

氾濫確率を基準にした治水システムの 建設手順計画とその応用に関する研究

堀 智晴・池淵 周一
小尻 利治・神山 英幸

OPTIMAL SCHEDULING OF THE CONSTRUCTION WORK FOR THE FLOOD CONTROL SYSTEM BASED ON FLOOD INUNDATION PROBABILITY

By Tomoharu HORI, Shuichi IKEBUCHI, Toshiharu KOJIRI
and Hideyuki KOUYAMA

Synopsis

The aim of this study is to establish the optimal scheduling of the construction work for the flood control system consisting of multi-subbasin and multi-reference point.

In this study, first, the flood inundation probability is adopted to estimate the change of reliability of the flood control system in time from the viewpoint of risk management. Second, to lighten the computational burden in optimization, following three steps are introduced, — 1) the step to reduce infeasible states by the status-quo conditions, 2) the step to optimize the scheduling under the condition of single work in each stage, 3) the step to search the optimal scheduling including the simultaneous construction of plural units. Last, these approaches are applied to a hypothetical flood control system for the verification of the theory.

1. 序 論

社会資本は、常に社会情勢や経済情勢に対応した拡充を要請される。都市化の進展にともない河川沿いの低平地にまで市街化の波が押し寄せ浸水被害の増加が大きな問題となっている今日、治水システムの早期の整備・拡充は重要な課題である。しかし、洪水災害は、その被害が発生しなければ問題が顕在化しないことや、被害を受ける人々が限定されていることなどから対策はなかなか理解を得られない場合も多い。また、公共事業に対する財政的な圧迫の強い今日では、計画最終年における治水システムのあるべき姿として設定される治水施設群の配置・規模計画の実現には多大の年月を要し、治水施設の整備計画は超長期構想化してきている。そこで、施設群の建設途上においても、既に整備された部分を有効に機能させることにより、流域の治水水準を段階的に上昇させることが不可欠となる。本研究は、以上の点に鑑み、施設計画で決定された治水施設群の建設を、工期をいくつかのステージに分割し、各ステージにおける予算の制約及び安全度の変化に関する制約を考慮しつつ、段階的に行ういわゆる建設手順計画の策定方法を考察するものである。

建設手順計画は、時間軸に沿ったダイナミックな側面を有する最適化問題であり、その解法には従来からDP が用いられてきた^{1),2)}。しかし、対象とする治水システムが広域化するにつれ、DP の計算過程で生じる状態量は膨大な数にのぼるため、実際に解を得るためには多大な計算労力を要する。この労力を軽減するためには、各時間断面（建設ステージ）における治水システムの信頼性評価（流域シミュレーションが主体

となる)の簡略化及び解探索の効率化が不可欠である。本研究では特に解探索の効率を高めることに重点をおき、最適化の過程を

- (1) 安全度の評価に関する制約条件を用いてシミュレーションにかけるべき状態量の削減を行う段階、
- (2) 削減された状態量に対して各ステージに施工する施設を1施設のみに限定したいわゆる順番施工を条件として、DPを適用し建設手順を求める段階、
- (3) 分割施工すべき施設の規模の分割幅を細かくし、1ステージ内に複数の施設の建設を行う同時施工も含めた解を、順番施工の条件下で求めた解から得られる情報を用いつつ探索する段階

の3つの段階に分けて、最適解に漸近する方法を提案する。

2. 建設手順計画の定式化

2.1 評価指標の設定

治水システムの建設手順計画は、施設計画で与えられた治水施設群の総工期をいくつかのステージに分割し、各ステージ内の予算制約のもとで、流域の治水水準の早期向上を目的として、施設群の建設手順を決定する問題である。したがって、建設手順計画の多くの代替案を評価する指標は、流域の治水水準が施設の完成にともなって時間的に変化する様子を明確に反映するものでなければならない。この指標には、大別して、工事期間中に洪水によって発生する被害額の期待値(ロス)を用いる方法と工事期間中に洪水による損害の発生する確率(リスク)を用いる方法の2つがある。

期待被害額は洪水に起因する経済的損失を評価に取り入れるることにより、流域の中でも資産の集中している地点に重点をおくなど地域の重要度に応じた評価が可能である。さらに、将来の資産の分布状況を予測することができれば、被害客体としての流域の変化をも考慮にいたれた計画を策定することができるといった特徴を持つ。これに対して、損害の発生する確率(リスク)を用いる方法は流域内の各防災対象地点が洪水に対してどの程度の信頼性を有するかを個別に把握することができるとともに、施設建設の効果を時間的なリスクの減少として捉えることができるといった点に特徴がある。もちろん、どちらの指標を用いるかは洪水災害のどのような側面に着目するかによって異なってくるであろうし、将来的には、両者を統合した指標が望まれる。本研究では、特に、リスク管理的な立場³⁾から、施設建設にともなう治水システムの信頼性の変化を把握するという点に重点をおき、各防災対象地点における洪水被害の発生確率(氾濫確率)を評価指標として用いることにする。なお、氾濫確率を評価指標として用いた場合でも、各地点における許容氾濫確率が、その地点の資産の蓄積度や人口等をにらみつつ設定されるものと考えれば、地域の重要度を考慮にいたれた治水システムの設計が可能となろう。

いま、洪水の形態を越流のみに限定すれば評価地点 $m(m=1, \dots, M)$ における氾濫確率 p_m は次式で定義される。

$$p_m = \Pr[(Q_m(t_0) > Q_m^s) \cup (Q_m(t_0+1) > Q_m^s) \cup \dots \cup (Q_m(t_0+T) > Q_m^s)] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Q_m(t)$: 地点 m における時刻 t の流量、 Q_m^s : 地点 m の許容流量(疎通能力)、 T : 洪水継続時間である。さらに、(1)式の定義を用いて、施設の建設期間中のステージ i における地点 m の氾濫確率を p_m^i と表す。 p_m^i は、ステージ i の期首に既に供用を開始されている施設のうち地点 m の堤防および地点 m より上流に位置する施設の規模の関数である。 p_m^i を用いれば各建設ステージにおける防災対象地点の信頼性および相互関係を個別に把握することができ、流域の開発計画や規制に関する1つの情報を提供することができよう。また、ステージ i における治水システム全体の危険度を

$$p^i = \max_m [p_m^i] \quad \dots\dots\dots (2)$$

で定義しておく。

2.2 建設手順計画の定式化

(1) 建設手順計画の目的関数

建設手順計画の目的は、治水システムの建設が長期にわたる中で、既に施工された施設を有効に機能させつつ、流域全体の治水水準を早期に向上させることにある。したがって、各ステージにおいて最も氾濫確率の高い地点の整備が重点的に行われることになる。しかし、広域的な治水システムは(1)式でも示したように複数の評価地点から構成され、各評価地点の氾濫確率の変化に関しては後に述べるような制約が課せられることから、必ずしも最も安全度の低い地点を優先的に補強することが流域全体の治水水準を早期に高めることにつながるとは限らない。そこで、建設工期全体との調和を考え、目的関数を次式で定義する。

$$J = \sum_{i=1}^{I+1} p^i \cdot \delta t^i \longrightarrow \min. \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 δt^i ：ステージ i の期間長である。 p^i をステージ i に関してプロットすれば **Fig.1** に示す氾濫確率低下曲線が得られるが、(3)式はその面積の最小化を意味している。

(2) 建設手順計画の制約条件と仮定

建設手順計画の制約条件としては、各ステージにおける建設費用に関するものおよび氾濫確率の変化に関するものがある。以下に本研究で用いる仮定及び制約条件を列挙する。

- 1) 施設計画で得られた最適配置・規模計画を構成する施設群を対象として建設手順計画を策定する。
- 2) ステージ i に建設された施設による治水効果はそのステージ末に一挙に発現するものとする。
- 3) ダム貯水池の建設にかかる費用は堤防に比べそのオーダーが大きく異なりまた費用負担も多方面に及ぶため、ダムと堤防を代替的に扱うのではなく費用制約の面からは分離して扱い、両者を並行して建設するものとする。すなわち、ステージ i の予算をダムに対して C_d^i 、堤防に対して C_r^i とすれば、

$$\begin{aligned} \sum_n C_n^i(x_n^i) &= C_d^i & n \in Z_d \\ \sum_n C_n^i(x_n^i) &= C_r^i & n \in Z_r \end{aligned} \dots \dots \dots (4)$$

