

動的遠心載荷模型実験装置を用いた盛土地盤に対する加振実験

AN INTRODUCTION OF THE DYNAMIC CENTRIFUGAL LOADING EXPERIMENTED FACILITY AND THE SHAKING EXPERIMENT FOR INVESTIGATION OF MODEL EMBANKMENT

鈴木弘敏*・中橋貞雄**・岸野敬行**

Hirotohi SUZUKI, Sadao NAKAHASHI and Takayuki KISHINO

Dynamic centrifugal facility was established in 1998. By using the facility the following tests were carried out.

- 1) Investigating of the performance of the dynamic shaking facility and acceleration sensors
- 2) Shaking tests for uniform embankment models

We report that the density and shape of embankment affects seismic behavior of embankment.

Key Words : *dynamic centrifugal facility, shaking test, model test, embankment model, seismic behavior*

1. 概 説

地震の多い我が国では、地盤および地盤構造物の地震時挙動を予測してその結果を設計に反映させることは非常に重要であり、とくに1995年に発生した阪神・淡路大震災以降は地震がもたらす人的・物的被害の甚大さからその対応が急務となっている。

地盤および地盤構造物の地震時挙動を把握する手法としては、大別して数値解析と模型実験が挙げられる。このうち模型実験は重力場における振動台実験が以前より行われてきた。振動台実験は数値解析と異なり、実際の土を用いた結果が得られると言う長所を持つ反面、相似則を導く際に用いた応力～歪みの仮定が中程度の歪みレベルまでしか適用できないために、土が降伏するような終局状態の安定問題等には適用できないという欠点を有している^{1),2)}。一方遠心力場における加振実験は終局状態も含む相似則が確立されており、重力場振動台実験が持つ上記の欠点を解消することは知られていた。しかし、加振制御の難しさと高性能のセンサー類を必要とすることから、あまり実施されてこなかった。近年、加振制御技術とセンサー性能の向上

により遠心力場における加振実験が可能となり³⁾、日本工営においても1998年度に導入された加振装置により模型地盤の地震時挙動を調査することが可能となった。

以上のような背景により、本研究では今回導入した装置の基本性能を把握し、さらに実地盤の地震時挙動を小型縮小模型において再現することを目的として、加振機本体およびセンサー類の性能確認試験と均一盛土地盤に対する遠心加振実験を実施した。この結果より地盤密度が変化した際の盛土模型内部の応答特性等の変化について考察するとともに、今後の課題について言及した。

2. 遠心載荷実験の近年の動向

1964年に我が国で初となる地盤工学用の遠心装置（大阪市立大学）が稼働を開始して以来、遠心装置の台数も増加の一途をたどってきた。図-1は我が国における遠心装置の台数と発表論文の件数（土木学会および地盤工学会）の推移を示すもの⁴⁾である。図-1より、1980年代から遠心装置台数が飛躍的に増加し、それに伴い発表論文数も増加していることがわかる。

図-2は図-1の発表論文に占める研究分野の割合の推移を示すもの⁴⁾である（但し1998年度データはその年に開催されたInternational Conference CENTRIFUGE 98の発表論

* 道路・橋梁・軌道部

** 首都圏事業部 地盤構造部

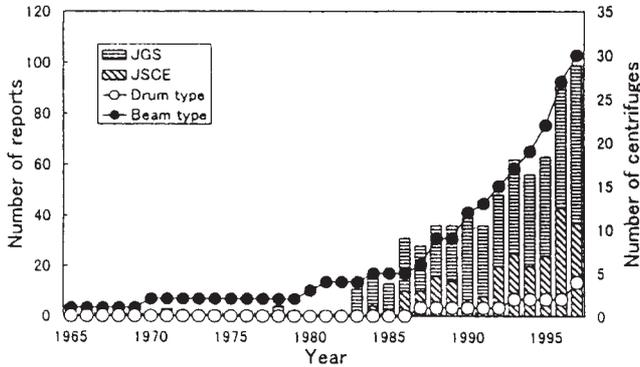


図 - 1 遠心装置の台数と発表論文数の推移 (日本)⁴⁾

文)。図 - 1 より、近年になるにつれて研究分野の多様化が進み、その中で動的問題・地震時挙動分野の占める割合が増加していることから、その重要性がうかがえる。また他分野ではCENTRIFUGE 98において地盤環境分野（主に汚染物質の地盤内拡散実験）の発表が新しく加わっており、欧州では遠心装置を用いた地盤環境研究ネットワークであるNECER (Network of European Centrifuges for Environmental geotechnic Research) が誕生しており、時代の趨勢がうかがえる。

3. 動的遠心装置の概要と現況

(1) 動的遠心装置とは

動的遠心装置とは、通常の遠心装置に加振台を搭載したものであり、遠心力が作用して実物と同じ応力状態となっている模型地盤に対し地震力を載荷して地盤の応答加速度、変位、過剰間隙水圧の経時変化等を調査・確認することを目的として実験が行われる。遠心力場における加振実験は、従来から行われてきた重力場振動台実験と比較して主に以下のような違いがある。

<長所>

極限安定状態や大変形問題も含む相似則が確立されているため、実際の地震時に生じる挙動の全てのプロセスが定量的に把握できる。

高い上載圧を受ける高盛土や大深度地下構造物等に関しても実物と同じ応力状態が再現されるため、高拘束圧における土の動的性質を正確に再現できる。模型の寸法が小さいため、短期間・低コストで実施できる。

<短所>

作用させる地震動の周波数が実物よりかなり大きくなるため（表 - 1 参照）、土の挙動の周波数依存性によっては実物の挙動と異なる可能性がある。

遠心力場では地盤内に設置された加速度計等のセンサーの大きさが見かけ上大きくなるので、超小型・軽量のものを使用する必要がある。

計測チャンネル数に制限が設けられるため、希望通りにセンサーが設置できない場合がある。

(2) 相似則

実物と同じ土質材料を用い幾何学的に $1/N$ に縮小した模型を、遠心加速度 $N(\times g, g=9.8m/s^2)$ の遠心力場において相似則が成り立つ。遠心力場において動的実験を実施する場合は、時間の相似則が圧密浸透問題と異なるため、 N 倍の粘性抵抗を持つ間隙流体を用いて浸透時間を $1/N$ とし、時間の相似則を動的現象に合わせる工夫がなされる。

(3) 動的遠心装置の現況

1998年現在、遠心載荷装置を有する国内の研究機関は35機関であり、装置台数は37（大学：19台・省庁：7台・建設会社：7台・コンサルタント会社：3台）である。これ

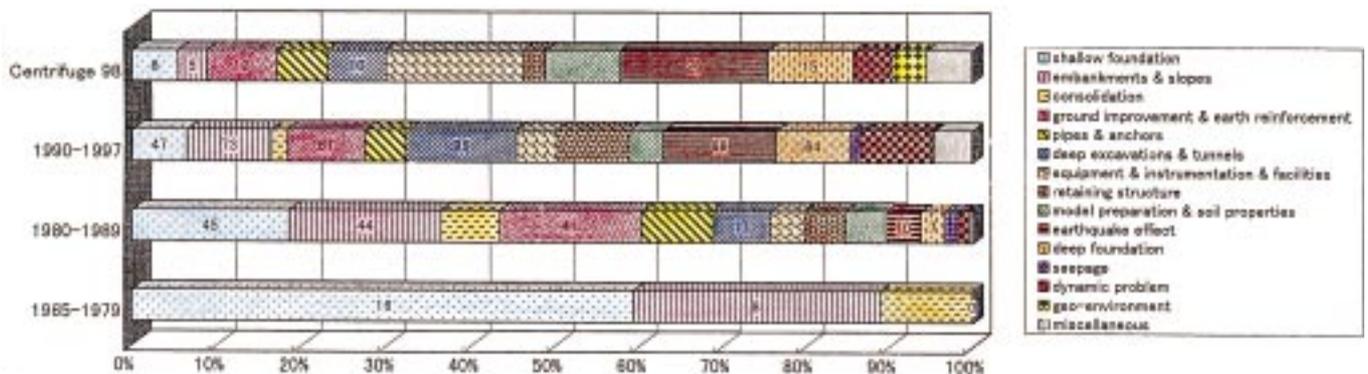


図 - 2 発表論文に占める研究分野の割合の推移⁴⁾

表 - 1 遠心載荷模型実験における相似則

物理量	相似比 (模型/実物)
応力	$\sigma_m / \sigma_p = 1 / 1$
ひずみ	$\epsilon_m / \epsilon_p = 1 / 1$
変位 (長さ)	$\delta_m / \delta_p = 1 / N$
力	$F_m / F_p = 1 / N^2$
曲げ剛性	$(EI)_m / (EI)_p = 1 / N^4$
伸び剛性	$(EA)_m / (EA)_p = 1 / N^2$
時間: 圧密現象 動的現象	$t_m / t_p = 1 / N^2$ $t_m / t_p = 1 / N$
動的加振加速度	$\alpha_m / \alpha_p = N / 1$
動的加振周波数	$f_m / f_p = N / 1$

