

洗掘で被災した鉄道橋脚の事例分析に基づく
洗掘発生危険度の評価手法

渡邊 諭* 藤原 将真* 吉田 郁政**

Evaluation Method for the Risk of Scouring
based on Case Studies of Railway Bridge Piers damaged by Scouring

Satoshi WATANABE Shoma FUJIWARA Ikumasa YOSHIDA

In order to optimize the maintenance and management of railway bridges to mitigate scouring disasters that threaten the safety and stability of railway transport, it is crucial to appropriately assess the risk of localized scouring occurring at bridge piers. In this study, we propose an indicator to represent the risk of scouring. This indicator was determined by calculating the dimensionless tractive forces acting on the riverbed from hydrological statistics recorded during scouring disasters, then comparing and organizing the results between disaster-affected and non-affected conditions. As a result, we found a consistent linear relationship between the normalized scouring force and the root penetration ratio when in the event of disasters.

キーワード：局所洗掘，河川橋脚，水文統計量，無次元掃流力，根入れ比

1. はじめに

鉄道の河川橋りょうにおいては、増水時に橋脚基礎の周辺地盤が局所的に洗掘され(以下、洗掘という)、橋脚基礎が沈下・傾斜し甚大な被害が発生する場合がある。これらに対する維持管理に必要なリソースを最適化するためには、洗掘により被災の可能性が高い橋脚の抽出が重要となり、過去には、統計分析に基づく洗掘危険度の判定¹⁾や、採点表形式での抽出の取組^{2) 3)}がある。しかし、これらの取り組みでは洗掘が発生しやすい素因の経験的な評価が主眼となっており、洗掘を発生させる外力に関しては十分に考慮されていない。洗掘は河床の耐力特性と、河川流の外力特性との相互関係により発生・進行する複雑な現象であるため、外力である増水時の流量の影響を考慮した洗掘危険度の定量的な評価方法が求められている。

そこで本研究では、河川橋脚の洗掘を対象とした維持管理の効率化を目的として、過去の洗掘災害事例の河川流量データから、河川橋脚における洗掘の発生危険度を表す指標に関して検討した。さらに、この結果を利用し、相対的に洗掘の危険性が高い橋りょうの抽出手法を提案した。また、洗掘危険度は河川の状態のみならず、橋りょうの構造条件である阻害率や橋脚基礎形式、基礎の根入れ深さなどにも大きく影響を受けるため、線形判別分析⁴⁾や機械学習⁵⁾を用いた分析事例もある、そうした橋りょう構造に起因する洗掘への抵抗性は別途検討することとし、本稿では洗掘災害発生時における指標の経験値を洗掘に対する耐力と見なして洗掘の発生危険度の基準値を表現することを試みた⁶⁾。

2. 分析対象

鉄道総研が保有する資料によると、1974年以降に増水により鉄道の河川橋りょうに何らかの変状が発生

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 東京都市大学

した事例は91件であった。被災種別ごとに整理すると、橋脚に洗掘が生じたものが最も多く(41件:44.6%)、次いで橋脚が流失したもの(27件:29.3%)、橋脚が傾斜したもの(20件:21.7%)、橋脚が損傷したもの(3件3.3%)、洗掘防護工の変状(1件:1.1%)の順となる。この収集した91件のうち、災害発生日時が明確な事例は30件であるが、このうち水位観測記録を有するものは11事例である。この中からさらに、①被災形態が橋脚洗掘および橋脚傾斜の事例、②橋りょう近傍の河床断面図が取得可能な事例、③被災橋りょうから約10km以内の水文観測点から流量・水位データが取得可能な事例、④被災橋りょう周辺の河床勾配および河床材料の代表粒径の情報が取得可能な事例、の条件を満たす表1の8橋りょうを抽出し分析対象とした。ここで、橋脚が流失したものを対象外としたのは、被災メカニズムとして桁に作用する流体力が支配的であること、橋脚流失を発生させる降雨は被災前に検知できる可能性が高いことによる。また、河川の状況や根入れ等の記述は検査記録に基づいている。

被災形態について、洗掘は一般的に河川流が直接作用する橋脚の上流側で発生することが多い。上記8橋りょうは、被災後の調査で桁冠水の痕跡が認められておらず上流側への傾斜が発生していた。一方で、いずれの事例も増水後の水位低下時において異常発生を知得したものであり、詳細な水位変化を含め経時的な状況変化については不明である。そのため、被災時に橋脚に作用したと考えられる河川流量の最大値を推定し、その規模に着目した検討を行う。なお、表1の各項目の求め方については後述する。

いずれの被災橋脚も無防護であり、後述する洗掘の発生危険度を表す指標の検討においては、被災橋脚および無防護橋脚全てを対象とした分析を実施している。図1に、被災した橋りょう位置における河川断面図を示す。上記8橋りょうの河川のうち、低水護岸が設けられた高水敷を有するものはC、H橋りょうである。また、G橋りょうの被災橋脚より堤防側には張コンクリートにより遊歩道として整備されている。それ以外の河川では砂州が形成されており、A、B、D、E、F、G橋りょうの被災橋脚はその砂州上に、C、H橋りょうは平常時に水が流れる滞筋中に位置している。

表1 分析対象(8事例)の概要と分析に使用したパラメータ⁶⁾

橋梁	被災年月	被災橋脚	被災概要	基礎形式	無防護橋脚数/ 全橋脚数	セグメント ¹³⁾	河床勾配 <i>l</i>	河床材料の 代表粒径 <i>d_g</i> (m)	粗度係 数 <i>n</i>	観測データ	データ期間		被災時 流量 <i>Q</i> (m ³ /s)
											-	-	
A	2003/8	19P傾斜	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	21/21	2-2~3	1/2596	0.0105	0.0195	水位 上流側17km	2002	- 2019	1824.6
		20P基礎露出											
B	2004/9	1P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接(1~5P) 杭(6~10P)	7/10	2-2	1/1200	0.7 (推定)	0.04	水位 上流側1.5km	1992	- 2020	1334.3
C	2006/7	3P	滞筋中の橋脚が傾斜	直接(1~5P) 杭(6P)	6/6	2-2	1/2880	0.01	0.03	流量 下流側2.5km	2001	- 2017	643.8
D	2012/7	2P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	2/6	1	1/200	0.05	0.025	流量 下流側1.5km	2001	- 2017	387.7
E	2015/9	10P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	ケーソン	15/21	1	1/196	0.063	0.0263	流量 上流側8km	2001	- 2017	2194.6
F	2016/8	3P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	4/4	1	1/152	0.3 (推定)	0.035	水位 上流側7km	2008	- 2019	291.3
G	2017/10	5P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	杭(1P) 直接(2~5P)	3/6	2-1	1/260	0.035	0.024	水位 上流側0.5km	2001	- 2017	351.9
H	2017/10	3,4P基礎露出	滞筋中の橋脚の基礎が露出	直接+杭	8/9	2-2	1/1210	0.004	0.027	水位 下流側4km	2006	- 2019	2385.2

