堤防天端高の縦断変動が超過洪水時の堤防越水外力に与える影響

Stochastic effects of the longitudinal fluctuation of levee-crown elevation on overtopping flow forces due to the excess flood.

松尾和巳*・望月達也**・藤田光一***

By Kazumi MATSUO, Koh-ichi FUJITA and Tatsuya MOCHIZUKI

Estimating the forces due to a flood exceeding a design discharge is essential for properly designing the armored levee against the overtopping and consequent levee break. Longitudinally dense field surveys on levee-crown elevation showed its fluctuation and statistic properties. Unsteady flow calculation for flood routines with levee-overtopping was made to evaluate overtopping discharges, where the surveyed fluctuation was stochastically incorporated. Calculation results showed that the fluctuation effect on the discharges was significant. A simplified stochastic method was proposed for determining the expected value of overtopping flow forces to be considered in the armored levee design.

Key words: armored levee, levee design, stochastic approach, flood routine, risk analysis

1. はじめに

河道の疎通能力を上回る洪水が発生すると堤防を越水した水が堤防を侵食し、破堤すると大量の水が堤内地に流出するため非常に大きな災害に発展する。このため、越水に対して耐力の大きな堤防を整備することは、洪水被害を低減するうえで有効な方法と考えられる。このような耐越水型の堤防を設計するためには、超過洪水時に発生する堤防越流水による堤防侵食外力の規模（越流水深や継続時間など。以下「堤防越水外力」という。）を適正に評価することが必要である。

堤防越水外力の評価に際して、どのような規模の超過洪水を対象とするかが重要な課題であるが、そのときに生じる堤防越水外力の評価手法が確立されていなければ、対象とする洪水に対して所要の安全性を有した堤防を設計することはできない。堤防越水を伴う超過洪水時の水面形及び越流水深については石川¹⁾によって報告されているが、堤防高の縦断変動など局所的な越流要因を考慮した確率的な評価はなされていない。本研究は、洪水規模が所与の場合の堤防越水外力の確率的評価手法について検討したものである。

2. 堤防越水外力の生起確率評価手法

2. 1 概要

超過洪水時の洪水流の挙動については、堤防越水条件下での不定流計算によって求めることができる。しかしながら、従来の越水を前提としない河道計画において、河床や粗度といった変動成分を加味し、これら

* 正会員 建設省土木研究所 主任研究員 河川部河川研究室
(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

** 正会員 建設省土木研究所 室長 河川部河川研究室

*** 正会員 工博 建設省土木研究所 主任研究員 河川部河川研究室

を抱絡するような条件下において計画高水位以下で流下可能な河道を計画すれば可とされるのとは異なり、前述の変動成分のほか、堤防高の縦断変動など局所的な越流要因を考慮して堤防越水外力を評価する場合には、これらの変動要因によって生じる数cm程度の越流水深の変化が堤防を侵食する外力として大きく影響してくることもあり、堤防越水外力の規模とその生起確率に応じた確率的な現象として捉えなければならない。

堤防越水外力は、越流水深を1つの指標として表すことができるが、この越流水深は河川水位と堤防高との差である。したがって、河川水位と堤防高に影響を及ぼす変動要因を確率的に定量化すれば、越水外力の確率的評価が可能となる。河川水位は、流量、河川の縦・横断形状、粗度係数によって決まるが、ここでは洪水規模を所与として検討するので上流端の入力ハイドロを設定し、そのときの各河道区間毎の越流量を計算すれば各河道区間毎の流量は計算により定まる。また、河川の縦・横断形状、粗度係数は、洪水の流れ易さを表す指標と考えれば、それらの変動をまとめて代表的な1～2の指標の変動に置き換えることができる。一方、堤防高は、人為的な管理によって一定の幅の中で確率変動すると考えられる。

