

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1029      September 2002

S C P 改良地盤の動的応答特性に関する遠心模型実験

北 詰	昌 樹
菅 野	高 弘
河 又	洋 介
西 田	直 人
石 丸	一 宏
中 山	義 紀

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 実験装置及び資料 .....	4
2.1 遠心模型実験装置 .....	4
2.2 加振装置及び試料容器 .....	5
2.3 試料 .....	5
3. 実験条件及び実験方法 .....	6
3.1 実験条件 .....	6
3.2 模型地盤の作製 .....	7
3.3 加振実験 .....	7
3.4 実験データの整理方法 .....	8
4. 実験結果と考察 .....	9
5. 結論 .....	17
6. あとがき .....	17
謝辞 .....	17
参考文献 .....	17

# Centrifuge Model Tests on Dynamic Properties of Sand Compaction Pile Improved Ground

Masaki KITAZUME\*  
Takahiro SUGANO\*\*  
Yohsuke KAWAMATA\*\*\*  
Naoto NISHIDA\*\*\*\*  
Kazuhiro ISHIMARU\*\*\*\*\*  
Yoshinori NAKAYAMA\*\*\*\*\*

## Synopsis

Sand compaction pile (SCP) has been widely utilized for the improvement of the bearing capacity and settlement of soft ground. Although the static stability mechanisms of SCP have been well understood, little has been known about the details of the dynamic properties. As a result, the seismic design standard ignores the differences of dynamic properties between improved and unimproved ground.

This study aims at clarifying the dynamic characteristics of SCP-improved ground in order to provide more reasonable design procedures. A series of shake tests was undertaken at different improvement ratios under centrifuge acceleration of 50 G. The dynamic properties of each case were evaluated by transfer function and relative displacements which were calculated from the measured accelerations.

It was found that dynamic properties of SCP improved ground were between the values for the original soft clay ground and dense sand ground. The results also revealed that, as the improvement ratio increases, the dynamic characteristics of SCP improved ground and dense sand ground became closer.

**Key Words:** sand compaction pile (SCP), improvement ratio, transfer function , relative displacement

---

\* Head, Stabilization Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division

\*\* Head, Structural Dynamics Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division

\*\*\* Fudo Construction Co., LTD. (Joint research)

\*\*\*\* Nippon Kaiko Co., LTD. (Joint research)

\*\*\*\*\* Japan Industrial Land Development Co., LTD. (Joint research)

\*\*\*\*\* Electric Power Development Co., LTD. (Visiting researcher of Structural Dynamics Laboratory)

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

Phone : +81-468-445055 Fax : +81-468-418307 e-mail : [kitazume@pari.go.jp](mailto:kitazume@pari.go.jp)

# SCP 改良地盤の動的応答特性に関する遠心模型実験

北詰 昌樹\*  
菅野 高弘\*\*  
河又 洋介\*\*\*  
西田 直人\*\*\*\*  
石丸 一宏\*\*\*\*\*  
中山 義紀\*\*\*\*\*

## 要 旨

サンドコンパクションパイル (SCP) 工法は、軟弱地盤の支持力増加・沈下抑制等を目的とした地盤改良工法であり、地盤の静的な安定機構に関する研究が精力的に実施されてきた。一方、地震時の SCP 改良地盤の動的な特性に関しては、余り明らかにされていないのが現状である。そのため、港湾構造物の現行設計法である震度法において、SCP 改良地盤は改良前の軟弱地盤と同等の評価をされている。しかしながら、近年の震災報告にて SCP 改良地盤上の構造物は比較的被災程度が抑えられていたとされており、より経済的な評価の確立が望まれている。本研究では、遠心模型実験装置を用いて SCP 改良地盤の動的応答特性を把握し、より合理的な設計を可能にすることを目的として、実験・評価を行った。

実験は、改良率が異なる SCP 改良地盤を 50 G の遠心加速度場にて加振し、改良率が動的特性に及ぼす影響を調査した。また、軟弱な粘性土地盤と良質な砂質土地盤を対象とした実験を実施し、SCP 改良地盤と比較・検討を行った。それぞれの地盤の動的特性は、計測された加速度波形から伝達関数及び相対変位を算出することにより評価した。

その結果、SCP 改良地盤の動的応答特性は、改良前の軟弱な粘性土地盤と良質な砂質土地盤の中間的な性質を示し、改良率が高いほど良質な砂質土の性質に近づいていくことが明らかとなった。

キーワード：サンドコンパクションパイル (SCP) 工法，改良率，伝達関数，相対変位

---

\* 地盤構造部地盤改良研究室長  
\*\* 地盤構造部構造振動研究室長  
\*\*\* 不動建設株式会社 ソロ・エンジニアリング 本部 技術統轄部 技術管理室 (共同研究)  
\*\*\*\* 日本海工株式会社 技術部 技術課 (共同研究)  
\*\*\*\*\* 国土総合建設株式会社 技術本部 設計部 (共同研究)  
\*\*\*\*\* 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター 地盤構造グループ (構造振動研究室 研修生)  
〒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：0468-44-5055 Fax：0468-41-8307 e-mail：kitazume@phri.go.jp

## 1. まえがき

沿岸地域には軟弱な沖積粘土地盤が厚く堆積していることが多く、港湾の整備や空港の沖合展開などの建設工事では、沈下対策やすべり防止等を目的として通常地盤改良工事が行われる。種々ある地盤改良工法の中で、サンドコンパクションパイル（Sand Compaction Pile、以下SCP）工法は、軟弱地盤中へ強制的に砂を圧入して、よく締まった砂杭を造成すると共に周辺地盤を締め固めることにより、支持力の向上、沈下の抑制等を図る工法で、これまでに多数の施工実績を有している。

現在、SCP改良地盤上に築造される港湾構造物の耐震設計は、一般に震度法により検討されている<sup>1)</sup>。震度法において設計水平震度は、地震の発生頻度や地震が発生した際の被災程度に応じて設定される地域別震度に、施設の重要性を踏まえた重要度係数と施設の基礎となる地盤の性状を考慮した地盤種別係数を乗じて算出される。この中で、地盤種別係数は構成土質とその層厚から決定される係数であり、例えば軟弱地盤層では1.0～1.2の値が採用される。合理的で経済的な構造物ならびにSCP改良地盤の設計のためには、これら係数を適切に設定して設計震度を求めることが重要である。

SCP工法により改良された地盤は、軟弱な粘性土地盤中に強固な砂杭が打設された複合地盤であるため、その強度や変形特性・動的特性等の設定にあたっては複合地盤の効果を適切に見積もる必要がある。兵庫県南部地震において、SCP工法で改良された地盤上の構造物は被災程度が抑えられていたと報告されており<sup>2)</sup>、SCP改良地盤の優れた動的特性の一端を示している。しかしながら、SCP改良地盤の動的特性には未解明な点が多く、現行の設計法においてSCP改良地盤は改良前の軟弱地盤と同等の評価をされており、適切に評価されているとはいえない。

そこで、本研究ではSCP改良地盤の振動特性を遠心模型実験で詳細に検討することとした。実験では、改良率の異なるSCP改良地盤を対象に50 Gの遠心加速度場で加振実験を行い、改良率の違いが地盤の振動伝達特性に及ぼす影響を調べた。さらに、軟弱粘性土地盤および良質な砂質土地盤を対象とした加振実験もあわせて行い、SCP改良地盤の振動特性と比較・検討を行った。本報告では、遠心模型実験の詳細ならびに実験結果について詳細に記述する。

## 2. 実験装置及び試料

### 2.1 遠心模型実験装置

本実験では現地規模の応力条件を再現するために、遠心模型実験装置を用いて50 Gの遠心加速度の下で実験を行った。遠心模型実験装置は、1/Nに縮尺された模型地盤に縮尺に応じた遠心加速度（NG）を作用させることによって実物と同じ応力状態を再現するものである。本実験では写真-1に示す当研究所所有の遠心模型実験装置（Mark II）を用いた。装置の主要な諸元を表-1に<sup>3)</sup>、遠心模型実験の相似則を表-2に示す。

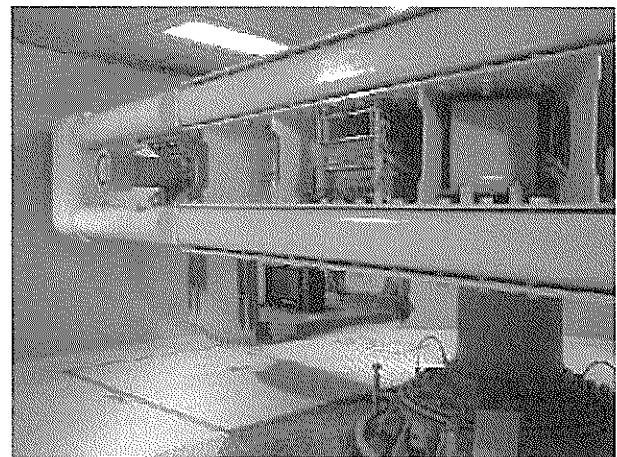


写真-1 遠心模型実験装置

表-1 遠心模型実験装置諸元

最大遠心加速度	113 G
最大搭載重量	2760 kg
回転半径	3.8 m
加減速時間	15 min
最大回転数	163 rpm
回転数制御範囲	0.1～163.0 rpm
主モータ	DC450 kW

表-2 遠心模型実験の相似則

項目	模型/実物	備考
長さ	1/N	
加速度	N	
質量	1	
応力	1	
時間	1/N <sup>2</sup>	圧密・浸透
周波数	N	

## 2.2 加振装置及び試料容器

本実験で使用した加振装置を写真-2に示す。加振装置は、試料容器および模型地盤全体を剛結させた振動台に動的な繰り返し変位を加えることで、地震慣性力に相当する外力を模型地盤に作用させるものである。表-3に加振装置の仕様を示す。

実験に使用した試料容器を写真-3に示す。試料容器は内寸法で幅78 cm、奥行き20 cm、高さ50 cmの剛性の高いものである。容器前面には厚さ約2 cmのアクリル板が用いられており、実験時の模型地盤の挙動が観察できる

