

7. RPD工法によって改良された建物基礎の動的遠心模型実験

Shaking Table Tests on Centrifugal Force Field of Building Foundation Ground Reinforced by Plastic-Board-Drains.

溝口 義弘*¹

要 旨

筆者らは、プラスチックボードドレーン（以下、PBD という）の先端を非液状化層に定着し、PBD 頭部をジオグリッドで連結する RPD 工法を開発した。これまで、RPD 工法を適用した水平地盤の振動台実験¹⁾を行い、地盤の液状化に対する改良効果を確認し、RPD 工法の評価方法について検討してきた。今回、5 階程度の建物を想定した摩擦杭基礎と直接基礎に対して、RPD 工法を併用した場合の液状化特性を調べるために、動的遠心载荷実験装置を用いた振動台実験を行った。その結果、RPD 工法は構造物基礎の液状化対策工として有効であることを確認した。

キーワード：プラスチックボードドレーン／動的遠心模型実験／液状化／摩擦杭基礎

1. はじめに

筆者らは、液状化対策工法として PBD の排水効果と地盤の変形抑制効果を兼ね備えた RPD 工法(Reinforcing Plastic-Board-Drains)を開発した。RPD 工法は、PBD 先端部を非液状化層にアンカーで定着し、PBD 頭部をジオグリッドと固定治具で連結する工法である。これまで RPD 工法を水平地盤に適用した場合について振動台実験を行い、液状化地盤の改良効果を確認し、RPD 工法の評価方法について検討を行ってきた²⁾。

液状化層が厚くて 5 階建て程度の建物構造物の基礎には、支持杭では杭長が長くなり不経済となり、直接基礎では液状化により建物被害が甚大になる可能性があるため摩擦杭が用いられるケースが考えられる。しかし、地盤が完全に液状化すると杭と地盤の摩擦力が十分に発揮できなくなる可能性があるため、液状化層を RPD 工法で改良することにより、地盤との摩擦力の低減が抑制され建物被害を軽減することが期待できるものと考えられる。

今回、5 階程度の建物を想定した摩擦杭基礎と直接基礎に対して、RPD 工法を併用した場合の液状化特性等について調べるために、動的遠心载荷実験装置を用いた振動台実験^{3) 4)}を行った。本報では、振動台実験の結果について報告する。

2. 動的遠心模型実験

2.1 動的遠心载荷実験装置の概要

実験に用いた動的遠心载荷実験装置の仕様を表-1 に、実験装置を写真-1 に示す。実験装置は、回転半径 1.5m のビーム型で、遠心加速度を 200G まで加速できる。また、

プラットフォームに振動台を取り付けることにより動的試験を行うことができ、正弦波あるいは地震波を用いて振動台を加振することができる。試験土槽はローラー付きアルミフレームを積層した単純せん断土槽で、内寸法は長さ 450mm、幅 150mm、高さ 210mm で、止水のために内側にゴムシートを取り付けている。計測計器は、動ひずみ計により 24ch まで計測できる。

表-1 動的遠心载荷実験装置の仕様

载荷機構	ビーム型 (スイングプラットフォーム式)
回転半径	1,500mm (プラットフォームまで)
最大遠心加速度	200G
計測システム	24ch 動ひずみ計測器

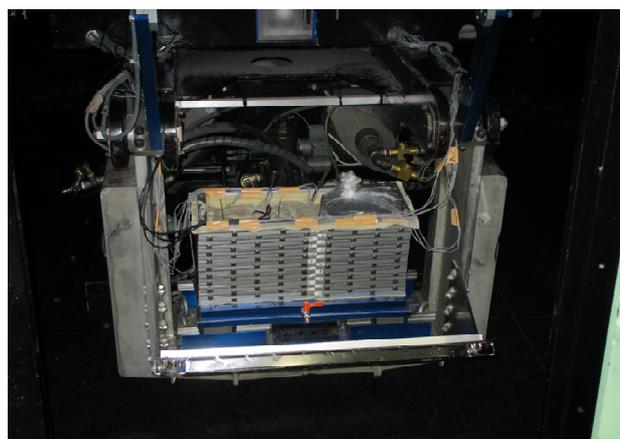


写真-1 動的遠心载荷実験装置 (試験土槽)

