

橋梁下部工における3次元計測技術の 出来形管理への適用性の検討

国土交通省国土技術政策総合研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所

○原 直之
山下 尚
小塚 清

1. はじめに

1.1 建設就業者の現状と担い手不足

バブル経済崩壊後、建設業の公共投資額は平成4年あたりをピークに大きく減少していった。それに対し建設就業者数は公共投資額に対し比較的多く割合をしめる時代が続いた。一方、若者の建設業離れは進んだため、近年では建設業における技能労働者約340万人のうち、今後10年間で全体の1/3にもなる110万人のベテランの職人たちの離職が懸念されており、これからの建設業を担う若年層（～24歳）の割合は全体の1割程度となる見込みである。¹⁾（表-1）

表-1 建設業界の就業者の年齢構成



1.2 建設業の生産性向上を目指す

建設現場の構造物のほとんどが「屋外（特に土木）」、「一品受注生産」、「労働集約型生産」などの特徴により、製造業等で進められている「自動化・ロボット化」、「IoT技術・ICT技術」の導入が難しいとされていた。しかし、近年では「ICT技術」を活用した測量機器や建設機械の登場により、現場経験に左右されることなく「高精度」な測量や施工が可能となり、その有効性が認められてきている。

国土交通省ではそのような「ICT技術」を現場に速やかに適用することで、「人・日当たりの仕事量」を向上させる取り組みを、「i-Construction」と命名し、建設業の生産性向上を目指している。

2. 研究目的

2.1 i-Construction と出来形管理要領の策定

国土交通省では、2016年頃から、～建設現場の生産革命～を目指し、「i-Construction」を提唱してきた。i-Constructionのトップランナー政策である、ICT技術の全面的な活用²⁾の考え方から、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」の策定を進めてきた。これは、現場の施工管理において、3次元データや情報通信技術を適用することにより、高効率・高精度な出来形管理を実現するとともに、従来方法に比べて現場従事者のデータ管理の簡略化・書類の作成に係わる負担の軽減等を可能とする要領である。令和3年度までに、土工編やトンネル編、様々な工種の要領が策定されてきた。

令和4年度には、橋梁下部工を対象とした「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(構造物工(橋脚・橋台)編)(案)」(以下「本要領」という)が策定された。

本報告は、本要領の現場適用性の検証を、国土技術政策総合研究所内に設立された、「建設DX実験フィールド」内の実物大橋脚模型を用いて行ったものである。

2.2 TLS と UAV の計測方法の違い・特性の把握

本要領で対象となる3次元計測技術は「TS等光波方式」「空中写真測量(UAV)」「地上型レーザースキャナー(TLS)」「無人航空機搭載レーザースキャナー」の4種である。本報告では、2種類のTLSと1種類のUAVを用いて計測を行った。(図-1)



図-1 本実験で選定した機器

TLS と UAV では出来形計測方法・精度検証方法が大きく異なる。そのため、要領に従い実物大の橋脚模型を用いて、標定点の設置～点群モデル化までの一連の流れを実施することで、本要領の記載内容において説明不足な部分や、利用者に分かりにくい記載等があれば、令和4年度の要領策定時に修正を検討する。

2.3 従来方法との計測作業時間を比較

従来方法による出来形計測は、①基準高の計測、②その他測定項目の計測、③監督職員による立ち合い、大きくこの3つに分けられる。これらは基本的に「3人～4人」程度の人数を要する作業である。

3次元計測技術を用いることで、3次元ソフト上で合成された構造物（以下「点群モデル」）を作成することができる。「①基準高の計測」や「③監督職員による立ち合い」は、取得した点群モデル上で出来形計測を代替することができるので、現場での2回目の計測が不要となる。

このように、従来では「3～4人」必要であった人数を、「1～2人」に削減することで現場での拘束時間を短縮し、現場職員の負担軽減・生産性向上を確認する。

2.4 建設DX実験フィールドの活用

稼働中の現場に機器を持ち込み、データ取得等を行う場合、現場を提供いただく元請会社、担当現場監督職員に多くの負担がかかる場合が多い。建設DX実験フィールド内の実物大模型を活用することで、現場の都合に影響を受けることなく、安全で時間的に余裕のある実験を行うことができる。

