

# ひび割れおよび剥離検出のためのVR技術を用いた 橋梁目視点検支援システムの開発

江本久雄 (榊構造物クリニック) 宮本文穂 (山口大学名誉教授) 高橋 順 (電気化学工業(株))

## Development of VR-based Inspection Support System for Crack and Spalling Detection in Deteriorating Bridges

Hisao EMOTO (Kouzoubutsu Clinic Co., Ltd.), Ayaho MIYAMOTO (Professor Emeritus) and  
Jun TAKAHASHI (Denki Kagaku Kogyo K.K.)

**Abstract:** In this study, a novel VR-based system for inspection of deteriorating concrete bridges is proposed to support of the crack and spalling detection which is a key role in existing bridge maintenance. The proposed system, called a VR-based support system for bridge inspection, was applied to an aged bridge for confirming the representing ability of both cracking and spalling damages as a specific example. Experimental results showed that the VR images data with hammering sounds (audio) data have a sufficient ability of representing both crack width over 0.2 mm and a certain spalling area near concrete surface. In this system, the three-dimensional image(photo) data was used to recognize the cracking damage for professional visual inspector. On the other hand, as spalling damage inside the concrete surface couldn't be identified accurately from only image(photo) data, then the hammering sounds (audio) data was incorporated into the system as an additional function for recognition of the spalling damage.

**Key Words :** maintenance support system, visual inspection, virtual reality(VR), crack, spalling, damage, hammering sounds

### 1. 緒言

社会基盤構造物のひとつである橋梁は、戦後から50年余りの期間に全国各地で建設され、特に高度経済成長期には多く建設されてきた。しかしながら、現在それらの橋梁は、長い歳月が経ち、自然災害、大型車両の増加等の影響により、橋梁の耐久性・耐荷性が下がり、コンクリートのひび割れ、または剥落の危険性が指摘され維持管理の重要性に関心が集まっている。

橋梁の維持管理の流れとして、定期的に橋梁が所在する現場に向き、専門家が目視で損傷の有無を判別、損傷状態の診断を行い、診断結果から補修・補強計画を立案・実施することであり、橋梁の損傷状態を確実に把握し、重大な損傷や事故を未然に防止するためである。しかしながら、我が国の橋梁の維持管理の実態に目を向けてみると、公共事業費の削減に伴い、点検、診断、補修・補強の信頼度が十分に確保されていない。また、市区町村において約9割の自治体が定期的な橋梁点検を実施していない等、橋梁点検に多くの不備が生じている<sup>1)</sup>。

目視点検では、定期的に専門技術者によってひび割れや剥離などの変状を記録する。しかし、専門技術者といえども、変状の指摘箇所がばらつくことが分かっている。この低減には Virtual Reality<sup>2)</sup>(以下: VR)を利用した検討会(ヒアリング会)を実施することで、有効であることが分かっている<sup>3)</sup>。また、検討会で若手の専門技術者の育成にも活用が期待される。これは、現場研修とは異なり、天候・時間の制約がなくなり、また、交通の遮断の必要もなくなるため効率的に支援可能となる。また、専門技術者によって記録された変状データを VR に実装することによって、複数人で同時に同じ変状データを観ながら議論ができる。さらに、目視点検は定期的に実施されるため、時系列のデータベースとして活用が期待できる。しかしながら、VR データのひび割れ幅<sup>4)</sup>の精度の検討や剥離の表現に関する課題がある。ひび割れ幅に関しては、どのような画像データであれば、どの程度のひび割れ幅が表現できるかどうか、剥離に関しては、その変状の性質上微妙な凹凸は画像データのみでは、それと識別できない、ということが挙げられる。

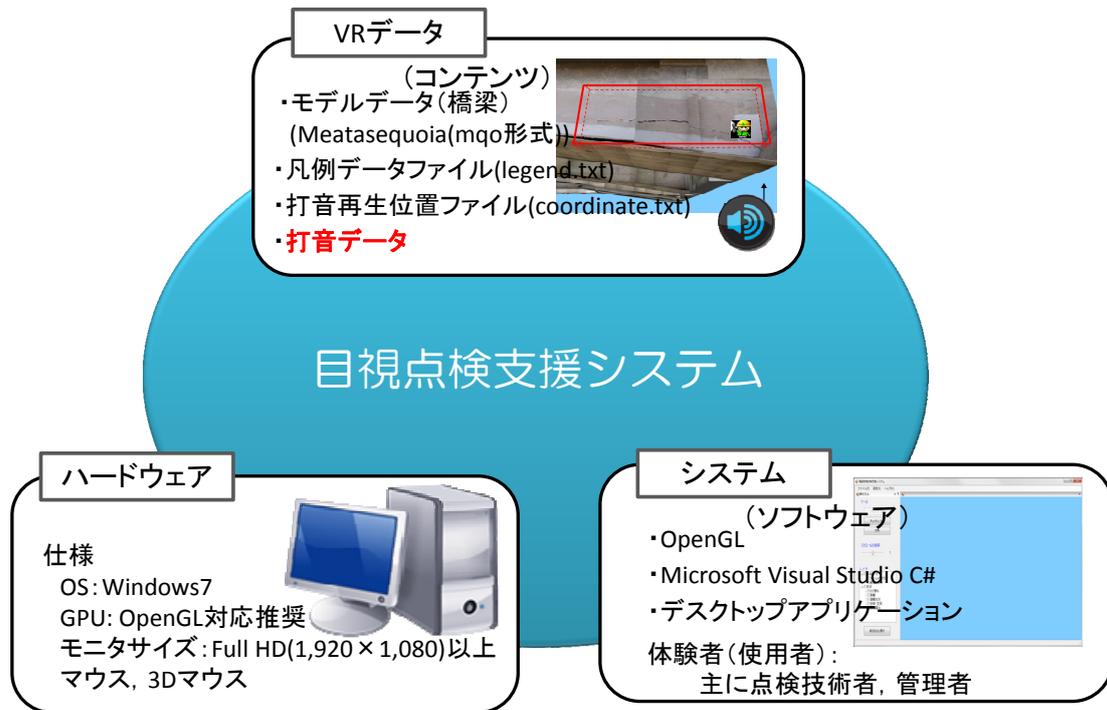


図-1 目視点検支援システムの構成

そこで、ひび割れ幅に関しては、撮影距離やカメラの仕様といった撮影環境などの条件を設定し、検討を行う。剥離に関しては、専門技術者がフィールドでの打音検査を実施することからヒントを得て、人工現実感を表現できる VR 技術の聴覚情報として打音(音声)データを追加することで、識別可能かどうかの検討を行う。

これらの検討結果から、本システムに機能追加を行うことによって、ひび割れと剥離の変状をより現場で目視点検を行っているようなリアルな環境として表現できるシステムに改良し、橋梁目視点検のより有効な支援を試みる。

## 2. VR技術を活用した目視点検支援システムの概要

### (1) システムの構成

本システムの構成としては、図-1に示すように「VRデータ(コンテンツ)」、「ハードウェア」および「システム(ソフトウェア)」から構成される。VRデータ(コンテンツ)では、橋梁モデル、凡例データファイル、打音生成位置ファイル、打音データなどから構成される。このVRデータでは、人工知能分野におけるフレーム問題<sup>9)</sup>をさけるため景観などは対象とせず、橋梁だけをモデル化している。しかし、リアル感を追求するために、打音のデータを採用している。次に、ハードウェアとしては、没入型ディスプレイなどの専用デバイスやメディアルームといった大がかりなデバイスでは、広く活用し

にくい状況が発生するため、本システムでは、汎用的なPCやワークステーションによって体験できる構成としている。次に、システム(ソフトウェア)としては、3DCGモデルの取り扱いが容易なOpenGLを用いてVisual Studio C#にて構築している。本支援システムは、デスクトップ環境の使用を前提としており、UI環境や変状データなどを保持するためのDB環境に優れた開発環境としている。また、本システムの体験者(使用者)の対象としては、主に点検技術者及び管理者である。

