

ICT 浚渫工（河川）の 施工管理基準策定の検討

国土交通省 近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 調査課 専門官 やまぐち あつひさ 山口 敦久

1. はじめに

国土交通省が推進する i-Construction のトップランナー施策である「ICT の全面的活用」については、3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT 建設機械による施工、3次元出来形管理及び3次元データでの納品を行うものであり、2016年度より ICT 土工として取り組みを開始し、2017年度には ICT 舗装工及び ICT 浚渫工（港湾）が開始されている。

このような状況のもと、MG バックホウ（MG は Machine Guidance の略）による河川浚渫も進められており、3次元設計データを利用して行われるため、工程全体での効率化も期待できることから、2018年度には新たに「ICT 浚渫工（河川）」として取り組みを始めている。

MG バックホウ等の ICT 建設機械による施工では、丁張の削減や作業効率の向上等、さまざまな導入効果のほか、ICT 建設機械の作業装置における施工中の軌跡（以下、「施工履歴データ」という）を記録することで、この軌跡データを出来形管理に活用することにより、出来形管理作業の大幅な効率化・省力化が期待できる。特に施工中や施工後の降雨に伴う河川の水位増加等により、常にあるいは一時的に水面下に没する河床部

分の掘削や浚渫工における水底の掘削では、地上型レーザースキャナー（以下、「TLS」という。TLS は Terrestrial Laser Scanning の略）や UAV（UAV は Unmanned Aerial Vehicle の略）等の既存の出来形計測技術による出来形計測が困難であるが、施工履歴データを活用した出来形管理手法を用いることにより、作業効率が飛躍的に向上する。

そこで、河川浚渫における MG バックホウを使用したバックホウ浚渫船による施工履歴データでの出来形管理の適用を目指し、実現場等での施工履歴データを用いた面的な出来形管理に対応した精度管理手法や規格値案を検討した。

2. 施工履歴データの計測機器としての精度検証

図-1 に施工履歴データの精度検証のイメージを示す。施工履歴データを出来形計測に使用するには、施工履歴の計測機器の精度検証を実施する必要がある。これは過年度のバックホウ浚渫船現場における現場実態調査の結果において、施工履歴データを用いた出来形管理結果が、トータルステーション（以下、「TS」という）やレッド測深による測定結果と比較したところ、40 cm 程度の差異が見られたためである。この要因として、実際の施工形状と施工履歴データによる出来形形状

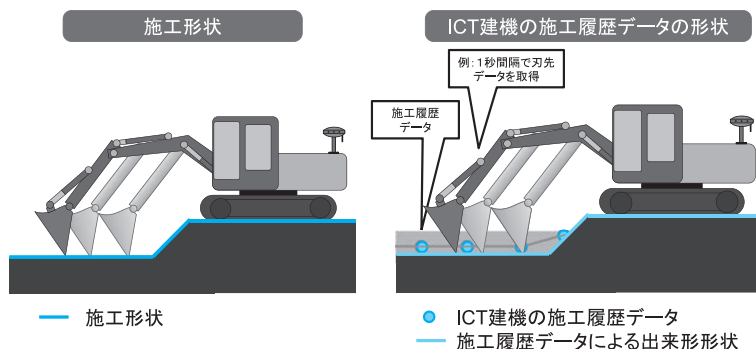


図-1 施工履歴データの精度検証イメージ

の違いが発生することが考えられ、連続的に取得される施工履歴データの取得間隔が疎であるため、実際の出来形と記録点間をつないだラインが適合しないことが原因であると考えられた。そのため、施工履歴データから求められる出来形計測結果が実際の出来形形状に適合するために必要なデータ取得頻度や、計測前のICT建設機械の精度管理方法とその管理値について、真値（TSで計測された刃先の軌跡）と施工履歴データで比較検証を行うため、まず最初に施工履歴データの計測機器における精度検証を行った。

