

液状化地盤における多層固化改良に関する研究

－振動台実験による改良効果の検証－

Study of the Multiple Solidified Layer on the Liquefiable Ground - Verification of Improved Effects by the Shaking Table Test -

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
三上 博 HIROSHI MIKAMI

板状の固化改良体を液状化対象層内に多層配置することにより、部分的に地盤の軟化や液状化を許容して減震効果を利用するとともに沈下および不同沈下を低減することを期待した地盤改良形式である多層固化改良を提案した。本研究では、種々の改良率に対して多層固化改良の振動台実験を実施して、減震効果と沈下抑制効果の観点から本改良形式による改良効果について検討した。その結果、多層改良は全層改良に比較して減震効果を発揮すること、改良率以上に沈下を抑制する効果があることが明らかになった。

キーワード：液状化，振動台，地盤改良，多層，沈下，薬液注入

In this study, a series of shaking table tests was conducted under various improvement rates to investigate the effect of the multiple solidified layer method. That improvement method involves placing multiple plate-like layers of solidified soil used chemical grouting.

As a result, it was found that the multiple solidified layer was effective for attenuating seismic motions and repression of settlement.

Key Words: Liquefaction, Shaking table, Soil improvement, Multi-layer, Settlement, Chemical grouting

1. はじめに

地震時の地盤の軟化や液状化は様々な被害をもたらすことから、地盤改良による液状化対策の多くは液状化防止を目的としている。その一方で、液状化は強非線形化により地震動を大きく低減する効果があることから、上部構造物に対しては免震層としての機能を果たして構造物や人的被害を軽減する場合がある。例えば、1995年兵庫県南部地震では、埋立地盤に建つ直接基礎構造物の直下の地盤が液状化したことにより、上部構造物の被害が軽減されたことが報告^{1),2)}されている。また、この効果に着目して、液状化を積極的に利用する基礎形式や地盤改良方法等の減震技術に関する検討^{3)～6)}がいくつか行われている。

このような事例から、部分的に地盤の軟化や液状化を許容する考え方は、完全に液状化を防止する方法に比べて構造物が受ける慣性力やコストの面で有利になると考えられる。しかしながら、直接基礎構造物を対象とした

場合には、要求性能を満たす沈下や不同沈下に抑えられるかが問題となろう。また、近年、既設構造物の継続使用を前提とした維持保繕に関する技術の必要性が高まり、地盤改良工法についても既設構造物への適用性が重要な課題となっている。

そこで、著者らは、板状の固化改良体を液状化対象層内に多層配置することにより、部分的に地盤の軟化や液状化を許容して減震効果を利用するとともに沈下および不同沈下を低減することを期待した地盤改良形式である多層固化改良を考えた(図-1)。改良体は薬液注入工法により施工することを想定していることから、既設構造物直下地盤への適用を可能としている。また、本改良方法では部分改良とすることによる薬液使用量の低減が、コスト削減に寄与する効果も期待している。

本研究では、種々の改良率に対して多層固化改良の振動台実験を実施して、減震効果と沈下抑制効果の観点から本改良形式による改良効果について検討した。

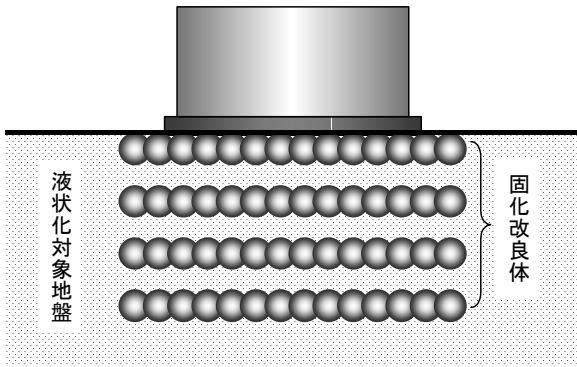


図-1 多層固化改良のイメージ

表-1 薬液の配合と改良体の強度

	薬液名	量(ml)
A液	ASFシリカ	60
	アクターM	16
	水	124
B液	PRシリカ	60
	水	140
一軸強度 (kPa)	7日養生	120
	28日養生	159

