

成果報告書

3次元モデルとメタバーズを活用した インフラメンテナンス技術に関する教育手法の構築

林 和彦 香川高等専門学校

角野 拓真 阿南工業高等専門学校

2023年12月

1. 研究の背景

現在、道路や鉄道を構成する橋梁等に代表される社会基盤施設の老朽化が社会的な問題となっており、合理的で、かつ高精度な維持管理体制の構築が求められている。一方で、少子高齢化により維持管理に携わる技術者が不足していることから、効率化に資する新技術の開発を進めるとともに、より高度な技術力を有する技術者の育成を行うことが急務である。ICT 技術の進歩により様々な点検や診断を行う支援技術が開発されている。橋梁に関しては我が国には約 73 万橋あり、うち地方公共団体が管理する橋梁は全体の 9 割以上であり、地方においてこれらの橋梁を維持管理していくためには膨大な数の技術者を確保していく必要がある。

橋梁点検・診断に携わる人材育成に関しては、国土交通省では点検・診断をおこなう技術者に対しての資格を定めており、道路橋点検士（一般財団法人橋梁調査会）他、大学等や民間が認定する技術資格を国土交通省登録資格（公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者資格登録）として認定する制度が運用されている。橋梁点検に関しては数多くの技術者・技能者が携わっており、基礎的レベルから高度なレベルまで必要とされるスキルも様々であり、それらのニーズに応じた適切な教育制度が拡充することが望まれている。

大学においては長崎大学の道守養成ユニット、岐阜大学等のメンテナンスエキスパート(ME)等の橋梁を主体とした高度なメンテナンス技術者育成が行われている。高等専門学校（独立行政法人国立高等専門学校機構に所属する国立の 51 校 55 キャンパス）においては、2014 年より舞鶴工業高等専門学校に社会基盤メンテナンス教育センターを立ち上げ地域における橋梁メンテナンス人材育成を開始し、准橋梁点検技術者および橋梁点検技術者を国立高等専門学校機構として資格認定を開始した。さらに 2019 年度より文部科学省の助成事業「KOSEN 型産学共同インフラメンテナンス人材育成システムの構築」が採択されたのをきっかけに現在は福島高専・長岡高専・福井高専・香川高専の 5 高専にも拡充して実施されている。このうち初級レベルの位置づけである「橋梁点検（初級編）」講座は、事前の e ラーニングによる知識習得と対面 2 日間の実習を主体とした講習会により構成されており、定員 10 名の少人数教育により実施されている。この講習で合格認定された准橋梁点検技術者は、国土交通省の民間資格認定には達してはいないものであるが、橋梁点検の基礎的な技術の習得・ボトムアップを達成目標としており、地方自治体職員、地方のコンサルタント等からの受講ニーズも高い。橋梁点検（初級編）講座は現時点で 1000 名以上の受講者を輩出している。

このような構造物の維持管理を行う技術者を育成するためには、専門的な知識を座学により体系的に学修すると同時に、実構造物等を用いた現場特化型の実習が必要となる。前述の高専における橋梁メンテナンス人材育成に関しては、香川高専では 2020 年 4 月に約 300m²の実習フィールドを整備し、実際に供用され劣化や架け替え等で撤去された構造物を移設し、教育に用いている（図-1）。このように体系的に教育を実施するために同種の教育施設を設置していくことが望まれるが、各学校等において予算や人員の確保・施設の維持を行うことは現実的には困難な状況にある。国土交通省の各地方整備局の技術事務所等でも同様の実習施設を備えており、大学や高専と連携した人材育成も望まれているが、実際には地理的な制約も多い。また、多種様々な劣化部を有する橋梁教材を備えることは数の制約もあり、移設教材でなく近隣の実橋梁を使った実習を行うにしても、多種多様な劣化の種類を擁す橋梁の選定やそれらが永劫に劣化部分を残したまま教材として使い続けることは難しい。



