

戦2 盛土施工の効率化と品質管理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23

担当チーム：技術推進本部（施工）

研究担当者：小橋秀俊、藪雅行、堤祥一、

【要旨】

現状の盛土締固め施工において、技術基準に基づく施工管理が行われているものの、地震・豪雨等の災害等による、供用後の盛土の崩壊や経年的な部分沈下等が発生するケースがある。これは、土の締固め特性を考慮した施工機械の選定基準が明白でないこと、施工時における品質の均一性の確保・脆弱箇所の把握が充分でないことが要因のひとつとして考えられる。

そこで本研究では、土質と施工機械の適切な選定、新しい品質管理手法の提案を主なテーマとし、施工機械の選定に関する転圧試験、土質の締固め特性の把握のための基礎実験、新しい品質管理手法に関する基礎試験を実施した。結果、土を破壊させない範囲にて適切な施工機械を選定する必要があること。施工機械の締め固めエネルギーと、土の状況に応じた適切な締固めエネルギーを考慮して、土と施工機械の組合せを評価する必要があることが分かった。

キーワード：盛土締固め、施工機械、締固め特性、盛土材、品質管理

1. 研究の背景と方針

盛土締固め施工においては、道路土工指針等に基づく施工管理が行われているものの、地震・豪雨等の災害等により、供用後の盛土の崩壊や経年的な部分沈下等が発生するケースがある。これは、土の締固め特性を考慮した施工機械の選定が充分でないこと、施工時における品質の均一性の確保・脆弱箇所の把握が充分でないことが要因のひとつとして考えられる。

そこで本研究では、土質条件に応じた施工機械の適切な選定、新しい品質管理手法の提案を主なテーマとし、施工機械の締固め特性に関する基礎データ収集、施工機械の選定に関する転圧試験、土質の締固め特性の把握のための基礎実験、新しい品質管理手法に関する基礎試験を実施した。施工機械の締固め特性に関する基礎データ収集については、「戦3 盛土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究 (3)」で述べており、本稿ではそれ以外の研究結果について報告するものとする。

本研究における各種試験の位置付けを図1-1に示す。これら一連の試験結果を組合せ、評価することにより、最終的には対象土質の締固め特性を考慮した、施工機械の選定、適切な施工手法の明示、脆弱箇所を面的に把握できる施工管理手法の提案を行いたいと考えている。

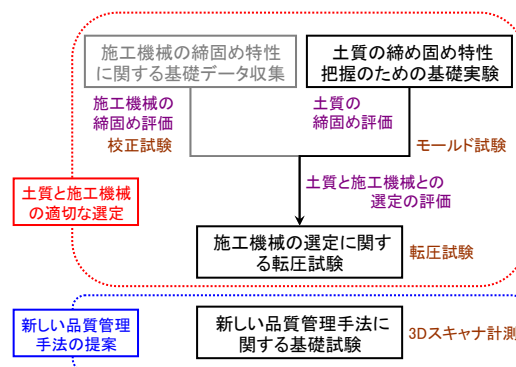


図1-1 本研究における各種試験の位置付け

2. 施工機械の選定に関する転圧試験

(1) 試験の概要

対象土に応じた施工機械の選定に関する転圧試験の概要を図2-1～2-2に、実験ケースと仕様を表2-1～2-3に示す。今回の転圧試験は、機械と締固め対象土質との相性や関係を実大規模で把握し、室内でのモールド試験や施工機械の締固め特性に関する基礎データ収集を補完する位置付けとして実施している。具体的には2種類の砂質土（江戸崎砂、玉造砂）と2種類の施工機械（10tタイヤローラ、11tロードローラ）に対し、各転圧回数（0、2、4、6、8、16回）ごとに各種計測・試験（砂置換、RI試験、ブロックサンプリング、地盤沈下量計測、土圧計

