

土砂化等の床版上面損傷状況のマクロ分析に向けた データ構築と損傷傾向の試分析

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○角間 恒
蛸子 恭好
畠山 乃

道路橋コンクリート床版の維持管理を戦略的かつ計画的に進めるためには、土砂化をはじめとした上面損傷（以下、土砂化等）の発生状況や影響要因をマクロな視点で分析する必要がある。寒地構造チームは、令和4年度に、実橋の維持管理データを活用した北海道における土砂化等発生状況のマクロ分析に着手したところであり、本稿では、分析用に構築を進めているデータセットについて概説するとともに、統計的手法（生存時間解析）を用いて、床版の土砂化等発生状況の試分析を行った結果について報告する。

キーワード：床版、土砂化、損傷傾向、生存時間解析

1. はじめに

インフラの維持管理を計画的かつ戦略的に行うためには、個々の施設の状態を知るのはもちろんのこと、複数施設を束ねた「群」としての劣化損傷の特徴や将来的な劣化損傷の進行を、マクロ的な視点で評価・予測することが求められる。

ここで、道路橋のコンクリート床版（以下、床版）では、土砂化をはじめとした上面損傷（以下、土砂化等）が維持管理上の関心事になって久しいが、その発生および進行の特徴は、必ずしも維持管理の実務に反映可能な形で明示されてきていない。これは、1) 統一的な基準で実施されている橋梁定期点検では、目視点検を基本とするが故に、舗装の下で発生する土砂化を直接的な点検対象として取り扱えないこと、2) 補修設計や補修工事等を通じて蓄積される調査・対策記録の活用範囲が、基本的に個々の橋梁の維持管理サイクル内に留まっていること等により、これまで、土砂化等の発生傾向をマクロ的に把握するための記録の集約および分析が行われてこなかったことに原因があると考えられる。

そこで寒地構造チームでは、土砂化等発生のマクロ的な特徴を明確化し、床版の効率的な維持管理に貢献することを目的に、実橋の維持管理データを活用した土砂化等の発生状況や影響要因の分析に取り組んでいる。本稿では、分析用に構築を進めている土砂化等発生状況に関するデータセットについて概説するとともに、データセットの一部を使用して、北海道における土砂化等発生状況の試分析（ケーススタディ）を行った結果を報告する。なお、本稿における分析には、統計的手法の一つである生存時間解析を用いている。

表-1 対象橋梁（径間）の抽出条件

条件1	RC床版を有する鋼鈑桁橋である。
条件2	舗装撤去工の範囲が縦断方向1径間以上、かつ、横断方向1車線以上である。
条件3	橋梁単位で、過去に床版上面の断面修復工や増厚工が行われていない。

※上記条件に合致する“径間”を抽出

2. 土砂化等発生状況に関するデータ構築

(1) データセットの概要

本研究では、国土交通省北海道開発局（以下、北海道開発局）が管理するコンクリート床版を有する橋梁のうち、舗装（表基層）撤去工が行われた橋梁（径間）を基本的な分析範囲にする。現在構築中のデータセットでは、平成28年度～令和3年度に実施された橋梁補修工事の記録を基に、表-1の条件に合致する166径間（87橋）を抽出して、橋梁諸元や供用環境、損傷状況等に関する情報を整理している。

図-1にデータセットのイメージを示す。データセットは、「橋梁・径間単位でのデータ」と「床版を細かく分割したセル単位でのデータ」に大別して構成されており、次項でそれぞれの詳細を説明する。なお、以下の内容は令和5年12月末時点のものであり、今後も随時、データセット項目の追加等を行う予定である。

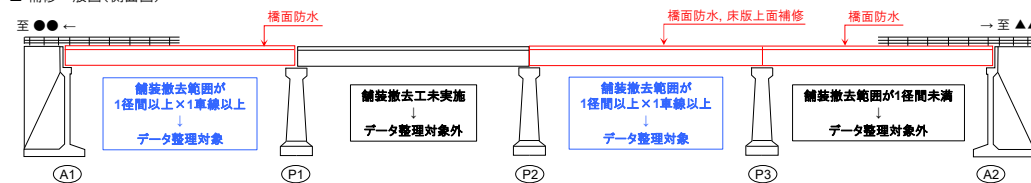
(2) 橋梁・径間単位でのデータセット項目

橋梁管理カルテや定期点検調書等を基に、橋梁諸元や供用環境に関する情報を橋梁あるいは径間単位で整理した。図-1中に整理した項目の一例を示しており、橋梁

例) 単純合成板桁橋+3径間連続合成板桁橋

A) 橋梁・径間単位でのデータセット項目

■ 補修一般図(側面図)