図-1 香川高専での橋梁実習フィールドとそれを用いた講習

近年、ICT 技術の発展により構造物を 3 次元にモデル化し、仮想空間上に構築するメタバース技術が発達し、安価な機材でできるように日々進化している。この技術を確認して橋梁点検技術者育成に資することが求められている。例えば、国土交通省中国地方整備局中国道路メンテナンスセンターにおいては、VR（バーチャルリアリティ：仮想現実）橋梁点検講習会を実施しており、VR ゴーグルを用いて橋梁点検目的でモデル化された橋梁を用いて損傷部位を点検する技術を学ぶコンテンツを用いたパッケージ化された講習会を運用している（図-2）。

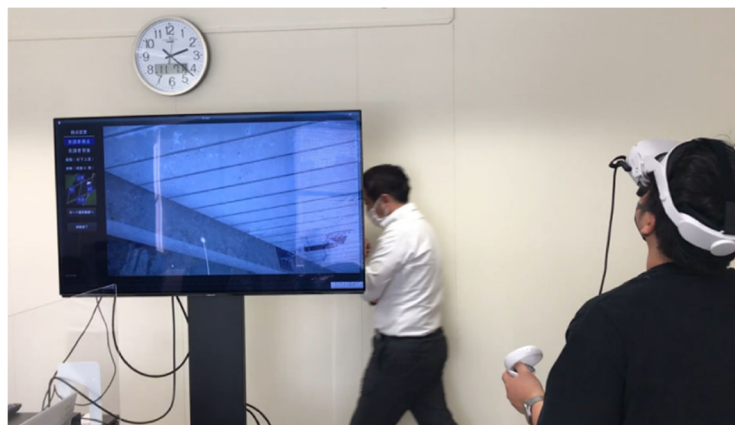


図-2 VR ゴーグルを用いた橋梁点検実習の体験（中国道路メンテナンスセンター）

2. 本研究の目的

著者らが目指す方向性は次の通りである。橋梁メンテナンス技術者育成に焦点をあて、実際に供用されている橋梁の 3 次元モデルを構築し、VR ゴーグルやタブレット端末を介して、仮想空間内で 3 次元モデルを用いた診断技術の学修プログラムを構築する。それを活用しながら、地域の技術者の育成、学生の教育に資する。この取組みは、橋梁のデジタルアーカイブに近いものである。

教育コンテンツとして考えると、特定の橋梁のモデル化ではなく、典型的な劣化を仮想的に盛り込んだ仮想橋梁を構築する方向性もあり得るが、著者らは忠実な橋梁の再現を目指した。リアリティを追求することを念頭に置いているが、その中には劣化の経時変化、鉄筋等の内部情報、補修工事の前後の状態、などの時系列も含んだ 4 次元であり、また、コンクリートの浮きなどを点検ハンマーで調べた際の打音音声、非破壊試験の結果等の診断情報、図面や地理的要因の付属情報も含めることも可能である。

ひとつの学校等ごとにこのようなコンテンツを揃えることは橋梁の構造や規模、劣化要因の種類を考えると非常に困難である。その代わりに、賛同する各学校等で作成したコンテンツを共有するようなコンソーシアム、現在急速に進められている公共のオープンデータプラットフォーム等での運用も視野に

入れている。

今回は上記を見据えた取組みの中で、導入となる3次元モデル化手法の構築、診断情報の付与、等について基礎的な検討を行った。

3. 3次元の計測技術

3.1 3次元教材の特徴

3次元モデル化した教材を用いることの利点は次のように整理できる。

- ① 現場に行かずに何度も確認することができる
 - 移動のための距離・時間・費用の縮減ができる
 - 学習後に個人で何度も復習ができる
- ② 受講者の視点が多様化される
 - 足場が必要な箇所、立ち入りができない箇所でも閲覧ができる
 - 講師・受講者の視点を同一にすることができる（同じものを見ることによる教育効果の向上）
- ③ 作成モデルを複数の教育拠点で共有できる点
 - 各学校・組織で個別にコンテンツを整備する必要がない
 - 地域依存性もある橋梁の劣化という観点で、各学校・地域でコンテンツ作成を分担する（アルカリシリカ反応、凍害等のコンテンツは発生する地域でないと難しい）

