

PBD群敷設地盤の振動台実験 — 1 G場と遠心場の比較 —

Shaking Table Tests of Group Installation by Plastic-Board-Drain - Comparison of Gravitational Force Field and Centrifugal Force Field -

溝口 義弘*

要 旨

液状化地盤にプラスチックボードドレーン（PBD）群を敷設した地盤の改良効果を評価するため、PBD敷設地盤の振動台実験（1 G場）を行った。しかし、振動台実験では模型地盤の地盤深さに限界があり、液状化層厚が大きくなると、大型土槽を用いた実験を行う必要がある。そこで、大型土槽実験の代わりに遠心模型実験装置を用いた振動台実験を行い、液状化層厚の異なる1 G場と遠心場の振動台実験からPBD敷設地盤の改良効果を検証した。実験の結果、1 G場と遠心場の実験結果には整合性があり、PBD敷設地盤の液状化強度は無対策地盤の初期相対密度に対応して評価できることが分かった。

キーワード：1 G場／遠心場／振動台実験／液状化／プラスチックボードドレーン

1. はじめに

現在、社会資本整備のコスト縮減によって国内の基盤整備に関わる建設投資額は年々減少の一途をたどっており、既存施設の有効活用が求められている。また、東南海地震や南海地震をはじめとして、自然災害に対する減災・防災のニーズはますます要求されるようになっていく。そのため、都市部においては、周辺環境や自然環境に優しい液状化対策工法の開発が求められている。

地盤の液状化対策には、地盤改良を行って液状化させないようにする方法と、液状化しても構造物の機能を維持するよう基礎を強固にする方法がある。前者の地盤改良工法として、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。しかし、地盤を締固める工法では、改良効果に対する信頼性は比較的高いが、施工時に振動・騒音が発生し、締固めに伴う地盤への強制変位があるため、周辺環境に及ぼす影響が大きくなり既設構造物の近傍や市街地などでの採用が難しい。そのため、打設深度に多少の問題は残すものの低振動・小口径なる工法が開発されている。一方、排水工法では、その材料に碎石が用いられてきたが、最近はプラスチック系のドレーン材も使用されてきている。排水工法は、締固め工法と比較して、振動・騒音が少なく、周辺環境への影響が少ない利点があるが、液状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問題が挙げられる。

このような液状化対策工法の現状と動向を踏まえ、RPD工法を開発した。RPD工法は、PBDの先端をアンカーで非液状化層に定着し、PBDの頭部をジオグリッドと固定治具で連結することで、排水性能と拘束性能をあわせもつ工法である。これまでRPD工法を適用した地盤を対象に振動台実験を行い、PBDとジオグリッドによる地盤の変形抑制効果とPBDの排水効果によって、地盤の液状化強度が増加することを検証してきた^{1)~3)}。

今回、PBD敷設地盤の改良効果を評価するため、PBDの打設間隔を変化させた模型地盤の振動台実験を行った。しかし、液状化層厚が10m程度になれば、大型単純せん断土槽を用いて実験を行わなければならないが、実験期間、費用等が大がかりになる。そこで、大型土槽実験に代わる遠心模型実験装置を用いた振動台実験を行い、1 G場と遠心場の実験結果との整合性を比較しながら検討を行った。本報は、それらの実験結果について報告する。

2. 1 G場の振動台実験

2.1 実験方法

模型地盤の概要を図-1に示す。地盤高さは45cmで、PBDの配置は千鳥配置である。実験ケースを表-1に示す。PBDの打設間隔は、相似率を1/5として、実施工での最小打設間隔60cmを考慮し、12cm、16cm、20cmの3種類である。

