

洗掘被害を受けやすい既設橋梁の抽出への線形判別分析の適用

藤田智弘・七澤利明・佐々木惇郎

1. はじめに

災害に強い強靱な道路ネットワークを実現するために、大規模地震や大雨による洪水等による道路機能への影響を最小限に留められるようにすることが求められる。この要求を早期にかつ合理的に実現するために、耐荷性向上対策を実施すべき既設道路構造物の構造条件等の提示が求められる。

橋梁では、局地的な集中豪雨等により、河川等を横断する橋梁の支持地盤が侵食・洗掘される被害が生じ（写真-1参照）、落橋に至った事例も確認されている。また、道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月）²⁾にも記載の通り、洗掘に対する安定性の確保は、橋梁を維持管理する上で最も配慮すべき事項の一つであると考えられているが、洗掘対策が必ずしも十分でない既設橋梁の被災リスク評価手法は確立されていない。

そこで、本検討では橋梁基礎の洗掘に着目し、被災した既設橋梁基礎の統計分析により洗掘被害を受けやすい河川特性や橋梁基礎の構造条件（以下「洗掘要因」という。）を抽出することを試みたので、その検討の概要について紹介する。

2. 既設橋梁基礎の洗掘要因の抽出

2.1 既設橋梁基礎の洗掘データベースの構築

平成23年から平成28年までの豪雨と平成30年7月豪雨で洗掘により被災した橋梁を対象に、災害



写真-1 洗掘で被災した橋梁

査定資料、土木研究所資料及び橋梁定期点検要領に基づいて実施された定期点検データを用いて構造諸元や被災内容に関する基本条件を整理し、既設橋梁の洗掘に関するデータベース（以下「洗掘DB」という。）を構築した。

洗掘DBでは、災害査定資料等で洗掘が生じていることが明記されているものに加えて、橋梁下部構造の沈下、倒壊や流出のいずれかの変状が確認された橋梁についても、洗掘が確認された橋梁として収録した。なお、桁の流出のみが生じている場合など、流木の衝突等の明らかに洗掘以外の原因による変状と考えられるものは除いている。以上により、183橋を統計分析において洗掘あり（以下「A群」という。）とした。

また、統計分析で洗掘を受けやすい条件を抽出するために、洗掘が確認されていない橋梁も洗掘DBに収録した。洗掘が確認されていない橋梁は、洪水規模の違いの影響をできるだけ排除するために、A群と同水系を渡河する橋梁で同程度の洪水を経験した橋梁とした。収録内容は、国が管理する国土交通省地方整備局、同北海道開発局、内閣府沖縄総合事務局が平成29年度までに橋梁定期点検要領に基づいて実施した定期点検データの内容とした。洗掘が確認されていないことの判断は、定期点検結果において洗掘に関する損傷程度の評価がa（洗掘なし）のみであることと、洗掘に関する補修履歴が記録されていないことに基づいて行った。その結果、207橋を統計分析において洗掘なし（以下「B群」という。）とした。

2.2 洗掘データの分析方法

本検討では、洗掘要因の抽出を統計分析手法のうち線形判別分析にて行った。線形判別分析は、複数の情報（説明変数）で表現された複数の部分集団から構成される母集団に対して、どの集団に属するかを最もよく判別することができる写像が得られる多変数の一次関数（説明関数）を決定するものである。簡単のため、二変数の場合の線形

判別分析の概念図を図-1に示す。また、特徴抽出手法の一つとして、説明変数の削減を目的としてもこの手法が使われることがある。説明関数は、式(1)の通りとなる。

$$f = \sum_{i=1}^n (w_i \times x_i) + C \text{-----式(1)}$$

ここで、 f は説明関数、 i は説明変数の数、 w_i は判別係数、 x_i は説明変数、 C は定数を示す。

線形判別分析の結果、説明関数は使用する説明変数の組み合わせの数だけ得られる。また、各説明変数の寄与度の大小は、式(2)で示す標準化した説明関数の標準化判別係数の絶対値を比較することで判断することができる。

$$F = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i) \text{-----式(2)}$$

ここで、 F は標準化した説明関数、 W_i は標準化判別係数、 X_i は無次元化した説明変数を示し $X_i = (x_i - m_i) / \sigma_i$ 、 m_i は説明変数の平均値、 σ_i は標準偏差を示す。

