

遠心力場の振動台実験における飽和砂地盤のせん断剛性と減衰に関する研究

佐藤正義¹

¹正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)

遠心力場での飽和砂地盤の動力学特性を調べるため、せん断土槽(内寸法が長さ74 cm, 幅34 cm, 深さ50 cm)を用いて乾燥砂地盤および飽和砂地盤(間隙流体として水とシリコンオイル)を作製し、正弦波スイープ加振による遠心力場の振動台実験を実施した。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、飽和砂のせん断剛性の大きさおよび剛性低下は、間隙流体の違いによらずほぼ一定で、乾燥砂地盤よりも約1.5倍大きいこと、減衰は間隙流体の違いによらず低周波数0.1 Hzにおける中空ねじり試験の約1.5倍であること、逆解析で求めた飽和砂地盤のせん断剛性と減衰を用いることにより、高精度に地震波による実験結果をシミュレートできることが分かった。

Key Words : centrifuge test, shaking table test, laminar container, dry sand, saturated sand, viscous fluid, shear modulus, damping ratio

1. はじめに

遠心力場の振動台実験による実証的研究が、地盤の耐震工学の分野において注目され、特に液状化問題への適用が各研究機関で試みられている。今後、遠心実験の結果を実地盤の地震時挙動の定量的評価を行うための基本データや数値解析法の検証データとするためには実験結果を定量的に評価する必要がある。このため、模型地盤のせん断剛性・減衰および液状化強度など地盤の振動応答性状に係わる特性を把握することが重要である。遠心力場における飽和砂地盤の振動実験では、浸透現象の相似性¹⁾を満足させるため、模型地盤の透水性を実物の縮尺比に応じて小さくし、かつ振動周波数を実物の縮尺比に応じて大きくする必要がある。このため、間隙流体は高粘性の実際と異なる材料を用いること、実際よりも大きな周波数を加えることによる影響が混合して生じる問題がある。したがって、シリコンオイルやグリセリン水溶液などの高粘性の間隙流体を用いた模型地盤のせん断剛性・減衰・液状化抵抗などの動力学特性を明らかにする必要がある。

高周波数の载荷における砂のせん断剛性・減衰に注目すると、乾燥砂地盤についてはHardin et al.²⁾およびKim et al.³⁾による共振法の要素試験、著者⁴⁾による遠心力場の振動台実験の逆解析結果から、砂のせん断剛性と減衰に対する周波数の影響は小さいことが明らかにされている。また、飽和砂地盤については要素試験と遠心

実験の2つがある。Tatsuoka et al.⁵⁾は共振法の要素試験と繰返し中空ねじり試験との比較から、せん断剛性は周波数の影響は小さく、減衰は共振法のほうが0.1 Hz 载荷の通常の中空ねじり試験よりも小さいが、これは载荷の波数の影響であると結論している。風間ら⁶⁾は遠心加速度を変化させて水を用いた模型地盤の振動台実験を行い、模型地盤のせん断波速度(せん断剛性)と拘束圧の関係は、従来の要素試験結果と定性的な傾向が一致したことを示している。しかし、間隙流体に高粘性流体を用いた飽和砂地盤の高周波数におけるせん断剛性・減衰を定量的に検討した例はなく、遠心力場の模型振動実験結果を定量的に評価する上で問題点をかかえている。

本研究は、せん断土槽を用いた遠心力場の振動台実験における飽和砂地盤の高周波数での動力学特性を明らかにすることを目的としている。具体的には、間隙流体に水および水の30倍の粘性を持つシリコンオイル、水の100倍の粘性を持つシリコンオイルを用いた場合の遠心力場の振動台実験を行う。次に、これらの振動台実験により得られた結果の逆解析により、それぞれの場合における模型地盤のせん断剛性と減衰を求める。この結果と中空ねじり試験のせん断剛性と減衰を比較し、周波数の影響および間隙流体の影響を検討する。さらに、逆解析で求めた飽和砂地盤のせん断剛性と減衰を用いた地震応答解析を行い、地震波による実験結果のシミュレーションについて検討する。

