

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

Analysis of Liquefaction Induced Landslide in Consideration of Groundwater Under Pressure Inflow

村田 宗一郎¹⁾, 一井 康二²⁾

1) Soichiro MURATA, 博士課程前期, 関西大学大学院社会安全研究科, k194391@kansai-u.ac.jp

2) Koji ICHII, 教授, 関西大学社会安全学部, ichiik@kansai-u.ac.jp

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、液状化による大規模な地すべりが発生した。この液状化による地すべりは、被圧地下水の存在が影響を及ぼした可能性が指摘されている。しかし、そのような被圧地下水を考慮した動的解析の事例は少ない。そこで、被圧地下水の流入の影響を考慮した再現解析を試みた。その結果、地盤が終局時のせん断強度の小さな特殊な地盤であれば水の流入がなくても観測された液状化地すべりを再現できることが分かった。また、一般的に想定される地盤条件であっても水の流入を行うことで地盤の流動量が増加することが示された。

キーワード：液状化，地すべり，有限要素法，被圧地下水 (IGC : E-02, E-08)

1. はじめに

日本では、昭和39年(1964年)新潟地震発生後、液状化に関する研究が行われてきた。今では、液状化を考慮した地盤の動的解析を設計実務で行うことも増えている。例えば岸壁の地震時変形や地盤沈下、盛土の挙動、地中埋設構造物の浮き上がりを対象にした動的解析が報告されている^{1),2),3),4)}。しかし、稀な事例であるとはいえ、液状化による地盤の大規模な地すべりや地盤流動の報告⁵⁾がされているのに対し、このような大規模地すべりの動的解析の事例は少ない。

2018年にインドネシアで発生した地震でも、液状化による大規模な地すべりが発生した⁶⁾。しかし、この液状化による地すべりが発生したメカニズムは未だ明らかになっていない。そして、この事例では被圧地下水が関与している可能性が指摘されている⁵⁾。また、被圧地下水の関与に加えて、透水性の低いシルト層直下などでの水膜現象⁷⁾が発生した可能性もある。

被圧地下水や水膜現象を考慮した動的解析は、通常の液状化による地盤の大規模流動の動的解析よりもさらに難しく、あまり事例がない。そこで本稿では、2018年のインドネシア地震の際に発生した液状化による地すべりを対象にこれらの影響を考慮した再現解析を試みた。

2. 検討対象

2.1 Jono-Oge 地区の大規模液状化地すべり

本稿で検討対象となる大規模液状化地すべりは、2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島で発生した地震によるものである。この地震のマグニチュード(M_w)

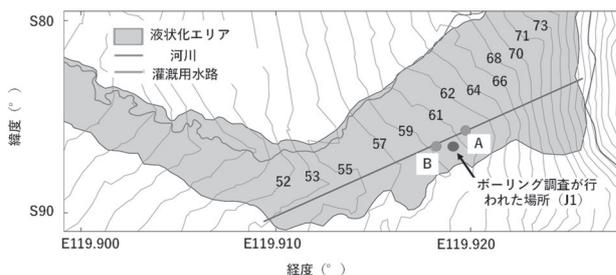
は7.5である。この地震では、地震に起因して液状化現象が発生し、液状化による大規模な地盤流動により約2000人⁶⁾が犠牲になった。これまでの液状化災害での犠牲者が数名から数十名であるケースがほとんどであることを考えると、過去の液状化災害からは想像できないような犠牲者が出ており、液状化の研究者や技術者に大きな衝撃を与えた。

図-1に液状化による大規模流動が発生したJono-Oge地区の等高線⁸⁾を示す。図-1中の点Aに存在した家が点Bまで移動しており⁸⁾、その間の標高を図-2に示す。この間の、Jono-Oge地区の傾斜角は $1^\circ \sim 1.5^\circ$ ⁹⁾と非常に緩やかな斜面である。

図-3にJono-Oge地区のボーリングデータの概略⁹⁾を示す。調査地点は図-1中の点J1の地点である。当該地点は砂層とシルト層が相互に堆積しており、水膜現象が発生しやすい箇所であったと推測される。

