

6. プラスチックボードドレーン群によって改良された地盤の動的遠心模型実験

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

溝口 義弘^{*1} 浅田 毅^{*2}

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）の先端を非液化化層に定着し、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、PBD 群によって改良された模型地盤の振動台実験¹⁾を行い、液化化深さ 5m を対象とした地盤の改良効果を確認した。今回、液化化深さ約 10m を対象とした改良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。その結果、これまでに実施した振動台実験の結果を再現することができ、地盤の改良効果を確認した。

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／液化化

1. はじめに

地震の活動期に入ったと言われる昨今、今後 30 年間に地震が発生する確率は、東南海地震では 60%～70%程度、南海地震では 50%～60%程度と言われており²⁾、それらの地震が起これば、兵庫県南部地震以上の液化化被害が発生するものと懸念される。

地盤の液化化対策には、地盤密度の増大、過剰間隙水圧の抑制・消散、固結、せん断変形の抑制、過剰間隙水圧の遮断などを目的とする工法が既に多く開発され、数多くの実施例が報告されている。

締固め工法は、改良効果への信頼性は比較的高いが、施工時の振動・騒音および周辺地盤の変形が無視出来ないため、既設構造物での近接工事、市街地での施工等では採用し難い。一方、排水工法は、締固め工法と比較して、振動・騒音も少ない施工が可能であり、周辺環境への影響が少ないが、液化化対象層が厚いと排水効果が低下したり、地震後にある程度の沈下が生じる可能性があるなどの課題が挙げられる。

筆者らは、プラスチックボードドレーンの排水効果と地盤の変形抑制効果を兼ね備えた工法として RPD 工法 (Reinforcing Plastic-Board-Drains)を開発した。RPD 工法は、PBD の先端を非液化化層にアンカーで定着し、PBD の頭部をジオグリッドと固定治具で連結する液化化対策工法である。これまで RPD 工法を適用した地盤の振動台実験を行い、液化化深さ 5m を対象とした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してきた³⁾。

今回、液化化深さ約 10m を対象とした液化化地盤に対して、動的遠心載荷実験装置を用いた振動台実験を行い、地盤の改良効果を調べた。本報は、振動台実験の結果に

ついて報告するものである。

2. 動的遠心模型実験

2.1 動的遠心載荷実験装置の概要

実験に用いた動的遠心載荷実験装置⁴⁾の仕様を表-1に、動的遠心載荷実験装置を写真-1に示す。動的遠心載荷実験装置の単純せん断土槽は、19 層の積層フレームで、長さ 70cm×幅 27cm×高さ 46cm (内寸法)であり、止水のため内側にゴムシートを貼り付けている。

表-1 動的遠心載荷実験装置の仕様

載荷機構	ビーム型 (スイングプラットフォーム式)
回転半径	2,600mm (プラットフォームまで)
最大遠心加速度	250G (静的実験)、100G (動的実験)
計測システム	40ch 動ひずみ計測器



写真-1 動的遠心載荷実験装置の全景

*1 技術研究所環境・生産研究グループ

*2 技術室安全・環境管理部

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1/25で、遠心加速度は25Gである。実験に用いた試料は7号珪砂（ $e_{max}=1.145$, $e_{min}=0.666$, $D_{50}=0.18mm$ ）である。模型地盤は、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、その後、地盤表面にジオグリッドとバルサ材を敷設し、PBDをバルサ材に固定して作製した。地盤高さは37.5cm（実大換算9.38m）である。

