

第24回 国土技術開発賞 最優秀賞受賞

遮水性盛土の総合的な品質管理法 最新の技術知見と ICT を融合した新たな品質管理

〔受賞者〕 独立行政法人水資源機構／鹿島建設株式会社

〔本稿執筆者〕 独立行政法人水資源機構 さかもと ひろき 坂本 博紀

以下に、第24回 国土技術開発賞で最優秀賞を受賞した「遮水性盛土の総合的な品質管理法」を紹介します。

1. はじめに

近年、i-Constructionによる生産性向上が推進されており、一般土工ではGNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）を用いた盛土の転圧回数管理（以下、「GNSS管理」という）や、GNSSと振動ローラの応答加速度から得られる地盤剛性指標（Soil Stiffness index, 以下、「SSI」という）を組み合わせた面的な締固め管理法（ローラ加速度応答法）の導入が進められている^{1),2)}。

遮水性盛土の代表的な構造物として、河川堤防やフィルダム遮水ゾーンが挙げられる。このうち、フィルダム遮水ゾーンは作用水圧が非常に大きく、破壊時の被害が甚大であることから、浸透破壊に対抗するためにより高い品質が要求される。このため、フィルダムの施工における品質管理は、管理項目、要求品質、確認頻度の全てが一般土工と比べて厳しい条件で管理される。

しかし、これらの管理試験は、いずれも現実的に実施可能な頻度の抜取検査であることから、ロット内の品質のバラツキや局所異常の有無につい

での確認は、技術者の目視監視等による判断に頼っていたのが実情であった。

一方、近年の技術者不足により、従来のような多数の人員配置を前提とした施工体制の確保が困難になりつつあることから、一般土工と同様に、GNSS管理やローラ加速度応答法を用いた面的な締固め管理法の導入が望まれていた。

しかし、GNSS管理では締固め状態の定量的な評価ができないため、GNSS管理のみでは遮水性は担保できない。また、ローラ加速度応答法等のSSIを用いた締固め管理法についても、盛土材の含水比が高い遮水性盛土では締固めに伴うSSIの変化が小さいため、SSIの管理値の設定が困難であった。

さらに、後述するとおり、遮水性盛土は締固め時の含水比が低下するほどSSIが高くなり、透水係数が高くなるという特性がある。これらの理由により、従来のSSIの下限值管理法では遮水性盛土の品質管理を行うことは困難とされてきた。

本技術では、新たに「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法」（以下、「SSIの上下限值管理法」という）を開発し、既存のICT技術を組み合わせることで、遮水性盛土に適用可能な面的な品質管理法を開発した。この際、飽和度と締固めエネルギーに着目した「締固め管理基準の改善」を行い、品質管理値に反映することで、生産性向上と品質向上を同時に実現した。

2. 開発技術の概要

「遮水性盛土の総合的な品質管理法」の全体イメージを図-1に示す。本技術は以下の①～⑥の技術を組み合わせることで、全量管理型の品質管理法を実現したものである。

〔本技術を構成する技術〕

- ① 粒度（搬出時）の全量管理
- ② 含水比（搬出時）の全量管理
- ③ 締固めエネルギーの全量管理
- ④ 地盤剛性の全量管理（及び「SSIの上下限值管理」による遮水性能の管理法）
- ⑤ 締固め管理基準の改善
- ⑥ リアルタイム遠隔監視システム

盛土の品質は、使用材料の土質が大きく変化しない場合には、[1] 粒度、[2] 含水比、[3] 締固めエネルギーによって概ね定まる。このため、従来の盛土の品質管理では、粒度、含水比を抜取検査により管理し、締固めエネルギーを施工仕様規定により管理することで、これら [1] ～ [3] の締固め条件が一定の幅に収まるよう管理したうえ

で、転圧後に密度、透水係数を現場にて直接計測してその品質を確認している。

本技術では①～③により、前述した [1] ～ [3] の締固め条件を全量管理に近づけることで、締固め後の品質が概ね一定の幅で収まることを保証する。

① 粒度（搬出時）の全量管理

デジタルカメラ画像解析により粒度分布を把握する画像粒度解析を採用し、従来は1回/日であった粒度確認の頻度を1回/30分に変更した。この結果、全施工ロットにおいて複数回の粒度確認が可能になった。

