

川上ダム建設事業におけるICT技術を導入した工事について

河野 将大¹・市川 滋己²

¹独立行政法人水資源機構川上ダム建設所 工事課 (〒518-0294三重県伊賀市阿保251番地)

²独立行政法人水資源機構川上ダム建設所 工事課課長 (〒518-0294三重県伊賀市阿保251番地)

水資源機構ではi-Construction & Management の一環として、建設生産プロセスの現場にて抜本的な生産性の向上、効率化及び高度化を図るため、ICTの全面的な活用を推進している。川上ダム建設事業においても、工事用道路工事や不安定化懸念斜面对策工事（押え盛土工事）にてUAVを用いた3次元起工測量、ICT建設機械を用いた施工等のICT技術を導入した施工を実施している。

本稿では、川上ダム建設事業にて実施したICT技術を導入した工事について、生産性向上への効果と今後の課題について報告する。

キーワード i-Construction、ICT土工、3次元測量、ICT建設機械

1. はじめに

川上ダムは淀川水系木津川の支川前深瀬川に建設中の重力式コンクリートダムで、洪水調節、新規利水、流水の正常な機能の維持を目的とした多目的ダムである。

当建設事業では、ダム本体工事の本格的な着手に向けて工事用道路工事や不安定化懸念斜面对策工事等を実施してきた。これらの工事のうちi-Construction & Management の一環として、ICT技術を導入した2件の工事について、生産性向上への効果について述べると共に、今後の課題について述べる。

2. 川上ダムにおけるICT技術を導入した工事

当ダムにおけるICT技術を導入した工事では、ICT土工における施工プロセス（①3次元起工測量、②3次元設計データ作成、③ICT建設機械による施工、④3次元出来形管理等の施工管理、⑤3次元データの納品）の各段階でICT技術を導入した。「場内工事用道路工事」においては4段階（①②④⑤）の施工プロセスで、「上川原地区斜面对策工事」においては1段階（③）の施工プロセスで、ICT技術を導入した施工を実施した。次章以降に、各工事におけるICT技術について述べる。

3. 場内工事用道路工事

(1)工事概要

場内工事用道路工事は、ダム本体工事にて使用する重機が通行するための道路建設及び建設発生土受入地の整備を実施する工事であり、約44,200m³の盛土の施工が主たる内容である。なお、本工事は水資源機構における施工者希望I型ICT活用工事の第1号である。

(2)ICT技術を導入した施工の実施

場内工事用道路工事では2.で記述した①②④⑤の4段階の施工段階においてICT技術を導入した施工を実施した。

a) 3次元起工測量

3次元起工測量はUAVによる空中写真測量を行い、測量対象範囲約15,400m²に対して、オーバーラップ率90%、サイドラップ率60%の条件で長さ271mの飛行コース3本、及び長さ231mの飛行コース3本で空中写真撮影を行い、計540枚程度の撮影写真から写真測量ソフトウェアを用いて点群データを作成した。

空中写真測量の精度を確かめるために、光波測距儀を用いた測量を併せて実施した結果、ほぼ同一の横断形状となり、空中写真測量による3次元起工測量の精度が確認された。

作業日数は空中写真撮影から測量データの解析、横断

図作成まで、精査を含むと1週間程度の日数を要した。なお、UAVの飛行に際しては猛禽類への影響についての配慮から、時期、時間及び場所等について制約が生じるため、余裕をもった工程計画が必要となった。

b) 3次元設計データ作成

3次元設計データ作成では、2次元の設計データ(設計図面)を3次元化するとともに、起工測量結果から作成した点群データを点群処理ソフトウェアにて読み込み、3次元化した設計データと比較できるようにした(図-1参照)。データ作成については、約20日間の作業日数を要した。なお、3次元化は基になる設計図面(平面図、縦横断面図)が多いほど、精度が向上し、時間短縮にも繋がるが、本工事では契約当初に大幅な形状変更となり、発注図の縦断面図が適用できなかつたことから平面図を用いて3次元化を行ったため、時間を要している。