3. 計測方法

3.1 3次元計測技術を用いた出来形計測の方法

本報告で取得した点群モデルは、【TLS】3データ（機種A、機種B）、【UAV】4データ（SfMソフトA、SfMソフトB）の計7データである。（表-2）

TLS では、対象構造物を囲むように八方位（東西南北＋四方位）、対象構造物から5mの距離を取って、すべて同じ条件で点群モデルの取得を行った。スキャン密度（※）の違いにより、取得できる点群モデルの密度にどれぐらいの違いが出るかを把握するため、「20mm@10m」「5mm@10m」「6mm@10m」と異なる密度で測定を実施した。（※スキャン密度：対象構造物を10mの距離からスキャンした際に取得できる点と点の間隔が○mmピッチ）

UAV では、対象物を囲むようにドーム状に高さを5段階に分けて、計測（写真撮影）を行った。取得した150枚程度の写真データを、2種類の写真測量解析ソフト（SfMソフト）を用いて点群モデルを作成した。その際、出力する解析密度を変えて、

その結果に違いがあるかを確認した。解析密度は「最高密度」「高密度」「中密度」にて、解析を行った。

表-2 選定した機器のスキャン密度・解析密度

| 選定機器 | | スキャン密度 解析密度 |
|------|---------|----------------|
| TLS | 機種A | 20mm@10m |
| | 機種B | 5mm@10m |
| UAV | SfMソフトA | 最高 |
| | SfMソフトB | 最高 |
| | | 高 |
| | | 中 |

3.2 要求精度に関して

各管理項目における精度検証は、各側面及び天端上に設置した検証点の座標値を従来手法により取得（以下TS真値）し、合成した点群モデル上の座標値と比較して行う。要求精度には段階があり、それぞれ「3mm以下」「7mm以下」「10mm以下」「16mm以下」となっており、TS真値と点群モデル上の検証点の座標との誤差の大きさによって、計測できる管理項目が変わる。（表-3）

表-3 橋脚躯体工における計測時の要求精度

表13-5 構造物工（橋脚躯体工-ラーメン式以外）における計測時の要求精度

| 測定項目 | 規格値 | 要求精度 | |
|-------------------|----------|-------------|-----------|
| 基準高 ∇ | ± 20 | 7mm以下 | |
| 厚さ t | -20 | | |
| 天端幅 w1 | -20 | | |
| 敷幅 w2 | -50 | 16mm以下 | |
| 高さ h | -50 | | |
| 天端長 $\phi 1$ | -50 | | |
| 敷長 $\phi 2$ | -50 | | |
| 支間長及び中心線の変位 | ± 50 | 10mm以下 | |
| 橋脚中心間距離 ϕ | ± 30 | | |
| 支承部アンカーボルトの箱抜き規格値 | 計画高 | +10～-20 | +3～-7mm以下 |
| | 平面位置 | ± 20 mm | |

3.3 TLS 精度確認方法

TLS の精度確認は、各側面および天端に設置した検証点のTS真値と、点群モデル上の検証点の2点間距離を比較して行う。例えば、機種B(6mm@10m)のデータでは北南の検証点の2点間は「2007mm」に対し、現場で求めた北南の検証点のTS真値の2点間距離は「2006mm」である。このことから、TS真値と点群モデルの誤差は「+1mm」となり、要求精度は「3mm以下」の項目が対象となる。

精度検証に使用する検証点は、構造物を挟んで対角線となるように選定する。（図-2）

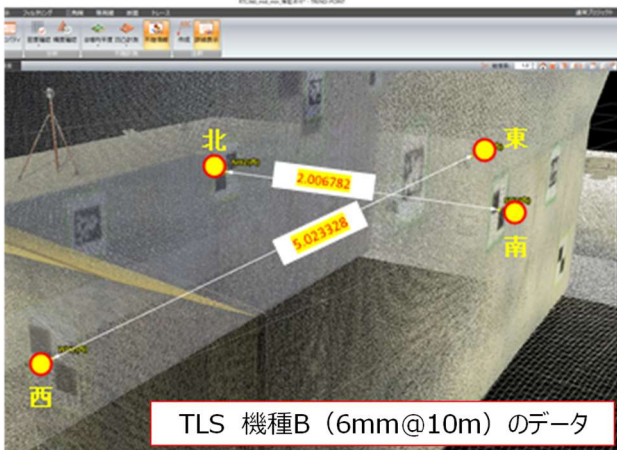
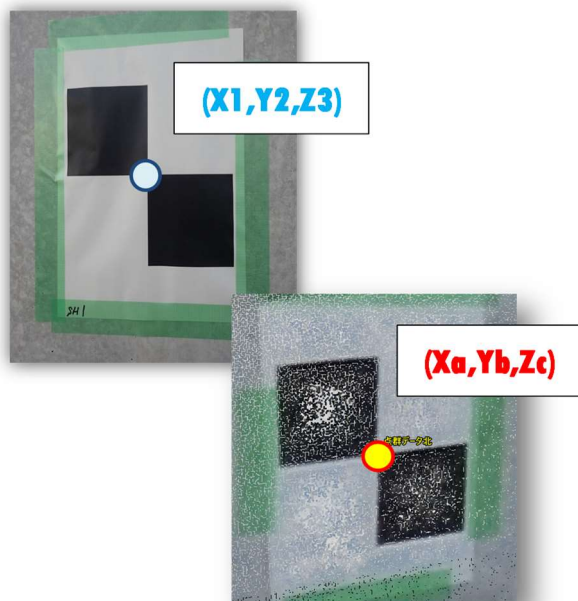