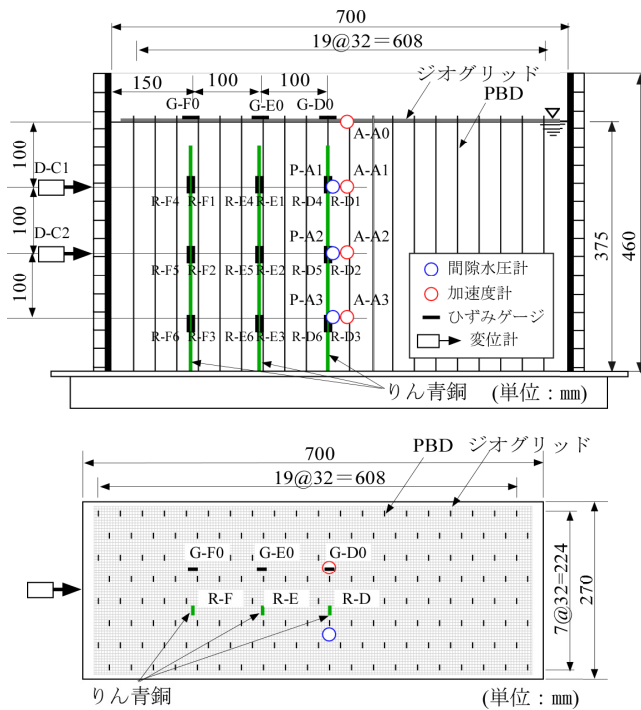
PBDは、写真-2に示すように剛性と通水量に関する相似則⁵⁾が満足するように筒状に加工したフィルター内部にスパイラル状の樹脂を組み込んだものを、また、ジオグリッドは、剛性に関する相似則が満足するように網戸の網を用いた。間隙流体は、透水性に関する相似則が満足するように水の25倍粘性をもつメトロースの水溶液

を用いた。模型地盤の作製後の状況を写真-3に示す。

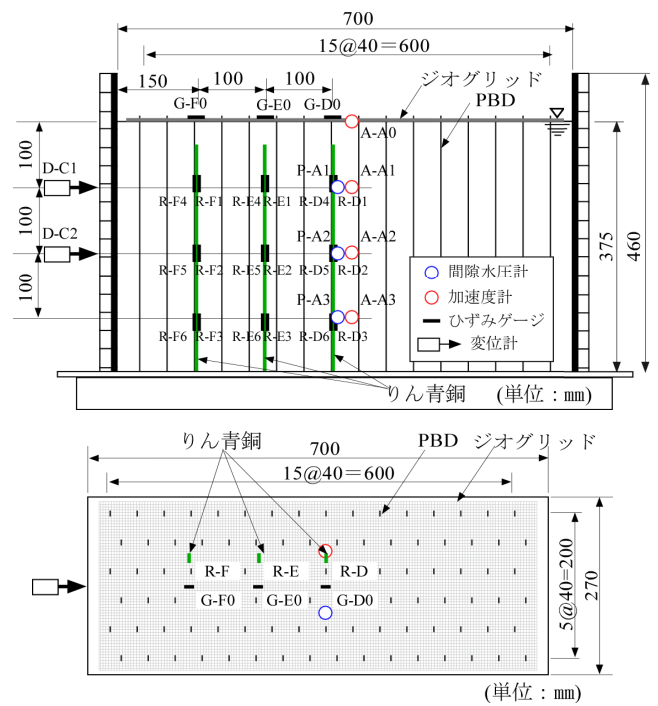
計測項目は、地盤内の加速度と間隙水圧、せん断フレームの水平変位、単純せん断土層底面に固定したりん青銅のひずみ、ジオグリッドのひずみである。りん青銅のひずみは地盤の変形を、ジオグリッドのひずみは張力を調べるものである。計測計器の仕様と数量を表-3に示す。

実験ケースを表-4に示す。PBDの打設間隔は3.2cm, 4.0cm（実大換算80cm, 100cm）の2種類である。表中のPBD径比 a/b は、図-2に示すように、PBDの排水領域と同じ面積に置き換えた等価な円の半径 b に対するPBDの周長が等しい円に置き換えた等価な円の半径 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。

加振方法は、実大換算1.5Hzの正弦波を20波、加振加速度100galから250galまで50galづつの段階方式を採用した。以下の物理量は実大換算で表す。



(1) 打設間隔 80cm (ケース 1)



(2) 打設間隔 100cm (ケース 2)

