



# プラスチック・ボード・ドレーン群打設による液状化対策工法の開発

溝口, 義弘

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2005-09-25

(Date of Publication)

2013-02-20

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3448

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003448>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 279 】

氏 名・(本 籍)	溝口 義弘	( 兵庫県 )
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学 位 記 番 号	博い第377号	
学位授与の 要 件	学位規則第5条第1項該当	
学位授与の 日 付	平成17年9月25日	

【 学位論文題目 】

プラスチック・ボード・ドレーン群打設による液状化  
対策工法の開発

審 査 委 員

主 査	教 授	田中 泰雄
	教 授	沖村 孝
	教 授	内田 一徳

地震の活動期に入ったと言われる昨今、今後 30 年に地震が発生する確率が、東南海地震では 50%程度、南海地震では 40%程度と言われている。今まで以上に、兵庫県南部地震で発生した液状化被害が発生するものと懸念され、ますます地盤の液状化対策や構造物等の耐震対策などが重要な課題となってくる。

本研究では、プラスチック・ボード・ドレーン材（以下、PBD とする）を地盤に一定間隔で打設し、PBD 先端部を支持地盤に固定し、PBD 頭部をジオグリッドで連結する PBD 群打設工法を開発している。PBD 自身が持つ排水機能に新たに PBD とジオグリッドによる地盤の拘束機能を付加させれば、液状化の可能性の高い砂地盤の耐震補強を行うことが可能になると考えられる。本研究の目的は、模型振動台実験により排水効果と拘束効果による補強効果を確認し、室内要素試験と個別要素法を用いたシミュレーション解析により地盤の補強メカニズムを明らかにしながら、合理的な設計法を提案するものである。

本論文は、序論、結論の他、6章から構成されている。

第 1 章では、レベル 2 地震動で地盤が液状化しても構造物の機能を損なわないようにするためには、ある一つの工法では対応しきれないケースが考えられ、複数の液状化対策工法を併用した工法の開発が求められている。また、周辺環境に及ぼす影響が少なく、既設構造物の近傍や市街地などでも施工できる経済的な液状化対策工法の必要性を論じた。

さらに、既存の液状化対策工法の現状と課題について概説し、本研究において拘束効果と排水効果による強度増加を期待していることから、締固め工法と排水工法の設計法について詳述した。また、液状化対策工法の開発を効率的に進めていくため、改良効果確認のための研究ツールとして、実験的手法と解析的手法について論述し、本研究において補強効果を確認するための振動台実験と、補強メカニズム解明に有効な解析方法の一つである個別要素法（以下、DEM とする）について述べた。

第 2 章では、簡易な小型土槽に PBD の材質、固定方法（PBD 先端部の固定の有無、PBD 頭部とジオグリッドとの連結の有無）、PBD の排水の有無等を変化させた小型モデル地盤を作製し、PBD 群打設工法の有効性を確認した。有効性が認められた PBD の設置方法を基本として、単純せん断土槽に PBD の敷設本数、排水性の有無を変化させた PBD 敷設地盤を作製し、無処理地盤と比較しながら、排水効果と拘束効果からなる液状化対策機能および地盤内の間隙水圧特性や地盤の変形状況等について調べた。

排水機能を有した PBD を敷設した地盤では、液状化強度は PBD の敷設本数が多くなるほど大きくなること、加振終了後の過剰間隙水圧の消散も PBD の敷設本数が多くなるほど早くなり、PBD の排水効果が発揮されていること、また、地盤と PBD 内に設置したりん青銅のひずみから推定した地盤と PBD の変位を比較すると、地盤の変位に比べて PBD の変位は小さく、PBD とジオグリッドによる拘束効果が発揮されていることを示した。

また、実大の PBD と実施工で用いられている板状ドレーン材を敷設した地盤の振動台実験を行い、PBD の間隙水圧特性について調べた。実大の PBD は、敷設位置よりドレーン材の周長から求めた等価換算径の 3 倍程度離れた位置では、過剰間隙水圧の発生が抑制され、

等価換算径がほぼ等しい板状ドレーン材と同程度の排水効果が発揮されることを示した。

次に、地盤の密度を変化させた無補強地盤の液状化実験を実施し、PBD 敷設地盤の液状化強度を評価するため、液状化強度と相対密度との相関性について示した。

振動台実験のみでは、排水効果と拘束効果が統合されているため、補強メカニズムを解明することは困難である。そこで、第 3 章から第 6 章で、室内要素試験と DEM を用いたシミュレーション解析を行い、拘束効果および排水効果について別々に検討し、PBD 群打設工法の補強メカニズムについて考察した。また、DEM 解析による室内要素試験の再現性についても検討を行い、室内要素試験の結果を定性的に再現することができ、地盤の排水効果+拘束効果を評価できる有効なツールであることを示した。

