

不飽和砂の浸潤・締固め特性と 加振時破壊形態に関する実験的考察

藤森 弘晃¹・荒木 功平²

¹学生会員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail: g15mc006@yamanashi.ac.jp

²正会員 山梨大学大学院 総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail: karaki@yamanashi.ac.jp

近年、地下水位が深い位置にある不飽和埋め戻し地盤において、飽和地盤の挙動とは異なる沈下が生じ、度々報告されている。地震動による不飽和地盤の沈下に関しては研究・報告が少なく、メカニズムも解明されていない。本研究では不飽和状態の模型地盤を作成し、振動台を用いて加速度を与え、加振前と加振後の沈下量、飽和度、乾燥密度の関係を求めている。その結果、不飽和地盤の破壊形態にクラックが生じるケースと地表面に流出水が生じるケースを確認した。そして、二つの破壊形態が分かれる条件について、境界値となる飽和度の存在を示唆している。加えてその飽和度は締固め試験や水平浸潤試験から導かれる飽和度と近い値を示すことを考察している。

Key Words: *unsaturated soils, degree of saturation, settlement, permeability, compaction characteristic*

1. はじめに

近年、地下水位が深い位置にある不飽和埋め戻し地盤において、飽和地盤の挙動と異なる地震動に伴う沈下現象が生じ、度々報告・指摘され始めている。新潟県中越沖地震（2007年7月16日）が発生した際には、繰返しせん断により柏崎刈羽原子力発電所敷地内で埋め戻し不飽和土が40～80 cm沈下していることが確認された¹⁾。原子炉建屋は支持岩盤に直接設置されているため沈下を起こさなかったが、周辺地盤の沈下により、各種埋設配管が寸断された²⁾。また、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）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³⁾。

近年の大規模な地震災害を受け、不飽和地盤の破壊形態が飽和地盤の破壊形態と全く異なる挙動を示すことがわかり、無視できなくなったため、飽和地盤の評価法によらない不飽和地盤を対象とした評価法の確立が急務となっている。しかしながら、不飽和地盤は飽和地盤に比べ強度が大きく安全であると考えられてきたため、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成し、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、締固め特性を明らかにし、不飽和地盤の特徴的な破壊形態との関連性を考察している。

2. 用いた試料（鹿島海浜砂）の物理特性、浸潤特性、締固め特性

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た。鹿島海浜砂の物理特性を把握するために、土粒子の密度試験、土の粒度試験、砂の最小密度・最大密度試験、突固めによる土の締固め試験を行った。

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。土粒子の密度 $\rho_s = 2.676 \text{ Mg/m}^3$ は一般的な無機質の鉱物の密度 $2.5 \sim 2.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲内である⁷⁾。最大間隙比 $e_{\max}$ 、最小間隙比 $e_{\min}$ 、平均粒径 D_{50} は概ね豊浦標準砂と同じ値を示した。小林ら⁸⁾によれば拘束圧が作用することで保水性が高くなる傾向を示すとされているが、本報で用いている鹿島海浜砂の水分保持曲線、拘束圧載荷状態での保水性については不明で

あり、今後の課題である。

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に鹿島海浜砂の粒径加積曲線を示す。均等係数 $U_c = 1.864$ ，曲率係数 $U_c' = 0.867$ を得た。この結果から鹿島海浜砂は分級された粒径幅の広くない砂であるといえる。

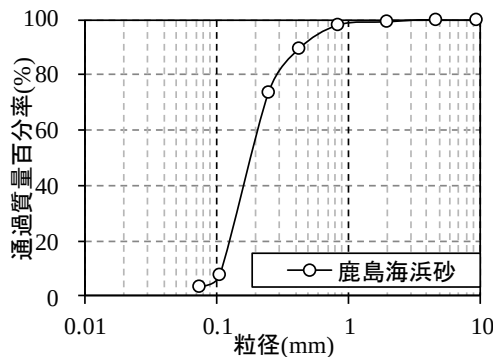


図-1 粒径加積曲線

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) を示す。最大乾燥密度 $\rho_{d\max} = 1.634 \text{ Mg/m}^3$ ，最適含水比 $w = 15.8\%$ を得た。また、この時飽和度 $S_r = 66.3\%$ である。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% の曲線に漸近していくことがわかる。

