

遠心力場における振動台実験と地盤の動的変形特性に関する研究

佐藤正義*

比較的大型のせん断土槽（内寸法：長さ 74 cm、幅 34 cm、深さ 50 cm）を用いて乾燥砂および飽和砂の地盤を作製し、遠心力場の振動台実験を行った。乾燥砂実験の逆解析により、模型地盤のせん断剛性と減衰を求めた。その結果と 1 g 場振動台実験および中空ねじり試験の結果との比較により、せん断剛性と平均拘束圧の関係は実験方法や加振周波数の違いに影響されないことを示した。逆解析結果を用いて、模型地盤の数値シミュレーションを行い、解析は実験と良く一致することを確かめた。

Key Words: centrifuge test, shaking table test, laminar container, sand, back analysis, shear modulus, numerical simulation

1. はじめに

近年、遠心力場における振動台実験が注目されており、各研究機関で地盤の液状化等の再現実験が試みられているが、これまで実験結果の妥当性を詳細に検討したものは少ない。これは、遠心力場において振動台実験を実施することの困難さ、および振動測定の技術的困難さによるところが大きかったためであろう。しかし、遠心力場における振動台実験結果を、実地盤の地震時挙動の定量的評価を行うためのデータとし、かつ数値解析法の検証データとすることが、今後の遠心力場における振動台実験の課題であると考えられる。そのためには、実験結果に妥当性が要求されることは当然である。最も基本的な地盤のみの振動実験に関して言えば、妥当な実験結果とは模型地盤全体が一樣にせん断振動しており、土槽境界の影響が小さいものである。これまで遠心力場の振動実験において、土槽境界の影響に関しては、剛体土槽の実験では土槽境界に緩衝材を設けその効果を検討したものが^{1)~3)}、せん断土槽の実験については、Whitmanらの小型せん断土槽による実験⁴⁾があるが、土槽が小型のため模型地盤は回転運動により地盤中心部と端部の沈下量に差があるとの結果が得られている。遠心力場の地盤の振動台実験において、土槽境界の影響が少ない実験結果を得るためには、出来るだけ大きなせん断土槽を用いる必要があると考える。特に砂地盤の液状化を取り扱う問題など、大きな地盤変形を伴う実験にはせん断土槽を用いる必要があり、その実験結果の妥当性をチェックし実験の精度を向上させることが重要である。

また、遠心力場の振動台実験では想定した実地盤と模型地盤の縮尺比に応じて時間軸を短くする、すなわち模型地盤への加振周波数を大きくする必要がある。このた

め、模型地盤の変形や強度などの力学特性が、従来の要素試験で得られたものと異なっているのではないかと懸念されるが、この点に関して検討されたものは非常に少ない。風間ら⁵⁾は、遠心加速度を変化させて振動台実験を行い、模型地盤のせん断波速度（せん断剛性）と拘束圧の関係を求め、従来の要素試験結果とほぼ一致したとの結論を得ている。この結論は、定性的には妥当であるが、せん断ひずみとの関係が明確にされていない。地盤のせん断剛性はせん断ひずみによって変化するため、せん断剛性と拘束圧の関係を検討するには、模型地盤のせん断剛性とせん断ひずみの関係を把握する必要があると考えられる。

本論文は、まず研究に使用した遠心力場の振動実験装置と大型のせん断土槽について述べる。つぎに、乾燥砂地盤および飽和砂地盤の振動台実験を行い、模型地盤が妥当なせん断振動をしているかどうか、および土槽境界の影響について検討する。さらに、遠心力場における動的変形特性のひずみ速度依存性を検討するため、模型地盤のせん断剛性と拘束圧の関係を求め、1 g 場振動台実験および中空ねじり試験の結果と比較する。液状化実験において浸透現象の相似性を満足させるという観点から、高粘性流体を用いた実験が行われるが、ここでは間隙流体が水の場合と高粘性流体の場合について、両者の三軸試験を行い比較する。最後に、地盤定数の試験結果を用いて一次元地震応答解析により、実験結果を良くシミュレートできるかどうかを検討する。

2. 実験装置の概要⁶⁾

(1) 遠心装置

遠心装置を Fig.1 に示す。試験体搭載用のプラットフォームは 2 種類あり、静的実験用は剛なボックス構造で、動的実験用は比較的小型で高出力の電磁式振動起振機を内蔵した振動台である。静的実験と動的実験の実験目的

*正会員 工修 清水建設(株)技術研究所 主任研究員
(〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)

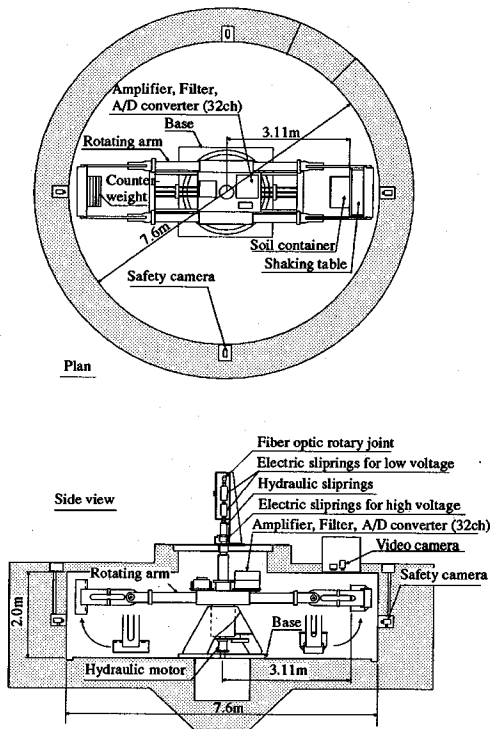


Fig.1 Geotechnical centrifuge in underground pit

によってプラットフォームを付け変える。載荷能力は、静的実験の場合は遠心加速度 $100g$ 場で質量 750 kg 、動的实验の場合は遠心加速度 $50g$ 場で質量 300 kg であり、過去の動的遠心実験装置よりも振動台搭載能力が大きいのが特徴である。

回転駆動装置は、フィードバック制御式の油圧モーターを採用した。そのため、遠心装置の回転数を自由に制御でき、 $10g$ 以下でも安定した遠心力場を発生させることが可能である。データ収録システムは、遠心機本体の中心位置近くに 32 チャンネルのアンプ・フィルター・A/D コンバーターを搭載している。回転体の中で各センサーの出力をデジタルデータに変換し、光ロータリージョイント経由で計測室内のデータ処理用コンピューターへ転送する方式を採用している。