第 3 章では、振動台実験の PBD 敷設地盤をモデル化するため、単純せん断試験装置を用いた定体積せん断試験とその DEM 解析を行い、第 4 章では、PBD 周辺地盤のモデル化として、せん断土槽の境界問題の影響がない中空ねじりせん断試験装置を用いた一方方向の非排水せん断試験と、周期境界条件での DEM 解析を行い、単調載荷時の PBD 補強要素の拘束効果について論述した。

PBD 先端部を固定し PBD 頭部をジオグリッドで連結した場合、無処理地盤と比べると、せん断応力は大きく、PBD の本数が多くなるほど有効応力の低下は少なく、PBD の本数効果があること、また、地盤の変形が抑制されることが分かった。また、微視的に見た土要素と PBD の変位から、土と PBD が一体となって動いていることを示した。ただし、境界問題の影響がある定体積せん断試験では、PBD で囲まれた領域内外で要素変位と要素間の接触力に違いが見られた。

第 5 章では、非排水繰返し中空ねじり試験とその DEM 解析を行い、繰返し載荷時の PBD 補強要素の拘束効果について論述した。

PBD の本数が多くなるほど液状化強度は大きく、PBD の本数効果があること、また、PBD は引張補強材として機能しているが、PBD の引張抵抗は、せん断ひずみが 0.1%以上にならないと、PBD 先端部と頭部に引張力が生じないことが分かった。PBD とジオグリッドによる拘束効果は単調載荷時と異なる。粒子の再配列が生じ、PBD と同等に動く土粒子と自由に動く土粒子が混在し、特にせん断方向に向かって前方側で PBD と同等に動く土粒子によって、上下方向に卓越した構造骨格を形成し、応力伝達を行っていることを示した。

第 6 章では、実地盤と解析モデルとの寸法効果を検討し、実地盤を想定した PBD 敷設地盤の DEM 解析を行った。PBD に排水機能を持たせたケースと、排水機能を持たせないケースについて、排水繰返し載荷を与え、繰返し載荷時の PBD 敷設地盤の排水効果および拘束効果について論述した。

排水機能を有した PBD を敷設した地盤は、排水機能を有しない PBD を敷設した地盤に比べて、せん断ひずみは小さく、過剰間隙水圧の発生も少なく、液状化強度は大きくなり、PBD の本数効果があることが分かった。PBD の排水効果として、PBD の排水により PBD 周辺部の土粒子の移動が少なくなり、過剰間隙水圧の発生が抑制される。また、上下方向

の構造骨格がせん断方向に向かって後方側にも拡大し、領域内全域に上下方向の構造骨格が形成され、応力伝達を行っていることを示した。

次に、実施工でのPBDの正方形配置などを考慮したPBDの奥行き方向の敷設間隔の影響を調べるため、PBDの剛性およびPBDの排水量を低減させることで、PBDの奥行き方向の敷設間隔の影響を反映できると仮定して、擬似的な解析モデルを作製し、排水繰返し解析を行い、PBDの排水効果について論述した。

PBDの奥行き方向の敷設間隔が広がるほど、過剰間隙水圧が上昇しやすく、液状化強度が小さくなる傾向を示したが、擬似的な解析モデルのためPBD敷設地盤の振動台実験の結果と比べても満足できる結果とはならなかった。

第7章では、これまで実施した振動台実験と室内要素試験およびDEM解析の結果から、繰返し載荷時の強度増加を、拘束効果による強度増加と排水効果による強度増加とに分け、排水効果による強度増加の割合は0.4~0.6程度占めていることを示し、第3章から第6章で別々に検討した拘束効果と排水効果をまとめ、PBD群打設工法の補強メカニズムを明らかにした。地盤をPBDとジオグリッドとで囲むことによって、地震動による水平方向のせん断力をPBDに沿った鉛直方向に変化させ、PBDが引張り補強材として働くとともに、PBD自体が持っている排水性に加え、PBDとジオグリッドの拘束性によって、土粒子の移動で発生した過剰間隙水圧を消散させる。また、全体として土粒子の移動量が小さく抑えられ、拘束効果と排水効果が有効に組み合わさったものであることを示した。

次に、既往の排水工法と締固め工法の設計法を用いて、PBD群打設工法の設計法への適用性について検討を行った。板状ドレーン材の設計法を適用した場合、PBDの置換率(改良範囲に占めるPBDの占有面積の割合)が増えると過剰間隙水圧比は小さくなり、ある程度の整合性が得られた。一方、SCP工法の設計法を適用した場合、実験結果とかけ離れた結果となり整合性が得られず、既往の設計法ではPBD群打設工法の補強効果を評価するには困難であると考え、排水効果と拘束効果を加味した新たな設計法について検討を行った。第2章で得られたPBD敷設地盤の液状化強度と相対密度の相関性を利用し、水平地盤におけるPBD敷設地盤の液状化強度は、補強効果により見掛け上地盤の相対密度が増加したものと、無処理地盤に対応する相対密度で評価できることを提案した。