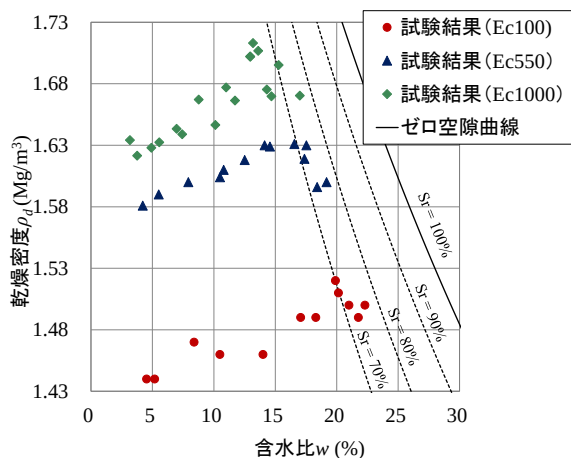


図-2 締固め曲線

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オート管式給水装置からなるが水頭差は与えない。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。

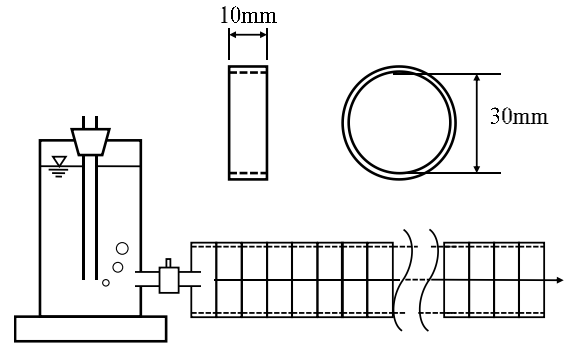


図-3 水平浸潤試験装置の模式図

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% 程度で飽和しないことがわかる。

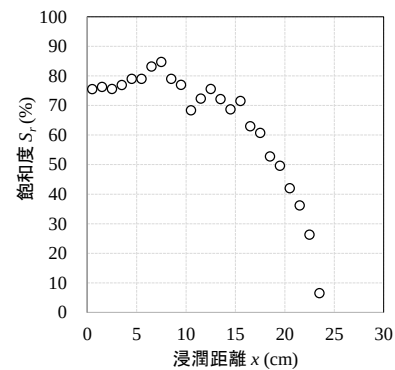


図-4 飽和度～浸潤距離関係

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，模型地盤は密度にばらつきが生じないように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。

最初に，作成する試料の乾燥密度と飽和度を設定し，そこから乾燥砂の質量，水の質量をそれぞれ計算した。乾燥砂と水をよく混合し，混合した試料を 5 等分して模型土槽に入れながら転圧し締固めを行った。

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 まで飽和度～沈下量～加速度関係を求める。なお、実際の地震動は種々のパラメータにより特徴づけられるが、本振動台実験では、昨今計測されている強震動のおおよそ平均的な加速度レベルであると考えられる 200～700Gal で加振した⁹⁾（新潟県中越沖地震（2007 年）では最大 701.0 Gal，長野県北部の地震（2011 年）では最大 207.2 Gal，東北地方太平洋沖地震（2011 年）では最大 1076.4 Gal が観測されている）。

図-5 (a)，(b) に小型土槽と大型土槽それぞれの沈下量の測定点を示す。図-5 (a)，(b) に示す 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、沈下量を鋼製定規により各点計測し、測定点全点の平均沈下量とした。

