

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

Shear Tendency of Reinforced Sand by Prefabricated Vertical Drain Using Distinct Element Method

溝口 義弘*

浅田 毅*

要 旨

筆者らは、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個別要素法を用いて、プラスチックボードドレーン（以下、PBDとする）敷設地盤の補強メカニズムについて検討を行っている。今回、以前に実施した乾燥状態でのPBD敷設地盤の単純せん断試験をシミュレーション解析し、PBDとジオグリッドとの拘束特性を調べた。その結果、PBDで囲まれた領域の変形は小さく、せん断剛性が高くなり、PBDとジオグリッドとの地盤の一体化による拘束効果が発揮されていることが明らかになった。

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

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、既設構造物に対する液状化対策の必要性がますます求められるようになってきており、液状化対策工の施工実績が増加してきている。その中にはプラスチック性のドレーン材を用いた液状化対策工もみられるようになってきた。

筆者らは、液状化地盤にプラスチックボードドレーンを群状に敷設し、PBDの先端部を支持地盤に固定するとともに、PBDの頭部をジオグリッド等で連結する工法（以下、PBD群工法とする）を提案した。PBD群工法の適用例を図-1に示す。本工法は、地震等によって液状化対象層に液状化が生じても、構造物周囲を群状に敷設したPBDで囲みこむことによって、杭などの変形・破壊を抑えるとともに、過剰間隙水圧の発生抑制および消散を図り、液状化被害を最小限に抑えることを目的としている。

これまでに実施したPBD敷設地盤の振動台実験より、PBD敷設本数が多くなるにしたがい液状化強度が大きくなること、および排水効果と拘束効果との相乗効果のあることを確認した。また、静的な単純せん断試験によって、PBD敷設地盤における有効応力の低下が無処理地盤のものより少なくなることから、PBD敷設による地盤の補強効果を確認した¹⁾。

今回、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個別要素法（Distinct Element Method、以下DEMと略記する）を用いて単純せん断試験のシミュレーション解析を行い、PBDとジオグリッドによる地盤の補強効果を検証した。本稿は、その解析結果について報告するものである。

今回、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個別要素法（Distinct Element Method、以下DEMと略記する）を用いて単純せん断試験のシミュレーション解析を行い、PBDとジオグリッドによる地盤の補強効果を検証した。本稿は、その解析結果について報告するものである。

2. PBD敷設地盤の定体積単純せん断試験のDEM解析

2.1 解析方法

DEMは、Cundall(1971)²⁾によって開発された数値解析技術で、有限要素法や境界要素法のような連続体を解析する手法でなく、非連続体を扱う一手法であり、粒状体や粉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。解析手法は、個別要素と呼ばれる多角形や球あるいは円筒形を剛体としてモデル化したものであり、これら集合体の挙動を求める際のアルゴリズムはきわめて単純である。要素ごとに他の要素との接触判定を行い、粒子間に弾性ばねや粘性ダッシュポットを仮定することにより接触力を求める。その接触力から得られた運動方程式を時間積分で解くというものである。今回、解析に用いたDEMは円要素に転がり摩擦抵抗³⁾を導入したものである。

