

戦-2 盛土施工の効率化と品質管理の向上技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：地質地盤研究グループ施工技術チーム

研究担当者：小橋秀俊、藪雅行、藤田智弘

【要旨】

未曾有の豪雨・地震により、依然として盛土の崩壊が発生している。盛土における被災調査結果や模型実験によれば、盛土内の排水不良とともに締固め不足が被災の要因となることがわかってきた¹⁾。従来、道路盛土の締固めにおいて最も広く用いられている品質管理方法は、施工方法を想定し、設計上要求すべき強度、変形抵抗を満足するような締固め度を規定することにより、締め固めた土の性質の恒久性と設計から要求される力学特性の両者を確保しているとみなすものである²⁾。しかし、盛土に求められる品質の要求（豪雨・地震に対する安全性）を達成するためには、締固め度の設定だけでなく、それを確実に達成するための適切な締固め機械の選定法、施工手法および品質管理手法を確立していく必要がある。

そこで、本研究では選定した締固め機械の締固め特性について計測するとともに、品質管理に用いられる各種計測方法の盛土の品質管理への適用性の検討のために、代表的な土質（砂質土や粘性土等）において含水比（最適含水比、最適含水比よりも乾燥側の含水比（以下、乾燥側含水比と呼ぶ）、最適含水比よりも湿潤側の含水比（以下、湿潤側含水比と呼ぶ））を固定した締固め回数試験を行うこととした。本年度は、砂質土に対して乾燥側含水比、及び最適含水比で締固め回数試験を行い、締固め回数ごとの乾燥密度の計測や品質管理に用いられる各種計測を行った。その結果、本実験条件においては、選定した4種類の締固め機械の中で振動ローラが最も締固め度を高めるのに適していた。一方で、ブルドーザ単独では本実験で使用した土の締固め度を高めるのは困難であった。また、各種計測データは乾燥密度と一定の相関性を持つことを確認した。

キーワード：盛土、締固め特性、含水比、締固め回数

1. はじめに

我が国の盛土施工においては、盛土の品質向上への要請に呼応するように建設機械についても技術革新が進んでいる。さらに、道路土工—施工指針³⁾（現在は、道路土工—盛土工指針²⁾）に基づき締固め作業及び締固め機械の選定を行っているが、この指針の運用から30年余りが経過しており、その間に締固め機械の性能は大きく改善されている。

こうした状況を踏まえ、本研究では、現在盛土締固めに用いられている代表的な施工機械を用いて締固め回数試験を行い、施工条件に応じた締固め機械の選定、施工手法（施工厚さ）、各種品質管理に用いられる計測方法の盛土の品質管理への適用性の検討を行う。さらに、選定した締固め機械による締固め回数試験の結果と土の突固め試験の結果を比較し、実現場における土の締固めと室内試験の土の締固めの関連性について検証を行う。

本研究では、盛土施工時の盛土の品質を確保するために、最適な施工機械の選定及び最適な締固め施工手法・品質管理手法の選定を目的とし、以下を行う。

- ① 施工・土質条件に応じた最適な締固め機械の選定の検証
- ② 締固め機械の機種や施工・土質条件による施工手法（施工厚さ）の検証
- ③ 各種品質管理に用いられる計測方法の盛土の品質管理への適用性の検討
- ④ 締固め機械による締固め回数試験と土の突固め試験との比較

上記①～④の検討を進めるために、本年度は実験場内に盛土工事現場を模擬した実験フィールドを作成し、砂質土について2種類の含水比の土に対して、写真-1～3に示す締固め機械の特性の把握を行うこととした。

2. 目的



写真-1 タイヤローラ



写真-2 ブルドーザ



写真-3 振動ローラ

3. 実験概要

3.1 実験ピット

本試験は土木研究所構内の土工実験施設内の実験ピットにて行った。図-1に実験ピットの詳細を示す。実験ピットはコンクリートで構成されており、転圧回数試験用地盤（以下、試験地盤と呼ぶ）に影響を与えないように実験ピット底面より高さ 2.8 m まで基礎地盤用地盤（以下、基礎地盤と呼ぶ）で盛り立てを行った。

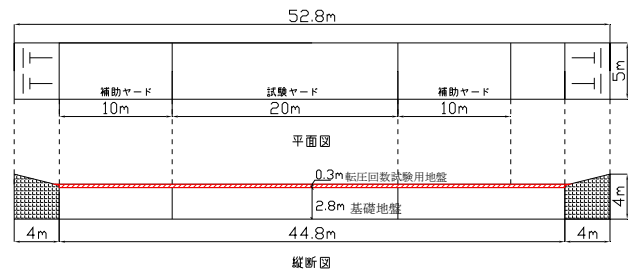


図-1 実験ピット詳細図

3.2 使用土質条件の選定

本試験で使用する土質条件としては、砂質系の土質を使用した。細粒分含有率は、基礎地盤では $F_c=13\%$ 、試験地盤には $F_c=10\%$ のものを使用する（表-1）。使用した土の粒径加積曲線を図2、図3に示す。また、表-1に示す最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_o は、突固め試験（JISA 1210）の $c-A$ 法で算出したものである。