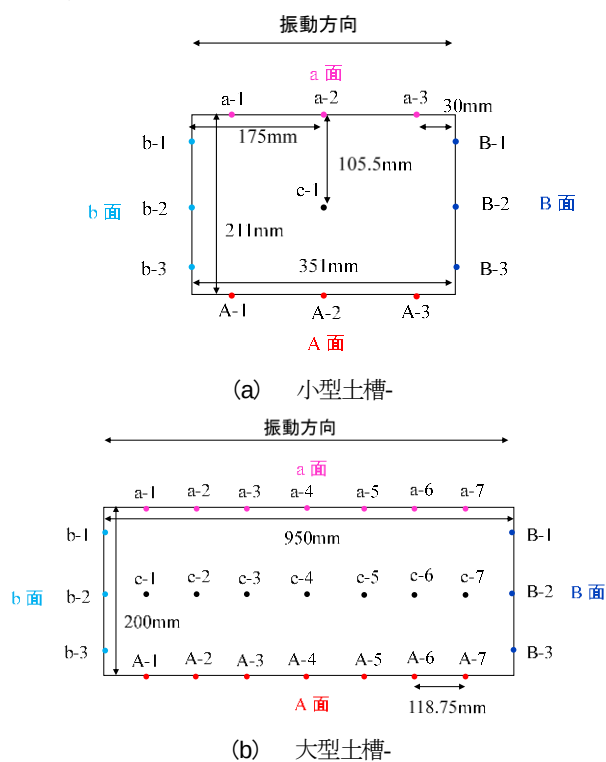


図-5 模型土槽の上面図-

図-6 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表面までの高さ h を計測し模型土槽の長辺 a 短辺 b から体積を求め水面以下の飽和度を算出した。

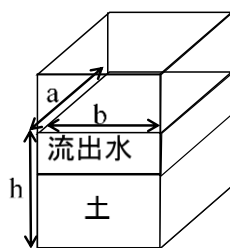


図-6 液状化後の測定方法

表-2 (a)，(b) に本論文で行っている小型土槽と大型土槽の実験ケースを示す。初期飽和度，初期乾燥密度を変えて 25 ケース行っている。

表-2 鹿島海浜砂の物理特性

(a) 小型土槽

	Name	ρ_{d0} (Mg/m ³)	S_{r0} (%)		Name	ρ_{d0} (Mg/m ³)	S_{r0} (%)
小型	case1	1.15	40	大型	case10	1.25	40
	case2	1.15	45		case11	1.25	50
	case3	1.20	25		case12	1.25	55
	case4	1.20	30		case13	1.30	35
	case5	1.20	40		case14	1.30	40
	case6	1.20	45		case15	1.30	55
	case7	1.20	50		case16	1.30	60
	case8	1.25	30		case17	1.35	60
	case9	1.25	35		case18	1.35	65

(b) 大型土槽

	Name	ρ_{d0} (Mg/m ³)	S_{r0} (%)
大型	case1'	1.25	40
	case2'	1.20	40
	case3'	1.25	50
	case4'	1.25	30
	case5'	1.15	40
	case6'	1.30	60
	case7'	1.35	60

4. 加振時の不飽和地盤挙動の実験結果と考察

本章では加振前および加振後の飽和度変化に着目する。ただし、地表面（または水面）以下の土層全体の飽和度について着目している。

(1) 地震動に伴う破壊形態の違い

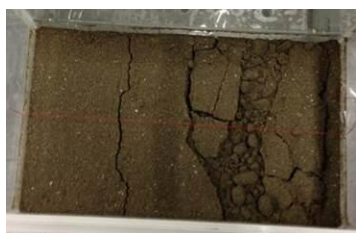
実験終了後、地表面に流出水を確認したケース（以下、不飽和液状化と称す）と地表面にクラックやすべりを確認したケース（以下、不飽和クラックと称す）を確認した。写真-1 (a)，(b) に小型土槽における不飽和クラック，不飽和液状化，写真-2 (a)，(b) に大型土槽における不飽和クラック，不飽和液状化をそれぞれ示す。

写真-1 (b) より、不飽和液状化が発生した地盤の表面には泡が発生した。これは、地盤の飽和度上昇に伴い、間隙内の空気が地表面に浮きあがったためだと考えられる。また、写真-1 (a) と (b) のケースでは初期飽和度に 5 % の違いしかないが、不飽和地盤の加振後の破壊形態は大きく異なることがわかる。初期飽和度のわずかな違いが不飽和地盤に全く異なる破壊形態をもたらすことを示している。なお、写真-1 (a) および (b) の加振後の飽和度 S_r はそれぞれ 71.7%，82.5 % であった。

