

京都大学大学院 ○北 勝利, 小林俊一
 京都大学防災研究所 柴田 徹
 岐阜大学工学部 八嶋 厚

1. はじめに

遠心模型実験は、実物との幾何学的相似性および力学的相似性を考慮し得る小型模型実験手法として近年注目を集めており、特に1980年代以降、その振動問題への適用が精力的に試みられている。遠心模型実験における相似則の実験的検証は、斜面安定など静的問題に関しては数多く行われている。一方振動問題に関しては、香川¹⁾などにより遠心力場における相似則(表-1)の理論的検討は行われているものの、その実験的な検証例は少ない。

表-1 遠心力場における振動実験の相似則

遠心加速度	$1/\lambda$
長さ	λ
振動周波数	$1/\lambda$
応力	1
ひずみ	1
密度	1
変位	λ
振動加速度	$1/\lambda$

Lambeら²⁾は、2種類の遠心加速度場における、乾燥砂水平地盤の加振実験結果の比較を行った。しかしLambeらの実験では、³⁾加振周波数が2種類に固定されていた、⁴⁾1g場における振動実験結果との比較がなされていない、などの問題点を残している。

本研究では、遠心力場における振動実験の適用性を検討するために、1g場における大型せん断土槽を用いた水平地盤の水平方向加振実験(以下1g実験)の結果と、10g遠心力場における同種の乾燥砂試料を用いた振動実験(以下遠心実験)の結果の比較を行った。その際、模型地盤の非破壊的物性把握を目的として、せん断波速度の計測システムを構築した。

2. 実験概要

1g実験および遠心実験で用いたせん断土槽、実験条件、加速度センサ配置の概要を図-1に示す。

2.1 1g実験の概要

1g実験では横幅433cm、奥行283cm、高さ230cm、層数20段の大型せん断土槽を用いた。土槽枠は側面の板ばねで支えられ、各層は完全に分離し、層間摩擦はゼロである。また今回の実験では土槽枠質量は土試料質量の25%である。

模型地盤は、基盤れき層(層厚30cm)上に気乾状態の珪砂(平均粒径:0.32mm、土粒子比重:2.65、最大間隙比:1.22、最小間隙比:0.68)を巻き出し、ゆすりこみ沈下がなくなるまで振動台加振による締固めを行った。砂層厚は200cm、相対密度は約90%である。

振動実験は振動台加速度片振幅80galの正弦波入力による共振実験を行った。本研究では、地表面、砂層中央(GL-100cm)、砂層最下部(GL-200cm)において計測された、水平(加振)方向加速度データを利用している。

2.2 遠心実験の概要

遠心実験では横幅45cm、奥行15cm、高さ20cm、層数20段のアルミ製矩形せん断土槽を用いた。土槽枠はローラーベアリングで支持され、層間摩擦の低減が図られている。今回の実験では土槽枠質量は土試料質量の

The Experimental Study on Applicability of the Similarity Law for the Shaking Table Test and Measurement of Shear Wave Velocities on the Centrifuge: Katsutoshi Kita, Shun-ichi Kobayashi, Toru Shibata (Kyoto University) and Atsushi Yashima (Gifu University).

