

2軸2輪式転圧ローラの制駆動時における 最適走行制御

室達朗¹・星加泰央²・河原莊一郎³

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

²正会員 工修 東洋建設株式会社 (〒101 東京都千代田区神田錦町3-7-1)

³正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

本論文は、まさ土地盤上を走行するタンデムローラ等の2軸2輪式転圧ローラについて、その転圧効果を最大限にあげるために前後輪の制駆動走行時における最適制御方法を提案することを目的としている。まず、乾燥したまさ土地盤に対する転圧ローラの走行システムについてシミュレーション解析を行い、その結果について転圧走行実験によって検証した。制駆動力、有効制駆動力はスリップ率の絶対値の増加とともに増大すること、ローラの沈下量はスリップ率0%付近が最小となること、まさ土の乾燥密度を最大ならしめるローラ最適制御条件はスリップ率-5%の両輪制動走行状態であることが判明した。

Key Words : road roller, trafficability, slip ratio, compaction, control

1. まえがき

転圧ローラの走行性能が地盤の締固めに与える影響を知ることは施工技術者にとって極めて重要なことである。特に、最小の転圧回数で目標の密度を得るために転圧ローラの走行性能の何が最も効くのかを解明することは意義が深い。そのためには、まず地盤と転圧ローラとの相互作用、すなわち車輪の走行性能を把握する必要がある。これには、ローラの制駆動状態における各スリップ率の下で車輪が走行するときに行ける沈下量、車輪にトルクを駆けたときに地盤反力として発生する制駆動力、車輪に作用する走行抵抗、および車輪が他の物体を牽引するための有効制駆動力がある。次に、車輪と地盤との境界面に発生する接地圧によって土を締め固める機構を把握し、ローラがそれぞれの制駆動状態で走行するときの地盤の転圧回数と地中の密度変化を調査する必要がある。

本論文の目的は、乾燥したまさ土地盤上を前後輪の両輪が制駆動状態で走行する2軸2輪式転圧ローラの走行性能について、シミュレーション解析する方法を提案するとともに、その解析結果について車両走行実験によって検証すること、および地盤の締固め密度を最大ならしめる転圧ローラ最適制駆動制御条件を地盤のローラ転圧実験によって明らかにすることである。

まず、シミュレーション解析を行うために必要な地盤-車輪系定数を実験解析によって決定し、トロコイド曲線で与えられる車輪の転動軌跡から各スリップ率に対する沈下量、制駆動力、有効制駆動力および走行抵抗を算定する解析手法を提案する。次に、2軸2輪式転圧車両を設計製作し、気乾燥状態のまさ土地盤上でスリップ率、両輪制駆動状態および転圧回数を変化させて走行実験を行い、車輪の沈下量、制駆動力および有効制駆動力などの走行性能について解析結果の妥当性を検証するとともに、これらの走行性能と転圧回数がまさ土地盤の締固めに及ぼす効果について調査する。その後、地盤の締固め密度を最大ならしめる転圧ローラ最適制駆動制御条件について考察する。

2. 地盤-車輪系定数の決定

(1) 平板載荷・除荷実験

試料砂として粒径4.75 mm以下に調整した気乾燥状態のまさ土を使用した。実験は土槽(長さ1.20 m, 幅0.10 m, 高さ0.35 m)の平面ひずみ状態で直径0.32 mの剛性車輪(線圧16.0 kN/m)を転圧回数0, 2, 4, 6, 8および10回のときに、各々、矩形板の幅 $b=0.05 \sim 0.10$ mと変化させて行った。従来、垂直応力 p (kPa)と沈下量 s (m)の関係は、矩形板の幅 b

表-1 地盤-車輪系定数

N	ρ_d g/cm ³	k_c kN/m ⁿ⁺¹	k_{c_r} kN/m ^{n_r+1}	k_ϕ kN/m ⁿ⁺²	k_{ϕ_r} kN/m ^{n_r+2}	n	n_r	m_i	a 1/m	c_0 ×10 ⁻²	c_1	c_2
1-F	1.484	76	2110	62.2	335	0.826	0.174	0.434	166	3.807	0.809	0.806
1-R	1.536	278	2060	76.6	372	0.723	0.174	0.434	190	2.728	0.801	0.803
2-F	1.569	483	1950	87.4	412	0.647	0.174	0.434	215	1.780	0.790	0.770
2-R	1.580	579	1900	91.3	432	0.619	0.174	0.434	227	1.242	0.785	0.717
3-F	1.592	674	1840	95.8	452	0.594	0.174	0.434	240	1.028	0.778	0.708
3-R	1.595	739	1820	96.8	466	0.579	0.174	0.434	249	0.888	0.776	0.685
4-F	1.598	781	1800	98.1	475	0.570	0.174	0.434	255	0.811	0.773	0.674
4-R	1.601	812	1780	99.3	482	0.563	0.174	0.434	259	0.729	0.771	0.661
5-F	1.602	829	1780	99.7	486	0.560	0.174	0.434	261	0.699	0.770	0.655
5-R	1.607	902	1730	101.7	502	0.546	0.174	0.434	272	0.607	0.765	0.642
6-F	1.610	950	1710	102.9	513	0.537	0.174	0.434	279	0.547	0.761	0.630
6-R	1.611	961	1690	103.4	516	0.535	0.174	0.434	281	0.531	0.760	0.628
7-F	1.611	966	1690	103.4	517	0.534	0.174	0.434	281	0.524	0.760	0.625
7-R	1.612	984	1680	103.8	521	0.531	0.174	0.434	284	0.506	0.759	0.622
8-F	1.613	1000	1670	104.2	525	0.528	0.174	0.434	286	0.492	0.758	0.620
8-R	1.614	1014	1660	104.6	528	0.526	0.174	0.434	288	0.479	0.756	0.618
9-F	1.614	1027	1660	104.6	531	0.524	0.174	0.434	290	0.464	0.756	0.611
9-R	1.615	1049	1650	105.0	534	0.522	0.174	0.434	292	0.448	0.755	0.608
10-F	1.616	1058	1640	105.5	536	0.520	0.174	0.434	294	0.428	0.753	0.602
10-R	1.616	929	1640	105.5	539	0.519	0.174	0.434	295	0.424	0.753	0.600

(m) の寸法効果を考慮した Bekker の経験式¹⁾を改良し、次式で与えられている。

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) s_0^n - \left(\frac{k_{c_r}}{b} + k_{\phi_r}\right) (s_0 - s)^{n_r} \quad (1)$$

ここに、

k_c, k_{c_r} : 粘着力 c に支配される定数 (kN/mⁿ⁺¹, kN/m^{n_r+1})

k_ϕ, k_{ϕ_r} : 内部摩擦角 ϕ に支配される定数 (kN/mⁿ⁺², kN/m^{n_r+2})

n, n_r : 沈下指数

b : 矩形板の幅 (m)

s_0 : 除荷開始時の沈下量 (m)

