

14. 振動台実験によるプラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化特性

Liquefaction Tendency of Reinforced Sand by Prefabricated Vertical Drain Based on Shaking Table Test

溝口 義弘*

浅田 毅*

要 旨

液状化地盤にプラスチックボードドレーン材(以下、PBDとする)を敷設し、その頭部をジオグリッドで拘束することによって、地震時の過剰間隙水圧の発生を抑制するだけでなく、地盤のせん断変形を抑制する効果を合わせ持つことを確認するために振動台実験を行った。実験の結果、排水性PBDを敷設した地盤は、無処理地盤あるいは非排水性PBDの敷設地盤に比べて液状化が生じにくく、地盤の補強効果がより発揮されることが分かった。

キーワード：プラスチックボードドレーン、液状化、振動台実験、液状化強度、排水性、拘束性

1. はじめに

近年、プラスチック性のドレーン材を用いた液状化対策工の施工実績が増加しているが、その対策工の補強メカニズムに関する研究は数多くはない。筆者らは、液状化地盤にプラスチックボードドレーン材を敷設し、PBDの頭部をジオグリッドで拘束した場合、PBDの排水性とPBDとジオグリッドによる地盤の拘束性によって、地震時の過剰間隙水圧の発生抑制と地盤のせん断変形抑制を兼ね備えた補強効果があらわれると考え、振動台実験を行ってその特性を調べた¹⁾²⁾。

今回、排水機能のあるPBDと排水機能のないPBDを敷設した模型地盤の振動台実験を行い、液状化特性を調べた³⁾⁴⁾。本稿ではその振動台実験の概要と結果を報告する。

2. 振動台実験

振動台実験の概要を図-1に示す。油圧式の振動台上に単純せん断土槽を設置し、その中に模型地盤を作製した。振動台は長さ2000mm、幅1500mmで、最大積載荷重24.5kNであり、水平方向に最大1G、鉛直方向に最大0.5Gまで加振することができる。単純せん断土槽は厚み60mmのローラー付きアルミフレームを積層した長さ1200mm、幅1000mm、高さ1035mmのもので、内側に止水のためにゴムメンブレンを張っている。

模型地盤は以下の手順にしたがって作製した。地盤作製前、PBDの下端部を金具でせん断土槽底面に固定した。また、ひずみゲージを貼付けたりん青銅を地盤中とPBDの内部に設置した。その後、初期相対密度が45%の飽和

地盤になるように、水中落下法により単純せん断土槽内に珪砂7号を投入しながら、間隙水圧計、加速度計を所定の位置に設置した。地盤作製後、ジオグリッドを地盤表面に敷き、PBD頭部に固定した。水位は地盤表面に一致させた。

実験条件を表-1に、PBDの配置図を図-2に示す。排水性PBDの敷設本数を変えたケース(2)(3)(4) (24本、9本、6本)と、非排水性PBDの敷設本数を変えたケース(5)(6)(24本、9本)、および比較のためにPBDを敷設しない無処理地盤のケース(1)の合計6ケースについて実験を行った。実験に使用した珪砂7号(岐阜県土岐産)の粒度分布と物理特性を図-3に示す。最大粒径は約0.5mm

