

治水計画における計画降雨の決定に関する一考察 Model Analysis for Design Rainfall in Flood Prevention Planning

憐 日水コン 正員 萩 原 良 巳
憐 日水コン 正員 中 川 芳 一
憐 日水コン 正員 蔵 重 俊 夫

1. はじめに

現行の治水計画においては、計画高水流量までを河道全区間にわたり防御することが計画目標とされる。さらに、計画高水流量の決定については、通常、ある一定期間に対する総降雨量の確率評価から計画降雨を定めた後、流出解析により基本高水を求め、ダムによるカット分を差し引いた残りとして定められている。¹⁾ このとき計画降雨は既往の実績資料にもとづき、複数設定され、流出解析によるピーク流量に対するカバー率の評価から最終的に一つの基本高水、さらには計画高水流量が得られる。ところが、ここで計画降雨の設定に関し二つの問題点を指摘することができよう。すなわち、一つは降雨の再現性の問題であり、今一つはその問題に付随したカバー率の妥当性である。一方、最近の長崎や山陰水害のように、小流域でシャープな形状の洪水がそのまま流下し、しかもその現象が瞬時にして起こるため、水防や避難活動の実施が困難な中小河川については、より安全性を強調した計画が必要となっていると思われる。

本稿は、こうした問題意識のもと、治水上非常に不利な状況にある中小河川の改修計画を対象とした計画降雨の設定問題について一つの方法論を提案するものである。すなわち、ここでは問題を不確実性下における意志決定問題として捉えることを基本的認識とする。その上で、社会・経済的な流域条件を考慮して既に決定された治水安全度²⁾、比較的信頼性における降雨に関する情報として、安全度相当の総降雨量及びピーク降雨量を与件としてDynamic Programmingを用いた最適化モデルにより計画降雨を決定するものである。評価基準については本来、個々の流域の実状に応じて設定すべきであろうが、現在の中小河川の治水水準を考慮して基本的な2つの治水方式を考え、それぞれについて設定した。一つは、自然調節方式のダムを一基備えた築堤河道方式の流域に対するダムの必要調節容量の最大化であり、もう一つは、ダムの無い築堤河道方式の流域に対するピーク流出量の最大化である。

2. 計画降雨設定モデル

2-1 モデルの概要

中小河川の改修については、一般には掘込河道を中心としつつも、安全度を大きく採るにつれ、築堤河道とせざるを得ないのが現状であろう。一方、より安全度を高める場合や、ダム適地がある場合については、当然治水ダムを計画することになる。いずれにしても破堤氾濫が最大の懸案となり、河道におけるピーク流量が治水上最も重要な計画変数と考えられよう。こうしたことから、治水上非常に不利な状況下にある中小河川について降雨の再現性を前提とせず、計画降雨を設定するとき、所与の安全度に対する河道のピーク流量が最大となる降雨として定めることが一つの方法として合理的であると思われる。本稿では、治水計画として築堤河道方式と、治水ダム+築堤河道方式の2つの基本的治水方式を設定し、各々についての計画降雨設定モデルを検討する。また、治水ダムについては、中小河川の性格上、確実にピークカットが期待できる自然調節方式を想定する。各々の治水方式に関する具体的評価基準は以下の通りである。

- ① 築堤河道方式：任意の一評価地点での流出量の最大化
- ② 治水ダム+築堤河道方式：自然調節方式のダムについては、ダム地点において流出量は確実にピークカットされる。このとき、下流の河道への放流量のピークは貯水量のピークと時間的・量的に対応しており、必ずしも流出量のピークとは対応しない。従って評価基準として必要調節容量の最大化を採るこ

とが合理的であろう。

次に、以上の評価基準に対し、比較的信頼性における降雨に関する情報として、治水安全度相当の総降雨量及びピーク降雨量に関する制約条件を設定する。さらに、流域の雨水貯留量、累積降雨量、ダムを想定する場合にはそれらに加えてダム貯水量を状態変数とし、各時刻の降雨量を決定変数とした Dynamic Programming³⁴⁾における関数方程式を定式化し、それを解くことから計画降雨を決定するものである。

