

コストダウンをめざした概略工程計画検討のための 計画数理モデル分析に関する研究

A Study on Development of Heuristic Approach to Obtain Cost-reduced Construction Planning and Scheduling by Utilizing Mathematical Planning Model for General Resource Allocation Problem

立命館大学理工学部

正 員 春名 攻*

J R 西日本コンサルタンツ株式会社

正 員 山田孝弘**

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****

by Mamoru HARUNA*, Takahiro YAMADA**, Susumu NAMERIKAWA***, Takeo ITO****

近年の建設工事における技能労働者の量的・質的不足の問題や、建設機械・資源の購入単価・使用料の高騰、さらには今日の財政の行き詰まりによる公共事業のあり方の抜本的見直しなどの問題を考慮すれば、コストが最小となるよう工事用資源の投入量を決定したり、同時にこれらの投入量を最も効率的に使用して、工期をできる限り短縮化したスケジュールを求める努力を払うことは、従来にも増して重要になってくるものと考えている。

このため、本研究では、これまでに以上の課題を効率的に達成できるような工事用資源配分問題を考慮するとともに、理論的にみても最適性の保証があり、実際的にみても操作性の高い詳細工程計画レベルを対象とする最適工程計画モデルの開発を行ってきた^{1) 2)}。

以上のような研究成果を踏まえ、本研究では、今回さらに、上述の既開発モデルを効果的に活用するとともに、概略工程計画レベルのより一般的な工事用資源配分問題を取り上げて、理論的・システム論的な検討を行った。即ち、概略工程計画レベルの計画要素である各種工事用資源の機種・規格などの選定問題をも考慮した、より一般化した工事用資源配分計画の方法に関する研究を行った。そこでは、現実的な計算量で計画要素と特性値の関連構造を把握することが可能な実験計画法の適用を中心とした上述の工程計画モデルによる計画数理モデル分析を通して、計画者にとっての有効な情報となりうる工程・原価・工事用資源の関連構造を把握するとともに、工事費用の低減化をめざしている。

【キーワード】コストダウン、概略工程計画、資源配分問題、モデル分析

1. はじめに

本研究グループでは、これまでのPERT系ネットワークプランニング・スケジューリング問題の最適解法に関する研究を行う過程の中で、工程ネットワーク構造のトポロジカルな特性分析を進めた結果、以下に示すような研究成果を得ている。即ち、カット集合とルート集合との間の順序関係が、トポロジカルな関係として、もとの工程ネットワークの作業間順序関係に変換されるメカニズムが存在することを明らかにした。さらに個々のカットを要素とするカットネットワークの構成方法を開発するとともに、各種のPERT系ネットワークプランニング・スケジューリング問題を、このカットネットワークを活用して変換し、求解可能な最適資源配分問題として求める方法を明らかにしてきた。

なお、このようなアプローチは、以下に示すような具体的な問題に適用され、その有効性が確認された。即ち、CPMの問題では、各ルートの短縮日数の最適配分問題として定式化し、DP手法を用いて最適解を求める方法を開発した。また、PERT/MANPOWER問題では、各ルートの実施日数を決定変数として、カットネットワーク上での資源量の1日あたりの使用量制約を考慮した最適時間配分問題に変換すれば、最適解を求めることが可能であることを明らかにした。

そして、上記のPERT/MANPOWER問題の最適解法に関する開発研究は、以下のような、より一般的な資源配分問題の定式化とその最適解法の開発研究につながることとなった。即ち、PERT/MANPOWER問題においては与件となる工事用資源の投入量についても変数化し、より一般性を高めていく形でモデル開発を行ってきた。しかし、このような工程計画問題においても、各種工事用資源の機種などについては、既に最適な選定が与えられていることを仮定しており、

*理工学部環境システム工学科 077-561-2736

**技術部土木設計 06-303-1446

***大学院理工学研究科(博) 077-561-2736

****大学院理工学研究科 077-561-2736

今後とも、まだまだ問題の一般化を進めていくことは、重要な課題であるといえる。

そこで、本研究では、今回さらに、上述の既開発モデルを効果的に活用するとともに、概略工程計画レベルのより一般的な工事用資源配分問題を取り上げて、理論的・システム論的な検討を行った。即ち、概略工程計画レベルの計画要素である各種工事用資源の機種を選定問題をも考慮した、より一般化した工事用資源配分計画方法の開発をめざした。そこでは、これまでの研究方針とは異なり実験計画法の適用を中心とする発見的なアプローチを採用した。これは、このような一般的な工事用資源配分問題に対して、数理計画理論を適用し最適探索することは難しいとともに、これまで、我々が行ってきた理論展開を適用しても、その実行可能領域の大きさにより、最適解を求める労力は非常に大きくなることが予想されるためである。即ち、理論的な最適性は保証されないものの、現実的に分析可能である本アプローチによってより一層のコストダウンのための有効情報を抽出できるならば、その開発には大きな意味があると考えた。

2. 最適資源配分問題の定式化とその解法

ここでは、まず開発する工事用資源配分計画システムの中核的なシステムモデルとして位置づけている既開発の最適工程計画モデルについてその概要を取り纏めておくこととする。

本研究では、効率的な資源の運用をより一層追求するために、各作業に対する単位時間あたりの投入資源量を、従来のPERT系のネットワークプランニング・スケジューリング問題のように一定値とはせず、計画変数として取り扱うこととした。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。

(1) 工事費用に関するモデル構築上の考え方

さて、ここでは、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、それとともに工程ネットワークを構成する各作業に対しては、最適

な工事用資源の機種や規格などは既に与えられているものとする。即ち、作業 j ($j = 1, \dots, n$) に必要な資源 i ($i = 1, \dots, m$) の延べ投入必要資源量 W_{ij} は、一義的に確定値として求められていると仮定する。