測) を実施した。

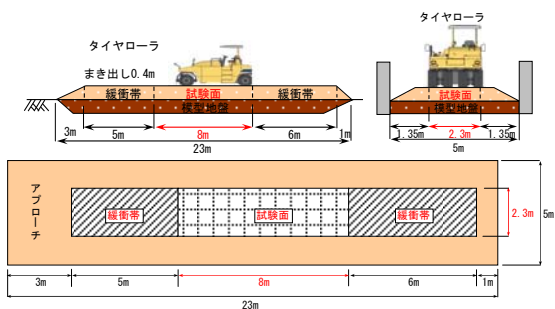


図 2-1 転圧試験の試験ヤード

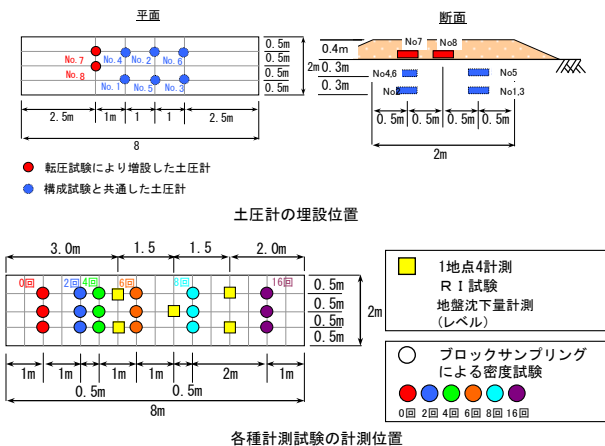


図 2-2 計測機器の設置位置と各試験の実施位置

表 2-1 転圧試験の実験ケース

Case	対象土質*1	選定機械*2	転圧回数
Case 1	江戸崎砂	10tタイヤローラ	0,2,4,6,8,16回
Case 2		11tロードローラ	
Case 3	玉造砂	10tタイヤローラ	0,2回
		11tロードローラ	0,2,4,6,8,16回

* 1 11tロードローラは無振動にて実施
 * 2 Case3は、転圧2回で地盤が破壊し、10tタイヤローラが動けなくなったため、11tロードローラでやり直しを行った

表 2-2 対象土の基本物性値

項目	記号・単位	江戸崎砂	玉造砂
自然含水比	ω_n (%)	16.1	8.3
細粒分含有率	F_c (%)	6.6	3.2
最大粒径	D_{max} (mm)	4.75	19
均等係数	U_c	2.5	3.2
地盤工学分類		細粒分混じり砂	礫まじり砂
試験法		A-c法	A-c法
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.63	1.75
最適含水比	ω_{opt} (%)	18.8	14.1

表 2-3 各計測項目と試験の仕様

実施試験と計測項目	計測数	実施箇所	備考
RI試験	20回	図2-2参照	4計測/地点
重錘落下試験	20回		計5地点
ブロックサンプリング	3箇所		土壌サンプラー
沈下計測	11箇所	中心断面	3Dレーザー キャナと比較
土圧計測	8	図2-2参照	

* 各計測は、転圧回数0,2,4,6,8,16回ごとに実施

(2) 試験の結果と分析

転圧回数ごとの土圧計の変化を図 2-3 に示す。GL-0.4m に埋設された土圧計 7、8 の値が高く、GL-0.7m 以深に埋設された他の土圧計値は大きく減衰することが分かる。これより、載荷圧の有効範囲は 30cm 程度であること。転圧回数の増加に伴う土圧計の値には大きな変化は見られないことが分かった。

