

盛土品質の全量管理に向けた技術開発 —材料品質（含水比，粒度分布），締固め品質の全量管理技術—

Development of Technology for Total Control of Embankment Quality — Technology for Total Control of Material Quality (Water Content, Grain Size) and Quality of Compacted Soil —

米 丸 佳 克 藤 崎 勝 利 吉 田 輝
松 本 聡 碩 田 中 恵 祐¹⁾

要 約

近年、盛土施工の i-Construction が推進されており、盛土施工に ICT が本格的に導入されつつある。しかしながら、真の意味で盛土施工を合理化するには、ICT の活用による測量や施工の自動化だけでなく、盛立材料の管理や締固め管理までを含めた自動化と、これによる全量管理を実現する必要がある。このような背景から、筆者らは盛土施工に関わる各種品質管理の全量管理に向けた技術開発を進めている。今回は、盛立材料の品質（含水比や粒度分布），ならびに締固め品質管理の全量管理に向けた開発の一例を報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 盛土施工の品質管理の将来像
- III. 盛立材料の全量品質管理手法の開発
- IV. 締固め品質のリアルタイム全量管理手法の開発
- V. 真の「土工現場の工場化」に向けて
- VI. おわりに

I. はじめに

我が国の生産人口の減少が確実に進行する中、土木工事の生産性向上は喫緊の課題となっている。これを受けて、当社では、「建設現場の工場化」を目標として、盛土施工では計画や検査に係る測量に 3D スキャナやドローンによる写真測量を積極的に導入するとともに A⁴CSEL¹⁾ などの重機施工の自動化技術の開発を推進している。しかしながら、土工現場の工場化を実現するには、ICT の活用による測量や施工の自動化だけでなく、現状は人力に頼っている盛立材料の管理から締固め管理まで含めた品質管理の自動化も不可欠である。

このような背景から、筆者らは各種品質管理試験の自動化に向けた技術開発を進めている。本報告では、盛土施工における材料および締固め管理の自動化と、これによる全量管理の実現に向けた開発の一例を報告する。

II. 盛土施工の品質管理の将来像

Fig.1 には、代表的な大規模盛土工事であるフィルダムの品質管理フローの推移を年代別に示している。施工に関しては、2000 年代からそれまで現場担当者の目視による管理を主体としていた転圧管理等に ICT が導入され、GNSS を活用した 3 次元位置情報を利用することで転圧状況（施工箇所、転圧回数）をリアルタイムに管理することが可能となった。さらに当社では、近年、A⁴CSEL も推進している。その一方で、盛立材料や締固め品質の管理は多大な手間と時間をかけた人力計測に頼っており、このスタイルは全く変わっていない。さらに、そうまでして得られた測定結果も離散のかつ局所的



Fig.1 品質管理フローの推移
(Quality Control Flow)

1) 関東支店 Kanto Branch

キーワード : 品質管理, 画像粒度モニタリングシステム, 近赤外線水分計, 変形係数

Keywords : quality control, grain size monitoring system by image analysis, near-infrared moisture meter, deformation modulus

なものとならざるを得ない。筆者らはこれらの品質管理試験に新規センシング技術を導入して自動化を目指した技術開発に取り組んでいる。品質管理試験の自動化に伴い、品質管理の多頻度化が可能となり、究極的には、盛土品質の全量管理につながる事が期待される。これによって Fig.1 中に示す筆者らが目指す人力をできる限り廃した新しい品質管理が実現できると考える。

Ⅲ. 盛立材料の全量品質管理手法の開発

1. 盛立材料管理の現状

ロックフィルダムの材料品質の管理項目の代表的なものとして、含水比や粒度分布がある。盛立材料の搬出前に試験によって要求品質を満足することを確認し、要求品質に適合しない場合は、盛土場に搬出せずに、攪拌、曝気、散水等の再調整を行う。これらの品質管理試験は一定の時間間隔で実施される (Table 1)。また、これを補うようにして現場技術者が土取場、盛立箇所などで目視によって材料の種類、変化、均質性などを確認している。本節では、これらの盛立材料品質管理試験の全量管理に向けた取り組み事例を紹介する。

Table 1 品質管理項目例

(Quality Check Points for Earth Material)

試験項目	試験方法	試験頻度
含水比試験	炉乾燥法 (JIS A 1203)	2回/日
	電子レンジ法 (JGS 0122)	
	フライパン法	
粒度試験	JIS A 1204	1回/日
締固め試験	JIS A 1210	