図-2 T L S精度確認状況

3.4 UAV 精度確認方法

UAV の精度確認は、現場で求めた T S 真値の座標 (X1, Y2, Z3) と点群モデル上の検証点の座標 (Xa, Yb, Zc) を直接比較し、要求精度 (Δ) = $\sqrt{(X1 - Xa)^2 + (Y2 - Yb)^2 + (Z3 - Zc)^2}$ の式によりその誤差を確認する (図-3)

要求精度は TLS 同様、それぞれ「3 mm以下」「7 mm以下」「10 mm以下」「16 mm以下」で、T S 真値と点群モデル上の検証点の座標との誤差の大きさによって、計測できる管理項目が変わる。



要求精度(Δ)=
 $\sqrt{((X1 - Xa)^2 + (Y2 - Yb)^2 + (Z3 - Zc)^2)}$

図-3 U A V精度確認イメージ

3.5 計測 (立会) 時間の比較

従来方法による出来形計測は①型枠のケレン・

清掃→②基準高の計測→③幅や厚さなどの各出来形計測→④監督検査職員による立会→⑤足場解体に大きく分けられる。本要領を適用することで、②基準高の計測、④監督職員による現場立会の作業を「作業人数1人」に削減することが可能となる。

また、従来方法では当たり前であった、ロッドやピンポールなどの計測作業も不要となり、大幅な計測時間の削減が期待できる。(図-4)

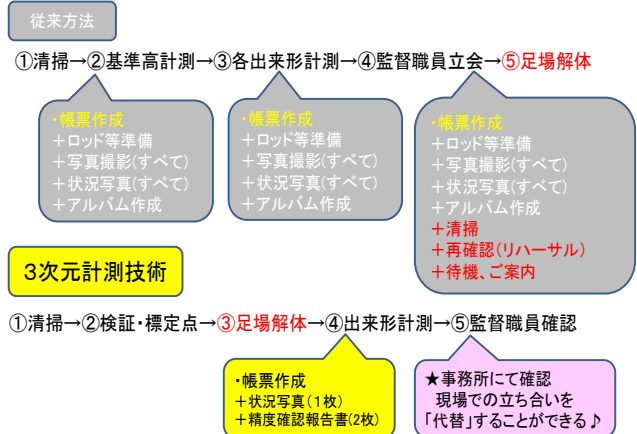


図-4 計測 (立会) 作業工程の比較

4. 計測結果

4.1 TLS 精度確認結果

TLS の取得データは【機種A: スキャン密度 20mm@10m、5mm@10m】【機種B: 6mm@10m】の計3データの要求精度を検証した。

結果、スキャン密度「20mm@10m」のデータにおいては、「北南」で「T S 真値との差」が「13mm」「東西」で「8mm」となり、「要求精度±16 mm以下」の測定項目(敷幅(W2)、高さ(h)、天端長(ℓ1)、敷長(ℓ2)、支間長及び中心線の変位)のみが、点群モデル上で出来形計測が可能となる。

「機種A_5mm@10m」「機種B_6mm@10m」のデータに関しては「要求精度±3 mm」を満足したため、本要領のすべての測定項目で本要領の適用が可能という結果を得た。(表-4)

表-4 TLS スキャン密度別の要求精度確認結果

| スキャン密度 | 北南 | 真値との差 | 東西 | 真値との差 | 要求精度を満足する測定項目 |
|----------|------|-------|------|-------|---------------|
| (TS真値) | 2006 | - | 5026 | - | - |
| 20mm@10m | 2019 | 13mm | 5034 | 8mm | ±16mm以下 |
| 5mm@10m | 2006 | 0mm | 5027 | 1mm | ±3mm以下 |
| 6mm@10m | 2007 | 1mm | 5023 | -3mm | ±3mm以下 |

