

橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価

The Development and Evaluation of Telemetry in Bridge Maintenance

西村 正三^{*,**}・木本 啓介^{*}・松岡のどか^{*}・大谷仁志^{***}・緒方 宇大^{****}・松田 浩^{*****}

By Shozo NISHIMURA^{*,**}, Keisuke KIMOTO^{*}, Nodoka MATSUOKA^{*}, Hitoshi OTANI^{***}

Takahiro OGATA^{****} and Hiroshi MATSUDA^{*****}

Abstract: Telemetry was developed to resolve the difficulties due to time and cost consumed for scaffolding in proximity visual inspection on long span bridges. In this research, the application 3D laser scanner, Giga-pixels imaging system and camera-attached UAV to monitor the crack distribution at the bridge tower was performed and its applicability to bridge maintenance was confirmed. The verification and validation are summarized as follows: (i) Crack width can be calculated accurately by using Crack Index (CI); (ii) an analytical formulation was proposed to take into account the effect of inconsistency of contrast and resolution; (iii) satisfactory crack widths can be calculated from ortho-images created by “giga-pixel imaging system”; (iv) scaffolding difficulties on bridge inspection can be easily solved by using UAV with HD camera that enables monitoring from the open sea.

Key words: Optical measurement techniques, monitoring, UAV, Gigapixel imaging system

Keywords: 光学的測定法, 構造物の検査, UAV, ギガピクセル画像撮影システム

1. はじめに

わが国の高度経済成長期に建設された橋梁など膨大な量の構造物の劣化が急速に進む中で、その管理と評価技術の高度化が一層求められる状況にある¹⁾。これまで橋梁維持管理における定期点検をはじめとする各種点検は主に近接目視などによって行われてきたが、長大橋の場合には足場仮設に伴う工期やコスト、高所作業、ロープアクセスによる安全性などに課題があった²⁾。このため、点検の初期段階ではデジタル画像や3Dレーザなどに代表される遠隔からの測定、計測手法を用いたインフラ構造物の変状調査とモニタリングへの活用が期待されている¹⁾。本研究は、長大橋梁の鉄筋コンクリート（以下RC）製の主塔に発生しているひび割れ取得の可能性検証を目的に、遠隔から計測が可能な3Dレーザ計測、ギガピクセル画像撮影およびUAV搭載のカメラで撮影した画像（以下UAV画像）で得られた各デジタル情報をもとに処理解析を行い、今後の高所・難条件でも実施可能な点検技術を開発するためにその有効性や課題について検証したものである。

2. 調査手法の提案

RC構造物では、ひび割れの進展状況をモニタリングすることは、長寿命化にとって重要である。従来高架橋など遠望からひび割れを計測する手法としてクラックスケール（以下スケール）を内蔵した測量機で計測する手法³⁾や望遠レンズを装着して拡大画像を取得する手法⁴⁾などが用いられてきた。しかしスケール内蔵測量機の場合は、画像を記録できず、広範囲を計測するには作業効率が劣る。望遠レンズを用いた拡大画像は、その位置の特定に労力を要するなどの課題があった。ひび割れ幅の算出は、対象近傍にひび割れ幅の基準となるスケールを貼りこの画像を基に幅を算出しなければならない。しかし本対象の主塔は地上50mに位置するため、これらひび割れ幅を特定するためのスケールや空間的な位置を特定するためのステレオ写真解析に必要な標定点設置の制約⁵⁾を受ける。そこで安全性、作業性に優れ高精度・非接触に点検可能な計測法である3Dレーザや超高精細デジタル画像を用いた高所・難条件でも実施可能な点検技術を用いて検証することとした。

* (株)計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部

Keisoku Research Consultant Co., Ltd. Creative design group

**長崎大学大学院工学研究科博士後期課程

Doctor Course Student, Nagasaki University

*** (株)トプコン スマートインフラ・カンパニー

Topcon Co., Ltd. Smart Infrastructure Company

****長崎大学工学部 学部生

Undergraduate Student, Nagasaki University

*****長崎大学大学院工学研究科 教授 工博

Prof., Dr. Eng, Nagasaki University

3. 計測・解析の概要

(1) 大芝大橋の概要

対象の大芝大橋は、広島県東広島市安芸津と大芝島を結ぶ延長470m、幅員5m、主塔高75mの斜張橋である。平成9年に竣工し、平成20年度農業用施設維持事業としてロープアクセスによる点検調査〔20年調査〕が実施されている⁶⁾。今回はP5主塔（道路面から50m）のひび割れ幅の判読を主体に調査研究を実施した。

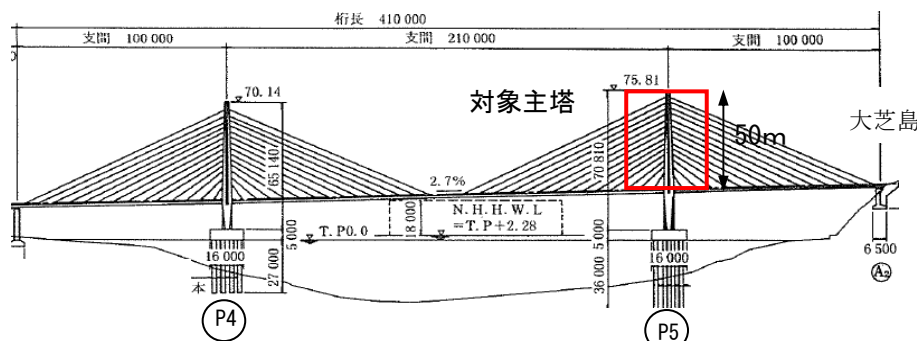


図1 大芝大橋の一般図（参考文献⁶⁾からの抜粋）

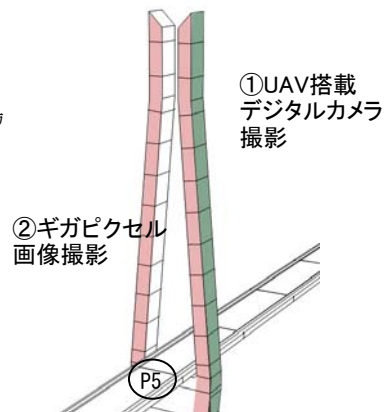


図2 各計測箇所の位置図

(2) 計測・解析の概要

光学的計測手法である3Dレーザ計測，ギガピクセル画像撮影システム⁷⁾ およびUAV画像の計測・撮影箇所と解析処理の流れを図2, 3に示す。主塔の橋軸方向は橋詰からギガピクセル画像撮影システムを用い，外海側からはUAVでステレオ撮影して各壁面を詳細に画像取得した。3Dレーザ計測は2箇所から実施し，得られた点群座標とそれを処理した稜線抽出情報を元に処理・解析に活用した。

