

治水施設の着工順位付問題に関する研究 On Construction Scheduling of Flood Control Structures

大阪大学 工学部 正員 室 田 明
近畿大学 理工学部 正員 江 藤 剛 治
機建設技術研究所 正員 栗 田 秀 明

1. 目 的

段階的な河川改修のあり方については古来より、各水系の改修計画を実現する過程で、常に最重要検討課題の一つとして議論され続けてきた。その成果は、河川計画の諸フェーズに個々に反映されてはいるものの、現在にいたるまで、段階的河川改修計画手法として全般的にまとめられたものは示されていない。河川改修計画に関連する諸要素のそれぞれについて深く研究し、技術を高めていくことはもとより重要であるが、それらをバランスよく総合する技術もまた必要である。これが段階改修計画手法を含む、河川計画手法に課された課題である。

近年特に、段階的河川改修計画が重要視されるようになってきた背景の一つを、建設省淀川工事事務所の報告書では次のように説明している（淀川工事事務所・（財）国土開発技術研究センター1981）。「……、安定成長期を迎えたわが国経済において、治水施設整備事業の予算の伸びに大きくを期待できず、当面の計画目標である、工事実施基本計画を完了するにも非常に長年月を要することになる。

このような状況において、河道改修事業を進めて行くには、限られた予算のなかで事業の必要性、優先順位をはっきりと見極めた充分に効率の高い事業を執行していく必要がある。……」

このような要請を背景として、最近この課題に関するいくつかの報告が発表されている。しかしこれらの報告のいずれも、段階的河川改修計画の持つかなり広範な内容のうちの1側面を取り上げているにすぎない。筆者らは、段階的河川改修計画を数種のカテゴリーおよび階層に分類することを試みた（江藤・室田・水野1981）。このうち階層的な見地からは次のような枠組を提示した。

- i 長期計画レベル（治水水準改訂問題）：水系全体の治水水準・質をいかに向上させるかを検討する。
段階改修の見地からは特に、何段階程度で向上させるかを検討する。
- ii 中期計画レベル（治水投資配分問題）：バランスの取れた整備を行うためには、第n段階の工事が完了した時点で、各治水施設それぞれの整備水準がどのようになっているべきかを検討する。これは各治水施設への投資配分問題として定式化される。
- iii 短期計画レベル（着工順位付問題）：第n段階（期）工事の範囲内で、各治水施設の着工優先順位を決定する。

このような分類・階層化には次のようなメリットがある。

- i 問題をバランスよく全般的に把握し、論ずることができる。
- ii 実用性のある数理計画モデルを作ることができる。
- iii 得られる解の最適性・問題点などに関する物理的解釈・検討などが容易になる。

逆に言えば、前記3レベルの問題を単一の数理計画モデルの中に組み込んで定式化することも可能ではあるが、現存の電子計算機を用いてその解を得るには、実用性を損なう程度に粗い離散化を必要とする。また最終的に手にする1組の最適解が、物理的にどのような意味を持っているかについて解釈することも難かしい。

筆者らはこれまで、治水水準改訂問題に関する基礎的検討、治水投資配分問題に関する基本的な考え方を示した。本論文では、治水施設の着工順位付問題について考察する。

2. 概 要

着工順位付問題は通常0-1整数計画法などを用いて定式化し、分枝限定法などを用いて解くことができる。しかしながら治水施設の着工順位付問題においては多くの錯綜する制約が存在するので、数理計画モデルの作成にあたっては、これらに対する十分な配慮が必要である。むしろ多くの制約を用いることにより、解の選択幅を十分絞ることができるならば、限られた数の実行可能解の中から最適解を探索することができる。よって本論文では着工順位付問題に関連する目的関数・制約条件について列挙し、検討を加える。

概要は次のとおりである。

- i 目的関数・制約条件を分類・列挙する。
- ii 制約条件のうち、次の条件について実際的な評価の手順を提示する。「どの治水工事によっても、洪水危険度が、一時的にせよ有意な程度に増加する地点があってはならない。」
- iii これを主要な制約条件として、N川の改修工事着工優先順位を検討した例を示す。
- iv N川の改修計画を実際に担当している河川技術者により示された着工優先順位と、上記の結果を比較検討する。

3. 目的関数

Sorensen らは建設投資に対する国民の要望は次の2種に大別できるとしている (Sorensen and Jackson 1968)、i Essential Needs、ii Desirable Needs。実際の要望を上記のいずれかに分類することは困難であるが、一応この考え方に従うものとすれば、建設投資の目的は主として、Essential Needsに込めることであると考えられる。