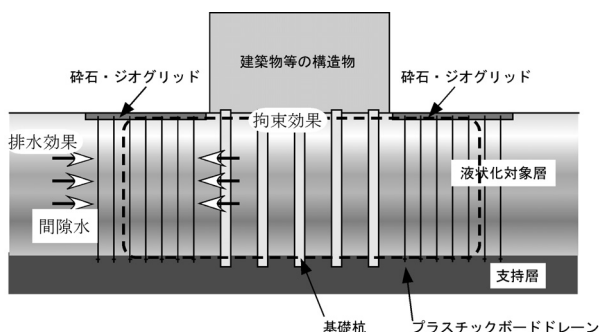


図-1 PBD群工法の適用例

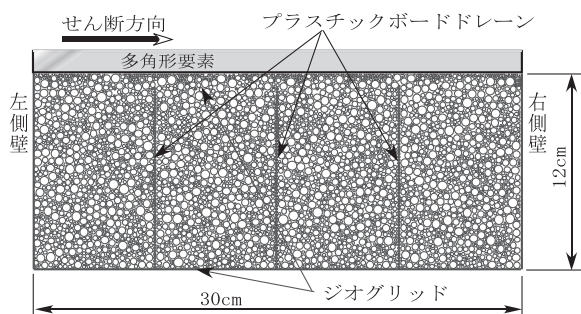
*土木研究グループ

解析モデルは、定体積せん断試験を忠実に再現するために、土要素を境界内にパッキング（自由落下）した後、土要素上面に載荷版に相当する多角形要素を載荷し、19.6 kPaの圧力で一次元圧縮を行って作成した。解析ケースを表－1に示す。図－2にモデルの一例として、PBDを3本敷設し、その上下端部をジオグリッドで連結したモデル3-1の初期状態を示す。

DEMではPBDを線形材料で表すことができないため、図示するように要素を連結させたものを用いた。ジオグリッドは目合いを考慮して隙間を設けた。解析モデルの寸法は長さが30cm、高さが12cmで、土要素数は約4000個で、平均粒径は定体積せん断試験に用いた珪砂5号の7.2倍である。土要素、PBD、ジオグリッドの材料定数を表－2に示す。PBDとジオグリッドの材料定数は同一とした。解析によるせん断は、最上段せん断箱要素に対応する左側壁の上端部を一定速度でせん断させながら、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。なお底面は固定境界である。

表－1 解析ケース

ケース	PBD敷設本数	PBD上端部連結材料	PBD下端部連結材料
モデル0	なし	なし	なし
モデル3-1	3本	ジオグリッド	ジオグリッド
モデル3-2		ジオグリッド	なし
モデル4-1	4本	ジオグリッド	ジオグリッド
モデル4-2		ジオグリッド	なし



図－2 解析モデルの一例(モデル3-1)

表－2 材料定数

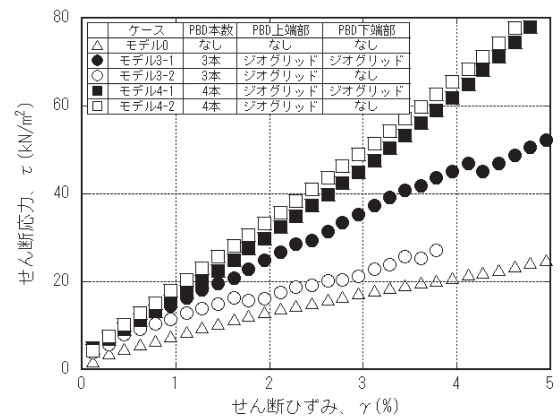
	土要素	PBDとジオグリッド
要素密度(kg/cm ³)	2640	1000
法線方向ばね定数(N/m)	2.0×10^{07}	4.0×10^{08}
接線方向ばね定数(N/m)	1.5×10^{07}	3.0×10^{08}
法線方向減衰定数(N・sec/m)	5.2×10^{02}	8.0×10^{02}
接線方向減衰定数(N・sec/m)	$7.0 \times 10^{-0.3}$	8.0×10^{02}
要素間摩擦角(deg)	24	なし
転がり摩擦角(deg)	24	なし

