

弾性堆積盆地の三次元的な幾何形状が地震動の増幅特性に及ぼす影響の数値的検討

Numerical Investigation of the Effect of Three-Dimensional Geometry of Elastic Sedimentary Basins on the Amplification Characteristics of Seismic Motions

松本雅紀¹, 野田利弘², 豊田智大²

1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻・matsumoto.masaki.m8@s.mail.nagoya-u.ac.jp
2 名古屋大学・工学研究科土木工学専攻

概要

本研究では、堆積盆地の三次元的な幾何形状が地震動の増幅特性ならびに地表加速度分布に与える影響について数値解析的に検討した。議論を簡単にするため、基盤層および堆積層はともに弾性体とし、基盤層と堆積層の剛性に明確なコントラストを与えた。これにより、剛性比に応じた地震動の増幅が基盤層と堆積層の境界で生じることとなるが、三次元的な堆積盆地ではさらに、実体波のレンズ効果と表面波の干渉による強震動を生じることとなる。本稿では、地表の加速度応答および堆積盆地の伝達関数が、堆積盆地の幾何形状に応じてどのように変化するかを系統的に調べた。球形、楕円形、台形といった様々な盆地形状に対する時刻歴応答および周波数特性の比較から、1) 盆地が深いほど長周期地震動の増幅がより顕著になる、2) 楕円形盆地では球形盆地に対し加速度が小さくなる、3) 台形盆地では基盤傾斜による多次元効果が球形盆地より少ないことなどを示した。

キーワード：地震，堆積盆地，三次元，伝達関数，大規模並列解析

1. はじめに

堆積盆地において、地震波が硬い基盤層から軟弱な堆積層に入射すると、剛性の違いに起因して地震波が増幅され大きな被害を及ぼす。また、堆積盆地が三次元的である場合、実体波のレンズ効果に加え、実体波が地表面に干渉することで生じる表面波（Rayleigh 波および Love 波、長周期地震動の主要成分となる）の干渉により生じる強震動、また長時間に亘る地震動の滞留により、被害が甚大化する。したがって、地震被害の正確な予測には堆積盆地三次元的な幾何形状を考慮した地震応答解析が必要不可欠である。そこで本研究では、三次元地震応答解析を通して、堆積盆地の三次元的な幾何形状が堆積盆地の震動特性に与える影響を解明することを目指す。

2. 三次元球形盆地の弾性地震応答解析

2.1 解析条件

硬質な基盤層の上に相対的剛性の小さい堆積層を有する堆積構造を想定し、図1の有限要素メッシュを作成した。ただし、堆積盆地の形状は球形（盆地幅 5000m、盆地深さ 50m）とし、y 方向の対称性を考慮した半断面のモデルを作

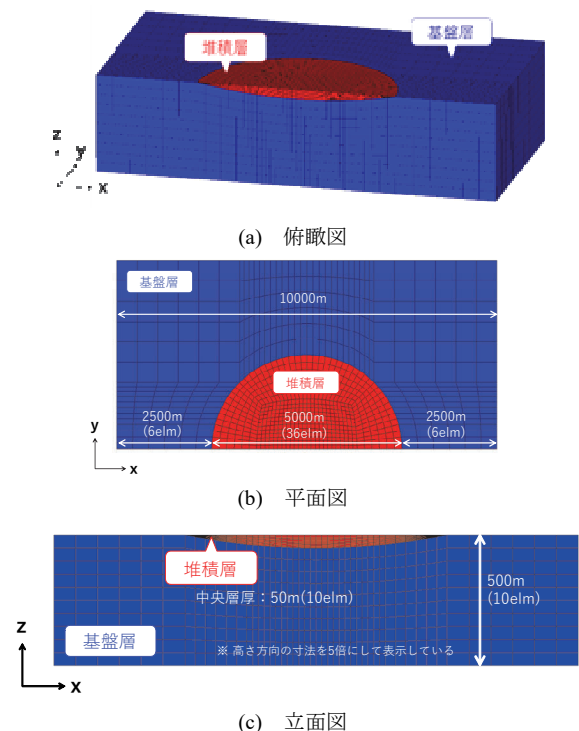
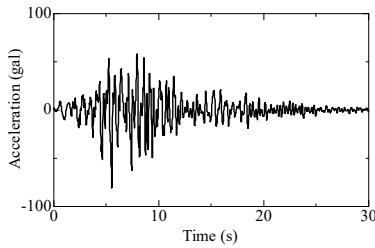
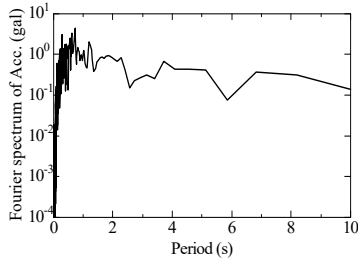


図1 三次元球形盆地



(a) 加速度の時刻歴 (最大 81gal, 継続時間 30 秒)



(b) 加速度フーリエ振幅スペクトル

図2 入力波

表1 弾性体の材料定数

	基盤層	堆積層
ヤング率 E (kN/m ²)	1500000	14500
ポアソン比 ν	0.25	0.25
土粒子密度 ρ^s (g/cm ³)	2.0	1.6
P波速度 c_p (m/s)	949	104
S波速度 c_s (m/s)	548	60.2

