

論文 橋梁目視点検支援システムにおけるひび割れ画像解像度の検討

宮本 文穂^{*1}・江本 久雄^{*2}・高橋 順^{*3}・内村 俊二^{*4}

要旨: 既存 RC 橋梁に発生する様々な損傷の点検を擬似的に体験でき、維持管理の専門家が行う点検から診断までの思考過程が臨場感を持って仮想的に体験できる、バーチャルリアリティ(VR)技術を利用した橋梁目視点検技術教育の支援システムを開発した。このシステムで重要となるのが、既存橋梁の耐久性性能などを判定するための指標の一つである「ひび割れ幅」を3次元画像からどの程度記録・識別できるかである。本論文では、VR 画像上で視認できるひび割れ幅と画像解像度との関係についての検討を行うとともに、実橋梁の画像と目視点検結果に基づいて重要なひび割れ幅を記録・識別するために必要な画像解像度を検討した。

キーワード: 橋梁目視点検, バーチャルリアリティ, 点検支援システム, ひび割れ幅, 画像処理

1. はじめに

我が国の既存橋梁の多くは、建設後かなりの年数が経過しているため老朽化しているものが少なくない。そのため、維持管理しなければならない橋梁の数は年を重ねるごとに多くなり、近い将来には、これらの橋梁の維持管理業務が重大な社会問題になることが予想される。既存橋梁はその規模が比較的大きく、すでに長年にわたって供用されてきているため、社会的・経済的影響を考えると老朽化が進んでいても新たに架け替えることが容易にはできない。国や地方自治体の財政が逼迫していることを考慮すると、限られた予算の中で適切な維持管理を行い、橋梁の余寿命をできるだけ延ばす対策（長寿命化）が必要である。

一般的な橋梁の維持管理業務では、定期的に現地に向いて主に目視点検によって劣化・損傷の有無を把握し、維持管理マニュアルなどに基づいて必要な性能の現状を診断する。したがって、橋梁点検に携わる技術者への教育は、橋梁構造の基礎知識を学び、次に橋梁現地に向いて熟練技術者の指示のもとで点検・診断手法などを伝授され、逐次経験を積み重ねてきた。しかしながら、点検・診断技術者の技術能力に技術資格のような一定の基準がないこと、また、一定の基準となるような点検者教育システムがないことが課題であり、技術基準・資格制度・人材育成の充実が必要であることが指摘されている¹⁾。これらの課題のうち、技術基準・人材育成に対しては点検技術者教育の確立が重要と考える。

上記の課題を解決する方法の一つとして、橋梁現地に近い「空間」を創造し、橋梁構造物の長いライフサイクルを短い「時間」で表現する環境を提供することが可能

な、バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) 技術を利用した橋梁目視点検技術教育の支援システムの開発が考えられる²⁾。著者らは RC 橋梁の3次元 CG モデルを用い、その表面に既存橋梁の外観写真の画像を貼り付けることによりリアリティのある映像化を実現し、橋梁目視点検支援システムを開発している^{2),4)}。本システムにより、既存橋梁に発生する様々な損傷の点検を擬似的に体験でき、維持管理の専門家が行う点検から診断までの思考過程が臨場感を持って仮想的に体験できる。

さらに、数年にわたって撮影した実橋梁の外観写真を本システムに用いれば、撮影時期の異なる写真の差分をとることで、ひび割れ等の損傷の進行を画像内で評価することが可能になると考えられる。その際に重要となるのが、重要な損傷の画像記録において、コンクリートの耐久性性能を判定するための重要な指標である「ひび割れ幅」をどの程度記録・識別できるかである。そこで本研究では、VR 画像上で視認できるひび割れ幅と画像解像度との関係について検討を行う。まず、橋梁目視点検支援システムの概要について述べ、さらに、橋梁の耐久性性能とひび割れ幅の関係について述べる。そして、実橋梁の画像と目視点検結果に基づいて、重要なひび割れ幅を記録・識別するための画像解像度を検討する。

2. VR 画像による目視点検支援の考え方

2.1 VR 目視点検支援システムの概要

(1) システムの目的, 機能

橋梁点検技術者のための VR 目視点検支援システム (以下、本システム) は、①3次元画像 (3D-CG) による劣化・損傷の確認、②VR を利用して点検箇所のウォ

