

多層固化改良された液状化地盤のオンライン地震応答実験

On Line Pseudo-Dynamic Response Test to Evaluate the Effect of Improving Liquefiable Soils through the Multilayer Grouting Method

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
三上 博 HIROSHI MIKAMI
中田 雅夫 MASAO NAKATA

本論文は、多層固化改良された液状化地盤において、その改良率や改良形式を種々変えたオンライン地震応答実験を行い、対策地盤の地震時挙動に与える影響について考察した。まず、各改良形式の履歴変形特性や加速度応答特性を比較し、改良形式の違いがこれらに与える影響について調べた。さらに、地盤変位や加速度等の応答特性と改良率および改良形式との関係を整理し、多層固化改良の減震効果について検討した。

キーワード：地震動特性、液状化、オンライン地震応答実験、地盤改良、薬液注入

In this study, a series of on line pseudo-dynamic response tests were conducted to investigate the seismic behavior of liquefiable ground improved by the multilayer grouting method.

The results indicated that the multilayer grouting method was effective for attenuating seismic motion.

Key Words: Seismic Response, Liquefaction, Pseudo-Dynamic Test, Soil Improvement

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、地盤改良による対策工法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機能し、各種被害を軽減する場合がある。例えば、1995年兵庫県南部地震における埋立て地盤に建つ直接基礎構造物の事例^{1),2)}では、基礎直下の地盤が液状化し、上部構造物の被害が低減されたことが報告されている。このような効果に着目して、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が行われている^{3)~6)}。

地盤の軟化や液状化を許容する地盤改良方法は、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はもとより、改良工事のコストの面で有利となり得ることが考えられる。しかしながら、直接基礎構造物を対象とした場合には、沈下や不同沈下の要求性能を満たすかが問題となる。一方、近年、既設構造物を対象とした耐震補強技術の必要性が高まっている。

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、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多層固化改良を提案した^{7)~11)}。本改良形式は、軟弱層の減震効果が硬い地盤に挟まれた場合に大きい¹²⁾ことに着目し、この効果を有効に利用することを特徴としたものである。また、改良体は薬液注入工法により造成するため、既設構造物直下への適用が可能である。

本研究では、種々の改良率（改良体全層厚／液状化対象層厚）で多層固化改良のオンライン地震応答実験を実施し、本改良形式の地震応答特性について詳細に考察した。さらに、全層固化改良等の他の改良形式との比較を行い、改良効果についても検討を行った。

2. 実験概要

(1) オンライン地震応答実験の概念

オンライン地震応答実験は日下部ら¹³⁾により開発されたものであり、そのアルゴリズムは以下のとおりである。まず、解析対象地盤を質点系にモデル化し、基盤面から地震動を入力する。次にコンピュータにより質点系

の振動方程式を解き、各質点の応答変位を求める。そして、得られた変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体に与え、その時自動計測された復元力を用いて次のステップの応答変位を計算する。すなわち、本手法はこれらの過程を地震動が継続する間繰り返すことにより時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素実験の供試体から直接求め、それをオンラインで応答解析に結びつけて地震時の地盤の挙動をシミュレートするものである。なお、要素実験部分は、図-1 に示す日下部ら¹⁴⁾により試作された簡易単純せん断試験機を用いた。また、多層からなる地盤のすべてをオンライン実験することは、システムが高価になるばかりでなく作業も煩雑化する。そこで、本実験では液状化や大変形が予想され、数値モデル化が困難な部分のみを要素実験で復元力を求め、その他の部分は修正 Ramberg-Osgood (以下、修正 R-O) モデルで復元力を求めるサブストラクチャ法を採用した。

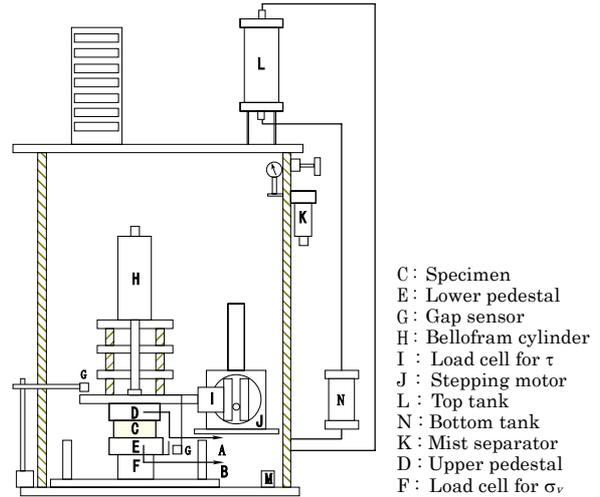


図-1 簡易単純せん断試験機

(2) 地盤モデル

地盤モデルは、図-2 に示すように深さ 14m の水平成層地盤を想定し、これを 7 分割して一次元の質点系モデルで置き換えたものとした。このうち、地下水位以下の L2 層～L7 層 (GL-2m～GL-14m) の復元力を要素実験により実測し、L1 層 (GL-0m～GL-2m) の復元力は修正 R-O モデルにより算定した。ここで、すべての地盤は相対密度 $D_r=50\%$ の砂層、すなわち地下水位以下では液状化層となるようにモデル化した。