である。

実験解析によって求めた地盤-車輪系定数 $k_c, k_{c_r}, k_\phi, k_{\phi_r}, n, n_r$ とまさ土地盤の乾燥密度 ρ_d (g/cm³) との関係は次式で与えられる。

$$k_c = 14.1 + \frac{515(\rho_d - 1.46)}{-0.890(\rho_d - 1.46) + 0.216} \quad (2)$$

$$k_{c_r} = 2130 - \frac{787(\rho_d - 1.46)}{-4.80(\rho_d - 1.46) + 1.00} \quad (3)$$

$$k_\phi = 56.4 + \frac{515(\rho_d - 1.46)}{-3.69(\rho_d - 1.46) + 2.21} \quad (4)$$

$$k_{\phi_r} = 323 + \frac{515(\rho_d - 1.46)}{-5.35(\rho_d - 1.46) + 1.21} \quad (5)$$

$$n = 0.867 + \frac{5.25(\rho_d - 1.46)}{5.15(\rho_d - 1.46) - 3.16} \quad (6)$$

$$n_r = 0.174 \quad (7)$$

以上の実験式の適用範囲は、乾燥密度 $\rho_d = 1.40 \sim 1.70$ g/cm³ のゆるく堆積したまさ土地盤とする。

(2) 平板牽引試験

車輪と地盤とが相対的にスリップすることによって、境界面にせん断力が発生し車輪に推進力を与える。同時に、車輪には静的沈下量に加えて滑り沈下量が発生する。推進力を予測するためには、車輪と供試地盤との間のせん断抵抗とスリップ量の関係が必要となってくる。実験は平面ひずみ状態で当該剛性車輪を転圧回数 $N=0, 2, 4, 6, 8$ および10回のとき矩形板の幅 $b=0.30$ m を用いて接地圧 p を変化させて行った。

せん断抵抗 τ (kPa) と平板のスリップ量 j (m) の関係は漸近型を示し、次式で与えられる²⁾。

$$\tau = (m_c + m_i p) \{1 - \exp(-a j)\} \quad (8)$$

ここに、

p : 平均接地圧 (kPa)

m_c : 地盤と平板との間の付着力 (kPa)

m_i : 地盤と平板との間の摩擦係数

a : 変形係数 (1/m)

である。

平板載荷、除荷実験と同様の求め方より地盤一車輪系定数 m_c, m_t, a と乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) との関係は次式で示される。なお、気乾燥のまさ土を使用したことにより $m_c = 0 \text{ kPa}$ である。

$$m_t = 0.434 \quad (9)$$

$$a = 159 + \frac{525(\rho_d - 1.46)}{-8.82(\rho_d - 1.46) + 1.98} \quad (10)$$

次に、滑り沈下量 s_s (m) を予測する式として、平均接地圧 p (kPa) および土のスリップ量 j_s (m) の関係について次式が成立する³⁾。

$$s_s = c_0 p^{c_1} j_s^{c_2} \quad (11)$$

ここに、 c_0, c_1, c_2 は地盤一車輪系定数である。

同様に、これらの地盤一車輪系定数と乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) との関係は次式で示される。

$$c_0 = \left\{ 0.431 - \frac{5.25(\rho_d - 1.46)}{-0.683(\rho_d - 1.46) + 2.47} \right\} \times \left(\frac{1}{98} \right)^{c_1} \times 100^{c_2 - 1} \quad (12)$$

$$c_1 = 0.812 - \frac{0.0945(\rho_d - 1.46)}{1.00 - 4.80(\rho_d - 1.46)} \quad (13)$$

$$c_2 = 0.815 + \frac{0.346(\rho_d - 1.46)}{1.00 - 4.80(\rho_d - 1.46)} \quad (14)$$

(3) 地盤一車輪系定数

シミュレーション解析に使用する地盤一車輪系定数を決定するため、両輪制駆動状態で走行する2軸2輪式転圧ローラの最終走行実験（スリップ率：前輪 -37.2%，後輪 -49.4%）終了後、地表面においてコーン貫入実験を実施し、コーン指数を測定した。一方、まさ土の乾燥密度とコーン指数の関係について、モールド試験を実施した。

その結果、地盤の地表面における乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) は、コーン指数 q_c (kPa) の関数として次式で与えられることが判明した。

$$\rho_d = 1.46 + \frac{0.517(q_c - 121)}{2.03(q_c - 121) + 514} \quad (15)$$

従って、2軸2輪式転圧ローラのシミュレーション解析において使用する地盤一車輪系定数 $k_c, k_o, k_{cr}, k_{or}, m_c, m_t, a, c_0, c_1$ および c_2 は、上式で決定される乾燥密度 ρ_d を式(2)~(7)、(9)~(10)および(12)~(14)に代入して求めた。

一例として、両輪が制駆動状態で走行する場合の転圧回数 N （前輪通過後を $N-F$ 、後輪通過後を $N-R$ で示す）に対する地盤一車輪系定数を表-1に示す。

3. シミュレーション解析

(1) 車両走行システム

2軸2輪式転圧ローラの前後輪が、制駆動走行状態において、ゆるく堆積したまさ土地盤上で牽引走行している場合について、その車両走行力学を明らかにする。

図-1(a)(b)は、前後輪が共に駆動状態であるとき、および前後輪が共に制動状態にあるときの前後輪および車両に作用する諸力および車両諸元を示している。車両重量 W は車両の重心位置 G に作用し、前輪部の荷重 W_t 、後輪部の荷重 W_r はそれぞれ車軸中心 O_t, O_r に作用する。なお、車両重心 G の位置は、軸距 $\overline{O_t O_r}$ に至る垂直距離で表現される高さ h_s 、車両中心線からの偏心量 eD である。 D は前後輪軸間距離であり、 R_t, R_r は前後輪の半径である。後輪の駆動トルク $Q = Q_{rd}$ または制動トルク $Q = Q_{rb} < 0$ は後輪軸中心 O_r に作用する。車両の有効牽引力 $T = T_D$ または有効制動力 $T = T_B < 0$ の作用点 F の位置は、軸距 $\overline{O_t O_r}$ に至る高さ H 、車両中心線からの距離 $L > 0$ または $L < 0$ で与えられる。また、前輪軸中心 O_t には有効駆動力 T_{td} または有効制動力 T_{tb} が作用し、後輪軸中心 O_r には有効駆動力 T_{rd} または有効制動力 T_{rb} が作用する。車両トリム角 θ_t は、軸距 $\overline{O_t O_r}$ の水平面となす角度であり、前輪最下点 M_t における沈下量を s_t 、後輪最下点 M_r における沈下量を s_r とすると、

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{R_t - u_t + s_r - R_r}{D} \quad (16)$$

