

橋梁の簡易的な点検手法の構築に向けた 部材間の損傷程度の関連性に関する基礎的分析

南 貴大¹・藤生 慎²・中山 晶一郎³・高山 純一⁴

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: takahoro1993@gmail.com

²正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

高度経済成長期に一斉に建設された橋梁が耐用年数を迎え、架け替えや長寿命化の検討がなされている。このような中、国土交通省は平成26年から、国が定める統一な基準により5年に1回の頻度で近接目視により点検を行うことを法令で定めており、地方自治体においても点検・診断・措置・記録というメンテナンスサイクルを確立することを目指している。しかし特に市区町村の自治体において財源や人材の不足から5年に1度の頻度で近接目視による点検を行うことが非常に困難な状況である。そのため本研究では、点検者の負担を軽減するために、大きな損傷が生じている橋梁をスクリーニングする手法の構築を目指す。本研究では過去に行われた橋梁の定期点検結果を用いて、損傷が生じる要因を環境条件、諸元、他部材の損傷の有無の視点で統計的に分析を行った。

Key Words : bridge, maintenance, regular inspection, association analysis, deterioration rate

1. はじめに

日本では高度成長期以降に建設された道路橋が、今後一斉に老朽化する。建設後50年以上経過する橋梁が平成25年では約18%であるが、10年後には約43%、20年後には約67%と加速度的に増加し、橋梁の高齢化が訪れることになる¹⁾。緊急的に整備された箇所や立地条件の厳し

い橋梁では老朽化が顕在化し、図-1に示すように地方公共団体管理橋梁では平成27年で約2300橋が通行規制を行っており、平成20年から7年間で約2.4倍に増加している²⁾。そのため一斉に老朽化する橋梁を戦略的に維持管理することが求められている。

このような中、重大な損傷が生じてから対策を講じる事後保全的な維持管理から損傷が軽微なうちに対策を講



図-1 地方公共団体管理橋梁の通行規制等の推移 (2m以上)²⁾

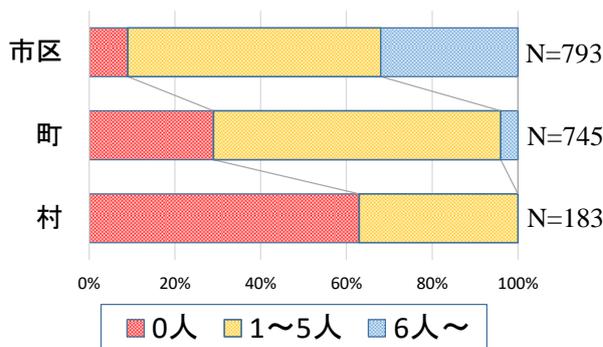


図-2 市区町村における橋梁保全業務に携わる土木技術者数²⁾

じて橋梁の健康寿命を延ばす予防保全的な維持管理に転換を図っている。予防的に対策を講じるためには定期的に橋梁を点検・診断し、橋梁の健康状態を把握する必要がある。そのため国土交通省は平成26年から、国が定める統一な基準により5年に1回の頻度で近接目視により点検を行うことを法令で定めており、各道路管理者の責任による点検・診断・措置・記録というメンテナンスサイクルを確立することを目指している。

しかし、5年に1度の近接目視点検には、橋梁保全に携わっている土木技術職員や点検委託会社が管理橋梁数に対して圧倒的に少ないことや、点検費用が高く修繕にお金を当てられないことなど、大きく財源の不足と人材の不足の二つの面で課題がある³⁾。特に市区町村においては、図-2に示すように、橋梁保全業務に携わる土木技術者が少なく、5年に1度の近接目視を行うことが非常に困難な状態である²⁾。

そのため本研究では、点検者の負担を軽減するために、大きな損傷が生じている橋梁をスクリーニングする手法の構築を目指す。本研究では、まず、過去に行われた橋梁の定期点検結果を用いて、損傷が生じる要因を明らかにすることを目的にした。具体的には環境条件、諸元、他部材の損傷の有無が損傷の発生に影響しているかについて統計的に分析を行った。どのような条件がそろくと重大な損傷が発生しやすいのかを明らかにすることで、詳細な点検をするべき橋梁のスクリーニング手法の構築の一助になる。