2.2 解析結果

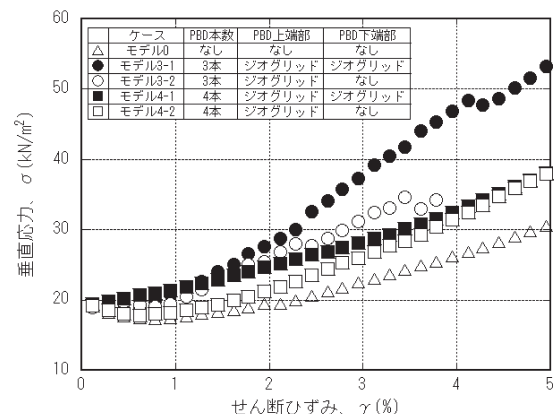
せん断ひずみとせん断応力の関係を図－3に示す。せん断ひずみは供試体の高さに対する最上段せん断箱要素の水平変位の割合を表したものである。PBDの敷設本数が多いほどせん断応力は大きくなる。また、PBDが3本の場合、PBD上下端部をジオグリッドで連結したモデル3-1のせん断応力がPBD上端部をジオグリッドで連結したモデル3-2のものより大きく、定体積せん断試験と同じ結果¹⁾を示している。

せん断ひずみと垂直応力の関係を図－4に示す。モデル0は、定体積せん断試験の場合、せん断中収縮傾向を示していたものが、今回の解析では、せん断ひずみが2%をすぎるあたりから収縮から膨張傾向に変化している。DEMではダイレイタンスを過大に評価する傾向があり、その影響が解析結果に表れている。PBDの上下端部をジオグリッドで連結したモデル3-1とモデル4-1は、PBD上端部をジオグリッドで連結したモデル3-2とモデル4-2に比べて膨張度合いが大きく、これらは定体積せん断試験と同じ傾向を示している。