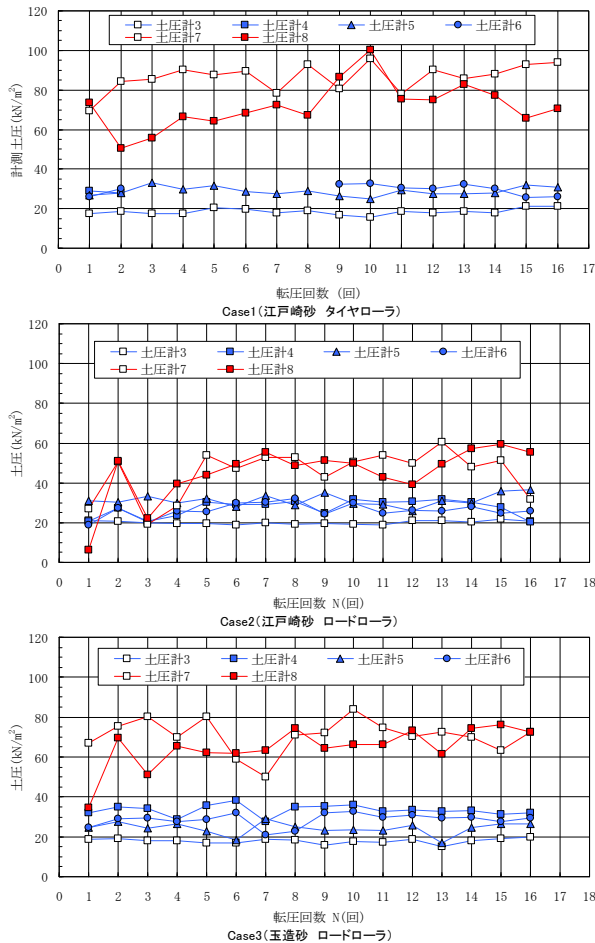


図 2-3 転圧回数ごとの土圧計の変化

計測した密度と、RI の密度計測地点にて、レベルにより計測した地盤沈下量を比較し、その相関性について評価を行った。結果を図 2-4 に示す。これより、いずれの密度試験方法においても、転圧初期は相関性が低いものの、ある程度転圧が進んだ段階では、地盤沈下量と密度に相関性がある様子を見ることができる。

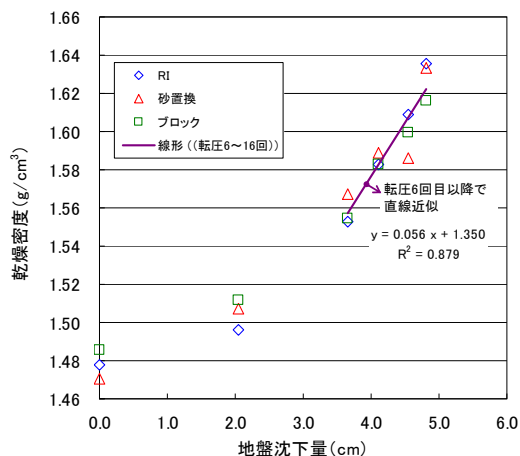


図2-4 沈下量と密度の相関性について (Case1)

今回の転圧試験で用いた対象土と施工機械を組合せた結果、どの程度の締固めエネルギーで転圧されたか。室内試験の締固めエネルギー $1.0E_c$ (A-c 法) にて当てはめて整理した結果を図2-5に示す。ここでは、室内試験にて求めた密度と E_c の関係(白い四角で結んだライン)に、転圧試験の結果を色付きの四角にてプロットしている。これより今回の転圧試験では、室内 E_c 換算で、最大0.5~1.4 E_c に相当する締固めエネルギーで転圧されたこと。また載荷圧がCase1より小さいCase2では、換算した E_c がCase1と比較して小さくことが確認できた。

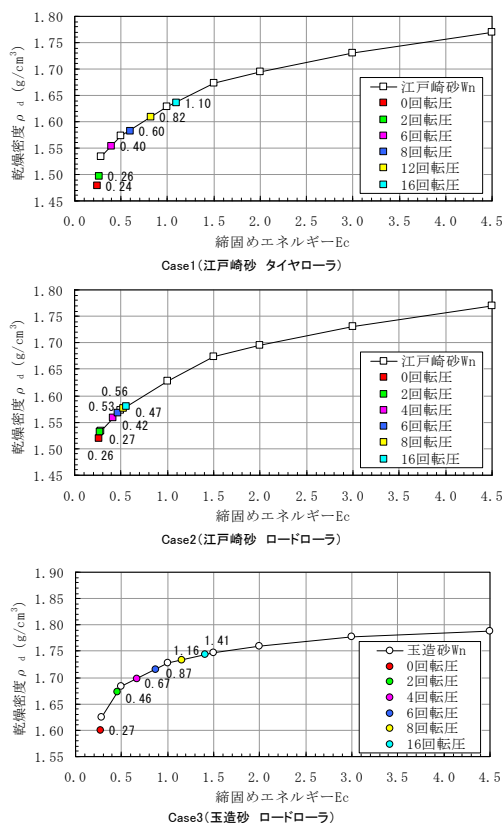


図2-5 施工機械の締固めエネルギーへの換算結果

(3) 試験結果のまとめ

今回の転圧試験の結果を下記に整理する。

- 施工機械による土圧の影響範囲は深さ 30cm までが有効範囲であり、それ以深では大きく減衰することが分かった。また転圧回数の増加に伴う土圧の値の変化は見られなかった。
- 密度と地盤沈下量について、両者とも転圧回数とともに収束する傾向を示し、密度と地盤沈下量に相関性があることを確認できた。
- 今回使用した2種類の砂と施工機械にて、どの程度の締固めエネルギーであったか室内試験の E_c を用いて確認することができた。

