

画像目視点検環境下での 橋梁のひび割れ検出において 点検スキルが検出結果に与える影響の分析 ～クラスター分析を用いた検討～

浦田 渡¹・南 貴大²・藤生 慎³・福岡 知隆⁴・高山 純一⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:superw7@stu.kanazawa-u.ac.jp

²学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:taketaka0503@stu.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学研究員 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵フェロー会員 金沢大学名誉教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:takayama@se.kanazawa-u.ac.jp

高度経済成長期に多く建設された橋梁の高齢化が急速に進んでいる。国土交通省は橋梁に対する予防保全的な維持管理を重要視し、全ての橋梁に対して定期点検を義務付けている。現在実施されている点検手法である近接目視点検は予算・人員の問題により効率化が見込めないことから、その代替手法となる様々なシステムが研究されているが、本研究では、超高解像度のカメラを用いることで視覚的に現在の点検と遜色ない環境を構築し、人が画像上でひび割れの診断を行う「画像目視診断システム」を提案する。これまで本研究では橋梁点検の経験年数が画像目視点検におけるひび割れ検出に与える影響についての評価を行った。今回は被験者のひび割れ検出結果データを経験年数とひび割れ診断の所要時間でクラスター分析から分類し、各クラスターが適合率、再現率、F値に与える影響の評価を行った。

Key Words : bridge inspection, maintenance, diagnostic imaging, image attributes, lightness, contrast, chroma, inspection skills, variance analysis

1. はじめに

現在、国土交通省が所管している橋梁は全国で約73万橋（平成25年道路局集計）の数があり、このうち、建設後50年を経過した橋梁の割合は2013年の段階で全橋梁の約18%を占め、高齢化構造物として扱われている。これらの高齢化構造物は10年後には約43%、20年後には約67%と急激に増加していく¹⁾（図-1）。

このような状況で、安全上問題が発生する可能性のある全橋梁に修繕や架け替えといった処置が適切に行えるとは考え難い。そこで国土交通省は予防保全的な維持管理を重要視し、すべての橋梁に5年に1回の頻度で近接目視点検を行うことを定めているが、「点検委託費や大型点

検車使用による予算確保」や、「管理する橋梁に対する

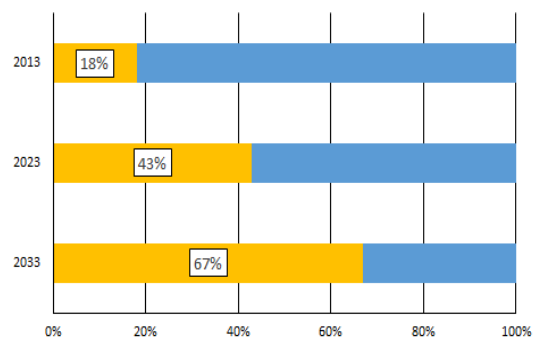


図-1 建設後 50年を経過した橋梁の割合¹⁾

点検技術者の不足」などといった課題がある²⁾ことから、今後これまでと同様の精度を担保した点検を継続的にやっていくことは非常に困難である。

このような背景を踏まえ、本研究グループでは、現在行われている近接目視点検の代替的な点検手法として、超高解像度（1億画素）のカメラで撮影した橋梁の画像を橋梁点検者が目視することで、点検対象物の損傷部分を診断する画像目視点検システムの構築を行っている。このシステムは、写真さえ撮影すれば、場所にこだわらず遠隔地での診断が可能であるため、人員の確保という面での負担が軽減されるが、課題として「診断者のスキルによって検出結果が異なる」、「画像の属性によって検出しにくい箇所が存在する」などがあげられている。このような背景のもと、本研究では、橋梁点検の経験者を対象として、画像を用いたひび割れ検出実験を行い、被験者の経験年数がひび割れ検出結果に与える影響を明らかにする。今回は特に被験者がひび割れ検出に要した時間に着目し、各被験者のひび割れ検出結果を被験者の経験年数とひび割れ検出に要した時間からクラスター分析することで、より詳細な検出結果の分析を行う。