■ 補修一般図(平面図)



橋梁単位で整理したデータ(例)
路線名、架設竣工年、適用示方書、架橋位置、橋長、大型車交通量、凍害危険度、反応性骨材使用の可能性、気象データ

径間単位で整理したデータ(例)
上部工形式、支間長、平面線形(斜角、曲線半径)、縦断勾配、横断勾配、桁合成、床版支間、床版厚、舗装厚、既設防水層の有無、既設防水層の設置年、過年度定期点検結果(対策区分判定)、過年度診断結果(健全性)

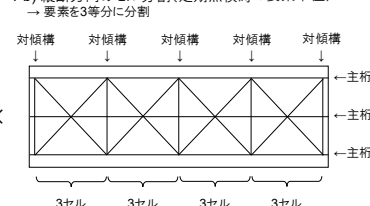
B) セル単位でのデータセット項目

B-1) 床版のセル分割方法(例: 上記橋梁の第3径間)

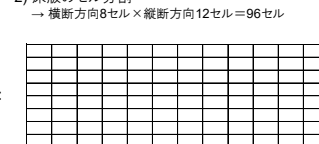
1-a) 横断方向のセル分割(道路の幅員構成ベース) → 路肩を1セル、車線を3セルに分割



1-b) 縦断方向のセル分割(定期点検時の要素単位) → 要素を3等分に分割



2) 床版のセル分割 → 横断方向8セル×縦断方向12セル=96セル



B-2) セルへの各種データの割り当て(例: 上記橋梁の第3径間)

1) 位置的特徴の割り当て(例: 走行位置との関係)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 路肩、1: 主たる走行位置、2: その他

2-a) 損傷状況の割り当て(例: 下面の漏水・遊離石灰)

a	a	a	a	c	c	c	a	a	a	a	a	c
a	a	c	c	c	0	d	a	a	a	a	a	c
c	a	a	a	a	c	0	c	a	a	a	a	c
c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	c
c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	d
c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	c
c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	e
c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	e

a: 損傷記録なし、c~e: 評価区分c~eの損傷が記録

2-b) 断面修復工の実施状況の割り当て

0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

0: 断面修復なし、1: 断面修復あり

図-1 データセットのイメージ

諸元では、架橋位置、架設竣工年、適用示方書、上部工形式、径間長、平面線形(斜角、曲線半径)、桁合成、床版支間、床版厚、舗装厚、既設防水層の有無および設置年など、基本諸元に加えて床版の劣化損傷に影響を及ぼすと考えられる情報も整理対象にした。また、供用環境では、大型車交通量、凍害危険度、コンクリートにおける反応性骨材使用の可能性、気象データ(国土数値情報における1981~2010年の平年値メッシュデータ)等を橋梁単位で整理している。このほか、当該工事直前に実施された定期点検および診断の記録として、床版下面の各種損傷(床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰)に対する対策区分判定、および、床版に対する健全性の判定区分を径間単位で整理している。

(3) セル単位のデータセット項目

a) セル分割

本研究では、床版を定期点検における部位、部材の最小評価単位(以下、要素)よりも細かい単位(以下、セル)に分割した後、各セルに損傷状況等に関する情報を割り当てている。図-1中にセル分割方法の例を示しており、横断方向では道路の幅員構成をベースに路肩部を1セル、車線部を1車線当たり3セルに、縦断方向では定期点検における要素をベースに、これを3分割した。

b) 位置的特徴の割り当て

分割した各セルには、橋梁一般図を基に、セルの位置的特徴を割り当てた。図-2に位置的特徴の割り当て方法を示しており、現データセットでは、横断方向に関して「A. 走行位置との関係」と「B. 主桁位置との関係」を、縦断方向に関して「C. 支点との位置関係」を割り当てている。これにより、例えば「輪荷重走行位置の直下である」、「主桁直上/近傍である」といった床版部位に応じた劣化損傷の傾向を、要素単位のときよりも詳細に評価できるようにしている。