2. 近赤外線水分計による含水比の変動監視

(1) 近赤外線水分計による含水比の全量監視例

小石原川ダム (福岡県：(独) 水資源機構) では、コア材の製造プラントに近赤外線水分計を導入し、コア材含水比の全量監視を行った。近赤外線水分計とは、含水比と高い相関を持つ近赤外線の吸光度を測定する計器である。当ダムでは、盛立場への搬出前にコア材混合設備に同水分計を設置 (Photo 1) し、ベルトコンベアで運搬される材料の含水比の変動傾向を全量監視した²⁾。小石原川ダムのコア材の自然含水比 w_n は最適含水比 w_{opt} よりも乾燥側にあることが多く、コア材に加水して含水比を調整する必要があった。ストックパイルにおける散水では含水比を目標値にまで上昇させること、ならびに散水量を確実に管理することが困難であったため、プラントに装備した加水装置でコア材の含水比調整を行った。コア材製造時の含水比の連続測定監視結果を Fig.2 に示す。近赤外線水分計による含水比測定結果は、JIS 法の含水比測定結果と概ね一致しており、含水比の変動傾向を適切に捉えている。コア材の製造プラントでは、同水分計の測定結果をもとに加水量の調整を実施したが、計測値の5分移

動平均値は概ね施工含水比の範囲内 ($w=14.3\sim 17.3\%$) で変動し、全量管理が品質確保に大きく寄与していることがわかる。

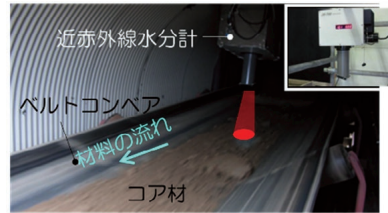


Photo.1 近赤外線水分計の設置状況 (Near-Infrared Moisture Meter)

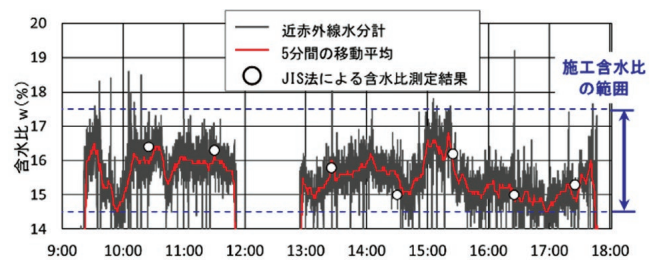


Fig.2 近赤外線水分計による含水比の連続監視結果例 (Continuous Monitoring Record of Water Content Using Near-Infrared Moisture Meter)

(2) 室内迅速含水比測定装置の開発

盛土施工では、盛立材料の含水比を日々測定、管理する必要がある。また、一般的な盛土現場ではベルトコンベアで土を輸送することは少なく、従来の測定方法 (Table 2) による含水比管理も重要である。ただし、従来法では、測定時間や測定可能な試料土の粒径の制限に起因した測定精度の問題があった。そこで、前述した近赤外線水分計を使って迅速かつ精度良く測定することが可能な室内含水比測定装置 (以下、当装置) を試作した。試作した当装置は Photo 2 に示すように、小型の近赤外線水分計、リング状の試料受皿、受皿を回転させるターンテーブルとモーターで構成されている。測定試料の最大粒径は 37.5mm、測定試料量は最大 10kg で、JIS A 1204 で規定される最大粒径 37.5mm の材料の最小分取質量と同等以上である。含水比は、表面を概ね平坦に均した受皿上の測定試料に近赤外線を照射しながら受皿を 1 回転 (1 分間) させて連続的に測定し、この平均値を測定結果とする。試料の準備、測定、廃棄に要する時間は約 5 分である。

Table 2 従来の室内含水比測定方法 (Conventional Soil Testing Method)

測定方法	特徴	問題点
① 炉乾燥法 (JIS A 1203)	・最も一般的な方法 ・多量な試料でも測定可能	・測定に時間がかかる (18時間以上)
② 電子レンジ法 (JGS 0122)	・迅速測定方法 (測定時間は15分程度)	・測定可能な粒径が 10mm 以下 ⇒ 大径の礫・石が混入すると測定結果にバラつきが生じやすい
③ フライパン法	・迅速測定方法 (測定時間は30分程度)	・測定可能な粒径が 20mm 以下 ⇒ 大径の礫・石が混入すると測定結果にバラつきが生じやすい

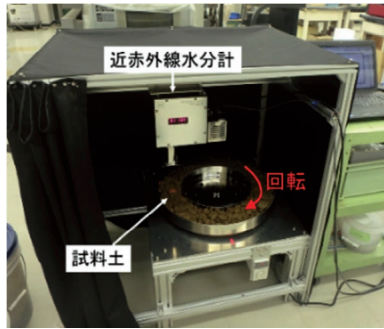


Photo 2 装置全景
(Machine Foreground)

