

# 高リフト厚のまさ土に対する遠心加振機を搭載したローラと履帶式車両の振動転圧効果

室達朗<sup>1</sup>・吉岡伸朗<sup>2</sup>・三好宗仁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工修 NTT株式会社 四国支社法人営業本部 (〒790 松山市1-4-3)

<sup>3</sup>正会員 工修 NTT株式会社 徳島支店企画部 (〒770 徳島市西大工町2-5-1)

本研究の目的は、新しい転圧機械を開発するため、総重量と同じにした2軸2輪式ローラと履帶式車両を使用した遠心加振機による振動転圧実験結果より、高リフト厚におけるまさ土の線荷重と面荷重による転圧機構を解析するとともに、その締固め効果について比較検討することである。その結果、履帶式車両は、2軸2輪式ローラと比較して、振動転圧後のコーン指数と締固め密度は浅層部から中間層にわたってかなり高い値を示し、深層部においても十分高い値を得ている。特に、深層部における最大衝撃力の水平／鉛直成分比が大きく、土のダイレイタンシー効果によって体積収縮する適切なせん断ひずみを発生させ、高リフト厚全層にわたって有効な締固めが達成されている。

**Key Words :** vibro-compaction, roller, tracked vehicle, high lift, centrifugal oscillator

## 1. はじめに

21世紀初頭における土木施工技術は、従来工法の改善だけに留まらず、さらに飛躍的な施工技術の発展がなされるパラダイム転換期の到来と位置付けることができる。特に、近年においては、環境に優しくかつ施工速度を向上させるための新急速施工法が強く求められている。例えば、R C D (Roller Compacted Dam Concrete) 工法<sup>1,2)</sup>などで要求されている高リフト厚の材料の急速締固め工法において、顕著な締固め効果を發揮するための新しい転圧機械を開発することが、大変重要な課題である。従来、鉛直方向の起心力を発生させる起振機を搭載した振動ローラ<sup>3,4)</sup>では、十分なリフト厚をとることが不可能であり、さらに地表面部分では過転圧のために密度が増加しない、などの欠点を有している。

本研究の目的は、新しい転圧機械を開発するため実施したローラと履帶式車両を使用した基礎振動転圧実験結果より、高リフト厚での線荷重と面荷重による転圧機構を解析するとともに、その締固め効果について比較検討することである。一般に、最大締固め効果の得られる最適振動数は、当該地盤と振動転圧機との共振振動数より若干低いことが知られている<sup>5)</sup>。

ここでは、総重量を約10kNと同じにした2軸2

輪式ローラと履帶式車両に、それぞれ同一の振動数56.8 Hz、遠心力7.35 kNの遠心加振機を搭載し、リフト厚約80 cmのまさ土地盤上を走行させた場合の両者の振動転圧効果について比較実験を行っている。まず、無振動時と振動時における地表面の沈下量と深さ方向のコーン指数を各転圧回数毎に計測するとともに、深さ方向の締固め密度が転圧回数によって如何に変化するかについて考察している。また、地中に埋設した土圧計、鉛直・水平振動加速度計を用いて、ローラおよび履帶式車両の走行時に発生する地中応力伝播特性を各転圧回数毎に計測している。その後、深さ方向の土圧分布については Boussinesq の理論値との比較を行っている。さらに、鉛直・水平振動加速度計を用いて深さ方向の水平／鉛直加速度比を算定し、水平方向の交番せん断応力が深さ方向に如何に有効に作用しているかについて考察する。以上の土質力学的考察により、まさ土地盤の高リフト厚における締固め効果は、遠心加振機を搭載した場合、ローラと履帶式車両においてどちらが優位であるかについて比較検討する。

## 2. 実験方法と試験方法

### (1) まさ土地盤

試料土として愛媛県松山市産の比重2.66のまさ土を選定し、気乾燥状態のまさ土の最大粒径が4.75

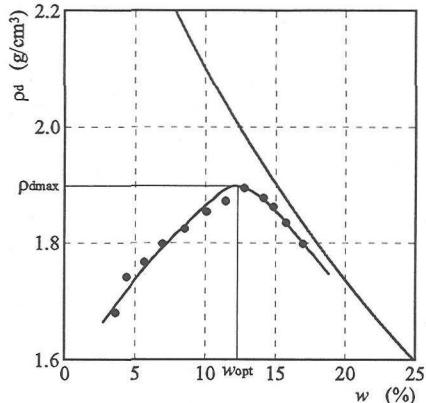


図-1 まさ土の乾燥密度  $\rho_d$  と含水比  $w$  の関係

mm となるようにふるい分けた。粒度分析の結果、平均粒径は 0.78 mm、均等係数は 12.0、曲率係数は 3.0 であった。JISA 1210 試験方法 1.1.a による突き固め試験の結果、図-1 に示すように、最適含水比は  $w_{opt}=12.8\%$ 、最大乾燥密度は  $\rho_{dmax}=1.90\text{ g}/\text{cm}^3$  であり、そのときの飽和度は 85.1% であった。なお、このときの土の単位体積当たりの締固めエネルギーは、 $551.3\text{ kNm}/\text{m}^3$  と算定された。

最適含水比に調整した試料土を種々の打撃エネルギーで同一のモールド内に 3 層に分けて突き固め、頂角  $\pi/6\text{ rad}$ 、高さ 5 cm、底面積  $6.61\text{ cm}^2$  のコーンを使用してコーン貫入試験を実施した。その結果、試料土の湿潤密度  $\rho_t(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、乾燥密度  $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$  とコーン指数  $q_c(\text{kPa})$ との間には、次式に示す実験式が成立することが判明した。

$$\begin{aligned}\rho_t &= 0.8639 q_c^{0.109} \quad (r=0.997) \\ \rho_d &= \frac{\rho_t}{100+w_{opt}} \times 100 = 0.766 q_c^{0.109} \quad (1)\end{aligned}$$

ここに、 $r$  は相関係数である。さて、試験用まさ土地盤は、最適含水比となるように加水調整したまさ土を、長さ 540 cm、幅 150 cm、高さ 100 cm の鋼製パネル板を組み合わせた長大土槽に深さ 80 cm に達するまで、高さ 100 cm より自由落下させ、一定の湿潤密度  $\rho_t=1.45\pm 0.03\text{ g}/\text{cm}^3$  になるように慎重に充填して製作した。その後、地表面を平滑に均して振動転圧試験に供した。

## (2) 遠心加振機

起振機として、振動数 56.8 Hz、周期 17.6 ms、遠心力  $F=7.35\text{ kN}$  の 3 相 200 V、出力 0.75 kW の遠心加振機を選定した。この遠心加振機は、水平軸の回りに計 14 枚の偏心マスを回転数 3,410 r.p.m. で回転

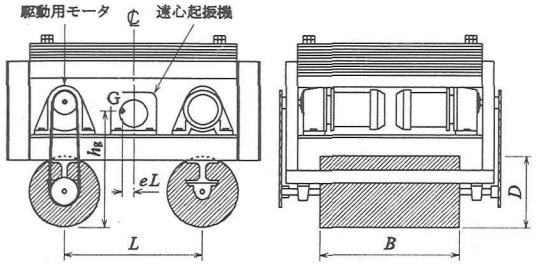


図-2 2軸2輪式ローラ

表-1 2軸2輪式ローラの車両諸元

車両総重量	$W$	10.28 kN
車両重心偏心率	$e$	0.002
車両重心高さ	$h_g$	53.3 cm
車輪幅	$B$	60.0 cm
車軸間隔	$L$	60.0 cm
車輪直徑	$D$	32.0 cm
線圧		85.8 N/cm
車速	$V$	4.61 cm/s

