

切盛土工における ICT/3次元データの利用とその効果

The Effect by Using ICT (Abbreviation of Information and Communication Technology) and 3-Dimensional Data in Excavation and Embankment

江本 浩樹*¹ 大畑 拓也*¹ 國富 和真*¹
 Hiroki Emoto Takuya Ohata Kazuma Kunitomi

要旨

2016年、国土交通省は i-Construction のトップランナー施策である「ICTの全面的な活用」を、土工を対象に先行してスタートさせた。さらに、2017年1月には産官学連携による i-Construction 推進コンソーシアムが設立され、建設現場の生産性向上を目指す動きが活発化してきた。高齢化による建設従事者不足の問題を抱える建設業界は、この取り組みに大きな期待を寄せており、当社も土工現場における ICT の活用を開始したところである。三浦市最終処分場建設工事では、仮設道路取付けにおいて UAV 空撮による起工測量や ICT 土工を適用した。岡野高架橋下部他工事では、切盛土工での施工計画や施工管理に 3次元測量結果や 3次元設計モデル等の 3次元データを有効活用した CIM を適用した。ここでは、これらの土工における i-Construction の取り組み内容とその効果について検証した結果を報告する。

キーワード：i-Construction ICT CIM 3次元データ UAV空撮

1. はじめに

CIM (Construction Information Modeling) とは、計画・調査・設計段階から 3次元モデルを導入し、その後の施工、維持管理の各段階においても 3次元モデルに連携・発展させ、あわせて事業全体にわたる関係者間で情報を共有することにより、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図るものと定義されている (図 1)。i-Construction は、こうした CIM や ICT (情報化施工技術) をあらゆるプロセスにおいて全面活用し、建設現場の生産性向上を図る取り組みである。

切盛土工現場の生産性向上・効率化を目的とした設計モデルおよび測量結果の 3次元データの活用方法の例を図 2 に示す。i-Construction では、掘削・敷均し・転圧機械にマシンガイダンス (MG) やマシンコントロール (MC) 機能をもたせた ICT 土工が 3次元設計モデルの主要な活用方法となっているが、UAV 空撮やレーザースキャナー (LS) を用いた地表面の 3次元測量データと 3次元設計モデルを組み合わせることで、次のような現場生産プロセスおよび項目での効率化が図れる。

- ・ 施工計画段階：土量算出や土量配分計画、地表面形状変化の面的把握など
- ・ 施工管理段階：出来高数量算出による工程管理、土量変化率把握による配分計画の見直しなど
- ・ 検査段階：道路面・法面の出来形把握、出来形帳票作成など

i-Construction の本格導入を見据えて、当社では三浦市

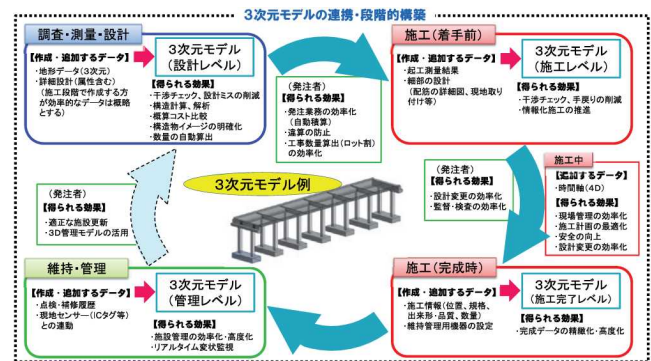


図 1 CIM の概要 (国土交通省ホームページ¹⁾ より引用)

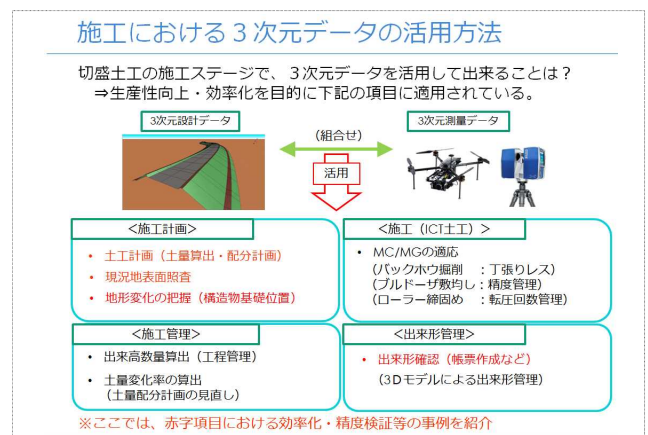


図 2 土工における 3次元データの活用方法 (大阪建設業協会講習会資料²⁾ より引用)

最終処分場建設工事、岡野高架橋下部他工事の土工においてバックホウ MC による ICT 土工や、3次元データを利用した CIM の試行などを行った。本稿では、ゼネコン各社にお

