

# 締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察

建山和由<sup>1</sup>・藤山哲雄<sup>2</sup>・西谷誠之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学 助教授 工学研究科 土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町 1-39-16)

<sup>3</sup>正会員 工修 日本道路公団 静岡建設所 (〒420 静岡市御幸町 11-30)

土の締固め施工に用いられる振動ローラの振動挙動が土の締固めに伴い変化することを利用して土の締固め度をリアルタイムで評価する施工管理手法の開発研究の一環として、振動ローラの振動挙動に関する詳細な考察を行った。ここでは振動ローラ～地盤系を2自由度振動モデルで置き換え、数値計算により地盤剛性の変化に伴う振動ローラの振動挙動変化の特徴について検討を行った。この結果を詳細に考察することにより、地盤の締固めに伴い振動ローラの振動挙動が変化する原因を非線形振動の考え方をを用いて解釈し、またその特徴についても地盤特性や振動条件と関係させて議論を行った。

**Kew Words** : soil compaction, vibratory rollers, vibrating behavior, spectrum, nonlinear oscillation, chaos

## 1. はじめに

振動ローラやタンパ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。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、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<sup>1)2)</sup>。この手法を利用すると、面的かつリアルタイムの施工管理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。このため、海外を中心に各種の土工作業でその適用性が検討されるようになってきたが、振動式締固め機械の振動挙動が地盤の締固めに伴い変化する原因、ならびにその変化の特徴については必ずしも明確な説明が行われるにいたっていない。本論文では、数値計算により振動式締固め機械の振動挙動が地盤の締固めに伴い変化する原因

とその変化の特徴について考察を行った。

## 2. 振動式締固め機械の振動挙動

Fig.1 は、(社)日本建設機械化協会・建設機械化研究所において振動ローラを用いて行われた土の締固め試験の結果を示したものである<sup>3)</sup>。この試験では9t級片輪式振動ローラを用いてマサ土を繰り返して転圧した際の転圧に伴う土の締固め状況の変化や振動ローラの振動挙動変化が計測されたが、Fig.1 はこのうち振動輪加速度の周波数特性を計測した結果の一例を示したものである。図中(a)は転圧1回目の軟らかい地盤上での振動挙動、(b)、(c)がそれぞれ転圧6回目の中程度の硬さの地盤、転圧12回目の非常に硬い地盤上での振動挙動を表している。これらの図より、転圧を受けて地盤が硬くなるのに伴い振動輪の振動挙動も変化していることがわかるが、さらに詳細に検討すると、下記の事項が読み取れる。

(a)の軟らかい地盤上で振動する振動輪加速度の周波数分析結果は起振機の振動数(基本振動数 $f$ )とその高調波振動数(基本振動数 $f$ の整数倍の振動数 $2f, 3f, 4f, \dots$ )にのみスペクトル成分が現れる(高調波振動数の波を高調波成分と呼ぶことにする)。

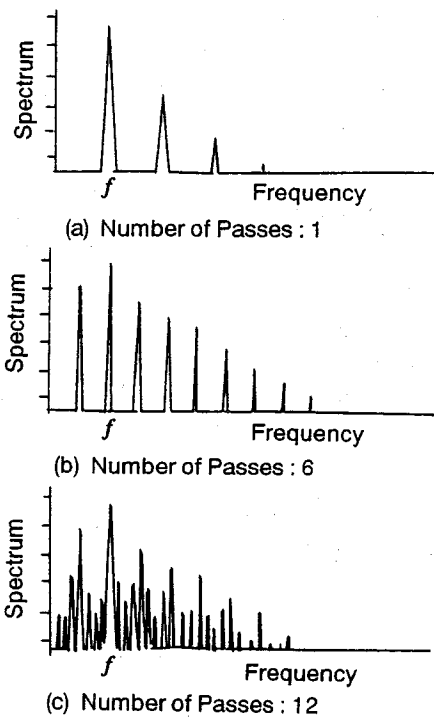


Fig.1 Frequency characteristics of the acceleration of the vibratory rollers

(b)の中位の地盤上では振動輪加速度の周波数分析結果には振動輪の振動数 $f$ とその高調波成分の他に基本振動数の1/2の振動数(1/2分数調波)とその整数倍の振動数の波が成長してくる。

