

飽和多孔質体 $u-w$ 定式化による砂質地盤の液状化解析 —3次元 Stress-Density モデルの適用—

大成建設 技術センター 正会員 ○宇野 浩樹 非会員 船原 英樹
アーク情報システム 計算技術開発部 非会員 石田 貴之 正会員 鈴木 知晃

1. はじめに 著者らは、汎用構造解析プログラム TDAPIII をプラットフォームとして、間隙水の慣性の影響が想定される各種ドレーン工法による液状化対策工の検討に用いる等、より適用性の高い液状化解析プログラムの開発を進めている。本報文では、TDAPIII に導入した、Biot の飽和多孔質体理論に基づく支配方程式の定式化と液状化地盤のための構成モデルについて述べるとともに、1次元土柱モデルを対象に実施した液状化解析について示す。

2. 支配方程式の定式化 微小変形を仮定し、固相の変位 u と液相の固相に対する平均相対変位 w を未知数とする $u-w$ 定式化を導入した。 $u-w$ 定式化では飽和多孔質体と間隙水に関するつり合い式を解く。間隙水は圧縮性材料とし、間隙水圧 p は連続式を用いて u および w で表現する。実装に際しては土粒子を非圧縮とし、1次要素の FEM によって離散化形式を導入した。地層の種類や密度等によって要素間の間隙率が不連続の場合、 $u-w$ 定式化は $u-U$ 定式化よりも解析精度の点で有用である。

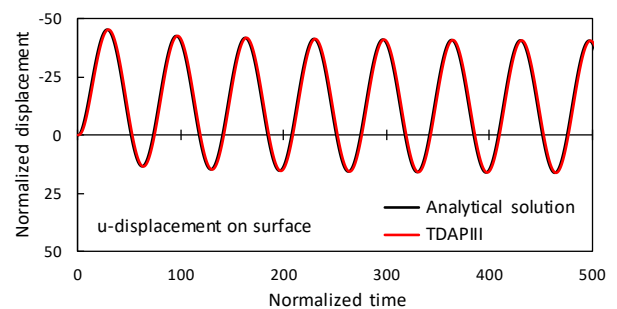


図1 解析解²⁾と数値解の比較

プログラムの妥当性については Simon et al.(1984)の1次元弾性柱に対する解析解²⁾をもとに検証している。詳細は割愛するが、図1のように、TDAPIIIによる数値解は Simon et al.(1984)による解析解とよく一致している。また、後述の1次元モデルによる液状化解析では、動的解析に続いて過剰間隙水圧の消散過程を準静的に解析しているが、いわゆる圧密解析に対しては Terzaghi の1次元圧密理論による解析解をもとに検証している。

3. 液状化地盤の構成モデル Stress-Density モデル (以下、SD モデル) を導入した。本モデルは、弾塑性構成モデルの一つであり、正規化された偏差応力～偏差ひずみ関係が図2に示す state index $I_s = (e_U - e)/(e_U - e_Q)$ によって規定されるという性質に基づいている³⁾。ここに、 e_U : 現在の有効拘束圧 p' に対して最もゆるい状態の UR-line 上の間隙比、 e_Q : 擬似定常状態の QSS-line 上の間隙比、 e : 現在の間隙比、である。state index の適用により、同一種類の砂質土に対しては、 p' や e 、相対密度 D_r によらず、同一のパラメータでモデル化できる。また、文献3)、4)では構成則が単純2次元で記述されているのに対し、文献5)においては3次元に拡張されている。

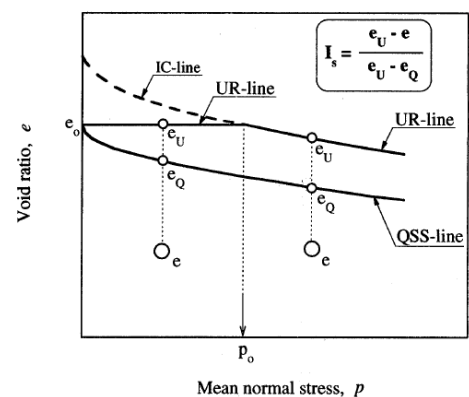


図2 SDモデルにおける state index³⁾

4. 1次元モデルによる液状化解析

4.1 解析条件 1次元土柱モデルは層厚 20m、要素高さ 1.0m ピッチとした。水平 y 方向は u 、 w とともにすべて固定し、 y 方向を面外とする平面ひずみ条件とした。水平 x 方向、鉛直 z 方向については、底面の u 、 w を2方向ともに固定し、剛基盤とした。底面より上層は u 、 w を2方向ともに自由とし、同一深度の u 、 w をそれぞれ等変位で拘束した。図3に示す加速度

