

2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土の不飽和液状化試験の数値解析

松丸 貴樹¹・海野 寿康²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: matsumaru.takaki.35@rtri.or.jp

²正会員 宇都宮大学 地域デザイン科学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: unno@cc.utsunomiya-u.ac.jp

本論文では、2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土 (Spfa-1 および En-a) を用いて実施された不飽和液状化試験 (繰返し三軸試験) を対象として、数値シミュレーションによる再現を試みた。三相系多孔質体理論に基づいた解析手法により、飽和土の構成式をそのまま不飽和状態で解析に活用すると液状化強度を過小に評価することを確認した。そこで、不飽和液状化試験で特徴的な間隙比の変化に着目し、ダイレイタンス挙動を間隙比変化に応じて変化させる発展則を導入した。提案手法を用いた解析を行ったところ、両火山灰質土の実験挙動を良好に再現できることを確認した。

Key Words: volcanic soil, liquefaction, unsaturated soil, numerical simulation

1. はじめに

2018年北海道胆振東部地震では、山間部における斜面崩壊が多く発生した¹⁾。特に、勇払郡厚真町を中心とした地域では、全体の約9割の災害が集中しており、火山灰質土から成る地盤が、表層崩壊や土砂が泥流状に崩壊する流動性崩壊などの多くの地盤災害が発生した。この地盤災害を受け、崩壊した土砂の性状や力学特性の把握が精力的に行われている。

本地震以外においても、近年の地震災害では、火山地域での火山灰質土からなる斜面や土構造物の地震被害が数多く報告されている²⁾。例えば、2003年三陸南地震においては、宮城県築館町の火山灰質砂質土から構成される緩斜面が崩壊し、土砂が泥流上に流出する現象が生じている³⁾。また、2003年十勝沖地震においても、北海道旧端野町において火山灰質土から成る盛土が流動破壊する現象が生じている⁴⁾。2016年熊本地震においても、多くの火山灰質土の地盤災害が報告されている。鉄道や道路等の線状構造物には火山灰質土から成る自然斜面・土構造物が多く存在し、今後も類似の災害が発生することに対して現象の解明、対策工の検討等が急務となっている。

我が国は、第四紀以降の活発な火山活動に起因して火山噴出物が堆積しているが、地盤材料として火山灰質土

は火山灰質砂質土・火山灰質粘性土という名称で特殊土に区分されている⁵⁾。火山灰質砂質土については、近年の地盤災害を受けて液状化に関する研究が精力的に進められており、特に飽和状態での繰返し非排水三軸試験 (液状化試験) が系統的に実施されており、一般の砂質土との違いが示されている^{6,7)}。

ところが、上述の地盤災害においては地下水位以下の地盤だけでなく、地下水位より上方の不飽和領域でも液状化が生じているものと考えられている。例えば、風間ら⁸⁾は宮城県築館町の災害事例⁹⁾を対象に、火山灰質土の不飽和繰返し三軸試験を行い、飽和度が70%程度の不飽和状態であっても液状化が生じる可能性があることを示している。また、海野ら¹⁰⁾はこの不飽和繰返し三軸試験を対象とした数値解析を行い、不飽和状態で液状化が生じることを解析的に示している。2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土についても、不飽和状態での液状化試験から液状化発生の可能性が示唆されている¹¹⁾。しかしながら、これを裏付ける数値解析的なアプローチはなされていない。

そこで、本研究では2018年度の北海道胆振東部地震で被災した火山灰質土の不飽和液状化試験を対象に、数値解析による再現を試みた。数値解析は、飽和土を対象とした構成式を用いて行った上で、実験結果の再現性を踏まえて不飽和液状化試験で見られる体積変化に起因し

た間隙比の変化に着目し、構成モデルの改良を行い、数値解析の精度向上を試みた。

2. 数値解析手法

本研究では、土骨格と間隙水および間隙空気から成る三相系の不飽和多孔質体を想定し、土骨格の変位 \mathbf{u}^s 、間隙水圧 p^w および間隙空気圧 p^a を未知数とする基礎式（混合体のつりあい式と間隙水・間隙空気の連続式）¹²⁾を用いた。ただし、不飽和繰返し三軸試験のシミュレーションでは有限要素法等に基づく境界値問題としての扱いは行わず、非排気・非排水条件より供試体内の諸量の分布は一様と仮定した次式に示す局所形の方程式を用いる¹⁰⁾。

$$\begin{bmatrix} ns^w/K^w - nc & nc & 2s^w & 0 \\ nc & ns^a/K^w - nc & 2s^a & 0 \\ s^w - cp^w + cp^a & s^w + cp^w - cp^a & -D_{11} - D_{12} & 0 \\ s^w - cp^w + cp^a & s^w + cp^w - cp^a & -D_{31} - D_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}^w \\ \dot{p}^a \\ \dot{\varepsilon}_x \\ \dot{\varepsilon}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s^w \dot{\varepsilon}_z \\ -s^a \dot{\varepsilon}_z \\ D_{13} \dot{\varepsilon}_z \\ D_{33} \dot{\varepsilon}_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 n は間隙率、 s^w は間隙に対する水の体積比（飽和度）、 s^a は間隙に対する空気の体積比、 K^w は間隙水の体積弾性係数、 c は比水分容量、 D_{ij} は弾塑性マトリックスの成分である。入力を軸ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_z$ とすることで、側方ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_x$ （ $=\Delta \varepsilon_y$ ）、鉛直応力増分 $\Delta \sigma_z$ 、間隙水圧増分 Δp_w 、間隙空気増分 Δp_a を求めることができる。

土骨格の構成式には簡易な繰返し弾塑性構成式を用いた。具体的には、せん断による降伏を考慮した相当応力比一定型の降伏関数、非線形移動硬化則¹⁴⁾、非関連流動則、Cam-Clay型の塑性ポテンシャル関数を用いた。それぞれについて、式(2)~(5)で記述される。

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\boldsymbol{\eta} - \mathbf{a}\| - k = 0 \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{a}} = a \left(\frac{2}{3} b \dot{\mathbf{e}}^p - \mathbf{a} \dot{\varepsilon}_d^p \right) \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{e}}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial g}{\partial \mathbf{s}} \quad \dot{\varepsilon}_d^p = D \dot{\gamma} \frac{\partial g}{\partial p'} \quad (4)$$

$$g = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\boldsymbol{\eta} - \mathbf{a}\| + M_m \ln \left(\frac{p'}{p'_a} \right) \quad (5)$$

