

高松塚古墳墳丘と石室の破損の要因分析 ～動的解析による地震の寄与についての基礎的検討～

京都大学防災研究所・三村衛

1. はじめに

高松塚古墳の墳丘の調査によって、古墳墳丘内部に地震由来と考えられる多くの亀裂や地割れが認められた。盛土構造物の亀裂や割れは乾燥収縮や雨による侵食によっても生じるが、これらは主としてごく表層に近い部分で発生するのが通例である。これに対して、高松塚古墳墳丘のようにほとんど含水比が変化していない墳丘内部にも無数の亀裂や地割れが広がっていることの要因としては、地震を想定せざるを得ない。本報では、墳丘と石室に現存する被害が地震によるものであるかどうかを、動的解析（繰り返し震動荷重を受けた時の地盤構造物の応力、変形の数値解析のことを総称する）に基づいて検討した結果を報告する。ただし、初年度においては、まず定性的な挙動をとらえることに重点を置き、地震波形は正弦波を与え、波の周期と最大加速度をパラメータとして、繰り返し载荷を受ける高松塚古墳の挙動を定性的にとらえることを目指した。また、南海地震に対して想定される地震動を入力した検討も行い、他のケースとの比較検討を行った。

2. 解析モデルと解析パラメータ

検討に用いた解析モデルと必要となる入力パラメータについて説明する。墳丘部（土の部分）は繰り返しを受ける土の構成モデルとして図-1 に示す Ramberg-Osgood モデル（通称 RO モデル）を適用した。RO モデルの骨格曲線と履歴曲線は次式のように表される。

$$\text{骨格曲線: } \gamma = \frac{\tau}{G_0} \left[1 + \alpha |\tau|^\beta \right], \quad \text{履歴曲線: } \frac{\gamma \pm \gamma_0}{2} = \frac{\tau \pm \tau_0}{2G_0} \left[1 + \alpha \left| \frac{\tau \pm \tau_0}{2} \right|^\beta \right]$$

ここで、 γ はせん断ひずみ、 τ はせん断応力、 G_0 はせん断弾性係数、 γ_0, τ_0 はそれぞれ履歴の折返し点におけるせん断ひずみとせん断応力、 α, β は材料パラメータである。減衰定数 h は DW を減衰エネルギーとして以下のように表すことができる。

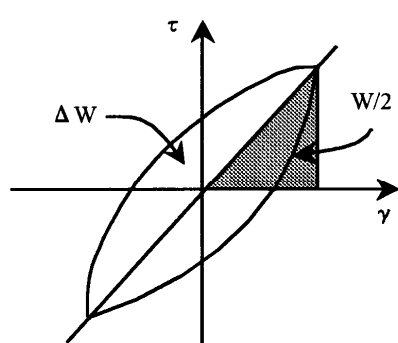
$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{\alpha \tau_0^\beta}{1 + \alpha \tau_0^\beta} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2} \left(1 - \frac{G}{G_0} \right)$$

h_{\max} を最大減衰定数とすると、 $\gamma \rightarrow \infty$ で $G \rightarrow 0, h \rightarrow h_{\max}$ となるので β は $\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}}$ となる。この関係を

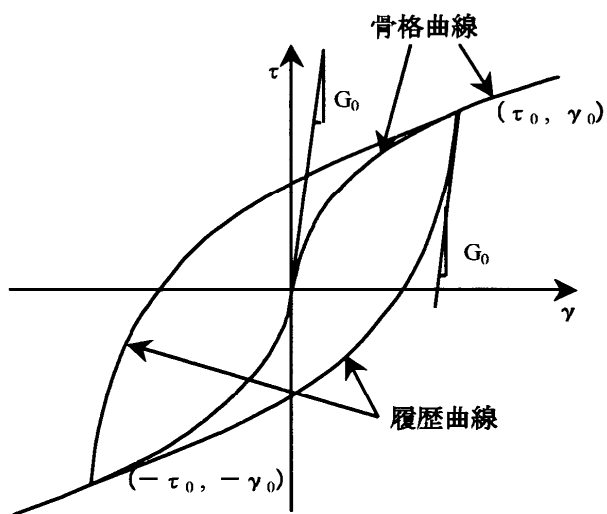
骨格曲線と履歴曲線とから $\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha |\tau G|^\beta}$ が得られ、 $G/G_0 = 0.5$ の時の基準せん断ひずみ $\gamma_{0.5}$ とすると、

$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0.5} G_0} \right)^\beta$ と規定できる。以上より、RO モデルを用いる際に確定しなければならないパラメータ

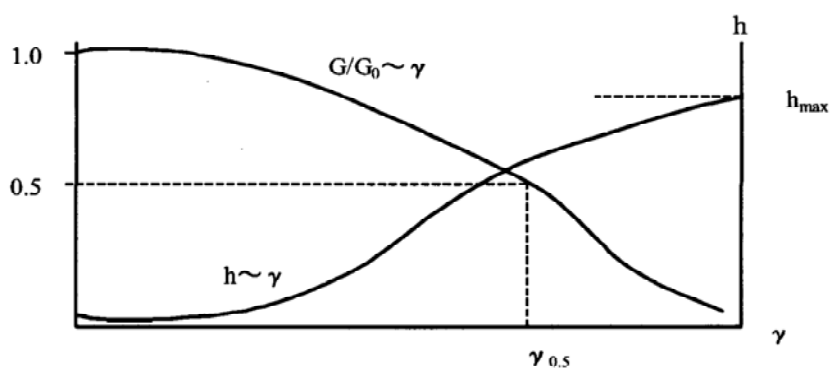
は $G_0, h_{\max}, \gamma_{0.5}$ の 3 つであることがわかる。



(a) 履歴面積



(b) 骨格曲線と履歴曲線



(c) せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性

図-1 Ramberg-Osgood モデルの概念

3 動的解析（有限要素法；FEM）の概要

高松塚古墳墳丘部、石室石材にみられた地割れと亀裂に対し、既往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有限要素解析（dynamic Finite Element Analysis）を実施し、動的FEM解析によ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った。