計画目的は、計画の種別にかかわらず、次のように要約することができる。

- i 国民の要望の達成度の総計を最大化する。
- ii 国民の要望の達成度を平等化する。

治水問題では次のような変数を最大・最小化、あるいは平等化する。

- a 洪水被害額 b 溢流量 c 洪水生起回数あるいは確率。

著者らは、1水系の治水計画においては、水系内の洪水被害額の総量を最小化することと、水系内の各点の溢流量・洪水被害額を平等化することが、ほぼ同値となることを指摘した(室田・江藤1981)。たとえば分合流点を有しない単一河道の疎通能は、下流に向って増大することはない(疎通能定理)、通常の条件下では総被害額を最小化するためには、上下流を通じて疎通能を一定としなければならないことなどを理論的に証明した。この意味での平等化は、治水投資配分問題の解として具体化される。よって着工順位付問題では、評価の基準となる変数(上記のa~cなど)の、水系全体としての総量を最小(大)化することを目的関数とする。

4. 制約条件

制約条件として表-1のようなものが考えられる。

量的制約とは、ある量の上下限が指定される場合で、等式制約もこれに含める。順序制約はその特別な場合であるが、着工順位付問題では特に重要となるので、別途分類する。極端な場合十分多くの順序制約が存在すれば、その問題はPERT系の問題として定式化することができる。同様な理由から、全ての制約を時間制約とそれ以外の制約に分類する。

PERT系の問題をLPで解く場合は、順序制約を時間軸上の量的制約の形で表すことはよく知られている。

以上の目的関数・制約条件のもとで図-1のフローに従ってシステム解析が行われる。「評価」・「代替案の選択」をくり

表-1 着工順位付問題の制約の分類

- | | |
|---|--|
| a | 経済的制約：年間投資額の上限 |
| b | 社会的制約：治水安全度のバランス、工事による治水上の悪影響などを避ける |
| c | 制度的・行政的制約：用地、本川・支川の担当行政組織のちがひ、他の河川利用目的との整合 |
| d | 環境：生物、景観、文化財、工事中の環境問題 |
| e | 物理的：土砂移動に関連した制約 |
| f | その他 |

- | | |
|------|------|
| 順序制約 | 時間制約 |
| 量的制約 | 他の制約 |

返して最適解を探索する。

また表-1に示した制約条件を補完することにより、実際の計画における制約のチェック・リストとして利用することもできる。

5. 治水工事の洪水危険度に対する影響分析

本論文では特に次の制約を取り上げる。「どの治水工事によっても、一時的にせよ洪水危険度が有意な程度に増加する地点があるてはならない。」

前川・高橋・安藤は神田川の中小洪水災害について、経年的に見て洪水被害の生起地点が下流側に移動してきたこと、その原因としては、旧水田地帯の市街化・住宅地化の他に、河川改修・下水道の普及の影響が大きかったことを指摘している（図-2：前川・高橋・安藤 1981）。

この問題が複雑になるのは、全ての改修区間の改修が、他の改修区間の洪水災害の原因になりうると同時に、全ての区間が、洪水災害の評価規準点となるからである。逆に、より上位の計画では、評価規準点あるいは基準値をただ1点、あるいはただ数点に限定することにより解析を容易にしている。

基本的には、ある工事を行った場合と行わない場合のそれぞれに対して水理（水文・水理・氾らん）解析を行い、各河道区間の水理量（水位・流量・溢流量）を比較すれば、各治水工事が各地点の洪水危険度におよぼす望ましい影響、悪影響を評価することができる。縦軸に工事を行う各工事単位、横軸に影響を受ける地点を取って、影響のしかたを行列表示すれば、以後の解析に便利である。ここに各改修区間、貯水池、遊水地などの工事において、各段階において一括して行う一連の工事を工事単位と呼ぶ。また悪影響を表示したものを悪影響行列、望ましい影響を表示したものを改善行列、悪影響あるいは望ましい影響が検出されるとき、これを表示したものを狭義の影響行列と呼ぶ。

影響行列は表-2の諸条件に依存して異なったものになる。表-2について説明する。

小降雨に対しては、ある工事を行っても行わなくても洪水とはならない場合でも、ある程度以上の大降雨に対しては異なる結果が生じる場合もある。逆に中小の降雨に対してのみ差が生じる場合もある。

