

ダム工事におけるハイブリッド型工程計画 モデルの適用に関する実験的研究

—コンクリートダム工事を対象として—

A experimental study on developoment for Scheduling system of dam construction
project by Hybrid model

立命館大学理工学部 春名 攻*
立命館大学大学院 小林 隆志**
立命館大学大学院 ○竹林 弘晃**

By Mamoru HARUNA, Takashi KOBAYASHI, Hiroaki TAKEBAYASHI

ダム建設プロジェクトは、効果的な水資源の確保や治水対策や発電など多目的な目標の早期実現を目指して積極的に推進することが重要である。また、限られた社会資本のもとでの効率的なダム建設の施工法を確立し、これまでに努力が払われてきた新技術の開発の促進・普及だけでなく生産活動の合理化・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。

そこで、本研究では、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た。工程計画作成プロセスの各段階に介在する様々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と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、非常に複雑な問題の解決方法と高度な意思決定方法に関して検討を行うこととした。

【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

1. はじめに

我が国における建設産業は、投資額からみると決して欠くことのできない基幹産業といえる位置を占めているが、実施段階へ移行すると他産業に比較して近代化が立ち遅れているのが実状といえる。本研究は、このような状況の中で建設工事における合理化を阻んでいるとみられる問題点や課題を抽出し、その問題点を解決するための実現化方策について提言することを目指しておこなうこととした。

これまでに本研究グループでは、現場マネジメン

ト業務の中核として位置付けられる工程計画業務に着目するとともに、システムズアプローチの中で計画者の経験を有効に活用するためのヒューリスティックアプローチによる計画代替案策定の方法論の開発と、この方法論を支援するための情報システムの開発をおこなってきた。しかしながら、計画代替案を作成するにあたっては、計画者による判断を多分に伴うために、最適化を追求するためには、この部分の自動化をおこない、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と考えた。

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られることから、実際の工事施工に好ましくかつリアリティのある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行うこととした。

* 正 員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)

** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(同上)

2. システム開発の必要性

これまでに、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、新技術の開発の促進・普及に対しては多大な努力が払われてきた。しかしながら、工事のもう一つの側面である施工計画・管理という面からみると、工事の施工法や管理方法に関するマネジメントが主として熟練技術者の過去の経験や勘にもとづいて行われているというのが実状である。つまり、工程計画のシステム化にあたっては、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おり、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に計画化のプロセスが明らかにされていないものと考えられる。

この理由としては、制約条件が多様多様であること、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、意思決定が主観的・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の特異性によるものと考えられる。

【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 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

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在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思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. ハイブリッド型工程計画モデルの特徴と過去の適用事例

（1）ハイブリッド型工程計画モデルの特徴

工程計画を策定する際において、計画代替案設計モデルは、次のような要件を満足させる必要があると考える。

第1に、問題を解決するために設定した目的に対して実行可能な計画代替案集合を規定することができ、その集合の中でも最も望ましく目的にかなった計画代替案を合理的に設計することができること、つまり、「目的合理性」を満足させる必要がある。

第2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できること、つまり、「現象合理性」を満足させる必要がある。

第3に、分析を効率よく行えるようなモデルであること、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。

このように工程計画における計画代替案の設計に関しては、上述の3つの要件のバランスを保ちながら分析を進めることが望ましい。しかし、これまでに開発されてきた工程計画モデルは、望ましい計画代替案を設計するという目的を達成するために満足すべき3つの要件である「現象合理性」・「目的合理性」・「操作性」に対して一長一短がある。

そこで、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」を構築することにより以上に述べた課題を解決することとする。

(2) 過去の適用事例

昨年度、本研究グループでは、ハイブリッド型工程計画モデルの特徴を生かし、山岳トンネル工事を対象として、次のような研究を行なった。この研究で構築したモデルの内容は、「まず、シミュレーションモデルに投入機械の組合せの計画代替案を入力し、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。次に、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）にもとづき最適化モデル（工事費用最小化モデル）によって、制約条件を満たす範囲内で新たに改善された解（投入機械の組合せ）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。」という一連の動作を解の変化がなくなるまで繰り返し、最適解（最も望ましい投入機械の組合せの計画代替案）に到達しようとするものである。このモデルを用いることにより、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」の確保が可能となるとともに、対象事例によっては、よりリアリティの向上を期待できることとなった。さらに、本モデルを施工計画・管理システムに導入することにより、システムの自動化をはじめとした高度化に発展していくことができると考える。

よって、本研究では、ダム工事においても、以上に述べた考え方にに基づき、ハイブリッド型工程計画モデルの特徴を生かし、システムの構築を行なうことによって、より望ましいダム工事工程計画が行なえるのではないかと考える。