2-2 モデルの定式化と解法

2-1 で述べたような考え方により、最適計画降雨量を決定するための Dynamic Programming³⁴⁾の関数方程式を設定することができる。

① 築堤河道方式の場合

図-1 に示すように、流出量は、概ね時間的にも量的にも流域の雨水貯留量に対応することは水文学の教えるところである。従って流出量最大化基準を流域の雨水貯留量最大化基準で置き換えて考え、次の関数方程式を設定することができる。

$$F_i(Se_i, R_i) = \max_{r_i} \{G_i(r_i) + F_{i+1}(Se_{i+1}, R_{i+1})\} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq \sum_{i=1}^i r_i \leq R_{i, \max} \quad (2)$$

$$0 \leq r_i \leq r_{\max} \quad (3)$$

ここに、 F_i : i 期以降必要とされる流域貯留量の最大値、 Se_i : i 期での流域貯留量、 R_i : i 期までの累積雨量、 G_i : i 期～ $i+1$ 期の流域貯留量の増分である。また、(2)式は総降雨量が $R_{i, \max}$ 以下である制約を示し、(3)式はピーク降雨量が $r_{\max}$ 以下である制約式であり、 $R_{i, \max}$ はともに、計画主体の定める治水安全度の指標として予め与えられるものとする。なお、一意的に定め難い場合には chance constrained method⁵⁾などの適用も考えられている。⁶⁾

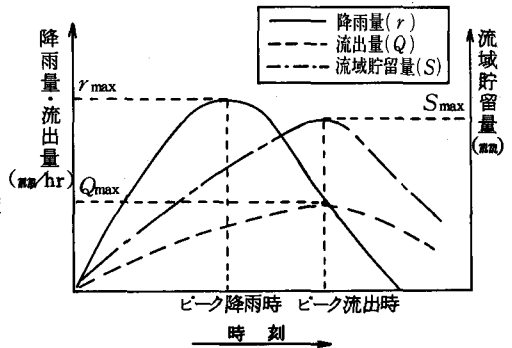


図-1 流出現象の模式図

② 自然調節方式の治水ダム+築堤河道方式の場合

自然調節方式のダム有流域では、必要調節容量の最大化基準であり、関数方程式は次の通りである。

$$F_i(S_i, Se_i, R_i) = \max_{r_i} \{G_i(r_i) + F_{i+1}(S_{i+1}, Se_{i+1}, R_{i+1})\} \quad (4)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq \sum_{i=1}^i r_i \leq R_{i, \max} \quad (5)$$

$$0 \leq r_i \leq r_{\max} \quad (6)$$

ここに、 F_i : i 期以降必要とされる最大調節容量、 S_i : i 期でのダム貯留量、 G_i : i 期～ $i+1$ 期の調節量の増分である。

以上2 ケース示した関数方程式を解くためには、別途流域貯留量、さらには自然調節方式のダム有流域に対してはダム貯留量に関する状態方程式が必要である。まず、流域貯留量に関しては、取扱いの容易さ、及び精度の良好さから現在最も実用化されている貯留関数法を採用すると、⁷⁾

$$(\text{運動の式}) \quad (Se_i + Se_{i+1})/2.0 = K \cdot q_i^p \quad (7)$$

$$(\text{連続の式}) \quad Se_{i+1} - Se_i = f \cdot r_i - q_i \quad (8)$$

である。ここに、 q_i : 流出高、 f : 流出率、 K, p : 定数であり、(7)式が運動の式、(8)式が連続式である。この(7)、(8)式により、 Se_i 及び r_i から q_i 及び Se_{i+1} を求めるためにはニュートンラプソン法の適用が一般的

である。

さらに、ダム貯留量については、

$$〔連続の式〕 \quad (Q_i + Q_{i+1})/2 - (O_i + O_{i+1})/2 = S_{i+1} - S_i \quad (9)$$

$$〔貯水位・放流量式〕 \quad Q_i = g(H_i) \quad (10)$$

$$〔貯水位容量曲線〕 \quad H_i = \phi(S_i) \quad (11)$$

である。ここに、 Q_i ：ダム流入量（自然流出量）、 O_i ：ダム放流量、 H_i ：ダム貯水位である。また、貯水位放流量式の関数形 g は、穴あきダム方式かあるいはゲート一定開度方式かにより一意的に定まる¹⁾。また、この洪水調節計算についても、貯留関数の場合と同様に非線形連立方程式となっているため、ニュートンラプソン法等の適用が必要である。

