

氾濫確率を計画安全度指標とした治水システムの策定法 Optimal Flood Control System based on Flood Inundation probability

京都大学工学部 正員 堀 智晴
京都大学防災研究所 正員 池淵 周一
岐阜大学工学部 正員 小尻 利治

1. 序論

洪水現象が豪雨という自然現象を受けて生起するものである以上、治水システムの策定にあたっては対象とする洪水の規模を設定し、計画決定されたシステムが外力である洪水に対してどの程度の安全性を有するかを明確にする必要がある。このため、現行の治水計画では計画規模の年超過確率に対応する豪雨の総量から計画降雨を決定し、計画基準地点において計画降雨に対応するハイドログラフ（いわゆる基本高水）を設定することにより施設計画の基本とする方法が用いられている。しかし、近年、流域の開発が進行するにつれて次のような問題点が指摘されている。

- (1) 流域内の土地利用の改変に伴い防災の対象となる地点が増加しつつあるが、多評価地点系からなるシステムを設計する際には計画降雨の総量だけでなくその時間分布・空間分布が重要な要素となる。
- (2) 実績降雨の引き延ばしによる時・空間分布の決定法では、得られたハイドログラフが現実の豪雨の物理的・統計的性質を保存しているかどうか疑問が残る。
- (3) 将来の不確実さ、財政上の問題等に対処するアプローチとして段階施工計画を策定する際には、流域の治水水準の時間軸上の変化を明確に把握する必要がある。

本研究では、以上の点を考慮し、時・空間確率構造を保存した形でシミュレートした多数の豪雨群を入力として算定した各評価地点における洪水生起確率（氾濫確率）を指標としてシステムの安全度評価を行う。さらに、治水システムの広域化に伴う代替案の増加に対応してその計画決定プロセスをスクリーニング、シミュレーション、シークエンシャルの3段階に分割して行う方法を考察する。

2. 治水システムに関するリスク分析と策定方針

2.1 治水システムのリスクとその評価

洪水災害とは、流域に大雨が生起し、これが流域場の種々の特性に応じて河川の流量に変換され、河川流量と治水施設群との相互作用を通じて氾濫、被害を発生するという広範な過程を含む概念である。そこで、広域的な治水システムを念頭において洪水災害の過程をリスクマネジメントの諸概念を用いて整理する。

治水システムにおいて洪水発生のも最も根本となる「危険発生事象」は豪雨という自然現象である。この豪雨に対して開発に伴う流域の変貌や人口・資産の集中等の「危険事情」が加わり、ハードな治水システムや避難・警報システムの整備を含めた代替案といった「行動」が作用した結果、洪水氾濫という「危険事象」が生起する。もちろん、「危険事情」には「被害客体」である流域住民の水防意識やその逆の無関心さといった精神的な対応姿勢も含まれよう。また、「危険事象」

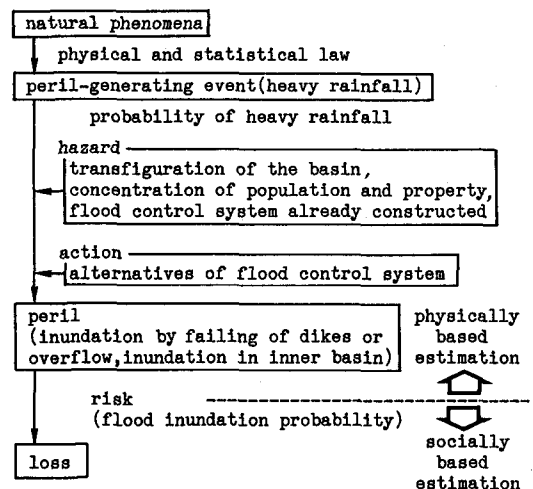


Fig.1 Systematic sketch of risk analysis for flood control system

と「被害客体」が有機的に関連して「損害」が生じるが「損害」の内容や程度には床上、床下浸水や構造物の破壊といった物理的被害に加え心理的な被害も含まれよう。Fig.1は上述のうちハード面の対応や被害に焦点を当て、リスク分析の内容を示したものである。

