

# 軟弱地盤上を走行する履帯の牽引性能に関する寸法効果

## SIZE EFFECT OF TRACK PERFORMANCE OF RUNNING GEAR ON WEAK GROUND

室 達朗\*・河原莊一郎\*\*

By Tatsuro MURO and Soichiro KAWAHARA

This paper aims to clarify the size effect of track performance of running gear on disturbed silty loam. The maximum tractive resistance  $F_{\max}$  and the sinkage  $z_m$  to be predicted were analyzed by use of dimensional analysis and multiple regression method. Four kinds of geometrically similar rigid track model were used, and 171 cases of traction tests were executed on the silty loam of 30, 35 and 40% water content in a range of average contact pressure 0.98 to 9.80 kPa. Considering the distorted design condition of soil properties when the model tests were executed on the same soil condition as that of prototype, it is clarified that the ratios of prototype ( $p$ ) to model ( $m$ ) are described as exponential functions of the geometrically similar ratio of track width  $B$  and grouser height  $H$  as,  $(F_{\max})_p/(F_{\max})_m = (B/B_m)^{1.667}$  and  $(z_m)_p/(z_m)_m = (H/H_m)^{0.954}$

### 1. ま え が き

従来、土と建設機械の相互作用に関して実物の挙動を知るため多くはモデルを用いて実験が行われてきているが、実物とモデルとの間の寸法効果を扱ったものは少ない。現実には寸法効果がみられるにもかかわらずその研究が少ないのは、土の挙動を規定する基礎方程式が不明確であるので、モデル実験から得られた結果を実物に適用する際の相似率が不明の場合がほとんどであるためである。このようなとき、モデル実験の結果をいくつかの無次元量で整理し、相互の関係を明らかにして実際問題へ適用しようとする方法が次元解析である。土-機械系においては従来、たとえばブルドーザのブレードの排土抵抗などの力の次元をもつものを予測するため、幾何学的な相似比が異なったモデルについて実験を行い、結果を次元解析して実物の挙動を外挿する方法がとられてきた<sup>1),2)</sup>。

本報告は、軟弱地盤上を走行する履带式車両の走行性を把握するため、その基礎となる履帯モデルの牽引試験における牽引抵抗および沈下量に関して寸法効果を明ら

かにすることを目的とする。そのため、5個のグローサーをもつ剛性履帯について4種の幾何学的に相似な履帯モデルを用意し、試料土の含水比、平均接地圧の条件を組み合わせて牽引試験を行った。牽引抵抗、沈下量の実験結果をII定理<sup>3)</sup>を用いてそれぞれ次元解析を行ううえで、実物と同じ地盤条件でモデル実験を行った場合の土の性質に関して相似条件がひずむことを考慮して、モデル実験の結果から実物の牽引抵抗、沈下量を予測する実験式をモデルと実物の幾何学的相似比の関数として表わし、寸法効果の存在を明らかにした。

### 2. 試 料 土

試料土は愛媛県越智郡菊間町産のシルト質ロームを用いた。土質性状をTable 1に示す。なお、練り返した試料土の湿潤密度 $\gamma$ は含水比30~40%の間ではほとんど変化していない。さて、種々の含水比で練り返した不飽和試料土のペーンせん断特性を調べるため、羽根の直径5.0 cm、高さ9.3 cmの4枚羽根を直角に取り付けたペーンを用いて試験を行った<sup>4)</sup>。せん断応力 $\tau$ と回転角 $\theta$ の関係をFig. 1に示す。これはペーン中央での貫入深さ7.5 cm、回転角速度0.2 rad/sのものであるが、非排水せん断強度 $c_u$  (kPa)は含水比 $w$  (%)が高くなるに従って減少しており、両者の間に次式の関係が成立し

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科  
(〒790 松山市文京町3)

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

Table 1 Soil properties of Kikuma silty loam.

Specific gravity		$G_s$	2.84
Liquid limit		L.L.(%)	35.2
Plastic limit		P.L.(%)	21.4
Plasticity index		$I_p$	11.8
Grain size Distribution	Coefficient of uniformity	$U_c$	6.40
	Coefficient of curvature	$U_c^2$	0.31
	Average grain size	$D_{50}(mm)$	0.054
Unit weight		$\gamma(kN/m^3)$	18.2
Void ratio		$e$	0.98
Water content		$w(\%)$	32.8

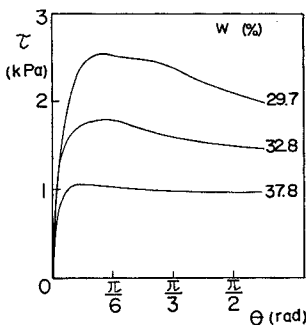


Fig. 1 Relations between shear stress  $\tau$  and rotation angle  $\theta$  at vane shear test.

