

地中壁の設置による側方流動軽減技術 に関する遠心模型実験

本多剛¹・東畑郁生²・玉手聡³・安田進⁴・福井聡⁵・田中智宏⁶・内山純一⁷

¹ 東京大学大学院工学系研究科助手 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: honda@geot.t.u-tokyo.ac.jp

² 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp

³ 独立行政法人産業安全研究所 (〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

E-mail: tamate@anken.go.jp

⁴ 東京電機大学教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

⁵ 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: fukui-s@geot.t.u-tokyo.ac.jp

⁶ 東京電機大学博士後期課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

E-mail: tanaka@g.dendai.ac.jp

⁷ 東京電機大学博士前期課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

E-mail: 02smg02@ed.ccs.dendai.ac.jp

地震時に河川堤防の堤体下部地盤で液状化が発生し、堤体が沈下や亀裂などの被害を受けることがある。本論文では、これらの被害の軽減するために薬液改良による地中壁を設置する工法を採用し、その効果を検討するために遠心模型実験を実施した。河川周辺には細粒分を多く含む軟弱地盤が堆積していることが多く、これを再現するために地盤材料には細粒分含有率92.8%のシルト砂を用いて実験を行った。この結果、細粒分含有率の高いシルト砂地盤においても地盤表層で液状化が発生し、堤体が側方流動に伴う沈下と堤体の転倒破壊によって崩壊した。一方、対策工法を施したケースでは沈下が抑制されることが確認できた。

Key Words : Centrifuge model test, chemical grouting, liquefaction, river dike, silty sand

1. はじめに

過去の地震において、河川堤防の堤体が大きな被害を受けることが報告されている¹⁾²⁾。これらの堤体の被害は、堤体下部にある軟弱地盤が地震時に液状化現象を伴うような強度低下を引き起こすことに起因している。そして、下部の支持基盤が側方流動することにより上部堤体に亀裂や沈下が発生する。このような被害を抑えるためには、堤体下部の軟弱地盤に何かしらの対策を施し、堤体の支持地盤の側方流動や沈下を抑えることが必要である。たとえば、Mizutani et al.³⁾の1G場で実施した模型振動台実験では、地盤中に矢板による地中壁によって側方流動を抑えることができ、堤体の沈下を抑制できることを確認している。本論文では、既設の河川堤防の耐震対策工法として薬液改良による地中壁を設置する工法の効果を検討するために、地中壁の厚さや設

置場所を変えた遠心模型振動台実験を行った。河川周辺には細粒分を多く含む軟弱地盤が堆積していることを考慮して、地盤材料に鳥取県境港市の竹内工業団地で採取したシルト砂（細粒分含有率：92.8%）を使用した。この試料は、鳥取県西部地震（2000）の際に実際に液状化を起こした地点から採取されたものである。

2. 遠心模型実験

(1) 実験条件

本実験では、未対策の1ケースと薬液改良による地中壁を設置した3ケースの計4ケースの遠心模型振動台実験を30Gの遠心場で実施した。模型容器には幅450 mm、高さ272 mm、奥行き150 mmの剛性容器を使用し、側壁の影響を軽減させるために容器側壁に

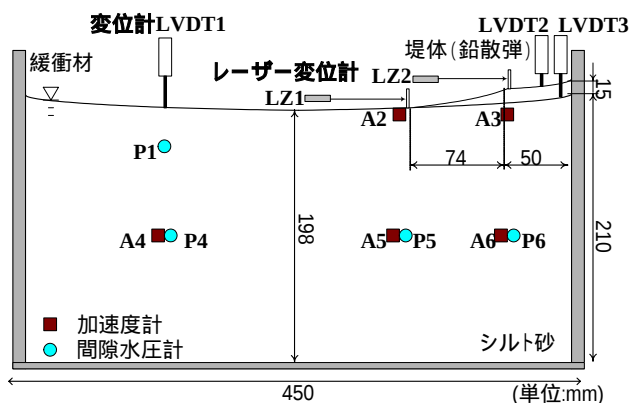


図-1 模型地盤概要 (Case1, 未対策)