以上のことから本研究では、粗度係数と堤防高を代表的な変動要因として設定し、図-1、図-2に示すモデル河道及びモデル洪水を用いて堤防越水条件下での不定流計算²⁾（本検討では陰型式差分法）を行うことにより、主として堤防高の確率変動のモデル化とその変動によって生じる堤防越水外力の生起確率について検討するとともに、粗度係数の変動と越水外力の生起の関係について分析した。なお、パターン1の洪水が本モデル河道の流下能力相当の洪水（ピーク流量14,000m³/s）であり、本洪水が流下したときの最高水位が堤防高から2m下の高さを上回らないようにモデル河道を設定した。また、パターン2の洪水が以下の検討に用いた超過洪水（ピーク流量23,800m³/s）であり、本超過洪水が流下したときの最高水位がモデル河道の上流端では堤防高を上回らないようにモデル河道を設定している。

図-1 検討に用いたモデル河道

図-2 検討に用いたモデル洪水

2.2 堤防高の変動特性

堤防高変動特性の1つの例として利根川における500m間隔の堤防高の測量結果をもとに、堤防高の変動特性を分析した。ここでは、移動平均値とその地点の堤防高の差をその地点の堤防高の変動成分としている。図-3は、移動平均のNを17（8km）としたときの変動成分の自己相関を求めたものである。移動平均値を基準としているために長周期の変動を見ることはできないが、隣接した地点との相関が低いことから、500m間隔での堤防高はランダムに変動するものとして扱ってよいと判断される。また、このときの変動成分をヒストグラムで表したのが図-4であり、三角形に近い分布形をしていることがわかる。

図-3 堤防高変動自己相関(500mピッチ)

次に、利根川の中流部の5km区間を抜き出して20m間隔で堤防高を測量し、起点と終点を結ぶ高さを基準

として変動成分を求め、同様の分析を行った結果を図-5、図-6に示す。図-5の自己相関係数については、1000m程度まで正の相関でなだらかに減少しているが、これは前述の500m間隔で測量された堤防高が、一定の区間を代表する高さとして取り扱えることを示すものと考えられる。また、この区間では、区間中央部付近が起終点を結ぶ基準線よりも低くなる下に凸の大きな縦断形状をしていたために、2000m付近で負の相関が高い結果となっている。また、図-6のヒストグラムでは、3つの山が見られるが、これはおよそ1000mを単位として階段状に不連続となる箇所があったためである。

以上のことがすべての河川堤防に適用できるわけではないが、500m単位でその区間を代表する高さを設定すると、その堤防高変動成分はランダムに変動するとともに、確率分布の一形態として三角形に近い分布形状があることがわかった。

図-5 堤防高変動自己相関(20mピッチ)

図-4 堤防高変動ヒストグラム(500mピッチ)

図-6 堤防高変動ヒストグラム(20mピッチ)

2. 3 堤防越水外力の生起確率に関する検討

(a) 評価手法の適合性

堤防高の変動成分の特性が既知の場合の堤防越水外力の生起確率の評価手法の1つとして、堤防高をランダムに与えた試行計算を数多く行い、その計算結果を確率統計的に整理するモンテカルロ法がある。しかし、堤防越水を伴ったときの洪水流の挙動は、一点一点の堤防高に敏感に反応するのではなく一定の区間の平均的な越流特性によって決まるので、そのときの平均的な河川水位と堤防高の確率変動の関係によって、越流水深の生起確率分布を表しうると考えられる。すなわち、堤防高をランダムに与えた試行計算を数多く行う代わりに、堤防高の変動特性から求められる越流量の期待値関数を用いた越流計算によって河川水位の期待値を求め、これに図-7に示すように堤防高変動の確率分布を重ねることによって越流水深の生起確率を求めるのである。

堤防高の変動特性から求められる越流量の期待値関数（以下、「越流量期待値関数」という。）の詳細は次の(b)で述べることとし、ここでは、本評価手法の適合性について述べる。適合性の検証は堤防高変動成分の確率分布に合わせて堤防高をランダムに与えたときの各地点の最大越流水深の生起特性と、越流量期待値関数を用いた時の最大越流水深を比較することにより行った。堤防高変動成分の確率分布が分布幅±40cmの三角形分布と一様分布の場合について、500m毎にランダムに堤防高を変えたモデル河道にパターン2の超過洪水を流す20回の試行計算（不定流計算）結果と、堤防高を変えないモデル河道にパターン2の超過洪水を