(3) 当装置の測定精度の検証

前述した小石原川ダムのコア材³⁾を最大粒径 37.5mm に調整したものをを用いて精度検証を行った。このコア材の含水比を複数変化させて、近赤外線装置、フライパン法、炉乾燥法で含水比をそれぞれ測定した。Fig.3 に炉乾燥法と近赤外線装置、フライパン法の比較結果を示す。Fig.3 に示すように、近赤外線装置はコア材の施工含水比の範囲 (14.3%~17.3%) において、炉乾燥法の測定結果に対して概ね±1%の精度で測定できることがわかる。また、含水比が高くなり、コア材の表面に水分が浮くような状態になると、近赤外線装置の測定結果の誤差が大きくなる傾向がある。近赤外線装置とフライパン法の測定結果を比較すると、炉乾燥法の測定結果に対する残差の標準偏差 (当装置: 0.9, フライパン法: 0.8) は概ね同等であり、降雨等によって一時的に表面に水が浮くような状態を除けば、近赤外線装置は含水比管理に適用可能であると判断した。

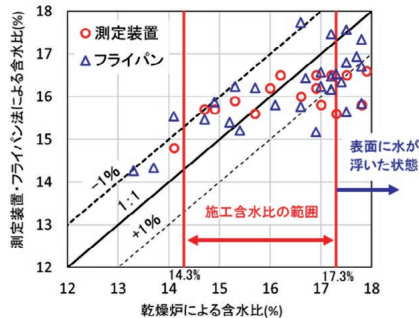


Fig.3 炉乾燥法との比較
(Comparison with Oven-dry Method)

(4) 室内迅速含水比測定装置を導入した品質管理方法案

Fig.4 に近赤外線装置を導入した品質管理フロー (案) を示す。従来方法での含水比の試験頻度は 1~2 回/日だが、迅速な測定が可能な近赤外線装置を導入すると、例えば 1 回/1 時間というように測定頻度を増やすことができる。このような頻度で測定することで施工中の含水比の変動監視が可能

となる。この施工中の変動監視によって、含水比の変動がない場合は施工を継続する (従来方法での確認は省略), 含水比の変動を検知した場合は従来方法で含水比を確認するという品質変動の有無に応じた合理的な品質管理にもつながる。

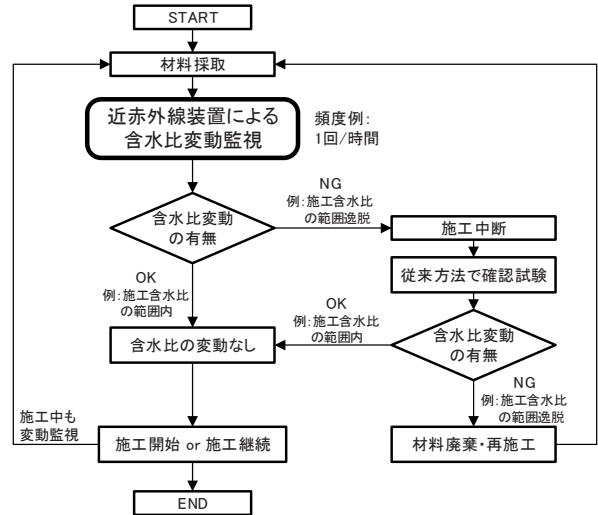


Fig.4 室内迅速含水比測定装置を活用した材料管理方法案
(Proposed Quality Control Method for Measuring Water Content)

3. 画像粒度モニタリングシステムによる粒度の変動監視

(1) 画像粒度モニタリング®システム

当社では、デジタルカメラで撮影した土質材料の画像から粒度を迅速に把握できる画像粒度モニタリング®システム (以下、本システムと称す) を同業他社に先駆けて実用化しており、すでに約 10 現場で実績を上げている⁴⁾。本システムは、ブラックボックス的な要素を排した単純なシステムを志向して開発したもので、市販のデジタルカメラ (1,220 万画素程度) とコンピュータで構成される。測定手順は、Fig.5 に示すように測定対象材料を水平かつ薄く敷き均してデジタルカメラで撮影 (STEP1) し、画像を PC に取り込む (STEP 2)。この画像を解析して各粒子の輪郭を識別し、複数の監視粒径 (例えば、40mm, 20mm, 10mm など) 毎に粒子を抽出 (STEP 3) 後、監視粒径毎に粒度インデックスを算出する (STEP4)。粒度インデックスとは、(1) 式に示すように監視粒径ごとに累積した粒子面積を撮影全面積で正規化したものであり、二次元の画像情報を定量化した独自の指標である。一連の画像解析 (Fig.5 中、STEP2~ STEP4) は専用プログラムによって十数秒で処理が完了する。

$$l_i = \frac{S_A}{A} \dots (1)$$

ここに、

A : 測定対象材料の撮影全体画像

S_A : ある監視粒径以上の粒子投影面積

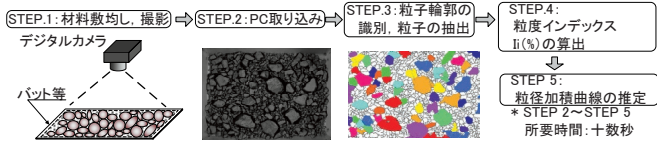


Fig.5 画像粒度モニタリング®システム

(Grain Size Monitoring System by Image Analysis)

