

第3章 イノベーション技術の開発・適用事例の調査

本章では、2章で紹介した各カテゴリーに対応するイノベーション技術の開発事例ならびに適用事例の調査結果を示す。

- ・ 状態変化の有無を推定した事例（カテゴリー①に対応）

本事例は、設置期間を通じて架台が橋梁へ及ぼす影響の有無を確認するとともに、撤去後に設置前の状態に復元できるか確認するためのモニタリングを実施した内容である。

- ・ カメラ画像とAIを用いた路面状態診断技術（カテゴリー②に対応）

本事例は、舗装の鳥瞰画像の取得、ひび割れの評価、さらに機械学習ベースの特徴量マッチングを利用したわだち掘れ量評価に関する内容である。

- ・ 加速度センサによる橋梁の挙動を推定した事例（カテゴリー②に対応）

本事例は、横桁ウェブに生じた亀裂発生の原因究明を目的とし、加速度センサを用いた主構と床版の「たわみ挙動」の推定を行った内容である。

- ・ 3次元構造物情報を活用した事例（カテゴリー④に対応）

本事例は、GISをベースとした3次元構造物DBの構築から、構造物の3Dモデル化、3Dモデルへの損傷情報を付与した内容である。

- ・ Deconstruction monitoringの試行とUAVによる橋梁挙動の解明（カテゴリー⑤に対応）

本事例は、トラス橋の床版撤去に伴う変形挙動や部材力および応力の解放を計測により把握し、現在、計算でしか求めることのできていない死荷重応力へ及ぼす実態を把握した内容である。

3.1 状態変化の有無を推定した事例（カテゴリー①に対応）

○適用したイノベーション技術

長距離レーザ変位計測など

○フォーカスした内容

東京 2020 大会の開催にあたり、海の森水上競技場に立地している既設橋（下路式アーチ橋、全長 249.5m）のアーチリブの上に、放送用の仮設カメラ架台（以下、ケーブルカメラ架台）を設置することになった。対象橋梁を図 1 に示す。設置後から使用目的を果たすまで約 4 か月半の期間、橋梁上に据え置かれるため、以下の状況の変化の把握を目的としてモニタリング計測を実施した。

モニタリングは、主として、設置期間を通じて橋梁への影響の有無を確認すること、撤去後に設置前の状態に復元できるか確認することとし、ケーブルカメラ架台が設置されることで影響を受けるケーブル架台近傍の①アーチリブ、②斜材ケーブル、③主桁を対象部材として抽出した。上記に対し、着目状態とその対象から、図 2 に示すモニタリング項目を設定した。具体的には、アーチリブの傾斜および鉛直変位、ケーブルの加速度である（図 3）。このとき、主桁の変形やひずみを長期的に計測する手法も対象になり得るが、アーチリブと斜材ケーブルの状態を把握することで、主桁の状況も間接的に把握できるだろうと考え、本計測の対象外とした。なお、本事例紹介では、長距離レーザ計測によるアーチリブの変位計測について詳述する。



図 1 対象橋梁

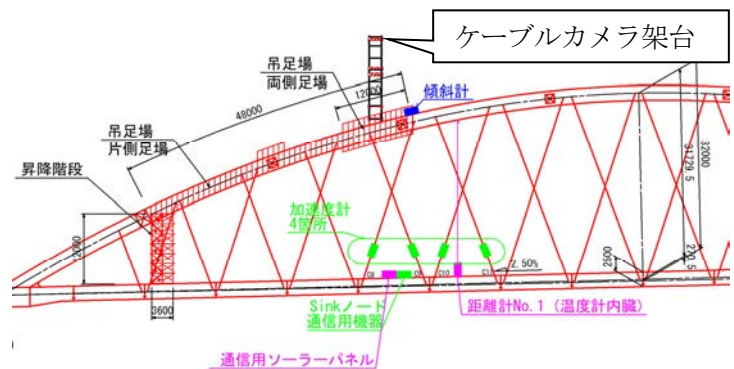


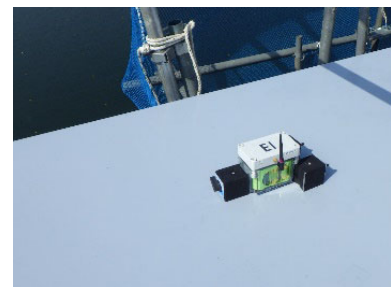
図 2 ケーブルカメラ架台の設置位置



a)加速度計



b) レーザ変位計



c)傾斜計

図 3 計測機器設置状況

○計測において留意した点など

長距離レーザ変位計は、市販の無線加速度センサで、メッシュ型通信を行うものを用いた。これは、LPWA (Low Power Wide Area) の電波にてセンサ近傍に設置した中継機 (ゲートウェイ) へ取得データを転送し、さらにゲートウェイから 4G-LTE 回線を通じてクラウド環境へ通信し、リアルタイムで計測結果を確認できるように設定した (表 1)。計測器は内臓バッテリーで長期間駆動するが、ゲートウェイについては、長期の計測のため、ソーラー電源にて給電を行った (図 4)。

ここで、計測値のリピータビリティについて、事前に、トータルステーションによる測量との差異について、プリズムシールなどのターゲットは用いない測距離 50m 条件で検証を行い、再現性を確認している。

表 1 レーザ変位計の仕様

	変位計
通信方法 (中継機まで)	LPWA
通信方法 (クラウドまで)	4G-LTE
計測間隔	10min (架台設置後60min)
アラート機能	有



図 4 ゲートウェイ

○分析により確認された立証した事象

変位計設置時の状態を基準とし、その基準距離からの変位量を計測した。計測期間中変動は、橋梁の温度変化による伸縮によるものと推定されるが、変位計設置当初と撤去ごろ結果を比較すると変位量が、およそ設置時に回帰していることが確認できる (図 5)。架台設置時のデータを見ると、最大 2mm 程度の鉛直変位が観測されているが、橋梁全体の変動が大きく、ほとんど影響が生じていない状況であった。

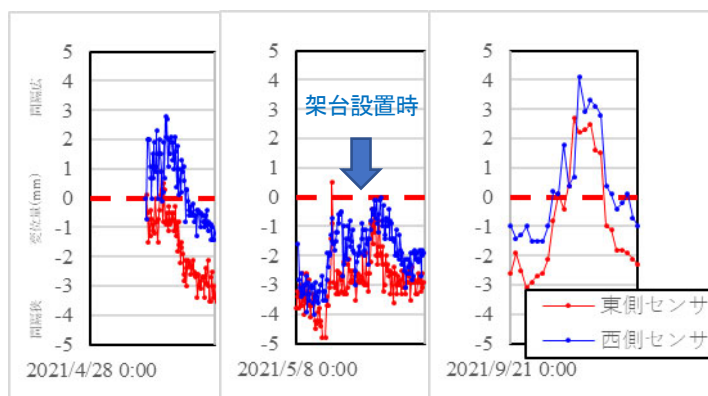


図 5 変位量の計測結果

○まとめ

架台設置・撤去に対し、計測で着目したアーチリブは元どおりとなったと見なしてよく、計測期間の範囲において、橋梁への影響は生じないものとした。ここで、外気温による橋梁全体の伸縮による影響が大きく、今回の測定が、4月開始と9月終了と、気温条件が似通っていたことが、比較的分かりやすい結果のなった要因と推察される。このように、計測データを対比するためには、季節を類似されて、フォームポジションに回帰したこと説明するのが良いと考えられる。