ある河道区間で洪水が生起するかどうかは、他の河道区間の疎通能力や、貯水池、遊水地などの整備水準に強く左右される。

洪水が生起する可能性のある河道区間の堤防の構造、高水位と堤外地の地盤高の関係なども主要な要因となる。

影響があるかどうかを判定する基準となる判定基準によっても、当然影響行列は変わる。この場合判定基準は、d の構造物の強度、特に堤防の強度や、氾らん原の重要度を十分考慮して決める必要がある。

b～g の条件が設定されると、種々の降雨波形に対してそれぞれ影響行列（悪影響行列、改善行列、影響行列）を計算する。

これらの影響行列を次の手順で総合化する。

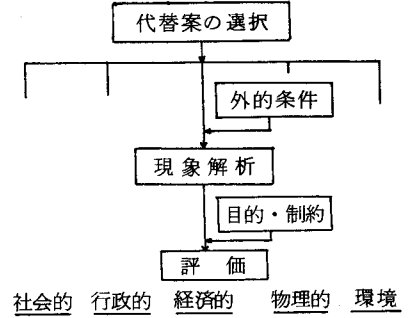


図-1 評価の手順

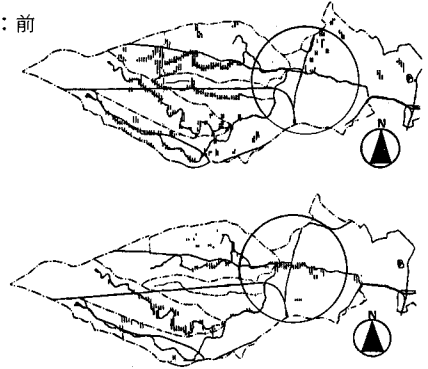


図-2 神田川の中小洪水災害
（前川・高橋・安藤：S56年
年講II部P.654より引用
上：S36～S49 下：S50～S53

表-2 影響行列に影響を与える因子

- a 降雨波形
- b 他の治水施設の整備水準
- c 工事単位の決め方
- d 治水施設、特に堤防の構造・強度
- e 影響度評価の判定基準（感度）
- f 氾らん原の重要度
- g その他

i 悪影響行列については、各要素を0-1変数表示し、各降雨波形に対して得られた行列をブール算で加算する。

ii 改善行列については、通常の加法で加算する。各降雨波形の生起確率を重みとする平均でもよい。

悪影響行列については、工事により、有意な程度の治水上の悪影響が絶対生じてはならないという考え方を反映したものである。改善行列については、改善の程度は大きい方が望ましいという考え方を反映したものである。

既に完工状態にある工事単位の影響を調べる場合は、その工事を行っていないと仮定した場合と、完工状態に対して水理解析を行うことにより、近似的に影響度を評価することができる。

得られた悪影響行列は、電子計算機による最適解探索時の制約条件として使用できる。

この他、影響行列は次に述べるように、治水計画上で非常に有効な情報となる。影響行列をISM (Interpretive System Modelling) などを用いて単純化し、解釈を加えることにより、工事による各治水施設、河道区間の水理量の影響関係に考察を加えることが容易となる。特に結果を図的に表示することにより、直観的な理解、判断を助ける。

以上の手順を表-3、図-3に示す。

表-3について補足する。

第n期(段階)工事完了時の各治水施設の整備水準は、治水投資配分問題により決定される。何段階で工事を行うかは治水水準改訂問題として取り扱われる。これにより工事単位もおおむね決められる。

判定基準はある程度恣意的に決めざるをえない。

降雨波形については、通常の治水計画と同様に、実績降雨波形、数種の確率に対する引伸し実績降雨波形、同じく数種の確率に対する中央集中型合成降雨波形などを用いるのが簡便である。

6. 影響分析の例

6. 1 条件

前節で提示した手法をN川の改修計画に適用した。河道の概形を図-4に示す。

作成した10年確率24時間降雨波形と、その降雨強度式を図-5、図-6に示す。同様の降雨波形を20年、50年、100年、200年確率に対して作成した。さらに実績既往最大降雨波形を用いた。

膨大な回数の水理計算を行うために、水理計算には不等流計算法を用いた。時間ステップは1時間とし、各時間ごとに不等流計算を行った。河道貯留効果、流出遅れ、合流効果などにより、不定流と不等流の計算結果には、

表-3 影響度分析の予備解析

- 各施設・河道区間に対して
- a 第n段階(期)工事完了時の各治水施設の整備水準の設定
 - b 工事単位の設定
 - c 判定基準(感度)の設定
 - d 降雨波形の設定

