

盛土施工の効率化と品質管理の向上技術に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：地質・地盤研究グループ（施工技術）

研究担当者：小橋秀俊、藪雅行、藤田智弘

【要旨】

集中豪雨や規模の大きな地震により、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、締固め度等の管理基準値のみならず、それを確実に達成するための前提となる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。

本研究では、盛土施工において、盛土に求められる品質を確保するための施工手法、品質管理手法を提案することを目的として、盛土工事現場を模擬した実験フィールドにおいて、各種盛土材料に対して、盛土施工に一般的に使用される締固め機械を用いて転圧試験を実施している。本年度は、昨年度に引き続き各種盛土材料に対する転圧試験を実施するとともに、これまでの実験結果から細粒分の少ない材料について、締固め機械と盛土の締固め特性の関係を整理した。また、動的平板載荷試験により得られる値と従来の品質管理指標である乾燥密度について相関性を検証し、砂質系土質材料に関しては、最適含水比より乾燥側では両者に良好な相関性があることがわかった。

キーワード：盛土、締固め、締固め機械、品質管理、密度

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技術革新が進んでいる。また、盛土施工は、一般的に道路土工—盛土工指針²⁾（旧：道路土工—施工指針³⁾）により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規格・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、盛土施工において盛土に求められる品質を確保するための施工手法、品質管理手法を提案することを目的として、以下の検討を行っている。

- ① 締固め機械や土質条件（含水比等）による土の締固め特性の検証
- ② 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

本年度は、土木研究所内の屋内実験場に作成した盛土工事現場を模擬した実験フィールドにおいて、細粒分含有率の少ない砂質系土質材料、細粒分含有率の多い粘性系土質材料の 2 種類の盛土材料に対して、締固め機械と

して、写真-1～写真-3 に示したタイヤローラ、振動ローラ、ブルドーザを用いた転圧試験を行った。なお、施工後の盛土品質や施工性に影響を与える含水比については、砂質系土質においては 3 種類を設定し、粘性系土質においては、事前に締固め機械の走行試験を行い、締固め機械が走行可能な含水比を設定した。



写真 - 1 タイヤローラ



写真-2 振動ローラ



写真-3 ブルドーザ

表-1 盛土材料の物性

	土質材料 A	土質材料 B
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.675	2.665
細粒分含有率 F_c (%)	15.3	57.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.674	1.531
最適含水比 w_{opt} (%)	16.3	24.9
実験含水比 w_i (%)	10,15,16	28~36

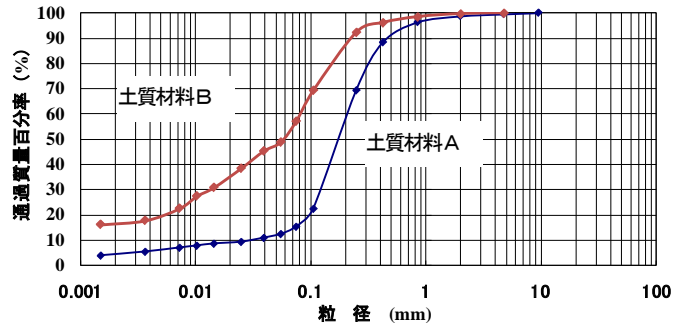


図-2 粒径加積曲線

2. 実験の概要

2.1 実験条件

(1) 実験フィールド

本実験は土木研究所構内の土工実験棟実験ピットにて行った。図-1に実験フィールドの概要図を示す。実験ピットはコンクリートで構成されており、試験用地盤に影響を与えないように基礎地盤として実験ピット底面より高さ2.8mまで表-1に示す土質材料Aで盛り立てを行い、実験はこの基礎地盤上で実施した。

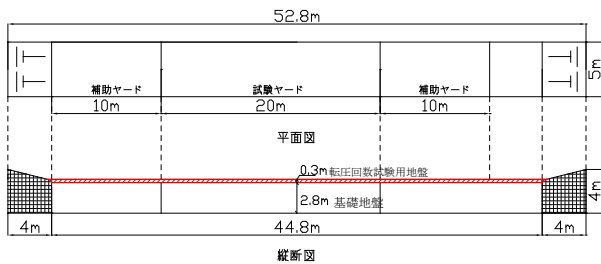


図-1 実験フィールドの概要図

(2) 盛土材料の土質条件

本実験に使用した盛土材料を表-1に示す。本実験では砂質系土質材料(土質材料A)及び粘性系土質材料(土質材料B)を使用した。細粒分含有率は、土質材料Aでは15.3%、土質材料Bでは57.1%である。使用した土の