このように、長距離レーザ変位計測は、静的な条件とはなるが、計測レンジ（計測距離、変動範囲等）を事前に検証した上で、合致した機器を用いることで、測量手法を用いた計測に代替できる可能性がある。

○参考文献

- 1) 新倉利之，中澤治郎，奥村祐介，BURDEN Alan，新谷達也：東京 2020 大会ケーブルカメラ架台の設計と施工（その 1），令和 4 年度土木学会全国大会年次講演会，2022.
- 2) 脇坂大地，高沢優人，安田亨，奥村祐介：東京 2020 大会ケーブルカメラ架台の設計と施工（その 2），令和 4 年度土木学会全国大会年次講演会，2022.

3.2 カメラ画像と AI を用いた路面状態診断技術（カテゴリー②に対応）

○適用したイノベーション技術

機械学習を利用した画像解析技術

○フォーカスした内容

スマートフォンなどの機材に搭載されるカメラが近年急速に高性能化、高機能化しており、高解像度の鮮明な画像が従来になく容易に取得できるようになった。また機械学習技術の発展により高度な画像解析が容易に行えるようになってきている。舗装状態の診断にも画像撮影と AI による画像解析を適用し、路面診断を高度化する取り組みがある。ここでは、舗装の鳥瞰画像の取得、ひび割れの評価、さらに機械学習ベースの特微量マッチングを利用したわだち掘れ量の評価について紹介する。

車内に設置されたドライブレコーダやスマートフォンにより舗装路面を撮影した画像に鳥瞰変換を施し、多数の画像をつなぎ合わせることで、真上からみた詳細な路面画像を取得することができる（図 1）。通常はラインスキャンカメラ等を搭載した専用車を利用して作成されるものであるが、汎用カメラによる画像を利用してカメラパラメータの推定や画像つなぎ合わせにより同等の画像を取得できる。カメラ画角の画像を鳥瞰変換することにより、路面変状の大きさや位置の定量的な把握が容易となる¹⁾。

機械学習ベースのひび割れ評価の代表的な手法としてセマンティックセグメンテーションによるひび割れの抽出が挙げられる（図 2 左）。教師画像の学習によりひび割れを抽出できる。管理指標に用いられるひび割れ率も算出できる（図 3）が、管理指標には含まれていないひび割れ総延長、交点数、縦横ひび割れの比といった多様な特微量（図 2 中および右）も算出できるため、より合理的な管理指標を創出することも期待される。

路面形状の評価にも画像の機械学習技術が利用できる。路面が平坦であることを仮定した鳥瞰変換は、路面の凹凸により歪みが生じる。連続撮影された鳥瞰画像からこの歪みを解析することにより、舗装管理指標であるわだち掘れ量などを評価することが提案されている（図 4）²⁾。Structure from Motion (SfM) と呼ばれる 3 次元形状構築技術も利用できるが、本手法は SfM を計算負荷、精度の観点で改善するものともいえる。画像の特微量抽出とマッチングが 3 次元構築の要素技術であるが、機械学習によりこれらをロバスト化、高度化している。

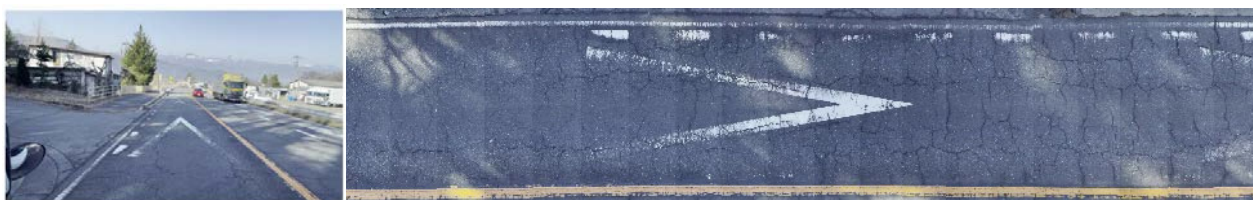


図 1 車内カメラによる撮影画像と鳥瞰図¹⁾



図2 ひび割れ抽出とひび割れ特徴量の算出¹⁾

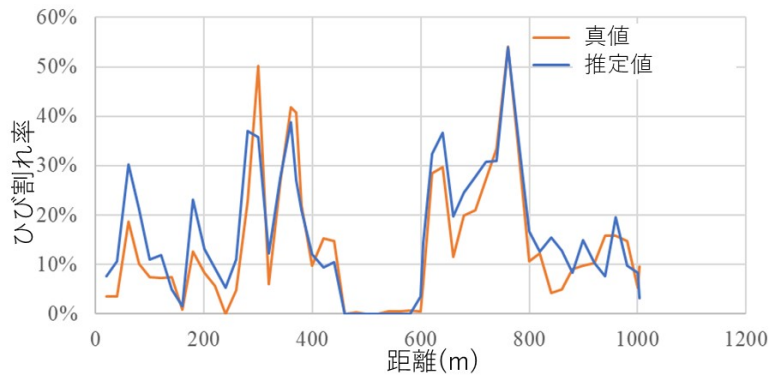


図3 ひび割れ率の推定¹⁾

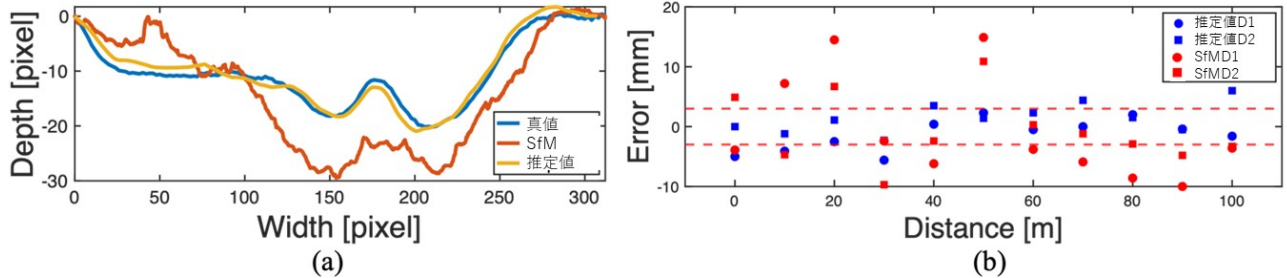


図4 わだち掘れ量の推定²⁾

○計測において留意した点など

舗装の画像解析においては鮮明な画像が得られることが重要である。近年のスマートフォンは高解像度化や自動焦点調節機能の高度化により、鮮明な画像が得られやすくなってきているものの、カメラの揺れを小さくする、フロントガラスに反射する画像が写りこまないようにする、といった工夫も必要である。

