

〔報文〕 動的解析による高松塚古墳の損傷要因の検討

三村 衛*・長屋 淳一*²・石崎 武志

1. はじめに

壁画保存のため石室を解体する高松塚古墳で発掘調査が行われ、墳丘内部に無数の亀裂や地割れが縦横に走っていることや石室の天井石に亀裂が発生していることが確認された¹⁾。高松塚古墳西方1.5kmにあるカズマヤマ古墳の墳丘と石室が1361年の正平南海地震によって崩壊した事例²⁾もあり、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。突き固めによって構築された土構造物である古墳の墳丘が、地震外力を受けた時にどのようにして挙動するか、また、内部に石室のような明らかに剛性の異なる構造物を内包していることによる影響など、よくわかっていないことが多い。この高松塚古墳に発生した亀裂と地震の因果関係を明らかにするために、これまでに石室を含む墳丘部をモデル化し3次元動的FEM解析を実施し、地震動による墳丘部に発生する亀裂発生メカニズムについての検討⁴⁾を行った。本報告は、高松塚古墳の発掘調査において明らかとなった墳丘部の地盤構造に石室と地盤の剥離と併合を考慮するジョイント要素を設けてモデル化を行い、当該地における想定地震動による影響評価を行った。また、地震動による石室に作用する応力と亀裂の関係についての検討も行った。

2. 解析モデルおよび解析条件

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。

2-1. 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1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⁵⁾とし、石室は弾性材料とした。また、今回は石室に作用する応力を評価するために石壁の厚さ方向を3分割し、石室と地盤間および上下壁と側壁の間にジョイント要素を設けて地震動における変位発生時の剥離を考慮できるモデルとした。過去の地震により亀裂が発生するか否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

*京都大学防災研究所 *²(株)地域地盤環境研究所

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。

表1に地盤における解析パラメータ、表2に石室の解析パラメータを示す。地盤の初期せん断弾性係数はベンダーエレメント試験におけるせん断波速度 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^{1,6)}、単位体積重量はRI湿潤密度検層^{1),6)}より設定した。

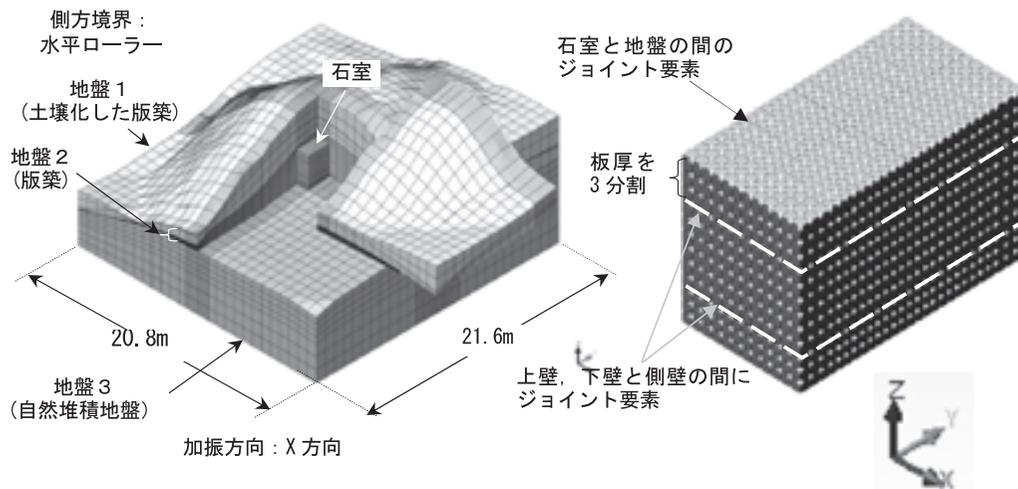


図1 墳丘部の有限要素メッシュ図

表1 地盤における解析パラメータ

	地盤1 土壌化した版築	地盤2 版築	地盤3 自然堆積地盤	備考
単位体積重量 γ (kN/m ³)	14.0	16.0	18.0	墳丘部におけるRI湿潤密度検層より
ポアソン比 ν	0.488	0.478	0.45	墳丘部におけるPS検層より
初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	31500 ($V_s=150$ m/s)	31500 ($V_s=150$ m/s)	120000 ($V_s=260$ m/s)	地盤1,2は、ベンダーエレメント試験の V_s より設定
最大減衰率 h_{max}	0.3	0.3	0.3	動的変形試験動的変形試験から求められた $G/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線のフィッティングより)
$\gamma_{0.5}$	0.0025	0.0025	0.0025	