図-1 模型地盤と計測計器の配置（断面図と平面図）

表-2 実験に用いた材料

地盤材料	7号珪砂
間隙流体	メトロース
PBD	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
固定用角材	バルサ材



写真-2 実験に用いた PBD

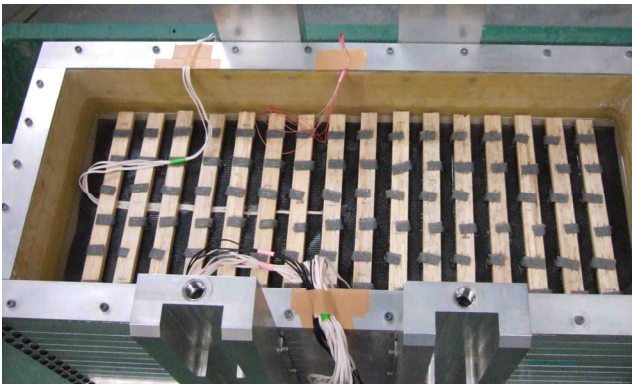


写真-3 模型地盤の作製後の状況 (ケース 2)

表-3 計測計器の仕様と数量

計測項目	仕様	数量
加速度	圧電式加速度計(10SW)	深度方向 4 点
間隙水圧	間隙水圧計(P306AV-5)	深度方向 3 点
フレーム変位	レーザー式変位計(LB-01)	深度方向 2 点
りん青銅 のひずみ	ひずみゲージ(KFG-2-120)	深度方向 3 点 3 ケ所
シオクリット® のひずみ	ひずみゲージ(KFG-2-120)	3 点

表-4 実験ケース

ケース	PBD 打設間隔	PBD 径比 a/b	初期相対密度
1	80cm(32mm)	0.151	48.5 %
2	100cm(40mm)	0.121	55.0 %

※括弧内は模型寸法を示す。

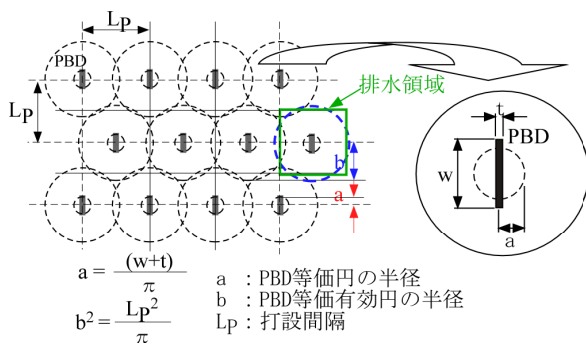


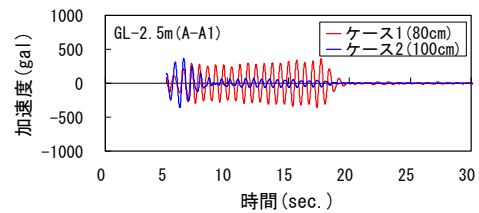
図-2 PBD 径比の模式図

3. 実験結果

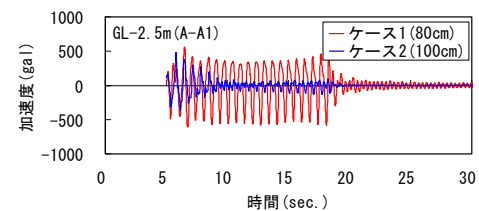
3.1 加速度

加振加速度 150gal、200gal、250gal の時の GL-2.5m(A-A1) と GL-7.5m(A-A3)の加速度の経時変化を図-3に示す。なお、加振加速度 100gal の加速度の経時変化を省略するが、地盤内の加速度は一樣である。

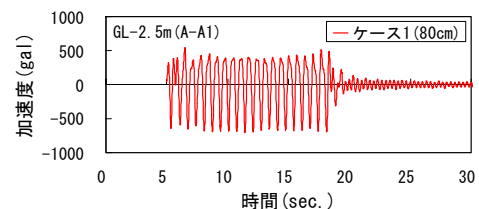
ケース 1 (打設間隔 80cm) の場合、加振加速度 150gal、200gal、250gal では、加振中の加速度はほぼ一樣に振幅し



