

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.45 NO.2 June 2006

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 45 卷 第 2 号 (Vol. 45, No. 2), 2006年 6月 (June 2006)

目 次 (CONTENTS)

1. NOWPHAS波浪観測データを同化させた波浪推算法の開発とその特性の検討
..... 橋本 典明・河合 弘泰・永井 紀彦 3
(Development of Adjoint WAM Model to NOWPHAS Wave Observation Data
..... Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Toshihiko NAGAI)
2. 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化
..... 菊池 喜昭・永留 健・水谷 崇亮 29
(Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Taka-aki MIZUTANI)
3. アーク形の矢板とトラスを有する新形式二重矢板護岸構造の水平抵抗性能の評価
..... 菊池 喜昭・北詰 昌樹・水谷 崇亮・恩田 邦彦・平嶋 裕・木下 雅敬・森 玄 51
(Lateral Resistance of Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure
Yoshiaki KIKUCHI, Masaki KITAZUME, Taka-aki MIZUTANI, Kunihiko ONDA, Yutaka HIRASHIMA, Masanori KINOSHITA, Gen Mori)
4. ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム
..... 菊池 喜昭・永留 健・御手洗 義夫 87
(Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Yoshio MITARAI)
5. 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性
..... 菊池 喜昭・中島 研司・木村 淳治・水谷 崇亮105
(Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kenji NAKASHIMA, Junji KIMURA, Taka-aki MIZUTANI)
6. 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
..... 高橋 英紀・山脇 秀仁・北詰 昌樹・石橋 伸司135
(Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement
..... Hidenori TAKAHASHI, Shuuji YAMAWAKI, Masaki KITAZUME, Shinji ISHIBASHI)
7. 耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性
..... 宮田 義一・若林 徹・濱田 秀則169
(Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel
..... Yoshikazu MIYATA, Toru WAKABAYASHI, Hidenori HAMADA)

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

高橋 英紀*・山脇 秀仁*・北詰 昌樹**・石橋 伸司***

要 旨

液状化現象を再現するために多くの動的遠心模型実験が行われているが、模型地盤の飽和度や通水方法の違いが飽和度に与える影響について検討した研究はこれまでほとんどない。そこで本研究では、3種類の方法で作製した模型地盤に対してP波の伝播速度を用いて飽和度を調べ、完全飽和模型地盤の作製方法について検討した。その結果、作製方法の違いによって飽和度は大きく変化することが確かめられ、炭酸ガスで間隙を置換した後に真空下で通水する方法が完全飽和模型地盤を作製するためには適していることがわかった。また、深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討に先立って、実物スケールの挙動に対する動的遠心模型実験の実験精度を検証するために、3種類の寸法の模型に対して Modeling of models 手法を適用した遠心模型実験を実施した。

近年、液状化対策工法として深層混合処理地盤を格子状に形成して抑制する工法が注目されている。これは壁面状に改良土を打設することによって地盤のせん断変形を抑制し間隙水圧の上昇を低減するものである。この工法での格子間隔の決定方法については簡便な設計指針が示されているが、液状化層厚が薄い場合や厚い場合に極端な設計となるなどの不合理さが指摘されている。本研究では、格子間隔を変化させた一連の動的遠心模型実験及び数値解析を実施し、地盤の動的応答特性や間隙水圧の上昇特性について調べ、格子間隔と液状化抑制効果の関係を明らかにした。これらの実験結果に基づいて格子間隔の新たな設計法を提案した。さらに、コスト縮減のために新たな格子配置を提案し、その配置による地盤の液状化特性を検討した。

キーワード：深層混合処理工法，格子状改良地盤，液状化，遠心模型実験

* 地盤・構造部 地盤改良研究室

** 地盤・構造部 地盤改良研究室長

*** 国土交通省 近畿地方整備局（前地盤改良研究室）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5055 Fax：046-841-8098 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement

Hidenori TAKAHASHI*

Shuuji YAMAWAKI*

Masaki KITAZUME**

Shinji ISHIBASHI***

Synopsis

Many centrifuge model tests on saturated model ground have been carried out for investigation on the liquefaction phenomenon. However, there were few investigations in which the degree of model ground saturation prepared by various techniques was measured and the performance of the techniques was discussed. In the present study, the model ground preparation techniques for manufacturing fully saturated model ground were discussed. A model sandy ground was prepared by three various techniques and the degree of model ground saturation was estimated by measuring the P-wave velocity propagating through the ground. The degree of model ground saturation was greatly influenced by the type of preparation technique, and a saturated model ground prepared by percolating CO₂ gas followed by fluid in a vacuum condition was recommended for manufacturing fully saturated ground. Then, the modeling of models tests on three different scaled models were carried out on the saturated model ground manufactured by the recommended technique, which demonstrates the repeatability and reliability of this centrifuge model tests for the simulation on prototype behavior.

Recently, the grid-type ground improvement by the deep mixing method (DMM) has been applied for the liquefaction prevention. The grid made by treated columns is expected to function to restrict the pore water pressure generation between the grids due to the reduction of shearing deformation. The existing guideline on the grid spacing is pointed out to have limitations for practical applications. In the present study, a series of dynamic centrifuge model tests and numerical analyses were conducted to investigate the effect of grid spacing on liquefaction prevention. The seismic ground response and the pore water pressure generation in the ground were measured in detail. A new rational design guideline on the grid spacing was proposed. Further, a new arrangement of grid type improvement was also proposed for more economical design.

Key Words: deep mixing method, grid-type improved ground, liquefaction, centrifugal model test

* Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Head, Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Former, Soil Stabilization Division)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445055 Fax : +81-46-8418098 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

目 次

要 旨	135
1. まえがき	139
2. 粘性流体を用いた飽和砂地盤の作製方法とその飽和度	140
2.1 模型地盤の作製方法	140
2.2 飽和度の測定方法	141
2.3 重力場での地盤の飽和度	142
2.4 遠心場での地盤の飽和度	144
3. Modeling of models手法による動的遠心模型実験の精度検証	146
3.1 Modeling of models手法の概要	146
3.2 模型地盤の作製方法	146
3.3 模型実験方法	148
3.4 地盤内加速度の応答特性	149
3.5 間隙水圧の応答特性	151
4. 格子状改良による液状化抑制効果に関する実験的検討	152
4.1 深層混合処理による液状化抑制工法の概要	152
4.2 遠心模型実験方法	153
4.3 地盤内加速度及び間隙水圧の応答特性	154
4.4 格子寸法比率 L/H と液状化抑制効果	156
4.5 L/d による格子間隔の設計手法の提案	156
5. 格子状改良による液状化抑制効果に関する数値解析	157
5.1 数値解析方法	157
5.2 模型実験と数値解析結果の比較	158
5.3 格子状改良による液状化抑制メカニズム	159
5.4 格子間隔～深度比率 L/d とせん断応力低減効果	159
6. 改良深度の縮減に関する検討	160
6.1 改良深度の縮減化に関する概要	160
6.2 遠心模型実験方法	160
6.3 地盤内加速度の応答特性	161
6.4 間隙水圧の応答特性	163
6.5 改良深度と液状化特性の関係	164
7. 結論	164
8. あとがき	166
謝辞	166
参考文献	166

1. まえがき

地震時の地盤挙動を再現するための模型振動実験を行う場合、実物と同じ形状（寸法比）にしても模型の挙動は相似にならないことが多い。これを解決するために、振動実験を重力場（1g場）で行う場合、模型地盤の物性における応力依存特性を考慮した相似則を用いることによって、寸法比と模型地盤挙動を関連付ける。これに対して、振動実験を遠心場で行う場合、寸法比に見合った遠心加速度を加えることによって強制的に模型地盤の応力状態を実物と同等にして、寸法比と模型地盤挙動を関連付ける。重力場で行う振動実験では大型の振動台を用いることが多く、経済的及び時間的な制約を受けるために、遠心模型実験装置を用いて振動実験を行う場合が増えてきている。遠心模型実験に用いる模型地盤は比較的小さいために、地盤の作製に要する時間と労力の面においても優位であることから、遠心模型実験の有用性は益々高まると考えられる。

再現性の高い動的遠心模型実験を行うためには、砂地盤の相対密度や飽和度を管理することが必要不可欠である。本研究では、深層混合処理工法による液状化抑制効果を調べる振動実験に先立って、粘性流体で作製した砂地盤の飽和度を詳細に調べた（図-1.1参照）。また、遠心模型実験装置を用いて精度が高い実験を行うためには高度な地盤作製技術及び遠心場での振動実験技術を要することから、実験に先立って実験精度の検証を行う必要がある。本研究では、飽和した砂地盤を対象に3種類の遠心加速度で遠心模型振動実験を行い、Modeling of Models手法を用いて実験精度を検証した。なお、Modeling of Models手法とは遠心模型実験の精度を検証する代表的な手法で、例えば過去に地盤の支持力問題^{1),2)} や杭の水平抵抗問題³⁾ などに適用されている。

近年注目されている液状化対策工の1つに深層混合処理工法（以下、DMM工法）⁴⁾ を用いた液状化抑制工法がある。DMM工法とは、石灰やセメント系の固化材を地中に供給することによって深層にいたる固化処理土を造成する工法である。1回の打設で杭状の固化処理土が形成でき、繰り返し打設を行うことによって任意の形状の改良地盤を造成することが可能である。液状化対策工として採用されている改良形式は、固化処理土の杭を組み合わせることによって造成した格子状のものが多い（図-1.2参照）。この工法を適用した埋立地盤において液状化が抑制された例が報告されている⁵⁾。

格子状に固化処理土を打設することによって液状化を抑制する工法の設計では、固化処理土の壁の間隔（格子

間隔）をどのように設定すればよいか問題となる。古賀ら⁶⁾ や馬場崎ら⁷⁾、Suzuki *et al.*⁸⁾ は模型実験及び数値解析を実施し、それらの結果に基づいた簡便な設計指針⁹⁾ を示している。そこでは、液状化の発生が予想される層の厚さ H と格子間隔 L の比 L/H を指標にして、 L/H を0.8以下にすると液状化の抑制効果が認められるとされている。しかしながら、 L/H によって液状化抑制効果を評価して格子間隔を決定する場合、液状化層厚が小さい場合には必要な L/H を保つために格子間隔を極端に狭くする必要が生じる。また逆に、液状化層厚が大きい場合、 L/H を保つために格子間隔が極端に広くなり、地表面付近は液状化する可能性がある。このように、 L/H を用いて格子間隔を決定すると種々の不合理性が生じる。

本研究では、先に述べたような地盤作製方法の検討や実験精度の検証を行った後に、格子内に作製した飽和砂地盤の液状化特性について調べ、より合理的に格子間隔を決定する手法について検討した。また、近年の建設コスト縮減の気運の高まりから、構造物の機能を損なわない範囲内で地盤改良を行う領域を縮減することがますます必要となっている。そこで、格子状改良地盤の一部の改良深さを浅い部分に留めた改良形式での液状化特性についても検討した。

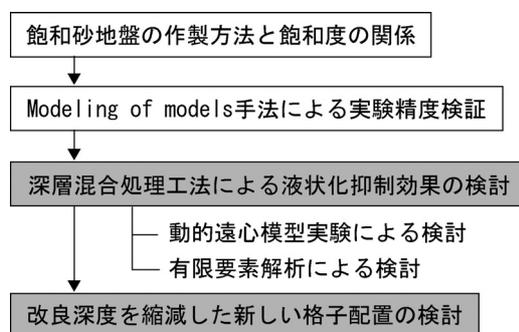


図-1.1 研究の流れ図

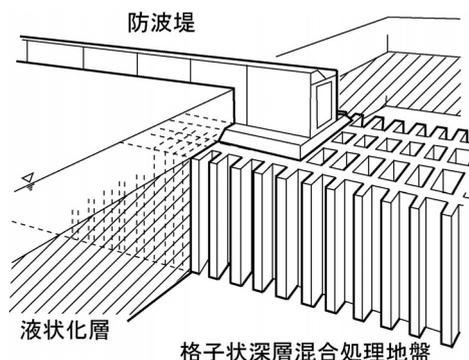


図-1.2 防波堤下部に適用した格子状改良地盤

2. 粘性流体を用いた飽和砂地盤の作製方法とその飽和度

2.1 模型地盤の作製方法

液状化現象を再現する模型実験における飽和砂地盤の作製に関しては、多くの手法が考えられている。例えば、比較的好く用いられている方法としては、バキューム・ポンプによって間隙流体を吸引する方法や、脱気槽内で水頭差によって間隙流体を通水させる方法、土槽に溜めた間隙流体表面に乾燥砂を慎重に降らして水中落下させる方法などが挙げられる。Ueno¹⁰⁾の調査によると、砂地盤の密度管理を行いやすいために、乾燥砂地盤を作製してから間隙流体を真空下で通水させる方法が広く採用されている。また、要素試験での試料作製方法に従って、乾燥砂地盤を作製した後に間隙の空気を炭酸ガス(CO₂)で置換して、真空下で間隙流体を通水させることも多い。しかしながら、炭酸ガスによる置換と真空下での通水が飽和度に与える影響を模型実験レベルで調べた研究はほとんどなく、飽和地盤を作製するためのそれらの必要性は明確でない。そこで本研究では、間隙の空気を炭酸ガスで置換していない地盤や大気圧下で間隙流体を通水させた地盤の飽和度についても調べ、炭酸ガス置換と真空下通水が飽和度に与える影響について検討した。

実験に用いた砂は福島県産の相馬珪砂5号で、その特性を表-2.1に示している。乾燥砂地盤の作製は寺師ら¹¹⁾の方法に従った。これは、図-2.1に示すように、砂地盤の堆積による地盤高の変化が相対密度へ影響を与えない高さからサンドホッパーによって砂を空中落下させる方法である。この方法によってほぼ均一な砂地盤を作製できることが過去の研究¹¹⁾によって確かめられている。また、サンドホッパーの流出口の大きさを調整することによって地盤の相対密度を調整することができる。地盤の飽和度は重力場と遠心場で計測しており、それぞれの模型地

盤の概略図を図-2.2に示している。乾燥砂地盤を作製した後に図-2.3に示す装置群を用いて間隙流体の通水を行

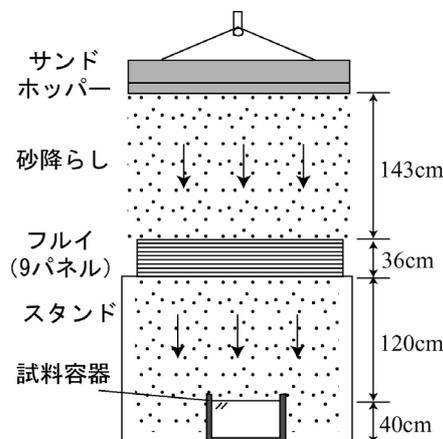
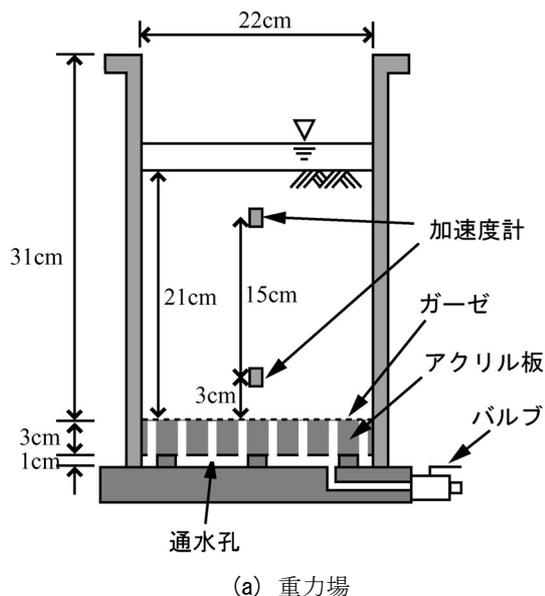
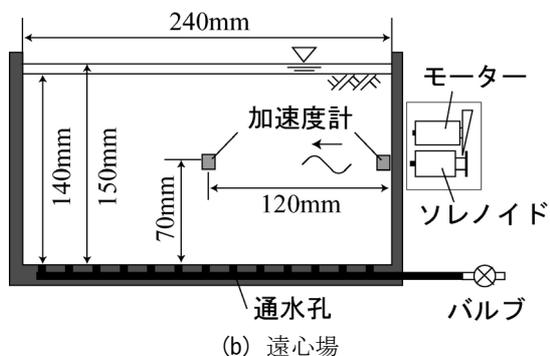


図-2.1 地盤作製のための空中落下法



(a) 重力場



(b) 遠心場

図-2.2 地盤の飽和度を調べるための模型実験概略図

表-2.1 相馬珪砂の物性

土粒子密度, G_s		2.65
最大間隙比, e_{max}		1.10
最小間隙比, e_{min}		0.69
粒度分布	D_{60} (mm)	0.36
	D_{30} (mm)	0.29
	D_{10} (mm)	0.21
	D_{60}/D_{10}	1.71

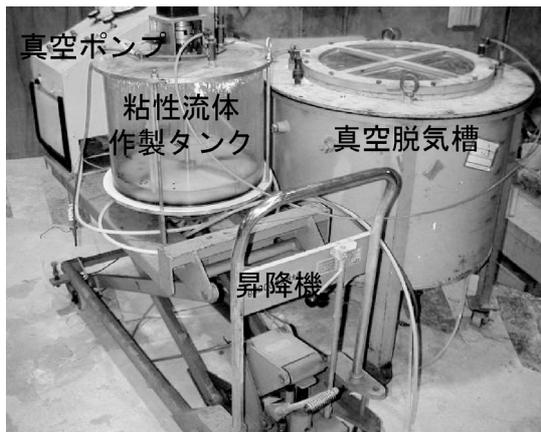
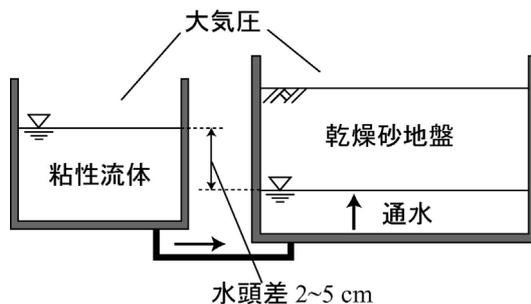