以上の議論を数学的に定式化すると次のようになる。すなわち、「危険発生事象」を ξ 、 ξ を支配する要因を $\Psi=(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N)$ とすれば、「危険発生事象」の生起確率は次式で与えられる。

$$\Pr[\xi] = e(\Psi) \quad (1)$$

ψ_i は豪雨の発生を支配する物理法則あるいは統計的性質に対応する。また、「危険事象」を Π_γ ($\gamma=1, \dots, \Gamma$)「危険事情」を $\Phi=(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_L)$ とすれば、ある「行動」 α_ρ ($\rho=1, \dots, \varrho$)を選んだときに生じる「損害」 $\lambda_{\rho\gamma}$ は $\xi, \Phi, \alpha_\rho, \Pi_\gamma$ に依存し、

$$\lambda_{\rho\gamma} = f(\Pi_\gamma, \alpha_\rho, \Phi, \xi) \quad (2)$$

と表される。さらに、 $\lambda_{\rho\gamma}$ が生起する確率（「リスク」）を $\theta_{\rho\gamma}$ とすると、 $\theta_{\rho\gamma}$ も $\xi, \Phi, \alpha_\rho, \Pi_\gamma$ に依存するから次式が成立する。

$$\theta_{\rho\gamma} = \Pr[\lambda_{\rho\gamma} > 0] = g(\Pi_\gamma, \alpha_\rho, \Phi, \xi) \quad (3)$$

ただし、 $e(\cdot), f(\cdot), g(\cdot)$ はそれぞれ括弧内の変数の関数であることを表す。計画降雨をベースとして計画規模を表す方法は式(1)を基本とするものであり、氾濫確率を基本とする方法は式(3)に基づくものである。

2.2 治水システムの策定方針とその定式化

いま、「行動」 α_ρ として治水施設の配置・規模計画を考え、決定変数として施設 n の規模 x_n を要素とするベクトル $X=(x_1, \dots, x_N)$ を定義する。簡単のため「危険事象」の種類を越流氾濫に限定すれば(3)式の $\theta_{\rho\gamma}$ は評価地点 m の氾濫確率 P_m で置き換えることができ、

$$P_m = \Pr[\{Q_m(t) > Q_m^a\} \cup \{Q_m(t+1) > Q_m^a\} \cup \dots \cup \{Q_m(t+1) > Q_m^a\}] = g_m(X, \Phi, \xi) \quad (4)$$

となる。ここに、 $Q_m(t)$:評価地点 m 、時刻 t での洪水流量、 Q_m^a :地点 m の許容流量である。(4)式の P_m を用いればリスク管理を中心とした治水システムの策定方針は「すべての評価地点の氾濫確率 P_m が許容氾濫確率を上まわらないという条件のもとでシステムの建設にかかる費用を最小にすること」、すなわち、

$$\begin{aligned} C &= \sum_{n=1}^N h_n(x_n) \longrightarrow \min. \\ \text{subj. to} \quad P_m &= g_m(X, \Phi, \xi) \leq P_a^m \end{aligned} \quad (5)$$

と定式化される。ただし、 $h_n(x_n)$ は施設 n を規模 x_n まで建設するのに必要な費用を表す。

2.3 治水システムの段階的計画決定プロセス

広域的な治水システムを対象とする場合、式(5)で示される施設計画の代替案は膨大な数となる。そこで、最適解へのアプローチの方法として次の2段階計画決定プロセスを導入する。すなわち、スクリーニング段階においてシステムを可能な限り単純化し、最適化手法を駆使することによって幾つかの上位解を抽出する。次に、上位解及びその近傍を詳細な洪水追跡、貯水池操作を含むシミュレーション段階にかけ、代替案のアウトプットに改善が得られない時これを最適解とするのである。一方、公共事業に対する財政的な圧迫の強い今日では、施設計画で決定された治水システムを短期間で実現することは