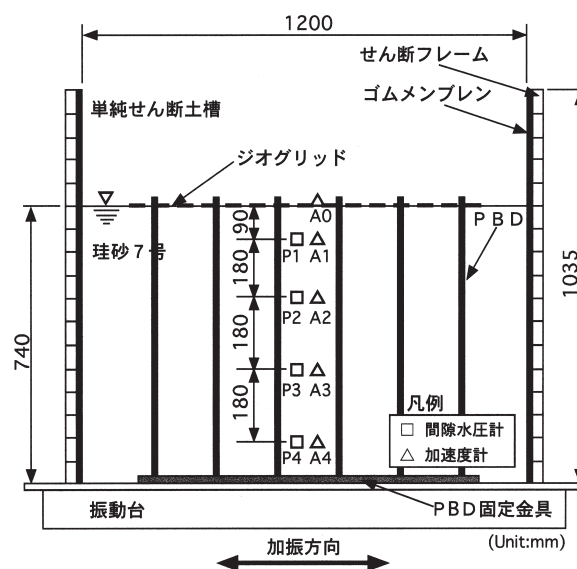


図-1 振動台実験の概要

*土木構造研究室

で細粒分を含まない、均一なきれいな砂である。

実験に用いたPBD材の形状を図-4に示す。排水性PBDは、軟弱地盤の圧密促進工法などの実施工で使用されているPBDと地盤との剛性を考慮し、スパイラル状のポリエチレン樹脂の芯材に目詰まりを防止するためのフィルターを装着したものである。非排水性PBDは、水の流入を防ぎ、地盤とフィルターの摩擦を排水性PBDと同じものとするため、フィルターの内側に遮水性のナイロンを貼付けたものである。PBDの大きさは、実施工で使われている最小打設間隔（PBDの幅200mm、打設間隔800mm）から決めた。地盤表面に敷いたジオグリッドを図-5に示す。ジオグリッドは、引張強さ98kN/m、

伸度25%以下、目合い4mmのものである。りん青銅に貼付けたひずみゲージの位置を図-6に示す。

加振実験は、単純せん断土槽長手方向に周波数1Hzの正弦波を加速度40galで20波予備加振を行った後、地盤が液状化するまで加速度80galから20galずつ段階的に増加させ、それぞれ20波加振した。測定項目は、地盤の加速度、間隙水圧およびりん青銅のひずみである。

3. 地盤の土質特性

地盤作製後にコーン貫入試験を行った。その結果を図-7に示す。表-1からもわかるように非排水性PBD敷設地盤は、排水性PBDのものより初期相対密度が小さいため、コーン指数も小さくなっている。

図-8にコーン指数から柴田らの方法⁵⁾を用いて深さごとに求めたPBD敷設地盤の液状化強度と無処理地盤の加速度測定結果から求めた液状化強度を示す。コーン指数から推定した地盤の液状化強度は、排水性PBDと非排水性PBDの敷設地盤ともに深さ方向にほぼ一定であり、ケース(1)の無処理地盤の液状化強度と比べると、値のばらつきがあるがほぼ同等であることが分かる。したがっ

表-1 実験条件

ケース	PBDの種類	敷設本数(敷設間隔)	相対密度(%)
(1)	なし		45
(2)	排水性	6×4=24 (160mm)	45
(3)		3×3= 9 (240mm)	49
(4)		3×2= 6 (400mm)	46
(5)	非排水性	6×4=24 (160mm)	36
(6)		3×3= 9 (240mm)	39

