

I-26 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

Development of a Virtual Reality-based System for Bridge Inspectors

澤村修司¹・溝部和広²・内村俊二³・宮本文穂⁴

Shuji SAWAMURA, Kazuhiro MIZOBE, Shunji UCHIMURA, and Ayaho MIYAMOTO

抄録: 橋梁の維持管理を行うためには橋梁点検を行う必要がある。しかしながら実際には、橋梁点検の結果は点検者によるばらつきが生じている。その結果、橋梁の性能評価にばらつきを生じ、橋梁の適切な維持管理が行えないことが問題となる。そこで、ばらつきをなくすためには、橋梁点検者の損傷把握の技術を一定レベルにする必要がある。その方法として、橋梁点検者が繰り返し同じ環境で橋梁損傷を体験・学習を行い同じ損傷結果を導き出せる損傷体験システムと、このシステムを用いた橋梁点検技術者の育成システムの開発を行う必要がある。本論文では、橋梁点検技術者のための VR 技術を活用した損傷体験システムの開発と効果について述べる。

Abstract: In this paper, a virtual reality (VR)-based system of bridge inspection for bridge inspectors is proposed. The system aims to store inspection results and images of bridges, to train the inspection skill of inspectors and to evaluate the inspection results. Firstly, inspection manual, review of inspection results, and lecture of training inspection skill for bridge maintenance in Yamaguchi prefecture are introduced. The purpose of the actions is to improve the accuracy of inspection and diagnosis. The inspection manual by Yamaguchi prefecture government is simplified as compared with the inspection manual made by the ministry of land, infrastructure, transport and tourism of Japan. Then, reviews of the government check and revise the inspection results in according to the standard of Yamaguchi prefecture government. The lecture of training inspection skill is for young inspectors and engineers. However, the problem is that the effect of the actions on improving the inspection accuracy is small. It is considered that the inspection accuracy is dependent on inspector's skill and the more effective training of inspection skill is needed. One of solutions is a training system with virtual experience of bridge inspection which is independent of the conditions of place and time. Then, the VR-based system of bridge inspection is proposed as a solution of the problem by using the advantage of VR technology. In this paper, the development process of the VR-based system of bridge inspection is also described. In addition, it is shown that the application to actual inspection of bridge is very effective to improve the inspection accuracy.

キーワード: 橋梁点検, バーチャルリアリティ, 3次元 CG モデル

Keywords: Bridge inspection, Virtual reality, 3-dimensional CG model

1. はじめに

現在、山口県の既存橋梁は、架橋後 50 年が経過した橋が全体の 20% を占めており、今後この割合は急激に増加し、約 20 年後には全体橋梁数の約 70% にまで増加する¹⁾。既存橋梁は、架橋地点の過酷な気候の影響を受け、劣化が進行している橋梁も少なくない。そのため、近い将来損傷を受けた橋梁の維持管理が重大な問題となることが予測される。また、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、予算の中で適正な維持管理を行い、橋梁の余寿命を延ばす必要がある。

維持管理を行うにあたっては、橋梁のライフサイク

ルを考慮し、橋梁の維持修繕計画を策定して行う必要がある。橋梁の維持管理は、橋梁の損傷状況を把握する点検が重要となる²⁾。

山口県が管理している橋梁は約 3500 橋あり、各々の橋梁の詳細調査は多くの時間と費用を要するため、短期間内では不可能である。そのため、効率よく点検し、損傷状況を把握するために目視点検が行われている。目視点検を行うためには、橋梁技術者の技術と経験が必要となる。しかし、少子高齢化による若手人材の不足、熟練技術者の大量退職などにより、技術の教育や伝承の機会が失われつつある。さらに近年の公共事業削減により、経験する現場も少なくなり技術の向上の機会も限られてきている。

1 : 正会員 (財)山口県建設技術センター 技術部技術課

(〒753-0073 山口県山口市春日町 8-3 春日山庁舎内, Tel :083-920-4221, E-mail : s.sawamura@yama-ctc.or.jp)

2 : 非会員 山口県土木建築部道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)

3 : 正会員 山口大学大学院医学系研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

4 : フェロー会員 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

表-1 国土交通省と山口県の橋梁点検項目および評価基準の比較⁶⁾

部材区分	損傷	橋梁定期点検要領(案)平成16年3月国土交通省道路局国道・防災課(抜粋)					山口県橋梁通常点検マニュアル			
		a	b	c	d	e	a	b	c	
上部工 (コンクリート橋)	主桁・横桁	ひびわれ	なし	幅(RC<0.2, PC<0.1) 間隔≥0.50m	幅(RC<0.2, PC<0.1) 間隔<0.50m または 幅(0.2≤RC<0.3, 0.1≤PC<0.2) 間隔≥0.50m	幅(RC≥0.3, PC≥0.2) 間隔≥0.50m または 幅(0.2≤RC<0.3, 0.1≤PC<0.2) 間隔<0.50m	幅(RC≥0.3, PC≥0.2) 間隔<0.50m	なし	規模 小 幅(RC<0.3, PC<0.2)	規模 中 幅(RC≥0.3, PC≥0.2)
		剥離, 鉄筋露出	なし	—	剥離のみ	剥離あるが鉄筋露出軽微	鉄筋腐食大	なし	剥離のみ	鉄筋露出
		遊離石灰, 漏水など	なし	—	漏水のみ	遊離石灰のみ	漏水に錆汁あり	なし	—	あり
		異常振動, たわみ	なし	—	—	—	あり	なし	—	あり
		欠損	なし	—	局部的欠損	—	著しい欠損	なし	局部的欠損	著しい欠損
	床版・間詰め	剥離, 鉄筋露出	なし	—	剥離のみ	剥離あるが鉄筋露出軽微	鉄筋腐食大	なし	剥離のみ	鉄筋露出
		抜け落ち	なし	—	—	—	抜け落ちあり	なし	—	あり
		鋼板接着部の損傷	なし	—	規模 小	—	規模 大	なし	規模 小	規模 大
		床版のひびわれ	幅≤0.05mm 間隔: 1.0m以上, 一方向	幅<0.1mm 間隔: 1.0~0.5m, 一方向	幅<0.2mm 間隔: 0.5m, 格子状直前	幅≥0.2mm 間隔: 0.5~0.2m, 格子状	幅≥0.2mm 間隔: 0.2m以下, 格子状	なし	一方向ひびわれ 幅<0.2mm	二方向ひびわれ 幅≥0.2mm
	舗装	ひびわれ	なし	—	—	—	あり	なし	—	あり
		ポットホール	なし	—	—	—	あり	なし	—	あり
	伸縮装置	段差, 変形, 破損など	なし	—	局部的欠損	—	著しい欠損	なし	—	著しい欠損
	地覆高欄	欠損など	なし	—	局部的欠損	—	著しい欠損	なし	—	著しい欠損
		腐食, 変形など	なし	—	局部的欠損	—	著しい欠損	なし	—	著しい欠損
	排水装置	腐食, 変形など	なし	—	局部的欠損	—	著しい欠損	なし	—	著しい欠損