○分析により確認された立証した事象

通常は専用車により計測するひび割れ率、わだち掘れといった路面管理指標を、スマートフォンやドライブレコーダ等の簡易な車載機材を用いて推定可能であること、従来の路面管理指標以外にも多様なひび割れ指標を算出可能であることが示された。

○まとめ

専用車による計測に依存していた従来の舗装評価では、舗装調査の頻度が限定的であり、また、豊富な情報量を含む画像から取得する情報は、ひび割れ率という限定的な指標のみであった。今後はスマートフォンやドライブレコーダ等の汎用機材を搭載した一般車両により高頻度で取得した画像を、機械学習等の採用により推定可能となる多様な指標により多角的に評価し舗装の状態評価や劣化予測が高度化するものと期待される。

○参考文献

- 1) GEDA, J.M.G., XUE, K., NAGAYAMA, T., ZHAO, B.Y., NAKA, M. Estimation of pavement crack ratio by top-view transformation of in-vehicle smartphone camera and deep learning-based classification, *Intelligence, Informatics and Infrastructure*, Vol. 3, No. 3, pp26-39, 2022.
- 2) 高文超, 薛凱, 長山智則, 趙博宇, 蘇迪: 車載カメラ撮影画像の歪み解析による路面わだち掘れ評価, 第78回土木学会全国大会年次学術講演会概要集, V-145, 2023.

3.3 加速度センサによる橋梁の挙動を推定した事例（カテゴリ②に対応）

○適用したイノベーション技術

加速度計測に基づく変位推定法

○フォーカスした内容

図1に示す横桁ウェブに生じた亀裂発生の原因究明を目的とし、床版と主構のたわみ挙動の差異によって生じるものとの仮説に基づき、加速度センサを用いた主構と床版の「たわみ挙動」の推定を行った。

対象橋梁の横桁は、1径間あたり9本配置されており、床版からの荷重を主構に伝達する構造となっている。ここで、亀裂発生状況より、床版の首振りによる横桁上フランジのねじれにより生じたものと推察されるが、亀裂の発生が桁端部付近に集中していることから、桁端部の主構と床版において、以下に示す2パターンいずれかの挙動が生じていると仮説を立てた。

- ① 主構の回転 > 床版の回転
- ② 主構の回転 < 床版の回転

ここに、①②はいずれも、橋軸直角方向まわりの回転を示す。この挙動の仮説を立証するために、加速度計を用いたたわみ挙動の推定方法を参考に載荷試験と計測を行った。計測対象は、A1-P1間とし、図2に示す加速度計配置とした。●は地覆上、▲は下弦材上に設置した加速度計をそれぞれ示す。

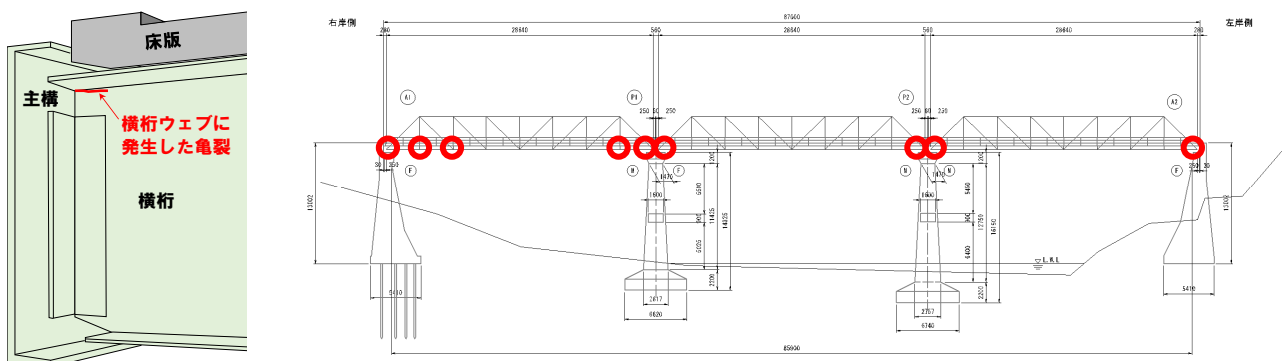


図1 亀裂発生箇所

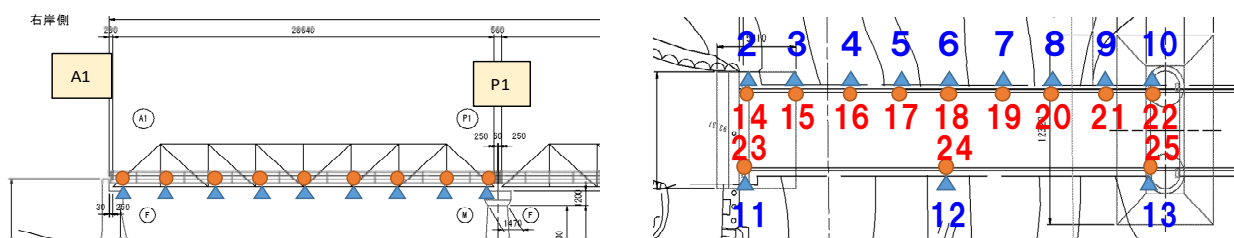


図2 加速度計の配置

○計測において留意した点など

加速度計は、市販の無線加速度センサで、メッシュ型通信を行うものを用いた。これは、現地で 25 個のセンサの時刻同期を得るための省力化を考慮したためである。このこともあり、現地におけるセッティング時間は 30 分程度で済んでいる。加速度計の配置のポイントは、ポニートラス下弦材の格点の位置と橋面の地覆の位置を合わせて配置するが、この際、後で実施する解析時に、方向を取り違えないよう、加速度計の向きをそれぞれ、同じ向きに置くことが重要である（図 3）。

なお、挙動の把握は、短期の計測（動的載荷・静的載荷）と済むため、データは加速度計内のメモリカードに記録することとした。



図 3 加速度計の設置状況

○分析により確認された立証した事象

加速度計測の結果から算出した橋軸直角方向まわりの回転角の最大値の分布図を図 4 に示す。これによると、横桁番号 5 の位置となる支間中央の回転角はほぼ 0rad となり、横桁番号 1 (A1 支承線) および横桁番号 9 (P1 支承線) において、床版の回転角が主構の回転角を大きく上回っている。すなわち、図 5 に示すように、床版がよく回転し、主構が回転しない挙動を示していることから、これらの変位さが要因で亀裂が発生したと推測した。

