

粘土地盤上の不飽和盛土の地震中・地震後挙動に関する空気～水～土骨格連成解析

名古屋大学 ○吉川高広 (学), 野田利弘 (正)

名城大学 小高猛司 (正) 株式会社 浅沼組 高稲敏浩 (正)

1. はじめに

東日本大震災では、粘性土基礎地盤上の砂質土からなる河川堤防の閉封飽和域が液状化したことに注目を集めている¹⁾。そこで、「空気～水～土骨格連成動的/静的有限変形解析コード」²⁾を用いて、粘土地盤上の不飽和盛土の地震中・地震後のシミュレーションを、非常に簡単な条件のもとで試みた。ただし本稿では紙幅の都合上、施工過程のシミュレーション結果の掲載は省略した。

2. 解析条件

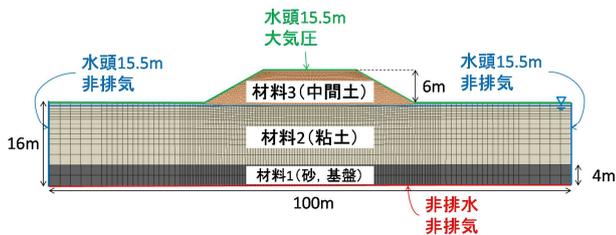


図1 水理境界条件と空気境界条件

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下0.5mに存在する地盤を、表1に示す材料1と材料2でつくる。その地盤に同表の材料3の盛土を構築した。表1はSYS Cam-clay Model³⁾の材料定数と初期値、さらには土粒子密度を示す。ただし全ての材料で構造劣化指数 $b=c=1$ とした。紙幅の都合上、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の掲載を省略するが、盛土(材料3)の水分特性曲線と飽和度 S_r に対する k^w 、 k^a の関係を図2に示した。盛土は、初期飽和度を70% (初期の間隙空気圧は0kPa) に設定して、堤体高さが約6mになるように四回に分けて盛土⁴⁾を構築した。施工時間は約3週間で、その後約50年間圧密させた。次に図3に示した地震波(平成16年の中央防災会議で策定された東海・東南海・南海地震の三連動地震の想定地震波を翠川⁵⁾の式を用いて $V_s=300\text{m/sec}$ まで増幅させた地震波)を地盤底部の水平方向に入力した。その後地震波の入力を停止し、その他の条件はそのまま、圧密計算をした。堤体盛土の施工中は、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⁶⁾⁷⁾⁸⁾(密度

$\rho=2.0\text{g/cm}^3$, せん断波速度 $V_s=300\text{m/s}$), 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

		材料1	材料2	材料3
弾塑性パラメータ	NCLの切片	N	1.98	2.08
	限界状態定数	M	1.2	1.5
	圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.045	0.15
	膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.002	0.03
	ポアソン比	ν	0.15	0.1
発展則パラメータ	正規圧密土化指数	m	0.08	2.5
	構造劣化指数	a	2.2	0.45
	構造劣化指数	c_s	1.0	0.3
	回転硬化指数	b_r	3.5	0.05
	回転硬化限界定数	m_b	0.9	1.0
初期値	構造の程度	$1/R_0^*$	1.01	2.0
	過圧密比	$1/R_0$	5000	1.7
	応力比	η_0	0.545	0.545
	異方性の程度	ζ_0	0.545	0.545
土粒子密度		ρ^s	2.636	2.65
			2.42	

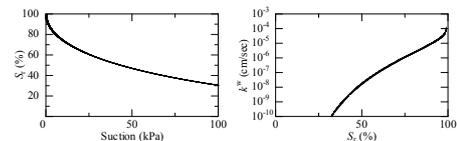


図2 水分特性曲線および透水・透気係数の関係

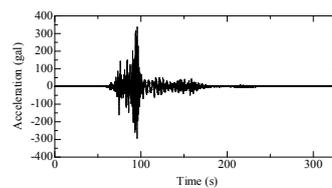
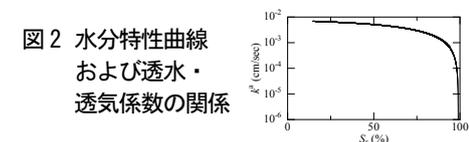


図3 入力地震波

3. 解析結果

図4は最大加速度時の過剰間隙水圧、間隙空気圧および平均有効応力の分布図を示す。堤体下部の「閉封飽和域」で過剰間隙水圧や間隙空気圧が高く、平均有効応力は周りに比べて小さい。これは飽和度が高い状態、つまり地震などの短時間では等体積が保たれる状態で、SYS Cam-clay Modelの骨格構造概念の一つである「構造」が喪失したためである。盛土の閉封飽和域以外の箇所は、瞬時に圧縮可能な空気が比較的多く存在しているため、閉封飽和域に比べて有効応力の減少や、過剰間隙水圧および間隙空気圧の上昇は生じにくい。

