

液状化地盤のスロッシング現象による ひずみの局所化に関する一考察

伊藤 裕也¹・後藤 浩之²・栗間 淳³・澤田 純男⁴

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ito@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴ 正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

地盤の液状化による埋設管の被害はこれまで多くの地震災害で発生しているが、液状化地盤と非液状化地盤の境界付近に見られることが多い。2011年東北地方太平洋沖地震では、液状化地盤が大きく揺動したことでひずみが集中し管路被害が生じたとする見解があるが、液状化地盤を流体のように揺動させてその影響をみた研究はこれまでなかった。本研究では、有限変形を考慮した有限要素法を用いて、流体状に振る舞う液状化地盤の揺動（スロッシング）現象について数値解析を行った。流体に対する解と比較することで手法の妥当性を検証した後、浦安市の液状化地盤を対象とした動的解析を行った。スロッシング現象により生じる地盤ひずみを求めることでひずみの局所化が発生すること、またその位置と実際の埋設管被害との関係について考察した。

Key Words: earthquake, liquefaction, sloshing, finite element method, buried, ground strain

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源に近い東北地方だけでなく関東地方にまで及ぶ広い範囲で液状化による被害が発生した。京川ら¹⁾によると、東北地方太平洋沖地震による液状化は大量の噴砂を伴う大規模なものであり、液状化の程度が大きくなった原因として、過去国内で発生した地震と比べ比較的強く継続時間の長い地震動が東北から関東にかけて広い範囲で観測されたことを指摘している。その被害は東京湾沿岸と利根川下流域の住宅地で特に深刻であり、特に千葉県浦安市はライフラインの寸断や建物の一部損壊など顕著な液状化が発生した地区である。

液状化被害の中でも、上下水道などの埋設管路の被害は長期に渡って広範囲に影響が残るものである。浦安市でも埋設管被害が数多く報告されており、水道の配水管において漏水や継手が抜けるなどの被害が多く発生した。安田ら²⁾によると、浦安市内の道路で液状化によるものと見られる地面の突き上げ被害が発生していたが、この突き上げ被害が生じた箇所と管路の被害箇所とがよく一致していることが報告されている。幕張海浜公園沿いの道路で市民が地震発生時に撮影した動画から、歩道が3-

4秒の周期で揺動していたと推定され、こうした地面の突き上げ被害は、液状化した地盤が大きく揺動し、構造物に近い箇所や液状化層と非液状化層との境界においてひずみが集中して発生したものと推察している。すなわち、安田らは突き上げ被害と管路被害はいずれも液状化した地盤が大きく揺動したことによって生じたものであると指摘している。

媒質が流体であれば、振動によって生じる揺動は重力が復元力として作用するスロッシング現象として知られている。このため、液状化した地盤も流体のように振る舞い、スロッシング現象に似た挙動を示した結果として道路の突き上げや管路被害が生じたのではないかと予想される。しかし、液状化地盤を実際に流体のように揺動させて、発生するひずみ等への影響を見た研究はこれまでほとんどなかった。

秋山ら³⁾は、液状化地盤を模した流体状の媒質におけるスロッシング現象を解析する手法を開発した。まず液状化地盤を固体と流体の中間的媒質とみなし、固体と液体それぞれの支配方程式を統合することにより両方に適用可能な支配方程式を導いている。さらに有限変形を考慮することで重力による復元力を自然に導入することができ、スロッシング現象を解析可能とした有限要素法を

提案している。しかし、後述するように定式化において一部見直すべき箇所があることや、実際の問題への適用例は示されていないかった。

そこで本研究では、液状化地盤のスロッシング現象により発生するひずみ分布を考察するため、重力の影響を考慮した有限要素法を提案して液状化地盤の振動解析を行う。提案手法について説明した後、矩形容器におけるスロッシング現象の数値解析結果と既往の解とを比較して手法の妥当性について検証する。その後、浦安市の液状化地盤を対象として動的解析を行い、地盤のひずみ分布を求め、埋設管被害との関係について考察する。

2. スロッシング現象を表現可能な有限要素法

本研究では、有限要素法を用いて液状化地盤を模した流動性のある物体の解析を行う。液状化地盤のように流体的な性質を持つ物体を振動させるとスロッシング現象が生じ、これを解析するためには復元力として作用する重力の影響を考慮する必要がある。本章では有限変形を考慮して重力の作用を含めた有限要素法による解析手法について説明する。

(1) 運動量保存則

スロッシング現象を解析するためには、秋山³⁾が指摘したように物体の有限変形を考慮して重力の作用を取り入れる必要がある。時刻 t において物体が占める領域を V_t とすると、時刻 t における運動量保存則の弱形式は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \int_{V_t} \rho_t \ddot{u}_i v_i dV + \int_{V_t} \sigma_{ij} v_{i,j} dV \\ &= \int_{V_t} \rho_t b_i v_i dV + \int_{S_t} \bar{T}_i v_i dS \end{aligned} \quad (1)$$

ここで ρ_t は時刻 t における密度を表す。 $\ddot{u}_i$ と σ_{ij} はそれぞれ加速度ベクトルと Cauchy 応力テンソル、 b_i は重力加速度などの物体力ベクトルである。 v_i は試験関数であり、 $v_{i,j}$ は基準配置に関する v_i の空間微分を表す。

(2) 構成則

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、液状化時の地盤をせん断剛性の非常に低い物質としてモデル化する。有限変形を考慮する場合、物質の構成則も有限変形に対応したものでなければならない。本研究では、ひずみを対数ひずみで表した超弾性モデルの1つである Hencky モデルを採用する。

対数ひずみは変形勾配テンソル F_{ij} を用いて

$$\varepsilon_{ij}^h = \frac{1}{2} \ln F_{ik} F_{kj} \quad (2)$$

と表される。対数ひずみを用いた構成則は Hooke 則と同じ関数型で与える。

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^h + 2\mu \varepsilon_{ij}^h \quad (3)$$

ただし、 τ_{ij} は Kirchhoff 応力テンソルである。 μ と λ はラメの定数であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを表している。Kirchhoff 応力と Cauchy 応力は体積変化率 $J = |F_{i,j}|$ を用いて

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{J} \tau_{ij} \quad (4)$$

の関係があるため、

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{J} (\lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^h + 2\mu \varepsilon_{ij}^h) \quad (5)$$

を構成則として採用した。

秋山³⁾は Almansi ひずみを用いて Hooke 則と同じ関数形で Cauchy 応力を求めていたが、Lagrange 座標系で式(1)を立てたときに用いるのは適切ではない可能性がある。そこで本研究では Hencky モデルを構成則に用いることとした。