注)添字の p は原型(prototype),m は遠心模型(model)を表す。

らのうちビーム型装置は32台を占めており(残りはドラム型) 加振装置を併せ持っているビーム型装置は15台である。その中の省庁・建設会社・大学および日本工営に設置された装置の仕様一例を表-2に示す。表-2に見られるように、建設省土木研究所・竹中技術研究所などに見られる有効半径6m強、遠心載荷容量400g・ton強といった巨大装置を除いては、有効半径2m前後、載荷容量100g・ton前後、搭載可能な質量と加振加速度より得られる起振力は4~6tonと、中規模クラスの装置が殆どである。また、設定周波数範囲は概ね10~400Hz程度となっている。なお表-2には記していないが、かねてよりUniversity of California, Davisの遠心装置を用いて実験を行っていた大林組が独自の遠心装置を設備する準備をしており、またコン

サルタント会社では建築系最大手の日建設計が本年度の地盤工学会年次学術講演会の展示ブースで動的遠心装置を用いた実験例を宣伝の中核に据えるなど、各研究機関において積極的な取り組みが見られるようになってきている。

4. 日本工営の動的遠心装置

(1) 構成

動的加振装置用に改造した日本工営の遠心装置図を図-3に、今回導入した加振装置を写真-1に、回転中の遠心装置本体(加振装置搭載)を写真-2に示す。

本加振装置は日立製作所製で電気油圧サーボ方式により起振力を発生させており、実験室外に設置された油圧源装置、回転軸周りに取り付けられているアキュムレータ、加振テーブルおよびそれを起振させるアクチュエータ、そして模型土槽より構成される。加振力の制御および油圧の管理等は制御室内のコンピュータと油圧操作盤により行われる。

本加振装置の仕様を表-3に、加振限界線図を図-4に示す。正弦波加振では図-4中の太線内領域の条件で加振可能である。表-2および表-3に見られるように本加振装置は他機関のものと比較して中規模クラスに位置する。しかし、その遠心載荷機能および加振機能は同クラスの中ではトップレベルであり、建設省土木研究所等の巨大装置の機能に匹敵すると言える。

(2) 特長

本加振装置は以下のような特長を持つ。

表 - 2 動的加振装置を設備した研究機関の遠心装置仕様一例

研究機関		日本工営	建設省 土木研究所	運輸省港湾 技術研究所	竹中 技術研究所	清水建設	鹿島建設	大成建設	東洋建設	西松建設	東京工業 大学	中央大学
遠心力 載荷 機能	最大遠心加速度 ($\times g^{*1}$)	250	150	113	200	200	200	200	250	150	150	150
	有効回転半径 (m)	2.80	6.80	3.80	6.50	3.35	2.70	2.65	2.20	3.80	1.25	3.05
	最大搭載質量 (kg)	1000	5000	2780	5000	750	1000	400	300	130	250	660
	模型搭載スペース ($L \times W \times H$) (mm)	1000×800 ×900	2400×1300 ×1000	1800×1800	2000×2000 ×1100	-	800×1000 ×800	1000×800	600×400× 300	1250×1250 ×1250	-	1100×500 ×1250
	遠心載荷容量 (g・ton)	100	-	312	-	150	110	80	75	200	38	100
動的 加振 機能	耐遠心加速度 ($\times g^{*1}$)	100	100	50	100	100	50	50	50	50	50	50
	最大搭載質量 (kg)	250	定格1000 (最大2000)	500	500	450	定格175 (最大250)	180	100	定格500 (最大2400)	50	200
	最大加振力 (ton)	12	60	12.5	12	4.5	6.3	3.6	2.0	32.0	-	2.0
	入力加速度 ($\times g^{*1}$)	25	40	25	20	10	25	20	20	40	-	10
	入力周波数 (Hz)	10~400	10~400	10~250	~200	40~400	25~350	30~300	-	10~300Hz	100Hz	50~300Hz
	最大速度 (cm/sec)	40	90	60	-	-	20	30	-	90	-	-
	最大振幅 (mm)	±3.0mm	±5.0mm	±6.0mm	±3.0mm	-	±3.0mm	±2.0mm	±2.5mm	±5.0mm	±0.5mm	±0.5mm
	テーブル寸法 ($L \times W$) (mm)	700×400	-	-	1220×530	950×650	700×400	-	-	1000×700	-	450×950
加振制御方式 ^{*2}	油圧式	油圧式	油圧式	油圧式	電磁式	油圧式	油圧式	油圧式	油圧式	油圧式	電磁式	

*1

1g(重力加速度)=9.8m/sec²

*2

油圧式: 電気油圧サーボ方式、電磁式: 電磁デジタルフィードバック方式

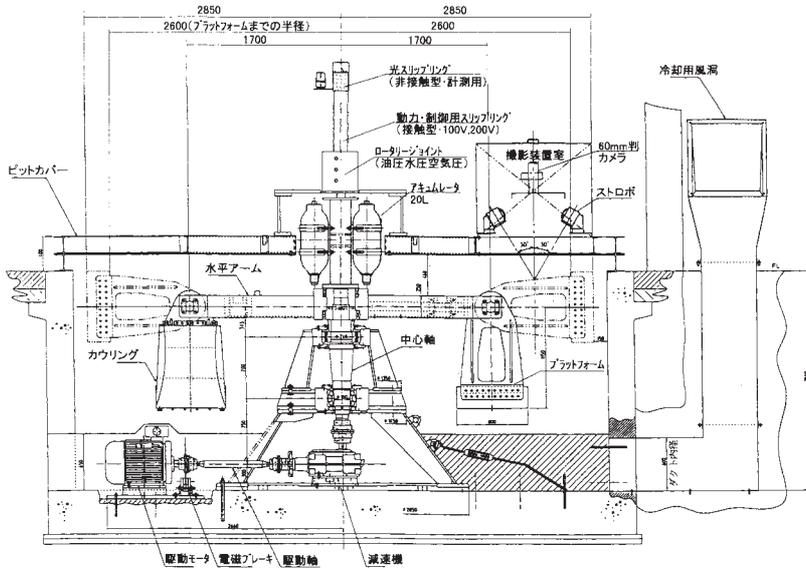


図 - 3 日本工営の遠心装置図(動的加振用に改造)

表 - 3 動的加振装置仕様

項目	遠心機型	仕様	
		縮尺1/100	縮尺1/50
加振機能	最大速度	40cm/s	40cm/s
	最大振幅	±3.0mm	±150mm
	最大加速度	25g	245cm/s ²
	加振周波数	10~400Hz	0.1~4Hz
	加振方向	回転に対して垂直方向	
	最大加振力	12,000kgf(118kN)	
装置	耐遠心加速度	100g	
	テーブル寸法	(L)700mm×(W)400mm	
	最大積載質量	250kg(試料+容器)	
	油圧供給方式	アクチュエータ+ロータリージョイントからの連続供給	
	油圧源	供給側20L×1台, 戻り側20L×1台	
	吐出量	25l/min	
制動的加振	圧力	210kgf/cm ² (20.6MPa)	
	電動機	11kW, AC200V, 50Hz	
使用ポート数	供給1, 戻り1		
制御方式	電気油圧サーボ方式		
制御軸数	水平1軸方向加振		
制御モード	加速度または変位		
加振波形	正弦波、地震波、ランダム波		

※ 1g=9.8m/s²

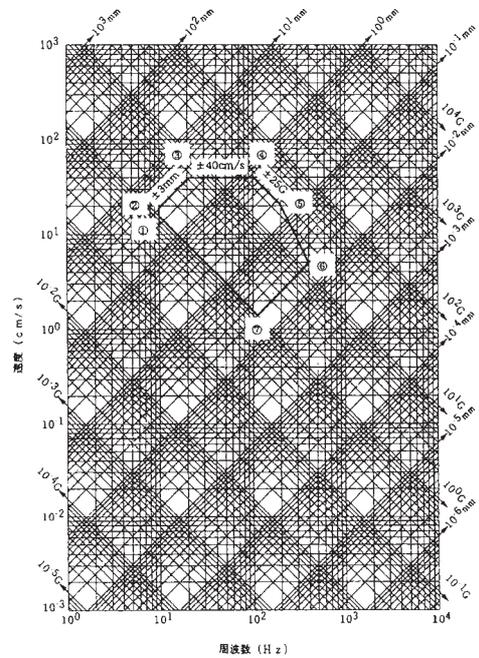


図 - 4 加振限界線図(正弦波加振)