3. 鉄道河川橋脚の洗掘発生危険度を表す指標の検討

3.1 着目した指標および分析の流れ

洗掘現象は、橋脚周りの土砂流失をともなう河床変動により生じる。そのため、洗掘の発生危険度を表す指標として無次元掃流力に着目し、被災時の流量に対応する無次元掃流力を算出するとともに、被災時と比較するため各年の最大流量に対応する無次元掃流力と比較した。まず、収集した水位・流量の観測データから河川流量観測断面における被災時および各年の最大水位・年最大流量を抽出する。次に、抽出した

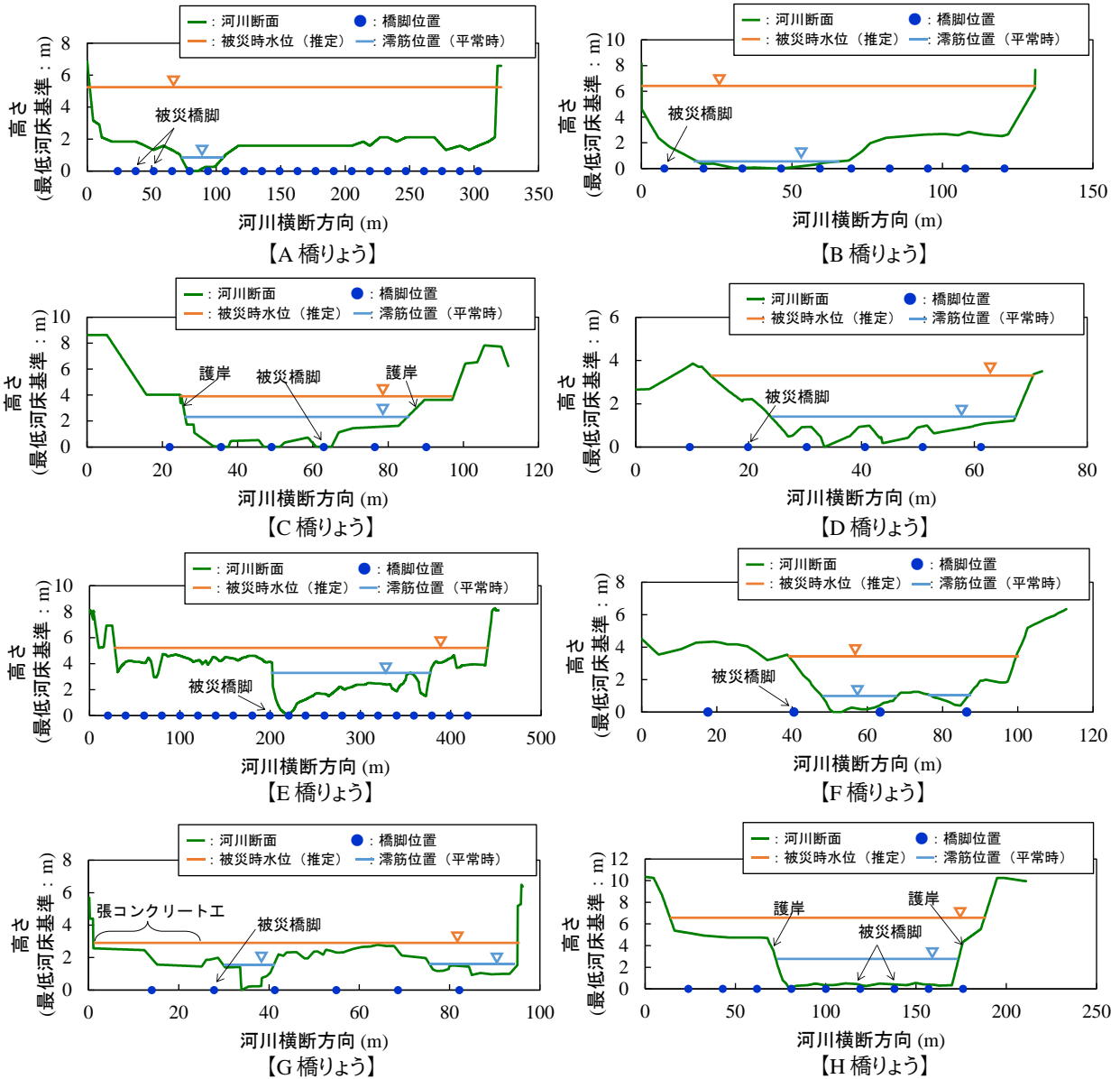


図1 被災橋りょう位置における河川断面図⁶⁾

年最大流量が被災橋りょう位置に流下すると仮定し、この位置の河川断面に基づいた流量を算出して年最大流量に対応する被災橋脚位置での水位、流量、および平均流速を求め、これらから無次元掃流力を算出する。流量算出には様々な手法^{7) 8) 9) 10)}があるが、鉄道事業者が多数の河川橋りょうを対象として解析を実施する場合を考慮し、必要なパラメータ数が少ない簡易な手法が望ましい。そこで、境界混合を考慮しない複断面等流計算⁷⁾とし、分割断面ごとの無次元掃流力を算出する。ここではエネルギー勾配=河床勾配とすることができる等流¹⁰⁾と仮定したが、これは被災箇所近傍の水文観測所が基本的にか所であり、被災橋りょう付近のエネルギー勾配を算出することが困難であったためである。また、複断面形状を呈する河川では、堆積メカニズムの違いにより河床位置により河床材料は異なっており、それに伴い粗度係数は異なるが、上述のとおり実務への適用を考慮して河床材料は一様とみなした。

