

地下水位が異なる粘性土地盤上の不飽和盛土の静的／動的空気～水～土骨格連成解析

有効応力解析法 動的解析 地下水位

名古屋大学

学生会員

○吉川高広

国際会員 野田利弘

名城大学

国際会員

小高猛司

GEOASIA 研究会

国際会員

高稲敏浩

1. はじめに

東日本大震災では各所で粘性土地盤上の河川堤防が崩壊し、被災断面では無被災断面に比べて地下水位が高かったことが確認されている¹⁾。これを受けて、地下水位が異なる粘性土地盤上の不飽和盛土の築造時・地震中・地震後シミュレーションを、空気～水～土骨格連成動的／静的有限変形解析コード²⁾を用いて実施した。その結果、地下水位が高い場合は、盛土の飽和度が高く、骨格応力（有効応力）が小さいために、地震中に大きな変形が生じた。地震後には、地下水位が高い場合は盛土内に浸潤線が形成されるが、地下水位が低い場合は水位が上昇するものの、盛土内浸潤線は形成されなかった。

2. 解析条件

図 1 は解析断面の概略図で、水理境界条件と空気の境界条件を中心に示す。2次元平面ひずみ条件を仮定した。地表面と盛土表面のみ水理条件として全水頭（＝位置水頭＋圧力水頭）一定境界、空気の境界条件として大気圧を満たす排気条件を設定して、その他は非排水・非排気条件とした。位置水頭の基準面は解析断面の下端（工学的基盤）に設定した。初期地下水位については、初期の地表面位置に一致する場合と地表面下 2m に位置する場合の 2 ケースの解析を実施して、地表面と盛土表面に設定した全水頭境界の水頭値は、前者は 15m、後者は 13m に設定した。

粘性土地盤の土骨格の構成式に関する材料定数および初期値は、東日本大震災で被災した鳴瀬川上流 30.0k 地点（下中ノ目地区）の堤内地でサンプリングされた不攪乱試料の力学試験結果を、SYS Cam-clay model³⁾で再現して決定した。盛土の材料定数および初期値の決定に際しては、東日本大震災で被災した河川堤防の土材料を用いた力学試験結果を得ることが困難であったため、実際の河川堤防の盛土材として用いられている土試料の材料定数および初期値⁴⁾を用いた。盛土は 1 日 1m の早さで高さ 6m まで 30 回に分けて構築した⁵⁾。粘性土地盤と盛土の水分特性は、Carsel and Parrish⁶⁾の silty clay と silt の van Genuchten 式⁷⁾のパラメータを参考にして決定した。水分特性曲線の最大飽和度は 99%とした。盛土の初期飽和度は 73.4%とした⁴⁾。盛土載荷後は過剰間隙水圧が消散するまで圧密させることで地震前の状態とした。図 2 は入力地震動を示す。KiK-NET 小野田（MYGH05）の NS 成分の地震波形を利用した。地震時には地盤底部の水平方向を粘性境界にして、側方には周期境界を与えた。

3. 盛土築造時の解析結果

図 3 は、(i)地下水位＝GL-0m と(ii)地下水位＝GL-2m の場合について、圧密が終了した盛土載荷終了から 20 年後の飽和度分布である。(i)地下水位＝GL-0m の場合について考えると、図 1 で示した地表面と盛土表面の全水頭 15m の水理境界条件により、圧密終了時には解析断面全域で全水頭が 15m になる。つまり、土要素の飽和度は、地盤底面からの鉛直座標 15m 以上では各材料の最大飽和度以下に、鉛直座標 15m 以下では各材料の最大飽和度以上になる。地下水位＝GL-2m の場合も同様に、鉛直座標で 13m が最大飽和度の境界となる。したがって、地下水位が高い方が盛土底部をはじめに飽和度が高い。紙幅の都合上図は省略するが、GL-0m の場合は盛土底部中央の最終沈下量が 50cm であったため、50cm の閉封飽和域が形成されたと言える。図 4 は平均骨格応