(1) 加振加速度 150gal



(2) 加振加速度 200gal



(3) 加振加速度 250gal

図-3 加速度の経時変化

ており、地盤の剛性低下はみられない。

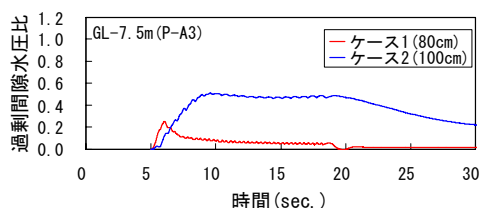
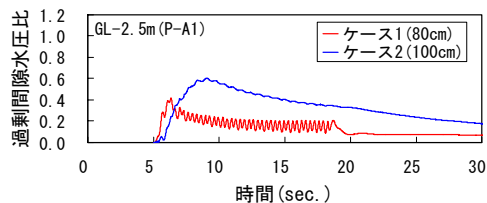
ケース 2 (打設間隔 100cm) の場合、加振加速度 150gal、200gal では、加振後 4～5 秒で加速度が低下し、地盤の剛性が低下している。

3.2 過剰間隙水圧比

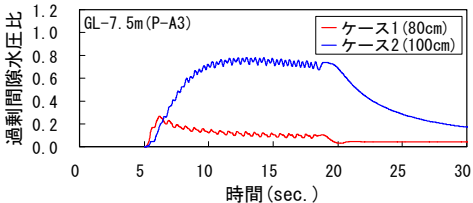
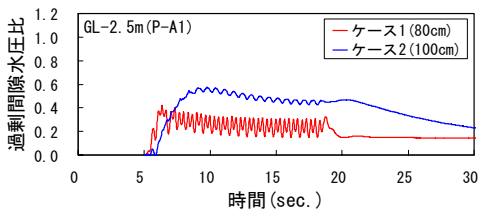
加振加速度 150gal、200gal、250gal の時の GL-2.5m(P-A1) と GL-7.5m(P-A3)の過剰間隙水圧比の経時変化を図-4に

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。

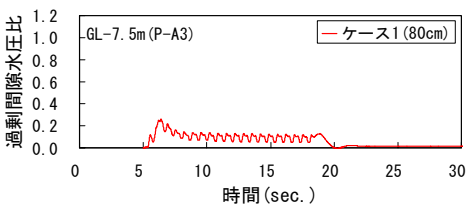
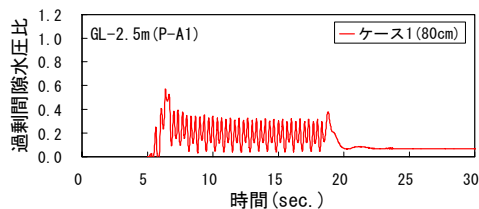
ケース 1 (打設間隔 80cm) の場合、加振加速度 150gal、200gal では、GL-2.5m の過剰間隙水圧比は、加振後 1.5 秒で最大 0.4 程度に達した後、消散している。加振加速度 250gal では、GL-2.5m の過剰間隙水圧比は、最大 0.6 程度に達した後、消散している。



(1) 加振加速度 150gal



(2) 加振加速度 200gal



(3) 加振加速度 250gal

図-4 過剰間隙水圧比の経時変化

ケース 2 (打設間隔 100cm) の場合、加振加速度 150gal では、GL-2.5m の過剰間隙水圧比は、加振後 4 秒で最大 0.6 程度に達した後、消散している。加振加速度 200gal では、GL-7.5m の過剰間隙水圧比は、最大 0.8 程度に達した後、消散している。PBD の打設間隔が小さいケース 1 のほうが消散速度は早い。

加振加速度毎の最大過剰間隙水圧比の変化を図-5 に示す。地盤深さが浅い位置ほど最大過剰間隙水圧比は大きな値を示し、加振加速度が大きくなるほど最大過剰間隙水圧比は大きくなる。また、PBD の打設間隔が小さいほど過剰間隙水圧の発生は抑制されていることが分かる。

