

不飽和土構造物の施工時・地震時・地震後の
空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーション
(Soil-water-air coupled finite deformation simulation of an unsaturated soil structure
during construction and during/after a seismic motion)

吉川高広¹, 野田利弘²

1 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻・yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

概 要

東日本大震災では多数の地盤や土構造物が甚大な被害を受けた。特に河川堤防や造成宅地盛土の崩壊メカニズム、浦安市の液状化メカニズムの解明に関しては、地下水位の高さや地震前・地震後の不飽和域の飽和化が重要なキーワードとして挙げられており、飽和土だけでなく不飽和土も扱える理論体系・解析が必要となっている。そこで空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを用いて、簡単な条件を想定して計算を試みた。今回は、施工段階から地震中、地震後も一貫した枠組で計算できる本解析コードの強みを生かして、不飽和盛土の築造・地震中・地震後の計算を行なった。その結果、次に示す飽和土では見られない力学挙動が確認された。(1)築造時は、載荷に伴う粘土地盤の沈下により、盛土内部に閉封飽和域が形成される。(2)地震後に、排気に伴う間隙空気圧・過剰間隙水圧の減少・消散、平均有効応力の回復が生じる。(3)(2)の盛土内の空気圧・水圧の減少・消散により、地盤から盛土内へ水が流入する。

キーワード：不飽和土，連成解析，静的／動的解析

1. はじめに

東日本大震災では多数の地盤や土構造物が甚大な被害を受けた。特に河川堤防や造成宅地盛土の崩壊メカニズム¹⁾、浦安市の液状化メカニズム²⁾の解明に当たっては地下水位の高さや地震前・地震中の不飽和域の飽和化が重要なキーワードとして挙げられており、飽和土に加えて不飽和土も扱える理論体系または解析が必要となっている。そこで、本研究では、野田ら³⁾や吉川ら⁴⁾が開発した空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを、まず不飽和から飽和までをよりシームレスに扱えるように改良を施した後、それを用いて簡単な条件を想定して数値シミュレーションを実施した。今回は、施工段階から地震中、さらには地震後も一貫した枠組で計算できる本解析コードの強みを生かして、粘土地盤上の不飽和盛土について築造過程および地震中・地震後の挙動を調べた。

2. 空気～水～土骨格連成有限変形解析手法の概要

支配方程式のうち、運動方程式、土骨格と間隙水の連成式、土骨格と間隙空気の水成式を、それぞれ式(1)、式(2)、

式(3)に示す。

$$\rho \mathbf{x}_s = \text{div } \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \quad (1)$$

$$s^w \text{div } \mathbf{v} + \text{div} \left[\frac{k^w}{\gamma_w} \{ -\text{grad } p^w + \rho^w \mathbf{b} - \rho^w (D_s \mathbf{v}_s) \} \right] + n(D_s s^w) = 0 \quad (2)$$

$$s^a \text{div } \mathbf{v} + \frac{1}{\rho^a} \text{div} \left[\rho^a \frac{k^a}{\gamma_w} \{ -\text{grad } p^a + \rho^a \mathbf{b} - \rho^a (D_s \mathbf{v}_s) \} \right] + n(D_s s^a) + \frac{n s^a}{\rho^a R \Theta} (D_s p^a) = 0 \quad (3)$$

ここで D_s は土骨格から見た物質時間微分を表す作用素であり、 $\mathbf{x}_s$ は土骨格の変位ベクトル、 $\mathbf{v}_s (= D_s \mathbf{x}_s)$ は土骨格の速度ベクトル、 $\mathbf{x}_s (= D_s \mathbf{v}_s)$ は土骨格の加速度ベクトルを表す。 $\mathbf{T}$ は全 Cauchy 応力テンソル、 $\mathbf{b}$ は物体力ベクトル、 p^w は間隙水圧、 p^a は間隙空気圧を表し、 s^w は飽和度、 s^a は空気間隙比 ($= 1 - s^w$)、 n は間隙率を表す。また、 ρ 、 ρ^w 、 ρ^a は土全体、水、空気の密度をそれぞれ表し、 γ_w は水の単位体積重量を表す。 R は空気の気体定数、 Θ は絶対温度を示す。なお、簡単のために、土粒子と間隙水は非圧縮性、間隙空気は圧縮性を仮定している。

