

6. 厚層における土の締固め管理に用いる新しい密度測定器 SST の開発

○愛媛大学大学院：本田 恭邦
愛媛大学工学部：室 達朗、敷島 直樹

1. はじめに

現在の締固め密度測定には RI 計器が一般的に使用されており、短時間に高精度の測定結果が得られている。しかし、散乱型の計器ではごく表面の密度しか計測できず、透過型であっても貫入孔が必要であり、約 20 cm の深さまでしか測定できない等の問題がある。締固め機械の大型化や作業能力の向上に伴い、厚層締固めが可能となりつつあるため、地表面よりかなり深い位置での密度を測定する装置の開発が必要である。

そこで、6 個の土圧計を配置し、地盤内に生じる 3 次元の応力を測定できる密度測定器 SST(Stress State Transducer)を地中に埋設し、転圧時に伝わる地盤内応力データを基に土の密度を決定する方法を提案する。この方法だと、従来のように測定のために、RI 計器設置のための貫入孔の必要が無くなるため、非破壊かつリアルタイムでの深層における密度管理が可能であり、締固め工の省力化、効率化が図れると考える。

本研究の目的は、SST が厚層での締固め管理に用いる密度測定器として適応可能かどうかを照査することである。そのために、鉛直加振型履带式車両を用いた転圧実験を行い、締固めた土の密度を計測するとともに、その際に生じる地盤内応力を計測する。実験で得られた応力データを密度に変換して推定した密度と、実際に計測した密度との比較を行う。履带式車両の総重量 4.9 kN と最大加振力との载荷比 α を 0.4, 0.8 および 1.2 とし、振動周波数 10~25 Hz において合計 13 通りの実験条件で、深さ 45 cm に撒きだしたまさ土地盤に対して模型実験を実施した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 まさ土地盤

試料土として使用した愛媛県産のまさ土を使用した。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, 比重は 2.66 である。JISA1210,1.1a に規定する締固めエネルギー $E = 551.3 \text{ kNm/m}^3$ において、最適含水比 ω_{opt} は 12.8 %, 最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.88 g/cm^3 , 飽和度 S_r は 82.1 % であった。従って、土の締固め管理基準の締固め度 90% (D_{90}) は 1.69 g/cm^3 である。まさ土供試地盤は、最適含水比に調整した土を、長さ 540 cm, 幅 150 cm, 高さ 65 cm の土槽内に深さ 45 cm に達するまで充填し作製した。

土の乾燥密度とコーン指数との関係を調べるためにコーン貫入試験を実施した。その結果、土の乾燥密度 $\rho_d (\text{g/cm}^3)$ は、次式に示すように、コーン指数 $q_c (\text{kPa})$ と初期地表面からの深さ $z (\text{cm})$ の関数で与えられることが分かった¹⁾。

$$\frac{\rho_d}{\gamma_w} = 1.271 \left[\frac{q_c}{\{1 + 3.101(z/H)\} p_0} \right]^{0.109} \quad (r = 0.991) \quad (1)$$

ここに、 γ_w は水の密度 1.00 g/cm^3 , p_0 は大気圧 98.0 kPa, H は層厚 45 cm であり、 r は相関係数である。

2.2 履带式車両による締固め実験

実験に使用した、鉛直加振機を搭載した履带式車両を図-1 に示す。鉛直加振機を搭載した車両総重量 W は 4.9 kN であり、車両重心偏心率 e は 0.07, 履帯幅 B が 20 cm, 履帯接地長は L が 91 cm, 平均接地圧は q が 13.5 kPa である。搭載した加振機は、2 軸偏心マスで構成さ