で与えられる。ここに、 u_t は前輪通過後のリバウンド量である。

なお、前後輪のローラ幅は、 B_t, B_r である。

a) 両輪駆動状態

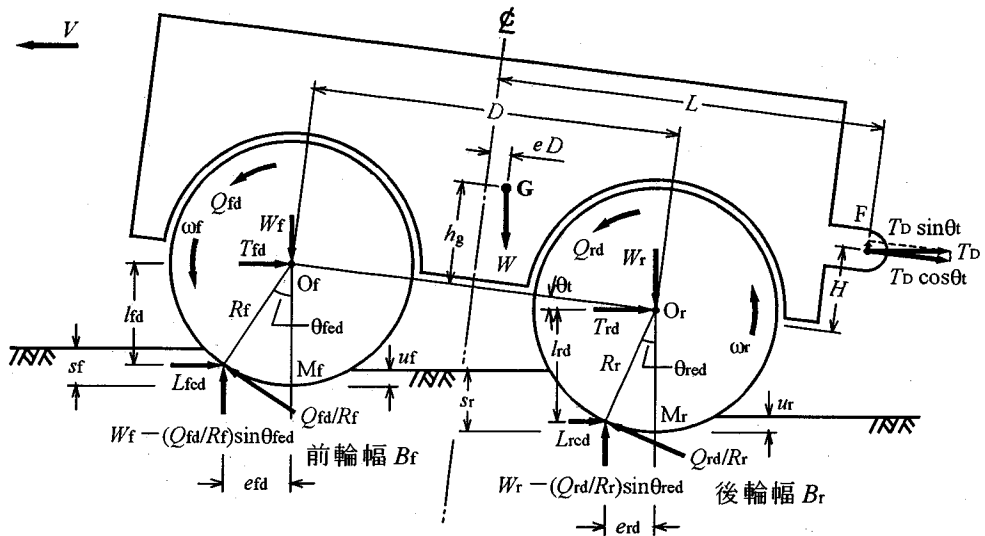
前輪接地部には、水平方向の走行抵抗（締固め抵抗） L_{tcd} 、鉛直方向の地盤反力 $W_t - Q_{td} \sin \theta_{ted}$ 、および接線方向の駆動力 Q_{td}/R_t が偏心量 $e_{td} = R_t \sin \theta_{ted}$ 、 $l_{td} = R_t \cos \theta_{ted}$ の位置に作用している。同様に、後輪接地部には、水平方向の走行抵抗（締固め抵抗） L_{rco} 、鉛直方向の地盤反力 $W_r - Q_{ro} \sin \theta_{reo}$ 、および接線方向の駆動力 Q_{ro}/R_r が偏心量 $e_{ro} = R_r \sin \theta_{reo}$ 、 $l_{ro} = R_r \cos \theta_{reo}$ の位置に作用している。

車両の進行速度を V とし、前後輪の回転角速度をそれぞれ ω_t, ω_r とすると、前後輪のスリップ率 i_{td}, i_{rd} はそれぞれ次式で与えられる。

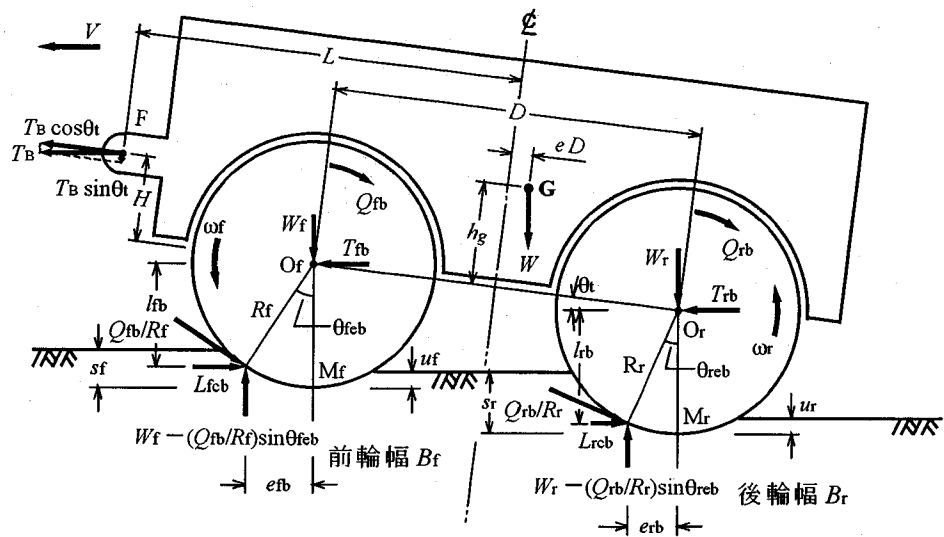
$$i_{td} = 1 - \frac{V}{R_t \omega_t} \quad (17)$$

$$i_{rd} = 1 - \frac{V}{R_r \omega_r} \quad (18)$$

次に、水平および鉛直方向の力の釣合式は次式で



(a) 前後輪駆動状態



(b) 前後輪制動状態

図-1 ゆるく堆積したまき土地盤上を走行する2軸2輪式転圧ローラに作用する諸力と寸法

与えられる。

$$T_D = \frac{Q_{fd} \cos \theta_{fed}}{R_f} + \frac{Q_{rd} \cos \theta_{red}}{R_r} - L_{fcd} - L_{rcd} = T_{fd} + T_{rd} \quad (19)$$

$$W = W_f + W_r \quad (20)$$

また、 O_r 点回りのモーメントの釣合より、次式が成立する。

$$W_f D \cos \theta_t - T_{fd} D \sin \theta_t - W \left\{ \frac{D}{2} - (eD + h_g \tan \theta_t) \right\} \cos \theta_t + H T_D \cos \theta_t - \left(L - \frac{D}{2} \right) T_D \sin \theta_t = 0 \quad (21)$$

上式において、 W_f を仮定し前式(20)より W_r を求める。その後、有効駆動力 T_{fd} 、 T_{rd} および走行抵抗 L_{fcd} 、 L_{rcd} を前式(1)、(8)および(11)より算定する⁴⁾。前式(19)より有効牽引力 T_D を算定しその値

表-2 転圧ローラの車両諸元

車両重量	W	4.76 kN
前輪半径	R_f	16 cm
後輪半径	R_r	16 cm
前輪幅	B_f	60 cm
後輪幅	B_r	60 cm
重心偏心率	e	0
重心高さ	h_g	19 cm
制駆動力 T の作用点 F の 車両中心線からの距離	L	± 55 cm
制駆動力 T の作用高さ	H	0 cm
後輪の周速度	$R_r \omega_r$	9.56 cm/s
前後輪軸間距離	D	60 cm
前輪の線荷重	$W/2B_f$	39.7 N/cm
後輪の線荷重	$W/2B_r$	39.7 N/cm

を式(21)に代入し、前に計算した値と一致するまで繰り返し計算を行う⁵⁾。

b) 両輪制動状態

前輪接地部には、水平方向の走行抵抗（締固め抵抗） L_{fcb} 、鉛直方向の地盤反力 $W_f - Q_{fb} \sin\theta_{feb}$ 、および接線方向の制動力 Q_{fb}/R_f が偏心量 $e_{fb} = R_f \sin\theta_{feb}$ 、 $l_{fb} = R_f \cos\theta_{feb}$ の位置に作用している。同様に、後輪接地部には、水平方向の走行抵抗（締固め抵抗） L_{rcb} 、鉛直方向の地盤反力 $W_r - Q_{rb} \sin\theta_{reb}$ 、および接線方向の制動力 Q_{rb}/R_r が偏心量 $e_{rb} = R_r \sin\theta_{reb}$ 、 $l_{rb} = R_r \cos\theta_{reb}$ の位置に作用している。