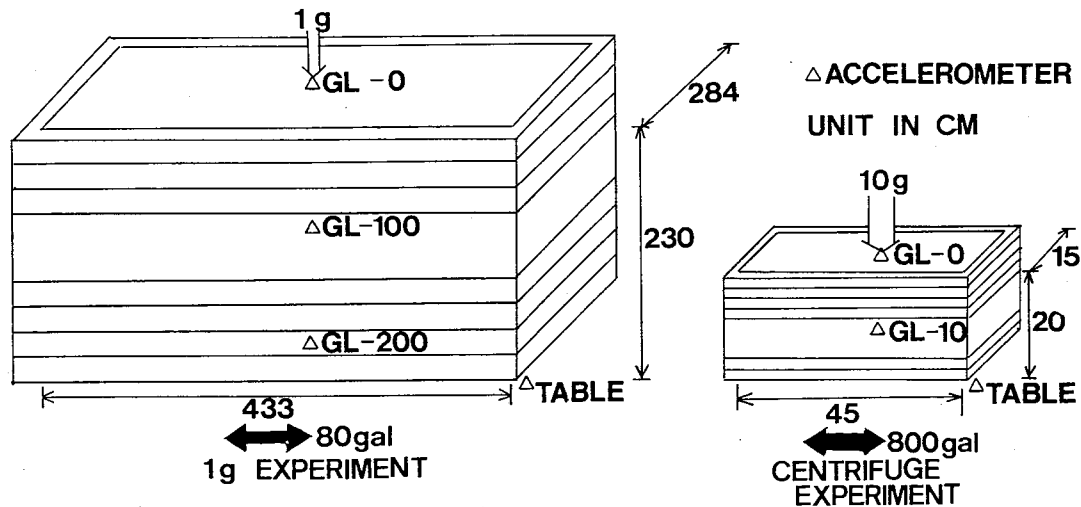


図-1 1gおよび遠心力場における振動実験の概要

31%であり、1g実験における質量比と同等である。

模型地盤は、1g実験における基盤れき層を省略し、土槽底部より珪砂を巻き出し、振動による締固めを行った。実験終了後の地盤の相対密度は95%以上であった。

1g実験の砂層厚と遠心実験の模型砂層厚の比より、遠心加速度は10gとなる。地表面、砂層中央（GL-10cm）、振動台における加速度データを利用した。遠心実験では有効回転半径2.5mの遠心模型実験装置、および油圧サーボ制御の振動アクチュエータ³⁾を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 遠心力場における定加速度振幅入力実験

遠心加速度10gにおいて、1g場換算で80galおよび150galの一定加速度振幅正弦波を入力した場合の、地表面における振動台加速度に対する応答倍率および位相ずれ（共振曲線）を図-2に示す。通常場における振動実験と同様に、入力加速度が大きい場合に最大応答倍率は小さくなり、共振周波数も低くなる傾向が見える。なお、以下周波数軸について、1g場における値に換算している。

3.2 1g実験結果と遠心実験結果の比較

1g実験では振動台加速度が片振幅80galの正弦波を入力しているが、砂層下部に30cmのれき層があるため、砂層最下部（GL-200cm）においては、各周波数によって異なる加速度振幅応答が得られている（図-3）。一方遠心実験では、砂層最下部の加速度は振動台加速度に等しい。そこで両実験において同条件下の砂層の応答性状を比較するために、遠心実験では図-3の応答倍率曲線より計算される加速度振幅を、入力加速度振幅として共振実験を行った。また1g実験においては、地表面または砂層中央部の複素振幅を砂層最下部の複素振幅で除すことによって、地表面または砂層中央部の砂層最下部に対する周波数伝達関数を求め、比較材料として用いた。

地表面における、1g実験より得られた伝達関数と、遠心実験で得られた周波数応答を図-4に示す。図-4(a)の応答倍率に注目すると、応答倍率の小さな低周波数域および高周波数域において、1g実験結果と遠心実験結果は良く一致している。また共振点付近で応答倍率が大きい周波数域では、遠心実験で得られた応答倍率は、1g実験

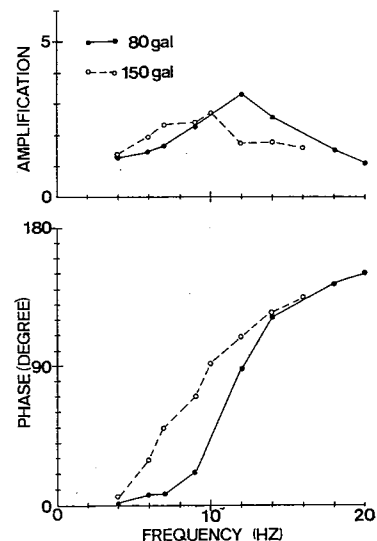


図-2 一定加速度振幅入力による共振曲線（遠心実験，地表面）

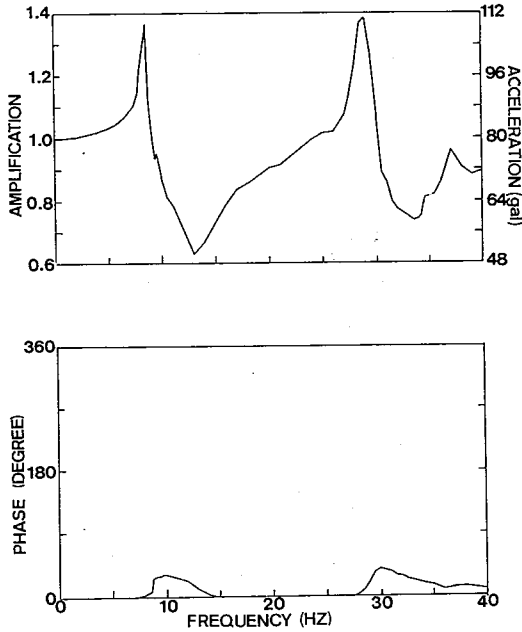


図-3 砂層最下部 (GL-200cm) における共振曲線 (1g 実験)