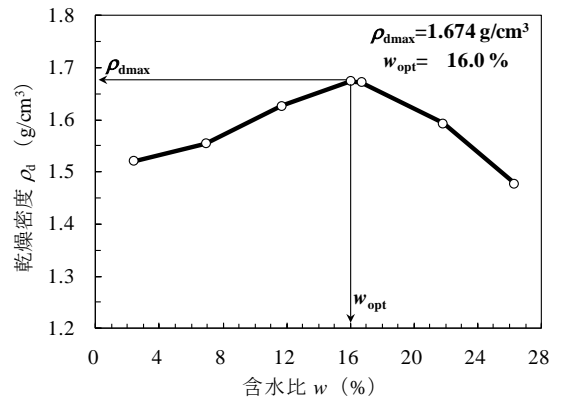


図-3 締固め曲線 (土質材料A)

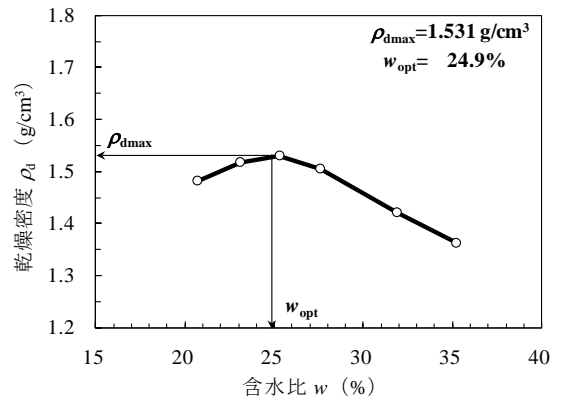


図-4 締固め曲線 (土質材料B)

粒径加積曲線を図-2 に示す。また、表-1 に示す最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} は、突き固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210) のA-c法で算出したものである。締固め試験の結果により得られた締固め曲線を図-3、図-4 に示す

(3) 実験時の含水比条件

本実験では土質材料Aについては含水比を3つのケースに分け転圧試験を行うこととした。実験含水比については、 $w=10\%$ 、 15% 、 16% の3ケースとした (表-1)。また、土質材料Bについては、含水比によっては締固め機械による施工が困難なことが想定されたため、事前に締固め機械の走行試験を行い、走行可能な含水比により転圧試験を行った。

(4) 締固め機械

実験に用いた締固め機械を表-2 に示す。機械は盛土工事に広く利用されている振動ローラ、タイヤローラ、ブルドーザの3機種とし、車両重量については実験ピットでの実験が可能となる範囲内で同程度となるものを選定した。

表-2 締固め機械の規格

使用機械	車両質量
振動ローラ	11t級 (土工用)
タイヤローラ	11t級
ブルドーザ	11t級 (湿地タイプ)

2.2 実験内容

表-2 に示す各種締固め機械と表-1 に示す盛土材料に対する締固め特性の関係を把握するために転圧試験を行った。表-3 に、転圧試験において計測した項目、測点数及び計測時点を示す。また、図-5 に、実験フィールド内での各計測項目の計測箇所を示す。転圧試験は、図-1 のハッチングで示すように基礎地盤上に仕上がり厚 300mm となるように盛土材料を敷均し、各締固め機械の前後進により締固めを行った。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ケースについて行った。なお、実験に当たっての初期条件 (締固め回数0回) は、人力敷均し後 0.1 m^3 級の油圧ショベルのクローラにて2回締め固めた状態とした。また、締固め機械の走行速度も締固め特性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、実施工を想定した3~4km/h程度に固定し実験を行った。写真-4 に、上記で述べた初期条件の状況、写真-5 に振動ローラを用いた転圧試験の状況を示す。以下に各計測項目の詳細について述べる。

