

## 装軌車両の旋回抵抗を対象とした相似則について

### SIMILITUDE IN STUDIES OF TURNING RESISTANCE OF TRACKED VEHICLES

近藤 博\*・田中信哉\*\*・杉山 昇\*\*\*

By Hiroshi KONDO, Nobuya TANAKA and Noboru SUGIYAMA

The vehicles of crawler type, such as bulldozer, are superior in the trafficability of off the road. On the contrary, the turning resistance may be several times larger than that of straight travelling. Therefore the turning performance of tracked vehicles gives a serious problem.

This paper describes the similitude technique of soil-gear interaction system. The results of turning resistance test of the rigid track models were reported and discussed to find the way of approaches to the solutions of the prediction methods of the prototype performances from the model tests.

When the both model and prototype were tested on the same soil conditions and same track ratio (=0.2), the relation between turning resistance moment of prototype  $M$  and that of model  $M_m$  has been given as follow;

$$M = n^k M_m$$

where,  $n$  is scale length,  $k=3.94$  on dry sand,  $k=3.81$  on wet sand and  $k=3.24$  on clay.

*Keywords:* model test, similitude, construction machine, tracked vehicles

#### 1. まえがき

装軌式車両は軟弱地、不整地での走行性がよいことから、建設機械、農業機械等に多くみられるが、旋回時の抵抗は直進時の抵抗の4~7倍になるといわれている。油圧ショベルやクローラクレーン等の所要馬力は、走行しながら作業することができないため、旋回時に要する消費馬力によって決められる。よって、原価低減、省資源等の観点から装軌式車両の旋回性能が問題になってきている。

走行抵抗に関する研究は数多く行われ、Bekker<sup>1)</sup>により、不完全ながら一応確立されたようである。

一方、旋回抵抗については、従来から履帯下面と土との粘着係数またはすべり係数を用いて計算<sup>2)</sup>されていた。しかし、履帯の旋回抵抗は下面のすべり抵抗と側面で土を排土しつつ旋回するときの排土抵抗とから構成されていると考えられる。排土抵抗による抵抗モーメントは堅土での旋回では問題にならない量であるが、軟弱

な地盤上で沈下しながら旋回する場合には無視できない量になる。油圧ショベル等の装軌式建設機械の稼働現場は軟らかい地盤のこと多く、旋回不能になるような場合もあり対応に苦慮している。そして、このような場合の旋回抵抗モーメントは、従来の粘着係数を用いた計算では把握できないと考えられる<sup>3)</sup>。

このような土-機械系の性能は解析が困難であるから、一般には実験データをもとにして設計される。しかし、実物の機械で実験するには、経済的にも、時間的にも大変であり、かつ、土の性質を一定にコントロールすることが困難であるから、信頼性のあるデータを得ることは非常に難しい。したがって、実物の性能が模型実験から推測できるようになるならば非常に便利になる。

模型実験によって実物の性能を予測するためには、流体中における航空機や船等に用いられているのと同時に、模型実験の条件と予測されるべき実物のおかれた条件との間に相似条件が成立する必要がある。しかし、土-機械系の場合には、土性を適当に制御できないため、模型実験を相似条件が満たされない状態、すなわち、ひずんだ模型で行わなければならない。したがって、ひずみを処理する方法が問題となる。

本研究は、装軌式車両の旋回時の抵抗を予測するとき

\* 正会員 工修 東海大学講師 工学部土木工学科  
(〒259-12 平塚市北金目1117)

\*\* 学生会員 東海大学工学研究科学生(同上)

\*\*\* 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科(同上)

の基礎となる、信地旋回時の制動履帯をモデル化した剛性履帯模型による旋回抵抗実験を実施し、旋回抵抗の特性を解明するとともに、Schafer ら<sup>4)</sup>の提唱したひずみ係数と予測係数を用い、土-機械系における相似条件、ひずみの設定法とその処理および予測係数との関係について考察した。

## 2. 実験装置と実験計画

### (1) 実験路面の特性

実験路面の作製には、乾燥状態の豊浦標準砂（以下乾燥砂）、湿潤状態の豊浦標準砂（以下湿潤砂）および湿潤状態のYAクレー（商品名、以下粘土）の3種を用いた。乾燥砂は密度を2段階（以下単位体積重量 $\gamma$ の大きい方を乾燥砂D、小さい方を乾燥砂L）で実験を行った。コーン指数 $q_c$ は、トラフィカビリティ判定の場合と同様に、貫入量5cmと10cmのときの抵抗値を平均して求めた。

供試土の諸特性を表-1に示す。

### (2) 実験装置

実験装置全体の概要を図-1に示す。土槽（幅70×高さ50×長さ140cm）内に均一に詰められた路面上で履帯模型を旋回させる。模型はトルクメータを介して駆動軸に、また駆動軸は保持枠で走行機に取り付けてある。走行機および保持枠はパルスモータでコントロールすることができ、駆動軸の位置を移動させながら模型を旋回させることができる。なお、駆動軸は軸方向に自由度があり、履帯模型の旋回に伴うすべり（動的）沈下が測定