写真-1 (a) と (b) から、与えられた地震動が同じでも、初期飽和度が 5 % 程度異なっていれば、全く異なる破壊形態を示すことがわかる。

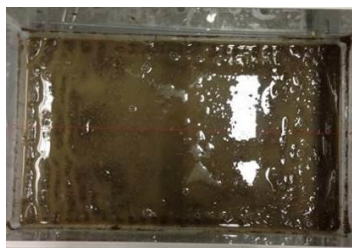
写真-2 (a) と (b) は、 $S_0 = 60\%$ 、 $\rho_{d0} = 1.35 \text{ Mg/m}^3$ で行った実験での 500 Gal 終了時と 600 Gal 終了時をそれぞれ示している。

写真-2 (a) は不飽和クラックが発生している。中央部ではクラックが確認でき、振動方向に直交する面付近で大きく沈下が発生している。写真-2 (b) では不飽和液状化が発生している。写真-2 (a) の 500 Gal 終了時の飽和度 S_f は 79.8%，写真-2 (b) の 600 Gal 終了時の飽和度は 81.7%であった。写真-2 (a) と写真-2 (b) では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。



(a) 不飽和クラック

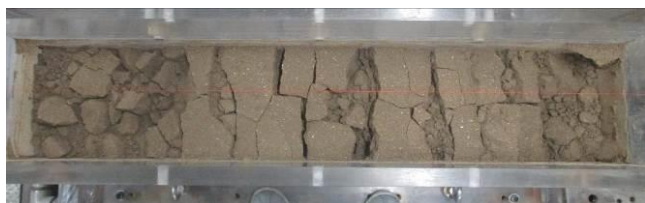
($S_0 = 55\%$, $a_f = 700 \text{ Gal}$, $S_f = 71.7\%$)



(b) 不飽和液状化

($S_0 = 60\%$, $a_f = 700 \text{ Gal}$, $S_f = 82.5\%$)

写真-1 小型土槽 ($\rho_{d0} = 1.30 \text{ Mg/m}^3$)



(a) 不飽和クラック

($a_f = 500 \text{ Gal}$, $S_f = 79.8\%$)



(b) 不飽和液状化

($a_f = 600 \text{ Gal}$, $S_f = 81.7\%$)

写真-2 大型土槽 ($S_0 = 60\%$, $\rho_{d0} = 1.5 \text{ Mg/m}^3$)

図-7 は、小型土槽を用いて行った実験のうち初期乾燥密度 $1.20 \text{ Mg/m}^3 \sim 1.35 \text{ Mg/m}^3$ 、初期飽和度 $45\% \sim 65\%$ の範囲にある 8 ケースをプロットしたグラフである。×印のプロットは 700 Gal 加振後に地盤にクラックやすべりが発生したケース（不飽和クラック）であり、○印でプロットしたケースは 700 Gal 加振後に地表面に流出水を確認したケース（不飽和液状化）である。

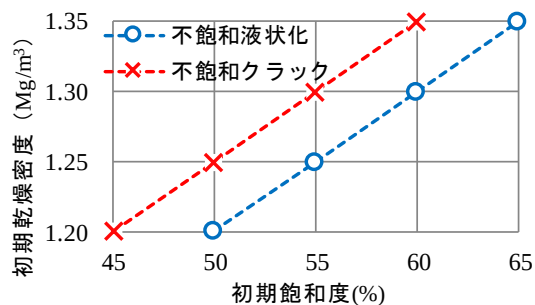


図-7 破壊形態の分かれる境界

図-7 より、不飽和クラックと不飽和液状化それぞれの破壊形態を示した初期条件は概ね線形上にあることも確認できる。ここで、×印のプロットを結んだ線を不飽和クラックライン、○印のプロットを結んだ線を不飽和液状化ラインと称する。不飽和地盤の破壊形態が不飽和クラックと不飽和液状化に分かれる不飽和クラックラインと不飽和液状化ラインの初期飽和度の差は 5% しかない。つまり、不飽和地盤の初期飽和度が 5% 異なるだけでそれぞれ全く異なる破壊形態をもたらすことがわかる。

一方、地震前に不飽和地盤の乾燥密度と飽和度および地震外力が既知であれば、地震後の破壊形態が不飽和クラックか不飽和液状化かを予知できる可能性を示している。しかしながら、本実験では一つの基本振動しか与えていないため、加振時間など加振条件を変えて実験を行い、普遍性を明らかにする必要がある。

