

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630195

研究課題名(和文) 固体が流体かに依存しない支配方程式に基づいた高精度数値解析手法の開発

研究課題名(英文) High-accurate common numerical method for dynamic behavior of solid and fluid materials

研究代表者

澤田 純男 (Sawada, Sumio)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70187293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、固体が流体かに依存しない支配方程式を理論的に導出し、その支配方程式に基づいた数値解析コードを開発して、固体と流体との中間的状态にある媒質の動的な挙動を高精度に解析することを目指したものである。固体と流体の双方を取り扱うことのできる支配方程式をラグランジュ形式で導出し、線形弾性体からニュートン流体までシームレスに解析できることを静的解析、および動的解析によって検証した。本解析コードを飽和砂地盤の動的解析に適用し、液状化地盤の揺動現象を再現することができた。非液状化層や埋設構造物を想定した側壁付近で、励起された鉛直振動に伴う液状化が確認された。

研究成果の概要(英文)：We focus on dynamic behavior of intermediate state of solid and fluid materials. Liquefied ground is one of the typical examples. In order to simulate the behavior accurately, common governing equations are introduced representing both solid and fluid materials, and develop a numerical scheme in Lagrange coordinate system. The developed code is verified by static and dynamic analysis on the material combining linear elastic material and Newton fluid. We apply the codes to saturated sand, and analyze the liquefaction considering the sloshing behavior. Results show liquefaction induced by vertical vibration of free surface.

研究分野：地震工学

キーワード：数値解析 流体解析 固体解析 スロッシング

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけて広い範囲で大規模な液状化現象が発生した。特に被害が深刻な地域は東京湾岸と利根川下流域であり、非常に大規模な液状化が起きている。新浦安駅ではエレベータ施設の沈下、埋め立て地東側の護岸では隆起および側方流動の痕跡が見られた他、埋設貯水槽の浮き上がり被害も報告されている。噴砂、噴水がところどころ発生するのではなく一面に発生する様子が報告されており、噴砂の量も大変多いものであった。また、幹線道路の歩道や生活道路などで舗装の盛り上がりや舗装が壁面に沿って迫り上がる被害が報告されている。

東北地方太平洋沖地震までは液状化現象をとらえた動画は希少であったが、都市部で発生したことや撮影デバイスが普及したことより、液状化に伴うものと思われる地盤の動的挙動が撮影されている。本研究では、このうち液状化地盤の揺動現象に着目する。これは地盤が液状化した後に4-5秒程度の周期で地盤が大きく水平および上下に振動する現象で、安田・萩谷(2012)によって路面の突き上げ被害との関連が予想されていた。

2. 研究の目的

本研究は、液状化地盤の揺動現象を数値解析により表現することを目指すものである。地盤の液状化層は、地震動が作用するまでは固体(飽和砂)である。地震動が作用することで、せん断変形による正のダイレイタンスが生じて過剰間隙水圧が上昇する。これに伴い、有効応力が減少するため、有効応力の減少とともに流体的な性質を示すと考えられている。結果として、液状化は時間が経過するにつれて固体から流体へその性質が変化するプロセスと解釈することもできる。

そこで、本研究では液状化した地盤を固体と流体の中間的性質を持つ媒質であると考え、ところが、固体と流体とでは異なる支配方程式を用いることが一般的である。媒質が固体であれば、支配方程式は固体の構成則と運動方程式からなる。媒質が流体であれば、支配方程式は Navier-Stokes 式と連続の式からなる。このため、固体と流体の中間的な状態を解析するためには、双方に共通して適用可能な手法が必要である。

3. 研究の方法

本研究では、まず固体と流体双方に適用できる支配方程式について考察し、有限要素法による数値解析コードを開発する。数値解析コードの妥当性を検証するため、静的解析と動的解析により比較した。その上で、液状化に対応した構成モデルを導入して液状化地盤の揺動解析を実施した。

4. 研究成果

(1) 固体と流体とで共通する支配方程式

揺動現象のように媒質がある領域内にとどまる問題を想定していることから、Lagrange 座標系で表現する。この時、運動方程式は固体・流体によらず次式で表される。

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (1)$$

ここに、 ρ は密度、 u_i は変位ベクトル、 σ_{ij} は応力テンソル、 b_i は物体力である。

固体の場合、応力とひずみを関連付ける構成モデル(Hooke 則等)と、ひずみと変位を対応させる適合条件式とを連立させる。流体の場合、応力とひずみ速度テンソルを関連付ける構成モデル(Newton 流体の構成モデル等)と連続式とが用いられる。Newton 流体の場合、運動方程式と構成モデルから Navier-Stokes 式が導かれるため矛盾はない。ただし、非圧縮流体の場合、Lagrange 座標系では連続式が恒等的に成立してしまうため、水圧とひずみ速度テンソルとの間にひとつ関係式が必要である。通常は、 $u_{ij} = 0$ なる関係がこの目的に用いられる。

固体と流体とで共通する支配方程式を立てるには、双方で共通している Lagrange 座標系の運動方程式を用いれば良い。その上で、固体と流体それぞれに対応する構成モデルを採用すればよい。ただし、流体時の関係式 $u_{ij} = 0$ を担保しなければならない。

