2025.4.14，第 12 号

はじめに

＜御挨拶＞

昨年は、温暖化が顕著で世界の平均気温が観測史上最高になったといわれており、世界の各所で自然災害が多発しています。自然災害の主たるものは地震、台風と豪雨によるものであり、公共インフラから住宅までその強靭化は緊急の課題です。2024 年は元旦に能登半島地震が発生し、福井県から新潟県まで液状化が発生し、甚大な被害が発生しました。自然災害の予測・対策やインフラ設計では液状化に対する強さを予測することが重要であり、種々の方法が用いられてきました。特に地盤の液状化を含む予測・解析において数値シミュレーション手法が発展してきました。災害対策を含めたインフラの強靭化には、事前予測と事後評価が必要であり、科学的なツールによるより迅速で効率的な対策が望まれている状況です。本研究所では数値シミュレーション手法による地盤の液状化は解析手法を中心に、堤防の浸透問題も解析可能な解析法の開発と普及を行っています。これらが、国土の強靭化への取り組みに資することを願っております。よろしくお願いいたします。

2025 年 4 月

一般社団法人　LIQCA 液状化地盤研究所　会長　岡　二三生

LIQCA 液状化地盤研究所 住所連絡先

606-8226　京都市左京区田中飛鳥井町 138-1

防災研究協会第 3 研究室気付

電話＆FAX　075-585-4445
e-mail　office@liqca.org

LIQCA 液状化地盤研究所について

当社団法人は 2013 年 7 月に設立され今年で 9 年目です。現在正会員が 17 名(内法人 4 社)、賛助会員が 4 社、理事は 6 名、監事 2 名で構成されています。ほぼ月 1 回の研究会を行い、最新の情報を取り入れた解析プログラムの開発、より使いやすいプログラム作成、ユーザーのためのサポート事業を行っております。 詳しくは http://liqca.org を御覧ください。

昨年度のセミナーと活動

１．LIQCA 液状化プログラム普及事業

2024 年版では、LIQCA2D の実践編の例題の解析で、初期弾性係数の影響を見るため解析例を増やしました。また、LIQCA2DFD では、拡張繰返し弾塑性体モデルを増やしました。

2．2024 年 11 月 27 日に Zoom により LIQCA 液状化プログラムセミナーを開催し、無事終了しました。資料は“LIQCA2D24･LIQCA3D24（2024 年公開版）資料”に対する説明とマニュアルです． 資料、マニュアルには、入力方法やモデルを増やすため修正･加筆しました。

２．研究開発

本年も引き続き、解析法の高度化とわかりやすい資料の提供を目指してゆく予定です。

次回のセミナー開催について

2024 年度の LIQCA 液状化解析プログラム追加セミナーは 2025 年 5 月 15 日に実施予定です。

ホームページについて

LIQCA 液状化地盤研究所の HOME PAGE でのユーザーのための LIQCA 情報のページでセミナーでの追加資料、正誤表やプログラムの保守情報を掲載しています。 http://liqca.org

関連国内国際会議･研究集会

1．日本材料学会第 74 期通常総会･学術講演会は郡山氏の日本大学で 2025 年 5 月３０日（金）～6 月 1 日（日）に開催されます。

2. 第 60 回地盤工学会研究発表会は、2025 年 7 月 22（火）-25 日（金）に山口県下関市で開催されます。

3．土木学会 2025 年度第 80 回年次学術講演会 は 9 月 8（月）-12（金）日まで熊本大学黒髪キャンパスで開催されます。

4．第 21 回国際地盤工学会議 The 21th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, が 2026 年 6 月 14～19 日まで Vienna, Austria で開催されます。https://www.icsmge2026.org/en/

広報　第 60 回地盤工学会研究発表会の技術展示へ Web ページで参加しています。

編集後記

春らしくなってきました。皆様ご健勝のこととおもいます。ニューズレターNO.１２号です。昨年は１月１日に能登半島地震が発生しました。 平成 22-24 年に、のと里山街道（旧能登有料道路）を調査し、地震動による盛り土の解析をしましたので、今年は解析対象の復旧強化区間に出向いて確認しようと考えています。 コラムでは、当研究所の理事の大成建設の宇野氏に連成解析の力作をいただきました。お忙しいところありがとうございます。