② 含水比（搬出時）の全量管理

近赤外線水分量計を採用し、従来は3回/日程度であった搬出材料の含水比の確認頻度を常時監視に変更した。

③ 締固めエネルギーの全量管理

現場の締固めエネルギー（Compaction Energy Level on field, CEL_f ）を規定する施工層厚と転圧回数の管理は、従来は目視やチェックシートによ

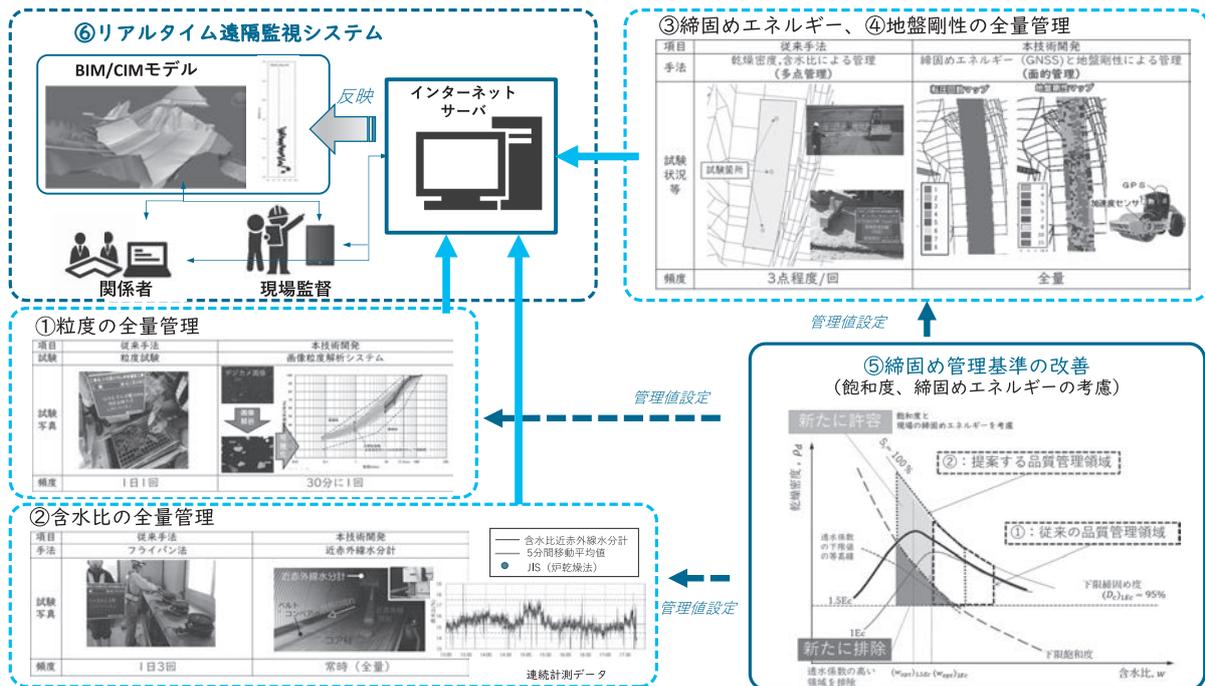


図-1 遮水性盛土の総合的な品質管理法の全体イメージ

り管理していたが、GNSS 管理により電子データとして記録した。

ここで①②は搬出時の品質管理であるため、施工途中の含水比変化や材料分離等による局所異常については考慮されない。そこで、締固め後の品質確認として、④においてローラ加速度応答法による計測記録により、締固め後の地盤剛性のデータを記録・保管する。

本技術では、3. で詳述する「地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法 (SSI の上下限值管理法)」を開発・導入し、ローラ加速度応答法と組み合わせることで、④による遮水性能の面的管理を実現した。