図-2.3 地盤に通水するための装置群

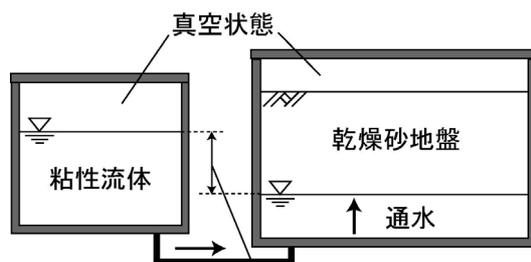
った。通水方法は以下の3種類であり、それぞれの通水方法の概略図を図-2.4に示している。

- 1) 大気圧通水法：図-2.2に示した真空ポンプと粘性流体作製タンクを用いて12時間以上脱気した間隙流体を、大気圧下で乾燥砂地盤の底面から通水する。（図-2.4(a)参照）
- 2) 真空通水法：間隙流体と同様に12時間以上脱気した乾燥砂地盤に間隙流体を真空下で通水する。（図-2.4(b)参照）
- 3) 炭酸ガス（CO₂）・真空通水法：乾燥砂地盤の底面から炭酸ガスを1000 cm³/minの流量で約1時間注入して、地盤中の空気を炭酸ガスに置換した後、真空通水法と同様に砂地盤と粘性流体を12時間以上脱気し、真空下で通水する。（図-2.4(c)参照）

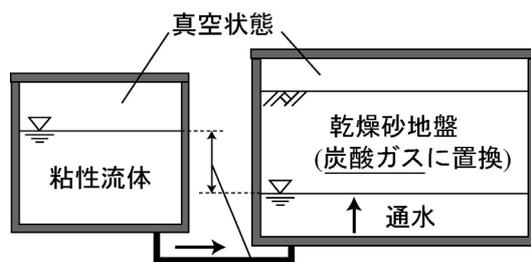
間隙流体には、粘性流体として信越化学工業製のヒドロキシプロピルメチル・セルロースの水溶液を用いた。間隙流体として粘性流体を用いるのは、動的遠心模型実験における動的変形現象と間隙水圧消散現象の相似則を合わせるためであり、遠心加速度に見合った粘度の粘性流体にする必要がある。水溶液の濃度を变化させることで、流体の粘度を变化させることができるが、同じ濃度であっても作製してからの経過時間や水溶液の温度によって粘度が变化する。特に温度による影響は大きく、事前に行った予備測定では、水溶液の温度が5℃変化すると動粘度が約10 m²/s変化することがわかった。なお、動粘度とは温度や圧力などの条件を一定にして流体の粘度を密度で除した値である。事前の予備測定に基づいて、試験を実施する時間と場所において極力想定した粘度となるように水溶液の濃度を調整し、試験直後に動粘度を計測した。また、重力場と遠心場での試験用の乾燥砂地盤に真空下で粘性流体を通水するための時間は、それぞれ



(a) 大気圧通水法



(b) 真空通水法



(c) 炭酸ガス・真空通水法

図-2.4 地盤への粘性流体の通水方法

約2日間と約1日間であった。

2.2 飽和度の測定方法

地盤の飽和度は乾燥重量と湿潤重量、体積から求めることができるが、この方法で求めた飽和度は少なからず誤差を含んでいると考えられる。これは、本実験では地盤表面をバキュームによって整形し若干の凹凸が残っており、正確な地盤の体積を求めることが困難であったためである。そこで、地盤内に伝播する縦波の弾性波速度（以下、P波速度）を計測することによって地盤の飽和度を推定した。P波速度が飽和度に影響を受けることは Ishihara^{12),13)}によって明らかにされており、近年は要素試験や現場計測において多く用いられている。例えば要素試験ではバンダーエレメントを用いた計測^{14),15),16)}が行わ

れており、現場においてはクロスホール方式やダウンホール方式を用いた計測を行うのが一般的になっている。模型実験でP波速度を計測した例としては、北ら¹⁷⁾や Arulnathan *et al.*¹⁸⁾によるものがある。北らは波動発信源として圧電振動子を用いており、遠心場での弾性波速度を計測している。Arulnathan *et al.*は小型のエアハンマーと一般的な加速度計を用いて弾性波速度を計測している。後者の計測方法の利点はシステムの導入が容易なことであり、本研究においてもこの手法を用いてP波速度を計測した。

多孔質弾性体に対してはP波速度と飽和度の関係は理論的に明らかにされている。Kokusho¹⁹⁾とTsukamoto *et al.*²⁰⁾によると、P波速度 v_p と間隙圧係数 B (B値) には以下の式の関係がある。

$$\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1-\nu_b)}{3(1-2\nu_b)(1-B)} \quad (1)$$

ここで、 v_s : S波速度、 ν_b : 土骨格のポアソン比である。また、 B 値と飽和度 S_r には以下の式の関係がある。

$$B = \frac{1}{1+n\frac{K_b}{K_w}S_r + n\frac{K_b}{K_a}(1-S_r)} \quad (2)$$

ここで、 K_b, K_w, K_a : 土骨格と水、空気の体積弾性係数である。

式(2)は B 値の定義式から容易に導くことができ、例えば文献²¹⁾にもその導出過程が示されている。土骨格のポアソン比 ν_b と体積弾性係数 K_b を仮定すると、式(1)と式(2)によってP波速度 v_p と飽和度 S_r の関係が明らかとなる。この関係によれば、飽和度が100%に近づくにつれてP波速度は1000~1500 m/s程度まで急激に大きくなり、完全飽和に近い地盤での飽和度の指標とすることができる。

重力場での試験では、ハンマーによって容器底面を打撃して地盤内にP波を発生させた。一方、遠心場での試験では、遠隔操作できる小型のハンマーによってP波を発生させた。図-2.5にこの装置を示しているが、モーターとソレノイドを組み合わせたものであり、ソレノイドを電氣的に作動させることで試料容器側面を打撃することができる。また、モーターを作動させることでソレノイドを元に位置に引き戻し、繰り返して容器側面を打撃することが可能である。試験では、地盤内に15 cmだけ離して設置した2個の加速度計で振動波を受感し、それらの到達時間の差からP波速度を算定した。データのサンプリング周波数は100 kHzである。図-2.6には、地盤内に加速度計を設置した方法を示している。図に示すように、釣り糸とアクリル板を使って加速度計の位置と方向を固定し、空

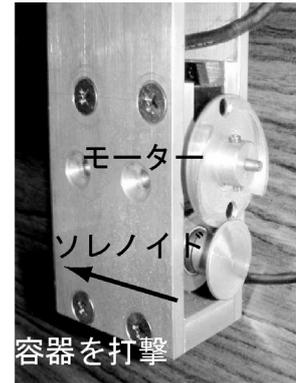


図-2.5 P波ハンマー

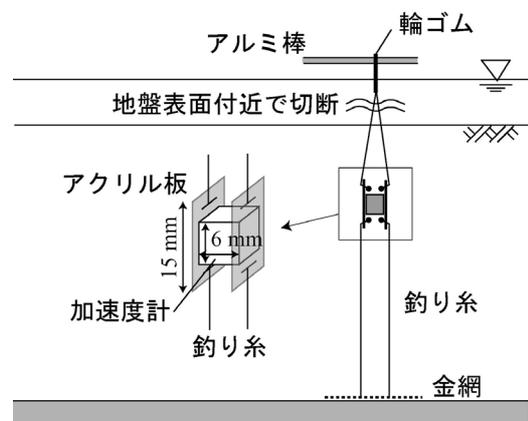


図-2.6 地盤内への加速度計の設置方法

中落下法で乾燥砂地盤を作製した。その後、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、加速度計が地盤内で自由に振動できるようにした。

2.3 重力場での地盤の飽和度

(1) 模型砂地盤

模型砂地盤の相対密度と粘性流体の通水方法を変化させて、重力場における地盤の飽和度を調べた。表-2.2に試験ケースの一覧を示しており、地盤の重量と体積から求めた飽和度も併せて示している。作製した地盤は、相対密度95%を目標とした密な地盤と25~30%を目標とした緩い地盤であるが、緩い地盤の相対密度は密な地盤と比べてばらつきが大きい。これは、試料容器の天端まで砂が堆積した後にさらに砂が落下して試料を振動させる等の地盤作製時での微小な差が緩い地盤での相対密度に大きな影響を与えるためだと考えられる。なお、50gの遠心加速度場で動的模型実験を行うことを想定して、粘性流体の動粘度は水の50倍に相当する50 m²/sを目標とした。ただし、実験ケースPL1-2~PL3-2の動粘度は実験

表-2.2 P波速度の計測試験ケース一覧 (重力場)

ケース名	通水方法	D_r (%)	S_r (%)	ν (m ² /s)
PDA-1	大気圧	90.2	89.2	54.3
PDA-2		93.5	90.7	51.6
PDV-1	真空	97.7	99.6	54.3
PDV-2		96.7	101.8	51.6
PDG-1	炭酸ガス・真空	99.2	100.0	54.3
PDG-2		96.2	100.9	51.6
PLA-1	大気圧	15.3	95.1	55.3
PLA-2		25.9	96.7	-
PLV-1	真空	25.4	100.1	55.3
PLV-2		29.9	100.6	-
PLG-1	炭酸ガス・真空	24.6	100.8	55.3
PLG-2		31.2	100.8	-

D_r : 相対密度, S_r : 飽和度, ν : 動粘度

の都合で計測できなかったため、これらの動粘度については表から省いている。

表-2.2に示すように、粘性流体の通水方法を大気圧通水法とした密な地盤と緩い地盤の飽和度はそれぞれ90%と96%程度であった。一方、通水方法を真空通水法又は炭酸ガス・真空通水法とした地盤の飽和度は約100%であった。このように、地盤の重量と体積から求めた飽和度から判断すると、通水する際に大気圧か真空下であることは地盤の飽和度に大きな影響を与え、真空下で通水すると飽和度は100%に近づくことがわかった。

(2) P波速度

模型地盤内の2個の加速度計が受感した振動波形の例を図-2.7に示している。図には2種類の相対密度と3種類の通水方法で作製した地盤で計測された振動波形を(a)~(f)として示している。各図の左側の縦軸は地盤下部で計測した加速度であり、右側の縦軸は地盤上部で計測した加速度である。図に示すように、上下に設置した2つの加速度で受感した振動波形は等しい形状になっていない。これは、試料容器側面や地盤表面で反射した振動が上部の加速度計にも到達するためと考えられる。そこで本研究では、振動を受感したと考えられる時点の時間差を伝播に要する時間とした。これは、最初に到達する振動は最も伝播距離が小さくなるように地盤内を直線的に伝播したものと考えられるためである。振動を受感したと考えられる時間を各図に矢印で表している。

図-2.7(a), (c), (e)から判断すると、3種類の通水方法で作製した密な地盤での振動の到達時間差は108×

10⁻⁵ s, 17×10⁻⁵ s, 10×10⁻⁵ sである。どのケースにおいても上下に設置した2個の加速度計は15 cmと同じ距離だけ離れており、真空下で通水することや乾燥砂地盤の間隙を炭酸ガスで置換しておくことはP波速度を速めることがわかった。緩い地盤においても同様の傾向が確認できる。

(3) P波速度と飽和度の関係

測定したP波速度と飽和度との関係を図-2.8に示している。図には、1つの模型地盤に対して3回計測したP波速度の平均値をプロットしている。図中の横軸は地盤の重量と体積から求めた飽和度である。また、上述の多孔質理論(式(1)と(2))から求めたP波速度と飽和度の関係も併せて示している。実線は相対密度が100%の場合の関係で、破線は相対密度が25%の場合の関係である。また、土骨格のポアソン比を0.4、体積弾性係数を6.0×10⁴ kN/m²と仮定した。

理論式によると、飽和度が90~95%程度の場合の緩い地盤と密な地盤でのP波速度はそれぞれ約145と190 m/sである。大気圧で粘性流体を通水した地盤でのP波速度は約290 m/s(緩い地盤・飽和度96%)と150 m/s(密な地盤・飽和度90%)であった。緩い地盤でのP波速度は理論値よりも若干大きい。例えば中澤ら²²⁾による要素試験結果においても飽和度が約98%の場合には計測値が理論値を上回っていた。計測値が理論値を上回る原因は、理論式では砂地盤を多孔質弾性体と仮定しているためと考えられるが、詳細な原因については不明である。ただし、大気圧で粘性流体を通水した場合、P波速度は比較的小さいレベルに留まっていることについては確認できた。

真空通水法による砂地盤に対して重量と体積から求めた飽和度は約100%であった。P波速度に関しても比較的大きな値であり、相対密度に関係なく約740~900 m/sである。炭酸ガス・真空通水法による砂地盤での重量と体積による飽和度も約100%であったが、P波速度はさらに大きく約1300~1600 m/sである。P波速度の増加傾向から、真空通水法において粘性流体の通水前に炭酸ガスで空隙を置換すると、さらに飽和度が高まることが確認できた。Tsukamoto et al.²⁰⁾は完全に飽和した豊浦珪砂でのP波速度は約1700 m/sであることを要素試験レベルで示している。この速度は水中を伝わるP波速度よりも10~15%程度大きい。完全飽和地盤では水中だけでなく密着している砂粒子においても振動が伝播するためと考えられている¹³⁾。これから、炭酸ガス・真空通水法によって作製した砂地盤の飽和度は1300~1600 m/sと大きく、完全飽和に近いことがわかった。

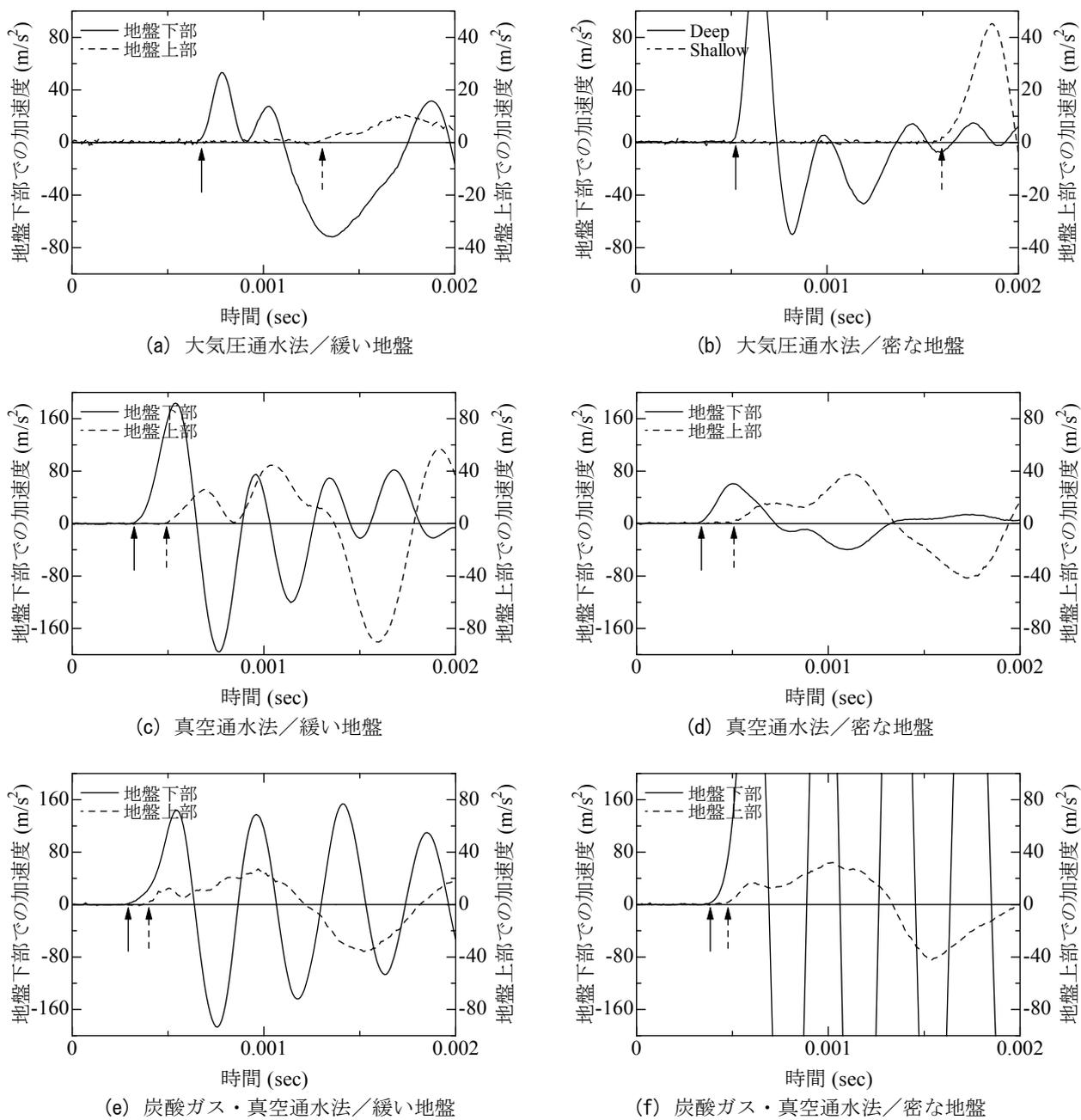


図-2.7 受感した振動波形の例

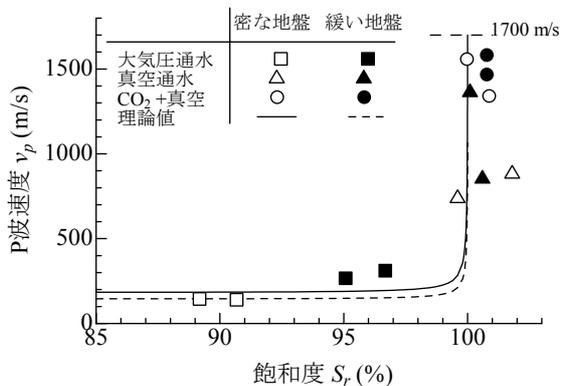


図-2.8 地盤の飽和度とP波速度の関係

2.4 遠心場での地盤の飽和度

(1) 模型砂地盤

遠心模型実験では遠心加速度の増加によって地盤内の静水圧が大きくなるために、模型地盤の飽和度は重力場での値よりも大きくなる可能性がある。そこで、遠心加速度場で地盤内を伝播するP波速度を計測し、その飽和度の変化を調べた。遠心模型実験装置の諸元については参考文献²³⁾を参照されたい。表-2.3に試験ケースの一覧を示している。模型砂地盤は重力場での試験用の地盤と同

