

# 前後進コンパクタの走行速度を利用した 地盤剛性評価手法の適用性改善に関する研究

橋本 毅<sup>1</sup>・藤野 健一<sup>2</sup>・建山 和由<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: t-hashi77@pwri.go.jp

<sup>2</sup> 独立行政法人土木研究所 主席研究員 技術推進本部 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: fujino@pwri.go.jp

<sup>3</sup> 立命館大学教授 理工学部 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: tateyama@se.ritsumei.ac.jp

小型平板式振動締固め機械の一つである前後進コンパクタの走行速度が地盤剛性に依存して変化する現象を利用し、走行速度を測定することにより土の締固め度を評価する手法の実現可能性を検討した。まず、最も一般的な前後進コンパクタを対象として数値計算により走行速度と地盤剛性との関係について考察を行った。この結果、走行速度は地盤剛性に依存して変化するが、必ずしも締固め評価基準値を含む地盤剛性の範囲で走行速度が変化するわけではないため、締固め施工管理の手法としてはそのままでは使えないことがわかった。このため、ユーザがコンパクタに対して軽微な改造を施すことにより評価基準値を含む範囲の地盤剛性の変化を走行速度から推定し得ることを数値計算で明らかにし、その信頼性を実物の前後進コンパクタを用いた室内実験ピットにおける土槽実験にて検証した。

キーワード: *soil compaction, ground stiffness, reversible vibratory plate compactor, running speed*

## 1. はじめに

前後進コンパクタや振動ローラなどの振動締固め機械を用いて土の締固めを行う場合、機械の振動挙動は接触している地盤の剛性に影響を受けているため、機械の振動挙動を解析することによって地盤の剛性を推定することが可能である。地盤剛性は、締固め度などと同様に締固めの品質を表す指標の一つであるが、従来その計測はFWD試験などにより施工後に抜き取り検査にて行われてきた。一方この締固め機械の振動挙動を解析する手法を用いることができれば、地盤剛性値の計測を面的にリアルタイムに行うことが可能となり、締固めの品質管理を大きく合理化できる可能性があると言える。

締固め機械の振動挙動を解析して地盤剛性を推定する方法の一つとして加速度計を利用する手法がある。これは機械に加速度計を搭載し、その信号を解析することにより地盤剛性を推定する手法であり、これまでさまざまに研究がなされ<sup>1)~6)</sup>、開発、実用化もされている<sup>7)~9)</sup>。しかしながらこの加速度計を利用した手法は、締固め機械に加え加速度計・演算モジュール・表示計といった機器が必要となり、価格の上昇や、すでに現場にて使用されている既販機への展開が困難であることなどが、普及への問題点の一つとなっている。

また一方、前後進コンパクタの走行速度に着目して、地盤剛性を推定する方法も考えられる。

前後進コンパクタとは小型平板式振動締固め機械の一つであり、機械内部に回転する2本の偏心錘(起振体)を有し、その遠心力により発生する振動力と本体の重量との効果により締固め効果を発生する機械である。また、その2本の起振体による合成振動力の振動方向をオペレータ手元の操作レバーにて前後へ傾斜させることにより、前後任意の方向に走行することが可能であり、主に盛土の締固め時において大型締固め機が進入できないような狭隘部や構造物近傍などの施工に利用されている。

この前後進コンパクタは、自身の振動と地盤からの反力によって細かくジャンプしており、滞空時に起振体から水平方向の力を受けることにより前方あるいは後方に移動し、それを繰り返すことにより走行している。すなわち、その走行速度は機械の滞空時間に大きく影響を受けていることになる。また滞空時間は、機械の振動挙動の一つであるから接触している地盤の剛性に影響を受けていると考えられる。したがって前後進コンパクタの走行速度を解析することにより、地盤剛性を推定することが可能であると考えられる。

筆者らは、前後進コンパクタの走行速度が接触している地盤の剛性に影響を受けることを利用し、走行速度を測定することにより、地盤剛性をリアルタイムで推定する手法の確立を試みた<sup>10)</sup>。その結果、現在市場にて使用されている前後進コンパクタの仕様そのままでは、

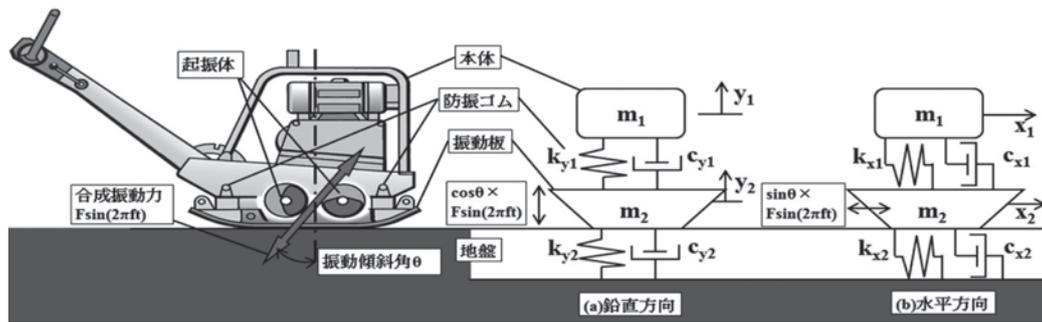


図-1 前後進コンパクタ～地盤系モデル

走行速度から地盤剛性が著しく低い地点(ウィークポイント)を検出することは可能であるが、地盤剛性値そのものを推定し、締固め品質管理値を満たしているか評価を行うことは困難であることがわかった。

そこで本研究では、前後進コンパクタに改造を施すことにより走行速度から地盤剛性が締固め品質管理基準値を満足しているか評価する手法の確立を試みた。目標とした品質管理基準値は、現在日本国内で唯一地盤剛性を品質管理基準値としている鉄道盛土における締固め品質管理基準値<sup>11)</sup>を用いることとした。またコンパクタは、現在国内で最も一般的に使用されているものを対象とし、改造は既販機への対応を考慮し、ユーザにて施工可能な軽微なものとした。

ここではまず数値計算により、前後進コンパクタの走行速度と地盤剛性との関係、および改造により変化するパラメータがその関係に及ぼす影響について考察を行い、その結果をもとに走行速度から地盤剛性値が締固め品質管理基準値を満足しているか推定、評価する手法の提案を行った。さらにこの手法の信頼性を、実際の前後進コンパクタを用いた室内実験ピットにおける土槽実験にて検証した。

## 2. 数値計算方法

数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討においては、鉛直方向の運動と水平方向の運動とに分けて計算を行った。

まず鉛直方向では、前後進コンパクタ～地盤系を図-1(a)のような2自由度振動モデルに置き換える。この本体～振動板～地盤からなる振動系の運動方程式は式(1)にて表され、これをRunge-Kutta法を用いて解くことにより、時間変化に伴う鉛直方向変位を計算した。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + c_{y1}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_{y1}(y_1 - y_2) &= -m_1 g \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_{y2} \dot{y}_2 + k_{y2} y_2 - c_{y1}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k_{y1}(y_1 - y_2) &= -m_2 g + \cos \theta \times F \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (1)$$

