

第三セクター鉄道路線を対象とした 河川橋梁の洪水時流出リスクの検討

A Study on Flood Risk of River Bridges on Third Sector Railway Lines

都市人間環境学専攻 20N3100011I 栗田 樹
Itsuki KURITA

Key Words : Third Sector, Risk during heavy rain, R-S model, storage function method

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、2021年9月現在でも全線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を抽出する。また、高いリスクを示す鉄道が存在する場合、その原因が何か、他の鉄道路線のリスクの結果と比較し検討する。

2. 研究対象

本研究の対象とする鉄道事業者は第三セクターとする。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。また、第三セクター路線はその株の多くを所在する都道府県や沿線自治体が保有しており、他の鉄道路線と比較して自治体に近い立場にある。そのため他路線よりも、河川の管理を行う自治体との連携がとりやすく早急な災害対策工事が行えるため、本研究で危険な状態の路線を明確にした際の効果が大きいと判断し、これを対象とした。

図-1に全国の第三セクター46路線の所在地を示す。赤線で示す路線は、営業係数が100を超える路線を示しており、本研究ではこれらの路線から、沿線に洪水の可能性が高い河川が存在しない4路線を除いた28路線から対象路線を抽出した。河川の洪水には河川流域面積内での降水量が大きな要因となるため、光永の先行研究¹⁾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みこれを研究対象とした。本研究では北海道の道南いさりび鉄道路線、高知の土佐くろしお鉄道路線(中村・宿



図-1 全国の第三セクター路線の所在地

表-1 対象橋梁の構造及び橋脚数

	河川名	橋梁材料	構造形式	橋脚数	
道南いさりび鉄道	亀川	鋼橋	桁橋	0	
	大釜谷川	鋼橋	桁橋	1	
	大当別川	鋼橋	桁橋	0	
	茂辺地川	鋼橋	桁橋	2	
	流溪川	鋼橋	トラス橋	0	
	戸切地川	鋼橋	桁橋	2	
	大野川	鋼橋	桁橋	4	
	久根別川	鋼橋	桁橋	0	
	土佐くろしお鉄道	渡川	コンクリート	桁橋	6
		伊与木川	鋼橋	桁橋	5
蛸瀬川		鋼橋	桁橋	9	
吹上川		鋼橋	桁橋	1	
後川		鋼橋	トラス橋	3	
物部川		鋼橋	桁橋	8	
安芸川		コンクリート	桁橋	10	
肥薩おれんじ鉄道		球磨川	鋼橋	桁橋+トラス橋	11
		二見川	鋼橋	桁橋	5
		佐敷川	鋼橋	桁橋	4
	湯出川	鋼橋	桁橋	2	
	米ノ津川	鋼橋	桁橋	5	
	高尾野川	コンクリート	桁橋	2	
	折口川	鋼橋	桁橋	2	
	高松川	鋼橋	桁橋	4	
	高城川	鋼橋	桁橋	2	
	川内川	鋼橋	トラス橋	4	

毛線,ごめん・なはり線の2路線),熊本・鹿児島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他の構造物よりも復旧に時間を要するケースが多い²⁾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掘被害確率を導出し,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
- ・その水系に十分に大きな流域面積があること
- ・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

表-1に対象の橋梁及びその構造,橋脚数を示す。

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時リスクを算出する。被害発生時リスクは式(1)のように表される³⁾。

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

C_t は被害発生時リスク[円/年], 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 は橋梁の上部構造が流失する確率と橋脚が洗掘被害を受ける確率の2パターンについて考え,R-Sモデルの考え方を用いて導出する。R-Sモデルの式を式(2)に示す。

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

上部構造流失確率の場合, 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。橋脚の洗掘被害確率の場合, R は各橋脚の根入れ長, S は局所洗掘深 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1年間あたりの各被害発生確率を導出する。

上部構造流失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。

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

μ 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 μ はRabbatの実験結果⁴⁾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。

