

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 G 施工技術 T

研究担当者：宮武 裕昭 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。

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きた。昨年度まででは、砂質土（FC10 相当）と粘性土（FC50 相当）にて実験を行い、締固め機械の性能と盛土の品質（締固め状況）の関係を整理するとともに、この成果を踏まえて施工条件に応じた適切な施工手法（施工厚さ・締固め回数）および機種を選択を行うための基礎資料を整理した。また、動的平板載荷試験手法と従来の品質管理指標である密度について相関性を検証し、砂質系土質に関しては、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。

本年度では、昨年度までの実験に引き続き、別個の土質（FC15 相当）を用いて同様の実験を行った。本報ではこの結果を報告する。

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も技術革新が進んでいる。さらに、道路土工—盛土工指針²⁾（旧：道路土工—施工指針³⁾）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、盛土締固めに用いられている代表的な施工機械を用いて転圧試験を行い、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った。

本年度では、昨年度までの実験に引き続き、別個の土質（FC15 相当）を用いて同様の実験を行った。本報ではこの結果を報告する。

2. 実験条件

2. 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 に実験ピットの詳細を示す。昨年度作成した基礎地盤（実験ピット底面より高さ 2.8m まで）を使用し、以後の実験はこの基礎地盤上で実施した。

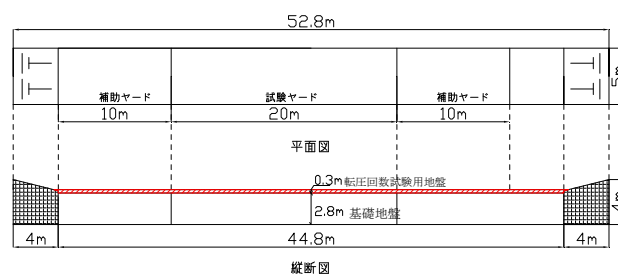


図-1 実験ピット詳細図

2. 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（FC15 相当）を使用した。使用した土の粒径加積曲線を図 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 (JISA 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に示す

表-1 盛土材料の物性

	FC15 相当
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.662
細粒分含有率 F_c (%)	16.0
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.634
最適含水比 w_{opt} (%)	17.7
実験含水比 w_i (%)	16.5, 17.5

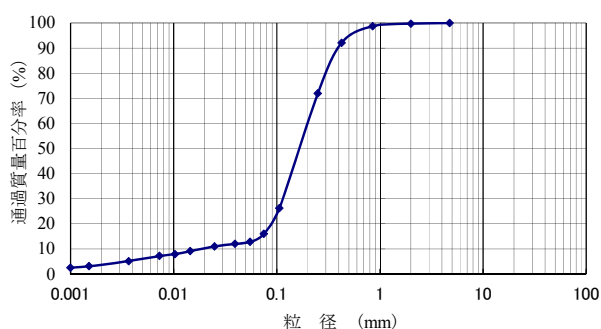


図-2 粒径加積曲線

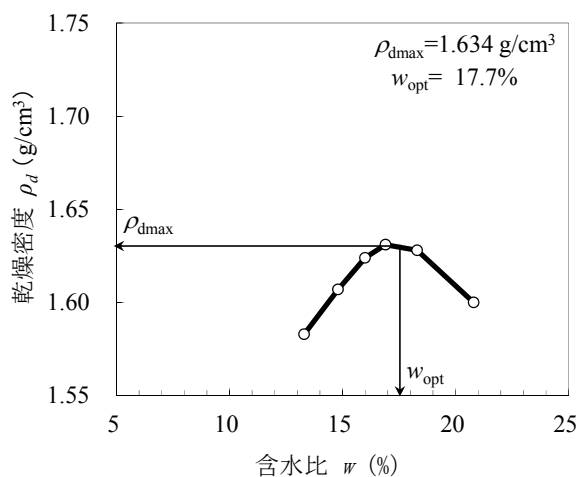


図-3 締固め曲線

2. 3 実験時の含水比条件

本試験では含水比を2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、 $w=16.5\%$ 、 17.5% の2ケースとした (表-1)。

2. 4 締固め機械

実験に用いた締固め機械を表-2および写真-1~2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、タイヤローラの2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 使用機械の規格