### (2) システムの機能

本システムの機能としては、橋梁モデルの表示、表示レイヤの切り替え、ひび割れの拡大縮小表示、そして打音による剥離の確認機能などがある。橋梁モデルの表示では、橋梁モデルの作成には、実橋梁を撮影することから、現実のテクスチャを利用していることから、実際の橋梁の表面を表示できるようにした。そして、点検学習や劣化部の説明での操作性を考え、マウス操作により移動・回転・拡大縮小の操作ができるようにした。表示レイヤの切り替えでは、目的により、打音機能や表示レイヤなどへの切替が容易にできるようにした。ひび割れの確認では、必要に応じて橋梁モデルを拡大し、ひび割れの状態を詳細に観察できるようにした。また、ひび割れとともに確認が必要となる剥離に関しては、橋梁モデルの画像だけでは剥離の微妙な凹凸の変化を判断することが困難であるため、打音再生による剥離の確認機能を実装した(図-1中、VRデータ内の打音データ)。

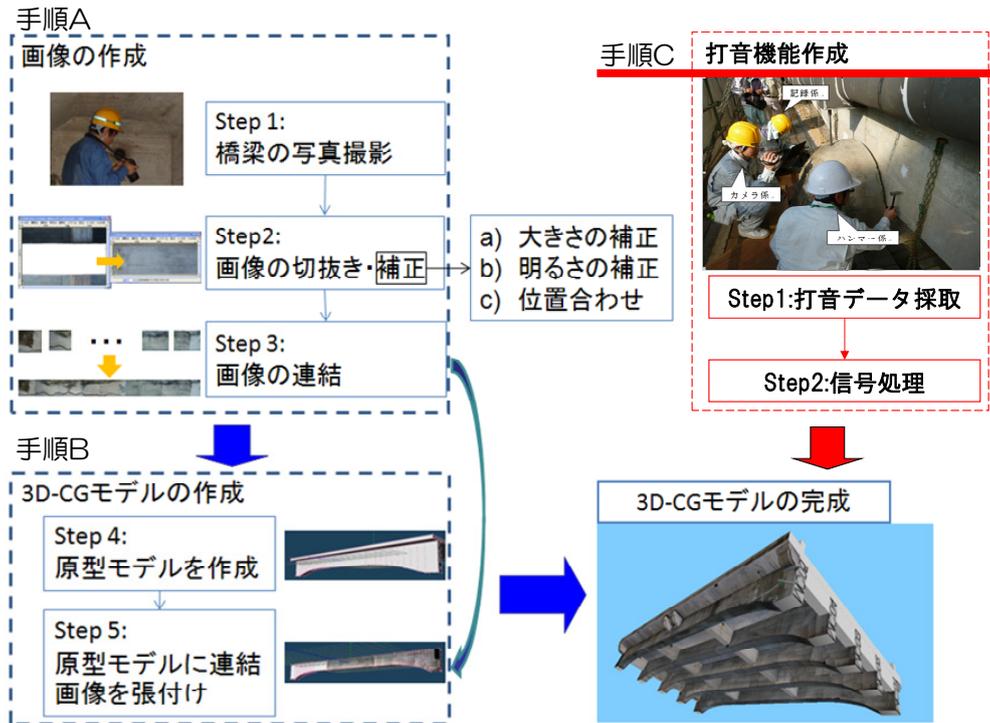


図-2 VRデータ(コンテンツ)の作成手順

(3) VRデータ(コンテンツ)の作成手順

ここでは、VRデータ(コンテンツ)作成方法の概要について述べる。なお、本システムの目的に応じて作成する必要がある。

図-2に示すような手順でVRデータである3DCGモデルの作成を行う。図中左側(青色点線枠)が3DCGモデル、図中右側(赤点線枠)が打音データの作成手順である。

まず、手順Aでは、橋梁の写真撮影を各部材ごとに行い、画像処理ソフトを用いて画像の大きさ・明るさ・位置を調整し、その画像を連結する。この画像が、3DCGモデルのテクスチャとなる。次に、手順Bとしては、モデル作成を行うMetasequoia<sup>10</sup>を用いて3DCG原型モデルの作成を行いテクスチャを貼り付ける。以上の作業で3DCGモデルが完成する。次に、手順Cとして、橋梁の剥離がある場合と、そうでない場合(健全)の打音(音声)データを録音する。この録音した打音(音声)データから不要部分を削除して、データを作成している。この打音(音声)データを3DCGモデルの剥離の箇所または健全な箇所といったような適切な座標値を設定し、打音再生可能とし、追加した機能である。

(4) 支援システムとしての活用方法

本システムの活用のポイントとしては、図-3に示すように点検データの保管(データベース)、点検技術の学習支援(教育)、点検結果の検討支援、劣化・損傷の経年進行の評価(シミュレーション)としている。

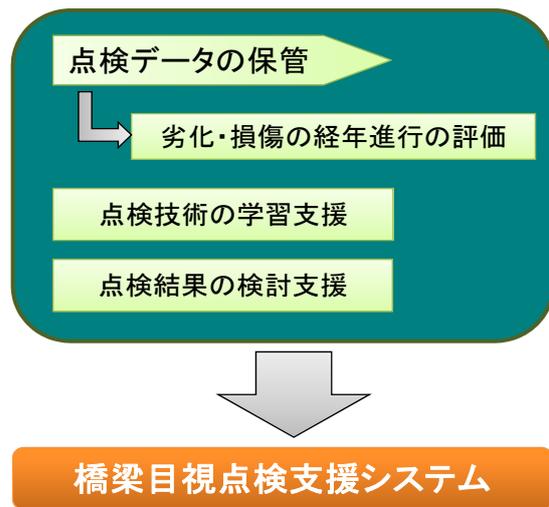


図-3 本システムの活用点

点検データの保管としての活用では、橋梁の3DCGモデルデータだけでなく、橋梁目視点検結果を併せ持つことにより実現可能である。橋梁目視点検結果としては、変状の種別や形状を付加することで、変状図と比較しながら橋梁の劣化・損傷の確認をすることが容易にできる。さらに、その結果を時系列データとして蓄えることが可能となる。

次に、点検技術の学習支援(教育)及び点検結果の検討支援について述べる。本システムの橋梁技術者の教育支援の対象としては、若手技術者だけではなく熟練技術者も対象としている。一般的に、若手技術者は橋梁の初歩

的な勉強から始め、現場に出向いて熟練技術者の指導のもとに点検・診断などを行い、経験を重ねて能力を向上させる。一方、熟練技術者は、定期的な講習会や検討会を行うことで、経験を重ねるに連れて生じる技術者同士の差異を防ぐことができる。しかしながら、公共事業費の削減で維持管理の予算の減少が原因で、若手技術者と熟練技術者の教育が疎かになってきている。現場で教育を行うには多くの費用と時間が浪費されている。そこで本システムを用いることで現場に行かずして、橋梁点検の教育支援が行える。本システムを活用することで、交通の遮断、天候、時間の制約がなくなり、費用削減にも繋がる。

また、実物画像でのひび割れなどの外観から推定される劣化推定シミュレーションを導入できれば、さらに支援システムとしての有用性が広がると考えられる<sup>6),8)</sup>。

### 3. VRデータの作成

ここでは、VRデータのうちテクスチャとなる素材の作成方法について述べる。本研究の3DCGモデルのテクスチャは、臨場感を持たせるために、実橋梁を撮影した画像を用いる。そのため、画像を撮影するために、橋梁現場で足場を利用したり、河川から撮影を行う必要がある。また、撮影画角は、VRデータの目的により異なるため、その検討を行っている。なお、撮影用カメラとして高解像度カメラ（一眼レフカメラ）を用いる。

#### (1) 撮影方法

橋梁の撮影箇所としては、主に橋梁の上部工の主桁、床版、横桁および下部工である。特に目視点検で確認する上部工を下部工よりも詳細に撮影する。上部工の撮影においては、カメラを上に向けて、橋梁の桁下で実施する。また撮影には、**図-4**のように撮影係、マーカー係、記録係の3人1組で行う。

撮影係は、対象物に対して垂直かつ、一定の距離で撮影を試みる。これは、撮影後の画像編集の際に、画像の引き伸ばし・変形などの幾何学補正を極力減らすためである。さらに、テクスチャの作成時間の軽減という意味もあるが、ひび割れ幅に影響しないようにするためでもある。また、本システムの利用目的にもよるが、実橋梁の状況を詳細に記録するためには、可能な限り近接してもれなく撮影する。撮影した画像は撮影1枚ごとに確認し、色・明るさ・ぶれ等の問題があればだちに撮り直しを行う。マーカー係は、撮影係と連携して、写真を合成する際の重複領域（のりしろ）を判断するために、レーザーポインタを照射することで目印をつける。