(c)の硬い地盤上では周波数特性の規則性は無くなり、種々の振動数成分を含んだ複雑な振動挙動を示している。

上記の結果は振動ローラの振動挙動を計測すると一般的に得られる結果であるが、その原因については必ずしも明らかにされていない。

本論文では、以上の実験事実を鑑み、数値計算により振動式締固め機械の振動挙動について考察を行い、下記の3項目の解明を試みた。

- (1) 振動式締固め機械の加速度の周波数特性に高調波成分が現れる理由
- (2) ある程度硬い地盤上で振動する振動式締固め機械の加速度の周波数特性に高調波成分の他に1/n分数調波が現れる理由
- (3) 非常に硬い地盤上で振動する振動式締固め機械の加速度の周波数特性には規則性が無くなり、種々の振動数成分を含んだ複雑な振動挙動を示す理由

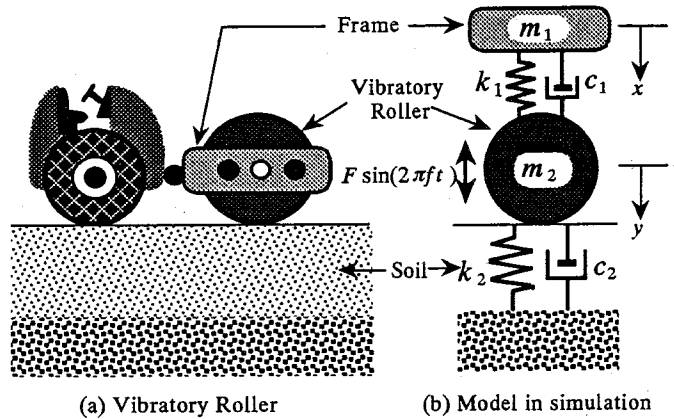


Fig.2 Vibratory roller and its model for simulation

### 3. 数値計算による振動ローラの挙動解析

Fig.2(a)は最も代表的な振動式締固め機械である振動ローラの模式図を表している。振動ローラは通常、内部に起振機を備えた鋼製のドラム(振動輪)が防振ゴムを介して鋼製のフレームに固定されており、その自重と振動力により土を効率的に締固めることのできる機械である。振動式締固め機械にはこの他、振動機のみからなるタンパーやガイドのついた小型起振機であるプレートコンパクタなどがある。本論文では振動式締固め機械の振動挙動と地盤特性の関係を調べるため、以下に示す数値計算を行った。

Fig.2(b)は数値計算で用いた振動ローラ～地盤系のモデル化を表している。ここでは地盤上で振動する基礎の問題を参考に<sup>4)</sup>、地盤をフォークトモデルで置き換えた。フレーム構造を持たないタンパなどの振動式締固め機械では、フレーム質量 $m_1$ を0とおけば同じモデルでその振動をモデル化することができる。

Fig.2(b)の2自由度振動系の振動挙動を表す運動方程式を求めると式(1)が得られる。ただし、ここでは土と振動ローラの振動輪との間に引張り力は働かないと考え、地盤反力 $k_2y + c_2\dot{y}$ が負値をとるときには $k_2 = c_2 = 0$ とすることにより振動輪が地盤から跳び上がる現象も考慮している。

$$\begin{aligned}
 m_1\ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_1g \\
 m_2\ddot{y} + k_2y + c_2\dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_2g + F\sin(2\pi ft)
 \end{aligned}$$

ただし、 $k_2y + c_2\dot{y} < 0$  のときは  $k_2 = c_2 = 0$  (1)

ここで、 $x, y$  はそれぞれ荷重が作用していないときの基準としたフレームと振動輪の変位(m)を、また $x, y$ に付した $\cdot$ は時間に関する1回微分を、また $\ddot{\cdot}$ は同じく時間に関する2回微分を表す。