現状ではPC上に保存した詳細データを扱うためには、ある程度高性能のPC（特にグラフィックボード）が必要となってくることと、オンラインサービス上で軽快に作業を行うためにはデータ容量を縮小する必要があり解像度等のクオリティが低下するデメリットもあるため、「詳細」かつ「どこでも利用」という両方のニーズを同時に両立することは難しいが、このあたりは今後のICT技術の発達やICTインフラの整備により近い将来に達成されることと思われる。

3.2 3次元計測技術の現状での利用

現時点において橋梁メンテナンス分野で3次元を活用したものとしては、橋梁点検のひび割れ等の記録において短時間で調書を作るために写真だけでなく3次元測量することも行われている。簡単に利用できる手法として、LiDAR（ライダー）技術がある。近赤外光や可視光、紫外線を使って対象物に光を照射し、その反射光を光センサでとらえ距離を測定するリモートセンシング技術である。LiDARはスマートフォンやタブレット（例えば、iPhone Proシリーズ、iPad Proシリーズ）にも組み込まれ、フリーまたは安価なアプリを用いて瞬時に3次元モデルが構築できるため、多くの現場で使われるようになってきている。ただし、橋梁調査の多くの利用では精度向上の観点よりも短時間で計測を行うことを目的としているため、詳細部位までのモデル再現は目的としていない。特に、スマートフォン等の手持ち機材のLiDARでは点群密度に限りがあることや橋梁の詳細を撮影するために何度も同じ場所をスキャンすることによって写真合成がずれてしまうことも多く、後述の通り本検討では橋梁全体のモデル化では使用はしていない（一部局部的なモデル化には活用・併用している）。



(a) 写真テクスチャが一部不鮮明な例



(b) 往復撮影によりモデルがずれた例

図-3 LiDAR でモデル化した事例

土木建築向け 3D レーザースキャナも現状は一般化され、測量分野では多く用いられている。橋梁についても瞬時に座標データを取得することができるため、新規建設における既存構造物との位置関係の把握や施工時の検討に用いられることが多い。3次元スキャナで得られたデータはその点での xyz 座標および色情報であるが、あくまでも点の集まりであるため詳細を見るためには点群密度を増やす必要があるが、ひび割れ等の線として分布する情報を扱うには苦手である(図-4)。また、機材を据えたところから見える範囲でしかデータがとれないため、例えば桁の内側の詳細形状までを計測しようとなると、レーザースキャナを数多く動かすことが必要であり、例えば鋼橋のフランジ等の形状を忠実にモデル化するためには膨大な視点から計測することとなり、現実的ではない。



図-4 3D レーザースキャナによる点群データの例

3.3 SfM 技術 (フォトグラメトリ)

SfM (Structure from Motion) は、オーバーラップするように撮影された写真から写真測量の技術を用いて写真を解析し 3 次元位置を同定して 3 次元モデルを作成する手法であり、フォトグラメトリ (Photogrammetry) とも呼ばれる。飛行機やドローンから地表面をオーバーラップしながら撮影し、地図作成や 3 次元地形を計測する手法も同じ方法を用いている。点群データが得られた後、それらを結んだポリゴンデータを生成し、その表面に撮影した写真情報を貼り付けるため、視覚的にも詳細なリアリティのあるモデルを作成することができるのが特徴的である。その特徴を活かして建築物のアーカイブなどでも数多くの実績がある。

現地では例えば 6 割程度以上のオーバーラップした写真を多数撮影することのみが用いられるため、スキャナや前述の LiDAR 等の機材を使用しなくて良い。カメラのみを現地に持参し、長さ情報はカメラの焦点距離等でも可能であるが、寸法の一部を実測した値や、物理的にスケールを写真に写し込む等でも寸法を同定できる。このような手軽さから、カメラ以外を必要としない点で海底に沈む船をモデリングする等の戦災遺構のデジタルアーカイブにも活用されている。