これら①～④により全量管理する各指標の管理値に、⑤の「締固め管理基準の改善」を反映することで、同一材料を使用した場合の密度や透水係数等の品質向上を実現している。「締固め管理基準の改善」については4. で説明する。

また、①～④の品質管理記録をクラウド管理することで、関係者がPC やタブレット端末等でリアルタイムに情報共有できる環境を整備した (図-1 の⑥)。

3. 地盤剛性指標の上下限值管理による遮水性盛土の締固め管理法 (SSI の上下限值管理法)

本章では、盛土の遮水性能の面的管理を実現するために考案した「SSI の上下限值管理法」の考え方を記す。

(1) 課題の整理

遮水性盛土において面的管理を適用する際の主要課題は以下の2点である。

- ① GNSS 管理 (締固めエネルギーの管理) は、盛土材料の管理と組み合わせて物性曲線は同定できるものの、物性曲線上の位置までは同定できない。このため、遮水性能が不足する乾燥側での締固めを排除することができない (図-2)。

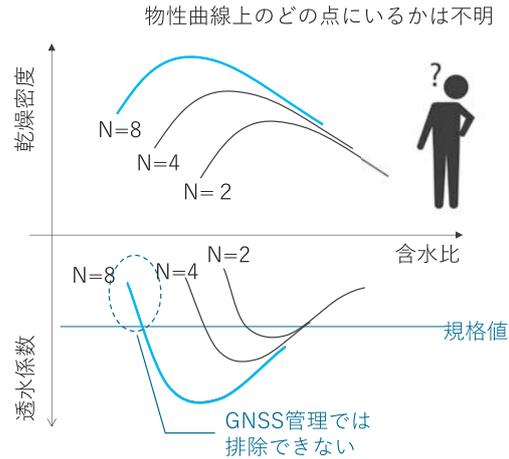


図-2 GNSS 管理と遮水性能の関係 (イメージ)

- ② ローラ加速度応答法では、地盤剛性指標 (SSI) の面的データを取得できる。しかし、高含水比材料では、転圧回数 N の増加に伴い乾燥密度が上昇しても SSI の変化が小さいため、SSI のみで締固め状態を評価することは困難である (図-3)。

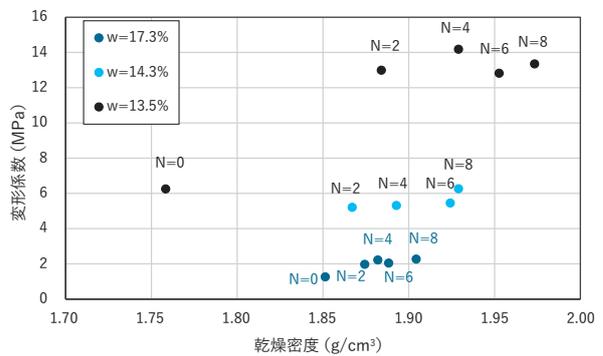


図-3 乾燥密度と地盤剛性 (変形係数) の関係

(2) 基本的な考え方

「SSI の上下限值管理法」は、GNSS 管理とローラ加速度応答法のそれぞれの課題を相互に補完するよう組み合わせた管理法である。

図-4 に遮水性盛土における「締固めエネルギーに応じた含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係 ($w-\rho_d$ 曲線群)、含水比 w と透水係数 k の関係 ($w-k$ 曲線群)」と、「所定の締固めエネルギーにおける含水比 w と地盤剛性指標 SSI の関係 (w -SSI 曲線)」をイメージで示す。図中のブルー網かけ部分は含水比の管理範囲を示す。