今回用いた解析コードでは、一般に行われているような飽和度 s^w (または空気間隙比 s^a) の時間的変化項について、

水分特性式を用いて比水分容量とサクシオンに置き換える手法ではなく、飽和度の時間変化項も未知数として扱い、それを補う形で、水分特性式を式(4)のように連立させる手法を用いた。

$$f(p^w, p^a, s^w, n, p^w, p^a, s^w, n, \dots) = 0 \quad (4)$$

ここで、 f は水分特性を与える関数で、関数形は用いるモデルに依存する。本稿では、式(5)のような水分特性式を与えた。

$$\{a_{es}(s^w_{\max} - s^w_{\min})S_e^2\} \{ (D_s p^a) - (D_s p^w) \} - (\ln S_e)(D_s s^w) = 0 \quad (5)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 $s^w_{\max}$ は最大飽和度、 $s^w_{\min}$ は残留飽和度、 a_{es} は水分特性を表す材料パラメータである。式(5)の水分特性式の特徴は、有効飽和度 S_e が 1 (サクシオン p^s が 0kPa) の時に、 dp^s/dS_e が 0 になる関数となっている点であり、van Genuchten⁵⁾式などの水分特性式とはこの点で異なる。また、有効飽和度 S_e は、

$$S_e = \begin{cases} \frac{s^w - s^w_{\min}}{s^w_{\max} - s^w_{\min}} & (s^w < s^w_{\max} \text{ のとき}) \\ 1 & (s^w \geq s^w_{\max} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (6)$$

で定義する。

有効応力式には平均化骨格応力を用いる。

$$-T' = -T - (s^w p^w + s^a p^a) \quad (7)$$

T' は有効応力テンソルであり、 T 、 T' は引張を正にとっている。なお、土骨格の構成式として、広範な土の力学挙動を対象にする SYS Cam-clay Model⁶⁾を用いた。

透水係数 k^w と透気係数 k^a の式は、Mualem⁷⁾モデルに水分特性曲線として van Genuchten 式 ($m = 1 - 1/n$) を用いた次の式を用いる。

$$k^w = k^w_s \cdot S_e^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right\}^2 \quad (8)$$

$$k^a = k^a_d \cdot (1 - S_e)^{\frac{1}{2}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (9)$$

ここに、 k^w_s は飽和透水係数、 k^a_d は乾燥透気係数である。

初期値・境界値問題に対する解は、式(1)の 3 式に式(2)、式(3)、式(4)を加えた合計 6 式に対し、土骨格の変位成分 3 個と間隙水圧 p^w 、間隙空気圧 p^a 、飽和度 s^w の計 6 個を未知数として、有限要素法を適用して求める。

3. 解析条件

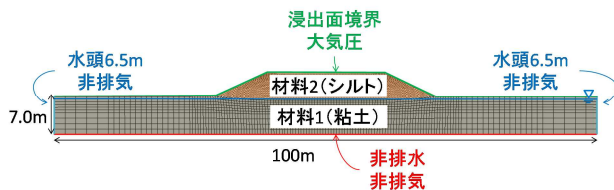


図1 境界条件

解析では、粘土地盤にシルトからなる盛土を載荷し、地震波として規則波（正弦波）を与えて、地盤～盛土系の挙動を調べた。

図1は水理境界と空気境界を示す。初期に地下水面が地表面下 0.5m に存在する地盤を、表1と表2に示す材料1でつくる。その地盤に同表の材料2の盛土を構築した。表1はSYS Cam-clay Modelの材料定数・初期値を示す。表2は水分特性と透水係数 k^w ・透気係数 k^a に関するパラメータを示す。表3はその他の物性値を示す。また、図2と図3には、それぞれ材料1と材料2に関する土の水分特性と透水・透気係数の関係を示した。盛土の初期飽和度は 80%（初期の間隙空気圧は 0kPa）に設定して、三回に分けて構築した⁸⁾。最終的な盛土高は約 4.5m に設定した。その後、加速度振幅 100gal、周期 0.5sec の正弦波を地盤底部の水平方向に 30 秒間入力した後、地震波の入力を停止し、その他の条件はそのまま、圧密放置計算をした。

