遠心載荷模型実験を用いた過剰間隙水圧消散 工法による液状化対策の効果の検証

海野寿康¹・林健太郎²・浅田英幸³・居場博之⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Toshiyasu.Unno@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Kentaro.Hayashi@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 東亜建設工業株式会社 エンジニアリング事業部 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1)

E-mail: h_asada@toa-const.co.jp

⁴正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

E-mail: h_iba@toa-const.co.jp

本研究では、人工材ドレーンによる過剰間隙水圧消散工法が施工された仙台港や東京港の2011年東北地方太平洋沖地震の調査結果を示すとともに、遠心載荷模型実験による過剰間隙水圧消散工法の液状化抑制効果の検討結果を示す。現地調査の結果、複数のドレーン施工箇所において十分な液状化抑制効果を発揮できたことを確認した。一方、遠心載荷実験の結果、間隙水圧の消散効果についてドレーンへの排水により加振中に発生する過剰間隙水圧比を低い値で納めることや振動終了後、早期に過剰間隙水圧を消散させ水圧が高い状態を短時間に抑えることを示した。改良地盤では、せん断中のドレーンへの排水により有効応力が回復することや地盤密度が増加することにより、振動中に剛性が回復する結果となった。

Key Words :liquefaction, partial drain, saturated sand,centrifuge model test, shaking table test

1. はじめに

(1) 研究の背景

港湾や埋立地区など臨海部の地震地盤災害の代表的なものとして砂地盤の液状化が真っ先にあげられる。液状化対策の原理には、大きく分けると①土を締固める、②間隙水圧の上昇を抑える、③土粒子を固結させる、④土を液状化しない材料に置き換える等がある¹⁾。この中で、②の原理に基づく液状化対策工法に、本研究が研究対象とする人工材ドレーンによる過剰間隙水圧消散工法がある。この工法は、地震時に発生する過剰間隙水圧を許容値以下に抑えられるようにドレーンを地盤中に配置する工法である²⁾。

過剰間隙水圧消散工法は、1976年にSeed and Bookerによってグラベルパイルによる設計方法³⁾が提案されてから30年以上経過しており、効果の評価や現象の解明に関する研究が解析や模型実験などにより1980年代～1990年代にかけて精力的に行われている^{例えは4)}。田中ら⁵⁾⁶⁾は、過剰間隙水圧消散工法の一つであるグラベルパイルを対象に1G振動模型実験を実施し、過剰間隙水圧の消散過程

について検討をおこない、効果的なグラベルパイルの配置について言及している。加藤ら^{例えは7)}は、過剰間隙水圧が地震中に消散する過程について有効応力解析を通して検討を行いその有効性について解析的に示した。

実務においてもグラベルの他にプラスチック製ドレーンなどの人工材ドレーンを用いた工法も1989年に実用化されおり、港湾施設を中心に広く採用されている⁸⁾。

一方、既往の研究成果から、設計値を超えた地震動が長時間継続した場合、過剰間隙水圧が許容値を越えてしまい液状化に至らしめることが懸念されるなど、過剰間隙水圧消散工法が他工法に比べ粘り強さにかける等の課題が指摘されている⁹⁾。しかしながら風間は、液状化後の間隙水圧の再配分を念頭に、一旦液状化に達した場合でも施工箇所では速やかに過剰間隙水圧は消散し、その結果、残留変形量は無対策に比べて小さくなることを指摘している¹⁰⁾。よって、設計上の過剰間隙水圧比の許容値を越えた場合においても十分に液状化・液状化後の残留変形への抑制には効果があると考えられる。ただし、既往の研究では、入力震動に対し如何に過剰間隙水圧を設計値以下に抑えるかを主眼としており、設計値よりも

大きな加震が入り改良地盤が液状化、もしくは高い過剰間隙水圧比状態からの排水について着眼した研究はほとんどなされおらず、実務上も反映されていない。

(2) 研究の目的

実地震における実績や優れた経済性などを考慮した場合、粘り強さに欠ける等の指摘を受ける過剰間隙水圧消散工法であるが十分に有効な工法であると考えられる。しかし、既往の研究の多くが間隙水圧の挙動に着目し解析や実験を実施しており、加速度応答特性などは、未解明な部分が多い。また、設計地震動以上の加速度履歴を長時間受け改良地盤が液状化が生じてしまった場合の挙動なども十分に検討されてこなかった。

