

建設機械の機種選定と最適投入量決定問題を考慮した ハイブリッド構造を持つ最適工程計画モデルの開発

立命館大学理工学部 正会員 春名 攻
立命館大学大学院 学生員 滑川 達
立命館大学大学院 学生員 ○伊藤壮央
矢作建設工業株式会社 正会員 池津 亮

1. はじめに

建設工事施工計画の中核を構成する工程計画は、施工対象のブロック分割やこれらブロック間の実施順序、建設工事に投入する各種工事用資源の機種等やその投入量の検討を行う概略工程計画のレベルと、それらの決定を前提として、単位作業の明確化、それら作業間の順序関係（技術的・管理的順序関係）、投入される総資源の配分問題を伴うスケジューリング問題を検討する詳細工程計画のレベルに分割し、段階的に計画を策定していくことが現実的である。

しかし、概略工程計画レベルにおける計画要素の検討を行う段階において、これら計画要素の決定が工事費用縮減等の施工計画目標に対して合目的であるかということを、定量的に把握することは非常に困難である。このため、これまでのところ計画者の経験や勘に基づいたアプローチが計画策定方法の中心となっているのが現状といえる。

そこで、本研究においては、以上のような概略工程計画レベルの検討問題に対し以下のようにアプローチして、概略工程計画策定のための定量的でかつ計画者にとって有効となり得る計画情報の作成をめざした。すなわち、まず詳細工程計画レベルを対象とした工程計画問題として、各作業への投入資源量をも変数化したより一般的な工事用資源配分問題を取り上げるとともに、問題に対する定式化とその効率的最適解法の開発を行った。

さらに、本研究では、概略工程計画レベルの計画要素、すなわち投入する工事用資源の機種等の詳細工程計画問題における前提条件を、解が改良される（コスト縮減の）方向へ向かうよう逐次変化させていくことにより、概略工程計画レベルの計画要素が工事費用に及ぼす影響を分析するとともに、このような

モデル分析を通して一層のコストダウンを図った工程計画の策定をめざした。

2. 詳細工程計画レベルを対象とした一般的 資源配分問題のモデル化の方針

本研究では、まず前述した概略工程計画レベルおよび詳細工程計画レベルの検討項目を図-1のように整理するとともに、投入資源に関する必要コストを以下のように捉えることとした。すなわち、資源投入に伴う必要コスト Z は、単位時間あたりの建設工事への投入資源量を全工程を通して一定であると仮定すれば、式(2.1)に示すように、建設工事全体の延べ使用資源量に比例するコストと、同じく建設工事全体に対する延べ投入資源量および工期に比例するコスト、ならびに、これらに無関係な固定費用によって構成される、と考えることとした。すなわち、

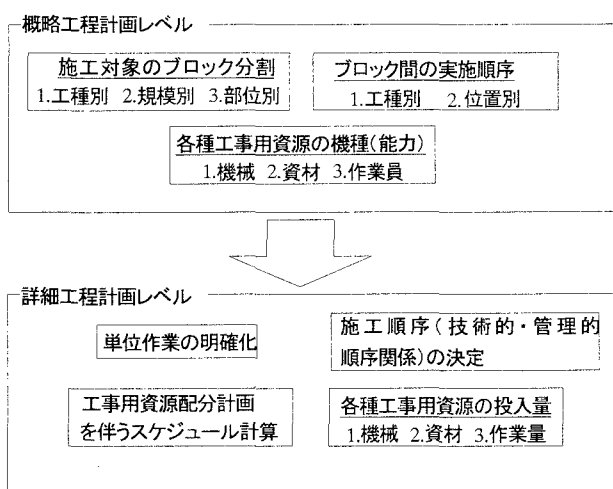


図-1 概略・詳細工程計画レベルの検討項目

$$Z = \sum_i \sum_j W^{ij} \cdot c_i^1 + \sum_i S^i \cdot \lambda \cdot c_i^2 + q \quad (2.1)$$

W^{ij} ; 作業 j に必要な資源 i の延べ投入必要資源量, c_i^1 ; 単位資源量・単位時間あたりの資源 i の使用費用, S^i ; 単位時間あたりの資源 i の投入量, λ ; 工期, c_i^2 ; 単位資源量・単位時間あたりの資源 i の存置費用, q ; 仮設費等の固定費用