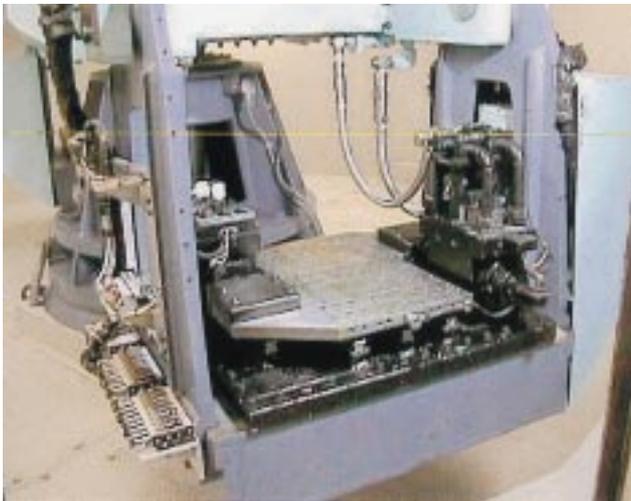


写真 - 1 動的加振装置



写真 - 2 回転中の遠心装置本体(遠心加速度: 30g)

1) 連続加振が可能

本加振装置の油圧は地上の静止側にある油圧源で発生させるが、その圧力はロータリージョイントを介して常時遠心ピット内回転側へと供給される。このため加振後油圧が低下しても瞬時に蓄圧され、再加振することができる。

2) 補正加振が可能

通常、制御コンピュータから加振装置へ目標波形を送ると、加振テーブルに容器を設置した系が持つ固有振動数のために目標波形とは異なった応答波形を示す。しかし本加振装置では、目標波形と応答波形の違いを比較・修正する事を繰り返して最適な指令波形を作成することができる。

3) 目的に応じた地震波形の入力が可能

本加振装置は 正弦波、 実地震波、 ランダム波の 3

種類が入力可能であるため、目的に応じた地震波形を設定できる。

4) コリオリ力と遠心加速度分力の影響を軽減する構造

遠心载荷によりスイングアップした後の加振テーブルが天地方向に加振することにより、加振加速度への遠心加速度分力の影響およびコリオリ力の影響を軽減する構造となっている。

動的遠心装置が普及し始めた頃は各研究機関とも遠心装置本体が小さかったために、図-5に示すように加振方向を装置回転接線方向とする装置が主流であったので、遠心加速度分力の影響により模型容器端部付近では想定とは異なる加振加速度が発生していた。しかし図-6に示すような天地方向加振ではこの影響を軽減できる。またコリオリ力も回転中には常に模型容器に作用するが、作用方向は接線方向であるため天地方向加振ではこの影響を軽減できる。日本工営製の遠心装置ではプラットフォーム型の遠心装置本体を採用しており、機器搭載スペースに余裕があるために上記のような加振テーブルの配置が可能となった。

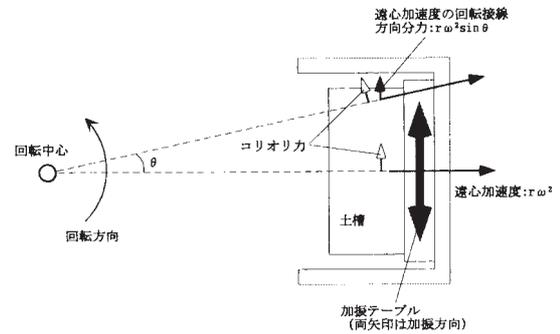


図-5 回転接線方向加振時の遠心速度分力とコリオリの影響 (初期の動的加振装置)

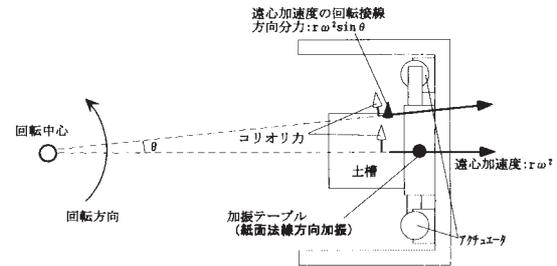


図-6 天地方向加振時の遠心速度分力とコリオリの影響 (最新の動的加振装置、NKも含む)

5. 加振性能試験

以下に加振装置本体の性能試験結果について述べる。なお、本装置以外に建設省土木研究所と西松建設の加振装置を作製した日立製作所によれば、波形再現性等のパフォーマンスは本装置が最も優れているようである。

(1) 正弦波による加振限界性能試験

今回、新たに導入された加振装置の性能を確認するために、図-4に示した加振限界線図において加速度、速度、変位、周波数の4項目の限界を示す各折点部において下記の条件で正弦波による加振実験を実施した。

加振制御方法の相違：加速度制御、変位制御

遠心加速度の大小：重力場、20g、50g、100g

搭載質量負荷の大小：無負荷および最大搭載質量250kg

図-7に試験結果の一例として遠心加速度50gにおける250kg搭載時の限界線図の、にあたる条件での変位振幅図及び加速度振幅図を示す。限界線図上の試験結果としては非常にきれいな波形が得られている。