求められる解析は、石室を含む円錐形の墳丘の地震力による変形、ひずみ分布に基づく墳丘土の評価であるので、対象を三次元にモデル化し、動的有限要素解析を行った。モデル化に際し、現地の地形図から図-2 に示すような 1972 年当時の標高値を基に三次元の地盤モデルを作成した。地震動は正弦波とし、周期を 0.2, 0.5, 10. 秒，最大加速度を 200, 400, 600 gal とする 9 ケースを解析した。また比較のため、図-2 に合わせて示した南海地震の想定は波を入力とするケース 10 を追加した。

- ①モデル化範囲：石室を含む墳丘部分（三次元モデル）
- ②解析モデル：Ramberg-Osgood モデル（RO モデル） 石室は弾性体
- ③解析ケース：表-1 に示す 10 ケース

表-1 解析ケース

	波形	周期（秒）	最大加速度（gal）	備 考
ケース 1	正弦波	1.0	200	
ケース 2	正弦波	1.0	400	
ケース 3	正弦波	1.0	600	
ケース 4	正弦波	0.5	200	
ケース 5	正弦波	0.5	400	
ケース 6	正弦波	0.5	600	
ケース 7	正弦波	0.2	200	
ケース 8	正弦波	0.2	400	
ケース 9	正弦波	0.2	600	
ケース 10	想定地震動	—	107.6	南海地震を想定し大阪府南東部における想定地震動

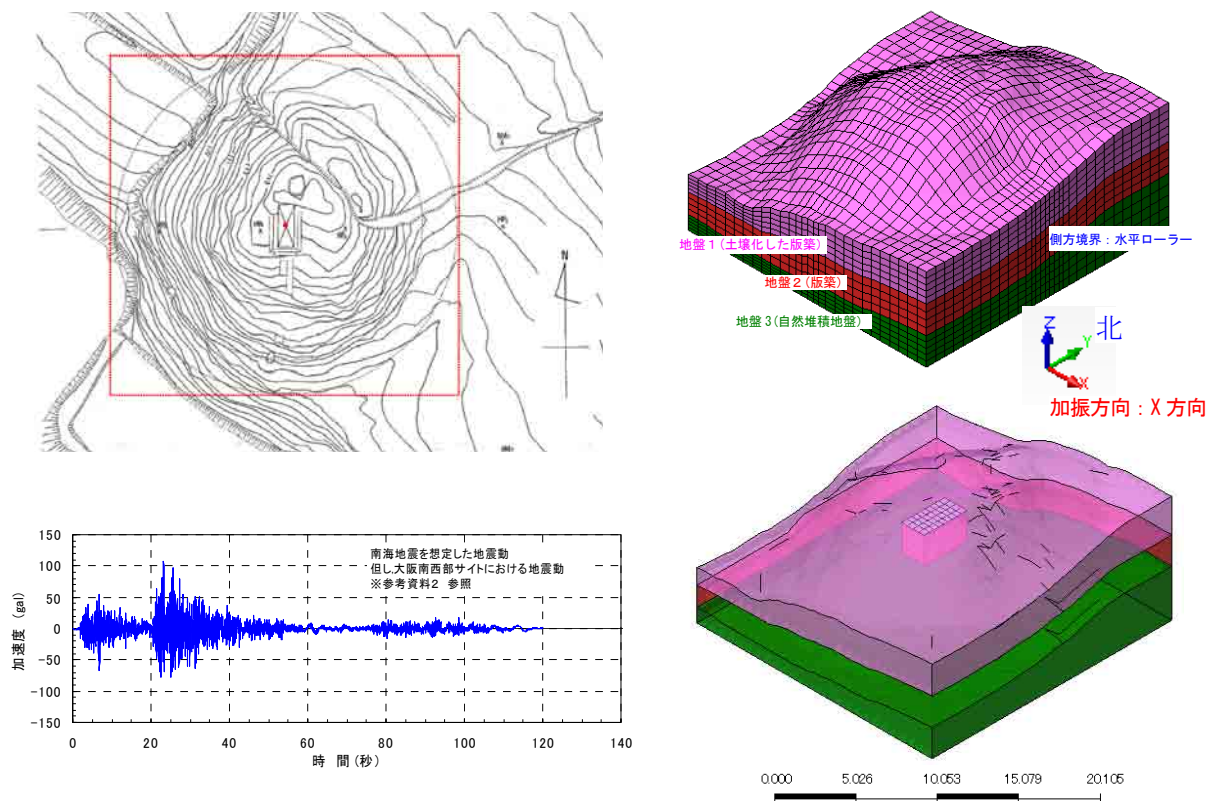


図-2 解析モデル図と南海地震想定地震動

4. 動的 FEM による解析結果

(1) 正弦波を外力とした動的 FEM 解析

A. 最大変位量

正弦波による動的 FEM 解析結果より短周期である 0.2 秒において最も大きな変形が生じる（固有値解析結果より，墳丘部の固有周期は 0.17 秒）。すなわち，海洋側の長周期地震動よりも内陸型の比較的短周期の地震動の影響が大きいと考えられる。