有効応力経路を図－5に示す。PBDが4本の場合を見ると、PBD上下端部をジオグリッドで連結したモデル4-1の方がモデル4-2に比べ、有効応力の低下が小さい。



図－3 せん断ひずみとせん断応力の関係



図－4 せん断ひずみと垂直応力の関係

全体的に単純せん断試験よりも解析結果の方が有効応力の低下度合いが小さいが、PBDの敷設本数が多いと有効応力の低下は小さくなることもわかる。

以上のことから、解析は定体積せん断試験の結果を定量的に再現していないが、定性的に同じ傾向を表現できていることが分かった。

2.3 PBD敷設地盤の特性

(1) 要素の変位分布

要素の変位ベクトルを図-6に示す。せん断開始前からせん断ひずみが5%時までの土要素の中心点の移動ベクトルを表したものである。

PBDで囲まれた中央の領域を領域Ⅱ、その左側壁側を領域Ⅰ、右側壁側を領域Ⅲとする。モデル0では、側壁の影響により領域ⅠとⅢの側壁近くの変位が領域Ⅱの変

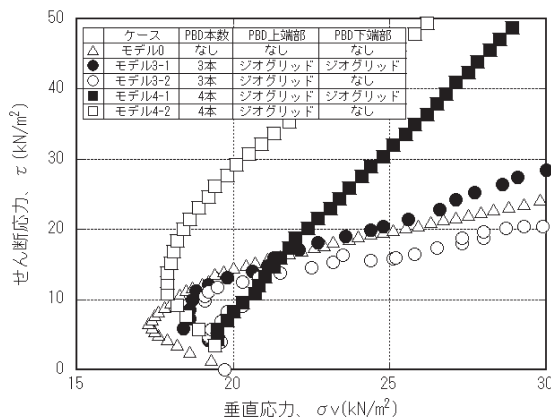


図-5 有効応力経路

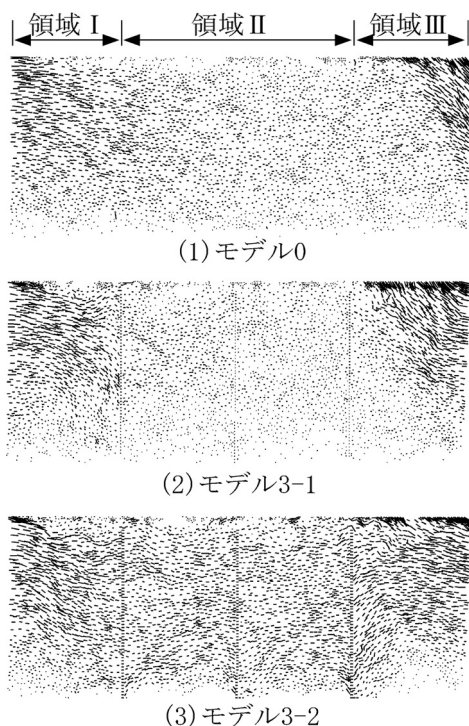


図-6 要素の変位分布

位より大きく、領域Ⅱの変位は水平方向に卓越している。PBD上下端部を連結したモデル3-1をみると、側壁近くの変位はモデル0と同じような挙動を示しているが、PBDで囲まれた領域Ⅱの変位は一樣で他のモデルに比べて小さく、PBDと一体となって動いている様子が分かる。PBD上端部だけを連結したモデル3-2では、モデル3-1とほぼ同じ挙動を示すが、変位ベクトルは大きい。図を省略するがPBDを4本敷設した場合も同じ傾向を示す。

(2) 要素間の接触力分布

要素間の接触力分布を図-7に示す。図中の直線の長さが接触力の大きさを、直線の方が接触力の向きを、中心点が接触力の作用点を表している。全ケースとも側壁の影響により接触力は右側壁近くでは小さく、左側壁付近では大きくなっている。石原⁴⁾は単純せん断試験において砂のような粒状体では、せん断箱内でのひずみ分布が不均一になりやすく、せん断方向に向かって前方の右側壁近くの土は緩くなるのに対して、後方の左側壁近くの土は締まる傾向があると述べている。このような傾向が解析結果に表れている。

上下端部を連結したモデル3-1をみると、左側壁側の領域Ⅰ、PBDで囲まれた領域Ⅱ、右側壁側の領域Ⅲと順に接触力が小さく、領域ごとの接触力はほぼ一様となり3層構造を示している。上端部を連結したモデル3-2も、モデル3-1と同じように3層構造を示している。モデル

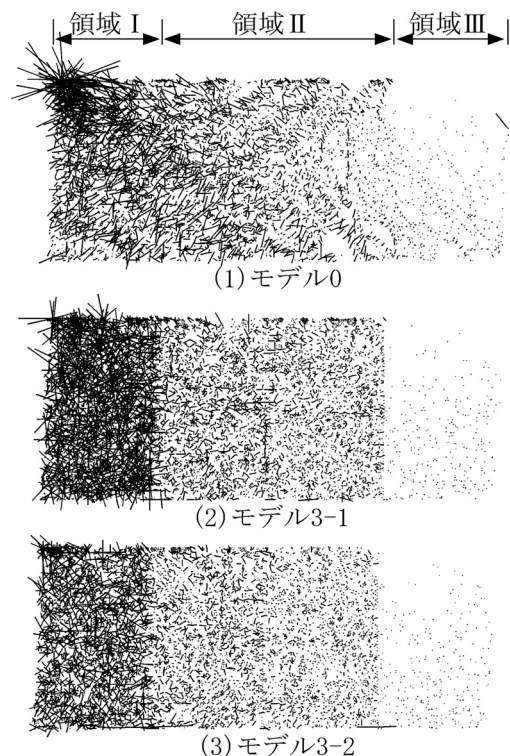


図-7 要素間の接触力分布

0のように接触力が連続的に減少しないのは、PBDとジオグリッドとによって一体化（抱き込み等）が生じているためではないかと考えられる。なお、PBDを4本敷設した場合も同じ傾向を示す。

