

# 液状化対策としての杭式深層混合処理工法に関する振動台実験

## Shaking Table Tests of Liquefiable ground Improved by Deep Mixing Method of Soil Stabilization

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI  
山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO  
黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

液状化対策を目的とした深層混合処理工法のうち杭式改良に着目し、改良杭を1軸で施工する標準的な杭式改良（以後、1軸改良）と、4軸同時に施工する杭式改良（以後、4軸改良）に関する振動台実験を実施した。

せん断土槽を用いた振動台実験の結果から、過剰間隙水圧比の低減効果は4軸改良のほうが1軸改良よりも高いことが確認された。また、矢板護岸モデルを対象として実施した固定土槽を用いた振動台実験の結果から、矢板護岸の変位を低減して背後地盤の流動的な変形を抑制する効果は、レベル2地震動を考慮した場合、4軸改良のほうが1軸改良よりも高いことが明らかとなった。

**キーワード**：液状化，側方流動，振動台実験，深層混合処理工法

In order to estimate the effect of deep mixing method of soil stabilization against liquefaction, model shaking table tests were conducted while varying the improvement ratio and the improvement form of the columns. Two types of improvement form were considered. One is the one axis mixing method, and the other is the four axes mixing method. As a result of shaking table tests on sheet pile quay model, it was found that the four axes mixing method was the most effective in decreasing the ground lateral flow by liquefaction by decreasing the lateral displacement of the quay against level 2 earthquake.

**Key Words**: Liquefaction, Lateral Flow, Shaking Table Test, Deep Mixing Method of Soil Stabilization

### 1. はじめに

近年、液状化対策工法として深層混合処理工法による工事件数が増加傾向にある<sup>1)</sup>。深層混合処理工法は主にセメント系の安定材を攪拌混合し地盤を固化させて液状化を防止するものであるが、施工中の振動・騒音が少なく周辺地盤の変位もある程度抑制することが可能なことから、市街地や既設構造物への近接施工に適用性が高いという特徴を有している。

深層混合処理工法の改良形式としては、ブロック式（全面改良）、格子式、壁式、杭式がある。このうち、液状化対策としてはブロック式、格子式を適用しているのが一般的である。格子式改良は格子状に囲まれた改良体の内部に未改良土を有するが、改良体が地震時のせん断変形を抑制することによって液状化を防止すると言われる<sup>2)</sup>。また、兵庫県南部地震（1995）を経験した格子状改良地盤が周辺の液状化による壊滅的な被害に対して健全であったことが確認<sup>3)</sup>されている。

これに対して杭式改良は施工性の面では有利であるが、他の改良形式に比べて液状化対策効果は低い<sup>4)</sup>と考えられてきた。最近の振動台実験による研究によると、改良体を杭式に配置した場合でも地震時のせん断ひずみが小さくなり、せん断変形が抑制されて液状化対策効果があると考えられた事例が報告<sup>5),6)</sup>されている。また、先に著者らが実施した格子式改良と杭式改良の液状化対策効果を解析的に検討した結果<sup>7)</sup>からは、格子式改良のほうが少ない改良率から改良効果を示すものの、杭式改良についても改良率がおおむね35%以上であれば格子式改良と同様に過剰間隙水圧の上昇が抑えられて液状化を抑制することが示された。このように、杭式改良についてもその改良効果を検討する余地があるように思われる。

本研究は、杭式深層混合処理工法による液状化抑制効果を振動台実験により検証する。実験では、単軸で施工する標準的な杭式改良（以後、1軸改良）に加え、4軸の杭式改良（以後、4軸改良）についてもモデル化を行