上記の仮定の下、河川断面を横断方向に N 分割 ($1, 2, i \dots N$) した各断面内の平均流速 v_i を式(1)で、各断面内の流量 q_i を式(2)で、河道断面全体の流量 Q を式(3)で求めた。ここで、 n は河床の粗度係数、 A_i は各断面の面積、 L_i は各断面の潤辺、 I は河床勾配、 A_i/L_i は径深であり、河川の横断方向に対して、マンニングの粗度係数 n 、河床勾配 I は一定とし、水面高さは横断方向に変化しないと仮定した。

$$v_i = \frac{1}{n} \left(\frac{A_i}{L_i} \right)^{2/3} I^{1/2} \tag{1}$$

$$q_i = A_i v_i \tag{2}$$

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \tag{3}$$

表1中には、8橋りょうの構造諸元とともに、計算に用いたパラメータをまとめている。表中のデータは河川整備計画における付属資料、各種財産図や災害記録から取得した。河川勾配 I および代表粒径 d_R に関して、G橋りょう以外の7橋りょうは各河川管理者が作成した整備計画等の資料中のもの、もしくは河川縦断図より算出したものであり代表粒径は d_{60} である。G橋りょうについては鉄道事業者が実施した測量結果の値を用いた。マンニングの粗度係数 n については、整備計画等の資料中から取得した値であるが、代表粒径のデータが取得できなかったB、F橋りょうについては、式(4)で表されるマンニング・ストリクラーの式により算出した。

$$n = \frac{d_R^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \tag{4}$$

河床材料の土粒子比重 G_s はすべての河川で2.65とした。 g は重力加速度を示す。また、流量記録があるC、D、E以外の橋りょうでは水位観測地点の流量を一旦同様の流量計算で推定した上で、被災橋りょう位置にその推定流量を与えて算出した。図2に、各被災橋りょうにおける被災年以前までの年最大流量と被災時の流量をそれぞれ示す。なお、図1中には、平常時における滞筋の概略位置とともに、算出した被災時の流量が流下したときの水位を示している。表1に示したパラメータおよび式(1)~(3)から、式(5)により無次元掃流力 τ^* を求めた。

$$\tau^* = \frac{u_*^2}{(G_s - 1)gd_R} = \frac{gRI}{(G_s - 1)gd_R} \tag{5}$$

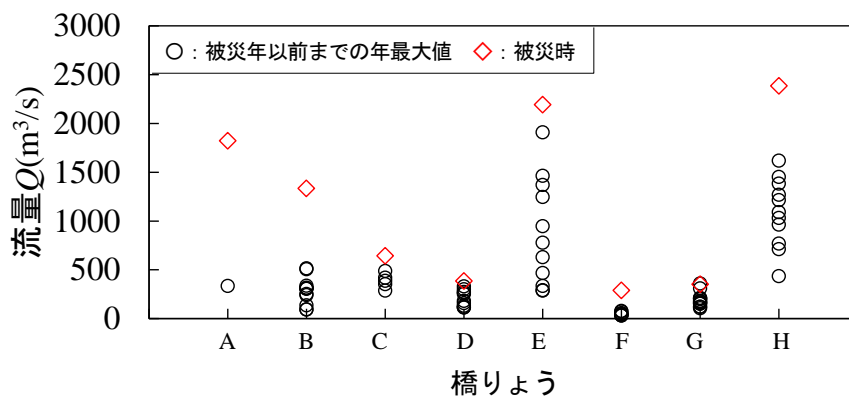


図2 橋りょう別にみた年最大流量（被災年まで）⁶⁾

3.2 無次元掃流力の分析結果

山本¹¹⁾は、日本の沖積河川において年最大流量に対応する無次元掃流力の平均値と代表粒径との間に一定の関係があることを示している。そこで、図2に示した被災年以前までの年最大流量ならびに被災時の

流量に対応する無次元掃流力（以下、年最大無次元掃流力という）を被災した橋脚ごとに整理しプロットしたものが図3である。被災時の年最大無次元掃流力◇の位置に着目すると、いずれの橋りょうもプロット群の上端部、すなわち既往最大値を超えた値で被災していることが分かる。ただし、G橋りょうについては、被災時の値を超過しても被災を免れているケースが存在する。図中には、参考値として各代表粒径の河床材料が一様に分布すると仮定して岩垣の式¹²⁾による無次元限界掃流力（土粒子に作用する掃流力と、土粒子の抵抗値との釣り合いから求められる河床材料が移動を始める限界の強さを表す理論値、ここではいずれも $\tau_c^*=0.050$ ）を破線で示した。仮定のため単純な比較はできないが、C、E、GおよびH橋りょうでは被災時のみならず、被災以前において参考値を大きく超過している年が多数存在する。したがって、作用した年最大無次元掃流力の大小関係を比較するだけでは、橋りょう・橋脚間の洗掘に対する抵抗性の相対的な差異を評価するのは限界がある。一方、山本¹¹⁾は自然堤防の形成や氾濫原の堆積を含む河道スケールや平面形態を規定する流量として平均年最大流量が適切である、と述べている。そこで本稿では、平均年最大流量に対応する無次元掃流力を求め、その値に対する増水時の無次元掃流力の比率を求めることで、洗掘に対する抵抗性を評価できる、と考えた。すなわち、過去に平均的に作用した無次元掃流力が大きい橋脚であれば、根入れや橋脚構造の違い等に起因して相対的に洗掘に対する抵抗性が強い、と仮定した。

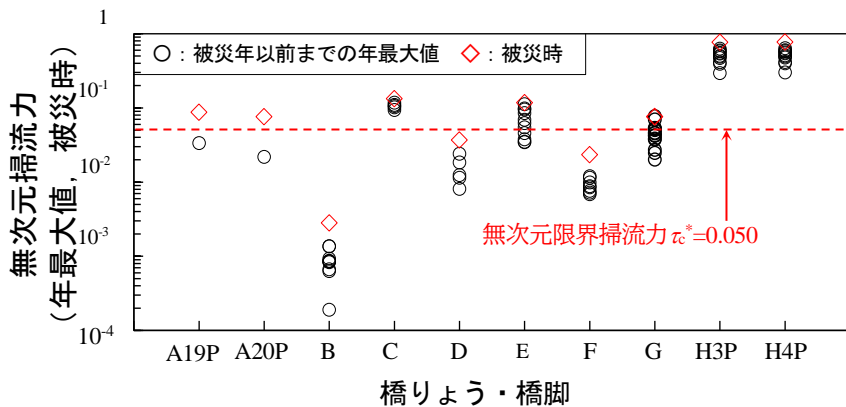


図3 橋りょう別にみた年最大無次元掃流力（被災年まで）⁶⁾

3.3 無次元掃流力の正規化

各河川の流況は地形・地質学的な構造の違いにより様々であり、本来それら背景的要因を考慮せずに無次元化した指標を用いることには課題がある。一方で、災害発生危険度の相対的な評価を行うために河川の特性を表す指標の正規化量を用いることは有効であり、例えば、井上¹³⁾は無次元断面積を導入して洪水時の橋りょう被害リスクの評価を行っている。