表-1 供試土の特性

供試土	w (%)	c (gf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\gamma$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$q_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
標準砂 (乾燥)	0.0	—	38	1.38	1.07
	0.0	—	41	1.49	2.10
標準砂 (湿潤)	2.0	17.0	27	1.29	0.63
粘土 (YAクレー)	31.0	84.0	—	1.98	0.57

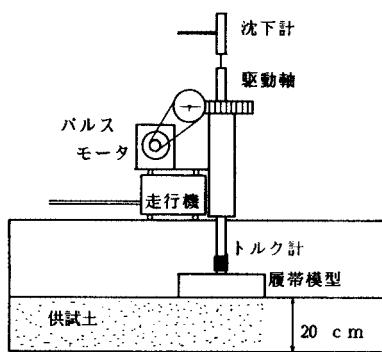
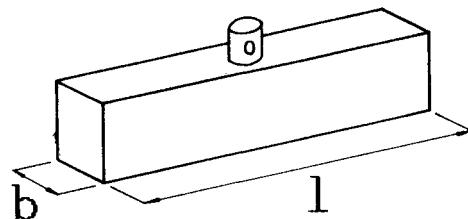


図-1 実験装置の概要



模型 No.	b (cm)	l (cm)	b/l	A (cm <sup>2</sup> )
1	4	20	0.2	80
2	6	30	0.2	180
3	8	40	0.2	320
4	10	50	0.2	500
5	4	40	0.1	160
6	5	50	0.1	250
7	6	60	0.1	360
8	3.2	50	0.064	160
9	5.33	30	0.178	160
10	8	20	0.4	160
11	4	30	0.133	120
12	4	50	0.088	200
13	2	40	0.05	80

図-2 履帯模型の形状と寸法

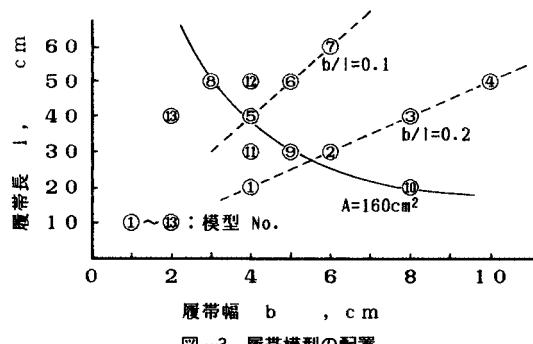


図-3 履帯模型の配置

可能である。

### (3) 剛性履帯模型

履帯には、けん引力等を大きくするための、グローサとよばれる突起物が付いているために、旋回抵抗が大きくなるが、それが寸法効果に与える影響は小さいものと判断し、グローサなしの履帯模型とした。

剛性履帯模型の形状および接地面の寸法等を図-2に示す。図-3は13種の履帯模型の配置関係を示したもので、この図からも明らかなように、履帯模型は形状比(履帯幅 $b$ /履帯長 $l$ )が0.2と0.1の相似形のほかに、履帯幅、履帯長および形状(接地面積 $A$ 一定で形状比

表一2 実験の組合せ

接地圧 $p$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	実験番号												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.10	●○ △×	○○ △×	●○ △×	●○ △×	●○	●○	●○	●○	●○	●	●	●	●
0.125						●○							
0.15		●○ △×		●		●○							
0.20	●○ △×	●○ △×	●○ △×	●○ △×	●○	●○	●○	●○	●○	●	●	●	●
0.25		●		●○ △×	●								

●：乾燥砂 D  
○：乾燥砂 L  
△：湿潤砂  
×：粘土

\*印は下面の粗度を  
3段階に変化させ  
て実験を行った。

の異なるもの) の影響をも調べられるように準備した。

#### (4) 実験の組合せ

実験は履帯の形状、接地圧、土質および履帯模型下の粘着係数をパラメーターに取り行った。実験の組合せは表一2に示した(マーク部を実施)ように、土質に関しては乾燥砂を、接地圧に関しては0.1と0.2 kgf/cm<sup>2</sup>を中心にして101の組合せのもとで実験を行った。接地圧0.125, 0.15および0.25 kgf/cm<sup>2</sup>は、接地圧を相似模型の大きさに比例(以下相似接地圧)させるためと接地圧の影響を調べるために用いた。表中の\*印は履帯底面の粗度を変えての実験も行ったものである。