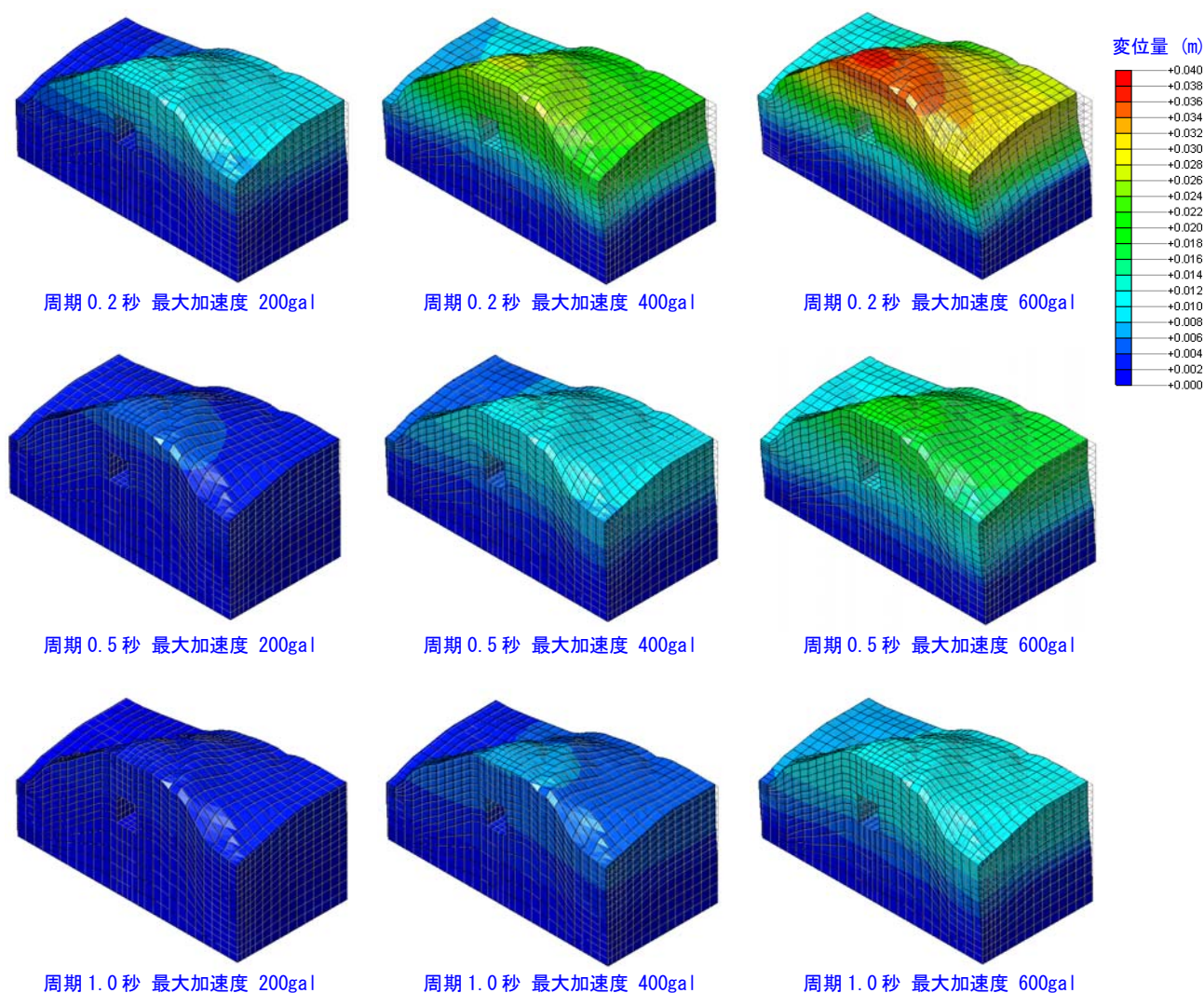


図-3 変位図と変位量コンター図

(2) 正弦波 周期0.2秒 最大加速度 600gal における解析結果

A. X方向水平応力 σ_{xx}

①引張応力が卓越する部分

右振れの場合→石室の右上部付近, 墳丘部左側の表層付近

左振れの場合→石室の左上部付近, 墳丘部右側の表層付近

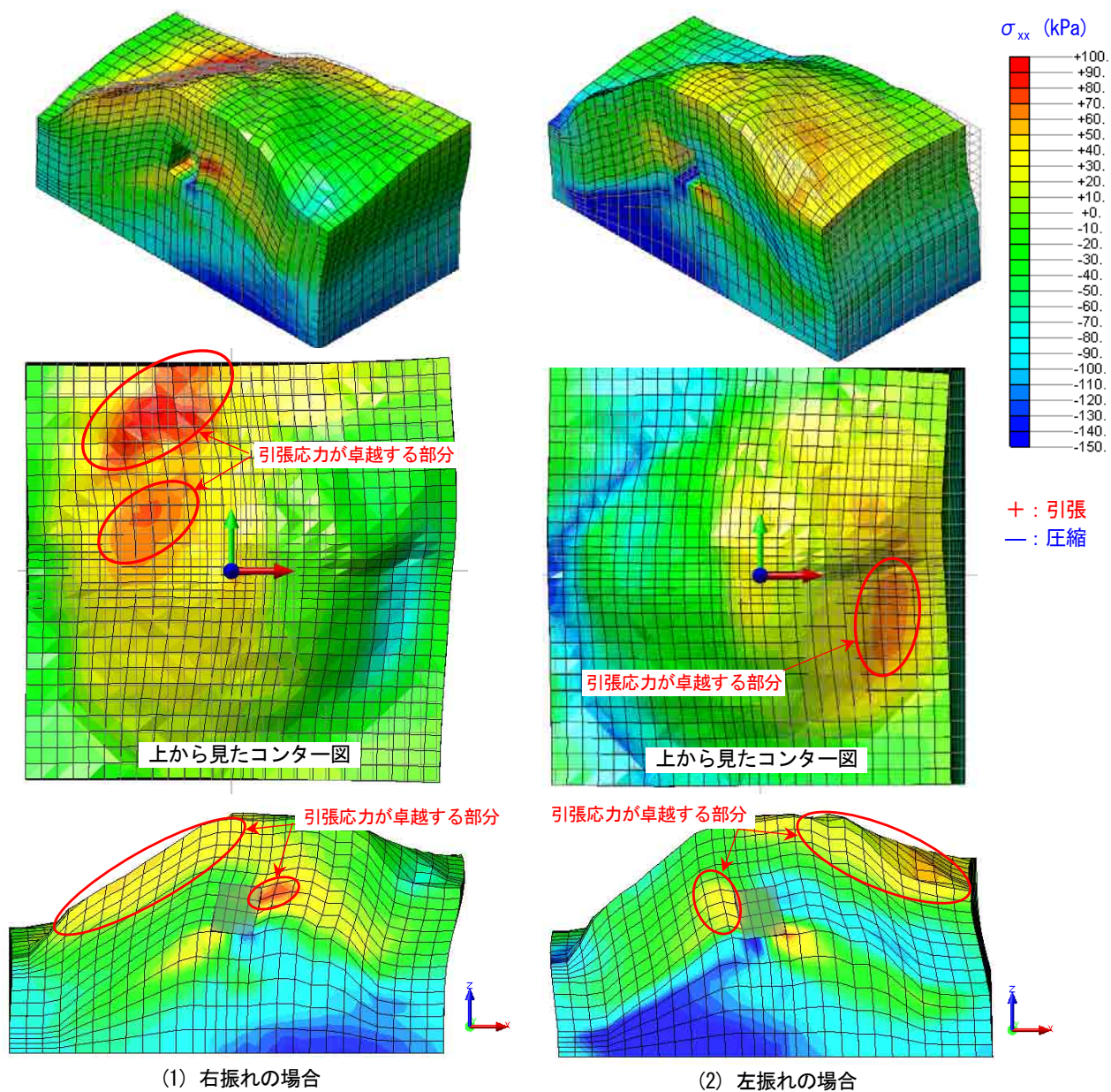


図-4 X方向水平応力 σ_{xx} のコンター図

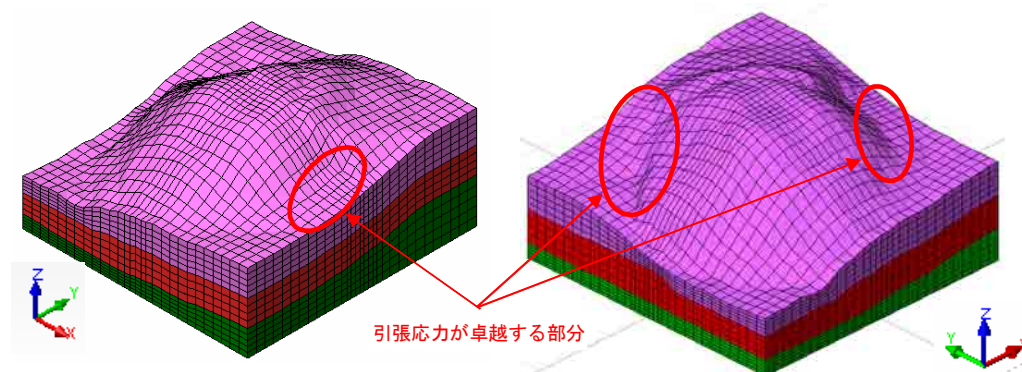


図-5 引張応力が卓越する部分

B. せん断応力 τ_{xz}

せん断応力が卓越する部分 石室両側部

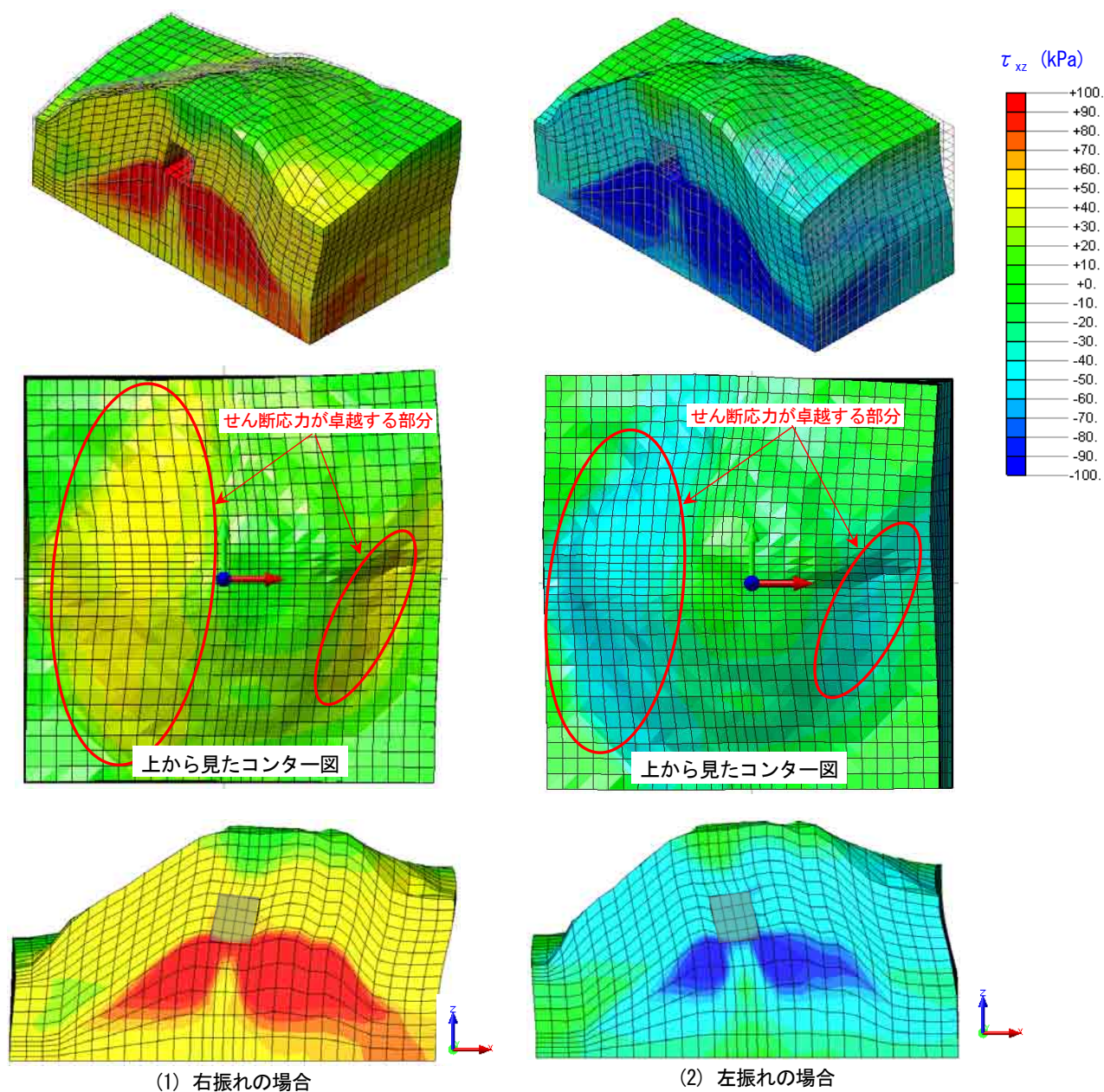


図-6 せん断応力 τ_{xz} のコンター図

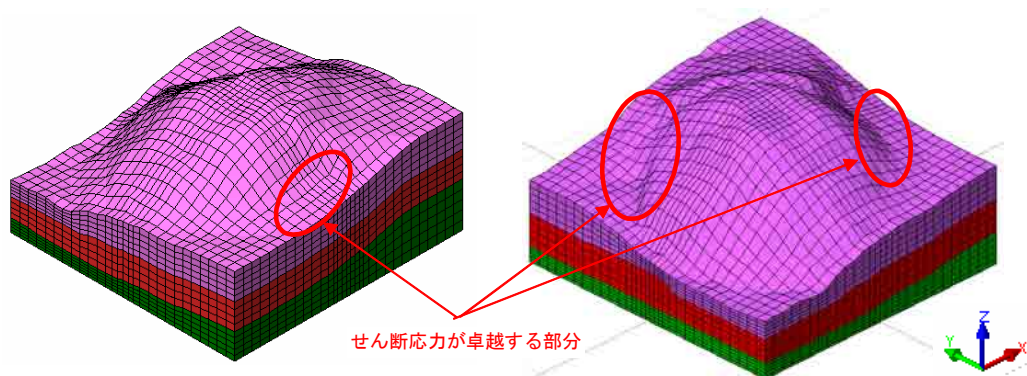


図-7 せん断応力が卓越する部分