ここでは、各年で求められる年最大無次元掃流力の平均値を求め、その値に対して何倍の値が作用したときに洗掘により被災したかを橋りょう同士で比較することで相対的な危険度評価を実施することとした。同観点から、図3に示した被災時の無次元掃流力をその橋脚における洗掘に対する耐力の上限値、既往最大値を下限値と考え、それぞれの値を年最大無次元掃流力の平均値で除した正規化量を算出した。図4に算出イメージを、式(6)に正規化した無次元掃流力の定義を示す。

$$\text{正規化量} = \frac{\text{被災時の値もしくは既往最大値}}{\text{年最大無次元掃流力の平均値 (年最大の無次元掃流力の総和 / 観測年数)}} \quad (6)$$

正規化の分母となる「年最大無次元掃流力の平均値」は、年最大流量に対応する年最大の無次元掃流力の総和を観測年数で除した値であり、被災時を含む全観測期間を対象として算出した。全観測期間を対象と

したのは、観測開始から被災までの期間が短い場合、平均値の算出に用いるデータ数が不足し、結果的に正規化した際のばらつきが大きくなってしまふことを防ぐためである。同様の理由により、普段滞筋にならない箇所に位置する橋脚では、観測年によって年最大無次元掃流力が0となる場合があるが、これらは除外して平均値を算出した。また、近年では気候変動の影響により豪雨の発生頻度が増加しており、その影響があると考えられる近年を含む全期間を対象とすることで安全側の評価になると考えたためである。

図5に、各橋りょうにおける年最大無次元掃流力の平均値と被災時を含む年最大無次元掃流力との関係を示す。破線は両者が1:1となる線を、◇は被災時を、△は既往最大値を示している。図から、年最大無次元掃流力の平均値と被災時および年最大無次元掃流力の既往最大値には強い正の相関があり、一部の既往最大値を除いて年最大無次元掃流力の平均値よりも大きいことが分かる。すなわち、年最大無次元掃流力の平均値を基準に被災し得る値の大小関係の評価できる可能性を示唆している。以降の検討は、この正規化した値（以下、正規化量という）を用いる。

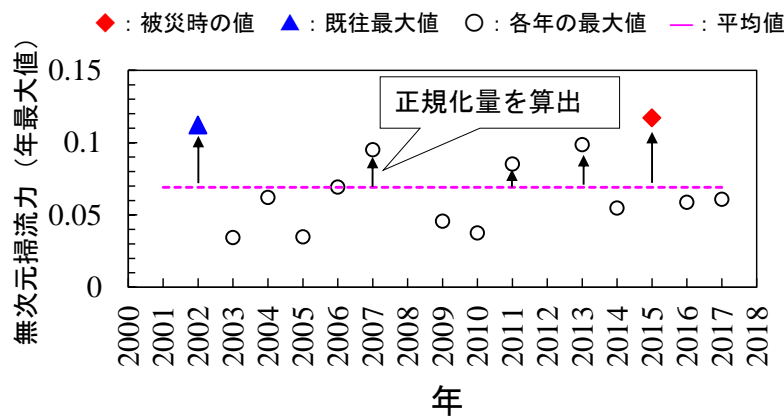


図4 正規化量の算出イメージ⁶⁾

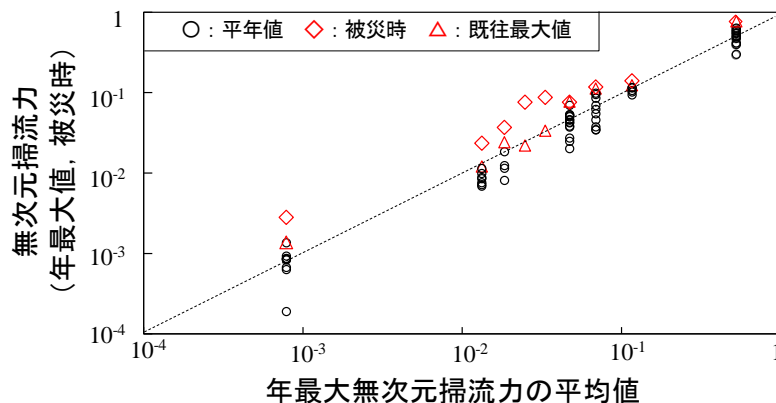


図5 橋りょう別にみた年最大無次元掃流力（被災年まで）⁶⁾

4. 洗掘発生危険度を表す正規化量の基準値の検討

4.1 基準値の考え方

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について検討する。ここでは、橋脚が立地する河川内の位置条件に着目した正規化量、橋脚の根入れ比に着目した正規化量、について検討した。前者は、維持管理において目視のみで取得できる情報であるのに対し、後者は図面による躯体寸法の情報とともに、橋脚位置における河床高さの計測が必要となる。以下に、それぞれの検討内容について述べる。

