

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.51 No.2 September 2012

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 51 卷 第 2 号 (Vol. 51, No. 2) , 2012 年9月 (September 2012)

目 次 (CONTENTS)

1. 液状化対策としての格子状固化処理工法の改良深さ低減に関する研究
……………高橋英紀, 森川嘉之, 津國正一, 吉田誠, 深田久 …… 3
(Approach to Reducing Improvement Depth of Lattice-shaped Cement Treatment Method for Liquefaction Countermeasure
……………Hidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA, Shoichi TSUKUNI, Makoto YOSHIDA, Hisashi FUKADA)

液状化対策としての格子状固化処理工法の 改良深さ低減に関する研究

高橋 英紀*・森川 嘉之**・津國 正一***・吉田 誠****・深田 久*****

要 旨

液状化対策工法として、深層混合固化処理工法等を用いて格子状に地盤を固化処理する方法がある。今までは非液状化層に達するまで固化処理を行っていたが、この工法の経済性をより高めるために、固化処理する深度を液状化層内に留める方法について模型実験および数値解析によって検討した。その結果、固化処理する深度を液状化層内に留めても、この固化体と非液状化層の振動を同期させることで、液状化対策効果が発揮されることを確認した。

キーワード：液状化，格子状改良，改良深さ，浮き型，深層混合固化処理工法

* 地盤研究領域 動土質研究チーム
** 地盤研究領域 地盤改良研究チーム
*** (株)竹中土木 環境・エンジニアリング本部
**** 五洋建設(株)技術研究所
***** (株)不動テトラ 地盤事業本部技術部
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1
電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

Approach to Reducing Improvement Depth of Lattice-shaped Cement Treatment Method for Liquefaction Countermeasure

Hidenori TAKAHASHI*
Yoshiyuki MORIKAWA**
Shoichi TSUKUNI***
Makoto YOSHIDA****
Hisashi FUKADA*****

Synopsis

Lattice-shaped cement treatment by using the deep mixing method and others has been used as a liquefaction countermeasure, where the cement treatment normally reaches un-liquefiable stratum. In terms of the economic pursuit of ground improvement, the method to reduce the improvement depth was investigated by a series of model tests and numerical analyses in the present study. The studies described that a liquefaction countermeasure could be seen to synchronize the movements of un-liquefiable stratum and floating and cemented soil solid, which was formed by reducing the improvement depth.

Key Words: liquefaction, lattice-shaped cement treatment, improvement depth, floating-type, deep mixing method

* Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Field
** Soil Stabilization Group, Geotechnical Engineering Field
*** Takenaka Civil Engineering & Construction
**** Penta-ocean Construction
***** Fudo Tetra
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445054 Fax : +81-46-8444577 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
1.1 研究の概要	7
1.2 液状化対策効果の発現メカニズム	8
2. 遠心模型実験条件	10
2.1 実験ケースと模型地盤の作製方法	10
2.2 振動実験方法	12
3. 改良深さの影響	13
3.1 過剰間隙水圧の発生特性	13
3.2 入力加速度と最大過剰間隙水圧の関係	13
3.3 地表面の沈下特性	14
4. 着底型形式を併用した対策効果	14
4.1 応答加速度特性	14
4.2 過剰間隙水圧の発生特性	16
4.3 地表面の沈下特性	17
5. 動的数値解析による検討	18
5.1 数値解析の概要と条件	18
5.2 模型実験と数値解析の比較	21
5.3 改良深さと液状化対策効果の関係	23
5.4 側方の着底型固化体の必要幅の検討	24
6. まとめ	25
7. おわりに	26
謝辞	26
参考文献	26
付録	28

1. はじめに

1.1 研究の概要

地震時に緩い砂地盤で生じる液状化現象は噴砂や地盤沈下などの地表面に対する被害を生むだけでなく、基礎杭に対する地盤反力や支持力を低減したり、岸壁や擁壁へ多大な土圧を作用させて被害をもたらす。このため、砂地盤での液状化を抑制する多くの工法が提案され、液状化対策として施工が進められている。

液状化対策工法の中で、細粒分を多く含む地盤にも適用できる工法として、セメントを用いた深層混合固化処理工法¹⁾がある。深層混合固化処理工法とは、石灰やセメント、セメント系固化材などを地中に供給し地盤内で攪拌翼を用いて機械的に混合することによって地盤を固化する工法である。近年では、既設構造物などを対象に、高圧噴射を利用して地盤を崩し硬化材を流し込む高圧噴射式攪拌工法²⁾なども利用されている。これらの工法では、固化処理された固化杭を多く形成することによって任意の形状の固化体を造成することが可能である。

改良率を低減させた経済的な形式として、図-1.1に示すような格子状の形式がある。液状化地盤を固化処理工法で格子状に固化することによって、固化壁に囲まれた液状化地盤において地震時に発生するせん断応力は低減し、液状化を抑制できる^{3), 4), 5)}。この工法を適用した実際の埋立地盤において、地震時に液状化が抑制されたと

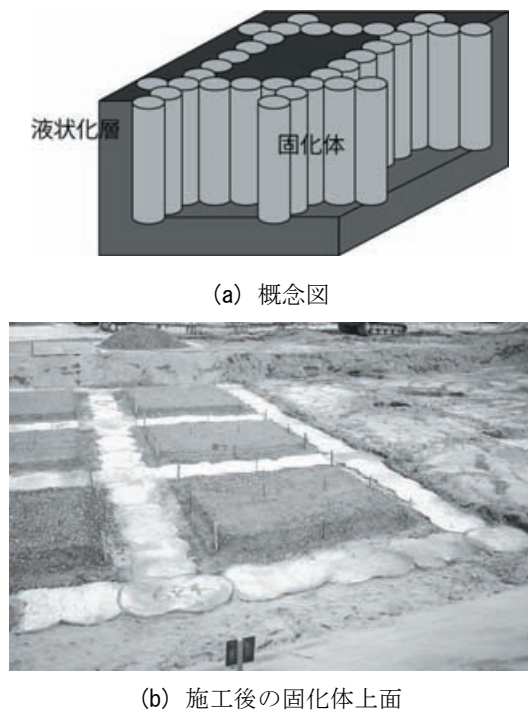


図-1.1 格子状固化処理工法

いう報告例^{6), 7)}もある。しかしながら、液状化対策としてよく利用されるサンドコンパクションパイル工法に比べて深層混合固化処理工法等は比較的高価である。このため、必要な固化量を減らせることはコスト低減に大きく寄与する。特に、既存既設直下にも適用できる高圧噴射式攪拌工法は非常に高価であり、その固化量を減らすことは経済的に大きなメリットとなる。

過去に、高橋ら⁸⁾は格子状固化処理工法を対象として格子の壁の間隔を変化させた模型実験を実施しており、格子間隔の影響を明らかにしている。本研究では、より固化量を減らす観点から、図-1.2に示すように格子状固化体の全体を非液状化層に着底させない形式（以降、浮き型形式と称す）について検討を行い、その液状化対策効果を調べた。浮き型形式の固化体の側方には、その非液状化層に対する相対的な水平変位を低減するために、着底型の構造体を設置することとした。なお、浮き型の固化体と着底型の構造体は地震時の変形挙動が大きく異なることが予想され、両者を剛結すると内部安定性を保てない可能性が高い。そこで安全側の設計として、剛結しないことを想定して検討を進めた。

具体的な検討方法としては、実物スケールでの地盤構造物の応力状態を再現できる遠心力場で振動模型実験を行い、浮き型の格子状固化処理地盤での液状化特性を調べた。また、模型実験をシミュレートした有限要素法解析による動的数値解析を行い、液状化特性を表すパラメータを同定するとともに、固化体の深さを変化させたパラメトリックな解析を実施し、その効果を検討した。

模型実験では2つのシリーズの実験を実施しており、1つ目のシリーズでは、浮き型の固化体の非液状化層に対

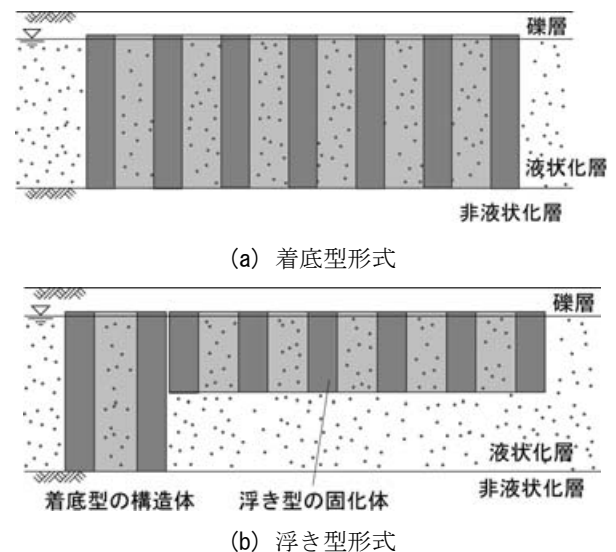


図-1.2 格子状固化処理工法の種類

表-1.1 1次元解析の土質パラメータ (せん断応力低減効果)

	G_0 (MN/m ²) ($\sigma'_0=98\text{kN/m}^2$)	m_G^*	ν	ρ (g/cm ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	h_{max}
表層	62	0.5	0.33	1.84	0.0	39.0	0.24
固化土	150	0.0	0.33	2.04	—	—	—
液状化層	62	0.5	0.33	2.04	0.0	39.0	0.24
非液状化層	37	0.0	0.33	2.04	—	—	—

* m_G : 初期せん断剛性の有効拘束圧依存性を表すパラメータ

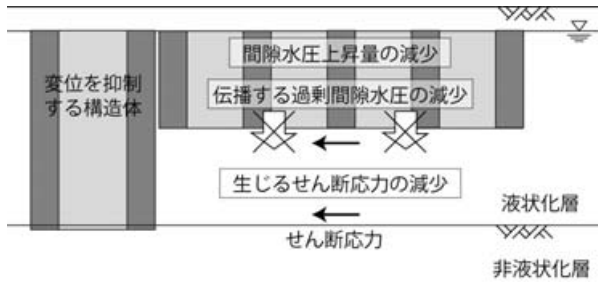


図-1.3 対策効果発現メカニズムの概念図

する相対的な水平変位を極力低減するため、固化体の側方に壁面を設けた。固化体の水平変位を低減することによって、非液状化層と固化体の振動を極力同期させ、両者に挟まれた液状化層で発生するせん断応力を低減し、液状化を抑制することが可能と考えられる。2つ目のシリーズでは、より現実的な地盤条件を想定し、浮き型の固化体の側方に水平変位を抑制する構造体を設置した。この実験シリーズでは、水平変位を抑制する構造体として着底型の格子状固化体を用いている。

動的数値解析では、格子状の固化体を3次元でモデル化し、有限要素法解析によって地震応答特性を調べた。また、浮き型の固化体の深さを変化させたパラメトリック・スタディを実施し、固化体の深さと液状化対策効果の関係を調べた。

1.2 液状化対策効果の発現メカニズム

(1) せん断応力の低減

ここでは、浮き型形式の格子状固化処理地盤での液状化対策効果の発現メカニズムについて考察しておく。図-1.3の概念図に示すように、深層で発生するせん断応力の低減および浅層から深層への過剰間隙水圧の伝播の抑制の2つの効果で液状化対策が表れていると著者らは考えている。

1つ目のせん断応力の低減については、図-1.3に示すように非液状化層と浮き型の固化体の振動を同期させて、両者に挟まれた液状化層で発生するせん断応力を低減し、液状化を抑制できると考えられる。このせん断応力の低減効果を確認するため、有限要素法による1次元の動的

表-1.2 1次元解析計算ケース (せん断応力低減効果)

ケース名	形式	固化体の深さ	水平変位の同期
a	無改良	0.0 m	無し
b	浮き型	6.0 m	無し
c	浮き型	6.0 m	有り

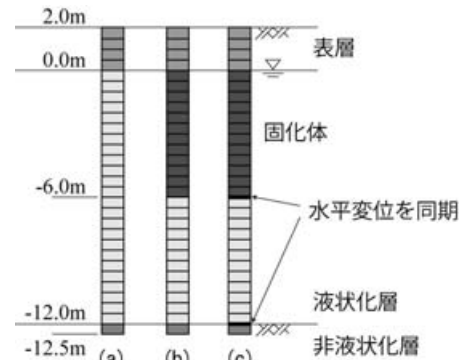


図-1.4 1次元解析モデル (せん断応力低減効果)

数値解析を実施した。表-1.1に計算に用いた土質パラメータを、表-1.2に計算ケースをまとめている。また、図-1.4に解析モデルを示している。ケースaは無改良の地盤、ケースbとcは浅層を改良した浮き型形式の地盤をモデル化しており、ケースbにおいては非液状化層表面と浮き型の固化体下端の水平変位を同期させず、ケースcにおいては同期させて計算を行った。表層と液状化層には非線形の弾塑性モデル (骨格曲線は双曲線モデル) を、固化体と非液状化層には線形弾性モデルを構成則として用いた。なお、この解析は地盤の応力状態を確認することを目的としているため、液状化をモデル化しなかった。入力した振動は最大加速度が 3.0 m/s^2 の 2 Hz の正弦波であり、振動時間は 20 秒 とした。

図-1.5に各計算ケースにおける深度方向のせん断応力分布を、図-1.6に深度方向のせん断ひずみ分布を示している。図-1.5に示すように、無改良のケースaおよび非液状化層と同期させない浮き型のケースbにおいては、液状化層の深層において発生するせん断応力が大きいことが分かる。このため、図-1.6のように深層で大きなせん

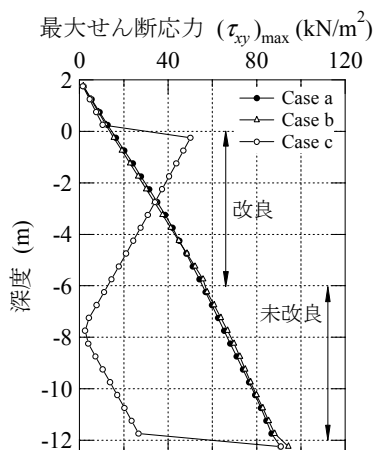


図-1.5 深度方向のせん断応力分布

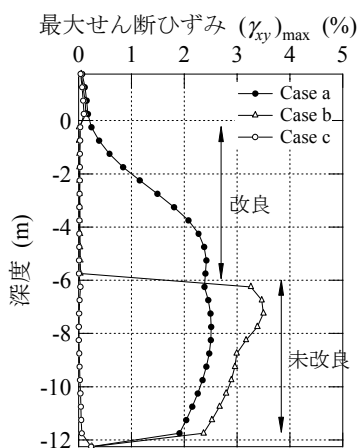


図-1.6 深度方向のせん断ひずみ分布

ん断ひずみが生じている。この解析においては液状化をモデル化していないが、このような大きなせん断応力およびせん断ひずみが生じることで、液状化層の深層において地盤が液状化すると考えられる。

一方、図-1.5 に示した非液状化層と同期させた浮き型のケース c においては、浮き型の固化体下部の深層でのせん断応力が小さいことが分かる。このため、図-1.6 に示すように、深層におけるせん断ひずみも小さい。このことから、非液状化層と浮き型の固化体の水平変位を同期させることによって、未改良の深層における液状化を抑制できると考えられる。

(2) 過剰間隙水圧伝播の低減

2 つ目の過剰間隙水圧の伝播の抑制については、浅層を格子状に固化することでその格子壁に囲まれた浅層において間隙水圧の上昇を抑えることができる。浅層において大きな過剰間隙水圧が発生する無改良のケースでは、深層で発生した過剰間隙水圧が振動中に上部の浅層へ消

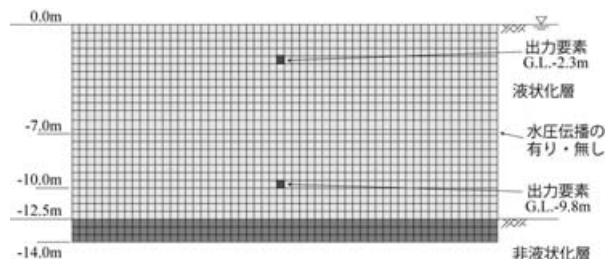


図-1.7 2次元解析モデル（過剰間隙水圧の抑制効果）

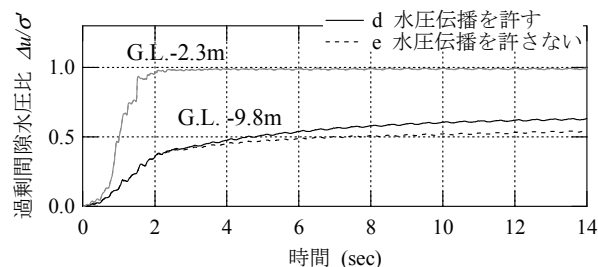


図-1.8 浅層と深層での過剰間隙水圧比の時系列

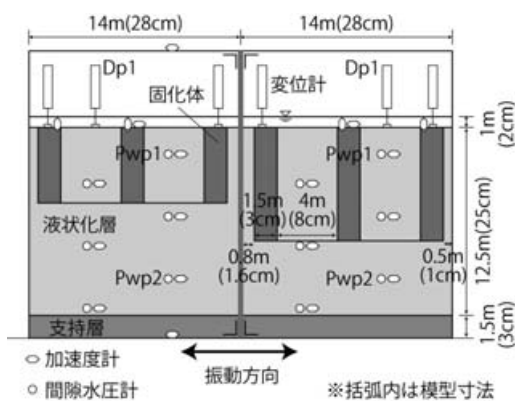
散できないか、あるいは逆に浅層から過剰間隙水圧が深層へ伝播する場合も起こり得る。浅層を固化することで深層の過剰間隙水圧が浅層へ消散でき、浅層から深層への水圧伝播の可能性も減るため、液状化対策効果があると言える。特に、地震動の継続時間が長い場合、水圧伝播が液状化特性に与える影響は大きくなり、浮き型の格子状固化処理工法の有効性は増すと考えられる。

深層の過剰間隙水圧が浅層へ消散することは容易に想像できるが、浅層から深層への過剰間隙水圧が伝播することは想像に難い。そのため、この現象を有限要素法による2次元の動的数値解析で確認した。図-1.7 に解析モデルを示している。計算ケースとしては、深度 6.8 ~ 7.0 m の要素において水圧の伝播を許す場合（ケース d）と許さない場合（ケース e）の2つとした。計算に用いた構成則や土質パラメータは5章で後述する表-5.3 のものを用いた。なお、構成則は過剰間隙水圧の伝播も考慮できるモデルである。入力振動を最大加速度が 1.0 m/s² の正弦波とし、継続時間は 15 秒とした。