*¹ 技術研究所環境・生産研究グループ

2.2 実験方法

実験に用いた模型地盤と計測計器の配置を図-1に、実験に用いた材料を表-2に示す。模型地盤と実地盤の縮尺比は1/30で、遠心加速度は30Gである。

模型地盤は、杭とPBDを所定位置に設置した状態で初期相対密度が50%になるように水中落下法を用いて7号珪砂を投入し、地盤表面にジオグリッドを敷設し、PBDとジオグリッドを連結して模型地盤を作製した。その後、建物モデルを地盤表面に設置し杭と連結した。地盤高さは18.0cm(実大換算4.50m)である。

実験に用いた試料は、7号珪砂($e_{max}=1.145$, $e_{min}=0.666$, $D_{50}=0.18mm$)で、間隙流体は、透水性に関する相似則⁵⁾が満足するように水の30倍粘性をもつメトローズの水溶液を用いた。PBDは、剛性と通水量に関する相似則が満足するように筒状に加工したフィルター内部にスパイラ

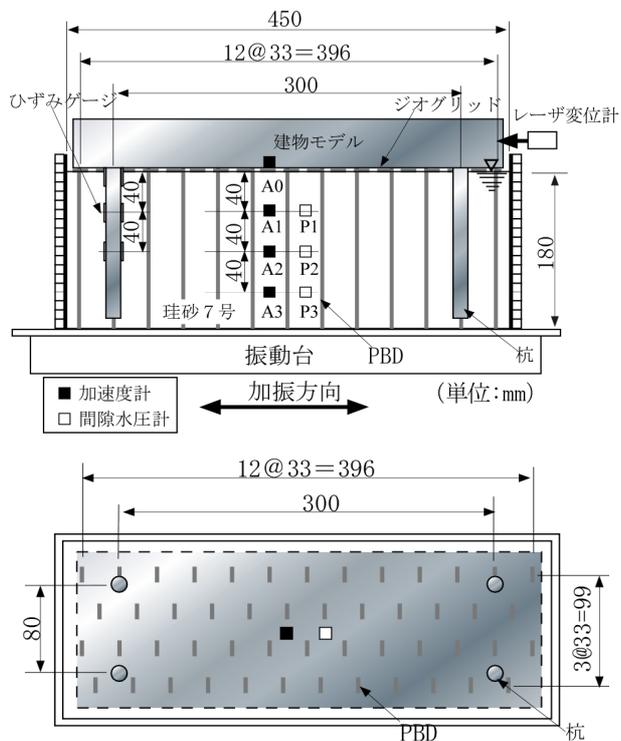


図-1 模型地盤と計測計器の配置(断面図と平面図)

表-2 実験材料

地盤材料	7号珪砂
間隙流体	メトローズ
PBD	フィルター：不織布 芯材：スパイラル状の樹脂 幅8mm×厚さ4mm
ジオグリッド	網戸の網
杭	アルミパイプ、φ19mm,t=2mm

ル状の樹脂を組み込んだものを、ジオグリッドは、剛性に関する相似則が満足するように網戸の網を用いた。建物モデルの荷重は、5階程度の建物を想定し30kN/m²とした。杭(摩擦杭)は、アルミパイプを用い、杭のひずみを測定するためにひずみゲージを杭の表裏に貼り付けた。

計測項目は、地盤内の加速度と間隙水圧、建物の加速度と水平変位、および杭のひずみである。計測計器の仕様と数量を表-3に示す。

実験ケースを表-4に示す。無対策地盤、直接基礎または摩擦杭基礎に対してRPD工法で改良したケースと改良していないケースの5ケースについて実施した。PBDの打設間隔は3.3cm(実大換算99cm)で、杭の間隔は30cm(実大換算9.0m)である。