(3) 有限要素による離散化

弱形式で表された式(1)の積分を、領域 V_t を分割した要素 V_e および S_{te} 毎に分割して評価する。なおここでは、自然な境界($\bar{T} = 0$)以外の S_t が無いものとして、右辺第2項は考えない。

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{V_e} \rho_t \ddot{u}_i v_i dV + \sum_e \int_{V_e} \sigma_{ij} v_{i,j} dV \\ &= \sum_e \int_{V_e} \rho_t b_i v_i dV \end{aligned} \quad (6)$$

各要素の積分を評価するために形状関数 N_e を用いて、要素内の変位を節点変位で近似する。

要素毎に各項の積分を評価する。まず式(6)の左辺第1項は形状関数を用いると次のように表される。

$$\begin{aligned} & \int_{V_e} \rho_t \{\ddot{u}_i\} \{v_i\} dV = \{v\}^T \int_{V_e} \rho_t [N]^T [N] dV \{\ddot{u}\} \\ &= \{v\}^T [M_e] \{\ddot{u}\} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで右辺の積分は形状関数のみに依存するため、 V_e と ρ_t が与えられると $[M_e]$ を計算することができる。微小変形を仮定する場合は V_e は基準配置に固定されており、かつ ρ_t も初期値と等しいため、時刻 t に依らず $[M_e]$ は一定の値となる。しかし有限変形を考える場合は、 V_e や ρ_t が時刻により変化するため、 $[M_e]$ を毎時刻求めなければならない。

ここで要素 V_e は基準配置である初期状態で定めた領域 V_0 を占める物体を常に追跡するように設定することを考える。このとき、要素 V_e が占める物体の質量は保存されるので、

$$\int_{V_0} \rho_0 dV = \int_{V_e} \rho_t dV \quad (8)$$

が成り立つ。

式(6)の左辺第2項は、形状関数の空間微分を表すマトリクス $[B]$ を用いて次のように表される。

$$\begin{aligned} \int_{V_e} \sigma_{ij} v_{i,j} dV &= \{v\}^T \int_{V_e} [B]^T \{\sigma\} dV \\ &= \{v\}^T \{K_e(u)\} \end{aligned} \quad (9)$$

$\{\sigma\}$ は Cauchy 応力テンソルの成分からなるベクトルで、この応力テンソルの成分は、要素内の変位分布から変形勾配テンソルを介して Hencky モデルの構成則により計算される。すなわち、節点変位 $\{u\}$ の関数である。右辺の積分は有限変形の場合は $[M_e]$ と同様に時刻で変化するため、毎時刻求めなければならない。

式(6)の右辺は次のように表される。

$$\int_{V_e} \rho_t b_i \{v_i\} dV = \{v\}^T \int_{V_e} \rho_t [N]^T b_i dV = \{v\}^T \{f_e\} \quad (10)$$

ここでの積分もこれまで述べたように時刻毎に求めなければならない。

以上のように求められた積分を全体系で重ね合わせ、かつ任意の $\{v\}$ で成り立つとすると、次式のような行列形式の方程式が導かれる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + \{K(u)\} = \{f\} \quad (11)$$

この式を毎時刻に解くことで、変位ベクトルを求める。

(4) 解析条件とパラメータの設定

本研究では、上述した有限変形を考慮した有限要素法を用いて数値解析を行うが、せん断剛性が非常に小さくなった場合に体積ロッキングが生じることを防ぐため、曲げモードも表現可能な9節点のアイソパラメトリック要素を用いる。このため領域積分には5×5点のガウス求積による数値積分を適用する。

物体の材料パラメータは初期密度 ρ 、および Hencky モデルの μ と λ であるが、 μ と λ は微小変形時には Hooke 則のラメの定数とみなせるので、S 波速度 V_s 、P 波速度 V_p と次の関係にあると考える。

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \quad (12)$$

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (13)$$

$V_s = 0$ の時 $\mu = 0$ となり、これはせん断変形に対して応力が発生しないことを意味する。 V_s が増加するにつれ μ も増加し、せん断変形に対して応力が発生するようになる。すなわち本研究の解析モデルでは、地盤が液状化し固体から流体へとその振る舞いに変化する様子を V_s の値によってパラメタライズしていると言える。

3. 解析手法の妥当性の検証

重力の作用下において矩形容器内の媒質を周波数 f の正弦波で水平方向に加振し、容器内媒質の自由表面の形状および容器壁面における自由表面の鉛直変位について比較する。有限変形を考慮した解析結果と微小変形を仮定した解析結果を比較し、スロッシング現象に対する有限変形理論を用いた解析手法の妥当性を評価する。また、容器壁面付近での鉛直変位について Housner の解との整合性を確認する。

(1) Housner の解

Housner⁴⁾は容器内の流体の運動を1自由度の振動系でモデル化することによって、1次モードのスロッシング周波数 f_1 と壁面における自由表面の鉛直変位を示している。矩形容器内の流体の1次モードスロッシング周波数は以下の式で表される。

$$M_1 = M \frac{0.83 \tanh(1.6D/L)}{1.6D/L} \quad (14)$$

$$k_1 = \frac{3M_1^2 g D}{M L^2} \quad (15)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{M_1}} \quad (16)$$

ここで $2L$ は容器の幅、 D は媒質の自由表面から容器底面までの深さ、 M は容器内の流体の質量を表している。式(14)の M_1 は流体の質量のうち、スロッシングにより水平に揺動する部分の質量に相当し、式(15)のばね定数 k_1 のばねを取り付けた1自由度系の振動を考えることで f_1 が求められる。

この時、壁面付近の自由表面の鉛直変位を d とすると、 d は以下の式によって求められる。

$$d = \frac{0.84a \left(\frac{k_1 L}{M_1 g} \right)}{1 - \frac{a}{L} \left(\frac{k_1 L}{M_1 g} \right)^2} \quad (17)$$

ここで a は上で述べた質量 M_1 の質点を周波数 f の正弦波で振動させた時の相対変位振幅である。

(2) 解析モデル

図-1に示す矩形容器を解析モデルとして用いる。壁面における垂直方向の変形は拘束し、表面BCは自由表面とする。物性や寸法に関する解析パラメータを表-1に示す。

入力する正弦波は以下のように、Housner の式で求められる周波数 f_1 に倍率 n をかけた f とし、共振しないよう f_1 より小さく設定する。

$$f = n f_1 (n < 1) \quad (18)$$

表-1 スロッシング解析のパラメータ

入力波振幅 [m/s ²]	0.01
1次モードスロッシング周波数 f_1 [Hz]	0.392
倍率 n	0.3, 0.5, 0.7
S波速度 V_s [m/s]	0-10
P波速度 V_p [m/s]	1500.00
密度 ρ [kg/m ³]	1000.00
重力加速度 g [m/s ²]	9.8
水深 [m]	5
容器幅 [m]	5
要素数	100
総節点数	441