させることによって鉛直面内の  $2\pi\text{ rad}$  方向に遠心力を作用させることができる。従って、2軸2輪式ローラまたは履帶式車両の進行方向に対して直角方向に遠心加振機の水平軸を設定することにより、各車両の進行方向に作用する水平振動力  $F_H(\text{kN})$  および鉛直振動力  $F_V(\text{kN})$  を載荷させることができる。それぞれの振動波形は、偏心マスの角速度  $\omega(\text{rad}/\text{s})$ 、時間  $t(\text{s})$  に対して次式で与えられる。

$$\begin{aligned}F_H &= F \sin \omega t \\ &= 7.35 \sin 113.7 \pi t \quad (2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_V &= F \cos \omega t \\ &= 7.35 \cos 113.7 \pi t \quad (3)\end{aligned}$$

## (3) ローラによる振動転圧実験

試作した 2 軸 2 輪式ローラの構造図面を図-2 に、その車両諸元を表-1 に示す。遠心加振機を搭載した車両総重量は 10.3 kN であり、前後輪ローラに作用する線荷重は 85.8 kN/cm である。ローラの直徑は 32.0 cm、幅は 60.0 cm であり、2 台の 0.75 kW の 3 相 200 V の電動モータにより前後輪ローラの両輪駆動とした。すでに、前報<sup>④</sup>で述べたように、気乾燥状態のまさ土地盤に対しては、前後輪ローラ共制動状態でスリップ率 -4.7 % で走行させた場合が最も締固め効果が大きくなるが、本実験においては、実用性を勘案して両輪駆動状態で自走させて転圧することとした。当該車両の走行速度は、履帶式車両

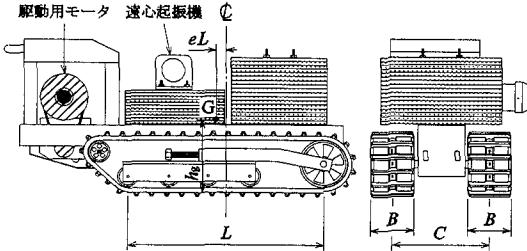


図-3 履帶式車両

と同じにするため、 $4.61 \text{ cm/s}$ とした。なお、まさ土地盤に対する転圧回数 $N$ 回とは、長大土槽の中央部分の同一走行レーンを2軸2輪式ローラが $N$ 回往復したことを意味する。

試験手順としては、まず $N=0$ 回のみ地表面に木板を敷き、その上でローラを走行させ、ある程度地表面が安定してローラが自走可能となるようにした。また、最初から振動転圧させると沈下量が急増し、ローラの走行抵抗が増大するため、まず、無振動状態で $N=1\sim10$ 回まで転圧し、その後振動状態で $N=11\sim20$ 回まで振動転圧することとした。なお、この実験方法は、実際の施工現場において、まき出された土砂を最初ブルドーザで転圧した後振動ローラを用いて所定の転圧密度に達するまで締め固める工法に準拠したものである。この場合、振動転圧による土の単位体積当たりの締め固めエネルギー $E$ は、次式で示す石原ら<sup>7)</sup>の計算式に、後述する土槽底面からの高さ $H=60 \text{ cm}$ において計測した鉛直方向の変位振幅 $\beta_v=4.46 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、車両総重量 $W=10.3 \text{ kN}$ 、鉛直振動力 $F_v=7.35 \text{ kN}$ 、振動数 $f=56.8 \text{ Hz}$ 、転圧回数 $N_T=2 N=20$ 回、車両速度 $V=4.61 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、転圧幅 $B=0.60 \text{ m}$ 、リフト厚 $h=0.80 \text{ m}$ を代入すると $64.0 \text{ kNm/m}^3$ と算定された。

$$E = 2\beta_v(W + \frac{F_v}{2}) \cdot \frac{fN_T}{VBh} \quad (4)$$

各転圧回数毎に、地表面の沈下量を計10ヶ所、深さ方向のコーン指数を計5ヶ所、2軸2輪式ローラ走行レーン中央部において計測した。なお、コーン貫入試験では、前述したコーンを使用し、一定の貫入速度 $3.42 \text{ cm/min}$ で、土槽底面までの各深さにおける貫入抵抗を連続的にロードセルを用いて自動計測できるシステムを開発した。さらに、土中の所定の深さに前もって埋設しておいた土圧計および水平・鉛直加速度計によって、2軸2輪式ローラの各走行時の地中応力および振動状態をリアルタイムで計測することとした。土圧計は直径 $30 \text{ mm}$ 、厚さ $6$

表-2 履帶式車両の車両諸元

車両総重量	$W$	10.89 kN
車両重心偏心率	$e$	0.003
車両重心高さ	$h_g$	34.0 cm
履帶幅	$B$	20.0 cm
履帶接地長	$L$	91.0 cm
履帶間隔	$C$	45.5 cm
前輪半径	$R_f$	12.0 cm
後輪半径	$R_r$	9.0 cm
下転輪数		4
下転輪半径	$R_m$	8.0 cm
グラウサ高さ	$G_h$	2.5 cm
グラウサピッチ	$G_p$	7.0 cm
平均接地圧	$p$	29.8 kPa
車速	$V$	3.75 cm/s

mm の円盤型であり、その最大容量は $196 \text{ kPa}$ のものを使用した。また、加速度計は3成分を計測できる圧電子型のものであり、その最大容量は $1,000 \text{ G}$ 、感度 $3.4 \text{ pc/G}$ 、応答周波数 $8,000 \text{ Hz}$ のものを使用した。

#### (4) 履帶式車両による振動転圧実験

ゴム製履帯を装着したたわみ性履帶式車両の構造図面を図-3に、その車両諸元を表-2に示す。遠心加振機を搭載した車両総重量は、重錘を用いて調整し $10.9 \text{ kN}$ とした。履帯の接地長は $91 \text{ cm}$ 、幅は $20 \text{ cm}$ であり、平均接地圧は $29.8 \text{ kPa}$ である。当該履帶式車両の往復走行においては互いに先行する轍を跨いで走行させることとし、 $N$ 回往復させたときの転圧回数を $N$ 回と算定した。 $0.75 \text{ kW}$ の3相 $200 \text{ V}$ 電動モータによって後輪スプロケットを駆動させることとし、車両の走行速度は2軸2輪式ローラの速度と同じになるように $3.75 \text{ cm/s}$ に設定して自走走行させることとした。走行形態はローラの場合と同様に、実際の締め工法を勘案し、転圧回数 $N=1\sim10$ 回では無振動転圧とし、 $N=11\sim20$ 回で振動転圧させることとした。この場合、振動転圧による土の単位体積当たりの締め固めエネルギー $E$ は、後述する土槽底面からの高さ $H=60 \text{ cm}$ において計測した鉛直方向の変位振幅 $\beta_v=1.09 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、車両総重量 $W=10.9 \text{ kN}$ 、鉛直振動力 $F_v=7.35 \text{ kN}$ 、振動数 $f=56.8 \text{ Hz}$ 、転圧回数 $N_T=2 N=20$ 回、車両速度 $V=3.75 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、転圧幅 $B=0.883 \text{ m}$ 、リフト厚 $h=0.80 \text{ m}$ を上式(4)に代入すると $13.6 \text{ kNm/m}^3$ と算定された。