成した。入力動は、図 2 に示す兵庫県南部地震の振幅を 1/10 とした地震波を模型底面の x 方向にのみ入力した。弾性体の材料定数は、表 1 のように設定した。

2.2 解析結果

代表的な時刻におけるせん断ひずみ分布を図 3 に示す。同図より、三次元的な波動干渉に起因した円環状のひずみ集中帯の発生が解かれていることがわかる。

次に、盆地中央部における地表面での x 方向の加速度波形、加速度フーリエ振幅スペクトル、盆地底面～地表面間での伝達関数をそれぞれ図 4 に示す。 $T=1\sim 3$ s 程度の周期帯において 10 倍～100 倍程度の顕著な増幅が解かれたことがわかる。

3. 球形盆地の深さが震動特性に与える影響

堆積層の深さを変化させることでレンズ効果による実体波干渉の焦点位置が変化すると考えられる。

そこで、模型について図 5 に示すように、堆積盆地の深さを 1/2 倍、2 倍にした計算を実施した。

代表的な時刻におけるせん断ひずみ分布を図 6~7 に、盆地地表面中央部における加振方向の加速度波形をそれぞれ図 8(a)に示す。堆積層が厚くなるほどせん断ひずみが大きくなる傾向、加速度増幅が時間遅れになる傾向が見られる。図 8(b)における加速度フーリエ振幅スペクトルに加え、

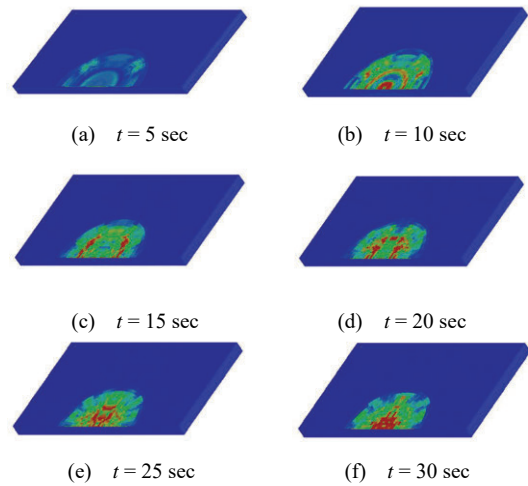
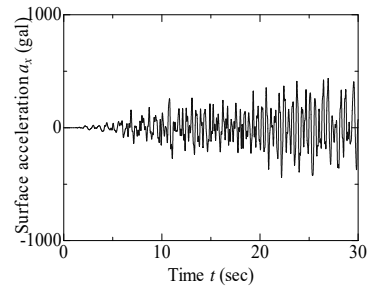
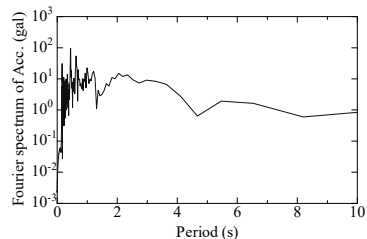


図3 せん断ひずみ分布 0 0.05%

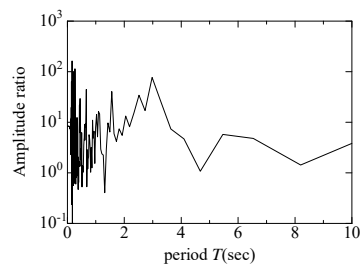


(a) 地表面における x 方向加速度 (最大 436gal)



(b) 地表面における

x 方向加速度のフーリエ振幅スペクトル



(c) 堆積層中央での伝達関数

図4 解析結果

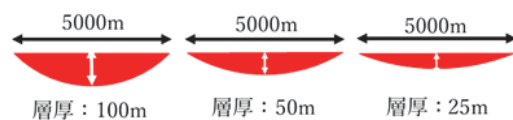


図5 堆積盆地深さの変化

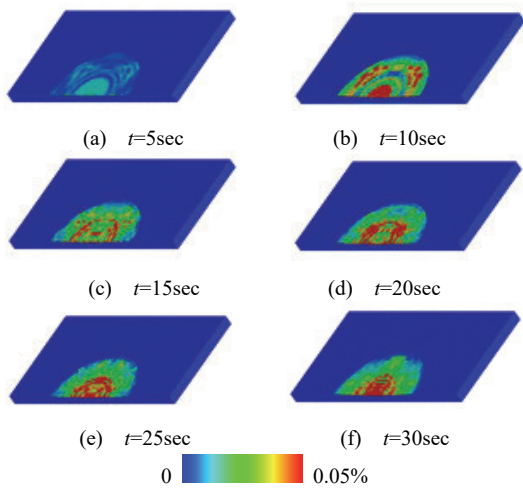


図6 せん断ひずみ分布 (深さ 2 倍)

