

立命館大学 正員 春名 攻
 大阪府 正員○辻井 裕
 立命館大学大学院 学生員 竹林 弘晃

1. はじめに

本研究グループでは、現場マネジメント業務の中心に位置づ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、この方法を支援するための情報システムの開発を行ってきた²⁾。さらに、工事施工の不確実性に対しての計画・実施のRealityを確保するために、施工シミュレーションを活用した工程計画案の策定プロセスを提案してきた³⁾。

しかし、これらの方法によって計画代替案を作成しても、そこにはどうしても計画者の判断が数多く含まれることとなるため、最適化を目指すためには、この部分の自動化を行いシステムの高度化を行っていく必要があると考えた。

そこで、本研究においては、代替案設計モデルとして、施工現象の再現を行なうシミュレーションモデルと、計画目的を追求し最適な（合目的で実行可能な）計画代替案を求める最適化モデルを混成させた「ハイブリッド型工程計画モデル」の開発を行うこととした。

2. ハイブリッド型工程計画モデルの要件とモデルの概要

工程計画の策定において、合理的で説得力のある計画代替案を、合理的・効率的に設計していくことは大変重要であり、その計画代替案設計モデルは、次のような要件を満足させなければならないといわれている¹⁾。

まず、第1に、問題を解決させ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ることが重要である。次いで、その集合の中で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」を満足させなければならない。

第2に、計画代替案の検討にあたって、分析目的に適した精度で現象を表現できること、つまり、「現象合理性」を満足させなければならない。

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、工程計画問題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が、このために本研究では、現象合理性の確保を目的として施工過程の再現を行なうシミュレーションモデルと、計画目的の追求を行なう数理計画モデルである最適化モデルとを混成して、「ハイブリッド型工程計画モデル」を作成することを目指した。

ここで本モデルは、図-1に示すようなモデル構成となっている。すなわち、
 『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

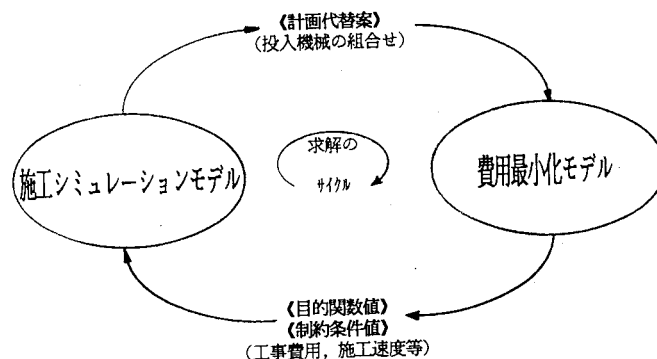


図-1 ハイブリッド型工程計画モデルの構成

(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繰り返しながら最適解(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。

3. ハイブリッド型工程計画モデルの具体的内容

a) シミュレーションモデルの構成

ハイブリッド型工程計画モデルを用いて計画代替案を設計する場合、本モデルの動作に起因して多数回のシミュレーション実験を繰り返す必要がある。したがって、本モデルが計画者にとって望ましい操作性を有するためには、本モデルで構成されるシミュレーションモデルは、要求される精度の範囲内で、以下の要件を満足させる必要がある。すなわち、

① 施工過程の諸現象を合理的に再現すること、

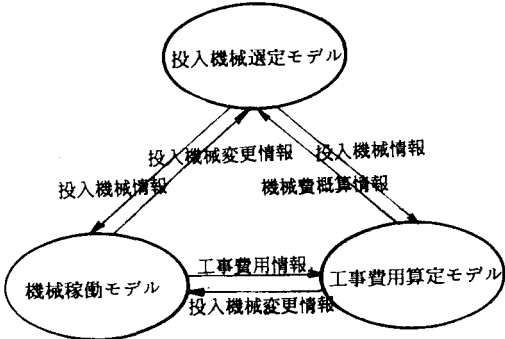


図-2 施工シミュレーションモデルの構成

表-1 数理計画モデルの内容

与件	工種作業間の技術的施工順序
評価の方法	工事費用の最小化
パラメータ	ブロック分割、ブロック間の施工順序
計画変数	施工速度
制約条件(1)	工期
制約条件(2)	施工速度の変更可変範囲 施工間隔(安全性、施工性の確保)