以上の利点を加味して、本手法での橋梁の 3 次元モデルの構築においては、SfM 技術を用いることを標準とした。

4. SfM を用いた橋梁モデリング手法

4.1 橋梁の特徴

SfM 技術は前述の通りある程度広く用いられている手法であるものの、橋梁実構造物を撮影するには多くの課題があった。著者らは、まずは、橋梁をモデル化する方法を試行錯誤的に検討した。

比較的規模が大きい橋梁は、その大きさだけでなく、SfM 技術を用いる点での困難な点が以下の通り存在する。日射が当たり、車両交通もある路面、撮影が困難な高欄、日中でも暗くなる桁下特に支点付近、横桁やフランジ等の凹凸、一見して特徴がなく同じパターンが続く桁の内部 (桁、対傾構、補剛材などが規則的に配置されている)、桁下と外部とでの明暗差が極端に大きいこと、等である。

4.2 使用した機材と撮影方法

1) SfM ソフトウェア

Recap Photo (大学・高専等の教育機関はフリーで使用できる)

Reality Capture (学生への教育目的ではフリーであるが、研究・その他外部への公表等では有料ライセンス取得が必要。またはモデル生成毎に料金を支払う方法もある)

他にも有料ソフトのフリー版も複数試したが、モデル生成できる数に限りがあり、部分モデルを生成して他のソフトで合成をする方法もあるが、手間がかかること合成時に貼り付けたテクスチャがずれる等の不具合も解消せずに上記のソフト (有料ライセンス) の利用を主としている。

2) コンピュータ

Recap Photo は Autodesk 社のサーバーで処理をして 3 次元合成をするため、コンピュータのマシンパワーはあまり必要としない。

Reality Capture はコンピュータ上での計算が必要である。写真合成・モデル生成時は CPU のみで、テクスチャ貼り付けの際にはグラフィックボードの GPU (CUDA コアが必要) を使用する。

いろいろな PC 環境で使用しているが、使用した中で最高スペックの構成は、Windows 11、CPU は Intel Core i7 12700K、メインメモリは 96GB、グラフィックボードには NVIDIA RTX A4000 (GPU メモリ 16GB) または NVIDIA GeForce RTX 3070 (GPU メモリ 8GB) とした。

2) 撮影機材

写真撮影においては、一眼レフカメラで撮影するのが精細のモデルが得られるものの、そもそも一眼レフカメラで画角奥まで焦点 (ピント) のあった写真撮影をするのは留意点が多い。橋梁 1 径間程度で数百枚~千枚を撮影するため、撮影が疲れる。広角のレンズ (35mm フィルム換算で焦点距離 24mm 程度のレンズ) も必要である。本体の軽さを考慮して、一眼レフでは例えば Canon EOS Kiss X9 を使用した。

動画を撮影して動画から静止画を切り出す方法が手軽であり、現在の主流の計測ではその手法を多く採用している。ビデオカメラの場合、光学ズーム機能などは優れているものの、ポートレートモードではピントが合う範囲が狭く、橋梁を撮影しても、手前の桁にピントがあると奥の桁にはピントが合っていない状態などもあるため、SfM の写真合成には必ずしも適当ではない。また、本体の光軸方向の長さが大きいと、橋梁の支点部等に近づいても取り回しが悪いことがある。ビデオカメラのモデルによっては広角側の画角が足りない場合もある。その点では、スマートフォンの動画撮影機能に優位性がある。

スマートフォンでは、最近では 4K ビデオ撮影 (横 3840×縦 2160 ピクセル) 等の解像度があり、また、毎秒 30 フレームだけでなく 60 フレームの撮影もできる機材が多い。iPhone 12 Pro を用いた (本機材には LiDAR の機能は内蔵するが、その機能は使用していない)。

