

水の流入を考慮した液状化時大規模流動解析のV&Vの試み

A Trial of V&V of Numerical Analysis of Liquefaction Induced Landslide Considering Water Inflow

村田宗一郎¹⁾, 一井康二²⁾

Soichiro MURATA and Koji ICHII

1)関西大学 社会安全研究科 大学院生 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1, E-mail:k194391@kansai-u.ac.jp)

2)博 (工) 関西大学 社会安全学部 教授 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1, E-mail: ichiik@kansai-u.ac.jp)

V&V is important for quality assurance of analysis results. However, V&V of non-linear dynamic analysis is still very difficult. In this study, I tried to check the mesh size effect on the dynamic analysis with water inflow, as a part of V&V process. As a result, the mesh size did not affect the deformation level of soil layers although the local layer's deformation is significant in the landslide with water inflow.

Key Words : Liquefaction, V&V, FEM, Mesh Size,

1. はじめに

日本では、昭和39年(1964年)新潟地震発生以降、液状化に関する研究が行われてきた。現在では、液状化を考慮した動的解析が設計実務で使用される機会も増えている。このような設計実務に用いる地盤の動的解析においては、V&V(検証と妥当性確認)が解析結果の品質保証の観点から重要である。そこで、これまでにV&Vに関する研究がいくつか行われている。例えば、原子力学会は2018年に検証と妥当性確認の手順を含むガイドラインを作成している¹⁾。また、地震応答解析に関しても土木学会がガイドラインとその実践事例を作成している²⁾。しかし、非線形の挙動を対象とした動的解析のV&Vは難しい。

2018年にインドネシアで発生した地震では、液状化による大規模な地すべりが発生した³⁾。この事例は被圧地下水の関与⁴⁾と透水性の低いシルト層直下などでの水膜現象⁵⁾が可能性として挙げられている。そして、村田・一井(2023)⁶⁾は清田(2020)⁴⁾を参考に地下水の流入を考慮した動的解析を行い、観測された変形量に比べると小さいものの、水膜現象による流動の再現に成功している。

しかし、水膜現象が発生した場合、局所的に変形が集中した領域が生じ、地盤のメッシュサイズが解析結果に影響を与える可能性がある。これに対して、被圧地下水や水膜現象を考慮した動的解析のV&Vはあまり事例がない。そこで、水の流入を考慮した動的解析の検証の一環としてメッシュサイズに着目した検証を試みた。

2. 既存の研究について

(1) FEM解析におけるメッシュ収束性の検証

FEM解析では、メッシュサイズを細分化すれば理論的に近づき解析精度が向上する。しかし、モデル化に問題がある場合はメッシュサイズを細分化しても、誤差が小さ

くならない場合がある。例えば、山田・櫻井・鈴木(2017)⁷⁾では、地下水の揚水・注水問題において、メッシュ収束性の検証を行っている。その結果、解析領域形状の近似精度の問題からメッシュ分割を細かくしても精度の向上につながらない量があることが示されている⁷⁾。つまり、対象となる問題に応じたメッシュのサイズや形状が必要である。

(2) 水の流入を考慮した液状化による大規模流動解析

2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島でマグニチュード7.5の地震が発生した。この地震では1°~1.5°⁴⁾と非常に緩やかな斜面において大規模な地すべりが発生し、約2000人³⁾が犠牲になった。清田(2020)⁴⁾はこの事象には液状化の発生に加えて被圧地下水が関与している可能性があるとして報告している。そこで、村田・一井(2023)⁶⁾は地下水の流入を考慮した動的解析を行い、図-1⁶⁾のように地下水の流入があると地盤の流動量が増加することを示した。しかし、図-1に示された流動量は観測された流動量に比べると小さい値である。再現解析の詳細については参考文献⁶⁾を参照されたい。

