

振動式締固め機械の振動特性を利用した地盤の締固め度の評価手法について

建山和由*・中島 聡**・藤山哲雄***

振動式締固め機械の振動挙動の変化から地盤の締固め度を計測する手法の確立を目指し、起振機の振動挙動と地盤剛性との関係、ならびにこれに及ぼす振動条件の影響について数値計算により考察を行い、この結果をもとに振動条件によらず地盤剛性を評価することのできる計測手法の提案を行った。さらにこの手法の適用性を小型の起振機を用いた室内実験ならびに大型のタンバを用いた現場実験により検討した。

Key Words : soil compaction, ground stiffness, vibrating exciter, acceleration, frequency

1. はじめに

タンバや振動ローラなどの振動式締固め機械は、機械内部に回転する偏心重りをもち、その遠心力により周期的な振動力を発生させる機械である (Fig.1 参照)。この機械は本体の自重と周期的な振動力の作用により効率的に土を締固めることができるため、近年、フィルダム、道路盛土、宅地の造成、埋設管の埋め戻し、その他の土工事において広く利用されている。

振動式締固め機械を用いて土を締固める場合、その振動挙動は土の締固めが進行して地盤剛性が大きくなるにしたがい変化する。このため、この現象を利用して振動式締固め機械の振動挙動から地盤の締固め度を判定する試みが従来よりなされてきた^{1), 2)}。この手法を利用すると、面的でかつリアルタイムの締固め評価を実施することができ、従来の RI 法と併用することにより、より合理的な施工管理を実現することが可能となる。この観点から海外では既に空港の造成や各種の土工現場でこの手法が利用されているが、国内においては試験的に実施されるにとどまっている。この原因としては、1) 振動式締固め機械の振動挙動と締固められた土の工学的性質との関係が明確でないため、振動挙動から土の締固め度を直接的には評価しにくいこと、2) 振動式締固め機械の振動挙動は地盤剛性だけではなく、機械の重量や振動数などの振動条件の影響を受けるため、締固め度の判定を行うには使用する締固め機械ごとに地盤剛性と振動挙動との関係を把握しておかなければならないこと、などが考えられる。

本研究では、振動式締固め機械の振動挙動から土の締

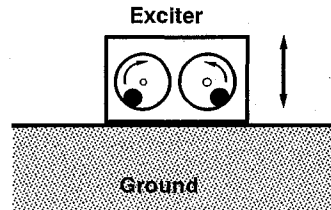


Fig.1 An exciter vibrating on the ground

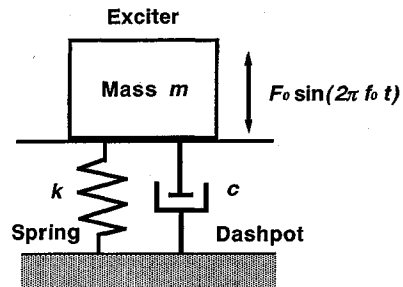


Fig.2 Simulation model for the exciter-ground system

固め度を評価する手法を実際の施工管理に適用し得る計測手法に改良することを目指し、主に上記 2) の問題点の解決を試みた。ここでは数値計算により、起振機の振動挙動と地盤剛性との関係、ならびにこれに及ぼす振動条件の影響について考察を行い、この結果を基に、振動条件によらず地盤剛性を評価することのできる計測手法を提案した。さらにこの手法の適用性を小型の起振機を用いた室内実験ならびに大型のタンバを用いた現場実験により検討した。ただし、ここでは振動式締固め機械のうち、一自由度の振動系でモデル化することのできる起振機に限定して議論を行った。

2. 数値計算による起振機挙動の検討

数値計算では地盤上で振動する基礎の問題を参考に³⁾、起振機～地盤系をフォークトモデルで表わされる

* 正会員 工博 京都大学講師 工学部 土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
 ** 正会員 工修 (株)間組 技術研究所 技術開発部
 *** 学生員 京都大学 大学院 工学研究科

Table 1 Parameters of the exciter in the numerical simulation

mass <i>m</i> (kg)	dynamic force <i>F</i> ₀ (N)	frequency <i>f</i> ₀ (Hz)
20	196, 392, 588, 196, 392	12, 20, 32, 40, 48
200	1960, 3920, 5880, 1960, 3920	12, 20, 32, 40, 48
2000	19600, 39200, 58800, 19600, 39200	12, 20, 32, 40, 48
20000	196000, 392000, 588000, 196000, 392000	12, 20, 32, 40, 48

Table 2 Parameters of the ground in the numerical simulation

mass <i>m</i> (kg)	spring constant (N/m)				
	<i>k</i> ₁	<i>k</i> ₂	<i>k</i> ₃	<i>k</i> ₄	<i>k</i> ₅
20	1.0×10 ⁵	2.5×10 ⁵	6.7×10 ⁵	1.7×10 ⁶	4.0×10 ⁶
200	1.0×10 ⁶	2.5×10 ⁶	6.7×10 ⁶	1.7×10 ⁷	4.0×10 ⁷
2000	1.0×10 ⁷	2.5×10 ⁷	6.7×10 ⁷	1.7×10 ⁸	4.0×10 ⁸
20000	1.0×10 ⁸	2.5×10 ⁸	6.7×10 ⁸	1.7×10 ⁹	4.0×10 ⁹

地盤上で起振機が振動する問題に置き換え (Fig.2 参照), 振動する起振機の変位 *y* ならびに振動加速度 \ddot{y} を差分法により求めた。

Fig.2 の場合, 起振機と地盤とで構成される振動系の運動方程式は式 (1) で表わされる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = mg + F_0 \sin(2\pi f_0 t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで,

m: 起振機の質量(kg), *F*₀: 最大起振力(N)