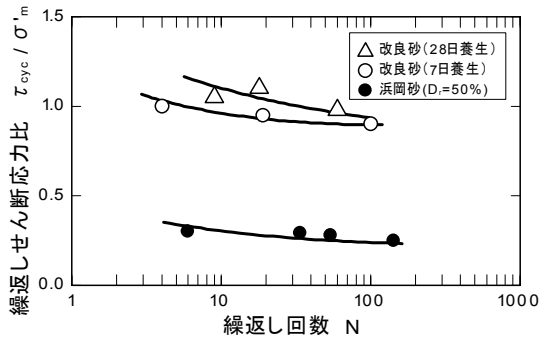


図-2 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係

2. 振動台実験概要

(1) 実験試料および改良体

実験に供した試料は、浜岡砂 ($G_s=2.699, e_{max}=0.933, e_{min}=0.593$) である。改良体は、あらかじめ $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$ の型枠内に水ガラス系の恒久グラウト (パーマロック) ⁷⁾ を満たした状態で浜岡砂を水中落下させて作製した。表-1に、使用した恒久グラウトの配合と一軸圧縮強度を示す。振動台実験には、一週間養生した改良体を使用している。図-2は、非排水繰返し単純せん断試験から得られた浜岡砂 ($D_r=50\%$) と改良体 (7日, 28日養生) のせん断ひずみ両振幅 5% に至るに必要な繰返しせん断応力比 τ_{cyc}/σ'_m と繰返し回数 N の関係を示したものである。浜岡砂 ($D_r=50\%$) は液状化を生じてひずみ両振幅 5% に達しているが、改良体は液状化を生じる