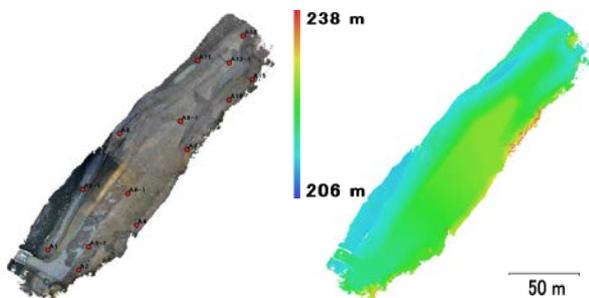


図-1 空中写真(左)から標高データを解析(右)

c) 3次元出来形管理

出来形管理は、UAVを用いた出来形測量を実施し、3次元設計データと出来形測量結果データから出来形合否判定総括表(出来形管理図)(図-2)を作成し、各ポイントとの離れにより出来形の良否判定を行うことで管理した。管理値外の数値が出た場合は合否判定総括表にて一目で把握できるようになっている。なお、一部出来形測量の結果から設計と多少の誤差は生じたが、盛土等構造物に影響がないことを現地で確認した。また、起工測量と出来形測量のデータを使用し、プリズモイダル法により体積計算を行うことで土量を算出した。

出来形合否判定総括表

工程		場内工事用道路 No.0~No.0+80		測量地点	
種別		測点		合否判定結果	
道路土工		No.0+80~No.2+14.7		異常値有	
路体盛土工、路盤工、盛土工					
天端 標高較差	測定項目	規格値	判定		異常値有
	平均値	-4.4mm	±50mm		
	最大値(差)	147mm	±150mm		
	最小値(差)	-120mm	±150mm		
	データ数	4,932	1点/m ² 以上 (4.54点以上)		
法面 標高較差	評価面積	4,540m ²		異常値有	
	平均値	-0.3mm	±80mm		
	最大値(差)	491mm	±190mm		
	最小値(差)	-384mm	±190mm		
	データ数	3,507	1点/m ² 以上 (2.484点以上)		
評価面積	2,483m ²				
測定回数	10	0.3%未満 (10点以下)			
		天端のばらつき	規格値の±60% (100.0%) 実測値 4,911 (99.6%)	法面のばらつき	規格値の±80% (98.8%) 実測値 3,314 (94.5%)

図-2 出来形範囲合否判定総括表(異常値有の判定事例)

4. 上川原地区斜面对策工事

(1) 工事概要

上川原地区斜面对策工事は湛水により不安定化が懸念される斜面に対し、斜面前面に約39,200m³の押さえ盛土を行うことで、円弧すべりの発生を抑止する工事である。

本工事では、位置情報取得システムを搭載した振動ローラを用いて「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領(以下管理要領という。)」に従い盛土の密度管理を実施するとともに、受注者の技術提案により敷均し作業にはMC(マシンコントロールシステム)を搭載したブルドーザ(写真-1)を、締固めに用いる振動ローラ(写真-2)には位置情報取得システムと併せて加速度応答システムを搭載し、盛土品質の確保を図った施工を実施した。なお、押さえ盛土全体層83層のうち59層目から83層目にかけて盛土材となる流用土の含水比が増加したため、生石灰による土質改良を実施した。



写真-1 MC搭載ブルドーザによる敷均し状況(左)

写真-2 振動ローラによる転圧状況(右)

(2) ICT技術を導入した施工の実施

上川原地区斜面对策工事では2.で記述した③の1段階の施工段階においてICT技術を導入した施工を実施した。

a) MC搭載ブルドーザによる施工

MCを搭載したブルドーザによる施工では、GNSSによりブルドーザの位置情報を計測し、施工箇所の設計データと現地盤データの差分に基づき、排土板の高さ・勾配を自動制御するシステムを搭載している。

従来はブルドーザのオペレーターは、丁張りや敷均し状況を目視確認しながら排土板を操作する必要があったが、MCを搭載することにより排土板高さが自動的に調整される。このことにより、オペレーターによる複雑な操作を行う必要がなくなり、熟練したオペレーターでなくても所定の敷き均し厚で確実に施工することが可能となり、盛土の品質確保に繋がる。

b) 位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラによる施工

位置情報取得システムを搭載した振動ローラは、締固め転圧時の位置情報をGNSSにより取得し、施工時の移動軌跡及び転圧回数を運転席のディスプレイに表示することで、オペレーターがリアルタイムで転圧状況の確認を行うことが可能となっている。移動軌跡及び転圧回数

については、記録・印字を行うことも可能であり、別途監督員による転圧状況の確認も可能である。加えて、本工事に用いた振動ローラには、締固めによって地盤に与える振動を加速度計で計測し、その周波数を分析することで得られる地盤応答値について取得可能な加速度応答システムについても搭載している。

本工事では、位置情報取得システムを用いて、「管理要領」に基づいた盛土の品質管理を行うとともに、振動ローラに搭載された加速度応答システムを用いて締固め時の地盤応答値を計測し、盛土の締固め状況の指標として利用した。