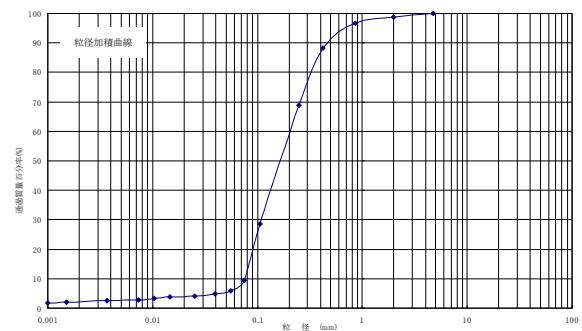


図-2 粒径加積曲線（基礎地盤）

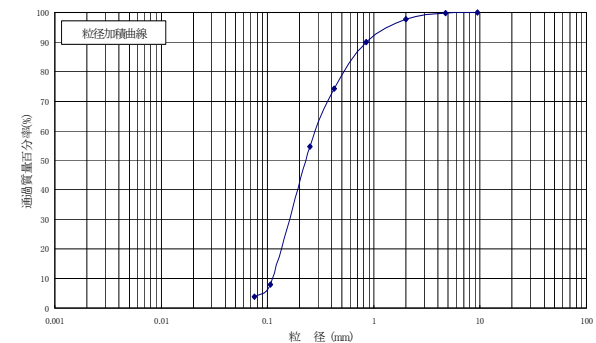


図-3 粒径加積曲線（試験地盤）

表-1 土質材料の物理特性

試験項目	試験地盤	基礎地盤
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68	2.71
細粒分含有率 F_C (%)	10	13
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.67	1.80
最適含水比 w_o (%)	16.0	14.4

3.3 試験時の含水比条件

本試験では試験地盤の含水比を3つのパターンに分けて締固め回数試験を行うこととした。図-4に突固め試験(c-A法)によって得られた試験地盤の乾燥密度—含水比曲線を示す。11%付近を乾燥含水比領域、15%付近を最適含水比領域、18%付近を湿潤含水比領域とし、3種類の含水比での締固め回数試験を行うこととした。

本年度は、試験用地盤の含水比を乾燥含水比領域及び最適含水比領域の2パターンとし、締固め回数試験を行った。

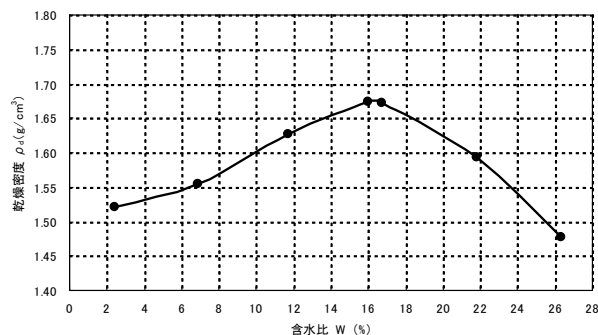


図-4 突固め試験による乾燥密度—含水比曲線

3.4 締固め機械の選定

締固め回数試験に使用する機械としては、道路盛土の工事に広く利用されている機種を選定した。表-2に示すように、実験ピットでの実験が可能な範囲内で各機種の機械重量が同程度のものとした。

本年度の試験ケースとしては、タイヤローラ、ブルドーザ、振動ローラ（振動なし）、振動ローラ（振動あり）の計4パターンについて行った。また、締固め機械の運転速度も締固めに影響を及ぼすことから、本試験では各機械の走行速度については実施工を想定して約3～4 km/hに固定した。

表-2 使用締固め機械仕様

使用機械	規格
タイヤローラ	11t 級 (CP210)
ブルドーザ	11t 級 (D5k 湿地タイプ)
振動ローラ	11t 級 (SV512D)

4. 締固め回数試験

表-2に示す締固め機械の土の締固め能力を検証するために締固め回数試験を行った（写真-4）。図-5に実験ピット内の計測平面図を示す。締固め回数試験は、図-1のハッチングエリアで示すように基礎地盤上に仕上がり厚300mmとなるように試験地盤を敷均し、各締固め機械の前後進により締固めを行った。各種締固め機械における締固め回数と締固め度の関係、及び乾燥密度と品質を確認するための各種計測データとの関係を把握するために表-3に示す計測を行った。また、初期締固め条件（締固め0回）は、人力敷均し後0.1m³級の油圧ショベルのクローラにて2回締固めめた状態とした（写真-5）。

以下、主な計測項目の概要を示す。

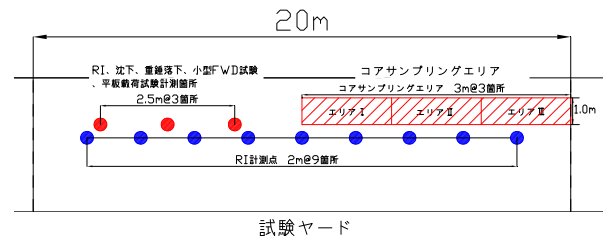


図-5 締固め回数試験計測平面図

表-3 計測項目一覧

計測項目	測点数	計測回数
密度・含水比 (コアサンプル)	3	締固め0,2,4,6,8,12,16回後
密度・含水比 (RI 密度計測器)	9	締固め0,2,4,6,8,12,16回後
沈下量 (レベル測量)	3	締固め0,2,4,6,8,12,16回後
地盤反力係数 (小型 FWD 試験)	3	締固め0,2,4,6,8,12,16回後
地盤反力係数 (動的平板載荷試験)	3	締固め0,2,4,6,8,12,16回後
地盤反力係数 (平板載荷試験)	3	締固め 16 回後



