

ハイブリッド型建設工事工程計画モデル の開発に関する実証的研究 —大規模トンネル工事を対象として—

An Empirical Study on a Development for the Hybrid Scheduling Model of Construction Project
- Targeting on Large-scale Tunneling Project -

春名 攻*、辻井 裕**、竹林 弘晃***

By Mamoru HARUNA, Yutaka TSUJII, Hiroaki TAKEBAYASHI

In this study, a new type scheduling model for designing desirable construction planning and scheduling efficiently is developed especially for the purpose of obtaining method of an outline scheduling plan.

In this planning model rationality in modeling phenomenon and objective function to the purpose of planning is tried to keep in good balance between them with good operability.

The hybrid scheduling model of construction project combining with simulation model and optimization model is developed to obtain such goal as stated above. A practical case study to this model is discussed by applying in construction planning of the actual large-scale tunneling project.

1. はじめに

近年、施工計画・管理業務の迅速化・省力化、さらには、確実化のため、AIシステムやエキスパートシステム化をはじめとして、可能な限りの工程計画作成の自動化が求められている。そのためには、計画者の判断のシステム化など自動化に努めるとともに、システムの高度化を図る必要がある。これまでに、システム工学やオペレーションズ・リサーチに

関する研究の発展にしたがい、線形計画法や非線形計画法、システムシミュレーション技法などの実務分野への適用例も数多く試みられているが、^{1) 2)}「いかにして施工プロセスの再現精度を落とさないで、合理的かつ効率的に設計意図を反映させた計画代替案を設計するか」という課題に対しては、適当な解答が得られていないのが現状である。

そこで、本研究では、現場マネジメント業務の中核的存在である工程計画の策定方法に着目し、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計画代替案設計モデルの開発を行うこととした。

2. 従来の工程計画モデルの概要と課題

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

キーワード：トンネル工事、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)

** 正員 工修 大阪府土木部
(〒540 大阪市中央区大手前2-1-22)

*** 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)

れている。⁸⁾

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。これまでに開発されてきた工程計画モデルは、ヒューリスティックモデル、シミュレーションモデル、数理計画モデルに大別される。ここでは、これらのモデルの概要について概観するとともに、課題について考察することとする。

まず、ヒューリスティックモデルは、計画者の経験則を有効に活用して、代替案の設計を行うことから、計画者の意図を反映した計画代替案を策定することが可能である。しかし、このアプローチによって計画代替案を策定する際には、妥当解は得られるもののどうしてもそのプロセスに計画者の判断が数多く含まれているため、この部分の自動化を進めていくことによって、最適化を目指していく必要がある。

次に、シミュレーションモデルは、現象解析を主

な目的として開発されたモデルであり、現象を分析目的に応じた精度で抽象化・簡略化して現象再現を行うモデルである。したがって、このモデルを用いて計画代替案を設計するためには、予め用意された計画代替案集合を入力情報としてシミュレーション実験を行い、再現された現象に対して必要な評価基準を導入して計画代替案の評価を行う。そして、このような操作を次々と異なる計画代替案に対して続け、各案を比較しながら望ましい案に近づけていくという手順をとる。このため、計画代替案の変更が容易に行われるかどうか、シミュレーション実験を含めた計算時間に要する時間の長短をどうするかどうか等が、モデルの操作性を規定し、これらの程度により、比較できる計画代替案も限定される。したがって、最も望ましく目的にかなった計画代替案を求めるためには、想定しうるすべての計画代替案を比較・検討しなければならないが、これまでの研究事例においては、少数の計画代替案の比較・検討で妥協しているケースが少なくないのが実状のようである。

一方、数理計画モデルは、計画目的や実行可能性の条件を目的関数の最大化あるいは最小化という形や制約条件という形で数学的に表現し、最適化手法を用いて制約条件を満たす領域（実行可能領域）内での最適解（最も望ましい計画代替案）を求めるモデルの総称である。したがって、このモデルを用いて計画代替案を設計するためには、計画目的や実行可能性の条件を明確にし、これを関数表現化して計画モデルとして定式化し、最適計算を行って最適解を求めるという手順をとる。そしてこのモデルにお