(2) 振動加振装置

振動台実験における装置の基本諸元は、振動台設置時の回転中心からテーブル面の距離は 3.11 m 、振動台搭載質量は 300 kg 、最大加振加速度は $10g$ 、テーブルサイズは $950 \times 650\text{ mm}$ である。振動加振方式は電磁式を採用しているため、高周波数領域でも安定した加速度で加振できる。この振動台は、藤井⁷⁾が開発したものに幾つかの改良を加えたものである。また、模型地盤への入力地震動として精度良く実地震記録による加振を行うため、コンピューター制御によるデジタルフィードバック補正加振の機能を有している。

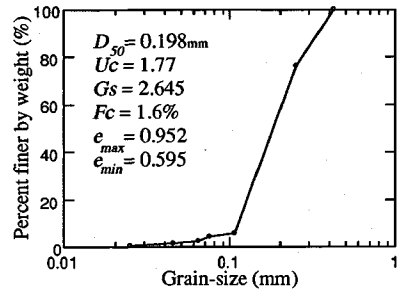


Fig.2 Grain-size accumulation curve and physical properties

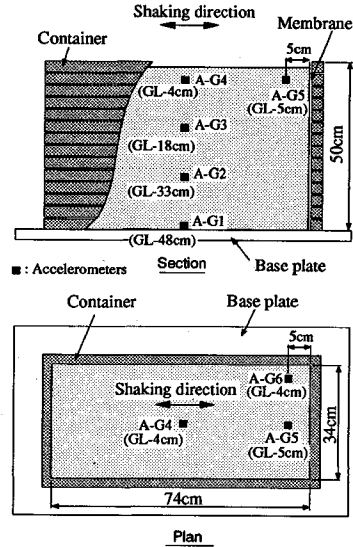


Fig.3 Dry sand model and location of accelerometers

(3) せん断土槽

遠心力場の振動実験において、土槽境界の影響を少なくするためには土槽を出来るだけ大きくする必要がありと考え、過去の遠心力場の土槽よりも大型のものを製作した。土槽のタイプは国生⁸⁾の考案によるせん断土槽を遠心実験用に製作したもので、正方形の中空スチール角パイプ(外寸法 32 mm 、厚さ 1.2 mm)を 14 段積み重ね、各々の角パイプ間には平型ベアリング(ベアリング厚さ 2 mm 、ベース厚さ 1 mm)を設置した。土槽の内寸法は、長さ 74 cm (加振方向)、幅 34 cm 、深さ 50 cm で、土槽内側には厚さ 1 mm のゴムメンブレンを取り付けた。せん断土槽底板には、模型地盤を飽和させることを目的とし、水および高粘性流体などの間隙流体を注入するため 8 箇所の注入口を設けている。

3. 遠心力場における振動台実験

(1) 乾燥砂地盤の振動台実験

a) 実験概要

遠心力場の振動台実験において、模型地盤が妥当なせ

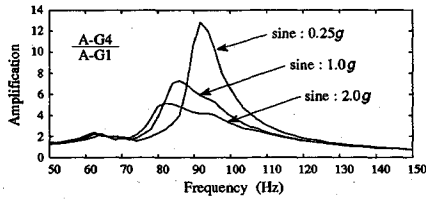


Fig. 4 Comparison of frequency response functions at ground surface

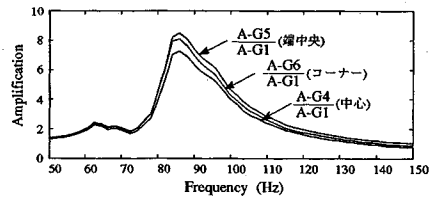


Fig. 7 Comparison of frequency response functions at three locations (see Fig. 3)

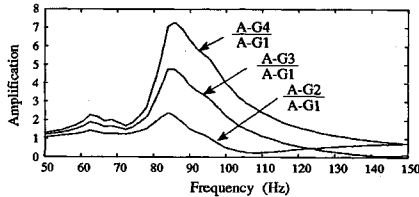


Fig. 5 Comparison of frequency response functions at three depths (see Fig. 3)

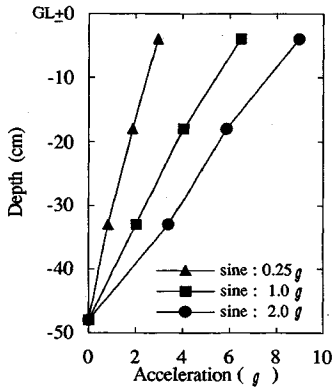


Fig. 6 Distribution of acceleration at the same time

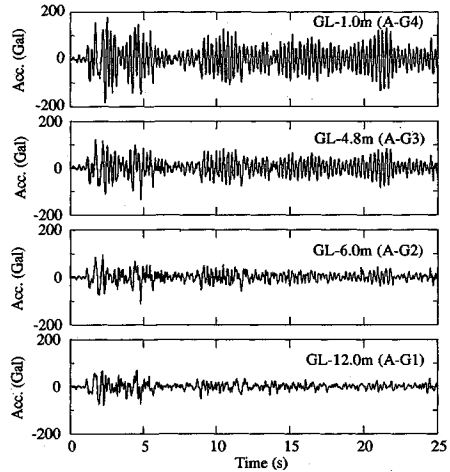


Fig. 8 Acceleration histories for dry test

ん断振動をしているかどうか、および土槽境界の影響をどの程度受けているかを検討するため、大型のせん断土槽を用いて乾燥砂地盤の振動台実験を行う。

実験に用いた地盤材料は豊浦標準砂で、その粒径加積曲線を Fig. 2 に示す。模型地盤は空中落下法(ロート法)により作成し、相対密度は 84%、乾燥密度は 1.60 g/cm³ である。模型地盤高さは 48 cm、模型地盤重心位置における遠心加速度は 25 g である。計器配置を Fig. 3 に示す。加振は正弦波加振と地震波加振の 2 種類を行う。正弦波加振は、スイープ加振で、振動数範囲は 50~150 Hz、加振レベルは 0.25 g、1.0 g、2.0 g の 3 種類である。地震波加振は、入力地震波は時間縮尺を 1/25 にしたエルセントロ波 NS 成分で、加振レベルは 2.0 g (実物対応: 約 80 Gal) である。

