

18. ICT バックホウ施工履歴データを用いた河床掘削における 出来形管理規格値の検討

国土技術政策総合研究所
国土技術政策総合研究所
国土技術政策総合研究所

○ 西村 峰鷹
森川 博邦
大槻 崇

1. はじめに

国土交通省では i-Construction のトップランナー施策として「ICT の全面的な活用」を打ち出し、平成 28 年度より ICT 土工の取り組みを開始し、その後、舗装工、浚渫工へその取り組みを拡大し普及に取り組んでいる。河川工事においては、平成 30 年度から ICT 浚渫工(河川)にてバックホウ施工履歴データや音響測深機器を用いた出来形管理基準を策定して生産性向上に取り組んでいる。

2. 河川工事における課題と研究目的

しかし、河川土工のうち、河床掘削においては降雨後の河川の水位上昇により、整形が完了した範囲が施工後に冠水する場合がある。また、施工中に既に冠水しており、水面下にある箇所を掘削、整形しなければならない場合もある。したがって、一つの現場に対して土工(水面上の掘削)と河床掘削(水面下の掘削)が混在する可能性がある。その場合、UAV、TLS 等の多点計測技術を使用して出来形の面管理を実施することが困難である一方で、従来手法である TS 等を用いた断面管理を実施すると生産性が向上しない。さらに、水没箇所の出来形管理は図-1 に示すように直接水中に入り込み計測を実施するため危険を伴うという課題がある。

したがって、生産性及び安全性向上の観点から河床掘削の出来形管理に適用可能な技術を選定しその出来形管理基準を整備することを目的とする。

3. 河床計測技術の選定

上記課題を解決するための水中部を計測する技術の候補としては、ナローマルチビーム、グリーンレーザー、ICT バックホウ施工履歴データの 3 つがある。これら候補技術の概要を示す。

① ナローマルチビーム

超音波により水底を測深する技術である。船に取り付けられたソナーヘッドと呼ばれる装置から、測深ビーム(マルチビーム)を扇形に出力し測深データを収集する。



図-1 水没した河床の出来形計測の様子

② グリーンレーザー

ヘリコプター等に照射器を設置して空中から水中を透過する特性を持つ緑色のレーザーを照射し水中の地形を面的に計測する技術である。レーザー測深機とともに近赤外線レーザーと航空カメラを搭載しており、陸域から水面下までの連続した地形データと航空写真を同時に取得することが可能である。

③ ICT バックホウ施工履歴データ

3次元 MG または MC 機能を搭載した ICT バックホウにより直接出来形を計測する技術である。ICT バックホウは作業装置(ICT バックホウの場合であればバケット刃先位置)の 3次元座標データをリアルタイムに取得している。したがって、ICT バックホウを計測機器と見做し、バケット刃先の 3次元座標データ(以下施工履歴データ)を出来形管理に用いることが可能である。

これら 3 つの技術を以下の観点で比較した。

- ・精度：計測精度
- ・コスト：導入に必要なコスト
- ・作業性：1日あたりの計測可能量
- ・内製化難易度：施工者による内製化難易度
- ・河床掘削への適用性：河床掘削へ適用するに当たり障壁となるもの等

表-1 水中部計測候補技術

技術名	グリーンレーザ (ヒアリング：中日本航空)	ナローマルチビームソナー (ヒアリング：アークジオサポート)	ICTバックホウ施工履歴データ
公称精度	±100cm	平均±60mm	±50mm(静止状態)
コスト	約300万円/現場 (計測・解析・図化作業含む)	200万円/日 (計測・解析・図化作業含む)	追加コストは不要
作業性	1日あたり数km ² の面積を計測 (対地高度による)	1日当り7kmの測線を計測 計測幅は水深の3倍程度 (レーザー計測角120°の場合)	施工と同時に出来形を記録可能
内製化 難易度	不可 (解析にノウハウを要する)	不可 (解析にノウハウを要する)	可能 (施工者による運用実績多い)
河床掘削 適用性	透明度が高くないと計測が困難 (河床掘削時は濁りが発生しやすい)	河床掘削は水深が数十cm程度 であり浅く計測が困難	適用可能

これら3つの技術を比較した結果を表-1に示す。コスト、施工者による内製化難易度、河床掘削への適用性の観点から施工履歴データを河床掘削出来形管理に新規に適用可能な技術として採用することとした。