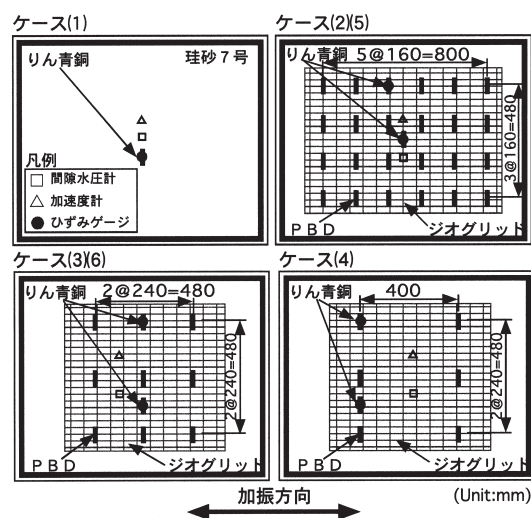


図-2 PBDの配置

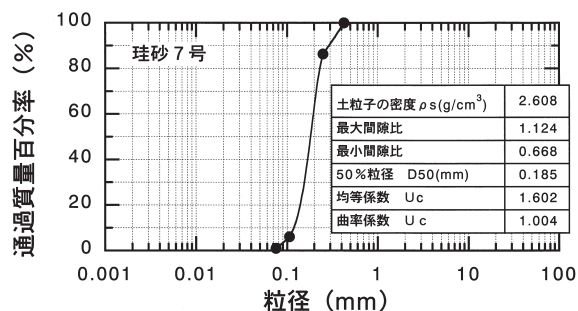


図-3 珪砂 7号の粒度分布

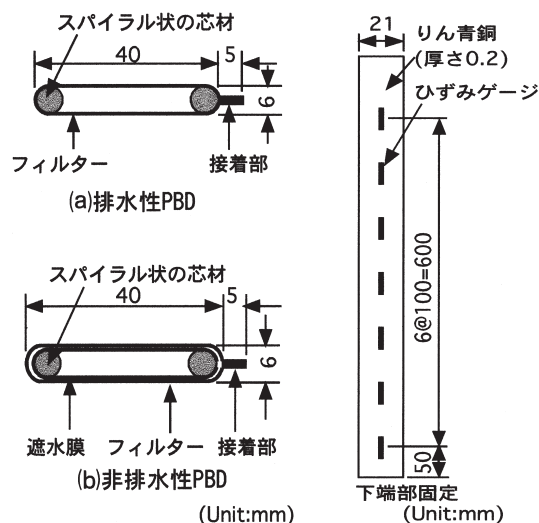


図-4 PBDの形状

図-6 りん青銅

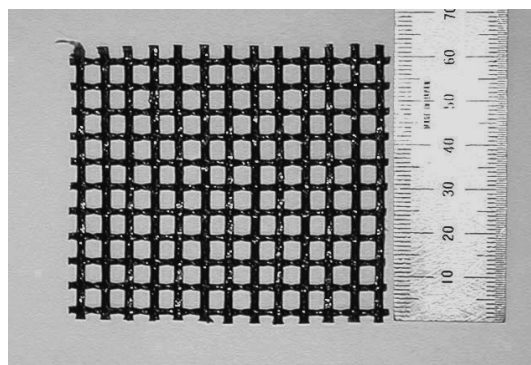


図-5 ジオグリッド

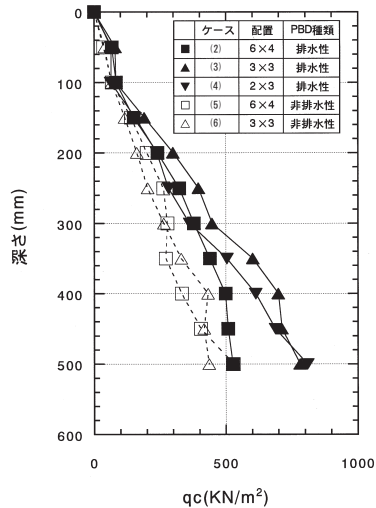


図-7 地盤のコーン指数

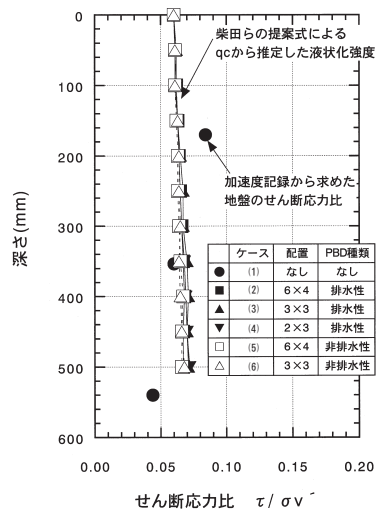


図-8 地盤のせん断強度

て、全ケースとも初期の地盤状態はほぼ同じものと考えられる。

4. 実験結果

4.1 地盤の加速度

液状化したときの測点A3（深さ450mm）における加速度の時刻歴を図-9に示す。なお、図中の矢印に示した数字は過剰間隙水圧比を示す。地盤が液状化したときの加振加速度は、無処理地盤のケース(1)では80gal、排水性PBD敷設地盤のケース(2)では160gal、ケース(3)では140gal、ケース(4)では80gal、非排水性PBD敷設地盤のケース(5)、(6)では80galである。排水性PBD敷設地盤において、PBDの敷設本数が多いほど地盤が液状化する時の加振加速度は大きく、地盤の液状化が生じにくいことが分かる。

