

8. 新しい厚層締固め機械の研究開発

～鉛直加振型履带式車両の性能比較～

愛媛大学：*室 達朗，河原 莊一郎
日立建機(株)：三林 貴宏

1. はじめに

近年、高リフト厚の土砂を高速で転圧し顕著な締固め効果を発揮する新しい締固め機械の開発が集積の緊急課題であるとされている。従来、鉛直方向に加振する振動ローラでは、地表面部分において過転圧のために密度が増加しないばかりでなく、厚層での締固めは不可能とされてきた。振動ローラが地盤に作用する線荷重よりはむしろ加振型履带式車両の履帯接地圧として地盤に作用する面荷重による締固め作業の方が、土粒子の横方向の移動を拘束するためより効果的な転圧作業を実現させることができると予測できる。本研究の目的は、新しい厚層締固め機械を研究開発することであり、まず、遠心加振機を搭載した振動ローラと履带式車両の転圧効果について比較し、履带式車両の方がより大きな転圧性能を示すことを明らかにする。次に、鉛直加振型履带式車両と遠心および水平加振型履带式車両について、それぞれの転圧性能を比較し、鉛直加振機がより転圧効果の優れた加振方向であることを実証する。

2. 実験装置と方法

2.1 供試地盤

愛媛県産の粒度配合に優れたまさ土を最適含水比 12.8% に調整し、長さ 5.4m、幅 1.5m、高さ 1.0m の大型土槽に充填して供試地盤を作成した。試料土の物性は、平均粒径 0.78 mm、均等係数 12、比重 2.66 であった。一定の高さ 1m より試料土を自由落下させ、リフト厚 80 cm に達するまで注意深く充填した。その結果、深さ方向の初期湿潤密度は、 $1.45 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ とほぼ均一な密度を有する地盤を作成することができた。

2.2 締固め機械

(1) 2軸2輪式振動ローラ

図-1 は、試作した 2 軸 2 輪式振動ローラの構造図である。遠心加振機は車両中央部分においてその水平軸を車両の進行方向に対して直角方向に設置してある。遠心加振機の振動周波数は 56.8 Hz、遠心加振力 7.35 kN であり、出力 0.75 kW の電動モータで駆動されている。この遠心加振機を搭載した車両総重量

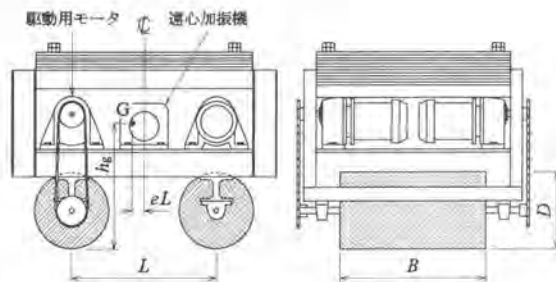


図-1 2軸2輪式振動ローラ

は約 10kN であり、前後輪ローラに作用する線荷重は 85.8kN/cm である。これらのローラは直径 32 cm、幅 60 cm であり、2 台の出力 0.75 kW の電動モータによって両輪駆動状態で自走させた。車両重心の偏心率 e は 0.002、重心高さ h_g は 53.3 cm、車軸間隔 L は 60 cm、車速は 4.61 cm/s である。

(2) 加振型履带式車両

図-2は、ゴム製履帯を装着したたわみ性履带式車両の構造図である。加振機を搭載した車両総重量は約11kNであり、車両重心偏心率 e は0.003、重心高さ h_g は34cm、履帯幅 B は20cm、履帯接地長 L は91cm、履帯間隔 C は45.5cm、平均接地圧は29.8kPaである。車両は0.75kWの電動モータで後輪スプロケットを駆動させ、車速は3.75cm/sとした。加振機として使用した遠心加振機は2種類あり、一方は前述したものと同一で、他方は振動周波数16Hz、遠心加振力9.8kNであり、出力3.7kWの電動モータで駆動されている。鉛直方向加振機および車両の進行方向に振動する水平加振機は、振動周波数16Hz、最大加振力9.8kNであり、出力3.7kWの電動モータで駆動されている。