で得られた応答倍率と比較して小さくなっている。一方同図(b)の位相差曲線に注目すると、遠心実験結果は1g実験結果と比較して、周波数の増加に伴う位相差増加の割合が緩やかであり、特に共振点より高い周波数域においてその傾向が著しい。砂層中央部 (GL-100cm) における計測結果 (図-5) においても同様の傾向が認められる。なお共振周波数については、1g実験および遠心実験において良い一致が見られている。

1g実験結果と比較して遠心実験において最大応答倍率が小さくなり、周波数増加に対する位相差増加割合が緩慢な原因として、両実験で用いたせん断土槽の層間摩擦抵抗の影響が考えられる。即ち、層間摩擦力が各層の相対変位に依存せず一定と考えると、相対変位が大きい場合には復元力など地盤の応答特性が卓越するのに対し、相対変位が小さい場合には相対的に層間摩擦抵抗に起因する減衰の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

4. せん断波速度の計測システム

模型実験において、非破壊的な方法により模型地盤の物性を把握することは、実験の再現性を確認する上で有用である。せん断波速度は、材料剛性と密接に関係した重要な情報であるが、遠心模型実験における計測例は少ない。Gohlら⁴⁾はベンダーエレメントを用いて、遠心模型実験中に地盤のせん断波速度を計測したが、この方法ではエレメントの変形モードが複雑であり、ひずみレベルの把握が難しい問題点があり、エレメント自体も高価である。本研究では圧電振動子を波動発信源とし、2つの加速度センサを受信部としたせん断波速度の計測システムを構築した⁴⁾。本システムの特徴は、波動発信源に廉価な素子を採用したこと、受信部の加速度波形を積分することにより速度波形が得られ、速度波形とせん断波速度から、一次元波動伝播理論に基づいてひずみレベルの概略値を推定できることである。計測システムの概要を図-6に示す。

ファンクションジェネレータより発信した単発電気信号 (矩形波、両振幅 10V、周波数 10kHz) は、回転腕上のアンプで10倍に増幅される。圧電振動子の両電極に電圧が負荷されることにより、電極に挟まれた圧

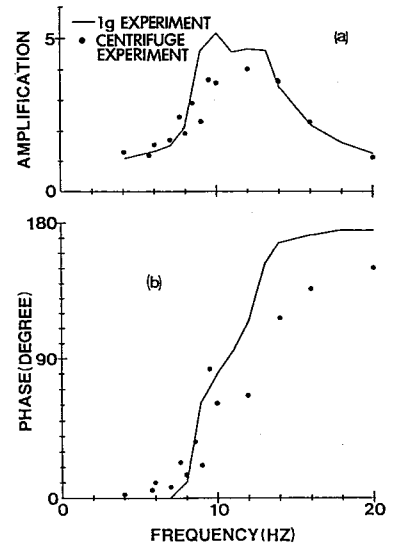


図-4 周波数伝達関数 (地表面)

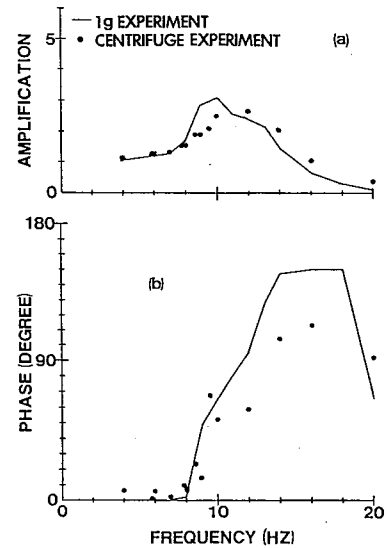


図-5 周波数伝達関数 (GL-100cm)

