

ダム工事工程計画システム化におけるハイブリッド型モデルの適用に関する実験的研究 ーリフトスケジューリングをとおしてー

A Experimental Study on Development of Hybrid Scheduling Model for Large-scale Dam Construction Project

春名 攻*、小林 隆志**、竹林 弘晃***

By Mamoru HARUNA, Takashi KOBAYASHI, Hiroaki TAKEBAYASHI

In this study a new type lift-scheduling model for setting-up concrete in dam construction process efficiently is developed as following steps. At the first step it is made clear a problem-structure about actual lift-scheduling. At the second step this study discusses about relations between balance of scales and capacities, which machines and facilities for producing, transporting and setting-up concrete give, and other machines and facilities including temporary facilities. At the third step a practical simulation for setting-up concrete is implemented, methodology of lift-scheduling which can solve various problems to select and to arrange construction machines and facilities efficiently is studied. At the fourth step it is intended to consider both the method to solve construction planning problems that is very complicated and the way to make decisions utilizing advanced technique such as hybrid scheduling model. Planning model developed in this study satisfies a good balance between rationality in modeling phenomenon and objective function. A practical study is discussed by applying to construction planning of the actual gravity-style concrete dam project.

1. はじめに

建設工事において、周辺環境に悪影響を及ぼすことなく安全に、迅速に、経済的に、高品質な構造物を構築するために、新技術の開発促進・普及とともに

キーワード：ダム工事、工程計画

ハイブリッド型工程計画モデル、

* 正員 工博 立命館大学理工学部 教授

(〒603 京都市北区等寺院北町56-1)

** 学生員 立命館大学大学院 理工学研究科

(〒603 京都市北区等寺院北町56-1)

*** 学生員 立命館大学大学院 理工学研究科

(〒603 京都市北区等寺院北町56-1)

に生産活動の合理化・高度化のためのマネジメント技術の確立が強く求められているといえる。

近年、一現場当りの現場技術者・作業者は減少し、労働者不足は顕在化し深刻な問題となっており、施工現場での管理項目や管理基準は複雑・多岐化の傾向にある。また、専門技術者としての現場職員による適切な判断を下すことが困難であり、これを支援するニーズも高まってきている。

このような状況において、近年人工知能(AI: Artificial Intelligence)の適用事例が増加しており、有効な対応策として考えられている。その中において、エキスパートシステムも最も有効なものの1つとして実用化されている。また、エキスパー

トシステムを構築するにあたっては、従来のデータベースに対して知識ベースに関する認識が高まっており、知識ベースの構築が最も重要な課題であると考えられている。つまり、必要可能な限り工程計画作成の自動化を図るためには、熟練技術者の判断機構を明確にし、より高度化された意思決定支援システムを構築する必要がある。

そこで、本研究においては、現場マネジメント業務の中でも工程計画策定業務が工事全体に及ぼす影響が大きく、重要な位置を占めるものと考え、実際の工事施工に好ましくかつリアリティのある工程計画代替案を合理的・効率的にデザインするためのシステムモデルの開発を研究対象として取り上げることとした。

2. システム開発の背景

これまでに、工程計画システム化の研究は数多くなされてきているが、その内容としては、計画作成の基本的手順と工事の階層性という対象問題の基本構造を明確化するまでに留まっている場合が多い。そして、実際には計画案を策定することができるほど詳細かつ具体的な計画化のプロセスが明らかにされていないものが多いと考えられる。

この理由としては、制約条件が多種多様であること、計画案の作成に統一化された手法が存在しないこと、代替案の数が膨大であること、意志決定が主観的・経験的に行われていること、評価方法が定性的手段に依存していること、作成された計画案は各々の計画者の技量によって相異なること、等々の特徴が挙げられ、これらのことは、一般製造業とは異なる建設生産システム

【STEP. 1】 現行業務の状況把握
問題点の明確化（改善方針の要点整理） ダム工事の概要（工事施工の手順） ダム設備計画の基本（施工特性）
【STEP. 2】 開発業務システム案の作成 （機能イメージレベル）
従来システムとの相違点 知識データベースシステムの位置づけ （テキスト的知識、経験則的知識、直観的知識）
【STEP. 3】 システムの概略設計
リフトスケジュールに関する検討 ダム工程計画プロセスの把握
【STEP. 4】 システムの詳細設計
実働性などの具体的検討
【STEP. 5】 運用実験、評価
本システムの有用性を検証するためにモデル工事を作成し適用を図る。