4.2 橋脚の位置条件ごとの正規化量

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について河川内の位置条件に着目し検討する。図6は、上記で述べた各橋りょうにおいて算出した正規化量と、その正規化量の再現期間を橋りょうごとに求め、両者の関係を改めて整理したものである。横軸の正規化量の再現期間は、すべての年最大無次元掃流力の値からガンベル法¹⁴⁾により再現期間を算出し、それぞれの年最大無次元掃流力に対応する再現期間を求めたものである。図から、正規化量の分布範囲は0~4程度の範囲にあり、橋りょう別にみると、被災時の正規化量は大きいものからB, A, D, F, E, G橋りょうである。これらは、安定した砂州に位置していた橋脚が被災した事例であり、次いで滞筋中のH, C橋りょうと続く。つまり、通常時に水が流下していない位置にある橋脚では、図5に示したように被災時の無次元掃流力が無次元限界掃流力より小さく理論的には河床変動が生じないと判断される場合でも、被災時の正規化量は1を超えて大きくなる傾向となっている。同時に、被災時の正規化量に対応する再現期間も大きくなっており、平年と異なる顕著な水位が生じていることを示している。逆にH, C橋りょうでは滞筋にあるため増水事象も多く、被災時の正規化量に対応する再現期間は短い。なお、正規化量が1、すなわち平均年最大無次元掃流力に対応する再現期間は概ね2~3年であり文献11)の内容と整合する(図中黒破線)。このように橋脚位置の違いにより被災時の正規化量も異なる傾向が示唆されており、橋脚の位置条件に着目して正規化量を整理する。

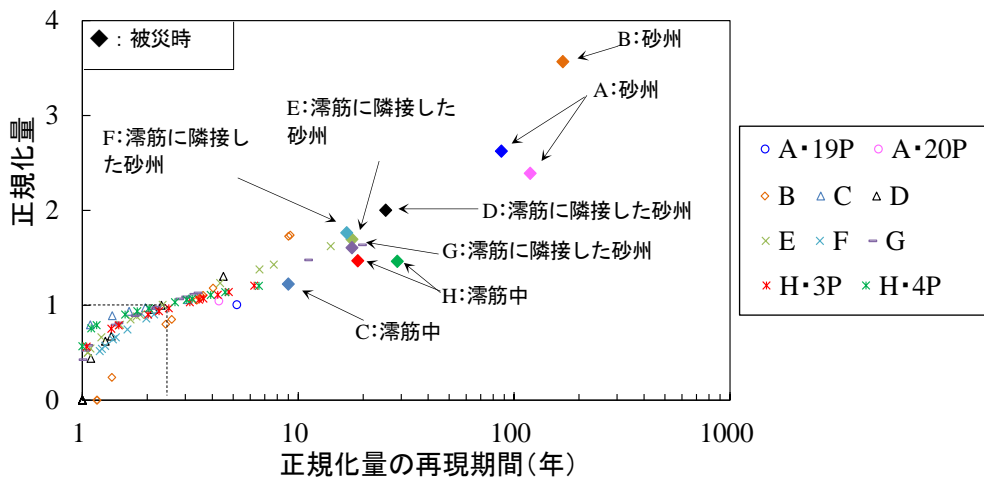


図6 年最大無次元限界掃流力の正規化量とその再現期間⁶⁾

整理の対象とした橋脚は表1に示した8橋りょうを構成する橋脚のうち、被災橋脚と同じ無防護の全橋脚とした。今回用いた位置条件の分類は、滞筋中の橋脚、滞筋に隣接する橋脚および陸地の橋脚の三種類とした。ここでいう滞筋中の橋脚とは、平水時に流路となる箇所位置する橋脚を指し、陸地とは平水時に流路とはならない箇所位置する橋脚、そのうち上記の滞筋の直近に位置する橋脚が滞筋に隣接する橋脚となる。なお、この分類は、文献2の洗掘採点表における判定項目中の表現をそのまま採用したものである。分類された橋脚数は滞筋中の橋脚：19基、滞筋に隣接する橋脚：8基および陸地の橋脚：30基となる。図7に、上記で対象とした全橋脚において、年最大流量発生時の正規化量に加え、正規化量が1を超えた増水イベントの全ピーク値を集計して箱ひげ図で示す。また、その対象期間は、被災時を含む全観測期間を対象とした。なお、データ中には当該橋脚位置まで水位が上昇しなかった年のデータ(正規化量0)は含めていない。これは、長大橋りょうでは陸地の橋脚を多数有するため、その高さまで水位が到達しない観測年を加えると正規化量0の度数が顕著に大きくなり、増水発生時の統計的な特性が不明瞭になってしまうためである。

図 7 から、データ群のばらつきを表す四分位範囲は陸地の橋脚が最も大きく、次いで滯筋に隣接する橋脚、滯筋中の橋脚の順となり、第 3 四分位数+1.5×四分位範囲における最大値（以下、最大値という）の値も同様の傾向を示すことが分かる。これらは、ある程度の規模以上に増水しないと水位が観測されない陸地では流量の相対的なばらつきが大きくなる一方で、常時水が流下する滯筋では増水時の流量のばらつきは小さくなるためである。平均値をみると、陸地の橋脚が他の 2 種よりも若干大きい値となるが、これは陸地において正規化量が 1 を超える増水イベントそのものが他の二種の橋脚と比べ相対的に大規模な出水となるため、それらを集計した場合に平均値を押し上げたためと考えられる。

図 7 中には、被災橋脚における被災時ならびに被災前の既往最大値となる無次元掃流力の正規化量を位置条件別に重ねて示している（図中◇、△）。プロット位置から、災害が発生し得る正規化量の範囲は位置条件によって異なる傾向を示し、それらの平均は滯筋の橋脚で 1.28、滯筋に隣接する橋脚および陸地では最大値付近の 1.77、2.41 となる。また、B 橋りょうでは被災時の正規化量が顕著に大きいのが、この値は外れ値に相当していることがわかる。これは、この時の被災時流量の再現期間が数百年のオーダー（図 8 参照）であるためである。同プロットを含まない場合の平均値は 1.57 となる。

陸地および滯筋に隣接する橋脚は一般に基礎の根入れが大きく安定しているため、最大値に近い規模の増水が作用しないと洗掘災害に至らないものと考えられる。一方、滯筋の橋脚における被災時の正規化量は、第 3 四分位数をやや超えた範囲に位置する。上述のように増水時でも流量のばらつきが少ない滯筋では、正規化量が他の二種ほど 1 を大きく超えない場合でも、急激に洗掘の危険性が高まることを示唆している。