各転圧回数毎に、地表面の沈下量として、初期地

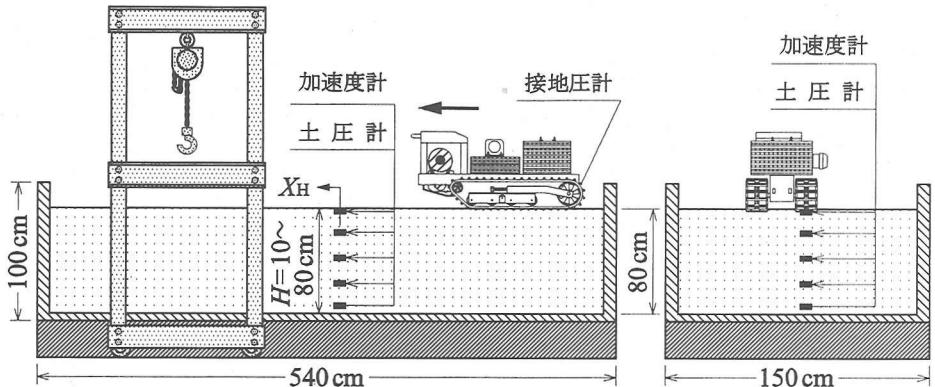


図-4 各種計測器の埋設位置

表面からの履帯のわだち部分におけるグラウサ突起部の位置を計10ヶ所計測した。また、前述したコーン貫入試験を履帯のわだち部分直下において計5ヶ所の位置で実施し、深さ方向のコーン指数の変化を計測した。

地中に埋設した各種計測器は、図-4に示すように、前述の2軸2輪式ローラの場合と同様に、土槽中央部において土槽底面からの高さ $H$ (cm)の位置に設置した。土圧計および加速度計の埋設位置は、それぞれ $H=10, 20, 40, 65, 80$ cmの5ヶ所および $H=10, 45, 60, 80$ cmの4ヶ所とした。なお、履帶式車両の走行時の履帯に作用する接地圧分布を各転圧回数毎に計測するために、グラウサ突起部分に埋め込んだ土圧計を試作した。

### 3. 実験結果

#### (1) 地表面沈下量と転圧回数

2軸2輪式ローラおよび履帶式車両の走行に伴って発生する地表面の沈下量 $S$ (cm)と転圧回数 $N$ との関係を図-5に示す。 $N=1\sim10$ 回の無振動転圧においては、いずれも $N$ の増加とともにある値に収束していくが、振動転圧に移行する $N=11\sim20$ 回において、地表面の沈下量は急激に増加し、 $N$ の増加とともに収束する傾向にある。履帶式車両は、往路と復路は履帶幅相当分だけずらして転圧するため一往復で約80cmの幅が転圧されるが、2軸2輪式ローラでは往路も復路も同じ場所を転圧するので一往復での転圧幅は60cmである。2軸2輪式ローラと履帶式車両とでは同じ転圧回数でも通過回数が異なるため両者の沈下量を単純に比較することは出来ない。例えば、同一通過回数後の沈下量を比較した場合、無振動転圧では履帶式車両の往復10回転圧(通過回数10回)と2軸2輪式ローラの往復5回

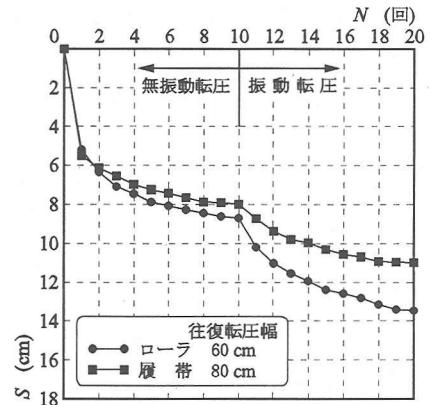


図-5 沈下量 $S$ と転圧回数 $N$ の関係

転圧(通過回数10回)に対してほぼ同じ沈下量を示しているが、振動転圧で同様な比較を行った場合、2軸2輪式ローラの沈下量の方が大きくなっている。その原因是、2軸2輪式ローラでは同一のレンンを走行させているため、振動転圧時の加振力による大きな線荷重の増加により進行方向と直行する両側の未だ締め固まっていない地盤への側方流動により地表面沈下量は見かけ上増加したものと考えられる。従って、地表面沈下量のみから両車両の転圧効果を評価することは不可能である。

#### (2) 深さ方向のコーン指数と転圧回数

まず、転圧開始前の供試地盤であるまさ土地盤の深さ方向のコーン指数について、前述した方法で、コーン貫入試験を実施した。その後、各車両走行による $N$ 回の転圧後、コーン貫入試験を各5ヶ所で行い、コーン指数と深さとの関係を各転圧回数毎に計測した。図-6は、2軸2輪式ローラに対する平均コーン指数 $q_c$ (kPa)と深さ $z$ (cm)の関係を各転圧回

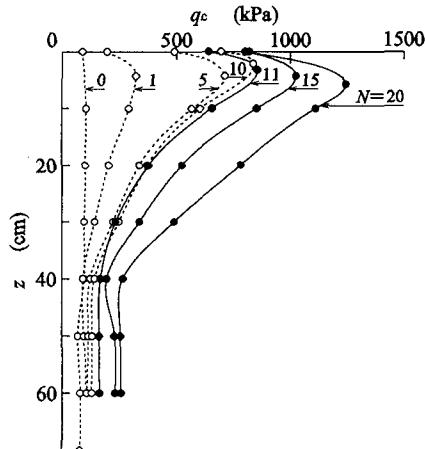


図-6 各転圧回数  $N$ に対するコーン指數  $q_c$ と深さ  $z$ の関係（2軸2輪式ローラ）

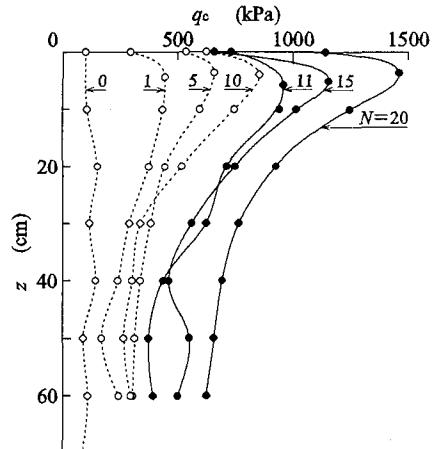


図-7 各転圧回数  $N$ に対するコーン指數  $q_c$ と深さ  $z$ の関係（履帶式車両）

数  $N$ に対して示したものである。 $N=0$ の値は初期設定されたまさ土地盤のコーン指數と深さとの関係であり、深さ方向にほぼ均等な地盤強度を示しており、試料土であるまさ土が均一にまき出されていたことが分かる。 $N=1\sim 10$ 回の無振動転圧では、 $N$ の増加とともにコーン指數  $q_c$ は一般に増加するが、各  $q_c$ の値は地表面からの深さ  $z$ とともに次第に増加し、ある  $z_m$  の値を通過すると急激に減少している。さらに、 $N=11\sim 20$ 回の振動転圧において、 $q_c$  の値は一般に  $N$  の増加とともにさらに増加する傾向を示している。 $q_c$  の最大値を示す  $z_m$  の位置は  $N$  の増加とともにより深くなるが、それぞれの地表面からの深さの平均値は  $3.9 \pm 1.2$  cm である。 $N=20$ 回において、 $q_c$  は  $z_m=5.7$  cm において最大値  $q_{cmax}=1,247$  kPa を示し、転圧効果がある深さに集中していることが分かる。この傾向は、ローラ転圧の特徴であり、浅層部では過転圧によるニーディング現象により地盤強度が低下するのに対し、深層部では十分な応力伝播が得られないため地盤強度は増加しないことによるものである。

図-7は、履帶式車両に対する平均コーン指數  $q_c$  (kPa) と深さ  $z$  (cm) の関係を各転圧回数  $N$  に対して示したものである。 $N=0$ の値は前述のものと同一である。 $N=1\sim 10$ 回の無振動転圧では、同様に  $N$  の増加とともにコーン指數は増加するが、 $q_c$  の値は地表面からの深さとともに急増し、ある  $H_m$  において最大値  $q_{cmax}$  を有し、さらに深くなると次第に減少している。2軸2輪式ローラと比較して、それぞれの  $q_{cmax}$  はかなり増加している傾向が見られる。さらに、 $N=11\sim 20$ 回の振動転圧において、 $q_c$  の値は一般に  $N$  の増加とともにさらに増大する傾向を示