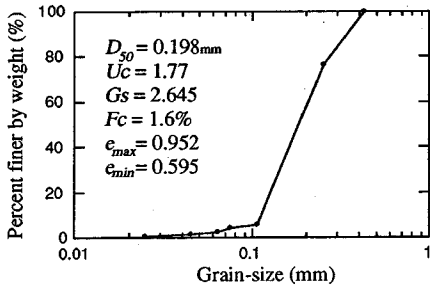


Fig.1 Grain-size accumulation curve and physical properties

Table 1 Test conditions for centrifuge tests

| | Pore liquid | Relative density (%) | Sine wave acceleration level (g) | Excitation frequency range |
|--------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
| CASE-1-Dry | Air | 93 | 0.2, 0.6, 1.2, 2.5 | 50~150Hz |
| CASE-1-Water | Water | | 0.2, 0.6, 1.2 | |
| CASE-2-Dry | Air | 94 | 0.2, 0.6, 1.2, 2.5 | |
| CASE-2-30cs | Silicon oil 30cs | | 0.2, 0.6, 1.2 | |
| CASE-3-Dry | Air | 99 | 0.2, 0.6, 1.2, 2.5 | |
| CASE-3-100cs | Silicon oil 100cs | | 0.2, 0.6 | |

2. 遠心力場における飽和砂地盤の振動台実験

(1) 実験方法

実験に使用した遠心装置の基本諸元は、振動台設置時の回転中心からテーブル面までの距離が3.11 m、振動テーブルの大きさは950×650 mmである。振動加振の性能は、遠心加速度50 g場で、振動台搭載質量が300 kg、最大加振加速度は地震波の場合10 g、正弦波の場合5 g、加振周波数範囲は50~350 Hzである⁷⁾。せん断土槽は、正方形の中空スチール角パイプを14段積み重ねたもので、各々の角パイプ間には平型ベアリングを設置した。土槽の内寸法は、長さ74 cm (加振方向)、幅34 cm、深さ50 cmであり、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に水や高粘性流体などの間隙流体の注入口を8箇所設けている。

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.1 に、実験ケースの一覧を Table 1 に示す。実験に用いた地盤の相対密度は93~99%と非常に密にした。液状化が対象となる地盤の相対密度よりもかなり大きくしたのは、液状化が対象となる緩い砂地盤では振動台加振により過剰間隙水圧が上昇するので、後述する逆解析を行うための伝達関数を求めることができなくなるからである。ここでは、シリコンオイルなどの間隙流体による周波数依存性の影響を把握することに重点をおいており、地盤密度の違いの影響は間隙比の関数で補正

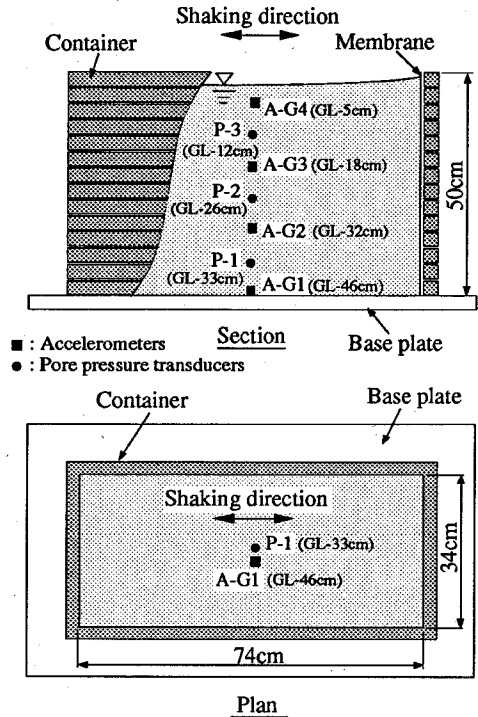


Fig.2 Model of sand deposit and location of transducers (CASE-1-Water)

することとした。

振動台の加振方法は一定加速度の正弦波スイープ加振で、加振加速度を各実験について Table 1 に示す様に0.2 g~2.5 gの範囲内で変化させている。また、それぞれの加振加速度で周波数範囲を50~150 Hzまで変化させ、模型地盤の一次固有振動数にまたがるように加振している。なお、Table 1 におけるcsとはシリコンオイルの粘性を表す記号で、30 csは水の30倍の粘性である。シリコンオイルの密度は、30 csでは $\rho=0.96 \text{ g/cm}^3$ 、100 csでは $\rho=0.97 \text{ g/cm}^3$ であり、ほぼ水の密度に等しい。

代表的な実験としてCASE-1-Waterの試験体および計器配置を Fig.2 に示す。加速度計および間隙水圧計は、土槽境界の影響が最も小さいと考えられる中心位置に配置している。他の実験の計器配置も計器の設置深度のわずかな違いを除けばほぼ同じである。

実験の手順を以下に示す。

- ① 空中落下法 (ロート法) により、乾燥状態の模型地盤を作製する。
- ② 乾燥砂の模型地盤に遠心加速度25 gを与え、加振加速度を変化させて、正弦波スイープ加振実験を行う。
- ③ 模型地盤の遠心加速度を1 gに戻し、土槽を真空箱に入れ土槽底部からそれぞれの実験仕様に依じて水、シ