精度検証を行う項目は、MGバックホウによる静止状態での計測精度の検証（静的計測）、動作状態での計測精度の検証（動的計測）と実施工を想定した整形後の出来形と軌跡データの比較検証とした。なお、実現場での精度検証は、誤差の原因が現場条件に起因するものか、ICT建設機械自体に起因するものかどうか判別しにくいことから、精度検証実験をテストヤードにおいて実施した。

(1) 静止状態での計測精度の検証及び結果（静的計測）

① 検証内容

図-2に静止状態での計測精度検証内容を示す。MGバックホウのブーム・アームを最も開いた状態から、最も抱えた状態になるまで、10点の異なる位置でバケットの刃先を静止させ、各静止点で施工履歴データとTSで計測する刃先の3次元座標を記録し、両者の差を確認することにより施工履歴データの静止観測時の精度を評価した。

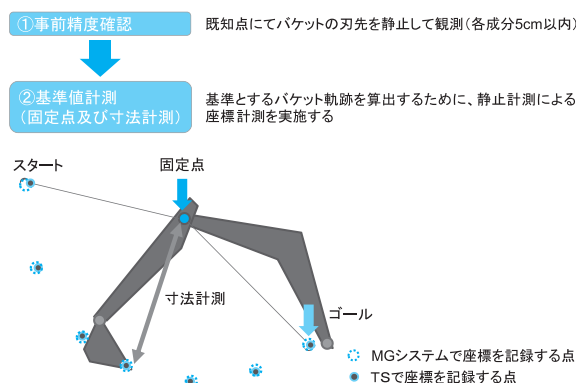


図-2 静止状態での計測精度検証内容

② 検証結果

図-3に静止状態での計測精度の検証結果を示す。静止状態で計測した施工履歴データとTSで計測した真値との距離誤差は、最大で50mmであった。また、距離誤差の標準偏差は 3σ で33.6mmであり、ICT土工の出来形管理に適用できる精度の目安（ $3\sigma < 50\text{mm}$ ）¹⁾を満足する結果であるが、x、y座標のバラツキが大きい。

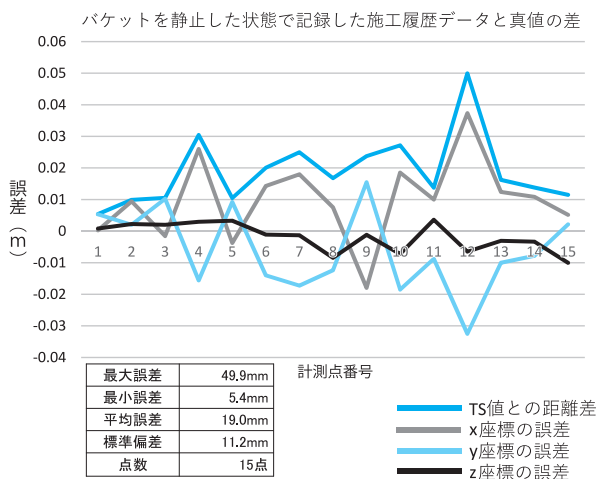


図-3 静止状態での計測精度の検証結果

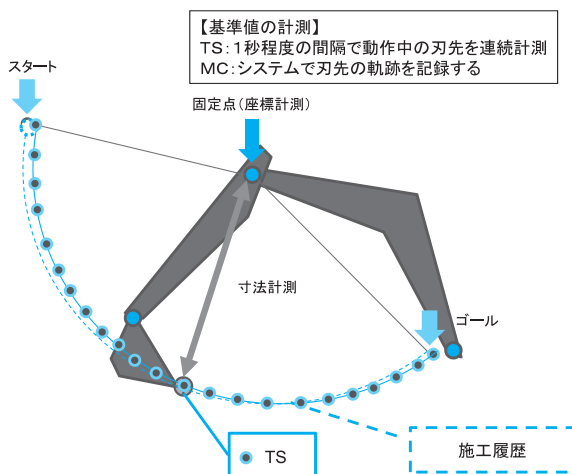
この検証結果から、施工履歴データを用いた出来形管理に記載する精度管理方法として、以下の2点を記載する必要があると考えられた。