コラム　-論文-

ｕ－Ｕ定式化に基づく水－土連成有限要素法解析について

一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所理事

大成建設株式会社　宇野浩樹

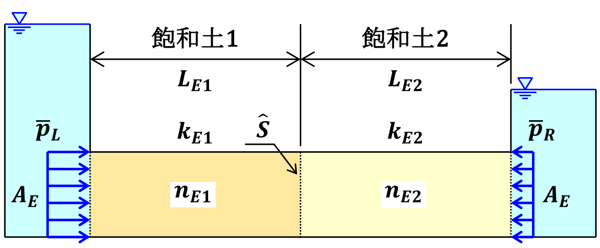
1. はじめに

本研究所では u-p 定式化が実装された液状化解析プログラムを公開していますが，公開版資料 第Ｉ編 理論編[1)]の冒頭では他の定式化についても触れられています。それらの定式化のうち，今回のコラムでは，液相の圧縮性を仮定して固相の変位uと液相の変位Uを未知数とする u-U 定式化に着目し，著者が考える実用上の課題とその解決策について紹介します。

2. u-U 定式化による FEM 解析の実用上の課題

ここでは，シンプルな問題を対象に，Zienkiewicz and Shiomi (1984)[2)]による u-U 定式化を 1 次アイソパラメトリック要素で離散化した FEM 解析の適用性について検討します。

解析条件を図 1 に示します。間隙率の異なる飽和土 1，飽和土 2 が隣接する，長さ 10m の供試体に水頭差を作用させ，定常状態における Darcy 流速と間隙水圧を計算しました。要素の分割幅は 0.5m ピッチとし，透水係数は$k_{E1}=k_{E2}=1.0\times10^{-4}$m/s と設定してモデル内で均質に設定しました。さらに，間隙水の体積弾性係数は$K^f=2.2\times10^{6}$kN/m^{2}としました。



＜長さ，断面積＞

$L_{E1}=L_{E2}=5$m，$A_E=1.0$m^2

＜間隙率＞

$n_{E1}=0.400$，$n_{E2}=0.600$

＜透水係数＞

$k_{E1}=k_{E2}=1.0\times10^{-4}$m/s

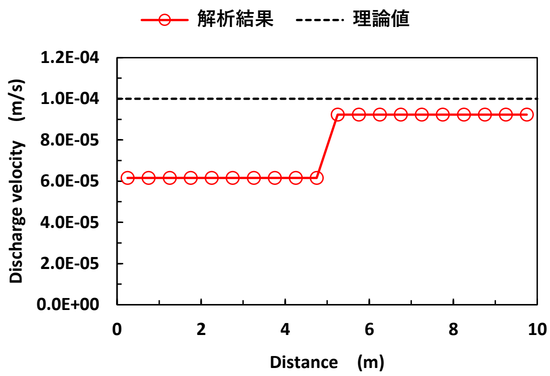
＜間隙水＞

$\gamma^f=9.81$kN/m^3，$K^f=2.2\times10^{30}$kN/m^2

＜水圧境界＞

$\bar{p}_L$＝98.1kPa，$\bar{p}_R$＝0kPa

図 1　1 次元浸透問題



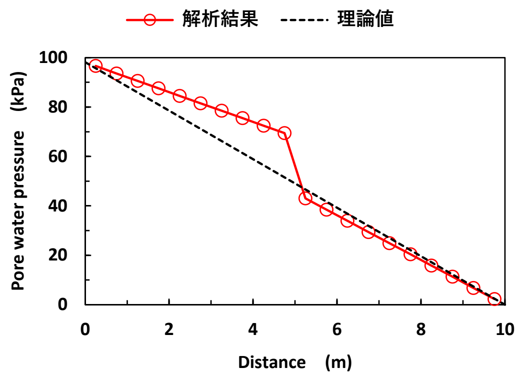


図 2　u-U 定式化に基づく従来手法による 1 次元浸透解析結果

（左：Darcy 流速分布，右：間隙水圧分布）

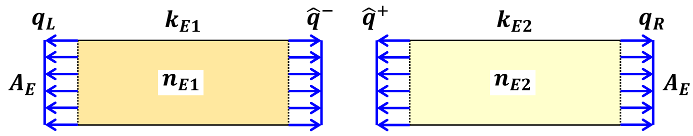
解析結果として，要素内の Darcy 流速と間隙水圧の分布図を図 2 に示します。各図には Darcy 則による理論値も併記しています。ここで，要素 E 内の Darcy 流速v_Eは，要素 E 内の間隙率n_E，要素 E を構成する節点 K の液相速度$\dot{\bar{U}}_K$，形状関数N_K^Uより，$v_E = n_E N_K^U \dot{\bar{U}}_K$によって求めています。

