

地上型レーザスキャナを用いた 水管橋点検のための実証実験

札幌市水道局 給水部 給水課 ○関 拓矢
梶本 和也
猪子 敬之介

2021年に補剛形式の水管橋が相次いで崩落した。そのような事故を抑止するには、近接目視点検は勿論のこと、橋梁全体系の変形を定量的に計測できる技術が不可欠となる。橋梁全体を3次元的に精度良く計測できる機器としては地上型レーザスキャナがある。しかしながら、これまで桁形式の道路橋を計測した実践研究はあるものの、補剛形式の水管橋を計測した事例はない。そこで、点検実務で地上型レーザスキャナが使用できるのかを検証するため、複数機種を用いて長大で複雑な形状を持つ補剛形式の水管橋の実測を試みた。その結果、本実験の条件においては、対象の計測機器の全てで水管橋のマクロな形状寸法を計測するのに十分な精度を有すること、また、機種によって操作性に優劣があることなどの結論を得た。

キーワード：地上型レーザスキャナ、点群データ、水管橋、点検、ニールセンローゼ補剛形式

1. はじめに

2021年2月24日に美唄市でトラス補剛形式の水管橋が、また、同年10月3日に和歌山市でランガー補剛形式の六十谷水管橋が、上部工主構部の腐食により相次いで崩落したり²⁾ (写真-1、2)。後に、前者では兩岸の橋台天端に大きな高低差が生じていたこと¹⁾、後者では崩落した径間において約1年前から予兆のような異常変位が観測されていたこと³⁾が指摘されている。

それ以前の水管橋の点検については、厚生労働省令(水道法施行規則)でその方法、頻度、記録と保存期間などが具体的に定められていなかった⁴⁾こともあり、管体や空気弁からの漏水に重さが置かれ、全国的にはほぼ半数の水管橋で上部工主構部(管体、トラス弦材、横構、アーチ材、吊材、橋門構等)の変形や腐食が目が向けられていなかった⁵⁾。六十谷水管橋の事故を受けて、厚生労働省から水道事業者等へ緊急点検実施の要請があり⁶⁾、上部工主構部の近接目視点検やそれに代わるUAV(Unmanned Aerial Vehicle)を用いた点検などが行われるようになってきた⁴⁾。

しかしながら、道路橋とは違い、水管橋点検の日は浅い。点検の方法や頻度が十分ではなく、法定耐用年数48年を経過した水管橋が全国に1割ほどある⁵⁾現状を鑑みれば、崩落寸前のものがそこかしこにあっても不思議ではない。冒頭の事故事例のような崩落を抑止するには、近接目視点検は勿論のこと、橋梁全体系の変形を把握し崩落の予兆を捉える必要があると考えられる。また、ガイドライン⁶⁾や指針⁷⁾でも、上部工主構部の変形の有無を点検することになっており、それらを定量的に計測できる技術が不可欠となる。



写真-1 美唄市水管橋の崩落状況¹⁾ (2021年2月25日撮影)



写真-2 六十谷水管橋の崩落状況²⁾ (2021年10月3日撮影)

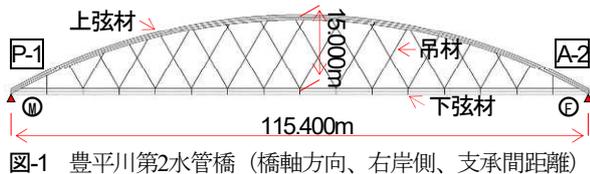


図-1 豊平川第2水管橋（橋軸方向、右岸側、支承間距離）

表-1 豊平川第2水管橋の基本構造条件

管径	1,200A（外形1,219.2mm）×2条
形式	ニールセンローゼ補剛形式
橋長（支間長、径間）	234.000m（支間長117.0m×2径間）
支承	ローラー支承及びピン支承
建設年度	1983年度（昭和58年度）