- $m_1$  : 前後進コンパクタ本体質量 (kg)
- $m_2$  : 前後進コンパクタ振動板質量 (kg)
- $y_1$  : 前後進コンパクタ本体鉛直方向変位 (m)
- $y_2$  : 前後進コンパクタ振動板鉛直方向変位 (m)
- $k_{y1}$  : 防振ゴムの鉛直方向バネ係数 (N/m)
- $k_{y2}$  : 地盤の鉛直方向バネ係数 (N/m)
- $c_{y1}$  : 防振ゴムの鉛直方向粘性減衰係数 (Nsec/m)
- $c_{y2}$  : 地盤の鉛直方向粘性減衰係数 (Nsec/m)
- $F$  : 最大起振力 (N)
- $f$  : 振動数 (Hz)
- $\theta$  : 振動傾斜角 (rad)

ここで、図-1のモデル上では地盤と振動板が結合しているため、式(2)で表される地盤反力 $N$ (N)が負値となる場合も算出される。しかしながら実際には両者は結合していないため、地盤反力 $N$ が負値となることはありえず、それは振動板が地盤から離れること、すなわちジャンプをしていることを表している。そこで計算では、地盤反力 $N$ が正值から負値に変化した時をジャンプ開始時とし、その後着地時までは式(1)に $k_{y2} = c_{y2} = 0$ を与え滞空中の変位を計算した。

$$N = -c_{y2} \dot{y}_2 - k_{y2} y_2 \quad (2)$$

また着地の判定については、同時に式(2)において $N = 0$ とすると本式は地盤の変位を表すことになるため、これを解くことにより滞空中の地盤変位を計算し、振動板変位と地盤変位が逆転した時を着地時とした。

また水平方向では、接触中は振動板と地盤との間にすべりは発生しないと仮定し、図-1(b)のような2自由度振動モデルに置き換える。この振動系の運動方程式は式(3)にて表され、式(1)と同様にRunge-Kutta法を用いて解くことにより、時間変化に伴う水平方向変位を計算した。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_{x1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{x1}(x_1 - x_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{x2} \dot{x}_2 + k_{x2}(x_2 - x_0) - c_{x1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_{x1}(x_1 - x_2) &= \sin \theta \times F \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (3)$$

- $x_1$  : 前後進コンパクタ本体水平方向変位 (m)
- $x_2$  : 前後進コンパクタ振動板水平方向変位 (m)
- $x_0$  : 着地点 (m)
- $k_{x1}$  : 防振ゴムの水平方向バネ係数 (N/m)
- $k_{x2}$  : 地盤の水平方向バネ係数 (N/m)
- $c_{x1}$  : 防振ゴムの水平方向粘性減衰係数 (Nsec/m)
- $c_{x2}$  : 地盤の水平方向粘性減衰係数 (Nsec/m)

接地・ジャンプの判定は、前述の鉛直方向の計算結果を用い、滞空中は式(3)に $k_{x2} = c_{x2} = 0$ を与え滞空中の変位を計算した。

数値計算のフロー図を図-2に、また計算に用いた前後進コンパクタの機械仕様を表-1、地盤条件を表-2に示す。

ここで機械諸元は現在国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクタの値を設定した。

鉛直方向地盤バネ係数 $k_{y2}$ については、本研究ではかなり柔らかい地盤から締固めの進行した硬い地盤までの幅広いバネ係数における走行速度の挙動を確認したいため、後述の5章に示す土槽実験にて得られている小型FWD試験の結果を参考に、 $k_{y2} = 0.3 \sim 20.0$  MN/mに設定した。

また鉛直方向地盤粘性減衰係数 $c_{y2}$ は、減衰比 $D_{y2}$ を用いて式(4)で示されるが、地盤上で振動する機械基礎の問題等を参考に<sup>11)</sup>、減衰比 $D_{y2}$ を0.4と設定した。

$$c_{y2} = 2D_{y2}\sqrt{m_2k_{y2}} \quad (4)$$

鉛直方向防振ゴム粘性減衰係数 $c_{y1}$ は、式(4)と同様に算出できるが、本体の振動が安定する範囲でなるべく小さくなるよう減衰比 $D_{y1}$ を0.1に設定した。

水平方向地盤バネ係数 $k_{x2}$ は、弾性体上における基礎の鉛直振動の問題<sup>12)</sup>、および水平振動の問題<sup>12)</sup>を参考に、鉛直方向地盤バネ係数 $k_{y2}$ との関係式(5)を用いて算出した。ここで地盤のポアソン比 $\nu$ は締固めによる影響が明確でないため、一般的な値として0.4とした。

$$k_{x2} = \frac{8(1-\nu)^2}{7-8\nu}k_{y2} \quad (5)$$

水平方向地盤粘性減衰係数 $c_{x2}$ は、鉛直方向地盤粘性減衰係数同様に、減衰比 $D_{x2}$ を0.3として算出した。

また水平方向防振ゴムバネ係数 $k_{x1}$ および粘性減衰係数 $c_{x1}$ は、防振ゴムの形状、取り付け状態から、鉛直方向バネ係数 $k_{y1}$ および粘性減衰係数 $c_{y1}$ と等しいとした。

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。ここで付加質量とは、振動板下部地盤の一部が振動板と一緒に振動してしまうと仮定し、計算の際に振動板の質量に付加するべきその一部地

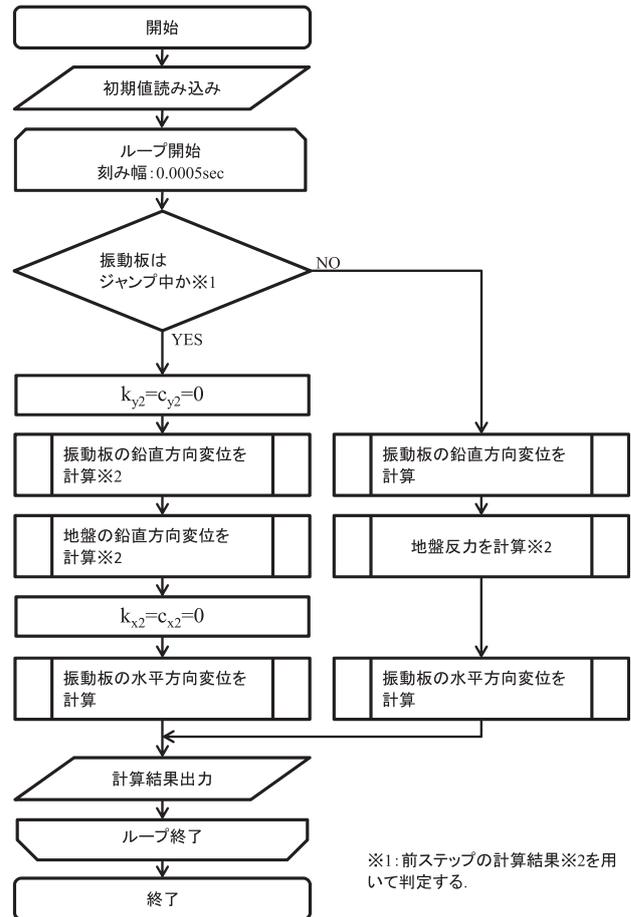


図-2 数値計算フロー図

表-1 計算条件 (機械仕様)