最後に、PBD群打設工法を既設盛土構造物の液状化対策として適用した事例について述べる。PBD敷設地盤の振動台実験を実施し、原地盤強度に対して加振条件が過大であったためか、基礎地盤の過剰間隙水圧が上昇し、PBDの排水効果が発揮されず液状化に至ったが、千鳥格子配置の場合、盛土形状をある程度維持することができ、側方流動に対し、PBDとジオグリッドによる拘束効果が発揮されることを示した。

第8章では、各章で得られた結論をまとめるとともに、本研究で残された今後の課題および展望について概説した。

以上

氏名	溝口 義弘		
論文題目	プラスチック・ボード・ドレーン群打設による液状化対策工法の開発		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	田中 泰雄
	副査	教授	沖村 孝
	副査	教授	内田 一徳
	副査		
			印

要旨

本研究では砂質地盤に対する液状化対策工法として、プラスチック・ボード・ドレーン材(以下、PBDとする)を地盤に一定間隔で打設するPBD群打設工法を開発し、そのメカニズムと効果について研究したものである。今回開発された工法では、PBDの先端部を支持地盤に固定し、PBD頭部をジオグリッドで連結し、拘束効果および排水効果の両面から液状化に対する地盤の補強を図る工法となっている。研究では、模型地盤による振動台実験を実施し、PBD自体が持つ排水効果と、PBDとジオグリッドによる地盤の拘束効果による補強効果を確認し、室内要素試験と個別要素法を用いたシミュレーション解析を行い、拘束効果および排水効果による地盤の補強メカニズムを明らかにしながら、合理的な設計法を提案している。

本論文は、序論、結論の他、以下の6章から構成されている。

第1章では、既存の液状化対策工法および改良効果確認手法について述べ、現状の液状化対策工法の課題について言及している。周辺環境に及ぼす影響が少なく、既設構造物の近傍や市街地などでも施工できる経済的な液状化対策工法の必要性を論じ、特に、締固め工法と排水工法については、本研究と密接に関係することから、両工法の問題点と設計法について詳述している。また、液状化対策工法の開発と改良効果確認のための研究ツールとして、実験的手法と解析的手法について論述し、本研究において実施された、補強効果確認のための振動台実験と、メカニズム解析に有効な手法の一つである個別要素法(以下、DEMとする)について述べている。

第2章では、まず簡易な小型土槽を用いた実験結果を述べている。PBDの材質、固定方法等を変えた小型モデル地盤を作製し、PBD群打設工法の有効性とPBDと上下端固定方法との最適組み合わせを確認している。

次に大型単純せん断土槽を用いた実験結果に言及し、PBDの敷設本数、排水性の有無を変えて、無処理地盤と比較しながら、2つの補強効果(排水効果と拘束効果)および地盤内の間隙水圧特性や地盤の変形状況等について考察している。排水機能を有したPBDを敷設した地盤では、液状化強度はPBDの置換率に比例して大きくなり、加振終了後の過剰間隙水圧の消散もPBDの置換率に比例して早く、PBDの排水効果が発揮されていること、また、PBD間の地盤変位は、非拘束の地盤変位に比べて変位量が小さく、PBDとジオグリッドによる拘束効果が発揮されていることも示している。

また、既存の板状ドレーン材と今回提案しているPBD材の実寸材材について振動台液状化実験を行い、等価換算径がほぼ等しい板状ドレーン材と同程度の排水効果が発揮されることを示している。

一方、PBD敷設による地盤の液状化強度の増加を評価するため、PBD敷設地盤と地盤密度を変えた無補強地盤の液状化実験とを比較し、PBD敷設地盤の液状化強度増加を地盤の相対密度の増加と関連づけている。

また振動台実験のみでは、排水効果と拘束効果による補強メカニズムを解明することは困難である。そこで、第3章から第6章にわたって、室内要素試験とDEMを用いたシミュレーション解析より拘束効果および排水効果について別々に検討し、PBD群打設工法の補強メカニズムについて考察している。

第3章では、振動台実験のPBD敷設地盤をモデル化するため、単純せん断試験装置を用いた定体積せん断試験とそのDEM解析を行い、第4章では、せん断土槽の側壁(境界)の影響がない中空ねじり試験装置を用いた非排水せん断試験と、周期境界条件でのDEM解析を行い、静的時のPBD敷設地盤の拘束効果について論述している。PBD下端部を固定しPBD上端部をジオグリッドで連結した場合、無処理地盤と比べると、せん断応力は大きく、PBDの本数が多くなるほど有効応力の低下は少なく、PBDの本数効果があること、また、地盤の変形も小さくなることを示している。