(3) TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理

「管理要領」に基づいた盛土の品質管理とは、所定の締固め度を満足する締固め回数を予め設定し、設定した締固め回数を確認することで所定の締固め度が確保されていると見なす品質管理方法である。

実施手順は、①盛土材の材料試験、②試験施工、③所定の転圧仕様（回数）設定、④所定仕様に基づく施工、となる。

盛土の管理基準値は、本工事の設計条件である現場湿潤密度 1.82g/cm³ 以上という条件及び材料試験結果から、締固め度は 91.6%以上が必要となるため、施工時に確保すべき締固め度を 92.0%とした。

試験施工では、設定した管理基準値である締固め度 92.0%が得られる転圧回数を確認するために、1 ヤードを 6.5m×7.0m、管理ブロックの大きさを 50cm×50cm として転圧回数を 4・6・8・10・12 回の 5 水準で実施し、砂置換による現場密度試験結果から締固め度を確認した。

転圧回数と砂置換による現場密度試験結果の関係を試験施工の結果として表-1 に示す。

表-1 試験施工（流用土）結果（締固め度）

捲出厚	mm	330	目標値					
最大乾燥密度	g/cm ³	1.702	築堤部	締固め度>92.0%(ρ _d >1.82g/cm ³)				
最適含水比	%	18.1						
転圧回数	回	4	6	8	10	12		
乾燥密度	g/cm ³	1.661	1.723	1.756	1.752	1.737		
締固め度	%	97.6	101.2	103.2	102.9	102.1		
自然含水比	%	15.6	15.7	15.1	15.3	14.8		
湿潤密度	g/cm ³	1.919	1.994	2.021	2.02	1.994		
目標の達成	築堤部	○	○	○	○	○		

これによると 4 回転圧で締固め度は 97.6%となり、所要の締固め度 92.0%を十分満足することが確認された。そこで所定転圧回数を 4 回として施工を行うこととした。

また、土質条件が異なるため、土質改良を行う際に、当初の試験施工と同様の条件で、転圧回数 2・4・6・8・10 回の 5 水準で試験施工を実施した。なお、土質改良後は、材料試験の結果から締固め度を 90.0%としている。

転圧回数と砂置換による現場密度試験結果の関係を試験施工の結果として表-2 に示す。

表-2 試験施工（改良土）結果（締固め度）

捲出厚	mm	330	目標値					
最大乾燥密度	g/cm ³	1.846	築堤部	締固め度>90.0%(ρ _d >1.82g/cm ³)				
最適含水比	%	11.5						
転圧回数	回	2	4	6	8	10		
乾燥密度	g/cm ³	1.668	1.706	1.731	1.746	1.69		
締固め度	%	90.4	92.5	93.7	94.6	91.5		
自然含水比	%	13.5	13.9	14.4	15.2	17.5		
湿潤密度	g/cm ³	1.894	1.946	1.981	2.013	1.986		
目標の達成	築堤部	○	○	○	○	○		

これによると 2 回転圧で締固め度 90.4%となっており、所定の締固め度 90.0%を満足したが、材料の品質により、所定の締固め度を満足できない可能性があったため、安全側で施工を行えるように所定転圧回数を 4 回として施工を行うこととした。

(4)加速度応答システムを用いた盛土の締固め管理

締固め度によって振動ローラの振動挙動は変化する。この振動挙動を定量的に評価した値（地盤応答値）を締固め度の管理において補助的に用いている。振動挙動の定量的な評価とは、振動ローラの振動輪の加速度を計測し、周波数分析すると、振動ローラの振動数の他に高調波成分や分数調波成分が観測されることを利用したものである¹⁾。周波数特性における振動ローラの基本振動成分に対する高調波成分や 1/2 分数調波について加算あるいは除算を行ったものを評価値とするが、その式の構成から数種類の方式があり、本工事においては式(1)で表わされる CCV を評価値とした。式(1)の記号は図-3 中の記号による。