- ・河床掘削の施工を行う日の始業時に、ICTバックホウの刃先の位置をTSで計測し、計測される刃先の位置座標との差異から計測精度を確認することを施工者に課す必要がある。
- ・計測精度の管理値は、x、y、zの各成分について $\pm 50 \text{ mm}$ とする。

(2) 動作状態での計測精度の検証及び結果（動的計測）

① 検証内容

図－4に動作状態での計測精度検証内容を示す。バケット静止状態での精度確認により、 3σ

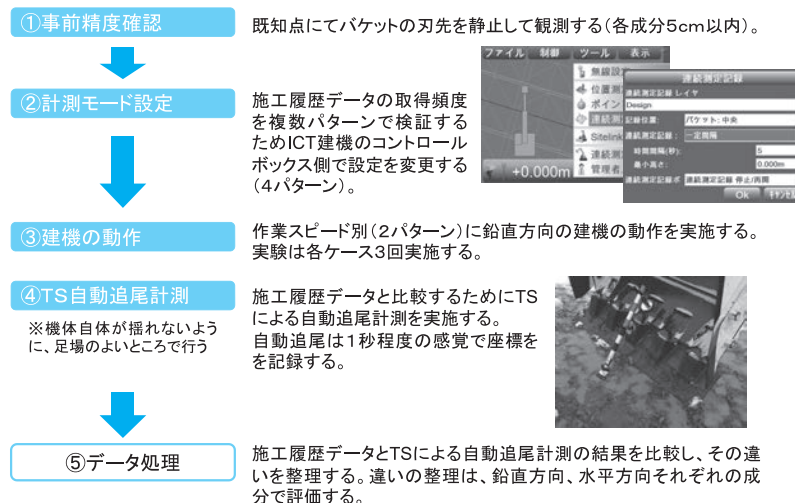


図－4 動作状態での計測精度検証内容

で50 mm程度以下の精度を有することが確認されたが、実現場において出来形管理に用いることを想定しているのは、施工中（バケット動作中）に記録される刃先の位置精度であるため、MGバックホウのバケット動作中の精度をTSの自動追尾計測（以下、「自動追尾TS」という）との比較により検証した。

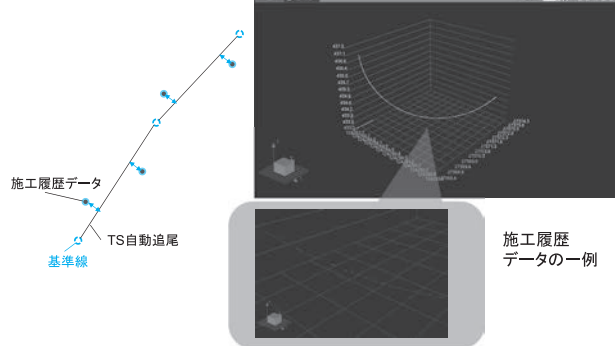
② 実験手順

図－5に実験手順を示す。実験は既知点にてバケットの刃先を静止観測し、x、y、zの各成分の誤差が5 cm以内であることを確認した後、掘削を模した動きでバケットを動作させ、施工履歴データと刃先の自動追尾TSを実施した。実験ケースでは、動作中の施工履歴データの記録頻度を1秒毎、2秒毎、10 cm毎、50 cm毎の4パターンに変化させるとともに、各パターンについてバケット移動速度を高速と低速の2パターンを組み合わせた計8ケースで各ケース3回実施した。自動追尾TSによる刃先の位置計測の頻度は、全てのケースで1秒毎に設定した。なお、高速とはMGバックホウによる整形ではない掘削作業を想定したバケット動作速度であり、低速とはバックホウによる河床の整形作業を想定したバケット動作速度である。実際の施工では、高速、低速の区別なく施工履歴データが記録されるので、高速でも所要の精度を満足させる必要があるため、実験ケースに設定した。



