

# 被災事例の統計分析等に基づく 道路橋の洗掘による被災リスクに関する研究

島田 裕貴<sup>1</sup>・宮原 史<sup>2</sup>・七澤 利明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 元 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（現 東急建設株式会社）

（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 渋谷地下鉄ビル内）

E-mail: shimada.hiroki@tokyu-cnst.co.jp

<sup>2</sup>正会員 国土技術政策総合研究所（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地）

E-mail: miyahara-f852a@mlit.go.jp

<sup>3</sup>正会員 元 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  
（現 近畿地方整備局 大阪国道事務所）（〒536-0004 大阪府大阪市城東区今福西 2-12-35）

E-mail: nanazawa-t92pq@mlit.go.jp

激甚化・頻発化する豪雨により道路橋の基礎に洗掘が生じ、道路ネットワークの機能が長期にわたって低下する被害がみられる。耐災害性を備えた道路ネットワークを確保するためには、道路橋基礎の洗掘による被災が生じないようにすることが重要であり、合理的に道路橋基礎の洗掘対策を進めてゆく観点からは、洗掘被災リスクが高いと考えられる橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件を明らかにする必要がある。本稿では、過去の洗掘被災事例に基づき、洗掘に影響を及ぼすと考えられる条件を定量的要因と定性的要因に分け、統計的手法による分析と被災事例の個別分析の 2 段階で検討した。近年の被災事例を対象に検討結果の妥当性検証も行い、洗掘被災リスクが高いと考えられる条件を明らかにした。

**Key Words:** *scouring, road bridge, risk of scour damage, linear discriminant analysis*

## 1. はじめに

近年、激甚化・頻発化する豪雨により道路橋の基礎に洗掘が生じ、道路ネットワークの機能が長期にわたって低下する被害がみられる。例えば 2019 年の台風 19 号では、国道 20 号法雲寺橋において洗掘が原因と考えられる橋脚の沈下が生じ、約 1 ヶ月半にわたり、通行止めの措置がとられた。耐災害性を備えた道路ネットワークを確保するためには、道路橋基礎の洗掘による被災が生じないようにすることが重要である。

洗掘により被災が生じる可能性（以降、洗掘被災リスク）は、橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件によっても異なり得る。このため、合理的に道路橋基礎の洗掘対策を進めてゆく観点からは、洗掘被災リスクが高いと考えられる橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件を明らかにする必要がある。

現状、国が管理する道路橋における橋梁基礎の洗掘に対して、対策の必要性を判断する枠組みの 1 つに道路防災点検がある。この点検では、安定度調査表<sup>1)</sup>を用いて、

河川を渡河する橋梁の構造や河道の特性、現地の変状に対して点数をつけることで対策の必要性が判断される。しかしながら、安定度調査表における採点項目の配点の根拠は明確ではない。

これに対して、過去に洗掘により被災が生じた事例に基づいて構造条件や周辺環境条件について分析することが洗掘被災リスクが高いと考えられる条件を明らかにするうえで有効である可能性がある。

そこで本研究では、過去の洗掘被災事例に基づき、洗掘被災リスクが高いと考えられる橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件を明らかにすることを目的とする。

## 2. 洗掘予測や洗掘判定に関する既往の手法と本研究の位置づけ

道路橋における橋脚周りの洗掘深の算定には、過去に建設省土木研究所の推定式（以降、土研式）が提案されている。河川を横過する橋梁に関する計画の手引き（案）

<sup>2)</sup>に記されている土研式を式(1)に示す.

$$Z = (Z/D) \cdot D \cdot K_{\alpha} \cdot K_d \quad (1)$$

ここで、 $Z$ ：洗掘深(m)、 $Z/D$ ：無次元洗掘深、 $D$ ：橋脚幅(m)、 $K_{\alpha} \cdot K_d$ ：修正係数である。 $Z/D$ 、 $K_{\alpha} \cdot K_d$ については、手引き<sup>2)</sup>に併記されている参考図により求めることができる。この土研式では、対象橋脚に洗掘が生じた時の想定される洗掘深(洗掘量)を算定できる。しかしながら1.に述べたとおり、橋梁ごとに異なる構造条件や周辺環境条件によって洗掘被災リスクは異なり得る。土研式ではそのような橋梁ごとに異なる条件を考慮することができない。

また、佐溝ら<sup>3)</sup>は、河川の増水時に橋脚基礎周辺が洗掘された際の列車の運転規制措置を合理的かつ効果的に実施するため、日常の検査業務で得られるパラメータを基本とした判別分析により洗掘に伴う被災の可能性の有無を橋脚単位で判定する手法を提案している。その手法では、「河川の地形地質的な性状」「河川工学的、水理学的な性状」「洗掘と鉄道橋梁の構造条件」の3つの条件に関するパラメータ群から相関性の高いパラメータが除去され、次に示す9つのパラメータが選定された。河川の曲率 $l/r \times 1000(1/km)$ 、流域の侵食速度 $E_v(mm/year)$ 、最大水深 $h_i(m)$ 、河床材料の平均粒径 $d_m(cm)$ 、植生の有無 $V_{eg}$ 、橋脚幅 $D_i(m)$ 、分担阻害率 $S_{oi}$ 、流路内位置比 $P_{oi}$ 、橋脚と水際線との距離 $ds_i(m)$ の9つである。これら9つのパラメータと河川に架かる鉄道橋梁の被災事例データ(被災歴あり：91橋脚、被災歴なし：75橋脚)を用いて判別分析を行った結果、被災歴あり又は被災歴なしの判別について、80%以上の正答率を有することが確認されている。しかしながら、鉄道橋と道路橋とは、求められる機能や適用基準が異なるため構造条件も異なる。先述のように、橋脚幅などの構造条件も洗掘に影響を及ぼす要因の1つと考えられるため、鉄道橋を対象として得られた結果を構造条件の異なる道路橋にそのまま適用することは適切ではないと考えられる。

以上に示した既往の手法からみると、本研究で行う道路橋を対象とした過去の被災事例を用いた洗掘被災リスクに関する研究はこれまでに例がない。

### 3. 研究方法

#### (1) 研究の流れ

過去の災害調査報告<sup>例えば4)</sup>を参照すると、洗掘に影響を及ぼすと考えられる要因には、河床勾配や河積阻害率などの定量的な値でその特性を表すことができると考えられる要因もあれば、滯筋の変遷など、定量的な値でその特性を直接的に表すことができない要因もあった。そ

こで本研究では、統計的手法による分析と被災事例の個別分析の2段階に分けて検討を行う。検討にあたっては、過去に被災が生じた橋梁(以降、被災あり橋梁)と被災が生じていない橋梁(以降、被災なし橋梁)のデータを収集し、データベースとして一覧表に整理する。

はじめに、洗掘に影響を及ぼすと考えられる要因のうち、定量的に数値として扱う構造条件・周辺環境条件(以降、定量的洗掘被災リスク要因)をパラメータとした線形判別分析を行い、その結果から洗掘に影響を及ぼすと考えられる定量的洗掘被災リスク要因を明らかにする。

次に、線形判別分析の結果、実際の被災の有無と判別結果が合致せず非適合となった橋梁を対象に、定性的な特性として扱う構造条件・周辺環境条件(以降、定性的洗掘被災リスク要因)に着目して個別に分析し、洗掘に影響を及ぼすと考えられる定性的洗掘被災リスク要因を明らかにする。

最後に、2021年に豪雨により洗掘被害が生じた3橋梁を対象に、上記の過程で得られた定量的及び定性的洗掘被災リスク要因の妥当性を検証する。

#### (2) 線形判別分析による定量的洗掘被災リスク要因の検討

3.(1)で収集した被災あり及び被災なし橋梁データの定量的洗掘被災リスク要因を説明変数として線形判別分析を行う。線形判別分析は、複数の説明変数(パラメータ)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)を決定する解析手法である<sup>5)</sup>。線形判別分析の結果得られた説明関数を構成する各説明変数の寄与度の大小を整理することで、洗掘被災リスクが高いと考えられる定量的洗掘被災リスク要因を明らかにする。