(3) 山岳トンネル工事とコンクリートダム工事の比較

トンネルは、地山条件が設計に与える影響が大きい線形構造物である。そして、山岳トンネル工事は、トンネルの中でも最も広く施工されている工事であり、掘削と支保構造物との構築を繰り返して、トンネルを完成させるものである。よって、工程計画を策定する際には、掘削機械や運搬機械といった投入機械の選定、組合せが工程計画に大きく影響するといった特徴をもっている。

一方、ダム工事は、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、他の工事とは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。よって、工程計画を策定する際には、バーチャープラントやコンクリート打設運搬設備などといった仮設備の配置や選定、組合せが工程計画に大きく影響するという特徴

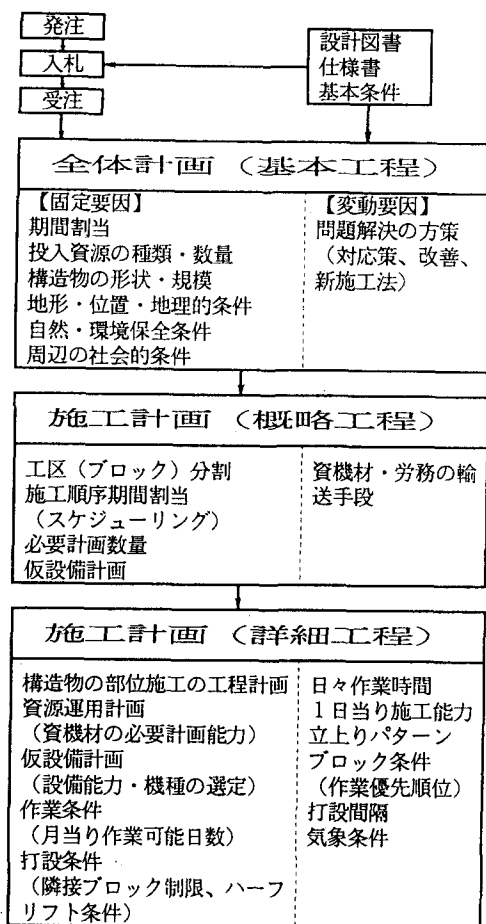


図-2 ダム工事プロセスにおける工程計画の内容

をもっている。

以上のことから、工種的には全く異なる種類の工事であるが、両工事ともに大型で高価な機械を用いて施工するため、投入する機械の選定、組合せにより、工程計画の良否が大きく変動すると考える。

4. システム構築のコンセプト

ダム工事工程計画案の作成プロセスを図-2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おこなう。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、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おこなう必要がある。

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、さまざまな問題が複雑に絡んでおり、また自由度が大きいので、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、熟練技術者の経験・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り、計画代替案の最適性を保証するような工程計画モデルの開発は依然として遅れているものと考えられる。

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（設備の組み合わせ）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。

そこで、仮設備の配置や選定、組み合わせといった問題を効率的に解決しながらリフトスケジュールを決定するために、実行可能性を確保するためのコンクリート打設シミュレーションと、最適性を追求した評価を混成させた、ハイブリッド型モデルを開発することとした。

つまり、本研究においては、ダム工事の中でも重要な位置を占め、中核的存在であるコンクリート打設工事に関して、概略工程レベルでの計画全体を通じての整合性を確保し、現実に応用可能な妥当解を確実に獲得することができ、また、特に設備計画を検討する上でコンクリート打設計画を合理的・効率的にスケジューリングすることを目指すものとした。すなわち、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計画案を作成できるかを追究する」こととした。

5. システムの構築

(1) 知識データベースシステムの基本構造

一般に、問題解決は対象のモデル化とモデルに基づく求解手法の適用から構成されている。実際の問

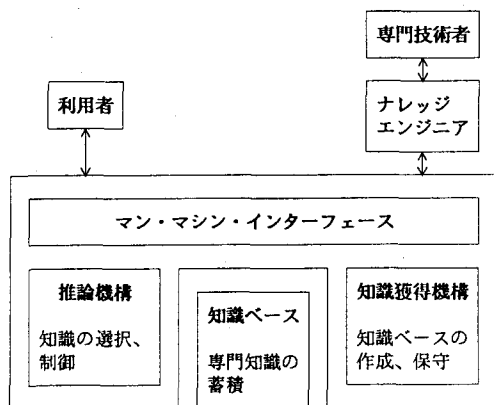


図-3 知識データベースシステムの構成

題は、対象の数理解モデル化が困難な場合や数理解モデルが存在しても数理的な解法が見あたらない悪構造の場合も多く、その結果、判断業務をはじめとする本質的な問題解決はマン・マシンのシステムの人間の側に委ねられていたと考えられる。対象モデルの説明には仕様書などが、また、求解には経験・ノウハウが活用されている。これら非数理解モデルの記号知識群を知識ベースとして構成し、記号推論機能によって問題解決に役立てることがAIの基本的役割と考えられる。