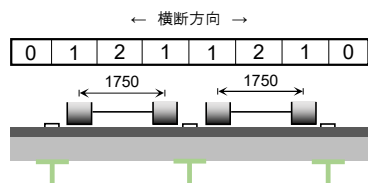
c) 損傷および補修状況の割り当て

定期点検における損傷図を基に、各セルに対して、床版下面における「床版ひびわれ」、「剥離・鉄筋露出」、「漏水・遊離石灰」、路面における「路面の凹凸」、「舗装の異常」に関する損傷程度の評価区分(a~e)をトレースした。現データセットでは、当該工事直前の点検結果をトレース対象にしている。

次に、土砂化等発生状況の割り当てとして、補修工事における出来形図を基に、床版上面を対象にした断面修復工の実施箇所を各セルにトレースした。ここで、損傷状況ではなく断面修復状況をトレースしたのは、1)床版の点検・調査において広範囲に上面の目視観察を行う機会はほとんどなく、既存の点検・調査記録を基に、多く

A. 走行位置との関係

- 0：路肩部
- 1：車輪直下(セル内に車輪中央が位置する)
- 2：車輪間(セル内に車輪中央が位置しない)



C. 支点位置との関係

- 0：支点非近傍(下記1, 2以外)
- 1：端支点部直近
- 2：連続桁の中間支点部直近



B. 主桁位置との関係 (L:床版支間、W_{cell}:横断方向のセル寸法)

- 11：張出部、かつ、主桁近傍(セル中央～主桁の距離がL/4未満)
- 12：張出部、かつ、主桁非近傍(セル中央～主桁の距離がL/4以上)
- 31：主桁直上(セル中央～主桁の距離がW_{cell}/2未満)

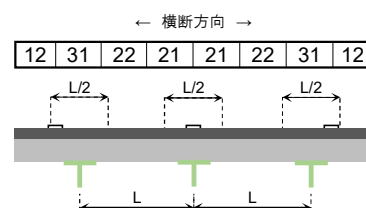
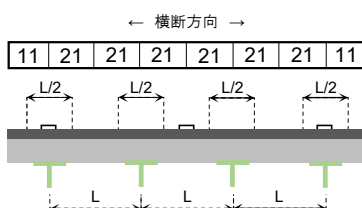
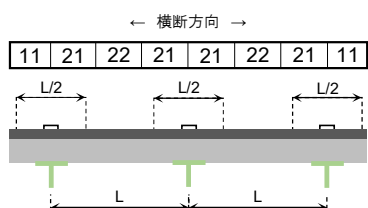


図-2 セルの位置的特徴の割り当て方法

の橋梁に対して広範囲での土砂化発生状況を特定するのは困難であること、2) 補修工事において補修実施の判断根拠となる損傷状況までが記録されることはなく、補修工事記録を基に、土砂化等発生状況を特定するのは困難であること、3) データセット構築のために現地調査を重ねることは、データ蓄積の観点で非効率であること、等の理由による。このことから、本研究で整理している床版上面の損傷には、土砂化だけでなく、例えば、上面への打音を基に補修実施を判断した箇所などが含まれていることに留意されたい。また、現データセットでは、断面修復工の深さに関する情報は取り込んでいない。

3. 土砂化等発生状況に関する試分析

上記で概説したデータセットを基に、北海道開発局が管理する鋼板桁橋床版における土砂化等発生状況に関するいくつかの試分析(ケーススタディ)を実施した。本分析は、限られたサンプルを用いて試行的に実施したものであり、劣化損傷傾向に関する確定的な知見を示すものではないことに留意されたい。

(1) 生存時間解析

分析には、医学分野や機械分野での適用実績が豊富で、近年、道路構造物の劣化損傷分析への適用^{1), 2)}も見られている生存時間解析を採用した。生存時間解析は、ある事象(イベント)が発生するまでの時間に焦点を当てる統計的手法であり、ある時間以降に状態を追跡できなくなったサンプルを「打ち切り」として取り扱えるところに特長がある。