各説明変数の寄与度の大小は、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。仮に説明変数を2つとした場合の標準化した説明関数は、 $F = W_1 X_1 + W_2 X_2$ ( $F$ ：標準化した説明関数、 $W_1, W_2$ ：標準化判別係数、 $X_1, X_2$ ：標準化した説明変数)となる。説明変数とする定量的洗掘被災リスク要因のうち、例えば竣工年や橋長などの次元が異なる説明変数を標準化することで無次元とし、その係数(標準化判別係数)の絶対値を比較して大小を判断する。標準化した説明変数は、 $X_i = (X_i - m_i) / \sigma_i$ ( $m_i$ ：説明変数 $x_i$ の平均値、 $\sigma_i$ ：標準偏差、 $i$ ：説明変数の数)で求められる。

また、洗掘被災リスクが高いと考えられる定量的洗掘被災リスク要因を明らかにするための説明関数の妥当性は、説明関数による判別の適合率が確認する。実際の被災の有無と線形判別分析の結果得られた説明関数による

判別結果が合致した割合を表す適合率の高さにより、説明関数の妥当性、ひいては、その説明関数を構成する説明変数（定量的洗掘被災リスク要因）の妥当性を確認する。

“被災あり”又は“被災なし”の判別は、標準化しない説明関数の各説明変数に値を代入して算出された  $f$  値と  $f$  値の重心を比較することにより行う。仮に説明変数を 2 つとした場合の標準化しない説明関数は、 $f = w_1 x_1 + w_2 x_2 + C$  ( $f$ : 標準化しない説明関数,  $w_1, w_2$ : 判別係数,  $x_1, x_2$ : 説明変数,  $C$ : 定数項) となる。また重心は、被災あり及び被災なし橋梁データの説明変数（定量的洗掘被災リスク要因）を標準化しない説明関数に代入して得られた被災あり及び被災なし橋梁それぞれの  $f$  値の分布の中心値を表す。判別対象とする橋梁の  $f$  値が被災ありの重心に近ければ“被災あり”、被災なしの重心に近ければ“被災なし”と判別される。なお、ケースごとに分析に用いる被災あり橋梁及び被災なし橋梁のデータ数は異なるため、重心もケースごとに異なる。

### (3) 個別分析による定性的洗掘被災リスク要因の検討

線形判別分析の結果得られた説明関数による判別の結果、実際の被災の有無と判別結果が合致せず非適合となった橋梁のうち、「見逃し」となった橋梁に着目する。ここで、見逃しとなった橋梁とは、被災あり橋梁であるが“被災なし”と判別された橋梁のことを指す。なお、被災なし橋梁であるが“被災あり”と判別された橋梁は「空振り」と称する。見逃しは、定性的洗掘被災リスク要因により被災が生じた可能性が考えられる。そのため、ここでは見逃しとなった橋梁を対象に、その要因を個別に分析し、洗掘被災リスクが高いと考えられる定性的洗掘被災リスク要因を明らかにする。

なお、佐溝ら<sup>3)</sup>は、定性的な条件と考えられる植生の有無( $V_{eg}$ )について、植生ありを 0、植生なしを 1 とすることで判別分析のパラメータの 1 つとして考慮している。しかしながら植生の状態によっては、0 (植生あり) 又は 1 (植生なし) の 2 値では適切に評価することができない場合もあると考えられる。したがって本研究では、そのような条件については線形判別分析の説明変数とせず、個別に分析することとした。

### (4) 洗掘被災リスク要因の妥当性検証

3.(2)の結果得られた説明関数に、2021 年に豪雨により洗掘被害が生じた 3 橋梁の説明変数（定量的洗掘被災リスク要因）を代入して、“被災あり”又は“被災なし”のどちらに判別されるかを確認する。次に、当該 3 橋梁を個別に分析し、3.(3)の結果得られた定性的洗掘被災リスク要因に該当するかを確認することで、定量的及び定性的洗掘被災リスク要因の妥当性を検証する。

## 4. 線形判別分析による定量的洗掘被災リスク要因の検討

### (1) 橋梁データの収集と定量的洗掘被災リスク要因の整理

被災あり橋梁は、以下に該当する橋梁のデータを収集した。ここで、「被災あり」は、豪雨や台風により橋台又は護岸又は橋脚の基礎に洗掘が生じ、上部構造や下部構造に欠損や流出、沈下、傾斜などの被災が生じたことを表す。被災あり橋梁のデータ数は計 214 橋梁であった。

- ・道路管理者から提供を受けた 2011 年から 2016 年までの洗掘により被災が生じた橋梁：157 橋梁
- ・1990 (平成 2) 年九州中北部梅雨前線豪雨で洗掘により被災が生じたとされる橋梁<sup>6)</sup>：31 橋梁
- ・1998 (平成 10) 年福島県南部・栃木県北部豪雨で洗掘により被災が生じたとされる橋梁<sup>7)</sup>：20 橋梁
- ・2018 年に発生した豪雨や台風及び 2019 年台風 19 号で被災が生じた橋梁のうち、筆者らが把握している橋梁：6 橋梁

被災なし橋梁は、被災あり橋梁が経験した外力（洪水など）規模の影響を排除して洗掘被災リスク要因を見出すため、被災あり橋梁と同等の外力を経験した橋梁とした。本研究では、被災あり橋梁と被災時点で同一水系内に位置し、被災あり橋梁に該当しない橋梁がそれに該当するものとした。被災なし橋梁に被災が生じていないことは、国管理の橋梁については、定期点検の損傷程度評価や橋梁管理カルテに基づいて、自治体管理の橋梁については、洗掘の有無や橋梁条件などを調査することを目的として別途道路管理者に対して行ったアンケートの回答に基づいて確認した。その結果、被災なし橋梁のデータ数は 445 橋梁となった。

収集した被災あり及び被災なし橋梁データから表-1 に示す 11 種の定量的洗掘被災リスク要因を選定し、データベースとして一覧表に整理した。定量的洗掘被災リスク要因については、橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件から洗掘に影響を及ぼすと考えられる条件を網羅的に選定し、表-1 に示す 11 種とした。このうち、(A)～(E)、(G)、(H)、(K)は収集したデータを基に整理した。収集した橋梁データにこれらの値の一部がなかった場合も、公表されている資料から推定することができた場合には、その値とした。(F)、(I)、(J)は収集データには記載がなかったため公表されている資料から推定した。表-1 には 11 種の定量的洗掘被災リスク要因それぞれの整理方法も併記する。

### (2) 線形判別分析のケース設定及び有意性の評価

表-1 に示した 11 種の定量的洗掘被災リスク要因全て

の値が揃うデータを被災あり橋梁 214 橋梁及び被災なし橋梁 445 橋梁から抽出した結果、被災あり橋梁 87 橋梁、被災なし橋梁 404 橋梁となった。

線形判別分析は、橋梁データを「全橋梁」「橋脚がある橋梁（以降、橋脚あり橋梁）」「橋台のみの（橋脚がない）橋梁（以降、橋台のみ橋梁）」と 3 パターンに分けて行った。河道内の橋脚は河積を阻害することや橋脚周辺では水流を乱す渦が発生すると言われている<sup>2)</sup>。このことから、橋脚あり橋梁と橋台のみ橋梁では、洗掘に影響を及ぼすと考えられる要因が異なると考えられるため、「橋脚あり橋梁」と「橋台のみ橋梁」とでパターンを分けて分析を行うことで、それぞれのパターンの適合率を上げることができると考えた。

また、相関関係が大きい説明変数の組合せがある場合、全説明変数を用いた線形判別分析では、それぞれの説明変数の寄与度が不明瞭になってしまう可能性がある。このため、3 つのパターンそれぞれにおいて全説明変数を対象とした分析ケース（以降、全説明変数対象ケース）と相関関係がある説明変数を除いた分析ケース（以降、内部相関変数除外ケース）の 2 ケースを行うこととした。

以上により、本研究の分析ケースは表-2 に示す 6 ケースとした。なお、本稿においては、説明変数の寄与度が明瞭に表れると考えられる内部相関変数除外ケース 2,4,6 の計 3 ケースの線形判別分析結果について示すこととする。