車両の進行速度を V とし、前後輪の回転角速度をそれぞれ ω_f 、 ω_r とすると、前後輪のスリップ率 i_{fb} 、 i_{rb} はそれぞれ次式で与えられる。

$$i_{fb} = \frac{R_f \omega_f}{V} - 1 \quad (22)$$

$$i_{rb} = \frac{R_r \omega_r}{V} - 1 \quad (23)$$

次に、水平および鉛直方向の力の釣合式は次式で与えられる。

$$T_B = \frac{Q_{fb} \cos\theta_{feb}}{R_f} + \frac{Q_{rb} \cos\theta_{reb}}{R_r} - L_{fcb} - L_{rcb} = T_{fb} + T_{rb} \quad (24)$$

$$W = W_f + W_r \quad (25)$$

同様に、 O_r 点回りのモーメントの釣合より、

$$W_f D \cos\theta_t - T_{fb} D \sin\theta_t - W \left\{ \frac{D}{2} - (eD + h_g \tan\theta_t) \right\} \cos\theta_t + HT_B \cos\theta_t - \left(L - \frac{D}{2} \right) T_B \sin\theta_t = 0 \quad (26)$$

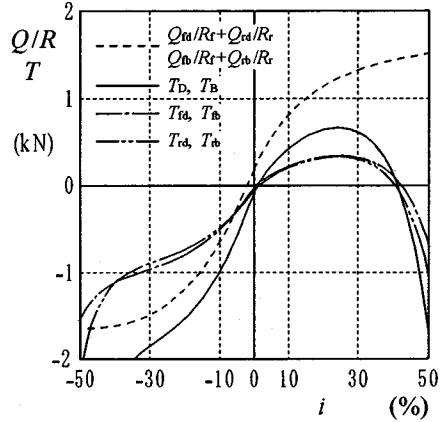


図-2 シミュレーション解析による前後輪の制駆動力の和 $Q/R = Q_{fa}/R_f + Q_{ra}/R_r$ 、 $Q_{fb}/R_f + Q_{rb}/R_r$ 、前後輪の有効制駆動力 $T = T_{fa}$ 、 T_{fb} および T_{ra} 、 T_{rb} 、車両の有効牽引力 T_D 、有効制動力と T_B と前後輪のスリップ率 i の関係

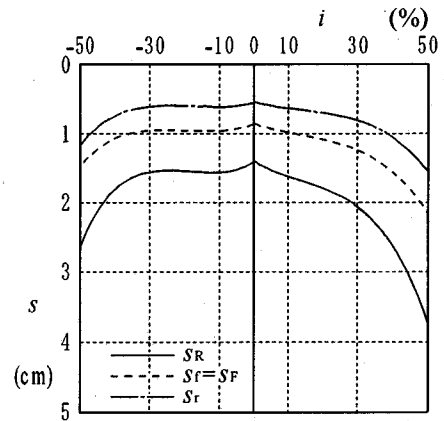


図-3 シミュレーション解析による前輪の沈下量 $s_f = s_F$ 、後輪の沈下量 s_r 、転圧ローラの全沈下量 s_R と前後輪のスリップ率 i の関係

が成立する。

上式において、 W_f を仮定し前式(25)より W_r を求める。その後、有効制動力 T_{fb} 、 T_{rb} および走行抵抗 L_{fcb} 、 L_{rcb} を前式(1)、(8)および(11)より算定する。前式(24)より有効牽引力 T_B を算定しその値を式(26)に代入し、前に計算した値と一致するまで繰り返し計算を行う。

(2) 解析結果

前章で求めた地盤-車輪係数および表-2 に示す車両諸元を用いて、当該2軸2輪式転圧ローラが両輪とも制駆動状態で走行している場合について、

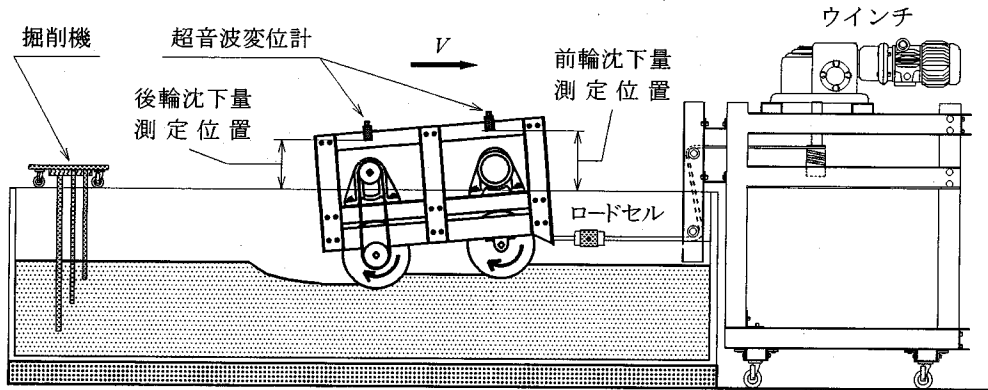


図-4 2軸2輪式転圧ローラの走行・転圧実験装置（制動状態）

シミュレーション解析を行った。一例として、転圧回数 $N=1$ において、両輪が同一のスリップ率 $i_a = i_{fa} = i_{ra}$ で駆動状態にあるとき、および同一のスリップ率 $i_b = i_{fb} = i_{rb}$ で制動状態にあるときの各車輪の制駆動力、有効制駆動力、沈下量、および車両の有効牽引力を算定した。なお、地盤-車輪系定数は、前輪に対しては $N=1-F$ の値を、後輪に対しては $N=1-R$ の値を用いて計算した。

図-2は、前後輪の制駆動力の和 $Q/R = Q_{fa}/R_f + Q_{ra}/R_r$ または $Q_{fb}/R_f + Q_{rb}/R_r$ 、前後輪の有効制駆動力 $T = T_{fa}$ 、 T_{ra} または T_{fb} 、 T_{rb} 、車両の有効牽引力 $T = T_b$ または T_B とスリップ率 $i = i_a$ または i_b の関係を示したものである。前後輪の制駆動力の和 Q/R は、すべてのスリップ率 i に対して車両の有効牽引力 T より大きくなっている。 $i = -2.2\%$ において、 $Q/R = 0 \text{ kN}$ となり、車両は純粹転動していることが明らかである。また、前後輪の有効制駆動力 T は、前後輪に対する地盤-車輪系定数の差異により、 i_a において $T_{fa} < T_{ra}$ 、 i_b において $T_{fb} > T_{rb}$ となっている。なお、車両の有効牽引力 T_b または T_B は、前式(19)と(24)より $T_{fa} + T_{ra}$ または $T_{fb} + T_{rb}$ で与えられており、 $i = 0.8\%$ において車両の有効牽引力 $T = 0 \text{ kN}$ となり、車両は自走状態にあることが明らかである。

図-3は、両輪が制駆動状態にあるときの前輪の沈下量 s_f 、後輪の沈下量 s_r および原地盤表面からの前輪ローラの沈下量 $s_{rf} = s_f$ と後輪ローラの沈下量 $s_{rr} = s_f - u_f + s_r$ を示したものである。制駆動状態において、 s_f が s_r よりも大きくなるのは、前後輪下での地盤-車輪系定数の差異によるものである。また、駆動状態における原地盤表面からの後輪ローラの沈下量 s_{rr} が、同じスリップ率 $i_a = i_b$ において、制動状態における値よりも大きくなるのは、車両通