*f*₀: 起振機の振動数(Hz), *t*: 時間(sec)

k: 地盤のバネ係数(N/m), *g*: 重力加速度(m/sec²)

c: 地盤の粘性減衰係数(Nsec/m)

y: 起振機の鉛直変位(m) (起振機を載せる前の地表面を基準とし, 鉛直下向きを正とする)

実際の起振機は振動条件によっては地盤から飛び上がって地表面から離れる場合も生じる。計算過程においてこの現象を表現するために, 起振機が地盤から離れている間は地盤からの反力は働かないものと考えて, 式 (1) 中のバネ係数 *k* と粘性減衰係数 *c* の値を 0 とおいた。また, 地盤の付加質量については不明な点が多いため, ここでは考慮しなかった。

計算では, 式 (1) の運動方程式を差分法を用いて解くことにより, 時間経過にともなう起振機の変位 *y*, 加速度 \ddot{y} を計算し, さらに加速度波形の周波数分析を行った。Table 1 に計算で用いた起振機の振動条件に関するパラメータを示す。ここでは, 模型実験などで用いられる小型の起振機から実際の大規模土工現場で用いられる大型タンパーにいたるまで, 種々の起振機の挙動を検討し得るようこれらのパラメータを設定した。

地盤特性に関するパラメータとしては, 比較的柔らかい地盤から硬い地盤までを表わせるよう, 盛土工などの実施工で得られた平板載荷試験の結果等を参考に決定した。ここでは, 種々の地盤において平板載荷試験で求められた地盤反力係数の実測値から, 地盤を半無限の弾性体と考えてそのヤング率を計算し, この地盤上で起振機の底板と同じ形状・面積の板で載荷試験を行ったと想定

したときに計算により求められる荷重と沈下量との関係からバネ係数を決定した。また, ここでは起振機の質量に応じてバネ係数を 5 段階に変化させて設定した (Table 2 参照)。実際には各質量に対して広い範囲のバネ係数で計算を行ったが, このうち起振機の振動波形が「適度」に乱れる範囲のみを取り出し, 起振機の質量別に Table 2 のバネ係数の値を設定した。ここで, 振動波形が「適度」に乱れるとは, ある振動条件に対してバネ係数が小さすぎると振動波形が全く乱れず, 逆にバネ係数が大きすぎると波形の乱れに一定の傾向が認められなくなるが, この間のバネ係数に対しては起振機の振動波形がある規則性を持って乱れるという意味である。適度な振動を生じる範囲は起振機の振動条件, 特に質量に大きな影響を受けるため, ここでは起振機の質量に応じた地盤のバネ係数を設定した。各質量の起振機を設定範囲外の地盤上で振動させる場合も考え得るが, この問題については本論文の最後でこの手法の実施工への適用との関連で議論を行う。また, 実際問題として, 質量の大きい起振機は一般に接地面積も大きいため, 同じ地盤上でも同一の変位に対して発生する地盤反力が大きくなり, このためバネ係数も大きくなることをも考慮し, ここでは Table 2 の地盤パラメータを用いて議論を行った。

また, 粘性減衰係数 *c* の値はバネ係数 *k* の値に応じて式 (2) により設定し, 減衰比 *D* の値は地盤上で振動する基礎の問題を参考に, *D*=0.4 を用いた³⁾。計算は Table 1 に示す振動条件の種々の組み合わせに対して Table 2 の 5 段階の地盤条件について実施した。

$$c = 2D\sqrt{mk} \dots\dots\dots (2)$$

本論文では地盤の締め度として, このバネ係数の大きさをを用いることにする。すなわち, バネ係数が大きいほどよく締められた地盤を表わすと考えることにする。

Fig.3 は, *m*=20 kg, *F*₀=196 N, *f*₀=32 Hz の場合について変位波形, 加速度波形ならびに加速度波形の周波数分析結果を 3 種類の地盤特性について計算により求めたものである。ただし, 変位波形については図を見やすくするために式 (1) で定義した変位の正負を逆にして描いている。これらの結果をみると, (a) の柔らかい地

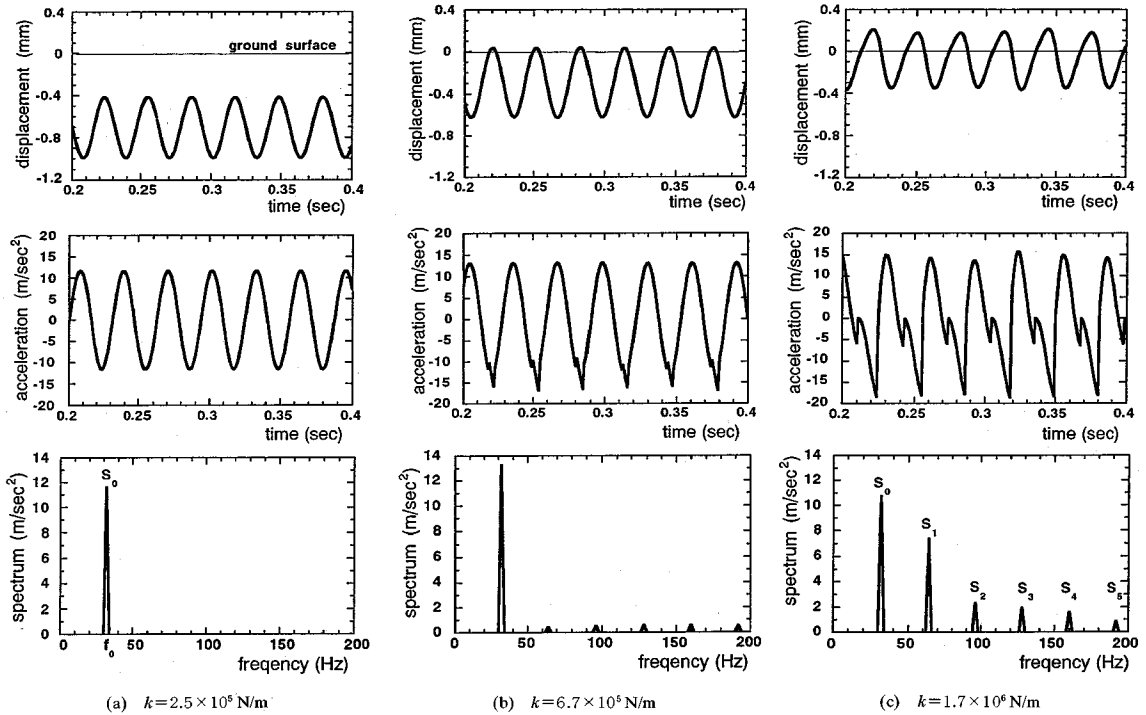


Fig.3 Calculation behavior of the vibrating exciter (displacement, acceleration and spectrum characteristics)