ひび割れ幅の判読は，開発した「ひび割れ幅判読図化システム」⁸⁾を用い検証した。

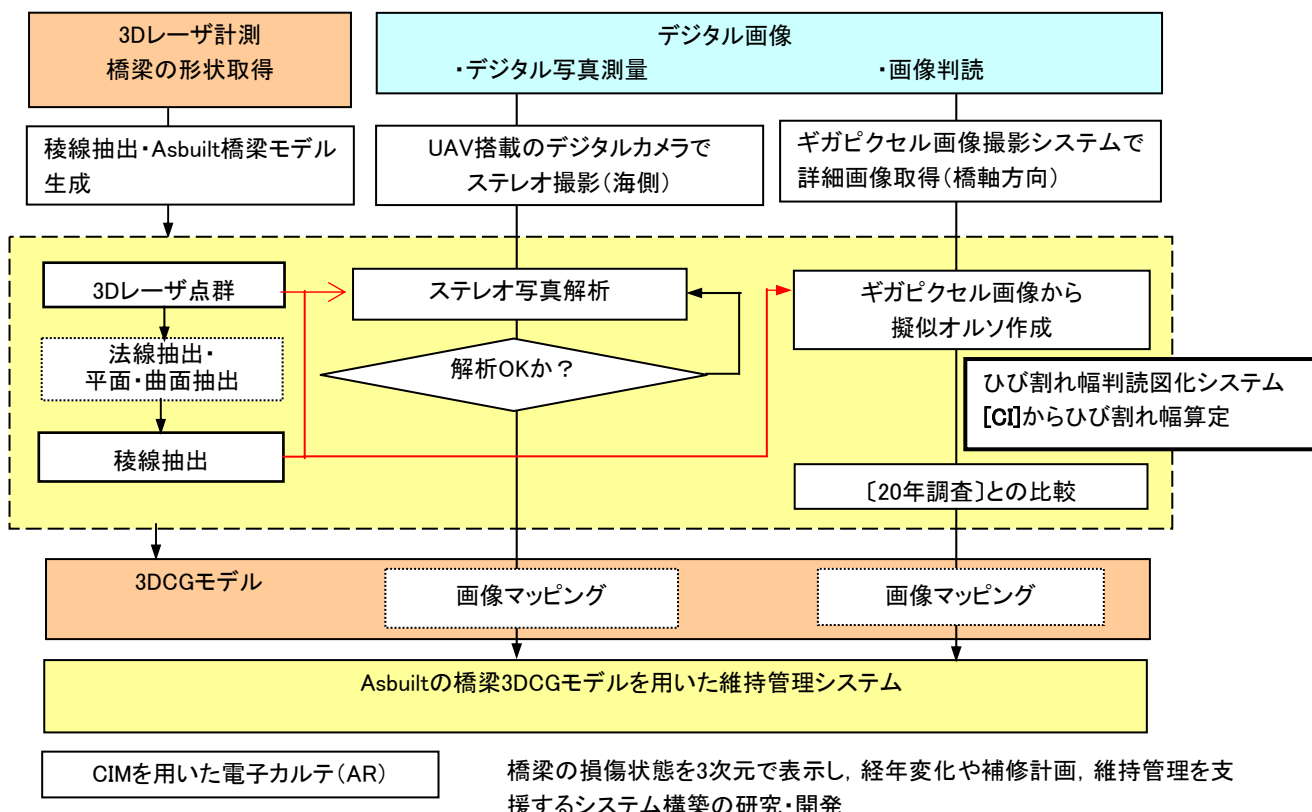


図3 解析検討のフロー

4. ひび割れ幅判読図化システムについて

(1) クラックインデックス【CI】の概要

RC造のひびわれ幅伸展を評価するには0.2mm以上のひび割れ捕捉が必要とされる⁹⁾。図4の①は、デジタルカメラ(1,200万画素以下12MP)に望遠レンズ(f=200mm)を装着し、距離20mから図5に示すクラックスケールを1mm/pixelで撮影し、それをグレイ階調で表したものを示す。また②はピーク位置を合致させ拡大表示したものである。クラック幅が大きいとグレイ階調のピークである特徴値が大きくなる。一方③は下地が灰色の場合、特徴値は小さくなるが分布幅は②と同様に-4~4Pixelの範囲内に納まり差異が少ないことを示す。筆者らはこれらの事項を元に、図6に示すように、「ひびわれ幅の特徴量」としてクラックインデックス(以下【CI】): $\sum \text{GRAY}(i)$ という指標を考案した。【CI】は、分解能以下のクラックがCCDに取り込まれた際の、各グレイ階調GRAY(i)の総和(iは-4~4まで)であり、クラック幅が大きいと【CI】値も大きくなる。また【CI】からクラック幅を定量的に算定・図化が可能な「ひび割れ幅判読図化システム」を構築した⁸⁾。

(2) グレイレベルと【CI】の詳細

RC造表面の濃淡は千差万別であり、ひび割れ近傍に基準となるシートを貼り、この基準画像からクラック幅を算出することが最良である。しかし部位が高所にあり、シート設置の制約や、適切な解像度で撮影できない

場合もある。そこで普遍的に【CI】を適用することが可能か否かを検証するために、シート下地のグレイレベルや撮影解像度を変えてその影響を把握した。用いた基準シートは図5に示すように、グレイレベル8段階、幅11段階である。撮影距離50m、望遠レンズ(200~500mm)を用い対象面での解像度は、0.5、1.0、2.0mm/pixelの3段階とした。シート画像の各グレイレベル、各解像度における【CI】をそれぞれ算出し、クラック幅との関係を求めた。その検証結果の一部を図7に示す。