加振方法は、実大換算1.0Hzの正弦波を20波、加振加速度50,100,200,300galまでの4段階に分けて载荷した。以下の物理量は実大換算値を表す。

3. 実験結果

3.1 地盤の過剰間隙水圧比

各ケースの液状化するまでのP2(GL-2.4m)の過剰間隙水圧比の経時変化を図-2に示す。なお、過剰間隙水圧比は、過剰間隙水圧を初期有効上載圧で除した値である。以下、加振加速度は振動台の実測加速度を示す。

無対策地盤Case1では、加振加速度70galで過剰間隙水圧比が1に達し、地盤は液状化している。

直接基礎の場合、対策なしCase2では、加振加速度152galで過剰間隙水圧比が1.0以上となり、地盤が液状化している。対策有りCase3では、加振加速度274galでも

表-3 計測計器の仕様と数量

計測計器	仕様	数量
加速度計	東京測器, ARH-10A	深度方向3ヶ所 建物、振動台
間隙水圧計	東京測器, KEP-200KPA	深度方向3ヶ所
レーザ変位計	KEYENCE, LB-300	1ヶ所
杭のひずみゲージ	東京測器, EFLK-02-01	深度方向3ヶ所

表-4 実験ケース

Case	種類	RPD工法	建物	杭
1	無対策	×	×	×
2	直接基礎・対策なし	×	○	×
3	直接基礎・対策有り	○	○	×
4	摩擦杭基礎・対策なし	×	○	○
5	摩擦杭基礎・対策有り	○	○	○

過剰間隙水圧比が約 0.5 程度で地盤は完全に液化化に至っていない。

摩擦杭基礎の場合、対策なし Case4 では、加振加速度 383gal で過剰間隙水圧比が 1.0 に達し、地盤は液化化している。対策有り Case5 では、加振加速度 330gal でも過剰間隙水圧比が約 0.5 程度で地盤は完全に液化化に至っていない。

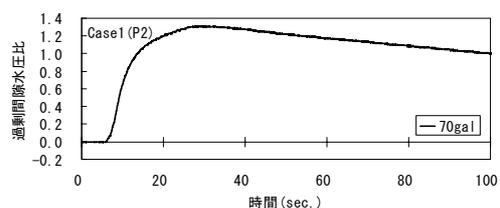
無対策 Case1 と対策なし Case2,Case4 では、液化化後の過剰間隙水圧の消散速度は非常に遅いが、対策有り Case3,Case5 では、PBD の排水効果により加振終了後の過

剰間隙水圧の消散速度は無対策あるいは対策なしに比べて早い。

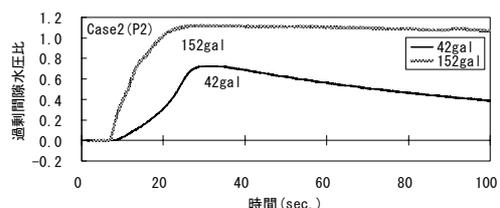
3.2 地盤の加速度

各ケースの液化化したときの A2(GL-2.4m)の地盤の加速度の経時変化を図-3 に示す。なお、液化化に至っていない Case3 は最終加振時の経時変化を、Case5 は A3(GL-3.6m)の最終加振時の経時変化を示す。

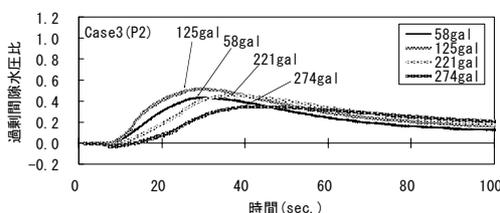
無対策 Case1 と対策なし Case2,Case4 では、加振中に地盤が液化化しているため、加速度の振幅は低下している