記録係は、撮影の進捗状況や撮影枚数（ファイル名）



図-4 撮影の様子と役割



図-5 橋梁撮影用のラジコンヘリ

や撮影方向等を上部工の展開図を利用した撮影計画図に記入する。この際に、変更点や計画外の事項も記録する。撮影終了後に写真データを整理するために、どの部材の撮影をしたのかが分かるように撮影部材名称が書かれた黒板を撮影する。

モデル作成における画像データ撮影は、撮影橋梁の桁下高さの問題や河川等を足場として利用するといった安全面での課題がある。さらに、人手による撮影距離などカメラの扱いといった撮影のばらつきがあり、撮影環境によって影響が生じる。しかし、**図-5**に示すようなラジコンヘリ<sup>1)</sup>を用いることで、足場等の撮影環境に影響されずに画像データを取得することが可能になる。そして、GPSを利用した自動撮影を行うことで、撮影のばらつきが低減する。

また、動画データを利用したりリアルタイムでの遠隔橋梁点検も可能である。そして、打音検査を行うことができない撮影環境であれば、ラジコンヘリにて熱画像データを取得し、剥離検出機能に対応することを検討している。

#### (2) 撮影画像への影響因子

橋梁の撮影は、屋外での撮影となるため、撮影距離・明るさ・撮影環境などの撮影に影響を与える問題が生じる。ここでは、これらの影響について検討を行う。

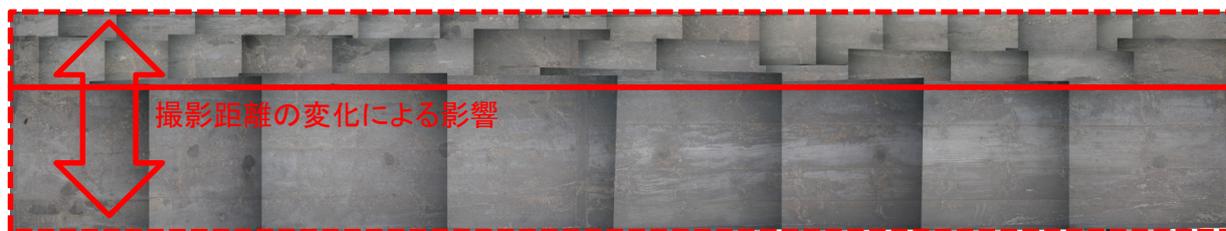


図-6 画像サイズが異なる場合の連結画像の例



図-7 不均一な色彩の連結画像の例

#### a) 撮影距離の影響について

現場(屋外)での撮影では、足場などにより撮影対象との距離を一定に保つことは困難である。撮影距離が変化すると画像の撮影範囲が変化してしまい、図-6のように画像サイズの大小が生じてしまい、連結しにくくなるのと同時に連結した画像の見栄えも悪くなる。解決策の一例としては、対象物との距離を可能な限り一定に保つために、マーカー係と記録係によって、撮影範囲(撮影画角)を検討し、識別のためにレーザーポインターやチェックテープを利用し撮影範囲(撮影画角)を指示する。

#### b) 明るさの影響について

理想の撮影条件としては、明るさが一定であることが重要であるが、現場(屋外)での撮影では、天気(晴れや曇り)、撮影を行う時間帯(太陽の位置)によって明るさにむらが生じる。さらに、撮影途中に急に雲が現れ暗くなってしまうことや、撮影方向の都合上、太陽光を身体で防いでしまうことがある。その結果、画像の合成(連結)を行った際、図-7のような不均一な色彩の画像になる。

また、図-8に示すような桁下の水面から波打ちの太陽光が反射することがある。この現象が発生すると、画像連結に支障がでることと、波打ちの光が損傷に見えてしまう恐れがある。対策としては、反射光が出ない曇りの日や撮影を行う時間帯(太陽の位置)を検討して、実施することである。

さらに、足場を設置することで、桁下での撮影環境が極端に暗くフラッシュ機能を用いると図-9のように明るい部分と暗い部分が生じる。この場合は、投光器や作業灯などを利用し全体を明るくし撮影を実施する。

#### c) 撮影環境の影響

撮影環境によって、図-10のような吊り足場の鎖や付属物(水道管など)が取り付けられている場合がある。その場合、撮影対象の範囲内に不必要な部材として写りこ



図-8 波打ちの光が反射した画像の例



図-9 フラッシュ機能による画像の例

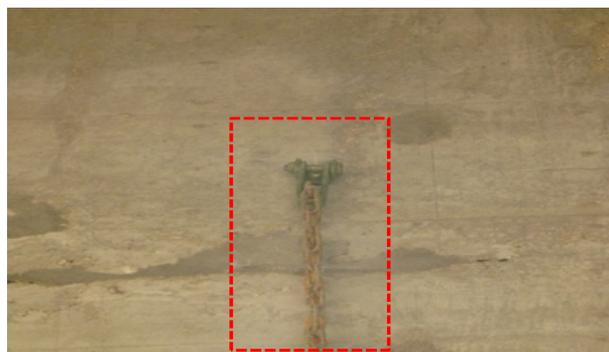


図-10 不要部材が写り込んだ画像の例

んでしまい、損傷箇所を被ってしまう場合もある。そこで、いくつか角度を変えて撮影し、被って隠れてしまった箇所を補助する撮影を行う。

### (3) 機材選択の影響

ここでは、撮影機材（カメラ、レンズ）の選択によって、撮影画像の精度に与える影響について検討する。また、本検証では、ひび割れの変状を対象として、撮影対象物からの距離により、どの程度のひび割れ幅が把握できるかどうかの検証を行った。

検討方法は、撮影距離および撮影面積の変化に応じて、どの程度のひび割れ幅が把握できるかどうかを調べる。実験機材の配置を図-11に示す。図-11に示すように、ひび割れ幅を把握するために、白色の壁にクラックゲージを設置した。なお、実際のコンクリート表面は、灰色で、汚れなどもあるため、コンクリートブロックなどの異なった材質での検討も行う。また、一般的にひび割れ幅が0.2mm以上<sup>12)</sup>で補修が必要とされているが、クラックゲージに記される0.04mmが、画像から確認できるかどうかの判断で検証を行った。実験の方法は、広角と望遠の切り替えを行い、撮影距離として、それぞれ30cm, 50cm, 1m, 2m, 3m, 5m, 6mのときの撮影範囲とひび割れ幅を求める。ここで、6mの条件は、望遠レンズでの望遠のみである。この際に用いたカメラは、2種類(SONY α300, Panasonic DMC-G2)で、そのうち一台(Panasonic DMC-G2)は、標準レンズと望遠レンズの二通りで実施する。

また、カメラのスペックは、SONY(α300)：1020万画素、23.6×15.8 CCD、Panasonic(DMC-G2)：1210万画素、4/3型Live MOSであり、レンズは、SONY(α300)：3.5-5.6/18-70、Panasonic DMC-G2：標準レンズ3.5-5.6/14-42、望遠レンズ4-5.6/45-200である。

### (4) 考察

表-1, 2に検証結果をまとめる。表中の縦と横の数値は撮影画像のサイズを示しており、これらの数値から撮影面積を求めた。また、表中の青色(○)はひび割れ幅0.04mmまで確認でき、黄色(△)はひび割れ幅0.04mmがぼやけており、0.1mmまで確認でき、赤色(×)は0.04mmが確認できないことを示す。また、斜線が引かれている欄は、撮影が不可能の場合であり、記録なしを意味する。