表-2.3 P波速度の計測試験ケース一覧（遠心場）

ケース名	通水方法	D_r (%)	S_r (%)	ν (m ² /s)
PLA-C	大気圧	44.7	94.1	44.7
PLV-C	真空	41.0	99.0	43.3
PLG-C	炭酸ガス・真空	30.4	99.5	44.2

D_r : 相対密度, S_r : 飽和度, ν : 動粘度

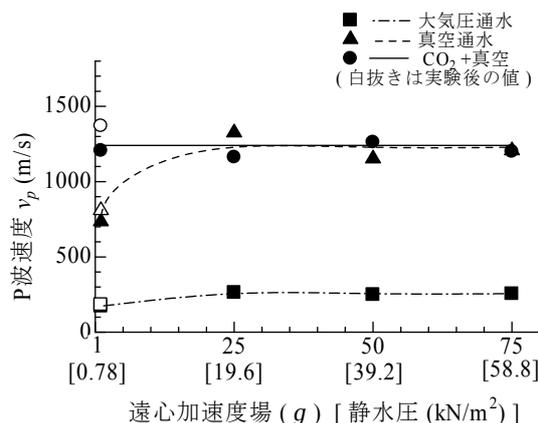


図-2.9 遠心加速度と P 波速度の関係

じ方法で作製しており、粘性流体の動粘度は水の50倍に相当する50 m²/sを目標とした。地盤の重量と体積から求めた飽和度は、大気圧通水法によるものが94%と小さく、他の通水方法によるものはほぼ100%であった。この傾向は重力場での試験結果と整合性があった。

(2) 遠心加速度とP波速度の関係

P波速度の測定は、1g, 25g, 50g, 75gの4種類の遠心加速度場で行った。また、遠心加速度場から重力場に戻した後もP波速度を計測した。試験で得られた遠心加速度とP波速度の関係を図-2.9に示している。図中の横軸には、加速度計を設置した位置（実物スケールで地表面から3.5 mの深さ）での静水圧も併せて示している。また、図中の1gでの白抜きのプロットは遠心実験後に重力場で測定した結果を表しており、傾向が理解しやすいように試験結果には補助線を入れている。

図に示すように、大気圧通水法で作製した地盤の重力場におけるP波速度は約180 m/sであるが、遠心加速度が25g以上になると約250 m/sに増加していた。また、真空通水法による地盤においても遠心加速度が増加するとP波速度が750 m/sから1200~1300 m/sに増加していた。ただし、遠心場での計測後に重力場で計測したそれぞれのP波速度は約185 m/sと810 m/sであり、遠心加速度を加える前の値にほぼ戻っていた。つまり、遠心加速度を模型地

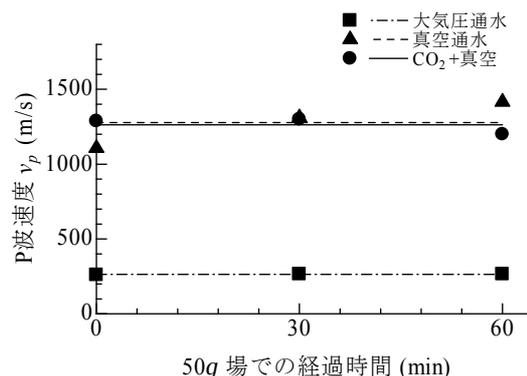


図-2.10 遠心場での経過時間と P 波速度の関係

盤に付加することによって飽和度が一時的に増加するが、重力場に戻ることによってほぼ元の値に戻ることがわかった。一方、炭酸ガス・真空通水法による地盤でのP波速度は、遠心加速度の大きさに関係なく約1200~1300 m/sであり、遠心加速度を付加することによる飽和度の増加は認められなかった。これは、炭酸ガス・真空通水法による地盤は重力場においても完全飽和状態に近く、遠心加速度を付加しても飽和度がこれ以上増加しなかったためと考えられる。

(3) 遠心場での経過時間とP波速度の関係

遠心場での経過時間とP波速度の関係を調べるために、遠心加速度を50gに保ち30分と60分後にP波速度を測定した。50gの遠心加速度場での経過時間とP波速度の関係を図-2.10に示す。図中には、計測値の平均値を実線で追記した。大気圧通水法と炭酸ガス・真空通水法による地盤のP波速度はほとんど変化していないが、真空通水法による地盤のP波速度は時間の経過に伴い300 m/s程度のP波速度の増加が見られた。しかしながら、真空通水法による地盤でのP波速度は1000 m/s以上であり、飽和度はほぼ100%に近いため、飽和度はほとんど変化していない可能性が高い。以上から、遠心模型実験装置で長時間にわたって遠心加速度を作用させても地盤の飽和度が変化する可能性は低いことがわかった。

これらのことから、地盤の飽和度は通水方法及び遠心加速度に大きく影響を受けることが確認できた。完全飽和地盤を対象とした模型実験を行う場合、少なくとも真空下で粘性流体を通水させる必要がある。また、今回の試験条件では、炭酸ガスで空隙を置換した後に通水しなくても遠心加速度によって地盤はほぼ完全飽和状態となっていた。ただし、これは使用する砂や地盤条件によって異なる可能性があるため、より完全な飽和状態の地盤を作製するためには炭酸ガスによる置換が必要であると考えられる。

3. Modeling of models手法による動的遠心模型実験の精度検証

3.1 Modeling of models 手法の概要

近年、液状化が生じる地盤の動的な現象を検証するために遠心模型実験は多く実施されているが、地盤の作製方法や、通水方法、寸法効果、間隙流体の粘度、地盤の境界条件、入力波などの多くの条件によって実験データは影響を受ける。そこで、信頼性の高い実験データを得るためには、実験に先立って実験結果に対する精度の検証を行うことが必要である。遠心模型実験の結果が実物の挙動を再現していることの検証方法として、Modeling of models手法がしばしば用いられる。Modeling of models手法とは、図-3.1に示すように同一の実物を表す数種の寸法の模型地盤と遠心加速度の組み合わせで実験を行い、実物スケールに換算した結果が同じであれば、実際の現象も再現することが可能とみなす方法である。また参考として、実物スケールに対する遠心模型実験の相似則を表-3.1に示している。

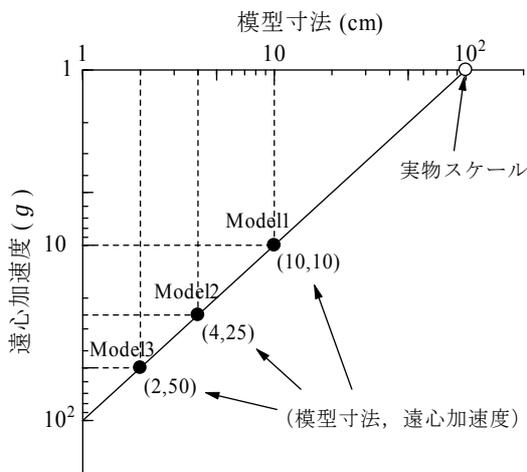


図-3.1 Modeling of models 手法の概念図

表-3.1 遠心模型実験の相似則

物理量	遠心場模型 (Ng)	実物 ($1g$)
模型寸法	$1/N$	1
加速度	N	1
土密度	1	1
飽和度	1	1
粘性	$1/N$	1
時間 (動的)	$1/N$	1
時間 (拡散)	$1/N^2$	1

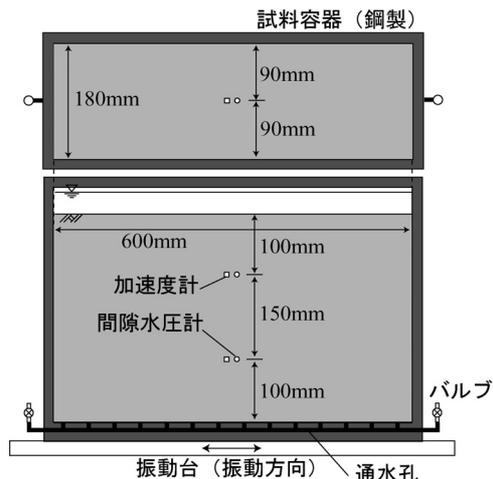
液状化現象を調べるための遠心模型実験を実施した過去の研究において、Modeling of models手法を適用した例^{24), 25), 26)}がいくつかある。これらの研究では、比較的差の小さい2種類の遠心加速度場での実験結果を比較し、実物スケールに換算した実験結果の一致を確認している。本研究では、深層混合処理地盤を想定した高剛性壁に囲まれた模型砂地盤を対象とした実験に先立って、寸法縮尺を1/10, 1/25, 1/50の3種類としたModeling of models手法による実験を実施し、遠心模型実験による実物スケールでの挙動の再現性に関する精度を検討した。

3.2 模型地盤の作製方法

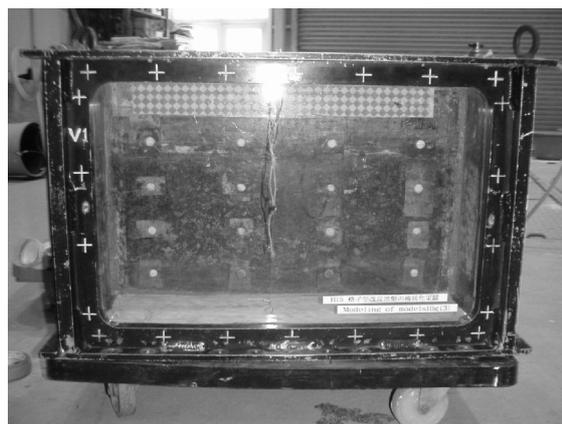
3種類の遠心加速度場で行った模型実験の概略図を図-3.2に示している。実物スケールに換算して横幅6.0 m×深さ3.5 m×奥行き1.8 mの容器を想定して、10g, 25g, 50gの3種類の遠心加速度に対する相似則に従って模型寸法を決定した。遠心加速度が10gでの実験には図-3.3(a)に示す試料容器を用いて、遠心加速度が25g, 50gでの実験には図-3.3(b)に示す試料容器を用いた。10gの実験用の試料容器は剛性の高い鋼製の試料容器である。25gと50gの実験用の試料容器は厚さ2 cmのベークライトの板を井桁に組み合わせたものであり、それぞれの板の交差箇所にはみぞを設けるとともにボンドで接着し、容器内を完全に遮水した。実験ではベークライトで作製した試料容器を10gの実験に用いた鋼製の試料容器内にボルトで固定した。また、地盤への通水が地盤の下部から効率的かつ均等に行えるように、容器の底板に直径6 mmの穴を20 mmピッチで開けて、バルブを介して通水できるようにした。

Modeling of models手法における実験で重要な条件の1つが、各遠心加速度における地盤の境界条件の一致である。予備的に実施した実験結果によると、10g用の試料容器においては容器天端での振動のピーク加速度は容器底面でのものよりも5~10%程度大きかった。一方、25gと50g用のベークライトで作製した試料容器では天端と底面でのピーク加速度に大きな差はなかった。このように10g用の実験における境界条件は他の遠心加速度での実験のものとは若干異なっていた。本研究では、10g用の実験においては容器天端と底面で加速度を計測し、その平均値を振動のピーク加速度として実験データをまとめた。

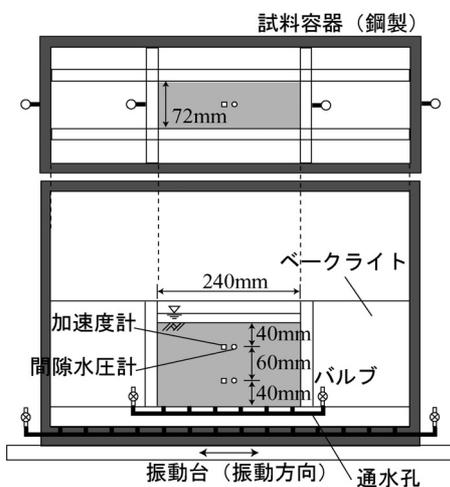
加速度計と間隙水圧計は、実物スケールで地表面から深さ1.0 mと2.5 mに相当する位置に設置した。前述の図-2.6に示した方法で、地盤内の所定の位置に各計測センサーを埋め込んだ。なお、振動によって地盤内に発生する衝撃的な水圧の影響を取り除くために、間隙水圧計の



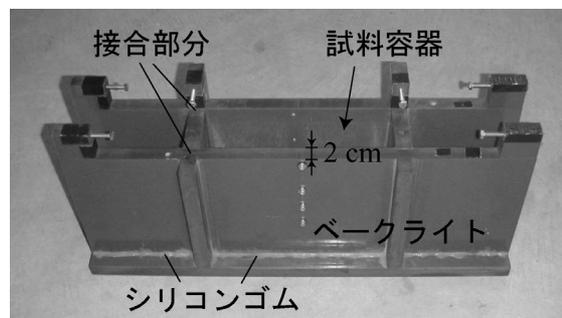
(a) 10 g 実験



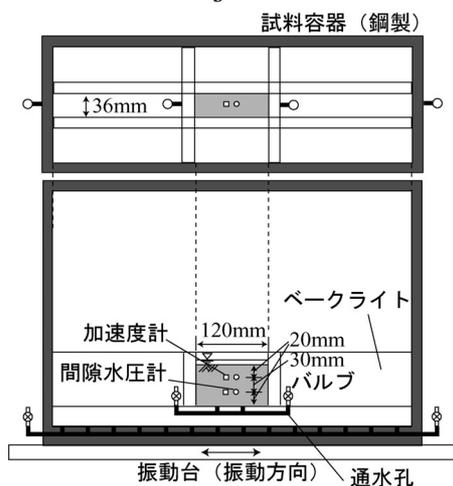
(a) 10 g 実験



(b) 25 g 実験



(b) 25 g 実験



(c) 50 g 実験

図-3.2 Modeling of models 実験用の模型概略図

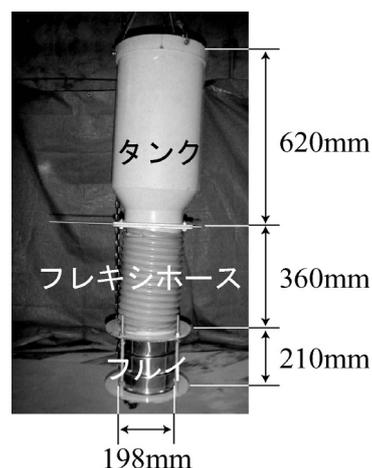


図-3.4 小型のサンドホッパー

受圧面を振動方向に対して直角方向にした。

乾燥砂地盤の作製に関しては、当初は相対密度が45%程度となるように作製を試みたが、3種類の大きさの試料容器において相対密度が最大30%程度異なった。この原

因としては、砂が堆積する過程で地表面高さに違いが生じると、砂粒子が落下後に斜面上を移動し、試料容器が大きいほど土粒子の移動量が多くなるためと考えられた。そこで、寺師ら¹¹⁾が用いたものとは異なる図-3.4に示し

た比較的小型のサンドホッパーを使い、砂の流出口を左右に緩やかに動かして砂を堆積させるようにした。小型のサンドホッパーを動かすことで、試料容器内の地表面高さをほぼ均等に保ちながら砂を堆積させることができる。このサンドホッパーでは、鋼製の筒とフレキシホースの間の鉄板をずらすことによって砂の落下を制御し、鉄板に開けた穴の径を変えることによって流量を変化させられる。砂の流出口には2mmフルイが3枚取り付けられている。このサンドホッパーを用いることで、3種類の試料容器における相対密度の差を15%以下と比較的小さくすることができた。乾燥砂地盤を作製した後に、炭酸ガス・真空通水法によって粘性流体を通水した。なお、遠心加速度場での浸透時間の相似率と動的現象に関する時間の相似率を合わせるために、10g、25g、50gの実験における粘性流体の動粘度が10 m²/s、25 m²/s、50 m²/sとなるように調整した。

3.3 模型実験方法

実験ケースの一覧を表-3.2に、目標とした入力波を表-3.3に示している。模型地盤の相対密度は45%，飽和度は100%を目標として模型砂地盤を作製した。遠心模型実験では、所定の遠心加速度に到達した後に、振動台によって模型地盤に50波の正弦波を加えた。10g、25g、50gでの実験における入力波の振動数はそれぞれ40 Hz、100 Hz、

200 Hzであり、実物換算では振動数4 Hz (周期で0.25 s)に相当する。Modeling of models手法における実験で境界条件以外の重要な条件の1つが、各遠心加速度における入力波形の一致である。入力波形の例を図-3.5に示している。(a)、(b)、(c)はそれぞれ10g、25g、50g場における実物換算で約300 galの入力波形を示している。3種類の遠心加速度での波形を比較すると、振動台の特性のために初期の振動波形は異なっているが、その後の波形はほぼ類似していることがわかった。また、これらの波形を実物スケールに換算して重ね合わせたものを図-3.5(d)に示して

表-3.2 Modeling of models 実験のケース一覧

ケース名	遠心加速度 (g)	D _r (%)	ν(m ² /s)
M50-3	50	48.7	44.1
M50-4		51.0	41.6
M25-5	25	33.9	18.3
M25-6		53.0	20.9
M25-7		41.0	24.2
M10-4	10	46.2	13.1
M10-5		44.0	13.2
M10-6		50.0	4.9

D_r:相対密度, ν:動粘度

表-3.3 Modeling of models 実験での加振条件一覧

ケース名	実物スケール	10g test		25 g test		50 g test
		M10-4, 5	M10-6	M25-5, 6	M25-7	M50-3, 4
遠心加速度 (g)	1	10		25		50
模型寸法	1/1	1/10		1/25		1/50
入力振動波形の種類	正弦波, 50 波					
振動時間 (sec)	12.5	1.25		0.5		0.25
振動周波数 (Hz)	4	40		100		200
目標ピーク加速度 (m/s ²)	0.75 (75 gal)	7.5	7.5	18.75	18.75	37.5
	1.0 (100 gal)	10.0	-	-	25.0	-
	1.25 (125 gal)	12.5	-	-	31.25	-
	1.5 (150 gal)	15.0	15.0	37.5	37.5	75.0
	2.0 (200 gal)	20.0	-	-	-	-
	2.5 (250 gal)	-	-	-	62.5	-
	3.0 (300 gal)	30.0	30.0	75.0	-	150.0
	3.5 (350 gal)	-	-	-	87.5	-
	4.0 (400 gal)	-	40.0	-	-	-
4.5 (450 gal)	-	-	112.5	-	225.0	