このとき、詳細工程計画レベルにおいては、各種工事用資源の機種等が、概略工程計画レベルで既に決定されていることを前提としているため、 W^{ij} , c_i^1 , c_i^2 は確定値となる。さらに、 q は当該工事に固有な値であることから、詳細工程計画レベルにおける必要コスト Z の最小化問題は、結局のところ式(2.2)に示すような延べ遊休資源量に比例するコスト Z' の最小化問題に帰着することがわかる。

$$Z' = \sum_i r_i \cdot c_i^2 \quad (2.2)$$

r_i ; 工程全体を通しての延べ遊休資源量

このため、以降においては、詳細工程計画レベルの工程計画問題を、総遊休費用を最小にする資源の最適投入量と最適スケジュールの同時決定問題として定式化していくこととする。

3. 一般的工事用資源配分問題の定式化

本研究では、より一層の効率的な資源運用を追求するために、PERT/MANPOWER 手法のように各作業に対する単位時間あたりの投入資源量を一定値とはせず、計画変数として取り扱うより一般的な資源配分問題の定式化を行う。ただし、ここでの単位時間は、施工実施段階での実現性を考慮して、投入資源の運用・転用に関する現実の現場管理行為が実行可能な期間とし、以下においては、この単位時間を1週間程度と仮定して議論を進めていくこととする。

さて、ここでは、前述したとおり建設工事の施工過程が工程ネットワークで表現されており、図-1に示した概略工程計画レベルの計画要素がすべて最適に与えられているものとする。このとき、総遊休費用最小を目的とした詳細工程計画レベルでのより

一般的な工事用資源資源配分問題は、ネットワークプランニング・スケジューリング問題として以下のように定式化することができる。

Minimize

$$C^L(S, \lambda) = \sum_{e=1}^N c_e^L(\max_{1 \leq i \leq N} S_e, \lambda_e) \quad (3.1)$$

$$S_e = S_e(M_e^1, \dots, M_e^R) \quad (3.2)$$

Subject to

$$\max_{1 \leq e \leq N} S_e = S \quad (3.3)$$

$$\sum_{e=1}^N \lambda_e = \lambda \quad (\lambda^{\min} \leq \lambda \leq \lambda^{\max}) \quad (3.4)$$

$$\sum_{e=1}^N M_e^k = M^k \quad (k = 1, \dots, R) \quad (3.5)$$

S ; 工事用資源の投入量ベクトル ($S = (S^1, \dots, S^m)$; 資源 i の投入量), λ ; 工期, $\lambda^{\min}$; 工期の下限値 (ここでは、すべての作業が最短で終了する所要日数でかつ最早開始時刻にスタートしたときの工期と考える), $\lambda^{\max}$; 工期の上限値 (ここでは、制約工期と考える), e ; カットネットワークにおけるレベル ($e = 1, \dots, N$), $c_e^L(\cdot)$; レベル e のカットでの遊休費用, S_e ; レベル e のカットにおいて最大の単位時間あたりの必要資源量ベクトル ($S_e = (S_e^1, \dots, S_e^m)$; レベル e のカットにおいて最大の単位時間あたりの資源 i の必要資源量), λ_e ; レベル e のカットに配分される所要時間, M_e^k ; レベル e のカットにおいてルート k に配分される投入資源量ベクトル ($M_e^k = (M_e^{k1}, \dots, M_e^{km})$; レベル e のカットにおいてルート k に配分される資源 i の資源量), M^k ; ルート k への延べ投入必要資源量ベクトル ($M^k = (M^{k1}, \dots, M^{km})$; ルート k への延べ投入必要資源量)

さらに、以上のような定式化は、本研究がこれまで PERT/MANPOWER 問題の最適解法の開発研究を行う過程で進めてきた、カット理論に関する研究成果により、その作成方法を明らかにしてきたカットネットワーク (図-2) 上での求解可能な最適資源配分問題として以下のように変換することができる。

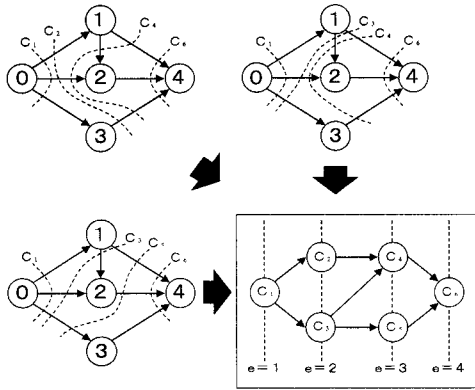


図-2 カットネットワーク

Minimize

$$S_c(M^1, \dots, M^R) = \max_{1 \leq i \leq R} S_{ei}(M_{ei}^1, \dots, M_{ei}^R) \quad (3.6)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^R M_{ei}^k = M^k \quad (k=1, \dots, R) \quad (3.7)$$