2. 既往研究の整理

これまでに橋梁定期点検結果を用いた研究は数多く行われているため、既往研究をまとめるとともに本研究の位置づけを行う。

過去の目視点検結果を用いた統計的な劣化予測モデルの構築は、橋梁群全体としてのマネジメント戦略や予算管理を検討する場合に必要であるため、多くの研究がなされている。

貝戸らは、NY市がここ9年間に実施した829橋梁に対する目視点検結果を用いて劣化速度に着目することで、過去の検査・補修等の情報が不十分な既存の構造物に対しても適応可能であることを示し、マルコフ過程による個別の橋梁の劣化予測を提案している⁴⁾。また劣化速度の過分散が施設グループ間における劣化速度の異質性と、グループを構成する個々の施設間における異質性という2つの異なる異質性が混合されることによって発生すると考え、階層的異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化し、そのベイズ推計法を提案している⁵⁾。

津田らは健全度間の推移過程を指数ハザードモデルを用いて表現することで構造特性や使用環境、検査状況が異なる異質な検査データを用いて劣化特性を非集計的に推定することを可能としている⁶⁾。また劣化予測モデルの推計精度を逐次改良するために新しく利用可能となった点検データに基づいてベイズ推計する方法論の提案も行っている⁷⁾。

小林らは健全度の測定結果に誤差が発生するメカニズムを隠れマルコフ劣化モデルを用いて表現できることを示し、真の健全度により定義されるマルコフモデルをマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションによりベイズ推計する方法論を提案している⁸⁾。また互いに双方の劣化過程に影響を及ぼすような複合的劣化過程を表現するために複合的マルコフ劣化モデルの開発を行い、さらに調査情報が同時に獲得できないという時間的不整合性の問題に関して、システム的なデータ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ劣化モデルの提案を行っている⁹⁾。

また本研究と同様に橋梁定期点検結果を用いて統計的分析から劣化要因の検討を行った研究もある。

玉越ら¹⁰⁾は、国が管理する全国の道路橋の定期点検結果を用いて、重回帰分析により環境条件や橋梁形式、適用基準など多岐にわたる属性との関連に着目して劣化に支配的な要因の抽出を行っている。

大竹ら¹¹⁾は、岐阜県が管理する鋼橋RC床版の点検結果を用いて主成分分析を行い、離散量として与えられた従来の健全度を連続量として評価し、算出した指標を目的変数、橋梁の台帳データベースに記載されている橋梁諸元や環境条件を説明変数とし線形重回帰分析を用いて影響因子の抽出を行っている。

大島ら¹²⁾は、橋梁の老朽化に影響する諸因子を解析し、数量化理論II類を用いて、それらと部材損傷との関係について検討を行い、各因子が部材損傷に影響する関係を把握している。

また著者ら¹³⁾も地方自治体の2期分の橋梁の定期点検結果を用いて劣化速度を算出し、GISを活用して橋梁台帳に記載されていない環境条件を把握し、数量化理論I類を用いて環境要因と橋梁の諸元（橋長、上部工材料、供用年数）が健全度に与える影響を分析している。分析結果によると、橋梁の諸元（橋長、上部工材料、供用年数）が劣化速度に大きな影響を与える要因であることが分かった。

以上のように、様々なデータ・方法を用いて、橋梁の劣化に影響を与える諸因子の分析は数多くなされている。しかし既往研究では、劣化要因を橋梁の諸元と環境条件の点で分析を行っているが、他部材の損傷の有無の影響を考慮していない。橋梁は様々な部材によって構成されており、少なからず影響を及ぼし合っていることが予想される。損傷の発生要因を環境条件、諸元に加え、他部

材の損傷の有無の3つの視点で統計的に分析を行った点が本研究の新規性である。他部材との損傷の関係性を明らかにすることで、重点的に点検すべき部材の選定を行うことができ、橋梁の点検の簡易化・効率化を図ることができると考えている。

3. 使用データ

橋梁定期点検は、道路橋の各部材の状態を把握、診断し、当該道路橋に維持や補修・補強等の必要な措置を特定するために必要な情報を得るためのものであり、安全で円滑な交通の確保、沿道や第三者への被害の防止を図るなどの橋梁に係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施されている。橋梁定期点検では、損傷状況の把握及び対策区分の判定を行い、これらに基づき部材単位での健全性の診断及び道路橋毎の健全性の診断を行い、これらの結果の記録を行う。本研究では、様々な部材に対して損傷種類別に細かく評価された点検結果が十分に蓄積されている横浜市が管理する橋梁の定期点検結果を使用データとした。