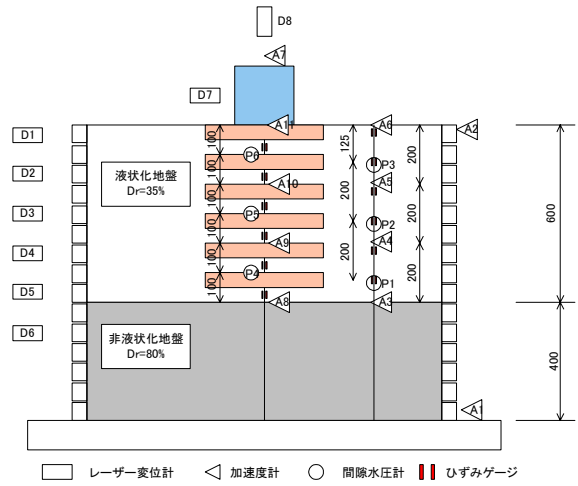


図-3 実験模型の概要

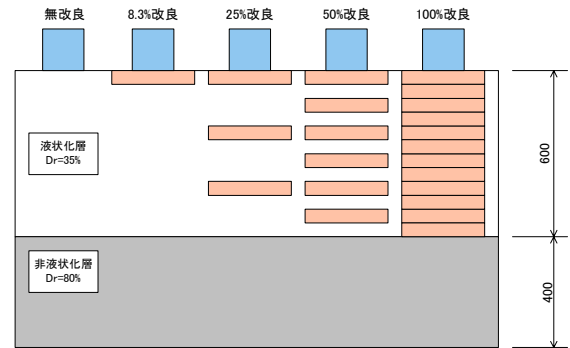


図-4 実験ケース

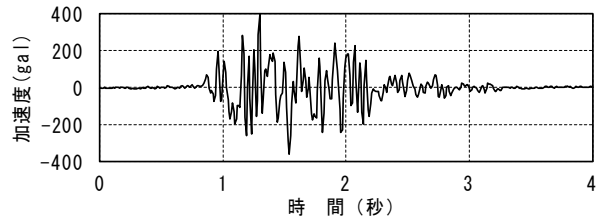


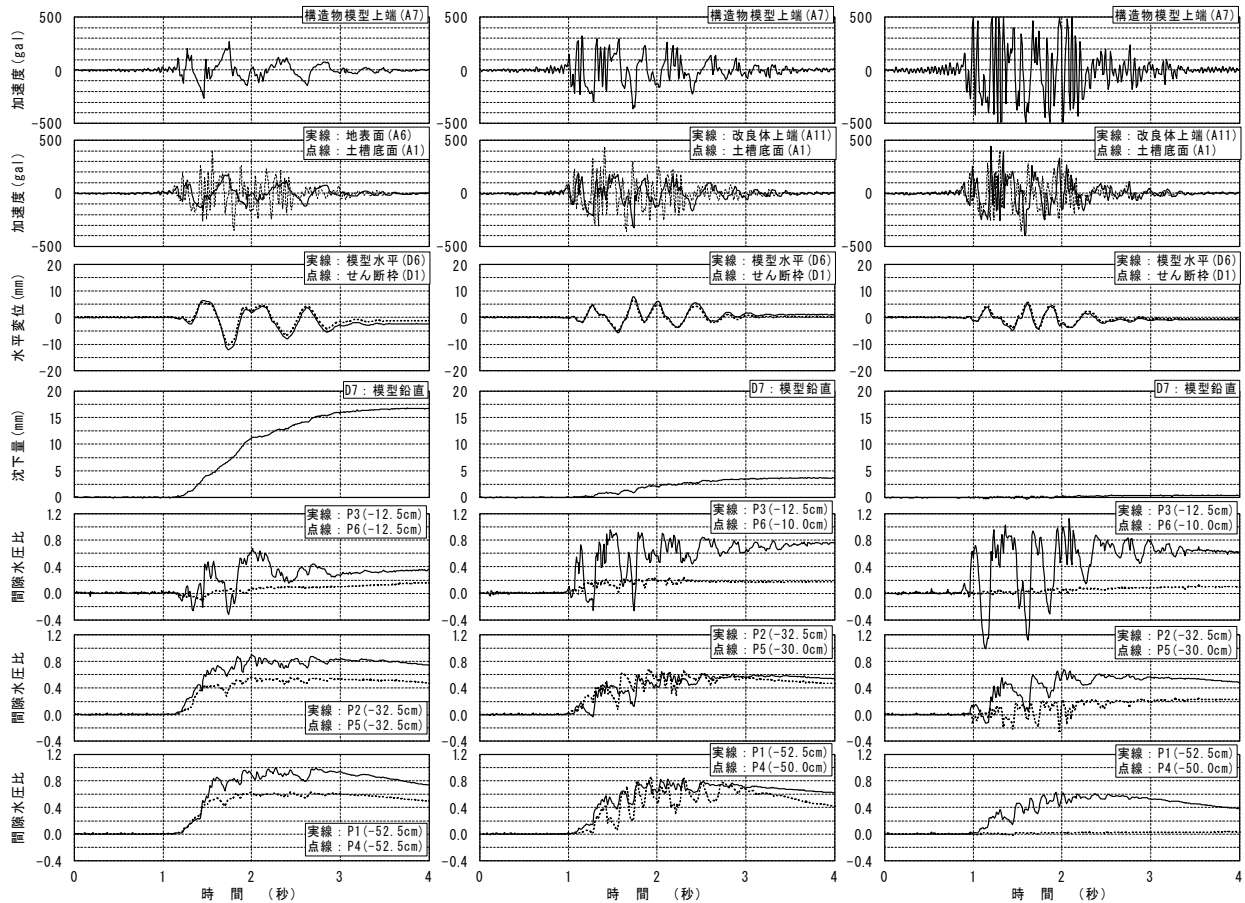
図-5 入力加速度波形 (L-2 入力)

ことはなかった。また、改良体の繰返し強度は応力比で 1.0 程度と、未改良の場合に比べてかなり高いことが分かる。

(2) 実験方法

振動台実験は、幅1.2m×奥行き0.8m×高さ1.0mのせん断土槽を用いて重力場で行った。図-3に実験模型の概要を示す。実験模型には、地盤中に加速度計、間隙水圧計とひずみゲージを、上部構造物に加速度計とレーザー変位計を、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ている。