写真-1 せん断土槽

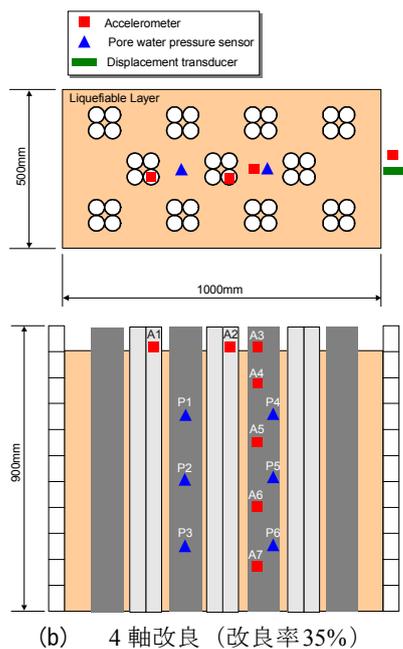
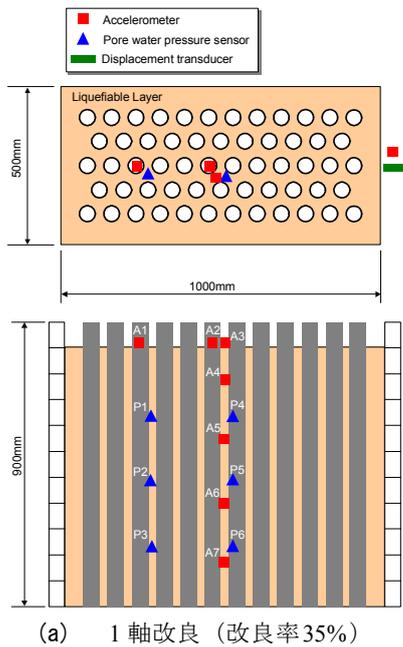


図-1 実験モデル

表-1 実験ケース (せん断土槽)

項目	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
改良形式	無改良	一軸改良	一軸改良	4軸改良
改良率(%)	0	35	50	35
入力加速度(Gal)	100~500 (100Galピッチ)			

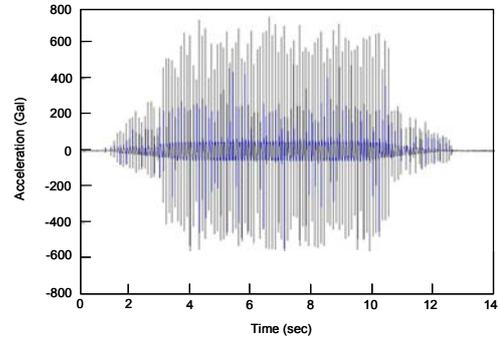


図-2 入力波の時刻歴

い、その改良効果を検討することも目的の一つとした。後者の施工方法には CDM-Land4 工法<sup>8)</sup>があり、一度に通常の深層混合処理改良杭4本分に相当する改良体を施工できる特徴を有していることから、液状化に対する抑制効果が認められれば施工面でより有利な改良仕様になることが期待される。実験は、まず液状化に対する杭式改良の基本的な知見の取得を目的として、せん断土槽を用いた模型振動台実験を実施し、各実験ケースの過剰間隙水圧比の比較を通して杭式改良の液状化抑制効果について検討した。次に、比較的大型の固定土槽を用いて矢板護岸をモデルとした模型振動台実験を実施し、より現実的な条件で、改良地盤の液状化抑制のみならず側方流動等による対象構造物の変形抑止に対して杭式改良がどのように機能するか、その改良効果と改良仕様について検討した。

## 2. せん断土槽を用いた振動台実験

### (1) 実験概要

せん断土槽を用いた振動台実験は、幅1,000mm×奥行き500mm×高さ900mmのせん断土槽(写真-1)を用いて重力場で行った。図-1に実験モデルの概要を示す。模型地盤は、初期相対密度が30%となるよう乾燥状態の豊浦砂を空中落下させて作成した。改良体モデルには直径48mm、厚さ約3mmで長さ1,000mmの塩ビ管を用い、4軸改良ではこれを4本束ねてモデル化した。塩ビ管の上端および下端には、それぞれ厚さ5mmのプラスチックボードを配し、塩ビ管を相互に固定した。なお、このプラスチックボードによる塩ビ管の固定は水平変位のみであり、塩ビ管下端の境界条件はピン結合と同等であ

る。塩ビ管の直径をプロトタイプに換算した場合、改良体の杭径は約1,000mmとなる。実験模型には、地盤中に加速度計および間隙水圧計を、せん断枠に加速度計とレーザー変位計をそれぞれ設置して計測を行った(図-1)。実験ケースは、表-1に示すように改良形式および改良率をパラメータとして設定した。実験に用いた入力波は図-2に示す10Hzの正弦波であり、最大加速度での加振時間は5秒間とした。最大加速度は100Galから500Galまで100Galピッチで増大させた。