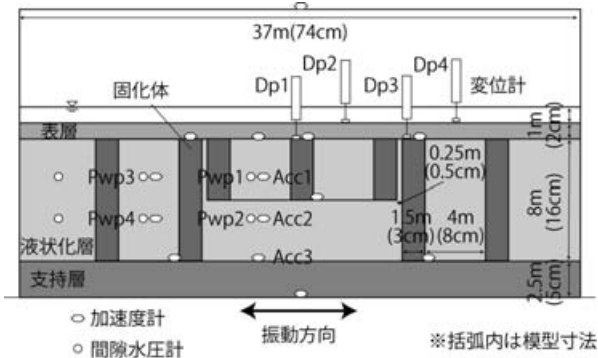
図-1.8 に、計算ケース d と e の浅層 (G.L.-2.3m) および深層 (G.L.-9.8m) における過剰間隙水圧比の時系列を示している。図に示すように、水圧伝播を許さなかったケース e の深層では、3 秒以降の間隙水圧の上昇が緩やかで、ほぼ平衡状態にあった。一方、水圧伝播を許したケース d の深層では、3 秒以降も間隙水圧が上昇し続け、浅層から深層へ過剰間隙水圧が伝播していた。このことから、浅層での過剰間隙水圧の抑制は深層での間隙水圧の上昇量を低減させ、液状化対策効果となり得ることが確認された。

表-2.1 実験ケースの一覧

シリーズ	ケース	固化体の深さ			液状化層の相対密度	形式
		左	中央	右		
A	A1	—	0.0 m	—	54 %	無改良
	A2	—	5.0 m	—	53 %	浮き型
	A3	—	7.5 m	—	53 %	浮き型
	A4	—	10.0 m	—	53 %	浮き型
	A5	—	12.5 m	—	46 %	着底型
B	B1	0.0 m	0.0 m	0.0 m	48 %	無改良
	B2	8.0 m	8.0 m	8.0 m	43 %	着底型
	B3	8.0 m	4.0 m	8.0 m	48 %	浮き型
	B4	8.0 m	6.0 m	8.0 m	46 %	浮き型
	B5	0.0 m	4.0 m	8.0 m	54 %	浮き型
	B6	8.0 m	2.0 m	8.0 m	57 %	浮き型



(a) シリーズ A (A2, A3)



(b) シリーズ B (B3)

図-2.1 実験模型の概略図

2. 遠心模型実験条件

2.1 実験ケースと模型地盤の作製方法

上述のように、本研究は2つの実験シリーズで構成されている。1つ目の実験シリーズ（以降、シリーズAと称す）は、図-2.1(a)に示すように浮き型の固化体の非液状化層に対する相対的な水平変位を側方の壁面で抑制したものである。2つ目の実験シリーズ（以降、シリーズBと称す）は、図-2.1(b)に示すように浮き型の固化体側方に着底型の格子状固化体を設置したものである。

シリーズ A, B の実験ケースの一覧を表-2.1 に示す。

シリーズ A では、試料容器内部を2つの領域に分け、それぞれ深さが異なる浮き型の固化体をモデル化し、固化体の深さと液状化対策効果の関係を調べた。ケース A1 と A4、ケース A2 と A3 が同じ試料容器内で振動実験を行ったケースである。シリーズ B では、試料容器内に着底型と浮き型の固化体をモデル化し、浮き型の固化体の深さを变化させた実験を実施し、より現実的な地盤条件における固化体の深さと液状化対策効果の関係を調べた。ただし、試料容器の幅に制限があるため、浮き型の固化体全体の幅は実際に現場で想定している幅よりも狭くなっている。

格子壁の間隔は4 m と統一した。過去に高橋ら⁸⁾によって格子壁の間隔が液状化対策効果に与える影響が調べられており、そこでは格子壁の間隔 L と液状化を抑制したい地盤の深度 d の比 L/d を1.5 以下とすれば 5.0 m/s^2 と大きな振動によっても液状化しないことが述べられている。これに倣うと、ケース B3 と B5 において浮き型の固化体の中心点（深度 $d=3 \text{ m}$ ）で液状化が生じないようにするためには、格子の間隔を $L=1.5 \times d=1.5 \times 3=4.5 \text{ m}$ 以下とする必要がある。このため、安全側の整数値として4.0 m を採用した。

両シリーズの模型寸法は、実物寸法換算で地盤高さ $14.0 \text{ m} \times$ 幅 $28.0 \text{ m} \times$ 奥行き 9.0 m （シリーズ A）と地盤高さ $11.5 \text{ m} \times$ 幅 $36.8 \text{ m} \times$ 奥行き 10.0 m （シリーズ B）である。非液状化層としての支持層は、相対密度が $D_r=76 \sim 81 \%$ （シリーズ A）の豊浦珪砂、 $D_r=81 \sim 93 \%$ （シリーズ B）の相馬珪砂5号で作製した砂層である。豊浦珪砂と相馬珪砂5号の物性を表-2.2(a)と(b)に示しておく。なお、支持層は所定の高さからサンド・ホッパーによって砂を空中で落下させて堆積させる砂降らし法で作製した。

支持層を作製した後、液状化層の作製に先だって加速

表-2.2 砂材料の物性

(a) 豊浦珪砂		
土粒子密度, ρ_s		2.66
最大間隙比, e_{max}		0.99
最小間隙比, e_{min}		0.61
粒度	D_{60} (mm)	0.19
	D_{30} (mm)	0.16
	D_{10} (mm)	0.13
	D_{60}/D_{10}	1.49
(b) 相馬珪砂 5 号		
土粒子密度, ρ_s		2.65
最大間隙比, e_{max}		1.13
最小間隙比, e_{min}		0.68
粒度	D_{60} (mm)	0.35
	D_{30} (mm)	0.29
	D_{10} (mm)	0.23
	D_{60}/D_{10}	1.54
(c) 相馬珪砂特 4 号		
土粒子密度, ρ_s		2.65
最大間隙比, e_{max}		0.76
最小間隙比, e_{min}		0.55
粒度	D_{60} (mm)	1.40
	D_{30} (mm)	1.06
	D_{10} (mm)	0.82
	D_{60}/D_{10}	1.70

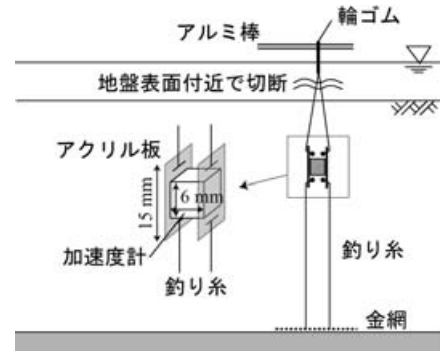
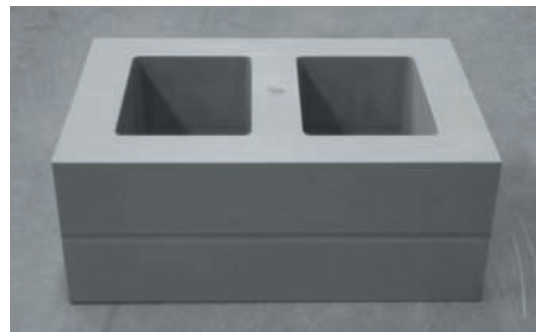
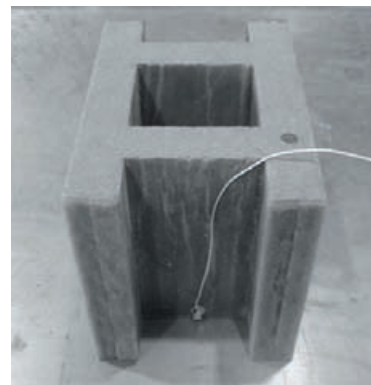


図-2.2 計測センサーの設置方法



(a) シリーズ A (塩化ビニル製)



(b) シリーズ B (珪砂の固化処理土)

図-2.3 実験に用いた固化体模型

度計および間隙水圧計を所定の位置に吊り下げた。図-2.2 にセンサーの設置方法の概略図を示している。釣り糸とアクリル板を使ってセンサーの位置と方向を固定し、乾燥砂地盤の作製後に釣り糸を上部で吊り上げている輪ゴムを地盤表面付近で切断し、センサーが地盤内で自由に振動できるようにした。センサーの設置後、再び空中落下による砂降らし法によって液状化層となる緩い砂地盤を作製した。砂材料には支持層と同じ相馬珪砂 5 号を用いた。

浮き型の固化体の下端となる深さで砂降らしを一度中断し、バキュームで整形して平坦な地表面を作製し、その上に格子状の固化体を設置した。シリーズ A では、固化体として単位体積重量が 13.7 kN/m^3 の塩化ビニル製のモールド (図-2.3 (a) 参照) を用いた。シリーズ B では、含水比 30% の相馬珪砂 5 号に早強セメント (乾燥重量比 20%) を混合・攪拌して、モールド内で固化したもの (図-2.3 (b) 参照) を用いた。なお、固化体の一軸圧縮強さは $3219 \sim 5300 \text{ kN/m}^2$ であり、湿潤単位体積重量は $18.0 \sim 19.8 \text{ kN/m}^3$ であった。固化体の設置後に再び砂降らしを行い、液状化層となる緩い乾燥砂地盤を作製した。緩い砂地盤の平均的な相対密度は $D_r = 46 \sim 54\%$ (シリーズ A)、 $D_r = 48 \sim 57\%$ (シリーズ B) であった。また、シリーズ B では、路床を想定した表層地盤を相馬珪砂特 4 号

で作製した。その物性を表-2.2 (c) に示している。特 4 号は 5 号よりも粗く、相対密度も $D_r = 81 \sim 98\%$ と大きくしたため、この表層では液状化は生じない。

通水方法についてもシリーズ A と B で異なる。シリーズ A では、炭酸ガス CO_2 で間隙を置換し、さらに脱気を行った後に、重力場で水頭差によって粘性流体を地盤に流し込んだ。この方法によって、完全飽和に近い状態の飽和砂地盤が作製できることを確認している^{8), 9)}。粘性流体は水の 50 倍の粘性を持つメトローズ水溶液であり、粘性の高い間隙水を用いるのは、動的遠心模型実験における動的変形現象と間隙水圧消散現象の時間の相似則を

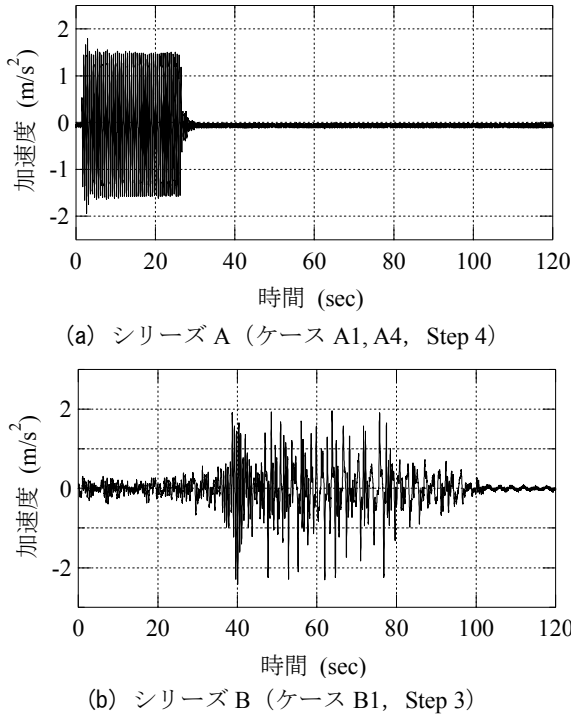


図-2.4 試料容器底面で計測した加速度

合わせるためである。シリーズ B では、遠心力場で粘性流体を地盤に流し込んだ。この方法は岡村・来山¹⁰⁾によって提案されたものであり、通水時におけるサクシオンによる不飽和領域を減らすことで、飽和度の高い地盤を作製できる。通水後、変位計や観察用のデジタルカメラ等を設置し、模型地盤とした。

2.2 振動実験方法

港湾空港技術研究所が所有する遠心模型実験装置 Mark II¹¹⁾を用いて、模型地盤内に実物スケールでの地中応力を再現した。実験装置の有効回転半径は 3.8 m である。なお、格子壁に囲まれた緩い飽和砂地盤が液状化する過程を遠心力場での振動実験で再現できることは、過去に Takahashi *et al.*⁸⁾が Modeling of models 手法を用いて調べている。そこでは、10G, 25G, 50G の 3 種類の遠心加速度下で、格子壁で囲まれた飽和砂地盤に対して振動実験を実施し、各遠心加速度における地盤での入力加速度に対する過剰間隙水圧の発生特性はほぼ一致することが確かめられている。

作製した模型地盤に対して遠心力場で振動を加え、その動的挙動を観察した。シリーズ A での振動の入力信号は 100 Hz (実物寸法換算で 2 Hz) の正弦波 50 波である。一方、シリーズ B での振動の入力信号は L2 地震動を想定した模擬不規則波である。波形の形状を保って徐々に大きな加速度振幅の波形を入力するステップ加振方式に

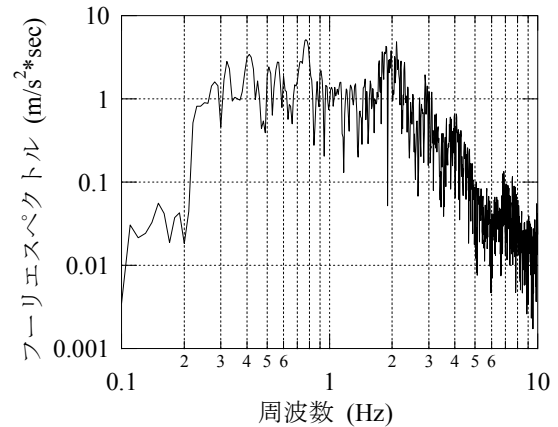


図-2.5 シリーズ B (ケース B1, Step 3) の入力加速度のフーリエスペクトル

表-2.3 計測振動の最大入力加速度

(a) シリーズ A

	A1 (m/s ²)	A2 (m/s ²)	A3 (m/s ²)	A4 (m/s ²)	A5 (m/s ²)
Step1	0.27	0.64	0.64	0.27	0.49
Step2	0.82	0.80	0.80	0.82	0.81
Step3	1.16	1.07	1.07	1.16	1.16
Step4	1.53	1.36	1.36	1.53	1.62
Step5	2.39	2.16	2.16	2.39	2.31
Step6	3.51	3.16	3.16	3.51	3.33
Step7	4.52	4.17	4.17	4.52	4.63
Step8	5.43	5.19	5.19	5.43	5.82

(b) シリーズ B

	B1 (m/s ²)	B2 (m/s ²)	B3 (m/s ²)	B4 (m/s ²)	B5 (m/s ²)	B6 (m/s ²)
Step1	0.46	0.44	0.44	0.46	0.51	0.51
Step2	2.00	1.94	1.94	1.96	1.90	1.90
Step3	2.44	2.32	2.51	2.59	2.78	2.84
Step4	2.70	2.68	2.76	2.76	2.82	2.78
Step5	2.68	2.61	2.68	2.76	2.91	2.84
Step6	2.74	2.53	2.74	2.80	2.87	2.84

よって振動実験を実施し、振動中の地盤内の応答加速度や間隙水圧の上昇、振動前後の側面写真や地盤変形量を計測した。

振動の応答加速度波形の一例として、実験ケース A1, A4 (Step 4)および B1 (Step 3)での試料容器底面での加速度時系列を図-2.4 に示す。また、実験ケース B1 での入力加速度のフーリエスペクトルを図-2.5 に示す。シリーズ A では入力信号を正弦波としたものの、振動台の能力限界によって計測した加速度波形はピーク値で尖る形状となっていた。なお、いずれの実験ケースにおいても、試料容器天端での加速度振幅は底面での振幅よりも 10%程度大きくなる傾向があった。各実験ケースにおいて試料容器底面で計測した加速度振幅の最大値をまとめると表-2.3 のようになる。表に示すように、各実験ケースの模型重量が異なるなどの理由で、同じ波形信号を入

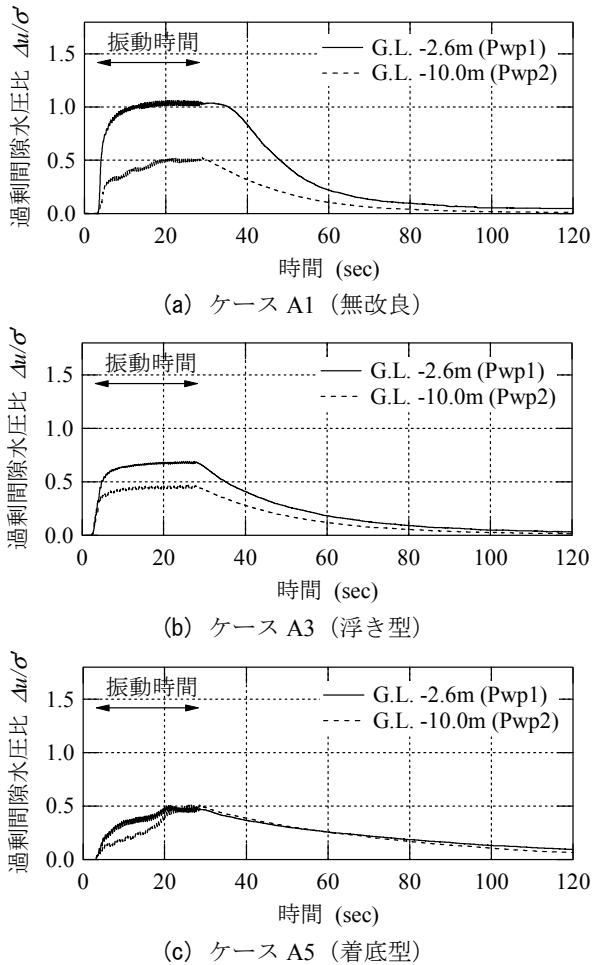


図-3.1 過剰間隙水圧比の時系列 (シリーズ A)

力したにもかかわらず実験ケース間で入力加速度の振幅は多少異なっていた。

3. 改良深さの影響

3.1 過剰間隙水圧の発生特性

実験シリーズ A では、浮き型の固化体の側方に壁面を設けて非液状化層と固化体の振動を同期させて、液状化対策効果が発揮されるかを調べたが、本節では、特に過剰間隙水圧の発生特性について述べる。図-3.1 に、代表として、実験ケース A1 (無改良), A3 (浮き型), A5 (着底型) における過剰間隙水圧比 (以降、 $\Delta u/\sigma$ と記す) の時系列を示す。なお、時間は実物寸法換算しており、 $\Delta u/\sigma$ は間隙水圧計 (図-2.1 (a) の Pwp1, Pwp2) で計測した過剰間隙水圧を有効上載圧で除したものである。また、入力加速度が約 1.50 m/s^2 (Step 4)、深度 2.6 m, 10.0 m での実験値を示しており、振動中の実験値の変動成分を除去するために 1 波形の区間において移動平均を取っている。