している。それぞれの  $q_{cmax}$  を示す地表面からの深さの平均値は  $4.3 \pm 0.9$  cm である。 $N=20$ 回において、 $q_c$  は地表面で  $1,140$  kPa を示し、 $z_m=3.6$  cm において最大値  $q_{cmax}=1,461$  kPa をとり、転圧効果がかなりの深さまで伝達していることが分かる。この傾向は、履帶式車両の特徴であり、地表面の浅層部における地盤強度が十分に高く、その値がある深さにまで持続している。その後、深さの増加とともに地盤強度は減少していくが、依然として2軸2輪式ローラと比較して高いコーン指數を示していることが明らかである。

### (3) 深さ方向の締固め密度と転圧回数

前述したまさ土地盤に対する乾燥密度  $\rho_d$  とコーン指數  $q_c$  の関係式(1)を用いて、前節で述べた2軸2輪式ローラと履帶式車両通過後の  $q_c$  の深さ方向の分布を乾燥密度  $\rho_d$  の分布に換算することができる。この場合、2軸2輪式ローラ、履帶式車両共  $N=0$ における  $q_c$  の値は深さ  $z$  とともに殆ど増加しないので、深さ方向の上載荷重の影響はきわめて少ないと判断した。図-8は、2軸2輪式ローラに対する締固め密度である乾燥密度  $\rho_d$  ( $g/cm^3$ ) と深さ  $z$  (cm) の関係を、各転圧回数  $N$  に対して示したものである。いずれの  $N$  の値に対しても、一般に、 $\rho_d$  はある深さで最大値を示しており、深層部での締固めは十分に行われていない。無振動転圧完了時の  $N=10$ 回目では、 $\rho_d$  は  $z_m=2.9$  cm において最大値  $\rho_{dm}=1.60$   $g/cm^3$  を示した後減少し、一定値  $\rho_{dr}=1.30$   $g/cm^3$  に漸近している。一方、振動転圧完了後の  $N=20$ 回目では  $\rho_d$  は  $z_m=6.1$  cm において  $\rho_{dm}=1.66$   $g/cm^3$  を示した後減少し、 $\rho_{dr}=1.40$   $g/cm^3$  に漸近している。

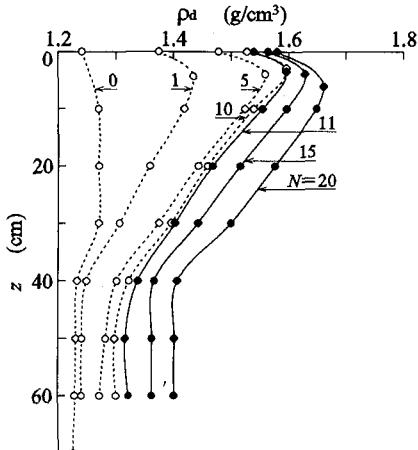


図-8 各転圧回数  $N$  に対する乾燥密度  $\rho_d$  と深さ  $z$  の関係（2軸2輪式ローラ）

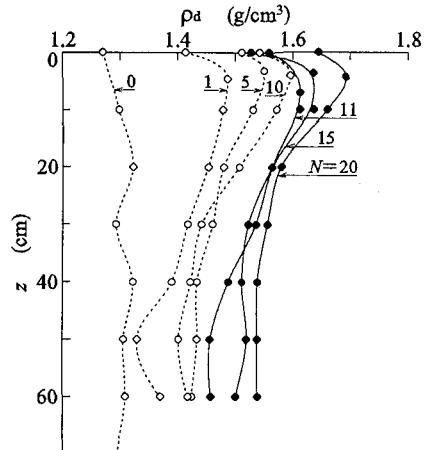
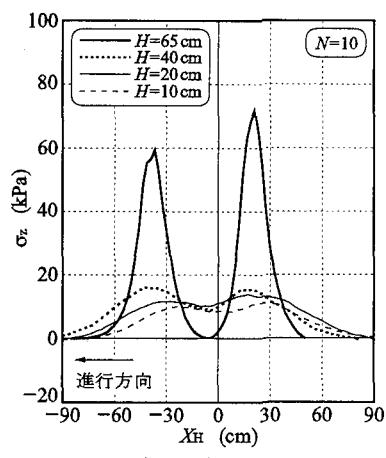


図-9 各転圧回数  $N$  に対する乾燥密度  $\rho_d$  と深さ  $z$  の関係（履帶式車両）

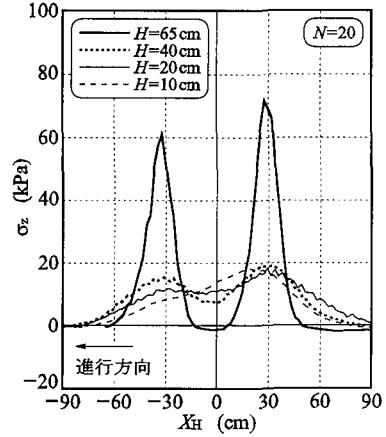
また、各深さ毎の  $\rho_d$  は無振動、振動時とも  $N$  の値とともに増加し、ある一定値に漸近している。これらの深さ  $z$  と締固め密度  $\rho_d$  の関係について、藤井ら<sup>8,9)</sup>は振動ローラによるれき質土の締固めについてヤング係数とポアソン比の締固め密度による変化を三軸圧縮試験より計測し、FEMによる数値解析を行っており、同様な結果を得ている。

図-9 は、履帶式車両に対する締固め密度  $\rho_d$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) と深さ  $z$  (cm) の関係を、各転圧回数  $N$  に対して示したものである。一般に、 $N$  の増加とともに  $\rho_d$  は増大しており、いずれの  $N$  の値に対しても地表面からある深さまで高い締固め密度が得られており、さらに特記すべきことは、深層部においても比較的高い締固め密度が得られていることである。すなわち、無振動転圧完了時  $N=10$  回目では、地表面において  $\rho_d = 1.54 \text{ g}/\text{cm}^3$  を示し、 $z_m = 4.1 \text{ cm}$  において最大値  $\rho_{dm} = 1.60 \text{ g}/\text{cm}^3$  となっている。また、深層部においても  $\rho_{dr} = 1.42 \text{ g}/\text{cm}^3$  を得ている。一方、振動転圧完了時  $N=20$  回目では、地表面において  $\rho_d = 1.64 \text{ g}/\text{cm}^3$  を示し、 $z_m = 4.3 \text{ cm}$  において最大値  $\rho_{dm} = 1.69 \text{ g}/\text{cm}^3$  となっている。また、深層部においても  $\rho_{dr} = 1.54 \text{ g}/\text{cm}^3$  と高い値を示している。また、各深さ毎の  $\rho_d$  は無振動、振動時とも  $N$  の値とともに増加し、ある一定値に漸近している。

従って、これらの実験結果は、履帶式車両を用いた転圧方法が、高リフト厚の締固めに極めて有効であることを実証するものである。なお、ローラ及び履帶式車両の振動転圧によって得られた最終の乾燥密度分布は、突き固め試験によって得られた最大乾燥密度の 90 % である  $1.71 \text{ g}/\text{cm}^3$  に達していない。すなわち、締固め度  $D$  値はローラで最大 87.4 %、