表-3 計測項目一覧

計測項目	測点数	計測時点
密度・含水比 (コアサンプル)	3	締固め回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
沈下量 (レベル測量)	3	締固め回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (小型FWD)	3	締固め回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (重錘落下試験)	3	締固め回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (平板載荷試験)	3	締固め回数 16 回後

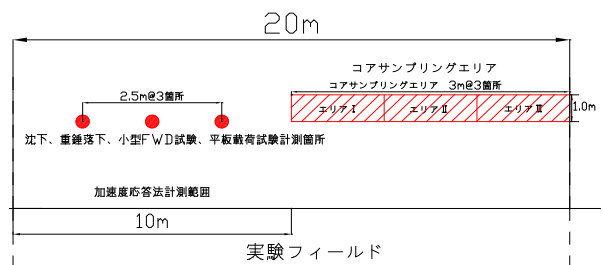


図-5 計測箇所



写真-4 初期条件の状況



写真-5 転圧試験状況

(1) 密度・含水比 (コアサンプリング) 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」という)による計測を行った(写真-6)。コアカッターは、内径 $\phi 100$ mm、高さ100 mmのものを使用した。コアサンプリングは、深さ方向の締固めの状況の違いを把握するため、地盤の深さ $h=0\sim 10$ cm、 $10\text{cm}\sim 20$ cm、 $20\text{cm}\sim 30$ cm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。

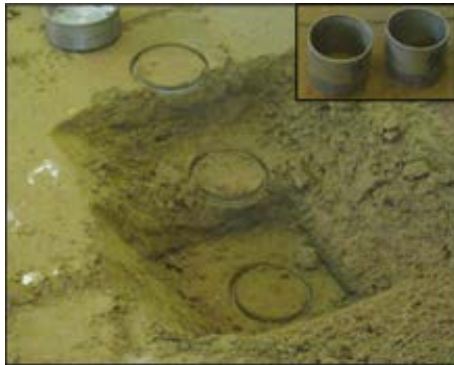


写真-6 コアサンプリング状況

(2) 地盤反力係数 (重錘落下試験) 計測

土木研究所で開発された超小型動的平板載荷試験装置⁴⁾IST-03 (Impact Soil Tester 3、写真-7)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、平板載荷試験 (JIS A 1215) による K_{30} (地盤反力係数) を求めた。(IST-03 による試験については、以下、「重錘落下試験」という。)



写真-7 超小型動的平板載荷試験装置

(3) 地盤反力係数 (小型FWD試験) 計測

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-8)。



写真-8 小型FWD試験状況

(4) 地盤反力係数 (平板載荷試験)

JIS A 1215「地盤の平板載荷試験方法」に準拠し、 K_{30} を求めた。(写真-9)。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-9 平板載荷試験状況

3. 実験結果

3.1 密度計測結果

(1) 土質材料A

土質材料Aの $w=10\%$ 、 15% 、 16% におけるコアサンプリングにより得られた結果として、地盤表層からの深さ $h=0\sim 10$ cm、 $10\sim 20$ cm、 $20\sim 30$ cmで計測された乾燥密度の平均値を図-6に示す。

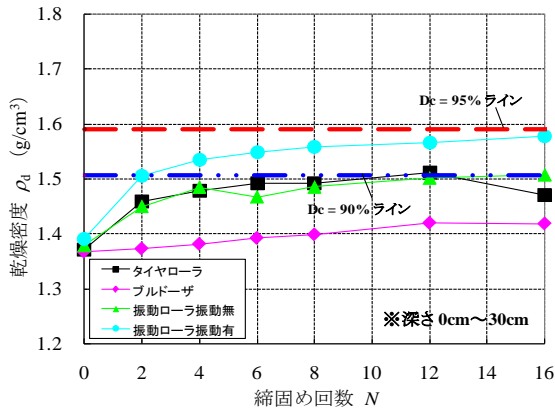
なお、図-6に示す締固め度 $D_c=90\%$ 、 95% の破線は、それぞれ盛土工指針に記載されている現場盛土工事の路体、路床・構造物接続部における日常管理の基準値の目安を示している。