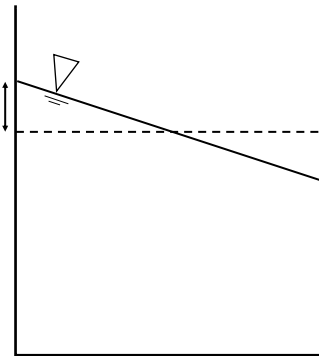


図-1 矩形容器モデル

$n = 0.5$ とした場合の入力加速度を図-2に示す。 n のそれぞれについて、S波速度を0-10 m/sの間に設定した媒質を入れた容器を加振し、容器壁面における自由表面の鉛直変位 h を求め、式(17)の d と比較する。

(3) 解析結果

有限変形を考慮した有限要素法を用いて、周波数倍率 $n=0.5$ におけるB点での最大鉛直変位を、媒質のS波速度 V_s を横軸にとり図-3に示す。また、Housnerの解も図中の $V_s = 0$ に示している。同様に、微小変形のみを仮定して求められた最大鉛直変位も示している。なお、振動中の変形の様子を一例として図-4に示す。

有限変形を考慮した解析結果では、 $V_s = 0$ に近づくにつれて鉛直変位が増加する傾向がみられる。一方、微小変形を仮定した場合も同様に V_s の低下に伴い鉛直変位が増加する傾向にあるものの、 $V_s = 5$ m/s以下では有限変形の解を明らかに上回る大きさの値を示し、 $V_s = 0$ では解析途中で解が発散し正しく計算できない。すなわち、せん断応力が非常に小さな流体の挙動を解析する場合、重力の影響を考慮できない微小変形の条件下では実現象に即した挙動を表現できないと考えられる。

同様に図-5, 6に $n = 0.3, 0.7$ の場合における鉛直変位を示す。有限変形を考慮した解析では、 $V_s = 0$ の時にいず

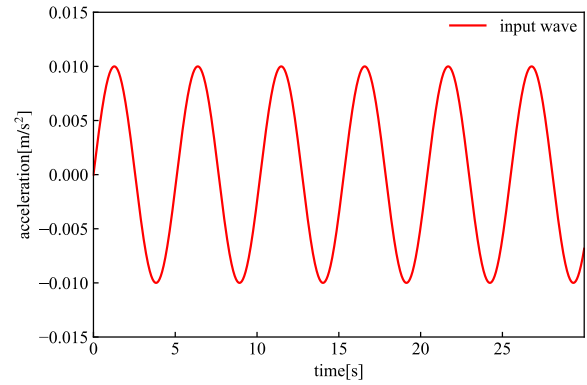


図-2 入力加速度波形 ($n=0.5$)

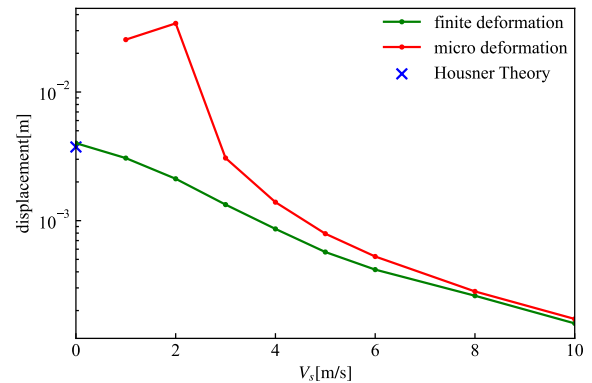


図-3 有限変形、微小変形を考慮した解析によるB点の最大鉛直変位の比較 ($n=0.5$)

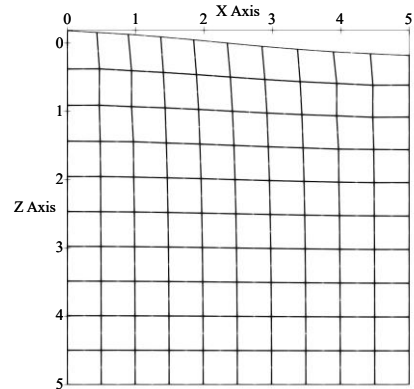


図-4 解析中のメッシュ図 ($n=0.5$, 変形倍率50倍)

れも概ね Housner の解と一致する結果が得られている。図-7は $V_s = 0$ の時の $n = 0.3, 0.5, 0.7$ の結果をまとめて示したものである。有限変形を考慮した解析結果は Housner の解のように、入力波の周波数 f が1次スロッシング周波数 f_1 に近づくにつれて値が大きくなる傾向を示している。 $n=0.3, 0.5$ の場合の誤差は6.5%程度であるが、 $n=0.7$ の場合に27%と相対的に誤差が大きくなる。加振周波数が共振周波数に近づくため、解析モデルとして採用した 10×10 の計100のメッシュ数では十分な精度で変形

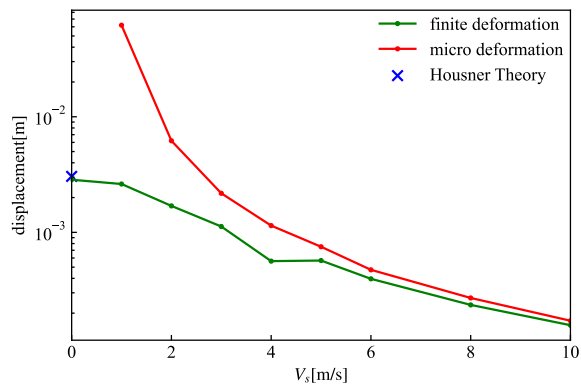


図-5 有限変形，微小変形を考慮した解析による
B点の最大鉛直変位の比較 ($n=0.3$)

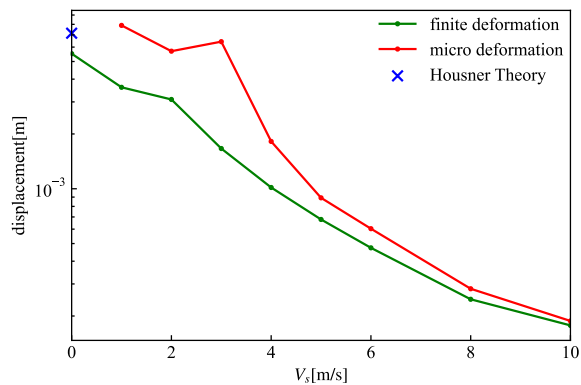


図-6 有限変形，微小変形を考慮した解析による
B点の最大鉛直変位の比較 ($n=0.7$)