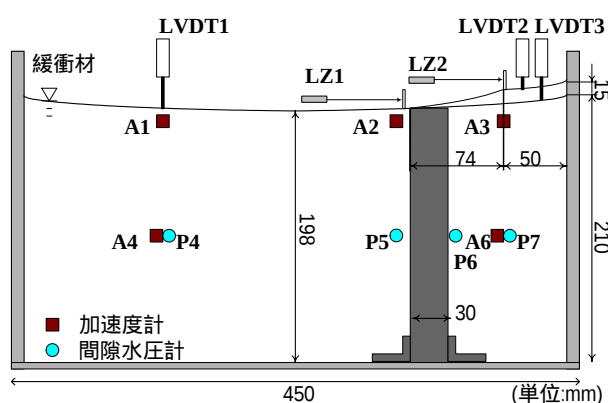


図-2 模型地盤概要 (Case2, 薬液改良 30mm)

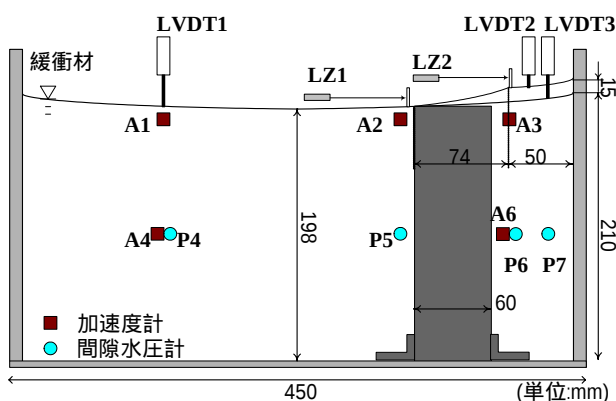


図-3 模型地盤概要 (Case3, 薬液改良 60mm)

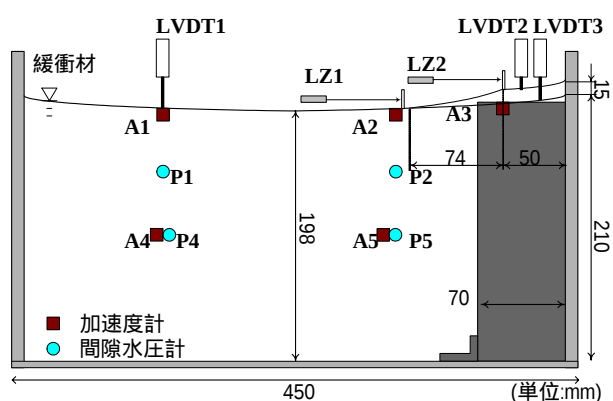


図-4 模型地盤概要 (Case4, 薬液改良 70mm)

厚さ10 mmの緩衝材を設置している。また容器壁面が側方流動に影響を与えないようにするため模型地盤を半断面模型とし、堤体下部の軟弱地盤をできる限り確保するために堤体を鉛散弾で再現することで堤体の高さを抑えている。堤体高さは設置圧が実スケールと等しくなるように決めている。この模型地盤の概要と計測器の配置図を図-1から図-4に示す。なお、図中のスケールは模型スケールである。

模型地盤は、予めスラリー状にしたシルト砂を容器に投入し30Gの遠心場で自重圧密を行い一様地盤を作成する。改良体を設置するケースでは、自重圧密前に改良体を設置する。この一様地盤の飽和単位体積重量は 17.3 kN/m^3 程度となる。その後、堤体として鉛散弾を最小間隙比（単位体積重量 $\gamma_d = 67.34 \text{ kN/m}^3$ ）となるように高さ15 mmまで設置し、堤体が静的に破壊しないように段階的に遠心加速度を上げて再度遠心圧密を行った。

加震は容器の長手方向に図-5に示すような加速度振幅の異なる正弦波を3回（実スケール換算で2Hz，約1000，300，150 gal）入力した。1回目の入力は600 galになるように設定したものの、加震台の性能の限界から最大1000 gal程度でてしまっている。また2，3回目の加震は余震を再現している。

