

ICTを活用した盛土の締固め管理技術 ～飽和度モニタリングシステム～

永井 裕之¹，三反畑 勇¹，西尾 竜文¹

¹安藤ハザマ・技術研究所土木研究部

近年大地震や集中豪雨などの自然災害による盛土構造物の崩壊例が増えており、従来よりも高品質な盛土の施工が求められている。このような背景から、従来の乾燥密度と含水比の管理に加えて、最適飽和度に着目した新たな盛土管理手法が提案されている。しかし、土の密度や飽和度は施工完了後に測定した点情報であるため、効率的なリアルタイムの施工管理にならない。そこで、既知の含水比で締固め施工中にCCVシステムによって評価された地盤剛性から、リアルタイムで面的に土の密度、飽和度を推定する手法の確立を目的とした大型土槽内での締固め機械による転圧試験を実施し、CCV値からリアルタイムで面的に推定可能なことを示した。

キーワード：盛土，締固め，リアルタイム，飽和度，CCV 値

1. はじめに

近年大地震や集中豪雨などの自然災害による道路や鉄道の盛土、宅地造成盛土やため池堤体などの崩壊例が増えており、主要因の一つとして締固め不足が挙げられている¹⁾。このような背景から、従来よりも高品質な盛土の施工が求められている。一方、従来の盛土品質管理で主流であった乾燥密度と含水比の管理に加えて、最適飽和度を基本にして飽和度を管理する新たな締固め管理法が提案されている^{2), 3), 4)}。

また、近年、TS・GNSSを適用した盛土の締固め管理法が進展している。この方法は、事前に実施した試験施工で決定した施工仕様（使用機械、撒き出し厚、転圧回数）に基づく工法規定方式であり、乾燥密度と含水比を管理する従来の施工管理よりも大幅な省力化が見込まれている。しかし、工法規定方式でも、施工仕様を締固めた土の乾燥密度と含水比が設計で要求する物性を実現できるように決める必要がある。以上を踏まえると、以下の二つが解決すべき課題となる。

課題①：従来の管理法は、施工後に限られた場所で測定した土の乾燥密度、飽和度に基づいているため、効率的なリアルタイムの施工管理にならない。

課題②：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理において、規定した転圧回数で施工を行った場合に、土質や含水比がばらつくことによって、過転圧や転圧不足が発生する懸念もある。

これらの課題の解決が必要である。筆者らは、

締固め施工中にCCV (Control Compaction Value)

⁵⁾システムによって評価された地盤剛性から、既知の含水比に対して、リアルタイムで面的に土の乾燥密度と飽和度を推定する手法の確立を目指している。

2. 締固め管理の現状と課題

(1) 盛土の要求性能と管理基準

「盛土構造物の要求性能を満足する盛土の剛性・強度・透水性・コーラップス抵抗等の諸物性を実現するには、締固めにおいて、盛土材の土質と含水比 w (以下、 w)、締固めエネルギーCEL (以下、CEL)、締固め土の乾燥密度 ρ_d (以下、 ρ_d)あるいは所定のCELに対する締固め度 D_c (以下、 D_c)と飽和度 S_r (以下、 S_r)を適切に管理する必要がある」として、表-1に示す5つの管理境界に基づく管理法が提案されている^{2), 3), 4)}。表-1によると、土構造物の要求性能に必要な物性管理項目は、a) 高い強度・剛性の確保、b) 水浸による強度低下の抑制、c) 必要な遮水性の確保、d) 水浸による沈下の抑制、e) 過転圧の防止であり、これらの要求を満足するために必要な管理境界は、含水比下限線 (以下、WL)、含水比上限線 (以下、WU)、締固め度下限線 (以下、DL)、飽和度下限線 (以下、SL)、飽和度上限線 (以下、SU) である。それぞれの管理項目を満足するために必要な管理境界を、● (非常に重要)、○ (重要) と表記してある。なお、WL, WUは締固めに用いる盛土材に対する管理項目であり、WL, WU, DL, SL, SUの全てが締固めた盛土に対する管理境界である。