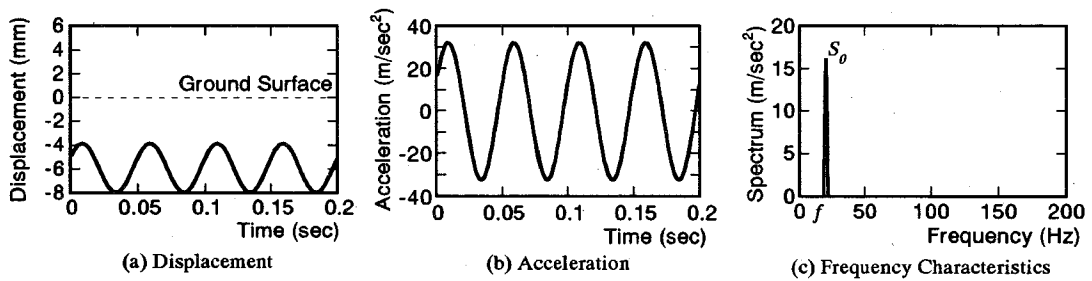


Fig.3 Calculation results of the vibrating behavior of a vibratory roller ( $k_2 = 5.0 \times 10^6$  N/m)

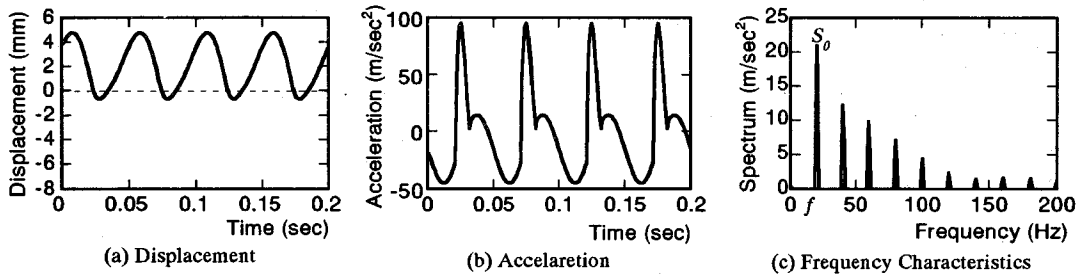


Fig.4 Calculation results of the vibrating behavior of a vibratory roller ( $k_2 = 2.0 \times 10^8$  N/m)

- $m_1$  : フレーム質量 (kg)
- $m_2$  : 振動輪質量 (kg)
- $f$  : 振動数 (Hz)
- $F$  : 最大起振力 (N)
- $k_1$  : 防振ゴムのバネ係数 (N/m)
- $c_1$  : 防振ゴムの粘性減衰係数 (Nsec/m)
- $k_2$  : 地盤のバネ係数 (N/m)
- $c_2$  : 地盤の粘性減衰係数 (Nsec/m)

振動ローラの振動挙動について考察を行うため、式(1)で表される運動方程式をRunge-Kutta法を用いて解くことにより時間経過にともなう振動ローラの変位、加速度を計算し、さらにフーリエ解析により加速度の周波数特性を求めた。振動ローラの諸元の値は実際に用いられている機種を想定し、また地盤のバネ係数  $k_2$  の値は実施工で得られた平板载荷試験等の結果を参考に設定した。地盤の粘性減衰係数は  $c_2 = 2D_2 \sqrt{m_2 k_2}$  により設定し、減衰比  $D_2$  は地盤上で振動する基礎の問題を参考に 0.4 を用いた<sup>4)</sup>。

#### 4. 振動ローラの振動輪加速度の特徴

Fig.3, Fig.4 は、ある標準的な振動ローラ ( $m_1 = 1000$ kg,  $m_2 = 2000$ kg,  $f = 20$ Hz,  $F = 58800$ N,  $k_1 = 1.0 \times 10^6$  N/m) が2種類の硬さの地盤上 ( $k_2 = 5.0 \times 10^6$  N/m,  $k_2 = 2.0 \times 10^8$  N/m) で振動する際の振動輪の変位波形、加速度波形、および加速度の周波数分析結果を上述の数値計算により求めたものである。

ただし、変位波形と加速度波形はわかりやすいように上向きを正として描いており、変位図中の点線は地表面を表している。この計算結果をみると、軟らかい地盤上 (Fig.3) で振動する振動輪の加速度波形は規則正しい正弦波形を示し、またその周波数分析結果には振動ローラの振動数 ( $f$ ) にのみスペクトルが現れている (図中  $S_0$ )。これに対し、やや硬い地盤上 (Fig.4) で振動する振動輪の加速度波形は正弦波形より大きく乱れ、またその周波数分析結果においては振動ローラの振動数の整数倍の振動数成分 (高調波) に対するスペクトルが現われていることがわかる。この結果は Fig.1 (a) の実験結果と同じ傾向を示している。近年開発が試みられている振動ローラの振動特性の変化を利用した締固め度の評価手法は、Fig.4 (c) の振動加速度の周波数特性を定量化している場合が多い。