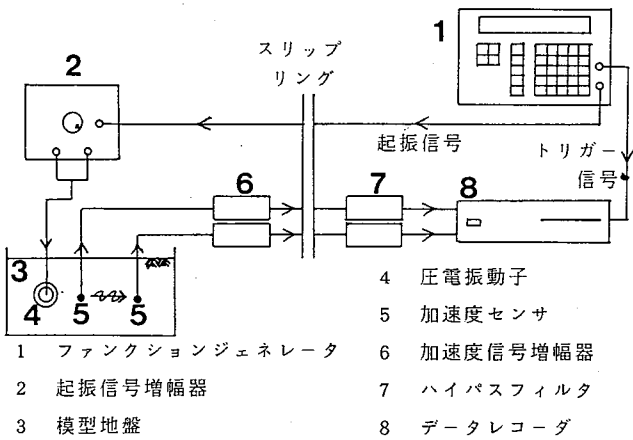


図-6 弾性波速度計測システム

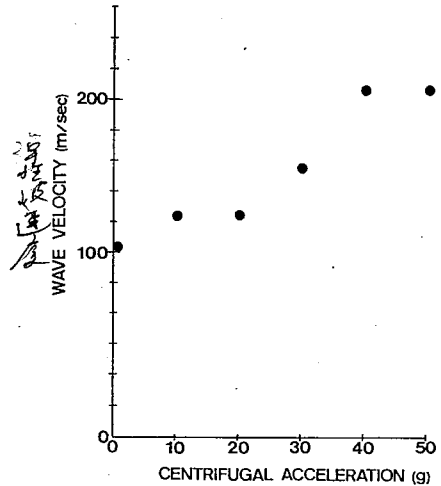


図-7 遠心加速度とせん断波速度

電素子が伸縮し、地盤内にじょう乱が生じ波動として伝播する。地盤中を伝播する波動は圧電型加速度センサ（応答周波数 2Hz～45KHz）によって感知される。センサからの信号は増幅され、ハイパスフィルタによって低周波ノイズを除去された後、データレコーダ（サンプリング周波数 20KHz）に収録される。収録された加速度データは、10回のスタッキング操作によってS/N比の向上が図られている。

本システムを用いて計測された、遠心加速度とせん断波速度との関係を図-7に示す。模型地盤材料には、前述の1-g場や遠心力場における振動実験と同じ気乾珪砂を用いている。相対密度は85%、加速度センサ深度（土被り）は9.6cm、2つの加速度センサ間の距離は3.1cmである。図-7より、遠心加速度が大きくなるに従い、即ち拘束圧が大きくなるに従い、せん断波速度も大きくなっていることがわかる。

5. おわりに

1 g場における乾燥砂水平地盤の振動実験結果との比較による、遠心力場における振動実験の相似則の適用性を検討を試みた。その結果共振周波数、応答倍率特性とも両実験結果間で概ね良好な対応を見た。しかし1 g実験と比較して、遠心実験では周波数増加に伴う位相差増加の割合が緩慢であった。この原因の一つとして、せん断土槽枠の層間摩擦の影響が考えられる。

また、遠心力場において弾性波速度を計測するためのシステムを構築した。本報告では計測精度の問題から、同システムによって計測されたせん断波速度と、振動実験結果との定量的な対応は示せなかったものの、従来より指摘されている、せん断波速度の拘束圧依存性は今回の実験においても確認された。

謝辞：本研究を行うにあたり、1 g場における振動実験結果を提供いただいた（株）大林組技術研究所 後藤洋三氏、松田 隆氏、久保寺家光氏に深謝する次第である。また、弾性波速度計測システムの構築にあたっては、摂南大学 道廣一利助教授に貴重な助言を賜った。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 香川崇章：土木学会論文報告集，第 275号，pp.69-77，1978.
- 2) Lambe, P.C. and Whitman, R.V. : Proc. ASCE, GT3, pp.265-287, 1985.
- 3) 北 勝利，八嶋 厚，柴田 徹，上田孝行：京都大学防災研究所年報，No.32, B-2, pp.207-217, 1989.
- 4) Gohl, W.B. and Finn, W.D.L.: Proc. Conf. on Prediction and Performance in Geotech. Eng., pp.419-426, 1987.
- 5) 北 勝利，小林俊一，柴田 徹，八嶋 厚：第25回土質工学研究発表会発表講演集，pp.905-906, 1990.