図-1 本研究におけるシステム化のプロセス



図2 ダム工事の工程とその内容

ムの特異性によるものとする。

そこで、本研究においては、図-1に示すようなシステム化のプロセスにしたがって検討を進めるにあたって、工程計画案作成プロセスの各段階に介入する重要で相異なるさまざまな要因に対処するために、これらの専門的知識を整理して蓄える知識データベースに関する検討を行った。また、施工計画に関する最適な情報を提供することを支援するようなハイブリッド型工程計画システムの開発を目指して、非常に複雑な問題解決方法と高度な意志決定方法に関して検討を行った。さらに、このような考え方を適用した具体的なシステム開発の対象としては、重力式コンクリートダム工事を設定し実証的検討を行うこととした。

3. システム構築のコンセプト

(1) ダム建設工事の概要

ダム本体の施工手順は、まず川の切り替えを行ってダムサイトをドライにして、基礎掘削を行う。一方、原石山の表土を剥ぎ原石を採取する。採取した原石を骨材プラントに運び、骨材を製造する。骨材をコンクリートプラントに送り、別途運ばれてきたセメントと併せてコンクリートを製造する。練りあがったコンクリートをダムサイトに運搬して打ち込む。この間発生した土石等は土捨て場に搬送する。また、これら全ての工事施工に必要な動力源の供給施設も確保しなければならない。動力は主として電力と重油・軽油である。さらに、そのような輸送設備そのものの工事のために必要な資機材・動力の運搬にも労力を要するものとなる。

図-2には、ダム工事の一般的な工程とその内容を示している。一般的には、本体工事、管理設備、仮設備、および補償工事に大別され、その内容は、多種多様にわたる工事や作業の集合体であり、他の工事とほとんど無関係に実施できるものもあるが、大部分の工事はある工事が進まなければ次工事を施工できない関係にある。そのうえ、その工事が完了しなければ、他工事に重大な支障を与えるなど、全体工事を構成する各工事要素が相互に影響を及ぼしながら複雑に絡み合った体系をなしている。

また、準備工、施工設備、施工管理、安全管理施

設といった仮設備は、その後の施工設備工事やダム本体工事の能率的な施工に影響を及ぼし、工程・工費・品質とは不可分な関係にあるものと考えられる。

(2) ダム工事工程計画システム化の方針

ダム工事工程計画案の作成プロセスを図-3に示す。まず始めに、全体計画（基本工程）を作成することになるが、その内容としては、次のようである。すなわち、設計図書・特記仕様書等に基づいて、期間の割当、構造物の形状・規模、投入資源の種類・数量、ダムサイトの地理的条件、そして環境保全・社会的条件などといった予め設定された固定的な要因に関する検討を行う。ついで、当該工事の施工にあたっての留意事項及び具体的な問題点の対応策、改善方法並びに新施工法といった問題解決の方策に関して、各項目毎に全体の枠組みと方針を決定し、

