

表層固化処理した地盤の 動的特性に関する実験的考察

EXPERIMENTAL CONSIDERATION ABOUT THE DYNAMIC CHARACTERISTIC OF PARTIALLY SOLIDIFIED GROUND

小林正和¹・善 功企²・陳 光斉³・笠間清伸⁴

Masakazu KOBAYASHI, Kouki ZEN, Guangqi CHEN, Kiyonobu KASAMA

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²フェロー 博(工) 九州大学教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 理博 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(工) 九州大学助教 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

In order to evaluate the dimension of the ground improvement as a liquefaction countermeasure, two series of shaking table tests have been conducted for improved model grounds with various improvement dimensions. First series of shaking table tests was to investigate effects of the thickness of ground improvement on the pure water pressure buildup, ground response acceleration and earthquake-induced settlement. Second series were to investigate seismic behaviors of interface ground between improved ground and unimproved ground. The acceleration of shaking table was applied by step loading; 100, 200, 300 and 400gal with the sinusoidal wave form of 3Hz. The main conclusions obtained from this study are as follows; 1) It is important to improve the surface layer of ground for reducing ground liquefaction and earthquake-induced settlement. 2) There is the accumulation of pore water pressure in unimproved ground below the improved ground. 3) The subsidence of improved ground is induced by the earthquake-induced settlement of unimproved ground.

Key Words : *Liquefaction, Ground improvement, Shaking table test, pore water pressure, settlement*

1. はじめに

大地震が頻発する我が国では、地盤の液状化現象による港湾、空港、道路などの土木構造物の被害が多数報告されており、液状化対策の重要性がますます高まっている。液状化対策工法には各種の固化処理工法があるが、近年では従来工法に加え、薬液注入による浸透固化処理工法¹⁾が開発されている。浸透固化処理工法は、既存構造物の直下の地盤に、浸透性の高い恒久型の薬液を注入し、間隙水を所要の強度を有するゼリー状の物質に置換することで、地震時の過剰間隙水圧の発生を抑えて液状化を防止する工法である。浸透固化処理土のせん断強度に影響する指標として、薬液の種類や量²⁾、拘束圧、養生条件、混合の程度や浸透特性³⁾が調査され、要素レベルでの強度特性はほぼ明らかになりつつある。また、最近では、薬液の浸透特性に起因した原位置強度のばらつきを評価するための大型土槽実験⁴⁾や、多層固化処理による減震効果および沈下低減効果に着目した振動台実験⁵⁾、ならびに固化処理で液状化

対策された港湾施設の改良効果を検証するための遠心模型実験⁶⁾および現場実証試験⁷⁾などが実施されている。

しかしながら、液状化対策に関する従来の設計法では、液状化すると判断された地盤の全層を改良することが一般的であり、液状化層厚が局所的に変化する場合でも改良層厚を柔軟に変化させることは通常行われない。また、本工法に用いられる薬液は高価であるため事業費がかかる上に、液状化層厚が局所的に変化する場合には不同沈下を生じる可能性があるという課題が残されている。そのため、液状化地盤を全層改良する代わりに、一定層厚の未改良層を残した部分改良により薬液のコストを削減するだけでなく、改良層厚をコントロールし不同沈下を低減する効果的な液状化対策法の開発が急務となっている。そこで本論文では、地盤表層からの改良層厚を変化させて地盤改良した実験(以降、実験Type-Aとよぶ)と、そのさいの地盤改良域と未改良地盤の



境界付近の動的特性を解明する実験(以降、実験 Type-Bとよぶ)の2つに関して、模型地盤を用いた振動台実験を行い、地震時の間隙水圧挙動、地震時応答特性および地震時沈下特性を評価した。