実験により得られた各含水比における締固め回数-乾燥密度の結果および含水比-乾燥密度結果を以下に述べる。

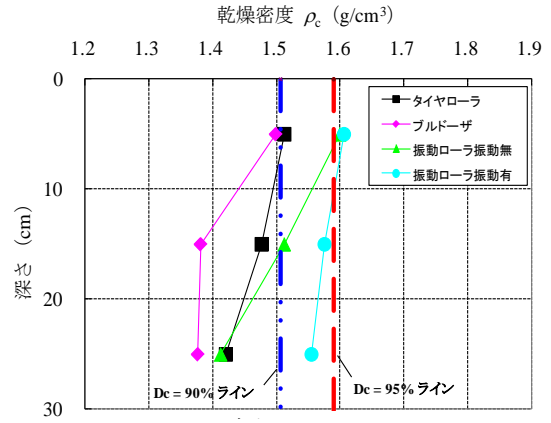
- 1) 振動ローラ (振動あり)、振動ローラ (振動なし)、タイヤローラについては、締固め回数が増えるにしたがって、乾燥密度が増加する傾向を示した。
- 2) 振動ローラ (振動あり)、振動ローラ (振動なし)、

タイヤローラについては、概ね締固め $N=6\sim 8$ で密度

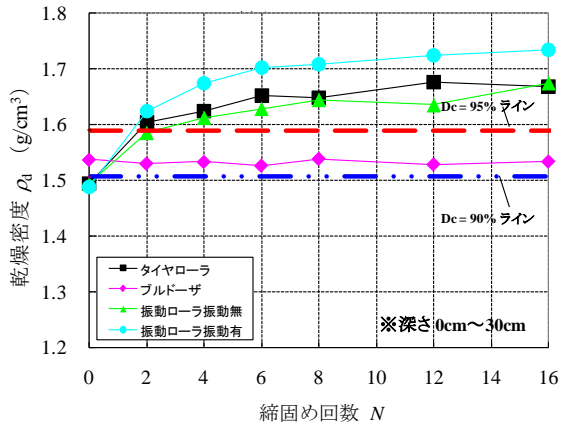
固め機械との差が著しいものとなっている。



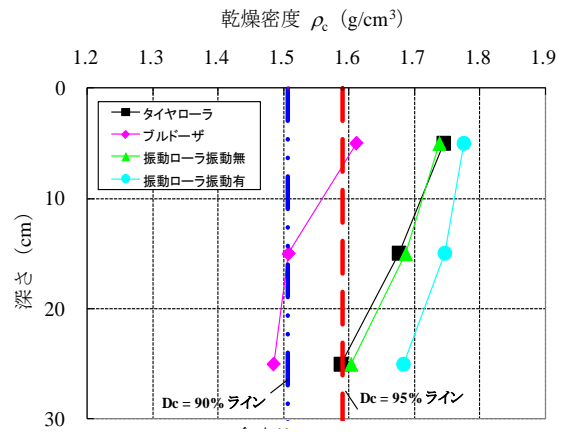
(a) 含水比 $w=10\%$



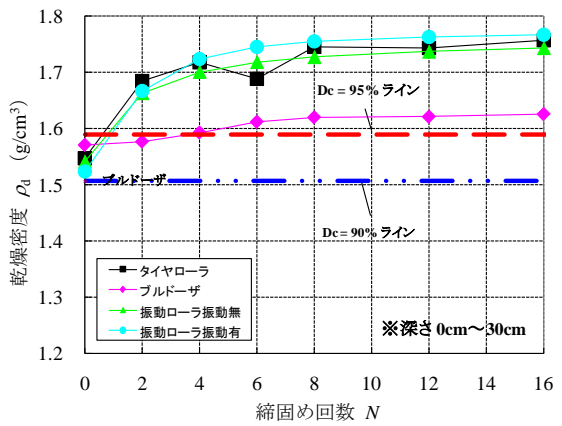
(a) 含水比 $w=10\%$



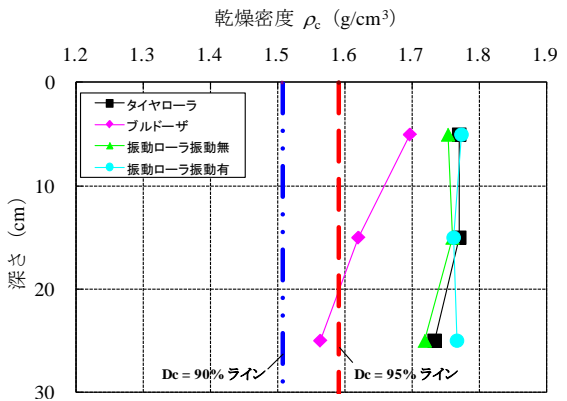
(b) 含水比 $w=15\%$



(b) 含水比 $w=15\%$



(c) 含水比 $w=16\%$



(c) 含水比 $w=16\%$

図-6 土質材料 A における締固め回数-乾燥密度 (試験地盤表面からの深さ $h=0\sim 30$ cm の平均値) の関係

図-7 土質材料 A における試験地盤表面からの深さ-乾燥密度 (締固め回数 $N=16$) の関係

の増加が収束した。

3) 振動ローラ (振動あり) は、いずれの含水比においても乾燥密度が高く、特に乾燥側に関しては、他の締

4) ブルドーザについては、締固めをおこなっても初期の状態 (締固め回数 $N=0$) に比べて、乾燥密度は増加しないもしくは増加してもその増加量は他の施工機械

に比べて小さい。

土質材料Aの $w=10\%$ 、 15% 、 16% について各締固め機械の締固め回数 $N=16$ 時の乾燥密度—試験地盤表面からの深さの関係を図-7に示す。これらの乾燥密度の値はいずれも3箇所の平均値である。なお、コアサンプリングの $h=0\sim 10\text{cm}$ 、 $10\text{cm}\sim 20\text{cm}$ 、 $20\text{cm}\sim 30\text{cm}$ での計測値は、それぞれの平均深さ 5cm 、 15cm 、 25cm の位置にプロットしている。