3.3 地盤のせん断ひずみ

加振加速度 150gal、200gal、250gal の時の地盤のせん断ひずみ γ_1 、 γ_3 の経時変化を図-6 に、加振加速度毎の地盤の最大せん断ひずみの変化を図-7 に示す。なお、地盤のせん断ひずみ γ_1 (GL-0.0m~GL-2.5m) は加速度波形 (A-A0, A-A1) 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ある。せん断ひずみ γ_3 (GL-5.0m~GL-7.5m) もせん断ひずみ γ_1 と同様に加速度波形 (A-A2, A-A3) から求めた値である。

地盤深さが浅い位置ほど地盤のせん断ひずみは大きな値を示し、加振加速度が大きくなるほど地盤のせん断ひずみは大きくなる。また、PBD の打設間隔が小さいほど地盤の変形が抑制されていることが分かる。

地盤のせん断ひずみが 0.05 以上の加速度は、ケース 1 では 250gal 以上、ケース 2 では 150gal から 200gal の間である。本実験では、全てのケースで過剰間隙水圧比が 1.0 に達しなかったため、液状化の判断は過剰間隙水圧比が 0.6 以上で、せん断ひずみが 0.05 以上とすると、地盤が液状化した加速度は、ケース 1 では 250gal、ケース 2 では 150gal と考えられる。

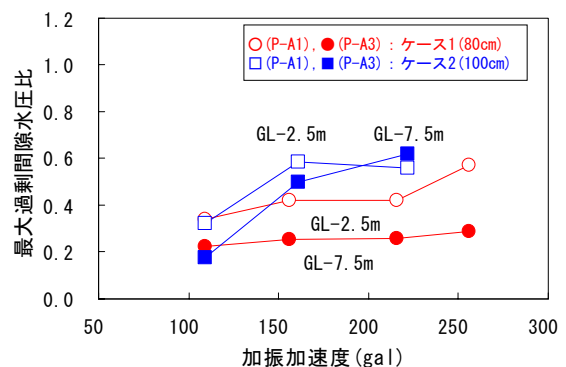
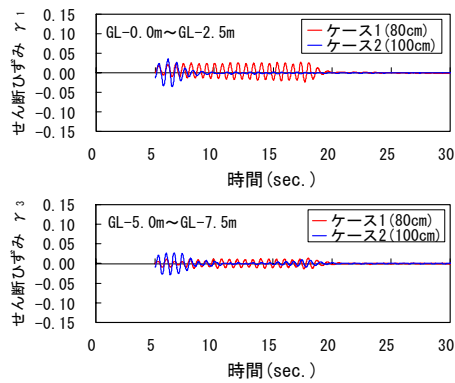
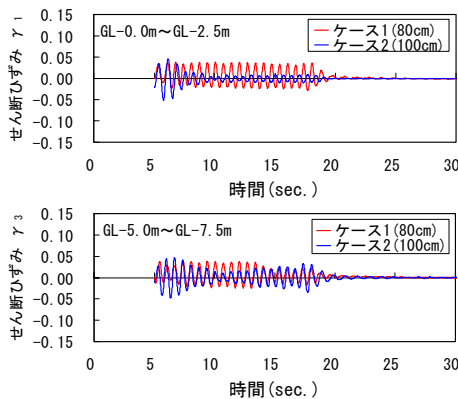