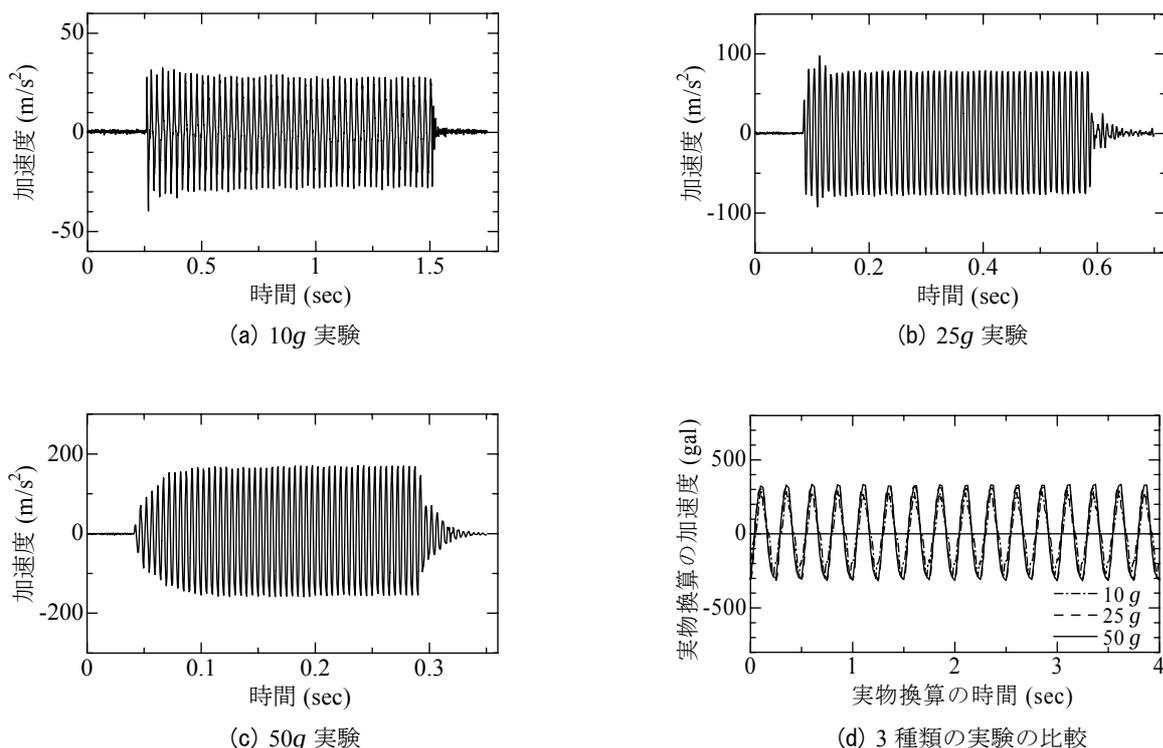


図-3.5 振動台による入力波形

いる。これからも3種類の波形はよく類似していることが確認できた。

表-3.3に示すように、実験を効率化するために、加振方法としてはステップ加振とした。予備実験において、地盤内で発生した過剰間隙水圧は約1分間でほぼ消散することを確認したが、より確実に過剰間隙水圧を消散させるために約2~3分の間隔を空けてステップ加振を行った。実験ではステップ加振を行ったために、地盤が完全に液状化すると相対密度が大きく変化して地盤の条件が変化すると考えられる。逆に、十分に液状化が生じていない箇所においてはステップ加振を行っても大きくは相対密度が変化しないと考えた。そこで、以下で示す実験結果においては、地盤が十分に液状化した振動加速度よりも大きい振動加速度での計測値を検討から除いた。実験では、データのサンプリング周波数を2 kHzとして、振動中の加速度や間隙水圧を測定した。

3.4 地盤内加速度の応答特性

(1) 応答加速度の経時変化

遠心加速度が25gでの実験（ケースM25-6）において試料容器（ベークライト）及び地盤内で計測した加速度の経時変化を図-3.6に示している。これらは3種類の振動加速度で地盤を振動させた際に計測した加速度である。ま

た、図中の加速度と時間は実物スケールに換算している。入力した振動加速度が比較的小さい場合（図-3.6(a)参照）、1.0 mの深度でのピーク加速度が振動加速度よりも多少大きいものの、3ヶ所で計測されたピーク加速度はほぼ同様の値であった。これは剛性が大きい試料容器の幅が比較的小さいために、地盤が容器とほぼ一体となって振動するためだと考えられる。地盤が試料容器と一体となって振動していることから考えると、この振動加速度においては地盤は液状化していないと考えられる。

振動加速度が大きくなると（図-3.6(b)参照）、1.0 mの深度での加速度波形において、3波目でのピーク加速度が急激に減少する傾向が見られた。減少したピーク加速度は振動加速度よりも非常に小さく、この時点で地盤が完全に液状化したと考えられる。つまり、間隙水圧の上昇によって土粒子の骨格が崩れ液状化したために、地盤内の加速度計まで振動が伝播しなかったと考えられる。2.5 mの深度でのピーク加速度は、15波目付近において一時的に減少し、再び振動加速度と同様の値まで戻る現象が見られた。これは、砂の繰返しせん断による間隙水圧の上昇速度に比べて、透水による間隙水圧が減少する速度が速かったためと考えられる。

振動加速度がさらに大きくなると（図-3.6(c)参照）、いずれの深度においても数波目にピーク加速度が急激に

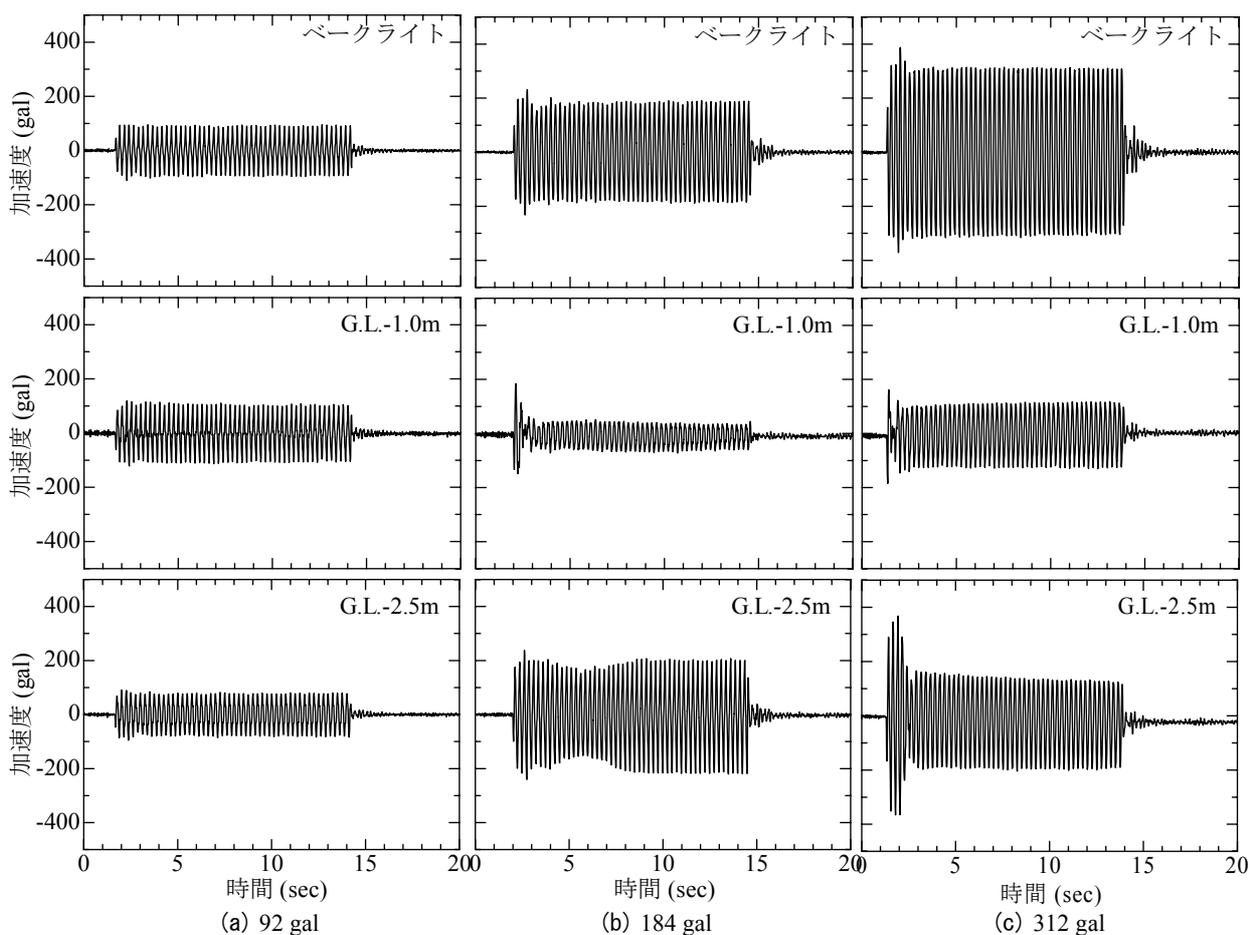


図-3.6 地盤内の応答加速度の経時変化

減少し、振動加速度よりもかなり小さかった。このことから、1.0 mだけでなく2.5 mの深度においても地盤が完全に液状化したと考えられる。このように、地盤内で計測した加速度の経時変化から、地盤の液状化を判定することができる。

(2) 振動加速度と応答加速度の関係

地盤内加速度の応答特性に関して、Modeling of models 手法によって実物スケールの挙動を再現する精度を検討した。液状化が生じる加振ステップまでの振動加速度と地盤内でのピーク加速度の関係を図-3.7にプロットしている。ここで振動加速度とは試料容器で計測した加速度のピーク値のことであり、振動加速度と地盤内のピーク加速度は実物スケールに換算している。また、振動中に地盤内のピーク加速度が急激に減少した場合は減少した直後のピーク加速度をプロットした。プロットが集中していると考えられる領域を図中にハッチで示している。

図-3.7(a)に示した1.0 mの深度では、振動加速度が約110 gal以下の場合、振動加速度と地盤内でのピーク加速

度はほぼ同じ値であり、実験データは図中の45度線付近にプロットされている。一方、振動加速度が約130 gal以上の場合、振動中に地盤内のピーク加速度は急激に減少し、振動加速度よりもかなり小さかった。これは、地盤が完全に液状化し、図中の実験データは45度線よりも下にプロットされていると考えられる。図中にプロットされた実験データはハッチで描かれた箇所にほぼ重なっており、遠心加速度に関係なく液状化が生じる振動加速度はほぼ同じであることが確認できた。

図-3.7(b)に示した2.5 mの深度においても、遠心加速度に関係なく実験データはハッチで描かれた箇所にほぼ重なっている。振動加速度が約235 gal以下の場合には振動加速度と地盤内でのピーク加速度はほぼ同じ値であり、約275 gal以上になると地盤内のピーク加速度は振動中に急激に減少していた。このように、3種類の遠心加速度場で計測した加速度は実物スケールに換算するとほぼ同じ傾向を示していることが確認できた。

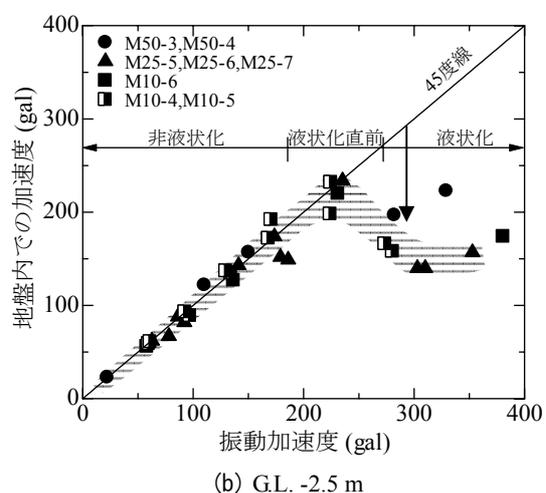
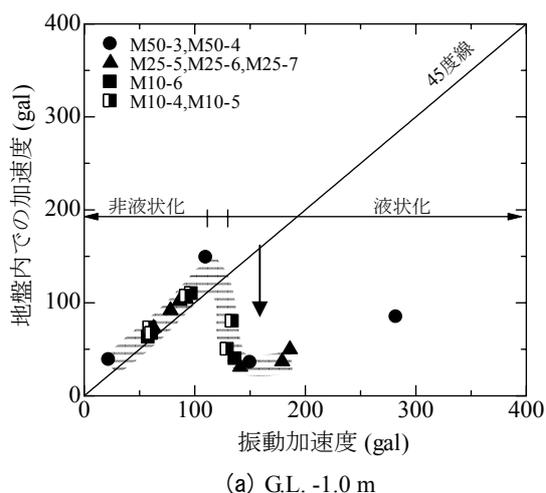


図-3.7 振動加速度と地盤内の応答加速度の関係

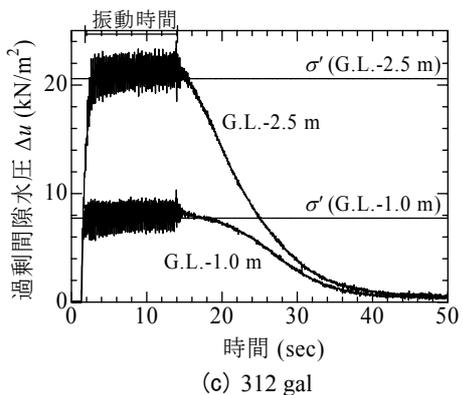
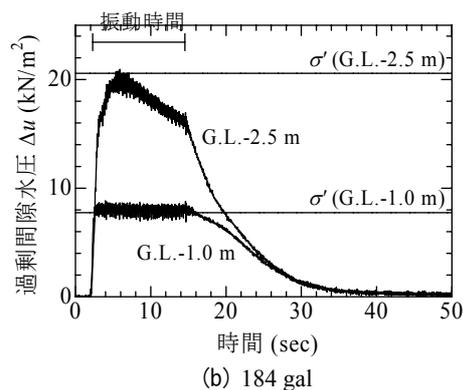
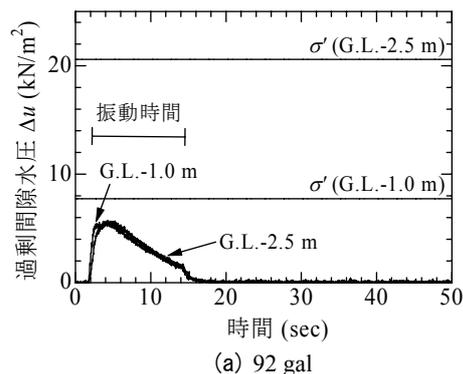


図-3.8 地盤内の間隙水圧の経時変化

3.5 間隙水圧の応答特性

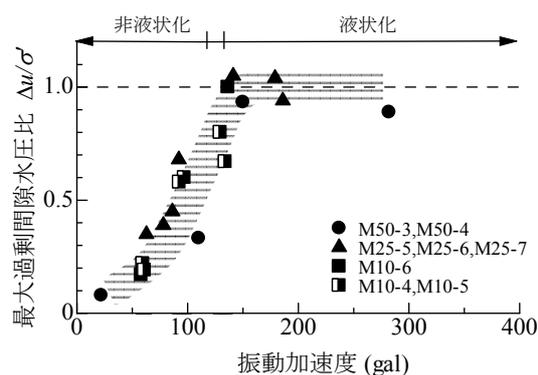
(1) 過剰間隙水圧の経時変化

遠心加速度25gでの実験（ケースM25-6）において地盤内で計測した過剰間隙水圧の経時変化を図-3.8に示している。これらは3種類の振動加速度で地盤を振動させた際に計測された過剰間隙水圧である。また、図中の時間は実物スケールに換算しており、有効上載圧を実線で示している。ただし、振動直前の静止時での間隙水圧からセンサーの深度を求め、有効上載圧を算出した。

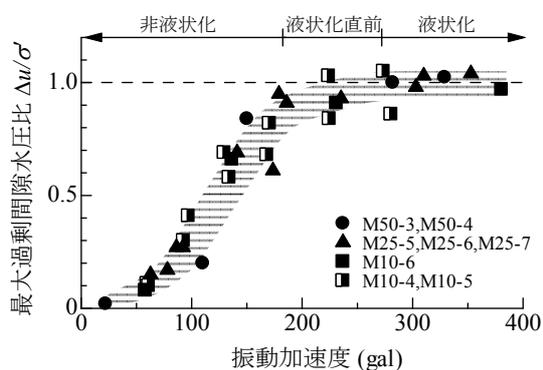
入力した振動加速度が比較的小さい場合（図-3.8(a)参照）、1.0 mと2.5 mの深度とも振動中に間隙水圧が多少上昇するが、過剰間隙水圧は有効上載圧まで達することなく振動中に消散している。これは、砂の繰り返せん

断による間隙水圧の上昇速度に比べて、透水による間隙水圧の減少速度が速かったためと考えられる。また、振動後には過剰間隙水圧は速やかに消散している。

振動加速度が大きくなると（図-3.8(b)参照）、1.0 mの深度においては、過剰間隙水圧が有効上載圧とほぼ等しくなるまで発生し、振動終了後に消散する。これは、地盤が液状化していることを示している。一方、2.5 mの深度では有効上載圧の近くまで間隙水圧が上昇したが、振動中に過剰間隙水圧が消散する傾向が見られた。これについても、透水による間隙水圧の減少速度が速かったためと考えられる。振動加速度がさらに大きくなると（図-3.8(c)参照）、いずれの深度においてもそれぞれの有効上載圧と同程度の過剰間隙水圧が発生しており、地盤が



(a) G.L. -1.0 m



(b) G.L. -2.5 m

図-3.9 振動加速度と地盤内の間隙水圧の関係

液状化していることがわかる。また、振動後には過剰間隙水圧は消散するが、液状化しなかった場合と比べて消散する速度は遅いことが確認できた。

(2) 振動加速度と過剰間隙水圧の関係

地盤内で発生する過剰間隙水圧の最大値を用いて、Modeling of models手法によって実物スケールの挙動を再現する精度を検討した。液状化が生じる加振ステップまでの振動加速度と最大過剰間隙水圧の関係を図-3.9にプロットしている。なお、振動加速度は実物スケールに換算し、過剰間隙水圧は有効上載圧で除することによって過剰間隙水圧比として表す。また、図中のプロットが集中していると考えられる領域をハッチで示している。