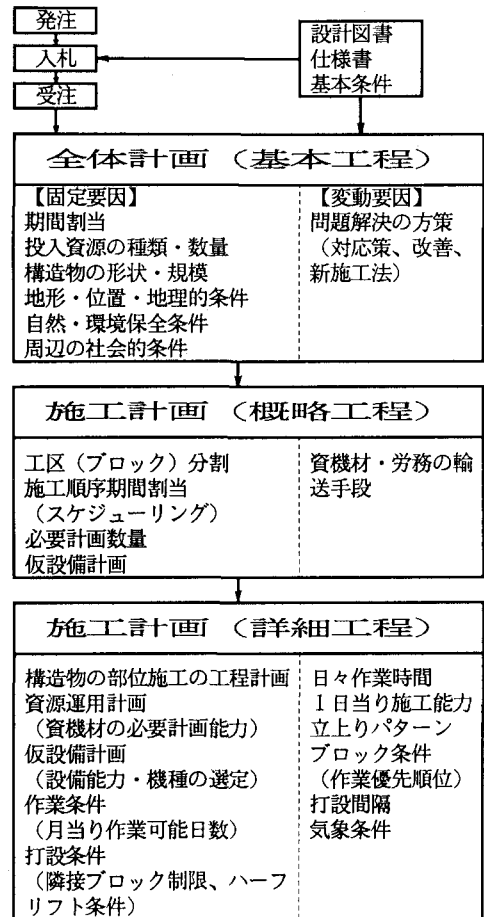


図-3 ダム工事プロセスにおける工程計画の内容

技術情報の収集を行うなど工事の施工特性上の問題点や様々な不確実性を伴う変動的な要因に対しても検討を行っておく必要がある。特に、後者の場合においては、ダム工事の大規模化、要求されるコンクリート打設量の多様化、そして、谷の形状が急峻であるとかダムの断面形状の拡幅といったダムサイトの地形、地質条件の悪化などに起因するコンクリート打設範囲の広域化を検討したり、コンクリート運搬機械の選択肢の増加といった問題に対して、工事全体の要求品質や施工条件と照らし合わせて、矛盾・無理・無駄・斑を低減するべく検討を行う必要がある。

つぎに、施工計画（概略工程）作成段階においては、工区分割やスケジューリング、資機材の必要計画数量の算出、主要仮設備計画、それに資機材・労務の輸送手段の

検討を行うことが必要である。これに沿って、構造物の部位施工の工程計画・スケジューリングを行うこととなる。さらに、資源や工期などの制約条件をもとに単位作業の日程を設定するといった詳細工程計画の作成を行うこととなる。そして、このようにして作成された計画代替案を総合的に評価し、問題点が生じた部分に対して逐次再検討を図りスケジュールの改善を行うのである。また、部分的な改善で

問題解決が不可能な場合には、当初の概略工程計画作成段階にフィードバックし、必要に応じて再度計画代替案の修正を行う場合も存在すると考えられる。

このような工程計画の作成もしくは修正プロセスにおいて、実際に問題点の改善を図ったり、工程の修正をおこなうにあたっては、熟練技術者による経験やノウハウをもとにヒューリスティックな方法によって検討が進められている。

つまり、現在のダム工事計画を作成するにあたっては、様々な問題が複雑に絡んでおり、また、自由度が大きいため、計画者の意思決定構造における判断基準、評価要因に対する重要性は高まっている。さらに、現状においては、熟練者の経験・知識にもとづいて計画案の作成を行っているために、複数の計画代替案をリアルタイムに検討することは困難であ

