

3.3.8 側方流動に対する基礎の耐震性向上の新技术・新工法の研究

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 既存の液状化対策の流動対策としての適用性検討
 - 2) 実験条件の確定と準備工の整備
 - 3) 予備実験の実施
- (c) 業務の成果
 - 1) 既存の液状化対策の流動対策としての適用性検討
 - 2) 実験条件の確定と準備工の整備
 - 3) 遠心載荷試験装置による予備実験
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成15年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 側方流動に対する基礎の耐震性向上の新技术・新工法の研究

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
社団法人地盤工学会		
地震時の流動対策に関する研究小委員会		
東京電機大学 理工学部	教授（委員長）	安田 進
中央大学 理工学部	教 授	石原 研而
(財)電力中央研究所 地盤耐震部	上席研究員	金谷 守
関東学院大学 工学部	助教授	規矩 大義
(独)港湾空港技術研究所 構造振動研究室	室 長	菅野 高弘
東京大学大学院 工学系研究科	教 授	東畑 郁生
不動建設（株）技術統轄部 技術管理室	室 長	原田 健二
応用地質（株）技術本部 地震防災センター （委員外）	技師長	吉田 望
東京大学大学院 工学系研究科	助 手	本多 剛
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程 1年	福井 聡
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程 1年	亀田 真加
東京電機大学大学院 理工学研究科	博士課程 1年	田中 智宏

(c) 業務の目的

本研究では、都市部における効率的な震災軽減を目的として、新しい合理的な側方流動対策技術の開発、提案を行なう。そして、提案する技術の有効性を確認する室内試験、模型振動実験を計画、実施するのと並行して、その数値シミュレーションを行ない、実地盤、実大模型に対策工を適用した場合の効果を予測、検討する。なお、都市部においては、岸壁・護岸背後地盤の流動と緩やかな傾斜地盤の流動の両者とも発生する可能性があるため、本研究では両者とも対象にする。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

既存の液状化対策の流動対策への適用性の検討と問題点の抽出
護岸形式、基礎形式の違いによる、効果的な対策位置に関する検討
実験を実施する上での、基本の護岸形式、地盤条件を検討する。
新しい流動対策技術の検討とその模型実験の準備
幾つかの対策モデルに対する予備的な振動台実験、遠心载荷実験の実施

2) 平成15年度：

新しい流動対策技術の対策効果の検証実験の実施

護岸変状と背後地盤の流動変形量の関係についての実験的検討
簡易な流動解析手法を用いた対策効果のシミュレーションの実施

3) 平成16年度:

護岸変状を考慮に入れた流動対策の検討と模型実験、中型模型振動台実験の実施
既設構造物、新設構造物の両面から見た対策工の施工性の検討
対策効果の解析的な確認、検証
実大規模の模型実験への適用性の検討
全体の取り纏め

(e) 平成14年度業務目的

既存の液状化対策の流動対策への適用性を検討する。
護岸形式、基礎形式の違いによる合理的な対策施工箇所に関する検討を実施する。
実験を実施する上での、基本となる護岸形式、地盤条件を検討する。
新しい流動対策技術の検討とその模型実験の準備をする。
予備的な振動台実験、遠心載荷実験を実施する。

(2)平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 1) 既存の液状化対策の流動対策への適用性を検討するため、既に工法として実績のある複数の液状化対策工法を、既往の研究成果等から抽出して討議、検討を行い、そのなかから基礎の流動対策として有効と考えられる、地盤改良工法、地中連続壁工法、排水工法を選定した。
さらに、それらの対策工が最も有効に機能する施工位置を基礎形式ごとに検討し、次年度以降の本実験の資料とした。
- 2) 統一された条件での実験を実施するため、護岸形式、地盤条件の検討を行った。これまでに実施された一斉実験、一斉解析等の結果も参考に、流動対策の模型振動実験、ならびに遠心実験の実験条件を確定した。
- 3) 流動対策の実験に用いる実験用土槽の製作と、排水実験のための準備工を実施ほか、標準的に使用する土質試料を大量採取し、各種土質定数を求める試験を実施した。
- 4) 採取された試料を用いて、遠心載荷実験により予備実験を実施した。

(b) 業務の実施方法

1) 既存の液状化対策の流動対策としての適用性検討

既存の対策工法の流動対策としての適用性検討では、これまで各機関や担当者が実施してきた実施工や模型実験、数値解析等のデータを持ち寄り、流動対策としての適否を検討した上で、最も有効な対策工法を抽出した。また、最適な施工位置についても、既往の実験や数値解析結

果をもとに検討した。

2) 実験条件の確定と準備工の整備

既往の模型振動実験や遠心実験、実施工等のデータをもとに担当者間の討議により、次年度以降の実験条件を確定した。また、地盤試料については実際に液状化が生じた埋立地において現地調査を行い、対象土を採取、試験室において各種土質試験を実施した。