② 入出力の関係が確定的であり、かつ計画代替案が比較的簡単な数量として表現でき、把握が可能なこと、

③ 比較的計算時間の短いシミュレーションモデルであること。

そこで、上記①～③の条件を総合的に勘案して、シミュレーションモデルを図-2に示すように構成した。

ここで、このモデルの一連の動作を示すと以下のようである。すなわち、投入機械選定モデルにおいて、投入機械の組合せの検討を行い、考えられるすべての投入機械の組合せパターンを作成する。また、機械稼働モデルにおいては、掘削工程と覆工工程を対象として、設定された機械情報をもとにして、イベントシーケンス型のモンテカルロ・シミュレーション言語であるGPSSによって構築されたモデルによって投入機械の稼働状況のシミュレーションを行なう。さらに、工事費用算定モデルにおいては、工事費用の算定を積み上げ的去に行い、費用関数を直接費・間接費・固定費別に算定する。これら一連の流れにもとづいて各作業の開始時刻・終了時刻、施工速度、工事費用および費用関数の算定を行なう。

b) 数理計画モデルの構成

本ハイブリッド型工程計画モデルにおいては、目的関数値や制約条件値をシミュレーションモデルの出力値としてのみ把握できる。また工程計画問題は、作業の開始時刻や終了時刻、費用等の制約条件付き問題となる可能性が大きい。このため最適化モデルで用いる最適化手法については、以下のような要件を満足する方法でなければならない。

- ① 関数形が明かでない問題に対応できること、
- ② 制約条件を考慮できること、
- ③ シミュレーションモデルへのアクセス回数ができるだけ少なくなるように配慮されていること。

そこで、本研究においては、このモデルを制約条件付き非線形最適化問題として定式化を行なうこととした。ここでは、工事費用の最小化を図るために表-1に示す内容をもった計画モデル(工事費用最小化モデル)を開発した。なお、モデルの定式化は、表-2に示される通りである。ここで、本モデルで用いる操作変数は工種作業 v_i ($i \in V_1$) の開始時刻 t_i と施工速度の関数で表現される所要時間 d_i で

ある。また、目的関数は、直接費用 $f(\alpha_i)$ と間接費用 $f(\beta)$ 、一定費用 $f(\gamma)$ の和の最小化である。

4. 実証的検討

ハイブリッド型工程計画モデルを用いて実際の工程計画問題を検討する際には、計算量は飛躍的に大きくなり問題も複雑化する。そこで、効率的で、信頼性の高い計画代替案の設計方法を構築するために、例題を用いて本モデルの運用方法に関する検討を行なうこととする。ここで検討する例題は、実際的な問題とあまりにもかけ離れすぎている、その運用方法の妥当性を欠くことになる可能性が大きい。しかし、あまりにも複雑な問題を検討していくことも、工事特有の個別条件が大きければモデルの汎用性を