そこで本研究では、実地震における人工材ドレーンの効果について、2011年東北地方太平洋沖地震における調査結果より実地震における効果について報告するとともに、遠心載荷模型試験装置を用いてドレーン改良地盤を模擬した模型地盤を加振し、改良地盤の挙動について模型実験的に検討を行った。

2. 大規模地震における港湾施設への対策効果

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では多くの港湾施設が地震時における液状化により被災したが、人工ドレーンを用いた過剰間隙水圧消散工法が施工された岸壁では甚大な被害を生じなかった。例として東京港と仙台塩釜港を示す。

図-1 東京港木材埠頭の施工断面図

写真-2 地震後の東京木材埠頭岸壁の地盤改良施工箇所 状況

東京港15号地の木材埠頭では、2003年から2004年にかけてドレーン敷設工事が実施された。施工個所のドレーンの配置は正方形配置、間隔は50～55cm、設計地震動はM7クラスを想定したものと考えられる。標準的な施工断面図を図-1に、施工状況を写真-1に示す。

東京や千葉などの埋立地で液状化による甚大な被害が生じたが、東京港木材埠頭では、被害を免れた。写真-2は、木材埠頭の地震後の岸壁法線であるが全く被害を生じていないことが分かる。写真-3の中央のグレーチングは、改良と未改良の境界であるが、未改良域では舗装盤がめくれ液状化による被害を受けているが、改良域では、全く変形を生じていない。この地域で得られている観測加速度履歴は100galから200gal程度であり、設計地震動と同程度の加速度履歴であったと考えられ、工法が有効に働く結果となった。

仙台塩釜港向洋埠頭では、1995年にドレーン敷設による液状化対策工事が実施された。地震時には現地で計測された加速度履歴は600galを越え非常に大きな加速度と長い継続時間の地震動に見舞われた地区である。施工個所のドレーンの配置は正方形配置、間隔は64cmであり、設計地震動はM8クラスを想定して設計・施工された。

未改良部は、舗装の陥没や土砂の流出といった被害が確認されたが、改良部では、全体的に15cm程度（平均打設長さの2.4%）沈下したのみで甚大な被害は確認されなかった（写真-4）。この沈下は、地震中のドレーンによる排水沈下に起因したものと考えられる。

仙台塩釜港の施工箇所において特筆すべきは、マグニチュード9以上である設計波に相当する大きな加速度が

写真-1 東京港木材埠頭の施工状況

写真-3 未対策部と対策部の状況（左：未対策 右：対策）

(a) 無対策 (b) 人工材ドレーン施工箇所 (c) 施工箇所沈下量
写真-4 人工材ドレーンの配置箇所の被災状況 2011年東北地方太平洋沖地震における仙台塩釜港向洋埠頭の状況

図-2 遠心载荷実験に用いたせん断土槽

入力された箇所であり、設計上の許容値を超えているにも関わらず甚大な被害が生じなかった点である。

以上のように甚大な被害をもたらした2011年東北地方太平洋沖地震においても、複数の施工箇所において十分な液状化抑制効果を発揮できたことが明らかになった。

3. ドレーン排水による液状化抑制効果の検証

(1) 遠心载荷模型実験の概要

本研究では、20G遠心場（载荷遠心力20G, 模型縮尺1/20）において、未改良地盤及び配置状況を変えたドレーン改良模型地盤に振動を与え、地中の間隙水圧や応答加速度等を観察し加振中・後の地盤の挙動からドレーンによる効果を検証した。

载荷装置：実験にはせん断土槽を用いた。使用した土槽は、作用する内圧を考慮して2種類のアルミ合金の積層板（上部：板幅30mm, 質量4.12kg, 下部：板幅60mm, 質量5.10kg）を19段積み重ねており、内寸法は縦250mm×横600mm×高さ300mmである。せん断土槽の内面の隅角部は曲率をつけて応力条件を緩和させており、積層板と積層板の隙間は約1mmを保つようにボールベアリングおよびステンレス製のベアリング軌条を取り付けている。図-2にせん断土槽の概要を示す。用いた遠心载荷装置の詳細は、文献(11)に詳しい。

模型地盤：模型地盤は、埋立砂地盤を模擬するため相馬硅砂5号(表-1)を水中落下法により目標相対密度 $Dr=60\%$ 、層厚270mm(実寸：5.4m)で作製し、間隙水は粘度を水の1/20にしたグリセリン水溶液を使用した。地表面には非液状化層を模擬したベントナイト（含水比