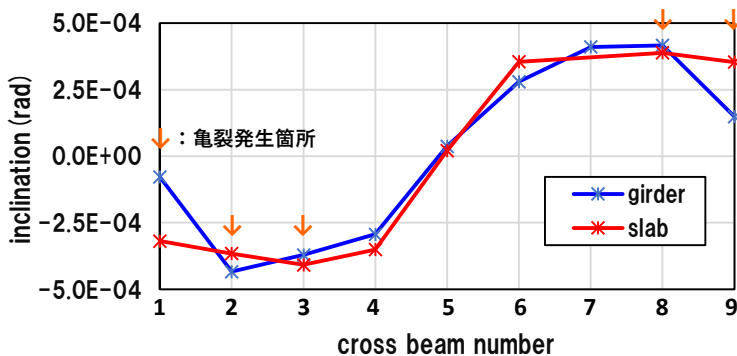


図 4 分析結果

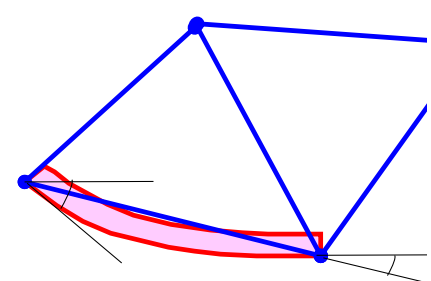


図 5 想定される挙動

○まとめ

亀裂を発生させる挙動が特定できたと言って良い。ここで、主構の回転が小さくなる要因としては、支承の拘束やポニートラス特有の「しなりにくさ」の影響などが推察されるが、いずれにしても、今回の挙動の推定結果は、今後の措置（補修・補強）において重要な情報となる。

鋼構造物の維持管理においては、期待した補修・補強効果の発揮により、再劣化の発生を防止すること求められており、事例として挙げたイノベーティブな状態把握技術が普及することで、着実な措置方針の設定に役立つことが期待できる。

○参考文献

- 1) 芳賀堯, 寺岡毅, 塩谷智基, 横山勇氣, 楊曜華, 蘇迪, 長山智則: 加速度センサによるポニートラス橋のたわみ挙動推定による端横桁の亀裂発生原因の推定, 令和4年度土木学会全国大会年次講演会, 2022.

3.4 3次元構造物情報を活用した事例（カテゴリー④に対応）

○適用したイノベーション技術

GIS をベースとした3次元構造物DB

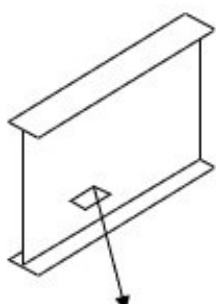
○フォーカスした内容

(1) 3次元構造物情報DBの構築

3次元構造物情報DBとは、全ての情報を地理座標（点群座標）に紐付けるものであり、そのために構造物の3次元モデルを作成し、この要素（部材）に維持管理情報を紐付けることで、3Dモデル上に情報を可視化しようとするものである。3Dモデルについては部材は3Dサーフェスとして扱う。これは取得できる点群情報とも親和性が高く、またデータ量が少ないが、情報の表示について過不足はないことが理由である。

部材DBは、地理座標を用いた要素テーブル、座標テーブルより構成する。これらのテーブルを利用して、CADモデル、FEMモデルなど維持管理業務に必要となるモデル構築が可能である。図1に要素テーブル内容を示す。ここでは損傷番号が5番と記入されているが、損傷テーブルの5番のデータを参照することで、損傷情報を取得できる。

要素テーブルに維持管理情報などを追加する。例えば、損傷を表示させる場合、特定の損傷は要素内の発生位置がほぼ特定されているため、損傷位置情報があいまいでも適切な位置に損傷を表示させることができる。このようにして、損傷情報などを要素上に可視化することができる。



構造物番号	1025381
部材番号	576
部材種類	MG
格点	51,52,85,84
損傷番号	5

図1 要素テーブル

(2) 3D モデル作成

3D モデルはいくつかの方法を組合せて作成する。①点群から面の存在を推定して多角形（メッシュ）を作成する方法（図 2）、②2次元図面から3次元モデルを作成し、これを点群など GIS 座標系空間にフィッティングさせる方法などがある（図 3）。この方法は、CAD 上の3点（あるいはそれ以上の点）と対応するであろう点群上の3点を選び、最小二乗法により CAD モデルの位置を決定するものである。通常、①の方法では完全なモデルは作成できない場合が多く、②のモデルと併用してモデル化を行う。場合によっては、②の設計モデルと点群を同時に表示させることで、両者補完するモデル化も可能である。

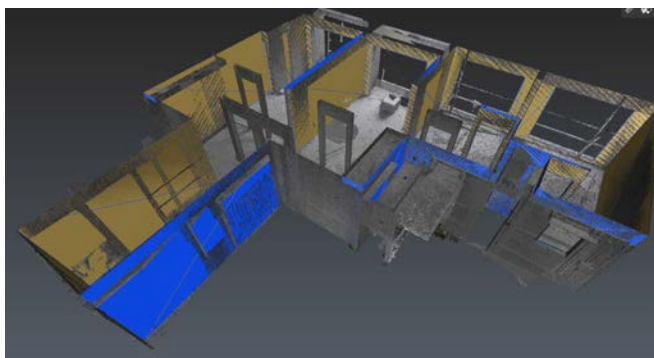


図 2 点群からのモデル抽出例

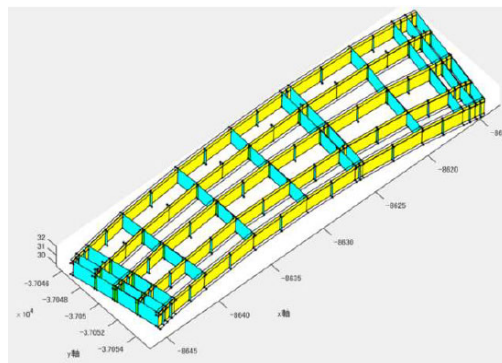
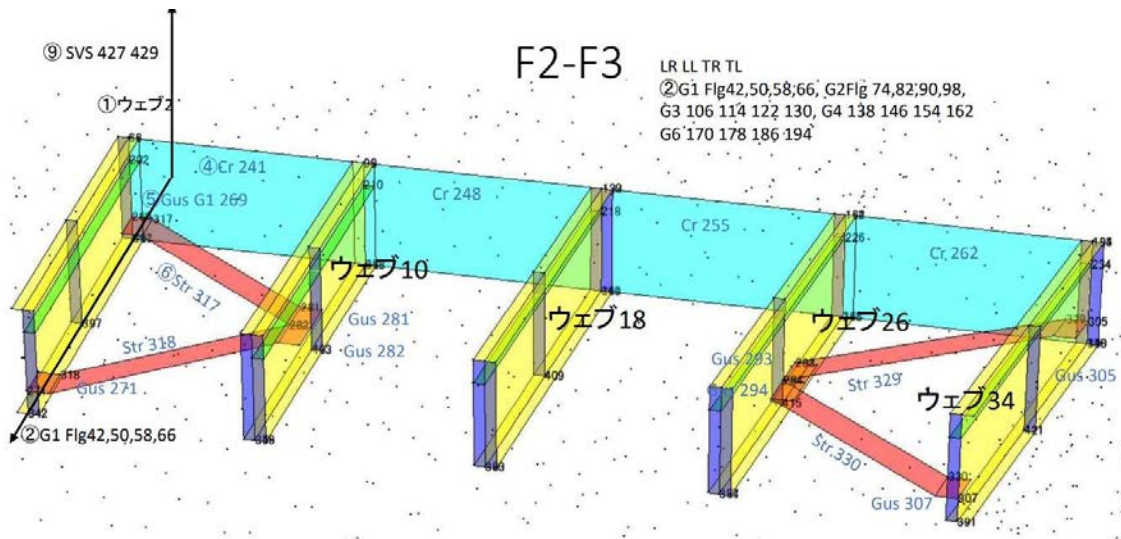


