

プラスチックボードドレーン材挿入による地盤の補強効果

Effect of Reinforcing of Liquefiable Ground using Anchored Plastic Board Drain

溝口 義弘*

浅田 毅*

要 旨

本報では、中空ねじり試験装置を用いたPBD（プラスチックボードドレーン）敷設地盤の非排水せん断試験とその数値解析を行い、PBDとジオグリッドで囲まれた地盤の補強効果について調べた。その結果、PBD敷設地盤は無処理地盤に比べると、せん断剛性は大きく、有効応力の低下が少なくなること、また、せん断するにしたがい土とPBDが一体となって挙動し、PBDには大きな引張力が働くことが明らかになった。

キーワード：中空ねじりせん断試験／個別要素法／プラスチックボードドレーン／拘束効果

1. はじめに

近年、我が国では地震の活動期に入ったと言われており、地震が起きますと、兵庫県南部地震で発生した液状化現象と同等のものが発生する可能性が大きい。沿岸部に広がる工場跡地、埋立地等の利用が盛んに進められており、対策工の必要性がますます求められるようになっていく。

液状化対策工法については種々の工法が開発されているが、経済的で施工性のよいものは数多くはない。これらのうち実績の多いものとして、密度増大を目的としたサンドコンパクション工法、間隙水圧消散工法のグラベルドレーン工法などが挙げられるが、これらは既存構造物近傍での施工には不適切な場合が多い。そのため、既存構造物近傍では高価な地盤固結工法が用いられている。

筆者らは、既存構造物近傍でも施工可能なPBD群液状化対策工法を提案し研究開発を行っている。本工法は、打設工事によって周辺に及ぼす影響が比較的小さいPBDを液状化地盤に群状に敷設し、PBD先端部を液状化層下部の支持地盤に固定するとともに、PBD頭部をジオグリッドで連結するものである。本工法では、PBD本来の機能である過剰間隙水圧の発生抑制と消散を図ることに加え、PBDとジオグリッドとの地盤の拘束によるせん断変形を抑制することが特長である。

これまで本工法の有効性を確認するために振動台実験、室内試験等を実施してきた。PBD敷設地盤の振動台実験より、PBD敷設地盤は無処理地盤に比べて液状化しにくく、PBDの敷設本数が多いほど液状化強度が大きくなることを確認した¹⁾。また、静的ではあるが単純せん断試験装置を用いたPBD敷設地盤の定体積せん断試験と個別

要素法(Distinct Element Method、以下DEMとする)を用いた数値解析より、PBD敷設地盤の補強効果を明らかにした²⁾。しかし、単純せん断試験では、せん断土槽の側壁の影響などによりPBDとジオグリッドで囲まれた地盤の補強メカニズムを十分に解明するまでには至らなかった。

今回、側壁（境界）の影響が少ない中空ねじり試験装置を用いて、PBDを挿入した中空供試体の非排水条件の下で一方方向のねじりせん断試験を行い、PBDとジオグリッドによる地盤の補強効果について調べた。また、DEMを用いて非排水せん断試験のシミュレーション解析を行い、PBD敷設地盤の強度・変形特性等について検討を行った。本報は、その試験と解析結果について報告するものである。

2. PBD敷設地盤の中空ねじり試験

2.1 試験方法

試験に用いた中空円筒ねじりせん断試験装置を図-1に示す。供試体への鉛直荷重はベロフラムシリンダーで、ねじりせん断力（トルク）は変位制御と応力制御が可能なメガトルクモータにより載荷する。鉛直荷重とねじり力の計測は供試体上部に設置した二方向ロードセルで計測する。ねじり変位はセル外に設置した回転角計により計測する。中空円筒供試体の寸法は、内径60mm、外径100mm、高さ210mmである。

PBDの配置位置を図-2に示す。PBDの挿入本数は、0本、2本、3本、6本の4ケースで、PBDの設置間隔は等間隔である。試験に用いた試料は珪砂5号で、その粒度分布と物理特性を図-3に示す。試験に用いたPBD材は写真-1に示すように通常使用されている芯材付き