(2) 長安ロダム施設改造工事での試行

リアルタイム材料管理の実用化・オーソライズ化に向けて、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）の一環である2018年度国土交通省公募事業「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に本システムが採択され、2018年度に長安ロダム施設改造工事（徳島県、国土交通省四国地方整備局）において試行した。当現場は減勢工をCSGで施工しており、製造時の材料管理として1回/時間の頻度で行うCSG材の粒度試験（簡易法）⁹⁾と併せて本システムを試行し、得られたデータを比較して経時的な変動監視機能に関する分析や加積通過率の推定精度を検証した。また、粒度試験（JIS法）を1回/日の頻度で実施し、その結果とも比較した。

本システムによる粒径40mm, 20mm, 10mmの粒度変動監視結果例（施工3日間）をFig.6に、粒径加積曲線の推定結果例をFig.7に示す。本システムで推定した加積通過率の変動傾向は粒度試験（簡易法）の結果と概ね一致した。また、本システムで推定したCSG材の粒径加積曲線と簡易法で得た粒径加積曲線もほぼ一致し、CSG材の粒度が所定の粒度範囲を満足していることが確認できる。本システムおよび粒度試験（簡易法）による加積通過率の推定精度をFig.8に示すJIS法で求めた加積通過率に対する偏差分布で分析した。その結果、本システムで求めた加積通過率は粒度試験（簡易法）で求めた加積通過率よりもJIS法に対する偏差が小さく、本システムは従来の簡易法と同等以上の精度で粒度分布を推定できることがわかった。

(3) CSG施工当日の品質管理の合理化

本システムを日常の材料管理に導入した新しい品質管理フロー案をFig.9に示す。新しい品質管理フローでは、CSG材の粒度が安定している状態では、これまでの粒度試験（簡易法）の代替として本システムで材料管理を行い、本システムによって粒度の変動を検知した場合には、粒度試験（JIS法）を行い、粒度を確認する。これにより、試験に要する時間や人員を大幅に削減できるため、材料管理の生産性向上に寄与できる。また、粒度試験（簡易法）よりも試験時間を大幅に短縮できるため、より高い頻度（例えば1回/15分）で粒度の変動状況を監視することが可能となり、品質の向上にも寄与できる。さらに、材料管理データをクラウドサーバ上に転

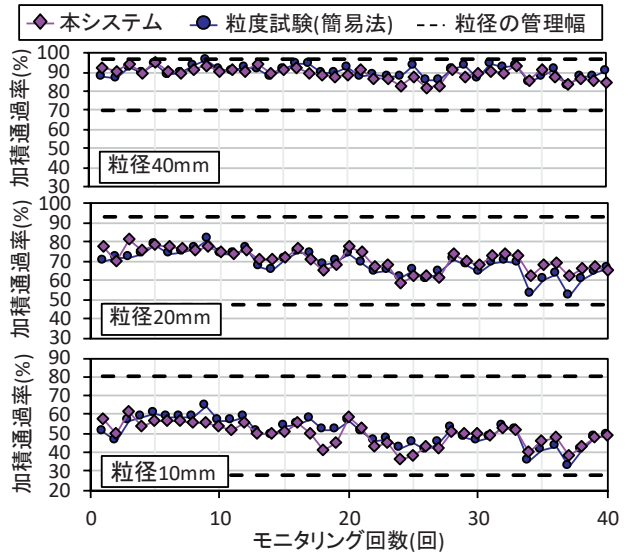


Fig.6 粒度変動監視例

(Example of Grain Size Fluctuation Monitoring)

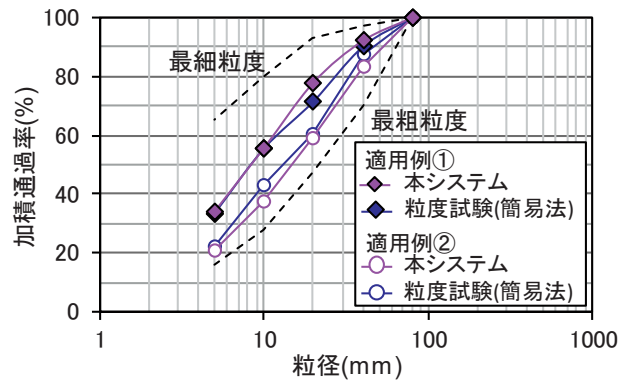


Fig.7 粒径加積曲線例

(Grain Size Distribution Curve)