(2) 従来管理と飽和度管理の現状と課題

従来の盛土の締固め管理法は、表-1に示す管理境界DL, WL, WUを規定する方法が主流である。DLは締固め度Dc (=現場で締固めた土の乾燥密度/基準の締固め試験での最大乾燥密度)の全測定値の許容下限値であり、Dcの平均値は許容下限値よりも5%程度高くなることを前提としている。標準プロクター(1Ec)による最大乾燥密度を基準としたDcの正確な値が仮に90%ならば緩い状態であり、Dcの許容下限値90%は近代的機械施工での実際的な値である。また、WL, WUは盛土材の含水比の最適含水比に基づく許容下限値と上限値である。日本のように雨の多い地帯では、自然含水比が最適含水比よりかなり高い場合が多く、その状態で乾燥密度を高める施工を進めようとするとうーバーコンパクションが生じやすくなるという施工上の問題に加えて、施工後の変形が過大になり過ぎることや、安定性の確保が難しくなるなどの長期品質保証の観点からも問題が生じることが多い。

しかし、最大乾燥密度と最適含水比は締固めエネルギーと土質が変化すると変動する。また、締固めエネルギーと土質は、それぞれの現場で規定するが一定程度変動し、しかも通常は締固めエネルギーは不明である。このような背景から、高品質な盛土実現のためには、締固めエネルギーや土質の不可避的な変化に依存せず、効率良く締固めが行える新たな盛土品質管理指標が必要となっている。

龍岡らは、粘性土・砂・礫質土と幅広い土質材料を対象にした締固めの研究を行っている^{2), 3), 4)}。その結果によると、所定の締固めエネルギーで所定の土が最大乾燥密度を示す飽和度(最適飽和度と呼ぶ)の値は土質と締固めエネルギーの変化に鈍感である。このことから、土質と締固めエネルギーを規定している現場では最適飽和度は一定と見なして、両者の変化に関わらず最適飽和度の実現を締固めの目標することによって、それぞれの

現場締固め条件での最適な締固め状態を実現する方法が提案されている^{2), 3), 4)}。

また、CBRなどの変形・強度特性や飽和後の透水係数は、乾燥密度と締固め時の飽和度の関数であることも明らかにされている^{2), 3), 4)}。これらの結果に基づき、図-1に示すように、従来の施工含水比の管理と締固め度下限値管理に加え、「最適飽和度」を挟んだ一定の範囲の飽和度を実現する飽和度管理を導入することによって締固め管理を合理化する方法が提案されている^{2), 3), 4)}。この方法では、従来の管理法で規定するWL, WU, DLに加えて表-1に示すSL, SUを規定する。

しかし、施工後に測定した土の乾燥密度と飽和度に基づいて管理する方法では、要求値を満足しないと再施工となる場合がある。また、測定数が限定的なので品質不良を見落とす可能性がある。これらの課題を解決するためには、リアルタイムかつ面的な品質管理を行う必要がある。

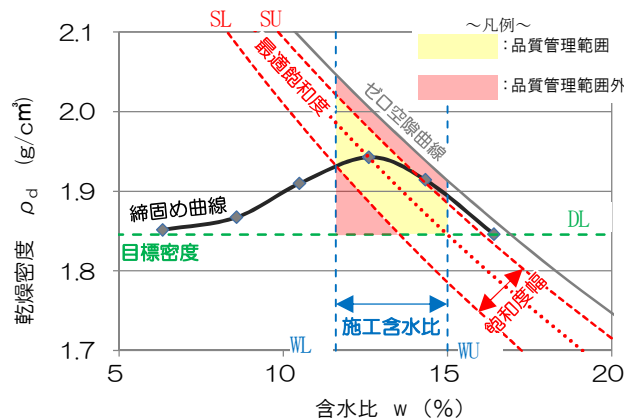


図-1 飽和度管理図^{2), 3), 4)}

(3) 情報化施工の現状と課題

我が国において、建設現場における生産性の向上、建設現場の魅力の創出を目的とした i-Construction が打ち出され、最優先課題として「ICTの全面的な活用 (ICT 土工)」が進められている。図-2には、従来施工と ICT 土工 (情報化