b) 実験結果

基盤入力加速度 (A-G 1) に対する地表付近地盤 (A-G 4) の周波数伝達関数を、正弦波 0.25 g、1.0 g、2.0 g

加振について重ね書きしたものを Fig. 4 に示す。正弦波レベルの増加に伴い、地盤の一次固有振動数の低下とともに応答倍率の低下がみられる。これは地盤の非線形現象に伴う地盤のせん断剛性の低下と減衰の増加によるものである。正弦波 1.0 g 加振の基盤入力加速度 (A-G 1) に対する各深度 (A-G 2~A-G 4) の周波数伝達関数を Fig. 5 に示す。地盤の一次固有振動数約 85 Hz において、地盤下部から上部になるにしたがって応答倍率は大きくなっている。また正弦波 0.25 g、1.0 g、2.0 g 加振について地盤の一次固有振動数における加速度振幅の深度分布を Fig. 6 に示す。せん断剛性の拘束圧依存性の効果、すなわち深さ方向のせん断剛性の変化により、地盤の振動モードが変化することが理論的に検討⁹⁾されているが、Fig. 6 に示す各加振レベルとも振動モードは、ほぼ直線形状をしており、地盤のせん断剛性の拘束圧依存性が顕著に現れていることを示している。Fig. 4~Fig. 6 より模型地盤はほぼ妥当なせん断振動をしていると考えられる。

土槽境界の影響をどの程度受けているかを把握するため、土槽中心と土槽境界付近における加速度応答の差を検討する。正弦波 1.0 g 加振の基盤 (A-G 1) に対する土槽中心 (A-G 4) と土槽端中央 (A-G 5)・土槽コーナー (A-G 6) の周波数伝達関数を Fig. 7 に示す。地盤の一次固有振動数において、土槽中心と土槽端中央・土

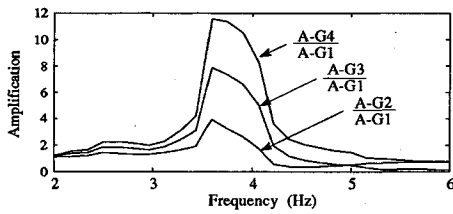


Fig.9 Comparison of frequency response functions at three depths (see Fig.3)

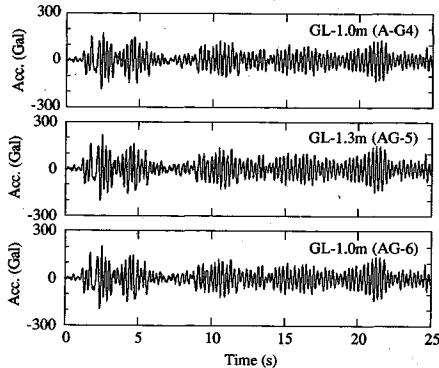


Fig.10 Comparison of acceleration histories at three locations (see Fig.3)

槽コーナーの応答倍率差は10%以下である。せん断土槽を用いたことによりこの程度まで小さくできたと考えられる。

つぎに、地震波加振の結果について述べる。なお、ここに示す図中の数値は相似則により対応する実地盤の値に変換している。エルセントロ波の加振における地盤の各深度の加速度時刻歴を Fig.8 に示す。地盤の下部から地表近くになるにしたがって加速度応答に増幅がみられるため、地表近くは地盤の一次固有振動数による応答波が顕著に現われている。基盤に対する各深度の周波数伝達関数を Fig.9 に示す。模型地盤の一次固有振動数のピークが顕著に現われており、この時の振動モードは Fig.5 との類似性から正弦波加振と同様であると考えられる。したがって、地震波加振の結果も正弦波加振と同様に、ほぼ妥当なせん断振動をしていると評価できる。また、土槽中心 (A-G 4) と土槽端中央 (A-G 5) ・土槽コーナー (A-G 6) の加速度時刻歴を Fig.10 に示す。(A-G 4) の最大加速度は 195 Gal であり、(A-G 5) は 212 Gal ・(A-G 6) は 206 Gal で、応答加速度の差は 6 ~ 9 % 程度であり正弦波加振の結果と同様である。

(2) 飽和砂地盤の振動台実験 (液状化実験)

a) 実験概要

液状化問題への取り組みとして、加速度応答および間隙水圧上昇の挙動から、模型地盤が妥当なせん断振動をしているかどうかを検討するため、飽和砂地盤の振動台実験を行う。

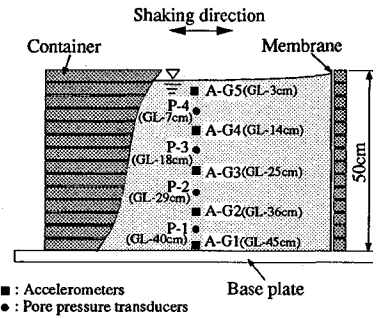


Fig.11 Saturated sand model and location of transducers

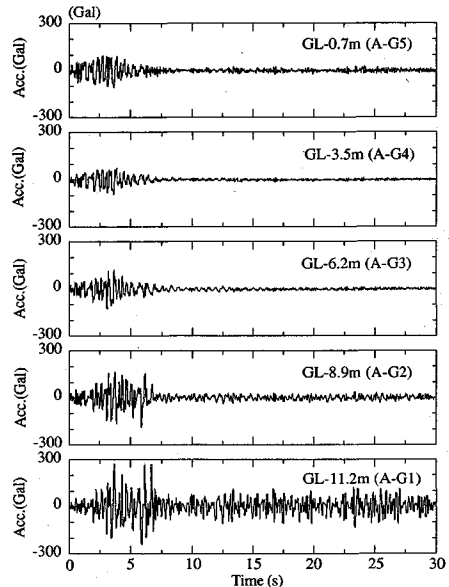


Fig.12 Acceleration histories for saturated test

実験に用いた地盤材料は前述の乾燥砂の実験と同じ砂である。模型地盤は空中落下法で作製し、相対密度は 60%、湿潤密度は 1.95 g/cm³ である。間隙流体には、水の 30 倍の粘性をもつシリコンオイルを用いており、密度は 0.96 g/cm³ である。シリコンオイルを、土槽底部の注入口から 30 時間かけて注入し、地盤を飽和させた。地下水位は地表面に一致させている。模型地盤重心位置における遠心加速度は、25 g である。計器配置を、Fig.11 に示す。振動台の加振方法は、入力地震波は時間縮尺を 1/25 にした十勝沖八戸港波 EW 成分で、最大加振加速度レベルは 6.8 g (実物対応：約 280 Gal) である。

b) 実験結果

地盤の各深度の加速度時刻歴を Fig.12 に、過剰間隙水圧の時刻歴を Fig.13 に示す。ここに示す図中の数値は相似則にそって対応する実地盤の値に変換している。Fig.12 の地盤加速度は、Fig.13 の過剰間隙水圧が約