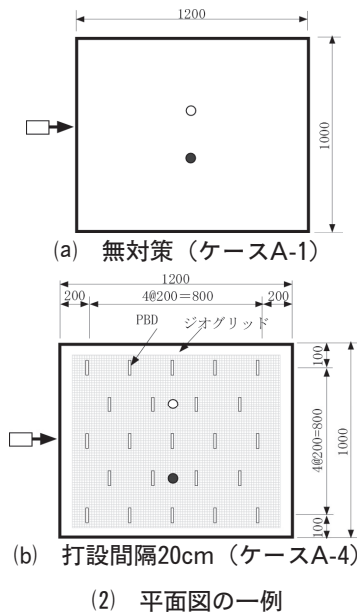
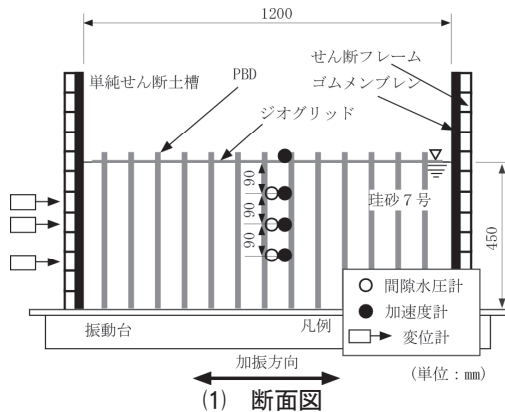
地盤材料は、珪砂7号で、初期相対密度 D_{r0} が50%（TYPE-1地盤）、40%（TYPE-2地盤）になるよう水中落下法で作製する。珪砂7号の粒度分布を図-2に示す。

*技術研究所土木研究グループ

実験に用いたPBDとジオグリッドを写真－１に示す。
PBDの寸法は、実大寸法200mm×10mmに対して40mm×3mmのものである。

加振波形は、1Hzの正弦波で20波加振し、振動台の加振加速度は、地盤が液状化するまで80galから20galずつ段階的に増加させる。

計測項目は、地盤内の加速度、間隙水圧およびせん断フレームの変位である。



図－１ 模型地盤の概要

ケース	PBD打設 間隔(cm)	初期相対密度 D_{r0} (%)	
		TYPE-1 地盤	TYPE-2 地盤
A-1	—	47.0	41.8
A-2	12	49.2	42.0
A-3	16	50.6	41.8
A-4	20	47.0	42.9

2.2 実験結果

(1) 過剰間隙水圧

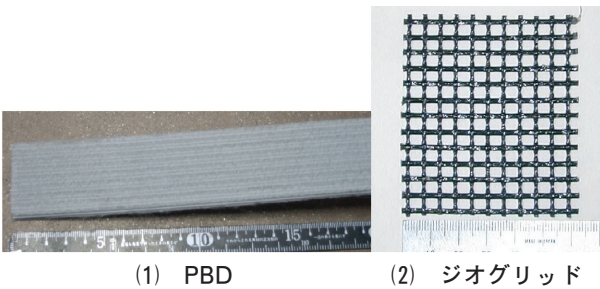
地盤が液状化した時の振動台の加振加速度を表－２に示す。TYPE-1,2の地盤にかかわらずPBDの打設間隔が小さいほど、液状化加速度は大きくなるが分かる。

TYPE-1地盤の無対策地盤が液状化した80galの時とほぼ同一加速度の時の各ケースの過剰間隙水圧比の経時変化を図－３に示す。PBD敷設地盤は、無対策地盤に比べて過剰間隙水圧が発生しにくいことが分かる。なお、TYPE-2地盤についても図を省略するが同様の結果を示している。

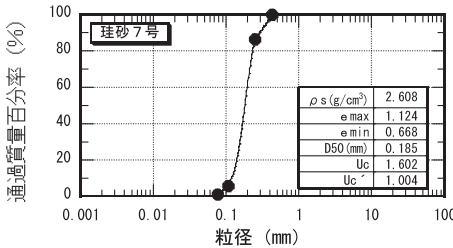
加振加速度ごとの最大過剰間隙水圧比の変化を図－４に示す。PBDの打設間隔が小さいほど、最大過剰間隙水圧比が1.0に達する加振加速度が大きくなる。また、PBDの打設間隔が小さいほど、同じ加振加速度で比べると、過剰間隙水圧の発生が抑制されていることが分かる。

(2) せん断ひずみ

加振加速度ごとのせん断ひずみの変化を図－５に示す。なお、せん断ひずみは地表面とGL-90mmに設置した加



写真－１ 実験に用いた材料



図－２ 珪砂7号の粒度分布

表－２ PBD群敷設地盤の振動台実験の結果

ケース	PBD打設 間隔(cm)	液状化加速度 (gal)	
		TYPE-1 地盤	TYPE-2 地盤
A-1	—	80	70
A-2	12	300	200
A-3	16	240	200
A-4	20	240	125