2. 既往研究

これまでに近接目視点検の代替手法に関する既往研究についてまとめ、本研究の位置づけを示す。

岡田ら³⁾は、受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と、その実橋梁における模擬点検を行った。マルチコプタには、橋梁のように複雑かつ狭隘な環境を安全に飛行するために、3軸ジンバルを介して接続された本体と球殻が独立に受動回転できる構造を採用した。また、これまでの実橋梁での第三者評価で、橋梁表面に受動回転球殻を接触させながら近接飛行することで、国交省点検要領で発見が必要とされる0.1[mm]のひび割れなどの損傷を撮影できることが認められているが、課題として耐風性と飛行時間の制限が挙げられた。

藤原ら⁴⁾は、橋桁の下面や支承部など近接目視が困難な箇所に対して、ポールユニットを用いて視準可能な位置にカメラを据え付け、点検、測定、映像記録採取を行う装置を開発した。この装置を用いた点検方法としては、点検ロボットカメラに搭載しているレーザー距離計によりカメラから対象面までの距離を測定し、そのデータに基づいて対象面における大きさを認識し、操作端末（タブレットPC）画面にクラックスケール等の計測目盛を表示させることでひび割れ幅、ひび割れ長さ、塗装劣化の長さなどを測定する。現場検証の結果、腐食・剥離・鉄筋露出などの損傷評価は可能であるものの、ひび割れの検出に関しては精度が低く課題が残る結果となった。

様々な代替手法に課題がある中、南ら⁵⁾は、超高解像

度カメラで撮影された点検部位前景の画像を用いて、人が0.1[mm]のひび割れを検出する画像目視点検環境の構築を行っている。画像目視診断でのひび割れ検出に関する課題としては、画像の属性によって検出しにくい箇所が存在すること、診断者のスキルによって検出結果が異なる可能性があることなどがあげられている。

本研究では画像を用いたひび割れ検出において、検出結果にばらつきを生じさせる要因として被験者の経験年数と検出に要した時間に着目した。これらの要因からひび割れ検出結果のデータをクラスター分析を用いて分類し、各クラスターが後述する適合率、再現率、F値に与える影響の評価を行った。

3. 写真撮影実験

平成30年9月20日（木）10時30分から16時の5時間30分及び9月21日（金）10時から12時の2時間に、石川県羽咋市にて写真撮影実験を実施した。撮影した橋梁は7橋で、いずれも石川県羽咋市が管理を行っている。今回の実験では事前に羽咋市から提供を受けた橋梁定期点検データを基に、コンクリート橋脚にひび割れを有しており、かつ2径間以上の橋梁を対象として選定した。撮影実験を行った7橋のうち、平成28年に定期点検が完了している橋梁が3橋、平成29年に定期点検が完了している橋梁が2橋、平成30年に点検予定（未点検）の橋梁が2橋であった。撮影対象部材としては、いずれの橋梁もコンクリート橋脚を対象とし、撮影の際は超高解像度カメラを三脚に取り付け、橋梁の下部で橋脚の全景が撮影できる距離から撮影を行った（図-2）。また、撮影枚数は7橋の合計で454枚であった。

4. ひび割れ診断実験

(1) 実験の概要

本研究では画像目視点検の実現可能性を検証するにあたり、超高解像度カメラで撮影された画像からひび割れ



図-2 撮影実験風景



図-3 ひび割れ診断実験対象画像



図-4 橋梁点検経験者による診断実験

の検出を行うひび割れ診断実験を実施した。ひび割れ診断実験を行うにあたり、写真撮影実験を行い、カメラの解像度と撮影距離の関係からひび割れ幅0.2mm以上のひび割れが視認でき、かつ部材に十分にひび割れを有している損傷部の画像を選定したところ、O橋の橋脚部の画像（図-3）が条件を満たし、画像からひび割れの検出を行うひび割れ診断実験に適していたため、実験に用いる画像として使用した。