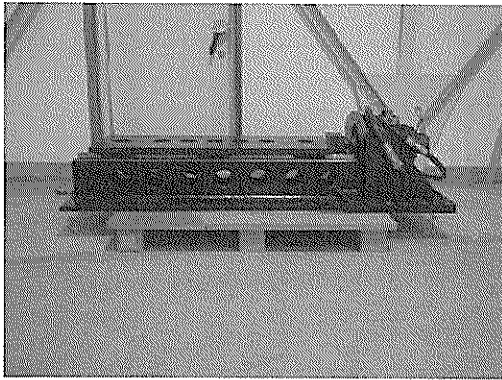


写真-2 加振装置

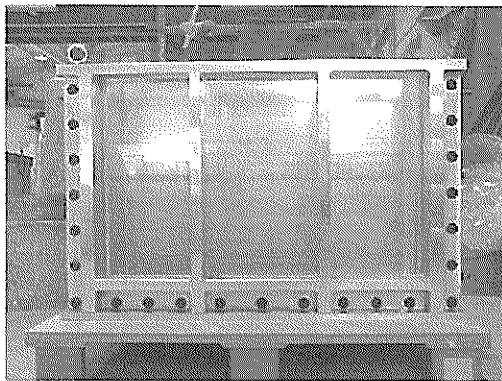


写真-3 試料容器

表-3 加振装置仕様

制御方式	変位制御
最大遠心加速度	Max 50 G
加振周波数	Max 250 Hz
ストローク	Max ±6 mm
最大速度	50 cm/sec
最大圧力	20.6 MPa
固有振動数	280 Hz
負荷	Max 200 kg×50 G
加速度	Max ±12 G

ようになっている。実験にあたって、容器下部に入力した地震波が地盤上方に伝播するとともに容器側面で反射することにより、地盤中の応答波形が乱れる事が考えられた。そのため、既往の研究<sup>4)</sup>を参考に容器側面に厚さ2 cmのシリコンラバーを設置し容器側面からの地震波の反射を極力小さくするように工夫した。

## 2.3 試料

### (1) 粘性土地盤

粘性土地盤にはカオリン粘土を用いた。カオリン粘土は市販の粘土粉末であるASP-100カオリンと5Mカオリンを重量比で1:1で混合したもので、圧密係数( $C_v$ )が大きく圧密に要する時間が短いことが特長であり、遠心模型実験でよく用いられる試料である。表-4にカオリン粘土の物理特性を示す。また、カオリン粘土の『地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験(JGS0542-2000)』<sup>5)</sup>より得られた $G \sim \gamma$ 曲線を図-1に示す。変形特性を求めるための繰返し三軸試験は、供試体に正弦10波の繰返し応力を作用させて応力 $\sim$ ひずみ曲線を描くことにより、各せん断ひずみ $\gamma$ におけるせん断剛性 $G$ と履歴減衰率 $h$ を求めるものである。

表-4 カオリン粘土の物理特性

土粒子密度	$\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.655
液性限界	$\omega_L$ (%)	84.6
塑性限界	$\omega_P$ (%)	26.0
塑性指数	$I_P$	58.6
礫分	(%)	0
砂分	(%)	1
シルト分	(%)	8
粘土分	(%)	91
最大粒径	(mm)	0.425

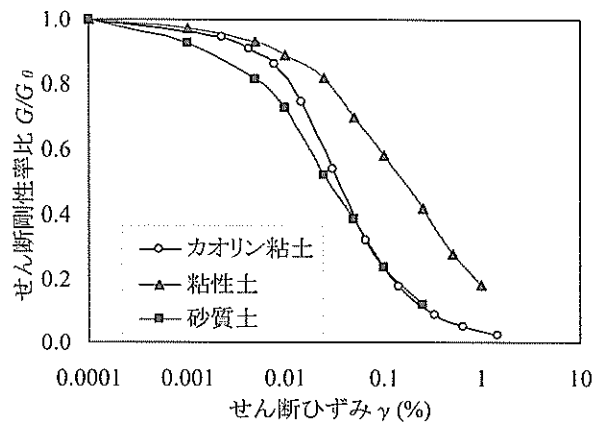


図-1 カオリン粘土の  $G \sim \gamma$  曲線

図-1には代表的な砂（塑性指数  $I_p$ : N.P.,  $\sigma'_{vm}=49$  kPa,  $\sigma'_{vm}$ : 平均有効主応力）及び粘土 ( $I_p \geq 30$ ) の  $G \sim \gamma$  曲線<sup>6)</sup>を併せて示している。図-1より、本実験で用いたカオリン粘土は大ひずみ領域での剛性低下が著しく、0近くまでせん断剛性が低下していることが分かる。

繰り返し三軸試験より得られたせん断剛性  $G \sim$  過剰間隙水圧比関係を図-2に示す。同図は、非排水繰り返し三軸試験において、正弦波を1波入力する毎に得られるせん断剛性を縦軸に、その時に発生する過剰間隙水圧の最大値を繰り返し三軸試験時の圧密応力で除して算出した過剰間隙水圧比を横軸として図示したものである。なお、過剰間隙水圧は、供試体底面に設置した間隙水圧計において、繰り返し载荷前に計測された間隙水圧と繰り返し载荷中に計測された間隙水圧の差である。図-2より、繰り返し応力を作用させることにより発生するせん断ひずみが小さいうちは、過剰間隙水圧の上昇及びせん断剛性の低下は見られないが、発生するせん断ひずみが大きくなると、カオリン粘土中の間隙水圧が上昇しせん断剛性が著しく低下していることが見て取れる。

従って、カオリン粘土は繰り返し応力や過剰間隙水圧の上昇に伴って乱されることにより、著しく軟化する非常に鋭敏な粘土であるといえる。

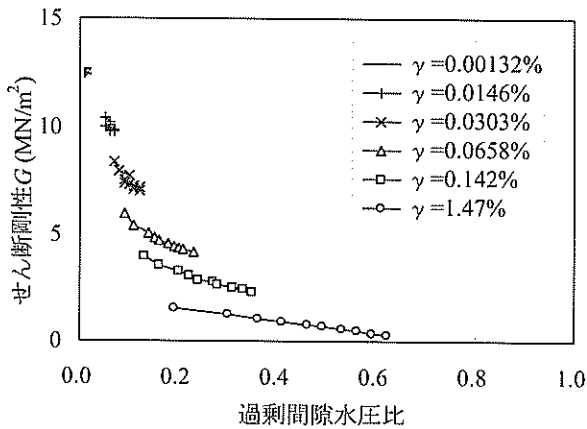


図-2 せん断剛性  $G \sim$  過剰間隙水圧比

(2) 基礎砂層及び改良地盤

粘土下部の基礎砂層及び改良部（SCP工法により施工された砂杭をモデル化した改良杭や100%置換改良部、及び砂質土地盤）には、特性の良く知られている豊浦砂を用いた。表-5に豊浦砂の物理特性を示す<sup>7)</sup>。

表-5 豊浦砂の物理特性

土粒子密度	$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	2.64
最大乾燥密度	$\rho_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	1.65
最小乾燥密度	$\rho_{dmin}$ ( $g/cm^3$ )	1.33

3. 実験条件及び実験方法

3.1 実験条件

本実験では、3種類の改良率のSCP改良地盤のほかに無改良の粘性土地盤、砂質土地盤の合計5ケースの地盤に対し加振実験を行った。改良率が28%のSCP改良地盤の概略図を図-3に、各実験ケースの主な仕様を表-6に、各ケースの計測器の配置位置を表-7に示す。

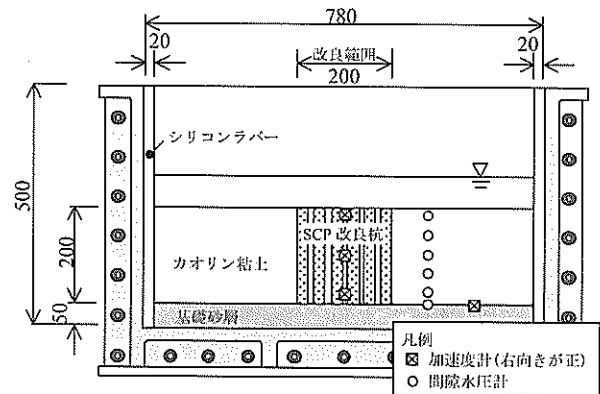
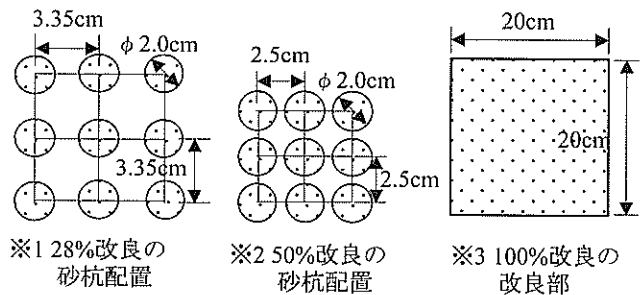


図-3 模型地盤の概略図 (Case2)

表-6 実験ケース一覧

名称	地盤高 (cm)	改良率 (%)	打設本数 (本)	杭芯距離 (cm)
Case1	20	---	---	---
Case2	20	28	36	3.35 <sup>*1</sup>
Case3	20	50	64	2.50 <sup>*2</sup>
Case4	20	100	---	20×20 <sup>*3</sup>
Case5	20	全層砂	---	---



※1 28%改良の砂杭配置

※2 50%改良の砂杭配置

※3 100%改良の改良部

表-7 計測器配置表

設置地盤	砂層上端	粘性土地盤				
		GL, (cm)	-18	-14	-10	-6
Case1	○	○	○	○	○	○
Case2	○	○	△	○	△	○
Case3	○	○	△	○	△	○
Case4	○	△	△	△	△	○
Case5	○	○		○	△	○