いま、作業 j の開始後第 k 週目の資源 i の作業 j への投入資源量を M_{ijk} とすれば、延べ投入必要資源量 W_{ij} は、

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^{D_j} M_{ijk} \quad (2.1)$$

で表される。ここで、 D_j は、作業 j を作業着手後から終了するまでに要した所要時間である。このように表すと、 D_j は M_{ijk} の増加に対して減少傾向の関係であり、少なくとも非増加であることが式 (2.1) より容易に理解できよう。

しかし、作業 j への投入資源量 M_{ijk} がある値以上になると、それに伴う作業能率の向上や所要時間の短縮があまり期待できなくなり、逆に、ある値以下になると、作業能率が極度に劣化したり作業の実行さえも困難となってくる場合が考えられる。このように、現実的には、 M_{ijk} に上・下限値が存在すると考えてもよい。以下においては、前者を最大投入可能資源量 M_{ij}^{max} 、後者を最小投入可能資源量 M_{ij}^{min} とよび、モデルの中に導入することとする。

即ち、第 k 週目の投入資源量 M_{ijk} は、

$$M_{ij}^{min} \leq M_{ijk} \leq M_{ij}^{max} \quad (2.2)$$

を満たさなければならない。

以下において、本研究で用いた投入資源に関する必要コストに対する考え方を整理して示す。即ち、資源投入に伴う必要コスト Z は、単位時間あたり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 (2.3) 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。即ち、

$$Z = \sum_i \sum_j W_{ij} \cdot c_i^1 + \sum_i S_i \cdot \lambda \cdot c_i^2 + q \quad (2.3)$$

ここで、

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 ; 単位時間への資源*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

である。

なお、 c_i^1 の内容としては、稼動経費、維持修理費、等々が考えられ、また c_i^2 の内容としては、保管関係経費、税金を含めた管理費などの存置費用が考えられる。そして、計画の作成においては、この Z を工事施工が実行可能な範囲でできる限り低減化することが望ましいことについては、これまでに論述してきたとおりである。

このとき、 c_i^1 、 c_i^2 は投入資源の種類に固有な値であり、また、 W_{ij} は確定値であるため、当然のこととして、その総和も確定値であることは明らかである。さらに、 q は当該工事に固有な値であることから、資源投入に伴う必要コスト Z の最小化は、式(2.4)の Z' の最小化と同義となる。

$$Z' = \sum_i S_i \cdot \lambda \cdot c_i^1 \quad (2.4)$$

ここで、 n を工程全体を通しての延べ遊休資源量と考えれば、延べ投入資源量 $S_i \cdot \lambda$ は式(2.5)のように表すことができる。また、逆に n は、投入資源量と工期によって変化する量であることが式(2.6)より容易に理解できる。

$$S_i \cdot \lambda = \sum_j W_{ij} + n \quad (2.5)$$

$$n = S_i \cdot \lambda - \sum_j W_{ij} \quad (2.6)$$

ここで、 W_{ij} が確定値であることと、式(2.5)、(2.6)の内容から、 Z' の最小化は式(2.7)のような Z'' の最小化と同義となる。

$$Z'' = \sum_i n \cdot c_i^2 \quad (2.7)$$

即ち、式(2.5)、(2.6)、(2.7)からも明らかなように、これまで示してきた計画問題は、結果として、総遊休費用を最小化するような工事用資源の最適投入量と最適工期(最適スケジュール)との

同時決定問題に帰着することがわかる。

以下においては、上述の考え方に従った問題の定式化と、DPを用いた最適解法について述べていくこととする。

(2) カットネットワークにおける資源配分問題の定式化とDPを適用した最適解法

今回の問題へのアプローチでは、まず、カットネットワークを、次のような方法で求めることから始めた。即ち、カットに含まれる元々のネットワークのアクティビティ間の順序関係を調べ、カット間の順序関係を決定した。つぎに、この順序関係に基づいて、個々のカットを結合点とする図-1のようなカットネットワークを求めることとした。そして、カットを結合点とするカットネットワークに対して、イニシャルレベルを設定し、式(2.7)に示した遊休費用を、資源の投入量と工期の関数 $C^L(S, \lambda)$ と表すこととする。このとき、関数 $C^L(S, \lambda)$ は、カットネットワークにおけるレベルを用いて式(3.1)のように分解することができる。したがって、遊休費用を最小化する工事用資源の最適投入量・最適スケジュールの同時決定問題を、カットネットワークにおける最適資源配分問題として、以下のような形に定式化することができる。

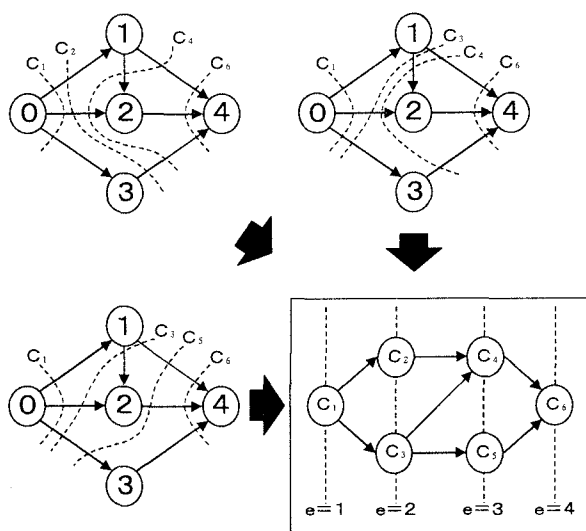


図-1 カットネットワーク

Minimize

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

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

Subject to

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

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

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

ここで、

S ; 工事用資源の投入量ベクトル ($S = (S^1, \dots, S^m)$ S^i ; 資源 i の投入量)、 λ ; 工期、 $\lambda^{\min}$; 工期の下限值 (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 ($e=1, \dots, N$)、 $c_e^i(\cdot)$; 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 ($S_e = (S_e^1, \dots, S_e^m)$ S_e^i ; 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 ($M_e^k = (M_e^{k1}, \dots, M_e^{km})$ M_e^{ki} ; 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)である。

