

液状化地盤内を水平方向に伝播する波に及ぼす重力の影響に関する数値解析的検討

東電設計株式会社 正会員 ○新垣 芳一
 京都大学 正会員 澤田 純男
 京都大学 正会員 後藤 浩之

1. はじめに

重力による物体力はどのような媒質に対しても等しく働くが、媒質を伝播する波に対する影響は鉛直方向の変形量に依存する。硬い地盤ではその変形量が微小であるから、重力の影響はたいてい無視できる。一方、水のように粘性の低い Newton 流体のような液体は軟らかく、変形が生じやすいので、重力波が発生する。液体と固体の中間状態の媒質、つまり液状化地盤のような剛性が非常に小さい媒質においても、伝播する波に対して変形量の増加に伴う重力の影響が予想される。

そこで本研究では、液状化地盤を表現するために砂の弾塑性モデルと混合体理論に基づく二相混合体モデル (Biot の式) を導入した有限要素法を用いて数値解析を行う。さらに、重力による復元力を表現する項を二相混合体モデルで用いる運動方程式に導入することで、液状化地盤内を水平方向に伝播する波に及ぼす重力の影響について検討する。

2. 液状化地盤内の波動伝播に関する数値解析

Biot の式に基づく二相混合体モデルを構成する 2 種類の運動方程式に重力項を導入すると次式が得られる。

$$\rho \ddot{u}_i + \rho_w \ddot{w}_i - \sigma_{ij,j} - \rho g u_{3,i} - \rho_w g w_{3,i} = \rho b_i \quad (1)$$

$$\rho_w \ddot{u}_i + \frac{\rho_w}{n} \ddot{w}_i + \frac{\rho_w g}{k_{ij}} \dot{w}_j - p_{,i} - \rho_w g u_{3,i} - \frac{\rho_w g}{n} w_{3,i} = \rho_w b_i \quad (2)$$

ここに、 u_i は土粒子の変位ベクトル、 w_i は間隙水の見掛けの相対変位ベクトル、 σ_{ij} は全応力テンソル、 p は間隙水圧、 ρ は土の湿潤密度、 ρ_w は水の密度、 n は間隙率、 k_{ij} は透水係数テンソル、 g は重力加速度、 b_i は物体力を生じさせる加速度ベクトルを表す。全体の運動方程式(1)の第 4 項と第 5 項、間隙水に関する運動方程式(2)の第 5 項と第 6 項が重力項に相当する。

本研究では、2 種類のモデルを用いて、3 ケースの解析を行う。各ケースで使用されるモデルの種類と基盤層以外の材料定数を表-1 に示す。表中の e_0 は初期間隙比、 ν はポアソン比を表す。解析手法としては、解析地盤の基盤層以外の層を液状化させるための液状化解析を行った後、それぞれの解析地盤に図-1 に示すような点荷重を鉛直下向きに与えることで、表面波を発生させる。

図-2 に地表面における鉛直応答変位のペースト波形図を示す。図の縦軸は時間、横軸は地表面における点荷重からの水平距離を表す。また重力項を含まない場合の数値結果を黒線、重力項を含む場合の数値結果を赤線で表す。図よりどのケースにおいても重力の影響が現れていないことがわかる。

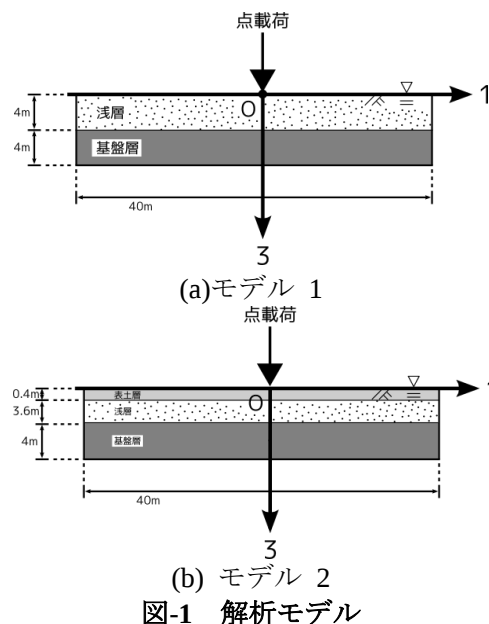


表-1 モデルの種類と基盤層以外の材料定数

	Case 1	Case 2	Case 3
モデル(図-1)	1	1	2
層名	浅層	浅層	表土層 浅層
k [cm/sec]	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-8} 1×10^{-4}
e_0	0.95 緩い砂	0.75 密な砂	0.75 密な砂
ν	0.4999979	0.4999980	0.4999980

キーワード 液状化, 重力, 波の伝播, ポアソン比

連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計株式会社 TEL 03-6372-5111 (代表)

3. ポアソン比が重力項に及ぼす影響

一般に、液状化地盤のような間隙を水に満たされた飽和土のポアソン比はほぼ 0.5 である。Gilbert (1967) によると、非圧縮性媒質の剛性が非常に小さい場合において「重力の影響を受けるフェーズ (波)」が現れる。一方、Chavetz-Garcia and Bard (1993)によると、媒質の圧縮性を考慮した場合、Gilbert (1967)が提案したフェーズはポアソン比が大きくなるほど小さくなる。