た。

$$c_u = 61.5 \times 0.897^w \dots \dots \dots (1)$$

次に、直径7、10 cmの円板を用いて平板貫入試験を行った。この試験は貫入速度0.5 cm/sの変位制御型で行った。貫入圧力  $p_p$  と貫入変位  $z_p$  の関係を Fig. 2 に示す。  $p_p$  (kPa) と  $z_p$  (cm) の間に一般に次式の関係が成立する<sup>5), 6)</sup>。

$$p_p = A z_p^k \quad A, k: \text{定数} \dots \dots \dots (2)$$

$A$  の値は  $w$  が高いほど小さくなり、  $k$  の値は  $w$ 、平板の寸法に関係なく、  $0.564 \pm 0.036$  であった。平板の寸法の違いによる  $p_p$  への影響は  $w = 29.7\%$  で幾分みられるが、その他の場合はみられない。これは平板の寸法が直径7、10 cmとあまり違わないためと考えられる。

### 3. 履帯モデルの牽引試験

#### (1) 履帯モデルおよび牽引装置

軟弱地盤上で牽引される履帯の寸法効果を調べるため、 Fig. 3 に示すような鋼製の履帯モデルを製作した。各履帯モデルは5個のグローサからなる剛性履帯であり Table 2 にそれぞれの形状と寸法を示した。履帯モデル A, B, C および D は、グローサピッチ  $G_p$  とグローサ高さ  $H$  の比  $G_p/H$  3種類について、2、4 および 8 倍と幾

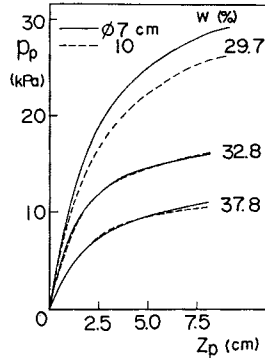


Fig. 2 Relations between penetration pressure  $p_p$  and sinkage  $z_p$  at plate test.

何学的相似形をした4種類であり、計12個の履帯モデルを使用した。ここで、モデルDは実物大のものである。

これらの履帯モデルを牽引する装置は、 Fig. 4 に示したように出力0.2 (0.4) kWのモータ軸に取り付けた直径7.0 cmのドラムを回転させ、2個の定滑車を介してワイヤを巻きとることによって履帯モデルを水平に牽引する機構になっている。牽引抵抗はワイヤ途中に設置した最大4.9 (19.6) kN、感量0.98 (0.98) Nのロードセルで検出し、自記記録させた。牽引速度はすべて0.5 cm/sで行った。試料土は大型および小型土槽内で所定の含水比で均一に練り返し、高さ約50 cmになるように充填した。なお、 Fig. 4 および上記中括弧で示した値はモデルDに対するものである。各履帯モデルについて、平均接地圧  $p$  が0.98, 2.94, 4.90, 6.86, 9.80 kPaとなるように鋼製の重りを载荷した。試料土の  $w$  は約30, 35, 40%に調整した。実験はこれらの条件を組み合わせ、三次元土槽内で計171ケース行った。

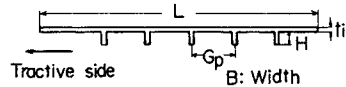


Fig. 3 Track model.

Table 2 Shape and dimension of track model.

	H(cm)	B(cm)	L(cm)	$G_p$ (cm)	$E_i$ (cm)	$G_p/H$
Model A	1.0	5.0	29.0	4.5	0.45	4.5
	1.5	5.0	29.0	4.5	0.45	3.0
	3.0	5.0	29.0	4.5	0.45	1.5
Model B	2.0	10.0	58.0	9.0	0.45	4.5
	3.0	10.0	58.0	9.0	0.45	3.0
	6.0	10.0	58.0	9.0	0.45	1.5
Model C	4.0	20.0	116.0	18.0	0.90	4.5
	6.0	20.0	116.0	18.0	0.90	3.0
	12.0	20.0	116.0	18.0	0.90	1.5
Model D	8.0	40.0	232.0	36.0	0.90	4.5
	12.0	40.0	232.0	36.0	0.90	3.0
	24.0	40.0	232.0	36.0	0.90	1.5

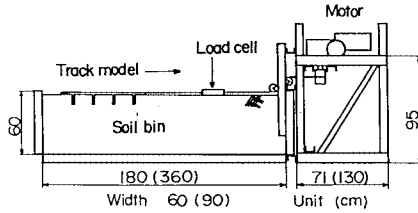


Fig. 4 Test apparatus for traction of track model.