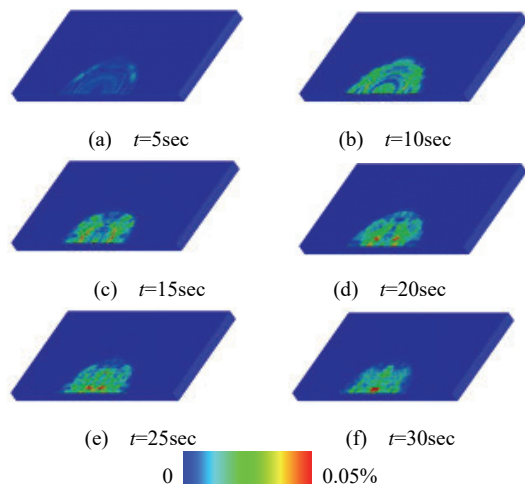


図7 せん断ひずみ分布 (深さ 1/2 倍)

図 8(c)における伝達関数からも、長周期地震動 (3s~) の増幅は、堆積層が厚いほど顕著に生じることがわかる。

次に、伝達関数について考察する。詳細は 5 章で述べるが、三次元盆地の伝達関数には、以下のような特徴がある。

- ① 三次元盆地の伝達関数は、一次元モデルの伝達関数 (図 6-1 緑線のように、周波数領域で規則的に増幅倍率のピークが出現する) と概ね同様の傾向を有する。すなわち、1/4 波長則から決まる固有周波数/固有周期に対して顕著な増幅を示す。
- ② ただし、多次元性に起因して、一次元モデルの固有周波数以外の周波数帯の波の入力に対しても増幅を示す。この結果、三次元伝達関数は一次元伝達関数から乖離し、不規則な形状となる。

図 8(c)において、堆積層厚 1/2 倍のモデルでは、上記①と同様の規則性が認められるが、堆積層厚 2 倍のモデルでは、この規則性はほぼ完全に喪失している。このことから、堆積層厚の増大 (基盤傾斜角の増大) により多次元効果 (5 章で低次元モデルと比較しつつ議論する) がより顕著に現れることが確認できる。

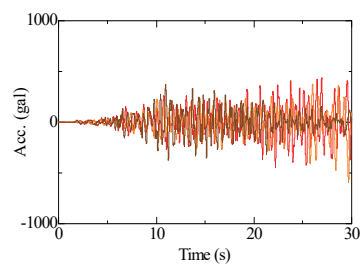
4. 堆積盆地の幾何形状が震動特性に与える影響

4.1 はじめに

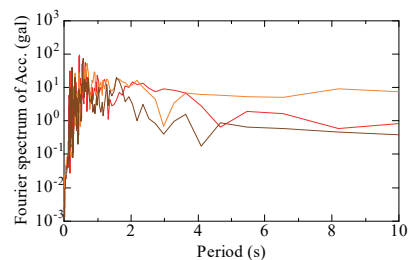
ここまでの球形盆地を対象に解析を行った解析では、入力地震動 (最大 81gal) に対して非常に大きな地表水平加速度 (最大 436gal, 入力動の約 5.4 倍) が得られた。これは、球形という盆地形状の下で、焦点効果により盆地中央での加速度増幅が極端に大きくなることによる。この影響を数値的に捉えるとともに、堆積盆地の基盤幾何形状が加速度増幅特性に与える影響について系統的に把握するため、盆地形状を変えた検討を行う。本稿ではとくに、楕円形盆地および台形盆地を対象とした。

4.2 楕円形盆地

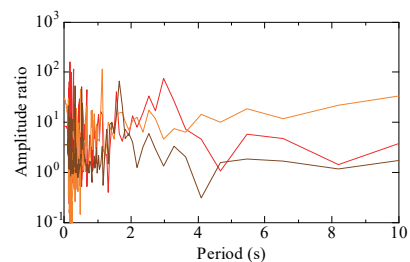
図 1 の球形盆地の寸法を x 軸方向および y 軸方向に拡大



(a) 地表面における x 方向加速度の時刻歴



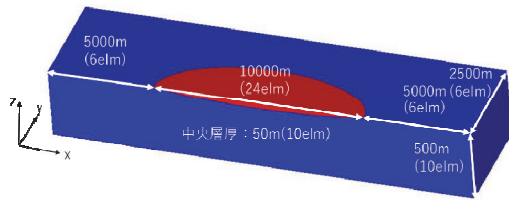
(b) 地表面における x 方向加速度のフーリエ振幅スペクトル



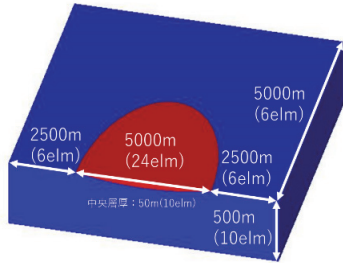
(c) 堆積層中央での伝達関数
■ 深さ等倍 ■ 深さ 2 倍 ■ 深さ 1/2 倍

図 8 解析結果

することで図 9 のような楕円形モデル (以後、それぞれ楕円形 X, 楕円形 Y と呼ぶ) を作成して解析を行った。入力波および材料定数は球形盆地の解析に一致させた。これらのモデルにおいては、深さは球形盆地と同一だが、盆地端での傾斜角や焦点位置は球形盆地とは異なる。