3) 予備実験の実施

採取された土質試料を用いて、遠心載荷実験による予備実験を実施した。

(c) 業務の成果

1) 既存の液状化対策工の有効性の検討

既往の液状化対策のうち流動対策として定性的に効果が実証されているモデルについて検討した。現時点では、護岸背面の地盤改良タイプ、変形抑制タイプを対象とし、排水タイプやその他の有効な工法についても、その対策効果が顕著であることが今後の研究で明らかになれば、実験計画の検討対象とすることとした。さらに、護岸形式による効果の違いを考慮するため、ケーソン護岸タイプ、矢板護岸タイプに対して対策実験を実施するほか、流動量の低減効果だけでなく、基礎杭に作用する流動力や基礎杭の変形についても検討を行った。

対策工の施工位置については、図1に示すように、対策対象の基礎前面および背面側の両方について検討し、次年度以降の実験計画に反映させることとした。

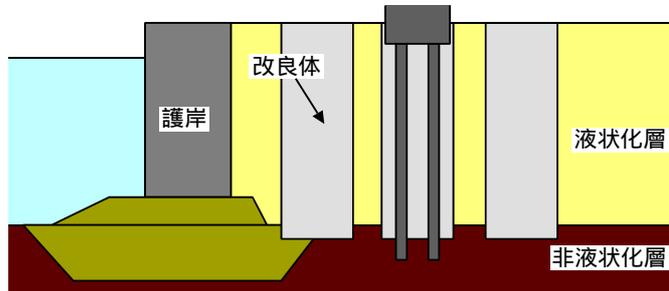


図1 護岸近傍の基礎に対する対策工のイメージ

2) 実験条件の確定と準備工

次年度以降の実験条件として、図2、図3のようなモデルとし、以下のように確定した。

- ・ 同一装置を使用してモデル幾何縮尺を変えた実験も行う。
- ・ 模型地盤の作成方法は、平成14年度の遠心実験に準じる。
- ・ ケーソンの材質は鉄・ステンレス・木材等適宜選択し、その重心をほぼ中心にし、単位体積重量を合わせることをとする。杭模型は板状のアルミ製とする。
- ・ 流動抑止杭模型は高速道路での耐震補強例を基に寸法を決定する。
- ・ 地中矢板壁模型は 型を基に寸法を設定する。
- ・ 杭・流動抑止杭・地中矢板壁模型の固定方法について、固定治具を用いる場合は挟み込むだけでなく、ボルト・ナット固定する。
- ・ 杭・流動抑止杭・地中矢板壁模型の弾性域におけるヤング率E算出の実験を別途行う。

- ・ 地中地盤変位は蝶番でつないだ板に取り付けた加速度計の値から傾斜角を求め、変位を測定する方法とする。(液状化時に計測器に働く浮力を考慮する必要がある)

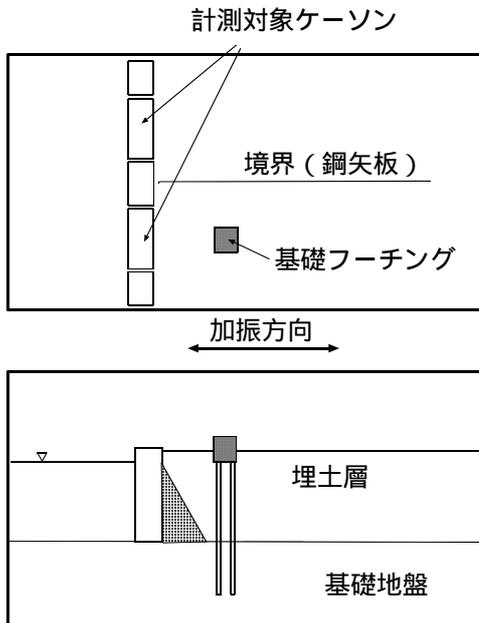


図2 ケーソンタイプ

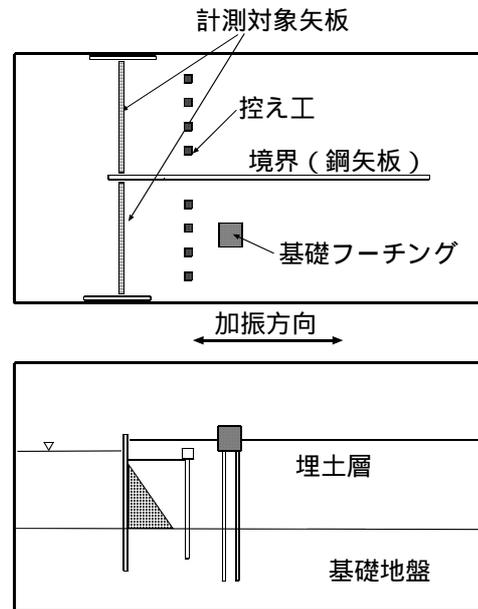


図3 矢板護岸タイプ

- ・ 計測はあくまで計測用ケーソンを中心に行う。
 - ・ 加振方向は護岸法線直交方向(慣性力がかかる方向)にする。加振波は正弦波、8Hz、400gal、20波とする。(実波形で卓越周波数1Hz、ピーク値600galとし、相似側で考えて設定)
- また、写真1には模型実験に供するために製作した土槽を、写真2、3には排水タイプ実験のための装置治具を示す。



