

〔報文〕 高松塚古墳墳丘部の動的解析

三村 衛*・長屋 淳一*²・石崎 武志

1. はじめに

平成16年度に実施された高松塚古墳の発掘調査において、トレンチの断面から多くの地震によると思われる亀裂が発見された¹⁾。明日香村真弓地区のカヅマヤマ古墳では、墳丘が斜面に沿って大きく崩落し、磚積構造の石室がせん断された形で発掘されており²⁾、南海・東南海地震をはじめとする歴史地震によって多くの古墳が被災していること³⁾を勘案すると、高松塚古墳墳丘内部に認められる亀裂も地震由来のものであると推定される。

高松塚古墳壁画恒久保存対策として石室を解体し、壁画を取り出すにあたり、平成18年度に墳丘の大規模な掘削を伴う発掘調査が実施された。その発掘の過程で平成16年度にトレンチ壁面で発見された亀裂が掘削領域内で三次元的に広がり、幅10cm以上のクラックが墳丘内部を縦横に走っていることや石室直上では石室の輪郭に沿って直線的に走り、石室の隅から外側に向かって放射状に広がっていることが確認された⁴⁾。三村・石崎^{1,5)}は墳丘の石室から2.5m離れたポイント3箇所でもボーリング調査を実施し、その孔においてPS速度検層を実施した。その結果によれば、原位置S波速度は、明瞭な版築構造を有している部分であっても70~160m/sと、高松塚古墳墳丘版築土が有するせん断強さ⁶⁾からは考えられない低い値を示しており、墳丘内部の地割れや亀裂の影響が測定値に反映されていると指摘されている。実際にボーリング調査時に採取された亀裂のない不攪乱試料を用いた室内ベンダーエレメント試験では、 $V_s=160\text{m/s}$ 以上という高い値が得られている⁶⁾。つまりこの結果は版築土が健全であればこの程度のS波速度を有していることを示しており、原位置で測定された低いS波速度は、高松塚古墳墳丘が、墳丘内部の亀裂と地割れによって本来版築土が持っている強度そのものとは対応しないような不安定な状態にあることを明らかにしたものであると考えられる。

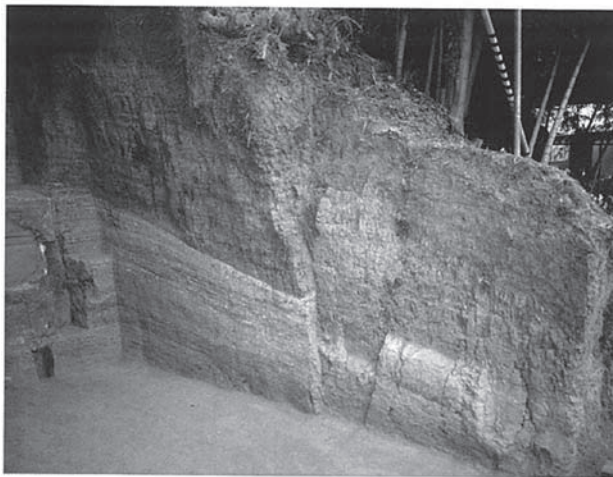
こうした発掘調査結果を受け、本稿では、高松塚古墳墳丘内部で発見された地割れや亀裂が地震由来のものであるかどうかを数値解析に基づいて検討する。高松塚古墳の動的特性（地震荷重など繰り返し荷重を受ける時の挙動特性）を考える場合には、広大な埋立地のような対象物を取り扱う場合とは異なり、直径23m、高さ6m弱という円形盛土構造物であるということで三次元効果が顕著になる。本稿では、墳丘を1972年に発見された時点の図面に基づいて三次元にモデル化し、墳丘の有する形状的な特徴を加味したより実際に近い地盤モデルを作成する。ただし、検討の第一段階ということで、石室石材の細かい要素分割や古墳墳丘の版築構造の微妙な違いなどについてはモデル化から除外する。入力地震外力としては、高松塚古墳墳丘の固有周期をチェックし、それに近い地震波と今世紀中頃までに発生すると言われている東南海・東南海地震の想定地震波を用い、地震外力を受ける際の高松塚古墳の動的挙動について検討するとともに、応力やひずみの集中帯がどの場所で顕著に現れるのかを調べることにより、亀裂や地割れが最も発生しやすい地点の同定を行う。そして、一連の数値解析結果を実際の墳丘亀裂、地割れの分布と比較することにより、数値解析の妥当性と墳丘内部の亀裂と地割れが地震由来と考えられるかどうかについて検討する。

2. 高松塚古墳における亀裂の発生状況

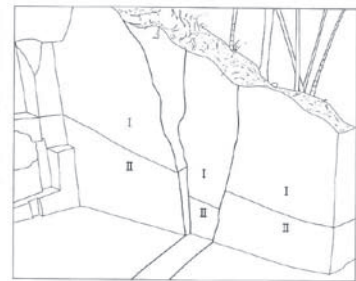
高松塚古墳では、過去の発掘調査において墳丘を刻む複数の亀裂が発見されている。ここでは、これらの亀裂の発生状況を示す。