が成り立たなければならない。ただし、 x_n^i ：ステージ i における施設 n の施工規模、 C_n^d 、 C_n^r ：堤防及びダムの建設費用、 Z_d 、 Z_r ：建設予定の堤防及びダムの集合である。

- 4) 建設期間中においては、どの評価地点においても、氾濫確率が直前のステージにおける値より増加してはならない。ただし、氾濫確率がすでに許容氾濫確率以下となっている地点においては、許容氾濫確率を越えない範囲での氾濫確率の増加は認めるものとする。すなわち、

$$\begin{aligned} p_m^i &\geq p_m^{i+1} & (p_m^i > p_m^a \text{ または } p_m^{i+1} > p_m^a \text{ のとき}) \\ p_m^i &\leq p_m^{i+1} & (p_m^i \leq p_m^a \text{ かつ } p_m^{i+1} \leq p_m^a \text{ のとき}) \end{aligned} \dots \dots \dots (5)$$

を満足しなければならない。

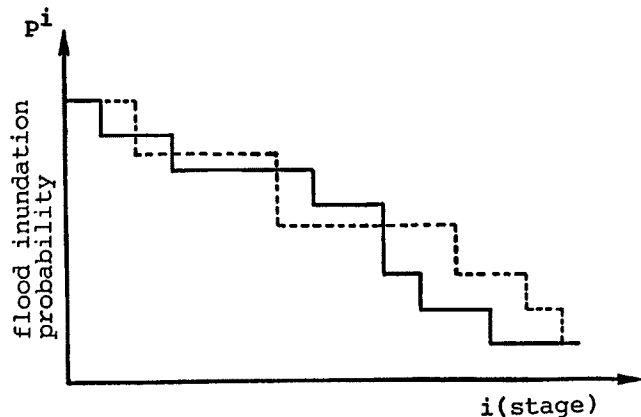


Fig.1 The decreasing curve of flood inundation probability.

3. 流域モデルの構成と氾濫確率の算定

本研究では、時空間分布構造を保存した形でシミュレートした多数の豪雨を入力として治水施設群を介した流況追跡を行い、(1)式の定義にしたがって評価地点の流量と疎通能力とを比較することによって氾濫確率を算定する。氾濫確率の算定方法としては他に各部分流域からの流出流量の間の遷移確率行列を用いて簡便に算定する方法がある⁴⁾が、対象とする施設計画が、既にシミュレーション段階を経て決定されるものであることを考慮し、氾濫確率の精度を確保するといった観点から、流況シミュレーションによって氾濫確率を算定する方法を採用した。以下に本研究で用いた洪水追跡法と治水施設のモデル化についてまとめておく。なお、降雨シミュレーションの詳細については文献 5) を参照されたい。

(1) 洪水追跡計算

洪水流下の非線形性を表現できる流出モデルには貯留関数法や kinematic wave 法がある。流出現象の把握といった観点からは物理的基礎の明確な kinematic wave 法が望ましいことは言うまでもない。しかし、本研究では、多数の豪雨ケースにたいして流量の追跡を行わなければならないこと、流量の追跡と最適化手法とを組み合わせる探索を行うこと、用いる指標が氾濫確率であることなどから計画決定に必要な精度及び計算時間を考え貯留関数法を用いることにする。

(2) ダム貯水池モデル

各種治水施設の中でも人為的な操作の可能な施設としてダム貯水池がある。ダム貯水池の操作方式としては一定量放流方式、一定率放流方式、最適操作を行う方法があるが、本研究では、計画段階におけるダム操作方式が問題となることを考慮し、様々な規模の洪水に対して常に一定の割合で調節を行うことのできる一定率放流方式を採用することにする。なお、ダム貯水池は建設途中で効果を発揮することはなく施設計画で予定されていた規模がすべて完成してからその効果を発現することは言うまでもない。

(3) 堤防及び氾濫モデル

本研究で用いる指標が氾濫確率であることから、各評価地点においては、その疎通能力を越える部分が堤内地に越流、氾濫するものと仮定する。すなわち、評価地点 m より下流に流下する流量 $\underline{Q}_m(t)$ は、評価地点 m の上流側流量を $\overline{Q}_m(t)$ とし、

$$\underline{Q}_m(t) = \begin{cases} \overline{Q}_m(t) & (\overline{Q}_m(t) \leq Q_m^a \text{ のとき}) \\ Q_m^a & (\overline{Q}_m(t) > Q_m^a \text{ のとき}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表される。また、流量追跡に貯留関数法を用いていることから、氾濫水が洪水継続時間中に河道へ逆流入することは無視して考えることにする。

4. 建設手順計画の解法

治水システムの段階的建設手順計画は、時間的かつ空間的に多段階の決定過程を有していることから、その解法には DP の適用が可能である。しかし、広域的な治水システムを対象とする場合、各施設の施工規模の分割幅を細かく取り複数施設の同時施工まで含めると、建設手順の代替案は膨大な数に上るため計算時間や記憶量など計算機上の制約により実際に解を得ることは不可能に近い。そこで、本章では、河川の特徴である上下流問題を考慮して状態量の削減を図るとともに、まず、順番施工に限定した建設手順の最適解を求め、これを初期解としてさらに施設の分割を細かくし複数施設の同時施工をも含めた建設手順計画の最適解を探索する方法を展開する。

4.1 DP を用いた定式化

まず、全工事期間を I 期のステージに分割して施工するものとし、ステージ i の期首において既に建設

され機能している施設の規模の組合せを表すベクトル $\mathbf{s}^i$ を次式で定義する。

$$\mathbf{s}^i = (s_1^i, s_2^i, \dots, s_n^i, \dots, s_N^i) \dots\dots\dots (7)$$

ただし, s_n^i : ステージ i における施設 $n(n=1, \dots, N)$ の規模, N : 施設の総数である。したがって, s_n^{i+1} は施設 n の完成後の規模を表す。さらに, ステージ i において施工する施設の規模の組合せを表すベクトル $\mathbf{x}^i$ を次式で定義する。

$$\mathbf{x}^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i, \dots, x_N^i) \dots\dots\dots (8)$$

ここに, x_n^i はステージ i における施設 n の施工規模を表す。いま, 施設 n の完成後の規模 s_n^{i+1} を K_n 段階に分割し, $\delta s_n (= (s_n^{i+1} - s_n^i) / K_n)$ を 1 単位として施工することを考えれば (s_n^i は現況における施設 n の規模を表す), k_n をステージ i における施設 n の施工単位数として,

$$x_n^i = \begin{cases} k_n \cdot \delta s_n & (k_n \text{ 段階分施工する}) \\ 0 & (\text{施設 } n \text{ は施工しない}) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

となる。もちろん, x_n^i の組合せはステージ i における総建設予算による制約を受ける。(7)式, (9)式から, s_n^i と x_n^i との間には,

$$s_n^i = \sum_{\xi=1}^{i-1} x_n^\xi \dots\dots\dots (10)$$

が成り立つ。したがって, ステージ i からステージ $i+1$ への遷移構造式は,

$$\mathbf{s}^{i+1} = \mathbf{s}^i + \mathbf{x}^i \dots\dots\dots (11)$$

と表される。

さらに, ステージ i における流域の危険度 p^i は $\mathbf{s}^i$ の関数となるから, この関係を $p^i = f(\mathbf{s}^i)$ と表す。

ところで, ステージ i における氾濫確率は, ステージ i の期首において既に建設されている施設の組合せのみによって決まりその建設順序には依存しないから(3)式で表される目的関数は,

$$\begin{aligned} \min J &= \min_{\substack{\{\mathbf{s}^i\} \\ (i=1, \dots, I)}} \left[\sum_{i=1}^{I+1} p^i \cdot \delta t^i \right] \\ &= \min_{\substack{\{\mathbf{s}^i\} \\ (i=1, \dots, I)}} \left[\sum_{i=1}^I f(\mathbf{s}^i) \cdot \delta t^i + f(\mathbf{s}^{I+1}) \cdot \delta t^{I+1} \right] \\ &= \min_{\substack{\{\mathbf{s}^i\} \\ (i=1, \dots, I-1)}} \left[\min_{\{\mathbf{s}^I\}} \left\{ \sum_{i=1}^I f(\mathbf{s}^i) \cdot \delta t^i \right\} + f(\mathbf{s}^{I+1}) \cdot \delta t^{I+1} \right] \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで,

$$u^i(\mathbf{s}^i) = \min_{\substack{\{\mathbf{s}^\xi\} \\ (\xi=1, \dots, i)}} \left[\sum_{\xi=1}^i f(\mathbf{s}^\xi) \cdot \delta t^\xi \right] \dots\dots\dots (13)$$