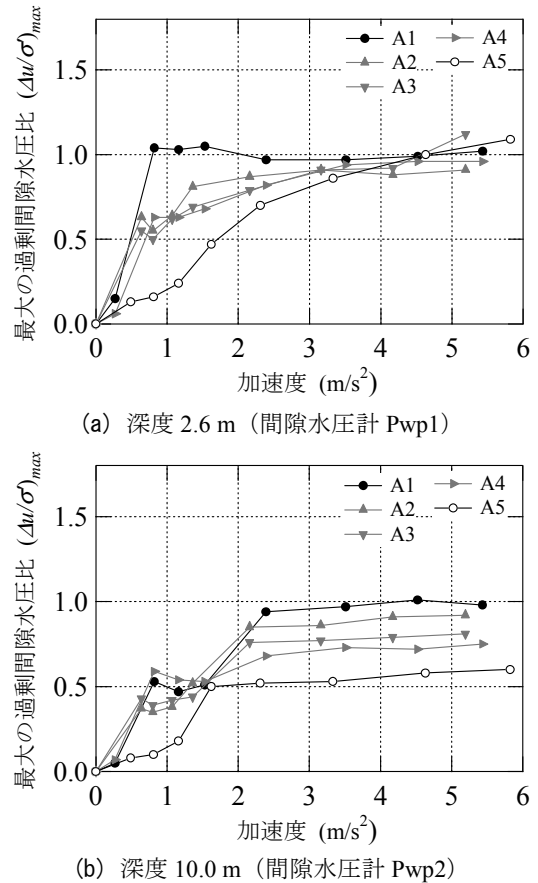


図-3.2 加速度と最大過剰間隙水圧比 (シリーズ A)

図-3.1 (a) に示したケース A1 での時系列を見ると、深度 2.6 m の浅層において、振動開始直後に $\Delta u/\sigma$ が急激に増加して、液状化を示す 1.0 に達している。振動終了後においても $\Delta u/\sigma$ の減少に時間を要している。深度 10.0 m の深層においては $\Delta u/\sigma$ が 0.5 程度までしか上昇しなかった。図-3.1 (b) に示した A3 では、振動開始直後に浅層において $\Delta u/\sigma$ が 0.7 程度、深層において $\Delta u/\sigma$ が 0.5 近くまで上昇し、振動中の後半には定常状態に至っていた。浅層における過剰間隙水圧が低減されていることから、浮き型の格子内部の浅層においては液状化対策効果が認められた。図は省略するが、他の浮き型の実験ケース A2, A4 においても同様の傾向であった。図-3.1 (c) に示した A5 においては、浅層と深層のいずれにおいても $\Delta u/\sigma = 0.5$ 程度であり、浅層での液状化対策効果を確認できた。ただし、深層においては、いずれの実験ケースにおいても $\Delta u/\sigma$ が 0.5 程度に留まっており、この振動レベルでは液状化対策効果を確認できなかった。

3.2 入力加速度と最大過剰間隙水圧の関係

図-3.2 には、深度 2.6 m と 10.0 m (図-2.1 (a) の Pwp1,

Pwp2) における入力加速度と過剰間隙水圧比の最大値 $(\Delta u/\sigma')_{max}$ の関係を実物寸法換算で示している。なお、 $\Delta u/\sigma'$ は振動中に変動するために、その変動の中心点を $(\Delta u/\sigma')_{max}$ とした。

図-3.2(a)に示した深度 2.6 m での関係を見ると、入力加速度が 1.0 m/s^2 以下の段階においてケース A1 での $(\Delta u/\sigma')_{max}$ は 1.0 に達している。一方、入力加速度が 1.0 m/s^2 以下の場合、A2 ~ A4 では $(\Delta u/\sigma')_{max}$ が 0.7 以下となっており、ここでも浅層での液状化対策効果が確認できた。A5 では $(\Delta u/\sigma')_{max}$ が 0.2 以下となっており、より顕著な対策効果が現れていた。さらに、A2 ~ A4 において $(\Delta u/\sigma')_{max}$ が 1.0 に達するのは入力加速度が 4.0 m/s^2 以上となった段階であり、これは A5 の結果とほぼ等しい。このことは、浮き型形式であっても、格子状固化体に囲まれた浅層において液状化対策効果が発揮されることを示している。ただし、A2~A4 の結果には大きな差が無く、浮き型の実験ケース群において固化体の深さの違いによる効果は明確には表れていなかった。

図-3.2(b)に示した深度 10.0 m での関係を見ると、入力加速度が 2.0 m/s^2 以下の段階ではケース A1 と A2~A4 の $(\Delta u/\sigma')_{max}$ の間に明確な差が無いものの、入力加速度が 2.0 m/s^2 以上の段階で、A1 の $(\Delta u/\sigma')_{max}$ は 1.0 近くで、A2 ~ A4 の $(\Delta u/\sigma')_{max}$ は 0.7~0.9 で定常化していた。A2~A4 においては、固化体の深さが大きいほど $(\Delta u/\sigma')_{max}$ は小さかった。また、A5 では $(\Delta u/\sigma')_{max}$ は 0.5 ~ 0.6 で定常化していた。これらのことから、浮き型形式であっても格子状の固化を行っていない深層において液状化対策効果が発揮され、固化体が深いほど対策効果も大きくなることを確認された。

3.3 地表面の沈下特性

本節では、地表面沈下量について述べる。入力加速度と格子状固化体で囲まれた内部の砂地盤の累積の地表面沈下量の関係を図-3.3 に実物寸法換算で示す。変位計の位置は図-2.1(a)に Dp1 として表わしている。なお、実験シリーズ A では、砂地盤の飽和単位体積重量よりも小さい単位体積重量を持つ固化体を用いたため、砂地盤の間隙水圧が上昇して砂地盤と固化体間の摩擦力が低下すると固化体が浮き上がった。このため、図-3.3 には、固化体の浮き上がりの現象が顕著に生じる前の振動段階での実験値を示している。

図に示すように、入力加速度が 1.0 m/s^2 以下の段階においては、ケース A1 と A2 では大きな沈下量が生じるが、A3 ~ A5 での沈下量は小さかった。ただし、入力加速度が 1.0 m/s^2 を超えると、いずれの実験ケースにおいても

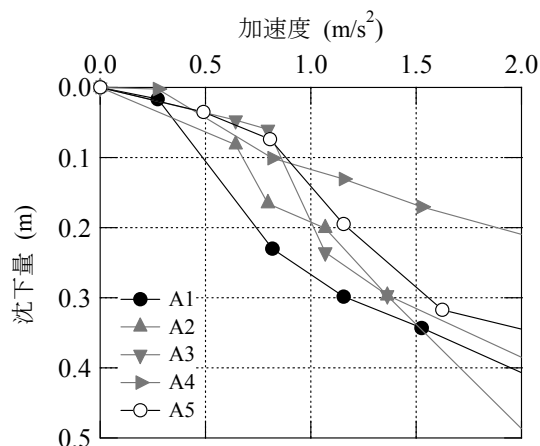


図-3.3 地表面沈下量 (シリーズ A) (変位計 Dp1)

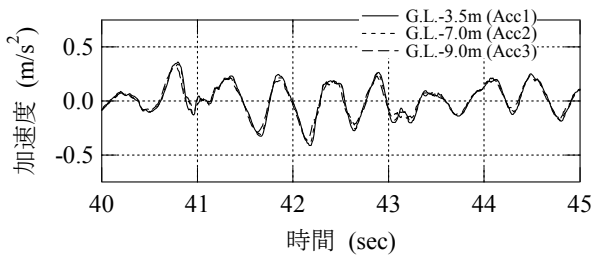
比較的大きな沈下量が表れていた。このことから、小さな振動レベルにおいては、固化体の深さをある程度確保すれば、浮き型の改良であっても沈下量を低減できることが確認できた。振動レベルが大きくなると固化体の深さにかかわらず沈下が生じたのは、シリーズ A ではシリーズ B のように液状化を生じない表層を設けなかったために、改良の有無に関係なく地盤に変位計の先端部 (地盤との接触部) がめり込んだ可能性が考えられる。このため、シリーズ B では表層を非液状化層とし、固化体の深さと地表面沈下量の関係を再度調べている。

4. 着底型形式を併用した対策効果

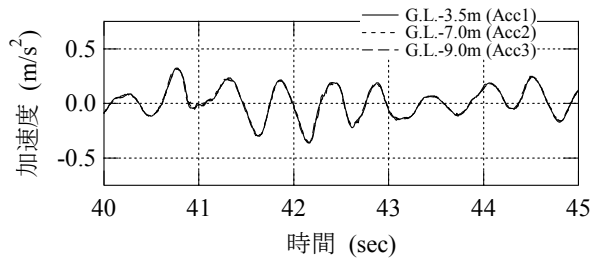
4.1 応答加速度特性

実験シリーズ B では、より現実的な地盤条件を想定し、浮き型の固化体の側方に水平変位を抑制する着底型の格子状固化体を設置し、液状化対策効果が発揮されるかを調べたが、本節では、特に地盤の応答加速度特性について述べる。図-4.1 および図-4.2 には、実験ケース B1 (無改良)、B2 (着底型)、B4 (浮き型) における応答加速度の時系列 (主要動の初期を拡大したもの) を示している。図-4.1 は入力加速度が約 0.45 m/s^2 (Step 1) の場合、図-4.2 は約 1.97 m/s^2 (Step 2) の場合の計測値である。なお、加速度と時間は実物寸法換算しており、液状化層内の浅層と深層である深度 3.5 m, 7.0 m (図-2.1(b)の Acc1, Acc2) および支持層の表面である深度 9.0 m (図-2.1(b)の Acc3) での応答加速度を示している。

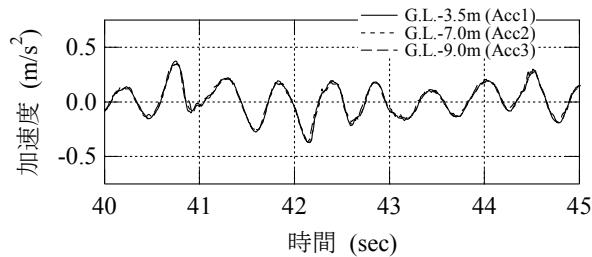
図-4.1 に示したケース B1, B2, B4 での Step 1 における時系列を見ると、いずれの深度においてもほぼ同程度の応答加速度となっており、地盤が浅層まで一体的に振動していることが分かる。この振動レベルにおいては、地



(a) ケース B1 (無改良)



(b) ケース B2 (着底型)

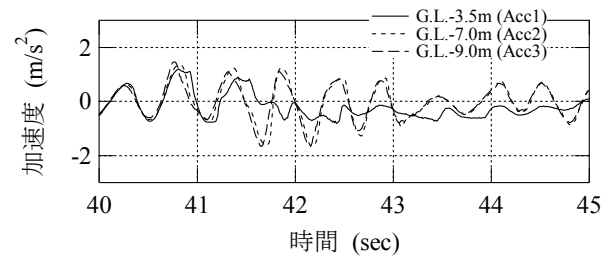


(c) ケース B4 (浮き型)

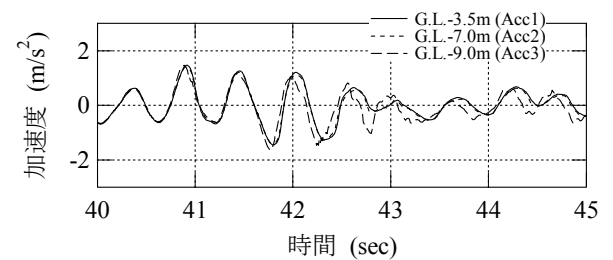
図-4.1 地盤の応答加速度の時系列 (シリーズ B, Step 1)

盤の非線形化や液状化が進んでいなかった。一方、図-4.2(a)に示した B1 での Step 2 では、液状化層の浅層の加速度が支持層や深層の加速度とずれており、特に 42 秒以降においてはほぼ支持層と深層の振動が連動していなかった。これは、この振動レベルにおいては浅層の地盤が剛性を失うほど十分に液状化したためと考えられる。図-4.2(b)と(c)に示した B2, B4 での Step 2 では、液状化層の浅層と深層の加速度が支持層の加速度よりも遅れており、位相遅れが発生していた。しかしながら、B1 とは異なり、浅層と深層の加速度は支持層の加速度とほぼ連動して振動しており、地盤の剛性は大きくは失われていない。すなわち、地盤は液状化状態には至っていない。これらのことから、加速度の観点においては、B2 の着底型だけでなく B4 の浮き型改良によっても液状化を抑制できることが確認された。

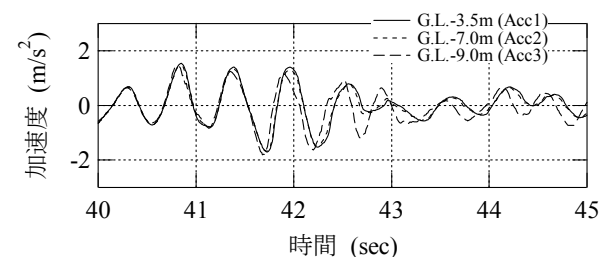
着底型や浮き型の改良を行うことで地盤全体の平均的な剛性がどの程度大きくなるかを確認するため、液状化層と固化体の複合地盤での固有周波数を調べた。図-4.3 に、地盤の非線形化が進んでいない Step 1 において液状



(a) ケース B1 (無改良)



(b) ケース B2 (着底型)



(c) ケース B4 (浮き型)

図-4.2 地盤の応答加速度の時系列 (シリーズ B, Step 2)

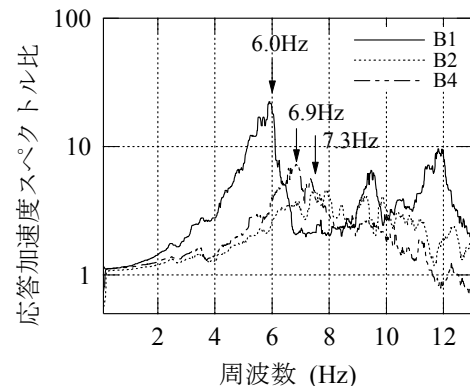


図-4.3 応答加速度スペクトル比 (シリーズ B, Step 1)

化層と固化体の複合地盤の上下端で計測した応答加速度のフーリエスペクトル比を示している。図に示した極値から判断すると、それぞれの実験ケースにおける 1 次モードの固有周波数は B1: 6.0 Hz, B2: 7.3 Hz, B4: 6.9 Hz であった。連続体の固有振動数 f_n と初期せん断弾性係数 G_0 には以下の関係式がある。

$$\frac{1}{f_n} = \frac{4H}{V_s} \quad (4.1)$$

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4.2)$$

ここに、 H : 地盤の層厚、 V_s : 弾性波 (S 波) の速度、 ρ : 地盤の密度である。この 2 式によると、 G_0 は f_n の 2 乗に比例している。この関係式を複合地盤にもあてはめると、無改良の B1 に比べて着底型の B2 で 1.48 倍、浮き型の B4 で 1.32 倍の平均的なせん断弾性係数を有していた。浮き型での剛性は着底型のそれよりも多少小さいが、無改良の剛性に比べて大きく、浮き型の改良であっても地盤の剛性を大きくできることが分かった。

4.2 過剰間隙水圧の発生特性

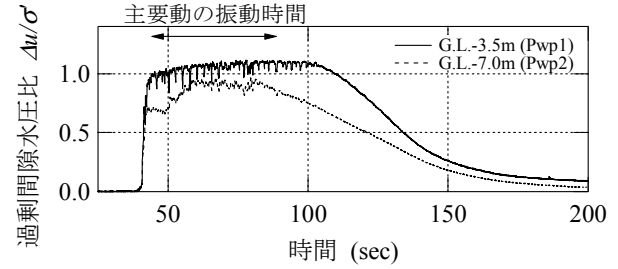
(1) 過剰間隙水圧比の時系列

本節では、過剰間隙水圧の発生特性について述べる。

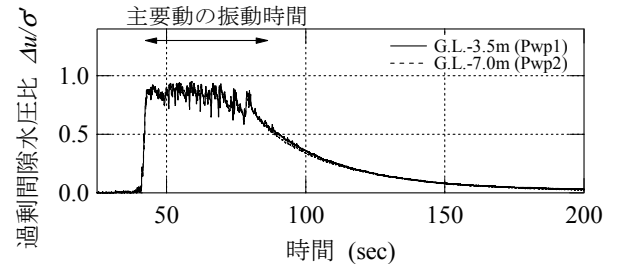
図-4.4 には、実験ケース B1 (無改良)、B2 (着底型)、B4 (浮き型) における Pwp1, Pwp2 (図-2.1 (b) 参照) での過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'$ の時系列を示している。横軸の時間は実物寸法換算している。また、入力加速度が約 1.97 m/s^2 (Step 2)、深度は 3.5 m, 7.0 m での実験値を示している。

図-4.4 (a) に示したケース B1 での時系列を見ると、深度 3.5 m の浅層において、振動レベルが大きい主要動を作用させた直後に $\Delta u/\sigma'$ が急激に増加して、液状化を示す 1.0 に達している。また、主要動の作用後においても $\Delta u/\sigma'$ が緩やかに減少しており、液状化の程度が大きかったことを表わしている。なお、地盤が液状化した場合、振動中に間隙水圧計が沈降するために、沈降量に相当する水圧の増分が発生する。振動中の沈降量を計測することが難しいために、図中に示した $\Delta u/\sigma'$ から水圧増分による値を引いておらず、 $\Delta u/\sigma'$ が 1.0 を超えて過剰間隙水圧の消散後も 0 となっていない。実験シリーズ B ではシリーズ A と比較して沈降量が大きいため、より顕著にこの特性が表れている。しかしながら、本稿では液状化の状況を把握することを目的としており、 $\Delta u/\sigma'$ が 1.0 を超えていても解釈に大きな問題は無いと見做し、振動中に生じる水圧増分に対する補正を行わないこととした。深度 7.0 m の深層においても、 $\Delta u/\sigma'$ が 1.0 に達していないものの 1.0 近くまで増加し、振動後の減少速度も遅い。このことから、深度 7.0 m においても、液状化の程度が比較的大きかったと推測される。

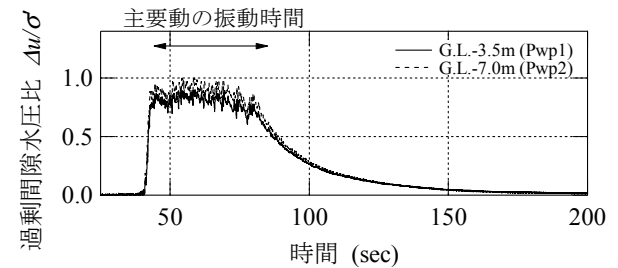
図-4.4 (b) に示したケース B2 での時系列を見ると、い



(a) ケース B1 (無改良)



(b) ケース B2 (着底型)



(c) ケース B4 (浮き型)

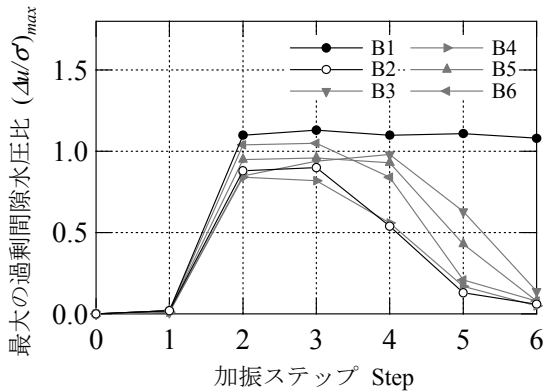
図-4.4 過剰間隙水圧比の時系列 (シリーズ B, Step 2)