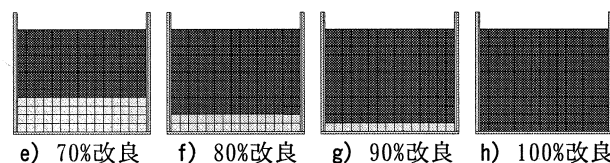
図-1に、本実験で使用した模型土槽の断面図を示す。実験Type-Aは、表層からの改良深度を変化させた実験であり、実験Type-Bは地盤改良域と周辺地盤の境界付近に着目した実験である。模型地盤の縮尺は24m層厚の実地盤の1/40とし、600mm(高さ)×750mm(幅)とした。また模型地盤内は、12行×15列のメッシュに分割し、各地盤要素を50mm(高さ)×50mm(幅)×300mm(奥行)とした。地盤を液状化する要素(未改良土)と液状化しない要素(改良土)の2つにモデル化し、未改良域および改良域を作製した。未改良域は5号珪砂(最大乾燥密度1.511g/cm³、最小乾燥密度1.225g/cm³)を使用し、水中落注法により相対密度30%に調整した。改良域は、アルミ製の箱に薬液(エコシリカⅠ)を入れた後、その薬液が入った水中に5号珪砂を落下させて蓋で密封した剛体模型を配列させて作製した。剛体模型を用いたのは、改良部の剛性・強度が未改良土に比べて非常に

a) 実験Type-A

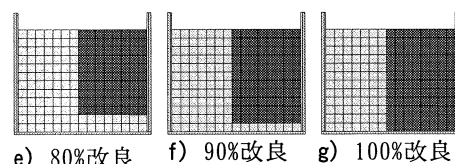
改良域	剛体模型(5号硅砂+エコシリカ)
未改良域	5号硅砂
改良率 %	0, 25, 50, 60, 70, 80, 90, 100
入力加速度 Gal	100, 200, 300, 400
入力波	3Hzの正弦波
相対密度 %	30

b) 実験Type-B

改良域	剛体模型(5号硅砂+エコシリカ)
未改良域	5号硅砂
改良率 %	25, 50, 60, 70, 80, 90, 100
入力加速度 Gal	100, 200, 300, 400
入力波	3Hzの正弦波
相対密度 %	30



a) 実験Type-A



b) 実験Type-B

图-2 改良形状

大きく、変形しないと仮定したためである。なお、剛体模型の全面は不透過であり、水圧が伝播したり蓄積することはない。また、用いた薬液は、恒久性の水ガラス(エコシリカ I)であり、薬液濃度は6%、養生日数は7日とし、初期pHを3(pHは時間とともに中性化)とした。なお、比重は未改良土とほぼ等しい。

