

## 振動ローラを用いた現場締固めにおける密度予測に関する研究

PREVIOUS EVALUATION OF DRY DENSITY OF THE SOIL COMPACTED  
BY VIBRATORY ROLLERS IN CONSTRUCTION FIELD

畠昭治郎\*・建山和由\*\*・石澤利昭\*\*\*

By Shojiro HATA, Kazuyoshi TATEYAMA and Toshiaki ISHIZAWA

In this paper, the correspondence was investigated between indoor compaction test and vibratory roller compaction as follows.

- ① From compaction results with various vibratory rollers, it was made clear that soil densities were determined by their dynamic line pressure.
- ② From impact compaction tests with various impact energies, it was ascertained that soil densities were determined by energy of rammer defined by the product of rammer weight and dropping height.
- ③ The relationship between rammer energy and dynamic line pressure was investigated through the medium of densities obtained from ①, ②.

On the relationship obtained from ③, we suggested a new method for predicting the density of the field compacted soil from impact compaction test whose energy was changed according to respective vibratory rollers and its applicability was confirmed in field compaction.

## 1. まえがき

近年の土木施工の機械化に伴い、締固め施工でも大型の締固め機械が用いられるようになってきたが、その中でも特に、振動ローラはフィルダム、道路盛土などの大規模土工において盛んに利用されている。

一般に、振動ローラは動的な起振力とローラ自身の自重により効果的に土を締固めることができるが、個々の振動ローラにより締固めに対する能力には大きな差がある。そのため、重要な土構造物の造成にあたっては、現場において、最も効果的な締固めを与える作業条件を決めるために盛立試験を行う場合も多い。

一方、土の締固めに対する室内試験としては、JISで規定された突固め試験があり、締固め曲線、最適含水比、最大乾燥密度の決定などに利用されている。しかし締固め曲線は加える締固めエネルギーにより異なり(Fig.1)、JIS法で求めた最適含水比、最大乾燥密度が実際の振動ローラのそれに対応していない場合が多く、現在では、突固め試験は施工の管理基準となる  $\gamma_{max}$  や  $w_{opt}$  を決定

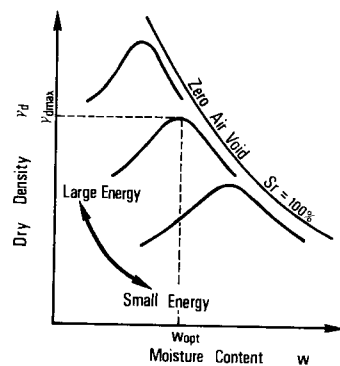


Fig.1 Compaction Curves with Various Energies.

するための手法になっているようである。

本研究では、日本建設機械化協会建設機械化研究所において行われた種々の振動ローラの締固め性能試験の結果より、個々の振動ローラと突固め試験におけるエネルギーとの対応関係を明らかにした。さらに、この結果に基づき、現場で振動ローラを用いて行われる盛立試験をモールドとランマを用いた室内突固め試験のレベルで再現し、現場での締固め状況を予測する方法を考案した。この方法を実際の現場締固めに適用し、振動ローラによる締固め状況を施工前に推定することにより、振動ローラ

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科(同上)

\*\*\* 正会員 工修 フジタ工業関東支店  
(〒151 渋谷区千駄ヶ谷3-13-18)

ラの機種を選定、有効な転圧回数決定、あるいは振動ローラを用いた場合の締固め曲線の推定に役立てようとするものである。

## 2. 振動ローラによる締固めと突固め試験との対応

振動ローラを用いた現場締固めは、土をある厚さにまき出し、これを振動ローラにより繰り返し転圧することにより行う。このとき、現場で用いられる振動ローラは種類が多く、その能力も機種により大きく異なるため、現場での締固め状況を突固め試験を利用して予測するには、個々の振動ローラに対応して突固め試験のエネルギーを変えてやる必要がある。この場合、個々の振動ローラと突固めエネルギーとの対応関係は、同一の土を振動ローラと突固め試験により締固め、得られた密度を比較することにより検討することができる。しかし、同じ振動ローラでも転圧回数が変われば締固め密度も異なるため、両者の対応関係は一意的には決まらない。そこで、ここでは突固め試験を振動ローラによる締固めに対する模型実験として用いることにより、現場での締固め状況を予測することにする。

ここでいう模型実験とはモールドを土層、ランマを振動ローラの模型、ランマの落下を振動ローラの通過とみなして締固め実験を行うということである。すなわち、個々の振動ローラに適するようにランマの重量や落下高さを変化させ、振動ローラの転圧回数に相当する回数だけランマを落下させることにより、現場での締固めを再

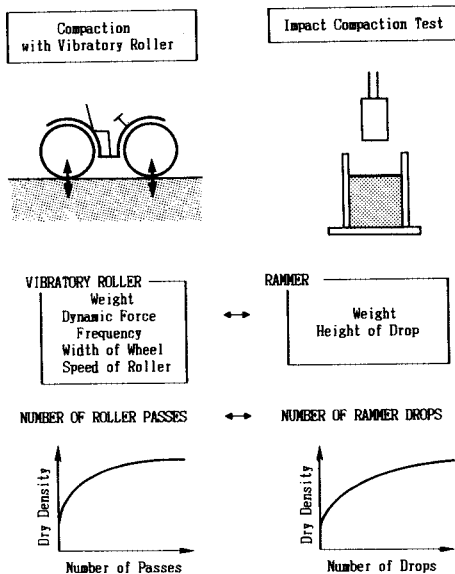


Fig. 2 Correspondence of Soil Compaction by Vibratory Roller to Impact Compaction Test.