(2) 地盤材料

本実験には鳥取県境港市の竹内工業団地で採取し

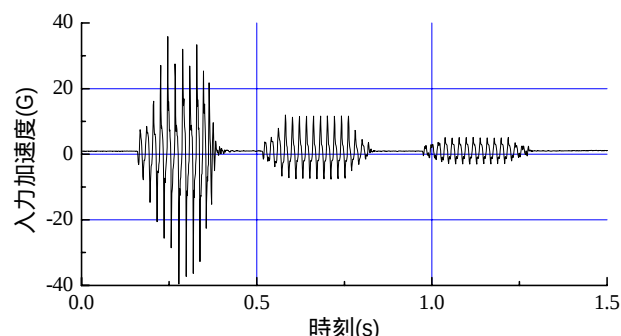


図-5 入力加速度 (Case1, 未対策)

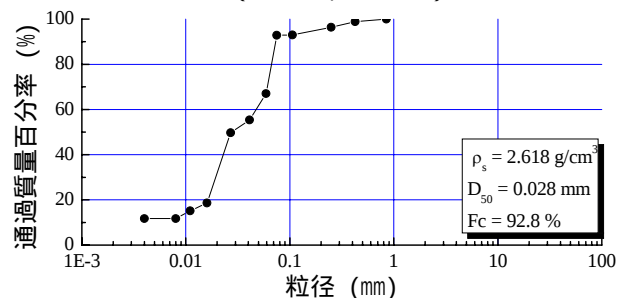


図-6 シルト砂の粒径加積曲線

たシルト砂（細粒分含有率：92.8%）を使用した。この試料の粒径加積曲線を図-1に示す。この試料は細粒分含有率が高いため透水性が低い（ $k = 6.84 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，20kPaの圧密試料）。一般に遠心

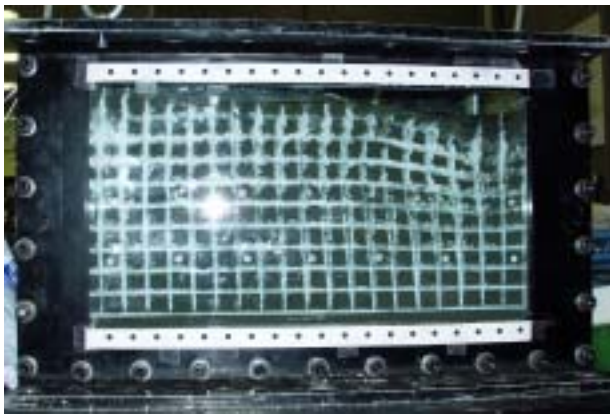


図-7 変形後の写真 (Case1, 未対策)



図-8 変形後の写真 (Case2, 薬液改良 30mm)

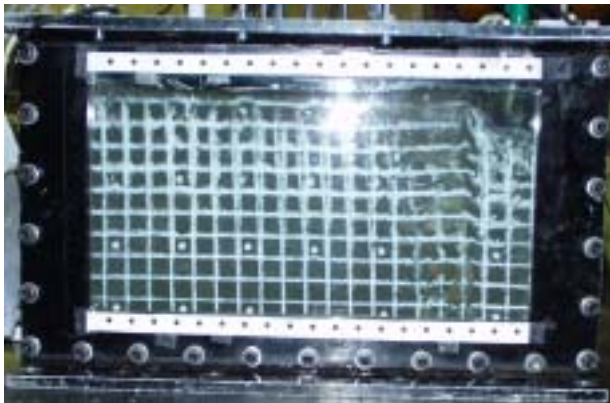


図-9 変形後の写真 (Case3, 薬液改良 60mm)

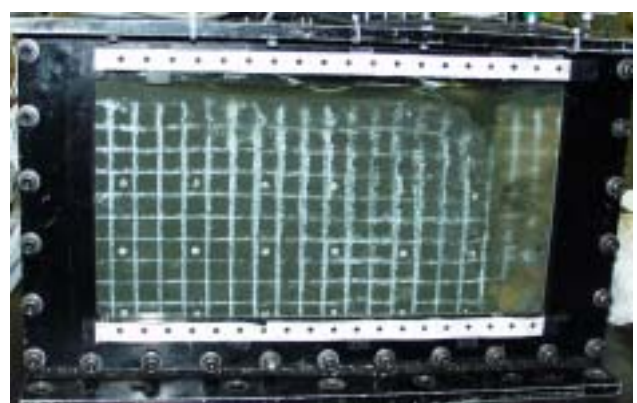


図-10 変形後の写真 (Case4, 薬液改良 70mm)