振動傾斜角	$\theta$ (度)	50
本体質量	$m_1$ (kg)	200
振動板質量	$m_2$ (kg)	130
鉛直方向防振ゴムバネ係数	$k_{y1}$ (MN/m)	1.0
最大起振力	$F$ (kN)	45
振動数	$f$ (Hz)	73
鉛直方向防振ゴム粘性減衰係数	$c_{y1}$	$c_{y1} = 2D_{y1}\sqrt{m_1k_{y1}}$ $D_{y1}=0.1$
水平方向防振ゴムバネ係数	$k_{x1}$	$k_{x1} = k_{y1}$
水平方向防振ゴム粘性減衰係数	$c_{x1}$	$c_{x1} = c_{y1}$

表-2 計算条件 (地盤条件)

鉛直方向地盤バネ係数	$k_{y2}$	0.3 ~ 20.0
鉛直方向地盤粘性減衰係数	$c_{y2}$	$c_{y2} = 2D_{y2}\sqrt{m_2k_{y2}}$ $D_{y2}=0.4$
水平方向地盤バネ係数	$k_{x2}$	$k_{x2} = \frac{8(1-\nu)^2}{7-8\nu}k_{y2}$ $\nu = 0.4$
水平方向地盤粘性減衰係数	$c_{x2}$	$c_{x2} = 2D_{x2}\sqrt{m_2k_{x2}}$ $D_{x2}=0.3$

表-3 鉄道盛土における締固め品質管理基準値  
(性能ランク II 上部盛土)

品質管理基準値A ( $70 \text{ MN/m}^3 \leq K_{30} \text{ 平均値} < 110 \text{ MN/m}^3$ )	$K_{30}$ 下限値 50 $\text{MN/m}^3$
品質管理基準値B ( $K_{30}$ 平均値110 $\text{MN/m}^3$ 以上)	$K_{30}$ 下限値 70 $\text{MN/m}^3$

盤の質量のことである<sup>12)</sup>。

以上の数値計算では、地盤剛性を前後進コンパクタ振動板すなわち長方形載荷による鉛直方向地盤バネ係数 $k_{y2}$ にて表している。一方、鉄道盛土における締固め品質管理基準値<sup>11)</sup>は、表-3に示すように円形載荷による地盤反力係数 $K_{30}$ 値にて与えられる。したがって、数値計算による走行速度から、地盤剛性値が締固め品質管理基準値を満足しているか検討するためには $K_{30}$ 値を $k_{y2}$ に変換する必要がある。そこで、まず円形載荷による地盤の変位<sup>13)</sup>より式(6)を、長方形載荷による地盤の変位<sup>13)</sup>より式(7)をそれぞれ得る。

$$K_{30} = \frac{1}{2r} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (6)$$

$r$  : 円形載荷板半径 = 0.15 (m)

$E$  : 地盤のヤング率 ( $\text{MN/m}^2$ )

$\nu$  : 地盤のポアソン比

$$k_{y2} = \frac{2\pi b}{L} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (7)$$

$$L = \ln\left(\frac{\sqrt{1+m^2}+m}{\sqrt{1+m^2}-m}\right) + m \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{1+m^2}+1}{\sqrt{1+m^2}-1}\right)$$

$$m = \frac{b}{a}$$

2a : 長方形載荷板(コンパクタ振動板接地部)の幅  
= 0.4 (m)

2b : 長方形載荷板(コンパクタ振動板接地部)の長さ  
= 0.3 (m)

式(6)、(7)より、地盤のヤング率とポアソン比を消去して式(8)を得る。

$$k_{y2} = \frac{4\pi br}{L} \cdot K_{30} \quad (8)$$

式(8)を用いて、地盤反力係数 $K_{30}$ 値を鉛直方向地盤バネ係数 $k_{y2}$ に変換するものとした。

### 3. 数値計算による前後進コンパクタ走行速度の検討(改造無しの場合)

表-1、表-2に示す条件にて計算した結果を図-3に示

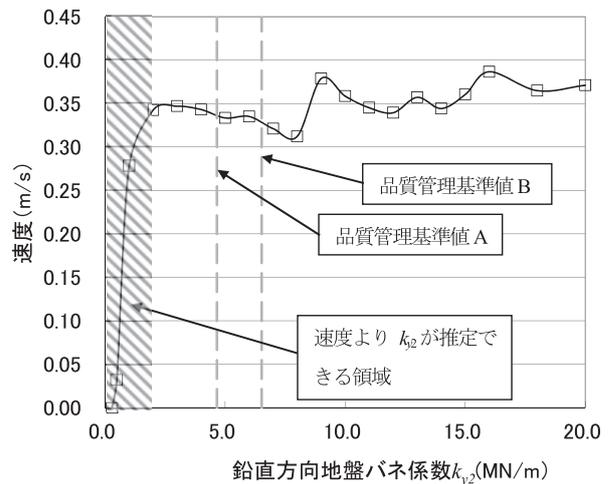


図-3 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係

す。横軸を鉛直方向地盤バネ係数、縦軸を前後進コンパクタ振動板の水平方向変位量から計算した走行速度で表している。また表-3による鉄道盛土における締固め品質管理基準値を式(8)にて地盤バネ係数に変換した値も破線で示している。これによると、図-3の斜線領域外では、地盤バネ係数に変化しても走行速度はほぼ一定になっており、走行速度から地盤バネ係数を推定することは困難であることがわかる。したがって走行速度から地盤バネ係数を推定することができるのは図-3の斜線領域であり、品質管理基準値よりかなり低い範囲となっている。よって、走行速度から地盤バネ係数が品質管理基準値を満たしているか推定するためには、図-3の斜線領域を右側へずらし品質管理基準値をカバーすればよいことがわかる。

ここで、地盤バネ係数と走行速度の関係をさらに詳しく見るために、4種類の異なる鉛直方向地盤バネ係数(0.3, 1.0, 2.0, 8.0  $\text{MN/m}$ )の地盤上における、前後進コンパクタ振動板の時間—鉛直方向変位、水平方向変位—鉛直方向変位を計算した結果を図-4(a)(b)(c)(d)に示す。また、グラフ中には滞空時間の1サイクル当たりデューティー比(1サイクル中の滞空時間の割合)および走行速度も併せて示している。