2.2 Jono-Oge 地区の流動距離と流動速度

Jono-Oge地区では、現地住民によって今回の液状化地すべりの様子がビデオで撮影¹⁰⁾された。撮影されたビデオ画像は地震開始約30秒後から約60秒後までの約30

図-1 Jono-Oge 地区の液状化エリアと等高線⁸⁾

秒間であると推定されている⁸⁾。このビデオ画像の特徴は、地盤流動によって流されている構造物の屋根の上から撮影されている点である。ビデオ画像では地盤が液体のようになり、木々や周りの構造物が流されていることが確認される。これらの情報からビデオ撮影地点の流動経路が推定された。

図-4は撮影されたビデオ画像をもとに推定された、ビデオ撮影者の流動経路の一部である⁸⁾。推定結果では、ビデオ撮影者は地震開始70秒後に当初の地点より250m下方に流動していたと推測されている⁸⁾。図-4中のX₁からX₂へ15.3mを移動するのに3秒を要しており、地盤の流動速度は約5.1m/sにまで達していたと推測されている⁸⁾。

そこで、本検討ではJono-Oge地区において地震開始から70秒で初期地点から250m下方まで流動し、流動速度約5.1m/sに達したケースを再現解析の対象とした。

3. 検討方法

3.1 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-ROSE¹¹⁾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、本研究で対象としたモデルは1次元のシンプルな構造であり、平行四辺形状での変形のみを想定している。そのため、要素の変形に伴う応力の変化の影響は要素に大きなひずみが生じても小さいと考えられ、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。

FLIP-ROSEでは、液状化する地盤についてマルクススプリングモデルとカクテルグラスモデルとよばれる二種類の土のダイレイタンスーのモデルを使用できる。

マルクススプリングモデルは多重せん断ばねモデル^{12), 13)}に累積塑性せん断仕事に基づいた有効応力経路¹⁴⁾を加えて土のダイレイタンスーの効果を表現したものである。

マルクススプリングモデルでは、液状化の排水沈下や、間隙水の移動に伴う水圧上昇や消散が地盤の変形挙動に及ぼす影響は考慮出来ない¹²⁾。これに対し、カクテルグラスモデルでは、体積変化(ダイレイタンスー)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ー)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ー)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ー)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ー)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、水に流入の影響を考慮することが出来る。詳しくは参考文献^{15), 16), 17)}を参照されたい。

3.2 地盤モデルについて

図-5にJono-Oge地区のボーリング調査の概略⁹⁾とそれに基づいて作成した有限要素モデルを示す。メッシュサイズは、深さ0mから-2.7mはボーリング調査の土層境界から決定し、-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。解析モデルはシルト層、砂層共に液状化層として、第2章で述べたカクテルグラスモデル要素と間隙水要素を用いてモデル化した。

