

杭の圧入による浅層地盤の液状化対策に関する振動台模型実験

伊藤 らな¹・ミレブ ニコライ²・清田 隆³・志賀 正崇⁴・片桐 俊彦⁵・沼田 淳紀⁶・村田 拓海⁷

¹ 東京大学大学院 社会基盤学専攻 修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: itora29@iis.u-tokyo.ac.jp

² Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy Chief Assistant Professor
E-mail: n.milev@yoda-bg.com

³ 正会員 東京大学 生産技術研究所 准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴ 正会員 東京大学 生産技術研究所 助教 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: shiga815@iis.u-tokyo.ac.jp

⁵ 正会員 東京大学 生産技術研究所 技術専門員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: toshi@iis.u-tokyo.ac.jp

⁶ 正会員 飛島建設 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)
E-mail: atsunori_numata@tobishima.co.jp

⁷ 正会員 飛島建設 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)
E-mail: takumi_murata@tobishima.co.jp

本稿では、緩い砂地盤に丸太杭を静的に圧入し地盤を密実化することにより、液状化対策とカーボンストックを同時に行うことができる工法の浅層改良工法への適用を検討した。実験は、中型せん断土槽を用いた1G場振動台模型実験を実施し、丸太杭については相似則を考慮してPVCを適用した。本研究では、多数の杭の圧入による改良範囲を変化させ、主に入力加速度と住宅模型のめり込み沈下量・傾斜角に着目し、改良効果を評価した。その結果、改良範囲を住宅模型より大きくすることにより、液状化に起因するめり込み沈下量と傾斜角が大幅に低減することを確認した。

Key Words: *countermeasure, liquefaction, log pile, shaking table test, soil improvement*

1. はじめに

地球温暖化の主要因であると言われている二酸化炭素を長期かつ安定的に貯蔵できる手法の一つとして、木材の有効活用によるカーボンストックが提案されている。このカーボンストックの一環として地下水位以深で生物劣化が発生しにくい特性を利用した木材の軟弱地盤対策が検討されている¹⁾。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震で東京湾岸の広い地域で液状化が発生し、戸建住宅などの小規模建築物に多くの被害が発生した。一般的な戸建住宅では液状化対策は行われてこなかったため、施工が容易でコストが低い液状化対策技術の検討が急務である。戸建住宅を対象

とした液状化対策として、中でも、厚い液状化層を有する地盤では、全層改良ではなく上層部に限定して改良を行う浅層盤状改良工法がこれまで検討されてきた²⁾。例として谷ら³⁾は、宅地地盤向けの複数の浅層盤状工法について、液状化被害を軽減し得る必要改良深度や経済性に関する議論を行った。

上記のカーボンストックと液状化対策を同時に行う方法として、丸太を静的に圧入して地盤の密実化を測る液状化対策工法が近年開発されてきた³⁾。この工法では、従来利用価値がそれほど高くない間伐材を地盤中に静的に圧入し丸太間の密度を上昇させることで、過剰間隙水圧の発生と変位の発生を抑えることを目標としている。

丸太を用いた液状化対策に関する既往研究として、例えば Riaz et al.⁴⁾は、丸太を圧入する工法を適用する場合、丸太同士を中心距離を直径の4倍と5倍の距離で設置して1G場振動台実験を行い、密度増大によるものと同等以上に液状化対策効果があることを示している。芹川ら⁵⁾は、既設構造物の液状化対策として丸太を構造物周辺に圧入することにより、格子壁を設置する場合と同等の沈下抑制効果があることや、丸太の頭部を固定することで効果がさらに向上することを示している。吉田ら⁶⁾は、構造物の周囲に丸太を圧入することで、構造物直下の過剰間隙水圧の立ち上がり・繰返しせん断に伴うせん断剛性の低下が抑制され、構造物の沈下を低減することや、数値解析により丸太頭部と基礎を交互に拘束することで効果がさらに向上する可能性があることを示している。

しかし、過去の丸太を用いた振動台実験の多くは、液状化対象地盤全層を改良対象としている。そのため本研究では、厚い液状化層上の戸建住宅に対しては現実的な選択肢である浅層改良を対象とし、丸太圧入による液状化対策工法の効果を確認することを目的として、一連の1G場振動台模型実験を実施した。