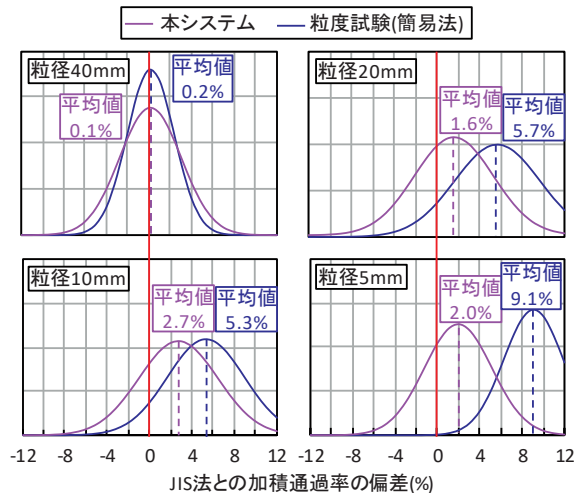


Fig.8 JIS法に対する本システムと簡易法の偏差の分布

(Comparison of the Results by JIS Method)

送することで、関係者がリアルタイムに共有できるため、試験立会や写真管理などの効率化が実現できる。

以上の結果から、技術の完成度や実用性等について国土交通省から高い評価 (A: 汎用性があり, 実用レベル) を得た。

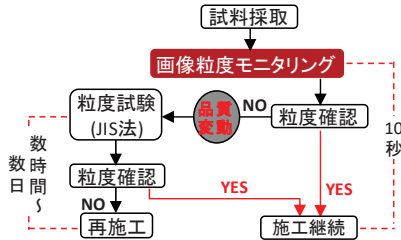


Fig.9 新しい品質管理手方案 (粒度試験)
(Proposed Procedure for Grain Size Monitoring)

IV. 締固め品質のリアルタイム全量管理手法の開発

1. 背景

盛土施工における品質確保のためには、盛立材料の品質管理に加えて、盛土の締固め品質の管理も重要である。ロックフィルダムのコア材のような一定の範囲の品質を有する材料であれば、試験盛土で規定された施工仕様 (敷均し厚, 転圧回数) を履行すれば所定の締固め品質が確保できると考える工法規定方式がある。この考えのもとで定められた転圧回数の履行状況を可視化する手段として、GNSSによって転圧機械の走行軌跡を記録する転圧管理システムの普及が進んでいる。その一方で、転圧管理システムを用いた場合でも従来行われてきた現場密度試験等を一定の頻度で実施することが特記仕様書などで定められている。この現場密度試験は人力によることから試験中は当該箇所の重機作業を中断する必要がある。このような背景から、筆者らは盛土施工に使用する締固めローラに非接触型変位計を設置し、無振動で走行させながら地表面のたわみ (相対沈下量) を計測し、リアルタイムかつ面的に締め固めた盛土の変形係数を算出する剛性評価システム「ローラたわみ法」を開発した。

2. ローラたわみ法の原理

Boussinesq 弾性論によれば「ローラの接地圧」, 「接地範囲」, 「地盤の変形係数」からローラ前後方向のたわみ分布を求めることができる。上記関係を利用することで、①任意の点でのたわみ, ②ロールの接地圧, ③接地範囲から、盛土の主要品質の1つである、「地盤の変形係数」を逆算することが可能である。ローラたわみ法は以下の手順で変形係数を評価する。

- ①初期地表高さが不明な状態のローラ車上からたわみを測定することは原理的に不可能なため、初期地表高さが不明でも求められる前後方向の2地点 A, B の同時刻のたわみ差 ($\Delta S = S_B - S_A$) を用いる (Fig.10)。
- ②接地圧は、ロール軸重÷接地面積と仮定する。
- ③接地範囲のうち、ロール横幅は既知だが前後方向の接地

幅は未知数とする。

- ④2つの未知数 (変形係数, 接地幅) に Boussinesq 弾性論によるたわみ式⁶⁾ と Hertz の弾性接触論⁷⁾ に基づく変形係数と接地幅の関係式を連立させ、変形係数を評価する。

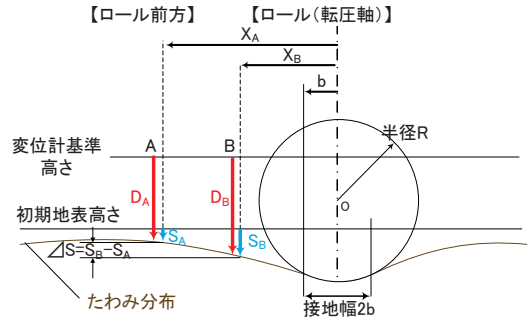


Fig.10 ローラたわみ法計測理論
(Evaluation Method of Deformation Modulus Measurement for Compacted Soil at Roller Moving)