盤 ($k=2.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $c=1.8 \times 10^3 \text{ Nsec/m}$) では、変位波形、加速度波形とも規則正しい正弦波形を示しており、加速度の周波数分析結果も起振機の振動数のところにのみスペクトル成分 (図中の S_0) が現われている。これに対し、(c) の硬い地盤上 ($k=1.7 \times 10^6 \text{ N/m}$, $c=4.7 \times 10^3 \text{ Nsec/m}$) では、変位波形、加速度波形とも正弦波形から大きく乱れ、また加速度の周波数分析結果を見ると、起振機の振動数以外の振動数成分 (図中の S_1, S_2, S_3, \dots) が現われていることが分かる。(a), (c) の中間の地盤に相当する (b) の場合 ($k=6.7 \times 10^5 \text{ N/m}$, $c=2.1 \times 10^3 \text{ Nsec/m}$) は、波形が乱れ始める段階である。

この波形の乱れを定量的に表わすため、周波数分析結果に着目し、次式で表わされる加速度波形のひずみ率 SD を定義する。この式より明らかなように、ひずみ率 SD が大きいほど起振機の振動数 f_0 以外の振動数に対するスペクトル成分が卓越していることを意味し、乱れた波形を表わすことになる。

ひずみ率 SD

$$SD = \frac{f_0 \text{ 以外の振動数に対するスペクトルの和}}{\text{起振機の振動数 } f_0 \text{ に対するスペクトル}} = \frac{\sum S_i}{S_0} \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

3. 起振機の振動挙動に及ぼす振動条件の影響

Fig.4 は、起振機の質量、起振力、振動数を一定 ($m=20 \text{ kg}$, $F_0=392 \text{ N}$, $f_0=20 \text{ Hz}$) とし地盤条件を Table

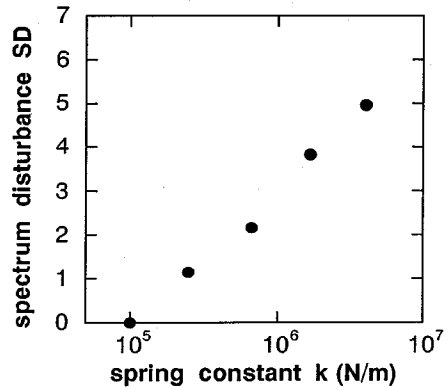
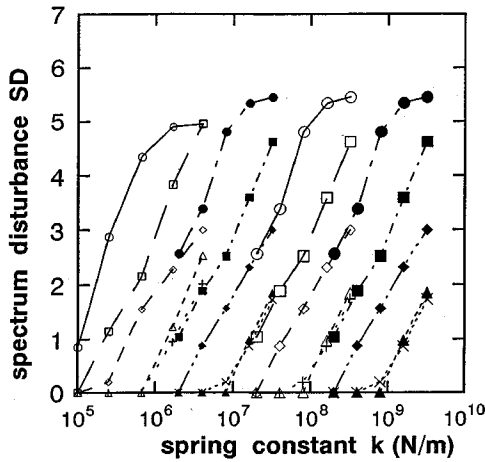


Fig.4 An example of the calculation results for spectrum disturbance vs. spring constant

2 の 5 段階に変化させて起振機の加速度波形のひずみ率 SD とバネ係数 k との関係計算により求めたものである。この図より、ひずみ率は地盤のバネ係数が大きいほど、すなわち、地盤が硬いほど大きくなることがわかる。

Fig.5 は、ひずみ率と地盤のバネ係数との関係を種々の振動条件 (起振機の質量、起振力、振動数) について求めたものである。ただし、計算で用いた振動条件の組み合わせは非常に多いので、この図にはそのうちの 20 組のみをプロットしている。この図より、個々の振動条件については、Fig.4 と同じくひずみ率は地盤のバネ係数とともに増加するが、両者の関係は振動条件により異



m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)	m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)
20	196	12	2000	19600	12
20	392	20	2000	39200	20
20	588	32	2000	58800	32
20	196	40	2000	19600	40
20	392	48	2000	39200	48
200	1960	12	20000	196000	12
200	3920	20	20000	392000	20
200	5880	32	20000	588000	32
200	1960	40	20000	196000	40
200	3920	48	20000	392000	48

Fig.5 Spectrum disturbance vs. spring constant for various combinations of mechanical parameters

り、横軸のバネ係数が対数で表わされていることを考えると両者の関係に及ぼす振動条件の影響は非常に大きいと判断できる。このため、起振機の振動特性から地盤の締固め度を判定しようとする場合には、あらかじめその起振機に対する較正曲線 (Fig.5中の各振動条件に対する曲線) を準備しておく必要がある。しかし実際の現場で使用される起振機の振動条件は多様であり、また起振機の振動数は作業中に多少の変動を伴うため、準備した較正曲線が使えなくなることも考えられ、このままでは実際問題への適用性は低いということになる。