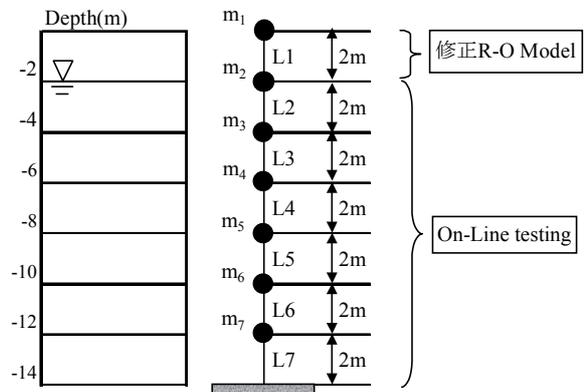


図-2 地盤モデル

(3) 実験試料・供試体

要素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。未改良供試体は、水中落下法により相対密度 $D_r=50\%$ となるように作製した。なお、要素試験の再現性を高めるために、砂供試体の密度管理は、所定の相対密度の $\pm 1\%$ 以内とした。一方、固化改良供試体には、水ガラス系恒久グラウト¹⁵⁾をモールドに満たした状態で水中落下を行い、未改良供試体と同一の相対密度とした。これを密封状態で 28 日間養生したものを試験に供した。表-1 に水ガラス系恒久グラウトの標準配合を示す。供試体寸法は直径 60mm、高さ 40mm である。

表-1 恒久グラウトの標準配合

	薬液名	配合量(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

ものである。なお、別途実施した一軸圧縮試験から得られた 28 日間養生した改良砂の一軸圧縮強度 q_u は、159kPa であった。

(4) 改良砂の繰返しせん断強度特性

図-3 は、図-1 に示した簡易単純せん断試験機を用いて行った繰返し単純せん断試験から得られた未改良砂と改良砂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/σ'_m と繰返し回数 N との関係を示した

繰返し回数 20 回で比較した場合、繰返しせん断応力比は改良砂で 1.05、未改良砂で 0.30 であり、改良砂の繰返しせん断応力比は未改良砂の 3 倍以上に大きくなっていることがわかる。また、未改良砂は 5% のひずみを生じて液状化しているが、改良砂は液状化に至っていない。

表-2 実験ケース

改良形式	無対策	単層固化改良		多層固化改良		全層固化改良
ケース名	N000	S017	S050	M033	M050	A100
改良率	0%	17%	50%	33%	50%	100%
層番号						
L1	非液状化層	非液状化層	非液状化層	非液状化層	非液状化層	非液状化層
L2	未改良層	改良層	改良層	改良層	改良層	改良層
L3		未改良層		未改良層	未改良層	
L4			改良層		改良層	
L5			改良層	未改良層		
L6			未改良層	改良層	改良層	
L7				未改良層	未改良層	

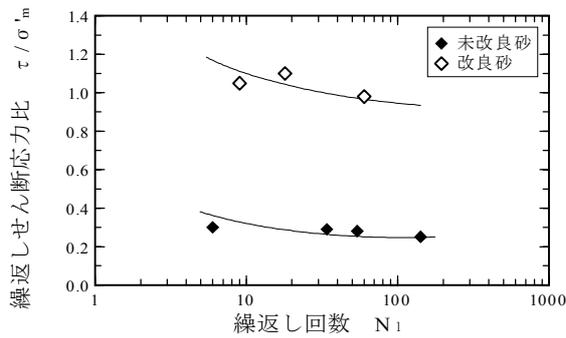


図-3 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係

(5) 実験・解析条件

オンライン地震応答実験は表-2 に示すように要素実験により復元力を求める L2 層～L7 層を対象として、改良形式および改良率を様々に変化させて実施した。ここで、全層固化改良は液状化層すべてを改良するものであり、従来の対策工法として位置付けられる。単層固化改良は改良層の下に免震層として未改良層を意図的に残す工法⁴⁾であり、既に設計事例¹⁶⁾も報告されている。なお、表中のケース名は改良形式と改良率を表しており、単層 (Singlelayer) および多層 (Multilayer) の頭文字をとり、例えば M050 は改良形式が多層で改良率が 50% のケースを表している。