2. 中型せん断土槽による液状化実験

(1) 実験概要

模型地盤は珪砂7号 ($\rho_s = 2.656\text{g/cm}^3$, $D_{50} = 0.150\text{mm}$, $e_{\min} = 1.206$, $e_{\max} = 0.715$)を用いた。用いたせん断土槽の寸法は、内寸横100cm、奥行き40cm、高さ70cmである。

模型の縮尺は1/20とした。本実験では杭の曲げ剛性に関するIaiが提案した相似則⁷⁾を考慮し、模型杭の材質として木材ではなくPVCを使用した。杭の長さは30cm、直径は1cmである。住宅模型の寸法は横29.9cm×奥行き23.4cm×高さ18.4cmで底面の応力は0.75kPaである。これは実地盤で一般的な戸建て木造住宅の底面応力15kPaに相当する。

模型地盤の相対密度 D_r は50%を目標とし、60cmの高さまで乾燥突き固めにより緩詰め地盤を作製した。次に模型地盤下方から水を徐々に浸透させ、地盤を飽和させた後、地表面から杭を静的に圧入した。中型せん断土槽実験での杭間の距離は、実際の施工でも実績のある4D(隣り合う杭の中心距離が直径の4倍)とした。なお杭が住宅模型を直接支持することを防ぐため、杭の頭に2mm程度土を被せている。その後、住宅模型を土槽中心に設置した。

図-1、図-2、図-3に、それぞれTest 1, Test 2, Test 3の側面図と平面図を示す。以下、改良深さをSD、液状化層深さをLD、改良幅をSW、構造物の幅をBWと表記する。Test 1は無対策、Test 2は建物直下、Test 3は建物直下と周辺に杭を圧入した。改良深さについて、Test 2

とTest 3ともSD/LD=0.5である。改良幅について、Test 2はSW/BW=1.00、Test 3はSW/BW=1.24とした、さらにTest 3は手前と奥に2列ずつ杭を増やして奥行方向の改良幅をTest 2の約1.5倍とした。使用したセンサーは、レーザー変位計(LS1~LS3)、アナログ変位計(DT1~DT4)、加速度計(A1~A9)、間隙水圧計(PW1~PW6)である。図-4に加振中の模型地盤の様子を示した。

図-5に加振に用いた入力波形の一例を示す。過去に行われた木杭の実験⁴⁾に合わせて、主要部では5Hzで20波を作用させた。加振は、振幅を約50galずつ増やすステップ加振とし、約80galから約600galまで実施した。

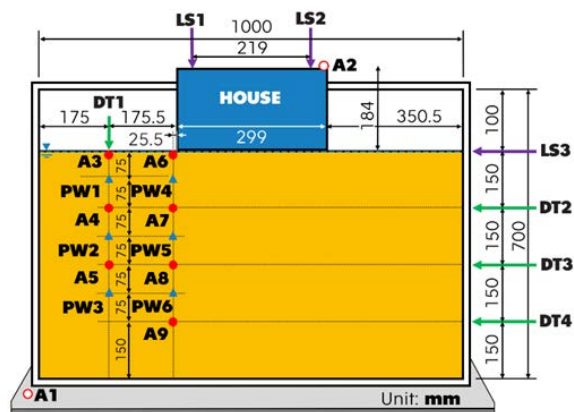


図-1 Test 1 (無対策)

