

機関番号：54501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560437

研究課題名（和文） 盛土崩壊抑制締固め法の開発

研究課題名（英文） Development of New Fill Compaction Method

研究代表者

江口 忠臣（EGUCHI TADAOMI）

明石工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授

研究者番号：20232944

研究成果の概要（和文）：

締固めは土工の品質を大きく支配する重要な工種である。供用期間中、安定を保ち得て、所定の支持性能を持ち続ける盛土を造成するには、その要求に合致する適切な締固めの実行が必要である。本研究は盛土端部の締固め強度不足による崩壊を抑制しうる転圧方法を開発し、災害復旧の高速施工に対応した厚層転圧システムの構築を目指すものであり、現場対応型の締固め指標の策定、厚層における密度管理手法を開発したのち最適振動数の追究を行った。その結果、設定しうる載荷比に対して最適振動数が存在する可能性を指摘し、厚層における深層部締固め密度を管理できる方法を提示した。

研究成果の概要（英文）：

The compaction of a soil is one of the important construction operations that influences the durability of soil structure. Therefore, the measurement of soil density, used to judge the degree of compaction, has to be performed exactly. Since a compaction of a thick finishing layer could be executed with the enlargement of compaction machinery and the improvement of productivity, new equipment which can measure the soil density in a deep stratum has to be developed. In this research, we propose a method of accurately estimating compacted soil density based on the three dimensional stresses measured in the ground during compaction by a Stress-State Transducer (SST). A tracked vehicle mounted with a vertical oscillator was used to compact a decomposed granite soil. A model experiment was executed at a frequency that was varied, setting the load ratio of maximum oscillating force to the vehicle weight. The three dimensional stresses in the ground were measured by use of the SST. Comparing the dry density converted from cone penetrometer test results and the dry density estimated from a formula, the compacted soil density at the lowest soil stratum could be estimated by measuring earth pressure using SST.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建設施工システム

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料、施工、建設マネジメント

キーワード：盛土、厚層、密度管理、最適振動数

1. 研究開始当初の背景

ここ数年の台風災害、地震災害において盛土の崩壊が多発しており、その大きな原因のひとつとして所期の締固め強度が盛土端部において十分に得られていないことが挙げられる。その数は看過できない状況となっており、先の新潟県中越沖地震においても道路盛土の崩壊が多数発生している。このような状況から施工時の品質を保証できる工法開発が喫緊の課題である。また、災害時道路盛土の復旧には時間的制約から効率的な締固め方法が必要とされている。締固めは土工の品質を大きく支配する重要な工種である。供用期間中、予想される悪条件下においても安定を保ち得て、さらに所定の支持性能を持ち続ける盛土を造成するには、その要求に合致する適切な締固めの実行が必要である。

締固めは土粒子の移動を外力によって制御しようとするものであり、振動ローラのような線荷重に対して、ある程度の踏圧面積を確保し土粒子を拘束した状態で締固めるならば、効果的な締固め成果が得られると予測できる。また、高リフト厚の転圧においてはまき出し土深層部における密度管理が不可欠であるが、一般的な透過型RI計測器では浅層部測定を前提としており、この問題を解決することが重要課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は盛土端部の締固め強度不足による崩壊を抑制しうる転圧方法を開発し、災害復旧の高速施工に対応した厚層転圧システムの構築を目指すものであり、現場対応型の締固め指標の策定、厚層における密度管理手

法を開発したのち最適振動数の追究を行う。それらを基に目的に沿った締固め強度実現のための機械条件を網羅した施工システムの構築を図る。

新しい振動数領域と面載荷による土粒子拘束作用を用いた転圧効果を組み合わせた研究例はこれまでになく、盛土端部の強度保証を可能にする低載荷周期転圧方法は画期的であり、高速施工による災害復旧工法と省エネルギー効果を含めた環境負荷低減技術として本研究の成果は有力な手段となり得る。

3. 研究の方法

(1) 現場対応型室内圧縮試験

転圧車両の通過回数 N が増加するとともに土の湿潤密度は上昇する。転圧車両の通過時間を t 秒とすると、荷重 Q を t 秒間載荷した後除荷し、この動作を N 回繰り返して定常状態に達するまで沈下量 d を計測する。繰り返し一次元拘束圧縮試験結果を整理することにより、深さ 1 m の厚層深層部に垂直応力 p_n が繰り返し作用するとき所定の締固め管理基準から算定した間隙比 e_n に達するに必要な繰り返し数 N を決定する。このシステムにおける試料土の圧縮特性を把握するため、締固め前の供試土を厚層転圧試験のまきだし厚さ $(1,000\text{ mm})$ の $1/2$ のモデルとしてモールド内で拘束圧縮試験を行い、間隙比-圧縮応力の関係から圧縮曲線を求める