2-1. 昭和47・49年発掘で発見された亀裂^{1,7)}

昭和47・49年に行われた発掘調査において図1に示すような墓道東壁の版築土層を引き裂く明瞭な地割れの痕跡が発見された。地割れの上端は幅1.4m, そこから2.5m下の床面付近では幅約60cmと, 下に向かってやや狭くなっている。図1での版築層は, 上半分(Ⅱ層とする)が褐色のシルト, 下半分(Ⅰ層)が白~薄褐色のシルトで, 両者の境界は写真からも区分が可能である。Ⅱ層上端の食い違いから判断すると, 地割れの内部で版築層が約30cm低くなっている。地層が2ヵ所で切断されて地割れが形成され, 内部が陥没したものと思える。この陥没は墓道に直交するように東西方向に続き, 調査区西壁の土層断面に至る。



墓道部の東壁写真
(昭和49年撮影, (独)国立文化財機構 奈良文化財研究所)



墓道部東壁の地割れの痕跡

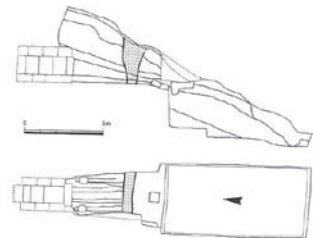
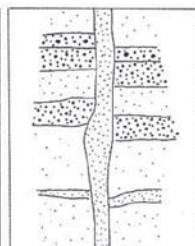
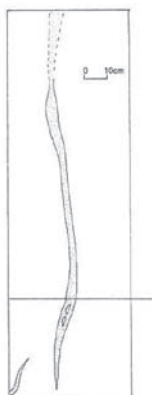
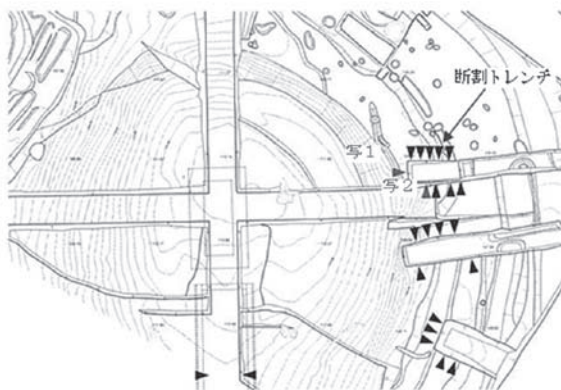


図1 昭和47・49年の発掘調査で発見された地割れ^{1,7)}

2-2. 平成16年発掘調査で発見された亀裂¹⁾

図2に断割トレンチの西壁および南壁で発見された亀裂の状況を示す。断割トレンチ西壁では, 最大幅5cmの亀裂が少なくとも1m25cmの深さまで観察された。このうち上部の深さ30cmまでは亀裂の形態が不明瞭だが, それより下方では墳丘版築層との境界が鮮明で, 亀裂の内部は版築層上部から流れ込んだと考えられる柔らかいシルト(わずかに極細粒砂を含む)で満たされていた。この亀裂はトレンチ底面ではほぼ東西方向にのび, 壁面から40cmの位置で消滅する。また, この亀裂に雁行して西北西-南東方向にのびる最大幅7cmの亀裂がある(図1中の写2)。亀裂を境にして南西側の地層が相対的に約3cm低下しており, 亀裂の内部は柔らかいシルト(わずかに極細粒砂を含む)で満たされていた。



写1 トレンチ西側の亀裂とその断面図

写2 トレンチ南側の亀裂とその断面図

図2 平成16年発掘調査で発見された亀裂¹⁾

2-3. 平成18年発掘調査で発見された亀裂

平成18年10月から国宝高松塚古墳壁画保存対策に伴う発掘調査として、劣化が進行する壁画の修理に向けて、石室を解体して墳丘から取り出すために実施した調査が行われた。この調査において石室近傍の墳丘部に多くの亀裂が発生していることが確認された。

図3に石室を覆う土層で見つかった亀裂の写真⁴⁾を示す。主な亀裂は東側に2本、西側に3本あり、長さはいずれも約3.5m、幅は、各5~20mmである。東西の亀裂から外側へ数本の亀裂が放射状に延びている。東側では、土層の一部が8cmほどずれた跡も見つかった。