表-2 数理計画モデルの定式化

目的関数	$C = \sum_i \sum_j f(\alpha_i) + f(\beta) + f(\gamma) \rightarrow \min$	
制約条件	$A_i^+ \leq a_i^+ \leq A_i^-$	施工速度の制約
	$t_i^+ \geq 0 \quad (t_i^+ \in V_i)$ $-t_i^+ - d_i^+ + t_j^+ \geq 0 \quad (P v_i^+ v_j^+ = 1 \text{ のとき})$ $-t_i^+ - d_i^+ + t_j^+ \geq 0 \quad (v_i^+ \in V_i)$ $d_i^+ = \frac{q_i^+}{a_i^+} \quad (v_i^+ \in V_i)$ $\quad \quad \quad \quad \quad (v_i^+ \in V_2)$ $P = \text{const}$	スケジューリングの制約
記号の定義	施工ブロック $k \ (k = 1, \dots, K)$ での工程 v_i^+ v_i^+ の集合 V $\begin{cases} V_1: \text{実作業の工程} \\ V_2: \text{時間間隔確保のための工程} \end{cases}$ 作業の順序関係 P $\begin{cases} P^+: \text{技術的順序関係} \\ P^*: \text{管理的順序関係} \end{cases}$ $P v_i^+ v_j^+ (\in P) = 1: v_i^+ \text{ は } v_j^+ \text{ の先行作業}$ 作業 $v_i^+ (\in V_1)$ の施工数量 q_i^+ 施工速度 $a_i^+ \ (A_i^+ \leq a_i^+ \leq A_i^-)$ 作業 $v_i^+ (\in V_1)$ の施工所要時間 $d_i^+ = \begin{cases} q_i^+ / a_i^+ \quad (v_i^+ \in V_1) \\ d_i^{+*} (= \text{const}) \quad (v_i^+ \in V_2) \end{cases}$ 作業 $v_i^+ (\in V_1)$ の開始時刻 t_i^+ 工事期間 t	

表-3 対象工事の概要

工事名称	鉄道トンネル工事 (斜坑部, 複線部, 単線部に分かれる)
制約工期	4年2ヶ月 (暦日工程)
総工事費用	221,300万円
施工延長	2,175.0m (最盛期の切羽2ヶ所)
地質区分	I _N , I _N (特), II _N , II _N (特) (軟岩中心)
施工法	NATM
掘削方式	機械 (自由断面掘削機を使用)
掘削工法	全断面掘削 (一部ショートベンチ or ミニベンチ)
ずり出し方式	複線部・斜坑部: タイヤ 単線部: レール

欠くことになってしまう。
そこで、本研究においては、「平成4年度版 土木工事積算基準マニュアル」に積算事例として掲載されている山岳トンネル工事をモデル分析の対象として取り上げることとした。この工事の概要は、文献4)に記載されている通りであるが、施工延長が807.2mあり、地山区分は道路公団方式でB〜D3に分類されている。施工法は、発破工法でベンチカット工法を採用しており、ずり出し方式はタイヤ工法である。積算のために策定された工程計画案を初期案としてこのときの工期 480日、総工事費用 134,800万円を制約条件として、検討を行うこととした。

ここで行なう検討は、シミュレーションモデルの出力結果として得られる費用関数の設定方法と最適化モデルの解法についてである。(ここでの検討内容は、膨大なものとなるため、詳細については講演時に述べることにする。)

次に、本研究においては、表-3に示す内容の工事に対して実証的検討を行なった。本モデルでは、5 Stepで解の探索が終了し、工期において77日短縮され、総工事費用については 4,471万円改善された工程計画案の策定を行うことが可能となった。また、このときの概略工程計画案を座表式工程表として図-3に示す。

5. おわりに

本研究においては、概略工程計画の代替案設計にあたって、「現象合理性」・「目的合理性」・「操作性」の確保を目指して、ハイブリッド型工程計画モデルの開発を行なった。そして、山岳トンネル工事への適用を通じて、効率的で十分実用可能な方法であることがわかった。今後は、構築工事や大規模造成工事をはじめとする他工事への適用を行なうことによって本モデルの適用範囲を拡大していきたいと考えている。

【参考文献】

1) 吉川, 春名, 多々納; 都市化流域にお

ける治水計画問題のモデル分析, 土木計画学研究・
論文集(2), 1985. 1.