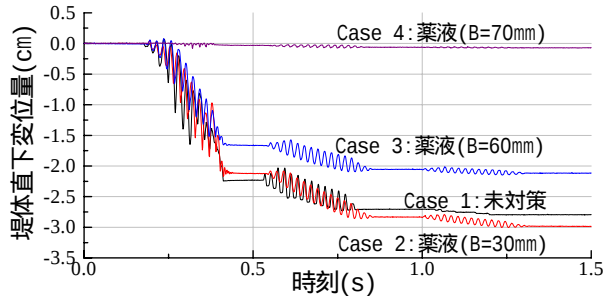


図-11 堤体直下の変位量

場 (nG) での加震実験では圧密時間の相似則をあわせるためにn倍の粘性流体が間隙流体として用いられるが、本実験では試料の透水性が悪く、粘性流体を用いることは作業上困難であったため間隙流体に脱気水を用いている。

改良体には、相対密度40%の豊浦珪砂に旭電化工業のパーマロック・ASF (シリカ濃度4.0%) の薬剤を注入し、固結させたものを使用した。

3. 実験結果と考察

(1) 地盤変形

図-7から図-10に実験終了後の地盤の変形図を示す。これらの図において、格子状の白線はカオリンパウダーを降りかけて、初期の格子間隔が20mmになるように作製したものである。全ケースとも地盤表層部で加震時にカオリンパウダーが拡散し、滲んでいる。これは加震によって地盤が液状化、若しくは液状化に近い状態になっているためと考えてよい。一方、模型地盤の下側では格子が明確に残っていることから液状化状態には達していないと考えられる。実際に模型地盤下側に設置した間隙水圧計は液状化状態となるまでの水圧上昇は見られなかった。今回の実験では地盤全体が液状化状態に達することはなかったが、これは試料の細粒分含有率が高いためであろう。しかしながら、地盤表層部が液状化状態に達することで堤体に大きな変形が生じている。

Case1からCase3では、堤体天端が地表面より下に沈下していることが分かる。これは、堤体材料として土よりも水中単位体積重量が大きい鉛散弾を使用しているためである。Case2とCase3の法尻部に改良体を設置したケースでは、改良体の直上では沈下がほとんど見られないものの、堤体の天端及び直下には沈下が生じている。また薬液改良体自体が側方に移動していることが分かる。Case4の堤体天端の下部に改良体を設置したケースでは、改良体上部の沈下が抑えられている。一方、改良体が途切れる法尻部分では大きな段差となって沈下が生じた。