(a) 楕円形 X



(b) 楕円形 Y

図9 楕円形盆地の有限要素メッシュ

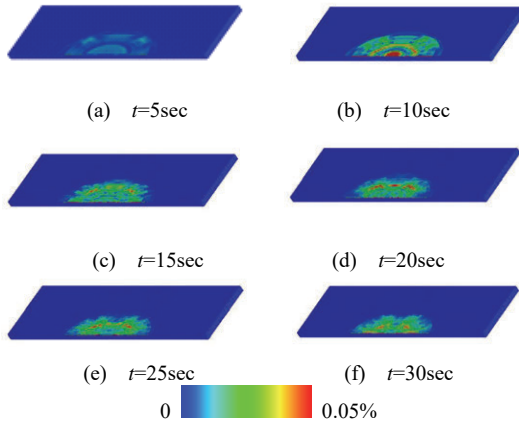
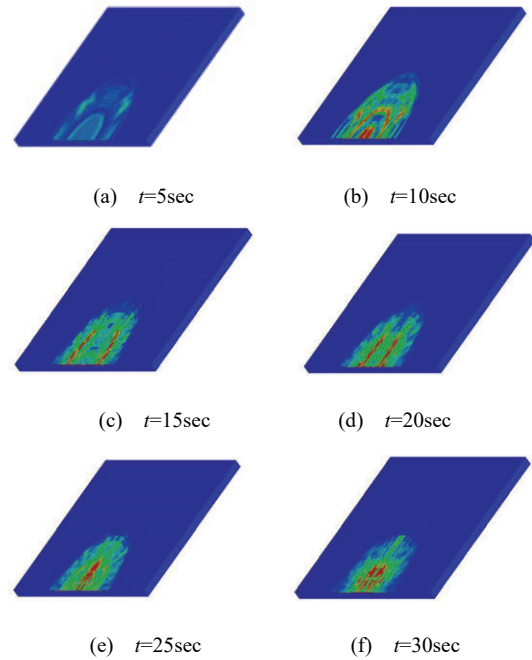


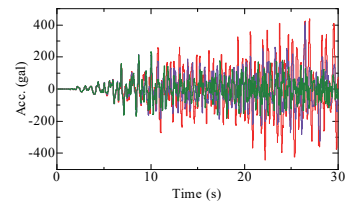
図10 せん断ひずみ分布 (楕円型 X)



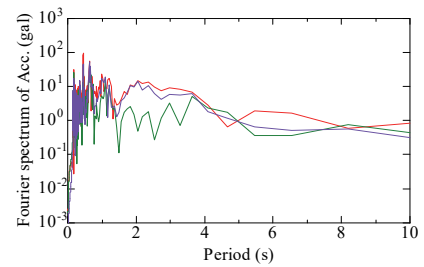
(e) $t=25\text{sec}$ (f) $t=30\text{sec}$



図11 せん断ひずみ分布 (楕円型 Y)

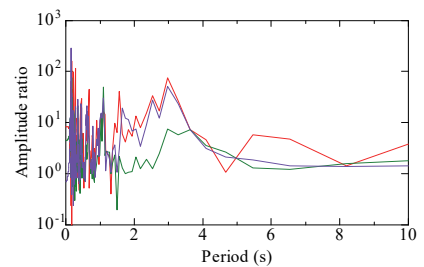


(a) 地表面における x 方向加速度の時刻歴



(b) 地表面における

x 方向加速度のフーリエ振幅スペクトル



(c) 堆積層中央での伝達関数



図12 解析結果 (楕円形盆地)

代表的な時刻におけるせん断ひずみ分布を図 10~11 に、地表の応答を図 12 に示す。せん断ひずみの大きさには球形盆地との明確な差異は認められないが、これは堆積層厚に差がないことによる。一方、図 12(c)の伝達関数を見ると、楕円形 Y では球形盆地とほぼ同一の伝達関数となることを確認できる。これは、本解析において y 方向には加振していないため、x 方向の加速度に較べて、y 方向の加速度の影響が相対的に無視できることによる。また、楕円形 X では球形盆地に対し、長周期成分 (2~4s) の増幅を生じにくいなど、一部の周波数帯で差異が認められるが、この傾向は 3 章において、盆地深さを浅くした場合の伝達関数の変化と同様である。これは、堆積層厚を 1/2 倍にすることと、模型の x 方向の寸法を 2 倍にすることが、同一の基盤傾斜角の変化を与えることによる。

なお、図 12(a)より、地表加速度の最大振幅は、球形盆地で最も大きく、楕円形盆地では相対的に小さくなっている。これは、球は焦点が 1 つであるのに対し、楕円体の

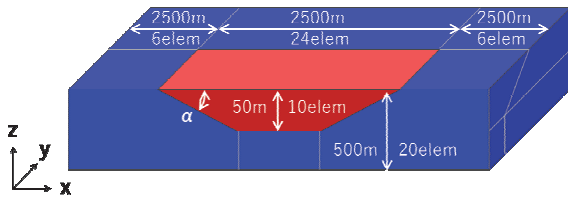


図 13 三次元台形盆地の有限要素メッシュ

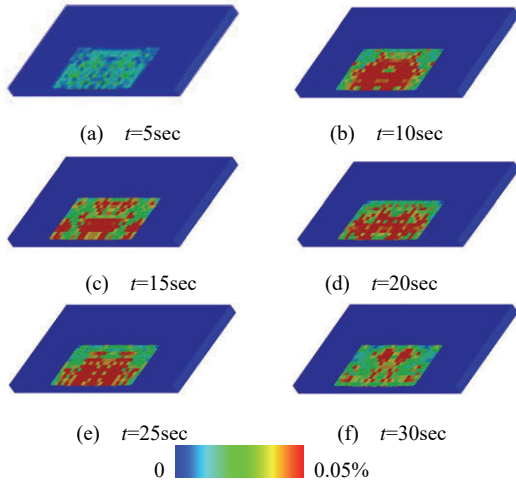


図 14 せん断ひずみ分布 (台形, $\alpha=2.29^\circ$)