3. 土の締め固め特性把握のための基礎実験

(1) 試験の概要

施工機械と対象土質との組合せを考慮する際、「対象となる土が、ある施工機械のエネルギーに対して、どの程度の締固め性能を期待できるか」を把握する必要があるものと考えている。これは、対象となる土の締固め性能以上に大きなエネルギーの機械を用いると、盛土の破壊(卓越したせん断変形)が発生し、また施工機械のエネルギーが小さすぎる場合、土の締固めの性能を十分に引き出せないためである。そこで、今年度は砂質土を対象として、締固めエネルギーに対して、どの程度の締固め性能を有しているか把握するためのモールド載荷試験を実施した。

モールド載荷試験の流れと概要図を図3-1~3-2に、試験のケースと主な仕様を表3-1に示す。

- ① 0.5、1.0、1.5、2.0、4.5、8.0、12.0 E_c の締固めエネルギーにて、突固め試料を作成する。
- ② 静的貫入試験を実施し、ピーク荷重値を把握する。
*地盤の支持力を把握
- ③ ①と同様な方法で再度試料を作成し、ピーク荷重値の2/3の値にて沈下量が安定するまで荷重を維持する。
*ここで維持する静的荷重が、室内試験や、施工機械により与えられる仕事エネルギーと想定する。
- ④ 収束した沈下量、載荷重値、密度、を計測し、地盤の剛性値を算出する。
*載荷重値-密度、地盤剛性の変化より、土の締固め性能と施工機械との相性を評価する。

図3-1 モールド載荷試験の流れ

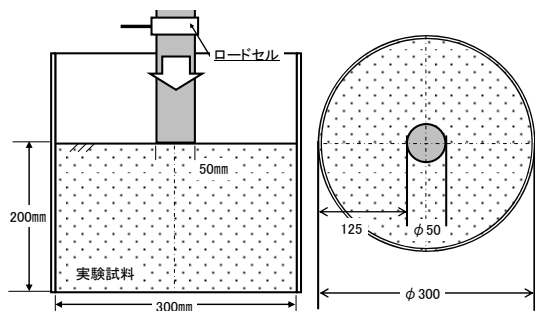


図 3-2 モールド試験の概要

表 3-1 試験ケース

Case	対象土	締め固めエネルギー	含水比
Case1	江戸崎砂	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.5Ec	18% (ω_{opt}), 16% (ω_n), 12%
Case2	玉造砂	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.5, 8.0, 12.0Ec	14% (ω_{opt}), 12%, 8% (ω_n)

* 各ケースとも貫入試験、載荷試験を実施
 * 対象土の基本物性は転圧試験の試料と同様
 * 1.0EcはA-c法に準拠し、他のEcはA-c法の突き固め回数を増減させて作成

(2) 試験の結果と分析

貫入試験の結果の一部（江戸崎砂- ω 16%）を図 3-3 に示す。これより、締め固めエネルギー E_c により、明白にピークを示す傾向がある場合（実線）と、ピーク値が求まらないケース（点線）がある様子が分かった。

またこの図 3-3 より、土の締め固め状態を考慮せず、初回から土のピーク値を超える大きな接地圧の施工機械を用いる場合、盛土の破壊が発生するため、施工機械選定では、接地圧が土ピーク値以下に留める必要があることが分かった。例えば、今回使用した 10 t タイヤローラの接地圧 (400 kN/m²) を図 3-3 にプロットすると、10 t タイヤローラは、0.5、1.0Ec の点線より下側に来っており、初期転圧時の施工機械として適切であることが分かる。