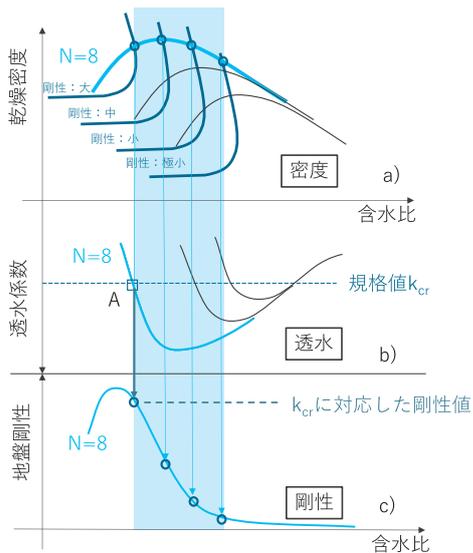


図-4 含水比と乾燥密度，透水係数，地盤剛性の関係（イメージ）

盛土材の土質・粒度が概ね一定な場合には、GNSS管理により、物性曲線が特定される。図-4a), b) では、転圧回数 $N=8$ の条件における $w-\rho_d$ 曲線、 $w-k$ 曲線を青線で示している。図-4b) より、含水比が管理範囲より低い領域（左側）では透水係数が規格値を超過しており、GNSS管理のみでは遮水性能を管理できないことが分かる。

図-4a) の紺線群は地盤剛性の等高線を示している。なお、このイメージ図は、小石原川ダム

の材料を用いた室内試験・現場盛立試験の結果と龍岡の研究³⁾を参考に描写している。1本のSSIの等高線が複数の $w-\rho_d$ 曲線と交差していることから、SSIの値のみから乾燥密度や締固め状態は評価できないことが分かる。

これに対して、GNSS管理で $w-\rho_d$ 曲線を一つに特定した状態であれば、SSIの等高線と $w-\rho_d$ 曲線の交点は一つに定まる。SSIの値に応じた物性曲線上の位置が一つに定まるため、SSIの上下限値を管理することで、物性曲線上の移動範囲を管理することが可能になる。

例えば、図-4b) の $N=8$ の $w-k$ 曲線において、透水係数 k が規格値 k_{cr} と一致する点AにおけるSSIの値を上限としてSSIを管理すると、含水比はWLを下限として管理されることになる。その結果、透水係数は $N=8$ の $w-k$ 曲線の点Aから右の範囲で管理される。

「SSIの上下限値管理法」の詳細については参考文献⁴⁾を参照されたい。

(3) 従来の締固め管理法との違い

図-5に従来型の「密度、含水比による管理法」と「SSIの上下限値管理法」の比較を模式的に示す。従来の管理法は、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の2変数を用いて、 $w-\rho_d$ 平面上の分布範囲を規定