(3) 要素の接点角分布

せん断ひずみが0、2、5%のときの要素全領域を対象とした要素の接点角分布の変化を図-8に示す。要素接点角 α は要素接平面の垂直方向が水平面とのなす角度で、全体を 10° 間隔の変域に区分し、その変域における各要素間の接点角の中央値を表している。要素接点角の度数分布 $M(\alpha)$ は変域内の接点度数を最大度数で正規化したものである。モデル3-1と3-2の場合、 90° と 270° の $M(\alpha)$ の増大はPBDの要素が含まれているためである。

モデル0をみると、せん断開始前の要素接点角分布はほぼ円形に近い形状を示すが、せん断ひずみが2%になると鉛直方向の接点が相対的に増加し、せん断方向の接点が相対的に減少し、粒子構造が変化している様子が分かる。これは、図-4に示すようにダイレイタンスーが変化する時に対応している。おそらく粒子構造の変化は変形に抵抗しようとしているためと考えられる。一方、PBDを3本敷設したモデル3-1とモデル3-2では、せん断による粒子構造の変化は少なく、これはPBDとグリッドによって要素が拘束されているためと考えられる。図を省略するがPBDを4本敷設した場合も同じ傾向を示す。

(4) PBD間力

せん断ひずみが1、3、5%時のPBD要素間の接触力分布を図-9に示す。上下端部を連結したモデル3-1の方が上端部だけを連結したモデル3-2より、PBD下端部で大きな接触力が働いている。このことは、PBDとジオグリッドとの拘束効果が発揮されているためだと考えられる。

3. 結論

個別要素法を用いたPBD敷設地盤の定体積せん断試験のシミュレーション解析の結果から、以下のことが分かった。

①DEMは定体積せん断試験の結果を定性的であるが表現することができる。

②PBD上下端部をジオグリッドで連結した場合、PBDで囲まれた領域内の要素変位は周辺の変位より小さく、要素間の接触力はほぼ一様となり、PBDと土要素が一体化（PBDとジオグリッドによる抱き込み）したような挙動を示す。

③PBDとジオグリッドの連結部には大きな力が作用する。

今後、周期境界条件下の地盤が飽和状態のときのDEM解析を行い、PBDの排水効果と拘束効果について検討

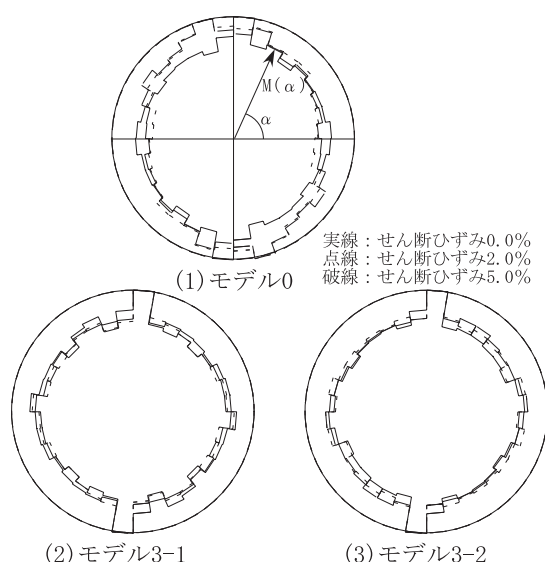


図-8 要素の接点角分布

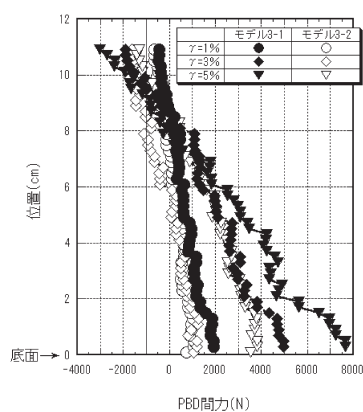


図-9 PBD間力

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泰雄教授、解析を共同で行った神戸大学大学院原弘典氏（現、(株)中央開発）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) Cundall, P.A. : A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rock-system, Symposium ISRM, Proc.2, pp.129-136, 1971
- 3) 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
- 4) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、pp.120-122、1976