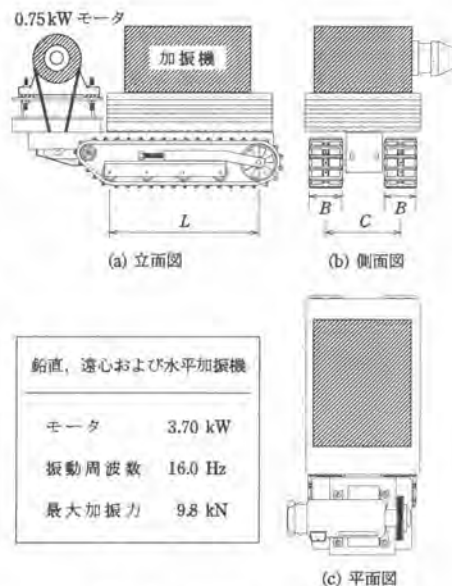


図-2 加振型履带式車両

2.3 実験方法

まず、振動周波数 $f=56.8\text{Hz}$ 、遠心加振力7.35kNの同一の遠心加振機を用いて、総重量約10kNとした2軸2輪式ローラと履带式車両による転圧実験を実施した。両車両の走行形態は実際の締固め作業を勘案し、転圧回数 $N=1\sim 10$ では無振動転圧とし、 $N=11\sim 20$ で振動転圧させた。ここに、 N とは車両が N 回往復したことを意味する。次に、履带式車両のみについて、 $f=16\text{Hz}$ に対する最大加振力をそれぞれ9.8kNとした鉛直・遠心および水平加振機を搭載し、総重量を約11kNとした履带式車両による転圧実験を行い、加振方向の振動転圧効果に及ぼす影響について調査した。ここでは、転圧回数 $N=1\sim 3$ では無振動転圧とし、 $N=4\sim 13$ で振動転圧させた。各転圧回数毎に、地表面の沈下量、深さ方向のコーン指数、垂直およびせん断応力、振動加速度を計測した。深さ方向の土の乾燥密度は、コーン指数より換算して求めた。地中に埋設した各種計測器は、図-3において履带式車両の場合について示すように、土槽中央部の走行レーンの履帯直下において、土槽底面からの高さ $H(\text{cm})$ の位置に設置した。

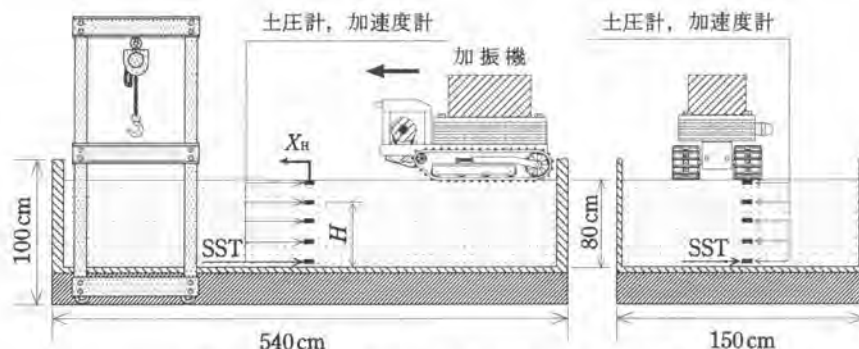


図-3 実験装置および各種計測器の埋設位置

3. 実験結果と考察

3.1 遠心加振機によるローラと履带式車両の振動転圧効果

(1) 深さ方向の乾燥密度分布

図-4は、 $N=20$ における深さ方向の乾燥密度分布について、2軸2輪式ローラと履带式車両による転圧効果を比較したものである。振動ローラでは、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.66 \text{ g/cm}^3$ 、深層部における乾燥密度 $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 、履带式車両では、 $\rho_{dmax} = 1.69 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$ と増加している。

