

地域アセットマネジメントへの簡易手法の適用 に関する一考察

大窪 和明¹・全 邦釘²・浅本 晋吾³・岡崎 慎一郎⁴

¹非会員 愛媛大学 防災情報研究センター (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3)
E-mail: okubo@cee.ehime-u.ac.jp

²非会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

³非会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒 338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

⁴非会員 香川大学大学院 工学研究科 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

本研究では、雨水による橋梁の汚れや土砂による排水溝、伸縮装置の詰まりなど、地域住民が日常的に観察可能な要因が、橋梁の健全度にもたらす影響を明らかにする。はじめに、橋体、舗装などの汚れや土砂の堆積に関する調査表を作成し、愛媛県宇和島市に存在する橋梁 195 橋を調査した。次に、調査結果と専門家によって作成された点検調書に記載された健全度を用いて傾向スコア法による分析を行い、橋梁の汚れが橋梁や部材の健全度にもたらす影響を定量的に評価した。その結果、橋台・橋脚の接続部分における雨水の汚れが目立つ橋梁ほど、全体の判定区分が比較的、高く、劣化が進んでいることが確認された。また、橋梁の全体の判定区分で見ると影響が少なかった要因（地覆の雨水による汚れや、伸縮装置における土砂の詰まり）でも、部材ごとに見ると影響は大きいことがわかった。特に、伸縮装置の詰まりが床版や主桁の判定区分にもたらす影響が大きく、地域住民が関心を持つ上で重要な項目となりうる可能性が示唆された。

Key Words : regional asset management, propensity score analysis, simple inspection method

1. はじめに

これまでの経済成長や人口増加に支えられて建設されてきた膨大な社会インフラを、今後も維持・管理していくためには膨大な金銭的および人的な資源が必要である。橋梁は日本全国に約 73 万橋存在し、その多くが高度経済成長期に建設されたものであり、既に多くの橋梁が橋齢 50 年を越えようとしている。今後、それらの橋梁の老朽化が進み、多くの橋梁において補修が必要になることが予想される。また、老朽化による事故を防ぐために、2014 年より、橋梁 2m 以上の橋梁について 5 年に 1 度の近接目視点検が義務化されている。こうした点検・補修費用には莫大な費用が必要になることが予想され、効率的な維持・管理施策が議論されているものの²⁾³⁾⁴⁾、使用できる予算に限りのある橋梁管理者が把握できる橋梁の状態や実施可能な対策には限界がある。

そこで、橋梁管理者のみが橋梁の状態を把握するのではなく、橋梁を日常的に利用する地域住民が、その状態に関心を持つことによって、異常を早期に発見し、管理者に連絡することによって、老朽化に伴う重大な事故の防止に貢献できるような地域アセットマネジメントの必要性が高まっている。しかし、橋梁の状態を把握する上では、専門家による専門的な判断によるもの

が多い中で、専門的な知識を持たない地域住民が、橋梁のどのような点に関心を持つべきかは、明らかにされていない。関心を持つべき項目としては、専門的な知識を持たない者でも、日常的に観測でき、かつ橋梁の安全性（耐荷力や健全度など）と密接に関連した部分が相応しいと考える。

片岡⁵⁾は、専門的な知識を持たない者でも、日常的に確認できる橋梁の雨水による汚れや雑草の繁茂などを点検項目として取り上げた橋梁管理の簡易手法を提案している。その中で、目視でも観測可能な橋梁の汚れ（清掃ランク）と劣化ランクに関する複数の評価項目を提案し、専門的な知識を持たない者による評価結果と、専門家による評価結果との間に高い相関が見られることを示している。さらに、香川県三木町におけるケーススタディを通じて、地覆の雨水による汚れ、伸縮装置の詰まり、橋台・橋脚の雨水による汚れが劣化の要因となり得ると述べている。また、劣化している（劣化ランクが高い）と判断された橋梁の中で、汚れていない橋梁は確認されなかった。

片岡において提案された評価項目は、専門的な知識を持たない者でも容易に確認することができるため、地域住民に関心を持ってもらう項目として望ましいといえる。また、土砂の詰まりや雑草の繁茂といった汚れは、地域住民の清掃活動によって取り除くことは十分

