

立命館大学	正 員	春 名	攻
東洋建設(株)	正 員	大 音	宗 昭
(株)建設技術研究所	正 員	○竹 林	弘 晃
立命館大学理工学部	学生員	石 黒	義 晃

1. はじめに

近年、工事の大規模化に伴い管理項目や基準は複雑・多岐化の傾向にある。そうした中で周辺環境に与える影響を最小限に抑え、安全かつ迅速、経済的に工事を行うため、工事計画のマネジメント分野においてもさらなる高度な計画・管理技術が要求される。

本研究グループではこれまで、工事マネジメント業務の中で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代替案を、効率的に設計可能な計画代替案作成モデルの開発を行ってきた¹⁾。その中の一つとして、ハイブリッド型工事計画モデルという代替案策定のための新しい工事計画モデル手法を開発し、山岳トンネル工事をはじめとした大規模建設工事に適用して、モデルの有用性を確認してきた。そこで本研究では、さらにモデルの適用性の範囲を拡大するため、土地造成工事計画を対象として実証的検討を行うこととした。

土工事の特徴として、一定期間内に大量の土砂を移動させる場合が多い。このため、工期内に安全でできるだけ費用が少ない工事を行うためには、的確な調査結果にもとづいて十分な検討を行い、大きな計画の変更が生じないような計画案を作成しておくことが重要である。さらに、土工事施工においては、投入土工機械によって大きく工期や費用は変動する。また、施工途中で工期に間に合わないために土工機械を変更すると、費用などの面で大きなロスとなり、品質や安全性の問題も生じてくる。つまり、工事開始後に投入機械を変更することは大きな無駄であり、当初計画案の策定時には事前に十分な検討をシステムティックに行うことが重要である²⁾。

そこで本研究では、土工事計画を階層的に策定可能なものと考え、またその中核的存在である工程計画は、密接な関係にある機械計画、費用計画を相互の利害関係をリアルに反映させた計画案を作成するためハイブリッド型モデルにより同時に、策定していくこととした。

2. 土地造成工事計画の特性

3. ハイブリッド型工事計画モデルの構成

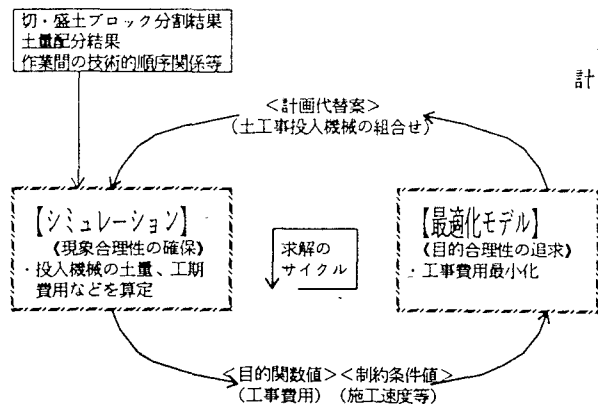


図-1 ハイブリッド型工事計画モデルの構成

工事工程計画の策定において、その計画代替案設計モデルは、次の要件を満足させる必要がある。まず第1に、実行可能な計画案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、「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、「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、「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といえる³⁾。

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、「ハイブリッド型工事計画モデル」を作成した。

つまり本モデルは、以上の概念にもとづき、図-1に示すようなモデル構成とした。すなわち、「まず、シミュレーションモデルに投入する土工機械の組合せ案を入力し、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(投入土工機械の組合せ)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(最も望ましい投入土工機械の組合せの計画代替案)に到達しよ

