

植生と河床の変動を考慮した河川高水計画の信頼性解析¹

Reliability analysis for flood control planning considering
stochastic nature on variation of vegetation and river bed

新川健二², 松崎浩憲³, 玉井信行⁴

Kenji SHINKAWA, Hironori MATSUZAKI, Nobuyuki TAMAI

1. はじめに

現在の河川高水計画は、自然の不確定要素に対する配慮があいまいである。つまり、計画高水位の決定においては、計画断面に計画高水流量を流下させたときの水位とするなど、河床形状や植生の変動といった自然の変化を考慮していない。現計画論には、自然の不確定性に対処するものとして堤防の余裕高というものがあるが、これは計画高水流量に対して経験的に一律に設定されている。したがって、現在の河川高水計画立案手法では、信頼度、工事規模などにおいて本当に適切なものが行われているか疑問である。また最近よく、便益の公平化というものが叫ばれているが、これに対処するには費用－便益の関係のみならず、信頼性をも考慮した計画論が必要である。また、地域住民の河川事業への参加に関しても、計画案の提示などといった情報公開が求められつつある。このような時には、合理的、定量的な計画手法が必要となる。

本研究では自然の不確定要素を考慮し、費用－便益－信頼度といった3要素を考慮した新たな計画案を提案した。具体的には、河床や植生の変動を、モンテカルロ法によって河床データや粗度係数を100～1,000通りに変化させた。このようにして得られた河道地形をもとに、不等流計算を行い得られた計算水位をワイブル分布¹⁾で評価して信頼度を算出した。そして、この新しい計画論を、ケーススタディーとして、X河川に適用したところ、現在の堤防は過大設計であるという結論を得た。

提案した手法は、各地点毎に余裕高を決定することができ、建設コストの削減までももたらしすることができる。また、今までは便益／費用しか考慮してこなかった治水経済調査に、自然の不確定さを取り入れた信頼性評価までを考慮することによって便益の公平化を図ることができる。さらに複数の信頼度に対する計画を地域住民等へ公開し、意見等を聴くことによって、昨年の改正河川法にも盛り込まれている住民の河川事業への参加も果たすことができるであろう。

2. 現状の高水計画との比較分析

2.1 現状の計画高水位の決定方法

現在の計画高水位は、計画高水流量、河道の縦断形、横断形などと関連して定められている。建設省河川砂防技術基準(案)²⁾によると、これらはそれぞれ次のように定められている。

計画高水流量：

洪水防御計画においては、基本高水を合理的に河道、洪水調節ダムなどに配分して、各地点の河道、洪

1 キーワード：不確定性、ワイブル分布

2 東京大学修士課程1年 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

3 (株)建設技術研究所 東京支社河川本部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

4 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

水調節ダムなどの計画の基本となる高水流量を決定するものとする。これを計画高水流量という。

基本高水：

基本高水は計画降雨について、適当な洪水流出モデルを用いて洪水のハイドログラフを求め、これを基に既往洪水、計画対象施設の性質などを総合的に考慮して決定するものとする。

河道の縦断形：

計画河床勾配は、計画河床高と関連させて河床の維持、事業費を考慮して定めるが、一般には現況の平均河床勾配を重視して定める。一般の河川では上流から下流へ向かって急から緩となるように変化させるものとする。

河道の横断形：

河道の計画横断形は、河道の縦断形、地形、地質、生物の多様な生息空間などを含む河川環境、沿川の土地利用状況などを勘案し、また長期的、局地的な河床変動を十分に考慮して定め、一般に複断面とする。ただし、急流河川や計画高水流量の小さい河川では河道の状況、維持の難易などを考慮して単断面についても検討して定めるものとする。

計画高水位：

計画高水位は、計画高水流量、河道の縦断形、横断形と関連して定めるが、沿川的地盤高を上回る高さを極力小さくする。

このように、計画高水位は計画高水流量を計画断面に流すことで決定されている。しかし、計画断面はきれいな複断面で考えられており、時間の経過による河床の変化や植生の繁茂の状況などは考慮されていない。

したがってこのように決定される計画高水位は、実際にどの程度現実を反映しているのか疑問である。また、現在の堤防の余裕高は、原則では流量に対して経験的に一律に決められている。