図4に石室に生じた亀裂⁵⁾を示す。石室天井石の南第1石と南第2石については、南北に亀裂が生じて2つに割れていることがわかっている。

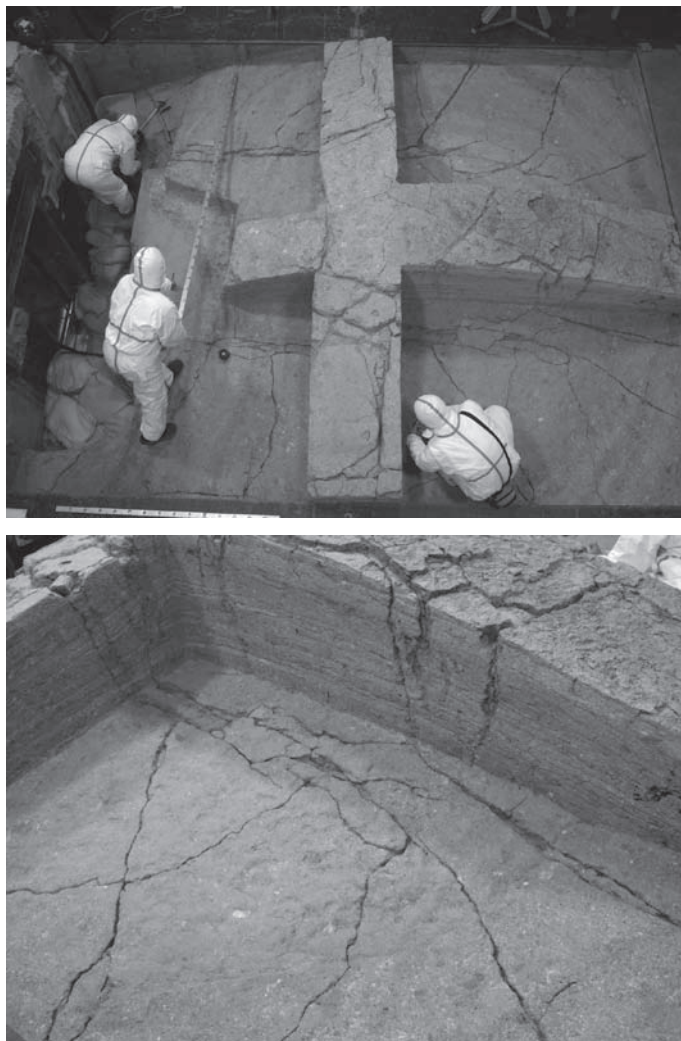


図3 石室を覆う土層で見つかった亀裂⁴⁾

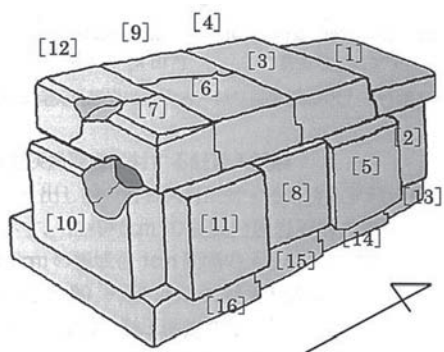


図4 石室の天井石1の亀裂⁸⁾

3. 動的 FEM 解析

高松塚古墳墳丘部にみられた亀裂への過去に発生した地震の影響を検討するために、墳丘部を有限要素でモデル化し、地震時を想定した動的な荷重を載荷する動的 FEM 解析を行った。動的 FEM 解析における墳丘部に発生する応力およびひずみの発生状況より、墳丘部に発生する亀裂の発生メカニズムについて検討を行う。

3-1. 解析条件

高松塚古墳は自然堆積地盤（シルト混じり細砂）の上にある石室（2m×2.3m×3.8m）の周りを土盛りした版築で覆われた構造であり、地震時の動的特性には3次元効果が顕著になると考えられるため、石室を包含する円形盛土という形状的な特徴を加味した実際に近い3次元モデルを作成した。図5に動的解析における有限要素メッシュを示す。地盤の非線形性を考慮するために石室周りの版築と石室下部の自然堆積地盤の2層は修正 Ramberg-Osgood (RO) モデル⁹⁾とし、石室は弾性材料とした。過去の地震により亀裂が発生するかどうかを議論するような定量的な評価をおこなうには、高松塚古墳の周辺地盤の地震の基盤となる深度までモデル化するべきであるが、今回は検討の第1段階で亀裂発生メカニズムを検討するための解析として、墳丘部の近傍のみをモデル化し、側方境界は、より地震力の影響が顕著に表れるように水平ローラーとした。地盤の有限要素モデルは総節点数13920、総要素数11256の3次元モデルである。

表1に解析パラメータを示す。地盤の初期せん断弾性係数はバンダーエレメント試験におけるせん断は速度 V_s 、RO モデルの非線形パラメータは繰返し載荷試験結果、ポアソン比はPS 検層^{1,5)}、単位体積重量はRI 湿潤密度検層^{1,5)}より設定した。

表2に今回実施した解析ケースを示す。まず、固有値解析により高松塚古墳の固有周期をチェックした後、周期および最大加速度を変えた正弦波による動的解析を行い、墳丘部の振動特性を調べ、応力およびひずみの発生状況より亀裂の発生しやすい部分を同定する。さらに、過去に発生したあるいは近い将来発生するであろう南海地震の想定地震動⁹⁾による解析を実施し、地震動による亀裂や地割れの可能性について検討を行う。

