

(II-1)

最適工程計画を目指したスケジューリングモデル の開発研究

A Study on the Development of Optimum Scheduling Model for Large-scale Construction Project

立命館大学 春名 攻*
立命館大学大学院 原田 満**
立命館大学大学院 ○荒川 和久**

By Mamoru HARUNA, Mitsuru HARADA, Kazuhisa ARAKAWA

現在、コンピュータを中心とするハード・ソフト両面での情報処理技術の発展は著しく、また、現場業務を支援する情報システムの開発の方法論も同時に大いなる進展を見せた。しかし、これらの多くは、単純な基本業務機能のシステム化が中心であり、現在では、処理の自動化や作業能力の軽減を目指すとともに、人間の思考に適した、より高度な検討処理方法の開発が望まれている。

このような判断のもとに、本研究においては、まず、工程計画・管理で生じる問題のうちでも特に重要な工程短縮問題を取り上げ、ネットワークボロジの考えを取り入れた分析を行ない、これにもとづいた新しいタイプの最適工程短縮モデルの開発を行った。次いで、例題を使つての本モデルの有効性の検討をとおして、最適工程のスケジューリング方法についての検討を行った。

【キーワード】 リミットパス・ネットワーク、カット、ネットワークボロジ、動的計画法

1. はじめに

現地生産、単品生産の言葉に代表される建設工事の計画・管理においては、現場に多くの権限と責任が与えられ、各個別工事の施工条件を考慮した独自の対応が必要とされている。また、情報処理技術・機器の著しい発展に支えられて、現場業務を支援する情報システムの開発も進展を見せたが、これらは各現場共通のシステムであると同時に、単純な基本業務機能のシステム化が中心であった。熟練な現場技術者の計画判断に関わる分野・行為を支援するための処理技術の開発・高度化は、今なお、検討段階にあるのが現状である。

そこで本研究では、ある目標となる基準が明確と

なれば、より高度な情報処理技術の開発や処理プロセスの改善が可能であると考え、最適化手法による理論的検討を行なうこととした。

本論文においては、これまでに基礎的研究として開発したネットワークボロジによる理論検討をベースとする工程短縮モデルの概要について述べることとする。さらに、本モデルの実務分野への適用を念頭において実証的に検討することによって、最適工程の策定方法について取りまとめることとする。

2. 工程短縮問題に関する検討

一般には、当初計画の策定、および施工の進捗に伴う修正計画の策定の、いずれの段階においても、制約工期内に工事が完了するように工程案を策定する必要がある。この他にも、工程の検討にあたっては、工事費用の低減、使用資源の効率的運用、等についても同時に検討を行う必要がある。しかし、現状では、熟練した管理技術者が、該当工事独自の条

* 正 員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)

** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(075-465-1111 EX3701)

件を考慮しつつ、過去の施工実績やノウハウにもとづいた検討を加えたり、それらの集約にもとづくヒューリスティックな方法によって計画案を策定することが多いため、工事が新工法であったり、大規模なものとなると、必ずしも合目的な計画案を策定してきたとは言い難い。

そこで、本研究では、実務においての重要な課題の1つである工程案の策定時における工程短縮の問題を取り上げ、その検討処理方法の改善を目指した理論モデルの構築を行った。

本モデルでは、前述の複数の検討項目のなかでも、工事費用の低減を同時に行えることが最も重要であると考え、図-1に示すように4段階の処理によって、工程短縮費用が最小となるような工程短縮案の