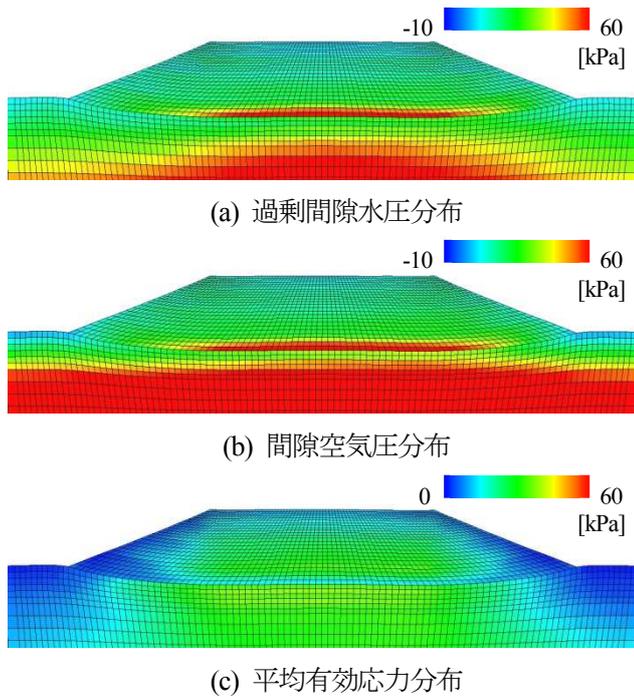


図4 最大加速度時の諸量の分布図

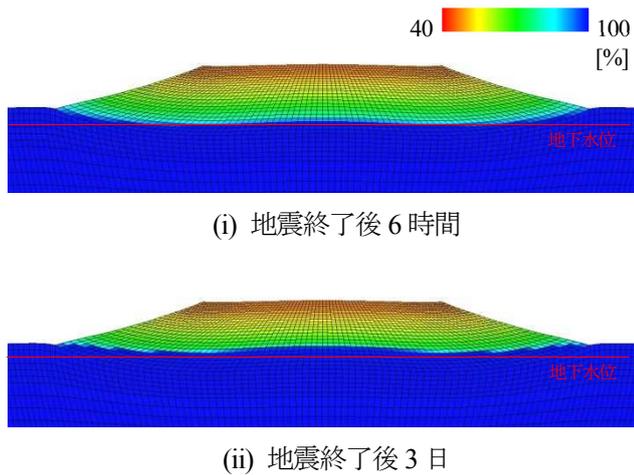


図5 地震中・地震後の飽和度分布

図5は地震中・地震後の飽和度分布を示し、鉛直座標で15.5mの位置、すなわち地下水位線の位置を図中に赤で示した。ここで興味深いのは、(ii)地震終了後3日で、堤体下部の飽和度が上昇し、堤体盛土内の水位が上昇している点である。この理由は、飽和粘土の塑性圧縮により高い過剰間隙水圧が発生した地盤と盛土との間に大きな動水勾配が発生して、地盤から盛土へ水が流入したからである。

4. おわりに

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盛土の

施工時・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)施工時は、盛土载荷に伴う粘土地盤の圧密沈下により、盛土下部に閉封飽和域が形成される。(2)閉封飽和域では地震中に平均有効応力が大きく低下し、過剰間隙水圧と間隙空気圧が高い。(3)地震後に、排気により間隙空気圧の減少のみならず過剰間隙水圧も消散させ、平均有効応力を回復させる。また、(4)(3)の内容に加えて飽和粘土地盤の塑性圧縮に伴う過剰間隙水圧の発生により、地盤から盛土内へ水が流入する。(1)と(3)に関しては紙幅の都合上説明を省略したが、研究発表会において説明する予定である。) これら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。ただし、地震後の盛土内の水位上昇時間や上昇高さは材料定数や初期値、境界条件によって変わるため、本解析結果の上昇時間や上昇量は一例に過ぎないことを強調しておく。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、実際の断面や材料を用いた耐震性評価を行なっていく予定である。

謝辞：JSPS 科研費 20126012, 25249064 と国土交通省 H25 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献：1) 地盤工学会 (2012): 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). 2) Noda and Yoshikawa (2014): Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type ..., *S&F*, to be submitted. 3) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of ..., *S&F*, 42(5), 47-57. 4) Takaine et al. (2010): Predictive simulation of deformation and failure of ..., *S&F*, 50(2), 245-260. 5) 翠川三郎(1987): 関東平野を対象とした震度分布予測, 構造工学論文集, 33B, 43-48. 6) Joyner and Chen (1975): Calculation of nonlinear ground response in earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), 1315-1336. 7) Lysmer and Kuhlemeyer (1966): Finite dynamic model for infinite media, *ASCE, EM4*, 859-877. 8) Noda et al. (2009): Co-seismic and post-seismic behavior of ..., *S&F*, 49(5), 739-756.