(a) 転圧回数  $N=10$  回



(b) 転圧回数  $N=20$  回

図-10 垂直応力  $\sigma_z$  の実測分布図（2軸2輪式ローラ）

履帶式車両で最大 89.1 % であった。前述したように、突き固め試験における土の単位体積当たりの締固め

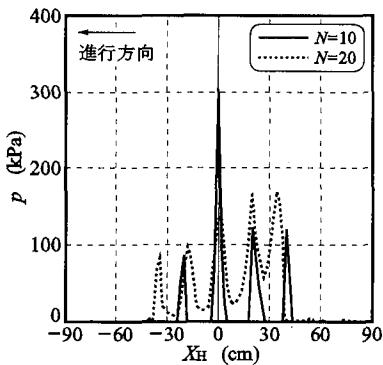


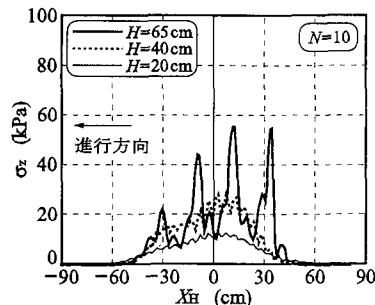
図-11 履帯下の接地圧分布  $p$  (実測値)

エネルギーは、ローラや履帯式車両による振動締固めエネルギーの約9～41倍にも達しており。同一の基準で比較するのは困難である。しかし、締固め度  $D$  値を向上させるためには、さらに大きな起振力を発揮する遠心加振機を搭載した実車両で実験を行う必要がある。

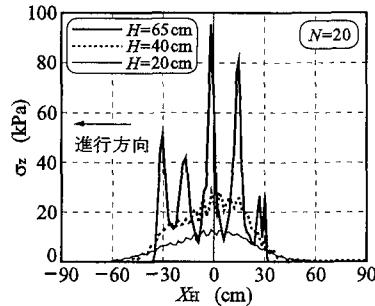
#### (4) ローラ走行による地中応力伝播

2軸2輪式ローラの走行によって発生する地中応力として、前述の土圧計を使用して、 $z$  軸方向の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) を、土槽底面からの高さ  $H = 10, 20, 40, 65$  および  $80\text{ cm}$  ( $z = 70, 60, 40, 15$  および  $0\text{ cm}$ )において計測した。図-10(a)は、無振動転圧完了時の  $N = 10$  回目における各高さ  $H$  における水平面上の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) の分布を示したものである。横軸の  $X_H$  は、水平面上においてローラの進行方向に取った値であり、計測時間に車両の進行速度を乗じ換算したものである。浅層部の  $H = 65\text{ cm}$ においては、ローラ直下において  $\sigma_z$  の応力集中による2つの山、60および72 kPaが観測されており、その間隔は前後輪ローラの間隔と一致している。なお、先行するローラ直下の  $\sigma_z$  の値は、後続するローラ直下の値より若干低下しているのは、締固め密度の差異によるものである。一般に、 $H = 65\text{ cm}$  におけるローラ直下の  $\sigma_z$  の値は、 $N$  の増加に伴う締固め密度の増加によって、無振動、振動時とも増大する傾向にある。深層部の他の  $H = 10, 20, 40\text{ cm}$  においては、ローラ直下において  $\sigma_z$  の値はかなり水平方向に分散して低下しており、それぞれの平均値は 12.9, 15.8 および 19.7 kPa と計測された。

図-10(b)は、同様に、振動転圧完了時の  $N = 20$  回目における各高さ  $H$  における水平面上の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) の分布を示したものである。図より明らかに、一般に、振動荷重による締固め密度の増加により  $\sigma_z$  の値は若干増加する傾向にある。この場合、



(a) 転圧回数  $N = 10$  回



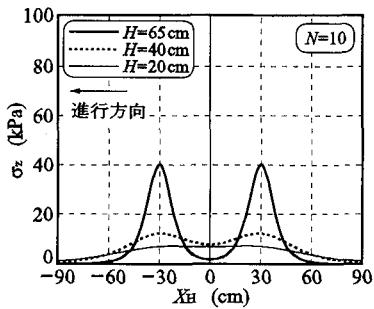
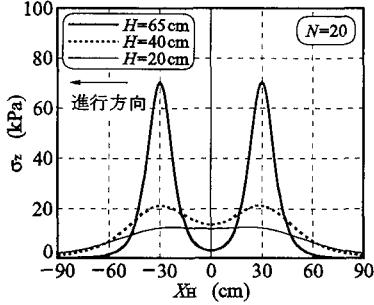
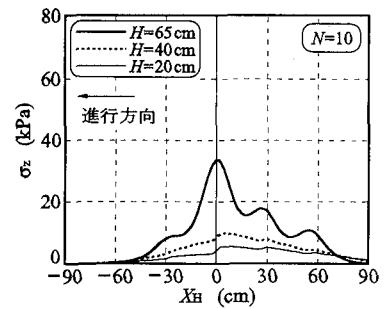
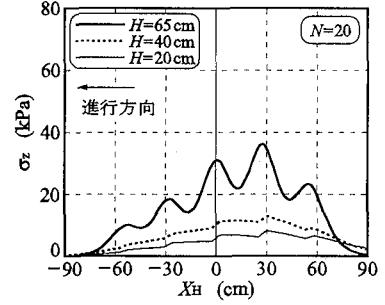
(b) 転圧回数  $N = 20$  回

図-12 垂直応力  $\sigma_z$  の実測分布図 (履帯式車両)

高振動数のために振動波形は明瞭には計測されず、 $N = 10$  回目における  $\sigma_z$  の分布形態と大きな相違点は認められない。

#### (5) 履帯式車両走行による地中応力伝播

まず、履帯式車両走行時の履帯に作用する接地圧分布  $p$  の一例として、 $N = 10, 20$  回目の計測結果を図-11に示す。この場合も、横軸  $X_H$  の値は、計測時間に車両の進行速度を乗じ換算したものである。図より明らかに、 $p$  の分布域は履帯接地長と一致しており、 $p$  は下転輪直下においてピーク値を有する波状分布を示している。図-12(a)は、無振動転圧完了時の  $N = 10$  回目における各高さ  $H$  における水平面上の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) の分布を示したものである。浅層部の  $H = 65\text{ cm}$  においては、下転輪直下において  $\sigma_z$  の応力集中による5つの山が計測されている。深層部の他の  $H = 20, 40\text{ cm}$  においては、下転輪直下において  $\sigma_z$  の値はかなり水平方向に分散して低下しているのが明らかである。さらに、後続する下転輪直下での接地圧が次第に増加しているのは、転輪の通過による締固め密度の増加によるものである。図-12(b)は、同様に、振動転圧完了時の  $N = 20$  回目における各高さ  $H$  での水平面上の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) の分布を示したものである。この場合も、振動波形は高振動数のためにはっきりとは見られな

(a) 転圧回数  $N=10$  回(b) 転圧回数  $N=20$  回図-13 垂直応力  $\sigma_z$  の理論分布図（2軸2輪式ローラ）(a) 転圧回数  $N=10$  回(b) 転圧回数  $N=20$  回図-14 垂直応力  $\sigma_z$  の理論分布図（履帯式車両）

いが、一般に、 $N$  の増加に伴う締固め密度の増加により、無振動、振動時とも  $\sigma_z$  の値は増加する傾向にある。なお、 $H = 65 \text{ cm}$ においては、下転輪直下での最大垂直応力  $\sigma_{z\max}$  は  $N = 10$  回目で  $56 \text{ kPa}$ 、 $N = 20$  回目で  $95 \text{ kPa}$  が計測されている。また、深層部の  $H = 40 \text{ cm}$ における  $\sigma_z$  の最大値は、 $25 \text{ kPa}$  と若干低下しているが、2軸2輪式ローラと比較すると約1.46倍とかなり高い値を示し、深層部まで地中応力の伝播が行われていることを示すものである。