(3) 南海地震想定地震動による動的FEM解析

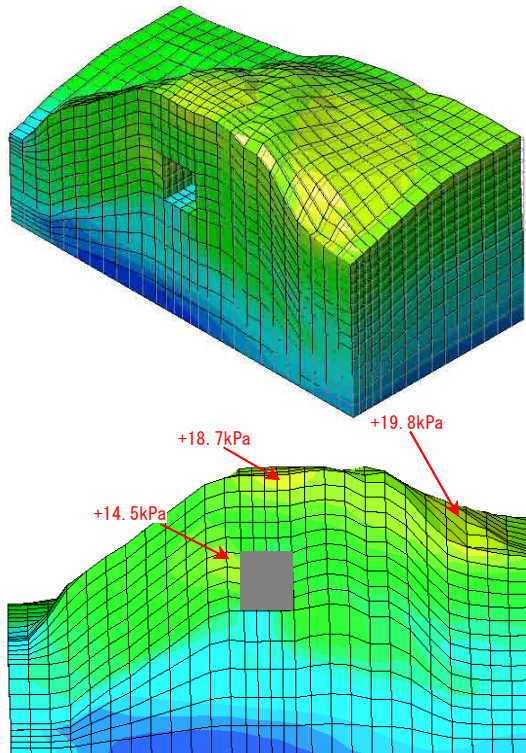


図-8 X方向応力 σ_{xx}

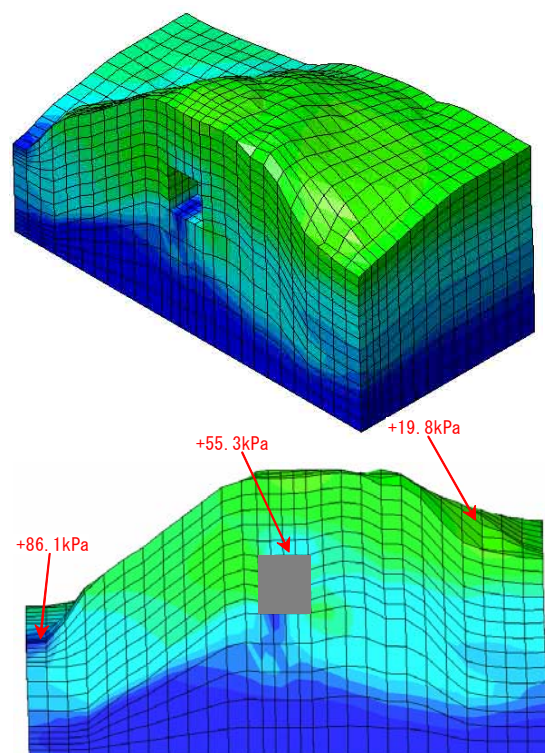


図-9 せん断応力 τ_{xx}

5. 解析結果の考察

地震動により墳丘部に亀裂が生じる場合、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、いわゆるせん断破壊によって発生する亀裂とを分けて考える必要がある。

(1) せん断による亀裂の発生

墳丘の版築土に対しては、粘着力 $c=100\sim150\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=25\sim36^\circ$ （一面せん断試験より）が既往の土質試験結果によって得られている。一方、40年後には高い確率で発生すると言われている南海地震による想定地震動を入力した場合、高松塚古墳墳丘における最大変位発生時のせん断応力は、石室付近で 55kPa 、墳丘の法尻部で 86.1kPa であり、いずれも墳丘の有する地盤強度を上回らない。すなわち、この地震動では、亀裂が生じるせん断応力のレベルまでには達しないこととなる。ただし、本解析では、墳丘内部の潜在亀裂を初期条件として与えているわけではなく、健全な状態であるとして計算されていることは確認しておかないといけない。破壊しないまでも、地震によってある程度ダメージを受けた墳丘が、100年～140年を経て再度同じタイプの地震を被った場合、既に墳丘の強度が初期に比べて低下していると考えられ、本解析と同じ結果を与えるとは限らない。

古墳の固有周期が 0.17 秒ということで、地震のタイプからいえば、周期が比較的長いプレート境界型の地震（南海地震はこれにあたる）よりは、直近の断層が破壊することによって起こる直下型地震の方が揺れやすいということがわかった。解析結果においても、周期 0.2 秒、最大加速度 600gal のケースで最大変位が発生し、これに対応して 100kPa 近いせん断応力が発生することがわかった。これは墳丘地盤の強度値の下限に近く、土要素が破壊してもおかしくないレベルである。