(1) 横浜市における橋梁の定期点検の概要

横浜市では平成12年度に「公共施設の長寿命化」の基本方針を定め、横浜市独自の定期点検要領を策定した。平成14年度から、この定期点検要領を基に定期点検を開始し、平成19年度までにすべての橋梁の点検を終えている。また5年に1度の頻度で定期点検を実施するために、毎年5分の1を目安に点検を行っている。定期点検は径間ごとに、橋面工（舗装、伸縮装置、高欄・防護柵・地覆、付属物）、上部工（コンクリート床版、鋼床版、コンクリート桁、鋼桁）、下部工、基礎、支承、落橋防止、その他、など合計27種類の点検対象部材について、それぞれの損傷状況に応じて損傷度が健全なものから順に、損傷なし、「a」、「b」、「c」、「d」、「e」で評価されている。また判定できないものは「判定不可」、部材がないものに関しては「部材なし」と判定されている。また損傷の規模については、「大」、「中」、「小」、「無」と評価されている。

(2) 分析対象橋梁

本研究では横浜市が管理する鋼橋1103径間対象にした。対象部材としては、点検が困難である鋼支承、ゴム支承、下部工の3つの部材とした。

鋼支承は腐食、亀裂、破断、変形・欠損、沈下・移動・傾斜についての損傷を点検対象としている。ゴム支承は亀裂、破断、変色・劣化、変形・欠損についての損傷を点検対象としている。鋼支承もゴム支承も4段階で

評価されており、最も健全なものから、損傷なし、損傷c（損傷が生じている）、損傷度d（支承機能に障害あり）、損傷度e（通行車両に支障）と評価されている。

下部工についてはひび割れ・遊離石灰による損傷を対象とした。下部工のひび割れ・遊離石灰は6段階で評価されており、最も健全なものから、損傷なし、損傷度a（遊離石灰を伴わない幅0.2mm未満）、損傷度b（遊離石灰を伴わない幅0.2mm以上～0.3mm未満）、損傷度c（遊離石灰を伴う幅0.3mm以上）、損傷度d（錆汁を伴う幅0.3mm以上）、損傷度e（著しい損傷が生じている）と評価されている。

最新の点検結果において各部材の損傷状況について図-3に示す。損傷c以上の判定された割合が鋼支承では約30%、ゴム支承では約12%であり、鋼支承はゴム支承に比べ損傷しやすいことが分かる。また下部工は6段階で評価していることから損傷なしと判定されている割合が他の部材に比べ低いことが分かる。予防保全的な維持管理を行うためには損傷度dや損傷度eの損傷が生じる前に対策をする必要があると考えたため、本研究ではそれぞれの部材において損傷cの損傷が発生する要因について分析を行う。

(3) 分析データセットの作成

本研究では鋼支承、ゴム支承、下部工の部材において損傷度cの損傷が発生する要因を環境条件、諸元、他部材の損傷の有無の視点で分析する。

本研究では、環境条件については、飛来塩分の影響の指標として海岸線からの距離、交通量の影響指標として幅員（交通容量）を考慮した。海岸線からの距離についてはGISを用いて海岸線からの直線距離を算出し、海岸線からの距離が1km未満、1km～3km、3km以上の3水準に各橋梁を分類した。また幅員については橋梁台帳に記載されているものを用いて、幅員4.5m以下、幅員4.5～18m、幅員18m以上の3水準に各橋梁を分類した。