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



写真-1 タイヤローラ



写真-2 振動ローラ

3. 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-4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、振動ローラ (振動なし)、振動ローラ (振動あり) の計3ケースについて行った。なお、実験に当たったの初期条件 (締固め回数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-3に、上記で述べた初期条件の状況、写真-4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(距離)	計測時点
密度・含水比 (コアサンプル)	3	転圧回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
沈下量 (レベル測量)	3	転圧回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (小型FWD)	3	転圧回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (重錘落下試験)	3	転圧回数 0,2,4,6,8,12,16 回後
地盤反力係数 (平板載荷試験)	3	転圧回数 16 回後

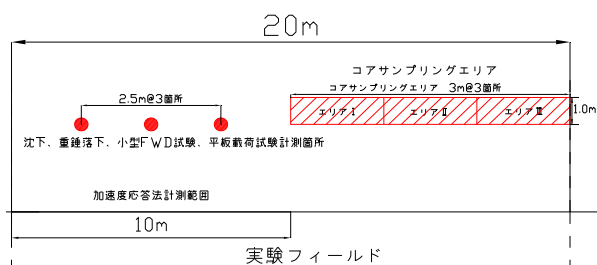


図-4 計測箇所



写真-3 初期条件の状況



写真-4 転圧試験状況

3. 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-5)。コアカッターは、内径 ϕ 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 $h=0\sim 10\text{cm}$ 、 $10\text{cm}\sim 20\text{cm}$ 、 $20\text{cm}\sim 30\text{cm}$ ごとに計測を行った。計測点は、図-4 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-5 コアサンプリング状況

3. 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-6)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-6 超小型動的平板載荷試験装置

3. 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-7)。



写真-7 小型FWD試験状況

3. 4 地盤反力係数 (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} を求めた。(写真-8)。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-8 平板载荷試験状況

4. 実験結果・まとめ

4. 1 密度計測結果

$w=16.5\%$ 、 17.5% における深さ0~100mm、深さ100mm~200mm、深さ200mm~300mmの締固め回数-乾燥密度の関係を図-5~10に示す。いずれも3測定点の平均で表している。なお、図中の破線は締固め度95%、2点鎖線は締固め度90%を示している。これは、「道路土工-盛土工指針」²⁾における日常管理値の目安を表している。

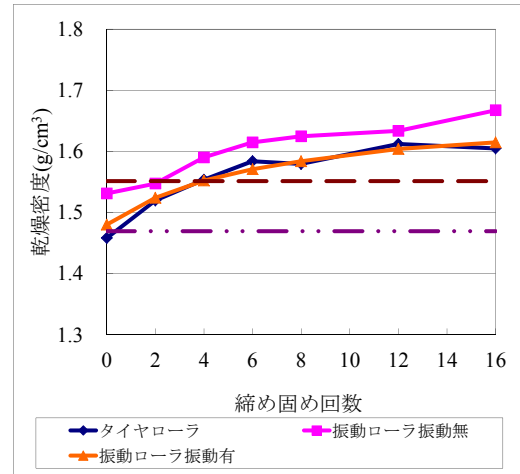


図-5 乾燥密度 ($w=16.5\%$, 深さ 0~100mm)

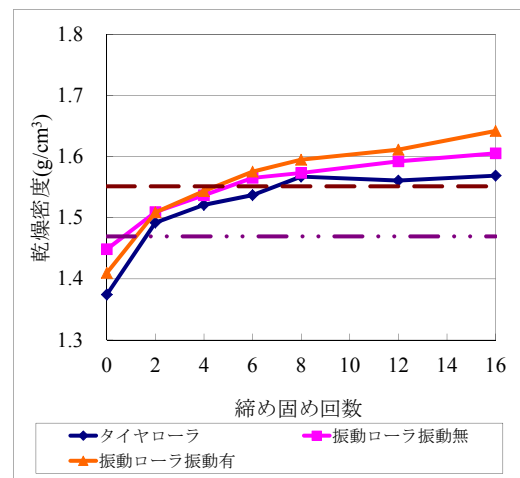


図-6 乾燥密度 ($w=16.5\%$, 深さ 100~200mm)