L1 層における修正 R-O モデルの解析パラメータは、 $G_0=48697.35\text{kPa}$, $\tau_f=22.56\text{kPa}$, $\alpha=2.451$, $\beta=2.293$ である。L2 層～L7 層の要素実験の圧密は、静止土圧係数 K_0 を 0.5 に設定した異方圧密とし、圧密圧力は $K_0=0.5$ となるよう有効側方向応力 σ'_h と異方分の有効軸方向応力 σ'_v を所定の値になるまで段階的に加えるものとした。

入力波は、1995 年兵庫県南部地震においてポートアイランドでアレー観測された PI-79mNS 成分 (最大加速度 570Gal) を用いた。

3. オンライン地震応答実験結果および考察

(1) せん断応力 τ - せん断ひずみ γ 関係および有効応力経路

図-4 に代表的ケースの L2 層～L5 層におけるせん断応力 τ - せん断ひずみ γ 関係を示す。L5 層を除く未改良層は、せん断応力が最大値に達した後、剛性低下が進行して液状化に至り、ひずみが激増してせん断応力がほぼゼロに近づいている。この傾向は、S050 の L5 層や M050 の L3 層・L5 層、すなわち改良層の直下や改良層に挟まれた層において著しくなっていることが特徴的である。

また、A100 の結果をみると、各層のせん断応力が他のケースと比較して大きく、上層への地震動の伝播が大きいことを示している。なお、L6 層～L7 層は、いずれのケースにおいても液状化には至らなかった。

図-5 は図-4 と同様のケースについて有効応力経路を示したものである。なお、砂の有効応力経路には、非排水の静的試験から求めた浜岡砂の変相線 (PTL ; Phase Transformation Line) も併せて示している。未改良層は変相線を越えると同時にひずみが増大して液状化に至っていることがわかる。一方、改良層は若干の有効応力の減少を示すものの、最終的に初期有効拘束圧の 7～8 割程度の値を保持して定常状態に至っている。

(2) 加速度の時刻歴応答波形と周波数特性

図-6 は同一ケースについて質点 m1～質点 m5 における応答加速度 a の時刻歴を示したものである。N000 の結果をみると、質点 m1～質点 m4 の波形が加振に伴って減衰し、長周期化していることが認められる。これは液状化により L2 層～L4 層の剛性が著しく低下して上層への地震動の伝播を抑制したためである。一方、A100

