

## 土の転圧締固めに関する実験的研究

### II. 振動式平滑胴ローラーによる転圧実験

吉田 勲\*

昭和57年7月31日受付

## Experimental Studies on Soil Compaction

### II. Compaction Tests with a Model of the Vibratory Smooth Wheel Roller

Isao YOSHIDA

The vibratory roller has been used for the compaction of sandy soil, but practical problems connecting performance have not been solved. Thus the author carried out compaction tests on sandy loam soil in the laboratory by using models of the vibratory smooth wheel roller and tried to clarify the relationships between the dry density of soil compacted by the vibratory roller and the number of rollings, the optimum frequency and the thickness of fill available for compacting the soil effectively and etc. The results are summarized as follows within the limits of this experiment.

- 1) The relationship between the compacted soil density and the number of passes can be expressed by empirical equation (2).
- 2) 8 passes are recommended as the optimum number for rolling.
- 3) The frequency suitable for compaction ranged from 30 cps to 40 cps and can be estimated by the formula (10).
- 4) The compaction effect of the vibratory roller is superior to that of the non-vibrating roller.
- 5) The thickness of fill suitable for rolling is about 40 percent of roller diameter.

### 緒 言

土の静的締固めは垂直荷重  $W$  が繰返し荷重として作用した結果、起きる現象である。しかし、ローラーによる転圧締固めは垂直荷重が地盤に垂直に作用するのみでなく、土をせん断する力も加わる (第1図)。この関係を模式化すると第2図のごとく一面せん断試験におけるせん断機構に類似できる。すなわち、乱した密度の低い土を

一定垂直荷重  $W$  で一面せん断する時、せん断ヒズミが増すにつれて、垂直変位も増加する。この点が静的な締固めと転圧締固めの相違点である (第1図(a), 第1図(b))。表面振動機による粒状土の締固めの研究は1930年の初期にドイツ<sup>11)</sup>において、初めて行われ、その後、振動機は改良されて現在にいたっている。現在使用されている振動ローラーの型式はほとんどすべて、第3図のように表わされる。第3図において、 $W_1$ は振動ローラーの軸に

\* 鳥取大学農学部農業工学科農地造成学研究室

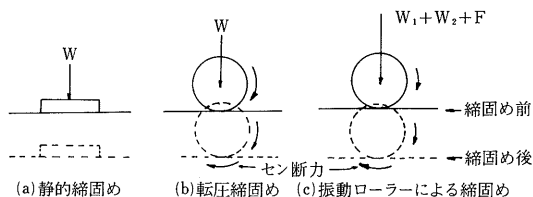
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

作用する起振機およびローラー以外の重量であり、 $W_2$ は起振機とローラーの重量である。 $F$ は回転軸から $\gamma_e$ 離れている偏心質量 $M_e$ が角速度 $\omega$ で回転することによって生ずる遠心力（振動力、 $F=M_e \cdot \gamma_e \omega^2$ ）である。 $K_1$ はローラー（あるいはタイヤ）のバネ定数、 $K_2$ は地盤のバネ定数である。したがって、振動ローラーによって土の締固めに寄与する力は $W=W_1+W_2+F$ である。平滑胴ローラー（タイヤ・ローラー）の締固め力と振動ローラーの締固め力の差は、上記の締固め力 $W$ の第3項の振動力にある。

振動力 $F$ は、小質量、小偏心距離であっても、振動数を増すことによって大きくなる。逆に、振動数が小さくても、偏心質量および偏心距離を増すことにより、あるいは、どちらか一方を増大させることによって大きくできる。したがって、振動ローラーは比較的小型であっても、平滑胴ローラー以上の締固め力を発揮できる。

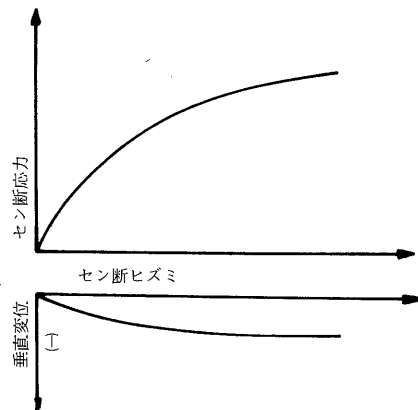
比較的小型で大型の平滑胴ローラー以上の締固め力を有するだけでなく、さらに、振動力を受けた土のセン断抵抗力は急激に低下し、その結果、圧縮抵抗が極小になり、わずかな荷重でも土を容易に圧縮せしめる大きな特徴がある。粗砂の場合、セン断抵抗は振動前のそのの $\frac{1}{2}$ に減少し、粘性土の場合、状況は異なるが振動の加速度が十分大きな振動の場合に、上記のことが、あてはまる。Youd<sup>16)</sup>は土の振動締固めについて研究し、振動機によって繰返して加えられるセン断ヒズミが土の締固めに及ぼす影響の重要性を実験的に証明した。

実際にセン断による沈下量を測定することは不可能であるが、概念的には、これはスリップ沈下と呼ばれるものである。すなわち、ローラーが土をセン断することにより、車両の進行速度が低下する。前報<sup>18)</sup>において、コロガリ抵抗は転圧締固めと密接な関係にあると述べたが、そのコロガリ抵抗の式の中に、セン断による沈下量（スリップ沈下）を代入すると、コロガリ抵抗はさらに大きくなる。転圧締固めと、静的締固めとの大きな違いはここにある。このように転圧機構についてはかなりの

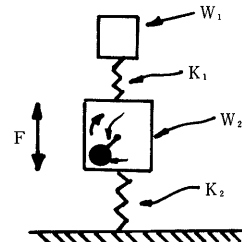


第1図 静的締固め、転圧締固めおよび振動締固めの概念図

説明がなされているものの土を締固める場合の有効転圧回数、最適振動数、有効マキ出し厚さなど多くの実際の問題は未解決のままである。そこで、これらの問題を解明するために、筆者は、転圧実験を行った。



第2図 疎な土の応力-ヒズミ曲線（一面セン断）



第3図 振動ローラーの一般型式

### 実験方法および実験結果の考察

#### 1. 実験1について

模型振動式平滑胴ローラーは第4図に示すように、直径40cmの平滑胴ローラーに25kgと40.1kgの振動機を取り付けたもので、その全重量はそれぞれ54.9kgと70.0kgである。振動機は第4図(b)に示すように、2個の偏心質量（偏心質量には3種類あり、各2個の質量の重量は、0.312、0.636、0.860kgである）が、たがいに、逆方向に回転することにより垂直方向に振動力（ $F=\gamma_e \cdot M_e \cdot \omega^2$ ）をローラーに0～60cpsの範囲で与えることのできる2軸偏心質量型である。便宜上、軽量の模型振動式平滑胴ローラーを模型No.1、重い方のそれを模型No.2と呼ぶことにする。模型No.1、模型No.2における偏心重垂重