現しようというのである。

この考え方では2つの対応関係を考慮しなければならない。1つは、個々の振動ローラの能力とランマが1回の落下により発揮するエネルギーとの対応、もう1つは振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応関係である (Fig. 2 参照)。これらの対応関係を定量的にとらえるためには、密度と締固め回数との関係を現場締固めと突固め試験の両者で比較すればよいと考えられる。ここでは、両者の密度～締固め回数関係を簡便に比較、検討するために双曲線近似法を利用することにする。

## 3. 双曲線近似法の利用

Fig. 3 は、締固め後の土の密度と転圧回数との関係を模式的に示したものである。この密度～転圧回数関係は式 (1) で定義される双曲線により近似できることが経験的に明らかにされている<sup>1)</sup>。

$$\gamma_a = \gamma_{a0} + \frac{N}{(a + bN)} \dots \dots \dots (1)$$

$\gamma_a$  : 転圧後の土の乾燥密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{a0}$  : 転圧前の土の乾燥密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$N$  : 転圧回数(回)

$a, b$  : 土質条件, 締固め機械の特性により決まる定数 (m<sup>3</sup>/kg)

ここで、定数  $a$  は、式 (1) を  $N$  で微分し、 $N=0$  とおけばわかるように、初期接線勾配の逆数である。すなわち、 $a$  は Fig. 3 の曲線のなだらかさを表わし、密度増加に対する転圧回数の効果を示すパラメーターである。また、式 (1) において  $N \rightarrow \infty$  とすれば明らかのように、 $\gamma_{a0} + (1/b)$  は無限に転圧を繰り返したときに達成できる乾燥密度を表わす。すなわち、定数  $b$  は最終的に達成できる密度と初期密度との差の逆数を表わし、転圧回数に関係しない量である。このように双曲線近似法を用いれば、 $a, b$  という2個のパラメーターにより密度～転圧回数関係を近似的に表現できる。

同一の土を振動ローラと突固め試験とで締固め、得られた密度～転圧回数関係、あるいは密度～突固め回数関係を双曲線により近似すれば、振動ローラによる締固めと突固め試験の両者において、 $a, b$  を定義することができる。ここで、 $b$  は締固め回数に関係せず、振動ローラやランマ自身の能力により決まり、 $a$  は、締固め回数

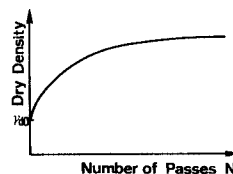


Fig. 3 Density-Number of Roller Passes Relation.

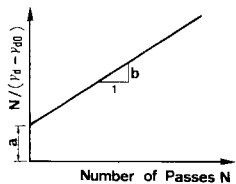


Fig. 4 Approximation of Fig. 3 by Hyperbola.

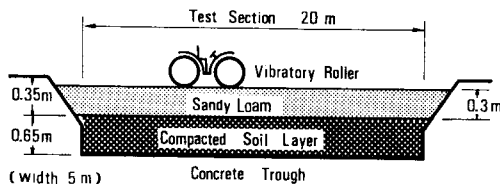


Fig. 5 Compaction Test with Vibratory Roller.

の増加に伴う密度増加の様子を表わす。よって、 $b$  により振動ローラの能力とランマの重量や落下高さとの対応を、また、 $a$  により、振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応を求めれば、振動ローラと突固め試験との対応関係を決定することができる。以下では、定数  $a, b$  を媒介として、振動ローラと突固め試験との対応関係を求めていくことにする。

ここで、実際に定数  $a, b$  の値を求めるには、式 (1) を少し変形し、次式の形にする。

$$\frac{N}{(\gamma_a - \gamma_{d0})} = a + bN \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) より、縦軸に  $N/(\gamma_a - \gamma_{d0})$ 、横軸に転圧回数  $N$  をとると、Fig. 3 の曲線は Fig. 4 のような直線で表わされる。直線の傾きより  $b$  を、切片より  $a$  を求めることができる。

#### 4. 振動ローラの特性と定数 $a, b$ の関係

定数  $a, b$  を媒介として、振動ローラと突固め試験との対応関係を求めるために、本節では、振動ローラの特性と  $a, b$  との関係について検討を行った。

建設機械化研究所では、過去 20 年ぐらいの間に、新しく製造された振動ローラの締固め性能試験を行ってきた。今回は、この試験結果を整理、検討することにより振動ローラの機械特性と定数  $a, b$  との関係について考察を行う。