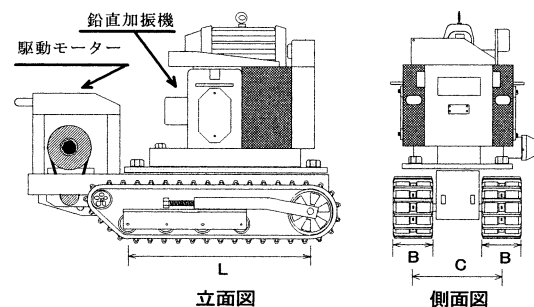


図-1 実験車両

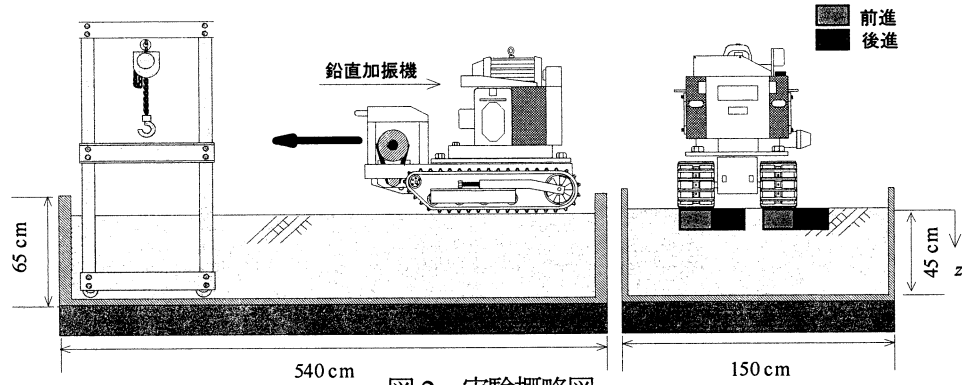


図-2 実験概略図

れており、加振トルクおよび振動周波数を調整することにより、鉛直方向に最大加振力 9.8 kN を発生することができる。

図-2 に実験概略図を示す。図のように前進で土槽端部まで走行した後、チェンブロックで別の走行レーンを後進で通過するように調整した。なお、 N 回往復走行させたときの転圧回数を N 回とした。0.75 kW のモータによって後輪スプロケットを駆動させ、車両速度 V を 3.75 cm/s に設定して自走走行させた。転圧実験は $N=1\sim3$ を無振動転圧とし、 $N=4\sim13$ を振動転圧とした。

地表面の沈下量 S (cm) は、各転圧回数毎に初期地表面からの履帯の轍の部分における位置を、計 12 ケ所デプスゲージを用いて計測し、その平均値とした。また、コーン貫入試験を履帯の轍部分直下において最低 5 ケ所の位置で実施し、貫入速度を 3.42 cm/min として、土槽底面まで深さ方向のコーン指数 q_c の変化を計測した。さらに、車両が走行することによって生じる地盤内応力を 6 個の土圧計を配置する SST を用いて、 z が 40 cm の位置に埋設し、後進時の応力変化を測定した。

2.3 SST による地盤内応力測定

地盤内の 3 次元の応力状態を測定するために、6 個の土圧計を直交座標系と、非直交座標系に配置した SST を使用した。最大寸法約 12 cm × 12 cm の応力測定装置は、土圧計の保護と、せん断応力の影響を最小限にし、正確な応力を測定するため、全体をテフロン素材で覆われている。SST の外観を写真-1 に示す。

図-3 に示すように、3 つの土圧計が X , Y , Z の直交座標系の方角へ垂直に配置され、他の 3 つは X , Y , Z 軸に対して 0.995 rad の角度にある n_1 , n_2 および n_3 軸の

非直交座標系に垂直は位置されている。SST から得られる応力は、 X , Y , Z 方向の応力を σ_x (kPa), σ_y (kPa), σ_z (kPa) であり、 n_1 , n_2 および n_3 軸方向をそれぞれ σ_{n1} (kPa), σ_{n2} (kPa), σ_{n3} (kPa) とする。これらの応力を測定することにより、土中に発生する 3 つの主応力 σ_1 (kPa), σ_2 (kPa), σ_3 (kPa) を求めることができる。さらに、主応力の関係から八面体応力を算出することができる²⁾。八面体垂直応力 σ_{oct} (kPa) および、八面体せん断応力 τ_{oct} (kPa) を次式に示す。

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$\tau_{oct} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{9} \right]^{1/2} \quad (3)$$

