加振時不飽和地盤のサクション変化に関する一考察

山梨大学　学生会員　○深沢　郁未，張キテイ
中日本高速道路株式会社　正会員　藤森　弘晃
山梨大学大学院　正会員　荒木　功平

１．はじめに

地震動に伴う不飽和地盤の沈下現象，斜面崩壊が指摘され始めている．新潟県中越沖地震では，繰返しせん断に伴い，柏崎刈羽原子力発電所敷地内の埋め戻し不飽和土が 40～80cm 沈下していることが確認された [1]．東北地方太平洋沖地震では，宮城県内の谷地形に厚い埋め戻し土により造成された盛土（不飽和谷埋め盛土）上の住宅地において最大 35 cm の揺すり込み沈下が発生し，大きく注目された [2]．また，熊本地震では，地震動により阿蘇大橋付近で大規模斜面崩壊が発生したが，崩土は不飽和の状態であったと考えられている [3]．しかしながら，現状，地震動に伴う不飽和地盤挙動のメカニズムに関する研究・報告は極めて少ない [4) 5)]．

本研究では地震動による不飽和地盤の沈下挙動・破壊形態のメカニズム解明を目指し，振動台を用いて実験的に研究している．具体的には初期飽和度と初期乾燥密度をそれぞれ設定した不飽和土（茨城県鹿島港付近で採取した鹿島海浜砂）からなる模型地盤を作製し，加振後の沈下量，飽和度，乾燥密度の関係を把握している．

２．用いた試料（鹿島海浜砂）の物理特性，締固め特性，浸潤特性，水分特性曲線

本実験では茨城県鹿島港付近で採取した鹿島海浜砂を用いる．

図 1 に鹿島海浜砂の粒径加積曲線，図 2 に突固めによる締固め試験を締固めエネルギーの 3 種類（Ec ＝ 100，550，1000 kJ/m^3）で行った試験結果（乾燥密度～含水比関係）をそれぞれ示す．図 2 より，乾燥密度のピークを過ぎると締固め曲線が飽和度 80%の曲線に近づいていくが超えることはなかった．

図 3 に鹿島海浜砂の排水過程における水分特性曲線を示す（乾燥密度，相対密度も図示する）．図 3 より，鹿島海浜砂の空気侵入値は飽和度 85%程度，サクションは 3kPa 程度と考える．

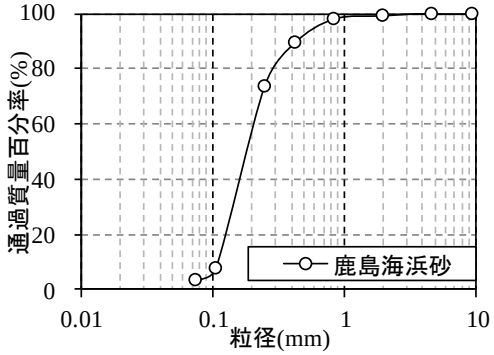

図１　粒径加積曲線

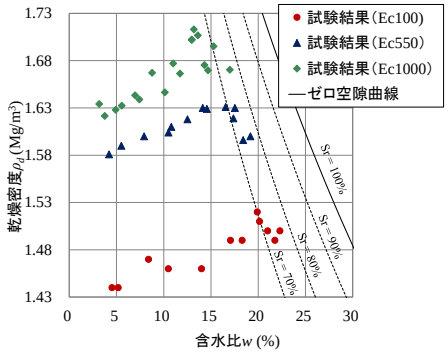

図２　締固め曲線

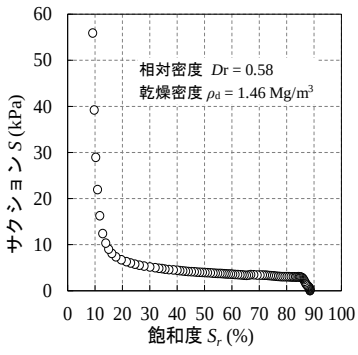

図３　水分特性曲線

３．加振中のサクション把握の試み

図 4 に実験に用いた土槽の概略図を示す。アクリル製の奥行 200mm，幅 950mm，高さ 550mm，総体積 7.6×107mm^3 の土槽を用いた．供試体の初期高さは 400mm に設定した．模型地盤は乾燥密度が均一になるよう留意して 5 層に分け 1 層ずつ転圧して作成した．振動は正弦波で与え，100Gal ずつ加速度を増やし 1 分間加振し，同様の作業を行い，200Gal から 700Gal まで沈下量～加速度関係を求めるものとした．なお，地表面に流出水を確認したケース（以下，不飽和液状化と称す）と地表面に

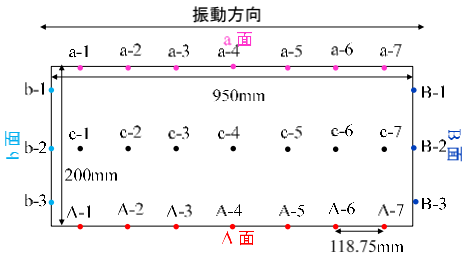

図４　土槽寸法概略図

キーワード　不飽和土，地震，振動台，破壊形態，飽和度
連絡先　〒400-8511　山梨県甲府市武田 4-3-11　山梨大学工学部土木環境工学科　ＴＥＬ055-220-8590

