

## 第三セクター事業者を対象とした鉄道の河川橋梁における洪水時流出リスクの検討

中央大学大学院 学生会員 ○栗田 樹 中央大学 正会員 佐藤 尚次

## 1. はじめに

近年、台風や豪雨による大規模水害により、鉄道が大きな被害を受け長期間不通になり、沿線住民の生活に影響を与える事態が多く発生している。2020年7月4日には、令和2年7月豪雨により、くま川鉄道湯前線の球磨川第四橋梁が流出し、2022年1月現在でも一部区間で運転を見合わせている。2005年に台風による豪雨被害を受けた高千穂鉄道高千穂線は、経営状態から自力での復旧が困難となり、廃線を余儀なくされた。

このような事態を防ぐためには、あらかじめどの鉄道事業者・路線が洪水に弱いのか、被害に合った場合自力での復旧が困難なのかを理解しておく必要がある。そこで本研究は、鉄道事業者の豪雨によるリスク評価を行う。鉄道事業者ごとに豪雨時のリスクを指標化し、それを比較することで危険な状態の路線および橋梁を抽出する。また、被害が発生した場合、自力での復旧が可能であるか、各事業者の収益を元に検討する。

## 2. 研究対象

本研究の対象とする鉄道は第三セクター路線とする。これは、第三セクター事業者は経営基盤が弱い企業も多く、そのような事業者の路線が被災した場合、自力での復旧は困難となることが予想できるからである。全国の第三セクター46路線のうち、営業係数が100を超える路線、かつ光永の先行研究<sup>1)</sup>による都道府県別の年最大日降水量を示す Gumbel 分布を参考に、沿線地域の降水量が多い路線を絞り込んだ。本研究では北海道の道南いさりび鉄道線、高知の土佐くろしお鉄道線(中村・宿毛線、ごめん・なはり線の2路線)、熊本・鹿児島島の肥薩おれんじ鉄道線の4路線を研究対象とする。

本研究で対象とする構造物は、一度被害が発生すると復旧に時間を要するケースが多い<sup>2)</sup>河川橋梁およびその橋脚とする。また、本研究は後述するが、各路線の河川橋梁の水害による上部構造流出確率および橋脚洗堀被害確率を導出し、それを用いて被害発生リスクを算出して各路線の評価を行う。確率導出の対象とする橋梁及び河川は、以下の条件をすべて満たしたものとする。

- ・橋梁が位置する河川が水系の主河道であること
- ・その水系が十分に大きな流域面積を持つこと
- ・橋梁周辺の地形から、増水時に水位が橋梁高さまで上がる可能性が高いこと

## 3. 研究手法

本研究では、各路線の危険度や自力での復旧が可能か判断する指標として橋梁被害発生リスクを算出する。被害発生リスクは式(1)のように表される<sup>3)</sup>。

$$C_t = \sum P_f \times C_f \quad (1)$$

$C_t$ は被害発生リスク、 $P_f$ は水害によって構造物に被害

が発生する確率、 $C_f$ は被害時コストである。 $P_f$ は、R-Sモデルの考え方をを用いて導出する。R-Sモデルの式を式(2)に示す。

$$Z = R - S \quad (2)$$

上部構造流出確率の場合、 $R$ は河川橋梁が持つ横からの抵抗力、 $S$ は上部構造に作用する流体力とする。橋脚の洗堀被害確率の場合は、 $R$ は各橋脚の根入れ長、 $S$ は局所洗堀深 $Z_s$ とする。 $Z$ の値が0以下になる場合、それぞれの構造物に被害が発生するものとする。 $R$ 及び $S$ それぞれが従う確率密度関数を求め、それを用いてモンテカルロシミュレーションを行うことで各被害確率を導出する。