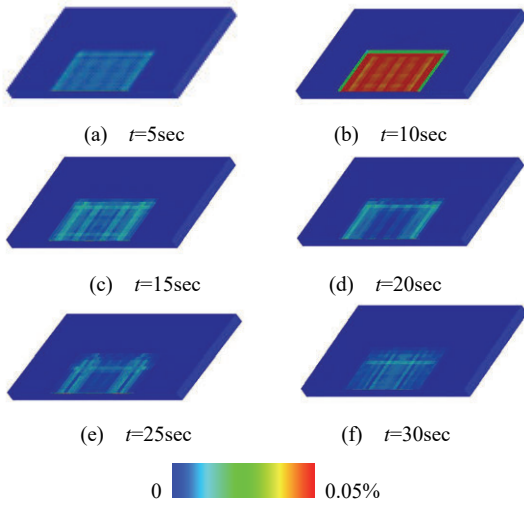


図 15 せん断ひずみ分布 (台形, $\alpha=45^\circ$)

焦点は2つ存在し、レンズ効果による増幅が球形盆地に比べて分散したことによる。

4.3 台形盆地

台形盆地の有限要素メッシュは、盆地の幅と深さを球形盆地モデルと対応させ、図 13 のとおり生成した。盆地端における基盤傾斜角は、 $\alpha=2.29^\circ$ (球形盆地端の基盤傾斜角に一致)、 45° 、 90° (垂直) の3種類を設定した。材料定数および入力地震動は、球形盆地の解析に準拠した。

代表的な時刻におけるせん断ひずみ分布を図 14-16 に、

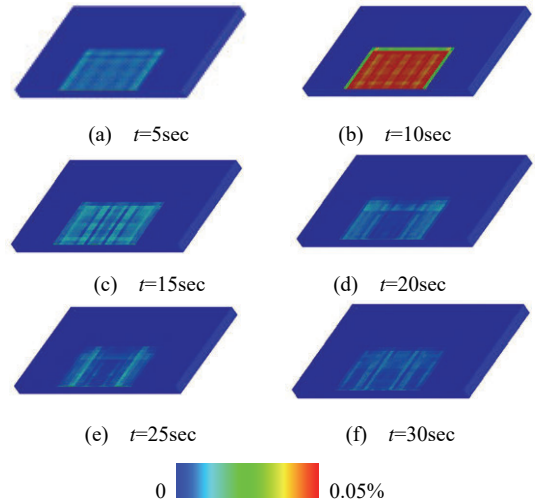
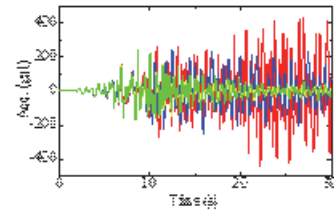
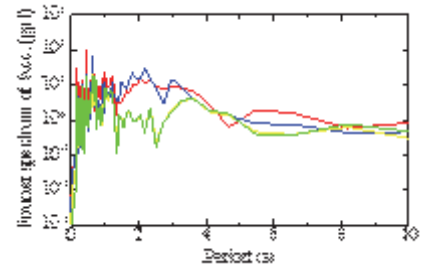


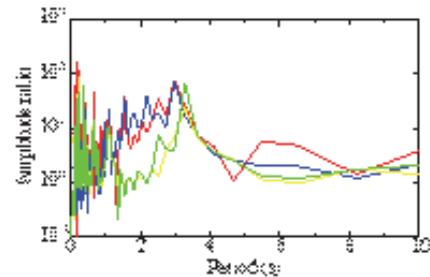
図 16 せん断ひずみ分布 (台形, $\alpha=90^\circ$)



(a) 地表面における x 方向加速度の時刻歴



(b) 地表面における x 方向加速度のフーリエ振幅スペクトル

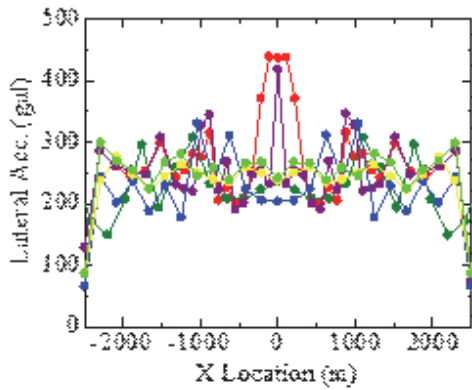


(c) 堆積層中央での伝達関数

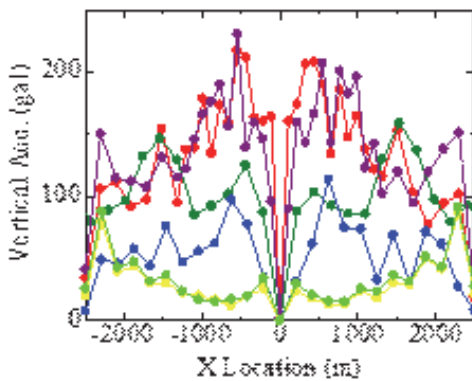
■ 球形 ■ $\alpha=2.29^\circ$ ■ $\alpha=45^\circ$ ■ $\alpha=90^\circ$