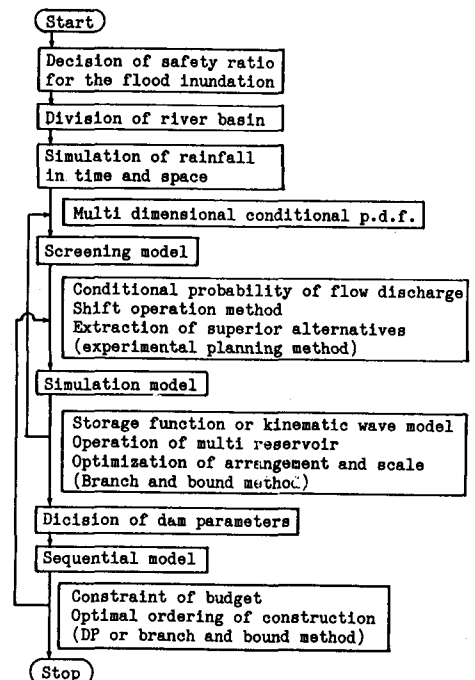


Fig.2 Flow chart of flood control planning

不可能に近く、ある期間毎に与えられた予算枠の中で段階的に流域の治水水準を向上させる必要がある。そこで、本研究ではこの段階的建設手順計画をシークエンシャル段階と位置付け、効率的な建設手順へのアプローチを図る。Fig.3 は、以上の考え方に基づく治水システムの段階的な計画決定手順を示している。

3. 治水システムの配置・規模計画

3.1 スクリーニング段階の解決定

スクリーニング段階では、氾濫確率の簡便な算定手法としてマトリクス演算を用いた方法を採用して計算時間の短縮を図ると共に、実験計画法の適用により各治水施設が氾濫確率に及ぼす影響を把握することを通じて上位解を抽出する。いま、治水施設 $n(n=1, \dots, N)$ を直交配列表に割付けて計算を行い、氾濫確率 P_m^E を得たとしよう。ここに、 ε :直交配列表における組み合わせ番号である。 P_m は地点 m に位置する堤防及び上流の施設(これらの集合を Z_n とする)の規模 x_n に依存し、

$$P_m = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad 1, 2, \dots, N \in Z_n \quad (6)$$

が成り立つ。 P_m に対し Z_n に属する施設を取り上げ分散分析を行えば、 P_m にある危険率 α をもって有意な影響を与える施設がピックアップされるからこれらの集合を Z_n' とすれば、(6)式は

$$P_m = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad 1, 2, \dots, N \in Z_n' \quad (7)$$

と書き換えられる。次に、各因子(施設)の水準(規模)毎にその変化が氾濫確率にどの程度の影響を与えるかを推定する。施設 n の規模が x_n から x_n' に変化したとき、 P_m の受ける影響の推定値 $\Delta P_{n,m}^{x_n, x_n'}$ は、

$$\Delta P_{n,m}^{x_n, x_n'} = \frac{\Omega}{E} \left(\sum_{\varepsilon \in \Omega_1} P_m^E - \sum_{\varepsilon \in \Omega_2} P_m^E \right) \quad (8)$$

で与えられる。ここに、 Ω :総水準数、 E :総実験回数、 Ω_1 、 Ω_2 :施設 n の規模が x_n, x_n' である組合せ番号の集合である。また、誤差の自由度を s^2 とし、危険率 α 、自由度 d に対応する t 分布の値を $t(\alpha, d)$ とすれば、推定値の信頼区間は次式で与えられる。

$$\Delta = \pm t(\alpha, d) \cdot \sqrt{2(\Omega/E)^2 s^2} \quad (9)$$

以上の解析で得た $\Delta P_{n,m}^{x_n, x_n'}$ を用いて上位解の決定を行う。まず、既に氾濫確率を追跡した直交配列表内の施設の組合せの中から制約条件を満足し、かつ、建設費用を最小にするものを上位数個選ぶ。次に、選択した施設の配置・規模を初期値として(8)式の情報を基にして効果の小さい施設を順次削減することによりさらに有利な解がないかを探索し上位解とする(ただし、ここでは既に得られた施設の配置を変化させない範囲で探索を行うものとする)。