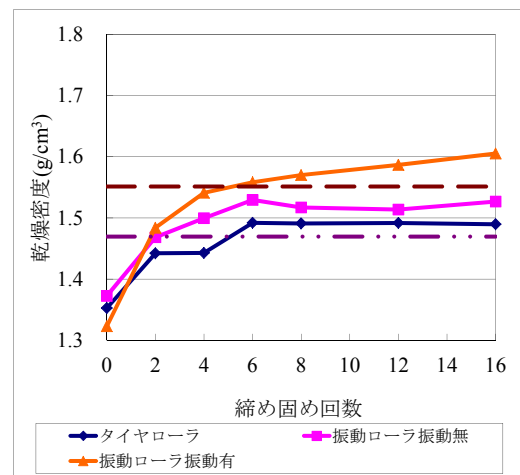


図-7 乾燥密度 ($w=16.5\%$, 深さ 200~300mm)

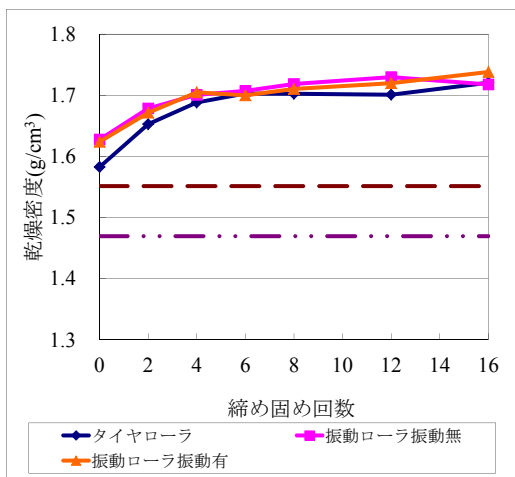


図-8 乾燥密度 ($w=17.5\%$, 深さ 0~100mm)

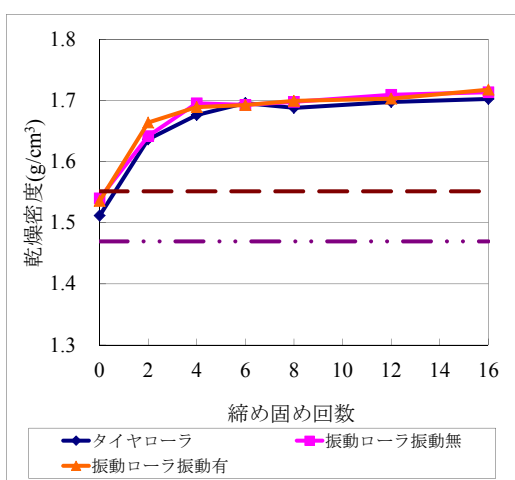


図-9 乾燥密度 ($w=17.5\%$, 深さ 100~200mm)

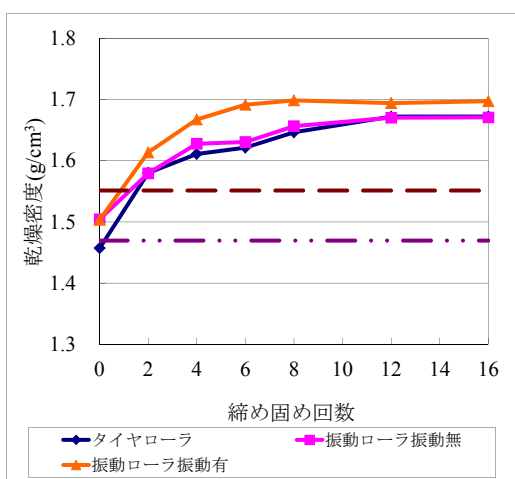


図-10 乾燥密度 ($w=17.5\%$, 深さ 200~300mm)

図-5~10 より、すべての機械において、締め固め初期で急速に密度が増加し、概ね締め固め回数 6~8 回程度で密度増加が収束へ向かっている。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。

次に $N=16$ 時の到達密度を見ると、 $w=16.5\%$ 、深さ 0~100mm の場合を除き、振動ローラ（振動あり）の乾燥密度が最も高く、特に $w=16.5\%$ （最適含水比より 1%乾燥側）の方が他の締め固め機械との差が大きいものとなっている。これは $w=16.5\%$ 、深さ 0~100mm の場合を除き、昨年度までの実験結果と同様の傾向である。

