

報告 ブータンにおける道路橋コンクリート床版の損傷に関する傾向分析

ヘンリー マイケル^{*1}・岡田 将弥^{*2}・ザングポ キンガ^{*3}

要旨：ヒマラヤの山岳国であるブータンでは、その山岳地形のため、道路インフラが非常に大きな役割を担っている。橋梁はこういった道路の連続性を担保する上で重要であるが、それらの損傷に対する研究はほとんどされていない。そこで、本研究では損傷がどのような特徴を持つ橋梁に発生しているのかを明らかにすることを目的とし、いくつかの分析を試みた。対象は道路橋のコンクリート床版である。その結果、他設備の異常が損傷の発生と関係していたり、特定の地域の橋梁に多くの損傷が見られたりした。これらの結果は今後の橋梁の維持管理計画につながると考えられる。

キーワード：ブータン、維持管理、ロジスティック回帰分析、決定木分析、ランダムフォレスト、SVM

1. はじめに

ブータンはヒマラヤの山岳国であり、その山岳地形のために、道路インフラが移動において大きな役割を担っている。しかし、図-1 に示すように道路本数は非常に少なく、迂回路が無いケースがしばしば見られる。さらに道路には多くの橋梁が存在しており、現地の道路局である Department of Surface Transport (以下 DoST) の管理下には 2023 年時点で 235 橋が存在している。

つまり、橋梁は道路の連続性を担保する上で重要であるが、DoST によると、維持管理においては予算や人材の不足といった課題がある。これらを解消するために、DoST では将来的な予防保全への転換を図っており、橋梁に対する劣化予測の実現を目指している。

しかし、利用可能な点検データが 2 年分のみであることや、図-2 に示すように新しい橋梁が多いため、損傷が生じている橋梁数が少ないこと、損傷の原因が施工不良による可能性があることなど、その実現に向けては課題が多く残っている。

そこで、本研究では現在損傷が生じている道路橋のコンクリート床版についてその特徴を明らかにすることを目的として、様々な分析を行った。床版は、直接輪荷重を受け取り、それを橋の桁や梁に分散・伝達させたり、主桁や橋全体の構造部材を雨水から保護したりするなど、安全性及び耐久性において非常に重要な部材であるが、損傷しやすい部材の 1 つであるため対象とした。コンクリート橋上面の損傷の様子を図-3 に示す。また、ブータンでは下部工の損傷も問題となっているが、下部工に関してはこれまでも大規模な補修が行われてきたことが DoST へのヒアリング調査で明らかになっており、今回利用するデータからはその補修履歴を考慮することが難しいため対象にはしなかった。損傷の傾向が明らかにな

ることで、将来的な劣化予測に用いるべき特徴が判明し、実現につながる。また、維持管理の予算や人材の効率的な利用及び点検・補修の効率化につながり、予防保全の実現に貢献できると考えられる。

橋梁の劣化及び損傷に関する分析はこれまでも数多く行われてきた。山崎らは東北地方における鋼橋の RC 床版を対象に、その点検データに Cox 回帰分析を適用することで劣化に対する各変数の影響をハザード比として定量化し、比較検討が可能であることを示した。凍結防止剤散布量、降水量、横断勾配が損傷発生リスクと大きく関わっているという結果だった。