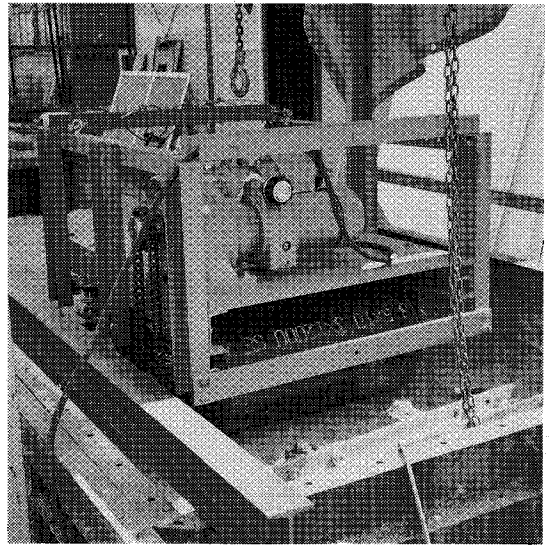


写真-1 4.76 kN 転圧ローラの実験状況

過に伴う地表面上のスリップ量 j_s が、入射角 θ_f 、離脱角 θ_r に対して、駆動時は $j_s = R(\sin\theta_f + \sin\theta_r) i_a / (1 - i_a)$ であるのに対し、制動時は $j_s = -R(\sin\theta_f + \sin\theta_r) i_b$ と小さくなるためである^{6), 7)}。

4. 2軸2輪式転圧ローラの走行実験

(1) 実験装置

まさ土地盤上における2軸2輪式転圧ローラの走行実験は、実験車両、土槽、ウインチ、クレーンおよび掘削装置からなる実験装置を用いて実施した。図-4は、自重4.76 kNの実験車両が3.7 kWのウインチで牽引され制動状態で走行している場合の実験

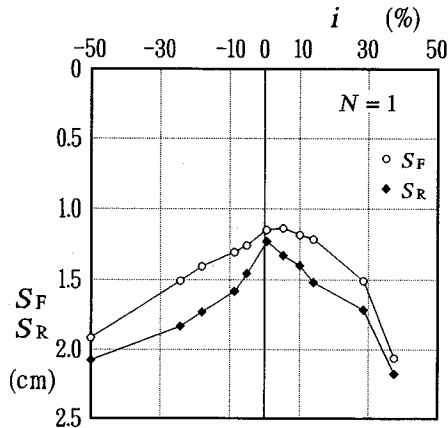


図-5 前後輪の沈下量 S_F, S_R とスリップ率 i に対する実験結果

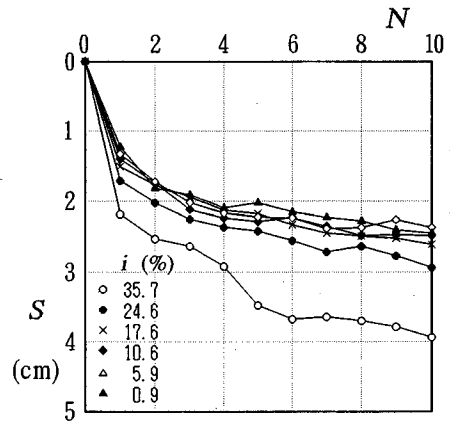
装置の概略図を示す。土槽は、長さ 540 cm、幅 150 cm、高さ 60 cm であり、前述したまま土の気乾燥試料を初期密度 $\rho_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$ になるように層厚 37 cm にわたって一様に充填している。転圧ローラの寸法は、長さ 110 cm、幅 90 cm、高さ 79 cm で、他の車両諸元は前表-2 に示した通りである。その構造は、写真-1 に示したように、一軸の前輪ローラと一軸の後輪ローラからなり、それぞれのローラをチェーンを介して制駆動する 0.75 kW の速度制御可能な電動モータ 2 台を搭載している。

(2) 実験方法

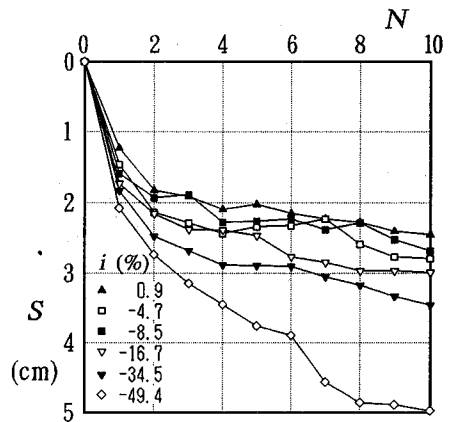
当該転圧ローラにおける前後輪の制駆動状態を左右するスリップ率を計 11 種類に変化させ、また、ローラの転圧回数 N を 1~10 回とし、前後輪の沈下量、前後輪の制駆動力と有効制駆動力、および車両の有効牽引力を測定した。なお、転圧ローラは、同一方向に走行させて実験を行った。走行実験は、すべての制駆動状態に対して前後輪の回転角速度が一定になるように初期設定をした。

転圧ローラの沈下量は、土槽端の水平な I ビーム上から超音波変位計またはリニアトランスデューサを用いて前後輪直下の位置を計測し、地表面の位置との差として算定した。前後輪に作用する制駆動トルクは、直径 30 mm の車軸に貼付したひずみゲージによって検出した。車両に作用する有効牽引力は、前後輪の車軸と同じ高さに設定した着力点に最大容量 4.9 kN のロードセルを設置し、ワイヤで転圧ローラを牽引するときの作用力として計測した。

実際のスリップ率は、転圧ローラの走行速度を計測し、前後輪の回転角速度より式(17)、(18)または



(a) 駆動状態



(b) 制動状態

図-6 後輪ローラの累積沈下量 S と転圧回数 N に関する実験結果

式(22)、(23)を用いて算定した。

(3) 実験結果

a) 沈下量

図-5 は、転圧回数 $N=1$ に対する原地盤表面からの前輪ローラの沈下量 $S_F = s_f$ と後輪ローラの沈下量 S_R の計測結果を制駆動状態における各スリップ率 i で整理したものである。原地盤からの後輪ローラの沈下量 S_R とは、前述したように、前輪ローラ通過後のわだちの深さ $s_f - u_f$ に後輪ローラの沈下量 s_r を加えたものであり、常に $S_R > S_F$ となっている。 S_F, S_R は、共にスリップ率 i の増加とともに増加する滑り沈下量によって増大している。図より明らかに、 S_F, S_R は、共にスリップ率 $i=0\%$ 付近で最小値を取っている。なお、以上の実験結果は、能勢ら⁸⁾ の行った一輪剛性車輪の実験結果とよく対応し