4. 振動条件の影響の除去

この問題を解決するためには起振機の振動挙動に及ぼす振動条件の影響を何らかの方法で除去する必要がある。この手法を考える前に、ここで地盤が硬くなると起振機の振動波形が乱れる原因について Fig.3 の計算結果をもとに考えてみる。

Fig.3 (a), (b), (c) においてそれぞれの変位波形を比べると、地盤が軟らかい (a) の場合には起振機の底面は常に地表面より下にあるのに対し、硬い地盤の (c) の場合には起振機の底面が部分的に地表面より上にあることがわかる。これは、起振機が地表面より飛び上がり、離れている状況を表わしている。地盤剛性が中程度の (b) の場合はこの中間であり、起振機が地表面より飛

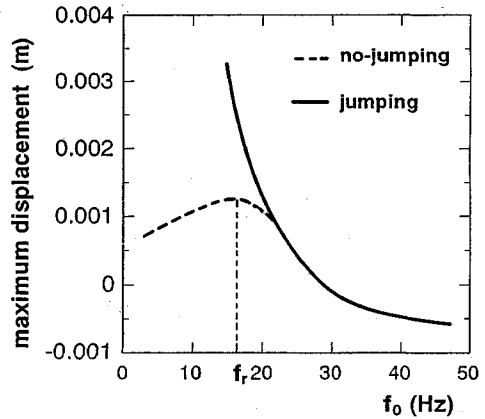


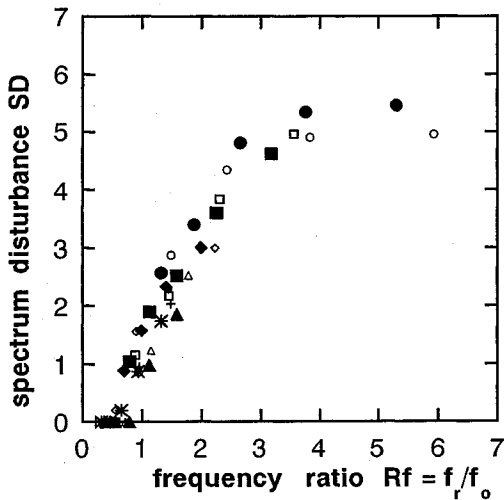
Fig.6 Relationship between the maximum displacement and the operating frequency of the exciter

び上がる現象が起こり始める段階である。これらのことより、地盤が硬くなると、ある硬さの地盤からは起振機は地表面から飛び上がり、離れる現象が生じるものと考えられる。起振機の振動波形が乱れるのは、この地表面よりの飛び上がりとそれに続いて起こる地表面への衝突に原因があると考えられる。

起振機の振動挙動の乱れの原因が、起振機本体の飛び上がりとそれに続く地盤との衝突現象にあるとすると、起振機の地盤からの飛び上がり量が多いほど加速度波形の乱れも大きいと考えられる。Fig.6は、起振機を載せる前の自然地盤の地表面を基準としたときの起振機底面の位置の最高値と起振機の振動数との関係に $m=20$ kg, $F_0=392$ N, $k=2.5 \times 10^5$ N/m の場合について前述の数値計算により求めたものである。図中の実線は数値計算の過程において起振機の地盤からの飛び上りを考慮した (起振機が地盤から離れている間は地盤からの反力を0と置く) 場合で、破線は起振機の地盤からの飛び上りを考慮しない場合である。後者は通常の一自由度減衰振動系の共振曲線を表し、地盤から負の反力も働き得ると考えている。この場合、図中の f_r は共振振動数で、式 (4) で表わすことができる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}(1-D^2)} \dots \dots \dots (4)$$

この図で、起振機の振動数 f_0 が共振振動数 f_r (厳密には共振振動数より少し大きい振動数) より小さい領域では、実線と破線が離れており、起振機が地盤から飛び上がっていることを表わしている。前述の仮定にしたがえば、この領域では起振機の振動加速度波形に乱れが生じると考えられる。また、この図は起振機の振動数が共振振動数より小さいほど起振機の地表面からの飛び上がり高さが大きくなるということを表わしており、これにともない波形の乱れも大きくなることが予想される。すなわち、起振機の加速度波形の乱れは起振機の振動数 f_0



	m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)		m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)
○	20	196	12	○	2000	19600	12
□	20	392	20	□	2000	39200	20
◇	20	588	32	◇	2000	58800	32
△	20	196	40	△	2000	19600	40
+	20	392	48	+	2000	39200	48
●	200	1960	12	●	20000	196000	12
■	200	3920	20	■	20000	392000	20
◆	200	5880	32	◆	20000	588000	32
▲	200	1960	40	▲	20000	196000	40
×	200	3920	48	×	20000	392000	48

Fig.7 Results of the arrangements in Figure 5 with resonant frequency f_r

と起振機～地盤系の共振振動数 f_r との関係に依存すると考えられる。そこで、次式で定義される振動数比 Rf を導入し、これと加速度波形のひずみ率との関係を調べるため、前述の Fig.5 の横軸を振動数比 Rf に変えて整理し直すと Fig.7 の結果が得られた。

$$Rf = \frac{f_r}{f_0} = \frac{1}{2\pi f_0} \sqrt{\frac{k}{m(1-D^2)}} \dots\dots\dots (5)$$

Fig.7 中には Table 1 に示す種々の振動条件に対する計算結果がすべて描かれているが、起振機の条件によらず、ひずみ率と振動数比の関係はほぼ 1本の曲線で表わされることが分かる。横軸の振動数比は式 (5) から明らかなように、地盤のバネ係数 k と起振機の振動数 f_0 、質量 m 、減衰比 D の関数であるから、この振動数比の値と f_0 、 m 、 D の値がわかればバネ係数 k は式 (5) を変形した式 (6) により決定することができる。

$$k = \frac{(2\pi f_0 Rf)^2 m}{1-D^2} \dots\dots\dots (6)$$

Fig.7 と式 (6) を利用すれば、振動条件によらず、起振機の振動加速度を計測し、その周波数特性からひずみ率を求めるだけで地盤のバネ係数を知ることができる。その手順は、以下の通りである。