実験により得られた各含水比における乾燥密度—試験地盤表面からの深さの結果を以下に述べる。

- 1) すべての締固め機械について深さ方向に対して密度の減衰が起こっている。
- 2) 振動ローラ（振動あり）については、いずれの含水比においても、深さによる密度の違いが他の機械に比べて小さい結果となった。
- 3) ブルドーザについては、試験地盤表面からの $h=0\sim 10\text{cm}$ と $h=10\text{cm}\sim 20\text{cm}$ 、 $20\text{cm}\sim 30\text{cm}$ での値の差は、いずれの含水比においても大きい。

(2) 土質材料Bについて

土質材料Bについては、事前に締固め機械の走行試験を行い、締固め機械が走行可能な含水比を設定することとした。事前の走行試験の結果、含水比が高い状態においては、振動ローラ、タイヤローラについては走行することが不可能であったため、各転圧試験時の含水比は、ブルドーザ、タイヤローラ、振動ローラ（振動あり）の順に、 $w=36\%$ 、 $w=28\%$ 、 $w=28\%$ とした。ブルドーザ、タイヤローラ、振動ローラ（振動あり）の転圧試験の結果を図-8、9に示す。タイヤローラ、振動ローラ（振動あり）については、含水比が高い状態では走行自体が困難になるものの、走行可能な条件下では締固め回数の増加により、乾燥密度は増加し、その増加傾向は $N=4\sim 6$ で収束する傾向を示した。ブルドーザについては、初期条件（締固め回数 $N=0$ ）と比較すると締固め回数を増した場合でも、乾燥密度の増加量は他の締固め機械に比べて小さい傾向を示した。

3.2 地盤反力係数計測結果について

盛土の品質を向上させていくためには、締固め度の向上とともに、その品質にばらつきが少ないことが求められる。重錘落下試験、小型FWD試験は、各種の密度試験に比べ機動性よく計測することが可能であるため、より多点での計測が可能である。このようなことから、これらの試験による盛土の品質管理への適用性の検討する