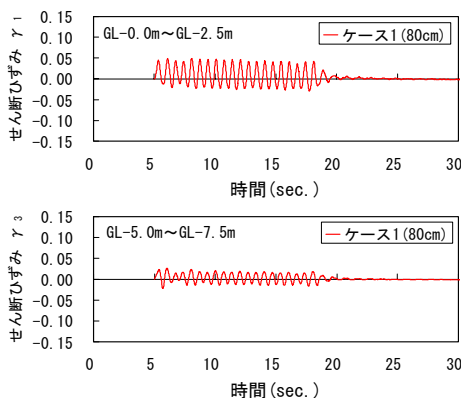
図-5 加振加速度と最大過剰間隙水圧比の関係



(1) 加振加速度 150gal



(2) 加振加速度 200gal



(3) 加振加速度 250gal

図-6 地盤のせん断ひずみの経時変化

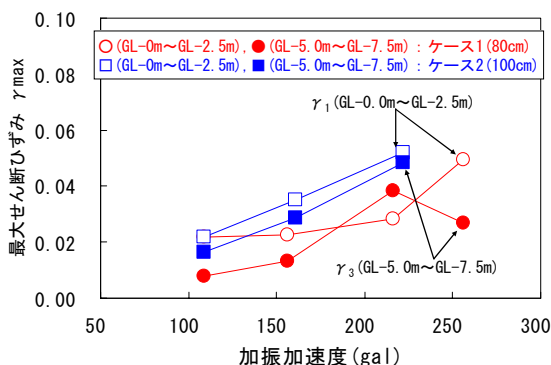
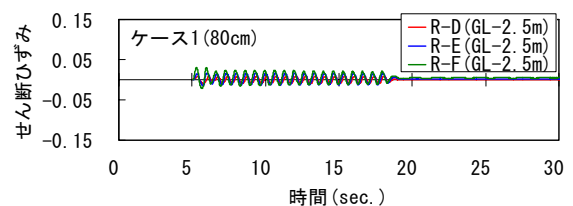


図-7 加振加速度と最大せん断ひずみの関係

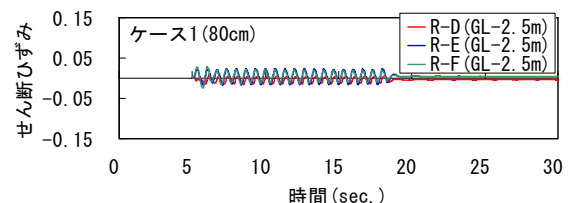
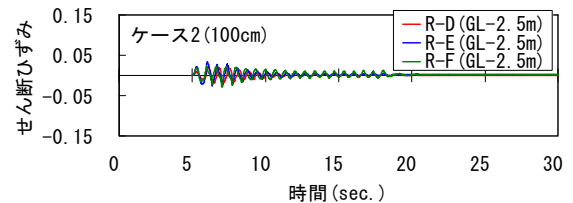
3.4 リン青銅のひずみ

加振加速度 150gal、200gal、250gal の時の GL-2.5m のりん青銅のひずみ(R-D1,R-D4,R-E1,R-E4,R-F1,R-F4)から推定したせん断ひずみの経時変化を図-8に示す。なお、せん断ひずみは、下端部を固定したりん青銅が地盤と一体となって動くものとして、下端部のひずみから順にりん青銅のたわみ角、水平変位を算出し、水平変位をひずみゲージ間の距離で除した値である。

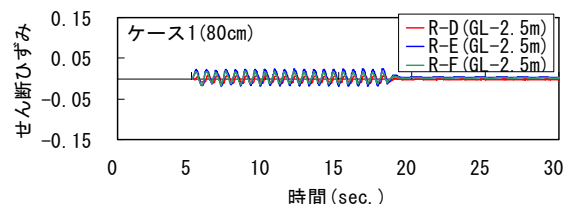
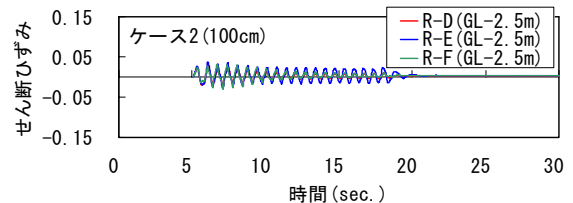
ケース 1、ケース 2 ともりん青銅の設置位置(R-D,R-E,R-F)に係わらず、せん断ひずみはほぼ同じ値を示し、また、位相のずれが少ない。したがって、改良域内では地盤が一樣に動いているものと考えられる。



