

不飽和砂の浸潤・保水・締固め特性による
加振時破壊形態の評価に関する実験的考察

山梨大学 学生会員 ○深沢 郁未
山梨大学大学院 学生会員 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盛られた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⁾．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ライフラインに甚大な被害をもたらした．また，地下水の関与を示す積極的な証拠は現地では見当たらず，崩土は不飽和の状態であったと考えられる³⁾．しかしながら，依然として地震動に伴う不飽和地盤の沈下現象や破壊形態のメカニズムに関する研究・報告は少ない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，振動台を用いて加振し，加振後の沈下量，飽和度，乾燥密度の関係を把握している．一方，用いた試料の水平浸潤特性，保水性，締固め特性を明らかにし，不飽和地盤特有の地中水分量～破壊形態関係について考察している．

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．

表 1 に種々の土質試験から得られた鹿島海浜砂の基本的物理特性についてまとめている．概ね豊浦砂の物理特性⁶⁾に近いことがわかる．

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（ $E_c = 100, 550, 1000 \text{ kJ/m}^3$ ）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．これは，突固めにより排水が生じるため，締固め曲線が取り得る飽和度には限界があると考ええる．

図 3 に水平浸潤試験装置模式図を示す．幅 10mm，内径 30mm のリングセル 50 個から成る試料円筒およびマリ奥特管式給水装置からなる．試験中に水頭差は与えない．給水開始後，浸潤前線が所定の位置に達したら給水を止め，時間を計測する．その後ただちに分解し，セル毎に給水面からの距離～含水比関係を把握する．

表 1 鹿島海浜砂の物理特性

土粒子の密度	ρ_s	(Mg/m^3)	2.676
最大間隙比	$e_{\max}$	-	1.082
最小間隙比	$e_{\min}$	-	0.652
均等係数	U_c	-	1.864
曲率係数	U_c'	-	0.867
平均粒径	D_{50}	(mm)	0.200
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}$	(Mg/m^3)	1.634
最適含水比	w_{opt}	(%)	15.8

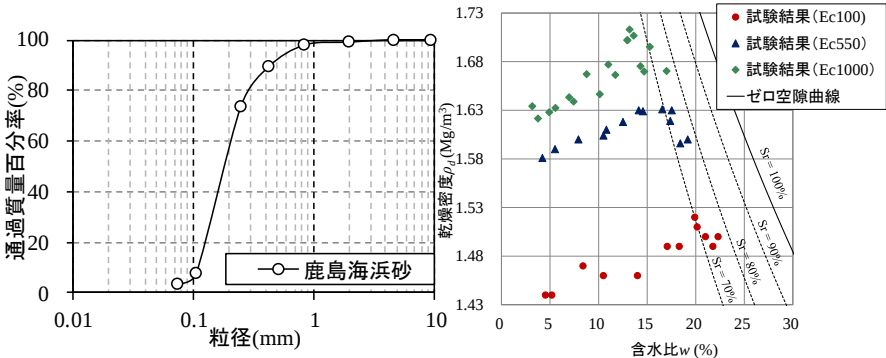


図 1 水平浸潤試験模式図

図 2 締固め試験結果

キーワード 不飽和土，浸透，締固め，振動台，水分特性曲線

連絡先 〒400-8511 甲府市武田 4-3-11-B-1-124 山梨大学 TEL. 080-5146-3726 E-mail : karaki@yamanashi.ac.jp