石室中央 YZ 方向の半断面

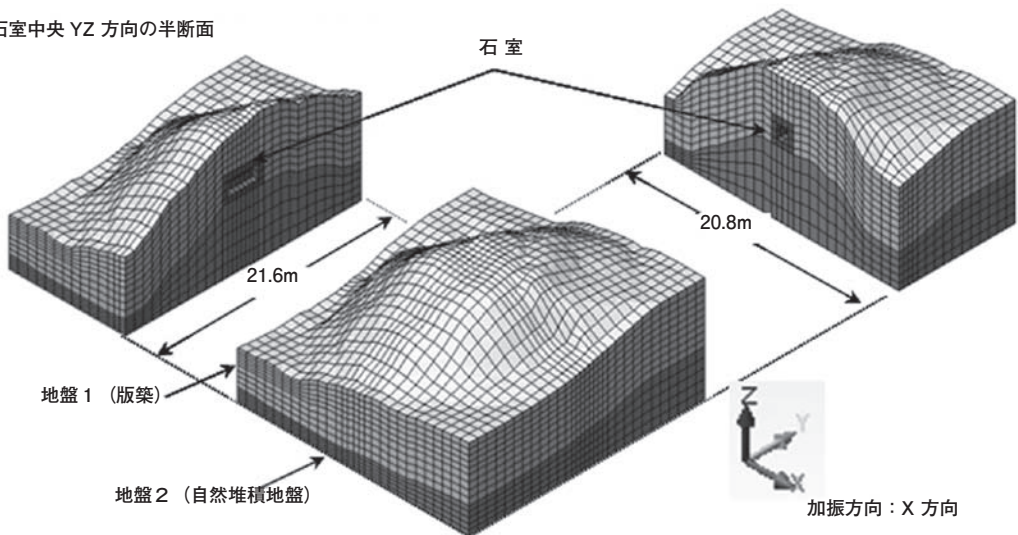


図5 墳丘部の有限要素メッシュ図

表1 解析パラメータ

	版築		自然堆積地盤	設定方法
	上部	下部		
単位体積重量 γ (kN/m ³)	14	16	18	RI 湿潤密度検層
ポアソン比 ν	0.488	0.478	0.45	PS 検層
せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	31500 (Vs=150m/s)		120000 (Vs=260m/s)	版築はベンダーエレメント試験の Vs 自然堆積地盤は PS 検層の Vs より
最大減衰率 h_{max}	0.3		0.3	版築の動的変形試験における $G/G_0 \sim \gamma, h/h_0 \sim \gamma$ 曲線のフィッティングにより設定 ※自然堆積地盤も版築と同じと仮定
$\gamma_{0.5}$	0.0025		0.0025	

表2 解析ケース

解析種別	地震動	備考
固有値解析		高松塚古墳の固有周期をチェックする。
正弦波による動的解析	最大加速度200, 400, 600gal 周期 0.2, 0.5, 1.0秒	地震動による応力およびひずみの発生状況より亀裂や地割れの発生しやすい部分を同定する。
南海地震想定地震動による動的解析	図12に加速度波形を図示参考文献8) 参照	当該地において過去に受けたあるいは近い将来発生するであろう南海地震の想定地震動による影響を検討する。

3-2. 修正 Ramberg-Osgood (RO) モデル

Ramberg-Osgood モデル¹¹⁾ は、もともと金属材料の非線形性解析のために提案されたものである。履歴曲線は、Masing 則を適用して求められる。ただし、RO モデルの原式のパラメータと土質実験などから求まる定数との対応づけが必要となる。そこで、龍岡らの修正式⁹⁾が提案され、パラメータは地盤の物理量との対応をとることができた。龍岡らの修正式は現在最も多く使用されている。

修正 RO モデルの骨格曲線と履歴曲線は次のように表される。

$$\text{骨格曲線} \quad \gamma = \frac{\tau}{G_0} (1 + \alpha |\tau|^\beta) \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{履歴曲線} \quad \frac{\gamma \pm \gamma_0}{2} = \frac{\tau \pm \tau_0}{2G_0} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau + \tau_0}{2} \right|^\beta \right) \quad \text{式 (2)}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

τ : せん断応力

G_0 : せん断弾性係数

(γ_0, τ_0) : 履歴の折返し点のせん断ひずみとせん断応力

α, β : 修正 RO モデルのパラメータ

減衰定数 h は、 ΔW を減衰エネルギーとすれば次のように表される。

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta + 21 + \alpha \tau_0^\beta} = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta + 2} \left(1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad \text{式 (3)}$$

h_{max} を最大減衰定数とすると、 $\gamma \rightarrow \infty$ で $G \rightarrow 0$, $h \rightarrow h_{max}$ となるから β は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \tag{4}$$

上式を骨格曲線と履歴曲線の線の式に代入すると次式を得る。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha |\gamma G|^\beta} \tag{5}$$

$G / G_0 = 0.5$ を与えるときのひずみを基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ とすれば、 α は次式で与えられる。

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0.5} G_0} \right)^\beta \tag{6}$$

以上より、ROモデルに必要なパラメータは G_0 、 h_{\max} 、 $\gamma_{0.5}$ の3つである。骨格曲線、履歴曲線、パラメータの意味を図6に示す。

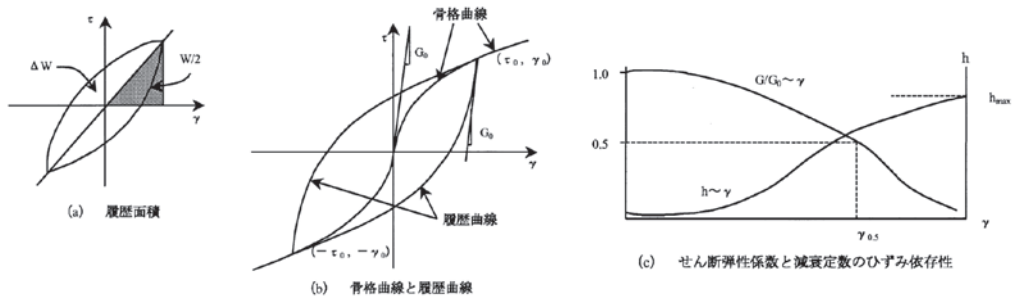


図6 ROモデルの性質

4. 解析結果

4-1. 固有値解析および正弦波による動的FEM解析結果

今回の解析対象である墳丘部における固有値解析を実施した。図7に1次モードにおける変形図を示す。固有値解析結果より、墳丘部の1次モードの固有周期は0.174秒、固有振動数5.76Hzであり、比較的短周期が卓越する地震動に大きく影響を受けると考えられる。すなわち、高松塚古墳は海洋型の長周期地震動よりは、内陸直下型の比較的短周期の強震動地震による影響が大きいと思われる。