線形判別分析の結果得られる説明変数、説明関数や標準化判別係数は、洗掘被害を受けやすい既設橋梁の判別のための着目点や判断基準を定めるための参考にすることができる。

2.3 線形判別分析の説明変数の設定

統計分析を行う上で重要なことは、洗掘要因となるものが線形判別分析を行う前に説明変数から漏れないようにすることである。そこで、説明変数の漏れを無くすことを目的に、既往の研究成果より、考慮すべき洗掘要因を調査した。

河川管理施設等構造令第62条の解説には、洗掘等の観点から河積を阻害する程度を最小限にとどめるために、河積阻害率(図-2参照)を5%以内に収めることを橋梁の構造設計を行う上での目安としている。また、洗掘深の推定式としては、Tarapore、Andru、小川ら、須賀らなど多くの提案式があるが³⁾、これらの式の説明変数には、流速、水深、橋脚の円柱径、河床材料の粒径等が用いられている。この他、佐溝ら⁴⁾は、鉄道橋脚周りの洗掘の有無の予測を試みており、推定式には分担阻害率、流路内位置比、橋脚と水際線の距離、植生の有無等が含まれる。大山ら⁵⁾は高水敷で発生した洗掘被害を調査して、主な洗掘要因が砂州の形成であるとした。

一方で、実務レベルで得られる情報のみで判別することも求められる。表-1は洗掘DBから定量化できるデータ項目と取得できるA群及びB群の

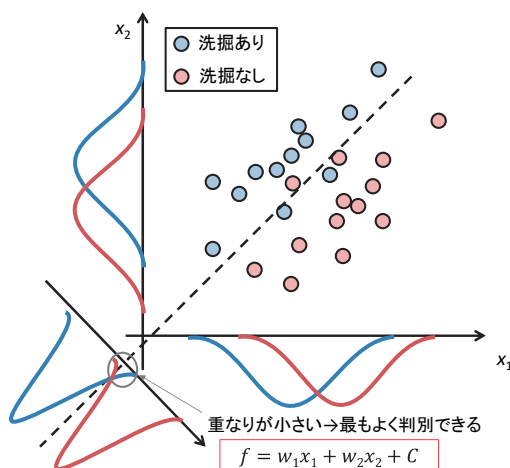


図-1 線形判別分析の概念図

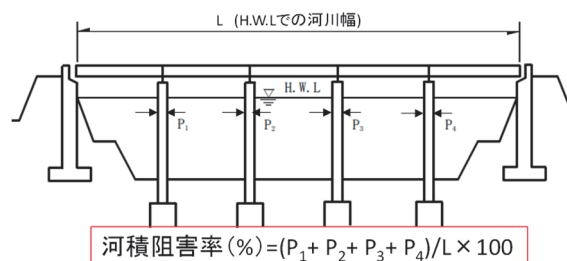


図-2 河積阻害率

表-1 定量化可能なデータ項目

| | 洗掘した橋梁群 (A群：183橋) | 洗掘しなかった橋梁群 (B群：207橋) |
|---------|----------------------|-------------------------|
| 建設年次 | 114 | 206 |
| 橋長 | 135 | 206 |
| 径間数 | 139 | 206 |
| 最大支間長 | 115 | 204 |
| 橋脚幅 | 34 | 13 |
| 流域面積(※) | 84 | 129 |
| 河床勾配(※) | 142 | 206 |
| 河道形状(※) | 183 | 207 |
| 河川幅 | 9 | 6 |
| 河床材料 | 4 | 0 |
| 被災時流量 | 12 | 0 |

※国土数値情報データから推定した値

数を示す。統計分析ではデータ数が少ないと信頼性が確保できないことから、そのデータ項目を取得できるA群とB群の合計が、全数(390橋)の過半数を超えるものを説明変数とした。結果、建設年次(西暦年)、橋長(m)、径間数(径間)、最大支間長(m)、流域面積(m²)、河床勾配、河道形状(湾曲：0、直線：1)を説明変数とすることとした。既往の研究成果から洗掘要因として考慮すべきと考えられる河積阻害率や流速は洗掘DBに収録されていなかったため、直接的には説明変数に設定できなかったが、建設年次、径間数や最大支間長は河積阻害率に関連し、河床勾配は流速に関連すると考えられる。建設年次が、河

積阻害率に関連すると考えられる理由は、昭和51年に河川管理施設等構造令が制定され、その解説書で初めて河積阻害率の目安が示されたことによる。ただし、建設年次が古いものほど過去の洪水の影響が累積している可能性が高くなると考えられるが、それらを分離できていない。なお、これらの説明変数の内部相関の有無を確認した結果、いずれの組合せも相関係数は0.7以下で、内部相関は見られないと判断した。

