

# 高リフト厚のまさ土に対する水平加振機を 搭載した履帯式車両の振動転圧効果

室達朗<sup>1</sup>・河原荘一郎<sup>2</sup>・三林貴宏<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 (〒790-8577 松山市文京町 3)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3)

<sup>3</sup>正会員 工修 日立建機㈱ 技師 (〒300-0013 土浦市神立町 6 5 0)

本研究の目的は、高リフト厚での締固め作業において車両進行方向の水平方向に加振する水平加振機を搭載した履帯式車両の面荷重による振動転圧効果を評価することである。自重 10.9 kN の小型履帯式車両に振動周波数を 16~51 Hz, 加振力 9.8 kN の水平加振機を搭載し、まさ土を厚さ約 80 cm に撒き出した大型土槽で転圧実験を実施した。その結果、振動周波数 16 Hz において、地表面沈下量と深さ方向の土の乾燥密度分布が最大値を示すこと、また乾燥密度は浅層部から中間層において比較的適切な交番せん断応力によるダイレイタンスー効果によって比較的高い値を示し、それ以深では、急速に減少し深層部において一定値に漸近することが判明した。

*Key Words : vibro-compaction, tracked vehicle, high lift, horizontal oscillator, decomposed weathered granite soil*

## 1. はじめに

近年、RCD工法<sup>1)</sup>などで要求されている高リフト厚の材料を高速で締め固める工法において、顕著な締固め効果を発揮する新しい転圧機械の開発が焦眉の緊急課題であるとされている。そのため、筆者らは、履帯式車両に作用する面荷重による転圧が、土粒子の横方向の移動を拘束し、より効果的な転圧作業が実現できると考えた。従来、履帯式車両による転圧効果を最大限に発揮する加振方法を究明するため、周波数 16~51 Hz で鉛直方向のみに最大起振力 9.8 kN の加振力を発生させる鉛直加振機を使用して実験を行った。その結果、地盤の固有振動数に近い周波数 16 Hz において、深層部での締固め密度は最大値を示し、また、深さ方向の締固め密度分布はほぼ一定となることを明らかにした<sup>2)</sup>。また、砂質土の撒き出し厚さ 100 cm, コンパクト総重量 81 kN, 振動周波数 12 Hz の鉛直加振力 172 kN を発生させる鉛直加振機と振動周波数 38 Hz の水平力 65 kN を鉛直軸まわりに発生させる遠心加振機を搭載した履帯式車両による現地転圧実験<sup>3)</sup>においても、水平方向の加振力による転圧効果が鉛直加振のみの場合と比較してさらに助長されることが実証されている。

本研究の目的は、高リフト厚のまさ土地盤の締固

め作業において、鉛直方向加振とは別に履帯式車両の進行方向の水平方向のみに起振力を与えた場合の締固め効果を評価することである。すなわち、地表面において種々の周波数の交番せん断応力を水平方向に付加することにより、車両重量による垂直応力下でのダイレイタンスー現象をより効果的に発揮させ深層部への締固めの促進を期待するものである。また、従来実施した鉛直加振型履帯式車両では、鉛直方向の地盤振動による環境への配慮が足りなため、できるだけ鉛直振動を発生させない水平加振型履帯式車両による締固め効果を目指したものである。ここでは、車両重量 10.9 kN の小型履帯式車両を使用し、平均接地圧は大型履帯式車両に準じて 29.8 kPa とした。その上に振動周波数 16~51 Hz, 最大加振力 9.8 kN の水平加振機を搭載し、まさ土の撒き出し厚さを実際の高リフト厚約 80 cm とした大型土槽を使用して、無振動時における初期転圧回数 3 回、振動時における転圧回数 10 回において地表面の沈下量がどのように変化するかについて調査した。また、深さ方向のコーン指数を各転圧回数毎に計測し、深さ方向の土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た。さらに、土中に埋設した土圧計、SST (Stress State Transducer)<sup>4)</sup> および鉛直・水平振動加速度計を使用

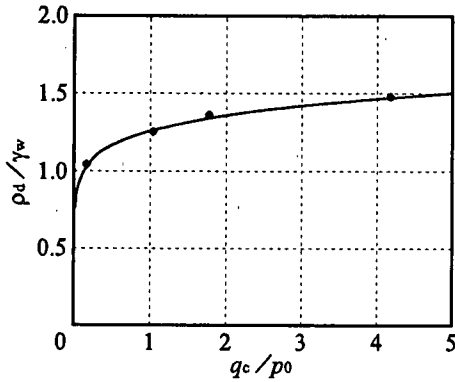


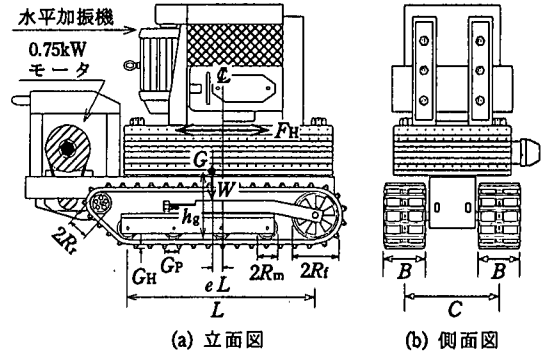
図-1 乾燥密度比  $\rho_d/\gamma_w$  とコーン指数比  $q_c/p_0$  の関係

して、履带式車両の転圧走行時に発生する動的応力の地中伝搬特性を各周波数と各転圧回数毎に計測した。また、深層部での垂直応力とせん断応力、およびせん断応力/垂直応力比が履带式車両の走行とともにどのように変化するかについて検討している。さらに、土中に伝播する鉛直・水平加速度分布より、鉛直・水平方向の加速度の位相差、加速度振幅および変位振幅の加振機の各周波数、各転圧回数による変化について考察している。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水平加振機による土の締め効果は、如何なる要因によって決定されるかについて実験結果より言及し、水平加振機の最適周波数を見いだすこととする。

## 2. 実験および試験方法

### (1) まさ土地盤

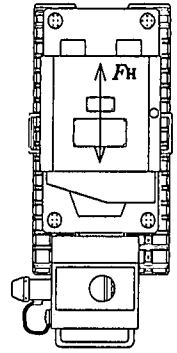
愛媛県松山市産の粒度配合に優れたまさ土を試料土として選定した。気乾燥状態のまさ土について比重試験および粒度分析試験を行った結果、比重 2.66、最大粒径 4.75 mm、平均粒径 0.78 mm、均等係数 12.0、曲率係数 3.0 であった。JISA1210, 1.1a による突き固め試験の結果、土の単位体積当たりの締めエネルギー 551.3 kNm/m<sup>3</sup> において、最適含水比  $W_{opt}$  は 12.8 %、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  は 1.90 g/cm<sup>3</sup>、飽和度は 85.1 % であった。この最適含水比に調整した試料土を種々の打撃エネルギーで同一の内容積 1000 cm<sup>3</sup> のモールド内に 3 層に分けて突き固め、頂角  $\pi/6$  rad、高さ 5 cm、底面積 6.61 cm<sup>2</sup> のコーンを用いてコーン貫入試験を実施した。その結果、図-1 に示すように、試料土の乾燥密度  $\rho_d$  (g/cm<sup>3</sup>) とコーン指数  $q_c$  (kPa) との間には、次式で示す関係式が成立した。