履帯の沈下量  $z$  は初期沈下量  $z_0$  とすべり沈下量の和で与えられ、地表とグロウサ先端位置との距離であると定義する。履帯の初期沈下量は、履帯モデル上に所定の  $p$  になるように重りを載荷して沈下が落ち着いたのち、履帯前後4か所をノギスで測定し平均して算定した。牽引中のすべり沈下量は、履帯モデルの前端と後端に取り付けた旗の挙動を写真撮影し、スライドから読み取った。なお、最終牽引距離は各履帯モデルのグロウサピッチの約2倍とした。Photo 1に履帯モデルの牽引試験の様子の一例を示した。

(2) 実験結果

Fig. 5に一例として、モデルB,  $w=35\%$ ,  $G_p/H=4.5$  の場合の牽引抵抗  $F$ , 沈下量  $z$  と牽引距離  $X$  の関係を示す。一般的な傾向として  $p$  が高いほど  $F$  は大きく  $z$  も増大する。なお、 $z$  は履帯モデル中央の沈下量である。この場合、 $p=4.90$  kPa以下の接地圧では  $F$  が最大となる  $X_m$  が存在する。しかし、それ以上の接地圧では  $F$  は最大値を示さず、 $X$  とともに漸増する。 $F$  が最大値を示さない  $p=6.86$  と  $9.80$  kPa の場合の  $F_{max}$  は、 $F$  が最大値を示す直前の接地圧  $p=4.90$  kPa の  $X_m$  と同じ  $X$  に対応するそれぞれの  $F$  の値とした。

次に、Fig. 6に  $w=40\%$ ,  $G_p/H=4.5$  の場合の最大牽引抵抗  $F_{max}$  とグロウサ高さ  $H$  の関係を示す。この例に限らず、他の  $w$ ,  $G_p/H$  の組合せについても  $F_{max}$  と  $H$  の間に両対数紙上でほぼ直線となる関係がみられる。一般に、幾何学的相似モデルではグロウサの底面積およ

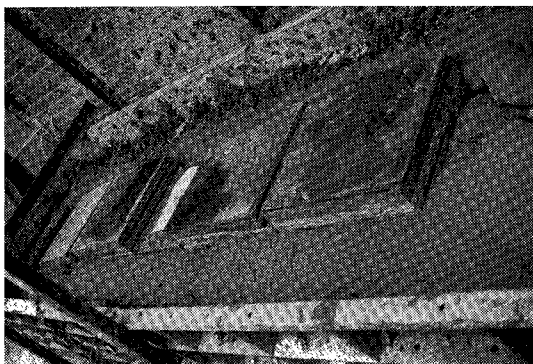


Photo 1 General view of traction test.

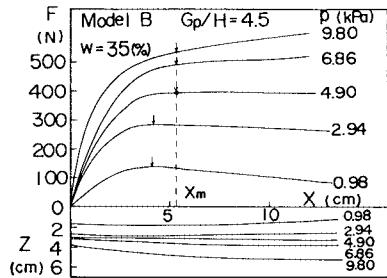


Fig. 5 Relations between tractive resistance  $F$ , sinkage  $z$  and distance of traction  $X$ .

び両側面積の和で与えられるせん断面積は  $H$  の2乗に比例すると考えられる。しかし、実際には後述するように沈下量が  $H$  に比例して大きくならないので図に示したように  $F_{max}$  と  $H$  の関係における指数の値は2より小さくなっている。なお、 $H$ ,  $B$  および  $L$  のとる範囲は実物大までとする。 $F_{max}$  と  $H$ ,  $p$  の間には次式で示される関係が成立する。

$$F_{max} = A_1 H^{k_1} p^{k_2} \quad A_1, k_1, k_2: \text{定数} \quad \dots\dots (3)$$

$A_1$  はモデル,  $w$ ,  $G_p/H$  などによって定まる。一方、 $k_1$ ,  $k_2$  はすべてのケースについてはほぼ一定でそれぞれ  $1.669 \pm 0.257$ ,  $0.556 \pm 0.127$  であった。なお、含水比別の重相関係数は  $w=30, 35, 40\%$  のときそれぞれ  $0.977$ ,  $0.968$ ,  $0.958$  であった。

Fig. 7に  $w=30\%$ ,  $G_p/H=1.5$  の場合の初期沈下量  $z_0$  とグロウサ高さ  $H$  の関係を示す。 $z_0$  も同様に、 $H$ ,  $p$  の間に次式で示される関係が成立する。

$$z_0 = A_2 H^{k_3} p^{k_4} \quad A_2, k_3, k_4: \text{定数} \quad \dots\dots (4)$$

$A_2$  はモデル,  $w$ ,  $G_p/H$  などによって定まる。一方、 $k_3$ ,  $k_4$  はすべてのケースについてはほぼ一定でそれぞれ

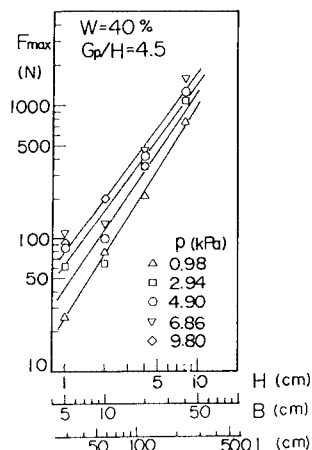


Fig. 6 Relations between maximum tractive resistance  $F_{max}$  and grouser height  $H$ , width  $B$ , track length  $L$  for 4 track models.