(2) 地震動に伴う沈下挙動

図-8 (a) ～ (e) に、それぞれ小型土槽を用いて初期乾燥密度 $\rho_{d0} = 1.15, 1.20, 1.25, 1.30, 1.35 \text{ Mg/m}^3$ において、初期飽和度 S_0 を変化させた場合の平均沈下量～加速度関係を示す。

図-8 (a) ～ (e) より、初期飽和度が大きいほど沈下量は増大傾向にあることがわかる。また、初期飽和度が大きいほど加速度の小さい段階で沈下を開始することがわかる。平均沈下量は、加速度が大きくなるほど大きくなり、100 Gal 増加に伴う沈下量の増え方も初期飽和度が大きいほど大きくなることがわかる。

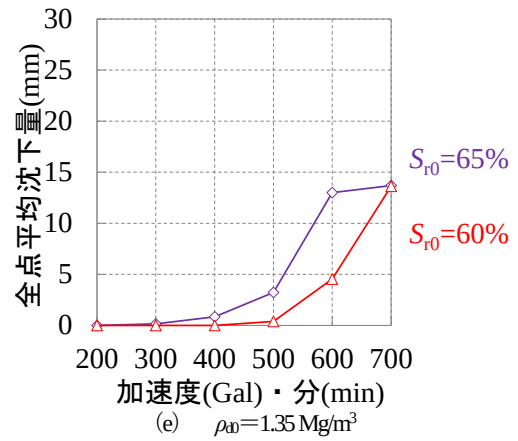
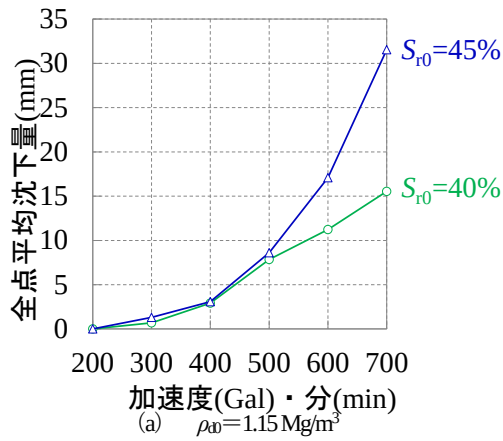
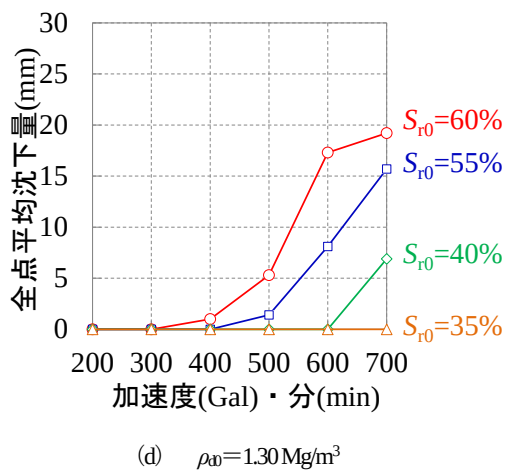
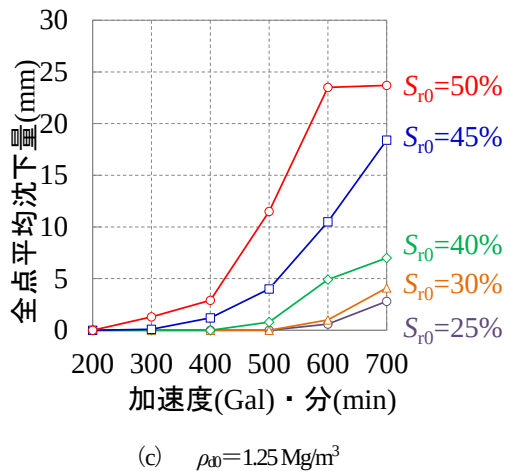
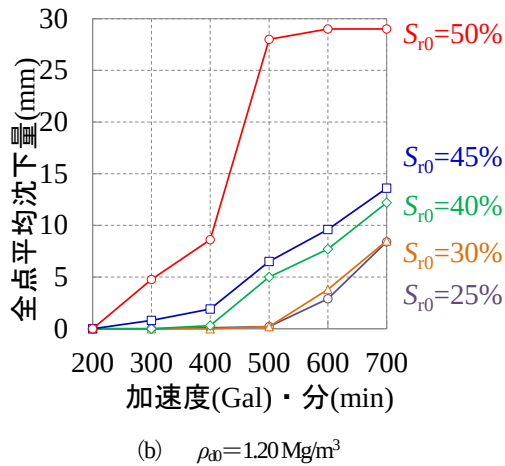
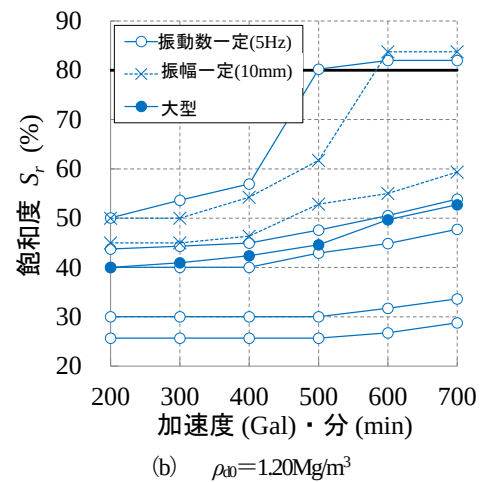
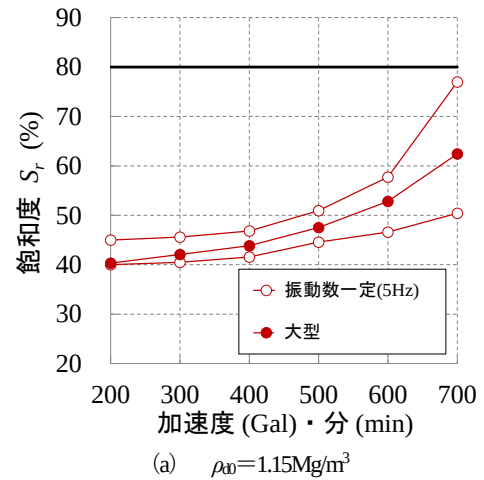