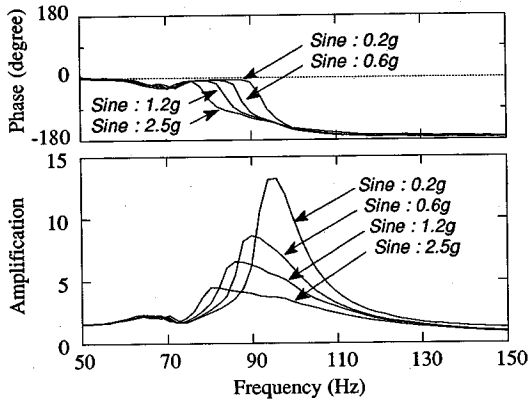


Fig.3 Comparison of frequency response functions and phases at ground surface for CASE-2-Dry

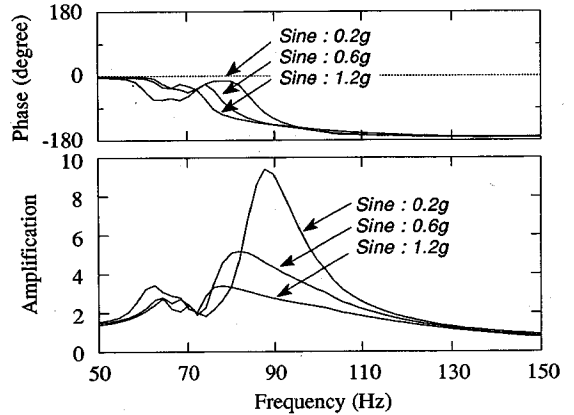


Fig.5 Comparison of frequency response functions and phases at ground surface for CASE-2-30 cs

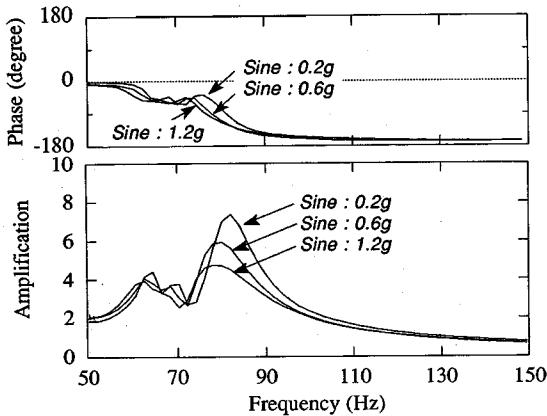


Fig.4 Comparison of frequency response functions and phases at ground surface for CASE-1-Water

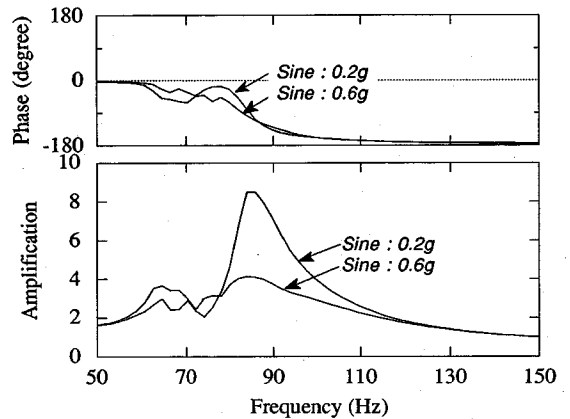


Fig.6 Comparison of frequency response functions and phases at ground surface for CASE-3-100 cs

リコンオイル 30 cs, シリコンオイル 100 cs の間隙流体を注入して、飽和地盤を製作する。なお、模型地盤を飽和させる過程において、土槽下部の注入口から間隙流体を注入することにより模型地盤の沈下は発生していない。

④飽和砂の模型地盤に遠心加速度 $25g$ を与え、加振加速度を変化させて、正弦波スイープ加振実験を行う。

(2) 実験結果

乾燥砂による正弦波スイープ加振実験は、Table 1 に示す様に 3 ケース行っているが、模型地盤の相対密度が概ね等しいためほぼ同一の結果を示した。代表例として実験 CASE-2-Dry の結果について述べる。Fig.3 は、基盤入力加速度 (A-G1) に対する地表付近地盤 (A-G4) の周波数伝達関数を、正弦波 $0.2g$ 、 $0.6g$ 、 $1.2g$ 、 $2.5g$ 加振について重ね書きしたものである。正弦波の加振レベルの増加に伴い、地盤の固有振動数の低下と