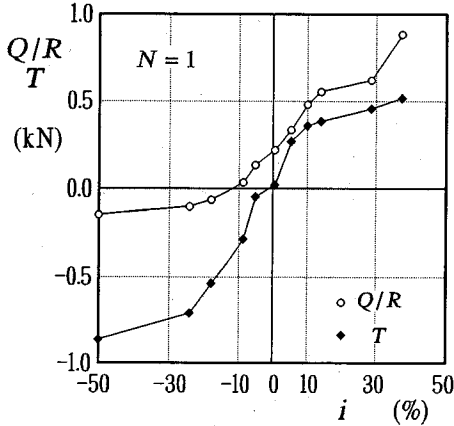


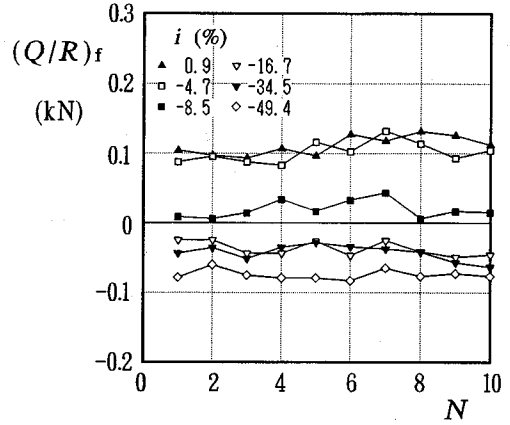
図-7 前後輪の制駆動力の和 $Q/R=Q_{fa}/R_f+Q_{ra}/R_r$, $Q_{fb}/R_f+Q_{rb}/R_r$, 車両の有効牽引力 $T=T_b$, 有効制動力 T_b と前後輪のスリップ率 i の関する実験結果

ており、前図-3 に示したシミュレーション解析結果ともよく対応している。

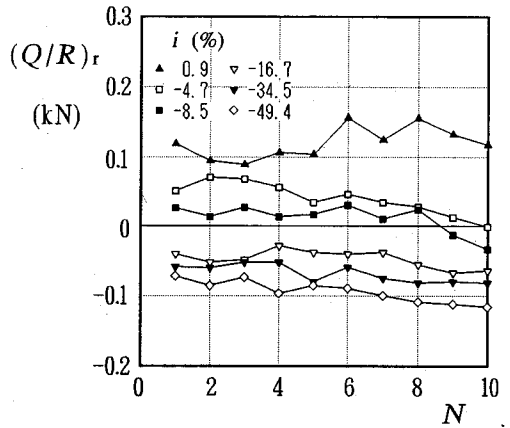
図-6(a) は、前後輪ローラがともに自走状態および5種類の駆動状態で走行しているときの後輪ローラの累積沈下量 S と転圧回数 N の関係を示したものである。自走状態におけるスリップ率は、 $i=i_{fa}=i_{ra}=0.9\%$ であり、駆動状態におけるスリップ率は、 $i=i_{fa}=i_{ra}=5.9, 10.6, 17.6, 24.6$ および 35.7% である。図-6(b) は、前後輪ローラがともに自走状態および5種類の制動状態で走行しているときの後輪ローラの累積沈下量 S と転圧回数 N の関係を示したものである。制動状態におけるスリップ率は、 $i=i_{fb}=i_{rb}=-4.7, -8.5, -16.7, -34.5$ および -49.4% である。図より明らかに、後輪ローラの沈下量 S は転圧回数 N の増加とともに増大していくが、その勾配 dS/dN は次第に減少している。また、スリップ率の絶対値 $|i|$ が大きくなるにつれて滑り沈下量が増大し、後輪ローラの沈下量 S は増加している。この現象は、ゆるく堆積したまき土のせん断変形中の体積減少、すなわちダイレイタンシーによるものである。なお、 $N=1$ において、 S の実験値は前図-3 に示したシミュレーション解析値とよく対応している。

b) 制駆動力、有効牽引力

図-7 は、転圧回数 $N=1$ 回における前後輪ローラの制駆動力の和 $Q/R=Q_{fa}/R_f+Q_{ra}/R_r$ または $Q_{fb}/R_f+Q_{rb}/R_r$, 車両の有効牽引力 $T=T_b$ または T_b とスリップ率 $i=i_a$ または i_b の関係について、実験結果の一例を示したものである。前後輪ローラの制駆動力の和 Q/R は、すべてのスリップ率 i に対して車両の有効牽引力 T より大きくなっている。ス



(a) 前輪ローラ



(b) 後輪ローラ

図-8 自走および制動状態における前後輪の制駆動力 Q/R と転圧回数 N に関する実験結果

リップ率 $i=0\%$ 付近で制駆動力、有効牽引力の勾配 $(Q/R)/i$ および T/i は共に大きいですが、スリップ率の絶対値 i が増加すると、それらの勾配は一定値に落ち着いて来る傾向にある。図より明らかに、 $i=-12\%$ 付近において、 $Q/R=0\text{ kN}$ となり、転圧ローラは純粋転動しており、 $i=0.9\%$ において $T=0\text{ kN}$ となり、転圧ローラは自走状態で走行している。なお、これらの実験結果は前図-2 に示したシミュレーション解析結果とよく対応している。

図-8(a) は、前後輪ローラが共に自走状態および5種類の制動状態で走行しているときに計測した前輪ローラの制駆動力 $(Q/R)_f=Q_{fa}/R_f$ または Q_{fb}/R_f と転圧回数 N との関係を示したものである。自走状態におけるスリップ率は、 $i=i_{fa}=i_{ra}=0.9\%$ であり、制動状態におけるスリップ率 $i=-4.7, -8.5\%$ においては駆動力 Q_{fa}/R_f が作用し、スリップ率

$i = -16.7, -34.5\%$, および -49.4% においては制動力 Q_{rb}/R_r が発生している。いずれの制駆動力 $(Q/R)_r$ も転圧回数 N の増加とともにわずかに増加している。図-8(b)は、前後輪ローラが共に自走状態および5種類の制動状態で走行しているときに計測した後輪ローラの制駆動力 $(Q/R)_r = Q_{rd}/R_r$ または Q_{rb}/R_r と転圧回数 N との関係を示したものである。自走状態におけるスリップ率は、 $i = i_{rd} = i_{ra} = 0.9\%$ であり、制動状態におけるスリップ率 $i = -4.7, -8.5\%$ においては駆動力 Q_{rd}/R_r が作用し、スリップ率 $i = -16.7, -34.5$, および -49.4% においては制動力 Q_{rb}/R_r が発生している。制駆動力 $(Q/R)_r$ は、自走状態を除いて、転圧回数 N の増加とともにわずかに減少する傾向にある。

図-9(a)は、前後輪ローラが共に5種類の駆動状態で走行しているときに計測した転圧ローラの有効牽引力 T_D と転圧回数 N との関係を示したものである。この場合、 T_D は N が増加してもほとんど変化せず、またスリップ率 $i = i_{rd} = i_{ra}$ による影響も明確ではない。図-9(b)は、前後輪ローラが共に5種類の制動状態で走行しているときに計測した転圧ローラの有効牽引力 T_B と転圧回数 N との関係を示したものである。この場合、 T_B は $N = 1 \sim 4$ 回の初期の転圧段階において多少変動するが、それ以降は次第に安定している。また、 $|T_B|$ はスリップ率 $|i| = |i_{rb}| = |i_{rb}|$ の増加とともに増大する傾向が見られる。