○: 加速度計・間隙水圧計を設置  
△: 間隙水圧計のみを設置

SCP改良地盤は、低改良率 ( $as \leq 40\%$ 、「港湾施設の技術上の基準・同解説」による分類、以下同) 地盤として改良率 28%, 中改良率 ( $40\% \leq as \leq 70\%$ ) 地盤として改良率 50%, 高改良率 ( $as \geq 70\%$ ) 地盤として改良率 100% の3種類を対象とした。実際の施工を考慮すると、高改良率地盤は接円配置相当 ( $as=80\%$ ) が妥当であるが、模型地盤作製上の問題で、接円配置では砂杭間に加速度計を設置することが非常に困難であるため、全置換 ( $as=100\%$ ) とした。また、未改良粘性土地盤と良質な砂質土地盤における加振時の動的挙動を把握する目的で、カオリン粘土及び砂のみで作製した地盤についての実験も併せて行った。

### 3.2 模型地盤の作製

本実験の手順は図-4 に示す実験フローに従って行った。

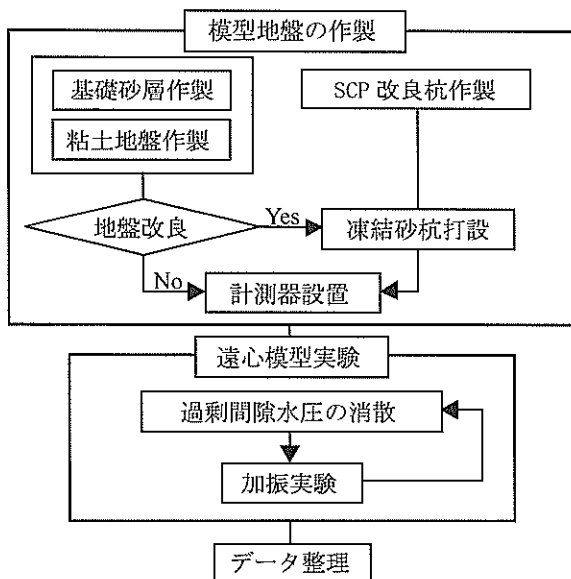


図-4 実験フロー図

#### (1) 粘性土地盤の作製方法

試料容器下層に厚さ 5 cm の基礎砂層を作製し、粘土試料と容器との摩擦を極力抑えるため、容器の内側にシリコンオイルとシリコングリースを 1:1 の割合で混合したものを均等に塗布し、その後、真空攪拌してスラリー状になった含水比 120% のカオリン粘土を気泡が入らないように注意しながら試料容器に投入した。この時投入する粘土量は、実験室内での予備圧密が終了した時の粘土層厚が 20 cm となる様に調整した。予備圧密はペロラムシリンダーを用いて 49 kPa の圧力でおこなった。また、予備圧密の終了は 3t 法<sup>8)</sup>により決定した。

#### (2) 改良杭の作製方法

Case2 及び Case3 (表-6 参照) で使用した改良杭は、各杭の含水比や相対密度などを精度良く再現するために、凍結砂杭を使用する事とした。凍結砂杭の作製に際しては、まず脱気水を満たした円筒形アクリルパイプ (直径 20 mm × 長さ 250 mm) を準備し、パイプ内に気乾状態の豊浦砂を静かに流し込み、相対密度が 85% 以上となるようにテーブル型のパイプレーターを用いて締固めた。その後、冷凍庫内で凍結させた後、アクリルパイプより砂杭を脱型し、打設対象となる粘性土地盤高に合わせて各杭の杭長を整形して作製した<sup>9)</sup>。

#### (3) 改良杭の粘性土地盤への打設方法

粘性土地盤への改良杭の打設方法は、粘性土地盤に穴を掘り改良杭を設置する置換方法と、改良杭を直接粘性土地盤に打ち込む圧入方法が考えられる。前者の方法では、砂杭の打設による周辺粘性土地盤の乱れを最小限に抑えることが可能で、粘性土地盤の強度特性を比較的精度良く見積もることが可能である。一方、後者の方法では粘性土地盤の乱れは大きいものの砂杭には周辺地盤からの拘束圧が期待でき、実際の施工方法に近いという利点がある。本実験の場合には、実際の SCP 改良地盤により近づけることを優先して、Case2 及び Case3 では後者の圧入方法で地盤の作製を行った。また、Case4 においては改良率が 100% であり、砂杭を打設する方法で改良地盤を作製することは困難であると判断されたため、改良区域の粘性土地盤を掘削・除去した後に、多重ふるい法にて改良杭と同じ相対密度 (85% 以上) となるように調整して改良地盤を作製した。

### 3.3 加振実験

一般には、検討の対象としている周波数帯において各周波数の正弦波を段階的に作用させることにより共振曲線を求める方法が用いられるが、模型地盤に作用させる振動の回数が非常に多くなるため、模型地盤が大きく乱れることが考えられた。そこで、入力波形には地盤内を伝達する過程において各周波数の振動がどのように増幅・減衰しているかを一度の加振で検討することが可能なホワイトノイズを用いることとした。使用するホワイトノイズは、構造物に影響を及ぼす周波数帯 (1 G 場で 0.5~2.0 Hz, 50 G 場で 25~100 Hz) の成分を均等に含むものとした。入力加速度の最大値はレベル 1 地震動を想定して 10.0 G (1 G 場で 200 Gal) とし、また、振動の増幅・減衰特性と入力加速度の大きさの関係を調べるために、最大値が 2.5 G, 5.0 G 及び 7.5 G (それぞれ 1 G 場で



50,100,150 Gal) の入力波による加振も行った。加振入力波一覧を表-8 に示す。加振は 4 種類の大きさのホワイトノイズを段階的に作用させることにより行った。また、初回の加振は、遠心加速度の増加過程で発生した粘土地盤中の過剰間隙水圧が消散したことを確認した後に、2 回目以降の加振は、それ以前の加振により発生した間隙水圧が消散したことを確認した後に行った。

表-8 加振入力波一覧

名称	周波数 (Hz)	最大加速度 (G)
ホワイトノイズ	25~100	2.5
		5.0
		7.5
		10.0

### 3.4 実験データ整理方法

模型地盤中に設置された加速度計及び間隙水圧計で計測されたデータは、図-5 に示すフローに従って整理した。また、整理された加速度及び間隙水圧のデータを総合的に判断することにより、実験結果に関する考察を加えた。

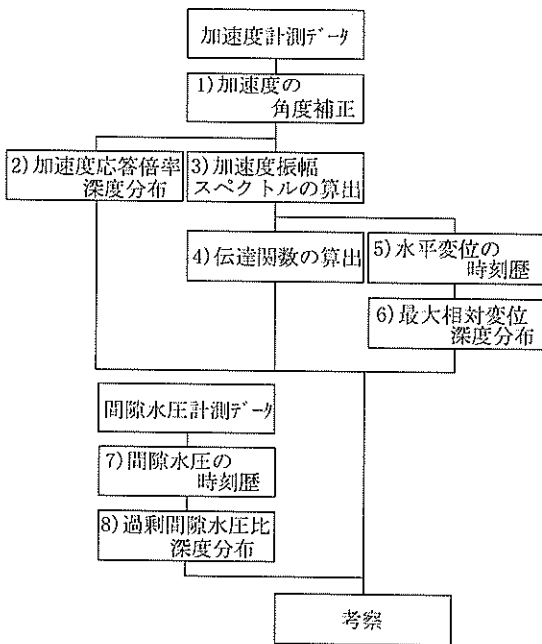


図-5 データ整理フロー図

#### (1) 加速度のデータ整理方法

##### 1) 加速度の角度補正

模型地盤内の加速度計が水平に設置されていない場合、計測した水平加速度は本来生じている水平加速度

より小さくなる。そこで 50 G 到達後の加速度計の計測値からその傾きを求め、加振実験時の計測値の補正を行って振動加速度の水平成分のみを算出した。

##### 2) 加速度応答倍率の深度分布

加速度応答倍率の深度分布の模式図を図-6 に示す。加速度応答倍率は各深度で得られた加速度の最大値を入力加速度の最大値で除すことにより算出したもので、その深度分布は基礎砂層上端から地表面にかけて振動がどのように増幅・減衰しているかの簡易な指標となるものである。

加速度応答倍率深度分布図において加速度応答倍率が 1 を超える場合、その深度における加速度の最大値は入力加速度の最大値より大きく、逆に 1 より小さい場合、その深度における加速度の最大値は入力加速度の最大値より小さいことになる。

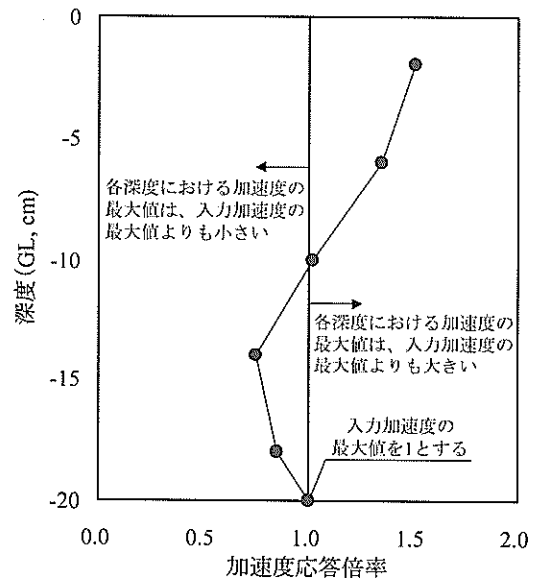


図-6 加速度応答倍率の深度分布 (模式図)

##### 3) 加速度振幅スペクトルの算出

角度補正して求めた加速度をフーリエ変換して、フーリエ振幅スペクトルを算出し、各加速度波形においてどの周波数成分が卓越しているかを調べた。

##### 4) 伝達関数の算出

伝達関数の模式図を図-7 に示す。伝達関数は対象とする地盤 (応答) のフーリエ振幅スペクトルを、基礎砂層上端 (入力) のフーリエ振幅スペクトルで除して算出した。