* 土木研究グループ

フィルター（厚さ4.5mm、幅20mm）である。供試体は、PBD下端部をペDESTALに固定した状態で、珪砂5号を空中落下法により所定の高さまで投入して作製した。なお、PBD群打設工法ではPBD頭部をジオグリッドにて連結するが、試験装置の制約によりPBD頭部はキャップに固定した。それぞれの供試体の初期相対密度は、44%～47%である。

試験は、供試体を脱気水で飽和させB値が0.95以上であることを確認してから等方圧140kPa（背圧100kPa）で圧密を行った。その後、非排水条件でせん断ひずみ速度1%/minで一方向にねじりせん断試験を行った。せん断中、供試体の高さが変化しないようにペDESTALシリンダーで軸力を調整した。

2.2 試験結果

せん断ひずみとせん断応力の関係を図-4に示す。PBDを挿入したケースは、無処理のケースに比べると

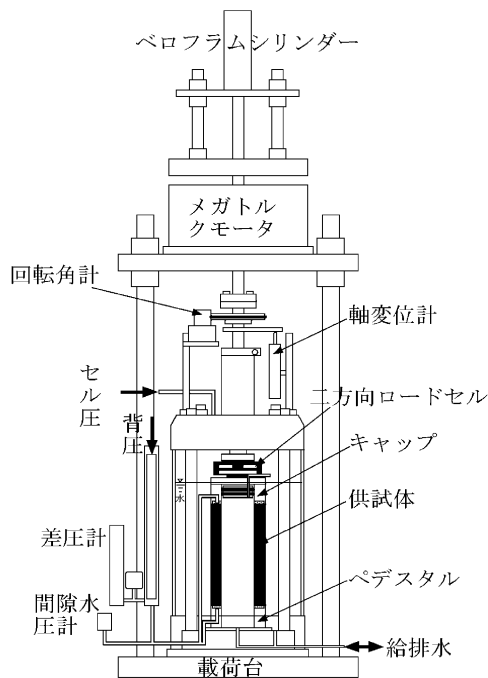


図-1 中空円筒ねじりせん断試験装置

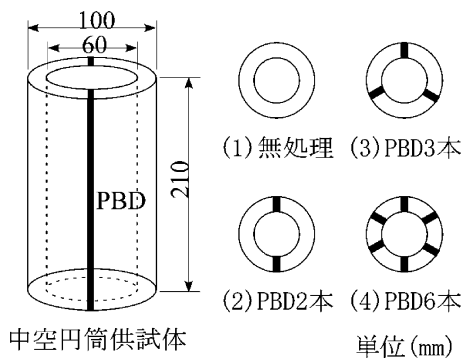


図-2 PBDの配置図

せん断応力 τ が大きくなる。また、PBDの本数が多くなると初期の曲線の傾きが大きくなり、せん断剛性が大きくなる。せん断ひずみ γ が1%以上になると、全ケースとも曲線の傾きはほぼ同じになる。

せん断ひずみと平均有効主応力の関係を図-5に示す。PBDを挿入したケースは、無処理のケースに比べると平均有効主応力 σ_m' が大きく、せん断ひずみ γ が2～3%の間でダイレイタンスーが負から正に変化している。また、PBDの本数が多くなると、正のダイレイタンスーが大きくなる傾向がある。

平均有効主応力とせん断応力の関係を図-6に示す。無処理のケースは、せん断開始と同時に平均有効主応力 σ_m' が大きく低下しているが、PBDを挿入したケースは、無処理のケースに比べると平均有効主応力 σ_m' の低下が少ない。PBDの本数が多くなるほど平均有効主応力 σ_m' の低下は少なくなるが、ある程度以上の本数になるとあまり変わらなくなるものと考えられる。また、