模型地盤は、層厚 40cm の非液状化層、層厚 60cm の液状化層の 2 層構造とした。下部層は、非液状化層とす



(a) 無改良 (0% 改良) (b) 多層改良 (50% 改良) (c) 全層改良 (100% 改良)

図-6 各センサーの経時変化 (L-2 入力)

るため、あらかじめ乾燥砂を空中落下させて作成した後、振動台を加振して相対密度が80%になるように締め固めた。上部層は、あらかじめ作製しておいた改良体を所定の位置に設置しながら乾燥砂を空中落下させて作成した。上部層の初期相対密度は、 $D_r=35\%$ 程度であった。加振前には、土層下部より注水し地表まで飽和状態とした。また、飽和終了後、直接基礎構造物を模擬した模型 (20cm × 20cm × 20cm) を地表中央部に設置した。

実験は、図-4に示すように無改良および固化改良体を配置した計5種類の改良率 (改良体全層厚/液状化対象層厚) に対して、それぞれ最大加速度200gal (L-1 入力)、400gal (L-2 入力) のホワイトノイズを使用して行った。図-5に、400gal 入力時の入力加速度波形を示す。

3. 実験結果および考察

(1) 応答値の経時変化

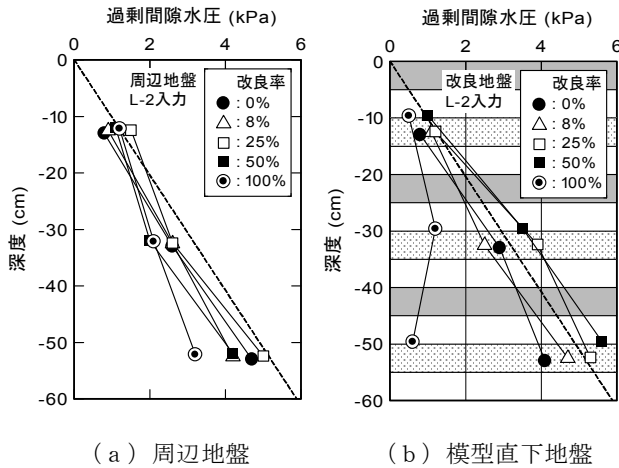
図-6に、L-2 入力時に計測された各センサーの経時変

化を示す。図の左から無改良、50%改良、100%改良の実験結果を示している。図中の1段目は、構造物模型上端(A7)の加速度応答を示している。構造物上端の応答加速度は、改良率が少なくなるほど応答が小さくなり、波形は長周期化している。

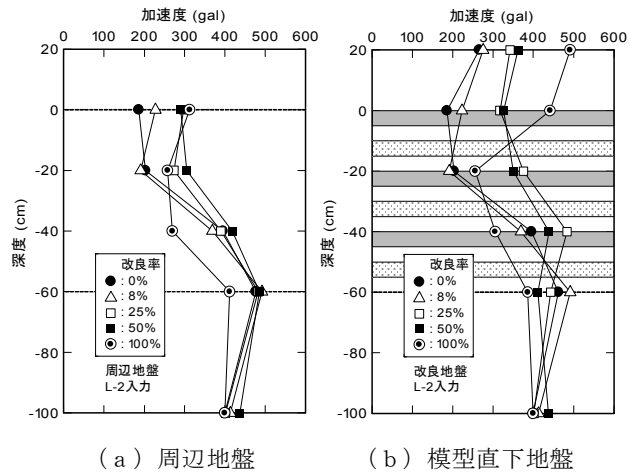
2段目は、地表面(A6, 実線)および改良体上端(A11, 実線)と土槽底面(A1, 点線)の応答加速度の比較を示している。地表および改良体上端の応答加速度は、改良率に応じて構造物模型と同様の傾向が認められるが、構造物模型上端の応答加速度と比較すると、100%改良で構造物の大幅な増幅傾向が確認される。