量、振動数、振動力およびローラー重量を第1表に示す。実験に使用した土そうおよび供試土の諸性質は前報で説明したとおりである。まず、供試土の砂質ローム土を15cmでマキ出し、その上を模型 No.1 を一定振動数のもとで0~50回転圧走行させ、転圧走行回数 N=2, 4, 8, 16, 26および50回後、表面の沈下量および表面下0~5cmの乾燥密度を測定した。ある一定振動数に対して初期含水比を4種類に変化させた。

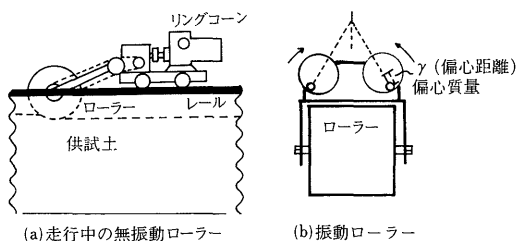
模型 No.2 の場合、マキ出し厚さを20cmにし、(1)式で定義する偏心率<sup>1)</sup>を3種類に変化させ、上記の実験を繰り返した。

$$\text{偏心率} = \frac{M_e \cdot \gamma_e}{M} \quad (1)$$

ここで、 $M_e$  : 偏心質量 (2個の和  $\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ )

$M$  : 偏心質量をも含めた振動機の総質量 ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ )

$\gamma_e$  : 偏心質量の偏心距離 (cm)



第4図 ローラーの説明図

第1表 模型ローラーの諸元

模型番号 (記号)	偏心 重り 重(g)	振動 数	ローラー 全重 量(kg)	振動力 F (kg)	F/W = $\beta$	偏心率 (cm)	備考
No.1( $M_0$ )	312	13	55.212	8.46	0.15	0.223	ローラー 径=40cm ローラー 幅17.5 cmで一定
		22		11.05	0.20		
		43		138.81	2.51		
		57		163.16	2.96		
No.2( $M_1$ )	860	15	70.860	23.36	0.33	0.036	
		30		93.44	1.32		
No.2( $M_2$ )	636	15	70.636	17.28	0.24	0.027	
		30		69.10	0.98		
No.2( $M_3$ )	312	15	70.312	8.48	0.12	0.013	
		30		33.90	0.48		
		45		76.27	1.08		

## 2. 実験2について

実験2は実験1で得た結果を基に、本機における最も転圧効果のある偏心質量(860g)を偏心距離 $\gamma_e=3\text{cm}$ で振動させて振動転圧実験を行い、その実験結果をもとに、有効マキ出し厚さおよび最適振動数の決定などを行う。

## 実験方法

前報で述べた実験土そう上を前述の模型振動式平滑胴ローラー(No.2,  $M_e=860\text{g}$ ,  $\gamma_e=3\text{cm}$ )を自走させて転圧実験を行った。また、深さ方向の締固め状態を知るために、コーンペネトロメーター(先端角 $30^\circ$ 、断面積 $3.2\text{cm}^2$ のコーン使用)を用いてコーン指数を求めた。締固め密度の測定は100ccの採土円筒を用いて行い、振動転圧中の振動機の振幅の測定は、日本測器505D型携帯用振動計を用いて行った。マキ出し厚を15cm, 30cmの2種類とし、含水比を種々に変化させて上記の実験を繰り返した。

## 考察

### 1. 乾燥密度と転圧回数

締固めを表現する方法には、転圧後の転圧面の沈下量と乾燥密度による方法とがある。前者は、沈下量が多ければ締固め効果が大きいことを示すという仮定に立っている。しかし、沈下量と乾燥密度の間には、必ずしも、直線的な関係はない。しかも、現場において盛土を締固める場合、JIS A 1210による最大乾燥密度の90~95%に締め固めることを要求している場合が多い。したがって、この方法だと、沈下量と密度の関係を前もって求めておく必要がある。現場締固めは、乾燥密度を基準にしているから、直接、乾燥密度を測定する方法の方が優れていると考える。

それゆえに、本論文においては、乾燥密度を転圧効果の判定基準に使用することにした。

筆者は以前の車両走行試験結果<sup>17)</sup>から、走行回数と表層土の乾燥密度の関係を次式で表わすことを提案した。

$$\gamma_{dN} = \gamma_{d0} + \frac{N}{a_\gamma + b_\gamma N} \quad (2)$$

ただし、 $\gamma_{d0}$  : 初期乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

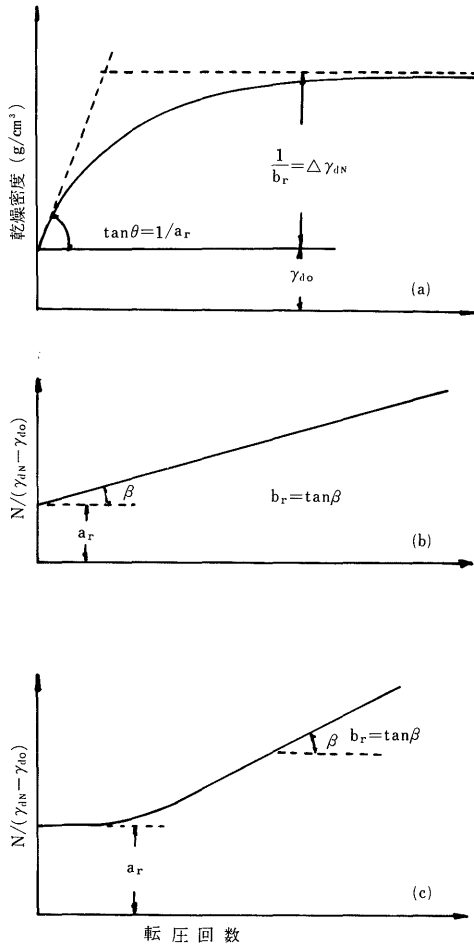
$\gamma_{dN}$  : N回走行後の乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$a_\gamma \cdot b_\gamma$  : 実験定数 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

N : 走行(転圧)回数

(2)式は第5図(a)に示すように初期傾度 $1/a_\gamma$ をもち、 $N \rightarrow \infty$ で $\gamma_{dN} - \gamma_{d0} = 1/b_\gamma$ に漸近する双曲線を表わす。