(2) 実地震波の再現試験

実地震波形を以下の条件で再現させた。

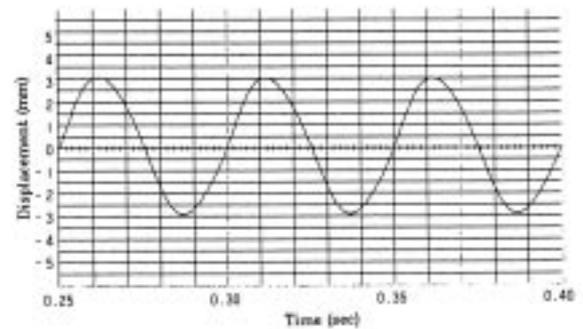
地震波形：神戸地震波

遠心加速度：50g

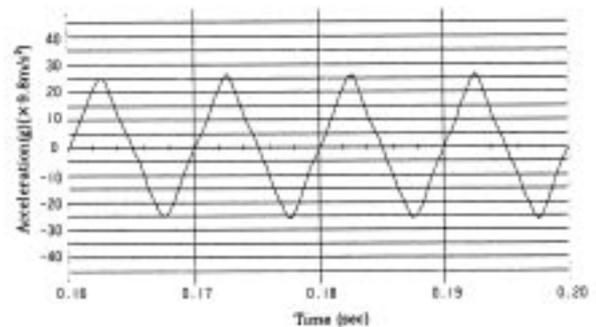
搭載質量：250kg

最大加速度：±20.0g { 392cm/s² }

目標とする地震波形およびスペクトルを図-8(a)に、

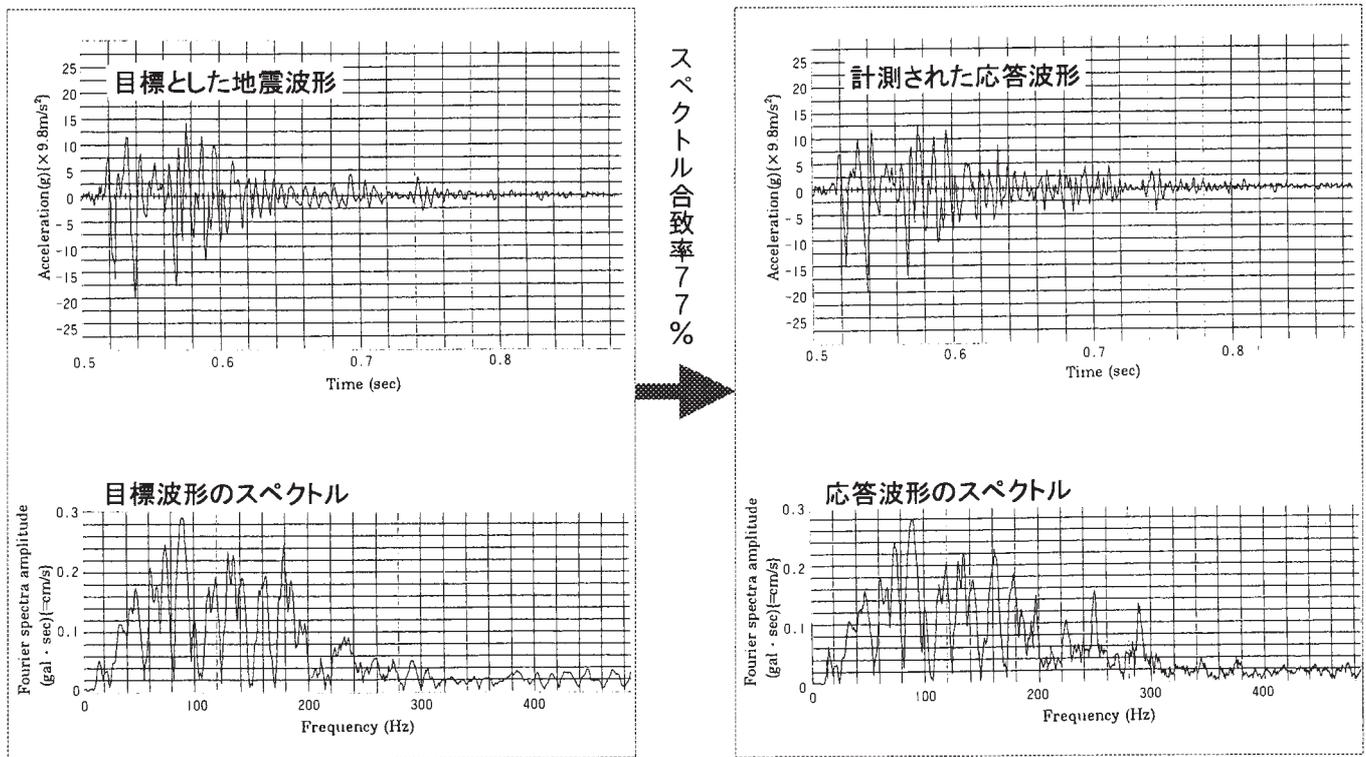


(a) Point での波形



(b) Point での波形

図-7 加振限界線図、の波形



(a) 目標とする地震波形とスペクトル

(b) 計測された応答波形とスペクトル

図 - 8 実地震波の波形とスペクトル (目標と応答)

計測された応答波形および応答スペクトルを図 - 8 (b) に示す。波形の再現性も良好で、スペクトル合致率として 77% という高い値が得られているのがわかる。

6. 動的加振実験で使用する加速度センサー検定試験

(1) 検定試験の概要

加振実験に使用する加速度センサーは以下の項目を目的として実際の使用条件である、遠心加速度が载荷された状態での検定試験を実施した。同様に動的加振実験で用いる間隙水圧計なども、実際の使用条件である遠心载荷された状態でのシリコンオイル等の間隙流体圧力を実際に測定して検定を実施している。

加速度センサーは、加速度検出の構造によりひずみゲージ型 (振動素子の支柱に貼られたひずみゲージの抵抗変化を検出)、圧電型 (衝撃加速度により振出される電荷を検出する) に大別される。そのような構造形式による加速度波形特性の相違を把握する。もともとこれらの加速度センサーは非常に大きな重力が作用している状態である、遠心加速度場での使用を条件に設計されているわけではない。そのため、実験での使用条件である各遠心加速度が作用した条件でのキャリブレーションを実施し、重力場で

実施された検定結果を補正する必要がある。

特に圧電型加速度センサーは個々の個体によりセンサー感度のばらつきがあるために、信頼できる加速度センサーの結果をもとに、それぞれについてキャリブレーションを実施する必要がある。

検定試験を実施したのは、写真 - 3 に示す小型軽量で主に地盤内各部に設置される圧電型加速度センサーと写真 - 4 に示したひずみゲージ型加速度センサーである。圧電型加速度センサーは、 $3.6\text{mm} \times 5.0\text{mm}$ の寸法で質量 0.16g と非常に小型軽量であり、模型地盤に与える影響が非常に小さい。また応答特性は非常に高応答であり、使用範囲の周波数特性 ($10 \sim 400\text{Hz}$) に対して全く問題とならない。圧電型センサーは高感度高応答であるが、ややばらつくこともあり、信頼性にやや劣る面がある。それに対してひずみゲージ型は高信頼性であるが、振動素子の応答が時間遅れを伴うことから応答特性に問題がある。

検定は加振テーブル上に圧電型 6 個、ひずみゲージ型 3 個の各加速度センサーを接着固定し、重力場および遠心加速度 50g 場において正弦波による実加振を行い、それらの計測波形について検討した。

(2) 検定試験結果

検定試験結果の 1 例として、遠心加速度 50g の遠心力場

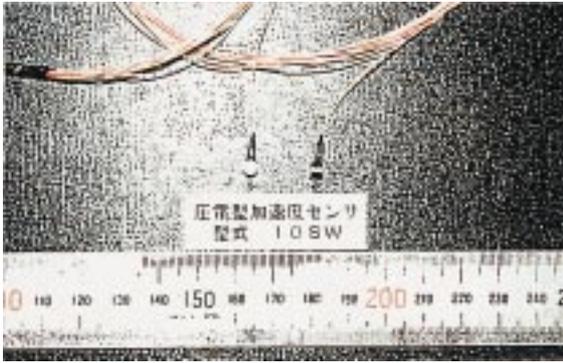
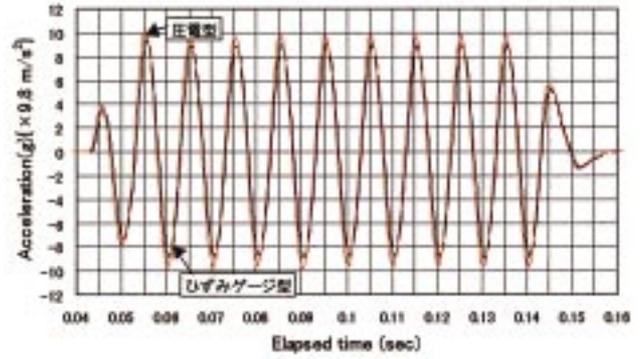


写真 - 3 圧電型加速度センサー (10SW)



(a) 全加速度波形 (100Hz、計測 5 kHz)

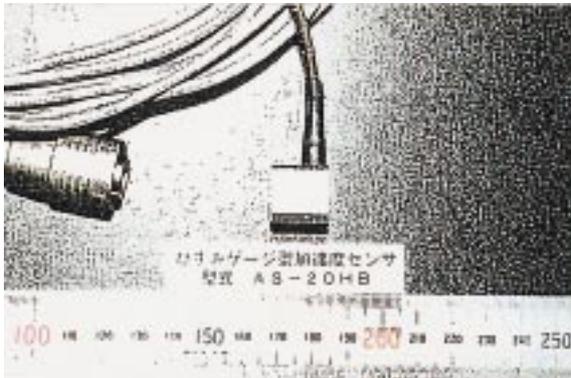
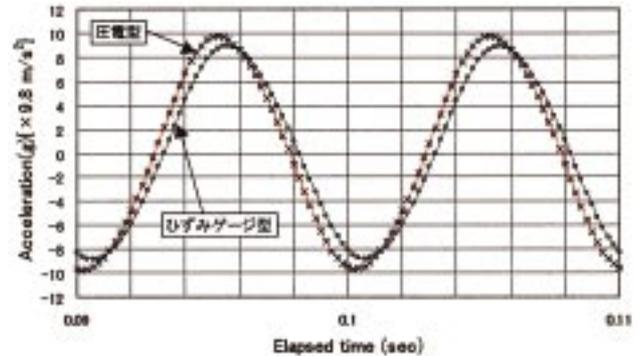


写真 - 4 ひずみゲージ型加速度センサー (AS-20HB)

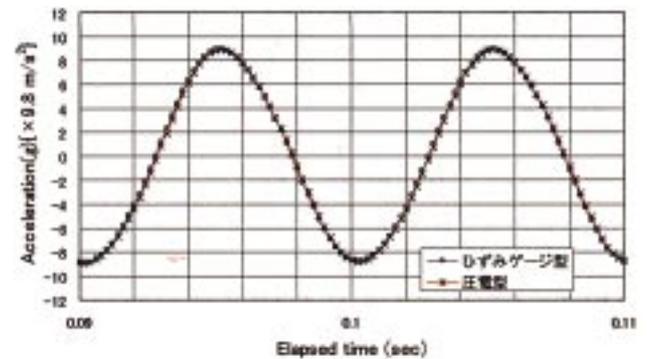


(b) 全加速度波形 (5 ~ 6 波目)

で加振実験を実施した例を図 - 9 に示す。加振は周波数 100Hz の正弦波を片振幅約 10g (実換算 : 196gal (cm/s²)) で 10 波載荷した。データ計測は 5 kHz (0.2msec.) で実施している。