表2 石室の解析パラメータ

	石室	備考
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.76	凝灰角礫岩の単位体積重量
変形係数 E (MN/m ²)	2900	凝灰角礫岩の超音波伝播速度試験
せん断弾性係数 G (MN/m ²)	1056	
ポアソン比	0.373	

2-2. 入力地震動

高松塚古墳が位置する奈良盆地の南部は、高松塚古墳が築かれてから現在にいたるまでに多くの地震を蒙っている。特に、太平洋海底に位置するプレートの境界(南海トラフ)から発生

する巨大地震である南海地震・東南海地震によって強い地震動を繰り返し受けている。よって、今回の動的解析における入力地震動には、海洋型地震（長周期卓越）の地震動である南海地震想定波⁷⁾を用いた。また、石室への影響は、上下動による影響が大きいと考えられるため、上下動（正弦波 最大加速度100gal）についても解析を行った。図2に解析に用いた入力地震動波形を示す。

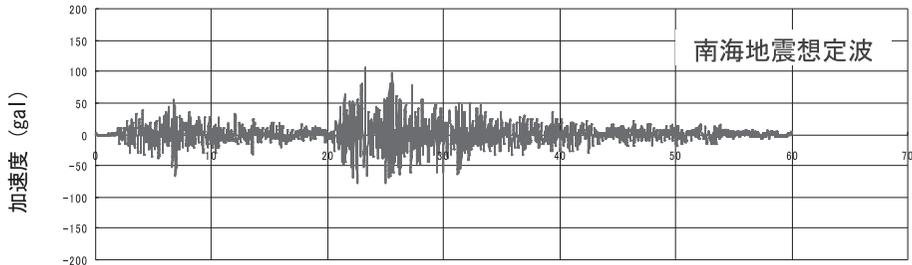


図2 解析に用いた地震波形

2-3. 修正 Ramberg - Osgood モデル

Ramberg-Osgood モデル⁸⁾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⁵⁾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。

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 : 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。

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

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。

$$\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad \text{式 (4)}$$

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3に示す。

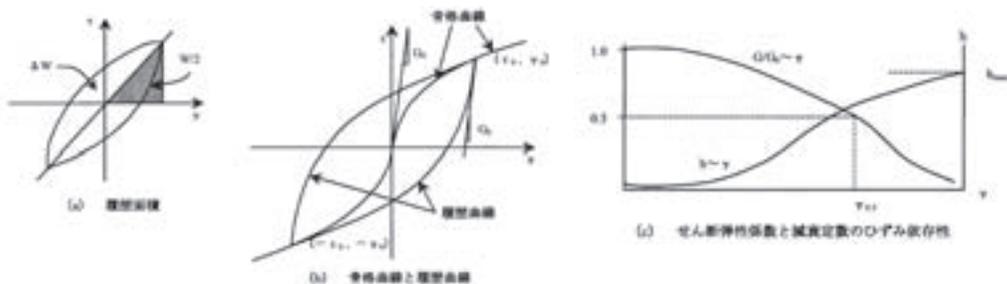


図3 ROモデルの性質

3. 解析結果と考察

3-1. 固有値解析

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4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0.153秒、固有振動数6.55Hz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、海洋型の長周期地震動による影響は小さく、内陸型の比較的短周期の強震動地震の影響が大きいと思われる。