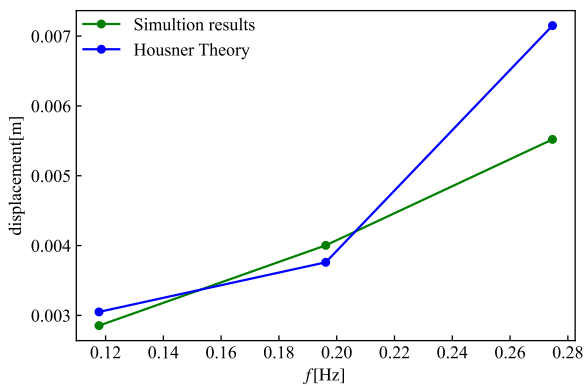


図-7 有限変形を考慮した解析による最大鉛直変位の
周波数応答

を追えなかった可能性も考えられる。

また、いずれの解析ケースにおいても $V_s = 5\text{m/s}$ 以下では微小変形による結果と有限変形を考慮した結果とで乖離が見られる。このため、液状化地盤のせん断剛性が十分低く $V_s = 5\text{m/s}$ 以下であると予想される場合には、有限変形を考慮した解析が必要であることを示していると考えられる。



図-8 浦安市における液状化解析の検討位置
(安田ら²⁾に加筆)

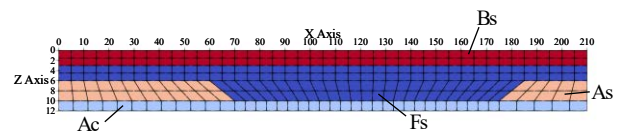


図-9 解析対象とする地盤モデル

本研究では以上の結果より、有限変形を考慮した提案手法によりスロッシング現象を表現することができるとして、以下の液状化地盤の解析を行なった。

4. スロッシング現象による地盤ひずみの局所化

既往の研究によって指摘されているように、液状化地盤における埋設管被害は地盤物性が不均一な部分、例えば液状化地盤と非液状化地盤の境界付近に発生することが多い²⁹⁾。このため、流動化した液状化地盤がスロッシング現象を起こし、ひずみが局所化した可能性が考えられる。本章では浦安市における液状化被害箇所を参考にした断面二次元の地盤モデルを作成し、有限変形を考慮した有限要素法を用いて動的解析を行う。安田ら²⁾が被害調査を行った地域の水道管は一般に深度 1.5 m 程度に埋設されているため、この深度の地盤ひずみに着目して考察する。

(1) 解析モデルと解析条件

安田ら²⁾が2次元地震応答解析を行った地点のうち、図-8に示す舞浜2丁目の調査断面 A-A'に着目する。舞浜2丁目は昭和40年代から海面を埋め立てられて造られた地区で、検討位置 A-A'も旧河道と砂州を埋め立てた箇所である。また、図中に水道管被害位置が示されているように、埋め立て以前の地形が旧河道と砂州の境界であり地盤形状が不均一とされる箇所に埋設管被害が集中している。この調査断面の地盤をモデル化して解析を行う。

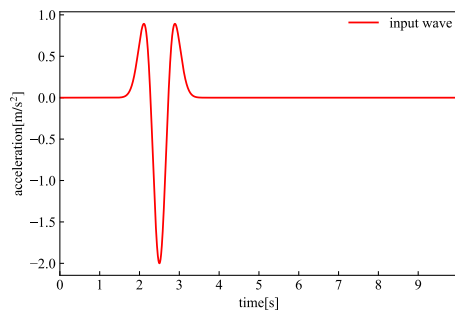


図-10 中心周波数 1.0Hz, 振幅 2.0m/s²のリッカー波

表-2 浦安市の解析モデルのパラメータ

入力波振幅 [m/s ²]	2.0
入力周波数 f_p [Hz]	0.5, 1.0, 2.0
重力加速度 g [m/s ²]	9.8
解析領域の幅 [m]	210
解析領域の深さ [m]	12
要素数	294
節点数	1275

表-3 モデル地盤の物性値

	密度 [kg/m ³]	P 波速度 [m/s]	S 波速度 [m/s]
盛土層(Bs) (非液化化)	1735	280	140
盛土層(Bs) (液化化)	1735	1500	0-10
浚渫埋立土層(Fs)	1837	1500	0-10
沖積砂質土層(As)	1837	1500	140
沖積粘性土層(Ac)	1735	1500	135

浦安市域の地盤は表層から順に、盛土層(Bs 層)、浚渫埋立土層(Fs 層)が堆積し、その下部に自然堆積層である沖積砂質土層(As 層)と沖積粘性土層(Ac 層)が既存ボーリング調査により明らかとなっている⁶⁾。浦安市液化化対策技術検討調査報告書⁹⁾に記載されている地盤層厚コンター図と安田らの解析モデルを参照し、調査断面 A-A'に沿って A'端を延長した 210m の範囲について、深さ 12m まで図-9 のようにモデル化した。地下水位は 3 m とし、設定した地下水位以深の盛土層、埋立土層が液化化すると仮定した。また、地下水位以下の土層は完全飽和していると仮定する。液化化層である埋立土層は旧河道を埋め立てた部分である $x=60-185$ m の範囲で層が厚くなっており、その両端で液化化層が薄くなるように腕型の不均一なモデルを作成した。なお、この液化化層の厚い範囲を以降では旧河道部と呼ぶ。

鉛直方向は、深さ 0-6 m までは要素厚 1.5 m、深さ 6-12 m までは要素厚 2 m とする。水平方向は要素幅 5 m を基本とし、旧河道部の形状に合うように設定した。側方の境界条件は周期境界とし、底面は鉛直方向の変形を拘束

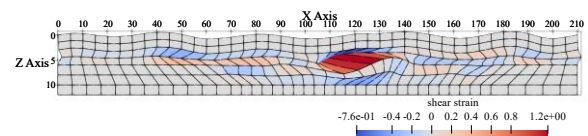
する。図-10 に示すようなリッカー波を 1 波、モデル底部から入力して動的解析を行う。表-2 に解析パラメータを、表-3 に地盤の物性値を示す。なお、地盤の物性値は安田らによるモデル⁹⁾を参考にしている。

(2) 入力波を変化させた場合の比較

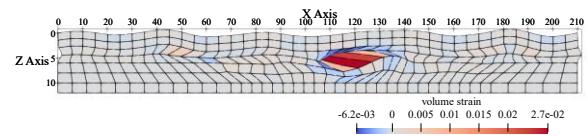
a) 入力周波数の影響

液化化層の S 波速度 V_s を 0 m/s に設定し、周波数 f_p を 0.5, 1.0, 2.0 Hz と変化させたリッカー波をそれぞれ入力した場合の結果を比較する。図-11, 12, 13 にそれぞれ $f_p=0.5, 1.0, 2.0$ Hz とした場合のモデル全体のひずみ分布、地下水位以浅のひずみ分布を示した。各図は解析時間中において、ひずみが最大を示した時刻のひずみ分布をそれぞれ表している。また、図中の変形倍率は 10 倍で表している。