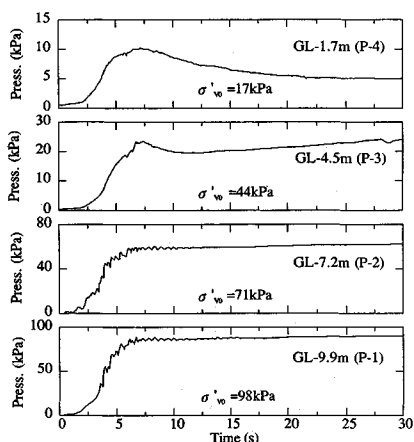


Fig. 13 Pore pressure histories for saturated test

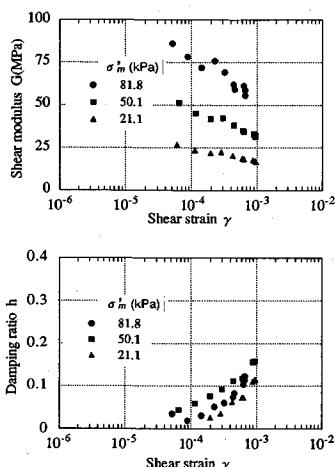


Fig. 14 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for centrifuge test

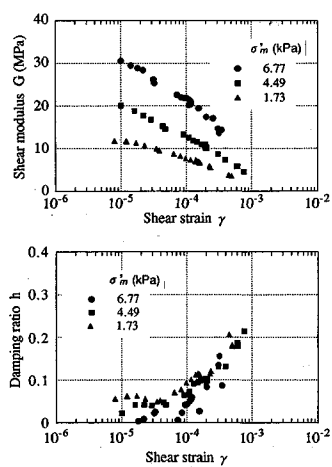


Fig. 15 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for 1g test

7.5 秒後にほぼ最大値に達した以後応答が小さくなっているが、比較的短周期で振動している。この理由として、せん断土槽の上部に配線した加速度計のコードが振動して、その振動が加速度計に伝達されているのではないかと考えられる。しかし、この点については今後さらに検討が必要である。一般的に、相対密度が60%程度の一次元の砂地盤ではサイクリックモリビティによる振動成分が間隙水圧の時刻歴に現われる量は少ないと考えられる。Fig. 13の過剰間隙水圧の時刻歴は、全体的にスムーズな形状をしており、過去の遠心力場における緩い砂地盤の液状化実験^{10), 11)}にみられる過剰間隙水圧の時刻歴に比較して振動成分が少ない。これは本実験が模型地盤をほぼ妥当なせん断振動させることができたためと考える。

4. 地盤要素の特性

(1) 動的遠心実験結果の逆解析による地盤のせん断剛性

模型地盤のせん断剛性がひずみ速度依存性に影響されるかどうかを本章の(4)で検討するに先だって、ここでは模型地盤のせん断剛性および減衰とせん断ひずみの関係を把握する。そのため、乾燥砂の正弦波スイープ加振実験結果から得られた周波数伝達関数に対し、松田ら⁹⁾の提案による逆解析を行い、せん断剛性および減衰を算定した。その結果をFig. 14に示す。逆解析は、文献⁹⁾を参考にして模型地盤の共振点における上昇部分の周波数約75~90 Hzを対象とした。せん断剛性は、模型地盤の上部から下部になるに従って大きくなり、拘束圧の影響がみられる。減衰に関しては、通常拘束圧が小さいほど同じひずみのときの減衰定数が大きくなるが、地盤最上部の▲が最も小さくなっている。

(2) 1g場振動台実験の逆解析による地盤のせん断剛性

遠心力場と同じ乾燥砂を用いた振動台実験を1g場で実施し、前記(1)と同様に模型地盤のせん断剛性および減衰とせん断ひずみの関係を把握する。せん断土槽の内寸法は、長さ200 cm(加振方向)、幅150 cm、高さ100 cmである。模型地盤の相対密度は89%であり乾燥密度は1.62 g/cm³である。模型地盤高さは98 cm。計器配置は、加速度計を基盤(土槽底面)にA-G 1、土槽の下部から上部にA-G 2 (GL-71cm)、A-G 3 (GL-36 cm)、A-G 4 (GL-7 cm)に設置した。加振は正弦波スイープ加振で、振動数範囲は1~50 Hz、加振加速度レベルは10 Gal, 25 Gal, 50 Gal, 100 Gal, 150 Galの5種類である。

遠心力場の実験と同様に、正弦波スイープ加振実験結果により得られた周波数伝達関数に対し逆解析を行い、せん断剛性および減衰を算定した結果をFig. 15に示す。逆解析の対象とした周波数は、模型地盤の共振点における上昇部分の周波数約15~28 Hzである。せん断剛性は、拘束圧の影響がみられる点において遠心力場の振動台実験と同様の傾向が得られている。減衰は、ばらつきは大きいものの概ね砂のせん断ひずみに依存する傾向が得られている。

(3) 要素試験による地盤のせん断剛性

遠心力場と同じ乾燥砂を用いた中空ねじり試験を行い、前記(1)、(2)と同様に模型地盤のせん断剛性および減衰とせん断ひずみの関係を把握する。供試体サイズは内径6 cm、外径10 cm、高さ10 cm、初期間隙比は $e_0 = 0.630 \sim 0.647$ 、相対密度は88~92%、載荷周波数は0.1 Hzである。試験は、等方応力で有効拘束圧を59, 98, 176 kPaに変化させた。せん断剛性および減衰を