#### (5) 実験手順

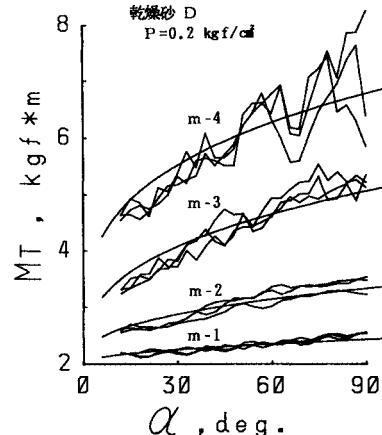
図一1を参考にし、実験の手順を説明する。

- 土槽の中に所定量の供試土を入れ、攪拌し一定の密度になるように締め固める。
  - 土槽底から深さ20 cmになるように表面を平らにならす。
  - 履帯模型に所要の荷重を載荷したのち、土槽中央部の路面に設置し、初期沈下量を測定する。
  - 履帯模型を3°/sの一定角速度で90°まで回転させ、旋回抵抗トルクおよびすべり沈下量を、図一4に示すプロックダイヤグラムにより計測処理した。
- 実験にあたっては現象の再現性を調べる意から同一実験を少なくとも2回行った。

### 3. 実験結果と検討

#### (1) 旋回抵抗試験

図一5は形状比0.2の履帯模型(No.1~4)を乾燥砂Dのもとで、接地圧0.2 kgf/cm<sup>2</sup>で旋回試験を行ったときの、旋回抵抗モーメント  $M_r$  と旋回角  $\alpha$  の関係をサン



図一4 計測およびデータ収録のブロック図

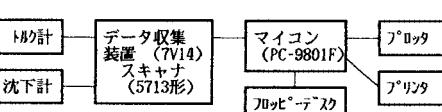
プリング間隔1秒で描いたときの例である。同一実験を3回行ったが、ばらつきが小さく再現性のよいことがわかる。 $M_r$  は旋回開始と同時に、履帯下面で生じるすべり抵抗モーメント分上昇し、以後すべり抵抗分は履帯模型中央に接地圧が集中するために減少する<sup>5)</sup>ものの、すべり沈下によって生じる排土抵抗成分を加味しながら大きくなっていくことがわかる。図中には実験値を幾何曲線( $M_r = u\alpha^v$  ここに、 $u, v$  は係数)で回帰した値を示してあるが、この回帰曲線は旋回初期部分を除いて、実験値の変動の平均をよく回帰していることがわかる。

すべり沈下量は、一般の載荷試験での沈下特性とは異なり、同一接地圧のときには寸法の小さい方が大きくなつた。

他の組合せの実験についても同様な傾向を示した。よって、旋回角が1ラジアン時の回帰旋回抵抗モーメント  $M_n (= u)$  と他のパラメーターとの関係について主に検討する。

#### (2) 履帯幅 $b$ と旋回抵抗モーメント $M_n$ の関係

図一6は、乾燥砂Dでの履帯幅  $b$  と旋回抵抗モーメント  $M_n$  との関係を履帯長  $l$  および接地圧  $p$  をパラ



図一5 計測結果の例

メーターにとり示したものである。 $l$  および  $p$  が等しいときには両対数グラフでほぼ直線関係で示され、 $b$  と  $M_{Tl}$  は

で示される。履帶が沈下しないような路面での旋回抵抗モーメント  $M_0$  の計算式は一般に次のように表わせる。

ここに、 $\mu$ : 履帶下面と路面との粘着係数

式(2)から明らかなように、すべり沈下をしないときの旋回抵抗モーメントは  $b$  の1次に比例するが、沈下しながら旋回するときには係数  $m_1$  は1より小さくなるようである。また、 $A_1$  の値は接地圧の約1.07乗に比例する。

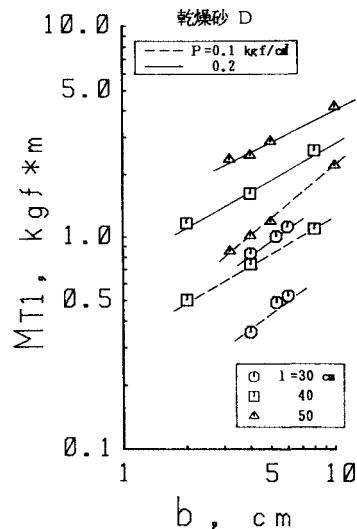


図-6 履帶幅と旋回抵抗モーメントの関係

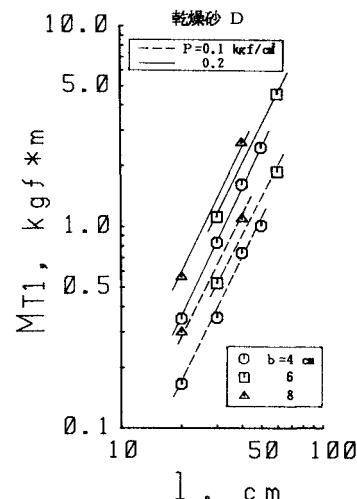


図-7 履帶長と旋回抵抗モーメントの関係

例しているようであるが、詳しくは後で考察する。

### (3) 履帶長 $l$ と旋回抵抗モーメント $M_{T1}$ の関係

図-7は、図-6と同様な条件での、履帯長  $l$  と旋回抵抗モーメント  $M_{Tr}$  との関係を示したものである。前図と同様、両対数グラフで直線となり、 $l$  と  $M_{Tr}$  は