盛土施工中は、地盤側方は水平方向を固定、地盤底部を水平・鉛直とも固定している。地震入力時は、地盤下端の水平方向を粘性境界⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾(密度 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ 、せん断波速度 $V_s=100\text{m/s}$)、鉛直方向を固定条件にして、側方には周期境界を与えた。

表1 材料定数および初期値

弾塑性パラメータ		材料1	材料2	発展則パラメータ		材料1	材料2
NCLの切片	N	2.1	1.8	正規圧密土化指数	m	2.5	0.2
限界状態定数	M	1.5	1.2	構造劣化指数	a ($b=c=1.0$)	0.4	1.0
圧縮指数	λ	0.18	0.08	構造劣化指数	c_s	0.2	0.8
膨潤指数	κ	0.03	0.02	回転硬化指数	b_r	0.001	0.3
ポアソン比	ν	0.3	0.3	回転硬化限界定数	m_b	1.0	0.5

初期値	材料1	材料2	
構造の程度	$1/R_0^*$	2.0	5.0
過圧密比	$1/R_0$	1.5	2.5
応力比	η_0	0.545	0.545
異方性の程度	ζ_0	0.545	0.0

表2 土の水分特性と透水・透気に関するパラメータ

水分特性曲線	材料1	材料2	透水係数・透気係数	材料1	材料2
$s^w_{\max}$ [%]	99.0	99.0	k^w_s [cm/sec]	1.0×10^{-6}	2.0×10^{-5}
$s^w_{\min}$ [%]	19.25	20.497	k^a_d [cm/sec]	5.51×10^{-5}	1.1×10^{-3}
a_{es} [kPa ⁻¹]	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-3}	α [kPa ⁻¹]	0.051	0.102
			n ($m=1-1/n$)	1.09	1.23

表3 その他の物性値

物性値	
ρ^s [g/cm ³]	2.65
ρ^w [g/cm ³]	1.00
R [m ² /sec ² /K]	287.042
Θ [K]	293.15 (20°C)