(2) 引張応力による亀裂の発生

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。解析結果によれば、南海地震波では、最大 19.8kPa の引張応力が墳丘部分で発生している。また石室近傍でも 14.5kPa の引張応力が発生している。一方、周期 0.2 秒、最大加速度 600gal のケースではより大きな引張応力が墳丘内部で発生しており、これらはせん断ではなく、引っ張りによって地盤に亀裂や割れを引き起こす可能性がある。また石室と墳丘土の境界では剛性の異なる物質の揺れ方の違いによって、発生応力が高くなり、亀裂の発生源となる可能性が高い。具体的には、以下に示すように、まず石室と版築間に剥離が生じ、そこを基点として漸次進行的に亀裂が進展すると考えられる（図-10 参照）。

- 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。

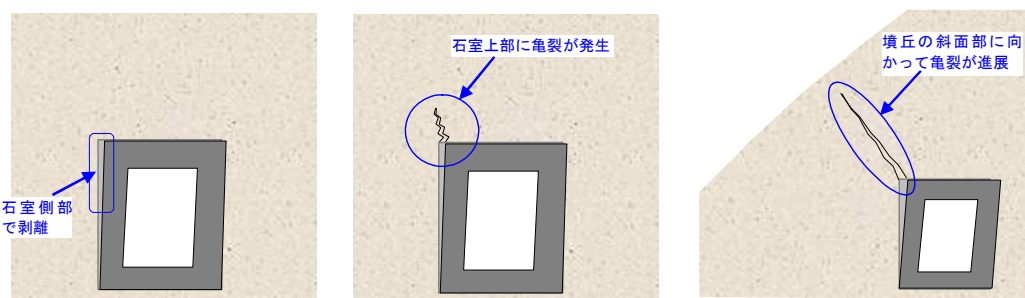


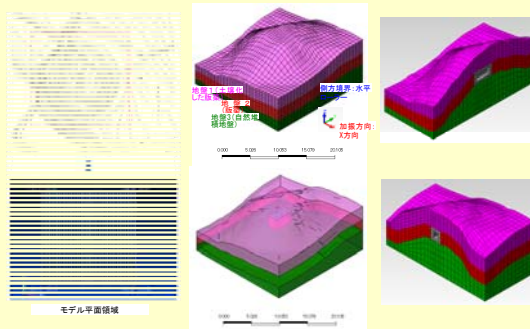
図-10 石室側部と版築の剥離に伴う亀裂の発生

6. 現状でのまとめ

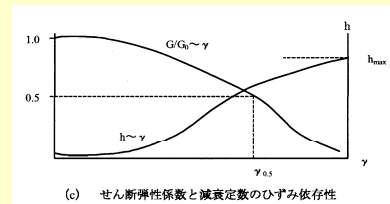
高松塚古墳壁画の劣化に地震がどのように寄与した可能性があるのかについて、動的三次元有限要素解析によって定性的な検討を加えた。その結果、現段階では以下のような結論が得られた。

- ①「高松塚古墳の墳丘の固有周期はおよそ 0.17 秒であり、地震のタイプで言えば長周期型の南海地震よりは短周期型の断層直下型地震を受けた場合の方が、応力、変位ともに厳しい状態に陥ることがわかった。
- ②「破壊形態としては、せん断による破壊よりはむしろ繰り返し载荷を受けて振動する際に発生する引張応力による引張破壊が起こりやすい。特に、墳丘版築土と石室の境界部、墳丘の肩の部分において大きな応力と変形が生じる。
- ③「高松塚古墳も単発ではなく繰り返し地震の履歴を受けていると考えられる。今回の解析は古墳が健全であるという初期条件の下で実施されており、この状態を初期として次の地震を受けて変形し、さらにそれを初期条件として次の地震を受けるということを繰り返してきたわけである。その場合、既に健全でない状態で地震外力を受けることになり、より脆弱なレスポンスをする可能性がある。将来を見通す場合には、こうした点についても考慮しておかなければならない。
- ④「本報では、定性的な検討ということで、正弦波を入力地震動とし、比較のために南海地震の想定波を適用した。今後、発掘によって明らかとなった墳丘内部の構造、外周の赤い版築、石室周りの白い版築の構造の違い、特に剛性の違いを正しくモデル化した、より現実に近い地盤モデルを作成して解析に供するとともに、最新の地震学の知見を入れた入力地震動を導入することにより、より現実的で精度の高い解析を実施し、定量的な評価を行う必要がある。

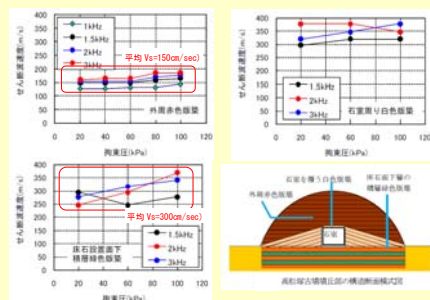
有限要素メッシュ



Ramberg-Osgoodモデル

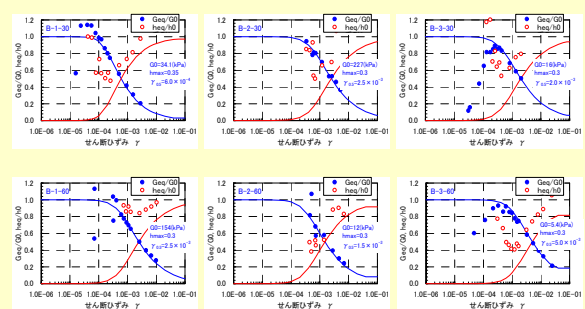


ROモデルに必要なパラメータは G_0 , h_{max} , $\gamma_{0.5}$ の3つである

地盤の初期せん断弾性係数 G_0 

ベンダーエレメント試験結果におけるせん断弾性波速度 V_s より $G_0 = \rho \cdot V_s^2$ により設定

R0モデルの非線形パラメータ



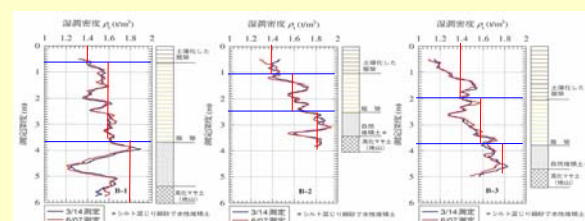
$h_{max} = 0.3$, $\gamma_{0.5} = 2.5 \times 10^{-3}$