ここに、 p' は平均有効応力、 \mathbf{s} は偏差応力テンソル、 $\boldsymbol{\eta}$ は応力比テンソル、 \mathbf{a} は背応力、 \mathbf{e}^p は塑性偏差ひずみテン

ソル、 ε^p 塑性体積ひずみ、 ε^p は塑性相当ひずみである。また、(2)式中の k は弾性域の大きさを表し、(3)中の $a \cdot b$ は材料定数、(4)式中の D はダイレイタンス係数、(5)式中の M_m は変相応力比、 p'_a は $\|\boldsymbol{\eta} - \mathbf{a}\| = 0$ となる時の p' の値である。

この構成式を基に、繰返し載荷ごとでリセットされる塑性相当ひずみに応じて次式に示す形で塑性剛性の低減を行っている、液状化時のような大きなひずみの発現を記述できるようにしている¹⁵⁾。

$$a = a_0 - \frac{(a_0 - a_1)}{1 + (a_0 - a_1) \exp(-C_f \varepsilon_d^{p(n)})} \quad (6)$$

ここに、 a_0 は a の初期値、 a_1 は a の下限値であり、 C_f は材料定数である。

水分特性曲線にはvan Genuchten (VG) モデル¹⁶⁾を用いることとする。ただし、一般にサクシオンと飽和度の関係は、主脱水曲線と主吸水曲線に囲まれた領域に位置するが、液状化のように載荷によって有効応力が減少する場合には、サクシオンが低下し飽和度が上昇するとともに、主吸水曲線に近づく挙動を示すと考えられる。このため、本研究では水分特性曲線は主吸水曲線を設定した後、現在の飽和度とサクシオンが繰返し載荷を受けることで現在の状態から主吸水曲線を指向する走査曲線上を動くものとした。走査曲線にはZhouら¹⁷⁾の手法を使って次式のように、主吸水曲線の形状に基づき記述するものとする。

$$\frac{\partial s_{es}^w}{\partial p^c} = \left(\frac{p_w^c}{p^c} \right)^{b^{wa}} \frac{\partial s_e^w}{\partial p^c} \quad (7)$$

ここに、 p_w^c は現在の有効飽和度 s_e に対する主吸水曲線上でのサクシオンの値、 b^{wa} は水分特性曲線の形状を設定するパラメータであり、大きな値を設定すると速やかにサクシオンが低下し走査曲線に摺りつく形状の曲線となる。つまり、本パラメータの設定によって繰返し載荷に伴うサクシオンの低下量を制御することができる¹⁵⁾。

3. 解析対象とした実験の概要

解析対象とした実験は、緑川ら¹¹⁾が実施した、2018年北海道胆振東部地震で多くの被害を受けた、火山灰質土の不飽和繰返し三軸試験である。試料となる火山灰質土は、厚真町で斜面崩壊を生じた箇所近傍で採取された、支笏湖降下軽石（以下では、Spfa-1と記す）および

表-1 解析対象とした不飽和三軸試験の条件

Sample	Case No.	Dry density [g/cm ³]	Void ratio	Degree of saturation [%]	Loading condition
Spfa-1	B-P-4	0.507	3.50	72.6	Stress control
	B-P-6	0.495	3.62	81.9	Stress control
		0.541	2.85	86.6	Strain control
En-a	A-P-1	1.332	1.13	65.8	Stress control
	A-P-7	1.326	1.13	81.7	Stress control
		1.219	1.32	80.1	Strain control

※Case No.は文献(11)に記載されているものを表す。

恵庭降下軽石（以下では、En-aと記す）である。

不飽和繰返し三軸試験は、両材料に対して繰返し載荷前の飽和度・サクシオンを変えて複数ケース実施されている。繰返し載荷前の基底応力は概ね 20kPa となっている。繰返し載荷は応力振幅一定の応力制御条件、および軸ひずみ振幅を 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 および 2.0%と漸増させるひずみ制御条件での載荷が行われているが、本研究では両試料に対して初期の飽和度・サクシオンの大きさが異なる 2 ケースの応力制御条件での載荷を解析対象とすることとした。解析対象とした不飽和三軸試験の条件を表-1 に示す。

実験結果については、次章以降で解析結果と共に示す。

表-2 Spfa-1 の解析で用いたモデルパラメータ

水分特性曲線に関するパラメータ	
最大飽和度・残留飽和度, s_s^w, s_r^w	0.99, 0.22
走査曲線のパラメータ, b	2.0
主吸水曲線, α, m, n	2.0, 1.4, 3.0
土骨格の構成式に関するパラメータ	
無次元体積弾性係数, K^*	500.0
無次元せん断弾性係数, G^*	300.0
移動硬化パラメータ, a_0, a_1	300.0, 50.0
移動硬化パラメータ, b	1.2, 1.0
限界状態の応力比, M_m	1.2, 1.0
ダイレイタンスー係数, D	0.2
弾性域の大きさ, k	0.01
間隙水・空気に関するパラメータ	
間隙水の実質密度, $\rho^{wR}(t/m^3)$	1.0
間隙空気の実質密度, $\rho^{aR}(t/m^3)$	1.23×10^3
間隙水の体積弾性係数, $K^w(kN/m^2)$	1.0×10^6
気体定数, $M^a(\text{OR})(m/s)$	1.21×10^5

4. Spfa-1 を対象とした解析

(1) 解析条件

解析に用いたモデルパラメータの一覧を表-1 に示す。

土骨格の構成モデルに関するパラメータについては、無次元化せん断弾性係数や限界状態の応力比は、飽和土を対象とした三軸試験をもとに設定した。移動硬化パラメータ $a_0 \cdot a_1$ 、ダイレイタンスー係数 D 、弾性域の大きさ k については構成式が飽和状態での繰返し三軸試験の応力～ひずみ関係や有効応力経路を再現できるように設定した。

水分特性曲線に関するパラメータについては、保水性試験の吸水過程を再現できるように van Genuchten モデルの基本パラメータを設定した。走査曲線の形状を決定するパラメータ b は不飽和繰返し三軸試験での挙動を再現性に基いて設定した。

式(1)に示すように、本数値解析手法では軸ひずみ増分を与えることで、各諸量を求める形となっている。そこで、応力制御・ひずみ制御いずれの解析条件においても、1 ステップの載荷で $5.0 \times 10^3\%$ のひずみ増分を与えることとし、応力制御条件下では求められた軸差応力の大きさを基に、ひずみの載荷方向を反転させることとした。また、応力制御条件での解析では、実験時と同様に