生存時間解析では、生存曲線と呼ばれる生存関数(生

存率)と生存期間の関係を導出することで、イベント発生までの時間やその影響要因の直観的な解釈が可能であり、その曲線の導出にはカプラン・マイヤー法³⁾が用いられることが多い。そこで本研究では、データセットを特徴が同じいくつかのグループ(以下、群)に分割した後、それぞれの群に対してカプラン・マイヤー法による生存曲線(式(1))を導出し、その曲線を比較することで土砂化等発生傾向に関する考察を行った。

$$S(t) = \prod_{i=1} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right) \quad (1)$$

ここで、 $S(t)$: 生存関数、 d_i : 時刻 t_i 時点におけるイベントの発生数、 n_i : 時刻 t_i 時点のリスク集合の大きさである。本分析では、着目するイベントとして「床版上面の断面修復工の実施」を、生存期間として「供用開始から当該工事直前の定期点検までの期間」を定義し、当該工事において断面修復工が実施されなかったサンプルを「打ち切り」として扱った。

なお、解析には、統計解析向けプログラミング言語 R (ver. 4.1.2) の survival パッケージを使用した。

(2) 分析事例 1

分析事例 1 では、セルを生存時間解析における評価単位(サンプル単位)として、土砂化等発生状況の試分析を行う。具体的には、現データセットのうち直橋かつ直線橋の橋梁(径間)を構成する 8659 セル(32 橋、64 径間)を抽出して、まず全セルをサンプルにして生存曲線を推定した後、ケーススタディとして、床版部位(セルの位置的特徴)別に分けしたセル群に対して生存曲線の推定を行った。なお、全 8659 セルの生存期間は 25~54

年に分布しており、全セルに対する土砂化等発生セルの割合は13% (1151セル) であった。

a) 全セルを対象にした生存曲線 (ケース 1-1)

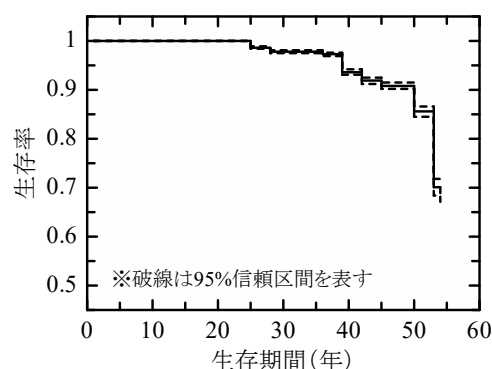
図-3(a)に、全セルを対象にして推定した生存曲線を示す。図より、本分析の範囲では、生存期間 25 年で土砂化等が発生したセルが現れ、その後、生存期間の増加とともに生存曲線が徐々に低下する傾向が見られている。寒地土木研究所では、過去に、舗装部分開削調査記録を基に、北海道開発局が管理する橋梁における土砂化発生状況を調査しており⁴⁾、その結果、床版の土砂化が主に供用年数 30 年を超えた橋梁で発生し、供用年数の増加とともに、調査箇所での土砂化発生割合が増加することを報告している。これらの結果を踏まえると、本分析と既往調査では分析・調査の元になる維持管理データや着目するイベントに違いがあるものの、イベントの発生時期や発生リスクの増加に関して同様の傾向を示しており、セル単位のデータセットを活用した生存時間解析によって、土砂化の発生状況を概ね妥当に評価できていると考えられる。

b) 走行位置との関係別の生存曲線 (ケース 1-2)