#### 4. 考察

##### (1) 深さ方向の応力伝播

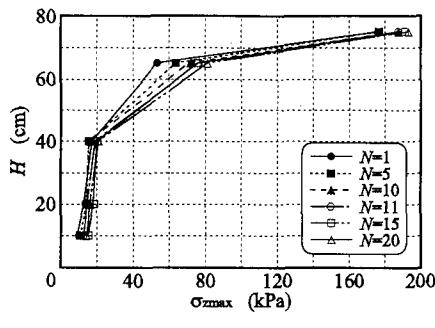
地表面に作用する等分布荷重  $q$  を受ける辺長  $a, b$  の長方形載荷面の隅角の下、深さ  $z$  における鉛直方向の垂直応力  $\sigma_z$  は、Boussinesq の理論<sup>10)</sup>によって次式を用いて算定することができる。

$$\sigma_z = \frac{q}{4\pi} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \cdot \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \quad (5)$$

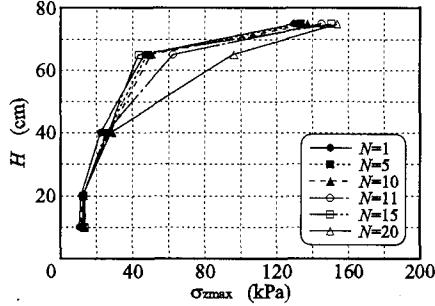
ここに、 $m=a/z, n=b/z$  である。藤井ら<sup>11)</sup>は、ローラおよび履帯式車両による地中応力分布につい

て、静的載荷および振動載荷による動的載荷とともに Boussinesq の理論解と現地計測値がよく対応することを示している。

2軸2輪式ローラの場合、各転圧回数毎に増加した地表面の沈下量  $\Delta S = D(1-\cos\theta_r)/2$  とリバウンド量  $\Delta u = D(1-\cos\theta_r)/2$  よりローラの入射角  $\theta_r$  と離脱角  $\theta_t$ <sup>12)</sup> を求め、ローラの接地長  $l = D(\sin\theta_r + \sin\theta_t)/2$  を算定することができる。車輪幅  $B$  と接地長  $l$  より算定される接地面積に対して、ローラに作用する軸荷重をその面積で除した接地圧が作用するとして、地中応力を算定した。図-13(a)(b)は、転圧回数  $N = 10, 20$  回目における各ローラの接地面積  $60 \times (4.72$  および  $4.12) \text{ cm}^2$  に対し、静的軸荷重  $5.14 \text{ kN}$  および起振力を加えた動的軸荷重  $8.82 \text{ kN}$  が作用した場合の平均接地圧  $182$  および  $357 \text{ kPa}$  について、前後輪ローラによるローラの進行方向  $X_H$  に対する地中応力  $\sigma_z$  の分布を土槽底面からの高さ  $H = 20, 40$  および  $65 \text{ cm}$  に対して計算したものである。前節で述べた  $\sigma_z$  の計測値と比較すると、Boussinesq の理論解による  $\sigma_z$  の算定値は、 $N = 10$  回目において計測値の 6割強となり、 $N = 20$  回目においては計測値とよく対応している。すなわち、静的荷重においては、Fröhlich<sup>13)</sup>が指摘しているように、砂質地盤においては応力集中がより顕著に発生し、Boussinesq の理論解では過小評価されている。一方、動的荷重の場



(a) 2軸2輪式ローラ



(b) 履帶式車両

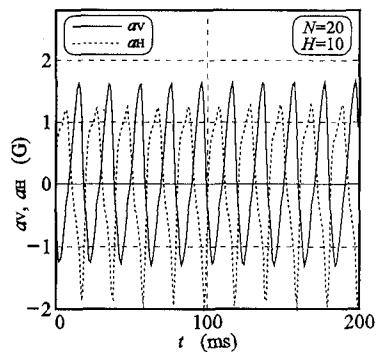
図-15 土槽底面からの高さ  $H$  と最大垂直応力  $\sigma_{z\max}$  の関係

合は、同様に応力集中が顕著に計測されているが、その絶対値は、起振力を加えて算定した Boussinesq の理論解と比較的よく一致していることが分かる。

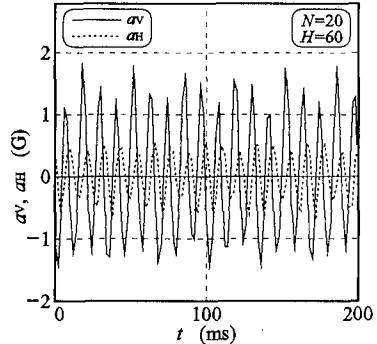
履帶式車両の場合、前節で述べた接地圧分布の計算値が地表面上の履帶の接地面積に作用するとして、地中応力を算定した。図-14(a)(b)は、同様に、 $N = 10$  および 20 回目における履帶式車両の両履帶の下転輪直下に分散する実接地面積分布に対し、車両重量 10.89 kN および起振力を加えた動的荷重 18.24 kN が作用した場合の 2 履帶に作用する接地圧分布より地中応力  $\sigma_z$  の分布を土槽底面からの高さ  $H = 20, 40$  および 65 cm に対して算定したものである。 $\sigma_z$  の算定値については、前節で述べた計算値と比較してかなり小さく、過小評価されている。この場合もローラの場合と同様に、計算値は応力集中によって大きな値を示しており、Boussinesq の理論解だけでは十分に説明することは出来ない。

図-15(a)(b)は、2 軸 2 輪式ローラおよび履帶式車両に対して、土槽底面からの各高さ  $H$  において実測された水平面上の垂直応力の最大値  $\sigma_{z\max}$  と  $H$  との関係において転圧回数  $N$  による変化を示したものである。重回帰分析の結果、次式を得た。

## 2 軸 2 輪式ローラ



(a) 土槽底面からの高さ  $H=10$  cm



(b) 土槽底面からの高さ  $H=60$  cm

図-16 鉛直、水平振動加速度波形  $av, ah$  (2 軸 2 輪式ローラ、転圧回数  $N=20$  回)

$$\sigma_{z\max} = 8.90 \times 10^{-5} H^{2.08} N^{0.119} \quad (R=0.930) \quad (6)$$

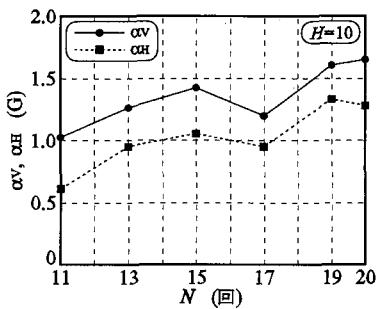
履帶式車両

$$\sigma_{z\max} = 7.37 \times 10^{-4} H^{1.42} N^{0.279} \quad (R=0.810) \quad (7)$$

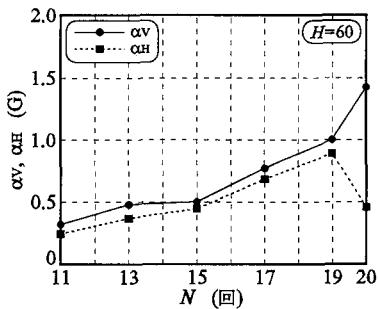
ここに、 $R$  は重相関係数である。両者共、 $N$  が増加すると  $\sigma_{z\max}$  は次第に増加しており、 $H$  が増加し地表面に近づく程放物線的に大きな値を示している。