いては、現象メカニズムを制約条件を含めてすべて関数表現をしておく必要があり、計画目的の追求のために目的関数として表現された評価尺度が最大あるいは最小となるように計画変数を操作する必要がある。しかし、計画問題で取り扱わなければならない現象の中には、非線形性や複合性、離散値を有するものが多く、関数の連立方程式等では十分に表現できないものも多い。したがって、これらの現象を数理計画モデル単独で取り扱おうとすると、現象を単純化して取り扱ったり、一部を削減して表現するという

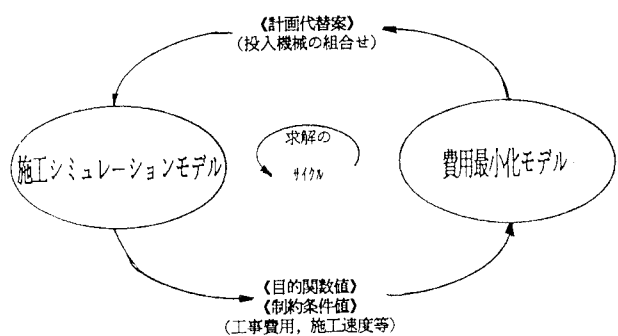


図-1 ハイブリッド型工程計画モデルの構成

「歪み」を生じ、現実の現象とかけ離れてしまう場合も少なくない。

以上のように、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、それぞれ一長一短がある。

そこで、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」を作成した。以下においては、ハイブリッド型工程計画モデルの概要について述べることにする。

3. ハイブリッド型工程計画モデルの構成

以上の概念にもとづき、ハイブリッド型工程計画モデルは、図-1に示すような構成となっている。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（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）に到達しようとするものである。

以下においては、ハイブリッド型工程計画モデルの構成要素であるシミュレーションモデルと最適化モデルについて概観する。

（1）シミュレーションモデルの構成

一般にハイブリッド型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、

- ①施工過程の諸現象を合理的に再現すること、
- 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、

等の要件を満足させる必要がある。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、投入機械選定モデル、機械稼働モデル、工事費用算定モデルの3つのモデルから構成した。

まず、投入機械選定モデルにおいては、当該工事における投入機械の組合せパターンを選定するとともに、フィジビリティチェックを行い、投入機械情報の検討を行う。

次いで、機械稼働モデルにおいては、投入機械選定モデルにより作成された投入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GPS S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う。

工事費用算定モデルにおいては、工事費用を施工速度の上昇により増加する直接費用、工事期間の延長により増加する間接費用、材料費等のように施工速度や工事期間に関係せず一定な固定費用の三種類に分類して、施工の進捗にしたがって積み上げていく方法により工事費用の算定を行う。

そして、以上の各種の情報をもとにして各アクテ

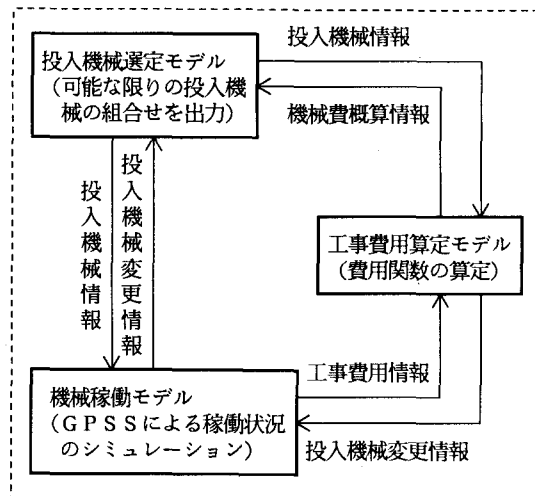


図-2 施工シミュレーションモデルの構成

イビティの開始時刻・終了時刻、施工速度、工事費用の算定を行うものである。また、工事期間と工事費用を基にして費用関数の設定も同時に行うこととしている。

(2) 最適化モデルの構成

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することができる。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採用す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。

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)	施工速度の変更可能な範囲 施工間隔 (安全性、施工性の確保)