図 2 のように，解析による Darcy 流速と間隙水圧は，いずれも理論値を再現しておらず，誤差が生じています。これは，間隙率の変化が不連続となるモデル中央の隣接面において，流量と間隙水圧の連続性が成立していないことによるものです。

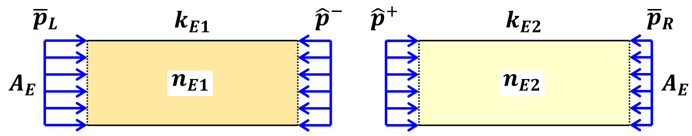
ここで，図 1 を図 3 のように分解し，流量と間隙水圧の連続性について説明します。

流量q（流出：正）の連続性については，飽和土 1 の右端から流出する間隙水は，隣接面での物質収支の観点より，過不足なく飽和土 2 の左端に流入しなければならず，$\hat{q}^+ = -\hat{q}^-$を満足する必要があります。また，間隙水圧pは，連通管の原理より，飽和土 1 と飽和土 2 の隣接面上の値が等しくなければならず，$\hat{p}^+ = \hat{p}^-$を満たす必要があります。以下，$\hat{q}^+ = -\hat{q}^-$，$\hat{p}^+ = \hat{p}^-$が成立することをもって，隣接面上の流量と間隙水圧が連続すると定義します。

飽和地盤では，間隙率の分布にかかわらず，流量と間隙水圧の連続性が常に成り立つ必要があります。そのため，飽和地盤のモデル化の際に地層の種類や密度の違い等によって要素間の間隙率の変化が不連続となる場合，u-U 定式化に基づく従来の FEM 解析の適用性には精度上の課題があると言えます。



(a)　流量の連続性（$\hat{q}^+ = -\hat{q}^-$）



(b)　間隙水圧の連続性（$\hat{p}^+ = \hat{p}^-$）

図 3　隣接面上の流量および間隙水圧の連続性

3. 課題解決のための提案

3.1　支配方程式

以下では，間隙率n，固相の変位ベクトルu_i，液相の変位ベクトルU_iによって液相の固相に対する平均相対変位ベクトルw_iを$w_i = n(U_i - u_i)$と定義し，Biot の飽和多孔質体理論による支配方程式を式(1)～式(6)に示します [1)~4)]。ここで，ひずみは微小ひずみを仮定し，土粒子は非圧縮としています。さらに，応力およびひずみの符号は引張を正とし，間隙水圧の符号は圧縮を正としています。

＜固相のつり合い式＞

$$(1-n)\rho^s \ddot{u}_i - n^2 \frac{\rho^f g}{k}\left(\dot{U}_i - \dot{u}_i\right) = \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} - (1-n)\frac{\partial p}{\partial x_i} + (1-n)\rho^s b_i \tag{1}$$

＜液相のつり合い式＞

$$n\rho^f \ddot{U}_i + n^2 \frac{\rho^f g}{k}\left(\dot{U}_i - \dot{u}_i\right) = -n\frac{\partial p}{\partial x_i} + n\rho^f b_i \tag{2}$$

＜飽和土のつり合い式＞

$$\rho \ddot{u}_i + \rho^f \ddot{w}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \tag{3}$$

＜間隙水のつり合い式＞

$$\rho^f \ddot{u}_i + \frac{\rho^f}{n}\ddot{w}_i + \frac{\rho^f g}{k}\dot{w}_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho^f b_i \tag{4}$$

＜連続式＞

$$n\frac{\partial \dot{U}_i}{\partial x_i} + (1-n)\dot{\varepsilon}^s_{ii} + \frac{n}{K^f}\dot{p} = 0 \tag{5a}$$

$$\frac{\partial \dot{w}_i}{\partial x_i} + \dot{\varepsilon}^s_{ii} + \frac{n}{K^f}\dot{p} = 0 \tag{5b}$$

$$\frac{\partial\{n(\dot{U}_i - \dot{u}_i)\}}{\partial x_i} + \dot{\varepsilon}^s_{ii} + \frac{n}{K^f}\dot{p} = 0 \tag{5c}$$