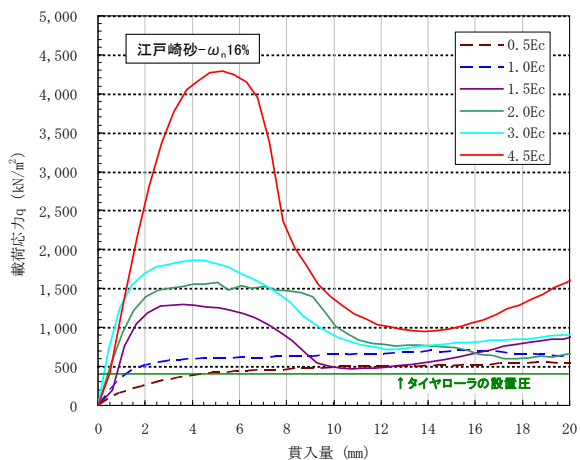


図 3-3 貫入試験の結果（江戸崎砂- ω 16%）

続いて、載荷試験を実施した結果を、締め固めエネルギー E_c を評価基準として、乾燥密度、地盤剛性（地盤反力係数：荷重維持により収束した沈下量と、載荷応力の傾きとして算出）、最大応力（貫入試験でのピーク値）の関係で整理を行った。江戸崎砂における結果を図 3-4～3-6 に示す。

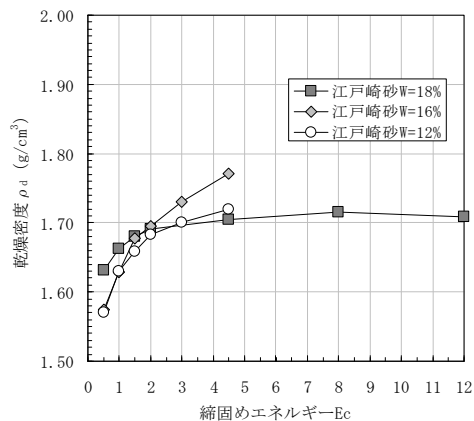


図 3-4 乾燥密度と Ec の関係（江戸崎砂）

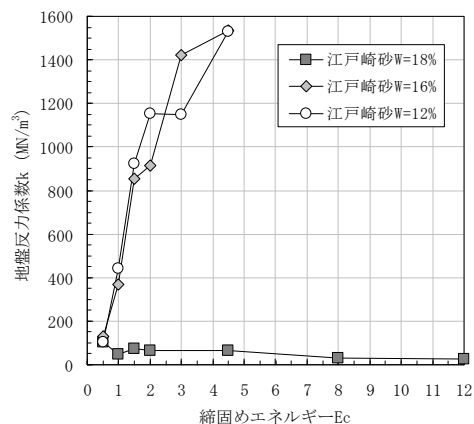


図 3-5 地盤剛性と Ec の関係（江戸崎砂）

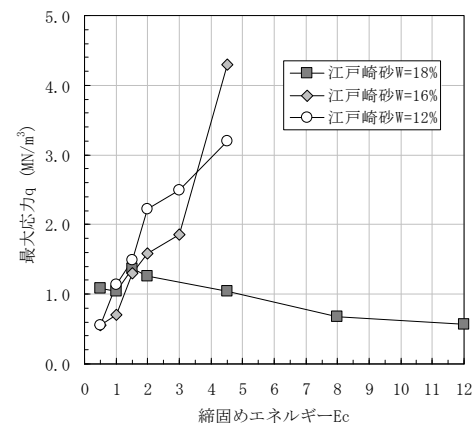


図 3-6 最大応力と Ec の関係（江戸崎砂）

これより、言えることを下記に整理する。

- 図 3-4 に示した密度- E_c の関係において、含水 18% では、 E_c の増加に関わらず密度は、1.5 E_c で頭打ちになっており、 E_c と地盤剛性、最大応力の関係を示した図 3-6、3-7 においても、 E_c が増加しても地盤剛性、最大応力は増加していない様子が確認できる。これより含水 18% の江戸崎砂に対して、1.5 E_c 以上は過剰な締固めエネルギーであり、これ以上の締固めエネルギーを与えることには意味がないことが分かる。
- 図 3-4～3-7 より、含水比 12%、16% では、 E_c が上がるにつれて、乾燥密度は緩やかに上昇し、かつ地盤反力と最大応力は比例的に上昇していく傾向を示す。これより含水比 12%、16% の江戸崎砂では、土自体に十分な地盤剛性と地盤応力が期待できることが分かる。
- しかしながら、図 3-3 に示した貫入試験の結果を考慮すると、実務においては、盛土の破壊をさせない範囲で、土の締固め状態に応じた適切な接地圧の施工機械を選定する必要があることが分かった。