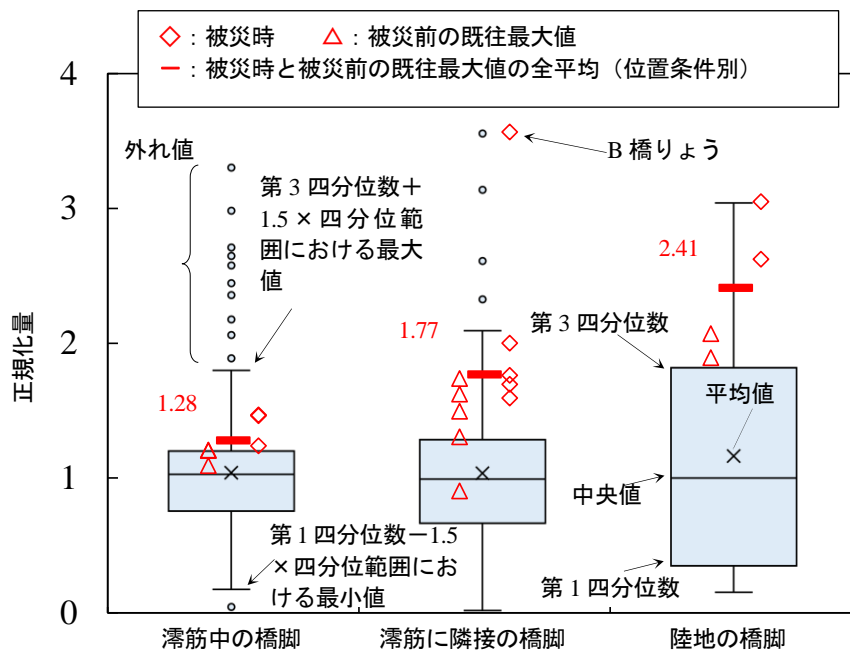


図 7 位置条件別における正規化量の分布と被災時および被災前の最大の正規化量⁶⁾

4.3 根入れ比と正規化量との関係

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について根入れ比に着目し検討する。図 8 は正規化量と根入れ比との関係を、図 7 と同じデータを対象として図をプロットしたものである。プロットにおいて、被災時の正規化量および被災前における正規化量の既往最大値、また被災時および既往最大時の出水発生時における被災橋脚以外のデータ、それ以外の橋脚のデータを区別している。また、図 7 と比較できるように、滯筋中の橋脚、滯筋に隣接する橋脚、陸地の橋脚をそれぞれ区別している。さらに、図

中には、根入れ比と被災時および既往最大時の正規化量との関係を線形近似したものを示している。一般的に、橋脚基礎の底面まで洗掘が進行すると基礎の安定性が急激に低下することが知られている。そのため、切片を 0 すなわち根入れが消失すると基礎形式等の区別なく河川の流体力により不安定化すると仮定した近似直線とした。

図から、被災時および既往最大時ともに根入れ比と正規化量の間には明瞭な正の相関関係があることが分かる。被災時の決定係数は 0.958、既往最大時の決定係数は 0.877 となっている。被災時の近似直線は、ほぼすべてのプロットを包括する上限付近に位置しており、正規化量を根入れ比との関係で整理することで、ばらつきの少ない相関関係が得られている。また、橋脚の位置条件をみると、根入れ比が増加するにつれて、滞筋中の橋脚、滞筋に隣接する橋脚、陸地の橋脚の順にプロットされており、図 6 で被災時の正規化量が顕著に大きかった B 橋りょうが最も右上にプロットされる結果となった。すなわち、ある根入れ比に対して、洗掘が発生する恐れがある正規化量の限界値を一義的に求められる可能性を示している。また、既往最大時の近似直線は被災時の近似直線のやや下かつプロット群の上側に位置しており、洗掘が発生する危険性が高まる根入れ比の目安となると考えられる。なお、E 橋りょうはケーソン基礎形式であり、4 基の橋脚で根入れ比が 7 を超える規模（最大 15.3）となっている。正規化量はいずれも 4 を下回っており、上記の回帰直線を大きく下回る位置にプロットされるため、図 8 の横軸は根入れ比 4 までの範囲しか示していない。

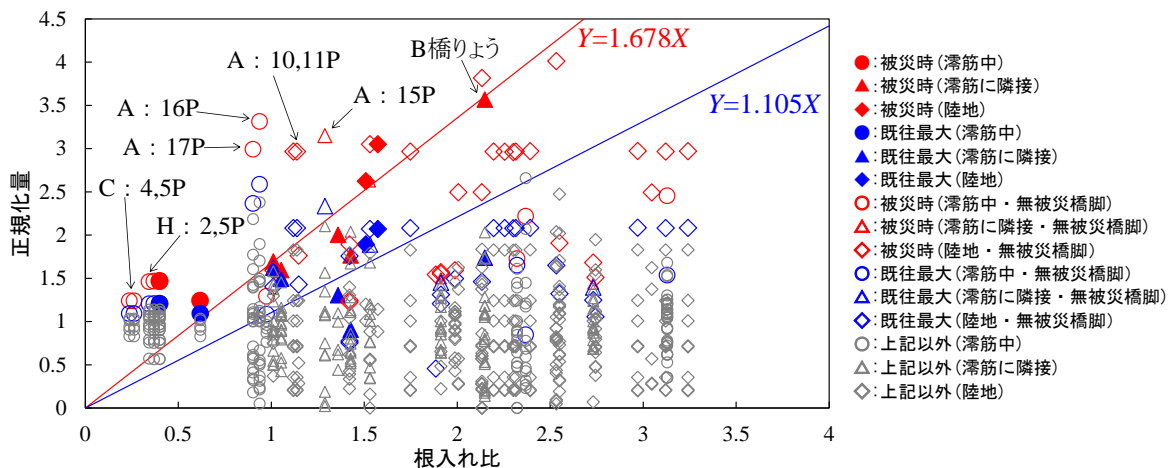


図 8 根入れ比と正規化量との関係⁶⁾

4.4 基準となる正規化量の選定

4.2 節では、被災時の正規化量の平均値は橋脚の位置条件により異なっており、橋脚の位置条件別の統計的な傾向と合わせて実現象と整合することを示した。しかし、平均値付近で被災している橋りょう数が少ないことから、洗掘に対する基準値として用いるには、ばらつきが大きくなっている可能性がある。これは、橋脚の位置条件を 3 分類に限定しているためと考えられる。