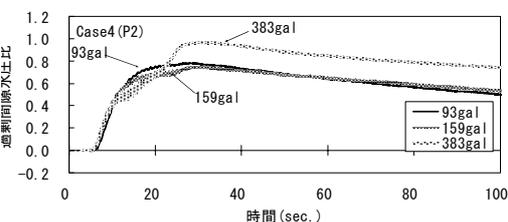
(1) 無対策 (Case1)



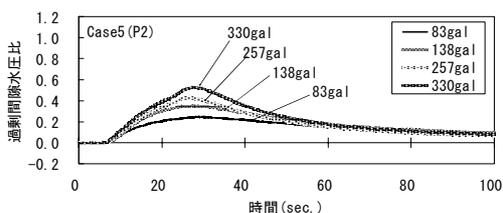
(2) 直接基礎・対策なし (Case2)



(3) 直接基礎・対策有り (Case3)

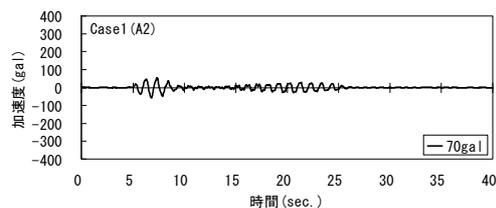


(4) 摩擦杭基礎・対策なし (Case4)

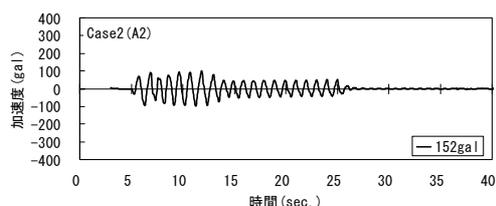


(5) 摩擦杭基礎・対策有り (Case5)

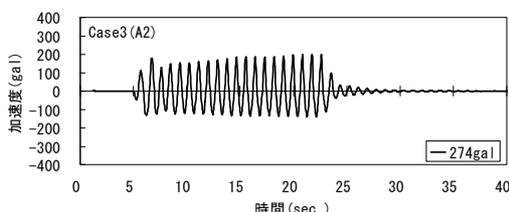
図-2 過剰間隙水圧比の経時変化



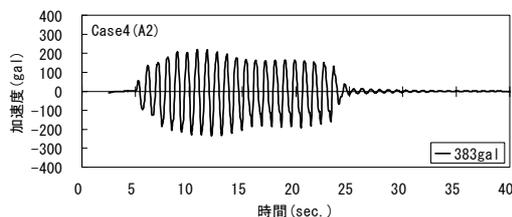
(1) 無対策 (Case1、70gal)



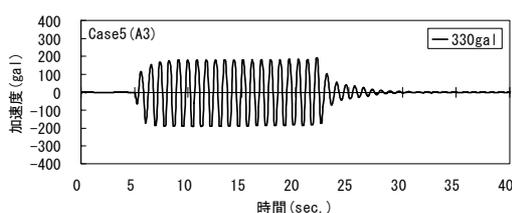
(2) 直接基礎・対策なし (Case2、152gal)



(3) 直接基礎・対策有り (Case3、274gal)



(4) 摩擦杭基礎・対策なし (Case4、383gal)



(5) 摩擦杭基礎・対策有り (Case5、330gal)

図-3 加速度の経時変化

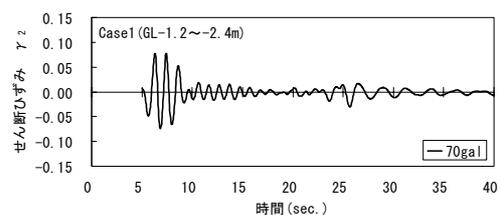
が、対策有り Case3,Case5 では、液状化に至らないため、加振中の加速度の振幅はほぼ同様である。