写真1 中型実験用模型土槽(砂試料を詰めた状態)



写真2 排水実験用土槽



写真3 排水試験用治具

3) 遠心载荷試験装置による予備実験

過去の地震において、地盤の液状化現象によって河川堤防の盛土が大きな被害を受けることが報告されている。この盛土に生じる被害は、盛土堤体の亀裂の発生や盛土自体の沈下である。また、この被害の主な要因は、地震時に盛土直下の地盤が液状化することで、盛土直下の地盤に側方流動が発生し、これに伴い盛土の沈下が生じるためである。したがって、盛土直下の地盤の側方流動を抑制できれば、盛土の被害を回避することができると考えられる。

そこで、本研究では既設の河川堤防の耐震対策工法として、連続矢板壁と薬液注入による地盤改良工法の効果を検討するために遠心模型実験を行った。

a) 実験概要

本実験で用いた地盤材料は、鳥取県西部地震(2000年)の再液状化した鳥取県境港市の竹内工業団地から採取したシルト砂である。この試料の土粒子密度 ρ_s は 2.618 g/cm^3 、平均粒径 D_{50} は 0.028 mm 、細粒分含有率 F_s は 92.8% である。この試料の粒径加積曲線を図4に示す。なお、変水位透水試験から得られた透水係数 k は $6.84 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ (20 kPa での予備圧密試料)である。地盤作成は、試料をスラリー状態にして真空状態で練り混ぜた後、模型容器に投入して遠心圧密を行った。再度、盛土を設置した後遠心圧密を行っている。

本実験では、未対策、矢板壁工法、薬液注入による地盤改良工法について6つの実験を行った。この実験条件を表1に示す。本実験で用いた模型容器は、幅 450 mm 、高さ 272 mm 、奥行き 150 mm の内寸法を持ち、容器両側の側壁には 10 mm の緩衝材を設置して壁面の影響を軽減させている。液状化地盤の層厚を 200 mm とし、盛土の堤体には鉛散弾を用いている。なお、これ以降のスケールは模型スケールであり、実スケールには換算していない。また実験時の遠心加速度は $30G$ である。

模型地盤概要を図5から図9に示す。

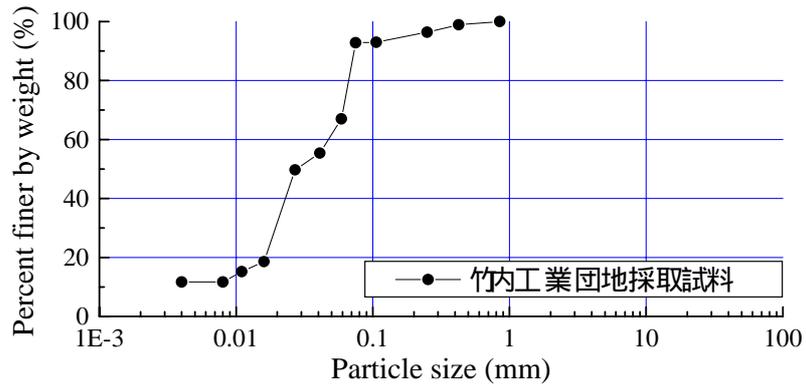


図4 竹内工業団地で採取した試料の粒径加積曲線

表1 実験条件

Case 1 未対策

Case 2 矢板壁 (排水機能なし)

Case 3 矢板壁 (排水機能あり)

Case 4 薬液改良 (法尻部、改良幅 B=30mm)

Case 5 薬液改良 (法尻部、改良幅 B=60mm)

Case 6 薬液改良 (天端直下、改良幅 B=70mm)

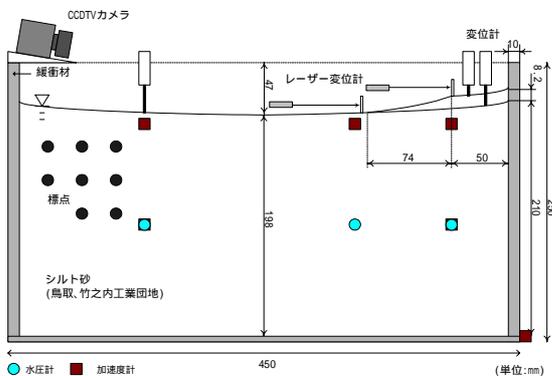


図5 模型地盤概要 (Case 1:未対策)