上部構造流出確率の導出に用いる橋梁の抵抗力 $R$ は以下に示す式(3)で定義する。<sup>4)</sup>

$$R = \mu(W - U) + R_b \quad (3)$$

$\mu$ は最大摩擦係数、 $W$ が上部構造重量[N]、 $U$ は上部構造に生じる浮力[N]、 $R_b$ は橋梁支承部の抵抗力[N]である。これらのうち最大摩擦係数 $\mu$ は Rabbat の実験結果<sup>4)</sup>より平均 0.62、標準偏差 0.032 の正規分布に従うものとする。これらの諸元を用いて $R$ の確率密度関数を橋梁ごとに求める。上部構造に働く流体力 $S$ は以下に示す式(4)で定義する。

$$S = \frac{1}{2} \rho_w C_d A v^2 \quad (4)$$

$\rho_w$ は水の密度[ $kg/m^3$ ]、 $C_d$ は抵抗係数、 $A$ は構造物を流れ方向に投影した面積[ $m^2$ ]、 $v$ は流速[ $m/s$ ]である。これらのうち流速 $v$ は、橋梁が位置する点での河川の流量 $Q$ [ $m^3$ ]を算出し、Manning 式を用いて流速 $v$ に変換する。Manning 式を以下に式(5)として示す。

$$v = \frac{5}{3} \left( \frac{Q}{B} \right)^{0.4} \frac{i^{0.3}}{n^{0.6}} \quad (5)$$

$B$ は橋梁が位置する点の川幅[ $m$ ]、 $i$ は河床勾配、 $n$ は Manning の粗度係数である。式(4)・(5)から、流量 $Q$ が分かれば流体力 $S$ が導出できることが分かる。流量 $Q$ は以下の式(6)から求める。

$$Q = \frac{1}{3.6} Aq + Q_b \quad (6)$$

$A$ は対象河川の流域面積[ $km^2$ ]、 $Q_b$ は基底流量[ $m^3/s$ ]である。また、 $q$ は貯留関数法における流出高[ $mm/h$ ]である。流出高 $q$ は、流域面積内での雨水の貯留量と流出量の間の一価の線形関係があると仮定した貯留方程式である式(7)及び式(8)を用いて、流域の降水量をもとに導出する。

$$s = kq \quad (7)$$

$$\frac{ds}{dt} = r_e - q \quad (8)$$

$s$ は貯留量[ $mm$ ]、 $k$ はパラメータ、 $r_e$ は有効降雨強度[ $mm/h$ ]である。

橋脚洗堀確率の算出に用いる局所洗堀深 $Z_s$ は、Laursen-Toch の式(式(9))を用いて導出する。

表-1 対象鉄道路線の各橋梁の上部構造流失リスクおよび橋脚の洗堀被害リスク

道南いさりび鉄道			土佐くろしお鉄道			肥薩おれんじ鉄道		
河川名	流失リスク	洗堀リスク	河川名	流失リスク	洗堀リスク	河川名	流失リスク	洗堀リスク
亀川	36	0	渡川	526,130,899	320,067,127	球磨川	150,647	488,037,654
茂辺地川	56,735	1,918,607	伊与木川	0	2,140,785	二見川	0	16,751,832
流溪川	45,666	0	吹上川	2,335	0	佐敷川	0	35,523,633
戸切地川	585	11,538,496	後川	0	1,091,630	湯出川	0	280,177
大野川	0	2,573,066	物部川	0	1,417,707	米ノ津川	0	64,293,295
久根別川	2,822,776	0	安芸川	23,217	4,272,591	高尾野川	0	4,984,873
						折口川	0	9,101,393
						高松川	0	8,457
						高城川	0	26,517,991
						川内川	4,101,236	343,553,460

$$\frac{Z_s}{D} = K \left( \frac{h_0}{D} \right)^{0.3} \quad (9)$$

$h_0$ は平均水深[m]、 $D$ は平均橋脚幅[m]、 $K$ は橋脚の形状係数であり、本研究ではこの値を 1.35 とする。また、橋脚の根入れ長については、橋梁が建設された年代ごとに、実データを元に正規分布に従うよう仮定した。