転圧実験で求めた( $\gamma_{dN} - \gamma_{d0}$ )とNとの関係から(2)式



第5図 転圧回数と乾燥密度との関係

の実験定数  $a_\gamma \cdot b_\gamma$  を求めるには、第5図(b)のように、 $N/(\gamma_{dN} - \gamma_{d0})$  を  $N$  に対して図示すればよい。ただし、乾燥密度の増加量—転圧回数曲線の初期部分において  $(\gamma_{dN} - \gamma_{d0})$  と  $N$  の間に直線関係が存在する場合には、両者の関係は第5図(c)のようになる。ローラーによる砂質ローム土の振動転圧締固めの場合にも、このようなことがいえるかを以下に検討する。一例として第6図に模型 No.1 によって含水比  $W=20.2\%$  の盛土を振動数 22cps で転圧した場合を示す。第6図(a)中、黒丸は実測値を示す。これを基に  $N'$  と  $N'/(\gamma_{dN} - \gamma_{d0})$  の関係を第6図(b)に示す。この例の場合、 $N'$  と  $N'/(\gamma_{dN} - \gamma_{d0})$  の間の相関係数は  $\gamma=0.99$  と高い。実験1の62組の資料について実験定数  $a_\gamma$ 、 $b_\gamma$  と  $N' - N'/(\gamma_{dN} - \gamma_{d0})$  間の相関係数を求めた。

実測値と実験式(2)による計算値の偏差を走行回数  $N=1, 5, 10, 15, 20, 25$  および50回に対して求めると、すべて、 $\pm 0.04$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) の範囲内であった。

RRL<sup>11)</sup> によると、密度の測定の標準偏差は細粒土で  $0.08\text{t}/\text{m}^3$  ( $0.08\text{g}/\text{cm}^3$ )、粗粒土で  $0.16\text{t}/\text{m}^3$  ( $0.16\text{g}/\text{cm}^3$ ) 以内にあると均質の密度とみなし、測定も正しかったとして良いとしている。相関係数はすべて、0.98と高く、両者の関係は高度に有意である。したがって、(2)式は振動転圧の場合にも成立すると考える。今後、無振動転圧回数を  $N$ 、振動転圧回数を  $N'$  で表わすことにする。

以上、転圧回数と乾燥密度との関係を述べたが、乾燥密度の増加量と地盤の圧縮とは密接な関係にある。

ところで、乾燥密度の増加量を知ると沈下量が、逆に、沈下量から乾燥密度の増加量が推定できるならば、土工管理などに便利である。そこで、両者の関係について考察する。佐々木<sup>12)</sup> は土の側方流動がない場合のローラーの沈下量を次式で表わした。

$$h_N = \frac{N}{a_z + b_z N} \quad (3)$$

ここで、 $h_N$  :  $N$  回転圧後の沈下量 (cm)

$a_z, b_z$  : 実験定数 (1/cm)

ここで、(2)式と(3)式の関係を検討すると次のようになる。転圧前、 $H$  の高さを有する土が、 $N$  回転圧後、表面が  $h_N$  だけ沈下し、層厚が、 $(H - h_N)$  になったものとする(第7図(b))。また、 $(B \times H \times \text{走行路長} \ell)$  なる体積の土の乾燥重量を  $W_s$  とすると、次の関係が成立つ

$$\gamma_{d0} = \frac{W_s}{B\ell H}, \quad \gamma_{dN} = \frac{W_s}{B\ell(H - h_N)} \quad (4)$$

したがって、

$$\Delta\gamma_{dN} = \gamma_{dN} - \gamma_{d0} = \frac{N}{\frac{a_z}{\gamma_{d0}} H + \frac{b_z H - 1}{\gamma_{d0}} N} \quad (5)$$

$$\therefore \gamma_{dN} = \gamma_{d0} + \frac{N}{\frac{a_z}{\gamma_{d0}} H + \frac{(b_z \cdot H - 1)}{\gamma_{d0}} N} \quad (6)$$

(2)式と(6)式とから、(7)式が得られる。

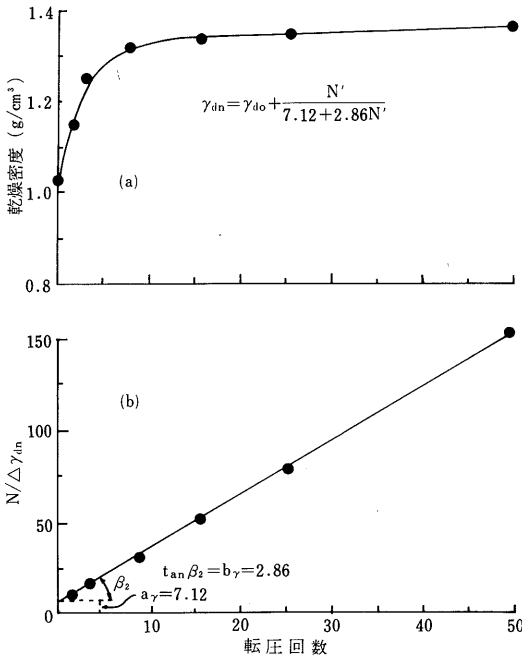
$$a_\gamma = \frac{a_z}{\gamma_{d0}} H, \quad b_\gamma = \frac{b_z H - 1}{\gamma_{d0}} \quad (7)$$

このように、(7)式で求めた実験定数から転圧地盤の平均的な密度の推定ができる。

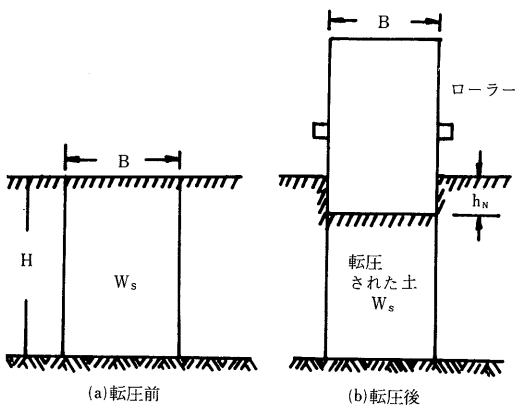
## 2. 有効転圧回数

筆者は前報において  $N$  回転圧後の土の締固め程度を表すするために、締固め率を次式で定義した。

$$\lambda_N = \frac{\gamma_{dn} - \gamma_{do}}{\gamma_{d\infty} - \gamma_{do}} \times 100 \quad (8)$$