Fig.4 の変位挙動と加速度波形を考察すると、振動輪が地表面より跳ね上がり、着地の瞬間に加速度波形がスパイク状に変化していることがわかる。すなわち地表面衝突時に振動輪の下向き速度が急激に減少するから、その瞬間に大きな上向きの加速度が生じ本来の正弦波形を乱しているものと考えられる。また Fig.3 の場合には、振動輪は地盤から跳ね上がらないため、加速度波形に乱れが生じないものと思われる。そこで、この振動輪の地盤からの跳ね上がりとそれに引き続いて起こる地表面との衝突に着目して、振動輪の挙動について考察を加える。

## 5. 高調波成分の発生理由に関する考察

まず、振動ローラの振動輪の振動挙動のうち、高調波成分の発生理由について考える。ここでは振動輪が地表面に衝突するときの振動輪の挙動について数値計算の結果を用いて考察する。

Fig. 4 の計算で用いたものと同じ機械条件の振動輪が自由落下し地表面と衝突する場合を考える。振動輪が地盤上に落下・衝突し、自由振動する場合の加速度波形を計算により求めるとFig. 5(a)の点線が得られる。ただし、ここでは式(1)の運動方程式において起振力  $F$  を 0 とし、Fig. 4 で振動輪が地表面と衝突する瞬間の速度を初期条件として振動輪挙動を求めた。また振動輪が地盤から同時に跳ね上がらないとした場合の振動輪の加速度波形を求め、同図中に加えると図中の破線が得られる。これらの2種の結果を合成すると同図中の実線が得られる。

Fig. 5(b) は、これと比較するためにFig. 4 の波形の1周期分を取り出したもので、さらにFig. 5(c), (d) はそれぞれFig. 5(a), (b) を周波数分析した結果を示している。Fig. 5(b) の跳ね上がりを考慮した計算結果とFig. 5(a) の正弦振動+自由落下の波形を比較すると、加速度波形、周波数特性ともその形状がよく似かよっていることがわかる。また、両者を周波数分析したFig. 5(c), (d) を詳細に見ると、それぞれ20(Hz), 55(Hz)付近の二つの振動数においてスペクトルが卓越していることがわかる。このうち20(Hz)は振動ローラの機械振動数に対応するが、特筆すべきは二番目のピーク点を示す55(Hz)が今回の計算条件における振動ローラ～地盤系の非減衰固有振動数とほぼ等しい振動数であるということである。すなわちこれは波形中の特異な加速度成分が、振動ローラが地表面に衝突した後に地盤上で自由振動する加速度成分に起因することを示唆するものと考えられる。

しかし、Fig. 4 における周波数分析結果では、この振動数成分は基本振動数の整数倍の振動数成分をもつ波として表現されている。この原因は以下に述べるようにフーリエ解析が任意の時系列関数を種々の周期を持つ三角関数の合成で表現するという性質に起因しているものと考えられる。

いま、振動数 20(Hz) と 55(Hz) の2種類の正弦波を、Fig. 6(a) に示すようにそのまま足しあわせる場合と、Fig. 7(a) に示すように20(Hz)の正弦波の各周期に55(Hz)の正弦波が1周期分だけ足しあわされる場合を考え、それぞれの周波数特性の違いを比較してみる。Fig. 6(b), Fig. 7(b) はそれぞれFig. 6(a), Fig. 7(a)中の2種類の波の合成波形で