もに応答倍率の低下がみられる。これは地盤のせん断ひずみの増加によるせん断剛性の低下と減衰の増加のために発生する現象であり、地盤の非線形性によるものである。

Fig.4~6 は、間隙流体に水、30 cs および 100 cs のシリコンオイルを用いた飽和砂地盤の正弦波スイープ加振実験の結果を Fig.3 と同様を示すものである。Fig.6 において正弦波 $0.6g$ 加振の応答倍率が小さいのは後述するように過剰間隙水圧比が 40% に達したためである。また、周波数約 65 Hz における地盤の加速度応答の増幅は、地盤の応答によるものかどうか現時点では不明である。そのため、後述する逆解析による地盤のせん断剛性と減衰を求めるデータとしては使用していない。せん断土槽自体の質量と飽和砂模型地盤との質量比はほぼ 1:6 で、Kutter et al.⁸⁾、Fiegel et al.⁹⁾ が使用しているせん断土槽と比較して土槽自体の慣性力の影響は小さい。また、拘束圧変化の影響を避けるために正弦波スイープ

Table 2 Amplification and natural frequency based on frequency response functions

| | Sine=0.2g | | Sine=0.6g | | Sine=1.2g | | Sine=2.5g | |
|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Amplification | Natural frequency | Amplification | Natural frequency | Amplification | Natural frequency | Amplification | Natural frequency |
| CASE-1-Dry | 12.2 | 98 | 9.0 | 92 | 6.8 | 89 | 4.5 | 84 |
| CASE-2-Dry | 13.6 | 97 | 10.7 | 92 | 8.1 | 89 | 5.5 | 84 |
| CASE-3-Dry | 15.6 | 95 | 9.8 | 89 | 7.1 | 86 | 4.7 | 83 |
| CASE-1-Water | 7.3 | 83 | 6.0 | 80 | 4.7 | 78 | — | — |
| CASE-2-30cs | 9.4 | 87 | 6.7 | 81 | 4.4 | 78 | — | — |
| CASE-3-100cs | 9.0 | 85 | 4.4 | 83 | — | — | — | — |

*) Natural frequency : Hz

Table 3 Shear modulus and damping ratio based on frequency response functions

| | Sine=0.2g | | Sine=0.6g | | Sine=1.2g | | Sine=2.5g | |
|--------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | G (MPa) | h (%) | G (MPa) | h (%) | G (MPa) | h (%) | G (MPa) | h (%) |
| CASE-1-Dry | 52.7 | 4.2 | 46.5 | 6.6 | 43.5 | 9.4 | 38.7 | 13.2 |
| CASE-2-Dry | 53.6 | 4.3 | 48.2 | 7.6 | 45.1 | 9.9 | 40.2 | 14.2 |
| CASE-3-Dry | 50.1 | 3.8 | 44.0 | 6.4 | 41.1 | 9.3 | 38.3 | 13.5 |
| CASE-1-Water | 46.3 | 6.0 | 43.1 | 7.6 | 40.9 | 12.3 | — | — |
| CASE-2-30cs | 52.5 | 6.3 | 45.6 | 12.3 | 42.3 | 17.9 | — | — |
| CASE-3-100cs | 49.2 | 6.7 | 46.9 | 14.2 | — | — | — | — |

加振による過剰間隙水圧は、有効上載圧に対する比が15%以下のデータを採用した。以後の検討において、過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下は考慮に入れていない。

今回行った実験について基盤入力加速 (A-G1) に対する地表付近地盤 (A-G4) の周波数伝達関数の応答倍率と固有振動数の一覧を **Table 2** に示す。同一の地盤条件で行われた実験では、加振加速度の増加に伴い地盤の固有振動数の低下と応答倍率の低下がみられる。実験の違いによる応答倍率の差は2から3と小さく、概ね妥当な結果であると考えられる。また、**Table 3** には弾性波動論により

$$G = \rho V_s^2$$

$$\text{ここに、} V_s = 4Hf_0$$

G : 地盤の平均せん断剛性

ρ : 地盤の密度

V_s : せん断波速度

H : 地盤深度

f_0 : 地盤の固有振動数

で求められる地盤の平均せん断剛性、および周波数伝達関数において $1/\sqrt{2}$ 法¹⁰⁾により求められる地盤の平均減衰の一覧を示す。**Table 3** に示すように応答のピークでの加振周波数が約100~80 Hzの高周波数で、間隙流体の粘性が30 cs および100 csの実験結果において、かな