表-1 盛土締固め管理における5つの管理境界^{2), 3), 4)}

管理境界	土構造物の要求性能の実現に必要な物性管理	土構造物の要求性能の実現に必要な物性管理			
		a) 高い強度・剛性の確保	水浸による b) 強度低下 c) 沈下の抑制	c) 必要な遮水性の確保	e) 過転圧の防止
締固めに用いる盛土材に対する管理境界	含水比下限線: WL	○	●	○	
	含水比上限線: WU	●			●
締固めた盛土に対する管理境界	締固め度下限線: DL	●	○	○	○
	飽和度下限線: SL		●	●	
	飽和度上限線: SU	○			●

●: 要求項目の確保に非常に重要な管理境界

○: 要求項目の確保に重要な管理境界

施工)との比較を示すが、土工における施工は、施工着手前の試験施工で決定した施工方法(締固め機械、締固め層厚、転圧回数)に基づいた施工規定方式であるが、大規模造成工事や線状盛土工事では盛土材の採取場所が広範囲に及ぶため、施工に伴って締固め特性が変化し、着手前の試験施工に基づいて規定された施工方法が実情と合わなくなる場合がある⁶⁾。例えば、同一の施工仕様(転圧回数)で施工した場合に、場所によっては転圧不足や過転圧が発生するといった課題である。これらの課題は、特定の施工仕様(転圧回数や撒き出し厚)ではなく、土の乾燥密度や飽和度などの品質情報も含めた施工管理を行うことで解決する必要がある。

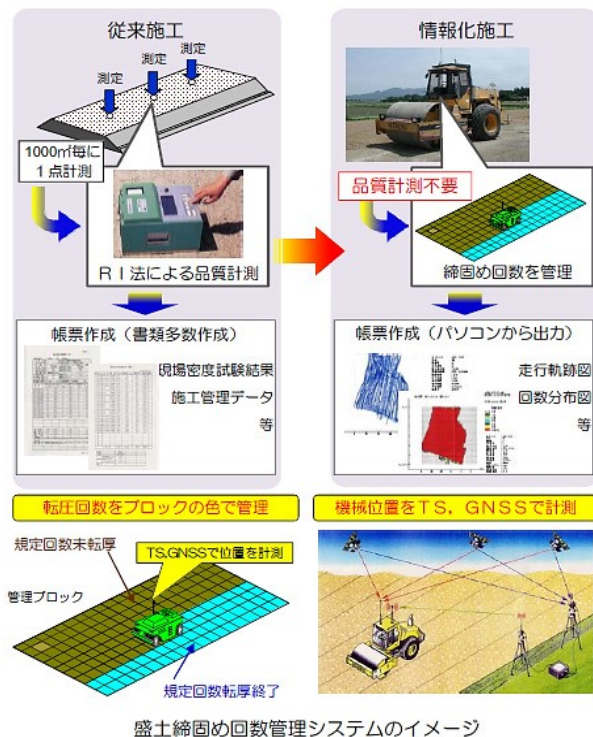


図-2 従来管理と情報化施工の比較

(出展：国土交通省九州地方整備局公共工事における i-Construction の概要)

3. 飽和度モニタリングシステムの開発

土の乾燥密度と飽和度を面的に、リアルタイムに把握することができる「飽和度モニタリングシステム」を開発した。既往の研究による検証、開発に伴い実施した実大締固め試験、飽和度モニタリングシステムの概要について以下に示す。

(1) 既往の研究成果

旧建築機械化研究所では、1965年～1990年の期

間に、砂質ロームを対象として多数の締固め機械を用いた実大締固め試験を実施しており、図-3は龍岡ら^{2), 3), 4)}がその結果をまとめたものである。これらの研究では、転圧回数8回における乾燥密度とCBR試験の関係を異なる飽和度毎に分類している。図-3を見ると、 S_r 一定の条件で ρ_d が増加した場合と ρ_d 一定の条件で S_r が減少した場合は、CBRは常に増加している。また、 S_r 一定条件下での $CBR \sim \rho_d$ 関係は締固め機械の種類と転圧回数(締固めエネルギー)に依らない。さらに、異なる S_r での CBR と ρ_d 関係の形は相似である。この結果に基づいて、龍岡ら^{2), 3), 4)}は図-3に示すデータは以下の式(1)で表現できることを示した。

