

洗掘防護工のリスク評価

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

金沢大学工学部 ○ 嶋嶋 章文

1. まえがき 河川構造物の被災調査によれば橋梁災害の多くが局所洗掘を主な原因としている。さらに近年多くの河川で河床低下が見られ、適切な洗掘防護工の重要性はより高くなっている。ここでは防護工の設計・施工という「対応」による安全度の変化に着目してそのリスクについて考える。

2. 河川構造物災害に対する防護工の設計・施工のリスク リスクは一般には「危険が生じている状態」での「対応・行為」に対する「災害が起きる危険性」としてとらえられる。河川構造物災害については、例えば河床低下や構造物の老朽化が進んだ状態で防護工の設計・施工をどう行うかによる被災確率の違いという形で評価されるものと考えられる。「対応」としての防護工の設計・施工は、(1)設計対象洪水をどう選ぶか(確率年)、(2)安全率をどう選ぶか(余裕高)、(3)どの程度の施工管理を行うか(抵抗指標のばらつき)などにより特徴付けられる。また、これらの「対応」を決定する背景として対象河川の河道・流量などの特性を把握しておく必要がある。防護工の設計は次のように行われる。はじめに設計流量を設定する。そこではまず対象洪水規模すなわち設計確率年 T_D の選定がなされる。これはその構造物に対しどれくらい重要性を考えるかという設計思想によるものである。そして対象河川での洪水頻度特性、例えば年最大流量の分布、それを支配するパラメータを知ることによって超過確率が $1/T_D$ である設計流量が決められる。次に設計対象洗掘深の設定が行われる。設計確率年に応じて設計流量から洗掘深推定式を用いて設計洗掘深 μ_{s0} を求める。さらに年最大流量分布から年最大洗掘深 μ_s の出現分布が特定される。こうして求められた設計洗掘深に対し、安全率 S_F を選定することによって根入れ深さの設計値 $\mu_R = S_F \mu_{s0}$ が決められる。

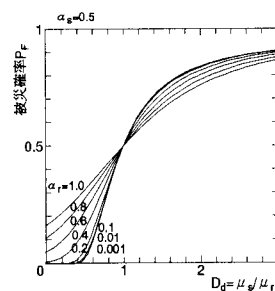
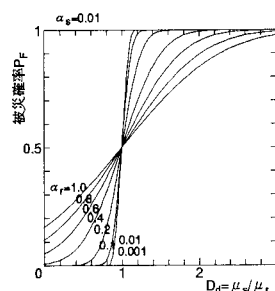
3. 被災確率の計算 被災確率は外力(洗掘深)が抵抗力(根入れ深さ)を上回る確率として評価される。洗掘深は対象洪水規模を限定しても河床条件(材料、勾配、河床形態その他)によって、根入れ深さも施工時のばらつきで確率変数(それぞれ s, r とする)となる。このとき、被災確率は次式で計算される。

$$P_F = \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (1)$$

ここに $t=s-r$, $f(t)$ は確率変数 t の密度関数である。 s, r は互いに独立である場合が多く、簡単のためそれぞれ平均値 μ_s, μ_r , 分散が σ_s^2, σ_r^2 の正規分布にしたがうとすると、 t は平均値 $(\mu_s - \mu_r)$, 分散 $(\sigma_s^2 + \sigma_r^2)$ の正規分布にしたがうことから、被災確率 P_F は次のように計算される。

$$P_F = 1 - \Phi \left[\frac{1 - D_d}{\sqrt{\alpha_s^2 D_d^2 + \alpha_r^2}} \right]; \quad \Phi(a) \equiv \int_{-\infty}^a \phi(x) dx \quad (2)$$

ここに ϕ :標準正規分布の確率密度関数, $\alpha_s = \sigma_s / \mu_s$, $\alpha_r = \sigma_r / \mu_r$ は s, r の変動係数であり, $D_d = \mu_s / \mu_r$ は一般に言うところの「安全率」の逆数である。図1は洗掘深の変動係数 α_s を一定としたときの D_d と被災確率の関係を α_r (施工のばらつきを表す)をパラメータとして示したものである。 α_s, α_r がともに0に近い(決定論的議論の場合), P_F はステップ関数的になるが, α_s, α_r が0でない値をとると $D_d=1.0$ で $P_F=0.5$ として P_F は D_d に対しなめらかに変化する。 $D_d = \mu_s / \mu_r$ の変化は、設計によって根入れ深さ μ_r が決定した状態では洗掘深規模つまりは洪水規模の変化を表し、被災確率は D_d すなわち洪水規模により変化することになる。この図より防護工の被災確率は設計対象洪水に対する被災確率だけでなく、それを下回る洪水あるいは上回る洪水に対する被災確率も同時に評価される。