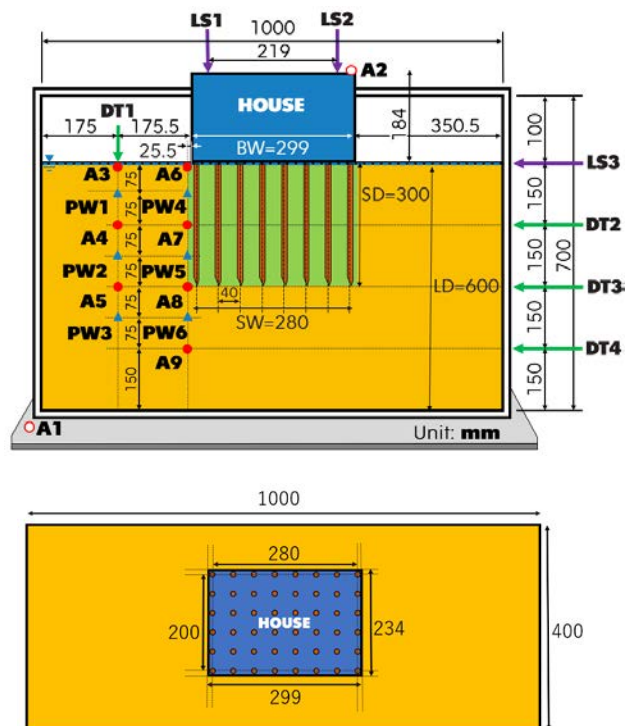


図-2 Test 2 (SD/LD=0.50, BW/SW=1.00)

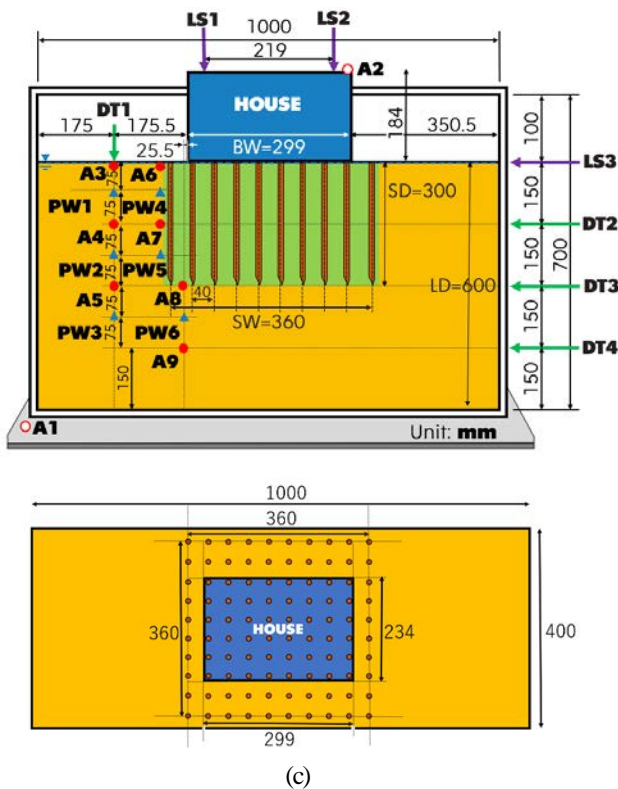


図-3 Test 3 (SD/LD=0.50, BW/SW=1.24)

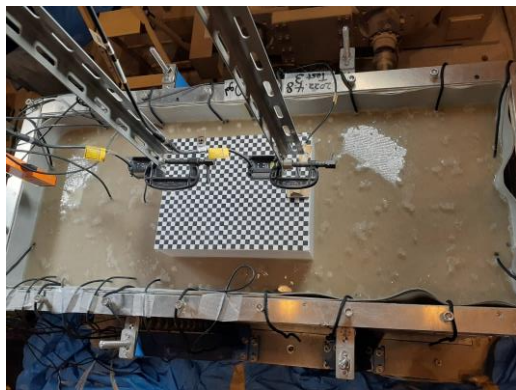


図-4 加振中の模型地盤

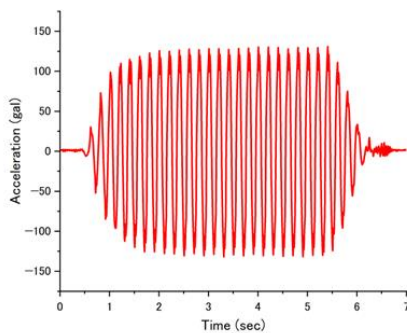


図-5 入力波形 (130gal)