クラックやすべりを確認したケース（以下，不飽和クラックと称す）があった．

(1)不飽和液状化が生じたケース

図 5 に初期乾燥密度 1.35Mg/m³，初期飽和度 60%，測定する深さ 300mm で行った振動台実験における加振中のサクション変化～計測時間結果関係を示す．加振時のプロットは加速度ごと色分けを行い，加振を行っていない（加速度 0Gal）ときは黒いプロットで表す．

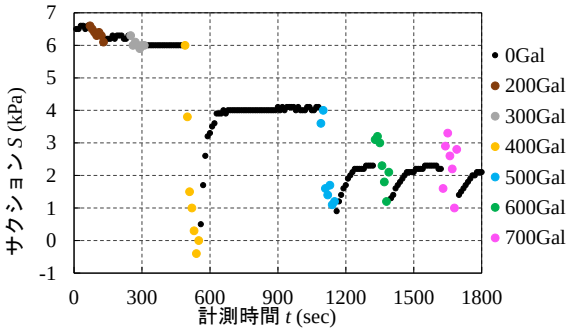

図 5　加振中のサクション変化
（深さ 300mm，不飽和液状化）

図 5 より，加振によりサクションが低下することが確認できる．200Gal，300Gal の加振時には地盤内のサクションに大きな変化はみられないが，400Gal 加振後にはサクションは 2kPa ほど低下し，6kPa まで戻ることはなかった．500Gal 加振後はさらにサクションが低下し，2kPa 程度になった．600Gal と 700Gal の加振中はサクションの変化がみられたが，加振終了後にサクションは増加する．ただし，概ね 2kPa より増加することはなかった．

今回のケースでは 500Gal 加振後に不飽和液状化が発生した．図 5 の鹿島海浜砂の水分特性曲線より，空気侵入値はおおむね 3kPa であり，500Gal 加振後はサクションが 3kPa を下回った．

(2)不飽和クラックが生じたケース

図 6 に初期乾燥密度 1.35Mg/m³，初期飽和度 55%，測定する深さ 300mm で行った振動台実験における加振中のサクション変化～計測時間結果関係を示す．

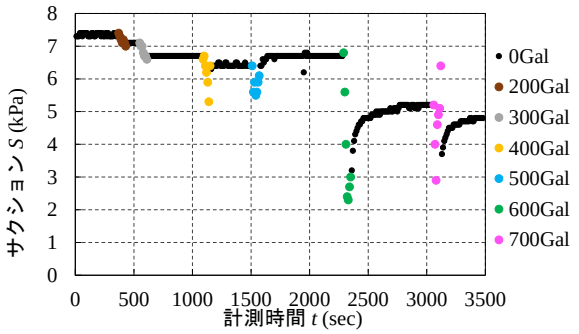

図 6　加振中のサクション変化
（深さ 300mm，不飽和クラック）

図 6 より，加振によりサクションが低下することが確認できる．200Gal，300Gal，400Gal の加振時には地盤内のサクションに大きな変化はみられないが，500Gal 加振後にはサクションは 1.5kPa ほど低下し，6kPa まで戻ることはなかった．600Gal 加振後はさらにサクションが低下し，3.5kPa 程度になった．700Gal 加振後は 3kPa 程度まで低下している．

今回のケースでは 500Gal 加振後に不飽和クラックが発生した．図 3 の鹿島海浜砂の水分特性曲線より，空気侵入値（サクションの急激な減少が始まる値）は概ね 3kPa であり，700Gal 加振後でもサクションが 3kPa を下回ることは無かった．そのため，不飽和液状化が発生しなかったと考えられる．

４．おわりに

鹿島海浜砂を用い，保水・締固め特性を実験的に考察した．水分特性曲線における空気侵入値の飽和度は 85%程度，サクションは 3kPa 程度で，締固め曲線中の最大飽和度は概ね 80%であった．加振時の模型地盤の連続的なサクションの計測結果から不飽和液状化を示した地盤のサクションの値は鹿島海浜砂の水分特性曲線から得られた空気侵入値の 3kPa を下回っていたことを確認した．

参考文献

1) 竹村弥生・建山和由：振動場における粒状体の挙動に関する実験的研究，土木学会論文集 C, Vol.68, No.1, pp127-137, 2012.
2) 若松・吉田・清田：土木学会東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害調査報告書，第 6 章造成地の被害，p.7, 2011.
3) 石川ら：平成 28 年熊本地震による土砂災害，砂防学会誌, Vol.69, No.3, pp55-66, 2016.
4) 北爪貴史，酒井俊郎，佐藤博，佐藤正行：繰返しせん断による不飽和砂質土の体積収縮特性と沈下量推定に関する基礎的検討，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.68, No.2, pp.410-421, 2012.
5) 河井正・石丸真・佐藤博・末広俊夫・谷智之：剛な構造物近傍地盤の地震時沈下挙動に関する 1G 場模型振動台実験（その１）変形メカニズムについて，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.93-94，2008.