3) 撮影時間帯

明るい日中はフォトグラメトリには適していない。その理由は、高欄などの影が残ってしまうことと、撮影中にも影は時々刻々と動くため、撮影する時間が変わると写真が異なるため、特に雲が動く際に日射と影が交互になるような場合にはモデル生成が難しい。もうひとつの観点は明暗差である。カメラは絞りを変えることで明るいところは絞って暗めに、暗いところは絞りをあけて明るく撮影し、どこでもほぼ同じ程度の明るさに撮影できるように調整されるのが通常である。ただし、橋梁の下面と上面とを結ぶための桁端部の撮影ではどちらの露出に合わせるかによって、片方が暗く潰れたり、逆に白飛びしてしまうこともある。また、張出し床版を下面から撮影する際に背景に明るい空が入り込むと床版が暗くなる場合もある。その点では、曇りの日に撮影することや、朝のまだ日が昇りきらない時点、日没後の直後などがフォトグラメトリの撮影には適している。

桁の中特に桁端部は元々暗いため、日没後は光量が足りない。よって、曇りでない日に最短で撮影をしようとする場合、①日が昇りきる前の早朝に路面と桁側面を撮影し、その後少し日が昇って来たときに桁の中を撮影する。撮影 1～2 時間。②日没の 1 時間程度前から現場に入り明るい時間に桁内部を撮影し、日没になった時点（空はまだ明るい）で桁の側面と路面を撮影する、で対応するのがよい。

4) 撮影方法

写真の場合には、60%以上オーバーラップするように連続的に撮影する。その際に、気をつけることは、人物が同じ位置に立ったまま体の向きを回転させて撮影することではなく、橋梁と一緒に撮影者も平行移動しながら撮影位置をずらしていくことである。視差ができることにより写真測量で合成ができるためである。1つの立ち位置からカメラだけを回転して10枚写真撮影をしたとしても、それは広角または天球カメラで1枚写真を撮影したものと同じ情報量しか持っておらず写真合成による位置同定ができないことになる。

鋼橋のプレートガーダーの下フランジは、断面に対して桁を回り込んで回転して撮影するようにすると撮影漏れが少なくなる。コンクリートT桁のウェブ側面と下面も同じで、斜めから側面と下面とを同時に含む写真を撮影しておかないとモデルの合成ができなくなる（図-5）。

高欄や地覆に関しては、川などから見上げた形の撮影ができるが、上方からのアングルが少なくなるため、撮影棒を使って自撮りをするような形で撮影をする。その際に撮影者の人物も写り込むが、動いている物体はそもそも写真合成ができないため、気にせず人が映り込んでも問題ない（図-6）。

ビデオカメラを動かすときに瞬時に手を動かすと画像がぶれるのでカメラゆっくり動くことを心掛ける。4Kの解像度で、毎秒30フレームとするか毎秒60フレームとするかは、写真のクオリティとしての違いはほとんど無いが、あとで何秒おきに写真を切り出すかに関係する。ゆっくり広範囲を撮影した場合には1秒毎に静止画1枚を切り出す程度が良いが、写真の量を増やした方がよい（オーバーラップ量も増やす）場合には、切り出し枚数を上げるためである。



図-5 桁での近接撮影



図-6 撮影棒を用いた高欄の外側の撮影

5) スケールの写し込み

寸法を合わせるためには、橋梁の長さを実測しておくか、付近にスケール（測量用スタッフ：2m～5m）を写し込んでおく必要がある。これまでの経験では、1軸の長さがわかればよく、直角にxyz方向にスケールを配置する必要はなかった。理由は定かではないがスケールを入れなくてもほぼ問題なく実際の大きさのモデルが生成されており寸法の修正を掛ける必要が無いレベルであったが、それはレンズの焦点距離等の情報を取得しているのかもしれないが、今後の課題としたい。

6) 撮影所要時間

桁内部をモデル化するには河川の高水敷、堤防の遊歩道等で歩いてアクセスができる程度の桁下空間が狭いものが望ましい。撮影棒を用いると、3m程度であれば許容である。時間をかければ高さ4～5mでも不可能ではない。

手持ちのカメラで撮影できる状況の場合、1径間で主桁が2～3本であれば上下面1時間程度で撮影可能である。熟練すれば30分程度である。予備も入れて写真枚数は1000枚程度で、動画では20分（約1000秒）程度である。

