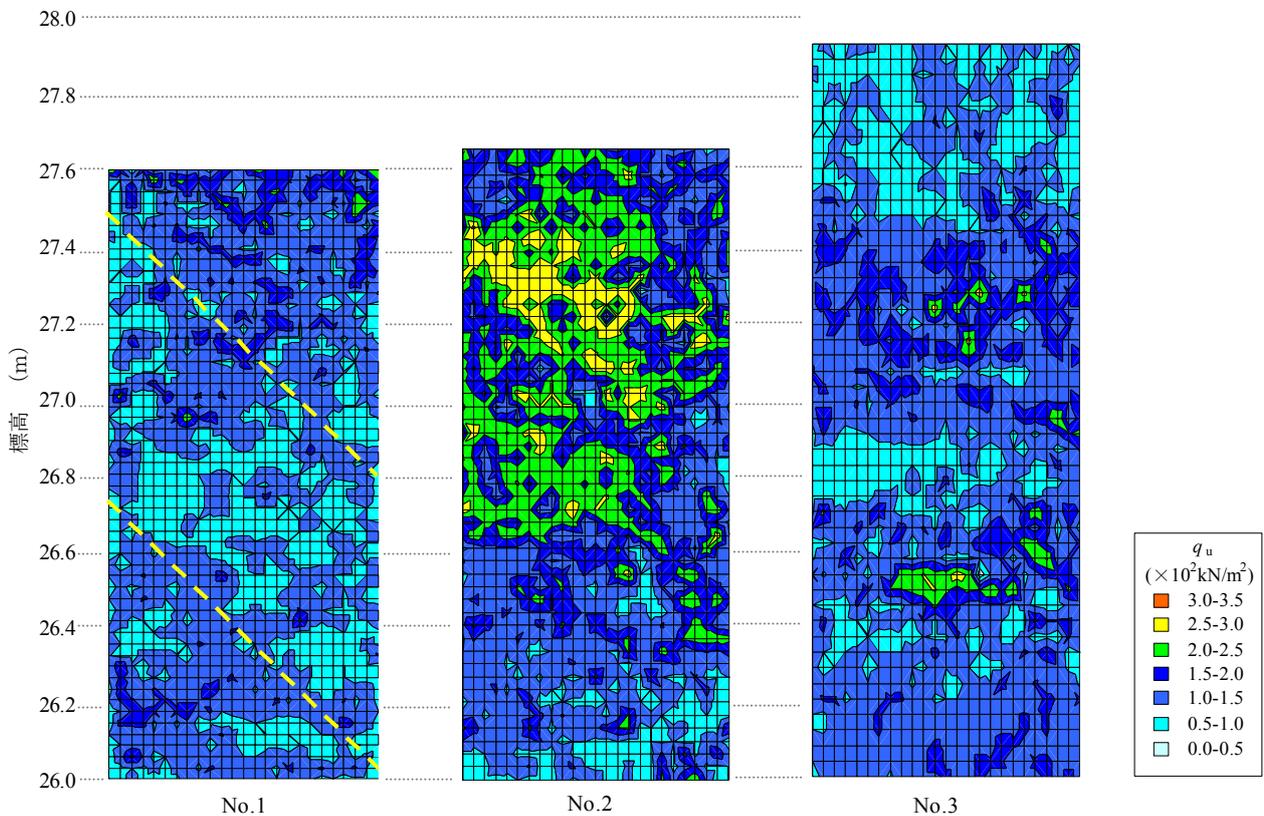


図 27 くびれ部の強度コンター図

較すると、後円部の中央に近いエリア No.2, 3 では前方部南西側や後円部で見られたものと同様の水平方向に卓越した積層構造が認められる。これに対して No.1 では強度コンターには左上から右下に向かういくつもの帯状構造がある。この構造は図 27 中に示した点線のような勾配を有しており、これは墳丘の構築過程を反映したものと考えられ、次項で考察する。