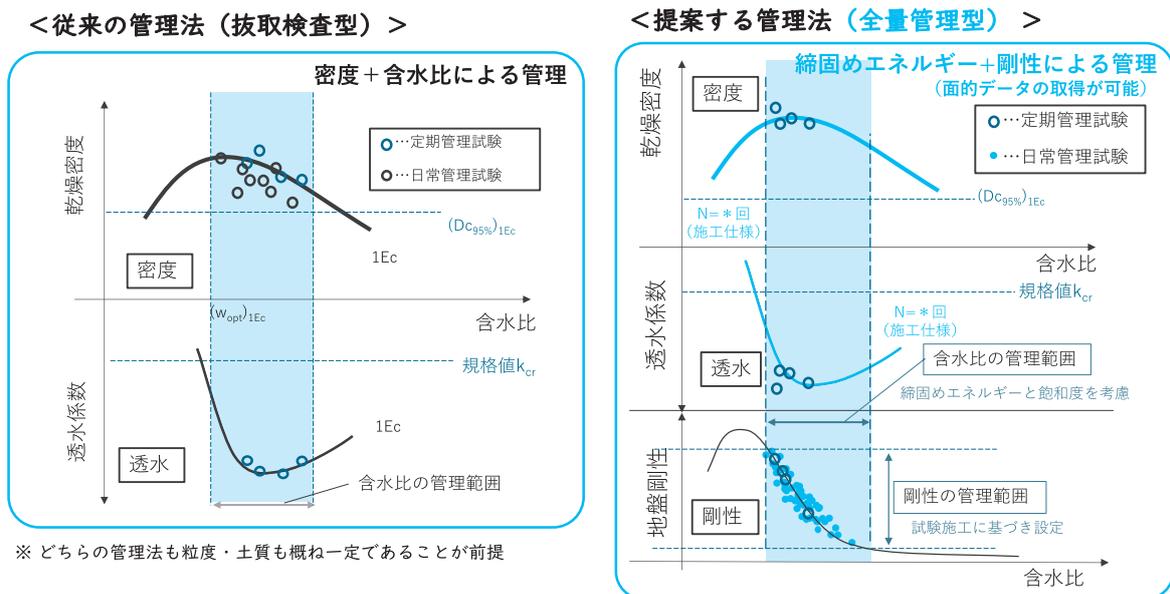


図-5 従来の管理法との比較

して締固め状態を管理する方法である。今回開発した「SSIの上下限值管理法」では、密度の代わりに締固めエネルギーを、含水比の代わりにSSIを管理する。

すなわち「SSIの上下限值管理法」は、従来の密度、含水比を用いた締固め管理法の延長線上の管理法といえる。この管理指標の変更の目的は、指標を変更することにより、ICTを用いた管理指標の全量管理を実現することにある。

4. 締固め管理基準の改善

図-6に本技術における「締固め管理基準の改善」の概要を模式的に示す。本技術では、現場の締固めエネルギー CEL_f が標準プロクターの $1Ec$ よりも高い場合に、 CEL_f に応じて管理含水比を低減させる（図-6の例では $CEL_f = 1.5Ec$ ）。こ

の時、遮水性能が低い領域（青斜線）が管理領域に占める割合が大きくなることから、遮水性能が低い領域を確実に排除するために飽和度の下限値（紺の一点破線で示す）を設定する。

また $w-\rho_d$ 平面上において下限飽和度 SrL の等高線よりも上側の領域では、所要の遮水性能が担保されることから、 SrL の等高線と CEL_f に対応する密度曲線（ $w-\rho_d$ 曲線）との交点 A における含水比まで、管理領域を拡大することが可能となる。