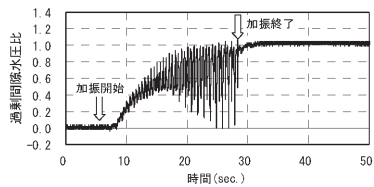
速度波形を2回積分して求めた水平変位を加速度計の距離で除した値を表す。無対策地盤が液状化する加速度の大きさでは、PBDを敷設した地盤のせん断ひずみはほとんど生じていないことが分かる。また、全てのケースで、液状化するとせん断ひずみが大きくなっていることが分

かる。

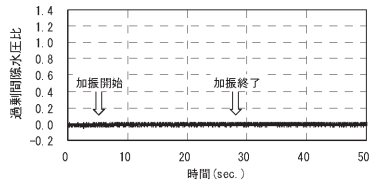
3. 遠心場の振動台実験

3.1 遠心模型実験装置の概要

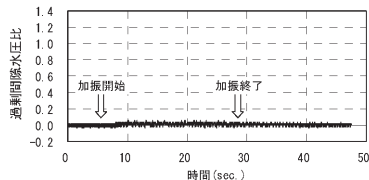
遠心模型実験装置は、回転半径1.5mのビーム型で、遠心加速度は200Gまで加速できる。また、プラットフォームに振動台を取り付けることで動的な試験を行うことができる。遠心载荷中に、振動台の水平方向に正弦波あるいは地震波を用いて加振する。土槽（試料容器）はローラー付きアルミフレームを積層した単純せん断土槽で、内寸法は長さ450mm、幅150mm、高さ210mmで、止水のために内側にゴムシートを取り付けている。写真-2に遠心载荷実験装置を示す。



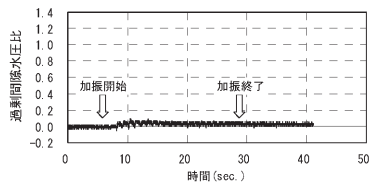
(1) 無対策 (ケースA-1)



(2) 打設間隔12cm (ケースA-2)

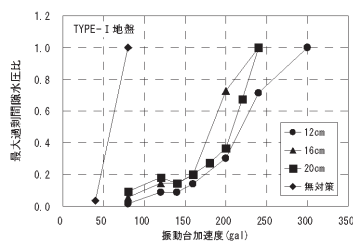


(3) 打設間隔16cm (ケースA-3)

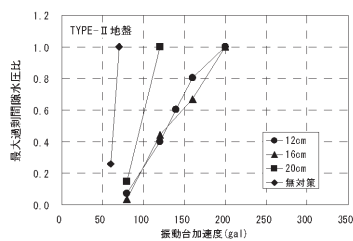


(4) 打設間隔20cm (ケースA-4)

図-3 過剰間隙水圧比の経時変化 (TYPE-1地盤、深さ90mm)