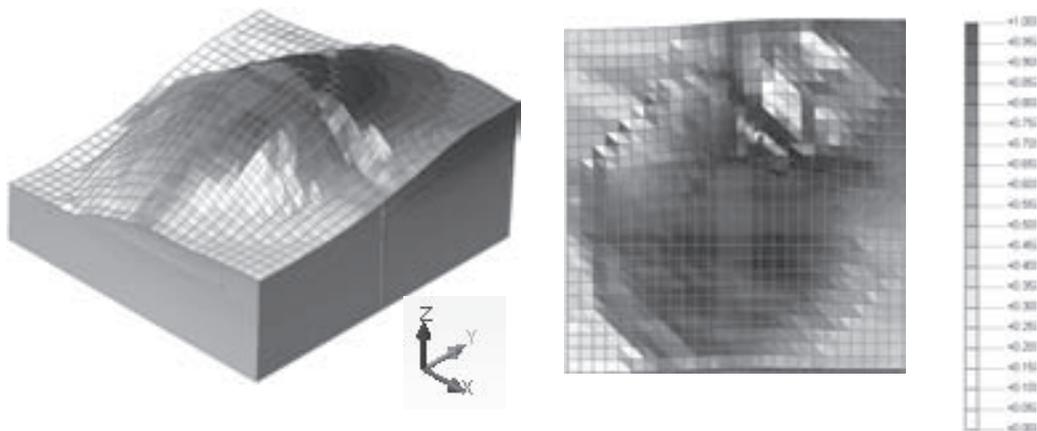


図4 固有値解析結果（1次モードの変形図）

3-2. 墳丘における加速度の増幅特性

平坦な地表面と比べ、高松塚古墳のような突起状の構造物に地震動が入力された場合、形状効果によって揺れが増幅されることが知られている。高松塚古墳と同じ明日香村の真弓地区にあるカヅマヤマ古墳は地震によって大きく崩壊しており、等価線形解析による動的解析により、斜面上の墳丘部において入力加速度の10倍を超える増幅が起こることが報告されている²⁾。そこで、まず想定した南海地震の地震動を図1の高松塚古墳の地盤モデルに入力した場合の墳丘における加速度の増幅特性について検討する。図5（口絵参照）に入力加速度と墳丘頂点における応答加速度の時刻歴および墳丘中心における加速度の増幅率（応答加速度／入力加速度）の深さ方向分布を合わせて示す。まず、入力加速度と墳丘頂点における応答加速度の時刻歴をみると、墳丘頂点における応答加速度は入力加速度に対してすべての時間において大きく増幅していることがわかる。すなわち、地震が発生した際、高松塚古墳墳丘部においては、明日香村の平地部分で感じられる揺れに比べてはるかに大きな加速度が生じることがわかる。ここで、応答値の出方は刻々変動するため、墳丘中心における加速度の増幅特性を検討する時刻をA～Fの6点抽出する。それぞれの時刻における墳丘中心に沿った加速度の増幅率（応答加速度／入力加速度）の深さ方向分布をみると、基礎地盤下端から標高が高くなるにしたがって加速度は増幅し、形状効果が顕著となる石室底面より上部になると増幅率は急激に大きくなる。最も増幅の大きくなるF点（27.2秒後）には墳丘頂部で応答加速度は7倍に達していることがわかる。このように、一様ではない構造物では形状効果による地震動の増幅が避けられず、揺れはより大きくなる傾向があることがわかる。また、高松塚古墳の場合、内部に剛性の異なる石室が存在するため、石室と周辺の地盤との応答の違いが古墳にとって不利に働くことにも留意しなければならない。