(1) 起振機の振動加速度を測定し、ひずみ率を決定する。

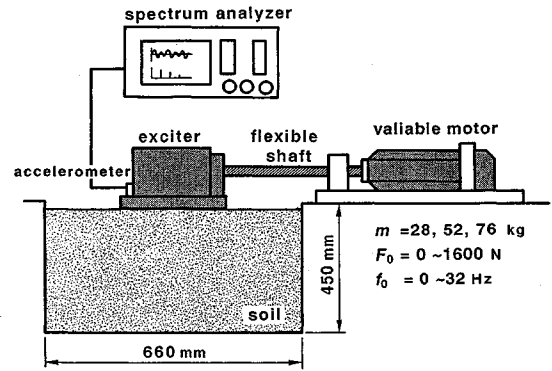


Fig.8 An experimental apparatus of the model experiments

(2) Fig.7 を利用して、ひずみ率から振動数比 Rf を決定する。

(3) 起振機の質量 m 、振動数 f_0 と振動数比 Rf からバネ係数 k を決定する。ただし、 D の値は 0.4 とする。

5. 室内実験による検証

前章で説明した地盤剛性の評価手法の適用性を調べるため、小型起振機を用いた室内実験を行った。実験は、Fig.8 に示すように 550×660×450 mm の土槽の中に試料土を締め固め、この上で小型起振機を振動させた。このとき起振機本体の加速度を圧電素子型の加速度計（最大加速度 150 g、測定周波数範囲 3～12 000 Hz）で計測し、波形処理装置を用いて周波数分析を行った。小型起振機は、底面寸法が 200×220 mm、高さ 130 mm の鋼製箱型起振機で、内部に同期した 2 軸の回転偏心質量をもっている。その駆動機構は、外部に変速モーターを置き、その回転をフレキシブルチューブを介して起振機内部の偏心質量の回転軸に伝えることにより偏心質量を回転させ振動力を発生させるものである。起振機の振動数は、外部の変速モーターの回転数を調整することにより 0～32 Hz の間で無段階に変化させることができる。また、起振機内部の偏心質量は各軸に 2 個づつ取り付けられており、それらの位相角を変えることにより、0～1 600 N の起振力を無段階で発生させることができる。起振機の質量は起振機の底板に着脱式の鋼製重りを取付けることにより 28、40、52、76 kg の 4 段階に変化させた。

実験に用いた試料土は砂質シルトであり、これを土槽内に 5 cm の厚さに敷均し、その上に鋼製の重りを落下させて締め固めを行った。この操作を 9 層繰り返して実験地盤の作成を行ったが、このとき重りの落下回数を調整することにより 4 種類の剛性の異なる地盤を作成した。実験は 4 種類の地盤上で起振機を振動させ、起振機の加速度波形から地盤のバネ係数を求め、これを起振機の底面積で除して地盤反力係数 (K 値) の推定値とした。また、試験後に同じ地盤上で平板載荷試験を行い、それ

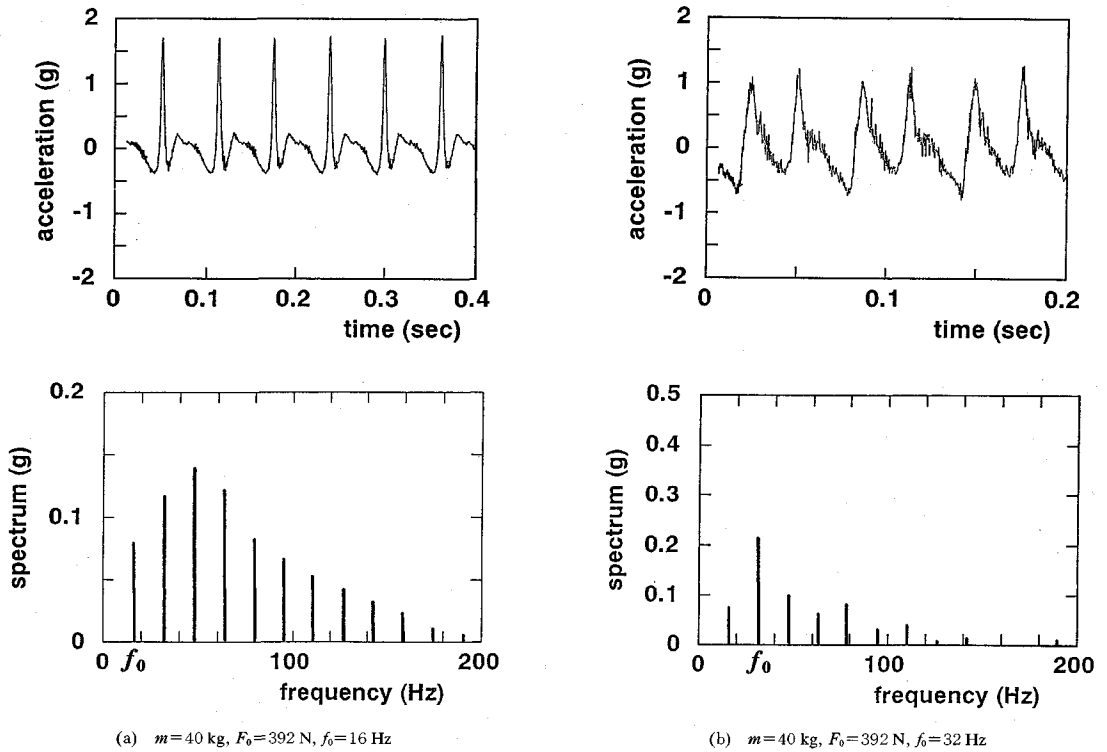


Fig.9 Examples of the exciter behavior measured in the model experiments

Table 3 Parameters of the exciter in the model experiments

mass m (kg)	dynamic force F_0 (N)	frequency f_0 (Hz)
28	274	13.0, 18.5, 25.5
40	392	16.0, 22.5, 32.0
52	510	17.5, 21.0, 25.0
76	745	21.5, 26.0, 30.0