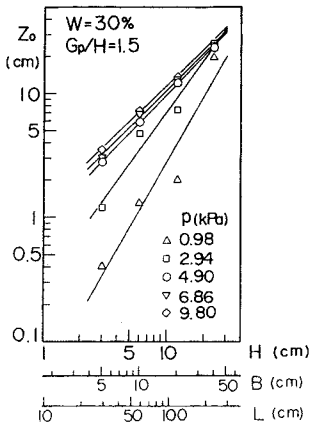


Fig.7 Relations between initial sinkage  $z_0$  and grouser height  $H$ , width  $B$ , track length  $L$  for 4 track models.

0.897 ± 0.023, 0.474 ± 0.103 であった。なお、含水比別の重相関係数は  $w=30, 35, 40\%$  のときそれぞれ 0.959, 0.966, 0.930 であった。なお、グローサ先端の土の破壊形状については  $G_p/H$  が小さいときグローサ先端を結ぶ平面内に、 $G_p/H$  が増大するに従ってグローサ先端と履帯の腹を結ぶ曲線としてそれぞれすべり線が認められた。また、含水比が低い状態では比較的すべり線は明瞭に観察されたが、含水比が高くなるに従い、塑性流動を引き起こし、すべり線は明確に現われなかった。

#### 4. 次元解析

##### (1) 解析方法

Schafer ら<sup>7)</sup>は土-機械系の相似性の諸問題の中で速度の遅い問題では加速度など時間の次元を含む変数は影響しないと考へて Table 3 に示す変数を一般的なものとして取り上げた。これから無次元量  $\Pi$  項を求めると次式のようになる。

$$\Pi_1 = \frac{R}{\alpha^{1/a} \lambda^{-b/a}}, \quad \Pi_2 = \frac{R_i}{R} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Pi_3 = \frac{\lambda_q}{\lambda}, \quad \Pi_{\alpha i} = \frac{\alpha_i}{\alpha^{a_i/a} \lambda^{(b_i - ba_i/a)}}$$

$\Pi_1$  は予想すべき量  $R$  を含む項、 $\Pi_2$  は抵抗比の項、 $\Pi_3$  は寸法比の項、 $\Pi_{\alpha i}$  は土の性質  $\alpha_i$  を含む項である。この場合、満足されるべき設計条件は次式のとおりである。

1.  $n_R = n_\alpha^{1/a} n_\lambda^{-b/a}$
  2.  $n_{Ri} = n_R$
  3.  $n_{\lambda q} = n_\lambda$
  4.  $n_{\alpha i} = n_\alpha^{a_i/a} n_\lambda^{(b_i - ba_i/a)}$
- .....(6)

$n$  は相似比で、たとえば  $n_R = R/R_m$ ,  $n_\lambda = \lambda/\lambda_m$  である。添字の  $m$  はモデルを表わす。

ここで、モデルと実物とで通常考えられる条件として  $\alpha$  と  $\alpha_i$  が同じであれば、 $n_\alpha = n_{\alpha i} = 1$  である。しかし、条件 4 が成立するためにはさらに次の条件のどれかが満

Table 3 List of variables.

Variable	Symbol	Basic dimensions
Lengths	$\lambda, \lambda_q$	$L$
Forces	$R, R_i$	$F$
Soil properties	$\alpha$	$F^a L^b$
	$\alpha_i$	$F^{a_i} L^{b_i}$

足される必要がある。

5.  $\alpha_i$  は無次元量である。すなわち、 $a_i = b_i = 0$  である。
6.  $\alpha$  と  $\alpha_i$  は同じ次元をもつ。
7.  $\alpha$  と  $\alpha_i$  の次元は、 $b_i = ba_i/a$  を満足する。

そうでないとき、条件 4 ははずむ。このとき、はずみ係数  $\beta_i$  は次式で定義される。

$$\beta_i = \frac{\Pi_{\alpha i m}}{\Pi_{\alpha i}} = n_\lambda^{(b_i - ba_i/a)} = n_\lambda^{s_i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$s_i = b_i - ba_i/a$$

すなわち、 $\beta_i$  は寸法比  $n_\lambda$  の関数として表わされる。一般に陸上の軟弱地盤上での建設車両の走行性を考える場合、表層の浅い部分のみを対象としているので土の性質は深さ方向にほとんど変化しない。本実験においても、土の性質は深さ方向に変化しないので条件 3 を満足させることができる。したがって、土の力学的性質に関しては上述のはずみ係数  $\beta_i$  のみを考慮すればよい。さらに、はずんだ系では予測係数  $\delta$  を必要とする。これは定義によると次式で示される。

$$\delta = \frac{\Pi_1}{\Pi_{1m}} = \frac{f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_c)}{f(\Pi_{2m}, \Pi_{3m}, \dots, \Pi_{cm})} \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらに、Schafer らは  $\Pi_1$  とはずんだ項  $\Pi_{\alpha i}$  がべき乗関係で表わされるとき次式で与えられるとした。

$$\delta = n_\lambda^s \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$s = -\sum e_i s_i$$