3.2 シミュレーション段階の解決定

シミュレーション段階では、3.1で得られた上位解をもとに実際に施設の操作を介して流況シミュレーションを行い最適配置・規模計画を決定する。上位解の中に最適解が含まれているかどうかの保証はないが、最適解の近傍に位置する解は含まれていると考えられる。そこで、上位解を始点とし、その近傍を分枝限定法を用いて探索することにより最適解を決定する。

4. 治水システムの段階的建設手順計画(シークエンシャル段階)

4.1 段階的建設手順計画の策定方針

治水システムの建設費用は既に配置・規模計画で決定されているから、本段階では流域の治水水準を時間軸上で全建設期間との調和を考慮しつつ早期に上昇させることが目的となる。そこで、目的関数として

$$J = \sum_{i=1}^I P^i \cdot \Delta t_i \longrightarrow \min. \quad (10)$$

を採用する。ここに、 i :建設ステージ($i=1, \dots, I$)、 P^i :ステージ i における流域の氾濫確率($=\max_n [P_m^i]$)、 Δt_i :ステージ i の期間長である。また、制約条件として次の2式が課せられる。

$$\sum_{n=1}^N C_n(y_n^i) \leq C^i \quad (i=1, \dots, I) \quad (11)$$

$$P_m^i \geq P_m^{i+1} \quad (P_m^i, P_m^{i+1} \leq P_m^n \text{ のとき}) \quad , (m = 1, \dots, M) \quad (12)$$

ただし、 c^i :ステージ*i*における投資予算、 $C_n(y_n)$:施設*n*を規模 y_n だけ施工する時の費用である。(11)式は各ステージにおける予算の制約を、(12)式は各ステージにおいて許容氾濫確率に達していない地点では施設の建設による一時的な氾濫確率の悪化を認めないことを表している。

4.2 堤防建設における先行・後続関係の概略的把握

一般に上流側地点の疎通能力が増加すると下流側の流量は増加するが、それが直接下流側地点の氾濫確率の悪化に結び付くかどうかは上下流の整備水準によって異なる。そこで、(12)式によって上流側地点の整備を行うために必要な下流側の整備水準を把握し、解探索の基本情報とする。いま、堤防*m*を k_m 段階に分けて施工するとし、ステージ*i*に評価地点*m*の堤防が第 k_m 段階まで完成しているときの地点*m*の氾濫確率 $P_m(k_m)$ は地点*m*より上流に位置する堤防の規模に依存する。すなわち、

$$P_m(k_m) = f(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}) \quad (13)$$

となる。明らかに、 $P_m(k_m)$ は $k_1, k_2, \dots, k_{m-1}$ に関して非減少関数である。ところで、 $P_m(k_m)$ は $k_1, k_2, \dots, k_{m-1}$ と k_m の相互関係で決まるからこれらの組合せの数の膨大さを考えれば各堤防の施工規模と氾濫確率の変化の関係を正確に把握するのは容易でない。そこで、任意の地点での疎通能力の拡大が下流地点の氾濫確率に及ぼす影響が直下流の地点で卓越するとし、

$$P_m(k_m) = f'(k_{m-1}) \quad (14)$$

として、実験計画法の適用により、 $P_m(k_m)$ と k_{m-1} の関係をさぐる。

まず、直交配列表への割り付けにしたがって氾濫確率の追跡を行い、地点*m-1*の疎通能力が水準 k_{m-1} から k_{m-1}' ($k_m < k_{m-1}'$)に変化したとき P_m に生じる変化の推定値 $\Delta P_{m-1, m}^{k_{m-1}-1, k_{m-1}'-1}$ を得る。また、地点*m*の疎通能力の水準が k_m から k_m' まで整備されたときの*m*自身の氾濫確率の変化を $\Delta P_{m, m}^{k_m, k_m'}$ であらわす。もちろん、

$$\Delta P_{m-1, m}^{k_{m-1}-1, k_{m-1}'-1} \leq 0 \quad \Delta P_{m, m}^{k_m, k_m'} \geq 0 \quad (15)$$