＜構成式＞

$$\Delta\sigma'_{ij} = D_{ijkl}\Delta\varepsilon^s_{kl},\ \ \Delta\varepsilon^s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\Delta u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\Delta u_j}{\partial x_i}\right) \tag{6}$$

ここに，u_i：固相の変位ベクトル，U_i，w_i：液相の変位ベクトル，平均相対変位ベクトル，ρ^s，ρ^f，ρ：土粒子，間隙水，飽和土の密度，n，k，K^f：間隙率，透水係数，間隙水の体積弾性係数，σ_{ij}，σ'_{ij}，p：全応力テンソル，有効応力テンソル，間隙水圧，ε^s_{ij}：固相のひずみテンソル，g，b_i：重力加速度，物体力ベクトル，です。

以下では 3 種類の定式化とそれらによる FEM 解析を扱います。すなわち，従来の u-U 定式化[2)]（以下，「u-U-1」），既往の u-w 定式化[3)]（以下，「u-w」），著者が提案する u-U 定式化[4)]（以下，「u-U-2」）の 3 種類です。ここで，前述の図 2 の解析結果は u-U-1 によるものです。また，u-w については，固相の変位uと液相の平均相対変位wを未知数とする定式化であり，これに基づく FEM 解析では前述の連続性が常に成立することから，次章で示す理論解のないケーススタディの参照解を求めるために用います。

各定式化で適用するつり合い式と連続式を表 1 に示します。なお，いずれの定式化においても，連続式の増分形により，最終的には間隙水圧pを未知数から消去します。

表 1　各定式化で適用するつり合い式と連続式

定式化	つり合い式	連続式
u-U-1	(1)，(2)	(5a)
u-w	(3)，(4)	(5b)
u-U-2	(1)，(2)	(5c)

3.2　離散化

(1) FEM の適用

直接解く方程式は，表 1 のつり合い式の離散化形式による連立マトリックス方程式であり，いずれの定式化も，つり合い式の空間離散化にはアイソパラメトリック要素による FEM を適用します。なお，次章のケーススタディでは，アイソパラメトリック要素の次数を 1 次とし，固相の変位u，液相の変位U，液相の平均相対変位wに対して同じ形状関数を仮定しています。

(2) 間隙率マトリックスの導入

FEM による離散化過程において，従来の u-U-1 では要素内の平均相対変位ベクトルw_iが次式のように表現されます。

$$w_i = n(U_i - u_i) = n(N^U_K\bar{U}_{Ki} - N^u_K\bar{u}_{Ki}) \tag{7}$$

ここに，n：要素内の間隙率，$\bar{u}_{Ki}$，$\bar{U}_{Ki}$：要素構成節点 K における固相の変位ベクトル，液相の変位ベクトル，N^u_K，N^U_K：固相および液相に関する形状関数マトリックス，です。

一方，著者が提案する u-U-2 では，まず，要素内の間隙率を節点に離散化するため，節点変位の自由度数mを次数とする$m \times m$の正方な対角マトリックス（以下，「間隙率マトリックス$\bar{n}_K$」）を導入します。具体的には間隙率マトリックスの節点 K に対応する成分$\bar{n}_K$を次のように定義します。

$$\bar{n}_K = \left[\sum_E (dV)_E \Big/ \sum_E (dV/n)_E\right]_K \tag{8}$$

ここに，$\bar{n}_K$：間隙率マトリックスの節点 K に対応する成分，$\sum_E (dV)_E$：つり合い式の弱形式において要素 E から節点 K に離散化される飽和土の体積の合計，$\sum_E (dV/n)_E$：要素内の間隙率nの逆数で重み付けした飽和土の体積の合計，です。

u-U-2 では，$\bar{n}_K$を用いることで，要素内の平均相対変位ベクトルw_iを次式のように表現し，

$$w_i = n(U_i - u_i) = N^U_K \bar{n}_K \bar{U}_{Ki} - N^u_K \bar{n}_K \bar{u}_{Ki} \tag{9}$$

平均相対速度ベクトル$\dot{w}_i$と平均相対加速度ベクトル$\ddot{w}_i$も同様の考え方で以下のように表現します。

$$\dot{w}_i = n(\dot{U}_i - \dot{u}_i) = N^U_K \bar{n}_K \dot{\bar{U}}_{Ki} - N^u_K \bar{n}_K \dot{\bar{u}}_{Ki} \tag{10}$$

$$\ddot{w}_i = n(\ddot{U}_i - \ddot{u}_i) = N^U_K \bar{n}_K \ddot{\bar{U}}_{Ki} - N^u_K \bar{n}_K \ddot{\bar{u}}_{Ki} \tag{11}$$