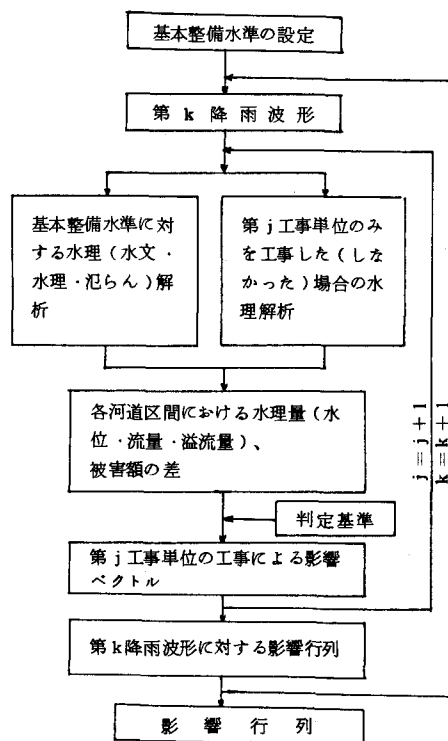


図-3 影響行列作成の手順

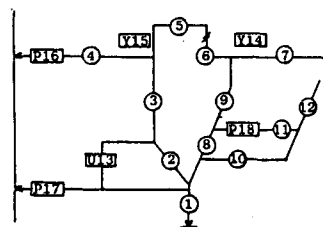


図-4 N川治水計画の概要

○:河道、P:ポンプ場、Y:遊水地
U:運河(河道)

かなり大きな差異を生ずる。しかしながら、不等流計算に入力する降雨波形をあらかじめ2時間移動平均して、このような波形平滑化効果を考慮すれば、不等流計算結果は不定流のそれにほぼ一致した。表-4に不等流と不定流によって計算された、各河道区間の総溢流量を比較して示している。

表-5に各工事単位を示している。

本例では最適解の探索は行っていない。影響関係の解析を主目的とした。よってある特定の基本整備水準に対して影響行列を作成するのではなく、表-6のような4種の基本整備水準を仮定し、それらに対する解析を総合して(各降雨波形に対する総合と同じ手順)、平均的あるいは代表的な影響行列を作成した。

流況により河道⑥の流向は逆転する。左(⑤の方向)に流れる場合を順流、右(⑦の方向)に流れる場合を逆流と呼ぶ。順流では④～⑤の河道と ⑥～⑦の河道はループ状をなすが、今回の水理計算では若干問題を生じた。逆流では、不等流計算を用いるかぎり、この2系列の河道は分断された形となり、実質上、通常の樹枝状の河道網となる。よって以下では主として逆流の場合の解析結果を示す。

治水工事による、洪水危険度への影響の有無の判定基準としては次の2基準を用いた。

- i 判定基準Ⅰ：溢流を生じる区間では、区間の総溢流量が±10%以上変化する場合、影響ありとする。
- ii 判定基準Ⅱ：溢流を生じない区間では、最高水位が堤防の天端下1m以内の水位にあり、かつ10cm以上の変化を生じるとき、影響ありとする。

この場合、堤体の構造・材料などについては考慮しなかった。後述のごとく、これが現場技術者の判断と、本解析結果の差異の一つの原因となった。

表-5 工事単位(工事の分割)

S：浚渫 G：護岸 K：掘削
 U：疎通能力を上げる。
 P：ポンプ能力を上げる。
 Y：容量、越流堤長を上げる。
 0：現況、1～3：各段階
 例 Y15：Y15の遊水池を3段階で整備する。よって0～3の4整備段階について検討する。

工区	工 事 単 位	工区	工 事 単 位
1	S1(0,1)	10	S10(0,1,2)
2	G2(0,1),S2(0,1,2)	11	S11(0,1,2)
3	G3(0,1),S3(0,1,2)	12	G12(0,1),S12(0,1)
4	G4(0,1)	13	U13(0,1,2)
5	K5(0,1),S5(0,1)	14	Y14(0,1,2,3)
6	K6(0,1),S6(0,1)	15	Y15(0,1,2,3)
7	K7(0,1)	16	P16(0,1,2,3)
8	S8(0,1,2)	17	P17(0,1)
9	S9(0,1,2)	18	P18(0,1)

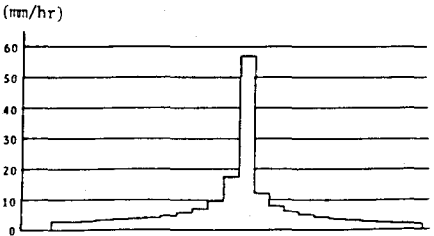


図-5 10年確率降雨波形
 図-6 同降雨強度曲線

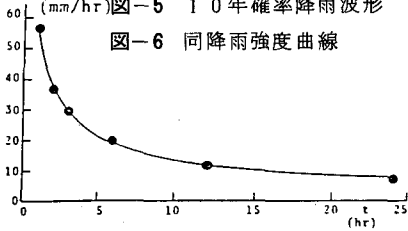


表-4 不等流と不定流の区間
 総溢流量の比較(m³)