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	$A_i t_i \leq a_i^* \leq A_i t_i$ $t_i \geq 0 \quad (t_i \in V_1)$ $-t_i - d_i + t_j \geq 0 \quad (P_{ij} v_j^* = 1 \text{ のとき})$ $-t_i - d_i + t_j \geq 0 \quad (v_j^* \in V_1)$ $d_i = \begin{cases} q_i^* / a_i^* & (v_i^* \in V_1) \\ d_i^* & (v_i^* \in V_2) \end{cases}$ $P = \text{const}$	施工速度の制約 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 V_1 : 実作業の工程 V_2 : 時間間隔確保のための工程 作業の順序関係 $P = \begin{cases} P^T: \text{技術的順序関係} \\ P^A: \text{管理的順序関係} \end{cases}$ $P_{ij} v_j^* (\in P) = 1: v_j^*$ は v_i^* の先行作業 作業 $v_i^* (\in V_1)$ の施工数量 q_i^* 施工速度 $a_i^* \ (A_i t_i \leq a_i^* \leq A_i t_i)$ 作業 $v_i^* (\in V_1)$ の施工所要時間 $d_i^* = \begin{cases} q_i^* / a_i^* & (v_i^* \in V_1) \\ d_i^* & (= \text{const}) \quad (v_i^* \in V_2) \end{cases}$ 作業 $v_i^* (\in V_1)$ の開始時刻 t_i^* 工事期間 t	

③シミュレーションモデルへのアクセス回数が少ないこと。

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 $v_i^* (\in V_1)$ 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。これらの関数形は、シミュレーションモデルの出力情報により決定される。

一般に、非線形最適化問題の解法として、変換法と非変換法とがある。本モデルの解法としては、制約条件付き最適化問題を何かな方法で変換して、修正目的関数を作成し、無制約最適化問題に置き換える変換法により解いていくこととした。^{4) 6)}

4. ハイブリッド型工程計画モデルの運用方法に関する検討

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。このため本章において

は、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、例題を用いて本モデルの運用方法に関する検討を行うこととする。ここで検討する例題は、実際のな問題とあまりにもかけ離れすぎていては、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」⁶⁾に積算事例として掲載されている山岳トンネル工事を取り上げることとした。この工事の概要は、表-3に示す通りである。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 1,348,000千円を制約条件として、以下に検討を行うこととした。

ここで行う検討は、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。

まず、費用関数を1次関数、2次関数、3次関数としたときのモデルの収束性と演算時間から費用関数の設定方法について検討を加えることとした。なお、ここでは、外点ペナルティ法によって修正目的関数を決定し、一般に収束性がよいとがわかってい

表-3 例題工事の概要

工事名称	道路トンネル工事
制約工期	480日(暦日工程)
総工事費用	1,348,000千円
施工延長	807.2m
地質区分	B ₁ , B ₂ , B ₃ , C ₁ , C ₂ , D ₁ , D ₃ (軟岩中心)
施工法	NATM
掘削方式	発破
掘削工法	ベンチカット(ロングベンチ or ショートベンチ)
ずり出し方式	タイヤ

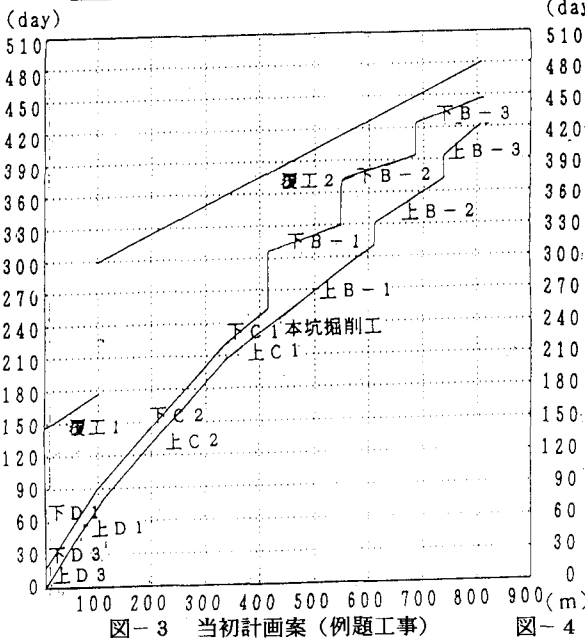


図-3 当初計画案(例題工事)