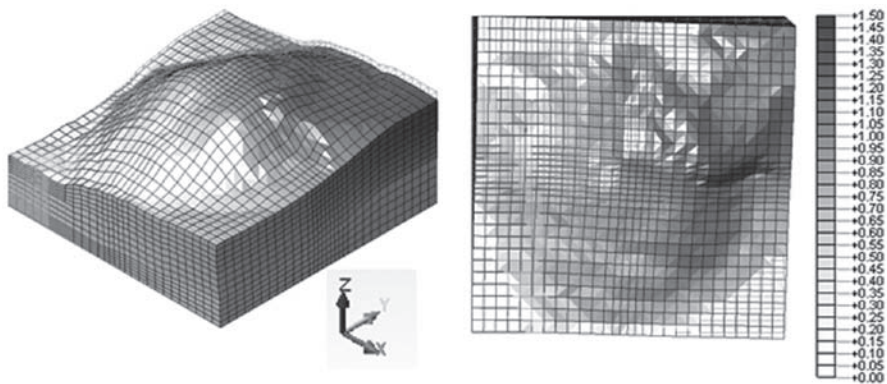


図7 固有値解析結果（1次モードの変形図）

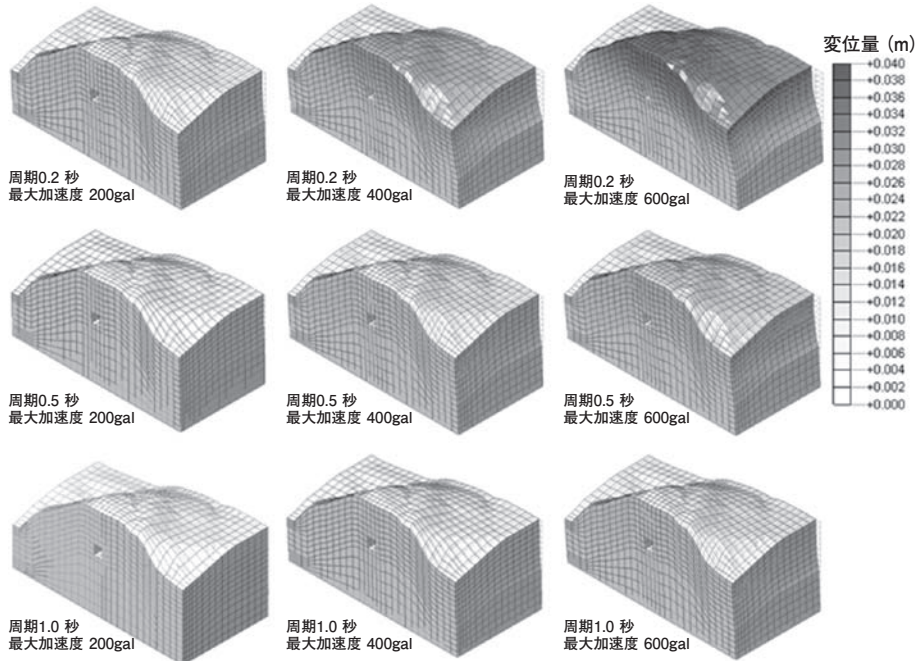


図8 変位図と変位量コンター図

図8に正弦波による動的FEM解析結果における最大変位を示した時点の変形図とX変位のコンター図を示す。これらの結果より、墳丘部は、短周期である0.2秒の場合に変位量は大きくなり、固有値解析による固有周期が0.174秒であったこととも一致する。

4-2. 墳丘部に作用する応力と亀裂発生に関する考察

地震のような動的荷重により墳丘部に亀裂が発生すると要因としては、

- ①引張応力による地盤間の剥離
- ②せん断応力による地盤のずれに伴う亀裂

の2つの要因が考えられ、引張応力およびせん断応力が卓越する部分が亀裂の発生しやすい箇所であると言える。図9、10に動的FEM解析の内、周期0.2秒、最大加速度600galにおける最大変位発生時のせん断応力 τ_{xz} とX方向応力 σ_x のコンター図を示す。これらの結果より、せん断応力は石室の側部の版築全体に発生し、引張応力は石室の上部隅角部付近および墳丘斜面部に作用していることがわかる。特に、傾斜勾配が変化する法尻付近の引張応力が大きく作用しており、平成16年発掘調査で法尻付近に亀裂が発見されたこととも一致する。また、墳丘部の亀裂は石室の上端面より上部へ放射状に発生している状況もみられた。これらの亀裂発生は、図11に示すように、

- ①石室側部に引張応力が生じ、石室と版築間に剥離が生じる。
 - ②石室の上部隅角部において石室と版築間の剥離により石室上部の版築に亀裂が生じる。
 - ③石室上部の亀裂は、拘束力の小さな部分ほど亀裂が生じやすいため、墳丘の斜面部に向かって放射状に進展していく。
- というプロセスで発生すると考えられる。