写真-4 締固め回数試験状況



写真-5 初期締固め状況

4. 1 密度・含水比計測

密度・含水比計測についてはJGS1613-1995「コアカッターによる土の密度試験方法」(以下、コアサンプリングと呼ぶ)とJGS1614-1995「RI 計器による土の密度試験方法」(以下、RI 密度計測と呼ぶ)による計測を行った(写真-6, 写真-7)。

コアカッターは、内径φ100 mm、高さ100 mm のものを使用した。コアサンプリングは、地盤の深さ $h=0 \sim 100 \text{ mm}$ 、 $100 \sim 200 \text{ mm}$ 、 $200 \sim 300 \text{ mm}$ ごとに計測を行った。計測点は、図5に示すとおりエリアⅠ、エリアⅡ、エリアⅢの3箇所とした。

RI 計器は、線源深さ200 mm のものを使用した。計測点は、図5に示すとおり9箇所で行った。



写真-6 コアサンプリング状況



写真-7 RI 密度計測状況

4. 2 動的平板載荷 (IST-03) 試験

超小型動的平板載荷試験装置 IST-03 (Impact Soil Tester 3) (写真-8)を用いて、落下させた重錘が地盤と衝突するときの弾性変形抵抗から地盤のバネ係数度を計測した。平板載荷試験による K_{30} 値(地盤反力係数)の換算値を求めることで地盤の支持力を評価した。



写真-8 動的平板載荷試験器

4. 3 小型 FWD 試験

小型 FWD (Falling Weight Deflectometer) による動的載荷試験を行った。重錘を試験地盤に自由落下させた時の地盤のたわみや衝撃時の加速度などを測定し、平板載荷によって求められる K_{30} 相当値を計測した(写真-9)。



写真-9 小型 FWD 試験状況

4. 3 平板载荷試験

JISA 1215「地盤の平板载荷試験方法」に準拠し、 K_{30} （地盤反力係数）を求めることにより地盤の変形や強さ等の支持力特性の計測を行った（写真-10）。本試験では、締固め試験終了時（締固め回数 16 回終了後）のみ試験を行った。



写真-10 平板载荷試験状況

5. 締固め回数試験結果

5. 1 密度・含水比計測結果

本試験では、試験用地盤の含水比は乾燥含水比領域（以下、 $w=w_d$ と呼ぶ）を $w \approx 10\%$ に、最適含水比領域（以下、 $w=w_o$ と呼ぶ）を $w \approx 15\%$ に調整した。図-6 に実際に本試験で用いた試験用地盤の含水比を示す。図-7、図-8、図-9 に $w=w_d$ の、図-10、図-11、図-12 に $w=w_o$ のコアサンプリングにより得られた乾燥密度－締固め回数の関係を各深さ $h=0\sim100\text{ mm}$ 、 $100\sim200\text{ mm}$ 、 $200\sim300\text{ mm}$ 毎に示す。また、図-13 に $w=w_d$ 、図-14 に $w=w_o$ の締固め回数 16 回終了後に計測した乾燥密度と深さの関係を示す。これら乾燥密度の値はいずれも図-5 に示す 3 測点で測定した平均値である。各グラフに示されている締固め度 $D_c=90\%$ 、 95% の破線は、「道路土工－盛土工指針」に記載されている現場盛土工事の路体、路床工事における日常管理の目安値である。

最初に、 $w=w_d$ の結果について述べる。

1. 締固め回数試験では、すべての締固め機械において締固め回数の増加とともに密度が増加する傾向を示している。
2. 振動ローラ（振動あり）の $h=0\sim100\text{ mm}$ では $D_c=95\%$ を超えたが、その他の締固め機械では $D_c=95\%$ を超えることはなかった。
3. ブルドーザの $h=0\sim100\text{ mm}$ では、ほぼ横這いに推移している。ブルドーザは表面を乱している可能性

が考えられる。

4. タイヤローラ及び振動ローラ（振動なし）は、 $h=0\sim100\text{ mm}$ では $D_c=90\sim95\%$ 内で推移している。しかし、 $h=200\sim300\text{ mm}$ では締固め度 90% を超えることはなかった。
5. 本実験ケースでは、振動ローラ（振動あり）が最も効果的に締固め度を高める締固め機械であった。