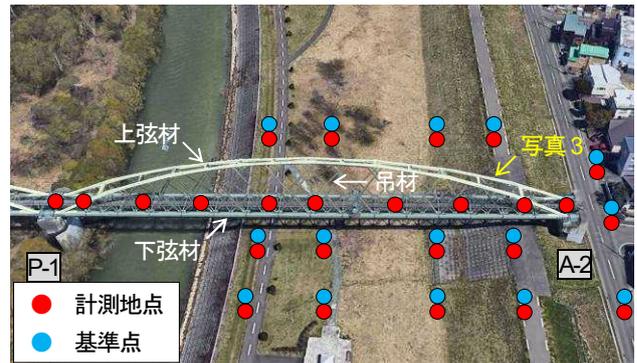


図-2 計測地点と基準点の位置（Google Earthに加筆）



写真-3 豊平川第2水管橋（高水敷、右岸・下流側から撮影）

橋梁全体を3次的に精度良く計測（測量）できる機器としては、実用性の観点で言えば、現状、地上型レーザスキャナが唯一である^{例えは8)}。そこから得られた点群データと図面あるいは前後の点群データを相互比較することで、経年の変形量の推移を捉えることができると考えられる⁹⁾。これまで地上型レーザスキャナを使用して桁形式の道路橋を計測した実践研究はあるものの^{例えは10)}、補剛形式の水管橋を計測した事例はない。そこで、水管橋点検の実務で地上型レーザスキャナが使用できるのかを検証するため、複数機種を用いて、既往研究、事故事例よりも、長大で複雑な形状を持つ補剛形式の水管橋の実測を試みた。ここでは、その結果得られた精度や操作性について報告する。

2. 実験条件

(1) 計測条件

計測対象の水管橋については、点検実務での地上型レーザスキャナの使用を見据え、大は小を兼ねるとして、既往研究の道路橋あるいは事故事例の水管橋よりも、長大で複雑な形状を持つ形式のものを選ぶことにした。ま

た、精度検証のため、竣工図があるものとした。調べた限り、文献^{8) 10) 11)}では全長22.4~50.0mの桁形式の道路橋を取り扱っており、事故事例⁹⁾の2つの水管橋はそれぞれ支間長57.7m、60.8m、下弦材から上弦材の中心間の鉛直高さ3.3m、8.5m、トラス補剛形式、ランガー補剛形式となっていた。これらの前提から、札幌市内の1級河川豊平川に架かる1983年建設の豊平川第2水管橋（以降、本橋と呼ぶ）を選んだ（図-1、表-1、写真-3）。本橋は、支間長117.0m（全長234.0m）、下弦材（管体）から上弦材（アーチ材）までの中心間の鉛直高さ15.0m、ニールセンローゼ補剛形式の独立水管橋で、竣工図もあり、十分に条件を満たす。

地上型レーザスキャナは、レーザを遮るものがあるとオクルージョンが生じる。このため、点群データを限なく取るには、あらゆる角度から計測する必要がある¹²⁾。架橋地点は、河川の高水敷を公園として利用しており、施設管理者の許可を得れば、計測機器を据え付けることができる。また、下弦材2条の間に点検歩廊があり、そこにも据え付けることができる。計測地点については、高密度に計測可能な範囲が計測機器を中心に半径10m以内という報告¹⁰⁾があることを踏まえ、歩行者や自転車の妨げとならぬよう、道路、堤防、河川敷に概ね20m間隔になるよう15点配した。一方、点検歩廊上の計測に際限はないため、地上よりもやや密に10点配し、全25点とした。ただし、上弦材の計測高さが10mを超えること、上弦材の頂部はレーザが届かないこと、低水路には計測機器が据え付けられないことから、点群データが疎になるか得られないと推測される。複数機種の精度を比較検証する上で、計測にあたり、ローカル座標として、地上の計測地点と同じ位置に橋軸方向3列、橋軸直角方向5行の基準点を設けた。さらに、豊平川および本橋の左右岸の形状がほぼ対称のため、右岸側の径間のみを計測することにした。計測地点と基準点の位置を図-2に示す。