*1 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻 教授 工博 (正会員)

*2 (有) ミツワ電器 情報システム開発室 室長 博士(工学) ((正会員)

*3 電気化学工業 (株) 中央研究所 主幹研究員 博士(工学) (正会員)

*4 第一工業大学 情報電子システム工学科 准教授 (正会員)

ークスルーによる仮想（疑似）体験，③劣化・損傷の確認と評価レベルの確認，④点検技術者の意見のフィードバック，⑤現地に何回も足を運ばなくても 3D-CG による仮想体験によって何時でも確認ができる，⑥過去に実施した点検結果の再現が可能のため両者の比較によって劣化・損傷の進行を具体的に把握し易い，などを目的として開発する。本システムの目的および機能の概念図を図-1 に示す。以下にそれぞれの機能を述べる。

- (a) **点検結果の保管**：データベース(DB)を利用し，写真データから作成した 3次元モデルデータおよび外観の画像と点検結果を保管する。これが本システムにおける教材となる。
- (b) **点検の疑似体験**：例えば，既存鉄筋コンクリート(RC)橋の外観の画像を用いて 3次元 CG による VR システムを構築する。これにより，VR 環境下で点検の仮想（疑似）体験を行うことができる。
- (c) **点検結果をもとにした学習**：VR 環境下での疑似目視点検の結果と専門家の点検結果とを比較することで，損傷の有無の確認と評価レベルの確認ができる。このシステムを用いて，点検技術者個々に学習を行うことができ，さらに，専門家を講師とする集合教育も行うことができるため，効果的な技術者教育が期待できる。
- (d) **点検結果のばらつき改善への活用**：橋梁の画像と点検結果を示しながら，点検した専門家へのヒアリングを行い，損傷と評価レベルの検討を行うことができる。これにより，点検技術者間の結果のばらつきを改善することが期待できる。

上述のいずれの機能も VR 環境下で実現することの最大の利点は，現場での点検の練習を必要最小限に留めることができ，また，時間および場所の制約を受けずに点検の体験（練習）が繰り返しできることである。

(2) 橋梁 3次元モデルの作成方法の概要²⁾

本システムにおける橋梁 3次元モデルの構築手順は，①RC 橋梁の写真撮影，②橋梁の画像の作成，③橋梁 3D-CG モデルの作成と画像の貼付けである。これら手順の概要を図-2 に示す。各手順について，以下に述べる。

①RC 橋梁の写真撮影

デジタルカメラを用いて，橋梁の各部材に対して近接撮影を行う。近接撮影ができない場合は，望遠レンズを用いて，各部材の外観の詳細をできるかぎり撮影する。その際，次に述べる画像作成のために，写真に前後の写真との重複する領域を持つように撮影する。