*1 技術統括本部 土木技術部

ける土工現場での CIM 適用の動向を述べるとともに、上記 2 現場での実施内容と実施による効果検証結果について報告する。

2. 土工における施工 CIM の動向

国土交通省は、2012 年に CIM の導入検討とモデル事業における試行を開始し、2014 年から施工 CIM へと展開している。日本建設業連合会はその流れを受けて、会員企業が試行した施工 CIM の適用効果や課題抽出等の成果を「施工 CIM 事例集³⁾⁴⁾」に取りまとめている。図 3 は 2015 年と 2016 年に発刊された事例集より、土工現場に適用された事例 20 件について、3 次元測量方法や 3 次元データの使用方法に関する件数を集計・分析した結果である。

図 3 より、抽出事例の約 70%の現場で(a)UAV か(b)LS による 3 次元測量が行われているのがわかる。また、3 次元データの使い方では、(d)土量把握、(e)出来高の確認、基礎面等の(h)形状確認・(i)問題把握等の施工計画・管理への利用があげられ、抽出事例の大半(80%)が協議資料として有効性があるとしている。土工の現場は比較的広範囲にわたるため、測量手間の軽減や地表面形状の早期確認(問題点把握)等に 3 次元データの活用メリットがあると考えられる。

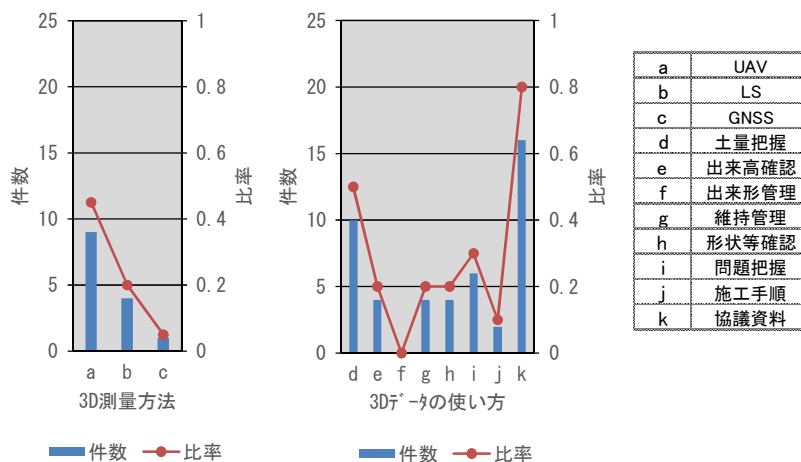
一方、今後の課題として、3 次元データを扱う人材の確保・教育の必要性、CIM を有効活用するためのハード・ソフトの環境整備の必要性などが挙げられている。

3. 最終処分場建設工事における取組み

3.1 工事概要および取組み内容

本工事は、横須賀市三浦市ごみ処理広域化基本計画に基づき、クローズド型の廃棄物処分場を建設する工事である。図 4 に完成予想図、表 1 に工事概要を示す。主な工事内容としては、仮設工事用道路と沈砂池を施工した後に、現況の谷状地形を掘削および盛土により造成し、廃棄物処分場となる貯留構造物を築造するものである。

仮設工事用道路や沈砂池については、背面の市道との干渉や所定の貯水量を満足するために、現況を考慮した計画が求められた。そこで、UAV による写真測量を実施して、現況地形を 3 次元で把握し、上記の仮設土工の計画に反映した。また、縦・横断測量結果と比較することで UAV による写真測量の精度を検証した。さらに、従来の断面による施工や出来形の管理ではなく、3 次元的施工かつ高精度



(a) 3次元測量の種類 (b) 3次元データの使用方法 (c) 記号凡例

図 3 土工における施工 CIM の動向



図 4 一般廃棄物最終処分場の完成予想図

表 1 工事概要

工事名称	三浦市一般廃棄物最終処分場建設工事
発注者	神奈川県三浦市
受注者	株式会社 鴻池組
工期	平成28年6月22日～平成32年2月28日
工事内容	敷地用地造成工 掘削工62,940m ³ 、盛土工61,200m ³ 地盤改良工 φ1800×480本(深層混合) 3,400m ² (浅層混合) 貯留構造物本体工 1式

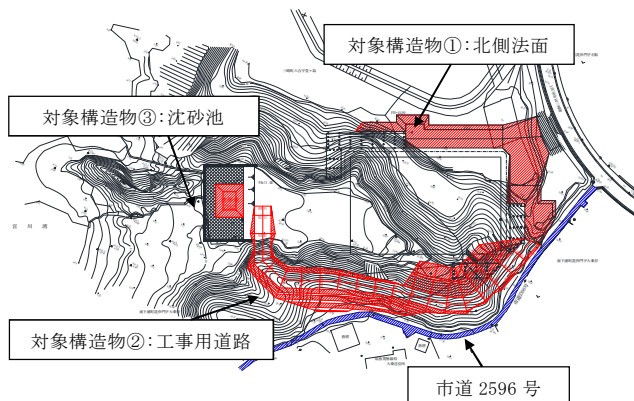


図 5 現場平面図および ICT 土工の対象構造物

管理の実現を目指し、バックホウ MC による ICT 土工を導入した。図 5 に ICT 土工の対象構造物を示す。

3.2 UAVによる起工測量結果の活用とその精度検証

3.2.1 起工測量の概要

現況地形を3次元で把握するために、起工測量でUAVによる3次元測量（以下、UAV測量）を実施した。実施計画においては、地上画素寸法やラップ率等をICTの全面的な活用に向けて平成28年4月に制定された基準類⁵⁾⁶⁾に準拠した。図6にUAVの飛行経路を、表2に測量実施条件を示す。