3.3 地盤のせん断ひずみ

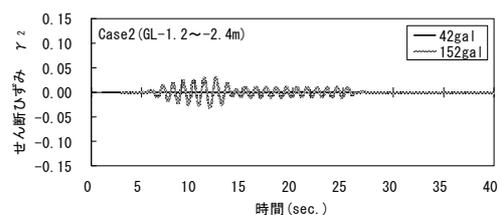
各ケースの液状化するまでの地盤のせん断ひずみ γ_2 の経時変化を図-4に、加振加速度毎の地盤の最大せん断ひずみ γ_2 の変化を図-5に示す。なお、地盤のせん断ひずみ γ_2 は、加速度波形 A1(GL-1.2m),A2(GL-2.4m)を2回積分して求めた2測点の相対変位を加速度計の距離で除した値で、GL-1.2m~GL-2.4mの地盤の平均的なせん断ひ

ずみである。

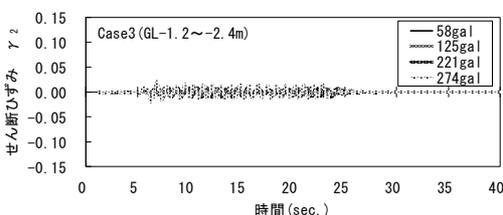
無対策 Case1 では、加振加速度 70gal で過剰間隙水圧比が 1.0 に達したときに、地盤のせん断ひずみが 0.08 に達するが、無対策以外のケースでは、液状化しても地盤の最大せん断ひずみは 0.05 に達しない。これは建物荷重による有効上載圧の増加に伴って無対策に比べてせん断変形が抑制されているものと考えられる。さらに、対策有り Case3,Case5 では、対策なし Case2,Case4 に比べせん断ひずみは小さくなり、PBD とジオグリッドによって地盤の変形が抑制されたものと考えられる。



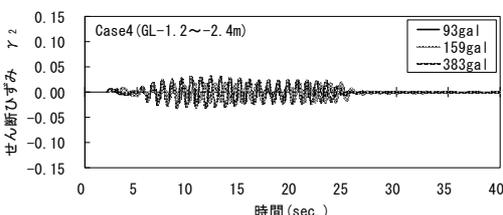
(1) 無対策 (Case1)



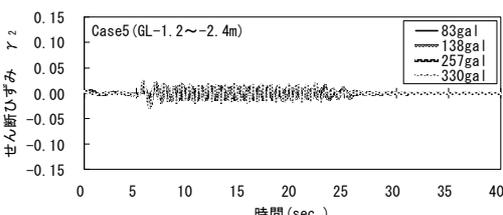
(2) 直接基礎・対策なし (Case2)



(3) 直接基礎・対策有り (Case3)



(4) 摩擦杭基礎・対策なし (Case4)



(5) 摩擦杭基礎・対策有り (Case5)

図-4 地盤のせん断ひずみの経時変化 (GL-1.2m~GL-2.4m)

3.4 地表面沈下

各ケースの液状化するまでの加振加速度毎の地盤の表面沈下率を図-6に示す。なお、沈下率は加振加速度毎に実測した地盤の表面沈下量を初期地盤高さで除した値である。加振加速度が大きくなるほど沈下率も大きくなるが、摩擦杭基礎の対策有り Case5 が最も表面沈下量が小さい。

3.5 建物の応答加速度と応答変位

各ケースにおける建物の応答加速度と応答変位の関係を過剰間隙水圧の上昇程度に応じて整理したものを図-7に示す。なお、Case3,Case5 は加振中の履歴ループを示す。

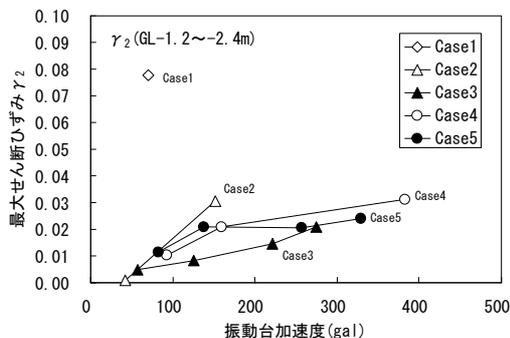


図-5 加速度と最大せん断ひずみの関係 (GL-1.2m~GL-2.4m)