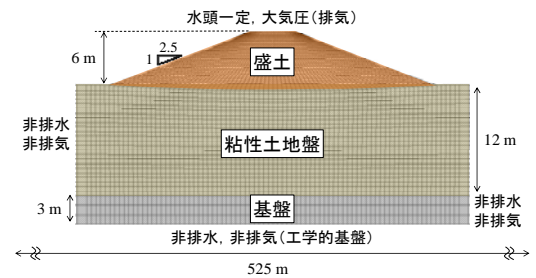


図 1 解析断面および水理・空気境界条件

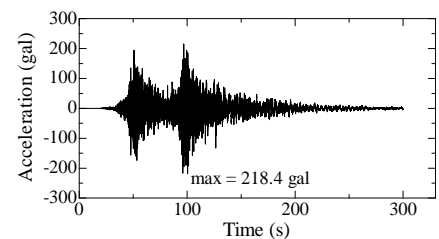
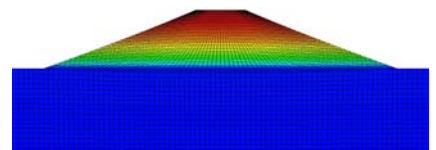
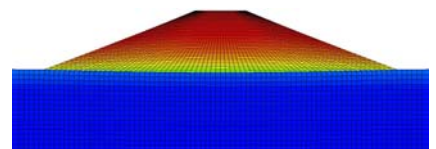


図 2 入力地震動

50 以下 100 (%)



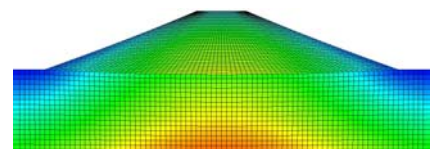
(i) 地下水位＝GL-0mの場合



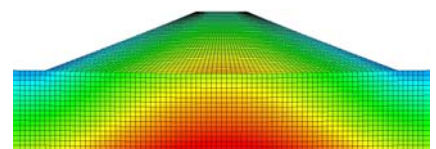
(ii) 地下水位＝GL-2mの場合

図 3 盛土後 20 年の飽和度分布

0 90 以上 (kPa)



(i) 地下水位＝GL-0mの場合



(ii) 地下水位＝GL-2mの場合

図 4 盛土後 20 年の平均骨格応力分布

力（平均有効応力）の分布であり、GL-0m の場合は GL-2m の場合より平均骨格応力が小さい。その理由は、地表面および盛土表面に設定した全水頭境界の水頭値の違いにより、GL-0m の場合は GL-2m の場合より解析断面全域で水圧が高いからである。

4. 地震中・地震後の解析結果

図 5 と図 6 は、地震終了直後におけるせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布である。まず、せん断ひずみ分布を見ると、盛土底部の変形が大きく、地下水位=GL-0m の場合の方が大きく

変形している様子を確認できる。平均骨格応力分布は、GL-0m の場合の方が、GL-2m の場合に比べて全体的に小さい。GL-0m では盛土底部で際立って小さい値を示すが、GL-2m ではその様子は確認されない。地下水位の違いによるこのような違いは、3.で示したように GL-0m の方が平均骨格応力が小さく、盛土底部に閉封飽和域が存在しているためである。閉封飽和域では地震時に等体積状態に近い条件でせん断されるため、平均骨格応力が著しく低下する。

図 7 は地下水位=GL-0m と地下水位=GL-2m の場合の地震中・地震後の天端中央の沈下～時間関係を示す。GL-0m の場合の方が沈下量は大きく、地震中に 1m 以上もの揺すり込み沈下が生じている。GL-0m と GL-2m のどちらにおいても、地震中の盛土部分の沈下量が大きく、最終天端沈下量の大半を占める。

図 8 は地震後に地下水が最高位となったときの飽和度分布である。なお、本解析では GL=0m の場合は地震後 30 日経過時、GL=2m の場合は地震後 50 日経過時に最高位になった。ここでは浸潤線の位置を、最大飽和度 99%を示す土要素を結んだ線であると考え、コンター図で示す数値の最大値と最小値を、最大飽和度 99%から±0.5%に設定して出力した。つまり、コンター図の緑色と赤色の境界線を浸潤線と考えればよい。この図より、地下水位が高い GL-0m の場合には地震後に盛土内に浸潤線が形成されることがわかる。地下水位=GL-2m の場合も地下水位は上昇したが、元々の水位が低いために、盛土内に浸潤線が形成されなかった。この水位上昇のメカニズムは、圧密沈下に伴い不飽和盛土底部が地下水下面に入り込むことにあるが、詳細は Noda et al.など^{8),9)}を参照されたい。

5. おわりに

本稿で示した河川堤防と地盤の相互作用下での地下水位の違いに伴う変形挙動の違いは、東日本大震災の被災報告と合致する。ただし、今回は地下水位の違いを、地表面および盛土表面に設定した境界条件の水頭値の違いで表現した。この方法で設定した水圧やサクション（すなわち飽和度）が実地盤の状態を定量的に評価できているかについては検討の余地がある。不飽和土の境界条件や初期条件の設定方法は、飽和土に比べ極めて難しいからである。今後もこれを課題としつつ、三相連成解析手法に基づいた研究を進めていく。