の関係で示すことができる。係数  $m_2$  は約 2 となり、剛路面での旋回抵抗モーメント推定式（式（2））の  $l$  の係数と一致していることがわかる。

#### (4) 形状比 $b/l$ と旋回抵抗モーメント $M_r$ の関係

図-8も、前と同様な条件での形状比  $b/l$  と旋回抵抗モーメント  $M_h$  との関係を示したものである。直線は接地面積  $A$  ( $= 160 \text{ cm}^2$ ) 一定で形状比が変化する場合である。

図中には、他の履帯模型の接地圧  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  のときの  $M_n$  の値もプロットしてある。そのプロットの側の数値は接地面積を表わしており、 $M_n$  は接地面積と形状比により決定できるようである。接地面積が一定であるならば、 $b/l$  と  $M_n$  の関係は次式で表わせる。

よって、形状比が1すなわち正方形に近づくほど  $M_n$  の値が小さくなり、その値は形状比が0.2のときの約1/4に減少することになる。

また、乾燥砂利での実験結果も、図-6~8と同様な傾向を示した。

## (5) 模型の大きさと旋回抵抗モーメント $M_n$ の関係

乾燥砂 D および湿潤砂での、形状比 0.2 の履帯模型 (No.1~4) の大きさ ( $l$  で表示) と旋回抵抗モーメント  $M_T$  の関係を図-9 に示す。実線は同一接地圧での回帰線を示し、破線は履帯模型 No.1 の接地圧を 0.1  $\text{kgf/cm}^2$  とし、履帯模型 No.2~4 に相似接地圧を作用

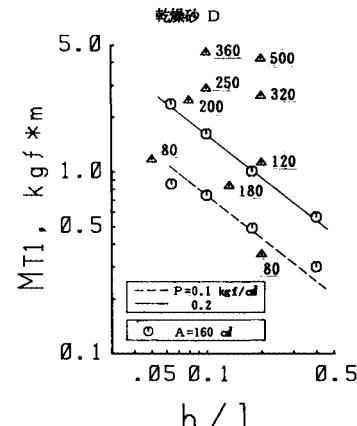


図-8 形状比と旋回抵抗モーメントの関係

させたときのもので、それぞれ次のように表わせる。

全供試土での  $k_1$  および  $k'_1$  の値を表-3に示した。この表からもわかるように、摩擦性の土である乾燥砂および見掛けの粘着力を保有する湿潤砂の、接地圧が 0.1 と  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  のときの回帰線はほぼ平行になっているが、粘着性の土である粘土の場合には平行になっていない。乾燥砂では、沈下量の大きくなる乾燥砂 L での  $M_{11}$  がわずかに大きくなつたが、 $k_1$  の値はほぼ等しくなつており、土質と同じときには、寸法効果も同一のようである。

図-10は形状比0.1の履帶模型(No.5~7)を乾燥砂Dで実験を行ったものであるが、傾度は異なるものの、図-9(a)と同様な関係を示していることがわかる。

図-11は、形状比0.2の履帯模型（No.1~4）を相似接地圧で実験したときの旋回角 $\alpha$ と $M_T$ の関係を、両対数グラフにサンプリング間隔0.1秒で描いたものである。この図から、相似模型を相似接地圧で実験したとき、旋回角 $\alpha$ が0.2ラジアン以降では勾配( $k_2'$ )がほぼ一定とみなせるので、 $\alpha$ と $M_T$ の関係は式(6)を用いて次のように表わせる。

表-3  $k_1$  と  $k'_1$  の値

K <sub>4</sub> , K <sub>4'</sub> 值	乾燥砂		湿潤砂	粘土
	D	L		
K <sub>4</sub> p=0.1	2.79	2.56	2.67	2.80
K <sub>4</sub> p=0.2	2.75	2.82	2.82	2.37
K <sub>4'</sub>	3.94	3.70	3.81	3.24

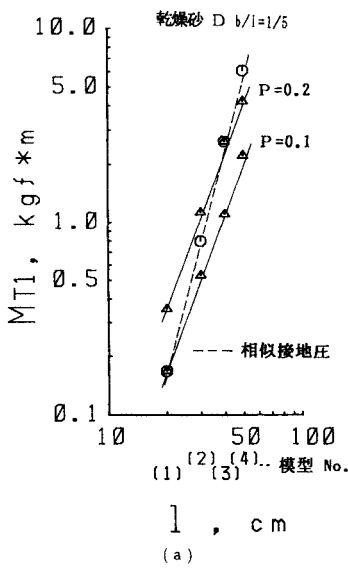


図-9 大きさと旋回抵抗モーメントの関係

この関係式を適用することにより、任意の旋回角での  $M_r$  を求めることができる。

#### 4. ひずみ模型と予測

### (1) 供試系と次元解析

履帶模型に所要接地圧になるように重りを載荷し、すべり沈下が生じる状態で旋回させたときの、旋回抵抗モーメントについての相似性を考察したものである。

表-4はこの系に関する変数として取り上げた因子を示す。時間の次元を含む変数は速度の遅い問題には影響しないと考えて取り上げなかった。土の性質を表わすパラメーターとしては、単位体積重量  $\gamma$  とコーン指数  $q_c$  を採用し、粘着力やせん断抵抗角は取り上げなかった。