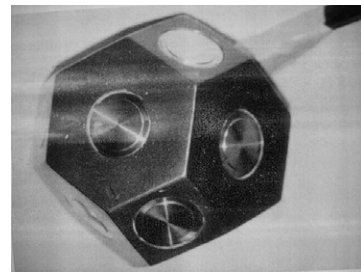


写真-1 SST の外観

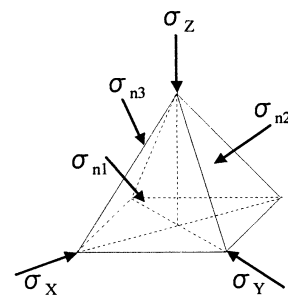


図-3 SST の座標図

3. 実験結果

3.1 深さ方向の乾燥密度分布と転圧回数

載荷比 $\alpha=1.2$ 、振動周波数 $f=16\text{ Hz}$ での、コーン貫入試験より算出した乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ と深さ $z(\text{cm})$ の関係を図4に示す。乾燥密度 ρ_d は転圧回数 N の増加とともに増大することが確認された。また、同実験条件における各種乾燥密度データと転圧回数の関係を図5に示す。この図において、 $\rho_{d\max}$ は測定された乾燥密度の最大値、 $\rho_{d\text{ave}}$ は全層での乾燥密度の平均値、 $\rho_{d\text{bot}}$ は $H=5\text{ cm}$ ($z=40\text{ cm}$)の位置での乾燥密度である。なお、 $\rho_{d\text{bot}}$ はSSTの埋設位置と同じ深さでの密度であり、SSTによる推定密度との比較には $\rho_{d\text{bot}}$ を用いる。

3.2 SSTで計測した地盤内応力

履帯式車両が走行することにより水平面上に生じる応力を土槽底面からの距離 H が 5 cm ($z=40\text{ cm}$)において、SSTを用いて計測した。一例として、 $\alpha=1.2$ 、 $f=16\text{ Hz}$ 、 $N=13$ での、八面体垂直応力 $\sigma_{\text{oct}}(\text{kPa})$ および八面体せん断応力 $\tau_{\text{oct}}(\text{kPa})$ と、水平距離 $X_H(\text{cm})$ の関係を図6に示す。この図において、 σ_{oct} と τ_{oct} は同じような分布を示しているが、 τ_{oct} の方が大きな値であった。図7に、 $\alpha=1.2$ 、 $f=16\text{ Hz}$ における八面体応力と転圧回数の関係を示す。 $N=3$ までの無振動転圧過程ではほぼ一定値となり、振動転圧過程の $N=4$ で値が急に上昇している。その後徐々にであるが値が増大しているが、大きな変動は見られなかった。

4. 考察

4.1 密度推定方法

SSTにより計測した地盤内応力から締固め密度を推定するため、Bailey³⁾の提案した以下の式を用いた。

$$\ln(\rho_d) = \ln(\rho_{d0}) - \left\{ (A + B \cdot \sigma_{\text{oct}}) \left(1 - e^{(-C \cdot \sigma_{\text{oct}})} \right) + D(\tau_{\text{oct}} / \sigma_{\text{oct}}) \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ は転圧後の締固め密度、 $\rho_{d0}(\text{g/cm}^3)$ は転圧前の初期密度、 $\sigma_{\text{oct}}(\text{kPa})$ は八面体垂直応力、 $\tau_{\text{oct}}(\text{kPa})$ は八面体せん断応力であり、 A 、 B (kPa^{-1})、 C (kPa^{-1})、 D は締固め係数である。この4つの締固め係数は、初期密度の異なる供試体を3軸圧縮試験で種々の八面体応力を作用させたときの密度変化から得られる係数である。本実験試料土のまさ土については、以

