

## 液状化地盤のスロッシングによるひずみの局所化

京都大学工学部 学生会員 ○伊藤 裕也

京都大学防災研究所 正会員 後藤 浩之

京都大学大学院工学研究科 学生会員 栗間 淳

京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男

## 1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、ライフラインなど埋設管に深刻な液状化被害が生じた。千葉県浦安市の安田ら<sup>1)</sup>の報告を例に挙げると、液状化地盤と非液状化地盤の境界付近で埋設管被害が集中することが報告されている。また、埋設管被害地点周辺の道路で突き上げ被害が確認されており、安田らは液状化層と非液状化層の地盤境界が存在する場所での、液状化地盤の揺動がこれらの被害の原因であると予想している。この揺動は図1に示すように容器内の流体が上下変動を伴いながら振動するスロッシングに似た現象である可能性が考えられる。そこで液状化地盤で発生したスロッシング現象によりひずみが局所化し、埋設管被害を引き起こしたと仮説を立てる。

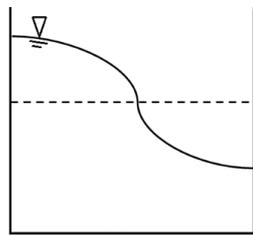


図1. スロッシング現象の模式図

本研究では、スロッシング現象を表現可能な有限要素法を用いて、液状化地盤を模した物体のひずみ分布を調べる。

## 2. 解析手法

液状化地盤は完全な流体とは限らないため、固体としての地盤の変形を表現しつつも流体としてのスロッシング現象を表す解析手法が必要になる。秋山<sup>2)</sup>の研究で示されているように、有限変形を考慮した有限要素法であれば、自由表面が変化し物体が占める領域が時間変化するスロッシング現象を表現できることが知られている。本研究では簡単のため、液状化により地盤材料のせん断剛性が劣化するプロセスは考慮せず、液状化地盤をせん断剛性が非常に低い物体としてモデル化する。構成モデルとしてS波速度 $V_s$ をパラメータとした超弾性構成モデル(Henckyモデル)を採用し、液状化によって地盤が固体から流体へと変化した度合いをS波速度 $V_s$ によって表す。この時、 $V_s=0$ [m/s]は完全流体に相当する。

## 3. 解析手法の検証

図2のような矩形容器に充填した物体を、図3に示すような固有周波数の0.5倍の正弦波で加振することを考える。なお、このときの固有周波数は物体が完全流体であると考えた場合のHousner<sup>3)</sup>の解を参照した。表1に示した解析パラメータを設定しS波速度 $V_s$ を変化させて、壁面付近の自由表面の鉛直変位と流体のスロッシング現象に対するHousnerの解とを比較した。

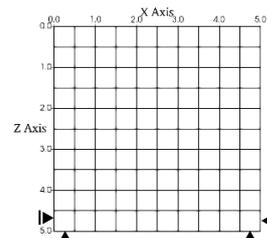


図2. 矩形容器のモデル図

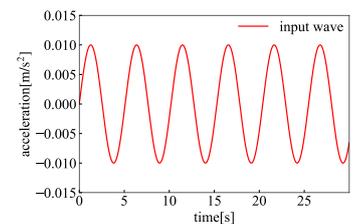


図3. 入力加速度

有限変形解析の $V_s$ と自由表面の鉛直変位の関係を図4に示す。 $V_s$ が減少するほど変位は増加し、Housnerの解へと近づいている。物体が $V_s=0$ [m/s]の流体である場合にスロッシング現象を再現できたと考えられる。また、微小変形解析の結果では、 $V_s=0$ [m/s]で解析解が近似解に比べ大きな値を示し、正しく計算できないことが明らかとなった。このことから、スロッシング現象の表現には有限変形を考慮する必要性があり、解析手法の妥当性が示された。

表1. 解析パラメータ

入力波振幅 [m/s <sup>2</sup> ]	0.01
入力周波数 [Hz]	0.19622
S波速度 $V_s$ [m/s]	0~10
P波速度 $V_p$ [m/s]	1500.00
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000.00
重力加速度 $g$ [m/s <sup>2</sup> ]	9.8

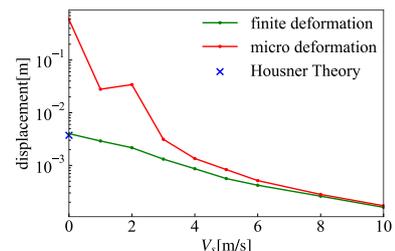


図4. 有限変形解析と微小変形解析での自由表面鉛直変位

## 4. 実地盤モデルと解析条件

スロッシング現象を表現可能な解析手法を用いて浦安市の液状化地盤を対象とした解析を行った。浦安市液状化対策技術検討調査報告書<sup>4)</sup>に記載されている地盤層厚に関する図面、および安田ら<sup>1)</sup>の二次元地震応答解析の解析モデルを参照し、地盤モデルを設定した。安田らが解析対象とした図5の測線A-A'上には旧河道の埋立によりAから65[m]付近に液状化層と非液状化層の境界による段差部が存在する。このA-A'に沿って、A'端を延長した幅210[m]深さ12[m]の範囲を簡略化してモデル化した(図6)。なお、液状化層は旧河道で深い構造を持つと仮定してA'側の段差部も設定し、浚渫埋立土層が椀型に分布したモデルを作成した。解析パラメータと地盤物性値は表2、3に示すように設定し、浚渫埋立土層のみが液状化することを考える。入力波は、模擬地震波として図7に示すリッカー波を1波入力し、液状化地盤のS波速度を変化させた解析結果を比較する。



