

粒状物体の非線形振動応答とせん断弾性係数に関する一考察

日本大学 学生員 ○山田 雄児 日本大学 正会員 木田 哲量
日本大学 正会員 澤野 利章 日本大学 正会員 阿部 忠

1. はじめに

我が国の都市部の地盤は沖積層などの軟弱地盤であることが多く、地震動による被害が拡大する地盤である。特に砂質土を多く含む地盤は、強制振動を受けた場合に非線形の振動応答を呈するために、地盤特性を考慮した耐震設計を行うことは困難とされている。これまで様々な条件下における砂質土層の非線形振動応答に関する実験が行われているが、これらの実験では非線形振動応答現象のみの再現であり、各種パラメータについては言及されていない。このパラメータの中でもせん断弾性係数を解明することは共振振動数の特定、さらには砂質土層の非線形振動応答の解明につながる重要な課題であると考えられる。

そこで本研究は、非線形振動応答実験の結果とウルトラソニースコープを用いて砂のせん断波伝播速度から求めたせん断弾性係数による非線形振動応答の計算結果を比較し、本実験で求めたせん断弾性係数の非線形振動応答への適合性について考察することとする。

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）とする。

2-1 非線形振動応答実験装置および実験方法

振動実験に用いる供試体は、せん断面寸法 300mm×300mm、高さ 10mm の供試体型枠を型枠の上下間にベアリングを挟みながら 26 段積み上げて高さ 410mm とし、400mm の高さまで振動により締固めながら豊浦標準砂を投入したものである。この供試体を油圧式二軸振動台上に固定し、入力加速度 50gal、100gal で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

実験装置は、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、その上部へ塩化ビニル袋内に豊浦標準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。次に、真空ポンプを用いて袋内部を負圧として豊浦標準砂に圧力を作用させる。ここで使用した鋼管型枠は、内径 130mm、厚さ 4mm、高さ 20mm、30mm、40mm の 3 種類である。実験装置の概略を図-1 に示す。実験方法は、塩化ビニル袋を密閉し、真空ポンプにより内部の空気を吸引する。その後、発振子により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 ずつ減少させながら、各内圧作用時のせん断波の伝播時間および砂層厚を測定し、砂層厚をせん断波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。

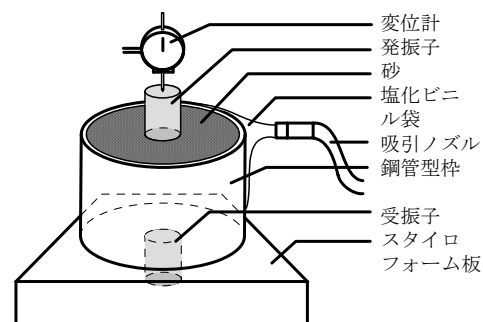


図-1 実験装置概略

3. 結果および考察

3-1 非線形振動応答実験結果

図-2 および図-3 より、入力加速度を増加させるに伴って共振振動数が低い振動数に移行する砂の材料特性により生じ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確認でき、非線形性が現れる結果が得られた。

キーワード：非線形振動、砂質土、せん断弾性係数、せん断波速度

連絡先：〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1 TEL. 047-474-2429

3-2 セン断弾性係数測定実験結果

各内圧における平均せん断波速度を表-1に示す。また、式(1)を用いて算出したせん断弾性係数を同表に示す。

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

ここで、 V_s ：せん断波速度 (m/sec)、 ρ ：密度 (1.65 g/cm³)、

g ：重力加速度 (980cm/sec²)

なお、密度はJISA1224に定められた砂の最小密度・最大密度試験に基づいて測定した最大密度とする。

これによると、内圧が減少するにつれて、せん断弾性係数の値も減少する傾向を示す。これは、内圧の減少につれて土粒子間の結合力が低下し、土粒子の間隙が大きくなることからせん断波の伝播時間が増したものと考えられる。さらに、図-4はせん断弾性係数と内圧の関係を最小二乗法による近似曲線で表したものである。この図から、内圧が大きくなるにつれて、せん断弾性係数の値は増加し、0.09MPa以上の内圧が作用すると、ある一定の値に収束すると考えられる。