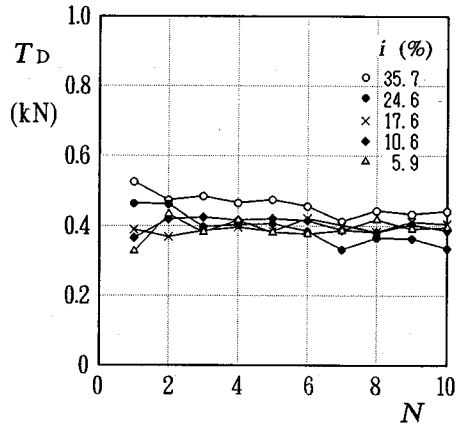
5. 2軸2輪式転圧ローラの転圧実験

(1) 実験装置

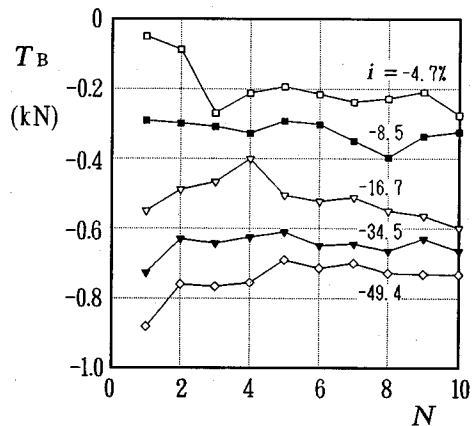
転圧実験装置は、前述した気乾燥のまさ土を充填した土槽と、走行実験に使用した2軸2輪式転圧ローラである。さらに、試料土であるまさ土の転圧後の乾燥密度の深さ方向の変化を計測するために、コーンペネトロメータを使用し、コーン指数 q_c を深さ方向に測定した。円錐コーンは、直径2.9 cmの底面積を有し、高さ5 cm、頂角 $\pi/6$ rad のものである。その後、まさ土の乾燥密度を求めた。

(2) 実験方法

転圧ローラの種々の走行状態、転圧回数およびスリップ率が、転圧後の地盤の強度に及ぼす影響について実験を行った。当該転圧ローラにおける前後輪の制駆動状態を同一とし、計11種類のスリップ率について、また、転圧ローラの通過回数 N を1~10回とし、ローラの平均線圧を $W/(B_r + B_r) = 39.7$ N/cm



(a) 駆動状態



(b) 制動状態

図-9 転圧ローラの有効牽引力 T_D 、有効制動力 T_B と転圧回数 N に関する実験結果

として転圧実験を実施した。転圧ローラの通過直後に地盤の深さ方向の強度変化を測定するため、コーン貫入試験を実施した。測定方法は、コーンペネトロメータのロッド先端に取り付けたコーンを供試地盤に鉛直方向に貫入させ、貫入力と貫入量を計測する。貫入力はロッドとハンドルの間にロードセルを取り付けて計測し、貫入量はワイヤ式線計変位計によって計測した。貫入力は、それぞれ貫入量 5, 8, 10 および 15 cm の値について読み取り、各深さにおけるコーン指数 q_c (kPa) を算定した。その後、各深さにおけるまさ土の乾燥密度 ρ_d を前式(15)によって算定した。

(3) 転圧回数と乾燥密度

供試地盤の表層部における乾燥密度と転圧回数との関係において、スリップ率 i が増大すると、転圧

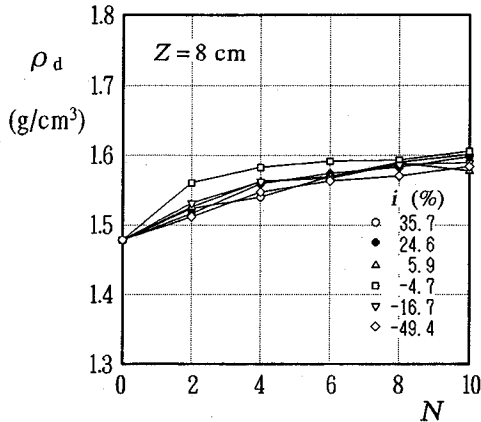


図-10 制駆動状態における乾燥密度 ρ_d と転圧回数 N に関する実験結果

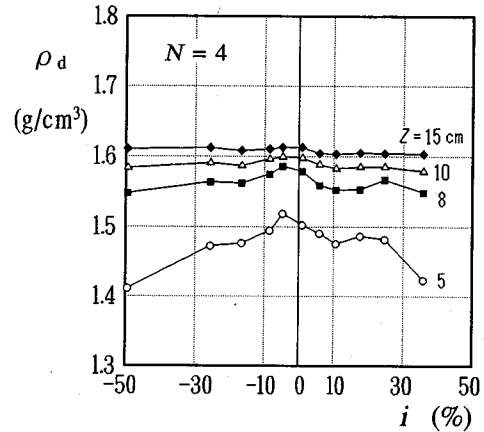


図-11 種々の深さ z に対する乾燥密度 ρ_d と前後輪のスリップ率 i に関する実験結果

ローラの走行による攪乱のため、乾燥密度はかなりばらついている。図-10は、一例として、深さ $z=8\text{ cm}$ において計測した乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) と転圧回数 N の関係を、6種類の制駆動走行状態について示したものである。一般に、 ρ_d は N の増加とともに漸増していくが、その勾配 $d\rho_d/dN$ は N の増加とともに減少している。この場合、 $i=-4.7\%$ において、乾燥密度はすべての転圧回数に対して常に最大値を示している。これらの現象は、交番せん断応力の繰返し数が転圧回数の増加とともに増大すること起因している。車輪式車両による地盤の転圧実験の結果、車輪直下の土の交番的な繰返しせん断変形に伴って発生する交番せん断応力が、土を締め固めるのに非常に有効であるとされている⁹⁾。

(4) スリップ率と乾燥密度

図-11は、一例として、転圧回数 $N=4$ において計測したまき土の乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) とスリップ率 i (%) との関係を各深さ $z=5, 8, 10$, および 15 cm に対して示したものである。図より明らかに、乾燥密度 ρ_d は、すべての深さ z において、前後輪が共に制動状態にあり、スリップ率 $i=i_{rb}=i_{fb}=-4.7\%$ において最大値を示している。なお、他の転圧回数においても同様な傾向が見られる。

上述の制動走行状態においては、前後輪の地盤との接地部において発生する正負の交番せん断応力が、まき土の締め固めに最も有効に作用したものと考えられる。通常、被牽引状態にある車輪の地盤との接地部においては、地盤内部に二つの土粒子の流動域が発生する。個々の流動域においては、主働破壊領域と受働破壊領域が交互に介在している。車輪の進行

方向に対して前方の流動域においては、土粒子は滑り線に沿って前方に移動し、その後車輪と地盤との境界面に沿って後方に移動するため、車輪接地部においては正のせん断応力が発生する。一方、車輪後方の流動域においては、土粒子は車輪と地盤との境界面に沿って前方に移動し、その後滑り線に沿って後方下方に移動するため、車輪接地部においては負のせん断応力が発生する⁷⁾。これらの現象は、被牽引状態にある車輪接地部の土粒子が車輪直下に位置する瞬間中心の回りを回転していることにより説明されている¹⁰⁾。制動状態にある転圧ローラの地盤との接地部においては、最適な交番せん断応力が地盤に伝達されると、ゆるく堆積した砂質地盤は砂粒子のダイレイタンシー効果によって土粒子密度の締め固めが促進されるのである。

なお、地盤の比較的浅い部分 $z=5\text{ cm}$ において、スリップ率 i がかなり増大するとき、地盤内に発生する交番せん断変形量が土粒子密度を増大させる上で余りにも大きすぎるため、締め固め効果は減少するのである。すなわち、地盤の土粒子密度は車輪の過剰なスリップによる攪乱現象、ニーディング効果によってダイレイタンシーが0となる臨界密度よりかなり減少するためである。