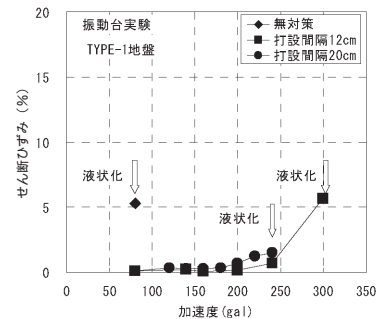


(1) TYPE-1地盤の場合

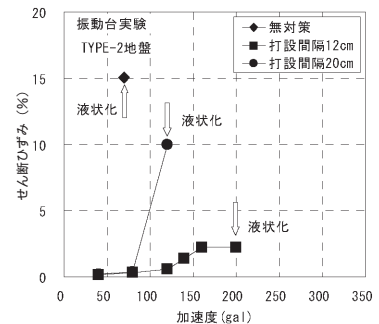


(2) TYPE-2地盤の場合

図-4 加振加速度と最大過剰間隙水圧比の関係



(1) TYPE-1地盤の場合



(2) TYPE-2地盤の場合

図-5 加振加速度とせん断ひずみの関係

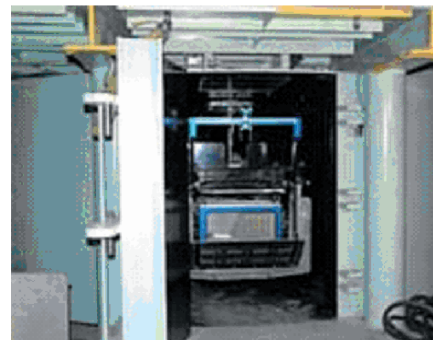
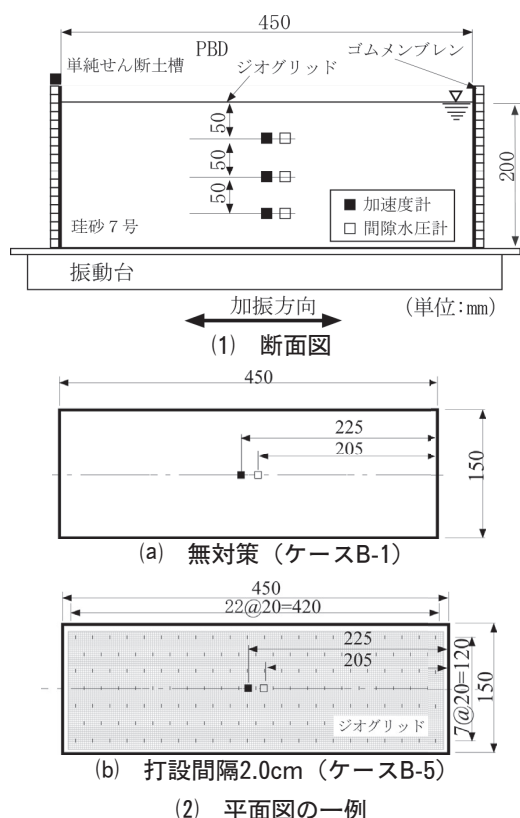


写真-2 遠心模型実験装置

3.2 実験方法

模型地盤の概要を図－6に示す。遠心場の実験では相似率 $1/n$ の模型地盤に nG の遠心加速度を加えて実験を行う。実験に用いたPBDの寸法は、実大寸法 $200\text{mm} \times 10\text{mm}$ に対して $4\text{mm} \times 2\text{mm}$ である。PBDの配置は千鳥配置で、PBDの打設間隔は、実施工での打設間隔に基づいて設定する。実験ケースを表－3に示す。

実験に用いた材料を表－4に示す。地盤材料は、1G場の振動台実験と同じ珪砂7号で、初期相対密度 D_{r0} が50%になるよう水中落下法で作製する。間隙流体には遠心力場での相似則を満足させるため、水の n 倍の粘性のあるメトロースを用いる。PBDとジオグリッドは、剛性の相似則が満足する写真－3(1), (2)に示すスパイラル状



図－6 遠心場の模型地盤の概要

表－3 実験ケース

ケース	遠心加速度 (G)	PBD打設間隔 (cm)	地盤深さ (cm)	初期相対密度 (%)
B-1	50	—	20 (1000)	47.3
B-2	25	2.4 (60)	20 (500)	52.6
B-3	30	2.4 (72)	20 (600)	50.6
B-4	30	3.2 (96)	20 (600)	51.4
B-5	50	2.0 (100)	20 (1000)	54.5
B-6	50	3.0 (150)	20 (1000)	53.9

() は実大換算値

の樹脂にフィルター材で覆ったPBDと網戸の網を用いる。また、固定金具は写真－3(3)に示すバルサ材を用いる。

加振波形は、実大換算で1Hzになる周波数の正弦波で20波加振し、地盤が液状化するまで段階的に増加させる。計測項目は、地盤内の加速度と間隙水圧である。

3.3 実験結果

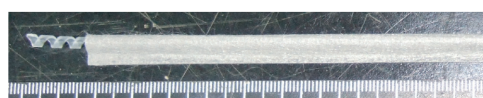
地盤が液状化した時の振動台の加振加速度を表－5に示す。PBDの打設間隔が小さいほど、液状化加速度は大きくなることが分かる。PBDの実大打設間隔が100cm (ケースB-5) の場合、加速度を227gal以上加振することができず、地盤が液状化するまでに至らなかった。そこで、打設間隔がさらに小さくなる模型地盤では、最大加速度を大きくするため、遠心加速度を低下させて実験を行った。

無対策地盤が液状化した73galと同等の加速度条件下での各ケースの過剰間隙水圧比の経時変化を図－7に示す。PBD敷設地盤は、無対策地盤に比べて過剰間隙水圧が発生しにくいことが分かる。