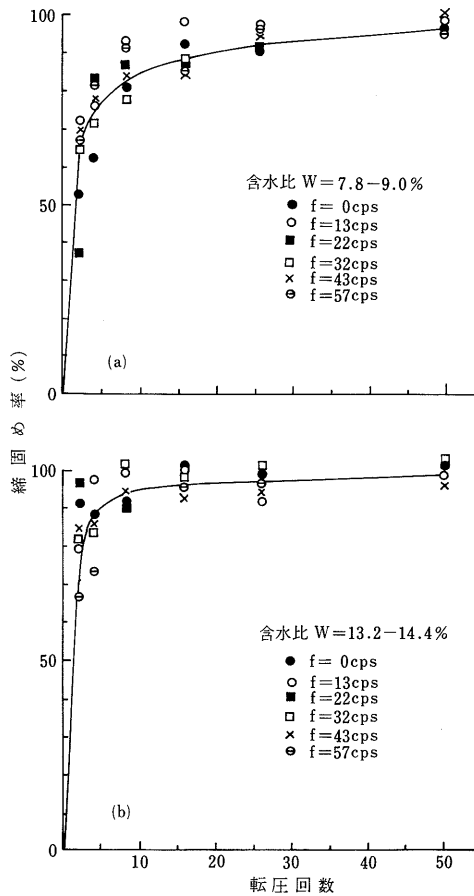
第6図 転圧回数と乾燥密度の関係  
(模型No.1, 振動数=22cps, 含水比=20.2%)



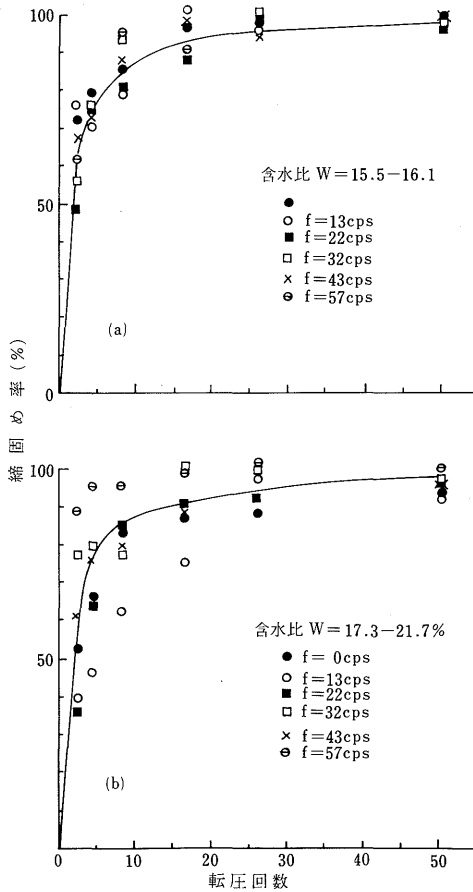
第7図 転圧前と転圧後の関係

模型No.1の資料を基に締固め率を計算し、その計算値から求めた平均曲線を含水比別に第8図と第9図に示す。第8図と第9図において、最適含水比 ( $W_{opt}=14.0\%$ )

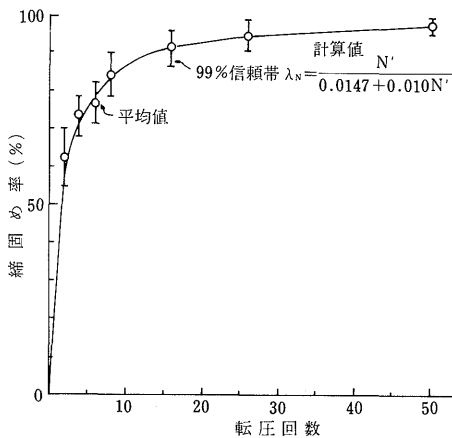
近傍 (第8図(b)  $W=13.2-14.4\%$ , 第9図(a)  $W=15.5-16.1\%$ ) の地盤の締固め率の分散は、最適含水比よりもかなり乾燥側 ( $W=7.8-9.0\%$ ) および、かなり高い ( $W=17.3-21.7\%$ ) 地盤の締固め率の分散よりも小さい。これは、本機による土の締固めは最適含水比近傍において、有効に行われてことを示している。また、第8図(b), 第9図(a)において、振動力間の締固め率には、有意差はない。そこで、実験1において模型No.1とNo.2の資料のうち、最適含水比近傍の資料を用いて各転圧回数に対して締固め率およびその99%信頼帯を求めその結果を第10図に示す。第10図において、99%信頼帯の幅は  $N'$  に対して一定でなく、 $N'=1$  のとき最大で  $\pm 7.5\%$ ,  $N'=8$  回で  $\pm 6.4\%$  と  $N'$  が大きくなるにつれて小さくなる傾向のあることがわかる。これは、転圧初期ほど  $\lambda_N$  のちらばりが大きく、 $N'$  の増大とともに、ちらばりが減



第8図 転圧回数と締固め率の関係



第9図 転圧回数と締固め率の関係



第10図 最適含水比の近傍の土を模型 No.1,2 で転圧締固めをした場合の転圧回数と締固め率の関係

少していくことを意味している。この締固め率の平均曲線の関係式は次のようである。

$$\lambda_N = \frac{N}{0.0149 + 0.0100N} \quad (9)$$

ただし、(9)式は含水比、13.2~18.4%、初期乾燥密度  $0.92 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$  の砂質ローム土について適用できる。第10図と(9)式とから、 $N' = 8$ 回までは、転圧は、かなり有効に行われるが、8回以後は転圧回数を増しても転圧効果は、あまりあがらないことがわかる。また、 $\lambda$ が85%以上になるには  $N' = 8$ 回の転圧が必要であることが(9)式から導かれる。ゆえに、筆者は、有効転圧回数は  $N' = 8$ 回であると考えている。Moorhouse ら<sup>9)</sup> は振動ドラムを用いて転圧実験を行い、24回転圧で得られた沈下量の%は8回転圧で得られたと述べている。Tooms<sup>13,14)</sup> は重粘土、砂質粘土、粒度配合の良い砂を振動ローラーで転圧し、その結果、転圧回数  $N' = 8$ 回以上では乾燥密度はあまり増加しないという結論を得た。RRLは、<sup>11)</sup> 5種類の土について3種類のローラーで転圧実験を行い8回の転圧以後の密度の増加量は少なく合理的な転圧回数を8回であるとしている。

佐々木は<sup>12)</sup> アースダム用土を2機種の転圧ローラー(無振動、2.7t、4t)で転圧し、転圧ローラーによる適正締固め回数は  $N = 8$ 回としている。Moorhouse および筆者の結論は振動転圧試験結果から導いたものであり、他方、RRL と佐々木の結論は無振動転圧試験結果から得られたものである。両者の転圧方法は根本的に異なるが、結論は一致した。これから、振動を含めて、有効転圧回数は8回であるといえる。