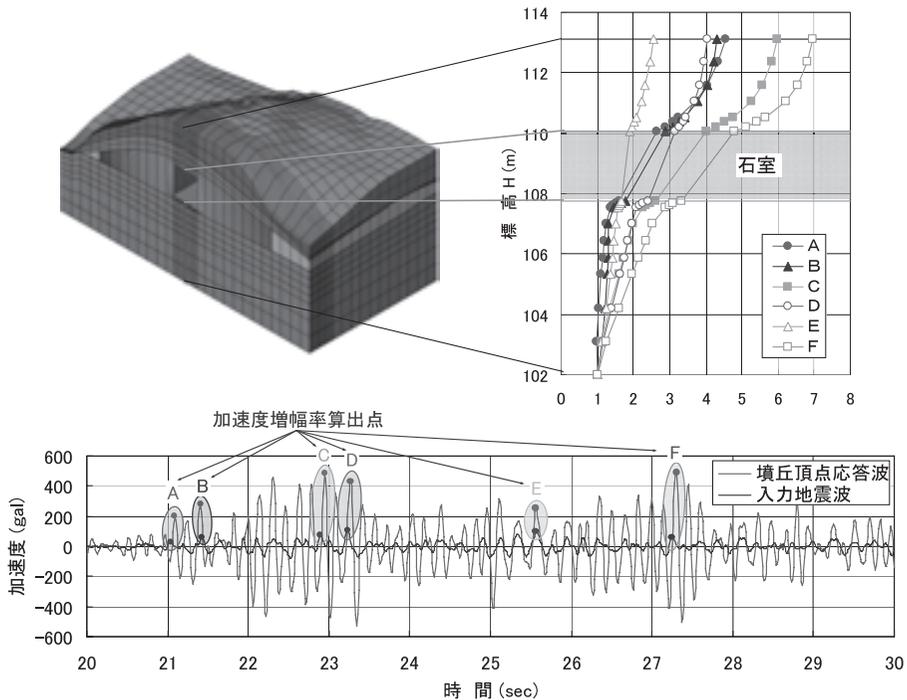


図5 墳丘頂上における応答加速度の時刻歴と墳丘中心に沿った加速度増幅特性

3-3. 墳丘部の発生応力

想定される南海地震の地震動を入力として図1の地盤モデルに与えた時の高松塚古墳墳丘部で発生する応力分布の一例を図6, 7に示す。図6は繰返し震動により東側に最も変位した時点の状態を、図7は最も西側に変位した時点の状態をそれぞれ表している。地震動を受けることによって、石室と墳丘地盤の境界部分および変形方向と反対側の墳丘斜面部分において引張応力が発生していることがわかる。平面的には東側に変位した場合には墳丘北西斜面に、西側に変位した場合には南東斜面において引張応力が大きくなることわかる。土質材料は圧縮には強く抵抗できるのに対し、引張に対しては、粘着力のある粘性土や固結力のある岩石であればある程度強度を発揮することができるが、砂質系土の場合は、亀裂や剥離が容易に発生し、ほとんど抵抗できない。高松塚古墳の墳丘は細粒分を含む砂質系材料で構築されており、引張応力発生領域では局所的な破壊が生じやすい。したがって、両図で表される引張応力卓越地点は微細な亀裂や局所的な破壊が生じる可能性が高い部分であると考えられる。

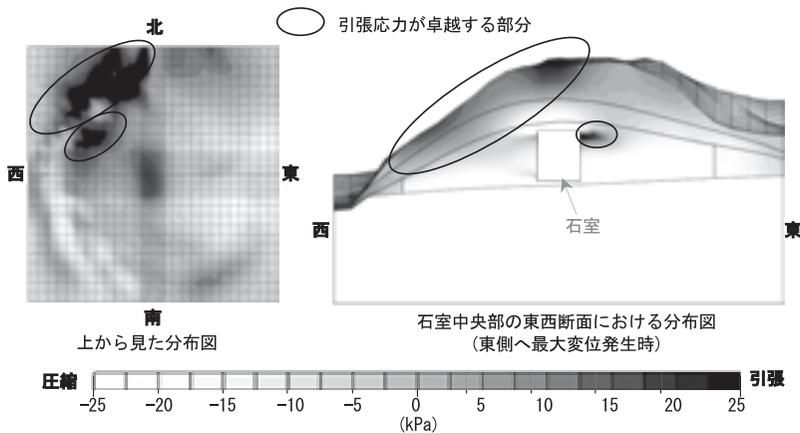


図6 東側へ最大変位発生時の東西方向応力分布図

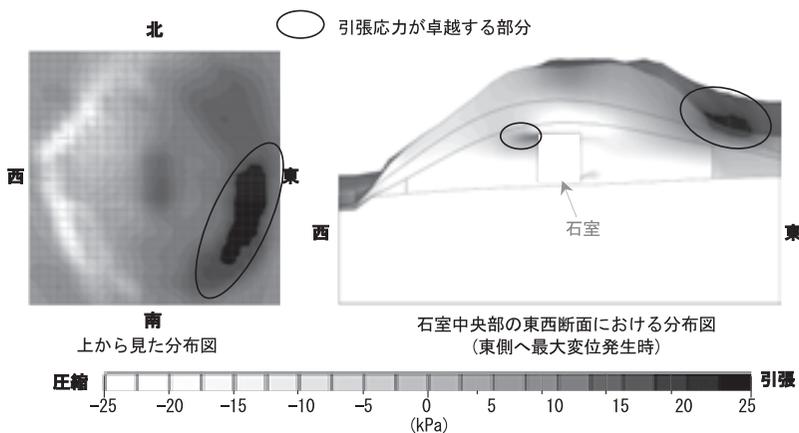


図7 西側へ最大変位発生時の東西方向応力分布図

次に、高松塚古墳墳丘を石室直上の10cm ところで輪切りにした断面におけるひずみ分布を図8, 9に示す。それぞれ左側に三次元的な鳥瞰図を、右側に平面図を示しているが、石室直