図1 D_d と被災確率の関係

4. 被災のリターンペリオドの計算 被災確率は安全率 S_F 、洗掘深と根入れ深さの変動係数 α_s, α_r を特定した上で、洗掘深規模 μ_s の関数として評価される。すなわち洪水規模ごとの安全度の指標である。これを河川の流量時系列を用いて次のようにその河川の構造物の安全度指標に変換する。年最大流量の分布と洗掘深推定式から年最大洗掘深 μ_s の出現分布(μ_s を代表値で割った変数を ξ として確率密度関数を $g(\xi)$ と表す)がわかっていると、 α_s, α_r を特定した場合被災確率 P_F は D_d すなわち ξ の関数 $P_F(\xi)$ と書けるから、1年あたりの被災確率密度 $\tilde{P}_F$ は次のように求められ、その逆数として防護工の被災のリターンペリオド T_d (年)が計算される。

$$T_d = \frac{1}{\tilde{P}_F} \quad ; \quad P_F = \int_0^{\infty} P_F(\xi) g(\xi) d\xi \quad (3)$$

いま年最大洗掘深の分布を指数分布あるいは対数正規分布と仮定すると、それぞれの場合の $g(\xi)$ および ξ と D_d の関係は次の式(4)、(5)のように書ける。

$$g(\xi) = \exp(-\xi) \quad \xi = S_F \ln T_D D_d \quad (4)$$

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_0 \xi} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \xi}{\zeta_0}\right)^2\right] \quad \xi = S_F \exp[-\zeta_0 \Phi^{-1}(1/T_D)] D_d \quad (5)$$

ここに $\zeta_0: \ln \mu_s$ の標準偏差で年最大洗掘深分布のばらつきを表す。図2, 3はそれぞれ年最大洗掘深の分布に指数分布と対数正規分布を仮定したときの設計確率年と被災のリターンペリオドの関係を α_s, α_r 、対数正規分布については ζ_0 も一定とし、安全率 S_F をパラメータとして示したものである。被災のリターンペリオド T_d は設計確率年 T_D および安全率 S_F の関数として変化し、 T_d と T_D は必ずしも一致しない。

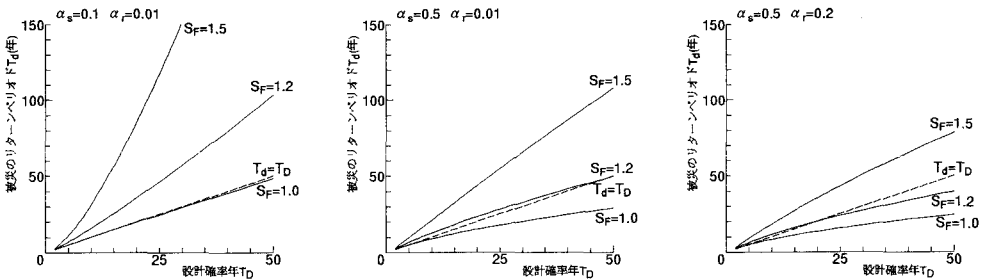


図2 設計確率年と被災のリターンペリオドの関係(指数分布を仮定した場合)

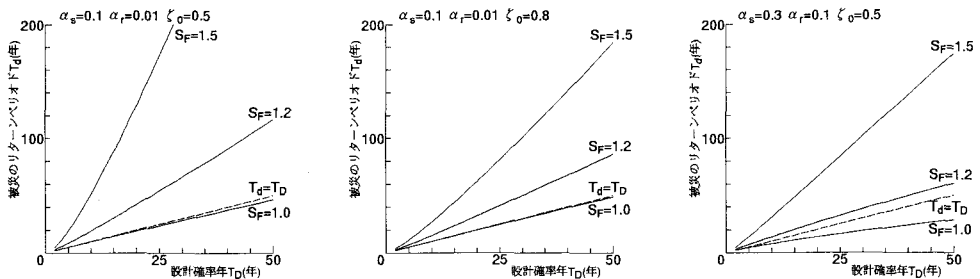


図3 設計確率年と被災のリターンペリオドの関係(対数正規分布を仮定した場合)

5. あとがき 上記のように、設計対象洪水に対する防護工の被災確率やそれを下回る、上回る規模の洪水に対する被災確率および被災のリターンペリオドが求められ、防護工の設計・施工という「対応」が持つリスクが評価される。そしてある被災確率および被災のリターンペリオドを設定すると、設計確率年に対してどれくらいの安全率(S_F)をとればよいか、施工管理をどのように行うべきか(α_r で表される)が検討され適切な「対応」をとることが可能となる。