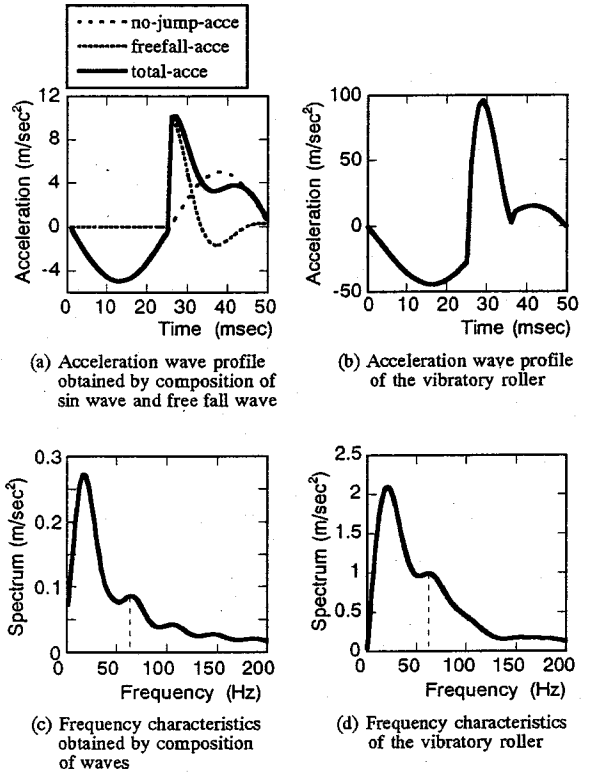


Fig. 5 The reason of the disturbance in the vibrating behavior of the vibratory roller

あり、Fig. 6(c), Fig. 7(c) はこれらの合成波形を周波数分析した結果である。これらの周波数分析結果をみると、2種類の正弦波をそのまま合成したFig. 6(c)の場合は20(Hz), 55(Hz)にのみスペクトルが卓越しているが、20(Hz)の正弦波1周期に対し55(Hz)の正弦波1周期が足されるように合成したFig. 7(c)の場合は、55(Hz)に対するスペクトルが消えてその代わりに20(Hz)の整数倍の振動数においてスペクトルが卓越していることがわかる。これはFig. 7の場合、55(Hz)の波も20(Hz)の周期で繰り返されることになるので、この波を55(Hz)の振動数の波では表現することができなくなり、20(Hz)で繰り返される波形を表現することができる振動数、すなわちその整数倍である40(Hz), 60(Hz), 80(Hz)…の波の合成によって表現せざるを得なくなるためである。

これと同じことが振動ローラの乱れた加速度波形にも当てはまる。Fig. 4 の加速度波形において、波形の乱れは前述の通り振動輪と地盤との衝突により生じると考えられるが、この衝突は振動輪の機械振動数に同期して繰り返されるため、その周波数特性は上と同じ理由で機械振動数の整数倍の振動数の

