

9. 軟弱地盤を走行する車輪式車両の研究

国立呉工業高等専門学校：*重松 尚久
愛媛大学：室 達朗，河原 莊一郎

1. はじめに

近年、車輪式車両のあり方が見直されてきている。自走式車輪式車両は、自ら工事現場に走っていき、作業をし、作業が終わればまた自走して走って帰ることができるため、機械の運搬や保管にかかるコストの削減が可能である。そのためには、オンロード、オフロードに関わらず安定した作業能力が発揮できる車輪式の建設機械の開発が望まれている。現在までに舗装道路上での車輪式車両の研究はかなり進んでいるが、軟弱地盤においての研究はあまり行われていない。そこで本研究では、ゆるく堆積したまさ土地盤上において2軸4輪車両を前輪駆動(FWD)・後輪駆動(RWD)・両輪駆動(4WD)の3種類の駆動状態で走行実験を行い、全沈下量及び有効牽引力を測定し、車輪式車両の走行特性を明らかにした。また、最大の有効牽引力が生じるスリップ率($i=38.2\%$)における地中応力状態を測定し、車両の走行が地盤に与える影響を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

試料砂として愛媛県松山産のまさ土を使用した。気乾燥状態のまさ土の最大粒径 4.75mm 以下に調整したまさ土の土質特性は土粒子比重 2.66、平均粒径 0.78mm、均等径数 12.0、曲率係数 3.0、最適含水比 12.8%であ

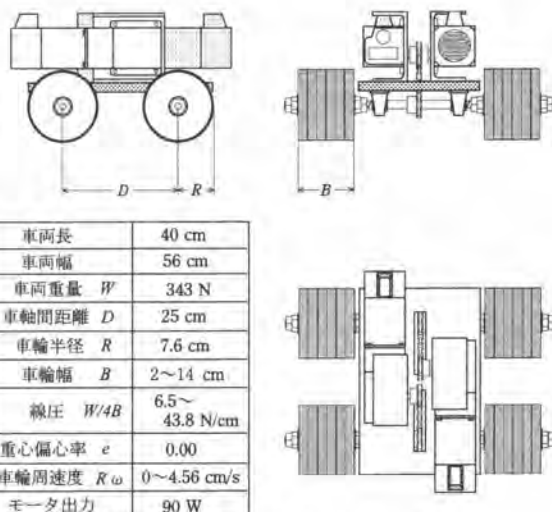


図-1 車輪式車両の三面図及び車両諸元

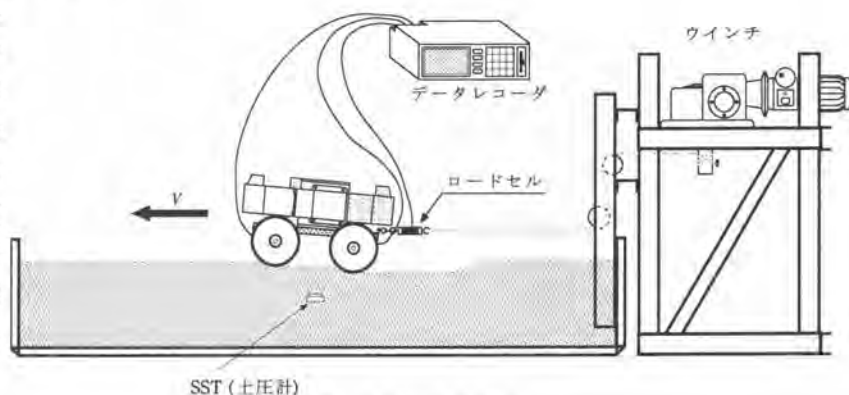


図-2 実験装置概略図

る。ここでは、含水比 $10.0 \pm 1.22\%$ 、乾燥密度 $1.33 \pm 0.88\text{g/cm}^3$ に調整したまさ土を鋼製のパネル板を組み立てた実験土槽(長さ: 350cm, 幅: 90cm, 深さ: 30cm)内に 5cm ずつまきだし、密度分布を一定にするために 0.1kgf/cm^2 の圧力で締め固め、五層に分けて 25cm の高さの供試体を作成した。車輪式車両には直径 15.3cm の剛性車輪を使用し、車両重量 $W=343\text{N}$ および走行速度 $V=0.73\text{cm/s}$ を一定のもとに実験をおこなった。ウインチから出されるワイヤーの速度によって車両速度を変えることによって車両速度を決定し、車輪の回転速度を変化させることにより車両のスリップ率をコントロールした。車輪式車両の三面図および車両諸元を図-1 に示す。実験の測定項目として、それぞれの車輪幅においてスリップ率を変化させた時の車両の有効牽引力 T 、全沈下量 s を測定した。図-2 に上記の土槽と車両の実験装置の概略図を示す。なお、スリップ率は実験車両の速度 $V(\text{cm/s})$ を測定し、次式(1)で求めた。

$$i = \frac{R\omega - V}{R\omega} = 1 - \frac{V}{R\omega} \quad (1) \quad R: \text{車輪半径}(\text{cm})$$