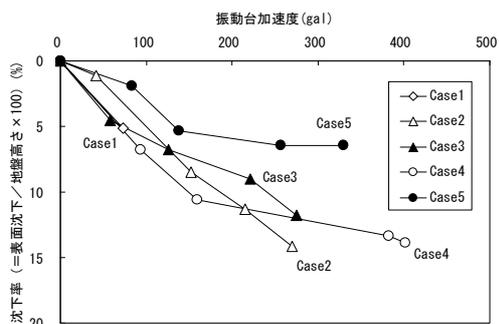


図-6 加速度と地盤の表面沈下率の関係

直接基礎の場合、対策なし Case2 では、加振してすぐに過剰間隙水圧が上昇し始め履歴ループの大きさが大きくなり、液状化に至る 8.0sec あたりから履歴ループが傾斜し地盤の剛性が低下している。一方、対策有り Case3

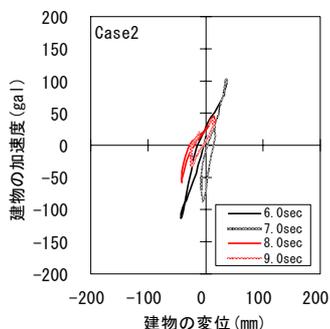
では、液状化に至っていないため履歴ループは加振中ほぼ一様で、地盤の剛性低下は生じにくい。

摩擦杭基礎の場合、対策なし Case4 では、過剰間隙水圧比が 0.5 に達する 12sec あたりから履歴ループが傾斜しはじめ地盤の剛性が低下している。一方、対策有り Case5 では、液状化に至っていないため、Case3 と同様に地盤の剛性低下は生じにくい。

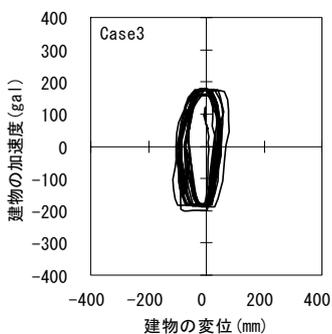
3.6 杭の曲げモーメント

摩擦杭基礎の Case4, Case5 の代表的時刻の杭の発生曲げモーメントと過剰間隙水圧の深度分布を図-8 に示す。

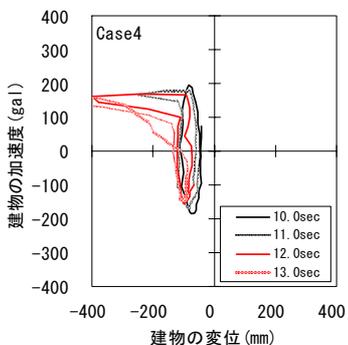
対策なし Case4 では、過剰間隙水圧比が 0.6 程度となる 11.42sec で曲げモーメントの分布も大きくなり、地盤からの外力が杭に作用しているものと推測される。



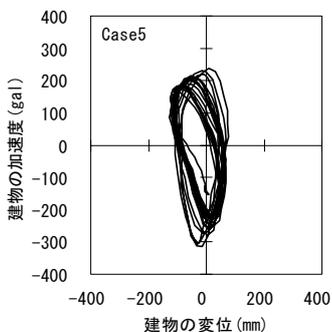
(1) 直接基礎・対策なし (Case2、152gal)



(2) 直接基礎・対策有り (Case3、274gal)