次に、算出したせん断弾性係数を非線形振動応答実験の実験条件の一部に適用して、これまで展開されてきた共振曲線算出式に代入した後、得られた共振曲線を用いて整合性を検討する。まず、粒状物体を非線形フォークト体モデルと仮定して、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 τ 、粒状構造体が1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¹⁾粒状構造体の基本方程式が得られる。その基本方程式をさらに整理して底面応答ひずみパラメータ η と振動数パラメータ ξ の関係式(2)を得る。

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

$$\text{ここで、} \frac{\gamma}{\gamma_1} = \eta, \frac{G'}{G_0} \omega = 2 h \xi, \frac{\rho}{G_0} \cdot \frac{4 L^2}{\pi^2} \omega^2 = \xi^2, \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{L}{G_0} \frac{\rho \bar{P}}{\gamma_1} = P$$

G_0 ：せん断弾性係数、 G' ：粘性係数、 L ：粒状構造体の高さ、

ρ ：粒状物体の密度、 ω ：入力振動数、 $\bar{P}$ ：入力加速度、

γ_1 ：粒状構造体の最大ひずみ

底面応答ひずみパラメータ η を応答加速度に、振動数パラメータ ξ を入力振動数に変換することにより、入力振動数と応答加速度の関係である共振曲線が得られる。ここで、振動実験に用いた最大ひずみ γ_1 および粘性係数 G' は明らかではないが、繰り返し計算を行うと、図-5および図-6のように、本共振曲線が既往の実験結果とほぼ近似できることが明らかになった。

4. 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

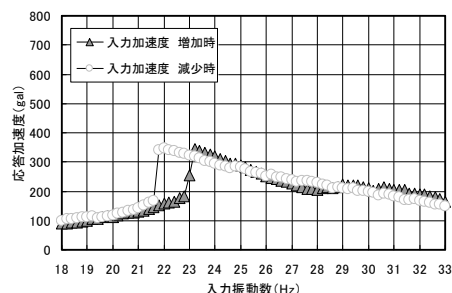


図-2 豊浦標準砂供試体 50gal

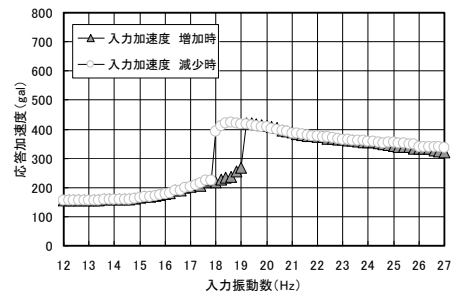


図-3 豊浦標準砂供試体 100gal

表-1 セン断弾性係数算出結果

内圧 (MPa)	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (kgf/cm ²)
0.09	214	771.1
0.08	213	763.9
0.07	211	749.6
0.06	207	721.4
0.05	202	687.0
0.04	195	640.2
0.03	186	582.5
0.02	176	521.5
0.01	158	420.3

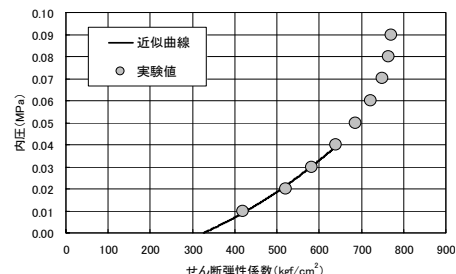


図-4 豊浦標準砂近似曲線

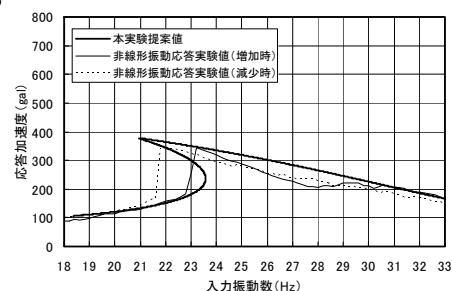


図-5 豊浦標準砂 50gal

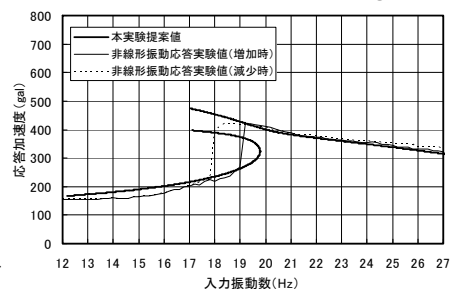


図-6 豊浦標準砂 100gal