ため、密度計測に併せて重錘落下試験、小型FWD試験

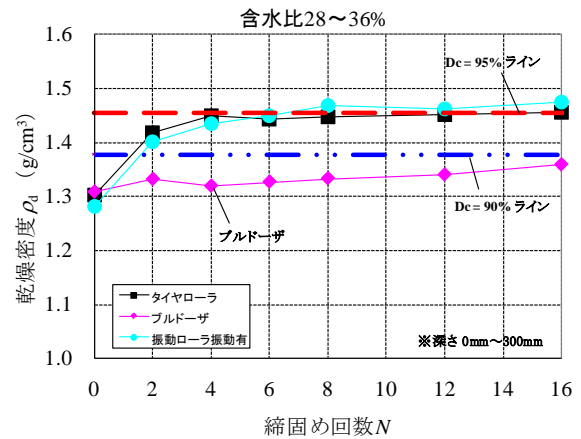


図-8 土質材料Bにおける締固め回数—乾燥密度（試験地盤表面からの深さ $h=0\sim 30\text{cm}$ の平均値）の関係

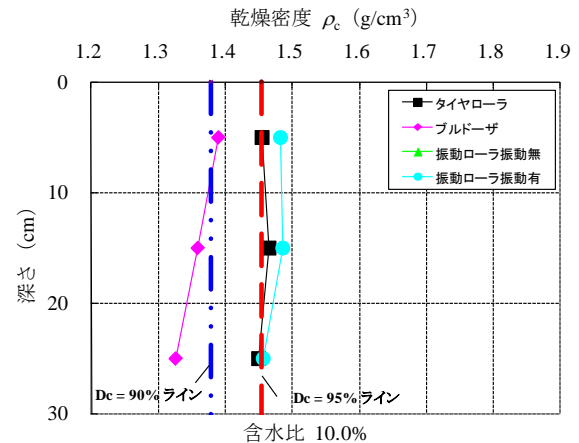


図-9 土質材料Bにおける試験地盤表面からの深さ—乾燥密度（ $N=16$ ）の関係

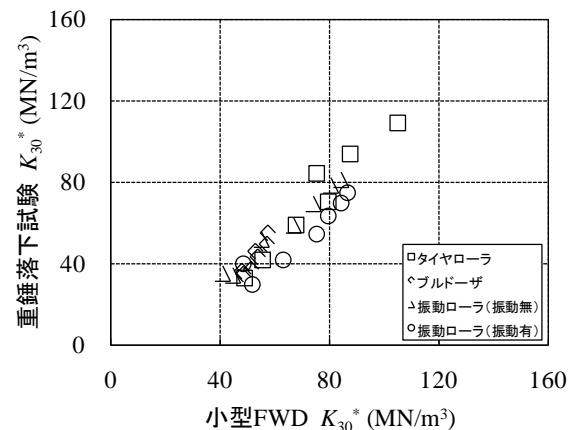
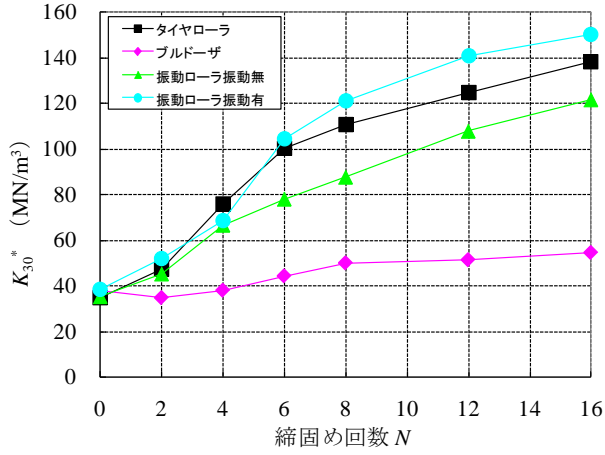


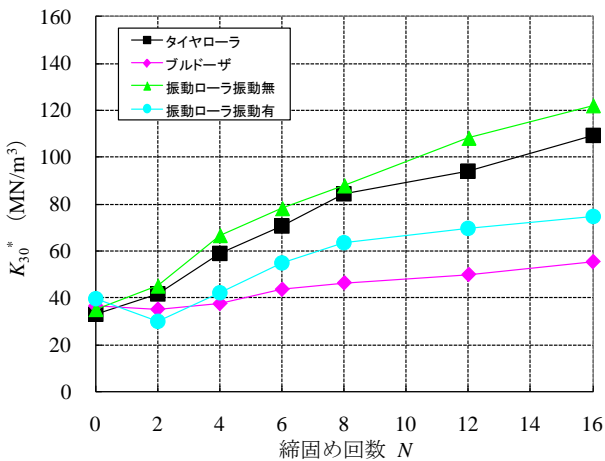
図-10 重錘落下試験 K_{30}^* —小型FWD K_{30}^* の関係