### 3. 振動および無振動転圧回数

まず模型 No.1 について考察する。振動転圧回数と無振動転圧回数との関係について、実験1から、初期状態のほぼ等しいものを取り出し、無振動転圧  $N = 8$ のときに得られる乾燥密度を生ぜじめるに必要な振動転圧回数  $N'$ を求めることにする。

含水比が  $W_2 = 13.2 \sim 14.4\%$  の範囲において無振動転圧の初期乾燥密度  $\gamma_{d0} = 0.92$  に近いものとして、振動数 43cps の  $\gamma_{d0} = 0.93$  がある。いま、無振動転圧回数  $N = 8$  の場合の乾燥密度は、実験1の模型 No.1 による資料から

$$\gamma_{d8} = 0.92 + \frac{N}{2.12 + 3.13N} \doteq 1.21$$

である。振動転圧で、 $\gamma_{d8} = 1.21$  にするのに必要な振動転圧回数  $N'$  は

$$1.21 = 0.93 + \frac{N'}{1.89 + 2.42N'}$$

$$N' \approx 2$$

となる。

W<sub>3</sub>=15.5~16.1%の場合、無振動転圧の初期乾燥密度γ<sub>d0</sub>=0.86に近いものとして、振動数が32cpsのγ<sub>d0</sub>=0.85がある。前例と同様な方法で、無振動転圧回数N=8のときに得られると推定されるγ<sub>d8</sub>を生で始めるに必要な振動転圧回数N'を求めるとN'≈2であった。

模型No.2についても同様な計算を行い、その結果を模型No.1のそれと一緒に第2表に記す。第2表から、振動転圧回数はN'=1~5回と無振動転圧回数よりもはるかに少ない回数で良いことがわかる。以上は実験式に基づく考察である。次に、実測した乾燥密度を基に、γ<sub>d8</sub>を得るに必要なN'を求めるとM<sub>2</sub>-45, M<sub>1</sub>-45(第2表)のN'=6, 2回の2例を除く他の3例は結算結果と一致した。実測値による振動転圧回数が、計算値のそれよりも、それぞれ1回多いのは、転圧回数N'=5回および1回において乾燥密度を測定していないことに基因する。

4. 最適振動数

振動数と乾燥密度との関係を見るために実験1において振動転圧回数N'=2, 4, 8, 16, 28および50回の場合のうち、1例として、N'=26における振動数と乾燥密度との関係を含水比別(W<sub>1</sub>=7.8~9.0%, W<sub>2</sub>=13.2~14.4%, W<sub>3</sub>=15.5~16.1%, W<sub>4</sub>=17.3~21.7%)に第11図

第2表 振動転圧回数と無振動転圧回数の比較

無振動転圧		振動転圧				備考
初期状態	N=8のとき	初期状態	γ <sub>d8</sub> の密度を得るに必要なN'			
含水比(%)	乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	含水比	乾燥密度			含水比
13.2	0.92	1.21	13.4	0.93	2	43cps
15.8	0.86	1.26	15.9	0.85	2	32cps
11.5	1.07	1.36	11.5	1.07	5	M <sub>2</sub> -45
13.2	0.96	1.34	13.2	0.96	2	M <sub>1</sub> -15
13.2	0.96	1.34	13.2	0.86	4	M <sub>2</sub> -45
18.2	0.94	1.39	18.2	0.94	4	M <sub>2</sub> -30
18.2	0.94	1.39	18.2	0.93	1	M <sub>1</sub> -45

に示す。第11図において、振動数乾燥密度曲線にピークが見られる場合、その振動数を求めると第3表のようになる。理論的には、振動機の振動数が土の固有振動と同

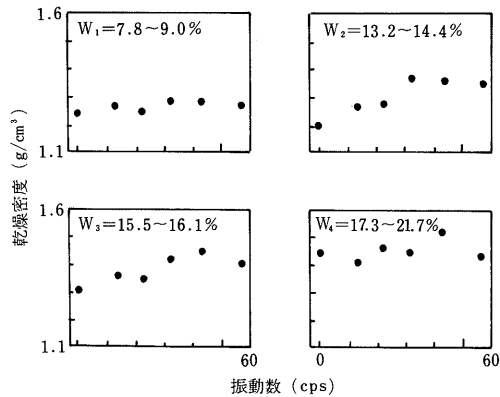
じ時、土は最も良く締まると言われているが、第11図中のピーク時の振動数が土の固有振動数であるかどうかを判定する理論は現在のところ無い。

また、第3表から、転圧初期において振動数-乾燥密度曲線にはピークが見られず、転圧回数が増加するにつれてピークが顕著になることがわかる。これは、転圧初期において、土が振動を受けると土粒子自身が自由に運動し、転圧回数が増すにつれて土全体が一体となって挙動することに起因すると考えられる。

第3表 各転圧回数における締固め最適振動数

転圧回数	振動数 cps					
	N'=2	N'=4	N'=8	N'=16	N'=26	N'=50
含水比						
W <sub>1</sub> =8.8-9.0%	*	*	32	*	32	32
W <sub>2</sub> =13.2-14.4%	*	32	*	32	32	32
W <sub>3</sub> =15.5-16.1%	*	43	*	*	43	43
W <sub>4</sub> =17.3-21.7%	*	*	43	43	43	43