図-3.9(a)に示した1.0 mの深度では、振動加速度が大きくなるにつれて発生する過剰間隙水圧の最大値も大きくなり、135 gal以上になると過剰間隙水圧はほぼ有効上載圧と等しくなっている。つまり、地盤は完全に液状化したと考えられる。ただし、ケースM10-4とM10-5に関しては、図-3.7(a)に示した地盤内での加速度から判定すると完全に液状化しているが、過剰間隙水圧比は1.0まで上昇していなかった。これは、地盤が完全に液状化した際

に間隙水圧計に何らかの問題が発生した可能性が考えられるが、詳細な原因については不明である。しかしながら、他の実験ケースでの実験データはハッチで描かれた箇所にはほぼ重なっており、遠心加速度に関係なく振動加速度に対する間隙水圧の上昇する傾向は一致していることが確かめられた。

図-3.9(b)に示した2.5 mの深度においても、遠心加速度に関係なく実験データはハッチで描かれた箇所にはほぼ重なっている。振動加速度が大きくなるにつれて地盤内の間隙水圧は上昇し、180 gal程度になると過剰間隙水圧比は1.0となる。さらに振動加速度が275 galを超えると、過剰間隙水圧は有効上載圧に達している。地盤内で計測した加速度から判断しても275 gal以上で地盤が完全に液状化していることから、地盤内の加速度と間隙水圧の特性は整合性が取れている。また、振動加速度が180~275 galの場合の過剰間隙水圧比に注目すると、地盤が完全に液状化していなくても過剰間隙水圧比は1.0に近くなるまで大きくなることがわかった。これらから、3種類の遠心加速度場で計測した間隙水圧は振動加速度に対してほぼ同じ上昇傾向を示していることが確認できた。

前述のように、3種類の遠心加速度で計測された応答加速度は、実験条件内では遠心加速度に関係なく（模型寸法に関係なく）ほぼ同じ振動加速度で地盤は液状化したことを示していた。また、振動加速度の増加に対する間隙水圧の上昇特性についても、遠心加速度に関係なくほぼ一致していた。このことから、本研究での液状化に関する動的遠心模型実験について、実物スケールでの挙動を再現する精度は高いことが確認できた。

4. 格子状改良による液状化抑制効果に関する実験的検討

4.1 深層混合処理による液状化抑制工法の概要

液状化を抑制する工法には、液状化地盤の密度を増加させる方法、液状化しにくい土に置き換える方法、地下水位低下工法、過剰間隙水圧消散工法、せん断変形を抑制する工法等がある。また、液状化が生じても構造物が安定できるように、杭の本数を増やしたり、基礎を深くしたりする対策工法もある。本研究では、近年注目されている深層混合処理（以下、DMM）工法によって飽和砂地盤を格子状に囲い込み、せん断変形を抑制する工法について検討した。格子状の改良地盤が液状化を抑制するメカニズムは、高い剛性を有した固化処理土の壁体が地震時の土粒子の移動を拘束することで、液状化の発生を抑制していると考えられている。

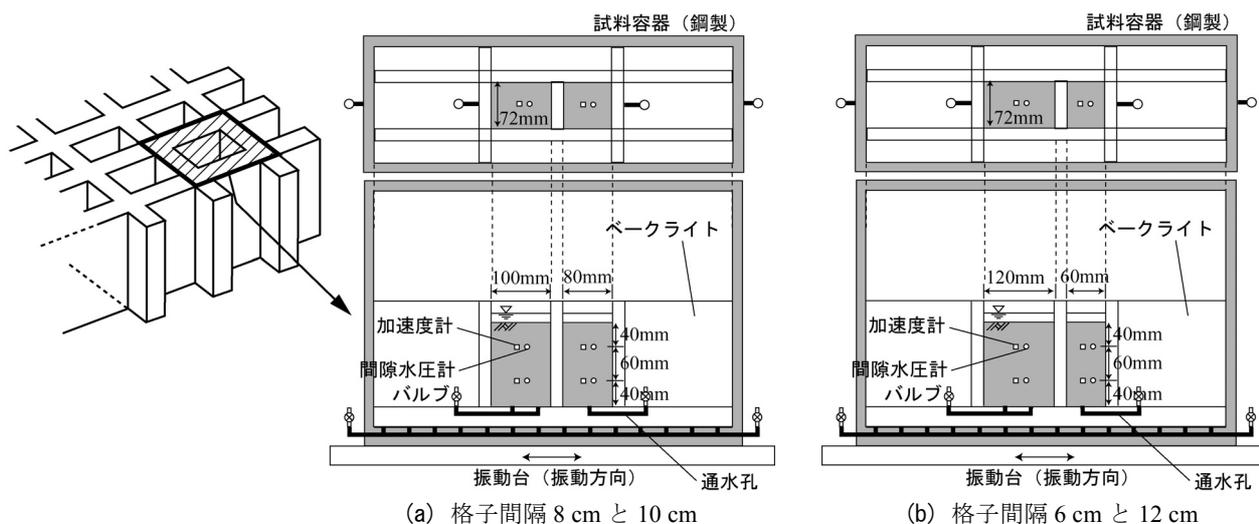


図-4.1 格子間隔の影響評価のための模型実験概略図

前述のように、格子状に固化処理土を打設することによって液状化を抑制する工法の設計では、固化処理土の壁の間隔（格子間隔）の設定が問題となる。格子間隔が狭いほど液状化の抑制効果が大きくなることが予想されるが、狭く設計するほど経済性は低下する。現行の設計指針⁹⁾では、液状化の発生が予想される層の厚さ H と格子間隔 L の比 L/H がある一定値以下になるように格子間隔を設定することとされている。しかしながら、 L/H によって液状化抑制効果を評価して格子間隔を決定する場合、液状化層厚が小さい場合には L/H を保つために格子間隔を極端に狭くする必要が生じる。逆に、液状化層厚が大きい場合、 L/H を保つために格子間隔が極端に広くなり、地表面付近は液状化する可能性がある。このように L/H を用いて格子間隔を決定すると、種々の不合理性が生じる。また、格子内の地盤は一樣に液状化するわけではなく、深度方向に異なる液状化特性を考慮した詳細な設計手法が必要であると考えられる。

そこで本研究では、先に述べたような地盤作製方法の検討や実験精度の検証を行った後に、格子内に作製した飽和砂地盤の液状化特性について遠心模型実験によって調べ、より合理的に格子間隔を決定する手法について検討した。また、数値解析も実施し、格子間隔を狭めることによる液状化の抑制効果について解析的にも検討した。

4.2 遠心模型実験方法

格子間隔の影響を評価するための遠心模型実験の概略図を図-4.1に示している。Modeling of models手法による遠心模型実験で用いた試料容器に加えて、2種類の異なる

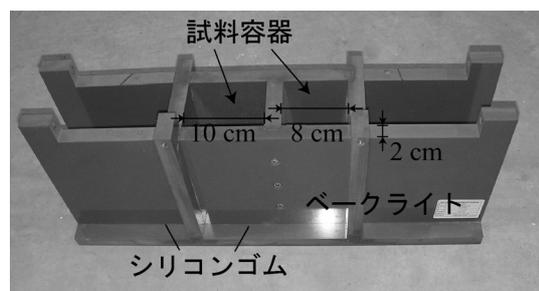


図-4.2 格子間隔の影響評価実験での試料容器

格子間隔を持つ2種類の試料容器を用意し、合計5種類の格子間隔での液状化特性について検討した。これらの5種類の格子間隔は6, 8, 10, 12, 24 cmであり、遠心加速度を $25g$ と設定したので実物スケールに換算すると格子間隔は1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 6.0 mである。また、試料容器の深さと奥行きは、それぞれ18.0 cmと7.2 cm（実物換算で4.5 mと1.8 m）である。格子間隔が8 cmと10 cmの組み合わせの試料容器を図-4.2に示している。この試料容器についても厚さ2 cmのベークライトを井桁に組み合わせることによって作製しており、地盤への通水が地盤の下部から行えるように容器の底板に穴を開けている。

前述の図-2.6に示した方法でセンサーを地盤内に設置し、図-3.4に示した小型のサンドホッパーによって乾燥砂地盤を作製した。相対密度の目標は45%とした。乾燥砂地盤を作製した後に、炭酸ガス・真空通水法によって粘性流体を通水して飽和地盤を作製した。なお、粘性流体の動粘度を $25 \text{ m}^2/\text{s}$ となるように調整した。

表-4.1 格子間隔の影響評価のための実験ケース一覧

ケース名	格子間隔 (m)	D_r (%)	ν (m ² /s)
E1-1	1.5 (6 cm)	49.7	23.6
E1-2		44.0	15.2
E2-1	2.0 (8 cm)	44.0	21.5
E2-2		41.7	13.0
E3-1	2.5 (10 cm)	44.0	21.5
E3-2		41.7	13.0
E4-1	3.0 (12 cm)	49.7	23.6
E4-2		44.0	15.2
M25-5	6.0 (24 cm)	33.9	18.3
M25-6		53.0	20.9
M25-7		41.0	24.2

括弧内は模型スケールでの寸法, D_r : 相対密度, ν : 動粘度

表-4.2 格子間隔の影響評価実験での加振条件一覧

	実物スケール	遠心実験
遠心加速度 (g)	1	25
模型寸法	1/1	1/25
入力振動波形の種類	正弦波, 50 波	
振動時間 (sec)	12.5	0.5
振動周波数 (Hz)	4	100
目標ピーク加速度 (m/s ²)	0.75 (75 gal)	18.75
	1.5 (150 gal)	37.5
	2.5 (250 gal)	62.5
	4.0 (400 gal)	100.0
	5.0 (500 gal)	125.0

実験ケースの一覧を表-4.1に、目標とした入力波を表-4.2に示している。表-4.1に示すように、粘性流体の動粘度は目標とした値よりも若干小さい結果となった。ここでは液状化が生じる振動加速度や水圧の上昇値を検討しているので、粘度が小さいことによって水圧消散が多少速くなることは後述する実験結果に大きな影響を与えないと考えられる。遠心模型実験では、所定の遠心加速度に到達した後に、振動台によって模型地盤に50波の正弦波を加えた。遠心加速度が25gでの実験における入力波の振動数は100 Hzであり、実物換算では振動数4 Hz(周期で0.25 s)に相当する。ここでは、異なる格子間隔による地盤での液状化抑制効果を比較するという点に着目しているので、ある特定の振動周期についてのみ検討を行った。振動周期が異なることによって格子間隔の影響度は変化する可能性もあり、周期の影響については別途検討する必要があると考えられる。また、表-4.2に示すように、

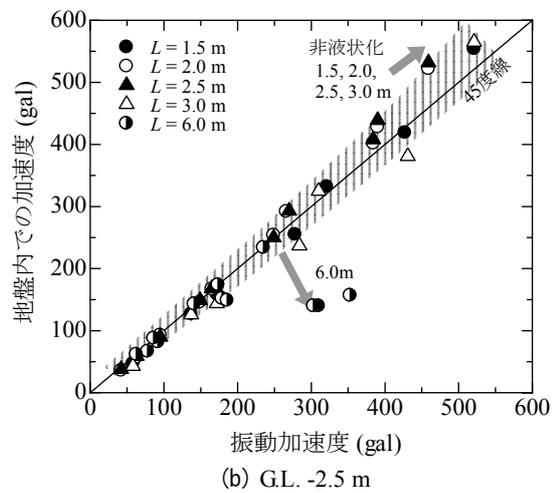
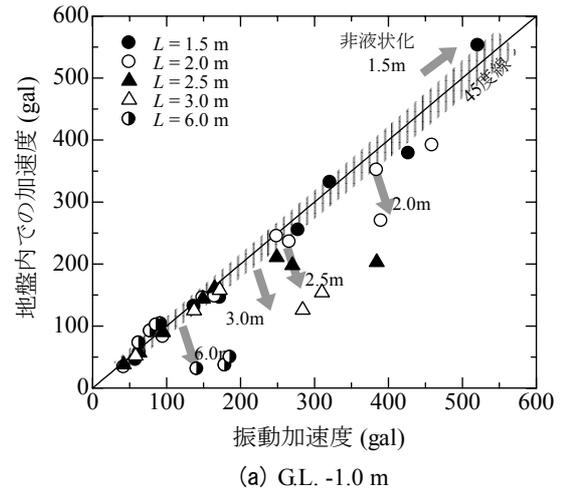


図-4.3 格子間隔を変化させた場合の振動加速度と地盤内の応答加速度の関係

本実験においても振動の加振方法をステップ加振とした。それぞれのステップ加振での振動加速度は75, 150, 250, 400, 500 galを目標とした。以下に示す実験結果においては、地盤が十分に液状化したと考えられる振動加速度よりも大きい振動加速度での計測値を検討から除いた。実験では、データのサンプリング周波数を2 kHzとして、振動中の加速度や間隙水圧を測定した。

4.3 地盤内加速度及び間隙水圧の応答特性

(1) 振動加速度と応答加速度の関係

液状化が生じる加振ステップまでの振動加速度と地盤内のピーク加速度の関係を図-4.3にプロットした。ここで振動加速度とは試料容器で計測した加速度のピーク値のことである。また、振動加速度と地盤内のピーク加速度は実物スケールに換算して、それぞれを横軸と縦軸に示している。振動中に地盤内のピーク加速度が急激に

減少した場合は減少した直後のピーク加速度をプロットした。45度線付近の液状化が生じていないと考えられる領域を図中にハッチで示している。ハッチの領域は45度線から概ね±10%の範囲である。

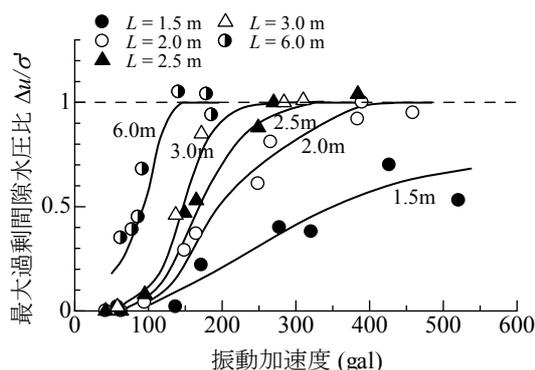
図-4.3(a)に示した1.0 mの深度における格子間隔が6.0 mでの実験結果に注目すると、振動加速度が85 gal程度の場合には地盤内での加速度もほぼ同じの値である。これは、地盤が液状化していないためと考えられる。さらに振動加速度が増加して140 gal程度になると、地盤内の加速度は振動中に急激に減少し液状化していると考えられる。同様の現象が他の格子間隔での実験においても確認でき、それぞれの格子間隔 L での実験において液状化が生じる振動加速度は85 ~ 140 gal ($L=6.0$ m), 170 ~ 285 gal ($L=3.0$ m), 250 ~ 270 gal ($L=2.5$ m), 385 ~ 390 gal ($L=2.0$ m)であった。格子間隔が1.5 mの場合は、520 gal程度の振動加速度を加えても地盤は液状化しなかった。段階的に振動加速度を大きくしているために上記の液状化が生じる振動加速度は幅を持った値ではあるが、格子間隔が狭いほど液状化が生じにくい傾向は確認できた。

図-4.3(b)に示した2.5 mの深度においても、ほぼ同様の格子間隔による液状化抑制効果が確認できる。格子間隔が6.0 mでの実験結果に注目すると、振動加速度が235 gal程度以下の場合には地盤内での加速度もほぼ同じの値であるが、300 gal程度では地盤内の加速度は急激に減少している。これから、235 ~ 300 galで地盤が液状化していると考えられる。一方、その他の格子間隔の場合には、500 gal程度の振動加速度を加えても液状化が生じていなかった。これから、2.5 mの深度においても格子間隔が狭いほど液状化が生じにくい傾向は確認できた。また、1.0 mの深度よりも2.5 mの深度において、液状化は生じにくい傾向があった。

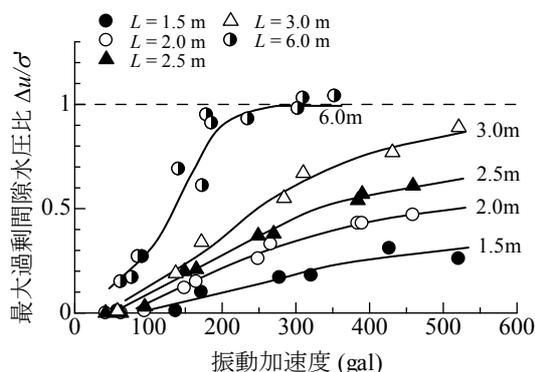
(2) 振動加速度と過剰間隙水圧の関係

液状化が生じる加振ステップまでの振動加速度と最大過剰間隙水圧の関係を図-4.4にプロットしている。ただし、振動加速度は実物スケールに換算し、過剰間隙水圧は有効上載圧で除することによって過剰間隙水圧比として表している。また、格子間隔による間隙水圧の上昇傾向の違いを比較しやすいように、それぞれの格子間隔での実験結果に補助線を入れている。

図-4.4(a)に示した1.0 mの深度では、振動加速度が大きくなるにつれて発生する過剰間隙水圧の最大値は大きくなり、格子間隔が1.5 mの場合を除いて過剰間隙水圧比は1.0まで達していた。また、格子間隔が狭いほど、過剰間隙水圧比が1.0に達する時の振動加速度は大きくなっていった。さらに、格子間隔が異なる実験での過剰間隙水



(a) G.L. -1.0 m



(b) G.L. -2.5 m

図-4.4 格子間隔を変化させた場合の振動加速度と地盤内の過剰間隙水圧の関係

圧比を同じ振動加速度で比較すると、格子間隔が狭いほど過剰間隙水圧比は小さい傾向があった。これから、格子間隔が狭いほど間隙水圧は上昇しにくく、液状化が生じにくいことが確かめられた。

図-4.4(b)に示した2.5 mの深度においても、ほぼ同様に格子間隔による液状化抑制効果が確認できる。格子間隔が6.0 mの場合には過剰間隙水圧比が1.0まで達するが、これよりも格子間隔が狭い実験においては500 galの振動加速度の場合にも過剰間隙水圧比は1.0にまでは達しなかった。また、格子間隔が異なる実験での過剰間隙水圧比を同じ振動加速度で比較すると、格子間隔が狭いほど過剰間隙水圧比は小さい。これから、2.5 mの深度においても格子間隔が狭いほど液状化が生じにくい傾向が確認できた。