(a) 立面図

(b) 側面図

水平加振機	
モータ	: 3.7 kW
最大加振力	: 9.8 kN
加振トルク	: 0.94 Nm
周波数	: 16~51 Hz
振動方向	: 水平



(c) 平面図

図-2 水平加振機を搭載した小型履带式車両

$$\frac{\rho_d}{\gamma_w} = 1.262 \left( \frac{q_c}{p_0} \right)^{0.109} \quad (r=0.997) \quad (1)$$

ここに、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量、 $p_0$  は大気圧であり、 $r$  は相関係数である。

さて、この試料土を長さ 540 cm、幅 150 cm、高さ 100 cm の大型土槽に一定の高さ 100 cm よりふりを通して自由落下させ、深さ 80 cm に達するまで慎重に充填した。得られた深さ方向の湿潤密度は、 $1.45 \pm 0.03$  g/cm<sup>3</sup> とほぼ均等な密度を有する供試地盤を作成することができた。

### (2) 水平加振機

水平方向に加振する起振機として、周波数 16, 25, 35, 51 Hz、周期 62.5, 40.0, 28.6, 19.6 ms、最大加振力 9.8 kN を発揮する水平加振機 EX-100VF を選定した。この水平加振機の寸法は、長さ 76.6 cm、幅 80.5 cm、高さ 53.5 cm であり、重量 1.62 kN である。加振トルクは、3.7 kW の電動モータを使用し、周波数  $f=2.5 \sim 51$  Hz に対して強制振動させ、最大 9.8 Nm まで連続的に変化させることができる。水平加振機は、2 軸偏心マスで構成されており、鉛直方向の起振力を相殺させる構造となっている。図-2 は、この水平加振機を履带式車両の中央部に搭載した場合

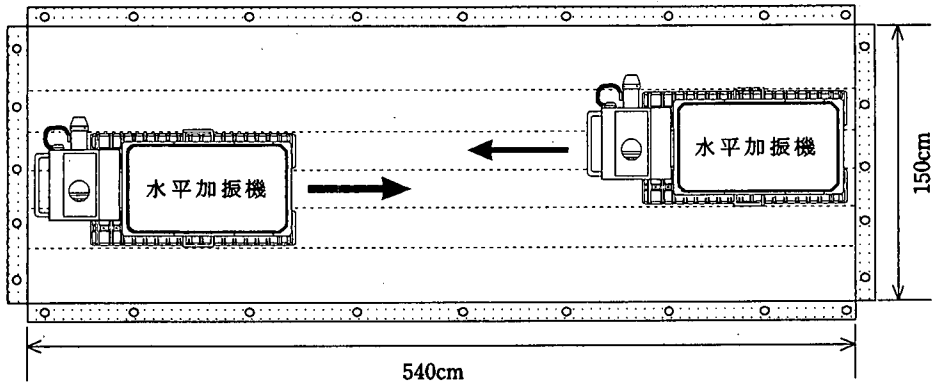


図-3 水平加振機を搭載した小型履帯式車両の走行レーンシステム

の構造についてその立面図，側面図および平面図を示したものである。

水平加振力  $F_H(t)$  kN は，最大水平加振力  $F_H$  kN，角速度  $\omega = 2\pi f$  rad/s，初期位相  $\gamma$  rad に対して，次式に示すように，時間  $t$  の正弦関数で与えられる。

$$F_H(t) = F_H \cos(\omega t - \gamma) \quad (2)$$

$$f=16 \text{ Hz} : F_H(t) = 9.80 \cos(32 \pi t - \gamma)$$

$$f=25 \text{ Hz} : F_H(t) = 9.80 \cos(50 \pi t - \gamma)$$

$$f=35 \text{ Hz} : F_H(t) = 9.80 \cos(70 \pi t - \gamma)$$

$$f=51 \text{ Hz} : F_H(t) = 9.80 \cos(102 \pi t - \gamma)$$

### (3) 履帯式車両による振動転圧実験

表-1 は，小型履帯式車両として選定したゴム製履帯を装着したたわみ性履帯式車両の車両諸元を示したものである。水平加振機を搭載した車両総重量は，数枚の鉄板を用いて調整し 10.9 kN とした。履帯の接地長は 91 cm，幅は 20 cm であり，平均接地圧は 29.8 kPa である。この履帯式車両を大型土槽上で往復走行させる場合，図-3 に示したように，互いに先行する轍を跨いで走行させ，2本の履帯が同一の轍を通過することのないように，走行レーンの端部において履帯式車両をチェーンブロックで吊り上げて所定の走行レーンを通るように調整した。ここでは， $N$  回往復走行させたときの転圧回数を  $N$  回と算定した。0.75 kW の 3 相 200 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 3.75 cm/s に設定して自走走行させることとした。なお，走行速度は実験の都合上実機と比較してきわめて小さいが，これは後述する土の単位体積当たりの締固めエネルギーをできるだけ実機のものに近付ける意図を含んだものである。走行方法は，実際の締固め工法を勘案し，転圧初期の軟弱

表-1 履帯式車両の車両諸元

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
履帯幅	$B$	20.0 cm
履帯接地長	$L$	91.0 cm
履帯間隔	$C$	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	$n$	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

なまき土に対しては転圧回数  $N=1\sim 3$  回を無振動転圧とし，その後，ある程度締め固まったまき土に対して転圧回数  $N=4\sim 13$  回を振動転圧とした。この場合，振動転圧による土の単位体積当たりの締固めエネルギー  $E$  は，一例として，後述する土槽底面からの高さ  $H=80$  cm，すなわち地表面において計測した鉛直方向の平均変位振幅  $\beta_v = 8.51 \times 10^{-5}$  m，車両総重量  $W=10.9$  kN，周波数  $f=16$  Hz，転圧回数  $N_T=2N=20$  回，車両速度  $V=3.75 \times 10^{-2}$  m/s，転圧幅  $B=0.883$  m，リフト厚  $h=0.80$  m を次式に代入すると，22.4 kNm<sup>3</sup> と算定することができる。

$$E = 2 \beta_v W \frac{f N_T}{V B h} \quad (3)$$

なお，実機の締固めエネルギーは，一例として牽引式 MV T 工法におけるタンパーの場合，鉛直加速度振幅は約 4 G であり<sup>10)</sup>，これより鉛直変位振幅を算定すると  $\beta_v = 1.10 \times 10^{-2}$  m，タンパー総重量  $W=147$

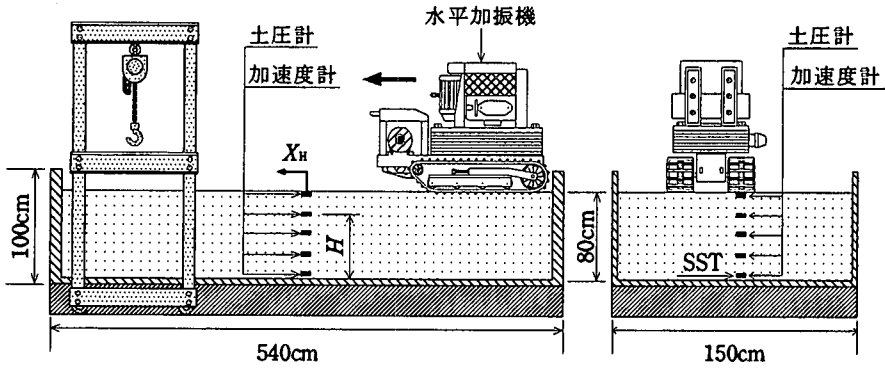


図-4 各種計測器の埋設位置

kN, 周波数  $f=9.5$  Hz, 転圧回数  $N_r=10$  回, 車両速度  $V=0.972$  m/s, 転圧幅  $B=2.5$  m, リフト厚  $h=1.8$  m を上式に代入すると  $E=70.2$  kNm/m<sup>3</sup> と算定される。