(3) 試験結果のまとめ

モールド試験の結果を下記にまとめる。

- 貫入試験より土の締固め状態に応じ、盛土の破壊をさせない範囲で、適切な接地圧の施工機械を選定する必要があることが分かった。
- 载荷試験より、土の種類や含水状態により、土自体に、十分な地盤剛性と地盤応力を期待できるケースと期待できないケースがあり、土の種類や含水状態に応じて、適切な締固めエネルギーがあることが分かった。

4. 新しい品質管理方法に関する基礎試験

(1) 試験の概要

現在の盛土の品質管理は、砂置換法や RI による密度管理が一般的である。しかしながら、これらの品質管理方法は、計測点を限定した地点管理であり、情報化施工や盛土の性能照査を念頭においた場合、将来的には締固めの均一性や脆弱箇所の把握が要求されることとなる。そのため、今後は盛土の締固めと相関性があり、かつ締固めの均一性や脆弱箇所の有無を把握が可能となる新しい管理指標が求められている。

今年度では、上記の条件を満たす管理指標として、地

盤沈下量に注目し、転圧試験にて、前述の図 2-4 に示す通り、密度と地盤沈下量の相関性に関する評価を実施した。結果、密度と地盤沈下量の間に良好な相関性が得られていることを確認することができた。

そこで、締固めにより生じる沈下量を面的に把握し、評価する手法として、3次元での測量が可能な 3D レーザースキャナ (以後、「3D スキャナ」とする) を用いて、施工に伴う沈下量の面的な把握を試みた。3D スキャナは数万点もの計測点を短時間で一度に計測でき、計測対象物を 3次元で把握することが可能な機器 (図 4-1 参照) であり、計測箇所は実験ヤードが見下ろせる不動位置で固定している。試験は転圧試験の Case1 と Case3 に対して実施した。

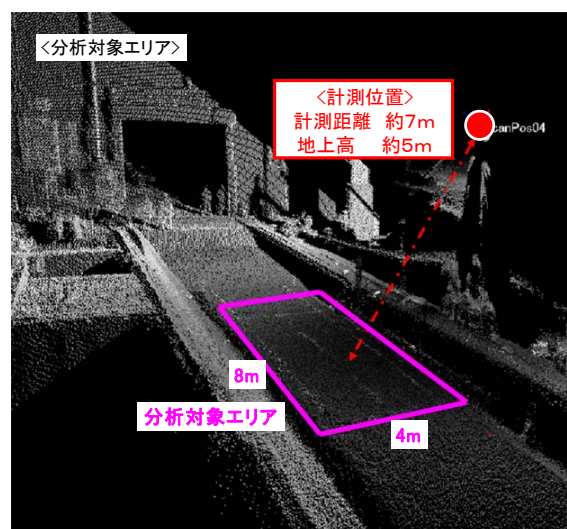
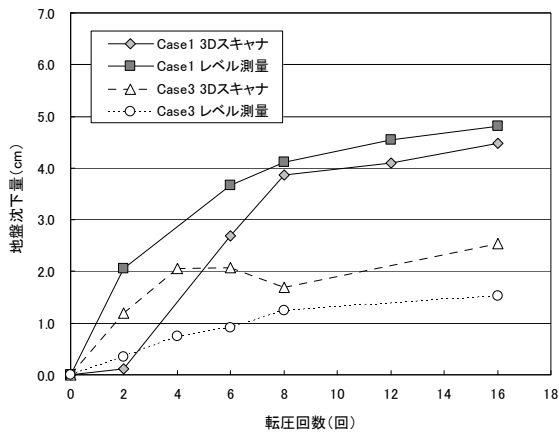


図 4-1 3D レーザースキャナによる計測イメージ

(2) 試験の結果と分析

図 2-4 にて用いたレベル測計測による沈下量と、今回の 3D スキャナによる沈下量の転圧回数ごとの比較結果を図 4-2 に示す。これより、転圧初期では地盤が不均一であり、特に Case3 では地盤の破壊が発生したため、値に差が見られるものの、転圧が進むにつれて徐々に収束し、最終的には約 10 mm 以内の誤差に納まることが分かった。これより、3D スキャナによる沈下計測は実態をほぼ反映したものであると考えることができる。