この締固め性能試験は、Fig. 5 に示すような土槽内に試料土と同じ土をよく締固めて基盤を作り、その上に 0.3 m の厚さにまき出された土試料を種々の振動ローラで締固めたものである。毎回、同じ土試料が繰り返し用いられているが、締固めによる粒子破砕はほとんどないので、これらの試験結果より、個々の機械の相互比較を行うことができる。試料土は、砂質ロームであり、比重 2.83、土質分類は SC である。Table 1 にその物理特性を示す。土の比重が 2.83 というのは、多少大きいようであるが、繰り返し試験して調べてもこの値が得られたので、以下、試料土の比重としては 2.83 を用いる。試験は、それぞれの機械について含水比を 4 種類変えて行われた。試料土の粒径加積曲線は、Fig. 6 に示すようである。

Table 1 Soil Index Properties.

Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)
2.83	30.3	15.7	14.6

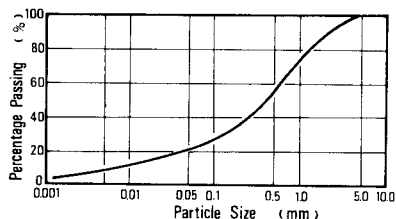


Fig. 6 Grain Size Distribution of Sandy Loam.

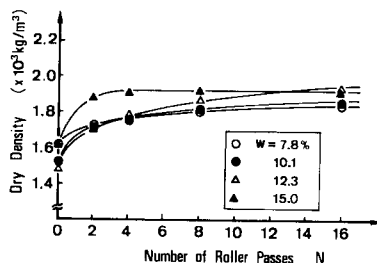


Fig. 7 An Example of Compaction Test Results.

Fig. 7 は、試験結果の一例であり、典型的な密度～転圧回数関係を示している。ただし、乾燥密度はまき出した試料土層の上部と下部について測定が行われており、Fig. 7 は、このうち上部についての実験結果を示している。同様の結果が 17 種類の振動ローラに対して得られている。Fig. 7 を双曲線近似法により整理したものが Fig. 8 である。よく近似できていることがわかる。他の振動ローラについても同じ整理を行ったが、どの機種についても双曲線近似法はよい近似を与え、相関係数は 95 % 以上である。以上の整理により、17 種類の機械それぞれに対し、4 種類の含水比について  $a, b$  の値が求まったことになる。

次に、得られた  $a, b$  と振動ローラの機械特性との関係について検討を行う。振動ローラの締固め能力を左右する要因としては、重量、起振力、振動数、転圧速度、締固め幅などが考えられる。しかし、今回、取り扱った振動ローラについては、振動数、転圧速度とも大きく異

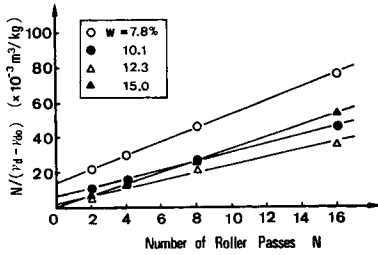


Fig. 8 Approximation of Fig. 7 by Hyperbola.

なるものが少なかったため、式(3)により定義される動線圧により振動ローラの特性を表わすことにした<sup>2)</sup>。

$$D = \frac{W_m}{L_m} + \frac{F_n}{L_n} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $D$ ：振動ローラの動線圧 (kN/m)  
 $W_m$ ：前、後輪荷重のうち大きい方の値 (kN)  
 $F_n$ ：前、後輪起振力のうち大きい方の値 (kN)  
 $L_m, L_n$ ：輪荷重、輪起振力を採用した方の車輪の幅 (m)

である。

上式からわかるように、動線圧とは、荷重と起振力の効果を車輪別に評価したものである。今回の試験で使用された振動ローラのうち、最大級、最小級とその中間のもの諸元を示すと、Table 2 のようである。動線圧が、20～103 kN/m の範囲にある機械について検討を行うことになる。

次に、振動ローラの動線圧と定数  $a, b$  との関係を各含水比に対して調べたが、機種により試験時の含水比が多少異なるため、4段階の試験時含水比に対する  $a, b$  の値より補間を行い、所定の含水比 (8, 9, 10%) に対する  $a$  と  $b$  の値を求めた。また、 $b$  については、締固めの限界を考えるとという意味で、 $\gamma_{d0} + (1/b)$  により整理を行った。Fig. 9, 10 は含水比 9% の場合についてこの結果をまとめたものであるが、これらは両者とも試料土層の上部の土に対する試験結果を整理することにより得られたものである。当然、同じ土でも下部の土は上部ほど締固まっておらず、下部の土に対して同じ整理を行えば、Fig. 9, Fig. 10 の  $a, \gamma_{d0} + (1/b)$  の値は異なることが予想される。しかし、下部に対するデータが少