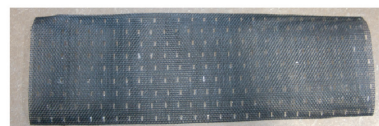
加振加速度ごとの最大過剰間隙水圧比の変化を図－8に示す。1G場の実験結果と同様に、PBDの打設間隔が小さいほど、過剰間隙水圧の発生が抑制されていることが分かる。

表－4 実験に用いた材料

地盤材料	珪砂7号
間隙流体	メトロース (遠心加速度 nG の場合、 n 倍粘性)
PBD	フィルター材+スパイラル状の樹脂 (封筒状) (実大) 幅 $200\text{mm} \times$ 厚さ 10mm (模型) 幅 $4\text{mm} \times$ 厚さ 2mm
ジオグリッド	網戸の網、 $430\text{mm} \times 130\text{mm}$
固定金具	(実大) 廃プラ (模型) バルサ材、幅 $10\text{mm} \times$ 厚さ $8\text{mm} \times$ 長さ 129mm



(1) PBD



(2) ジオグリッド



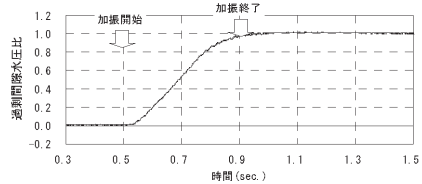
(3) 固定金具

写真－3 実験に用いた材料

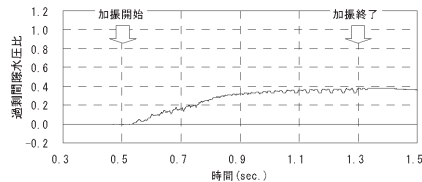
表－5 PBD群敷設地盤の振動台実験の結果

ケース	PBD打設間隔 (cm)	液状化加速度 (gal)
B-1	—	73
B-2	2.4 (60)	304
B-3	2.4 (72)	253
B-4	3.2 (96)	178
B-5	2.0 (100)	227gal 以上
B-6	3.0 (150)	132

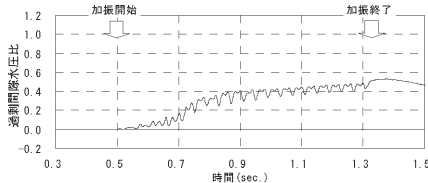
() は実大換算値



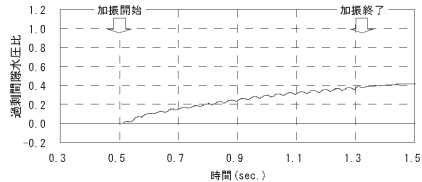
(1) 無対策 (ケースB-1)



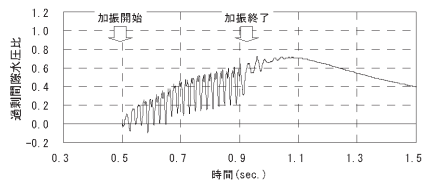
(2) 打設間隔60cm (ケースB-2)



(3) 打設間隔72cm (ケースB-3)

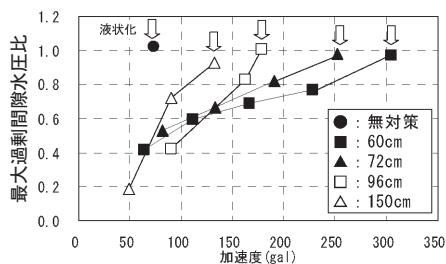


(4) 打設間隔96cm (ケースB-4)



(5) 打設間隔150cm (ケースB-6)

図－7 過剰間隙水圧比の経時変化 (深さ50mm)



図－8 加振加速度と最大過剰間隙水圧比の関係

4. 考察

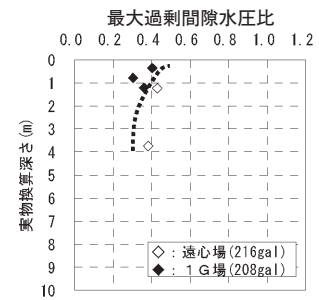
4.1 過剰間隙水圧比の深度分布

PBDの打設間隔と地盤深さを実大換算し、同等の加速度条件下での1 G場と遠心場の最大過剰間隙水圧比の深度分布を図－9に示す。液状化層厚が10m程度であれば、液状化層厚にかかわらず同一深さでの過剰間隙水圧比はほぼ同じ値を示していることが分かる。