ずれの深度においても、振動レベルが大きい主要動を作用させた際に $\Delta u/\sigma'$ が 1.0 に近い 0.9 程度まで増加している。しかしながら、振動後において $\Delta u/\sigma'$ は速やかに減少しており、地盤の液状化程度はそれほど高くないと考えられる。図-4.4 (c) に示した B4 においても B2 とほぼ同様の $\Delta u/\sigma'$ の傾向となっており、地盤の液状化程度はそれほど高くなかった。

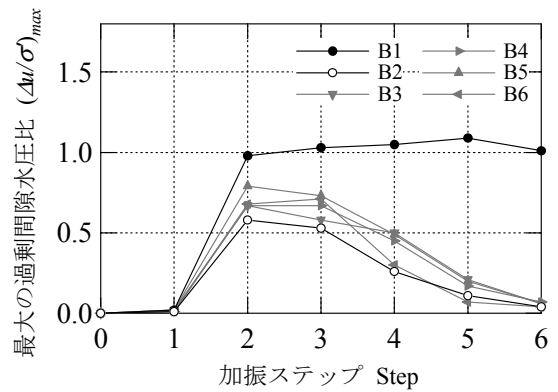
これらのことから、過剰間隙水圧の観点においても、B2 の着底型だけでなく B4 の浮き型改良によっても液状化を抑制できることが確認された。

(2) 最大の過剰間隙水圧比

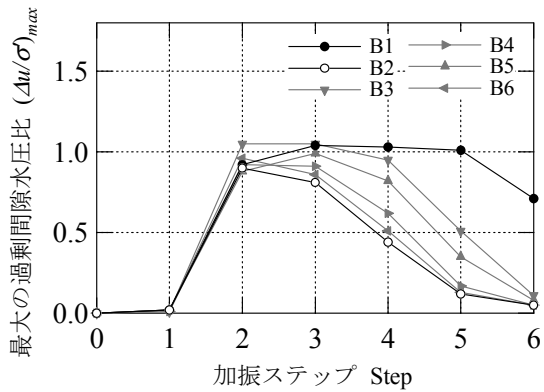
図-4.5 と図-4.6 には、深度 3.5 m と 7.0 m の各加振ステップでの最大の過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma')_{max}$ を示している。なお、 $\Delta u/\sigma'$ は振動中に変動するため、その変動の中心点を $(\Delta u/\sigma')_{max}$ とした。図-4.5 には浮き型格子体内部を含む実験模型中央部付近 (図-2.1 (b) の Pwp1, Pwp2) での実験値を、図-4.6 には浮き型の側方に設置した着底型の格子状固化体内部 (図-2.1 (b) の Pwp3, Pwp4) での実験値を示している。



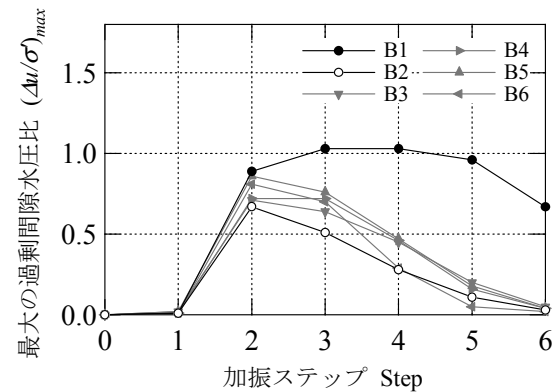
(a) 深度 3.5 m (間隙水圧計 Pwp1)



(a) 深度 3.5 m (間隙水圧計 Pwp3)



(b) 深度 7.0 m (間隙水圧計 Pwp2)



(b) 深度 7.0 m (間隙水圧計 Pwp4)

図-4.5 加振ステップと最大過剰間隙水圧比の関係(シリーズ B, 浮き型部)

図-4.6 加振ステップと最大過剰間隙水圧比の関係(シリーズ B, 着底型部)

図-4.5(a)の深度 3.5 m での結果を見ると、無改良のケース B1 の Step 2 において $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が 1.0 に達しており、その後の各加振ステップにおいても 1.0 まで増加している。つまり、Step 2 以降の加振ステップにおいて地盤は液状化し、振動を繰り返し加える毎に液状化することが分かった。一方、着底型のケース B2 においては、Step 2 と 3 において $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が 0.9 程度まで増加しているが、その後の加振ステップにおいては 0.6 以下となっており、地盤は液状化状態に至っていなかった。振動を繰り返し加えることで、地盤が液状化しにくくなっていた。浮き型のケース B3~B6 では、いずれの加振ステップにおいても B2 より $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が大きくなる傾向にあるが、B1 よりも $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が大幅に低減されており、浮き型であっても液状化抑制効果があった。図-4.5(b)に示した深度 7.0 m では、深度 3.5 m の結果に比べて $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が全般的に小さいが、深度 3.5 m とほぼ同様の傾向で $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が発生していた。

図-4.6(a)の深度 3.5 m での結果を見ると、無改良のケース B1 では、Step 2 以降の加振ステップにおいて $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が 1.0 に達しており、地盤が液状化している。

一方、着底型と浮き型のケース B2~B6 においては、Step 2 で $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が 0.6~0.8 程度まで増加するが、その後、振動を加える毎に $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が小さくなっており、液状化が抑制されていた。図-4.6(b)に示した深度 7.0 m においても同様の傾向にあり、浮き型の側方に設置した着底型格子状固化体の内部においては地盤が液状化していないことが分かった。

4.3 地表面の沈下特性

各加振ステップでの地表面の累積の沈下量を図-4.7 と図-4.8 に示す。沈下量は実物寸法換算で示している。図-4.7 には浮き型格子体上部(図-2.1(b)の Dp1, Dp2)での実験値を、図-4.8 には浮き型の側方に設置した着底型上部(図-2.1(b)の Dp3, Dp4)での実験値を示している。なお、実験シリーズ B で用いた固化体の飽和単位体積重量は砂地盤のそれと同程度であるため、シリーズ A のような振動中の固化体の浮き上がりは生じていない。

図-4.7 に示すように、無改良のケース B1 では Step 2 において 0.23 m 程度の沈下が生じ、その後の加振ステップ毎に沈下量は増加し、最終的には Step 6 において沈下

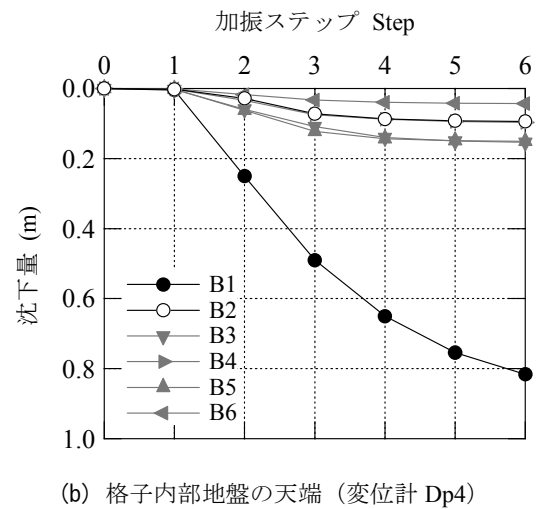
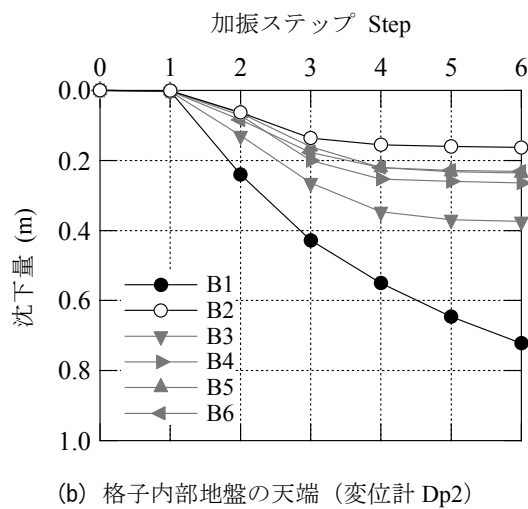
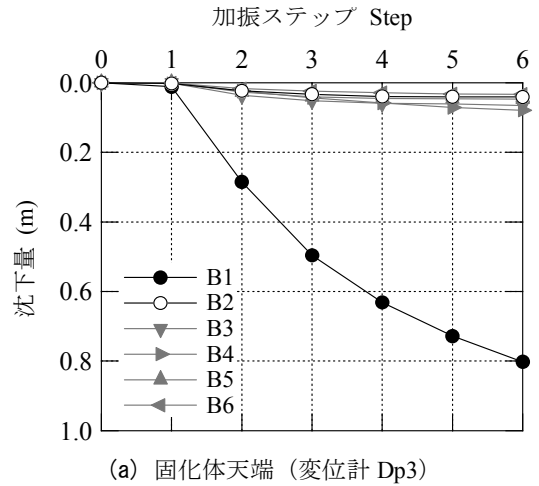
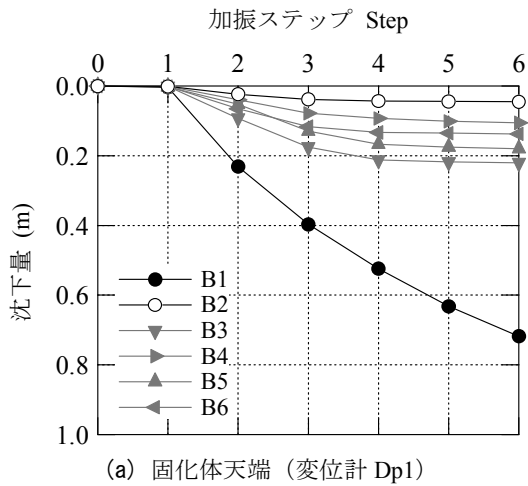


図-4.7 地表面沈下量 (シリーズ B, 浮き型部)

図-4.8 地表面沈下量 (シリーズ B, 着底型部)

量が 0.72 m まで達していた。これは地盤が加振ステップ毎に液状化したためである。一方、着底型のケース B2 の Step 2 では、固化体天端で 0.02 m、固化体内部地盤の天端で 0.06 m 程度の沈下であり、その後の各加振ステップにおいても大きな沈下は生じていなかった。これは地盤が液状化していないためである。浮き型のケース B3 ~ B6 では、いずれの加振ステップにおいても B2 より沈下量が大きくなる傾向にあるが、B1 に比べて沈下は大幅に低減されており、浮き型であっても沈下量の低減効果が大きいことが分かった。特に、B1 では繰り返して振動を加えることで、振動ステップ毎に地盤は大きく沈下したが、B3 ~ B6 のように浮き型の改良を施すことで、繰り返し加振による沈下量を大幅に低減できた。

図-4.8 に示した浮き型固化体の側方に設置した着底型固化体での沈下量を見ると、ケース B2 ~ B6 の Step 2 において、固化体天端で 0.02 ~ 0.04 m、固化体内部地盤の天端で 0.02 ~ 0.06 m 程度の沈下が生じているが、その後の各加振ステップにおいて沈下量が急激に大きくなる

ことはなかった。最終的には Step 6 において、固化体天端で 0.03 ~ 0.08 m、固化体内部地盤の天端で 0.04 ~ 0.15 m と小さな沈下であった。

5. 動的数値解析による検討

5.1 数値解析の概要と条件

(1) 数値解析の概要

前章までで、浮き型形式の液状化対策工法について検討を行い、その対策効果を実験的に明らかにした。本章では、遠心模型実験を動的数値解析でシミュレートして液状化特性を表すパラメータを同定するとともに、模型実験結果を補間することを念頭に種々の改良深さに対する液状化対策効果を数値解析によって調べた。また、浮き型の固化体の水平変位を抑制するために固化体の側方に着底型の構造物を設置することを想定し、その構造物の幅が液状化対策効果に与える影響を調べた。遠心模型実験の実験シリーズ A をシミュレートした解析をシリー

表-5.1 解析シリーズ A と C のケース一覧

シリーズ	ケース	深さ		形式	備考
		液状化層	浮き型固化体		
A	A1	12.5 m	0.0 m	無改良	実験シリーズ A の再現
	A2	12.5 m	5.0 m	浮き型	
	A3	12.5 m	7.5 m	浮き型	
	A5	12.5 m	12.5 m	着底型	
C	C1	20.0 m	0.0 m	無改良	液状化層厚 20 m
	C2	20.0 m	4.0 m	浮き型	
	C3	20.0 m	8.0 m	浮き型	
	C4	20.0 m	12.0 m	浮き型	
	C5	20.0 m	20.0 m	着底型	
	C6	15.0 m	0.0 m	無改良	液状化層厚 15 m
	C7	15.0 m	4.0 m	浮き型	
	C8	15.0 m	8.0 m	浮き型	
	C9	15.0 m	12.0 m	浮き型	
	C10	15.0 m	15.0 m	着底型	

表-5.2 解析シリーズ D のケース一覧

シリーズ	ケース	固化体の幅		形式
		着底型	浮き型	
D	D1	—	25.0 m	浮き型
	D2	4.0m	25.0 m	浮き型
	D3	6.0m	25.0m	浮き型
	D4	8.0m	25.0m	浮き型
	D5	10.0m	25.0m	浮き型
	D6	15.0m	25.0m	浮き型
	D7	—	50.0m	浮き型
	D8	4.0m	50.0m	浮き型
	D9	6.0m	50.0m	浮き型
	D10	8.0m	50.0m	浮き型
	D11	10.0m	50.0m	浮き型
	D12	15.0m	50.0m	浮き型

ズA, 改良深さを影響評価した解析をシリーズC, 側方の構造体の幅を影響評価した解析をシリーズDとする。

(2) 計算ケースと解析モデル

動的数値解析の解析ケースの一覧を表-5.1 と表-5.2 に示す。また、図-5.1 には、解析シリーズ A の 3 次元解析モデルの例を示す。計算メッシュ数を減らすために、格子状固化体の加振直交方向を片側半分にした 1/2 モデルで計算した。側面の境界条件は鉛直ローラー、底面の境界条件は固定とした。なお、無改良のケース A1 は奥行き方向に地盤の変化が無い場合、3 次元でモデル化する必要性が低い。このため、A1 については 2 次元解析とした。図-5.2 には、解析シリーズ C で用いた 3 次元解析モデルの例を示している。支持層の厚さは実験シリーズ A と同じ 1.5 m とした。液状化層厚は 20 m と 15 m の 2 種類とし、格子状固化体の深さを 4 m, 8 m, 12 m と液状化層厚と等しい深さとした。解析シリーズ A と同じく、無改良のケース C1 と C6 では 2 次元で解析を行った。

図-5.3 には、解析シリーズ D で用いた 2 次元解析モデルの例を示す。実験シリーズ A と同じく液状化層厚を 12.5 m, 支持層の厚さを 1.5 m とした。浮き型の側方の着底型固化体は支持層下端まで根入れした。浮き型固化体の深さは 7 m である。また、実験シリーズ B と同様に、着底型固化体と浮き型固化体の間には幅 5 cm の緩衝帯を設け、着底型固化体と浮き型固化体が剛結されないようにした。着底型固化体を浮き型固化体の片側だけに設置している。なお、解析モデルを単純化するために本解析シリーズでは浮き型と着底型の固化体の改良率を 100 %としているが、格子状形状を 2 次元でモデル化する手法を付録に示しておいたので参考にされたい。

(3) 解析コード

地震時の過剰間隙水圧の発生および消散過程をモデル化できる解析コード MuDIAN¹²⁾で動的数値解析を行った。液状化層に対しては、構成式として修正 *Densification* モデル¹³⁾を用いた。修正 *Densification* モデルでは、塑性せん断ひずみとダイレイタンシーによって発生する塑性体積ひずみを別々に計算しており、土質試験結果を用いたパラメータ設定が容易である。また、塑性せん断ひずみについては、*Mohr-Coulomb* の破壊基準で定義した降伏面内において下負荷面モデルを適用して算定した。さらに、塑性体積ひずみの計算には、累積損傷度理論を用いている。支持層に対しては、*Mohr-Coulomb* の破壊基準を適用した弾完全塑性モデルを用いた。この層は密な砂地盤として過剰間隙水圧の上昇を考慮しなかった。

解析で用いた土質パラメータを表-5.3 に示す。これらの土質パラメータは、土質試験結果を基本として定め、実験シリーズ A とそれをシミュレートした解析シリーズ A において最も整合性が取れるように調整して設定した

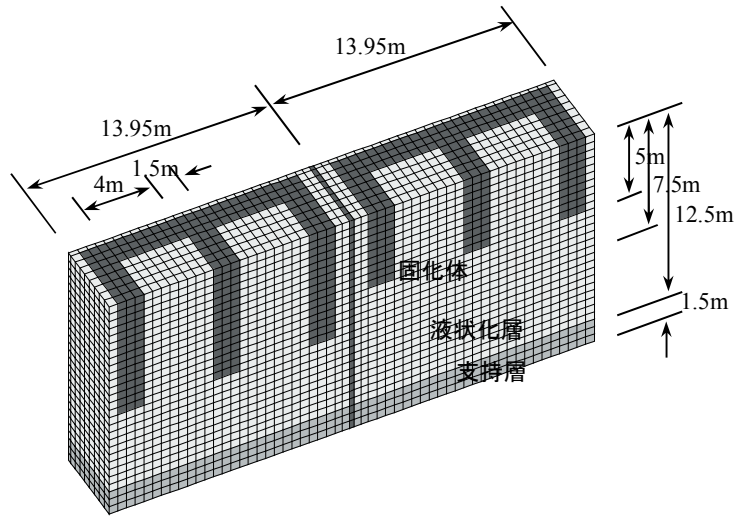


図-5.1 解析シリーズ A (A2, A3) の解析モデル

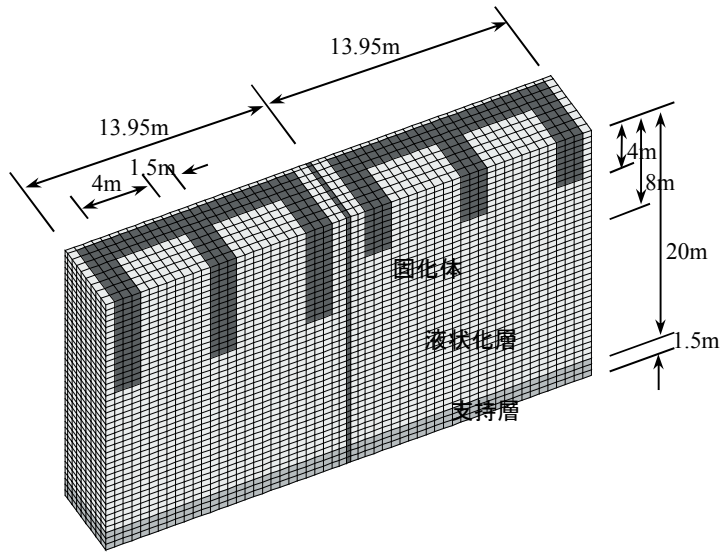
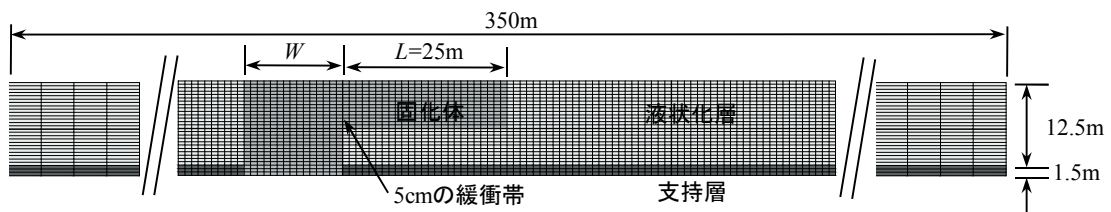
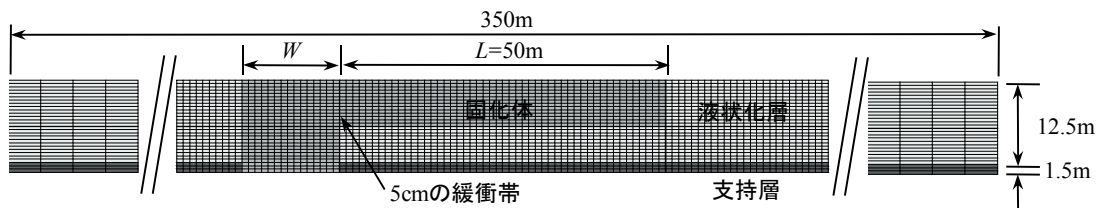