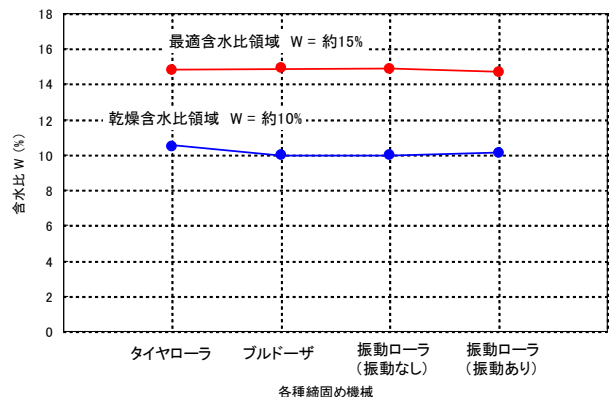


図-6 実験時の含水比

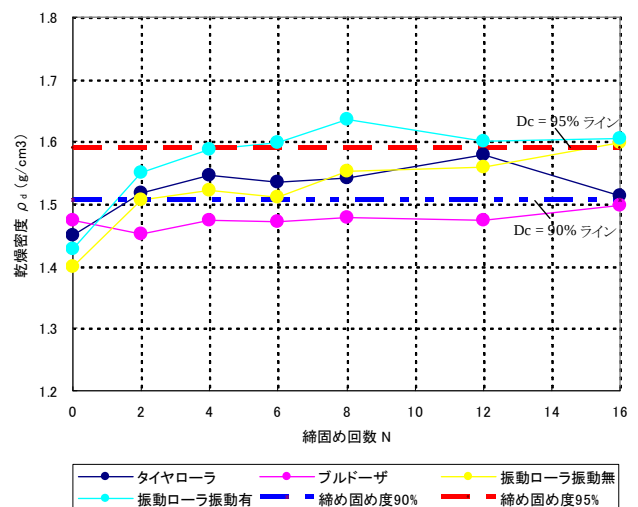


図-7 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_d$ $h=0\sim100\text{ mm}$)

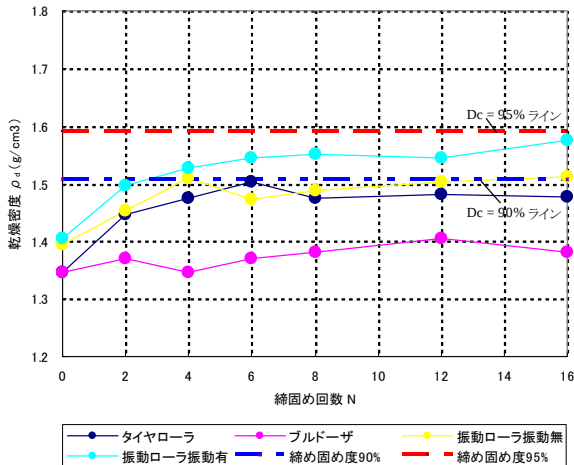


図-8 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_d$ $h=100-200$ mm)

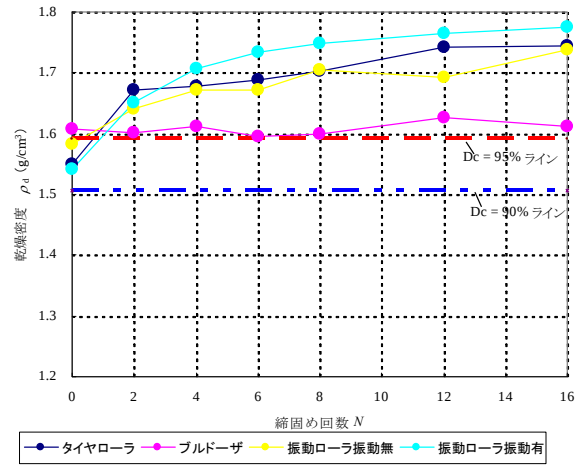


図-10 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_0$ $h=0-100$ mm)

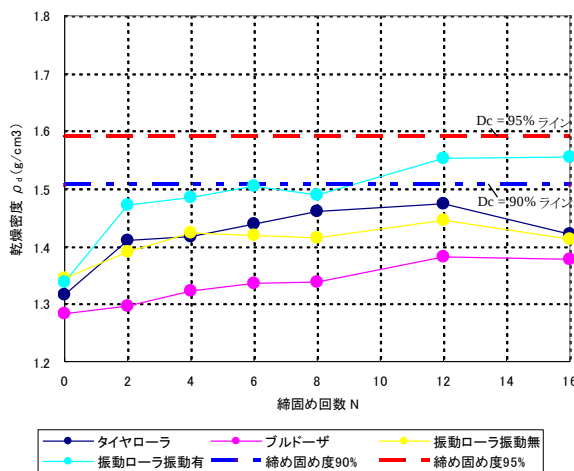


図-9 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_d$ $h=200-300$ mm)

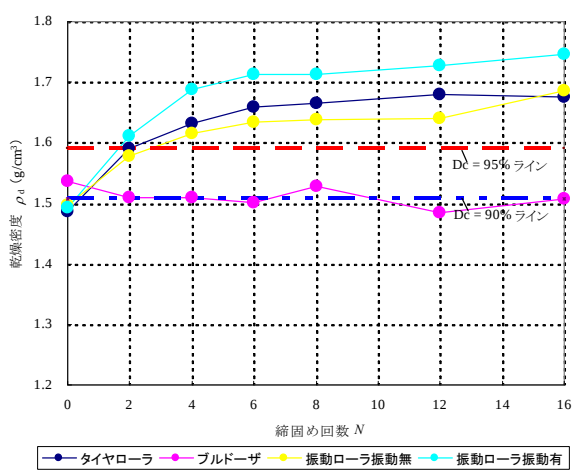


図-11 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_0$ $h=100-200$ mm)

次に、 $w=w_0$ の結果について述べる。

6. すべての締固め機械において締固め回数の増加とともに密度が増加する傾向を示している。
7. 振動ローラ（振動あり）ではすべての深さにおいて締固め回数2回で $D_c=95\%$ を上回った。
8. ブルドーザについては、締固め回数の増加による密度増加は有意に表れていない。
9. 振動ローラ（振動有り）は、他の締固め機械に比べると、深さ方向の密度の減少が小さいことがわかった。
10. 本実験ケースでは、振動ローラ（振動あり）が最も効果的に締固め度を高める締固め機械であった。