ポアソン比



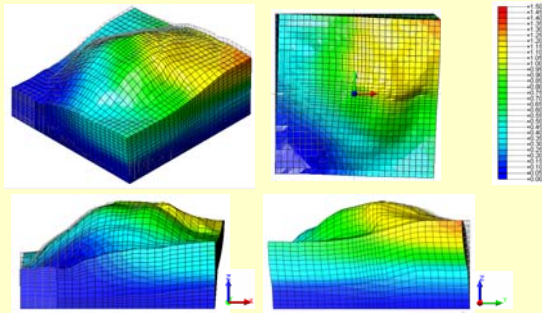
①地盤1: $\nu = 0.488$
 ②地盤2: $\nu = 0.478$
 ③地盤3: $\nu = 0.450$

単位体積重量



①地盤1: $\gamma = 1.4\text{kN/m}^3$
 ②地盤2: $\gamma = 1.6\text{kN/m}^3$
 ③地盤3: $\gamma = 1.8\text{kN/m}^3$

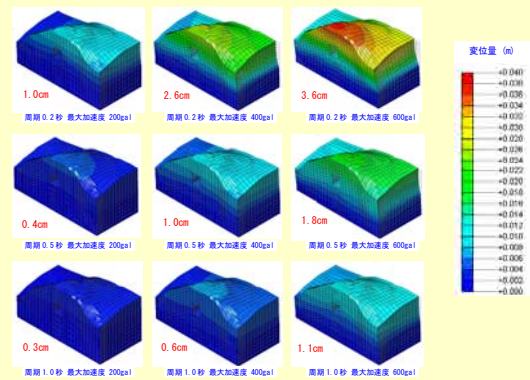
固有値解析結果



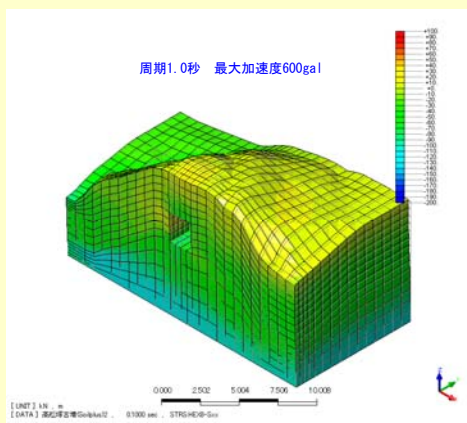
1次モードの固有周期:0.174秒

比較的低周期が卓越する地震動に大きく影響される。
海洋型の長周期地震動よりも内陸型の短周期地震動の影響が大きい

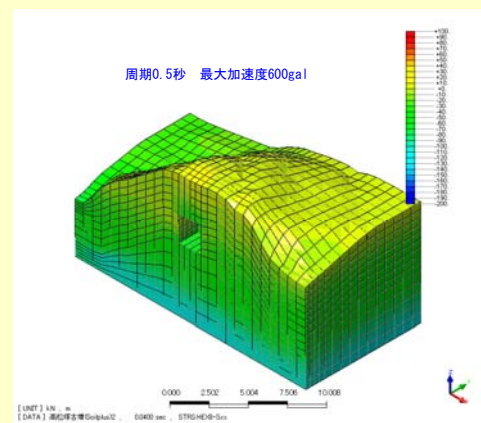
変位図最大変位量



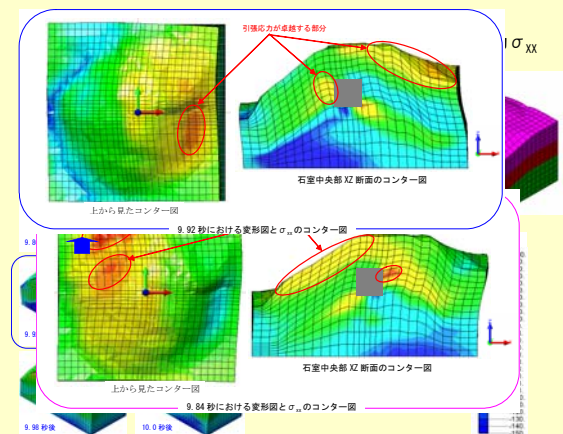
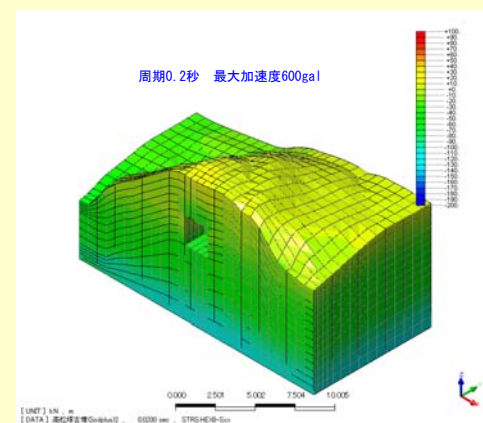
周期1.0秒 最大加速度600gal