氏名 溝口 義弘

両試験ともに微視的に見た土要素の変位と PBD の変位はほとんど同じで、土と PBD が一体となって動いていることや、両試験では境界条件が異なるため、定体積せん断試験では、PBD で囲まれた領域内外で要素変位と要素間の接触力に違いが見られることを示している。

第 5 章では、中空繰返しねじり試験とその DEM 解析を行い、繰返し載荷時の PBD 敷設地盤の拘束効果について論述している。PBD の本数が増えるほど液状化強度は大きく、PBD の本数効果があること、また、PBD は引張補強材として機能しているが、PBD の引張抵抗は、せん断ひずみが 0.1% 以上にならないと、PBD の上下端部には引張力が生じないことが分かった。PBD とジオグリッドによる拘束効果を微視的に見ると、単調載荷時と異なり、土粒子には PBD と同じように動く土粒子と自由に動く土粒子が混在し、粒子の再配列が生じ、PBD と同じように変位する土粒子によって、特にせん断方向に向かって前方側で上下方向に卓越した構造骨格を形成し、応力伝達を行っていることを示している。

第 6 章では、実施工を想定した地盤と解析モデルでの PBD の排水性に着目した相似則を考慮しながら、DEM を用いた排水条件下での繰返し解析を行い、繰返し載荷時の PBD 敷設地盤の排水効果及び拘束効果について論述している。排水機能を有した PBD を敷設した地盤は、排水機能を有しない PBD を敷設した地盤と比べて、せん断ひずみは小さく、間隙水圧の発生も少なく、液状化強度は大きくなり、PBD の本数効果があることを示している。PBD の排水効果として、PBD の排水により PBD 周辺の土粒子の移動が少なくなり、間隙水圧の発生が抑制されるとともに、上下方向の構造骨格がせん断方向に向かって後方側にも拡大し、領域内全域に上下方向の構造骨格が形成され、応力伝達することを明らかにしている。次に、実施工の PBD の配置方法を考慮して PBD 奥行き間隔の影響を調べるため、2 次元解析モデルについて PBD の剛性および PBD の排水量を低減させた擬似的な排水条件下での繰返し解析を行っている。解析結果は PBD の奥行き間隔の拡大により間隙水圧が上昇しやすく、液状化強度が小さくなる傾向を示すが、2 次元解析モデルの限界のため PBD の振動台実験結果を表現できる結果とはならず、3 次元解析の必要性を示している。

第 7 章では、PBD の振動台実験と室内要素試験および DEM 解析の結果から、繰返し載荷時の強度増加 ( $\Delta R_p$ ) を、拘束効果による強度増加 ( $\Delta R_c$ ) と排水効果による強度増加 ( $\Delta R_d$ ) とに分け、排水効果による強度増加の割合 ( $\Delta R_d/\Delta R_p$ ) は 0.4~0.6 程度占めていることを示し、第 3 章から第 6 章で別々に検討した拘束効果と排水効果をまとめて、PBD 群打設工法の補強メカニズムが、1)地震動による水平方向のせん断力が PBD に沿った鉛直方向に変化され、PBD が引張り補強材として働くとともに、2)PBD 自体が持っている排水性に加え、PBD とジオグリッドの拘束性によって、土粒子の移動で発生した過剰間隙水圧を消散させると言及している。その結果、土粒子の移動量が小さく抑えられ、拘束効果と排水効果が有効に組み合わせられたものであると結論している。

次に、PBD 群打設工法の設計法の確立に向けて、既往の排水工法と締固め工法の設計法の適用限界について検討を行っている。排水工法の設計法の場合、ある程度の整合性が得られるが、締固め工法の設計法を適用した場合には整合性が得られず、既往の設計法の拡張は PBD 群打設工法の補強効果を評価するには困難であるとし、排水効果と拘束効果を加味した新たな設計法を提案している。第 2 章で得られた PBD 敷設地盤の液状化強度と相対密度の相関性を利用し、水平地盤における PBD 敷設地盤の液状化強度は、補強効果により見掛け上地盤の相対密度が増加したものと、独自の設計法を提案している。

最後に、PBD 群打設工法を既設盛土構造物への適用事例について検討しており、PBD 敷設地盤の振動台実験から、地盤が完全液状化に至った場合においても PBD を千鳥格子配置すると、盛土形状をある程度維持することができ、側方流動に対し抑制効果が発揮されることを示している。

第 8 章では、各章で得られた結論をまとめるとともに、本研究で残された今後の課題および展望について述べている。

以上のように本論文は、PBD を用いた新しい液状化対策工法の提案と工法のメカニズムについて研究したもので、PBD 敷設での排水効果と拘束効果の関係について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の溝口義弘は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。

・特記事項  
・発表論文数 13 編