と定義すれば, 関数漸化式

$$\begin{aligned} u^{i+1}(\mathbf{s}^{i+1}) &= \min_{\{\mathbf{s}^i\}} [u^i(\mathbf{s}^{i+1} - \mathbf{x}^i) + f(\mathbf{s}^{i+1}) \cdot \delta t^i] \\ u^1 &= f(\mathbf{s}^1) \cdot \delta t^1 = p^1 \cdot \delta t^1 \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

を得る。(14)式は最適性の原理の成立を意味しており, 状態変数として各ステージで既に建設されている施設の組合せをとると DP による政策決定が可能であることを示している。

4.2 解探索の手順

4.1 で定式化した DP による解法は, 対象とする治水システムが広域化した場合や, 施設の施工規模単位を細かく取り複数施設の同時施工をも含めて解を探索する場合には, 建設ステージの中間段階で膨大な数

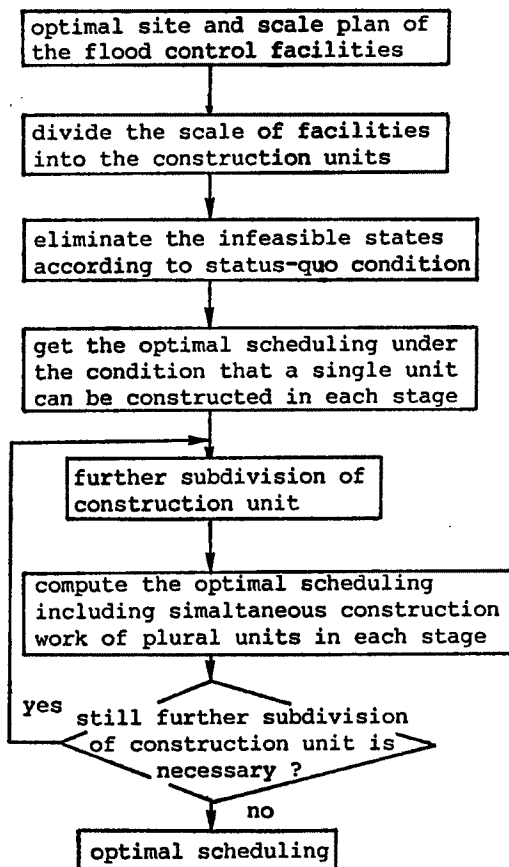


Fig. 2 Flow chart of optimal scheduling of construction work.

の状態量を生成するため、計算機的能力から実際に解を得ることは不可能といっても過言ではない。解決計算の実行可能性を高めるためには、(1) 氾濫確率の算定に要する計算時間の短縮、(2) 代替案の絞り込みによる解探索の効率化を図る必要がある。そこで、本節では、主として(2)の側面に着目し、解探索の過程を3段階に分割することによって順次最適解に漸近する方法をとる (Fig. 2 参照)。

まず、第一段階として、各評価地点の氾濫確率の変化に対する制約条件(5)を用いて、予め各ステージで実行可能でないと考えられる状態量(既に建設済みの施設の組合せ)を削減する。次に、削減された状態量を対象とし、各ステージで施工する施設の選び方を順番施工(1ステージに1箇所の施設のみを施工する方法)に限定してDPによる最適解の決定を行う。さらに、順番施工による解を初期解とし、施設の分割を細かく取り、複数施設の同時施工をも含めた最適解に漸近する。具体的には、順番施工という条件下で得られた解に対する氾濫確率低下曲線の特性を分析し、解を改善しないと考えられる状態量を除いた後、DPを用いて解を決定する。

4.3 制約条件に基づく状態量の削減

(5)式で表される制約条件は、工事期間中に河川の上流部の改修によって下流地点の氾濫確率が増加して

はならないということを表しており、流域の治水水準が比較的低い場合には施工施設の選択に対して非常に厳しい制約となる可能性が高い。そこで、(5)式の制約条件を明らかに満足しないと考えられる状態量を予め削減することによってDPによる解決定過程の計算量及び記憶領域の節約を図る。

このためには、各地点の疎通能力を1単位増加させたときその影響を受けて下流地点の氾濫確率がどの程度変化するかを把握しなければならない。ところで、一般に、1つの河川流域において上流側地点の疎通能力が増大すれば下流側地点の洪水流量が増加することは予想されるが、上流側河道整備による下流地点の流量の増加が直接下流地点の氾濫確率への悪影響に結び付くかどうかは、上流地点・下流地点の疎通能力の相互関係によって異なるため、これらの関係を正確に把握するのは容易ではない。そこで、筆者らは実験計画法を用いることによって、各地点の疎通能力と氾濫確率の関係を把握しようとする方法が提案している⁶⁾が、通常用いられる直行配列表は3水準程度までであり、これ以上施設を分割する場合にはいくつかの施工単位をまとめて1水準とする必要があり、精度上の問題が残る。以上の点に鑑み、本研究では、上流側の河道の疎通能力を拡大したとき、下流地点の氾濫確率が現況(施設建設開始以前)における氾濫確率を越えないために必要な下流地点の整備水準を求めることにより、実行可能でない状態量を削減することにする。以下、その手順を示す。

- (1) 各地点 $m(m=1, \dots, M)$ の拡大すべき疎通能力 $(s_m^{l+1} - s_m^l)$ をそれぞれ K_m 段階の施工単位に分割したとする。
- (2) 地点 m の疎通能力が k_m 段階にまで拡大されている場合について、地点 m の直下流の地点 $m+1$ までの流量の追跡を行う(このとき地点 m より上流に位置する地点 $1 \sim m-1$ までの疎通能力は現況

における値 ($s_1^i, \dots, s_{m-1}^i$ とする)。

- (4) 地点 $m+1$ での流量と疎通能力 $\delta s_m \cdot k_m (k_m=1, \dots, K_m)$ を比較することにより氾濫確率 p_{m+1} が現況における氾濫確率 p_{m+1}^1 を上回らないために必要な地点 $m+1$ の疎通能力のレベル数 l_{m+1}^m を求める。
- (5) 引続き地点 m の疎通能力が $\delta s_m \cdot k_m$ 、地点 $m+1$ の疎通能力が $\delta s_{m+1} \cdot l_{m+1}^m$ の状態のとき、地点 $m+2$ までの流量追跡を行い、(4)と同様な比較により地点 $m+2$ の疎通能力の必要レベル l_{m+2}^m を求める。本操作を地点 M まで続けて行う。
- (6) 以上の操作により $l_{m+1}^m (m=1, \dots, M-1, m'=2, \dots, M, k_m=1, \dots, K_m)$ を求めれば、任意のステージ i における疎通能力の組合せ s^i のうち、

$$s^i \{s^i | (s_m^i \geq k_m \cdot \delta s_m) \cap ((s_{m+1}^i < l_{m+1}^m \cdot \delta s_{m+1}) \cup \dots \cup (s_M^i < l_M^m \cdot \delta s_M))\} \dots\dots\dots (15)$$

を満足するものはすべて実行可能でないとして削除することができる。

4.4 同時施工を含めた解決定

順番施工による建設手順計画は、施設の分割幅が大きいこと、1ステージに1評価地点の改修しか行わないことから次のような問題がある。

- (1) 各評価地点の疎通能力を1単位拡大したときに、その地点よりも下流に位置する評価地点の氾濫確率が大きく変動する。
- (2) 施設の施工単位 (1回に施工する施設の規模) が大きいと各ステージに建設される施設の規模が過剰である場合がある。

これに対し、施設の施工単位を小さく取り1ステージ内で複数地点の改修 (同時施工) を認めることにより、

- (1) 各施設の1単位の施工が下流評価地点に与える影響が小さくなることから、順番施工という条件下では早期の建設着手が制約条件によって抑制されていた施設の早期着工が可能となる。
- (2) 上流評価地点の疎通能力の拡大と、それはよって悪影響を受ける下流地点の疎通能力の拡大とを同一ステージ内で平行して行うことにより、下流評価地点の氾濫確率の悪化を防ぐことが出来る。

