

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＝

安藤ハザマ 永井 裕之・三反畑 勇・西尾 竜文
 東京理科大学 菊池 喜昭・龍岡 文夫
 富山県立大学 兵動 太一
 酒井重工業(株) 内山 恵一・眞壁 淳・小薬はるな

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⁾。そのため、従来よりも高品質な盛土の施工が求められており、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)~(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、試験施工で決定した施工仕様（撒き出し厚、使用機械、締固め回数、走行速度）に基づく工法規定方式であり、乾燥密度と含水比の測定に基づく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、これらの方法には以下の課題がある。

- ・課題①：施工後に限られた場所で測定した土の乾燥密度、飽和度に基づいた飽和度管理では、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では、規定した一定の締固め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り、過転圧や締固め不足が発生する懸念もある。

従来より高品質な盛土の実現にはこれらの課題の解決が必要である。筆者らは、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た。

2. 締固め管理の現状と課題

2-1 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（以下、 w ）、締固めエネルギーCEL（以下、CEL）、締固め土の乾燥密度（以下、 ρ_d ）あるいは所定のCELに対する締固め度＝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（以下、 D_c ）及び w と飽和度（以下、 S_r ）を適切に管理する必要がある」として、第1表に示す五つの管理境界に基づく管理法が提案されている^{(2)~(4)}。第1表では、土構造物の要求性能に必要な物性管理項目は、

- ① 高い強度・剛性の確保
- ② 水浸による強度低下の抑制
- ③ 必要な遮水性の確保
- ④ 水浸による沈下の抑制
- ⑤ 過転圧の防止

であり、施工性の管理項目は

であり、これらの管理項を満足するための管理境界は、含水比下限線（以下、WL）、含水比

第1表 盛土締固め管理における五つの管理境界^{(2)~(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		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
		a)高い強度・剛性の確保				
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

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の管理境界を、●（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境界であり、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。

2-2 従来の管理法と飽和度管理の比較と課題

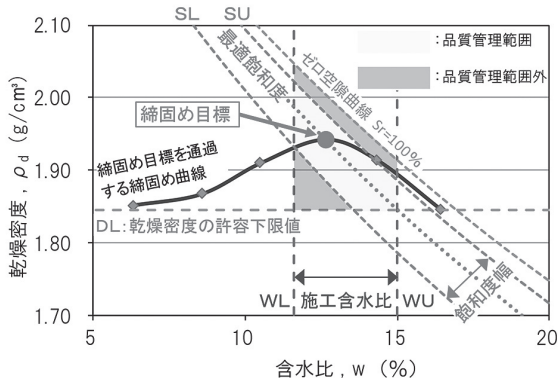
従来の盛土の締固め管理法は、第1表に示す管理境界DL、WL、WUを規定する方法が主流である。DLは、現場での D_c の全測定値に対する許容下限値である。標準プロクター（1Ec）による最大乾燥密度（以下、 $(\rho_d)_{max}$ ）を基準とした場合、DLの $D_c = 90\%$ は近代的機械施工での実際的な値である。しかし、仮に正確の D_c の値が90%ならば緩い状態である。これは、DLは現場でのCEL、土質の不可避的なばらつきに対処するために目標の平均値よりも低い値に設定しているからである。通常 D_c の平均値はDLよりも5%程度高くなる。また、WL、WUは盛土材の含水比の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)~(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、以下、 $(S_r)_{opt}$ ）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、両者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 $(S_r)_{opt}$ 、あるいは対象土構造物の要求性能に基づいた $(S_r)_{opt}$ に準じた S_r 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を提案している^{(2)~(4)}。

また、締固め状態と湿潤後の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している^{(2)~(4)}。これらの結果に基づき、第1図に示すように、従来の施工含水比の管理と締固め度の下限値管理に加えて、以下の管理を導

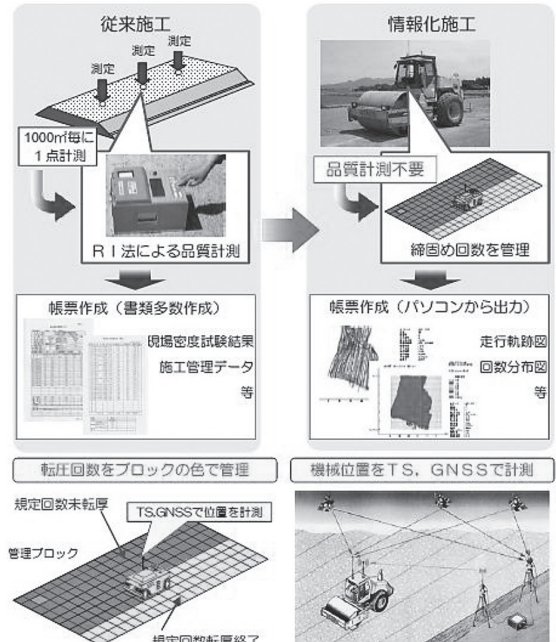
第1図 飽和度管理図^{(2)~(4)}

入して締固め管理を合理化することを提案している^{(2)~(4)}。すなわち、締固め目標を $S_r = (S_r)_{opt}$ (あるいは $(S_r)_{opt}$ に準じた S_r)と要求性能を満足する ρ_d (例えばIEcでの $(\rho_d)_{max}$)のように設定する。さらに、目標の S_r を挟んだ一定の範囲の S_r を実現する飽和度管理を行う。第1図では、目標の $S_r = (S_r)_{opt}$ としている。従って、この方法では、第1表に示すように、従来の管理法で規定するWL、WU、DLに加えてSL、SUを規定する。