(2) せん断土槽を用いた実験の結果および考察

図-3~図-6に、過剰間隙水圧比と入力加速度の関係を示す。過剰間隙水圧比は、図-1に示した20cm(P4)、40cm(P5)および60cm(P6)の各深度における最大値を示している。図-3に示す無改良の結果について、過剰間隙水圧比はいずれの深度においても1.0に近い値となっており、地盤が液状化に至っていることがわかる。これに対して、図-4および図-5に示す1軸改良の結果は、両者とも過剰間隙水圧比が0.6~0.8程度と無改良よりも小さくなっており、改良効果が認められる。なお、改良率35%と50%で過剰間隙水圧比の値は同程度であることから、改良率35%以上において改良率を増やしても過剰間隙水圧比低減に対する改良効果は顕著には向上しないものと思われる。図-6に示す4軸改良の過剰間隙水圧比は、0.5~0.6程度の値であり、4軸改良の過剰間隙水圧比に対する低減効果が確認できる。これらの効果は、改良体によって地盤のせん断変形が抑制されたことに起因するものと考えられる。

図-7は、1軸改良(CASE2)と4軸改良(CASE4)の比較として、改良率35%における深度40cmでの過剰間隙水圧比と入力加速度の関係を示したものである。図より、4軸改良の過剰間隙水圧比のほうが1軸改良のそれよりも小さいことが明らかであり、4軸改良のほうが過剰間隙水圧比の低減効果は高いものと考えられる。これは、同じ改良率とした場合、4軸改良の杭間隔は1軸改良の約3倍長くなる一方で、断面2次モーメントは13倍ほど大きいため、地盤全体の曲げ剛性は4軸改良のほうが高く、その結果、拘束効果が高まり過剰間隙水圧の発生量を低減したものと考えられる。

3. 固定土槽を用いた振動台実験

(1) 実験概要

矢板護岸モデルを対象として実施した固定土槽を用いた振動台実験は、幅2,000mm×奥行き400mm×高さ700mmのせん断土槽(写真-2)を用いて重力場で行っ

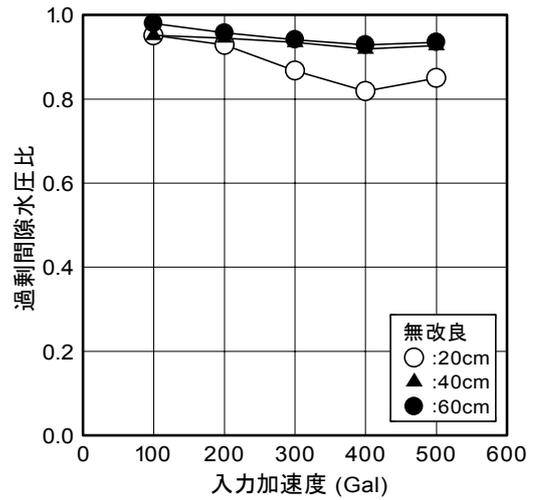


図-3 過剰間隙水圧比と入力加速度の関係 (CASE1: 無改良)

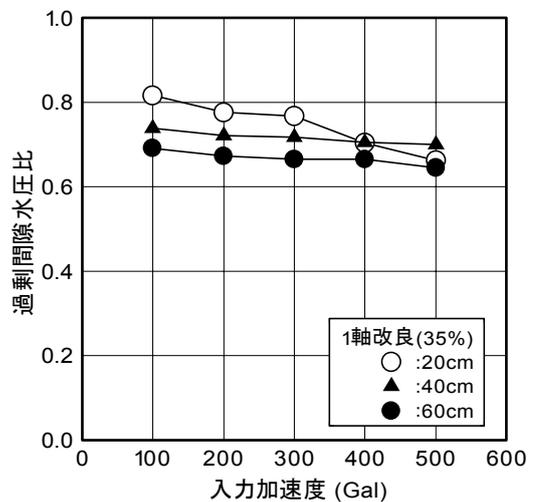


図-4 過剰間隙水圧比と入力加速度の関係 (CASE2: 1軸改良\_改良率=35%)