図-7 確率分布モデルの概念図

流し、越流量期待値関数を用いて越流量を求めた不定流計算結果を比較したものを図-8～11に示す。ここで、越流水深は計算水位（ピーク水位）と堤防高の差であり、越流水深のマイナスは河川水位が堤防高を下回る非越流である。比較地点は10.0km、20.0km、30.0km、40.0km、50.0km、60.0km、70.0km、80.0km地点の8地点であり、各地点ごとに左右岸合わせた40点をプロットしている。越流水深の確率分布は、越流量期待値関数を用いたときの最大越流水深に堤防高変動成分の確率分布を重ね合わせたものとよく一致している。

図-8 越流水深生起分布(三角形分布)

図-9 越流水深変動ヒストグラム(三角形分布)

図-10 越流水深生起分布(一様分布)

図-11 越流水深変動ヒストグラム(一様分布)

(b) 越流量期待値関数

堤防高の変動は、管理によってコントロールできる。その管理水準によって変動幅が決まるので、その変動幅を $\pm a$ として以下により越流量期待値関数を求めた。

堤防からの越流量は次式で表される。

$$Q = C B h^{3/2} \quad (1)$$

ここに、 Q ：流量 (m^3/s)、 h ：越流水深 (m)、 C ：流量係数

堤防高変動成分 x の確率分布が平均堤防高の周りで対称な分布型であり、 $\pm a$ の範囲で $P(x)$ ($-a \leq x \leq a$) である時の越流量の期待値 $Q(E)$ は平均堤防高に対する越流水深を H としたとき次式で与えられる。

$$\begin{aligned} Q(E) &= \int P(x) \cdot C B (H+x)^{3/2} dx \\ &= C' B (H+a)^{3/2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 C' ：補正した流量係数、 a ：変動幅の定数

C が水深によって変わらなければ次の(3)式の関係が成り立ち、 $H \geq -a$ で $Q(E) \geq 0$ 、 H の増加に伴い変動幅 a の影響は小さくなるので、 $Q(E)$ は(4)のように置ける。

$$C B H^{3/2} \leq C' B (H+a)^{3/2} \leq C B (H+a)^{3/2} \quad (3)$$

$$Q(E) = C B \{H + a \cdot f(H, a)\}^{3/2} \quad (4)$$

ここに、 $f(H, a)$ ： $H = -a$ で $f(H, a) = 1$ となる単調減少関数

以下に示す5つの確率分布型は、 $e^{-(H+a)/a}$ 、 $\{1 + \sinh\{(H+a)/a\}\}^{-1}$ 、 $1 - \tanh\{(H+a)/a\}$ の組み合わせにより

$f(H, a)$ が近似できたものである。図-12に、三角形分布の場合の近似度を C'/C で示す。

$y = (H+a)/a$ としたとき

〔三角形分布〕

$$P(x) = x/a^2 + 1/a \quad (-a \leq x < 0) \quad f(H, a) = 1 - \tanh(y) \quad (5)$$

$$= -x/a^2 + 1/a \quad (0 \leq x \leq a)$$

〔一様分布〕

$$P(x) = 1/2a \quad (-a \leq x \leq a) \quad f(H, a) = \frac{1}{1 + \sinh(y)} \cdot \frac{0.85}{0.85 + y} + \frac{y \{1 - \tanh(y)\}}{0.85 + y} \quad (6)$$

〔半楕円形分布〕

$$P(x) = \frac{2\sqrt{a^2 - x^2}}{\pi a^2} \quad (-a \leq x \leq a) \quad f(H, a) = \frac{0.8 \cdot e^{-y}}{0.8 + y} + \frac{y \{1 - \tanh(y)\}}{0.8 + y} \quad (7)$$

〔放物線型分布〕

$$P(x) = \frac{3(a^2 - x^2)}{4a^2} \quad (-a \leq x \leq a) \quad f(H, a) = \frac{0.2 \cdot e^{-y}}{0.2 + y} + \frac{y \{1 - \tanh(y)\}}{0.2 + y} \quad (8)$$