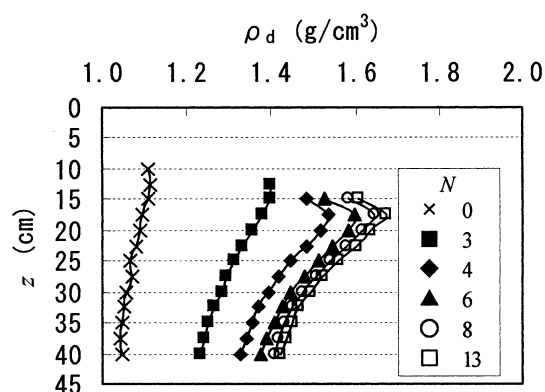


図4 乾燥密度 ρ_d と深さ z ($\alpha=1.2$, $f=16\text{ Hz}$)

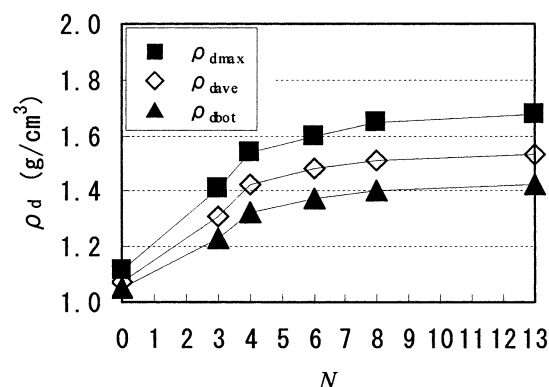


図5 各種乾燥密度と転圧回数 ($\alpha=1.2$, $f=16\text{ Hz}$)

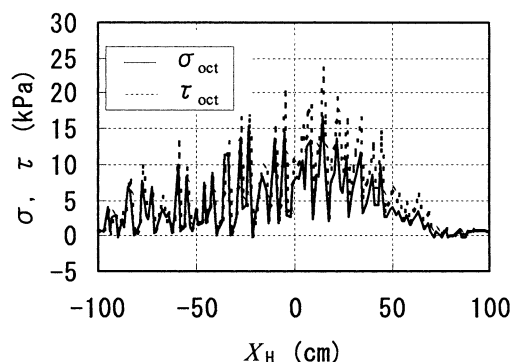


図6 八面体応力分布 ($\alpha=1.2$, $f=16\text{ Hz}$, $N=13$)

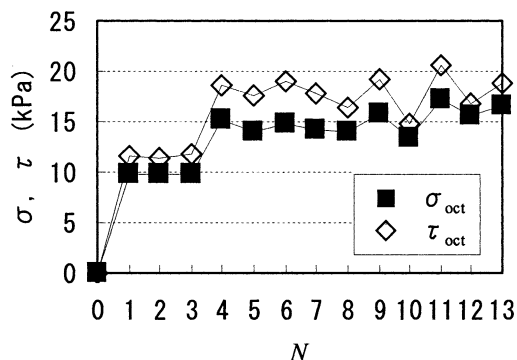


図7 八面体応力と転圧回数 ($\alpha=1.2$, $f=16\text{ Hz}$)

下のような近似式により係数を設定した.

$$A = -0.1795 \times \rho_{d0} + 0.2606 \quad (r = 0.999) \quad (5)$$

$$B = 0.00009533 \times \rho_{d0} - 0.000143 \quad (r = 0.999) \quad (6)$$

$$C = -0.03662 \times \rho_{d0} + 0.04557 \quad (r = 0.910) \quad (7)$$

$$D = -0.001040 \times \sigma_{oct} \times \rho_{d0}^{-6.0342} + 0.2508 \times \rho_{d0} - 0.3895 \quad (r = 0.960) \quad (8)$$