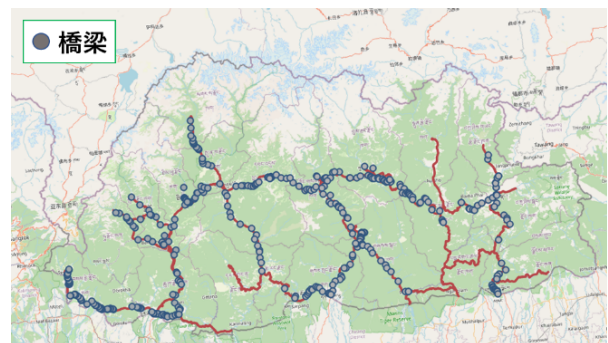


図-1 ブータン内の国道及び橋梁

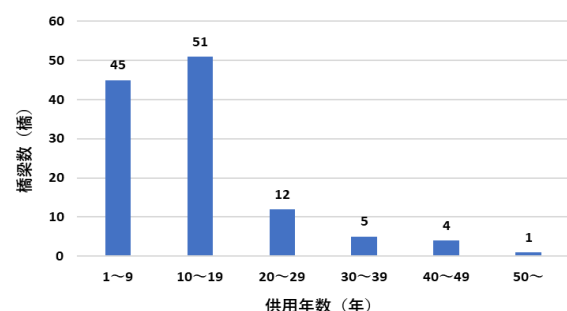


図-2 供用年数別橋梁数 (118 橋)

*1 芝浦工業大学 工学部教授 PhD (正会員)

*2 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 社会基盤学専攻

*3 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 社会基盤学専攻

中屋らは福井県が管理する橋梁に対して、定期点検結果を用い、劣化予測を行う際の影響因子を機械学習により分析した。その結果、海外線までの距離や、気温、日照条件などが算出された²⁾。

このように既往研究においても点検データを用いた数々の研究がなされている。これらと比較して、本研究では以下の2点について特徴がある。

第一に対象とする国をブータンとしている点である。ブータンの橋梁の劣化や損傷を対象とした分析はほとんどない。ブータンは面積が38,390 km²と小さい国であるが、管理オフィスの違いや、他部材の劣化状況など橋梁が置かれている条件は様々である。ブータンにおけるコンクリート床版の損傷の傾向を明らかにするということに本研究の特徴がある。

第二に点検データの量及び質についてである。前述したように、利用可能な点検データ量には制限がある。また、その内容についても改善を要する部分が散見される。例えば補修の履歴についてである。ブータンの点検データ内には供用年数の割に健全な状態である橋梁がいくつか見られるが、これらは補修によるものも含まれていると考えられる。しかし、補修の履歴に関するデータは存在しない。損傷の時系列を基にデータの扱い方を定義し、この問題には対処した。このように、データの制約がある中で分析を試みたのも本研究の特徴である。

2. データ概要

2.1 橋梁点検データ

本研究で使用したデータは2019年及び2023年のDoST管理下の橋梁に対して行われた点検データである。2019年のデータには201橋、2023年のデータには235橋の点検データが含まれている。これら橋梁数の差は2019年の点検時以降に建設された橋梁によるもので、2019年のデータに含まれていた橋梁は全て2023年のデータに含まれている。

本データは、橋梁のインベントリーデータと、部材毎の点検データで構成されている。部材毎の点検データは、損傷の程度ごとに損傷のランクが定義されていて、さらにそのランクごとに損傷のスコアが与えられる。これらのランクやスコアはJICAの技術協力プロジェクトにより定義されたものであり、点検データ内に詳細が記されている³⁾。スコアが高いことは損傷の程度が激しいことを意味する。対象としたコンクリート床版に関する損傷としては、ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・エフロレッセンス、コンクリートの部分的欠損の4種類が記録されている。分析の際はこれら損傷種ごとに行っている。

2.2 目的変数

本研究では床版の損傷種ごとに分析を行い、それぞれ



図-3 コンクリート橋上面の損傷

表-1 損傷種別損傷有無割合 (N=118 橋)

損傷種	損傷あり (橋)	損傷なし (橋)
ひび割れ	7 (5.9%)	111 (94.1%)
剥離・鉄筋露出	10 (8.5%)	108 (91.5%)
漏水・エフロレッセンス	13 (11.0%)	105 (89.0%)
コンクリートの部分的欠損	9 (7.6%)	109 (92.4%)

表-2 説明変数一覧

種類	変数
量的	供用年数 (2019 or 2023)、交通容量 (MT)、橋長 (m)、交通量 (2023 年 2 月)
順序	降雨量 (3 段階)、降雪量 (2 段階)
名義	国道か否か、管理オフィス (9 項目)、橋種 (3 種類)、迂回路の有無、舗装異常の有無、排水設備異常の有無、初期不良の有無

の分析において目的変数はその損傷の有無とする。表-1 に損傷種ごとの損傷有無割合を示した。全損傷において損傷ありの橋梁はいずれも15橋以下である。全体的に健全な床版が多い。