橋梁点検技術者の育成は急務であり、従来のような経験や伝承による時間をかけて技術者を育成する期間が十分でない。そのため、技術者を早期に養成する仕組みとして、現場経験と同様な講習が可能なバーチャルリアリティ(VR)技術³⁾を用いることによって、橋梁点検技術者育成が可能であると考えられる。VR技術は、建設・土木の分野でも実用化されており、施工過程の図示化や完成予想図の提示等に広く適用されている。一方、橋梁の目視点検技術については、VR技術を用いたシステムと教育プログラムが開発され、目視点検技術教育における有用性が報告されている⁴⁾。しかしながら対象とする橋梁の構造や形状が限られているため、学習教材の多種多様化さらには学習機会の増加に対応することが難しい点が問題である。したがって、学習教材の多種多様化および学習機会の増加によって教育効果をさらに向上させるには、さまざまな構造および形状の橋梁に対応することが課題である。

したがって本論文では、現場に近い「空間」を創造し、橋梁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により、技術力の向上と技術者の早期育成が可能となる、VR技術を活用した橋梁

点検技術教育の支援システムの開発と実用化を系統的に述べる。特にシステム開発では、学習教材となる橋梁モデルの作成に汎用ソフトウェアを用い、さまざまな構造および形状の橋梁に対応することで、学習教材の多種多様化および学習機会の増加を図る。

2. 山口県における橋梁点検の現状と課題

橋梁点検の現状と点検結果の信頼性向上に向けての取り組みを示す。

(1) 橋梁点検の現状

山口県では、橋梁維持管理費を少なくするため、橋梁の長寿命化修繕計画⁵⁾を策定し、県内橋梁全体維持管理費の最小化および個々の橋梁のライフサイクルコストが最小となる時点で適切に維持修繕を行い、橋梁の長寿命化を行うこととしている。すなわち長寿命化を行うにあたって、まず始めに行うことは橋梁の点検である。そのため橋梁点検は、維持管理を行う上で最も重要な要素となる。しかしながら、国土交通省の橋梁点検要領案⁶⁾で指示されているような、全ての部材に対する専門技術者による近接目視は多額の点検費用

表-2 各行政機関の点検者・損傷判定の比較

行政機関	点検者	損傷判定
山口県 ¹⁾	県庁土木職員	3段階
国土交通省 ⁶⁾	専門家	5段階
静岡県 ⁸⁾	専門家	5段階
岐阜県 ⁹⁾	専門家	5段階
長崎県 ¹¹⁾	専門家	5段階

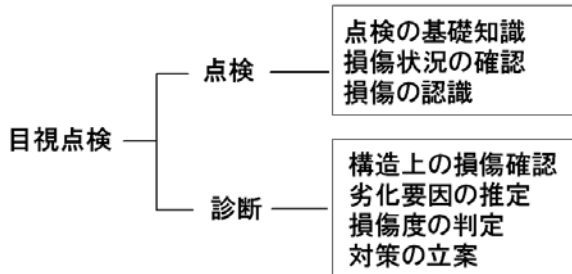


図-1 目視点検の役割と技術・能力の関連

が必要となる。一方、山口県においては、公共事業費が削減される中、多額の点検費用を捻出することは不可能な状況である。山口県では、点検費用を削減する方法として、点検を委託業者により行うのではなく、県庁土木技術職員により点検を行うこととしている。山口県では、県庁土木職員が橋梁点検を行えるように、山口県橋梁点検要領（案）¹⁾を策定している。山口県橋梁点検要領（案）は、国土交通省の橋梁定期点検要領（案）を基に点検の簡略化を図っている。簡略化した点は以下の点である：①対象部材の分割の簡略化、②点検範囲を全範囲から目視可能な範囲に限定する点検範囲の簡略化、③損傷の評価を5段階から3段階へ簡略化。表-1に、国土交通省と山口県の橋梁点検項目および評価基準の比較を示す。また、他の行政機関の点検評価および点検者の比較を表-2に示す。簡略化は、山口県庁土木職員が損傷を発見し、損傷の判定をしやすくすることを目的としている。

次に橋梁診断では、目視点検の結果から橋梁の損傷状況を診断する必要がある。すなわち、橋梁点検には、「点検」と「診断」の2つの技術を併せ持つことが必要である。図-1に、目視点検の役割と求められる技術・能力の関連を示す。「点検」は現状の状況を把握するのに対して、「診断」は、損傷の状況や場所から将来の損傷状況を予測するものである。これは、これまでの橋梁の知識・経験に基づいて行われる。

山口県における橋梁点検教育で求められることは、基礎知識の習得のみを目的とした点検教育ではなく、点検技術者の育成であると考えられる。

(2) 橋梁点検結果の信頼性

山口県では、県庁土木職員が点検・診断を行えるように橋梁点検講習会を行っている。しかしながら、点

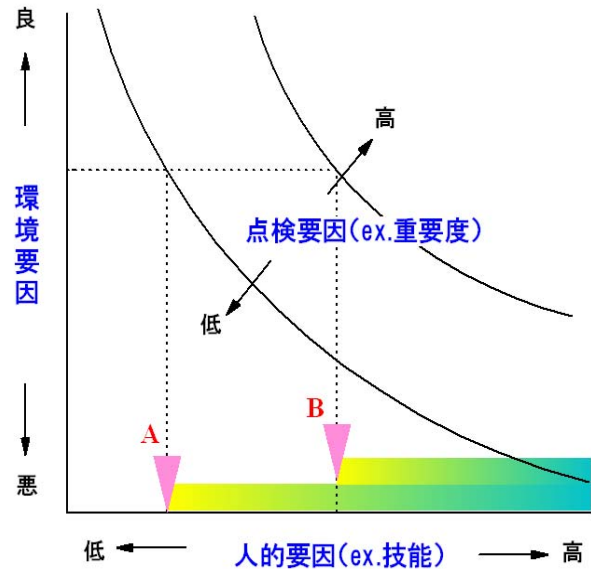


図-2 目視点検の精度に関わる要因の関係⁷⁾

検結果に関してはばらつきなく精度よく点検されているとは言えない状況である。図-2に、目視点検の精度に影響を及ぼす要因の関係を概念的に示す。図-2から、点検の重要度などの「点検要因」を曲線とし、点検技術者の能力などの「人的要因」を縦軸にし、点検作業現場の「環境要因」を横軸に示す。「点検要因」・「環境要因」・「人的要因」相互に影響が及んでいると考えられる⁷⁾。例えば、同一点検環境の条件下において、ある一定の点検要因の場合（図-2中A）とする。求める点検要因の重要度を上げると「人的要因」は高いものが必要となる。（図-2中B）