図-5.2 解析シリーズ C (C2, C3) の解析モデル



(a) D6 (浮き型固化体の幅 25 m)



(b) D12 (浮き型固化体の幅 50 m)

図-5.3 解析シリーズ D (D6, C12) の解析モデル

表-5.3 解析に用いた土質パラメータ

	G_0 (MN/m ²) ($\sigma'_0=98\text{kN/m}^2$)	ν	k (m/sec)	ρ (g/cm ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ϕ_p
固化土	1089.0	0.33	1.0×10^{-10}	1.92	—	—	—
液状化層	75.8	0.33	2.3×10^{-4}	1.92	0.001	36.0	0.80
支持層	110.0	0.33	1.0×10^{-4}	1.97	4.9	35.9	—

	下負荷面	ダイレイタンシーのパラメータ					
	U	α_{bc}	β_{bc}	α_{ac}	β_{ac}	α_{out}	β_{out}
液状化層	300	0.40	0.005	0.015	0.004	0.05	0.2

	ダイレイタンシーのパラメータ					
	α_{ud}	B	a	b	σ_{min}	
液状化層	2.0	10	0.5	4.0	0.01	

表-5.4 動的数値解析で用いた最大入力加速度

(a) 解析シリーズ A

	A1 (m/s ²)	A2 (m/s ²)	A3 (m/s ²)	A5 (m/s ²)
Step 3	1.16	1.07	1.07	1.16
Step 5	2.39	2.16	2.16	2.31
Step 6	3.51	3.16	3.16	3.33

(b) 解析シリーズ C

	C1~C10 (m/s ²)
Step 1	1.00
Step 2	1.50
Step 3	2.00
Step 4	3.00

(c) 解析シリーズ D

	D1~D12 (m/s ²)
Step 1	1.16

ものである。

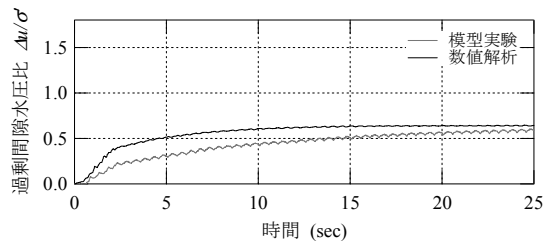
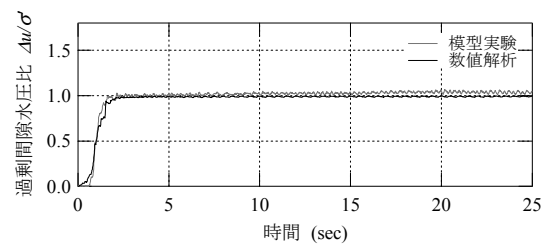
(4) 入力波形

動的数値解析に用いた入力加速度の波形は遠心模型実験と同じ 2 Hz の正弦波 50 波である。実験をシミュレートする解析シリーズ A では、模型実験の試料容器底面で計測された加速度時系列を入力加速度とした。解析シリーズ C と D では、実験での計測値ではなく理論的な正弦波を用いた。表-5.4 に数値解析に用いた波形の最大入力加速度を示している。

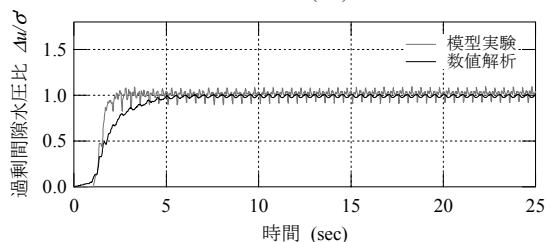
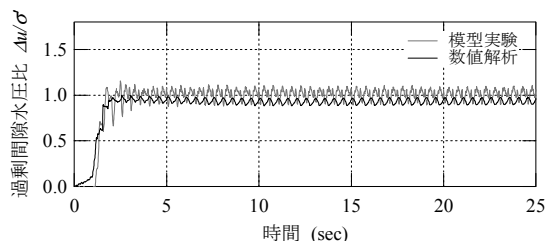
5.2 模型実験と数値解析の比較

(1) 過剰間隙水圧比の時系列

実験シリーズ A と解析シリーズ A の過剰間隙水圧 $\Delta u/\sigma'$ の発生過程と発生量を比較した。無改良のケース A1 での深度 2.6 m と 10.0 m での $\Delta u/\sigma'$ の時系列を図-5.4 に示す。これらは、最大入力加速度が 1.16 m/s² (Step 3) と 3.51 m/s² (Step 6) での結果である。なお、解析による $\Delta u/\sigma'$ は変動しながら 1.0 を超えているが、これは平均



(a) Step 3 (上段 GL.-2.6m, 下段 GL.-10.0m)

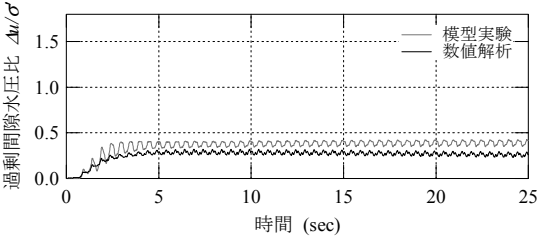
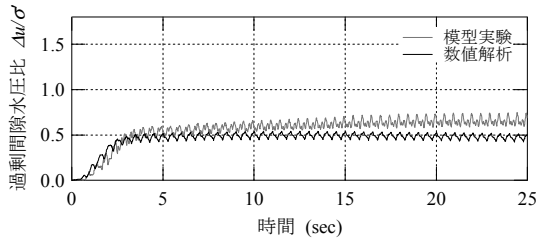


(b) Step 6 (上段 GL.-2.6m, 下段 GL.-10.0m)

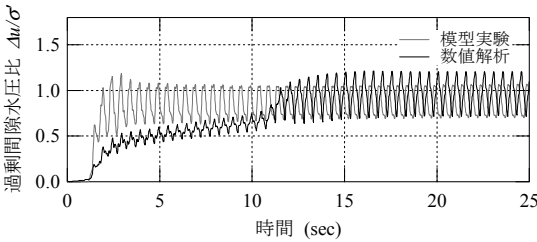
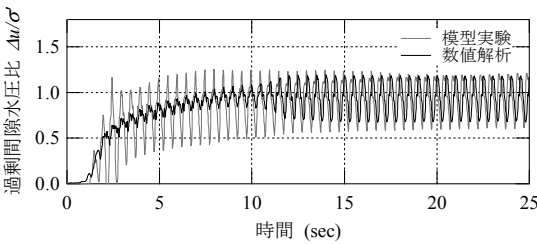
図-5.4 過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A1)

有効応力の弾性的な変動によるものである。

実験結果と解析結果を比較すると、Step 3 の深度 10.0 m での解析による $\Delta u/\sigma'$ が実験のそれよりも少し大きいですが、その他の深度と加振ステップにおいて概ね実験と解



(a) Step 3 (上段 G.L.-2.6m, 下段 G.L.-10.0m)



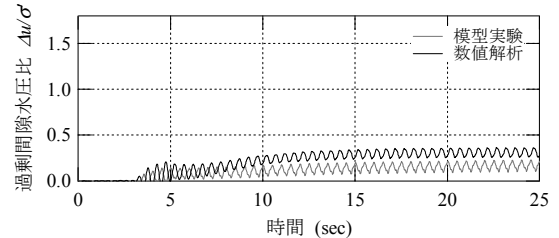
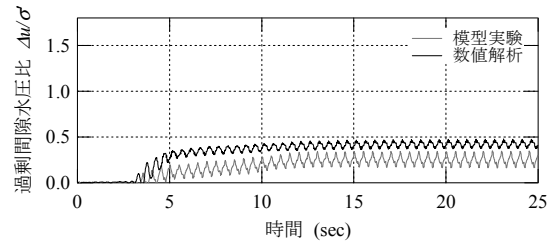
(b) Step 6 (上段 G.L.-2.6m, 下段 G.L.-10.0m)

図-5.5 過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A2)

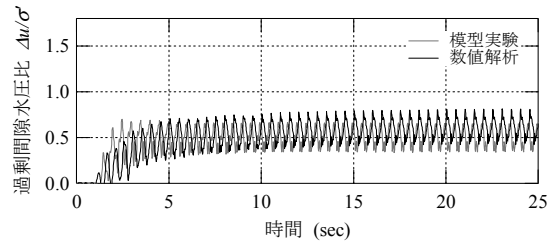
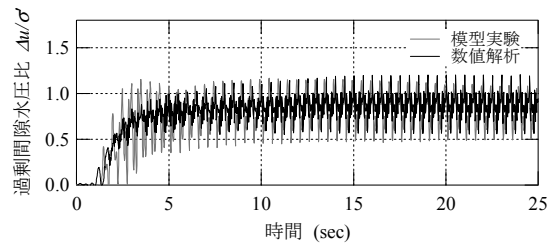
析の結果は近い値となっていることが分かる。

図-5.5には、ケース A2 (浮き型) での $\Delta u/\sigma'$ の時系列を実験結果と併せて示している。Step 3では、いずれの深度においても平衡状態に至った際の $\Delta u/\sigma'$ は実験と解析で多少異なっているものの、その差はそれほど大きくなく $\Delta u/\sigma'$ の発生過程も良く合っており、解析の精度が高いと言える。Step 6においては、深度 2.6 m での実験と解析の結果は近いが、深度 10.0 m において解析での $\Delta u/\sigma'$ の発生が遅れている。この要因は不明であるが、実験では塩ビ製の固化体が振動中に多少浮き上がる現象が確認されており、これによって地盤の拘束力が低下し、間隙水圧が上昇し易くなった可能性も考えられる。

図-5.6には、ケース A5 (着底型) での $\Delta u/\sigma'$ の時系列を実験結果と併せて示している。このケースにおいても、ケース A2 と同様に Step 3 で平衡状態に至った際の実験と解析の $\Delta u/\sigma'$ が多少異なっていたが、 $\Delta u/\sigma'$ の発生過程や Step 6 での実験と解析の結果は近かった。



(a) Step 3 (上段 G.L.-2.6m, 下段 G.L.-10.0m)



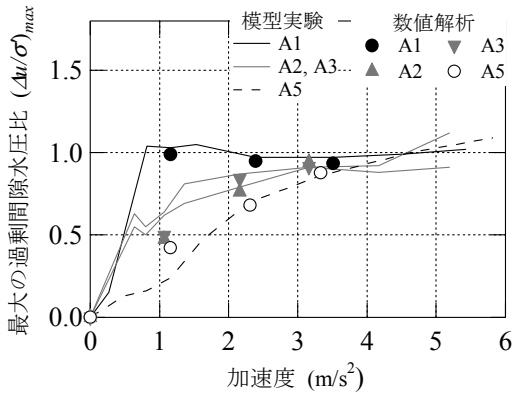
(b) Step 6 (上段 G.L.-2.6m, 下段 G.L.-10.0m)

図-5.6 過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A5)

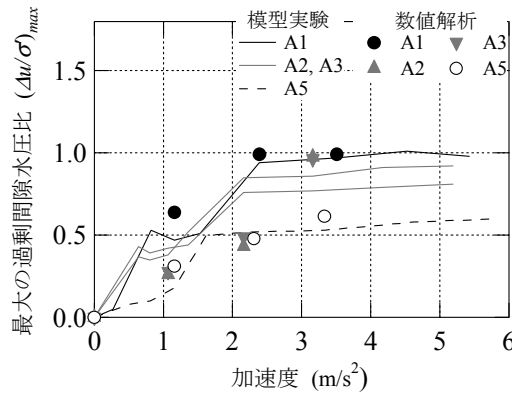
(2) 最大の過剰間隙水圧比

実験シリーズ A と解析シリーズ A の入力加速度と振動中の過剰間隙水圧比の最大値 $(\Delta u/\sigma')_{max}$ の関係を比較した。これを図-5.7に示す。なお、 $\Delta u/\sigma'$ は振動中に変動するために、その変動の中心点を $(\Delta u/\sigma')_{max}$ とした。

図-5.7(a)に示した深度 2.6 m での結果を見ると、入力加速度が小さい Step 3 (入力加速度が約 1.1 m/s^2) の A2 と A5 において多少の差異があるものの、実験と解析の結果は概ね近くなっている。図-5.7(b)に示した深度 10.0 m においては、深度 2.6 m の場合と比べると実験と解析の結果に差が生じている。特に、浮き型のケース A2 と A3 の Step 5 (入力加速度が約 2.3 m/s^2) における差が大きい。これは前述したように、実験において浮き型の固化体が浮き上がったことも一要因として考えられる。ただし、これらの結果を除くと、実験と解析の結果は概ね近くなっており、適切な土質パラメータが設定されたことを確認できた。



(a) 深度 2.6 m



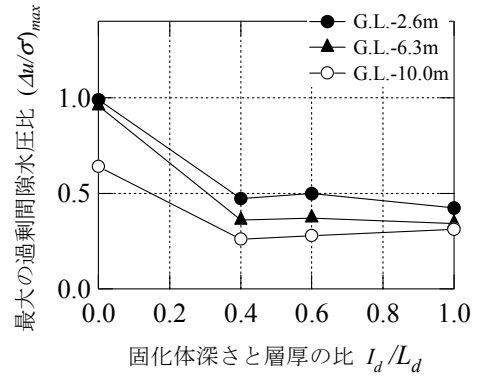
(b) 深度 10.0 m

図-5.7 実験と解析での過剰間隙水圧比の最大値の比較(実験と解析シリーズ A)

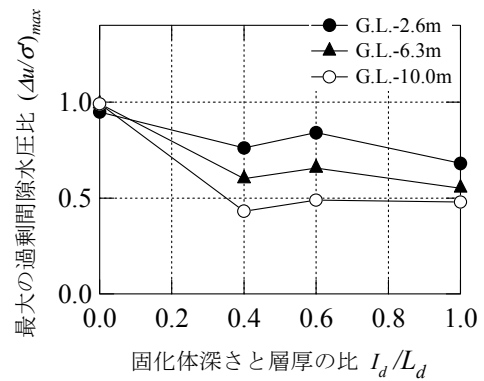
5.3 改良深さと液状化対策効果の関係

模型寸法の制約から遠心模型実験では液状化層厚を $L_d = 12.5$ m としている。遠心模型実験の結果を補足する目的で $L_d = 15$ m と $L_d = 20$ m とした解析シリーズ C を実施した。本節では、改良深さと液状化対策効果の関係を調べるために、解析シリーズ A と C で得られた固化体の深さ I_d と過剰間隙水圧比の最大値 $(\Delta u/\sigma')_{max}$ の関係を整理している。なお、 $\Delta u/\sigma'$ は振動中に変動するために、その変動の中心点を $(\Delta u/\sigma')_{max}$ とした。

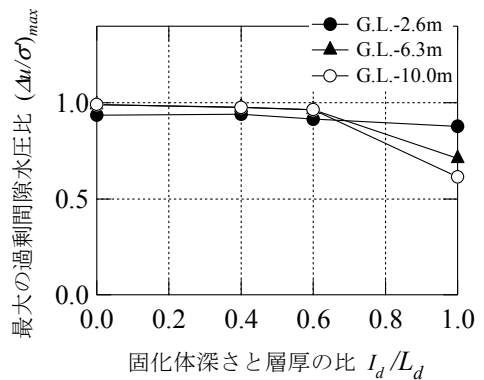
解析シリーズ A での結果をまとめたものが図-5.8 である。縦軸には $(\Delta u/\sigma')_{max}$ を、横軸には固化体の深さとして L_d で I_d を正規化した I_d/L_d を示している。図には、深度 2.6 m, 6.3 m, 10.0 m での結果をプロットしている。解析シリーズ C での $(\Delta u/\sigma')_{max}$ と I_d/L_d の関係を示したものが図-5.9 である。図には、深度 2 m, 6 m, 10 m, 14 m, 18 m (C1~C5 のみ) での結果をプロットしている。シリーズ C においても、液状化層厚および加振ステップに関係なく、 I_d/L_d が増すほど $(\Delta u/\sigma')_{max}$ が小さくなっていった。ここで、例えば $L_d = 15$ m の液状化層に対して $(\Delta u/\sigma')_{max}$ を 0.9 以下となるように固化体の深さを設計すると、Step 3



(a) Step 3



(b) Step 5



(c) Step 6

図-5.8 正規化した改良深さと過剰間隙水圧比の最大値の関係 (解析シリーズ A)

までの入力加速度に対しては I_d/L_d を 0.27 以上、Step 4 の入力加速度に対しては I_d/L_d を 0.8 以上とすればよい。 $L_d = 20$ m の液状化層に対しては、Step 4 の入力加速度に対して I_d/L_d を 0.6 以上とすればよい。

今回の解析条件下において、層厚に対する液状化抑制に必要であった浮き型固化体の深さをまとめたものが図-5.10 である。この図には解析シリーズ A と C に加えて、実験シリーズ A の結果も併せて示している。縦軸には浮き型固化体の深さを、横軸には液状化層厚を示している。