なお、式 (3.1)は遊休費用の最小化であり、式 (3.2)は任意のカットで最低限必要な資源の投入量 S_e が、そのカットにおいて各ルートに配分される資源量の関数となることを表している。また、レベル e のカットにおける遊休費用は、式 (3.6)のようにして求められる。

$$c_e^i(\max_{1 \leq e \leq N} S_e, \lambda_e) = \sum_{i=1}^m \left\{ \max_{1 \leq e \leq N} S_e^i \cdot \lambda_e - \sum_{j \in P_e} \left(\frac{\sum_{k=1}^R a_{kj} \cdot M_e^{ki}}{\sum_{k=1}^R a_{kj}} \right) \right\} \cdot c_i^2 \quad (3.6)$$

ここで、

j ; 作業、 P_e ; カット C に含まれる作業集合、

a_{kj} ; ルート行列の構成要素 (1 or 0)、 c_i^2 ; 前述した資源 i の存置費用である。

つづいて、制約条件式 (3.3)は、単位時間あたりの投入資源量が工程を通して一定であるという前述の仮定より、必要投入資源量の最大値が当該工事の資源の投入量を決定することを示す。また、式 (3.4)は各カットに配分される所要日数の総和が工期の上・下限値の範囲内でなくてはならないという条件を表している。さらに、前述の仮定より作業 j への資源 i の延べ投入必要資源量 w_{ij} が確定値であるから、明らかにルート k への延べ投入必要資源量 M^k も確定値である。このため、式 (3.4)のような資源量に関する配分条件が設定される。

以上がモデルの定式化であるが、その内容からも明らかのように、この問題を解くためには、式 (3.2)の値 S_e を求める必要がある。いま、上述の定式化を上位ユニットと考えれば、 S_e の値を求める機能をもつ下位ユニットに上位ユニットが与えられる情報は $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ および λ_e となる。ここで $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ ならびに λ_e は、

$$j \in C_e \cap j \notin C_{e+1} \quad (C_e < C_{e+1}) \quad (3.7)$$

の条件を満たすような作業 (群) が現在カット C_e までに確実に終了する範囲で与えられる。

このとき、明らかに下位ユニットでは、必要資源量 $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ と所要時間 λ_e として与えられた入力情報のもとで、現在のカット C_e に含まれる作業の実施を保証できる最小の投入量を求めるため、以下のような部分問題を解くことが要求される。即ち、ここでは、この部分問題を、各ルートの資源量を各単位時間に割り付けるための最適資源配分問題として、次のように定式化する。

Minimize

$$S_e(M_e^1, \dots, M_e^R) = \max_{1 \leq e \leq N} S_{et}(M_{et}^1, \dots, M_{et}^R) \quad (3.8)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^R M_{et}^k = M^k \quad (k=1, \dots, R) \quad (3.9)$$

ここで、
 s_{et} ; 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 ($s_{et} = (s_{et}^1, \dots, s_{et}^m)$; s_{et}^i ; 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_{et}^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 ($M_{et}^k = (M_{et}^{k1}, \dots, M_{et}^{km})$; 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)
 である。

ここで、式 (3.7)は上位から与えられる入力情報のもとで最低限必要となる資源の投入量を表している。即ち、ここでは各単位時間での投入量が一定であることを仮定している、この投入量をもっとも資源を必要とする時間断面によって決定されることとなる。また、式 (3.8)は、各ルートに投入される資源量の配分条件である。

さらに、この部分問題の定式化における資源配分問題としての分解が、カット C_e では次のような状態になる。つまり、カット C_e が工程ネットワークの始点から終点への順方向（同一方向）に向かう作業のみで構成されており、作業の実施がカット C_e 上の時間の流れに沿って行われているため、この部分問題は、DPの基本原理である最適性の原理が適用でき、評価関数を次のような繰り返し関数方程式に変換することができる。

$$S_{e1}(M_e^1, \dots, M_e^R) = s_{e1}(M_e^1, \dots, M_e^R) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} & S_{e\lambda_e}(M_e^1, \dots, M_e^R) \\ &= \min_{0 \leq M_{e\lambda_e}^k \leq M_e^k} \left[\max \left\{ s_{e\lambda_e}(M_{e\lambda_e}^1, \dots, M_{e\lambda_e}^R), \right. \right. \\ & \quad \left. \left. S_{e\lambda_e-1}(M_e^1 - M_{e\lambda_e}^1, \dots, M_e^R - M_{e\lambda_e}^R) \right\} \right] \quad (3.11) \end{aligned}$$

以上の説明から容易にわかるように、この変換によってDPを適用して部分問題を解くことが可能となる。このとき、下位ユニットは必要資源量 ($M_e^1, \dots, M_e^R$)、および所要時間 λ_e のもとでの最小値 $S_e(M_e^1, \dots, M_e^R)$ の情報の双方を上位ユニットにフィードバックする。以上のようなイテレーションをすべてのカットに対して行うことにより、上位ユニットの全体問題の最適解を求めることが可能となる。

ここで、全体問題は、この問題がフィードバックのないシステムとしてのカットネットワークでの資源配分問題として設定されているので、上述の部分問題の場合と同様に、最適性の原理を適用することができ、以下のような繰り返しの関数方程式として変換することができる。

$$C_1^L(S, \lambda) = c_1^L(S, \lambda) \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} & C_N^L(S, \lambda) \\ &= \min_{\substack{0 \leq S_N \leq S \\ 0 \leq \lambda_N \leq \lambda \\ (\lambda^{\min} \leq \lambda \leq \lambda^{\max}) \\ 0 \leq M_N^k \leq M^k}} \left\{ c_N^L(S_N(M^1, \dots, M^R), \lambda_N) \right. \\ & \quad \left. + C_{N-1}^L(\max(S_N(M_N^1, \dots, M_N^R), S_{N-1}(M^1 - M_N^1, \dots, M^R - M_N^R)), \lambda - \lambda_N) \right\} \quad (3.13) \end{aligned}$$