地表面の沈下量は, 各転圧回数毎に, 初期地表面からの履帯の轍部分におけるグラウサ突起部の位置を計 10ヶ所において計測し, その平均値として算定した。また, 前述したコーン貫入試験を履帯の轍部分直下において計 5ヶ所の位置で実施し, 貫入速度を 3.4 cm/min とし深さ方向のコーン指数の変化を測定した。

土中に埋設した土圧計, SST および鉛直・水平振動加速度計は, 図-4 に示すように, 土槽中央部において履帯式車両の履帯の走行レーン直下に設置した。土槽底面からの高さを  $H$  cm とすると, 土圧計および加速度計の埋設位置は, それぞれ  $H=10, 20, 45, 65, 80$  cm の 5ヶ所とした。なお, SST は  $H=10$  cm の位置に埋設した。

### 3. 実験結果

#### (1) 地表面沈下量と転圧回数

図-5 は, 水平加振機を搭載した履帯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  $N$  との関係を各周波数  $f$  (Hz) に対して示したものである。地表面の沈下量は初期撤き出し時を基準面とし, 履帯のわだち部分の履帯突起部の位置をデプスゲージを用いて走行中の後輪部位 5ヶ所で計測した。  $N=1\sim3$  回の無振動転圧においては,  $S$  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  $N=4\sim13$  回において,  $S$  は  $f=16$  Hz において急激に増加する現象を呈しているが, 他は  $N$  の増加とともにある値に漸近する傾向にある。  $N=13$  回の最終沈下量は,  $f=16$  Hz において 12.5 cm と最も大きく,  $f=51$  Hz において 11.0 cm と最小

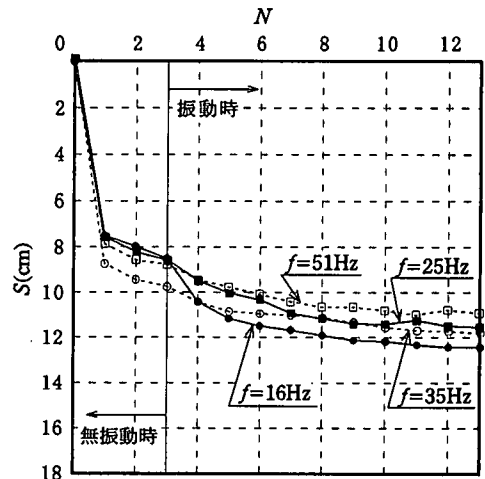


図-5 各周波数  $f$  に対する地表面沈下量  $S$  と転圧回数  $N$  との関係

値を示している。  $f=25, 35$  Hz においては, 沈下量は途中で前後しており, 実験のばらつきのために周波数との相関性は低くなっている。なお, この範囲の周波数における地表面沈下量の変動幅は, この場合, 鉛直加振機を搭載した地表面沈下量<sup>2)</sup>である  $f=16$  Hz における 15.8 cm,  $f=51$  Hz における 10.2 cm と比較すると, かなり小さい値となることが判明した。すなわち, 水平加振機では周波数による影響は小さいが, 鉛直加振機では低周波数で大きな締固め効果を発揮していたことは明らかである。この場合, 当該車両-地盤振動系の固有振動数  $5\sim10$  Hz<sup>2)</sup> に最も近い  $f=16$  Hz において地表面沈下量が最大値を示しており, 水平加振機においても鉛直加振機と同様な結果を得ている。

#### (2) 深さ方向の締固め密度と転圧回数

前述した方法で履帯式車両通過後の轍部分でコーン貫入試験を実施し, コーン指数  $q_c$  の深さ方向の分

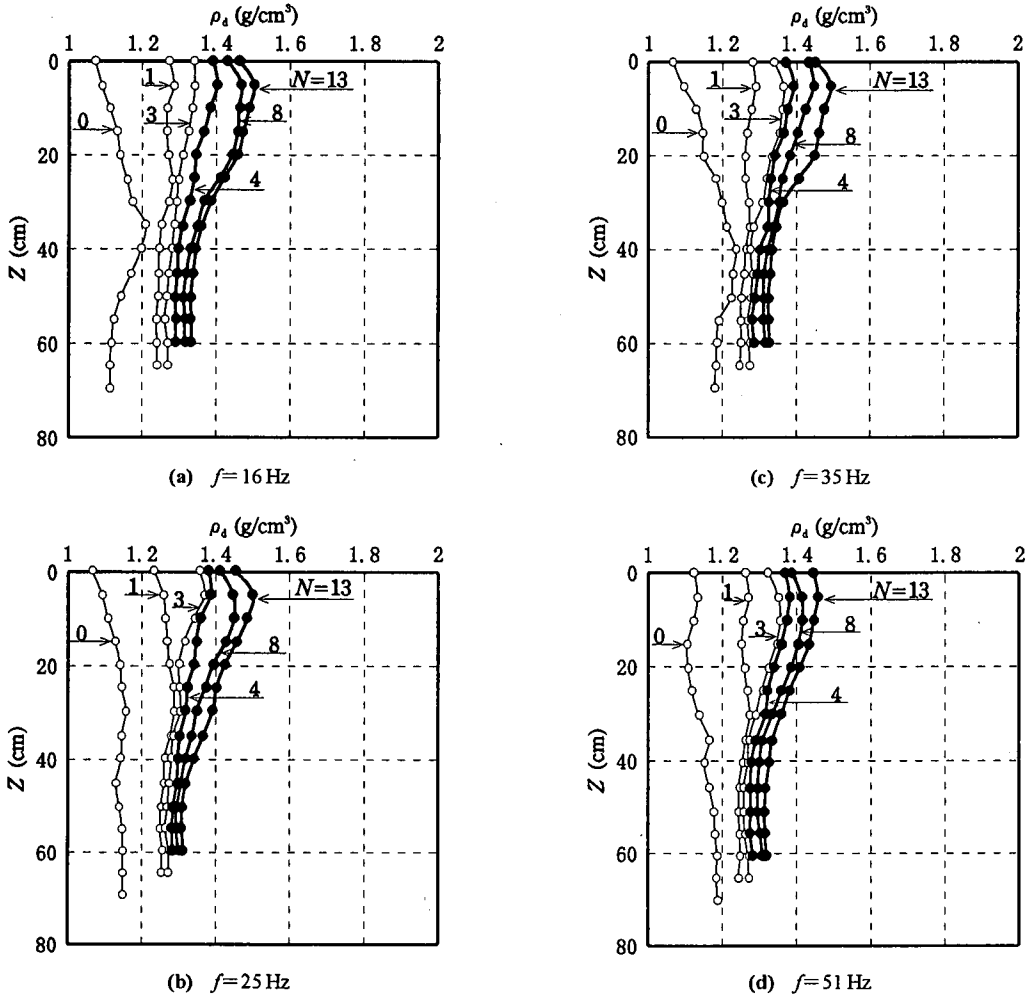


図-6 各転圧回数  $N$  に対する乾燥密度  $\rho_d$  と深さ  $Z$  の関係

布を計測した。その後、式(1)を用いて乾燥密度  $\rho_d$  の深さ方向の分布に換算した。図-6(a)(b)(c)(d)は、水平加振機の各周波数毎に、土の乾燥密度  $\rho_d$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 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、各深さ毎の乾燥密度は無振動、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。また、いずれの  $N$  の値に対しても、 $\rho_d$  はある深さで最大値を示しており、深層部での締め固めは十分には行われていない。一例として、 $f=16$  Hz に対する転圧試験の結果、○印で示す無振動転圧完了時の  $N=3$  回目では、乾燥密度の深さ方向の分布は、地表面における乾燥密度  $\rho_{d0}=1.34 \text{ g}/\text{cm}^3$  より深さ方向に増加し、深さ  $z=5.4$  cm において最大乾燥密度  $\rho_{dmax}=1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$  を示した後減少し、深層部では一定値  $\rho_{dr}=1.29 \text{ g}/\text{cm}^3$  に漸近している。また、●印で示す振動転圧完了時の  $N=13$  回目では、乾燥密度の深さ方