ないため、今回は上部での試験結果をもとに話を進めることにする。

Fig. 9 より  $a$  は多少のばらつきを示すが、動線圧の増加とともに指数的に減少していることがわかる。Fig. 10 の  $\gamma_{d0} + (1/b)$  は  $a$  の場合と同様にばらつきを示すが、動線圧とともに増加していることがわかる。他の含水比についても、同様の整理を行ったところ同じような結果が得られた。

以上、 $a, b$  と振動ローラの特性ととの関係を検討してきた。振動数、転圧速度なども考慮した動線圧に代わる新しい振動ローラの指標を作ることができれば、もう少しばらつきが小さくなる可能性もあるが、Fig. 9, 10 において定数  $a, b$  と動線圧の間には明らかに相関関係があると考え、この動線圧を用いることにする。すなわち、振動ローラにより土を締固め、そのときの密度～転

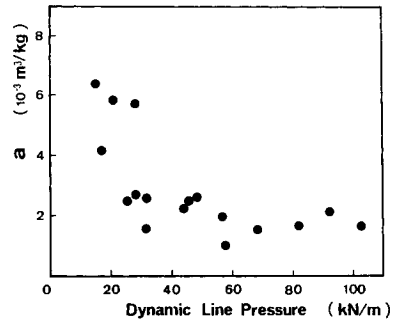


Fig. 9 Parameter  $a$  plotted against Dynamic Line Pressure.

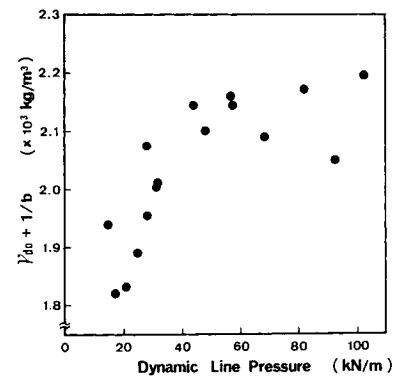


Fig. 10  $\gamma_{d0} + (1/b)$  plotted against Dynamic Line Pressure.

Table 2 Examples of Vibratory Rollers used in the Experiment.

No.	Weight of Drum (kN)		Width of Drum (m)		Frequency (cpm)	Generated Dynamic Force		Dynamic Line Pressure (kN/m)
	Front	Rear	Front	Rear		Front (kN)	Rear (kN)	
1	53.70	45.37	2.15	Tyre	2400	166.60	—	102.47
2	29.63	31.02	1.40	1.40	3000	49.00	49.00	57.16
3	4.12	6.66	0.80	0.80	2900	9.80	9.80	20.58

圧回数関係を双曲線により近似すると、定数  $a, b$  に及ぼす機械特性の影響は、動線圧によりおさえることができるということになる。

5. 突固め試験における定数  $a, b$  について

本節では、突固め試験においてランマの重量や落下高さを変えた場合  $a, \gamma_{90} + (1/b)$  がどのように変化するかを実験により調べた。ただし、ここでは、振動ローラの場合の  $a, b$  と区別するため、これらを  $a^*$  と  $b^*$  で表わすことにする。

実験は、JIS で規定されている 1 リットルモールドに土を 3 層に分けて詰め、ランマ重量を 24.5, 34.3, 44.1 N の 3 段階、落下高さを 0.1, 0.2, 0.3, 0.44, 0.55 m の 5 段階に変化させて締固めを行った。それぞれの実験に対し、落下回数を 5, 10, 15, 25, 45 回の 5 段階変え、得られた結果を双曲線近似することにより、各実験に対する  $a^*, b^*$  の値を求めた。実験で用いた試料土は、振動ローラの性能試験で用いられたものと同じ砂質ロームである。また、含水比は、8, 10, 12, 14 % 付近の 4 段階について実験を行った。Table 3 にこれらの実験条件をまとめて示す。

Fig. 11 (a) は得られた結果の一例であり、ランマ重量  $W_r = 44.1$  N, 落下高さ  $H = 0.2$  m の場合について、乾燥密度が落下回数とともに増加することを示している。これを前節と同様に双曲線により近似し、式 (2) の整理を行うと同図 (b) のようになる。この場合も密度～突固め回数関係は双曲線近似法によりうまく表現できることがわかる。この図より、4 種類の含水比に対する定数  $a^*$  と  $b^*$  の値が求まるが、他の実験結果についても同様の整理を行った。

今回の実験では、ランマの重量  $W_r$  と落下高さ  $H$  を変えたが、締固めに与えるこれらの要因の影響は、次式で表わされる  $K$  により評価するのが妥当と考えられる (以下、 $K$  をランマの落下エネルギーとよぶ)。

$$K = W_r \cdot H \dots \dots \dots (4)$$

$K$  の値が同じでも、 $W_r$  や  $H$  の組合せを変えると、必ずしも同じ締固め効果が得られないという実験事実もあるが、極端にいずれかの要因を大きくあるいは、小さくしない限り、その差は小さいので<sup>3)</sup>、式 (4) で表わされる落下エネルギーをランマの落下による締固め能力の指標として用いることにする。

そこで、各実験において得られた定数  $a^*, b^*$  とランマの落下エネルギー ( $K$ ) との関係を含水比別に整理し、Fig. 12 と Fig. 13 は結果の一例である。ただし  $b^*$  については前節と同様、 $\gamma_{90} + (1/b^*)$  の形で整理を行い、また含水比の違いについても前節と同様の補間を行うことにより、所定の含水比 (8, 9, 10 %) に対する整理

Table 3 Test Conditions of Impact Compaction Test.