計測地点ごとの点群データは、各社専用のレジストレーションソフトで結合した。その後、ソフトウェア Wing EarthやTREND-POINTを用いて点群データのフィルタリングやノイズ除去をしている。

表-2 本実験に用いた計測機器

	機種A	機種B	機種C	参考機種
本体				
メーカー名	Leica	Zoller+Frohlich	Leica	FARO
機種名	Scanstation P40	IMAGER5016	RTC360 3D	Laser Scanner Focus3D X330
測定精度	1.2mm+10ppm	1.0mm+10ppm	1.0mm+10ppm	±2mm (25m)
測定距離	0.4~270m	0.3~365m	0.5~130m	0.6~300m
スキャン速度	1,000,000点/秒	1,100,000点/秒	2,000,000点/秒	最大976,000点/秒
本体重量	12.25kg	6.5kg	5.35kg	5.2kg

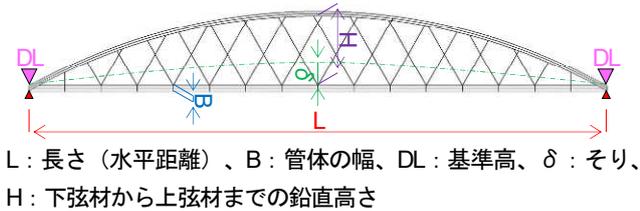


図-3 精度検証のための計測項目

(2) 計測機器

本実験に用いた地上型レーザスキャナを表-2に示す。これらの計測機器（これ以降、表-2に合わせ機種A、機種B、機種Cと呼ぶ）と、道路橋を計測した既往研究^{9) 10) 11) 12)}の中の性能の高い計測機器（FARO社製Laser Scanner Focus3D X330）を比べると、機種Cの測定距離以外は、全ての機種で同等かそれ以上の性能となっている。

表-2の各機種の主な性能を見ると、測定精度 $\pm 1.0 \sim 1.2\text{mm}$ 、最大測定距離 $130 \sim 365\text{m}$ 、スキャン速度 $1,000,000 \sim 2,000,000$ 点/秒である。また、本体重量は $5.35 \sim 12.25\text{kg}$ であった。

精度に関しては、鋼橋上部の出来形管理基準¹³⁾が長さ $\pm 20 + L/5\text{mm}$ （Lは全長、支間長）、そり $\pm 25 + L/2\text{mm}$ （Lは支間長）、基準高 $\pm 20\text{mm}$ 、幅 $0 \sim +30\text{mm}$ であり、建設年度の施工精度や測量精度を踏まえると、各機種の測定精度は十分と言える。しかし、機種Cは他2機種よりも測定距離が半分程度短く、測角精度、測距精度も劣るため、距離が長くなるほど精度が落ちる（点群データが疎になる）。ただし、本実験では密に点群データを取るために計測間隔を概ね 20m にしており、上弦材の計測高さも約 15m であることから、その影響は少ないものと考えられる。

操作性に関しては、現地で計測機器の設置、計測、移動を繰り返すため、スキャン速度が速く（計測の時間が短く）、本体重量が軽い方が望ましい。3機種の中では機種Cのスキャン速度が速く、本体重量が軽い。そのほか、機種Bと機種Cには移動時に相対的な位置を自己認識する機能が、機種Cには自動水平調整機能が付加されている。

(3) 精度検証のための計測項目

精度検証は、竣工図を正解として、それと点群データを比較することで行う¹⁰⁾が、竣工図に示されている値全てを比較するのは無駄が多く、効率が悪い。本実験の最終目標は、崩落の予兆となるような橋梁全体系の変形を定量的に捉えることにあるため、2つの事故事例に関する報告書^{1) 2)}と文献³⁾を元に、上部工主構部の変形の着目点を抽出し、計測項目にすることにした。