以上述べてきたモデルにより最適降雨量曲線 $r_i = (S_i, Se_i, R_i)$ を求めるフローチャートを図-2に示す。

同図では、自然調節方式のダム有流域を主眼に置いて示されているが、築堤のみの場合についてはダム貯留量 S_i と図の*の付いたボックスを省略することにより同様に計算が行なえる。

最後に最適降雨量曲線から計画降雨を設定するためには、まず状態変数として設定された流域貯留量、ダム貯留量、累積降雨量の初期値を与える。さらに、再び流出計算及び自然調節ダム流域の場合は洪水調節計算を行ない、各時刻毎に最適降雨量曲線から最適降雨量を定めれば良い。このとき問題となるのが初期値の与え方であるが、本稿で提示したモデルでは降雨の継続時間も総降雨量の定義域を長く採ることにより、先行降雨も同時に決定することができる。そのためダム貯留量は調節開始時点で零としてもさしつかえないと思われる。また、流域貯留量に関しては、前述のことから零と置くことも1つの立場であるが、流域の保水特性によっては無視し得ない場合も想定されよう。このため、初期貯留量の同定手法として準線形化⁸⁾などの適用による分析も重要と考えている。

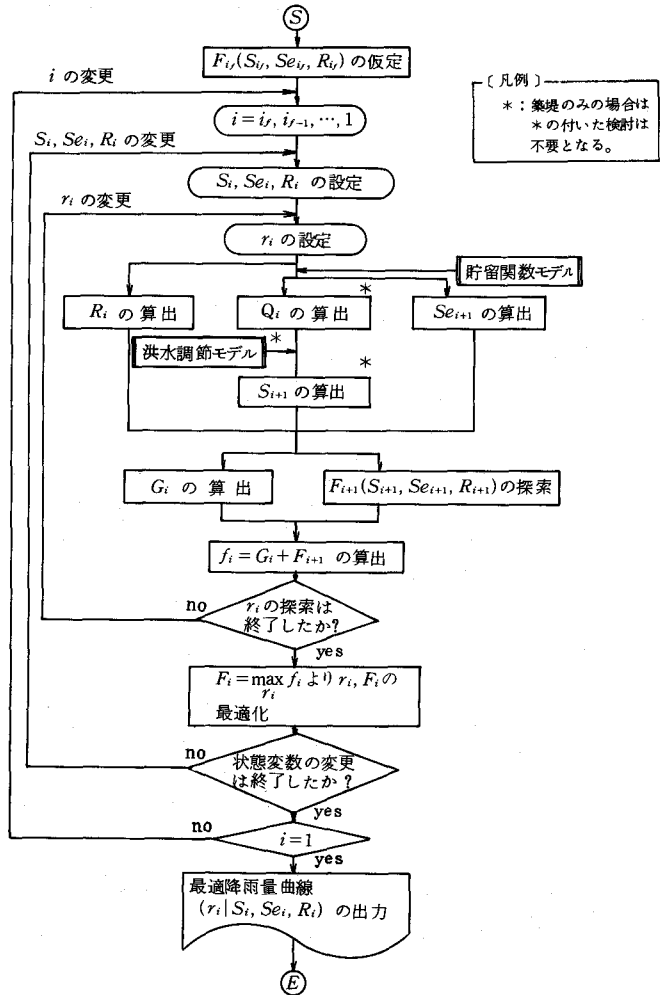


図-2 最適降雨量曲線のDPによる決定方法

3. モデルの適用結果とその考察

これまでに示してきた計画降雨決定モデルについて自然調節方式のダム有流域に絞ってモデル分析を行ない、モデルの特性ならびに今後の課題について述べていく。対象とする流域は流域面積40km²のA川で、上流のBダム流域は、流域面積10km²の小流域である。

Bダムは、穴あき方式の自然調節方式を採用した容量約1,800千m³の治水ダムとなっている。さらに、Bダム下流は都市化が進んでおり、近年の大洪水を契機に全川1/100のBダム嵩上げを含めた洪水防御計画が計画 中である。

3-1 適用データ

モデル運用上必要とされるデータについては、①降雨量の制約条件に関するもの、②貯留関数モデルの運用上必要なもの、③洪水調節計算上必要なものの3つのカテゴリーに分類される。表-1にこれらを一覧にして示す。このうち、貯留関数モデルにおける流出率は不飽和状態においてばらつきが大きく、0.5～0.8の範囲であった。これについては、感度分析的に解の変化を調べることにする。

