

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

堆積盆地 水～土骨格連成 弾塑性地震応答解析

名古屋大学 国際会員 ○野田 利弘, 豊田智大

非会員 岩井 周平

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

不整形な基盤形状を有する堆積盆地の地震時応答は、堆積層内での加速度増幅に加え、基盤層と堆積層の境界面での地震波の屈折によるレンズ効果、盆地端部において生成された表面波が実体波と干渉するエッジ効果¹⁾などを伴う。このため、地表面においては局所的な強震動や長時間に亘る地震動の継続を生じ、均一な堆積層を想定した場合と較べて被害が甚大化することが知られている。本報では、弾塑性二相系解析手法による三次元堆積盆地の地震応答解析結果を紹介する。堆積層として飽和した緩い砂地盤/軟弱粘性土地盤の材料定数を与えた解析により、緩い砂地盤においては液状化の発生のため波が伝わりにくくなって「スロッシング」現象が生じる一方、粘性土地盤においては顕著な増幅を生じるなど、堆積盆地の弾塑性性状に応じて地震時の応答が全く異なることを示し、地震応答解析における地盤の弾塑性特性ならびに水～土骨格連成の効果(体積拘束)を考慮することの重要性を指摘する。なお、著者らは別報²⁾において、三次元不整形性を有する堆積盆地を対象に一相系微小変形線形弾性解析を実施し、不均一な堆積構造に起因した波動伝播を解くとともに、簡易モデル(一次元・二次元モデル)との比較を通して、三次元解析の重要性を指摘している。

2. 一相系微小変形弾性応答解析²⁾

二相系弾塑性解析に先立ち、別報²⁾の一相系弾性解析の概略を述べる。解析には、名古屋大学地盤力学研究グループが開発した地盤変形解析コード **GEOSIA**³⁾を用いた。図1の三次元メッシュ(形状および寸法は宮本ら⁴⁾に準拠)の底面に、入力地震動として図2に示す神戸波のEW成分をx方向に与えた。平面ひずみ「土槽」を想定し、前背面のy方向変位を拘束するとともに、左右面には周期境界条件、底面には粘性境界条件を課した。弾性体の材料定数については割愛するが、基盤層と堆積層の間で明瞭な剛性のコントラスト(インピーダンス比で11.4倍)を与えた。

図3、図4はそれぞれ代表的な時刻におけるせん断ひずみ分布および変位速度分布を示す。解析初期において、宮本らと同様の円環状のひずみ集中帯の発生や、長時間に亘る揺れの継続が解かれた。また、堆積構造の三次元性に起因して、地震動の入力はx方向のみであるにもかかわらず、y方向およびz方向にも変位速度を生じることや、盆地中央の地表面においては、入力加速度の25倍もの大きさの応答加速度を生じ(図5)、フーリエ振幅スペクトルにおいても、様々な周期帯における地震動の増幅などが確認された(図6)。

3. 二相系有限変形弾塑性応答解析

次に、二相系弾塑性解析について述べる。弾塑性構成式にはSYS Cam-clay model⁵⁾を用いた。基盤層は岩盤のような材料を想定して超過圧密土とし、堆積層の構成材料として緩い砂地盤と軟弱な粘性土地盤の2種類を想定し、その材料定数および初期状態を表1のとおり与えた。初期比体積を模型全体で一様に与えたため、初期過

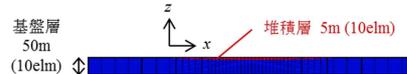
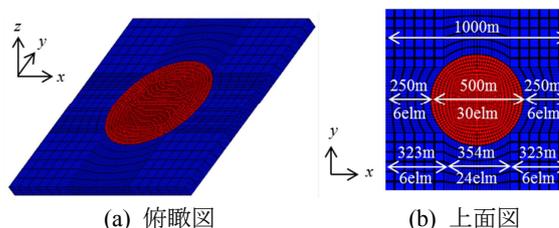


図1 有限要素メッシュ

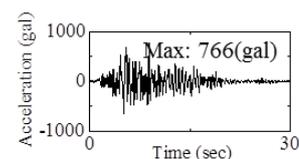


図2 入力地震動

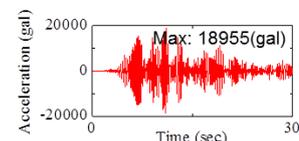


図5 地表の加速度(弾性)

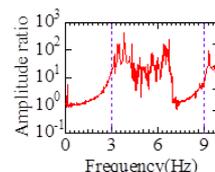


図6 堆積層の伝達関数(弾性)

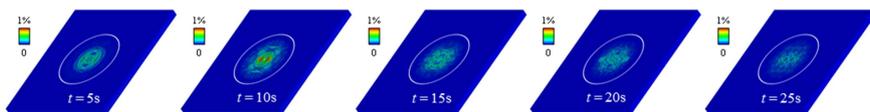


図3 せん断ひずみ分布(弾性)

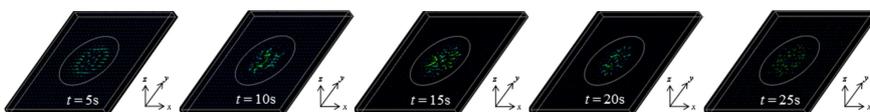


図4 変位速度分布(弾性)

圧密比は自重に応じて非一様に分布する。また、ここでは対称性を考慮して、図 1 の $x-z$ 面を挟んで手前側の領域のみを解析対象とした。入力地震動は、図 2 の神戸波の振幅を 1/10 として入力とした。