②部材外観の画像の作成

まず，デジタルカメラで撮影された各写真に対して，画像編集ソフトを用いて，レンズ補正，部材画像の切り抜き，整形などの画像処理を施し，部材外観の部分画像

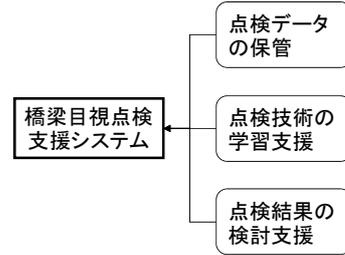


図-1 橋梁目視点検支援システムの目的と機能

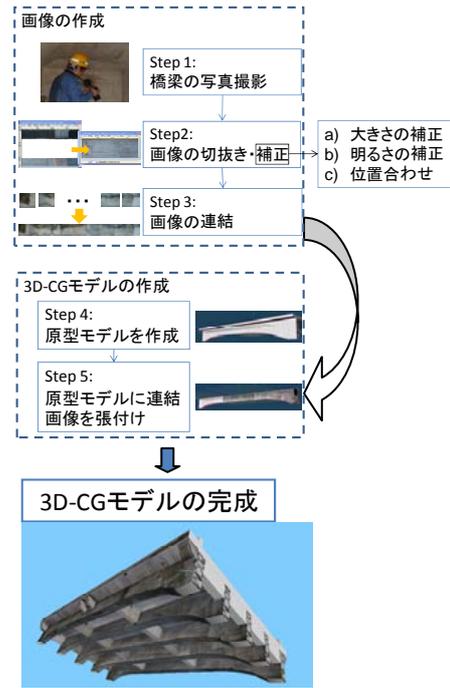


図-2 橋梁 3D-CG モデルの作成手順

を作成する。次に，部分画像の連結を行い，部材外観の画像を作成する。

③橋梁 3次元モデルの作成と画像の貼付け

様々な形状の橋梁に対応するため，汎用の 3D-CG モデル作成ソフトを用いて，対象橋梁の 3D-CG モデルを作成する。対象橋梁の寸法図をもとに橋梁のモデルを作成した後に，②で作成した各部材の外観画像を貼り付ける。作成した橋梁の 3D-CG モデルの例を図-3 に示す。

2.2 目視点検で対象とする劣化・損傷

コンクリート橋 (RC および PC 橋) の耐荷性能、耐久性能などを評価する際に，目視点検で指摘の対象となる劣化・損傷の種類は，ひび割れ，剥離，遊離石灰，豆板・空洞，鉄筋腐食劣化などである³⁾。ここで，ひび割れ，剥離，鉄筋腐食劣化の画像例をそれぞれ図-4，5 および 6 に示す。これらの劣化・損傷のうち，視覚的に画像上で認識できる主要な劣化・損傷は，ひび割れ，剥離および鉄筋腐食劣化であると考えられる。

一方，複数の目視点検専門家が既存橋梁に対して同一



図-3 橋梁 3D-CG モデルの例

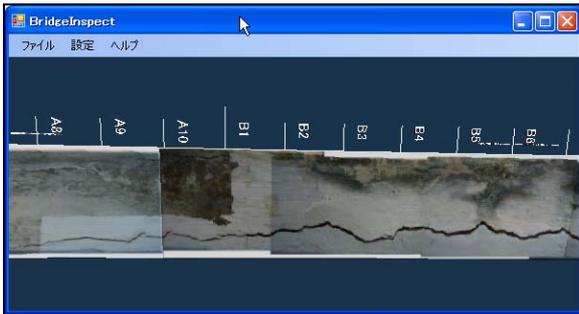


図-4 ひび割れの画像例



図-5 剥離の画像例



図-6 鉄筋腐食劣化の画像例

表-1 ヒアリング会前後における目視点検結果の
一致度比較

	ひび割れ	剥離	鉄筋腐食劣化
ヒアリング前の目視点検結果一致度	28%	47%	18%
ヒアリング後の目視点検結果一致度	59%	56%	39%

の劣化・損傷箇所を目視点検しても、点検および診断結果にかなりの“ばらつき”があることが指摘されている⁴⁾。そこで、点検結果のばらつきを低減する目的で、複数年にわたって実施した実橋（KT橋（旧橋））の近接目視点検に参加した点検者に対して、最終年の近接目視点検の実施前に、本システムを用いて過去の点検結果を表

示し、過去の目視点検結果について議論を行う「ヒアリング会」を実施した。本システムを導入したヒアリング会の前後における損傷毎の点検結果の一致度を比較したものを表-1に示す。表-1より、本システム導入によるヒアリング会後の点検結果の一致度が比較的高く、ばらつきが少ないことがわかる。特に、ひび割れに関する一致度が大きく改善されている。このことから、本システム導入によりひび割れの点検結果のばらつきが改善され、本システムにおけるひび割れ表示が効果的であったと言える。したがって、本システムにおけるひび割れ表示は、仮想的な目視点検を提供するにあたって重要な要素であると言える。

2.3 ひび割れの耐久性に及ぼす影響

コンクリート構造物の劣化進行過程は、潜伏期→進展期→加速期と推移し、それに伴いコンクリート表面に現れるひび割れの方向や幅も進展することが知られている⁵⁾。また、ひび割れの原因として、塩害や中性化、アルカリ骨材反応等が指摘されている³⁾。ここでは塩害の場合を例に取り上げ、コンクリート劣化とひび割れ幅との関係について述べる。