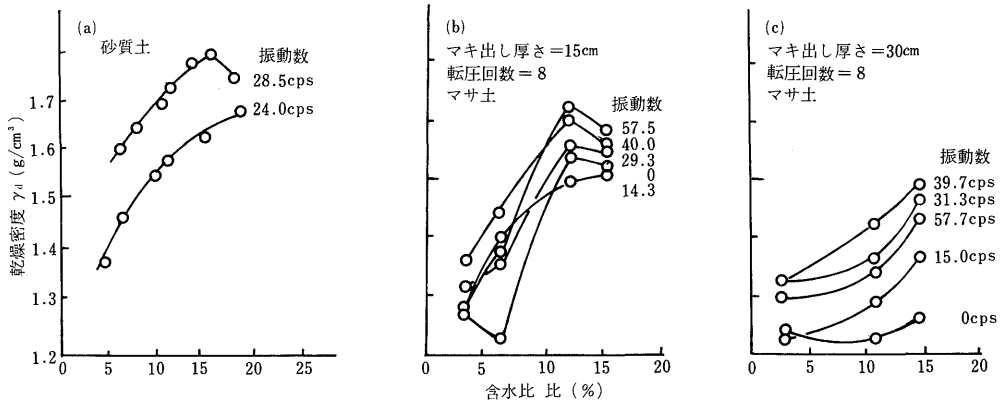
\* ピーク値のないもの



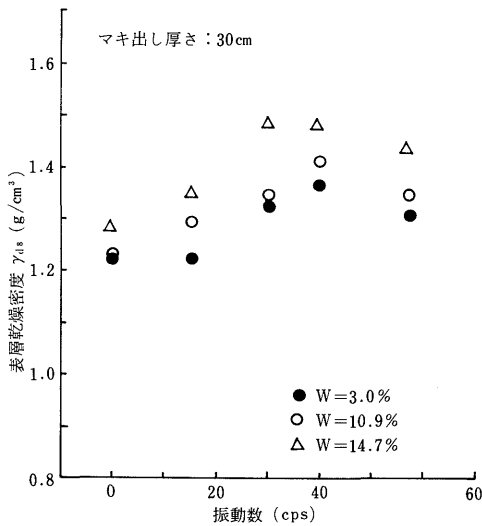
第11図 振動数(cps)~乾燥密度の関係 (模型No.1, N'=26の場合)

含水比は土の締固めに影響する重大な因子である。そこで、マキ出し土の含水比によって、締固め密度がどのように変化するかを描いたのが第12図である。

村山らは<sup>10)</sup>側方拘束の条件下にある砂質土に関する振動締固め実験から第12図(a)に示す結果を得た。第12図(a)から、一定振動数で振動締固めを行うと含水比の増加とともに乾燥密度も増大し、ある含水比において、その乾燥密度は最大値に達し、さらに含水比が増加すると、乾燥密度は逆に減少するのがわかる。第12図(b),



第12図 含水比と乾燥密度の関係

第13図 振動数と転圧回数  $N'=8$  のときの  
表層乾燥密度

(c)は、筆者の転圧実験のうち、マキ出し厚さが、それぞれ、15cmおよび30cmの場合の転圧回数  $N'=8$  における含水比と乾燥密度の関係を示している。筆者の転圧実験方法と村山らの方法とは異なるけれども、第12図(a)および第12図(b)から、JIS法による締固め試験の場合と同様に、振動締固めにおいても最適含水比および最大乾燥密度の存在が確認される。

マキ出し厚さ30cmの場合、含水比20%近くにおいて、ローラー表面に土中水分が付着し、ローラーは空転し自走できなかった。第12図(b)、(c)両図を比較すると、第

12図(c)の乾燥密度の方が少し小さいことがわかる。これは、マキ出し厚さが厚く、応力の伝達領域が広いことに起因すると思われる。

以上のことから、最も効果的な締固めは、最適含水比付近で ( $W_{opt}=14\%$ )、振動数30~40cps付近で期待できそうである。

次に、乾燥密度と振動数の関係を見るために、マキ出し厚さ30cmの盛土を8回転圧後に実測した乾燥密度を振動数に対し第13図に示す。第13図から、乾燥密度-振動数の関係は30~40cps付近でピークを示しているのがわかる。したがって、この範囲の振動数で転圧すれば、最も効果的な締固めが期待できそうである。筆者は振動転圧結果を整理するにあたり、乾燥密度-振動数の関係に顕著なピークが見られない場合が多いこと、土は減衰を有し、かつ振動転圧時の共振振動数を算出する有力な理論がないことなどから、乾燥密度-振動数曲線のピーク時の振動数を共振振動数と呼ばず、福岡<sup>5)</sup>の考えに従って土の締固めの最適振動数と呼ぶことにする。基礎地盤工学の分野において、基礎地盤の固有振動数を求める方法が研究され、King, Hsieh, Richart, Barkan,<sup>2)</sup> Tchebotarioff, Paw, Lysmer, Reissner などの方法があるが、その中で、Tchbotarioff-Alpan<sup>6)</sup>の実験式は、本実験で得た最適振動数に最も近い値を与えた。その式は、(10)式で表わされる。

$$f_N = \frac{a}{W} A_1^{0.248} \quad (10)$$

$f_N$ : 固有振動数 (=最適振動数, C/min)

$A_1$ : 接地面積 ( $m^2$ )

$W$ : 振動機の全重量 (kg)



- a : 土の種類により定められる定数  
 ピート : 39,000, 塑性粘土 : 69,000  
 砂 : 82,000, 砂岩 : 111,000

本実験では、砂質ロームを用いているので、a 値として、塑性粘土と砂の平均値をとって、 $a=75,500$  と仮定し、この値と 8 回転圧時の接地面積  $A=3.5 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 、 $W=70.86 \text{kg}$  を(10)式に代入すると  $f_N=37 \text{cps}$  を得る。a 値を仮定したにもかかわらず、算出した最適振動数は、本実験で求めた締め最適振動数の 30~40cps の間にある。これから、(10)式は、振動転圧に有効な振動数を推定する手段として有効であると考えられる。

Viering (1961) は<sup>15)</sup> 砂、砂分を含む砂利、シルトおよびシルト質の土に底面積  $0.5 \text{cm}^2$  を有する振動機を振動数 0~80cps 間で作動させて、振動数と振幅の関係を研究し、共鳴振動数は下層土の静的土圧の増加とともに増加し、ある一定値を超えると共鳴振動数は減少すること、静的土圧が減少するにつれて、共鳴点は顕著でなくなるが、数個の振幅の最大値が生じること、これらの土の共鳴振動数は 22cps~26cps 間にあることなどを報告している。

Lewie は<sup>7)</sup> 砂の振動締め試験から共鳴振動数は約 30~40cps の範囲にあったと報告している。また D'Appolonia ら<sup>3)</sup> は、直径 119cm、幅 190cm、総重量 5.7t および、直径 119cm、幅 168cm、総重量 2.9t の 2 機種振動ローラーによって砂を締め、その結果、共鳴振動数は 29.5cps であるという結論を報告している。以上述べてきたように、文献によると砂質土の最適振動数は 22~40cps の間にあり筆者の砂質ロームに関する実験では、30~40cps の範囲にあった。

##### 5. 有効マキ出し厚さ

実際、どの程度の深さまで締めがおよぶのか、また、それでは、いかなるマキ出し厚さにすれば効果的な締めができるかを調べるために、マキ出し厚さ 30cm の場合につき、盛土の鉛直方向のコーン指数を各転圧回数ごとに測定した。第 14 図に含水比が  $W=3.0, 10.9$  および  $14.7\%$  の場合の 8 回転圧後のコーン指数と深さの関係を、ワダチ面を深さ 0cm として示している。