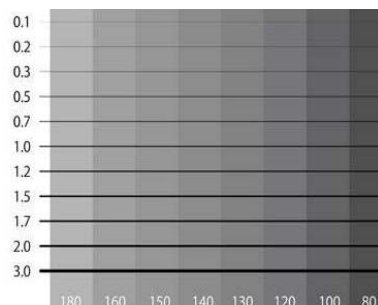


図5 クラックスケールシート

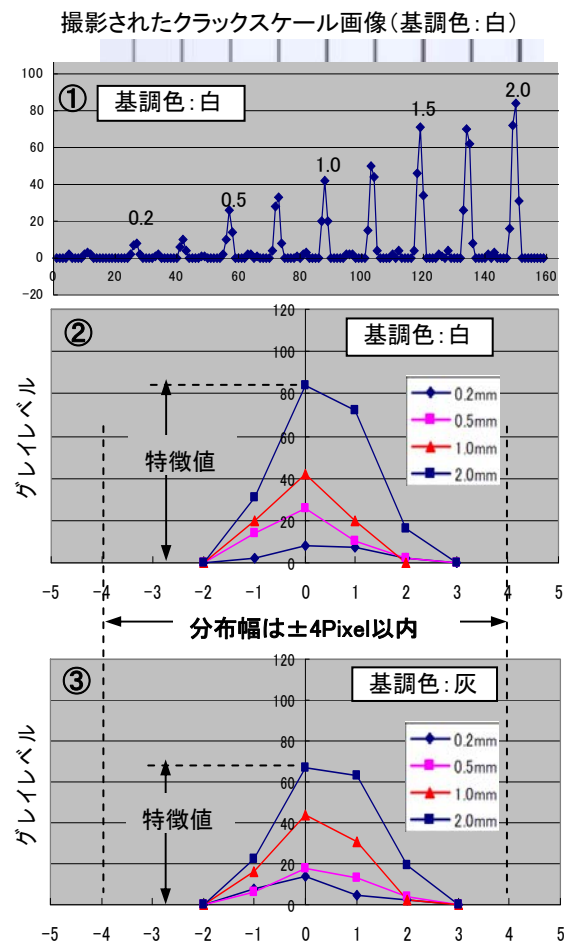


図4 クラック近傍の濃淡分布図

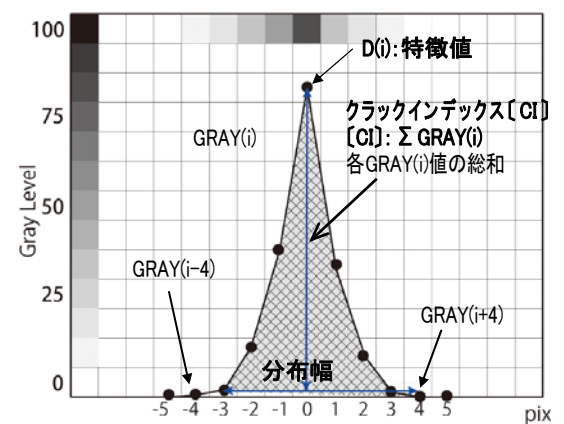


図6 特徴量算出の模式イメージ

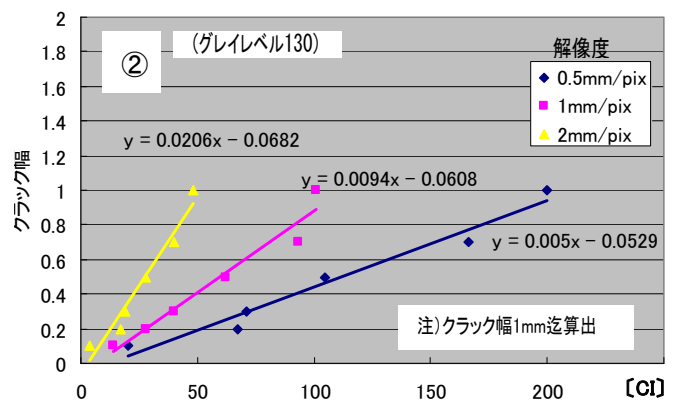
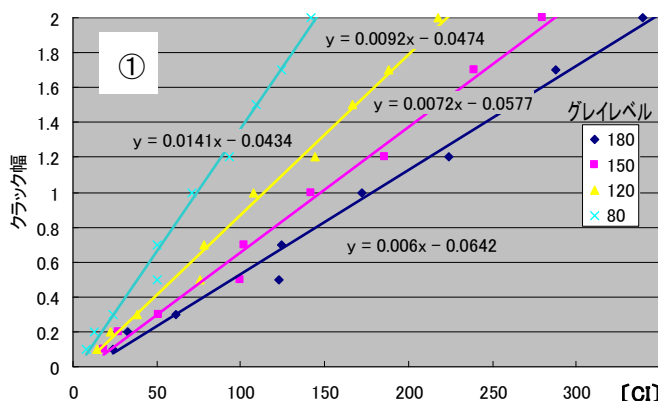


図7 【CI】とクラック幅の関係 (左:グレイレベル, 右:解像度の違いによる【CI】とクラック幅との関係)

5. ギガピクセル画像撮影システムを用いた擬似オルソ作成

(1) 自動撮影雲台について

自動撮影雲台（商品名：Gigapan）¹⁰⁾ は、2 軸のモーターを搭載し、設定した撮影範囲を画角によって自動分割・撮影を行う雲台であり、NASAほかが開発し市販されている。自動撮影雲台は設置した一点から垂直、水平方向に回転しながら放射状に撮影を行うため、一枚に合成処理された画像は球面の一部を切り出した形状となり、画像には歪みが含まれる（図8）。この合成処理された画像は、数十億画素の画像（以下ギガピクセル画像）であり、数ギガバイトに及ぶが、画像の構造を、高解像度から低解像度の画像の集合体（画像ピラミッド構造）にすることで通常のPCでもストレス無く拡大縮小などの操作が可能である（図9）。

図10①は、対象面に対してカメラをA度回転した場合は、 $\cos A$ の逆数倍で解像度が低下することを示し、図10②は回転角度と単位あたりの長さ倍率の関係を示したものである。例えば60度の時には2倍となり、ひび割れの幅が正確に求められなくなる。このギガピクセル画像の解像度を保持したまま幾何補正処理で擬似的なオルソ化ができれば、先述の「ひび割れ幅判読図化システム」でクラック幅が算出でき応用性が高い。

そこで3Dレーザ他で得られた形状データも併用した幾何補正処理を下記検討した。



図8 自動撮影雲台で撮影した画像例（約800枚の画像から合成 全体で56億画素）



図9 自動撮影雲台の機構

(2) ギガピクセル画像の歪み補正について

図11は壁面に1m角のグリッドを設定し、自動撮影雲台を用い撮影したイメージである。この詳細に撮影された各画像からひび割れ幅の算出について考える。

そのためには撮影した各画像を射影変換で幾何補正した後、画像解像度を、例えば1mm/pixelになるように解像度を一定にする必要がある。オルソ画像を作成するには一般に、カメラ光軸と撮影面が直交していることが望ましい。そこで詳細撮影された画像毎に幾何補正（射影変換）を行い、カメラ光軸と撮影した建物面を直交化する。このようにすることで、擬似的にオルソ画像の作成が可能となる。ここで本論ではあくまでも設定平面に投影することの意味から「擬似オルソ画像」と称する。そのとき図10に示す回転角による解像度低下を見越して撮影計画を立てる必要がある。