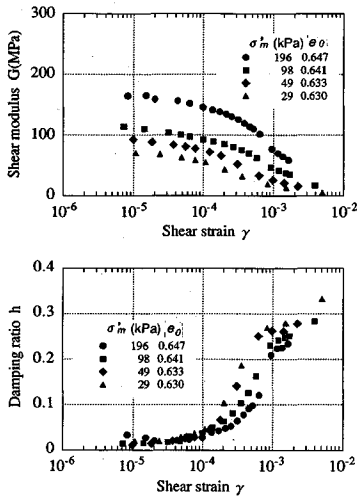


Fig.16 Shear modulus and damping ratio for torsional shear test

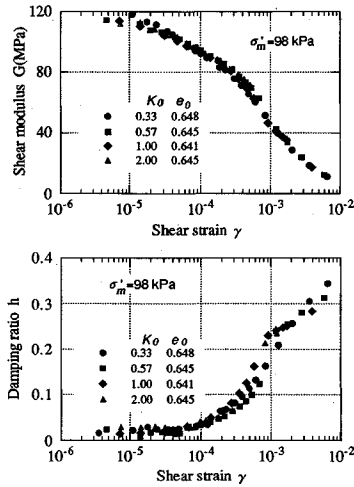


Fig.17 Shear modulus and damping ratio for torsional shear test ($\sigma_m = \text{const.}$)

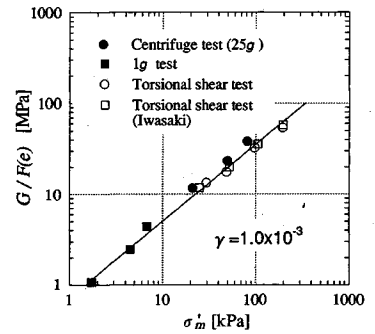


Fig.18 Relation between shear modulus and confining pressure ($\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$)

Fig.16に示す。なお、模型実験における応力状態は異方応力状態であるため、平均有効拘束圧を98 kPaとした異方応力の試験も併せて実施した。結果はFig.17に示すように、せん断剛性は K_0 とは独立であり龍岡ら¹²⁾の結論と同じであった。

(4) 地盤のせん断剛性の比較

大きな加振周波数が対象となる遠心力場の振動台実験において、せん断剛性がひずみ速度依存性の影響により従来の要素試験等から求められたものと異なっていないかという点は、遠心力場の振動台実験の定量的評価において重要である。この点を検討するため、遠心力場の振動台実験および1g場振動台実験、要素試験により求めたせん断剛性と平均拘束圧の関係を下記の式に基づき比較する。

$$G = A(\gamma) \cdot F(e) \cdot \sigma'_m{}^{n(\gamma)}$$

ここに、 G : せん断剛性

$A(\gamma)$: 係数

$F(e)$: 間隙比の関数 $= (2.17 - e)^2 / (1 + e)$

σ'_m : 平均拘束圧

$n(\gamma)$: 平均拘束圧のべき指数

遠心力場の振動台実験の逆解析結果により得られた最大のせん断ひずみレベルとして、 $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ に対するせん断剛性と平均拘束圧の関係をFig.18に示す。同様に、最小のひずみレベルとして、 $\gamma = 5.0 \times 10^{-5}$ に対するせん断剛性と拘束圧の関係をFig.19に示す。なお、縦軸はせん断剛性 G を間隙比の関数 $F(e)$ で補正しており、参考として岩崎ら¹³⁾による豊浦砂の中空ねじり試験結果も示す。載荷周波数は、遠心振動台実験の場合は約90 Hz、1g場振動台実験の場合は約30 Hz、中空ねじり試験の場合は0.1 Hzである。

Fig.18に示す様にせん断ひずみが $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ レベ

ルにおいては、何れの実験結果もせん断剛性と平均拘束圧の関係はほぼ直線上にあり、実験方法や載荷周波数による違いはみられない。このときの、べき指数 n は約0.85でせん断剛性と拘束圧の関係は次式で表される。

$$\gamma = 1.0 \times 10^{-3} \text{において;} G = 0.82 \cdot F(e) \cdot \sigma'_m{}^{0.85}$$

ここに、 G : せん断剛性 (MPa)

σ'_m : 平均拘束圧 (kPa)

しかし、Fig.19に示す様にせん断ひずみが $\gamma = 5.0 \times 10^{-5}$ レベルにおいては、本研究の中空ねじり試験および岩崎ら¹³⁾による中空ねじり試験結果は、ともにべき指数 n が約0.5であるのに対し、遠心振動台実験は n が約0.8、1g場振動台実験は約0.7であり、振動台実験は要素試験よりも n が大きくなっている。この原因は今後詳細に検討すべきであるが、せん断ひずみレベルが小さい実験結果のシミュレーションにはこの結果を考慮に入れるべきであろう。

以上により、比較的大きなせん断ひずみレベル： $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ の場合には、乾燥の豊浦砂は90 Hzまではひずみ速度依存性の影響は小さい。したがって、遠心振動台実験での地盤の拘束圧を把握することにより、0.1 Hz程度の低載荷周波数による中空ねじり試験によって模型地盤の変形特性を把握できると考えられる。

なお、1g場の振動台実験および遠心力振動台実験において平均拘束圧は、 $\sigma'_m = (1 + 2K_0)\sigma'_z$ で算定した。このとき σ'_z は、地盤の密度と地盤深度から算定した。1g場振動台実験および遠心振動台実験で求めた土圧係数 K_0 をFig.20に示す。1g場振動台実験の場合、土圧係数は、模型実験の実施にあたって埋設した3台の水平土圧計の計測結果から求めた。3台の水平土圧計によると K_0 はばらつきが大きいので、平均値をとって $K_0 = 0.3$ とした。このように、模型地盤の応力条件を把握す

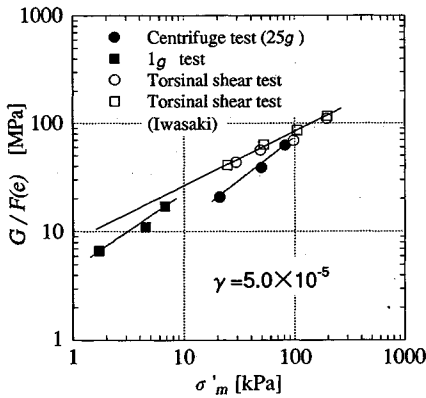


Fig.19 Relation between shear modulus and confining pressure ($\gamma=5.0 \times 10^{-5}$)