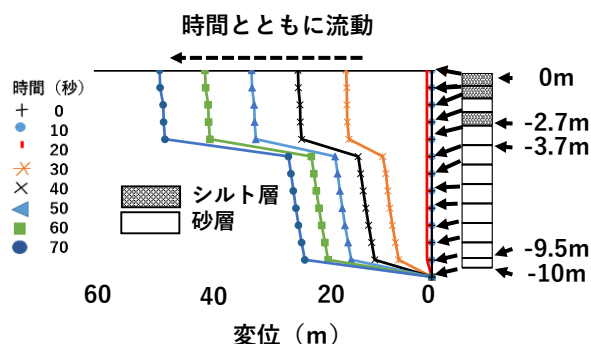


図-1 水の流入を考慮した動的解析の解析結果の例⁶⁾
(各節点の水平変位)

この検討事例においてはシルト層直下や最下層部で大変形が発生している．このように変形が集中した領域については、メッシュのサイズや形状の設定が解析結果に影響を及ぼしていた可能性がある．そこで、本検討では上述の水の流入による地盤流動解析を対象にメッシュサイズに着目した検証を試みた．

3. 検討方法

(1) FLIP-ROSEの構成則

本検討では、2次元有効応力解析プログラムFLIP-ROSE⁸⁾を用いて解析を行った．FLIP-ROSEは微小変形理論に基づくプログラムであるが、今回の検討対象とした地盤モデルは1次元のシンプルな構造であり、平行四辺形状の変形を想定している．そのため、要素形状の変化による影響は小さく有限変形理論に基づくプログラムを使用する必要はないと考えた．

今回の解析では、多重せん断ばねモデル^{9),10)}にカクテルグラスモデルを組み合わせたモデルにより液状化解析を実施した．カクテルグラスモデルでは、体積変化(ダイレイタンス)を、現時点で作用しているせん断ひずみに応じて体積膨張する成分(正のダイレイタンス)と累積のせん断ひずみの値に応じて体積収縮する成分(負のダイレイタンス)の重ね合わせで表現している．その結果、せん断ひずみの増加に伴って体積が増加する状態(正のダイレイタンス)を追跡することや、体積収縮する過程(負のダイレイタンス)での間隙水圧の上昇を追跡することが出来る．さらに、土骨格の支配方程式と間隙水の移動に関する式を連成させて解いており、旧来のFLIP-ROSEにおけるマルチスプリングモデル⁹⁾を用いた解析と異なり、水の流出入の影響を考慮することが出来る．詳しくは参考文献^{11),12),13)}を参照されたい．

(2) 地盤モデルについて

図-2に有限要素モデルを示す．土層モデルは2018年インドネシア地震で大規模な地すべりが生じたJono-Oge地区のボーリング調査¹⁴⁾をもとに決定した．基本となるメッシュサイズは、-2.7mまでの土層境界に加えて、-2.7m以深は1mごと、一番下の要素は0.5mとした．また、解析を簡単にするために、幅と奥行は共に1mとした．そのため、今回作成した有限要素モデルの節点数は26、要素数はカクテルグラスモデル要素12個と間隙水要素12個の合計24個である．この有限要素モデルをケース1とする．

図-3に地盤モデルの細分化の例を示す．本稿では深さ方向の細分化に着目した結果を示す．ケース1の各要素を深さ方向に8分割し、幅はケース1の各要素のアスペクト比と同等になるようにした．細分化後の有限要素モデルの節点数は194、要素数はカクテルグラスモデル要素96個と間隙水要素96個の合計192個である．この有限要素モデルをケース2とする．

地盤の傾斜の影響を再現するために、傾斜角 θ (本検討では 2°)に応じた重力加速度 g を各要素に与えた．また、

下方境界は剛基盤とし、各要素の両端の節点の変位が等しくなる拘束条件(多点拘束)を与えて斜面下流方向への流動を再現した．本検討では、同じ高さにある節点の底面平行方向の変位を同じものとした．

(3) 入力地震動について

図-4に本研究で使用した入力地震動を示す．2018年インドネシアスラウェシ島地震の際にPaluで観測された地震動のうちNS方向の地震動⁷⁾を地盤モデルの底面に平行に与えた．解析時間は70秒間とした．解析における時間積分は、0.01秒間隔で行った．また、レーレー減衰の剛性比例係数 β を、極めて小さな値(2.0×10^{-8})とした．