(2) 実験結果と考察

代表的な試験結果として、図-6 から図-8 に Test 2 の Stage 3 (130gal) の結果、図-9 に所定の位置に設置された加速度計の各ステップにおける計測値を示す。図-6 では同一深度における改良部付近と改良部から離れた箇所での過剰間隙水圧の時刻歴を比較している。深さ 225mm 地点と 375mm 地点における模型地盤での有効上載圧は、それぞれ 1.89kPa と 3.15kPa となり、過剰間隙水圧比で見た場合このステージではより深い 375mm 地点の方が液状化は進行している。一方で間隙水圧計の設置位置で比較すると、225mm 地点、375mm 地点ともに、改良部から近いセンサーと遠いセンサー (PW2 と PW5, PW3 と PW6) は過剰間隙水圧の値はほぼ同じ値を示した。しかし、改良部に近いセンサー (PW5, PW6) ではサイクリックモビリティに起因するスパイク形状が見て取れる。各センサーの間隙水圧の絶対値は初期設置位置や Stage 3 以前の沈下量によって変化しうるため、間隙水圧の時刻歴波形の形状などと合わせた解釈を行う必要がある。このような観点に立つと、Test 2 の Stage 3 の段階では杭圧入による過剰間隙水圧抑制効果は発現しなかったと言える。

図-7 にレーザー変位計によって記録された Stage 3 の住宅模型沈下量の時刻歴データを示す。加振直後から沈下を開始し、過剰間隙水圧の上昇が鈍くなった 2 秒前後から次第に沈下量の振幅が増大し、振動が終了すると 5 mm 程度で沈下は収束した。また LS1 と LS2 の結果を比較すると、加振後 4 秒付近から差が大きくなり、せん断土槽長手方向の傾斜がより大きくなっている点が見て取れる。

図-8 は Stage 3 における応答加速度の時刻歴を示している。このステージにおける入力加速度は 130gal である。住宅模型上に設置されている加速度計 A2 と自由表面上に設置されている加速度計 A6 はいずれも入力加速度よりも大きい加速度振幅を示している。一方で地中に存在する加速度計 (A7~A9) については加速度振幅の違いは見られない。

図-9 は Test 2 における各ステージで観測された住宅模型と地盤の最大加速度を示したものである。Stage 1 (47 gal) から Stage 3 (130 gal) では入力加速度 A1 に対して地盤中の A6 や A7 において大きな加速度が観測されている。一方、Stage 4 (170 gal) 以降は A2 は頭打ちとなり、Stage 6 (220 gal) 以降では地盤内の加速度計の値も 275gal 程度で頭打ちとなっている。この点からも、Test 2 では Stage 3 付近で液状化が発生していることが分かる。

図-10 と図-11 は、各ステージ終了後にレーザー変位計を用いて計測された住宅模型の総沈下量と傾斜角である。入力加速度の増加と共に沈下量は大きくなり、Test 2 では 400gal に達すると沈下量の増分はやや小さくなる。同様に、住宅模型の傾斜角も入力加速度の増加と共に大き

くなる傾向にある。200gal-300gal にかけては傾斜角の増分は落ち着くが、Test 2 では 300gal を超えると再度大きく傾く傾向が確認された。また、Test 3はTest 2に比べて加振方向に約 1.3 倍、奥行方向に約 1.8 倍改良範囲を広げたことにより、180 gal の入力加速度に対して Test 2 と比べてめり込み沈下量は実地盤換算で 14.9cm 軽減され、傾斜角は約 12% となった。このことから、改良範囲が液状化改良効果を大きくすることで液状化対策効果が大きくなったことを確認した。

図-10 と図-11 より、建物直下のみ杭を圧入した Test 2 (SD/LD=0.50, BW/SW=1.00) は、未改良の Test 1 と比較すると 180gal の入力加速度に対して構造物のめり込み沈下量は実地盤換算で 11.7cm 軽減され、傾斜角は約 30% となった。改良範囲を広げた Test 3 (SD/LD=0.50, BW/SW=1.24) は、未改良の Test 1 と比べてめり込み沈下量は実地盤換算で 26.6 cm 軽減され、傾斜角は 3.7% となった。

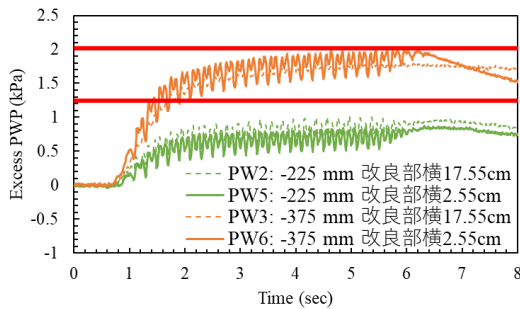


図-6 間隙水圧の時刻歴 (Test 2, Stage 3)