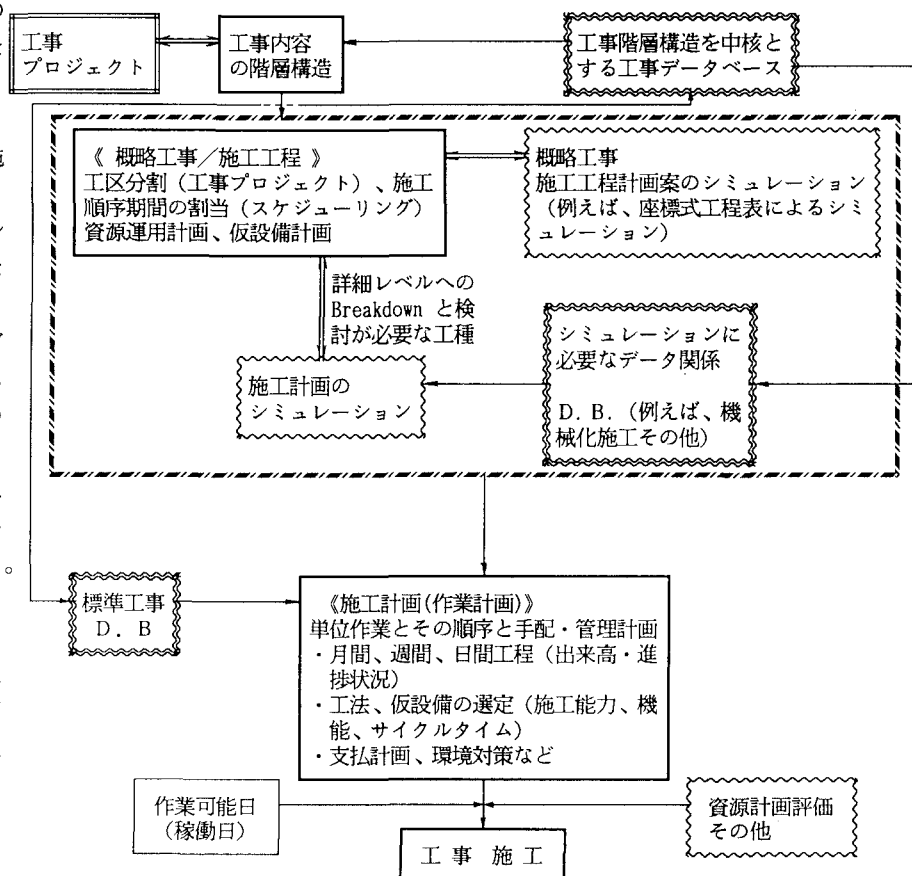


図-4 工程計画作成におけるシステム化の概念フレーム

また、計画案の最適性を追求するにあたっては、経済性を考慮することは計画案の評価基準として非常に重要である。また、仮設備の配置や選定、組み合わせといった問題も工事計画を作成する上で非常に大きな比重を占め、工事費用にも大きな影響を与えるものと考えられることから、仮設備の配置（設備の組合せ）を逐次変化させることにより、最適化を行っていく方法を考えることとした。

つまり、本研究の目的は、「いかにしてダム工事施工プロセスの精度を落とさずに工事施工を再現し、工事がスムーズに流れ、かつ最も経済性の高いダム工事基本計画案を作成できるかを追求する」こととした。なお、図-4にこのようなシステム化の概念フレームを示している。

(1) ハイブリッド型工程計画システムの概要

工程計画の策定において、計画代替案作成モデルは次のような要件を満たす必要があると考える。

第二に、計画代替案の検討にあたって、分析目的に適合した精度で現象を表現する、つまり『現象合理性』を満足させる必要がある。

第三に、効率よくモデル分析が行えること、つまり、『操作性』という要件をも満足させることが望ましいと考える。

このように、工程計画問題における計画代替案の

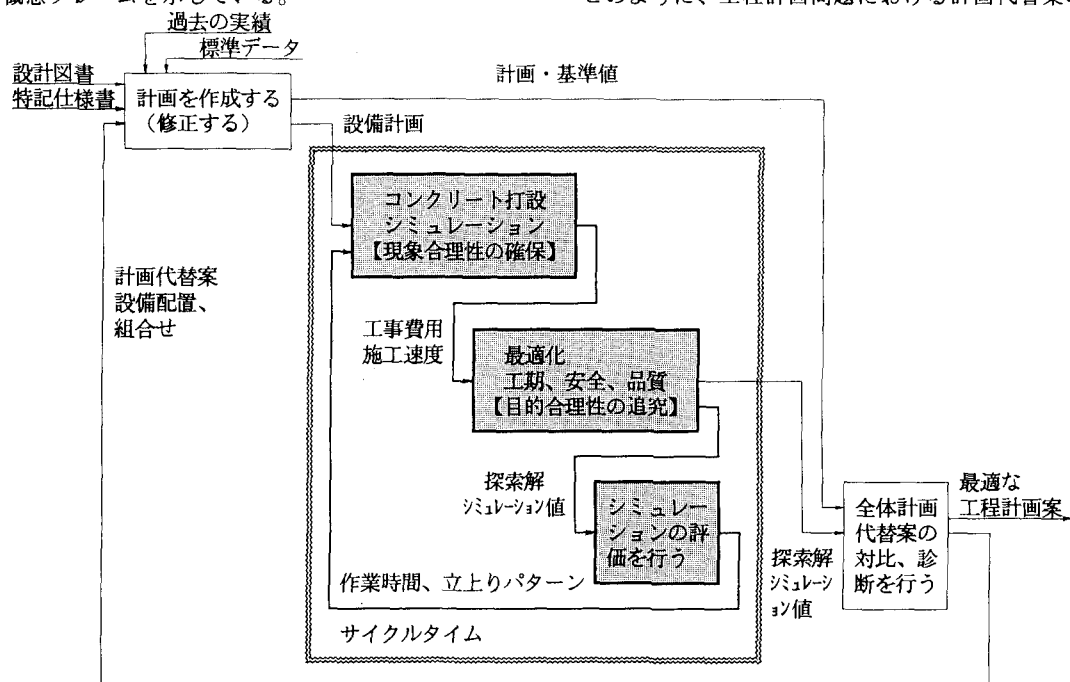
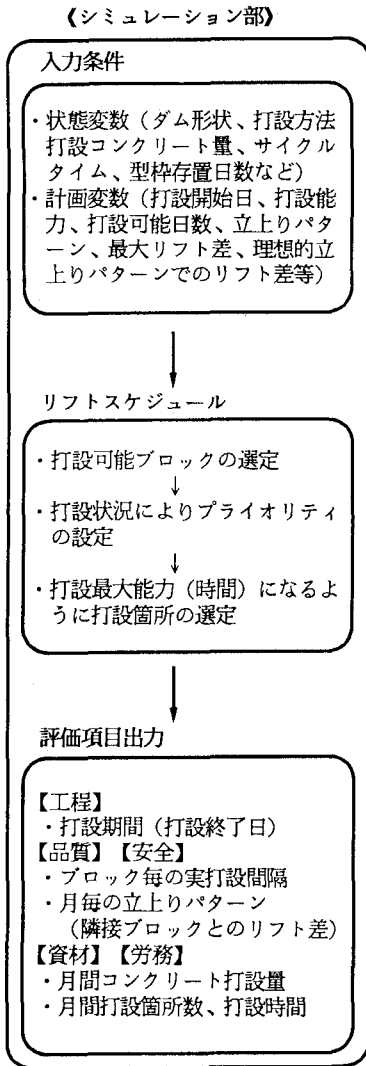


