

氏名（本籍） ^{なが}永 ^い井 ^{ひろ}裕 ^{ゆき}之（茨城県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第 1094 号
学位授与の日付 2021 年 3 月 18 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 **現場施工における締固め土の力学特性の評価
手法に関する研究**

論文審査委員 （主査）教授 菊池 喜昭
教授 塚本 良道 教授 佐伯 昌之
教授 水野 正行 教授 野口 昭治

論文内容の要旨

本研究は、盛土の締固め管理を高度化することにより施工の合理化や盛土構造物の高品質化を実現する手法に着目したものである。本論文では、まず、品質規定方式や工法規定方式といった現状の締固め管理手法に加え、施工全体の生産性向上を目指す i-Construction の取り組みについて説明した上で、施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現する新しい締固め管理技術の重要性を示した。

一方、新しい締固め管理手法を実現するために解決すべき現状の締固め管理の課題として、品質測定手法の即時性の確保、Walker-Holtz による礫率補正式(以下、WH 式)の修正による品質評価手法の高度化の必要性について示した。これより、加速度応答法による締固め特性の評価手法および礫率補正式の高度化を目的とした現場および室内実験を実施し、盛土構造物の品質情報をリアルタイムかつ面的に測定し、その結果に礫率補正式を適用することで高精度な品質評価を行うことのできる新しい締固め管理手法を提案した。本手法を実工事に適用し、その有効性を明らかにした。

以下に本論文の各章の要旨を述べる。

第 1 章では、盛土の締固め管理の特徴を概観した上で、近年激甚化する自然災害による盛土構造物の被害状況、さらに施工の生産性向上を目的とした i-Construction の推定について説明し、施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現する新しい締固め管理手法の重要性を示した。上記の内容を踏まえ、本研究の目的を示し、本論文の全体構成を概説した。

第2章では、盛土の締固め管理に関して、これまでに得られている知見を示し、現状の締固め管理手法（品質規定方式、工法規定方式）の詳細や、ICT技術の現場導入実績などについて示した。しかし、本研究の目的を達成するには、現状の締固め管理における品質測定手法の即時性の確保、礫率補正式の高度化による品質評価手法の向上に関する課題などが存在することを明らかにした。

以上の内容を踏まえ、上記の課題を解決するために行った実験結果を第3章、第4章にとりまとめた。

第3章は、地盤剛性指標による効率的な締固め管理手法の検討を目的とし、大型土槽内にて最大粒径の小さい室内粒度試料を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施した。転圧中には加速度応答法（CCV システム）による地盤剛性指標を計測し、所定の転圧回数施工後には砂置換法、RI 試験による密度および含水比測定とともに、小型 FWD 試験、キャスポル試験、現場 CBR 試験による地盤剛性指標の計測を行った。転圧試験の測定データと、小型 FWD 試験、キャスポル試験、現場 CBR 試験、CCV システムにより取得したそれぞれの地盤剛性指標（ $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$ 、CBR 値、CCV 値）の相関を調べたところ、いずれの地盤剛性指標とも飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d をパラメータとする関係式が成立することを示した。これより、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式に基づく締固め管理を行うことが可能であることが明らかとなった。地盤剛性指標のうち、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$ 、CBR 値は、砂置換法と同様に施工完了後の点情報として得られる指標であるのに対して、CCV 値は、施工中にリアルタイムかつ面的な測定が可能であるため、本研究の目的の一つである施工の合理化に最も適した工法である。

第4章は、第3章に示した CCV 値による締固め管理手法の実工事への適用性を検証するため、実工事において大粒径の土粒子を含む現場全粒度試料を対象とした転圧試験を実施した。転圧施工中は CCV 値を計測し、転圧施工後は RI 試験による密度と含水比の測定を行った。

この転圧試験の測定データを解析し、CCV 値が飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d をパラメータとした関係式で表現できることを示した。これより、CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式が実大規模の大粒径土粒子を含む場合にも適用できることを意味しており、この関係式による締固め管理は実工事に適用可能であることを示した。

ところで、一般に、現場施工における目標締固め度 $(D_c)_{1E_c} =$ 「現場施工時に取得した乾燥密度 ρ_d 」 / 「現場全粒度試料での $1.0E_c$ のエネルギーの時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} 」 は室内実験により求めた $1.0E_c$ のエネルギーの時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} をもとに設定される。しかし、室内試験と現場試験とは用いる地盤材料の最大粒径 D_{max} が異なるため同じエネルギーで締め固めた時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} の最大粒径の違いによる補正が必要である。これには一般的には、WH 式が用いられるが、WH 式には課題があり、その推定精度や適用範囲には制限がある。そこで、現場全粒度試料での $1.0E_c$ での最大乾燥密度 ρ_d を精度良く推定するためには新たな補正方法が必要である。そこで、最大粒径 D_{max} を変化させて小型・大型装置に

よる室内締固め試験を実施した。その結果、WH 式によって求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を最大乾燥密度の比 $X=「WH 式による推定値」/「実測値」$ で補正することで礫率混入後の試料の礫率 P から、現場全粒度試料の $1.0E_c$ での最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を推定できることを明らかにした。本章で提案した現場最大乾燥密度 ρ_{dmax} を求めるための礫率補正手法を用いることにより、室内実験の結果から目標締固め度 $(D_c)_{1E_c}$ を設定できるようになることを示した。

第 5 章は、第 3 章、第 4 章の結論を受け、加速度応答法による品質測定手法、 $X-P$ 関係による締固め度 $(D_c)_{1E_c}$ の推定手法を組合せた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法を示した。事前準備として室内試験と試験施工を行い、それらの結果を踏まえて本施工を行う。