* Case3はロードローラの転圧のみ抽出

図 4-2 レベル実測と 3D スキャナとの比較

続いて、転圧回数ごとに整理した 3D スキャナによる沈下のコンター図を図 4-3 に示す。施工機械の車輪幅や転圧していない箇所との境界部、転圧不足箇所がある様子を視認することができた。機械の振動や計測距離の問題等、現段階では様々な課題があるものの、沈下量による面的な施工管理自体は、将来性があることを今回の試験より確認することができた。

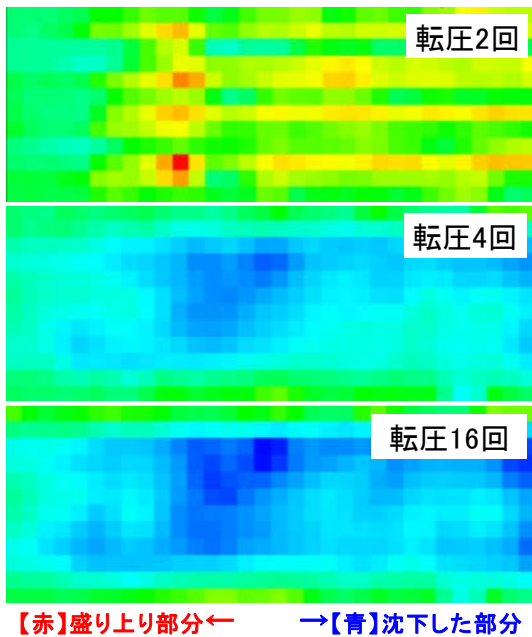


図 4-3 3D スキャナによる沈下コンター (Case2)

(3) 試験結果のまとめ

3D スキャナによる品質管理方法の結果を下記にまとめる。

○3D スキャナによる沈下計測は、レベル実測に近い精度があり、転圧の施工状況を面的に把握できる様子

を確認することができた。

○3D スキャナの計測精度については、徐々に向上していくことを考慮すると、今後の実用的な品質管理のツールとしての可能性を有しているものと考えられる。

5. 全体のまとめ

今回の研究結果を下記にまとめる。

○乾燥密度と地盤の沈下量について、相関性があり、3D スキャナによる沈下計測により、転圧に伴う沈下の状況を、面的に把握できることを確認することができた。

○転圧試験により、室内試験での締固めエネルギー E_c を用いて、施工機械の締固めエネルギーを評価できることが分かった。

○モールドの貫入試験より、各 E_c ごとのピーク値を抑え、データを蓄積することにより、適切な重機の選定が可能になることが分かった。

○モールドの載荷試験より、多種多様な土に対しデータを収集することで、過転圧となる E_c が求まること分かった。

今後はレキ質土、粘性土等、対象となる試料の種類を増やし、現場データとの比較検討、動的荷重による検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (社) 地盤工学会：土の締固めと管理-土質基礎工学ライブラリ 36-、1991 年
- 2) 日本道路公団試験所：土の締固め特性 (土の締固め効果と一層施工厚の検討) -試験所技術資料第 221 号-、2003 年
- 3) 横田聖哉, 中村洋丈: 高速道路における小型施工機械を用いた締固め特性、p14-19 建設の施工企画、2009 年 11 月
- 4) 建設省土木研究所施工研究室：盛土の締固め管理に関する調査 -土木研究所資料第 1472 号- 1979 年 1 月

EFFECTIVE CONSTRUCTION AND QUALITY CONTROL FOR EARTH STRUCTURES

Abstract : When the disaster for examples earth quake and rainstorm was happen, we frequently watched the collapsed embankment in Japan. We think the cause is that the quality control system and compaction method of embankment are not enough. It is required to improve the standard of compaction method and quality control system in considering uniformity and soil characteristics.

In this research, we conducted two sort experiments. One is about the relationship between compacting equipment and soil characteristics. Other is about the development on new quality control considered uniformity and soil characteristics.

As conclusion, we found that the soil characteristics are important factor to select compacting equipments.

Key words : compaction of embankment, compacting equipment, characteristic in compaction, embankment material, quality control