表-1に実験条件を、図-2に改良形状をそれぞれ示す。ここで、表-1の改良率とは、改良域の改良層厚を全深度(600mm)で正規化したものである。土槽の

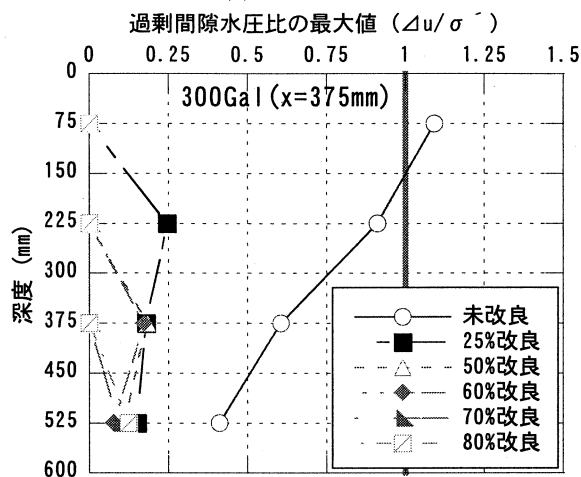


図-3 最大過剰間隙水圧比の深度分布

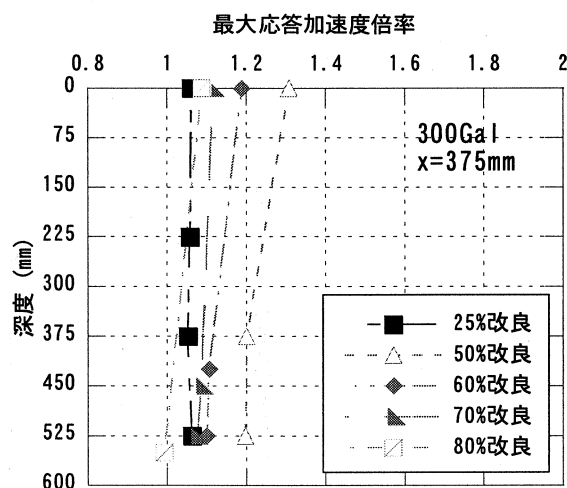


図-4 最大応答加速度倍率の深度分布

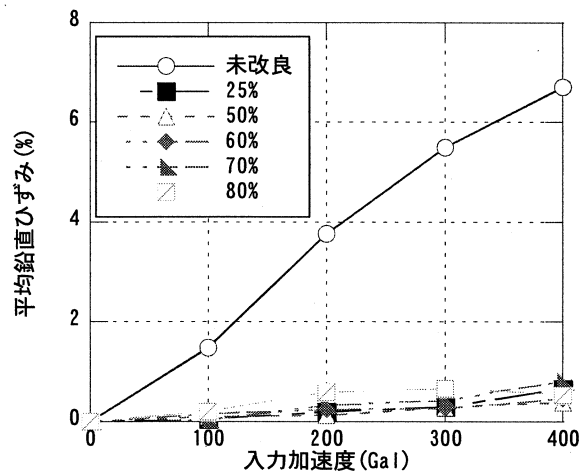


図-5 入力加速度と平均鉛直ひずみの関係

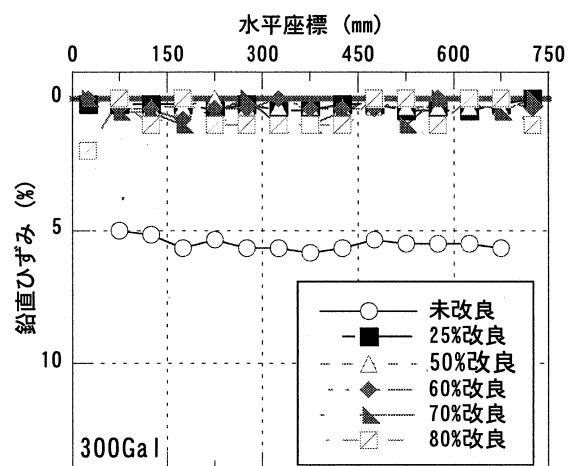


図-6 鉛直ひずみの水平分布

両端にクッションを設置し、波動の鉛直壁からの反射を低減した。振動台の加振は、重力場において 3Hz の正弦波を 10 波ずつ 100Gal～400Gal まで 100Gal 単位で増加させるステップ载荷で行った。模型土槽には加速度計と間隙水圧計を図-1 のように設置し、地表面の各要素では地盤の沈下量を測定した。なお、水平方向および鉛直方向に、それぞれ x 座標および z 座標をとる。

3. 実験 Type-A

(1) 間隙水圧特性

図-3 に、 $x=375\text{mm}$ における 300Gal 加振時の最大過剰間隙水圧比の深度分布図を示す。改良部は剛体模型を用いており間隙水圧は上昇しないので、便宜上 0 とした。図-3 より、未改良地盤の最大過剰間隙水圧比は深層ほど小さく、表層ほど大きい分布形状になった。深度 $z=0\sim300\text{mm}$ で最大過剰間隙水圧比が

1.0 に近づき、液状化を生じた。一方、25%～80% 改良は未改良地盤の分布形状と同様であるが、最大過剰間隙水圧比は大きく低減し、25% 改良でも最大で 0.25 程度であった。したがって、液状化層の表層から 25% 改良するだけでも、地盤中に発生する過剰間隙水圧を大きく低減できると考えられる。通常の未処理砂地盤においては、地盤の浅部ほど拘束圧が小さいため表層部ほど液状化を起こしやすく、徐々に表層部の液状化層から間隙水圧が伝播することで、深部へと液状化が進展していくが、本実験のように表層部を固化処理すると水圧の伝播が生じず、液状化の深部への拡大を防止できたものと考えられる。