ひび割れ診断実験は被験者が52インチ4Kモニターのディスプレイ上に表示された対象画像（図-3）から拡大・縮小を繰り返すことでひび割れを目視で見つけ出し、ひび割れの上をなぞるように赤線を引くことでひび割れの検出を行う（図-4）。赤線を引く作業と拡大・縮小はマウスで行い、すべての操作を超高解像度カメラ専用のソフトウェア上で行う。

今回は橋梁点検経験者を対象としてひび割れ検出実験を行った。建設コンサルタント4社（石川・福井・富山）を訪問し、経験年数にばらつきがある34名の点検者を被験者として設定した。なお、経験年数による比較分析を行う（0～5年、5～10年、10～15年、15年以上で分類し、各経験年数がひび割れ検出精度に与える影響を分析）ため、使用した画像は画像の属性等を変化させていない撮影時の元画像を使用した。

本実験の対象橋梁は既に定期点検が行われているため、橋梁点検調書の損傷図から近接目視点検によるひび割れ検出結果が得られ、その結果を対象画像（図-3）に反映させることで本実験における正解データを作成した（図-5）。作成した正解データと各被験者の結果を照らし合わせ、各被験者の結果の評価を行う。

(2) 診断結果のメッシュ変換

本実験では被験者はひび割れの検出をマウスで赤線を引くことで行う。ひび割れの上をなぞる作業はフリーハ



図-5 近接目視点検結果から作成した正解データ

ンドであるため、分析の際に各被験者のひび割れをpixel単位で一致させることが困難である。そこで本実験では検出結果の赤線を含んだ画像をメッシュ変換することで分析を可能とした。本実験におけるメッシュ変換とは被験者がひび割れ診断をした画像を一辺が16pixelの正方形（256pixel）のメッシュで縦34×横45に分割し、正方形の中にひび割れ（赤線）を含んでいるメッシュを赤で色付けする処理の事を指す。

また、近接目視点検の結果から作成した正解データと各被験者の結果の比較に関しては、同位置にあるメッシュが共に赤色である場合か共に無色である場合を一致、正解データでは赤色であるが、被験者の結果では無色である場合を見落とし、正解データでは無色であるが、被験者の結果では赤色である場合を誤検出とする。

(3) ひび割れ検出精度評価に用いる指標

本研究では被験者が検出したひび割れをメッシュ変換することで正解データとの比較を行うが、その際に被験者のひび割れ検出結果がどの程度正解データと一致しているか評価をする必要がある。本研究では被験者の検出精度を評価する指標として適合率、再現率、F値を用い

る。

適合率とは、被験者のひび割れ検出結果の中に近接目視点検結果から作成した正解データと一致しているひび割れがどれだけ含まれているかを表す指標である。適合率が高ければ、ひび割れの誤検出が少ないことを示しており、ひび割れ検出の精度が高いことが表される。

再現率とは、近接目視点検結果から作成した正解データの中に被験者のひび割れ検出結果と一致しているひび割れがどれだけ含まれているかを表す指標である。再現率が高ければ、ひび割れの見落としが少ないことを示しており、多くのひび割れを検出できていることが表される。

F値は適合率と再現率の調和平均を取った値であり、被験者間の検出精度の優劣を付ける際に用いる。

5. 経験年数と所要時間がひび割れ検出結果に与える影響に関するクラスター分析

(1) ひび割れ検出結果のクラスター分析による分類

30名の被験者データを橋梁点検の経験年数とひび割れ診断の所要時間でクラスター分析を行った結果、クラスター1の平均経験年数は3.6年、平均所要時間は約22.6分、クラスター2の平均経験年数は3.6年、平均所要時間は約10.0分、クラスター3の平均経験年数は12.0年、平均所要時間は約9.7分、クラスター4の平均経験年数は12.7年、平均所要時間は16.5分となり、経験年数が浅くひび割れを検出に長い時間を要したクラスター1を「経験浅い・時間長い」、経験年数が浅く短い時間でひび割れを検出したクラスター2を「経験浅い・時間短い」、経験年数が長く短い時間でひび割れを検出したクラスター3を「経験長い・時間短い」、経験年数が長くひび割れ検出に長い時間を要したクラスター4を「経験長い・時間長い」として分類した(表-1)。