図－5 実験手順

データ処理は、TS自動追尾の軌跡(3次元線データ)と施工履歴データ(点データ)を比較し、その距離を計測精度として評価する。



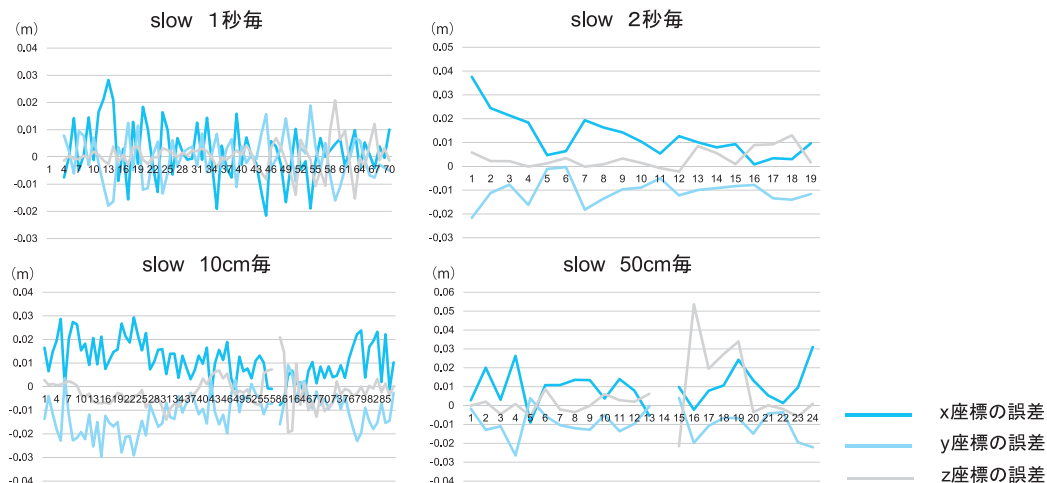
図－6 データ処理手順

図－6 にパターン別の施工履歴データ結果と自動追尾 TS 結果によるデータ処理手順を示す。精度の評価は、自動追尾 TS で計測した刃先の位置座標(1秒毎に計測)を直線で結び、このライン(基準線と呼ぶ)に対する施工履歴データの離れ距離を計測精度として評価した。

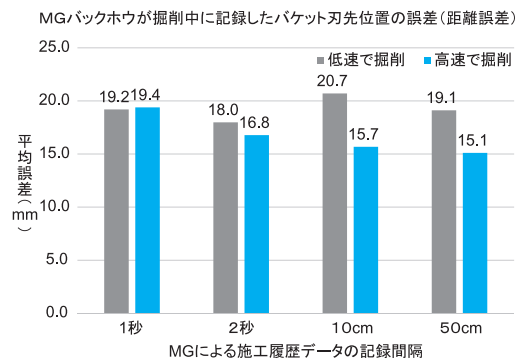
③ 検証結果

図－7 に動作状態での計測精度の検証結果を示す。MG バックホウのバケットを動作させている途中の施工履歴データの x, y, z 座標と、同時に自動追尾 TS で計測した刃先の位置座標との比較を行い、x, y, z の各成分についての差を算出した結果、以下のことが分かった。

- ・ 施工履歴データの誤差は z 座標で最大でも約 50 mm 程度の誤差で収まっている。
- ・ 出来形管理で最も重要視される z 座標について



図－7 動作状態での計測精度検証結果



図－8 バケット刃先位置の誤差結果

は、全体的な傾向としては x, y 成分と比較して誤差が小さい傾向があるため、施工前の精度確認試験により、x, y, z 各成分の誤差が 50 mm 以内であることを確認しておけば、z 成分の精度を十分担保できることが分かった。

図－8 に高速及び低速でのバケット刃先位置の誤差結果を示す。バケット動作中の施工履歴データと自動追尾 TS で計測した真値とを 50 点比較した結果、施工履歴データと自動追尾 TS との誤差(距離誤差)は施工履歴データの記録頻度やバケット動作の速度によらずほぼ一定で、15～20 mm 程度であった。よって、動的な計測精度はデータの取得頻度の影響を受けにくいと考えられたため、精度担保の観点からは、取得頻度についての規定は不要と考えられた。