以上に述べてきたように、最適解法としてDPを適用することにより、最小遊休費用ならびに資源の最適投入量、最適工期を厳密に求めることができる。さらに、そのときのスケジュールは、全体問題で最適解となった部分問題の決定変数ベクトルの合成を行うことによって、容易に表現できる。

3. より一般化をめざした工事に用資源配分計画の方法に関する検討

(1) 本研究におけるモデル分析の基本方針

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順序関係、建設工事に投入する各種工事用資源の機種や規格など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、単位作業の計画、それら作業間の順序関係（技術的・管理的順序関係）、投入す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と考える。

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。

このため、本研究では、前節で示した既開発の詳細工程計画レベルを検討対象として工程計画モデルを下位レベルの先取りの分析ツールとして、図-2に示した考え方で効果的に活用する。ここで、図-2には、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、投入する各種工事用資源の機種などの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、これらの決定を前提として開発した詳細工程計画モデルによる先取りのモデル分析を通して明らかにする。そして、これらの分析結果をベースとして、施工対象のブロック分割や工事用資源を媒介とした工程と原価との関連メカニズムに関して考察を加えていくという本研究の基本方針を示している。

(2) コストダウンをめざした実験計画法によるモデル分析の方法³⁾

ここでは、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-2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問題を取り上げたモデル分析の内容を示していくこととする。

工事用資源配分問題のさらなる一般化をめざしたこのようなモデル分析を行うにあたっては、これまで本研究が進めてきた工程ネットワークのトポロジカルな特性を効果的に活用するとともに、

離散最適化理論を適用したアプローチを採用したとしても、組み合わせ数が膨大となり、実際上の計算は困難となる。

このため本研究では、各種工事用資源の機種選定問題も含めたより一般的な工事用資源配分問題に対して次のような実験計画法を用いたヒューリスティックなアプローチを採用することとした。

いま、各作業遂行に必要な資源 i がある。この資源 i として投入可能な機種が k_i あるとすれば、ここでの問題は、コストが低減化するような作業 j の資源 i の機種 k_i を選定することである。

さて、前節で示した工程計画モデルは、機種 k_i が与えられているものとして定式化しているため、ここでは、この工程計画モデルを用いて、このモデルの前提条件である各作業ごとに使用する機種を変化させた形でのモデル分析を実施することとした。即ち、まず問題の解空間をランダム場であるものと仮定するとともに、作業 j に必要な資源 i を実験における因子とし、またその資源 i として投入可能な機種 k_i を水準とした実験計画を直交配列表にもとづいて設計する。なお、ここでの実験は、前節で示した工程計画モデルによる数値演算を示しており、このときの特性値としては、モデルのアウトプットである工事費用を取り上げている。

ここでは、問題の説明を、図-3のような作業数が7、各作業に必要な資源の種類が1つで、そのときの投入可能な機種が4つである例題ネットワークを用いて、具体的に示していくこととする。

なお、表-1には例題のインプットデータを、図-4には例題ネットワークのカットネットワークを示しておいた。

まず、表-2には、この例題における実験計画を L_{64} の直交配列表に割り付け、各実験に対して行った既開発の工程計画モデルによる数値演算の結果を工事費用として示した。

つづいて、この実験結果に対して分散分析を行い、各作業に投入する資源（因子）ごとの寄与率を算出する。ここで、例題における64の実験結果に対する分散分析表を表-3に示しておく。そして、寄与率の高い（ここでは5%有意となる）作業 j の

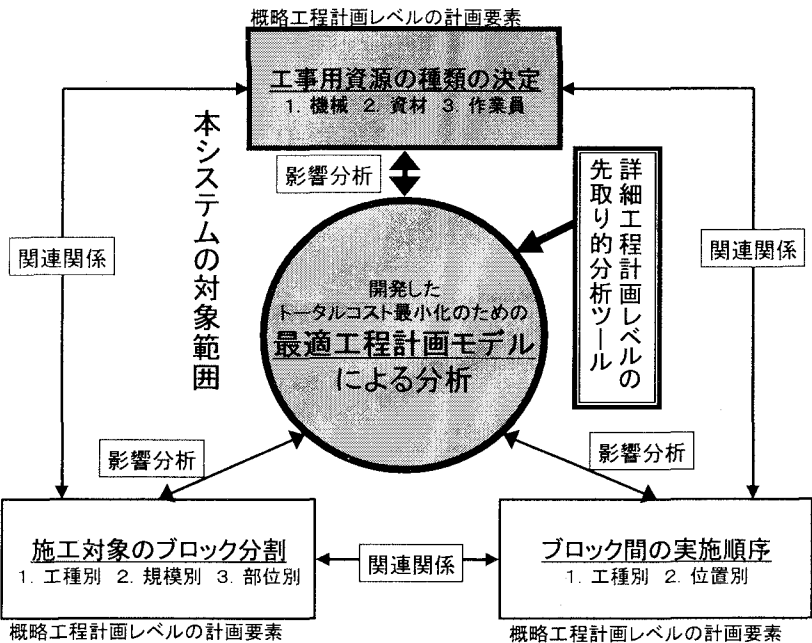
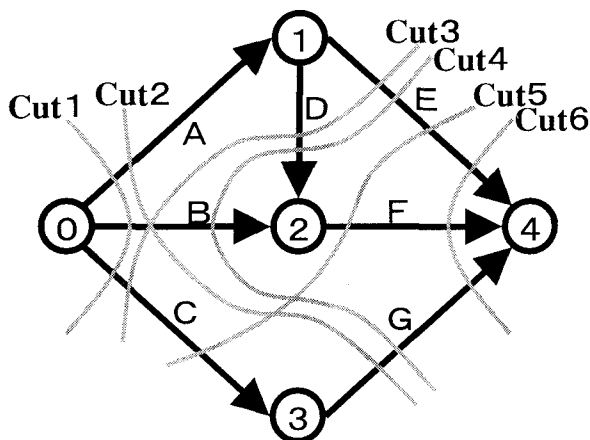
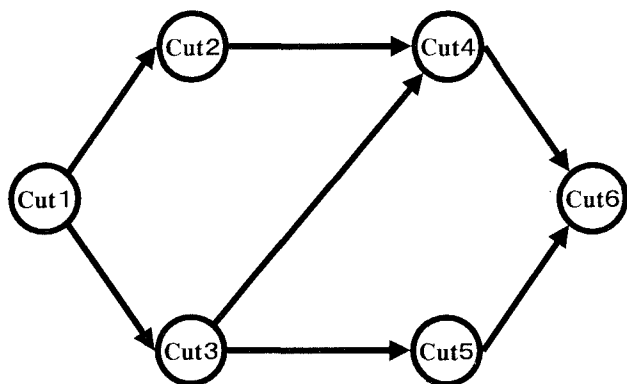