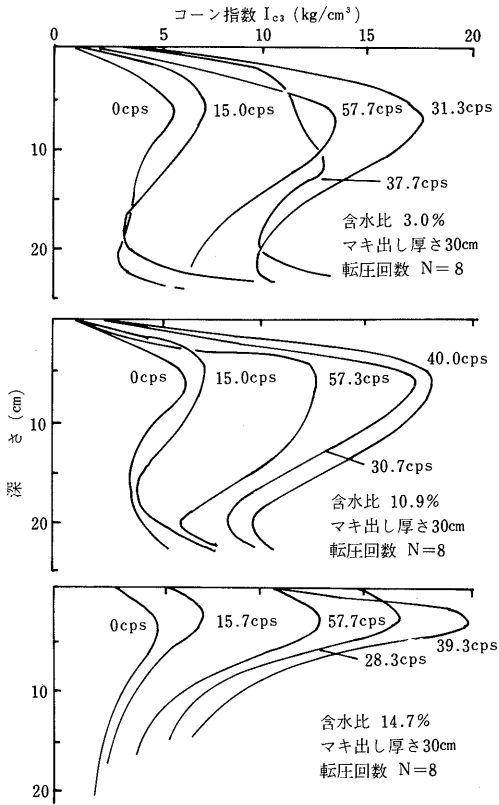
D'Appolonia らは<sup>3)</sup> 砂質土を振動ローラーで転圧し、被転圧地盤内の密度を測定した結果、乾燥密度は表層で低く、ある深さにおいて最大値を示し、それ以後では低下することを示した。第 14 図のコーン指数の分布図からも、同様の傾向がうかがえる。次に第 14 図(a), (b), (c) 間のコーン指数の分布曲線を比較すると、含水比が高く

なるにつれてコーン指数のピーク値は表面近くにあらわれるが、盛土の上層部と下層部のコーン指数の差は大きくなること、また含水比と振動数が増加するにつれて、コーン指数のピーク値は増大し、曲線は次第に鋭くなるが、ある一定値に達すると、次には減少することなどがわかる。これは、前述したように、含水比と振動数が盛土の締めにおよぼす効果には、それぞれ締め最適値があるということと一致している。この場合、振動数 30~40cps の深さコーン指数曲線は最大値を示している。

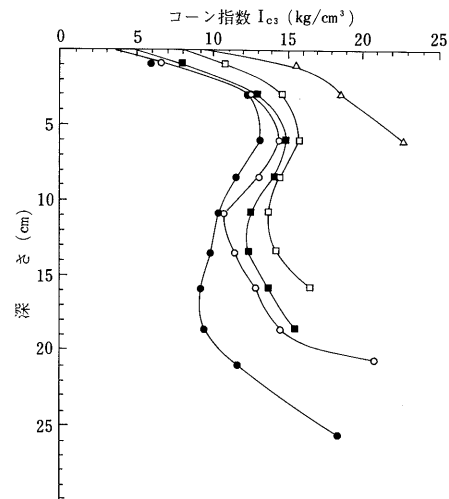
さて、盛土は<sup>8)</sup> 土のマキ出しと転圧の繰返し操作によって構築されるものであるから、1 回のマキ出し厚さをどの位にしたらよいか問題となる。そこで、転圧に有効なマキ出し厚さを知るために、10cm から 5cm 間隔で 30cm まで 5 種類のマキ出し土を本供試土の最適振動数 40cps で模型振動式平滑胴ローラーを用いて 8 回転圧を行い、その結果、得た被転圧地盤内のコーン指数の分布を自然含水比および最適含水比別に第 15 図、第 16 図に示す。第 15 図と第 16 図において、マキ出し厚さ 10cm の場合、コーン指数は深くなるにつれて増大している。これは、転圧締めが有効に行われていることを示している。さらにマキ出し厚が厚くなると、深さコーン指数曲線にはピークが見られ、しかも、そのピーク値は低下する傾向が見られる。これらのことから、マキ出し厚さが厚くなる程、転圧効果は低下することがわかる。コーン指数がピークを示す深さよりもマキ出し厚が過度に厚いと各転圧層間にゆるい層ができる。逆に、マキ出し厚さがあまりにも薄いと転圧の能率が悪い。そこで、筆者は、深さコーン指数曲線にピーク値のあらわれる最小厚がマキ出し厚さとして適当であると考えた。本実験の場合、その厚さは 15cm である。ところで D'Appolonia らは<sup>3)</sup> 含水比  $W=3.0\%$  の砂質土を  $W=12.5 \text{kip}$ 、直径 47 (119.3cm) インチの振動ローラーで転圧した結果から、マキ出し厚さとして、1.5ft を提唱している。いま、マキ出し厚さ (h) とローラー直径 (D) の比 (h/D) を求めると筆者の実験の場合、 $h/D=0.38$ 、D'Appolonia の場合、 $h/D=0.38$  となる。これらのことから、マキ出し厚さは振動ローラーの直径の約 40% までが許容される。

##### 6. 振動振幅

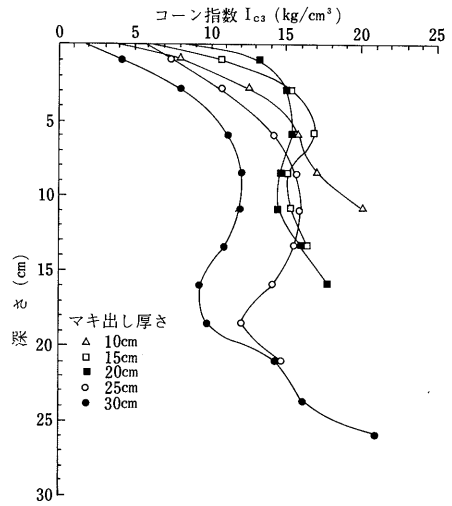
第 17 図に転圧回数~振幅の関係を示す。第 17 図(a) (b) から (マキ出し厚さ 15cm)、振幅は転圧初期において少し変動するが、転圧回数の増加につれて一定値となることがわかる。振動数が 30cps 近くのととき、振幅は最大値を示し、最小値は 15cps 近くで得られた。すなわち、振動