2.3 説明変数

本研究で用いた説明変数は表-2 に示す通りである。交通容量は設計時の値である。交通量は2023年の2月に計測されたもので、全車両を含み、台数で記録されている。管理オフィスは全部で9項目あり、各オフィスの管轄地域図を図-4 に示す。橋種はコンクリート橋、鋼橋、コンボジット橋の3種類である。舗装及び排水設備の異常については、その有無が床版の損傷に影響を与えている可能性を考え、説明変数として採用した。初期不良の有無については、床版の点検データに他損傷と並列で記録されていた豆板の有無を採用した。これは、豆板の発生要因が施工不良によるものであると判断したためである。

2.4 供用年数の取り扱い

使用した2つの点検データ内では、2019年から2023年にかけて表-3 に示すように5パターンの損傷変化が床版において見られた。パターン1及びパターン2に関しては、どちらも損傷のスコアが回復しているものである。ここで言うスコアの回復とは、2.1節において述べた

損傷のスコアが減少していることを意味し、すなわち、2019 年より 2023 年の方が床版の健全度が良いということである。これらのスコア回復は補修によるものと考えられるため、2019 年時点での供用年数を説明変数とし、目的変数は損傷ありとしている。パターン 3 に関しては、いずれの点検年においても損傷は見られないが、2019 年から 2023 年の間に損傷が発生して、補修された可能性を否定しきれないので、2019 年時点での供用年数を説明変数とし、目的変数は損傷無しとしている。

パターン 4 及びパターン 5 に関しては、2019 年から 2023 年の間に補修がされたとは考えにくい。したがって、これらのパターンでは 2023 年時点での供用年数を説明変数とし、目的変数は損傷ありとしている。

なお、2019 年より前の補修に関しては下部構造に対するものがほとんどで、床版に対する補修がほとんどされていなかったことは DoST の職員に確認済みである。

2.5 説明変数間の相関関係

分析に入るにあたって、各説明変数間での相関関係を調べた。その結果、国道であるか否かと Thimphu の管理下にあるか、降雨量内及び降雪量内でそれぞれの相関係数が 0.7 以上の高い相関が見られた。これらが混在している状態だと分析の精度に問題が生じてしまうので、国道であるか否か及び降雨量、降雪量を今回の説明変数からは除いた。国道であるか否かを除いたのは、データ内の約 95%が国道上の橋梁であったからである。

3. 分析概要

本研究ではロジスティック回帰分析、決定木分析、ランダムフォレスト、SVM の 4 つの分析を行った。ロジスティック回帰分析は 2 値分類問題に適している手法であるため用いた。龍田らは勾配ブースティング決定木を用いて、損傷原因等に対して各橋梁の特徴がどのように影響するかを求めた⁴⁾。この研究を参考にし、本研究ではチューニングが少なく、初期探索に向いており、ノイズの影響も受けにくいランダムフォレストを使用した。また、視覚的な解釈をするため、それが可能である決定木分析も行った。SVM については、説明変数が複数存在する高次元のデータに有効であることや、少量のデータに対しても効率的に学習が可能であるため用いた。各分析では、説明変数の目的変数への重要度や影響度を算出し、ブータンにおける床版の劣化傾向を明らかにすることを目的としている。なお、今回の分析ではデータ内全体の特徴を把握することに重点を置いたため、いずれの分析においてもデータを学習データとテストデータには分けていない。

3.1 ロジスティック回帰分析

ロジスティック回帰分析は目的変数が名義変数の場合



図-4 管理オフィス管轄地域図

表-3 損傷パターン

No. パターン	損傷有無		分析に用いた変数	
	2019	2023	供用年数	損傷有無
1	あり	なし	2019 年時	あり
2 (スコア回復)	あり	あり	2019 年時	あり
3	なし	なし	2019 年時	なし
4 (スコア悪化)	あり	あり	2023 年時	あり
5	なし	あり	2023 年時	あり