このように点検結果「点検要因」には点検精度が求められるが、点検結果の精度は「環境要因」、「点検要因」、「人的要因」それぞれの影響を受けている。これらの影響の中で「環境要因」に関しては、既設橋梁の架橋現場条件を変更することは不可能である。そのため、橋梁点検車やポールカメラなどを用いて環境要因の改善を図っているが、全ての面で環境改善とはならず、根本的な環境要因の変更は困難である。また、「点検要因」に関しては、点検レベルを下げるのが考えられるが、これは既設橋梁や社会資本おける安心・安全を下げることとなるため簡単には行えない。最後に「人的要因」に関しては、他の2つの要因に比べると点検技術者の能力のみに影響している。

このことから、点検技術者の能力の向上を図ることが、点検データの精度および信頼度を向上させるのに最も重要な対策と考える。

(3) 点検結果の向上への取組み

橋梁点検データの信頼性を向上させるためには、点検技術者の能力向上を行った上で、点検データのばらつきを少なくする必要がある。点検結果のばらつきを

表-3 損傷区分と内容¹⁾

損傷区分	内 容
a	損傷なし
b	損傷が発生している
c	損傷が著しい

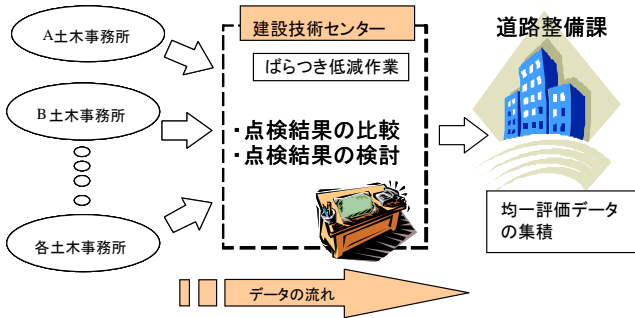


図-4 損傷評価の平準化の流れ

少なくする方法として、山口県では、①橋梁点検方法のマニュアル化と損傷判定事例集の作成、②橋梁点検実施前に橋梁点検技術者講習会の実施、③点検データを集約した点検データの平準化の三つを行っている。データの信頼性を向上するために、これらの三つを①②③の順番で行い、最後の③の作業によりデータの信頼性を確保している。これら三つの方法を以下に述べる。

①マニュアルの作成と損傷判定事例の作成

損傷評価のばらつきを少なくするために、山口県が損傷事例集¹⁾を作成し、これと照らし合わせて損傷程度を判定することにより損傷評価のばらつきを低減させている。損傷事例集を図-3に示す。損傷の判定は、表-3に示す。

②橋梁点検技術者講習会の実施

講習会は一日かけて行い、前半は点検手法の講義、後半は既設橋梁の損傷程度を診断し損傷判定手法を習得するものである。

③点検データを集約した点検データの平準化

各出先事務所で行った橋梁点検のデータは財団法人山口県建設技術センターが集約し、損傷程度を見直すことによって平準化することで、損傷程度評価のばらつきを低減している。評価の平準化は、過去の点検や他の類似構造物と比較・検討することにより点検データおよび評価結果の統一化を図り、精度を向上するものである。図-4に、損傷評価の平準化のための流れを示す。

(4) 点検結果のばらつきと原因

前述したように①や②の方法で点検技術者の能力向上を行っている。しかしながら、点検結果が異なっているのが現状である。以下に、点検データを平準化した事例から点検結果のばらつきの原因を考察する。



図-3 各部材の損傷度判定事例

・事例1 (図-5) (表-4)

点検者は、現地橋梁の、橋梁部材主桁・横桁の点検を行い、該当部材に対して、損傷が発生していない損傷区分 a と判定を行っている(表-4)。しかし図-5(丸内)に示すように、主桁ウェブ部に大きな塊状の剥離があり、主桁端部の横締め緊張力が低下していると考えられるため、損傷区分判定を著しい損傷の c に修正した。

・事例2 (図-6) , (表-5)

点検者は、現地橋梁の、橋梁部材床版・間詰の点検を行い、該当部材に対して、著しい損傷が発生している損傷区分 c と判定を行っている(表-5)。しかし図-6(丸内)に示すように、鉄筋露出は、床版・間詰め部の一部であり、鉄筋露出部分付近に鉄筋腐食によるコンクリートひび割れも見られないことから、構造的な影響は少ないと考えられるので、損傷区分判定を要経過観察の b に修正した。

表-4 事例1 橋梁点検結果の平準化結果対比表

点検項目	事務所点検結果	平準化結果
主桁・横桁部の剥離・鉄筋露出	損傷なし(a)	著しい損傷(c)



図-5 平準化対象の事例1

表-5 事例2 橋梁点検結果の平準化結果対比表

点検項目	事務所点検結果	平準化結果
床版・間詰部の剥離・鉄筋露出	著しい損傷(c)	軽微な損傷(b)



図-6 平準化対象の事例2

このように点検データの平準化の段階で損傷評価が大きく異なる結果が発生する原因としては、損傷事例が部分的であることから評価が曖昧となることが考えられる。この評価が曖昧となることの原因として、橋梁点検前の講習会において受講者の習熟の度合いが異なっているためと考えられる。そこで橋梁点検技術の向上のためには、より実践的な点検講習会が重要であるとされる。

表-6 メンテナンスエキスパート研修内容

	内容
第1回	アセットの概要+橋の点検とは+メンテナンスエキスパートとは
第2回	橋梁メンテナンスエキスパートへの期待 長寿命化修繕計画の作成演習
第3回	鋼橋およびコンクリート橋の点検ポイント +点検調査実務演習（実橋梁）
第4回	部材詳細調査方法の概要 詳細調査実務演習（中性化、塩害試験）
第5回	維持補修対策概要 +損傷評価基準・評価判断

(5) 橋梁点検講習会の現状と課題

点検の手法を説明するための橋梁点検講習会は、橋梁の写真を用いて点検する場所や点検ルートの説明を講義形式で行っている。口頭での説明であるため、点検手法の習得は受講者それぞれの想像力に依存している。その結果、橋梁の現地経験が豊富な受講者は現地の空間的な理解を行うが、現場経験が少ない場合は、講習会の画像のみでの理解となってしまうため現地での行動を想像できない。その結果、橋梁全体を点検するのではなく損傷のみを見ることとなり、見落としや損傷判断の間違いが生じると考えられる。これらより、現在の講習会の限界として以下の4点が考えられる：

- ①現場での点検の臨場感が出せない
- ②説明が局部的な説明となり空間的な説明とならない
- ③損傷が部分的であるので、現実感がない
- ④一度しか学習機会がない

上記講習会の現状を解決する要素には、以下の3つが挙げられる：①想像を補う空間的な表示、②点検現場空間を移動しているかのような空間表示、③繰り返し説明が行えることが、重要である。イーラーニングによる教育システムにより、場所や時間の制約がなく繰り返し学習することが可能であるが、教材の伝達が録画の要素となるため、受講者が自ら操作し体験できる教育システムが必要であると考えられる。