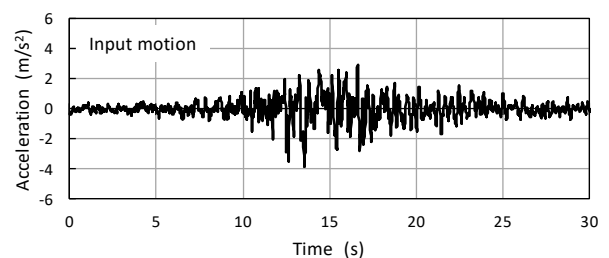


図3 入力加速度時刻歴

度波形は建築分野で用いられている告示波の一つであり、 x 方向に入力した。砂質地盤の密度、間隙比、透水係数

キーワード 液状化、有効応力解析、 $u-w$ 定式化、弾塑性構成モデル、微小変形、有限要素法

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7221

は $\rho=2.0\text{Mg/m}^3$, $e=0.75$, $k=1.0\times 10^{-4}\text{m/s}$ で均質に設定し, SD モデルのモデルパラメータは豊浦砂を想定して文献 4)を参照した。ここで, ダイレイタンスーパラメータ μ のひずみ依存性を制御する S_c は, 液状化強度曲線が概ね同様になるよう, 深度ごとに調整した。SD モデルで再現される両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=5\%$ の液状化強度曲線を図 4 に示す。間隙水の密度, 体積弾性係数は $\rho^w=1.0\text{Mg/m}^3$, $K^w=2.2\times 10^6\text{kN/m}^2$ とした。時間積分には Newmark の β 法を適用し, $\Delta t=0.001\text{s}$, $\beta=0.3025$, $\gamma=0.6$ とした。Rayleigh 減衰は初期剛性比例型で設定し, $\alpha=0$, $\beta=0.003$ とした。さらに, 動的解析後は圧密解析を実施した。なお, 重力加速度は $g=9.81\text{m/s}^2$ としている。

4.2 解析結果 代表的な例として, 地表面における水平加速度時刻歴を図 5 に示し, GL.-9.5m における有効応力径路およびせん断応力～せん断ひずみ関係を図 6, 図 7 に示す。地表面加速度は時刻 15 秒付近でややスパイク状に応答しているが, その後の振幅は低下している。これは, 図 6, 図 7 の矢印のように, 塑性膨張と塑性圧縮が顕著に発生し, 有効拘束圧と剛性が回復しながらも低下して液状化に達するためである。

さらに, 動的解析および後続の圧密解析で得られた, GL.-9.5m における過剰間隙水圧比と地表面沈下量の各時刻歴を図 8, 図 9 に示す。GL.-9.5m における過剰間隙水圧は, 当該深度以深からの透水の影響を受け, 加震後の概ね時刻 500～4000 秒にかけて消散している。地表面沈下は, 地表面から間隙水が流出するため, 加震時から生じているが, 残留沈下量の大部分は水圧消散が支配的な加震後に発生している。

5. まとめ 構造要素を豊富に有する TDAPIII に, 飽和多孔質体理論の $u-w$ 定式化に基づくつり合い式と液状化地盤の構成モデルとして 3 次元 Stress-Density モデルを導入した。本報文では適用事例として 1 次元土柱モデルによる液状化解析について示したが, 今後は被災事例や模型実験等の再現解析を通じて解析プログラムの適用性を検証する予定である。