る共役勾配法により、最適化モデルを解くこととした。

ここで検討内容については、膨大なものになるため詳細については、講演時に述べることにするが、費用関数の設定方法の違いによっても工期、総工事費用とも、それほど大差はなく、現象合理性、目的合理性とも確保されているものと判断することができるものとする。(費用関数を1次関数としたときは、4Stepで探索が終了し、工期が437日、総工事費用が1,329,511千円、2次関数としたときは、6Stepで探索が終了し、工期が436日、総工事費用が1,329,390千円、3次関数としたときは、10Stepで探索が終了し、工期が435日、総工事費用が1,329,892千円である。また、演算時間については、費用関数を1次関数、2次関数、3次関数と高次関数になっていくにしたがって、指数関数的に増加している。)また、概略工程計画案の策定が概略的な時間と資源の配分を目指し詳細工程のフレームとなっていることから、工事費用関数の設定方法は1次関数として線形性を仮定しても何等問題がないと推察される。なお、図-3に例題の当初計画案、図-4に費用関数を1次関数としたときの改善されたときの工程計画案(概略工程計画案)をそれぞれ座表式工程表として示している。

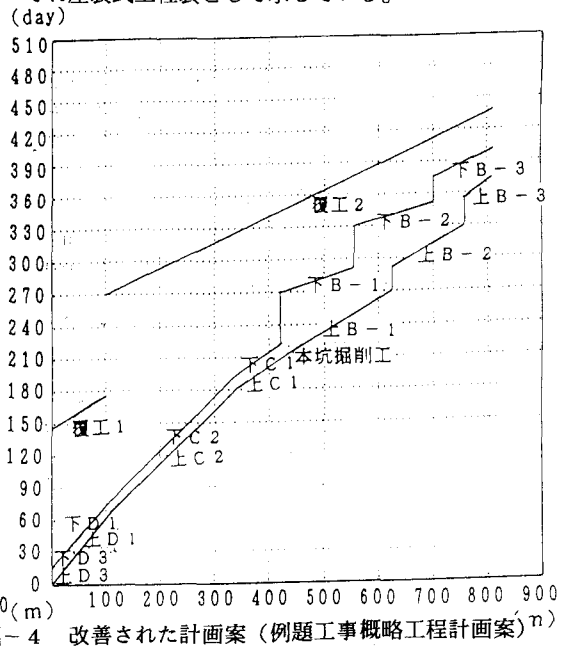


図-4 改善された計画案(例題工事概略工程計画案)

次いで、非線形計画法の解法について検討を加えることにする。前述したように本モデルの解法として変換法を用いることとしているが、そのときの無制約問題の解法については、修正目的関数の解法としては共役勾配法を採用することとした。一方、ペナルティパラメータの設定方法については、外点法、内点法および拡張Lagrange法の3つの方法を取り上げて検討を行うこととした。ここでの検討内容についても、膨大なものになるため詳細については、講演時に述べることにするが、これら3つの方法とも工期、総工事費用とも、それほど大差はなく、現象

表-4 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ヵ月（暦日工程）
総工事費用	2,213,000千円
施工延長	2,175.0m（最盛期の切羽2ヵ所）
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

表-5 探索過程

探索Step	シミュレーションモデル		最適化モデル	
	工期	費用	工期	費用
1	1,460	2,213,000	1,441	2,192,432
2	1,429	2,187,572	1,418	2,179,589
3	1,410	2,175,199	1,402	2,171,065
4	1,394	2,168,922	1,387	2,168,813
5	1,385	2,168,411	1,384	2,168,348
6	1,383	2,168,288	1,383	2,168,288
7	1,383	2,168,288	—	—

注) ①工期の単位：日，工事費用の単位：千円。
②探索状況の確認を行うために、探索のサイクルが終了しても、シミュレーションを行っている。

合理性、目的合理性とも確保されているものと判断することができるものとする。（外点法においては、4Stepで探索が終了し、工期が437日、総工事費用が1,329,509千円、内点法においては、7Stepで探索が終了し、工期が437日、総工事費用が1,329,511千円、拡張Lagrange法においては、6Stepで探索が終了し、工期が436日、総工事費用が1,329,419千円となっている。）