表-4 の因子から II 項を計算すると次のようになる。

$$\Pi_1 = \frac{M_{ri}}{q_c l^3}, \quad \Pi'_2 = \frac{l\gamma}{q_c}, \quad \Pi'_3 = \frac{p}{q_c}, \quad \Pi_4 = \mu, \quad \Pi_5 = \frac{b}{l} \quad \dots \dots \quad (8)$$

$\Pi_1$ を予測すべき量である旋回抵抗モーメント  $M_n$  を含んだ項として、それらが次の関係にあるものとする。

表-4 土-足回り装置系の変数

変数	記号	単位
旋回抵抗モーメント	$M_T$	$F \cdot L$
接地圧	$p$	$F \cdot L^{-2}$
履帯長	$l$	$L$
履帯幅	$b$	$L$
粘着係数	$\mu$	—
単位体積重量	$\gamma$	$F \cdot L^{-3}$
コーン指數	$q_c$	$F \cdot L^{-2}$

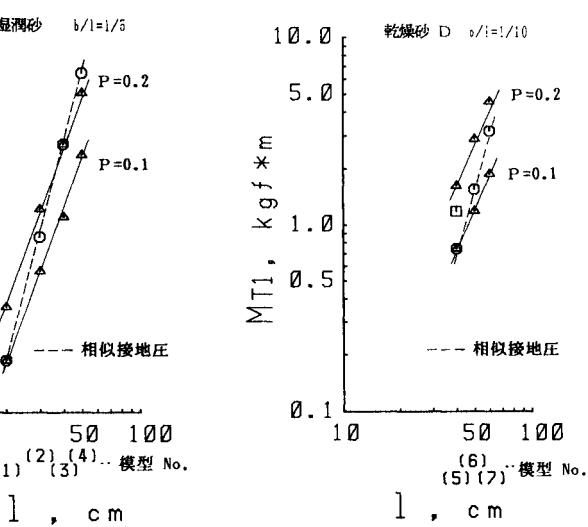


図-10 大きさと旋回抵抗モーメントの関係

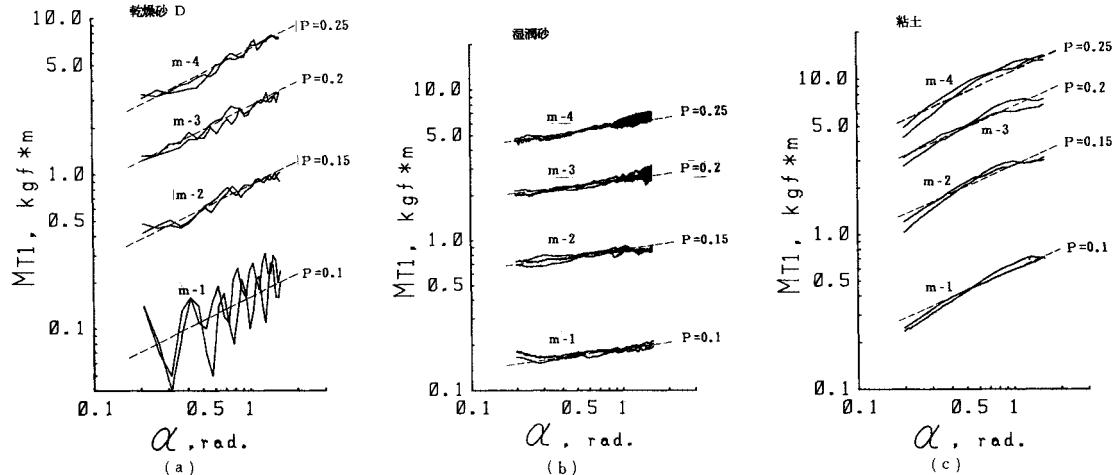


図-11 旋回角と旋回抵抗モーメントの関係

表-5 相似条件

No.	II 項	相似条件
1	$\Pi_1$	$M_{T1} / q_{cm} l_m^3 = M_1 / q_c l^3$
2	$\Pi_2$	$l_m \gamma_m / p_m = l \gamma / p$
3	$\Pi_4$	$\mu_m = \mu$
4	$\Pi_5$	$b_m / l_m = b / l$

$$\Pi_1 = f(\Pi'_1, \Pi'_2, \Pi'_4, \Pi'_5) \quad (9)$$

また、上式は次のようにも表わすことができる。

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_4, \Pi_5) \quad (10)$$

ここに、 $\Pi_2 = l\gamma/p$  とする。

したがって、Design Conditions は表-5 のようになる。

## (2) ひずみ模型と予測

前記した式 (10) が成立するかどうかをみるために各 II 項を計算し、履帯の旋回抵抗モーメント  $M_{T1}$  を含んだ II 項を予測すべき量としてこれらの関係を考察した。もし、ある一定の関係が得られるならば、模型実験の結果から実物の性能を予測することができる。