4. 施工履歴データの計測精度検証

施工履歴データを河床掘削出来形管理に適用するにあたり、その精度を検証するとともに操作、設定等注意すべき事項についても検討した。

4.1 施工履歴データ計測誤差要因

ICTバックホウの施工履歴データの精度は静止状態では公称±50mmとなっているが、実際に掘削整形した出来形と施工履歴データを比較した場合、その標高較差は±50mmよりも悪化し得ることが予測される。その要因として、以下の項目が考えられる。

要因1. 姿勢角センサの応答遅れ等による誤差

ICTバックホウの作業機を早く動かした場合、作業機等に装着されている姿勢角センサが追従しきれないまたは姿勢角を計算するコントローラの演算が間に合わないためにICTバックホウが認識している自身の姿勢と真の姿勢に誤差が生じると考えられる。

要因2. 施工履歴記録ロジックによる誤差

現状ではICTバックホウの施工履歴データはバケットの刃先位置のみでしか施工履歴データを記録出来ない仕様となっている場合が多い。図-2に示すようにバケット刃先を少し浮かせた状態でバケットの底面等のバケット刃先以外の箇所では整形すると実際に整形しているバケット位置と施工履歴データとして記録しているバケット位置に差異が生じ得る。また、現状ではバケット刃先で掘削後に埋め戻しを行いバケット刃先の軌跡が最終的な出来形を必ずしもなぞらない場合も想定される。

要因3. データ取得密度による誤差

図-3に示す様に離散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一致しないことが考えられ、データ取得頻度等のデータ取得密度の差異が

施工履歴データの計測精度に影響すると推測出来る。さらに、ICT活用工事における面的な出来形評価には1m²に1点以上の点群密度が要求されている。ICTバックホウ施工履歴データはバケット刃先位置の右端、左端、または中央等ある1点のみを履歴データとして記録する仕様である場合がある。そのような場合 TLS,UAV等と比較して計測点群数が大幅に少ない。また、履歴データを取得する時間間隔、距離間隔等のデータ取得頻度も計測点群密度に影響すると考えられる。