が成り立つ。各施工レベル間での氾濫確率の変化を直線的と仮定するとFig.3に示す疎通能力一氾濫確率変化曲線が得られる。Fig.3を用いると次の手順により地点*m-1*の実行可能な改修幅を判断することができる。

(1) (a)において評価地点*m*の疎通能力を $\overline{OA}$ で表すと、地点*m*の氾濫確率は建設開始前に比べて $\overline{OB}$ だけ改善されている。

(2) (b)において $\overline{OB}$ に対応する点*C*をとると、*C*に対する横距 $\overline{OD}$ が、点*m*の疎通能力が $\overline{OA}$ のもとでの地点*m-1*の実行可能な改修幅を表す。

4.3 DPを用いた解決定

4.1で定式化した建設手順問題にDPを適用する。

まず、 $Y_i = (y_1^i, \dots, y_n^i)$ をステージ*i*で施工する施設の組合せを表すベクトルとする。 y_n^i は施設*n*を予め設定した分割規模のうち何段階を建設するかを表している。ただし、 $y_1^i, \dots, y_n^i$ は式(11)の予算制約を満足しなければならない。さらに、ステージ*i*の期首における治水システムの状態ベクトルを S_i

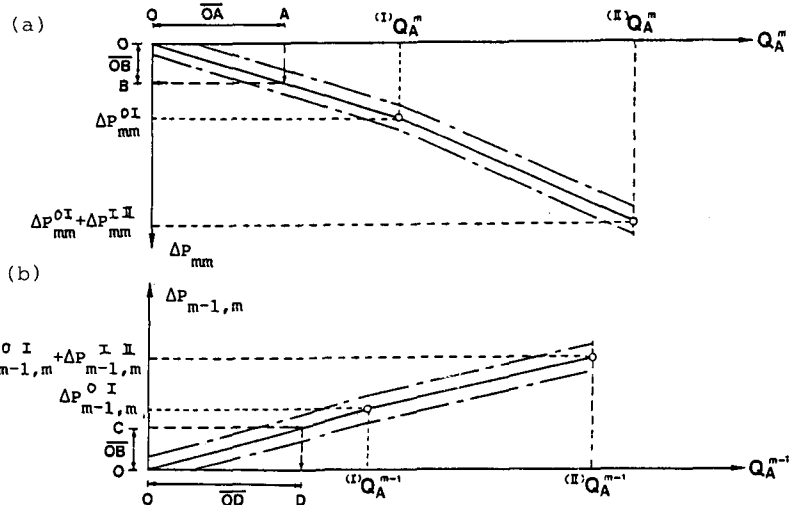


Fig.3 Analysis on status-quo conditions

= (sⁱ₁, ..., sⁱ_n)で表す. sⁱ_nはステージiの期首において施設nの既に完成している段階数を表す. したがって, ステージiからi+1への遷移構造式は

$$S_{i+1} = S_i + Y_i \tag{16}$$

となる. ところで, Pⁱ_jはステージiの期首に建設されている施設の規模の組合せによって決まりその経路には依存しないから, (10)式は,

$$J = \min \left[\sum_{i=1}^{I-1} P^i(S_i) \cdot \Delta t_i + P^I(S_I) \cdot \Delta t_I \right] \tag{17}$$