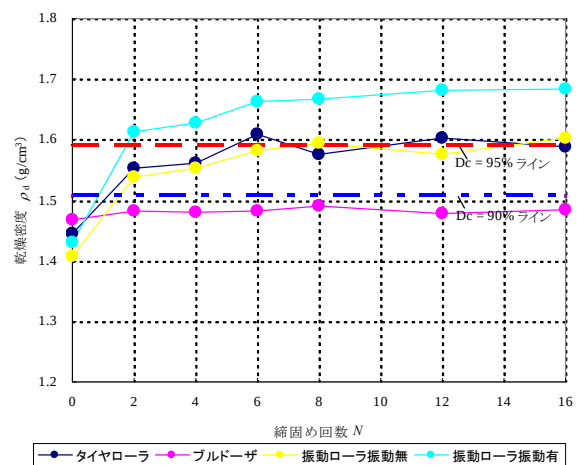
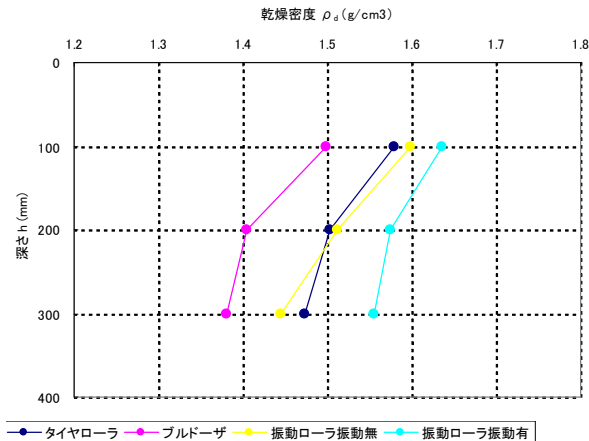
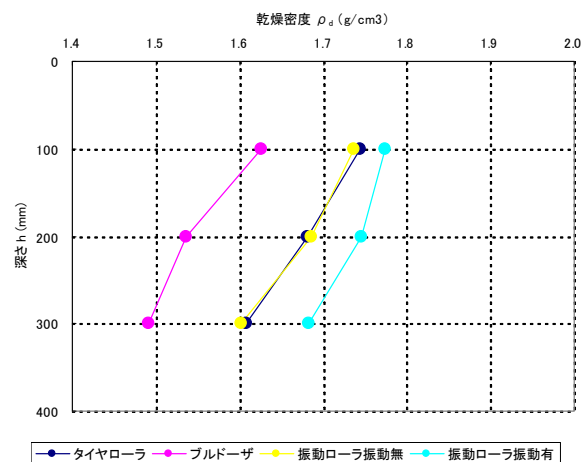
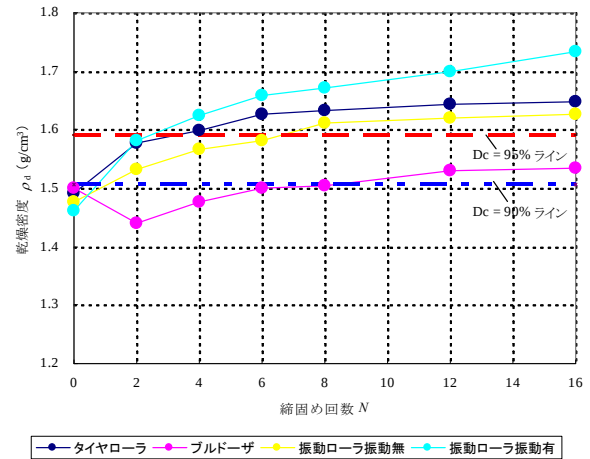


図-12 乾燥密度

(コアサンプリング $w=w_0$ $h=200-300$ mm)


図-13 深さ－乾燥密度（コアサンプリング $w=w_d$ ）

図-14 深さ－乾燥密度（コアサンプリング $w=w_0$ ）

RI 密度計測による $w=w_0$ の乾燥密度と締固め回数について図-15 に示す。但し、図で示す値は図-5 に示す 9 測点で測定した平均値である。RI 密度計測の結果でも、締固め回数 8 回以上ではブルドーザ以外の各締固め機械で $D_c = 95\%$ を上回る結果となった。


図-15 乾燥密度－締固め回数
(RI 密度計測 $w=w_0$ $h=0-200$ mm)

突固め試験で得られる結果と実際の施工で得られる結果の関係を比較するため、図-16 に突固め試験の結果と締固め回数試験によって得られた締固め回数 16 回終了後の RI 密度計測により得られた乾燥密度を示す。また、突固め試験の条件については表-4 に示す。なお、2.7Ec は突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）に規定されている試験方法ではなく、1.0Ec と 4.5Ec の締固めエネルギーの半分のエネルギーになるように調整し突き固め固めたものである。締固め回数試験によって得られた乾燥密度と突固め試験によって得られた最大乾燥密度を比較すると、 $w=w_d$ では、すべての締固め機械で締固め回数 16 回終了後の乾燥密度は、1.0Ec の突固め試験で得られた最大乾燥密度を超えることはなかった。 $w=w_0$ においては、振動ローラ（振動なし）とタイヤローラでは、締固め回数 16 回終了後の乾燥密度は 1.0Ec の突固め試験で得られた最大乾燥密度とほぼ同等の値を示した。振動ローラ（振動あり）では、締固め回数 16 回終了後の乾燥密度は 2.7Ec の突固め試験で得られた最大乾燥密度と同等の乾燥密度を示した。