図 7 は、堆積層を緩い砂地盤とした場合の平均有効応力分布の経時変化を示す。地盤は地震中に堆積層内において平均有効応力が著しく低下し、地盤が液状化している。液状化の発生は、図 8 に示す地表面の要素挙動においても確認できる。また、図 9 の変位速度分布においては、堆積層全体が一様に流動する「スロッシング」現象の発生を確認した。さらに、図 10(a)の地表面における水平方向の加速度～時間関係より、3 つの時間帯 (0s~3s, 3s~6s, 6s~9s) での時刻歴ごとの堆積層の伝達関数として図 11 が得られる。同図より、解析初期において増幅倍率の値は 1 を上回るが、液状化に伴って堆積層内での増幅率が次第に 1 を下回る (波が伝わらなくなる) 様子からもわかる。この結果は、一相系弾性堆積層の伝達関数 (図 6) があらゆる周波数帯で増幅を示すのと対照的である。また、堆積層が軟弱粘性土の場合も、堆積層が砂の場合 (同図(a)) とは異なり、平均有効応力がある程度低下しても波動は伝達され、図 9(b)のように、顕著な増幅と揺れの継続が得られた。このように、堆積層の弾塑性性状の差異に応じてその応答が大きく異なることを確認した。

4. おわりに

盆地／不整形地盤は、その三次元構造に起因して水平堆積構造の地盤と異なる固有周期特性を有する。堆積盆地の地震時の揺れは、このため水平堆積構造の場合と較べて複雑になるが、堆積盆地の堆積層の弾塑性特性が地震中の地盤の剛性低下に伴い固有周期が変化するため一層複雑になる。今後、揺れに及ぼす地盤の三次元構造・弾塑性性状・(直達)入力地震の影響について、系統的に明らかにしてゆきたい。なお、盆地構造を有する堆積層の二次元地震応答解析事例については、中井ら⁹⁾を参照されたい。

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。

参考文献)

- 1) Kawase, H. (1996): The cause of the damage belt in Kobe: "The Basin-edge effect,"..., *Seismo. Res. Lett.*, **67**(5), 25-34.
- 2) 豊田ら (2021): 線形弾性解析に基づく堆積盆地の三次元構造が地震動の増幅..., 土木学会第 76 回年次学術講演会, submitted.
- 3) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion..., *Soils Found*, **48**(6), 771-790.
- 4) 宮本ら (2016): 3次元非線形地盤震動解析を用いた堆積層における地盤ひずみ集中効果..., 土木学会論文集 A1, **72**(1), I_768-I_776.
- 5) Asaoka, A. et al. (2008): An elasto-plastic description of two-distinct volume change mechanisms of soils, *Soils Found*, **42**(5), 47-57.
- 6) 中井ら(2021): 2016年熊本地震における阿蘇カルデラ陥没被害に及ぼした地層不整形性と軟弱粘性土の影響, 本誌.

表 1 材料定数

	基盤層	堆積層 (砂)	堆積層 (粘性土)
<弾塑性パラメータ>			
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.005	0.045	0.200
膨張指数 $\bar{\kappa}$	0.00004	0.002	0.040
限界状態定数 M	1.60	1.20	1.70
NCL の切片 N	3.100	1.980	1.995
ポアソン比 ν	0.30	0.15	0.10
<発展則パラメータ>			
正規圧密土化指数 m	30.0	0.08	30.0
構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	0.10	2.20	0.55
構造劣化指数 c_s	1.0	1.0	0.2
回転硬化指数 b_r	0.0	3.5	0.0
回転硬化限界 m_b	0.2	0.9	1.0
<物性値>			
土粒子密度 ρ^s (g/cm ³)	2.650	2.636	2.650
透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}
<初期状態>			
初期過圧密比 $1/R_0$	(深さ方向に分布)		
初期構造程度 $1/R_0^*$	1.0	2.0	30.0
初期間隙比 e_0	2.042	1.066	1.451
初期異方性 ζ_0	0.0	0.6	0.0
初期応力比 η_0	1.0	0.6	1.0

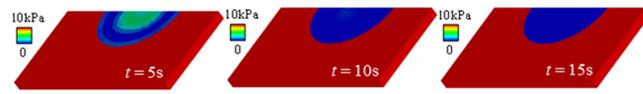


図 7 平均有効応力分布 (砂)



図 9 変位速度分布 (砂)

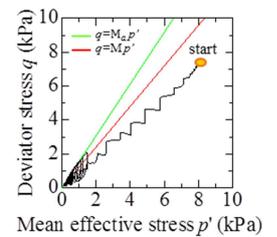


図 8 要素挙動 (砂)

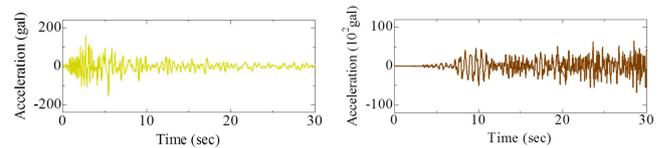


図 10 地表の加速度～時間関係

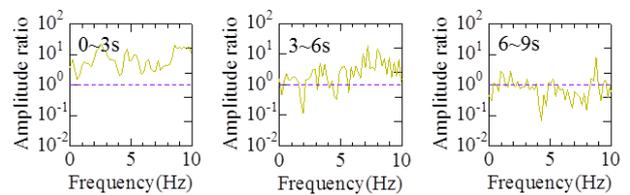


図 11 堆積層の伝達関数 (砂)