間隙水圧pについては，連続式(5c)の増分形から間隙水の構成式を導出し，要素内の間隙水圧増分Δpを次式のように表現します。

$$\Delta p = -\frac{K^f}{n}\left\{\frac{\partial N^u_K}{\partial x_i}(1-\bar{n}_K)\Delta \bar{u}_{Ki} + \frac{\partial N^U_K}{\partial x_i}\bar{n}_K \Delta \bar{U}_{Ki}\right\} \tag{12}$$

ここに，n：要素内の間隙率，$\bar{n}_K$：間隙率マトリックスの要素構成節点に対応する成分，$\partial N^u_K/\partial x_i$，$\partial N^U_K/\partial x_i$：形状関数マトリックス$N^u_K$，$N^U_K$の導関数，です。

3.3　提案手法の特徴

u-U-2 による FEM 解析においては，間隙率マトリックス$\bar{n}_K$の導入により，連立マトリックス方程式の各項の間隙率が隣接面を形成する節点での値で表現されるため，前述の連続性が常に成立します。すなわち，隣接面上の流量の連続性は式(9)～(11)によって常に成り立ちます。また，要素内の間隙水圧を式(12)によって記述し，各相の分応力テンソル（固相：$\sigma'_{ij} - (1-n)p\delta_{ij}$，液相：$-np\delta_{ij}$，$\delta_{ij}$：クロネッカーのデルタ）に伴う等価節点力を$\bar{n}_K$で表現するため，間隙水圧の連続性も常に成立します。

さらに，$\bar{n}_K$の節点 K に対応する成分を式(8)のように定義することで，要素間の間隙率が不連続となる隣接面上では，液相の加速度，速度，変位の各ベクトル$\ddot{U}_i$，$\dot{U}_i$，U_iが隣接面上で不連続となる真の応答の加重平均（重み係数：$(dV)_E$）として求められます。これについては次章で補足します。

4. ケーススタディによる妥当性確認

4.1　1 次元浸透問題

(1) 解析条件

本節では図 1 の 1 次元浸透問題に u-U-2 による準静的な FEM 解析を適用します。モデルの寸法や解析用物性値，境界条件等は前述の通りです。各つり合い式から慣性項を除き，時間積分には後退差分法を用いました。

(2) 間隙率マトリックス

前述の定義より，間隙率マトリックス$\bar{n}_K$の各成分は，飽和土 1，飽和土 2 の一般部の節点で，与条件の 0.400，0.600 となります。一方，モデル中央の飽和土 1～飽和土 2 の境界面をなす節点では，要素のメッシュが等断面積（1.0m^2）かつ等ピッチ（0.5m）であるため，(2×0.400×0.600)/(0.400＋0.600)＝0.480 となります。

(3) 解析結果

定常状態における要素内の Darcy 流速と間隙水圧の分布図を図 4 に示します。各図には Darcy 則による理論値も併記しています。ここで，u-U-2 による FEM 解析では，要素 E 内の Darcy 流速v_Eが，要素 E を構成する節点 K の間隙率$\bar{n}_K$，液相速度$\dot{U}_K$，形状関数N_K^Uより，$v_E = N_K^U \bar{n}_K \dot{U}_K$によって求められます。