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ρ_w は水の密度、 $(\rho_d / \rho_w - b)^c$ は単調増加関数であり、 b と c は正の定数で土質により異なる。 $f_{CBR}(S_r)$ は、 S_r の単調減少関数である。式(1)は締固めエネルギーの情報を含まないため、 ρ_d と S_r がわかればCBR値を推定できることを意味している。

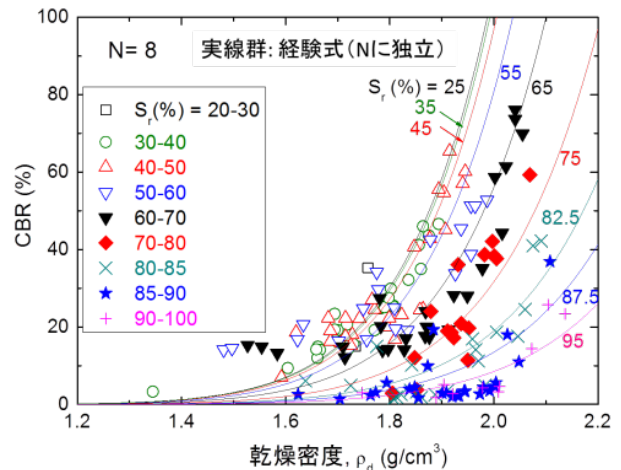


図-3 締固め終了時の飽和度 S_r をパラメータとした関係^{2), 3), 4)}

(2) 実大締固め試験による検証

CCVシステムを設置した13t級振動ローラを使用して、砂質土を対象とした実大締固め試験を実施した。転圧試験状況、CCVシステムの概要、加速度計の仕様を、それぞれ図-4、図-5、表-2に示す。ここで、CCVシステムとは、図-5に示すように、振動ローラの前輪に取付けた加速度計で測定した応答加速度に基づく締固め管理システムであり、振動ローラの天端に取付けたGNSS受信アンテナより取得した位置情報と組み合わせることで、リアルタイムかつ面的な盛土の品質管理に活用することが可能である。



図-4 実大締固め試験状況



図-5 CCV システムの概要

表-2 加速度計の仕様

電源電圧	12V または 24V 専用
使用温度条件	-10℃～50℃
使用湿度条件	85RH%以下
耐振性	5G/Hz 以下 (5～60)
防水性	IP65 相当
消費電力	50W 以下
耐衝撃 (ピーク)	1000G

(3) CCV値推定式の作成

転圧回数毎に CCV 値と密度試験を測定し、CCV 値と ρ_d および S_r との関係を確認した。図-6 に、実大締固め試験で得られた CCV 値と ρ_d の関係を飽和度毎に分類した結果を示す。

図-6 より、 S_r が一定で ρ_d が増加した場合、 ρ_d が一定で飽和度が減少した場合には、CCV 値は常に増加することが確認できる。これより、式(1)に倣い、 S_r をパラメータとした CCV 値と ρ_d の関係の経験式を式(2)のように導いた。

$$CCV = f_{ccv}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \cdot \dots \cdot \text{式(2)}$$

$f_{ccv}(S_r)$ は、 S_r の単調減少関数である。含水比の値が既知ならば、式(2)によって CCV 値から ρ_d と S_r を推定することが可能になる。筆者らは、この推定方法によって、乾燥密度と飽和度をリアルタイムに管理することが可能な「飽和度モニタリングシステム」を開発した。図-7 に、本システムのモニタリング画面を示すが、式(2)より求められる施工中の乾燥密度、飽和度を面的（最小 50cm メッシュ）にリアルタイムで把握することができる。これにより、従来管理、飽和度管理、そして ICT 土工の課題を解決した効率的な飽和度管理が可能となった。なお、飽和度の測定に必要となる含水比は、RI 等を活用し、転圧前に素早く確認することとしている。