これによると、地盤が軟らかいとき(図-4(a),  $k_{y2} = 0.3 \text{ MN/m}$ )、前後進コンパクタ振動板は地盤と共に振動を行いジャンプはしていない。そして、振動板と地盤との間にすべりは発生しないと仮定しているため、前後進コンパクタはその場で斜め振動を繰り返すこととなり、走行速度は0となる。

上記より地盤が少し硬い場合は(図-4(b),  $k_{y2} = 1.0 \text{ MN/m}$ )、前後進コンパクタはジャンプを開始する。滞空中は地盤による水平方向の拘束が働かないため、タイミングよく起振体から水平方向の力を受けることにより振動

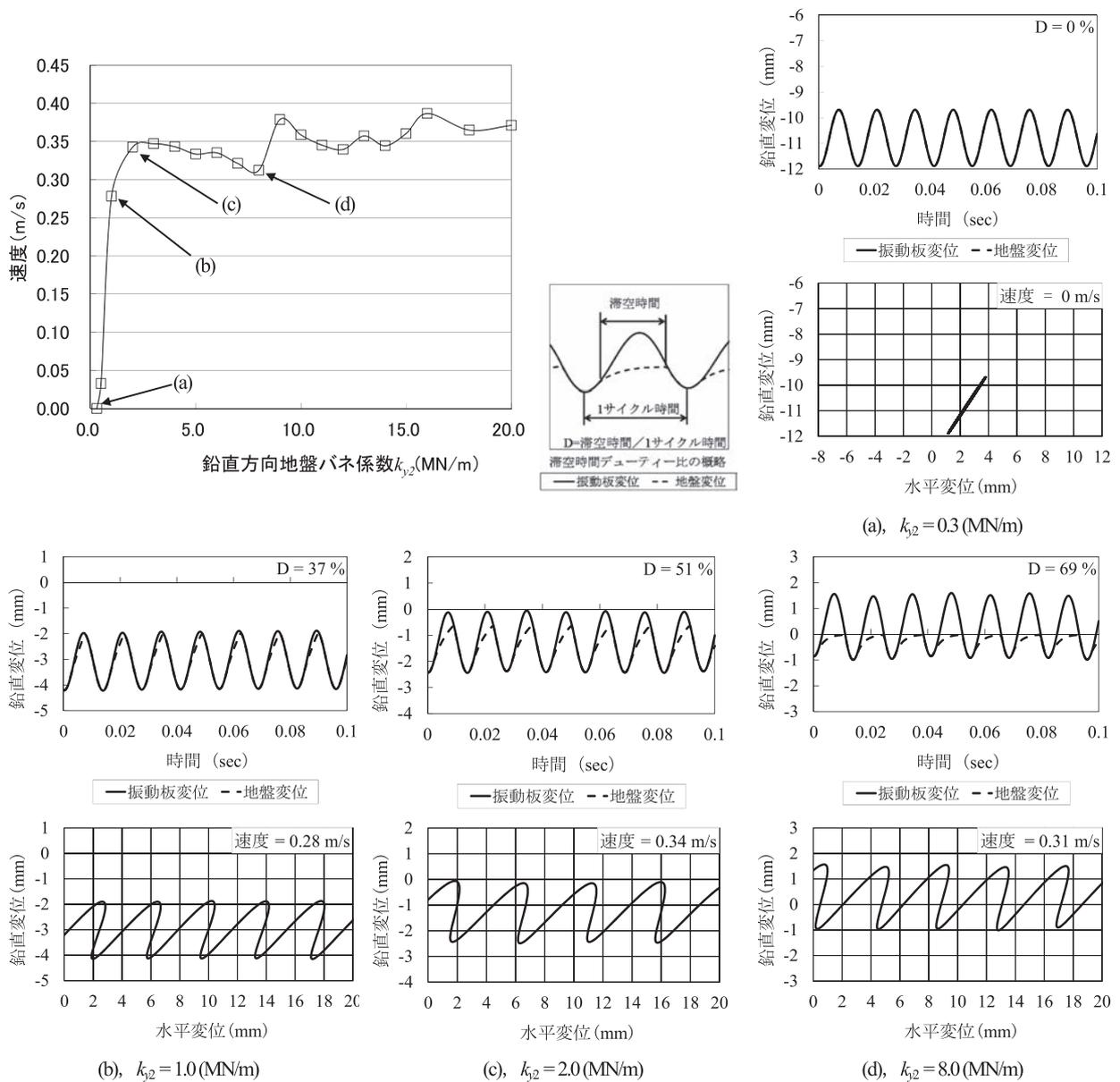
板には水平方向に地盤に対する相対変位が発生する。従って、前後進コンパクタは水平方向へ走行を開始する。

さらに地盤が硬い場合(図-4(c),  $k_{y2} = 2.0 \text{ MN/m}$ ), ジャンプによる滞空時間が長く(デューティー比が大きくなり), 1 ジャンプ当たりの水平方向変位が増加し, 従って走行速度が速くなる。しかしながら, さらに地盤が硬い場合でも(図-4(d),  $k_{y2} = 8.0 \text{ MN/m}$ ), ジャンプによる滞空時間は長くなるが, 走行速度は速くはならない。これは, 水平方向への力も起振体による振動力であるため, 進行方向正向きの力が発生している時間は1 サイクルの半分の時間(デューティー比 50%)しかないためと考えられる。すなわち, 滞空時間のデューティー比が 50% を越えても, 進行方向正向きへの力を受ける時間はそれ以上増加しないため, 走行速度はそれ以上増加せず走行速度はおおむねある一定の速度で安定すると考

えられる。

以上から, 図-3 の斜線領域を右側へずらすためには, 前後進コンパクタがジャンプを開始する地盤バネ係数(以下  $KJ$  とおく)が大きくなるよう前後進コンパクタの改造を行えばよいことがわかる。

なお, これまでの計算はポアソン比を 0.4 として行っているが, トンネル標準示方書(開削工法編)<sup>14)</sup>によると, 地盤のポアソン比は砂質土および粘性土において, 0.3 ~ 0.45 と考えられる。そこでポアソン比を 0.3 および 0.45 とし図-3 と同様の計算を行ったところ結果はほぼ同一となった。これは, 前後進コンパクタの走行速度は, 地盤の横方向バネ係数および減衰係数の影響はほとんど受けず, 縦方向バネ係数および減衰係数による滞空時間が支配的であることを表している。よって以降にお