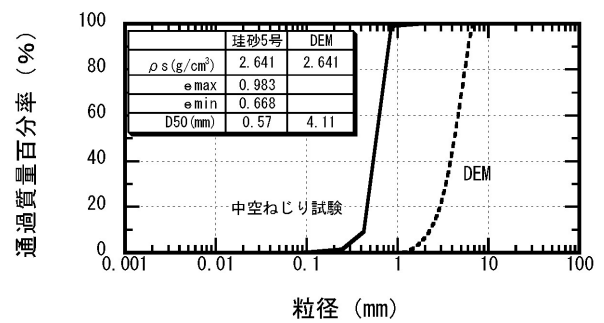


図-3 珪砂5号の粒度分布

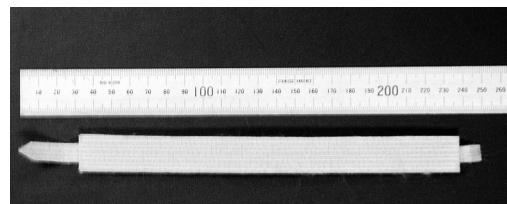


写真-1 PBD材（芯材付きフィルター）

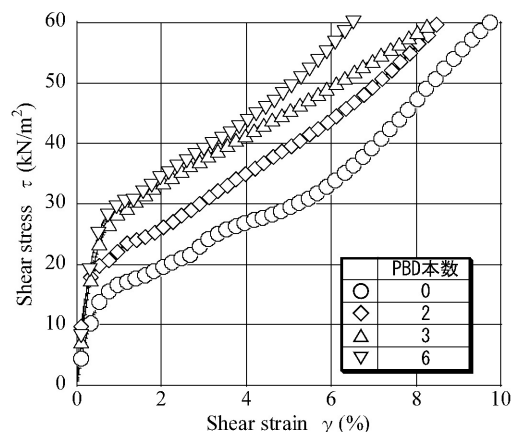


図-4 せん断ひずみとせん断応力の関係

体積変化特性が膨張に転じた（変相点を過ぎた）後のせん断応力 τ はPBDの本数が多くなるほど大きい。

3. PBD敷設地盤のDEM解析

3.1 解析方法

DEMは、Cundall(1971)³⁾によって開発された数値解析方法で、粒状体のような離散体の力学挙動を解析するのに適している手法である。DEMを用いてシミュレーションを実施する際、通常の間要素を用いたのでは十分な強度が発揮されない場合があり、これを改善するため、今回の解析に用いたDEMは間要素に転がり摩擦抵抗を導入したものである⁴⁾⁵⁾。

解析モデルは、中空ねじり試験を忠実に再現するために、PBDとジオグリッドを所定の位置に配置し、土要素を境界内に自由落下した後、土要素上面にキャップに相当する多角形要素を載荷し、19.6kPaの圧力で一次元圧縮を行って作成した。モデルの一例を図-7に示す。図は、PBDを3本敷設し、その頭部をジオグリッドで連結したモデル地盤の圧密後の状態である。左側面と右側面は連続した周期境界条件である。モデル地盤は乾燥状態