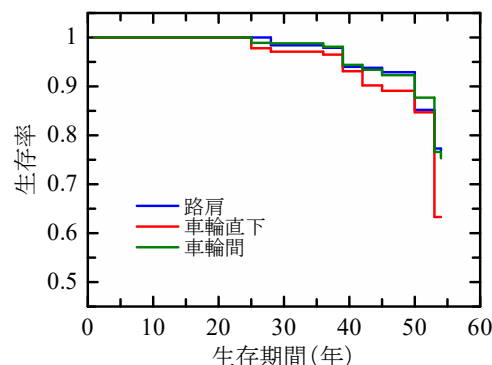
次に、土砂化等発生に及ぼす床版部位 (セルの位置的特徴) の影響に関する分析例として、全セルを図-2 中の「A. 走行位置との関係」別に分けて、その群毎に生存曲線を推定した。実橋において土砂化調査を行う場合、車輪走行位置直下を舗装部分開削箇所を選定することが多いが、本分析により、上記箇所に着目して調査することの妥当性を統計的な観点から検証してみたい。

図-3(b)に、路肩群、車輪直下群、車輪間群のそれぞれについて推定した生存曲線を示す。図より、車輪直下群において、他の群と比較して早期に生存曲線が低下する傾向を見て取れる。土砂化の調査位置は、土砂化の進行程度や耐荷性能等の部材性能への影響を考慮して選定するものではあるが、本図からは、土砂化等の発生しやすさという観点において、車輪走行位置直下に着目して調査することの妥当性が示唆される。また、著者らは、土砂化が車輪直下で発生し、車輪走行方向に進行しやすいことを実験的に明らかにしている⁵⁾が、本分析結果は、こうした実験的知見の妥当性も同時に示していると考えられる。

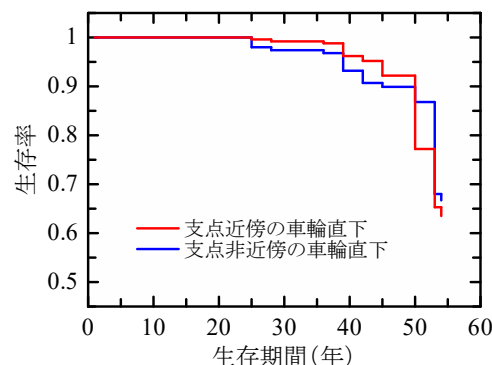
一方、他の群の生存曲線を見てみると、車輪直下群だけに土砂化等が集中して発生しているわけではないことがわかる。特に、舗装部分開削による調査が行われる頻度が少ない路肩部においても土砂化等が発生していること、また、路肩部と車輪間とで土砂化等の発生リスクの推移が同様になっていることは興味深い。これは、実橋において輪荷重が常に同一箇所を走行するとは限らず、路肩部であっても供用中に輪荷重作用を受ける場合があること、舗装-地覆 (緑石) 間から土砂化の原因となる水の浸入を受けやすいことなどが影響していると考えられる。



(a) 全セル (ケース 1-1)



(b) 走行位置との関係 (ケース 1-2)



(c) 支点位置との関係 (ケース 1-3)

図-3 生存曲線の推定結果 (分析事例 1)

c) 支点位置との関係別の生存曲線 (ケース 1-3)

土砂化等発生状況に及ぼす床版部位の影響に関するもう一つの分析例として、図-3(b)における車輪直下群に属するセルをさらに図-2 中の「C. 支点位置との関係」別に分けて、その群毎に生存曲線を推定した。

図-3(c)に、推定した生存曲線を示す。図より、縦断方向への土砂化等発生傾向に着目したとき、本分析の範囲において、支点近傍よりも支点非近傍において土砂化等の発生が早期に生じている結果であった。本分析ケースの設定に際しては、伸縮装置付近からの水の浸入や車両が伸縮装置部を通過する時の衝撃力作用を受ける端支点部、活荷重に伴う負曲げ作用による上面へのひび割れの発生などの影響を受けやすい連続桁の中間支点部において土砂化等の発生リスクが高くなる結果を予期していた

が、道路管理者や点検・調査技術者が共通して持っているであろうこうした認識は、マクロ的に見た土砂化等の発生状況には必ずしも合致していないかもしれない。このことの真偽については、今後もサンプル数の増加を図りながら確かめていきたい。