加速度波形を見てわかるように、時間的なずれおよび振幅値に対してもずれを生じているのがわかる。ひずみゲージ型は振動素子の揺れを感知しているため、若干の時間の遅れを伴う。重力場の実験では問題とならない遅れであると考えられるが、相似則により模型での時間が実時間の縮尺倍となる動的遠心実験では大きな誤差を伴うこととなり、模型地盤での位相の変化と捉えられ、せん断剛性の低下と解釈されてしまう危惧がある。それに対し圧電型では時間的な遅れは生じていないものと考えられる。

図に示したようにセンサーメーカーの検定表による係数では圧電型では振幅値が大きく計測されている傾向が見られる。そのために振幅値については信頼性が高いと考えられるひずみゲージ型の加速度センサーにより補正を実施している。振幅値の補正および時間遅れの補正を実施したのが図 - 9(c) である。両センサーによる応答加速度は完全に一致しているのがわかる。



(c) 補正された加速度波形 (5 ~ 6 波目)

図 - 9 検定試験の加速度波形一例

7. 均一盛土地盤を対象とした加振実験例

基礎的な土構造物の地震時挙動を調査することを目的として、均一盛土地盤を対象として加振実験を以下のように実施した。

(1) 実験方法

実験は盛土の密度を変えて以下の 2 ケースを実施した。なお、実験は内寸 H : 500mm × W : 800mm × D : 200mm のアルミ製剛土槽内に模型地盤を作製し、遠心加速度 50g 場で行った。

表 - 4 実施したケース一覧

ケース名	想定状況	備考
CASE1	不良施工盛土	Dc=80%(盛土部)
CASE2	良施工盛土	Dc=90%(盛土部)

Dc：密度

1) 実験モデル

図 - 10にCASE 1、CASE 2 の実験モデルを示す。両ケースとも盛土勾配を1：1.5、実物換算した盛土高を 5 m、基盤部をDc = 90%密度とした。また、図 - 11はセンサー設置位置図（両ケース共通）であり、頭文字の“ A ”は加速度センサーを、“ L ”はレーザー変位計を表す。加速度センサーは振動台上を含め9点に設置し、主に左法肩から深度方向と法面付近の応答加速度分布を計測できる配置とした。レーザー変位計は左法肩と法尻の鉛直変位を計測するために設置した。

容器の境界条件を実際の地盤に近づけるため、容器底面には耐水性のサンドペーパー（ J \$63258 J 180 ）を張り付けて地盤の滑動を防ぎ、容器加振方向両端面の境界は法尻との間に緩衝領域を設けて盛土に与える影響を軽減した。また、後述するように地盤材料の間隙流体としてシリコンオイルを使用していることから、容器前後面には摩擦は発生しないものとして処理は施していない。

2) 模型地盤材料

盛土および基層部の材料として豊浦砂とカオリン（竹原化学工業製）を乾燥重量比 8：2 の割合で混合したものを使用し、その間隙流体として遠心力場における圧密浸透現象と動的現象の時間に関する相似則を近づけるためにシリコンオイル（kf96-50cs、公称動粘度 = 50 ± 2・5cSt、信越シリコン製）を使用した。

表 - 5に地盤材料の土質性状試験結果一覧を示す。今回使用した地盤材料は日本統一分類法に従えば砂質土 { SF } に属する。また、締固め試験より得られた結果より、地盤の密度は以下ようになる。

CASE 1 の盛土部：湿潤密度 $\rho_t = 1.685 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

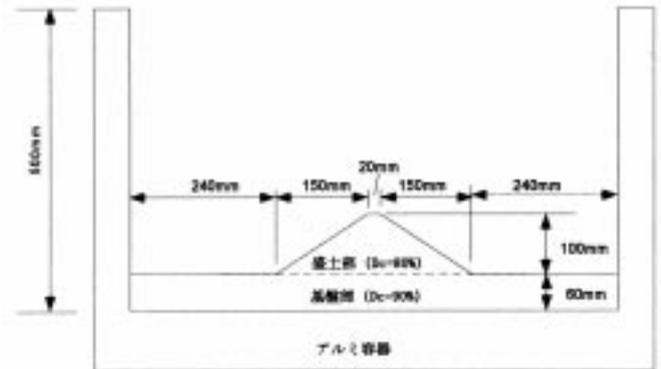
CASE 2 の盛土部：湿潤密度 $\rho_t = 1.895 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

3) 加振条件

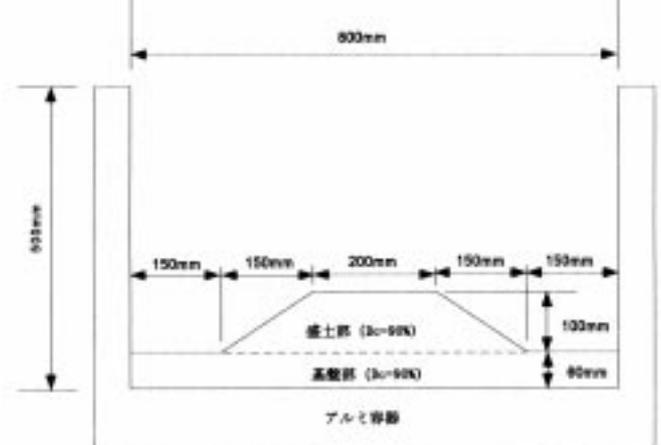
模型地盤に対する加振は 2 ステップを踏んで行った。1 ステップ目は地盤のS波速度：Vsおよび地盤の固有振動数を求めるために地盤に影響を与えない程度の振幅の小さいパルス波を入力し、2 ステップ目に表 - 6 に示す本加振波を入力して盛土地盤の挙動を調べた。本加振波はCASE 1 では1回、CASE 2 では2回载荷した。

4) 実験手順

実験は以下の手順で行った。

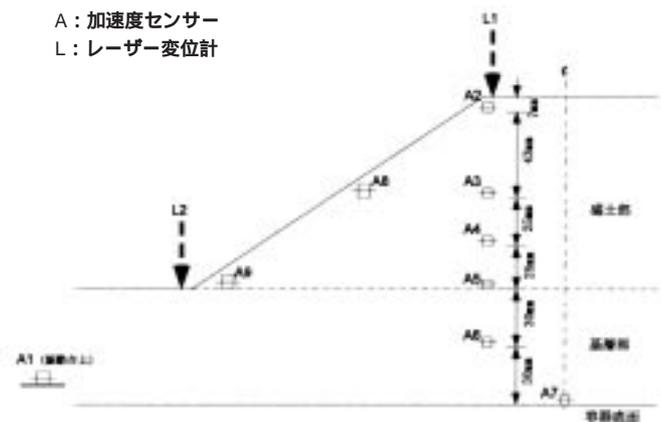


(a) CASE1



(b) CASE2

図 - 10 実験モデル



A：加速度センサー
L：レーザー変位計

図 - 11 センサー設置位置図 (CASE 1、2 共通)

遠心力载荷（50g到達後、盛土変位量が安定するまで待機）

パルス波加振

CASE 1 では目標加速度20,39,78,118cm/s²（実物換算値）を1回ずつ（118cm/s²は2回）加振

CASE 2 では目標加速度39,78cm/s²（実物換算値）を

表 - 5 地盤材料の地質性状試験結果一覧

項目		結果
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$		2.662
粒度分布	最大粒径(mm)	0.425
	平均粒径(mm)	0.150
	細砂分(425~75 μm)(%)	80
	シルト分(75~5 μm)(%)	8
	粘土分以下(<5 μm)(%)	11
	均等係数 U_c	29.4
	由率係数 U_c'	14.4
コンシステンシー	液性限界 w_L (%)	NP
	塑性限界 w_p (%)	NP
	塑性指数 I_p	—
締固め	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.897
	最適含水比 w_{opt} (%)	11.0
動的変形特性 ($\sigma_v=58.9\text{kPa}$ 時)	$\bar{Q}_{max}(\text{kgf/cm}^2 \times 98.1\text{kPa})$	540.6
	H_{max}	0.2394

※締固め、動的変形試験の潤滑流体はシリコンオイル使用。

表 - 6 本加振波の設定値

条件	設定値
波形	正弦波
制御方法	加速度制御
加振加速度上限	20g(392gal, 1gal=1cm/s ²)
周波数	100Hz(2Hz)
波数	20波

※ ()内は実物換算値

1回ずつ加振

本加振

CASE 1 : 1回加振

CASE 2 : 2回加振

遠心力停止

(2) 実験結果と考察

以下に実験結果を示す。なお、特に断らない限り数値は実物換算値を表記した。

1) 盛土変位量

CASE 1 およびCASE 2 の法肩部鉛直変位量の変化を図 - 12に示す。両ケースとも初めの本加振で大きな変位が生じているが、CASE 1 では盛土高の約1割に相当する90cmの沈下が生じており、これはCASE 2 の4倍以上の大変形である(写真 - 5)。CASE 1 とCASE 2 は天端幅が異なるため、単純に比較することは出来ないが、天端幅の差異が変位に多大な影響を与えるとは考えにくいことから、