[塩分浸透の拡散係数とひび割れとの関係]

補修対象に至らない程度のひび割れを対象に、ひび割れが塩分浸透の拡散係数に及ぼす影響を考える。算定式は、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾にある、ひび割れと見かけの拡散係数の関係を示す次式を用いる。

$$D_c = D + (w/L)(w/w_a)^2 D_0 \quad (1)$$

ここで、 D_c はひび割れを考慮した拡散係数(mm²/s)、 D はコンクリートの塩化物イオン拡散係数(mm²/s)、 w はひび割れ幅(mm)、 L はひび割れ間隔(mm)、 w_a は鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値(mm)である。 D_0 はコンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を示す定数で一般に 200(cm²/年)が用いられる。式(1)において右辺第2項がひび割れの影響を示しているため、ひび割れによる拡散係数の変動を D_d とすると、 D_d は次式で表される。

$$D_d = (w/L)(w/w_a)^2 D_0 \quad (2)$$

式(2)に、2.2で述べたKT橋（旧橋）の近接目視点検結果を当てはめ、ひび割れによる塩化物拡散係数の増加を計算した結果を図-7に示す。ここで、ひび割れによる塩化物イオン拡散係数の変動について考える。上述式(1)におけるコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、図-3に示した点検対象とした橋梁の主桁から採取したコンクリートコアの分析結果から算出した。調査コアは、

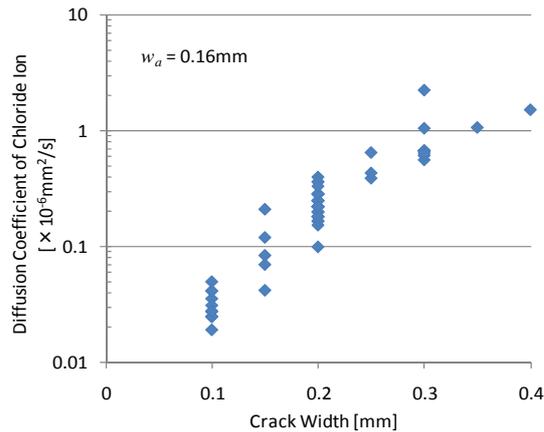


図-7 ひび割れ幅と塩化物拡散係数の関係

図-3 の主桁で橋軸直角方向の両端と中央から橋軸方向で場所を変えた8カ所から採取した。その結果、塩化物イオンの見かけの拡散係数は採取コア8点の平均値で $1.04 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ であった。また、図-7 に示すひび割れ幅に依存した拡散係数をみると、ひび割れ幅が 0.3mm 程度のところで $1.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ に至ることがわかる。本検討ではコアの採取はひび割れができるだけ確認できない部分で行った。従って上述式(1)からひび割れ幅による変動値を見込むと、ひび割れが 0.3mm 程度ある所では拡散係数は採取コアによる平均値 $1.04 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ の2倍程度に大きくなっていることが考えられる。これより、橋梁の耐久性に影響する塩化物イオンの拡散にある程度以上の大きさのひび割れが影響することがわかった。

2.4 VR像に要求されるひび割れ表示

上述 2.3 の議論から、ひび割れの幅については 0.2~0.5mm を画像上で認識できることが必要となると考える。そのためVR画像については、これらのひび割れ幅を記録・表示するために十分な画像解像度が必要となる。

3. VR 画像における劣化・損傷の認識

3.1 実験目的・方法

損傷画像において視覚的に認識できるひび割れ幅と画質(画像解像度)との関係を調べる目的で、損傷画像を用いた目視点検実験を行った。実験対象は、前述 KT 橋(旧橋)において目視点検を行った際に指摘されたひび割れ 28 箇所である。対象となるひび割れについて、専門家が計測した幅と本数の内訳を表-2 に示す。

損傷画像は、目視点検時に近接撮影された画像を用いた。撮影に用いたカメラは、SONY α -300 である。晴天時に撮影を行い、ホワイトバランスの設定及び感度設定が極力一定になるように撮影を行った。原画像のサイズは横 3,872 ピクセル、縦 2,592 ピクセルである。これらの原画像の分解能(1ピクセル当たりの実寸)は 0.05~