による地盤反力係数の計測を行った。

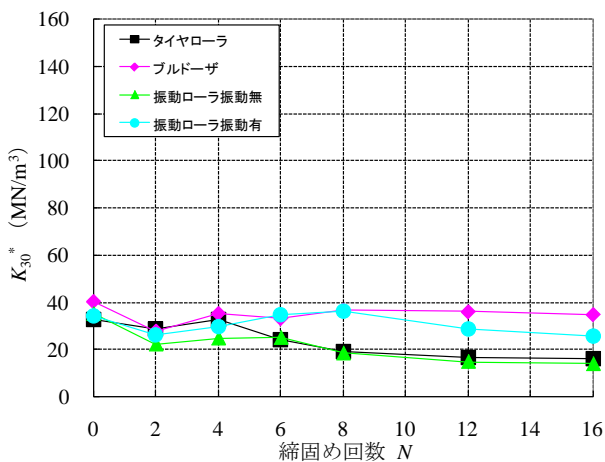
図-10に、土質材料Aにおける $w=15\%$ 時の各締固め回数での重錘落下試験によって得られた K_{30}^* と小型FWD試験によって得られた K_{30}^* の関係を示す。(なお、動的試験に



(a) 含水比 $w=10\%$



(b) 含水比 $w=15\%$



(c) 含水比 $w=16\%$

図-11 土質材料Aにおける締固め回数- K_{30}^* の関係

よって得られた地盤反力係数は平板载荷試験により実際に得られたものではないため、本報告では K_{30}^* と記載し区別して使用することとした。)重錘落下試験によって得られた K_{30}^* と小型FWD試験によって得られた K_{30}^* には強い相関があり、これは他の含水比、土質材料Bでも同様であった。本報告では土質材料Aの重錘落下試験によって得られた K_{30}^* について、以下に述べる。

土質材料Aにおける重錘落下試験によって得られた各含水比における K_{30}^* と転圧試験によって得られた結果を図-11 (a)、(b)、(c)に示す。図-11 (a)、(b)に示すように $w=10\%$ 、 15% では各使用機械締固め回数の増加とともに K_{30}^* が上昇することがわかる。しかし、図-11 (c)に示すように $w=16\%$ では締固め回数の増加により初期値と同等もしくは低下している。さらに、図-12に締固め回数 $N=16$ 時の各含水比- K_{30}^* の関係を示す。図より、 $w=10\%$ から $w=15\%$ 間より $w=15\%$ から $w=16\%$ 間で急激な K_{30}^* の低下を示した。

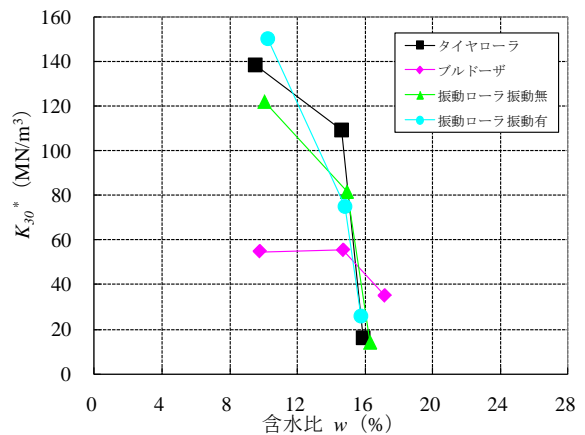


図-12 土質材料Aにおける含水比- K_{30}^* の関係($N=16$)