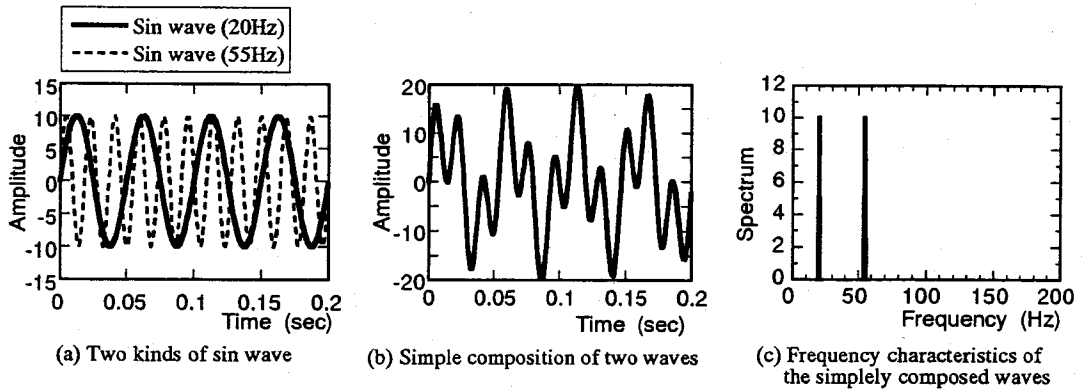


Fig.6 Simple composition of 20Hz sin wave and 55Hz sin wave

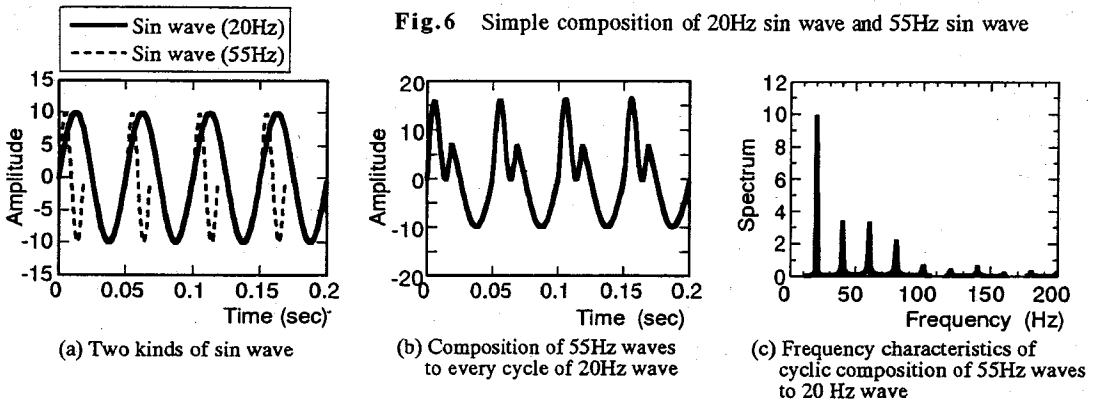


Fig.7 Cyclic composition of 55Hz sin wave to 20Hz sin wave

波の足しあわせでしか表すことができないことになる。すなわち、振動輪と地表面との衝突に起因する加速度成分の乱れは、本来振動ローラ～地盤系の固有振動数成分をもつ波であるにもかかわらず、基本振動数の整数倍の振動数の波の足しあわせで表されることになる。これが高調波スペクトルが出現する理由である。

## 6. 振動ローラの挙動の非線形力学的考察

次に地盤が硬いときに1/n分数調波が出現する理由について考察する。

軟らかい地盤から非常に硬い地盤までを想定し、この上でFig.4と同じ振動条件で振動ローラが振動する場合を考える。Fig.8(a)～(d)は、このときの振動輪加速度の周波数分析結果が地盤の硬化とともに変遷の様子を前述の計算で求めた結果である。この図からわかるように、地盤が硬くなるにしたがい、高調波スペクトルが出現した後、さらに1/2分数調波スペクトル、1/4分数調波スペクトルが出現し、最終的に卓越したスペクトルのない帯状のスペクトル分布に至ることがわかる。

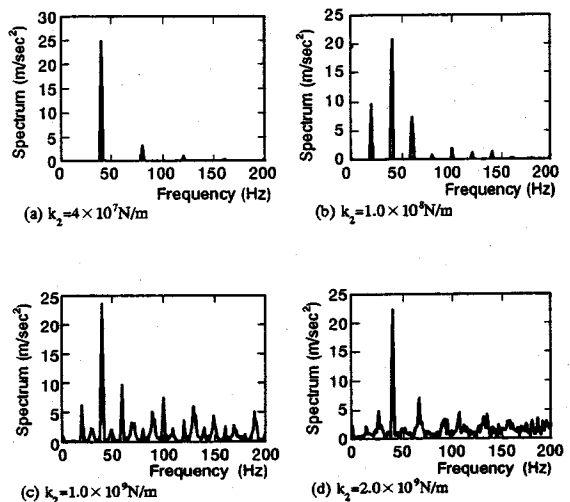


Fig. 8 Frequency characteristics of the acceleration of vibratory roller for four steps of the ground stiffness

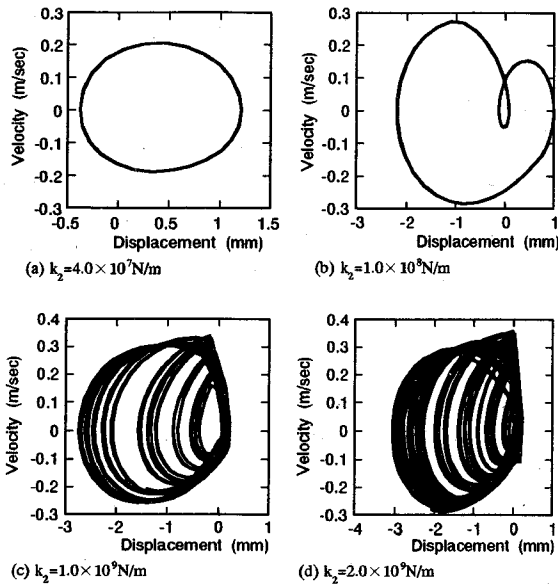


Fig. 9 Phase plane of the vibrating behavior of the vibratory roller for four steps of the ground stiffness