表-2 実験対象のひび割れの幅と本数

幅 [mm]	本数
0.1	10
0.2	5
0.5	3
0.7	2
1.0	4
1.5	2
2.0	2

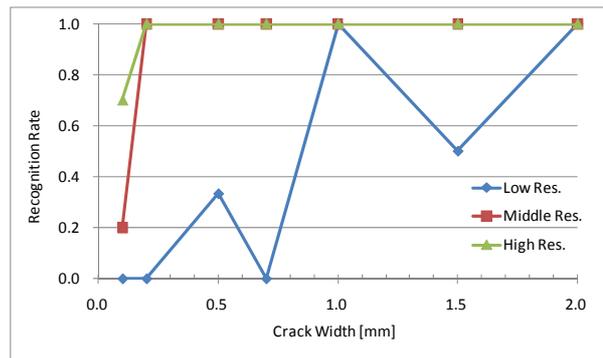


図-8 目視点検経験者のひび割れ認識率比較

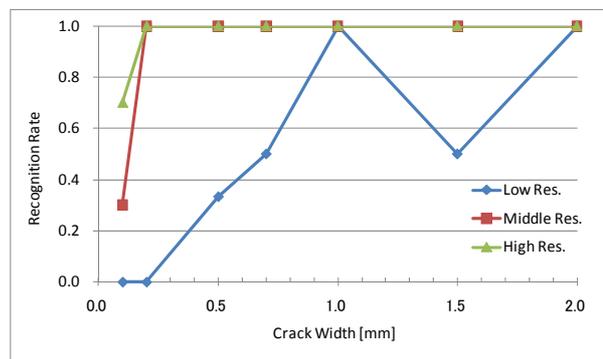


図-9 目視点検未経験者のひび割れ認識率比較

0.3mm/ピクセルであった。さらに橋梁目視点検支援システムでは、Lanczos フィルタ⁶⁾を用いて原画像から 3D-CG モデルのための貼付け画像(以下、VR 画像)を作成した。本システムでの高速表示や負荷の軽減を考慮して、VR 画像の分解能をそれぞれ、全体表示用画像は 4mm/ピクセル、部材表示用画像は 1mm/ピクセルとした。

上記の画像について、全体画像用および部材表示用画像、原画像をそれぞれ低解像度、中解像度、高解像度の画像と位置づけた。それぞれの画像上で、目視点検の経験がある画像処理担当者(学生)と目視点検の未経験者(学生)がひび割れの有無を目視で識別した。

3.2 実験結果

低、中、高解像度画像それぞれにおけるひび割れの識別率について、画像処理担当者の結果を図-8 に、点検未経験者の結果を図-9 にそれぞれ示す。これより、過去の

目視点検の経験の有無によるひび割れ認識率の傾向には著しい差異は認められない結果となった。これは、ひび割れ幅の特定は問わず、とにかくひび割れとして認識できたかどうかをひび割れ幅ごとの画像を示すことによって問うたことによるものと考えられる。

4. 考察

4.1 画像の解像度と作成について

(1) 画像解像度について

図-8, 9 より、目視点検の経験の有無にかかわらず、中解像度と高解像度の画像上で 0.2mm のひび割れ幅が認識可能であることがわかる。このことは、点検技術の学習者でも目視点検の専門家でも、0.2mm 幅以上のひび割れを本システム上で指摘することが可能であることを示している。部材表示のための VR 画像について、分解能の理論値は 1mm/ピクセルであるにもかかわらず 0.2mm 幅のひび割れが認識されている理由として、VR 画像にひび割れのエッジが記録されたためと考えられる。原画像から VR 画像への縮小に用いた Lanczos フィルタは、画像中のエッジを強調する特性をもっている。さらに拡大・縮小時には、周囲の画素の画素値も参照して画素値の再計算を行っている。したがって、ひび割れ幅が大きいほど画素値の再計算時に参照される画素が多くなり、その結果ひび割れのエッジが強調された VR 画像が作成されたと考えられる。