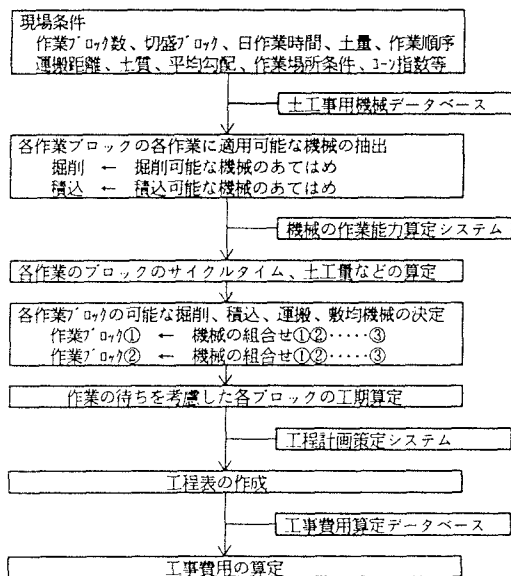


図-2 土工事シミュレーションの内容

うとするものである。

以上のことから本モデルは、シミュレーションモデルで保証される現象メカニズムの範囲内で、計画代替案を規範的に設計して行くためのモデルであり、モデルの運用の面からは、数理計画モデルのカテゴリーに属する。しかし、一般の数理計画モデルが、現象メカニズムを規定する拘束条件の役割を数学的な関数式系に担わせているのに対して、本モデルは、その役割をシミュレーションモデルに担わせているところに本質的な相違がある。

以下においては、ハイブリッド型工事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述べることにする。

a) シミュレーションモデルの構成

土の運搬を行う土工事の作業工程は、大きく分け

表-1 最適化モデルの内容

与件	工種作業間の技術的施工順序関係
評価方法	工事費用の最小化
パラメータ	ブロック分割数 ブロック間の管理的施工順序関係
計画変数	施工速度
制約条件	工期 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 工事費用最小化モデルの定式化

<目的関数> $C = \sum_i \sum_j f(\alpha_i) + f(\beta) + f(\gamma) \rightarrow \min$	
<制約条件> $A_i^* \leq a_i^* \leq A_i^*$ $t_i^* \geq 0 \quad (t_i^* \in V_1)$ $-t_i^* - d_i^* + t_j^* \geq 0 \quad (P^T: v_i^* = 1 \text{ のとき})$ $-t_i^* - d_i^* + t_e \geq 0 \quad (v_i^* \in V_1)$ $d_i^* = \begin{cases} q_i^* / a_i^* & (v_i^* \in V_1) \\ d_i^* & (v_i^* \in V_2) \end{cases}$ $P = \text{const}$	
<記号の定義> C : 工事費用 $f(\alpha)$: 直接費用, $f(\beta)$: 間接費用, $f(\gamma)$: 一定費用 工種作業 i ($i=1, 2, \dots, I$) 施工ブロック k ($k=1, 2, \dots, K$) 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 $\begin{cases} P^T: \text{技術的順序関係} \\ P^A: \text{管理的順序関係} \end{cases}$ $P = P^T + P^A$ $P^T: v_i^* \in V_1 \Rightarrow P^T: v_i^* \text{ は } v_j^* \text{ の先行作業}$ 作業 $v_i^* \in V_1$ の $\begin{cases} \text{施工数量 } q_i^* \\ \text{施工速度 } a_i^* (A_i^* \leq a_i^* \leq A_i^*) \end{cases}$ 作業 $v_i^* \in V_1$ の施工所要時間 $d_i^* = \begin{cases} q_i^* / a_i^* & (v_i^* \in V_1) \\ d_i^* (= \text{const}) & (v_i^* \in V_2) \end{cases}$ 作業 $v_i^* \in V_1$ の施工開始時刻 t_i^* 工事期間 t_e	

て掘削→積込→運搬→敷均といった流れで行われる。当然、それぞれの作業は全く異なった役割・形態を有しており、各作業に適合する機械も異なってくる。本研究では、現在考えられる種類の土工事機械をブ

ルドーザ系、スクレーパ系、ショベル系、ダンプ系、タイヤドーザ系といったように分別し、それぞれの機械の種類・規格・台数を現場条件に合わせた組合せを行い、シミュレーションを行うこととした。