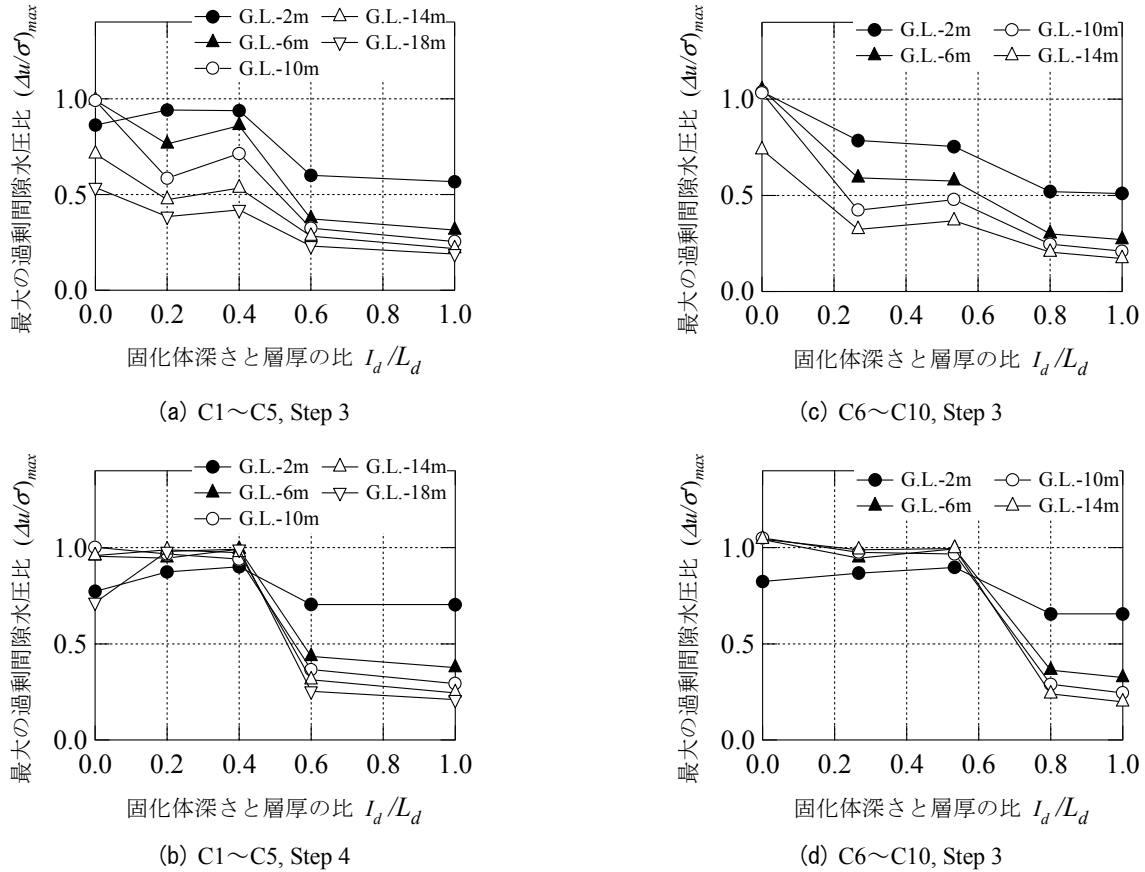


図-5.9 正規化した改良深さと過剰間隙水圧比の最大値の関係 (解析シリーズ C) (左列: $L_d = 20\text{ m}$, 右列: $L_d = 15\text{ m}$)

また、3種類のプロットの違いについては、 3.0 m/s^2 以上の加速度を入力しても $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9未満の場合(OK)、 3.0 m/s^2 以下では $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9未満だが 3.0 m/s^2 以上では $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9以上の場合(OK-NG)、 3.0 m/s^2 以下でも $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9以上の場合(NG)に分けた。なお、ここでは 3.0 m/s^2 という比較的大きな加速度を入力した場合を想定してプロットを仕分けており、 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ については0.9を閾値とした。

図に示すように、液状化の抑制程度に対して、安全側と危険側の2種類の境界を設定できる。この境界より浮き型固化体の深さを大きくすることで、液状化を抑制することができていた。地震動や地盤条件などを変化させて、より広範な条件下での境界を今後詳細に検証する必要があるが、このような境界を与えることで、液状化が抑制される固化体の深さを概略的に設定することが可能となる。なお、この固化体の深さは液状化を抑制できる値であり、別途地震時の慣性力に対する外部安定性および内部安定性を照査する必要がある。

5.4 側方の着底型固化体の必要幅の検討

前節では、浮き型固化体の液状化対策効果と液状化対

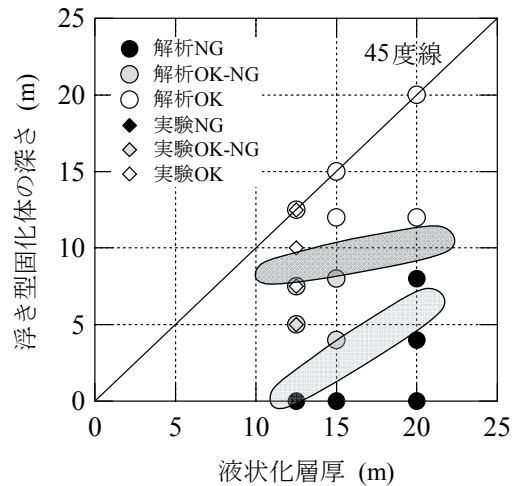
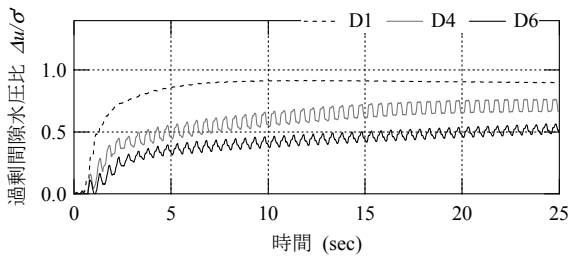
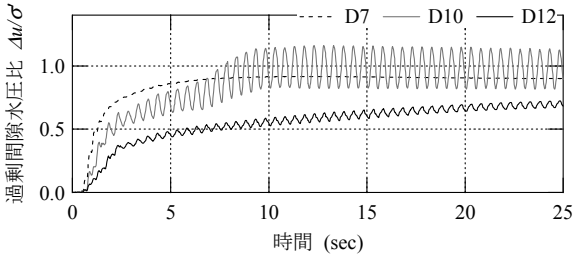


図-5.10 加速度と液状化抑制に必要な固化体深さ

策メカニズムについて検討したが、検討に用いた解析では、浮き型固化体のすぐ横に水平変位を抑制する固定された壁があるため、浮き型固化体の水平変位拘束効果が高い条件となっている。そこで、浮き型固化体の側方に着底型の固化体を設置した地盤における液状化対策効果について、着底型固化体の幅 W を変化させた動的数値解析(解析シリーズ D)を実施した。



(a) D1, D4, D6



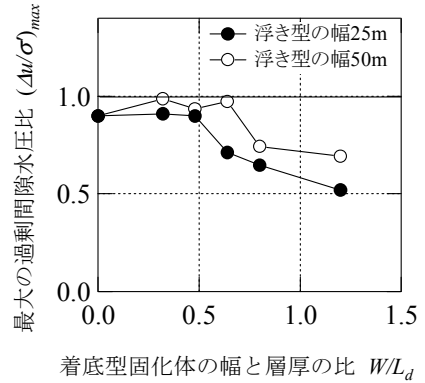
(b) D7, D10, D12

図-5.11 深度 10.3 m での過剰間隙水圧比の時系列 (解析シリーズ D)

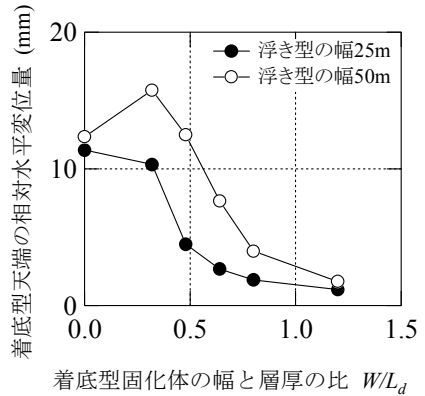
解析シリーズ D において、着底型固化体の幅 W を変化した場合の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma$ の時系列を図-5.11 に示す。この解析値は浮き型固化体の中央の深度 10.3 m での結果であり、図-5.11(a) は浮き型固化体の幅が $L = 25$ m での値で、図-5.11(b) は $L = 50$ m での値である。図-5.11(a) を見ると、着底型固化体を設けなかったケース D1 において $\Delta u/\sigma$ が最も初期段階で増加している。これに対して、 W を大きくすると $\Delta u/\sigma$ が増加しにくくなる傾向にあり、 W が最も大きいケース D6 での $\Delta u/\sigma$ の増加量が最も小さかった。図-5.11(b) においても、 W を大きくするほど $\Delta u/\sigma$ の増加量が小さくなっていった。また、図-5.11(a) に示した $L = 25$ m での結果よりも $\Delta u/\sigma$ は大きく、浮き型固化体の幅が広いほど $\Delta u/\sigma$ は増加しやすいことが分かった。

着底型固化体の幅 W が液状化の抑制に与える影響をまとめると図-5.12 のようになる。深度 10.3 m での過剰間隙水圧比の最大値 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ と液状化層厚で除した着底型固化体の寸法 W/L_d の関係が図-5.12(a) で、着底型固化体天端での水平変位の最大値と W/L_d の関係が図-5.12(b) である。なお、 L_d で除して整理したのは、着底型固化体の縦横比が着底型固化体の振動に対する安定性に大きな影響を与えていると考えたためである。

図-5.12(a) を見ると、着底型固化体が無い場合を除いて W/L_d が大きくなるほど $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が小さくなり、液状化の抑制効果が表れている。 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が大幅に低減するのは、浮き型固化体の幅が 25 m の場合で $W/L_d = 0.64$,



(a) 深度 10.3m での過剰間隙水圧比の最大値



(b) 着底型固化体天端での水平変位量の最大値

図-5.12 着底型固化体の幅と液状化対策効果の関係 (解析シリーズ D)

50 m の場合で $W/L_d = 0.8$ であった。

図-5.12(b) においては、着底型固化体が無い場合を除いて W/L_d が大きくなるほど水平変位量の最大値が小さくなっていった。これは、着底型固化体の幅 W を大きくしていくと、水平変位量が抑制されていくことを示している。水平変位量が大幅に低減するのは、浮き型固化体の幅が 25 m の場合で $W/L_d = 0.48$ 、50 m の場合で $W/L_d = 0.8$ であった。これらのことから、着底型固化体の幅は液状化層厚の 0.8 倍程度とすれば、液状化対策効果が見込めることが分かった。

6. まとめ

本研究では、格子状固化体の全体を非液状化層に着底させない形式 (浮き型形式の格子状固化処理工法) について検討を行い、その液状化対策効果を調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 浮き型の格子状固化処理工法の液状化対策メカニズムは、深層で発生するせん断応力の低減および過剰間

隙水圧の伝播の抑制の2つと考えられた。これらの効果について動的数値解析によって検証を行った。

- 2) 遠心模型実験において、浮き型の固化体と非液状化層の振動を同期させることで、浮き型の格子状固化体内部のみならず、固化体下部の未改良層においても間隙水圧の上昇を抑えることができた。固化体の深度が増すほど、間隙水圧の上昇を抑制できた。ただし、間隙水圧の上昇抑制効果は着底型よりも多少劣る結果となった。
- 3) 模型実験において地表面の沈下量を計測すると、浮き型の改良であっても無改良に比べて沈下量を大幅に低減できることが確認された。ただし、沈下量についても、着底型の沈下抑制効果に比べて多少劣る結果となった。
- 4) 動的数値解析において、入力加速度に応じて浮き型固化体の深さを適切に設定すれば、液状化層全層で対策効果が得られることが分かった。実験結果も併せて、液状化の抑制に必要な浮き型固化体の深さの参考値を示したが、地震動や地盤条件等によっても必要な固化体の深さは変化する可能性があり、今後より広範な条件下での結果を集める必要がある。
- 5) 浮き型固化体の側方に設置した着底型構造体の水平変位量が抑制されると、浮き型固化体下部での液状化対策効果がより高まることも分かった。また、この解析結果から、浮き型固化体側方の着底型構造物の幅が液状化層厚の0.8倍程度以上であると、液状化対策効果が大きく表れることが分かった。

7. おわりに

上述したように、固化処理する深度を液状化層内に留めた浮き型の格子状固化処理工法の液状化対策効果は着底型のそれよりも多少劣るため、適用する施設の重要度によって着底型と浮き型を使い分けることが重要である。また、浮き型の格子状固化処理工法の現場への適用性については未検討であるため、今後は試験施工等を行って、より詳細に適用性の検討を行っていく必要がある。

(平成24年4月27日受付)

謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所、五洋建設、清水建設、竹中土木、東亜建設工業、東洋建設、不動産テトラの共同研究の成果の一部である。研究を遂行するにあたり、各者の共同研究メンバーにご協力いただいた。また、遠心

模型実験の実施にあたり、ジオデザインの丸山憲治氏と竹花和浩氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル（改訂版）、沿岸技術研究センター、289p., 2008.
- 2) 日本ジェットグラウト協会：ジェットグラウト工法技術資料（第18版）、日本ジェットグラウト協会、82p., 2010.
- 3) 古賀泰之、松尾修、榎田実、伊藤浩二、鈴木吉夫：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（その2）、第23回土質工学研究発表会講演集、pp. 1019-1020, 1988.
- 4) 馬場崎亮一、鈴木吉夫、鈴木善雄、藤井齊昭：固化工法を用いた耐液状化基礎地盤改良工法（その2）、第26回土質工学研究発表会講演集、pp. 1007-1008, 1991.
- 5) T. Namikawa, J. Koseki, and Y. Suzuki: Finite Element Analysis of Lattice-shaped Ground Improvement by Cement-mixing for Liquefaction Mitigation, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 3, pp. 559-576, 2007.
- 6) 鈴木吉夫、斉藤聡、鬼丸貞友、木村玄、内田明彦、奥村良介：深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工、土と基礎、Vol. 44, No. 3, pp. 46-48., 1995.
- 7) 東 祥二、原田健二、仁田尾洋、橋本則之、鈴木亮彦、初山幸治、館下和行、菅野高弘、中澤博志：実大実験における格子状固化改良の液状化対策効果に関する研究、材料、Vol. 59, No. 1, pp. 14-19, 2010.
- 8) 高橋英紀、山脇秀仁、北詰昌樹、石橋伸司：深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案、港湾空港技術研究所報告、Vol. 45, No. 2, pp. 135-167., 2006.
- 9) H. Takahashi, M. Kitazume, S. Ishibashi, and S. Yamawaki: Evaluating the Saturation of Model Ground by P-wave Velocity and Modeling of Models for a Liquefaction Study, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol.6, No.1, pp. 13-25, 2006.
- 10) 岡村未対、来山博昭：遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究、土木学会論文集 C, Vol. 64, No. 3, pp. 662-671, 2008.
- 11) 北詰昌樹：新遠心模型実験装置の開発と研究への適用、港湾技術研究所資料、No. 812, 35 p., 1995.
- 12) 塩見忠彦、吉澤睦博、鬼丸貞友、津國正一：地盤と

構造物の非線形性を考慮した構造解析システムの開発，竹中技術研究報告，No. 54, pp. 1-8, 1998.

- 13) 津國正一，塩見忠彦：格子状改良地盤の過剰間隙水圧発生量を予測できる解析法の検討，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集（Ⅲ部門），pp. 172-173, 2001.

付録 格子状固化体の2次元FLIPでのモデル化手法

1. 2次元モデル化手法

格子状固化処理工法は、液状化地盤を固化壁で格子状に囲むことで地震時のせん断変形を抑制し、液状化を抑制するものである。このため、格子状改良地盤を含めた構造物全体の地震時挙動を動的数値解析で評価するにあたっては、格子状固化体の3次元形状を適切にモデル化する必要がある。モデル化方法の一つとして3次元解析が挙げられるが、モデル化や計算に膨大な時間を要し、実務に適用するには多くの課題が残されている。そこで、既往の文献¹⁾を参考に格子状固化体を2次元でモデル化することにより、遠心模型実験結果を再現できることを確認した。

浮き型の格子状固化処理工法の概念図を付図-1に示し、付図-2にモデル化手法の概念図を示す。固化体および地盤は有限要素（ソリッド要素）でモデル化するが、このとき付図-1(b)に示すように格子状固化体を面外変形する壁と面内変形する壁に分ける。付図-2(b)に示すように面外抵抗領域（「面外抵抗要素」と定義）は液状化層および支持層と併せてモデル化し、面内抵抗領域（「面内抵抗要素」と定義）は面外抵抗要素に重ねるように貼り合わせ、3次元の格子形状を擬似的にモデル化する（擬似3次元化手法と呼ぶ）。ここで、面外抵抗要素内節点と相対する面内抵抗要素内節点を等変位拘束とする。擬似3次元解析では面外抵抗要素の面外方向（紙面奥行き方向）に対する曲げを考慮できないことから、面外抵抗要素の変形を過度に拘束してしまうため、面内抵抗要素の剛性を低減させることで擬似的に曲げを考慮する。固化体および地盤の要素奥行き幅は、格子1スパン分の厚さをそれぞれ考慮する（付図-2(a)参照）。格子固化体と液状化地盤の境界部は2重節点とし、自重解析時は地盤の拘束圧を過小評価しないように2重節点間を水平方向のみ等変位拘束し、動的解析時は水平・鉛直方向とも等変位拘束することとする。

2. 解析方法

格子状固化処理工法の耐震性評価手法として、擬似3次元化手法による2次元動的数値解析の適用性について検討するため、本文で述べた実験シリーズAを対象に解析コードFLIP²⁾による解析を実施した。FLIPは有効応力法に基づく2次元地震応答解析コードであり、港湾施設の耐震設計を中心に広く利用されている。構成式として主応力軸の回転が自動的に考慮される東畑・石原³⁾によるマルチスプリングモデルを採用しており、過剰間隙水

圧の発生モデルとして液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇を評価できる井合モデルを使用している。

遠心模型実験再現のための解析ケースを付表-1に示す。解析では、浮き型固化体の深さを変化させて、全5ケースを実施した。実験に合わせて、入力地震動を2Hzの正弦波50波とし、無改良の実験ケースA1で液状化が生じるStep3（入力加速度が約1.0 m/s²）を対象に解析を実施した。入力地震動は、実験の容器底面で計測した加速度波形を直接用いた。

代表としてケースA2とA3の有限要素分割図を付図-3に、解析パラメータの一覧を付表-2に示す。液状化層（相馬珪砂5号 $D_r = 50\%$ を想定）および支持層（豊浦砂 $D_r = 80\%$ を想定）にはマルチスプリングモデルと塑性せん断仕事モデルを併用させ、それらの動的変形特性パラメータは土質試験結果に基づき設定した。また、ケースA3において浮き型固化体下部の未改良の地盤（深度8.2 m, 10.0 m, 12.0 m）での過剰間隙水圧比が実験結果に近づくように、液状化パラメータを調整・設定した。付図-4(a)に、設定した液状化パラメータによる要素シミュレーション結果と事前実施した繰返し三軸試験結果を比較しているが、解析による液状化強度は三軸試験結果の下限値に近い値が示されている。なお、支持層の液状化パラメータについては、繰返し三軸試験結果⁴⁾の要素シミュレーションにより決定した（付図-4(b)参照）。