一方、将来の点検者技術育成の観点から若手技術者を対象に点検技術講習会（以下「メンテナンスエキスパート研修」という）を行っている。メンテナンスエキスパート研修の対象者は、山口県土木技術職員として入庁し橋梁維持管理業務年数が3年以内かつ10年までの職員を対象に開催している。参加者は、山口県内各出先土木事務所から、総勢24人である。メンテナンスエキスパート研修は、橋梁点検の方法から、補修方法の考察までを、全5回により行うものである。表-6に研修概要を示す。

この研修に参加している 24 人を対象に橋梁点検診断技術を習得するために求めているニーズの調査を行った結果、以下の回答が得られた：

- ①橋の点検に係る実践的な検査や評価手法
- ②補修の要否の判断，診断事例
- ③橋梁の損傷の程度と，劣化メカニズム

この調査結果から，管理者の若手技術者が求めているものは，手順を学ぶマニュアルではなく，点検を実践的な手法により習得可能な教育システムである．また現在の橋の劣化がどのようなメカニズムで生じているのかと言う時系列を理解したいという要求があることが解る．そこで，各項目に対する解決方法として，

- ①現場に近い状況での繰り返し行える講習
- ②臨場感のある劣化から補修診断の体験
- ③損傷メカニズムが時系列で解る講習

が挙げられる．

以上の議論から，講習会に対して望まれていることは 2 次元的な説明ではなく，時間や空間における疑似体験を伴った説明であると考えられる．

3. VR 技術を用いた損傷体験システムの開発

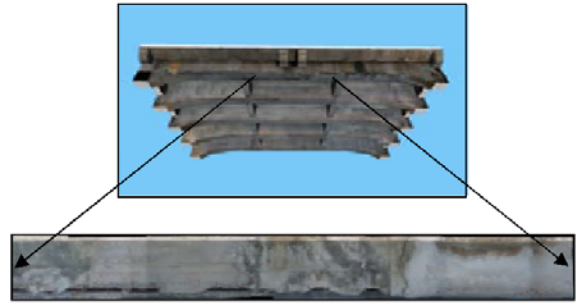
(1) 橋梁目視点検における VR 技術の適用

2. で述べた課題を解決する一つの方法として，橋梁架橋位置の状況に近い「空間」を創造し，橋梁のライフサイクルを短い「時間」で表現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点検技術教育のためのシステムの開発を提案する．VR とは，人間の感覚器官に対して，コンピュータなどによって合成した情報を示すことで，仮想体験できる技術の総称である．VR は次の構成要素からなる：①被験者が体験できる仮想世界，②感覚への働きで得られる物理的・心理的な没入感，③被験者の位置や動作に対する感覚へのフィードバック，④被験者が仮想世界に働きかける双方向対話³⁾．これらの要素の実現は，高性能コンピュータにより可能である．VR を用いた効果的な技術教育の例として，フライトシミュレータ等が挙げられる．

しかしながら，橋梁点検においては，人間の感覚器官に及ぼす設備は不要である．橋梁点検の技術者教育においては，目視点検が疑似体験できるシステムの開発が必要である．そこで，橋梁架橋現場の空間を創造し，仮想の橋梁点検体験が行えるシステムに VR 技術を活用する．VR 技術による仮想空間において既設橋梁に生じている損傷状況を表示することで，目視点検法や損傷の判断までのプロセスを効果的に学習することが可能である．

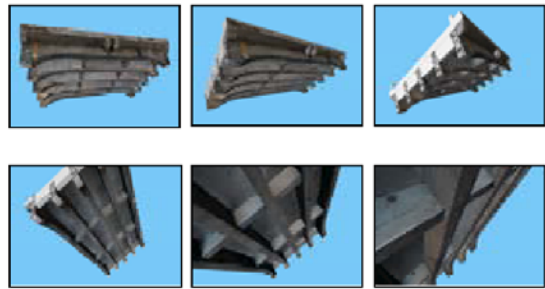
1. 画像による損傷確認

- ・橋梁の実画像を用いて損傷した部位の劣化状態の確認ができる。



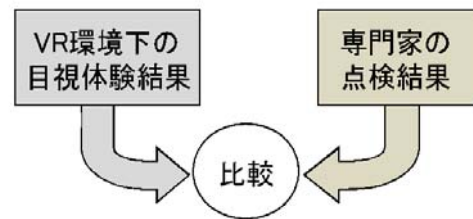
2. ウォークスルーによる点検疑似体験

- ・橋梁の外観の画像を用いて3次元CGによるVRシステムを構築し，VR環境下で点検の疑似体験を行う。



3. 損傷の確認と評価レベルの確認

- ・点検の疑似体験の結果と専門家の点検結果を比較し，損傷の有無の確認と評価レベルの確認ができる。



4. 点検者の意見のフィードバック

- ・損傷と評価レベルの検討のために，点検した専門家へのヒアリングを行い，点検結果のばらつきを改善する。



図－7 損傷体験システムの機能

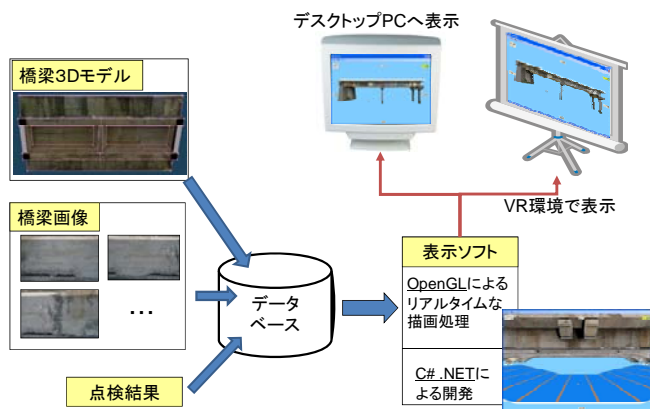


図-8 損傷体験システムの構成

(2) システムの考え方

橋梁点検技術者のための VR 損傷体験システム（以下、本システム）は、講習会において点検現場の空間を受講者に与え、理解の補助となるシステムとして以下の5点に着目して開発する。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ウォ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現地に何度も足を運ばなくても3D-CGによる仮想体験似によっていつでも確認ができる。図-7に本システム機能の概要を示す。これらの機能を以下のように教育システムとして活用する：

①点検結果の保管：データベースを利用し、写真データから作成した3次元モデルデータ・外観の画像と点検結果を保管することにより、過去の点検診断の事例として教育システムの教材となる。

②点検の疑似体験：既存鉄筋コンクリート（RC）橋の外観の画像を用いて3D-CGによるVRシステムを構築することにより、VR環境による仮想（疑似）点検体験を行う。

③点検結果を基にした学習：VR環境下で専門家の点検結果と比較することで、損傷の有無の確認と評価レベルの確認ができる。これにより、点検技術者個々に学習を行うことができる。