両振幅軸ひずみが 10%に到達する段階まで解析を行った。なお、本解析では飽和状態での解析についても式(1)の支配方程式を用いることとし、その際の飽和度・サクシオンは極めて小さな値を付与することとした。

(2) 解析結果および考察

まず、実験結果として、飽和状態での繰返し三軸試験（応力制御条件）、および不飽和状態での繰返し三軸試験（応力制御条件・ひずみ制御条件）を図-1 に示す。図中には、応力～ひずみ関係（軸ひずみ～軸差応力関係）、応力経路図（平均骨格応力～軸差応力関係）および繰返し回数～平均骨格応力減少比関係（Mean Skeleton Stress Reduction Ratio: MSSRR）を示している。

飽和状態の載荷では、ごくわずかな繰返し回数で平均骨格応力が減少し、変相線に到達すると軸ひずみが急増する挙動を示し、平均骨格応力減少比が 1 となって液状化状態に至っていることがわかる。これに対して、同じ応力制御条件での載荷では、飽和度が小さくなるほど骨格応力の低下が遅くなっている。軸ひずみも変相線到達

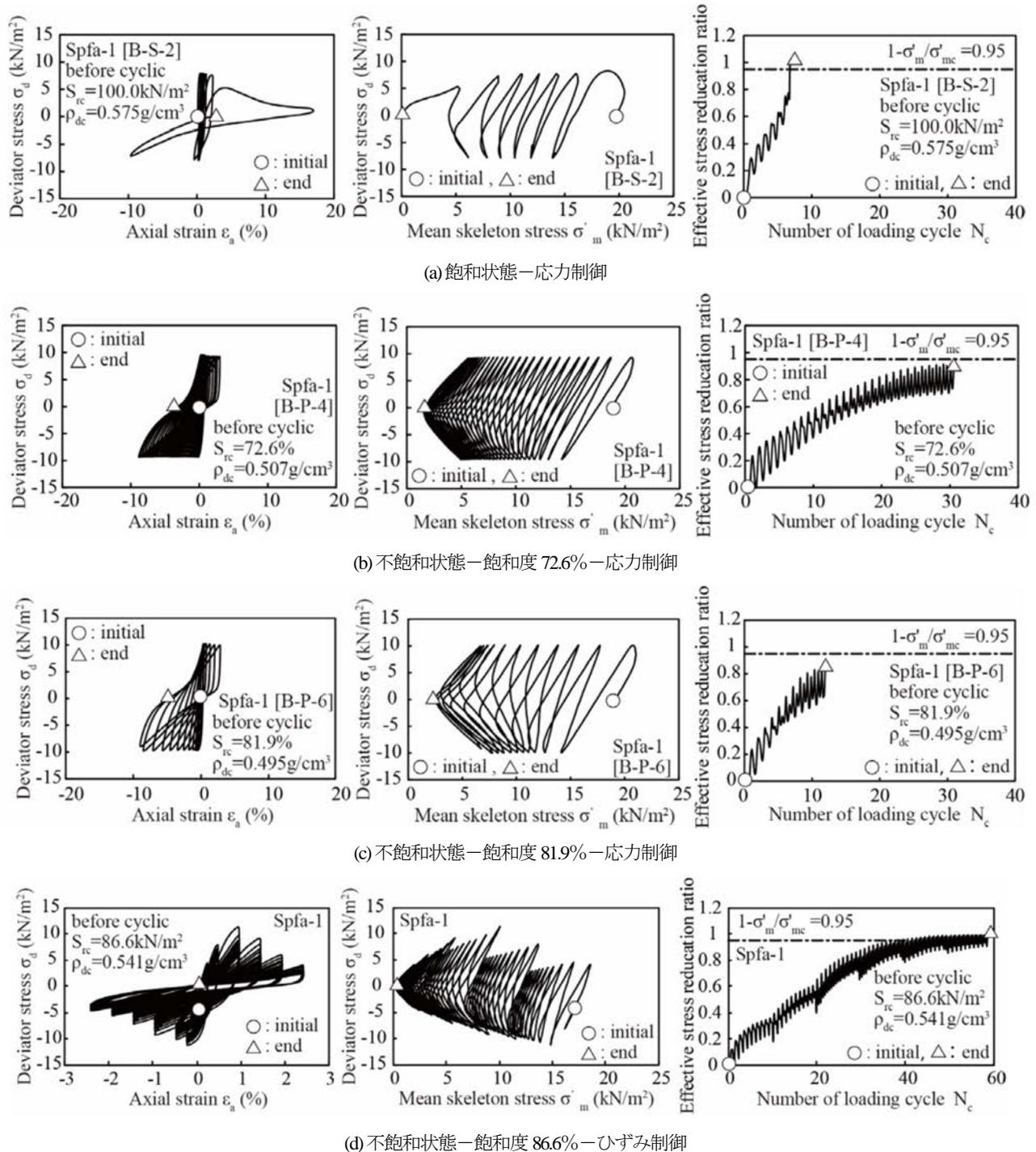
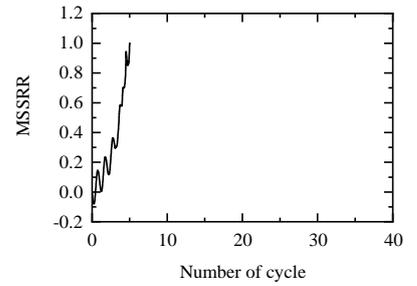
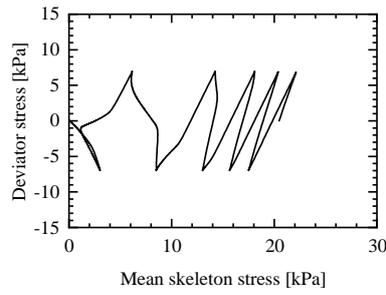
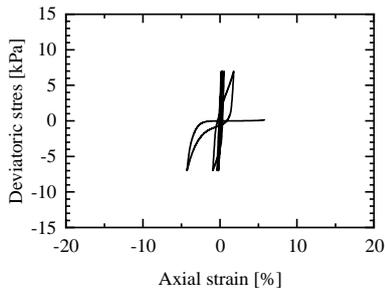