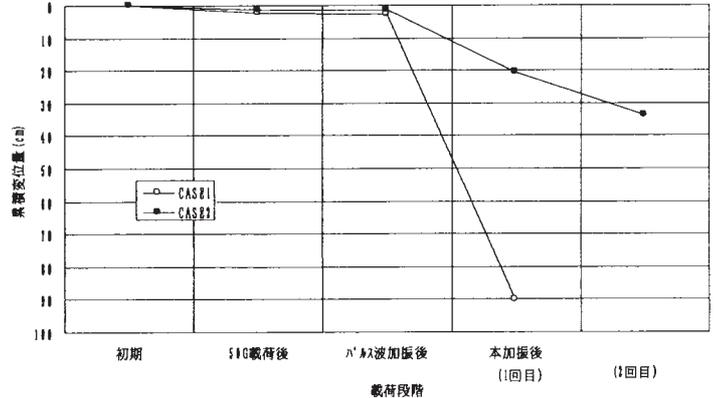


図 - 12 法肩部鉛直変位量の変化

加振によって生じる変形量は密度に大きく依存しており、 $D_c=80\%$ と 90% ではその変位量に多大な差が生じているものと思われる。また、法尻部鉛直変位量は法肩部に比べて非常に微小な変形であったため図示していないが、CASE 1 では全く変形していなかったのに対してCASE 2 では0.6cmの隆起が発生した。このことは、CASE 1 の変形は盛土内部のみの現象に留まったのに対してCASE 2 の変形は円弧滑りのような破壊が発生した可能性があることを示唆している。

2) S波速度: V_s とせん断剛性率: G

各加速度センサーにパルス波が到達した時間と加速度センサー間の距離から地盤のS波速度: V_s を算定した。法肩より深度方向へのS波速度分布を図 - 13に示す。また、算定した V_s より弾性波動論に基づいた以下の式で求めたせん断剛性率の深度方向分布を図 - 14に示す。

$$G_{max} (\text{kgf/cm}^2 \{ \times 98.1\text{kPa} \}) = \rho \cdot V_s (\text{cm/s})^2$$

ここで、 $\rho = t/g$: 質量密度 ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$)

両図とも、深度が増すに従い V_s および G が増加しており、拘束圧に依存する傾向がみられる。また、CASE 1 と比較してCASE 2 の方が大きな値をとっている。このことは、地盤の密度が高いほど V_s および G は大きな値をとるという一般的な傾向に合致するものである。両ケースで同じ密度である基層部でケース間に差があるのは、上述した拘束圧依存性により密度の高い盛土下の方が高い拘束圧を与えたためと考えられる。せん断剛性率に関して、 V_s より算出したものと動的変形特性試験より求めたものとを比較すると、同じ地盤密度($D_c=90\%$)でも V_s より算出した G の方が若干小さな値をとっている。

また、表 - 7⁶⁾より両ケースともに盛土部は沖積層の砂質土、基層部は洪積層の砂質土程度の媒質となっていることがわかる。

表 - 7 媒質の種類と弾性波速度等の関係^{*)}

媒質の種類		P波速度 v_p (m/s)	S波速度 v_s (m/s)	ポアソン比 ν	密度 ρ (g/cm ³)
軟弱土	砂	250~300	100~150	0.25~0.30	1.3~1.7
	粘土	11,500*	40~200		1.6~2.0
軟弱土	砂	1,000~1,500	300~350	0.25~0.30	1.2~1.8
	粘土	11,500*	100~200		1.4~1.8
硬土	砂	2,000~3,000	600~1,000	0.20~0.40	2.0~2.5
	粘土	3,000~3,500	700~1,000		2.5~2.7
石	砂	4,000~5,000	2,100~3,300	0.20~0.25	2.6~2.8
	粘土	4,600~6,700	2,500~3,000		2.8~3.0
上部マニウム		3,500~4,000	4,300~4,000	$\nu=0.25$	$\rho=2.5$
砂 (6.5, 9°C, 1kg/m ³)		301	—	—	0
砂 (7.0, 22~27°C)		1,588	—	—	1.0
水		1,482	1,400	0.238	0.997
コンクリート		3,128	1,790	0.167	2.3
鉄		5,050	3,120	0.285	7.86

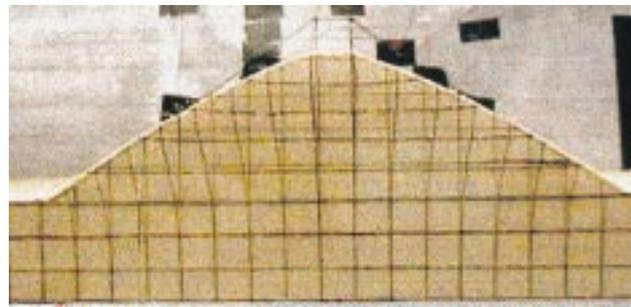


写真 - 5 加振後の変形形状 (CASE1, 直線マーキングは初期状態)

3) 盛土部の固有振動数

図 - 15および図 - 16は各々CASE 1、CASE 2 に対してパルス波を加振した際の基層部上面に対する盛土内部の伝達関数図である。基層部上面から法肩地表部付近へ近づくにつれて、図 - 15では6.5~7.0Hzでスペクトル振幅比が増大しており、この付近がCASE 1 の固有振動数であると考えられる。同様に図 - 16よりCASE 2 の固有振動数は8.0Hz付近であると考えられる。両ケースにおける固有振動数の差異は、密度が高いほど高周波成分が伝達され易くなるためであると思われる。

4) 本加振による応答加速度波形と応答倍率

図 - 17に本加振によって得られた応答加速度波形の一例を示す。また図 - 18は、加振台上に設置した加速度センサーの波形を基準とした各ケースの地盤内応答倍率分布である。応答倍率を求めるときに使用する振幅は全20波の中で平均的であると考えられる8~12波の振幅値を平均して、その値を代表振幅値とした。

図 - 18より、CASE 1 では法肩A 2 の応答倍率が約1.2倍とあまり増幅していないのに対してCASE 2 では約2倍の応答倍率を示している。このことは、CASE 1 では盛土の密度が低いために大変形が生じた代わりに揺れそのものの増幅は抑えられたが、CASE 2 では密度が高い分、変形は

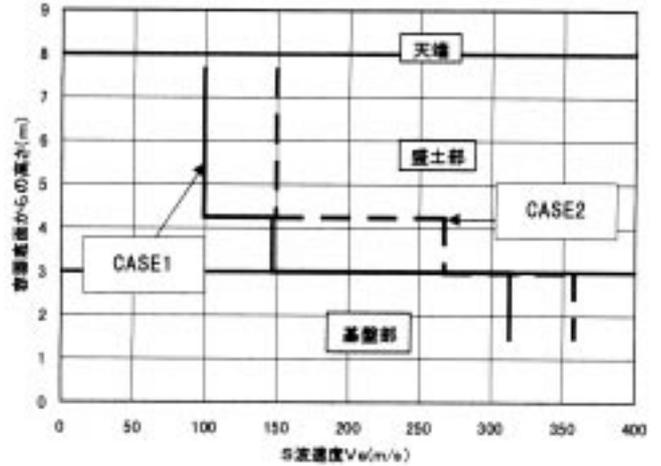


図 - 13 深度方向におけるS波速度の分布

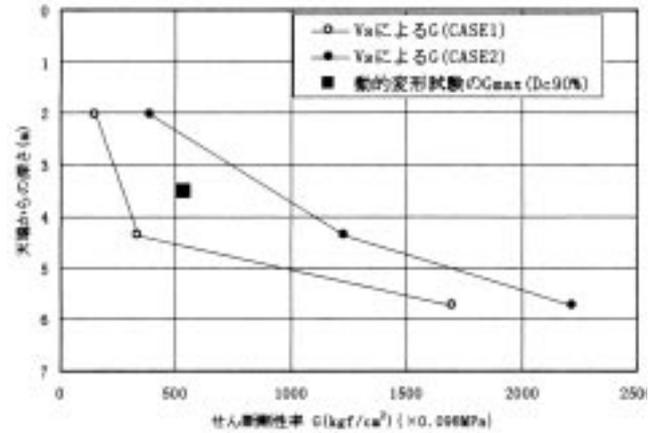


図 - 14 深度方向におけるS波速度の分布

小さいので揺れが増幅されやすい状態にあったためであると考えられる。ただし、その他の部分ではA 2のような顕著な傾向は見られないことから、CASE 1 の変形は法肩周辺の狭域で卓越していた可能性が高いと思われる。