表-1 相馬硅砂5号の諸元

		硅砂5号
土粒子密度	ρ_s g/cm ³	2.654
細粒分含有率 %	シルト分	0
	粘土分	0
平均粒径	D_{50} mm	0.39
最大密度	$\rho_{d \max}$ g/cm ³	1.567
最小密度	$\rho_{d \min}$ g/cm ³	1.24
透水係数	k_s cm/s	1.33×10^{-4}

400%)を厚さ20mm(実寸：0.4m)を配置した。

模型ドレーン：ドレーン材自体がせん断抵抗にならないようにコイル状に加工した針金を芯材として透水性の良いレース素材のフィルターを巻き付けた直径10mm(実寸：200mm)の円筒材を使用し、土槽基盤から地表面までの300mmで設置している(図-3)。なお、ドレーンは表層ベントナイト層を貫通しておりドレーンより排水された水は、地表へ排出される。

ドレーン配置：(a)21本（ドレーン間隔80mm 実寸：1.6m）、(b)8本（ドレーン間隔160mm 同：3.2m）(c)4本（ドレーン間隔160mm 同：3.2m）の密～疎を表現させた3パターンである。加振中・後の地盤の挙動を把握するために各種計測器を地盤内外に設置している。模型地盤の全様とドレーン、計測機材の配置を図-4に示す。間隙水圧計と加速度計は、表層から40, 160, 210mm(実寸：0.8m, 3.2m, 4.2m)の位置で配置した。

载荷条件：入力波は、地盤の挙動が把握し易いように正弦波を用い、昨今の地震動の大きさ等を考慮し実寸で300galおよび150galの2種類の振幅を実寸で4Hz(模型上：80Hz)で与えた。加振時間は、0.5秒(実寸：10秒)40波である。試験条件の一覧を表-2にまとめる。

(2) 入力150galの試験結果

図-5は、入力加速度150galにおけるドレーン密～疎、無対策の各実験における地盤内加速度、過剰間隙水圧の時刻歴である。改良地盤の過剰間隙水圧の最大値は、ドレーンの配置が密なほど低い結果となっている。同様に振動終了後の残留過剰間隙水圧の消散する速さもドレーンの配置が密なほど早い結果となった。図-6に水圧計PP3における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。図

表-2 試験条件の一覧

CASE	ドレーン 本数 (本)	ドレーン 間隔 モデル (cm)	ドレーン 間隔 実寸 (m)	SIN波 加速度 (gal)	地盤 密度 (目標値)	遠心 場 (G)
1	無対策	0	0	150	珪砂 5号 Dr=60%	20
2	21	8	1.6	150		
3	4	16	3.2	150		
4	無対策	0	0	300		
5	21	8	1.6	300		
6	8	16	3.2	300		
7	4	16	3.2	300

図-3 模型ドレーン

中、ドレーン 4 本のケースでは、過剰間隙水圧比が 0.95 以上に至っているため、液状化してしまったようである。図からドレーンにより過剰間隙水圧の最大値は低い値で抑えられ、かつ早期に消散していることが明確化される。以上、過剰間隙水圧の挙動はドレーンが配置されていることで最大値や継続時間が抑制される結果となった。

次に加速度応答挙動について考察する。非改良地盤では、水圧の値が比較的大きい加振中盤以降は、加速度はかなり小さくなる。これは、過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤の剛性が極端に低下、せん断波が伝播しにくくなるためである。一方、ドレーンが密配置で設置されている場合には、加速度は、加振中低下せず上昇し、振動終了後は高い値を示す。これらの結果について振動第 38 波目の片振幅の値を振動 5 波目の片振幅の値をもって正規化したものと配置したドレーンの本数の関係を図-7 に示す。図中入力波は、加振初期と末期の値に差はなく 1 であり、1 以上の値を示した場合には地盤の剛性が増加を、1 以下では剛性が低下していることをあらわす。

CASE-1 (無対策) では、地中の加速度計は全て 1.0 以下の値を示す一方、CASE-2 (ドレーン : 21 本) では、加速度計は全て 1.0 以上の値を示し、地表面に近いほど加速度の増加率が大きい。これは、地盤が液状化せず剛性が低下しなかったことに加え、排水に伴う密度増加によるものと考えられる。このことは CASE-2 が液状化していないにも関わらず、実験終了後に地表面沈下量が 8mm 生じ、相対密度で 12%程度増加していることから推測される。ただし密度増大による効果については、土の骨格収縮特性など要素特性にも関連するため、別途、部分排水繰返しせん断試験等の要素試験を実施し、有効