(1) 加振加速度 150gal



(2) 加振加速度 200gal



(3) 加振加速度 250gal

図-8 リン青銅のひずみから推定したせん断ひずみの経時変化

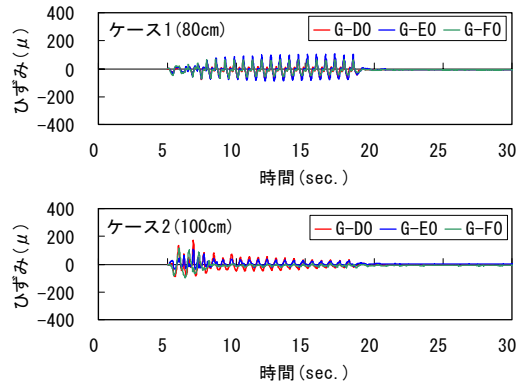
3.5 ジオグリッドのひずみ

加振加速度 150gal、200gal、250gal の時のジオグリッドのひずみ(G-D0,G-E0,G-F0)を図-9に示す。

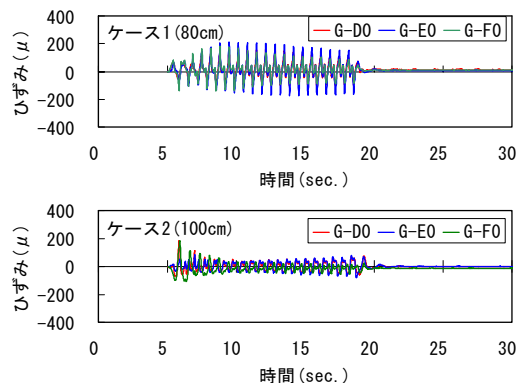
ケース 1、ケース 2 ともに 3 箇所のひずみ量はほぼ同じ値を示し、位相のずれがない。また、事前に実施したジオグリッドの引張試験で得られた弾性係数から推定した 1m 当たりの張力の最大値は、ケース 1 では 6.8kN/m、ケース 2 では 7.1kN/m となり、PBD とジオグリッドによる地盤変形が拘束されることによって、張力が発生しているものと考えられる。

4. 考察

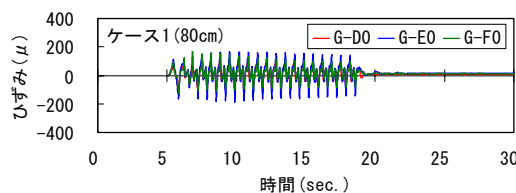
PBD 径比 a/b と液状化強度 R_p の関係を図-10に示す。なお、液状化強度 R_p は、地盤内に設置した加速度記録から求めたせん断応力を有効上載圧で除したせん断応力比



(1) 加振加速度 150gal



(2) 加振加速度 200gal



(3) 加振加速度 250gal

図-9 ジオグリッドのひずみの経時変化

から求めた値である。PBD 径比 a/b が大きくなるほど液状化強度 R_p は大きくなり、また、以前に実施した振動台実験の既往データ¹⁾ とほぼ同じ直線上に位置していることが分かる。

RPD 工法の設計において、図-10に示す PBD 径比 a/b と液状化強度 R_p の関係を用いて、PBD の打設間隔を設定することができる。設計フローを図-11に示す。原地盤の土質条件の調査を行い、地盤の液状化判定を行う。地盤が液状化するものと判定されると RPD 工法の設計を行う。まず、液状化抵抗率 F_L 値($=R_p/L_{max}$)が 1.0 以上となるような地盤の液状化強度 R_p を仮定する。なお、 L_{max} は地震時に発生する最大せん断応力比である⁷⁾。そして、液状化強度 R_p に対応する PBD 径比 a/b 、PBD の打設間隔 L_p を順に求めて、PBD の配置を設定する。なお、PBD 径比 a/b と PBD の打設間隔 L_p の関係は図-2による。