表-1に示す白色の壁での撮影面積の検討結果においては、以下のことが分かった。

- 望遠レンズを付けずに広角撮影を行った場合、SONY α300, Panasonic DMC-G2のどちらも対象物から50cmまでの距離での撮影であれば、青色

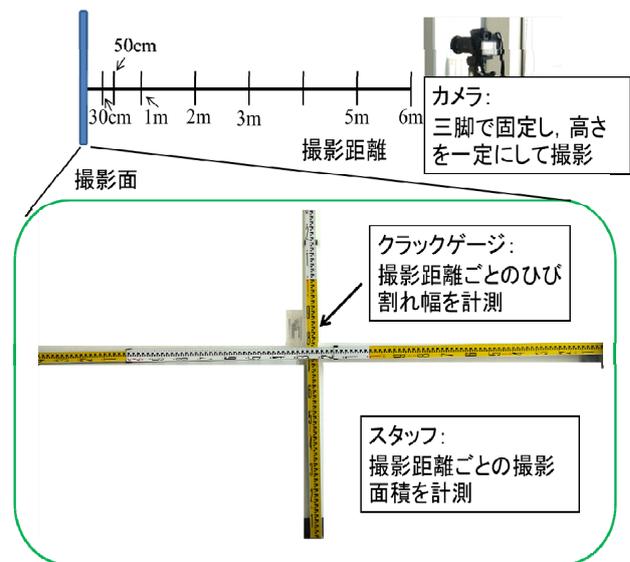


図-11 実験器具の設置概要

(○)であり、0.04mmのひび割れが確認できる。

望遠による撮影を行った場合、どちらも対象物から1mまでの距離が青色(○)であり、0.04mmのひび割れが確認できる。また、対象物の距離が2mまでなら黄色(△)であり、0.1mmのひび割れを確認することができた。

- 望遠レンズを付けて広角撮影を行った場合、対象物から2mまでの距離まで青色(○)で0.04mmのひび割れが確認でき、望遠による撮影を行った場合、対象物から6m離れても青色(○)で0.04mmのひび割れが確認できた。
- 青色(○)で0.04mmのひび割れ幅を確認できる撮影精度で撮影した際、一枚あたりに撮影できる範囲はおおよそ横50cm・縦40cm程度であった。
- 黄色(△)で0.1mmのひび割れ幅を確認できる撮影精度で撮影した際、一枚あたりに撮影できる範囲はおおよそ横80cm・縦60cm程度である。

表-2に示す灰色の壁の撮影面積の検討結果においては、以下のことが分かった。

- 検討1の白い壁に比べ、背後に模様が入ると撮影精度が落ちた。
- 望遠レンズを付けずにズーム機能も使用せず撮影を行った場合、対象物から30cmまでの距離での撮影であれば、青色(○)で0.04mmのひび割れが確認でき、対象物の距離が50cmまでなら黄色(△)で0.1mmのひび割れを確認することができた。ズーム機能を使用し撮影を行った場合、対象物から1mまでの距離ならば青色(○)で0.04mmのひび割れが確認でき、対象物の距離が2mまでなら黄色(△)で0.1mmのひび割れを確認することができた。

表-1 撮影面積の検討1(白色の壁)の検証結果

		SONY α 300			Panasonic DMC-G2			Panasonic DMC-G2 (望遠レンズ付)		
		横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )	横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )	横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )
ズーム無 (SONY:18mm, Panasonic:14mm, 望遠レンズ:45mm)	30cm	○ 32	○ 23	○ 736	○ 23	○ 20	○ 460			
	50cm	○ 55	○ 42	○ 2,310	○ 46	○ 36	○ 1,656			
	1m	× 132	× 88	× 11,616	× 113	× 87	× 9,831	○ 37	○ 29	○ 1,073
	2m	× 267	× 172	× 45,924	× 236	× 178	× 42,008	○ 77	○ 58	○ 4,466
	3m	× 400	× 260	× 104,000	× 369	× 270	× 99,630	△ 113	△ 85	△ 9,605
	5m	× 675	× 450	× 303,750	× 650	× 475	× 308,750	× 189	× 142	× 26,838
ズーム有 (SONY:70mm, Panasonic:42mm, 望遠レンズ:200mm)	30cm	○ 13.5	○ 10	○ 135	○ 9.5	○ 8	○ 76			
	50cm	○ 17	○ 13	○ 221	○ 16	○ 13	○ 208			
	1m	○ 36	○ 25	○ 900	○ 40	○ 31	○ 1,240			
	2m	△ 69	△ 47	△ 3,243	△ 83	△ 63	△ 5,229	○ 18	○ 15	○ 270
	3m	× 103	× 70	× 7,210	× 126	× 96	× 12,096	○ 27	○ 21	○ 567
	5m	× 172	× 117	× 20,124	× 215	× 160	× 34,400	△ 45	△ 34	△ 1,530

表-2 撮影面積の検討2(灰色の壁)の検証結果

		SONY α 300			Panasonic DMC-G2			Panasonic DMC-G2 (望遠レンズ付)		
		横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )	横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )	横(cm)	縦(cm)	面積(cm <sup>2</sup> )
ズーム無(SONY:18mm, Panasonic:14mm, 望遠レンズ:45mm)	30cm	○ 32	○ 23	○ 736	○ 23	○ 20	○ 460			
	50cm	△ 55	△ 42	△ 2,310	△ 46	△ 36	△ 1,656			
	1m	× 132	× 88	× 11,616	× 113	× 87	× 9,831	○ 37	○ 29	○ 1,073
	2m	× 267	× 172	× 45,924	× 236	× 178	× 42,008	△ 77	△ 58	△ 4,466
	3m	× 400	× 260	× 104,000	× 369	× 270	× 99,630	× 113	× 85	× 9,605
	5m	× 675	× 450	× 303,750	× 650	× 475	× 308,750	× 189	× 142	× 26,838
ズーム有(SONY:70mm, Panasonic:42mm, 望遠レンズ:200mm)	30cm	○ 13.5	○ 10	○ 135	○ 9.5	○ 8	○ 76			
	50cm	○ 17	○ 13	○ 221	○ 16	○ 13	○ 208			
	1m	○ 36	○ 25	○ 900	○ 40	○ 31	○ 1,240			
	2m	△ 69	△ 47	△ 3,243	△ 83	△ 63	△ 5,229	○ 18	○ 15	○ 270
	3m	× 103	× 70	× 7,210	× 126	× 96	× 12,096	○ 27	○ 21	○ 567
	5m	× 172	× 117	× 20,124	× 215	× 160	× 34,400	△ 45	△ 34	△ 1,530

\*青色(○) : 0.04mm のひび割れ幅を確認できる. △ (黄色) : 0.04mm がぼやけており, 0.1mm のひび割れ幅が確認できる. 赤色(×) : 0.04mm のひび割れ幅が確認できない

- 望遠レンズを付けた場合, ズーム機能を付けずに撮影を行った場合, 対象物から 1m までの距離ならば青色(○)で 0.04mm のひび割れが確認でき, 対象物の距離が 2m までなら黄色(△)で 0.1mm のひび割れを確認することができた. ズーム機能を使用すれば対象物から 3m までの距離が青色(○)で 0.04mm のひび割れが確認でき, 対象物の距離が 5m までなら黄色(△)で 0.1mm のひび割れを確認することができた.
- 青色(○)で 0.04mm のひび割れを表示する撮影精度で撮影した際, 一枚あたりに撮影できる範囲はおおよそ横 40cm 縦 30cm 程度であった.
- 黄色(△)で 0.1mm のひび割れを表示する撮影精度で撮影した際, 一枚あたりに撮影できる範囲はおおよそ横 80cm 縦 60cm 程度であった.

#### 4. VRデータの処理手法

##### (1) 画像編集の方法

撮影した画像を VR データのテキストとするために, 図-12 のような手順で作成を行う. 作成の手順は, 1. 「キャンバスサイズの変更」, 2. 「1 枚目の画像の大きさ, 歪みの編集」, 3. 「2 枚目以降の編集・連結」, 4. 「連結画像の切り抜き」の 4 ステップからなる. な

お, 画像編集には Gimp, 画像ビューワーには IrfanView の 2 つのソフトを用いた.

まず, 画像の編集に前処理として, 撮影した画像を部材名称ごとに分類する. 次に, 画像ビューワー(IrfanView)によって画像を適切なサイズに変換する. その後, 画像編集ソフト(Gimp)により, 画像の歪み, 色合い等を修正する.

##### a) 手順 1. キャンバスサイズの変更

最終画像サイズ(テキストサイズ)を予測して, キャンバスのサイズを設定する. なお, 画像編集の作業エリアをキャンバスといい, 撮影画像を画像処理ソフト(Gimp)に読み込ませた(ドロップ)後, キャンバスサイズを変更する. この作業は, 複数の画像を連結していくと, 貼付け方向(合成方向)に画像が大きくなるため, 編集可能サイズを広げるということである.

##### b) 手順 2. 1枚目の画像の大きさ, 歪みの編集

画像の大きさ, 歪みを編集する場合は画像編集ソフト(Gimp)の機能である「拡大・縮小」, 「遠近法」を選択し, 編集を行う. 「拡大・縮小」とは選択した範囲の画像を任意の大きさに拡大・縮小する場合に利用する.