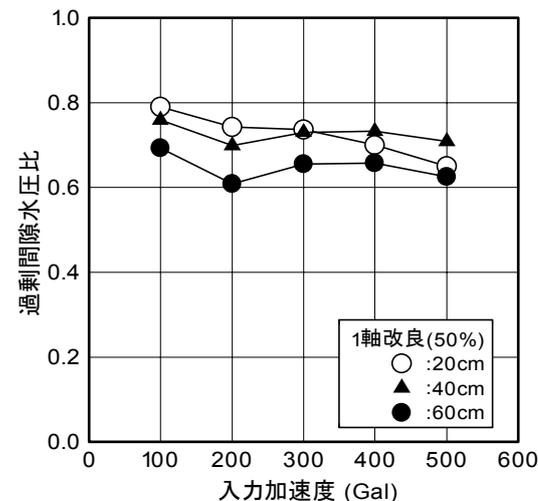


図-5 過剰間隙水圧比と入力加速度の関係 (CASE3: 1軸改良\_改良率=50%)

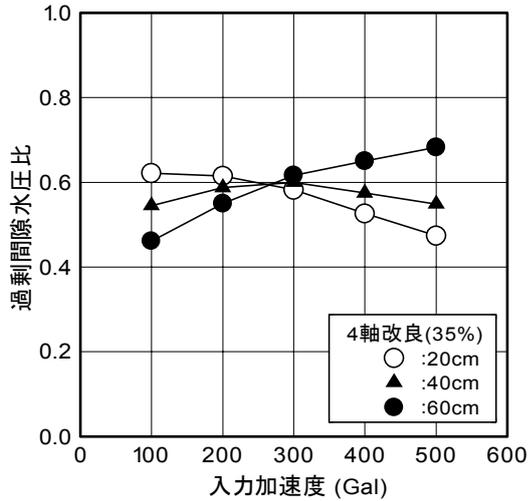


図-6 過剰間隙水圧比と入力加速度の関係 (CASE4: 4軸改良\_改良率=35%)

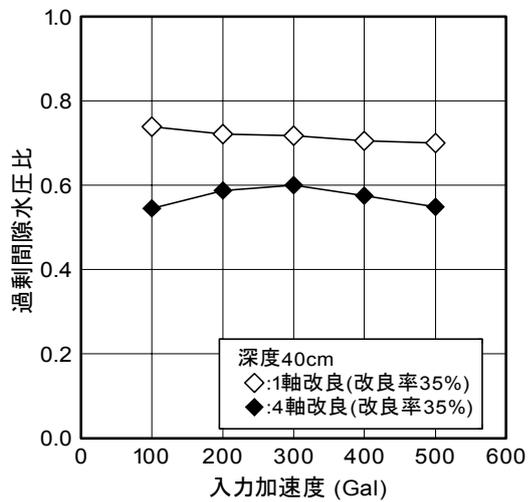


図-7 過剰間隙水圧比と入力加速度の関係 (1軸改良(CASE2)と4軸改良(CASE4)の比較)

た。図-8に1軸改良の改良率25%での実験モデルの概要を示す。模型地盤は、厚さ200mmの非液化化層、厚さ400mmの液化化層の2層構造とした。下部層は非液化化層とするため、相対密度が70%となるよう乾燥状態の豊浦砂を空中落下させた後、突固めて作成した。上部層の液化化層は、含水比5%の湿潤状態の豊浦砂を用いてウェットタンピング法で作成した。上部層の初期相対密度は-10%であった。改良体モデルには直径27mm、厚さ1.5mmで長さ800mmのテフロン管を用い、4軸改良ではこれを4本束ね、ナイロン製の結束バンドで上下を固定してモデル化した。テフロン管の上端および下端には、それぞれ厚さ5mmのプラスチックボードを配し、テフロン管を相互に固定した。なお、テフロン管の直径をプロトタイプに換算した場合、改良体の杭径は約500mmと