(2) 画像の撮影・作成方法について⁷⁾

上記 4.1(1)の議論より、補修対象となる細かいひび割れなどの損傷を画像に記録するためには、原画像が高解像度であることが必要であると言える。実橋梁のひび割れを記録するための、画質の高い画像を得る要因を図-10 に示す。図-10 において、詳細な損傷を記録するために画像解像度を上げると、橋梁全体をカバーする画像枚数が増加し、そのために多くの撮影時間が必要となる。さらに、本システムでの記憶容量や表示時の負荷に影響を与える。一方撮影環境・条件は、撮影作業量とともに、図-2 に示したモデル用画像の作成における画像処理の作業量にも大きく関わる。例えば、撮影場所が狭く、カメラの角度を部材に対して正面位置に設定できないとき、撮影後の画像処理において形状補正や大きさ補正の工程が必要となる。これより、画像の撮影および作成における課題として、以下のものが挙げられる：

- ① 本システムに最適な画像の解像度、および
- ② 作業負担の低減 (a) 撮影時, (b) 撮影後の画像処理)。

上記課題①の本システムにおける画像解像度については、前述 4.1 の議論から、橋梁全体表示および部材表示には 1mm/ピクセル程度の中解像度の画像を提示し、さらに局所的な表示を行う場合には 0.1mm/ピクセル程

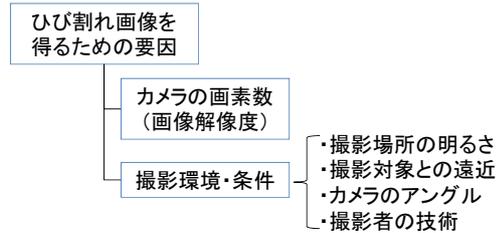


図-10 高精度ひび割れ画像を得るための要因



(a) HDビデオカメラ (b) デジタルカメラ
図-11 HDビデオ画像とデジタルカメラ画像の画質の比較例

度の高解像度の画像を提示することが考えられる。

一方、上記課題②の作業負担の低減については、a)撮影時の作業と b)撮影後の画像処理作業の両方の負担低減を検討する必要がある。両方の負担軽減を図る方法の一つとしてビデオカメラによる撮影が考えられる。ビデオカメラを用いると連続して撮影を行えるため、デジタルカメラに比べて短時間で撮影を行うことができる。また、ビデオ画像のフレーム画像を用いれば、フレーム間における画像の位置や大きさ、明るさの差異が比較的少なく、図-2 に示した画像処理工程のうち、大きさと明るさの補正の工程を省略することができ、位置合わせも比較的簡単に行うことができると考えられる。しかしながら、民生用のビデオカメラにおける最大画素数はハイビジョン (HD) 用である横 1920 ピクセル×縦 1080 ピクセルであり、デジタルカメラの画素数に比べると少ない。画素数による画質の違いについて、HD ビデオカメラによる画像とデジタルカメラによる画像の比較例を図-11 に示す。図-11 から、デジタルカメラの画像ではコンクリート表面の詳細な状態が記録されているのに比べ、ビデオカメラでの画像では詳細な状態が記録されていないことがわかる。

以上の議論から現状では、損傷の詳細な記録という点でビデオカメラは適しておらず、デジタルカメラを用いるほうが良いといえる。しかしながら、デジタルカメラの利用には前述した作業負担の低減が課題としてあるため、今後、撮影方法や事後の画像処理手法の検討が必要である。