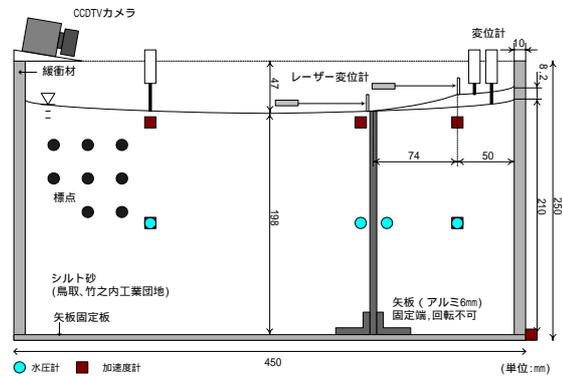


図6 模型地盤概要 (Case 2 & 3:矢板壁)

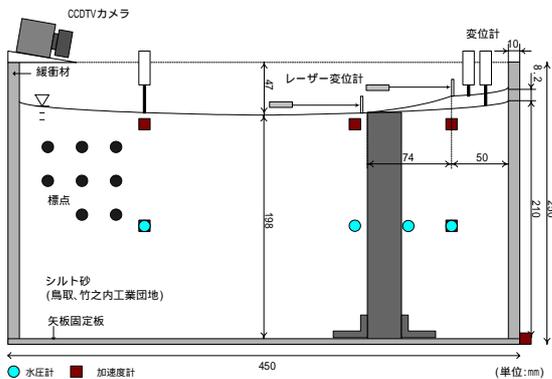


図7 模型地盤概要 (Case 4:薬液改良)

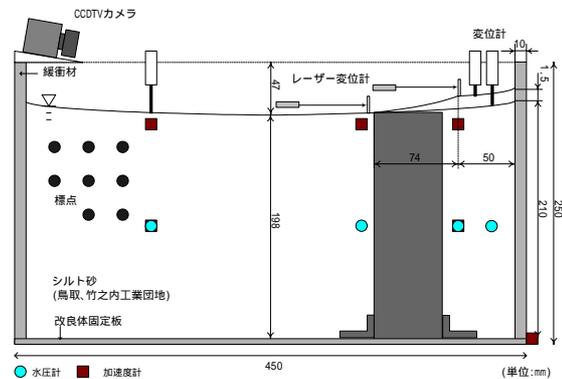


図8 模型地盤概要 (Case 5:薬液改良)

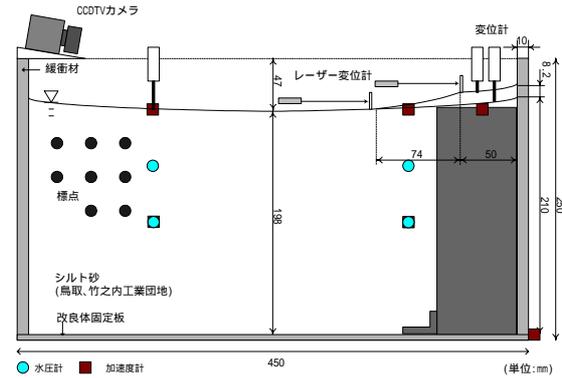


図9 模型地盤概要 (Case 6:薬液改良)

矢板壁の実験ケース (Case 2 & 3) では、矢板模型として厚さ 6mm のアルミニウム板を用いており、これは 型の鋼矢板に相当する。排水機能付矢板壁の Case 3 では 10 mm x 20 mm の排水材 5 本を盛土側に設置している。薬液改良のケースでは、相対密度 (Dr)40% の豊浦硅砂に水ガラス系の薬液を浸透固化させたものを使用している。Case 4 では法尻部から幅 (B)30mm の改良体を、Case 5 では法尻部から幅 (B)60mm の改良体を、Case 6 では天端直下に幅 (B)70mm の改良体を設置している。

本実験では入力加速度として、振幅の異なる正弦波を 3 回入力した。Case 1 から Case 6 の入力加速度を図 10 から図 15 に示す。

図 11 から図 15 の入力加速度より、3 回の正弦波の最大値には若干のばらつきが見られるものの、各ケースとも同程度の入力波形が得られている。

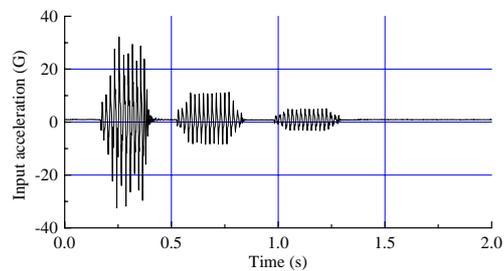
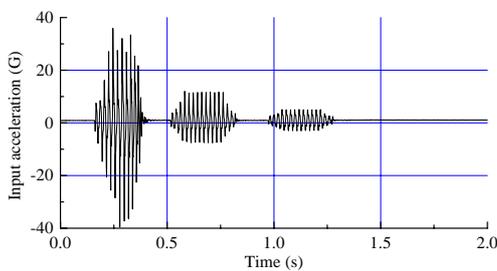