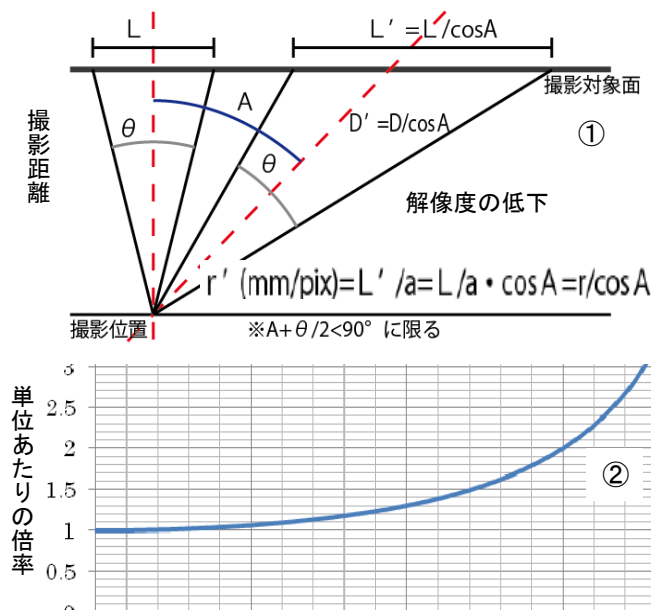


図10 回転角度と単位あたりの長さ倍率

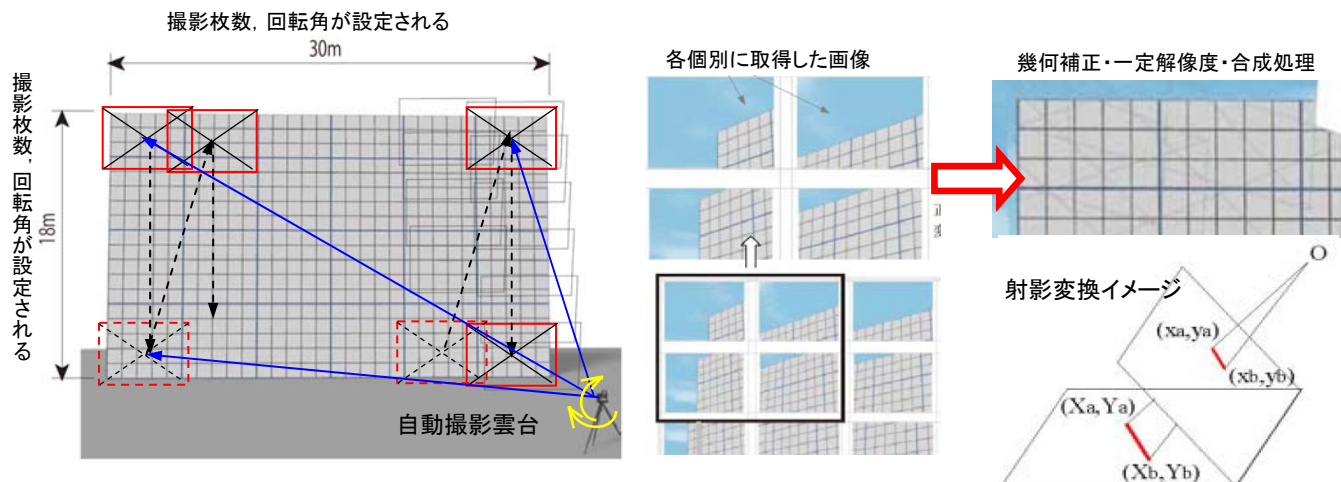


図 11 自動撮影雲台を用いた壁面撮影のイメージ

(3) 任意平面への投影

任意の平面上に図形を投影する射影変換は、一般的に2画像間のグリッドを用いて変換が可能である。すなわち図12に示す $G=(x,y)$ を、 $S=(X,Y)$ に射影変換を行う変換は式(1), (2)のように表せる¹¹⁾。

ここで $h_1, \dots, h_8$ は射影変換パラメータである。また投影面座標と幾何補正した座標4点それぞれの対応関係から射影変換パラメータを決定できることから、四角形 $G_{ij}G_{i,j+1}G_{i+1,j+1}G_{i+1,j}$ を四角形 $S_{ij}S_{i,j+1}S_{i+1,j+1}S_{i+1,j}$ に写す射影変換 h_{ij} を求めることができる¹¹⁾。

$$X = \frac{h_1x + h_2y + h_3}{h_7x + h_8y + 1} \quad (1) \quad Y = \frac{h_4x + h_5y + h_6}{h_7x + h_8y + 1} \quad (2)$$

射影変換では、実空間での擬似的な投影画像平面を決定する必要がある。本検証では、投影平面は3Dレーザで取得した建物の壁面形状から求め、自動撮影雲台で撮影した画像を投影する。

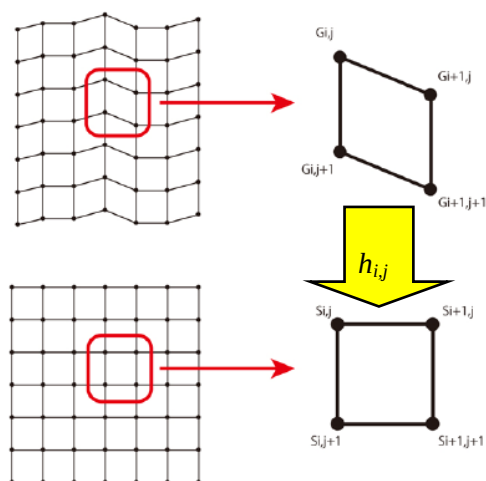


図12 グリッドの対応付け

(4) 解像度を一定とするための手法

投影された例えば10cmグリッドモデルの各点間の距離は座標値から算定できる。この投影グリッドモデルに位置する画像をその点間距離にしたがい、例えば150pixel/10cmの画像を100 pixel /10cmの画像にリサイズすることで、所定の1mm/pixelの画像を生成する(図14)。

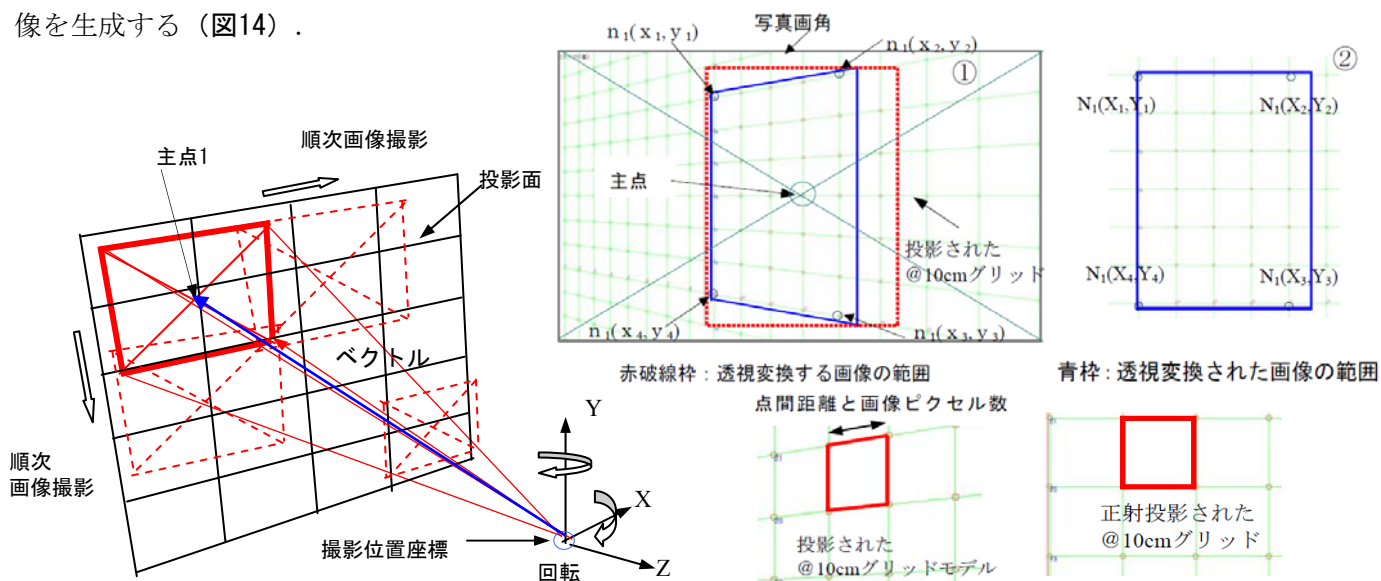


図13 投影座標系の説明

図14 解像度を一定とするための手法

(5) 検証概要

画像解像度が、1mm/pixelとなるよう、ギガピクセル画像撮影システムを用い、橋詰から主塔橋軸面を撮影した。撮影諸元を表1に示す。3Dレーザの点群から法線ベクトルを求め同一平面の抽出を行い、投影面を設定した。図15③に抽出した投影面を示す。