図 17 解析結果 (台形盆地)

地表の応答を図 17 に示す。傾斜角 $\alpha=2.29^\circ$ のケースでは、盆地地表面において非一様なせん断ひずみ分布が出現するが、さらに傾斜角を大きくした $\alpha=45^\circ$ 、 90° のケースでは、ほぼ一様なひずみの発生しか解かれておらず、



(a) 水平加速度最大値



(b) 鉛直加速度最大値

- 球形
- 楕円形 X
- 楕円形 Y
- 台形 ($\alpha = 2.29^\circ$)
- 台形 ($\alpha = 45^\circ$)
- 台形 ($\alpha = 90^\circ$)

図 18 盆地中央地表面を x 軸方向に横切る地表面上での最大加速度 (図の左右端は盆地端位置に相当する)

多次元効果は限定的であることがわかる。事実、図 17(c) の伝達関数について、 $\alpha=45^\circ$ 、 90° のケースでは、球形盆地に較べて、一次元固有周波数以外での増幅倍率は明らかに小さい。一方、傾斜角 $\alpha=2.29^\circ$ のケースに対する伝達関数は、盆地端基盤傾斜角を盆地模型と統一しているにもかかわらず、球形盆地の伝達関数とは異なる結果となった。このことから、地表近傍の震動を予測する上で、堆積層深さ、基盤傾斜角のみならず、基盤面のトポグラフィを精緻に考慮して地震応答解析を行うことの重要性が示唆できる。

4.4 多次元的な波動干渉と局所的な強震動の発生

盆地中央地表面を x 軸方向に横切る地表面上での水平・鉛直加速度の最大値をとると、図 18 が得られる。同図より、水平加速度が最大となる位置は模型中央とは限らず、盆地形状により異なることがわかる。最大値は、球形盆地では中央近傍で、台形盆地では盆地端寄りで発生している。なお、盆地中央での鉛直加速度は零となるが、これは盆地形状が x 方向に対称なので、逆位相の波による鉛直加速度の相殺されることによる。また、盆地直下の基盤傾斜の大きさよっても、最大加速度の発生位置は異なる。

表 2 三次元モデルと低次元モデルの特長¹⁾
(岩井, 2020)

説明	1D	2D	2DX	3D
模型				
←加振方向				
実体波(S波)	あり	あり	あり	あり
S波の増幅	あり	あり	あり	あり
層境界での反射	あり	あり	あり	あり
層境界での屈折	なし	あり	あり	あり
Rayleigh波	なし	あり	なし	あり
Love波	なし	なし	あり	あり

4.5 まとめ

本章では、三次元弾性堆積盆地の幾何形状が波動の増幅的干渉および地表面での振動特性に及ぼす影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 球形盆地の模型規模を大きくすることで、長周期地震動の発生が解かれた。
- 球形盆地の深さを大きくすると、長周期地震動の増幅がより顕著に生じるようになる。
- 楕円形盆地における加速度最大値は、球形盆地に対して小さくなる。
- 台形盆地では、球形盆地に較べて基盤傾斜による多次元効果は相対的に少ない。

5. 低次元モデルとの比較

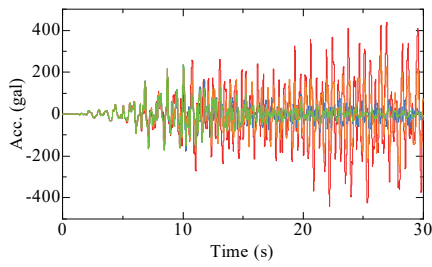
5.1 はじめに

前章までは、堆積盆地の三次元的な幾何形状に応じて特徴的な波動干渉の発生を確認するとともに、伝達関数もまた基盤形状等の影響を受けて変化することを確認した。しかし、三次元解析は常套化するには非常に計算コストが高く、実務レベルでの地震応答解析の大半は一次元解析にとどまる。よって、従来の地震応答解析(低次元での地震応答解析)は、三次元的な震動特性のうち、何を考慮できて何を評価し得ないのか、系統的な知見を得る必要がある。

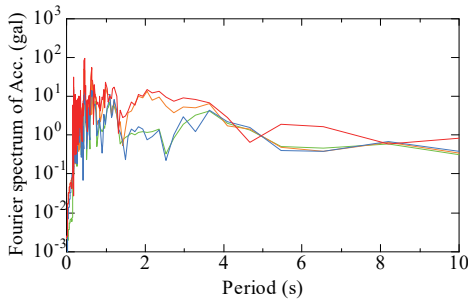
そこで本章では、三次元モデルと低次元モデルの解の比較を通して、三次元解析の重要性を指摘するとともに、三次元盆地特有の震動特性の抽出を試みる。