上10cm という標高では古墳北西、南西側には地盤が存在しないので、平面図として表示した場合に墳丘の形状とは必ずしも一致していない。応力状態を示した図6、7と整合させて、図8に繰返し震動により東側に最も変位した時点の状態を、図9に最も西側に変位した時点の状態を示している。応力状態と同様、いずれの方向に変位した場合でも、石室と墳丘地盤の境界部分に引張ひずみが発生していることがわかる。すなわち、この部分で最も亀裂の発生の可能性が高いことを表している。また、墳丘本体部分では斜面南東側、北西側に引張ひずみの発生領域が現れており、引張応力発生時点と調和的な結果を与えている。墳丘の発掘に際し、石室直上部分まで掘り下げた段階で、石室の形状に沿って亀裂が観察されている⁹⁾。動的解析結果においても石室と墳丘地盤の境界部分において破壊の直接の要因となる引張応力、ひずみの発生が集中的に現れており、発掘調査による知見と調和的な結果を与えることがわかる。以上より、地震動を受けた古墳内部で石室と墳丘地盤の境界部分において亀裂が発生し、それが周囲へと拡大するというモードで墳丘全体の被災へとつながった可能性が高い。

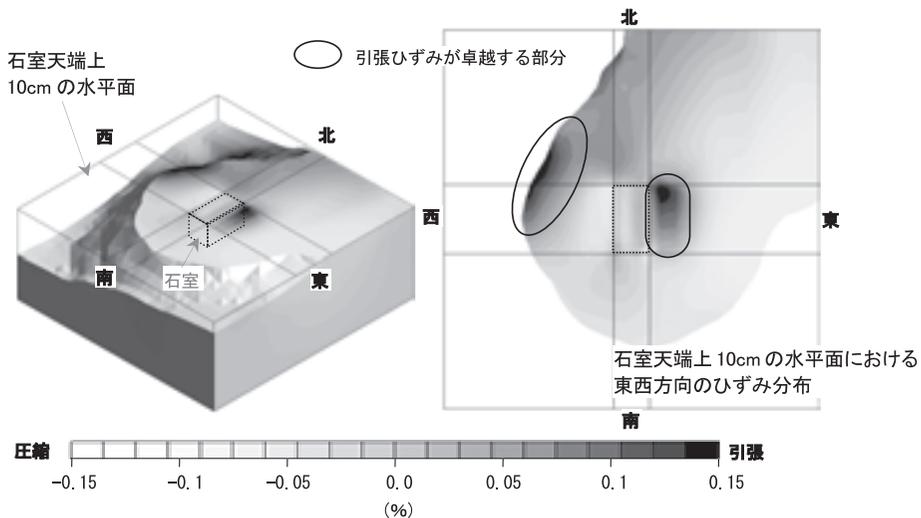


図8 東側へ最大変位発生時の東西方向ひずみ

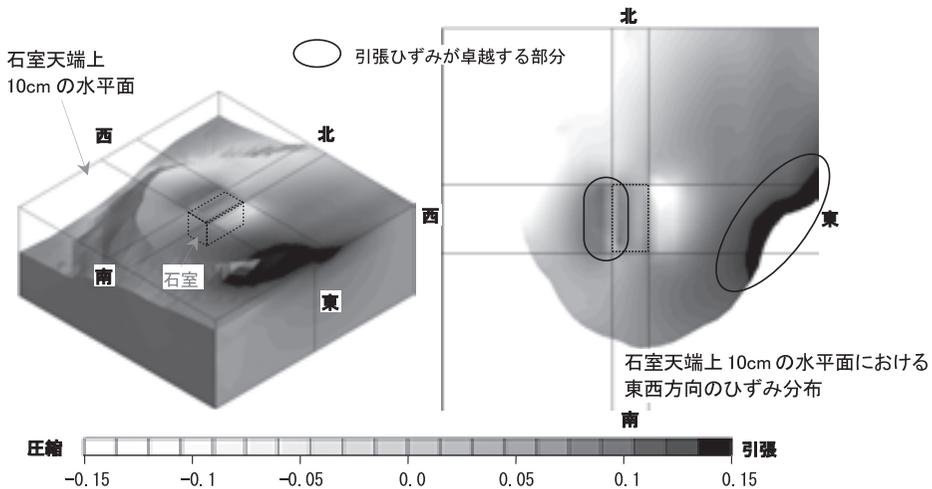


図9 西側へ最大変位発生時の東西方向ひずみ

3-4. 石室の応力

高松塚古墳においては石室の天井石に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^{1,9)}。図10に石室に発生した亀裂の状況を示す。このような天井石内側の中央部に亀裂が発生するのは、石室および石室上部の墳丘の自重と地震時の上下動により作用する曲げモーメントによるものであると考えられる。ここでは、正弦波（周期0.1秒，最大加速度100gal）の上下動による動的FEM解析を行い、石室に作用する応力を試算した。図11，12に自重と上下動による最大変位発生時における石室のせん断応力 τ_{xz} ，X方向応力 σ_{xx} を示す。石室および墳丘の自重により石室の隅角部でせん断応力，天井石，下床石の中央部内側に引張応力が発生し，上下動が作用することにより，これらの応力はさらに増加しているが，石室の強度（一軸圧縮強さ6.39MPa，圧裂引張強さ1.06MPa）に対して小さい値である。また，図10の左図に示すように実際の石室は壁が分割された構造であり，解析でモデル化したよりも変位の自由度が大きく，発生応力はさらに小さいと考えられる。但し，石室は凝灰角礫岩であり，必ずしも石室すべてが前述の強度を有するわけではなく，石室の弱部に何らかの要因で発生した亀裂が地震により拡大した可能性はある。

