# 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

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(CCV値)(以下「本剛性値」という)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、本剛性値からリアルタイムで面的に土の密度、飽和度を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<sup>1)</sup>。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<sup>2)~4)</sup>。

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がある。

筆者らは、上記の課題を解決するため、締固め施工中に CCV (Control Compaction Value) 5) システム (以下「本システム」という) 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 $\rho_a$  (以下、 $\rho_a$ ) あるいは所定の CEL に対する 締固め度 D。(以下,D。)と飽和度 S。(以下,S。)を適 切に管理する必要がある」として、表一1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<sup>2)~4)</sup>。表 一1によると、盛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

管理境界	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 d) 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	0	•	0	
	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	•	0	0	0
	飽和度下限線:SL		•	•	
	飽和度上限線:SU	0			•

表―1 盛土締固め管理における5つの管理境界2)~4)

●: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

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と最適含水比を基準 とした場合, 実締固め機械(近代的機械施工)の締固 めエネルギーは標準プロクターより大きいことが多い ため、従来許容下限値として採用されることが多い Dc = 90%は低すぎる場合が多い。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オー 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。

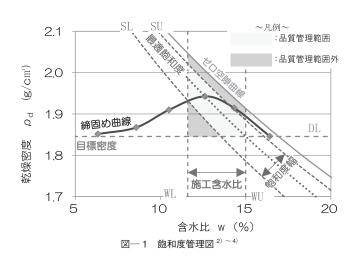
しかし、最大乾燥密度と最適含水比は締固めエネルギーと土質が変化すると変動する。また、締固めエネルギーと土質は、それぞれの現場で規定するが一定程度変動し、しかも通常は締固めエネルギーは不明である。このような背景から、高品質な盛土実現のためには、締固めエネルギーや土質の不可避的な変化に依存せず、効率良く締固めが行える新たな盛土品質管理指標が必要となってきている。

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 $^{2)\sim4}$ 。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<sup>2)~4)</sup>。

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 $^{2)-4}$ 。これらの結果に基づき、 $\mathbf{2}$  と締固め度の下限値管理に加え、「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 $^{2)-4}$ 。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。



#### (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、大規模な造成工事や 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<sup>6)</sup>。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。



盛土締固め回数管理システムのイメージ

図一 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、図一3は龍岡らがその結果をまとめたものである $^{2)\sim4}$ 。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。図一3を見ると、 $S_r$ 一定の条件で $\rho_d$ が増加した場合と $\rho_d$ 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 $\rho_d$  関係の形は相似である。この結果に基づいて、龍岡ら $^{2)\sim4}$  は図一3に示すように、CBR が以下の式(1)で表現できることを導いた。

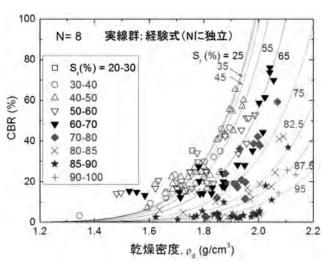


図-3 締固め終了時の飽和度 S, をパラメータとした関係 2) ~4)

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d/\rho_w - b)^c \qquad \cdots \sharp (1)$$

 $\rho_w$  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、 $\rho_d$  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。

#### (2) 実大締固め試験による検証

本システムを設置した13 t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、本システムの概要、CCVの仕様を、それぞれ写真-1、図-4、表-2に示す。ここで、本システムとは、図-4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



写真-1 実大締固め試験状況



図―4 本システムの概要

表一2 CCV の仕様

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

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。

## (3) 本剛性値推定式の作成

転圧回数毎に本剛性値と密度試験を測定し、本剛性値と $\rho_d$ および $S_r$ との関係を確認した。図-5に、実大締固め試験で得られた本剛性値と $\rho_d$ の関係を飽和度毎に分類した結果を示す。

図一5より、 $S_r$ が一定で $\rho_d$ が増加した場合と、 $\rho_d$ が一定で飽和度が減少した場合には、本剛性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本剛性値と $\rho_d$ の関係の経験式を式(2)のように導いた。

$$CCV = f_{CCV}(S_r) \cdot (\rho_d/\rho_w - b)^c \qquad \cdots \neq (2)$$

 $f_{CCV}(S_r)$  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)によって本剛性値から $\rho_d$  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-6 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 50 cm メッシュ)にリアルタイムで把握することできる。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、転圧前に RI 等を活用して素早く確認することとしている。

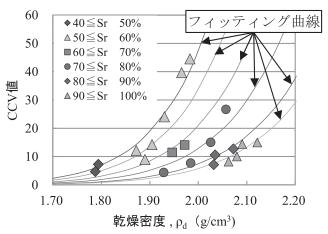
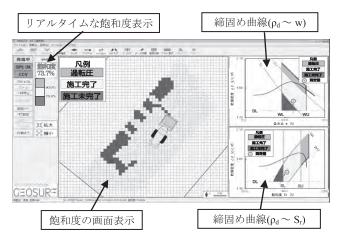


図-5 締固め終了時の飽和度 S,をパラメータとした関係



図―6 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 管理が主流であるが、近年では最適飽和度を締固め目 標値の一つと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 本剛性値 CCV 値と乾燥密度の推定式を確立し、推定 式を本システム 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、本剛性値から得られ 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。

J C M A

#### 《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, 早崎勉: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49回地盤工学研究発表会, pp.669-670, 2014



[筆者紹介] 永井 裕之(ながい ひろゆき) (㈱安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部