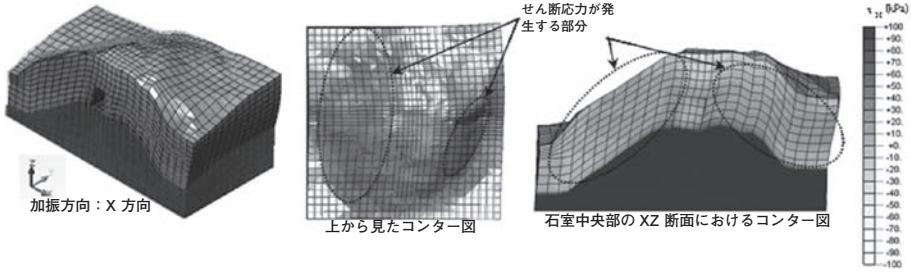


図9 せん断応力 τ_{xz} のコンター図 (最大変位発生時)

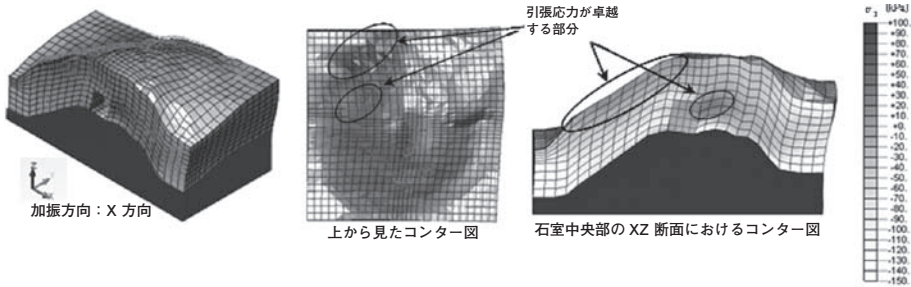


図10 X方向応力 σ_x のコンター図 (最大変位発生時)

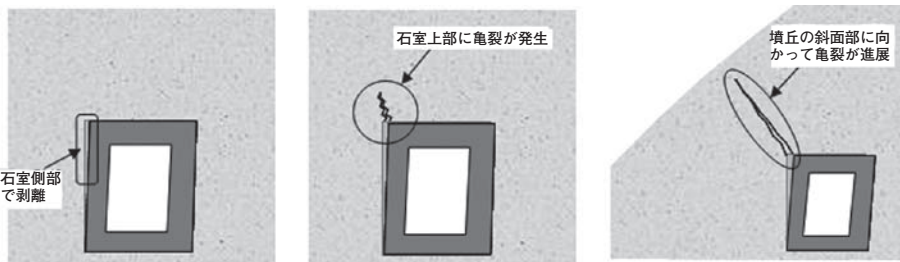


図11 石室側部と版築の剥離に伴う亀裂の発生

4-3. 南海地震想定地震動による動的FEM解析結果

高松塚古墳の石室を含む盛土構造では、4-1に示したように比較的短周期の地震動による影響を受けると考えられる。しかし、高松塚古墳が位置する奈良盆地の南部は、内陸型の短期地震よりも、南海トラフにおいて発生する巨大地震である南海地震を繰り返し受けていると考えられる。ここでは、これらの海洋型地震による墳丘部への影響を検討するために、鶴来らによる南海地震の想定地震動¹⁰⁾を用いて動的解析を実施した。図12に南海地震を想定した地震動の加速度波形と石室上端における変位の経時変化を示す。

地震動により墳丘部にケースが生じるのは、版築部の応力に引張応力が生じ、版築の引張強度を超えて剥離することによる亀裂と版築部のせん断強度を上回るせん断力が発生してずれが生じるケースがある。したがって、墳丘部に亀裂が生じるか否かを評価するためには、版築の引張強度およびせん断強度を知る必要がある。図13に最大変位が発生時(25.6秒後)におけるせん断応力 τ_{xz} のコンター図を示す。また、図14に版築に対して実施した一面せん断試験結果⁶⁾を示す。墳丘部におけるせん断力は石室付近で31.0kPa、墳丘の法尻部で28.8kPaであるのに対して版築部のせん断強度定数は、粘着力 $c = 100 \sim 150 \text{ kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi = 25 \sim 36^\circ$ である。すなわち、墳丘土は地表面のような拘束圧 0 kPa の場合においても $100 \sim 150 \text{ kPa}$ のせん断強度を

持つ材料であり、図12に示す地震動では、亀裂が生じるせん断応力レベルまでには達しないこととなる。

図15に最大変位が発生時（25.6秒後）におけるX方向応力 σ_x のコンター図を示す。これより石室上端部および地表面付近に15~20kPa程度の引張応力が発生していることがわかる。土質材料では、引張応力に抵抗するのは土粒子間の吸着力のみであり、引張強度はほとんど0に近く、引張応力が生じた部分には地盤間に剥離による亀裂が生じることとなるため、4-2に示したような石室側部における石室と版築間の剥離に起因する亀裂の進展が生じる可能性があると考えられる。