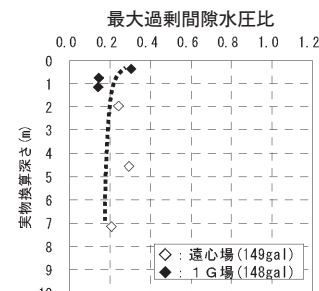
4.2 PBDの打設間隔の影響

液状化強度とPBD打設密度の関係の関係を図－10に示す。液状化強度は、地盤内の繰返しせん断応力比から求めた値である。せん断応力は、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(質量)を乗じ、地表から順に重ね合わせる方法⁴⁾により求める。打設密度は、せん断土槽断面積に対するPBDの総断面積の比率を表す。

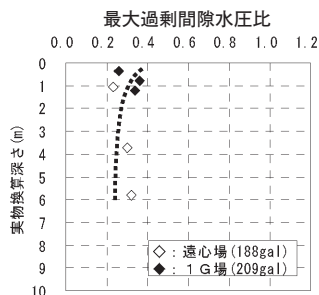
1 G場において、打設密度が0.3以上(打設間隔が100



(1) 打設間隔60cm



(2) 打設間隔72cm～80cm



(3) 打設間隔100cm

図－9 最大過剰間隙水圧比の深度分布

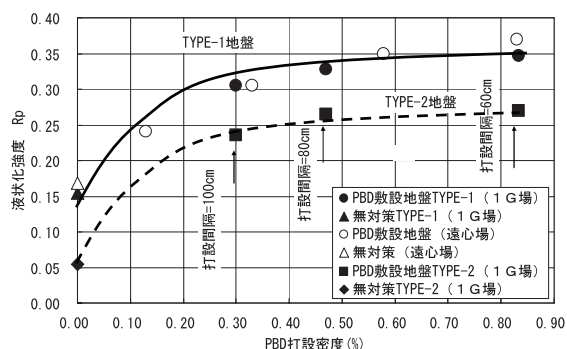


図-10 液状化強度とPBD打設密度の関係

cm以下)では、TYPE-1,2ごとに、液状化強度と打設密度の間にはほぼ直線的な相関関係があり、無対策地盤の初期相対密度に対応してPBD敷設地盤の液状化強度を評価することができる。また、1 G場のTYPE-1地盤とほぼ同じ地盤条件である遠心場の結果(○印)も、ほぼ同じ曲線上に位置していることが分かる。したがって、1 G場と遠心場の実験結果には整合性があることが分かる。

5. まとめ

PBD敷設地盤の改良効果を評価するため、PBDの打設間隔を変化させたPBD敷設地盤の振動台実験を1 G場と遠心場でそれぞれ行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) PBDの打設間隔が小さいほど、液状化加速度は大きい。
- 2) PBD敷設地盤は、無対策地盤に比べて過剰間隙水圧が発生しにくい。
- 3) 液状化層厚が10m程度であれば、液状化層厚にかかわらず同一深さでの過剰間隙水圧比はほぼ同じ値を示す。
- 4) 地盤が液状化するまではせん断ひずみは非常に小さい。
- 5) 打設密度が0.3以上(打設間隔が100cm以下)では、液状化強度とPBDの打設密度の間にはほぼ直線的な相関関係があり、無対策地盤の初期相対密度に対応してPBD敷設地盤の液状化強度を算定することができる。
- 6) 1 G場と遠心場の実験結果には整合性がある。

[謝辞]

遠心模型実験装置の実験施設を提供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 西形達明准教授、および実験を手伝って頂いた大学院生辻清仁君に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 溝口義弘、浅田毅、田中泰雄他：プラスチックボードドレーン敷設地盤の液状化特性、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.721～726、2002.11.
- 2) 溝口義弘、浅田毅：PBD群による盛土の変形抑制効果について、浅沼組技術研究所報、No.18、pp.51～56、2006.
- 3) 溝口義弘、浅田毅：PBD群による人孔の浮上り防止効果について、浅沼組技術研究所報、No.19、pp.65～68、2007.
- 4) 日本建築学会：地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み—、pp.205～224、1983.