図-1 Spfa-1の実験結果 (左：応力-ひずみ関係, 中央：応力経路図, 右：繰返し回数～平均骨格応力減少比)¹¹⁾

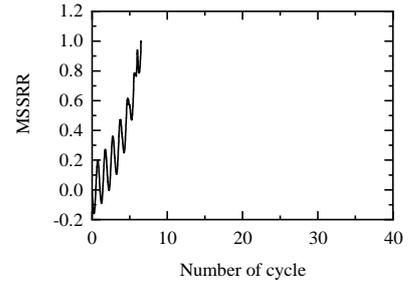
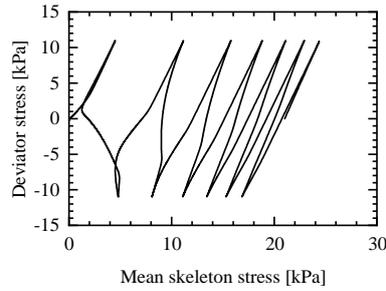
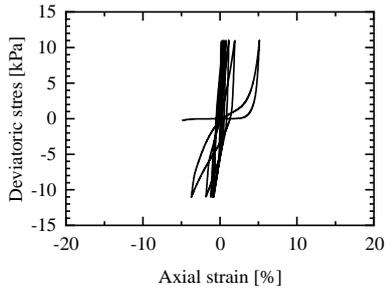
後も急激に増加することはない、ひずみが引張側へ蓄積される挙動を示しており、両振幅 10%に到達する時点でも数 kPa の軸差応力が残存しており、平均骨格応力減少比が 1 に到達するようなことはなかった。応力経路図は飽和状態のものとは比べ、圧縮側の荷重時に平均骨格応力が増加し、引張側の荷重時に減少する傾向が強くなる。また、荷重の進行とともに平均骨格応力の減少が緩慢化していくことが確認された。そのため、繰返し荷重の進行とともに、平均骨格応力減少比の上昇も緩慢化していく挙動を示していた。

また、ひずみ制御条件での荷重では、軸ひずみ 0.8% の荷重までは発揮される軸差応力が増加を示すが、1.2% 以降の荷重では減少する挙動を示し、軸ひずみ 1.6% の荷重時に平均骨格応力減少比が 1 となり液状化状態に至っているものと考えられる。

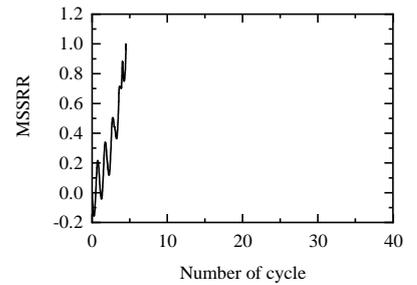
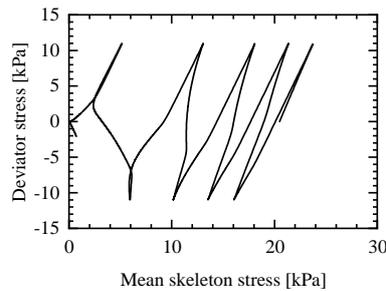
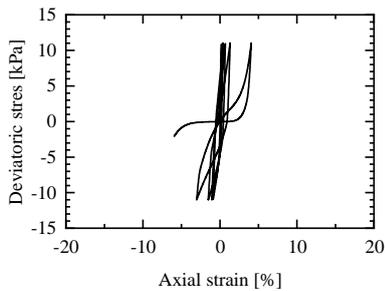
この実験挙動の解析結果を図-2 に示す。飽和状態での繰返し荷重については、実験と同様に荷重の進行と共に平均骨格応力が減少し、変相線到達後に軸ひずみが急増し、最終的には荷重開始後数回の繰返し回数で平均骨格応力減少比が 1 となることで液状化状態に至っている



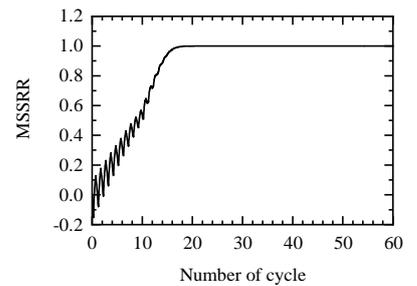
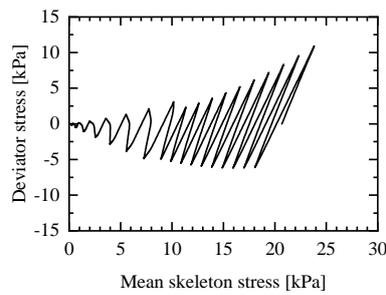
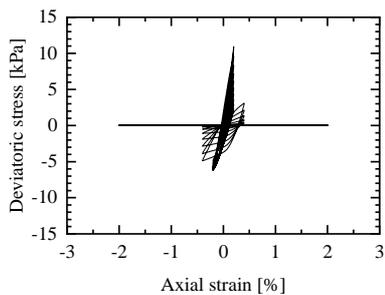
(a) 飽和状態—応力制御



(b) 不飽和状態—飽和度 72.6%—応力制御



(c) 不飽和状態—飽和度 81.9%—応力制御



(d) 不飽和状態—飽和度 86.6%—ひずみ制御

図-2 Spfa-1の解析結果 (左: 応力-ひずみ関係, 中央: 応力経路図, 右: 繰返し回数~平均骨格応力減少比)

ことが確認でき、概ね実験挙動を再現できていると言える。ところが、不飽和状態での載荷（応力制御）についても飽和状態での載荷と類似の挙動を示しており、載荷終了時の繰返し回数は実験と比較すると随分小さいものとなっている。特に、本解析では繰返し載荷の進行とともに平均骨格応力の減少が増加しており、また両振幅軸ひずみが 10%に到達するまでに平均骨格応力減少比が 1 に到達しており、平均骨格応力が残存する挙動を再現できていない。また、軸ひずみも飽和時の載荷と同様に変

相線到達後に急増しており、引張側に漸増していく挙動を再現できていない。

不飽和状態でのひずみ制御の載荷についても、実験と比較して少ない繰返し回数で平均骨格応力減少比が 1 に到達している。特に、載荷後半で平均骨格応力の減少が著しく、また発揮される軸差応力も実験と比較して小さいことがわかる。

5. 間隙比の変化を考慮した構成式の導入

(1) 導入した構成式

前章に示した解析結果から、特に繰返し载荷の後半において解析結果では平均骨格応力の減少が著しく、軸ひずみが急増する挙動が見られた。不飽和土の液状化試験では、飽和土の試験に準じて非排気・非排水状態で実施されるが、間隙空気が圧縮性を有するため、体積圧縮が生じる。つまり繰返し载荷中に間隙比が変化することとなる。このことに着目し、本研究では間隙比変化の影響を構成式で採り入れることとする。