線形判別分析の結果から得られた説明関数を用いて、

表-1 11種の定量的洗掘被災リスク要因とその整理方法

	定量的洗掘被災リスク要因	整理方法
(A)	竣工年（西暦）	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。
(B)	橋長（m）	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。
(C)	径間数	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。
(D)	最大支間長（m）	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。
(E)	橋脚幅（m）	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。径間数が 1 である橋梁（橋台のみの橋梁）の場合は「-（値なし）」とした。
(F)	流域面積（km <sup>2</sup> ）	対象橋梁が渡河する地点から上流の支川も含めた源流までの流域を国土数値情報「流域メッシュ」 <sup>8)</sup> より抽出し、面積を計測した。
(G)	川幅（m）	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は「不明」とした。
(H)	河床勾配	収集データに記載の値とした。収集データに記載がない場合は、対象橋梁位置の標高を地理院地図 <sup>9)</sup> より抽出、橋梁位置から上流方へ等高線を辿り、標高の変曲点までの距離と標高から勾配を算出した。この時、橋梁位置から変曲点までの距離が最も近い場合でも 200m 程度離れていたことから、変曲点が著しく橋梁に近く、橋梁の上流方ですぐに勾配が変化する橋梁はないと判断した。
(I)	曲率半径（m）	地理院地図 <sup>9)</sup> から対象橋梁渡河部の河道に沿って円を描き、縮尺からその円の半径（図-1）を計測して曲率半径を算出した。河道形状が直線の区間に架かる橋梁の場合、曲率半径は∞となるが、説明関数に代入する都合上、十分大きい値として「9,999（m）」とした。
(J)	湾曲角度（°）	地理院地図 <sup>9)</sup> を用いて対象橋梁の前後区間で河道に沿って線を引いたうえで、その線を接線とした円を描き、その円の中心と接点と接点がつくる角度（図-1）を計測して求めた（円の中心と接点とを結ぶ線は直交に引く）。この時、対象橋梁の前後区間をどの範囲とするかは、河川の湾曲による水衝が対象橋梁の洗掘に影響する可能性がある範囲を考慮して定めた。河道形状が直線の区間に架かる橋梁の場合は「0（°）」とした。
(K)	河積阻害率	(E)橋脚幅及び(G)川幅の値を用いて図-2に示す式により算出した。径間数が 1 である橋梁（橋台のみの橋梁）の場合は「-（値なし）」とした。



図-1 曲率半径、湾曲角度の求め方<sup>9)に加筆</sup>

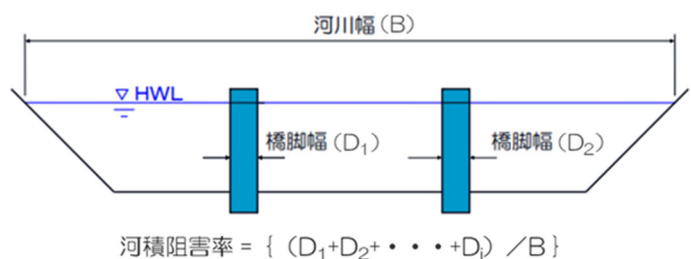


図-2 河積阻害率の求め方<sup>2)に加筆</sup>

表-3 全橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数

説明変数	$x_1$ :竣工年	$x_2$ :橋長	$x_3$ :径間数	$x_4$ :最大支間長	$x_5$ :橋脚幅	$x_6$ :流域面積	$x_7$ :川幅	$x_8$ :河床勾配	$x_9$ :曲率半径	$x_{10}$ :湾曲角度	$x_{11}$ :河積阻害率
$x_1$ :竣工年	1.000	0.258	0.043	0.383	0.198	0.180	0.243	-0.106	0.022	-0.074	-0.062
$x_2$ :橋長	0.258	1.000	0.799	0.708	0.898	0.735	0.925	-0.205	0.130	-0.129	0.426
$x_3$ :径間数	0.043	0.799	1.000	0.346	0.791	0.588	0.745	-0.197	0.082	-0.057	0.549
$x_4$ :最大支間長	0.383	0.708	0.346	1.000	0.532	0.517	0.646	-0.144	0.100	-0.092	0.189
$x_5$ :橋脚幅	0.198	0.898	0.791	0.532	1.000	0.599	0.861	-0.134	0.081	-0.073	0.563
$x_6$ :流域面積	0.180	0.735	0.588	0.517	0.599	1.000	0.714	-0.229	0.098	-0.081	0.284
$x_7$ :川幅	0.243	0.925	0.745	0.646	0.861	0.714	1.000	-0.192	0.142	-0.129	0.349
$x_8$ :河床勾配	-0.106	-0.205	-0.197	-0.144	-0.134	-0.229	-0.192	1.000	0.056	-0.059	0.027
$x_9$ :曲率半径	0.022	0.130	0.082	0.100	0.081	0.098	0.142	0.056	1.000	-0.945	-0.008
$x_{10}$ :湾曲角度	-0.074	-0.129	-0.057	-0.092	-0.073	-0.081	-0.129	-0.059	-0.945	1.000	0.039
$x_{11}$ :河積阻害率	-0.062	0.426	0.549	0.189	0.563	0.284	0.349	0.027	-0.008	0.039	1.000

表-2 本研究の分析ケース一覧

ケース	橋梁タイプ	分析対象
ケース 1	全橋梁	全説明変数対象ケース
ケース 2		内部相関変数除外ケース
ケース 3	橋脚あり橋梁	全説明変数対象ケース
ケース 4		内部相関変数除外ケース
ケース 5	橋台のみ橋梁	全説明変数対象ケース
ケース 6		内部相関変数除外ケース

“被災あり”又は“被災なし”を判別することに対する有意性は F 検定で評価した。本研究で行う 6 ケースにおいては、検定の結果、6 ケース全てで P 値は有意水準 0.01 (1%) よりも小さくなり、F 検定において「説明変数の平均値が全て等しい」とする帰無仮説を棄却できる確率が 99%以上となるため、本研究で行う 6 ケースは全て有意である。

(3) ケース 2 : 全橋梁—内部相関変数除外ケース

全橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数を表-3 に示す。相関係数は、一般に 0.7 以上で強い相関があるとされている。そのため本研究においても、絶対値で相関係数が 0.7 以上の場合に強い相関関係にあるものとした。表中の黄色ハッチングが絶対値で相関係数 0.7 以上を表している。ケース 2 では、橋長と相関関係にある変数が多く、径間数、最大支間長、橋脚幅、流域面積、川幅が強い正の相関関係にあった。また、曲率半径と湾曲角度が強い負の相関関係にあった。

ケース 2 では、橋長及び湾曲角度を代表の説明変数とし、径間数、最大支間長、橋脚幅、流域面積、川幅、曲率半径を除いて分析を行った。

説明変数をそれぞれ、 $x_1$  : 竣工年、 $x_2$  : 橋長、 $x_3$  : 河床勾配、 $x_4$  : 湾曲角度、 $x_5$  : 河積阻害率とする。全説明変数対象ケース 1 より説明変数の数が減少する分、ケース 2 における橋梁データ数は被災あり橋梁が 95 橋梁、被災なし橋梁が 411 橋梁に増加する。

表-4 にケース 2 における標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位を、標準化した説明関数を式(2)に示す。式(2)の係数(標準化判別係数)が表-4 に示す寄与度である。

$$F=0.7169X_1+0.5840X_2+0.1801X_3-0.1383X_4-0.3540X_5 \quad (2)$$

表-4 標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位 (ケース 2)

標準化した説明変数	寄与度	絶対値 (順位)
$X_1$ : 竣工年	0.7169	0.7169 (1)
$X_2$ : 橋長	0.5840	0.5840 (2)
$X_3$ : 河床勾配	0.1801	0.1801 (4)
$X_4$ : 湾曲角度	-0.1383	0.1383 (5)
$X_5$ : 河積阻害率	-0.3540	0.3540 (3)