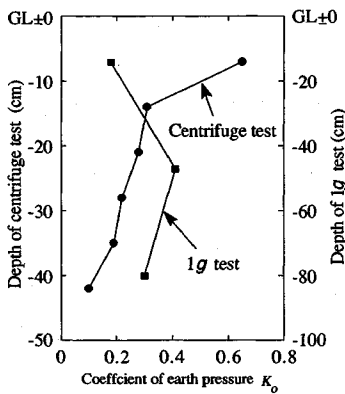


Fig.20 Distribution of coefficient of earth pressure

るための水平方向土圧を正確に測定することが困難であるという現状がある。遠心振動台実験の場合は、土槽枠にひずみゲージを貼りせん断土槽に水張し、遠心加速度を $25g$ に上昇させ、水圧によりせん断土槽枠に発生したひずみと乾燥砂により発生したひずみの関係から K_0 を算定した。結果は深さ方向に小さくなり、中富ら¹¹⁾の実験結果と同様の傾向を示している。平均拘束圧は、ここでは $1g$ 場の振動台実験と同様に $K_0=0.3$ として求めた。

(5) 地盤要素の液状化特性

a) 飽和砂の変形特性

液状化実験においては浸透現象の相似性を満足させるという観点から、高粘性流体を用いた実験が行われるが、変形特性としてのせん断剛性・減衰は間隙流体が水の場合とは異なるのではないかと疑問が残る。本研究における液状化実験では間隙流体に水の30倍の粘性をもつシリコンオイルを用いた。間隙流体にシリコンオイルを用いた場合の変形特性が、水の場合と異なるかどうかを比較するため三軸試験を実施し、地盤のせん断剛性と減衰を求めた。供試体サイズは直径 5 cm 、高さ 10 cm で、相対密度は $88\sim 92\%$ 、載荷周波数は 0.1 Hz である。試

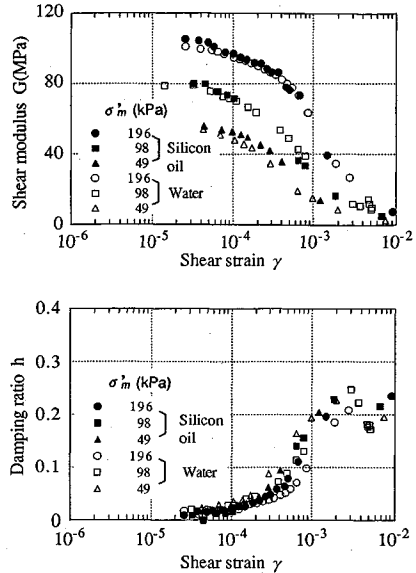


Fig.21 Comparison of shear modulus and damping ratio for silicon oil and water

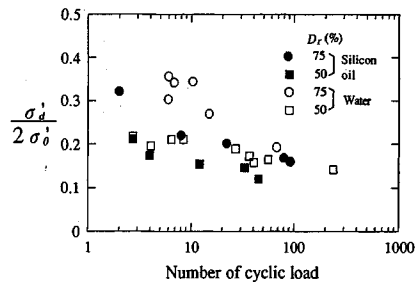


Fig.22 Comparison of liquefaction resistance for silicon oil and water

験は、等方で有効拘束圧を $49, 98, 196\text{ kPa}$ に変化させた。せん断剛性および減衰を Fig.21 に示す。シリコンオイルの場合と水の場合に差はみられない。

b) 液状化強度試験

間隙流体にシリコンオイルを用いた場合と水の場合の液状化強度を比較するため、三軸液状化試験を実施した。供試体サイズは直径 5 cm 、高さ 10 cm で載荷周波数は 0.1 Hz である。試験は、等方応力で有効拘束圧は 49 kPa 、相対密度は $D_r=50\%$ および 75% の場合の2種類である。実際には、水の場合 $D_r=46\sim 50\%$ および $70\sim 76\%$ 、シリコンオイルの場合 $D_r=46\sim 53\%$ および $72\sim 77\%$ であり、試験結果を Fig.22 に示す。相対密度 D_r は約 50% および約 75% の場合とも、間隙流体がシリコンオイルの場合は水の場合よりもやや小さくなるという傾向を示している。この結果は柴田ら¹⁵⁾によって実施された同様の試験結果と大きな違いはないと思われる。

c) 透水試験

間隙流体にシリコンオイルを用いた場合と水の場合の透水係数を比較するため、定水位透水試験を実施した。

Table 1 Comparison of permeability

	Head loss = 10 cm		Head loss = 30 cm	
	Water	Silicon oil	Water	Silicon oil
Coefficient of permeability (cm/s)	2.90×10^{-2}	0.127×10^{-2}	2.45×10^{-2}	0.116×10^{-2}
Ratio	22.8 : 1		21.1 : 1	

Table 2 Analytical constant for dry test

GL- $\pm 0.0m$	ρ_d (t/m ³)	G σ (MPa)	γ_{ref} (x10 ⁻⁴)	h_{max}
GL-1.0m	1.60	30	6.0	0.25
GL-4.5m	1.60	40	6.0	0.25
GL-8.24m	1.60	70	6.0	0.25
GL-12.0m	1.60	100	6.0	0.25

供試体サイズは直径 5.2 cm, 高さ 9 cm で, 試験結果は Table 1 に示すように, 間隙流体として水を使用した場合の透水係数はシリコンオイルを使用したものの約 22 倍であり, これは過去に風間ら⁵⁾および柴田ら¹⁵⁾によって実施された同様の試験結果とほぼ対応している。

d) 体積圧縮係数

有効応力解析に必要な解析定数として豊浦砂の体積圧縮係数を求めるため, 除荷時の等体積膨張試験を間隙流体に水を用いて三軸試験により実施した。供試体サイズは直径 5 cm, 高さ 10 cm で, 供試体を作製し所定の有効拘束圧 19.6, 29.4, 49.0 kPa で圧密した後, 除荷し体積変化量を測定した。いずれの試験結果も, 体積圧縮係数はほぼ $m_v = 0.0628 \text{ m}^2/\text{MN}$ であった。