(a) ドレーンピッチ 8.0cm (1.6m) 21 本

(b) ドレーンピッチ 16.0cm (3.2m) 8 本

(c) ドレーンピッチ 16.0cm (3.2m) 4 本

図-4 ドレーンの配置と各種計測機材の配置

応力の回復挙動と合わせてさらに検討する必要がある。

一方、ドレーンが 4 本の CASE-3 では、地表面に近い加速度計のみ 1.0 を切るような結果となった。これは CASE-3 が短期間ではあるが液状化し高い過剰間隙水圧が発生・再配分に伴い上向きの浸透流が生じ表層付近において剛性が低下したことによるものと推測する。このようにドレーンによる排水効果は、地盤の剛性に強く結びついていることが分かった。

(3) 入力振幅300galの試験結果

入力振幅が 300gal の試験ケースの中で CASE-6, CASE-7 は、CASE-3 同様にドレーンがあっても地盤が液状化に至るケースである。ドレーンが密に配置している CASE-5 では、300gal でも液状化せず、また無対策である CASE-4 では、全層液状化が生じた。

代表例として CASE-6 の結果を図-8 に示す。ドレーンが設置されているのにも関わらず、過剰間隙水圧は、水圧計の設置深度によらず加振中上昇を続け、載荷後半でピークを迎えている。また、加振初期において上昇勾配が大きく、過剰間隙水圧比が 0.5~0.7 の範囲内に至ると上昇勾配が小さくなる。このことから加振初期は、過剰間隙水圧の上昇にドレーンの排水が間に合わないようである。この増加率の変化点は、加速度履歴より確認すると、剛性が極端に低下している時点である。

CASE-6 における加速度応答の挙動は、加振後半に回復する傾向にはあるが加振初期に剛性が極端に低下するため、大きく増加するには至らなかった。

図-9 に CASE-4~CASE-7 の水圧計 PP3 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。CASE-6 および CASE-7

図-5 SIN波150Galにおける地盤内の間隙水圧、応答加速度の時刻歴

図-6 150Galにおける過剰間隙水圧比の比較 (PP3)

図-7 ドレーンの配置による加速度応答の増減の比較

は、ドレーンがあるにも関わらず、過剰間隙水圧比が非常に高い値を示し無対策 (CASE-4) と同様 0.90 以上の値を示し CASE-6 にいたっては、0.95 以上となる。ただし、過剰間隙水圧は無対策に比べ早期に消散する。なお、SIN 波 300(Gal) シリーズでは、無対策 CASE-4 であっても過剰間隙水圧比が 1.0 に至っていないが、これは液状化に伴う上向きの浸透流により地盤内の水圧計が若干浮き上がり、計測される過剰間隙水圧が初期の有効土被り圧まで上がらないためによるものと考えられる。要素試験や模型実験の際には、一般的に過剰間隙水圧比が 0.95 に至った時点で初期液状化と判断する^{例えば 12)}ことからこの点については、特に対策をとっていない。

(4) ドレーンを配置しても地盤が液状化に至る場合

CASE-3 や CASE-6, CASE-7 のように入力加速度履歴に対してドレーンの排水能力が十分ではない場合には過剰間隙水圧は、ドレーンからの消散よりも振動による増加が勝り、加振中に上昇し続け地盤は液状化に至る。この為、剛性低下に伴う地盤の応答加速度の極端な低下挙動が観察される。しかしドレーンによる排水促進効果により無対策に比べ早期に過剰間隙水圧を消散できるため、液状化状態にある期間を大幅に短縮することができる。特に CASE-6 では、排水に伴い振動終盤には有効応力の回復や密度増加に伴う剛性の回復が観察された (図-8)。

図-8 ドレーン8本, 300Galの間隙水圧、応答加速度の時刻歴

図-9 300Galにおける過剰間隙水圧比の比較 (PP3)

4. まとめ

本研究では、過剰間隙水圧消散工法の港湾施設における液状化対策効果について、2011年東北地方太平洋沖地震における状況について示すとともに遠心載荷模型実験装置を用いて効果の検証を行った。以下、結論である。