単位: mm

4.2 UAV 精度確認結果

UAV の取得データは「SfM ソフトA」「SfM ソフトB」の2種類のソフトを用いて、計4データの要求精度を確認した。

結果、4データすべてにおいて、要求精度が「±7mm以下」という結果となった。(表-5)

表-5 UAV 解析密度別の要求精度確認結果

| | 解析密度 | TS真値との差 | | | | 要求精度を満足する測定項目 |
|----------|------|---------|---|---|---|---------------|
| | | 東 | 西 | 南 | 北 | |
| SfM ソフトA | 最高 | 3 | 6 | 4 | 2 | ±7mm以下 |
| SfM ソフトB | 最高 | 2 | 7 | 3 | 4 | ±7mm以下 |
| | 高 | 4 | 7 | 5 | 5 | ±7mm以下 |
| | 中 | 2 | 4 | 5 | 4 | ±7mm以下 |

単位：mm

4.3 従来方法との延べ計測作業時間の比較結果

従来方法、UAV、TLSの中で、最も計測(立会)作業時間が少ない結果となったのは、「TLS」を用いて計測を行った場合の「621分」であった。

理由として、UAV、TLSは「②検証点・標定点の座標取得(X,Y,Z)」という作業に時間が必要となるものの、対象構造物を点群モデル化してしまえば「基準高」「監督検査」は、点群モデル上で出来形計測を実施することができるので、大幅な計測時間の削減が可能であることが確認できた。

(表-6)

表-6 各出来形計測時間の比較結果

| | 基準高 | 出来形計測 | 監督検査 | 合計 | 作業人数 |
|------|-----|-------|------|------|------|
| 従来方法 | 155 | 735 | 380 | 1270 | 3~4名 |
| UAV | 5 | 631 | 40 | 676 | 1~2名 |
| TLS | 5 | 576 | 40 | 621 | 1~2名 |

単位：min

UAVとTLSを用いた場合の「出来形計測にかかった時間」に注目すると「TS真値の取得」と「対象物のスキャン」で差がある。

UAVの場合、標定点の数が1つの面で4箇所、合計24か所計測する必要があり、TSの盛り替え(計4回)が発生することから「155分」多くかかっている。また、「対象物のスキャン」に注目するとTLSの場合、標定点となるターゲットの座標取得に時間を要することから「90分」の差が生じている。(表-7)

表-7 出来形計測時間内訳

| | 出来形計測 | | | 作業人数 |
|-----|--------|---------|-------|------|
| | TS真値取得 | 対象物スキャン | データ解析 | |
| UAV | 436 | 50 | 150 | 1~2名 |
| TLS | 281 | 140 | 160 | 1~2名 |

差 -155 +90 +10

単位：min

5. まとめ

5.1 結論

本報告で、「TLS(地上型レーザースカナー)」を用いて出来形計測を行った場合、延べ計測(立会)作業時間が「621分」と従来方法と比較して、「649分」削減できることが分かった。また、スキャン密度は「5mm@10m以上」の密度でスキャンすることが望ましい。本要領を適用する場合、使用する3次元技術の持つ計測能力を十分に考慮して、対象物に対し「離しすぎない」「角度をつけすぎない」などに留意する必要がある。

5.2 今後の課題

今回の報告で、表-5で示すようにUAVを用いた際の全てのデータに関して、「要求精度を満足する測定項目」が「±7mm以下」となった。本要領で定める橋脚躯体工の「測定項目」「基準高」「厚さ(t)」「天端幅(W1)」「支承部アンカーボルトの箱抜 平面位置」等の「要求精度」が「±7mm以下」である。ことから、UAVを用いる場合は、仮設足場解体前に、上記項目の計測を従来方法で実施すべきかを受注者側で判断する必要がある。

UAVの要求精度をあげる方法として、安定したラップ率を確保するなどといった対応が考えられるが、写真撮影はUAV操縦者の熟練度によって大きく差が出る。対象構造物を自動で撮影できるUAV等を使用した場合の検討も今後していきたい。

また、TLSの出来形計測作業手順について、要領の要追記部分が判明した。TLSの場合、標定点の設置は任意であるが、それだと電子納品時に絶対座標を点群に付与することが困難なので、土工と同様に、「測定対象構造物の周りに評定点を設ける」など、文章の追記を検討する。

参考文献

- 2015年(一社)日本建設業連合会「再生と進化に向けて」より作成
- 国土交通省 3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)