〔二山(四次関数)型分布〕

$$P(x) = \frac{5}{3a^5} \left(\frac{a^4}{4} + \frac{3a^2}{4} x^2 - x^4 \right) \quad (-a \leq x \leq a) \quad f(H, a) = \frac{2 \cdot e^{-y}}{2 + y} + \frac{y \{1 - \tanh(y)\}}{2 + y} \quad (9)$$

(c) 粗度係数の変動と堤防越水外力との関係に関する考察

モデル河道は縦断的にスムーズな形状をしており、勾配変化点を除けば河道の疎通能力が急激に変わることはない。しかしながら、実際の河道は河積の拡大・縮小、樹木の繁茂、河床変動等により洪水の流れ易さが地点毎に変化している。このような箇所毎に流れ易さが変化する河道における堤防越水外力の生起特性を把握するため、粗度係数を細かいピッチで変化させて検討を行った。

粗度係数は、500m区間毎にモデル河道の粗度係数の周りに $\pm 10\%$ の範囲で一様に分布するようにランダムに変化させて20回の試行計算を行った。また、あわせて流れ易さの変動はないが全体的に流れ難い場合として、粗度係数を一律10%増加させたケースについても計算を行った。計算結果を比較したものが図-13である。越流水深の平均値は粗度係数に変化を与えなかった場合よりも小さくなっているが、最大の越流水深は大きくなり、粗度係数を一律10%増加させた場合よりもさらに大きくなっている。

図-12 越流量期待値関数の近似状況(三角形分布)

図-13 越流水深の生起分布(粗度係数を変化させた場合)

(d) 堤防越水外力の大きさと生起確率に関する考察

図-14と図-15は越流量期待値関数を用いて、堤防高変動特性による平均越水深の変化を比較したものである。堤防高変動の大きさを表す a の値が大きいほど平均越流水深は小さくなるが、越流水深は平均越流水

深の周りで $\pm a$ の範囲で変動するので、最大越流水深は逆に大きくなる。また、堤防高変動成分の確率分布形の変化による平均越流水深の変化では、一様分布が一番小さく三角形分布が最大となっているが、この場合、堤防高変動の範囲は同じであるから、同様に最大越流水深も三角形分布が最大となる。

以上の結果から、(c)で述べた粗度係数を変動させた場合の結果とあわせて考えると、流れ難さ、逆にいえば越流し易さの変動が区間を通して小さいほど、また越流し易いところが多いほど最大越流水深は小さくなるといえる。すなわち、洪水の流れ易さの変動を小さくし、広く浅く越水するようにすることが最大越流水深を小さくするために有効ということである。これを越流水による破堤と結びつけて考えると、一連区間の堤防に1箇所でも弱点箇所があつてそこが破堤すると、他の堤防がいかに強固であっても大きな被害となるのであるから、破堤確率を低くするにはいかに弱点箇所を作らないかが重要な課題であり、越流水に対する耐侵食性の構造上の限界と河道管理の限界をあわせて考えなければならない。

なお、堤防高変動成分の確率分布を用いて越流水深とそれに対応する生起確率を求めることが可能であり、その一例を図-16、17に示す。

3. まとめ

本研究では堤防高の変動成分と粗度係数を取り上げ、モデル河道での計算により、それらの変動が堤防越水外力の規模と生起確率に及ぼす影響について検討し、それらの変動を小さくすることが堤防越水外力を小さくするうえで非常に重要であることがわかった。堤防高については、物理的にその変動特性を把握することが可能でありモデル化も容易であったが、今回粗度係数を指標として検討した河道の流れ易さの変動をどのように調べ、定量化するかが今後の課題である。

参考文献

- 1) 石川：堤防越水をとまなう直線矩形断面河道の水面形、第26回水理講演会論文集、1982。
- 2) 橋本、藤田、加賀谷：河川における不定流計算法(IV)、土木研究所資料、第2080号、1984。
- 3) 山本、藤田、布村：堤防満杯流量時の水位変動による堤防越流、土木研究所資料、第3161号、1993。

図-14 変動幅別平均越流水深(三角形分布)

図-15 確率分布型別平均越流水深(変動幅 $\pm 0.4m$)

図-16 確率分布型別越水確率(変動幅 $\pm 0.4m$)

図-17 生起確率別越流水深(変動幅 $\pm 0.4m$)