

第Ⅲ部門

古墳墳丘の石室が地震時の破壊挙動に与える影響

京都大学大学院	学生会員	○有働 龍也, Tumurkhuyag Enkhtuvshin
京都大学大学院	正会員	澤田 茉伊
京都大学大学院	フェロー会員	三村 衛

1. はじめに

歴史的な地盤構造物である古墳を文化遺産として後世に伝えていくことは非常に重要であるが、自然作用により損傷している古墳も多く、特に地震による被害は甚大である。平成28年熊本地震でも、多くの古墳で墳丘の崩壊や落石が発生した。外観上の対症療法では、被害の再発や悪化を招く恐れがあるため、地盤工学に基づき破壊メカニズムを明らかにし、有効な修復・保存技術を研究する必要がある。

そこで本研究では、動的遠心模型実験によって、墳丘の地震時の動的挙動と破壊メカニズムを解明することを目的とする。古墳は埋葬施設としての石室を内部に抱えることが多いので、特に石室の条件に着目し、条件の違いが破壊挙動に与える影響を調べる。

2. 実験概要

本実験では、50G 場において剛性土槽を用いて動的遠心模型実験を実施した。模型の条件は高松塚古墳(円墳、直径18m、高さ5.0m)の縦断面を参考に決定した。高松塚古墳をはじめ、奈良県高市郡明日香村の古墳では、宗教上の理由、もしくは土量の削減のためと考えられるが、古墳は南側斜面の一部を切土して造られることが多く、いくつかの古墳では地震痕跡が発掘されている。図-1に、実験模型ならびに計測項目の概略図を示す。

実験材料として2mm以下にふるい分けした牽牛子塚古墳の発掘残土を用いた。盛土は、高松塚古墳の原位置試験¹⁾を参考に、含水比15%に調整し、 $V_s=130\text{m/s}$ を目標に、密度を変化させて動的変形試験を行った結果、乾

燥密度 ρ_d を 1.58g/cm^3 に設定した。一方、地山は盛土に対して、十分剛性の高い地盤になるように、試料に固化材として消石灰を混合(乾燥重量比で10:1)し、 $\rho_d=1.71\text{g/cm}^3$ ($V_s=240\text{m/s}$ 相当)に設定した。石室は、板厚0.5mの石材を4枚組み合わせたもの(内寸:幅1.03m、高さ1.13m)を想定し、寸法と密度が相似率を満足するようエポキシ樹脂板を用いて作製した。ただし、樹脂板同士は接着しない。なお、盛土の前面には直径5mmのターゲットを埋め込み、実験前後に撮影した写真を画像解析することにより、盛土の変形をとらえられるようにした。

加振においては、入力波形として、2Hz、20波のテーパー付き正弦波を用いた。そして、入力加速度の大きさに応じて、墳丘部分の変位・加速度の応答を調べるため、10段階のステップ加振を行った。

3. 実験結果

実験後の写真および画像解析結果を図-2に示す。地山側の石室隅角部より法肩にかけて大きく亀裂が生じ、石室の天井と、上部の盛土が地山と逆側にずれ動いていることがわかる。画像解析によると、天井は13.4mm移動した。亀裂は、地山の存在のため盛土は地山から離れるように変位しようとするが、石室部分は盛土の変形に抵抗し、石室と盛土の間で発生する引張により生じたと考えられる。振動台の最大加速度と残留変位の関係を図-3に示す。変位は、図-1において赤矢印の方向への変位を負とする。ここでは、各加振ステップの時刻歴波形の加振前後の変位の差の累積値を残留変位とする。振動台の最大加速度が約 250m/s^2 になると、地山と逆側の法肩・法尻が地山から離れるように変

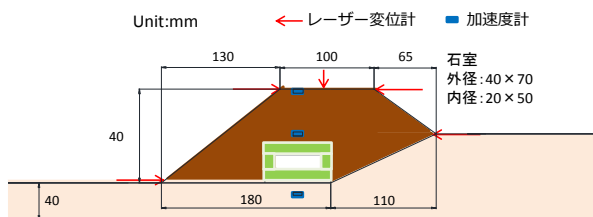


図-1 模型概略図



図-2 実験後の写真

Udou Tatsuya, Tumurkhuyag Enkhtuvshin, Sawada Mai and Mimura Mamoru
e-mail : udou.tatsuya.76w@st.kyoto-u.ac.jp

位し、天端が沈下していることがわかる。破線で示す最終の2ステップでは、これと異なる挙動を示す計測点があるが、これは盛土の変形が大きくなり、変位計測用のターゲットの転倒したためと考えられる。