「遠近法」とは, 画像の歪みをとるために, 台形状に変形する機能である. 橋梁の写真撮影において, 正確に真正面から撮影することは不可能に近く, 橋梁の画像にわずかながら歪み(遠近感)ができてしまう. そこで, 歪み(遠近感)を取り除いて真正面から撮影した画像を作成するために, 「遠近法」を用いる.

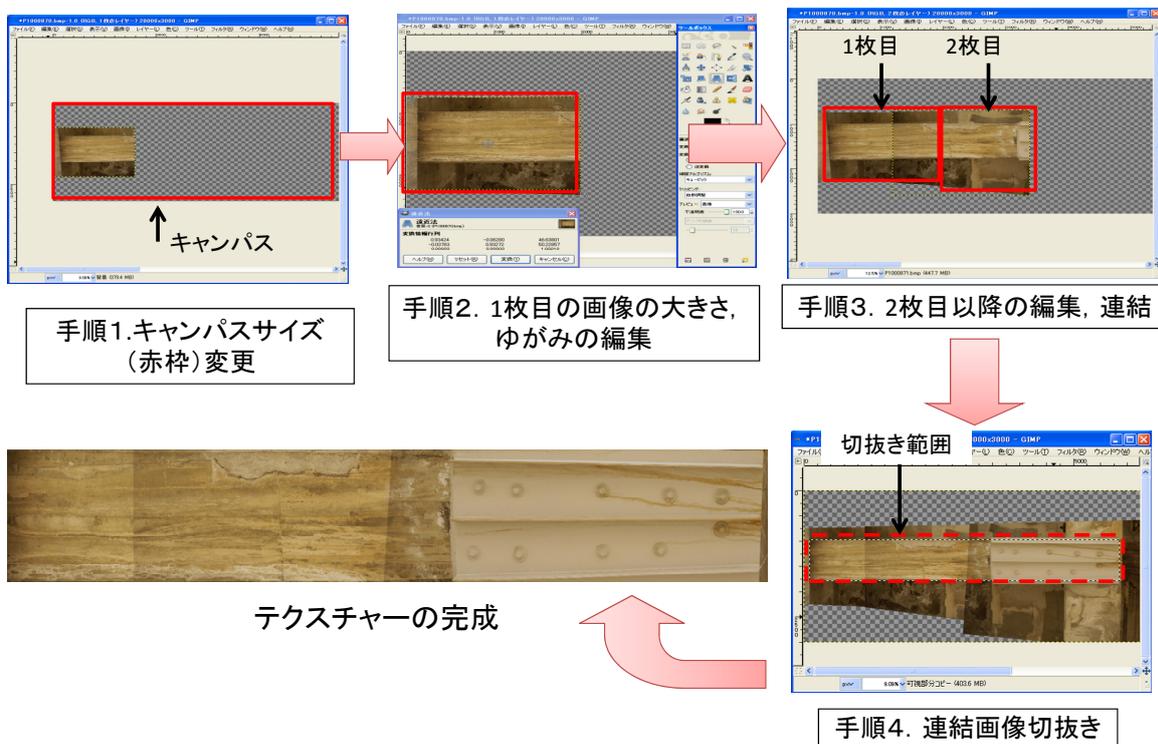


図-12 テクスチャ作成手順

### c) 手順3. 2枚目以降の編集・連結

1枚目の画像の大きさ、歪みの編集と同様の方法で形状の修正と、さらに位置合わせのための移動を行う。この場合、撮影で設定した重複領域が合致するように形状修正および位置合わせを行うことが重要である。そのため、先に作られた画像の重複領域と合致するまで、貼り付けた画像の形状修正と移動の作業を何度も繰り返す必要がある

### d) 手順4. 連結画像の切り抜き

全ての画像の編集・連結が完了すれば、次に不要な箇所の手抜きを行う。連結した画像の形状は、長方形が多いため、画像編集ソフト(Gimp)の機能である「短径選択」を用いて切り抜きを行う。

以上の手順を各部材ごとに行うことで、テクスチャが完成する。

## (2) 3DCG 原型モデルの作成及びテクスチャの貼付

画像編集 (テクスチャの作成) の手順が完了したら、VR データのひな形となる 3DCG 原型モデルを作成し、テクスチャを貼り付ける。ここでは、モデリングの作成ツールとして、ソフトウェア (Metasequoia) を用いる。

3DCG 原型モデルを作成するには、設計図から得た寸法情報をもとに、基本図形を組み上げて橋梁立体モデルを作成する。作業ウィンドウ内の座標軸はそれぞれ橋梁右岸方向を X、高さ方向を Y、奥行上流方向を Z とし、X、Y、Z の単位座標値 1 は橋梁の寸法 1cm に対応させるものとする。

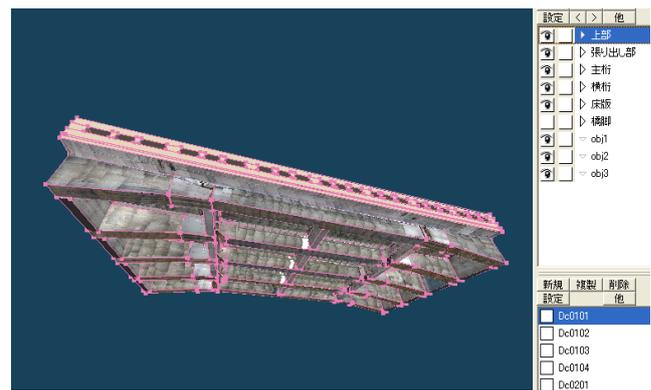


図-13 貼り付け後の原型モデル例

図-13 に示すように、橋梁の 3DCG モデルに作成したテクスチャを原型モデルに貼り付ける。貼り付けには、作成したテクスチャを材質パネルに登録し、各部材である横桁、主桁、張り出し部へと貼付ける。

以上より、3DCGモデルが完成する。

## 5. VRデータのシステム化

### (1) システム作成の考え方

本システムは、点検技術者や管理者が通常のデスクトップPCにて容易に利用できることを前提としていることから、図-14に示すようなデスクトップアプリケーションソフトとした。システムの活用の目的により、例えば、ひび割れの良否を判別するため、詳細なひび割れ (幅

0.04mm~0.2mm)を表示したい場合、要求される撮影面積(画角)が横50cm・縦40cm程度で撮影を行う必要がある。しかし、ファイルサイズが大きくなり、スムーズな表示や操作ができないため、本システムでは0.1mm~0.2mmが表示できる程度の画像を採用している。詳細なひび割れを表示するためには、拡大した際に、詳細な画像と切り替わるなどの工夫が必要と考えている。

ひび割れの確認に関しては、表現できるひび割れ幅は、モデルのテクスチャによるため、3章「VRデータ(コンテンツ)の作成」および4章「VRデータの処理手法」での検討結果をもとに、また、ひび割れ確認の目的に応じた精度で表示することを考えた。一方、劣化情報として提供する必要がある剥離に関して、本システムでは打音を埋め込むことで対応した。

(2) システムの活用効果

山口県で行われている橋梁技術者講習会<sup>13)</sup>で本システムを使用していただき、本システムにおける損傷体験の学習効果の検証を行った。

a) 橋梁点検講習会の概要

山口県では橋梁目視点検を行うにあたり、県の若手技術者に対して橋梁の概要およびその点検方法についての講習会を行っている。この橋梁点検講習会は、橋梁点検を行ったことがない若手技術者に対して鉄筋コンクリートの劣化・損傷メカニズムを理解し、橋梁点検技術のポイントを習得することを目的としている。

b) 本システムを導入した点検講習会

橋梁点検講習会において、点検実習を行う前に、点検方法の説明と点検体験として本システムを導入した。コンクリート橋の損傷について専門技術者の説明を受けた後、本システムの3DCGモデルを大型スクリーンに映し出し、画像により損傷の確認と点検方法およびポイントの説明を行った。