に用い、目的変数に関わる説明変数が回帰式にどの程度関与しているかを解析するものである⁵⁾。今回のデータの目的変数は損傷の有無という名義変数であり、説明変数が 2 つ以上ある多変量解析を必要としたため、本分析を用いた。

結果の解釈に当たっては、まず、有意な変数を算出した。各変数の P 値が 0.05 より小さい場合にその変数を有意であるとみなした。その上で、有意な変数に対してのみオッズ比を求めた。オッズ比は各説明変数が回帰式にどの程度影響しているのかを示すものである。

3.2 決定木分析

決定木分析は一般的なデータマイニング手法であり、その結果を木構造によるルールを組み合わせて表現するものである⁶⁾。決定木分析ではその結果が視覚的な解釈が容易な形で算出されるので、目的変数に対する説明変数間の相互関係を説明的に捉えることができる。

今回の目的変数は二値データであるため、分類木を使用している。

3.3 ランダムフォレスト

ランダムフォレストは複数の決定木を用いて行われる機械学習アルゴリズムである⁷⁾。個々の決定木に対する識別性は高くはないが、それぞれの決定木の結果を補って、最終的な結果をより高精度で算出可能である。

本分析では決定木分析同様、分類のランダムフォレストを使用し、分析に用いた決定木の数は 100 である。

3.4 SVM

SVM (サポートベクターマシン) は機械学習手法の 1 つである。SVM はデータを異なるクラスに分類する際に、クラス間のマージンを最大化するように境界を設計する。

そのため、説明変数が複数存在するデータに対してもその性能を維持することができる。

4. 分析結果

4.1 ロジスティック回帰分析

表－4 にロジスティック回帰分析の結果を示した。

ひび割れに対する分析において、有意であると算出された変数は、Trashigang (P 値<0.001) の管理下であるかと排水設備の異常有無 (P 値=0.029) であった。そのオッズ比は Trashigang が 0.0、排水設備の異常有無が 55.9 であった。この結果は、Trashigang の管理下ではひび割れが生じていないこと、排水設備に異常があるかない場合に比べてオッズが 55.9 倍になり、ひび割れが生じやすいことを示している。

剥離・鉄筋露出においては、排水設備の異常有無 (P 値=0.014) が有意な変数として算出された。また、そのオッズ比は 194.2 であった。このことから、排水設備に異常があるかない場合に比べてオッズが 194.2 倍になり、コンクリート床版には剥離・鉄筋露出が生じやすいことが分かる。

4.2 決定木分析

図－5, 6, 7, 8 にそれぞれひび割れ、剥離・鉄筋露出・漏水・エフロレッセンス、コンクリートの部分的欠損に対する決定木分析の結果を示した。各ノードの value については、左の値が損傷なし、右の値が損傷ありの橋梁数を示している。損傷なしの値が損傷ありの値より大きい場合、そのノードは No Damage に分類され、朱色で表される。損傷なしの値が損傷ありの値より小さい場合そのノードは Damage に分類され、青色で表される。各ノードの色の濃淡はジニ不純度と関連している。ジニ不純度が 0、即ち分割結果が純粋であるノードは濃い色で表され、ジニ不純度が大きくなるにつれてそのノードは薄い色で表される。

図中の分岐の変数として登場している ting 及び samdrup はそれぞれ Tingtibi と Samdrup Jongkhar のことであり、どちらも管理オフィスの名前である。また、draindamage は排水設備異常の有無、age は供用年数、honeycomb は初期不良の有無、capa は交通容量、volume は交通量、pavedamage は舗装異常の有無、length は橋長をそれぞれ意味する。

ひび割れ、漏水・エフロレッセンス、コンクリートの部分的欠損における Damage に分類されたノードは、排水設備に異常が生じていることが共通の特徴であった。また、ひび割れ、コンクリートの部分欠損だけで見ると、損傷が Damage に分類されたノードは Samdrup Jongkhar の管理下であるという共通の特徴があった。これら、排水設備の損傷と Samdrup Jongkhar の管理下であることは

表－4 ロジスティック回帰分析結果

損傷種	有意変数	オッズ比
ひび割れ	2 個	Trashigang : 0.0 排水設備 : 55.9
剥離・鉄筋露出	1 個	排水設備:194.2
漏水・エフロレッセンス	なし	－
コンクリートの部分的欠損	なし	－