## (2) 深さ方向の鉛直・水平加速度

2 軸 2 輪式ローラが振動荷重を受けて走行しているとき、計測結果の一例として、転圧回数  $N = 20$  回目において、ローラ直下における土槽底面からの高さ  $H = 10, 60$  cm で計測した鉛直、水平加速度  $av, ah$  の振動波形を図-16(a)(b)に示す。この場合の  $av, ah$  の位相差は約  $\pi/2$  rad である。それぞれの振動周波数は 49.0, 87.5 Hz であり、遠心加振機の発生周波数 56.8 Hz と異なる。この現象は、前後輪からの入力波が地中で干渉したためである。 $H = 10, 60$  cm に対する鉛直方向の平均振幅  $av$  は、それぞれ  $1,411 \pm 166, 1,347 \pm 213$  gal に対して水平方向の平均振幅  $ah$  は  $1,532 \pm 436, 451 \pm 58$  gal であった。この場合、 $ah$  は それぞれ  $av$  の 108.6, 33.5 % であ



(a) 土槽底面からの高さ  $H=10\text{ cm}$



(b) 土槽底面からの高さ  $H=60\text{ cm}$

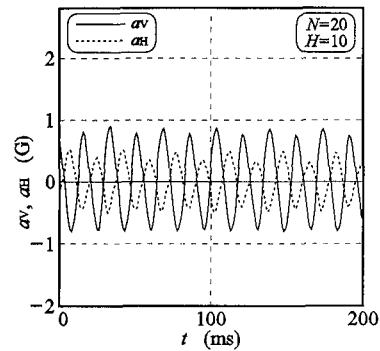
図-17 鉛直、水平振幅  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  と転圧回数  $N$  の関係 (2 軸2輪式ローラ)

る。鉛直、水平方向の変位振幅  $\beta_v$ ,  $\beta_H$  は、 $H=10, 60\text{ cm}$  に対して、それぞれ埋設した鉛直、水平加速度計より得られた  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  を  $\omega^2$  で除したものであり、それぞれ  $\beta_v=1.49 \times 10^{-2}\text{ cm}$ ,  $\beta_H=1.62 \times 10^{-2}\text{ cm}$ , および  $\beta_v=4.46 \times 10^{-3}\text{ cm}$ ,  $\beta_H=1.49 \times 10^{-3}\text{ cm}$  と算定される。図-17(a)(b) は、各計測深さ  $H=10, 60\text{ cm}$  に対して測定した  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  の転圧回数  $N$  による変化を示したものである。図より明らかに  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  は、 $N$  の増加とともに増加している。 $H=10, 20, 40, 45, 60, 65$ , および  $80\text{ cm}$ ,  $N=11, 13, 15, 17, 19$ , および 20 回の全ての組合せである計 42 通りの実験において得られた振幅  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  について重回帰分析を行った結果、次式に示すように、ともに  $N$ ,  $H$  の増加とともに増加している。

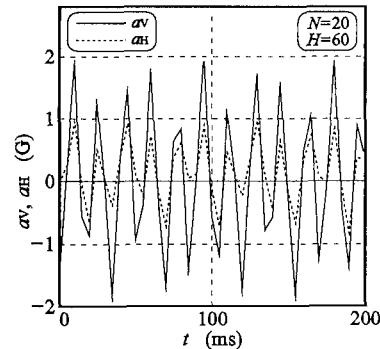
$$\alpha_v = 0.105 H^{0.588} (N-10)^{0.218} \quad (R=0.422) \quad (8)$$

$$\alpha_H = 0.123 H^{0.431} (N-10)^{0.234} \quad (R=0.403) \quad (9)$$

同様に、変位振幅  $\beta_v$ ,  $\beta_H$  についても重回帰分析を行った結果、周波数のばらつきが大きく重相関係数はかなり小さくなるが、次式に示すように、ともに  $N$ ,  $H$  の増加とともに増加している。



(a) 土槽底面からの高さ  $H=10\text{ cm}$



(b) 土槽底面からの高さ  $H=60\text{ cm}$

図-18 鉛直、水平振動加速度波形  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  (履帯式車両、転圧回数  $N=20$  回)

$$\beta_v = 8.53 \times 10^{-3} H^{0.309} (N-10)^{0.152} \quad (R=0.263) \quad (10)$$

$$\beta_H = 5.96 \times 10^{-3} H^{0.202} (N-10)^{0.360} \quad (R=0.297) \quad (11)$$

従って、2軸2輪式ローラにおいては、同図より明らかに、特に深層部における鉛直、水平方向の振動加速度は十分伝達されており、変位振幅も大きいにも拘わらず締固め効果が少ないのは、鉛直および水平方向の振動荷重より算定される垂直応力  $\sigma_z$  とせん断応力  $\tau_{xy}$  の間に位相差が約  $\pi/2\text{ rad}$  存在しており、両者が同時に作用していないこと、低垂直荷重下における繰り返しせん断変形に伴うニーディング作用によって強度低下を引き起こし密度が増加していないことに起因している。

一方、履帯式車両が振動荷重を受けて走行しているとき、一例として、履帯中心直下における土槽底面からの高さ  $H=10, 60\text{ cm}$  における  $N=20$  回目での鉛直、水平加速度  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  の振動波形を図-18(a)(b) に示す。この場合の位相差は殆ど存在せず、振動周波数は  $57.0, 57.5\text{ Hz}$  であり、平均鉛直振幅  $\alpha_v$

は、 $784 \pm 36$ ,  $1,418 \pm 412$  gal, 平均水平振幅  $\alpha_H = 428 \pm 60$ ,  $676 \pm 175$  gal であった。 $\alpha_H$  は  $\alpha_V$  の 54.6, 47.7% であり、履帶によって水平加振力はかなり伝達されている。すなわち、振動荷重による鉛直方向の垂直応力  $\sigma_z$  に対するせん断応力  $\tau$  の比率は、それぞれ 0.546, 0.477 となっている。この場合、鉛直、水平方向の変位振幅  $\beta_V$ ,  $\beta_H$  も同様にして、それぞれ  $\beta_V = 6.11 \times 10^{-3}$  cm,  $1.09 \times 10^{-2}$  cm,  $\beta_H = 3.34 \times 10^{-3}$  cm,  $5.18 \times 10^{-3}$  cm と算定される。図-19(a)(b)は、同様に、各  $H = 10, 60$  cm に対して計測した  $\alpha_V$ ,  $\alpha_H$  の  $N$  による変化を示したものである。 $H = 10, 20, 40, 45, 60, 65$  および  $80$  cm,  $N = 11, 13, 15, 17, 19$ , および 20 回の全ての組合せである計 42 通りの実験において得られた振幅  $\alpha_V$ ,  $\alpha_H$  について重回帰分析を行った結果、次式に示すように、ともに  $N$  による変動は少ないが、 $H$  の増加とともに増加している。

$$\alpha_V = 0.308 H^{0.412} (N-10)^{-0.275} \quad (R=0.525) \quad (12)$$

$$\alpha_H = 0.357 H^{0.661} (N-10)^{0.200} \quad (R=0.213) \quad (13)$$

同様に、変位振幅  $\beta_V$ ,  $\beta_H$  についても重回帰分析を行った結果、周波数のばらつきが大きく重相関係数はかなり小さくなるが、次式に示すように、ともに  $N$  による変動は少ないが、 $H$  の増加とともに減少している。

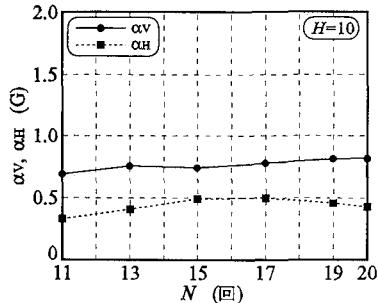
$$\beta_V = 3.12 \times 10^{-3} H^{-0.227} (N-10)^{0.000722} \quad (R=0.243) \quad (14)$$

$$\beta_H = 1.06 \times 10^{-3} H^{-0.234} (N-10)^{0.222} \quad (R=0.346) \quad (15)$$