写真-2 固定土槽

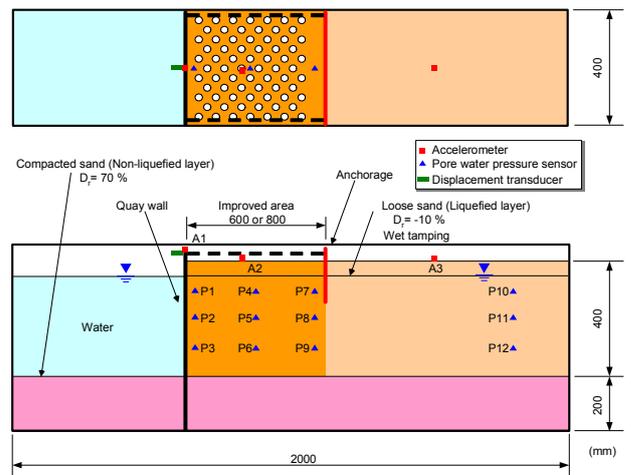


図-8 実験モデル

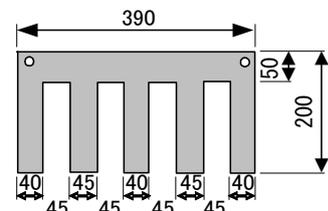


図-9 アンカーモデル

なる。写真-3および写真-4に、1軸改良と4軸改良の改良体モデルの配置状況を示す。矢板護岸模型には厚さ26mm、高さ510mmのアルミ板を用い、この上端と図-9に示すプラスチックボード製のアンカーを直径5mmの鉄製ロッドで結合した。なお、矢板護岸模型の下端は土槽底部の溝にはめ込んでいるだけで固定していない。実験模型には、地盤中に加速度計および間隙水圧計を、固定土槽に加速度計を、矢板護岸模型には加速度計と上部の水平変位を計るレーザー変位計をそれぞれ設置して計測を行った(図-8)。また、土槽側壁面には、黒く染めた豊浦砂を線状にマーカースとして配置し、実験中にビデオカメラで撮影することにより地盤内の変位分布を観察



写真-3 改良体模型の配置状況（1軸改良）

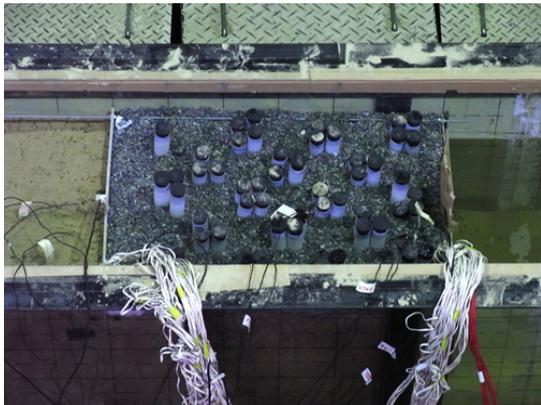


写真-4 改良体模型の配置状況（4軸改良）

表-2 実験ケース（固定土槽）

項目	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8
改良形式	無改良	一軸改良	一軸改良	4軸改良
改良率(%)	0	25	25	25
改良範囲(mm)		600	800	600
入力加速度(Gal)		200Gal, 500Gal		

した。実験ケースは、表-2に示すように改良形式，改良率および改良範囲をパラメータとして設定した。実験に用いた入力波は，固定土槽の実験で用いたものと同じ10 Hzの正弦波であり，最大加速度は200Galおよび500Galの2ケースとした。

(2) 固定土槽を用いた実験の結果および考察

a) 模型地盤の変位

写真-5～写真-7は，無改良（CASE5），1軸改良（CASE6）および4軸改良（CASE8）における500Gal加振後の模型地盤の変形状況を示したものである。

無改良（CASE5）では，模型地盤の変形状況は，矢板が前方に大きく転倒し，これに伴って背後地盤の液状化層の水平変位量が大きく生じている。この水平変位は矢板護岸近傍が最も大きく，矢板護岸から離れるに従って漸減しているものの，広範囲に渡って流動的な地盤変位