り大きな減衰を示している。このことは、高粘性の間隙流体を用いた実験では、乾燥砂の実験に比較して大きな減衰を持つと推察される。

3. 遠心力場の振動台実験結果の逆解析による地盤のせん断剛性と減衰

(1) 乾燥砂の特性

今回実施した乾燥砂の正弦波スイープ加振の実験結果から得られた周波数伝達関数に対し、松田らの提案による逆解析¹¹⁾を行い、模型地盤の各層毎のせん断剛性および減衰を算定した結果を **Fig.7~Fig.9** に示す。なお、逆解析に用いたデータは文献¹¹⁾を参考にして模型地盤の共振点における上昇部分を対象としている。算定した模型地盤各層のせん断剛性と減衰は、**Fig.2** に示す各加速度計の埋設位置間における平均値である。したがって、図中の平均拘束圧 σ'_m は、各加速度計の中間位置での値である。この位置での平均拘束圧は、 $\sigma'_m = (1 + 2K_0)\sigma'_z$ で算定する。鉛直応力 σ'_z は地盤の密度と地盤深度から算定し、土圧係数 K_0 は文献⁴⁾と同様に0.3と仮定した。**Fig.7, 8, 9** から明らかなように、せん断剛性はせん断ひずみの増加によって小さくなり、拘束圧の影響も示している。減衰は、せん断ひずみの増加に伴って増加する傾向を示している。

(2) 飽和砂の特性

間隙流体として水、シリコンオイル30 cs、シリコンオイル100 csを用いた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乾燥砂地盤と同様の方法で求めた結果を **Fig.10~Fig.12** に示す。これらの図においても乾燥砂の実験と同様、せん断剛性のひずみ依存性および平均拘束圧の影響が現れている。また、減衰は平均拘束圧の影響は明確ではないがせん断ひずみの増加に伴って増加する傾向を示している。

Fig.7~Fig.9 に示した乾燥砂の結果と比較すると、同一の深度では飽和砂の平均拘束圧が小さいにもかかわらずせん断剛性の低下はみられず、減衰は大きい傾向を示している。また、乾燥砂の場合に比べせん断ひずみの増加に伴うせん断剛性は、低下の割合が著しい。

(3) 拘束圧の影響

遠心加速度の変化に伴う拘束圧変化の影響を調べるために、遠心加速度を13gにした飽和砂の加振実験を行った。なお、間隙流体はシリコンオイル100 csを用いている。この実験で求めたせん断剛性と減衰を **Fig.13** に示す。**Fig.12** と比較して、せん断剛性は約70%であり平均拘束圧の平方根に概ね比例している。このことは、要素試験から得られているこれまでの知見と矛盾せず、

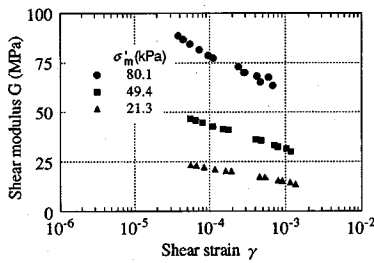


Fig.7 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-1-Dry

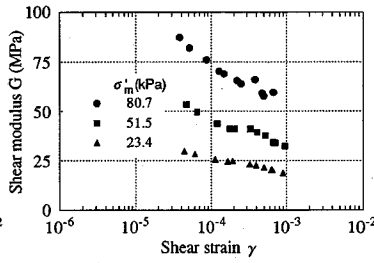


Fig.8 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-2-Dry

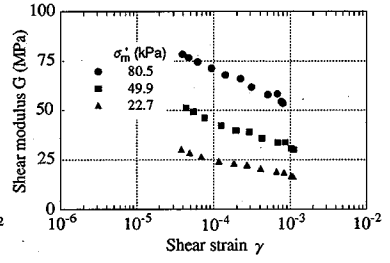


Fig.9 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-3-Dry

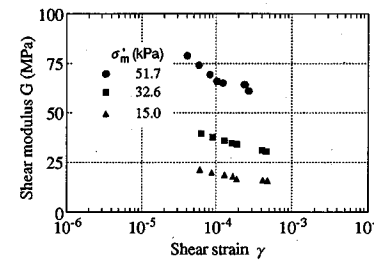
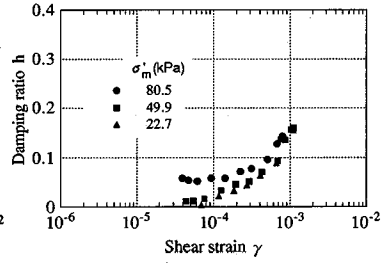
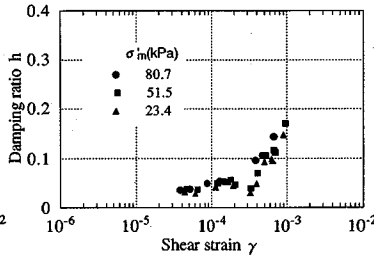
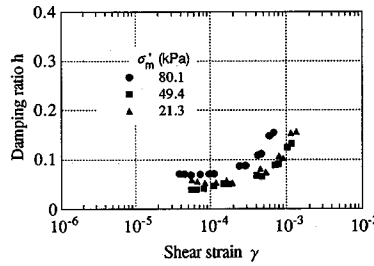


