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

中央大学　学生会員　○光永　憲弘
中央大学　正会員　佐藤　尚次

1. はじめに

近年，全国各地で前線や台風などに起因する異常な集中豪雨により, 河川の増水が発生している. 気象庁のアメダス観測点の観測結果より近年の集中豪雨の発生回数は増加傾向にあることがわかっている.

我が国の河川は急勾配で短距離離という特徴を持つため大雨が降ると洪水になりやすい．河川増水時には，河川に架かる橋梁の上部構造の流出，橋脚の洗掘・折損といった被害[1)]が発生している．今後，河川増水時には上部構造流出等の橋梁被害が危惧される.

鉄道橋・道路橋への被害は交通機能に影響を及ぼし，多くの利用者の生活に支障をきたす. また，橋梁の上部構造流出による二次災害なども考えられる. このことから河川増水による橋梁への被害の評価や検討が必要となる. そこで本研究では, 過去に発生した上部構造流出被害を評価し，橋梁の上部構造流出に関する信頼性を検討し，被害を軽減させるための合理的な橋梁設計を検討する.

2. 評価対象とする橋梁

本研究で評価する橋梁として過去に上部構造流出の被害が発生した 5 橋を対象とする．具体的には, 2005 年 9 月の宮崎豪雨によって被害を受けた耳川に架かる小原橋・小布所橋・尾佐渡橋の 3 橋と 2011 年 7 月の新潟･福島豪雨によって被害を受けた只見川に架かる田沢橋・西部橋の 2 橋である．各橋梁の詳細を表−1 と表−2 にそれぞれ示す.

3. 流体力・抵抗力式の設定

本研究での上部構造流出に関しての評価として以下の式を用いる.

(1) 河川増水時の上部構造に作用する流体力

本研究で評価する増水時の流体力 S は定常流状であり，橋桁の全面と背面での水位が同程度となるので, 橋梁に作用する流体力 S は式(1)で表わされる[2)].

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

ρ_w:水の密度[kg/m^3]
v:流速[m/s]
C_d:抵抗係数
A:構造物を流れ方向に投影した面積[m^2]

流体力 S の橋桁部の抵抗係数C_dの値は式(2)の条件から求められる[3)].

$$C_d = 2.1 - 0.1(B/D) \quad 1 \leqq B/D < 8 \qquad 式(2)$$

B:桁の総幅員[m]
D:桁の総高[m]

表−1　対象橋梁の形式・完工年・支承数

橋名	橋梁形式	完工年	支承数
小原橋	単純トラス橋	昭和40年(1965年)	4
小布所橋	単純トラス橋	昭和40年(1965年)	4
尾佐渡橋	合成桁橋	昭和50年代(1975年代)	6
田沢橋	単純トラス橋	1956年版の示方書を使用	4
西部橋	ランガー桁橋	昭和53年(1978年)	4

表−2　対象橋梁の寸法・総重量

橋名	桁長[m]	桁幅[m]	桁高[m]	1径間当たりの総重量[kN]
小原橋	75.8	5.2	2.2	3520.2
小布所橋	65.4	5.2	2.5	2896.3
尾佐渡橋	54.7	5.2	2.9	2533.8
田沢橋	75.7	4	1.6	3920.5
西部橋	120.4	5.2	2.6	4874.1

表−3　対象橋梁に作用する流体力と抵抗力

橋名	流体力[kN]	抵抗力[kN]
小原橋	108.9×v^2	2732.6
小布所橋	114.5×v^2	2449.5
尾佐渡橋	118.1×v^2	3404.1
田沢橋	804.7×v^2	2815.1
西部橋	190.4×v^2	4113.8

(2) 橋桁の抵抗力

流体力 S が橋桁に作用することで生じる抵抗力 R は上部構造の重量と摩擦係数をかけた摩擦による抵抗力と支承部に用いられているボルトのせん断耐力による抵抗力の和とし，式(3)で表わされる.

$$R = \mu(W - U) + 0.7\sigma a N_1 N_2 \qquad 式(3)$$

μ:最大摩擦係数(0.6)
W:上部構造重量[N]
U:上部構造に生じる浮力[N]
σ:ボルトの降伏耐力[N/mm^2]
a:ボルトの断面積[mm^2]
N_1:1 支承当たりのボルトの数
N_2:1 径間当たりの支承の数

摩擦係数 μ は一般的に 0.6 程度とみなして良いとされている．河川増水のように徐々に水位が上がる場合は，桁部と床板部で囲まれた空間に空気が密閉され，その分の浮力が発生する可能性がある.

4. 流体力・抵抗力の計算

式(1)と式(3)から，各橋梁の流体力 S と抵抗力 R を算出した結果を表−3 に示す.