斜面の傾斜を再現するために、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を多点拘束し

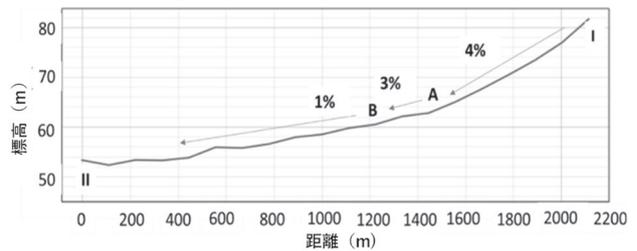


図-2 Jono-Oge地区の標高の変化⁸⁾

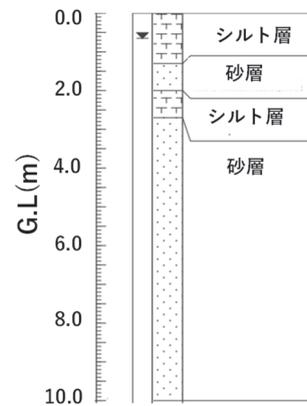


図-3 Jono-Oge地区(J1)のボーリングデータの概略⁹⁾

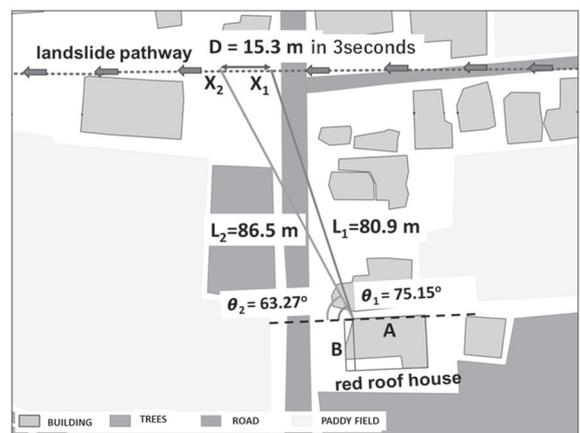


図-4 ビデオ画像撮影者の流動経路の一部と流動速度の推定⁸⁾

で斜面下流方向への流動を再現した。多点拘束とは、異なる節点の挙動を同じにすることである。本検討では、同じ高さにある節点の x 方向の変位を同じものとした。

3.3 入力地震動について

図-6 に本研究で使用した入力地震動を示す。本研究では、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⁶⁾を地盤モデルの底面に平行に与えた。解析時間は 70 秒間を対象とした。

解析における時間積分は、0.01 秒間隔で行った。本研究では、地盤流動がかなり大きいケースを対象に解析を行った。そのため、剛性に比例した人工的な抵抗を小さくする必要があり、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。

3.4 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。この初期自重解析は地盤の傾斜角に応じた重力加速度（初期の応力状態）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。これは水が地表に出ると水圧が解放されるためである。また、最下面（-10 m 以深）および側面は不透水境界とした。ただし、最下層部より水を流入させるケースは側面のみ不透水境界とし、水の流入量を底面で規定した。

3.5 地盤パラメータの設定

表-1 に本稿で使用する地盤パラメータ¹⁸⁾（物理的パラメータとダイレイタンスパラメータ）と検討ケースを示す。

Palu の Jono-Oge 地区では、まだ土質試験データが得られていないため、今回は物理的パラメータ、ダイレイタンスパラメータ共に山本・飛田 (2020)¹⁸⁾を参照した。そのため、本研究で使用したパラメータの値はあくまで暫定的な値である。山本・飛田 (2020)¹⁸⁾は物理的パラメータを決定するために Palu 市 Balaroa 地区の地すべり上端部で行われたボーリング調査を参照している。彼らは、ボーリング柱状図の N 値と細粒分含有率 F_c (%) を読み取り、FILP プログラムのパラメータ簡易設定法¹⁹⁾を用いている。表-1 に物理的パラメータの値を示すが、初期せん断剛性と体積弾性係数は平均有効拘束圧 98 kN/m² に対する値として示されており、各要素の値は深さ毎に平均有効拘束圧に依存して変化する。

山本・飛田 (2020)¹⁸⁾によるダイレイタンスパラメータの決定は、Palu 市 Sibalaya 地区で現地採取されたシルト質砂の室内試験の結果を用いている。具体的には、Sibalaya 地区で現地採取されたシルト質砂 ($D_r=12.1\sim13.1\%$) の液状化強度曲線に対して、一要素でのせん断試験