(3) 整形後の出来形と軌跡データの比較

① 検証内容

図－9 に MG バックホウによる整形後の出来形と軌跡データの比較を示す。施工履歴データの取得間隔の違いによる計測精度の変化を確認するために、作業パターン別の比較検証を実施した。

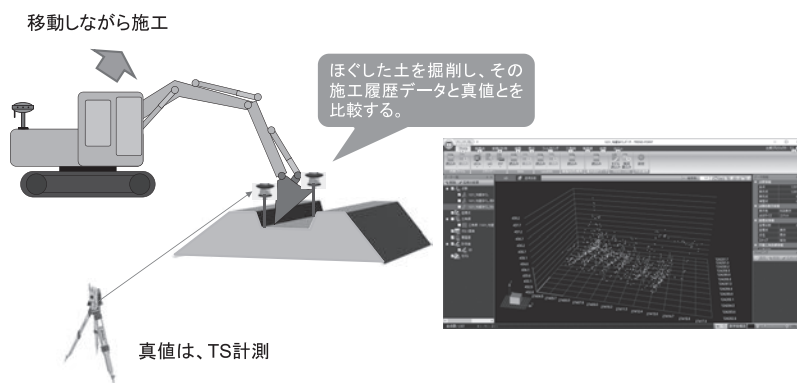
この検証は、施工履歴データと実際に整形を行った地盤の出来形との比較である点で、前述した(2)の検証とは異なっており、実現場における施工履歴データを用いた出来形管理を想定した精度検証実験となっている。なお、実験手順は基本的に(2)②と同じ手順で行っているが、建設機械の動作は低速パターンのみで行った。

② 計測密度についての検証結果

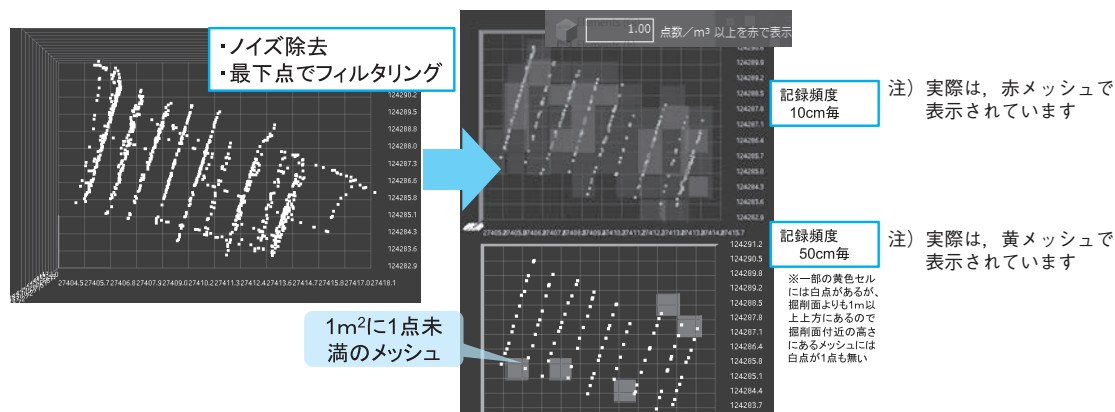
図－10 に計測点群密度の検証結果を示す。施工履歴データは、TLS、UAV 写真と比較して計測点数が大幅に少なく、出来形評価を行う $1\text{m} \times 1\text{m}$ メッシュの個数に対して点が不足しやすい傾向が見られる。面的出来形管理には少なくとも 1m^2

に 1 点以上の点群密度が必要であるが、10 cm 刃先が移動する度に 1 点の頻度で施工履歴データを記録する設定で整形作業を行った場合、施工範囲全面で 1m^2 に 1 点以上の割合で点が記録されているものの（図－10 の赤メッシュが該当）、50 cm 毎に施工履歴データを記録した場合、1 点も記録されていないメッシュ（図－10 の黄メッシュ）が見られた。