4.2 施工履歴データ計測誤差要因検証方法

4.1で示した要因1.,要因2.及び要因3.を検証するために次に示す実験1.,実験2.,実験3.を行った。

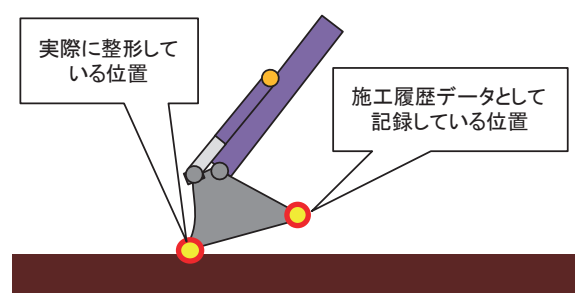


図-2 施工履歴記録ロジックによる誤差

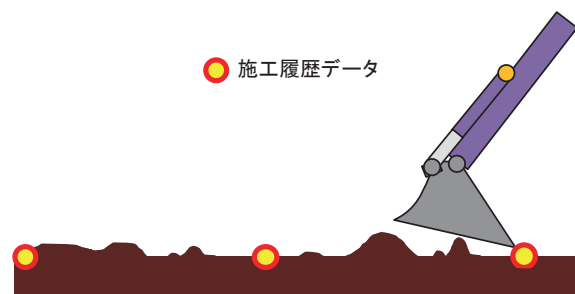


図-3 データ取得密度による誤差

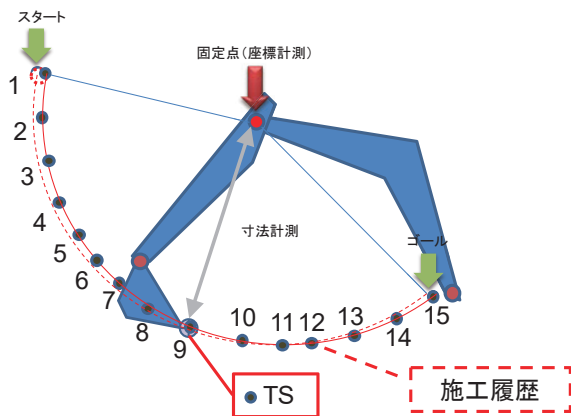


図-4 静的精度および動的精度検証方法

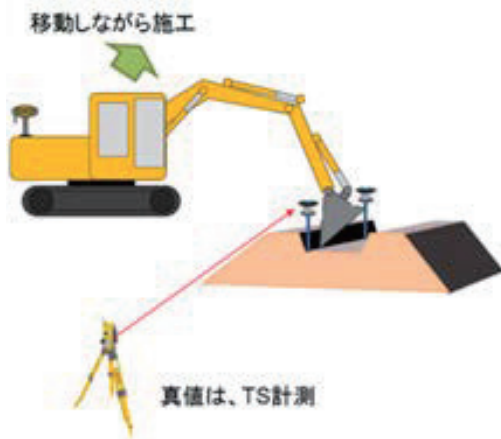


図-5 整形作業での精度検証方法

実験 1. 静的状態での施工履歴データの精度検証
作業機を静止させた状態で施工履歴データの精度を計測した。ICT バックホウの刃先の位置を TS により計測した値を真の値とし、図-4 に示すように固定点を回転軸としてアームのみを動かして姿勢を変化させ、15 姿勢計測した。ICT バックホウにより記録されている刃先位置の履歴データの値を記録、比較した。

実験 2. 動的状態での施工履歴データの精度検証
ブーム、アームを最も開いた状態から、アームのみを最も閉じた状態まで動作させ、施工履歴データの精度を検証した。検証の際、姿勢角センサの応答の遅れを検証するためにアームの動作速度を「高速」と「低速」の 2 パターンで実施した。ここで、「高速」とは整形ではない掘削作業時の、「低速」とは整形作業時の作業機速度を想定している。データ取得密度は最も密に取得可能である 1 秒とし

た。

実験 3. 整形作業での施工履歴データの精度検証

5m 四方の平面に対して実際に ICT バックホウにより整形作業を実施して施工履歴データと TS により計測した標高とを比較してその精度を算出した(図-5 参照)。なお、データ取得頻度パターンとしては 1 秒毎、2 秒毎、10cm 毎、50cm 毎の 4 パターンとして計測を実施した。

4.3 施工履歴データ計測誤差要因の検証結果

4.2 にて実験した結果について記す。実験 1.の結果は図-6 に示す通りとなり計測姿勢 1～15 全点が X,Y,Z 全ての軸で±40mm 以内となっていた。また、実験 2.の結果である図-7 と比較すると「高速」と「低速」とでは平均誤差に有意な差は無いと見做すことができるとわかった。したがって、要因 1.「姿勢角センサの応答遅れ等による誤差」が原因となり動的な施工履歴データが静的な施工履歴データよりも精度が悪化することは無いと考えることが出来る。

実験 3.の結果を表-2 に示す。データ取得パターンが密である 1 秒の場合と 10cm の場合は概ね同じ結果が得られ、疎である 2 秒の場合と 50cm の場合も概ね同じ結果が得られた。その一方で、データ取得パターンが密である 1 秒と 10cm の場合に対してデータ取得パターンが疎である 2 秒と 50cm の場合を比較するとデータ取得パターンが疎である場合の方が密である場合よりも標準偏差が約 25mm 大きい。これは要因 3.「データ取得密度による誤差」が影響していると推測することができる。また、図-7 と表-2 から空中で動的に計測した施工履歴データと実際に整形した施工履歴データを比較すると実際に整形した場合は平均で約+30mm の差がある。これは要因 2.「施工履歴記録ロジックによる誤差」が原因であると推測することができる。

4.4 施工履歴データの計測点群密度と公称精度

施工履歴データは、レーザスキャナーや UAV 写真測量と比較して計測点数が大幅に少ない傾向が見られる。面的出来形管理に必要な 1m² に 1 点以上の点群密度を満足するためには、10cm 刃先が移動する毎に 1 点の頻度で履歴データを記録するパターンで整形作業を実施する必要があることがわかった。したがって、この場合の施工履歴データの精度に着目すると 平均 55.1mm, 3σ≒54.9mm であり、55+55=110mm となる。しかし、要因 2.「施工履歴記録ロジックによる誤差」により生じる誤差は施工時に建機オペレータが注意することで 30mm よりも小さくすることが可能である。したがって、施工履歴データの精度公称値は±100mm とすることができると考えた。また、施工履歴データにより出来形管理を行う場合は、要因 1.の影響が無いことを確認するとともに、要因 2., 要因 3.の影響を極力排除