から求めた地盤反力係数と上述の起振機振動から求めた地盤反力係数との比較を行った。平板载荷試験では起振機の底板と同じ寸法の鋼板を地盤上に置き、これに油圧ジャッキで载荷を行い、载荷重～変位関係の初期の直線部の傾きを平板の底面積で除した値をもって平板载荷試験による地盤反力係数とした。平板载荷試験により得られた4種類の地盤反力係数 K 値は、3.2, 4.8, 6.4, 10.1×10^7 N/m³ であった。実験を行った起振機の振動条件は Table 3 に示す通りである。

Fig.9 は、実験で得られた起振機の加速度波形とその周波数分析結果の一例である ($m=40$ kg, $F_0=392$ N)。このうち図 (a) は $f_0=16.0$ Hz の場合、図 (b) は $f_0=32.0$ Hz の場合であり、いずれも $K=10.1 \times 10^7$ N/m³ の硬い地盤上での結果である。図より (a), (b) とともに加速度波形が乱れ、周波数分析結果も起振機の振動数 f_0 以外の高調波成分が生じているが、加速度波形とその周

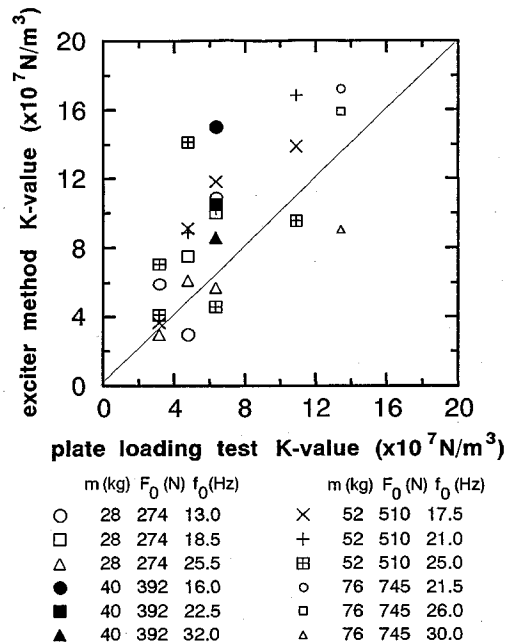


Fig.10 Comparison of the K -values measured by the plate loading tests with those evaluated by the exciter methods in the model experiments

波数分析結果とも振動数により異った結果を示している。両者とも同じ地盤上での実験結果であることを考え

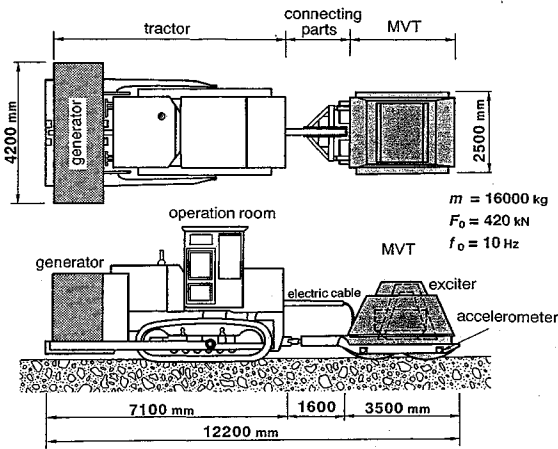


Fig.11 A large size exciter MVT used in the field experiments

ると、起振機の振動挙動が振動条件の影響を受けるという前述の計算結果をこの図は表わしていることがわかる。実験では図のような周波数分析結果を各実験において求め、前述の方法に従い地盤反力係数 K 値を推定した。

Fig.10 は起振機の振動挙動から推測した地盤反力係数 K 値と平板載荷試験から得られた K 値とを比較したものである。かなりバラツキはあるものの、両者の間には対応関係が見られる。バラツキの主な原因としては、起振機の振動モードが実験中に変動し、計算で想定している鉛直方向の振動だけではなく、ロッキング振動のモードが現われ、その変動に応じて加速度波形も変化し、バラツキが生じたものと考えられる。起振機の振動挙動を利用して地盤特性を評価する場合にはこの振動モードの変動による影響を処理する方法を考えるか、あるいは振動モードが鉛直方向のみに限られるような装置を作成する必要がある。この一策として次章で述べる現場実験で用いた大型起振機では底板面の形状に丸みをつけ、ロッキング振動が起りにくい構造を採用している。

6. 現場実験による適用性の検討

次に、この地盤判定手法の適用性を調べるため大型の起振機であるマンモスバイプロタンパー（以下、MVT とよぶ）を用いて現場実験を行った。MVT は、締固め力が極めて強い振動式締固め機械であり、その機構は同期した 2 軸の偏心質量を電気モーターで回転させ振動を発生させるものである。MVT の諸元は質量 16 t、最大起振力 420 kN、振動数 9.5 Hz、底板の寸法 2.5×3.5 m で、底板は W 型に丸みをつけてロッキング振動が生じにくいように設計されている。またブルドーザーを改良したトラクタで牽引されることにより移動しながら地盤の締固めを行うことができる (Fig.11 参照)。実験を行った現場は A, B, 2 箇所の土工現場で、現場 A の土