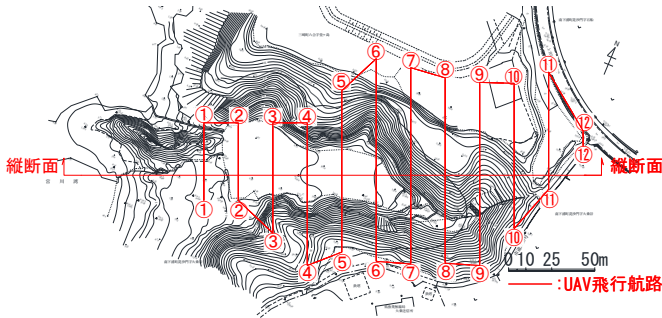


図6 飛行計画図

表2 実施条件

カメラ画素数	2470画素
飛行距離	1400m
地上画素寸法	14mm(規格20mm)
写真撮影枚数	279枚
オーバーラップ率	90%
サイドラップ率	60%

UAVはあらかじめ設定した飛行経路に沿って自動飛行しながら、搭載されたデジタルカメラによって航空写真を一定の時間間隔で撮影した。写真1に実施状況を示す。



(a) 使用機体 (b) 実施状況
写真1 UAV測量の実施状況

3.2.2 起工測量結果の活用（沈砂池の計画へ反映）

UAVにより撮影した航空写真からステレオマッチングの原理により、3次元の点群データを作成することができる。図7は当該現場のUAV測量の結果を処理して作成した3次元点群データに、仮設工事用道路や沈砂池といった仮設の切盛土工の3次元設計モデル(緑色)を重ねたものである。これらと比較することで仮設の切盛土工の位置や高さ等の計画に活用できる。ここでは、現況地形が当初の想定より

低かったため、沈砂池の貯水量が目標値より少なくなるのが予測できた。そこで、当初計画より沈砂池の掘削深さを50cm深くすることで、所定の貯水量を確保した。

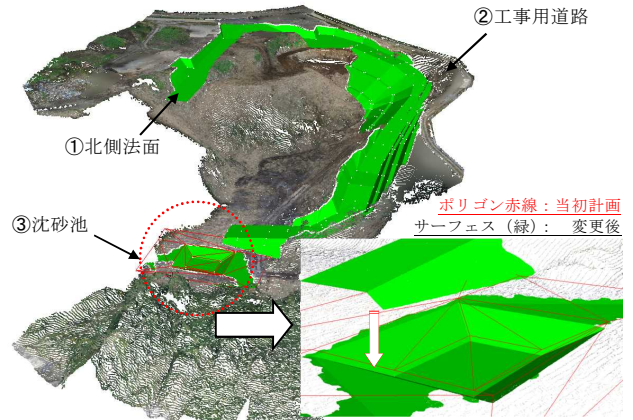


図7 点群データと3次元設計モデル

3.2.3 起工測量結果の精度検証

トータルステーション (TS) による現況地形の縦・横断測量を計17断面で実施して、3次元測量データとの比較検証を実施した。図8は、図6の縦断面位置でのTSとUAVによる地表面形状の比較結果である。また、TSによる地表面高さに対するUAV測量結果の誤差頻度を整理した結果を図9に示す。ここでは、それぞれの測量結果による地表面

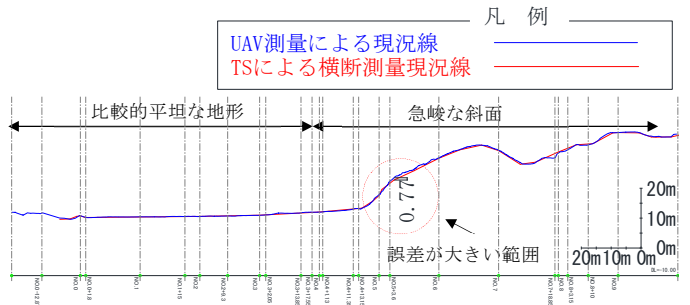


図8 UAVとTSによる成果の比較

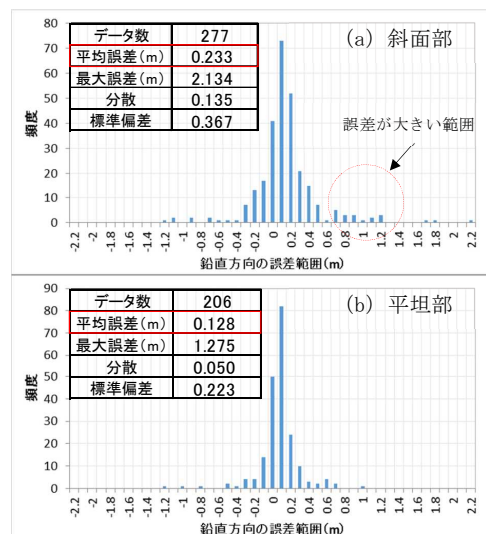


図9 鉛直誤差の分布

形状の違いを見るために、平坦部と斜面部で誤差を分析した。誤差のピーク頻度は0~0.1mにあり、平坦部より斜面部で誤差が大きくなる結果となった(図9)。特に斜面部の凹凸面では、誤差が0.77mと大きくなる傾向が確認できた(図8)。この原因は、写真から点群データを生成する現状のステレオマッチングによる方法では、変曲点の抽出精度が低いためであると考えられる。