$$CCV = \frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \dots\dots式(1)$$

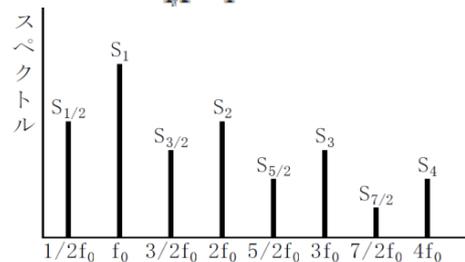


図-3 振動ローラの周波数特性

(3) にて示した当初及び土質改良前の試験施工において、CCV 値についても同時に計測を行い、その結果を基に適切な締固め状態における CCV 値を設定した。

試験施工における CCV 値の計測結果を表-3 及び図-4 に示す。

表-3 試験施工結果（CCV 値抜粋）

	2回転圧	4回転圧	6回転圧	8回転圧	10回転圧	12回転圧
最大値(流用土)	8.2	14.0	12.6	9.6	8.5	
最大値(改良土)	9.8	8.4	11.8	9.7	7.6	
最小値(流用土)	2.1	5.2	3.9	3.4	2.5	
最小値(改良土)	2.7	2.0	2.1	2.1	2.1	
平均(流用土)	4.7	9.2	7.0	6.4	4.6	
平均(改良土)	6.5	6.3	6.1	6.1	5.4	

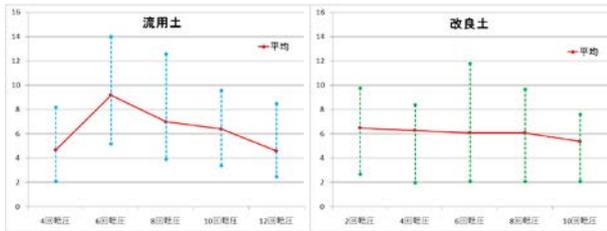


図-4 試験施工結果 (CCV 値抜粋)

流用土においては、所定の締固め度を満足している 4 回転時の CCV 値が 2.1~8.2 であることから、CCV 値の管理値を 2~8 を目安として管理していくこととした。改良土においては、(3) で定めた転圧回数 4 回より厳しい条件である転圧回数 2 回の現場密度試験にて、締固め度 90.0%以上となった CCV 値 3 以上を目安として管理を行っていくこととした。なお、盛土材料の品質のばらつきにより CCV 値の上限もばらつくことがそれまでの施工にて判断できたため、上限は設けないこととした。

(5)盛土の品質管理

盛土の品質管理の記録として、ある盛土層における転圧回数と CCV 値を图示したものを図-5 に示す。この図のように所定の締固めが行われていることを目視で確認することが可能である。

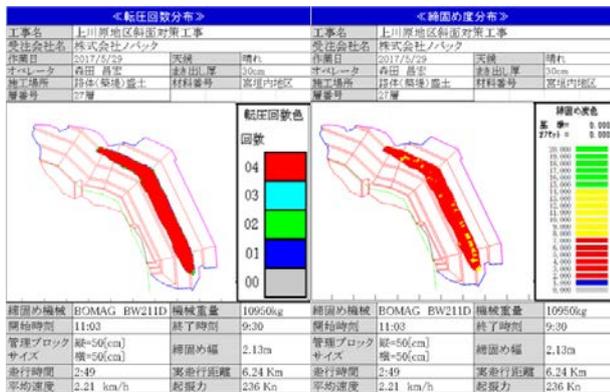


図-5 転圧回数 (左)、CCV 値 (右)

本工事における CCV 値について、盛土全体 (1 層目~83 層目) における各層の平均結果を図-6 に、受注者の提案により実施した現場密度試験 (砂置換法) から得られる乾燥密度と CCV 値の関係を図-7 に、盛土全体の CCV 値の度数分布を図-8 に示す。なお、現場密度試験を実施した箇所の座標を押えておくことで、50 cm×50 cm 角のピンポイントで CCV 値との比較が可能となっている。また、(1) にて示した通り 59 層目から生石灰による土質改良を実施している。

図-6 にて、改良土は流用土と対比すると CCV 値の増加傾向を確認することができる。また、図-7 からは、土質改良実施前の CCV 値と乾燥密度のトレンドは同傾向にあることが分かる。ただし、図-6、図-7 のどちらに

おいても、59 層目から 65 層目までの間における CCV 値についてはこれらの傾向が見られない。この理由としては、58 層目までの改良前の地盤の影響を受けているとともに、土質改良の反応がピークに達していなかったと推定できる。図-8 からは、改良土は流用土と比較すると CCV 値 5~6 以上の割合が多くなると共に、CCV 値 7~8 以上の高い値の割合では流用土より、約 13%多くなっている。