(2) 各クラスターが検出結果に与える影響の分析

各クラスターがひび割れ検出結果に与える影響を分散分析により評価する。分散分析の結果を表-2に、クラスターごとの適合率、再現率、F値の平均値を図-6から図-7に示す。算出したP値より、クラスターは適合率、再現率に有意な影響を与えていることが明らかとなり、F値

表-1 クラスター分析の結果

	規模	経験年数(年)	所要時間(分)
経験浅い・時間長い	7	3.6	22.6
経験浅い・時間短い	11	3.6	10.0
経験長い・時間短い	5	12.0	9.7
経験長い・時間長い	7	12.7	16.5

表-2 クラスター分析の結果

	経験浅い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	経験長い・時間長い	P値	判定
適合率	73.5	80.4	79.8	72.2	0.9×10^{-1}	*
再現率	89.3	83.9	83.3	87.6	0.9×10^{-2}	*
F値	80	82	80.7	78.9	0.3	

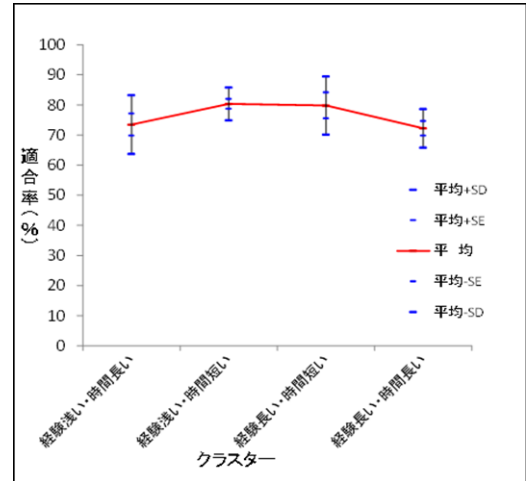


図-6 クラスターごとの適合率の平均

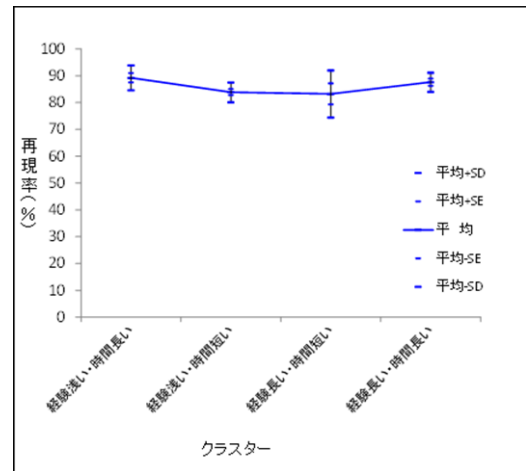


図-7 クラスターごとの再現率の平均

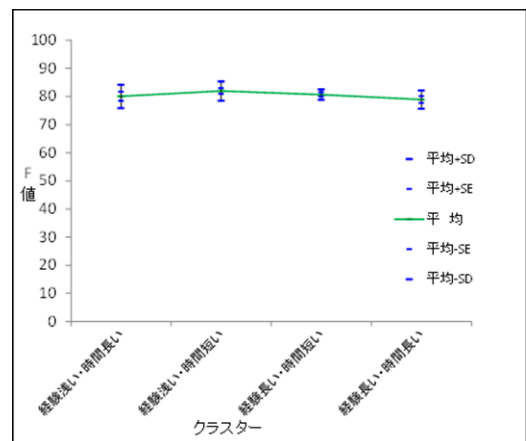


図-8 クラスターごとのF値の平均

に関してはクラスターによる有意な影響を与えなかった。図-7に示す再現率の平均のグラフによると、「経験浅い・時間長い」と「経験長い・時間長い」の値が高くなっており、「経験浅い・時間長い」は経験年数が浅くひび割れを検出に長い時間を要した被験者、「経験長い・時間長い」は経験年数が長くひび割れ検出に長い時間を要した被験者であることから、ひび割れ検出に長い時間をかけている被験者の方が再現率が高い傾向があることが明らかとなった。適合率に関しては、図-6のグラフより「経験浅い・時間短い」と「経験長い・時間短い」の値が高くなっており、「経験浅い・時間短い」は経験年数が浅く短い時間でひび割れを検出した被験者、「経験長い・時間長い」は経験年数が長く短い時間でひび割れを検出した被験者であることから、ひび割れ検出に時間をかけていない被験者の方が適合率が高い傾向があることが明らかとなった。クラスターが適合率、再現率、F値、所要時間に与える影響評価をクラスターごとにさらに細かく分析を行う。4つに分類したクラスターを2組ずつ合計6つの組み合わせで分散分析を行い、適合率、再現率、F値に関して各クラスターが他のクラスターに与える影響を明らかにした。分散分析の結果を表-3から表-5に示す。F値に関しては、どのクラスターの組み合わせでも有意な影響を与えなかった。適合率に関しては「経験浅い・時間短い」と「経験長い・時間長い」の間に有意な差が生じ、「経験浅い・時間短い」のひび割れ検出における適合率の平均値が80.4で、「経験長い・時