表-2 各周波数  $f$  に対する最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$ 、地表部乾燥密度  $\rho_{d0}$  および深層部乾燥密度  $\rho_{dr}$  の変化

$N$	$f$ (Hz)	16	25	35	51
3	$\rho_{dmax}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.35	1.39	1.37	1.35
	$\rho_{d0}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.34	1.36	1.34	1.33
	$\rho_{dr}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.29	1.27	1.28	1.27
13	$\rho_{dmax}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.51	1.50	1.50	1.46
	$\rho_{d0}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.47	1.45	1.45	1.45
	$\rho_{dr}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.34	1.31	1.33	1.32

向の分布は、地表面  $\rho_{d0}=1.47 \text{ g}/\text{cm}^3$  より深さ方向に増加し、深さ  $z=5.4$  cm において最大乾燥密度  $\rho_{dmax}=1.51 \text{ g}/\text{cm}^3$  を示した後減少し、深層部では一定値  $\rho_{dr}=1.34 \text{ g}/\text{cm}^3$  に漸近している。他の周波数に対する乾燥密度の深さ方向の変化は、表-2にまとめて示した通りであり、振動時  $N=13$  においては  $\rho_{d0}$ 、 $\rho_{dmax}$ 、 $\rho_{dr}$  とも  $f=16$  Hz において最大値を示し、一般に、 $f$

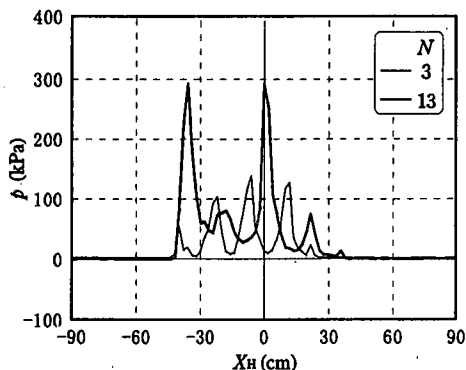


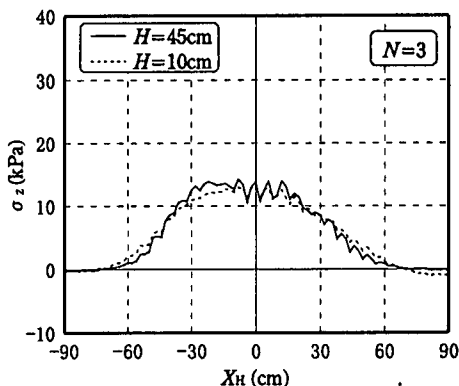
図-7 履帯下の接地圧  $p$  の実測分布 ( $f=16$  Hz)

の増加とともに減少していく傾向が認められる。

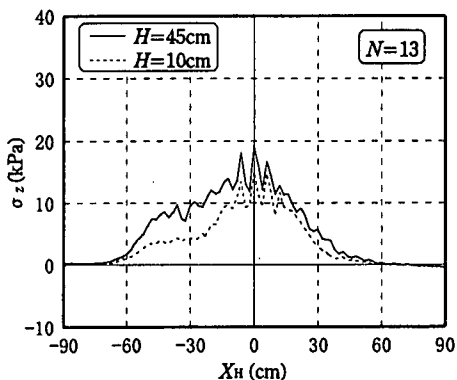
なお、この場合の水平加振機を搭載した履帯式車両による転圧実験において得られた最大乾燥密度  $\rho_{dmax}=1.51$  g/cm<sup>3</sup> は、突き固め試験によって得られた最大乾燥密度の90%である1.71 g/cm<sup>3</sup>に達していない。すなわち、締固め度  $D$  値は、この場合、最大79.5%であった。前述したように、突き固め試験における土の単位体積当たりの締固めエネルギーは、この場合の履帯式車両による振動締固めエネルギーの約24.6倍にも達しており、同一の基準で比較するのは困難である。しかし、締固め度  $D$  値を増大させるためには、さらに大きな加振力を発揮する低周波数の遠心加振機を搭載した実車両の開発が必要である。

### (3) 地中応力伝播

水平加振機を搭載した履帯式車両の走行によって発生する地中応力として、前述の土圧計を用いて、深さ  $z$  軸方向の垂直応力  $\sigma_z$  (kPa) を、土槽底面からの高さ  $H=10, 20, 45, 65$  および  $80$  cm ( $z=70, 60, 35, 15$  および  $0$  cm) において計測した。図-7は、履帯に作用する接地圧  $p$  (kPa) の分布について、一例として、周波数  $f=16$  Hz の場合における無振動転圧完了時の  $N=3$  回および振動転圧完了時の  $N=13$  回目の計測結果を示したものである。横軸の  $X_H$  (cm) は、水平面上において履帯式車両の車両中心線と計測器埋設地点との間の走行方向の距離であり、計測時間に車両の走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4個の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-8(a) は、この場合の無振動完了時  $N=3$  回目における土槽底面からの高さ  $H=10, 45$  cm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。図より明らかに、中間層および深層部においてほぼ同じ垂直応力の値を示



(a) 転圧回数  $N=3$



(b) 転圧回数  $N=13$

図-8 履帯下の垂直応力  $\sigma_z$  の実測分布 ( $f=16$  Hz)

しており、下転輪直下での応力集中は水平方向にかなり分散して低下している。図-8(b)は、同様に、振動転圧完了時の  $N=13$  回目における土槽底面からの高さ  $H=10, 45$  cm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。図より明らかに、 $\sigma_z$  は履帯中央部分に応力集中しており、締固めによる密度増加により中間層は深層部に比し若干増加している。

### (4) 深さ方向の鉛直・水平加速度分布

水平加振機によって履帯式車両が水平方向の振動荷重を受けて走行しているとき、一例として、周波数  $f=25$  Hz について、転圧回数  $N=12$  回目の土槽底面からの高さ  $H=10, 45$  および  $80$  cmでの鉛直・水平加速度  $a_v, a_H$  の振動波形の計測結果を図-9(a)(b)(c)に示す。この場合の  $a_v$  と  $a_H$  の位相差は、 $H=10$  cmにおいて  $0.416 \pm 0.146 \pi$  rad,  $H=45$  cmにおいて  $0.486 \pm 0.138 \pi$  rad,  $H=80$  cmにおいて  $0.301 \pm 0.227 \pi$  radであった。また、それぞれの振動周波数は、24.7 Hz, 60.2 Hz, 31.6 Hzであり、水平加振機の発生周波数25 Hzとは異なっている。この現象は、