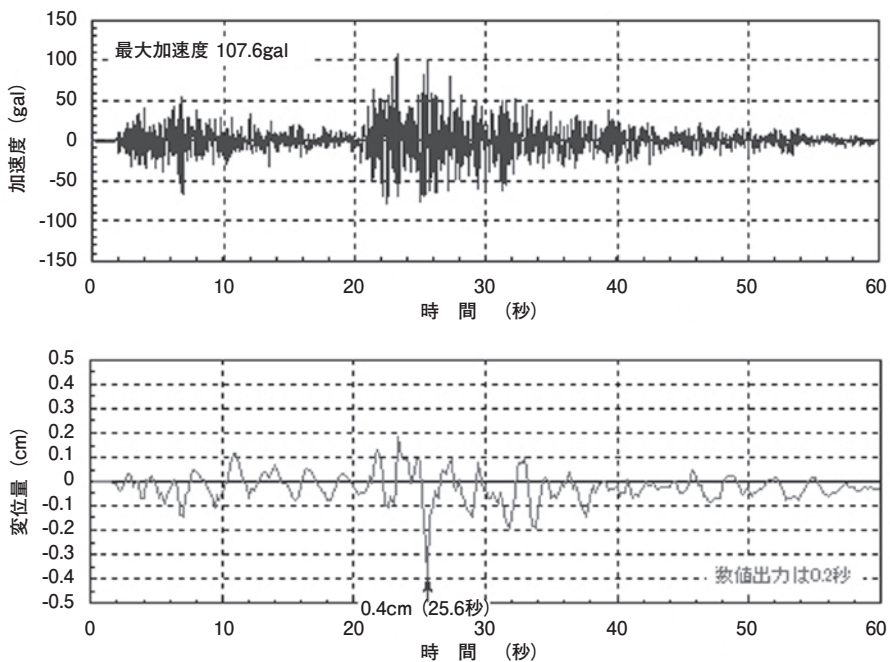


図12 南海地震を想定した地震動の加速度波形石室上端における変位の経時変化

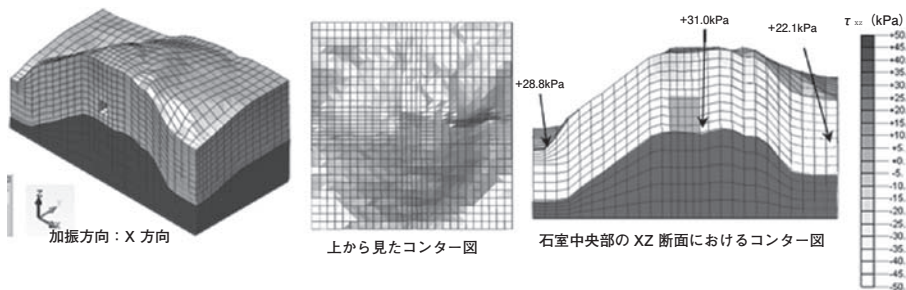


図13 最大変位時（25.6秒）におけるせん断応力 τ_{xz}

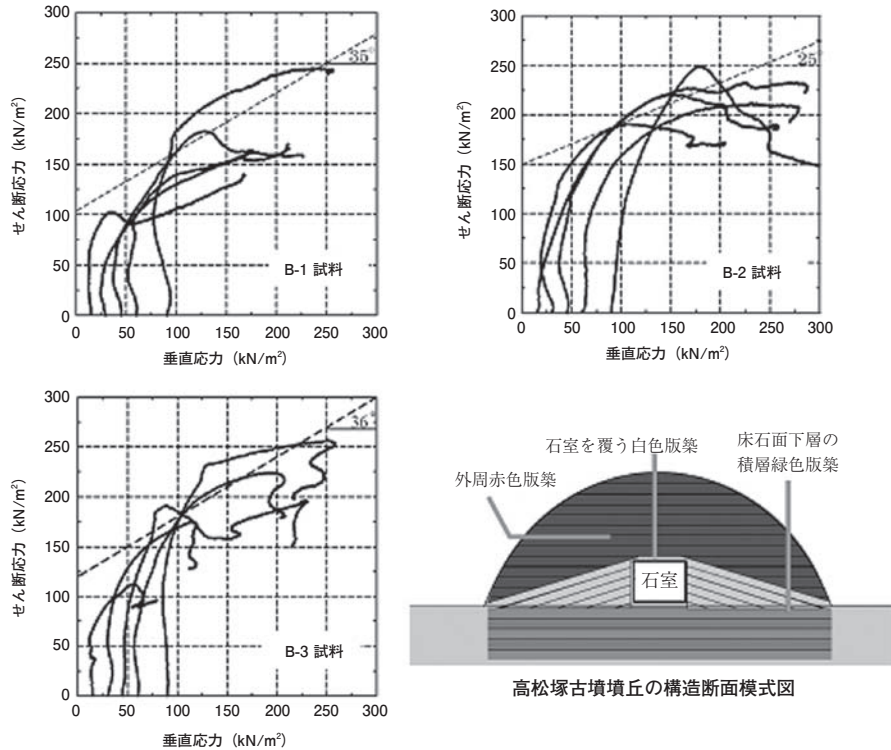


図14 外周赤色版築土の一面せん断試験結果と強度定数⁶⁾

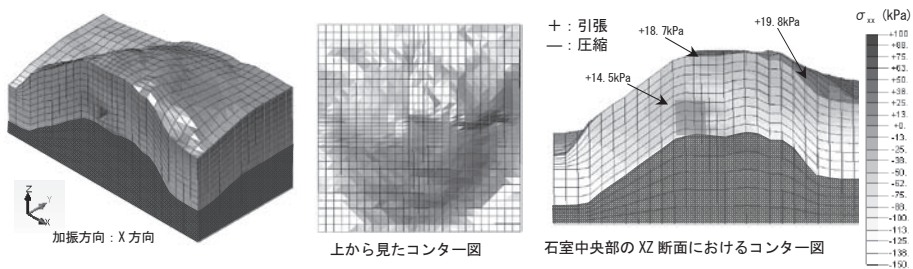


図15 最大変位時 (25.6 秒) における X 方向応力

5. まとめ

高松塚古墳において発見された墳丘内部の亀裂や地割れは過去に発生した巨大地震によるものと考えられている。本研究では、石室を内包した円錐形の盛土である古墳が、地震力を受けて変形する場合の挙動と応力およびひずみの発生状況を動的 FEM 解析により調べ、墳丘内部における地震時の亀裂発生メカニズムの端緒を得ることを目的として実施した。その結果、以下のような知見を得た。

- ①高松塚古墳の墳丘部の固有周期は0.17秒であり、比較的短周期の地震動で大きな変位が生じる。すなわち、海洋型の長周期地震動による影響よりも、内陸型の短周期の強振動地震の影響が大きい。
- ②地震動により亀裂が生じる要因には、せん断応力による地盤のずれを伴う亀裂と引張応力

による地盤間の剥離によるものが考えられる。動的FEM解析結果より、これらの応力は石室の側部および墳丘の法尻付近に発生し、亀裂が発生する可能性が示唆された。発掘調査においてもこれらの部分に亀裂が見つかっており、数値解析結果は、調和的な結果を与えている。

- ③南海地震想定地震動では、せん断による亀裂が発生するレベルでの応力は発生しなかったが、引張応力による表層付近の亀裂および石室側部の剥離に伴う石室上部から放射状に進展する亀裂の発生は、十分起こり得ることがわかった。

参考文献

- 1) (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－, (2006)
- 2) 明日香村教育委員会：カヅマヤマ古墳発掘調査報告書, (2007)
- 3) 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, 4, pp.623-645 (2003)
- 4) 松村恵司：石室解体修理事業に伴う発掘調査, 月刊文化財, 532, 16-21 (2008)
- 5) 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, 1-4, 157-168 (2006)
- 6) 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, Vol.65, No. 1, 241-253 (2009)
- 7) 猪熊兼勝：特別史跡 高松塚古墳保存施設設置に伴う発掘調査概要, 月刊文化財, 143, 30-35 (1975)
- 8) 三村 衛, 吉村 貢：高松塚古墳石室解体に伴う石室石材および墳丘版築の安定性評価について, 土木学会論文集C, Vol.65, No. 3, 597-608 (2009)
- 9) 龍岡文夫, 福島伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力～ひずみ関係のモデル化について (1), 生産研究, 第30巻9号, 26-29 (1978)
- 10) 鶴来雅人, 趙伯明, Petukhin Anatoly, 香川敬生：南海・東南海地震の大阪府域における強震動予測, 構造工学論文集 Vol.51 A, 501-512 (2005)
- 11) Jennings, P. C. : Periodic Response of a General Yielding Structure, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.90 No. EM. 2, 131-166 (1964)