表-4 突固め試験方法一覧

Ec		モールド内径 cm	突き固め 層数	1層当たり の突き固 め回数	落下高さ cm
1.0	2.5	10	3	25	30
2.7	4.5	10	3	25	45
4.5	4.5	10	5	25	45

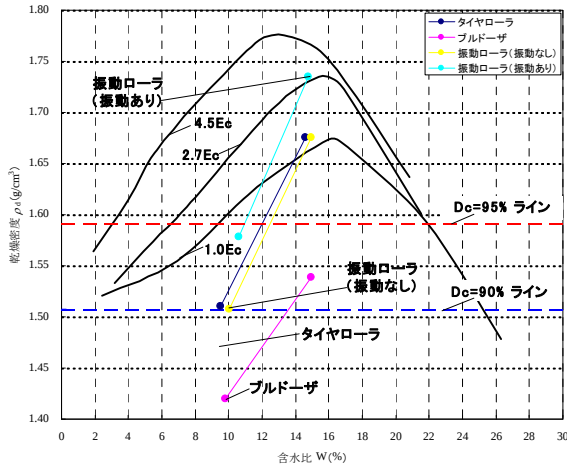


図-16 突固め試験結果及び締固め回数試験結果

5. 2 沈下量計測結果

各含水比における各種締固め機械の締固め回数と沈下量の関係を図-17、図-18に示す。グラフの沈下量は、いずれも図-5に示す3測点で測定した平均値である。

各含水比において全ての締固め機械において、締固め回数の増加に伴い沈下量も増加する傾向があることがわかった。また、締固め回数の初期段階（締固め回数2～4回）での沈下量が多く、その後は収束に向かう傾向を示している。最も注目すべき点は、 $w = w_d$ ではブルドーザによる締固めが他の締固め機械と比較して最も沈下量が多いことである。図-19、図-20に、各締固め回数終了後の乾燥密度と沈下量の関係を示す。乾燥密度と沈下量の関係を一次関数で近似した相関係数を表5に示す。ブルドーザ以外の締固め機械については相関係数0.9以上となった。

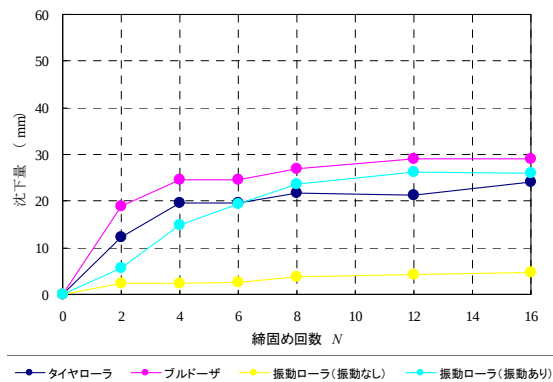


図-17 沈下量—締固め回数 ($w = w_d$)

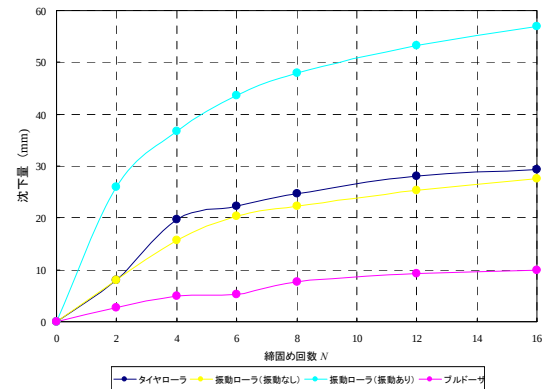


図-18 沈下量—締固め回数 ($w = w_0$)

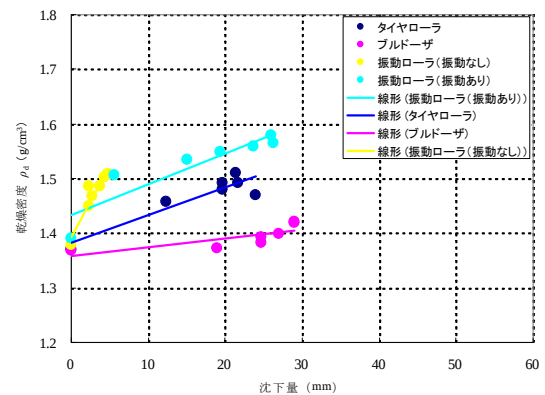


図-19 乾燥密度—沈下量 ($w = w_d$)

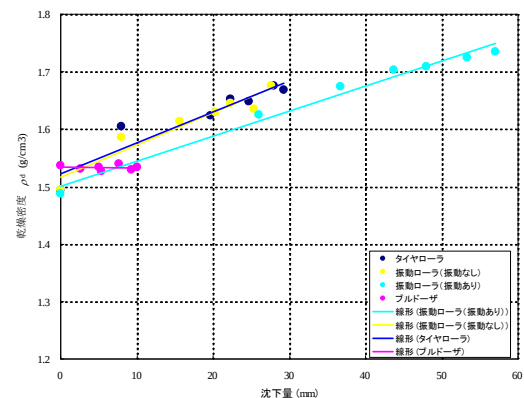


図-20 乾燥密度—沈下量 ($w = w_0$)