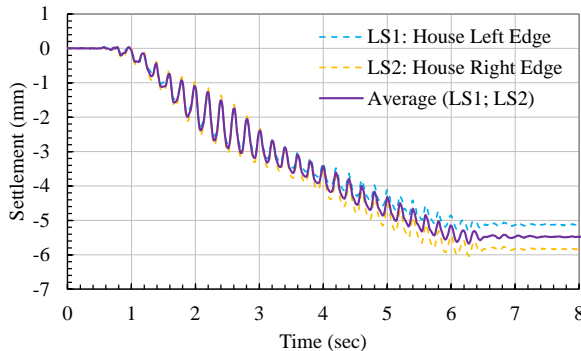


図-7 構造物の沈下の時刻歴 (Test 2, Stage 3)

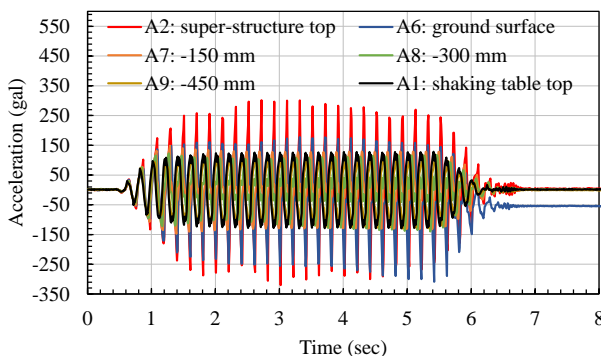


図-8 応答加速度の時刻歴 (Test 2, Stage 3)

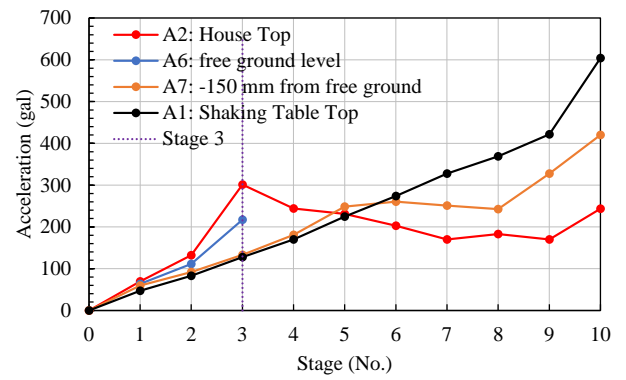


図-9 加速度の値 (Test 2)

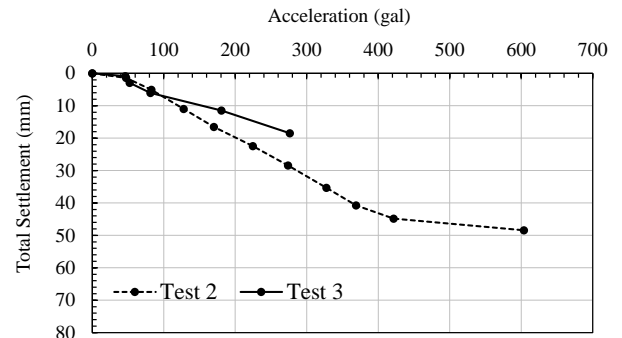


図-10 入力加速度と累積総沈下量 (Test 2, Test 3)

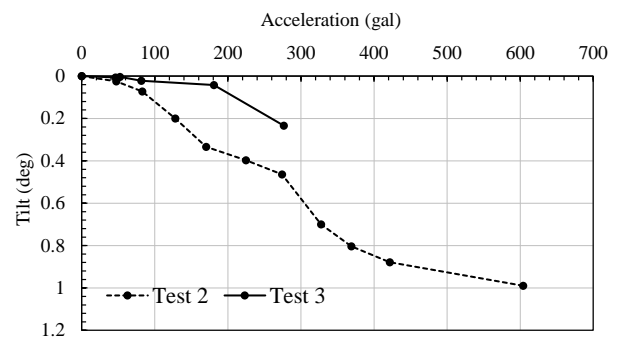


図-11 加速度と構造物の傾斜角 (Test 2, Test 3)