図-2 本研究におけるモデル分析の考え



図－3 例題ネットワーク



図－4 例題ネットワークのカットネットワーク

表－1 例題のインプットデータ

作業	資源1											
	機種1			機種2			機種3			機種4		
	延べ投入必要資源量	投入可能資源量の最小	投入可能資源量の最大	延べ投入必要資源量	投入可能資源量の最小	投入可能資源量の最大	延べ投入必要資源量	投入可能資源量の最小	投入可能資源量の最大	延べ投入必要資源量	投入可能資源量の最小	投入可能資源量の最大
A(0, 1)	2	1	2	4	1	2	6	2	2	8	2	4
B(0, 2)	3	1	2	6	2	3	9	2	3	12	3	4
C(0, 3)	5	1	3	9	2	4	14	3	5	18	4	6
D(1, 2)	3	1	2	5	1	1	8	2	3	10	3	5
E(1, 4)	3	1	1	6	2	3	9	3	4	12	3	5
F(2, 4)	4	2	3	7	2	4	11	2	3	14	3	4
G(3, 4)	6	3	3	11	3	4	17	3	5	22	4	6
存置費用	60万円/週・台			30万円/週・台			20万円/週・台			15万円/週・台		
使用費用	20万円/週・台			15万円/週・台			12万円/週・台			10万円/週・台		

資源 i に対する機種 k_i （水準）の変化と、特性値としての工事費用の変動の関係を調べる。即ち、例題においては、有意な因子として、作業Aの資源、作業Dの資源、作業Fの資源、作業Gの資源が抽出されるので、それぞれの投入資源に

対して図－5から図－8のような工事費用（特性値）との関係図を作成する。

そして、次のような条件を満たす水準を抽出することにより、寄与率の高い作業に投入する資源に対する機種の絞り込みを行うこととした。

- ①平均工事費用が最小の機種（水準）
- ②すべての実験の中で最小の工事費用となった実験を含んでいる機種（水準）

即ち、例題においては、図－5から図－8の結果より、作業Aの資源を機種1、作業Dの資源を機種1、作業Fの資源を機種1、作業Gの資源を機種1および機種4として絞り込むことができることがわかる。

このようにして絞り込んだ寄与率の高い作業に投入する機種を固定した形で、新たな実験計画を再び直交配列表に割り付け、同様の分析を行う。このような実験計画法によるモデル分析の一連のプロセスを、分散分析の結果、有意となる作業に投入する資源（因子）が存在しなくなるまで繰り返し行うことにより、一層のコストダウンを図った望ましい工程計画案を求めることができることとなる。

以上のモデル分析を、例題に対して実施した分析過程を図－9および図－10に示すとともに、図－11には最終的に求められた工程計画案を資源山積み図として示した。本例題においては、すべての作業に投入する資源が機種1となるパターンが実験中、最も安価な計画となった。なお、このようにしてコストダウンを図った工事費用としては、2,140万円が求められた。

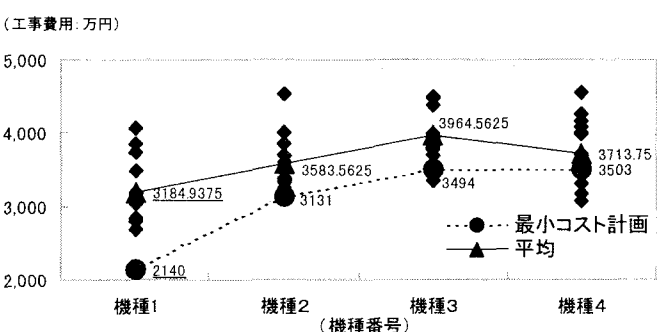
4. おわりに

本研究においては、詳細工程計画レベルの工事用資源配分問題を効果的な先取りの検討ツールとして概略工程計画レベルの要素である施工対象のブロック分割やブロック間順序関係、各種工事用資源の機種の決定などを考慮したより一般的な資源配分問題を取り上げて、理論的・システム論的な検討を行った。本稿では、このうち特に各種工事用資源の機種の決定に関する検討を行っている。そこでは、実験計画法の適用を中心としたヒューリスティックなアプローチを採用し、理論的には、求解不可能とされている問題に対して、最適性の