3段目は、構造物模型(D6, 実線)とせん断枠上端(D1, 点線)の水平応答変位の比較を示している。いずれのケースも、構造物模型とせん断枠上端は同位相の応答を示していることから、本実験では改良体も含めた地盤同一深度の水平変位に関して局所的な変化を生じていないことが推察される。

4段目は、構造物模型の沈下量を示している。構造物模型の沈下量は、改良率を上げることにより低減していることが分かる。また、他の応答値の経時変化を参照す



(a) 周辺地盤 (b) 模型直下地盤
 図-7 最大過剰間隙水圧分布 (L-2 入力)



(a) 周辺地盤 (b) 模型直下地盤
 図-9 最大加速度分布 (L-2 入力)

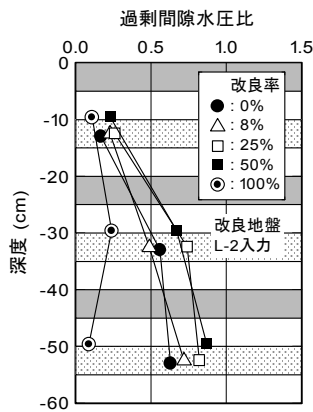


図-8 最大過剰間隙水圧比分布
 (模型直下地盤, L-2 入力)

ると、沈下は加振中にほとんどが生じて、加振後の間隙水圧消散過程での沈下量はわずかであることが分かる。

5 段目～7 段目は、周辺地盤（実線）と模型直下地盤（点線）の過剰間隙水圧比の比較を示している。過剰間隙水圧比は、事前に実施した自重解析から得られた有効上載圧で計測値を正規化して求めている。周辺地盤上端部 P3 位置の計測値の経時変化中には水平変位の位相に対応した上下動が認められることから、間隙水圧におよぼすせん断枠の影響が考えられる。周辺地盤の過剰間隙水圧比はいずれのケースも概ね 0.8 を超えており、液状化しているものと判断できる。100% 改良の直下地盤の計測結果は、改良体の過剰間隙水圧の発生がわずかであることを表している。

(2) 最大応答値

a) 過剰間隙水圧分布

図-7 (a), (b) に、L-2 入力時の周辺地盤と模型直下地盤の最大過剰間隙水圧の深度分布を示す。周辺地

盤の最大過剰間隙水圧は一部で液状化に至っていない部分が見られるが、概ね無改良（改良率 0%）の結果と同様の傾向を示して液状化を生じた状態にあることが分かる。次に、模型直下地盤の最大過剰間隙水圧であるが、改良地盤の間隙水圧計は全層改良となる改良率 100% については改良体内にそれ以外のケースでは未改良部分に設置されている。この場合、改良率 100% の最大過剰間隙水圧は他のケースに比べて小さな水圧の発生に留まっており、改良体内では間隙水圧が発生しにくいことが明らかである。その他のケースでは、模型直下地盤の最大過剰間隙水圧が周辺地盤よりも大きくなっている部分が見られる。これは、直接基礎型の模型が設置されていることによる上載圧増加の影響もあるが、後に示す加速度応答の違いが主因と考えられる。

図-8には、模型直下地盤の最大過剰間隙水圧を自重解析から求めた有効上載圧で除して正規化した最大過剰間隙水圧比の分布を示した。図から、改良率 100% 以外のケースで深部ほど過剰間隙水圧比が大きいたことが分かる。表層部では模型自重による上載圧増加の影響を強く受けていることもあるが、振動中はシェイクダウンを生じて液状化しにくい状態になっていることが推察される。

b) 最大加速度分布

図-9 (a), (b) に L-2 入力時の最大加速度の深度分布を周辺地盤、模型直下地盤のそれぞれについて示した。周辺地盤の加速度は上部層（深度 0～-60cm）の軟化・液状化により全てのケースでほぼ同様に減衰している。ただし、地表付近の加速度は改良体の影響を受けて改良率の高いものほど大きくなる傾向が認められる。模型直下地盤の加速度応答は周辺地盤と同様に上部層（深度 0～-60cm）において改良率に応じた減衰傾向が認められるが、改良率 100% の結果は地表付近で大きく増幅