Weight of Rammer (N)	Height of Drop ( $10^{-2}$ m)	Number of Drop per Layer	Moisture Content (%)
24.5	10,20,30,44,55	5, 10	8, 10
34.3	10,20,30,44	15, 25	12, 14
44.1	10,20,30	45	

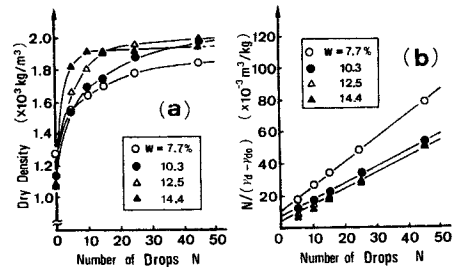


Fig. 11 Test Result obtained from Impact Compaction Test and its Approximation by Hyperbola.

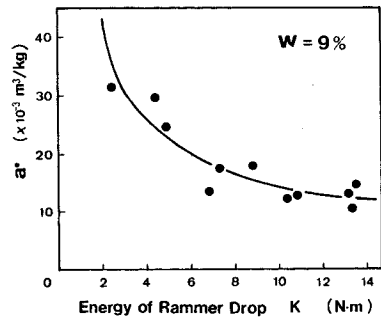


Fig. 12 Parameter  $a^*$  plotted against Energy of Rammer Drop.

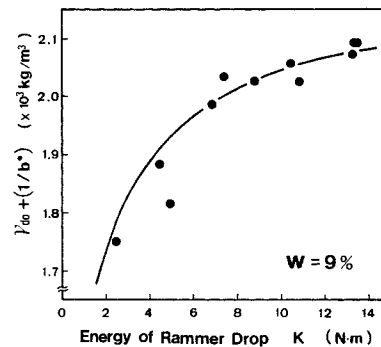


Fig. 13  $\gamma_{90} + (1/b^*)$  plotted against Energy of Rammer Drop.

を行った。これらはそれぞれ、振動ローラの場合の Fig. 9 や Fig. 10 と同じ傾向を示しており、突固め試験におけるランマの落下エネルギーと振動ローラの動線圧とが対応することがわかる。以上は、含水比 9% の場

合の結果であるが、他の含水比についても同様の結果が得られた。

6. 突固め試験による現場締固め状況の推定

3., 4. より明らかになったことをもう一度述べると以下のようである。

- ① 振動ローラを用いた締固めにおける  $a, \gamma_{so} + (1/b)$  は土質条件が一定ならば動線圧 ( $D$ ) により決まり, Fig. 9, Fig. 10 のような関係がある。
- ② 突固め試験における  $a^*, \gamma_{so} + (1/b^*)$  の値は土質条件が一定ならば, ランマの落下エネルギー ( $K$ ) により決まり, Fig. 12, Fig. 13 のような関係がある。

以上の結果より, 振動ローラの動線圧とランマの落下エネルギーとの対応, ならびに, 振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応を求め, さらに, その結果を利用して, 振動ローラによる締固めを室内の突固め試験により予測する方法について考察を行うことにする。

(1) 振動ローラの動線圧とランマの落下エネルギーとの対応

Fig. 10, Fig. 13 より,  $\gamma_{so} + (1/b)$  の値が等しいところの動線圧 ( $D$ ) とランマの落下エネルギー ( $K$ ) とを調べ, その対応関係を求めたところ, Fig. 14 のようになった。ただし, ここでは Fig. 13 の結果を图中的双曲線で近似し, これと Fig. 10 より, 動線圧とランマの落下エネルギーとの対応関係を求めた。Fig. 14 より明らかのように, ばらつきはあるが動線圧とともにランマの落下エネルギーも増加し, その傾向はこの程度の含水比の差異では変わらないことがわかる。そこで, この関係を式 (5) のような比例関係で表わしたところ比例定数として  $C=0.31$  が得られた。

$$K = C \cdot D \dots\dots\dots (5)$$

先にも述べたが, Fig. 9, Fig. 10 は振動ローラの転圧

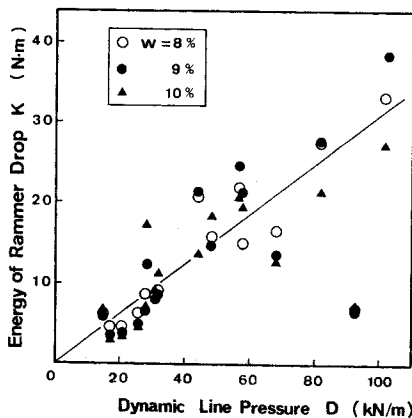


Fig. 14 Correspondence between Dynamic Line Pressure and Energy of Dropping Rammer.