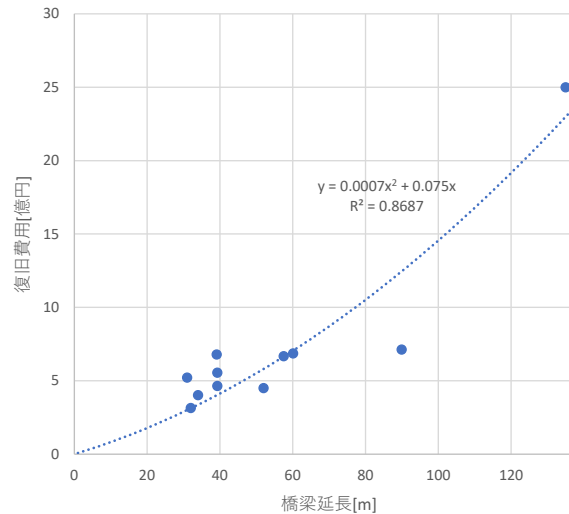


図-2 橋梁流失事例の橋梁延長と復旧費用の散布図

表-2 三陸鉄道の東日本大震災被災前と被災後の営業収益および営業費

	営業収益	営業費
被災前(2009年)	390,424,626	541,365,799
被災後(2011年)	134,251,464	441,005,565
減少割合	0.656139867	0.185383403

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

ρ_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。

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

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。

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

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

表-3 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掘被害リスク

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	洗掘リスク	河川名	流失リスク	洗掘リスク	河川名	流失リスク	洗掘リスク
亀川	402	0	渡川	527,579,987	322,369,374	球磨川	213,366	863,709,031
茂辺地川	211,484	8,761,486	伊与木川	0	2,263,023	二見川	0	80,700,238
流溪川	180,554	0	吹上川	2,427	0	佐敷川	0	103,278,694
戸切地川	2,241	54,230,246	後川	0	1,198,874	湯出川	0	25,210,798
大野川	0	14,391,963	物部川	0	1,586,057	米ノ津川	0	205,129,570
久根別川	23,718,473	0	安芸川	23,441	4,462,431	高尾野川	0	51,386,396
						折口川	0	1,002,228
						高松川	0	312,945
						高城川	0	150,275,103
						川内川	5,087,405	836,735,126

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。

橋脚洗掘確率の算出に用いる局所洗掘深 Z_s は, Laursen-Tochの式(式(9))を用いて導出する。

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

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。

橋梁が被害にあった場合に発生する被害時コストは, 被害にあった構造物の復旧費と鉄道の営業利益の損失を考慮する。このうち, 構造物復旧費用に関しては図-2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(億円), x は被害を受けた橋梁延長[m]である。また, 橋脚が洗掘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。

営業利益の損失については, 国土交通省の鉄道統計年報および三陸鉄道の被災事例を元に定義した。表-2に三陸鉄道の東日本大震災被災前の2009年と被災後の2011年の営業収益および営業費を示す。2009年の三陸鉄道は鉄道の運行が通常通り行われていたのに対して2011年は通年で全線バス代行で営業を行っていた。これから得られた営業利益の減少割合と, 鉄道統計年報から得られた対象路線の運輸収入の積を被災後の営業利益損失とする。営業費でも同様のことを行い, 営業費の減少分もリスクに考慮する。

4. リスクの算出

表-3に対象路線の各橋梁の上部構造流失リスクおよび橋脚洗掘被害リスクの算出結果を示す。いずれの路線も上部構造流失よりも橋脚洗掘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掘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。

次に, 被災時に国・自治体から支払われる復旧費への補助金を考慮したリスクの算出を行った。本研究では特定大規模災害等鉄道施設災害復旧事業費補助金の受給を想定し, 令和2年7月豪雨で被災したくま川鉄道の事例を参考にし, 復旧費用の97.5%が支払われるものとした。表-4に対象3社の通常時のリスクと補助金が支払われる場合のリスクの比較を示す。3社を比較すると, 土佐くろしお鉄道では補助金のリスクに対する効果が非常に大きいことが確認できる。路線全体で97%以上リスクが削減されており, 通常時のリスクでは土佐くろしお鉄道の10分の1以下の値だった道南いさりび鉄道よりも補助金が受給できる場合はリスクを抑えられる結果となった。一方で通常時のリスクが土佐くろしお鉄道よりも大きかった肥薩おれんじ鉄