2.2 新たな高水計画の提案

実際の河川の河床断面は、形状自体が洪水流などにより変化したり、植生の繁茂状況が変化して流れに対する抵抗が変わったりと、長い時系列の中でその形を特定することは不可能である。つまり上でも述べたように、現在の計画高水位、堤防高の決定方法には改善すべき点が残されている。

そこで、過去の洪水時の水位データからその分布を求め、確率的に評価された信頼性を採用することで、より適切に計画堤防高を決定することができると考えた。

しかし、実際にはそのような洪水時の水位や河道地形のデータは、十分な数だけ存在しないため、河床形状、植生の変化を、モンテカルロ法により数多く表現して、河道地形を生成した。これらに対して1次元不等流計算を行って水位を求める方法を考えた。

そしてこのようにして求められた水位の分布にワイブル分布を当てはめて、超過確率、確率年等を算出し、これらをもとに費用、便益、信頼性の3要素を考慮した河川計画を提案した。

また従来の河川計画では、便益(B)と費用(C)の関係についてのみ考慮して、事業を実施するか否かを考えてきた。しかし便益の公平化という点を考慮すると、従来の河川計画では不十分である。つまり河川計画では、費用と便益の関係だけではなく、河床の変動、植生の変遷などの不確定要素まで考慮する必要がある。つまり、B、Cに信頼性(R)を加えた3要素を考えて、事業の優先度を定めるべきである。以下に、新たに提案する計画案の体系を6段階に分けて述べる。

第1段階 基本となる断面形と植生

シミュレーションを実行する前に、その基本となる現状の断面形および植生の繁茂状況（本文では以下で基本断面、基本植生と呼ぶ）を決め、それに対する水位を求める必要がある。

各断面における植生の影響まで含めた代表粗度係数を定める。これは、それぞれの断面での河床材料や植生の様子に対して航空写真等から各断面の特徴を把握して、ある粗度係数を仮定し（つまり植生の流れに対する影響を粗度係数に含めて考える）、それをもとに不等流計算を行い対象区間内にある観測所の、過去の

洪水の記録と一致するまで係数を変えて繰り返す。このため、対象区間内には観測所が必ず必要であり、そこにおける過去の洪水の流量と水位のデータが多く残っていることが望ましい。

このようにして定まった粗度係数に対して、計画流量を流した時の不等流計算をすることで、基本となる断面、植生に対する計画高水位と、計画断面に対する計画高水位を比べることができる。

第2段階 過去の洪水の記録から河床形状、植生の変化を考察

過去の洪水実績を考察することから、河床形状や植生の繁茂状況の変動に関するルール（河床の洗掘や土砂の堆積の具体的な度合いや、低水路、高水敷の植生の移り変わり様子の違いなど）を決める。

第3段階 河床形状、植生の変化を反映した河道地形を生成

第2段階で求めたルールの範囲内で河床形状、植生を、モンテカルロ法によって求めた乱数を用いて表現し、横断形状を100～1,000個作成する。

具体的には、河床の高さや、植生を表現する粗度係数がある範囲内でアトランダムに変化させる。

第4段階 不等流計算で各断面の水位を求める

以上のようにして定めたさまざまな状況に対して、不等流計算をすることで各ケースに対する各断面の水位を求める。多数のケースについて行うことで、実際に近い水位の変動が得られる。

第5段階 水位の分布および超過確率、確率水位の推定

このようにして求めた各断面における何ケースもの水位の分布から、母集団の分布を推定する。この際、極値などの分布に関しては、ガンベル分布やワイブル分布が比較的よく当てはまることが知られているため、それらを当てはめてみて、相関係数の高いものを採用する。

こうして母集団の分布を求めた後、超過確率、確率水位などを求めることで既往の計画高水位、堤防高、余裕高などに対する信頼性解析、および信頼度まで考慮した際の適切な堤防高などを求めることができる。

第6段階 費用-便益-信頼性分析

Cost（年費用）、Benefit（年便益）、Reliability（信頼性）の3つの要素を同時に評価し、最適な計画の決定法、ある信頼度に対する堤防余裕高の決定法を考える。便益を求める際には、想定年平均被害軽減期待額を用いるが、その算出方法などは治水経済調査要綱⁹⁾に沿うものとする。