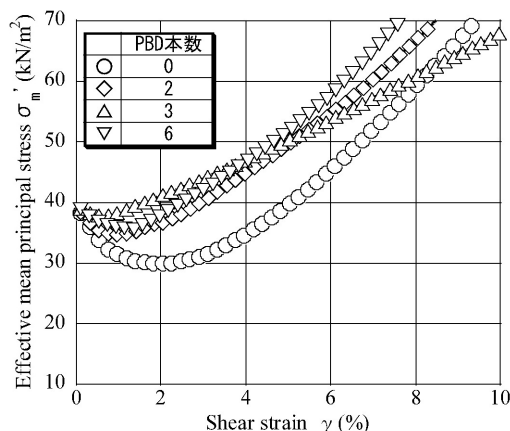


図-5 せん断ひずみと平均有効主応力の関係

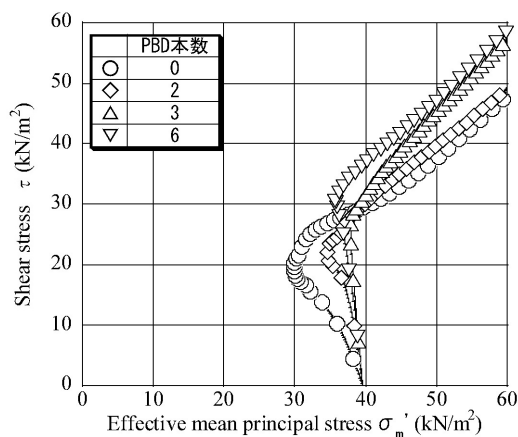


図-6 平均有効主応力とせん断応力の関係

で、その寸法は長さが30cm、高さが12cmである。土要素数は約4000個で、その粒度分布を図-3に示す。平均粒径は中空ねじり試験に用いた珪砂5号の約7倍で、均等係数は同じである。PBDは円形要素を連結させることで表し、ジオグリッドは目合いを考慮して隙間を設けた。PBD下端部の要素は回転自由とした。土要素と補強材(PBD、ジオグリッド)の材料定数を表-1に示す。解析は図-2に示す中空ねじり試験と同じ敷設本数の場合について行った。

解析は、底面および底面との接触粒子を一定速度でせん断させた。せん断中は多角形要素の高さが一定になるように垂直応力を増減させた。

3.2 解析結果

せん断ひずみとせん断応力の関係を図-8に示す。せん断ひずみ γ は底面の水平変位をモデル高さで除した値である。PBDを敷設したケースは、無処理のケースに比べるとせん断応力 τ は大きく、PBDの本数が多いほどせん断応力 τ は大きくなる。これらは、中空ねじり試験と同じ傾向を示している。

せん断ひずみと垂直応力の関係を図-9に示す。PBDの本数が多いほど圧縮しにくく、膨張傾向は大きくなっており、中空ねじり試験結果と比べるとダイレイタンスを過大に評価している。今回用いたDEMは二次元モデルであるために、せん断とともに粒子が他の粒子を乗り越えて膨張しやすくなるため、ダイレイタンスを過大に評価する結果となったものと考えられる。

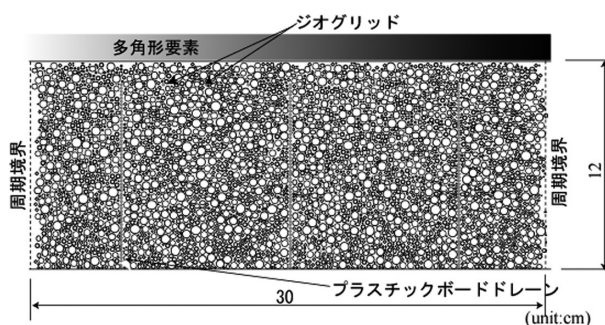


図-7 解析モデルの一例 (PBD 3 本の場合)

表-1 材料定数

	土	PBDとジオグリッド
要素密度 (kg/m³)	2640	1000
法線方向ばね定数 (N/m)	4.0×10^7	2.0×10^8
接線方向ばね定数 (N/m)	3.0×10^7	1.5×10^8
法線方向減衰定数 (N・sec/m)	2.6×10^2	8.0×10^2
接線方向減衰定数 (N・sec/m)	7.0×10^{-3}	8.0×10^2
粘着力 (N)	0	なし
要素間摩擦角 (deg)	24	なし

有効応力経路を図-10に示す。PBDを敷設すると有効応力の低下が小さくなるが、PBDが3本の場合が最も有効応力の低下が小さく、中空ねじり試験と同じ傾向が得られた。

以上のことから、PBDの本数によって、強度、ダイレイタンスー特性が変化することが分かる。土要素の粒径とPBD材の寸法の関係など忠実にモデル化ができない等により、今回のDEM解析の結果からは定量的なものに成り難いが、定性的には正確な挙動を表現できているものと考えられる。

