

# 粒径の異なる粒状物体のせん断弾性係数が非線形性に与える影響の実験研究

日大生産工（院） 橋井 康美 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

我が国では、1995年の兵庫県南部地震をはじめとし、地震の規模に関わらず地盤に関する地震被害が多く報告されている。その主要因は都市部や産業活動地域の多くが立地する地盤が沖積層などの軟弱地盤であるからである。特に粒状物体である砂質土を多く含む地盤は、地震動などの強制水平振動を受けた場合、共振振動数や応答加速度の特定が困難な非線形な振動応答を示すため、地盤特性を考慮した耐震設計が困難であるとされている。既往の研究では、様々な条件のもとで砂質土の非線形振動応答に関する研究が行われているが、依然未解明な要素が存在している。

そこで本研究では、非線形振動を支配する要因の1つであるせん断弾性係数に着目し、粒径の異なる各種砂のせん断弾性係数を算出し、これを理論式に適用して非線形振動応答解析を行い、振動応答実験で得られた実験値との整合性を検討することとする。さらに既往の研究<sup>1)</sup>により得られている結果と比較し、粒度の違いが非線形振動応答に与える影響について考察することとする。

## 2. 実験概要

### 2-1 供試体に使用する砂

振動応答実験およびせん断波速度測定実験に使用する粒状物体としての砂は、粒径の異なる珪砂3号、珪砂5号、珪砂7号の3種類を用

いる。なお、既往の研究に用いられている砂は山口県豊浦産の標準砂（以下、豊浦標準砂と称す）である。各砂の土質力学特性を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。

表-1 土質力学特性

	最小密度 (N/mm <sup>3</sup> )	最大密度 (N/mm <sup>3</sup> )	均等係数
珪砂3号	$1.38 \times 10^{-5}$	$1.65 \times 10^{-5}$	1.62
珪砂5号	$1.32 \times 10^{-5}$	$1.62 \times 10^{-5}$	2.00
珪砂7号	$1.26 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-5}$	2.24
豊浦標準砂	$1.39 \times 10^{-5}$	$1.62 \times 10^{-5}$	1.50

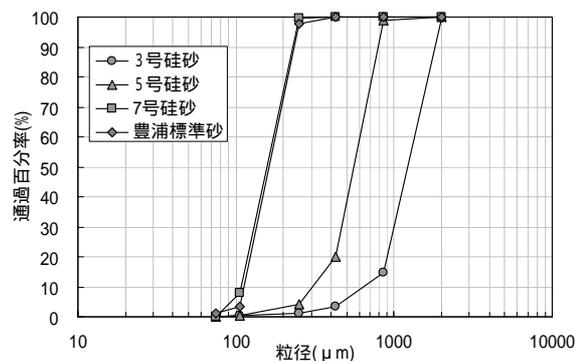


図-1 粒径加積曲線

### 2-2 実験装置および実験方法

せん断弾性係数はせん断波速度を求めることにより算出される。そこで、せん断波伝播時間をウルトラソニースコープにより、試料の厚さはダイヤルゲージ式変位計により計測する。実験方法は、塩化ビニル袋内において鋼管型枠内に試料となる砂を満たして密閉後、真空ポンプにより塩化ビニル袋内の空気を吸引して、試料に負圧を作用させる。その後、ウルトラソニースコープのせん断波発・受振子を砂面に接触させることでせん断弾性波を入力する。試料を

Experimental Study on the Influence of Elastic Shear Coefficient on  
Granular Body by Different Grain Size give to the Non-Linearity  
by Yasuyoshi HASHII , Tetsukazu KIDA  
Toshiaki SAWANO and Tadashi ABE

保持する鋼管型枠には内径 130mm、高さ 20mm、厚さ 4mm のものを使用する。図 - 2 に実験装置概略を示す。袋内の内圧を調整しながら 0.09MPa から 0.01MPa 間を 0.01MPa ずつ減少させ、各内圧作用時のせん断波伝播時間および試料の厚さを計測し、せん断波伝播時間で試料の厚さを除すことでせん断波速度を得る。この手順で各試料において 15 回ずつ計測する。

### 3. 実験結果

#### 3 - 1 せん断弾性係数算出結果

表 - 2 に珪砂 3 号、珪砂 5 号、珪砂 7 号、豊浦標準砂の各内圧作用時における平均せん断波速度を示し、式(1)より求めたせん断弾性係数を表 - 3 に示す。

$$G_0 = \frac{V_s^2 \times}{g} \times 10^3 \quad (1)$$

ここで、 $V_s$  : せん断波速度(m/sec<sup>2</sup>)

: 密度(N/mm<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)

