

第Ⅲ部門

細・粗互層盛土の密度と強度特性に関する実験的研究

京都大学大学院工学研究科 学生員○中野 雄太  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 澤田 茉伊  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 三村 衛  
 ソイルアンド・ロックエンジニアリング 正会員 吉村 貢

1. はじめに

古墳など歴史的地盤構造物の墳丘の中には細粒土と粗粒土を交互に締め固めた細・粗互層構造を有しているものがある。そういった古墳の一例として、奈良県高市郡明日香村の都塚古墳（図 1）が挙げられる。都塚古墳は 6 世紀末に築造された古墳で、方形の段築状をしていたと確認されており、その規模は一辺約 41m、高さ 4.5m 程度である。古墳墳丘は一般的に均質な材料を用いて築造されるが、都塚古墳では細粒分含有率の異なる 2 種類の材料を交互に締め固めた細・粗互層構造を有している<sup>1)</sup>。図 2 に都塚古墳の代表層の粒径加積曲線を示すが、層厚 10cm 前後の細・粗粒土層が交互に締め固められている。明日香村内には、都塚古墳墳丘の細粒土粒径の土のみで造られた墳丘もあり、都塚古墳では意図的に粗粒土層を設けたと考えられる。細・粗互層構造を墳丘に用いた理由として、①密度・強度の増加、②圧密促進、③雨水の浸透抑制効果を期待したといったことが考えられる。そこで本研究では、墳丘を模擬した試料を用いて、室内試験で①～③を調べた。本稿では、このうち、①について議論する。



図 1 都塚古墳の外観

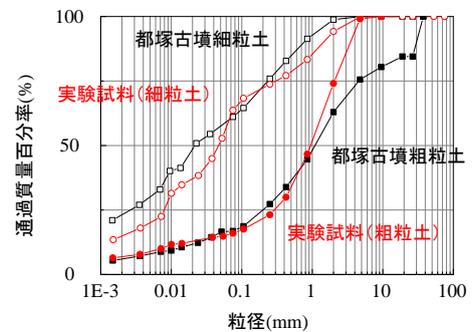


図 2 都塚古墳と実験試料の粒径加積曲線

2. 細・粗粒土の締め固め特性と互層地盤の密度構造

実験試料は、都塚古墳の粒度分布を参考に、購入土（マサ土と深草粘土）を粒度調整して作製した（図 2 に併記）。一連の試験で用いる供試体は、墳丘と同等の密度・含水比を有することが必須であるため、その締め固め特性を調べた。墳丘の締め固めは現在の機械施工と異なり、踏み固めやタコなどの器具を用いた人力により行われていたと考えられる。三村ら<sup>2)</sup>はその締め固めエネルギーは Standard Proctor ( $E_c=550\text{kJ/m}^3$ ) の 10～20%程度であったと報告している。そこで、本研究では人力による締め固めエネルギーを  $0.2 \times E_c$  と仮定し、細粒土および粗粒土に対して、通常の  $1.0 \times E_c$  に加えて、 $0.2 \times E_c$  で締め固め試験を行った（図 3）。なお締め固めエネルギーはランマーの落下回数を変化させることにより調整した。この試験の結果より、墳丘築造時の密度構造を再現するための供試体の含水比と密度の条件を決定した。墳丘の施工含水比は自然含水比と定め、細粒土は 16.8%、粗粒土は 12.0%とした。また、密度は自然含水比状態の試料を  $0.2 \times E_c$  で締め固めたときの乾燥密度から、細粒土は  $1.45\text{g/cm}^3$ 、粗粒土は  $1.77\text{g/cm}^3$  とした。

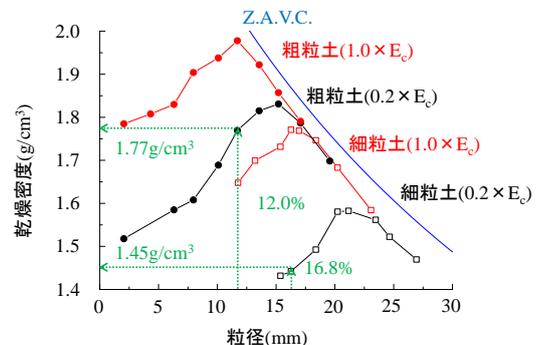


図 3 締め固め曲線

以上の条件で、細粒土単体、粗粒土単体、互層の三種類の供試体を作製し、供試体内の密度分布を比較することにより、互層構造が密度に与える影響を調べた。円筒形アクリルモールド（内径 20cm、高さ 101cm）内に、自然含水比に調整した試料を均等に撒きだし、所定の乾燥密度となるように層厚を管理しながら締め固めることによって供試体を作製

した。なお一層あたりの層厚は 4cm とし、測定領域は最低でも 40cm (10 層分) となるようにした。密度測定にはこうして作製した供試体に  $\gamma$  線を照射し、その透過の程度から密度を推定する RI (ラジオアイソトープ) コア密度測定機を用いた。試験の結果を図 4 に示す。いずれの単体供試体でも、締固め層厚を周期とする密度の振幅が読み取れる。これは締固め面ではエネルギーが直接伝えられるが、締固め面から遠ざかるにしたがってエネルギーが消散することに由来する。互層供試体については、各層の密度勾配は単体の場合と同等であるが、細粒土のみの場合よりも平均的な密度は増加している。また供試体ごとの密度は細粒土、粗粒土の概ね平均であることがわかった。なお周期は 2 倍になっているが、これは粗粒土層内の最小密度と細粒土層内の最大密度が偶然同等であったためである。