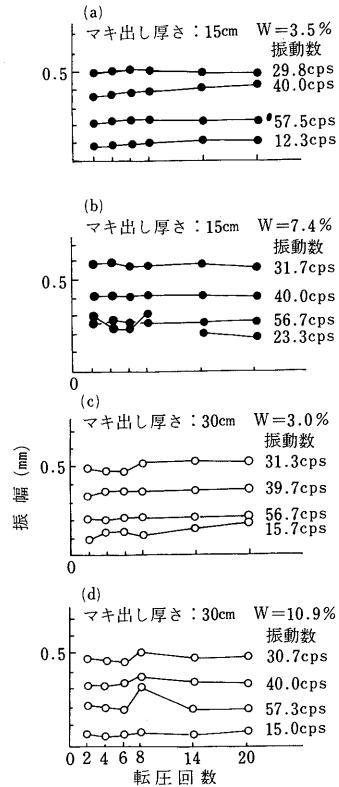
第14図 コーン指数と深さの関係



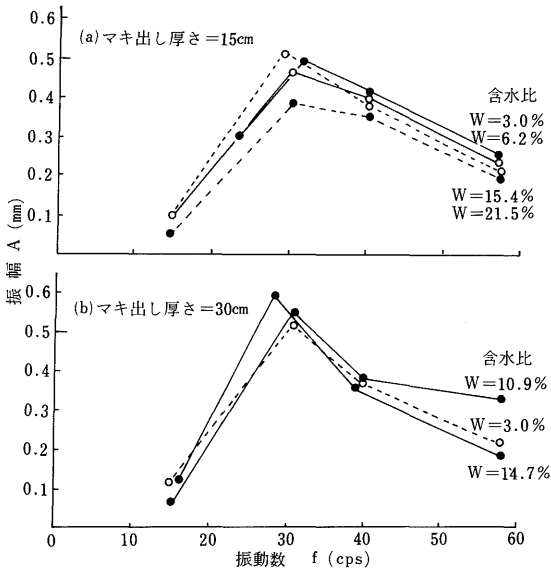
第15図 コーン指数と深さとの関係  
含水比=10.2% ローラー直径=40cm  
転圧回数=8回



第16図 コーン指数と深さの関係  
含水比=15.5% ローラー直径=40cm  
転圧回数=8回



第17図 転圧回数と振幅



第18図 振動数と振幅の関係

数が最適振動数近くるとき振幅は最大となる。第17図(c), (d)はマキ出し厚さ30cmの場合の振幅と転圧回数との関係を示している。これらの図からも、マキ出し厚さ15cmの場合と同様のことがいえる。

次に、 $N'=8$  回の時の振動数～振幅関係を示すと第18図のようになる。第18図からマキ出し厚さ15と30cmの場合、振動数 30cps 付近で振幅は最大となっているのがわかる。この時の加速度を  $(2\pi Af)^2$  で計算すると加速度はほぼ、重力の加速度の1.4～2.1の間にある。D'Appoloniaは<sup>4)</sup> 風乾した砂に、種々の振幅の振動を加えたところ、締め固めの最大の効果は振動の加速度が2gのとき最大で、2g以上になると供試体の体積は減少すると報告している。

ま と め

マキ出し厚さ15～30cmの盛土上で、二機種の振動型ローラーで転圧実験を行なった結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 振動転圧の場合、転圧回数と乾燥密度の関係は(2)式で表わせる。
- 2) 本研究の場合の実用転圧回数は  $N'=8$  回である。
- 3) 本実験における最適振動数は 30～40cps である。
- 4) 無振動転圧回数  $N=8$  回にて得られると推定される乾燥密度を生ぜじめるに必要な振動転圧回数は  $N'=1 \sim 5$  回であり、振動転圧は無振動転圧よりもはるかに

締め固め効果は良い。

- 5) 振動転圧の最適振動数は Tchbotarioff-Alpan の式で推定できる。
- 6) 有効マキ出し厚さはローラー直径の約40%である。

最後に、本研究にあたり懇切なる御指導とご教示をいただいた九州大学名誉教授藤川武信博士、鳥取大学教授河野洋博士、佐賀大学教授加来研博士、九州大学教授高山昌照博士に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Alpan, I : Machine foundation and soil resonance. *Geotechnique*, 11 95～113 (1961)
- 2) Barkan, D.D. : *Dynamics of Base and Foundation*. McGraw-Hill, New York (1960) pp.54～131
- 3) D'Appolonia, D.J., Whitman, R.V. and D'Appolonia, E. : Sand compaction with vibratory rollers. *ASCE*, 95 (SM. 1) pp. 263～284 (1968)
- 4) D'Appolonia, E. : Dynamic loading. *ASCE*, 96 (SM. 1) 49～72 (1970)
- 5) 福岡正巳 : 振動締め固め土の動的性質とその応用. 土質工学会, 東京 (1965) pp. 165～196
- 6) Lee, L. : *Soil Mechanics*, Butterworth, New York (1968) pp. 465～527
- 7) Lewice, W.A. : Recent research into compaction of soil by vibratory compaction equipment, *Proc. of 5th Int. Conf. on SMFE* 2 pp. 261～268 (1961)
- 8) Li, C. Y. : Basic concepts on the compaction of soil. *ASCE*, 82(1) 1～20 (1956)
- 9) Moorhouse, D. C. and Baker, G. L. : Sand densification by heavy vibratory compactor. *ASCE*, 95 (SM. 4) 985～994 (1969)
- 10) 村山塑郎・谷本喜一・松野三郎 : 側方拘束土の締め固めに関する実験的研究. 土木学会論文集, 43 59～63 (1956)
- 11) Road Research Laboratory : *Soil Mechanics for Road Engineers*. Her Majesty's Stationary Office, London (1952) pp. 1～172
- 12) 佐々木次郎・酒井松雄・高橋 衛・根岸久雄 : 締め固め工法の研究(1). 農技研報 : F5, 2 74～78 (1952)
- 13) Tooms, A. F. : The Performance of Avelling-Barford VP7 7 mg selfpropelled vibrating roll-

- er in the compaction of soil. *Road Research Laboratory Ministry of Transport Report*, LR257 1~8 (1969)
- 14) Tooms, A. F. : The performance of Bomag BW 75 s and BW200 double vibratory roller in the compaction of soil. *Transport and Road Research Laboratory, Department of Environment*, TTTR Report LR480 1~11 (1972)
- 15) Viering, T. L. : The vibrational behaviour of soil in relation to its properties. *Proc. of 5th Int. Conf. on SMFE*, 2 545~553 (1961)
- 16) Youd, T. L. : Compaction of sands by repeated shear straining. *ASCE*. 96 (SM.7) 709~725 (1972)
- 17) 吉田 勲 : 車両走行によるホ場土の締固め. 土とコンクリート, 58 43~46 (1968)
- 18) 吉田 勲 : 土の転圧締固めに関する実験的研究 : I. 模型ローラー走行時の土中応力. 鳥大農研報, 34 109~122 (1982)