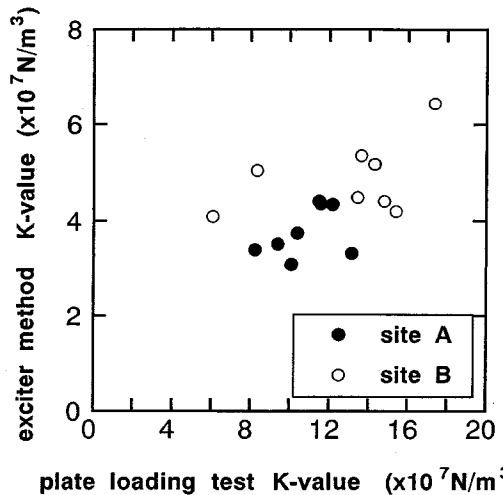


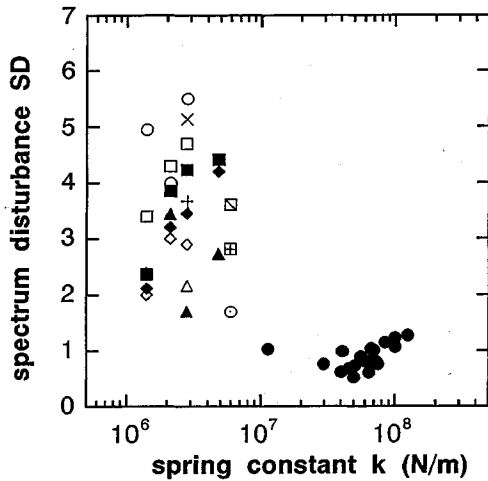
Fig.12 Comparison of the K -values measured by the plate loading tests with those evaluated by the exciter methods in the field experiments

質は礫混じり砂質シルト、現場 B はロック材であった。

実験はそれぞれの現場で材料土を 1.1~1.65 m の厚さにまき出し、この上を MVT が時速 2.0 km/h の速度で繰り返し被牽引・転圧し、材料土の締固めを行った。この際、現場内に所定の計測点を設け、転圧回数 2, 4, 6, 8 回目に MVT がこの地点を通過する際の機械本体の加速度波形を本体内部に取付けた加速度計で計測し、その波形から前述の手法に従い、その地点の地盤のバネ係数 k_{MVT} を推定した。また各転圧回数における地盤反力係数 K 値を直径 0.3 m の円盤を用いた平板載荷試験により計測した。

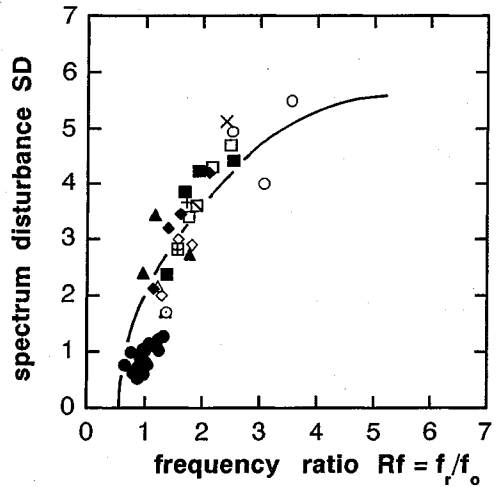
MVT の振動挙動から求めたバネ係数 k_{MVT} を地盤反力係数 K 値に直すには底面積で除す必要があるが、MVT と平板載荷試験では底板の面積が大きく異なり、単に底面積で除すだけでは寸法効果の影響が生じる。このため、ここでは次に述べる方法により MVT の挙動から求めたバネ係数 k_{MVT} を 0.3 m 径の円盤載荷時の地盤反力係数に換算し、これと実際の平板載荷試験の結果とを比較した。

いまヤング率 E (N/m²) の半無限弾性地盤上で MVT 底板を用いて載荷試験を行う場合を考える。このとき、荷重/沈下量比で表される k_{MVT} とヤング率 E との関係を数値計算により求めると式 (7) のようになる⁵⁾。また同じく半無限弾性地盤上に半径 a (m) の円盤で載荷を行ったときの荷重 P (N) と沈下量 δ (m) との関係は式 (8) で表わすことができる⁶⁾。そこで MVT から求めたバネ係数 k_{MVT} より式 (7) を用いて地盤のヤング率 E を推定し、そのヤング率 E をもつ地盤上で半径 $a = 0.15$ m の円盤に載荷したときの P/δ (N/m) の値を式 (8) を用いて求める。そして、こ



m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)	m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)		
○	28	274	13.0	◆	52	510	17.5
□	28	274	18.5	▲	52	510	25.0
◇	28	274	25.5	▣	76	745	21.5
×	40	392	16.0	⊞	76	745	26.0
+	40	392	22.5	○	76	745	30.0
△	40	392	32.0	●	Field Experiments		
■	52	510	17.5				

Fig.13 Spectrum disturbance vs. spring constant for the results of model and field experiments



m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)	m (kg)	F ₀ (N)	f ₀ (Hz)		
○	28	274	13.0	◆	52	510	17.5
□	28	274	18.5	▲	52	510	25.0
◇	28	274	25.5	▣	76	745	21.5
×	40	392	16.0	⊞	76	745	26.0
+	40	392	22.5	○	76	745	30.0
△	40	392	32.0	●	Field Experiments		
■	52	510	17.5	—	Calculation		

Fig.14 Results of the arrangements in Figure 13 with resonant frequency fr

の値を円盤の面積で除すことにより地盤反力係数 K 値を求めた。ただしポアソン比 ν の値は締めめによる影響等が明確でないため、一般的な値として 0.4 を用いた。

$$k_{MVT} = 2.43E \dots \dots \dots (7)$$

$$P = \frac{4aE}{1-\nu^2} \delta \dots \dots \dots (8)$$

Fig.12 は、MVT の挙動から予測した K 値と平板載荷試験から求めた K 値との比較結果である。この図より両手法により求めた K 値の間にはバラツキはあるものの傾向的にはある程度対応していることがわかる。しかしながら、この図の縦軸と横軸の目盛のスケールは異なったものを用いている。これは、平板載荷試験から求めた K 値の方が MVT の振動挙動から推測した K 値より約 2 倍以上大きかったためである。この原因としては、次のようなことが考えられる。平板載荷試験では載荷面積が小さいため比較的地表付近のよく締められた硬い地盤の K 値を測定している。これに対し、MVT は載荷面積が大きいため、まき出し層内の比較的深部で地表面ほどは締められていない部分の地盤の影響をも測定している。このため、MVT の振動特性から推定した K 値は小さめに現われたのではないかと考えている。直径 0.3 m の円盤を用いた平板載荷試験では通常、0.4 ~ 0.6 m 程度の深さの地盤特性しか評価できないことを考えると⁷⁾、MVT を用いた測定手法の方がまき出し層全体の特性を適切に評価することができるのではないかと