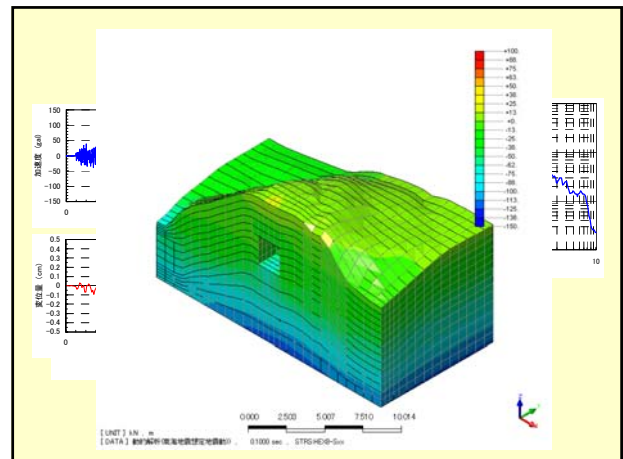
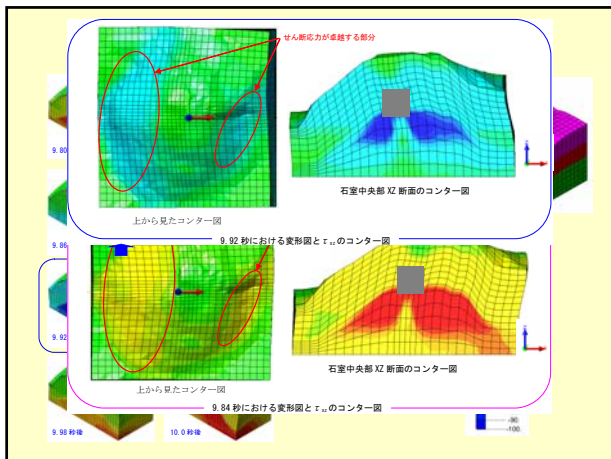


周期0.5秒 最大加速度600gal

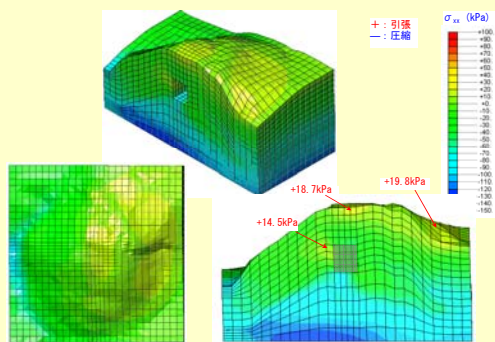


周期0.2秒 最大加速度600gal

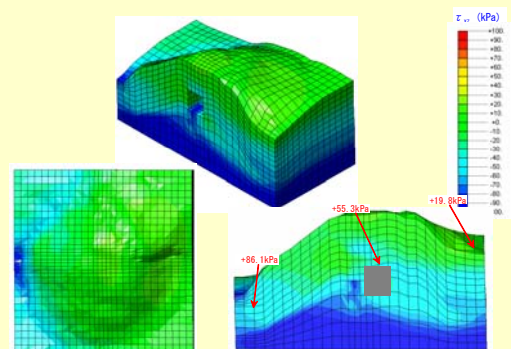




最大変位時(25.6秒)におけるX方向応力 σ_x



最大変位時(25.6秒)におけるせん断応力 τ_{xz}



地震による墳丘部の亀裂への影響について

1) 墳丘部の振動特性

墳丘部の固有周期は0.17秒程度であり、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。

2) 地震動による墳丘部の応力分布と亀裂の関係

地盤に亀裂が生じる要因としては、

- 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、地震動によるせん断応力および引張応力が大きく発生する部分に亀裂が生じやすい。今回の動的FEM解析において墳丘部でせん断応力、引張応力が大きく発生する部分は以下の箇所であった。

- ① 引張応力：右振れの場合→石室の右上部付近、墳丘部左側の表層付近
- 左振れの場合→石室の左上部付近、墳丘部右側の表層付近

- ② せん断応力：石室両側部

特に、引張応力は墳丘斜面の法尺付近（傾斜勾配が変化する部分）において引張応力が卓越する。

南海地震想定地震動による墳丘への影響

(1) せん断による亀裂の発生

- ① 外周赤色版築土のせん断強度定数

粘着力 $c=100 \sim 150 \text{ kPa}$

内部摩擦角 $\phi=25 \sim 36^\circ$

- ② 南海地震想定地震動における

最大せん断応力

石室付近で55kPa

墳丘の法尺部で86.1kPa

→ 墳丘を健全であると仮定すると、この地震動では、亀裂が生じるせん断応力のレベルまでには達しないこととなる。

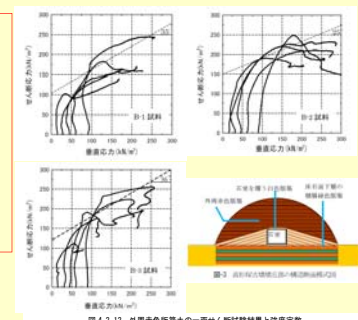


図 4.2.12 外周赤色版築土の一面せん断試験結果と強度定数

南海地震想定地震動による墳丘への影響

(2) 引張応力による亀裂の発生

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。但し、石室周りの版築は、まず石室と版築間に剥離が生じるため、以下のようなプロセスで亀裂が発生すると考えられる。

- 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。

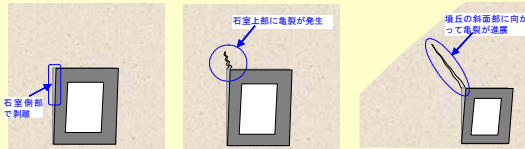


図 4.2.13 石室側部と版築の剥離に伴う亀裂の発生

まとめ

- ① 高松塚古墳の墳丘部の固有周期は0.17秒であり、地震としては、プレート境界型巨大地震より断層直下型地震による短周期の地震動の方が危険である。
- ② 地震動による亀裂の要因となるせん断応力および引張応力は、石室の側壁部付近および墳丘の法尻付近に発生する。
- 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には達しないが、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が考えられる。また繰り返し被災することで徐々に劣化することを考慮する必要がある。

今後の課題

- ① 発掘調査結果により、版築構造が場所によって異なることがわかっている。それぞれの構造に見合った剛性、強度の値をインプットとして現実に近いモデルを構築する。
- ② 石材自体を細かくモデル化することにより、石材内部における亀裂の発生機構が追跡できるかどうか検討する。
- ③ 南海地震想定地震動について、最新の地震学の知見を取り入れることにより、現実的な入力地震動による挙動評価を行う。