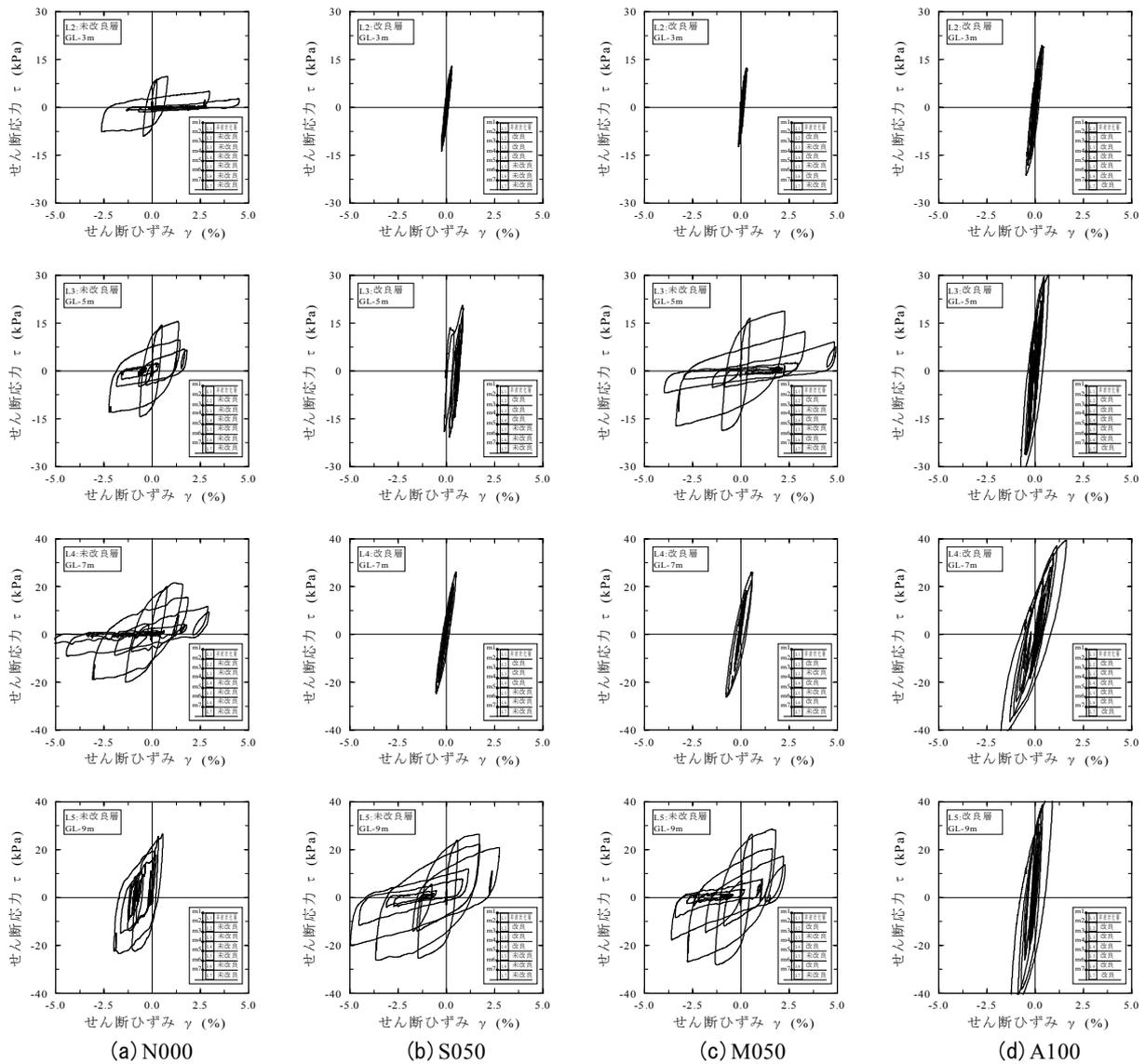


図-4 せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係

の波形にはすべての質点で長周期化は認められず、応答も大きいことがわかる。これに対して、S050の結果をみると、質点 m1～質点 m4 の波形が A100 のそれらと比較して減衰しており、L5 層が液状化したことによる減震効果が認められる。さらに、M050 は改良層 (L4 層) である質点 m4 の波形に若干の高振動数成分が認められるものの、それより上層の質点 m1～質点 m3 の波形は N000 と同様に加振に伴い大きく減衰し長周期化していることが特徴的である。これは L5 層に加えて L3 層が液状化したためであり、L2 層が改良層であるにも関わらずこのような結果になったことから、L3 層が液状化したことによる減震効果は表層にまで及ぶことが明らかである。

図-7 は同一ケースにおける地表応答波 (質点 m1) の加速度応答スペクトルを示したものである。S050 は、固

有周期 1 秒付近の応答が卓越しているのに加え、固有周期帯域が 0.3～0.4 秒付近のやや短周期側でも応答が大きくなり、A100 と同様な傾向を示している。これに対して M050 の応答は、固有周期 2.5 秒以下の周期帯域で S050 よりも小さく、特に 0.3～0.4 秒付近における減衰が顕著となっていることが認められる。このことから、M050 の減震効果は単層固化改良ないし全層固化改良に対して、特に固有周期帯域が 0.5 秒よりも短周期側の構造物において大きくなることがわかる。

なお、風間ら¹⁷⁾は地表面応答に及ぼす軟弱地盤の影響について検討し、地表面以下に軟弱層がある場合にはその塑性化によって地表面の最大加速度応答は小さくなるものの長周期成分は大きく減衰しないことを示している。今回の結果も、固有周期 2.5 秒以上の周期帯域の応答には液状化層の有無によって違いは認められなかった。