D : 滞空時間の1サイクル当たりデューティー比  
 図-4 鉛直方向および水平方向変位の計算結果

いても、ポアソン比は0.4として計算を行うものとする。

#### 4. 有効な改造内容の検討と地盤バネ係数合否判定手法の提案

表-1に示す前後進コンパクタの仕様を変更するために必要な改造が、ユーザにて行うことができる軽微なものかを検討すると下記ようになる。

- (1) 振動傾斜角：2本ある振動起振体の位相を変更すればよく、軽微な改造である。
- (2) 本体質量・振動板質量：軽くすることは困難であるが、質量を付加することは軽微な改造である。
- (3) 防振ゴムバネ係数・粘性減衰係数：専用品である防振ゴム自体を新たに設計し交換する必要がある、ユーザにて行える改造ではない。
- (4) 振動数：エンジン回転数を変更する必要があるが、エンジンは定格回転数にて運転されるので、これ以上回転数を上げることは困難である。また、前後進コンパクタは振動のON/OFFに遠心クラッチを使用しているため、回転数を下げることも困難である。
- (5) 最大起振力：起振体の偏心量を変更するか、振動数を変更する必要がある。偏心量の変更はユーザには難しく、(4)に示した通り振動数の変更も困難である。

以上より、ユーザにて行える軽微な改造は振動傾斜角の変更と本体および振動板の質量付加である。ここで、これらの変更がジャンプを開始する地盤バネ係数  $KJ$  に与える影響を検討するために、図-5に示す様な防振ゴムを除いた振動体が地盤上に置かれた1自由度振動モデルを考える。本モデルにおいて重力の影響がないとした場合、振動体が地盤から受ける反力  $N'$  の最大値は式(9)によって求めることができる<sup>15)</sup>。

$$N'_{MAX} = \sqrt{\frac{(F \cos \theta)^2 (c_{y2}^2 (2\pi f)^2 + k_{y2}^2)}{(k_{y2} - M(2\pi f)^2)^2 + (c_{y2} \times 2\pi f)^2}} \quad (9)$$

この振動体が地盤からジャンプするには、この地盤反力最大値  $N'_{MAX}$  が重量  $Mg$  より大きければよい。した

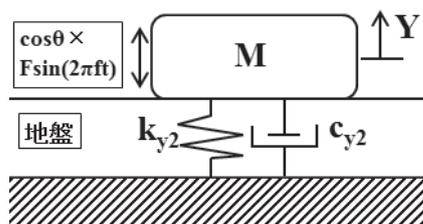


図-5 1自由度振動モデル

がって、ジャンプをする条件は式(10)によって表される。

$$\sqrt{\frac{(F \cos \theta)^2 (c_{y2}^2 (2\pi f)^2 + k_{y2}^2)}{(k_{y2} - M(2\pi f)^2)^2 + (c_{y2} \times 2\pi f)^2}} \geq Mg \quad (10)$$

式(10)を整理すると、式(11)によって表される  $k_{y2}$  の2次不等式が得られる。

$$FC \cdot k_{y2}^2 + 2M(2\pi f)^2(2D^2FC - 1)k_{y2} + M^2(2\pi f)^4 \leq 0$$

$$FC = 1 - \left( \frac{F \cos \theta}{Mg} \right)^2 \quad (11)$$

ここで、前後進コンパクタの最大起振力鉛直方向成分  $F \cos \theta$  は通常総重量  $Mg$  より大きく設定されるため、式(11)における  $FC$  は負の値になる。よって式(11)の左辺を  $H(k_{y2})$  とおいた場合のグラフは、図-6に示す様に上に凸で、 $H(0) = M^2(2\pi f)^4$  (正值)である放物線となる。地盤のバネ係数  $k_{y2}$  は負値となることはないので、振動体がジャンプをする条件式(10)を満足する  $k_{y2}$  の範囲は、図-6の斜線部分となる。したがって振動体がジャンプを開始する地盤バネ係数  $KJ$  は方程式  $H(k) = 0$  の大きい方の解となり、式(12)で表される。

$$KJ = \frac{M(2\pi f)^2 \cdot \left\{ (2D^2FC - 1) - \sqrt{(2D^2FC - 1)^2 - FC} \right\}}{FC} \quad (12)$$

式(12)にて  $KJ$  と  $\theta$  および  $KJ$  と  $M$  との関係の求めると、図-7および図-8の様になる。これらから、振動体がジャンプを開始する地盤バネ係数  $KJ$  は、振動傾斜角  $\theta$  が大きいほど、また起振体の質量  $M$  が大きいほど増加することがわかる。

図-1の前後進コンパクタモデルにおいても同様な傾向があると仮定し、2章と同様な数値計算を、振動傾斜角  $\theta$  を50度から80度まで、本体質量  $m_1$  を200 kgから700 kgまで、振動板質量  $m_2$  を130 kgから350 kgまで変化させて行った結果を図-9～11に示す。これらより、

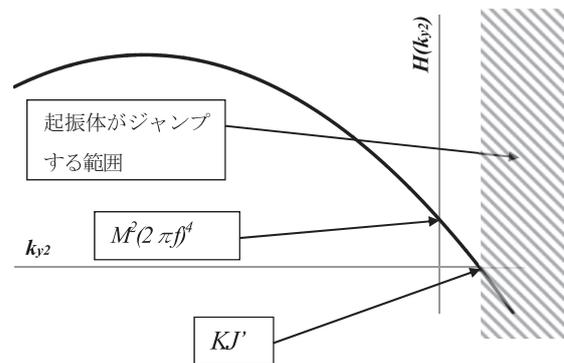


図-6  $H(k_{y2})$  グラフ

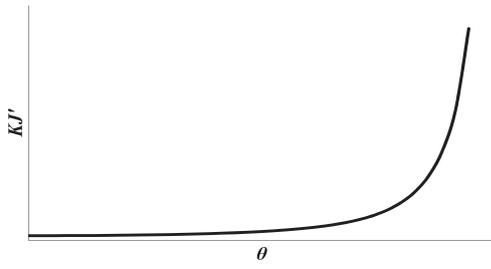


図-7  $KJ$  と  $\theta$  の関係

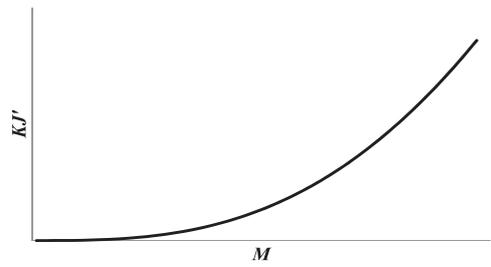


図-8  $KJ$  と  $M$  の関係

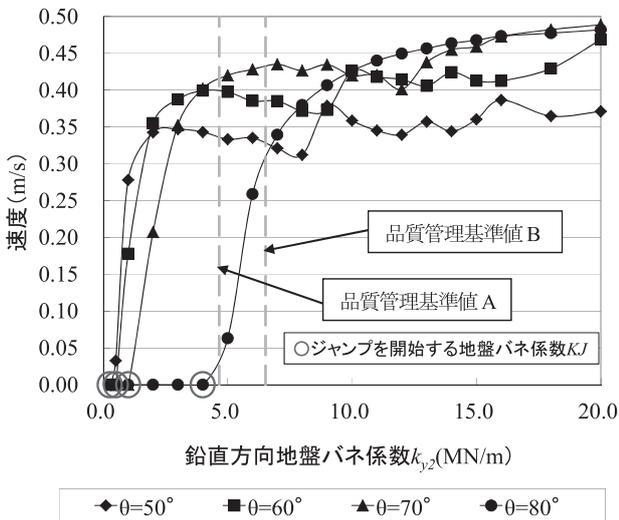


図-9 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (振動傾斜角を変化させた場合)