この際、各断面で複数の信頼度に対して堤防高、B/C、などを求めることで、各信頼度に対して適切な堤防高を断面毎に求めることができる。これを一覧表などにまとめ、地域住民等に公開し意見を聴くことで、住民の河川計画への参加も実現できる。

また、B/CにRを加えて考慮した際の最適堤防高の決定方法としては、重み付き得点によるものやファジィ測度を用いるものなどが考えられる。

3. 適用事例と考察

以上の計画案を、具体的にX河川の一部区間(8km)について適用した例について述べる。

3.1 粗度係数の決定

まず45km地点から53km地点までの、1983年の各河床断面のデータ（500m間隔で17断面）と、観測所における過去の洪水時の流量、水位の実測値に対して、粗度係数をさまざまに変化させて不等流計算を行ってみたところ、次の表1に示した値で過去の洪水痕跡を再現することができた。なお、植生の状況については1985年の航空写真から読み取った。

表1 逆算して求めた粗度係数一覧			
砂地	0.030	草本類1	0.040
田	0.035	草本類2	0.050
		高木	0.060

注) 草本類1：繁茂していない状態、草本類2：繁茂している状態

3.2 基本断面、基本植生における水位

1983 年の河床形状、1985 年の植生状況（上で決定した粗度係数に基づく）に対する水位を求める。流量には計画流量を用いた。

3.3 河床形状、植生の変化を考慮した解析

3.3.1 河床形状

過去の河床形状の変化を見てみると、対象区間の河床は洪水流による侵食、堆積などにより概ね 2m 程度鉛直方向に変化している。また河床形状の変化は、そのほとんどが低水路内に見られ、高水敷の変化はわずかで水位の算出の際には無視できる程度である。

よって、これらのことを合わせて考えた結果、各断面の低水路内のみの河床を、基本断面（1983 年）よりも鉛直方向に 2m 以内（上下 1m 以内）の範囲でアトランダムに変化させることにした。

また、侵食と堆積の度合いが偏らないように、侵食される断面と堆積される断面を交互に設定する。

こうして得られた断面のうち、侵食傾向の断面の一例を図 1 に示す。

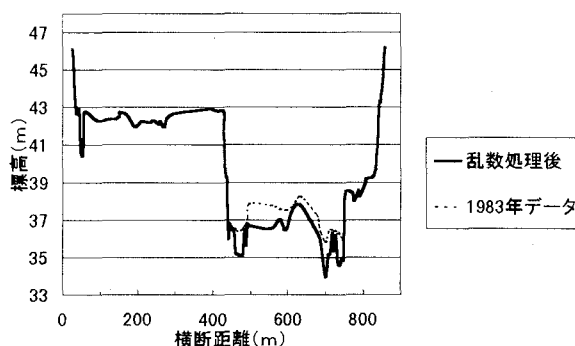


図 1 モンテカルロ法によって生成した
侵食傾向の断面の例

3.3.2 植生

過去の航空写真から植生の分布状況や繁茂の様子を見てみると、さまざまに変化している。対象区間内の様子を見てみると、低水路は砂州および草本類となっており、高水敷は草本類、田、高木などとなっている。よって対象区間内の各断面において、代表粗度係数が最も小さくなるのは、低水路がすべて砂州、高水敷がすべて田となる場合であると考えた。逆に最も粗度係数が大きくなるのは、低水敷内の砂州すべてが草本類に覆われ、高水敷に高木が生い茂る場合とした。具体的には各断面とも粗度係数を 0.030 から 0.050 までの間でアトランダムに変化させた。

3.4 河床形状、植生の変化による水位の変動

3.4.1 河床形状の変化

乱数処理された断面について、不等流計算を行って水位をもとめるシミュレーションを 100 ケース行い、特定断面における水位の分布をもとめた。水位変動の様子の一例を図 2 に示す。

図を見ると、計画高水位に比べ実際の水位の方がかなり低くなっているが、これは現況の河道が侵食されているからであり、実際に計画河床高よりも現況最深河床高の方が 2～4m 程度低くなっている。