(2) 加速度応答特性

図-4 に、 $x=375\text{mm}$ における 300Gal 加振時の最大応答加速度倍率の深度分布図を示す。ここで、応答加速度倍率は、各ケースにおける応答加速度を振動台の入力加速度で除して正規化して求めた。なお、未改良地盤は 200Gal 加振時にすでに液状化を生じ、

加速度計が水平を保てなくなり、300Gal 加振時以降正確な値を計測できなかったためにここには示していない。図-4 より、最大応答加速度倍率は、いずれの改良率においても増加せず、改良率による値および分布形状の差異はみられなかった。25%改良の結果が最も小さく、地表面($z=0$ mm)でも 1.1 程度であった。50%以上の改良率では改良率が大きくなるほど最大応答加速度倍率は小さくなった。

(3) 地震時沈下特性

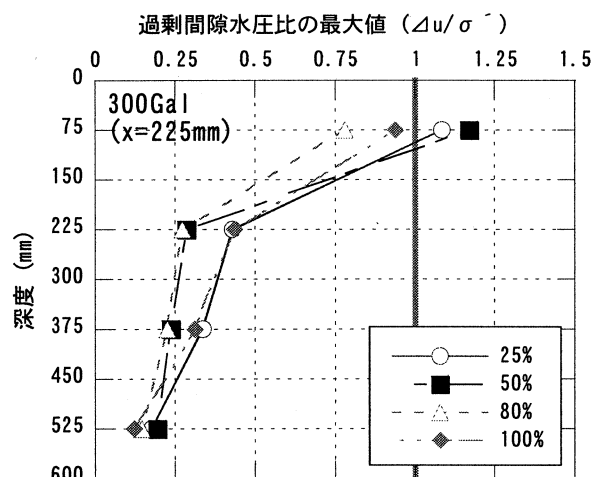
図-5に、入力加速度と平均鉛直ひずみの関係を示す。ここで、鉛直ひずみは、各ケースにおける地表面沈下量を各水平位置における地盤の未改良層厚で除し、100を乗じて算出した。図-5より、いずれのケースにおいても入力加速度の増加にともない、平均鉛直ひずみは増加した。未改良地盤は他のケースに比べ特に大きく増加し、400Gal加振後には7.5%程度であった。25%~80%改良では、未改良地盤に比べ鉛直ひずみは大きく抑制され、25%改良でも400Gal加振後には0.7%程度であった。

図-6に、300Gal加振後の各ケースの鉛直ひずみの水平分布図を示す。図-6より、未改良地盤の鉛直ひずみが最大であり、平均して6%程度であった。その他のケースでは、改良率によらず、未改良地盤に比べ、鉛直ひずみは大きく抑制され、平均して0%~2%程度であった。また、いずれのケースにおいても一定層厚の未改良層を残しているため、不同沈下は生じなかった。