(2) 地中応力伝播

図-5(a)(b)は、2軸2輪式ローラと履带式車両において、それぞれ $N=20$ について各 H における鉛直方向の垂直応力 σ_z の水平面上の分布を車両の進行方向にとったものである。 $H=65 \text{ cm}$ においては、ローラ直下において応力集中による2つの山が観測されているが、履带式車両では下転輪直下において5つのピーク値が観測されている。 $H=40 \text{ cm}$ においては、履带式車両での最大垂直応力 25.0 kPa は、ローラでの 17.1 kPa と比較して約1.46倍と高い値を示している。

(3) 深層部における振動加速度分布

図-6(a)(b)は、2軸2輪式ローラと履带式車両において、それぞれ $H=10 \text{ cm}$ において計測した鉛直、水平加速度 a_v, a_h の振動波形である。両者の位相差は、2軸2輪式ローラにおいて約 $\pi/2 \text{ rad}$ であるのに対し、履带式車両においては殆ど存在せず、鉛直と水平方向力が同時に作用するために転圧効果が優勢となることを示唆している。

3.2 鉛直・遠心および水平加振型履带式車両の振動転圧効果

(1) 車両-地盤系振動特性

図-7は、鉛直、水平加振力 F_v, F_h を発生させる加振型履带式車両と鉛直、水平方向のばね定数 k_v, k_h と減衰定数 c_v, c_h を有する Voigt model で構成される地盤との間の振動特性を解析するための車両-地盤系振動モデルである。最大加振力 F 、角速度 ω 、位相差 γ に対し、 $F_v = F \sin(\omega t - \gamma)$ 、 $F_h = F \cos(\omega t - \gamma)$ と表現される。車両の質量 m 、慣性モーメント J 、回転角 θ 、履帯接地長 L 、車両重心高さ h_g に対し、 $x-y$ 座標において、次式で示す鉛直、水平および回転方向の振動方程式が成立する。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_v \frac{dy}{dt} + k_v y = F \sin(\omega t - \gamma) \quad (1)$$

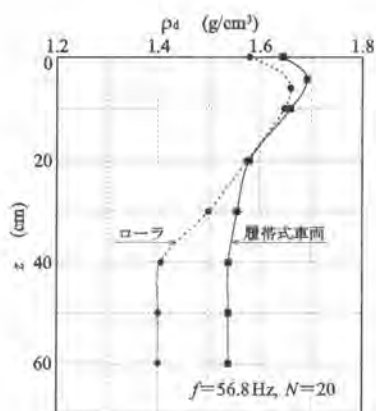
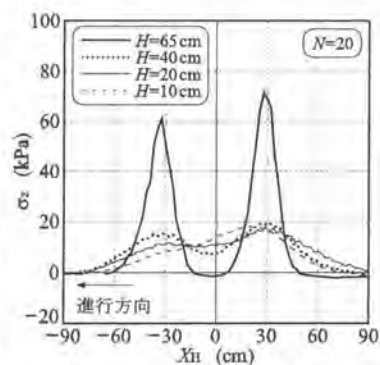
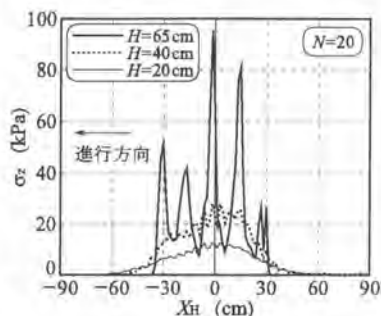


図-4 乾燥密度 ρ_d と深さ z の関係 (遠心加振機)