これらの結果から乾燥傾向での施工時には、CCV 値は増加傾向にあると推定できる。

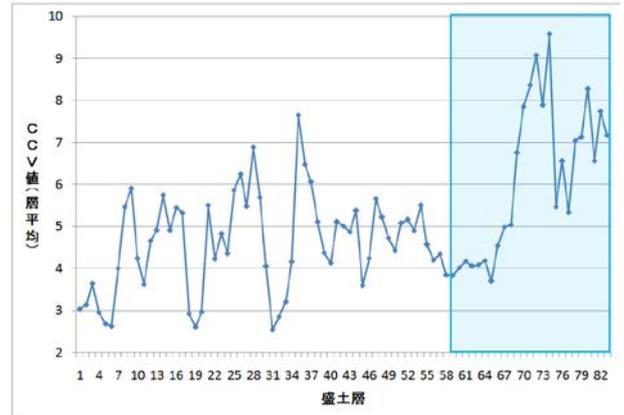


図-6 CCV 値 (各層平均)

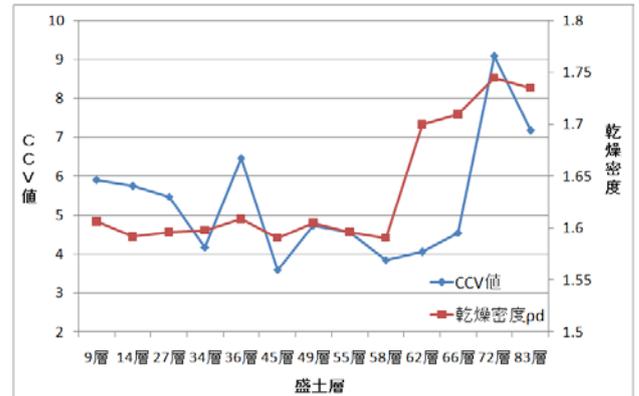


図-7 CCV 値と乾燥密度の比較

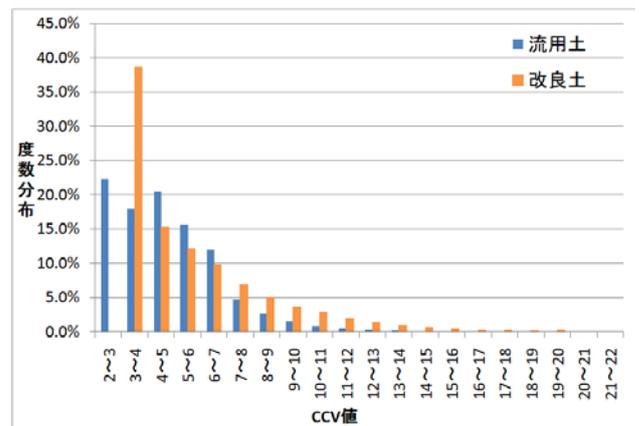


図-8 CCV 値の度数分布

また、現場密度試験（砂置換）にて得られた締固め度の結果を図-9に示す。改良前の結果は、転圧回数：4回、CCV値：2.3～8.4の管理基準において、現場密度試験による締固め度は93.1～95%となっており、盛土の所定締固め度92.0%を満たしていることを確認した。改良後の結果は、転圧回数：4回、CCV値：3以上の管理基準において、現場密度試験による締固め度は91.9～96.2%となっており、盛土の所定締固め度90.0%を満たしていることを確認した。

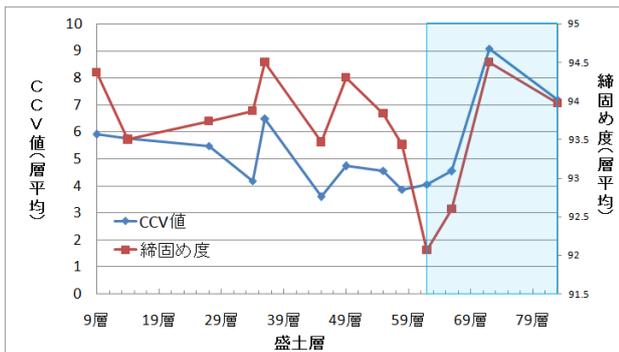


図-9 CCV値と締固め度

これらのことから、TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理と加速度応答システムを用いた盛土の締固め管理を併用した品質管理は有効であると言える。ただし、CCV値は、土の品質（粒度や含水比等）により値が大きく左右されるため、管理基準値の定め方をさらに検討していく必要がある。

5. ICT技術活用効果と今後の課題

(1) ICT技術活用効果

ICT技術を活用した工事の実績から以下の効果があると判断された。

○UAV測量を行うことで、法面での測量等危険な箇所での測量作業がなくなるため、作業の安全性向上等現地作業の負担を大幅に軽減できる。実働日数においても従来8日程度要するところを3日に短縮することができた。