図 10 入力加速度 (Case 1:未対策) 図 11 入力加速度 (Case 2:矢板壁、排水なし)

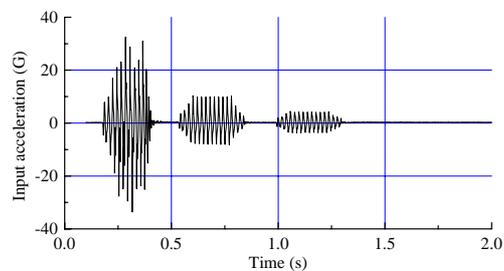
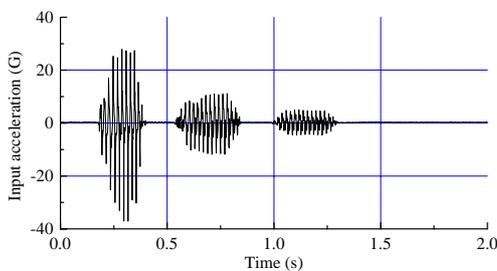


図 12 入力加速度 (Case 3:矢板壁、排水あり) 図 13 入力加速 (Case 5:薬液 B=30mm)

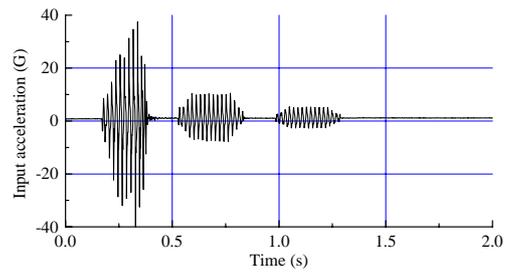
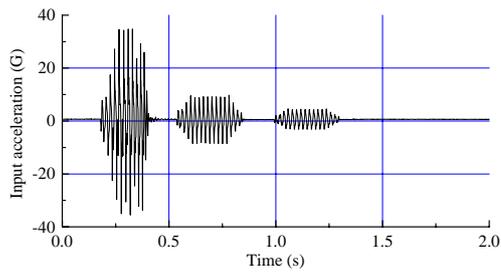


図 14 入力加速度 (Case 4:薬液 B=60mm) 図 15 入力加速 (Case 5:薬液 B=70mm)

b) 結果と考察

本実験では、スラリー状の試料を容器に投入後遠心圧密を行い、盛土を設置してから再度遠心圧密を行い、初期地盤とした。矢板壁の両脇は、止水性を高めるために厚さ 0.4 mm のメンブレンシートを貼り付けた後、グリースを塗布している。3 回の正弦波による加震後は、加震時に発生した過剰間隙水圧を消散させるため 30 G の遠心加速度場で地盤を放置している。遠心実験後の地盤の変形図を図 16 ~ 21 に示す。

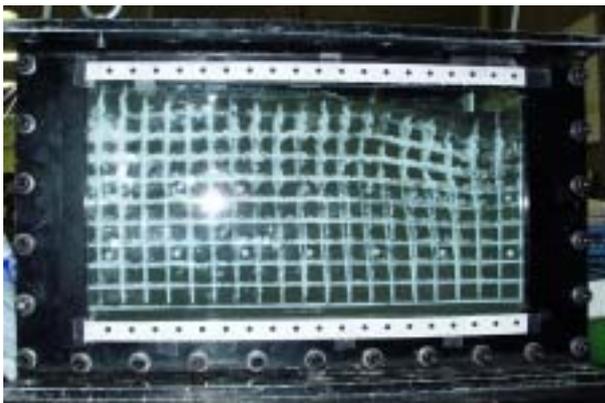


図 16(a) 地盤変形図 (Case 1:未対策)

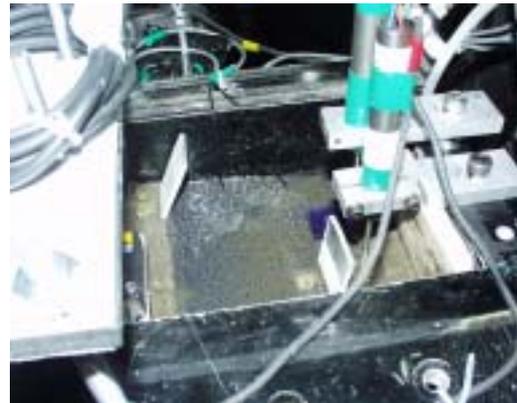


図 16(b) 盛土の変形 (Case 1:未対策)