定性的な解析結果の利用として、以下にモデル地盤内の変位と応力分布について検討する。

せん断ひずみ γ が5%時の全要素の変位ベクトルを図-11に示す。せん断は底面境界とそれに接する要素を一定速度でせん断しているために、底面の変位が最も大きくなっている。また、全ケースとも水平方向の変位が卓越していることが読み取れる。図中にPBDの位置をP1、P2で、土要素の位置をS1、S2、S3で表す。図-11のP1、P2、S1~S3の要素の水平変位分布を図-12に示す。これらの図から分かるように、無処理の場合、底面と上面

での変位差は大きく、浅くなるにしたがい相対的な変位量は大きく、解析ケースの中で最も変形しやすい。一方、PBDを敷設すると無処理のものに比べ、底面とPBD頭部間の変位量は相対的に小さく、変形が抑制されているこ

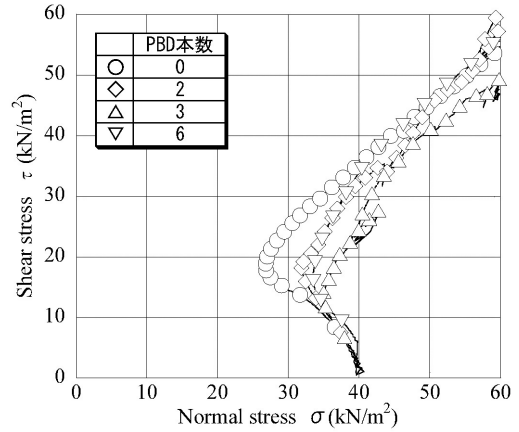


図-10 有効応力経路

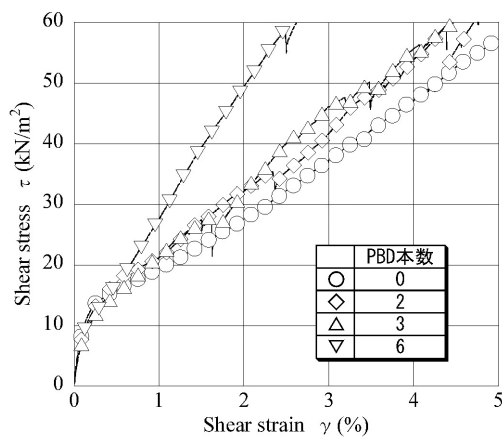


図-8 せん断ひずみとせん断応力の関係

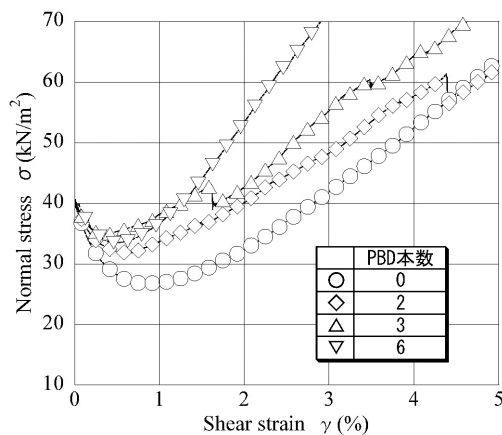


図-9 せん断ひずみと垂直応力の関係

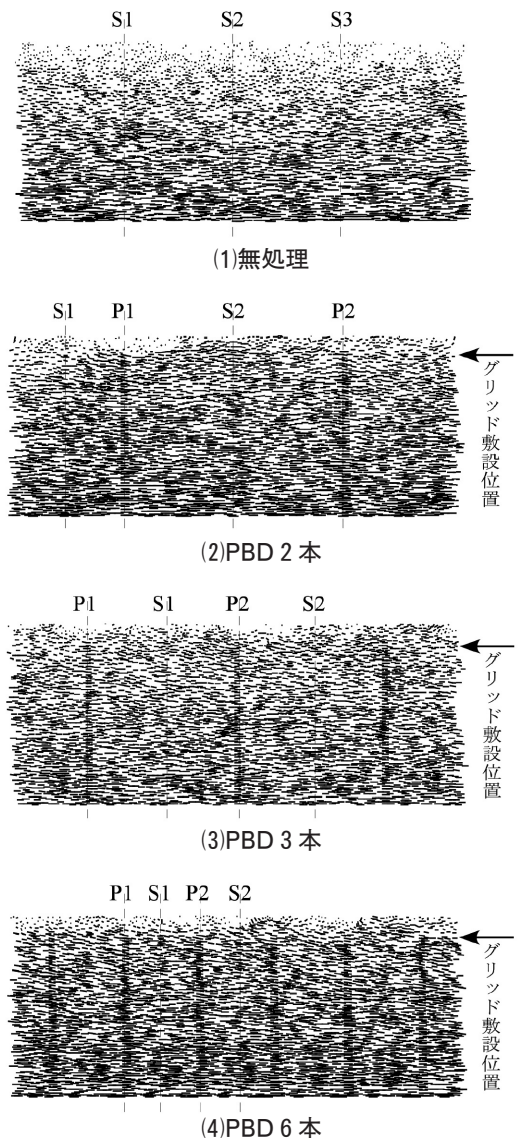


図-11 変位ベクトル

とが分かる。ジオグリッドより上に位置する要素では相対変位は大きい。PBDが2本の場合、PBD頭部付近の土要素の変位はPBDの変位に比べると若干大きく、変形しやすくなっているが、PBDが3本以上になると、土要素の変位とPBDの変位は変わらず、土とPBDが一体となって動いていることが分かる。