(50年確率雨量)

区 間	不 定 流	不 等 流
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	1.25	1.27
5	1.92	2.61
6	0.38	0.10
7	0.51	0.47
8	0	0
9	0.07	0.26
10	0	0
11	0	0
12	0	0.38
計	4.13×10^6	5.09×10^6

6. 2 解析結果

図-7は実績既往最大降雨に対する悪影響行列の例を示す。この図は既にISMにより単純化した行列と、その階層図を示している。一般的に次の傾向がある。

- i 工事によりその点の水位に影響が出る場合は、上流に影響がおよぶ。
- ii 溢流量が変化するときは、主として下流に向けて影響がおよぶ。
- iii ポンプ場、遊水地、貯水池などの施設は通常改善効果のみを持つ。ただし水系内の他河道区間にポンプ排水されるような場合は別である。

図-7、図-4(図-8)より悪影響のおよび方がよくわかる。これを制約として最適解を求めることは、図的には次のように表現することができる。「悪影響階層構造図の、シンクと孤立点の中から、改善効果の最も高い工事を行う。次にその工事を取り除いた階層構造図をもとにして、同様の選択を行う。」図-8はこうして定めた概略の着工順序を示している。

図-9に実際にN川の改修計画を担当している現場技術者の示した望ましいと思われる改修順序を示している。

図-10は同じ3名の技術者の直感により影響行列を作って、それをもとにして決めた改修順序である。これらの図の比較より次のようなことがわかる。

- i 図-10では下流から確実に工事を進める。いわば「建前」あるいは常識的な答になっている。
- ii 図-8と図-9は傾向的には一致する。図-8で最下流河道の工事が先行するのは、この区間の堤防の前面は鋼矢板製で非常に強固であり、現場技術者としてはほとんど危険を感じていないのに、本解析における水位に関する判定基準では、悪影響があると判定してしまったことが1因となっている。
- iii 図-9では、⑤、⑩、⑪の工事が先行することになっているが、これらは現在災害の生じやすい区間である。現場サイドとしてはどうしても、そのような区間の工事を先行させる。

以上、5、6節に示した手法は、改善の余地はあるが、実用に耐えうる手法であると考えられる。

7. おわりに

本研究は古川、水野両氏(共に当時学生、現建設省)の協力のもとに進められた。記して謝意を表する。また本研究の遂行に御協力いただいた関係各方面の方々に深甚の謝意を表する。

表-6 基本整備水準

1. 現況：現況河道、昭和54年度末には、G2、G3、K5、K6の工事が終了することになっているため、この工事が終わった状態。
2. 途中1：S1、G2、S2(I)、G3、S3(I)、K5、K6、S8(I)、S9(I)、S10(I)、S11(I)、U13(I)、Y14(I)、Y15(I)、P16、P17、P18が終了した状態、すなわち各施設の1段階目の工事が終了した状態。
3. 途中2：治水施設(河道改修を除く)の完成した状態。
4. 計画：第3次全体計画の完成状態。

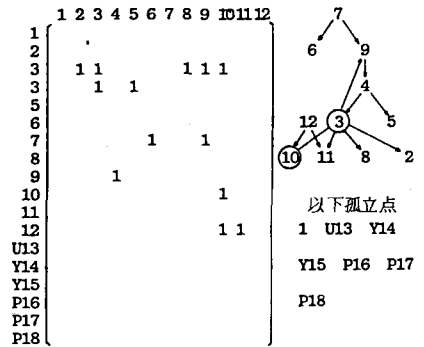


図-7 悪影響行列(逆流) 階層構造図

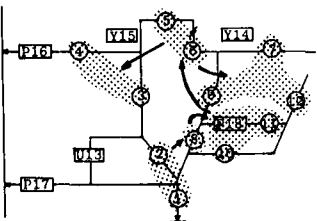


図-8 影響行列による概略の順位
施設の順位略(以下同じ)

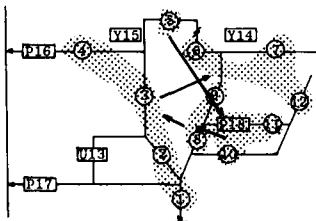


図-9 現場技術者による順位

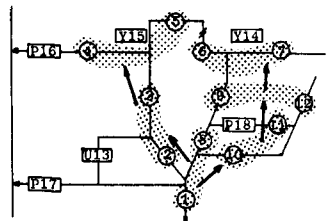


図-10 現場技術者の直観による
影響行列に基づく順位