振動時の応答加速度と間隙水圧の特性から、格子状地盤改良において格子間隔を狭めるほど液状化の抑制効果があることが確認できた。また、液状化の抑制効果は格子間隔だけでなく、着目する深度と振動加速度によってもその抑制効果は変化することも確かめられた。

4.4 格子寸法比率 L/H と液状化抑制効果

格子間隔 L と液状化層厚 H の比率 L/H に対する過剰間隙水圧比の最大値を図-4.5に示している。なお、振動加速度が150～180 galにおける実験値を丸印で、250～280 galにおける実験値を三角印でプロットしている。それぞれの実験値を比較しやすいように実験結果に補助線を入れている。本研究で間隙水圧を計測した位置は、実物換算で地表面から1.0 mと2.5 mの深さであり、液状化層厚に対する相対的な深度は $d/H=0.3$ と $d/H=0.7$ である。

図から判断すると、相対的な深度や振動加速度に関係なく、 L/H が大きいほど発生する過剰間隙水圧は大きくなっている。言い換えると、いずれの深度や振動加速度においても、液状化層厚に対して格子間隔が狭くなると液状化が抑制されることがわかる。比較的浅い地点($d/H=0.3$)における実験結果に注目すると、振動加速度が150～180 galの場合には、 L/H が0.9より大きくなると過剰間隙水圧比が1.0に達して液状化している。一方、振動加速度が250～280 galの場合には、 L/H が0.7より大きくなると過剰間隙水圧比が1.0に達している。このことから、振動加速度が大きい場合、より小さな L/H でも液状化が生じることがわかる。つまり、ある一定の L/H を満たすように格子間隔を設定するのではなく、想定される振動の大きさを考慮して格子間隔を設定する必要があると考えられる。

液状化層内の深い地点($d/H=0.7$)においても、同様に振動加速度が大きいほどより小さな L/H でも液状化が生じていた。さらに、同じ振動加速度で深度が異なる実験結果を比較すると、浅い地点において過剰間隙水圧比が1.0に達する時の L/H が深い地点でのものよりも小さいことがわかる。これは、深度が浅い場合には小さな L/H でも

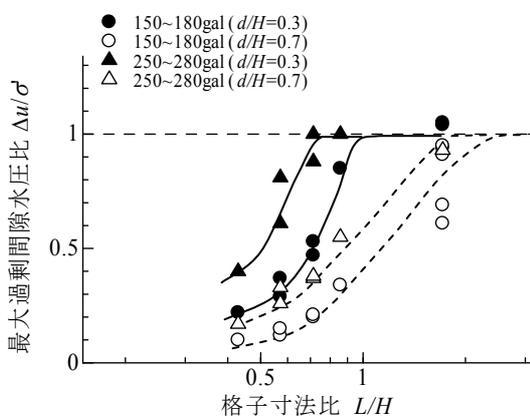


図-4.5 格子寸法比 L/H と過剰間隙水圧比の関係

液状化が生じることを示している。したがって、ある一定の L/H を満たすように格子間隔を設定するのではなく、液状化が生じる可能性がある浅い部分を考慮して格子間隔を設定する必要があると考えられる。

4.5 L/d による格子間隔の設計手法の提案

前述のように、 L/H を用いて格子間隔を決定すると、種々の不合理性が生じる。また、格子間隔の設定方法においては振動加速度の違いや液状化が生じる浅部を考慮する必要があると考えられる。そもそも地盤の液状化強度は上載圧に依存するので、液状化層厚 H ではなく深度 d で液状化の特性を評価する方が合理的であると考えられる。格子内の地盤の液状化特性は格子間隔 L にも影響を受けるので、格子間隔 L と深度 d によって地盤の液状化特性をまとめることを考えた。

格子間隔 L を計測した深度 d で除した比率 L/d と振動加速度の関係を図-4.6に示している。計測した地点において液状化が生じた場合には黒丸で、液状化が生じなかった場合には白丸で示した。ただし、液状化が生じたか否かの判断は、地盤内でのピーク加速度から判定した。これは、振動加速度の増加に対して最大過剰間隙水圧比は徐々に増加するために、液状化を生じる明確な振動加速度を求めにくいためである。地盤内の応答加速度においては、地盤が完全に液状化すると振動中に振動加速度よりも急激に小さくなり、液状化が生じる振動加速度が比較的明確である。ただし、図-3.6(b)に示した2.5 mの深度での地盤内での応答加速度のように、振動中に振動加速度よりも一時的に小さくなるが、再び振動加速度と同様の値まで戻る現象が見られたものを図中に灰色でプロットしている。図から判断すると、地盤が液状化した振

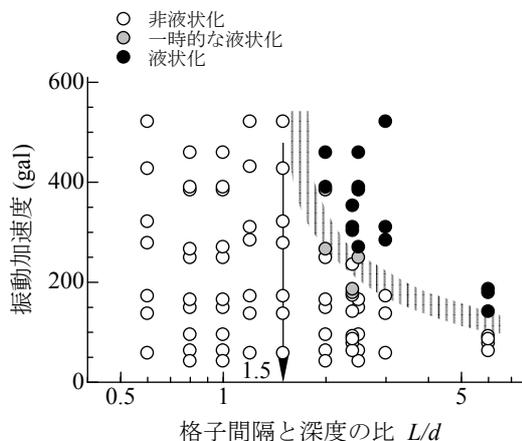


図-4.6 格子間隔～深度比率 L/d と液状化が生じる振動加速度の関係

動加速度（黒丸）と液状化しなかった振動加速度（白丸）は2つの領域にほぼ区分することができるので、境界と考えられる領域をハッチで示した。

図中のハッチで示した領域に注目すると、 L/d を小さくすると地盤が液状化する時の振動加速度は大きくなり、 L/d が1.5以下になると500 gal程度の振動加速度でも地盤が液状化しないことがわかる。これから、今回の実験条件においては L/d を1.5以下になるように格子間隔を設定すると、大きな液状化抑制効果が期待できることがわかった。つまり、液状化を抑制したい深度 d の1.5倍の格子間隔に設計すればよいと考えられる。また、格子間隔をかなり小さく設定しても、深度 d が小さい場所においては L/d を1.5以下にするのは難しく、浅部の液状化を抑制するのが困難なこともわかる。このような浅部の深度を慎重に検討し、液状化を生じないような地盤に置換することや、この部分での液状化を許容するような設計が必要であると考えられる。

注意したいのは、どの現場においても L/d を1.5以下にすれば液状化が生じないということではなく、現場条件によって指標値は変化すると考えられる。例えば、地盤の液状化強度によって指標値は変化する。また、地盤上部に構造物がある場合には、その上載圧によって地盤の拘束圧が大きくなり同じ格子間隔であっても液状化が生じにくくなると考えられる。このように、指標値については現場ごとに検討を行う必要がある。

5. 格子状改良による液状化抑制効果に関する数値解析

5.1 数値解析方法

格子状に改良した固化処理土に囲まれた地盤の液状化特性をより詳細に調べるために、数値解析を実施した。数値解析には地震応答解析プログラムFLIP²⁷⁾を用いた。FLIPでは、土の応力ひずみ関係に双曲線モデルを組み合わせたマルチスプリングモデル²⁸⁾を採用しており、有効応力法によって非排水条件下での地盤の液状化を考慮した解析²⁷⁾が可能である。

解析メッシュ図を図-5.1に示しており、格子状改良地盤の一部をモデル化した遠心模型実験での模型断面を再現したものである。解析での寸法は実物スケールとし、メッシュ間隔は0.25 mのソリッド要素とした。解析メッシュの側方及び下部は試料容器を想定した剛性の大きい線形弾性体とし、飽和砂地盤をモデル化した部分はマルチスプリング要素とした。また本解析は、二次元解析で格子状改良地盤の振動特性を再現するために、図中に白

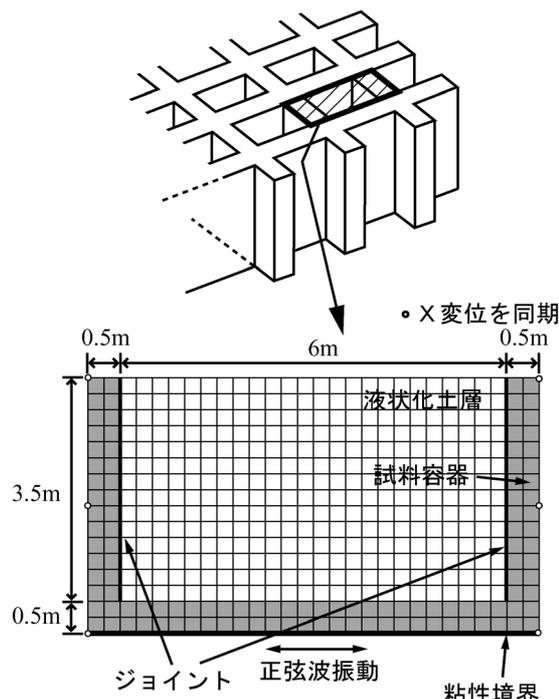


図-5.1 解析メッシュ図

表-5.1 数値解析の土質パラメータ

K_{max} (MN/m ²)	G_{max} (MN/m ²)	h_{max} (%)	n	ϕ'_1	ϕ'_p
197.5*	75.8*	42.1*	0.473	36.0	28.0
S_1	w_1	p_1	p_2	c_1	
0.005	5.0	1.0	1.15	3.0	

* $\sigma'_c = 100 \text{ kN/m}^2$ とした場合の値

点で示した節点における水平変位が常に等しくなるように同期させた。さらに、試料容器と飽和砂地盤の側面境界に関しては摩擦がないものと仮定し、ジョイント要素を入れた。

飽和砂地盤を想定した要素に用いた土質パラメータを表-5.1に示している。解析では相対密度が50%の相馬珪砂を想定しており、変形係数や非線形特性、内部摩擦角に関しては別途実施したねじりせん断試験及び三軸圧縮結果から決定し、液状化強度特性に関しては繰り返し非排水三軸試験結果にフィッティングするようにパラメータを決定した。液状化強度に関する試験結果と数値解析でのフィッティング結果を比較したものを図-5.2に示している。解析では、格子間隔を2.0, 2.5, 3.0, 6.0 mと変化したケースと、水平方向に壁面がない無改良地盤を想定したケースについて計算を行った。

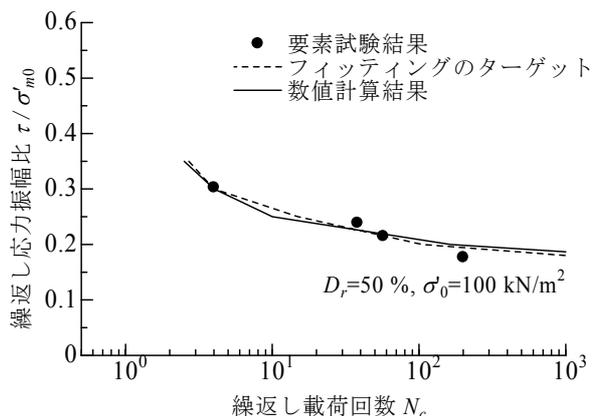


図-5.2 要素試験へのフィッティング結果

5.2 模型実験と数値解析結果の比較

(1) 振動加速度と応答加速度の関係

数値解析と遠心模型実験結果の比較を行った。図-5.3には、実験で得られた1.0 mの深度での振動加速度と最大過剰間隙水圧比の関係を示している。図には、数値解析において過剰間隙水圧比が0.9となる振動加速度を併せて示している。ただし、比較しやすいように、実験結果については図-4.4に示した補助線のみを示している。

図に示すように、遠心模型実験と同様に数値解析においても、格子間隔が狭いほど液状化が生じにくいことがわかる。格子間隔が6.0 mでの実験結果と解析結果に注目すると、数値解析において過剰間隙水圧比が0.9に達する振動加速度では模型実験での過剰間隙水圧比は約0.7であった。他の格子間隔についてもほぼ同様の傾向であり、数値解析において過剰間隙水圧比が0.9に達する振動加速度では模型実験における水圧比は約0.6～0.7であった。このことから、数値解析で用いた要素試験による液状化強度が若干低めに見積もられていると考えられる。ただし、格子間隔が小さいほど液状化が抑制される効果についてはほぼ同様の傾向であり、抑制効果に関しては実験での地盤挙動を再現できることが確認できた。

(2) 格子間隔～深度比率L/dと液状化抑制効果

格子間隔Lを着目した深度dで除した比率L/dと振動加速度の関係を図-5.4に示している。着目した深度において過剰間隙水圧比が0.9に達した場合には黒点で、達しなかった場合には十字で示した。過剰間隙水圧が0.9に達する振動加速度（黒点）と達しない振動加速度（十字）は2つの領域にほぼ区分することができ、その境界と考えられる箇所を実線で示した。また、図-4.6に示した実験結

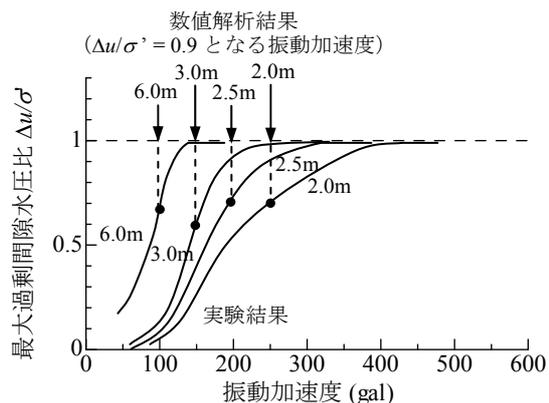


図-5.3 液状化が生じる振動加速度の比較

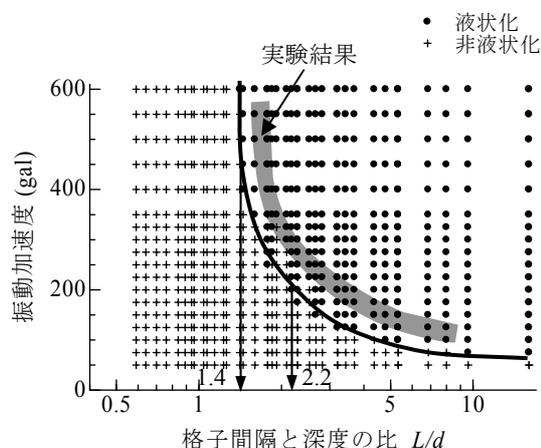


図-5.4 L/dと液状化が生じる振動加速度の関係における比較

果における液状化と非液状化の境界と考えられる箇所も併せて示した。

図の実線部分に注目すると、数値解析においてもL/dが小さい場合には、地盤が液状化する時の振動加速度は大きくなり、L/dが1.4以下になると600 gal程度の振動加速度でも地盤が液状化しないことがわかる。言い換えると、今回の計算条件においてはL/dを1.4以下になるように格子間隔を設定すると、大きな液状化抑制効果が期待できることが示された。模型実験結果と比較すると、数値解析において過剰間隙水圧が0.9に達する時の振動加速度の方が、実験において液状化が生じる時の振動加速度よりも多少小さかった。このことから、数値解析における液状化強度が実験におけるものよりも低かったと考えられ、上述の傾向と一致する。しかしながら、L/dを指標とすると液状化・非液状化を2つの領域に分けられる点と、それらの境界部分がL/dの減少に対して増加する傾向に

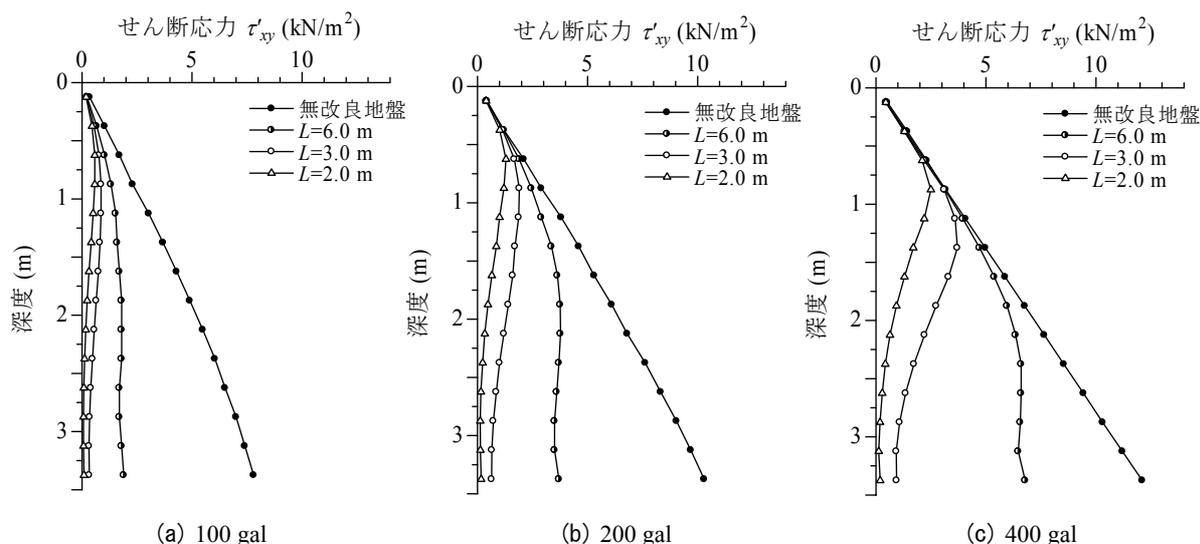


図-5.5 水平方向のせん断応力の深度分布

については、数値解析によって実験での挙動を再現できることがわかった。

5.3 格子状改良による液状化抑制メカニズム

砂質土地盤を格子状に改良した場合には、剛な改良壁から水平荷重が作用して地盤内に生じるせん断応力が抑制され、結果的にせん断歪みも小さくなり液状化が抑制されると考えられる。ここでは、格子間隔を狭くすることによってせん断応力が低減されるのかを確認する。格子間隔を変化させた各計算ケースにおいて、地盤中央で振動中に発生する水平方向の最大せん断応力の深度分布を図-5.5に示す。図には、格子間隔が2.0, 3.0, 6.0 mでの最大せん断応力と無改良地盤での最大せん断応力を示している。