本システムを体験した若手技術者18名が実橋梁にて行った点検結果と事前に専門技術者が行った点検結果を、比較し点数化した。

点数化の方法は、専門技術者が作成した点検結果の損傷に番号を付け、損傷の箇所と損傷の種類および数を把握する。次に若手技術者と専門技術者の点検結果を比較し、損傷の箇所と損傷の種類が正確に点検され、記述されているか採点を行った。採点方法は、損傷の箇所と損傷の種類により点数をつけ、100点満点として採点を行った。表-3のように損傷の箇所は、損傷の箇所が「一致」であれば2点、箇所が「ずれる」であれば1点、「記載なし」であれば0点とした。同様に損傷の種類も、「一致」であれば2点、「異なる」であれば1点、「記載なし」であれば0点とした。例えば、表-3より、損傷箇所が「一致」と損傷の種類が「一致」であれば4点とな



図-14 システム画面と打音再生のモデル例

表-3 点の付方

		損傷の種類		
		一致	異なる	記述なし
損傷の箇所	一致	2点	1点	0点
	2点	4点	2点	0点
	ずれる	3点	1点	0点
	1点	0点	0点	0点
	記載なし	0点	0点	0点
	0点			

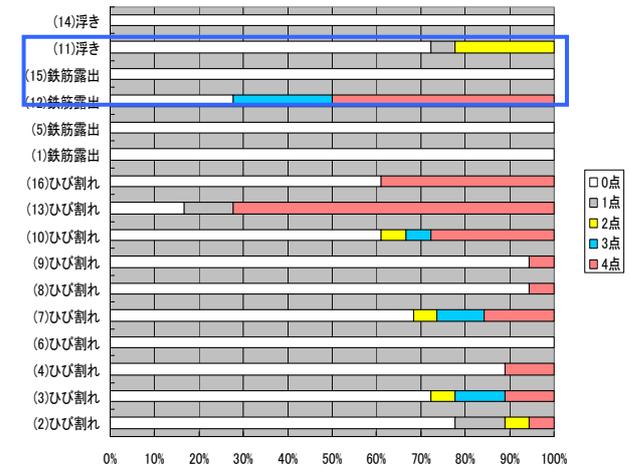


図-15 若手技術者の点検結果得点比率

る。このように若手点検技術者の点検結果の得点付けした結果を図-15に示す。

c) 考察

図-15より、浮きの損傷に対しては理解が得られなかったと考えられる。本システムの活用効果として、ひび割れや鉄筋露出には学習効果があると考えられるが、浮きの損傷については画像データのみでは、学習効果が得られにくいことがわかった。実際の橋梁点検では浮きという損傷に対しては、打音検査を行う。そのため本システムには、打音検査のように視覚情報だけでなく聴覚情

報を利用して、浮きという損傷を表示できる機能が必用である。

### (3) ひび割れ検出機能

詳細なひび割れ幅を表示するに既往の作成方法ではいくつかの問題があった。画像編集においては、撮影時に対象物からの距離や対象撮影面からの角度を一定にするような撮影を行う必要があり、これは、画像編集（連結）の際に不備（ひび割れが歪む）が生じる場合があるためである。画像編集ソフト（Gimp）を用いることで、画像を対象とする撮影面からの角度を垂直に撮影できなくても、垂直に補正できる。しかし、人手による作業のため、細かな損傷の形状・大きさが変化する可能性があるため、特に、ひび割れ幅 0.04mm～0.2mm 程度のものを表示したい場合は、写真撮影を工夫する必要がある。

次に、撮影時の明るさ（太陽光）によって連結（合成）の前後の写真の色が変化したり、波打ちの反射が写り込むため、曇り時の撮影など工夫が必要である。また、明るさの調整に関しては、撮影時に考慮することも重要であるが、ある程度の範囲であれば、撮影後の画像にて対応可能である。撮影画像の保存形式としては、JPG 形式だけでなく、RAW データ形式で保存することにより、明るさの調整範囲が大きく改善される。図-16 に示すように暗い時にフラッシュ機能を使わず RAW データ形式で保存すると、編集ツールによって画像に部材が一見写っていないように見えても、部材がはっきり見えるような明るさ調整が可能となる。しかしながら、RAW データは非圧縮形式のため JPG 方式の画像データに比べ容量が3倍程度ほど大きくなる。そのため、利用方法としては、撮影環境の明るさに問題がある場合などが考えられる。

また、3DCG モデルの容量においては、橋長 10m 主桁 2 本の小さな橋梁のでさえ撮影画像のデータ量は約 5GB ほどになる。しかし、モデルの作成ソフトとして使用しているメタセコイアはメモリの上限が 2.0GB なため、画質精度を落とさなくてはならない。そのため、IrfanView を用い画像サイズを調整する。画像サイズを調整する時は、各部材ごとにサイズ変更値を一定にする。これは、画像 1 枚ごとに変更値を変えていると図-6 のようになるためである。また、損傷が発生している箇所（主に主桁や床版）においては、画質精度を保つため、極力画質サイズを下げなくする。

VR データの 3DCG モデルは、実際の主桁や床版などを撮影しているため、実橋梁に近いものとなっているが、より臨場感を持たせるためには、高欄や舗装といった部材、さらには、周りの環境条件（空や河川など）をフレーム問題を考慮しながら採用する必要がある。

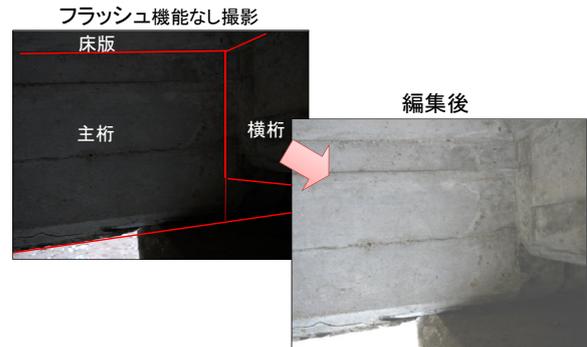


図-16 明るさ調整の例

### (4) 打音再生機能

剥離の確認機能として追加した打音の埋め込みについて述べる。本システムは橋梁の3DCGモデルを表示し、「ひび割れ」の劣化・損傷の確認をすることができる。しかし、「剥離」といった変状は、平面画像のみでは、確認することは困難である。橋梁撮影の際に斜めからの撮影を行えば、著しい損傷の場合コンクリートが浮いているかどうかを見分けることができるが、3DCGモデルに貼り付ける際に、正面から見た画像になるように加工をする必要があるため、損傷の大きさや形状が変化してしまう。また、微小な損傷では、画像データだけの説明には限度がある。そこで、実際の目視点検では、点検ハンマーなどによる打音検査を行い、音による「剥離」の確認を行っているため<sup>14)</sup>、本システムでは、3DCGモデルをシステム上の点検ハンマーによりクリックすることによって打音を再生し、コンクリート剥離検出機能を追加した。本システムのサブメニュー（図-14中の左側）の中の「チェックハンマー（打音機能）」ボタンをクリックすると打音機能がONの状態になり、ボタンの色が赤色に変化し、またマウスカーソルも打音用のカーソルに変更される。次に、モデル（図-14中の右側）から、打音を再生したい「損傷箇所（打音再生エリア）」にマウスカーソルを移動する。なお、打音再生する損傷箇所は、橋梁ごとの変状図をもとに、実際に録音した打音データを損傷の状態と適合する箇所に設定する。以上より、再生したい損傷箇所をクリックすることで、打音が再生できる。

打音データの録音方法は、打音を録音している位置および変状が確認できるように、デジタルビデオカメラによる撮影を行う。その動画データから映像と音声データと分離し、音声データのみを利用する。なお、橋梁現場での音声データの録音に際しては、環境の雑音、例えば、車の走行音、近隣の電車、話し声などの音が少ない環境で録音する。この音声データを打音検査をしているような長さに調整し、点検データあるいは現地で採取した剥

離のある位置と 3DCG モデルの座標軸との対応付けを行い実装する。さらに、打音による剥離を認識するには、その音の差異を判別するため、損傷部と健全部の最低 2 種類の打音が必須である。そのため、打音を採取する際には、損傷部およびその周囲の健全部の打音を録音し、システムには、その音をそれぞれ指定した範囲で搭載している。本システムでは、搭載している打音データは図-14 に示す赤枠の縦 50cm×横 130cm の範囲といった著しい損傷箇所である。課題としては、縦 2cm×横 20cm の範囲といった微小な損傷範囲の打音を搭載するために、体験者が音を鳴らしたくなるような工夫が必須である。

健全部と著しい損傷部の音の違いは、専門家が聴くとはっきりと判別できる。しかし、システムで健全部と損傷部の音の違いを判別するためには、音声の特徴を把握する必要がある。そのため、システムによってその差異をより判別しやすくするために、打音の波形や周波数などを表示し、定量的に音の違いを判別できる機能の検討を行った。さらに、将来的には微小な損傷部も表示することも検討している。