(4) 解析手順について

解析は初期自重解析と地震応答解析の2段階に分けて行った．初期自重解析は完全排水条件(間隙水は考慮せず、地下水位以深では水中質量密度指定)で行った．この初期

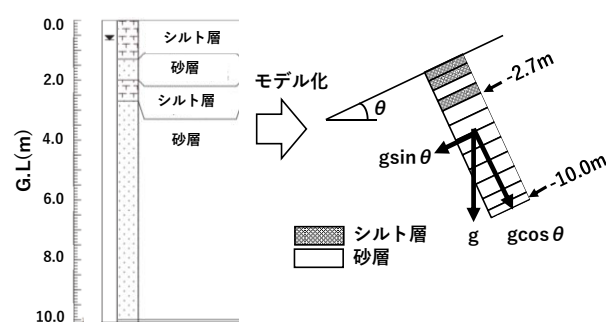


図-2 本検討で使した地盤モデル¹⁴⁾

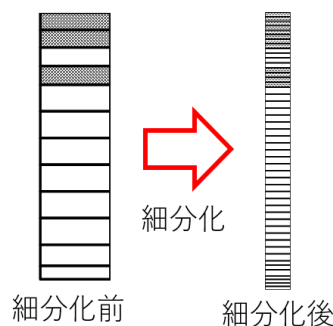


図-3 地盤モデルの細分化の例

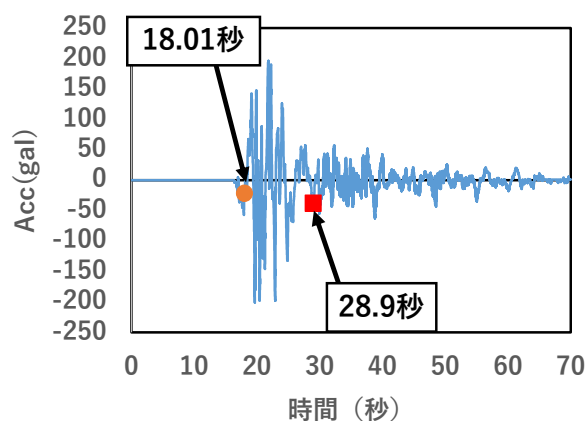


図-4 Palu で観測された NS 方向の地震動³⁾

表-1 解析で使した地盤パラメータ ^{6), 15)}

初期せん断剛性	49,334 kPa ($\sigma'_m = 98$ kPa 時)
体積弾性係数	128,655 kPa ($\sigma'_m = 98$ kPa 時)
質量密度	2.064 g/cm ²
強度定数 c, ϕ	$c = 0, \phi = 35.16^\circ$
最大減衰定数	$h_{max} = 0.24$
ダイレイタンスーのパラメータ	$\varepsilon_d^{cm} = 0.15, r\varepsilon_d^c = 2.0, r\varepsilon_d = 1.6, q_1 = 3.8, q_2 = 1.0, l_k = 2.0, r_k = 0.49, c_1 = 1.0, s_1 = 0.005$
透水係数	砂層 = 1.0×10^{-9} m/s シルト層 = 1.0×10^{-2} m/s,
終局定常状態のせん断強度	設定しない ($q_{us} = 0$)

自重解析は地盤の傾斜角に応じた重力加速度を各要素に与えて、各地盤要素の初期応力状態を設定するためのものである。

地震応答解析では解析モデルの最上面（地表面）で水圧が0の値になるように境界を設定した。また、側面は不透水境界とし、最下層部より水を流入させた。水の流入量は解析開始18秒後から1 m²あたり2 m³/sとした。

(5) 地盤パラメータについて

表-1に地盤パラメータ ¹⁵⁾（物理的パラメータとダイレイタンスーパラメータ）を示す。本検討では村田・一井 ⁽²⁰²³⁾ ⁶⁾で参照した物理的パラメータ、液状化パラメータを使用した。また、水の流入によるひび割れを考慮し、透水係数は比較的大きい値を設定した。パラメータの詳細については参考文献 ^{6), 15)}を参照されたい。