また、説明変数の値を実際に代入して、“被災あり”又は“被災なし”を判別する場合に使用する標準化しない説明関数を式(3)に、ケース 2 における重心を以下に示す。

$$f=0.0448x_1+0.0042x_2+4.8210x_3-0.0032x_4-12.0831x_5-88.7599 \quad (3)$$

被災ありの重心 : -0.9078

被災なしの重心 : 0.2098

$x_1 \sim x_5$  に判別対象とする橋梁の値を代入し、算出された値が -0.9078 に近いほど“被災あり”と判別され、0.2098 に近いほど“被災なし”と判別される。ケース 2 における判別適合率は、約 70%であった。

判別係数に着目すると、湾曲角度( $x_4$ )、河積阻害率( $x_5$ )は負となっており、これらの値が大きくなることで、 $f$  値は被災ありの重心である -0.9078 より近づくと、被災ありになりやすい(洗掘が生じやすい)ことを表している。これに対して、竣工年( $x_1$ )、橋長( $x_2$ )、河床勾配( $x_3$ )は正となっており、これらの値が大きくなることで、 $f$  値は被災なしの重心である 0.2098 より近づくと、被災なしになりやすい(洗掘が生じにくい)ことを表している。

一般に、湾曲角度が大きい場合、その形状から水衝部が形成されやすいため洗掘は生じやすいと考えられる。河積阻害率が高い場合も洗掘は生じやすいと考えられる。このことから、湾曲角度、河積阻害率の判別係数が負となっていることは説明性を有する分析結果であるといえる。

また、竣工年が大きい(新しい)場合、経年であって

表-5 橋脚あり橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数

説明変数	$x_1$ :竣工年	$x_2$ :橋長	$x_3$ :径間数	$x_4$ :最大支間長	$x_5$ :橋脚幅	$x_6$ :流域面積	$x_7$ :川幅	$x_8$ :河床勾配	$x_9$ :曲率半径	$x_{10}$ :湾曲角度	$x_{11}$ :河積阻害率
$x_1$ :竣工年	1.000	0.339	0.060	0.411	0.278	0.238	0.325	-0.071	0.064	-0.122	-0.125
$x_2$ :橋長	0.339	1.000	0.738	0.713	0.874	0.681	0.916	-0.164	0.153	-0.170	0.123
$x_3$ :径間数	0.060	0.738	1.000	0.265	0.727	0.492	0.676	-0.152	0.079	-0.062	0.266
$x_4$ :最大支間長	0.411	0.713	0.265	1.000	0.521	0.487	0.633	-0.076	0.149	-0.163	-0.043
$x_5$ :橋脚幅	0.278	0.874	0.727	0.521	1.000	0.517	0.839	-0.076	0.081	-0.084	0.376
$x_6$ :流域面積	0.238	0.681	0.492	0.487	0.517	1.000	0.665	-0.206	0.114	-0.105	-0.006
$x_7$ :川幅	0.325	0.916	0.676	0.633	0.839	0.665	1.000	-0.160	0.166	-0.165	0.001
$x_8$ :河床勾配	-0.071	-0.164	-0.152	-0.076	-0.076	-0.206	-0.160	1.000	0.088	-0.076	0.281
$x_9$ :曲率半径	0.064	0.153	0.079	0.149	0.081	0.114	0.166	0.088	1.000	-0.943	-0.089
$x_{10}$ :湾曲角度	-0.122	-0.170	-0.062	-0.163	-0.084	-0.105	-0.165	-0.076	-0.943	1.000	0.109
$x_{11}$ :河積阻害率	-0.125	0.123	0.266	-0.043	0.376	-0.006	0.001	0.281	-0.089	0.109	1.000

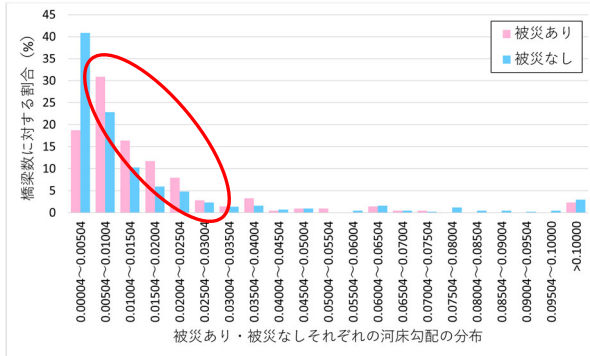


図-3 被災あり及び被災なしそれぞれの河床勾配の分布  
(縦軸：橋梁数に対する割合)

いる損傷も少ない。また、河川管理施設等構造令の制定後に設計された橋梁であれば、それ以前に設計された橋梁より洗掘は生じにくいと考えられる。このことから、竣工年の判別係数が正となっていることは説明性を有する分析結果であるといえる。

一方、河床勾配については、値が大きいほど勾配が急になるため、洗掘は生じやすいと考えられる。しかしながら、判別係数は正となっているため、河床勾配が大きい場合、 $f$ 値は被災なしの重心(0.2098)に近づくこととなり、説明性を有さない分析結果となった。そこで、図-3に縦軸を橋梁数に対する割合とした被災あり及び被災なしそれぞれの河床勾配の分布を示す。データからは図-3赤丸に示すように、河床勾配が比較的小さい橋梁で被災ありの割合が大きい傾向であったことから、河床勾配が緩い(小さい)場合に被災が生じやすいとの結果になったと考えられる。

橋長と最大支間長と流域面積と川幅については、各変数のみが増減した場合を考えた時に洗掘の生じやすさに対して正負どちらの影響を及ぼすかは一概には評価し難い。このため、橋長と最大支間長と流域面積と川幅は判別係数の正負の傾向に対する考察の対象には含めていない。

(4) ケース 4：橋脚あり橋梁—内部相関変数除外ケース

ケース4における橋梁データ数は被災あり橋梁が55橋梁、被災なし橋梁が265橋梁である。橋脚あり橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数を表-5に示す。

表-6 標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位 (ケース4)

標準化した説明変数	寄与度	絶対値(順位)
$X_1$ :竣工年	0.6234	0.6234(1)
$X_2$ :橋長	0.5506	0.5506(2)
$X_3$ :流域面積	-0.0286	0.0286(6)
$X_4$ :河床勾配	0.2854	0.2854(4)
$X_5$ :湾曲角度	-0.1096	0.1096(5)
$X_6$ :河積阻害率	-0.4803	0.4803(3)

ケース4では、橋長と相関関係にある変数が多く、径間数、最大支間長、橋脚幅、川幅が強い正の相関関係にあった。また、曲率半径と湾曲角度が強い負の相関関係にあった。

ケース4では、橋長及び湾曲角度を代表の説明変数とし、径間数、最大支間長、橋脚幅、川幅、曲率半径を除いて分析を行った。

説明変数をそれぞれ、 $x_1$ :竣工年、 $x_2$ :橋長、 $x_3$ :流域面積、 $x_4$ :河床勾配、 $x_5$ :湾曲角度、 $x_6$ :河積阻害率とした。

表-6にケース4における標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位を、ケース4における標準化しない説明関数を式(4)に、重心を以下に示す。

$$f = 0.0395x_1 + 0.0037x_2 - 0.00004x_3 + 7.8037x_4 - 0.0025x_5 - 20.1193x_6 - 78.0272 \quad (4)$$

被災ありの重心：-1.1572

被災なしの重心：0.2402

判別係数は、流域面積( $x_3$ )、湾曲角度( $x_5$ )、河積阻害率( $x_6$ )が負、竣工年( $x_1$ )、橋長( $x_2$ )、河床勾配( $x_4$ )が正となった。ケース2(全橋梁—内部相関変数除外ケース)の分析結果と比較すると、本ケースでは説明変数の1つとなった流域面積が負となる結果として追加された。これ以外の判別係数の正負の傾向はケース2と同様であった。