### a) $\Pi_1$ と $\Pi_2$ の関係

図-12 (a) に、形状比 0.2 の履帯模型 (No. 1~4) の乾燥砂での  $\Pi_1$  と  $\Pi_2$  の関係を例示する。この図から、乾燥砂 D および L の接地圧 0.1 および 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>についての平行な直線関係 (乾燥砂 L での  $p = 0.1$  kgf/cm<sup>2</sup> のデータは省いた。), 接地圧が一定で乾燥砂 D と L についての平行な直線関係および同一模型についての平行な直線関係が得られる。表-5 に示した Design Conditions うち、土の性質がモデルと実物とで同じでかつ形状比も同じであるならば条件 2 と条件 3 は成立する。条件 1 は相似接地圧で実験すれば成立しそうであるが、旋回時にすべり沈下が生じるので  $\Pi_2$  がひず

むことになる。よって、接地圧を同一にし、 $\Pi_2$  をひずませて解析を進めることにする。そのひずみ係数を  $\beta_1$  とすると、 $\Pi_{2m}$  と  $\Pi_2$  の関係は次式のように表わせる。

$$\Pi_{2m} = \beta_1 \Pi_2 \quad (11)$$

また、図-12 (a) から

$$\Pi_1 = A_5 \Pi_2^{k_5}, \quad \Pi_{1m} = A_5 \Pi_{2m}^{k_5} \quad (12)$$

式 (11) と (12) から

$$\Pi_{1m} = \beta_1^{k_5} \Pi_1 \quad (13)$$

$\Pi_2$  が模型の系において  $\beta_1$  だけひずみを受けたのであるから、 $\Pi_{1m}$  と  $\Pi_1$  の関係は予測係数を  $\delta_1$  とすると次式のように表わせる。