5.1.2 墳丘の構造および構築過程の推定

発掘調査面で実施した墳丘盛土に対する一連の原位置試験によって、古墳の墳丘は現在と同じように水平に積層する工法で築造されたことが明らかとなった。

古代の技術で築造された古墳墳丘は、精密な設計に基づいていると考えられている。図 28 は昼飯大塚古墳の設計の1つの考えを示している。古代の長さの基準は「人体尺」であり、古墳は人が両手を広げた長さ「尋(ヒロ)」を基準としている¹⁰⁾。「尋」には大和政権につながる大王墓に適用されたとされる約 160cm に相当する「大尋」と、地方の首長墓に適用されたとされる約 150cm の「小尋」があり、昼飯大塚古墳は後者に相当する。昼飯大塚古墳では 8 尋を 1 区画として、図 28 のように後円部直径 8 区画、前方部の長さは後円部の半径に相当する 4 区画で設計されたと考えられる。

こうした設計コンセプトに基づき、古代の技術者は墳丘の外形を縄と杭を使って基盤上に描き、墳丘の築造を行ったと考えられる。具体的には、図 29 に示すように、まず

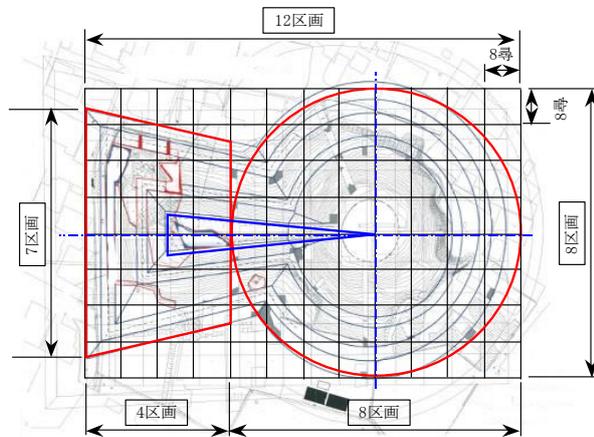


図 28 昼飯大塚古墳の設計

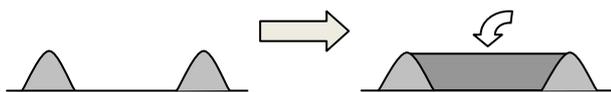


図 29 墳丘構築の手順

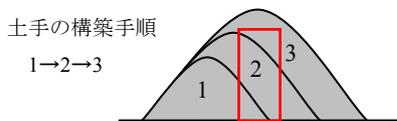


図30 墳丘の土手形成手順

描かれた外形線に沿って後円部の境界に土手状の盛土を形作り、内側に向かって土を配置することによって墳丘を盛り上げ、ある段階で図 30 に示すように境界の土手状盛土を嵩上げし、内側に土を配置するという工程を繰り返して真円の墳丘を構築したものと想定される。

前方部と後円部の接合部にあたるくびれ部の断面は、図 30 に示すような部分にあっており、図 27a)の強度分布は図 30 の四角で囲んだ部分を測定したために、左上から右下への斜めの締め面が現れたものであると説明できる。

6. おわりに

岐阜県大垣市の史跡昼飯大塚古墳の復元と整備にあたり、損壊を受けて墳丘断面が現れた箇所を中心に、原位置試験を実施するとともに、発掘調査で得られた墳丘土に対する室内土質試験を併せて行い、墳丘の構造や強度特性を調査した。史跡へのダメージを最低限に抑えるために、実質非破壊の表面型 RI 密度水分測定器と針貫入試験機を用いて、墳丘断面の原位置密度、含水比、ならびに換算一軸圧縮強さを面的に評価することができた。高松塚古墳をはじめ、各地の歴史的地盤構造物の地盤工学的な調査で実績のあるこうした実質非破壊の原位置試験法が、昼飯大塚古墳においても非常に有効に機能し、復元整備計画の基礎となる工学的情報を提供することができた。また、前方後円墳の前方部と後円部の境界部の調査によって、墳丘の構築過程を強度分布に基づいて推定することができた。