表－ 2 直交配列表によるモデル分析（実験）の割り付け

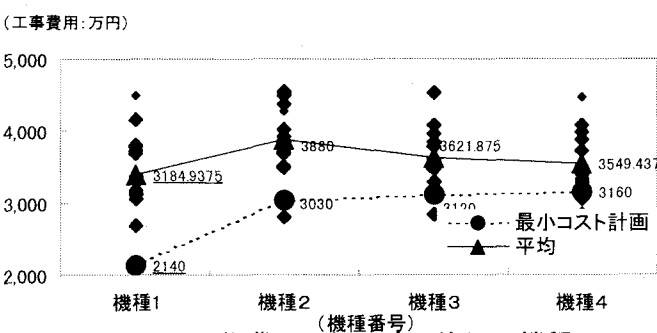
実験 番号	各作業に投入する資源(因子)の機種(水準)							使用費用	在庫費用	総費用
	A	B	C	D	E	F	G			
1	1	1	1	1	1	1	1	520	1,620	2,140
2	1	1	1	1	1	2	2	590	2,100	2,690
3	1	1	1	1	1	3	3	656	2,400	3,056
4	1	1	1	1	1	4	4	680	2,430	3,110
5	1	2	2	2	2	1	1	630	2,400	3,030
6	1	2	2	2	2	2	2	700	2,100	2,800
7	1	2	2	2	2	3	3	766	3,080	3,846
8	1	2	2	2	2	4	4	790	2,700	3,490
9	1	3	3	3	3	1	1	720	2,400	3,120
10	1	3	3	3	3	2	2	790	2,400	3,190
11	1	3	3	3	3	3	3	856	1,980	2,836
12	1	3	3	3	3	4	4	880	2,970	3,850
13	1	4	4	4	4	1	1	760	2,400	3,160
14	1	4	4	4	4	2	2	830	3,240	4,070
15	1	4	4	4	4	3	3	896	2,835	3,731
16	1	4	4	4	4	4	4	920	1,920	2,840
17	2	1	2	3	4	1	2	716	2,415	3,131
18	2	1	2	3	4	2	1	696	3,835	4,531
19	2	1	2	3	4	3	4	823	2,700	3,523
20	2	1	2	3	4	4	3	815	2,790	3,605
21	2	2	1	4	3	1	2	703	2,625	3,328
22	2	2	1	4	3	2	1	683	2,700	3,383
23	2	2	1	4	3	3	4	810	2,430	3,240
24	2	2	1	4	3	4	3	820	2,520	3,340
25	2	3	4	1	2	1	2	743	2,625	3,368
26	2	3	4	1	2	2	1	723	2,610	3,333
27	2	3	4	1	2	3	4	850	2,295	3,145
28	2	3	4	1	2	4	3	842	2,475	3,317
29	2	4	3	2	1	1	2	728	3,285	4,013
30	2	4	3	2	1	2	1	708	3,825	4,533
31	2	4	3	2	1	3	4	835	3,025	3,860
32	2	4	3	2	1	4	3	827	2,860	3,687
33	3	1	3	4	2	1	3	774	2,720	3,494
34	3	1	3	4	2	2	4	815	3,060	3,875
35	3	1	3	4	2	3	1	742	3,735	4,477
36	3	1	3	4	2	4	2	795	3,195	3,990
37	3	2	4	3	1	1	3	782	3,000	3,782
38	3	2	4	3	1	2	4	823	2,640	3,463
39	3	2	4	3	1	3	1	750	3,750	4,500
40	3	2	4	3	1	4	2	803	3,150	3,953
41	3	3	1	2	4	1	3	747	2,950	3,697
42	3	3	1	2	4	2	4	788	3,135	3,923
43	3	3	1	2	4	3	1	715	3,780	4,495
44	3	3	1	2	4	4	2	768	3,600	4,368
45	3	4	2	1	3	1	3	779	3,000	3,779
46	3	4	2	1	3	2	4	820	2,520	3,340
47	3	4	2	1	3	3	1	747	3,750	4,497
48	3	4	2	1	3	4	2	800	3,000	3,800
49	4	1	4	2	3	1	4	803	2,700	3,503
50	4	1	4	2	3	2	3	812	3,200	4,012
51	4	1	4	2	3	3	2	800	3,465	4,265
52	4	1	4	2	3	4	1	763	3,795	4,558
53	4	2	3	1	4	1	4	818	2,905	3,723
54	4	2	3	1	4	2	3	827	2,350	3,177
55	4	2	3	1	4	3	2	815	2,880	3,695
56	4	2	3	1	4	4	1	878	3,280	4,158
57	4	3	2	4	1	1	4	783	2,730	3,513
58	4	3	2	4	1	2	3	792	2,275	3,067
59	4	3	2	4	1	3	2	780	2,520	3,300
60	4	3	2	4	1	4	1	743	3,240	3,983
61	4	4	1	3	2	1	4	786	2,510	3,296
62	4	4	1	3	2	2	3	811	2,790	3,601
63	4	4	1	3	2	3	2	783	2,700	3,483
64	4	4	1	3	2	4	1	846	3,240	4,086
計								49,594	181,555	231,149