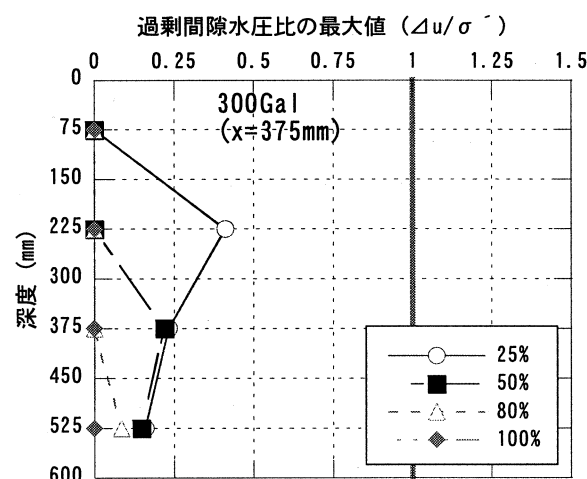
4. 実験 Type-B

(1) 間隙水圧特性

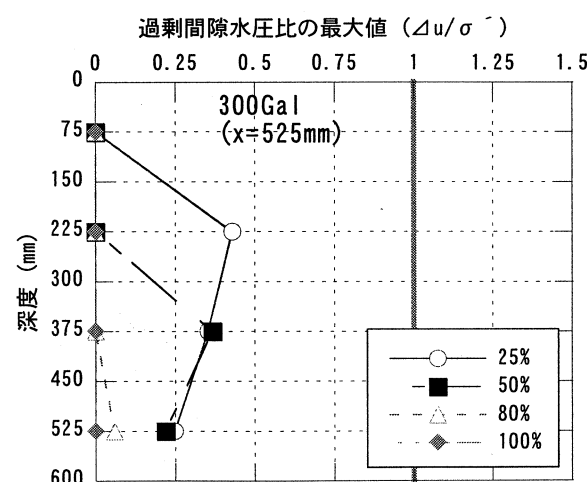
図-7 に、 $x=225$ mm(側方の未改良域)、 $x=375$ mm(未改良域と改良域の境界)および $x=225$ mm(改良域直下)における 300Gal 加振時の最大過剰間隙水圧比の深度分布図を示す。図-7a)より、側方の未改良域($x=225$ mm)における過剰間隙水圧比は、改良率によらず同程度であり、深層ほど小さく表層ほど大きい分布形状になった。深度 $z=0\sim150$ mm で最大過剰間隙水圧比が 1.0 に近づき、液状化を生じた。しかしながら、図-7b), c)より、25%~100%改良では、分布形状は同様であるが最大過剰間隙水圧比は大きく低減され 0.4 以下であった。特に、25%および 50%改良の改良域直下では、未改良域と改良域の境界($x=375$ mm)よりも、改良域直下($x=525$ mm)における間隙水圧が大きくなった。これは、加振による繰返しせん断により発生した間隙水圧が、未改良域と改良域の境界では未改良域へ向けて抜けやすいのに比べ、改良域直下では未改良域から比較的是なれているために抜けにくく、間隙水圧が蓄積することで値が大きくなったものと考えられる。また、80%改良は改良域における未改良土の層厚が非常に小さいために間隙水圧はほぼ上昇せず 0.1 程度であり、100%改良は改良域における未改良土が存在しないために間隙