と表される. ここで, ステージi期末までの目的関数値の最適値f_i(S_i)を

$$f_i(S_i) = \min \left[\sum_{\zeta=1}^i P^\zeta(S_\zeta) \cdot \Delta t_\zeta \right] \tag{18}$$

とすれば, 次の関数漸化式が得られる.

$$f_i(S_i) = \min_{\{Y_{i-1}\}} \left[f_i(S_{i-1}) + P^i(S_{i-1} + Y_{i-1}) \cdot \Delta t_i \right] \tag{19}$$

(19)式は最適性の原理を意味しており, 状態変数として先に定義したS_iを用いればDPによって解を決定することができる.

4.4 建設手順計画の決定

広域的な治水システムを対象とする場合, (19)式に基づくDPは中間ステージで膨大な状態量を生成するため計算量, 記憶量の点からその実行可能性は極めて低い. そこで, 近似的な多段決定法として状態変数をS_iの代わりにステージiに施工する施設にとることを考える. この方法はY_iに至る経路として, ステージi-1で施工される施設群から目的関数値を最小にするものを選んでいくに過ぎないため最適性の原理は成立しない. しかし, 状態量の個数は各ステージで施工可能な施設の組合せと一致するため記憶量, 計算量の大幅な節減が図られること, 建設手順は(12)式の制約を満足するように決定されること等の点を考慮すれば本方法によって近似解を導出しておくことの有効性が理解できる. したがって, まず, 上述の方法で近似解を求め, これを初期解として分枝限定法を用いて最適解の探索を行う.

5. 適用と考察

5.1 配置・規模計画の決定

まず, 3.1で述べた方法にしたがい得られた上位解の一つをFig.4に示す (同図に適用流域の概要を併記している. 図中, ≻は部分流域を, ≻はダムを, ○は評価地点を, □は河道を表し, また, 評価地点に付記した()内の数値は氾濫確率を, ()外の数値は疎通能力を表し

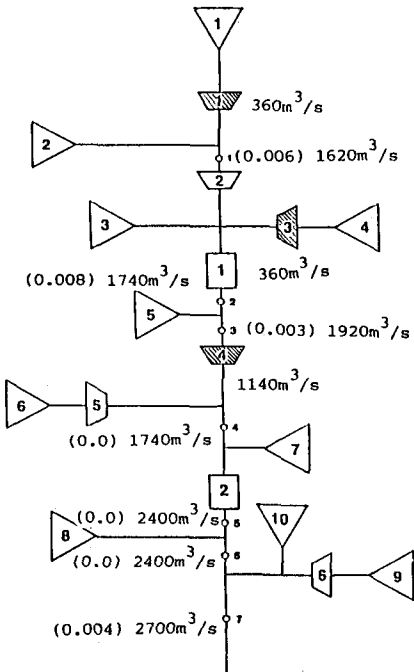


Fig.4 The superior alternative in screening model

Table.1 Optimal site and scale plan

dam	capacity (x10 ³ m ³ /s)	Q _s	α	cost (x10 ¹⁰ yen)	over flow ratio
1	0.8	150	0.1	1.70	0.004
2	0	0	0	0	0
3	1.1	150	0.3	1.78	0.004
4	3.8	500	0.4	2.67	0.001
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0

dike	Q _a (m ³ /s)	cost (x10 ¹⁰ yen)	flood inundation probabilities
1	2000	0.381	0.008
2	2400	0.390	0.004
3	2400	0.363	0.008
4	1800	0.157	0.008
5	1900	0.157	0.005
6	2200	0.157	0.008
7	3300	0.338	0.010

ている)。入力としたシミュレート豪雨は1000個である。さらに、シミュレーション段階においてこれら上位解の近傍を分枝限定法により探索して得られた最適配置・規模計画をTable.1 (表中、 Q_s はダムにおける調節開始流量、 α は放流率である)に示す。なお、建設費用は、ダムの場合固定費用を149.7億円/ m^3/s 、調節量当りの単価を0.1424億円とし、堤防については2200円/ m^3/s として算定した。