床版の損傷に影響を与えている可能性が示唆された。

剥離・鉄筋露出においては、最も初期不良が想定され、月の交通量が 653 台以上の橋梁群が Damage と分類されたノードとなった。

4.3 ランダムフォレスト

表－5 にランダムフォレストの結果、重要度が高いと算出された説明変数とその重要度を損傷ごとに示した。排水設備の異常有無、橋長、供用年数、交通量、交通容量、舗装の異常有無はいずれの損傷種においても重要度が高い結果となった。特に橋長、供用年数については、どの損傷においても高い重要度となった。しかし、この分析結果は単に変数の重要度を表しているに過ぎず、その変数の大きさがどのように目的変数に影響を及ぼしているかは分からないため、橋長や供用年数が長いことが損傷の発生に影響を与えているとは言い切れない。

また、排水設備の異常の有無もほとんどの損傷で高い重要度を示した。

4.4 SVM

表－6 に SVM の結果、重要度が高いと算出された説明変数を示した。全ての損傷において舗装異常の有無が重要度の高い変数として算出された。舗装の異常がそれぞれの損傷の発生に関係している可能性が考えられる。

ひび割れ、剥離・鉄筋露出においては、排水設備が最も重要度が高い説明変数であった。舗装同様、排水設備の異常が損傷の発生に影響を与えている可能性がある。

漏水・エフロレッセンスに対する分析では、管理オフィス名が多く重要度が高い変数として算出された。どのオフィスの管理下にあるか、及び地理的な橋梁の位置が漏水・エフロレッセンスの発生に影響を与えているという結果となった。

5. 考察

表－7 に全損傷に対する各分析結果をまとめた表を示した。

まず、ロジスティック回帰分析においては、有意な変数を記入している。また、決定木分析に関しては、各損傷に対する分析で Damage のノードに到達するまでの分割に使われた説明変数を記入している。ランダムフォレスト、SVM に関しては分析の結果、重要度が高く算出さ