松丸・渦岡¹⁹⁾は、構成式の塑性剛性に関係する移動硬化パラメータ a_0 に対して間隙比の変化の影響を考慮する手法を導入している。具体的には、移動硬化パラメータ a_0 を、次式で示すように間隙比の変化を考慮した a_0^* として記述することとしている。

$$a_0^* = \frac{a_0}{(e/e_0)^{\psi^m}} \quad (8)$$

ここに、 ψ^m はモデルパラメータである。本パラメータの設定により、特に繰返し载荷後半で間隙比が変化した際のせん断応力の大きさを調整することができる。

また、本論文では更に、実験挙動で確認された平均骨格応力の減少が繰返し载荷の後半で緩慢化している挙動に着目し、ダイレイタンシー量についても間隙比の大きさに基づいて、次式のように低減していくことを提案する。

$$D^* = D \cdot (e/e_0)^{\psi^d} \quad (9)$$

ここに、 ψ^d はモデルパラメータである。本パラメータの設定により、特に繰返し载荷後半でのダイレイタンシー量を調整することが可能である。

なお、松丸・渦岡¹⁹⁾はサクシヨンの大きさに応じてダイレイタンシー係数を調整する手法を導入している。この手法では、特に繰返し载荷の初期のダイレイタンシー係数が小さいため、载荷初期における平均骨格応力の減少を抑制する効果を有するが、载荷の進行と共にサクシヨンが低下するため、载荷後半ではダイレイタンシー係数の値が大きくなることとなる。本提案手法で導入する効果はこの手法と根本的には同様であるが、载荷後半で徐々に効果が発揮される点が異なっている。

(2) 導入手法を用いた Spfa-1 の解析結果および考察

上述の解析手法を用いて、Spfa-1 の解析を再度実施した。設定したパラメータは、表-2 のモデルパラメータは変更することなく用い、新たに導入したモデルに関するパラメータは、 $\psi^m=20$ 、 $\psi^d=60$ とした。

得られた解析結果を図-3 に示す。飽和三軸試験を対象とした解析では、間隙比の変化はわずかであるため、解析で得られた挙動は図-2 のものとほとんど変わらない。ところが、不飽和状態を対象とした繰返し载荷では、繰返し载荷の進行に伴って平均骨格応力の減少が緩慢化していく挙動を再現できており、これに伴って生じる軸ひずみも変相線到達以降に急増することなく、主として引張側に蓄積する挙動を示している。また、繰返し载荷の進行とともに平均骨格応力減少比の増加も緩慢化していき、両振幅軸ひずみ 10%到達時においても平均骨格応力減少比は 1 とはならず、数 kPa の骨格応力が残存している。

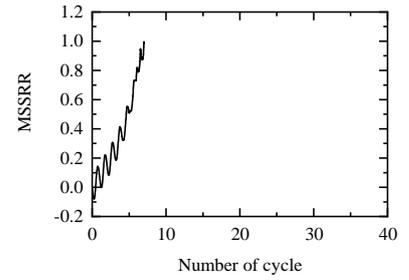
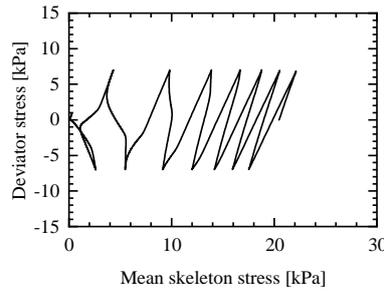
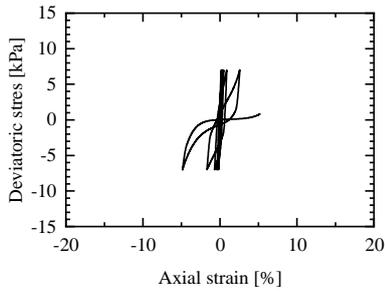
また、ひずみ制御での繰返し载荷では、平均骨格応力減少比が 1 となる回数が提案したモデルの導入前と比べて遅くなっており、繰返し载荷後半で発揮される軸差応力も大きくなっている。実験と比較すると液状化に至る回数はやや少ないものの、実験挙動の再現性が改善されている。

以上の解析から、提案モデルを導入することで不飽和状態の繰返し载荷挙動を良好に再現できることを確認できた。

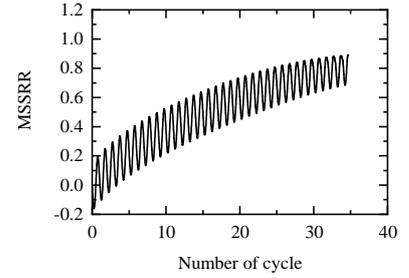
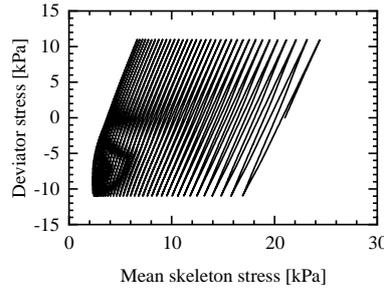
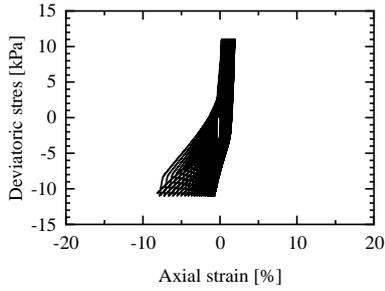
6. En-a を対象とした解析

同様の手法を用いて、En-a を対象とした解析を行う。設定したモデルパラメータを表-3 に示す。土骨格の構成式、水分特性曲線のモデルパラメータ共に、Spfa-1 の解析と同じ方法で設定を行った。なお、後述する実験挙動を踏まえ、間隙比に関するパラメータは、塑性剛性に係る ψ^m は Spfa-1 よりも小さく設定し、一方で ψ^d は大きな値を設定しており、間隙変化の影響がダイレイタンシー特性により大きく表れるパラメータの設定とした。