まず、報告書¹⁾には、崩落後に兩岸の橋台天端を測量した結果、設計図面と比べ、 1.16m の高低差と左岸側の橋台天端に 1.4% の傾斜が生じていたこと、また、崩落以前に上弦材の溶接部が腐食して破断し、下弦材に曲げ変形が生じていたであろうことが示されている。次に、報告書²⁾では、吊材の破断の本数が増えるにつれて、上弦材では上に凸状の、下弦材では下に凸状の変形が進展していく様を解析的に再現している。文献³⁾では、衛星SAR画像を用いて、橋脚を不動点にした下弦材（管体）の変位解析を行い、崩落した径間の異常変位（たわみ）を観測している。これらから、上部工主構部の変形の着目点は、下弦材の水準差（橋台、橋脚の位置）とたわみ、下弦材と上弦材の相対変位となるようである。

ここでは、本橋に対し、キャリブレーションのための下弦材の長さ（水平距離）と管体の幅、そして、下弦材の基準高、そり、下弦材（頂部）と上弦材（底部）までの鉛直高さの5つを計測項目とし、竣工図と比較することにした。精度検証のための計測項目を図-3に示す。

ただし、本橋には温度変化の影響¹⁴⁾（竣工が10月、本実験が7月）、下弦材（水で一定の温度）と上弦材との温度差の影響¹⁴⁾が生じていることも考えられる。そのため、不動点となるような橋台・橋脚上の点間距離、高さ以外の値（そり、下弦材から上弦材までの鉛直高さ）に関しては参考値とし、そりは変形形状（上に凸状か下に凸状か）に、下弦材から上弦材までの鉛直高さは機種間の値の差に注目する。

表-3 各機器の計測結果と点群数

		竣工図面	機種A	機種B	機種C
水平距離 (mm)		115,400	115,400 (誤差±0)	115,400 (誤差±0)	115,401 (誤差+1)
幅 (mm)		1,219	1,219 (誤差±0)	1,219 (誤差±0)	1,219 (誤差±0)
基準高 (m)	橋脚側 (P-1)	19.796	19.800 (誤差+0.004)	19.793 (誤差-0.003)	19.799 (誤差+0.003)
	橋台側 (A-2)	19.911	19.912 (誤差+0.001)	19.910 (誤差-0.001)	19.912 (誤差+0.001)
そり (mm)		152	148 (誤差+4)	171 (誤差+19)	169 (誤差+17)
鉛直高さ (mm)		13,933	13,984 (誤差+51)	13,984 (誤差+51)	13,973 (誤差+40)
点群数 (容量GB)		—	425,460,523 (16.4)	477,161,579 (18.6)	46,347,354(1.85)

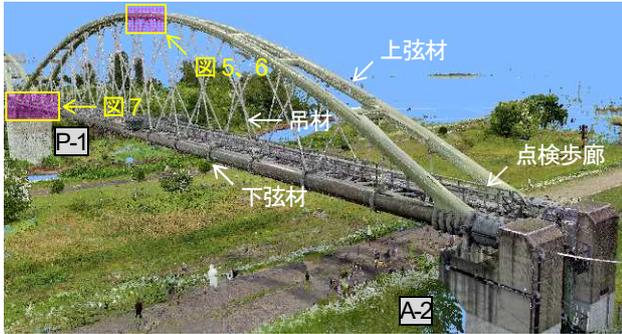


図-4 点群データのスクリーンショット (機種B)

3. 実験結果と考察

(1) 精度検証と点群数

各機種の計測結果と点群数を表-3に、点群データのスクリーンショットの一例(機種B)を図-4に示す。紙面の都合上、計測結果は本橋の上流側(左岸側から見て右側)の値のみを掲載した。

まず、精度についてである。表-3より、計測項目のうち、キャリブレーションのための長さ(水平距離)と管体の幅に関しては、いずれの機種も竣工図との誤差はほぼなかった。これは、対象物(下弦材)を見上げる角度(高水敷)、水平の角度(堤防)からだけではなく、見下げる角度(点検歩廊)からも計測したことに加え、点群データを密に取れる間隔にしたためである。これくらいの角度、間隔、距離で計測すると精度が高く、どの機種も測定精度の範囲内(2.0~2.4mm)で計測できることが分かった。