表1 撮影諸元

使用カメラ	SONY α55	
画素数	4912×3264	
焦点距離	500mm	
撮影距離 (m)	100～110m	
撮影画角 (m)	4.7×3.1	5.2×3.4
解像度 mm/pix	0.96	1.05

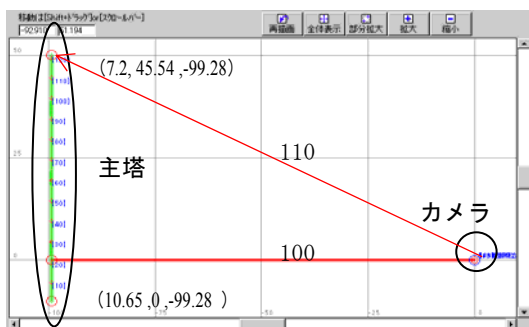


図16 カメラ位置とモデル面を設定

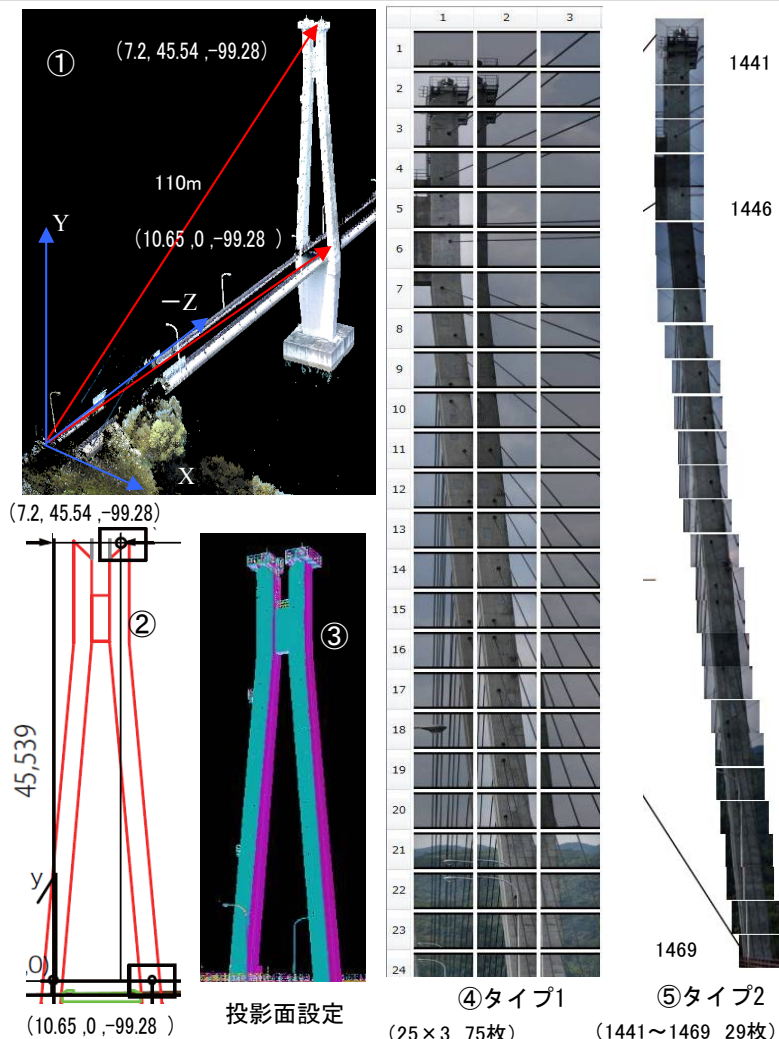


図15 ギガピクセル画像撮影

撮影タイプ2 は、カメラから主塔頂部、基部までの撮影距離差が10mあるために垂直回転毎にピント調整し計29枚の画像を取得したものである（図15⑤、図16）。以下タイプ2の処理過程を「幾何補正システム」の画面を用いて説明する。図17に示すように画面の左で、カメラ位置・撮影範囲の座標と分割数を設定し入力する。画面右は、撮影画像に撮影行列IDを設定することで、各撮影画像の角度が割り振られ水平、上下角の角度を取得する。なお本機器は機構が若干華奢であり、重量のある望遠レンズを用いた場合、撮影開始、終了点で光軸がローリングする傾向があり、光軸周りに画像を回転する補間処理を実施している。

1) まずカメラ位置と投影面の空間座標系を設定する。撮影開始、終了点、撮影位置の座標(x, y, z)と撮影の分割数を入力する。2) 入力情報に従い各画像のカメラの回転角が算出される。3) カメラ位置と角度、カメラの画角からグリッドモデルの射影変換を行い、グリッドモデルに撮影画像を重畳表示し画像の位置が算出され、モデル座標と撮影画像座標から画像の幾何補正条件と解像度を求める。このようにして画像の解像度はグリッドモデルから距離が分かるため解像度を一定とすることができる（図18）。

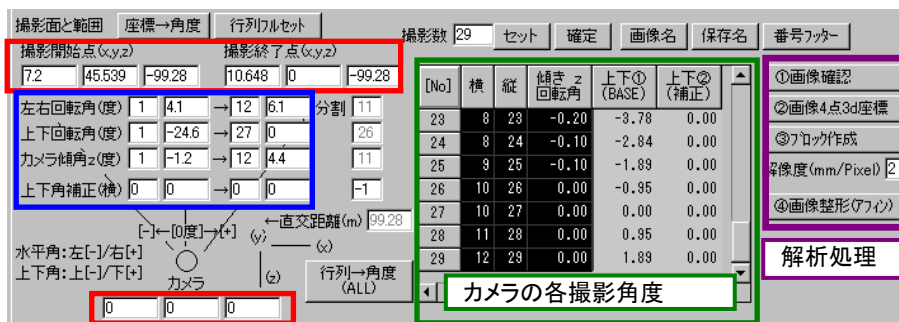


図17 撮影角度の取得ほか(幾何補正システム画面の例)

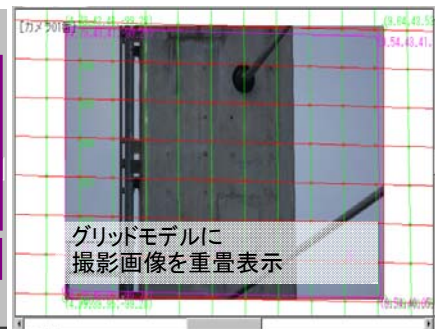


図18 作成された擬似オルソ画像

6. UAV（無人航空機）を用いた外観調査

ステレオ写真解析では、画像中の標定点を測量するか、あるいは直接カメラの外部標定要素を求める必要がある。これらの測量、外部標定を必要としない固定基線長カメラを用いたひび割れ進展の計測手法の研究も行われている⁵⁾。しかし本主塔では外海側にカメラを固定できる箇所はなく、また主塔には基準尺なども設置できないため、3Dレーザの点群および稜線抽出データを標定要素として用い、オルソ画像生成の精度とひび割れ判読精度について検証した。