図のように，解析による Darcy 流速と間隙水圧は，いずれも理論値とよく一致しており，u-U-2 によって妥当な解析結果が得られることを確認しました。

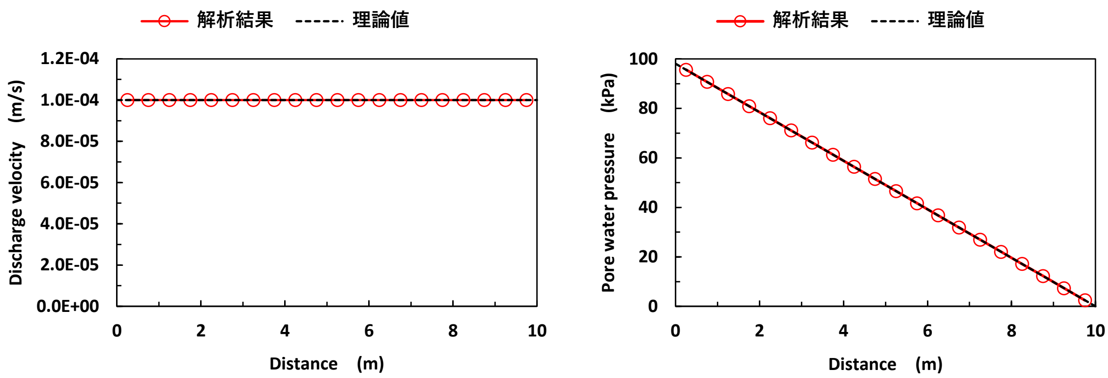


図 4　提案手法による 1 次元浸透解析結果

（左：Darcy 流速分布，右：間隙水圧分布）

さらに，定常状態における節点の液相速度$\dot{U}_K$の分布図を図 5 に示します。図のように，$\dot{U}_K$は，間隙率と同様，モデル中央の隣接面上において不連続に変化します。u-U-2 において，間隙率の変化が不連続となる隣接面上の$\dot{U}_K$は，$(dV)_E$を重み係数とする加重平均として求められますが，今回の要素のメッシュが等断面積かつ等ピッチであるため，飽和土 1，飽和土 2，それぞれの一般部における$\dot{U}_K$の単純平均と等しくなっています。

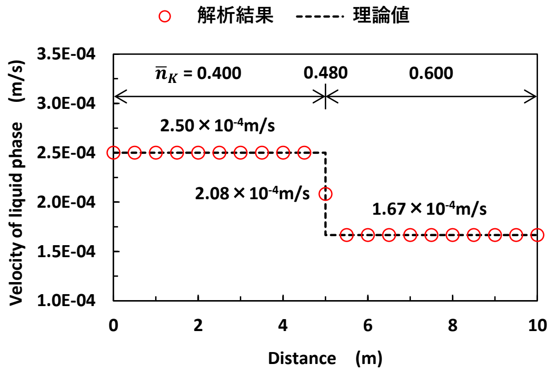


図 5　提案手法による 1 次元浸透解析で得られた液相速度分布

4.2　1 次元鉛直震動問題

(1) 解析条件

本節の 1 次元鉛直震動問題については，理論解が得られないため，u-w による FEM 解析の結果を参照解とし，u-U-1 および u-U-2 の u-w に対する誤差を比較して検討しました。

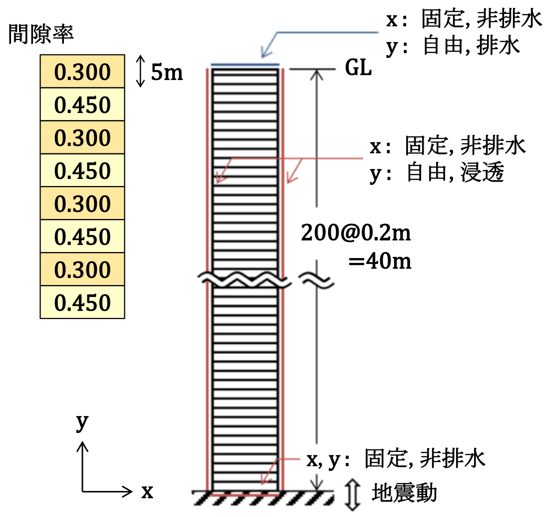
解析モデルを図 6 に示します。層厚は 40m，要素の高さは 0.2m としました。境界条件は，底面を水平方向，鉛直方向ともに変位固定かつ非排水とし，その他は鉛直方向の変位と浸透を自由とする 1 次元問題の条件としました。固相の構成則には線形弾性モデルを適用しました。

間隙率nは，要素内で一定とし，上層から深度方向 5m ピッチで 0.300，0.450，0.300，･･･，0.450 と互層状に変化させました。透水係数kは解析ケース毎に 1.0×10^{-8}，1.0×10^{-7}，･･･，1.0×10^{-1}m/s とし，各ケースでは数値実験という位置付けによって層厚 40m のモデル全体に均質に与えました。

地盤は密度ρ＝2.0Mg/m^3，ヤング係数E＝2.0×10^4kN/m^2，ポアソン比ν＝0.25，間隙水は密度ρ^f＝1.0Mg/m^3，体積弾性係数K^f＝2.2×10^6kN/m^2とし，重力加速度はg＝9.81m/s^2としました。