(3) 分析事例 2

土砂化等発生状況に関するデータセットを橋梁群としての維持管理計画策定の場面に活用しようとした場合、床版を細分化したセルよりは、橋梁や径間単位での土砂化等発生傾向の明確化が要求されと考えられる。そこで分析事例 2 では、現データセットを構成する全 166 径間 (87 橋) をサンプルにして、径間単位での土砂化等発生状況の試分析を行う。まず、全径間をサンプルにして生存曲線を推定した後、ケーススタディとして、当該橋梁の架橋位置の凍害危険度別に分けた径間群に対して生存曲線の推定を行った。サンプルとした全 166 径間の生存期間は 24～54 年に分布しており、全径間に対する土砂化等発生径間の割合は 40% (67 径間) であった。なお、本分析では、径間内で断面修復工が実施されていれば、その面積や体積に関わらず、当該径間を「断面修復あり」として取り扱っている。

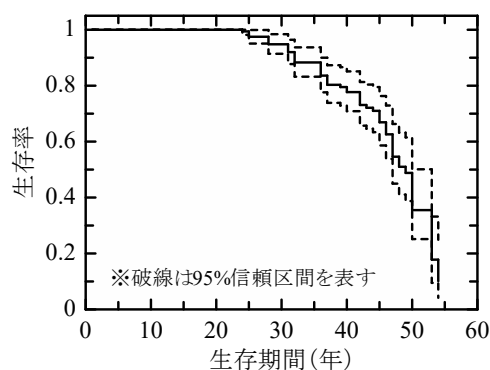
a) 全径間を対象にした生存曲線 (ケース 2-1)

図-4(a)に、全径間を対象にして推定した生存曲線を示す。図より、本分析の範囲では、生存期間 24 年で土砂化等が発生した径間が現れ、その後、生存期間の増加とともに生存曲線が徐々に低下した。平均生存期間 (生存率が 0.5 となる生存期間) は 49 年であり、N 年生存率 (生存期間 N 年のときの生存率) は、N=30 年で 0.95、N=40 年で 0.78、N=50 年で 0.36 であった。すなわち、表-1 に合致する径間があったとき、点検時の供用年数が 30～40 年程度であれば土砂化等が発生している可能性は低いが、供用年数が 50 年に達しているような場合には、高い可能性 (半数以上) で土砂化等が発生していることを疑うべきであることを示している。

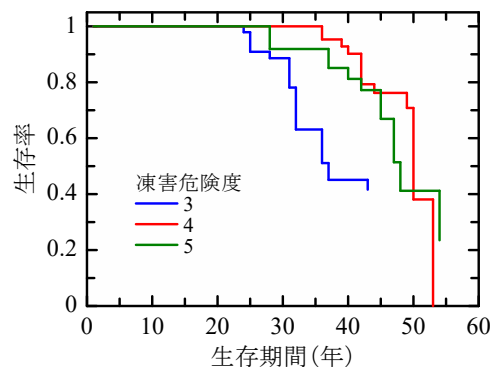
b) 凍害危険度別の生存曲線 (ケース 2-2)

次に、土砂化等発生に及ぼす橋梁架橋位置の影響に関する分析例として、分析対象の径間を架橋位置の凍害危険度別に分けて、その群毎の生存曲線を推定した。

図-4(b)に、推定した生存曲線を示す。ここでは、サンプルの構成 (サンプル数、供用年数の分布) が概ね同程度であった凍害危険度 3～5 群に関する曲線を示しており、図からは、本分析の範囲において、凍害危険度 3、5、4 の順に生存曲線が早期に低下していることが見て取れる。これは、土砂化等が床版への水の供給状況 (舗装の損傷や防水層の有無) や活荷重の作用状況等の影響を強く受けて発生するものであり、気象データに基づく凍害危険度の高さが必ずしも床版の土砂化等発生リスクに寄与しないことを示唆している。したがって、床版の点検・調査に当たっては、初期に実施する橋梁諸元や供



(a) 全径間 (ケース 2-1)



(b) 架橋位置の凍害危険度 (ケース 2-2)

図-4 生存曲線の推定結果 (分析事例 2)

用環境等の基礎的調査において、「凍害危険度が低い」という理由のみで、土砂化等の発生リスクを低く見積もることがないように留意する必要があると言える。

4. 土砂化等発生状況の分析に向けた課題

上記 3. の分析は、限られたサンプルを用いて試行的に実施したものである。今後、土砂化等発生状況を本格的に分析していく上では、データセットの充実はもちろんのこと、分析手法の選択や分析結果の解釈といった点に課題があり、以下に検討すべき課題の例をまとめる。