4. メッシュサイズの影響の検討結果

(1) 過剰間隙水圧

図-5に過剰間隙水圧の時刻歴を示す。今回はシルト層直下の過剰間隙水圧に着目した。両ケースとも水を流入した解析開始18秒後から過剰間隙水圧が上昇している。その後、過剰間隙水圧の減少が時折みられるが平均的には一定の値で推移している。この間隙水圧の減少は要素のせん断変形に伴うサイクリックモビリティにより剛性が回復したことによるものであると考えられる。ケース1とケース2とで過剰間隙水圧の減少のタイミングや減少量の多少の差はあるもののほぼ一致している。

(2) 各節点の水平変位

図-6には地表面の水平変位の比較を示すが、2ケースの差はほとんどない。メッシュサイズの細分化を行っても地表面の変位に大きな影響はないことが分かる。

図-7に各節点の水平変位を示す。ケース1とケース2共に地震開始30秒後から水平変位が大きくなっていることが分かる。また、シルト層直下の要素 (-2.7m直下の要素) ではせん断変形が極めて大きくなっている。これは水膜

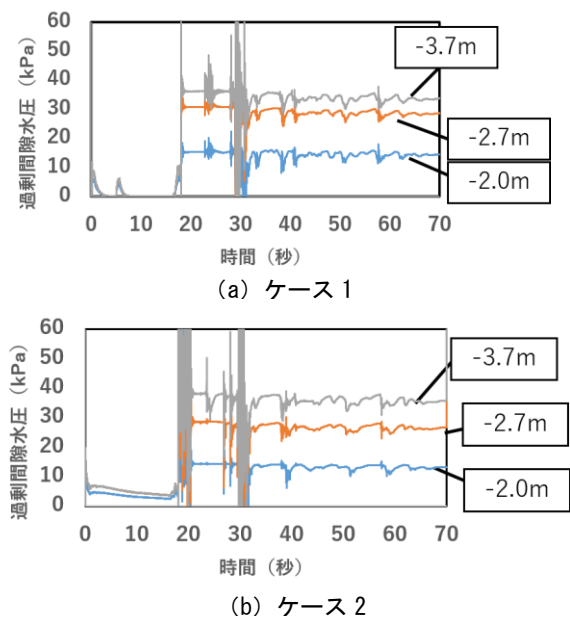


図-5 過剰間隙水圧の時刻歴

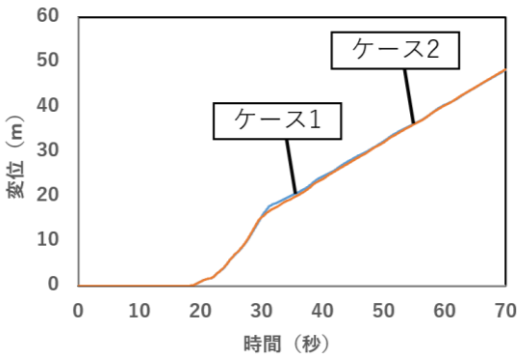


図-6 地表面の水平変位

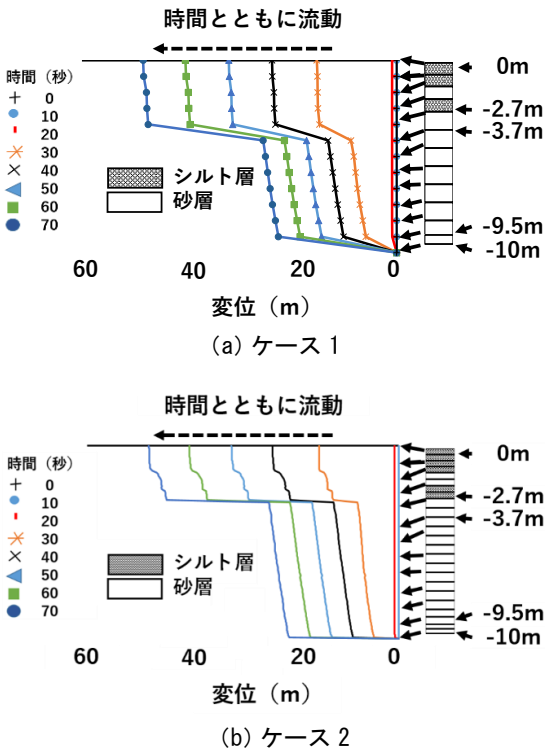


図-7 各節点の水平変位

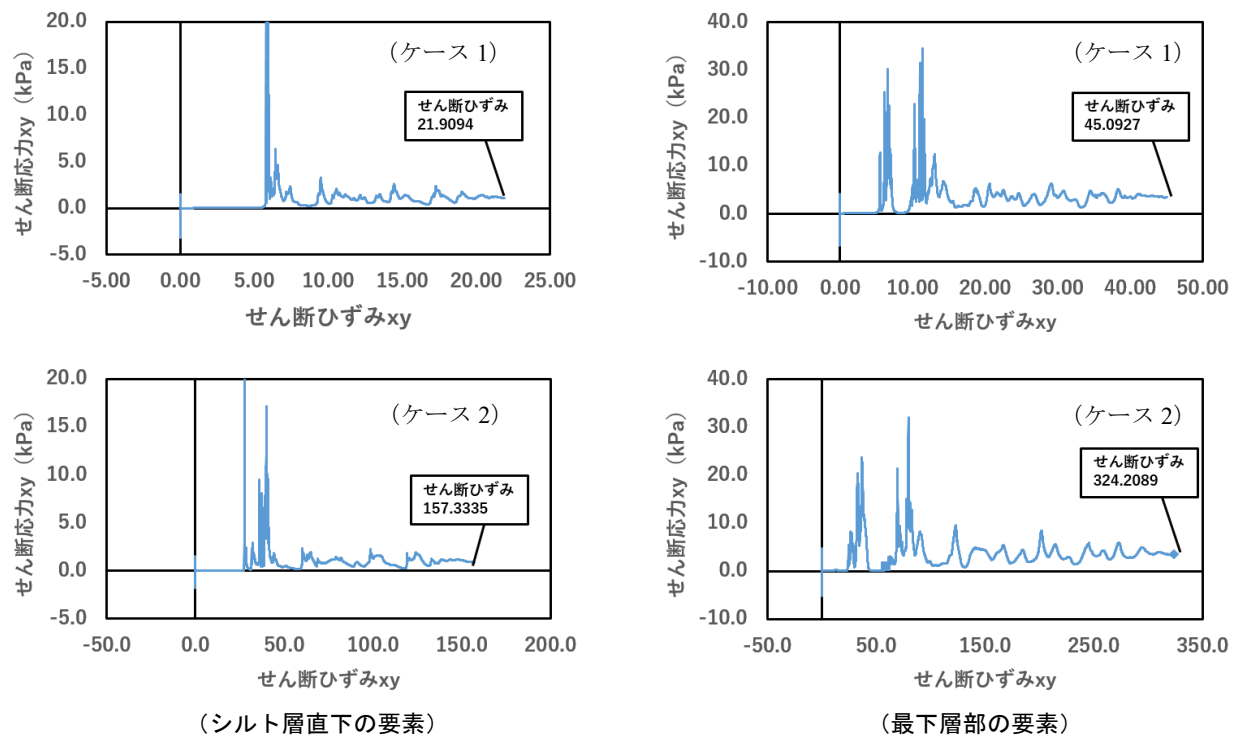


図-8 せん断応力せん断ひずみの関係図

現象に相当する形で変形が集中したものである。なお、メッシュサイズの細かいケース2では-2.7mより上の要素の変形の分布をケース1に比べてより細かく把握することが出来ている。