等の効果を期待することができ、順番施工という条件下で得られた解を更に改善することができる。

ところが、同時施工をもふくめて DP をそのまま適用することは、順番施工に限定した場合に比べ膨大な状態量を対象として氾濫確率の算定を行う必要があることから計算機的能力上の制約から不可能である。したがって、同時施工を含めた解を得るためには、順番施工で得られた解が与える情報と、疎通能力と氾濫確率との関係を表す関数の特性を用いて、解曲面の概略を分析し、明らかに解の改善方向にない状態量を削減する必要がある。

いま、順番施工という条件下で得られた解による各ステージの状態量 (各ステージで既に建設済みの施設規模の組合せ) の列を、

$${}^0s^i = ({}^0s_1^i, {}^0s_2^i, \dots, {}^0s_M^i) \quad (i=1, \dots, I+1) \dots\dots\dots (16)$$

とし、 ${}^0s^i (i=1, \dots, I+1)$ に対する各評価地点の氾濫確率の列を、

$${}^0p^i = ({}^0p_1^i, {}^0p_2^i, \dots, {}^0p_M^i) \quad (i=1, \dots, I+1) \dots\dots\dots (17)$$

氾濫確率低下曲線の値を

$${}^0p^i = \max[{}^0p_1^i, {}^0p_2^i, \dots, {}^0p_M^i] \quad (i=1, \dots, I+1) \dots\dots\dots (18)$$

とする。ところで、地点 m の氾濫確率 p_m は、地点 m および m より上流の地点の疎通能力 $s_\xi (\xi=1, 2, \dots, m)$ 関数であり、

$$p_m = f_m(s_1, s_2, \dots, s_m) \dots\dots\dots (19)$$

と表される。 f_m は $s_1, s_2, \dots, s_{m-1}$ に対しては非減少, s_m に関しては非増加の関数である。以下, 同時施工を含め, 施設の施工単位 δs_m を順番施工の解を求めたときの施工単位 ${}^0\delta s_m$ の半分 ($\delta s_m = {}^0\delta s_m/2$) するものとして議論を進める。

まず, 順番施工によって得られた氾濫確率低下曲線において, 氾濫確率の最大値が低下しているステージ, すなわち, ${}^0p^{i*-1} \neq {}^0p^{i*}$ なるステージ i^* に着目する (添字 0 は順番施工における解に対するものであることを示す)。 ${}^0p^{i*-1} \neq {}^0p^{i*}$ は, ステージ i^*-1 において氾濫確率の最大値 (${}^0p^{i*-1} = \max_m [{}^0p_m^{i*-1}]$) を与える地点 (これを l_{i^*-1} で表す) の疎通能力が1単位 ($\delta s_m m^2/s$) だけ拡張されたことを示している。このとき, $l_{i^*-1} \neq l_{i^*}$, すなわち, 氾濫確率の最悪値を与える地点が変化していれば, ステージ i^*-1 に施工された規模 δs_m が過剰であった可能性がある。そこで, ステージ i^*-1 に拡大された規模を1単位 (ここでいう1単位とは新たな規模分割での1単位) 減らした状態,

$${}^0s^i = ({}^0s_1^{i*}, {}^0s_2^{i*}, \dots, {}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*} - \delta s_{l_{i^*-1}}, \dots, {}^0s_M^{i*}) \dots\dots\dots (20)$$

に対する氾濫確率 $\bar{p}^{i*} (m=1, \dots, M)$ 及び最大値 $\bar{p}^{i*}$ を計算する。このとき入力である降雨の数が有限であることと制約条件 (5) 式より, ステージ i^*-1 では疎通能力が拡大されなかった地点 $m (m \neq l_{i^*-1})$ に対しては $\bar{p}_m^{i*} = {}^0p_m^{i*} (m \neq l_{i^*-1})$ が成り立つ。よって, 次の二つの場合を考えればよい。

(1) ${}^0p^{i*} < \bar{p}^{i*}$ の場合

この場合は, ${}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*}$ を ${}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*} - \delta s_{l_{i^*-1}}$ に削減すればステージ i^*-1 で氾濫確率が最大であった地点 l_{i^*-1} の氾濫確率が十分低下せず, ステージ i^* においても依然としてこの地点の氾濫確率が最大となることを示している。したがって, ${}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*}$ は過剰とは言えず, 順番施工によって得られた解を改善するためには

$${}^1s_{l_{i^*-1}}^{i*} \geq {}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*} \dots\dots\dots (21)$$

でなければならないことがわかる (${}^1s_m^{i*}$ は同時施工を含めた場合のステージ i における地点 m の疎通能力を表す)。ただし, この条件下ではステージ i^*-1 とステージ i^* で氾濫確率の最大値を与える地点が変化する ($l_{i^*-1} \neq l_{i^*}$) から上流側に変化するか下流側に変化するかによって分けて考える。

a) $l_{i^*-1} < l_{i^*}$ (氾濫確率の最大値を与える地点が下流側に変化する) 場合

$f_{l_{i^*}}$ は地点 l_{i^*} より上流の地点の疎通能力に対して非減少関数であるから, 上流の疎通能力を必要以上に拡大しても下流に有利に働くことはない。従って, ${}^1s_{l_{i^*-1}}^{i*} = {}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*}$ で十分である。すなわち, ステージ i^* における新しい状態量の候補として,

$$\begin{aligned} {}^1s^i &= ({}^1s_1^{i*}, {}^1s_2^{i*}, \dots, {}^1s_m^{i*}, \dots, {}^1s_M^{i*}) \\ \text{ただし, } {}^1s_m^{i*} &\leq {}^0s_m^{i*} \quad (m < l_{i^*-1}) \\ {}^1s_m^{i*} &= {}^0s_m^{i*} \quad (m = l_{i^*-1}) \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

なる ${}^1s^i$ をとればよい。

b) $l_{i^*-1} > l_{i^*}$ (氾濫確率の最大値を与える地点が上流側に変化する) 場合

上流の地点の疎通能力を高めるためには, 下流地点の整備水準を高めておく必要があるからa)のように ${}^1s_{l_{i^*-1}}^{i*} = {}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*}$ で十分とはいえない。そこで,

$$\begin{aligned} {}^1s^i &= ({}^1s_1^{i*}, {}^1s_2^{i*}, \dots, {}^1s_m^{i*}, \dots, {}^1s_M^{i*}) \\ \text{ただし, } {}^1s_m^{i*} &\geq {}^0s_m^{i*} \quad (m = l_{i^*-1}) \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

なる ${}^1s^i$ を新しい状態量の候補とする。

(2) ${}^0p^{i*} = \bar{p}^{i*}$ の場合

この場合は, ${}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*}$ を ${}^0s_{l_{i^*-1}}^{i*} - \delta s_{l_{i^*-1}}$ に削減してもステージ i^*-1 で氾濫確率が最大であった地点 l_{i^*-1} の氾濫確率が十分に低下し, ステージ i^* にはやはり最大値を与える地点が他の地点に移動することを示している。したがって, 順番施工において, ステージ i^*-1 で施工された $\delta s_{l_{i^*-1}}$ なる規模は過剰であった可能性がある。

a) $l_{i^*-1} < l_{i^*}$ (氾濫確率の最大値を与える地点が下流側に変化する) 場合

(1)―a)と同様な議論から ${}^1s_{i+1}^* = {}^0s_{i+1}^*$ で十分である。そこで、新たな状態量の候補として、

$${}^1\mathbf{g}^* = ({}^1s_1^*, {}^1s_2^*, \dots, {}^1s_m^*, \dots, {}^1s_M^*)$$

ただし、 ${}^1s_m^* \leq {}^0s_m^*$ ($m < l_{i+1}$)

$${}^1s_m^* = {}^0s_m^* - \delta s_m \quad (m = l_{i+1}) \dots\dots\dots (24)$$

なる ${}^1\mathbf{g}^*$ をとる。

b) $l_{i+1} > l^*$ (氾濫確率の最大値を与える地点が上流側に変化する) 場合

(1)―b)と同様に、

$${}^1\mathbf{g}^* = ({}^1s_1^*, {}^1s_2^*, \dots, {}^1s_m^*, \dots, {}^1s_M^*)$$

ただし、 ${}^1s_{i+1}^* \geq {}^0s_m^* - \delta s_m$ ($m = l_{i+1}$) $\dots\dots\dots (25)$