なお、密度は JISA1224 に定められた砂の最小密度・最大密度試験で求め、表 - 1 に示した最大密度とした。

これより、各砂ともに内圧が減少するに伴い、せん断波速度が低下し、せん断弾性係数が減少する傾向にあることがわかる。これは内圧の減少に伴い、土粒子間の間隙が大きくなり、せん断波伝播時間が大きくなり、せん断波速度の低下に伴いせん断弾性係数が減少している。既往の研究により得られている豊浦標準砂と比較すると、豊浦標準砂、珪砂 7 号、珪砂 5 号、珪砂 3 号の順でせん断弾性係数が小さくなっているのがわかる。これは材料を構成している砂の粒径に起因するものと考えられ、図 - 1 および表 - 1 より、3 号珪砂がもっとも粒度が粗く、珪砂 5 号、珪砂 7 号、豊浦標準砂となるにつれ、粒径が細かくなっていることから、粗粒分を多く含む材料で構成された砂ほど土粒子間の間隙が大きく、せん断波が伝播しにくくなること

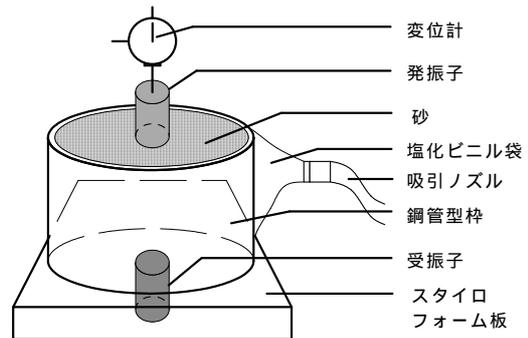


図 - 2 実験装置概略

表 - 2 平均せん断波速度

内圧 (MPa)	せん断波速度 Vs(m/sec)			
	珪砂 3 号	珪砂 5 号	珪砂 7 号	豊浦標準砂
0.09	193	198	203	214
0.08	192	196	200	213
0.07	190	193	198	211
0.06	187	189	194	207
0.05	183	185	189	202
0.04	176	179	183	195
0.03	168	172	175	186
0.02	157	161	165	176
0.01	149	146	151	158

表 - 3 せん断弾性係数

内圧 (MPa)	せん断弾性係数 Go(N/mm <sup>2</sup> )			
	珪砂 3 号	珪砂 5 号	珪砂 7 号	豊浦標準砂
0.09	62	65	67	76
0.08	61	63	65	75
0.07	60	62	64	73
0.06	58	59	61	71
0.05	56	56	58	67
0.04	52	53	54	63
0.03	47	49	50	57
0.02	41	43	44	51
0.01	37	35	37	41

から、せん断弾性係数の値が小さくなるものと考えられる。しかし、粒径に大きな違いの見られない豊浦標準砂と珪砂 7 号を比較してみると、せん断弾性係数は同じ値を示していない。つまり、構成材料の粒径が同じ程度であっても、土質力学特性の違いによりせん断波伝播時間が変わることから、必ずしもせん断弾性係数は粒径に依存していなと考えられる。また、図 - 3 ~ 6 は各砂のせん断弾性係数と内圧の関係を示したものである。これらの図から各砂ともに 0.09MPa 以上の内圧が作用する場合にはほぼ一定の値に収束するものと推測できる。