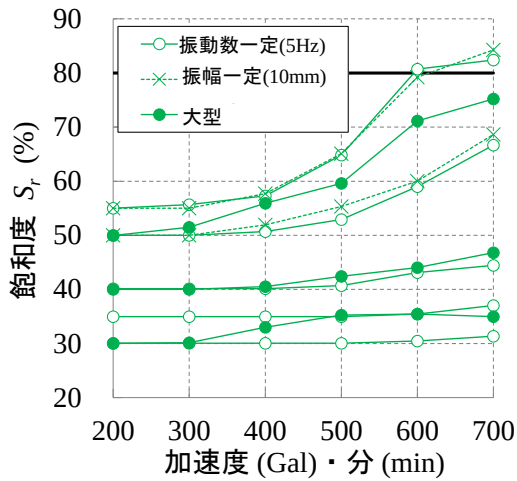
図-8 加振時の沈下量～加速度関係（初期乾燥密度一定）



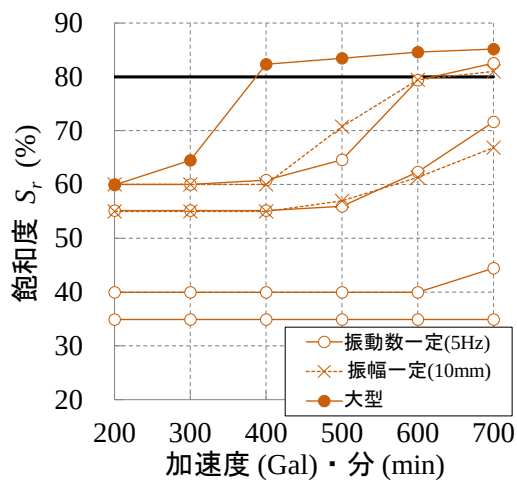
(3) 地震動に伴う飽和度の変化

図-9 (a) ～ (e) は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示す。

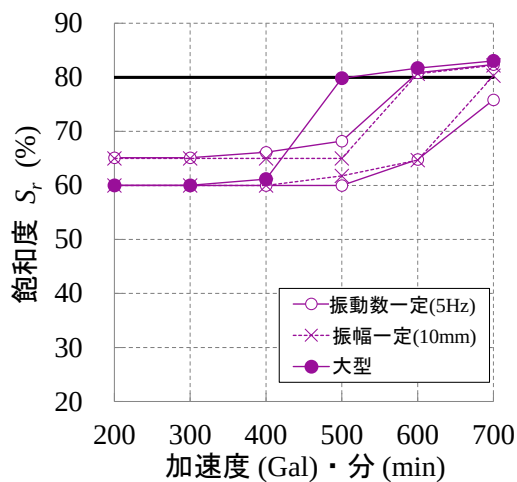




(c) $\rho_{d0}=1.25\text{Mg/m}^3$



(d) $\rho_{d0}=1.30\text{Mg/m}^3$



(e) $\rho_{d0}=1.35\text{Mg/m}^3$

図-9 飽和度～加速度関係

図-9 (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のがわかる。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。逆に、加振後の飽和度が80%以下のケースではいずれも不飽和すべりを示した。

図-10は、初期乾燥密度 $\rho_{d0}=1.30\text{Mg/m}^3$ において、初期飽和度を変化させた場合における、加振後の飽和度 S_{rf} から初期飽和度 S_{r0} を減じた飽和度増分 $(\Delta S_r = S_{rf} - S_{r0})$ ～加速度関係を示している。図-10 から初期飽和度が大きいほど、加振後の飽和度増分が上昇しやすく（小さな加速度でも飽和度増分が発生しやすい）、加速度が大きくなった際の加振による飽和度の上がり方が大きいとわかる。

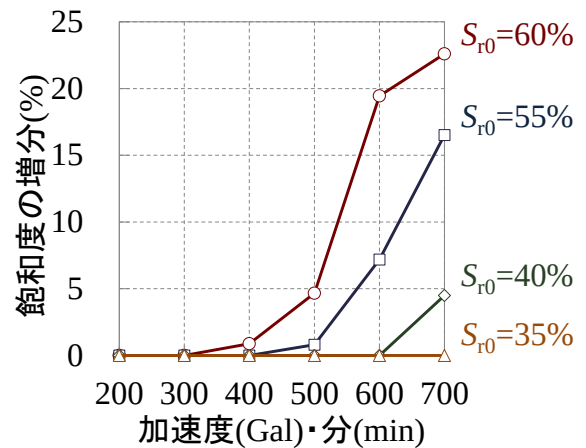


図-10 飽和度増分～加速度関係 ($\rho_{d0}=1.30\text{Mg/m}^3$)

5. 鹿島海浜砂の破壊形態の飽和度による評価

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-11 に、700 gal 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。今回の実験のケースではすべて圧縮（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として次式を提案する。

$$S_{rf} - 31.5 = 4.68 \cdot (S_{r0} - 31.5) \cdot \rho_{d0}^{-3.68} \quad (1)$$

式 (1) より得られた直線を図-11 に示す。実験結果は小型土槽、大型土槽ともにこの直線におおむね一致している。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

いで概ね線形的に関連づけられることが確認できる。

図-11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 6 つのケースでは小型土槽、大型土槽に関わらずいずれも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。このことは、飽和度 80 % 付近を境界として地盤に相転移が起こることを示していると考えられる。

これらの結果は、地盤内において飽和度の不均質な分布は存在していると考えられるが、地震外力に伴う飽和度変化と破壊形態を初期乾燥密度、初期飽和度から概ね評価できる可能性を示している。

さらに、浸潤試験における最大の飽和度、締固め曲線の漸近する飽和度、加振時破壊形態に相転移が生じる飽和度が概ね 80 % であったことから不飽和地盤の浸潤・締固め特性と加振時破壊形態の関連性が示唆される。