以上の考察から、トンネル工事へのハイブリッド型工程計画モデルの適用にあたっては、費用関数を線形（1次関数）と設定して、外点法により探索を行っていく方法が最も運用が効率的であり、操作性が優れていると判断することが可能である。以下に述べる実証的検討においては、この方法にもとづき行うものとする。

5. 実証的検討

ここでは、以上の考察にもとづき設計したハイブリッド型工程計画モデルの実証的検討を表-4に示す内容の山岳トンネル工事を取り上げて行うこととした。（なお、対象工事は、本研究グループが昨年度において、工事施工の不確実性の削減を目指して行った際のものと同一のものである。）⁷⁾

対象工事にハイブリッド型工程計画モデルを適用したところ、表-5に示すように、6Stepで探索が終了し（探索状況のチェックのため、探索のサイクルが終了しても、シミュレーションを実施する）、当初計画案と比較して工期において77日短縮され、総工事費用においては44,712千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。つまり、当該工事の当初計画案の策定時においては、44,712千円分多く見積っていたことを示している。

また、春名・辻井・小林のモデル⁷⁾により検討した工程計画案と比較すれば、ハイブリッド型工程計画モデルを利用して検討した工程計画案の方が、工期において15日短縮され、総工事費用においては、9,123千円（機械変更、工法変更等の工事費用は含まない）改善された工程計画案を策定することが可能となった。