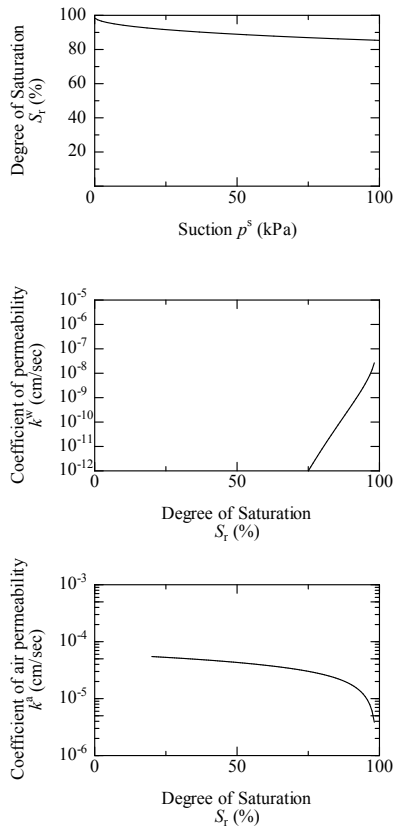


図2 材料1(粘土)の水分特性、透水係数、透気係数の関係

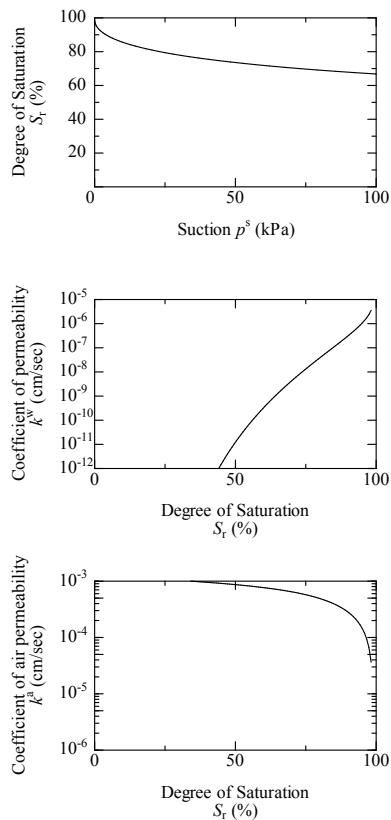


図3 材料2 (シルト) の水分特性、透水係数、透気係数の関係

4. 解析結果

4.1 盛土施工過程の解析結果

3.の解析条件で述べたとおり、盛土は三回に分けて構築した。ここでは、三回目の解析結果を例にとって、特に「飽和度」に注目して説明する。図4は飽和度分布の経時変化で、(a)は盛土載荷直後、(b)は盛土載荷直後から圧密終了時までの一例として載荷後約35日の時点、(c)は圧密終了時を示す。また、図5には、図4と同時刻の過剰間隙水圧分布(全水頭)分布の経時変化を示す。

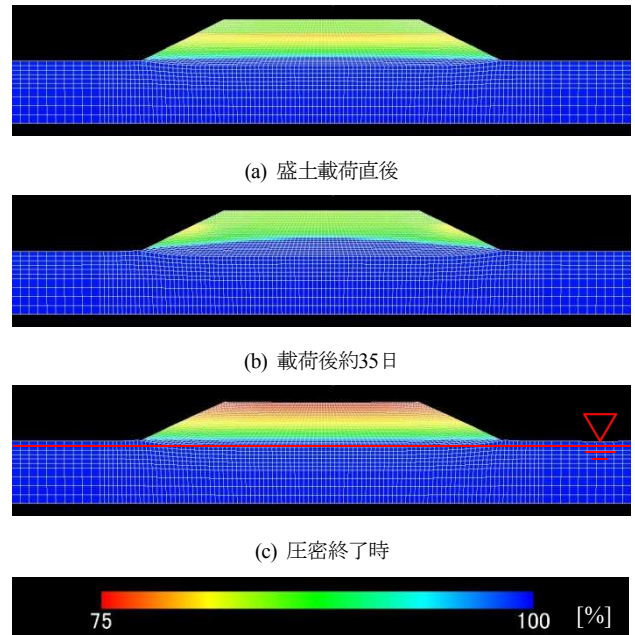


図4 飽和度分布 (盛土施工過程)

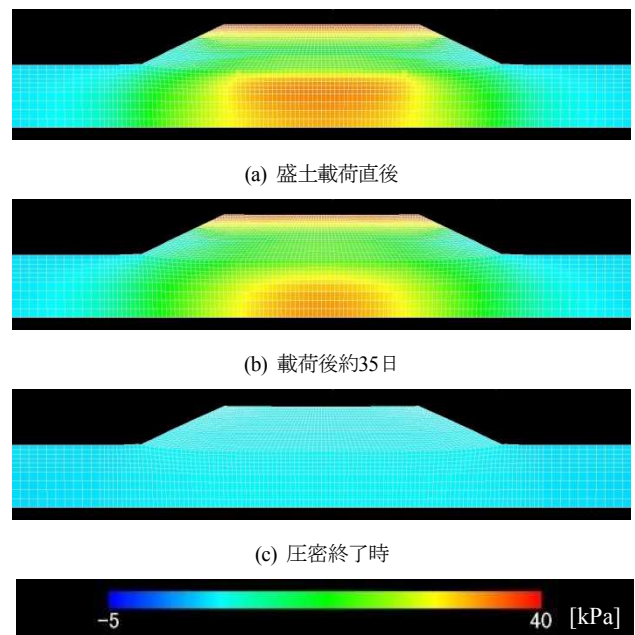


図5 過剰間隙水圧分布 (盛土施工過程)