図-1の前後進コンパクトモデルにおいても図-5と同様に、ジャンプを開始する地盤バネ係数  $KJ$  は、振動傾斜角が大きいくほど、また本体および振動板質量が大きいくほど増加することがわかり、走行速度から地盤バネ係数が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推測するためには、振動傾斜角を80度、あるいは本体質量を700 kg、振動板質量を350 kgに増加すればよいことがわかる。しかしながら、本体質量を500 kg、また振動板質量を220 kg付加させることは質量、スペース的に現実的ではなく、また管理基準値付近での走行速度の変化量は、振動傾斜角を80度にした場合が最も大きいため、実際に最も有効な改造は振動傾斜角を80度に増加させることである。そして図-9より、振動傾斜

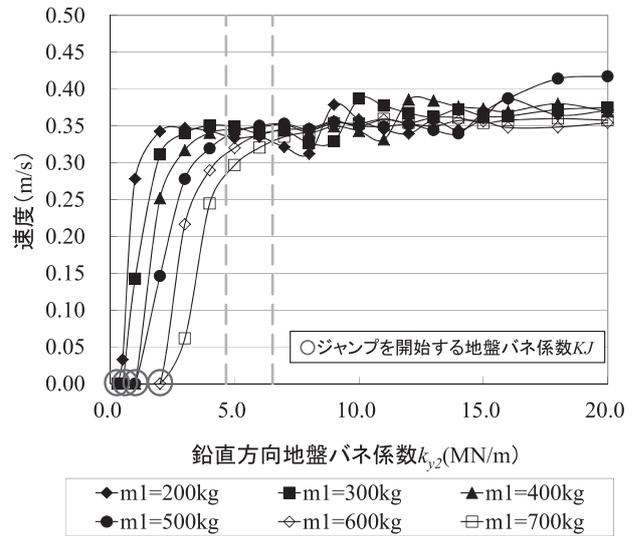


図-10 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (本体質量を変化させた場合)

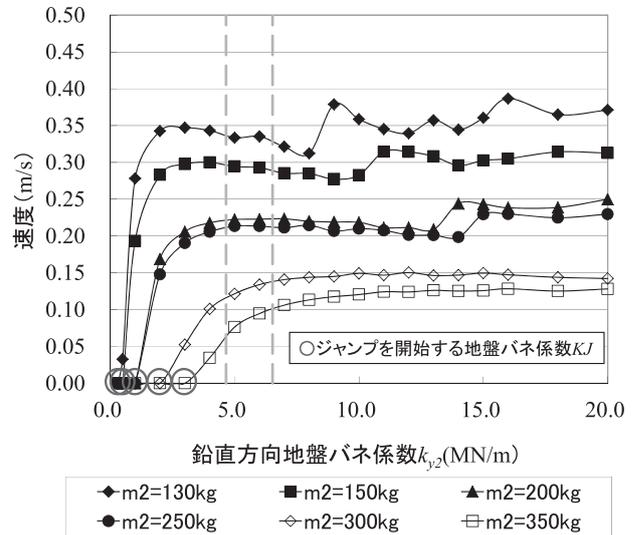


図-11 数値計算による地盤バネ係数と走行速度の関係 (振動板質量を変化させた場合)

角を80度に改造した前後進コンパクトを用い、品質管理基準値Aならば走行速度0.05 m/s程度、品質管理基準値Bならば走行速度0.30 m/s程度を基準として地盤バネ係数値の合否判定を行えばよいことがわかる。

### 5. 土槽実験による適用性の検証

前章で説明した、振動傾斜角を80度に改造した前後進コンパクトの走行速度から地盤バネ係数値の合否判定を行う手法の適用性を調べるため、室内実験ピットにて実験を行った。

実験は図-12に示す、幅5 m × 長さ44.8 m × 高さ4 mの実験ピット内に、実際に前後進コンパクトを用いて施工を行うような構造物近傍の現場を模した実験フィールドを作成して行った。まず、実験ピット内に表-4

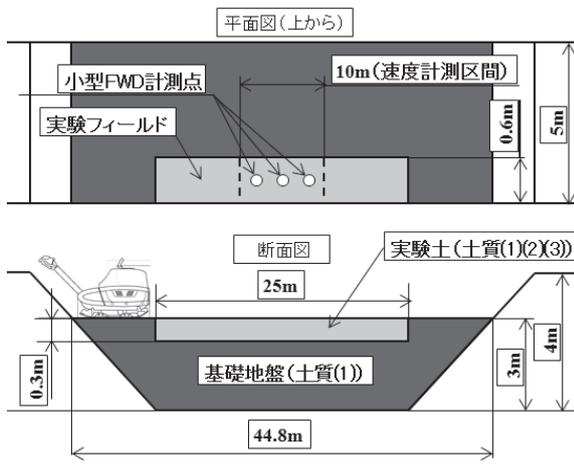


図-12 実験フィールド

表-4 土の物理特性

	土質(1)	土質(2)	土質(3)
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.675	2.665	2.647
最大粒径 $D_{max}$ (mm)	9.5	4.75	9.5
細粒分含有率 $F_c$ (%)	15.3	57.1	4.3
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.674	1.531	1.571
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	16.0	24.9	18.2

に示す土質(1)を用い、十分に締め固められた高さ3mの基礎地盤を作成した。作成においては、材料の含水比を最適含水比である16%になるよう調整し、盛り立ては層厚300mm毎に10tonタイヤローラにて8回締め固めを行った。本条件にて締め固めを行うことにより、締め固め度95%以上の十分に締め固められた基礎地盤が得られた。次にその基礎地盤の壁際に幅0.6m×長さ25m×深さ0.3mの溝を掘削し、そこへ仕上がり厚さ0.3mになるよう実験土を盛り立て、実験フィールドとした。また実験土は、締め固め品質管理基準値を含む幅広い固さの地盤を再現することが1種類の土質では困難であったため、3種類の土質を使用した。表-4、図-13～16に実験土の特性を示す。

その実験フィールド上を表-1の仕様を持つ前後進コンパクターと、その機械の振動傾斜角を80度に改造した前後進コンパクターの2種類の機械にて走行・転圧を行い、フィールド内10mを通過する時間をストップウォッチにて計測し走行速度を算出した。また同時に前後進コンパクターが通過後の地盤反力係数を小型FWDにて計測した。なお、小型FWDの計測は上記速度を計測した10m区間内の3点で行い平均値を採用することとした。小型FWDの計測・データ処理方法は、「土木学会、