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

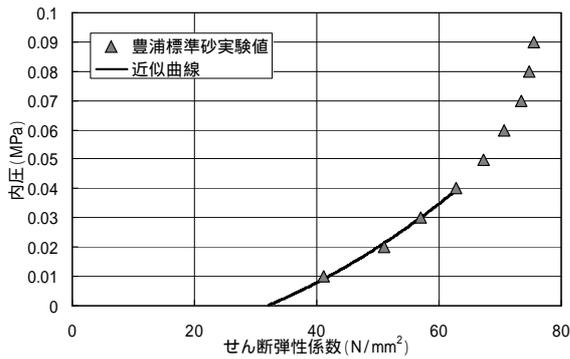


図 - 3 豊浦標準砂近似曲線

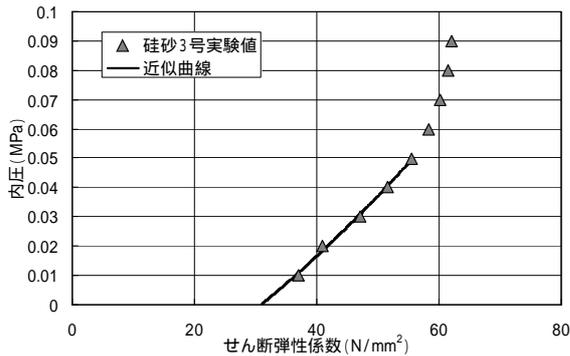


図 - 4 珪砂3号近似曲線

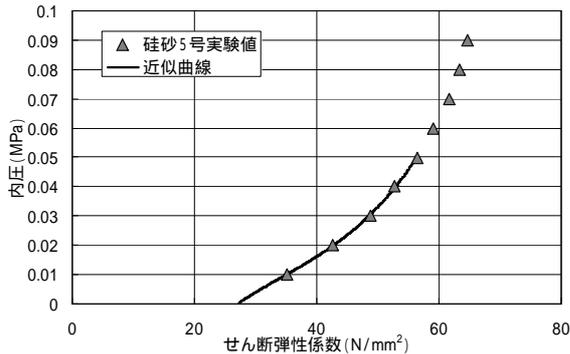


図 - 5 珪砂5号近似曲線

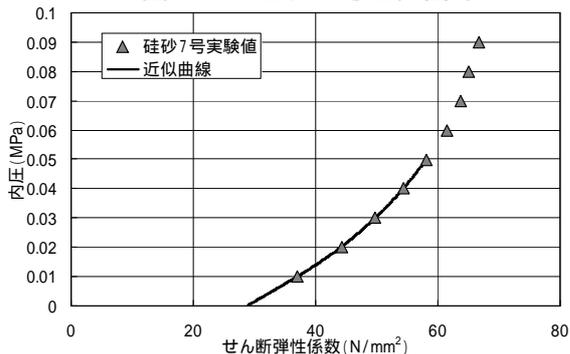


図 - 6 珪砂7号近似曲線

実験で用いた供試体高さは 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、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が困難であるため、せん断弾性係数が収

束しはじめる前の 0.05MPa 以下の値を用いて最小二乗近似によりせん断弾性係数を推定し、その結果を表 - 4 に示す。

表 - 4 供試体状態におけるせん断弾性係数

	土圧 (MPa)	せん断弾性係数 $G_0(N/mm^2)$
珪砂3号	0.00654	34.6
珪砂5号	0.00647	32.1
珪砂7号	0.00639	34.1
豊浦標準砂	0.00654	38.8

このようにして得られたせん断弾性係数を共振曲線算出式に適用し、得られた共振曲線の適合性を検討する。まず、粒状物体を非線形振動モデルと仮定し、粒状物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オークト体のせん断応力、粒状物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物体の基本方程式<sup>2)</sup>を得る。この基本方程式を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。また、振動数パラメータを入力加速度に、底面応答ひずみパラメータを応答加速度に変換することにより共振曲線を得る。なお、応答加速度  $a$  は応答加速度倍率として式(3)により換算する。

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

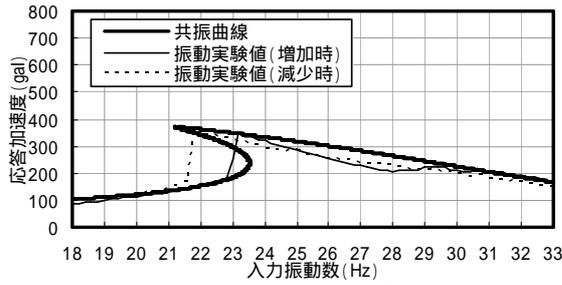
ここで、 $\frac{\gamma}{\gamma_1} = \eta$ 、 $\frac{G'}{G_0} \omega = 2h$

$$\frac{\rho}{G_0} \cdot \frac{4L^2}{\pi^2} \omega^2 = \eta^2, \quad \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{L\rho\bar{P}}{G_0\gamma_1} = P$$

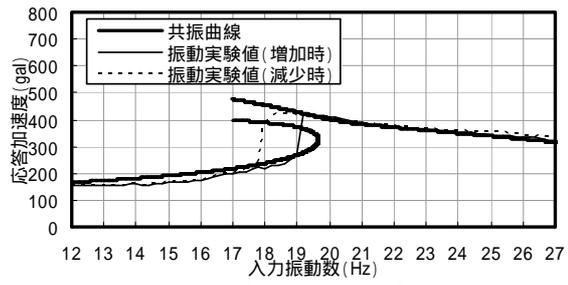
$$|a| = \frac{\bar{P}}{P} \frac{4}{\pi} \eta \left( 1 + 4h^2 \eta^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$G_0$  : 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、 $\gamma_1$  : 粒状構造体の最大せん断ひずみ