伝達関数は加速度の各周波数成分が基礎砂層から検討の対象としている深度まで伝播する間に、どのような割合で増幅・減衰しているかを表している。伝達関数が 1 より大きい場合、その周波数成分が基礎砂層に

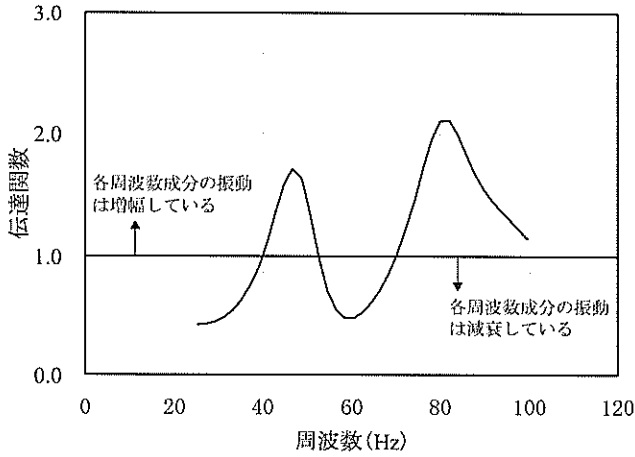


図-7 伝達関数 (模式図)

比べて増幅していることを表しており、また、伝達関数の値が大きくなるほど周波数の増幅率は大きくなる。逆に、伝達関数が1より小さい場合は、その周波数における成分が減衰しており、値が小さいほど減衰していることを表している。

5) 水平変位の時刻歴

フーリエ変換することにより得られた加速度の各周波数成分を2回積分して各周波数における変位振幅を算出、逆フーリエ変換により水平変位の時刻歴を求めた。また、変位の時刻歴を算出する過程で、構造物の動的挙動を支配する周波数帯25~100 Hz (1 G 場 0.5~2.0 Hz) 以外の成分は0とした。

6) 最大相対変位の深度分布

各深度における水平変位の時刻歴から基礎砂層上端

における水平変位の時刻歴を、対応する時間毎に減ずることによって基礎砂層に対する各深度の相対変位及びその最大値を算出した。最大相対変位の深度分布図から、加振に伴い地盤そのものがどれだけ変位しているかを把握することができる。

(2) 間隙水圧のデータ整理方法

7) 時刻歴

計測した間隙水圧を遠心模型実験開始時の時間を0として図示した。

8) 過剰間隙水圧比深度分布

過剰間隙水圧比は、各深度において加振前に計測された静水圧と、それらの深度で加振後に計測された間隙水圧との差である過剰間隙水圧を、それらの深度における有効上載圧で除すことにより導いた。過剰間隙水圧比が1の場合には有効上載圧が0になっていることを、過剰間隙水圧比が0の場合には地盤内の水圧が静水圧状態になっていることを示す。

4. 実験結果と考察

4.1 粘性土地盤 (Case1)

最大加速度が2.5G及び10.0G (1G場で50,200 Gal) のホワイトノイズで加振した時の入力加速度波形 (基礎砂層上端) と各深度における応答加速度波形を図-8(a)(b)に示す。二つの入力波ケースにおけるGL-2cm

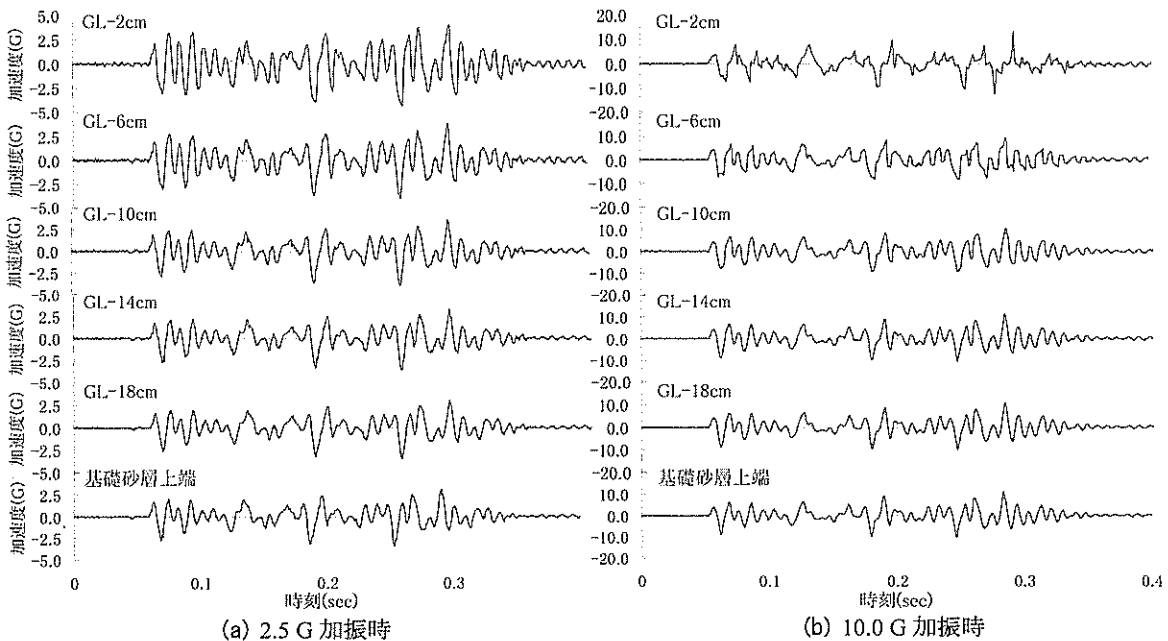


図-8 各深度における加速度波形 (Case1)

位置での加速度波形を比較すると、2.5 G 加振時は GL-2 cm における加速度波形と入力加速度波形が類似しているが、10.0 G 加振時は入力加速度波形に比べて GL-2 cm における加速度波形が鋭角状になっており、異なる形状を示していることが見て取れる。

次に、図-9 に加速度応答倍率の深度分布を示す。加速度応答倍率は、3.4 に示したように、各深度で得られた加速度の最大値を入力加速度の最大値で除すことにより算出したもので、その深度分布図は基礎砂層上端から地表面にかけて振動がどのように増幅・減衰しているかの簡易な指標としてよく用いられる。図-9 を見ると、最大加速度 2.5 G で加振した時は、基礎砂層上端から地表面に向かって、浅くなるほど加速度応答倍率が大きくなっていることが分かる。これは、地盤が弾性体に近い挙動をしていることを示している。一方、最大加速度が 10.0 G で加振した時は、GL-14 cm から GL-6 cm にかけて加速度応答倍率が小さくなるものの、GL-6 cm から GL-2 cm にかけて大きくなっており、2.5 G 加振時と異なる傾向を示している。これらの図より、入力加速度が大きくなると地盤の動的挙動に何らかの変化が生じていることがうかがえる。

二つのケースにおいて生じたこれらの相違をさらに詳しく調べるために、基礎砂層上端より粘性土地盤に入力された振動が、粘性土地盤内を伝播して地表面に到達するまでの間に地盤内で生じている現象について、伝達関数を用いることにより検討する。

最大加速度が 2.5 G 及び 10.0 G のホワイトノイズで加振した時の各深度における伝達関数を図-10(a) (b) に示す。伝達関数は、加速度の各周波数成分が基礎砂層から

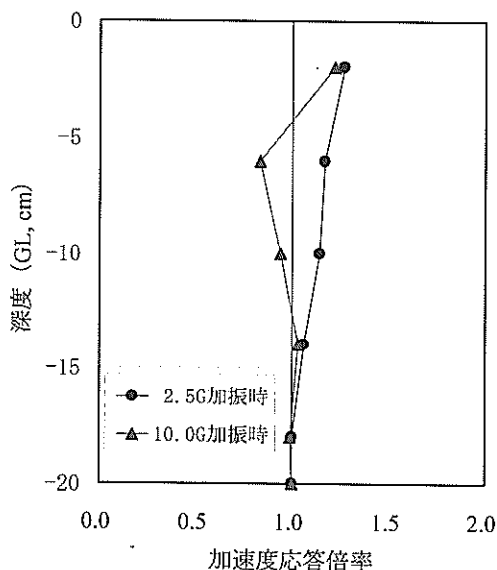
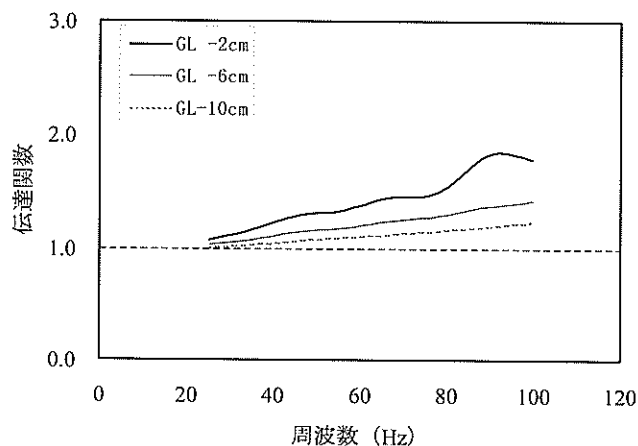
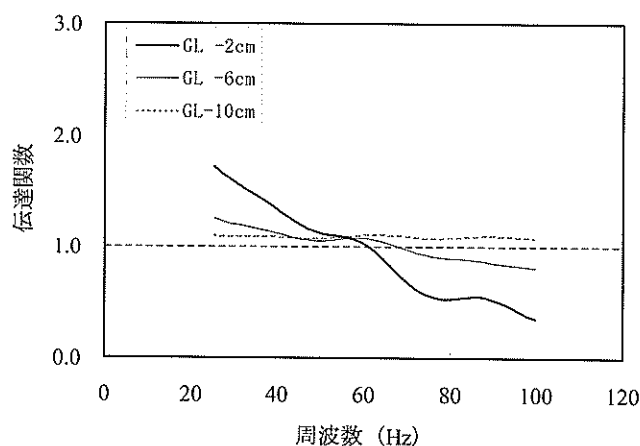