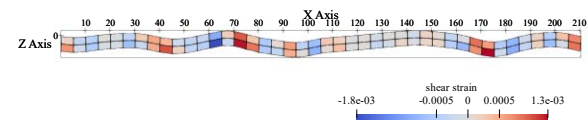
各図のモデル全体のひずみ分布に着目すると、液化化層内のせん断ひずみは Fs 層内で大きく、周波数が下がるにつれてその絶対値が増加する傾向が見られる。同様に体積ひずみも周波数が下がるにつれて絶対値が増加する傾向にある。地下水位以浅のみに着目した各図を比較すると、 $f_p=0.5$ Hz の場合にせん断ひずみは、 $x=65, 180$ m の旧河道両端部に集中している。一方体積ひずみは旧河道部中央の $x=120$ m 周辺に集中することがわかる。



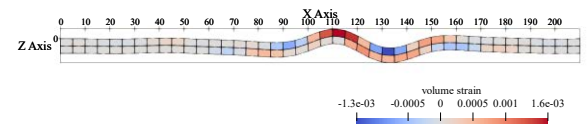
(a) モデル全体のせん断ひずみ



(b) モデル全体の体積ひずみ



(c) 地下水位以浅のせん断ひずみ



(d) 地下水位以浅の体積ひずみ

図-11 $f_p=0.5$ Hz, $V_s=0$ m/s, 地下水位 3.0m のケースのひずみ分布

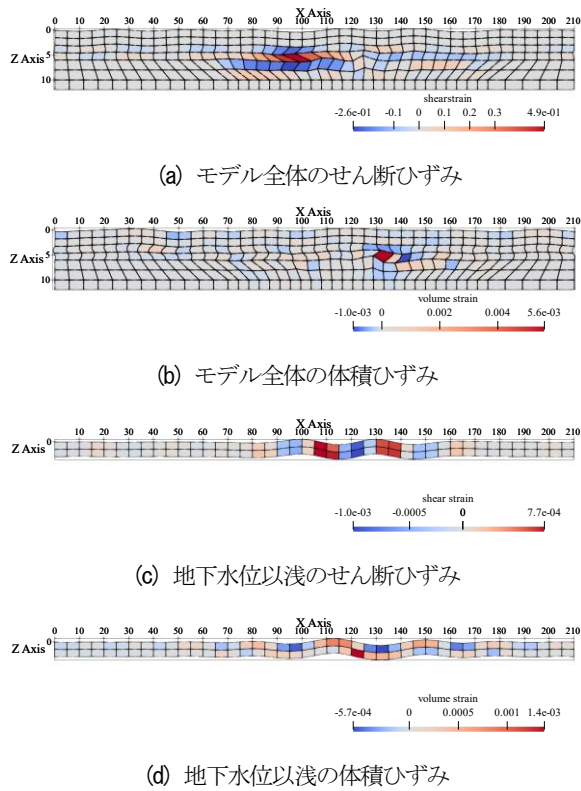


図-12 $f_p=1.0\text{Hz}$, $V_s=0\text{m/s}$, 地下水位 3.0m のケースのひずみ分布

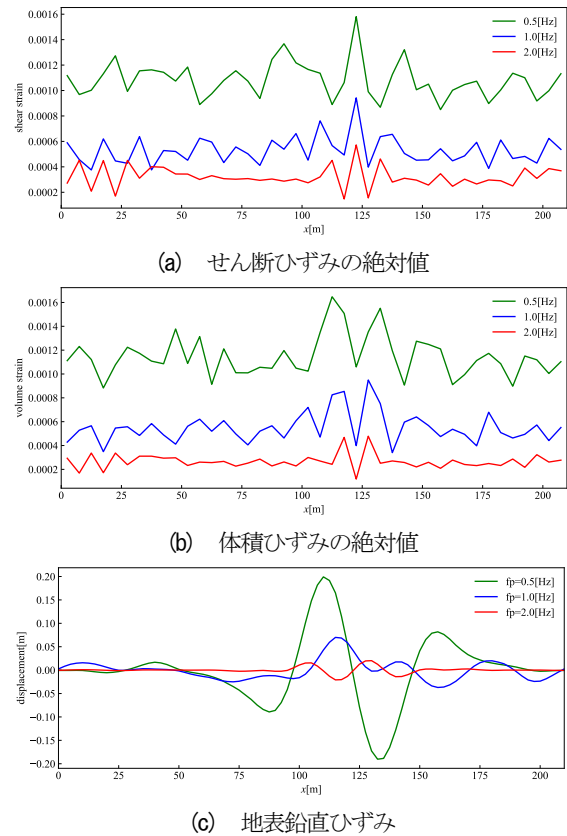


図-14 周波数 f_p を変化させた場合の埋設管深さの最大ひずみと地表面鉛直変位の比較

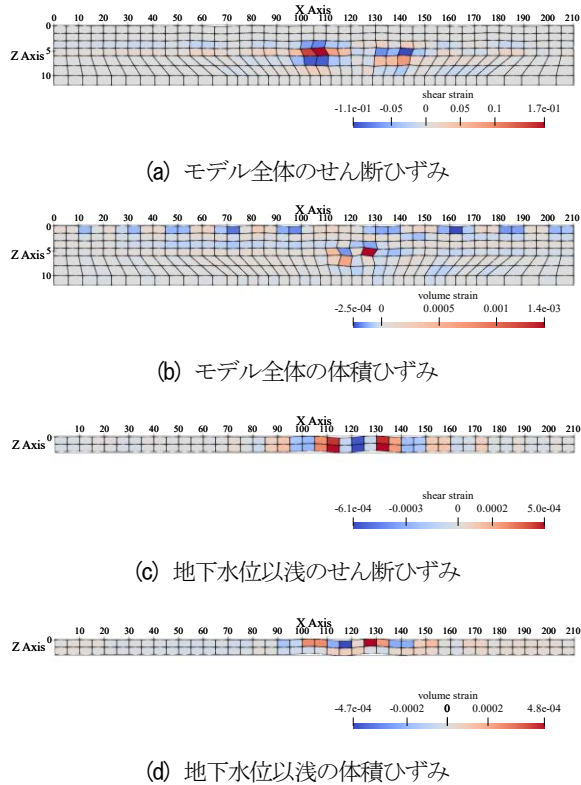


図-13 $f_p=2.0\text{Hz}$, $V_s=0\text{m/s}$, 地下水位 3.0m のケースのひずみ分布

ここで深度 1.5 m に敷設された埋設管への影響を考えるため、地表の要素毎に最大のせん断ひずみと体積ひずみの絶対値の分布をそれぞれ入力周波数ごとに比較して図-14(a)(b)に示す。モデル全体での傾向と同様に周波数 f_p の低下に伴いひずみの値が増加する傾向が見られる。せん断ひずみ、体積ひずみは同様にどの周波数においても旧河道部中央の $x=120\text{ m}$ 付近にピークを持つ形状を示しており、 $f_p=0.5\text{ Hz}$ で最も大きく、 $f_p=2.0\text{ Hz}$ で最も小さくなる。ただし、その形状は周波数が低下するに従ってひずみの生じる領域が旧河道中央から端部に広がる様子がみられる。