(2) 現場対応型室内圧縮試験システム

転圧車両の通過回数 N が増加するとともに土の湿潤密度は上昇する。転圧車両の

通過時間を t 秒とすると、荷重 Q を t 秒間載荷した後除荷し、この動作を N 回繰り返して定常状態に達するまで沈下量 d を計測する。繰り返し一次元拘束圧縮試験結果を整理することにより、深さ 1 m の厚層深層部に垂直応力 p_n が繰り返し作用するとき所定の締固め管理基準から算定した間隙比 e_n に達するに必要な繰り返し数 N を決定する。このシステムにおける試料土の圧縮特性を把握するため、締固め前の供試土を厚層転圧試験のまきだし厚さ ($1,000\text{ mm}$) の $1/2$ のモデルとしてモールド内で拘束圧縮試験を行い、間隙比 - 圧縮応力の関係から圧縮曲線を求める。

(3) 試料土八面体応力特性測定

破壊現象を論ずる場合に用いる指標である八面体応力特性を求めることは締固め効果を推定する上で重要である。試料土のせん断応力を考慮した圧縮係数を三軸圧縮試験により求める。試験装置は三軸圧縮試験機（現有設備）と計測システム（初年度経費として要求）を組み合わせる。土質試験として三軸圧縮試験を行うことにより、盛土材料の密度変化である体積ひずみが八面体垂直応力と八面体せん断応力の関数として密度変換式で与えられる。変換式中の定数は、盛土材料の初期密度で作成した円筒供試体に作用する主応力を変化させ、八面体垂直応力および八面体せん断応力を変化させることによって決定する。

(4) 密度管理システム構築

応力変換器として、土圧計を用い正方形と六角形で構成された多面体プラットフォームの表面に配置したものを製作する。土圧計は直交座標系とこれに対しある方向余弦をもつ非直交座標系上に配置され、得られた垂直応力から八面体垂直応力を求める。応力変換器で計測した八面体垂直応力と八面体せん断

応力を三軸圧縮試験より求めた密度変換式に代入して、密度を算定する密度センサーを構築する。土の密度センサーによって求めた土の乾燥密度が、RI密度計によって計測した密度変化の内、転圧車両の通過回数が無限となったときの最終密度と一致していることを検証する。

(5) 最適振動数の追究

踏圧面確保と載荷周期、軸荷重の組み合わせによる締固め効果を考察するため土槽転圧試験を土槽転圧システム（図1）と振動数可変型転圧用車両（図1）を用いて行う。供試地盤は最適含水比に調整した盛土材料を 1 m の厚さでまき出し表面を成型し、転圧前の供試地盤間隙比を $1.211\sim 1.223$ に調整する。応力変換器を所定の方向に埋設しておき、転圧時に地盤内に生じる3次元の応力を測定する。土の撒き出し厚さを 1 m 程度とした厚層の深層部を締め固めるのに必要な垂直応力および交番せん断応力が深層部にまで確実に伝達されているかどうか、必要な転圧車両の転圧回数はいくらであるか、および深層部での土の密度が所定の締固め管理基準を達成しているかどうかについて、実施工に先立つ試験施工において、それらを確認できることを特徴として開発した土の密度センサーを用い、載荷重と載荷周期との関係である載荷比が締固め効果に与える影響を把握する。

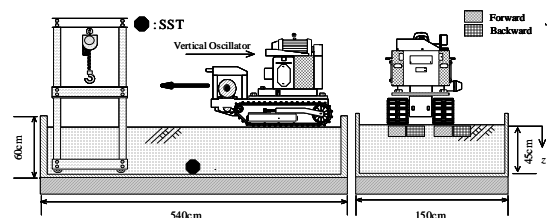


図1 転圧システムと転圧車両

4. 研究成果

図2は沈下量と転圧回数との関係を示したものである。載荷比 1.0 、振動数 12 Hz 、 16 Hz の場合

と荷重比 1.8, 振動数 16Hz について示した。転圧回数 $N=3$ までは装置の自重のみで転圧している。いずれの荷重比も同じ条件でありほぼ等しい値を示している。転圧回数 4 回目以降は振動転圧の結果である。振動転圧を行うことにより沈下量は大きく増加している。転圧回数が 10 回を超えると沈下量変化はほぼなくなっている。振動数 16Hz での荷重比 1.0 および 1.8 の沈下量はそれぞれ 11.8cm と 14.3cm であり、その差は 2.5cm となっている。これは加振力の増加が沈下量に大きく影響することを示している。