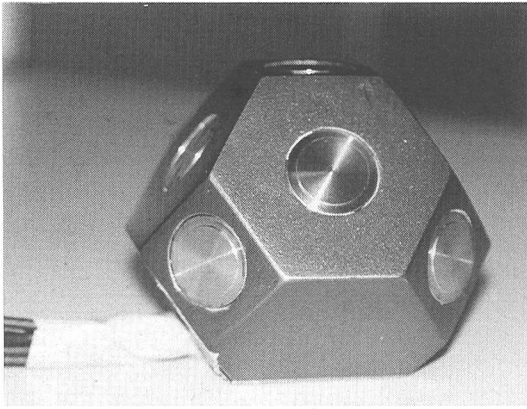


写真-1 SST (Stress state transducer)

特に中間層においては、前後輪部分からの入力波が地中で干渉したためであると考えられる。

$H=10, 45, 80$  cmにおける鉛直方向の加速度振幅  $a_v$  は、それぞれ  $144.9 \pm 13.4$  gal,  $270.6 \pm 155.1$  gal,  $44.1 \pm 29.1$  galであるのに対し、水平方向の加速度振幅  $a_H$  は、それぞれ  $598.2 \pm 63.2$  gal,  $500.9 \pm 269.5$  gal,  $62.3 \pm 22.9$  galであった。この場合、 $a_H$  はそれぞれ  $a_v$  の4.13倍、1.85倍、1.41倍であり、いずれの場合においても、水平方向の加速度振幅は鉛直方向と比較して大きいことが明らかとなった。

なお、鉛直・水平方向の変位振幅  $\beta_v, \beta_H$  は、 $H=10, 45, 80$  cmにおいてそれぞれ計測した鉛直・水平加速度振幅  $a_v, a_H$  を  $\omega^2$  で除して算定することができる。その結果、 $H=10$  cmにおいて  $\beta_v=(5.88 \pm 0.55) \times 10^{-3}$  cm,  $\beta_H=(24.27 \pm 2.56) \times 10^{-3}$  cm,  $H=45$  cmにおいて  $\beta_v=(10.98 \pm 6.29) \times 10^{-3}$  cm,  $\beta_H=(20.32 \pm 10.93) \times 10^{-3}$  cm,  $H=80$  cmにおいて  $\beta_v=(1.79 \pm 1.18) \times 10^{-3}$  cm,  $\beta_H=(2.52 \pm 0.93) \times 10^{-3}$  cmと算定することができる。

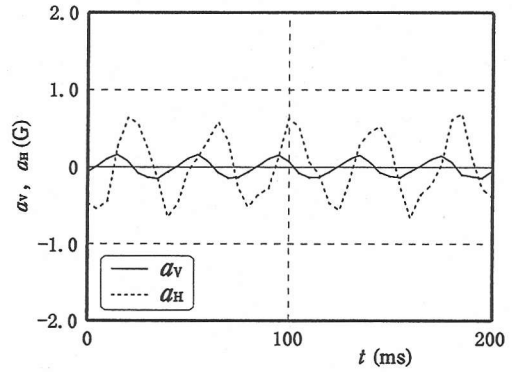
#### 4. 考察

##### (1) 深さ方向の土中応力伝播

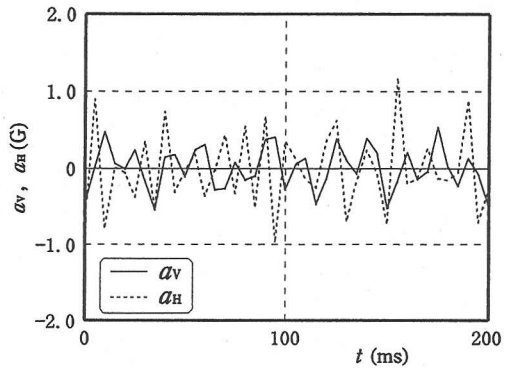
図-10は、当該履帯式車両に対して、一例として、周波数  $f=16$  Hzにおいて、土槽底面からの各高さ  $H$  において実測された水平面上の最大の垂直応力  $\sigma_{zmax}$  と高さ  $H$  との関係性を各転圧回数  $N$  に対して示したものである。

それぞれ、 $N$ が増加するとともに  $\sigma_{zmax}$  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。

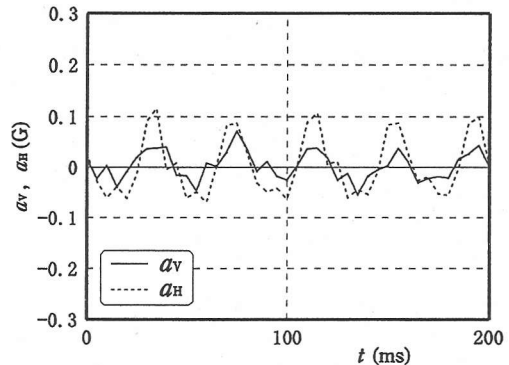
すなわち、浅層部から中間層 ( $H=45 \sim 80$  cm)



(a)  $H=10$  cm の場合



(b)  $H=45$  cm の場合



(c)  $H=80$  cm の場合

図-9 鉛直・水平振動加速度  $a_v, a_H$  の分布 ( $N=12$  回,  $f=25$  Hz)

においては大きな垂直応力が作用しており、高圧縮応力下での交番せん断応力が車両通過回数の増加とともに繰り返り作用し、さらに水平加振機の振動荷重による鉛直および水平加速度の位相差が深層部と比較して小さいことなど比較的適切な交番せん断応力が作用していた。また、浅層部における鉛直・水平加速度振幅は中間層と比較して小さいが、これが大きな垂直応力の作用下でも乾燥密度の頭打ちとな

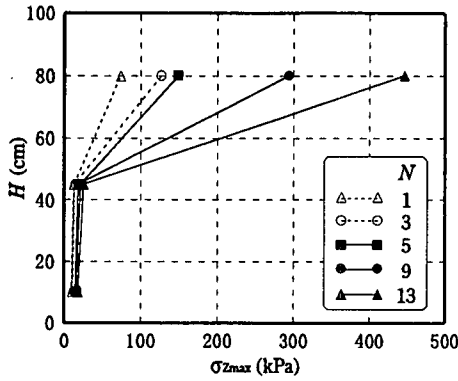


図-10 土槽底面からの高さ  $H$  と最大垂直応力  $\sigma_{zmax}$  の関係 ( $f=16\text{ Hz}$ )

った原因である。一方、中間層においては、鉛直・水平加速度は後述するように卓越しており、これが地表面下のある深さで最大の乾燥密度を呈した要因であると考えられる。さらに、深層部においては、圧縮応力がかかなり低下しているために、振動による交番せん断応力の効果は少なく乾燥密度の増加には反映していない。

## (2) 水平面上の垂直及びせん断応力分布

水平加振機を搭載した履帯式車両の走行によって発生する3次元の全ての土中応力を計測するために写真-1に示すSSTを作成した。SSTは、3個の土圧計を直交座標系であるX-Y-Z軸に垂直に配置してそれぞれの垂直土圧  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  を計測し、他の3個の土圧計をX-Y-Z軸との方向余弦がそれぞれ  $\pm 0.5774$  をなす非直交座標系である  $m_1$ - $m_2$ - $m_3$  軸に垂直に配置してそれぞれの垂直土圧  $\sigma_{m1}$ ,  $\sigma_{m2}$ ,  $\sigma_{m3}$  を計測することのできる大きさ約7cm角の14面からなる構造体である。SSTは、そのXY平面を水平面にZ軸を鉛直上方にとり、XY軸の2等分線上を履帯式車両の走行方向となるように、土槽底面からの高さ  $H=10\text{ cm}$  の位置に埋設した。