健全部および著しい損傷部と思われる箇所の打音を録音した音声データは、一般的なサンプリング周波数 44.1kHz、量子化ビット数 16bit で正規化を行った。ここでは、点検ハンマーで叩いた 1 回分ごとの打音データを抜き出し、それを健全部と著しい損傷部の波形とした。その結果を図-17 に示す。

次に、フーリエ解析し、打音データの定量化を行った。その結果を図-18, 19 に示す。図-18, 19 より、著しい損傷は 500~1000Hz の間に高い振幅が見られたが、健全部はその範囲において低く、2000~2500Hz の間で高い振幅であった。500~1000Hz の間の振幅の大きさを示すことにより、打音音声を定量的に判別することが可能であると考えられる。

本システムにおいて、打音再生機能を活用した際の活用効果としては、打音を再生することで、これまで把握しにくかった「剥離」の変状を検出でき(剥離検出機能)、「ひび割れ」の変状だけでなく、「剥離」も聴覚により表現することができるようになったので、点検技術者の学習支援に活用することができる(聴覚を活用した点検技術者の学習支援機能)などが挙げられる。

## 6. 目視点検支援システムの活用

### (1) 活用の考え方

本システムの活用方法としては、点検データの保

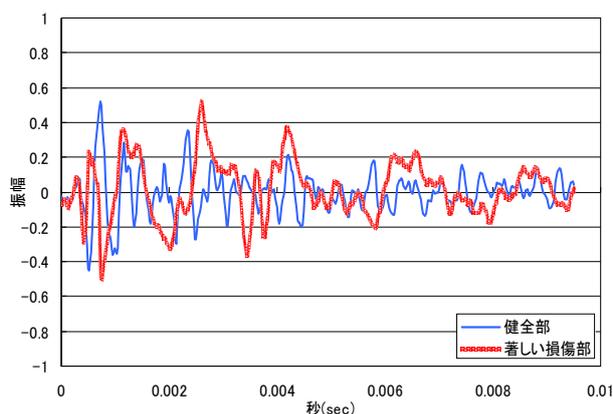


図-17 打音データの健全部と損傷部の波形

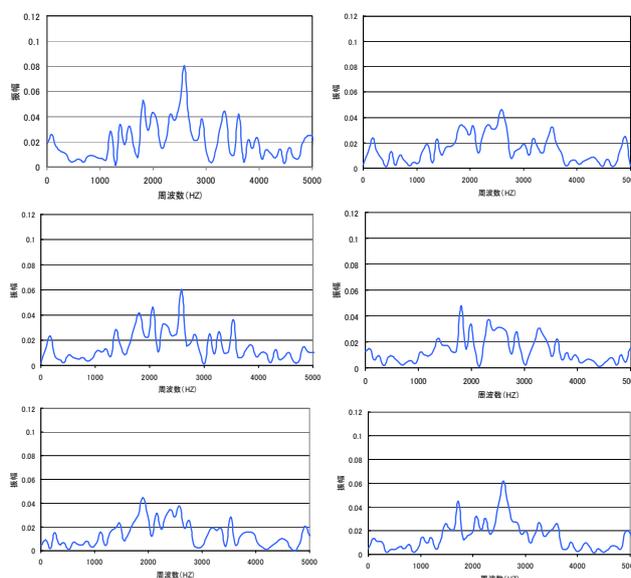


図-18 健全部の周波数別の振幅

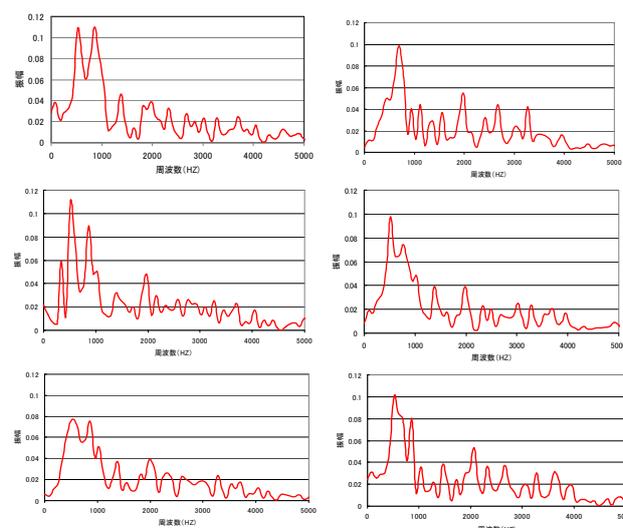


図-19 著しい損傷部の周波数別の振幅

管、点検技術の学習支援、点検結果の検討支援、劣化・損傷の経年進行の評価があるが、それぞれの特徴を整理すると、表-4 のようになる。ここでは、活用事例の特徴を詳細に説明する。

#### a) 点検技術の学習支援

目的としては、若手点検技術者の教育、熟練技術者間の差異の軽減であり、その活用方法としては講習会等での一斉学習や個別学習が挙げられる。その期待される成果としては、点検・診断技術の学習となる。そのため、システムにおける課題としては、操作がしやすいユーザーインターフェースが重要となる。さらに、運用面では、講習会などの企画などが重要となる。

#### b) 点検結果の検討支援

目的としては、点検者が点検結果について、変状の指摘箇所といった見落としや間違っただ指摘の相違を確認し、精度の高い変状図の作成および点検結果の評価・診断が挙げられる。その活用方法としては、複数の点検者が同じ部屋に集まり、比較的大きなスクリーンに VR を表示することで、議論を行う。本研究では、集団で議論することから、集団学習の意味合いも含み、ヒアリング会と定義している。その期待される成果としては、点検データの精度の改善である。そのため、システムにおける課題としては、操作性の問題もあるが、変状データの実装が重要となる。運用面では、ヒアリング会の運営が挙げられる。

#### c) 劣化・損傷の経年進行の評価

目的としては、変状の経年進行の確認、調査・研究への活用である。その方法としては、時系列で VR データを表示することである。この期待される成果としては、変状の経年進行課程の解明が挙げられる。そのため、システムにおける課題としては、大容量の VR データを時系列で保管、表示できるシステム作成である。

#### d) 点検データの保管

目的としては、リアルな VR データおよび変状図の保管や一般住民への現状の説明資料としての活用である。その方法としては、作成した電子データをデータベース化し、保管する。期待される成果としては、経年進行の確認や過去のデータの調査、さらには、住民への説明資料の補助が挙げられる。そのため、システムでの課題としては、大容量データの保管、運用面では、データの欠落やサーバの維持などがある。

次にこれらの活用例のうち、点検結果の検討支援<sup>3)</sup>と点検データの保管(説明資料の補助)の例について述べる。

### (2) 活用検討の一例

点検結果の検討支援の目的としては、点検者間での点検結果の“ばらつき”，つまり、指摘箇所の相違を議論し、精度の高い変状図や変状の評価・診断につなげることである。そのため、目視点検を複数人の専門家が実施し、次の目視調査までの間に、一堂に会し、VR を活用

表-4 VR活用方法の特徴の一覧

活用方法	目的	方法	期待される効果	考えられる課題	
				システム	運用面
点検技術の学習支援	若手点検技術者の教育、熟練技術者間の差異の軽減	講習会等でVRを使い、変状の確認をする。(一斉学習、個別学習)	点検・診断技術の学習	容易なUI (User Interface)の作成	講習会などの企画・運営
点検結果の検討支援	点検者が点検結果について、変状の指摘箇所(見落としや間違っただ指摘)の相違を確認し、精度の高い変状図の作成および点検結果の評価・診断。	複数の点検者が一カ所に集まり、議論を行う。(集団学習:ヒアリング会)	精度の高い変状図の作成および点検結果の評価・診断	容易なUI (User Interface)の作成、変状データの実装	ヒアリング会の企画・運営
劣化・損傷の経年進行の評価	変状の経年進行の確認、調査・研究。	VRデータを時系列で表示。	変状の経年進行の解明。	大容量データを時系列で表示するシステム作成。	— (研究用途で活用)
点検データの保管	リアルなVRデータおよび変状図の保管。説明資料。	作成した電子データをデータベースを構築し保管する。	経年進行の確認、過去のデータの調査、説明資料の補助。	大容量データの保管。	データの欠落やサーバの維持