(1) UAV (Unmanned Aerial Vehicle) について

UAVは機体にGPSとIMUを搭載し、飛行経路を設定しておくことで自動飛行が可能で対象部位を詳細に撮影することができる。使用したUAVは一般的にマルチコプタと呼ばれており、固定翼機と比較して、主塔のような鉛直構造物の撮影に適している。用いたUAVの機体（MK-8）の外観と仕様を図19、表2に示す。

(2) 撮影条件

飛行時間の観点から搭載するカメラはなるべく軽量であることが望ましく、ミラーレスカメラ（画素数16MP、焦点距離：55mm）を搭載しステレオ撮影する計画とした。世界測地系の背景地図はGoogle-Mapで提供されるが当該対象エリアは島嶼部にあり、余り鮮明ではなかった。また搭載しているGPSは1周波の低精度（誤差5m程度）であり、風速などの影響により機体が流されることも考慮し、安全性を確保するため構造物から20mを確保する計画とした（表3）。なお撮影に用いたカメラのレンズ歪み等については、予めレンズのキャリブレーションを実施している。撮影対象は、主塔と桁側面であり、主塔撮影は主塔を挟み込む3方向から撮影する計画とした。そこで飛行ルートに関係から対象面における画像解像度は2.0mm/pix程度である。一般的に、撮影解像度と捕捉可能なひび割れ幅については、きれいに清掃した明るい壁面の場合、1/10位の解像度まで認識可能と報告されている⁹⁾。今回は捕捉対象のひび割れ幅は壁面の汚損状況の影響も考慮し、解像度の1/5である0.4mmを目標とした。UAV撮影、WayPointの状況を図20、21に示す。

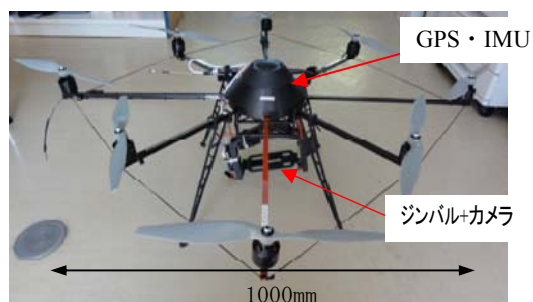


図19 UAV(MK-8)の外観

表2 UAVの仕様(MK-8)

搭載重量	1.5kg
耐風安定性	10m/s
飛行時間	～15min
飛行距離	1～1,5km
高度	～300m
GPS	1周波

表3 撮影仕様

使用カメラ	SONY NEX5D
画素数	4952 * 3056
焦点距離	55mm
撮影距離	20m
撮影画角	8.51m * 5.67m
解像度	1.85mm/pix

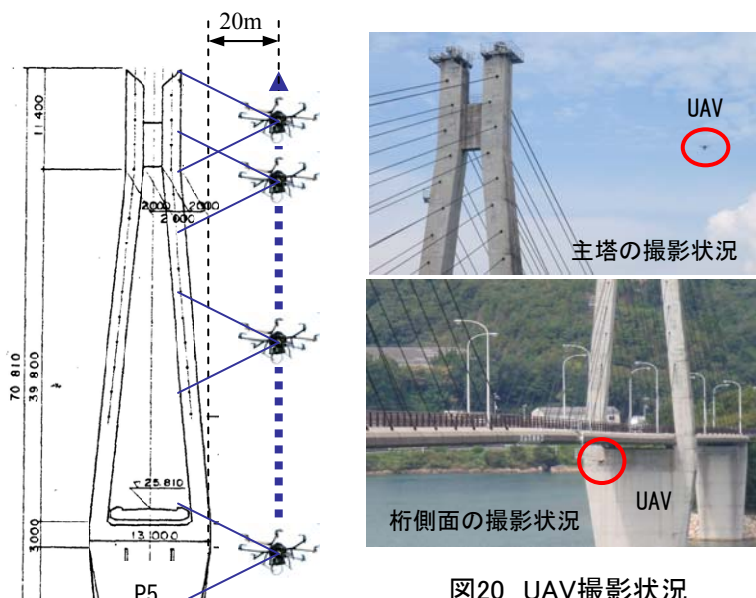


図20 UAV撮影状況

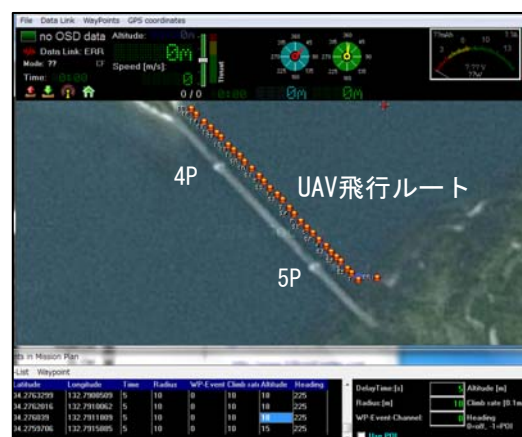


図21 WayPoint の状況

(3) デジタル写真解析処理

撮影距離は20mで行った. 1コースを上下に飛行させ, 上下ステレオ撮影を行った. 撮影枚数は25枚である. 図22は, 主塔に対する撮影形態および解析処理過程を表している. 写真解析はトプコン社製のImage Masterを使用した. 一般的に写真測量では, 基線比 $B/Z=0.3\sim0.6$ の撮影を行うが, 今回は撮影距離の制約から基線長は3m前後であり基線比は凡そ0.15程度となった. 基準点の測量精度は, 測定点の3次元座標の要求精度の5~10倍の精度で行うのが基本であり, 今回はひび割れの発生位置を, 【20年調査】と重ね合わせ比較することを考え, その平面的な位置ズレは10cm程度を想定した. 基準点精度は, 3Dレーザの精度である1.5cm+分解能 $\Delta z=1.5\text{cm}$ でおよそ3cm程度となる(3Dレーザ:GLS-1500の場合, $\pm 15\text{mm/at}200\text{m}$). 全ステレオペアで, パスポイント, タイポイントを選定し, さらに3Dレーザ点群データを用いて, バンドル調整計算により写真の外部標定要素を同時に決定した. バンドル調整計算後に得られるモデルの3次元座標と計算前の3次元座標が大きく異なる点はステレオペア上で同一点を正確に選定できていないか, 点群データを用いた地物標定の際の誤差が大きい点であると考えられるので, これらを異常値として取り除き, 計算結果を確定させた. 解析結果を表4に示す. 結果23モデルの絶対精度は約3cm程度である. この様に3cmでほぼそのひび割れ位置を特定でき, オフセットで一致させれば, ひび割れの進行具合を経年的に確認することができるものとする.