一方、吉川・春名のモデル²⁾により検討した工程計画案と比較すれば、ハイブリッド型工程計画モデル

を利用して検討した工程計画案の方が、工期において4日短縮され、総工事費用においては、2,385

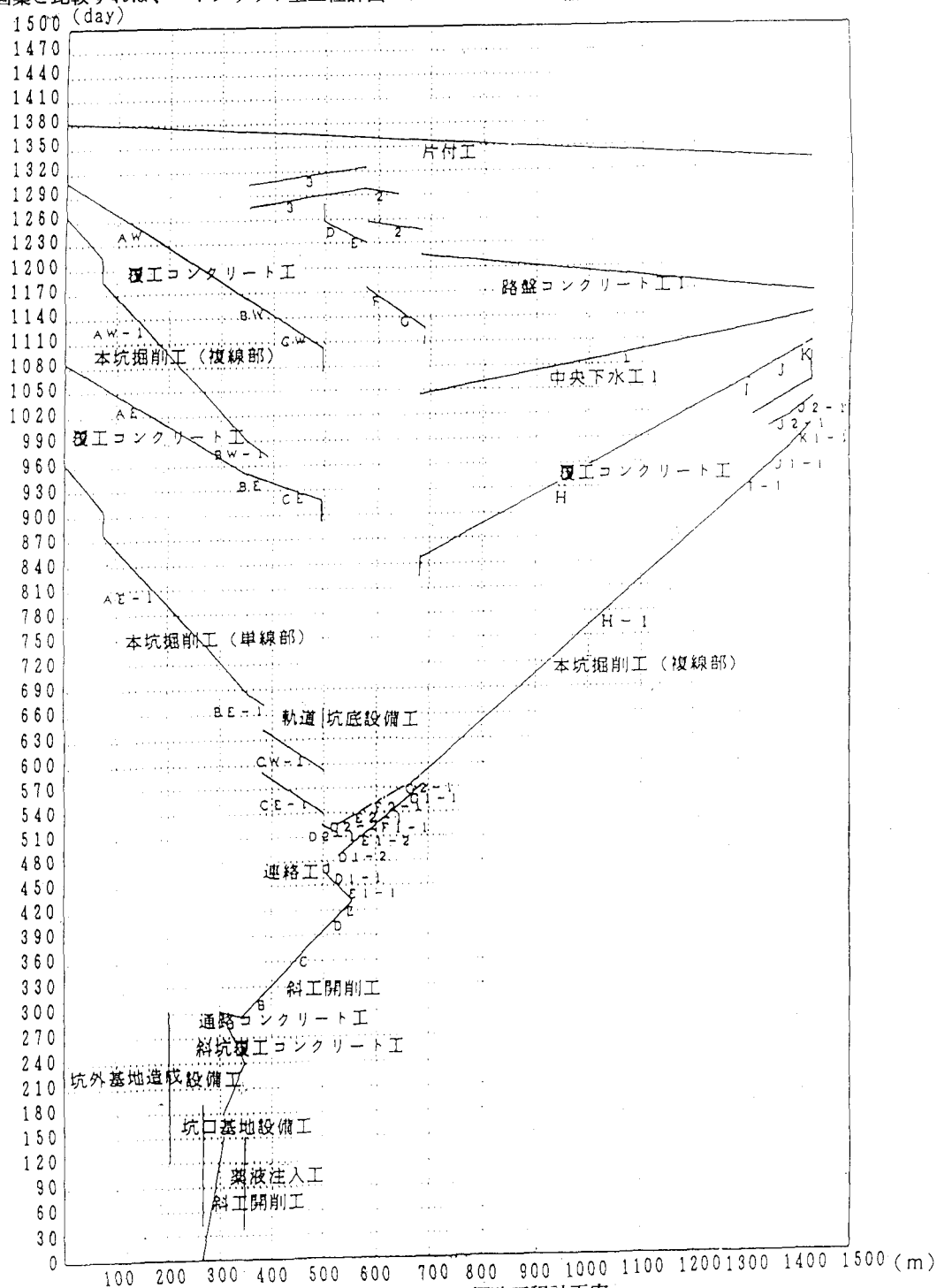


図-5 概略工程計画案

千円改善された工程計画案を策定することが可能となった。

以上のことから、ハイブリッド型工程計画モデルが非常に有効な代替案設計モデルであることが明らかとなった。なお、このときの概略工程計画案を図-5に示す。

6. おわりに

本研究においては、「いかにして施工プロセスそのものの再現精度を落とさないで、合理的かつ効率的に計画図を反映した計画代替案を設計するか」という課題を解決するために、代替案設計モデルとして、施工現象の再現を行うシミュレーションモデルと、計画目的を追求し最適化（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った。本研究で得られた研究成果を取りまとめると以下の通りである。

（1）本研究において開発したハイブリッド型工程計画モデルを活用することによって、計画代替案の「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、本モデルの有効性・効率性を確認することができた。

（2）従来の最適化モデルにおいては、費用関数を直線（1次関数）として仮定してきたケースが多く見受けられたが、本研究において開発したハイブリッド型工程計画モデルにおいては、2次関数、3次関数・・・についても取り扱うことが可能となり対象事例によっては、計画案のRealityの確保と精度の向上を期待することが可能である。

（3）ハイブリッド型工程計画モデルを施工計画・管理システムに組込むことによって、システムの効率性をさらに向上させることが可能であると考えられる。

今後の課題としては、以下のものが挙げられる。

（1）本研究において開発したシステムは、スーパーコンピュータを活用したが、演算時間に約5時間50分（実証的検討の事例）を必要としている。今後は、システムの改良を行うことによって、演算時間の短縮をはかっていく必要があると考える。

（2）ハイブリッド型工程計画モデルを大規模造成工事をはじめとする他工事への適用を行うことによ

って、本モデルの適用範囲を拡大していくとともにモデルの改良を行っていく必要がある。

（3）工事施工のプロセスを整理するとともに、システムのCAD化・CG化についても検討していく必要がある。また、AIやエキスパートシステム化の方向についても検討していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 河原畑良弘；施工計画・管理システムの合理的な設計法に関する実証的研究，京都大学博士論文，1978. 11.
- 2) 吉川 和宏，春名 攻；建設工事における総括工程計画モデルの開発研究，土木計画学研究論文集，1984. 1.
- 3) 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.
- 4) Fiacco, A. V. and McCormick, G. P. ; Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques, John Wiley & Sons, New York, 1968.
- 5) Hestens, M. R. ; Conjugate Direction Methods in Optimization, Springer-Verlag, Berline, 1980.
- 6) 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
- 7) 春名、辻井、小林；トンネル工事計画のシステム化に関する研究—掘削投入機械の選定方法について—，第15回土木計画学研究発表会・講演集，1992. 11.
- 8) 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. 12.
- 9) 春名、辻井、小林；ハイブリッド型工程計画モデルの開発に関する実験的研究，平成5年度土木学会関西支部年次学術講演概要集，1993. 5.