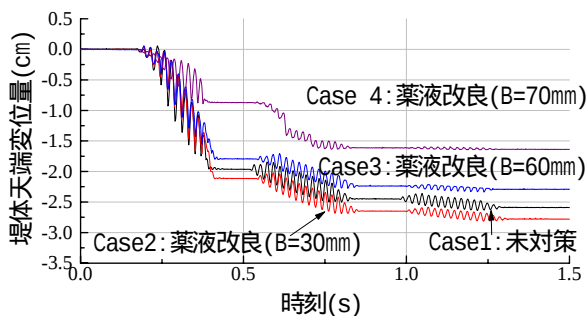


図-12 堤体天端の変位量

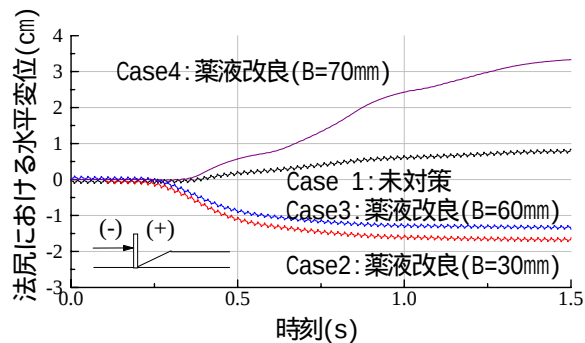


図-13 法尻における水平変位

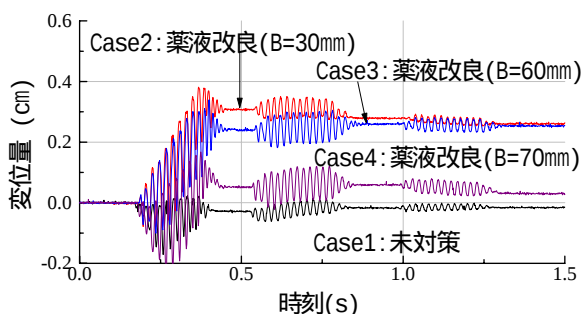


図-14 法尻から 200mm 離れた地点での変位量

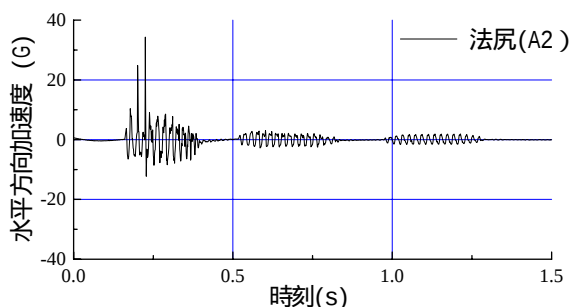


図-15 法尻での水平方向加速度 (Case1)

堤体直下の変位量の時刻歴を図-11に示す．図-11より，天端直下に改良体を設置したCase4ではほとんど沈下が生じていない．一方，改良幅30mmのCase2では未対策のCase1に比べて対策効果がほとんど見られていない．これは，改良幅が小さいため改良体自身が曲げモードで変形したために側方流動をおさえることができなかったと考えられる．改良幅60mmのCase3では未対策のケースに比べて沈下が約30%抑制されている．

図-12に堤体天端での変位量を示す．天端の沈下量は堤体自体の破壊を伴うため堤体直下とは幾分異なっている．堤体直下に薬液改良体を設置したCase4では，堤体直下の沈下が見られなかったのに対して，堤体天端の変位が生じていることから堤体そのものが加震によって崩壊している．1回目の入力加速度が1000 galほど出てしまったことや容器側壁で地盤の応答が大きくなることを考慮すると，堤体に過大な変形が生じてしまったと考えられる．

次に，堤体法尻における水平変位を図-13に示す．これはレーザー変位計から得られた値であり，水平変位が漸増しているのはレーザー変位計の変換速度が遅いためである．図-13の設置図を見て分かるように，この水平変位はターゲットの水平移動と回転移動による変位の和である．このため，Case1とCase4ではターゲットの回転によって右側に倒れている．特にCase4では，法尻部に大きな不等沈下が発生したため転倒による変位が大きい．一方、

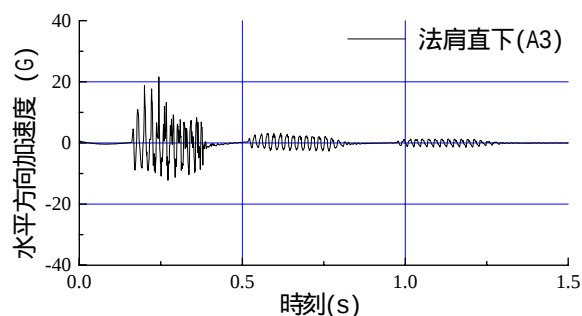


図-16 法尻直下での水平方向加速度 (Case1)

Case2とCase3では，法尻直下に改良体が入っているため転倒モードが起こらず，左側に水平変位が生じている．

図-14に法尻から200mm離れた地点での鉛直変位を示す．未対策のケースでは鉛直変位に大きな変化は見られていない．一方，薬液改良のケースでは地盤の隆起が見られた．この隆起は地盤が側方に移動したために起きたと考えられるため，薬液改良のケースで側方流動が大きかったのだろう．これは，未対策のケースでは堤体直下で局所的な変形（側方流動及び不均一荷重による転倒）が起こったのに対して，改良体を設置したケースでは，改良体が押されるために変形領域が広がったことによるものと考えられる．