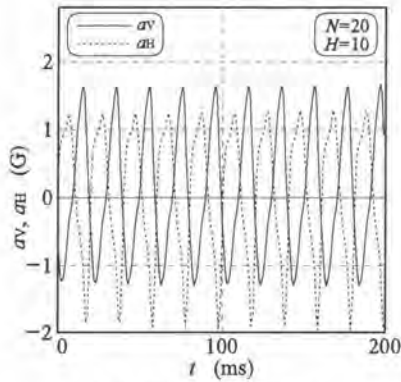


(a) 2軸2輪式ローラ

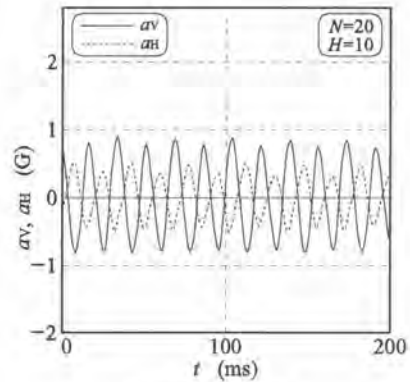


(b) 履带式車両

図-5 垂直応力 σ_z の実測分布図 ($N=20$)



(a) 2軸2輪式ローラ



(b) 履帯式車両

図-6 鉛直、水平加速度 a_v, a_H の経時変化

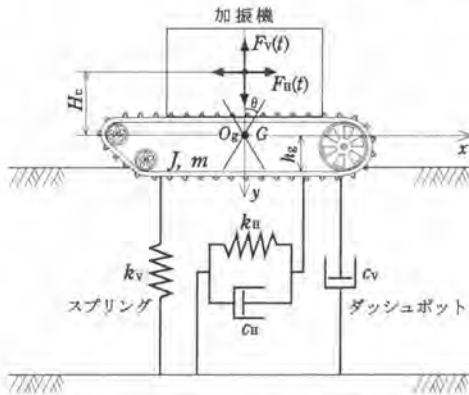


図-7 加振型履帯式車両-地盤系モデル

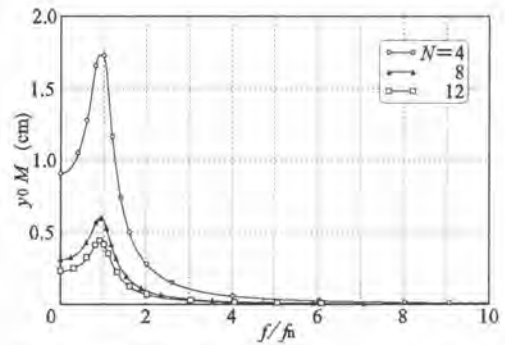


図-8 3種類の転圧回数に対する共振曲線

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_n \frac{dx}{dt} + k_n x - h_g c_n \frac{d\theta}{dt} - h_g k_n \theta = F \cos(\omega t - \gamma) \quad (2)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + h_g^2 c_n \frac{d\theta}{dt} + h_g^2 k_n \theta - h_g c_n \frac{dx}{dt} - h_g k_n x + \frac{1}{12} L^2 c_v \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{12} L^2 k_v \theta = F H_c \cos(\omega t - \gamma) \quad (3)$$

図-8は、当該車両-地盤系における鉛直方向の共振曲線であり、振幅 $y_0 M$ と振動周波数 f と固有振動数 f_0 の比率との関係を転圧回数 4, 8, 12 について算定したものである。それぞれ $f/f_0=1$ ($f_0=4.96, 8.46, 9.85$ Hz) において、車両-地盤系は共振しており、振動振幅は最大値を示している。