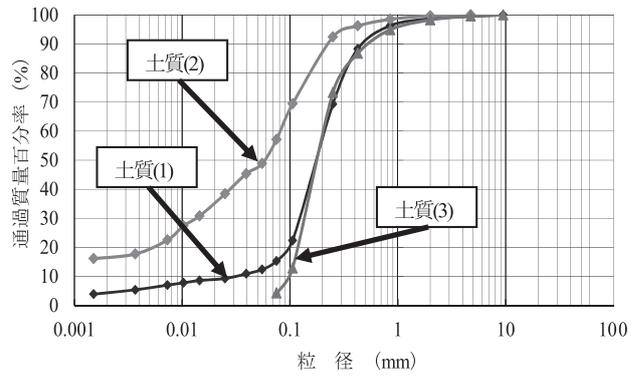


図-13 粒径加積曲線

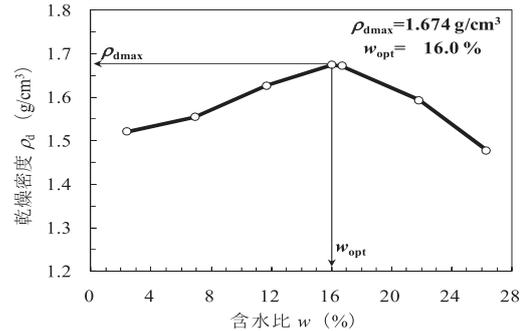


図-14 締め固め曲線 (土質(1))

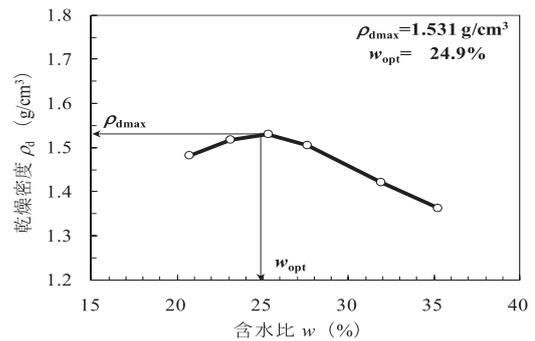


図-15 締め固め曲線 (土質(2))

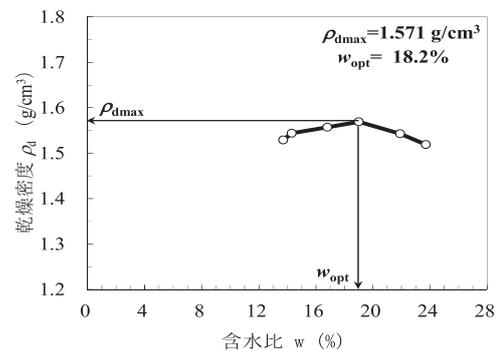


図-16 締め固め曲線 (土質(3))

FWDおよび小型FWD運用の手引き」<sup>16)</sup>および、「FWD-Lightによる小型FWD試験方法(地盤編)」<sup>17)</sup>に従い行った。表-5に小型FWDの仕様を示す。

2種類の前後進コンパクター、3種類の土質を用いて実験した結果を図-17に示す。プロットに際し、小型

表-5 小型 FWD 仕様 (株東京測器研究所製)

本体型式	KFD-100A
載荷板径	150, 200, 300(mm)
重錘質量	5(kg)
落下高さ	50~530(mm)
表示器型式	TC-351F
データ収集ソフトウェア型式	TC-7351
計測・処理ソフトウェア型式	TC-7100

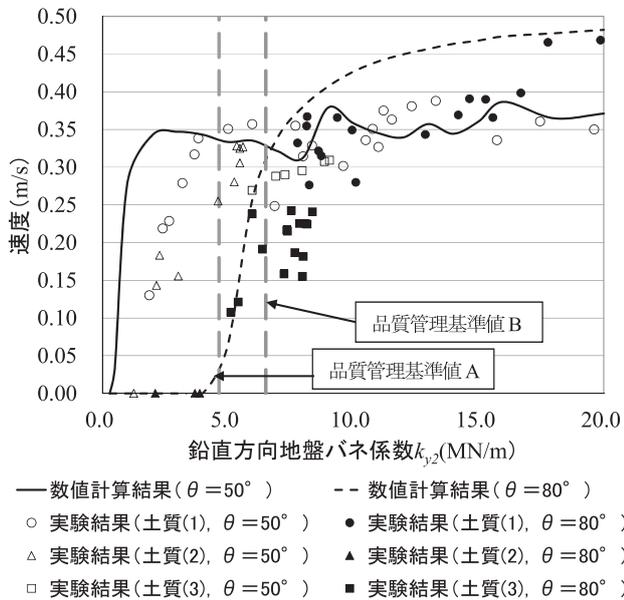


図-17 土槽実験による地盤バネ係数と走行速度の関係 (実線および破線は計算による結果)

FWDにて得られる地盤反力係数( $K_{30}$ 相当値)は式(8)にて地盤のバネ係数に変換した。

図-17によると、実験結果は計算結果と同様に、振動傾斜角を $50^\circ$ から $80^\circ$ に増加するとジャンプを開始する地盤バネ係数が大きくなるのがわかる。そして、振動傾斜角 $50^\circ$ では走行速度から地盤バネ係数が品質管理基準値A, Bをそれぞれ満たしているか推定することは比較的困難であるが、振動傾斜角 $80^\circ$ にすることにより、品質管理基準値A, Bの合否判定を行うことが可能となることがわかる。しかし、振動傾斜角 $50^\circ$ ,  $80^\circ$ 両方共に実験結果が計算結果よりやや右方にプロットされている。これは数値計算を行う際の、モデル化やパラメータ設定の手法、付加質量やすべりの無視という仮定など、多くの要因が考えられる。その結果、走行速度により地盤バネ係数値の合否判定を行う際の基準速度は、品質管理基準値Aの場合は計算結果と実験結果はほぼ等しく $0.05\text{ m/s}$ 程度であるが、品質管理基準値Bの場合は実験結果では計算結果よりやや低く $0.20\text{ m/s}$ 程度となっている。したがって、実際に走行速度により地盤バネ係数値の合否判定を行う場合は、事前に試験施工を行い品質管理基準値と走行速度の関係を求めておくことが現実

的である。

また、本研究では鉄道盛土における締固め品質管理基準値を目標にしているが、図-9から振動傾斜角を調整すれば他の基準値を推定することも可能であるといえる。その場合も同様に数値計算結果と実施工との間に多少のずれが存在すると考えられるため、事前に試験施工等を行うことが現実的である。