3. 実証実験概要

Fig.11 に示す試験盛土 (小石原川ダム: コア材) においてローラたわみ法の実証試験を実施した。コア材は最大粒径 150mm の細粒分質砂礫 (GFS) である。Walker-Holtz 法によって礫率補正した締固め曲線を Fig.12 に示す。当試験では、盛土施工に使用する 10t 級振動ローラを用いてローラたわみ法を試行した。Photo 3 のように転圧輪周りのフレームに非接触型変位計を地盤に対して水平になるように設置し、データロガーを用いてデータの収集 (サンプリング周波数: 100Hz) を連続的に行った。なお、転圧中は振動ローラに設置した変位計が振動して良好に計測できないため、所定の振動転圧完了後に、無振動で後進させながら地表面のたわみ差 (ΔS) を計測し、変形係数 E を算出した。今回は、当方法と同様に面的評価が可能な CCV (加速度応答法) から算出される CCV 値、ならびに落球探査法⁸⁾ による変形係数 E も測定した。また、RI 法による現場密度試験も併せて行い、これらの変形係数と RI 法で測定した乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の関係について検討した。

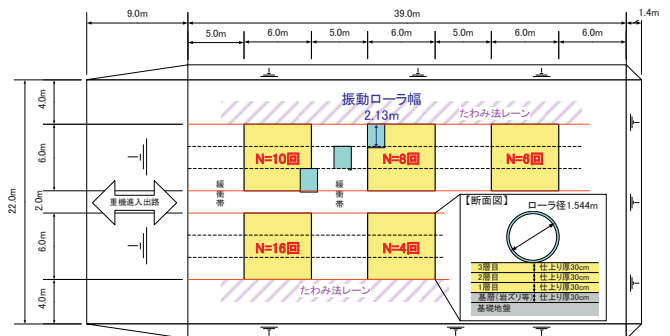


Fig.11 試験ヤード
(Test Area)

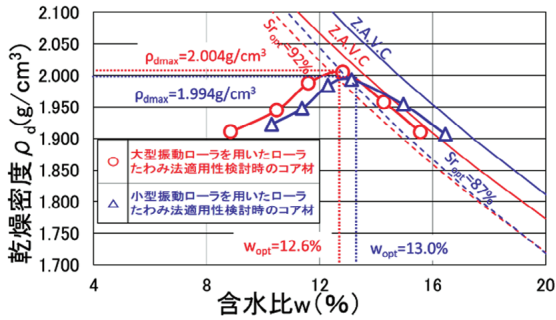


Fig.12 締固め曲線 (Compaction Curve)



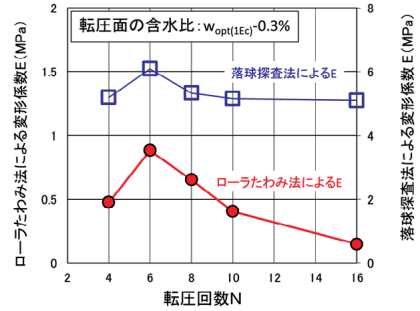
Photo 3 大型ローラと非接触型変位計 (Large Roller and Non-Contact Displacement Sensor)

4. 実証試験結果

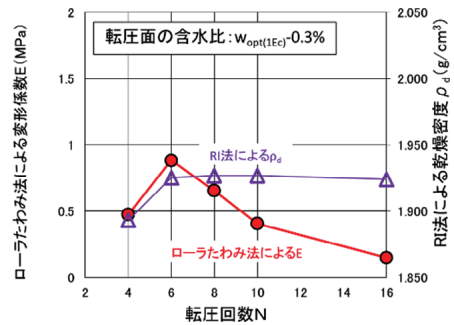
Fig.13 にローラたわみ法および落球探査法の試験から得られた変形係数 E の測定結果を示す。Fig.13 (a) に転圧回数 N と変形係数 E の関係, Fig.13 (b) は転圧回数 N と変形係数 E の関係および転圧回数 N と乾燥密度 ρ_d の関係, Fig.13 (c) はローラたわみ法と CCV 値との比較結果である。Fig.13 (a), (b) によると, 変形係数 E, 乾燥密度 ρ_d ともに, 転圧回数 $N=6$ でピークを示していることがわかる。また, ローラたわみ法ならびに落球探査法から算出した変形係数 E を比較すると絶対値は異なるものの, 6 回転圧時にピークを示しその後低下する傾向が一致している。Fig.13 (c) によると, CCV 値は転圧回数 N の増加に伴い増加し, 転圧回数 $N=7$ 以降は概ね一定値に収束しており, 落球探査法およびローラたわみ法とは異なる傾向を示した。これは, CCV 値は振動走行しながら測定しており, 落球探査法やローラたわみ法よりも計測深度が深いことが要因のひとつと考えられる。Fig.14 に乾燥密度 ρ_d と変形係数 E の関係, Fig.15 に変形係数 E と飽和度 Sr の関係を示す。図中には Fig.12 で示した締固め曲線のピーク (ρ_{dmax}, W_{opt}) における飽和度を最適飽和度 $Sr_{opt}^{(9)}$ として示した。龍岡ら⁹⁾によれば, 最適な締固め状態とは, 転圧回数の増加によって乾燥密度 ρ_d および飽和度 Sr の増加が鈍化し, それに伴い剛性が低下した状態である。Fig.15 に示すように転圧回数 $N=6$ 以降の変形係数 E が減少する過程では, 乾燥密度 ρ_d と飽和度 Sr がほぼ一定の値に収束している。こ