基準高についても、竣工図の基準高が管頂であったこともあり、長さと同様、全ての機種で測定精度もしくは測距精度(機種Aと機種Bが距離50mで3mm、機種Cが距離40mで5.3mm)が概ね保たれていた。

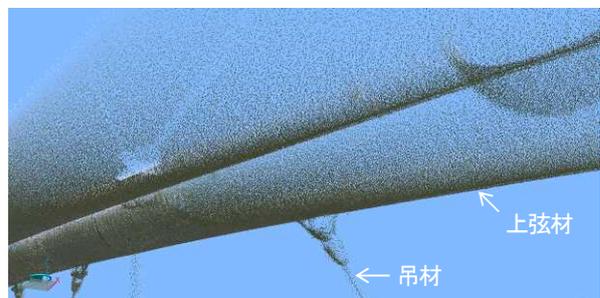
一方、そりは、温度変化の影響があったと考えられ、竣工図と実測との間に差が生じており、何れの機種も計測誤差を上回っていた。また、機種間でばらつきが大きく、機種Aが他2機種の値とかけ離れていた。これについては、本橋の長さ(水平距離)、幅、基準高に差がなかったことを考えると、機種A、機種Bと機種Cの計測日と天候が異なり(機種Aが7月11日晴れ、機種Bと機種Cが7月12日曇り)、気温差が最大3.5°Cあったことも少なからず影響していると推測される。そりの変形形状は、



a) 機種A



b) 機種B



c) 機種C

図-5 機種ごとの上弦材頂部付近のスクリーンショット

上に凸状(プラス側)となっており、崩落の予兆となるような下に凸状の変形は検出されなかった。

下弦材から上弦材までの鉛直高さも同様に、竣工図と実測との間に差が生じていた。そりよりも誤差が大きくなっているのは、温度変化の影響に加え、温度差の影響もあったと推察される。機種間の値に着目すると、機種Aと機種Bがほぼ同じ値であったのに対し、機種Cは2章2節の仮定に反して1cm程度の開きが生じていた。これについては、上弦材の計測高さが15m程度となっており、機種Cは距離が長くなるほど点群データが疎になるためと考えられる。機種ごとの上弦材頂部付近の点群データのスクリーンショットを図-5に示す。

以上のことから、本実験の条件においては、参考値以外の計測項目に関して、対象の計測機器の全てで水管橋のマクロな形状寸法を計測するのに十分な精度を有することが分かった。一方、精度に対する長大橋の温度変化の影響、温度差の影響は無視できないため、できる限り計測の時季、日時を合わせたい。また、計測可能な範囲を超えると著しく精度が落ちる機種もあるので、測定精度や測定距離だけではなく、測角精度と測距精度にも注意を払う必要がある。

なお、実験現場にはハンディタイプの可搬型レーザスキャナも持ち込んで計測を試みたが、地上型レーザスキャナに比べると、測定精度で1/10、最大測定範囲で1/5～1/15、スキャニング速度で1/2～1/5程度性能が劣るため、本橋の計測には適していなかった。これは文献⁹⁾の整理結果とも整合している。このようなレーザスキャナは、UAV空中写真測量¹⁰⁾と同様に、地上型レーザスキャナではオクルージョンを生じたり、計測機器を据え付けられなかったりした際に、それを補完するような場面での活用が見込まれる。

次に、点群数に関しては、表-3のとおり、測定精度が高く、測定距離が長い機種ほど点群数（データ容量）が多くなる。機種Cに比べ機種Aと機種Bは点群数、データ容量が約10倍である。必然、画面操作、点群データの結合、フィルタリングやノイズ除去など、計測後の内業に労力を割くことになる。また、本実験では点検歩廊上の計測間隔を密にしたが、点群数が多くなるばかりで、精度は上がらなかった。これらのことから、計測機器と計測間隔は、計測条件に見合ったものとするのが肝要である。