表-5 乾燥密度-沈下量 相関係数

	相関係数	
	$w=w_d$	$w=w_o$
タイヤローラ	0.92	0.94
ブルドーザ	0.77	0.13
振動ローラ (振動なし)	0.94	0.96
振動ローラ (振動あり)	0.91	0.99

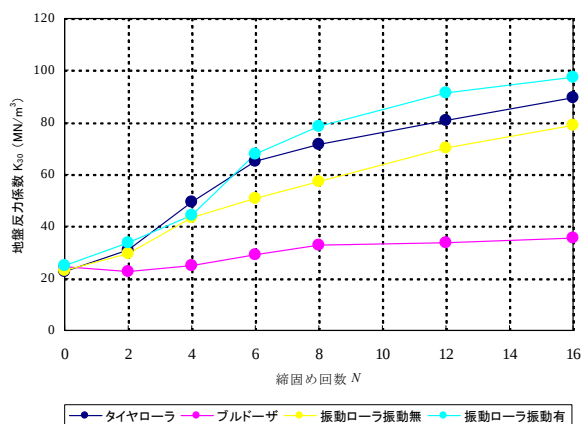
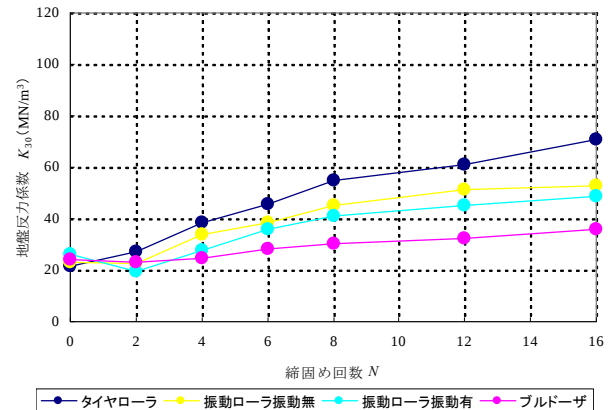
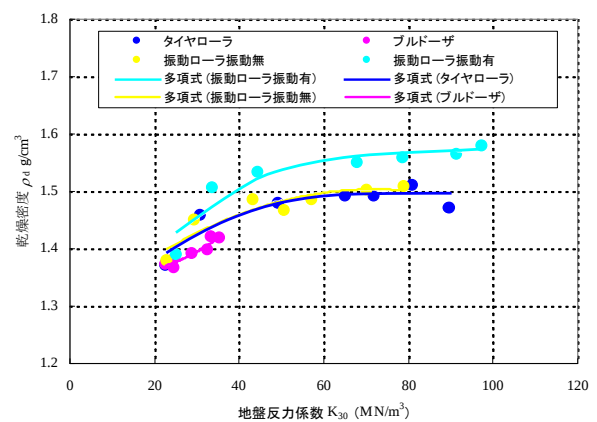
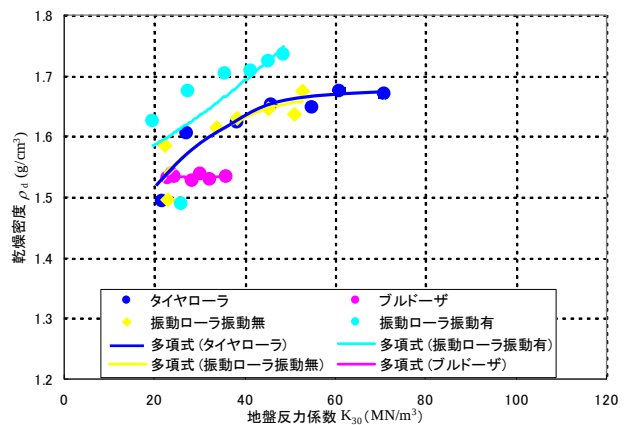
5. 2 動的平板載荷 (IST-03) 試験結果

動的平板載荷試験によって得られた各含水比における地盤反力係数 K_{30} と締固め回数との関係を図-21、図-22 に示す。ここで、地盤反力係数値は動的平板載荷値を平板載荷試験によって得られる地盤反力係数 K_{30} に換算した値である。また値はいずれも図-5 に示す3測点で計測した平均値である。

地盤反力係数は締固め回数の増加に伴い増加する傾向がある。

また、各含水の違いによる地盤反力係数の比較を行うと、各締固め機械において $w=w_d$ で計測された値の方が、 $w=w_o$ に計測された値を上回っている。乾燥密度や沈下量が $w=w_o$ でより大きな値を示すのとは異なる傾向を示す。

次に、乾燥密度と地盤反力係数 K_{30} の関係を図-23、図-24 に示す。図から、すべての締固め機械において、乾燥密度と地盤反力係数 K_{30} の値は、正の相関を示しているといえる。