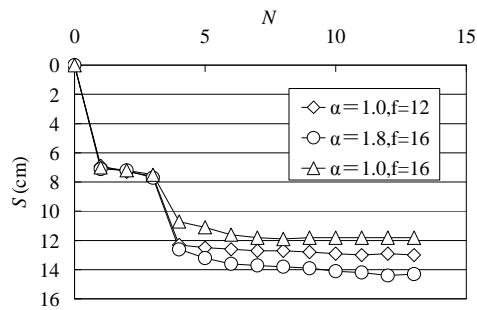


図 2 試料沈下量と転圧回数

図 3, 図 4 は転圧後の乾燥密度と振動数の関係を示したものである。最大乾燥密度, 深層部乾燥密度ともに振動数増加とともに減少していることがわかる。換言すれば振動数を減ずれば大きな締固め効果を得ることができるといえる。荷重比 1.0 以下は転圧装置が接地した状態で転圧を行う振動転圧であり, 荷重比 1.0 を超えるものは衝撃を伴う転圧となる。今回の結果はいずれの場合においても上述の現象が生じており興味深い。

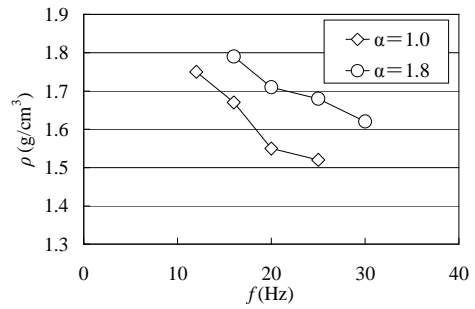


図 3 最大乾燥密度と振動数

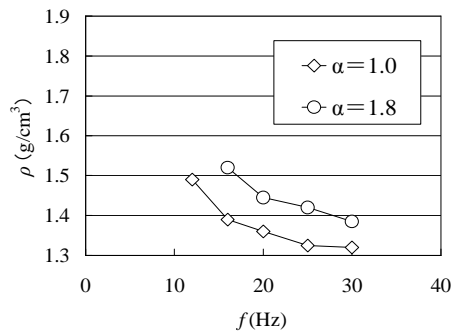


図 4 深層部乾燥密度と振動数

大きな締固め効果を得ようとする方策は荷重する力を大きく採ることが挙げられるが, 荷重面が剛であると荷重面直下の応力が大きくなり深さ方向の応力減衰が顕著になる。一方, 今回の結果から得られた応力比を大きく採ることが可能な方策を講ずれば, 締固め後の深さ方向の密度差が小さくなると考えられ, 盛土締固めにおける品質向上に寄与することになる。



図 5 現場施工試験

図5は重ダンプトラック現場施工試験の状況であり、図6はその結果である。現場試験のため浅層部の初期密度が大きい影響があるものの深層部まで所定の密度を実現しており応力比増加の効果が現れていると考えられる。