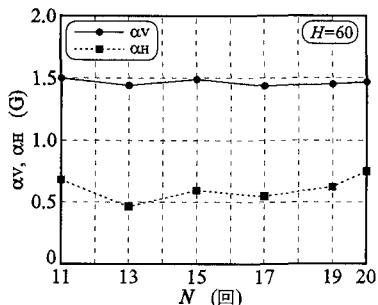
従って、履帶式車両の場合、特に深層部における鉛直、水平方向の振動加速度および変位振幅は 2 軸 2 輪式ローラと比較してかなり小さいにも拘わらず締固め効果が十分に発揮されているのは、鉛直および水平方向の振動荷重より算定される垂直応力  $\sigma_z$ , せん断応力  $\tau_{xy}$  の間に位相差が殆ど存在せず、両者が同時に作用していること、高垂直荷重下における交番せん断力の作用による適切なダイレイタシ一効果によって体積ひずみの増加による土の圧縮変形が効果的に助長され密度が増加していくことに起因している。

## 5. 結論

最適含水比に調整した高リフト厚 80 cm のまさ土地盤上を走行する同じ車両重量約 10 kN をもつ 2 軸 2 輪式ローラおよび履帶式車両について、無振動転



(a) 土槽底面からの高さ  $H=10$  cm



(b) 土槽底面からの高さ  $H=60$  cm

図-19 鉛直、水平振幅  $\alpha_V$ ,  $\alpha_H$  と転圧回数  $N$  の関係（履帶式車両）

庄および同一の遠心加振機による振動転圧を行った場合の転圧効果について比較実験を行い、土圧計および加速度計を用いて地中応力の解析を行った。その結果得られた新しい知見を以下に列記する。

(1) 2 軸 2 輪式ローラによる振動転圧後の地盤強度を示すコーン指数および締固め乾燥密度は、地表面よりある深さまで増加し、それぞれ中間層において最大値 1,247 kPa, 1.66 g/cm<sup>3</sup> を示した後減少する。すなわち、浅層部においてはニーディング現象により、また深層部においては応力伝播が不十分であるため、その転圧効果は十分に発揮されていない。

(2) 履帶式車両による振動転圧後のコーン指数および締固め乾燥密度は、浅層部から中間層にわたって 2 軸 2 輪式ローラと比較して高い値を示し、最大値 1,461 kPa, 1.69 g/cm<sup>3</sup> を得ている。その後、深層部において僅かに減少している。すなわち、高リフト厚のまさ土地盤の深層部における転圧効果は十分に発揮されている。

(3) 鉛直方向の垂直応力の伝播は、両車両とも一般に、深さ方向に減少するが、転圧回数の増加とともにその値は増加する。特に、深層部における垂直応力は、2 軸 2 輪式ローラと比較して、履帶式車両においてより大きく伝播している。

(4) 2軸2輪式ローラの場合、一般に、転圧回数と土槽底面からの高さの増加とともに地中に伝達される鉛直・水平加速度の振幅は増加するが、変位振幅は減少する。特に深層部における鉛直・水平方向の振動加速度は十分伝達されており変位振幅も大きいにも拘わらず締固め効果が少ないのは、鉛直および水平方向の振動荷重より算定される垂直応力とせん断応力の間に位相差が約 $\pi/2$ rad存在しており、両者が同時に作用していないこと、低垂直荷重下における繰り返しせん断変形に伴うニーディング作用によって密度が増加しないことに起因している。

(5) 履帯式車両の場合、鉛直、水平加速度の振幅と変位振幅の転圧回数による変動は少ないが、土槽底面からの高さの増加とともに鉛直、水平加速度の振幅は増加し、変位振幅は減少している。特に深層部における締固め効果が十分に発揮されているのは、鉛直および水平方向の振動荷重より算定される垂直応力とせん断応力の間に位相差が殆ど存在せず、両者が同時に作用していること、高垂直荷重下における交番せん断力の作用による適切なダイレバターンシーエフコートによって体積ひずみの増加による土の圧縮変形が効果的に助長され密度が増加したことによ起因している。そのため、高リフト厚全層にわたって有効な締固めが達成されている。

なお、本実験における遠心加振機の振動数は56.8Hzで実施したが、さらにこの場合の地盤一車両系固有振動数である約5~10Hzに近付ける方がより効果的な転圧作業を期待することができるこ付記する。

**謝辞：**本実験を実施するに当たり、本学技官河野幸一氏、本学卒業生岩崎幹氏の御援助を得た。ここに、

心よりの敬意と謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 室達朗、荒井克彦、深川良一、建山和由：最新建設施工学——ロボット化・システム化——、朝倉書店、pp.131-139、1994年3月。
- 2) 松本徳久、佐谷靖郎、志賀三智：ローラ転圧コンクリートの締固め特性、建設省土木研究所報告、第178号、pp.1-39、1988年10月。
- 3) Shiming,Y. and Xiaopeng,X. : Stress analysis in soil acted with roller and influence to compaction effect, Proc. of the 12th Int. Conf. of the I.S.T.V.S., Beijing, China, pp.180-187, Oct., 1996.
- 4) 八谷好高、上中正史、深海正彦、佐藤勝久：現場締固め再現装置と2・3の実験、運輸省港湾技術研究所、技研資料、No.711, pp.1-17, 1991年6月。
- 5) Selig,E.T. : Fundamental of vibratory roller behavior, Proc. of Int. Conf. of SMFE, Vol.2, pp.375-380, 1977.
- 6) 室達朗、星加泰央、河原莊一郎：2軸2輪式転圧ローラの制動駆動時における最適走行制御、土木学会論文集、No.534/VI-30, pp.201-212, 1996年3月。
- 7) 石原公明、麻生公裕、加藤俊昭、苗村康造、田村徹、渡辺克夫：けん引式マンモスバイプロタンパ工法の開発、建設の機械化、第459号、pp.51-55、1988年5月。
- 8) 土質工学会編：土の締固めと管理、土質工学会、pp.29-155、1991年8月。
- 9) Fujii,H., Shimada,K., Nishimura,S. and Tajiri,N. : Several considerations about the mechanism of field compaction, Proc. of the 10th Int. Conf. of the I.S.T.V.S., Kobe, Japan, pp.393-404, Aug., 1990.
- 10) 赤井浩一：土質力学、朝倉書店、pp.193-234、1986年3月。
- 11) Fujii,H., Sawada,T. and Watanabe,T. : Stresses in situ generating by bulldozers, Proc. of the 8th Int. Conf. of the I.S.T.V.S., Cambridge, England, pp.259-267, Aug., 1984.
- 12) 室達朗：テラメカニックス——走行力学——、技報堂出版、pp.31-74、1993年2月。
- 13) Fröhlich,O.K. : Druckverteilung im Baugrunde, Springer, pp.12-18, 1934.

(1997. 4. 21 受付)

## EFFECTS OF ROLLER AND TRACKED VEHICLE MOUNTING A CENTRIFUGAL OSCILLATOR ON THE VIBRO-COMPACTION OF A HIGH LIFTED DECOMPOSED GRANITE SANDY SOIL

Tatsuro MURO, Nobuaki YOSHIOKA and Munehito MIYOSHI

The objective of this paper is to innovate a new compaction machinery by comparing experimentally the effects of two-axle, two wheel road roller and tracked vehicle mounting a centrifugal oscillator on the vibro-compaction of a high lifted decomposed granite sandy soil. Measuring the normal pressure distribution and the vertical and horizontal acceleration in the soil, the effects of both the vehicles having the same total weight on the increment of the soil density have been considered theoretically. As the results, the tracked vehicle showed the larger cone index and soil density at the shallow and intermediate stratum. Especially, the ratio of the horizontal and vertical value of maximum impact force was large enough at the deep stratum, so that an optimal alternative shear strain to promote the increment of soil density due to the dilatancy effect was developed at the whole range of the high lifted soil stratum.