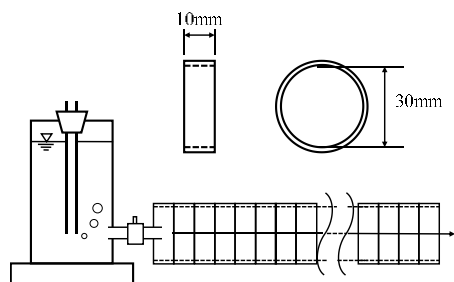


図3 水平浸潤試験模式図

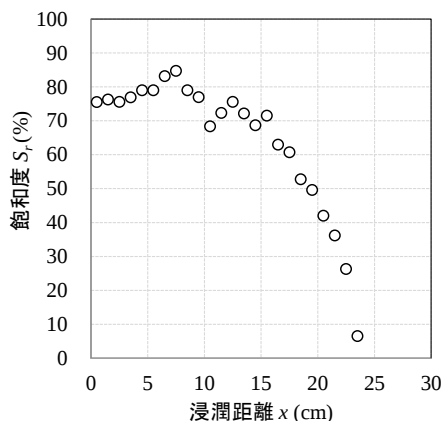
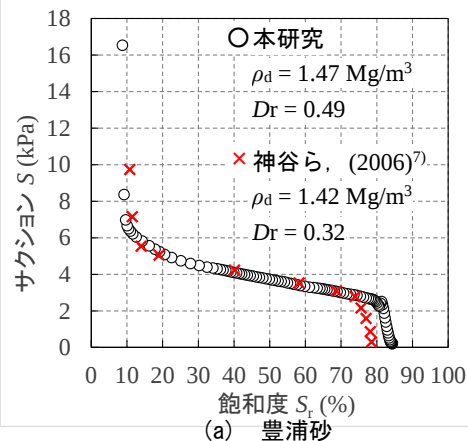
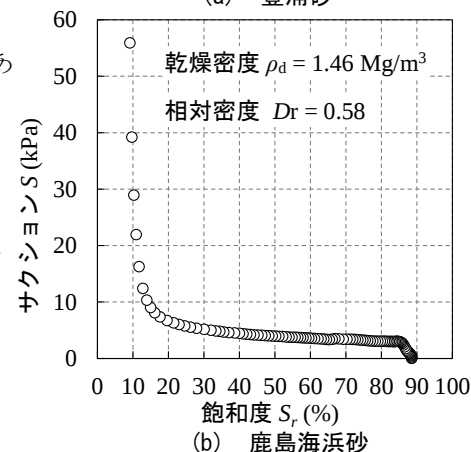


図4 飽和度～浸潤距離関係



(a) 豊浦砂



(b) 鹿島海浜砂

図5 水分特性曲線

図4に得られた飽和度～浸潤距離関係を示す。浸潤時間は2244秒である。給水部付近は飽和度80～90%程度で飽和しないことがわかる。

図5(a), (b)に豊浦砂と鹿島海浜砂の排水過程における水分特性曲線をそれぞれ示す(乾燥密度, 相対密度も図示する)。水分特性曲線は水分特性曲線測定装置(UMS社製HYPROP)を用い, 突固めて作製した供試体をあらかじめ脱気水で飽和させ, 定常蒸発法により試料のサクションと質量を経時的に測定し求めた。図5(a)から本装置と神谷ら⁷⁾の水分特性曲線は良好な関係を示しており測定値は妥当と考えている。飽和度の高い領域で多少異なるが, これは密度差の影響と考えている。図5(b)より, 鹿島海浜砂の空気侵入値はともに飽和度85%前後と考える。飽和度 $S_r = 85\%$ を超えるとサクションの急激な低下が見られ, サクション $S = 0\text{kPa}$ のとき, 飽和度 $S_r = 90\%$ 程度であることがわかる。飽和度 $S_r = 80\%$ から10%まではサクションは概ね $S = 3\text{kPa}$ から 20kPa であり大きな変化が見られないが, 飽和度 $S_r = 10\%$ 未満では急激なサクションの変化が見られた。

3. 振動台を用いた不飽和地盤の模型実験概要

実験には, アクリル製の奥行211mm, 幅351mm, 高さ260mm, 総体積 $1.0 \times 10^7 \text{mm}^3$ の土槽(以下, 小型土槽)と, アクリル製の奥行200mm, 幅950mm, 高さ550mm, 総体積 $7.6 \times 10^7 \text{mm}^3$ の土槽(以下, 大型土槽)の2種類を用いた。供試体の初期高さは小型土槽で135mm, 大型土槽で400mmに設定した。ここで, 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た。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。

図6(a), (b)に小型土槽と大型土槽それぞれの沈下量の計測地点を示す。A面, a面と平行に(B面やb面に直交方向)1分間振動させた後, 鋼制定規により沈下量を計測する。

図7に加振後の飽和度の算出方法を示す。加振終了後に底面から流出水までの高さ h を計測し, 模型土槽の長編 a 短辺 b から体積を求め水面以下の飽和度を算出した。