ω : 車輪の円周方向の角速度(rad/s)

次に、車両の走行が地盤に与える影響を詳しく調べるため、地表から 15cm にところに SST (Stress State Transducer)¹⁾ を埋設し、地中における垂直応力 σ_z 及びせん断応力 τ_{xz} を測定した。図-3 に SST のモデルを示す。これは、6 つの土圧計を多面体構造の中に埋め込んで作られたものであり、地中の主応力、せん断力と八面体応力が算定できるようになっている。なお、X,Y,Z は直交座標になっている。これを面 Z を水平面にとり、X と Y 軸の二等分線が進行方向となる位置に埋設した。

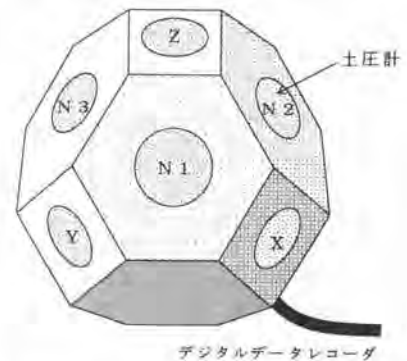


図-3 SST (Stress State Transducer) 概略図

3. シミュレーション解析

(1) 地盤-車輪系定数の決定 車両が走行するとき、後輪は前輪の通過した後の地盤を走行するため、前輪と後輪にでは通過する地盤が異なっている。そのためそれぞれの地盤に対する地盤-車輪系定数を求める必要がある。今回は、上記で示した供試地盤を前輪の通過する地盤、この供試地盤上を線圧 2.5kgf/cm のローラで転圧したものを後輪の通過する地盤とし、前輪と後輪の 2 種類の供試地盤を作成し、それぞれの供試地盤上で平板載荷・除荷試験^{3),4)} および平板牽引試験⁵⁾ を行い、地盤-車輪系定数を求めた。表-1 にその値を示す。

表-1 地盤-車輪系定数

前輪	後輪
$k_c=16.827 \text{ N/cm}^{n+1}$	$k_c=17.219 \text{ N/cm}^{n+1}$
$k_{cr}=45.002 \text{ N/cm}^{n+1}$	$k_{cr}=222.979 \text{ N/cm}^{n+1}$
$k_\phi=1.137 \text{ N/cm}^{n+2}$	$k_\phi=3.499 \text{ N/cm}^{n+2}$
$k_{\phi_r}=13.397 \text{ N/cm}^{n+2}$	$k_{\phi_r}=29.557 \text{ N/cm}^{n+2}$
$n=0.932$	$n=0.666$
$n_f=0.447$	$n_f=0.634$
$m_c=0.008 \text{ kPa}$	$m_c=0.001 \text{ kPa}$
$a=3.043 (1/\text{cm})$	$a=6.617 (1/\text{cm})$
$m_f=0.519$	$m_f=0.598$
$c_0=0.117 \text{ cm}^{1+2c_1-c_2}/\text{N}^{(n)}$	$c_0=0.123 \text{ cm}^{1+2c_1-c_2}/\text{N}^{(n)}$
$c_1=0.625$	$c_1=0.293$
$c_2=0.828$	$c_2=1.269$