④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できる。

いずれの機能もVR環境下で実現することで、現場と同様な経験が行われる。また、時間および場所の制約を受けずに繰り返し点検の体験（練習）ができる。VR本来の人間のさまざまな感覚に訴えるようなVR環境を実現するには、高額な機材と、高度なシステムを要する。しかしながら安価で、教育効果の高いシステムも望まれる。そのため、橋梁の目視点検技術向上

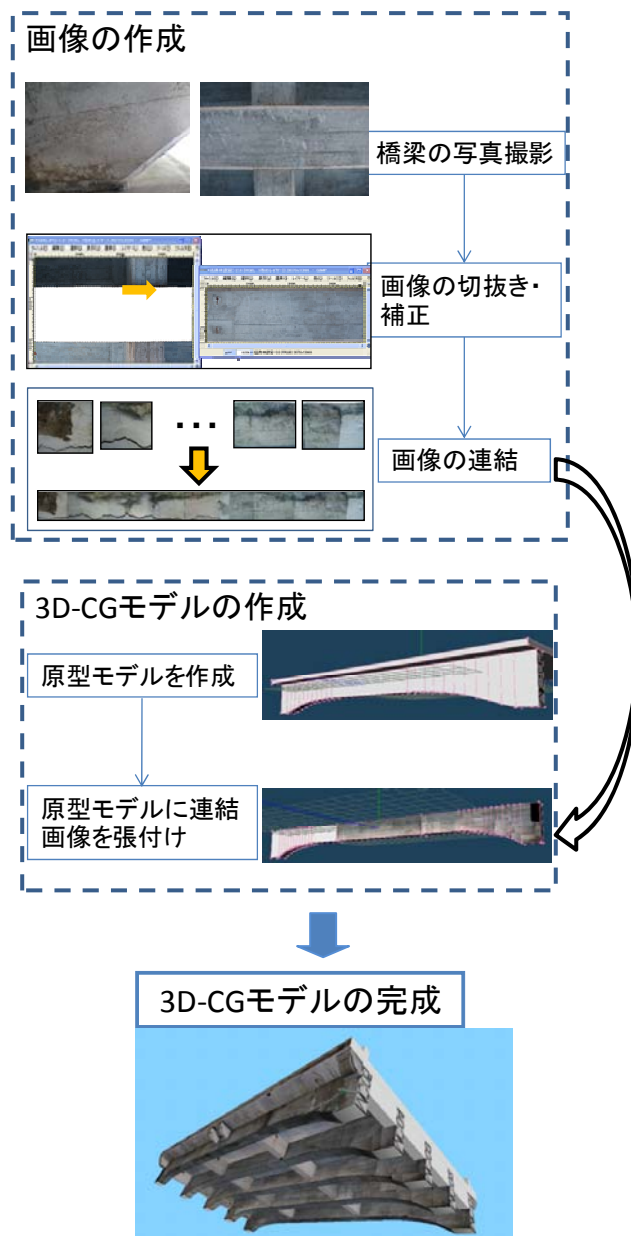


図-9 橋梁3D-CGモデルの作成手順

が目的である点を考慮するとVR技術として視覚情報と入力映像間の双方向性の実現を重点的に行うことで、VRシステムによる環境下を作成する。本システムの構成を図-8に示す。図-8に示すように本システムでは、複数の橋梁について、目視点検の結果、橋梁外観の詳細写真、橋梁3D-CGモデルからなるデータベースを構築し、開発したソフトウェアを用いてデータベースからのデータの読出し、表示画面の構成および、ディスプレイやスクリーンへの映写を行う。

(3) システムの作成手順

システム構築の手順は、a) 既設(RC)橋梁の写真撮影、b) 橋梁の画像作成、c) 橋梁3D-CGモデルの作成と画面の貼り付け、d)表示ソフトウェアの開発である。橋梁3D-CGモデルの作成手順の概要を図-9に示す。以下に橋梁3D-CGモデルの作成の手順を述べる。

a) RC 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。本研究で撮影された画像の画素数は 3872×2592 ピクセルであった。カメラと撮影対象の距離が約 1m の場合、画像の分解能は約 0.1mm/ピクセルである。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。撮影の際には、天候などの周囲光が画像に与える影響を考慮して日中に撮影を行い、陰影で暗くなる部材と明るい部材との明度の差を小さくするために露出やホワイトバランスの調整に留意する。さらに、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。

b) 画像連結による部材外観画像の作成

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。画像の連結は、以下の①と②の手順を繰り返すことで行う。

①画像類似度による画像の位置合わせ

画像間で最も類似する領域に 2 画像を重ねるものである。類似度には正規化相互関係 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation, ZNCC) ¹¹⁾を用いた。ZNCC は、両画像の重複領域を画素値を要素とする一次元ベクトルと見なし、ベクトルの内積を取ることで重複領域の類似度を表すものである。さらに、ベクトルを正規化することで画像全体の明暗の違いの影響を受けないことが特徴である。

いま、図-10 に示すように画像 A と画像 B が重なり合っているとする。重複領域の幅を m 画素、高さを n 画素とし、左上の座標を $(0,0)$ 、右下の座標を $(m-1, n-1)$ とする。画像 A の重複領域の輝度値を $I(i,j)$ 、画像 B の重複領域の輝度値を $T(i,j)$ とする。このとき ZNCC は式(1) で計算される。

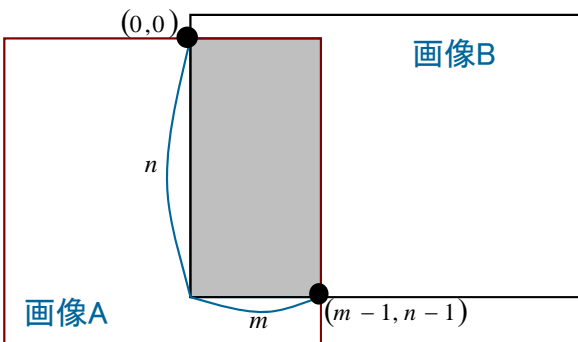


図-10 ZNCC による 2 画像の位置合わせ

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} ((I(i,j) - \bar{I})(T(i,j) - \bar{T}))}{\sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (I(i,j) - \bar{I})^2 \times \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (T(i,j) - \bar{T})^2}} \quad (1)$$

ただし、

$$\bar{I} = \frac{1}{mn} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} I(i,j), \quad \bar{T} = \frac{1}{mn} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} T(i,j) \quad (2)$$

ZNCC の値が 1 に近いほど重複領域が類似していると判断される。画像の位置合わせでは、画像 A 上で画像 B をずらしながら ZNCC を計算し、ZNCC の最大値を算出した画像 B の位置を適用する。