3-2 計算条件

状態変数及び決定変数等の離散化については表-2に示す通りである。

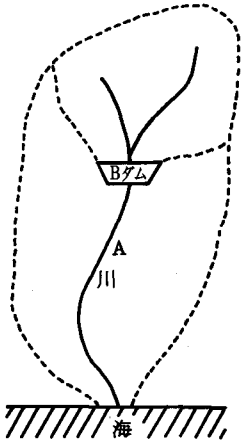


図-3 対象流域

表-1 適用データ一覧

項 目	適 用 デ ー タ	設 定 根 拠
降 雨 量 の 制 約 条 件	$R_{if, \max} = 456 \text{ mm/日}$ $r_{if, \max} = 114 \text{ mm/hr}$	ダム地点確率降雨強度曲線による。
貯 留 関 数 モ デ ル	$K = 25.0$ $p = 0.5$ $f = \begin{cases} 0.5 \sim 0.8 & \text{for } R_i \leq 100 \text{ mm} \\ 1.0 & \text{for } R_i > 100 \text{ mm} \end{cases}$	ダム地点洪水流出解析による。
洪水調節計算モデル (i) 貯水位・放流量式	流量係数 = $\begin{cases} 1.9 & \text{for 越流} \\ 2.7 & \text{for オリフィス流} \\ 4.0 & \text{for 管路流} \end{cases}$	多目的ダムの建設による。 ¹⁾
	コンジット幅 = 2 m コンジット高 = 3 m	ダム計画書による
(ii) 貯水位・容量曲線	$S_i = 37.0 \cdot H_i$ (S_i : 1,000 m ³ , H_i : ダム底からの水位 m)	ダム計画書による

表-2 計算条件

項 目	変 数	設定範囲	離散化単位	単 位	初 期 値
状態変数	ダム貯水量	0.3*～6.0	0.3	10 ⁶ m ³	0.3
	流域貯留量	0～300.0	15.0	mm	0.0
	累積降雨量	0～456.0	24.0	mm	0.0
決定変数	降 雨 量	0～114.0	6.0	mm/hr	—
段	時 刻	0～24.0	1.0	hr	—

* : ダムの堆砂容量である。

3-3 適用結果

表-1において示したように、流出係数 f が0.5～0.8の範囲で定まらないため、その両端の値に対し、2ケースの計画降雨を求めたものが図-4(1)、(2)である。

これをみると、流出率が高いケースについてはほぼ中央集中型となり、時間降雨はピーク降雨量に関する制約条件ぎりぎりまでの状態を総降雨に関する制約を満たす範囲で持続させようとしている。これに対し、流出率が低いケースでは、典型的な後方集中型となっており、土壌を飽和させる目的から前半に緩慢な増加率で降雨を配置し、一端飽和してしまうと集中的に降雨を与えることが最適な結果となっている。これを流量でみると、流出率が高くなるほどシャープなダム流入量を想定する方が安全側であることが示されている。また、Bダム直下の計画高水流量は流出率 f が0.8の場合で $73.2\text{ m}^3/\text{s}$ 、0.5の場合で $69.0\text{ m}^3/\text{s}$ として得られた。さらに、必要調節容量については $f=0.8$ の場合で $2,400\times 10^3\text{ m}^3$ 、 $f=0.5$ で $2,150\times 10^3\text{ m}^3$ であり、現在より、 $350\sim 600\times 10^3\text{ m}^3$ 程度の嵩上げが必要であると結論された。

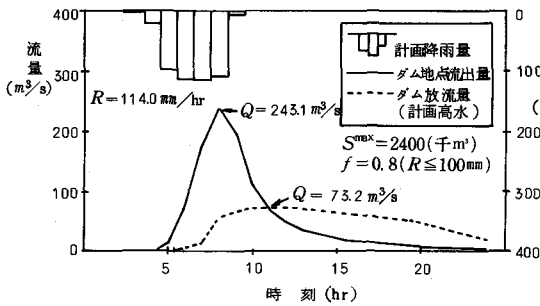


図-4(1) 計画降雨及び計画高水の決定結果 ($f=0.8$)

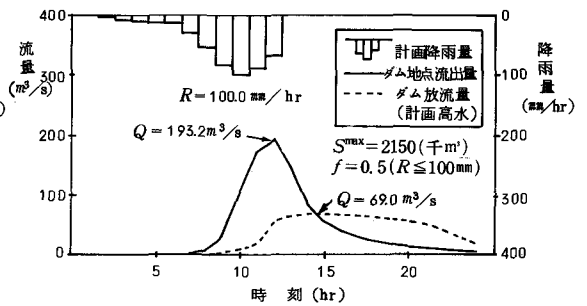


図-4(2) 計画降雨及び計画高水の決定結果 ($f=0.5$)