$$\Pi_1 = \delta_1 \Pi_{1m} \quad (14)$$

したがって、 $\delta_1$  と  $\beta_1$  の関係は次のようになる。

$$\delta_1 = \beta_1^{-k_5} \quad (15)$$

また、 $\beta_1$  は式 (11) から次のように表わせる。

$$\beta_1 = n_1^{-1} n_\gamma^{-1} n_p \quad (16)$$

ここに、 $n$  は scale factor とよばれるもので  $n = (\text{実物の値}) / (\text{モデルの値})$  を表わす。

したがって、 $n_{MT1}$  は次のようになる。

$$n_{MT1} = n_1^{3+k_5} n_p^{-k_5} n_{qc} n_\gamma^{k_5} \quad (17)$$

この式は、地盤および接地圧が同一のときには  $n_p$ ,  $n_{qc}$  および  $n_\gamma$  が 1 であるので次のように表わせる。

$$n_{MT1} = n_1^{3+k_5} \quad (18)$$

図-12 (a) から、係数  $k_5$  の値を求める  $-0.154$  であるので

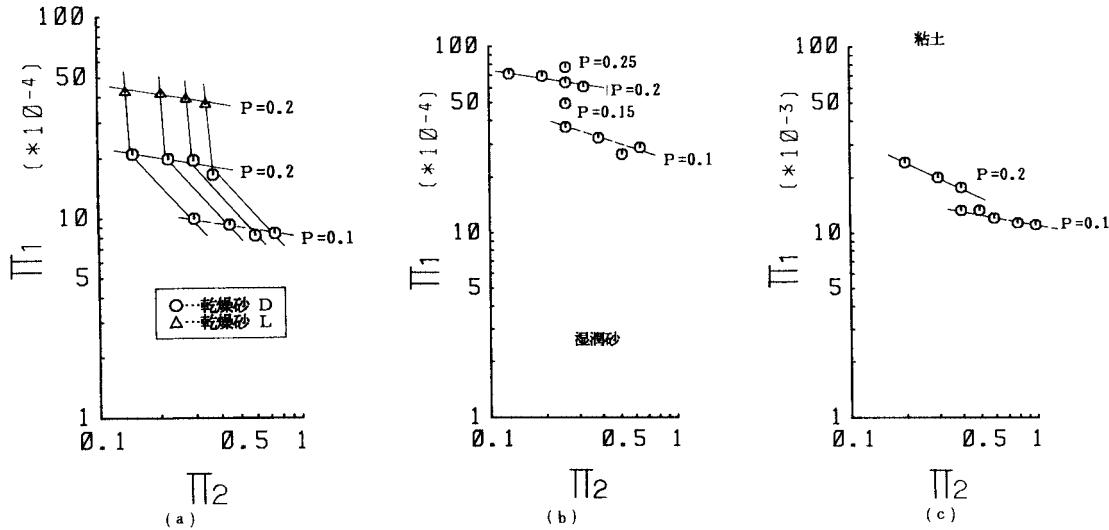
$$n_{MT1} = n_1^{2.85} \quad (19)$$

となる。

同様な手法により、地盤およびモデルが同一で接地圧が異なる場合には

$$n_{MT1} = n_p^{-k_5} = n_p^{1.07} \quad (20)$$

モデルおよび接地圧が同一で地盤の締まりの程度が異な

図-12  $\Pi_1$  と  $\Pi_2$  の関係

る場合には

$$n_{MT1} = n_{qc} n_{\gamma}^{k_5} = n_{qc} n_{\gamma}^{-0.13} \quad (21)$$

となる。また、式(19)～(21)は互いに独立であるので、 $n_{MT1}$ は次式のように表わせる。

$$n_{MT1} = n_1^{2.85} n_p^{1.07} n_{qc} n_{\gamma}^{-0.13} \quad (22)$$

よって、上式により、形状比 0.2 でモデル大きさ、接地圧、地盤の締まり状態が異なるときの実験値から旋回角 1 ラジアン時の旋回抵抗モーメントを予測することができる。

さらに、相似接地圧でかつ同じ地盤で実験するときは、式(22)は次のようになる。

$$n_{MT1} = n_1^{3.92} \quad (23)$$

$n_1$  の係数は式(6)の  $k'_4$  とほぼ等しくなることがわかる。さらに、図-11(a)に示した  $\alpha$ - $M_r$  関係を適用すると

$$n_{MT1} = n_1^{3.92} \alpha^{k_4} \quad (24)$$

となり、相似接地圧で実験することにより、任意の旋回角での  $M_r$  を予測することができる。

以上述べたように、乾燥砂の場合にはモデルと実物との接地圧を変えても予測は可能である。しかし、湿潤砂および粘土の場合には、図-12(b), (c)に示したように、接地圧 0.1 と 0.2  $\text{kgf/cm}^2$  の回帰線が平行でない。そこで、 $n_{MT1}$  を求めるためにはモデルと実物との接地圧を同一に、 $n_{MT1}$  を求めるときには、相似接地圧で実験を行う必要がある。模型下面の粗度を変えて行った実験結果でも、 $\Pi_1$  の値は異なるものの図-12(a)と同様な傾度を得た。

### b) $\Pi_1$ と $\Pi_5$ の関係

図-13 は、等接地面積で形状比の異なる模型の、乾燥砂での  $\Pi_1$  と  $\Pi_5$  の関係を示す。この図から、乾燥砂

D および L の接地圧  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$  および  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  についての平行な直線関係がわかる。形状比を変化させたのであるから、 $\Pi_5$  がひずむことになる。そのひずみ係数を  $\beta_2$  とすると

$$\Pi_{5m} = \beta_2 \Pi_5 \quad (25)$$

である。また、図-13 から次式のように表わせる。

$$\Pi_1 = A_6 \Pi_5^{k_6} \quad (26)$$

$$\Pi_{1m} = A_6 \Pi_{5m}^{k_6} \quad (27)$$

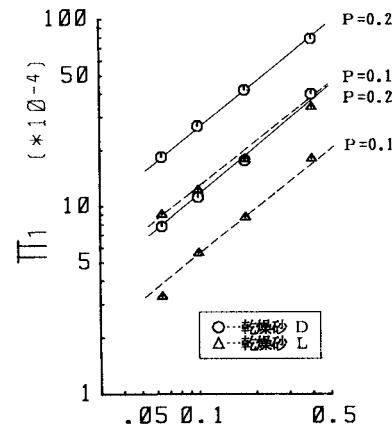
以下、a) と同様な手法により次式を得ることができる。

$$n_{MT1} = n_1^{3-k_6} n_{qc} n_b^{k_6} \quad (28)$$

等接地面積であるので、 $n_b$  および  $n_1$  を形状比  $R = b/l$  の比  $n_R$  を用いて表わすと

$$n_{MT1} = n_R^{-1.5+k_6} n_{qc} \quad (29)$$

となる。 $k_6$  の値は図から 0.824 となるので

図-13  $\Pi_1$  と  $\Pi_5$  の関係

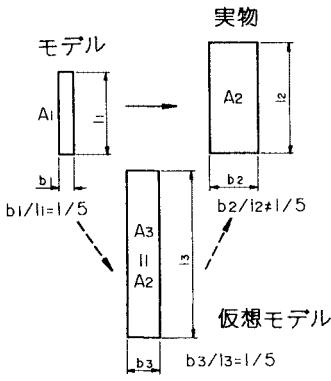


図-14 形状比が異なるときの予測法

$$n_{MTI} = n_R^{-0.676} n_{qc} \dots \quad (30)$$

となる。

式(30)は、接地面積および接地圧が一定で、形状比および地盤の締めの程度が異なるときの、旋回角1ラジアンでの旋回抵抗モーメントを予測することができる。また、地盤が同一のときには