飽和度と過剰間隙水圧の両図を対比しながら考察する。まず(a)載荷直後は盛土直下に過剰間隙水圧が発生する。こ

れにより、地盤から盛土に向かって水が流れ、盛土内の飽和度が高くなる。盛土中心の水位が最も高くなるのは、過剰間隙水圧が盛土中心直下ほど大きな値を示すからである。また、(a),(b)のどちらにおいても盛土上部で過剰水圧が高くなっている箇所があるが、これは新たに载荷した三段目の盛土に伴うものである。盛土は初期飽和度 80%で施工しており、初期間隙空気圧を 0kPa としたため、初期間隙水圧は、飽和度 80%に相当するサクション分だけ負圧となる。このときの過剰間隙水圧（全水頭）の値は施工済みの盛土部分より高いため、このようなコンター図となっている。(c)圧密終了時を見ると、過剰水圧がほぼゼロになっていることが確認できる。飽和度に関しては、図 1 の境界条件で示した通り、側方部の水理境界を水頭 6.5m で与えているため、鉛直座標で位置が 6.5m 以下では、その材料の最大飽和度より高い値を、6.5m 以上では最大飽和度より低い値を示す。一方盛土下部は、盛土载荷に伴う粘土地盤の沈下により、地下水位まで到達し、「閉封飽和域」が生成している。地下水位が地表下 0.5m と高い位置にあるため、地下水位より上部にある箇所でも、飽和度は高い状態になっている。

4.2 地震時応答

本節では、地震中・地震後の不飽和土の応答として特徴的な計算結果を取り上げる。図 6～図 10 はそれぞれ、構造、平均有効応力、間隙空気圧、過剰間隙水圧、飽和度の経時変化を示す。なお構造は嵩張りの程度を表すが、値が大きいほど構造が高い（嵩張っている）ことを示す。