4.2 VR画像の活用について⁷⁾

本システムの VR 画像は橋梁全体の座標位置で位置合

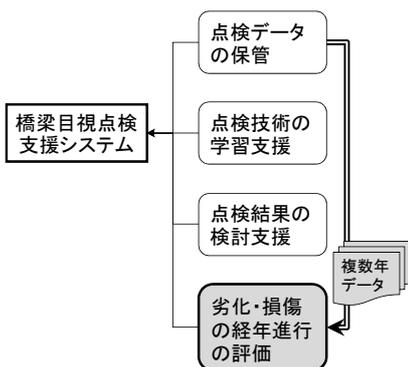


図-12 複数年にわたる画像データを用いた劣化・損傷の経年進行評価機能

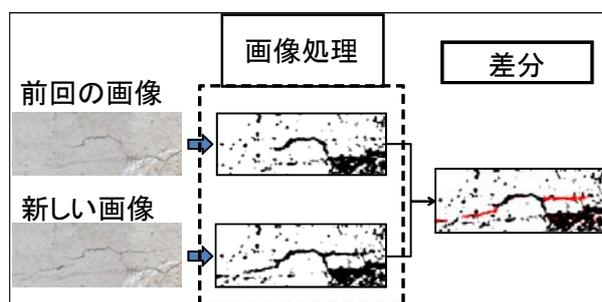


図-13 劣化・損傷の経年進行の抽出方法

わせがなされている。位置合わせがなされている VR 画像と前回の点検時の VR 画像とを比較することで、橋梁の劣化損傷の判定に関係するひび割れの進展を VR 画像から見出すことが可能であると考えられる。この手法により、ひび割れ損傷の進展を容易に知ることができるので、複数年にわたる VR 画像は点検結果の保存資料としても効果があると考えられる。さらに、この損傷進行を評価する機能を本システムに付加することで、本システムが経年での維持管理用データとしても用いられることも考えられる。図-12 に、損傷進行を評価する機能について、本システムにおける位置付けと既機能との関連を示す。画像処理によるひび割れ損傷進行の評価について手法の概要を図-13 に示す。VR 画像における座標位置の誤差補正手法やひび割れ部の抽出・先鋭化手法等を適用した VR 画像間の差を得ることで、経年による損傷の進行を見出すことが可能であると考えられる。これも今後検討すべき課題の一つである。

5. まとめ

本研究は、橋梁目視点検支援システムが表示する VR 画像上で視認できるひび割れ幅と画像解像度との関係について検討を行った。まず、橋梁目視点検支援システムの概要について述べ、さらに、橋梁の耐久性能とひび割れ幅の関係について述べた。そして、実橋梁の画像と目視点検結果に基づいて、重要なひび割れ幅を記録する

ための画像解像度について検討した。その結果、以下の結論が得られる：

- (1) 今回開発したバーチャルリアリティ(VR)技術を利用した橋梁目視点検支援システムでは、ひび割れ損傷画像からひび割れ幅を目視で認識する場合の画像の解像度と撮影作業、CG 作成作業などのバランスが重要となることが明らかとなった。
- (2) 高解像度画像(約0.1mm/ピクセル)において0.2mm以上のひび割れ幅を記録、識別できることを明らかとした。
- (3) 今回の VR 用画像(1mm/ピクセル)では、0.5mm以上のひび割れ幅を記録、識別できることが分かった。
- (4) VR 画像の撮影、作成時における解像度が及ぼす影響と課題を検討した。
- (5) 本研究で構築した VR 目視点検支援システムを用いると、複数年の点検結果を保存し、それらを相互比較することによって、損傷・劣化部の経年進行を評価する機能を付与可能となることを提案した。

今後の課題として、画像による経年劣化の進化を評価する機能の検討と、撮影時および画像作成時の作業負担を軽減する方法の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/4pdf/teigen.pdf>, (2008.8.25 入手)。
- 2) 澤村修司, 溝部和広, 内村俊二, 宮本文穂：橋梁点検者のためのバーチャルリアリティ損傷体験システムの開発, 土木学会土木情報利用技術論文集, Vol.19, pp.227-238, 2010。
- 3) (社)日本コンクリート工学協会編：コンクリート診断技術'11 [基礎編], 2011.1。
- 4) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂, 今井宏：専門家による既存 RC 橋の目視点検結果と評価のばらつき, 土木学会第 64 回年講演概要集, VI, 372, 2009。
- 5) (社)土木学会編：2007 年制定・コンクリート標準示方書 [設計編および維持管理編], 土木学会コンクリート委員会, 2007.12。
- 6) C.E. Duchon: Lanczos Filtering in One and Two Dimensions, J. of Applied Meteorology, Vol.18, No.8, pp.1016-1022, 1979。
- 7) 江本久雄, 内村俊二, 澤村修司, 高橋順, 宮本文穂：橋梁点検技術者のためのバーチャルリアリティ体験システムの開発～橋梁目視点検支援システム～, 社会基盤マネジメントシリーズ No.10, 山口大学大学院 理工学研究科 安全環境研究センター(RCES), pp.1-104, 2009.12。