(2) 解析方法 この解析では、ゆるく堆積したまさ土地盤(密度 1.61g/cm^3)において 2 軸 4 輪車両を走行させ、全沈下量・走行抵抗・駆動

力を車輪上の任意の点がトロコイド曲線上にあること”を用いて、地盤-車輪系定数を代入し算定する方法を提案し、その有効性を検討した。

図-4 は、後輪駆動状態で走行する 2 軸 4 輪車両に作用する諸力を表したものである。車両重量 W は車両重心 G に作用し、前輪

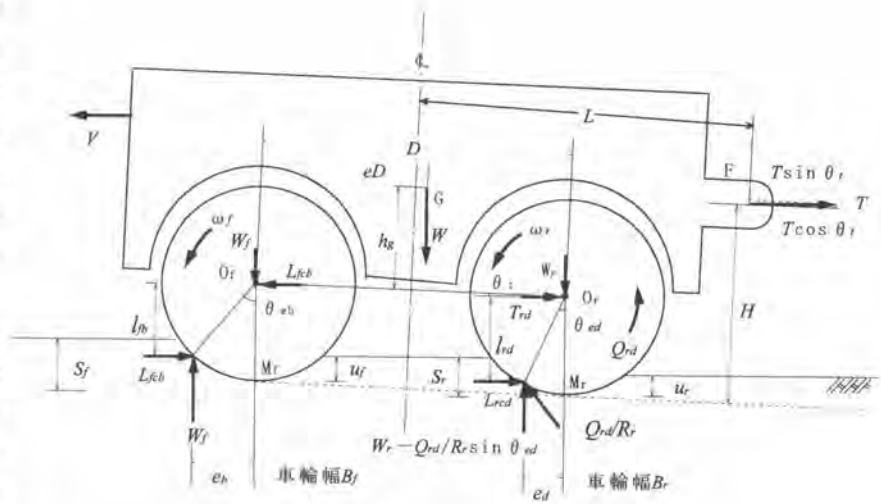


図-4 後輪駆動状態に作用する諸力と諸元

部の軸荷重 W_f 、後輪部の軸荷重 W_r はそれぞれの軸中心 O_f 、 O_r に作用する。車両重心は、軸間距離 O_fO_r に至る垂直距離 h_g 、車両中心線からの偏心量 eD で表される。後輪駆動トルクは後輪中心 O_r に作用する。有効牽引力 T の作用点 F の位置は、後輪通過後の水平地盤面からの高さ H 、車両中心線からの距離 L である。前輪軸中心 O_f には、水平方向に純粋転動時の転がり抵抗 L_{fcb} が作用し、後輪中心 O_r には、水平方向に有効駆動力 T_{rd} が作用する。車両傾斜角 θ は、軸間距離 O_fO_r の水平面となす角であり、前輪最下点 M_f における沈下量を s_f 、後輪最下点 M_r における沈下量を s_r とすると、

$$\theta = \sin^{-1} \frac{R_f - u_f + s_f - R_r}{D} \quad (2)$$

ここで、水平方向と鉛直方向の釣り合いより、次式(3)(4)が得られる。

$$T = T_{rd} + T_{fb} = \frac{Q_{rd}}{R} \cos \theta - L_{rd} - L_{fb} = T_{rd} - L_{fb} \quad (3) \quad W = W_f + W_r \quad (4)$$

Q_{rd} : 後輪の駆動トルク

L_{rd} : 後輪の締め固め抵抗

θ : 地盤反力と車輪最下点間の中心角

L_{fb} : 前輪の締め固め抵抗

また、 O_r 点回りのモーメントの釣り合いより、次式(5)が成立する。

$$W_f D \cos \theta + T_{fb} D \sin \theta - W \left[\frac{D}{2} - (eD + h_g \tan \theta) \right] \cos \theta + (H - R) T \cos \theta - \left[L - \frac{D}{2} \right] T \sin \theta = 0 \quad (5)$$

上記の関係式を用いて、後輪駆動状態で走行する 2 軸 4 輪車両の走行性能に関するシミュレーション解析を行なった。このシミュレーション解析の特徴は、車両傾斜角 θ の変化にともなう軸荷重の変化を考慮し繰り返し計算をすることで、任意のスリップ率における軸荷重を計算することができることにある。

4. 実験及びシミュレーション解析結果

(1) 全沈下量 全沈下量 s は前・後輪輪の沈下量を s_f , s_r , 前・後輪のリバウンド量を u_f , u_r とすると次式(6)で表される。

$$s = s_f - u_f + s_r - u_r \quad (6)$$

今回実験を行ったゆるく堆積したまさ土地盤では、リバウンドはほとんど起こらないため、全沈下量は前・後輪の沈下量の和と考えて良い。それぞれの駆動状態におけるスリップ率 i と全沈下量 s の関係を図-5に示す。解析値と実験値は、実験誤差を考慮すると良好な関係を示している。解析値と実験値において、全沈下量は4WD状態が最大となり、ついでRWD, FWD状態の順となった。実験値では、自走状態での全沈下量は8mm程度となり走行状態による違いはあまりなかったが、スリップ率が増加するに従って、4WD状態では全沈下量が大きく増加し、RWD状態ではスリップ率が20%を越えた辺りからは4WD状態と同じように大きく増加した。それに対して、FWD状態での全沈下量は緩やかに増加した。