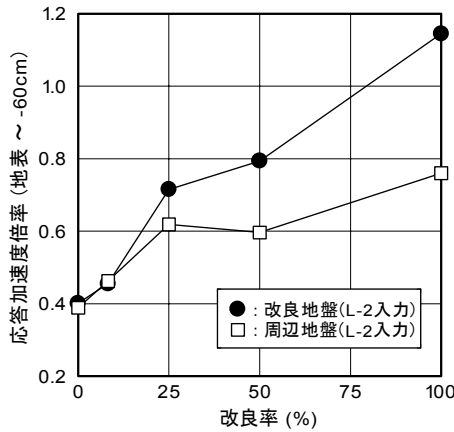


図-10 応答加速度倍率と改良率の関係

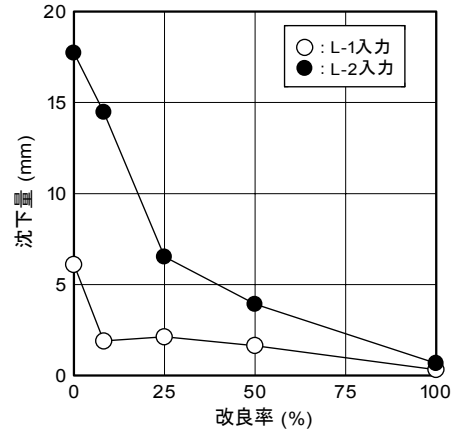


図-12 模型沈下量と改良率の関係

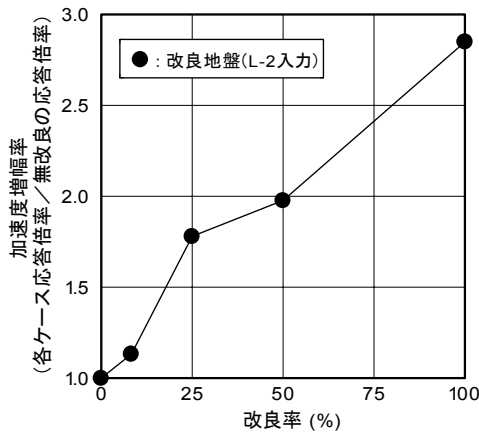


図-11 加速度増幅率と改良率の関係

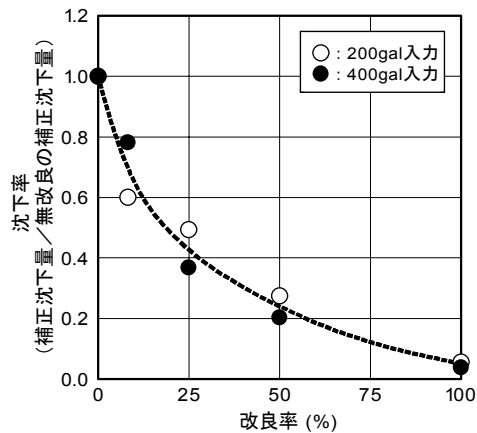


図-13 沈下率と改良率の関係

して他のケースと傾向を異にしている。また、表層改良(改良率 8%)の結果が無改良(改良率 0%)の結果と一致する傾向があるのに対して、加速度低減の程度は小さいが多層改良となる改良率 25%と 50%の結果がほぼ一致した傾向を示していることが特徴的である。