a) $x=225$ mm

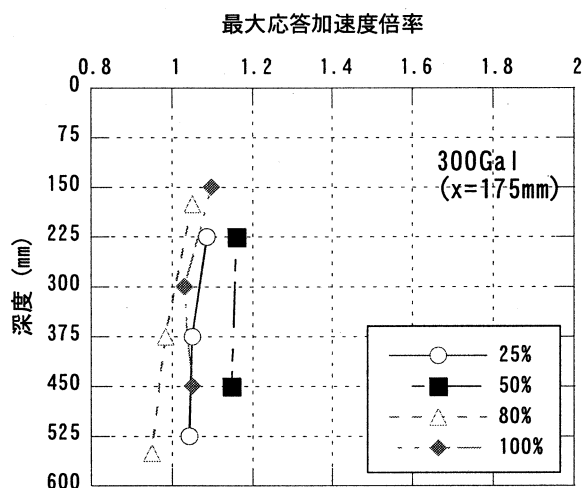


b) $x=375$ mm

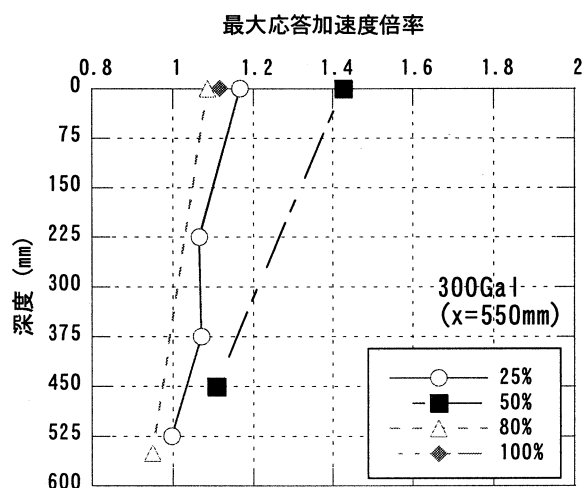


c) $x=525$ mm

図-7 最大過剰間隙水圧比の深度分布



a) $x=175\text{mm}$



b) $x=550\text{mm}$

図-8 最大応答加速度倍率の深度分布

水圧は全く上昇しなかった。

(2) 加速度応答特性

図-8 に、 $x=175\text{mm}$ (未改良域中央)および $x=550\text{mm}$ (改良域中央)における 300Gal 加振時の最大応答加速度倍率の深度分布図を示す。なお、図-8a)において、 $x=175\text{mm}$ (未改良域中央)では表層の液状化の影響により地表面($z=0\text{mm}$)に設置した加速度計が傾斜したため値を示していない。図-8より、いずれの改良率においても応答加速度倍率は比較的小さな値を示し、最大でも $x=175\text{mm}$ で1.15程度、 $x=550\text{mm}$ で1.4程度であった。また、改良率による分布形状の差異はほぼなく、分布は全ての改良率において、深層ほど小さく、表層ほど大きい形状になった。深層は振動台とほぼ一体となって動くことで値が小さく、表層は液状化による影響を直接的に受け値が大きくなったものと考えられる。

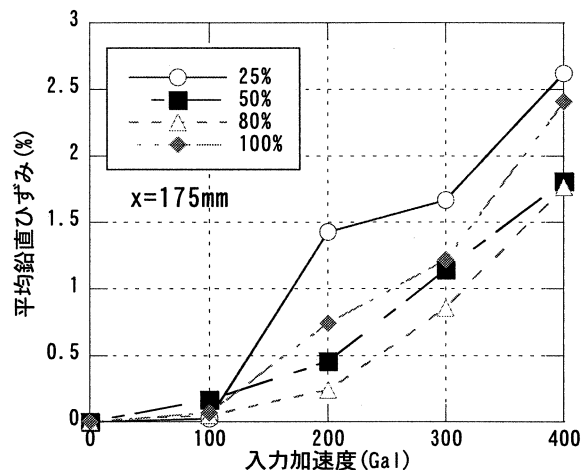


図-9 入力加速度と平均鉛直ひずみの関係

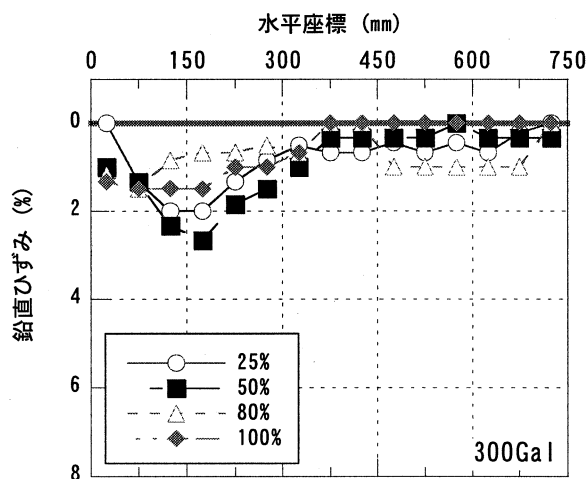


図-10 鉛直ひずみの水平分布

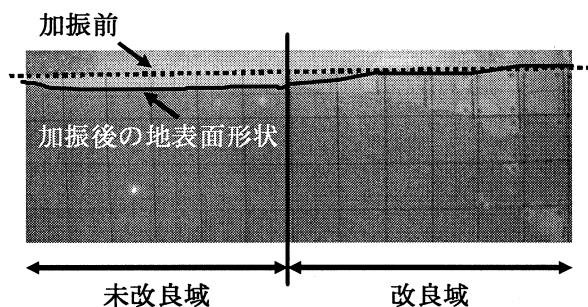


写真-1 実際の沈下の様子(400Gal 加振後)

(3) 地震時沈下特性

図-9に、入力加速度と側方の未改良域($x=175\text{mm}$)における平均鉛直ひずみの関係を示す。図-9より、改良率による分布形状の差異は生じず、全てのケースにおいて、入力加速度の増加に伴い、平均鉛直ひずみは増加した。200Gal加振時以降、液状化に起因した鉛直ひずみが増加した。また、同じ入力加速度で比較した場合には100%改良を除き、改良率の増加に伴い、相対的に平均鉛直ひずみは減少した。