図 3 2D 図面情報から 3D モデルの作成

(3) 損傷情報の表示 (マッピング)

これまでは、損傷情報の記録は台帳などを用いて行われ、点検時には橋の骨組形状と損傷位置を示した格子状のマップを作成し、これを参考にして点検箇所を決定している。点検記録は文字記号で表わされ、その情報から位置を特定するのは未経験者には困難である。これに対して、3D 損傷マップは部材に紐付けられた損傷情報を利用することで、3次元モデル上に損傷を表示させることができる。図4は、DB から3Dモデル上に損傷を表示させた例である。表示方法には改良が必要であるが、橋損傷管理をこれまでの格点管理から部材単位での管理とすれば、これまでに手間のかかっていた損傷情報の可視化についても効率的に実現できると考えられる。



imem1	idmg	loc1a	crk1a	fix_day1	損傷ランク	igrd
356	4	G2-F2-1	A2-T-5-9-15	2006/2/22	B2	2
349	5	G2-F2-3	A2-T-13-9-15	2006/2/22	B2	2
370	6	G3-F2-2	A2-W-10-9-3	2006/2/22	B2	2
363	7	G3-F2-4	A2-W-20-9-20	2006/2/22	B2	2
384	8	G4-F2-3	A2-T-5-9-5	2006/2/22	B2	2
377	9	G4-F2-5	A2-T-2-9-2	2006/2/22	B2	2
370	39	G3-F2-2	A2-T-9-9-9	<missing>	B1	2

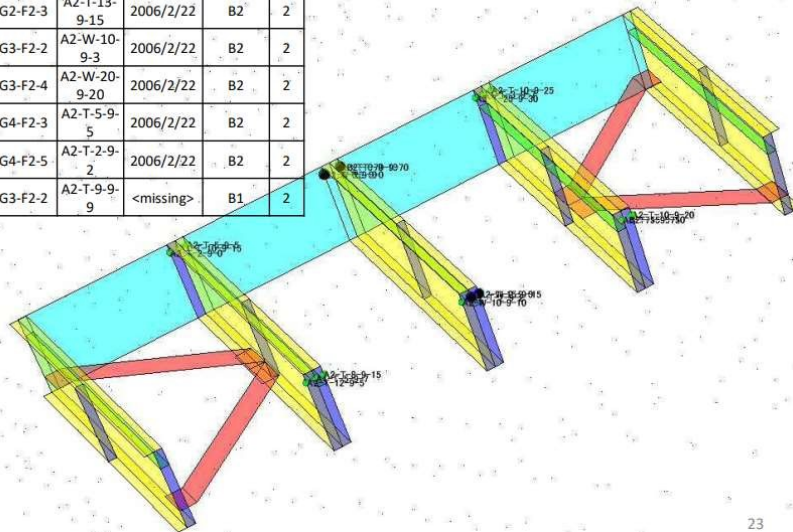


図4 損傷マップの例

○留意した点など

図5は、3Dモデルと点群を重ね書きした例である。モデルが大きくなると全ての点群、モデルを表示した場合、重なり合い、細部が見えなくなる部分が増える。また点群を全て表示した場合にも重なり合いが発生し、点群の後の画像がチェックできなくなるため、点の間引きが必要となる。このように干渉チェックは、最終的には以下のようなモデルの部分的な切り出しと、点群の間引きを行った状態で行う必要がある。なお、図6の事例は、桁内部等においては元の点群密度が不足しているため、問題に応じて2次部材、付属部材の再サンプリング、あるいは3Dモデル化が必要と考えられる。