と思われる。

Fig.13 に小型の起振機を用いた室内実験結果と MVT を用いた現場実験の結果を同じ図に示す。この図では小型起振機と MVT の振動加速度のひずみ率と地盤のバネ係数とをプロットしており、3 節の計算結果で示した Fig.5 に相当するものである。小型起振機と MVT とで地盤のバネ係数が大きく異なるため、両者の結果は離れたところにプロットされている。また、小型起振機の実験結果もばらついており、Fig.5 で述べたように振動条件による影響を受けていることがわかる。

Fig.14 は Fig.7 にならい Fig.13 の横軸を振動数比に変えて描きなおしたものである。Fig.14 中の実線は Fig.7 の計算結果を曲線で近似して記入したものである。この図では、室内実験と現場実験ともプロット点がばらついており、特に現場実験の結果については上述の MVT と平板載荷試験との地中の評価領域の違いに起因してプロット点が若干計算結果より下に現れている。しかしながら、今回提案した手法により計算結果と同じく Fig.13 に現れていた振動条件の影響を除去し、起振機振動の統一的な取り扱いができるということをこの図は表わしていると考えている。

7. まとめ

振動式締め機械の振動挙動から土の締め度度を評価する手法を実際の施工管理に適用し得る計測手法に改良

することを旨とし、数値計算により、振動挙動と地盤剛性との関係、ならびにこれに及ぼす振動条件の影響について考察を行った。この結果、起振機の振動加速度の乱れ度を表すひずみ率は、地盤が硬くなるほど大きくなること、ならびに、ひずみ率と地盤硬さとの関係は起振機の質量、振動数、起振力などの振動条件の影響を大きく受けることがわかった。そこで起振機の加速度波形が乱れる原因を考察することにより、起振機～地盤系の共振振動数に着目し、これと起振機振動数との比で表わされる無次元量とひずみ率との関係を求めると、起振機の振動条件によらずで計算結果を1本の曲線にまとめることができた。この結果を基に、振動条件によらず地盤剛性を評価することのできる計測手法を提案し、さらにこの手法の適用性を小型の起振機を用いた室内実験ならびに大型のタンパーを用いた現場実験により検討した。この結果、バラツキはあるものの起振機の振動挙動から地盤の硬さを推定することは可能と考えられるが、起振機の振動モードが変化すると計測値がその影響を受けるため、安定した振動を得るための工夫が必要であることがわかった。

なお、Fig.5は起振機の振動挙動は地盤剛性だけではなく振動条件の影響を大きく受けることを表わしているが、この図からはこの他に、個々の振動条件で測定し得る地盤剛性はある範囲に限られることも読み取ることができる。これは逆の見方をするならば、ある地盤剛性の測定においては、それに適した振動条件が存在するとい

うことに言い換えることができる。今後は、測定の対象とする地盤剛性に応じて最適な振動条件を選ぶ手法の開発も行っていく予定をしている。また、建設施工の自動化が望まれる今日、この手法は土の締固め度の判定だけではなく、種々の土工作業において作業対象である地盤特性を自動的に評価する手法へ応用することも可能と考えられ、様々な問題に対する適用性を探っていきたいと考えている。

最後に本研究における現場実験を進めるにあたり、株式会社間組 石原公明氏ならびにソイルアンドロックエンジニアリング株式会社 延山政八氏にご協力をいただいた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) S. Hata and K. Tateyama: Quality Control in Soil Compaction by Behaviors of exciter, Proc. of 88 th ISTVS Int'l Conf., vol.2, pp.691~705, 1984.
- 2) 嶋津晃臣: 振動ローラによる盛土の締固めに関する調査, 土木研究所資料, 第2184号, 1985年.
- 3) 岩崎敏男・嶋津晃臣訳: 「土と基礎の振動」, pp.207~263, 鹿島出版会, 1975年.
- 4) 振動工学ハンドブック, pp.121~127, 養賢堂, 1985年.
- 5) 加藤俊昭, 中島聡, 橋本隆治: 大型タンパーの加速度波形に関する一考察, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.1847~1850, 1991年.
- 6) 木村孟著: 土の応力伝播, 鹿島出版会, p.31, 1978年.
- 7) 土質工学会編: 土質調査法, p.387, 1990年.

(1993. 8. 5 受付)

THE EVALUATION OF THE DEGREE OF SOIL COMPACTION BY THE BEHAVIOR OF VIBRATING EXCITERS

Kazuyoshi TATEYAMA, Satoshi NAKAJIMA and Tetsuo FUJIYAMA

The behavior of an exciter which vibrates on the ground is studied through a numerical simulation. Results of the simulation make it clear that the vibrating behavior of an exciter varies not only with the stiffness of the ground, but also with the mechanical factors of the exciter, such as weight, frequency, etc. The effects of those factors on the behavior of an exciter are arranged with the resonant frequency of the exciter-ground system. The results of the arrangement yield a figure on which the ground stiffness can be uniquely specified from the vibrating behavior and the mechanical factors of the exciter. In this paper, we suggest a developing method with which the degree of soil compaction can easily be measured from the vibrating behavior of any exciter using this figure. The application of this method was examined in some model and field experiments.