例えば線形弾性体と Newton 流体の双方の性質を持つものとして以下の構成モデルを提案する。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\eta\dot{\epsilon}_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (2)$$

ここに η は Newton 流体の粘性係数に相当するパラメータ、 μ は線形弾性体のせん断剛性に相当するパラメータである。 p は流体時に水圧に相当する変数であるが、拘束圧として $p = -K\epsilon_{ii}$ なる関係で体積ひずみと対応するものとする。 η が 0 の場合、線形弾性体の構成モデルに一致する。また、 μ が 0 でかつ体積弾性係数 K が非常に大きい場合、Newton 流体の構成モデルと $u_{ij} = 0$ の関係にそれぞれ一致する。すなわち、パラメータを適切に制御することによって、両者を矛盾なく表現できていることとなる。

なお、揺動現象を解析するためには、重力による復元力を考慮する必要がある。このため、有限変形を考慮して数値コードを構築する。また、有限変形に対応した構成モデルとするため、Almansi のひずみテンソルで構成モデルを表す。

(2) 数値解析コードの検証

物体力として鉛直下方に重力加速度が加わっている状態で容器を回転させて静止させる(図1)。表面張力を考慮しない場合、完全流体の自由表面は重力方向に直交する平面となり、理論解が存在する。回転角を 0.1° として式(2)の構成モデルを用いて解析した結果が図2である。なお、容器の幅は 20m と設定している。ポアソン比は、線形弾性体に

おける体積弾性係数 K とせん断剛性 μ との関係と同様に定義しているため、ポアソン比 0.5 が $\mu=0$ に相当し、Newton 流体に似た振る舞いをするのが期待される。図 2 中に示すように、ポアソン比 0.5 において流体時の理論解に一致する。一方、ポアソン比が減少してせん断剛性が与えられると変位量は著しく低下する。これは、物体内部のせん断抵抗の寄与が相対的に大きくなることに対応し、実際に自由表面形状も平坦ではなく、曲線形となる。

また、容器を水平に加振して自由表面端部で生じる鉛直変位についても検証している。本解析コードの結果は、ポアソン比 0.5 の条件下で Housner (1963) の近似解とよく整合していることから、妥当性があると判断した。

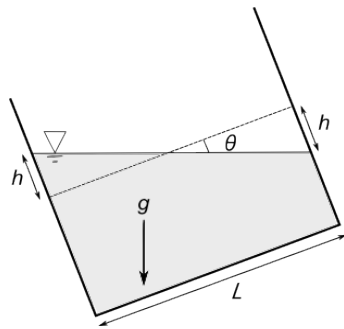


図 1 容器を傾ける解析の概念図

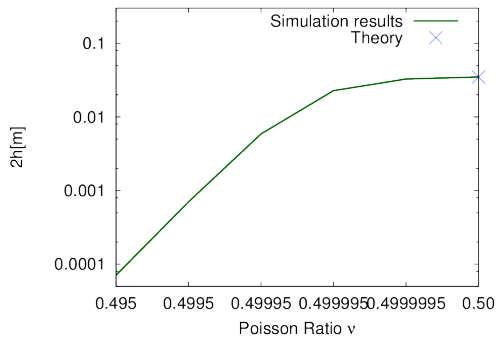


図 2 ポアソン比に伴う壁面における変位量の推移

(3) 液状化地盤の揺動現象の表現

二相系の飽和砂地盤に対して有効応力解析を行う場合、非排水条件下では式(1)の運動方程式と次式の構成モデルとを連立させて解く。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkp}^{ep} d\epsilon_{kl} + \frac{K_w}{n} d\epsilon_{kk} \quad (3)$$

弾塑性剛性テンソルのせん断成分が液状化によってゼロになると考えれば、有効拘束圧 dp' は同様に体積ひずみ増分 $d\epsilon_{kk}$ に比例するため、 K_w が十分大きい場合には先の構成モデルと同様に流体の支配方程式に帰着する可能性がある。そこで、弾塑性剛性テンソルに Li(2002) のモデルを用いて液状化を表現し、揺動現象を解析した。

解析対象は幅 20m、高さ 10m の矩形容器に

満たされた飽和砂地盤で、これに $1m/s^2$ の加速度振幅の正弦波 30 波を水平方向入力して加振する。自然地盤に対して矩形容器は不自然な設定であるが、地盤の不均質性や人工物の存在によって、非液状化層に取り囲まれる場合も考えられる。また、液状化対策として、液状化地盤に格子状に補強材を打設する工法も提案されており、これを簡易に模擬しているとも解釈できる。