- ① 2012年東北地方太平洋沖地震の被害調査から人工ドレーン材による過剰間隙水圧消散工法施工箇所は、被害が軽微であり十分に機能していた。設計地震動を遥に超える強震動を受けた場合でも無対策のような大規模な被害を生じることにはなかった点は特筆すべきことである。また、遠心載荷模型実験の結果から、
- ② 入力振動に対し密にドレーンを配置した場合、加振中に発生する過剰間隙水圧比を低い値で納めることができ、過剰間隙水圧比を0.95以上(=液状化)に至らせない。これは従来の設計思想に則ったものであり、既往の研究事例と一致した。
- ③ ドレーンにより改良された地盤は、振動終了後、早期に過剰間隙水圧を消散させ、水圧が高い状態を短時間に抑えることができる。この時、ドレーンの配置が密であるほど、早期に間隙水圧が消散させることができる。一方、ドレーン配置が疎で地盤が液状化してしまった場合でも、ドレーンがあることで未対策地盤に比べ早期に過剰間隙水圧を消散させることができる。
- ④ 地盤が液状化に至らない場合は、改良地盤は、振動中に剛性が回復・増加する結果となった。これは、ドレーンによりせん断中に有効応力が回復することによるものと地盤が排水条件に伴い密になったことによるものの2つの原因が挙げられる。
- ⑤ 一方、ドレーン配置が疎の場合、入力振動によっては地盤は液状化し、剛性が極端に小さい状態に至るが、ある程度ドレーンが配置してあれば載荷後半には排水に伴い剛性が回復するような挙動を示す。

以上のことから、従来、排水・水圧消散による最大過剰間隙水圧比の抑制のみが焦点とされてきた過剰間隙水

圧消散工法であるが、今回の実験により、有効応力の回復や密度増加など排水効果の副次的な作用が液状化抵抗の増加に効果があることを示す知見が得られた。このことから、過剰間隙水圧消散工法が大規模地震に対しても十分な液状化対策効果を発揮するといえる。

謝辞：模型実験の実施にあたり、日本大学工学部土木工学科 仙頭紀明准教授にご意見等を頂いた。ここの記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：液状化地盤の変形予測及び対策工法講習会講演資料, pp. 69-80, 2007.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：ドレーン工法の設計・施工, 埋立地盤の液状化対策ハンドブック(改訂版), pp. 170-193, 1997.
- 3) Seed, H.B. and Booker, J.R.: Stabilization of potentially Liquefiable sand deposits using gravel drains, *Journal of Geotechnical engineering division, ASCE*, Vol.103, No.GT7, pp568-757, 1977.
- 4) 井合 進：Large scale model tests and analyses of gravel drains, 港湾技術研究所報告, Vol.27-3, pp.250-160, 1988.
- 5) 田中幸久・国生剛治・江刺靖行・松井家孝：グラベルによる水平地盤の液状化防止について, 土木学会論文集, 352/III-2, pp. 89-98, 1984.
- 6) 田中幸久：ラベルによる改良地盤内の過剰間隙水圧, 体積変化量の計算方法, 土木学会論文集, 388/III-8, pp. 23-32, 1987.
- 7) 加藤 満・岡二三生・八嶋 厚・田中幸芳：グラベルドレーンによる地震時間隙水圧抑制と数値解析による実証, 土と基礎, 42(4), pp. 39-44, 1994.
- 8) DEPP 工法研究会：DEPP 工法技術資料, 2011.
- 9) 吉見吉昭：排水工法, 第二版 砂地盤の液状化, 技報堂, pp. 145-153, 1991.
- 10) 風間基樹：阪神大震災以降の液状化研究－液状化した土の残留変形特性の評価, 電力土木, No.348, pp.1-6, 2010.
- 11) 上野一彦・林健太郎・海野寿康：遠心力場用に開発したせん断土槽の特性, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1461-1462, 松山, 2010.
- 12) (社)地盤工学会：土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験, 地盤材料試験の方法と解説, 二分冊の2, pp. 730-749, 2009.

EVALUATION OF THE EFFECT OF DISSIPATION OF EXCESS PORE WATER PRESSURE METHOD USING CENTRIFUGAL MODEL TEST

Toshiyasu UNNO, Kentaro HAYASHI, Hideyuki ASADA and Hirofumi IBA

This study showed the two results of effect of the soil improvement using the drain for the preventing liquefaction method. One is a site investigation in the 2011 Tohoku - Pacific Ocean Earthquake, and the other is a shaking table test result using centrifugal model test. At the results of site investigation, the drain improvement ground did not liquefy in the Tokyo port and the Sendai Shiogama port. The model test showed the interesting results. According to the effect of the drain, the excess pore water pressure ratio of the improvement ground became a low value during shaking disturbance. And, the excess pore water pressure became to a low value quickly since the drain effect. Moreover, the density of the improvement ground increased during shaking disturbance since drainage of the drain. The stiffness of the ground was recovered after shaking since the density increased and effective stress recovered.