以上の結果より、施工履歴データの記録頻度について、計測精度の観点からは規定を設ける必要はないが、出来形評価に最低限必要となる点群密度を担保する観点からは、10 cm に 1 点以上の計測頻度に設定するよう規定を設ける必要があることがわかった。ただし現時点では、MG バックホウの ICT 建設機械メーカーによって計測頻度の設定方法が異なり、一定距離毎や一定時間毎、あるメッシュサイズ毎に 1 点代表点を記録する等、さまざまな方式があることから、計測頻度に関する管理値を一義的に要領に記載することが困難である。そこで、要領には「 $1\text{m} \times 1\text{m}$ メッシュに



図－9 整形後の出来形と軌跡データの比較イメージ

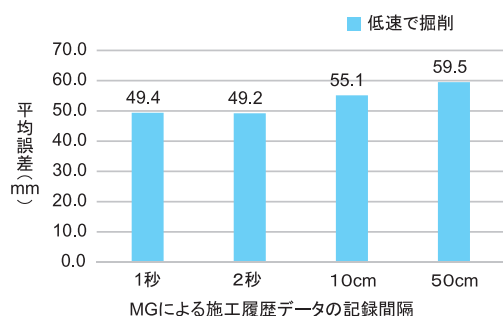


図－10 計測点群密度の検証結果

1 点以上有効な施工履歴データを記録すること」という規定を設けることが適切であると考えられた。

③ 計測精度についての検証結果

図－11 及び表－1 に、MG バックホウで掘削中に記録した低速モードにおけるバケット刃先位置と出来形の差の平均及び偏差を示す。施工履歴データと出来形との平均誤差（距離誤差）は、施工履歴データの記録頻度によらずほぼ一定であり、50～60 mm 程度であった。また、データのバラツキは、4 ケースの平均で $\sigma \div 22.71$ mm, $3\sigma \div 68.13 \div 70$ mm であった。平均誤差（50～60 mm 程度）は、実験時刻での衛星配置等が原因の誤差であると考えられるため、GNSS 衛星の配置などに偏りがない条件における実際の平均誤差は、GNSS の公称精度 ± 30 mm 程度になると考えられる。以上の誤差の傾向を踏まえた結果、計測精度全体としては、施工履歴データと TS 計測との差が ± 100 mm 程度になることがわかった。



図－11 バケット刃先位置と出来形との差

表－1 バケット刃先位置と出来形との平均及び偏差

		施工履歴記録間隔			
		1 秒	2 秒	10 cm	50 cm
低速で掘削	平均 (mm)	49.4	49.2	55.1	59.5
	偏差 (mm)	19.2	26.5	18.3	26.9

3. バックホウ浚渫船による出来形実態の分析

ICT 活用工事の浚渫工（河川）への適用に必要な出来形管理手法や管理基準の整備に向け、2. で実施した精度検証結果により施工履歴

データが浚渫工（河川）の出来形値として利用できることが確認できた。その後、河川浚渫の現場で実際に取得されているレッド測深の TS 計測出来形値を真値とし、施工時に取得された MG バックホウによる施工履歴データとの同一平面上での標高較差を利用して精度検証を行い、出来形実態の分析を行った。

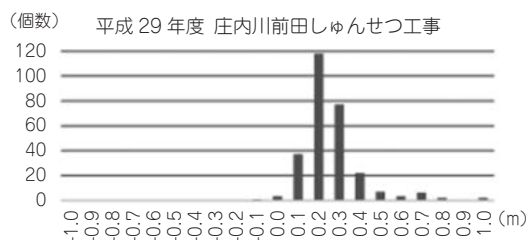
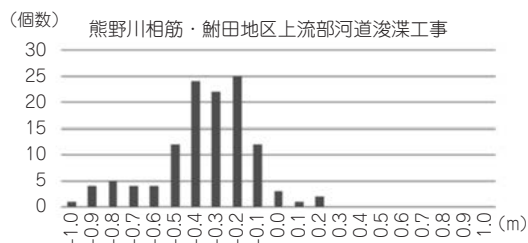
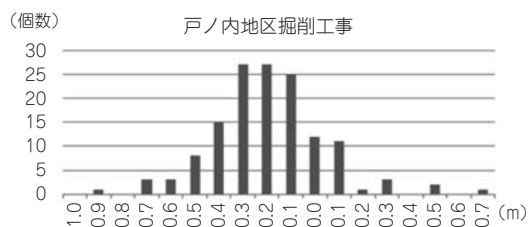
表－2 に、出来形実態調査を行った近畿地方整備局管内及び中部地方整備局管内の対象工事を示す。