(2) 操作性（計測時間）

本実験において、設置と移動を含む1点当たりの計測時間を実測したところ、機種A～Cでそれぞれ約15分、約8分、約3分であった。2章2節に示したとおり、機種Cは他の2機種よりもスキャニング速度が速く、本体重量が軽い。それに加えて、自己認識機能や自動水平調整機能を持つため、中間のターゲットの視準だけではなく、計測機器をレベルに据え付ける手間が省けたことも計測時間の短さに繋がり、機種A、機種Bの約1/5、約1/3となった。一方、機種Aは本体重量が重く、都度ターゲットの視準をしなければならぬため、設置と移動に時間が掛かり、同じスキャニング速度を持つ機種Bと比べても約2倍の時間を要した。

以上のことから、各機種のスキャニング速度や本体重量のほか、ターゲットの視準の有無や計測機器の据付の難易によって操作性に優劣があり、設置と移動を含めた計測時間を左右することが分かった。これらは点検時間の長短に関わり、結果的に人件費や機器損料に跳ね返ってくる。操作性のことだけを考えれば、本実験の現場のように計測地点を選ばない場所に、精度は劣るが操作性

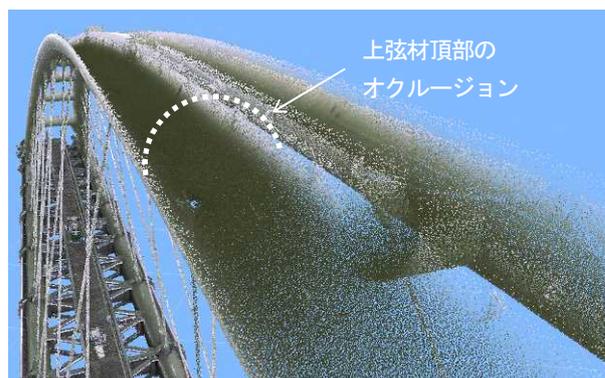


図-6 上弦材の頂部のオクルージョン（機種C）



図-7 橋脚上部から下弦材の間のオクルージョン（機種B）

の良い計測機器を用いれば、計測回数を増やして精度を上げるといったトレードも可能である。また、逆もしかりである。一般に水管橋の点検歩廊上のスペースは狭く、人が階段や梯子を昇り降りして計測機器を運ぶことになるため、その操作性は重要な要素である。

(3) 計測時の問題点

本実験で明らかとなった計測時の問題点としては、上弦材の頂部、橋脚上部から下弦材の間でオクルージョンを生じ、点群データを取得できなかったことが挙げられる（図-6、7）。このような部位で点群データを取得する方法としては、UAVで撮影した写真をSfM（Structure from Motion）処理し点群データに変換する方法^{10)、12)}や、1節で取り上げたハンディタイプの可搬型レーザスキャナで計測する方法が考えられる。しかし、それらの点群データは地上型レーザスキャナのものに比べると1オーダー以上精度が劣り、それに引きずられてデータ全体の精度が低下することもあるので、計測箇所・範囲を限定的にするなどの工夫が必要である¹⁰⁾。

4. 結論

本実験では、水管橋点検の実務で地上型レーザスキャナが使用できるのかを検証するため、複数機種を用いて、既往研究、事故事例よりも、長大で複雑な形状を持つ二

ールセンローゼ補剛形式の独立水管橋の実測を試みた。本実験の条件において得られた結論は次のとおりである。

- 本実験の条件においては、参考値以外の計測項目に関して、対象の計測機器の全てで水管橋のマクロな形状寸法を計測するのに十分な精度を有することが分かった。
- 精度に対する長大橋の温度変化の影響、温度差の影響は無視できないため、できる限り計測の時季、日時を合わせたい。
- 計測可能な範囲を超えると著しく精度が落ちる機種もあるので、測定精度や測定距離だけではなく、測角精度と測距精度にも注意を払う必要がある。
- 実験現場にはハンディタイプの可搬型レーザスキャナも持ち込んで計測を試みたが、地上型レーザスキャナに比べると性能が劣るため、本橋の計測には適していなかった。
- 測定精度が高く、測定距離が長い機種ほど点群数が多くなる。また、計測間隔を密にしても点群数が多くなるばかりで、精度は上がらないため、計測機器と計測間隔は、計測条件に見合ったものとするのが肝要である。
- 各機種のスキャニング速度や本体重量のほか、ターゲットの視準の有無や計測機器の据付の難易によって操作性に優劣があり、設置と移動を含めた計測時間を左右する。