(2) 有効牽引力 それぞれの駆動状態におけるスリップ率 i と有効牽引力 T の関係を図-6に示す。解析値と実験値を比較すると、有効牽引力は全ての駆動状態で解析値の法が実験値よりも大きくなった。これは、解析値が土の排土抵抗を考慮していないために、実験値よりも大きくなったと考えられる。解析値と実験値において、有効牽引力は4WD状態が最大となり、RWD, FWD状態の順になった。RWD, FWD状態の有効牽引力の違いは、後輪の方が前輪よりも締め固められた地盤を通過するために、接地面のせん断応力が増加するため、後輪が駆動状態にある方が大きな有効牽引力が得られると考えられる。FWD状態では $i=25\%$ 、RWD状態では $i=40\%$ 、4WD状態では $i=30\%$ 付近で有効牽引力は極大値を示した。また、自走におけるスリップ率を比較してみると、FWD, RWD状態は7%前後、4WD状態は5%辺りで自走できた。つまり、軟弱地盤においては4WD状態が安定した走行が出来ると言える。

(3) 地中応力 SSTの実測値(σ_v , σ_3 , σ_{v1} , σ_{v2} , σ_{v3})を数学的に解析し、地中での応力状態を以下のように算定した。

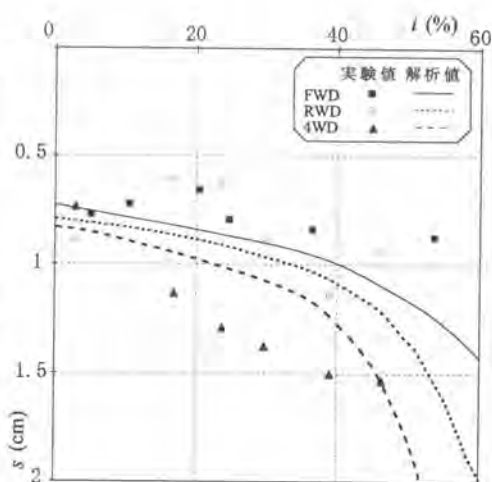


図-5 スリップ率と全沈下量の関係

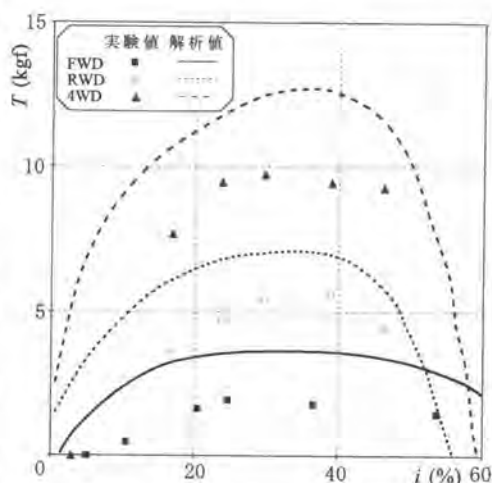


図-6 スリップ率と有効牽引力の関係

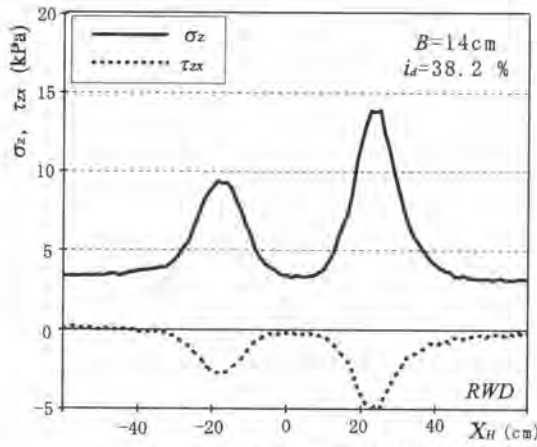


図-7 σ_z, τ_{zx} と X_H の関係 (RWD)

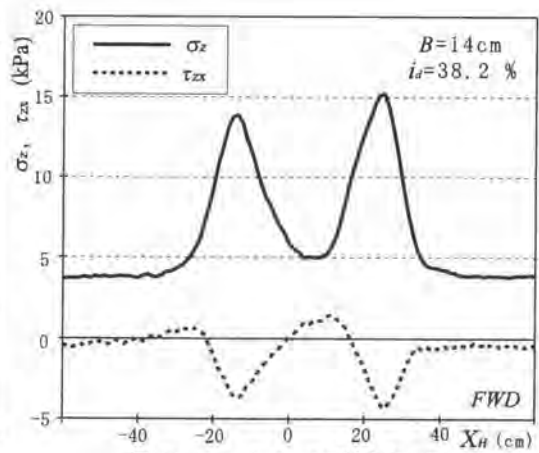


図-8 σ_z, τ_{zx} と X_H の関係 (FWD)

$$\tau_{zx} = \frac{3}{4} (\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (7)$$