すべてのケースにおいて、過剰間隙水圧比が0.6付近

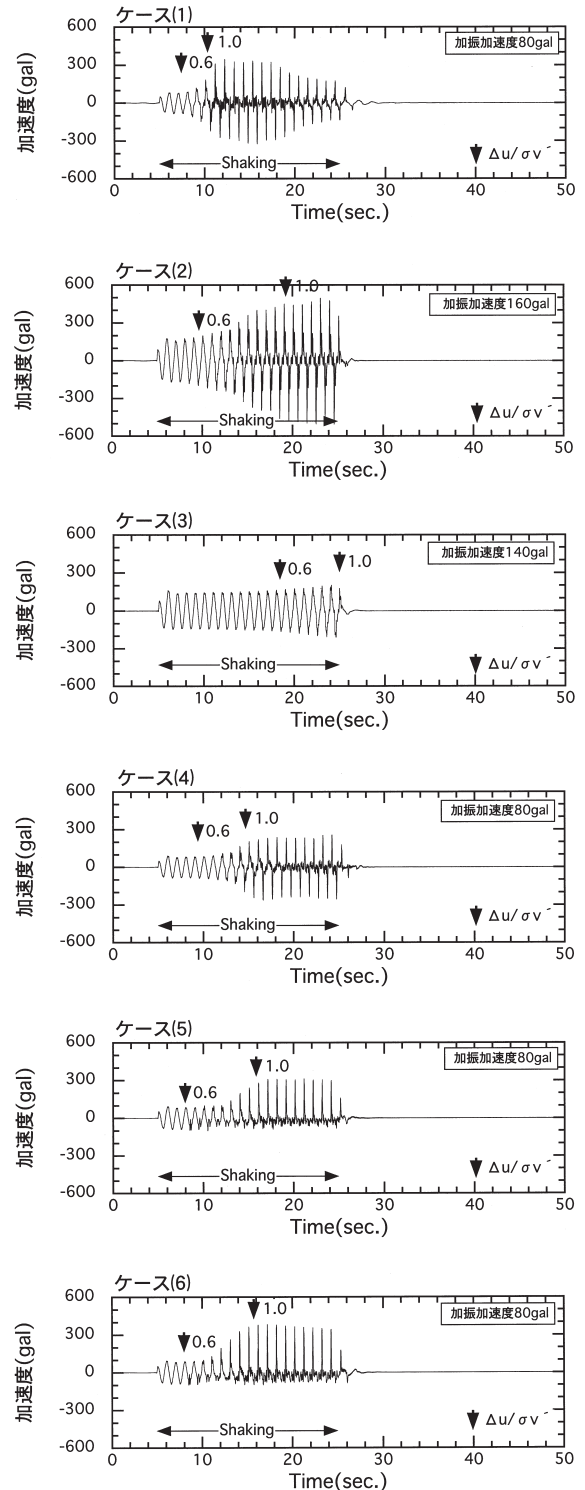


図-9 加速度の時刻歴（測点A3）

で加速度が上昇しはじめ、完全に液状化する（過剰間隙水圧比が1.0になる）と加速度は最大値に達する。また、加振中の加速度は低下せず、加振終了後に加速度は低下する。

4.2 地盤の過剰間隙水圧

液状化したときの測点P3（深さ450mm）における過

剰間隙水圧の時刻歴を図-10に示す。無処理地盤のケース(1)では80galの5サイクルで完全に液状化に至っているが、排水性PBD敷設地盤において、ケース(2)では160gal、ケース(3)では140galで液状化し、ケース(4)では80galの10サイクルで液状化に至っている。加振中の過剰間隙水圧の挙動は、無処理地盤のケース(1)と排水性PBDを敷設したケース(2)(3)(4)では異なる。特にケース(2)(3)では加振と同時に負の間隙水圧が発生し、正のダイレイタンスが生じている。さらに、加振中の過剰間隙水圧の上昇と下降の変動が大きくなり、地盤の補強効果が発揮されているものと考えられる。