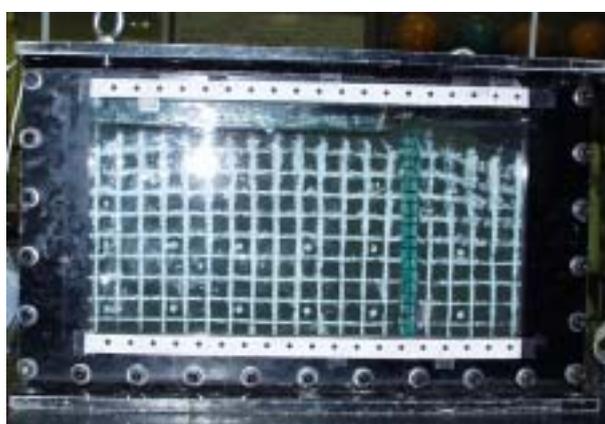
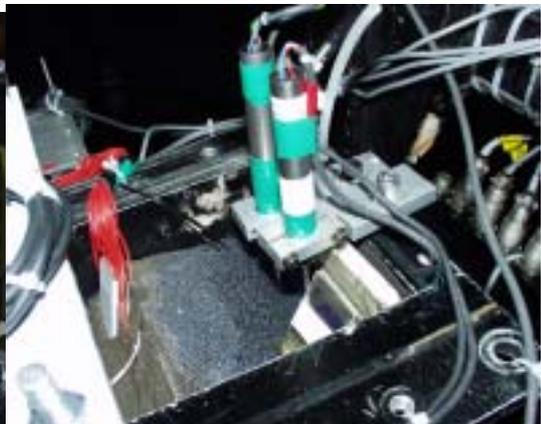


図 17(a) 地盤変形図 (Case 2:矢板、排水なし) 図 17(b) 盛土の変形 (Case 2)



各ケースの地盤変形より、格子状に設置したカオリンパウダーが加震後に拡散し、滲んでいることが見て分かる。そして、この領域は加震によって液状化、若しくは液状化に近い状態になっていると考えられる。



図-18(a) 地盤変形図 (Case 3: 矢板、排水あり) 図-18(b) 盛土の変形 (Case 3)



図 19(a) 地盤変形図 (Case 4: 薬液 B=30mm) 図 19(b) 盛土の変形 (Case 4)

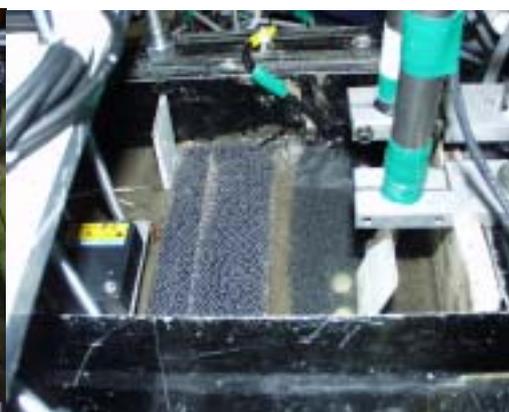
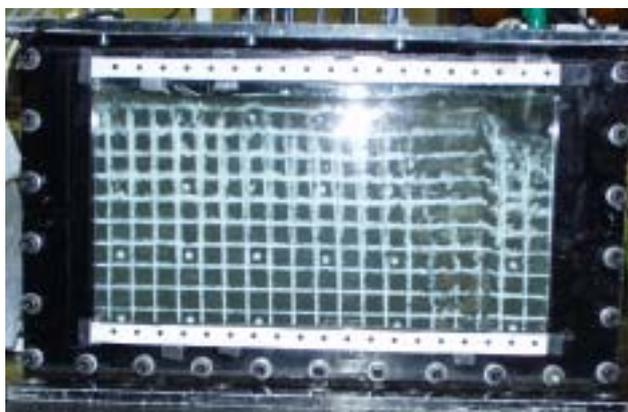


図 20(a) 地盤変形図 (Case 5: 薬液 B=60mm) 図 20(b) 盛土の変形 (Case 5)

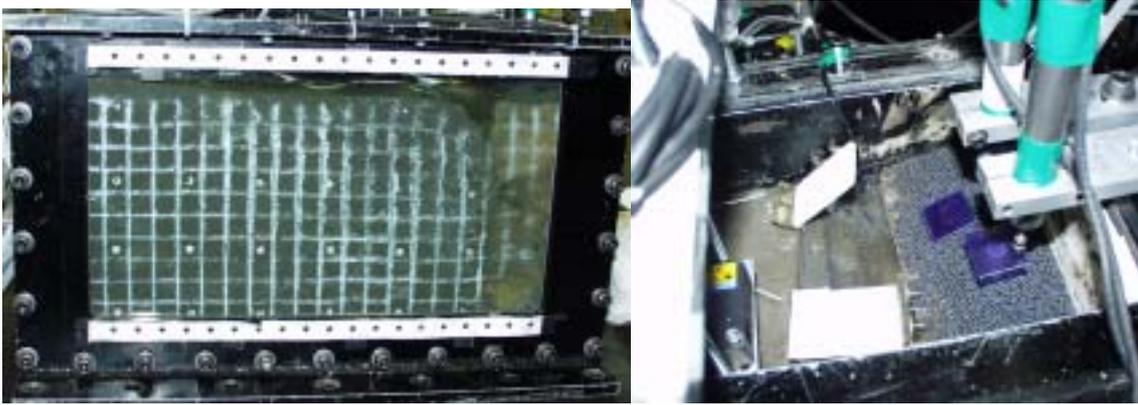


図 21(a) 地盤変形図 (Case 6:薬液 B=70mm) 図 21(b) 盛土の変形 (Case 6)