$e_i$  :  $\Pi_1$  と  $\Pi_{\alpha i}$  との関係における  $\Pi_{\alpha i}$  の指数

このことは、モデル実験が実物と同じ地盤条件で行われたとき、土の性質に関してはずんだ系であっても、モデルから実物の挙動を推定することが可能であることを示している。 $\delta$  は寸法比  $n_\lambda$  のみの関数であって、指数部は土-機械系が決まれば一定の値となる。なお、ここで土の性質がモデルと実物で等しいということは、深さ方向に対しても土の強度が一定となるように土を制御することであり、実験に際しては十分この点に留意した。

##### (2) 最大牽引抵抗 $F_{max}$

$F_{max}$  を予測すべき量として、試行錯誤の結果、次式で示される  $\Pi$  項が適切であると判断した。

$$\Pi_1 = \frac{F_{max}}{c_u B^2}, \quad \Pi_2 = \frac{p}{c_u}$$

$$\Pi_3 = \frac{G_p}{H}, \quad \Pi_4 = \frac{\gamma B}{c_u} \quad \dots\dots\dots (10)$$

土の性質を表わすものとしてベーンせん断試験結果より求めた  $c_u$  を使用したが、これは履帯モデルを牽引するとき、グローサ間にはさまれた試料土がせん断されるといふ機構が、ベーンせん断試験のせん断機構に相当していることによる。なお、抵抗比  $\Pi_3$  として次式のものと考えられるが、予測すべき量を含む  $\Pi_1$  項との間に明瞭な関係がみられなかった。

$$\Pi_3 = \frac{W}{F_{max}} \quad W: \text{履帯モデルの自重+荷重} \dots (11)$$

ここで  $c_u$  は各ケースについて実際に求めた  $w$  より式(1)を用いて算出した。

最初に、 $w=35\%$ 、 $G_p/H=4.5$  の場合の  $\Pi_1$  と  $\Pi_2$  の関係を Fig. 8 に示す。両変数間には両対数紙上でほぼ直線となる関係がみられる。この直線の傾きはモデルの寸法が小さいほどやや急になる傾向がある。これは、後述するように、履帯モデルの寸法が小さいほど同じ接地圧のもとでの沈下量が相対的に大きく、履帯前面の土の運土抵抗が増大するためである。

次に、 $w=30\%$ 、モデル B の場合の  $\Pi_1$  と  $\Pi_3$  の関係を Fig. 9 に示す。両変数間には負の相関がみられる。これは同じモデルを比較したとき、 $H$  が高いほどグローサ間にはさまれた試料土のせん断面積  $(B+2H)L$  が広がるため  $F_{max}$  が大きくなるからである。

$w=35\%$ 、 $G_p/H=3.0$  の場合の  $\Pi_1$  と  $\Pi_4$  の関係を Fig. 10 に示す。これも負の相関がみられる。 $\Pi_1$  には  $B$  が変数として含まれているので、この図より明らかに  $F_{max}$  に関して寸法効果が認められる。

$\Pi_1$  を被説明変数、 $\Pi_2$ 、 $\Pi_3$ 、 $\Pi_4$  をそれぞれ説明変数としてすべての実験データについて重回帰分析を行った結果、 $\Pi_1$  は次式で示されるように  $\Pi_2$ 、 $\Pi_3$ 、 $\Pi_4$  の積で表わせることが判明した。

$$\Pi_1 = 13.07 \Pi_2^{0.496} \Pi_3^{-0.586} \Pi_4^{-0.333} \dots (12)$$

(重相関係数  $R=0.791$ 、データ数 168)

なお、重回帰分析における統計量  $t$  値は  $\Pi_2$ 、 $\Pi_3$ 、 $\Pi_4$  に

ついてそれぞれ 13.0、 $-7.87$ 、 $-8.58$  であった。上式に式(10)および  $\gamma$  の値を代入して整理すると、 $F_{max}$  は次式となる。

$$F_{max} = 4.97 c_u^{0.837} p^{0.496} B^{1.667} (G_p/H)^{-0.586} \dots (13)$$

上式の適用性を示すため、一例として  $w=35\%$ 、 $G_p/H=1.5$  の場合の  $F_{max}$  と  $p$  の関係における計算値と実験値の比較を Fig. 11 に示す。図中、実線は式(13)を用いて算出したものである。多少の食い違いがみられるが、式(13)の適用性が伺える。

さて、 $\beta$ 、 $\delta$  は土の性質がモデルと実物とで同じである ( $n_{cu}=n_\gamma=n_p=1$ ) とみなし、この場合次式で与えられる。

$$\beta = \Pi_{1m}/\Pi_1 = n_B^{-1} \dots (14)$$

$$\delta = \Pi_1/\Pi_{1m} = n_B^{-0.333} \dots (15)$$

したがって、式(15)に式(10)を代入すると、実物の  $(F_{max})_p$  はモデルの  $(F_{max})_m$  を用いて次式で表わされる。

$$(F_{max})_p/(F_{max})_m = n_B^{1.667} \dots (16)$$

この指数の値は寸法効果がみられない場合、2となるのであるが、そうならない主な原因は後述する履帯の沈下量がグローサの貫入抵抗がかなり大きくなるために  $H$  に比例して大きくならないので、先頭のグローサによる試料土のすべり線の長さおよびグローサ間にはさまれた試料土の側面積が  $H$  に比例して大きくならないためであると考える。