のシミュレーション結果による液状化強度曲線をフィッティングすることでダイレイタンスパラメータを求めている¹⁸⁾。

Balaroa 地区は Jono-Oge 地区から約 12km 離れている。また、Sibalaya 地区は Jono-Oge 地区から 20km 離れてい

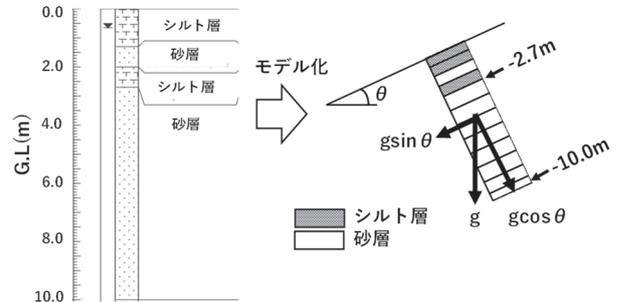


図-5 Jono-Oge 地区のボーリングデータ⁹⁾から作成した地盤モデル

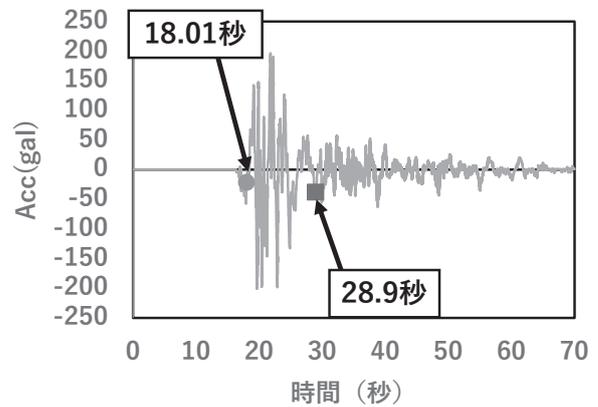


図-6 Palu で観測された NS 方向の地震動⁷⁾

表-1 本稿で使用する地盤パラメータ¹⁸⁾および検討ケース一覧

共通の物性値	初期せん断剛性=49,334kPa 体積弾性係数=128,655kPa (平均有効拘束圧=98kPa 時) 質量密度=2.064g/cm ² c=0, $\phi=35.16^\circ$ 最大減衰定数=0.24 ダイレイタンスのパラメータ ($\epsilon_d^{cm}=0.15$, $r\epsilon_d=2.0$, $r\epsilon_d=1.6$, $q_1=3.8$, $q_2=1.0$, $l_k=2.0$, $r_k=0.49$, $c_1=1.0$, $s_1=0.005$)
ケース A	透水係数 砂層= 1.0×10^{-4} m/s, シルト層= 1.0×10^{-6} m/s, $q_{us}=0.025$ kN/m ²
ケース B	透水係数 砂層= 1.0×10^{-4} m/s, シルト層= 1.0×10^{-6} m/s, q_{us} は設定しない
ケース C*	透水係数 砂層= 1.0×10^{-0} m/s, シルト層= 1.0×10^{-0} m/s, q_{us} は設定しない
ケース D*	透水係数 砂層= 1.0×10^{-0} m/s, シルト層= 1.0×10^{-2} m/s, q_{us} は設定しない

※ケース C とケース D は地震開始 18 秒後から下層部より水を 2m³/s で流入する



図-7 各要素の間隙水圧の上昇と steady-state の発生の分布

る。両地区ともに Jono-Oge 地区と同様の液状化による大規模な地盤流動が発生しており、距離は離れているものの、流動特性としては地質的に似た地盤と推測される。そこで、Jono-Oge 地区の詳細な土質試験データが得られていないことを踏まえ、Balaraoa 地区の物理的パラメータと Sibalaya 地区のダイレイタンシーパラメータを使用することとした。将来的には今回使用したパラメータの妥当性を Jono-Oge 地区の土質試験データと比較しての検討することが望ましい。

まず、ケース A として終局時のせん断強度 (steady-state) が 0.025kN/m^2 に収束するように設定したケースを行った。これは火山灰などの特殊な地盤を想定したケースであり、終局時のせん断強度の値は流動土塊のエネルギーバランスをもとに推定した値⁹⁾である。しかし、ボーリングデータでは現地がケース A のような終局時のせん断強度 (steady-state) の小さい特殊な地盤であったとは考えにくい。そこで、ケース B として、一般的に想定される地盤条件に対応した解析も行った。

ケース C とケース D は清田 (2020)⁵⁾を参考に下層部より水を流入したケースである。なお、流入量は解析の安定性などを考慮して $2\text{m}^3/\text{s}$ とした。なお、ケース C では砂層とシルト層の透水係数は同じ値とし、ケース D では砂層とシルト層の透水係数は異なる値とした。また、水の流入による地盤のひび割れを考慮し、透水係数はケース A やケース B に比べて大きい値を設定した。その他の地盤パラメータはケース B と同じ値を使用した。

4. 再現性の検討結果

4.1 各要素での間隙水圧の上昇と steady-state の発生の有無

図-7 に 4 ケースの各要素の間隙水圧の上昇の状況と steady-state の発生の有無を示す。なお、一般的には、過

剰間隙水圧比が 95% に達したことをもって液状化と判断されるが、等方応力状態下の要素試験と異なり、変形解析で求まる間隙水圧は要素変形の影響を受ける。また、steady-state の発生の有無については、応力状態が steady-state に達したかと大ひずみ発生の 2 種類に分けて判定した。まず、各要素の有効応力経路が破壊線上の steady-state の応力状態に到達したかどうかを判断した。さらに、steady-state の応力レベルでせん断ひずみが 100% より大きな値まで変形した場合に steady-state の大ひずみが発生したと判断している。