可能である。そのため、こうした汚れが橋梁の劣化に影響をもたらすことが明らかになれば、清掃活動を実施することによって、橋梁の劣化を遅らせる効果が期待できる。しかし、現在、多くの橋梁管理者によって作成されている点検調書に記載された点検結果との関係性については議論されていない。全国各地に蓄積されている点検調書と、簡易手法から得られた調査結果との関連性を議論することによって、今後、多くの地域において、簡易手法を用いた地域アセットマネジメントの検討がなされやすくなるものと思われる。

そこで本研究では、愛媛県宇和島市の橋梁を対象に住民が日常的に観察可能な橋梁の汚れについて調査するとともに、これらの評価結果と、点検調書に記載された橋梁や部材の健全度との関係性を明らかにする。具体的には、片岡によって提案された評価項目を用いて、雨水や雑草の繁茂といった橋梁の汚れを評価する。さらに、傾向スコアを用いて、橋梁の汚れが橋梁の判定区分や部材の健全度にもたらす影響を定量的に把握する。

2. 調査概要

(1) 調査対象

本調査は2017年8月28日から9月1日にかけて愛媛県宇和島市に存在する、195橋の橋梁を調査した(図-2)。土木工学科4年生程度の知識を持つ評価者が、現地において実際の橋梁を観察し、表-1に示す評価項目に従って橋梁の汚れの程度を評価した。評価項目は、既存研究⁵⁾にならない橋体、舗装、地覆、高欄、伸縮装置、支承、橋台・橋脚の7項目について、雨水による汚れや土砂の堆積、雑草の繁茂について、全く汚れていない、少し汚れている、かなり汚れているといった汚れの程度に応じて3段階で評価した。これらの評価項目を調査するための調査時間として、橋長5m程度の橋梁1橋当たり約10分程度の点検時間を要した。

(2) 調査結果

表-1には、調査結果の内、全く汚れていないものを10点、少し汚れているものを5点、かなり汚れているものを0点としたときの評価項目ごとの平均点、標準偏差、標本数をそれぞれ示す。

表-1の評価項目の中で、平均点が最も低かったのは、c)地覆の雨水による汚れの平均値5.13であり、次に、e)伸縮装置の詰まり、土砂の堆積(平均値5.18)、g)接続部分の雨水による汚れの程度(5.49)となっており、汚れが目立つ橋梁が多いことが確認できる。逆に、評価項目の平均値が高いb-2)舗装における排水溝の詰まり、雑草の繁茂、f)支承における土砂の堆積については、比較的、多くの橋梁において、汚れていなかったことが

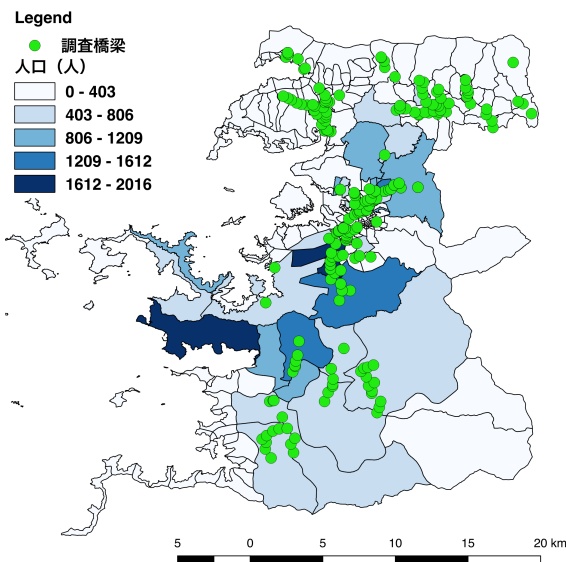


図-1 調査対象(愛媛県宇和島市)

確認できる。

3. 分析方法

(1) 使用データ

本章では、前章で述べた調査結果と、専門家による近接目視点検結果との関連性について分析するための方法について述べる。具体的には、今回の調査で得られた橋梁の汚れが、宇和島市や愛媛県などの橋梁管理者によって作成された点検調書に記載されている橋梁の判定区分や部材ごとの判定区分(健全度)に、与える影響を調べる。今回の調査対象となった橋梁の中で、平成26年度、27年度までに点検結果が把握できたのは189橋であった。橋梁の判定区分および部材ごとの健全度は、国土交通省道路局が2014年に発行した道路橋定期点検容量にしたがって評価されたI~IVの4段階で評価される判定区分を健全度の指標として用いた。