$$n_{MTI} = n_R^{-0.676} \dots \quad (31)$$

となり、形状比が変化したときの  $M_{TI}$  を予測できるこ<sup>と</sup>となる。

### c) $\Pi_1$ , $\Pi_2$ および $\Pi_5$ の関係

a) と b) に述べたことを適用することにより、モデルの形状比とは異なる実物の旋回抵抗モーメント  $M_{TI}$  を予測する方法について考察する。

図-14に示すように、形状比  $b_1/l_1=0.2$ 、接地面積  $A_1 (= b_1 \times l_1)$  のモデルを用いて、形状比  $b_2/l_2 \neq 0.2$ 、接地面積  $A_2 (= b_2 \times l_2)$  での  $M_{TI}$  を予測するときには、はじめに、接地面積  $A_3 (= b_3 \times l_3) = A_2$  で形状比  $b_3/l_3 = 0.2$  の仮想モデルの  $M_{TI}$  を式(22)を適用して求める。次に、式(31)を適用して実物の  $M_{TI}$  を予測することができる。以上をまとめると次式のように表わせる。

$$n_{MTI} = n_1^{2.85} n_p^{1.07} n_{qc} n \gamma^{-9.13} n_R^{-0.676} \dots \quad (32)$$

ここに、 $n_1 = l_3/l_1$  とする。

## 5. まとめ

装軌式車両の足廻装置をモデル化した剛性履帯模型を用いた旋回抵抗実験を、摩擦性の土である乾燥砂、粘着性の土である粘土、および両者の性質を有する湿潤砂の3種を用いて実施し、寸法効果および形状効果等について調べた。また、その結果に次元解析を適用したひずみ模型での相似則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) 履帯模型の旋回角  $\alpha$  と旋回抵抗モーメント  $M_T$  の間には、 $M_T = u\alpha^v$  の関係があり、 $u$ ,  $v$  の係数は、土質、形状、接地圧等により変わるが、相似模型を同一地

盤で相似接地圧で実験するときには、 $u$  は模型の大きさと比例関係を示し、 $v$  はほぼ一定値になることが明らかになった。

(2) 履帯模型の相似則の確立のため、次元解析を用い、この系に関与するものとして、旋回抵抗モーメント  $M_T$ 、接地圧  $p$ 、履帯長  $l$ 、履帯幅  $b$ 、履帯下面の粘着係数  $\mu$ を取り上げ、さらに、土の性質に関する因子として、単位体積重量  $\gamma$ 、コーン指数  $q_c$  を変数として、これらが次の関係にあるものとして考察した。

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_4, \Pi_5)$$

$$\Pi_1 = \frac{M}{q} \quad \Pi_2 = \frac{ly}{p} \quad \Pi_4 = \mu \quad \Pi_5 = \frac{b}{l}$$

その結果、 $\Pi_1$  が  $\Pi_2$ ,  $\Pi_4$  および  $\Pi_5$  から推定できることがわかった。

(3) 乾燥砂の場合には、旋回角  $\alpha$  が1ラジアンでの実物とモデルの旋回抵抗モーメントの比  $n_{MTI}$  は次式により表わされ、

$$n_{MTI} = n_1^{2.85} n_p^{1.07} n_{qc} n \gamma^{-9.13} n_R^{-0.676}$$

地盤と形状比が同一で、相似接地圧で実験を行ったときには次式で表わせることがわかった。

$$n_{MTI} = n_1^{3.92} \alpha^{k4}$$

この式により、任意の旋回角での  $M_T$  も推定できる。

(4) 濡潤砂および粘土に関しても、(3)の下式と同様な  $M_T$  の推定式が得られた。模型実験を行うときには、形状を同じにして行うのが一般的であるので、予測値が大きさの何乗に比例するかが求まればよいものと思う。よって、相似模型車両実験を、同一地盤、相似接地圧で実施すれば、模型車両実験結果に履帯模型実験から得られる予測係数を適用することにより、実車の性能を把握でき、設計計算に寄与するものと思料する。

本研究を遂行するにあたり、卒業研究の一部として実験に協力していただいた元本学修士課程学生 鈴木賢一氏（現在、日立建機株式会社）に、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Bekker, M. : Off-the road locomotion, The Univ. of Michigan Press, 1960.
- 2) 守田友義・薩摩林和美：ブルドーザ、産業図書、pp. 205~208, 1969年。
- 3) 杉山 昇・近藤 博：旋回抵抗に関する土質力学的考察、第18回土質工学研究発表会講演集、pp. 655~656, 1983年。
- 4) Schafer, R. L., Reaves, C. A. and Young, D. F. : An Interpretation of distortion in the similitude of certain soil-machine systems, Trans. ASCE., Vol. 12, No. 1, pp. 145~149, 1969.
- 5) Sugiyama, N. and Kondo, H. : Basic Study on the Turning Resistance of Track, Proc. of the 8th Int. Conf., ISTVS, pp. 889~899.

(1986.1.28・受付)