一方、非排水性PBDの敷設地盤において、ケース(5)(6)では80galでそれぞれ液状化に至っており、無処理地盤のケース(1)に類似した結果になった。しかし、模型地盤の強度が低いことと、液状化に至る繰返し回数が無処理地盤のケース(1)の5サイクルに対し、非排水性PBDのケース(5)(6)では12、11サイクルになっていることから、PBDの拘束効果がある程度発揮されたものと考えられる。排水性PBD敷設地盤でみられた過剰間隙水圧の上昇と下降の大きな変動は、非排水性PBD敷設地盤ではみられなかった。

測点P3における過剰間隙水圧が消散しはじめる時間は、ケース(1)の25秒後に対し、排水性PBDの場合、ケース(2)(3)で3秒後、ケース(4)で12秒後と排水性PBDの敷設

本数が多いほど消散速度が早くなることが分かる。一方、非排水性PBDの場合、ケース(5)で12秒後、ケース(6)で14秒後となり、無処理地盤のケース(1)に比べ消散速度が早くなっているが、おそらく非排水性PBDと地盤との境界から間隙水圧が消散したものと考えられる。

なお、測点P3以外の過剰間隙水圧の時刻歴を省略しているが、全ケースとも液状化は表層から順に生じ、加振終了後、過剰間隙水圧の消散は下層から順に生じている。

4.3 地盤のせん断応力

せん断応力 τ は、加速度計の測点間ごとの平均加速度にその間の全応力増分を乗じ、地表から順に重ね合わせる方法により求めた⁶⁾。ただし、加速度については主に加速度計の傾斜に起因すると思われる成分が含まれるので基線補正を行った。

測点A2とA3の中点位置における地盤のせん断応力 τ_s の時刻歴を図-11に示す。全ケースとも液状化前後でせん断応力が最大となるが、過剰間隙水圧の最大発生時と同時刻でない。最大せん断応力 τ_{max} は、無処理地盤のケース(1)の0.17kN/m²に対し、排水性PBD敷設地盤のケース(2)では0.34kN/m²、ケース(3)では0.26kN/m²、ケース(4)では0.23kN/m²となり、排水性PBDの敷設本数が多いほど地盤のせん断応力は増加していることが分かる。また、液状化すると地盤のせん断応力は低下するがPBDの敷設本数が多いほどその低下率は小さい傾向がある。

