

# 性質が異なる粒状物体のせん断弾性係数と非線形振動応答

## との関係に関する実験研究

日大生産工（院） 山田 雄児 日大生産工 木田 哲量  
日大生産工 澤野 利章 日大生産工 阿部 忠

### 1. はじめに

我が国の主要都市の地盤は沖積層などの軟弱な地盤であることが多いため地震による被害の拡大が懸念される。それらの地盤は層状構造を形成しており、特に砂質土を多く含む地盤は外力により強制水平振動を受けた場合に非線形の振動応答を呈するため、共振振動数や最大応答加速度の特定が困難であるとされている。そのため、地震時における砂質土層の振動応答を明確にすることは重要であり、これまで様々な条件下における非線形振動応答実験が行われてきた。一方で、その応答を表す共振曲線算出式の展開がなされているが、未知数のパラメータが多く未だ確立されていない。

そこで本研究では、多くのパラメータのうちのせん断弾性係数に着目し、ウルトラソニースコープを用いて各種砂のせん断波伝播速度から算出したせん断弾性係数を用いた非線形振動応答の計算値と振動実験により得た結果との整合性を検討することとする。

### 2. 実験概要

非線形振動応答実験およびせん断弾性係数測定実験に使用する粒状物体としての砂は山口県豊浦産の標準砂（以下、豊浦標準砂と称す）、JIS規格に定められたセメント試験用の標準砂（以下、JIS標準砂と称す）、千葉県成田地方

で採取された山砂（以下、成田山砂と称す）の3種類とする。

#### 2-1 非線形振動応答実験装置および実験方法

使用する供試体は、せん断断面寸法 300mm × 300mm の軽量溝鋼製の型枠に、砂の流出を防止するためのゴムシートを取り付け、鋼製のベアリングを挟みながら高さ 410mm となる 26 段積み上げて、振動によって締固めながら各砂を 400mm の高さまで投入したものとする。この供試体を油圧式二軸振動台上に固定し、入力加速度を 50gal、100gal それぞれ一定に保ちながら、入力振動数を 0.2Hz 刻みに増加、減少させ、供試体砂表面上の応答加速度を測定する。

#### 2-2 せん断弾性係数測定実験装置および実験方法

基盤に固定したスタイロフォーム板の中央にウルトラソニースコープのせん断波受振子を固定し、その上部の塩化ビニル袋内に各砂を満たした鋼管型枠を設置する。さらに、その上部に発振子、変位計の順に設置する。なお、鋼管型枠は内径 130mm、厚さ 4mm、高さ 20mm、30mm、40mm の3種類を使用した。実験装置概略を図-1に示す。実験方法は、塩化ビニル袋を密閉し、真空ポンプにより袋内の空気を吸引し、負となる圧力を砂に作用させる。その後、

---

Experiment Study on Elastic Shear Coefficient and Non-Linear Vibration Response  
of each different Property's Granular Materials

by Yuji YAMADA , Tetsukazu KIDA  
Toshiaki SAWANO and Tadashi ABE

発振子によるせん断波を発生させ、袋内の内圧を0.09MPaから0.01MPa間を0.01MPa刻みに減少させ、各内圧作用時におけるせん断波伝播時間および砂層厚を測定し、砂層厚を伝播時間で除してせん断波速度とする。この手順で各鋼管型枠高さにおいて10回ずつ測定する。

### 3. 結果および考察

#### 3-1 非線形振動応答実験結果

図-2~4に豊浦標準砂、JIS標準砂、成田山砂の供試体における振動実験の結果を示す。これより、すべての供試体において入力加速度が大きくなるにつれて共振振動数が低振動数域に移行する砂の材料特性による現象および共振振動数付近で応答加速度が急激に増加、減少するジャンピング現象が発生していることが確認できる。このことから、力学特性の異なる砂を用いた場合においても、その振動応答は非線形を示すことが確認できた。

#### 3-2 せん断弾性係数測定実験結果

各内圧作用時における平均せん断波速度を表-1に示す。せん断弾性係数 $G_0$ は式(1)により算出した。

$$G_0 = \frac{V_s^2 \cdot \rho}{g} \times 10 \quad (1)$$

ここで、 $V_s$ : せん断波速度(m/sec)、

$\rho$ : 密度(g/cm<sup>3</sup>)

$g$ : 重力加速度(980cm/sec<sup>2</sup>)