5.2 低次元モデルについて

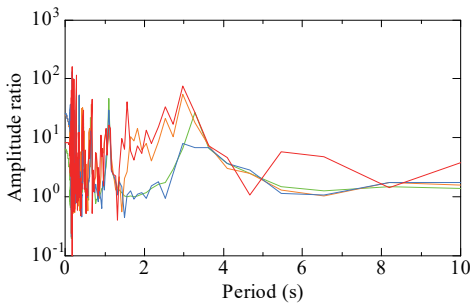
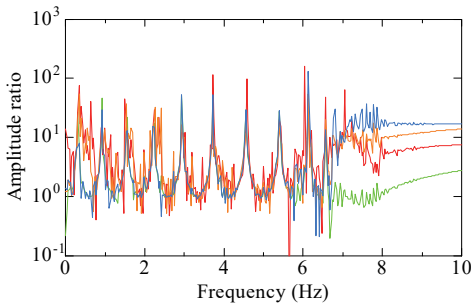
岩井(2020)を参考に、表2に示す4種類の解析を行った。1D では、基盤層と堆積層のインピーダンス比に応じた実体波の増幅が考慮されるが、2D および 2DX では、実体波のレンズ効果に加え、表面波(それぞれ Rayleigh 波、Love 波)も解かれる。3D では、それらすべての現象が考慮されることとなる。材料定数および入力地震動は、球形盆地の解析に準拠した。



(a) 地表水平加速度



(b) 加速度振幅スペクトル



(c) 伝達関数

■ 1D モデル ■ 2D モデル
 ■ 2DX モデル ■ 3D モデル

図 19 解析結果 (球形盆地)

5.3 解析結果

2章の球形盆地 (3D モデル) について、対応する低次元モデル (1D, 2D, 2DX モデル) を生成し、地表での加速度応答、加速度フーリエ振幅スペクトル、堆積層での伝達関数を比較した結果を図 19 に示す。

まず、図 19(a)より最大加速度の値を比較すると、入力動 (最大 81gal) に対し、1D モデルでは約 2.9 倍の加速が解かれたが、これは基盤層と堆積層のインピーダンス比による実体波の増幅によるものである。これに対し、2D モデル、2DX モデル、3D モデルの最大加速度は、1D モデルのそれぞれ約 1.3 倍、約 1.0 倍、約 1.9 倍にも達した。また、一次元モデルに比べ、地表における波の滞留時間の長期化も明確に解かれた。このことから、地震応答解析における多次元解析の重要性 (一次元地震応答解析による評価の危険性) が示唆された。

次に、スペクトル特性について見てゆく。本検討では、基盤層と堆積層のインピーダンス比を非常に大きく設定していることから (約 12 倍)、1D モデルの固有周波数は 1/4 波長則に従うと考えられる。このとき、 n 次固有モードの周波数 f_n は、堆積層厚を $H = 50$ m, S 波速度を $c_s = 60.2$ m/s として、 $f_n = c_s / \lambda_n$, $\lambda_n = 4H / (2n - 1)$ で計算できる。この式より固有周波数を算定すると、 $f_1 = 0.301$ Hz, $f_2 = 0.903$ Hz, … となり、図 19(c)の伝達関数のピークと一致する。一方、多次元モデルの伝達関数は、1D モデルとは異なる結果となる。2D・3D モデルにおいては、1D モデルにおいては見られない増幅が確認できる。この理由としては、実体波のレンズ効果や多重反射、表面波の重複などが考えられる。

ただし、実体波の波速は物質固有であるため、S 波は $c = 60.2$ m/s で伝播することとなる。盆地端から中央までの距離は 2500m となっているため、表面波の盆地中央への到達は最速でも $2500 \text{ m} / 60.2 \text{ m/s} = 41.5 \text{ sec}$ 以降であり、今回解析した 30 秒の継続時間内には到達していないと考えられる。4つのモデルの伝達関数にそれほど差が見られないのは、表面波の影響が解析中でほとんど生じておらず、実体波の干渉の仕方の差しか寄与しなかった結果であると考えられる。換言すれば、(表面波の影響が限定的な本計算に限られるが)、実体波の干渉 (レンズ効果) の仕方の違いによる応答倍率の差を考えるだけで、各モデル間での伝達関数の違いを説明できる可能性がある。

5.4 まとめ

- 三次元モデル (3D) では、低次元モデル (1D, 2D, 2DX) に対し顕著な加速度増加と継続時間の長期化が解かれた。このことから、三次元解析の重要性を指摘した。
- 今回の解析では、地震動継続時間中には表面波が盆地中央に到達しないため、低次元モデルと多次元モデルの伝達関数の差は、実体波の屈折干渉の仕方の影響のみであり、その差は限定的であった。モデル間での伝達関数の差異がもたらすレンズ効果に依存する本条件下では、盆地中央部での伝達関数は、その直下における基盤の曲率が小さいほど三次元モデルと低次元モデルの差異が無くなる結果となった。表面波の影響が顕著に生じる場合、長周期成分の卓越など、スペクトル特性に更なる差異を生じる可能性がある。