「締固め管理基準の改善」の詳細については参考文献⁵⁾を参照されたい。

5. 開発技術の導入効果

本技術を適用した小石原川ダムの遮水ゾーンの品質について、従来の管理法で建設された既存ダ

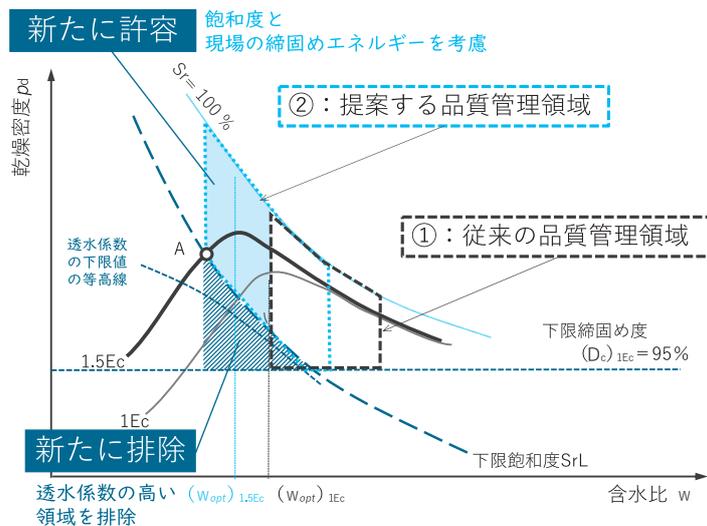


図-6 締固め管理基準の改善

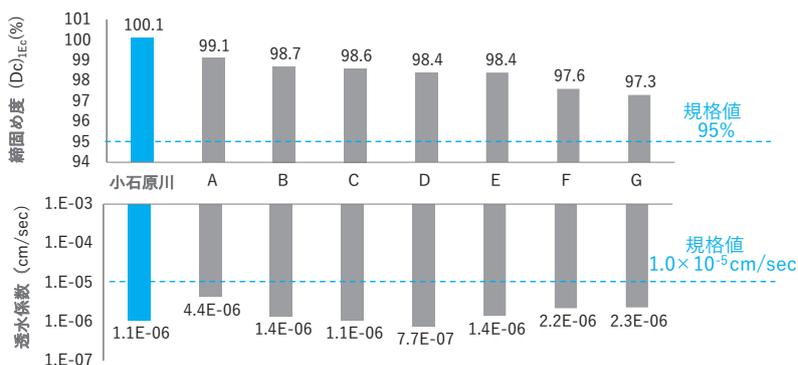


図-7 既設ダムとの品質比較（一般コア部）

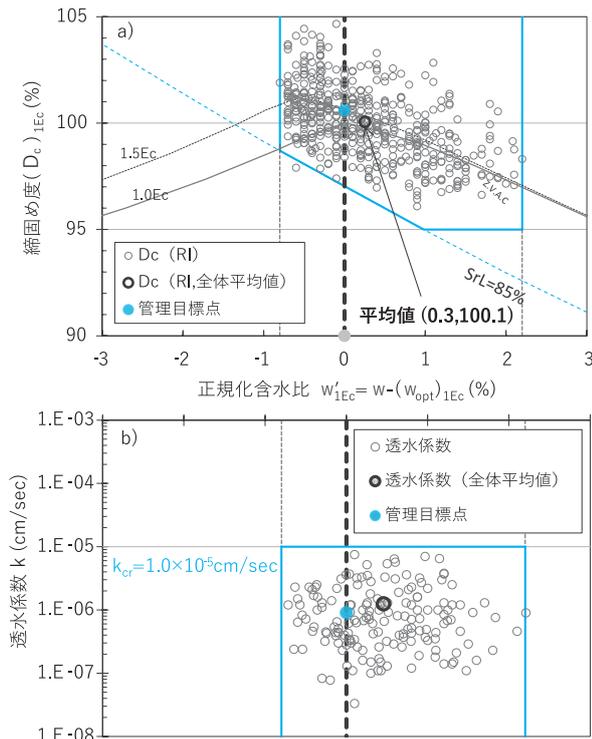


図-8 品質管理試験結果（開発技術適用ダム）

ム群との比較を図-7に示す。締固め度の平均値が唯一100%を超過しており、遮水性能も既存のダム群と同等以上である。

小石原川ダムの遮水ゾーンにおける締固め度と透水係数の実績（図-8）をみると、今回、締固め管理範囲の改善において新たに許容した1Ecの最適含水比よりも乾燥側（図-8 a), b)の太破線より左側）において、より高い品質（締固め度が高く、透水係数が低い）が得られていることが分かる。

本技術により高い品質を確保しつつ、盛立後の有効応力が適切に発現されていることを確認することで、22カ月弱と計画を上回る盛立速度（調査した100m超級のフィルダムでは月間盛立高(m/月)は過去最高)でコアの盛立を完了した（図-9）。

本技術を適用した小石原川ダムでは、転圧後のRI法による密度試験の大部分をSSIによる品質管理試験で代替することにより、締固め後の品質管理試験の時間が約1,300時間以上縮減できたと推定される（図-10）。また、現場外から盛土品質をリアルタイムで監視可能となり、発注者の監