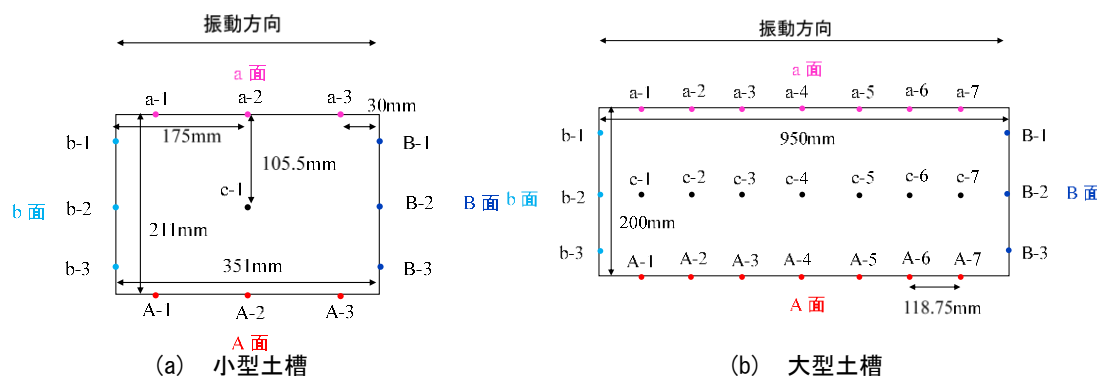


図6 模型土槽の上面図

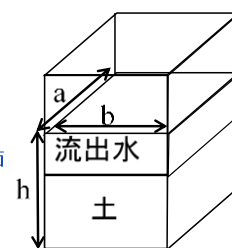


図7 液状化後の測定方法

4. 振動台を用いた不飽和地盤の模型実験結果と考察

実験終了後、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。

写真1 (a), (b) に小型土槽における不飽和クラック，不飽和液状化，写真2 (a), (b)に大型土槽における不飽和クラック，不飽和液状化をそれぞれ示す。

写真1 より，(a) と (b) のケースでは初期飽和度は 5% しか変えていないが，加振後の不飽和地盤の破壊形態は全く異なることがわかる．なお，写真1 (a), (b)の加振後の飽和度 S_{rf} はそれぞれ 71.7%，82.5% であった。

写真2 (a), (b) は $S_{r0} = 60\%$ ， $\rho_{d0} = 1.35 \text{ Mg/m}^3$ で行った実験での 500 Gal 終了時と 600 Gal 終了時をそれぞれ示す．それぞれ全く異なる破壊形態を示しているが，加振後の不飽和地盤の飽和度にはわずかな違いしかなかった。

図8 (a)～(e)にそれぞれ初期乾燥密度 $\rho_{d0} = 1.15, 1.20, 1.25, 1.30, 1.35 \text{ Mg/m}^3$ における不飽和地盤を加振した際の飽和度～加速度関係を初期乾燥密度 ρ_{d0} ごとに示す．○のプロットは振動数一定 (5Hz)，×のプロットは振幅一定 (10mm)，塗りつぶしのプロットは大型土槽を振動数一定で加振した結果をそれぞれ示す。

図8 (a)～(e)より，加速度が大きくなるほど 1 分間の加振による飽和度の上昇は大きくなることがわかる．一方，飽和度が 80%を超えると飽和度が上がりにくくなることがわかる。

なお，加振により飽和度が 80%以上になる 11 ケースではいずれも地表面に流出水が発生 (不飽和液状化) した．加振後の飽和度が 80%以下のケースではいずれも不飽和クラックを示した。



(a) 不飽和クラック ($S_{r0}=55\%$, $S_{rf}=71.7\%$)
(b) 不飽和液状化 ($S_{r0}=60\%$, $S_{rf}=82.5\%$)
写真1 小型土槽 ($\rho_{d0}=1.30 \text{ Mg/m}^3$)



(a) 不飽和クラック ($a_f = 500 \text{ Gal}$, $S_{rf}=79.8\%$)



(b) 不飽和液状化 ($a_f = 600 \text{ Gal}$, $S_{rf}=81.7\%$)

写真2 大型土槽 ($S_{r0} = 60\%$ ， $\rho_{d0} = 1.35 \text{ Mg/m}^3$)