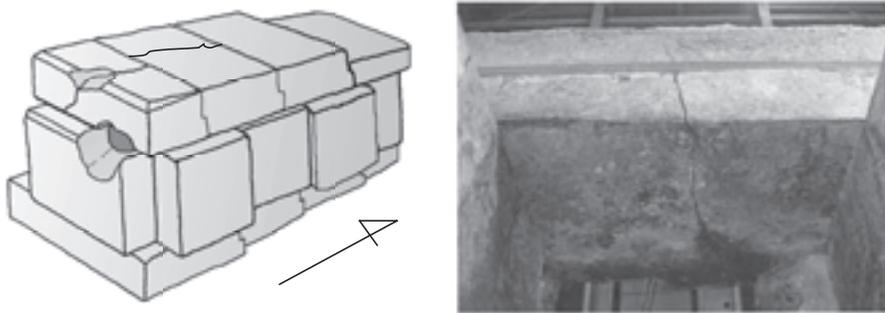


図10 石室に発生した亀裂

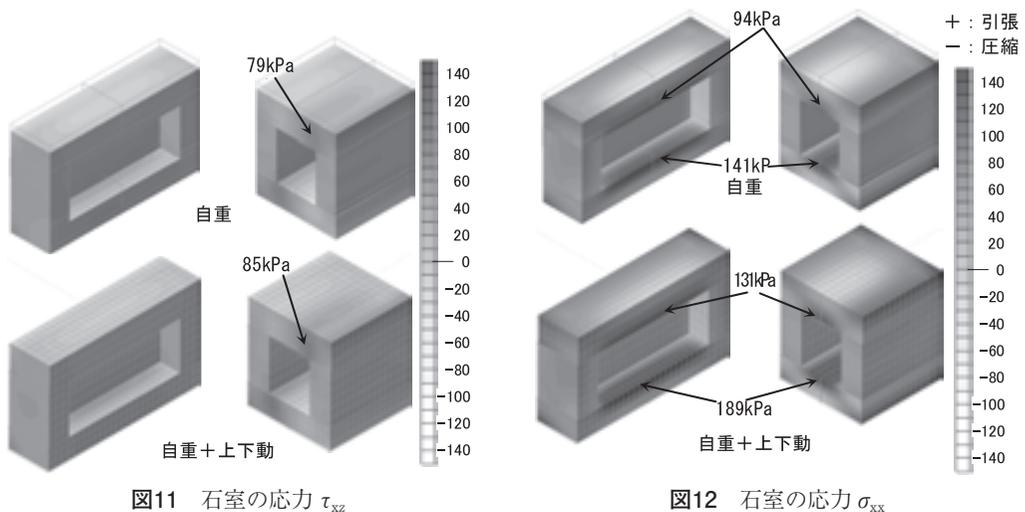


図11 石室の応力 τ_{xz}

図12 石室の応力 σ_{xx}

4. まとめ

高松塚古墳の発掘調査で発見された地震痕跡と思われる亀裂と地割れの発生メカニズムを検

討するために、三次元動的有限要素法による数値解析を実施した。その結果、硬質な石室と脆弱な墳丘地盤の境界部分で引張応力と引張ひずみが集中して現れ、亀裂の要因となることがわかった。この結果は発掘によって見いだされた知見と定性的に一致することから、高松塚古墳墳丘内部の多数の亀裂と地割れは地震によって生じた可能性が高い。一方、外力としての入力地震動をどのように設定するかによって解析結果は大きく変わってくる。特に、応力とひずみの大きさは地震動の強弱に強く影響される。今回は、南海地震の風化岩地盤における地震動として大阪府南東部における想定地震動を入力した。その意味では、古墳に最もダメージを与えた地震が特定されていない現状において、3章で示した結果は一つの可能性の域を出るものではない。本解析で入力した想定地震動では深刻な被害を受けるようなレベルの応力、変位は現れていない。ただし、東南海・南海地震は繰り返し発生しており、古墳は早い時期の地震によって被災した状態で後続の地震に見舞われていることになる。解析では健全な状態を初期条件としているが、1300年間の履歴を考えれば、弱体化した状態で何度も地震外力をうけることによって、同じ入力地震動であっても墳丘はより大きな変形を生じるように応答することになる。つまり、時代の経過とともに古墳の構造は劣化してきたとも考えられる。高松塚古墳の固有周期は0.153秒と得られたが、これは内陸直下型地震によって現れやすいため、今後、飛鳥周辺でこの種の地震が発生すれば被害は甚大なものになる。奈良県を取り巻く断層帯の動きによっては、備えなければならない地震は、東南海・南海地震だけでなくことも指摘しておかなければならない。

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：カツ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，檀原考古学研究所論集，4，pp.623-645 (2003)
- 4) 三村 衛，長屋淳一，石崎武志：高松塚古墳墳丘部の動的解析，保存科学，49，97-108 (2010)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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.51A，501-512 (2005)
- 8) 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)
- 9) 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)

キーワード：高松塚古墳 (Takamatsuzuka tumulus)；

三次元動的有限要素解析 (three dimensional dynamic finite element analysis)；

加速度増幅 (amplification of acceleration)；応力集中 (stress concentration)；

地盤と石材の相互作用 (interaction between the mound and the chamber stones)