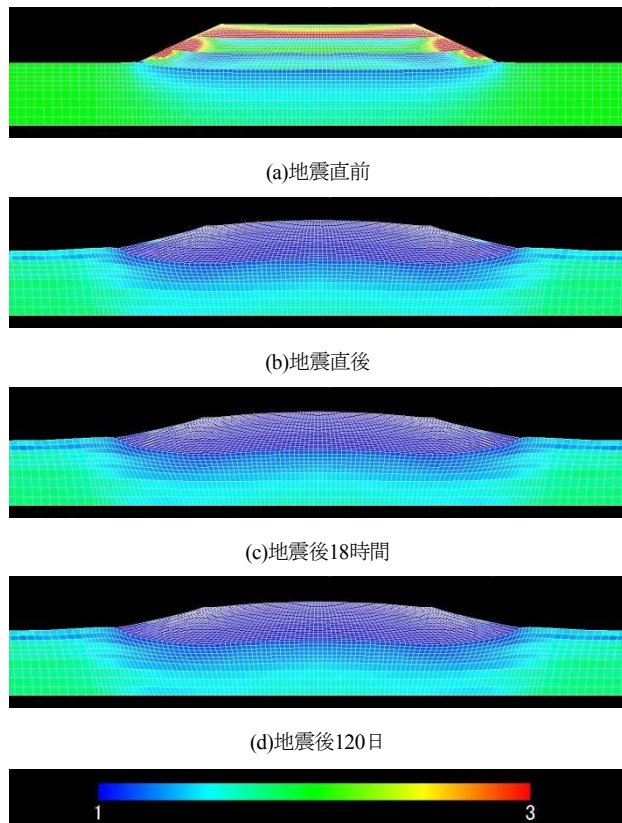


図6 構造分布（地震直前・地震後）

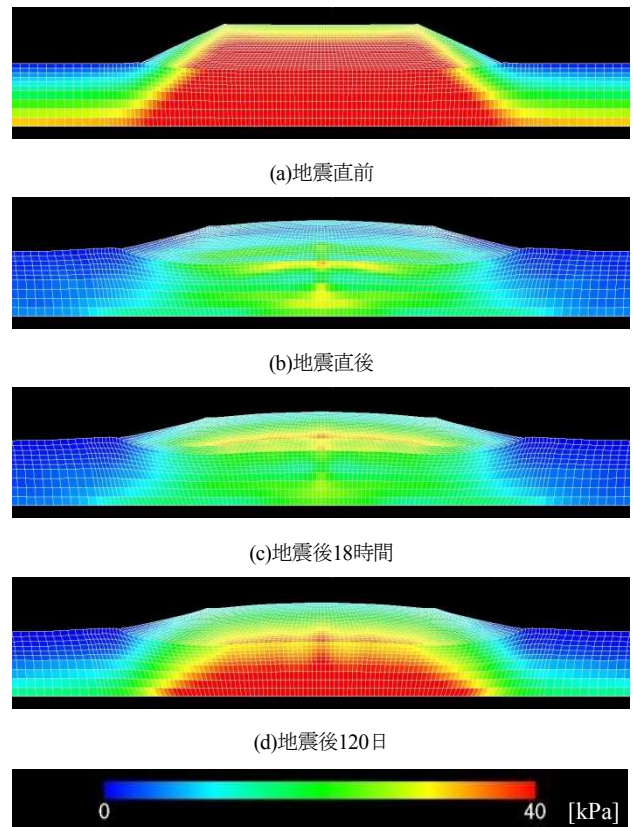


図7 平均有効応力分布（地震直前・地震後）

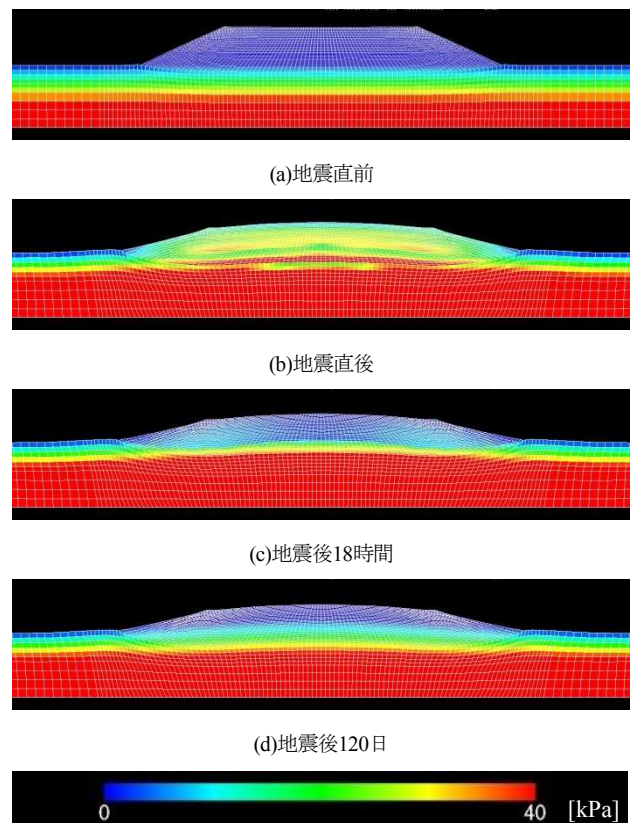


図8 間隙空気圧分布（地震直前・地震後）

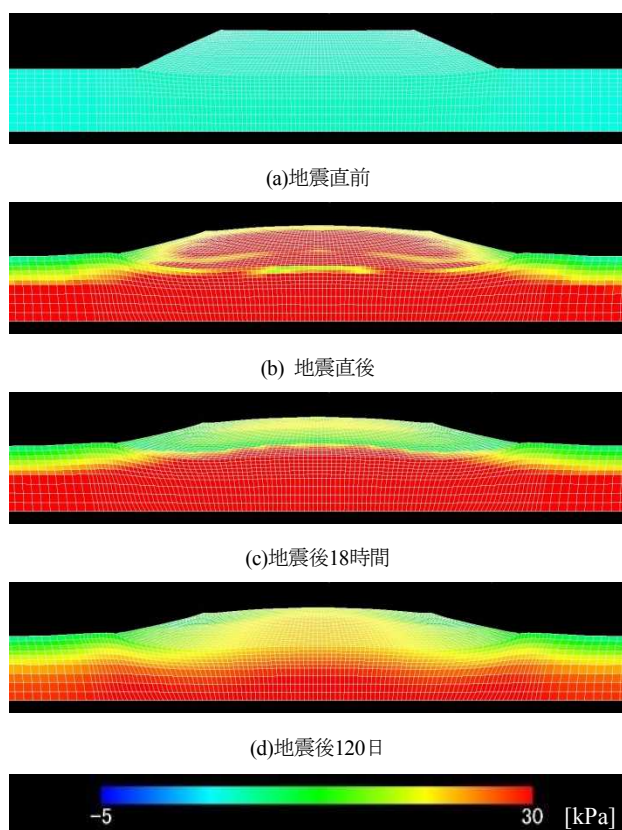


図9 過剰間隙水圧分布（地震直前・地震後）

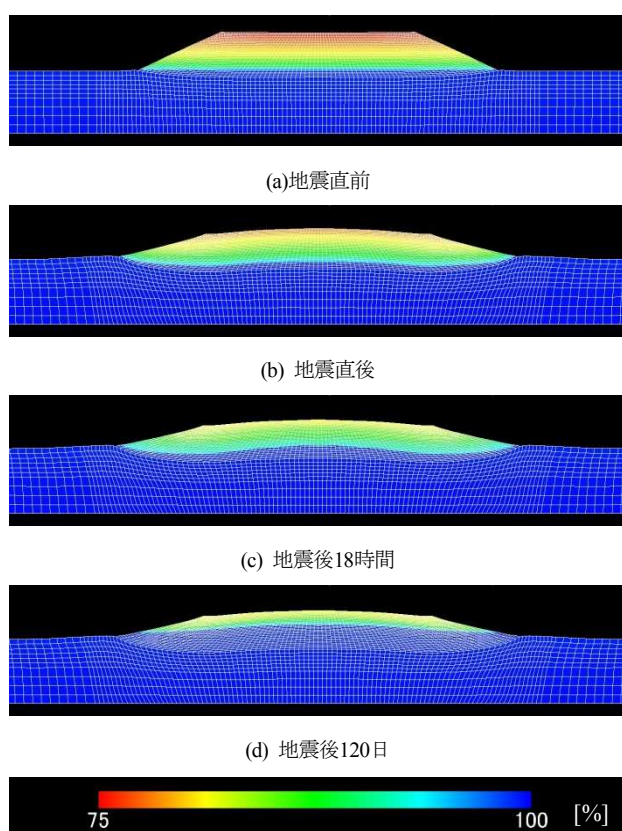


図10 飽和度分布（地震直前・地震後）

図6～図10において、各図の(a), (b), (c), (d)の記号は、同時刻のコンター図を示している。以下、「(a)→(b)」、「(b)→(c)」、「(c)→(d)」の三つの過程に分けて、計算結果を考察する。

まず、「(a)→(b)」について考察する。図7を見ると、平均有効応力が地震前に比べて地震直後では大きく減少していることがわかる。特に盛土に注目するが、この理由は、図6に示したSYS Cam-clay Modelにおいて骨格構造概念の一つとして表現される「構造」が、地震中にその殆どを喪失し ($R^*=1$)、大きな塑性圧縮を示したからである。つまり、土要素において、空気の圧縮以外の体積変化は起こらない中で構造が喪失し、これが弾性膨張を生じたからである。これに伴い図8と図9で示す間隙空気圧と過剰間隙水圧は上昇している。図10(b)の飽和度は若干上昇しているが、この要因のほとんどは空気の圧縮によるものだと考えられる。