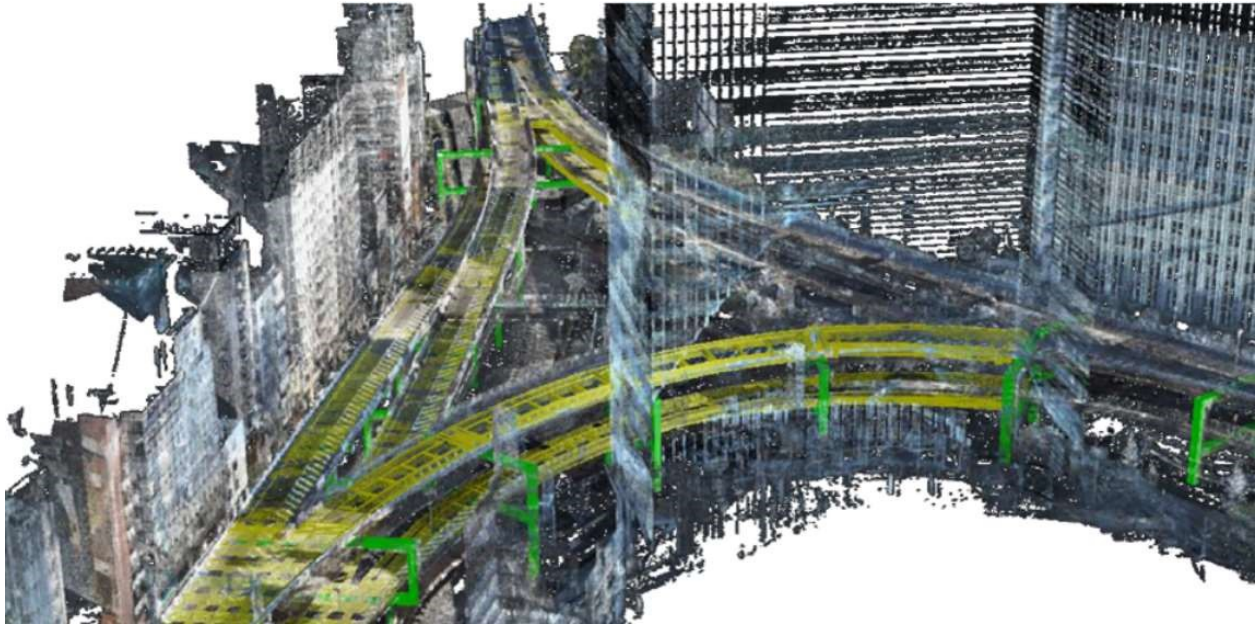


図5 点群と3Dモデルの重ね合わせ

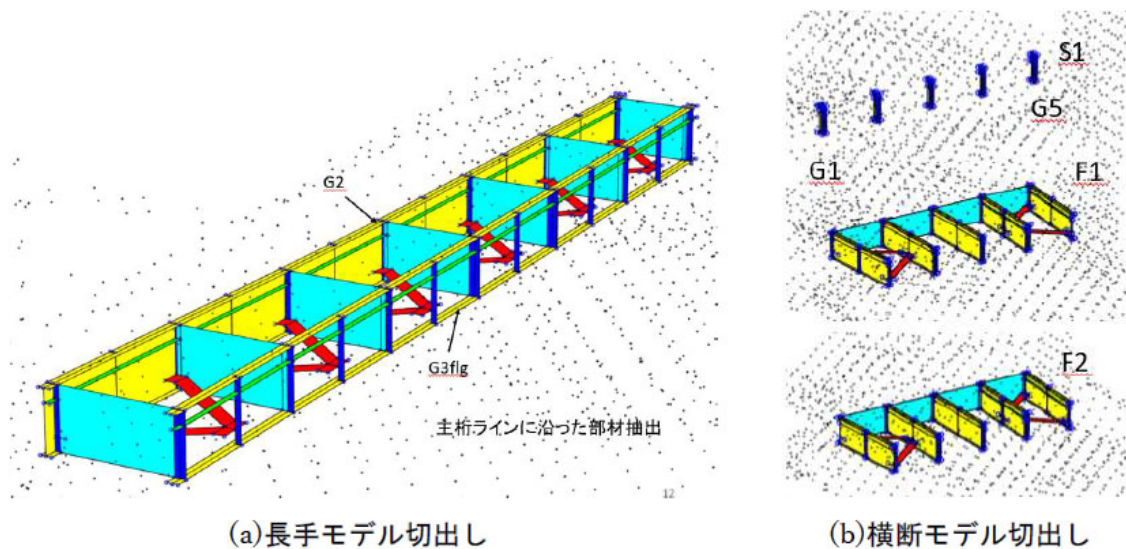


図6 干渉の可視化

○まとめ

BIM を利用した構造物設計，管理が広まっている．また，インフラ構造物の BIM モデルが進むと，これらを統合し，町のデジタルツインモデルへの集約が可能となり，膨大なインフラ構造物資産情報の共有が可能となる．これらを利用できれば，対象とした構造物に関連する多種多様な情報を 3D モデル上に取り込み，表示すること可能となる．このような情報可視化は DX 化の大きなメリットであり社会的貢献は大きいと考えられる．

3.5 Deconstruction monitoring の試行と UAV による橋梁挙動の解明（カテゴリー⑤に対応）

○適用したイノベーション技術

Deconstruction Monitoring 技術および UAV による画像処理技術

○フォーカスした内容

死荷重は構造物が存在する限り作用し続ける外力であり、道路橋示方書・同解説においては作用特性として永続作用に分類される。永続作用に分類される荷重は「常時又は高い頻度で生じ、時間的変動がある場合にもその変動幅は平均値に比較し小さい」という特徴がある。また、活荷重や水圧、温度変化の影響などは作用特性として変動作用に分類され、その特徴は「しばしば発生し、その大きさの変動が平均値に比べて無視できず、かつ変化が偏りを有していない」というものである。構造物の自重を計算で求めることによって、死荷重を算出することはできるが、構造物の供用中に死荷重を実際に計測することは困難である。しかし、架け替えをするなどの理由から、その構造物を撤去するとき、撤去の前後における構造応答を分析することによって、死荷重がその構造物自体に及ぼしていた影響を明らかにすることができる。

本報告では、福井県内で供用されていたトラス橋の床版撤去に伴う変形挙動や部材力および応力の解放を、ひずみゲージによるひずみ計測、加速度計によるモード形状と固有振動数の計測、変位計による部材の変位計測を行った。グローバル挙動は境界条件や床版との付着状態など橋梁の状態によっても変化し、同様に死荷重の効果も変化する。死荷重の効果とは死荷重が各部材に及ぼす断面力の影響を言う。現在、計算でしか求めることのできていない死荷重の応力へ及ぼす実態を把握した。

対象橋梁は旧布施田橋であり、九頭竜川に架かる橋で、福井県福井市と同県坂井市を結んでいた。その構造形式は曲弦ワーレントラス橋 3 連、RC ゲルバー橋 9 連、RC 単純 T 桁橋 16 連であり、延長は 559.60m、支承形式は 4 本ローラー支承である。また、本研究では曲弦ワーレントラス橋 2 径間を計測範囲とし、その支間長は 60,900mm である。旧布施田橋は昭和 33 年に架設され、平成 30 年までの約 60 年間供用された。旧布施田橋の部材を指して記述する際に、上流側にある部材を”部材名”（南側）、下流側にある部材を”部材名”（北側）と記述する。橋梁使用停止後に第 1 径間は 2020/12/09(水)から 2020/12/15(火)にかけて、第 2 径間は 2020/11/25(水)から 2020/12/01(火)にかけて床版が撤去された。旧布施田橋の外観を写真 1 に示す。



写真 1 旧布施田橋トラス橋部外観¹⁾

○計測において留意した点など

対象橋梁の第1径間の略図と各計測装置の配置と応力評価部材の位置を図1に示す。ひずみゲージそのものの温度変化の影響を差し引くため、フリー鋼材にひずみゲージを貼ったダミーゲージを配置した。

- ・ ひずみゲージ：1ゲージ3線式法により結線、支間中央部の下弦材の上面、鉛直材のウェブ面、床桁の下面に設置し、第1径間は10秒に1回計測した。
- ・ 接触式変位計：可動支承の橋軸方向変位を計測するため、可動支承部に強力磁石で固定し、北側、南側それぞれ2個設置した。
- ・ リング式変位計：橋梁のたわみを計測するため、第1径間の支間中央部の下弦材に固定、地面にはマグネット式固定台とおもりで固定し、設置した。