### (3) 沈下量 $z_m$

土-機械系では予測すべき量は力の次元をもつものが一般的であるが、軟弱地盤では履帯の沈下が大きく、走行抵抗も大きいので、今回沈下量  $z_m$  を予測すべき量として取り上げた。ここで  $z_m$  とは  $F_{max}$  を発揮するときの履帯モデル中央での沈下量である。 $\Pi$  項は次式のものを用いた。

$$\Pi_1' = \frac{z_m}{H}, \quad \Pi_2 = \frac{p}{c_u} \dots (17)$$

$$\Pi_3 = \frac{G_p}{H}, \quad \Pi_4' = \frac{\gamma H}{c_u}$$

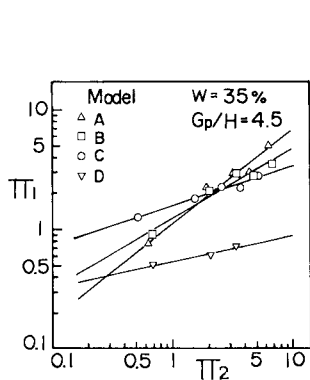


Fig. 8 Relations between  $\Pi_1$  and  $\Pi_2$ .

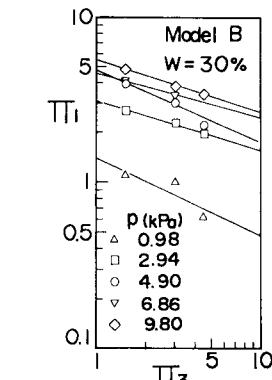


Fig. 9 Relations between  $\Pi_1$  and  $\Pi_3$ .

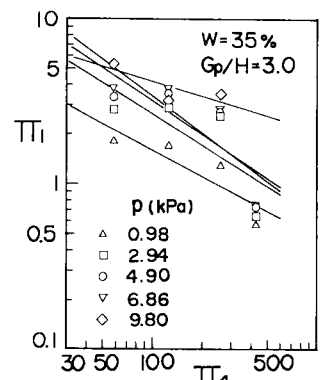


Fig. 10 Relations between  $\Pi_1$  and  $\Pi_4$ .

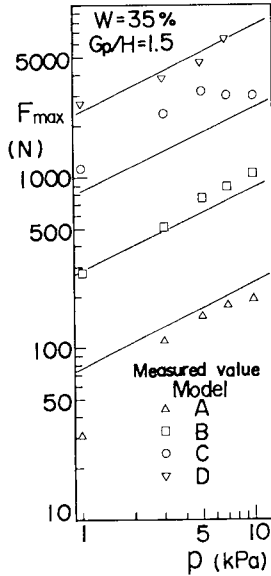


Fig. 11 Relations between maximum tractive resistance  $F_{max}$  and average contact pressure  $p$  (measured  $F_{max}$  and calculated one).

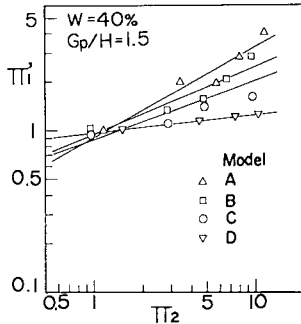


Fig. 12 Relations between  $II'_1$  and  $II_2$ .

$II'_1$  項は予測すべき量  $z_m$  を含む項で  $z_m$  を  $H$  で除して無次元化した。 $II_2$ ,  $II_3$  に関しては式 (10) と同じものである。 $II'_1$  項は式 (10) の  $II_4$  項の  $B$  を  $H$  に置き換えたもので、これは  $z_m$  は  $B$  よりも  $H$  に影響されるためである。

$w=40\%$ ,  $G_p/H=1.5$  の場合の  $II'_1$  と  $II_2$  の関係を Fig. 12 に示す。 $II'_1$  と  $II_2$  の間には両対数紙上でほぼ直線となる関係が成立するが、この直線の傾きはモデルの寸法が小さいほどやや急になる傾向がみられる。

次に、 $w=40\%$ 、モデル B の場合の  $II'_1$  と  $II_3$  の関係を Fig. 13 に示す。両対数紙上でほぼ直線となる関係がみられるが、 $II_3$  に比べて相関性は低く、 $G_p/H$  による  $II'_1$  への影響度は低い。

Fig. 14 に  $w=40\%$ 、 $G_p/H=3.0$  の場合の  $II'_1$  と  $II'_4$  の関係を示す。 $II'_1$  は  $II'_4$  が増加するに従って減少する

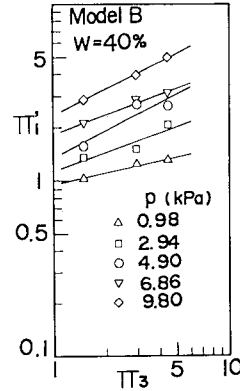


Fig. 13 Relations between  $II'_1$  and  $II_3$ .