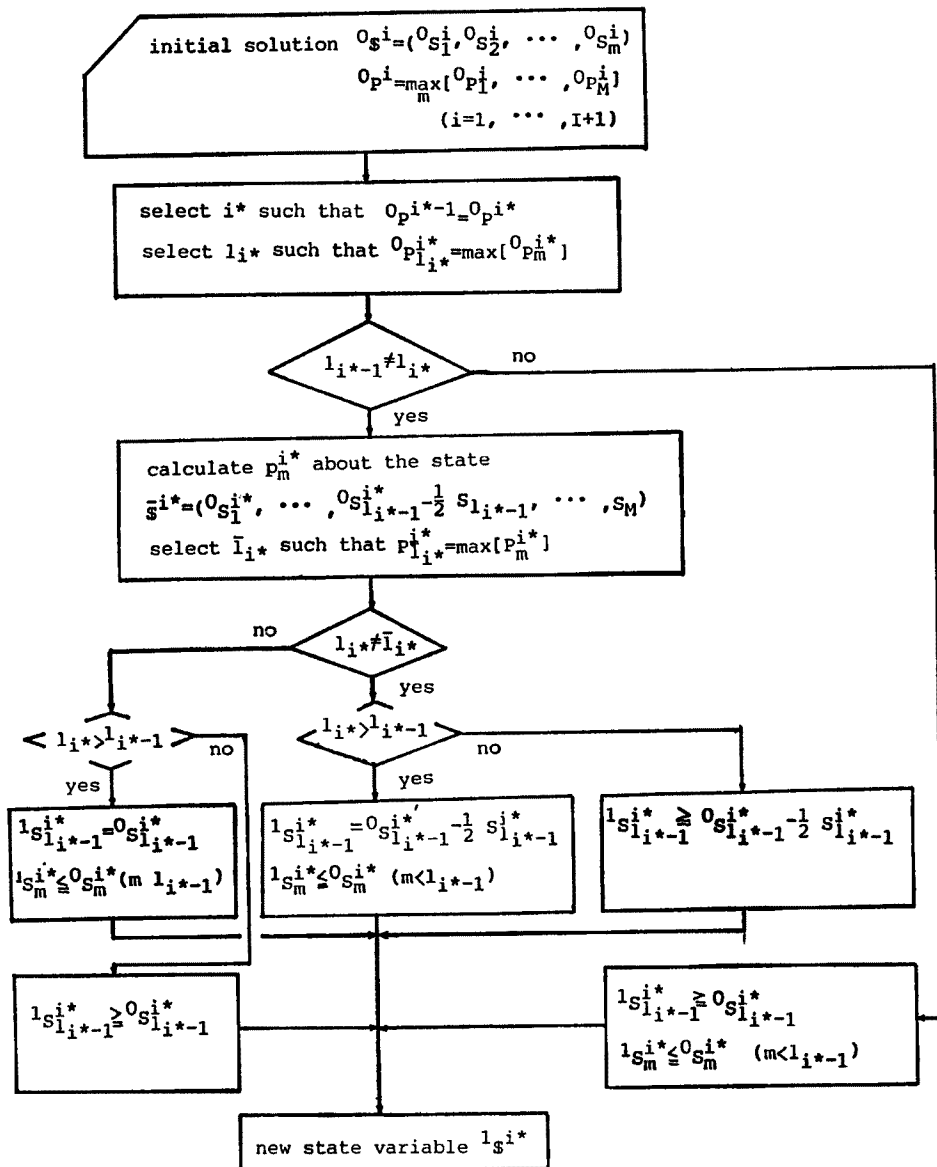


Fig. 3 Flow chart of scheduling the construction work including simultaneous construction of plural units.

なる ${}^1g^i$ を新しい状態量の候補とする。

また、順番施工で得た解においてステージ i^*-1 と i^* で氾濫確率の最大値を与える地点が変化していなければ ($l_{i^*-1}=l_{i^*}$ ならば)、ステージ i^* 以降に氾濫確率を下げるためには、地点 l_{i^*-1} の疎通能力をできるだけ早期にさらに拡大する必要がある。そこで、

$${}^1g^{i^*} = ({}^1s_1^{i^*}, {}^1s_2^{i^*}, \dots, {}^1s_m^{i^*}, \dots, {}^1s_M^{i^*})$$

ただし、 ${}^1s_m^{i^*} \geq {}^0s_m^{i^*} \quad (m=l_{i^*-1})$

なる状態 ${}^1g^{i^*}$ のみをステージ i^* における新たな状態量の候補とすればよい。(Fig. 3 参照)

なお、以上の方法は順番施工による解において氾濫確率の変化しているステージにのみ着目しているが、上記方法により対象とされたステージの施設の組合せが限定されることにより、分析の対象とされたステージ以外においても経路がないとして削減できる状態量が存在することは言うまでもない。

以上の手順で解の改善方向にないと考えられる状態量を削減した後、候補として残った状態のみを対象として DP を適用すれば同時施工を含めた建設手順計画がえられる。また、さらに施工単位を細かく取る必要があれば現在得られている建設手順計画を新たな初期解として上記手順を繰り返すことになる。

5. 建設手順計画の応用

5.1 安全度の変化に対する制約条件の緩和

本研究では、個々の評価地点に対する安全度の変化に対する制約として (5) 式を採用し、各地点の氾濫確率が許容氾濫確率を確保しない間は、氾濫確率が1ステージ前の値より上昇することがあってはならないとして建設手順計画を定式化し考察を加えてきた。したがって、現況の状態において氾濫確率の最大値を与える地点が流域の中流あるいは上流部にある場合、これらの地点の疎通能力を拡大するためには、下流側の地点の整備をかなり高い水準まで進めておく必要があることは容易に想像のできる場所である。ところで、許容氾濫確率は、施設計画を策定する中で設定される将来の最終的な目標であって極めて高い水準に定められているため、計画段階で描かれた治水システムと現実の河川の状態とはかなりの格差があり、予定された治水施設群の建設には非常に長い年月を要するのが実状である。このため、常に最終目標をにらみながら下流から上流へと工事を進めると、建設期間中、既に氾濫確率が許容氾濫確率付近まで低下した部分と、殆ど未整備の部分が画然と二分して存在することになり、未整備の部分は計画最終段階まで常に洪水の危険にさらされることになる。さらに、河川の下流部に対する人口や資産の集中が進み河川沿いの低平地までもが市街地となっている場合には、河川幅の拡張等疎通能力の拡大も困難であることから流域全体の安全度の向上はますます遅れることになる。

そこで、事業の中間的な目標として、氾濫確率 $p_m^{mid} (p_m^0 > p_m^{mid} > p_m^a, p_m^0$: 地点 m の現況での氾濫確率) を設定することを考える。すなわち、最終的には施設計画で保証される許容氾濫確率 p_m^a の達成を目指す、これには非常に長い年月と費用がかかるため、まず、各地点の氾濫確率を p_m^{mid} 以下に抑えることを目標にするといった場合を考える。このとき、制約条件 (5) 式は、全ての地点 m の氾濫確率が p_m^{mid} 以下になるまでは、

$$\begin{aligned} p_m^i &\geq p_m^{i+1} \quad (p_m^i > p_m^{mid} \text{ または } p_m^{i+1} > p_m^{mid} \text{ のとき}) \\ p_m^i &\geq p_m^{i+1} \quad (p_m^i \leq p_m^{mid} \text{ かつ } p_m^{i+1} \leq p_m^{mid} \text{ のとき}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (26)$$

と書き換えられる。 p_m^{mid} の値や個数をどの程度に設定すべきかについては、費用便益的な分析や建設期間全体との調和を考慮しつつ決定されなければならないが、本研究では、中間目標が設定されたことによる解の変化を適用を通じて議論することにする。

また、以上のように考えると、施設計画で保証された許容氾濫確率は、必ずしも最終目標とは言えず、超

長期的な視点からみれば、その後の社会情勢や経済情勢によって更に高い水準の許容氾濫確率が要求されることも有り得る。この様な観点に立てば、現在施設計画で目標とされていた許容氾濫確率も一種の中間目標であるということもできよう。