以上の手法で橋梁ごとに 40 年分の年最大流量を導出し、それをもとに被害確率導出に必要な諸元が従う確率密度関数を決定する。

上部構造が流失した場合に発生する被害時コストのうち、構造物復旧費用に関しては図-1 に示した、過去 20 年の橋梁流失事例の橋梁被害延長とその復旧費用の散布図を元に近似曲線を描き、これに従うものとする。以下にその近似式(10)を示す。

$$C_f = 0.0007x^2 + 0.075x \quad (10)$$

$C_f$ は橋梁流失時の復旧費、 $x$ は被害を受けた橋梁延長である。また、橋脚が洗堀を受けた場合は各橋梁の 2 径間分の橋梁延長の復旧費用が発生するものと設定する。

#### 4. リスクの算出

表-1 に対象路線の各橋梁のリスクを示す。いずれの路線も上部構造流失よりも橋脚洗堀のリスクが高い傾向が見られる。これはいずれの路線についても上部構造流失確率より洗堀被害確率が大きな値を取っているためである。また、土佐くろしお鉄道の渡川、肥薩おれんじ鉄道の球磨川および川内川ではリスクが非常に大きな値を示しているが、いずれの河川も各県内最大の大規模河川である。これらの大規模河川ではより優先的に災害対策が必要であることが確認できる。また、肥薩おれんじ鉄道線では、佐敷川や米ノ津川といった小中規模河川でも比較的値を大きな示している。これは当路線が 1910 年代に開業しており、橋脚に十分に安全な根入れ長が確保されていないこと、九州北部豪雨に代表されるように大規模な豪雨が多発していることなどが起因していると考えられる。当路線のように、豪雨が多発しやすい地域に所在し、建設年度が古い路線については小中規模の河川についても災害対策が必要だと考えられる。

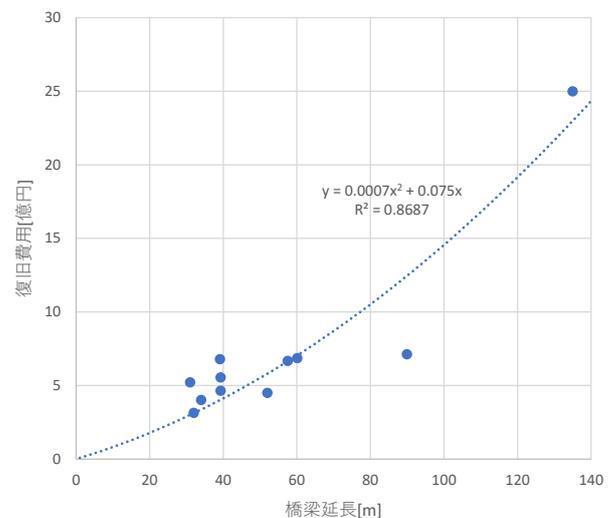


図-1 橋梁流失事例の橋梁延長と復旧費用の散布図

#### 5. 今後の展望

本研究では対象の第三セクター4 路線について河川橋梁の上部構造流失リスクおよび橋脚洗堀リスクの算出を行った。今後は、被害時コスト $C_f$ について被害発生時の運行収入の損失を考慮したリスクの算出を行う。また、国・自治体からの補助制度を受けた際、鉄道事業者および国・自治体がどれだけ費用を負担する可能性があるかの検討を行う。

#### 参考文献

- 1) 光永 憲弘 河川増水における橋梁上部構造流出に関する信頼性の検討 第45回土木学会関東支部 2018.3.
- 2) 国土交通省鉄道局施設課 政策レビュー「鉄道の防災・減災対策」平成30年10月4日
- 3) 和合 希世子 ゲーム理論を用いた防災投資の合意形成 第31回土木学会関東支部 2004.3.
- 4) Rabbat, B.G. and Russell, H.G.: Friction coefficient of steel on concrete or grout, J.Struct.Eng., ASCE, Vol.111