図-9 加速度応答倍率 (Case1)

検討の対象としている深度まで伝播する間に、どのような割合で増幅・減衰しているかを表すもので、伝達関数が 1 より大きい場合、その周波数成分が基礎砂層に比べて増幅していることを示しており、また、伝達関数の値が大きくなるほどその周波数成分の増幅率は大きくなる。逆に、伝達関数が 1 より小さい場合は、その周波数成分が減衰していることを示している。ここでは、各深度における加速度波形からフーリエ変換することにより得られた振幅スペクトルを、基礎砂層上端における加速度波形から得られた振幅スペクトルで、対応する周波数ごとに除すことにより導いた (3.4 参照)。図-10(a) より、2.5 G で加振した時は、GL-10 cm から GL-2 cm にかけて 25~100 Hz (1 G 場で 0.5~2.0 Hz) のすべての周波数において深度が浅くなるほど伝達関数が大きくなっており、増幅する傾向を示していることが分かる。一方、図-10(b) より 10.0 G で加振した場合は、GL-10 cm から GL-6 cm の間において低周波数側の伝達関数は深度が浅くなるほど大きく増幅傾向を示すものの、高周波数側の伝達関数は浅くなるほど小さく、減衰傾向を示して



(a) 2.5 G 加振時



(b) 10.0 G 加振時

図-10 各深度における伝達関数

り、GL-6 cm から GL-2 cm にかけてさらにその傾向が強くなっていることが分かる。従って、図-9 に示す 10.0 G 加振時の加速度応答倍率の深度分布図において、GL-10 cm から GL-6 cm で加速度応答倍率が小さくなるのは、高周波数側の振動が減衰している影響が強く現れた結果であり、一方、GL-6 cm から GL-2 cm にかけて加速度応答倍率が大きくなるのは、高周波数側の減衰よりも低周波数側の増幅が寄与した結果であると考えられる。同様に、図-8 (a) (b) で見られた応答加速度波形の相違は、各周波数成分の振動の増幅・減衰特性が変わっていることに起因していると推察される。

各入力波ケースから得た GL-2 cm における伝達関数を比較した図を図-11 に示す。同図より、入力加速度が小さい(本実験では最大加速度 2.5 G で加振) 場合には、周波数が高くなるほど増幅率が大きくなる傾向にあるが、ある入力加速度レベル(本実験では 5.0 G)を超えると、入力加速度が大きくなるほど低周波数側の成分のみが増幅し、高周波数側の成分が大きく減衰する傾向にあるこ

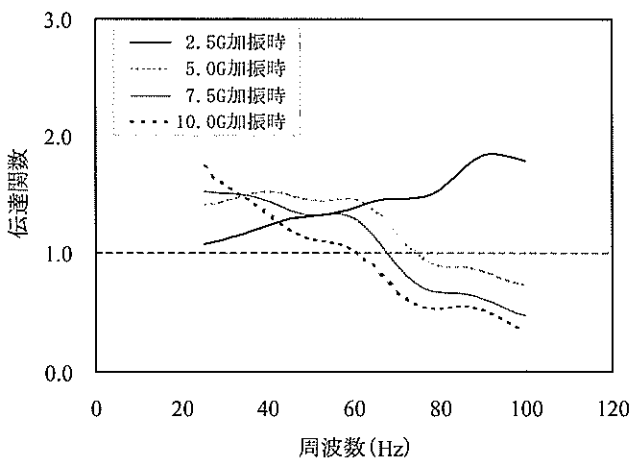


図-11 GL-2 cm における伝達関数 (Case1)

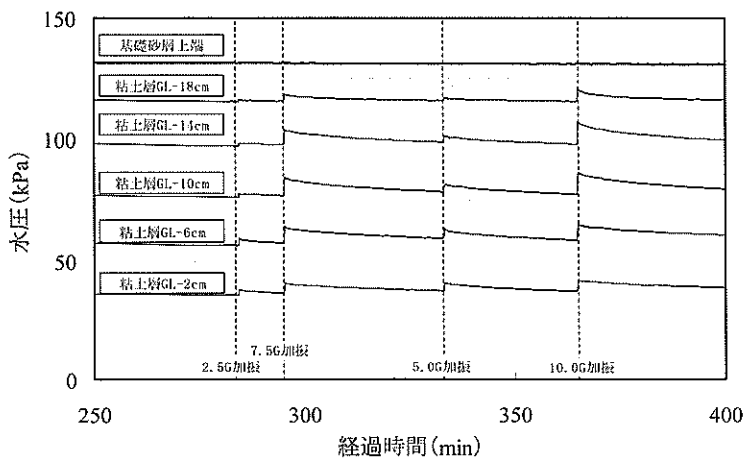


図-12 間隙水圧の経時変化 (Case1)

とが分かる。

次に、入力加速度が大きくなるほど低周波数側の成分が増幅し、高周波数側の成分が減衰する傾向が何に起因しているかを考察する。

4 回の加振実験前後での各深度における間隙水圧の変化を図-12 に示す。なお、横軸の時間は、遠心実験開始時の時間を 0 としている。同図より、加振に伴いすべての深度において間隙水圧が上昇していることが見て取れる。また、加振後における過剰間隙水圧比の深度分布(3.4 参照)を、入力加速度の大きさに関して比較したものを図-13 に示す。本実験では、間隙水圧が静水圧状態になっていることを確認した上で各加振を行っているため(図-12 参照)、それぞれの加振後における過剰間隙水圧比は、各加振によって発生した過剰間隙水圧を各深度における有効上載圧で除して算出した。同図より入力加速度が大きくなるほど、過剰間隙水圧比が大きくなることが分かる。本実験で用いたカオリン粘土は、2.3 で示したように間隙水圧の上昇に伴ってせん断剛性が低下し、軟化する性質を持つ。この際、過剰間隙水圧比が大きいほどその深度における地盤の軟化の程度は著しくなる。一般に、地盤が軟弱な状態にある場合には高周波数の振動が大きく減衰することが知られており、カオリン粘土地盤においても地盤の軟化に伴い高周波数の振動が大きく減衰したものと考えられる。

今回の実験で用いたカオリン粘土では、比較的小さい入力加速度レベル(5.0 G, 1 G 場で 100 Gal 相当)で間隙水圧の上昇に伴う軟化現象が生じた。しかしながら、地盤が軟化する入力加速度レベルは粘性土地盤の種類や強度などによって異なるため、高周波数側の振動が大き

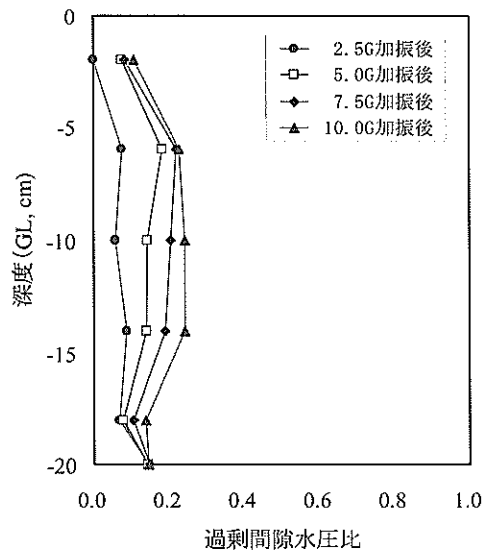


図-13 過剰間隙水圧比の深度分布

く減衰するようになる入力加速度レベルは対象地盤により異なる。従って、粘性土の種類や強度によっては、より大きな振動が作用しても軟化が生じることなく、地盤が弾性的な挙動を示すものもあると考えられる。なお、地盤が軟化することにより高周波数側の振動が著しく減衰することから最大加速度は小さくなるが、構造物の耐震安定性という観点からは一概に有利であるとは言い難い。

加振によって発生した最大相対変位の深度分布図を図-14に示す。3.4に示したように、最大相対変位は、各深度における加速度波形を2回積分することによって得られた変位波形から、同様にして得られた基礎砂層上端における変位波形を、対応する時間毎に減ずることで算出される相対変位の最大値である。入力加速度レベルが大きくなり地盤が軟化することによって、高周波数側の振動が著しく減衰するにも関わらず、図-14を見ると入力加速度レベルが大きいほど加振に伴い発生する相対変位も大きくなっていることが分かる。最大加速度と変位のどちらが構造物被害の指標としてより適切なのかは明確になっていないが、どちらも値が大きくなるほど構造物の被害が大きくなることは明らかである。従って、地盤が軟化して高周波数側の振動が減衰しても、地盤に大きな変位が生じることにより構造物が被害を受けるため、上部構造にとって不利になる場合が想定される。

以上のことから、粘性土地盤は入力加速度レベルが小さく地盤が軟化しない場合には地盤が弾性的な挙動を示し、周波数が高くなるほど増幅率が大きくなる傾向がある。反対に入力加速度レベルが大きく地盤が軟化する場合には、低周波数側の振動が増幅し、高周波数側の振動

が大きく減衰する傾向があることが分かった。また、地盤が軟化することにより高周波数側の振動が大きく減衰されても、加振により発生する水平変位量は入力加速度が大きくなるほど大きくなることも明らかとなった。

#### 4.2 砂質土地盤 (Case5)

4.1 粘性土地盤において示した加速度波形と、同等の入力加速度レベル (2.5 G 及び 10.0 G, 1 G 場で 50,200 Gal) における加振実験で計測された加速度波形を図-15(a) (b)に示す。同図より、最大加速度が 10.0 G のホワイトノイズで加振した時の GL-2 cm における加速度波形は、粘性土地盤に見られたような鋭角状の波形と異なる