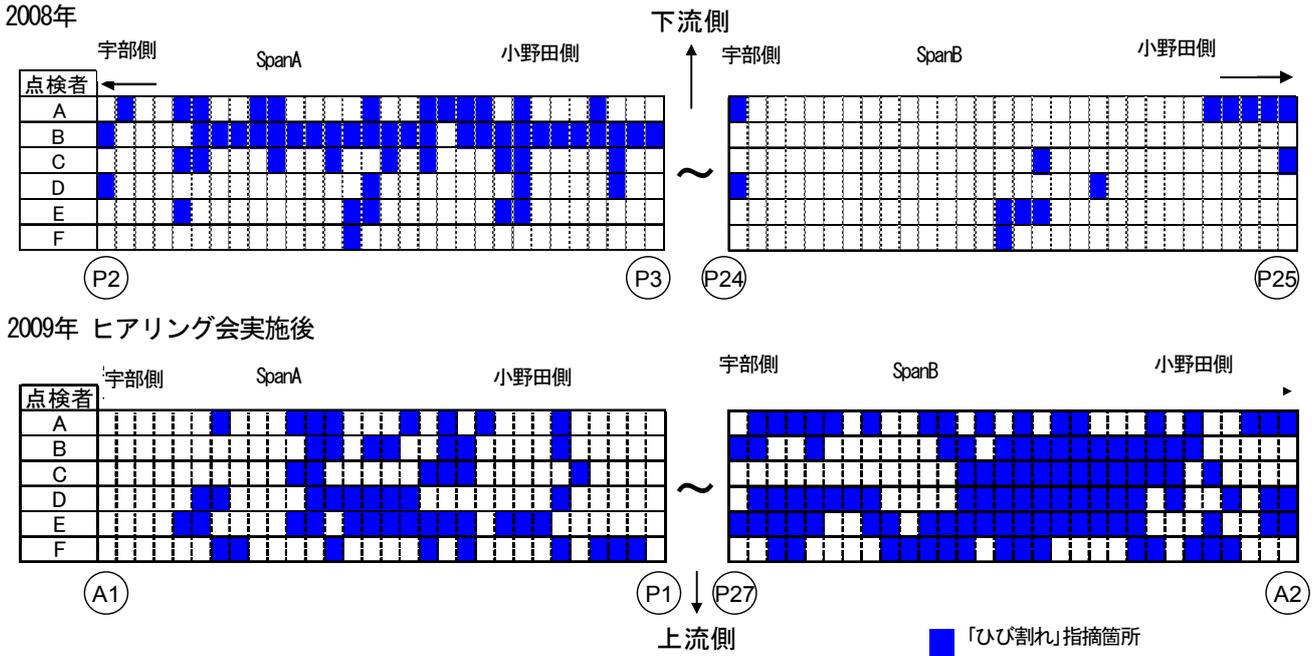


図-20 「ひび割れ」指摘箇所のヒアリング会前後での比較

して点検者同士で議論し、点検者の意見の抽出、共有を行った(ヒアリング会)。その結果、ヒアリング会前後での「ひび割れ」の指摘箇所を図-20に示す。

この結果から定量的な低減効果を得るために、式(1)の評価式により2008年度と2009年度の点検結果のばらつきを算出した。

$$Q = (\sum (P \times N) / \sum N) / P_0 \quad (1)$$

ここで、P: 同じところを指摘した人数、N: 指摘した人数が同じ場合の回数、P<sub>0</sub>: 点検者の総数である。

式(1)で得られる評価値が大きいほど、点検結果のばらつきが小さいことを示す。その結果、ヒアリング会実施前(2008年)の「ひび割れ」の評価値は、Q = 28 %、実施後(2009年)の評価値Q = 59 %となった。これより、ヒアリング会を実施した後の評価値が向上していることがわかり、ヒアリング会および「VR を活用した橋梁目視点検支援システム」の活用効果が確認された。

点検データの保管(説明資料の補助)の例としては、本システムを活用して、目視点検の橋梁調査説明会を実施した。この説明会では、専門家の方だけでなく、一般住民への説明を行った。この際に、打音機能を追加したシステムを実際に使用し、機能追加の効果などについて意見を聞くなどの検討も行った。その結果、専門家でない人(住民)からも、音の違いで聞こえるのでわかりやすいとの評価を得られた。今後、このような住民説明の場や、専門家の劣化判定の議論の場でシステムの活用を進めて

いき、打音機能の効果を含めたシステムの評価を進めることが必要と考える。

### 7. 結言

本研究では、橋梁目視点検を支援するために本システムの構成と VR データの作成方法及び処理手法について述べるとともに、ひび割れ幅の精度の検証を行った。また、本システムに、剥離を表現するために打音再生機能を実装し、コンクリート剥離検出を行った。最後に、活用方法の特徴を整理し、その一例を示した。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

- 1) 本システムの活用目的に応じたシステム構成とすることで、活用目的に対応することが可能となった。
- 2) VR データの作成および処理手法について、VR データに適した撮影方法および処理手法が明確となった。
- 3) 本システムの VR データの元となる画像としては、確認したいひび割れ幅のサイズにより切り替えを行うなどして、適切に選択する必要がある。その際の撮影において、ひび割れ幅 0.04mm が確認したい場合は、撮影範囲は縦 50cm 横 40cm 程度となる。また 0.1mm~0.2mm が確認したい場合は、撮影範囲は縦 80cm 横 60cm 程度となる。

- 4) 画像だけでは難しかったコンクリートの剥離の判別について、システムに打音再生機能を実装し判別の補助機能とした。
- 5) 剥離判別のために打音再生機能を付加したことで、VR データとして「ひび割れ」だけでなく「剥離」も変状データとして保存することができるようになった。
- 6) 打音再生機能は剥離箇所をクリックすることで打音が再生されるという点検初心者にも理解しやすい手法なので、点検学習などでの有効性が期待できる。また、音として表現するわかりやすさから、専門家でない人(住民)に対する説明の際にも活用効果が期待できると考えられる。
- 6) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順: 近接目視点検による撤去橋梁の健康診断と余寿命推定, 第 11 回 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.431-438, 2011
- 7) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂: 目視点検結果を利用した J-BMS によるコンクリート橋の健康診断および余寿命推定における学習効果, コンクリート工学年次論文集, 2012.7
- 8) 内村俊二, 高橋順, 江本久雄, 宮本文穂: 橋梁目視点検支援システムにおけるひび割れ幅認識の検討, 日本実験力学会講演論文集, pp.264-269, 2010
- 9) 小倉久和, 小高知宏: 人工知能システムの構成-基礎からエージェントまで-, 近代科学社, pp.197, 2001.4.
- 10) 横枕雄一郎, 伊藤真健, むつきはつか: Metasequoia-3DCG メタセコイア入門, オーム社, 2004.7.
- 11) 西村正三, 出水亨, 松田浩: 軍艦島の調査・検証からみた今後のインフラ構造物調査への提案-3D レーザ・写真解析・UAV・AR-, 実験力学論文集, Vol.12, No.3, pp.147-158, 2012.9.
- 12) 山口県土木建築部道路整備課: 山口県橋梁点検要領(案), 2008.8.
- 13) 内村俊二・澤村修司・宮本文穂: バーチャルリアリティを活用した橋梁目視点検支援システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1399-1404, 2010.7.
- 14) 国土交通省 中国地方整備局 道路部 道路保全企画グループ 中国技術事務所: 橋梁点検の着眼点と留意事項(案), 2011.11.

### 参考文献

- 1) 「道路橋の予防保全に向けた提言」について一国土交通省, <<http://www.mlit.go.jp/common/000015315.pdf>>Accessed2009.
- 2) 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通考: バーチャルリアリティ学, (株) コロナ社, 2011.1.11
- 3) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順, 平西邦裕: 現地調査に基づく撤去橋梁の健康診断と余寿命推定およびその検証法, コンクリート工学論文集, pp.119-132, 2012
- 4) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂: 老朽化橋梁の目視点検と診断結果の信頼性, 第 54 回日本学術会議材料工学連合, pp.175-176, 2010
- 5) 内村俊二, 高橋順, 江本久雄, 宮本文穂: 橋梁目視点検支援システムの開発と活用効果, 第 54 回日本学術会議材料工学連合, pp.177-178, 2010

(平成27年8月10日受理)