液状化地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係は、通常水平成分のせん断応力とせん断ひずみ関係でプロットされるが、ここでは鉛直-水平直交成分と水平せん断成分とに分けてプロットする。図 3 は鉛直-水平直交成分のせん断応力-せん断ひずみ関係、図 4 は水平成分のせん断応力-せん断ひずみ関係を表している。容器中央部では、水平成分の関係において逆 S 字型の液状化特有の履歴曲線が見られる。一方、自由表面・側壁近傍では、鉛直-水平直交成分に逆 S 字型の履歴曲線が見られる。このことは、液状化に至るせん断変形のうち、容器中央部は水平せん断が卓越するが、側壁近傍では鉛直-水平直交方向の変形によって液状化することが示唆される。すなわち、壁面近傍の上下変位の発生に伴って、液状化に至ることが示唆される。

矩形容器内の液状化状況を調べるため、有効拘束圧が初期値の 3% を下回った場合を液状化と定義してプロットしたものが図 5 である。ここでは時間発展を示していないが、自由表面・側壁近傍から液状化が発生し、H 型に発達する。液状化層の上部にお椀状の非液状化層が存在し、これが左右に揺動する現象が確認された。これは安田・萩谷 (2012) によって予想されていた現象と非常によく似ている。

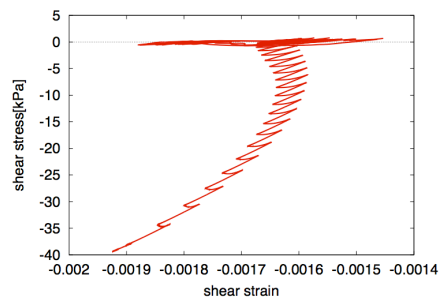
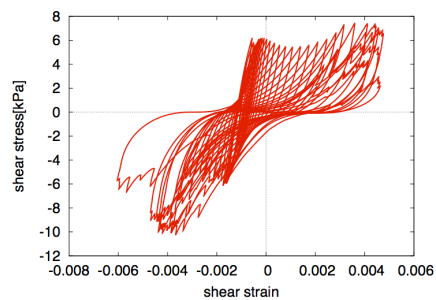
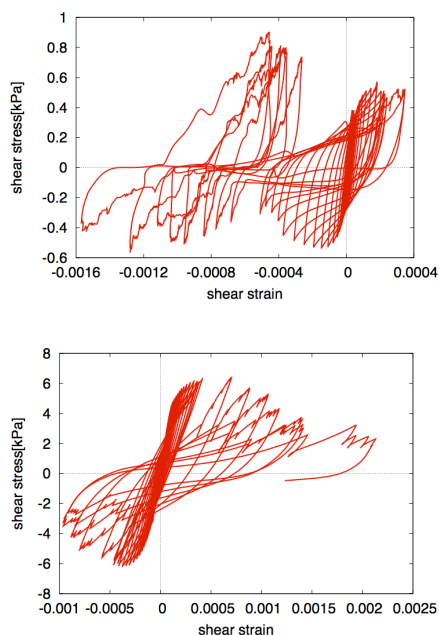


図 3 $\epsilon'_{xx}-\epsilon'_{zz}$ と $\sigma'_{xx}-\sigma'_{zz}$ の関係

(上：自由表面・側壁近傍要素，下：容器中央要素)

図4 ε'_{xz} と σ'_{xz} の関係

(上：自由表面・側壁近傍要素，下：容器中央要素)

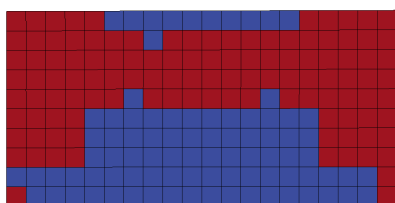


図5 液状化と判定した要素（赤色）の分布

<引用文献>

- ① 安田進，萩谷俊吾：東京湾岸の液状化エリアで発生した平面道路の突き上げ被害，第9回地盤工学会関東支部発表会概要，2012.
- ② Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tanks, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.53(2), 381-387, 1963.
- ③ Li, X.L.: A sand model with state-dependent dilatancy, Geotechnique, Vol.52(3), 173-186, 2002.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 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)，査読有，Vol.71(4), I_493-I_501, 2015.

- ② Yoshikazu Shingaki, Hiroyuki Goto, Sumio Sawada, Numerical study on wave propagation in a low-rigidity elastic medium considering the effects of gravity, Wave Motion, 査読有, Vol.51(5), 729-742, 2014. DOI:10.1016/j.wavemoti.2013.12.006

〔学会発表〕(計6件)

- ① 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，第34回土木学会地震工学研究発表会，2014年10月10日，まちなかキャンパス長岡（新潟県長岡市）.
- ② Ryohei Akiyama, Hiroyuki Goto and Sumio Sawada, Finite Element Simulation of Sloshing Behavior for Intermediate State of Solid and Fluid, 26th KKHTCNN Symposium, 2013年11月18日，シンガポール.
- 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有限要素法の開発，平成25年度土木学会全国大会，2013年9月4日，日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県習志野市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 純男 (SAWADA, Sumio)
 京都大学・防災研究所・教授
 研究者番号： 70187293

(2) 研究分担者

後藤 浩之 (GOTO, Hiroyuki)
 京都大学・防災研究所・准教授
 研究者番号： 70452323

米山 望 (YONEYAMA, Nozomu)
 京都大学・防災研究所・准教授
 研究者番号： 90371492