塩ビ製の固化体には線形平面要素、土槽中央のアルミ製の中仕切りには梁要素を適用した。固化体の面内抵抗要素ヤング率を付表-3に示す。擬似3次元解析では面外抵抗要素の面外方向（付図-3の紙面奥行き方向）に対する曲げを考慮できずに面外抵抗要素の変形を過度に拘束するため、面内抵抗要素ヤング率を低減させることで擬似的に曲げを考慮することとした。ケースA2とA3の固化壁に囲まれた液状化層（深度2.6 m, 4.4 m, 6.3 m）において、実験で計測された過剰間隙水圧比を再現できるように面内抵抗要素ヤング率を初期値の15%（441 MPa）に低減した。ケースA4とA5の面内抵抗要素ヤング率については、ケースA2とA3の値を基準に、固化体内枠幅および高さに応じて設定した。

3. 解析結果

付図-5～付図-9に、ケースA1～A5における応答加速度および過剰間隙水圧比について、実験と解析の結果をそれぞれ比較して示している。付図-5(a)に示した無改良のケースA1の加速度を見ると、実験では振動中に地盤浅層が液状化したために深度2.6 mで応答加速度の振幅大幅に減少しているが、解析においても同様の傾向が表

れている。付図-5(b)に示した過剰間隙水圧比については、深度 2.6 m, 6.3 m, 10.0 m において実験と解析の結果は比較的近い値となっている。

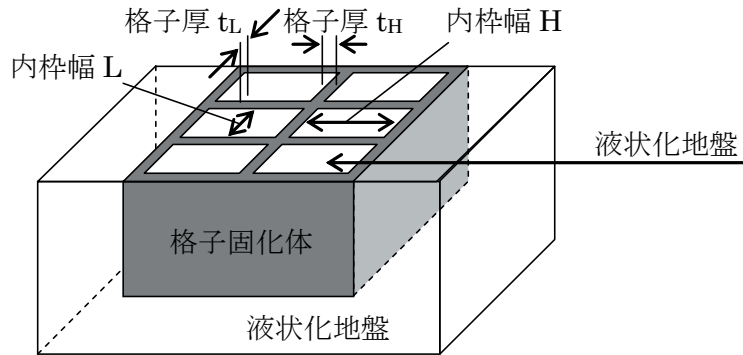
浮き型のケース A2 と A3 の結果を示した付図-6 と付図-7 によると、付図-6 のケース A2 については、深度 2.6 m では最大値を過小評価、深度 6.3 m, 10.0 m ではやや過大評価となった。ただし、固化体に囲まれた浅層の過剰間隙水圧が抑えられている様子や、固化体下部の未改良部において深層ほど過剰間隙水圧比が小さくなる様子については、実験と解析は概ね良い対応を示していた。付図-7 のケース A3 については、液状化層の液状化パラメータおよび格子状固化体の面内抵抗要素ヤング率を逆解析によって同定したこともあり、実験と解析の結果はよく整合していた。浮き型固化体の深さが最も深いケース A4 の結果を示した付図-8 によると、このケースにおいても概ね加速度および過剰間隙水圧比の実験と解析の結果は良く整合していた。

着底型のケース A5 の結果を示した付図-9 によると、過剰間隙水圧比の解析値は全般的に実験値よりも大きくなっていった。このため、応答加速度についても小さくなる傾向があった。しかしながら、固化体に囲まれた地盤が液状化しないことや、深層ほど過剰間隙水圧が増加しにくい傾向などは再現できていた。また、解析の結果の方が過剰間隙水圧が大きく、設計においては安全側の結果を与えることが分かった。

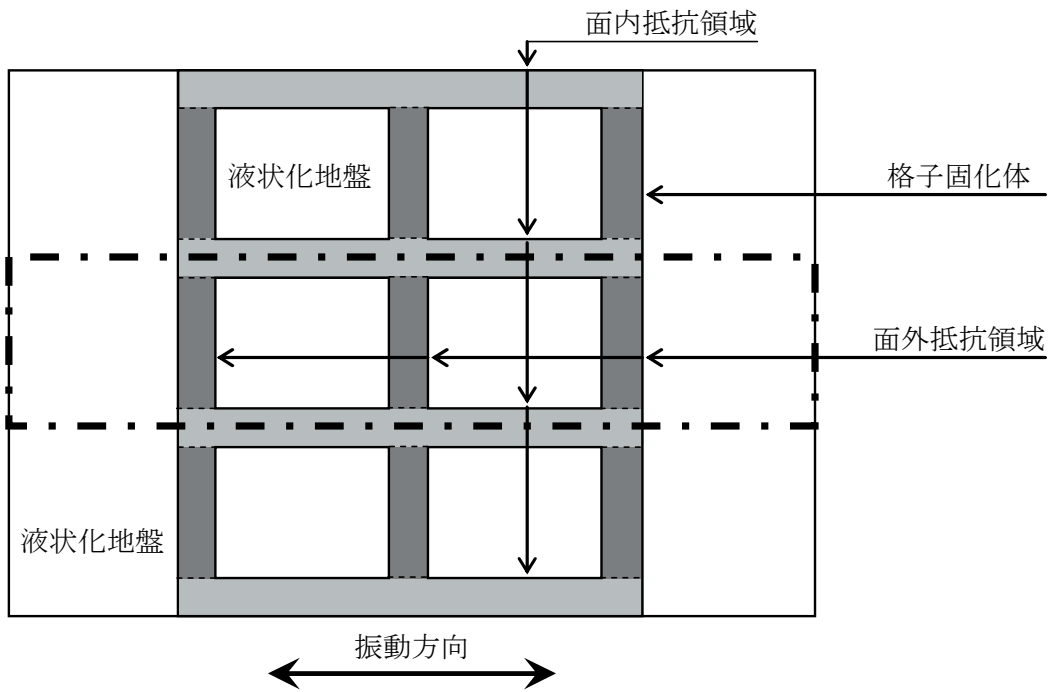
これらのことから、格子状固化体の 3 次形状の 2 次元モデル化手法として格子状固化体を擬似 3 次元でモデル化して、面内抵抗要素ヤング率を低減する方法を適用することで、解析コード FLIP による 2 次元動的数値解析で格子状固化処理工法の耐震性を概ね評価できることが確認された。

付録の参考文献

- 1) 吉澤睦博: 格子状改良地盤の力学特性を考慮した二次元有限要素法解析モデルの作成について、第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 231-232, 1999.
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter identification for a cyclic mobility model, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 57-83, 1990.
- 3) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proceedings of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 1, pp. 373-380, 1985.
- 4) Toki, S., Tatsuoka, F., Miura, S., Yoshimi, Y., Yasuda, S. and Makihara, Y.: Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 117-128, 1986.

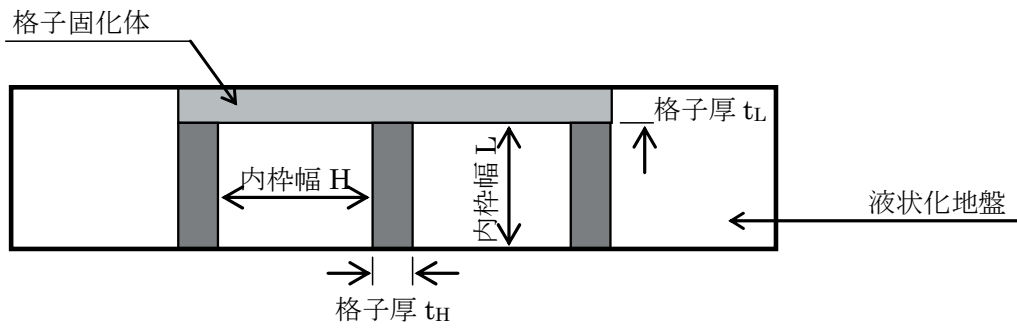


(a) 鳥瞰図

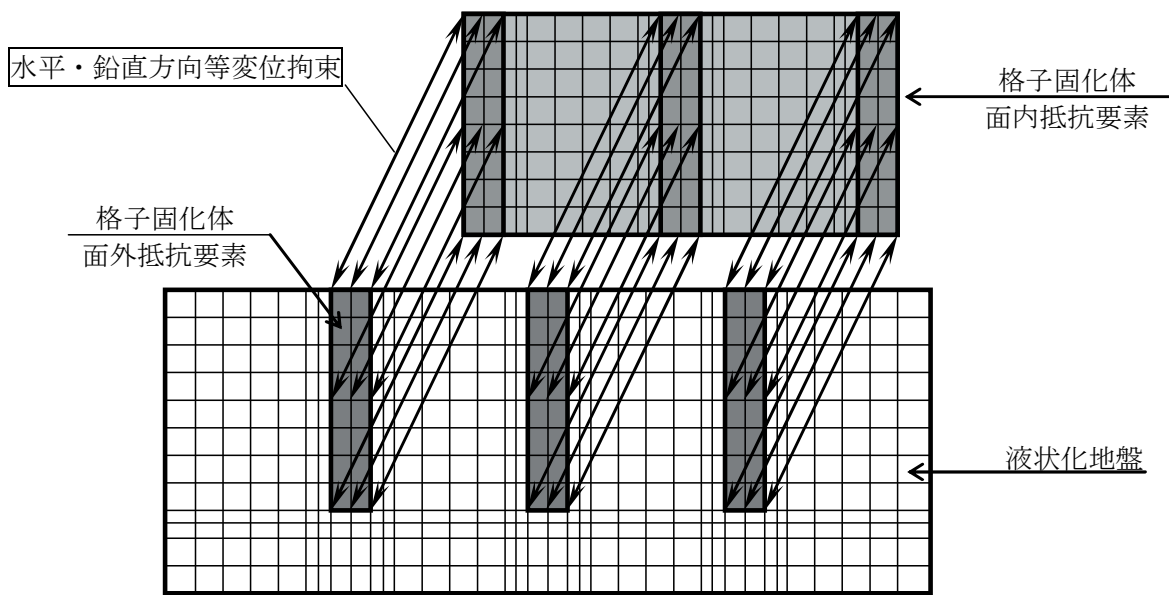


(b) 平面図

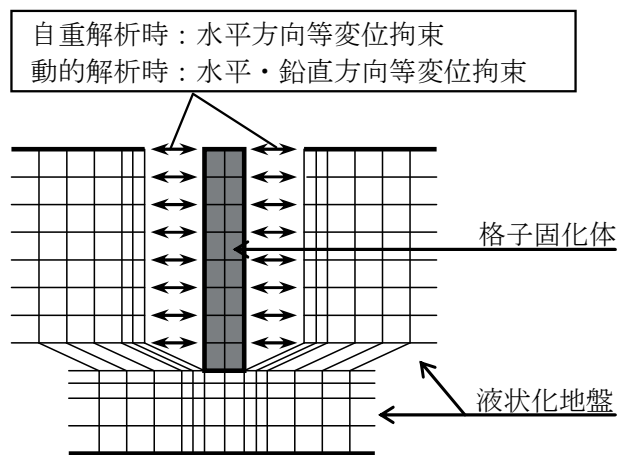
付図-1 浮き型の格子状固化処理工法の概念図



(a) 要素奥行き幅の概念



(b) 解析モデル

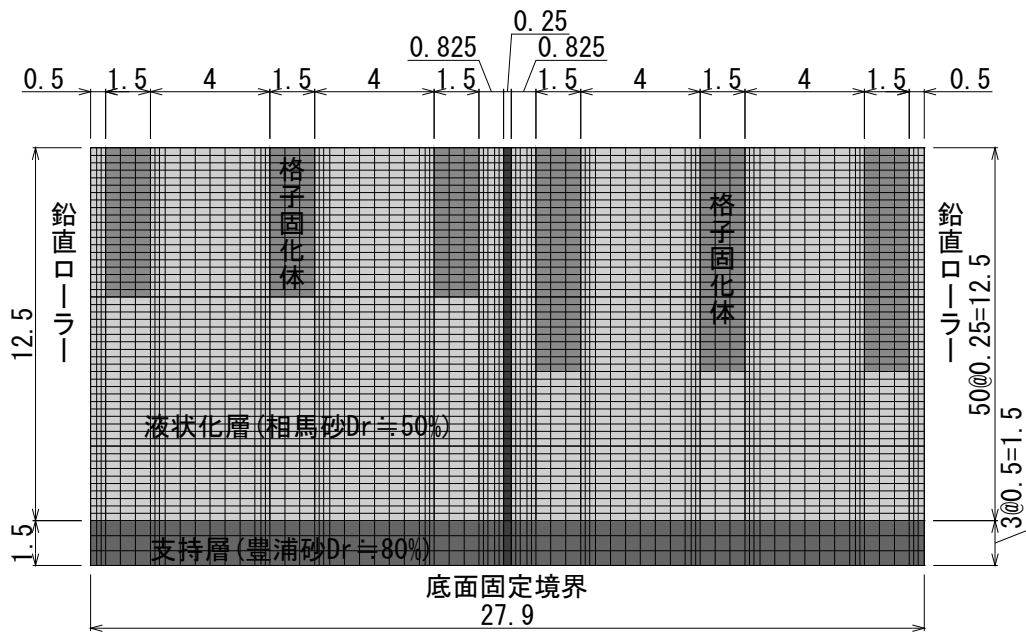


(c) 格子固化体と液状化地盤の境界部のモデル化

付図-2 浮き型の格子状固化工法の2次元モデル手法

付表-1 解析ケースの一覧

シリーズ	ケース	固化体の深さ	形式	加振条件
A	A1	0.0 m	無改良	Step 3 : Max 1.16 m/s ²
	A2	5.0 m	浮き型	Step 3 : Max 1.07 m/s ²
	A3	7.5 m	浮き型	Step 3 : Max 1.07 m/s ²
	A4	10.0 m	浮き型	Step 3 : Max 1.16 m/s ²
	A5	12.5 m	着底型	Step 3 : Max 1.16 m/s ²



付図-3 有限要素分割図 (ケース A2, A3)

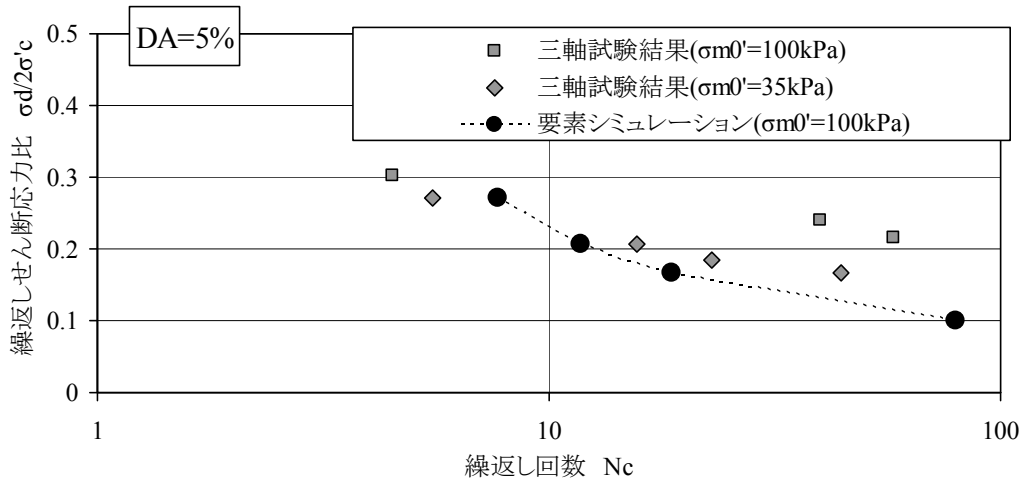
付表-2 解析パラメータの一覧

パラメータ		液状化層	支持層	固化体
湿潤密度	ρ_t	1.87	1.962	1.47
間隙率	n	0.473	0.413	
基準拘束圧	σ_{ma} (kPa)	100.0	98.0	
初期せん断剛性	G_{ma} (MPa)	75.8	110.0	
初期体積弾性係数	K_{ma} (MPa)	197.7	286.9	
ヤング率	E (Mpa)			2,940
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.35
初期せん断剛性の有効応力依存性	m_G	0.5	0.5	
初期体積弾性係数の有効応力依存性	m_K	0.5	0.5	
せん断抵抗角	ϕ_f (deg.)	36	35.9	
粘着力	C (kPa)	0	0	
履歴減衰の上限值	h_{max}	0.421	0.24	
変相角	ϕ_p (deg.)	28	32	
液状化特性全体の規定パラメータ	W_1	7.0	7.9	
液状化特性前半の規定パラメータ	P_1	0.30	0.6	
液状化特性後半の規定パラメータ	P_2	0.75	0.8	
液状化発生の下限値の規定パラメータ	C_1	0.80	1.5	
液状化の終局状態の規定パラメータ	S_1	0.002	0.005	

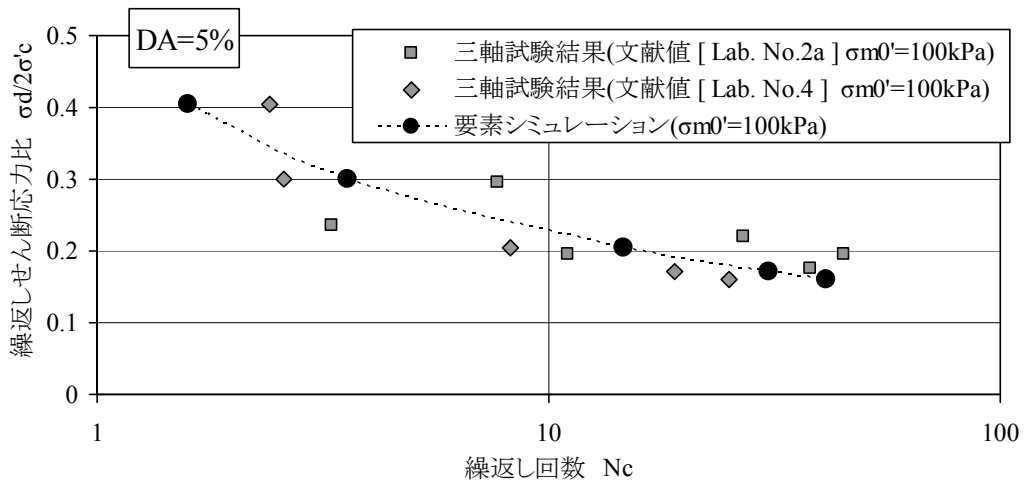
付表-3 面内抵抗要素のヤング率

ケース	格子固化体内枠幅 L (m)	格子固化体深さ (m)	面内抵抗要素ヤング率 (kPa)	初期値に対する割合 (%)
初期値	5.5	—	2,940,000	100
A1	—	—	—	—
A2	5.5	5.0	441,000	15
A3	5.5	7.5	441,000	15
A4	5.5	10.0	706,000	24
A5	2.25	12.5	2,156,000	73
	4	12.5	1,213,000	41
	6	12.5	809,000	28
	7.5	12.5	647,000	22