②特徴点に基づく画像の微調整

ひび割れや変色など、部材表面に現れた特異な形状を特徴と見なし 2 組の特徴点を抽出し、2 組の特徴点間の距離、方向が一致するように画像 B の大きさや角度の微調整を行う。特徴点の候補は、画像の色相および輝度の一次微分値を計算し、微分値の絶対値が大きいものを特徴点の候補として抽出する。次に、特徴点の候補の中から妥当な 2 組の点を特徴点として画像作成者が選択する。画像の微調整による連結手順の概要を図-11 に示す。

c) 3D-CG モデルの作成

橋梁の設計図または寸法図を基に橋梁を 3 次元モデル化し、さらに b) で作成した部材外観画像をモデルに貼り付けることで、VR 環境下で利用できる橋梁の 3 次元 CG (3D-CG) モデルを作成する。多様な構造および形状の橋梁に対応するため、市販の汎用 3 次元 CG 作成ソフトを用いて橋梁の 3D-CG モデルを作成する。作成の手順を図-12 に示す。以下に各手順を説明する。

①設計図・寸法図に基づく部材原型モデルの作成

既存の設計図または寸法図に基づいて、橋梁の各部材の 3D-CG モデルの原型を作成する。アーチ形状を持つ部材については、モデルを複数の直方体図形に区分し、それぞれの直方体図形の面を傾斜することで、アーチ形状を持つモデルを作成する。

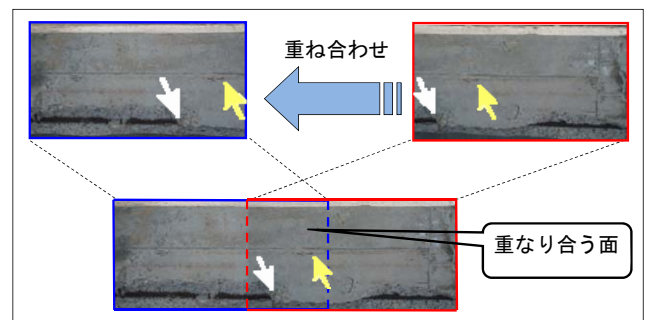


図-11 特徴点による画像の微調整

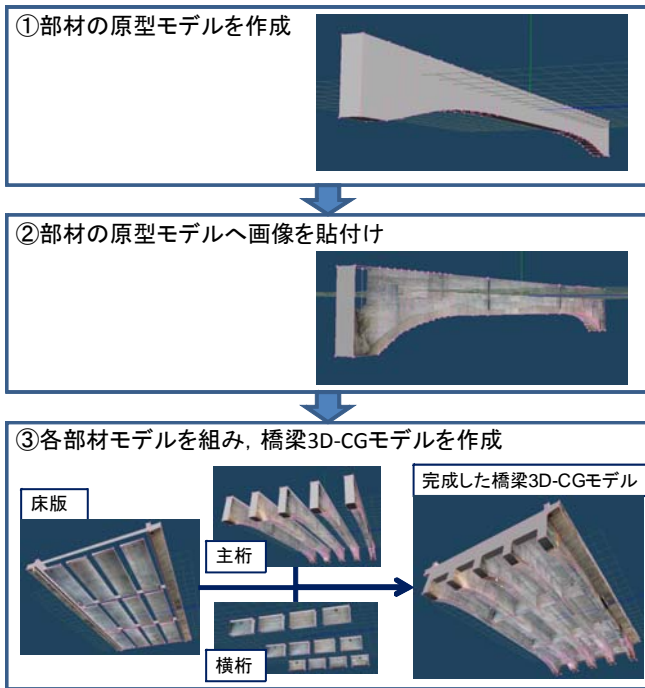


図-1 2 橋梁 3D-CG モデルの作成

②部材原型モデルに画像を貼合わせ

上記①で作成した部材の原型モデルに b)で作成した画像を貼り付けて部材モデルを作成する。アーチなど複雑な形状への貼付けは、UV マッピングにより行った。

③画像を貼った部材モデルを組み合わせ

上記①、②で作成した各部材モデルを組み合わせて、橋梁の 3D-CG モデルを作成する。

d) 表示ソフトウェアの開発

上記 c)で作成した橋梁 3D-CG モデルを PC 上で表示するためのソフトウェアを、プログラミング言語 C#.NET を用いて開発した。なお、3D-CG 表示のライブラリには OpenGL を用いた。

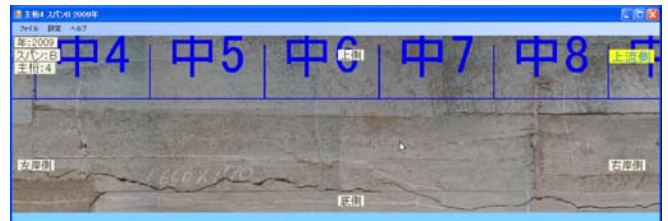
ソフトウェアの表示例を図-1 3に示す。まず、図-1 3 (a)に示すように橋梁全体と方向が提示される。マウスまたはキーボードの操作によって、さまざまな位置・方向で橋梁モデルを表示することにより (図-1 3 (b))、あたかも橋梁の下を移動して点検 (ウォークスルー) を行っているかのような映像を提示することができる。さらに、映像上で詳細な点検を行うために、特定の部材のみを高解像度で表示するサブウィンドウを起動することができる (図-1 3 (c))。部材表示サブウィンドウでは、全体表示時と同様にマウスまたはキーボードの操作によって、さまざまな位置・方向の表示ができ、さらに損傷位置の把握を支援するために、位置インデックスとスケールも表示できる。



(a) 橋梁の全体表示



(b) 橋梁下のウォークスルー



(c) 部材表示サブウィンドウ

図-1 3 ソフトウェアによる橋梁モデルの表示

4. システムの有効性の検証

本システムの有効性を検証した。検証 1 は、点検診断を 10 年以上行っている民間のコンサルタント技術者を対象に行った。また、検証 2 は点検用務の発注者である勤務年数 10 年未満の県庁職員を対象に行った。

(1) 点検技術者による検証

実際に点検を行う立場の技術者として、点検診断を 10 年以上行っている民間のコンサルタント技術者を対象に、多径間 RC 橋梁上部工の点検結果におけるばらつき減少により VR 支援システムによる効果の確認を行った。