作業Aに投入する資源



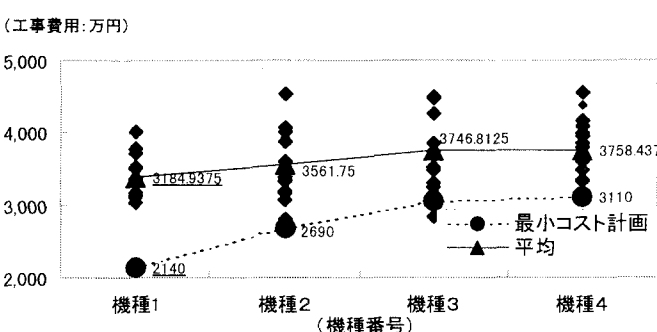
図－ 5 作業Aに投入する資源の機種と
工事費用との関係

作業Cに投入する資源



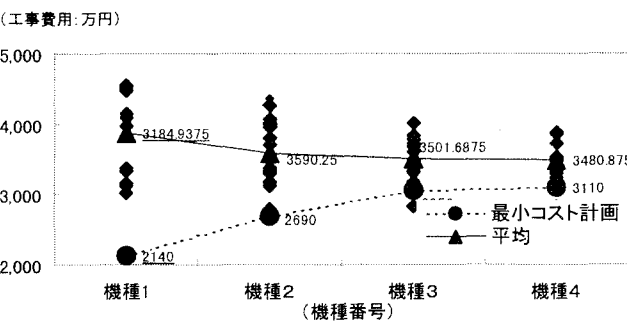
図－ 6 作業Dに投入する資源の機種と
工事費用との関係

作業Fに投入する資源



図－ 7 作業Fに投入する資源の機種と
工事費用との関係

作業Gに投入する資源



図－ 8 作業Gに投入する資源の機種と
工事費用との関係

表－ 3 分散分析表

各作業に投入する資源(因子)	自由度	変動	分散	純変動	寄与率(%)
A	3	5085505.5	1695168.5	4717338.3	27.94 **
B	3	400138.4	133379.5	31971.2	0.19
C	3	741222.2	247074.1	373054.9	2.21 *
D	3	1963319.7	654439.9	1595152.4	9.45 **
E	3	428451.3	142817.1	60284.0	0.36
F	3	1536865.5	512288.5	1168698.3	6.92 **
G	3	1575669.2	525223.1	1207501.9	7.15 **
e	42	5154341.5	122722.4	7731512.3	45.79
計	63	16885513.4		16885513.4	100.00

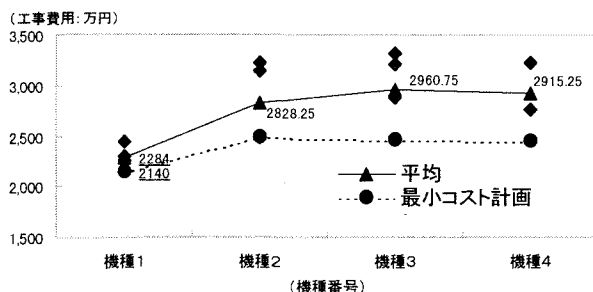
直交配列表

実験 番号	各作業に投入する資源(因子)の機種(水準)							使用費用	存置費用	総費用
	A	B	C	D	E	F	G			
1	1	1	1	1	1	1	1	1620	520	2140
2	1	1	2	1	2	1	1	1890	585	2475
3	1	1	3	1	3	1	1	1820	636	2456
4	1	1	4	1	4	1	1	1785	660	2445
5	1	2	1	1	2	1	1	1680	580	2260
6	1	2	2	1	1	1	1	1890	585	2475
7	1	2	3	1	4	1	1	2525	678	3203
8	1	2	4	1	3	1	1	2550	678	3228
9	1	3	1	1	3	1	1	1680	616	2296
10	1	3	2	1	4	1	1	2475	663	3138
11	1	3	3	1	1	1	1	2240	636	2876
12	1	3	4	1	2	1	1	2550	678	3228
13	1	4	1	1	4	1	1	1800	640	2440
14	1	4	2	1	3	1	1	2550	675	3225
15	1	4	3	1	2	1	1	2600	708	3308
16	1	4	4	1	1	1	1	2100	660	2760
計								33755	10198	43953

分散分析表

各作業に 投入する資 源(因子)	自由度	変動	分散	純変動	寄与率(%)
A					
B	3	763998.2	254666.1	12136.9	0.46
C	3	1179870.7	393290.2	150761.0	5.77 **
D					
E	3	181747.7	60582.6	0.0	0.00
F					
G					
e	6	485058.4	80843.1	244777.0	93.76
計	15			2610674.9	100.00

作業Cに投入する資源



直交配列表

実験 番号	各作業に投入する資源(因子)の機種(水準)							使用費用	存置費用	総費用
	A	B	C	D	E	F	G			
1	1	1	1	1	1	1	1	1620	520	2140
2	1	1	1	1	2	1	1	1800	550	2350
3	1	1	1	1	3	1	1	1800	568	2368
4	1	1	1	1	4	1	1	1725	580	2305
5	1	2	1	1	1	1	1	1920	550	2470
6	1	2	1	1	2	1	1	1680	625	2305
7	1	2	1	1	3	1	1	2100	658	2758
8	1	2	1	1	4	1	1	2025	670	2695
9	1	3	1	1	1	1	1	1920	568	2488
10	1	3	1	1	2	1	1	2100	598	2698
11	1	3	1	1	3	1	1	1680	616	2296
12	1	3	1	1	4	1	1	1995	628	2623
13	1	4	1	1	1	1	1	1800	580	2380
14	1	4	1	1	2	1	1	2070	610	2680
15	1	4	1	1	3	1	1	2070	628	2698
16	1	4	1	1	4	1	1	1680	640	2320
計										39574

分散分析表

各作業に 投入する資 源(因子)	自由度	変動	分散	純変動	寄与率(%)
B	3	181073.3	60357.8	77179.5	13.93 **
E	3	61463.3	20487.8	-	-
e	9	311681.3	34631.3	477038.3	83.07
計		554217.8		554217.8	

図-9 分析過程

(作業Gに投入する資源を機種1とした場合)

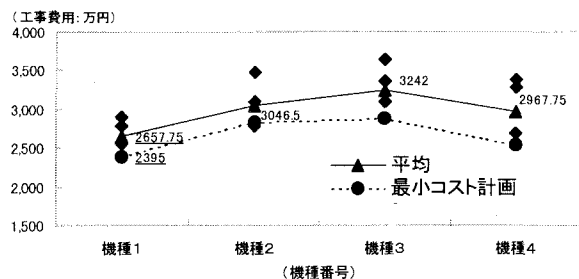
直交配列表

実験 番号	各作業に投入する資源(因子)の機種(水準)							使用費用	存置費用	総費用
	A	B	C	D	E	F	G			
1	1	1	1	1	1	1	4	1775	620	2395
2	1	1	2	1	2	1	4	2100	685	2785
3	1	1	3	1	3	1	4	2170	736	2906
4	1	1	4	1	4	1	4	1785	760	2545
5	1	2	1	1	2	1	4	2160	680	2840
6	1	2	2	1	1	1	4	2100	685	2785
7	1	2	3	1	4	1	4	2695	778	3473
8	1	2	4	1	3	1	4	2310	778	3088
9	1	3	1	1	3	1	4	2160	716	2876
10	1	3	2	1	4	1	4	2880	763	3643
11	1	3	3	1	1	1	4	2625	736	3361
12	1	3	4	1	2	1	4	2310	778	3088
13	1	4	1	1	4	1	4	1800	740	2540
14	1	4	2	1	3	1	4	2520	763	3283
15	1	4	3	1	2	1	4	2590	778	3368
16	1	4	4	1	1	1	4	1920	760	2680
計								35900	11756	47656