○3次元設計データの作成により従来の平面図や縦断図等の2次元の図面に比べ、現地状況が理解しやすくなる。

○3次元出来形管理では、高精度の施工やデータ管理の簡略化、書類作成の負荷軽減ができる。また、発注者の出来形管理においても、従来現場にて出来形を確認していたものが施工管理データの数値チェック等で代替が可能となる。

○MC搭載ブルドーザを使用することで、従来実施していた丁張り設置・検測作業（本工事の施工規模であれば10日程度の実働日数）が不要となり、施工時間の短縮に繋がる。また、オペレーターによる丁張確認や状況の目視

確認が不要となり、施工時間がオペレーターの技能に左右されなくなる。さらに、均等な敷き均し厚さを確保できるため、締固め度のばらつきを防止し、盛土の高い品質確保が可能となる。

○位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラを使用することで、オペレーターが車載モニターにて締固め回数分布図リアルタイムで確認することができ、踏み忘れ等のヒューマンエラーが少なくなると共に、過転圧（オーバーコンパクション）の防止等も可能となる。また、従来の盛土工事の品質管理では、施工後に現場密度試験を行うことが一般的であり、試験結果を迅速に施工に反映することが難しかったが、位置情報取得システムを用いた品質管理基準と併せて加速度応答システムを用いた品質管理を行うことで、施工を行いながら締固め状況を計測できるため、迅速に施工に反映させることが可能となる²⁾。

(2) 今後の課題

ICT技術を活用した工事の実施において、以下の課題が確認あるいは懸念された。

○3次元測量では、UAVは鉛直方向を撮影するため、立木や草、岩の陰になる箇所は精度が低く、従来の測量以上の伐採作業が必要となる。

○3次元設計データ作成では、2次元データの数が少ないと3次元化するための時間がかかるため、作業時間短縮のためには予め図面等を揃えておくことが必要である。

○ICT施工で用いるブルドーザ、及び振動ローラ等の建設機械の位置情報を常時取得するシステムについては、施工箇所が山間部等の場合には、衛星からの電波が遮られ、必要衛星数を補足できない可能性がある。同様に、近傍に建物や法面がある場合においても、衛星からの電波が多重反射し、測位値に誤差を生じる可能性がある。

○位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラでは、材料（土）の状態によりCCV値に大きなばらつきが生じる。このため、CCV値の管理設定値を、単純に試験施工時に締固め度を満足した値で設定してしまうと、材料のばらつきによる影響を受ける都度対応が必要となる。特に上限値については、材料の状態が乾燥側にある場合はCCV値は高い傾向を示すことが推測されるため³⁾、試験施工時に含水比や粒度等のCCV値に影響を与える要因と組み合わせて管理値を設定することが重要となる。今後の展望としては、含水比や乾燥密度だけでなく粒度や透水係数等土の他の係数との比較を行い、管理値を設定することでさらに幅広い施工に適用していくことも可能であると考えられる。また、現在はリアルタイムで締固め状況を確認できるのはオペレーターのみとなっているが、今後転圧状況のデータをクラウドに転送し、監督員もリアルタイムで確認できるようなシステムを構築することでさらによりよい管理ができるものとする。

6. おわりに

今回報告した2件のICT技術を用いた工事についてはいずれの工事においても、受注者から従来の施工方法と比べ生産性が向上したと回答を得ており、発注者側からしても、確実な品質の確保、施工日数が短縮できるため工程管理のしやすさ等の観点から生産性が向上できている。課題についても、ICT技術のさらなる向上及び現場での対処等により改善していくことが出来るものと考え

る。
川上ダムにおいても生産性向上を図り、よりよい品質のダムをいち早く建設できるよう進めていきたい。

今回紹介したICT技術を用いた工事の成果と課題が今後実施されるICT活用工事を進める上での参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 高倉敏・北村佳則・大谷茂・黒台昌弘・西尾貴至,「盛土地盤における締固め品質管理手法の開発」,土木学会,土木建設技術シンポジウム論文集,2004,p183-188
- 2) 古屋弘「加速度応答法を用いた盛土のリアルタイム品質管理手法」,大林組研究所報 No.77 2013
- 3) 坂本博紀・坂井田輝・田中英晶・有馬慎一郎,「フィルダムコア盛立の新たな品質管理手法の検討」,平成29年度水資源機構技術研究発表会