謝辞：JSPS 科研費 25249064 と国土交通省 H26 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) 国土交通省東北地方整備局北上川等堤防復旧技術検討会（2012）：北上川等堤防復旧技術検討会 報告書 本編
- 2) Noda and Yoshikawa (2015): Soil-water-air coupled finite ... S&F, 55(1), 45-62.
- 3) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description ... S&F, 42(5), 47-57.
- 4) Sakai and Nakano (2013): Interpretation of the effect of compaction ... In Proc. of the 18th ICSMGE, 1179-1182.
- 5) Takaine et al. (2010): Predictive simulation ... S&F, 50(2), 245-260.
- 6) Carsel and Parrish (1988): Developing joint probability distribution ... Water Resources Research, 24(5), 755-769.
- 7) van Genuchten (1980): A closed-form equation ... Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.
- 8) Noda et al.: Soil-water-air coupled seismic behavior ... In Proc. of the 15th ARC, accepted.
- 9) 吉川ら（2014）：粘土地盤上... 第 49 回地盤工学研究発表会, No.695(CD-ROM).

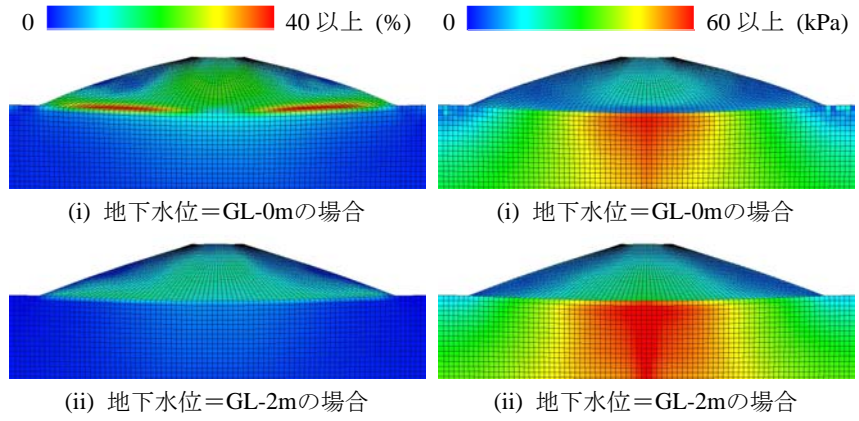
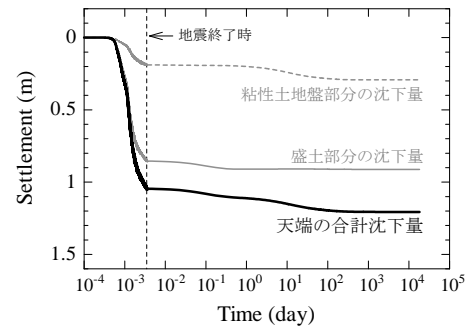
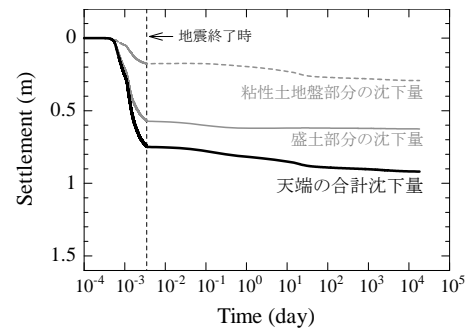


図 5 地震直後のせん断ひずみ分布

図 6 地震直後の平均骨格応力分布



(i) 地下水位=GL-0mの場合



(ii) 地下水位=GL-2mの場合

図7 地震時の天端中央の沈下～時間関係

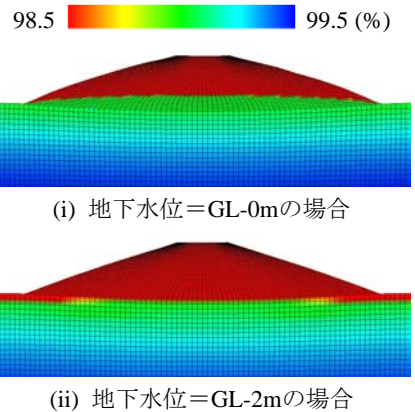


図 8 水位が最高時の飽和度分布