この他に熱電対、加速度センサも設置したが、データ分析の都合上、本稿では割愛する。

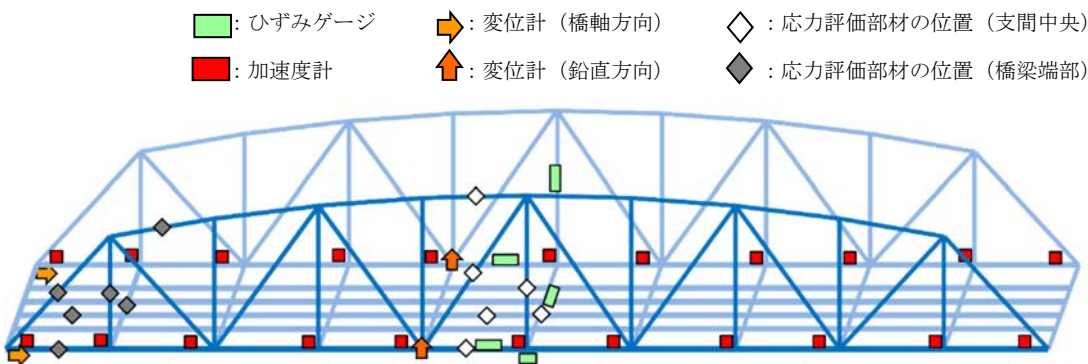


図1 計測装置の配置と応力評価部材の位置¹⁾

○分析により確認された立証した事象

(1) 計測による部材応答の把握

2020/12/05(土)～2020/12/17(木)において、第1径間では下弦材(北側)、下弦材(南側)、床桁(中央部)、鉛直材(北側)、フリー鋼材のひずみ計測、可動支承の橋軸方向変位計測、支間中央部の鉛直方向変位計測を行った。ひずみゲージそのものの温度変化の影響を差し引くため、それぞれの部材ひずみ計測値からフリー鋼材のひずみ計測値を差し引いている。また、計測データの最初のAM2:00～AM4:00のデータの平均値を基準値(ゼロ)としている。この場合は2020/11/15のAM2:00～AM4:00の平均値を計測データから差し引いている。図2にひずみ応答、図3に変位応答の計測結果を示す。図2より、下弦材(北側)は日中、気温が上昇すると圧縮ひずみが生じ、夜間に冷やされることで日中に生じたひずみが解放される。下弦材(南側)も概ね同様の応答を示すが、北側と比べると南側はひずみ変動の振幅が大きい。床桁(中央部)は日中、引張方向に大きくひずみが生じているが、これは床版撤去作業のための工事用車両によって発生していると思われる。鉛直材(北側)は温度上昇や工事用車両による荷重などによって、引張と圧縮どちらもひずみが生じている。

図3より、橋軸方向変位(北側)は日中、工事用車両の荷重によって橋梁が伸びる方向に変動し、夜間から翌朝にかけて中立位置まで戻る。橋軸方向変位(南側)も同様の応答を示すが、南側は北側よりも激しく乱高下している。鉛直方向変位は北側、南側同様に、日中、鉛直上方向に移動し、その後中立位置まで戻っている。これは工事用車両の荷重により、橋梁が伸びる方向に可動支承が動き、それによって橋梁全体が上方向に持ち上がるような挙動をするということが言える。また、計測した全ての部材

ひずみが急激に圧縮ひずみを生じ、橋軸方向変位は橋梁が縮む方向に、鉛直方向変位は上方向に急激に変化していることから、2020/12/11(金)に支間中央部の床版が撤去されたことが分かる。

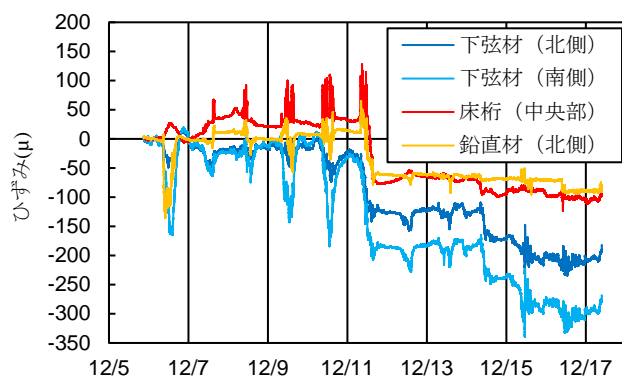


図2 床版撤去に際するひずみ応答の変動¹⁾

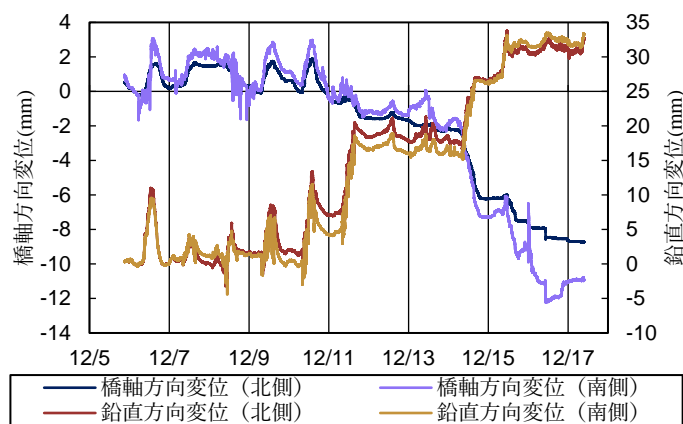


図3 床版撤去に際する変位応答の変動¹⁾

(2) UAV 適用による橋梁応答の解明

図3で確認された鉛直方向変位の日変動について別途の計測に基づき、考察した。図4は2022年8月30日~31日の24時間で記録した南側支承変位、鉛直方向変位履歴を示す。縦軸第1軸は部材表面温度(°C)、第2軸は変位(mm)を示している。部材温度に追従して7mmを越える水平変位が記録されており、可動支承の併進移動性能は機能している。鉛直方向変位に着目すると、部材温度上昇とともに鉛直上向きの変位が生じており、1mm程度の反りあがりが生じていることが見て取れる。なお、1PM~2PMの時間帯で計測機器に不具合がありこの時間帯の記録はない。反りあがり現象については有限要素法解析を含めて考察していく。北側も同様な傾向を示したが記録の不具合のため南側の結果で議論を進める。

図5は第1径間の橋台近傍の外観a)とサーモカメラで撮影した温度分布b)である。外観写真と比較すると、塗膜の残存状況が良好な部位は温度が低く、塗膜劣化し錆が生じている部位は相対的に温度が高いことがわかる。この結果から鋼部材の錆率が部材表面温度に与える影響が大きいと考えた。

上弦材・下弦材の上面について発錆面積の割合を撮影画像から求めた。上弦材はUAV、下弦材はステルカメラを用いて画像を集積した。写真2に示すように上弦材の上面は塗膜が喪失し、赤錆に覆われている状態であった。

表面の錆率を算定するために画像処理を施した(図6)。まず、画像に対して、トリミングを行うこと

で、背景部分を消去した。つぎに、射影変換を用いて、台形であった画像を長方形画像に変換した。最後に、錆と塗装の2値化処理を行うことで、画像を黒(0)と白(1)の2色に変換した。鋼材の湿食は漸次的に進行する現象であるが、サーモカメラの結果より部材温度差は赤錆の発生有無に依存すると考え、2値化処理で錆率を判定することとした。2値化処理はPythonのOpenCVライブラリを用い、閾値を120として設定した。上弦材と下弦材の錆率を以下の式からそれぞれ算出した結果、第1径間の平均錆率は、上弦材：91.3%、下弦材：33.2%という結果になった。