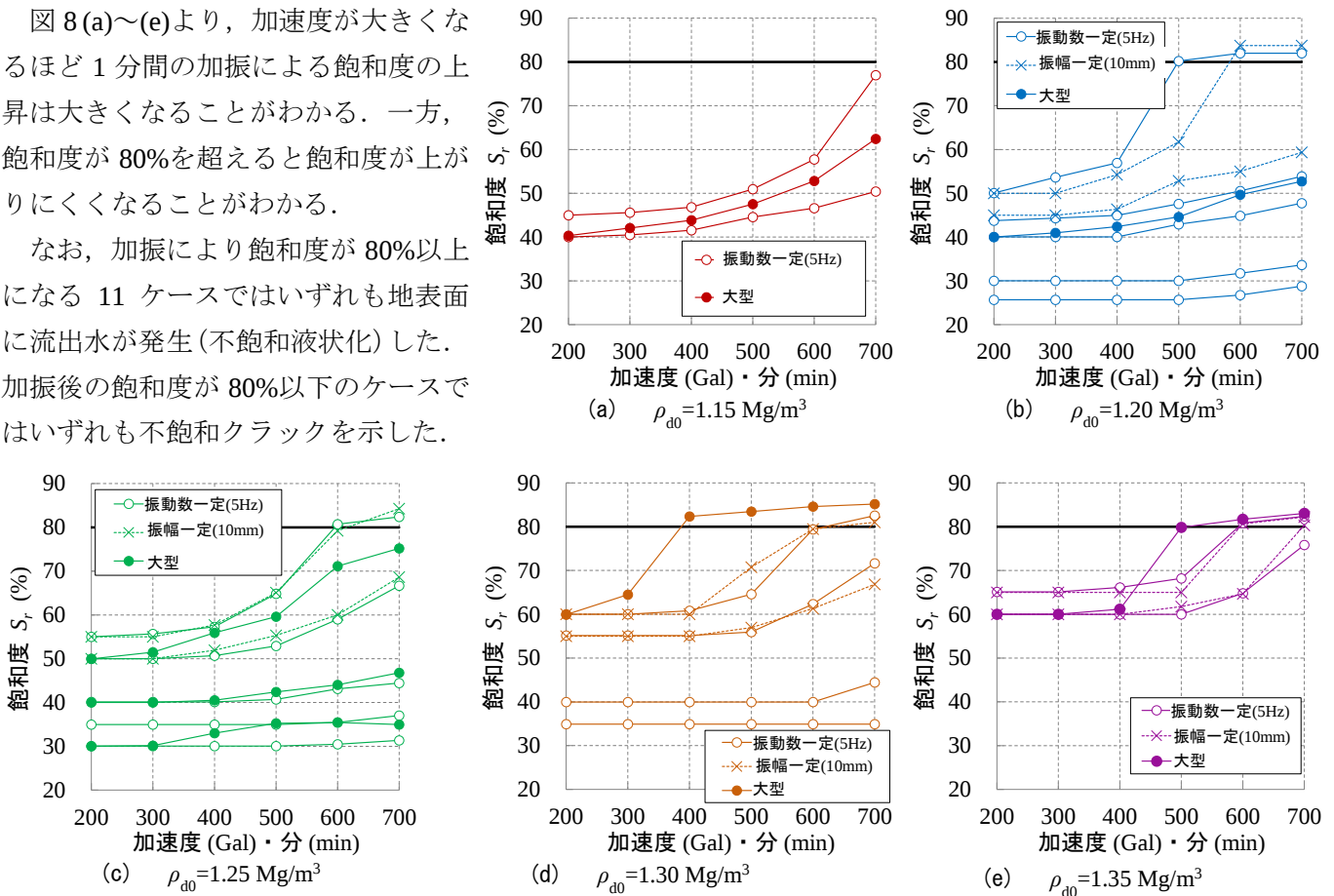


図8 飽和度～加速度関係

5. 浸潤・保水・締固め特性による加振時破壊形態の評価に関する実験的考察

鹿島海浜砂の破壊形態を、土槽の形状・サイズによらず相対的に評価する手法を考える。

図9に、700gal加振後の飽和度～初期飽和度関係を表したグラフを示す。白抜きのプロットが小型土槽、塗りつぶしのプロットが大型土槽での実験結果をそれぞれ示す。対角線は加振後の飽和度が初期飽和度と等しい状態、つまり、体積変化を起こさないラインを示し、このラインより上側は圧縮、ラインより下側は膨張をそれぞれ示す。今回の実験ではすべて圧縮（沈下）を示した。