Fig.10 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-1-Water

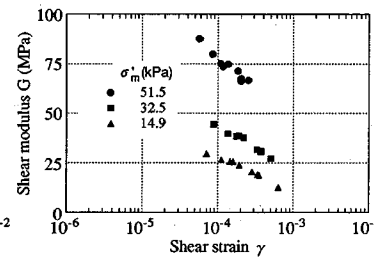


Fig.11 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-2-30 cs

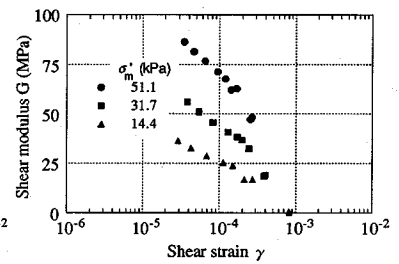


Fig.12 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for CASE-3-100 cs

飽和地盤に関して、遠心力場でもせん断剛性は平均拘束圧の関数と考えて良いと言える。

(4) 乾燥砂と飽和砂のせん断剛性および減衰の比較

平均拘束圧が、約 50 kPa である地盤のせん断剛性および減衰とせん断ひずみの関係を Fig.14 に示す。乾燥砂の剛性低下は、実験の違いによらず概ね同一であり実験結果の再現性は確保されている。

微小ひずみの範囲では同一の平均拘束圧において、飽

和砂地盤の場合は全般的にせん断剛性および減衰とも乾燥砂よりも約 1.5 倍大きい。飽和砂のせん断剛性の大きさおよび剛性低下は、間隙流体の違いによらずほぼ一致している。図中に、ほぼ同程度の相対密度の低周波数載荷 0.1 Hz による中空ねじり試験の結果⁴⁾を示すが、遠心実験より求めたものとほぼ同一である。この中空ねじりの結果は Iwasaki et al. の結果¹²⁾とほぼ一致しており、要素試験で得られる豊浦砂のせん断剛性として一般的なものである。乾燥砂は、せん断ひずみの小さい $\gamma=3.0$

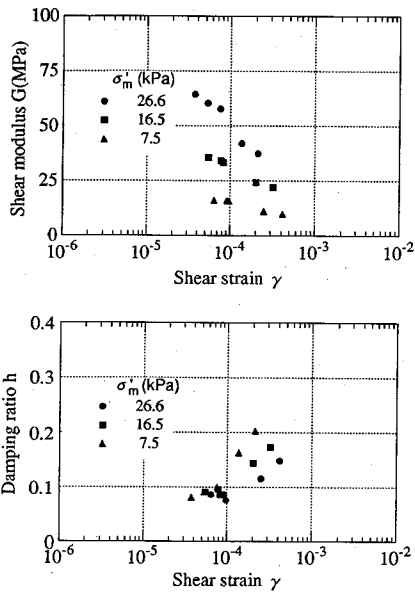


Fig.13 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for 13 g of CASE-3-100 cs

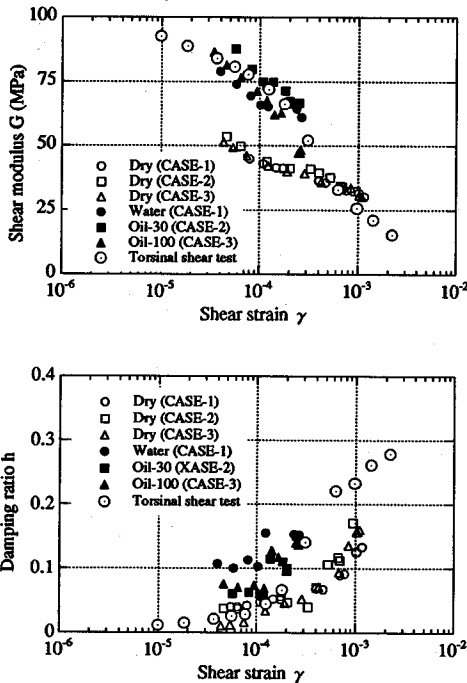


Fig.14 Shear modulus and damping ratio based on back analysis for $\sigma'_m = 50$ kPa

$\times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ の範囲では、中空ねじり試験より小さなせん断剛性を示し、せん断ひずみが $\gamma = 7.0 \times 10^{-4}$ になると中空ねじり試験と一致している。せん断土槽による乾燥砂と飽和砂のせん断剛性の違いは、遠心実験の