(1) 分析手法

本稿では、試分析方法として生存時間解析を適用し、その中でも、カプラン・マイヤー法により推定した生存曲線に着目して土砂化等発生傾向に関する考察を行った。こうした方法は、土砂化等発生の時間的特徴を直観的に解釈しやすい反面、その影響要因が多岐にわたるときには、サンプルを特定の群に分ける作業が複雑にならざるを得ない。そのため、土砂化等発生に及ぼす影響要因や影響度を明確化するためには、例えば Cox 比例ハザード分析といった多変量解析を実施していく必要があると考えられる。

また、近年では、AI 技術を用いて橋梁の劣化損傷進展の推定を試みる事例⁹⁾も報告されているところであり、

本研究で構築するデータセットに関しても、機械学習によって大量のデータを処理・分析することで、土砂化等発生の予測に活用できる可能性がある。

(2) 分析結果の解釈

分析結果を解釈する上では、データセットの特徴を理解する必要がある。例えば、現在のデータセットは、表-1 に示すように断面修復工の実施履歴がない橋梁を対象にした。これは、橋梁や径間単位で補修履歴が残されていたとしても、その詳細（部位や工法等）は不明なことが多く、断面修復工が実施されたセルがあった場合に、それが「初めての補修なのか再補修なのか」を区別するのが困難であるためである。このようなサンプルの抽出方法が土砂化等発生リスクの過小評価をもたらすのは明らかであり、特に供用年数が長い橋梁群（径間群、セル群）でその傾向が顕著になることに留意が必要になる。

(3) サンプル単位や目的変数の設定

本研究では、床版上面の状態を直接的に評価することを意識してデータセットの構築を進めているが、維持管理実務での本データセットの活用を想定した場合には、維持管理サイクルを回す上で各種の判断基準となる点検・診断結果を目的変数にして損傷傾向の明確化を図ることに、高いニーズがあるかもしれない。こうした視点から、本データセットには、床版下面の各種損傷（床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰）に対する対策区分判定や、床版に対する健全性の判定区分を記録するようにしており、今後、道路管理者等が活用しやすいサンプル単位や目的変数等の組合せについて、検討していく余地がある。

5. おわりに

本稿では、北海道における床版の土砂化等発生状況のマクロ分析に活用することを目的に、現在、寒地構造チームが構築を進めているデータセットの概要を説明した。

また、生存時間解析を用いて、土砂化等発生状況に関する試分析（ケーススタディ）を行った。

今後は、データセットの充実（例えば、サンプル数やデータセット項目の追加）を図るとともに、土砂化等発生に及ぼす影響要因の分析を進める予定である。また、道路管理者や点検・調査技術者らとも連携して、データセットや分析結果の維持管理実務での活用方法について検討していきたい。

謝辞：本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局より補修工事成果等の橋梁の維持管理に関する各種資料をご提供いただきました。ここに付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 宮原史、七澤利明：生存時間解析によるシェッド、大型カルバートの劣化特性分析、土木学会論文集 F4（建設マネジメント）、Vol.75、No.2、pp.I_105～I_119、2019.
- 3) Kaplan, E. L. and Meier, P.: Nonparametric estimation from incomplete observations, Journal of the American Statistical Associations, Vol.53, pp.457-481, 1958.
- 4) 中村拓郎、角間恒、守田稷人、葛西聡、西弘明：北海道における道路橋 RC 床版の土砂化に関する傾向調査、寒地土木研究所月報、No.796、pp.2-10、2019.
- 5) 角間恒、仁平陽一郎、畠山乃：床版土砂化の発生および進行過程に関する実験的検証、寒地土木研究所月報、No.849、pp.19-24、2023.
- 6) 例えば、龍田斉、原田豊、貫井敬章、榮洗希、清水亮平、長井宏平：勾配ブースティング決定木と畳み込みニューラルネットワークを組み合わせた橋梁の劣化進展推定、AI・データサイエンス論文集、3巻、J2号、pp.1017-1023、2022.