なお、密度はJISA1224に定められた砂の最小密度・最大密度試験で測定した最大密度とし、その結果を表-2に示す。これより、すべての砂において、内圧が減少するとせん断弾性係数の値も減少する傾向を示した。これは、内圧の減少に伴って土粒子間の結合力が低下し、土粒子の間隙が大きくなったためにせん断波の伝播時間が増加したものと考えられる。また図-5~7は、各砂のせん断弾性係数 $G_0$ と内圧の関係である。これらの図から、各砂ともに内圧の減少に伴うせん断弾性係数の減少傾向が異なることが確認できるが、特にJIS標準砂の低下

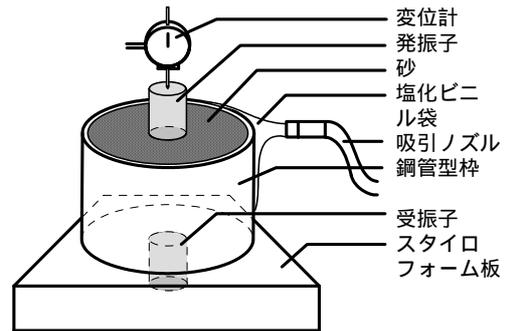


図-1 実験装置概略

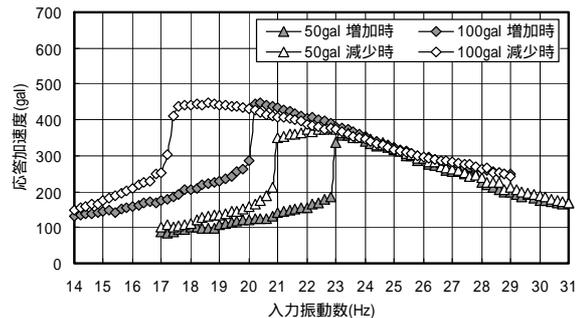


図-2 豊浦標準砂

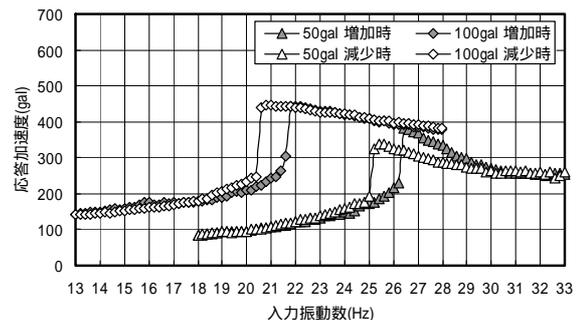


図-3 JIS標準砂

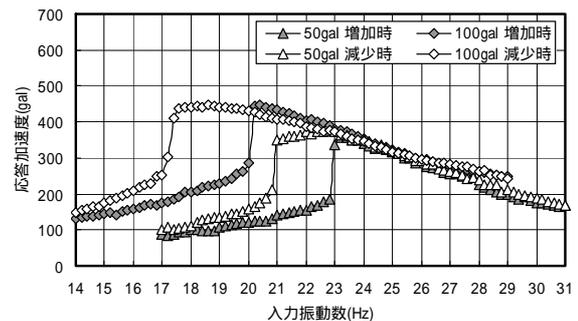


図-4 成田山砂

表-1 せん断波速度

内圧 (MPa)	せん断波速度(m/sec)		
	豊浦標準砂	JIS標準砂	成田山砂
0.09	214	209	190
0.08	213	205	189
0.07	211	201	188
0.06	207	194	185
0.05	202	186	182
0.04	195	176	177
0.03	186	162	171
0.02	176	146	163
0.01	158	123	150

率が大きな原因としては、JIS標準砂は他の砂に比べて粒径が大きく、粒度分布も広範囲であるためにせん断波が伝播しにくいと考えられる。また、豊浦標準砂と成田山砂は0.09MPa以上の内圧が作用するとせん断弾性係数はある一定の値に収束すると推測できる。JIS標準砂においてもさらに大きな内圧を作用させることでせん断弾性係数はある値に収束すると考えられる。

次に、実験により算出したせん断弾性係数を振動実験に用いた供試体状態に適用する。振動実験に用いた供試体は高さ400mmであることから内部に土圧が生じている。この土圧を各砂の単位体積質量から算出して平均内圧に換算すると内圧は0.01MPa以下となる。しかし、内圧が0.01MPa以下におけるせん断波伝播速度の測定は困難であるため、せん断弾性係数が収束し始める前の0.04MPa以下の値を用いて最小二乗法による近似により推定し、その結果を表-3に示す。