図 22 と図 23 に盛土直下及び天端での沈下量の時刻歴を示す。また図 24 には法尻から約 200mm 離れた地点での沈下量の時刻歴を示す。図 22 の盛土直下の沈下量より、最終沈下量は、Case 1:未対策 = Case 4:薬液 B=30mm > Case 5:薬液 B=60mm > Case 2:矢板、排水なし > Case 3: 矢板、排水あり > Case 6:薬液 B=70mm の順に小さくなっている。特に、盛土天端直下を改良した Case 6 では全く沈下が見られなかった。

一方、天端の沈下量は盛土堤体自体の破壊を伴うため盛土直下とは異なっている。Case 3 の排水機能付矢板と Case 6 の天端直下を薬液改良したケースでは対策効果が見られたが、その他のケースでは対策効果が見られていない。これは、加震時の入力波形が実物換算で最大約 1G まで作用したため、盛土堤体自体が壊れてしまったためと考えられる。図 24 の法尻から 200mm 離れた地点では、薬液改良のケースで地盤の隆起が見られる。これは、地盤が側方に移動したために起きたと考えられる。

最後に、矢板壁工法と薬液改良工法の対策効果について検討する。

矢板壁工法では、地盤の変形図の写真を見て分かるように液状化の発生が抑えられている。これは、下端を剛結した矢板壁が盛土堤体から生じるせん断力の伝達を抑制して

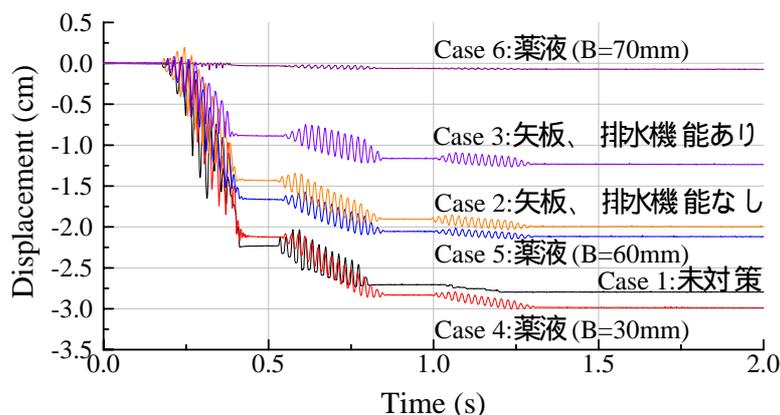


図 22 盛土直下の変位量の時刻歴

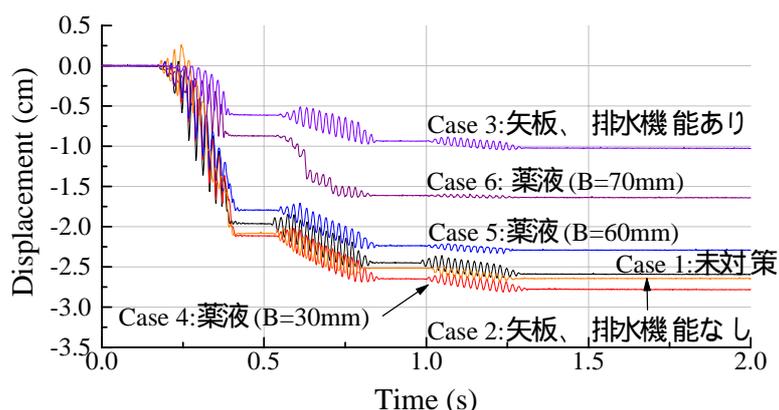


図 23 盛土天端の変位量の時刻歴

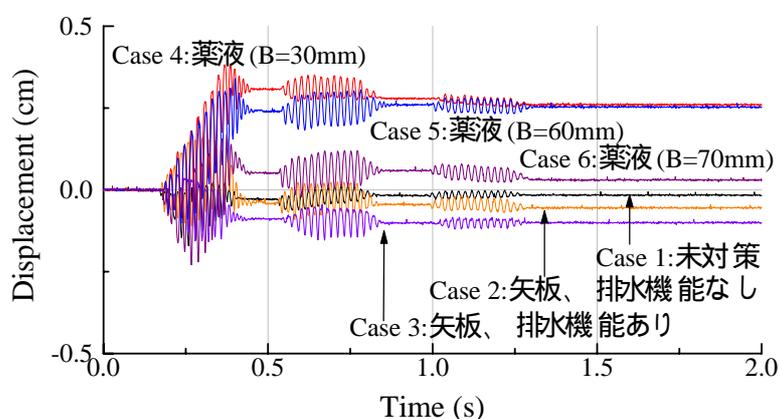


図 24 法尻から 200mm 離れた地点での変位量の時刻歴

いると考えられる。盛土直下の沈下量を見ると、排水機能のない矢板では約 30%、排水機能付矢板では約 60%の改良効果が見られた。排水機能付矢板は、排水機能のないものに比べて高い対策効果を示した。しかしながら、今回の実験では不均一荷重による不等沈下が発生したため、今後は矢板壁の設置位置を変えるなどによって不等沈下対策の検討を行う必要がある。