Table 4 Analytical constants for saturated test

| | ρ_t (t/m ³) | G_0 (MPa) | γ_{ref} ($\times 10^{-4}$) | h_{max} |
|----------|---------------------------------|----------------|--|-----------|
| GL+0.0m | 2.00 | 30 | 3.0 | 0.35 |
| GL-1.3m | | 40 | 3.0 | 0.35 |
| GL-4.5m | | 70 | 3.0 | 0.35 |
| GL-7.9m | | 100 | 3.0 | 0.35 |
| GL-11.7m | | | | |

乾燥砂による実験結果ばかりでなく、1g場の乾燥豊浦砂による振動台実験の結果もその傾向を示している⁴⁾。

Fig.14 によると減衰については、飽和砂は乾燥砂よりも約 1.5 倍大きく、中空ねじり試験の結果は微小ひずみの範囲で乾燥砂とほぼ一致している。飽和砂の減衰が、乾燥砂よりも大きくなるのは、以下のような現象が考えられる。高周波数载荷により、土粒子周辺の間隙流体の粘性減衰が付加される。土粒子の廻りに空気ではなく水やシリコンオイルなどの間隙流体がある場合、それが大きなひずみ速度で振動するとせん断変形に伴い土粒子間の流体の粘性が発揮され、ひずみ速度に応じて減衰が大きくなると思われる。試験結果をみると、間隙流体に水、シリコンオイル 30 cs および 100 cs の違いは明確には現われていない。したがって、間隙流体の粘性自体の影響は大きくないと考えられる。

4. 飽和砂実験の数値シミュレーション

(1) 解析方法及び解析定数

乾燥砂地盤の地震波加振による遠心力場の模型振動実験結果に対しては、逆解析から求めたせん断剛性と減衰を用い、修正 Ramberg-Osgood モデル¹³⁾による一次元地震応答解析で、実験結果をよくシミュレートできることを前報⁴⁾で示した。ここでは、上記との比較の意味から飽和砂地盤の実験と同様の検討を行う。解析は、シリコンオイル 100 cs を用いた場合の地震波加振実験を対象として行った。この実験はせん断剛性と減衰を求めたために行った正弦波スイープ加振実験の直後に実施したものである。

入力地震は、過剰間隙水圧の上昇の影響が現れないことを目的に実物換算で最大加速度が 26 Gal と比較的小さいものを対象とした。なお、加振実験結果で発生した過剰間隙水圧は最大でも 1.5 kPa であるので拘束圧低下の影響は無視できる。

解析定数は、Fig.12 に示したせん断剛性および減衰

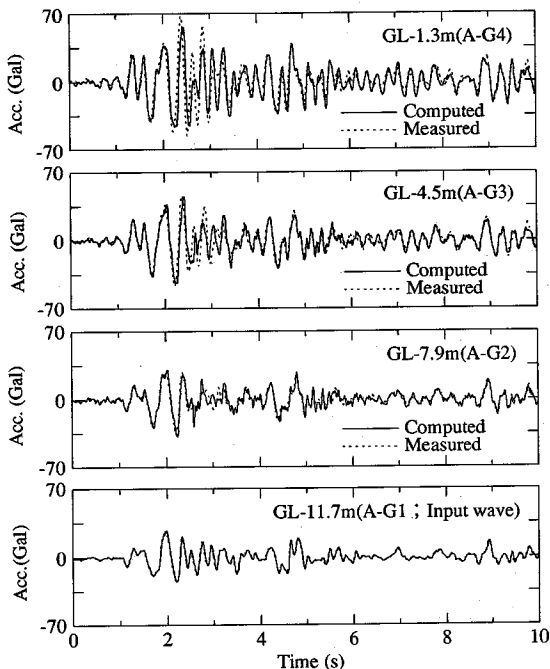


Fig.15 Comparison between computed and measured acceleration histories for saturated test

に基づいて決定した。解析に用いた定数の一覧を、Table 4 に示す。

(2) 解析結果と考察

実験と解析の地盤加速度の時刻歴に関する比較を Fig.15 に示す。図中、実線は解析であり、破線は実験である。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。解析は実験を、地盤の下部から地表近くまで良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 $\gamma=1.9 \times 10^{-4}$ である。このときのせん断剛性は、Fig.12 のせん断ひずみと剛性の値とほぼ一致していた。

以上の検討結果から、せん断土槽を用いた遠心実験では飽和砂の場合、正弦波スイープ試験の逆解析で求めた模型地盤のせん断剛性と減衰を用いることにより、高精度に実験結果をシミュレートすることができる。また先に示したように模型地盤のせん断剛性と中空ねじり試験から求めたせん断剛性は概ね一致するので、飽和砂の遠心実験において地盤のせん断剛性評価には中空ねじり試験の結果を適用できると考えられる。一方、飽和砂地盤における減衰は中空ねじり試験の結果よりも大きな値を適用すべきである。