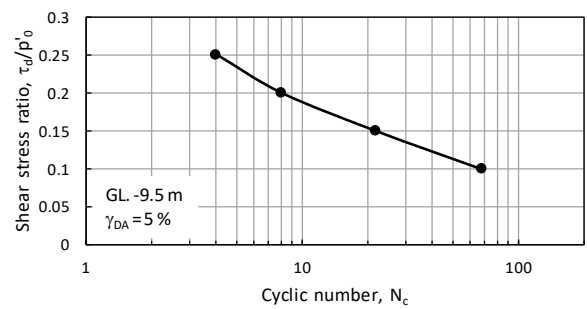


図 4 SD モデルによる液状化強度曲線

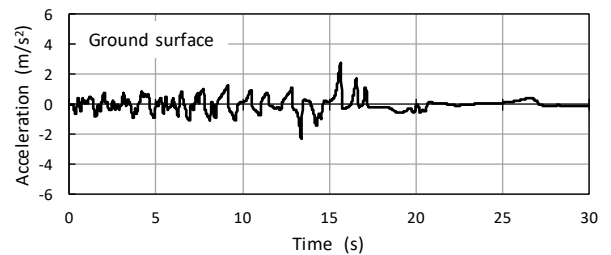


図 5 地表面における水平加速度時刻歴

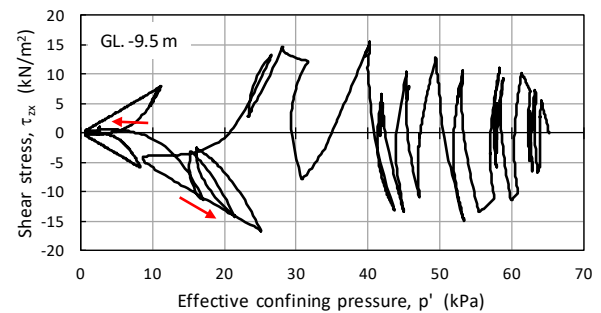


図 6 GL.-9.5m における有効応力径路

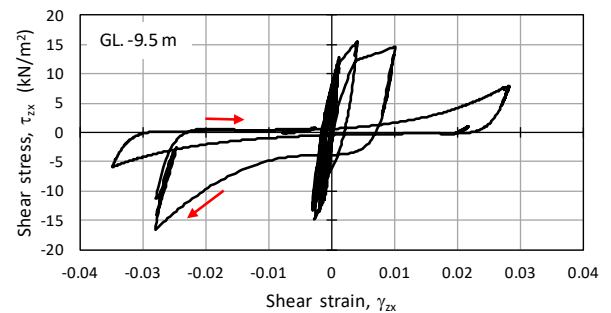


図 7 GL.-9.5m におけるせん断応力～せん断ひずみ関係

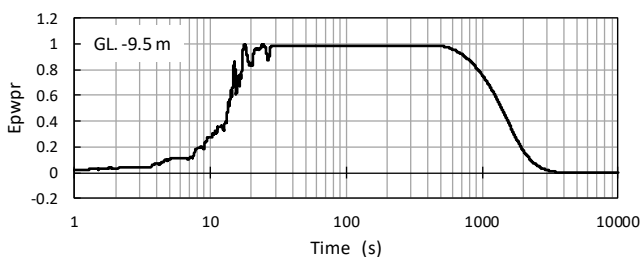


図 8 GL.-9.5m における過剰間隙水圧比 (Epwpr) 時刻歴

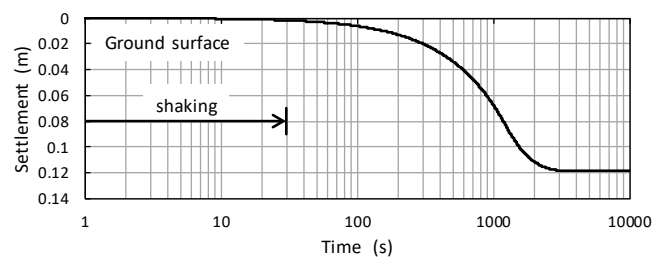


図 9 地表面沈下量時刻歴

参考文献 1) 宇野・船原: 二相系定式化の違いが間隙率の異なる飽和互層地盤の地震時挙動に及ぼす影響, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, III-136, 2020. 2) 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. 3) Cubrinovski and Ishihara: Modelling of sand behaviour based on state concept, Soils and foundations, Vol.38, No.3, pp.115-127, 1998. 4) Cubrinovski and Ishihara: State concept and modified elastoplasticity for sand modelling, Soils and foundations, Vol.38, No.4, pp.213-225, 1998. 5) Das, Bradley, and Cubrinovski: A three dimensional plasticity model for sands based on state concept, Applied mechanics and materials, Vol.553, pp.482-488, 2014.

謝辞 3 次元 SD モデルの導入に際し, Canterbury 大学 Misko Cubrinovski 教授にご指導いただきました。ここに感謝の意を表します。