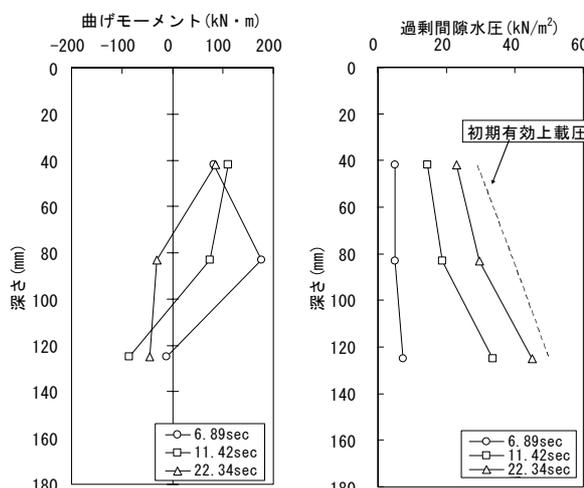


(3) 摩擦杭基礎・対策なし (Case4、383gal)

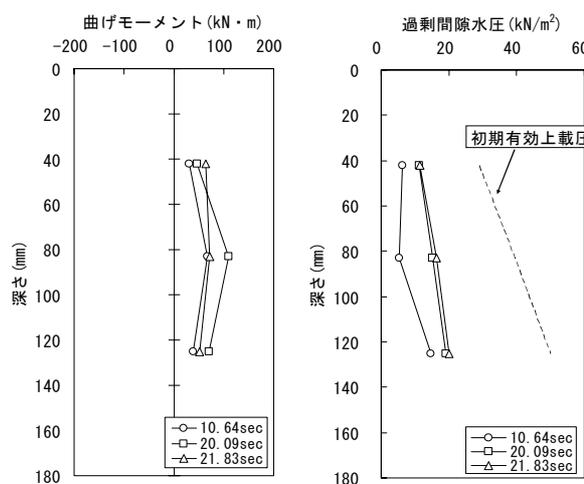


(4) 摩擦杭基礎・対策有り (Case5、330gal)

図-7 建物の応答加速度と応答変位



(1) 摩擦杭基礎・対策なし (Case4、383gal)



(2) 摩擦杭基礎・対策有り (Case5、330gal)

図-8 代表的時刻における杭の発生曲げモーメントと過剰間隙水圧の深度分布

一方、対策有り Case5 では、対策なし Case4 に比べ曲げモーメントの分布は小さく、地盤の変形が抑制されているため、地盤からの外力が杭に作用しにくいものと考えられる。

3.7 液状化強度特性

PBD 径比 a/b と液状化強度の関係を図-9 に示す。なお、液状化強度は、地盤内に設置した加速度記録から求めたせん断応力を有効上載圧で除したせん断応力比から求めた値である。PBD 径比 a/b は、図-10 に示すように PBD の排水領域と同じ面積に置換えた等価円半径 b に対する PBD の周長が等しい円に置換えた等価円半径 a の比で、従来の排水工法の設計に用いられているくい径比⁶⁾と同じ指標である。無対策の PBD 径比 a/b はゼロで、PBD の打設間隔が 100cm の PBD 径比 a/b は 0.120 である。以前に実施した建物のない水平地盤における既往データ¹⁾もプロット (○印) する。

無対策地盤における直接基礎と摩擦杭基礎の液状化強度に関して、直接基礎の対策なし Case2 の液状化強度は、建物荷重による有効上載圧の影響により、無対策 Case1 の液状化強度に比べて大きくなる。摩擦杭基礎の対策なし Case4 の液状化強度は、摩擦杭の影響により、直接基礎の対策なし Case2 の液状化強度より大きくなる。