5.2 建設期間中のダム貯水池操作

治水施設群の完成後のダム操作ルールは既に施設計画において決定されているが、他の施設の整備状況によってダムへの流入量が異なってくるため、建設期間中に完成したダムの操作ルールとして施設計画で決定されたものをそのまま適用することに問題のある場合も考えられる。例えば、ダム下流の河道疎通能力が低い段階では洪水調節開始流量を施設計画で設定した値よりも小さくする必要があろうし、また、ダム上流部の河道の疎通能力が計画されている値よりも低い段階では、より放流率を小さくすることにより洪水調節の効率を上げられる可能性もある。さらに、複数のダムが直列に配置される場合には一方のダムが未完成の間はダムへの流入量が全施設完成後よりも大きく施設計画で決定されたルールでは危険であるといった場合もある。したがって、建設期間が長期に及ぶ場合には、建設期間中の他の施設の整備状況に応じた操作ルールを設定する必要がある。

建設期間中のダム操作ルールの決定は、基本的にはダムの放流率、洪水調節開始流量などといった操作パラメータをも状態変数に組み込んで DP を適用すれば良い。しかし、4. でも考察したように、広域的な治水システムを対象とする場合には、建設予定の施設群の組合せだけでも膨大な数にのぼるため、さらに操作ルールまで含めて DP で求解することは不可能に近い。そこで、施設の建設手順の決定後、さらに解の改善が期待できないかを考えるものとし、操作ルールの決定を次の定式化で行う。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{I+1} \sum_{m=1}^M p_m^i(\alpha^i) \longrightarrow \min. \\ \text{subj. to} & \\ & r_n^i(\alpha^i) \leq r_n^0 \dots\dots\dots (27) \\ & p_m^i(\alpha^i) \leq *p_m^i \quad (m=1, \dots, M, i=1, \dots, I+1) \end{aligned}$$

ここに、 α^i ：ステージ i におけるダムの放流率の組合せ、 r_n^i ：ステージ i におけるダム n のオーバーフロー率、 r_n^0 ：施設計画による放流ルールに基づくオーバーフロー率、 $*p_m^i$ ：建設手順計画の最適解によるステージ i 、地点 m の氾濫確率である。すでに施設の建設順序の決定段階で氾濫確率の地点最大値の最小化が成されていることを考慮し、本段階では、各地点の最大値の総和の最小化を目的関数として設定している。また、制約条件として、建設期間中のダムのオーバーフロー率が施設計画決定時よりも増加してはならないこと、各地点の氾濫確率が既に得られた解よりも悪化してはならないことを課している。なお、(27)のようにダムの操作ルールの組合せのみの最適化であれば、DP 計算で解を求めることが可能である。

6. 適用と考察

6.1 適用流域の概要と治水システムの施設計画

適用の対象とする仮想流域モデルの概要を Fig. 4 に示す。10 個の部分流域と 7 個の評価地点から成る流域にダム建設候補地点 6 箇所および堤防建設地点 7 箇所（堤防は評価地点を対象として建設を考えるものとする）が設定されている。なお、各地点における疎通能力と氾濫確率の現況（施設建設以前）における値を Fig. 4 中に併記している。氾濫確率を算定する際の入力となる豪雨のケース数は 1,000 とした。

さらに、Fig. 4 に示す流域に対して決定された治水施設群の配置・規模計画を Table 1 に示す。配置・規模計画は次の定式化に基づきスクリーニング、シミュレーションの各段階を経て決定したものである⁶⁾。

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N h_n(y_n) \longrightarrow \min. \\ \text{subj. to} & \end{aligned}$$

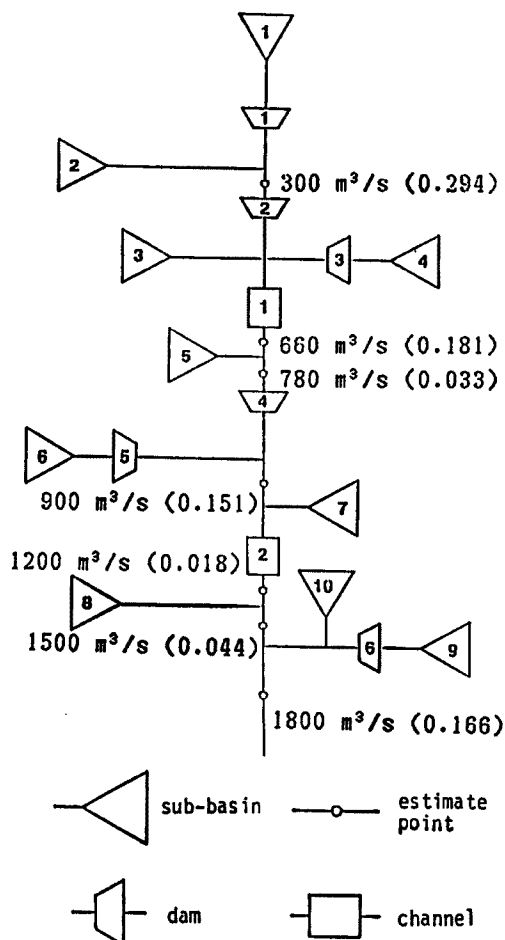


Fig. 4 The applied basin model.

.....(28)

$$p_m = f_m(y_1, \dots, y_N) \leq p_m^* (m=1, \dots, M)$$

ここに、 y_n : 施設 n の規模、 N : 建設候補施設の総数、 $h_n(y_n)$: y_n に対する費用、 p_m : 地点 m の氾濫確率、 M : 評価地点の総数、 f_m : 施設の規模と氾濫確率の関係を表す関数 (実際には流域シミュレーション)、 p_m^* : 地点 m の許容氾濫確率であり、(28) 式は各地点の氾濫確率が許容氾濫確率を満足する条件下での費用の最小化を意味している。本研究では、 $p_m^* = 1/100$ ($m=1, \dots, 7$) と設定した。(28) 式を満足する y_n が建設手順計画における建設終了後の施設の規模 s^{t+1} に相当する。

6.2 氾濫確率算定シミュレーションの効率化

本研究では、時・空間分布構造を保存した形で発生させた1000ケースの豪雨系列について、貯留関数法を用いて施設群を介した後の流況をシミュレートすることにより各地点での氾濫確率を算定する方法をとっている。ところが、建設手順計画の解探索時には施設の組合せ多数に対して氾濫確率を追跡する必要があるため、解決の負担を軽くするためには氾濫確率の算定に要する計算量をできる限り小さくする努力が不可欠である。さらに、治水システムが完成に近づくにつれ入力となる豪雨群の中でも氾濫を惹起する降雨の数が減少していくため、常に全ての豪雨群に対して流況シミュレーションを行うのは非効率である。

そこで、既に完成している施設の規模に応じて明らかに氾濫を起こさないと考えられる豪雨ケースを、入力から外すことにより氾濫確率を算定する労力を軽減することを考える。以下にその手順を示す。

- (1) 先ず、治水施設が何も存在しない状態において、各評価地点の疎通能力が無限大であるとして各豪雨ケース j ($j=1, \dots, J$; J : 豪雨の総数) に対する地点 m 時刻 t の流量 $Q_m^j(t)$ ($m=1, \dots, M$, $t=1, \dots, T$) を求める。
- (2) 次式で定義される $Q_{max\ m}^j$ を求める。

$$Q_{max\ m}^j = \max_t [Q_m^j(t)] \dots\dots\dots (29)$$

- (3) $Q_{max\ m}^j$ は豪雨ケース j によって地点 m が経験し得る最大の流量を表しているから、地点 m の疎通能力 Q_m^a が $Q_{max\ m}^j$ より大きければ豪雨ケース j に対しては地点 m では氾濫が生起しない。したがって、

$$j \in \{j | (Q_1^a \geq Q_{max\ 1}^j) \cap (Q_2^a \geq Q_{max\ 2}^j) \cap \dots \cap (Q_M^a \geq Q_{max\ M}^j)\} \dots\dots\dots (30)$$

なる豪雨ケース j はどの評価地点においても氾濫を生起させないから流況シミュレーションからははずすことができる。

以上の方法を用いれば建設手順計画の解探索時においてステージが進み施設群が完成に近づくにつれシミュレーションからははずすことのできる豪雨の数が増え解探索の労力を軽減することができる。なお、本方法を

Table 1 The optimal site and scale plan of flood inundation facilities

(a) Plan of dam reservoirs

dam	capacity ($\times 10^7 \text{m}^3$)	the discharge to begin dam control	discharging ratio	cost ($\times 10^{10} \text{yen}$)	overflow ratio
1	0.8	150 (m^3/s)	0.1	1.70	0.004
3	1.1	150	0.3	1.79	0.004
4	3.8	500	0.4	2.67	0.001