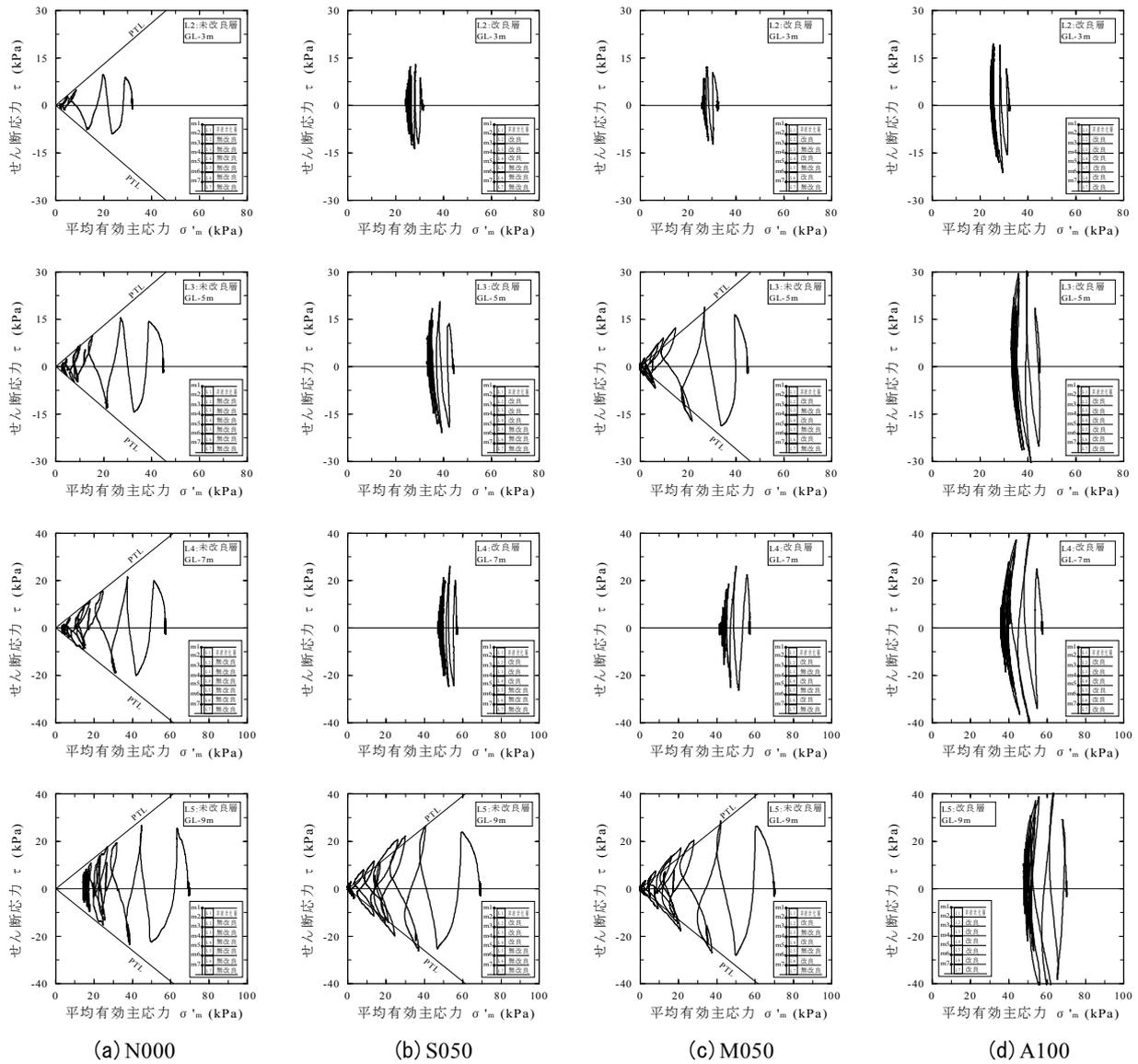


図-5 有効応力経路

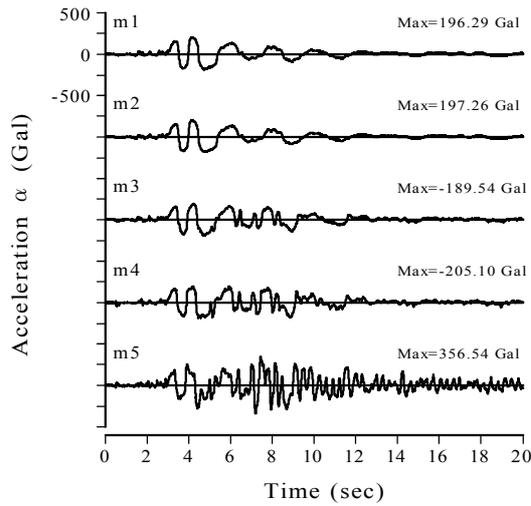
(3) 最大応答値の深度分布

図-8 に最大せん断ひずみ γ_{max} 、図-9 に最大水平変位 H_{max} 、図-10 に最大応答加速度 α_{max} の深度分布をそれぞれ示し、改良形式および改良率に関して比較した。

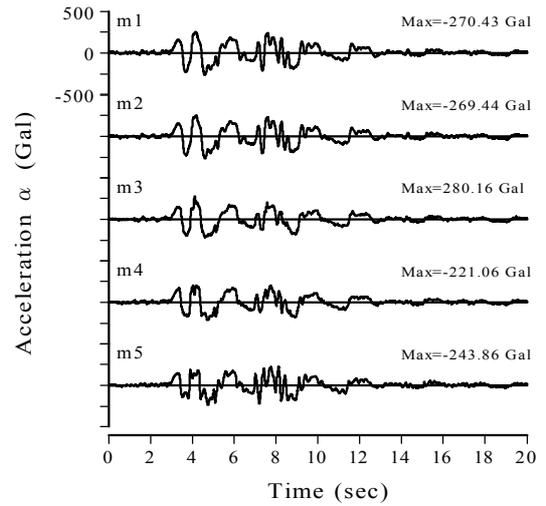
最大せん断ひずみ γ_{max} に関して、図-8 (a) 改良形式の比較に着目すると、N000 の場合、GL-10m 以浅で液状化によりひずみが増大し、その値は最大で 5% と大きな値となっている。これに対して、A100 におけるひずみの発生量は小さく、その最大値は 2% 以下である。S050 については、改良層直下に位置する未改良層 (L5 層: GL-8m~GL-10m) のひずみが大きく発達する分布形状を示している。M050 は改良層に挟まれた未改良層 (L3 層: GL-4m~GL-6m, L5 層: GL-8m~GL-10m) の 2 層でひずみが大きく発達する分布形状を示すことが特徴的である。次に、図-8 (b) 改良率の比較に着目すると、