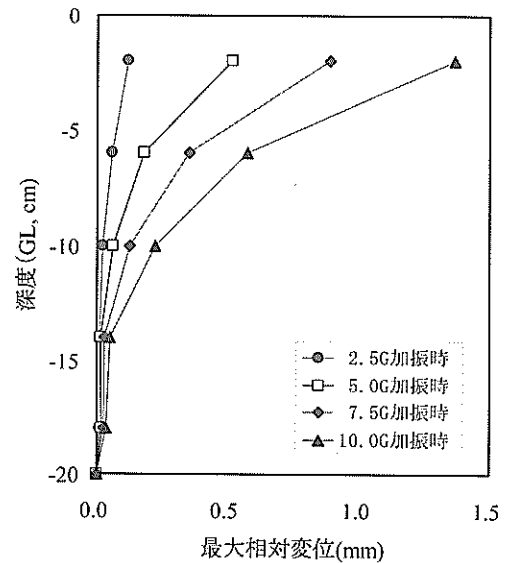


図-14 最大相対変位の深度分布 (Case1)

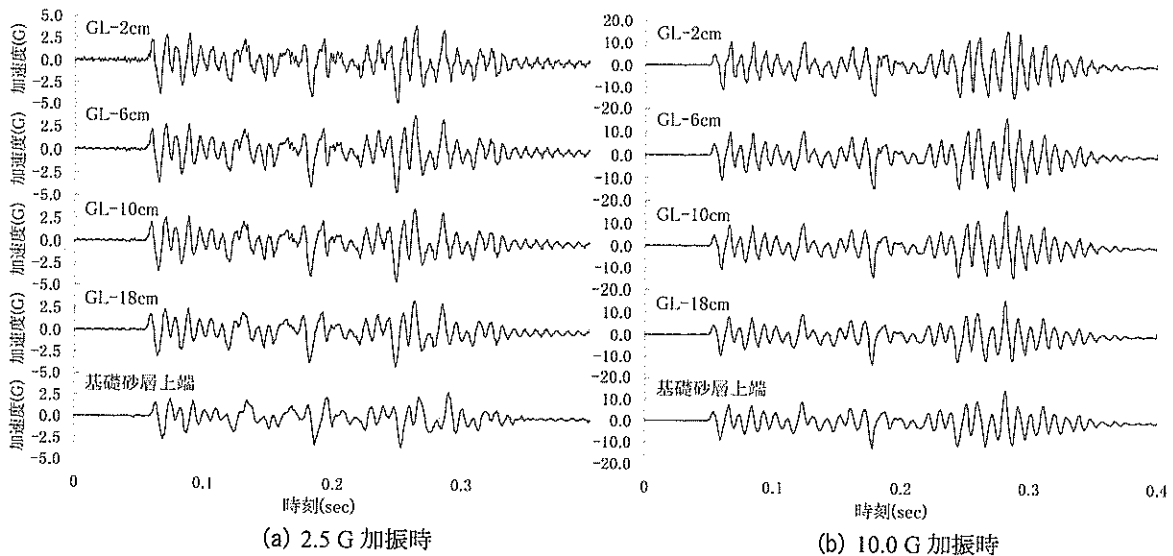


図-15 各深度における加速度波形 (Case5)

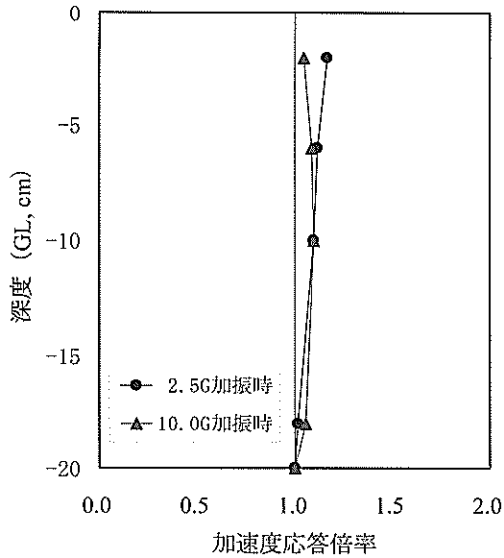


図-16 加速度応答倍率 (Case5)

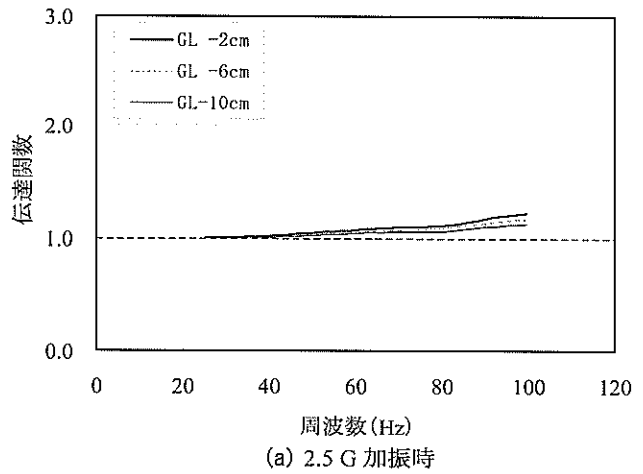
り、2.5 G 加振時と同様、入力加速度の波形と類似していることが見て取れる。

また、加速度応答倍率の深度分布を図-16 に示す。同図より、10.0 G 加振時の GL-2 cm において、加速度応答倍率が小さくなっているものの、2.5 G 及び 10.0 G 加振時ともに基礎砂層上端から地表面に向かってほぼ直線状に加速度応答倍率が大きくなっていることが分かる。このように粘性土地盤と異なる傾向を示した理由をさらに詳しく検討するために、伝達関数を用いて砂質土地盤内で起こっている現象を考察する。

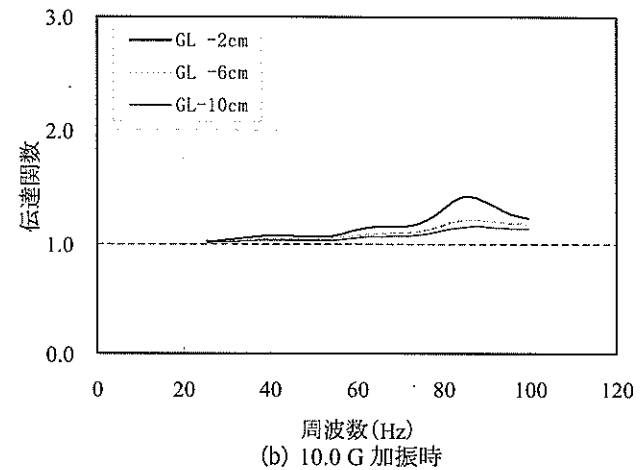
最大加速度 2.5 G 加振時及び 10.0 G 加振時での各深度における伝達関数を図-17 (a) (b) に示す。同図より、二つの入力波ケースとも深度が浅くなるほど 25~100 Hz (1 G 場で 0.5~2.0 Hz) におけるすべての周波数成分の振動が増幅していることが見て取れる。従って、入力加速度レベルに依らず振動が砂質土地盤内を基礎砂層上端から地表面に向けて伝播・増幅する過程は類似しており、その結果図-15 において 2.5 G 加振時と 10.0 G 加振時の加速度応答倍率の深度分布が比較的似通った傾向を示したと言える。

また、各入力波ケースから得られた GL-2 cm における伝達関数を比較したものを図-18 に示す。同図より、最も大きな加速度が入力された場合 (最大加速度 10.0 G にて加振) においてその他の入力波ケースと比べて高周波数側の振動が若干大きな増幅を示しているが、全体的な傾向は入力加速度の大きさに依らず周波数が高くなるほど伝達関数が大きくなることがわかる。

砂質土地盤において、このような傾向が見られる要因を加振実験の際に発生する間隙水圧を用いて検証する。



(a) 2.5 G 加振時



(b) 10.0 G 加振時

図-17 各深度における伝達関数

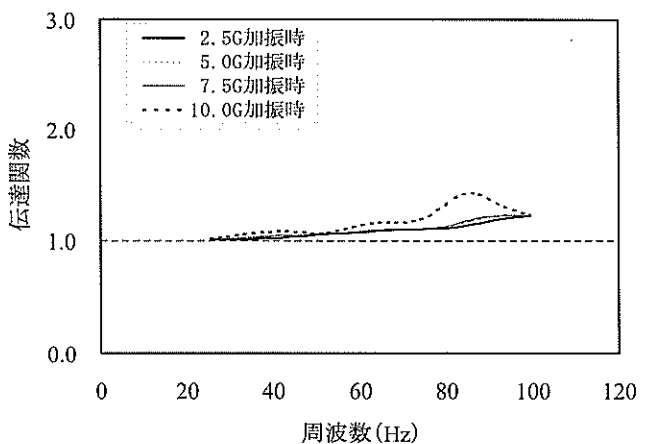


図-18 GL-2 cm における伝達関数 (Case5)

加振実験における間隙水圧の経時変化を図-19 に示す。同図より、加振に伴い間隙水圧がわずかに上昇するものの、瞬時のうちに消散していることが見て取れる。また、加振後における過剰間隙水圧比の深度分布を入力加速度の大きさと比較した図を図-20 に示す。同図より、

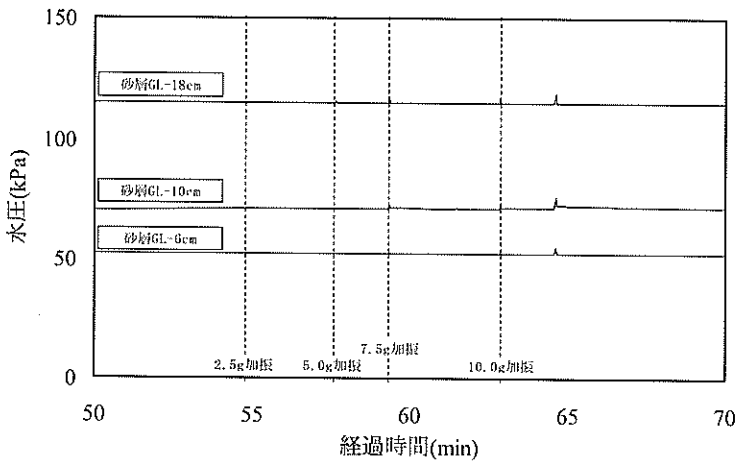


図-19 間隙水圧の経時変化 (Case5)