間長い」のひび割れ検出における適合率の平均値が72.2と低下していることから、「経験浅い・時間短い」と「経験長い・時間長い」の間では、経験年数が浅く短い時間で診断をした点検者の方がひび割れ検出結果における適合率が高くなる、つまりひび割れの誤検出が少なくなることが明らかとなった。再現率に関しては「経験浅い・時間長い」と「経験浅い・時間短い」の間に有意な差が生じ、「経験浅い・時間長い」のひび割れ検出における再現率の平均値が89.3で、「経験浅い・時間短い」のひび割れ検出における再現率の平均値が83.9と低下していることから、「経験浅い・時間長い」と「経験浅い・時間短い」の間では、経験年数が浅く長い時間で診断をした点検者の方がひび割れ検出結果における再現率が高くなる、つまりひび割れの見落としが少なくなることが明らかとなった。

7. まとめと今後の課題

(1) まとめ

画像目視診断システム構築の際の課題である「橋梁点検のスキルがひび割れ検出精度に与える影響」を把握するために超高解像度カメラで撮影した画像を用いたひび割れ診断実験を実施し、その結果の分析を行った。今回は特に、画像を用いたひび割れ検出において、検出結果にばらつきを生じさせる要因として被験者の経験年数と検出に要した時間に着目した。被験者のひび割れ検出結果データを経験年数とひび割れ診断の所要時間でクラスター分析することで分類し、各クラスターが適合率、再現率、F値に与える影響の評価も行った。クラスター分析により、30名の被験者は経験年数が浅くひび割れを検出に長い時間を要したクラスター、経験年数が浅く短い時間でひび割れを検出したクラスター、経験年数が長く短い時間でひび割れを検出したクラスター、経験年数が長くひび割れ検出に長い時間を要したクラスターの4つのクラスターに分類することができ、これらのクラスターが適合率、再現率、F値に与える影響評価を分散分析により行った。結果としてF値に関してはクラスターによる有意な影響を与えず、適合率に関しては「経験浅い・時間短い」と「経験長い・時間長い」の間では、経験年数が浅く短い時間で診断をした点検者の方がひび割れ検出結果における適合率が高くなる、つまりひび割れの誤検出が少なくなることが明らかとなった。再現率に関しては「経験浅い・時間長い」と「経験浅い・時間短い」の間では、経験年数が浅く長い時間で診断をした点検者の方がひび割れ検出結果における再現率が高くなる、つまりひび割れの見落としが少なくなることが明らかとなった。

表-3 適合率に関する分散分析の結果

	水準1		水準2		平均1	平均2	P 値	判定
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い				
適合率	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	73.5	80.4	0.07	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	73.5	79.8	0.16	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	73.5	72.2	0.76	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	80.4	79.8	0.90	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	80.4	72.2	0.3×10^{-1}	*
	経験長い・時間長い	経験長い・時間長い	経験長い・時間短い	経験長い・時間長い	79.8	72.2	0.10	