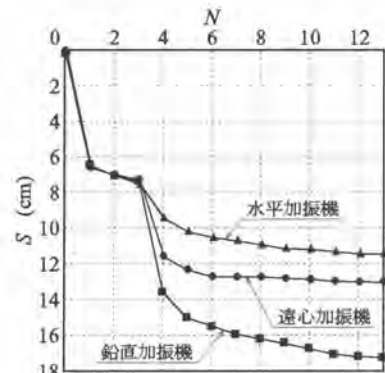


図-9 3種類の加振型履帯式車両による地表面沈下量 S と転圧回数 N の関係

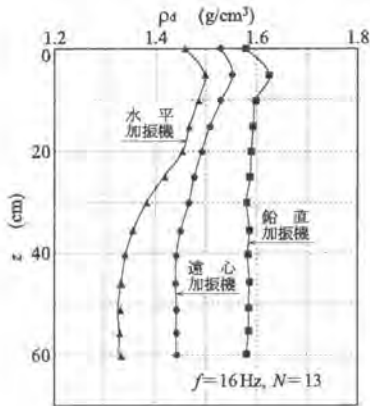


図-10 3種類の加振型履带式車両による締固め乾燥密度 ρ_d の深さ z 方向の分布

(2) 地表面沈下量

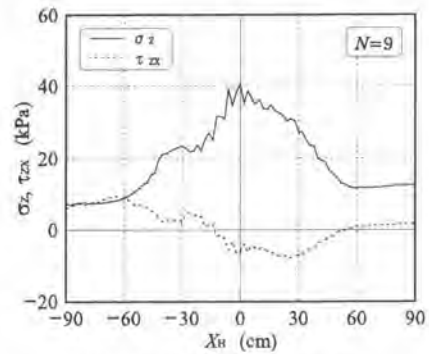
図-9は、鉛直・遠心および水平加振型履带式車両の走行による地表面沈下量と転圧回数との関係について、 $f=16\text{ Hz}$ における実験結果を示したものである。図より明らかに、鉛直加振機による最終沈下量は17.2 cmであり、この値は遠心加振機と比較して1.32倍、水平加振機と比較して1.51倍となっている。

(3) 深さ方向の乾燥密度分布

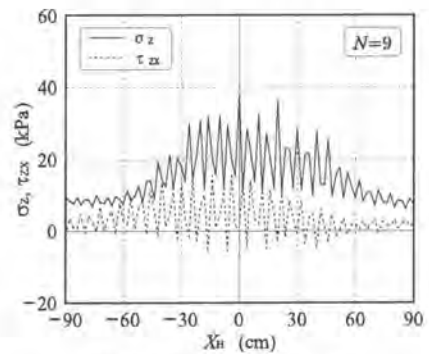
図-10は、 $f=16\text{ Hz}$ 、 $N=13$ における ρ_d の深さ z 方向の分布を示したものである。図より明らかに、鉛直加振機による乾燥密度分布は深層部に至るまでほぼ均一に締固められており、さらに他の加振機と比較して全層にわたって顕著な締固め効果を発揮している。鉛直加振機を使用した場合、地表面における乾燥密度は 1.54 g/cm^3 、 $\rho_{d\max}$ は $z=5.2\text{ cm}$ において 1.57 g/cm^3 、 $\rho_{\#}$ は 1.44 g/cm^3 であった。なお、地表面で計測した鉛直加速度振幅より算定した締固めエネルギーは、鉛直、遠心および水平加振型履带式車両でそれぞれ313.5、29.7、22.4 kNm/m³であった。

(4) 地中応力伝播

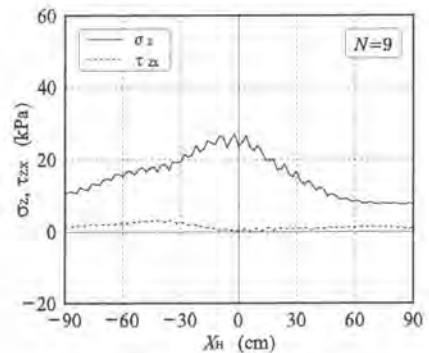
図-11(a)(b)(c)は、一例として、転圧回数9回目の鉛直、遠心および水平加振型履带式車両の走行に伴って発生する深層部($H=10\text{ cm}$)における水平面に作用するせん断応力 τ_{zx} と鉛直方向の垂直応力 σ_z の分布をSST (Stress State Transducer) を用いて計測し、車両の進行方向にとった水平距離 X_H に対



(a) 鉛直加振型履带式車両



(b) 遠心加振型履带式車両



(c) 水平加振型履带式車両

図-11 垂直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{zx} と水平距離 X_H との関係 ($H=10\text{ cm}$ 、 $f=16\text{ Hz}$)