S_{ei} ; レベル e のカットにおける単位時間 t の必要資源量ベクトル ($S_{ei} = (S_{ei}^1, \dots, S_{ei}^m)$; レベル e のカットにおける単位時間 t の資源 i の必要資源量) ; M_{ei}^k ; レベル e のカットにおける単位時間 t においてルート k に配分される投入資源量ベクトル ($M_{ei}^k = (M_{ei}^{k1}, \dots, M_{ei}^{km})$; レベル e のカットにおける単位時間 t においてルート k に配分される投入資源量)

加えて、この最適資源配分問題の分解はフィードバックのないカットネットワークに基づいているため、DPの基本原理解である最適性の原理が適用でき、次のような繰り返しの関数方程式として変形することができる。

$$S_{ei}(M^1, \dots, M^R) = S_{ei}(M_e^1, \dots, M_e^R) \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} & S_{e\lambda_e}(M_e^1, \dots, M_e^R) \\ &= \min_{0 \leq M_{e\lambda_e}^k \leq M_e^k} \left[\max_{1 \leq i \leq R} \left\{ S_{e\lambda_e}(M_{e\lambda_e}^1, \dots, M_{e\lambda_e}^R), \right. \right. \\ & \quad \left. \left. S_{e\lambda_e-1}(M_e^1 - M_{e\lambda_e}^1, \dots, M_e^R - M_{e\lambda_e}^R) \right\} \right] \quad (3.9) \end{aligned}$$

このようにして、詳細工程計画レベルの計画問題での最適性が保証される工程計画を計算量からみて也非常に効率的に求めることができる。

4. 概略工程計画検討のためのモデル分析

本研究では、前節で開発した詳細工程計画レベルを検討対象とする工程計画モデルを下位レベルの先取り的な分析ツールとして、図-3に示した考え方で効果的に活用することにより、工事施工計画の上位計画レベルである概略工程計画レベルの検討に有効な計画情報の作成をめざすこととしている。

特に、本稿では、このような研究目標達成のための第1ステップとして、図-3に示した概略工程計画レベルの計画要素のうち、建設工事に投入する各種工事用資源の機種選定とその投入量の決定問題を取り上げたモデル分析の方針を示していくこととする。

このようなモデル分析においては、まず概略工程計画モデルを、各作業に投入する各資源の1資源あ

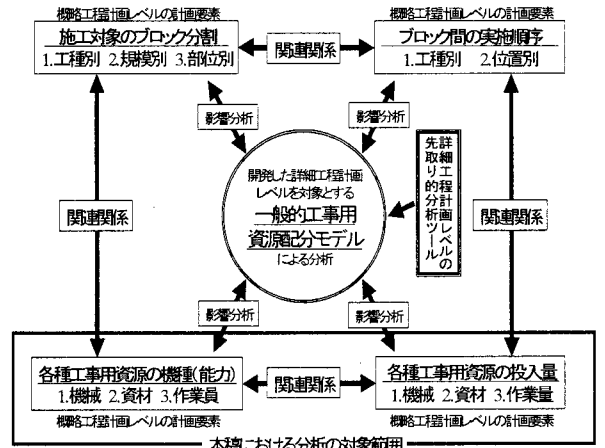


図-3 モデル分析の考え方

たりの施工能力を計画変数として導入するとともに、工事費用の最小化を目的とする最適化モデルとして定式化した。さらに、この概略工程計画モデルの計画変数の値が後続する詳細工程計画問題の前提条件となっていることは明らかであるため、この概略工程計画モデルと、前節で既に開発している詳細工程計画レベルを対象とした一般的資源配分問題とを統合化することにより、より合目的な上位計画レベルの計画要素の決定と、その決定が下位レベルに及ぼす影響を先取り的に分析できる計画プロセス間のハイブリッド型計画モデルを図-4に示すように構