図-5.5(a)に示した100 galの振動加速度の場合、無改良地盤では深い地点ほどせん断応力が大きくなっており、一様地盤における典型的なせん断応力分布となっている。一方、格子間隔が6.0 mの場合には、深度が1.0 m付近まではせん断応力は深度に対して増加しているが、それ以降ではせん断応力はほぼ一定値である。格子間隔が6.0 mの場合のせん断応力は無改良地盤のものよりも小さく、深いほどその差は大きくなっていることがわかる。格子間隔が3.0, 2.0 mと小さくなるにしたがって、せん断応力はさらに小さくなっており、せん断応力が大きく低減されている。このことから、格子状改良地盤に囲まれた地盤においては、格子間隔が狭く深い地点ほど発生するせん断応力は小さく、液状化が抑制されることがわかる。

図-5.5(b)に示すように振動加速度を200 galと大きく

すると、それぞれの地盤で発生する最大せん断応力は大きくなる。浅部においては格子間隔が6.0 mの地盤でのせん断応力が無改良地盤でのものと比べてほぼ等しくなっており、100 galの振動加速度の場合と比べてせん断応力の低減効果が小さくなっている。図-5.5(c)に示すようにさらに振動加速度が大きくなると、せん断応力の低減効果が小さくなる深度が増している。格子間隔が2.0と3.0 mの地盤での最大せん断応力についても、浅部から低減効果が小さくなっている。これらから、同じ格子間隔と深度の場合、振動加速度が大きいほどせん断応力の低減効果は小さくなることがわかった。

5.4 格子間隔～深度比率 L/d とせん断応力低減効果

上述のように、格子状改良地盤に囲まれた地盤においては、両側の鉛直な壁体を境界条件として地盤内の水平方向のせん断応力が低減される。また、格子間隔が狭く深い地点ほどせん断応力の低減効果は大きい。そこで、せん断応力の低減効果を格子間隔と深度の比 L/d でまとめ、図-5.6に示した。図の縦軸には無改良地盤における最大せん断応力で正規化した最大せん断応力を示しており、その比が1.0の場合には無改良地盤と比べてせん断応力の低減効果がないことを示している。

図に示すように、振動加速度が等しい場合には、 L/d に対して縦軸に示したせん断応力比はほぼ等しくなり、同一の曲線上に計算結果はプロットされている。振動加速度が100 galの場合、 L/d が20と比較的大きくても60%程度のせん断応力に低減されており、 L/d が小さくなるにつれてさらにせん断応力比は小さくなる傾向が見られる。言

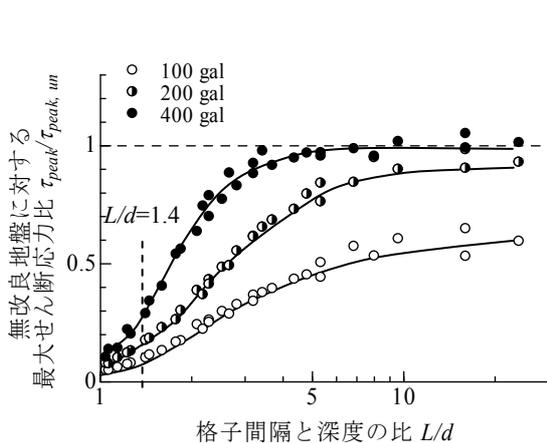


図-5.6 L/d とせん断応力低減率の関係

い換えると、格子間隔を狭くするか、着目する深度が深い場合には、せん断応力の低減効果が大きいことが確かめられる。振動加速度が200, 400 galと大きくなってもほぼ同様の傾向であり、 L/d が小さくなるにつれてせん断応力の低減効果は大きくなっている。等しい L/d で比較すると、振動加速度が大きいほどせん断応力の抑制効果は小さくなることも確認できる。

さらに詳細に図を見ると、100 galの振動加速度の場合には、 L/d が6.0～7.0以下になるとせん断応力比の減少傾向が強まり、1.4～1.5になるとせん断応力は十分小さくなり減少傾向は弱まっている。200と400 galの振動加速度についてもほぼ同様の傾向であり、 L/d が1.4～1.5付近になるとせん断応力は十分に低減されることがわかる。このことから、振動加速度が400 galと比較的大きい場合においても、今回の計算条件においては L/d が1.4程度になるとせん断応力が低減されることがわかった。この L/d 値は図-5.4で示した液状化が抑制される L/d 値とほぼ一致しており、整合性がとれていた。

6. 改良深度の縮減に関する検討

6.1 改良深度の縮減化に関する概要

格子間隔と液状化の抑制効果の関係を検討した結果、格子間隔が狭く深い地点ほど液状化が生じにくいことがわかった。液状化が生じる振動加速度を深度方向に示した概念図を図-6.1に示している。図には格子間隔が広い場合と狭い場合の関係を示しており、深いほど液状化が生じる時の振動加速度は大きくなっている。図のように、想定される振動加速度に対して液状化を抑制したい場合、

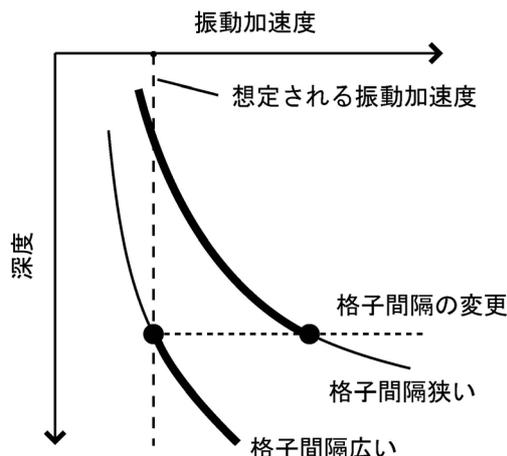


図-6.1 液状化が生じる振動加速度と深度の関係の概念図

現行設計法では狭い方の格子間隔で設計される。しかし、深い位置においては格子間隔を広く設定しても想定される振動加速度に対して液状化が抑制されることがわかる。

これから、格子状改良地盤における一部の壁体の改良深度を他のものよりも浅くする工法が発想される。一部の改良壁の深度を浅くすることによって、建設コストを縮減することが可能となり経済的である。特に、液状化層厚が大きい場合には、コストの縮減効果も大きいと考えられる。そこで本研究では、遠心模型実験装置を用いて振動実験を行い、一部の改良壁の深度を浅くした模型地盤での液状化特性について調べた。

6.2 遠心模型実験方法

一部の改良壁の深度を浅くした地盤での液状化特性を調べるための遠心模型実験概略図を図-6.2に示す。ベークライトで作製した格子間隔が24 cmの試料容器の中央にアルミ板を固定し、改良深度の浅い改良壁をモデル化した。地盤内のアルミ板の深さは4, 7, 10 cmの3種類であり、遠心加速度を25gとしたので実物スケールに換算すると1.0, 1.75, 2.5 mである。また、試料容器の深さと奥行きは、それぞれ18.0 cmと7.2 cm（実物換算で4.5 mと1.8 m）である。例として、地盤内のアルミ板の深さが7 cmの試料容器を図-6.3に示している。この試料容器についても厚さ2 cmのベークライトを井桁に組み合わせることによって作製しており、地盤への通水が地盤の下部から行えるように容器の底板に穴を開けている。また、ベークライトに対してアルミ板をボルトで固定し、ボルト孔やアルミ板とベークライトの隙間にはそれぞれOリングとゴム板を使用し完全に遮水した。

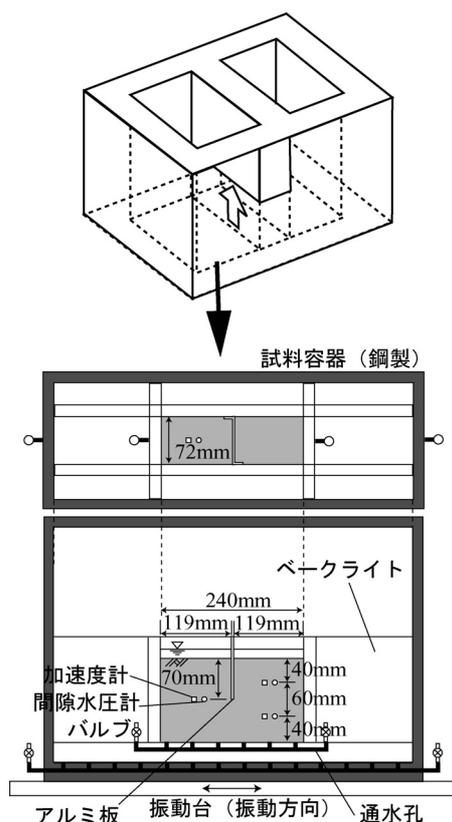


図-6.2 改良深さの影響評価のための模型実験概略図

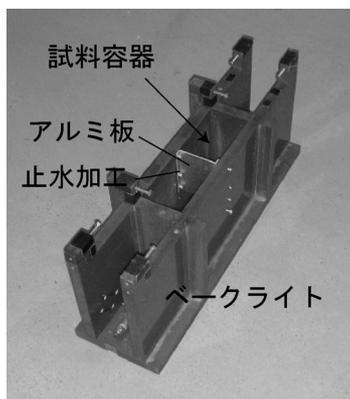


図-6.3 改良深さの影響評価実験での試料容器

前述の図-2.6に示した方法でセンサーを固定し、図-3.4に示した小型のサンドホッパーによって乾燥砂地盤を作製した。ここでの相対密度の目標は25~30%とした。乾燥砂地盤を作製した後に、炭酸ガス・真空通水法によって動粘度が $25 \text{ m}^2/\text{s}$ となるように調整した粘性流体を通水した。

実験ケースの一覧を表-6.1に、目標とした入力波を表-6.2に示している。表-6.1に示すように、3種類の深さのアルミ板を固定した実験に加えて、アルミ板を設置しなかったケースと改良壁が支持層に着底したことを想定した格子間隔が狭いケースについても実験を行った。遠心模型実験では、所定の遠心加速度に到達した後に、振動台によって模型地盤に50波の正弦波を加えた。遠心加速度が $25g$ での実験における入力波の振動数は 100 Hz であり、実物換算では振動数 4 Hz (周期で 0.25 s)に相当する。表-6.2に示すように、この実験においても振動の加振方法をステップ加振とした。表に示すように、中央の改良壁の深さが 3.5 m の実験ケースにおいては格子間隔が狭いため液状化が生じにくいことが予想されたので、振動加速度の増分を大きくした。また、以下に示す実験結果においては、地盤が十分に液状化したと考えられる振動加速度よりも大きい振動加速度での計測値を検討から除いた。実験では、データのサンプリング周波数を 2 kHz として、振動中の加速度や間隙水圧を測定した。

6.3 地盤内加速度の応答特性

中央の改良壁の深さと振動加速度の関係を図-6.4に示している。ここでの振動加速度とは試料容器で計測したピーク加速度であり、図中では実物スケールに換算している。各振動加速度において液状化が生じた場合には黒丸で、液状化が生じなかった場合には白丸で示した。なお、液状化が生じたか否かの判断は、地盤内でのピーク加速度から判定した。振動中に振動加速度よりも一時的に小さくなるが、再び振動加速度と同様の値まで戻る現象が見られたものを図中に灰色でプロットしている。また、図において液状化が生じる場合(黒丸)と生じない場合(白丸)の境界と考えられる箇所をハッチで示した。

図-6.4(a)に示すように 1.0 m の深度に着目すると、着目する深度(G.L.- 1.0 m)と中央の改良壁の深さが等しい場合には、 100 gal 程度の振動加速度で地盤が液状化している。また、着目する深度よりも改良壁が深くなると液状化が生じる振動加速度が約 150 gal と多少大きくなり、中央の改良壁が着底した実験ケース(改良壁の深さが 3.5 m に相当)における液状化が生じる振動加速度に近くなる。これから、着目する深度と同程度の深さまでしか改良を行わない場合、改良壁を設置することによる液状化抑制効果は認められなかった。一方、着目する深度よりも改良壁を深くすると、その深度での液状化抑制効果は徐々に増加し、改良壁が十分に深いと改良壁が着底した場合と同程度の液状化抑制効果があることがわかった。

表-6.1 改良深度の影響評価のための実験ケース一覧

ケース名	格子間隔 (m)		アルミ板の深さ (m)	D_r (%)	ν (m ² /s)
	上部	下部			
24M0-1	6.0 (24 cm)	6.0 (24 cm)	0.0 (0 cm)	28.9	30.7
24M0-2				41.0	24.2
24M0-3				29.0	23.2
24M4-1	3.0 (12 cm)		1.0 (4 cm)	29.1	24.5
24M4-2				23.9	26.5
24M4-3				22.1	26.0
24M7-1			1.75 (7 cm)	21.6	20.4
24M7-2				18.5	32.7
24M7-3				32.2	25.4
24M7-4	20.0			28.3	
24M10-1	3.0 (12 cm)		2.5 (10 cm)	24.6	27.8
24M10-2				43.0	21.3
12M0-1	3.0 (12 cm)	0.0 (0 cm)	31.4	27.9	
12M0-2			31.0	28.8	

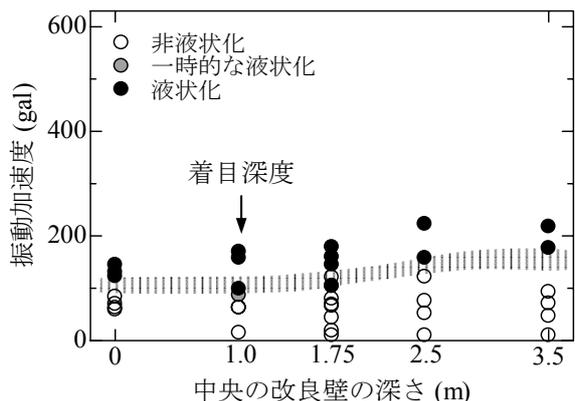
括弧内は模型スケールでの寸法, D_r :相対密度, ν :動粘度

表-6.2 改良深度の影響評価実験での加振条件一覧

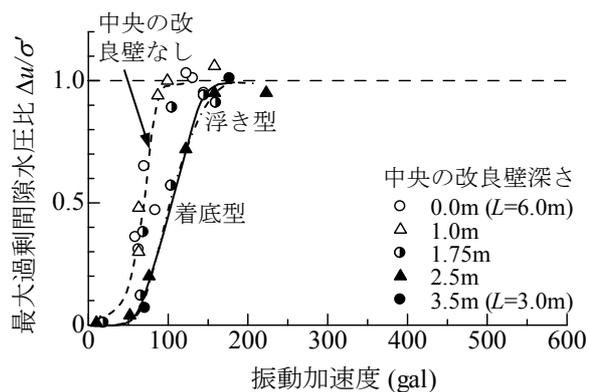
	実物スケール	遠心実験				
		0.0	1.0	1.75	2.5	3.5
改良壁の深さ (m)	-	0.0	1.0	1.75	2.5	3.5
遠心加速度 (g)	1	25				
模型寸法	1/1	1/25				
入力振動波形の種類	正弦波, 50 波					
振動時間 (sec)	12.5	0.5				
振動周波数 (Hz)	4	100				
目標ピーク加速度 (m/s ²)	0.25 (25 gal)	-	6.25	6.25	6.25	6.25
	0.75 (75 gal)	18.75	18.75	18.75	18.75	18.75
	1.25 (125 gal)	31.25	-	31.25	31.25	-
	1.75 (175 gal)	43.75	43.75	43.75	43.75	-
	2.5 (250 gal)	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
	3.5 (350 gal)	87.5	87.5	87.5	87.5	-
	4.0 (400 gal)	-	-	-	-	100.0
	6.0 (600 gal)	-	-	-	-	150.0

図-6.4(b)に示すように1.75 mの深度に着目すると、着目する深度よりも中央の改良壁が深くなると液状化が生じる振動加速度が大きくなる傾向があった。着目する深度が中央の改良壁深さが同程度の場合には約130 galで液状化しているのに対して、中央の改良壁を深くすると液

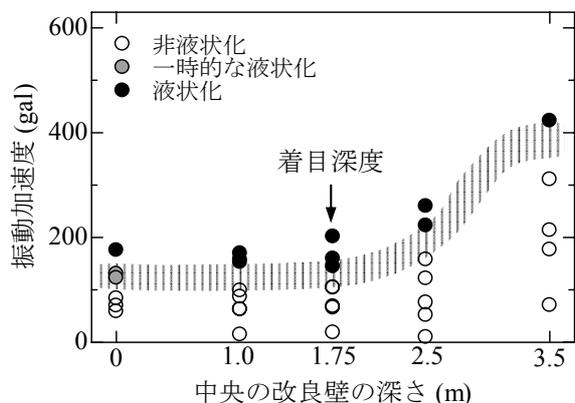
状化が生じる振動加速度が約200, 400 galと増加している。つまり、液状化抑制効果が増加し、中央の改良壁が着底した場合の液状化抑制効果に近づいている。ただし、着目する深度よりも改良壁の深さが深くなると急激に大きな液状化抑制効果が現れるわけではなく、着底した場合