このように得られたせん断弾性係数を非線形振動応答を示す共振曲線算出式に代入して得られた共振曲線について検討する。まず、粒状物体を非線形振動モデルと仮定して、粒状構造体が底面から強制振動を受けた場合の運動方程式に非線形フォークト体のせん断応力、粒状構造体が一次振動モードに従って振動すると仮定した場合の変位 $u$ を代入し、底面から表面までを積分することにより粒状構造体の基本方程式<sup>1)</sup>が得られる。その基本方程式をさらに整理することで底面応答ひずみパラメータと振動数パラメータの関係式(2)を得ることができる。

$$\left\{ \left( 1 - \frac{3}{16} \bar{P}^2 \right)^2 + 4h^2 \bar{P}^2 \right\} = P^2 \quad (2)$$

ここで、 $\frac{G'}{G_0} = 2h$

$$\frac{4L^2}{G_0} \bar{P}^2 = \frac{8}{G_0} \cdot \frac{L}{h} \bar{P} = P$$

表 - 2 最小密度・最大密度

	豊浦標準砂	JIS標準砂	成田山砂
最小密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.42	1.60	1.36
最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.65	1.84	1.62

表 - 3 供試体状態におけるせん断弾性係数

	平均内圧 (MPa)	せん断弾性係数 G <sub>0</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
豊浦標準砂	0.0065	38.8
JIS標準砂	0.0072	24.4
成田山砂	0.0064	35.0

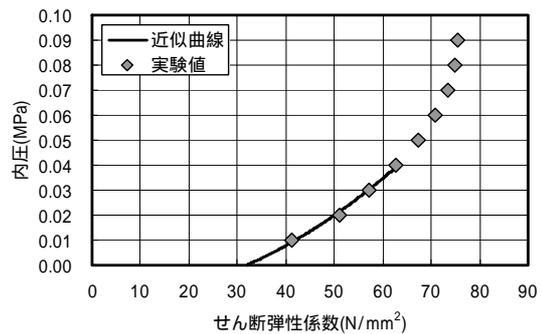


図 - 5 豊浦標準砂

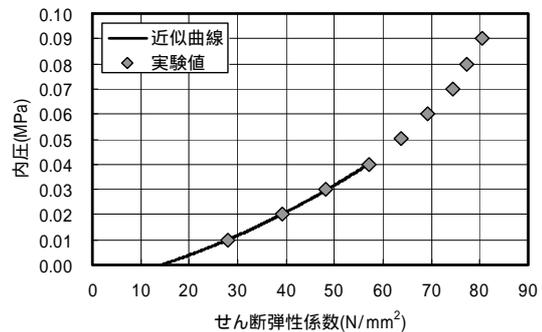


図 - 6 JIS標準砂

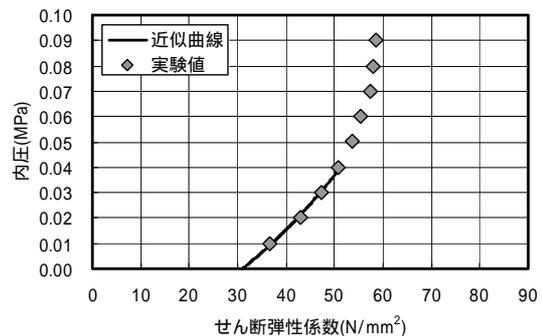
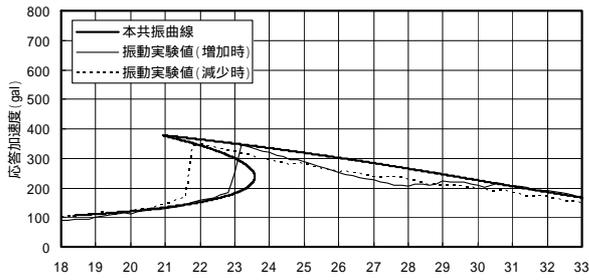
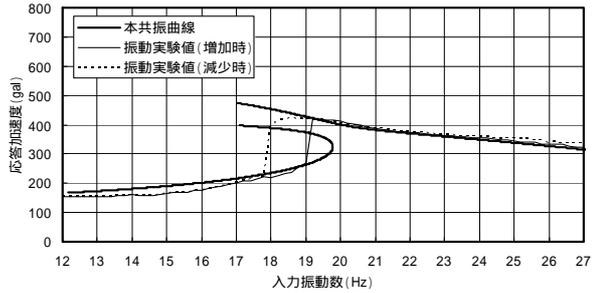