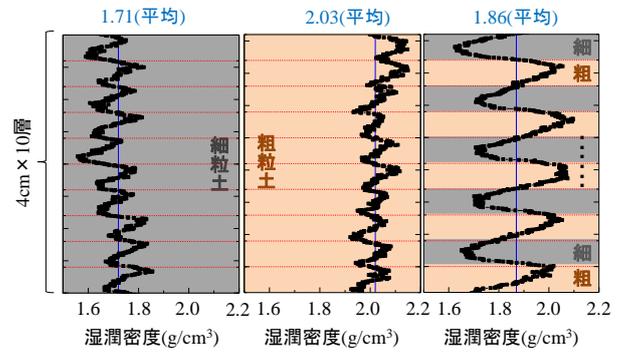


図 4 密度試験結果

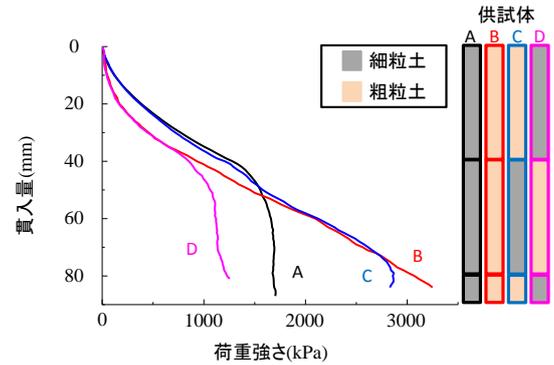


図 5 コーン指数試験結果

### 3. 細・粗互層地盤の強度特性

コーン指数試験により、互層地盤の強度性状を調べた。供試体は、内径 15cm のモールドに所定の含水比、乾燥密度となるように一層あたり 4cm 厚で、3 層を締め固めて作製し、コーン (先端角  $30^\circ$ 、底面積  $3.24\text{cm}^2$ ) を 1cm/sec で自動貫入したときの抵抗力を測定した。供試体は A. 細粒土単体、B. 粗粒土単体と C. 中間層が細粒土で他は粗粒土、D. 中間層が粗粒土で他は細粒土、の計 4 ケースとした。試験はそれぞれのケースごとに 3 回行ったが、再現性のある結果となった。3 回の試験結果の平均を図 5 に示す。貫入量が小さいときはいずれの供試体も同程度の強度を示す一方で、貫入量が大きくなると、細粒土の強度の増分は緩やかだが粗粒土は直線的に強度が増加するという傾向がみられた。これは、粗粒土が細粒土よりも大きな正のダイレイタンスを示すためである。ただし、異なる材料を互層にしたことによる相乗効果の類は確認されず、層ごとにそれぞれの材料の傾向がみられた。

次に細・粗粒土それぞれの強度定数を一面せん断試験で評価した。試験より、細粒土の粘着力は  $78.3\text{kPa}$  と粗粒土の  $49.2\text{kPa}$  よりも大きく、一方で内部摩擦角は細粒土が  $25.0^\circ$ 、粗粒土が  $50.9^\circ$  と粗粒土のほうが大きかった。これより低拘束圧では細粒土のせん断強度が粗粒土を上回るが、高拘束圧下ではその大小が変化する。この大小関係が入れ替わるときの拘束圧は  $35\text{kPa}$  ほどであり、単位体積重量が  $18\text{kN/m}^3$  であれば深さ 2m 程度である。すなわち、2m 以深においては粗粒土がより強いせん断強度を発揮するといえる。つまり、すべり面が深い場合には、粗粒土が細粒土よりも高いせん断強度を発揮するため、細粒土のみの墳丘よりも互層の方が安定であると考えられる。さらに、細・粗粒土の浸透特性に差があるために (例えば、飽和透水係数は、細粒土が  $1.51 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、粗粒土が  $1.51 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ )、層境界で雨水の内部への浸透が抑制される点でも、互層構造は力学的安定性に寄与していると考えられる。

### 4. まとめ

古墳墳丘に見られる細・粗互層構造が密度、強度に及ぼす影響について考察した。細粒土単一試料、粗粒土単一試料、細・粗互層供試体に対する試験により、細粒土単体よりも互層にすることで土層全体の平均的な密度は増加し、強度については細粒土、粗粒土が互層内でもそれぞれの特性を発揮することがわかった。さらに拘束圧が高くなると粗粒土のせん断強度発現が優位となり、大規模な墳丘で深いすべりが懸念されるような場合に互層地盤が安定性に大きく寄与することがわかった。本研究で対象とした互層構造などの、墳丘築造技術を工学的に評価することにより、力学的に安定でかつ遺跡の本質的価値を損なわない修復・保存技術の構築を目指す必要がある。

### 参考文献

- 1) 明日香村教育委員会、関西大学文学部考古学研究室：都塚古墳発掘調査報告書、2016.、2) 三村衛、澤田茉伊、吉村貢、松浦良信：古墳墳丘の締固めエネルギーに関する一考察、第 50 回地盤工学研究発表会講演集、pp.23-24、2015.