それに対し 4.3 節では、洗掘災害の発生を判断する基準値を、根入れ比と正規化量との関係から得られる指標により評価できる可能性を示した。橋脚の洗掘に対する抵抗性として根入れ比は重要な要素であり、文献 2 の洗掘採点表においても最も大きな配点が与えられている。これは、過去の経験から根入れ比が大きいほど洗掘の被害を受けにくくなることを反映したものであり、本稿で示した根入れ比と正規化量との関係においても矛盾がない結果となっている。また、被災時における詳細な洗掘発生状況は不明であることから河川や橋脚の構造特性の影響度は未知であるものの、根入れ比と正規化量という二つの定量的な値を用い、さらに被災時および既往最大時の二つの近似直線により一定の幅を持つ指標となっていると考え

られる。限られたデータでの結果であることから維持管理の現場に適用するためには精度を向上させる必要はあるものの、根入れ比に対応する正規化量を、その根入れ比における洗掘発生危険性の基準値として用いることが可能と判断した。

一方、図 8 中では、被災橋脚以外のデータにおいて上記の近似直線を大きく超えるにも関わらず被災に至らなかった橋脚が複数存在する。具体的には、A 橋りょうの 10, 11, 15, 16, 17P, C 橋りょうの 4, 5P, H 橋りょうの 2, 5P である。これらの橋脚が被災に至らなかった理由を経験的な知見により考察すると以下のとおりである。

A 橋りょうで被災した 19, 20P は河川の左岸側に位置し、河川の湾曲にともなう攻撃地形に該当するため、被災時において湾曲の内側に位置する他の橋脚よりも洗掘を受け被災した可能性が考えられる。被災を免れた 16, 17P は被災橋脚よりも根入れ比が小さいものの被災を免れているが、基礎底面が岩着していることなどが考えられる

C 橋りょうの 2 橋脚はいずれも滯筋中に位置しているが、橋りょうの上流側で河川幅の狭窄が生じており、かつ同狭窄箇所付近には鉄道橋脚より大規模な橋脚躯体を有する道路橋が存在する。これらの影響により被災橋脚付近で局所的な流速や乱れの増加など洗掘を促進させる流れが発生した可能性が考えられる。

H 橋りょうでは、上流側に捨石による落差工状の構造物が設置され河川は緩やかに左に湾曲しており、C 橋りょうと同様に上記の構造物の下流側で流れが複雑化した可能性がある。

いずれも、平面的な河川形状や橋りょうの周辺構造物の状況からの推察にとどまるが、上記いずれの橋りょうも文献 2 において経験的に洗掘を助長すると考えられる特徴を有しており、実務に適用する際には、これらの項目に合致するものほど対策の優先順位が高い橋脚として抽出することが考えられる。

5. 洗掘発生危険度を表す正規化量の基準値の検討

ここでは、4.3 節で示した被災時における近似直線から根入れ比に対応する正規化量を基準値として仮定した場合に、複数の橋りょう中から洗掘発生危険度を相対的に比較する手法を提案する。

モデルケースとして、橋りょう①と②を比較する例を示す。まず、橋りょう①と②と比較にあたり、各橋りょうにおいて洗掘が懸念される橋脚を抽出する必要がある。その手法として、例えば各橋脚の配点の大小から抽出する方法^{2) 3)}があるが、ここでは①橋りょうは根入れ比 1.1 の無防護の橋脚、②橋りょうは根入れ比 1.3 の無防護の橋脚、が抽出されたものと仮定し、どちらが洗掘に対する危険性が高いかを判断する。図 8 中に示した被災時の線形回帰式から基準値に相当する正規化量を求めると①橋りょうは約 1.85、②橋りょうは約 2.18 が得られる。

斜面の耐降雨性の比較事例では、崩壊に至る降雨の再現期間の大小関係から危険度を判断する取り組み¹⁵⁾がある。また、星野ら¹⁶⁾は、年最大流量の非超過確率の大小に着目して洪水危険度を評価している。ここでの提案手法の考え方も同様に、基準値に相当する正規化量とその再現期間に着目し、再現期間の違いが河川ごとの流域や流出の特性を含む過去の増水の経験値を表していると考えた。

図 9 は、抽出された橋脚のうち、基準値に相当する正規化量を図 6 と同様に横軸を再現期間として示したものである。例えば、①橋りょうの場合、基準値 1.85 に対応する再現期間は図 9 横軸上の▲となる。一方、②橋りょうでは、基準値 2.18 に相当する再現期間は図 9 横軸上の●となる。両者を比較すると、●は▲より再現期間が短いため洗掘発生が懸念される外力が高頻度で発生することとなり、相対的に危険性が高いと判定される。仮に、被災時における正規化量に対応する再現期間がほぼ同値である場合には、対象とする橋りょうにおいて検討時点までに経験した正規化量の既往最大値と図 8 中に示したそれぞれの近似

直線との大小関係，ならびに既往最大時の正規化量に相当する再現期間から相対的な危険度を比較することができる。また，4.4節で示した事例のように，経験的に明らかな洗掘を助長する項目との適合数なども比較の判断に利用できると考えられる。

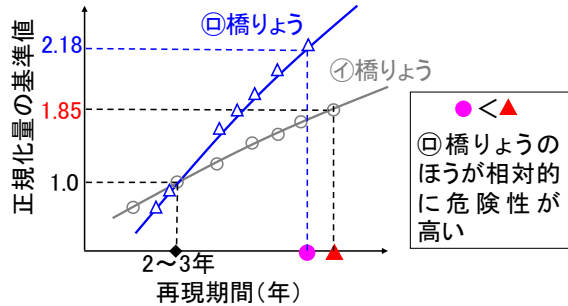


図9 正規化量の基準値に相当する再現期間に着目した橋脚の危険度の比較イメージ⁶⁾

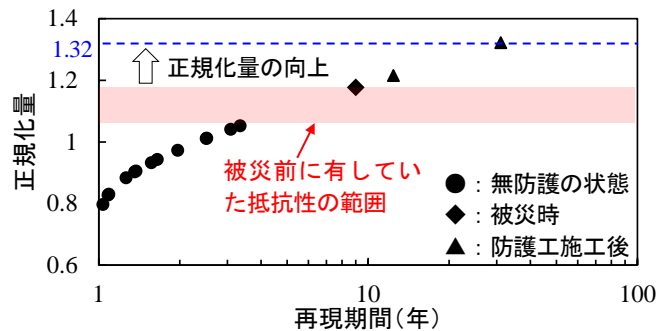


図10 防護工による抵抗性向上効果 (C 橋りょう)⁶⁾

この試案を用いることで，過去の経験値を踏まえつつ洗掘発生の危険性が高い橋脚を有する橋りょうが複数ある場合にも，相対的な危険度の比較が可能となる。また，これまで観測されていない未曾有の豪雨を想定した場合でも，再現期間を用いることで相対的な比較が可能であり，近年懸念されている気象の激甚化にも対応したものになっている。一般に，鉄道における洗掘災害に対する防災投資は，他の構造物よりも費用が大きいため，その意思決定の最適化により維持管理の効率化につながることが期待される。