キーワード：橋梁上部構造流出，流体力，確率紙，確率密度関数，破壊確率
連絡先：〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27　TEL：03-3817-1816

橋桁にかかる流速を確率密度関数として計算することで流体力 S に変動性を与えた．流速の確率密度関数は対象地点の流速データが不十分であったため，洪水解析に用いられる貯留関数法を用いて各橋梁地点での流量を計算した．降雨量はアメダス観測点のデータを用い，河川への流出量を計算した．貯留方程式は貯留量と流出量との間に一価の線形関係があるものと仮定して式(4)と式(5)で表わされる．

$$s = kq \quad \text{式(4)}$$

$$\frac{ds}{dt} = r_e - q \quad \text{式(5)}$$

s:貯流量[m^3]

k:流出による貯留量のパラメータ

q:流出量[m^3/s]

r_e:有効降雨量 [m^3/s]

ここで，流出による貯流量のパラメータ k と有効降雨量r_eはそれぞれ主河道長と流域面積との関係式である Hack の法則と山腹斜面の地表流を計算するための Kinematic Wave 法により式(6)と式(7)で表わされる．

$$k = 2.5\left(\frac{n}{\sqrt{i}}\right)^{0.6} A^{0.24} \quad \text{式(6)}$$

$$r_e = \frac{1}{3.6}\left(\frac{n}{\sqrt{i}}\right)^{0.6} Ar \quad \text{式(7)}$$

n:等価粗度

i:斜面勾配

A:流域面積[km^2]

r:降雨量[mm/h]

貯留関数法により求める流量は年最大流量の 20 年間分をとることにした．

5. 確率密度関数の作成

確率密度関数を作成するために求めた流速は，上部構造に水位が達していないような場合でも，断面積を上部構造が水没する時と同じ条件にすることで，擬似的に達しているようにして求めている．

貯留関数法により求めた流量の値を流速の値に変換し，確率紙を用いて分布形の当てはめを行った．Gumbel 確率紙と対数正規確率紙にプロットしたところ，耳川に架かる橋では Gumbel 確率紙上でほぼ直線状に並び，只見川に架かる橋では対数正規確率紙上でほぼ直線状に並ぶ結果となった．よって，耳川に架かる小原橋・小布所橋・尾佐渡橋における流速は Gumbel 分布に従い，只見川に架かる田沢・西部橋では対数正規分布に従うといえる．以上より，各橋梁での流速の確率密度関数を求めると**図-1** のようになる．

6. 破壊確率の計算

破壊確率の計算は**表-3** の流体力 S と抵抗力 R が等しくなる時の流速を求め，**図-1** の確率密度関数に当てはめ，1 年間で水位が上部構造まで到達する確率をかけて求める．1 年間で水位が上部構造まで到達する確率は，Manning 式より水位―流量曲線を作成し，その値から求めた．各橋梁の破壊確率の計算結果を**表-4** に示す．破壊確率は橋本・平野ら [4]の研究を参考に河川に土石流が発生する場合も計算した．

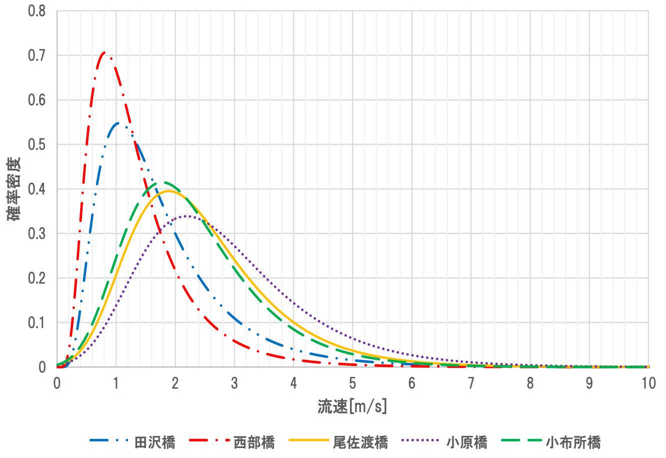

図-1 20 年間分の年最大流量から求めた流速の確率密度関数(1995-2014)

表-4 対象橋梁の 1 年間での破壊確率

橋名	小原橋	小布所橋	尾佐渡橋	田沢橋	西部橋
1年間の破壊確率[%]	0.073	0.010	0.019	0.002	0.002
1年間の破壊確率（土石流）[%]	0.113	0.018	0.032	0.004	0.003

7. おわりに

橋梁の上部構造流出に関して，流速の確率密度関数を用いて破壊確率の計算を行った．破壊確率の大小を見ると，橋の形状による破壊確率の変動が見られた．また，橋梁形式以外の要因として挙げられるのは，流速の確率密度関数からも分かる通り，地域による降水量の違いにあるといえる．しかし，**表-4** からも分かる通り，1 年間での破壊確率はかなり低い値となった．

今後の課題としては，河川の水位に関しての検討を深める事．また，それによる流速データ期間の再設定が挙げられる．上部構造に作用する力に関しても，流体力 S では，鉛直方向の力の考慮，抵抗力 R では，変動性の追加が必要であるといえる．そして，上部構造流出被害だけでなく，他の破壊モードを考慮する事も今後の課題に挙げられる．

参考文献・出典

1) 玉井信行，石野和男ら：豪雨による河川橋梁災害―その原因と対策―，技報堂出版，2015 年

2) 津波による橋梁構造物に及ぼす波力の評価に関する調査研究委員会報告書，土木学会，2013 年

3) 道路橋示方書・同解説　共通編，日本道路協会，2002 年

4) 橋本晴行，平野宗夫ら：土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究，土木学会論文集，No.565，1997.