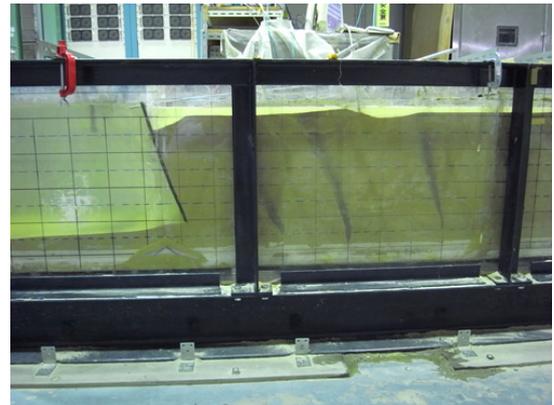


写真-5 模型地盤の変形状況（無改良（CASE5：500Gal加振後））



写真-6 模型地盤の変形状況（1軸改良（CASE6：500Gal加振後））

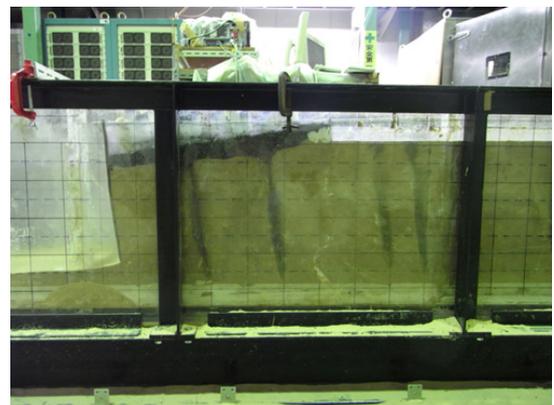


写真-7 模型地盤の変形状況（4軸改良（CASE8：500Gal加振後））

が生じていることがわかる。また，矢板護岸背面において地表面沈下量が大きく生じている。一方，1軸改良（CASE6）では，矢板護岸の転倒の程度が無改良（CASE5）と比較して小さく，矢板護岸背後地盤の水平変位も無改良よりも小さくなっている。このことから，変位低減に対する1軸改良の効果が確認されるものの，矢板護岸背面において地表面沈下量が大きく生じている

のは無改良 (CASE5) と同様な結果である。4 軸改良 (CASE8) の結果をみると、改良範囲内の線状のマーカが直線状に矢板護岸前方に傾斜している。また、改良範囲の地表面も直線的に傾斜し、矢板護岸背面の地表面沈下量が前述した 2 ケースと比較して小さい。さらに、背後地盤の流動的な変形が抑制されていることが認められる。これは、前述した改良体による拘束効果により、矢板護岸とアンカーで囲まれた改良範囲全体の見かけの剛性が高まり、水平土圧の増大に抵抗したことに起因するものとする。

**b) 矢板護岸の変位**

矢板護岸模型上端部の水平変位と入力加速度の関係を 図-10 に示す。図は、200Gal および 500Gal 加振終了後の変位量を示している。

200Gal 加振後の結果について、無改良 (CASE5) では矢板護岸の水平変位が 6.9cm 生じているのに対し、1 軸改良 (CASE6) のそれは 2.0cm、4 軸改良 (CASE8) のそれは 2.8cm となっており、変位低減に対する改良効果が認められ、その効果は 1 軸改良も 4 軸改良も同程度であると判断される。

500Gal 加振後の結果からは、変位低減に対する効果は改良形式や改良範囲によって異なることがわかる。すなわち、1 軸改良 (CASE6) の変位は約 9cm となっており、無改良 (CASE5) の 11cm に近い値となっている。これに対し、4 軸改良 (CASE8) の変位は 5.6cm に抑えられており、同じ改良率でありながら 4 軸改良のほうが 1 軸改良よりも矢板護岸の変位低減に対する改良効果が高いことが明らかである。これは、前述したように、改良範囲全体の見かけの剛性が高いことにより、背後地盤から作用する水平土圧に対する抵抗力が大きいことによるものと推察される。また、改良範囲の広い 1 軸改良 (CASE7) の変位は 2.3cm であり、1 軸改良 (CASE6) の結果との比較から、本改良形式においても改良範囲を広くすることによって矢板護岸の変位を低減することが可能となることわかる。

**c) 過剰間隙水圧比**

図-11 は、加振中における過剰間隙水圧比の最大値と入力加速度の関係を示したものである。図は、図-8中の P6 での結果を示している。

200Gal 加振における過剰間隙水圧比の最大値は 0.2 ~ 0.4 程度であり、500Gal 加振におけるそれは 0.3 ~ 0.8 程度であった。図-10 に示した矢板護岸の変位の結果と本結果を照らし合わせると、過剰間隙水圧比は矢板護岸の変位量に応じて変化することがわかる。すなわち、過剰間隙水圧比は、矢板護岸の変位量が小さい場合に大きな値となり、矢板護岸の変位量が大きい場合に小さな値