次に、せん断ひずみ γ が1%、2%の時の要素間力の分布を図-13に示す。図中のS1～S3は土要素の圧縮力の絶対値を、P1、P2はPBDの引張力を表す。無処理の場合、土要素の圧縮力は位置によって値のばらつきがあるが、せん断ひずみが増すと全体的に大きくなっている。一方、PBDを敷設した場合、せん断とともにPBDの引張力は増加し、各PBDの引張力はほぼ同じである。PBDの変位が大きくなるPBD頭部でPBDの引張力は大きくなる。また、PBDとジオグリッドで囲まれた領域内の土要素の圧縮力のばらつきは無処理のものに比べ少ない。これは土がPBDとジオグリッドとによって拘束されているためと考えられる。

4. まとめ

非排水せん断条件でPBDを挿入した中空供試体の一方のねじりせん断試験を実施した結果、PBDを挿入した供試体は無処理のものに比べると、せん断剛性は大きく、

有効応力の低下が少ないことが分かった。また、個別要素法を用いたPBD挿入モデル地盤のシミュレーション解析を行った結果、中空ねじり試験の結果とほぼ同様の傾向が得られた。モデル地盤内の変位・応力を見ると、PBDを挿入した地盤では、せん断とともに土要素の変位とPBDの変位はほぼ同じ動きを示し、土とPBDが一体となって挙動していることが分かった。また、各PBDの引張力はほぼ同程度増加し、PBD頭部付近で大きくなることが分かった。今後、繰返しによるPBD敷設地盤の要素試験と数値解析を行い、地盤の補強メカニズムについて検討を加えていきたい。

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泰雄教授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
- 2) 溝口義弘、浅田毅：個別要素法を用いたプラスチックボードドレーン敷設地盤のせん断特性、浅沼組技術研究所報、No.15、pp.83～86、2003
- 3) Cundall,P.A. : A Computer Model for Simulating