4.2 SSTによる締固め密度の予測

それぞれの実験条件における, 所定の転圧回数毎に計測した深層部乾燥密度 ρ_{dbot} と, SST から得られた地盤内応力を(4)式を用いて推定した密度 ρ_{dest} との比較を行った. なお, 振動転圧過程における締固め密度の予測を目的としているため, 無振動転圧過程は密度予測を行わないものとした. 従って, 上式の転圧前の初期密度 ρ_{d0} には, 無振動転圧終了時の $N = 3$ における ρ_{dbot} を使用した. 図-8 に $\alpha = 1.2$, $f = 16 \text{ Hz}$ における深層部乾燥密度 ρ_{dbot} と, 乾燥密度推定値 ρ_{dest} の比較を示す. また, 締固め密度管理基準の締固め度 90 % ($D_{90} = 1.69 \text{ g/cm}^3$) を図中に示す. この実験条件においては, 振動転圧過程 ($N = 4$ 以降) における八面体応力 (σ_{oct} , τ_{oct}) の変化が微小であったため, 密度推定値 ρ_{dest} はほぼ一定値となっている. また, 実際の深層部乾燥密度 ρ_{dbot} との誤差は +3.8 % ($N = 4$) から -6.6 % ($N = 13$) の範囲であった. 今回行った合計 13 通りの実験条件において, 密度推定結果を比較すると, 振動転圧を行った直後 ($N = 4$) の誤差がやや大きくなっていたが, 最終転圧時 ($N = 13$) には, 誤差がおおよそ ± 5.0 % 程度に収まっていた.

4.3 実施工における適応性

本研究では, 載荷比 α と振動周波数 f を変化させ, SST の密度測定器としての性能を照査した. 今回の模型実験では, 車両が地盤から跳ね上がらない ($\alpha \leq 1.0$) 場合も, 地盤から跳ね上がりながら衝撃力による転圧を行う ($\alpha > 1.0$) 場合も含まれている. 従って, 実施工のようにさらに大きな衝撃力が作用した場合においても密度推定が可能であると考えられる. しかしながら, あくまでも特定の材料・条件での見地なので, 適応にあたってはまだ不明な点が多いのが現状である.

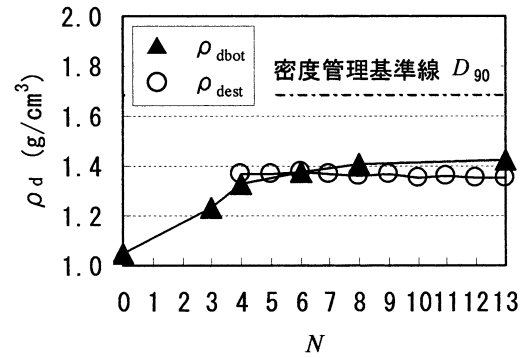


図-8 乾燥密度測定値 ρ_{dbot} と推定値 ρ_{dest} の比較
($\alpha = 1.2$, $f = 16 \text{ Hz}$)

今回の実験では密度管理基準を満たす土の密度測定は行えなかったが, 今後載荷比 α や振動周波数 f を変化させ, さらに締固まった土の密度測定を行いたい.

5. まとめ

厚層での締固め密度管理のに用いる機器である SST の性能を照査するため, 転圧実験により実際に計測した密度と, SST の応力データを基に推定した密度との比較を行った. その結果, いずれの実験条件においても, 最終転圧時 ($N = 13$) には SST による推定密度の誤差はおおよそ ± 5.0 % 以内に収まっており, SST が密度測定器として比較的有效であることが分かった. また, 載荷比 α が 1.0 より大きい, 衝撃力を伴う転圧を行った場合にもほぼ妥当な測定結果であった. そのため, 本実験条件よりも大きな力で転圧を行った場合についても, SST による密度測定は可能だと考えられる. なお, 今後は土質条件の変化に伴う適応性なども検討していく予定である.

- 参考文献 1) 室達朗, TRAN Dang Thai, 三林貴宏, 趙偉民: 厚層まき土に対する遠心加振型履帯式車両の振動転圧効果に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.53-64, 2002 年 9 月.
- 2) MURO, T., MIYOSHI, M. and MITSUBAYASHI, T. 1998. Effect of a Tracked Vehicle Mounting an Oscillator on the Vibro-Compaction of a High Lifted Decomposed Granite Sandy Soil, SOILS AND FOUNDATIONS, 38(4), 129-144.
- 3) BAILEY, A. C. and JOHNSON, C. E. 1989. A Soil Compaction Model for Cylindrical Stress State, Transactions of the ASCE, 32(3), 822-825