橋梁の架設年度や橋長などのデータも点検調書から得られるデータを用いた。今回の調査の対象となった橋梁の架設年度の分布を図-2に示す。この図から、多くの橋梁が1960年代から1970年代に建設されており、2017年現在で橋齢が50年程度の橋梁が多いといえる。最も古い橋梁は1930年度に架設されたものであり、最新の橋梁の架設年度は2012年度である。

各橋梁が存在する地域の年降水量や平均気温などの気象条件は、国土交通省によって提供されている国土数値情報ダウンロードサービスを利用し、点検調書に記載された橋梁の位置情報を下に算出した。また、橋梁の周辺の人口を把握するために、総務省が公表してい

表-1 評価項目の一覧

箇所	評価項目	平均値	標準偏差	標本数
橋体	a-1) 排水管の周りの雨水による汚れ	6.92	2.88	154
	a-2) 接続部分の雨水による汚れ	6.27	2.61	204
舗装	b-1) 路肩の土砂の堆積	6.28	3.41	210
	b-2) 排水溝の詰まり, 雑草の繁茂	7.96	2.57	152
地覆	c) 地覆の雨水による汚れ	5.13	2.80	204
高欄	d-1) 鉄筋の露出の程度 (RC)	7.81	3.64	53
	d-2) コンクリートの剥離・剥落 (RC)	6.01	3.92	53
	d-3) 変状の程度 (鋼)	6.26	2.55	174
	d-4) 脱落・破断の程度 (鋼)	8.41	2.82	175
伸縮装置	e) 伸縮装置の詰まり, 土砂の堆積	5.18	3.18	154
支承	f) 支承の土砂の堆積の程度	7.90	2.96	124
橋台・橋脚	g) 接続部分の雨水による汚れ	5.49	2.94	201

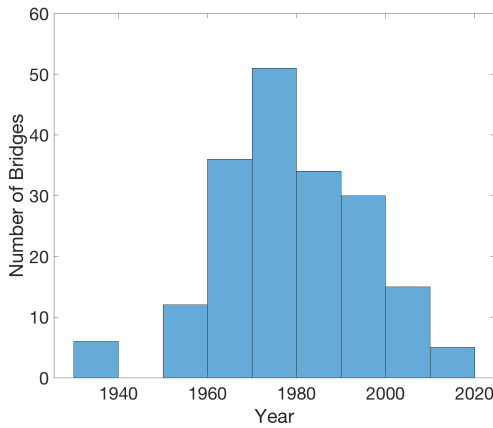


図-2 架設年度の分布

る地域メッシュ統計から、平成 27 年度の国勢調査に基づく小地域区分での人口を用いた。標高データは、国土交通省国土地理院の提供している地理院マップシートから橋梁ごとの標高を求めた。

(2) 傾向スコア法

本研究では、橋梁の汚れが橋梁や部材の健全度にもたらす影響について傾向スコアを用いて評価する。傾向スコアは、無作為割付が不可能な観察研究において、因果効果を適切に推定する方法として、Rosenbaum & Rubin⁶⁾によって提案された概念であり、これまで臨床医学や疫学を中心に多くの解析において用いられてきた。独立変数 (eg. 橋齢, 年降水量など) が従属変数 (eg. 判定区分, 健全度) にもたらす影響を調べる場合には、従属変数に影響を与える共変量 (eg. 橋梁の汚れなど) の分布が独立変数の値によって異なる可能性が

ある。ここでは、橋梁の汚れが橋梁の判定区分にもたらす影響を調べる際に、観測された橋梁の汚れの程度は既に判定区分に影響を与えてきたと考え、観測者によって操作できない変数であると考え。そこで、橋梁の汚れが「目立つ」橋梁群と「目立たない」橋梁群に分けて、判定区分の差異を調べる。しかし、橋梁の汚れにも判定区分にも関係すると考えられる橋齢や年降水量といった共変量の影響が除去されないために、橋梁の汚れが判定区分にもたらす単独の効果を知ることができない。傾向スコアは、そういった共変量の影響を除去して、因果関係を推定することが可能であり、ここでは Rosenbaum and Rubin による定義に基づき、次のように定義する。