次に、攪乱試料を用いた室内試験によって、墳丘土と復元用土の粒度特性と水分保持特性を調べ、古墳墳丘部と復元部との間の水分移動が起こらないように含水比の調整が必要となることを示した。また、墳丘構成土に対応した材料を使用し、墳丘土の締め特性を調べ、原位置 RI 密度水分検層結果との比較を通じて、墳丘構築時の締めエネルギーの推定を行った。大まかではあるが、黒ぼく土を中心とした墳丘は 20~30cm 層厚で人が踏み固める程度のエネルギーで構築されていることがわかった。こうした知見に基づき、欠損している墳丘の復元に当たっては、前述した層厚の推定とあわせ、1層 30cm、プレートタンパー1往復程度という施工仕様を提案した。現在、本稿で述べたような仕様に則って墳丘の復元工事が進められている。

参考文献

- 1) 大垣市教育委員会：史跡昼飯大塚古墳—本文編一、大垣市埋蔵文化財調査報告書、第12集、2003
- 2) 三村衛、吉村貞、寺尾庸孝、豊田富士人、中井正幸：史跡「昼飯大塚古墳」墳丘の盛土構造に関する検討、第55回地盤工学シンポジウム平成22年度論文集、pp.67-72、2010
- 3) (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、pp.62、2006
- 4) 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

- て、地盤工学ジャーナル, Vol. 1, No. 4, pp. 157-168, 2006
- 5) 明日香村教育委員会：カヅマヤマ古墳発掘調査報告書－飛鳥の磚積石室の調査－, 明日香村文化財調査報告書, 第5集, pp.164, 2007
 - 6) 明日香村教育委員会：真弓鐘子塚古墳発掘調査報告書－飛鳥の穹窿状横穴式石室の調査－, 明日香村文化財調査報告書, 第7集, pp.187, 2010
 - 7) 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の評価に関する研究, 土木学会論文集C, Vol.65, No.1, pp.241-253, 2009
 - 8) 土木学会：軟岩の調査・試験の指針（案）－1991年版－, 1992
 - 9) 豊田光雄, 延山政之：走査式(SRID)および固定式RIによるフィラダムコア材の締固め密度に関する考察, 第33回地盤工学研究発表会, pp.2045-2046, 1998
 - 10) 宮川徭：前方後円墳の築造企画と単位（1）, 計量史研究15（1）[16], pp.31-43, 1993

(2010. 1. 20 受付)

Geotechnical investigation for restoration of the mound of Hirui-Otsuka tumulus

Mamoru MIMURA¹, Mitsugu YOSHIMURA², Tsunetaka TERAO²,
Fujito TOYODA³ and Masayuki NAKAI⁴

- 1 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
- 2 Technological Development Division, Soil and Rock Engineering Co. Ltd.
- 3 Department of City Planning, Ogaki City
- 4 Board of Education, Ogaki City

Abstract

Geotechnical characteristics for the earth mound of historical tumuli are recently strongly required during the archeological investigation because the mechanical properties of mound soils have to be evaluated for conservation of those tumuli particularly in the case that they have to be restored or partly reconstructed. In the present paper, the procedure of the geotechnical investigation for geo-relics is introduced by exemplifying the achievement for the Hirui-Otsuka Tumulus, the largest keyhole shaped one in Gifu Prefecture. Needle penetration test is adopted as an almost non-destructive testing procedure to measure the equivalent uniaxial strength of the tumulus mound with little damage. On the basis of a series of in-situ experimental findings, the horizontally layered structures have been confirmed throughout the tumulus with different earth materials. The typical traces of compacted earth reflecting the procedure of construction of the tumuli mound as a variation of strengths have also been detected. A series of laboratory tests was conducted on the soils excavated from the tumulus as well as artificial ones selected for restoration of the tumulus. The properties of particle size distribution and retention have provided the useful suggestion for reconstruction of the lost tumulus mound that directly contacts the original tumulus mound. Compaction tests on the excavated tumulus mound soils shows that the tumulus mound was constructed with the energy of $0.1E_{cJIS}$ which is almost equivalent to the one with treading down. The investigated results have provided the effective proposal for restoration procedure of the tumulus.

Key words: Geo-relics, Mound of tumulus, Field investigation, Non-destructive test, Restoration