加振後の飽和度 S_{rf} を初期飽和度 S_{r0} と初期乾燥密度 ρ_{d0} から評価する関数として次式を提案する。

$$S_{rf} - S_{ra} = A \cdot (S_{r0} - S_{ra}) \cdot \rho_{d0}^{-B} \quad (1)$$

(S_{ra} , A , B : 実験定数 (フィッティングパラメータ, 図9では $S_{ra}=31.5$ (%), $A=4.68$, $B=3.68$))

式(1)より得られた直線を図9に示す。実験結果は小型土槽、大型土槽ともにこの直線上に概ね一致している。小型土槽、大型土槽ともに初期飽和度40%程度までは初期飽和度と加振後の飽和度の差があまりみられない。飽和度の上昇率は初期乾燥密度が小さいほど大きく、土槽の形状・サイズによらず、初期乾燥密度の違いで概ね線形的に評価できることが確認できる。

図9において、初期乾燥密度 1.30 Mg/m^3 、初期飽和度35%のケースを除き、すべてのケースで地盤にクラックが発生（不飽和クラック）した。一方、加振後の飽和度が80%以上のいずれのケース（初期飽和度、初期乾燥密度を変えた6つのケース）でも小型土槽、大型土槽に関わらず地表面に流出水が発生（不飽和液状化）した。逆に、加振後の飽和度が80%以下では不飽和液状化を示さなかった。このことから、飽和度80%を超えると地盤の状態が転移すると考えられる。

水平浸潤試験における最大の飽和度、締固め曲線の最大飽和度、加振時破壊形態に相転移が生じる飽和度は概ね80%であった。また、水分特性曲線のサクシジョンの急激な低下が起こる飽和度は概ね85%であった。このことから、不飽和地盤の破壊形態にはサクシジョンが働いたまま生じる破壊（不飽和クラック）とサクシジョンが消失して生じる破壊（不飽和液状化）の2種類があると考えられる。さらに、不飽和地盤の浸潤・締固め特性と加振時破壊形態に関連性が示唆される。

6. おわりに

鹿島海浜砂を用い、浸潤・保水・締固め特性と加振時破壊形態を実験的に考察した。浸潤試験における最大の飽和度、締固め曲線中の最大飽和度、加振時破壊形態に相転移が生じる飽和度が概ね80%であった。また、飽和度が80%を超えると加振しても飽和度が上がりにくくなった。加振時の不飽和地盤の破壊形態には低飽和度で生じる不飽和クラックと高飽和度で生じる不飽和液状化の2種類の特徴的な破壊形態がみられた。

謝辞: 本研究は国土交通省水管理・国土保全局砂防部砂防計画課、河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野（砂防）「早川流域における降雨と地盤の保水・透水特性に着目した土砂流出特性に関する研究」（研究代表者：荒木功平）の援助を受けました。ここに深甚の謝意を表します。

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, pp.127-137, 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, pp.55-66, 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.
- 6) 細谷旭弘・顧琳林・張鋒：低・中拘束圧で繰返し載荷を受ける豊浦砂の力学特性に関する実験的研究，第50回地盤工学研究発表会，pp.455-456, 2015.
- 7) 神谷浩二・Rully BAKRIE・本城勇介：保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定，土木学会論文集 C, Vol.62, No.3, pp.679-688, 2006.

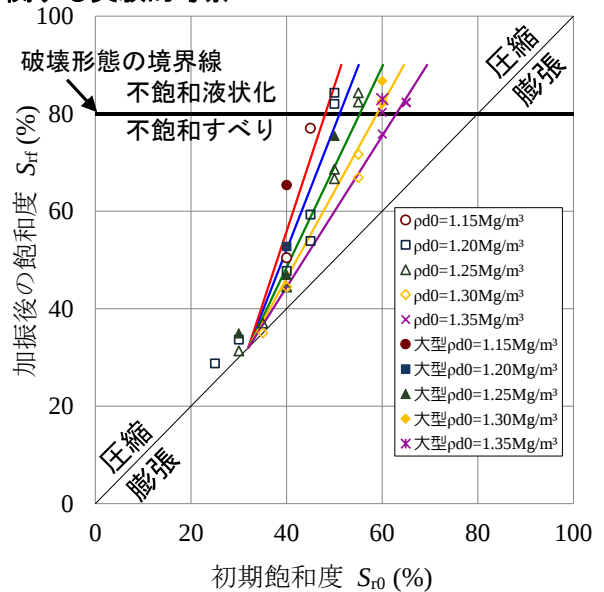


図9 加振後の飽和度～初期飽和度関係