Evaluation of Seismic Damage to the Mound of Takamatsuzuka Tumulus Based on Dynamic Finite Element Analysis

Mamoru MIMURA^{*}, Jun'ichi NAGAYA^{*2} and Takeshi ISHIZAKI

Innumerable cracks and fissures caused by huge earthquakes were found on the excavated walls inside the mound of Takamatsuzuka Tumulus during archaeological investigation. 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 as well as near-fault earthquakes possibly caused the damage to the tumulus mound. Thus, seismic stability is of importance for the conservation of tumulus mounds made of soil without artificial reinforcement.

In this study, a series of three-dimensional dynamic finite element analyses was 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. Based on archeological investigation, realistic modeling for the tumulus structure was conducted. Calculated performance shows that the natural period of Takamatsuzuka Tumulus that can generally be measured for near field earthquakes is 0.15 s. This means that such a small mound as Takamatsuzuka Tumulus is more fragile to near field earthquakes than subduction earthquakes. Serious amplification of acceleration can be seen in the tumulus mound. The response acceleration derived on the mound becomes much larger than the input acceleration monitored in the original ground. Calculated results also exhibit that serious stress concentration is found at the foot of the mound and at the boundary of the mound and the chamber stones, possibly causing the occurrence of cracks in the mound of Takamatsuzuka Tumulus.

^{*} Kyoto University

^{*2} Geo-Research Institute