(3) せん断応力せん断ひずみの関係図

図-8に特にせん断変形の大きかったシルト層直下の要素と一番下の要素のせん断応力せん断ひずみの関係図を示す。シルト層直下の要素、最下層部の要素とも、ケース1とケース2とで多少の差はあるものの、全体的に似た挙動を示している。しかし、ケース2の解析終了時のせん断ひずみの値はケース1の値に比べ約7倍程度の値を示している。これはメッシュ数を8倍にしていることに伴い、一つの要素の高さが8分の1倍となり、同じ変形量になるには一つの要素が負担するせん断ひずみの値が8倍になる必要があるためである。なお、ここではケース2の要素のせん断ひずみの値はケース1のせん断ひずみの値の8倍の値には到達しなかったものの、ケース1の要素の高さに対応する要素のせん断ひずみの値を合計するとほぼ8倍になる。

5. 結論

本検討では水の流入を考慮した解析を対象に地盤モデルの行の細分化を行い、メッシュ依存性の検証を行った。その結果、以下のことが分かった。

1. メッシュを深さ方向に細かくした場合でも、解析結果はメッシュの細分化前とほぼ一致することが分かった。このことから、従来の経験に基づいて設定した層厚1m程度のメッシュサイズでも変形量の評価という観点での実務上の検討は十分であると考えられる。

2. メッシュを深さ方向に細かくすることで変位の分布をより細かく把握することが出来る。このことから、変形が集中する層よりも上部の層の内部における変形状態を把握するには、より細かいメッシュを用いることが望ましいと考えられる。

今回は深さ方向に着目してメッシュの細分化を行っているが、今後はメッシュの幅の細分化など、更なる検証を行っていく必要がある。

謝辞: 本稿ではFLIPコンソーシアムが無償で提供するFLIP-ROSE (体験版) を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 一般社団法人日本原子力学会：シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015, 2015.
- [2] 公益社団法人土木学会：地盤・構造物の非線形解析法の検証と妥当性確認の方法-ガイドラインとその実践事例-, 2022
- [3] インドネシア気象・気候・地球物理学庁, Katalog Gempabumi Signifikan dan Dirasakan | BMKG (最終閲覧日：2023年3月23日)。
- [4] 清田隆, R. F. HIDAYAT, 多田直人, 早川潤：2018年Sulawesi地震による液状化に起因する大規模地盤流動ver.1.4, <https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2018/10/2018SulawesiEQv1-4.pdf>, (最終閲覧日：2022年6月3日)。
- [5] 樺澤和宏, 國生剛治：液状化地盤の水膜現象による流動の模型実験とエネルギー的検討, 土木学会論文集, 2004巻, 771号, pp.135-145, 2004.

- [6] 村田宗一郎, 一井康二: 被圧地下水の流入を考慮した液状化による地すべりの再現の試み, 地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, vol.40, No.1, pp.65-72, 2023.
- [7] 山田俊子, 櫻井英行, 鈴木誠: 注水/揚水孔の簡易有限要素モデルのコード検証, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.73, No.4, pp.450-459, 2017.
- [8] Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(3), pp. 360-392, 2011.
- [9] 一井康二, 上田恭平, 溜幸生, 中原知洋.: FLIPを用いた地盤地震応答解析の最前線, 地盤工学会誌, 第63巻, 第10号, 2015.
- [10] (財) 沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FLIPによる動的解析の実務【理論編】, 2013.
<https://www.flip.or.jp/file/riron.pdf> (最終確認: 2023年3月23日)
- [11] Zienkiewicz O. C., and Bettess, P.: Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions; general formulation and the validity various simplifying assumptions, *Soil Mechanics Transient and Cyclic Loads*, John Wiley&Sons, pp.1-16, 1982.
- [12] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Zhu, J. Z.: *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Six edition, Elsevir, 2000.
- [13] Ozutsumi, O., Iai, S.: Adjustment method of the hysteresis damping for multiple shear spring model. *Proc 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No.1, 68, pp.1-6, 2001.
- [14] 独立行政法人国際協力機構,
<https://www.jica.go.jp/index.html>, (最終確認: 2023年3月23日) .
- [15] 山本航, 飛田哲男: 2018 年スラウェシ島地震における緩斜面地すべりの発生メカニズムに関する解析的検討, 第40 回地震工学研究発表会, No.1596, 2020.