5. 実験結果の数値解析

(1) 乾燥砂実験の数値シミュレーション

a) 解析方法と解析定数

数値シミュレーションを行うに当たって解析に用いる地盤定数は, 地盤材料・応力状態・載荷周波数などが実験と同じ条件のもとで求められたものを用いることにより, 実験結果をよくシミュレートできると考えられる。この考えに基づき, 3. (1) に示した遠心力場の乾燥砂の振動台実験における地震波加振実験結果を対象として, 修正 Ramberg-Osgood モデル¹⁶⁾を用いた一次元地震応答解析による数値シミュレーションを行った。解析定数は, 4. (1) の逆解析により求めたせん断剛性と減衰に基づいて決定した。解析に用いた定数の一覧を, Table 2 に示す。

b) 解析結果と考察

地盤加速度の時刻歴における実験と解析の比較を, Fig.23 に示す。図中, 実線は解析であり, 破線は実験

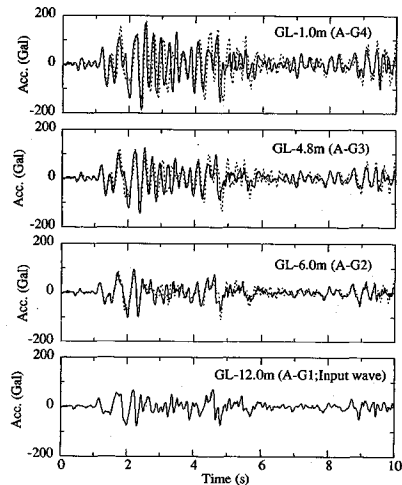


Fig.23 Comparison between computed and measured acceleration histories for dry test

Table 3 Analytical constants for saturated test

GL- $\pm 0.0m$	ρ_d (t/m ³)	G σ (MPa)	γ_{ref} (x10 ⁻⁴)	h_{max}	R_{20}	m^2v (m ² /MN)	k (cm/s)
GL-0.75m	1.95	3.3	6.0	0.25	0.16	0.0628	0.029
GL-3.5m	1.95	14	6.0	0.25	0.16	0.0628	0.029
GL-6.25m	1.95	26	6.0	0.25	0.16	0.0628	0.029
GL-9.0m	1.95	39	6.0	0.25	0.16	0.0628	0.029
GL-11.25m	1.95	53	6.0	0.25	0.16	0.0628	0.029

である。実験と解析は, 地盤の下部から地表近くまでよくシミュレートできている。なお, この解析における地盤の最大せん断ひずみは $\gamma = 5.0 \times 10^{-1}$ である。このことにより, 高精度に実験結果をシミュレートするためには, 地盤材料・応力状態・載荷周波数が実験と同じ条件のもとで求められた妥当な解析定数を用いる必要があることが分かる。

ただし, ここで述べているのは実験結果の高精度の数値シミュレーションに関する検討であり, 実構造物の設計にあたってはこれほどの精度で地盤の解析定数の推定は不可能であるし, これほどの予測精度も要求されるものではないのであろう。

(2) 飽和砂実験の数値シミュレーション (液状化実験)

a) 解析方法と解析定数

液状化実験結果の数値シミュレーションを行うに当たっても, 載荷周波数が実験と同じ条件のもとで求められた解析定数を用いることが望まれるが, 液状化強度等は遠心実験と同程度の載荷周波数で三軸試験を行うことが困難であるため, 低速載荷の試験で求めた解析定数を用いて数値シミュレーションを行った。解析コードは社本¹⁷⁾が提案している 1 次元有効応力解析法である。なお,

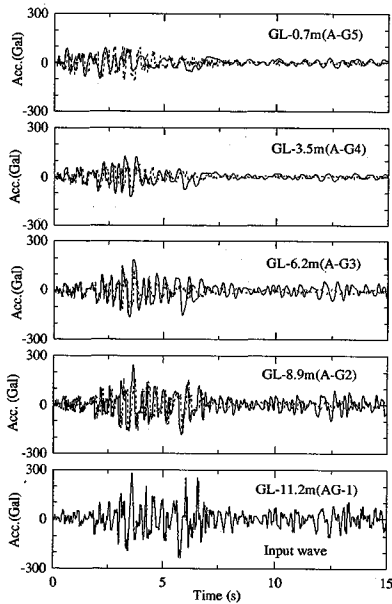


Fig.24 Comparison between computed and measured acceleration histories for saturated test

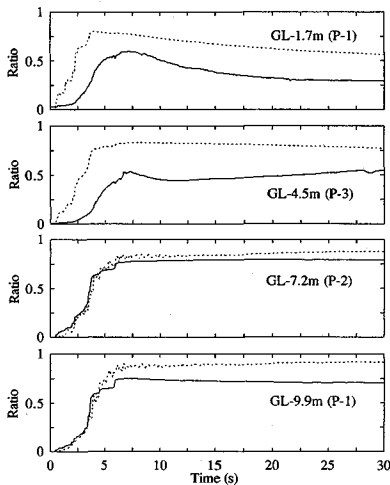


Fig.25 Comparison between computed and measured pore pressure histories for saturated test

この解析法はこれまで遠心力場の液状化実験¹⁸⁾, 1g場の液状化実験^{17), 19)}, 実地盤の地震観測結果²⁰⁾の数値シミュレーションに適用され, その有効性が検証されている. 解析定数は, 4.(1)の逆解析により求めたせん断剛性および減衰と4.(5)で求めた液状化強度, 透水係数, 体積圧縮係数を用いた. 解析に用いた定数の一覧を, Table 3に示す.

a) 解析結果と考察

地盤加速度および過剰間隙水圧の時刻歴における実験と解析の比較を, Fig.24, Fig.25に示す. 図中, 実線は解析であり, 破線は実験である. なお, 地盤加速度の時刻歴は15秒間, 過剰間隙水圧の時刻歴は30秒間を示

した. 解析結果は, 地盤加速度および過剰間隙水圧とも地盤の下部から地表面近くまで, 実験を比較的良好にシミュレートできている. しかし, 地表近くでは過剰間隙水圧の上昇過程において時間差がみられること, および過剰間隙水圧比の最大値が異なっていることなどに不満が残る. 液状化解析においては, 地盤のせん断剛性と液状化強度, および透水係数や体積圧縮係数などが解析結果を大きく支配する解析定数である. 本解析では, これらの定数を低速載荷の三軸試験で求めたため, 十分にシミュレートできていない部分があると考えられる.

6. 今後の課題

龍岡²¹⁾は「模型実験で理論的定量的評価を行うためには, 模型実験の応力・ひずみ条件のもとにおける実験砂の正確な変形・強度特性が判明していることが必要である」と適切な指摘をしているが, 遠心力場での振動台実験結果を定量的に評価しようとしたとき次の様な問題点がある. 現状において, 模型地盤の応力条件, すなわち水平方向土圧を正確に測定することが困難であるため, 要素試験により模型地盤の変形・強度特性を求めようとしても作用させるべき側圧が不明確である. そのため, 模型地盤の変形・強度特性を把握できず実験結果の定量的評価が困難な状態にある. 動的遠心実験結果の定量的評価のためには, 今後模型地盤の応力状態の測定精度を向上させることが重要である.