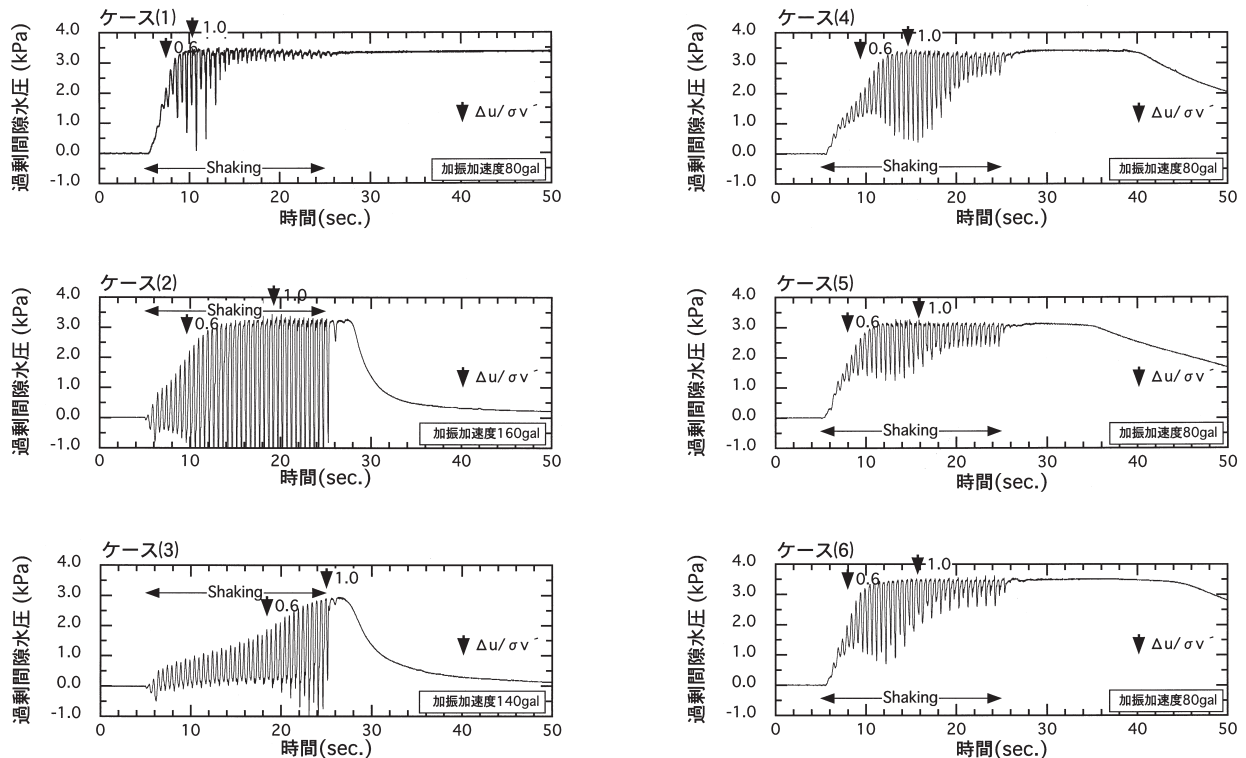


図-10 過剰間隙水圧の時刻歴（測点P3）

一方、非排水性PBD敷設地盤の最大せん断応力は、ケース(5)(6)では 0.19kN/m^2 となり、排水性のものと比べ無処理地盤より多少増加しているが、排水性PBD敷設地盤ほどの強度増加は見られない。

次に、PBDの敷設密度RAを図-12に示すように等価換算径を用いた式(1)で定義する。

$$RA = n \pi dw^2 / (4As) \quad (1)$$

ここに、 n ：敷設本数、 dw ：等価換算径($dw=2(w+t)/\pi$)、 w 、 t ：PBDの幅と厚さ、 As ：敷設面積である。

加速度計の測点ごとに求めた地盤の最大せん断応力比と敷設密度の関係を図-13に示す。各ケースとも加速度計の設置深さの違いにより最大せん断応力比のばらつきがあるが、排水性PBD敷設地盤の最大せん断応力比は、無処理地盤のケースより大きくなり、敷設密度に比例して増加している。一方、非排水性PBD敷設地盤の最大せん断応力比は、無処理地盤のケースより大きく、排水性PBDのものよりは低く、わずかであるが補強効果が発揮されているものと考えられる。なお、圧密促進に用いられているPBDの標準的な仕様（幅100mm、厚さ3mm、打設ピッチ80cm～150cm）も付記するが、ケース(3)(4)(5)の配置はPBDによる軟弱地盤の標準的な改良条件に対応していることを示している。

4.4 PBDのひずみ

過剰間隙水圧比が0.6、0.8に達したときのPBD内のり

ん青銅のひずみ分布を図-14に示す。PBDには引張りだけでなく圧縮も含み混在している。排水性PBD敷設地盤の過剰間隙水圧比が0.8のときのひずみは、過剰間隙水圧比が0.6のときのものに比べて、PBD下端部付近のひ