(3) 改良率と改良効果の関係

図-10は、上部層深度-60cmを基準にして地表での応答加速度倍率を改良地盤(模型直下地盤)および周辺地盤について改良率との関係で示した L-2 入力時の結果である。改良地盤の応答加速度倍率は、改良率が高くなるとともに増加していることが分かる。周辺地盤についても改良地盤ほどではないものの、同様の傾向が認められる。図-11には、改良地盤(模型直下地盤) L-2 入力時の加速度増幅率と改良率の関係を示した。ここで加速度増幅率は、図-10に示した改良地盤の応答加速度倍率を無改良(改良率 0%)の応答加速度倍率で正規化して求めている。図から、改良率 50%で無改良に比べて 2 倍の増幅を示し、改良率 100%で約 3 倍の増幅率を示していることが分かる。これより、部分的に地盤の軟化や液状

化を許容する改良体配置とすることにより全層改良に比較して減震効果を発揮することが明らかである。

図-12に L-1, L-2 入力時の模型の最大沈下量と改良率の関係を示した。図から改良率が高くなるほど沈下量が減少していくことが明らかである。改良率 100%では、1mm 以下の沈下量に留まっていることから、改良体の圧縮性は地盤に比較して非常に小さいと言える。また、加速度入力レベルが大きくなると加速度レベルの倍率以上に大きな沈下を生じていることが分かる。ここで、L-1, L-2 入力はそれぞれ最大加速度 200gal, 400gal を目標としているが、実際の入力加速度は同じ加速度レベルで違いが生じている。そこで、入力最大加速度と最大沈下量の関係から、図-12に示した沈下量をそれぞれ入力加速度 200gal, 400gal の場合に補正した補正沈下量を無改良の補正沈下量で除して求めた各ケースの沈下率と改良率の関係を、図-13に示す。図は改良率に応じた沈下抑止効果を鮮明に表しており、例えば改良率 50%の沈下は無改良(改良率 0%)時の沈下に対して約 3 割以下に抑えられており、改良率以上の沈下抑止効果を発揮していることが分かる。また、図の関係には入力

加速度の大きさにかかわらず同様の傾向が認められる。これらのことから、本改良形式は構造物の要求性能に応じた沈下量から改良率を選定することが可能であると考えられる。

4. まとめ

多層固化改良の振動台実験を実施してその改良効果について検討した。その結果、次のことが明らかになった。改良率が高くなるほど応答加速度倍率は増加するが、部分的に地盤の軟化や液状化を許容する改良体配置とすることにより全層改良に比較して減震効果を発揮する。沈下率と改良率の関係は入力加速度の大きさにかかわらず同様の傾向を示し、多層固化改良は改良率以上に沈下を抑制する効果がある。

謝辞：本研究は、三井住友建設(株)、(株)フジタおよび山口大学地盤地震工学研究所の共同研究として実施したものである。ご指導いただいた山口大学、兵動正幸教授ならびに三浦房紀教授、共同研究メンバーである(株)フジタ、岸下崇裕主任研究員の諸氏に厚く御礼申し上げます。また、実験に際しては恒久グラウト協会より注入剤の提供を頂きました。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平井芳雄, 加倉井正昭, 丸岡正夫, 山下清, 青木雅路: 液状化した埋立て人工地盤の直接基礎の挙動とその評価, 基礎工, Vol.24, No.11, pp.60~63, 1996.
- 2) 加倉井正昭, 青木雅路, 平井芳雄, 俣野博: 埋立て人工島における直接基礎の挙動, 土と基礎, Vol.44, No.2, pp.64~66, 1996.
- 3) 土木学会地震工学委員会: 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 2002.
- 4) 福武毅芳: 液状化を利用した地盤免震と構造物への影響(その2) 第36回地震工学研究発表会, pp.1735~1736, 2001.
- 5) 福武毅芳: 軟弱地盤の非線形性を利用した免震基礎, -液状化現象を積極利用した地盤免震技術を中心として-, 基礎工, Vol.30, No.12, pp.21~28, 2002.
- 6) 福武毅芳: 液状化現象を逆手に取った地盤免震技術, 土と基礎, Vol.51, No.3, pp.31~33, 2002.
- 7) 米倉亮三, 島田俊介: 恒久グラウトの恒久性のメカニズム, 土木施工, Vol.40, No.7, pp.99-106, 1999.