図-14(c)にそれぞれの入力周波数 f_p において地表の鉛直変位が最大となる時刻の変位分布を示す。旧河道部中央の $x=120\text{ m}$ 周辺の範囲で変位が最大をとっており、 f_p が低下するにつれて変位量が大きくなる傾向がある。このことは、入力加速度が一定の条件で f_p が低くなると入力の変位振幅が大きくなるためと、周波数が低いほど液状化層が一体となって振動するモードが表れやすいことによるものと考えられる。

b) 液状化層の挙動

入力周波数 $f_p=1.0\text{ Hz}$ 、液状化層の S 波速度 $V_s=0\text{ m/s}$ の場合における液状化層の挙動を確認する。図-15 は 0.75

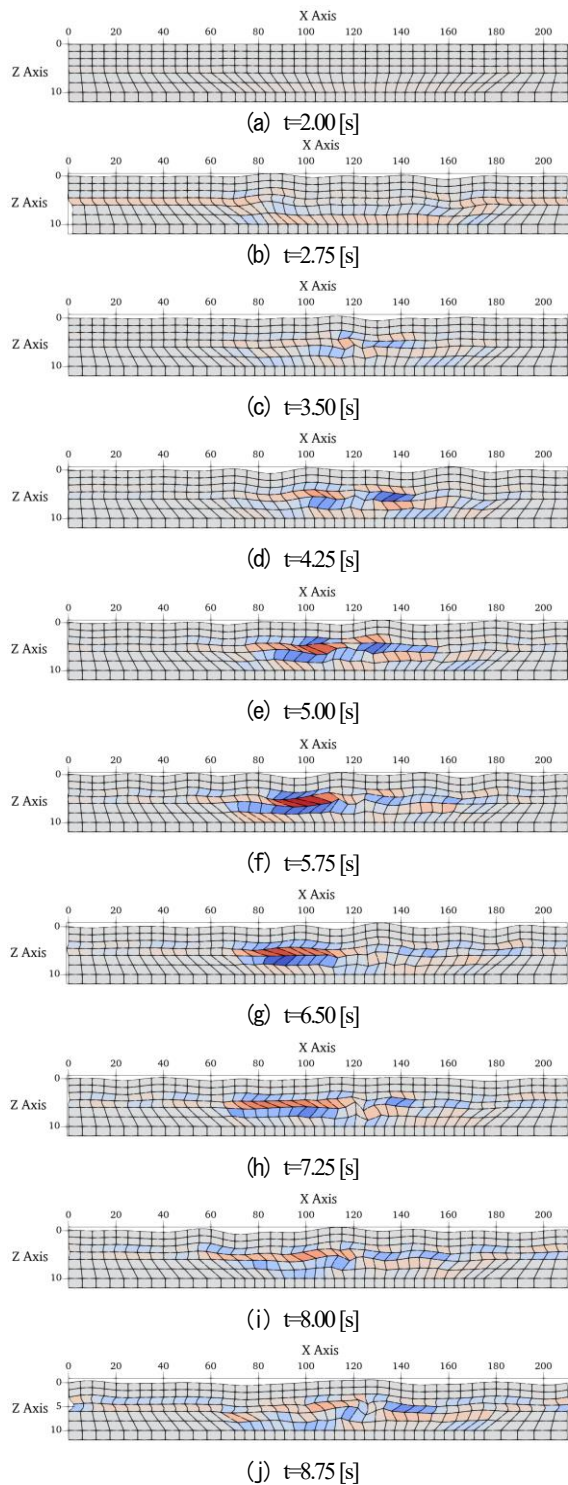


図-15 せん断ひずみ分布と変形のスナップショット

秒おきにモデル全体のせん断ひずみ分布と変形の様子をスナップショットで示したものである。モデル全体に広がる深さ 3-6 m の液状化層がまず大きく変形し、同時に $x=65, 180$ m の旧河道部両端で鉛直変位が生じている ($t=2.75$ s)。この鉛直変位は旧河道部中央に向かってそれぞれ伝播して中央付近で重なりあう。その後も、旧河道部内で鉛直変位が左右に伝播する様子が見られ、度々中央部で重なり合うために大きな振幅となっている。一方、旧河道部の外側には明瞭に伝播していない。このた

め、図-14 のようにひずみが旧河道部中央で大きくなると考えられる。

旧河道部内でも振動により液状化地盤が流動しており、流動した地盤が旧河道部側面の非液状化層との境界面に沿って鉛直上方向に変位する。これにより地表付近の非液状化層が変形し、図-11(c)に示すように旧河道部両端にせん断ひずみが発生したと考えられる。

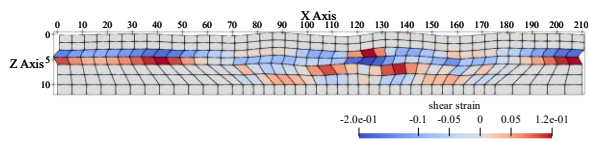
(3) S波速度を変化させた場合の比較

入力周波数 f_p を 1.0 Hz に設定し、液状化層の S 波速度 V_s を 0 から 10 m/s の間で変化させた場合の解析結果を比較する。図-16, 17 にそれぞれ $V_s=3, 10$ m/s とした場合のモデル全体のひずみ分布、地下水位以浅のひずみ分布を示している。