この結果、河床形状の変化による水位の変化は小さく、河床形状の変化が水位に与える影響は相当小さいと見られる。

これは、河床が洪水流によって部分的に侵食されて河床が下降したり、土砂が堆積して河床が上昇しても、結局はお互いの変化が相殺されて河積に大きな変化が生じないため、1 次元解析においては一定流量に対する水位はそれほど変化しないものと考えられる。

3.4.2 植生の変化

上述したように粗度係数を変化させて、各ケースを年最大洪水として 100 ケースの不等流計算を行なった。水位変動の様子の一例を図 3 に示す。このように、粗度係数を変化させると水位は大きく変化することが分

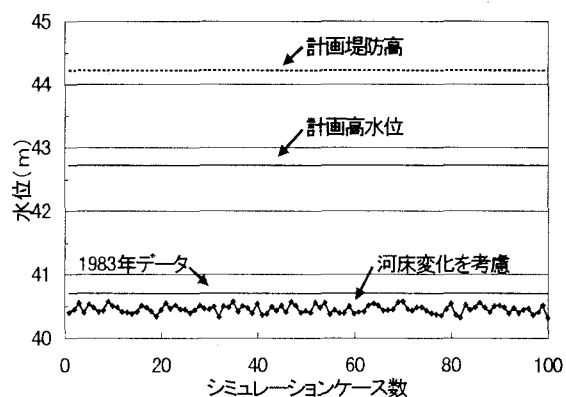


図 2 河床変化による水位の変動 (51.5km 地点)

かった。前に述べた河床形状の変化と比べると、水位に与える影響は河床形状よりも植生の繁茂状況の方がはるかに大きいということが言える。このことから治水対策としては、河道の改修よりも植生の管理の方に重きをおいた方が大きな効果を得られることがわかる。

3.4.3 両方の変化

次に、以上の2つの変化を同時に起こらせた場合について不等流計算を行った。水位変動の様子の一例を図4に示す。この断面においては、計画流量に対する水位が計画高水位を越えるケースも生じており、計画高水位を決定する際に河床形状や植生の変化を考慮しなければならないことがわかる。

3.5 確率水位

水位の変動に対して複数の分布を当てはめた結果、 $K=2.00$ のワイブル分布が最もよく適合した。この分布を基に求めた水位の出現の一例を表2に示す。このように48km地点における計画高水位の確率年は6.5年となる。つまり河床形状、植生の変化を考えた断面に対して計画流量を流すと、現在の計画高水位には6.5年に一度、水位が達する。この河川の安全率は百分の一であるので、これを満たすためには計画高水位が36.59mとなる。(現計画での計画高水位は36.27m。)これは1983年の河床形状、植生状況に対して計画流量を流した時の水位(35.81m)よりも80cm程度高くなっており、この値は河床形状および植生の不確定性が水位に与える変動分である。これに対して、この地点の現在の余裕高は計画高水流量に対して一律に1.5mとなっており、現在の余裕高の決定手法が非合理的であることがわかる。また1983年の河床を基に議論したこの例では、河床形状と植生以外の要素に対する余裕高が1.2m程度となり、現在の堤防高が過大であると言えるであろう。

表2 計画流量に対しての水位の出現 (48km 地点)

再現期間(年)	確率水位		
	河床の変化(m)	植生の変化(m)	両方の変化(m)
2	35.83	36.03	36.05
6.5	35.84	36.26	36.27
50	35.85	36.51	36.52
100	35.86	36.59	36.59
1000	35.87	36.79	36.79

3.6 費用-便益-信頼性分析

各地点の水位に応じて、実際の築堤護岸工事積算例⁴⁾をもとに堤防建設コストを算出した。また、氾濫シミュレーション⁵⁾の結果を用いて、治水経済調査要綱に基づいて想定年平均被害軽減額を算出し、式(1)より信頼度を求めた。表3に算出結果を示す。