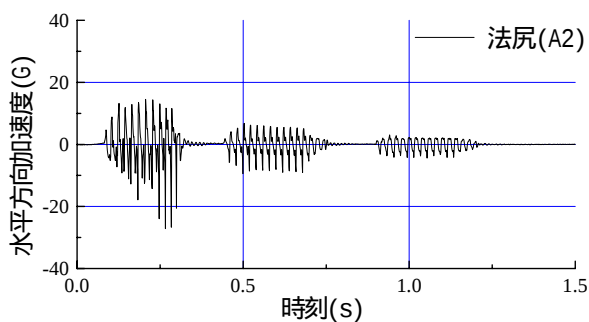


図-17 法尻での水平方向加速度 (Case2)

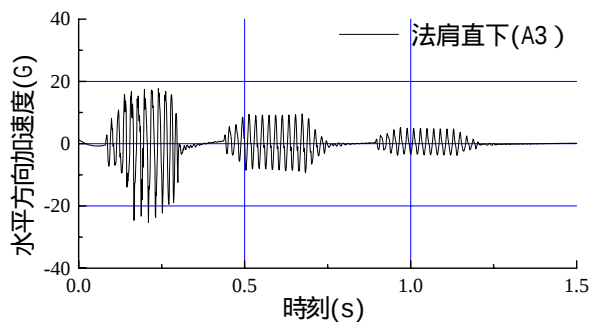


図-18 法肩直下での水平方向加速度 (Case2)

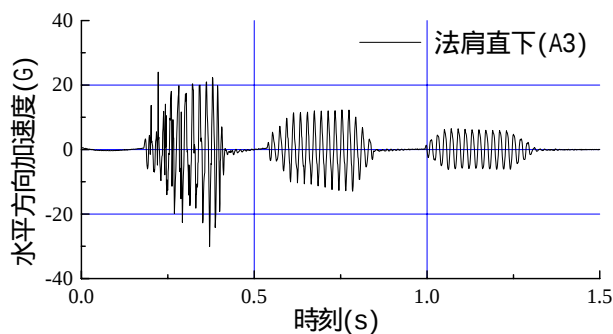


図-19 法肩直下での水平方向加速度 (Case3)

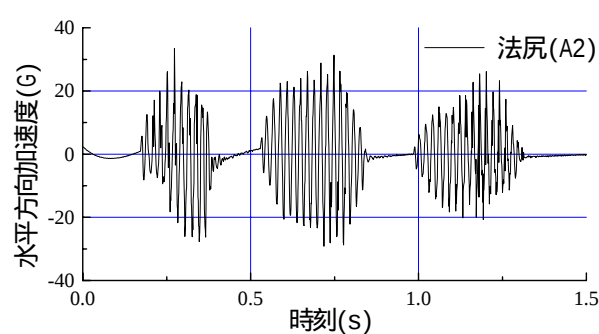


図-20 法尻での水平方向加速度 (Case4)

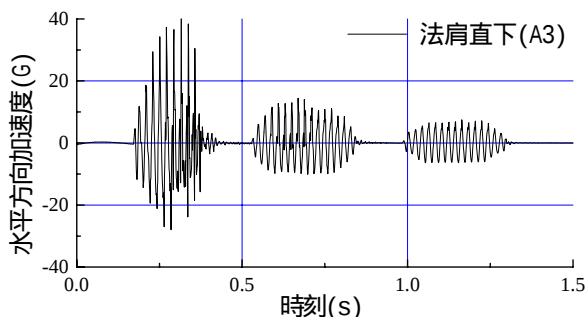


図-21 法尻直下での水平方向加速度 (Case4)

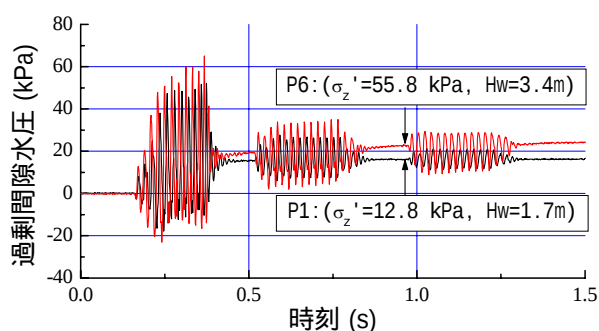


図-22 過剰間隙水圧 (Case1, 未対策)