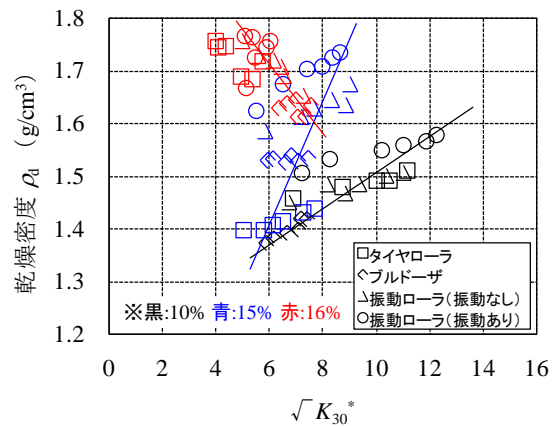


図-13 各含水比における乾燥密度- K_{30}^* の関係 (土質材料A)

次に、各含水比における乾燥密度- K_{30}^* の関係を図-13に示す。なお、図中の K_{30}^* については平方根を取った値となっている。 $w=10\%$ では乾燥密度と K_{30}^* の間には比較的良好的な相関関係があることがわかった。しかし、 $w=15\%$ 、 16% と含水比が推移するにつれて乾燥密度と K_{30}^* のバラつきは大きくなる。さらに、乾燥密度と K_{30}^* の関係は各含水比で独立した相関関係を示しており、含水比により相関性に違いが見られた。

6. まとめ

本研究において砂質系土質において代表的な締固め機会を用いて異なる含水条件のもと、締固め回数毎に転圧面からの深さ毎の乾燥密度を計測し、この測定結果を分析することにより以下の知見を得た。

- ①細粒分の少ない材料では含水条件によらず振動ローラは締固めに対する効果が大きく、転圧面からの深さによる乾燥密度の変化も小さい。
- ②振動ローラやタイヤローラでは締固め回数を増やすことにより乾燥密度が増加するが、概ね締固め回数 6～8 回程度以上では、ほぼ横ばいの傾向であった。それ以上の締固め効果を必要とする場合は、機体重量、機種を選定を見直す必要がある。
- ③含水比や締固め機械の種類によっては転圧後の乾燥密度分布が深さ方向に大きく変化し、特にブルドーザにおいては、その差は大きい傾向にある。一般的に盛土の施工管理における密度の測定は転圧面付近で行われるが、盛土の品質の向上には、この測定値とともに、土質条件に応じた施工機械の締固め特性を考慮する必要がある。

なお、表-4に、これまでの実験結果から整理した砂質系土質である土質材料Aに対する各締固め機械毎の締固

め特性を示す。

粘性系土質においては、実験が限られた条件下で行われていることに留意する必要があるが、これまでの実験結果から振動ローラ、タイヤローラについては、含水比により適用できる条件は限定されるが、走行可能な条件下では締固め度を高める一定の効果が認められた。その一方、ブルドーザについては、上記2機種に比べ走行可能な含水比の範囲は広いものの締固め度を高める効果については限定的であった。

また、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するため、密度計測に併せて重錘落下試験、小型 FWD 試験による地盤反力係数の計測を行い、乾燥密度との相関性について整理した。今回の実験条件では、土質材料が最適含水比に比べ乾燥側であればこれらの試験で測定した地盤反力係数と乾燥密度には比較的良好的な相関を示すものの、含水比が高くなるにつれて相関性が低下していく傾向が見られた。

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、さらに、異なる盛土材料において同様の実験を行うなどデータの蓄積を行っていく予定である。

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
- 4) 境ら：重錘落下による地盤反力係数の測定，第41回地盤工学会研究発表会，2006年

表-4 締固め機械の締固め特性（土質材料A）

締固め機械		タイヤローラ			ブルドーザ			振動ローラ（振動無）			振動ローラ（振動有）		
		11	15	16	11	15	16	11	15	16	11	15	16
深さ (cm)	0-10	—	◎	◎	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	10-20	—	◎	◎	—	○	○	○	◎	◎	○	◎	◎
	20-30	—	○	◎	—	—	○	—	○	◎	○	◎	◎

◎：締固め度 95%以上 ○：締固め度 90%以上 95%未満 —：締固め度 90%未満

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 fiscal year 2012, compaction tests were conducted with selected compaction machines under the some embankment material. As a result, we arranged the relations of kind of compaction machines and characteristic of dry density of soil after the construction.

Key words :

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