入力加速度が大きくなるほど過剰間隙水圧比も大きくなっているが、最大入力加速度（本実験では 10.0 G, 1 G 場 200 Gal）の場合でも発生した過剰間隙水圧比は小さいことが分かる。図-19 及び図-20 より、本実験で用いた砂質土地盤においては、過剰間隙水圧が発生しても即時に消散してしまうために地盤の著しい軟化（液状化）は起こらないと判断できる。従って、入力加速度レベルの大きさによらず入力加速度と GL-2 cm における加速度波形が類似していたのは砂質土地盤では地盤の軟化が生じずに各周波数成分の振動における増幅・減衰特性が大きく変化しなかったためと考えられる。

次に、最大相対変位の深度分布図を図-21 に示す。同図より、相対変位の最大値は基層から地表面に向かって深度が浅くなるほど大きくなっており、地盤全体が弾性的な挙動を示していることを裏付けている。

以上のことから、砂質土地盤における伝達関数は、本実験で用いた加速度レベルの範囲（2.5 G～10.0 G, 1 G 場 50～200 Gal 相当）において、加振に伴う間隙水圧の上昇はわずかで地盤に著しい軟化が生じないため、入力加速度の大きさに依らず高周波数領域の振動ほど増幅率が大きくなるという傾向を示すと言える。また、加振に伴って発生する水平変位は、基層から地表面まで深度が浅くなるほど増加しており、地盤全体が弾性体として挙動していることが分かった。

#### 4.3 粘性土地盤と砂質土地盤の比較

ここでは、粘性土地盤と砂質土地盤の差異をより明確にするため、比較・検証を行う。

図-22 は、カオリン粘土が軟化しない程度入力加速度レベル（本実験では 2.5 G, 1 G 場 50 Gal）における基礎砂層に対する GL-2 cm での伝達関数を、粘性土地

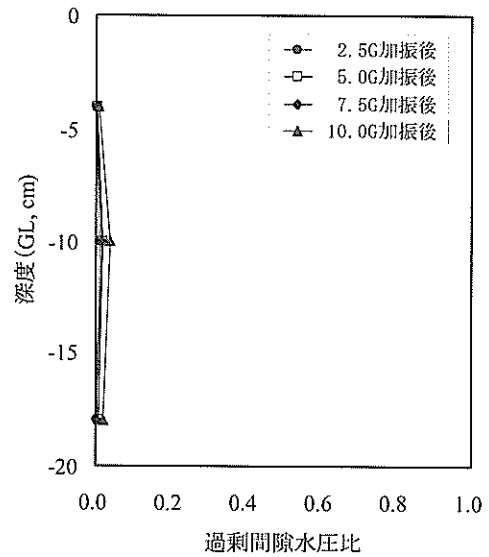


図-20 過剰間隙水圧比の深度分布 (Case5)

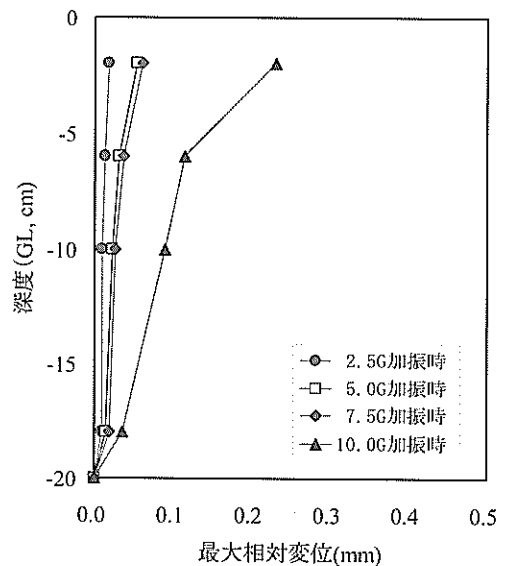


図-21 最大相対変位の深度分布 (Case5)

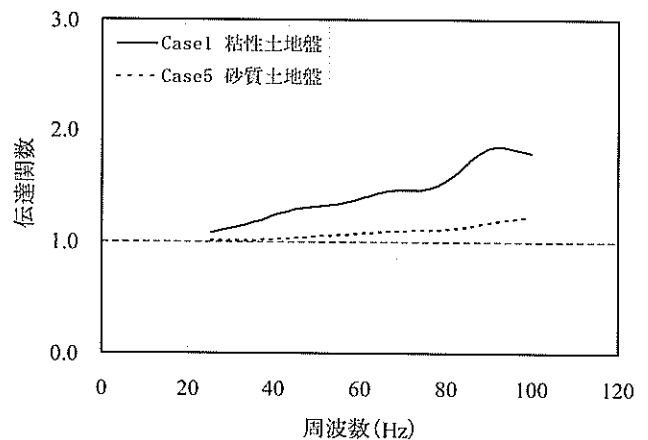


図-22 伝達関数の粘性土-砂質土比較 (2.5 G 加振時)

盤と砂質土地盤で比較したものである。同図より、粘性土地盤・砂質土地盤の双方において、周波数が大きくなると伝達関数が大きくなる傾向がある。しかしながら、砂質土地盤に比べて粘性土地盤の方が大きく増幅しており、各周波数において2つの伝達関数の比を取るとおよそ1.05~1.55倍程度である。従来から用いられている設計基準<sup>1)</sup>において、対象とする地盤上に築造される構造物の設計をする際に考慮しなければならない設計地震外力は、軟弱な地盤ほど大きくなるとされており、本実験結果はこの設計思想と同様の傾向を示している。

また、カオリン粘土が軟化する程度を入力加速度レベル(10.0 G 加振時, 1 G 場で 200 Gal)における、基礎砂層に対する GL-2 cm での伝達関数を、粘性土地盤と砂質土地盤で比較したものを図-23 に示す。同図より、低周波数側(約 55 Hz 以下)の振動は、砂質土地盤に比べて粘性土地盤の方が大きく増幅するが、高周波数側(約 55 Hz 以上)の振動は、粘性土地盤と砂質土地盤の関係が逆転していることが見て取れる。これは、粘性土地盤に比べて砂質土地盤の方が増幅しているからではなく、粘性土地盤中の間隙水圧が上昇し、それに伴い粘性土地盤のせん断剛性が大きく低下することにより高周波数の振動が大きく減衰することに起因していると考えられる。このような現象は、上記の設計基準とは逆の傾向である。そこで、2.5 G 及び 10.0 G 入力時における最大相対変位の深度分布を粘性土地盤と砂質土地盤で比較したものを図-24(a)(b)に示す。図-24(a)(b)より、地盤が軟化するかいなかによらず、GL-2 cm において粘性土地盤が砂質土地盤の約 6 倍も変位していることが分かる。従って、地盤が軟化しない場合は、注目している全ての周波数帯において砂質土地盤よりも振動が増幅(図-22)することにより大きな変位が生じているが、地盤が軟化した場合には、砂質土地盤よりも高周波数側の振動が大き

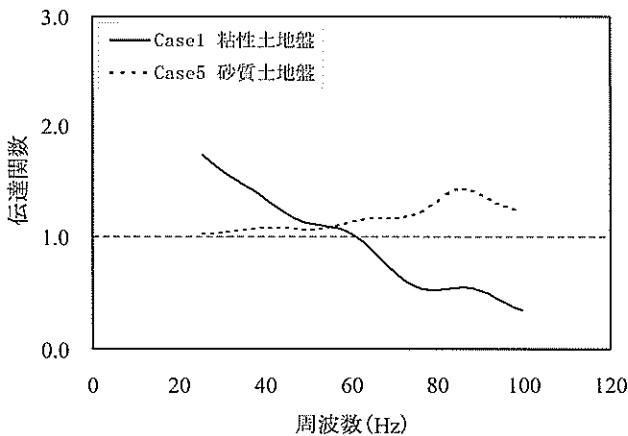
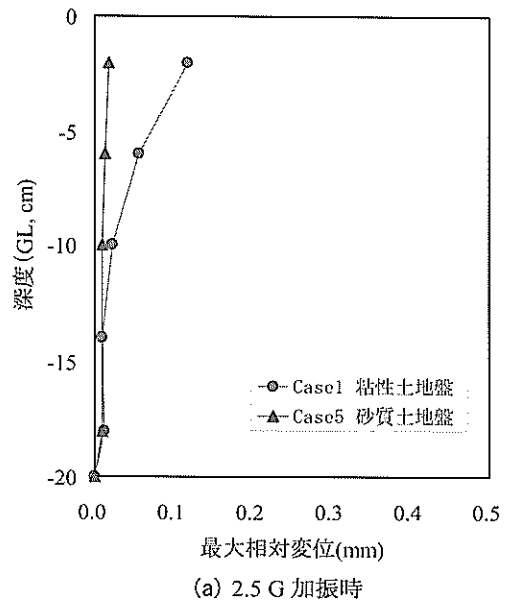


図-23 伝達関数の粘性土-砂質土比較 (10.0 G 加振時)

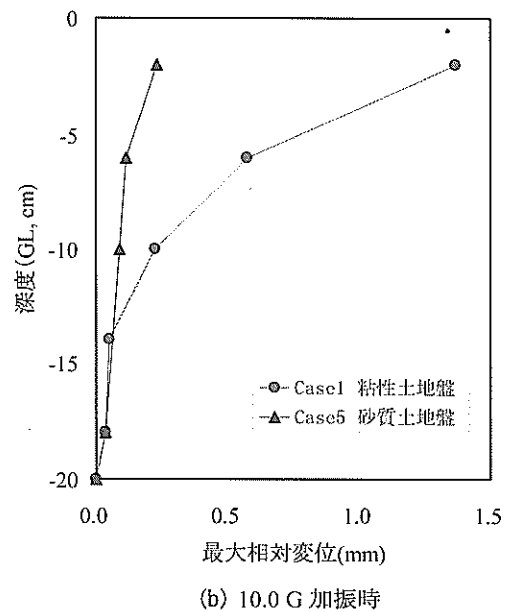
く減衰している(図-23)にもかかわらず、大きな変位が生じていることになる。

#### 4.4 SCP 改良地盤 (Case2~4)

カオリン粘土が軟化しない程度を入力加速度レベルにおける、基礎砂層に対する GL-2 cm の伝達関数を、5 ケースで比較したものを図-25 に、カオリン粘土が軟化する程度を入力加速度レベルにおいて比較したものを図-26 に示す。図中の 28%改良地盤 (Case2) 及び 50%改良地盤 (Case3) の伝達関数は、SCP 改良杭の間にあるカオリン粘土中に設置されている加速度計において得られた加速度波形を基に算出した。そのため、Case2 と Case3