諸元については、供用年数、支間長、交差物を考慮した。供用年数は橋梁定期点検データに記載されている架設年次から点検年までの年数を用いて、供用年数20年未

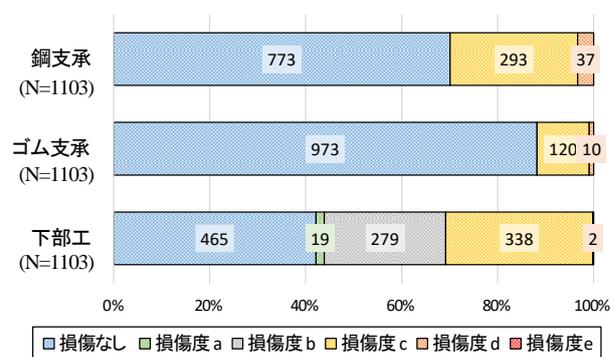


図-3 最新点検結果における損傷状況

表-1 分析データセットの一例

橋梁ID	損傷データ(定期点検結果)							環境条件データ			橋梁の諸元			
	舗装路面凹凸	伸縮装置遊間異常	高欄変形・欠損	鋼支承損傷度c	ゴム支承損傷度c	下部工損傷度c	.....	海岸線からの距離	幅員18m以上	.....	供用年数50年以上	支間長20m以下	河川(交差物)	.....
A	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
B	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
C	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
D	0	0	1	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
E	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
F	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
G	0	1	0	1	0	0	.....	0	0	.....	1	0	1	.....
H	0	1	0	1	1	0	.....	1	0	.....	1	0	1	.....
I	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	1	0	1	.....
J	1	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
K	0	1	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
L	1	0	0	0	0	1	.....	0	1	.....	0	0	0	.....
M	0	0	0	0	0	0	.....	0	1	.....	0	0	0	.....
N	0	0	0	0	1	0	.....	0	1	.....	0	0	0	.....
O	1	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
P	1	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	1	0	.....
Q	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	1	0	.....
R	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	1	0	.....
S	0	0	1	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
T	0	0	1	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
U	0	0	1	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....
V	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	.....	0	0	0	.....

満, 20~50年, 50年以上の3水準に各橋梁を分類した。本研究では径間ごとで分析を行っているため, 橋長ではなく支間長を考慮しており, 支間長20m未満, 20~50m, 50m以上の3分類で各橋梁を分類した。また交差物については橋梁定期点検データに記載されているものを用いて, 河川, 道路, 鉄道, 高速道路の4つに分類した。

他部材の損傷については, 横浜市が行っている定期点検時に対象となる27部材の損傷を考慮した。

これらのデータを基に作成した分析データセットの一例を表-1に示す。行は径間のIDを, 列は考慮した環境条件, 諸元, 他部材の損傷の有無について表しており, それぞれ1, 0のデータで入力を行った。

4. 分析手法

本研究では橋梁の価値のある相関ルールを抽出するデータマイニング手法であるアソシエーション分析を橋梁の定期点検結果に適用した。アソシエーション分析とはデータに潜む要素同士の相関をルールの形で抽出する手法である。アソシエーションルールは, $\{A \rightarrow B\}$ の形式で表現され, Aを条件部, Bを結論部と呼ぶ。ルールの重要性を表す評価指標に基づき, 閾値などの形で指標の条件を分析者が指定することによって, 条件を満たすルールを抽出する。本研究では, 以下に示す評価指標である, 支持度, 確信度, リフト値を用いてアソシエーションルールを抽出した。

$$\text{支持度} = \frac{N(A \cap B)}{N(\text{全データ数})} \quad (1)$$

$$\text{確信度} = \frac{N(A \cap B)}{N(A)} \quad (2)$$

$$\text{リフト値} = \frac{\text{確信度}}{P(B)} \quad (3)$$

一般的に, この3つの指標を用いてアソシエーションルールを抽出することが多いが, これらがそれぞれの程度の値を満たせば, 重要なルールであると判断できるのかという明確な基準はない¹⁴⁾。そのため本研究では, 支持度 ≥ 0.01 , 確信度 ≥ 0.30 , リフト値 ≥ 1.00 , としてアソシエーションルールの抽出を行った。ただしこの閾値の妥当性についての検討については今後の課題とする。

本研究では鋼支承, ゴム支承, 下部工の損傷に対してどのような要因が関連しているのかを把握することが目的であるため, 結論部を固定してアソシエーションルールの抽出を行うクラスアソシエーション分析を用いた。

5 分析結果

クラスアソシエーション分析を第3章の作成した分析データセットに適用し, 鋼支承, ゴム支承, 下部工の損傷が生じる要因について分析を行った。また伊藤ら¹⁴⁾¹⁵⁾の手法を参考にアソシエーションルールの階層的可視化を行った。本研究では階層的可視化において, 他部材の損傷による影響を緑色のハッチ, 環境要因による影響を赤色のハッチ, 諸元による影響を青色のハッチで視覚化した。以下に各部材の分析結果について示す。