分散分析表

各作業に 投入する資 源(因子)	自由度	変動	分散	純変動	寄与率(%)
B	3	708209.5	236069.8	113757.3	5.63 **
C	3	905674.5	301891.5	179579.0	8.89 **
E	3	161907.0	53969.0	39594.5	1.96
e	6	244625.0	40770.8	1687485.2	83.52
計	15	2020416.0		2020416.0	100.00

作業Bに投入する資源



作業Cに投入する資源

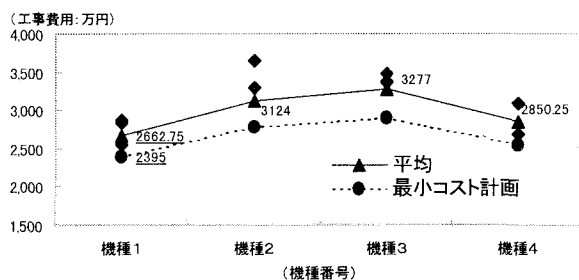
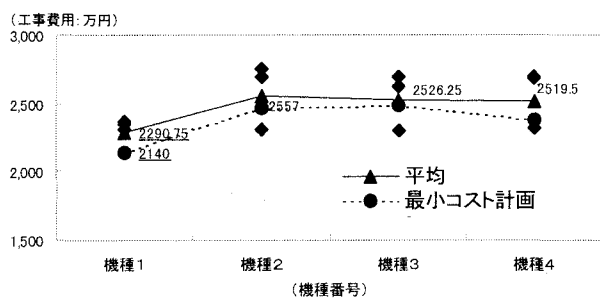


図-10 分析過程

(作業Gに投入する資源を機種4とした場合)

作業Bに投入する資源



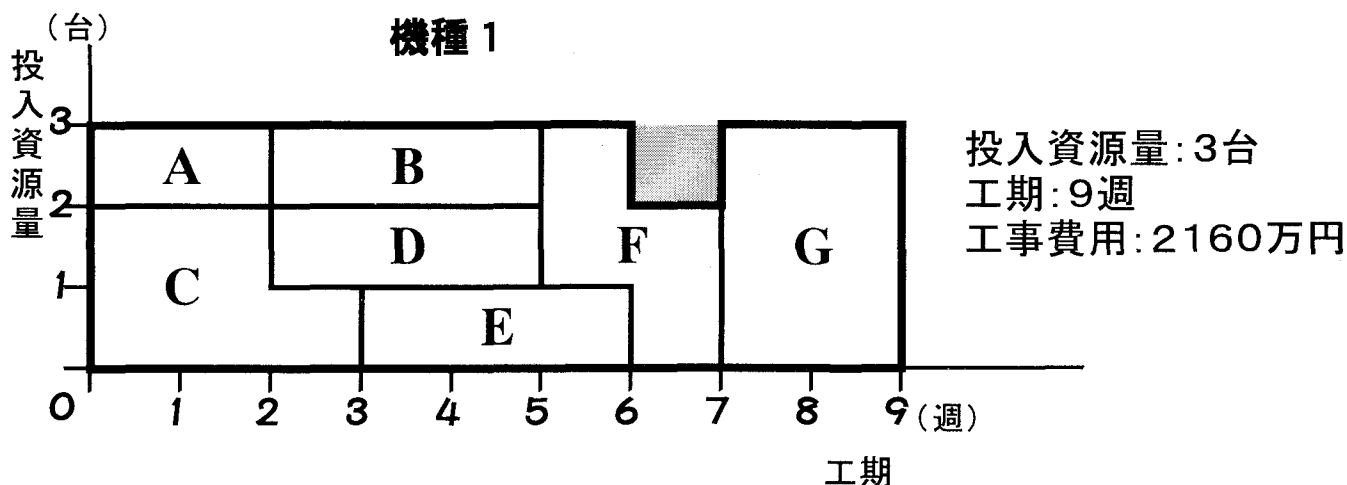


図-11 最も安価となった資源山積み結果

保証はないものの現実的な実験回数・計算量で、より望ましい工程計画案を策定する方法を提案した。

今後は、より大規模な実証分析を進めるとともに、さらにブロック間順序関係やブロック分割も考慮したより一般的な問題に対しても検討を加えていきたいと考えている。

参考文献

1) 春名攻，滑川達，櫻井義夫：

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，1997

2) 春名攻，滑川達，櫻井義夫：工事用資源の最適投入量決定問題に関する理論的研究，建設マネジメント研究・論文集 vol.5，土木学会建設マネジメント委員会，1997

3) 田口玄一：実験計画法 上・下，丸善，1976

A Study on Development of Heuristic Approach to Obtain Cost-reduced Construction Planning and Scheduling by Utilizing Mathematical Planning Model for General Resource Allocation Problem

In this study optimal scheduling problem with the minimum total cost of construction project is formulated through the topological analysis based on the theory of graph and network structure.

After formulating scheduling model an algorithm to solve it effectively is established DP procedure.

Moreover, general resource allocation planning system is studied through mode analysis using this scheduling model for the construction project planning.