なお、SSTの応答周波数は定格出力  $659 \times 10^6$  ひずみの土圧計と市販の動ひずみ計を使用しているため5kHzまで計測可能である。ここでは、データ整理上の読み取り間隔を0.1sとしている。

水平面上の垂直応力  $\sigma_z$  は直接計測され、せん断応力  $\tau_{zx}$  は、次式を用いて算定することができる。

$$\tau_{zx} = \frac{3}{4}(\sigma_{m1} + \sigma_{m3}) - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4)$$

図-11は、一例として、周波数  $f=25\text{ Hz}$ 、転圧回数  $N=13$  回目における土槽底面からの高さ  $H=10\text{ cm}$  の水平面における垂直応力  $\sigma_z$  とせん断応力  $\tau_{zx}$  の分

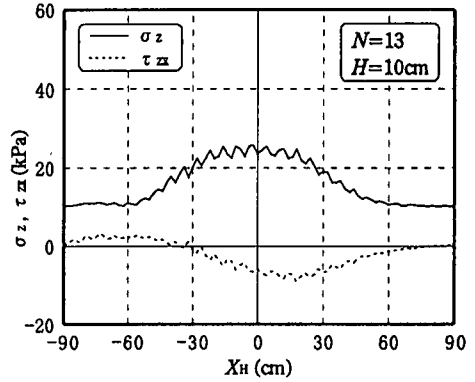


図-11 深層部における垂直応力  $\sigma_z$ 、せん断応力  $\tau_{zx}$  の実測分布 ( $f=25\text{ Hz}$ )

布を水平距離  $X_H$  に対して示したものである。図より明らかに、垂直応力  $\sigma_z$  は  $X_H=0\text{ cm}$  において最大値  $23.6\text{ kPa}$  を示し、せん断応力  $\tau_{zx}$  は、 $X_H=-72\text{ cm}$  において正のピーク値  $2.9\text{ kPa}$ 、 $X_H=18\text{ cm}$  において負のピーク値  $-9.1\text{ kPa}$  を示している。

また、 $\sigma_z$  と  $\tau_{xy}$  の分布範囲は、応力伝播により履帯式車両の接地長以上に拡散していることが明らかである。この深層部においても、正負に変動する交番せん断応力が繰り返し作用しており、村山ら<sup>9)</sup>が指摘しているように初期のまま土の弾塑性状態から締固め完了後の弾性体へと変態する土のダイレイタンス現象が有効に作用していたことが確認される。

## (3) 深層部における主応力分布

最大主応力  $\sigma_1$ 、中間主応力  $\sigma_2$ 、最小主応力  $\sigma_3$  は、次式に示す3個の不偏量  $J_1$ ,  $J_2$ , および  $J_3$  から算定することができる<sup>2)</sup>。

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (5)$$

$$J_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \quad (6)$$

$$J_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \quad (7)$$

また、主応力  $\sigma_{1,2,3}$  のX-Y-Z軸に対する方向余弦  $h_{1,2,3}$ ,  $m_{1,2,3}$ ,  $n_{1,2,3}$  は次式によって算定することができる。

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_{1,2,3})\tau_{yz} - \tau_{xy}\tau_{zx}}{(\sigma_y - \sigma_{1,2,3})\tau_{zx} - \tau_{xy}\tau_{yz}} = A$$



$$\frac{(\sigma_x - \sigma_{1,2,3})(\sigma_y - \sigma_{1,2,3}) - \tau_{xy}^2}{\tau_{zx}(\sigma_x - \sigma_{1,2,3}) - \tau_{yz} \tau_{xy}} = B$$

とおくと

$$l_{1,2,3} = \pm \left( \frac{1}{1+A^2+B^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$m_{1,2,3} = A l_{1,2,3} \quad (9)$$

$$n_{1,2,3} = B l_{1,2,3} \quad (10)$$

従って、車両の進行方向  $X_H$  に対する最大主応力  $\sigma_{1,2,3}$  の方向余弦  $\cos\theta_{1,2,3}$  は次式で算定することができる。

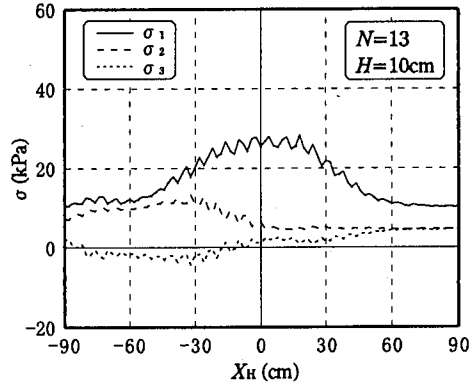
$$\cos\theta_{1,2,3} = \pm \sqrt{\frac{l_{1,2,3}^2 + m_{1,2,3}^2}{1 + \left( \frac{l_{1,2,3} - m_{1,2,3}}{l_{1,2,3} + m_{1,2,3}} \right)^2}} \quad (11)$$

図-12(a)(b)は、一例として、周波数  $f=25$  Hz、転圧回数  $N=13$  回目について、深層部  $H=10$  cm において発生する最大主応力  $\sigma_1$ 、中間主応力  $\sigma_2$ 、最小主応力  $\sigma_3$  の分布、およびそれらの  $X_H$  に対する方向余弦より算定した最大・中間主応力方向を水平距離  $X_H$  に対して示したものである。図より明らかに、 $X_H=18$  cm において最大主応力  $\sigma_1$  はピーク値 28.4 kPa、中間主応力  $\sigma_2$  は  $X_H=-32$  cm において 13.3 kPa を示し、最小主応力  $\sigma_3$  は殆ど発生していないことが判明した。すなわち、最大主応力  $\sigma_1$  は地盤反力の作用点が履帯後方に偏心していたためにその最大値が中央部より後方に発生しており、また、車両の進行方向に傾斜して作用する中間主応力  $\sigma_2$  は車両の進行方向の履帯接地部に発生する推進力によって車両前方のこの位置で最大の中間主応力となる圧縮応力を発生せしめたと考えられる。また、 $H=10$  cm の水平面上における最大主応力の方向は、履帯接地部中央に向かって傾斜していることが明らかとなった。なお、最小主応力  $\sigma_3$  が負値を示す部分では、履带式車両の通過に伴って、地中の土粒子の移動軌跡が楕円運動<sup>9)</sup>する際の除荷過程において、土が塑性流動し引張応力が発生したことによると考えられる。

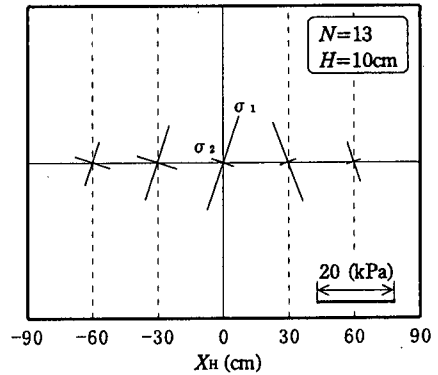
#### (4) 八面体垂直及びせん断応力分布

八面体垂直応力  $\sigma_{oct}$  および八面体せん断応力  $\tau_{oct}$  は、次式を用いて算定することができる。

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (12)$$



(a) 主応力



(b) 主応力方向

図-12 深層部における主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  の大きさ及び主応力方向の分布 ( $f=25$  Hz)