6) 解析

PC上で作業をするReality Captureの例で説明する。

- ・前述の1径間20分程度の撮影動画から、本ソフト上で動画から静止面の切り出しを行うときのPC計算時間が1～2時間程度。
- ・モデルの計算に2時間（1度でほぼ全ての写真が使われてモデル生成ができればよいが、写真の繋がりが不十分で例えば路面と桁下が分離して独立した2つのモデルとして出力されることは多々ある。その場合、両者に共通する画像から同じ点であるという情報を数点付加した上で再解析を行うことでモデルが繋がる。その場合は追加の作業時間が必要となる）。情報が付加されて行くにつれて解析時間は短くなる。
- ・写真テクスチャの貼り付けの計算に1～2時間程度
- ・必要な範囲のトリミング、情報量が多すぎるために不要なデータ量を減らす作業で1時間程度。（橋梁は平面の部材で構成される部分が多いため点群データを減らしても支障がない。その代わりにそれほどデータ量は多くない貼り付けるテクスチャの写真データはできるだけ落とさないようにするのが橋梁の場合の留意点である。）

7) 橋梁以外の環境構築

ゲームエンジンを用いて場を構築する必要がある。

作った橋梁モデルだけでなく、周囲の地形を作るには別のソフトで構築する。ゲームエンジンと呼ばれるもので、コンピュータ上で重力加速度を含めた色々な状況をモデル化できるものである。周囲の道路、河川、土手などを作り、光の加減のライティングを調整する。特にメタバースとして実際に橋梁の上を歩くような場合には、橋の上を歩けるようにアクセス階段をつけ、橋梁上を歩くためには橋梁に人がぶつかったら停止するという「当たり判定」の有無等を設定する。

この作業に数時間で、ここはいくらでもカスタマイズが可能となる。

ローカルPC上で橋梁を見たり、VRで体験したりするにはここまでの作業でもよい。

ゲームエンジンの例としては、Unity、Unreal Engine、Twinmotion 等がある。

8) メタバースプラットフォームへのアップロード。

オンラインのメタバースプラットフォームにアップロードすることにより、オンライン・多人数で体験することができる。

例えば、概ね無料で利用できるサービスとしてはCluster、VRChat 等がある。

著者らは、以前よりVRゴーグルはMetaQuest2を使用していたため、親和性が高いCluster、Unityの組み合わせで試行した。ただし、無料プラン内でアップロードできるワールドの解像度の制限等もあるため、これらの最適な方法についてはまだ模索中である。

5. メンテナンス教材としての工夫

5.1 モデルとして構築した橋梁

本研究期間において、数多くの橋梁を題材に、撮影方法の試行、ノウハウ蓄積を行った。主として地方橋梁であり、立ち入り禁止場所でなく、一般にアクセスできる箇所（歩道、桁下の遊歩道）から撮影を行っている。補修中においては、発注者の許可を得て撮影をした。ノウハウ確立のために使用した橋梁は数多く失敗した事例も多く、撮影した橋梁の全ての詳細記載は割愛するものの、モデル構築が完成した事例として以下の橋梁について紹介する。

RC床版橋：補修前後で撮影し、鉄筋腐食・コンクリートの浮きなどの打音情報を得た。補修前の撮影は本研究助成の前に撮影が完了していたが、とりまとめは何度も修正し、本研究の範囲で行った。

鋼プレートガーダー橋：塩害地域で腐食の程度が大きく、架け替え等の対応を検討されている橋である。

RCゲルバー橋：管理者より補修が実施される情報を得て、補修前（打音含む）、補修中のコンクリートはつりが行われた際の断面欠損した鉄筋の様子、補修後、の3ステップに渡り計測ができた。