まず、ケース A ではすべての要素で最大過剰間隙水圧比が 0.75 以上に達し、大きな変形の発生を考えると全要素で液状化に近い間隙水圧の上昇が発生している。しかし、解析で得られた最大過剰間隙水圧比の値には要素により差がある。最大過剰間隙水圧比の値が 0.9 を上回っている要素の地表面付近とシルト層直下と基盤面付近では、応力状態が steady-state に達しており、同要素では steady-state の応力レベルでの大ひずみも発生した。

次に、ケース B でもすべての要素で最大過剰間隙水圧比が 0.75 以上になるため液状化に近い間隙水圧の上昇が発生している。しかし、全ての要素で応力状態が steady-state に達することはなく、steady-state の応力レベルでの大ひずみも発生しない結果になった。

最後にケース C とケース D では全要素で最大過剰間隙水圧比が 0.95 以上になり完全に液状化が発生していると判断出来る。また、全要素で steady-state の応力状態に達した結果になった。しかし、steady-state の応力レベルでの大ひずみ発生については両ケースとも基盤面直上の要素 (要素番号 12) で発生した。また、ケース D についてはシルト層直下の要素 (要素番号 5) でも steady-state の大変形が発生した。

以上のことから、液状化に近い間隙水圧の上昇は全てのケースで発生していることが分かった。そして、steady-state の大ひずみが発生している要素がケースによっては