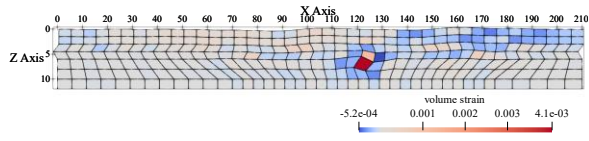
モデル全体のせん断ひずみ分布に着目すると、 V_s の低下に伴い地盤内ひずみのピーク値が増加し、モデル内でひずみが生じる領域が狭まる傾向にある。すなわち、液状化によりひずみが局所化する傾向にあることが示されている。モデル全体の体積ひずみ分布に着目すると、 V_s の変化に伴うひずみのピーク値に大きな変化は無いが、 $V_s=10$ m/s では地下水位以浅に大きな体積ひずみが生じているのに対し、液状化層の V_s が低いほど液状化層内でひずみが局所化している。地下水位以浅のせん断ひずみ、体積ひずみの分布については V_s の変化に対する一定の傾向は見られないが、 V_s の低下に伴いひずみの領域が狭い範囲に局所化している。体積ひずみは $V_s=10$ m/s で旧河道部両端に大きなひずみが見られるが、 V_s が低下するほど中央部に推移する傾向にある。

$V_s=0, 1, 2, 3, 4, 5, 10$ m/s のそれぞれのケースについて地表の要素毎に最大のせん断ひずみと体積ひずみの絶対値の分布を比較し図-18, 19 に示す。 V_s が 0-2 m/s の時にせん断ひずみの絶対値が最大となり、 V_s の変化によらずほぼ旧河道部中心にひずみのピークが見られる。しかし、 $V_s=3-10$ m/s ではひずみの大きな領域が旧河道部全体に広がり、特に V_s が 3 m/s では旧河道部端部付近にもピークが見られる。体積ひずみは V_s が大きいほどピーク値が大きくなる傾向を示す。 V_s が 2 m/s 以下では旧河道部中心にピークが見られるが、 V_s が 3 m/s 以上では旧河道部の端部に大きなひずみが表れる傾向にある。

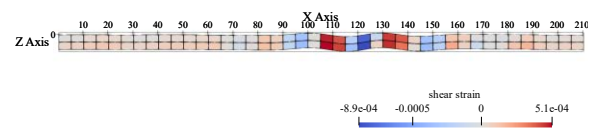
図-20 は地表の鉛直変位が最大の時刻での変位分布を示す。 V_s の変化による地表変位量の差はほとんど無く、 V_s の低下に伴い $x=120$ m の旧河道部中央付近に変位が大きく生じる領域が集中していくことが示されている。また、 $V_s=10$ m/s で変位が生じる領域が広がっている場合でも大きく変位が生じているのは旧河道部の範囲にとどまっており、液状化層と下部の非液状化層との境界面の形状が地表の鉛直変位の発生に影響している可能性が高いと考えられる。



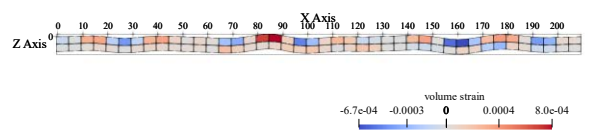
(a) モデル全体のせん断ひずみ



(b) モデル全体の体積ひずみ

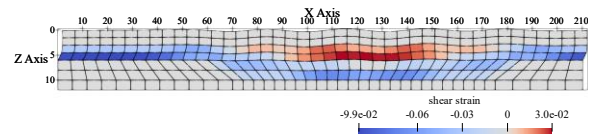


(c) 地下水位以浅のせん断ひずみ

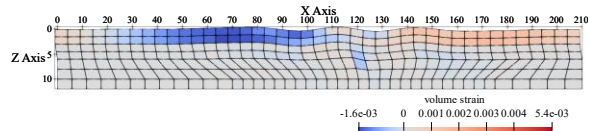


(d) 地下水位以浅の体積ひずみ

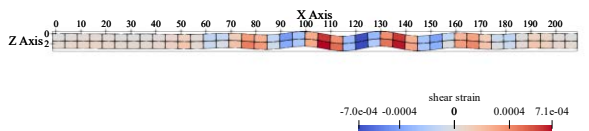
図-16 $f_p=1.0\text{Hz}$, $V_s=3\text{ m/s}$, 地下水位 3.0m のケースのひずみ分布