道では、リスク削減割合は約28%にとどまった。これは、鉄道事業収入における線路使用料収入の割合の差が起因すると考えられる。道南いさりび鉄道および肥薩おれんじ鉄道が所有する路線は、新幹線開通前までは幹線に位置づけられていた路線であり現在でも多くの貨物輸送が行われている。貨物輸送にあたって輸送事業者から支払われる線路使用料による収入の割合が道南いさりび鉄道では全体の約93%、肥薩おれんじ鉄道では約77%であることに対し、土佐くろしお鉄道では1%未満となっている。鉄道運休による貨物の線路使用料収入の損失に対しては補助金は支払われないため、このような結果になったと考えられる。また、表-5に示す2019年度の3社の純資産とリスクを比較すると、肥薩おれんじ鉄道は補助金を受給した場合でもリスクが純資産を大きく上回っており、豪雨・洪水に対して危険な状態であると言える。このように収入の多くを線路使用料で賄っている鉄道事業者にとっては現行の補助金制度ではリスクを下げられないケースもあるため、橋梁補強などの被災する前の予防保全に補助金を支給する制度の構築が必要である。

5. まとめ

本研究では第三セクター鉄道事業者に対して豪雨における橋梁被害時リスクの算出を行い、それを比較・分析を行うことで危険な状態の鉄道路線およびその要因の抽出を行った。対象3社では肥薩おれんじ鉄道において非常に大きなリスクが算出されたが、これは当路線が以下の条件を満たしていたためだと考えられる。

- ① 豪雨が多発している地域に路線を持つこと
- ② 巨大な水系を持つ河川に橋梁が存在すること
- ③ 路線開通が1910年代と古いこと
- ④ 収入の多くを線路使用料で賄っていること

上記の条件と同様の鉄道事業者では、肥薩おれんじ鉄道と同じく高いリスクを示す可能性がある。今後、新幹線開通と共に第三セクター化され利用者減少が見込まれる路線も存在するため、そのような路線でも検証が必要である。今後は災害に対して事後保全ではなく橋梁補強などの事前保全に対して補助金を受け取れるような制度の整備が必要であり、そのための基礎的研究として本研究は位置づけられると捉えている。

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

表-4 対象3社の特定大規模災害等鉄道施設災害復旧事業費補助金を考慮した被災時リスク

道南いさりび鉄道				
河川名	通常時		補助金考慮時	
	被害時リスク	割合	被害時リスク	割合
亀川	402	0.001%	367	0.001%
茂辺地川	5,555,984	8.16%	3,630,025	7.32%
流溪川	180,554	0.27%	136,030	0.27%
戸切地川	33,062,372	48.58%	21,811,769	44.00%
大野川	5,537,781	8.14%	3,029,042	6.11%
久根別川	23,718,473	34.85%	20,966,266	42.29%
計	68,055,567	100%	49,573,499	100%

土佐くろしお鉄道				
河川名	通常時		補助金考慮時	
	被害時リスク	割合	被害時リスク	割合
渡川	848,409,120	98.94%	23,366,044	98.63%
伊与木川	2,165,275	0.25%	78,010	0.33%
吹上川	2,427	0.000%	150	0.001%
後川	1,127,423	0.13%	63,084	0.27%
物部川	1,438,766	0.17%	56,501	0.24%
安芸川	4,315,078	0.50%	126,666	0.53%
計	857,458,089	100%	23,690,454	100%

肥薩おれんじ鉄道				
河川名	通常時		補助金考慮時	
	被害時リスク	割合	被害時リスク	割合
球磨川	863,922,397	56.44%	399,000,299	36.44%
二見川	80,700,238	5.27%	69,124,898	6.31%
佐敷川	103,278,694	6.75%	88,546,978	8.09%
湯出川	25,210,798	1.65%	22,750,725	2.08%
米ノ津川	205,129,570	13.40%	142,443,608	13.01%
高尾野川	51,386,396	3.36%	35,244,269	3.22%
折口川	1,002,228	0.07%	836,041	0.08%
高松川	312,945	0.02%	263,198	0.02%
高城川	150,275,103	9.82%	83,457,990	7.62%
川内川	841,822,531	55.00%	253,183,339	23.12%
計	1,530,564,706	100%	1,094,851,345	100%

表-5 対象3社の2019年度純資産総額

事業者名	純資産[円]
道南いさりび鉄道	226,140,000
土佐くろしお鉄道	338,847,000
肥薩おれんじ鉄道	383,130,744

- 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