図-5 ハイブリッド型工程計画モデルの構成

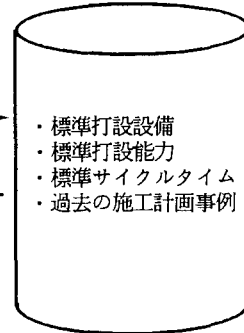
設計に関しては、上述の3つの要件のバランスを保ちながら分析を実行することが望ましい。したがって、本研究においては、現象合理性の確保を目的として施工過程の再現を行うシミュレーションモデルと、計画目的の追求を行う最適性の検討とを混成させた、『ハイブリッド型工程計画モデル』の開発をおこなった。

本モデルでは、まず、設計図書や特記仕様書に基づいて設備計画代替案の作成を行い、その段階における照会情報としては、過去の実績や標準データを用

入力することとなる。つぎに、このようにして作成された代替案をコンクリート打設シミュレーションへの入力情報としてシミュレーションを実行する。出力結果としては、シミュレーションの評価要因である目的関数値や制約条件値（各作業の開始時刻・終了時刻、施工速度や工事費用）を出力する。さらに、そのシミュレーションモデルの出力結果（評価要因の内容）にもとづき制約条件を満たす範囲内で新たに改善された解（作業時間、施工能力、立上りパターン）を求める。そして、この新しい解を再びシミュレーションモデルに入力する。また、全体計画レベルでの計画代替案の対比、診断を行い、新たに改善を加えた解（設備の配置、組合せ）をもとにして再度計画代替案を修正するという一連の動作を繰り返し、最適解（最も望ましい計画代替案）を算出しようとするものである。



〔知識データベース部〕



（２）シミュレーションモデルの構成

コンクリートダム工事では、設計段階において示された複数の目的地で分割されたブロックについて、岩着から天端までの打設順序を設定することが必要である。リフトスケジューリングは、このブ

ックに対する合理的な打設順序づけを行うシミュレーションプログラムである。図-6において、シミュレーションモデルの構成を示している。このプログラムでは、状態変数として取扱う入力データ（ダム形状、打設方式、打設コンクリート量、サイクルタイム、型枠存置日数等）と、計画変数として取扱う入力データ（打設開始日、打設能力、打設可能日数、立上りパターン、最大リフト差、理想的な立上りパターンでのリフト差等）を設定している。

そして、ダム本堤の打設作業とその並行作業（エプロン部の打設と型枠の移動を取り上げ、付帯構造物の設置作業とグラウト注入作業については、サイクルタイムとしてモデル化を行っている）の両者をプログラム内に組み込まれた種々の制約条件（半川締切りや洪水吐けの設定、リフト差の制限、打設能