する旨の注記を出来形管理要領等に追記すること等を考えている。

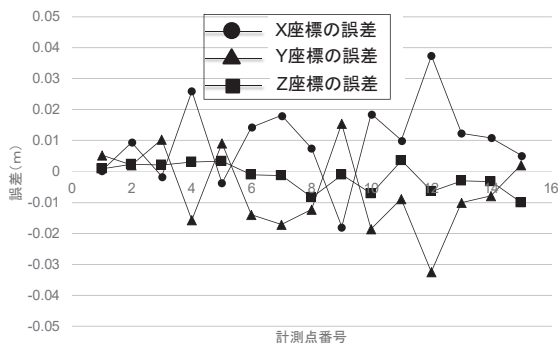


図-6 静止状態での施工履歴データ精度

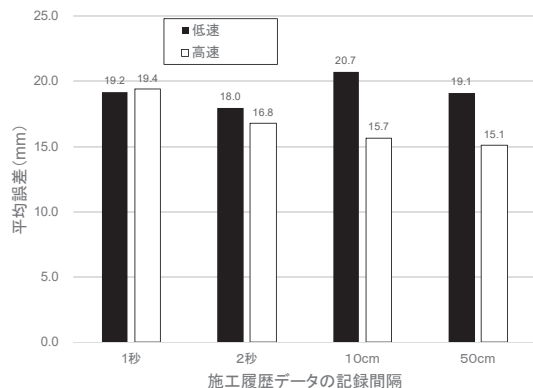


図-7 アーム動作速度による誤差

表-2 データ取得密度による誤差

データ取得パターン	1秒(密)	2秒(疎)	10cm(密)	50cm(疎)
平均(mm)	49.4	49.2	55.1	59.5
標準偏差σ(mm)	19.2	26.5	18.3	26.9
3σ(mm)	57.6	79.5	54.9	80.7

5. 出来形管理規格値の検討

施工履歴データを用いた場合の河床掘削出来形管理規格値を以下の手順で検討する。先ず実態調査として、従前の断面管理を実施している河床掘削現場において、合格となっている出来形に対して面的な出来形の真値を計測する。次に、施工履歴データで同一の出来形を面的に計測したとしても不合格とならないように、施工履歴データの計測精度を含めた規格値を設定する。

5.1 河床掘削現場の出来形実態調査

実態調査は3つの現場にて実施した。面的な出来形の真値はトータルステーションにより計測した。計測点は断面間の任意の点とし、1~5m間隔で格子状に計測した。

調査した3現場の結果を表-3に示す。表-3に示す通り、全計測値においては、平均値-3mm、標準偏差(σp)62mmにより $3\sigma p=190\text{mm}$ となった。

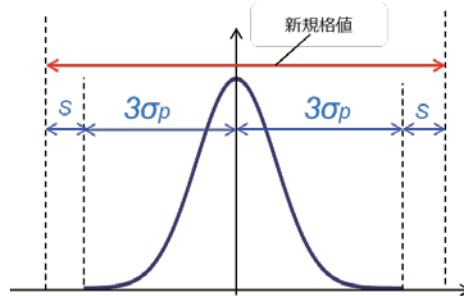


図-8 計測機器の精度を考慮した規格値

表-3 面的出来形の実態調査結果

	平均(mm)	σp (mm)	$3\sigma p$ (mm)
現場①	-0.005	0.063	0.189
現場②	0.053	0.116	0.348
現場③	-0.008	0.060	0.18
3現場集計	-3	62.27	187

5.2 計測精度を含めた規格値の設定

図-8に示す様に現場の施工精度(出来形)の実態を踏まえ、施工履歴データで同一の出来形を計測したとしても不良率が同一となるように規格値を設定した。4.4により計測器(施工履歴データ)の精度は $s=100\text{mm}$ 、5.1により現場の施工精度の実態($3\sigma p$)は 190mm であるため、施工履歴データを用いた出来形管理の規格値は $190+100=290\text{mm}$ とした。平均値の規格値は施工後の出来形の品質を担保するために断面管理と同じく $\pm 50\text{mm}$ とした。

6. 結論

本研究では、河川土工(河床掘削)において安全かつ生産性が高い出来形管理手法として施工履歴データを用いた出来形管理手法を提案した。ただし、基準検討の際に使用したデータは数現場の限られたものであり、全現場への適応性は実運用の中で確認していくこととなる。そのため、今後フォローアップを実施し運用上の問題があれば、速やかな「カイゼン」が必要である。

7. 提言

ICTバックホウ施工履歴データは表-1で示したように現場への導入が容易であり、施工と同時に出来形を計測できる利点がある。しかし、その一方で4.4に示したように現状では動的に出来形を計測した場合、その精度は $\pm 100\text{mm}$ 程度であり、河床掘削以外の土工一般では、面的出来形管理に用いる計測機器としての精度 $\pm 50\text{mm}$ を満足していない。施工履歴データによる動的な出来形計測の精度向上のためには、要因2., 要因3.に対する「カイゼン」の実装が待たれる。