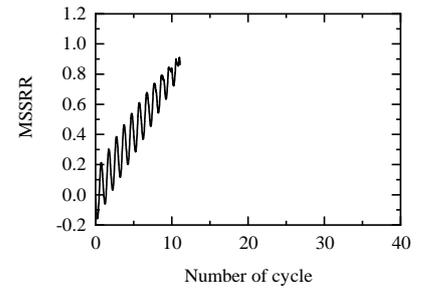
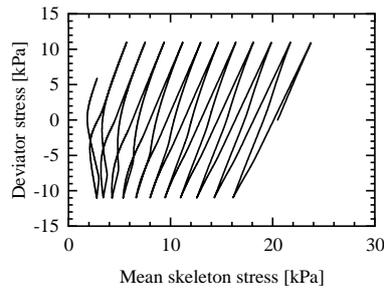
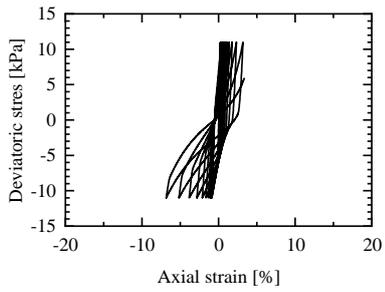
図-4 に不飽和状態での繰返し载荷に関する実験結果を示す。ひずみ制御・応力制御いずれの载荷においても、図-1 に示した Spfa-1 と類似の挙動を示していたが、繰返し载荷初期の段階での平均骨格応力の減少比が著しく、一方で繰返し载荷後半での低下の緩慢化もより大きく発揮されている。このため、繰返し回数～平均骨格応力減少比関係に着目すると、载荷初期の段階での平均骨格応力減少比の上昇が著しく、逆に载荷後半ではほとんど上昇しない挙動となっていた。Spfa-1 の解析結果を踏まえると、導入した構成モデルを用いないと、実験挙動の再現が難しくなることが示唆される。



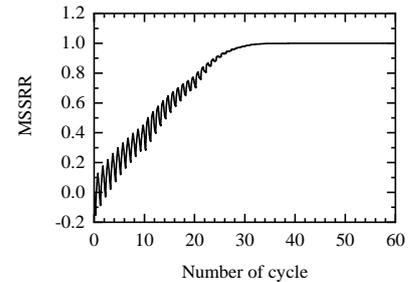
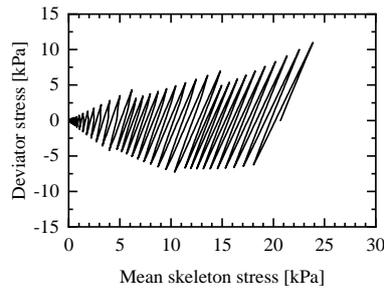
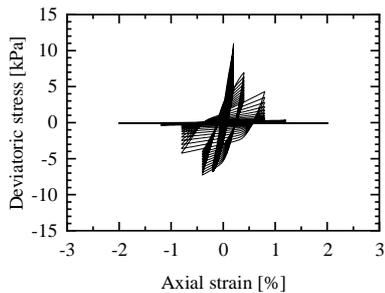
(a) 飽和状態—応力制御



(b) 不飽和状態—飽和度 72.6%—応力制御



(c) 不飽和状態—飽和度 81.9%—応力制御



(d) 不飽和状態—飽和度 80.6%—応力制御

図-3 Spfa-1 の解析結果 (左: 応力—ひずみ関係, 中央: 応力経路図, 右: 繰返し回数～平均骨格応力減少比)

導入した手法を用いて解析を行った結果を図-5 に示す。解析では、繰返し载荷初期の大きな平均骨格応力の減少を表現できており、繰返し载荷開始後数回の载荷で平均骨格応力減少比が大きく増加している点は実験を再現できており、Spfa-1 よりも载荷初期に大きく平均骨格応力が減少する挙動となっている。また、応力制御の载荷では軸ひずみが引張側に蓄積されることや、両振幅軸ひずみが 10%に到達した際に平均骨格応力が残存して

いる点でも実験と整合している。しかしながら、繰返し载荷後半では実験ほど応力の低下が抑制されていない状況となっている。また、ひずみ制御の载荷では、実験よりも平均骨格応力の減少が早くなっている。この挙動は、例えばパラメータ ψ^d をより大きく設定することで表現できることを確認しているが、一方で応力制御での载荷時に両振幅軸ひずみが 10%に到達する繰返し回数は実験よりも早くなるなど、実験での再現性が低下してしま

うことを確認しており、液状化に至る繰返し回数や平均骨格応力の低下、ひずみの増加など様々な挙動を再現できるよう、パラメータセットの検討やモデルの更なる改良について検討する必要がある。

7. まとめ

本論文では、2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土の不飽和液状化挙動を数値モデルで再現することを目的として、Spfa-1およびEn-aを対象とした液状化試験の再現を試みた。解析では、載荷条件や初期状態の異なる複数の試験に対する再現性を確認した。また、飽和土を対象とした構成モデルによる不飽和繰返し載荷試験の再現性を踏まえ、不飽和土の液状化試験で特徴的な間隙比の変化に着目した構成モデルを導入するとともに、実験挙動の再現を再度試みた。その結果、以下の知見が得られた。

1) Spfa-1 を対象として、飽和状態での載荷を再現でき

表-2 Spfa-1の解析で用いたモデルパラメータ

水分特性曲線に関するパラメータ	
最大飽和度・残留飽和度, s_s^w, s_r^w	0.99, 0.10
走査曲線のパラメータ, b	2.0
主吸水曲線, a, m, n	2.0, 1.4, 3.0
土骨格の構成式に関するパラメータ	
無次元体積弾性係数, K^*	500.0
無次元せん断弾性係数, G^*	300.0
移動硬化パラメータ, a_0, a_1	300.0, 50.0
移動硬化パラメータ, b	1.2, 1.0
限界状態の応力比, M_m	1.2, 1.0
ダイレイタンシー係数, D	1.2
弾性域の大きさ, k	0.1
間隙比に関するパラメータ, ψ^a, ψ^d	
間隙比に関するパラメータ, ψ^a, ψ^d	10.0, 200.0
間隙水・空気に関するパラメータ	
間隙水の実質密度, $\rho^{wR}(t/m^3)$	1.0
間隙空気の実質密度, $\rho^{aR}(t/m^3)$	1.23×10^{-3}
間隙水の体積弾性係数, $K^w(kN/m^2)$	1.0×10^6
気体定数, $M^a(OR)(m/s)$	1.21×10^5