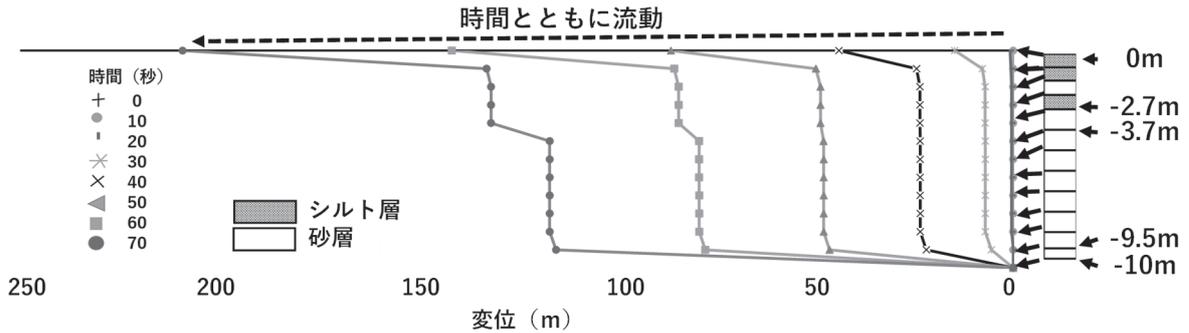


図-8 ケース A の各節点における水平変位

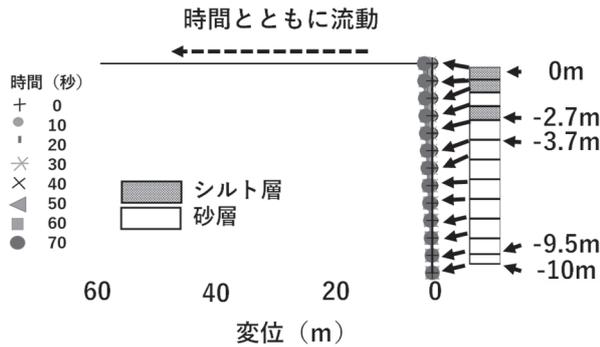


図-9 ケース B の各節点における水平変位

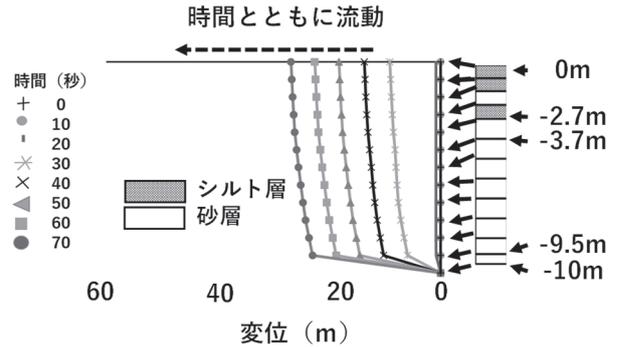


図-10 ケース C の各節点における水平変位

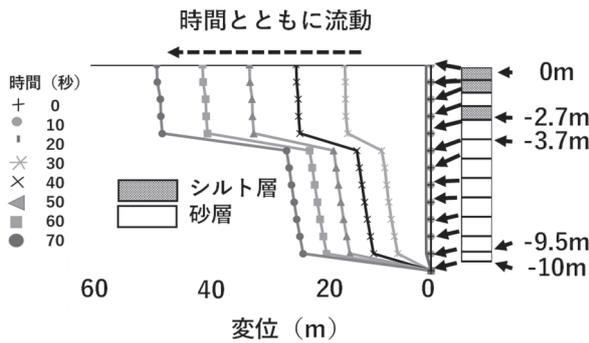


図-11 ケース D 各節点における水平変位

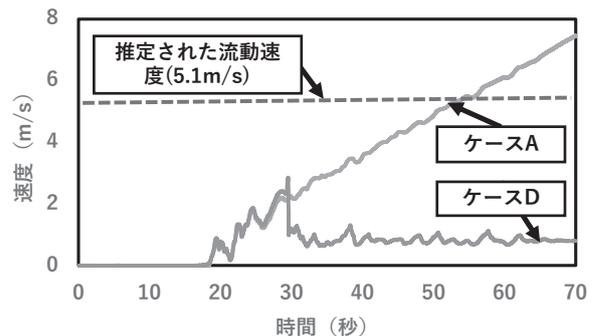


図-12 地表面における水平方向の流動速度の時刻歴

いくつかあることも分かった。そこで、各節点の水平変位を確認し実際の現象の再現性について検討した。

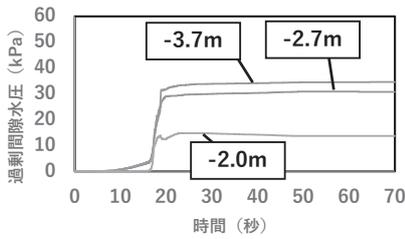
4.2 各節点の水平変位

図-8 から図-11 に各ケースの各節点における水平変位を示す。まず、ケース A では地震開始約 30 秒後から水平変位が大きくなり、解析終了時には、地表面の節点が初期位置から約 210m 下方に水平変位した。Jono-Oge 地区で発生した液状化地すべりは約 250m の変位であり、ほぼ再現できたことになる。次に、ケース B では水平変位がほとんど発生しない結果になった。つまり、一般的な地盤条件を想定すると、大規模な流動にはならないと考えられる。この結果は大規模な液状化による地すべりの発生が非常にまれなケースであるという事実に対して調和的である。次に、ケース C ではケース B に比べて大きな水平変位になった。しかし、ケース A や実際の値と比べると小さい値になった。つまり、水の流入は流動量を大きくする効果があるが、この解析条件では実現現象を再現できていない。最後にケース D では砂層とシルト層

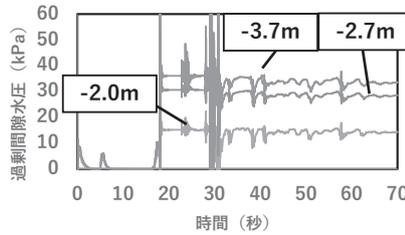
の透水係数を変えたため、シルト層直下 (-2.7m 地点) で大きなせん断変形が発生し、水平変位がケース C に比べて大きい値になった。シルト層の存在による水膜現象の発生が水の流入の効果を増加させるといえる。しかし、このケースでもケース A や実際の水平変位には至らなかった。

ここで、ケース A とケース D でシルト層直下の要素 (2.7m~3.7m の要素) でのせん断変形が大きくなっている。これはシルト層直下で水膜現象が発生したことを示していると思われる。