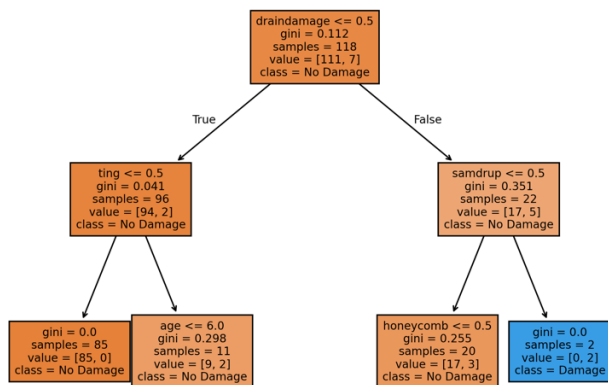


図-5 ひび割れ決定木分析結果

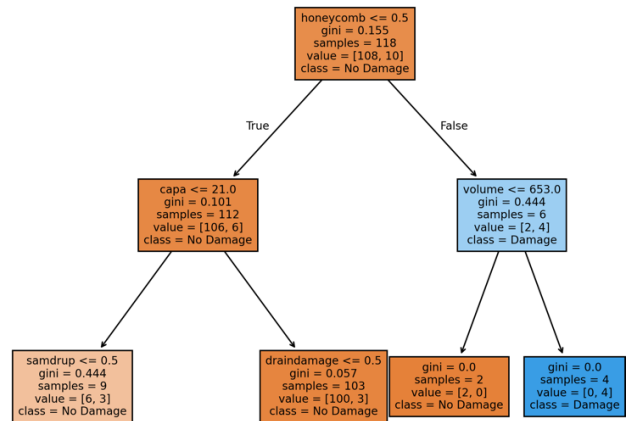


図-6 剥離・鉄筋露出決定木分析結果

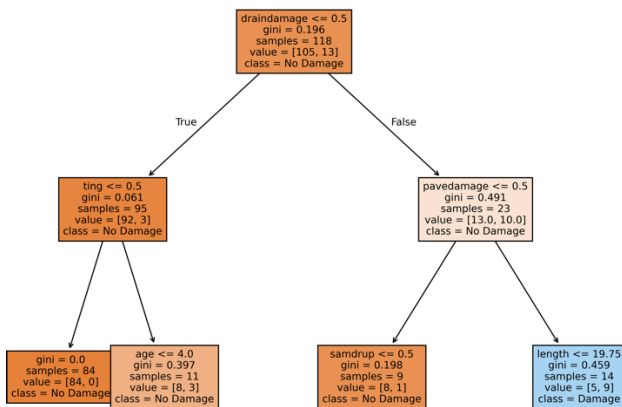


図-7 漏水・エフロレッセンス決定木分析結果

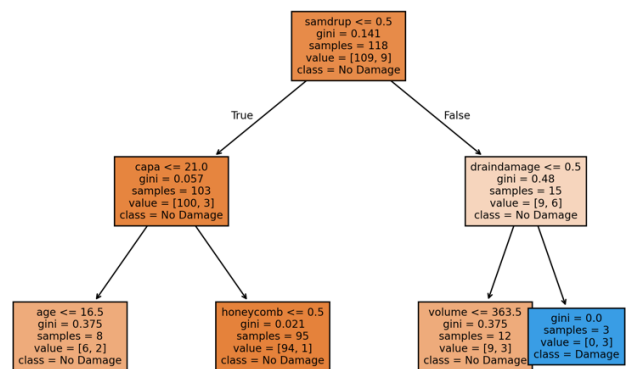


図-8 コンクリートの部分的欠損決定木分析結果

れた説明変数を記入している。

今回の分析では、排水設備、舗装における異常の有無、及び管理オフィスの違いが主に床版の損傷に影響を与えているという結果になった。日本のデータに比べて、環境条件に関するデータ項目が少ないため、ブータンのコンクリート床版に環境条件が関係していないと言い切れないが、他の設備の異常や管理オフィスがコンクリート床版の損傷の発生に関係していることはブータン独自の傾向である。

他部材と床版との関係については、排水設備の異常によって特に雨季に雨水の排水がうまくいかず、それが舗装に生じた異常によって床版に到達し、床版の損傷発生につながっていると考えられる。

また、管理オフィスに関しては、表-7にある5つの内、Trashigang と Thimphu を除く3つについてはどれもインドとの国境に位置するという共通の特徴を有している。また、Trashigang についても国土の最も東側に位置している。つまり、DoST がある首都 Thimphu からは遠く、管理が不十分である可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究ではブータンにおけるコンクリート床版について、損傷が生じているものの特徴を明らかにすることを

目的として分析を行った。その結果、床版以外の部材に異常が発生し、特定の管理オフィス下にある橋梁の床版に損傷が生じがちであることが明らかとなった。これらは今後のブータンにおける橋梁の維持管理において、次のように役立つと考えられる。第一に今後の点検・補修において、舗装や排水設備への重要度を上げられる。そうすることで、これらの異常を早めに補修できる、もしくは事前に予防することが可能になるので、結果的に床版を良好な状態で長い間保つことができる。

第二に、重要度が高いと算出された説明変数は今後の劣化予測においても重要な変数として扱うことができる。すなわち、必要な変数のみを用いて劣化予測をすることができるので、シンプルな予測モデルの作成につながる。

また、今後の課題も以下に示す。本研究で課題となったのは、データ内で損傷が発生している床版がごくわずかだったことである。この課題に対して、まずはデータの蓄積を待って、その都度新しいデータを取り入れ、精度を上げていくという対策が考えられる。また、データ科学の観点からは、こういったクラス不均衡問題に対して、有効な対策を取ることで、精度が向上することも考えられる。例えば、SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling TEchnique) と呼ばれる手法を使い、損傷のあるデータを複製するのではなく、生成するといった手段が

表－5 ランダムフォレスト説明変数重要度
(上位 7 位)