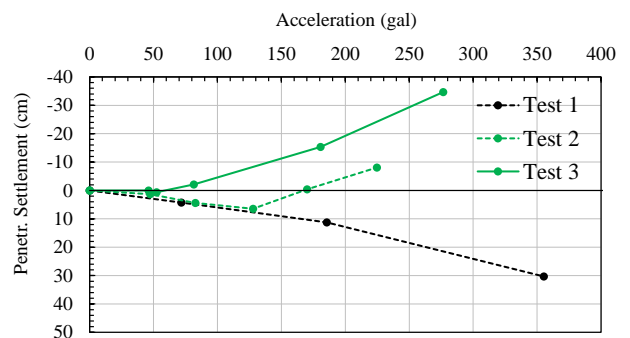


図-12 加速度とめり込み沈下量

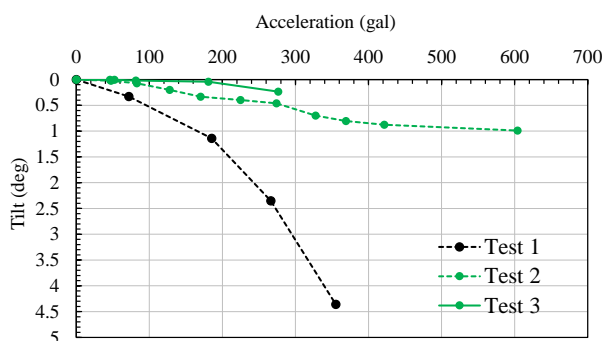


図-13 加速度と構造物の傾斜角

3. 結論

本研究では、丸太圧入による液状化対策工法の浅層盤状改良への適用を検討するため、中型せん断土槽を用いた1G場の振動台模型実験を実施した。

未改良のケースと比較すると、180 gal の入力加速度に対して改良深度 $SD/LD=0.50$, $BW/SW=1.00$ の場合構造物のめり込み沈下量は実地盤換算で 11.7 cm 軽減され、傾斜角は約 30% となることを確認した。また、 $BW/SW=1.24$ の場合構造物のめり込み沈下量は実地盤換算で 26.6 cm 軽減され、傾斜角は 3.7% となることを確認した。

REFERENCES

- 1) 富松義晴, 沼田淳紀, 濱田政則, 三輪滋, 本山寛: 持続可能社会へ向けた土木事業における木材利用の提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.68, No.2, pp.80-91, 2021
- 2) Ishihara, K: Stability of natural deposits during earthquakes, Proc. of 11th ICSMFE, Vol.1, pp.321-376, 1985
- 3) 谷和夫, 松下克也, 橋本隆雄, 山本彰, 竹内秀克, 野田利弘, 規矩大義, 大林淳, 清田隆: 浅層盤状改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, 533-553.
- 4) 沼田淳紀, 村田拓海, Saima RIAZ, 三村佳織, 原忠: 大型振動実験による丸太打設の液状化対策効果, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No.4 (地震工学論文集第 34 巻), I_274-I_283, 2015
- 5) 芹川由布子, 吉田雅穂, 宮島昌克: 既設戸建住宅を対象とした丸太を用いた液状化対策工法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第 35 巻), I_489-I_495, 2016
- 6) 三輪滋, 吉田雅穂, 村田拓海, 沼田淳紀: 丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の小型振動実験および数値解析による検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第 35 巻), I_117-I_128, 2016
- 7) S. IAI: Similitude for Shaking Table Tests On Soil-Structure-Fluid Model In 1g Gravitational Field, SOILS Found., vol. 29, no. 1, pp. 105-118, 1989.

SHAKING TABLE MODEL TEST ON SHALLOW GROUND LIQUEFACTION MITIGATION BY PRESS-IN PILES

Rana ITO, MILEV Nikolay, Takashi KIYOTA, Masataka SHIGA, Toshihiko KATAGIRI, Atsunori NUMATA, Takumi MURATA

This paper reports the results of a 1G-shaking table experiment using a medium-size laminar soil box to investigate the application of a method of compaction by static press-in of log piles into loose sandy soil, which can simultaneously provide liquefaction countermeasures and carbon stock. In this study, the improvement effect was evaluated by changing the improvement area, focusing mainly on the input acceleration and the settlement and tilt angles of the house model. The results confirm that the liquefaction-induced settlement and tilt angles are effectively reduced when the improvement area is larger than that of the house model.