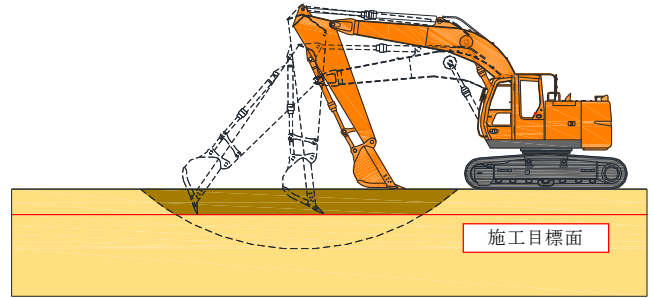


図10 マシンコントロールの概要

3.3 ICT 土工による情報化施工と施工進捗の可視化

3.3.1 ICT 土工の概要

図5に示す①北側法面、②工事用道路、③沈砂池の掘削工を対象にマシンコントロール(MC)によるICT土工を実施した。この技術は、油圧ショベルの位置と切土法面の3次元設計モデルを利用して、目標の施工面を自動認識し、機械側の油圧制御システムとの連動で深掘りを防ぐことができる。図10にMCの概要を、写真2に施工状況を示す。この技術を活用することで、丁張りが不要となり、施工の効率化が期待できる。



写真2 ICT 建機による施工状況

3.3.2 施工進捗の可視化

バックホウに搭載したGPSによる位置情報を活用して施工状況の確認や進捗管理ができるVisionLink®(Trimble社製)を導入した。このサービスは、随時バケットの位置と3次元設計モデルをクラウド上で比較して施工範囲や出来形の過不足をリアルタイムに表示するシステムで、インターネットで確認できる。図11は施工進捗の状況を可視化したものである。地図上で着色している部分が対象期間の施工範囲で、コンター色の違いにより設計に対する出来形の過不足を確認でき、施工計画の検討や打合せ資料として活用できる。また、このシステムはバケット位置による施工面データと地表面形状を示す起工測量データとの差分から、リアルタイムに施工土量の算出が可能である。一例として、2017年2月末時点で算出した土量を表3に示す。

表3 VisionLink®による算出土量
(2017年2月末現在)

施工面積(m ²)	8,786
切土土量(m ³)	19,209
盛土土量(m ³)	3,355
余剰土量(m ³)	15,854

今後、UAVおよびTSによる出来形測量を実施し、このシステムによる出来形や土工数量の精度の検証を行う予定である。また、その検証結果に基づき当該システムの効果的な利用方法について検討を行う所存である。

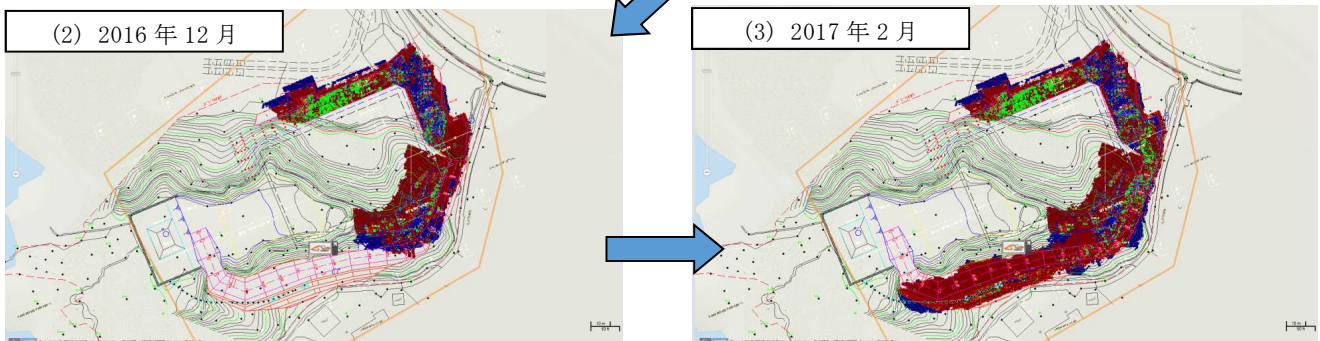


図11 施工進捗の可視化

4. 道路新設工事における取組み

4.1 工事概要および取組み内容

本工事は、切盛土工を主体とする道路新設工事である。起点側に切土箇所が、終点側に盛土箇所があり、盛土材に工区内の発生土を利用する計画である。工事概要を表4に、工区平面図を図12に示す。