また、橋脚形式、橋脚基礎形式については、洗掘DBの全ての橋梁を形式ごとに洗掘の有無の割合を比較した結果、特定の形式で洗掘の有無に有意な傾向があることが確認された。図-3は橋脚形式ごとの洗掘の有無の割合の比較結果を示す。特にパイルベント式の橋脚では、顕著な傾向が表れ洗掘なしのものがなかった。道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月）にも、パイルベント式の橋脚はその形状から周辺に生じる渦流により異常洗掘を起こしやすいことが記載されている。そのため、橋脚形式や橋脚基礎形式は洗掘要因と考えるべきであるが、形式の違いは定量的なデータにし難いため、予め橋脚形式、橋脚基礎形式をグルーピングして線形判別分析を行うことで、それらの影響を考慮することとした。

2.4 線形判別分析の結果

2.3で設定した説明変数を用いて、洗掘あり・洗掘なしを判別する線形判別分析を行った。線形判別分析では、説明変数の組合せによって有意な説明変数が異なる場合がある。そこで、全ての説明変数の組合せについて分析を行った。以下に、実際の洗掘あり・洗掘なしとの適合率が比較的高かった説明関数について考察する。

判定結果を表-2に示す。表中の数値は、各説明変数の標準化判別係数を示す。前述の通り、標準化判別係数の絶対値が大きいほど寄与度が高いことを示す。説明関数①の適合率は74%で、寄与度が高いものから順に、橋長が小さいほど、径間数が多いほど、河床勾配が急なほど、建設年次が古いほど洗掘しやすいという結果となった。特に、橋長と径間数の寄与度が他に比べて高い結果となった。それらの寄与度が高い理由としては、橋長が小さく径間数が多い橋梁では、河積阻害率が高くなることが考えられ、既往の研究成果等と同様に、河積阻害率が洗掘の有無の支配的な要因と

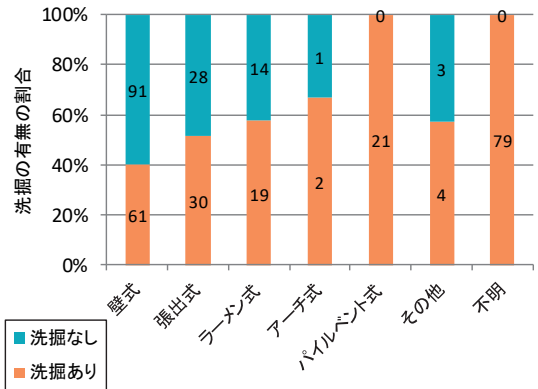


図-3 橋脚形式と洗掘の有無との関係

表-2 洗掘の有無に関する線形判別分析の結果

| | 各説明変数の標準化判別係数 | | | | | | | 適合率 |
|-------|---------------|-------|------|-------|------|------|-------|-----|
| | 建設年次 | 橋長 | 径間数 | 最大支間長 | 流域面積 | 河床勾配 | 河道形状 | |
| 説明関数① | -0.43 | -0.88 | 0.82 | — | — | 0.45 | — | 74% |
| 説明関数② | — | — | 0.52 | — | — | 0.94 | -0.25 | 65% |

なることを示唆している。説明関数②は、河道形状が説明変数に採用されたものの中で最も適合率が高かったもので、適合率は65%であった。河床勾配、径間数、河道形状の順に寄与度が高い結果となった。特に、河床勾配の寄与度が他に比べて高い傾向が確認できる。この傾向が生じる理由としては、河床勾配が大きいと流速が速くなる傾向があると考えられ、流速が速い中で河道形状が湾曲していると、水衝部にある橋台等が洗掘されやすいこと等が考えられる。

次に、前述の通り橋脚形式の違いを考慮するため、予め分析対象をグルーピングした上で線形判別分析を行った。グルーピングは、簡単のため最も橋脚形式数の多い壁式と壁式以外に分けた。グルーピングして分析した結果、壁式は68%、壁式以外は78%の適合率が得られた（図-4参照）。適合率が68%に低下した壁式について、適合率をさらに詳しく見ると、洗掘ありと判定されたものの適合率は71%から80%と改善される一方で、洗掘なしと判定されたものの適合率が75%から61%に低下した。つまり、洗掘ありと判定したものに対する空振り（実際は洗掘なし）が少なくなるが、洗掘なしと判定したものに対する見逃し（実際は洗掘あり）が多くなることとなる。適合率が78%に増加した壁式以外について、適合率をさらに詳しく見ると、洗掘ありと判定されたものの適合率は71%から74%、洗掘なしと判定さ