5.2 建設手順計画の決定

5.1で得られた配置・規模計画に対し、評価地点の疎通能力を地点1:6,地点2:6,地点3:5,地点4:2,地点5:2,地点6:2,地点7:5の各段階に分割して増大させる。また、ダム建設に必要なステージ数をダム1:2,ダム3:3,ダム4:9とし、ダムが1,3,4の順序で建設されるときの堤防の建設順序を定めることにする。なお簡単のために各ステージでシステムに投資される建設費用の総額を一定とし、この予算額に応じて1ステージにダム1単位、堤防2単位ずつが建設されるものとして得られた近似解をTable.1に、これに対応する氾濫確率低下曲線Fig.5に示す(表中の数字は各ステージ内に建設される施設の単位数を示している)。ステージ11で初めて地点1の堤防が着工可能となっているがさらに増設を行うためにはダム4の完成を待つ必要があり、ダム計画と建設計画の整合性を図ることの必要性がうかがえる結果となっている。

5.3 計画降雨をベースとした治水計画との比較

本研究で用いたシミュレート降雨1000個のうち流域平均総降雨量で第9位から11位の降雨を100年確率総降雨量に相当する入力とし、これら3ケースの雨に対して洪水を安全に流下させるものとして策定した配置・規模計画をTable.3に示す。表中の氾濫確率及びダムのオーバーフロー率は1000ケースの豪雨を入力として算定したものである。許容氾濫確率を満足しない評価地点が存在し、Table.1と比較すれば計画降雨の分布により施設計画に過小な部分が存在することがわかる。

Table.2 approximate solution on sequential model

stage	dike							dam			
	1	2	3	4	5	6	7	1	3	4	
1						1	1	1			
2			2					1			
3			2						1		
4			1			1			1		
5		2							1		
6		2								1	
7		2								1	
8							2			1	
9					2					1	
10							2			1	
11	1			1						1	
12										1	
13										1	
14	1			1						1	
15	2										
16	2										

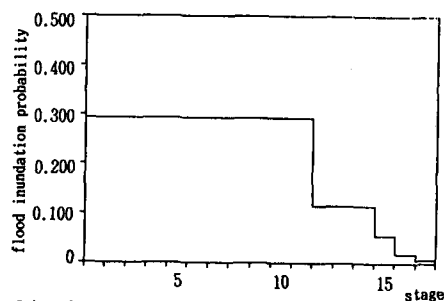


Fig.5 The decreasing curve of flood inundation probability

6. 結語

本研究では氾濫確率を計画安全度指標とした治水システムの策定方法を展開したが、今後、安全度指標として氾濫確率の他に回復性、深刻性等の指標の取り上げや、計画を取り巻く不確実性への対処方法等に付いて考察を加えていく必要がある。
[参考文献]

高埴,池淵,小尻:水系一貫した治水計画の策定に関する研究,京大防災年報,第25号B-2,1982

岡田:強不確実性下における水利用施設の拡張問題に関するリスク分析,京大防災年報,第28号B-2,1985

室田,江藤,水野:治水施設の着工順位付に関する研究,第26回水理講演会論文集,1982

Table.3 Site and scale plan according to tenth largest rainfall

dam	capacity ($\times 10^7 m^3/s$)	Q_s	α	cost ($\times 10^{10}$ yen)	over flow ratio
1	0.3	150	0.4	1.54	0.021
2	0	0	0	0	0
3	1.1	150	0.4	1.79	0.002
4	3.0	500	0.1	2.41	0.017
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0

dike	Q_a (m^3/s)	cost ($\times 10^{10}$ yen)	flood inundation probabilities
1	1800	0.291	0.020
2	2200	0.345	0.004
3	2400	0.363	0.001
4	1400	0.112	0.012
5	1900	0.157	0.0
6	2200	0.157	0.003
7	3300	0.336	0.007