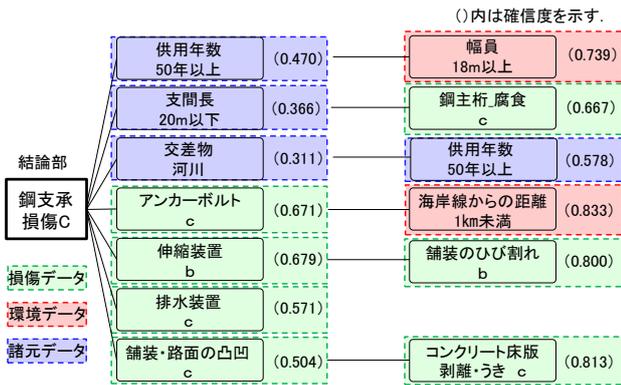


図-4 結論部が「鋼支承の損傷度c」におけるルール

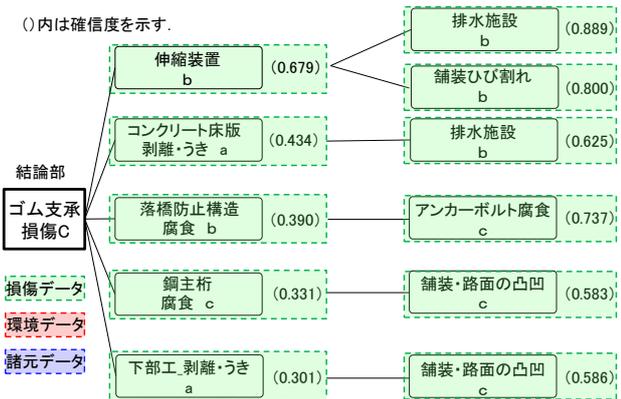


図-5 結論部が「ゴム支承の損傷度c」におけるルール

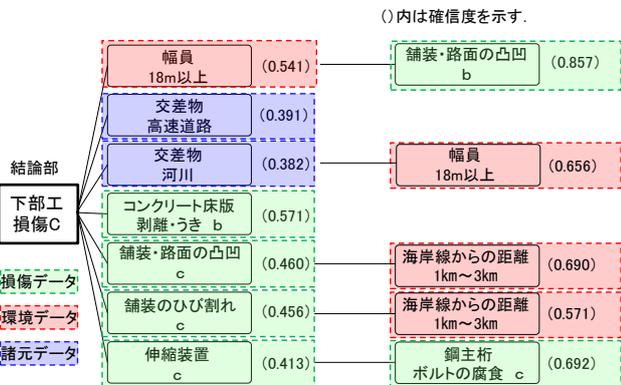


図-6 結論部が「下部工の損傷度c」におけるルール

a) 結論部が「鋼支承の損傷度c」におけるルール

結論部「鋼支承の損傷度c」におけるアソシエーション分析結果の階層的可視化を図-4に示す。伸縮装置の損傷が発生している場合、約68%の確率で鋼支承の損傷が発生していることが分かる。鋼支承の損傷が発生している可能性が高いことが分かる。伸縮装置に損傷が発生していた場合、そこから雨水が侵入して桁端部に滞水し、鋼支承に腐食が生じる可能性があるためであると考えられる。

b) 結論部が「ゴム支承の損傷度c」におけるルール

結論部「ゴム支承の損傷度c」におけるアソシエーション分析結果の階層的可視化を図-5に示す。伸縮装置が損傷している場合には約68%の確率で、伸縮装置と排水装置が損傷している場合、約89%の確率でゴム支承の損傷が発生していることが分かる。これは鋼支承の場合と同じメカニズムが考えられる。またゴム支承の損傷は環境や諸元とは関連性がなく、他の部材が損傷することによって、損傷することが多いことが分かる。

c) 結論部が「下部工の損傷度c」におけるルール

結論部「下部工の損傷度c」におけるアソシエーション分析結果の階層的可視化を図-6に示す。下部工の損傷に関連する要因について表したものである。下部工の損傷は「交通容量」、「舗装の損傷」、「床版の損傷」との関連性が多く、交通量が関係している可能性がある。また高速道路や河川と交差している場合、下部工の損傷が発生する可能性が高いことが分かる。これはメンテナンス困難であること、近接が困難であるため遠隔目視点検を行ってきたが、初めて近接目視点検を行ったことで損傷を把握可能になったことが原因として考えられる。