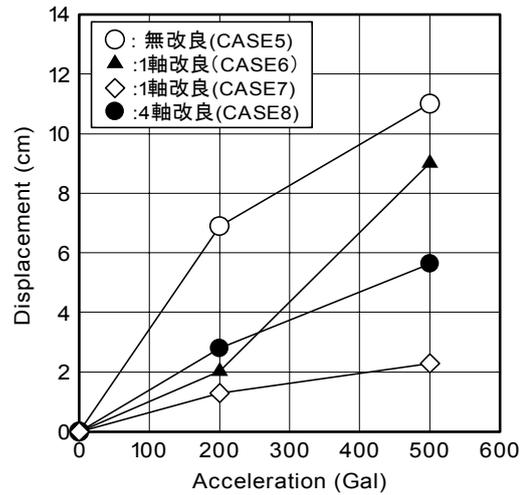


図-10 矢板護岸の水平変位と入力加速度の関係

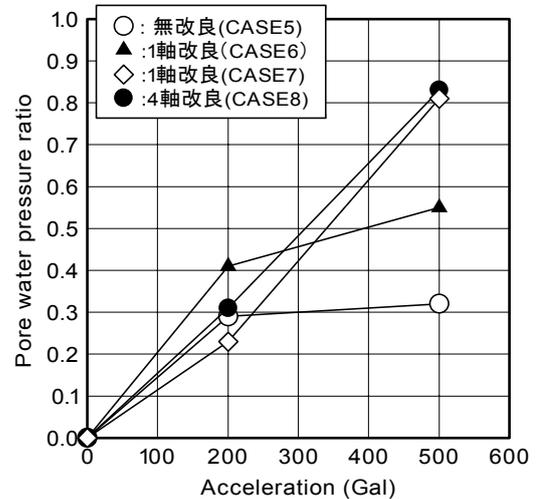


図-11 過剰間隙水圧比の最大値と入力加速度の関係

となる。これは、矢板護岸の変位に伴う側方拘束圧の低下と地盤流動に伴う砂のダイレイタンスーより、間隙水圧の発生量が減少することに起因するものであり、同様の振動台実験<sup>9)</sup>においても報告されているものである。

**4. おわりに**

液状化対策を目的とした深層混合処理工法のうち杭式改良に着目し、1 軸改良と 4 軸改良に対する振動台実験を実施してこれらの液状化対策効果や地盤変位低減効果について検討した。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

**[せん断土槽を用いた実験から得られた知見]**

- ①同一改良率で比較した場合、過剰間隙水圧比低減効果は 4 軸改良のほうが 1 軸改良よりも高い。
- ②改良率 35% を超えて改良率を増やしても、過剰間隙水圧比低減に対する改良効果は顕著に向上しない。

### 〔矢板護岸モデルを対象とした固定土槽を用いた実験から得られた知見〕

- ③同一改良率で1軸改良と4軸改良とを比較した場合、矢板護岸の変位を低減して背後地盤の流動的な変形を抑制する効果は、レベル1地震動に相当する200Gal加振では同程度であるのに対し、レベル2地震動に相当するような500Gal加振では4軸改良のほうが1軸改良よりも高い。
- ④1軸改良に関し、矢板護岸の変位低減効果は改良範囲を広げることにより向上する。

謝辞：本研究は、東京大学との共同研究として実施したものです。ご指導戴いた東京大学東畑教授・山田助教、実験を担当して戴いた Amin Bahmanpour 氏（博士課程）に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法， pp.196-197, 2004.
- 2) 例えば，鈴木義雄，時任和哉，鈴木吉夫，馬場崎亮一：固化工法による耐液状化基礎地盤改良工法の適用事例，基礎工， Vol.17, No.9, pp.87-95, 1989.
- 3) 鈴木吉夫，斉藤聡，木村玄，木林長仁，細見尚史：格子状地盤改良による液状化対策を施した建築基礎の調査報告，基礎工， Vol.23, No.10, pp.54-58, 1995.
- 4) 古賀泰之，谷口栄一，中角功，栗波啓治：深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験，土木学会第41回年次学術講演概要集， III， pp.201-202, 1986.
- 5) 安田進，村澤譲，小西武，田中智宏，内山純一：杭式に配置した改良体の液状化抑制効果，第38回地盤工学研究発表会講演集， pp.1881-1882, 2003.
- 6) 田中智宏，安田進，村澤譲，小西武，内山純一：杭式深層混合処理工法による液状化対策効果，土木学会地震工学論文集， Vol.27, No.210, 2003.
- 7) 山本陽一，高橋直樹，黒川幸彦：杭式深層混合処理工法の液状化対策効果に関する解析検討，三井住友建設技術研究所報告， No.4, pp.45-53, 2006.
- 8) CDM 研究会： CDM-Land4 工法技術マニュアル， 2002.
- 9) 水谷崇亮，東畑郁生，穴井啓二，中村滋：鋼矢板式護岸の背後地盤液状化に関する模型実験，第10回地震工学シンポジウム論文集， pp.1377-1382， 1998.