また, 動的遠心実験では相似則により模型地盤と想定した実大地盤との比で載荷時間を短縮するため, 現状の要素試験装置では対象とする加振周波数による試験ができないことも, 実験結果の定量的評価を困難な状態にしている. すなわち, 高粘性流体を使用した地盤材料の変形特性や液状化強度に関して, 遠心力場の実験に近い載荷周波数における地盤の特性を把握する必要がある.

7. 結論

- ① 乾燥砂地盤の振動台実験において模型地盤は妥当なせん断振動をしており, 土槽境界においても土槽慣性力の影響の少ない実験ができた. また, 高粘性流体を用いた飽和砂の実験においても, 加速度及び過剰間隙水圧の応答は妥当な結果を示し, 模型地盤が妥当なせん断振動をしている液状化実験ができた.
- ② 乾燥豊浦砂のせん断剛性は, せん断ひずみレベル: $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ の場合には90 Hzまではひずみ速度依存性の影響は小さい. したがって, 遠心振動台実験での地盤の拘束圧を把握することにより, 0.1 Hz程度の低載荷周波数による中空ねじり試験で模型地盤のせん断剛性を把握できる.
- ③ 地盤材料・応力状態・載荷周波数などが実験と同じ条件のもとで求められた妥当な解析定数を用いることに

より、修正 Ramberg-Osgood モデルによる一次元地震応答解析法で、高精度に遠心力場での振動台実験結果をシミュレートできる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重な御助言を頂いた清水建設(株)常任顧問吉見吉昭博士に対し、心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) Coe, C. J., Prevost, J. H. and Scanlan, R. H. : Dynamic stress wave reflections/Attenuations : Earthquake simulation in centrifuge soil models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, pp.109~128, 1985.
- 2) Cheney, J. A., Brawn, R. K., Dhat, N.R. and Hor, O. Y. Z. : Modeling free-field conditions in centrifuge models, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.9, pp.1347~1367, 1990.
- 3) Campbell, D. J., Cheney, J. A. and Kutter, B. L. : Boundary effects in dynamic centrifuge model tests, *Centrifuge 91, Balkema*, pp.441~448, 1991.
- 4) Whitman, R. V. and Lambe, P. C. : Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.9, No.2, pp.61~71, 1986.
- 5) 風間基樹・稲富隆昌：遠心力载荷模型実験手法の振動実験への適用性について，土木学会論文集，No. 477/I-25, pp. 83~92, 1993年10月。
- 6) Sato Masayoshi : A new dynamic geotechnical centrifuge and performance of shaking table tests, *Centrifuge 94, Balkema, 1994* (投稿中)。
- 7) Fujii, N. : Development of an electromagnetic centrifuge earthquake simulator, *Centrifuge 91, Balkema*, pp.351~354, 1991.
- 8) 国生剛治・岩楯敏広：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析，土木学会論文集，No. 285, pp. 57~67, 1979年5月。
- 9) 松田隆・後藤洋三：せん断土槽を用いた模型地盤の振動実験(その1)，大林組技術研究所報，No. 32, pp. 42~46, 1986。
- 10) Law, H-Y, Ko, Sture, S. and Pak, R. : Development and performance of a laminar container for earthquake liquefaction studies, *Centrifuge 91, Balkema*, pp.369~376, 1991.
- 11) Popescu, R. and Prevost, J. H. : Centrifuge validation of a numerical model for dynamic soil liquefaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.12, No.2, pp.73~90, 1993.
- 12) Fumio Tatuoka, Toshio Iwasaki, Shinji Fukushima and Hideo Sudo : Stress conditions and stress histories affecting shear modulus and damping of sand under cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.2, pp.29~43, 1979.
- 13) Toshio Iwasaki, Fumio Tatuoka and Yoshikazu Takagi : Shear modulus of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39~56, 1978.
- 14) 中富俊彦・上野勝利・日下部治・野本寿：模型砂地盤の初期応力と初期相対密度に及ぼす遠心加速度履歴の影響，第27回土質工学研究発表会，pp. 1379~1382, 1992年6月。
- 15) 柴田徹・上田孝行：遠心力場における飽和砂地盤の液化化実験，第26回土質工学研究発表会，pp. 1045~1048, 1991年7月。
- 16) 龍岡文夫・福島伸二：砂のランダム繰返し入力に対する応力~歪関係のモデル化について(1)，生産研究，30巻19号，pp. 26~29, 1978年9月。
- 17) 社本康広・時松孝次・有泉浩蔵：一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性，日本建築学会構造系論文報告集，pp. 113~119, 1992。
- 18) 佐藤正義・社本康広：砂地盤の液化化に関する遠心模型実験の解析，第24回土質工学研究発表会，pp. 985~986, 1989年6月。
- 19) 石川裕・社本康広・佐藤正義・若原敏裕：密な砂地盤の液化化模型実験と解析，第23回土質工学研究発表会，pp. 939~934, 1988年6月。
- 20) 社本康広・佐藤正義：模型砂地盤の液化化実験と数値解析によるシミュレーション，第24回土質工学研究発表会，pp. 999~1000, 1989年6月。
- 21) 龍岡文夫：室内せん断試験・原位置地盤調査・安定解析・模型実験・実構造物の挙動の関連について一砂地盤の基礎の支持力問題を例にして一，わかりやすい土質工学原論(第一回改訂版)，土質工学会，pp. 51~107, 1992。(1993. 12. 8 受付)

A STUDY ON SHAKING TABLE TESTS IN THE CENTRIFUGE AND DYNAMIC CHARACTERISTIC OF SAND DEPOSITS

Masayoshi SATO

Shaking table tests in a centrifuge were carried out for dry and saturated sand deposits in a relatively large laminar container, 74 cm long, 34 cm wide, and 50 cm deep. Shear moduli and damping ratios were calculated by using back analysis for dry sand model tests. The calculated results are compared with the results of $1g$ -field shaking test and torsional shear test with the same sand. It was found that the relationship between shear modulus and confining pressure for dry sand was not affected by method of tests and vibration frequency. Moreover, it was confirmed that analyses could simulate the tests for dry and saturated sand deposits by using analytical parameters which were calculated through inverse analysis.