5. おわりに

本実験の検証において、長大で複雑な形状を持つ補剛形式の水管橋であっても、点検実務で地上型レーザスキャナを使える一定の用途が立ち、崩落の予兆を捉えるのに最低限のラインはクリアしたものと考えられる。しかしながら、この結果は、計測条件、計測機器、計測項目に依存しているところが大きい。今後の課題として、より厳しい計測条件下で実証実験を行うこと、実務において点検業務をする際の計測機器の発注仕様を検討すること、本実験よりも詳細な部位・部材レベルの計測精度を確認すること、ヒートマップにより竣工図と点群データを3次的に比較することなどを進めていく予定である。

謝辞：本実験において、北見測機株式会社・大澤聡氏、株式会社アイバック・矢野裕也氏、TIIアサヒ株式会社・

杉山洪平氏、ライカジオシステムズ株式会社・下河原篤史氏から計測機器の貸与、水管橋の計測のご協力と貴重なご意見を賜った。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1)美唄市都市整備部上下水道課：美唄市水道事故に関する報告書について、<https://www.city.bibai.hokkaido.jp/soshiki/18/10857.html>、(2023年1月13日閲覧)
- 2)和歌山市企業局：六十谷水管橋破損に係る調査委員会報告書について、<http://www.city.wakayama.wakayama.jp/suido/1032420/1046310.html>、(2023年1月13日閲覧)
- 3)木下耕介・久村孝寛・山口裕貴・田中大地：衛星 SAR 画像を活用した橋梁の異常変位検知～和歌山県六十谷水管橋を事例として～、AIデータサイエンス論文集、3巻J2号、2022
- 4)厚生労働省医薬・生活衛生局水道課：水道の諸課題に係る有識者検討会、https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_25808.html、(2023年1月13日閲覧)
- 5)厚生労働省医薬・生活衛生局水道課：全国上下水道水管橋緊急調査の結果について、https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_23048.html、(2023年1月13日閲覧)
- 6)厚生労働省医薬・生活衛生局水道課：水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン、2019
- 7)公益社団法人日本水道協会：水道維持管理指針、2016
- 8)榎本真美・二宮建・下川光治・服部達也・森川博邦：橋梁点検3次元管理支援システムの開発と実証実験、情報処理学会第83回全国大会、5F-06、2021
- 9)山口愛加・関和彦・窪田諭：3次元点群データを用いた橋梁の損傷のヒートマップ表示、情報処理学会第83回全国大会、1ZE-03、2021
- 10)窪田諭・何啓源：複数の計測機器を用いた道路維持管理のための3次元データの構築、知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌) Vol.31、No.6、pp.867-875、2019
- 11)澁谷拓世・溝口知広：橋梁レーザ計測点群の部材別分解と3次元モデル構築手法、2021年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、A0415、2021
- 12)塚田義典・田中成典・窪田諭・中村健二・岡中秀騎：点群データを用いた橋梁の3次元モデルの生成に関する研究、知能と情報(日本知能ファジィ学会誌) Vol.27、No.5、pp.796-821、2015
- 13)国土交通省北海道開発局：道路・河川工事仕様書、<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/slo5pa000000kv6k.html>、(2023年1月13日閲覧)
- 14)社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編、2017
- 15)窪田諭・塚田義典・田中成典・梅原喜政・中原匡哉・飯田拓馬：構造物の3次元データ計測に用いる可搬型レーザスキャナの調査と設計、土木学会論文集F3(土木情報学)、Vol.75、No.2、H_105-H_113、2019