$w=16.5\%$ 、深さ 0~100mm における振動ローラ（振動あり）の $N=16$ 時の密度が低い理由は、振動ローラ（振動あり）による締め固めで地表面が乱されてしまった可能性が考えられる。

次に $w=16.5\%$ 、 17.5% における $N=16$ 時の乾燥密度—試験地盤表面からの深さの関係を図-11, 12 に示す。いずれも 3 測定点の平均で表しており、深さ 0~100mm、深さ 100mm~200mm、深さ 200mm~300mm での計測値は、それぞれの平均深さ 50mm、150mm、250mm の位置にプロットしている。

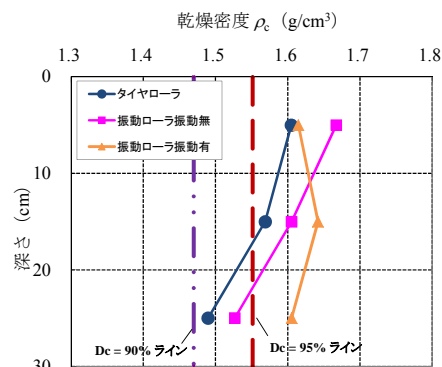


図-11 乾燥密度—深さの関係 ($w=16.5\%$)

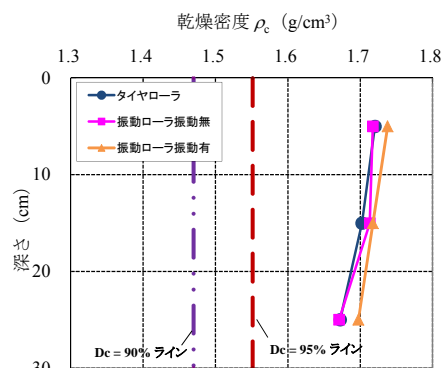


図-12 乾燥密度—深さの関係 ($w=17.5\%$)

図-11, 12 より、 $w=16.5\%$ における振動ローラ（振動あり）深さ 0~100mm から深さ 100mm~200mm の間のみ、乾燥密度が深くなるのに従って増加している。このことから、先の述べたように振動ローラ（振動あり）による締め固めで地表面が乱されてしまったことが考えられる。

それ以外の区間では、深さが深くなるほど乾燥密度は減衰しており、振動ローラ（振動あり）ではその減衰が他の機械に比べ小さいことがわかる。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。

4.2 地盤反力係数計測結果について

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-13, 14 に示す。なお、動的試験によって得られた地盤反力係数は平板載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。

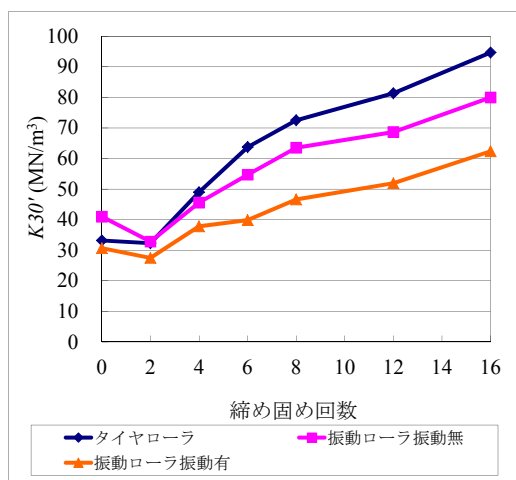


図-13 重錘落下試験による K_{30}^* ($w=16.5\%$)

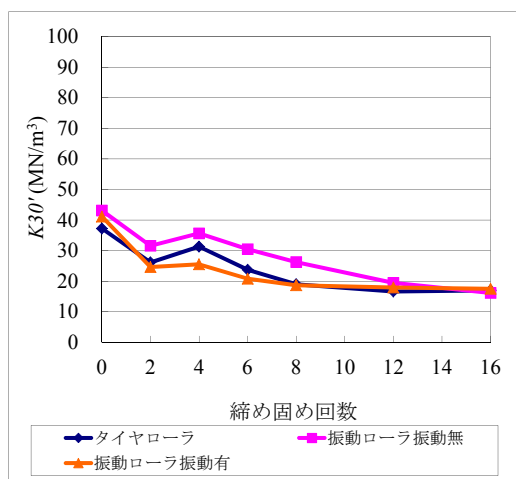


図-14 重錘落下試験による K_{30}^* ($w=17.5\%$)