地盤の比較的深い部分 $z=10$ または 15 cm においては、スリップ率 i がかなり増大しても、地盤内に発生する交番せん断変形量が土粒子密度を増大させる上で適切であり、土粒子密度は臨界密度以上となり、地盤は効果的に締め固められているのである。すなわち、スリップ率と共に増大する交番せん断応力も深さ方向に増大する比較的大きな垂直応力の下で作用するため、乾燥密度に及ぼすスリップ率の影

響は減少するのである。

従って、2軸2輪車両である転圧ローラの前後輪が共にスリップ率 $i = -4.7\%$ において制動状態で走行しているとき、気乾燥のまま土地盤は最も効果的に締め固められることが明らかとなった。

(5) 深さ方向の乾燥密度

図-12は、一例として、転圧回数 $N=4$ において計測したまさ土の乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) と地盤の深さ z (cm) との関係を6種類の制駆動走行状態について示したものである。 ρ_{d0} は、供試地盤の初期密度であり、深さ方向に一定である。一般に、深さ $z=20$ cm までは、 ρ_d は z の増加とともに放物線的に増大している。地盤の比較的浅い部分 $z=5, 10$ cm ではスリップ率 i の影響をかなり受けているが、地盤の深い部分 $z=15, 20$ cm においてはその影響はほとんど発生せずほぼ一定値に収束している。また、深さ $z=5$ cm においては、スリップ率 i の増加とともに、乾燥密度 ρ_d はニーディング効果により初期密度 ρ_{d0} よりも低下していることが明らかである。なお、この現象は転圧回数が小さいほど顕著であり、転圧回数の増加とともに次第に収斂している。

6. 結論

自重 4.76 kN、線荷重 39.7 N/cm の2軸2輪式転圧ローラの走行性能が気乾燥のまま土地盤の締め固め特性に与える効果について、前後輪が共に制駆動走行する場合を対象として、シミュレーション解析を行うとともに、走行および転圧実験によって調査した。得られた新しい知見は以下のようにまとめることができる。

(1) 地盤一車輪係数 $k_c, k_{cr}, k_s, k_{sr}, n, n_r, m_c, m_f, a, c_0, c_1, c_2$ は、式(2)~(7), (9)~(10)と(12)~(14)に示すように、地盤表面の乾燥密度 ρ_d ($1.40 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.70 \text{ g/cm}^3$) の関数として与えることができる。

(2) シミュレーション解析結果および実験結果より、前後輪ローラの沈下量は共にスリップ率 $i \neq 0\%$ において最小値となり、また $|i|$ の増加と共に次第に増加する傾向にある。

(3) シミュレーション解析結果および実験結果より、前後輪ローラの制駆動力の和の絶対値 $|Q/R|$ および車両の有効牽引力の絶対値 $|T|$ は、前後輪のスリップ率の絶対値 $|i|$ が増加するとともに増大する。また、それらの勾配 $|d(Q/R)/di|$ および $|dT/di|$ は、 $|i|$ が増加するとともに減少する。

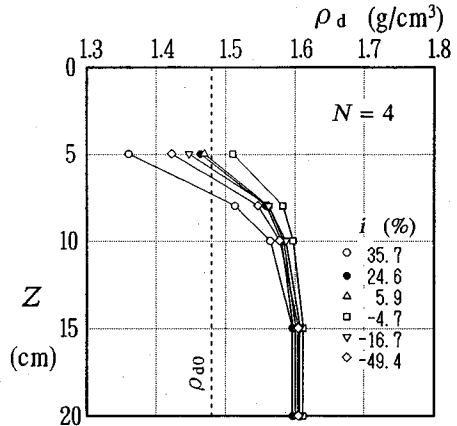


図-12 制駆動状態における深さ z と乾燥密度 ρ_d に関する実験結果

(4) まさ土地盤の乾燥密度を最大ならしめる転圧ローラの最適制御条件は、前後輪が共に -4.7% の制動条件で走行するように、ブルドーザ等によって被牽引走行させることである。このとき、地盤内部に発生する交番せん断応力が、土粒子密度を増加させる上でダイレイタンスー効果を極めて有効に発揮していることが判明した。

(5) 地盤の比較的浅い部分では、転圧後の乾燥密度に与えるスリップ率の影響は大きく転圧効果は低い。一方、地盤の比較的深い部分では、乾燥密度に与えるスリップ率の影響は小さく転圧効果は上昇する。

(6) 地盤の乾燥密度は、転圧ローラによる転圧回数が増加するほど上昇するが、その勾配は漸減する。また、その乾燥密度は、地盤のある深度までは、深さ方向に放物線的に増加する。

参考文献

- 1) M.G.Bekker : Off-the-road locomotion, The University of Michigan Press, pp.25-40, 1960.
- 2) 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 Terrain-Vehicle Systems, Torino, 1961.
- 3) 室達朗, 尾本清, 二村政明 : 湿地用ブルドーザの走行性能 — 模型車両実験 —, 土木学会論文集, 第387号/VI-9, pp.151-157, 1988.
- 4) 室達朗著 : テラメカニクス — 走行力学 —, 技報堂出版, pp.31-74, 1993.
- 5) T.Muro : Tractive performance of a four-wheel drive vehicle moving up a sloped weak terrain, Proc. of 6th European ISTVS Conference, Vol.2, pp.806-822, 1994.
- 6) T.Muro : Tractive performance of a driven rigid wheel on soft ground based on the analysis of soil-wheel interaction,

- J. of Terramechanics*, Vol.30, No.5, pp.351-369, 1993.
- 7) T.Muro : Braking performances of a towed rigid wheel on a soft ground based on the analysis of soil-compaction, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol.33, No.2, pp.91-104, 1993.
- 8) Y.Nohse, T.Shikanai, K.Hashiguchi, M.Ueno, H.Izumi and F.Koyama : A measurement of basic mechanical quantities of off-the-road traveling performance, *Proc. 10th Int. Conf. of the ISTVS*, pp.545-556, 1990.
- 9) S.Shaaban : Compaction of sand using ordinary off-road vehicles, *Proc. 8th Int. Conf. of the ISTVS*, pp.725-735, 1984.
- 10) J.Y.Wong : Behaviour of soil beneath rigid wheels, *J. of Agric. Engng. Res.*, Vol.12, No.4, pp.257-269, 1967.

(1995. 7. 3 受付)

OPTIMUM TRAFFICABILITY CONTROL SYSTEM OF A TWO-AXLE, TWO-WHEEL ROAD ROLLER DURING DRIVING AND BRAKING ACTION

Tatsuro MURO, Yasuo HOSHIKA and Soichiro KAWAHARA

Several travelling and compaction tests were executed by use of a two-axle, two-wheel road roller during driving and braking action on an air-dried weak decomposed granite soil. The experimental data were compared with the simulation analytical results. It is clarified that the amounts of sinkage, the driving and braking forces, and the effective driving and braking forces of the front and rear roller increase with the increment of the absolute value of the slip ratio or skid, and the optimum traffic condition of the road roller to obtain the maximum compaction density of the terrain is that both the front and rear roller are operating at -5% skid during braking action.