試験結果のうち, まき出した土層の上部において測定されたデータを整理することにより得られたものである。しかし, 実際の現場で問題となるのは, 上部だけではなく, まき出した土の層全体に対する乾燥密度である。建設機械化研究所のデータにおいて, 下部の土の密度を測定した結果をみると, 今回, 考えている含水比の範囲では, 上部の密度の約 90% になっていた。そこで, まき出した試料土層の平均の密度として, 上部の乾燥密度の 95% の値をとることとする。そして, 先と同様にして動線圧とランマの落下エネルギーとの対応関係を求めると, 比例定数として  $C=0.18$  という値が得られた。最近では, 現場密度の測定に RI 法などが用いられ, 比較的下部の土の密度まで考慮されることが多いため,  $C$  の値としては後者の値を用いる方が適当と思われる。

(2) 振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応について

次に,  $a, a^*$  を媒介として振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応を求める。

Fig. 9 と Fig. 12 を比べると, 振動ローラによる締固めと突固め試験とでは  $a$  の値の範囲が異なることがわかる。これは, 振動ローラの転圧回数 1 回に突固め試験の落下回数 1 回を対応させたためであるが, 必ずしも, このような対応をとる必要はない。実際には, 突固め試験においてランマを  $m$  回 ( $m > 1$ ) 落下させたとき, 初めて, 振動ローラの転圧 1 回と同じ締固め効果が得られると考えた方が妥当である。

突固め試験における落下回数を  $N^*$  で表わし, 突固め試験結果を双曲線により近似すると次式のようになる。

$$\gamma_a = \gamma_{so} + \frac{N^*}{(a^* + b^* N^*)} \dots\dots\dots (6)$$

また, 振動ローラによる締固め結果を双曲線により近似した結果を次式により表わす。

$$\gamma_a = \gamma_{so} + \frac{N}{(a + bN)} \dots\dots\dots (7)$$

ランマの落下  $m$  回が振動ローラの転圧 1 回に相当すると考えると,  $N^* = mN$  が成り立つ。突固め試験により現場での締固めを再現するためには, 式 (6), (7) により表わされる乾燥密度が等しくなければならない。両式の右辺がそれぞれ等しいとして,  $N^* = mN$  を考慮すると,

$$a = \frac{a^*}{m}, \quad b^* = b \dots\dots\dots (8)$$

という関係を得る。 $b$  は無限に転圧を繰り返したときの乾燥密度により決まるから, 当然,  $m$  の値によらず一定である。式 (8) より, 突固め試験により得られた  $a^*$  は実際の締固めにおける  $a$  の  $m$  倍になることがわかる。次に, 振動ローラの締固め試験データと突固め試

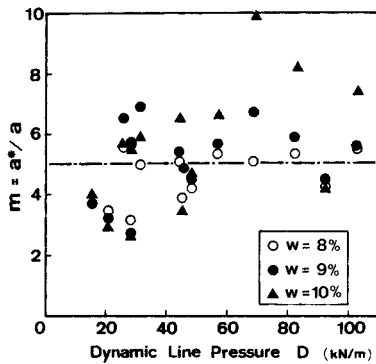


Fig. 15 The Ratio of  $a^*$  to  $a$  plotted against Dynamic Line Pressure.

験結果より  $m$  の値について検討を行った。

$m$  は、 $a^*$  と  $a$  の比により定義される。そこで、Fig. 9 の個々のプロット点の  $a$  の値と、それらの点の動線圧に対応するランマの落下エネルギーを用いて Fig. 12 から読み取った  $a^*$  の値により、 $m$  を求めた。ただし、ここでは、Fig. 12 における  $a^*$  とランマの落下エネルギーとの関係を図中の曲線で近似し、所定の落下エネルギーに対する  $a^*$  の値を求めた。得られた  $m$  を動線圧に対して描くと、Fig. 15 のようになった。

この図より、ばらつきは大きいですが、 $m$  の値としては 5 をとるのが妥当と考えられる。しかし、 $m=5$  という値は建設機械化研究所のデータのうち、まき出した土層の上部に対するものより得られた値である。前にも述べたように、下部の土は上部ほど締固まらないため、まき出した土層全体に対する  $a$  の値はもう少し大きくなり、 $m$  の値は逆に、小さくなると考えられる。しかし、下部の締固めに対するデータが少ないため、 $m$  の値については後に示す検証実験のところで検討することにする。

### (3) 突固め試験による現場締固め状況の予測方法

以上、振動ローラによる締固めと突固め試験との対応について述べてきた。この対応関係を利用すると、現場での締固めを突固め試験により予測することができる。

まず、現場で使用されている振動ローラの諸元から動線圧を計算し、式 (5) よりこれに対応するランマの落下エネルギーを決定する。落下エネルギーが決まれば、ランマの重量、落下高さが決まるので、JIS で規定されている 1 リットルモールドに現場の土を 3 層に分けて詰め、突固め試験を行う。