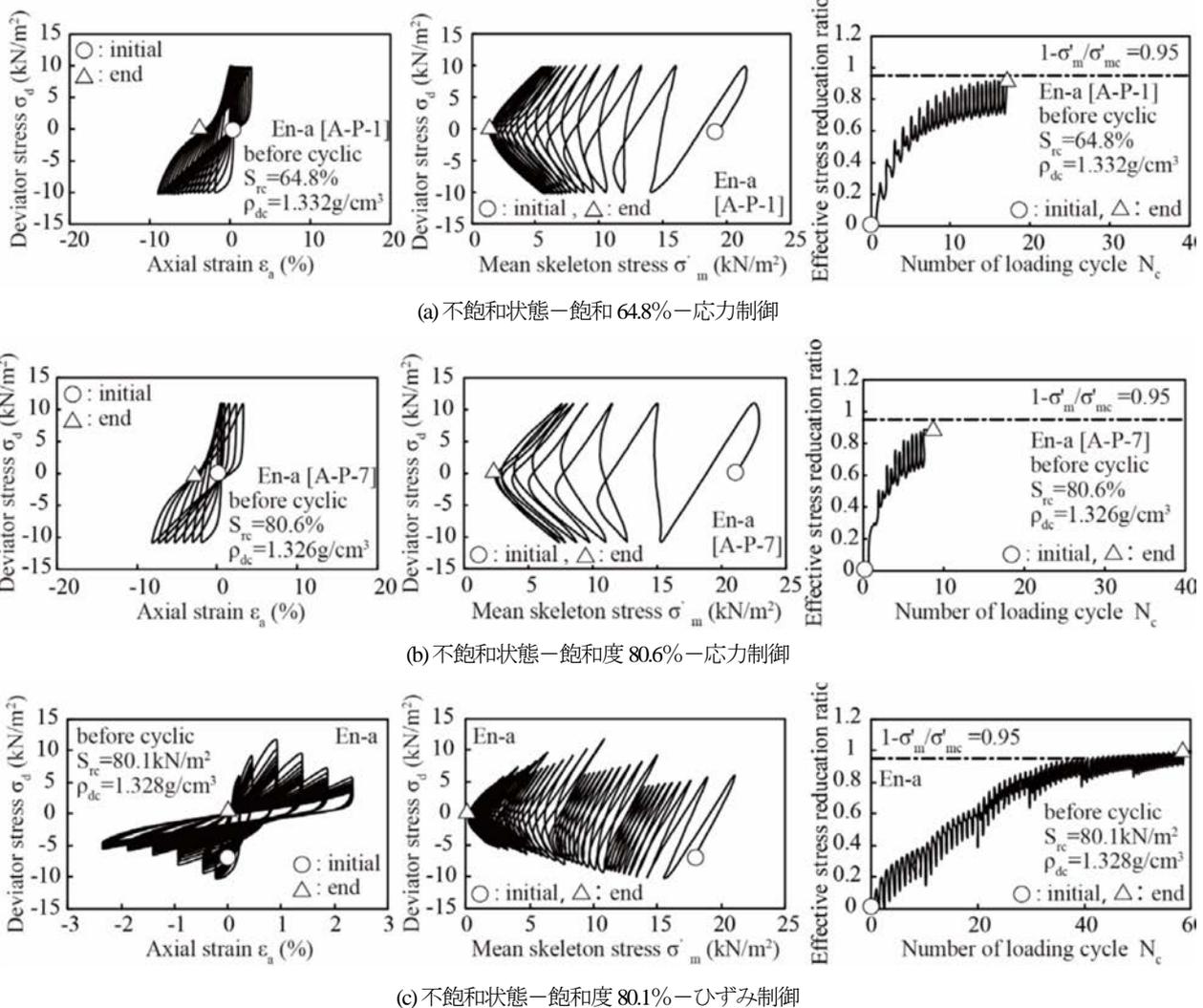
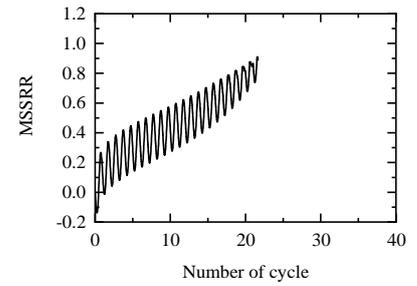
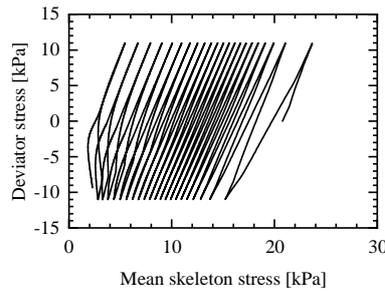
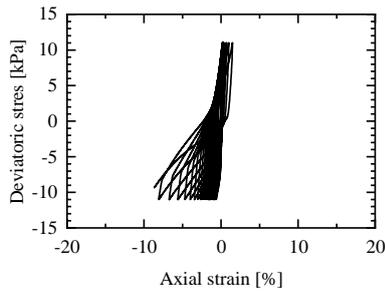
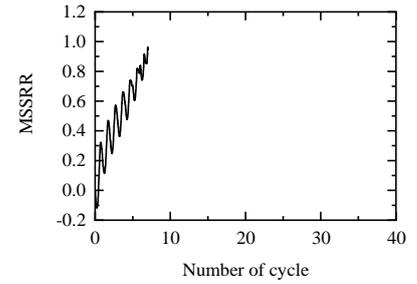
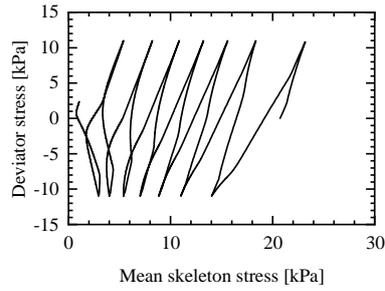
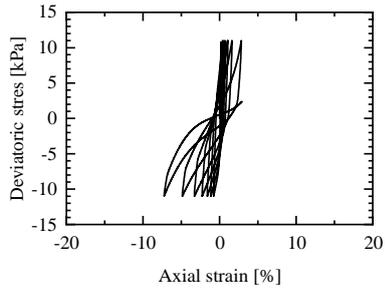