加速度振幅A_{max}＝0.1m/s^2，波数N＝10 波の正弦波を鉛直方向に入力することとし，周波数fについては解析ケース毎に 0.5，1.0，2.0，3.0，5.0，10.0Hz と設定しました。

時間積分には Newmark のβ法を適用し，各係数はΔt＝0.001s，β＝0.3025，γ＝0.6 としました。



＜間隙率＞

上層からn＝0.300, 0.450, 0.300, …, 0.450

＜基本物性値＞

地盤：ρ＝2.0Mg/m^3, E＝2.0×10^4 kN/m^2, ν＝0.25

間隙水：ρ^f＝1.0Mg/m^3, K^f＝2.2×10^6 kN/m^2

＜荷重条件＞

鉛直加振, 正弦波, A_{max}＝0.1m/s^2, N＝10 波

＜時間積分＞

Newmark の β 法, Δt＝0.001s, β＝0.3025, γ＝0.6

＜解析ケース：計 48 ケース＞

透水係数k＝1.0×10^{-8}, 1.0×10^{-7}, ･･･, 1.0×10^{-1}m/s

周波数f＝0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0Hz

※ Rayleigh 減衰は考慮せず

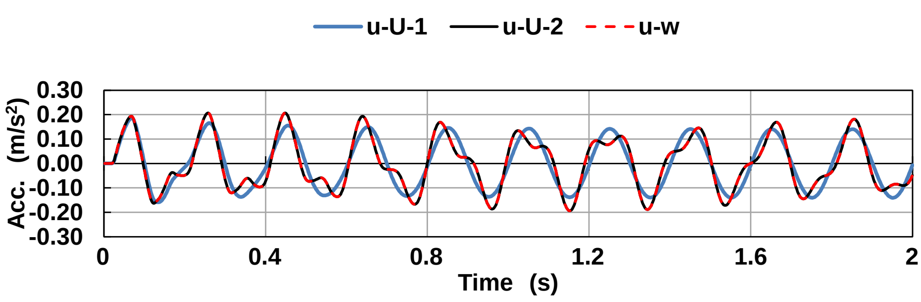
図 6　1 次元鉛直震動問題で用いた解析モデル

(2) 解析結果

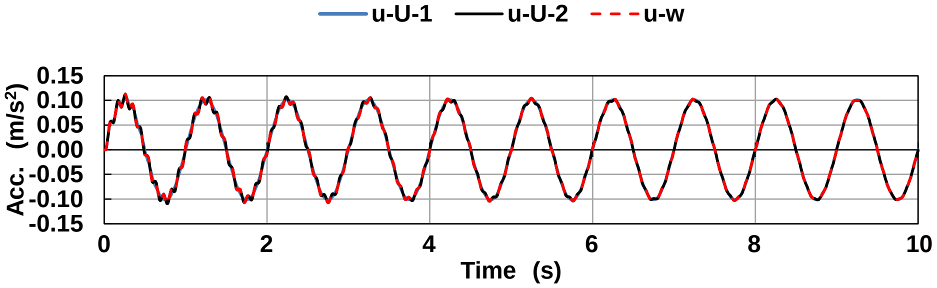
図 7 に，透水係数がk＝1.0×10^{-4}m/s のケースで得られた，地表面における固相鉛直加速度$\ddot{u}_y$の時刻歴の一例を示します。さらに，図 7 の時刻歴データから u-U-1，u-U-2 の u-w に対する誤差E_rを次式によって算定し，その結果を表 2 に示します。

$$E_r = \sum_{i=1}^{n_d} \left|\Delta \ddot{u}_{y|i}\right| \Big/ \sum_{i=1}^{n_d} \left|\ddot{u}_{y|i}\right| \tag{13}$$

ここに，E_r：u-U-1 あるいは u-U-2 の u-w に対する誤差，$\ddot{u}_{y|i}$：時間ステップiにおける u-w の地表面固相鉛直加速度，$\Delta\ddot{u}_{y|i}$：時間ステップiにおける u-U-1 あるいは u-U-2 と u-w の差，n_d：時間ステップ数，です。



(a)　周波数f＝5.0Hz



(b)　周波数f＝1.0Hz

図 7　k＝1.0×10^{-4}m/s のケースで得られた地表面における固相鉛直加速度の時刻歴

表 2　k＝1.0×10^{-4}m/s のケースで得られた u-U-1 および u-U-2 の誤差

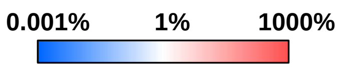
定式化 / 周波数	u-U-1	u-U-2
f＝5.0Hz	39.0%	4.7×10^{-9} %
f＝1.0Hz	4.4%	5.2×10^{-10} %