このとき、現場での密度～転圧回数関係を推定するためには、試料土の含水比は一定のまま、突固め回数を数段階変えて突固めを行う。ただし、突固め回数は、振動ローラの転圧回数の  $m$  倍とする。

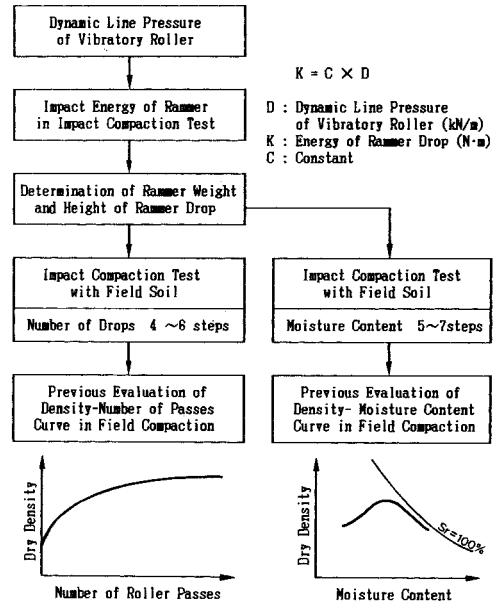


Fig. 16 Flow Chart to Predict the Field Compaction.

また、振動ローラを用いた場合の締固め曲線を予測する場合は、突固め回数一定で、試料土の含水比を数段階変えて突固めを行えばよい。これらをフローチャートに表わすと Fig. 16 のようになる。

## 7. 現場実験による検証

本節では、前節において提案した手法の現場締固めに対する適用性を調べるため、現場実験、あるいは実際の施工現場で行われた締固め試験結果などにより検討を行った。

### (1) 検証実験 A

以下に示すような現場実験に対し、密度～転圧回数関係の推定を試みた。まず、試料土と同じ土をよく締固めて造成した基盤上に試料土を約 0.5 m の厚さにまき出し試験ヤードとした。このヤードを振動ローラを用いて締固め、転圧前、2、4、8、10 回転圧後の乾燥密度を砂置換法により測定した。実験に用いた試料土は砂質シルト (SF) で、 $G_s=2.75$ 、 $U_c=350$ 、 $D_{max}=20$  mm、 $D_{50}=0.3$  mm、 $PL=12.4$  %、 $LL=21.3$  % である。また、振動ローラは、前後輪振動型で、動線圧は 101 kN/m であった。

次に、この試料土を室内へ持ち帰り前節で述べた方法により実験を行った。その結果より、転圧後の乾燥密度と転圧回数との関係を推定し、これと現場での実測結果との比較を行った。突固め試験としては、動線圧 101 kN/m に対応するランマの落下エネルギーが式 (5) より 18.2 Nm であるので ( $C=0.18$  を採用)、44.1 N

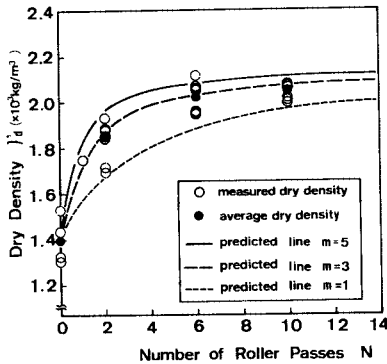


Fig. 17 Comparison of the experimental Results with the predicted Results for Density-Number of Roller Passes Relation.

(4.5 kg 重) のランマを 0.41 m の高さから落下させることにした。

密度～転圧回数関係の予測結果と現場の実測結果とを Fig. 17 に示す。○印は実測結果を、●はそれらの平均値を表わす。また、図中の実線は振動ローラの 1 回の転圧に対し、ランマの落下 5 回を対応させることにより求めた予測曲線であり、破線と点線はそれぞれ、ランマの落下 3 回と 1 回を対応させた場合の予測結果である。Fig. 17 より、 $m$  の値としては 5 では大きく、3 が適当で  $m=3$  とすると現場データにはばらつきはあるものの、予測結果と実測結果はよく一致することがわかる。

## (2) 検証実験 B

これは、実際の現場の締固め施工に際し、締固め機械の機種選定、対象土の締固め状況などを検討するために実機を用いて行われた試験結果の一部を先と同じように予測し、実測値と比較したものである。試験に用いられた振動ローラは実験 A と同じ動線圧 101 kN/m のもので、先と同様に 44.1 N (4.5 kg 重) のランマを 0.41 m の高さから落下させて実験を行った。

現場では、試料土を 0.2 m の厚さにまき出し、6 回転圧後の土の乾燥密度と含水比を測定している。ただし現場データは土取り場や試験日の違いにより、試験時含水比が多少異なるので、含水比による締固め乾燥密度の違いを表わす締固め曲線を予測することにした。試料土は崖錐材で、比重 2.75 の砂質土である。また、この土は礫を含むため、以下に示す現場のデータは礫率補正をした結果である。これに対する突固め試験は、15.9 mm 以下の試料土に対し、含水比を 6 段階変えて実験を行った。以上の実験により締固め曲線を求め、実測結果との比較を行った。