終点側切土部における工事着手時の現況地形を図13に示す。図13左側の横断面図に示すように、当該工事は各箇所ともに施工途中からの着手となることが特徴である。そのため、先行する別途工事の工事用道路や構造物掘削等によって当初の設計図面にない地形変化がみられ、施工土量の早期把握が土工計画・工程管理の上で重要であった。

そこで、土工における i-Construction および CIM の試行として、3次元データ活用による計画・管理を実施した。

- ・ 起工測量の3次元データを用いた土工計画
- ・ 起工測量の3次元データによる地表面形状の照査
- ・ 出来形測量の3次元データによる出来形管理の試行

表4 工事概要

工事名称	紀北西道路岡野高架橋下部他工事
発注者	国土交通省 近畿地方整備局
受注者	株式会社 鴻池組
工期	平成28年5月17日～平成29年3月15日
工事内容	工事延長 L=844m 橋梁下部工 鉄筋コンクリート橋台工 4基 道路土工 掘削工56,000m ³ 、盛土工47,000m ³ 法面工(植生工) 12,270m ² 法面工(鉄筋挿入工) 1,084本 橋梁上部工 橋梁付属物工 1式

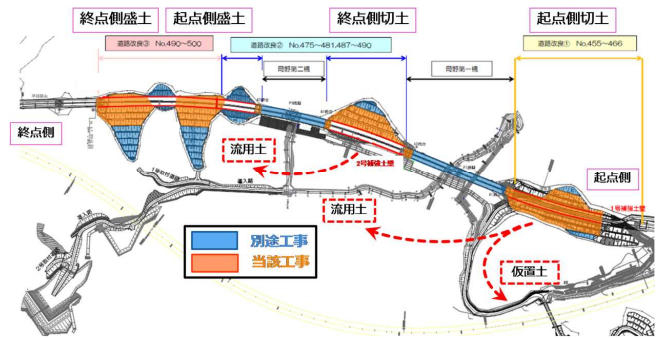


図12 工区平面図

4.2 起工測量の3次元データを用いた土工計画

土工計画における概算土量の算出には、UAVによる3次元測量(以下、UAV測量)のデータを用いた。着手時には先行工事が残っている状況(図13)であり、従来の測量が不可能な状態であったが、UAV測量の結果、先行工事に支障なく3次元データの取得が可能となった。

また、当該工事では、先行工事の完了後にレーザースキャナーによる3次元測量(以下、LS測量)を実施し、UAV測量による土量算出の精度確認や作業効率の確認に用いた。

4.2.1 3次元データを用いた土量算出方法

UAV測量では、搭載デジタルカメラによる航空写真からステレオマッチングの原理を用いて3次元点群データを求める。一方、LS測量の場合は、照射レーザーパルスの反射時間より距離を算出して3次元点群データを求めている。3次元測量の点群データ(図14左上)と3次元設計モデル(図14左下)を重ね合わせることで、その体積差分から掘削および盛土の土量が算出できる(図14右)。

当該工事で使用したUAV測量とLS測量の使用機器および使用ソフトを表5に示す。

4.2.2 測量条件に関する留意点

ICTの全面的な活用に向けて平成28年4月に導入された基準類^{5)~7)}に準拠して測量の条件を設定することとした。UAV測量に関する基準では地上画素寸法の規定(起工:2cm、出来形:1cm)がある。当該工事に適用すると起工測量時には高度80mで、出来形測量時には高度40mでの飛行を行う必要があった。しかしながら、工事範囲の境界には樹木が

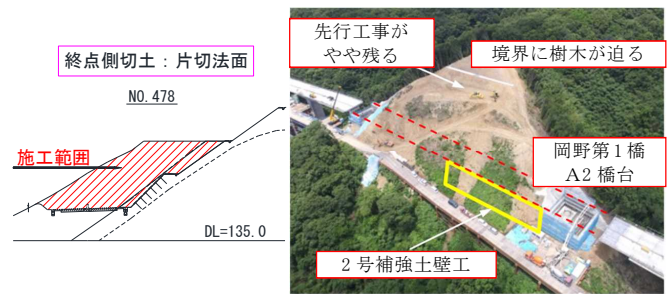


図13 工事着手時の現況地形(例:終点側切土)

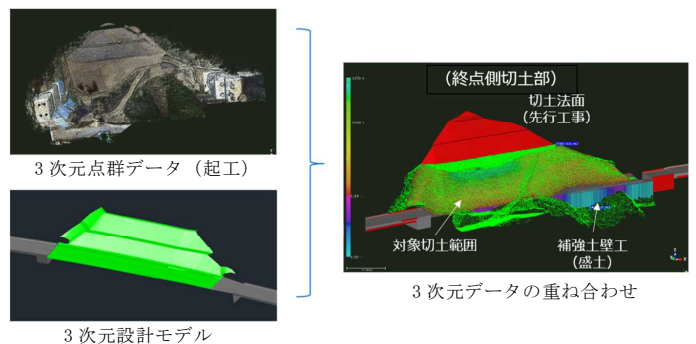


図14 3次元データによる土量算出方法(模式図)