また、変形の大きなケース A, C, D は一部の要素に大きなせん断ひずみが生じ、変形の大半は最下部の要素と地表面付近の要素で発生した変位である。一方、現地でも流動した構造物や木々には原型を留めたまま流動しているものもあり、表層部分が一つの土塊になって流動している部分もあったと考えられ、本解析の結果と整合的である。ただし、ケース A では表層のシルト層に大きな変形が生じており、実際の現象とは必ずしも整合してらず、全ての要素の終局時のせん断強度を非常に小さくし

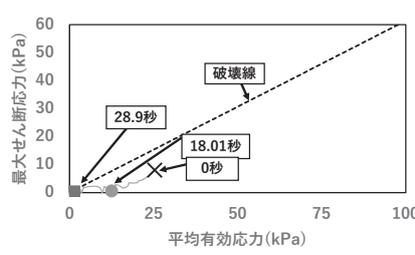


(a) ケース A

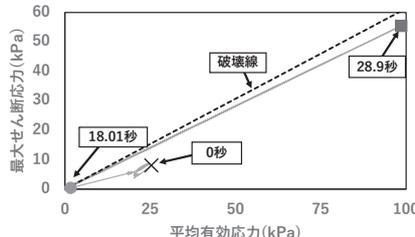


(b) ケース D

図-13 過剰間隙水圧時刻歴の比較

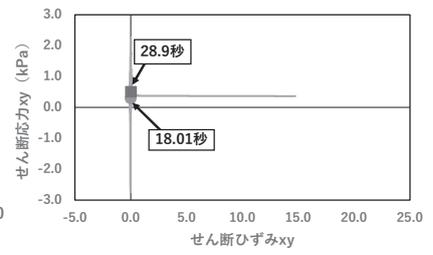


(a) ケース A

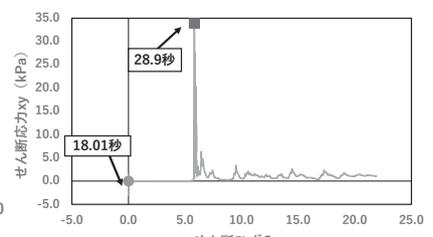


(b) ケース D

図-14 有効応力経路の比較



(a) ケース A



(b) ケース D

図-15 せん断応力とせん断ひずみの関係図

たことの悪影響があったと思われる。

次に、変形の大きなケース A とケース D を対象として、地表面の流動速度、シルト層直下の要素 (-2.7m~3.7m の要素) の過剰間隙水圧の時刻歴、有効応力経路、応力ひずみ関係を確認した。

4.3 地表面の流動速度

図-12 に地表面における水平方向の流動速度の時刻歴を示す。ケース A は地震開始約 18 秒後から流動速度が上昇し、地震開始 50 秒後には観測された流動速度に達した。それに対して、ケース D では地震開始約 18 秒後から流動速度が上昇しているが、地震開始約 30 秒後に大きな速度の低下があり、この後はほぼ一定の速度で推移している。この地震開始約 30 秒後の大きな速度低下がなければ、観測された大規模流動を良好に再現できた可能性が高い。

4.4 過剰間隙水圧

図-13 に過剰間隙水圧の時刻歴を示す。ケース A とケース D ともに入力地震動の振幅が大きくなる地震開始約 18 秒後から過剰間隙水圧が上昇している。この後、ケース A では過剰間隙水圧はほぼ一定の値で推移している。しかし、ケース D では地震開始 18 秒後以降も間隙水圧の減少が時折みられる。これは要素変形に伴うサイクリックモビリティが発生したためだと考えられる。特に速度が大きく低下した地震開始後約 30 秒後に大幅な間隙水圧の減少が生じている。

4.5 有効応力経路

図-14 に水膜の形成が推測された要素 (-2.7m~3.7m の要素) の有効応力経路を示す。ケース A とケース D 共に地震開始約 18.01 秒後から平均有効応力が減少し、その後は破壊線に沿って推移している。ケース A では平均有

効応力の回復がほとんど見られないのに対して、ケース D では、平均有効応力の回復が時折みられる。これはサイクリックモビリティによる剛性の回復が発生したと考えられる。