順位	ひび割れ	剥離・鉄筋露出	漏水・エフロレッセンス	コンクリートの部分的欠損
1	排水設備 0.14	初期不良 0.16	排水設備 0.16	供用年数 0.17
2	橋長 0.12	供用年数 0.13	橋長 0.13	橋長 0.16
3	供用年数 0.12	橋長 0.11	供用年数 0.12	Samdrup Jongkhar 0.12
4	交通量 0.10	排水設備 0.10	舗装 0.09	交通量 0.12
5	交通容量 0.08	交通量 0.09	交通容量 0.07	排水設備 0.11
6	初期不良 0.07	交通容量 0.09	交通量 0.07	交通容量 0.06
7	舗装 0.06	舗装 0.05	初期不良 0.06	舗装 0.05

有効であると考えられる。

さらに、本研究で用いたデータには環境条件に関するデータが日本の場合と比べて非常に少なく、これらがどのように損傷の発生に影響を与えているのか明らかにすることができなかった。今後はこういった環境条件に関するデータの収集も必要であると考えている。

謝辞：本研究に支援をくださった国際協力機構（JICA）の道路アセットマネジメントプラットフォーム（RAMP）に深く感謝申し上げますとともに、Bridge Management System（BMS）データを提供してくださった DoST に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中屋終人ほか：福井県管理の早期劣化橋梁を対象とした劣化予測に及ぼす影響因子，AI・データサイエンス論文集，Vol.5，No.3，pp.253-261，2024
- 2) 山崎崇央，石田哲也：生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71，No.4，pp.I_11-I_22，2015
- 3) 独立行政法人国際協力機構（JICA）ほか：ブータン国橋梁施工監理及び維持管理能力向上プロジェクト事業完了報告書要約版，2022.6
- 4) 龍田斉ほか：勾配ブースティング決定木を用いた橋

表－6 SVM 説明変数重要度（上位 7 位）

順位	ひび割れ	剥離・鉄筋露出	漏水・エフロレッセンス	コンクリートの部分的欠損
1	排水設備 0.77	排水設備 0.74	Phuentsholing 0.91	迂回路有無 1.00
2	舗装 0.60	舗装 0.66	舗装 0.89	舗装 1.00
3	Thimphu 0.14	迂回路有無 0.30	Sarpang 0.62	初期不良 0.79
4	初期不良 0.14	Phuentsholing 0.23	迂回路有無 0.46	Tingtibi 0.27
5	Lobeysa 0.13	Tingtibi 0.20	交通量 0.44	Phuentsholing 0.25
6	橋長 0.12	交通量 0.18	Samdrup Jongkhar 0.31	橋長 0.10
7	Sarpang 0.08	初期不良 0.11	Tingtibi 0.21	コンクリート橋 0.05

表－7 全分析まとめ

	ひび割れ	剥離・鉄筋露出	漏水・エフロレッセンス	コンクリートの部分的欠損
ロジスティック回帰：有意変数	Trashigang 排水設備	排水設備	なし	なし
決定木：主な分割変数	排水設備 Samdrup Jongkhar	初期不良 交通量	排水設備 舗装	Samdrup Jongkhar 排水設備
ランダムフォレスト：主な重要な変数	排水設備 橋長 供用年数 交通量	初期不良 供用年数 橋長 排水設備	排水設備 橋長 供用年数	供用年数 橋長 Samdrup Jongkhar 交通量 排水設備
SVM：主な重要な変数	排水設備 舗装 Thimphu	排水設備 舗装 迂回路	Phuentsholing 舗装 Sarpang 迂回路 交通量 Samdrup Jongkhar	迂回路 舗装 初期不良

梁損傷原因及び補修工法の推定と分析，AI・データサイエンス論文集，Vol.1，No.1，pp.63-70，2020

- 5) 大林準：ロジスティック回帰分析と傾向スコア（propensity score）解析，天理医学紀要，Vol.19，No.2，2016.12
- 6) 奥喜正，本村猛能，前鶴政和，内藤誠二：データマイニングにおける二値データ解析—決定木とロジスティック回帰分析，物流問題研究，Vol.44，pp.1-14，
- 7) 波部斉：ランダムフォレスト，情報処理学会研究報告，Vol.2012-CVIM-182，No.31，2012.5