図-7,8,9 は RWD, FWD, 4WD のそれぞれの走行状態に対する車輪幅 $B=14\text{cm}$, スリップ率 $i_d=38.2\%$ の垂直応力 σ_n , せん断応力 τ_{zx} と進行距離 X_H の関係を示す。なお, X_H は車両の中心が SST の真上を通過する時を $X_H=0$ とした。

a) RWD σ_z 及び $|\tau_{zx}|$ とともに純粋転動輪である前輪通過時より, 駆動輪である後輪通過時の方が大きな値となった。

b) FWD σ_z 及び $|\tau_{zx}|$ とともに, 駆動輪である前輪通過時と純粋転動輪である後輪通過時の値にはあまり大きな差はなかった。

c) 4WD σ_z 及び $|\tau_{zx}|$ とともに駆動輪である前輪通過時より, 駆動輪である後輪通過時の方が大きな値となった。

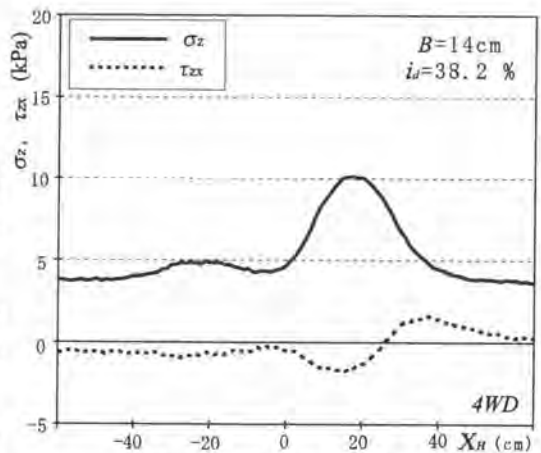


図-9 σ_z, τ_{zx} と X_H の関係 (4WD)

すべての駆動状態において前・後輪の通過する際に σ_z の値が最大になっていることが分かる。また, 純粋転動輪より駆動輪の方が大きな値が出ていた。 τ_{zx} は純粋転動輪では車輪の通過に伴って負の値になるのに対して, 駆動輪では車輪の通過に伴って正の値から負の値に転じていることが分かる。今回の実験では, 4WD 状態における σ_z 及び τ_{zx} の変化が他の 2 つの状態よりも小さくなった。これは実験のデータが少ないためで今後もっとデータを増やしていかなければならない。

5. まとめ

解析値と実験値を比較すると, 全ての駆動状態で全沈下量は良好な関係を示したが, 有効牽引力は実験値より解析値の方が大きくなった。排土抵抗のことを考慮に入ればこのシミュレーション解析は有

効であると考えられる。全沈下量は解析値と実験値において、4WD 状態が最大となり、ついで RWD、FWD 状態の順となった。また、有効牽引力は解析値と実験値において、4WD 状態が最大となり、RWD、FWD 状態の順になった。軟弱地盤においては 4WD 状態が安定した走行が出来ると言える。今回の実験では、SST で実測したデータはデータ数が少ないために定量的な比較は難しいが、車輪式車両が通過する際の、地中応力の変化の傾向はつかむことができた。今後の課題として、実験データを増やしていき定量的な比較ができるようにして、地中環境を考慮したそれらの基準点を探していくことが命題である。

参考文献 1) T.R Way, et al. : Soil stress state orientation beneath a tire at various loads and inflation pressures, Proc. of the 5th North American Meeting, I.S.T.V.S Conf. , pp.33-41, 1995. 2) T.A.Nichols, et al. : A Stress State Transducer for Soil, Trans. of the ASCE, 30(5), pp.1237-1241, 1987. 3) M.J.Bekker: Introduction to terrain-vehicle systems, the University of Michigan Press, pp.38-144,1969. 4) M.J.Bekker:Off-the-road locomotion, The University of Michigan Press, pp.25-40,1960. 5) Z.Janosi,and B.Hanamoto: The analytical determination of drawbar-pull as a function of slip for tracked vehicles in deformation soils, Proc. of the 1st Int.Conf.of the I.S.T.V.S,1961. 6) 室・荒井・深川・建山:最新建設施工学,朝倉書店,pp.96-108,1994.