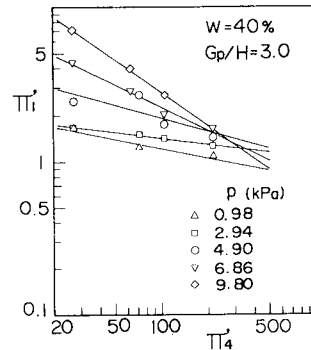


Fig. 14 Relations between  $II'_1$  and  $II'_4$ .

傾向がみられる。これより  $II'_4$  項は  $H$  を含んでいるので寸法効果が認められる。

$II'_1$  を被説明変数、 $II_2$ ,  $II_3$ ,  $II'_4$  をそれぞれ説明変数としてすべての実験データについて重回帰分析を行った結果、 $II'_1$  は次式で示されるように  $II_2$ ,  $II_3$ ,  $II'_4$  の積で表わせることが明らかとなった。

$$II'_1 = 0.705 II_2^{0.559} II_3^{0.312} II'_4^{-0.046} \dots \dots \dots (18)$$

( $R=0.862$ , データ数 166)

なお、 $t$  値は  $II_2$ ,  $II_3$ ,  $II'_4$  についてそれぞれ 20.5, 5.20, -1.67 であった。上式に式 (17) を代入して整理すると、 $z_m$  は次式で示される。

$$z_m = 0.617 c_u^{-0.513} p^{0.559} H^{0.954} (G_p/H)^{0.312} \dots \dots \dots (19)$$

上式の適用性を示すため、 $w=35\%$ 、 $G_p/H=1.5$  の場合の  $z_m$  と  $p$  の関係における計算値と実験値の比較を Fig. 15 に示す。図中、実線は式 (19) を用いて算出したものである。 $p=0.98$  kPa では差異がみられるが、それ以外の  $p$  ではおおむね実験値と計算値は一致している。

ところで、 $II'_4$  項はひずんだ  $II$  項になるので、 $F_{max}$  のときと同様にして  $\beta$ ,  $\delta$  は次式のように定まる。

$$\beta = II'_m / II'_4 = n_u^{-1} \dots \dots \dots (20)$$

$$\delta = II'_1 / II'_m = n_u^{0.046} \dots \dots \dots (21)$$

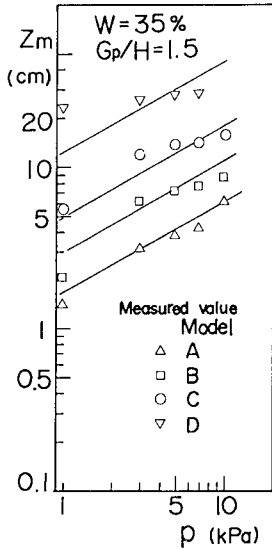


Fig. 15 Relations between sinkage  $z_m$  and average contact pressure  $p$  (measured  $z_m$  and calculated one).

したがって、式 (21) に式 (17) を代入すると、実物の  $(z_m)_p$  はモデルの  $(z_m)_m$  を用いて次式で表わすことができる。

$$(z_m)_p / (z_m)_m = n_H^{0.954} \dots \dots \dots (22)$$

これより一般に平板貫入試験にみられる寸法効果の関係は履帯には適用できないことがわかる。これは履帯をグローサ付きの平板であると考えるとき、グローサ付平板と平板では貫入圧力が著しく異なるためである。

ところで式 (22) の  $n_H$  の指数は 1 より小さくなっているので、相対的な沈下量  $\Pi'_1$  はモデルの方が実物より大きいことがわかる。これは履帯モデルの寸法が小さいほど、グローサ間にはさまれた試料土が側方へ逃げるときの平均的な移動距離が短いため、相対的な沈下量  $\Pi'_1$  が大きくなる。逆に履帯モデルの寸法が大きいとグローサ間にはさまれた試料土が側方へ逃げにくく、沈下量が相対的に抑制されるためと考える。このことは、Fig. 12 の  $\Pi'_1$  と  $\Pi_2$  の関係において  $\Pi_2$ 、すなわち  $p$  が増加するに従ってモデル A の  $\Pi'_1$  がモデル D より大きくなっていることから裏付けされる。

以上のように履帯モデルの牽引試験における  $F_{max}$ 、 $z_m$  とともに明らかに寸法効果がみられることが判明した。

### 5. 結 論

軟弱地盤上を走行する履帯式車両の走行性を把握するため、その基礎となる履帯モデルの牽引試験における最大牽引抵抗とそのときの沈下量に関して寸法効果を明らかにすることを目的として、5 個のグローサをもつ剛性履帯の幾何学的相似形のモデルを用いて実験を行い、そ