5) Dc = 90%盛土の両盛土と片盛土の比較

本報と同じ地盤材料かつ同じ盛土高と勾配を有するDc = 90%の片盛土地盤の実験結果とCASE 2 との比較を行う。実験条件の違いは 容器幅が半分の400mmであること、境界の影響を軽減するために厚さ20mmのシリコンラバーを加振方向の容器両端に設置していること、入力地震波が異なること(釧路沖地震波を使用)、センサー設置位置が異なること、最大および最小振幅値で応答倍率を求めていることである。なお、入力波が異なることから、以下5) 6) では加振による変形や応答波形については言及していない。

片盛土地盤の加速度応答倍率分布を図 - 19に示す。CASE 2 の応答倍率分布(図 - 18)と比較すると、法肩A 2 の値がCASE 2 より小さいことがわかる。これは片盛土

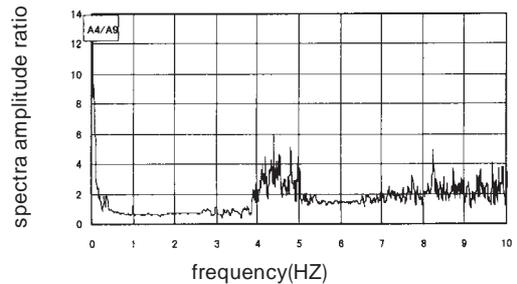
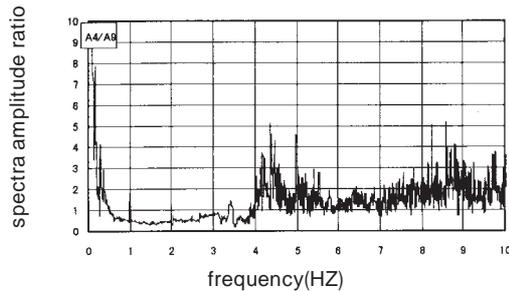
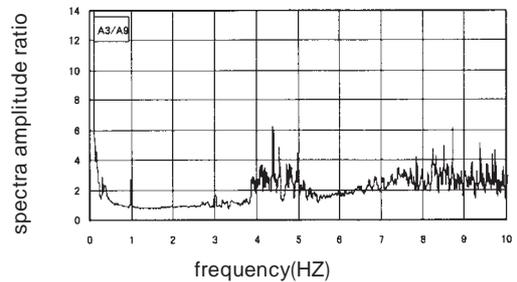
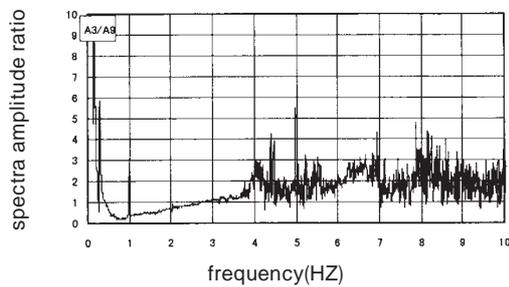
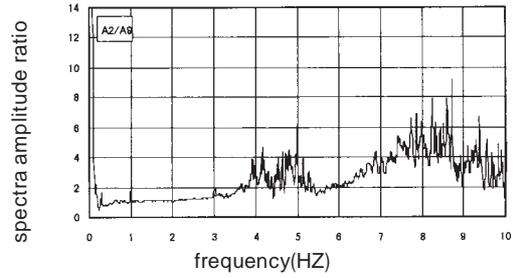
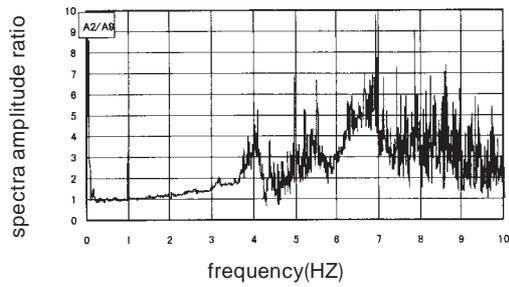
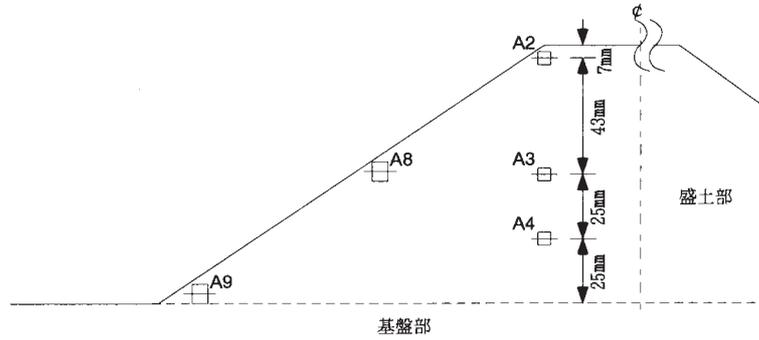


図 - 15 パルス波の基層部上面に対する伝達関数図 (CASE1)

図 - 16 パルス波の基層部上面に対する伝達関数図 (CASE 2)

のために加振方向への揺れが拘束されやすくなっているためであると思われる。また、図示していないが応答加速度波形のフーリエスペクトルより求めた地盤内伝達関数分布より、片盛土地盤の固有振動数は8.8Hzもしくは12.6Hzと考えられ、一方CASE 2の固有振動数は約8.0Hzと考えられることから、片盛土の場合の方が両盛土より高い固有振動数を持つものと思われる。

6) Dc = 90% 盛土の天端幅の違いによる比較

先述した5)の片盛土と同じ違いを持ち、天端幅が2cmと狭いDc = 90%の両盛土地盤(天端幅実物1m相当、

CASE 1と同形状)の実験結果とCASE 2を比較する。

図 - 20に天端の狭い両盛土地盤の加速度応答倍率分布を示す。CASE 2の応答倍率分布(図 - 18)と比較すると、天端の狭い場合の方が概ね応答倍率の値が大きいがわかる。これは天端が狭いためにCASE 2の形状より細くなっていることから揺れが起りやすいためであると思われる。なお、5)と同じ方法で求めた天端の狭い両盛土の固有振動数は7.8Hz(CASE 2は約8.0Hz)であることから、天端幅が盛土の固有振動数に与える影響は小さいものと考えられる。

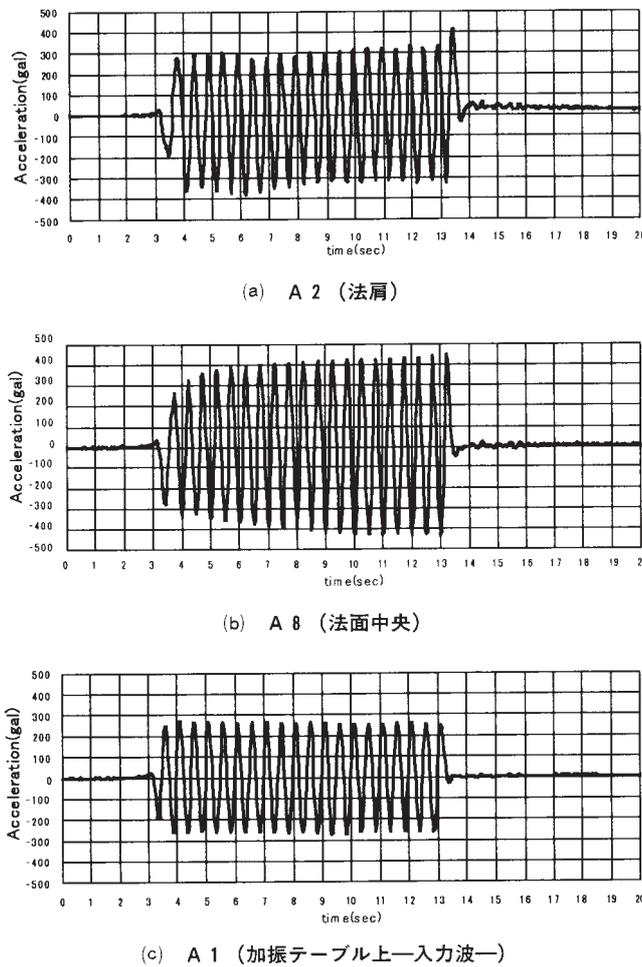


図 - 17 本加振の応答加速波形の一例 (CASE 1)