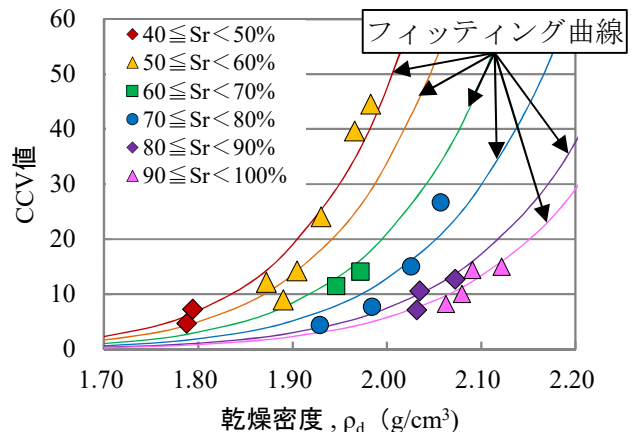


図-6 締固め終了時の飽和度 S_r をパラメータとした関係

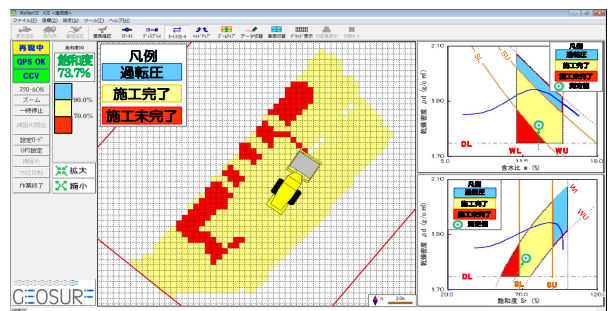


図-7 飽和度モニタリングシステム

4. おわりに

盛土の締固め管理は、従来から乾燥密度と含水比の管理が主流であり、近年では最適飽和度を基本にして飽和度を管理する新たな盛土管理手法が提案されている。また、近年は TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理の現場適用が進められている。しかし、これらの管理手法には、前述の課題が挙げられる。そこで、筆者ら

は、飽和度をパラメータとした CCV 値と乾燥密度の推定式を確立し、推定式を CCV システムに応用することで、土の乾燥密度、飽和度をリアルタイムかつ面的に管理できることを確認した。本システムを活用することで、前述の課題を解決できるため、高品質な盛土の実現が可能となった。今後は、施工中の含水比をリアルタイムに測定する技術の開発を行い、CCV 値から得られる乾燥密度、飽和度の精度向上を目指すとともに、本技術を多くの施工現場に広く展開することで、災害に強い社会資本の構築に貢献していきたい。

参考文献：

- 1) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会 (2012)：藤沼湖の決壊原因調査報告書。
- 2) Tatsuoka, F. (2015): Compaction characteristics and physical properties of controlled the degree of saturation. Keynote Lecture, Proc. of 15th Pan-American Conf. on SMGE and 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires. pp.40-76.
- 3) 龍岡文夫ら(2013～2015): 地盤工学・技術ノート. 盛土の締固め 1～20 回. 雑誌「基礎工」, 2013 年 7 月号～2015 年 2 月号.
- 4) 龍岡文夫: 土の締固めにおける飽和度管理の重要性, 雑誌ダム技術, No.354, pp.3-16, 2016.
- 5) 横田聖哉, 吉田武男, 藤井弘章, 内山恵一: 振動ローラ加速度を利用した締固め管理の検討—大規模土工における情報化施工に関する研究(3)—, 第37回地盤工学研究発表会, pp.664-665, 2002.
- 6) 吉田輝, 北本幸義, 早崎勲: 施工規定方式における規定転圧回数の実用的な更新手法, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.55-56, 2004.
- 7) 松尾健二, 茂木正晴, 橋本毅, 古屋弘, 内山恵一, 山口達也: 盛土施工における締固め特性について(その3)～大型振動締固め機械と加速度応答法の適用性～, 第69回地盤工学研究発表会, pp.669-670, 2014.