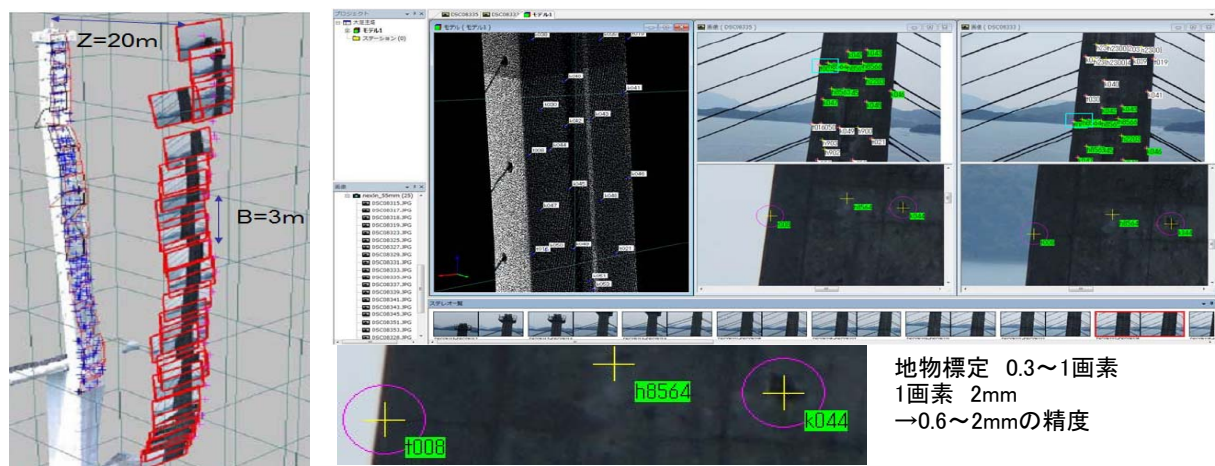


図22 撮影形態および地物標定解析処理の状況

表4 標定精度(外部・内部パラメータに対する標準偏差など)

標定の基準点	7点 (3Dレーザ点群の座標)				
パス/タイポイント	各モデルで10点~15点				
対象物上の分解能 (単位: m)	$\Delta XY=0.002, \Delta Z=0.015$				
X方向 (単位: m)		Y方向 (単位: m)		Z方向 (単位: m)	
標準偏差	最大残差	標準偏差	最大残差	標準偏差	最大残差
0.034	0.062	0.026	-0.041	0.034	-0.083

7. ひび割れ幅判読図化システムによる検証

ギガピクセル画像撮影による擬似オルソ画像およびUAV画像のステレオ解析によるオルソ画像を用いてひび割れ幅判読の検証を行った. 擬似オルソ画像(解像度1mm/pixel)の一部を図23に示す. 【20年調査】では, 図24に示す損傷状況が撮影記録されており, そのうち箇所A, B, Cの画像を「ひび割れ幅判読図化システム」を用い, ひび割れ幅の抽出精度の検証をおこなった. 評価は, 図7に示す各グレイレベル, 各解像度において検証した【CI】とそのひび割れ幅の算定式を用いてひび割れ幅を算出した. 箇所Aの各グレイレベルにおける抽出結果を図25にまとめて示す. 【20年調査】で0.1と記述されている部位①では, 解析の結果全てのグレイレベルにおいて0.2mm未満の評価となった. 一方部位②でグレイレベルが120, 80と暗い場合, 0.2~0.5mm未満の評価箇所も確認された. 箇所Bでは0.2mm以下と判定された. 箇所Cの【20年調査】およびUAVのステレオ解析で作成したオルソ画像を基に算出したひび割れ幅を図27に示す. UAV画像の解像度は2mm/pixであるが【20年調査】で0.4mm相当のものが, システム判定では0.5mm以上とほぼ同等の評価レベルが得られた.