築した。

なお、詳細工程計画レベルの分析ツールについては既に示しているので、以下では上述の概略工程計画モデルの定式化を示しておく。

Minimize

$$C(P_{ij}) \quad (4.1)$$

Subject to

$$P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad (4.2)$$

$C()$; 工事費用, P_{ij} ; 作業 j に投入する資源 i の 1 資源あたりの施工能力, $P_{ij}^{\min}$; 作業遂行可能な P_{ij} の下限値, $P_{ij}^{\max}$; 作業 j が遂行可能な P_{ij} の上限値, ; 工事施工遂行可能な P_{ij} の下限値, ; 工事施工遂行可能な P_{ij} の上限値

このとき、目的関数値である建設工事のトータルコスト $c()$ は、前節で開発した一般的資源配分問題を解いて求められる工程計画の結果から、式(2.1)に基づいてトータルコストを算出する詳細工程計画レベルの先取りの分析ツールから求められる値である。

なお、図-4 に示したハイブリッド型計画モデルは、概略・詳細工程計画モデル間のサイクリックな収束計算によって解を逐次改良していくことによって求解可能となるが、詳細な解法アルゴリズムについては、紙面の関係上割愛し発表時に示すこととする。

5. おわりに

本研究においては、建設工事施工計画における概略工程計画検討のために有効な計画情報化を目的と

した理論モデルの開発に関する研究を行った。

そこでは、まず概略・詳細工程計画レベルそれぞれの検討項目を整理するとともに、詳細工程計画レベルを対象とした工程計画問題を、従来の PERT/MANPOWER 問題とは異なり、各作業への投入資源量をも変数化したより一般的な工事用資源配分問題として定式化した。

さらに、概略工程計画モデルを工事費用の最小化を目的とする最適化モデルとして定式化した。そして、この概略工程計画モデルに、詳細工程計画レベルを対象とした一般的資源配分問題を下位レベルの先取りの分析ツールとして混成させたハイブリッド型計画モデルによるモデル分析の方法を示した。

参考文献

- 1) 春名攻：建設工事における施工管理に関するシステム論的研究，京都大学学位論文，1971
- 2) 春名攻，滑川達：ネットワーク工程表の構造特性分析と最適工程計画モデル構築に関する理論研究，建設マネジメント研究・論文集 vol. 4，土木学会建設マネジメント委員会，1996
- 3) 春名攻，滑川達，櫻井義夫：非線形・離散型費用関数に適用可能な新しい最適ネットワークスケジューリングモデルの開発研究—CPM とは異なったアプローチ—，土木計画学研究・講演集 19(1)，土木学会，1996
- 4) 春名攻，滑川達：PERT/MANPOWER 問題の最適解法の開発研究—カットネットワークにおける最適資源配分問題への変換を用いた新しい解法—，土木計画学研究・講演集 20(1)，土木学会，1997
- 5) 春名攻，滑川達，伊藤壮央：建設工事施工計画における一般的資源配分問題の最適解法の開発とそれを活用したモデル分析—概略工程計画検討のための計画情報化—，第 22 回土木情報システムシンポジウム講演集，1998

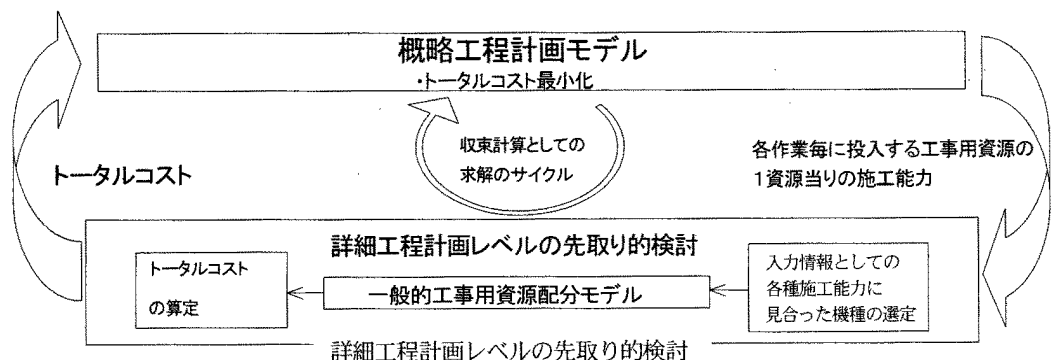


図-4 概略・詳細工程レベル間のハイブリッド型計画モデル