S017 および M033 でひずみが最大となる層は前者で L5 層 (GL-8m~GL-10m)、後者で L4 層 (GL-6m~GL-8m) であることがわかる。これらは連続する未改良層のうち下部に位置する層であることから、非線形化が著しくなる層は前述した改良率 50% の結果とは異なる。このように、未改良層の上部のひずみが下部のそれと比較して相対的に小さくなったのは、下部で地盤の軟化が進んだために上部への地震動の伝播が抑制されたことによるものと考えられる。ただし、未改良層上部におけるひずみは 2% 程度と大きいことから、液状化には至らないものの、これらの層も軟化が進んでいると言える。

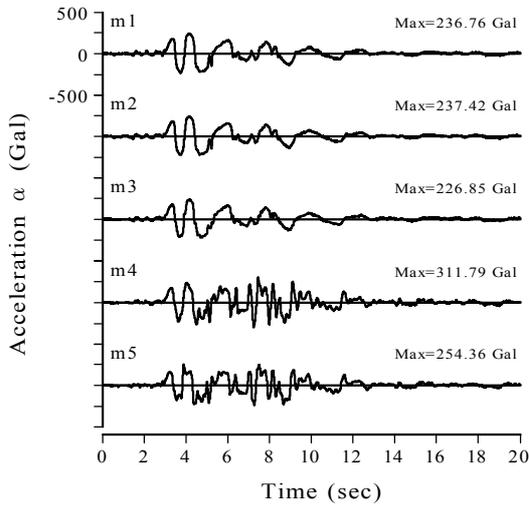
次に、最大水平変位 H_{max} に関して、図-9 (a) 改良形式の比較に着目すると、N000 および A100 では変位が表層に向かって線形的に増大していくのに対して、S050 および M050 では改良層直下や改良層に挟まれた未改良



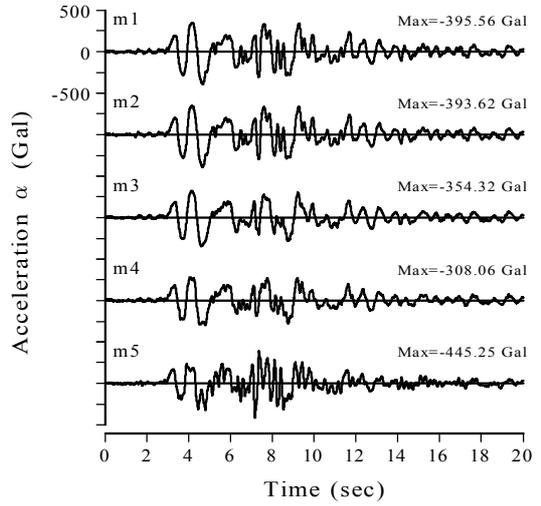
(a) N000



(b) S050



(c) M050



(d) A100

図-6 応答加速度 α の時刻歴

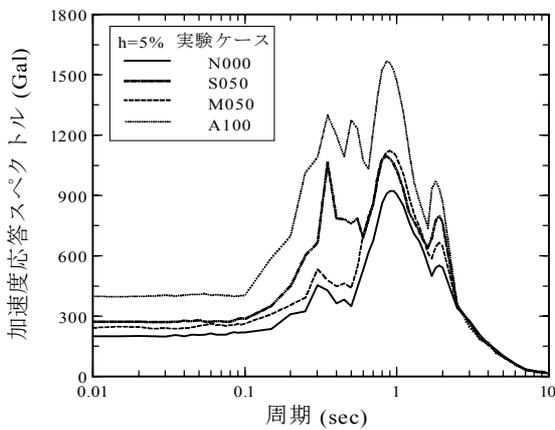
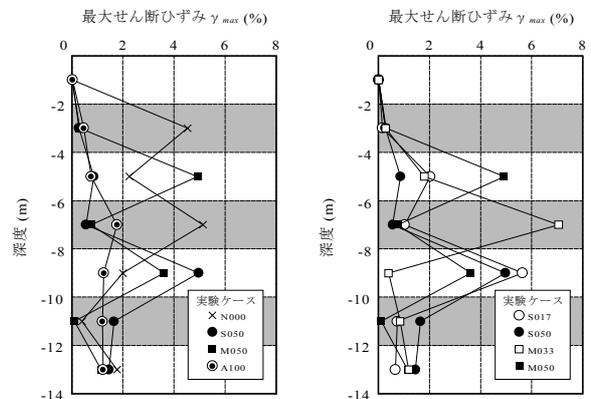