知識データベースシステムは、人間の知識をコンピュータに蓄積し、これを利用して問題解決を行うシステム化技術でありAI手法の中では最も実用化が進展している分野といえる。特に、対象分野を1つの専門分野に限定することにより専門技術者とはほぼ同等の働きを実現することが可能となったことからエキスパートシステムは有用な手段と考えられる。

従来型のシステムでは、問題の特性や解決方法、また各段階で必要となる処理手続きなど、問題解決に必要とされる知識をFORTRANなどのプログラム言語で一体化して記述することになる。これに

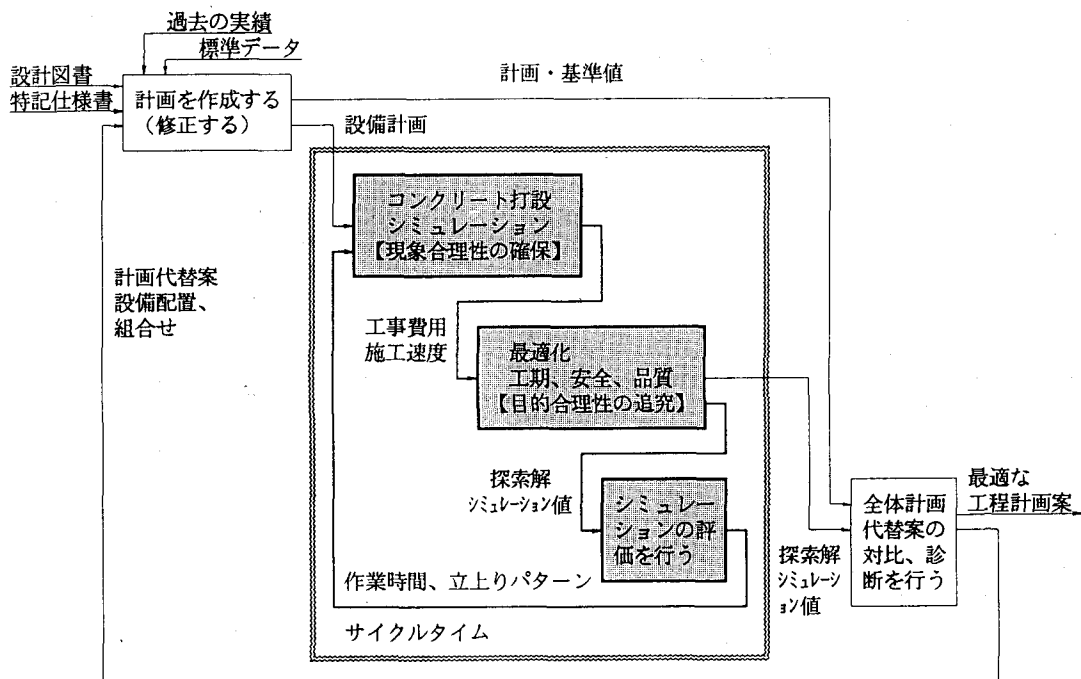


図-4 ハイブリッド型工程計画モデルの構成

対して、本システムにおいては、問題解決のための知識を知識ベースに蓄えて、汎用的な問題解決機構である推論機構においては、その知識に基づいた推論を図ることによって、問題解決が実行されることとなる。また、知識獲得機構においては、知識ベースに対して専門的知識を登録・保守する機能を有している。推論を行う場合、あるいは知識ベースの構築、保守を行う場合に、推論機構、知識獲得機構とシステム関与者をリンクするのがマン・マシン・インターフェイスである。なお、図-3においては知識ベースシステムの構成を示している。