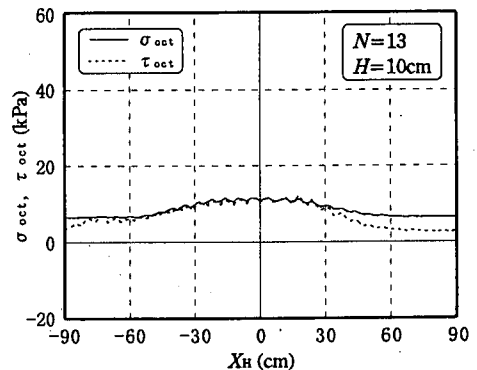


図-13 深層部における八面体垂直応力  $\sigma_{oct}$  と八面体せん断応力  $\tau_{oct}$  の分布 ( $f=25$  Hz)

$$\tau_{oct} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{9} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

図-13は、一例として、周波数  $f=25$  Hz、転圧回数  $N=13$  回目について、深層部の  $H=10$  cm におい

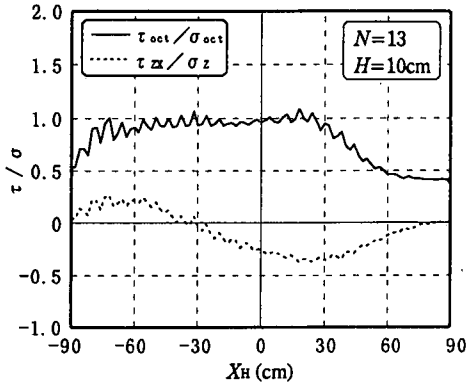


図-14 深層部におけるせん断応力/垂直応力比  $\tau_{zx}/\sigma_z$ ,  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  の分布 ( $f=25$  Hz)

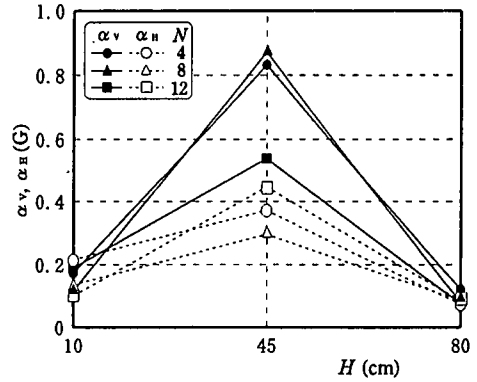


図-15 各転圧回数  $N$  に対する鉛直・水平加速度振幅  $\alpha_v$ ,  $\alpha_H$  と土槽底面からの高さ  $H$  との関係 ( $f=16$  Hz)

て発生する八面体垂直応力  $\sigma_{oct}$  および八面体せん断応力  $\tau_{oct}$  を水平距離  $X_H$  に対して示したものである。図より明らかに、 $\sigma_{oct}$  および  $\tau_{oct}$  の分布形状はなだらかな分布であり、それぞれ履帯式車両の接地中央部においてピーク値 11.6 kPa, 12.2 kPa を示している。

#### (5) せん断応力/垂直応力比分布

土中に発生するせん断応力と垂直応力の比率が土の締固めに大きな影響を及ぼすことはよく知られている<sup>7)</sup>。ここでは、前式(4)より算定されるせん断応力  $\tau_{zx}$  と計測された垂直応力  $\sigma_z$  の比率、および前式(21), (20)より算定されるせん断応力  $\tau_{oct}$  と垂直応力  $\sigma_{oct}$  の比率について考察する。図-14は、一例として、周波数  $f=25$  Hz, 転圧回数  $N=13$  回目について、深層部の  $H=10$  cm において発生するせん断応力と垂直応力の比率である  $\tau_{zx}/\sigma_z$  および  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  を水平距離  $X_H$  に対して示したものである。図より明らかに、 $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  の分布形状はなだらかな分布を示し、 $X_H=18$  cm においてピーク値 1.08 を示している。一方、 $\tau_{zx}/\sigma_z$  の分布形態は履帯式車両の前輪接地部位において正負が反転している。すなわち、 $\tau_{zx}/\sigma_z$  の値は、 $X_H=-72$  cm においてピーク値 0.26 を示し、 $X_H=24$  cm においてピーク値  $-0.37$  を示している。

Baileyら<sup>8)</sup>は、土の初期体積  $V_i$  と締固め後の体積  $V$  の比率の対数値は、八面体垂直応力  $\sigma_{oct}$ 、および八面体せん断応力と八面体垂直応力の比率である  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  の関数として、次式で与えられることを提言した。

$$\ln\left\{\frac{V}{V_i}\right\} = (A+B\sigma_{oct})\{1-\exp(-C\sigma_{oct})\} + D\left\{\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}}\right\} \quad (14)$$

ここに、A, B, Dは、一般に、負値、Cは正值の適合定数である。さらに、彼等は、土の密度は  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  の増加とともにほぼ直線的に増加することを実証している。砂質ロームの場合のD値は  $-0.14 \sim -0.11$  の範囲にあり<sup>8)</sup>、この場合の  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  の最大値 1.08 を上式に代入すると、 $\tau_{oct}$  のみによる体積減少  $V_i - V$  は  $V_i$  の 11~14% となるため密度は初期密度の 13~16% 増加すると予想される。従って、垂直応力による体積変化だけでなく、せん断応力によるダイレイタンスーの効果が十分に発揮され、比較的良好に締固めが行われると推察される。

しかし、前節3(4)で前述したように、鉛直と水平方向の加速度波形の位相差は  $0.3 \sim 0.5\pi$  rad とかなり大きな値を示しているために、如何に  $\tau_{oct}/\sigma_{oct}$  が大きくなっていても振動による転圧効果は少ない。すなわち、鉛直と水平方向加速度の位相差が比較的少なく、 $\tau_{oct}$  と  $\sigma_{oct}$  がほぼ同時に作用する鉛直加振機<sup>2)</sup>や遠心加振機<sup>9)</sup>を搭載した履帯式車両による転圧と比較して、締固め密度の向上においては頭打ちとなっていると考えられる。

#### (6) 深さ方向の鉛直・水平加速度振幅

水平加振機を搭載した履帯式車両の走行に伴って土中に発生する鉛直および水平方向の加速度の振幅  $\alpha_v$  (G),  $\alpha_H$  (G) は、土槽底面からの高さ  $H$  (cm) および転圧回数  $N$  によって変化する。

図-15は、一例として、周波数  $f=16$  Hz の水平加振機を搭載した履帯式車両の走行に伴って、各転圧回数  $N$  において発生する鉛直・水平加速度振幅  $\alpha_v$  (G),  $\alpha_H$  (G) と土槽底面からの高さ  $H=10, 45, 80$  cm との関係を示したものである。図より明らかに、各転圧回数  $N$  に対して  $H=45$  cm の中間層において発生する  $\alpha_v, \alpha_H$  は図より明らかに振動波形の干渉作用によって最大値を示しており、また

$\alpha_v$ の方が $\alpha_H$ より常に大きくなっている。なお、 $H = 80$  cmの地表面においては土の練り返し現象に伴って減少する傾向が見られた。なお、これらの傾向は、他の周波数においても同様に見られた。

なお、鉛直と水平方向の加速度波形の位相差は、前述したように、 $0.3 \sim 0.5\pi$  radの間にあり、かなり大きな値を示している。

### (7) 深さ方向における鉛直・水平振動の変位振幅

水平加振機を搭載した履带式車両の走行に伴って土中に発生する鉛直および水平方向振動による変位振幅 $\beta_v$  (cm),  $\beta_H$  (cm)は、前述した鉛直・水平加速度振幅 $\alpha_v$  (G),  $\alpha_H$  (G)および各加速度計の位置において実測された周波数 $f$ を用いて次式によって算定することができる。

$$\beta_{v(cm)} = \frac{980 \alpha_{v(0)}}{\omega^2} = \frac{980 \alpha_{v(0)}}{(2\pi f)^2} \quad (15)$$