本研究で作成した土工事シミュレーションの概略フローは図-2のようである。つまり、まず種々の現場条件から各作業ブロック、作業ごとに投入機械の可能な限りの組合せを行う。ここで組合せ可能な土工事機械は、79機種を想定している。次に、運搬距離や勾配、土質といった現場データから適用可能な土工事機械を各作業ごとにあてはめ、施工能力算定システムを用い作業間の待ちを考慮し、その現場にリアリティのあるサイクルタイムや時間当り施工能力を算出する。そして、工程計画算定システムによって、作業ブロック間の順序関係から得られる各作業ブロックの施工能力の制約に見合った土工事機械の組合せを選定し、スケジューリングを行う。最後に、工事費用算定データベースを用いて、土工事機械投入費用などの直接費用と、労務費、燃料費といった間接費用の算出を行う。

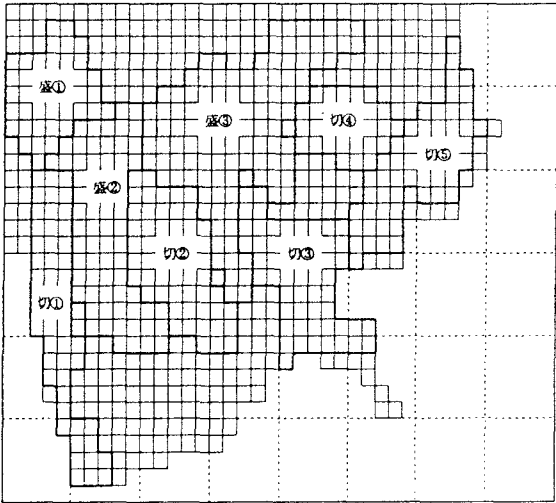


図-3 対象地の切・盛土ブロック図

表-3 対象工事の代替案探索結果

	step 1	step 2	step 3	step 4	step 5
	計画	最適化	計画	最適化	計画
作業ブロック	バックホウ 2台 1				バックホウ 2台 1
掘削	ダンプトラック 32t 2	→	→	→	ダンプトラック 15t 3
積込	ブルドーザ 3t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 3
運搬	217				217
能力(台/日)					
作業ブロック	バックホウ 0.6台 2				バックホウ 2台 1
掘削	ダンプトラック 32t 5	→	→	→	ダンプトラック 15t 3
積込	ブルドーザ 4t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 1
運搬	94				130
能力(台/日)					
作業ブロック	スローバ 16台 4				スローバ 2台 3
掘削	ブルドーザ 15t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 2
積込	450				510
運搬					
能力(台/日)					
作業ブロック	バックホウ 1.8台 2				バックホウ 2台 1
掘削	ダンプトラック 20t 3	→	→	→	ダンプトラック 15t 3
積込	ブルドーザ 6t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 1
運搬	225				207
能力(台/日)					
作業ブロック	バックホウ 0.6台 2				バックホウ 2台 1
掘削	ダンプトラック 20t 3	→	→	→	ダンプトラック 15t 3
積込	ブルドーザ 3t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 3
運搬	148				219
能力(台/日)					
作業ブロック	スローバ 16台 4				スローバ 2台 3
掘削	ブルドーザ 6t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 2
積込	237				376
運搬					
能力(台/日)					
作業ブロック	バックホウ 1.8台 1				バックホウ 2台 1
掘削	ダンプトラック 20t 3	→	→	→	ダンプトラック 15t 3
積込	ブルドーザ 4t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 3
運搬	120				141
能力(台/日)					
作業ブロック	スローバ 16台 4				スローバ 2台 3
掘削	ブルドーザ 11t 1	→	→	→	ブルドーザ 3t 3
積込	432				554
運搬	212				
能力(台/日)					
工期(日)	114567	108725	108315	107718	107284
費用(千円)		100357	100218	100069	100069

b) 最適化モデルの構成

最適化モデルは、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。つまり、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最適化モデルを開発した。なお、モデルの定式化は、表-2に示されるとおりであり、目的関数は直接費用 $f(\alpha_i)$ ・間接費用 $f(\beta)$ ・一定費用 $f(\gamma)$ の和によって構築した工事費用の最小化であり、制約条件は、施工速度の範囲とスケジュールによる制約である。また操作変数は、工種作業 V_i ($\in V_i$)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。よって、費用関数が、直線で表わせるときは、「目的関数が線形で、制約条件が非線形の数理計画問題」、費用関数が曲線で表わせるときは、「目的関数、制約条件とも非線形の数理計画問題」となることは明らかである。また、各費用の関数形は、シミュレーションモデルの出力情報により決定される。