※ケースA4, A5の面内抵抗要素ヤング率は、ケースA2, A3の値を基準に、格子固化体内枠幅Lおよび高さに応じて求めている。

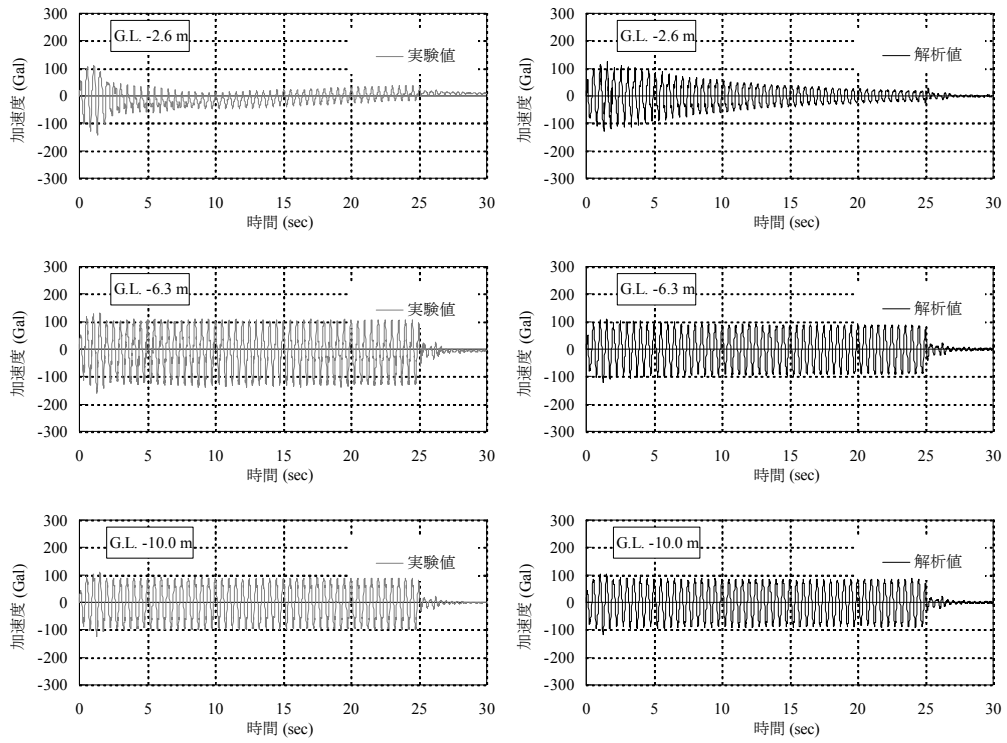


(a) 液状化層

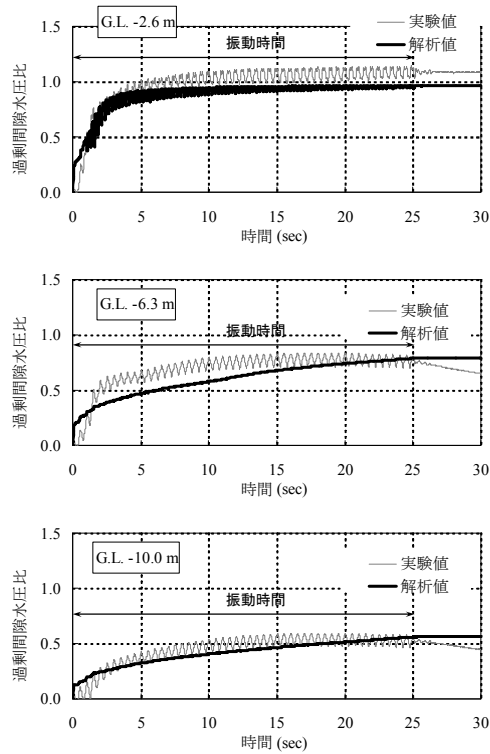


(b) 支持層

付図-4 液状化抵抗曲線とそのフィッティング結果

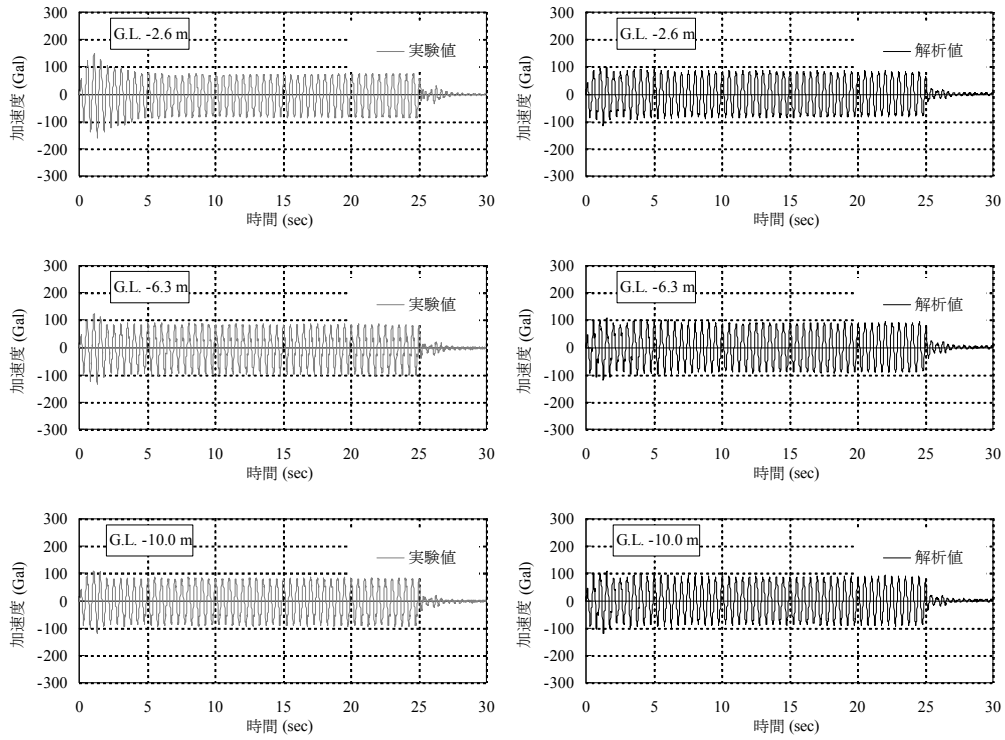


(a) 応答加速度

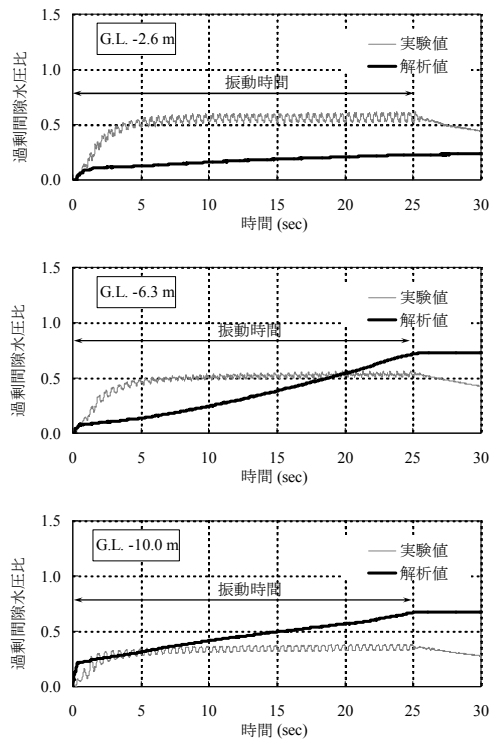


(b) 過剰間隙水圧比

付図-5 応答加速度と過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A1)

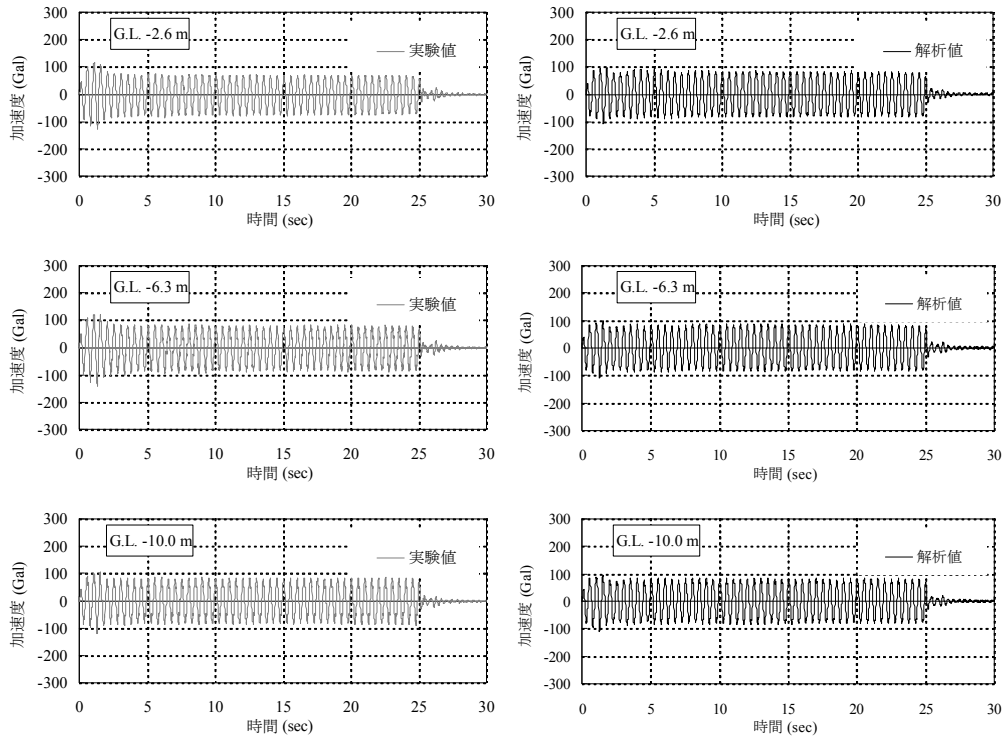


(a) 応答加速度

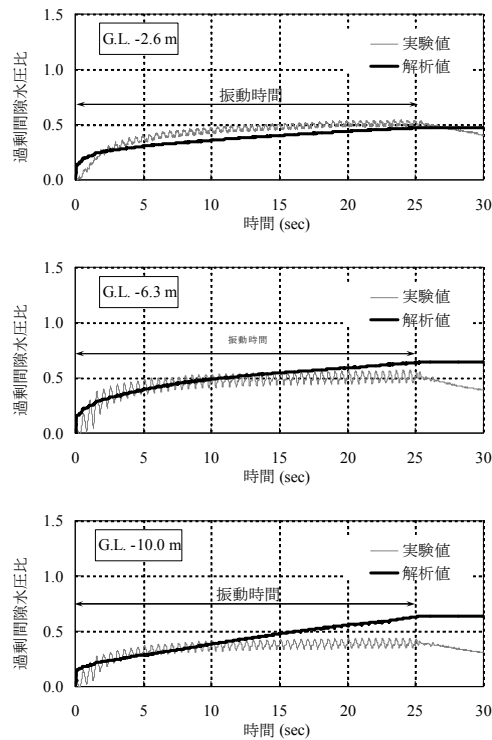


(b) 過剰間隙水圧比

付図-6 応答加速度と過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A2)

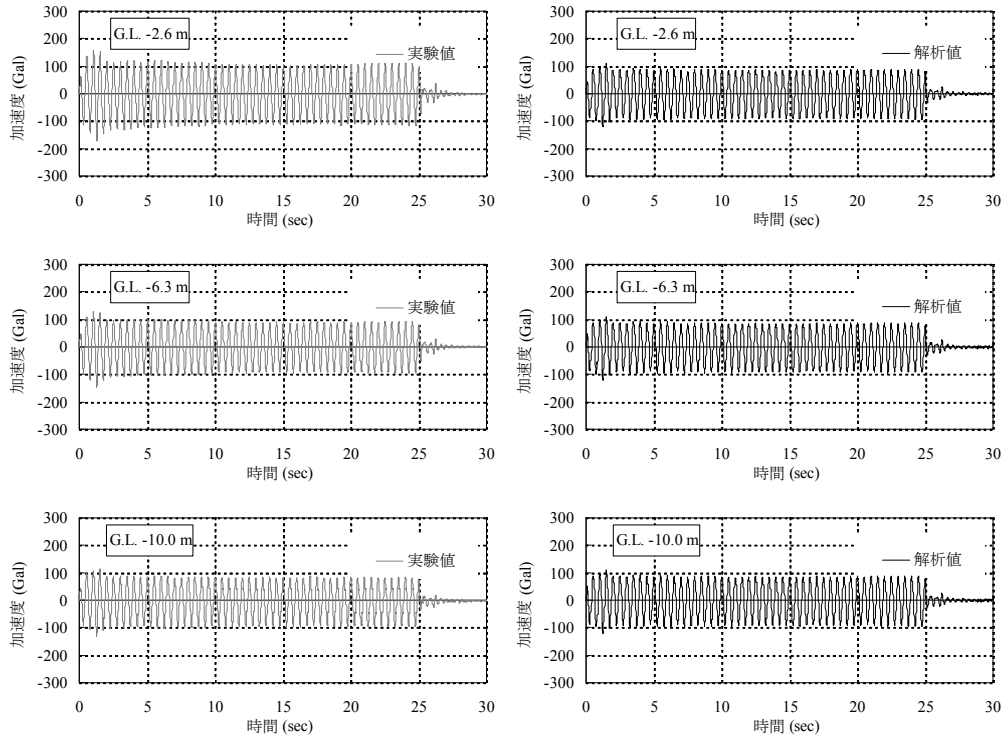


(a) 応答加速度

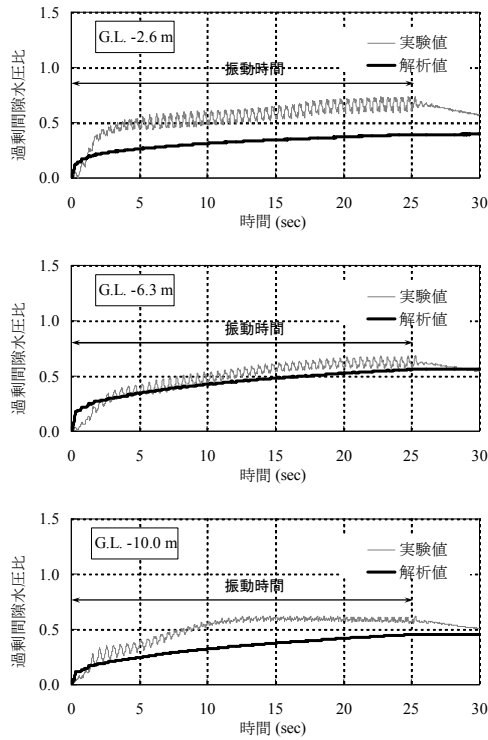


(b) 過剰間隙水圧比

付図-7 応答加速度と過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A3)

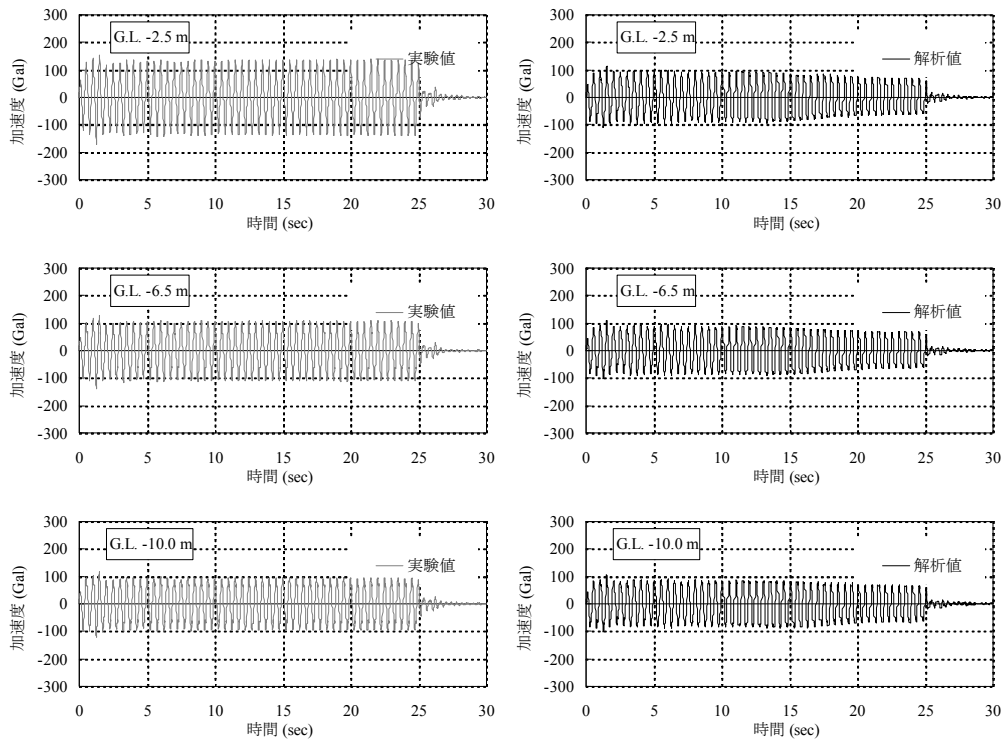


(a) 応答加速度

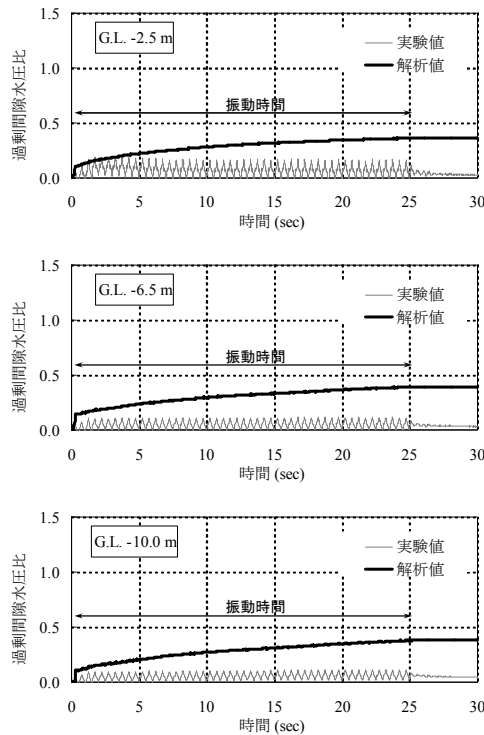


(b) 過剰間隙水圧比

付図-8 応答加速度と過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A4)



(a) 応答加速度



(b) 過剰間隙水圧比

付図-9 応答加速度と過剰間隙水圧比の時系列 (ケース A5)

港湾空港技術研究所報告 第51巻第2号

2012.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Approach to Reducing Improvement Depth of Lattice-shaped Cement Treatment Method for Liquefaction CountermeasureHidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA, Shoichi TSUKUNI, Makoto YOSHIDA, Hisashi FUKADA	3
---	---