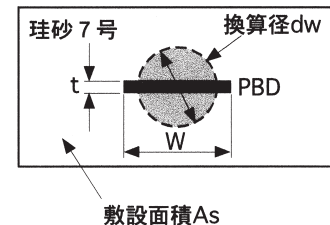


図-12 敷設密度の定義

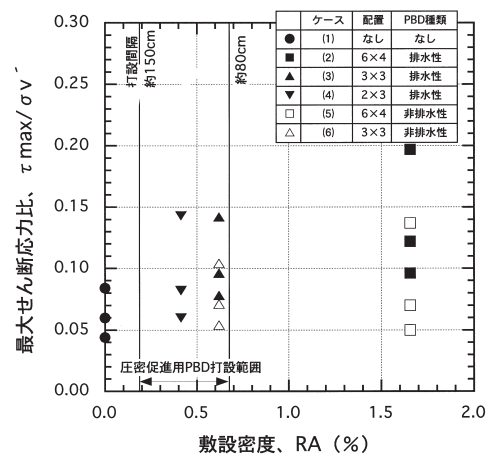


図-13 最大せん断力比と敷設密度の関係

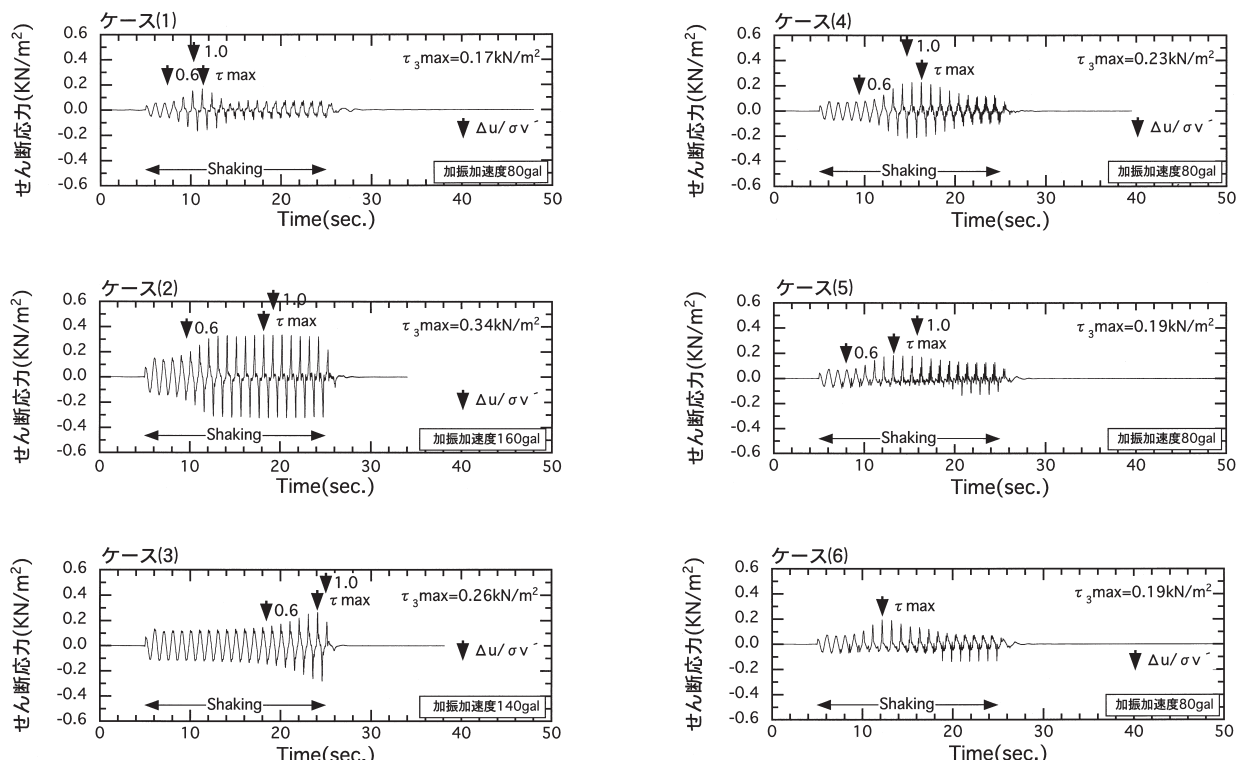


図-11 セン断応力 τ_3 の時刻歴

ずみが大きくなる傾向がある。

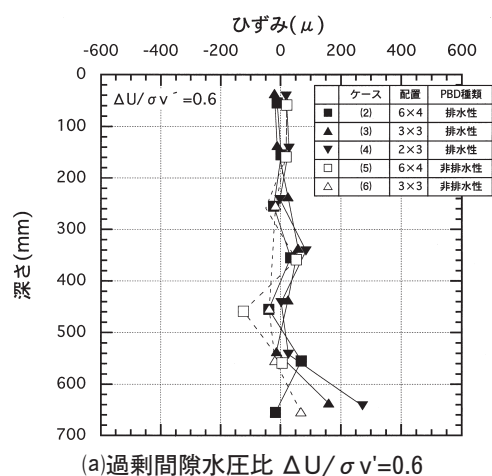
4.5 地盤表面の沈下

液状化したときの加振前後の地盤沈下量を図-15に示す。無処理地盤および非排水性PBD敷設地盤の沈下量に比べ、排水性PBDの敷設密度の高いケース(2)(3)ではほとんど沈下していないことが分かる。