これらのモデル化後の状況を図-7に示す。RCゲルバー橋の施工ステップについては図-8に示す。

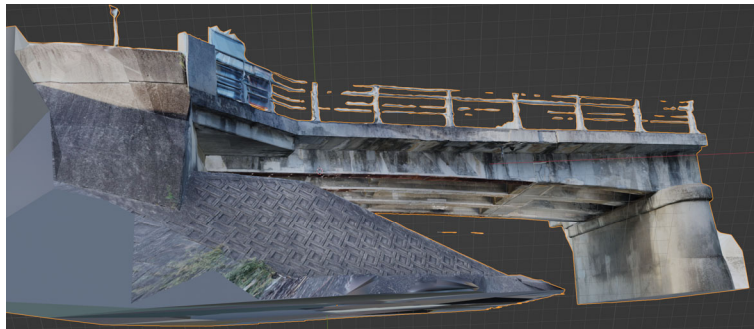
RCゲルバー橋についてのメタバース上に配置した例（Clusterを使用）を図-9に示す。Clusterについては解像度が自動で落とされてしまうためその対応や別のプラットフォームの使用等については今後の課題とする。



(a) RC 床版橋



(b) 鋼プレートガーダー橋



(c) RC ゲルバー橋

図-7 モデル化後の対象橋梁

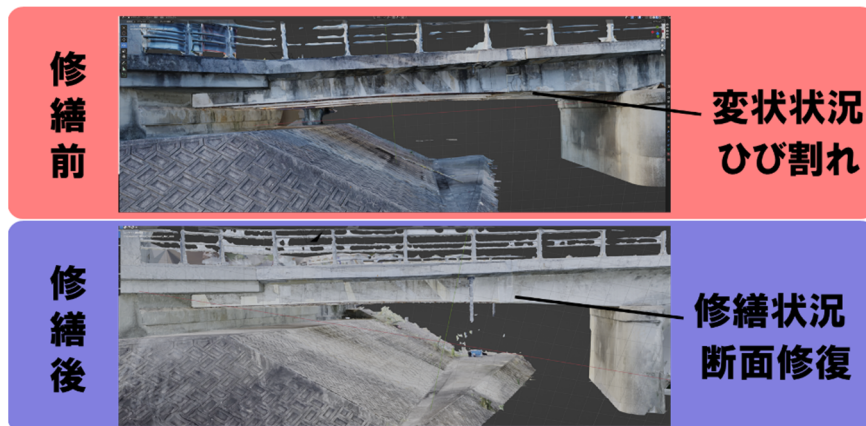


図-8 施工ステップの推移



図-9 メタバース上の橋梁（RC ゲルバー）の試作版

6. まとめ

3次元モデルの構築には、近年数多くの活用事例が報告されている SfM (Structure from Motion) を用いて実施した。3次元モデルは、対象とした構造物を一眼レフカメラ等により撮影された静止画像、あるいは 4K ビデオカメラにより撮影された動画から一定間隔で切り出した画像を用いて、フォトグラメトリソフトウェアにより構築した。

3次元モデルを作成するための撮影を行う上で留意すべき項目として、得られた知見を以下に列挙する。

1) 橋梁上に影が発生しない環境下での撮影の必要性

3次元モデルを作成する際に、橋梁上に影が生じている場合、画像を合成する解析を行う段階で、異なる画像上の同一点を認識できず、3次元モデルの精度が低下する恐れがある。そのため、曇天の場合、あるいは夕方から日没前の橋梁上に影が発生しない環境下で撮影を行うことが望ましいことがわかった。

2) 基準尺を同時に撮影する必要がある点

3次元モデルを作成する場合に、作成した3次元モデルに正確な寸法情報を持たせるため、箱尺等の寸法の基準となる基準尺を同時に撮影する必要があることが分かった。3次元モデル作成後は、基準尺に合わせて、3次元モデルの寸法補正を行うことで、3次元モデル上で実寸法情報を付与することができる。

3) 画像同士を 60%程度以上オーバーラップさせる必要性

3次元モデルを作成する場合、使用する画像は、60%程度以上オーバーラップしておく必要がある。60%程度以上のオーバーラップが確保できない場合、異なる画像上の同一点を認識できず、3次元モデルの精度が低下する恐れがある。橋梁の支間長が 20m 程度までの場合、約 60 分間の撮影で得られた数百枚から千枚程度の画像を用いることにより、概ね 60%程度以上のオーバーラップを満たした画像を用いて3次元モデルを作成することができることがわかった。