図-21 地盤反力係数 K_{30} (動的平板載荷換算値 $w=w_d$)図-22 地盤反力係数 K_{30} (動的平板載荷換算値 $w=w_o$)図-23 地盤反力係数 K_{30} (動的平板載荷換算値 $w=w_d$)図-24 乾燥密度-地盤反力係数 K_{30} ($w=w_o$)

5.3 小型FWD試験結果

小型FDWによって得られた $w=w_0$ における地盤反力係数 K_{30} と締固め回数の関係を図-25に示す。図に示す地盤反力係数値は小型FWD値を平板載荷によって得られる地盤反力係数 K_{30} に換算した値である。また値はいずれも図-5に示す3測点で計測した平均値である。

地盤反力係数は締固め回数の増加に伴い増加する傾向を示す。しかし、ブルドーザについてはその他の締固め機械と比較すると、転圧回数による地盤反力係数の増加は顕著に表れていない。

次に、乾燥密度と地盤反力係数 K_{30} の関係を図-26に示す。図から、すべての締固め機械において、乾燥密度と地盤反力係数 K_{30} の値は、正の相関を表している。

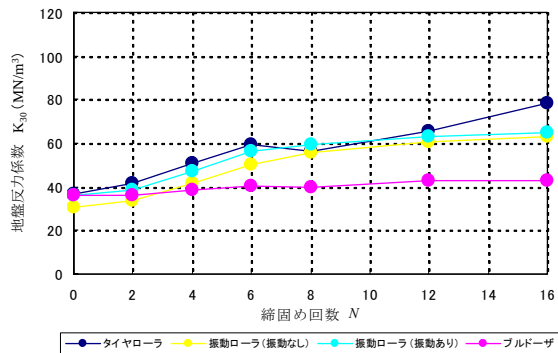


図-25 地盤反力係数 K_{30} (小型FWD試験換算値 $w=w_0$)

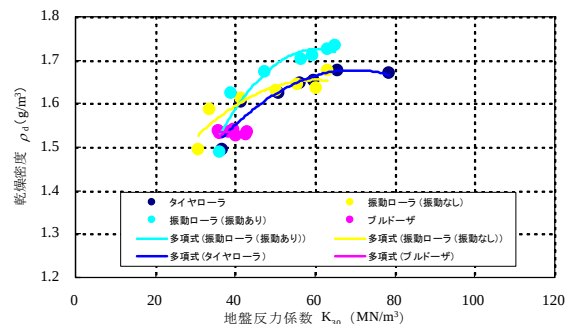


図-26 乾燥密度—地盤反力係数 K_{30} ($w=w_0$)

5.4 平板載荷試験結果

表-6に平板載荷試験で得られた地盤反力係数の平均値を示す。値はいずれも図-5で示した各3測点の平均値である。

$w=w_0$ のときに平板載荷試験で得られた地盤反力係数 K_{30} は、動的平板載荷(IST-03)試験や小型FWD試験により得られた値よりも少し高い値を示す傾向がある。

表-6 平板載荷試験結果

	地盤反力係数 K_{30} (MN/m³)	
	$w=w_d$	$w=w_0$
タイヤローラ	69.7	89.7
ブルドーザ	101.2	71.4
振動ローラ (振動なし)	146.4	83.1
振動ローラ (振動あり)	82.1	90.6

6. まとめと今後の課題

本年度は、各種締固め機械が乾燥側含水比及び最適含水比の砂質土に与える締固め特性の確認を行なうため、盛土工事を模擬した実験フィールドにおいて盛土締固め回数試験を行った。

その結果、本実験ケースにおいては、振動ローラ(振動あり)が他の締固め機械と比較して最も締固め度を高めるのに適していた。また、ブルドーザ単独では締固め度を高めていくことは困難であった。

今回実施した各種の計測データは乾燥密度と一定の相関性を持つことが確認できた。

しかし、実現場においては現場毎に様々な土質条件の盛土材料が用いられている。このようなことを踏まえつつ、より多くのデータを用いて施工機械と締固め特性の関係、品質管理手法について検討する必要がある。

今後は、最適含水比よりも湿潤側の含水比で締固め回数試験を実施するとともに、細粒分の異なる盛土材料において同様の実験を行うことで、データの蓄積を行っていく。

参考文献

- 1) 松尾 修：道路盛土・河川堤防の設計と締固め土の締固めと管理，基礎工，2009年7月号
- 2) 道路土工・盛土工指針，社団法人日本道路協会
- 3) 道路土工・施工指針，社団法人日本道路協会

A research of improvement of workability and quality control method for compaction work on embankment

Abstract :

Even now, many embankments have been collapsed by huge earthquakes and heavy rains. It has become clear that main factors why an embankment is collapsed are poor drainage and also no enough soil compaction. Setting of degree of compaction for satisfying strength and deformation resistance required in the design is the most widely used for the quality control on road embankment, traditionally. In order to satisfy the ability required to an embankment, it is necessary to establish how to select effectual compaction machine, compact by the machine, and evaluate the rain or earthquake safety of the embankment, additionally.

In this research, compaction tests were conducted with selected compaction machines under the two kinds of water contents of embankment material. Vibratory roller is the most effective compaction machine to improve the degree of compaction in this research condition. On the other hand, bulldozer is the worst in selected compaction machines. All data obtained by measurements conducted in quality control are correlated with dry density of soil.

Key words :

Embankment, Compaction machine, Quality control, Soil density, Water content