4.6 せん断応力とせん断ひずみの関係図

図-15 にケース A とケース D で水膜の形成が示唆された要素 (-2.7m~3.7m の要素) のせん断応力とせん断ひずみの関係を示す。両ケース共にせん断応力が小さい値でせん断ひずみが急増していることが分かる。つまり、せん断応力(せん断強度)を小さな値に維持させることが、大規模流動を再現するための必要条件であることを示していると考えられる。また、水の流入により、終局時のせん断強度が小さな地盤と同様の応力状態を生じさせることが可能であることも示唆している。ただし、ケース D ではせん断応力の増加が時折みられる。これはサイクリックモビリティによる剛性の回復であり、図-12 に示した流動速度の低下のタイミングと一致していることから、流動にブレーキをかける効果があると考えられる。そして、この違いがケース A とケース D の変形量の違いに繋がったと考えられる。なお、要素レベルでのせん断ひずみはケース D の方が大きい値である。一方、地盤モデル全体の水平変位はケース A の方がケース D に比べて大きい。これはシルト層直下の要素以外の要素の挙動の評価も流動量の評価には重要である可能性を示しており、この検討は今後の課題である。

5. 結論

本稿では、2018 年のインドネシア地震の際に Jono-Oge 地区で発生した液状化による地すべり再現解析を行った。この結果以下の点が明らかになった。

- (1) 地盤が終局時のせん断強度の小さな特殊な地盤であれば水を流入しなくても観測されたような液状化による大規模地すべりを再現できることが分かった。
- (2) 水の流入を行うと、一般的に想定される地盤条件であっても、地盤の流動量を増加させる効果があることが分かった。
- (3) 砂層とシルト層の透水係数を変えることでシルト層直下の要素では、せん断変形が大きくなることが分かった。これは水膜現象の発生に対応するものと考えられる。
- (4) サイクリックモビリティによる剛性の回復が発生すると、流動にブレーキがかかるため、観測されたレベルの大規模流動には至らないことが分かった。

今後は、メッシュサイズや解析時間ステップによって解析結果にどのような影響が生じるかを、再現解析の妥当性と評価するために検討していく必要がある。

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。また、関西大学院社会安全研究科 PDM コースの Karina A, Sujatmiko 氏には貴重な情報とご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 一井康二, 佐藤幸博, 井合進, 劉漢龍: 重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価, 地震工学研究発表会講演論文集, 25 巻, pp.973-976, 1999.
- 2) 秦吉弥, 一井康二: 降雨の影響を考慮可能な盛土斜面の動的解析, 日本地すべり学会誌, 48 巻, 4 号, pp.187-197, 2011.
- 3) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和: 高盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, 9 巻, 4 号, pp.747-759, 2014.
- 4) (財) 沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FILP による動的解析の実務【事例編】, 2013. <https://www.flip.or.jp/file/jirei.pdf> (最終確認: 2022 年 6 月 8 日)
- 5) 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).
- 6) 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: 2021 年 2 月 14 日).
- 7) 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.
- 8) Karina A, Sujatmiko, Koji Ichii.: Velocity of liquefaction induced landslide in Jono-Oge triggered by 7.5 Mw Palu earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, vol.77, No.4, pp. 436-445, 2021.
- 9) 独立行政法人国際協力機構, <https://www.jica.go.jp/index.html>, (最終確認: 2022 年 1 月 13 日).
- 10) Footage shows Indonesian earthquake causing soil liquefaction, <https://www.youtube.com/watch?v=c4sZlz8GuMI>, (最終閲覧日: 2022 年 1 月 13 日).
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) (財) 沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FILP 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: 2022 年 6 月 8 日)
- 14) Towhata, I. and Ishihara, K.: Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, pp.73-84, 1985.
- 15) 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.
- 16) Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Zhu, J. Z.: *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Six edition*, Elsevir, 2000.
- 17) Ozutsumi, O., Iai, S.: Adjustment method of the hysteresis damping for multiple shear spring model. *Proc 4th International Confrence on Recent Advances in Gotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No.1, 68, pp.1-6, 2001.
- 18) 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.
- 19) 港湾空港技術研究所: 液状化による構造被害予測プログラム FLIP において必要なパラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, pp.13-14, 1997.

(2022 年 6 月 8 日 受付)