次に、「(b)→(c)」について考察する。図7(c)では、図7(b)の時点で減少していた平均有効応力が回復している様子が確認できる。図8と図9の間隙空気圧分布と過剰間隙水圧分布を見ると、(b)では上昇していた間隙空気圧・過剰間隙水圧が、(c)になると減少・消散しているため、平均有効応力が回復している。この間隙空気圧・過剰間隙水圧の減少・消散の理由は、盛土から空気が排出されたためである。水が排出された可能性も考えられるが、このときの盛土内の透気係数（およそ 10^{-4}cm/sec ）は透水係数（およそ 10^{-8}cm/sec ）に比べて大きいので、空気が先に排出されることになる。この排気に伴い、間隙空気圧が減少し、過剰間隙水圧も消散した。つまり、排気は、空気圧のみならず、過剰水圧も消散させ、平均有効応力の減少を防ぐことが示されている。一方、飽和度の変化は、図10(c)を見ると、空気が排出されたことにより、若干上昇している様子が確認できる。

次に、「(c)→(d)」について考察する。ここで特筆すべき点は、図10(d)において、盛土内の飽和度が全体的に上昇していることである。これは、(b)→(c)過程における排気に伴う盛土内の過剰間隙水圧の低下により、盛土と地盤間の動水勾配が大きくなり、一気に地盤から盛土へ水が流入したことが原因である。図8(d)と図9(d)の間隙空気圧と過剰間隙水圧のコンター図を見ると、盛土内への水の流入による空気圧と水圧の若干の上昇が確認される。図7(d)を見ると、地盤から盛土へ水が流れたことにより、地盤内の間隙空気圧や過剰間隙水圧が下がり、地盤内で平均有効応力が回復した様子も確認できる。

5. おわりに

新たに飽和度を未知数とした空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを用い、比較的簡単な条件を設定して、粘土地盤上の不飽和シルト盛土の築造時・地震中・地震後の挙動を調べた。その結果、次のような知見が得られた。

(1)築造時は、载荷に伴う粘土地盤の沈下により、盛土内部に閉封飽和域が形成される。(2)地震後に、排気に伴う間

隙空気圧・過剰間隙水圧の減少・消散，平均有効応力の回復が生じる。また，(3)(2)の後に，盛土内の空気圧・水圧の減少・消散により，地盤から盛土内へ水が流入する。これらの一連の挙動は飽和土では見られない「不飽和土ならではの」挙動である。

東北地方太平洋沖地震の特徴の一つに，大きな余震が比較的短時間で発生したことが挙げられる。仮に，本震発生直後に盛土内の飽和度が上記のメカニズムにより上昇していたとすると，盛土は内部の飽和度が高い状態で余震を受けていたと考えられる。今後は，このような余震の影響も含め，今回の計算結果を足掛かりにして，地盤・構造物・入力地震動などの条件をパラメトリックに変えながら，各種の不飽和土地盤・不飽和土構造物の耐震性評価を行っていききたい。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会: 地震時における地盤災害の課題と対策, 2011年東日本大震災の教訓と提言(第二次), 2012.
- 2) 安田進, 原田健二, 石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.103-115, 2012.
- 3) 野田利弘, 中野正樹, 吉川高広, 浅岡顕: 空気～水～土骨格連成有限変形用いた初期サクシオンが異なる不飽和土供試体の力学挙動の再現, 第47回地盤工学研究発表会, 335, 667-668, 2012.
- 4) 吉川高広, 野田利弘, 浅岡顕: 不飽和土の非排気・非排水三軸試験の空気～水～土連成有限変形シミュレーション, 第47回地盤工学研究発表会, 336, 669-670, 2012.
- 5) van Genuchten, M. Th: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.44, pp.892～898, 1980.
- 6) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42 No.5, pp.47-57, 2002.
- 7) Mualem, Y: A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Proc. Water Resour. Res.*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 8) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T., and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, Vol.50, No.2, pp.245-260, 2010.
- 9) Joyner, W.B. and Chen, A.T.F.: Calculation of nonlinear ground response in earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), .1315-1336, 1975
- 10) Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer: Finite dynamic model for infinite media, *ASCE, EM4*, 859-877, 1996.
- 11) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.: Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.5, pp.739-756, 2009