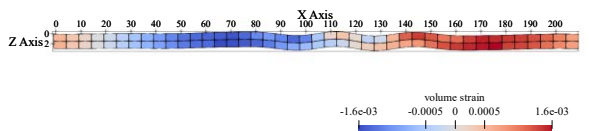
(a) モデル全体のせん断ひずみ



(b) モデル全体の体積ひずみ

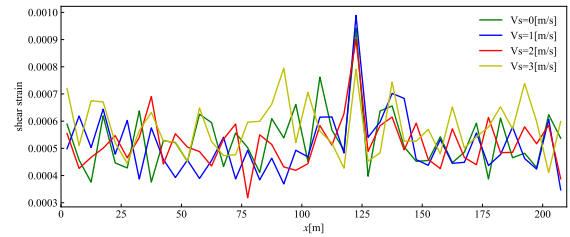


(c) 地下水位以浅のせん断ひずみ

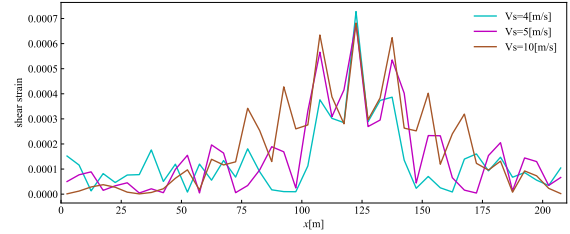


(d) 地下水位以浅の体積ひずみ

図-17 $f_p=1.0\text{Hz}$, $V_s=10\text{ m/s}$, 地下水位 3.0m のケースのひずみ分布

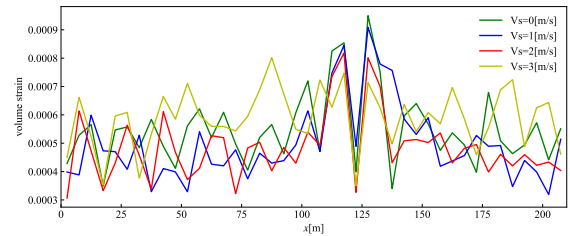


(a) $V_s=0, 1, 2, 3\text{ m/s}$

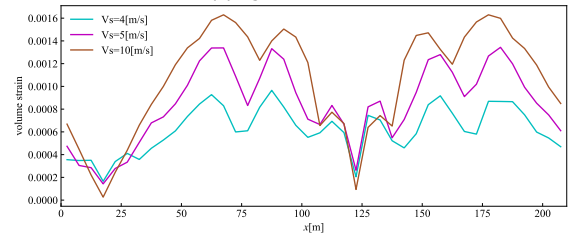


(b) $V_s=4, 5, 10\text{ m/s}$

図-18 S波速度を変化させた場合の埋設管深さの最大せん断ひずみ絶対値の比較

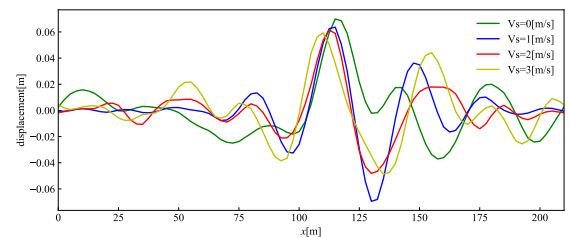


(a) $V_s=0, 1, 2, 3\text{ m/s}$

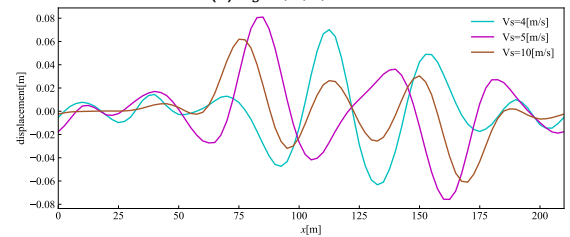


(b) $V_s=4, 5, 10\text{ m/s}$

図-19 S波速度を変化させた場合の埋設管深さの最大体積ひずみ絶対値の比較



(a) $V_s=0, 1, 2, 3\text{ m/s}$



(b) $V_s=4, 5, 10\text{ m/s}$

図-20 S波速度を変化させた場合の地表面鉛直変位の比較

(4) 埋設管深度における地盤ひずみの考察

以上の解析結果から、液状化によって生じる埋設管深度周辺の地盤ひずみについて考察する。埋設管深さでのひずみ分布から、S波速度が非常に低く $V_s=0$ m/s と考えられる場合にはせん断ひずみ、体積ひずみいずれも旧河道部中央に局所化する傾向が見られる。これは液状化地盤が流体のように振る舞い、旧河道部の両端で生じた鉛直変位が水平方向に伝播し、旧河道部中央で重なり合うため鉛直変位が大きくなるものと考えられる。そして、地表近くの埋設管深度におけるせん断ひずみ分布は、これに対応して旧河道部中央に局所化する。せん断ひずみが局所化した地点で埋設管が破損すると仮定すると、液状化層の段差部付近に埋設管被害が集中するという既往の報告と整合しない。一方、入力周波数 $f_p=0.5$ Hz の場合に明瞭にみられたが、液状化層の段差部付近にまず鉛直変位が発達することにより、せん断ひずみも同時に発達し大きなひずみを示すことがある。

また、液状化層の S 波速度を 0-10 m/s まで変化させた場合の結果を比較したところ、S 波速度が 3 m/s の範囲において旧河道部端部にもせん断ひずみのピークがみられ、体積ひずみについても S 波速度が 3-10 m/s の場合に旧河道部端部の周辺でピークを示す。液状化地盤は完全に S 波速度が 0 となる流体であるとは考えにくく、また安田ら²⁾も液状化層の S 波速度を 6 m/s と設定していたことを踏まえると、3-10 m/s 程度の小さな剛性を持つ流体状の物質であると解釈することもできる。この場合、液状化層を完全流体とみなす場合と比べ、より端部にひずみが誘導される傾向にあり、特に体積ひずみについて顕著であることは興味深い特徴である。

3章で示したように、S 波速度が 5 m/s を下回るような場合には微小変形と有限変形を考慮した解析とで結果に差があることから、この見解は本研究で用いた解析手法により明らかとなった結果といえるであろう。実際の液状化地盤がどの程度の S 波速度であるかについての検討が今後必要と考えられる。

本研究では、入力波がリッカー波というパルス状の波形であったため自由振動による効果を十分確認できなかったと考えられる。液状化層が一体となって揺動するようなモードが発達するような入力波であれば旧河道部端部にひずみが局所化する可能性も考えられるため、今後より詳細な検討が必要である。

5. 結論

本研究では重力を復元力とした揺動現象であるスロッシング現象を解析するため、有限変形を考慮した有限要素解析手法を用いて、液状化地盤に生じるひずみの分

布について求めた。その結果、液状化地盤のスロッシング現象によってひずみの局所化が生じた。この分布と埋設管被害、地盤変状との関係について考察した。

超弾性構成則である Hencky モデルと有限変形を考慮した有限要素法を提案し、矩形容器に入れた流体状の物質を正弦波を加振させる動的解析により手法の妥当性を検証した。その結果、媒質の S 波速度が 0 に近づくにつれて Housner の解に至ること、S 波速度が 5 m/s を下回る場合に微小変形による解との乖離が顕著になることが明らかとなった。

有限変形を考慮した有限要素法を用いて、浦安市の液状化地盤を解析し地盤内のひずみ分布を求めた。液状化層において地盤がスロッシング現象のような挙動を示した。液状化層である旧河道部中央、あるいはその両端においてひずみが局所化する傾向にあることを示した。この傾向は、入力周波数や液状化層の S 波速度などのパラメータによって変化するが、S 波速度が 3-5 m/s の場合にひずみが旧河道部端部に局所化する傾向にあることが明らかとなった。

しかし、本研究では液状化地盤の解析において、簡略化した地盤モデルや入力波にリッカー波のみを用いたが、実際の埋設管被害との比較を行うにはより詳細なモデルの作成や、実際の地震波を用いて解析し、実際に即した考察を行う必要があると考えられる。また、せん断ひずみと体積ひずみの局所化地点をもとに、埋設管被害との関連を考察したが、埋設管への影響を直接みるために地盤ばねを介した埋設管の変形解析が必要である。

参考文献

- 1) 京川裕之、清田隆、近藤康人、小長井一男：東北地方太平洋沖地震による浦安市埋立地盤の液状化被害調査。地盤工学ジャーナル、Vol.7, No.1, pp.265-273, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No.2, pp. 381-387, 1963.
- 5) 鋤田泰子、池尻大介：鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷。日本地震工学会論文集、Vol.12, No.4, pp.249-262, 2012.
- 6) 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。
http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/002/934/lasthoukou02-01.pdf (2021 年 1 月 25 日閲覧)

STRAIN LOCALIZATION DUE TO SLOSHING BEHAVIOR OF LIQUEFIED SOIL GROUND

Yuya ITO, Hiroyuki GOTO, Jun KURIMA and Sumio SAWADA

Damages to buried pipe lines due to soil liquefaction have occurred in the past earthquake disasters. They often occurred near the boundary between liquefied and non-liquefied ground. In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, a past study implied that the liquefied ground was greatly shaken and the strain was concentrated, which caused the pipe damage. In this study, the finite element method considering finite deformation is used to numerically analyze the sloshing behavior of the soil liquefied ground. After verifying the method by comparing it with solutions for fluids, a dynamic analysis is conducted for liquefied ground in Urayasu City. The localized strains caused by the sloshing are recognized, and the relationship between the location of the localized strains and the actual damage to the buried pipe is discussed.