表－2 出来形実態調査対象工事

工事名	事務所名	年度
戸ノ内地区掘削工事	猪名川河川事務所	2016
熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	紀南河川国道事務所	2017
平成 29 年度庄内川前田しゅんせつ工事	庄内川河川事務所	2017

(1) 施工履歴データを用いた出来形管理の施工精度確認

図－12 に出来形実態調査を行った現場での施工履歴データとレッド測深による TS 計測（真値）の標高差を示し、表－3 に標高差の平均及び標準偏差を示す。近畿地方整備局管内での現場では、真値よりも施工履歴データの結果が深い（－方向）



図－12 施工履歴データと真値との標高差

表－3 標高差の平均及び標準偏差

工事名	差の平均値	標準偏差
戸ノ内地区掘削工事	－241 mm	233 mm
熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	－296 mm	224 mm
平成29年度庄内川前田しゅんせつ工事	210 mm	142 mm

傾向にあったが、中部地方整備局管内での現場では、真値よりも施工履歴データの結果が浅い（＋方向）傾向にあった。

(2) 施工履歴データと真値との標高差の要因

近畿地方整備局管内の戸ノ内地区掘削工事及び熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事のように、刃先が真値を下回る誤差の原因としては、以下の点が考えられる。

- ・ 施工者ヒアリングによるとバックホウのオペレータは、バケットで抱える土量を最大化し、掘削効率を上げるため、はじめの掘削は刃先を設計面より深めに入れて掘削するが、掘削がある程度進むと平たんに仕上げるために、刃先の位置を設計に沿うように動かす傾向がある。この場合、はじめに深く掘削した時点で記録された刃先の履歴データを用いて出来形計上を算出するため、最終仕上がり面よりも深めに出来形が記録されることになる。
- ・ 刃先と根本のどちらの座標を施工履歴データとして記録しているかにより、施工履歴と出来形との差異が生じる。本現場では、バケットの爪先の履歴を施工履歴データとして記録しているが、掘削の進展により刃先が摩耗するため、徐々に実際の刃先の位置よりも施工履歴データが深く記録される傾向が生じる。
- ・ 掘削直後に埋まるため、刃先データが深くなる傾向にある。

また中部地方整備局管内の現場においては、施工履歴データの値が真値よりも浅い結果（＋方向）となった。その誤差の原因としては、提供データのフィルタリング方法が最下値ではなく平均値としていたため、実際の川底よりも高い位置の履歴データになったと考えられる。

以上の誤差要因を考慮して、施工履歴データを用いた出来形管理を行う場合には、日々の刃先位置の精度確認を行うだけでは不十分であり、事前にテスト施工を実施し、施工履歴データから求まる出来形とTS等による出来形の実測値との比較を実施し、その差異を加味して施工を行うとともに、施工履歴データの算出時にテスト施工で確認した差異を反映する必要があると考えられる。

2. 及び3. の結果により、施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）1-2-2 施工履歴データの計測性能及び精度管理及び、精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映されている。

4. 面的出来形管理基準の規格値案の検討

従来管理と同等となる面的な出来形管理基準及び規格値案を検討するため、該当工事の設計面とレッド測深の出来形値の同一平面上での標高較差を利用し出来形実態調査を行った。