の傾向はローラたわみ法と落球探査法で一致しており, ローラたわみ法によって転圧の進展に伴う変形係数 E の変化を捉えることができる。

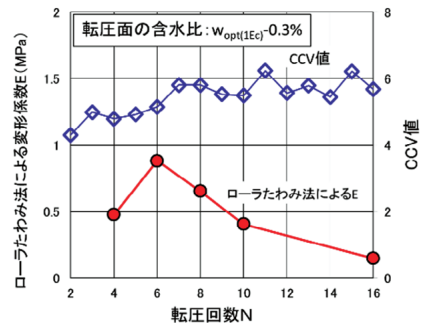
以上のように, ローラたわみ法では, サンプリグ周波数 100Hz の連続的な変形係数の計測が可能であり, 盛立面全面の変形係数 E を測定することができる。なお, ローラたわみ法と落球探査法の変形係数 E の絶対値の乖離の要因は今後の検討課題である。



(a) ローラたわみ法と落球探査法の関係 (Interaction Roller Deflection Method with Falling Ball Inspection)



(b) 変形係数 E と乾燥密度 ρ_d の関係 (Interaction E with ρ_d)



(c) 変形係数 E と CCV 値の関係 (Interaction E with CCV Value)

Fig.13 試験結果 (Test Result)

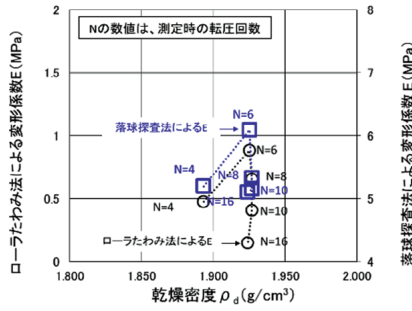


Fig.14 乾燥密度と変形係数の関係
(Interaction pa with E)

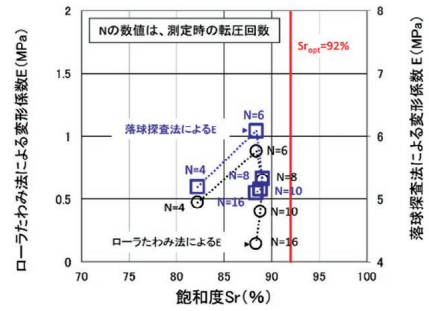


Fig.15 飽和度と変形係数の関係
(Interaction Sr with E)

5. 小型ローラを対象としたローラたわみ法実証実験

前述したローラたわみ法は10t級振動ローラを使用したのが、盛土施工に使用する同ローラに品質管理のための走行を追加した場合、盛立工程に影響を及ぼす可能性がある。そこで、盛土施工用のローラとは別に4t級振動ローラを用いた計測も実施した。4t級振動ローラにおいても10t級振動ローラ同様に転圧軸周りのフレームに非接触型変位計を設置してデータを取得した (Photo 4)。ここでは、4t級振動ローラを使って算出した変形係数 E と落球探査法から算出した変形係数 E を比較した。

Fig.16 に転圧回数 N と変形係数 E の関係を示す。このときの転圧面の含水比が $w_{opt(1Ec)}+1.9\%$ と湿潤側であったため、Fig.13 の傾向と異なり、変形係数 E は転圧初期においてピークを示した後、減少している。また、10t級振動ローラとは異なりローラたわみ法と落球探査法で求めた変形係数 E は、同等な値となった。これは4t級振動ローラにおける当方法と落球探査法のひずみレベルが同等であるためと考えられる。今後は再現性の確認等、4t級振動ローラを用いて当方法のデータを蓄積する予定である。



Photo 4 小型ローラと非接触型変位計
(Small Roller and Non-Contact Displacement Sensor)

6. ローラたわみ法を用いた品質管理イメージ

Fig.17 にローラたわみ法を用いた品質管理のフローを示す。所定の転圧が完了後、品質確認工程として「ローラたわみ法」による盛立全面の変形係数の測定を行う。前述したとおり、

転圧工程で使用した振動ローラによる品質確認では、工程に影響を及ぼす可能性があるため、品質確認用の専用機を用いることとした。これによって盛立工程への影響をなくすとともに、転圧完了範囲全面の品質確認が可能となる。さらに、現在開発中の A⁴CSEL と併用することで、締固め施工の完全無人化が可能となる。