撤去される 28 径間 RC 橋梁に対して、複数年にわたり近接目視点検および VR システムに用いる画像の近接撮影が行われた。検討対象となった点検は、2008

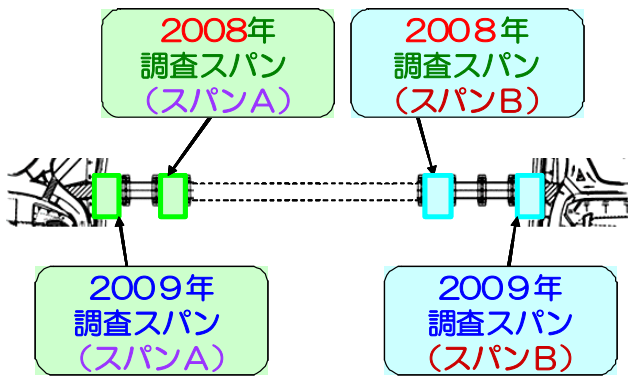


図-14 点検対象の橋梁

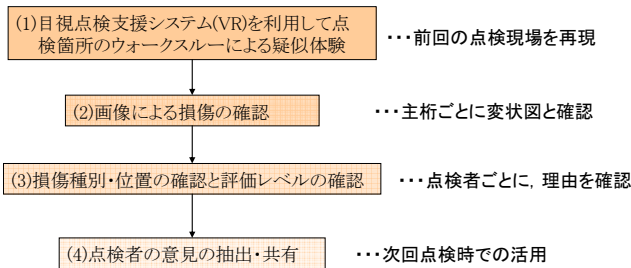


図-15 ヒアリング会の概要

年および2009年に行ったものである。図-14に、点検対象の橋梁および径間を示す。

2009年の点検においては、前年の点検を行った技術者に集合してもらい、前年の点検結果に関するヒアリング会を実橋点検の一ヶ月前に開催した。ヒアリング会の概要を図-15に示す。ヒアリング会では、前年に点検を行った径間をVRシステムにより提示して、ウォークスルーによる仮想点検を行い、損傷状況・損傷位置を確認した。各損傷の確認を行いながら、損傷評価の方法や基準について技術者同士で議論を行い、損傷評価の方法や基準について再確認を行った。

事前のヒアリング会を実施しなかった2008年度の点検結果と、事前のヒアリング会を実施した2009年度の点検結果について、図-16にひび割れの指摘箇所、図-17に剥離の指摘箇所の比較をそれぞれ示す。図-16、17から、2008年の点検結果に比べて、本システムを用いた2009年の点検結果にばらつきが少なくなっていることがわかる。さらに定量的な検討を行うために、2008年および2009年の点検におけるばらつきの度合いを、式(3)に示す評価式によって算出した。

$$Q = \left(\frac{\sum(P \times N)}{\sum N} \right) / P_0 \quad (3)$$

ここで、

P : 同じ箇所を指摘した人数

N : 指摘した人数が同じ場合の回数

P_0 : 点検者の総数

である。式(3)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表す。表-7に評価値の

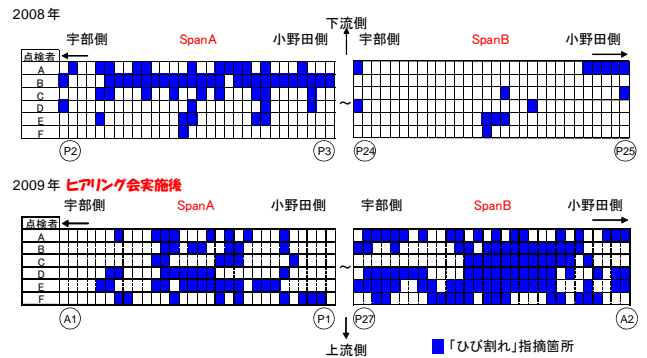


図-16 ひび割れ指摘箇所の比較

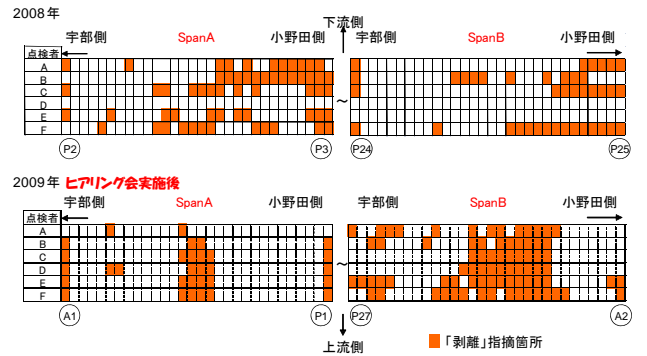


図-17 剥離指摘箇所の比較

表-7 ヒアリング会前後の評価値の比較

	ひび割れ	剥離
2008年(ヒアリング会なし)	28%	47%
2009年(ヒアリング会実施後)	59%	56%

比較を示す。

表-7よりひび割れ、剥離ともに、ヒアリング会を実施しなかった2008年の評価値に比べて、ヒアリング会を実施した2009年の評価値が向上している。これらのことは、ヒアリング会における本システムの仮想点検を通じて目視点検に関する点検者間の合意形成がなされたことにより、結果のばらつきが減少したものといえる。したがって本システムは、点検結果の確認や点検基準等の合意形成、さらには点検精度の向上に有用であるといえる。

(2) 若手技術者による検証

山口県に入庁して10年未満の若手技術者を対象に行った橋梁点検技術講習会において、本システムを適用した。そして講習の後に、本システムによる再現性、学習ツールとしての有用性、将来性や他の活用法の調査をアンケートにより行った。

点検対象は、11径間のRC橋梁のうち近接目視が可能な1径間とした。まず、現地橋梁点検を行う前に、橋梁点検野帳(図-18)に沿って、本システムの画像を提示しながら橋梁点検の手順について講習を行った。点検手順の説明を行った後に、受講者は実橋梁に

橋 梁 通 常 点 検 記 入 表

部材区分	損傷の種類	損傷ランク		
		a	b	c
Me	腐食、塗装劣化など	なし	表面錆あり	全体的な錆・板厚減少がある
	亀裂、破断、変形など	なし	局所的な亀裂などが見られる	大きな亀裂や破断が確認できる
	ボルトの脱落、腐食、ゆるみなど	なし	局所的なボルトのゆるみや脱落	多数のボルトのゆるみや脱落
	腐食、塗装劣化など	なし	表面錆あり	全体的な錆・板厚減少がある
Co	剥離・鉄筋露出	なし	剥離のみ	鉄筋露出
	遊離石灰、漏水など	なし	規模小	規模大
	異常振動、たわみ	なし	-	あり
	欠損	なし	局所的欠損	著しい欠損
床版・間詰め	剥離・鉄筋露出	なし	剥離のみ	鉄筋露出
	抜け落ち	なし	-	あり
	鋼板接着部の損傷	なし	規模小	規模大
	床版のひびわれ	なし	一方向ひびわれ(幅<0.2mm)	二方向ひびわれ(幅≥0.2mm)
	遊離石灰、漏水など	なし	規模小	規模大