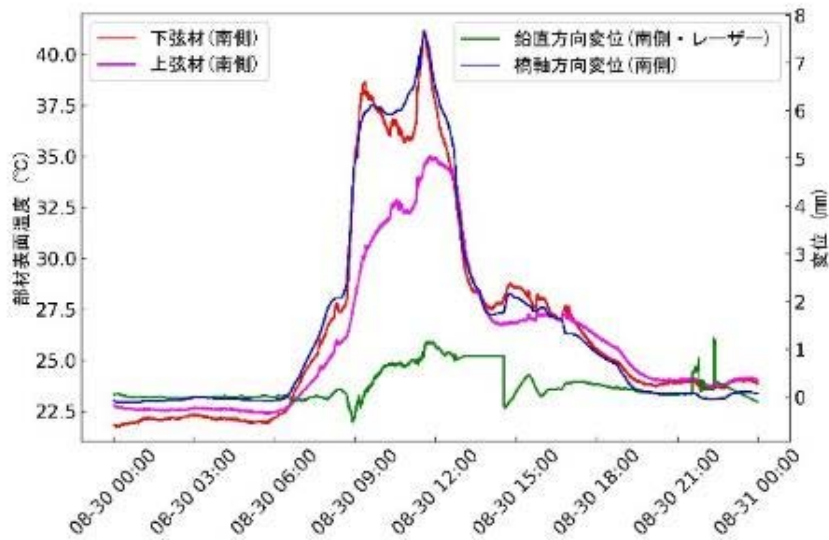
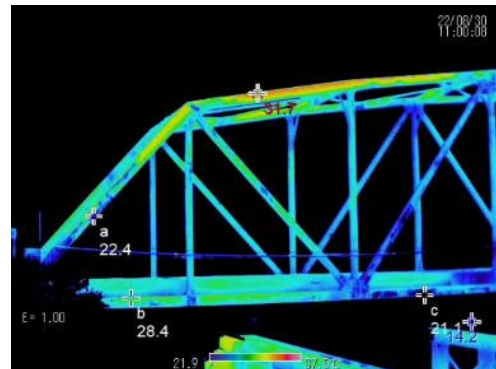


図4 トラス部材表面温度と変位履歴¹⁾



a) 塗膜の外観



b) サーモカメラ撮影像(11:00AM)

図5 トラス部材表面温度と変位履歴¹⁾



写真2 UAV撮影による上弦材の外観¹⁾

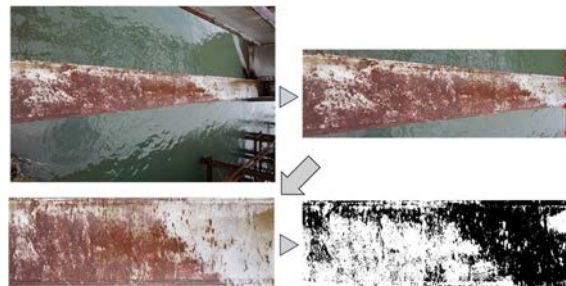


図6 画像処理のプロセス¹⁾

$$\text{錆率(\%)} = \frac{\text{白領域の合計}}{\text{画像の面積}} \times 100 \quad (1)$$

上弦材、下弦材の部材温度差が橋梁応答に及ぼす影響を確認するため、有限要素法(FEM)モデルを構築した。解析モデル(図7)は主部材をおよそ10分割したビーム要素によって構成し、全部材を材料非線形性のない鋼材とした。材料諸元は表2に示す。線形要素数は3071、節点数は3153である。境界条件は単純支持となっている。重力加速度を入力した状態で下弦材が水平になるようにキャンバーを導入したモデルとなっている。

サーモカメラ画像から取得した温度を基に、部材の想定最高温度を、錆率を考慮して算出した。適用した式(2)を以下示す。この温度について、熱電対で計測した2022/08/30 0:00の部材表面温度とで差をとり、FEMモデルの入力温度とした。

$$\text{想定温度} = \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times r \quad (2)$$

Max : 錆部の温度, Min : 塗装部の温度, r : 錆率

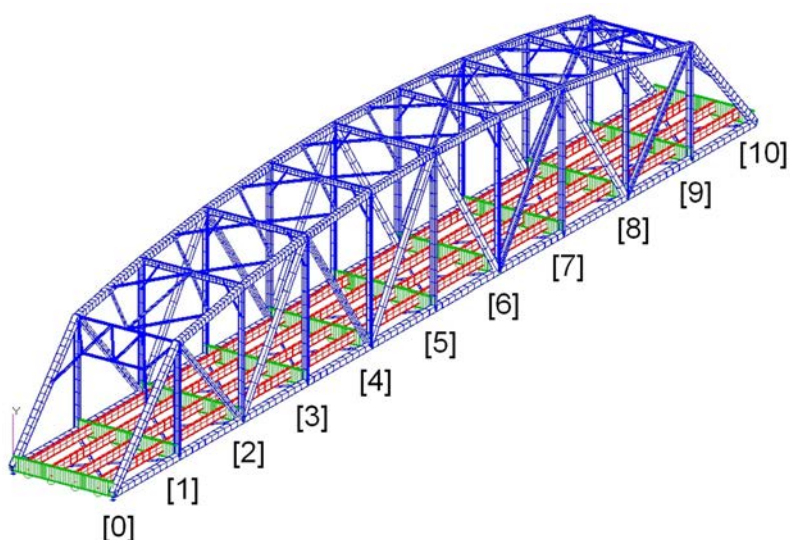


図7 解析モデル¹⁾

錆率をパラメータとし、入力温度に基づく構造応答を確認した。解析モデルの上弦材と下弦材の入力温度差は3.7℃である。なお、鉛直材、斜材の入力温度は上弦材と下弦材の平均値とした。上横材は上弦材と同じ入力温度、ストリンガー、床桁は下弦材と同じ入力温度とした。重力加速度を入力した後、部材温度を入力した。図8は温度入力後の鉛直変位の結果を上弦材と下弦材の節点毎に示した結果である。節点番号は節点0は橋台上、節点10は第1橋脚上にある。鉛直上向きに反りあがる応答を示し、第1節点の解析と実測値は近い値となったことがわかる。上弦材の温度が下弦材と比して高い場合は、鉛直上向きの反りあがり応答が生じ得ることが判明した。

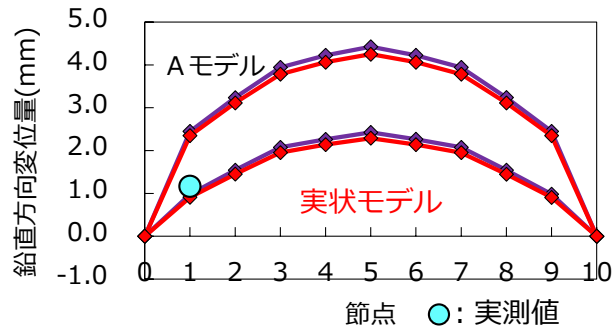


図8 上下弦材の解析結果と実測値の比較¹⁾

○まとめ

橋梁の死荷重は、架設時または撤去時のみにしか計測が出来ない。床版との付着や主構造の荷重分配などによって設計時の想定数値と異なる可能性があり、Deconstruction Monitoringによって荷重係数の再検討などの設計へのフィードバックが期待される。また、UAVの適用によってアクセス困難な部位の外観状態が確認しやすくなり、トラス橋のグローバル挙動解明の一助となった。今後、UAVは画像処理の高度化とリンクすることで益々有益なツールとなると予想される。

○参考文献

- 1) 鈴木啓悟，野島悠生，竹谷晃一，阿久津絢子，キールティキリーティヴァンカヤラパティ，伊藤裕一，佐々木栄一：トラス橋部材の発錆状態が部材温度と鉛直挙動に及ぼす影響，鋼構造年次論文報告集，2023。