以上のように、今回のモデルはこれまで統計的分析は行なわれてはいるものの最終的には経験的に定められてきた計画降雨に対し、目的合理的な立場から1つの方法論を提示し得たと考える。さらに、本節で示したように自然調節方式のダムについてはその容量決定にも応用が可能であることはモデルの利点の1つに挙げることができよう。なお、この場合、今回はダムについては嵩上げという特殊なケースを扱ったため検討の対象とはなっていないが、実際には放流施設の計画といった問題が残されている。また、モデルの適用結果は流出特性に無視し得ない影響を受けることも事実である。この問題に関しては、2.でも若干述べたが、筆者らも実用化について検討を行ってきた準線形化などの導入により流出率等の検討を加え、その精度を増すことが重要であろう。そして、そのような流出機構の解明が行なわれるまでの計画主体の措置としては、あくまでも流出率等は計画変数としての認識から治水安全度に斉合した値を設定していくことが1つの立場であろう。さらに、同モデルでは降雨の再現性に関する制約を信頼性の面から最低限に設定しているため、求まった計画降雨が現実離れる可能性も残っている。この場合には次善の解を検討していくことになろう。

4. おわりに

本稿は、特に急勾配の小流域で急激な出水のため氾濫による被害が甚大で、水防や避難活動の実施が困難な中小河川に着目し、治水計画における計画降雨の一設定方法を提案したものである。まず、こうした中小河川の基本的治水方式として築堤河道方式と、それに加えて治水ダムを一基考えた2通りの治水方式を想定し、それぞれ、流出量及び必要調節容量の最大化を計画降雨決定の評価基準として設定した。これに対し、比較的信頼できる情報として総降雨量とピーク降雨量に着目し、これらが治水安全度相当となるように制約条件を設定した。以上の評価基準、制約条件下において計画降雨設定モデルをDynamic Programming における関数方程式として定式化した。

さらに、自然調節方式のBダムの嵩上げ問題を把えるA川を対象としてモデルを適用したところ、流出率を小さく見込んだときは後半集中型、大きく見込んだときは前方集中型として計画降雨が設定され、その結果は現象的に解釈可能であり、モデルの有効性が示された。一方、流出モデルの精度は少なからず解に影響を与えるが、当面はモデルパラメータを治水安全度との対応を考慮して設定していくことが妥当であろうと考えられる。今後は、提案したモデルをより実用化していくため、利用可能な降雨情報や流出特性などの流域フレームが量的質的に変化した場合の感度分析的検討も必要であろうし、サブシステムである流出モデルの準線形化等による研究を併せて行なっていく予定である。最後に、本研究の遂行にあたり、工業技術院公害資源研究所・鷲見栄一氏、佛日水コン・森野彰夫氏、渡辺晴彦氏には熱心な討議・助言を多々頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設
- 2) 中川芳一・飯塚敏夫・梅本良平：治水規模の決定に関するゲーム論的研究，土木学会第23回水理講演会論文集，pp. 241～246，1979.
- 3) R. Bellman and S. E. Dreyfus：Applied Dynamic Programming, Princeton Univ. Press, 1962.
- 4) 鍋島一郎：動的計画法，数学ライブラリー7，森北出版.
- 5) 例えば，中川芳一・渡辺晴彦：豪雨の地域・時間分布特性分析，NSC研究年報，Vol. 7, №1, pp. 1～12, 1979.
- 6) 高樺琢馬・池淵周一：洪水の時・空間生起確率算定法とその治水計画への適用，京大防災研究所年報第22号B-2, pp. 179～194, 1979.
- 7) 例えば 佐藤勝夫：洪水流出計算法，山海堂.
- 8) 例えば 萩原良巳・中川芳一・蔵重俊夫：準線形化の河川計画への適用に関する研究，NSC研究年報Vol. 12, №1, 特定研究(7), 1984.
- 9) 中川芳一・森野彰夫・蔵重俊夫：流域の土地利用を考慮した洪水流出解析(1), (2), 土木学会第25～26回水理講演会論文集，1981～1982.