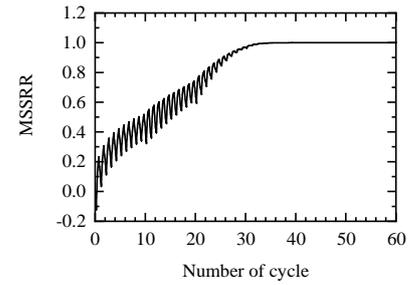
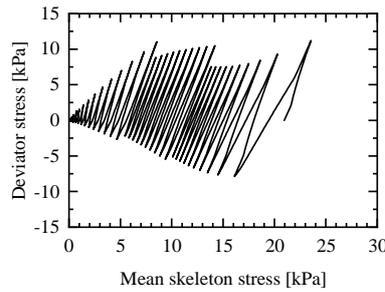
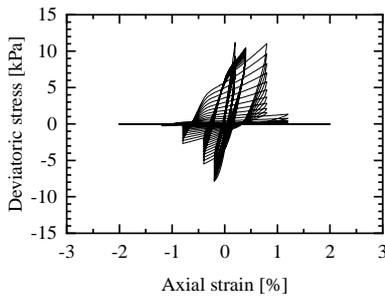
図4 En-aの実験結果 (左：応力—ひずみ関係, 中央：応力経路図, 右：繰返し回数～平均骨格応力減少比) ¹⁾



(a) 不飽和状態—飽和度 64.2kPa—応力制御



(c) 不飽和状態—飽和度 80.6%—応力制御



(d) 不飽和状態—飽和度 80.1%—応力制御

図-5 En-aの解析結果 (左：応力-ひずみ関係, 中央：応力経路図, 右：繰返し回数～平均骨格応力減少比)

る状態で、不飽和繰返し載荷試験の再現を試みたところ、実験より平均骨格応力の減少が早くなり、液状化に至る回数も少なく、実験挙動を適切に再現できなかった。

- 2) 不飽和土の液状化試験で見られる間隙空気の圧縮に起因した間隙比変化の影響を、塑性剛性だけでなくダイレイタンスー特性の変化として捉える発展則を構成モデルに導入した。
- 3) 導入した解析手法を用いて Spfa-1 の解析を再度試みたところ、平均骨格骨格応力の減少過程や、ひずみの引張方向への累積性、液状化に至る繰返し回数など実験挙動を良好に再現できることを確認できた。
- 4) 同様の手法を用いて En-a の繰返し載荷試験の解析を行ったところ、Spfa-1 よりも載荷初期により平均骨格骨格応力が減少する挙動を上手く表現できた一方で、繰返し載荷後半での平均骨格骨格応力の減少の再現についてはより精度向上が必要となることが確認された。

本解析では、間隙比に関する発展則を導入したことにより、応力経路図において限界状態線を越えた応力状態が生じる場合があり、限界状態線に沿った応力挙動を表現できる必要がある。また、実際の厚真町の斜面を対象とした地盤の地震応答解析を行って、Spfa-1 や En-a を含む地盤の液状化挙動について評価を行う必要がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 18H01529 (代表：海野寿康) の各助成を受けて実施したものです。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会：平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書, 2019.
- 2) 風間基樹, 三浦清一, 八木一善, 海野寿康, 鈴木輝之, 伊藤陽司：講座 火山灰質土—その性質と設計

- 法施工-6 火山灰質地盤の被害事例, 土と基礎, Vol.54, No.2, pp.45-54, 2006.
- 3) Uzuoka, R., Sento, N., Kazama, M. and Unno, T.: Landslides during the earthquake on May 26 and July 26, 2003 in Miyagi, Japan, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp.149-163, 2005.
 - 4) 山下聡, 伊藤陽司, 村田芳信, 林宏一, 堀智仁, 鈴木輝之: 2003年十勝沖地震における北海道端野町共和地区の液状化被害調査, 第39回地盤工学研究発表会講演集, pp.1949-1950, 2004.
 - 5) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 2009.
 - 6) 高田誠, 北村良介, 北田貴光, 富山貴史: 二次しらす地盤の動力学特性と液状化ポテンシャル, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.61-69, 1999.
 - 7) 江川拓也, 山梨高裕, 富澤幸一: 火山灰質土の液状化特性に関する検討-北海道における調査事例報告-, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.1, pp.352-364, 2016.
 - 8) 吉直卓也, 海野寿康, 金澤周平: 栃木県内に分布する火山灰質土の液状化特性, 第51回地盤工学研究発表会講演集, pp.1669-1670, 2016.
 - 9) 風間基樹, 高村浩之, 海野寿康, 仙頭紀明, 渦岡良介: 不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.2, pp.541-561, 2003.
 - 10) 海野寿康, 渦岡良介, 仙頭紀明, 風間基樹: 不飽和砂質土の繰返しせん断変形解析における間隙空気圧のモデル化の影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.3, pp.386-403, 2013.
 - 11) 緑川雄介, 海野寿康, 加村晃良, 仙頭紀明, 風間基樹: 2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土の物理特性および力学特性, 土木学会論文集 A1. (掲載決定)
 - 12) Uzuoka, R. and Borja, R. I.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.36, pp.1535-1573, 2012.
 - 13) 松丸貴樹, 渦岡良介: 間隙変化を考慮した水分特性曲線と土骨格の構成式を用いた不飽和繰返し三軸試験の解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.2, pp.I 323-I 334, 2016.
 - 14) Armstrong, P.J. and Frederick. C.O.: A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, Technical report C.E.G.B.Report RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories, 1966.
 - 15) 古田竜一: 粘土及び砂からなる多層地盤の動的挙動のモデル化とその応用, 岐阜大学博士論文, 2003.
 - 16) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
 - 17) Zhou, A.Z., Sheng, D., Sloan, S.W. and Gens A.: Interpretation of unsaturated soil behavior in the stress - saturation space, I: Volume change and water retention behavior, *Computers and Geotechnics*, Vol.43, 2012.
 - 18) 松丸貴樹, 渦岡良介: 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 70, No.4, pp.395-411, 2014.

(Received Sep. 7, 2020)

NUMERICAL SIMULATION OF UNSATURATED LIQUEFACTION TEST USING VOLCANIC SOILS DAMAGED IN THE 2018 HOKKAIDO IBURI EASTERN EARTHQUAKE

Takaki MATSUMARU and Toshiyasu UNNO

In this paper, the numerical simulations were conducted in order to reproduce the tendency obtained in the unsaturated liquefaction tests (cyclic tri-axial tests) using volcanic soils (Spfa-1 and En-a) damaged in the 2018 Hokkaido Iburi eastern earthquake. In the numerical simulations, the three-phase porous media theory was applied. However, the simulated results underestimated the unsaturated liquefaction resistance in unsaturated conditions, because the constitutive models used in the simulations were developed for describing the tendency of liquefaction characteristics for saturated soils. Therefore, the evolution rules focused on the change of void ratio were proposed for modifying the dilatancy characteristic of unsaturated soils. The simulated results using proposed method could successfully reproduce the tendency obtained in the tests using both soil.