古墳の地震時破壊メカニズムに関する研究―石室石材の摩擦の影響―

京都大学大学院	正会員	○澤田	茉伊
京都大学大学院	非会員	Tumu	rkhuyag Enkhtuvshin
京都大学大学院	フェロー会員	L 三村	衛

### 1. はじめに

古墳の多くは、自然作用や人為的破壊により損傷を受けている. 特に地震は、墳丘の亀裂や石室石材の落下といった深刻な被害を もたらす.近年では、平成28年熊本地震により、熊本県内の複数 の古墳が被災した.古墳を次世代に保存するためには、破壊メカ ニズムを解明し、予防的対策を採ることにより、被害を軽減する ことが必要である.本研究では、動的遠心模型実験と再現解析に より、古墳の地震時破壊メカニズムを解明することを目的とし、 特に石室石材の摩擦が破壊形態に与える影響を考察する.

## 2. 動的遠心模型実験による破壊挙動の確認

図1に示す1/50スケールの古墳の断面模型を用いて、50G場で実験を行った. 模型は,直径18m,高さ5mの円墳を想定したものであり,試料は同村の牽牛子塚古墳の発掘残土の2mm ふるい通過分を用いた. 細粒分を42%含む,比較的粒度のよいマサ土である.密度,含水比は,高松塚古墳

(奈良県明日香村)の調査<sup>1)</sup>を参考に,表1のように設定した.地山部分 は、試料に固化材として消石灰を混合し、盛土に比べて十分硬い設定とし た.石室は、厚さ10mmの樹脂板を4枚組み合わせて模擬した.樹脂板同士 の接触面は、滑らかな場合(c=10.2kN/m<sup>2</sup>、 $\varphi=17.9^{\circ}$ )と土粒子を付着させた 場合(c=11.6kN/m<sup>2</sup>、 $\varphi=32.6^{\circ}$ )の2種類とした.振動台に入力する変位波形 は、100Hzの正弦波とし、振幅を段階的に大きくして数波を与えた.

地表面の最大加速度がプロトタイプで 500gal 程度の加振をした際の実験 後の模型を図 2 に示す.いずれの模型も、天端と法面に亀裂が生じている. ただし、摩擦が小さい場合は、側壁が内側に移動し、直後に背面土が崩壊し たのに対し、摩擦が大きい場合は、石室は変形しないが、隅角部に亀裂が生 じている点に違いが見られる.

### 3. 主応力分布に基づく破壊メカニズムの考察

模型実験で確認された亀裂は, せん断もしくは引張応力によるもの と考えられる.そこで,実験を再現解析し,主応力分布をもとに, 亀 裂のメカニズムを考察する.地表面以上を解析領域とし,地表面で観 測された加速度を入力波とする.盛土は修正 Ramberg-Osgood モデル <sup>2)</sup>を適用し, 図3に示す動的変形特性をもとにパラメータを設定した. 樹脂板は剛体として扱い, 樹脂板間と周面の土との境界にはジョイン ト要素を設け, 滑動と剥離を表現できるようにした.ジョイント要素



図1 古墳の断面模型(1/50 スケール)

#### 表1 模型の諸量

	盛土	地山
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	_
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.58	1.91
含水比 (%)	15	_
飽和度 (%)	43	—
せん断弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	27	204



図2 実験後の模型(亀裂をトレース)



キーワード 動的遠心模型実験,地震応答解析,文化財保存,引張亀裂 連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-213 京都大学大学院工学研究科 TEL 075-383-3306

-695-

のせん断ばね定数は,一面せん断試験で得た応力-ひずみ関係をもとに決 定し,垂直ばね定数は,計算可能な範囲で十分大きい値とした.実験と解 析で得られた加速度応答の比較の一例を図 4 に示す.どちらもプロトタイ プスケールで表示している.より大きな加振条件では,盛土の亀裂の目開 きや,法面の崩落,振動台の特性に起因すると考えられる高周波成分が混 入し,これらを考慮しない解析とは差異が生じるが,高周波成分が混入し ない範囲では,両模型ともに,解析は実験を定量的に再現できた.

最大せん断応力  $\tau_{max}$  が最大になる時間断面の  $\tau_{max}$  の分布を図 5 に示す. いずれの模型も、周面土と石室天井の間に滑動、側壁との間に剥離が見られる. 側壁背面には、せん断強度を超える要素が点在するが、実験で亀裂が見られた天端や法面のせん断応力は相対的に小さいことから、亀裂の要因は、せん断応力ではないことがわかる.

最小主応力 σ<sub>3</sub> が最小になる時間断面の σ<sub>3</sub> の分布を図 6 に示す.いずれの 模型も,天端と変位方向と逆側の法面に σ<sub>3</sub> が負値となる引張領域が見られ

る.また、石室隅角部から側壁にかけても引張領域が 分布し、実験で確認された亀裂の箇所と合致している. そこで、の3の作用面と亀裂の方向を比較する. 亀裂が 引張応力に起因していれば、これらの方向は一致する. の3の作用面の角度の分布を図7に示す.天端では、水 平面から右回りに70~80°、また法面では、法線方向 にあたる50~60°に分布しており、実際の亀裂の方向 と近い.石室隅角部では、角度が読み取りにくいため、 図中に併記するが、左右それぞれで石室から法面に向 かう方向に作用面が位置しており、実際の亀裂と合致 する傾向を示している.以上より、実験で確認された 亀裂は引張応力に起因すると考えられる.

# 4. 石室石材の摩擦の影響

以上の主応力分布は、さらに大きな加振では、引張 領域が拡大するが、両模型に分布の傾向の違いは見ら れなかった.そこで、樹脂板間の滑動を比較する.側 壁上下端のジョイント要素の応答によると、摩擦が大 きい模型では、図2の亀裂が生じた加振においても滑







図7 最小主応力面の方向(左図:摩擦大,右図:摩擦小)

らないのに対し、摩擦が小さい模型では、プロトタイプで最大 1cm の相対変位が生じ、より小さな加振でも若干の 滑動が見られた.この滑動の有無が両模型の破壊形態の違いに寄与すると考えられる.すなわち、両模型ともに、 図6に示すように、石室背面土は剥離するが、引張応力が発生しているため、実際には解析のように復元せず、崩 壊して側壁を押す.このとき、樹脂板間の摩擦が小さい場合は、土圧と慣性力が摩擦力を上回り、石室内側に移動 する.したがって、石室空間を維持するためには、石材間の摩擦を確保することが重要である.石室に用いられる 凝灰岩の亀裂面の強度定数は、例えば三村ら<sup>3)</sup>の実験では、*c*=26kN/m<sup>2</sup>、*q*=37.5°であり、本実験よりも大きいと予 想されるが、解体した石室を復元する場合などは、耐震性に留意した石材間の処理が必要である.

参考文献 1) 三村衛, 石崎武志: 高松塚古墳の現状とその地盤特性について, 地盤工学ジャーナル, pp.157-168, 1(4), 2006. 2) 地盤工学会編: 地盤 工学ハンドブック, pp.212-223, 1999. 3) 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評価に関 する研究. 土木学会論文集 C, 65(1), pp.241-253, 2009.