さらに、改造後の前後進コンパクタは、材料撒き出し直後などの柔らかい地盤では走行することができないため、通常の締固めに使用することは困難である。したがって、締固めには通常の振動傾斜角 $50^\circ$ のコンパクタを使用し、締固め完了後に振動傾斜角を $80^\circ$ に改造したコンパクタを用いて走行速度を測定し、施工エリア全体の品質管理を行う手法が考えられる。

なお今回の数値計算では、走行速度に対する土質の影響要因として、地盤バネ係数、すなわち地盤の剛性のみを想定している。実験ではこの点の検証の意味も含めて土質を3種類変えて実験を行った。図-17によると、実験結果はすべての土質において数値計算結果と類似した傾向を示しており、今回実験で用いた土質の範囲では、土質による明確な差異はないものと考えられる。今後、礫質土や粘性土など様々な土質での検証を行い本手法の適用範囲を明らかにしたいと考えている。

## 6. まとめ

現在国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクタを用いて、その走行速度を測定することにより接触している地盤の剛性が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推定する手法の提案を目的とし、数値計算により走行速度と地盤バネ係数との関係について考察を行った。その結果、以下の点が判明した。

- (1) 前後進コンパクタをそのまま使用した場合は、走行速度を用いて地盤バネ係数値の合否判定を行うことは困難である。また、走行速度を用いて地盤バネ係数を推定できる領域は、品質管理基準値よりかなり低い範囲となっている。
- (2) 地盤バネ係数が低い場合( $0.3\text{ MN/m}$ 以下)、前後進コンパクタはジャンプせず走行しない。地盤バネ係数が上昇すると前後進コンパクタはジャンプを開始し走行する。そのジャンプを開始する地盤バネ係数値は、振動傾斜角が大きいほど、また本体および振動板質量が大きいほど増加する。
- (3) 軽微な改造として、振動傾斜角を $80^\circ$ に変更することにより、走行速度から地盤バネ係数値が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか

推定することが可能である。具体的には品質管理基準値 A ならば走行速度 0.05 m/s 程度、品質管理基準値 B ならば走行速度 0.30 m/s 程度を基準として地盤バネ係数値の合否判定を行えばよいことがわかる。

また本数値計算結果を実際の前後進コンパクタを用いた土槽実験にて検証した。その結果以下の点が判明した。

- (4) 計算結果と同様に、振動傾斜角を 80 度に増加することによりジャンプを開始する地盤バネ係数を大きくすることができ、走行速度から地盤バネ係数が鉄道盛土における締固め品質管理基準値を満たしているか推測することが可能である。
- (5) 数値計算結果と実験結果の間にずれが存在するため、品質管理基準値 B の場合での地盤バネ係数値の合否判定を行う際の基準速度は、実験結果では約 0.20 m/s 程度となる。したがって実際に合否判定を行う場合は、事前に試験施工を行い、品質管理基準値と走行速度の関係を求めておくことが現実的である。

前後進コンパクタを用いる施工現場は、構造物や既存地盤との接合部であることが多く、その品質管理はより一層慎重に行う必要がある。本研究による手法は、ストップウォッチなどを使用すれば非常に手軽であり、品質管理手法を容易に合理化する一助になると考えている。

課題として、数値計算結果と実験結果において、合否判定を行う際の基準速度に差異がある点が挙げられる。今後この差異を解消するよう検討を続けたい。また、本研究は現在国内で最も一般的に使用されている前後進コンパクタのみを対象として行ったが、今後は異なる仕様を持つ機械や、さまざまな土質条件での検討・実験を

行い、本手法の適用性をさらに向上したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 嶋津見臣, 見波潔, 中田公基, 嶋田功, 足立賢一: 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, pp.37-76, 1985.
- 2) 建山和由, 中島聡, 藤山哲雄: 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, 土木学会論文集, No.487 / III-26, pp.237-245, 1994.
- 3) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No.652 / III-51, pp.115-123, 2000.
- 4) Kröber, W., Floss, E. and Wallrath, W.: Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction, *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*, A. A. Balkema Publishers, pp.189-199, 2001.
- 5) 横田聖哉, 吉田武男, 藤井弘章, 内山恵一: 振動ローラの加速度を利用した締固め管理の検討—大規模土工における情報化施工に関する研究 (3) 一, 第 37 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1321-1322, 2002.
- 6) 横田聖哉, 益村公人, 藤山哲雄, 石黒健: 道路路床の施工管理の合理化に関する考察—(その 1) ローラ加速度応答を利用した剛性評価手法の適用性—, 第 37 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1337-1338, 2002.
- 7) 古屋弘, 藤山哲雄: 振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 $\alpha$  システム」, 建設機械, Vol.47, No.7, pp.48-54, 2011.
- 8) 小葉はるな, 眞壁淳, 上野健司: 情報化施工における転圧管理システム CIS の適用事例について, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.139-142, 2009.
- 9) 橋本毅: BOMAG エコノマイザー = 前後進プレートコンパクタによる転圧品質管理技術 =, 建設機械, Vol.44, No.8, pp.66-69, 2008.
- 10) 橋本毅, 藤野健一, 建山和由: 前後進コンパクタの走行速度を利用した地盤の低剛性地点検出手法の提案, 土木学会論文集, Vol.69, No.1, pp.1-9, 2013.
- 11) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計基準・同解説, pp.89-93, 丸善, 2007.
- 12) 岩崎敏男, 嶋津見臣訳: 土と振動の基礎, pp.207-263, p.367, 鹿島出版会, 1975.
- 13) 木村孟: 土の応力伝播, pp.18-31, 鹿島出版会, 1978.
- 14) 土木学会: トンネル標準示方書 (開削工法編)・同解説, p.266, 1996.
- 15) 小堀与一訳: 機械振動入門, pp.57-62, 丸善, 1962.
- 16) 土木学会: FWD および小型 FWD 運用の手引き, pp.65-74, 2003.
- 17) 株式会社東京測器研究所: FWD-Light による小型 FWD 試験方法, pp.4-17, 2008.

(2013.6.5 受付, 2013.9.4 採用決定)

## IMPROVEMENT OF THE EVALUATION METHOD FOR THE GROUND STIFFNESS THROUGH THE RUNNING SPEED OF REVERSIBLE VIBRATORY COMPACTORS

Takeshi HASHIMOTO, Kenichi FUJINO and Kazuyoshi TATEYAMA

The numerical simulation was carried out to discuss the effect of the ground stiffness on the vibrating behavior and the running speed of reversible vibratory plates. The result of the simulation made it clear that it is difficult to use the running speed of vibratory plates for the evaluation of the ground stiffness because it doesn't change in the prescribed domain of the ground stiffness, although the running speed depends on the ground stiffness. Therefore we suggested a method of slightly adjusting the mechanical factors of the plate to evaluate the prescribed domain of the ground stiffness. And we examined its reliability through test pit experiments.