同一の拘束圧で微小ひずみ領域におけるせん断剛性は、せん断土槽を用いた遠心実験では乾燥砂の方が飽和砂に比較して小さい。この違いの原因は、現時点では明

確ではない。しかし、この違いを反映した値を用いることによって、乾燥砂および飽和砂のいずれも地震波加振実験の結果を良く表現することができる。原因を明らかにするために、平均拘束圧を求めるときの土圧係数 K_0 や土槽慣性力などの詳細な評価を含め、今後さらに検討する必要がある。

5. まとめ

間隙流体に水とシリコンオイルを用いた豊浦砂の飽和地盤について、せん断土槽を用いた遠心力場の振動台実験を行った。逆解析により地盤のせん断剛性と減衰を求め、以下の結果が得られた。

- (1) 飽和砂のせん断剛性の大きさおよび剛性低下は、間隙流体の違いによらずほぼ一定である。
- (2) 同一の拘束圧に対する飽和砂地盤の場合、遠心力場の振動台実験では、せん断剛性は乾燥砂地盤よりも約 1.5 倍大きい。
- (3) 飽和砂のせん断剛性は、模型実験で得られたひずみの範囲では低周波数 0.1 Hz における中空ねじり試験とほぼ同一である。
- (4) 飽和砂の減衰は、間隙流体の違いによらないが、低周波数 0.1 Hz における中空ねじり試験の約 1.5 倍である。
- (5) 逆解析で求めた飽和砂地盤のせん断剛性と減衰を用いることにより、高精度に地震波による実験結果をシミュレートすることができる。

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、技術研究所 主任研究員 社本康広氏および技術研究所 客員研究員 張建民 博士に対し、心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 日下部治, 谷口栄一: 講座「遠心力模型実験」9. 適用事例-動的問題一, 土と基礎, Vol.36, No.8, pp.83-89, 1988年8月。
- 2) Hardin, B. O. and Richart, F.E.: Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, Vol.89, No.SM 1, January, pp.33-65, 1963.
- 3) D.S. Kim, K.H. Stokoe and J.M. Roesetto: Characterization of material damping of soils using resonant and torsional shear tests, *Proc. 5th Int. Conf., on SDEE, Univ. of Karlsruhe, Germany, Spt., pp.189-200, 1991.*
- 4) 佐藤正義: 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, 土木学会論文集, No. 499/III-28, pp.207-216, 1994年9月。
- 5) Fumio Tatsuoka, Toshio Iwasaki and Yoshikazu Takagi: Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus, *Soils and Foundations*,

Vol.18, No.2, pp.25-40, 1978.

- 6) 風間基樹, 稲富隆昌: 遠心力載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.
- 7) Masayoshi Sato: A new dynamic geotechnical centrifuge and performance of shaking table tests, *Proceedings of The International Conference Centrifuge 94*, Singapore, pp.157-162, Balkema, 1994.
- 8) Kutter, B., Idriss, I., Khonke, T., Lakeland, J., Li, X., Zeng, X., Tauscher, R., Goto, Y. and Kubodera, I.: Design of a large earthquake simulator at UC Davis, *Proceedings of The International Conference Centrifuge 94*, Singapore, pp.169-175, 1994.
- 9) Fiegel, G., Hudson, M., Idriss, I., Kutter, B. and Zeng, X.: Effect of model containers on dynamic soil response, *Proceedings of The International Conference Centrifuge 94*, Singapore, pp.145-150, 1994.
- 10) 例えば土木技術者のための振動便覧:(社)土木学会, pp. 4-5, 1985年10月.
- 11) 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.
- 12) Toshio Iwasaki and Fumio Tatsuoka: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- 13) 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.

(1994. 8. 23 受付)

SHEAR MODULI AND DAMPING RATIOS OF SATURATED SAND DEPOSITS ON SHAKING TABLE TESTS IN THE CENTRIFUGE

Masayoshi SATO

Shaking table tests in a centrifuge have been carried out for dry and saturated deposits of the Toyoura sand which were prepared in laminar container, 74 cm long, 34 cm wide, and 50 cm deep. Model deposits were saturated with either water or silicon oil, and then subjected to sinusoidal input shaking under centrifuge accelerations. Shear moduli and damping ratios were calculated using back analysis for the results of dry and saturated sand model tests. Consequently, it has been found that the shear moduli and the damping ratios of the sand in saturated state is 1.5 times large as same as those of it in dry at the same confining pressure; and dynamic centrifuge model test results of saturated sand can be simulated with a good level of precision on the basis of the shear moduli and damping ratios determined by back analysis.