図-13, 14 より、 $w=16.5\%$ （最適含水比より 1%乾燥側）では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、 $w=17.5\%$ （最適含水比付近）では締固め回数の増加により K_{30}^* は低下している。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。

次に、各含水比における乾燥密度（深さ 0-300mm 平

均）- K_{30}^* の関係を図-15 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。

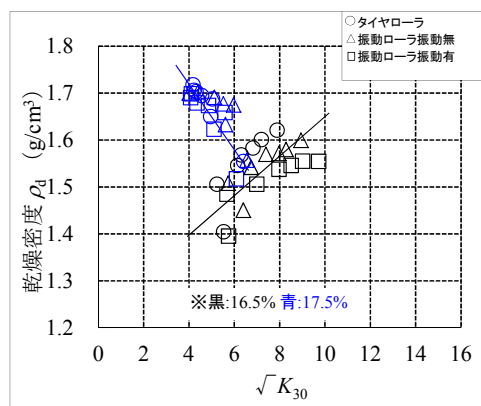


図-15 各含水比における乾燥密度- $\sqrt{K_{30}^*}$ の関係

図-15 より、 $w=16.5\%$ （最適含水比より 1%乾燥側）では乾燥密度と $\sqrt{K_{30}^*}$ との間にはバラツキはやや大きいものの正の相関があり、 $w=17.5\%$ （最適含水比付近）の場合では同様にバラツキはやや大きいものの負の相関があることがわかる。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。

5. まとめ

今回の実験によって得られた結果より、以下のことがいえる。

- 1) すべての含水比、機械において、締固め初期で急速に密度が増加し、概ね締固め回数 6~8 回程度で密度増加が収束へ向かっている。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。
- 2) 次に $N=16$ 時の到達密度を見ると、 $w=16.5\%$ 、深さ 0~100mm の場合を除き、振動ローラ（振動あり）は締固めに対する効果が大きく、また締固め地盤表面からの深さによる密度変化も小さい。これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である。
- 3) $w=16.5\%$ 、深さ 0~100mm における振動ローラ（振動あり）の乾燥密度が低い理由は、振動ローラ（振動あり）による締固めで地表面が乱されてしまった可能性が考えられる。
- 4) 今回の土質における各機械の締固め特性を表-4 にまとめる。本表は、機種選択、施工厚さの設定、締固め回数の設定の際に参考とすることができる。

表4 小型締固め機械の締固め性能特性 (FC15)

締固め機械		タイヤローラ		振動ローラ (振動なし)		振動ローラ (振動あり)	
含水比 (%)		16.5	17.5	16.5	17.5	16.5	17.5
深さ(mm)	0-100	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	100-200	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	200-300	○	◎	○	◎	◎	◎
締固め回数		6~8					

◎: 締固め度 95%以上 ○: 締固め度 90%以上 95%未満

- 5) $w=16.5\%$ (最適含水比より 1%乾燥側) では乾燥密度と $\sqrt{K_{30}^*}$ との間にはバラツキはやや大きいものの正の相関があり, $w_f=17.5\%$ (最適含水比付近) の場合では同様にバラツキはやや大きいものの負の相関があることがわかる. したがって K_{30}^* を乾燥密度の代替指標として使用することは, 本実験条件の下では可能であるといえる. しかし, 乾燥密度との相関性が各含水比で独立しているため, 施工時には含水比をある一定の範囲で管理する必要がある. これは昨年度までの実験結果と同様の傾向である.

本年度の実験では, 昨年度までの実験に引き続き, FC5 相当材料においての, 各機種種の締固め特性などをまとめることができた. 今後は他の土質 (砂礫質土, 碎石など) や他の重量クラスの機械, 他の計測システムについて実験を行い, 本研究のさらなる充実を図っていきたい.

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

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 2013, 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