また、ケース4における“被災あり”又は“被災なし”の判別適合率は、約75%であった。

表-7 橋台のみ橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数

説明変数	$x_1$ :竣工年	$x_2$ :橋長	$x_3$ :最大支間長	$x_4$ :流域面積	$x_5$ :川幅	$x_6$ :河床勾配	$x_7$ :曲率半径	$x_8$ :湾曲角度
$x_1$ :竣工年	1.000	0.370	0.398	0.081	0.162	-0.181	-0.050	0.010
$x_2$ :橋長	0.370	1.000	0.892	0.656	0.490	-0.138	-0.027	0.085
$x_3$ :最大支間長	0.398	0.892	1.000	0.719	0.545	-0.192	-0.067	0.125
$x_4$ :流域面積	0.081	0.656	0.719	1.000	0.333	-0.184	-0.136	0.215
$x_5$ :川幅	0.162	0.490	0.545	0.333	1.000	0.022	0.030	0.000
$x_6$ :河床勾配	-0.181	-0.138	-0.192	-0.184	0.022	1.000	0.021	-0.040
$x_7$ :曲率半径	-0.050	-0.027	-0.067	-0.136	0.030	0.021	1.000	-0.951
$x_8$ :湾曲角度	0.010	0.085	0.125	0.215	0.000	-0.040	-0.951	1.000

表-8 標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位 (ケース 6)

標準化した説明変数	寄与度	絶対値 (順位)
$X_1$ :竣工年	0.7461	0.7461 (1)
$X_2$ :橋長	0.4299	0.4299 (2)
$X_3$ :川幅	0.1097	0.1097 (5)
$X_4$ :河床勾配	0.1578	0.1578 (3)
$X_5$ :湾曲角度	-0.1500	0.1500 (4)

(5) ケース 6: 橋台のみ橋梁-内部相関変数除外ケース

ケース 6 における橋梁データ数は被災あり橋梁が 39 橋梁、被災なし橋梁が 146 橋梁である。橋台のみ橋梁データを用いた場合の各説明変数間の相関係数を表-7 に示す。ケース 6 では、最大支間長と相関関係にある変数が多く、橋長と流域面積が強い正の相関関係にあった。また、曲率半径と湾曲角度が強い負の相関関係にあった。なお、橋台のみ橋梁を対象とするため、径間数、橋脚幅、河積阻害率は説明変数から除外される。

ケース 6 では、ケース 2 及びケース 4 と代表の説明変数を統一するため、橋長及び湾曲角度を代表の説明変数とし、最大支間長、流域面積、曲率半径を除いて分析を行った。

説明変数をそれぞれ、 $x_1$ : 竣工年、 $x_2$ : 橋長、 $x_3$ : 川幅、 $x_4$ : 河床勾配、 $x_5$ : 湾曲角度とした。

表-8 にケース 6 における標準化した各説明変数の寄与度及びその絶対値と順位を、ケース 6 における標準化しない説明関数を式(5)に、重心を以下に示す。

$$f = 0.0453x_1 + 0.0216x_2 + 0.0029x_3 + 4.2566x_4 - 0.0036x_5 - 90.3791 \quad (5)$$

被災ありの重心: -0.6327

被災なしの重心: 0.1690

判別係数は、湾曲角度( $x_5$ )が負、竣工年( $x_1$ )、橋長( $x_2$ )、川幅( $x_3$ )、河床勾配( $x_4$ )が正となった。ケース 2 (全橋梁-内部相関変数除外ケース) の分析結果と比較すると、本ケースでは説明変数の 1 つとなった川幅が負となる結果として追加された。これ以外の判別係数の正負の傾向はケース 2 と同様であった。

また、ケース 6 における“被災あり”又は“被災なし”の判別適合率は、約 66%であった。

(6) 線形判別分析による定量的洗掘被災リスク要因の検討結果

各説明変数の寄与度からみた洗掘被災リスクについて、ケース 4 (橋脚あり橋梁-内部相関変数除外ケース) においては、分析の結果得られた判別係数の正負の傾向と洗掘の発生メカニズムに照らして想定される被災傾向が一致した説明変数は寄与度の大きい順に、竣工年、河積阻害率、湾曲角度となった。ケース 6 (橋台のみ橋梁-内部相関変数除外ケース) においては、竣工年、湾曲角度となった。また、橋長が洗掘の生じやすさに及ぼす影響は一概には評価し難いと想定したように、洗掘の発生メカニズムとの関係は明確ではないものの、橋長はケース 2,4,6 の 3 ケース全てで寄与度が上位から 2 番目であった。以上のことから、以下に示す定量的洗掘被災リスク要因の組合せに該当する条件の橋梁で洗掘被災リスクが高いと考えられる。

- ・竣工年が古い (小さい)
- ・河積阻害率が大きい
- ・湾曲角度が大きい
- ・橋長が小さい

また、判別適合率については、本節で着目したケース 4 では約 75%、ケース 6 では約 66%、また本稿に示していないケース 1,3,5 も含めた全 6 ケースの平均では約 73% であり、総じて 70% 程度の判別適合率を有していることが確認できた。この結果から、本節で示した橋脚あり橋梁及び橋台のみ橋梁の洗掘被災リスクが高いと考えられる定量的洗掘被災リスク要因は一定の妥当性を有するものと考えられる。

5. 個別分析による定性的洗掘被災リスク要因の検討

(1) 見逃しとなった橋梁の整理

6 つの全分析ケースのいずれかにおいて見逃しとなっ

た橋梁は計 39 橋梁であった。この 39 橋梁を対象に個別分析を行った。

(2) 個別分析で着目する定性的洗掘被災リスク要因

個別分析にあたっては、以下の a)~c)で示す 3 つの定性的洗掘被災リスク要因に着目することとした。

a) 砂州や植生による滞筋の固定化の有無

植生は、一般に種子や枝が漂着することで砂州に入植して形成される。植生が成長することで小規模出水の度に細粒土砂を捕らえて、砂州と低水路（滞筋）の比高差（砂州の地盤高と流路の水位との高低差）を拡大させる<sup>10)</sup>。また、山本ら<sup>11)</sup>は、比高拡大が進んで滞筋が固定化されることで砂州部のかく乱頻度が減少して砂州の樹林化につながることや滞筋部で洗掘が生じることなどから、比高拡大は近年の河道管理上の 1 つの大きな課題であると述べている。以上より、砂州や植生が河道内にあることで滞筋の固定化が生じやすくなり、局所的な河床低下や洗掘が引き起こされやすくなる。

b) 河川沿いの堤外樹林帯の有無

河川沿いに樹林帯がある場合、特に堤外樹林帯については、河道での洪水時の水位上昇や土砂堆積による河積の減少あるいは流木化などの治水上の支障をもたらすことがあると言われている<sup>12)</sup>。架橋位置付近の河川沿いに堤外樹林帯があることで、水位上昇による流量の増加や樹林帯の一部の流木化による河積の阻害により河床低下が生じやすくなる。

c) 架橋位置上流又は下流の落差工の有無

落差工の上流部では、落差工越流時に低下背水が発生し、低下背水による流速及び掃流力の増大で上流側の広い範囲に河床低下が生じるとされている<sup>13)</sup>。一方、架橋位置上流に落差工がある場合、上流に位置する落差工越流時の流速増大の影響により河床低下や洗掘が引き起こされやすくなる。

(3) 個別分析

5.(2)a)~c)の定性的洗掘被災リスク要因の該当の有無は公表されている航空写真<sup>9),14)</sup>や地形図<sup>9)</sup>、google ストリートビュー<sup>15)</sup>を用いて、当該橋梁渡河地点周辺の状況から確認した。

個別分析の例を図-4 に示す。図-4 のように航空写真と地形図を用いて当該橋梁渡河地点周辺の状況を確認することを基本とした。航空写真を拡大しても不鮮明で確認できない場合には google ストリートビューを用いることとし、それでも確認できない場合には「確認不可」とした。なお、当該橋梁渡河地点周辺の状況は、被災前の状況を確認する必要があるため、航空写真や google ストリートビューは当該橋梁の被災要因となった事象（豪雨や台風など）が発生するよりも前の時期に撮影されたものの中で、解像度が高く、最新のものを採用することとした。