キーワード：高松塚古墳 (Takamatsuzuka Tumulus)；地震由来の亀裂 (Earthquake Induced Crack)；三次元動的有限要素解析 (Three Dimensional Dynamic Finite Element Analysis)；応力集中 (Stress Concentration)；地盤と石材の相互作用 (Interaction Between the Mound and the Chamber Stones)

Dynamic Finite Element Analyses on the Mound of Takamatsuzuka Tumulus

Mamoru MIMURA^{*}, Junichi NAGAYA^{*2} and Takeshi ISHIZAKI

Innumerable cracks and fissures caused by huge earthquakes were found inside the mound of Takamatsuzuka Tumulus. Those cracks and fissures were originally found on the excavated walls during archaeological investigation. Furthermore, the large-scale excavation prior to the dismantling of the stone chamber in 2006 gave additional information about the three-dimensional distribution of those cracks and fissures. Serious ground motion due to huge subduction earthquakes hitting Japan every 100 to 140 years possibly caused the damage to the tumulus mound. The instability of the tumulus mound is one reason it was judged impossible to preserve the mural paintings *in situ*.

This paper presents the results of a series of three-dimensional dynamic finite element analyses conducted for the mound of Takamatsuzuka Tumulus to investigate the possibility of the occurrence of cracks and fissures induced by the outer forces of earthquakes. Calculated performance shows that the natural period of Takamatsuzuka Tumulus is 0.17 s. and that this value is the one that is generally measured for near field earthquakes. This means that such a small mound as Takamatsuzuka Tumulus is more fragile to near field earthquakes than subduction earthquakes. Calculated results also show that serious stress concentration, which could have caused the occurrence of cracks and fissures in the mound of Takamatsuzuka Tumulus, is found at the foot of the mound and at the boundary of the mound and the chamber stones.