(2) 地盤内の加速度応答

Case1(未対策)の法尻(A2)と法肩直下(A3)での水平方向の加速度の時刻歴を図-15と図-16に示す。なお、この加速度の値は加速度計の回転の影響を補正した値である。図-15と図-16より、地盤の表層部の加速度応答は入力加速度(図-5)に比べて応答がかなり小さくなっていることが分かる。これは、表層部で液状化現象が発生しているために応答が小さくなっていると言える。なお、液状化・非液状化領域及び薬液改良領域における応答加速度の振動数には明確な変化が見られなかった。これは、本実験では剛性容器を用いているために側壁から加震力が大きく、結果として入力加速度の振動数とほぼ同じ応答が得られたと考えられる。特に今回の実験ケースでは、1回目の遠心圧密において側壁の緩衝材が変形する

ために十分な減衰効果が得られなかった感がある。

同様に、Case2からCase4の法尻と法尻直下の加速度の時刻歴を図-17から図-21に示す。なお、Case3の法尻の加速度は計測器が実験中に故障したため計測できていない。薬液改良体を設置したケースでは法肩直下において、未対策に比べて大きな加速度が生じている。このことが堤体天端の沈下量(図-12)が堤体直下の沈下量(図-11)に比べて、地中壁の軽減効果が見られなかった原因の一つである。特に1回目の入力加速度は実スケール換算で最大1000 galに達していることを考慮すると、支持地盤の変形ではなく堤体自身が水平力によっても破壊している。

図-20より、Case4の法尻で大きな加速度が応答が出ている。特に2, 3回目の加震時には入力加速度よりも大きくなっている。これは、1回目の加震で液

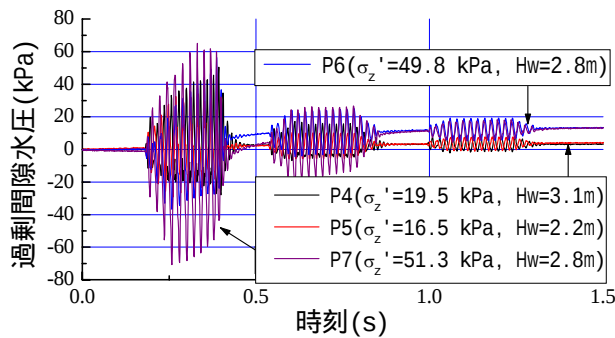


図-23 過剰間隙水圧 (Case3, 薬液改良 60mm)

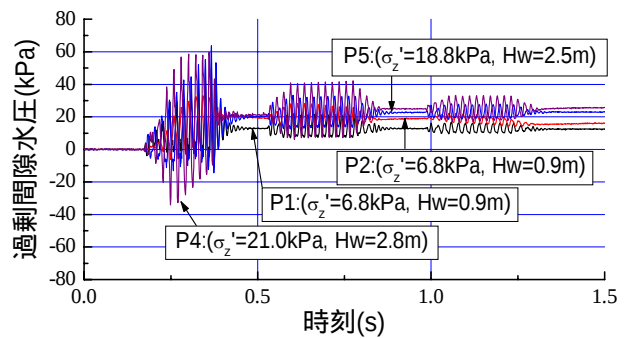


図-24 過剰間隙水圧 (Case4, 薬液改良 70mm)

状化状態に達した地盤が改良体に打ち付けられることにより、大きな加速度が生じたためである。この結果、Case4では法尻周辺で大きな段差を生じる沈下が起こっている(図-10)。

(3) 地盤内の過剰間隙水圧

今回の実験では間隙水圧計の設置作業中に計測器内に空気が混入し、加震時の水圧変化を測定できないものがあった。この節では、正しく計測できた計測器の過剰間隙水圧について考察する。