の結果を次元解析した。以下、本報告で得られた新しい知見を述べる。

(1) 履帯モデルのグローサ高さ  $H$  (cm)、平均接地圧  $p$  (kPa) と最大牽引抵抗  $F_{max}$  (N) の間には次式の関係が成立する。

$$F_{max} = A_1 H^{k_1} p^{k_2}$$

$k_1$  の値は平均  $1.699 \pm 0.257$

$k_2$  の値は平均  $0.556 \pm 0.127$  であった。

(2) 履帯モデルの  $H$ 、 $p$  と初期沈下量  $z_0$  (cm) の間には次式の関係が成立する。

$$z_0 = A_2 H^{k_3} p^{k_4}$$

$k_3$  の値は平均  $0.897 \pm 0.023$

$k_4$  の値は平均  $0.474 \pm 0.103$  であった。

(3) 予測すべき量を  $F_{max}$  (N) として、この系に關係する因子として履帯幅  $B$  (cm)、グローサピッチ  $G_p$  (cm)、 $H$  (cm)、 $p$  (kPa)、非排水強度  $c_u$  (kPa)、単位体積重量  $\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>) を取り上げ、これらの因子の組合せとして次式の  $\Pi$  項が適切である。

$$\Pi_1 = \frac{F_{max}}{c_u B^2}, \quad \Pi_2 = \frac{p}{c_u}$$

$$\Pi_3 = \frac{G_p}{H}, \quad \Pi_4 = \frac{\gamma B}{c_u}$$

次元解析の結果、 $\Pi_1$  は次式のように  $\Pi_2$ 、 $\Pi_3$ 、 $\Pi_4$  の積として表わすことができる。

$$\Pi_1 = 13.07 \Pi_2^{0.496} \Pi_3^{0.586} \Pi_4^{-0.333}$$

これより各変数間の関係は次式で与えられる。

$$F_{max} = 4.97 c_u^{0.837} p^{0.496} B^{1.667} (G_p/H)^{-0.586}$$

モデル実験が実物と同じ地盤条件で行われる場合、実物の  $(F_{max})_p$  はモデルの  $(F_{max})_m$  を用いてその幾何学的相似比  $n_B = B/B_m$  の関数として次式のとおりに与えられる。

$$(F_{max})_p / (F_{max})_m = n_B^{1.667}$$

(4) 予測すべき量を  $z_m$  (cm) とする場合、この系の  $\Pi$  項は次式のもの適切である。

$$\Pi'_1 = \frac{z_m}{H}, \quad \Pi_2 = \frac{p}{c_u}$$

$$\Pi_3 = \frac{G_p}{H}, \quad \Pi'_4 = \frac{\gamma H}{c_u}$$

次元解析の結果、 $\Pi'_1$  は次式のように  $\Pi_2$ 、 $\Pi_3$ 、 $\Pi'_4$  の積として表わすことができる。

$$\Pi'_1 = 0.705 \Pi_2^{0.559} \Pi_3^{0.312} \Pi'_4^{-0.046}$$

これより各変数間の関係は次式で与えられる。

$$z_m = 0.617 c_u^{-0.513} p^{0.559} H^{0.954} (G_p/H)^{0.312}$$

モデル実験が実物と同じ地盤条件で行われる場合、実物の  $(z_m)_p$  はモデルの  $(z_m)_m$  を用いてその幾何学的相似比  $n_H = H/H_m$  の関数として次式のとおりに与えられる。

$$(z_m)_p / (z_m)_m = n_H^{0.954}$$

以上のように履帯モデルの牽引試験における  $F_{\max}$ ,  $z_m$  ともに明らかに寸法効果があることが明らかとなった。

最後に,本研究を行うにあたって文部省科学研究費(総合研究)を受理したこと,および実験を行うに際し,本学元学生 高見昌良氏, 山下尚志氏の協力を得たことを記して謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) Ketterer, B. : Modelluntersuchungen zur Prognose von Schneid- und Planierkräften im Erdbau, BMT, 7, pp. 355~370, 1981.
- 2) Freitag, D.R., Schafer, R.L. and Wismer, R.D. :

Similitude studies of soil machine systems, Trans. ASAE, Vol. 13, No. 2, pp. 201~213, 1970.

- 3) 本間 仁・春日屋伸昌: 次元解析・最小 2 乗法と実験式, コロナ社, pp. 20~30, 1982.
- 4) 柴田 徹: 粘土のベンセン断強度に関する研究, 土木学会論文集, 第 138 号, pp. 39~48, 1967.
- 5) Bekker, M. G. : Introduction to terrain-vehicle systems, The University of Michigan Press., pp. 58~74, 1969.
- 6) Youssef, A. F. and Ali, G. A. : Determination of soil parameters using plate test, J. Terramechanics, Vol. 19, No. 2, pp. 129~147, 1982.
- 7) Schafer, R. L., Reaves, C. A. and Young, D. F. : An interpretation of distortion in the similitude of certain soil-machine systems, Trans. ASAE, Vol. 12, No. 1, pp. 145~149, 1969.

(1985. 7. 1・受付)