室内試験では、土粒子密度、粒度試験などの基本的な物性試験に加えて、二種類の最大粒径（例えば、最大粒径 $D_{max}=2.00, 37.5mm$ ）を持つ試料で突固め試験を実施し、最適飽和度 S_{ropt} 、突固め時の各締固め点から $D_c \sim$ 飽和度差 S_r-S_{ropt} 曲線、 $X-P$ 関係、現場全粒度試料に相当する所定締固めエネルギーでの最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を算出する。

試験施工では、要求性能を満足する施工仕様（重機、撒き出し厚、施工含水比 w 、転圧回数 N など）を決定と、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。

本施工では、試験施工で構築した CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を用いて、施工中に取得する CCV 値と施工前に測定した含水比 w から乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r をリアルタイムに推定し、事前準備で求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を用いて締固め度 $(D_c)_{1E_c}$ を満たしていることを確認していく。

なお、本手法の実工事への適用性を検討するため、実工事で取得した CCV 値をもとに乾燥密度 ρ_d を求めた結果、推定値と実測値は概ね一致することが確認された。これより、加速度応答法と礫率による最大乾燥密度補正式を組み合わせた新しい締固め管理手法の実工事への適用に対する有効性が明らかとなった。

第 6 章では、本研究で得られた結論と今後の展開や課題についてまとめた。本研究によって、盛土の品質情報をリアルタイムかつ面的に加えて高精度に評価することが可能であるため、本研究の目的である施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現することを示した。一方で、残された課題として、含水比のリアルタイムかつ面的な評価手法の開発の必要性と、その値を用いた CCV 値による乾燥密度 ρ_d の推定精度向上を指摘した。

論文審査の結果の要旨

本研究は、盛土の締固め管理を高度化することにより盛土構造物の高品質化や施工の合理化を実現する手法に着目したものである。本論文では、まず、品質規定方式や工法規定方式といった現状の締固め管理手法に加え、飽和度管理による締固め管理手法の重

要性や i-Construction の推進について示した。次に、品質規定方式においては、盛土の品質を評価する測定手法が施工エリアの代表点であり、かつ施工完了後にしか知りえることができないという点や、工法規定方式においては、施工場所や材料の変化に対応できないといった主たる課題について示した。そして、これらの課題を解決することを目的とし、加速度応答法による締固め特性の評価手法の確立を目的とした現場および室内で実験を実施した。この結果を受けて、リアルタイムかつ面的に盛土の品質を評価することのできる手法を提案し、この手法を用いた総合的な締固め管理手法の提案を行った。

以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究で対象とする盛土の締固め管理の特徴や現状を概観し、施工の高品質化や効率化に焦点を当てた場合の課題を明確化し、本研究の目的と本論文の全体構成を概説した。

第2章では、盛土の締固め管理に関して、これまでに得られている知見を示した。従来行われている盛土締固め管理手法や生産性向上を目的とした i-Construction の推進の方針を紹介し、本研究の位置付けを明らかにした。

第3章は、地盤剛性指標による効率的な締固め管理手法の検討を目的とし、大型土槽内にて実大締固め機械による転圧試験を実施した。施工中の締固め機械の加速度応答から求められる地盤剛性指標である CCV(Compaction Control Value)値を取得するとともに、従来から行われている現場 CBR 試験等による地盤剛性指標の計測を行った。その結果、土の地盤剛性指標も類似の変動挙動を示すことを明らかにし、また、それぞれの指標には一定の相関性があることを明らかにした。そこで、各種地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式を構築した。以上の成果に基づき、地盤剛性指標を活用した締固め管理手法を提案した。CCV 値は他の地盤剛性指標に比べて、施工中にリアルタイムかつ面的にデータを取得できるため、締固め管理の効率化に最も適しているといえることを示した。

第4章では、実大工事より使用する大粒径を用いた盛土材を対象とし、CCV 値による合理的な締固め管理手法を提案することを目的とし、実工事における転圧施工を行い、第3章で提案した地盤剛性指標である CCV 値を用いて施工管理することの妥当性を確認した。

次に、CCV 値から ρ_d を精度良く推定するために ρ_d の確率による補正式を高度化することを目的とし、最大粒径 D_{max} を変化させた室内締固め試験を実施した。その結果、従来から用いられている Walker-Holtz(WH)式による最大乾燥密度 ρ_{dmax} の推定値と実測の最大乾燥密度 ρ_{dmax} の比 $X = \text{「WH 式による推定値」} / \text{「実測値」}$ と確率混入後の試料の確率 P の関係を用いることで、同じ土試料であれば、基準となる D_{max} を任意に変えても同一の $X-P$ 関係が得られることを明らかにした。これにより、大粒径を含まない室内の締固め試験の結果をもとに、大粒径を含む原位置での目標締固め密度を合理的に推定できること明らかにした。

第 5 章は、本研究で実施した全ての実験結果を受け、CCV 値による高精度な ρ_d の推定を手段としたリアルタイムかつ面的な締固め管理手法の具体的な方法を検討し、そのフローを示した。

第 6 章では、本研究で得られた結論と今後の展開や課題についてまとめた。本研究によって、CCV 値といった ICT 技術を用いて、盛土の品質をリアルタイムかつ面的に加えて高精度に評価することができるため、合理的な手法により品質管理手法が提案できることが確認された。一方で、残された課題としては、含水比情報のリアルタイムかつ面的な評価手法、その値を用いた CCV 値による ρ_d の推定精度向上を指摘した。

以上のことから、本論文は博士(工学)の論文として十分に価値のあるものとして認められる。