図-18 橋梁点検野帳

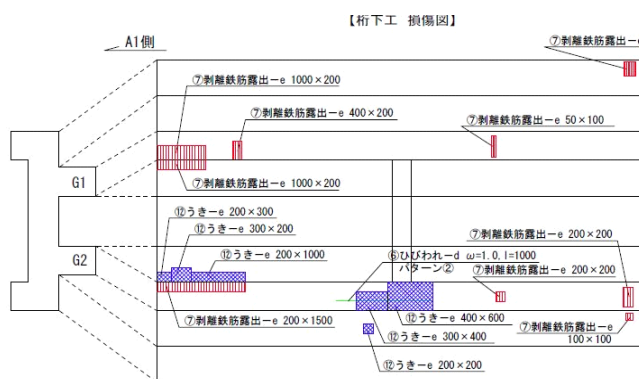


図-19 損傷図の解答例

て点検を行い、損傷図を作成した。

後日、橋梁点検技術者（講師）が作成した損傷図の解答例（図-19）と本システムの画像を用いて、受講者の点検結果（損傷の位置および種類）を確認し、損傷のランクの判定方法について解説する講習を行った。講習の後に、受講者である技術者へ本システムに関するアンケートを実施した。アンケートでは、本システムについて、橋梁点検技術者の立場から見た学習ツールとしての有用性、橋梁の損傷状態の再現性、改善点や今後の活用方法、将来性を回答してもらった。アンケートの結果を図-20に示す。

図-20において、「同様のシステムを他分野で見たことがある」との回答が70%あった。この質問は、シミュレーションシステムやゲーム、アトラクション等を通じたCGあるいはVRの経験の有無を調べることを意図したものであった。この結果から、回答者の70%は何らかのCGあるいはVR経験があり、経験したCGあるいはVRと比較しながら以降の回答を行ったものと考えられる。本システムで橋梁全体が再現できているとの回答が80%あった。また、損傷の種類については、剥離・剥落や鉄筋腐食劣化の損傷を約70%以上の方が本システム上で確認している。これらのことは、橋梁全体や剥離・剥落、鉄筋腐食劣化の損傷に

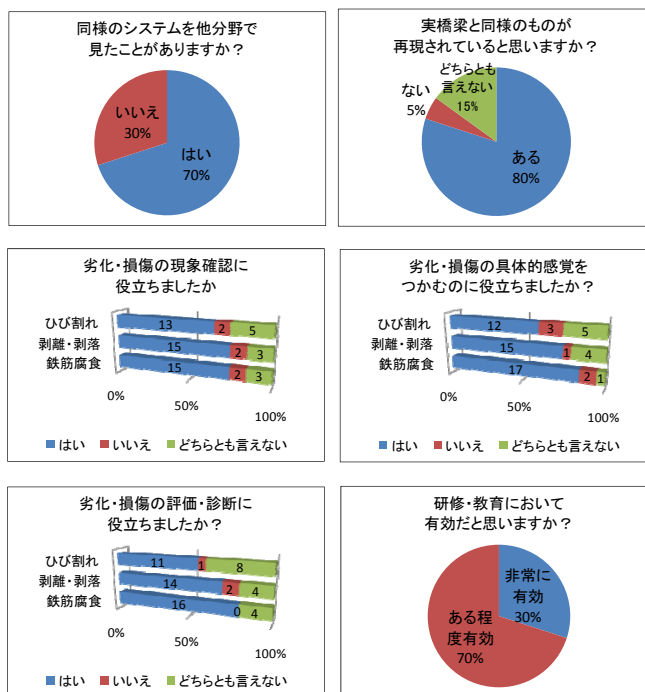


図-20 アンケート結果

ついて画像による提示が有効であったことを示している。一方、ひび割れによる劣化・損傷は約50%の人が確認しているにとどまっている。これは、本システムにおいて橋梁表面の凹凸が十分に表現されていないためであると考えられる。さらに、本システムの他の活用法や将来性、学習ツールとしての有用性や改善点について自由意見を記述してもらった。主な意見を以下に示す：

- ① 損傷判定が行える学習システムの機能が必要
- ② 細かい凹凸の表現の追加
- ③ 図面情報の追加
- ④ 浮きや剥離を判断する機能（打音）の追加
- ⑤ 橋梁点検結果の保存ツールとして期待

以上の結果から、若手技術者は技術習得のための本システムに有用性を認めており、さらに、学習を支援する機能や維持管理データベースとしての活用が課題であることがわかった。

5. おわりに

本論文では、橋梁を診断する上で重要な目視点検技術を習得するためのVR技術による損傷体験システムを提案した。まず、システム開発の背景として、山口県における点検技術講習会の課題を述べた。そして、課題に対する解決法として本システムの目的と作成方法を述べた。さらに、2つの事例を通して本システムの有効性を検証した。その結果、損傷・評価基準の合意形成のためのツールとして用いることにより、点検結果のばらつきを低減できることがわかった。また、

若手技術者へのアンケートにより，点検技術教育用としても有用性があることが示された。

一方，本システムについて次の課題：①ひび割れや剥離等の詳細な箇所での凹凸感の表現，②高解像度画像による詳細な表示，③浮きや剥離の判断のためのハンマー打音の付加，があげられる．これらの課題を解決することにより，さらに効果的な点検技術教育が行えると考えられる．

謝辞：本研究を行うにあたり，多大なるご協力を頂いた電気化学工業（株）高橋順氏および（有）ミツワ電気江本久雄氏に深謝いたします．また，調査に協力いただいた点検技術者の方々に感謝いたします．

参考文献

- 1) 山口県土木建築部道路整備課：山口県橋梁点検要領（案），山口県，2008.
- 2) 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>>，（入手 2008.8.25）.
- 3) Sherman W.R. and Craig A.B.: *Understanding Virtual Reality: Interface, Application and Design*, Morgan Kaufmann, 2003.
- 4) Miyamoto A., Konno, M. and Rissanen, T.: VR-based education system for inspection of concrete bridges, *Computers and Concrete*, Vol.3, No.1, pp.29-42, 2006.
- 5) 山口県土木建築部道路整備課：山口県橋梁長寿命化修繕計画，<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18200/kyouryou/kyouryou/apd1_1_2009020629234341.pdf>（入手 2009.7.1）.
- 6) 橋梁マネジメント研究会編：道路橋マネジメントの手引き，海洋架橋・橋梁調査会，2006年9月.
- 7) 石田純一：山口県における計画的な橋梁維持管理手法の導入に関する基礎的研究，山口大学大学院理工学研究科博士学位論文，2008.
- 8) 静岡県橋梁アセットマネジメントの取組：<[https://www2.pref.shizuoka.jp/all/file_download1060.nsf/1D506099633B663A492576170029FD24/\\$FILE/tenken_manual.pdf](https://www2.pref.shizuoka.jp/all/file_download1060.nsf/1D506099633B663A492576170029FD24/$FILE/tenken_manual.pdf)>（入手 2010.4.20）.
- 9) 岐阜県土木整備部維持管理課：<<http://www.pref.gifu.lg.jp/pref/s11657/index.html>>（入手 2010.5.14）.
- 10) 長崎県土木部道路建設課・道路維持課：<<http://www.doboku.pref.nagasaki.jp/~douro/index.html>>（入手 2010.4.20）.
- 11) 高木幹雄，下田陽久（監修）：新編画像解析ハンドブック，東京大学出版会，2004年9月.

(2010. 5. 27 受付)