さらにこの時の運動を、横軸に振動輪の変位、縦軸に振動輪の速度をとった相図上で観察してみる。Fig.9はこの結果を表したものである。高調波スペクトルが出現している段階では軌道は1周の閉じた楕円を描くが (Fig.9(a)), 1/2分数調波が出現している段階では軌道が2周 (Fig.9(b)) となり、すなわち2種類の周期運動の混合した運動になっていることがわかる。さらに1/4分数調波が出現している段階では、ばらつきがあってわかりにくい軌道は4周になり (Fig.9(c)), そして帯状のスペクトル分布を示している段階では何周もの軌道が描かれた運動に変化していることが分かる (Fig.9(d))。

このようなスペクトル分布図、相図の結果は、はじめ周期 $T$ の運動をしていたものが不安定になって周期 $T$ と周期 $2T$ の混合運動になり、さらに周期 $T$ 、周期 $2T$ と周期 $4T$ の混合運動、そしていくつもの周期が混合された運動に変化していく周期倍加分岐が生じていることを示している。

振動輪の振動は、地盤からの跳び上がりを生ずるために非線形振動であり、地盤が硬くなるほど跳ね上がりが大きくなるため地盤への衝突時の衝撃が大きく、非線形性が增大するといえる。Fig.8,9にみられるように、系の非線形性の増大にともない周期倍加分岐を通じて秩序だった振動から不規則な振動に至る道筋は、ファイゲンバウムのシナリオと呼ばれる典型的なカオスへ至る道筋の一つと一致する<sup>5)</sup>。すなわち、Fig.8(d), 9(d)に示す地盤が非常に硬く

なったときの振動輪の不規則な運動は、カオスに至っているものと推測される。この論文の最初に紹介したFig.1(c)の結果もこの状態に至っているものと推測される。この種の振動系におけるカオスの例としては、農業機械の振動式サブソイラーで地盤を掘削する際に、地盤からサブソイラーに衝撃的な力が周期的に作用し、サブソイラーの振動挙動がカオスにいたるといふ事例が報告されており<sup>6)</sup>、本論で取り上げた振動挙動もこれと同様の現象ではないかと考えている。

このように振動がカオス的であるときは加速度のスペクトルは帯状に連続的に分布し、しかも非定常なため定量的評価が不可能になるため振動輪加速度を地盤剛性の評価に用いるときには、振動がカオス的にならない範囲で計測を行う必要がある。

## 7. おわりに

地盤が締固まるに従い振動ローラの振動輪加速度が乱れる原因と高調波スペクトルが出現する理由を説明し、またその挙動を非線形力学的に考察することによって1/2分数調波スペクトルや帯状のスペクトル分布を示す現象の説明を試みた。数値計算にもとづく考察ながら、実際の現象を説明し得たのではないかと考えている。本研究の中で、振動ローラの振動挙動の理解にカオスを導入する点に関し北海道大学農学部・酒井憲司氏より数多くの助言をいただいた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 嶋津晃臣, 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, 1985年.
- 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年.
- 3) 建設機械化研究所: 創立30周年記念論文集, p.55~58, 1994年.
- 4) Richart, F.E., Jr, Hall, J.R., Jr, Woods, R.D. (岩崎敏男・嶋津晃臣共訳): 土の基礎と振動, p.207~230, 鹿島出版会, 1975年.
- 5) 下條隆嗣: カオス力学入門, p.1~133, 近代科学社, 1992年.
- 6) Sakai, K., Hosoda, H., Hata, S. and Takai, M.: Technical advances for the measurement recording and analysis of deterministic Chaos observed in Agricultural Implement System, *Proceedings of the 11th International Conference of ISTVS*, Vol2, pp.500-513, 1993.

(1996. 3. 25 受付)

## SOME ASPECTS OF THE VIBRATING BEHAVIOR OF A VIBRATORY ROLLER IN SOIL COMPACTION

Kazuyoshi TATEYAMA, Tetsuo FUJIYAMA and Masayuki NISHITANI

The vibrating behavior of a vibratory roller was discussed through numerical simulation as a part of the development research of the ground evaluating system in which the ground stiffness can be evaluated in real-time by monitoring the vibrating behavior of a vibratory roller which depends on the ground stiffness in soil compaction. In the simulation, the vibratory roller-ground system was replaced by the second degree of freedom vibrating model and the reason its vibrating behavior changes according to the ground stiffness and its characteristics were discussed in detail by introducing the consideration of the nonlinear vibration and chaos.