ここで、既往の研究により得られている豊浦標準砂の結果を図 - 7 に示す。本実験における

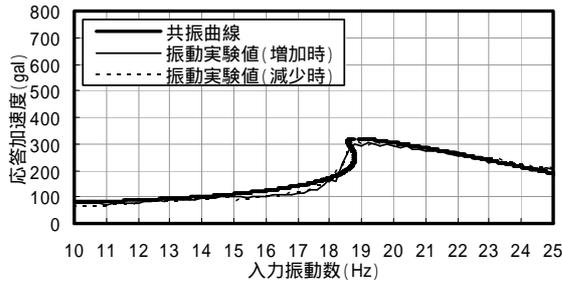


(a) 50gal

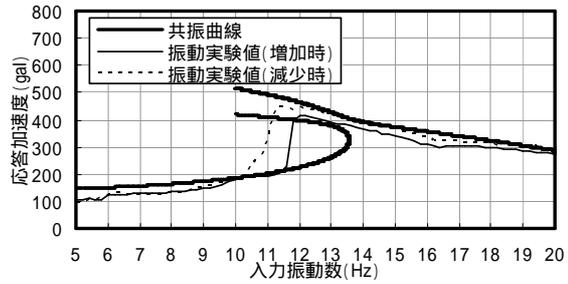


(b) 100gal

図 - 7 豊浦標準砂共振曲線

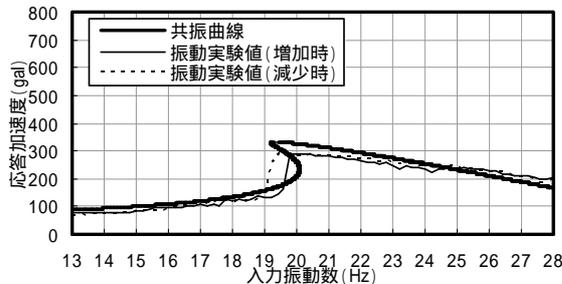


(a) 50gal

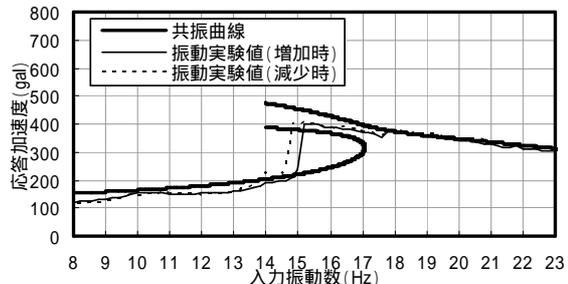


(b) 100gal

図 - 8 珪砂 3号共振曲線

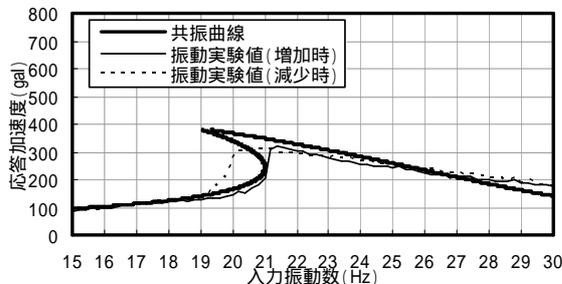


(a) 50gal

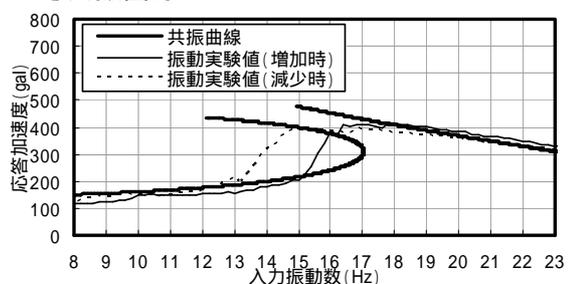


(b) 100gal

図 - 9 珪砂 5号共振曲線



(a) 50gal



(b) 100gal

図 - 10 珪砂 7号共振曲線

珪砂 3号、珪砂 5号、珪砂 7号の粘性係数  $G'$  および最大せん断ひずみ  $\gamma_1$  を適宜に仮定すると、図 - 8 ~ 図 - 10 に示すように入力加速度 50gal および 100gal 共に共振曲線算出式による結果と振動応答実験結果をほぼ近似させることができた。

#### 4. まとめ

せん断弾性係数は内圧の減少に伴い減少する。また、内圧が 0.09MPa 以上の場合は一定の値に収束する。

理論式において粘性係数  $G'$  および最大せん断ひずみ  $\gamma_1$  を適宜に仮定することで、振動応答実験結果と近似した結果を得られる。

#### 参考文献：

- 1) 山田 雄児、平成 18 年度 日本大学生産工学部 学術講演会 「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研究」
- 2) 熊膳 和也、平成 16 年度 修士論文「粒度構成が異なる粒状物体の非線形せん断振動応答に関する研究」