(4) 個別分析による定性的洗掘被災リスク要因の検討結果

39 橋梁の個別分析結果を表-9 に示す。39 橋梁のうち、2 橋梁を「確認不可」としたため、表-9 は 37 橋梁についての分析結果である。1 つの橋梁に対して複数の定性的洗掘被災リスク要因を有している場合もあるため、「目立った特性なし」の 3 橋梁以外の該当数の合計は 34 橋梁にはならない。見逃しとなった橋梁の多くが着目した 5.(2)a)~c)の定性的洗掘被災リスク要因に該当することが確認できた。このため、以下に示す定性的洗掘被災リスク要因に該当する条件の橋梁で洗掘被災リスクが高いと考えられる。

- ・砂州や植生により滞筋が固定化している
- ・河川沿いに堤外樹林帯がある
- ・架橋位置上流又は下流に落差工がある

なお、「目立った特性なし」の 3 橋梁については、洗

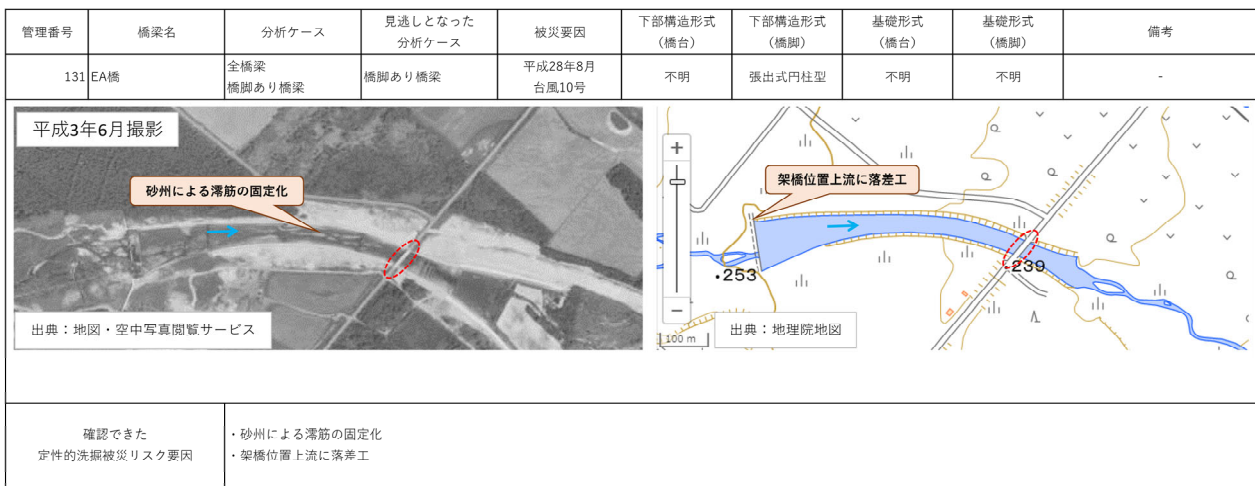


図-4 個別分析の例

掘による被災が生じた要因は不明であるものの、いずれも小規模な橋台のみ橋梁で、また、収集したデータでは下部構造形式が不明であり、構造的な脆弱性を有していた可能性が考えられる。

## 6. 洗掘被災リスク要因の妥当性検証

### (1) 2021年の被災事例3橋梁の概要

本章で対象とする2021年の被災事例3橋梁の概要を以下a)~c)に示す。

#### a) 川島大橋

川島大橋は岐阜県各務原市に位置し、木曾川を渡河する橋梁である。2021年5月27日にP4橋脚の沈下及び傾斜や上部構造の変形が確認され、5月28日から全面通行止めの措置がとられた。5月21日には付近の川島観測所において直近35年間の年最高水位で過去5番目に高い水位を記録する程の豪雨が発生していた。表-10に橋梁諸元を、写真-1に被災状況を示す。

#### b) 黄瀬川大橋

黄瀬川大橋は静岡県沼津市に位置し、黄瀬川を渡河する橋梁である。2021年7月1日~3日の断続的な降雨によりP4橋脚に沈下及び傾斜が生じ、通行止めの措置がとられた。7月3日深夜には黄瀬川の西部で最大時間降水量75mmが観測され、7月1日~3日までの総降水量は721mmであった。表-11に構造諸元を、写真-2に被災状況を示す。

#### c) 新大田切橋

新大田切橋は長野県駒ヶ根市に位置し、太田切川を渡河する橋梁である。2021年8月12日から続いた断続的な降雨により8月17日に基礎周辺地盤の洗掘が確認され、通行止めの措置がとられた。8月14日夜には付近の太田切観測所において最大時間降水量47mmが観測され、8月12日~15日までの総降水量は546mmであった。表-12に構造諸元を、写真-3に被災状況を示す。

### (2) 定量的洗掘被災リスク要因の被災事例への適用

ここでは、ケース2の式(3)を用いることとする。以下a)~c)に、式(3)に代入する定量的洗掘被災リスク要因と判別結果を示す。

#### a) 川島大橋の判別

川島大橋の定量的洗掘被災リスク要因を以下に整理する。

- ・  $x_1$  : 竣工年 (西暦) = 1962
- ・  $x_2$  : 橋長 (m) = 343.5
- ・  $x_3$  : 河床勾配 = 1/483
- ・  $x_4$  : 湾曲角度 (°) = 76
- ・  $x_5$  : 河積阻害率 = 0.023

竣工年と橋長は表-10に示すとおりである。河床勾配は木曾川水系河川整備計画<sup>16)</sup>より算出し、湾曲角度と河積阻害率は表-1に示した方法で算出した。なお、河積阻害率を求めるための橋脚幅及び川幅は橋梁一般図より仮定した。

式(3)に以上の値を代入すると、 $f = 0.0693$ となり、4.(3)に示す重心より、“被災なし”と判別される。この結果は、橋長が大きく、河積阻害率が小さいためと考えられる。

#### b) 黄瀬川大橋

黄瀬川大橋の定量的洗掘被災リスク要因を以下に整理

表-9 定性的洗掘被災リスク要因と該当した橋梁数

定性的洗掘被災リスク要因	該当した橋梁数
砂州による滞筋の固定化	17
植生による滞筋の固定化	7
河川沿いに堤外樹林帯	13
架橋位置上流に落差工	6
架橋位置下流に落差工	1
目立った特性なし	3

表-10 橋梁諸元 (川島大橋)

橋長	343.5m
上部構造	鋼5径間連続下路式トラス橋
下部構造	壁式橋台(2基), 壁式橋脚(4基)
基礎形式	橋台: ケーソン基礎, 橋脚: ケーソン基礎
竣工年	1962年



写真-1 P4橋脚の傾斜

表-11 橋梁諸元 (黄瀬川大橋)

橋長	83.49m
上部構造	鋼 5 径間非合成 I 桁橋
下部構造	重力式橋台 (2 基), 壁式橋脚 (4 基)
基礎形式	橋台: 直接基礎, 橋脚: 直接基礎・ケーソン基礎
竣工年	1953 年

表-12 橋梁諸元 (新大田切橋)

橋長	110.0m
上部構造	3 径間単純ポステン T 桁橋
下部構造	壁式橋台橋脚, 箱式橋台, 逆 T 式橋脚 (2 基)
基礎形式	橋台: 直接基礎, 橋脚: 直接基礎
竣工年	1987 年



写真-2 P4 橋脚の沈下及び傾斜



写真-3 基礎地盤周辺の洗掘

する。

- $x_1$ : 竣工年 (西暦) = 1953
- $x_2$ : 橋長 (m) = 83.49
- $x_3$ : 河床勾配 = 1/200
- $x_4$ : 湾曲角度 (°) = 73
- $x_5$ : 河積阻害率 = 0.072

竣工年と橋長は表-11 に示すとおりである。河床勾配は狩野川水系河川整備計画<sup>17)</sup>より算出し、湾曲角度と河積阻害率は表-1 に示した方法で算出した。なお、河積阻害率を求めるための橋脚幅は橋梁一般図に記載の値とし、川幅は橋梁一般図より仮定した。

式(3)に以上の値を代入すると、 $f \approx -1.9943$  となり、4.(3)に示す重心より、“被災あり”と判別される。この結果は、竣工年が古く、湾曲角度及び河積阻害率が大きいためと考えられる。