図 - 7 成田山砂

G<sub>0</sub> : せん断弾性係数、G' : 粘性係数、  
L : 粒状構造体の高さ、 $\rho$  : 粒状物体の密度、  
 $\omega$  : 入力振動数、 $\bar{P}$  : 入力加速度、  
 $\bar{u}_1$  : 粒状構造体の最大ひずみ

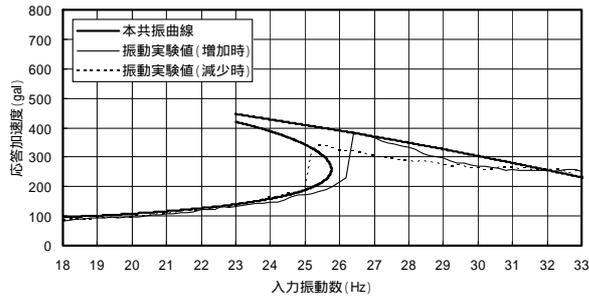


(a) 50gal

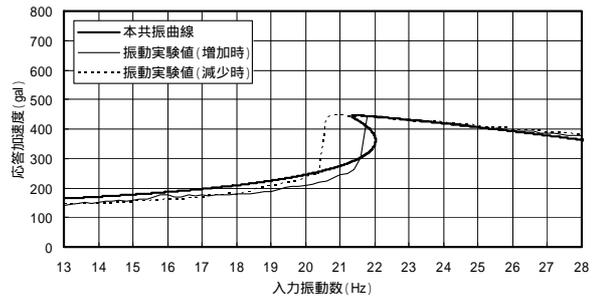


(b) 100gal

図 - 8 豊浦標準砂近似結果

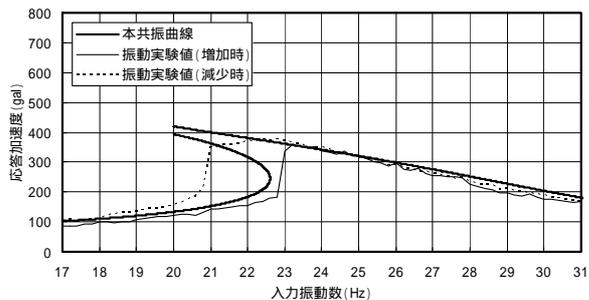


(a) 50gal

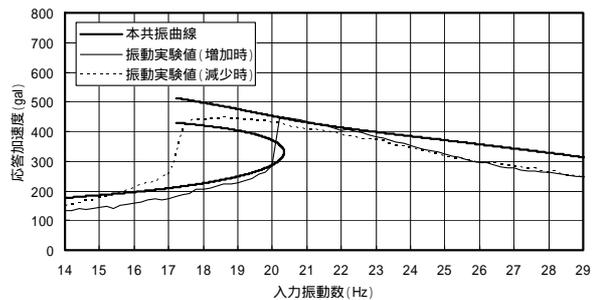


(b) 100gal

図 - 9 JIS 標準砂近似結果



(a) 50gal



(b) 100gal

図 - 10 成田山砂近似結果

また、底面応答ひずみパラメータを応答加速度に、振動数パラメータを入力振動数に変換することにより共振曲線を得る。なお、応答加速度  $a$  は応答変位による加速度と入力加速度の和によって求められることから式(3)により換算する。

$$|a| = \frac{\bar{P}}{P} \frac{4}{1 + 4h^2} \left(1 + 4h^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、最大ひずみ  $\epsilon_0$  および粘性係数  $G'$  を仮定しながら、繰り返し計算を行うと、粘性減衰パラメータ  $h$  および外力パラメータ  $P$  を表-4に示す値の時に、図-8~10のように共振曲線算出式による結果を振動実験の結果とほぼ近似させることができた。

#### 4. まとめ

各砂のせん断弾性係数  $G_0$  は内圧の作用状態

表 - 4 各種パラメータ仮定値

	豊浦標準砂		JIS標準砂		成田山砂	
	50gal	100gal	50gal	100gal	50gal	100gal
粘性減衰 パラメータ $h$	0.190	0.409	0.222	0.467	0.170	0.383
外力 パラメータ $P$	0.276	0.551	0.233	0.465	0.254	0.509

に大きく依存し、内圧が減少するほど低下率は大きくなり、内圧の増加する場合は一定値に収束する。

せん断弾性係数による非線形振動応答値は砂の性質が異なる場合でも、振動実験による結果とほぼ近似させることが可能であった。

#### 参考文献：

1) 熊膳和也、粒度構成が異なる粒状構造体の非線形せん断振動応答に関する研究、日本大学大学院生産工学研究科修士論文、(2004)、pp.10-18