$\beta_v$ (cm),  $\beta_H$ (cm)は、土槽底面からの高さ $H$ (cm)および転圧回数 $N$ によって変化する。

図-16は、一例として、周波数 $f=16$ Hzの水平加振機を搭載した履带式車両の走行に伴って、各転圧回数 $N$ において発生する鉛直・水平振動の変位振幅 $\beta_v$  (cm),  $\beta_H$  (cm)と土槽底面からの高さ $H$ との関係を示したものである。図より明らかに、振動加速度と同様に、 $\beta_v$ ,  $\beta_H$ は中間層の $H=45$  cmにおいては最大値を示すことが判明した。なお、これらの傾向は他の周波数においても見られた。

## 5. 結論

自重約10.9 kNのゴム製のたわみ性履带式車両に最大加振力9.8 kNの車両進行方向の水平方向のみに起振力を発生させる水平加振機を搭載し、最適含水比に調整した高リフト厚80 cmのまさ土地盤上で無振動転圧および周波数16~51 Hzで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、その実験結果について理論的考察を行った。得られた新しい知見を下記に列記する。

(1) 水平加振機の振動周波数は車両-地盤振動系の固有振動数において最も高い締固め効果を発揮するが、本実験の範囲では最も近い $f=16$  Hzにおいて地表面沈下量および転圧後の乾燥密度は最大値を示すことが判明した。

(2) 各深さにおける土の締固めによる乾燥密度は、無振動、振動時とも転圧回数の増加とともに増加し

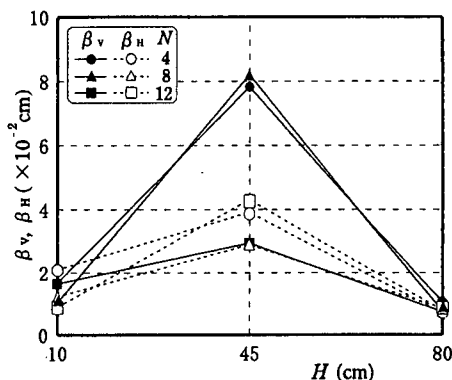


図-16 各転圧回数 $N$ に対する鉛直・水平振動変位振幅 $\beta_v, \beta_H$ と土槽底面からの高さ $H$ との関係( $f=16$ Hz)

ある一定値に漸近している。いずれの転圧回数においても、土の深さ方向の乾燥密度分布は、ある深さで最大値を示した後減少し、深層部での締固めは十分には行われていない。振動転圧においては、周波数16 Hzにおいて、最終締固め完了後の地表面における乾燥密度は $1.47$  g/cm<sup>3</sup>、深さ5.4 cmにおいて最も大きな乾燥密度 $1.51$  g/cm<sup>3</sup>に達しており、深層部での乾燥密度は $1.34$  g/cm<sup>3</sup>と低下している。また、これらの値は周波数の増加とともに低下している。

(3) 深層部における水平面上の垂直応力分布は、履带式車両の進行とともに大きくなり、履帯中央部にピーク値を有する凸型分布を呈している。せん断応力分布は履帯のフロントアイドラ近傍において正から負へ反転するとともに、履带式車両の往復走行においても逆方向に作用する交番せん断応力分布となるので土のせん断に伴うダイレイタンスー現象による締固め効果に大きな役割をすること、また、この水平面上の最大主応力の方向は履帯中央部で鉛直方向にあり、その左右位置では履帯の中央部に向かって傾斜していることが明らかである。

(4) 適切な交番せん断応力とは、車両通過とともに発生する正負の大きなせん断応力波形が高い垂直応力下で転圧回数とともに繰り返して発生すること、および加振力による水平・鉛直加速度が十分大きくかつ両者の間に位相差がなく八面体応力比が十分大きいこと等の要因によって決定される。深層部で発生する八面体垂直応力および八面体せん断応力をSSTによって計測した結果、いずれも履帯中央部においてピーク値を有する凸型分布を呈しており、八面体せん断応力が八面体垂直応力より若干大きく有効な締固め効果が期待できる。

(5) 水平加振力の作用によって、土中に発生する主応力の方向は回転し、それに伴ってせん断応力の作用方向も回転する。そのため、土のせん断ひずみ

が土中のあらゆる方向に発生するので、土の締固めに大きく寄与すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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, 1998年10月.
- 2) Muro, T., Miyoshi, M. and Mitsubayashi, T.: Effect of a tracked vehicle mounting an oscillator on the vibro-compaction of a high lifted decomposed granite sandy soil, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.38, No.4, pp.129-144, Dec., 1998.
- 3) 井上裕之, 賀川進, 大橋辰夫: 厚層転圧用のクローラ式振動締固機, コマツ技報, Vol.44, No.2, pp.44-49, 1999年2月.
- 4) Nichols, T. A., Bailey, A. C., Johnson, C. E. and Grisso, R. D.: A stress state transducer for soil, Transactions of the ASCE, Vol.30, No.5, pp.1237-1241, 1987.
- 5) 村山朔郎, 道広一利: A E からみた砂の粒子運動, 土木学会論文集, 第352号/III-2, pp.119-127, 1984年12月.
- 6) Yong, R. N. and Fattah, E. A.: Influence of contact characteristics on energy transfer and wheel performance on soft soil, Proc. 5th Int. Conf., ISTVS, Vol.2, Detroit, U.S.A., pp.291-310, 1975.
- 7) Bailey, A. C., Nichols, T. A. and Johnson, C. E.: Soil stress state determination under wheel loads, Transactions of the ASCE, Vol.31, No.5, pp.1309-1314, 1988.
- 8) Bailey, A. C. and Johnson, C. E.: A soil compaction model for cylindrical stress state, Transactions of the ASCE, Vol.32, No.3, pp.822-825, 1989.
- 9) 室達朗, 吉岡伸朗, 三好宗仁: 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帯式車両の振動転圧効果, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.139-150, 1998年3月.
- 10) 中島聡, 大場哲也, 隈本開男, 谷口利久: 大型締固め機械による土の厚層締固め技術 (牽引式MVT工法), ハザマ研究年報, pp.111-121, 1997年12月.

(1999. 5. 27 受付)

## EFFECT OF A TRACKED VEHICLE MOUNTING A HORIZONTAL OSCILLATOR ON THE VIBRO-COMPACTION OF A HIGH LIFTED DECOMPOSED GRANITE SANDY SOIL

Tatsuro MURO, Soichiro KAWAHARA and Takahiro MITSUBAYASHI

The aim of this paper is to evaluate the effect of plane load of a tracked vehicle mounted with a horizontal oscillator on the vibro-compaction of a high lifted decomposed granite soil. The vibro-compaction test was executed in a large soil bin of length of 540 cm, width of 150 cm and height 100 cm using a small tracked vehicle of total weight of 10.9 kN mounted with a horizontal oscillator having a constant exciting force of 9.8 kN in the range of frequency of 16 to 51 Hz. As a result, it was observed that the amount of depression of ground surface and the distribution of dry density of soil showed the maximum value respectively, at the frequency of 16 Hz. The dry density at the middle stratum showed a comparatively high value due to the dilatancy effect accompanying with an occurrence of alternative shear stress, while the dry density decreased rapidly to the low constant value at the deep stratum.