(2) ハイブリッド型ダム工事工程計画システムの概要

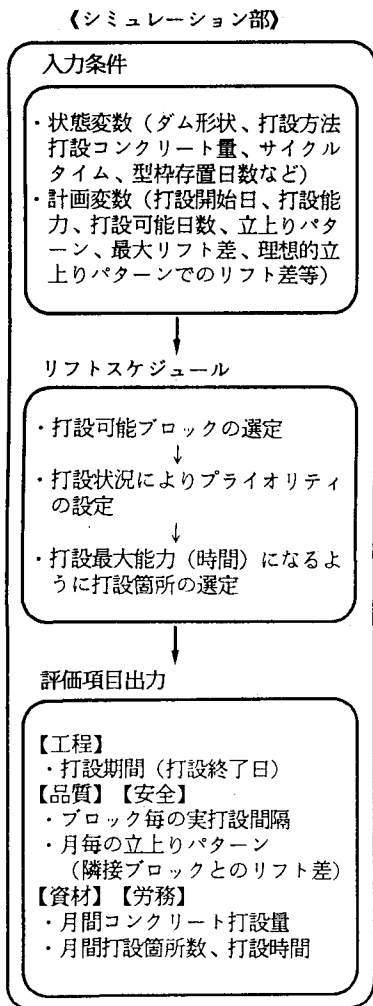
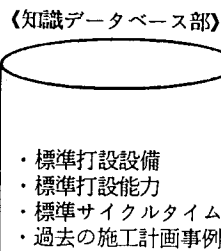


図-5 シミュレーションモデルの構成

本研究において構築したハイブリッド型工程計画モデルの構成を図-4に示す。このモデルは、コンクリート打設計画シミュレーションと最適化の2つのフェーズから構成されており、関与情報としては基本工程レベルの設備計画情報となる。

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を作成する。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。

(3) 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、このブロ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-5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、型枠存置日数など）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、立上がりパターン、最大リフト差、理想的な立上がりパターンでのリフト差など）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（エブ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。

（４）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-6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るよ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ルを決定するにあたっては、ダム工事全体の投資

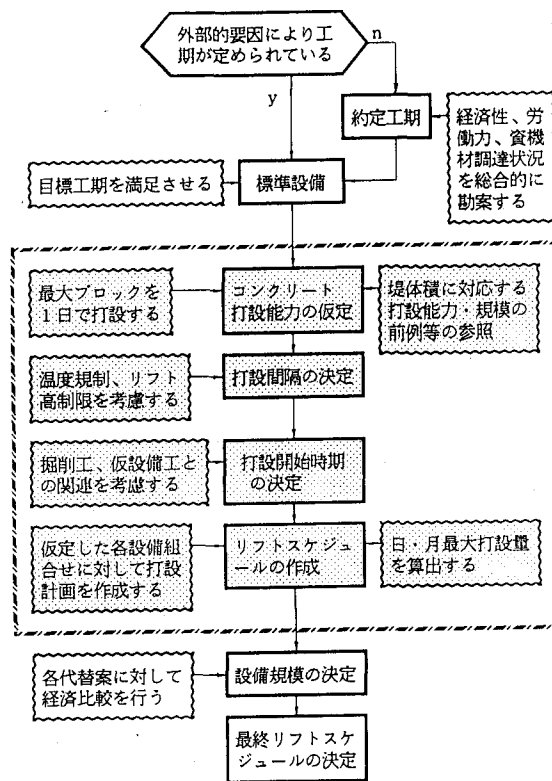


図-6 コンクリート打設計画シミュレーションのプロセス

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とりなど工程面との調整を図る必要があると考える。なお、図-7に最適化のための判断フローを示している。

6. おわりに

本研究をととして、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。

一方、ハイブリッド型モデルの有効性をトンネル工事だけでなく、コンクリートダム工事においても実証することができ、適用範囲の拡大がなされたといえる。

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、利用可能の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。

また、大規模土工事をはじめとする他工事への適用を行なうことにより、さらなる本モデルの妥当性の検討を行なっていくことが必要である。

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こととする。

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)興村組本社電算機センターの北角哲所長、ならびに、五十嵐善一氏、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)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
- 2)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
- 3)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
- 4)堀和夫：ダム施工法，1978.5
- 5)Wright, Wiggins, Jain, Kim (Eds.)：Expert Systems in Environmental Planning, 1993

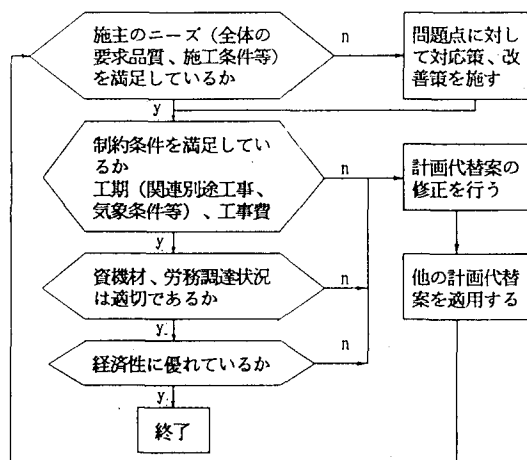


図-7 最適化のための判断フロー