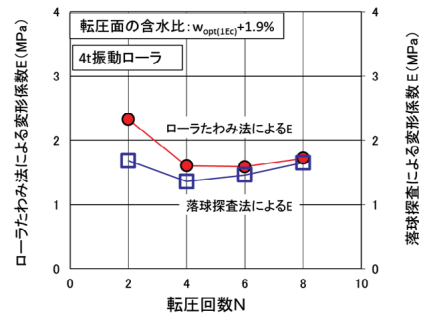


Fig.16 試験結果
(Test Result)

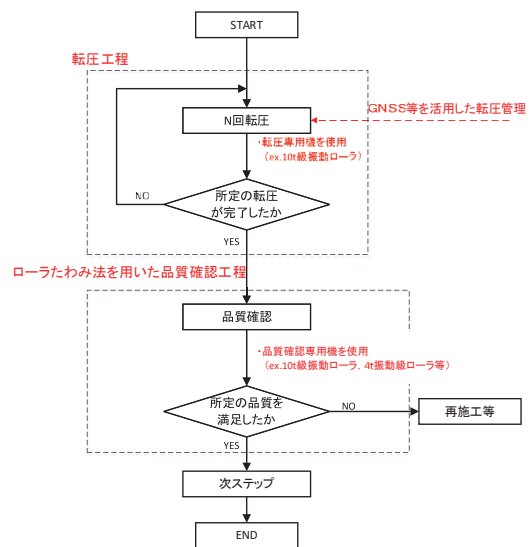


Fig.17 ローラたわみ法を用いた品質管理フロー
(Proposed Quality Control Method)

V. 真の「土工現場の工場化」に向けて

本報文では、盛土施工における品質管理（材料管理、締固め管理）の自動化に向けた開発成果について報告した。これらの開発成果は、盛土施工の品質管理を大きく変化させる可能性を秘めている。今回報告した技術を確認させることで、従来は人の手によって定時または定量間隔で実施されてきた品質管理が完全に自動化され、これと同時に盛立材料全量、ならびに盛立面全面を対象とした全量管理が実現できる。また、例えば盛立面の品質管理データを当社の A⁴CSEL にフィードバックすることで、品質不良箇所を自動的に検知して再施工する「自律施工」が可能となるかもしれない。その一方で、従来の品質管理に比べ、全量管理が可能となることで、施工現場から得られるデータはビッグデータ化する。このビッグデータを迅速に処理、分析する技術も必要となる。さらに、従来の品質管理のロジックとは異なる全量管理に適したロジック（例えば、一定の不良率を許容する方法）を構築し、オーソライズ化していく必要があり、これについては今後の課題である。

VI. おわりに

今回は、盛立材料および締固め管理の自動化に向けた開発の一例を報告した。今後も、盛立材料および締固め品質管理における全量管理手法の研究開発を鋭意進め、「土工現場の工場化」の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 鹿島 HP ; <https://www.kajima.co.jp/news/press/201505/14c1-j.htm>
- 2) 小林弘明ほか；ロックフィルダム盛立におけるコア材製造時の新しい品質管理（その1）近赤外線水分計による含水比の全量管理，土木学会第73回年次学術講演会，2018.
- 3) 辻良祐ほか；締固め土の乾燥密度，飽和度と変形係数（剛性）の関係，第53回地盤工学研究発表会，2018，pp.1039-1040.
- 4) 藤崎勝利ほか；デジタルカメラ画像を用いたCSG材の粒度変動監視システム，ダム工学23（1），2013，pp.19-26.
- 5) 財団法人ダム技術センター；台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料，2012.
- 6) 赤井浩一；土質力学，pp224-227，1966.
- 7) 渋谷壽一ほか；弾性学ハンドブック，pp473-474，2001.
- 8) 北本幸義ほか；球体衝突理論に基づく岩質および土質物性の迅速評価手法，土木学会論文集F3，Vol.75，No.1，2019，pp.21-35.
- 9) 龍岡丈夫ほか；盛土の締固め⑤，基礎工，Vol.41，No.11，2013，pp.96-99.

Development of Technology for Total Control of Embankment Quality – Technology for Total Control of Material Quality (Water Content, Grain Size) and Quality of Compacted Soil –

*Yoshikatsu Yonemaru, Katsutoshi Fujisaki, Teru Yoshida,
Akihiro Matsumoto and Keisuke Tanaka¹⁾*

The management of construction materials and processes is key to ensuring the quality of earth structures such as dams. Information and communication technologies have progressed rapidly and are used to improve management of the construction process. Real-time control technologies, such as automated construction machinery, are being introduced at construction sites, thus assisting hysteresis management and speeding up the construction work. However, for rationalizing the construction of embankments in practice, it is necessary to rationalize and automate the whole series of construction works, from the production of construction materials to the monitoring of compaction quality, not only the earthwork itself. With this background, we are developing technologies for automating quality control. This paper introduces an example of automating the management of materials and compaction.