6. おわりに

6.1 結論

本研究では、堆積盆地の三次元的な幾何形状を変えた弾性地震応答解析を実施し、以下の知見を得た。

- ・ 盆地が深さが大きいほど、長周期地震動の増幅がより顕著に生じるようになり、地表におけるひずみも大きくなる。
- ・ 伝達関数は基盤傾斜角に強く依存し、その値が大きいほど多次元効果（一次元解析からの乖離）がより明確に現れる。
- ・ 楕円形盆地における加速度最大値は、焦点の分散により球形盆地に対して小さくなる。また、台形盆地では、底面は flat であるため、球形盆地に比べて基盤傾斜による多次元効果は相対的に少なくなる。

また、低次元モデルとの比較を通して、以下の知見を得た。

- ・ 三次元モデルでは、低次元モデルに対し顕著な地表加速度と継続時間の長期化を生じることから、地震応答解析において三次元性を考慮することの重要性を指摘した。

6.2 今後の課題

- ・ 低次元モデルの解から、三次元の解析結果を推定する手法について検討したい。三次元効果を疑似的に考慮することも可能であり、その簡便的な考慮手法（たとえば、低次元モデルで得られた応答加速度を係数倍すれば良い、伝達関数を適切に補正して用いれば良いなど）を適切に提案できれば、工学的に非常に有用である。
- ・ 三次元解析における表面波の特徴の観察（理論波速と分散性、地表面の軌跡、深さ方向の速度分布など）を試みたが、実体波と表面波が三次元的に複雑に干渉する場であるため、抽出は困難であった。
- ・ 多方向加振条件下での三次元効果について議論する必要がある。また、水平動だけではなく鉛直動に対する応答関数も評価する必要があるほか、盆地中央以外の点における応答関数の特徴も把握する必要がある。
- ・ 別報⁵⁾では、地盤の弾塑性・水～土連成の効果についても検討しており、砂地盤では図 20(a)のような地盤全域での有効応力減少（液状化）により、同図(b)のような流動化した堆積層全体でのスロッシングを生じるとともに、S 波が伝わりにくくなるによる図 21(a)のような加速度減少が生じるのに対し、粘性土地盤では、図 21(b)のような加速度増幅が解かれるなど、応答は地盤の力学特性により大きく異なる。このような地盤の弾塑性性状に応じた震動特性の差異や、拘束圧依存性についても、更に検討したい。
- ・ 地震応答解析における水～土連成効果、とくに地盤の透水性が伝達関数の時間変化に与える影響についても考察したい。
- ・ 領域分割法により三次元解析の更なる高速化を図る。

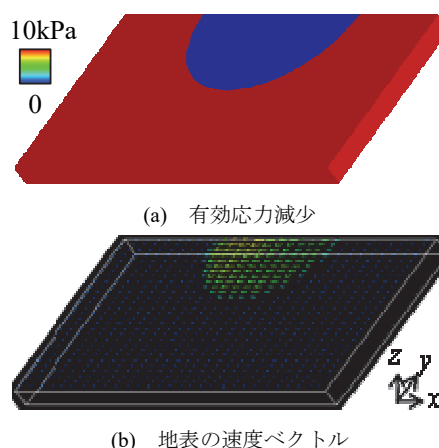


図 20 弾塑性地盤（砂質土）の応答⁵⁾

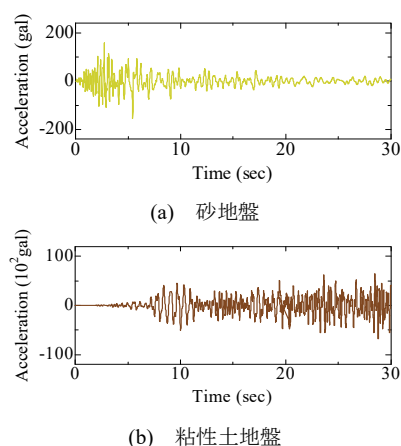


図 21 地表の水平加速度⁵⁾

謝辞 本研究の数値解析は、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムを用いて実施した。また、JSPS 科研費 22H01586 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 岩井周平(2020)：堆積盆地の三次元的な幾何形状が表層地盤の震動特性に与える影響の解明～スーパーコンピュータを用いた水～土連成解析を通じて～，名古屋大学修士論文。
- 2) 京都大学情報環境機構：スーパーコンピュータシステム，<https://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/ja/services/comp/supercomputer/>（アクセス日：2022年1月26日）。
- 3) 鈴木彩華(2017)：地盤不整形性に励起される表面波と実体波の干渉が表層地盤被害に及ぼす影響の解析的研究，名古屋大学院修士論文。
- 4) 中井健太郎，野田利弘，浅岡顕，鈴木彩華(2018)：表面波(Rayleigh波・Love波)と実体波の干渉が表層地盤被害に及ぼす数値解析的検討，地球惑星科学連合2018年大会，SSS14。
- 5) 野田利弘，豊田智大，岩井周平，浅岡顕(2021)：三次元堆積盆地の弾塑性性状に応じた地震応答の解析的研究，第56回地盤工学研究発表会，13-9-4-04。