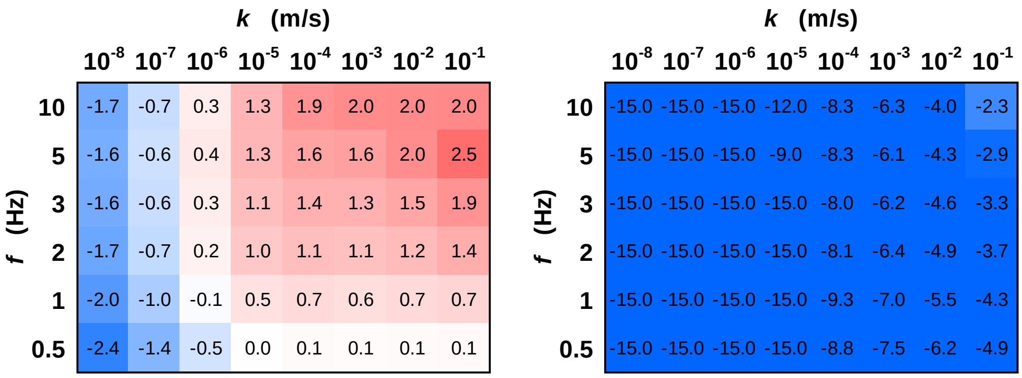
u-U-1 については，周波数f＝5.0Hz のケースで u-w の時刻歴波形と顕著な違いが見られ，10%オーダーの誤差が生じています。u-U-2 においては，いずれの周波数のケースも u-w とよく一致しており，誤差が大幅に低減しています。

透水係数k，周波数fのすべての組合わせについて，地表面における固相鉛直加速度の u-U-1， u-U-2 の誤差分布を図 8 のように整理しました。ここで，図中の数値は誤差E_rの百分率の常用対数（下限値：-15.0）を表しています。

u-U-1 については，最大で 100%オーダーの誤差が生じており，また，透水係数と周波数が高いほど，誤差が大きくなるという，誤差の透水係数と周波数に対する明瞭な依存性が認められます。一方，u-U-2 では，前述のケースよりも高透水性かつ高周波数の領域を含め，誤差が著しく抑制されています。今回の解析条件による誤差は，最大でも（k＝1.0×10^{-1}m/s，f＝10.0Hz）のケースにおいてE_r＝0.005%となっています。

以上より，要素間の間隙率の変化が不連続となる地盤モデルで固相と液相の挙動が連成する複雑な震動問題の場合にも，u-U-2 によって良好な精度で解析結果が得られることを確認しました。





(a) u-U-1 (b) u-U-2

図 8 u-U-1 および u-U-2 の誤差分布

5. まとめ

今回のコラムでは，間隙率の不連続面を含む FEM モデルに u-U 定式化を適用する際の精度上の課題について，具体的な解析例とともに説明し，解決のための提案手法を紹介しました。提案手法のポイントは，支配方程式の FEM による離散化の過程で間隙率を節点に離散化するための間隙率マトリックス$\bar{n}_K$を導入し，これによって隣接面上の流量と間隙水圧の連続性を常に成立させることにあります。

妥当性については，1 次元問題に関するケーススタディを行い，提案手法による数値解を理論解あるいは参照解と比較することで確認しました。なお，本手法は，1 次元問題に限定されず，2 次元，3 次元の問題にも適用可能な有用性の高い手法です。

最後に，今回のコラムの内容が今後の液状化解析手法や対策工に関するさまざまな検討・研究開発の一助となりましたら幸いです。ご高覧いただきありがとうございました。

参考文献

1) (一社)LIQCA 液状化地盤研究所: LIQCA2D24・LIQCA3D24 (2024 年公開版) 資料, 第 I 編 理論編, 2024.

2) Zienkiewicz and Shiomi: Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.8, pp.71-96, 1984.

3) Simon, Zienkiewicz and Paul: An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.8, pp.381-398, 1984.

4) 宇野・船原: 間隙率が異なる互層地盤の動的挙動における飽和多孔質体 u-U 定式化の適用性, 第 66 回理論応用力学講演会, OS4-4-03, 2022.