図5. 浦安市の解析検討位置

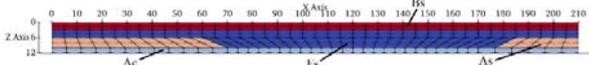


図6. 作成した地盤モデル

表2. 解析パラメータ

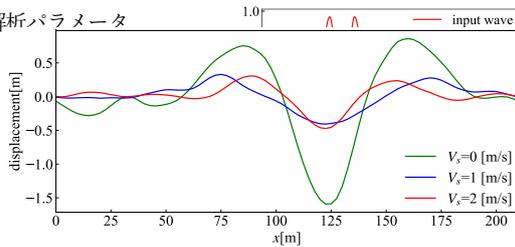


表3. 地盤物性値

	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	P波速度 $V_p$ [m/s]	S波速度 $V_s$ [m/s]
盛土層(Bs)	1734.7	279.8	140.0
浚渫埋立土層(Fs)	1836.7	1500.0	0~2
沖積砂質土層(As)	1836.7	1500.0	140.0
沖積粘性土層(Ac)	1734.7	1500.0	135.0

### 5. 解析結果

図8に1.00, 2.50, 3.75秒時点でのせん断ひずみ分布と変形を示す。水平方向に流動した地盤が段差部に乗り上げて鉛直方向に変位するようなスロッシング現象が観察された。x=70, 175[m]の旧河道両端の段差部周辺にひずみと鉛直変位が発生し、また、流動した地盤が衝突して旧河道中央にも鉛直変位が発生することが観察できた。埋設管深さの非液状化地盤での最大せん断ひずみ分布を図9に、地表の鉛直変位分布を図10に示す。Vsの低

下に伴い、せん断ひずみと鉛直変位が増加していること、せん断ひずみのピーク位置がVsの値によって段差部の左側、あるいは右側に変化していることが読み取れる。

安田ら<sup>1)</sup>によると浦安市の埋設管被害は旧河道の端部、すなわち地盤の段差部付近に集中する傾向が確認されている(図5)。一方で、解析で得られたひずみの局所化地点はVsによって異なるが、少なくとも液状化地盤が完全流体(Vs=0[m])の時の位置と埋設管被害位置は対応しない。この理由として、実際の液状化地盤のVsが0[m]ではない可能性が挙げられる。実際の地盤モデルや、入力波を考慮して実被害との対応について更なる検討が必要である。

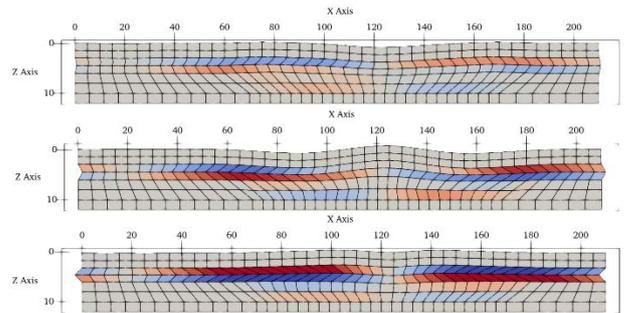


図8. 解析開始後1.00(上), 2.50(中), 3.75(下)秒でのせん断ひずみ

図9. 最大せん断ひずみ分布

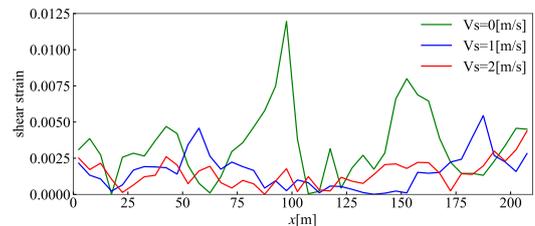


図10. 地表の鉛直変位分布

入力波振幅 [m/s <sup>2</sup> ]	2.0
入力周波数 [Hz]	1.0
重力加速度 $g$ [m/s <sup>2</sup> ]	9.8
モデル幅×深さ [m]	210×12
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1750.00

### 参考文献

- 1) 安田進, 石川敬祐, 五十嵐翔太, 田中佑典, 畑中哲夫, 岩瀬伸朗, 並木武史, 斉藤尚登. 東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明. 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 3, pp. 183-200, 2016.
- 2) 秋山良平, 澤田純男, 後藤浩之. 固体と流体の中間的媒質の揺動現象を解析するための支配方程式とその検証. 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. 493-501, 2015.
- 3) George W. Housner. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387, 1963.
- 4) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会. "浦安市液状化対策技術検討調査報告書". [http://www.city.urayasu.lg.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_001/002/934/lasthoukoku02-01.pdf](http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/002/934/lasthoukoku02-01.pdf), 2012.