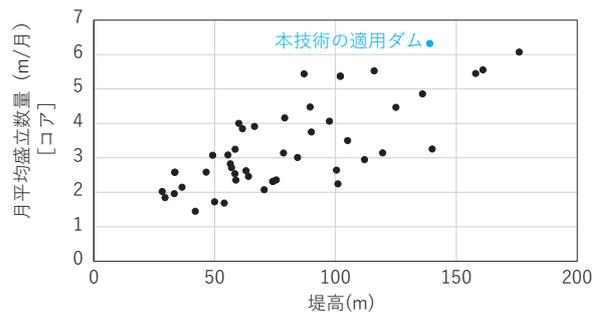


図-9 月間盛立高（国内100m超級）

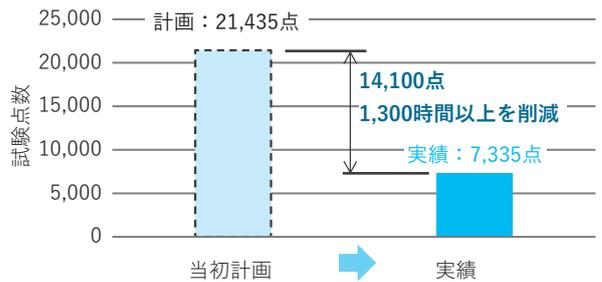


図-10 現場密度試験（RI試験）の縮減

督員数を独立行政法人水資源機構が建設した同規模ダムと比べて半数程度に減じた。

また、定量的かつ面的な締固め管理法の導入により、施工と同時に品質確認が可能となり、従来の抜取試験では把握が困難な施工ロット内の品質の一様性や局所異常の有無が把握可能となった。

6. 開発技術の社会的意義

本技術は、従来の管理法では困難とされていた遮水性盛土における面的な品質管理を実現するものであり、i-Constructionの改善・推進に寄与したと考えられる。また、「締固め管理基準の改善」にも併せて取り組むことで、品質向上と生産性の向上を同時に実現したことに意義がある。

本技術の中の「SSIの上下限值管理法」は、従来の地盤剛性の下限値管理に基づく締固め管理法の課題と改善方法を提示するものであり、締固め管理の向上にも寄与すると考えられる。

欧米を中心に、一般土工では定量的かつ面的な締固め管理（Continues Compaction Control, 以下、「CCC」という）の技術基準の整備と導入が進められているが、これらは全て剛性指標の下限

値もしくは変化率を管理する方法である。海外では、CCCの技術研究は現在も活発に行われているものの、いまだ地盤剛性の下限値管理から脱却した議論はなされていないのが現状である。前述したとおり、本技術は従来型の剛性指標の下限値管理法の課題を指摘するとともに、その具体的な改善方法を示したものとなっている。本技術の事例をもってCCCのあり方の議論を国際的に進めていくことで、技術の展開が図られることが期待される。

7. 開発技術の適用範囲と今後の課題

(1) 適用範囲

本技術のうち「締固め管理基準の改善」は、道路・鉄道・堤防・宅地等の盛土の締固め管理にも適用できる汎用的なものであり、この部分のみを適用することも可能である。特に自然含水比の低い盛土材を使用する場合には無理なく適用が可能である。

「SSIの上下限值管理法」は、適用条件として盛土材料の粒度等の土質が概ね一定である必要がある。また、地盤剛性は粒度等の土質、含水比、締固めエネルギーにより変化するため、SSIの管理値を定めるには現場ごとに盛立試験を行う必要がある。

(2) 今後の課題

本技術のうち「SSIの上下限值管理法」は粒度等の土質が概ね一定であることが適用条件となっているため、厳密な材料管理を行うフィルダム工

事のような大規模な遮水性盛土工事での適用性が高い。一方、道路や鉄道等の一般土工では発生材料をそのまま利用するのが基本であり、粒度・含水比の管理はほとんど行われなことから、本技術をそのまま適用することはできない。

今後、土質と締固めエネルギーの変化に応じた、地盤剛性と締固め状態の関係性を解明することで、一般土工にも適用範囲が広がる可能性がある。

8. 謝 辞

本技術をはじめとした小石原川ダムにおける締固めに関する取組において、多数のご助言をいただいた龍岡文夫先生をはじめとする技術委員及び有識者の皆さま、ならびに小石原川ダム事業の推進にご尽力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領（2012.3策定，2020.3最新改定），2020.
- 2) Federal Highway Administration：Intelligent Compaction Technology for Soils, 2014.
- 3) 龍岡文夫：土の締固めにおける飽和度管理の重要性，ダム技術，No.354，3月号，pp.3-16，2016.
- 4) 坂本博紀，小林弘明，龍岡文夫，曾田英揮：遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理，土木学会論文集C（地圏工学），76巻3号，pp.221-234，2020.
- 5) 坂本博紀，龍岡文夫，曾田英揮，小林弘明，小原隆志：締固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締固め管理，土木学会論文集C（地圏工学），77巻1号，pp.43-58，2021.