薬液改良工法では、盛土直下を改良した Case 6 では高い改良効果が見られた。しかし、法尻部に改良体を設置した Case 4 と Case 5 では大きな改良効果は見られなかった。この要因として、不等沈下の発生を改良体による壁が抑制できなかったこと、今回の改良体は 1G 場の拘束圧の低い条件で作製したため十分な剛性が得られなかったことなどが挙げられる。

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 既存の液状化対策工のうち、流動対策として有効と考えられる、地盤改良、地中連続壁、排水工法の 3 つを選定し、その最適な施工位置等について検討を行った。その結果をもとに、

平成 15 年度以降の実験計画を立案した。

- 2) 連続矢板壁と薬液注入による地盤改良工法の効果を検討するために遠心模型実験を行った。矢板壁工法では、矢板が盛土堤体から生じるせん断力の伝達を抑え、液状化の発生を抑える効果が現れた。排水機能付矢板は排水機能のない矢板に比べ高い対策効果を示した。薬液注入工法では、改良領域の直上の沈下は劇的に抑えられている。

(e) 引用文献

- 1) 大林淳, 原田健二, 山本実, 佐々木康: 締固め地盤の液状化抵抗に関する評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.1411-1416., 1998.
- 2) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa N. : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, pp.99-107, 1996.
- 3) (社)土木学会: 土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」, 1996.1.10
- 4) 阪神大震災・地盤調査研究会: 平成 9 年度報告書, 7. 改良地盤と未改良地盤の兵庫県南部地震における応答のシミュレーション, pp.145-206., 1998.
- 5) 原田健二・石田英毅: 大地震における建築構造物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実証的研究, 実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題シンポジウム論文集, pp.93-98., 1999.
- 6) 井合進, 小泉勝彦, 倉田栄一: 液状化対策としての地盤の締固め範囲, 土と基礎 Vol.39 No.2, pp.35-40, 1991.
- 7) 吉澤, 鬼丸, 畑中, 内田, 難波: LPG タンク基礎および周辺地盤の地震による影響についての考察, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1149-1152, 1997
- 8) Maegawa, F., Yasuda, S., Arai, D., Fukui, Y. and Harada, K.: Effectiveness of compaction pile method as a measure against liquefaction under intense shaking, XVICSME(Turkey), TC4, Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquake, pp.357-362, 2001.
- 9) 沿岸開発技術センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック, 1997.
- 10) 建設省土木研究所: 河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案), 土木研究所資料第 3513, ISSN0386-5878, 1997.
- 11) 地盤工学会: 基礎・地盤構造物の耐震設計, 2001.
- 12) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善, 2001.
- 13) 都市基盤整備公団: 宅地耐震設計マニュアル(案), 2002.
- 14) 日本道路協会: 道路土工のり面・斜面安定工指針, 丸善, 1999.
- 15) リバーフロント整備センター: 高規格堤防盛土設計・施工マニュアル, 2000
- 16) 地盤工学会: 液状化対策の調査・設計から施工まで, 地盤工学会, 1993.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

- 1) 平成 14 年度の業務計画に引き続き、流動対策の動的遠心模型実験を実施する。
- 2) 平成 14 年度の準備工をもとに、中型振動台実験、小型振動台実験を実施し、対策の有効性の確認に加えて、模型実験の寸法効果について検証する。
- 3) 護岸形式ごとに護岸変状と流動変形量の関係性を明らかにする。
- 4) 対策工の種類としては、護岸背面の地盤改良タイプ、変形抑制タイプ、排水タイプを採用し、実験結果より対策の有効性を確認する。
- 5) せん断土槽を用いて、地盤変状によって基礎杭に加わる流動力を定量的に評価する。
- 6) 簡易な流動解析手法を用いて、対策効果のシミュレーションを実施する。

業務の実施場所については、以下の通りとする。

- ・ 動的遠心載荷実験については、独立行政法人産業安全研究所の試験装置を借用し、本研究の研究分担者が直接実施する。
- ・ 中型模振動台実験については、研究代表者の所属機関である東京電機大学で実施する。
- ・ 小型振動台実験については、研究分担者の所属機関である独立行政法人港湾空港技術研究所ならびに関東学院大学で実施する。
- ・ 対策工の有効性の検討、シミュレーション解析については、分担者各自の所属研究機関で実施する。