表5 使用機器・ソフト

	使用機器		使用ソフト	
	UAV測量	機体	enRoute Zion QC-730	写真解析
	カメラ	Sony α6000	点群処理	ISP LandForms
LS測量	機材	FARO Focus3D X330	点群処理	Trimble Real Works

生い茂り（写真3）、工区終点側の盛土部近傍には鉄塔や送電線があった（写真4）ため、規定からやや外れるが、これらの障害物を避けるため60～100mの高度で空撮を実施することにした。

LS測量は測定距離が離れるほど測量精度が低下するが、測定距離に関する規定は特にはない。当該工事では、点群処理ソフトで標定点の認識が可能な測定距離50mを限度としてレーザースキャナー（LS）の盛替えを行った。

4.2.3 切盛土量の比較結果

3次元測量データを用いた土量比較の結果を表6に示す。この結果は、LS測量による算出土量を基準に、UAV測量による土量を比率で示したものである。

先行工事の残工事が少ない起点側切土部では、両測量の誤差は1%と小さい。一方、終点側切土部では、UAV測量時には先行工事の切土が2.5m残っており、このことが誤差の要因と考えられる。起点・終点側盛土部では、先行工事が少し残っていたが、全体の土量が多いことから比率による誤差は1.7%程度と小さく算定されている。また、後述するが、UAV測量では残存する草木表面を地表面として認識するため、終点側切土部にある2号補強土壁盛土部の土量誤差は、LS測量の土量に対して少なく計上された。

UAV測量による土量算出の結果は、LS測量と比較して遜色ない結果となった。よって、概算土量を把握する上では、十分実用的な測量方法であることが分かった。

表6 算出土量の比較結果

位置	測量方法	UAV	LS
起点側切土		1.010	1
終点側切土		1.141	1
2号補強土壁盛土		0.905	1
起点・終点側盛土		1.017	1

4.2.4 測量等の作業効率

測量からデータ処理・作成にかかる実施時間および人工数を整理して表7に示す。UAV測量は当該工事着手時に実施した工程を示しており、LS測量は先行工事完了後に開始した工程を示している。さらに、TSによる従来測量の工程も見積もり条件に基づいて併記した。

UAV測量は測量時間が極めて短く、データ処理までを考えると、LS測量に対し半分程度の時間・人工数で実施できている。一方、LS測量は、当該工事の現場条件では盛替えが多くなり、測量時間が多くなるとともに、データ処理にも時間がかかるため、従来測量と比較して工程的なメリットは少ない結果となった。

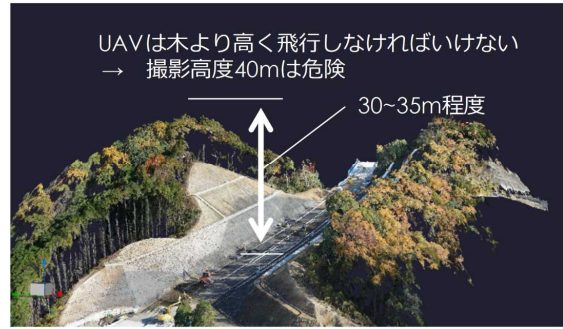


写真3 工区境界部の樹木の状況（起点側切土部）



写真4 鉄塔・送電線の状況（盛土部付近）

表7 測量からデータ処理・作成までの期間

測量手法	7月												8月						実施時間	必要人工						
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			1	2	3	4	5	6
UAV	基準点測量 現地測量																								基準点測量 3人1日 現地測量 3人3日 データ作成 1人4日 計6日	9
LS																									基準点測量+ 現地測量 4人3日 データ作成 1人8日 計11日	20
TS																									基準点測量 3人2日 現地測量 2人3日 データ作成 1人6日 計11日	18
備考	← 先行工事(残)																									
													← 概算土量算出は2週間ほど早かった													

UAV測量は先行工事の残作業に支障することなく実施でき、実用的な精度で手待ち時間なく効率的に作業を進められることがわかった。また、従来の手法では人の立入りが難しい急峻な地形も容易に測量できるメリットがあり、作業効率や生産性の向上に繋がる手法である。

4.3 起工測量の3次元データによる地表面形状の照査

終点側切土部の起工測量による状況を図15に示す。岡野第一橋A2橋台の背面に2号補強土壁（図中の黄色枠）があり、谷地形や構造物掘削等の極端な凹地形が認められた。ここでは、起工測量の3次元測量データを利用して補強土壁計画位置の地表面形状の照査を行った事例を紹介する。

4.3.1 地表面変化の可視化と壁面形状の照査

設計地表面の3次元データと起工測量時の現況地表面の

3次元データを重ね合わせて差分を求めることで、地表面形状の変化の程度が確認できる。図16はヒートマップを用いて両者の地表面データの高低差分布を可視化したものである。なお、本事例での現況地形の3次元データにはLS測量による点群データを使用した。