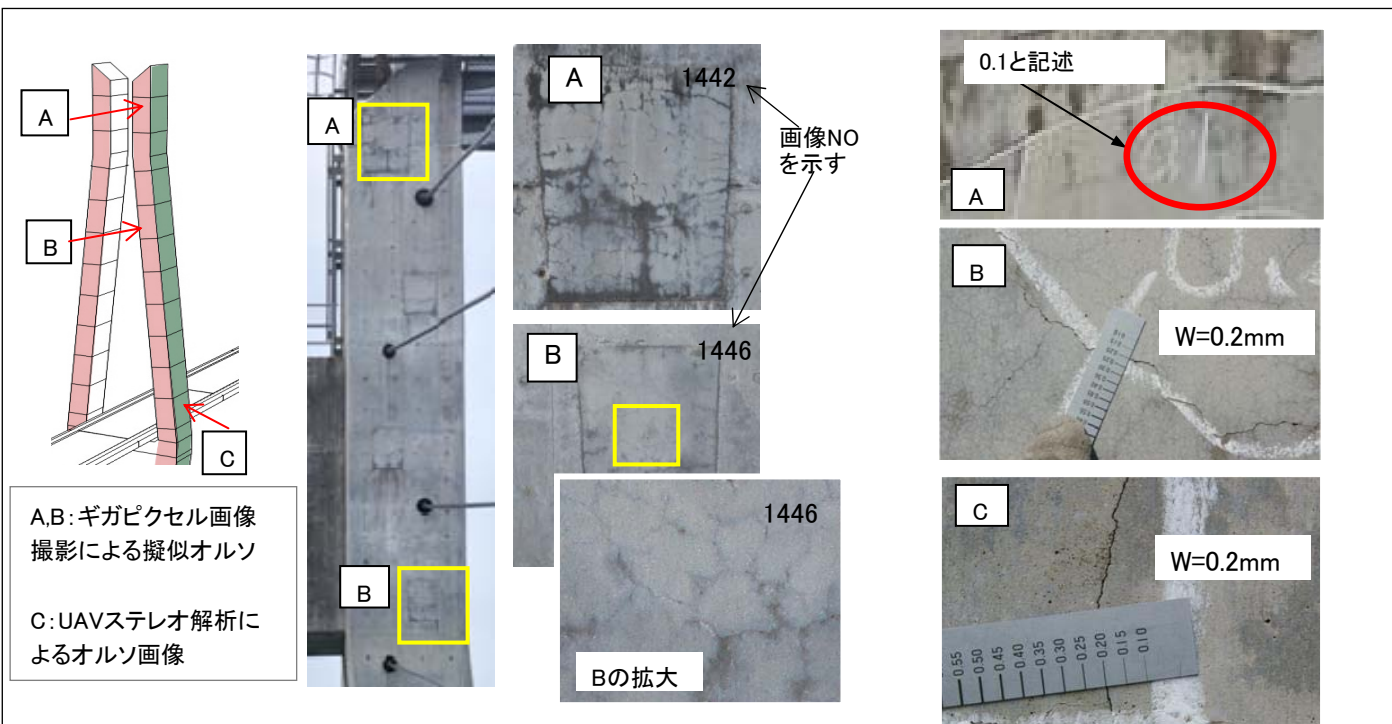


図23 擬似オルソ画像（撮影距離:110m, 解像度1mm/pixel）

図24 ローアクセス調査時の成果拡大

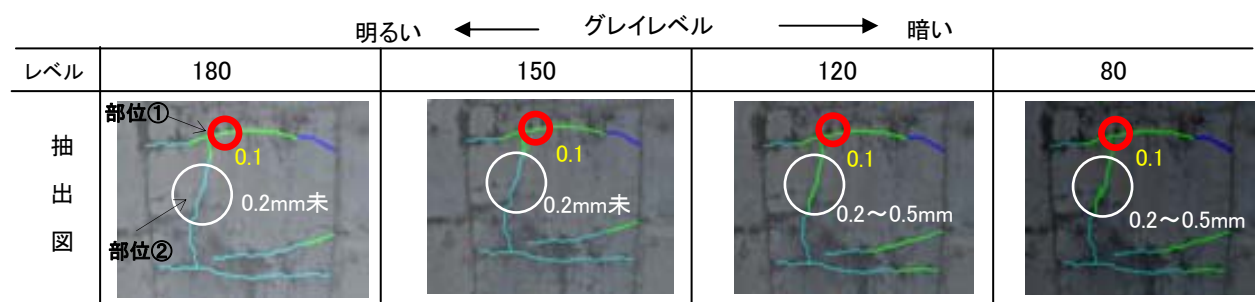


図25 グレイレベルを変化させた場合のひび割れ幅算定



図26 擬似オルソ画像によるひび割れ幅算定結果



図27 箇所CーUAVステレオ解析画像によるひび割れ幅算定結果

8. まとめ (3次元維持管理システムへの展開)

検証で得られた成果、および今後の応用可能性について以下まとめる。

・「ギガピクセル画像撮影システム」は、100mの遠望から対象壁面を連続的に撮影し撮影抜けのない擬似オルソ画像が作成でき、ロープアクセスによる近接目視調査と同等のひび割れ幅抽出精度が得られた。

・UAV画像は、足場架設の制限を受ける橋梁点検において、必要解像度を取得できる有効な撮影手段である。飛行ルートを設定しておくことで同じルートを反復して撮影でき、モニタリングへの活用性が高い。

橋梁点検を的確に行うには、効率的に必要且つ正確な情報を捉えること、新旧情報の比較から将来を予測すること、が重要となる。従来の点検により得られた情報は、変状箇所のみ画像である場合が多い。

しかし今回試行した遠隔から全体を網羅しながら、かつ高精度なデジタル画像取得が可能なギガピクセル画像やUAV画像などの手法を利用すれば、全部材、全部位の健全部も含めた情報も得られるため、経年変化を把握するためのデータとして活用できる。取得した膨大な画像を迅速に検索・閲覧ができるためには3次元維持管理という概念も重要である。3次元維持管理システムのイメージを図28に示す。損傷の3次元可視化は、変状原因の推定判断を補助する上でも有効である。

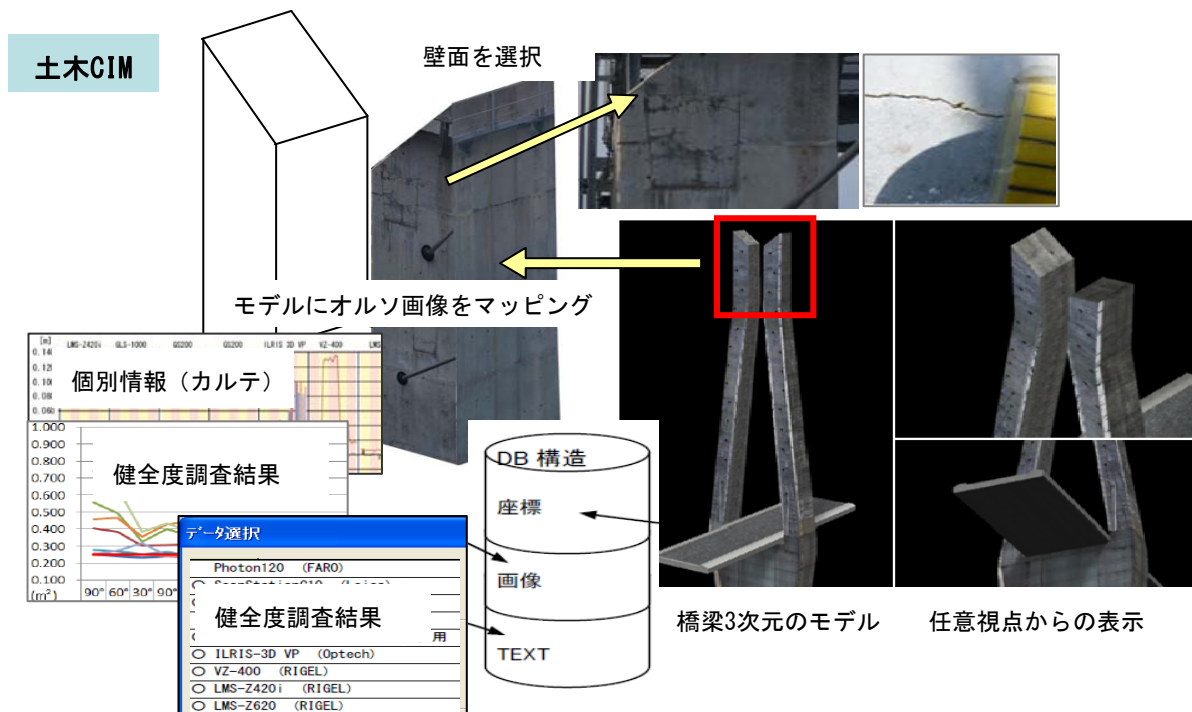


図28 橋梁の3次元維持管理システムのイメージ

謝 辞

大芝大橋の調査研究にあたっては、東広島市建設部維持課、安芸津支所産業建設課様から資料の提供など便宜を図っていただきました。紙面を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/index.html>
- 2) 原 創太ほか：ロープアクセスを利用した橋梁の点検について、土木学会第67回年次学術講演会概要VI-234, pp. 467-468, 2012
- 3) 前田 穰ほか：クラックスケール内蔵光波測量によるひび割れ幅点検システム、土木学会第62回年次学術講演会, 6-289, 2007
- 4) 曾根茂高ほか：デジタル画像解析によるコンクリート橋点検、土木学会第62回年次学術講演会, 5-060, 2007
- 5) 中川雅史ほか：コンクリートひび割れ進展観測のための時系列ステレオレジストレーション、JSPRS平成24年度年次学術講演会発表論文集, pp. 13-14, 2012. 5
- 6) 平成20年度 農業用施設維持事業 大芝大橋構造点検業務報告書
- 7) 西村正三ほか：光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング、JSEM, Vol. 12, No. 3, pp. 193-200, 2012. 9
- 8) 西村正三ほか：3Dレーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成、JSPRS Vol. 51, No. 1, pp. 46-53, 2012. 3
- 9) 例えば、社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '02 基礎編, pp. 89, 2002.
- 10) 例えば<http://gigapan.com/>
- 11) 今井倫太郎ほか：プロジェクトの幾何補正システムの開発、2012ビジョン技術の実利用ワークショップ, IS1-C10, 2012. 6