ここで，根入れ比と正規化量との関係式の適用範囲は，正規化量が1を超える範囲とするのが妥当と考える。理由として，前述のとおり正規化量が1となる再現期間は概ね2~3年であり，鉄道における定期検査の周期2年がそれを下回らないことが維持管理において重要と考えられるためである。1より小さい正規化量に対応する根入れ比となった場合には，別途詳細な検査を行うとともに必要に応じて基礎補強や洗掘防護工の設置など各種対策工の検討が考えられる。

なお，上記の試案の有効性を検証するには，洗掘防護工などの施工により正規化量が向上したことを確認することも重要である。事例が少ないため定性的な例示に留まるが，C 橋りょうは被災後の復旧対策として河床全幅に根固めブロックが敷設されたのちに被災時を超える増水を経験している。図10は被災時および被災前後に経験した正規化量と再現期間との関係を示したものであり，図の横軸は図6と同じ再現期間である。図から，補強後に正規化量1.32の増水を経験しており，補強効果が正規化量の向上として明瞭に現れていることが分かる。

5. まとめ

鉄道において過去に発生した洗掘災害事例の中から外力の算出可能な橋りょうに対し、橋脚に作用する無次元掃流力と年最大無次元掃流力の平年値との比（正規化量）を求めて、橋脚の位置条件と正規化量ならびに根入れ比と正規化量との関係をそれぞれ整理した。そのうち、根入れ比に対応する正規化量に基づき、橋脚の洗掘に対する危険度の比較手法を提案した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 水位または流量観測記録を有する8橋りょうについて、各年の観測記録から鉄道橋りょうの断面位置における年最大無次元掃流力を算出した。また、各橋脚の洗掘に対する耐力を比較するために、年最大無次元掃流力の平年値との比（正規化量）を求めた。算出した正規化量と被災した橋脚の根入れ比には線形の相関関係があり、根入れ比に対応する正規化量を、その根入れ比における洗掘発生の危険性の基準値とすることを提案した。

(2) 根入れ比に対応する正規化量の再現期間に着目し、洗掘に対する危険度を定量的に比較する試案を作成した。その結果、根入れ比に対応する正規化量の再現期間の大小を相対的に比較することで、洗掘が懸念される橋りょうを精度よく抽出できる可能性を示した。

なお、上記の根入れ比と正規化量の近似直線は限られた事例に基づくものであり、これを一般的な基準値として現行の維持管理手法に適用するには、事例の蓄積・分析を踏まえたさらなる精度向上と妥当性の検証が必要である。将来的には、既往の取り組みである線形判別分析の深度化や機械学習に基づく洗掘危険度の評価方法の開発など新たな知見と組み合わせ、洗掘の懸念がある橋りょうの抽出、抽出された橋りょうの危険度の比較、さらには水位に基づく運転規制値の最適化までの一連の業務を支援する総合的な維持管理手法の構築を目指したい。

文 献

- 1) 佐溝昌彦, 渡邊諭, 杉山友康, 岡田勝也: 統計的手法における被災注意橋脚抽出手法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 69巻, 3号, pp.237-249, 2013
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) 基礎構造物・抗土圧構造物, 付属資料4「洗掘を受けやすい橋梁を抽出するための採点表」, 丸善出版, 2007
- 3) 道路保全技術センター: 道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等), pp.123-147, 2007
- 4) 七澤利明, 宮原史, 藤田智弘, 佐々木惇郎, 山田薫, 島田裕貴: 道路橋の洗掘による被災リスク要因に関する研究-被災事例の統計分析等による検討及び令和3年(2021年)の豪雨災害調査-, 国土技術政策総合研究所資料, 第1202号, 2022
- 5) 我部山喜弘, 角野拓真, 岡崎百合子, 中村太郎, 岡崎慎一郎, 梶谷義雄, 渡邊諭, 佐溝昌彦: 機械学習を採用した橋脚の洗掘被災リスク評価モデルの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 76巻, 2号, pp. I_601-I_606, 2020
- 6) 渡邊諭, 藤原将真, 吉田郁政: 鉄道橋脚の洗掘被災事例の水文統計量に基づく洗掘発生危険度指標に関する基礎検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.1, 23-00029, 2023
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局: 国土交通省河川砂防技術基準(調査編), 平成26年4月, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html (参照日: 2022年4月1日)
- 8) Chow, V. T.: Open-Channel Hydraulics, International Student Edition, McGraw-Hill, pp.138-140, 1959.
- 9) 福岡捷二, 藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 1989巻, 第411号, pp.63-72, 1989
- 10) 木ノ瀬紘一, 森望, 浮辺悦信: 新たな領域分割法による不等流計算-抵抗力群を杭群とした場合-, 農業土木学会論文, 1998巻, 197号, pp.9-19, 1998
- 11) 山本晃一: 構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004
- 12) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 1956巻, 第41号, pp.1-21, 1956
- 13) 井上隆, 山村優桂, 二瓶泰雄: 豪雨時の橋梁被害リスク評価指標の検討~H30年西日本豪雨の三篠川橋梁被害縦断分布データを用いて~, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75巻, 2号, pp. I_1417-I_1422, 2019
- 14) GUMBEL, E. J.: The Return Period of Flood Flows, The Annals of Mathematical Statistics, Vol.12, No.2, pp.163-190, 1941.

- 15) 布川修, 杉山友康, 太田直之, 畑明仁, 堀倫裕, 亀村勝美, 岡田勝也: 鉄道の降雨時運転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出方法, 土木学会論文集 C, 66 巻, 1 号, pp.78-88, 2010
- 16) 星野大雅, 平沢勇之助, 戸倉駿人, 山本隆広: 年最大流量の非超過確率を用いた洪水危険度指標の開発の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71 巻, 4 号, pp.I_1489-I_1494, 2015