### c) 新大田切橋

新大田切橋の定量的洗掘被災リスク要因を以下に整理する。

- $x_1$ : 竣工年 (西暦) = 1987
- $x_2$ : 橋長 (m) = 110.0
- $x_3$ : 河床勾配 = 1/34
- $x_4$ : 湾曲角度 (°) = 0

- $x_5$ : 河積阻害率 = 0.07

竣工年と橋長は表-12 に示すとおりである。河床勾配は天竜川水系河川整備計画<sup>18)</sup>より算出し、湾曲角度は河道形状を直線と判断したため 0 とし、河積阻害率は表-1 に示した方法で算出した。なお、河積阻害率を求めるための橋脚幅は橋梁一般図に記載の値とし、川幅は橋梁一般図より仮定した。

式(3)に以上の値を代入すると、 $f \approx 0.0157$  となり、4.(3)に示す重心より、“被災なし”と判別される。この結果は、竣工年が新しく、橋長が大きく、湾曲角度が小さい(河道形状が直線である)ためと考えられる。

### (3) 定性的洗掘被災リスク要因の被災事例への適用

#### a) 川島大橋

図-5に川島大橋周辺の地形図の変遷を示す。1974年ごろには P4 橋脚周りにあった砂州が移動し、1988 年には P4 橋脚側に滞筋が形成されている。そして、2008 年以降は現在まで P4 橋脚のみが滞筋に位置している。このことから、川島大橋は「砂州による滞筋の固定化」に該当する。また、2008 年に行われた河川横断測量成果と 2021 年 5 月 29 日に行われた被災後の河床調査結果から得られた河床高さの推移から(図-6)、2008 年以降、P4 橋脚周りでは砂州及び滞筋が固定化し、河床低下が進行していたことが考えられる。以上のことから、河床低下

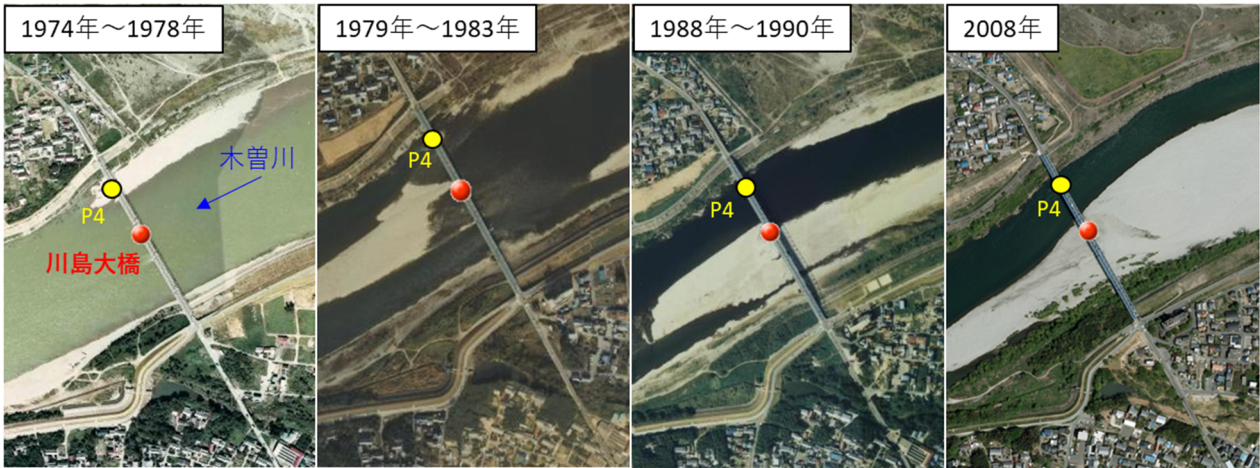


図-5 川島大橋周辺の地形図の変遷<sup>9)</sup>に加筆

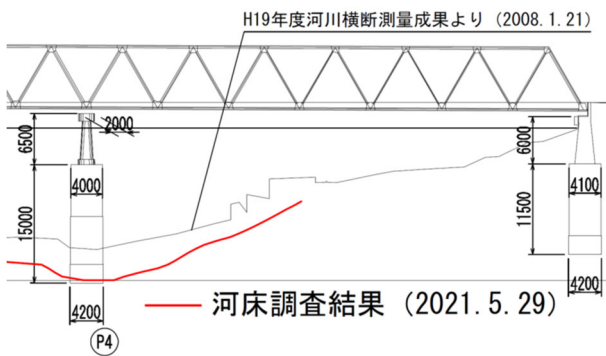


図-6 P4 橋脚周りの河床高さの推移 (出典：岐阜県提供資料)

が進行していた P4 橋脚周りにおいて、直近の豪雨により河床が P4 橋脚基礎下端まで洗掘されたことで P4 橋脚の沈下及び傾斜に至ったことが考えられる。

また、被災した P4 橋脚はケーソン基礎であり、長年の河床低下の進行により基礎が露出し（写真-1 及び図-6）、狭まった川幅（固定化した滯筋の幅）に対して、ケーソン幅による河積阻害が生じていた。仮に固定化した滯筋の幅約 84m とケーソン基礎幅 4.0m で河積阻害率を計算すると、4.8%となり、6.(2a)に示した河積阻害率 0.023 (2.3%) より2倍以上大きくなる。

#### b) 黄瀬川大橋

図-7に黄瀬川大橋周辺の地形図の変遷を示す。過去50年地形図に大きな変化はなく、滯筋は A2 橋台側に固定化されている。このことから、黄瀬川大橋は「砂州による滯筋の固定化」に該当する。

既往の洗掘防止対策に関しては、2019年6月時点で撮影された google ストリートビューでは P4 橋脚周りに設置されていた洗掘防止工の流出や破損が確認された。管理者提供資料によると、流出や破損が確認された洗掘防止工は平成 25 年度に設置されたものと考えられるが、その図面からは平成 25 年度以前にも洗掘防止工の設置が行われていたことが確認できた。P4 橋脚周りでは過去より洗掘防止工の流出と再設置が行われていたことが

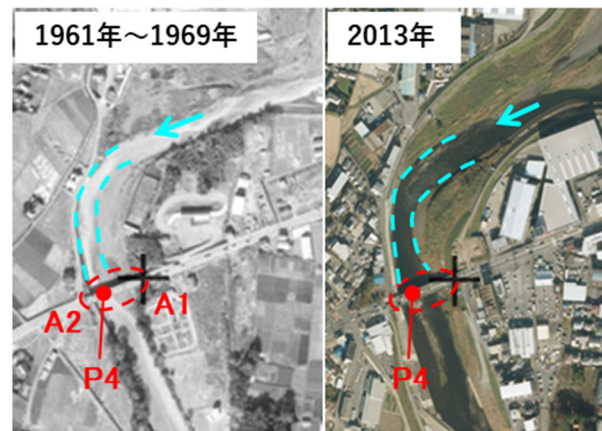


図-7 黄瀬川大橋周辺の地形図の変遷<sup>9)</sup>に加筆

推察される。以上のことから、A2 橋台～P4 橋脚周りは洗掘が生じやすい条件にあったと考えられ、過去より対策が講じられてきたものの、今回の断続的な降雨により P4 橋脚周りの河床が洗掘されたことで沈下及び傾斜に至ったことが考えられる。

#### c) 新大田切橋

図-8に被災前の新大田切橋周辺の航空写真を示す。図-8より、新大田切橋は「架橋位置上流に落差工」及び「架橋位置下流に落差工（本橋では落差を有する床固め工）」が該当する。新大田切橋の下流では、下流側の床固め工が破壊され、本橋近くの上流側にあった帯工から破壊された床固め工までの約 200m の区間で洗掘により河床が約 5m 低下していた。こうした状況から、下流側の床固め工の破壊に伴い大規模な洗掘が生じたことが考えられる。

新大田切橋が架かる太田切川は、深い谷地形を流れる河川であり、6.(2c)で推定した河床勾配は 1/34 と急勾配である。河川堤防の構造検討の手引き<sup>19)</sup>では、河床勾配が 1/34 の河道は「セグメント M」に分類される。手引き<sup>19)</sup>によれば、セグメント M に分類される河道の場合、直線河道であればどこの河岸も侵食され得るとされている。