(b) plan of allowable discharges

reference points	allowable discharge	cost ($\times 10^{10} \text{yen}$)	flood inundation probability
1	2000 (m^3/s)	0.381	0.008
2	2400	0.390	0.004
3	2400	0.363	0.008
4	1600	0.157	0.008
5	1900	0.157	0.005
6	2200	0.157	0.008
7	3300	0.336	0.010

適用することにより、現況 (Fig. 4 参照) においては1000 ケースの豪雨のうち635 ケースを、治水システム完成後 (Table 1 参照) では915ケースをシミュレーションからはずすことができた。

6.3 制約条件に基づく状態量の削減

本節では、建設手順の最適化の予備段階として4.3で述べた方法により、制約条件(5)式を用いた状態量の削減を行う。簡単のために各ステージでの予算及び期間長は一定と仮定するとともに、第一段階の最適化が順番施工を条件として行われることを考慮し、各ステージの予算で建設できる規模を1単位として、施設計画で与えられる各地点の疎通能力をTable 2に示す建設単位に分割して増加させることにする。また、ダムについては、それぞれ建設に要するステージ数を定め、ダム 1:2 ステージ、ダム 3:4 ステージ、ダム 4:9 ステージとする。

以上の条件下で算定した各地点の疎通能力を1単位高めるために必要な下流地点の疎通能力の最低レベル数の一例をTable 3に示す。Table 3(a)はダムが全く完成していない時点での必要規模であり、表中の数字は例えば、地点1の疎通能力を1単位高めるためには地点2～7の疎通能力がすべて少なくとも1単位高められていなければならないことを表している。Table 3(b)はダム1とダム3が完成している状態に対するものである。完成したダムの洪水調節効果により、地点2および4の疎通能力の拡大に必要な下流地点の疎通能力のレベルがダムが全く完成していない時点に比べて少なくてすむことが分かる。

Table 2 Construction units of the flood inundation facilities

levels of allowable discharge	reference points						
	1	2	3	4	5	6	7
0	300	660	780	900	1200	1500	1800
1	900	1260	1380	1600	1900	2200	2550
2	1500	1860	1880				3300
3	2000	2400	2400				

Table 3 The minimum required levels of allowable discharge at the lower reference point to construct an upper dike

(a) in the case that no dam reservoirs are constructed

	upper reference points					
	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1
3			0	0	0	0
4				1	1	1
5					1	0
6						1

(b) in the case that dam reservoir 1 and 3 are constructed

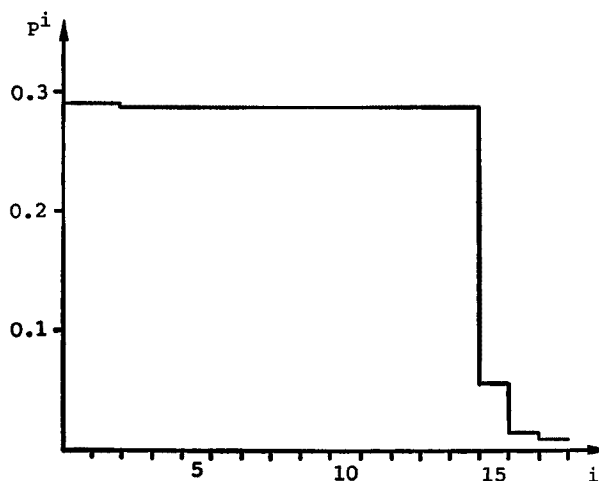
	upper reference points					
	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1
2		1	0	0	0	0
3			0	0	0	0
4				1	1	0
5					1	0
6						1

Table 4 Reduction of the number of states according to the status-quo condition

number of state state variables	stage														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
befor reduction	1	7	25	62	119	185	239	260	239	185	119	62	25	7	1
after reduction	1	3	6	8	9	26	28	26	22	19	17	14	9	4	1

Table 5 The optimal scheduling under the condition that a single unit can be constructed in each stage

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

Fig. 5 The decreasing curve of p^i by the solution shown in Table 5.

以上の分析を各評価地点および疎通能力の各レベルについて行い、各ステージにおける状態量のうち(15)式を満足しない規模の組合せを削減した結果を **Table 4** に示す。費用制約を満足する規模の組合せは1536にも達するが(5)式を満足しないものを予め除くことにより DP で対象とする状態量は193ですむことになり、解探索の労力がかな

り軽減されることが分かる。

6.4 順番施工による解決

6.3 で抽出された状態量を対象として DP 計算を行い、順番施工に限った場合の最適建設手順を求める。なお、通常ダムの計画は治水目的単独で成されることよりも利水、発電といった機能を含め多目的貯水池として行われることが多いことを考え、ダムの建設順序をシナリオとして与え、ダムの建設順序に応じた各地点の疎通能力の拡大順序を最適化することにする。ここでは、ダムの建設を 1, 3, 4 の順序で行うものとしたときの解を Table 5 に、氾濫確率低下曲線を Fig.5 に示す。表中の 1 は当該ステージでその施設を 1 単位建設することを表している。

本適用流域では評価地点 1 の氾濫確率の低下が解決に支配的となり、他の評価地点の疎通能力の拡大順序については同一の目的関数値を与える多数の解が存在した。したがって、これら最適解の間の優劣を判断するための補助的な目的関数として

$$J' = \sum_{i=1}^{I+1} \sum_{m=1}^M p_m^i \rightarrow \min. \quad (31)$$

を設定し、式(3)を最適化する解群のうち、(31)を満足する解を選んでいる。Table 5 から、氾濫確率の最大値を与える地点 1 の疎通能力を拡大するためには、計画されているダムがすべて完成していなければならず、ステージ 9, 10 では疎通能力の拡大が行えず工期が延びるという結果となっていることが分かる。

6.5 同時施工を含む解決

Table 5 に示した順番施工による解を初期解とし、施設の分割幅を 1/2 (従って分割数は 2 倍) にとり、各ステージで 2 地点の同時改修を含めて最適化を行った結果を Table 6 に、対応する p^i の低下曲線を

Table 6 The optimal scheduling including simultaneous construction of plural units of facilities in each stage

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

Fig. 6, 各評価地点の氾濫確率の低下曲線を Fig. 7 に示す。なお、本最適化においても複数の解が存在したため、(31)式により最適解の間で優劣付を行っている。以上の結果から次のような判断が可能である。

- (1) 順番施工に限定した場合、下流への悪影響のためダムがすべて完成するまで着工できなかった地点 1 の疎通能力の拡大が、同時施工を含めることにより、第 7

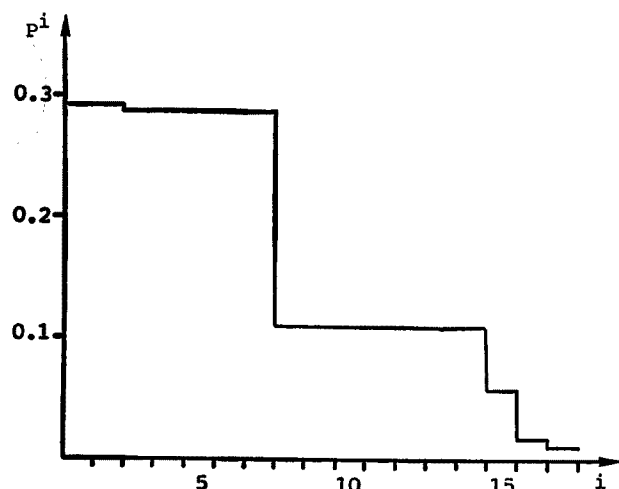


Fig. 6 The decreasing curve of p^i by the solution shown in Table 6.