6 まとめと今後の課題

本研究では、橋梁の予防保全的な維持管理を行う上で必要となる定期点検結果を用いて、損傷が発生する要因について環境条件、諸元、他部材の損傷の3つの視点から考慮したアソシエーション分析によって明らかにした。横浜市の橋梁定期点検結果を用いて、桁下にある近接目視点検が困難な部材である鋼支承、ゴム支承、下部工の損傷を対象に分析を行った。

鋼支承やゴム支承の場合、伸縮装置の損傷や排水装置の損傷の有無が大きく影響していることが分かった。排水施設が損傷による桁端部への雨水の侵入が関連性が高い理由として考えられる。

下部工においては路面の変状や幅員（交通容量）と関連性が高く、下部工の損傷は交通容量に関係している可能性が高いことが考えられる。

また、どの部材においても他部材の損傷が関連しており、特にゴム支承においては環境条件や諸元の影響は受けにくく、他部材の損傷が生じることで、損傷が発生する確率が高いことが分かった。そのため、比較的点検が簡易な伸縮装置や排水施設、舗装の状態などを把握することで、点検が困難な桁下の部材の状態をある程度把握することができる可能性について示唆された。

本研究では環境条件について、海岸線からの距離と交通容量の2要因を、諸元については供用年数、支間長、交差物の3要因について考慮しているが、他の要因も考

えられる。また各要因について分析上3水準に分類しているが、根拠に基づいた水準分けを行っていない。今後水準のパターンをいくつか設定し、適切な水準の決定が必要である。

アソシエーション分析を行う際に、支持度、確信度、リフト値について閾値を恣意的に設定したが、閾値の妥当性については検証していない。今後閾値を変動させることで、閾値の妥当性の検証を行う必要がある。

今後、定期点検結果が蓄積されることで、よりアソシエーションルールが精緻なものとなり、点検の簡易化・効率化の一助になることが期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり貴重な橋梁に関するデータをご提供していただきました横浜市道路局建設部橋梁課の皆様ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通白書 H28 第 II 部 第 2 章 第 2 節, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h28/hakusho/h29/pdf/np202000.pdf> (2017年7月17日閲覧)
- 2) 国土交通省 老朽化の現状・老朽化対策の課題, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf> (2017年7月17日閲覧)
- 3) 一般社団法人次世代センサ協議会, 点検業務のIoTの活用をめざして 自治体橋梁における橋梁点検業務実態調査報告書【課題・ニーズ調査偏】, http://www.socialinfra.org/p_activity/questionnaire/Bridge_tenken_Digest.pdf, 2017年7月19日閲覧
- 4) 貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No. 744, pp. 29-38, 2003.
- 5) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 4, pp.255-271, 2012.
- 6) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No. 801, I-73, pp69-82, 2005
- 7) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法: 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, PP473-491, 2006
- 8) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2008.9
- 9) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Nguyen Dinh THAO, 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.2, pp63-80, 2015
- 10) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集, Vol. 25, pp. 167-180, 2014.
- 11) 大竹雄, 流石堯, 小林孝一, 本城勇介: 橋梁点検データベースの統計解析に基づく劣化機構を考慮した鋼橋 RC 床版の健全度評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 3, pp. 683-695, 2012.
- 12) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No. 675, pp. 201-217, 2001
- 13) 南貴大, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一, 近田康夫: 環境要因が橋梁の健全度に与える影響の分析—石川県の橋梁定期点検データを用いて—, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.5, pp251-260, 2016
- 14) 伊藤晃, 吉川大弘, 古橋武, 池田龍二, 加藤孝浩: アソシエーション分析における可視化を用いた興味深いルールの探索, セッション ID: TD2-1
- 15) 伊藤晃, 吉川大弘, 古橋武, 光松 佐和子: 階層的可視化手法を用いたアソシエーション分析によるプロファイリング, 日本感性工学会論文誌 Vol. 10, No. 2 P 205-212, 2010

)

ASSOCIATION ANALYSIS OF BRIDGE COMPONENTS CONSIDERING DAMAGE DEGREE USING BRIDGE INSPECTION DATA

Takahiro MINAMI, Makoto FUJII, Shoichiro NAKAYAMA, Jyunichi TAKAYAMA