図-6 シミュレーションモデルの構成

力の制限、打設可能日数の制限など)を考慮しながらモデル内でシミュレートして、日々の打設箇所を設定し最終工期を予測するものである。

(3) シミュレーションの評価・検討

コンクリートダム の 堤 体 の 設 備 計 画 を 立 案 す る に あ た っ て は、コンクリートダムの施工特性(ダムサイト付近での材料調達、加工、維持管理が可能であること、あるいは、各種放流設備の据付けなど並行作業との適切なバランスを図ること。)を念頭において、経済性、労働力、資機材調達状況を総合的に勘案しながら、これと矛盾しない方向で適切な計画を作成する必要がある。

また、コンクリートダムの施工にあたっては、堤体コンクリートの品質を確保するために、コンクリート製造設備、コンクリート運搬設備、骨材製造設備など固定機械を主体とした工事用仮設備が不可欠であり、これらの工事用仮設備を工事全体との関連において適切な規模で選定し、全工期を通じて確実に稼働させることが堤体の品質、工事の経済性および工期を左右するものと考えられる。

そこで、本研究において開発したハイブリッド型工程計画システムを稼働させるにあたって、コンクリート打設計画シミュレーションの実行のプロセスを図-7に示している。まず、あらかじめ設定された約定工期をもとに目標工期を満足させるように標準設備を仮定する。つぎに、最大ブロックを1日で打設することができそうなコンクリート打設能力を仮定するが、その際には堤体積に対応する設備の打設能力・規模の過去の前例を参照する。続いて、温度規制、リフト高さ制限を考慮しながら打設間隔を決定し、掘削工、仮設備工などの並行作業との関連を考慮しながら打設開始時期を決定する。そして、仮定した各設備組み合わせに対してリフトスケジュールを作成する。その結果として、日・月間最大コンクリート打設量が算出される。以上のようにして作成した各代替案に対して経済比較を行い、設備規模を決定し、最終リフト

スケジュールをとりまとめる。

このような一連のコンクリート打設計画作成のプロセスにおいては、施工設備の種類・規模・配置、地形、工事の規模・工程・工法を十分に考慮して決定されている。さらに、施工設備の規模は、工程計画と互いに密接な関係をもつことから、相互の密接なフィードバックにより結論が得られるものであり、一義的に決定されるものではない。したがって、工程計画を作成する上で基本となるのは、地形、地質、ダムの設計から算出される工事量となる。また、堤体コンクリートの施工量については、ダムサイトの作業特性に合わせて分析し、要求される施工量の合理的な施工法とこれにふさわしい設備計画を立案する必要があるものと考えられる。