$$R(h) = 1 - e^{-\frac{(h-y)^m}{t_0}} \quad (1)$$

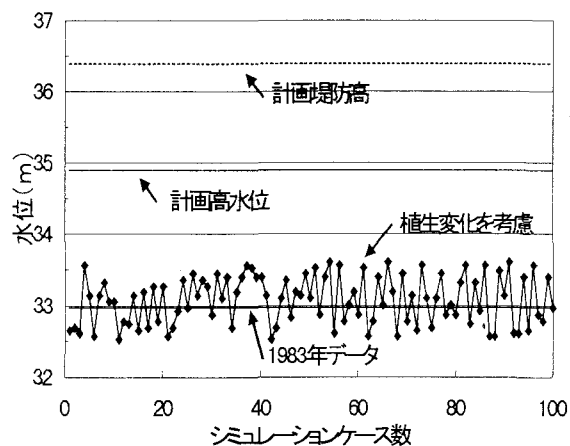


図3 植生変化による水位の変動(45.5 k m地点)

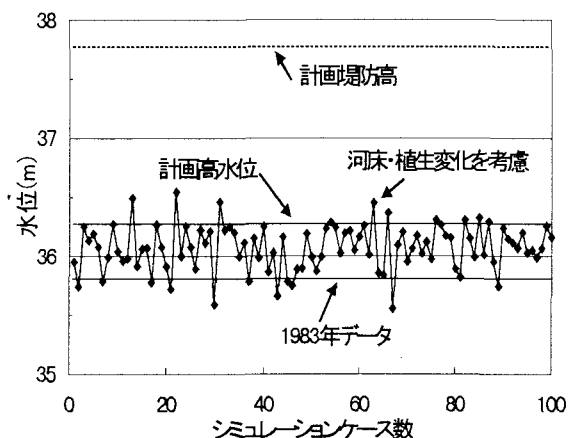


図4 両変化による水位の変動(48 k m地点)

表3 堤防高毎のB, C, R一覧

Rp(年)	水位(年)	B(百万円)	C(百万円)	B/C	R(%)
10	43.45	1,764	82.3	21.437	89.78
50	43.75	1,923	82.8	23.056	98.05
100	43.85	1,943	83.8	23.185	98.98
200	43.95	1,953	84.2	23.192	99.50
300	44.01	1,956	84.4	23.163	99.68
400	44.04	1,958	84.6	23.148	99.74
500	44.07	1,959	84.7	23.125	99.80
1000	44.16	1,961	85.1	23.044	99.90
10000	44.42	1,962	86.2	22.752	99.99

Rp:再現期間, B:年便益, C:年費用, R:信頼度

これをもとに、B,C,R を考慮に入れた最適堤防高を決定することができる。例えば、ファジィ測度を用いた決定手法を挙げると、R と B/C の重み付けを 1:1 とし、それぞれの要素を 100 点満点で評価して各水位毎の総合評価を求めた。その結果再現期間が 300 年の代替案が最適となり、最適堤防高は 44.01m と求まった（この地点での現計画堤防高は 45.15m）。各断面に対してこの手法を適用した結果、この河川では全断面において現況の堤防はかなり過剰に安全側に設計されていることがわかった。他河川にも適用することで、逆に危険側に設計されている例が得られることも推測され、現在の河川計画立案手法の中に不十分な部分があると考えられるであろう。

4. まとめ

自然の不確定性を考慮し、費用、便益、信頼性を考慮した計画案を提案した。そして、実際の河川に適用した結果、河床低下が生じている河川においては、植生と河床変動の効果を考えても現在の堤防高が過大になっているという結論を得た。つまり現在の高水計画論は外力の不確定性を考慮しているが、治水施設の不確定性を考慮した信頼性解析がなく、余裕高についての分析が不十分である。今回提案した計画案では、費用、便益に確率を加えたより合理的な信頼性解析を行うことができ、これにより便益の公平化も図ることができる。

参考文献

- 1) 合田良実：極値統計におけるプロットイング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討，港湾技術研究所報告，Vol. 27，pp. 62-68，1988.
- 2) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準(案)同解説調査編，計画編，1997.
- 3) 建設省河川局河川計画課：治水経済調査要綱，pp. 1-34，1985.
- 4) 建設工事積算研究会：土木工事積算基準マニュアル(平成3年度版)，pp. 404-426，1991.
- 5) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）—シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—，土木研究所資料第3400号，137p，1996.