図-22にCase1の過剰間隙水圧の時刻歴を示す。計測器の設置位置は図-1の通りであり、図中の凡例に計測器の位置における鉛直有効応力と水深を示す。図-22より、シルト砂地盤の飽和単位体積重量が 17.3 kN/m^3 であることを考慮すると、P1では1回目の加震後に液状化状態に達していると言える。一方、堤体直下にあるP6では堤体の上載荷重があるため、液状化状態までには達していない。

図-23と図-24にCase3とCase4の過剰間隙水圧の時刻歴を示す(図-3と図-4に計測器の配置図を示す)。Case3では、改良体の内側にある堤体直下のP6,P7において、1回目の加震時に大きな水圧変動が発生した。P7においては瞬間的に負圧も発生するほどの水圧変動が生じていることが分かる。これは、1回目の入力加速度が大きいことと、改良体によって締め切られていることから間隙水の回りこみが生じないために大きな水圧変動が観測されたと考えられる。一方、Case1とCase4では、負の過剰間隙水圧が瞬間的に発生するものの過剰間隙水圧は増加し、ほぼ液状化状態に達している。

4. まとめ

本論文では、細粒分含有率92.8%のシルト砂試料を用いて河川堤防の地震時の変形挙動と、薬液改良体による地中壁の側方流動の軽減効果について調べるために遠心模型実験を行った。これより、次のことが得られた。

- 1) シルト砂地盤全体が液状化状態に達することはなかったが、地盤表層で液状化状態となり未対策では大きな沈下生じた。その変形は側方流動

と堤体の不均一荷重による堤体のすべり破壊の2つのモードからなる。

- 2) 堤体直下の沈下量で比較すると、改良体直上の沈下はほとんど見られず、幅60mmの改良体を地中壁として設置したCase3では、約30%の沈下量の軽減が見られた。
- 3) 地中壁内側の堤体下部では、過剰間隙水はほとんど増加していない(Case3)。これは、薬液改良体の地中壁の締め切り効果によるものである。

本実験の加震では、1回目に設定した入力加速度よりも大きな出力が得られた。また半断面の模型地盤の採用したため、容器側壁の影響が堤体天端の沈下に大きく現れている。このため、下部地盤の側方流動のほかに、法尻が隆起するような堤体のすべり破壊が顕著に現れた。今後は、これらの課題を取り除いた実験を実施する予定である。

謝辞：本研究は文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」と東亜建設工業株式会社の御支援のもと、独立行政法人産業安全研究所との共同研究として実施されたものである。各方面の御支援に感謝致します。

参考文献

- 1) Matsuo, O: Damage to river dike, *Special issue of Soils and Foundations*, pp. 235-240. Japanese Geotechnical Society, 1996.
- 2) Towhata, I., S.K.Prasad, T.Honda and G.P.Chandradhara: Geotechnical Reconnaissance Study on Damage Caused by 2001 Gujarat Earthquake, India, *Soils and Foundations*, Vol42, No.4, pp.77-88 Japan Geotechnical Society, 2002
- 3) Mizutani, T., I.Towhata, N.Shinkawa, S.Ibi, T.Komatsu and T.Nagai: Shaking table tests on mitigation of liquefaction-induced subsidence of river dikes, *Proceedings of the 15th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Istanbul, Turkey, pp. 1207-1210, 2001.

(2003. 6. 30 受付)

Centrifuge model tests on the mitigation of lateral flow with ground wall.

Tsuyoshi Honda, The University of Tokyo
Ikuo Towhata, The University of Tokyo
Satoshi Tamate, National Institute of Industry Safety
Susumu Yasuda, Tokyo Denki University
Satoshi Fukui, The University of Tokyo
Tomohiro Tanaka, Tokyo Denki University
Jyunichi Uchiyama, Tokyo Denki University

Centrifuge model tests on the mitigation of lateral flow in a river dike carried out to investigate effects of a ground wall against the deformation due to seismic liquefaction. Silty sand with high fine content of 92.8 % was used in the model tests to simulate soft ground around dike river. From the results, it was found that the liquefaction was induced near the ground surface and cause large settlement and collapse of river dike even in silty sand. In the cases of chemical grouted wall, settlement was restricted by the ground wall.