定義：傾向スコア (Rosenbaum and Rubin) 橋梁 i の共変量ベクトルを \mathbf{x}_i 、割付変数の値を z_i とするとき、「汚れが目立つ」橋梁群に割り付けられる確率を、

$$e_i = p(z_i = 1 | \mathbf{x}_i) \quad (1)$$

と表し、 e_i を傾向スコアと呼ぶ。

ただし、割付変数 z_i は、汚れが目立つ橋梁群に割り付けられた場合には $z_i = 1$ 、それ以外の場合には $z_i = 0$ をとる変数である。また共変量の数を K としたときに、共変量ベクトル \mathbf{x}_i は $K \times 1$ の行ベクトルである。

本研究では、傾向スコアの算出には、次のようなロジットモデルを用い、最尤法によって傾向スコアのパラメータベクトル β を推定する。

$$e_i = \frac{1}{1 + \exp(-\beta^T \mathbf{x}_i)} \quad (2)$$

ただし、 β^T の T は転置行列を表す。算出した傾向スコ

アを用いて、橋梁の汚れが判定区分にもたらす影響を調べる際に、本研究では、マッチングを用いる。マッチングは、2つの群のそれぞれから、算出した傾向スコアが等しいと見なせる橋梁をペアにして、それらの差の平均を因果効果の推定値とする方法である。ここでは、傾向スコアの取りうる範囲を20区間に分割し、各区間に該当する標本を、それぞれの群から求め、平均を比較する方法をとり、期待値オペレータ $E()$ を用いて

$$E(y_1) - E(y_0) = E_e[(E(y_1|e, z=1)) - E(y_0(y_1|e, z=0))] \quad (3)$$

に従って因果効果を推定する。すなわち、傾向スコア e を与件として、同じ区間に割り振られた標本に対して、各群から得られた判定区分 y_1, y_0 から $y_1 - y_0$ を計算し、それを傾向スコアの分布で期待値をとったものを因果効果として考える。

4. 橋梁の汚れが全体の判定区分にもたらす影響

前章で述べた傾向スコア法を用いて、橋梁の汚れが橋梁全体の判定区分にもたらす影響を明らかにする。ここでは、割付変数を設定する評価項目について、表-1の結果から平均値の低かった（汚れが目立った）評価項目として、c) 地覆の雨水による汚れ、e) 伸縮装置の詰まり、土砂の堆積、g) 橋台・橋脚の接続部分の雨水による汚れの程度のそれぞれについて割付変数を設定し、傾向スコアを求める。

各評価項目は3段階で評価され、ほとんど汚れが見られないものを10点、汚れているものを5点、汚れが目立つものを0点とした。今回は評価点が0以上5以下のものを汚れが目立つ橋梁群1として割付変数 $z_i = 1$ を設定し、評価点が5より大きく1以下のものを汚れが目立たない橋梁群0として割付変数 $z_i = 0$ を設定し、式(2)を用いて、評価項目c), e), g)のそれぞれの割当変数について傾向スコアを推定した。割付変数、独立変数および推定結果を表-2に示す。説明変数には、架設年度、年降水量、標高、橋梁が属する小地域の人口、橋体における接続部分の雨水による汚れを用いた。これら3つの割付変数の傾向スコアを推定する際に、接続部分の雨水による汚れは有意であり、かつ負の係数であるため、この値が大きい（雨水による汚れが確認できない）ほど、汚れが目立つ橋梁群1に含まれる確率が下がることを意味している。また、地覆の雨水による汚れについては、年降水量が多く、標高が高い橋梁ほど汚れが目立つ橋梁群に含まれる確率が高まることを意味している。一方、伸縮装置の詰まりや橋台・橋脚における接続部分の雨水による汚れは、架設年度の