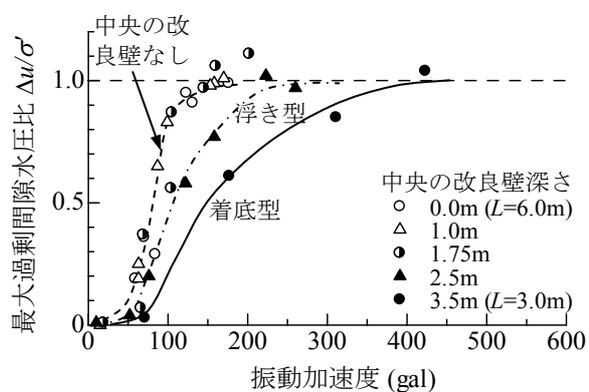
(a) 着目深度 1.0 m



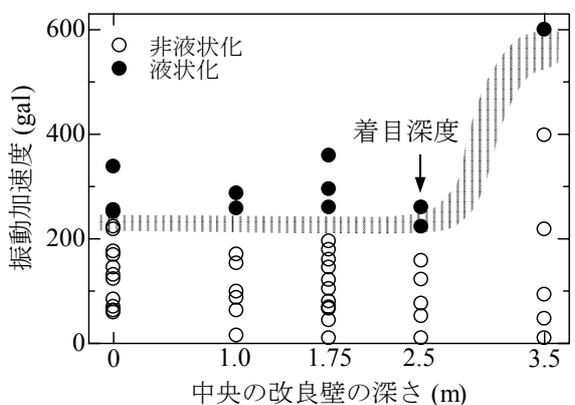
(a) 着目深度 1.0 m



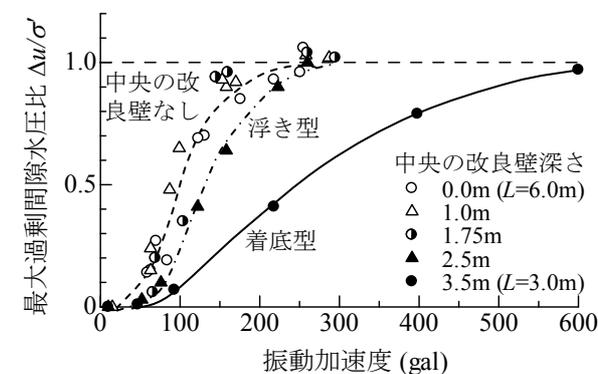
(b) 着目深度 1.75 m



(b) 着目深度 1.75 m



(c) 着目深度 2.5 m



(c) 着目深度 2.5 m

図-6.4 改良壁の深さと液状化が生じる時の振動加速度の関係

図-6.5 改良壁深さを低減した場合の振動加速度と過剰間隙水圧の関係

の液状化抑制効果に徐々に近づくことがわかった。図-6.4(c)に示すように2.5 mの深度に着目しても、ほぼ同様の液状化抑制効果が増加する傾向が確認できた。また、着目する深度よりも中央の改良壁の深さが浅い場合、改良壁の深さに関係なく約220~240 galで液状化しており、改良壁による液状化抑制効果は認められなかった。

6.4 間隙水圧の応答特性

液状化が生じる加振ステップまでの振動加速度と最大過剰間隙水圧の関係を図-6.5にプロットしている。なお、振動加速度は実物スケールに換算し、過剰間隙水圧は有効上載圧で除することによって過剰間隙水圧比として表している。また、比較しやすいようにそれぞれの実験結

果に補助線を入れている。

図-6.5(a)に示した1.0 mの深度では、中央の改良壁がないケース及び1.0 mのケースの場合、約60 gal程度の振動加速度で間隙水圧が大きく上昇し始め、約100 galで過剰間隙水圧比は1.0に達していることがわかる。一方、中央の改良壁が着底したケース及び改良壁が2.5 mのケースの場合、約70 galの振動加速度で間隙水圧が上昇し始め、約170 galで過剰間隙水圧比が1.0に達していることがわかる。中央の改良壁が1.75 mの場合にはそれらの中間的な過剰間隙水圧の上昇傾向が見られた。このことから、中央の改良壁が2.5 mで着底していなくても、着目する深度よりも改良壁が十分に深い場合には着底した場合と同程度の過剰間隙水圧しか発生しないことがわかった。

図-6.5(b)に示した1.75 mの深度では、中央の改良壁がないケース及び1.0, 1.75 mのケースの場合には振動加速度の増加に対してほぼ同様の傾向で間隙水圧が上昇していることがわかった。一方、中央の改良壁が着底したケースでは、400 galと大きな振動加速度を加えると過剰間隙水圧比は1.0に達していることがわかった。中央の改良壁が2.5 mの場合にはそれらの中間的な過剰間隙水圧の上昇傾向が見られた。上述のように、改良壁の深さを2.5 mとした場合、1.0 mの深度での間隙水圧の上昇特性は改良壁が着底した場合のものと同様であったが、1.75 mの深度での間隙水圧は改良壁が着底した場合の間隙水圧よりも上昇していた。これは、1.75 mの深度が改良壁の深さ(2.5 m)に比較的近いために液状化抑制効果が小さかったと考えられる。図-6.5(c)に示した2.5 mの深度においては、さらに着目する深度(2.5 m)と改良壁の深さ(2.5 m)が近く、その深度での間隙水圧は改良壁が着底した場合の間隙水圧よりも上昇していた。

6.5 改良深度と液状化特性の関係

改良深度と液状化が生じる振動加速度の関係を図-6.6に示した。図-6.6(a)と(b)には、中央の改良壁がない場合と着底した場合を想定した格子間隔が6.0 mと3.0 mでの実験結果をそれぞれ示している。図-6.6(c), (d), (e)には、中央の改良壁の深さを変化させた場合の実験結果を示している。各振動加速度において液状化が生じた場合には黒丸で、液状化が生じなかった場合には白丸で示した。なお、液状化が生じたか否かの判断は、地盤内でのピーク加速度から判定した。図において液状化が生じる場合(黒丸)と生じない場合(白丸)の境界と考えられる箇所を実線で示した。

図-6.6(a)と(b)に示すように、深さ方向に格子間隔が一様な場合、地盤の深い位置ほど液状化の生じる振動加

速度が大きくなり液状化が生じにくいことがわかる。また、格子間隔が6.0 mと3.0 mでの液状化の生じる加速度を比較すると、いずれの深度においても格子間隔が狭い3.0 mでの値の方が大きい。これから、格子間隔が狭いほど液状化が生じにくいことがわかる。

図-6.6(c)に示すように中央の改良壁の深さが1.0 mの場合には、浅部においては格子間隔が3.0 mと小さくなっているが、液状化の生じる振動加速度は格子間隔が6.0 mのケースでの値とほぼ等しく、液状化抑制効果がないことがわかった。一方、図-6.6(d)に示すように中央の改良壁の深さが1.75 mになると、1.0 mの深度において液状化が生じる振動加速度は若干ではあるが大きくなる傾向が見られる。これは浅部における格子間隔が3.0 mの領域が増えるため、全層で格子間隔が3.0 mのケースでの値に近づくことがわかる。中央の改良壁の深さが2.5 mとさらに深くなった図-6.6(e)では、1.0 mの深度において液状化が生じる振動加速度は格子間隔が3.0 mのケースでの値とほぼ等しくなる傾向がみられる。一方、1.75 mの深度においては、格子間隔が3.0 mと6.0 mのケースでの中間的な振動加速度の時に液状化しており、改良壁の深さと同じ深度になると格子間隔が6.0 mのケースでの値とほぼ等しくなっていた。

これらから考えると、中央に改良壁を入れることによって改良壁より浅い部分においては格子間隔を狭くすることと同様の液状化抑制効果が期待でき、改良壁以深では改良壁による液状化抑制効果はほとんど期待できないことがわかった。このように一部の改良壁の深度を浅くしても改良壁の深度よりも浅い箇所での液状化の抑制効果が期待できるので、特に液状化層厚や支持層までの層厚が大きい場合においてコストの縮減化に有効な手段となり得ると考えられる。ただし注意点として、支持層に着底した他の改良壁と同様に浅くした改良壁も格子内の地盤のせん断変形を抑制する必要がある。つまり、全体的に支持層から浮かして改良地盤を浅くすることはできず、また浅くする改良壁が多すぎると改良地盤が不安定となるので注意しなければならない。

7. 結論

最初に、液状化に関する遠心模型実験を行うにあたって、粘性流体(セルロース水溶液)を用いた模型砂地盤の作製方法とその飽和度を検討した。高剛性壁体によって格子状に囲まれた飽和砂地盤を対象に遠心模型実験を行い、Modeling of models手法によって遠心模型実験の精度も検証した。次に、格子状改良地盤の格子間隔を変化

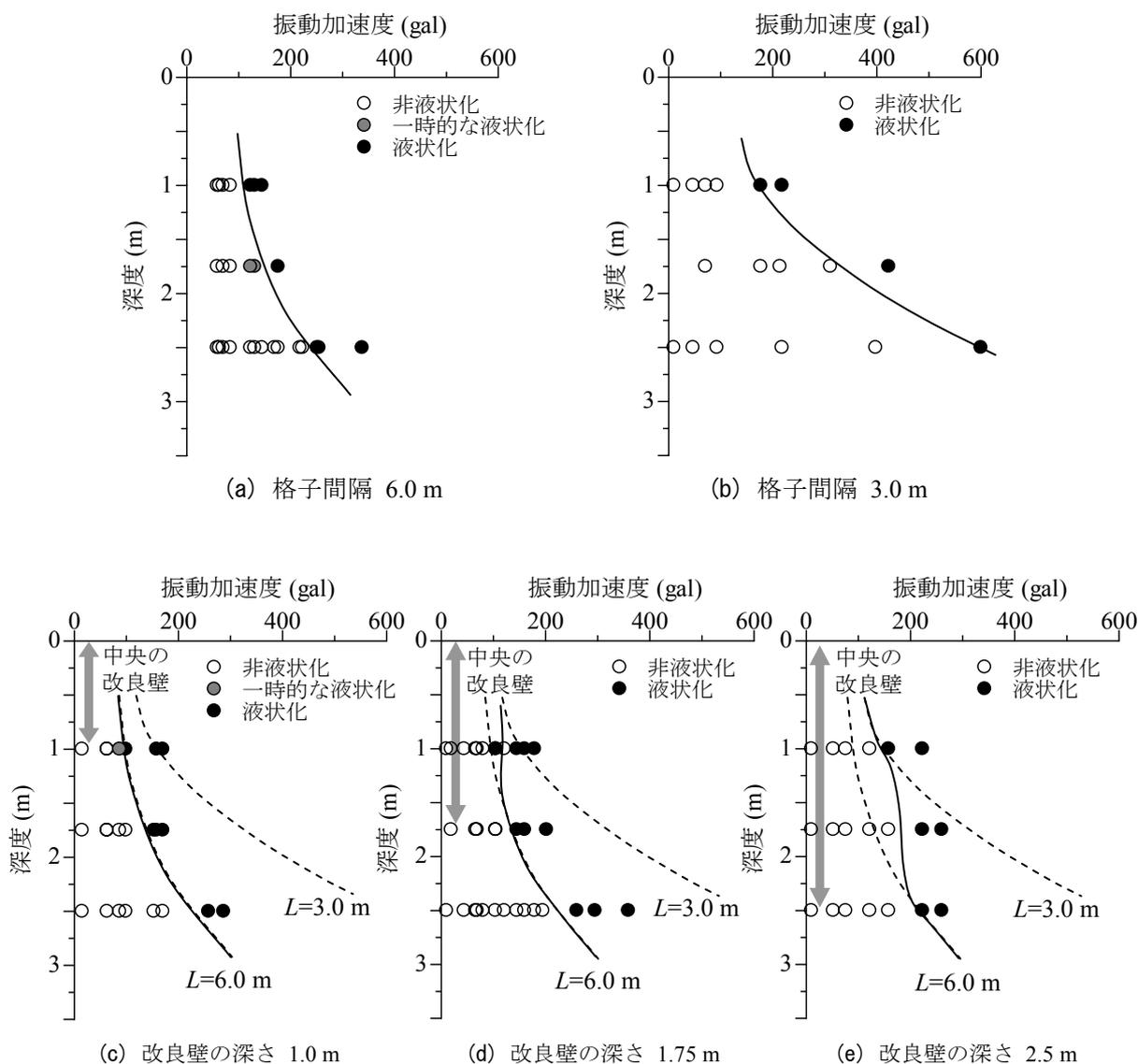


図-6.6 改良深度と液状化が生じる加速度の関係

させた遠心模型実験及び数値解析によって液状化特性について検討し、格子間隔の設定方法について新たな提案を行った。さらに、一部の改良深度を縮減する工法について提案を行い、その液状化特性について実験的に検討した。以下に、得られた主要な結論をまとめて示す。

- 1) 粘性流体を用いて飽和砂地盤を作製する際には、炭酸ガスで地盤内の空気を置換した後に真空下で通水することによって地盤を完全飽和に近づけられることが確認できた。また、模型地盤を遠心場においてによって一時的に地盤の飽和度が上昇し、地盤が完全飽和に近づくことがわかった。
- 2) Modeling of models手法による液状化に関する遠心模型実験では、模型縮尺が最大5倍異なる模型地盤に対

して振動実験を行った。実物換算した液状化が生じる振動加速度や間隙水圧の上昇特性がほぼ一致することが確かめられ、本研究での実物スケールでの挙動を再現する実験精度が高いことを示した。

- 3) 異なる格子間隔で行った遠心模型実験においては、格子間隔が狭いほど液状化の発生が抑制されることが確かめられた。また、液状化を判定する深度で格子間隔を除いた指標を提案し、格子間隔をより合理的に設計する方法を示した。
- 4) 数値解析によって格子間隔の影響を検討した結果、格子間隔が狭いほど地盤両側の高剛性な壁体によって地盤内に発生するせん断応力が低減されることがわかった。せん断応力が低減されることによって格子内の地盤での液状化が抑制されることを示した。

- 5) 格子状改良地盤での一部の改良壁を浅くし建設コストを削減する工法を提案した. 格子状改良地盤の一部の改良壁を浅い部分に留めても改良壁より浅い箇所については格子間隔が狭い地盤と同程度に液状化を抑制できることがわかった.

8. あとがき

本研究では, 粘性流体を用いた模型砂地盤の作製方法とその飽和度を検討した後に, **Modeling of models**手法によって遠心模型実験において実物スケールの地盤挙動を再現する精度を検討した. これらの検討で述べた実験方法は, 今後液状化現象を再現する動的遠心模型実験における基礎的な資料となる. また, 異なる格子間隔の改良地盤を想定した遠心模型振動実験では, 格子間隔と深度の比率 L/d から液状化抑制効果を評価する方法を示し, 現場において格子間隔を検討するための手法を示した. ここで示した指標値は地盤条件が異なれば変化すると考えられるので, 指標値については現場ごとに求める必要があることを注意したい. さらに, 一部の改良深度を削減した形式の改良方法を提案し, その液状化抑制効果についても検討した. 今後はより広範かつ具体的な現場条件においてその適用性を検討したい.

(2006年3月10日受付)

謝辞

国土交通省名古屋港湾空港技術調査事務所の宮島正悟所長には本研究の遂行にあたり貴重なご意見をいただきました. また, 数値解析の実施においては, 広島大学大学院工学研究科(当時, 港湾空港技術研究所地盤・構造部)の一井康二助教授にご助言をいただきました. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) Ovesen, N.K.: Centrifugal testing applied to bearing capacity problems of footings on sand, *Geotechnique*, Vol. 25, No. 2, pp. 394-401., 1975.
- 2) Terashi, M. and Kitazume, M.: Bearing capacity of foundations on top surface of slopes, *Proc. of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 415-418., 1987.
- 3) Terashi, M., Kitazume, M. and Kawabata, K.: Centrifuge modeling of a laterally loaded pile, *Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 991-994., 1989.
- 4) Coastal Development Institute of Technology.: The deep mixing method -principle, design and construction-, Balkema, 123p., 2002.
- 5) 鈴木吉夫, 斉藤聰, 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.
- 6) 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, pp. 1019-1020, 1988.
- 7) 馬場崎亮一, 鈴木吉夫, 鈴木善雄, 藤井斉昭: 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, pp. 1007-1008, 1991.
- 8) Suzuki, K., Babasaki, R. and Suzuki, Y.: Centrifuge tests on liquefaction-proof foundation, *Proc. of Centrifuge 91*, pp. 409-415., 1991.
- 9) 土木研究所, 間組, 東急建設, 不動建設, 大林組, 竹中工務店: 耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書(その2), 土木研究所共同研究報告書, No. 3, pp. 66-216., 1987.
- 10) Ueno, K.: Methods for preparation of sand samples, *Proc. of Centrifuge 98*, pp. 1047-1055., 1998.
- 11) 寺師昌明, 遠藤敏雄, 北詰昌樹: 遠心模型実験の計画と結果の信頼性—支持力に関する国際比較実験例一, 港湾技術研究所報告, No.28, Vol.3, pp.59-79, 1989.
- 12) Ishihara, K.: Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus, *Soils and Foundations*, Vol. 10, No. 4, pp. 10-38, 1970.
- 13) Ishihara, K.: On the longitudinal wave velocity and Poisson's ratio in saturated soils, *Proc. of the 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 197-201, 1971.
- 14) Nakagawa, K., Soga, K. and Mitchell, J.K.: Pulse transmission system for measurement of wave propagation characteristics of soils, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 122, No. 4, pp. 302-308., 1996.
- 15) Nakagawa, K., Soga, K. and Mitchell, J.K.: Observation of Biot compressional wave of the second kind in granular soils, *Geotechnique*, Vol. 47, pp. 133-147., 1997.
- 16) Fioravante, V.: Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation

- measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, pp. 129-142., 2000.
- 17) 北勝利, 柴田徹: 飽和砂地盤の液状化に関する遠心力載荷実験, 京都大学防災研究所年報, No. 36 / B-2, 12p., 1993.
- 18) Arulnathan, R., Boulanger, R.W., Kutter, B.L. and Sluis, W.: New tool for shear wave velocity measurements in model tests, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 23, No. 4, pp. 444-453., 2000.
- 19) Kokusho, T.: Correlation of pore-pressure B-value with P-wave velocity and Poisson's ratio for imperfectly saturated sand or gravel, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, pp. 95-102., 2000.
- 20) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., and Huang, K.: Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities, *Soils and Foundations*, vol.42, No.6, pp93-104., 2002.
- 21) Yang, J. and Sato, T.: Analytical study of saturation effects on seismic vertical amplification of a soil layer, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 2, pp. 161-165., 2001.
- 22) 中澤博志, 石原研而, 塚本良道, 鎌田邦夫, 大山敦郎: 砂の P 波速度及び液状化特性に及ぼす飽和度の影響, 第 26 回地震工学研究発表会, pp. 625-628, 2001.
- 23) 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, 35p., 1995.
- 24) Koseki, J., Koga, Y. and Takahashi, A.: Liquefaction of sandy ground and settlement of embankments, *Proc. of Centrifuge 94*, pp. 215-220., 1994.
- 25) 風間基樹, 稲富隆昌, 飯塚栄寿, 永吉貴行: 飽和砂地盤上の盛土の地震時安定性に関する遠心力模型振動実験, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 107-116., 1996.
- 26) Dewoolkar, M.M., Ko, H.Y. and Pak, R.Y.S.: Centrifuge modeling of models of seismic effects on saturated earth structures, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 2, pp. 247-266., 1999.
- 27) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Report of the port and harbour research institute*, No.29, Vol.4, pp.27-56, 1990.
- 28) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya*, pp.523-530., 1985.

港湾空港技術研究所報告 第45巻 第2号

2006.6

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 ニッセイエブロ株式会社

Copyright© (2006) 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。