2) 春名, 浅海, 原田, 辻井; トンネル工事を対象と
した工程計画・管理方法のシステム化に関する研究
; 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年12月

3) 春名, 辻井, 小林; 工事施工の不確実性を考慮し
た工程計画の方法に関するシステム論的研究—トン
ネル工事を対象として—, 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

4) 建設大臣官房技術調査室監修、建設工事積算研究
会編: 土木工事積算基準マニュアル平成4年度版,
(財)建設物価調査会

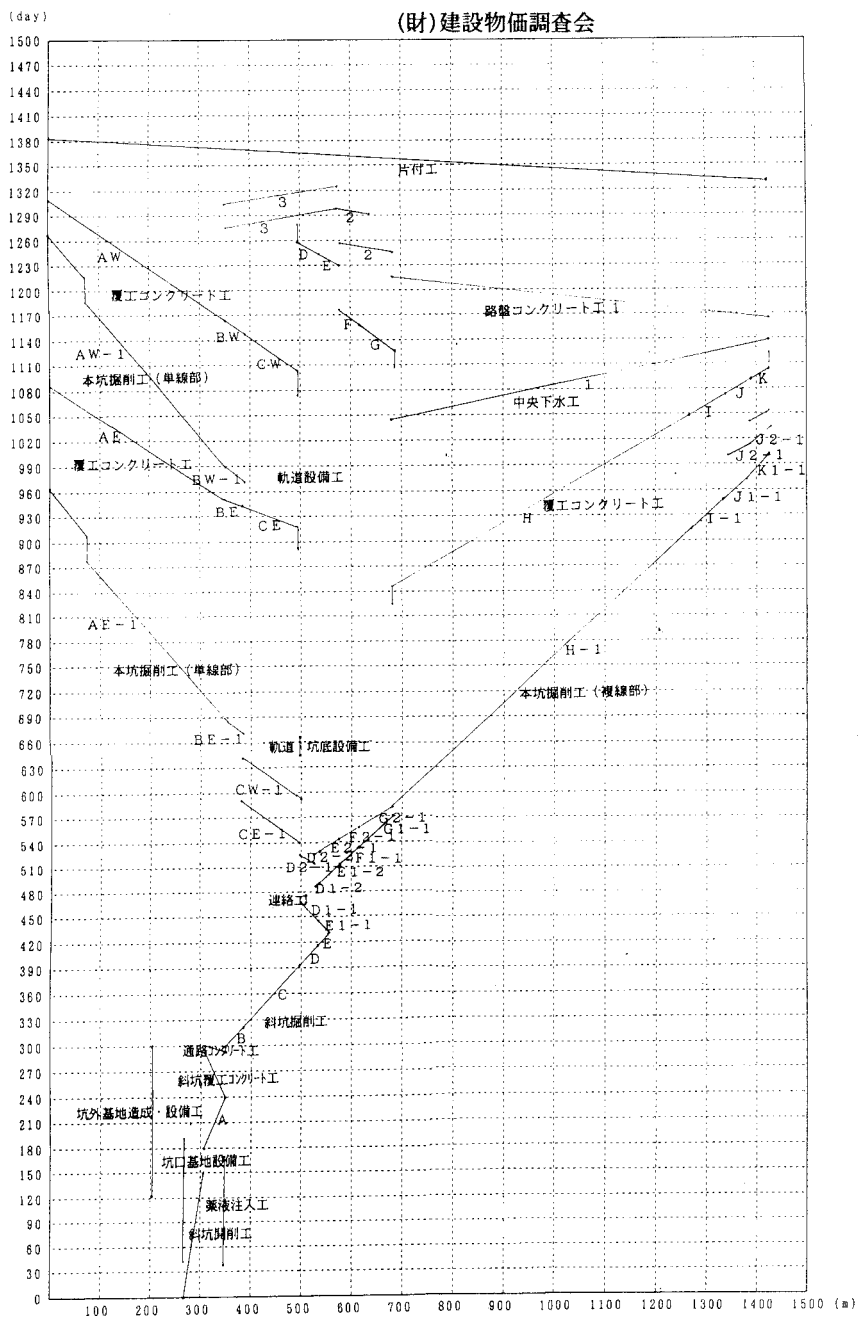


図-3 改善された工程計画案 (座標式工程表)