図16の青色の範囲は現況地表面が設計地表面より低い箇所を示し、黄色の範囲は高い箇所を示している。当該箇所の現況地表面は設計の地表面より2~5m低い箇所があり、補強土壁の形状変化への対応が必要であると即時に判断できる。

図17は地表面上に現れる補強土壁面を3次元モデルで示したものである。緑色表示面は当初設計に基づいた施工壁面、ピンク色表示面は3次元測量データに基づく現況地表面に合わせた施工壁面の形状を示している。この図によると、ピンク色が見える範囲(No.475付近、No.476~477間)の補強土壁面の形状変更が必要であることがわかる。

当該工事では、3次元データを基礎地盤高さなどの地表面形状の照査や協議資料に用いることで、補強土壁工の形状・構造変更の検討を短期間、かつスムーズに行うことができた。

4.3.2 2次元断面での地形照査の問題点

壁面位置および設計断面位置における地表面形状を図18に示す。図中の緑色線が当初設計の地表面を、赤色線がLS測量による現況地表面を表している。

従来は、設計断面(測点)での横断測量より地形照査を行っていた。当該箇所において従来手法で地形照査を行うと、図18の横断図にあるように、No.476やNo.477付近では地形変化なしと認識されてしまう。しかしながら、3次元データを用いることで、従来手法では確認できない設計断面間の地形の違いを早い段階で確認できることがわかる。

このような施工計画に適用できる3次元データは、対策検討の早期着手や工程遅延の原因排除を可能にし、建設現場の生産性向上のためのツールとして有効である。

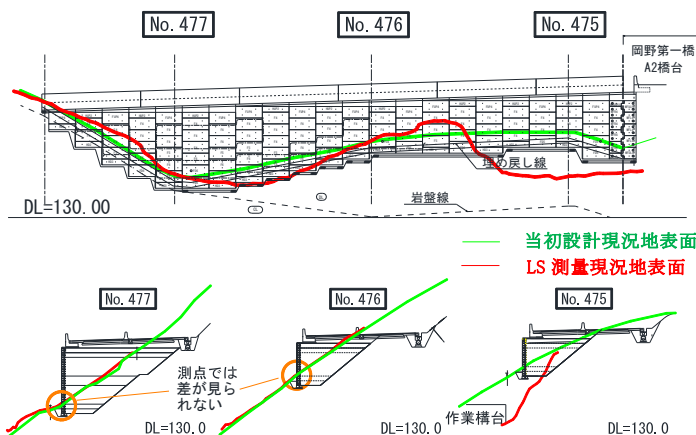


図18 地表面形状の比較(設計&3次元測量)

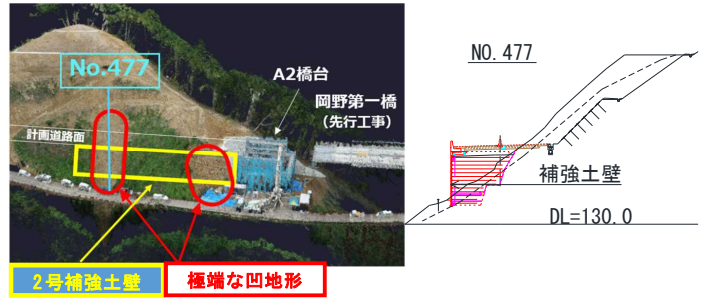


図15 2号補強土壁の周辺状況および計画断面

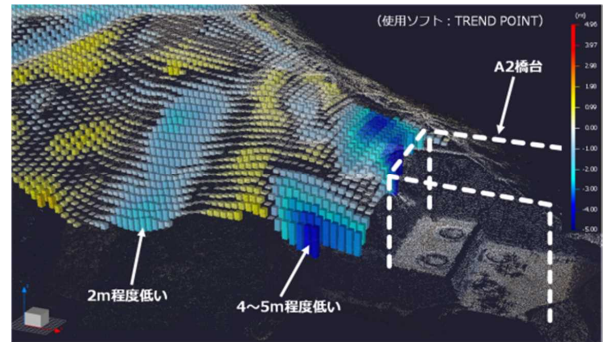


図16 設計地表面と現況地表面の高低差の視覚化

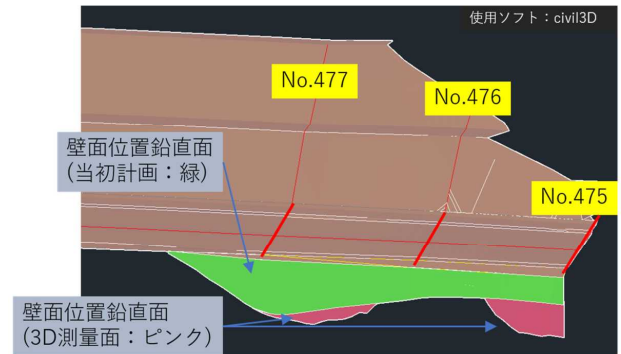


図17 補強土壁の壁面モデル比較

4.3.3 UAV測量における留意点

図19は、壁面位置での地表面形状を示し、青線は起工測量のUAV測量による3次元データに、赤線はLS測量による3次元データに、それぞれ基づいている。

UAVとLSの3次元測量による地表面形状は概ね一致しているが、No.476付近では最大1.2mもの誤差が生じている。この範囲には草木が残っており(図15)、UAV測量による3次元データは、この草木の表面を地表面と誤認した結果で