係数が負であるため、架設年度が新しくなるほど（橋齢が若くなるほど）、汚れが目立つ橋梁群に含まれにくくなることを意味している。

表-2から得られた傾向スコアを下に、マッチングを行い、式(3)に従って算出した因果効果を表-2の最後の行に示す。ただし、I-IVで評価されている判定区分を、1-4に置き換えた値で、式(3)の期待値を算出している。地覆が汚れていることによる判定区分の増加は、-0.014であり、汚れが見られる橋梁は0.014だけ判定区分が低いというように解釈することができる。地覆の汚れや伸縮装置の土砂の詰まりは、判定区分にほとんど影響をもたらしていないことが確認できる。しかし、一方では、橋台・橋脚の接続部分に見られる雨水による汚れが目立つ橋梁は、期待値で0.15ほど判定区分が高いことがわかった。

5. 橋梁の汚れが部材の判定区分にもたらす影響

(1) 対象とする部材の選定

ここでは橋梁全体の総合的な判定区分に大きな影響を与えそうな部材を選定し、雨水や土砂の堆積が判定区分に与える影響を明らかにする。点検調書が得られた189橋の内、判定区分がIIIであった橋梁は全部で50橋あった。この50橋について、各部材ごとの判定区分の平均値をとったものを表-3に示す。

表-3には、健全度について高い平均値をとった（劣化が進行している）上位5種類の部材の名称、判定区分の平均値および判定区分が記載されている標本数（平均値を計算する際の対象になった標本数）を示す。この表において、最も平均値が高いのは排水装置であったが、標本数1であり、判定区分IIIの橋梁において排水装置の判定区分がIIIであった橋梁は1橋しかない。したがって標本数が十分な数が得られていないと判断し、分析対象から除外した。同様の理由で塗装の健全度最後の分析対象から除外し、主要なものとして床版、主桁の2種類の部材について、汚れが健全度にもたらす影響明らかにする。

(2) 橋梁の汚れが床版の判定区分にもたらす影響

判定区分が記載されていても、部材によっては健全度が記載されていない場合もあるので、床版、主桁のそれぞれに対して(2)を用いて傾向スコアを推定し、表-4にその推定結果を示す。床版の推定結果から、人口が大きい地域ほど地覆における雨水による汚れが目立つ橋梁群に含まれる確率が下がる。また、標高が高いほど伸縮装置に土砂が詰まりやすくなる傾向にあることが確認できる。

表-2 推定結果 (全体の判定区分)

変数名			
割付変数	c) 地覆	e) 伸縮装置	g) 橋台・橋脚
定数項	17.87 (0.69)	71.64 (2.35)**	77.05 (2.81)***
架設年度	-0.01 (-0.78)	-0.037 (-2.35)**	-0.039 (-2.759)***
年降水量	0.00032 (2.35)**	0.00029 (1.82)*	0.00020 (1.46)
標高	0.013 (2.44)**	0.011 (2.21)**	0.0063 (1.71)*
人口 (小地域)	-0.0011 (-2.92)***	0.00045 (0.80)	0.00065 (1.27)
接続部分の雨水 による汚れ (橋体)	-0.24 (-2.90)***	-0.36 (-3.69)***	-0.41 (-4.65)***
McFadden の決定係数	0.20	0.27	0.28
因果効果	-0.014	0.0025	0.15

有意水準 : 0.001***, 0.01**, 0.05*

表-3 部材ごとの判定区分の平均値 (総合的な判定区分が III の橋梁のみを抽出)

部材名称	平均値	標本数
排水装置	3.00	1
床版	2.57	14
塗装	2.50	4
主桁	2.31	13
躯体 (下部構造)	2.16	13

これらの推定結果から、因果効果を推定した結果が、表-5である。地覆における雨水の汚れが床版の判定区分に与える影響は小さい(0.038)ものの、伸縮装置がもたらす影響は0.58と大きく、伸縮装置に詰まりがある場合には、0.54程度、床版の判定区分が上昇することが明らかになった。この理由の一つとして、伸縮装置に詰まりが発生することによって、伸縮装置の本来の機能を発揮しなくなったことによって、劣化が進んだことが挙げられる。

(3) 橋梁の汚れが主桁の判定区分にもたらす影響

表-4から、主桁の判定区分が点検調書に記載されている橋梁だけについて見ても、人口が大きい地域ほど地覆における雨水による汚れが目立つ橋梁群に含まれる確率が下がり、標高が高いほど伸縮装置に土砂が詰まりやすくなる傾向にある。すなわち、床版の推定結