Fig. 18 はこの結果であり、この場合も実線が転圧 1 回に対しランマの落下 5 回を、破線と点線がそれぞれ、

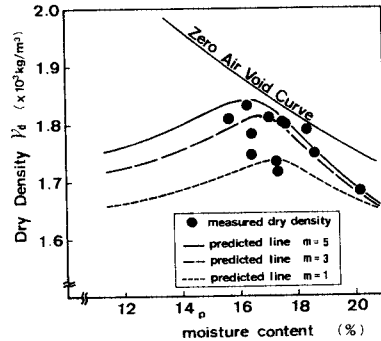


Fig. 18 Comparison of the experimental Results with the predicted Results for Compaction Curve.

3 回と 1 回の落下を対応させた場合である。やはり、 $m=5$ 、 $m=1$  のときより、 $m=3$  の場合がよく合っているようである。

## (3) 実験結果に対する考察

以上、今回提案した方法に対する検証実験を行った。建設機械化研究所の実験はすべて、まき出し厚さが、0.3 m で行われたが、検証実験 A では 0.5 m、B では 0.2 m となっている。当然、まき出し厚さは締固め状況に影響を及ぼすと考えられるが、今回の検証実験で使用された振動ローラは、比較的能力の大きいものであり、十分な締固め能力があったため、まき出し厚さによる差があまり生じなかったのではないかと考えられる。

その他、考慮しなければならない問題もいくつかあるが、今回の検証実験により、 $m$  の値として 3 程度をとれば、提案した方法により実際の振動ローラによる締固めを推定することも可能であると思われる。

## 8. 結 論

以上、振動ローラによる土の締固めと室内突固め試験との対応関係を調べ、それを利用した現場締固め状況の予測方法について述べてきた。それらを要約すると以下のようである。

(1) 突固め試験を振動ローラによる締固めの模型実験とみなし、a) 振動ローラ自身の能力とランマの重量、落下高さとの対応、b) 振動ローラの転圧回数とランマの落下回数との対応、を考える。

(2) (1) の対応関係を求めるため、同一条件の土を多機種の振動ローラとエネルギーを変えた突固め試験により締固めた。その結果、振動ローラの動線圧とランマの落下エネルギー (ランマ重量×落下高さ) との間には、式(5)で表わされる比例関係があることがわかった。

(3) (2) の実験結果より、ランマの落下回数 3 回が振動ローラの転圧 1 回に相当することがわかった。

(4) (2)、(3) の結果より、個々の振動ローラに



対応して突固め試験のランマ重量と落下高さを変え、振動ローラの転圧回数に相当する回数だけランマを落下させて締固めを行えば、現場におけるのと同じ密度が得られることになる。

次に、これらの結果より、実際の現場で行われた振動ローラによる締固め状況を突固め試験により予測し、実測結果との比較を行った。今回行った検証実験の範囲では、この方法により現場での密度～転圧回数関係や締固め曲線をうまく予測することができた。しかし、検討を要する問題もいくつか残されている。すなわち、

(1) 今回、提案した方法ではまき出し厚さを 30 cm としているが、実施工におけるまき出し厚さがこれと異なる場合には、締固めにより得られる土の密度も多少、予測値と異なることが予想される。

(2) 検証実験より、比較的粒度分布のよい砂質ローム、シルト、砂質土などの土についてはこの方法が有効であると考えられる。しかし、細粒分の多い粘土や高含水比で粒度分布の悪い砂については、室内試験では、土がモールドにより拘束されるため、現場におけるほど土が流動せず、突固め試験により予測した結果の方が多少、大きめにでるようである。また、粒径の大きい粗粒材では 1 リットルモールドでの突固めは不可能であり試験装

置などの問題を別途検討しなければならない。などである。このうち、適用土質の問題は特に重要な問題であり、さらに多くの現場にこの方法を用い、その適用性について検討する必要がある。

**謝 辞**：本論文で用いた振動ローラの締固めに対する数多くの貴重なデータは日本建設機械化協会建設機械化研究所より提供を受けたものである。また、現場における検証実験の実施、あるいは現場データの収集に際し、北神急行電鉄株式会社、ソイル・アンド・ロックエンジニアリング株式会社ならびに山崎建設株式会社から多大の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Kiichi Tanimoto : On compaction of soil by surface vibration load, Memoirs of the Faculty of Eng., Kobe Univ., No. 7, pp. 37~71, 1960.
- 2) 日本建設機械化協会編：日本建設機械要覧，日本建設機械化協会発行，pp. 700~727, 1983 年。
- 3) 畠昭治郎ほか：突固め試験の適用性に関する一考察，土木学会関西支部年次学術講演概要，Ⅲ-10-1, 1982 年。  
(1985. 7. 13・受付)