また、解法としては、本問題が制約条件付き最適化問題であることから、ペナルティ関

数法などを用いて修正目的関数に式を変換することにより無制約最適化問題に置き換えて解いていくこととした。

5. 実証的検討

ここでは、ここまで述べたように開発したハイブリッド型土工事計画モデルを、図-3のように切土ブロックが4つ、盛土ブロックが5つに分割された土工量409, 142 m³の山間部中規模宅地造成工事を対象として、実証的検討を行った。

土量配分結果などの与件情報をもとにハイブリッド型モデルを実行した結果、検討結果は、表-3に示すようになり、初期計画案よりも工期で18日、費用にして14,498千円の改善がなされた。なお、改善された工程計画案は、図-4に示すようになった。また、機械計画は、初期計画案に比べ探索過程が進むにつれて機械の機種が減少し、最終的には最も効率よく機械を用いている計画案が選定されていることがわかった。つまり、機械の機種・台数が比較的多い計画案は、莫大な投入費用を要するため直接工事費は上昇する。しかし、能力が不足気味の機械編成にすると工期が大きくなり、間接費が増大する。よって、作業の空白部分が大きいほど、機械を放置していることになって無駄となるため、効率的な機械編成と管理的順序関係を持ち合わせた工程計画案を探索できたと考える。

以上のように、実際の工事に適用することにより、当初計画案よりかなりの改善がみられたことから、土工事への本モデルの有効性が実証されたといえる。

6. おわりに

本研究の成果として、以下のようなものが上げられる。

(1) 最適化モデルとシミュレーションモデルの長所を併せもつハイブリッド型工事計画モデルを構築することにより、工事計画案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」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) 工事費用を評価アイテムとすることにより、経済性をも考慮したよりリアリティのある代替案を選択できるようにした。(3) 代表的な大規模建設工事である土地造成工事を対象とすることにより、大幅な計画案の改善が成されたため、ハイブリッド型モデルの適用範囲の拡大が成された。

【参考文献】

- 1) 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議講演集, 1992
- 2) 伊丹康夫: 建設機械の管理と施工, 財団法人建設調査物価会, 1988
- 3) 吉川, 春名, 多々野: 都市化流域における治水計画のモデル分析, 土木計画学研究・論文集, 1985

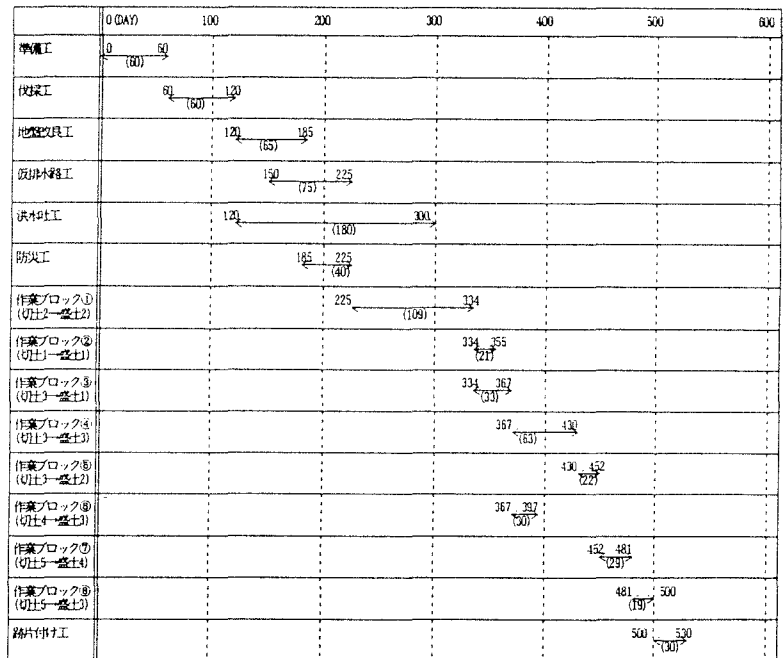


図-4 改善された工程計画案