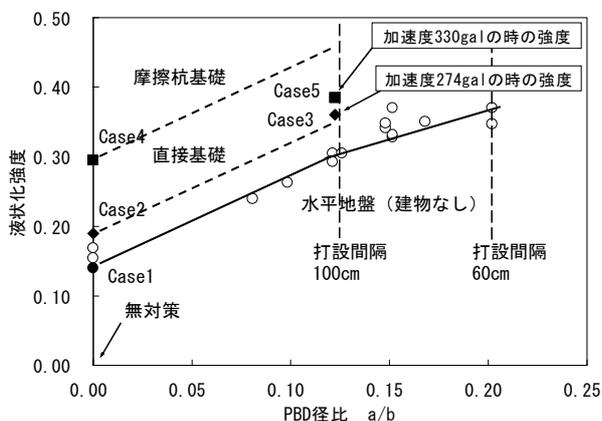


図-9 PBD 径比と液状化強度の関係

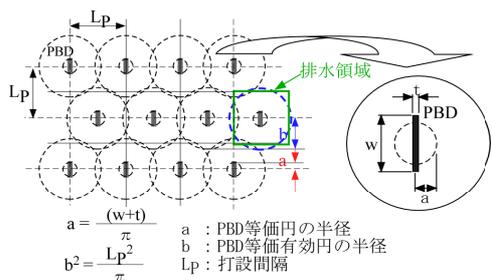


図-10 PBD 径比 a/b の模式図

対策有り Case3, Case5 については、液状化に至っていないため、図-9 に最終加速度の加速度記録から求めた値をプロットしているが、無対策地盤における強度増加は最低見込めるものと推測すると、点線で示した液状化強度に達するものと考えられ、液状化地盤を RPD 工法で改良した摩擦杭基礎が最も液状化強度は大きくなるものと考えられる。

4. まとめ

建物基礎の液状化対策工として、RPD 工法で改良された摩擦杭基礎と直接基礎について動的遠心載荷実験装置を用いた振動台実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) RPD 工法で改良することにより PBD の排水効果によって地盤の過剰間隙水圧の発生が抑制され、加振後の地盤の過剰間隙水圧の消散速度も早い。
- (2) RPD 工法で改良することにより地盤の剛性低下を抑制することができ、地盤の変形および表面沈下も抑制される。
- (3) RPD 工法で改良された摩擦杭に発生する曲げモーメントは、地盤からの外力が杭に作用しにくいため、改良していない摩擦杭より小さくなる。
- (4) RPD 工法により液状化地盤を改良することにより地盤の液状化強度を高めることができる。
- (5) RPD 工法による建物の液状化対策としての効果は、直接基礎よりも摩擦杭基礎の方が大きい。

今回、建物基礎への適用を目指し模型地盤の動的遠心載荷実験装置を用いた振動台実験を行ったが、液状化に至らなかったケースもあり、今後、振動台実験を補足し、杭基礎構造物に対する設計法について検討を行っていく予定である。

なお、RPD 工法は、株式会社浅沼組、株式会社不動産トラおよび錦城護謨株式会社の 3 社で共同開発されたものである。

[謝辞]

最後に実験に協力して頂いた関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 西形達明教授、大学院生(M2)の川原勇太氏に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 溝口義弘：PBD 群敷設地盤の振動台実験－1 G 場と遠心場の比較－、浅沼組技術研究報告、No.20、pp.37～42、2008.11.

- 2) 浅田毅、溝口義弘：プラスチックボードドレーン群工法の改良効果の評価方法、浅沼組技術研究所報、No.17、pp.63～70、2005.11.
- 3) 川原勇太、溝口義弘、西形達明：PBD による液状化対策工法における上載構造物の影響、第 47 回地盤工学研究発表会、pp.1537～1538、2012.7.
- 4) 川原勇太、溝口義弘、西形達明：PBD 材を用いた液状化対策工法の構造物基礎への適用、土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集、pp.501～502、2012.8.
- 5) 岡村末対、竹村次朗、上野勝利：講座 遠心模型実験－実験技術と実務への適用－ 2.遠心模型の相似則、実験技術－利点と限界、土と基礎、Vol.52、No.10、pp.37～44、2004.
- 6) 建設省土木研究所：液状化対策工法設計・施工マニュアル（案）、1999.