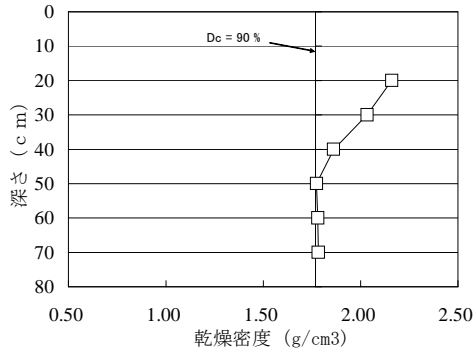


図6 重ダンプトラック現場施工試験結果

単純に荷重比 1.0 でほぼ同じ条件であるとして結果をまとめると図7のようになり、結果の中間付近に転圧後密度を最大にする振動数が存在する可能性を指摘できる。

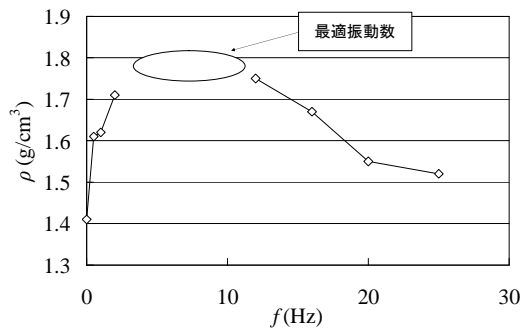


図7 振動数と転圧後密度

次に最適振動数について考察する。図8は重ダンプトラックタイヤが地盤を走行する際の挙動をモデル化したものである。ここで、 m_1 : 重ダンプトラックの質量(kg), m_2 : タイヤの質量(kg), m_e : 振動時の偏心質量(kg), r : タイヤの回転半径(m), k_2 : 地盤剛性, c_2 : 地盤の粘性減衰係数(Nsec/m)である。起振力 F_0 は(1)式で表され、振幅は(2)式で表さ

れる。

$$F_0 = m_e r (2\pi f)^2 \quad (1)$$

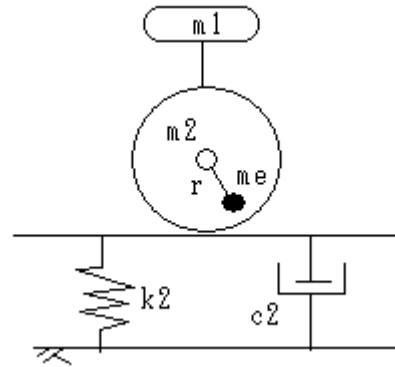


図8 タイヤ-地盤モデル

$$a_p = A / (2\pi f)^2 \quad (2)$$

ここで、 f はタイヤの振動数(Hz), A はタイヤの振動加速度 (m/sec^2) である。起振力は振動数により増加するため振動数を大きく採ることが良いが、逆に振幅は小さくなりそれぞれの効果の最も良い組合せを探らなければならない。このような現象から実際には両者の相反する関係を同時に満足する最適な振動数が 2Hz から 16Hz の間に存在すると推定され、その振動数は(3)式で表すことができる。

$$f_{opt} = \left\{ \frac{(m_1 + m_2) g A}{16\pi^4 m_e r \eta} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

ここで、 g : 重力加速度(m/s^2), η : 起振力による沈下量(m)である。(4)式は起振力による締固めエネルギーとタイヤがもつポテンシャルエネルギーの和を微分し、最適な振動数を求めたものである。今回の実験条件から求めた最適振動数は 4.1Hz となり推定範囲内となっている。

密度管理については、三軸圧縮試験結果から八面体垂直応力と八面体せん断応力を決定し、体積変化から密度を求め、得られた値を用いて最小二乗法により A,B,C,D を求めた。転圧試験時に SST で測定した応力から σ_1 , σ_2 , σ_3 を求め、(4)式により八面体応力を求めた。

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4)$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{9}}$$

履帯転圧装置による載荷比 1.2 の結果について考察する。算定した密度とコーン貫入試験結果から求めた密度について比較し、両者の差が小さければ SST を用いて得た密度が正確であるといえる。図 9 に各振動数における実測密度と予測密度を示す。いずれも誤差は 1%以下となっており良好な関係にあるといえる。

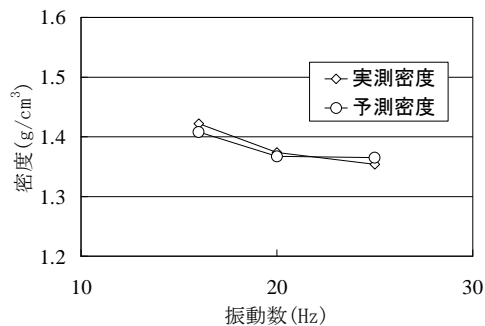


図 9 実測密度と予測密度の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 江口忠臣, 小寺一史, 履带式車両の振動転圧特性, 建設機械, 547 号, vol.46, No.9, pp.39-42, 2010.
- ② 江口忠臣, 室達朗, 厚層締固めにおける機

械条件と密度管理について, 建設機械, 523 号, vol.44, No.9, pp.47-50, 2008.

[学会発表] (計 1 件)

- ① 江口忠臣, 小寺一史, 履带式車両の振動数転圧特性, 平成 21 年度建設施工と建設機械シンポジウム梗概集, pp.132-133, 2009.

[その他]

- ① ホームページ等

明石高専都市システム工学科

<http://www.akashi.ac.jp/contents/Civil/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江口 忠臣 (EGUCHI TADAOMI)

明石工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授

研究者番号：20232944