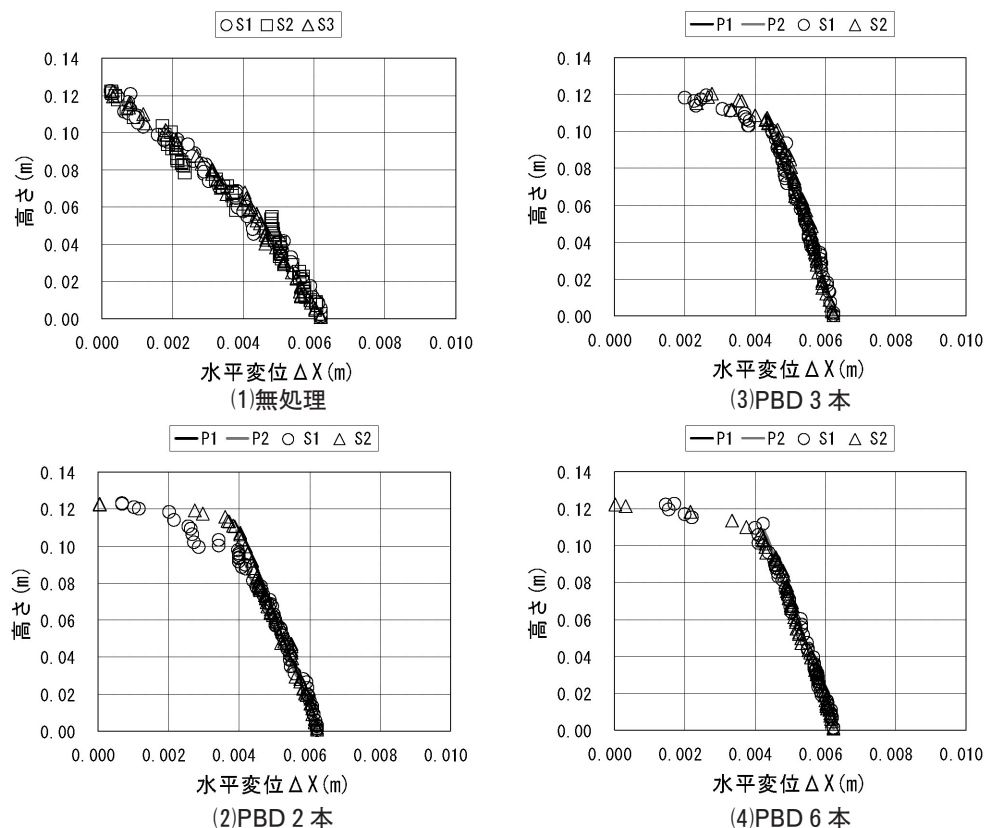


図-12 土とPBD要素の水平変位分布（ジオグリッドの敷設高さ：0.11m）

Progressive Large Scale Movement in BlockyRocksystem,
Symposium ISRM、Proc.2、pp.129～136、1971

- 4) 阪口秀：円形要素を用いたDEMにおける回転抑制に関する研究、第27回土質工学研究発表会、pp.571～

572、1992

- 5) 中瀬仁、本田中、西野隆之：個別要素法摩擦パラメータを設定するためのねじりせん断シミュレーション、第36回地盤工学研究発表会、pp.503～504、2001