して示したものである。図より明らかに、車両中心位置である $X_H = 0$ において、鉛直加振機での σ_z は最大値 40.4 kPa と他の加振機と比較して卓越しており格段の地中応力の伝播が認められる。それに対応する τ_{xz} は -6.2 kPa を示しており、この場合、車両の通過に伴って正から負へと増減する大きな交番せん断応力が作用しており、せん断に伴うダイレイタンスー効果によって体積収縮し、最も有効な締固めが達成されたのである。すなわち、八面体垂直応力および八面体せん断応力の増加によって体積収縮が助長されたのである。

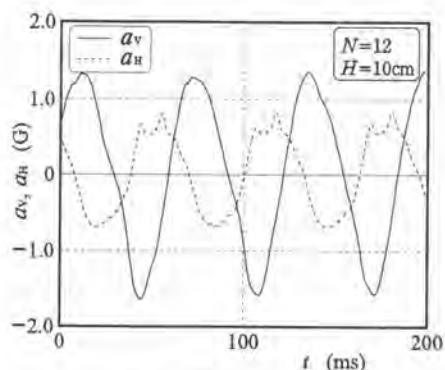
(5) 深層部における振動加速度分布

図-12 (a) (b) (c) は、一例として、転圧回数 12 回目の鉛直、遠心および水平加振型履带式車両の走行に伴って発生する深層部における鉛直および水平加速度 a_v, a_H の振動波形である。鉛直加振機での平均鉛直、水平加速度振幅は 1.47 G, 0.75 G と他の加振機と比較して顕著な振動加速度を示しており、両者の位相差が 0.75π であったとしても深層部における大きな振動転圧効果を発揮する大きな要因となっている。

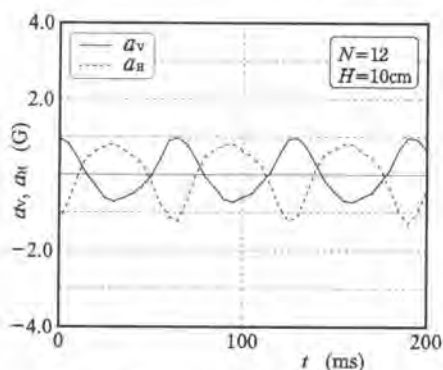
4. 結論

(1) 振動周波数 56.8 Hz, 遠心加振力 7.35 kN の遠心加振機を搭載した同じ総重量約 10 kN を有する 2 軸 2 輪式振動ローラと履带式車両を使用して、厚さ約 80 cm のまさ土地盤での振動転圧実験の結果、最大乾燥密度および深層部での乾燥密度については、履带式車両の方が振動ローラと比較してそれぞれ約 1.01 倍および 1.10 倍と増加する。

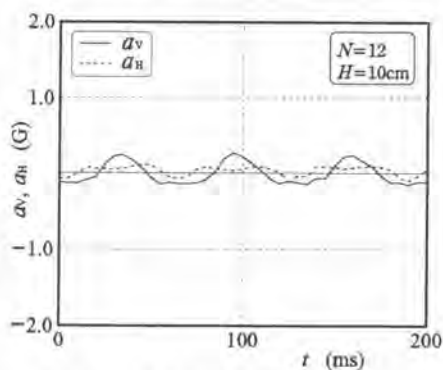
(2) 振動周波数 16 Hz, 最大加振力 9.8 kN, 総重量約 11 kN, 厚さ約 80 cm のまさ土地盤での鉛直加振型履带式車両は、他の同じ遠心、水平加振型履带式車両と比較して深層部における締固め効果を顕著に発揮することができる。また、深さ方向の乾燥密度分布は全層にわたって均一となり、これは地中応力の深層部への伝播、交番せん断応力によるダイレイタンスー現象、さらに大きな加速度振幅によって体積収縮が効果的に行われ、地表面沈下量と締固め乾燥密度を著しく向上させたためである。



(a) 鉛直加振型履带式車両



(b) 遠心加振型履带式車両



(c) 水平加振型履带式車両

図-12 深層部に作用する鉛直、水平加速度 a_v, a_H の経時変化 ($f=16$ Hz)