図-10 に、300Gal 加振後における鉛直ひずみの水平分布図を示す。図-10 より、改良率により分布形状にほぼ差異はないが、側方の未改良域では改良率によらず約 2%の鉛直ひずみが生じ、改良域直下では 80%改良を除き、改良率の増加に伴い減少した。 $x=0\text{mm}$ において鉛直ひずみが小さな値を示したのは、模型土槽壁面の影響であると考えられる。また、図-10 の分布形状より、実際に固化処理を施した地盤では、未改良域との境界付近で液状化した未改良域に引きずり込まれるような沈下形状になると推測できる。本実験では、平均して 1%未満の鉛直ひずみを生じた。

写真-1 に、実際に本実験により生じた 400Gal 加振後の沈下の様子を示す。写真の左側が未改良域、右側が改良域である。改良地盤として剛体模型を用いているため側方の未改良域との境界付近で不連続な沈下形状になっているが、加振後の剛体模型は未改良域の方へ引きずり込まれるように傾斜した。このように、液状化した未改良域に引きずり込まれて生じる沈下を抑制するために、余改良域を設けることが必要であること判断されるが、適切な余改良域の設け方も効果的な液状化対策を図る上で重要な検討事項であると考えられる。

5. まとめ

本文では、地震時を想定した振動台実験から、間隙水圧発現特性、応答加速度倍率および液状化に起因する鉛直ひずみに着目して、表層改良した模型地盤の動的特性を調べた。地盤表層からの改良層厚を変化させて地盤改良した実験 Type-A、およびそのさいの地盤改良域と未改良地盤の境界付近の動的特性を解明する実験 Type-B により得られた結論を以下にまとめる。

(1) 地盤表層からの改良層厚を変化させた地盤では、25%改良でも、50%~80%改良と同程度の液状化抑制効果を発揮し、最大過剰間隙水圧比は 0.25 程度、最大応答加速度倍率は地表面でも 1.1 程度、平均鉛直ひずみは 0%~2%程度であった。

(2) 改良地盤直下の未改良地盤では、中央付近ほど間隙水圧が蓄積しやすいが、過剰間隙水圧比は最大でも 0.5 未満であり液状化は生じなかった。

(3) 側方の未改良地盤における最大応答加速度倍率は、改良層厚による大きな差異は生じず、最大でも 1.15 程度であった。

(4) 改良地盤は、液状化した側方の未改良域に引きずり込まれるような沈下形状を生じ、平均して 1%未満の鉛直ひずみが生じた。

謝辞：本研究は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所による、固化処理による液状化対策検討業務の成果の一部である。記して、関係者各位には深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 財団法人 沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル，2003。
- 2) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Umeda, K. and Enomoto, T.: Syclic resistance of clean sand improved by silicate-based permeation grouting, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.233-245, 2006。
- 3) 林健太郎，善功企，山崎浩之，林規夫：溶液型薬液注入工法の浸透および強度特性に関する大型土槽実験，土木学会論文集 No.694/III-57, pp.221-228, 2001.12。
- 4) 山崎浩之，善功企，河村健輔：溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用，港湾空港技術研究所報告，第41巻，第2号，pp.119-151, 2002。
- 5) 高橋直樹，岸下崇裕，山本陽一，兵動正幸，三浦房紀，吉本憲正：液状化対策としての多層固化改良に関する振動台実験，土木学会論文集 C Vol.62 No.2, pp.502-518, 2006.6。
- 6) 今村眞一郎，平野孝行，萩原敏行，高橋章浩，竹村次朗：注入固化工法を用いた既設タンクの基礎地盤の液状化対策に関する遠心模型実験，土木学会論文集 No.764/III-67, pp.101-120, 2004。
- 7) Patricia M. Gallagher, Carolyn T. Conlee and Kyle M. Rollins: "Estimation of in-situ strength of cement-treated soils based on a two-phase mixture model," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.133, No.2, pp.186-196, 2007。