10段階のステップ加振の代表として、5ステップ目の加速度の時刻歴波形を図-4に示す。各ステップで得られた加速度波形をスペクトル解析し、増幅率（盛土内もしくは天端のフーリエ振幅／盛土下のフーリエ振幅）を求めたところ、盛土内では、1.42、天端では1.25であった。ただし、振動台の特性上、入力波は2Hzを超える高周波の波が多少含まれ、これが増幅率の算定に影響するため、ここでの増幅率は、2Hzにおけるフーリエ振幅を用いて算定した。

4. 石室が古墳の動的挙動に与える影響

石室の有無、石材の有無、石材間の摩擦が動的挙動に与える影響を調べるため、前述と同様の手順で比較実験を行った。

(1) 石室の有無による比較

石室がない盛土模型を用いて実験を行った。その結果、盛土に亀裂が生じず、残留変位もほとんど生じず、最終加振ステップにおいてもわずか0.5mmであった。また盛土内および天端の増幅率は、それぞれ1.23、1.19となっており、石室がある場合よりも小さい。すなわち、石室を内包することによって、石室上部の盛土は揺れやすく

なると考えられる。

(2) 石材の有無による比較

石材を取り除いた空洞が空いた盛土で実験を行った。振動台の最大加速度が約 250m/s^2 になると、空洞上部が崩落した。石材がある場合よりも急激に破壊が進むが、大きな変状が生じる際の振動台の最大加速度は同程度である。また、石材を取り除いた盛土内および天端の増幅率は1.19、1.20となっており、石材を有するケースよりも小さくなっている。石材がない場合は、やや極端な想定であるが、実際の古墳においても石材が著しく損傷している場合は、本実験で観察されたような脆性的な破壊が起こると予想される。

(3) 石室の摩擦の大小による比較

エポキシ樹脂板の断面に試料を付着させて、摩擦を効かせた実験を行った。一面せん断試験で評価したところ、試料を付着させない場合は $c=9.0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=26.2^\circ$ 、付着させる場合は、 $c=10.2\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=17.9^\circ$ となった。このように摩擦が大きい場合は、盛土に亀裂が生じず、残留変位も小さく、最終加振ステップにおいてもわずか0.8mmであった。これは石室間の摩擦が十分発揮されていることに起因すると考えられる。石材間の摩擦の大小によって、破壊の程度に顕著な差が見られたことから、摩擦が古墳の耐震性に与える影響は大きく、石室を修復する際は、石材間を接着、間詰めする必要があると考えられる。

5. 結論

本研究で、動的遠心模型実験を用いて墳丘の加振時の挙動を観察し、動的応答を定量的に評価することができた。石室を有する盛土は、石材間の摩擦が小さい場合は、振動台の最大加速度が約 250m/s^2 になると、地山側の石室隅角部に大きな亀裂が生じ、石室の天井と、上部の盛土が地山から離れるように変位した。しかし、摩擦が大きい場合は、変形はほとんど見られず、石室間の摩擦が耐震性に与える影響が大きいことがわかった。また、盛土荷重を支える石材がない場合は、天井が脆性的に崩落することがわかった。

参考文献

- 1) 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。

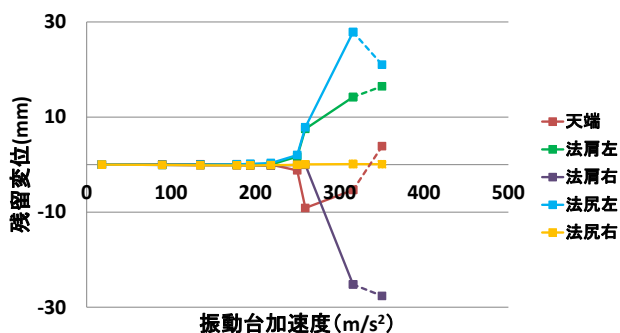


図-3 振動台の最大加速度と残留変位

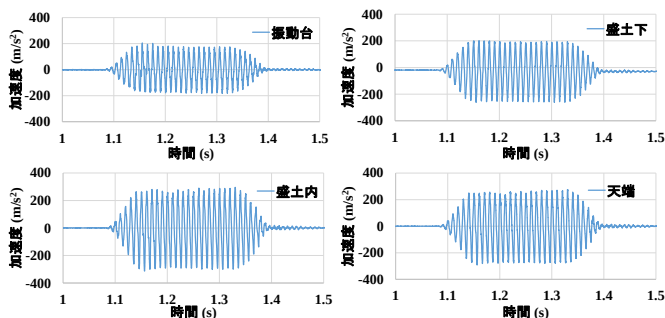


図-4 加振5ステップ目の加速度の時刻歴波形