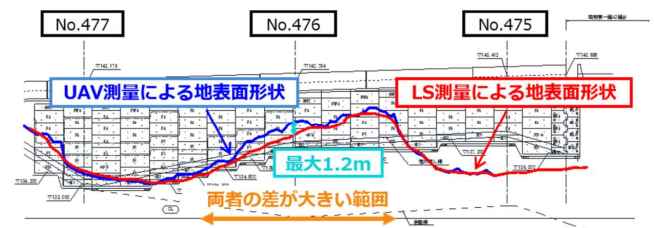


図19 地表面形状の比較(UAV&LS)

あると考えられる。したがって、UAV による地表面の測量精度を確保するには、伐採や草木の除去を確実にしておく必要がある。なお、LS 測量の場合は一部地盤面に到達するレーザーが存在するため、この程度の草木であれば地表面を精度良く測定できる。

4.4 出来形測量の3次元データによる出来形管理の試行

新基準⁶⁾に準じてUAV測量による出来形測量を試行した。当該工事ではICT土工は採用していないため、効率化の確認と問題点の把握が主な目的である。なお、UAV測量は施工完了直前に行ったため、ごく一部で残施工箇所がある。

4.4.1 出来形計測結果

出来形計測結果の一例として、起点側切土部の出来形の合否判定結果を図20に示す。対象範囲の3次元データを利用することで、平場と法面に区分して合否判定および帳票作成ができるため、従来作業と比べて効率化が図れる。

当該工事では従来の法丁張りによる掘削であったが、3次元データによる出来形合否判定においては、標高較差の平均値は規格値を満足した。また、各点の判定結果も平場で約97%、法面で約95%が規格値内という結果であった。しかしながら、図20の黒色で示される箇所(赤色破線の丸枠)において規格値外の値で不合格となる異常値を検出した。

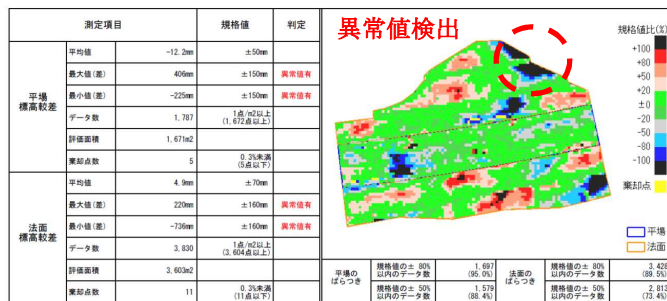


図20 3次元データによる出来形合否判定結果

4.4.2 異常値検出の原因と対応

図21は、異常値検出箇所の3次元設計モデルと3次元出来形データを重ね合わせたものである。3次元設計モデルはほぼ直線的な法面形状であるのに対し、3次元点群データは現地形に合わせたラウンディングが施されている。今回検出された異常値は、この現場合わせのラウンディング施工に起因していると考えられる。

ICT土工を適用する場合は、3次元設計モデルに基づく施工が行われるため異常値は発生しにくいと考えられるが、ラウンディングのような現地合わせの施工を行うと、出来形測量データと設計モデルが一致しない。また、事前にラウンディング形状を3次元設計モデルに反映させることは可能であるが、モデル作成に手間がかかり効率化に相反す

る作業になると考えられる。こうした問題への対応は、しばらくは発注者との協議を重ねて解決することになるであろう。

さらには、異常値発生リスクや植生の部分生育の可能性がある長大切土法面の出来形検査方法、小段シールコンやブロック積み擁壁部の土工部の出来形検査方法など、生産性向上と品質確保を両立させるための出来形管理手法についての細部におよぶルール作りが必要になると考えられる。



図21 異常値検出の原因(端部ラウンディング部)

5. おわりに

ICT 土工や施工計画・管理への3次元データの活用は、建設生産プロセスを変化させ、生産性向上・効率化の実現、さらには建設業の魅力の構築に不可欠な技術となり得ると思われる。また、3次元データの活用方法や活用する場合は今後益々増えると想定されている。本報告で紹介したような適用事例を今後も積み重ねていき、現場技術者が是非使いたいと思う3次元データの活用方法の立案やシステム構築の実現を目指し、開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP：例えば、http://www.jacic.or.jp/books/jacic.joho/jac114/p_2.pdf
- 2) 一般社団法人大阪建設業協会土木委員会：土木工事における「i-Construction」の取組み及び施工の創意・工夫・改善事例講習会資料、2017.2
- 3) 一般社団法人日本建設業連合会：2015 施工 CIM 事例集
- 4) 一般社団法人日本建設業連合会：2016 施工 CIM 事例集
- 5) 国土交通省：UAV を用いた公共測量マニュアル(案)、2016.3
- 6) 国土交通省：空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)、2016.3
- 7) 国土交通省：レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)、2016.3