(3) 加振実験に関するまとめ

以下に均一盛土地盤に対する加振実験結果をまとめる。

室内試験と同様に模型実験においてもS波速度とせん断剛性率の拘束圧依存性および密度依存性が再現される。

盛土の密度が高いほど固有振動数が高くなる傾向を示す。

盛土の密度が低い場合は大変形が生じる代わりに法肩付近での応答加速度の増幅は抑えられ、密度が高い場合は変形が小さい代わりに応答加速度が増幅されやすい。

Dc = 90%の同一密度で片盛土と両盛土の場合を比較すると、片盛土では法肩の応答倍率が両盛土より小さくなり、かつ固有振動数は高くなる傾向を示す。

Dc = 90%の同一密度の両盛土に関して、天端幅が狭いときは広いときと比較して応答倍率が大きくなる傾向がある。しかし固有振動数に与える影響は小さい。

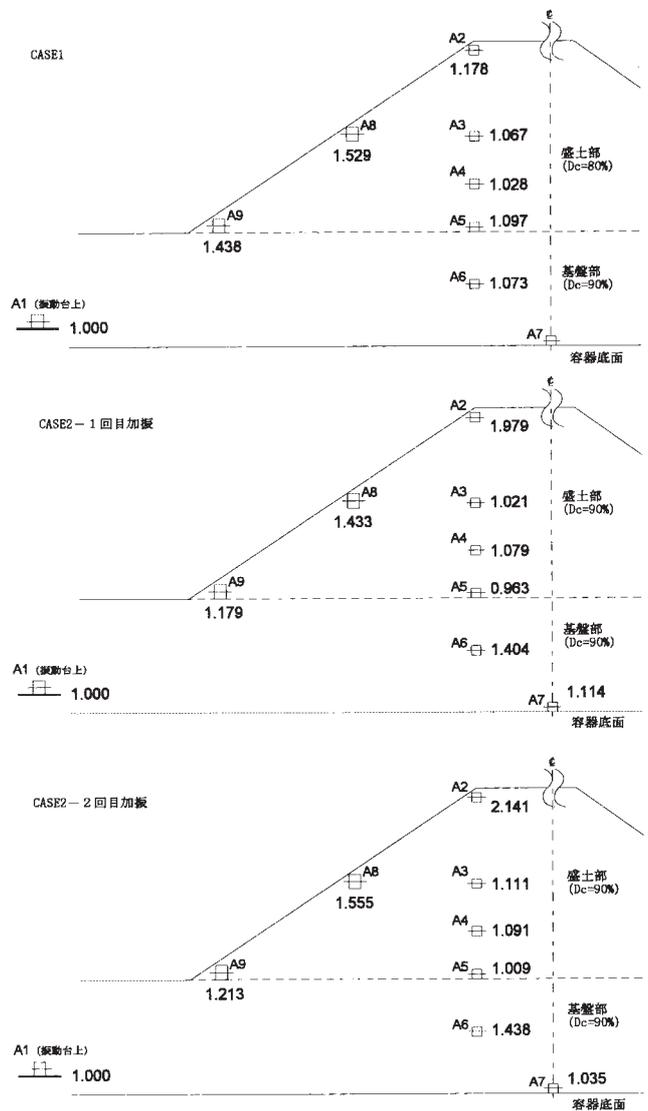
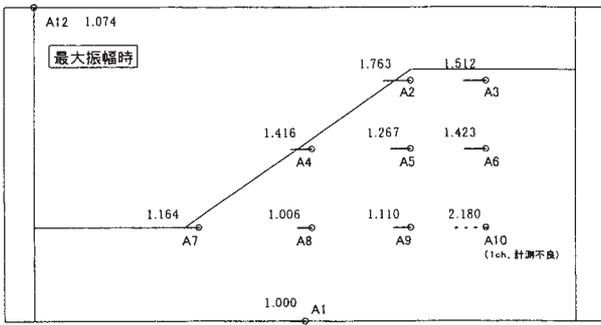


図 - 18 地盤内加速度応答倍率分布 (加振テーブル上A1に対する値)

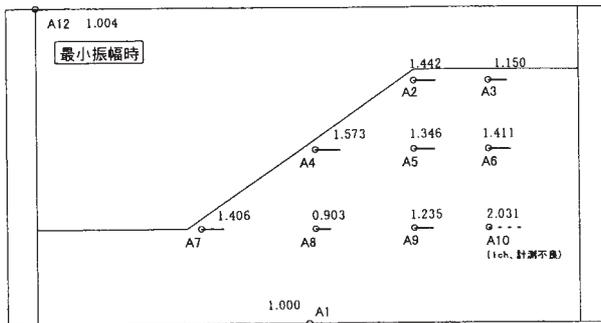
8. 今後の課題

今回は1998年度導入された動的遠心装置の性能を調査するとともに均一盛土に対して簡単な加振実験を実施して、動的遠心装置を使用することの有効性を確認することができた。しかし、地震時の地盤工学的課題としては、液状化現象をはじめ地盤の側方流動、トンネル等の地中構造物の挙動、構造物基礎の安全性等多種多様にわたっている。上記の実験を実施するためには模型容器境界の影響を軽減できるせん断土槽 (本報中の加振実験は容器両端に緩衝領域を設けたため剛土槽が使用可能であった) と、加速度センサーを数多く設置するための圧電型加速度センサー用チャージアンプを増設する必要がある。したがって今後はこれらの設備を整えた上で以下の項目に関して研究する予定である。

やや深い地盤の地震時における液状化現象の調査と対策工法の研究

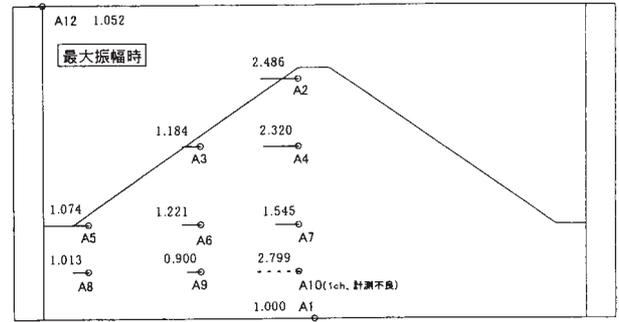


(a) 法尻方向 (A 1 : 7.660g=150.1gal 相当)

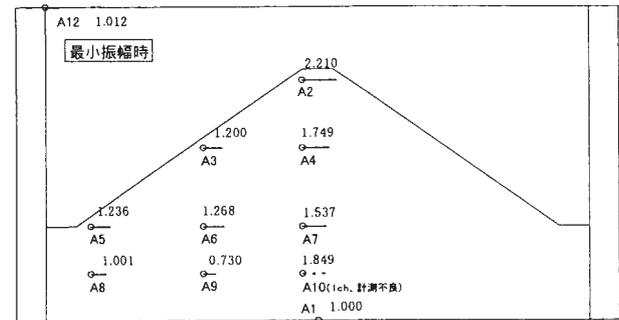


(b) 盛土背面方向 (A 1 : -8.692g=170.4gal 相当)

図 - 19 片盛土地盤の加速度応答倍率分布



(a) 法尻方向 (A 1 : 8.665g=169.8gal 相当)



(b) 盛土背面方向 (A 1 : -10.177g=198.3gal 相当)

図 - 20 天端幅の狭い両盛土地盤の加速度応答倍率分布

既設の地中構造物の地震時挙動把握とその免震・制震方法の研究

加振実験結果と高度な液状化解析手法 (FLIP) との比較検討および相互補完の方法検討

なお、最終的には上記の検討結果を踏まえて、実験結果を設計に反映する方法を探ることが重要であると考えている。

参考文献

1) Iai, S: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model

in 1g Gravitational Field, Report of the Port and harbour Research Institute, Vol.27, No.3, pp.3-23, 1988

2) 水野二十一: 実験観測 (その3) 模型振動台実験、構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム論文集、土質工学会、pp.53-60、1990
 3) 日下部治、谷口栄一: 遠心模型実験 9・適用事例 - 動的問題 -、土と基礎、土質工学会、Vol36、No.8、pp.83-89、1988
 4) Kimura, T: Development of geotechnical centrifuges in Japan, SPECIAL LECTURES AND REPORT, International Conference CENTRIFUGE 98, pp.23-32, 1998
 5) 土木学会: 動的解析と耐震設計 - 地震動・動的特性 -、技報堂出版、pp.91-95、1989
 6) 地盤工学会: 土質工学用語辞典、p.150、1996