図-7 加速度応答スペクトル (地表)



(a) 改良形式の比較

(b) 改良率の比較

図-8 最大せん断ひずみの深度分布

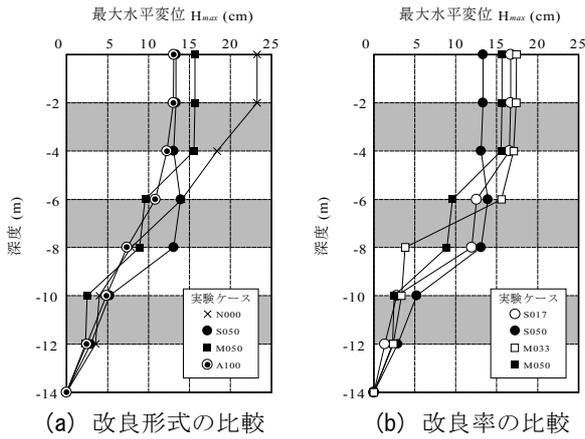


図-9 最大水平変位の深度分布

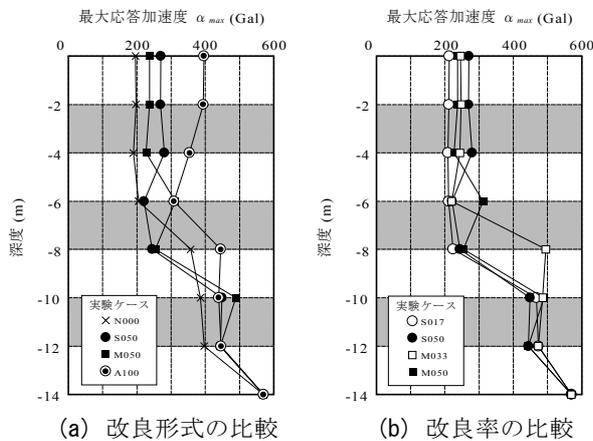


図-10 最大応答加速度の深度分布

層で変位が増大していることがわかる。地表面最大変位は、N000の24cm程度に対して、A100およびS050で13cm程度、M050で16cm程度となった。これより、水平変位抑止効果は改良層が厚いほど大きくなるものの、個々の改良層が薄い多層固化改良も十分な効果があることが確認された。図-9(b)改良率の比較をみると、多層固化改良および単層固化改良のそれぞれで改良率の増加に伴い地表面変位が減少していることがわかる。したがって、多層固化改良を含めて対策地盤は構造物の要求性能に応じた改良率を選定することが可能であると考えられる。

最大応答加速度 α_{max} に関して、図-10(a)改良形式の比較に着目すると、N000の分布形状は地盤が液状化したことにより上層への地震動の伝播が抑制され、表層に向かって減衰している。これに対して、A100の加速度の分布形状はGL-6m以浅で増幅している。これは図-4に示したように、地盤の剛性低下が少なく復元力が大きいことが原因と考える。一方、S050の分布形状は、液

状化したL5層(GL-8m~GL-10m)で減衰するものの、改良層となるL3層(GL-4m~GL-6m)で再度増幅している。M050の分布は、各改良層において増幅傾向を示すものの、改良層に挟まれた未改良層で大きく減衰している。特に、質点m4(GL-6m)の加速度はS050と比較して1.4倍ほど大きな値であるが、質点m3(GL-4m)の加速度はL3層(GL-4m~GL-6m)の液状化に伴う減震効果により大きく減衰し、その結果、地表面応答加速度はS050よりも小さくなっている。また、図-10(b)改良率の比較に示すS017の結果をみると、その分布形状はN000のそれと類似していることから、単層固化改良の場合、改良率が小さいとそれが加速度の分布形状へ与える影響はわずかであることがわかる。

(4) 加速度減衰率と改良形式および改良率の関係

図-11は加速度減衰率と改良率の関係を示したものである。ここで加速度減衰率は、無対策および対策地盤の地表面最大応答加速度をA100のそれで正規化して求めている。まず、加速度減衰率は改良率の低下に伴って小さくなり、全層固化改良と比較して無対策で50%の減衰率であることがわかる。さらに、同様の比較から、単層固化改良(改良率50%)で約70%、多層固化改良(改良率50%)で約60%の減衰率を示していることがわかる。