そこで、導入した重力項に及ぼすポアソン比の影響について、有限要素法を用いた線形解析で検証を行う。解析地盤は半無限体を対象とし、その材料定数として、密度に約 $1514[\text{kg/m}^3]$ (間隙比 0.75 の乾燥砂に相当)、S 波速度に約 $3.12[\text{m/sec}]$ を与えた。S 波速度の大きさは重力による物体力に関するエネルギーとせん断変形に関するエネルギーが釣り合うときの大きさであり、Gilbert (1967)が提案した「重力の影響を受けるフェーズ (波)」が現れる剛性の大きさに相当する。検証のために解析地盤のポアソン比には、大きさの異なる 0.33 と 0.499996 の 2 種類を用いる。また荷重条件としては、解析地盤の地表面に 1 周期の余弦波の時間関数を持つ点荷重を鉛直下向きに与える。

図-3 に地表面における鉛直応答変位のペースト波形図を示す。図-3 (a)より、解析地盤のポアソン比が 0.33 の場合、地表面を伝播する波が重力項の影響を受けていることがわかる。一方、図-3 (b)より、解析地盤のポアソン比が 0.499996 の場合、重力項による影響があまり確認できない。以上の解析結果は Chavetz-Garcia and Bard (1993)の知見と一致する。液状化に関する数値解析の結果も踏まえると、ポアソン比が 0.5 に近い液状化地盤では重力の影響は現れないことになる。しかし、ポアソン比がほぼ 0.5 である水のような軟らかい媒質が重力の影響を受けやすいことは明白な事実であり、本研究で得られた知見は矛盾する。

以上より、既往の研究も含めて、本研究で導入した重力項では、ポアソン比が大きいほど重力の影響が出にくくなり、実際の現象と矛盾するため、他の理論や現象についても議論する必要がある。

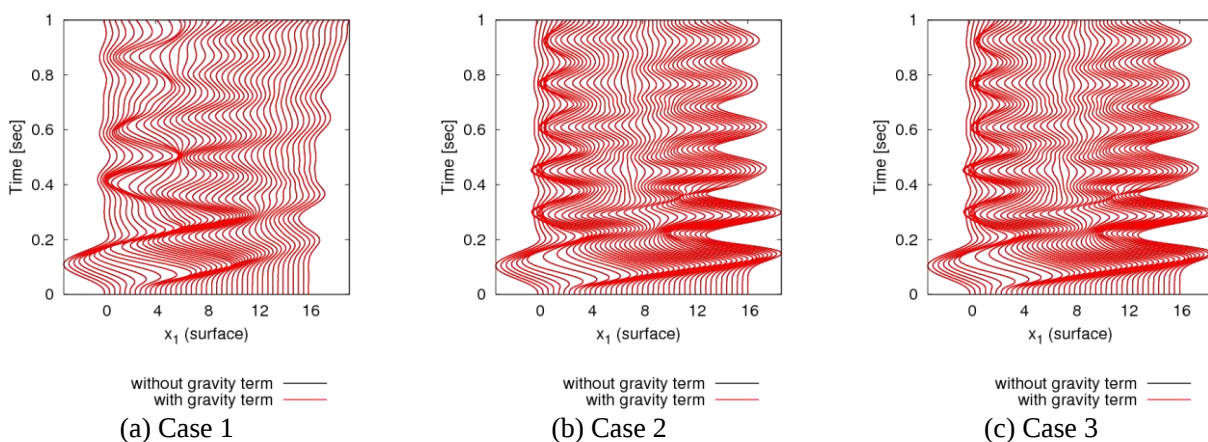


図-2 地表面における鉛直応答変位のペースト波形図 (波の伝播解析)

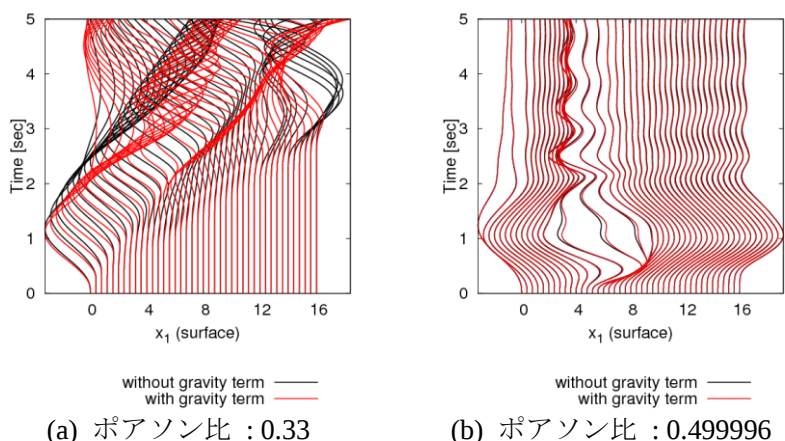


図-3 地表面における鉛直応答変位のペースト波形図 (ポアソン比の検証)

参考文献

- 1) Gilbert, F. Gravitationally perturbed elastic waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 57, pp. 783-794, 1967
- 2) Chavez-Garcia, F. J. and P. Y. Bard. Gravity waves in Mexico City? i. gravity perturbed waves in an elastic solid. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83, pp. 1637-1655, 1993.