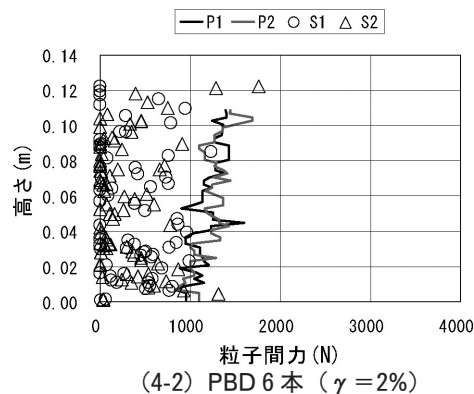
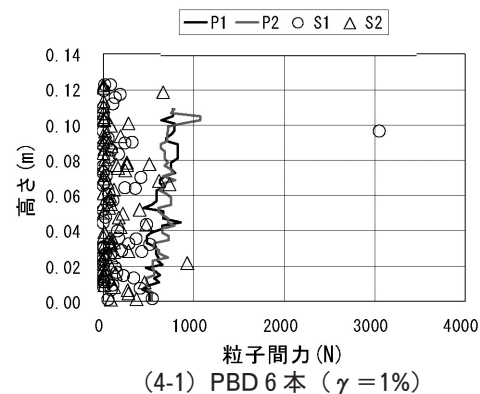
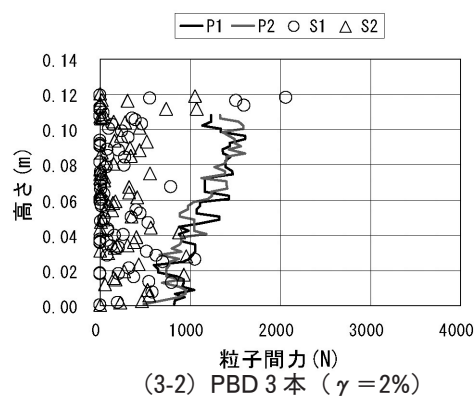
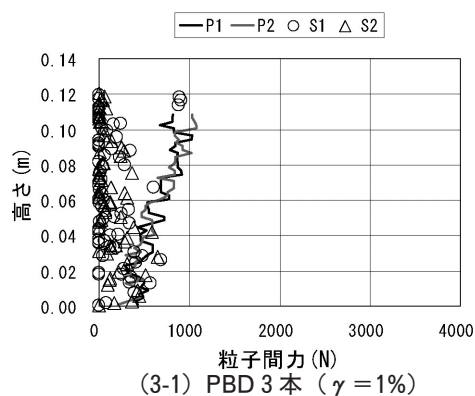
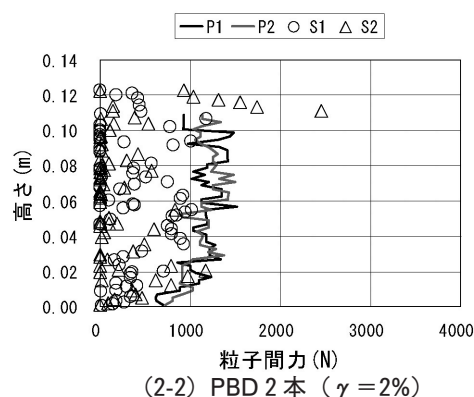
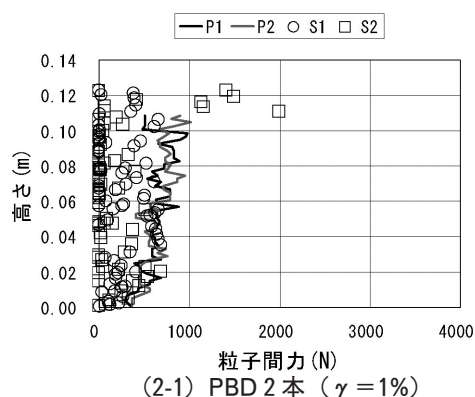
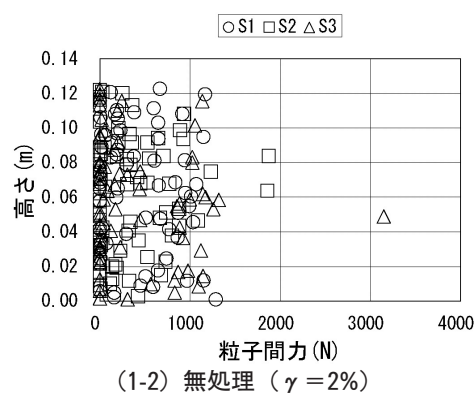
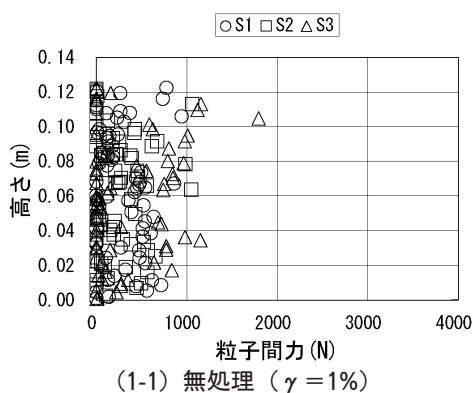


図-13 要素間力の分布