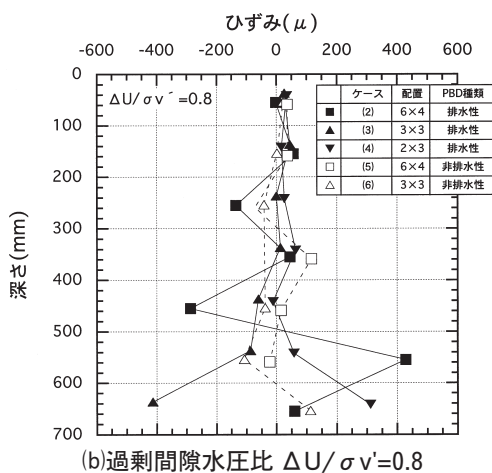
5. まとめ

振動台実験の結果、以下のことが分かった。

- (1)排水性PBDを敷設した地盤では、PBDの敷設密度に比例して液状化強度が大きくなる。



(a)過剰間隙水圧比 $\Delta U/\sigma'v=0.6$



(b)過剰間隙水圧比 $\Delta U/\sigma'v=0.8$

図-14 PBD内のりん青銅のひずみ分布

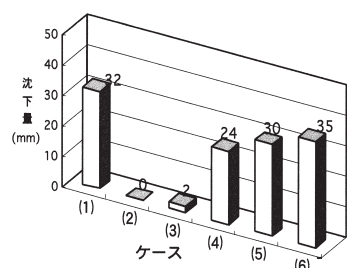


図-15 地盤表面の沈下量（液状化時）

- (2)非排水性PBDを敷設した地盤では、排水性PBD敷設地盤ほどの大幅な強度増加はみられない。

- (3)PBDの排水機能によって、地盤の補強効果がより発揮される。

- (4)排水性PBD敷設地盤ではPBDの下端部付近のひずみが大きい。

- (5)排水性PBD敷設地盤では液状化による地盤の沈下量が低減される。

今回、振動台実験の結果からPBDの排水効果と拘束効果の2つの機能による相乗効果を確認することができた。今後、PBDとジオグリッドによる地盤の拘束効果について検討を加えていきたいと考えている。

最後に、この研究を行うにあたり、御指導頂いた神戸大学都市安全研究センター田中教授、実験を共同で行った青木マリーン(株)、錦城護謄(株)、(財)地域地盤環境研究所の方々に感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) 田中泰雄、溝口義弘、浅田毅、窪嶋章伍、今澤義朗、野村忠明、大寺正志、本郷隆夫：振動台実験によるプラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化特性（その1）、第36回地盤工学研究発表会講演集、pp.729～730、2001
- 2) 田中泰雄、村上譲二、浅田毅、窪嶋章伍、野村忠明、田中誠、長屋淳一、福田光治：振動台実験によるプラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化特性（その2）、第36回地盤工学研究発表会講演集、pp.731～732、2001
- 3) 田中泰雄、溝口義弘、浅田毅、窪嶋章伍、今澤義朗、野村忠明、大寺正志、本郷隆夫、福田光治：プラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化強度と拘束効果（その1）、第56回土木学会年次学術講演会、pp.504～505、2001
- 4) 田中泰雄、村上譲二、浅田毅、窪嶋章伍、野村忠明、田中誠、長屋淳一、福田光治：プラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化強度と拘束効果（その2）、第56回土木学会年次学術講演会、pp.506～507、2001
- 5) Shibata.T. and Teparaksa.W.：Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests、土質工学会論文報告集、vol.28, No.2, pp.49～60、1988
- 6) 近藤、佐々木、松本：飽和砂層の振動台実験における過剰間隙水圧比と動的せん断応力比の関係、第42回土木学会年次学術講演会、pp.132～133、1987