果における推定結果と定性的には整合的な推定結果が得られた。

地覆、伸縮装置の汚れが主桁の判定区分にもたらす因果効果を推定した結果を、表-5に示す。ここでは地覆における雨水の汚れが目立つ橋梁群では、判定区分が0.26ほど高く、伸縮装置について見ても0.58と大きいことが明らかになった。

6. まとめ

本研究では、愛媛県宇和島市を対象に、雨水による橋梁の汚れや土砂による排水溝、伸縮装置の詰まりなど、地域住民が日常的に観察可能な要因が、橋梁の健全度にもたらす影響を明らかにした。その結果、橋台・橋脚の接続部分における雨水の汚れが目立つ橋梁ほど、全体の判定区分が比較的、高く、劣化が進んでいることが確認された。また、橋梁の全体の判定区分で見ると影響が少なかった要因(地覆の雨水による汚れや、伸縮装置における土砂の詰まり)でも、部材ごとに見ると影響は大きいことがわかった。特に、伸縮装置の詰まりが床版や主桁の判定区分にもたらす影響は大きく、詰まりが目立つ橋梁群では床版の判定区分が0.54だけ上昇している。

以上から、地覆の雨水による汚れ、伸縮装置における土砂の詰まりが目立つ橋梁においては、床版または主桁が劣化している可能性が高いものと考えられる。これらの評価項目を日常的に観察することは、専門的な

表-4 推定結果 (床版, 主桁の傾向スコア)

変数	床版		主桁	
	c) 地覆	e) 伸縮装置	c) 地覆	e) 伸縮装置
定数項	-2.58 (-0.19)	49.95 (1.31)	-0.0060 (-0.17)	49.30 (0.86)
架設年度	-0.0010 (-0.15)	-0.022 (-1.05)	0.0046 (0.26)	-0.024 (-0.80)
年降水量	0.00038 (1.37)	0.00022 (-0.68)	-0.000039 (-0.14)	0.00023 (0.54)
標高	0.012 (1.96)*	0.013 (1.99)**	0.053 (1.61)	0.017 (2.04)**
人口 (小地域)	-0.0012 (-2.22)**	0.001 (1.35)	-0.0016 (-2.76)***	0.0012 (1.51)
橋体の接続部分の 雨水による汚れ	-0.15 (-1.11)	-0.44 (-2.53)**	-0.24 (-1.70)*	-0.69 (-3.71)***
McFadden の決定係数	0.21	0.32	0.35	0.48

有意水準 : 0.001'***', 0.01'***', 0.05'*'

表-5 推定結果

割付変数	c) 地覆	e) 伸縮装置
床版	0.038	0.54
主桁	0.26	0.43

- 5) 片岡洋輝：目視による橋梁管理の簡易手法に関する研究, 香川大学大学院工学研究科修士論文, 2017.
- 6) Rosenbaum PR, Rubin DB: The central role of the propensity score in observational studies for causal effects, *Biometrika*, Vol.70, pp.41-55, 1983.
- 7) 星野崇宏：調査観察データの統計科学：因果推論・選択バイアス・データ融合. 岩波書店, 2009.
- 8) 星野崇宏, 岡田謙介: 傾向スコアを用いた共変量調整による因果効果の推定と臨床医学・疫学・薬学・公衆衛生分野での応用について, *保健医療科学*, Vol.55, pp.230-243, 2006.

(平成 29 年 12 月 11 日 受付)

知識がないものでも確認できるため, 劣化が進行している橋梁をスクリーニングする 1 つの方法となりうる。それだけでなく, 土砂による詰まりや雑草の繁茂を取り除くなどの清掃活動を実施することによって, 橋梁の劣化の進行を遅らせる効果が期待できる。

謝辞： 本研究の一部は, 内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: JST) によって実施されました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路構造物の現状 (橋梁) : 2013.< http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf >
- 2) Hu, X., Daganzo, C., and Madanat, S.: A reliability-based optimization scheme for maintenance management in large-scale bridge networks. *Transportation Research Part C*, Vol.55, 166178, 2015.
- 3) 古田均, 保田敬一, 築山勲, 竹林幹雄: 消費者余剰を考慮した道路橋 RC 橋床版の最適補修対策. *構造工学論文集*, Vol.54A, pp.142151, 2008.
- 4) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, *土木学会論文集 F*, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.