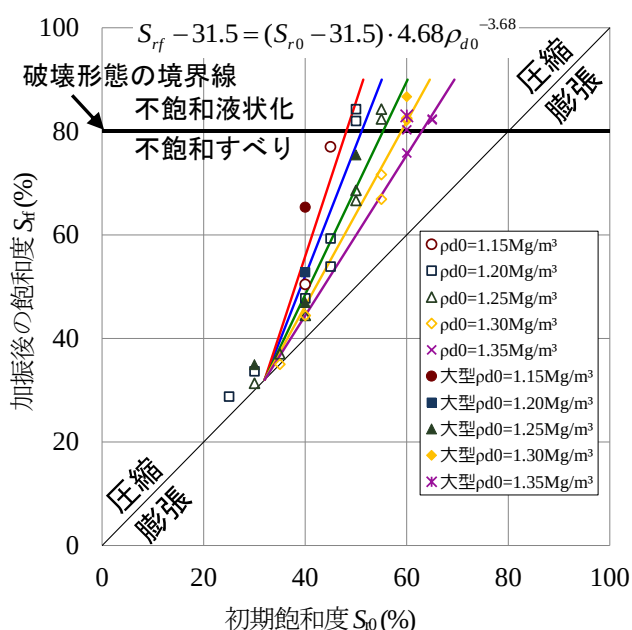


図-11 加振後の飽和度～初期飽和度関係

6. おわりに

振動台を用いて鹿島海浜砂から成る不飽和模型地盤（地下水位が無い地盤）の地震時の沈下挙動・破壊形態を実験的に考察した。その結果、初期飽和度が大きいほど地震時の飽和度は増加しやすいことがわかった。しかし、飽和度 80 % を境にして飽和度増分が著しく減少する傾向がみられた。加振により沈下が生じた結果、クラックやすべり破壊を示した地盤で、土層全体の飽和度は 80 % 未満であり、液状化した地盤は 80～83 % であった。

このことから、不飽和地盤の破壊形態について、ある飽和度を境界にして相転移が起こると考えた。また、初期飽和度が小さい場合、700 gal まで加振しても破壊しなかった。逆に言えば不飽和地盤が破壊するか否かは、地震前の飽和度を把握すれば判断できると考える。

不飽和模型地盤の浸潤・締固め特性と加振時破壊形態を実験的に考察した。その結果、浸潤試験における最大の飽和度、締固め曲線の漸近する飽和度、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。このことから不飽和地盤の浸潤・締固め特性と加振時破壊形態の関連性が示唆される。

今後、不飽和地盤の地震時破壊挙動に関する研究の加速的な発展に向け、本研究成果を周知していきたい。

謝辞：：本研究の一部は国土交通省の河川砂防技術研究開発助成 地域課題分野（砂防）（代表者：荒木功平）、国立大学法人山梨大学の分野横断的融合研究プロジェクト（代表者：鈴木猛康）の援助を受けました。ここに深甚の謝意を表します。また、北爪貴史氏（株式会社東電設計）、森智昭氏（甲府市）、後藤聡氏（国立大学法人山梨大学）に多くのご助言・ご協力をいただきました。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) Sakai, T., Suehiro, T., Tani, T., and Sato, H.: Geotechnical performance of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station caused by the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake, Case History Volume for Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Technical Committee No.4, ISSMGE, pp.1-29, 2009.
- 3) 若松加寿江・吉田望・清田隆：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.
- 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) 社団法人 地盤工学会：土質試験-基本と手引-（第二回改訂版），pp.17-25，2011.
- 8) 小林薫・西村友良・森井俊広・中房悟：破碎した貝

殻の水分特性曲線に及ぼす拘束圧の影響, 土木学会
第 66 回年次学術講演会, pp.789-790, 2011.

- 9) 気象庁ウェブページ: 気象庁 強震波形
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>, 2015.

(2016. *. * 受付)

AN EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON PERMEABILITY, COMPACTION CHARACTERISTIC AND FAILURE PATTERN BY VIBRATION FOR UNSATURATED SOILS

Hiroaki FUJIMORI, Kohei ARAKI

In recent years, unsaturated backfill that groundwater level is in a deep position, result in different settlement from the behavior of the saturated ground, it has been frequently reported. However less research for settlement of unsaturated soil by seismic motion, the mechanism has not been elucidated. In this study, the relationships between the amount of settlement, degree of saturation and dry density have been assessed, to prepare a unsaturated model ground, by using a shaking table. It was confirmed two failure pattern for the unsaturated ground liquefaction and cracks. The possible is found the boundary value of the degree of saturation.