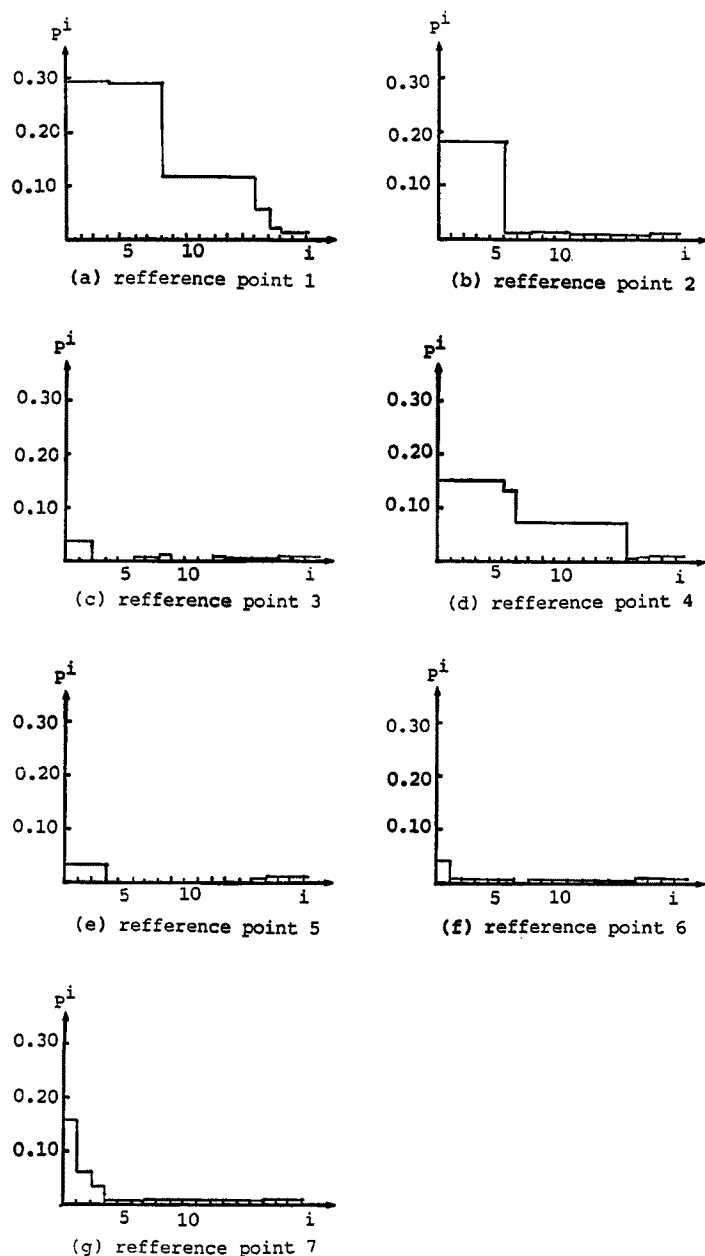


Fig.7 The decreasing curve of flood inundation probability at each reference point by the solution in Table 6.

工を含めた場合にはステージ7と遅れる結果となっている。これは、評価地点4の疎通能力を早い段階で高めるとこの地点の氾濫確率が大きく減少するため、この後評価地点1の疎通能力を高めた際に地点4の氾濫確率が再び増加して制約条件(5)式に抵触し最も氾濫確率の大きい地点1の整備が遅れてしまうことが原因である。したがって地点4の氾濫確率低下曲線に限って考えれば、上流の整備に関する制約を常に1ステージ前の氾濫確率と比較して行う(5)式よりも、例えば、現況の氾濫確率を越えない程度の増加までは認めるというように緩和した方が建設期間全体からみれば有利になる可能性があり、5.2で考察したように制約条件の緩和を考える必要性を示唆している。

ステージで着工できるという結果となっている。これは、分割幅を細かくとったことにより各地点の疎通能力の拡大が下流評価地点の氾濫確率に与える影響が小さくなったこと、さらにステージ7において地点1および4の同時改修を行うことにより地点1の疎通能力の拡大によって地点4の氾濫確率の受ける悪影響が相殺されていることによると考えられる。

(2) 地点1の疎通能力を2単位以上拡大するためには、順番施工による場合と同じくダム群の完成を待つ必要がある。これは、地点1の1単位の疎通能力の拡大が下流の評価地点に与える影響が、他の地点の疎通能力の1単位が下流に及ぼす影響に比較して非常に大きいことを示している。したがって、今後更に分割数を増やして解の改善を行う場合には、地点1のように氾濫確率に与える影響の大きい地点の疎通能力は細かく分割するなど、疎通能力と氾濫確率の応答関係に応じた規模分割が必要である。

(3) 建設期間前半で比較的氾濫確率の大きい評価地点4の疎通能力の拡大は、順番施工による解ではステージ5で着手されているのに対し、同時施

また、本適用例ではダム建設計画にシナリオを与えダム建設計画に応じて各評価地点の疎通能力の拡大計画を最適化するという形をとったが、ダムをも含めて建設手順を最適化する場合にも原理的には DP を適用する際に状態変数としてダム建設の進捗状況あるいは完成時期を追加すればよい。しかし、きめ細かい建設手順計画を策定するためには既に行ってきたように各地点の疎通能力の分割数を増やしながらか解の探索を行わなければならない、最適化の全ての段階にダムの建設順序の最適化をも含めると解を得るためには多大な計算労力を要する。ところで、以上の適用例からもダムの完成が下流評価地点の氾濫確率の変化に与える影響が大きいことが伺えるから、ダムの建設順序が解に与える影響は各地点の疎通能力の分割が比較的粗い段階の解探索でも補足できるであろう。そこで、各ステージでの施設の組合せが少ない順番施工による最適化の段階でダムを含めた建設手順の最適化を行い、ダムについてはそこで決定された建設順序を最適解とし疎通能力の分割を細かくして同時施工をも含めた最適を行う段階では各地点の疎通能力の拡大順序のみを最適化の対象とするという方法が考えられる。

7. 結 語

本研究は多施設・多評価地点系からなる広域的な治水システムを対象とした建設手順計画を、システムの安全度の時間的変化を氾濫確率の低下として捉えるとともに、解探索の効率化に重点をおいて考察したものである。本研究で得られた成果を簡単にまとめておく。

- (1) 治水施設群の整備にともない流域の治水水準が段階的に上昇する様子を氾濫確率の時間的変化という形でとらえ、建設手順計画の定式化を行った。
 - (2) 建設手順計画の解探索にかかる計算労力を軽減し求解を可能とするために 1) 制約条件に基づき実行可能でない状態量を予め削減する段階、2) 順番施工に限定して建設手順の決定を行う段階、3) 順番施工による建設手順を初期解とし、初期解から得られる情報をもとに施設の分割規模をより細かく取りながら複数施設の同時施工をも含めた最適解を探索する段階の 3 段階に分けて最適建設手順に漸近する方法を提案した。
 - (3) 最適化の各段階で複数の最適建設手順が存在する場合に対処するため、補助的な目的関数を導入し、これら最適解間の優劣を判断する基準を示した。
 - (4) 建設手順計画をより一般化するための応用として、各評価地点の安全度の変化に対する制約条件の緩和の可能性について考察を加えた。更に、システムの建設期間中のダム操作ルールを建設手順計画との調和を考慮しつつ決定する方法を定式化した。
- さらに、今後の課題として、
- (6) 本研究では、各ステージの予算を固定的に与えられるものとして最適化を行ったが、今後、ステージ内の予算が計画と異なったり変動した場合に建設手順計画の解がいかなる影響を受けるかを分析する必要がある。
 - (7) 流域の土地利用状況の時間的変化やそれに伴う流出特性の変化など、環境条件の時間軸上の変化により影響を考慮にいたれた策定方法への展開を図る。

等があげられる。

参 考 文 献

- 1) 江藤剛治・室田 明・水野雅光：段階的治水計画について，第25回水理講演会論文集，1981，pp. 279-284.
- 2) Kojiri, T., S. Ikebuchi and T. Takasao: Optimal Planning of Flood Control Systems Based on Screening, Simulation and Sequential Models, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 32,

1982, pp. 209-227.

- 3) 岡田憲夫：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，京都大学防災研究所年報，第28号 B-2, 1985, pp. 253-262.
- 4) 池淵周一・小尻利治・堀 智晴：洪水の時・空間生起確率算定法，土木学会論文集，第369号，1986, pp. 175-184.
- 5) 小尻利治・堀 智晴・池淵周一：スクリーニング段階における治水システムの策定に関する研究，京都大学防災研究所年報，第27号 B-2, 1985, pp. 241-254.
- 6) 池淵周一・小尻利治・堀 智晴：広域的な治水システムの段階的計画決定プロセスに関する研究，京都大学防災研究所年報，第29号 B-2, 1986, pp. 137-156.
- 7) 岸田 隆：治水計画の中間目標と事業実施順位の最適化に関する研究，京都大学学位論文，1985.