これらのことから、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多層固化改良は、全層固化改良と比較して減震効果を発揮し、さらにその効果は同一改良率の単層固化改良よりも大きいことが明らかである。

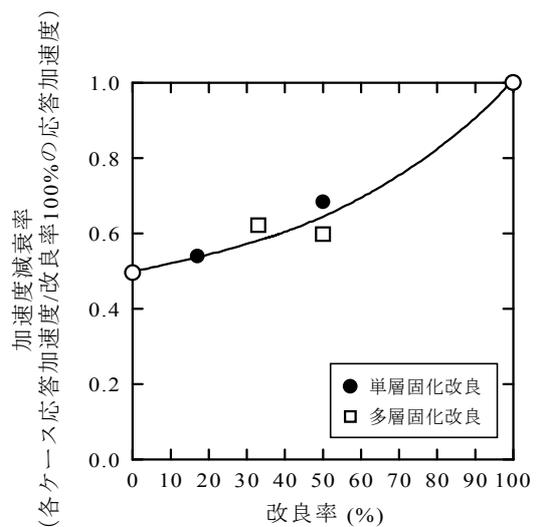


図-11 加速度減衰率と改良率の関係

4. まとめ

本研究では、多層固化改良のオンライン地震応答実験を実施し、本改良形式の地震時挙動について考察した。さらに、他の改良形式との比較を行い改良効果についても検討した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 未改良層の減震効果は、それが改良層の直下または改良層に挟まれた位置にある場合に大きいことが確認された。
- ② 全層固化改良と比較して、加速度減衰率は単層固化改良（改良率 50%）で約 70%、多層固化改良（改良率 50%）で約 60%となり、多層固化改良は全層固化改良と比較して減震効果を発揮し、さらに、その効果は同一改良率の単層固化改良よりも大きいことが明らかとなった。
- ③ 多層固化改良の減震効果は、特に固有周期帯域が 1 秒よりも短周期側の構造物において大きくなることが確認された。
- ④ 水平変位抑止効果は改良層が厚いほど大きくなるものの、多層固化改良も十分な効果があることが確認された。また、水平変位抑止効果は改良率に依存することから、構造物の要求性能に応じた改良率を選定することが可能であると考えられる。

謝辞：本研究は、三井住友建設㈱、㈱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。ご指導戴いた山口大学、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㈱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ご提供を頂きました。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, 一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) 三浦房紀, 兵動正幸, 吉本憲正, 岸下崇裕, 山本陽一, 高橋直樹: 液状化地盤における多層固化改良に関する研究(その 1: 振動台実験と考察), 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1873-1874, 2003.
- 8) 兵動正幸, 三浦房紀, 吉本憲正, 山本陽一, 高橋直樹, 岸下崇裕: 液状化地盤における多層固化改良に関する研究(その 2: 改良率と改良効果について), 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1875-1876, 2003.
- 9) 兵動正幸, 三浦房紀, 吉本憲正, 高橋直樹, 山本陽一, 岸下崇裕, 木村真也: 液状化地盤における多層固化改良に関する研究(その 3: オンライン地震応答実験による検証), 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1877-1878, 2003.
- 10) 三浦房紀, 兵動正幸, 吉本憲正, 岸下崇裕, 山本陽一, 高橋直樹: 液状化地盤における多層固化改良に関する振動台実験(改良率と改良幅の影響について), 土木学会第 58 回年次学術講演会講演集, pp.293-294, 2003.
- 11) 兵動正幸, 三浦房紀, 吉本憲正, 高橋直樹, 山本陽一, 岸下崇裕, 木村真也: 液状化地盤における多層固化改良に関するオンライン地震応答実験(改良形式の比較), 土木学会第 58 回年次学術講演会講演集, pp.295-296, 2003.
- 12) 村井信義: 埋立地盤における地震動の増幅特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 451 号, pp.89-98, 1993.
- 13) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: オンライン地震応答実験による 2 層系砂質土の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.
- 14) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 藤井照久, 兵動正幸: 簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用, 土木学会論文集, No.617/III-46, pp.299-304, 1999.
- 15) 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.
- 16) 福武毅芳, 竹脇尚信, 長谷場良二, 山口弘信, 吉原進: 西田橋基礎の地震応答シミュレーション 沖積地盤上の石造アーチ橋の移設計画, 土木史研究, No.18, pp.395-410, 1998.
- 17) 風間基樹, 柳澤栄司, 稲富隆昌: 地表面応答に及ぼす中間軟弱粘土層の非線形性の影響, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.219-230, 1997.