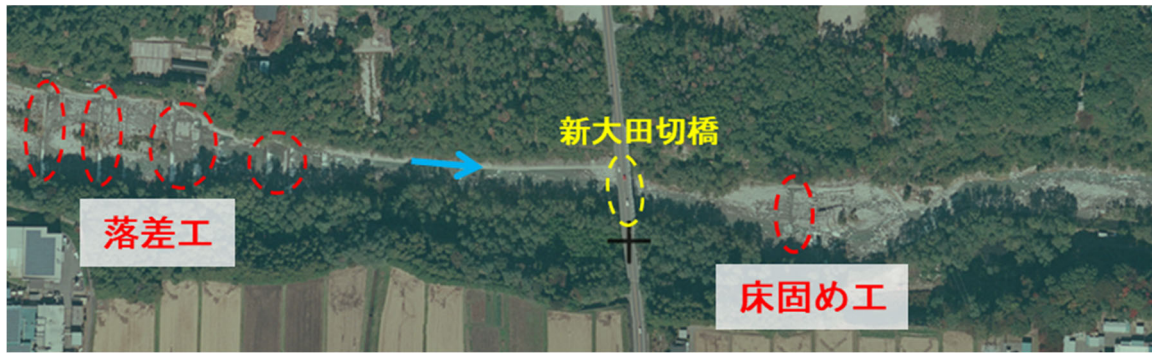


図-8 被災前の新大田切橋周辺の航空写真<sup>外務省</sup>

加えて、天竜川流域は古くから幾多の土砂災害を起こしてきたとされており<sup>20)</sup>、土石を伴う水流が生じることでより大規模な侵食が生じやすい条件にあったことが考えられる。

#### (4) 洗掘被災リスク要因の妥当性検証結果

定量的洗掘被災リスク要因の妥当性検証では、3 橋梁のうち、1 橋梁が“被災あり”、2 橋梁が“被災なし”と判別された。

一方、定性的洗掘被災リスク要因の妥当性検証では、3 橋梁全てが 5.(4)で明らかにした定性的洗掘被災リスク要因に該当した。以上のことから、本章までに明らかにした定量的及び定性的洗掘被災リスク要因は妥当性を有するものと考えられる。

また、川島大橋では、滯筋の固定化の状態（定性的洗掘被災リスク要因）や洗掘の進行状態が変化することにより、河積阻害率（定量的洗掘被災リスク要因）に変化が生じる場合があることも確認された。新大田切橋では、セグメント M に分類される河道の場合、直線河道であればこの河岸も侵食され得るとされており、土石を伴う水流により河床の侵食が生じやすい条件にあった可能性もあることも確認された。

## 7. まとめ

本研究では、過去の洗掘被災事例に基づき、洗掘被災リスクが高いと考えられる橋梁の構造条件や河川などの周辺環境条件を明らかにするため、統計的手法による分析と被災事例の個別分析の2段階の検討を行った。

線形判別分析による定量的洗掘被災リスク要因の検討結果から、以下に示す定量的洗掘被災リスク要因の組合せに該当する条件の橋梁で洗掘被災リスクが高くなることが分かった。

- ・竣工年が古い（小さい）
- ・河積阻害率が大い
- ・湾曲角度が大い

- ・橋長が小さい

次に、個別分析による定性的洗掘被災リスク要因の検討結果から、以下に示す定性的洗掘被災リスク要因に該当する条件の橋梁で洗掘被災リスクが高くなることが分かった。

- ・砂州や植生により滯筋が固定化している
- ・河川沿いに堤外樹林帯がある
- ・架橋位置上流又は下流に落差工がある

最後に、2021年の被災事例3橋梁を対象に、定量的及び定性的洗掘被災リスク要因の妥当性を検証した。定量的洗掘被災リスク要因の妥当性検証では、3橋梁のうち、2橋梁が“被災なし”と判別されたものの、定性的洗掘被災リスク要因の妥当性検証では、3橋梁全てが 5.(4)で明らかにした定性的洗掘被災リスク要因に該当した。以上のことから、本研究で明らかにした洗掘被災リスクが高いと考えられる定量的及び定性的洗掘被災リスク要因は妥当性を有するものと考えられる。

今後の課題として、橋脚あり橋梁及び橋台のみ橋梁それぞれに対して洗掘被災リスクが高い条件を抽出する手法の精度を向上させることが挙げられる。線形判別分析の結果得られた説明関数による判別適合率そのものを上げることは、筆者らの現状のデータ収集体制では難しいと考えられるが、見逃しとなった橋梁の定性的洗掘被災リスク要因や洗掘の進行状態を明らかにして見逃しの数を減らすことで判別適合率を補うことは可能と考える。本研究の川島大橋の事例において、定性的洗掘被災リスク要因や洗掘の進行状態が定量的洗掘被災リスク要因の実質的变化に影響したことを検証したのはその1例である。また、新大田切橋の事例のように、急勾配の場合は直線河道の場合でも洗掘被災リスクが高くなる可能性があることを考慮した洗掘被災リスクの検討も洗掘被災リスクが高い条件を抽出するうえで有用と考える。橋脚あり橋梁及び橋台のみ橋梁それぞれの場合で定性的洗掘被災リスク要因及び洗掘の進行状態をより細かく分析し、定量的手法と組み合わせることで精度が向上するものと

考える。

**謝辞：**橋梁データの収集にあたっては、所管の道路管理者の方々には、ご多忙にもかかわらず、資料提供のご協力をいただきました。また、2021年に豪雨により洗掘被害が生じた3橋梁について、中部地方整備局、関東地方整備局、岐阜県、静岡県、駒ヶ根市を始めとする関係諸機関の方々にも、ご多忙にもかかわらず、資料提供のご協力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 財団法人道路保全研究センター：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等），2007.9.
- 2) 財団法人国土技術研究センター：河川を横過する橋梁に関する手引き，2009.7.
- 3) 佐溝昌彦，渡邊諭，杉山友康，岡田勝也：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，土木学会論文集，Vol.69，No.3，pp.237-249，2013.
- 4) 平成 28 年（2016 年）台風 10 号等に伴う豪雨による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 1069 号・土木研究所資料第 4384 号，2019.3.
- 5) 藤田智弘，七澤利明，佐々木惇郎：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，土木技術資料，2019.11.
- 6) 九州北中部梅雨前線豪雨による橋梁の被害調査，土木研究所資料第 2964 号，1991.3.
- 7) 平成 10 年 8 月末豪雨による福島県・栃木県豪雨災害現地調査報告書，土木研究所資料第 3793 号，2001.3.
- 8) 国土交通省：国土数値情報（流域メッシュデータ）
- 9) 国土交通省国土地理院：地理院地図
- 10) 前野詩郎，吉田圭介：河道内の流れと植生動態，ながれ，第 33 巻，第 4 号，2014.8.
- 11) 山本太郎，千葉学，高橋賢司，佐藤裕介：砂州掘削調査による河道断面の比高拡大プロセスの考察，土木学会第 72 回年次学術講演会，2017.9.
- 12) 秋山壽一郎：樹林帯の氾濫流抑制機能，自然災害科学，Vol.25，No.3，2006.
- 13) 財団法人国土技術研究センター：床止めの構造設計手引き，1998.12.
- 14) 国土交通省国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス
- 15) google：google ストリートビュー
- 16) 国土交通省中部地方整備局木曾川下流河川事務所：木曾川水系河川整備計画，2008.3.
- 17) 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所：狩野川水系整備計画，2005.12.
- 18) 国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所：天竜川水系河川整備計画，2009.7.
- 19) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），2012.2.
- 20) 国土交通省中部地方整備局天竜川上流河川事務ホームページ

(2022.9.20 受付)

## RESEARCH ON THE RISK OF SCOUR DAMAGE TO ROAD BRIDGES BASED ON STATISTICAL ANALYSIS AND INDIVIDUAL ANALYSIS OF DAMAGE CASES

Hiroki SHIMADA, Fumi MIYAHARA and Toshiaki NANAZAWA