(1) 出来形実態調査結果の整理

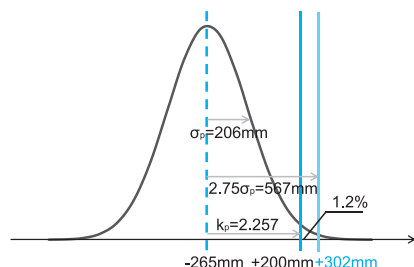
表－4に表－2の近畿地方整備局管内及び中部地方整備局管内の工事を含め、浚渫工4現場のデータを合わせて、各現場で適用した出来形管理の規格値を基準とした場合の不良率（上側・下側）

表－4 不良率一覧

現場	現場名	平均 (m)	標準偏差 (m)	最大値 (m)	最小値 (m)	母数	不良個数 (上)	不良個数 (下)	不良率 (%)	不良率(上) (%)	不良率(下) (%)
1	戸ノ内地区	－0.294	0.233	0.265	－1.402	139	1	0	0.7	0.7	0.0
2	熊野川	－0.125	0.125	0.300	－0.390	140	3	0	2.1	2.1	0.0
3	庄内川一色	－0.594 (－0.394)	0.189	0.662 (－0.862)	－0.953	214	3	0	1.4	1.4	0.0
4	庄内川前田	－0.421 (－0.221)	0.095	0.172 (0.372)	－0.642	278	2	0	0.7	0.7	0.0
	全データ	－0.385 (－0.265)	0.237	0.662 (－0.862)	－1.402	771	9	0	1.2	1.2	0.0

表－5 不良率を許容した規格値（案）

4 現場	①規格値 (mm)	②平均値 (mm) 【現場実態の値】	③規格値の範囲外となる割合 P% (上限 / 下限)別【現場実態の値】	③' k_p	④標準偏差 σ_p (mm) 【(①－②)÷ k_p 】	全数管理の上限値案 ②+ 2.75 σ_p (mm)
(案) 平均値を現場実態で設定	200	－ 265	1.2 (1.2/0)	2.257	206	302



図－13 不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値（案）

を算出した結果を示す。現場 1，現場 2 は基準高の規格値が + 200 mm，現場 3，現場 4 については規格値が 0 mm なので，従来規格値を参考に 200 mm 下がり仮に設計値とした場合の設計値からの離れを合わせて括弧書きで表記している。いずれの工事も，従来手法としては検査に合格している。

(2) 調査結果の評価と方針と規格値（案）の検討

表－5 及び図－13 に，不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値（案）の検討結果を示す。表－4 の結果から，上限規格値においては設計値もしくはバラツキ調査結果の平均値を中心として，現状のバラツキ調査から割り出した不良率を踏まえた正規分布について，ICT 土工の規格値と同じ 0.3% を棄却してよい上限値として設定した値に，計測精度を加えた値で規格値を検討した。なお，余掘りを前提としており，下限値は設けず，平均値規格は設計値である ± 0 mm 以下とした。

この結果，全数の面的管理となる規格値の上限としては，+ 302 mm となった。土木工事施工管理基準及び規格値（案）では，+ 302 mm に加え，施工精度 ± 100 mm を加えた + 400 mm が個々の規格値として設定されている。

5. おわりに

ICT 浚渫工（河川）適用にあたり，バックホウ浚渫船による面的な施工管理基準の適用を図る方法の一つに，MG バックホウによる施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）において，計測性能，精度管理，精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映され，出来形管理の規格値（案）においても提案することができた。現場数の少ない中で施工管理基準を検討していることもあり，今後はフォローアップを行った上で，カイゼンを行っていくことが必要と考える。

2019 年度からは，土工の河床掘削分野における施工履歴データによる出来形管理も新たに拡大される。作業装置の精度確認については，計測センサーの姿勢を確認する姿勢毎に 1 回以上として簡素化され，今後は ICT 建設機械による施工履歴データの活用が進んでいくものと考えられる。

謝辞：近畿地方整備局猪名川河川事務所，近畿地方整備局紀南河川国道事務所，中部地方整備局庄内川河川事務所につきましては，貴重な現場及びデータを提供いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 近藤弘嗣，長山真一，藤島崇，石田大輔，服部達也，池田広貴：i-Construction で適用する土工出来形の面管理に関わる基準類の検討，土木学会 第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集，2016