以上のようなことから、最終的なリフトスケジュー

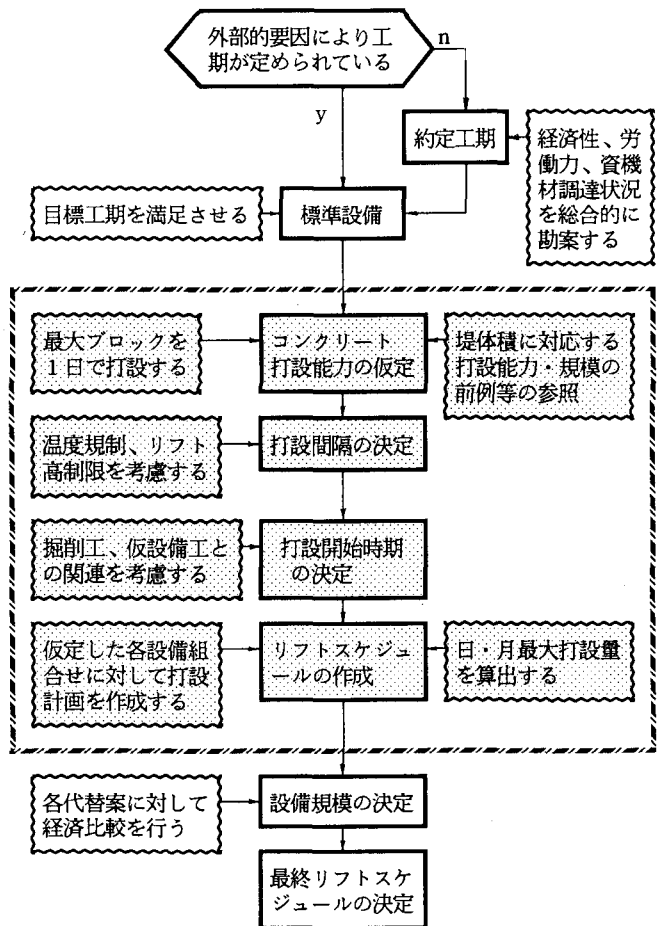


図-7 コンクリート打設計画シミュレーションのプロセス

ールを決定するにあたっては、ダム工事全体の投資効果を考慮した合理性、経済性を追求すべきであり、工事全体の要求品質、施工条件等を満足しているか、関連別途工事や気象条件などの制約条件を満たしながら予定工期内で工事施工が終了したか、予定工事費用内で工事施工を行うことができたかなどといった項目に対して適切な評価・判断を下し、必要ならば逐次計画代替案の修正を行い、他の計画代替案を適用して再度評価を行うこととした。また、必要に応じてコンクリートの配合、リフト高、ブロック割など設計面及び工期を長くするなど工程面との調整を図る必要があると考える。なお、図-8に最適化のための判断フローを示している。

5. おわりに

本研究をとおして、重力式コンクリートダム工事への適用を通じて、コンクリート打設計画シミュレーションモデルと最適性の評価・検討をおこなう2つのフェーズの長所を併せもった「ハイブリッド型工程計画システム」の開発を行うことにより、工程計画の代替案作成にあたって必要とされる「現象合理性」、「目的合理性」、「操作性」の確保が可能となった。

また、計画作成段階に介在する不確実性、計画の自由度などに関して、よりリアリティのある意志決

定が可能なものになったと考えられる。さらに、人工知能(AI)を施工計画システムに導入することによって、人間とコンピュータの問題解決方法にみられる違いを少なくし、コンピュータであっても人間の行っているような問題解決が行えることになると考える。

今後の課題としては、AI技術を導入することによって、企業の組織や人間に内在する知識を顕在化し、蓄積し、共有化し、利用可能なように知識ベース化を図り、集約された情報の知的内容を質的に高めた知識集約型の工程計画システム化に関する検討を加えていきたいと考えている。

なお、本システムの実際工事への適用に関する実証的検討については、紙面の関係上ここでは記述できなかったため、本論文発表時に説明を行う。

最後に、本研究を行うにあたり、貴重な資料の提供をはじめ適切なご助言をいただいた、(株)奥村組本社電算機センターの北角哲氏、五十嵐善一氏、また、同技術本部の坂史朗氏に対して、厚く感謝の意を表する次第である。

《参考文献》

- 1)池田将明、関原康成、和久昭正：工程管理システムの現場適用に関する一考察-海上橋梁下部工事を例として-、第10回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集1992.12
- 2)建設省、土木研究所、(社)日本建設機械化協会：ICカードによる施工情報システムの開発、官民連帯共同研究報告書、1993.3
- 3)岡衛、五十嵐善一、市原義久：シールド施工管理エキスパートシステムの開発、第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、1991.11
- 4)中村靖治：ダムのできるまでⅢ 施工計画編(コンクリートダム、フィルダム)、1993.1
- 5)堀和夫：ダム施工法、1978.5
- 6)ダム技術センター：ダム技術増刊 NO.1、1985.1
- 7)Wright, Wiggins, Jain, Kim (Eds.) : Expert Systems in Environmental Planning, 1993

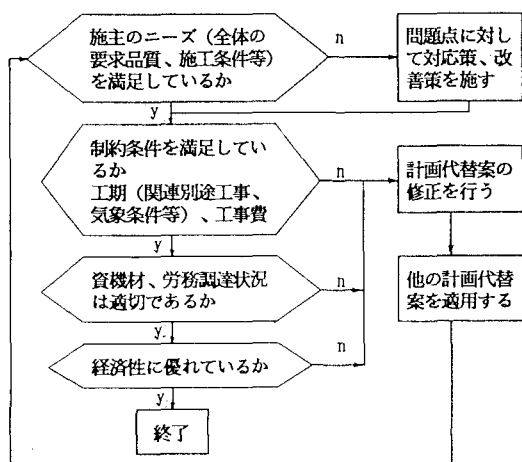


図-8 最適化のための判断フロー