しかし、施工後に測定した土の ρ_d 、 w 、 S_r 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、測定数が限定的なため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が必要となる。

2-3 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。第2図には、従来施工とICT土工 (情報化施工) との比較を示す。土工における施工規定管理では、施工着手前の試験施工で決定した施工方法 (締固め層厚、締固め機械、締固め回数、走行速度) が実現されるように管理する。しかし、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



盛土締固め回数管理システムのイメージ

第2図 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)

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 (締固め回数) で施工した場合に、場所によっては締固め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 (締固め回数や撒き出し厚) 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。

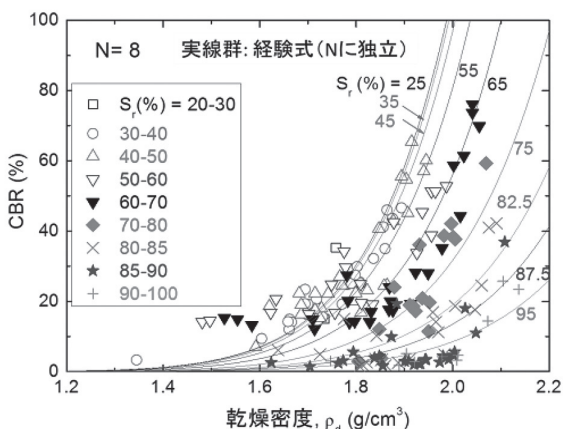
3. 飽和度モニタリングシステムの開発

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、開発に伴う実施した実大締固め試験実験、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。

3-1 既往の研究成果

旧建設機械化研究所では、1965～1990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、第3図は龍岡らがその結果をまとめたものである^{(2)~(4)}。第3図では、締固め回数8回における乾燥密度 ρ_d と CBR試験の関係を異なる飽和度 S_r 毎に分類している。 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 ~ ρ_d 関係は締固め機械の種類と締固め回数（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)~(4)}は第3図に示すデータは以下の式(1)で表現できることを示した。



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

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

ρ_w は水の密度、 $(\rho_d / \rho_w - b)^c$ は ρ_d の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 が分かれば CBR 値を推定できることを意味している。筆者らは、上記の式(1)に依り、CCV値から乾燥密度と飽和度を推定する手法を検討した。

3-2 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。締固め試験状況、CCVシステムの概要、加速度計の仕様を、それぞれ写真1、写真2、第2表に示す。ここで、CCVシステムとは、写真2に示すように、振動ローラの前



写真1 実大締固め試験状況



写真2 CCVシステムの概要

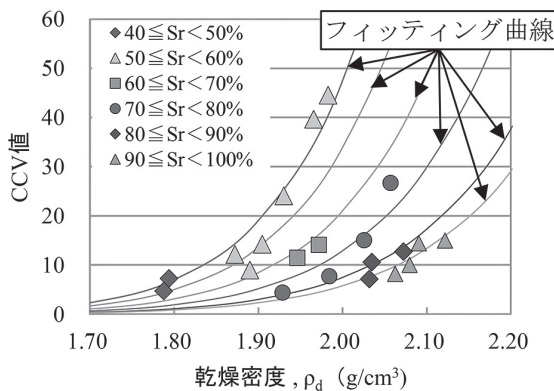
第2表 加速度計の仕様

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

輪に取り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り付けた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。

3-3 CCV値推定式の作成

締固め回数毎にCCV値と ρ_d を測定し、CCV値と ρ_d および S_r との関係を確認した。第4図に、実大締固め試験で得られたCCV値～ ρ_d 関係を飽和度毎に分類した結果を示す。



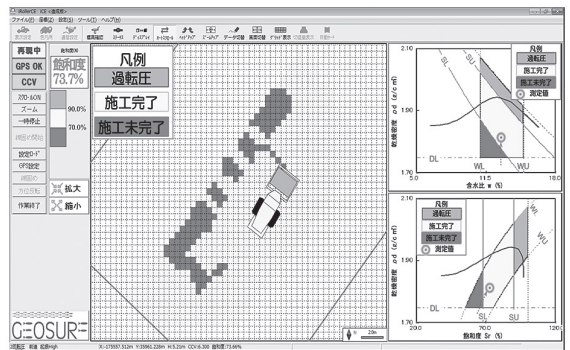
第4図 締固め終了時の飽和度 S_r をパラメータとした関係

第4図より、 S_r が一定で ρ_d が増加した場合と、 ρ_d が一定で S_r 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～ ρ_d 関係の経験式を式(2)のように導いた。

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

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。ただし、式(2)は適宜現場の測定値によってキャリブレーションする必要がある。なお、重要なポイントとして、 w 一定の締固め過程で ρ_d が増加するとCCVは増加した後 S_r の増加に伴って減少に転じる。このためCCVの値だけに基づく適切な締固め管理はできないことになる。

筆者らは、式(2)に基づくことによって ρ_d と S_r 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。第5図に、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 ρ_d と S_r 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、従来の管理法、飽和度管理、そしてICT土工における諸課題を解決した効率的な締固め管理が可能となった。なお、この管理で必要となる含水比 w は、RI等を活用し、締固め前に素早く確認することとしている。



第5図 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、従来は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基本にして飽和度も管理する方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。筆者らは、これらの管理手法を総合化した管理法の開発を目指している。すなわち、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、より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：藤沼湖の決壊原因調査報告書（2012）
(2) Tatsuoka,F：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（2015）
(3) 龍岡文夫・他：“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（2013～2015）
(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）