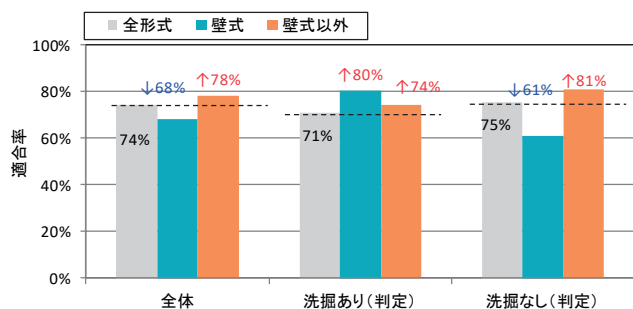


図-4 橋脚形式のグルーピングによる適合率の変化

れたものの適合率が75%から81%に改善された。つまり、洗掘ありと判定したものに對する空振りが少なくなるだけでなく、洗掘なしと判定したものに對する見逃しも少なくなる事となる。

2.5 結果の考察

判定と実際の洗掘の有無の適合率が比較的高かった、説明関数①や説明関数②において、適合率が74%や68%に留まった原因としては、説明変数で設定したもの以外の定量化が困難な洗掘要因、例えば、砂州の形成の有無等が支配的となっている事例があると考えられる。他に、洗掘ありの橋梁は、洗掘により被災したものを災害査定資料等から抽出したため、国だけでなく地方自治体管理の橋梁も含まれるが、洗掘なしの橋梁は、国が管理する橋梁から抽出したため、比較的橋長や径間数が大きい橋梁が多く、サンプルに偏りがあったことが考えられる。また、予め橋脚形式が壁式と壁式以外でグルーピングした上で線形判別分析を行った結果については、壁式以外では適合率が4%改善されたことから、橋梁形式自体が洗掘要因である又は形式により洗掘要因が異なることが考えられる。

3. まとめと今後の課題

橋梁基礎の洗掘に着目し、線形判別分析による洗掘要因の抽出を試みた。分析の結果、比較的適

合率の高い説明関数では、既往の研究等で洗掘要因とされている河積阻害率や流速との関連が強いと考えられる橋長、径間数や河床勾配が洗掘に対して寄与度が高くなる結果が得られた。

今後の課題とその対応について以下に示す。

①線形判別分析の適合率の改善

線形判別分析の適合率の改善に向けて、定量化が困難な洗掘要因は、予め適切なグルーピングを行った上で線形判別分析を行う予定である。また、洗掘ありと洗掘なしのサンプルの偏りについては、洗掘なしに地方自治体管理の橋梁も含める予定である。

②適合しない橋梁の個別分析

実際は洗掘ありの橋梁にもかかわらず線形判別分析で洗掘なしと判定したものは、統計分析ではなく個別に洗掘要因を分析する予定である。

統計分析の結果のみで、漏れなく洗掘対策を実施すべき橋梁を抽出する手法を提案することは困難であると考えている。本研究では、統計分析による定量的なスクリーニングに加えて、個別分析による知見を組み合わせ、洗掘被害を受けやすい既設橋梁の有効な抽出方法を提案する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所：平成26年（2014年）北海道地方被災橋梁等調査報告、国土技術政策総合研究所資料第868号、土木研究所資料第4307号、2015.10
- 2) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月）
- 3) 建設省土木研究所：治水上から見た橋脚問題に関する検討、土木研究所資料第3225号、1993
- 4) 佐溝昌彦、興水聡、森泰樹、渡邊諭：統計的手法による鉄道橋梁の増水時における被災注意橋脚抽出手法、No.3、Vol.69、土木学会論文集D3（土木計画学）、2013
- 5) 大山史晃、渡邊康玄：洪水時に発生した低水路の土砂堆積及び高水敷の河床洗掘と砂州形成との関係、第46巻、水工学論文集、2002

藤田智弘



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部構造・基礎研究室 主任研究官
Tomohiro FUJITA

七澤利明



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部構造・基礎研究室長
Toshiaki NANAZAWA

佐々木惇郎



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部構造・基礎研究室 研究官
Atsuo SASAKI