表-4 再現率に関する分散分析の結果

	水準1		水準2		平均1	平均2	P 値	判定
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い				
再現率	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	89.3	83.9	0.3×10^{-1}	*
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	89.3	83.3	0.1	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	89.3	87.6	0.5	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	83.9	83.3	0.8	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	83.9	87.6	0.1	
	経験長い・時間長い	経験長い・時間長い	経験長い・時間短い	経験長い・時間長い	83.3	87.6	0.1	

表-5 F値に関する分散分析の結果

	水準1		水準2		平均1	平均2	P 値	判定
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い				
F 値	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	80.0	82.0	0.3	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	80.0	80.7	0.7	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	80.0	78.9	0.5	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	82.0	80.7	0.5	
	経験浅い・時間長い	経験長い・時間長い	経験浅い・時間短い	経験長い・時間短い	82.0	78.9	0.1	
	経験長い・時間長い	経験長い・時間長い	経験長い・時間短い	経験長い・時間長い	80.7	78.9	0.4	

(2) 今後の課題

本研究ではひび割れの検出を行うシステムの可能性に関して検証を行った。橋梁点検経験者を対象とした実験を行った際、ヒアリング調査を行い、本システムにおける課題の把握を行ったところ、ひび割れ検出だけでなく損傷部の健全度の評価が必要であること、ひび割れ以外の損傷の判断が難しいことが課題として挙げられた。本システムの実用化を目指すにはひび割れ検出だけでは不十分であり、健全度評価も必須条件である。また、ひび割れの自動検出技術にも焦点を当て、損傷検出及び判定の自動化・半自動化を可能にするためのシステムの再構築も必要であると考えられる。

- /maintenance/02research/02_01.html
- 2) 一般社団法人次世代センサ協議会, 点検業務の IoT の利活用をめざして 自治体橋梁における橋梁点検業務実態調査報告書【課題・ニーズ調査編】, http://www.socialinfra.org/p_activity/questionnaire/Bridge_tenken_Digest.pdf
 - 3) 岡田佳都, 岡谷貴之: 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と実橋梁における点検性評価, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.2, pp.119-122, 2016
 - 4) 藤原保久, 梅津健司, 丹野浩二, 千葉嘉隆: 橋梁等構造物の点検ロボットカメラ, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.581-582, 2016
 - 5) 南貴大, 藤生慎, 高山純一, 須田信也, 奥村周也, 渡辺一生: 超高解像度カメラで撮影された画像を用いた橋梁点検の実施可能性に関する基礎的検討, 社会技術論文集, Vol.15, pp.54-64, 2018

参考文献

- 1) 国土交通省 インフラメンテナンス情報 社会資本の老朽化の現状と将来, <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku>

(2009.7.1 受付)

ANALYSIS OF INFLUENCE OF INSPECTION SKILLS ON DETECTION RESULT
OF BRIDGE CRACK DETECTION UNDER IMAGE VISUAL INSPECTION
ENVIRONMENT
~EXAMINATION USING CLUSTER ANALYSIS~

Wataru URATA, Takahiro MINAMI, Makoto FUJII, Tomotaka FUKUOKA,
and Junichi TAKAYAMA

The aging of many bridges constructed during the period of high economic growth is rapidly progressing. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism places importance on preventive maintenance of bridges and requires periodic inspections of all bridges. The proximity inspection, which is currently being performed, cannot be expected to be efficient due to budget and personnel issues, and various alternative systems have been studied. We propose an "image visual diagnosis system" that constructs an environment that is visually comparable to current inspections by using a camera, and that allows a person to diagnose cracks on images. In this study, we evaluated the effect of years of experience in bridge inspection on crack detection in visual inspection of images. In this study, the data on the crack detection results of the subjects were classified based on the years of experience and the time required for crack diagnosis from cluster analysis, and the effect of each cluster on the precision, recall, and F value was evaluated.