(a) 2.5 G 加振時



(b) 10.0 G 加振時

図-24 最大相対変位の粘性土-砂質土比較



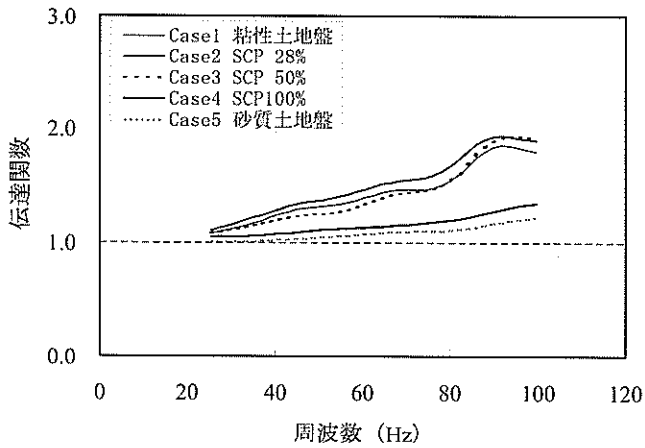


図-25 伝達関数の改良率比較 (2.5 G 入力時)

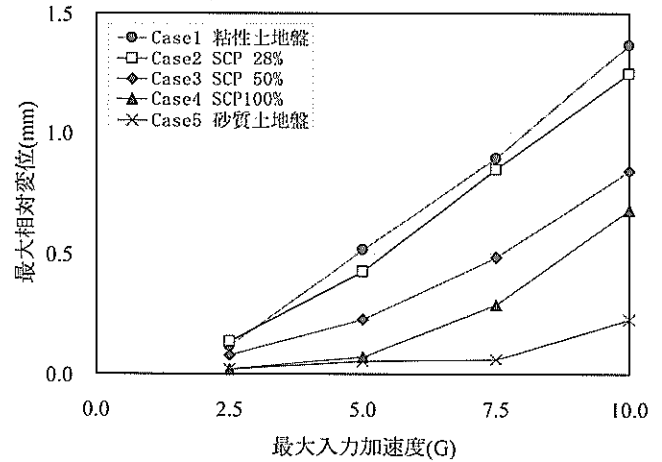


図-27 最大相対変位の改良率比較

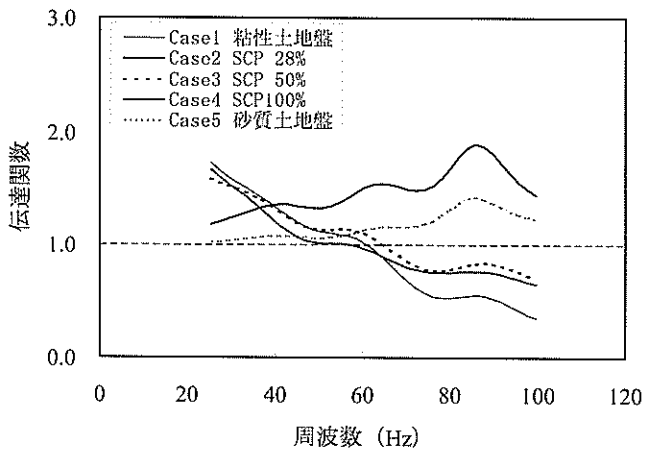


図-26 伝達関数の改良率比較 (10.0 G 入力時)

の伝達関数は粘性土地盤の伝達特性を強く反映している可能性もあるが、ここでは砂杭間において計測されたデータを改良地盤全体の挙動を代表するものとして検討する。

図-25 より、Case2~4 のすべてのケースにおいて伝達関数は粘性土地盤及び砂質土地盤と同様に周波数が大きくなるほど伝達関数が大きくなる傾向があることがわかる。しかし、改良率が28%と50%の改良地盤の伝達関数は粘性土地盤の伝達関数とほぼ同等であり、一方100%改良地盤の伝達関数は砂質土地盤のそれとほぼ一致していることがわかる。また、図-26 より、28%改良地盤及び50%改良地盤において伝達関数は低周波数側の振動が増幅し高周波数側の振動が大きく減衰する傾向が見て取れ、砂質土地盤よりも粘性土地盤に近い性質を示していると推定される。しかし、28%改良地盤・50%改良地盤の伝達関数と粘性土地盤の伝達関数を比較すると、高周波数領域において改良地盤の方が粘性土地盤よりも減衰量が小さく、28%改良よりも50%改良地盤の方

がさらに減衰量が小さくなっている。これは、改良杭と杭間の粘性土で構成される複合地盤が未改良地盤に比べて軟化しにくくなっているためであり、打設された砂杭の数が多く改良率が高いほど軟化の程度が抑えられているためであると考えられる。従って、改良率が高いほど粘性土地盤との差異が大きくなり、高周波数側の振動が減衰しない砂質土地盤に近い傾向を示すようになると言える。

次に100%改良地盤における伝達関数を見ると、カオリン粘土が軟化するレベルの振動が入力されても高周波数側の振動が減衰せずに周波数が高いほど大きく増幅する傾向を示していることが見て取れる。また、100%改良地盤の伝達関数は入力加速度レベルが小さい時は砂質土地盤の伝達関数とほぼ一致していた(図-25 参照)が、図-26 より、入力加速度レベルが大きくなると砂質土地盤よりも伝達関数が大きくなり増幅率も大きくなっていることが分かる。これは、改良区域の周辺にある地盤が軟化することにより改良区域を拘束する土圧が低下したことが原因と考察される。

5つのケースにおけるGL-2 cmでの最大相対変位を比較したものを図-27に示す。横軸は入力加速度の最大値を用いた。同図より、SCP改良地盤の変位量は粘性土地盤と砂質土地盤の間であり、改良率が高いほど変位量が小さくなっていることが分かる。

以上のことから、伝達関数及び相対変位の結果より、SCP改良地盤は粘性土地盤と砂質地盤の中間的な性質を示し、また、改良率が高くなるほど砂質地盤に近づいていくことが明らかとなった。

## 5. 結論

遠心模型実験装置を用いて、SCP改良地盤及び未改良粘性土地盤、良質な砂質土地盤の振動伝達特性を実験・検討した結果、下記の知見が得られた。

- 1) 粘性土地盤に対して比較的小さい加速度が作用した場合、地盤は軟化することなく弾性挙動を示し、地表面付近での応答加速度は入力加速度よりも大きいことが分かった。一方、入力加速度が大きくなると地盤中に過剰間隙水圧が発生し、地盤の軟化が生じる。地盤の軟化により振動の高周波数成分が大きく減衰して、粘性土地盤中央付近において入力加速度よりも応答加速度が小さくなる現象が見られた。また、地盤が軟化することにより大きな変位が生じることが分かった。
- 2) 砂質土地盤の場合、実験を行った範囲では地盤が軟化する現象は生じず、地盤全体が弾性的に挙動した。そのため、基層から地表面までの加速度応答倍率もほぼ直線的に増加する傾向が見られた。
- 3) SCP改良地盤は、粘性土地盤と砂質土地盤との中間的な特性を示すことが分かった。この傾向はSCP地盤の改良率によって異なり、改良率が高くなるほど砂質土地盤の現象が卓越することが分かった。従って、SCP工法で改良することにより支持力の向上や沈下の抑制だけでなく振動特性も改善されていることが分かった。
- 4) SCP改良地盤の振動伝達特性は改良区域周辺の地盤にも影響され、周辺地盤の軟化に伴い改良区域を拘束する土圧が低下することにより各周波数における増幅率や相対水平変位が大きくなる現象が見られた。

## 6. あとがき

遠心模型実験の結果より、SCP改良地盤は未改良の粘性土地盤と砂質土地盤の中間的な振動特性を示し、改良率が高くなるほど砂質土地盤に近い特性を示すようになることが明らかとなった。今後は、本研究で得られた知見を基に、数値解析を用いた原地盤粘性土の厚さや動的性質、砂杭改良率、入力加速度波形などをパラメータとした解析や現地観測等を行い、さらに詳細な検討を行う必要がある。

(2002年5月30日受付)

## 謝辞

本研究は、当所地盤・構造部地盤改良研究室および構造振動研究室と不動建設㈱、日本海工㈱ならびに国土総合建設㈱の共同研究による成果の一部を取りまとめたものである。本研究を進めるにあたり、関係者には多くのご支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説，pp.261-263，1999。
- 2) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T. : Performance of Caisson Type Quay Walls at Kobe Port, Soils and Foundations, pp.119-136, Jan., 1996.
- 3) Kitazume, M. and Miyajima, S. : Development of PHRI Mark II Geotechnical Centrifuge, Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, No.817, 1995.
- 4) 林宏親，西川純一，谷口啓二郎：盛土の地震時挙動に関する遠心模型実験，第32回地盤工学研究発表会，pp.1025-1026，1997。
- 5) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.659-669，2000。
- 6) (財)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)，p.67，1997。
- 7) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，p.58，p.140，2000。
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，p.485，2000。
- 9) 寺師昌明，北詰昌樹：低置換率SCP工法により改良された粘性土地盤の支持力，港湾技術研究所報告，第29巻，第2号，pp.119-148，1990。

港湾空港技術研究所資料 No.1029

2002.9

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. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 有限会社 黎明社

Copyright © (2002) 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。