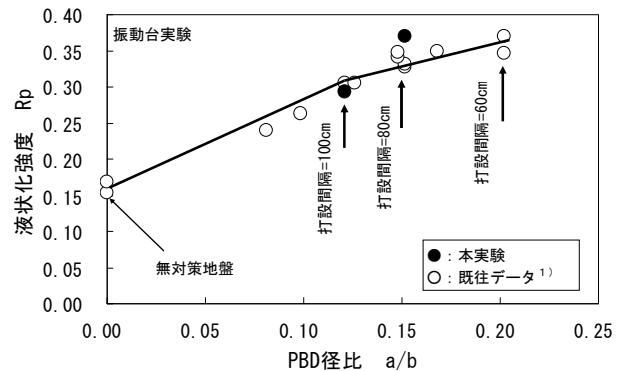


図-10 PBD 径比と液状化強度の関係

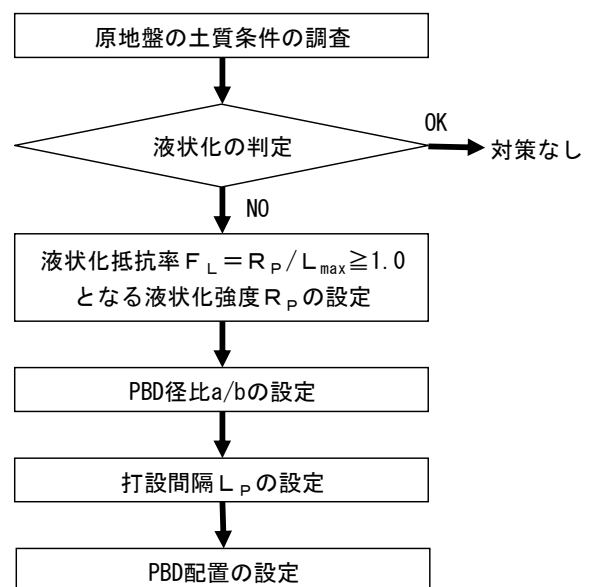


図-11 RPD 工法の設計フロー

5. まとめ

RPD 工法による地盤の改良効果を確認するため、動的遠心载荷実験装置を用いて、PBD 群によって改良された模型地盤の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) PBD の排水効果により過剰間隙水圧の発生が抑制され、また、PBD の打設間隔が小さいほど過剰間隙水圧の発生は抑制される。
- (2) PBD とジオグリッドにより地盤の変形が抑制され、また、PBD の打設間隔が小さいほど地盤の変形は小さい。
- (3) 地盤内に設置したりん青銅のひずみから推定したせん断ひずみは改良域内ではほぼ同じ値を示し、改良地盤が一様に変形している。
- (4) 地盤は PBD とジオグリッドで拘束されることにより、ジオグリッドには張力が作用する。
- (5) 本実験は既往の振動台実験の結果を再現することができ、PBD の打設間隔が小さいほど液状化強度は大きくなる。
- (6) 液状化強度と PBD 径比の関係をj用いて RPD 工法の設計法を提案した。

RPD 工法は、株式会社浅沼組、株式会社不動テトラおよび錦城護謨株式会社の3社で共同開発し、平成22年2月15日に財団法人土木研究センターにて建設技術審査証明（建技審証第0904号）を取得したものである。

今後、RPD 工法を数多くの現場へ適用していきたい。

[謝 辞]

最後に実験に協力して頂いた株式会社不動テトラの東祥二氏、錦城護謨株式会社の野村忠明氏、川鍋修氏、井口実氏に深く感謝の意を表します。

また、動的遠心载荷実験装置等の実験施設を提供しご指導して頂いた日本工営株式会社中央研究所の方々に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) 地盤調査研究推進本部：長期評価による地震発生確率値の更新について、ホームページ、2009.
- 3) 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.

- 4) 鈴木弘敏、中橋貞雄、岸野敬行：動的遠心载荷模型実験装置を用いた盛土地盤に対する加振実験、こうえいフォーラム第9号、pp.125～137、2001.1.
- 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.
- 7) (財)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2002.