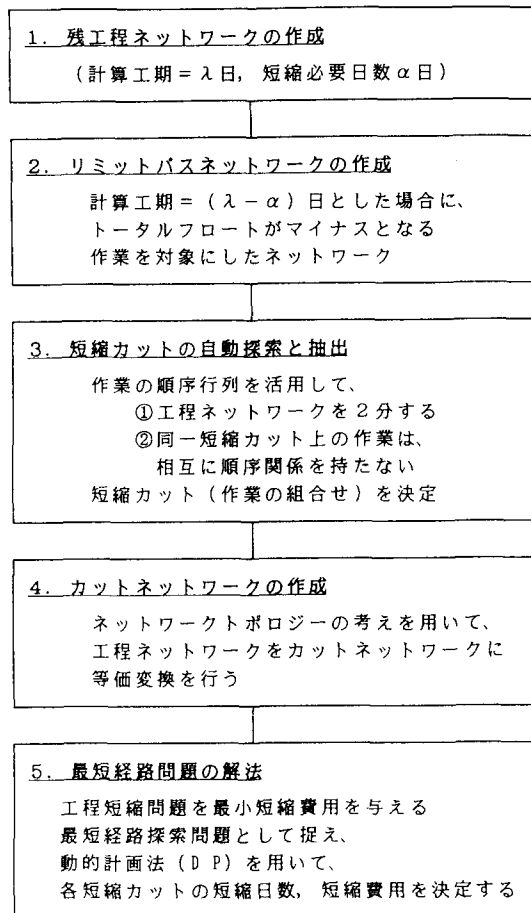


図-1 本研究の対象範囲

策定を行っている。

以下、本モデルの処理内容について、述べることにする。

(1) 工程短縮問題の基本的考え方

ここでは、問題の内容や理論的検討をわかりやすく説明するため、図-2(a)に示すような対象工事の工程ネットワークが与えられた場合について考えて行くこととする。工程ネットワークは、当初計画段階では、標準データ情報をもとに策定された標準工程であるとする。また、フォローアップ段階では、施工実績の集約と進捗予測の結果から与えられる残工程であるとする。

トータルフロート TF_{ij} ($(ij) \in P$) が0日のアクティビティからなるクリティカルパスは、始点と終点を結ぶ経路の中で、最長時間を要する経路である。このため、この経路が短縮対象であることは容易に理解されるが、ある必要日数 (α 日) の短縮を実行しようとした場合には、クリティカルパス以外にも短縮対象となるアクティビティの存在が推測できる。これに対して、トータルフロートがアクティビティの持つ全余裕日数であることに着目すれば、短縮対象となるアクティビティを限定することは、十分に可能である。すなわち、トータルフロートがマイナス値を示せば、予定工期に完了するためには、その日数分だけの短縮が必要である。

例えば、先の工程の最終時刻 (λ) が50日として算出され、 $\alpha = 5$ 日の短縮を行なう場合には、 $(\lambda - \alpha) = 45$ 日を最終終了時刻におきかえることで、当初のトータルフロートより α 日を減じた値が新たなトータルフロートとなる。

本研究では、工程ネットワーク全体を短縮対象として捉えるより、検討対象アクティビティを限定した方が合理的であると認識して、マイナスフロート作業のみを取り上げたネットワークを再構成することとした。

これらの概念は、ずっと以前にリミットパスの概念として考案されているが、本研究では、以後、このリミットパスよりなるネットワークを、リミットパス・ネットワークと呼ぶこととする。

図-2(b)にリミットパス・ネットワークを示したが、“ $J2 \rightarrow J7 \rightarrow J14$ ”の経路で2日、

“ $J2 \rightarrow J8 \rightarrow J9 \rightarrow J14$ ”の経路で5日、

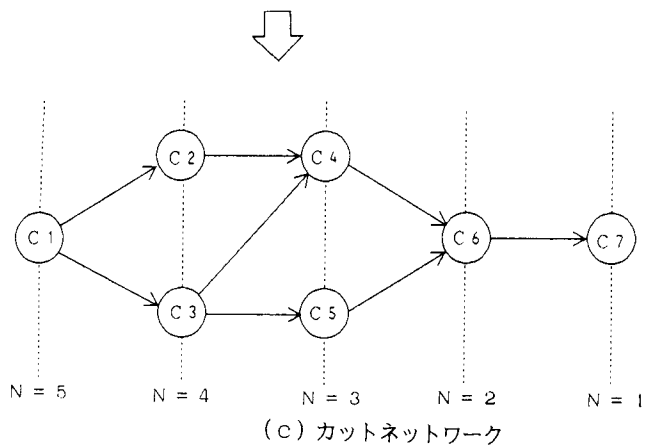
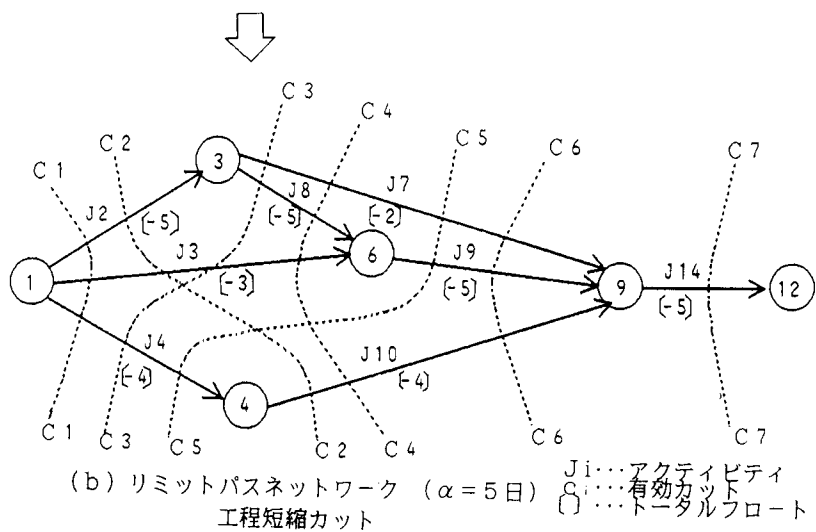
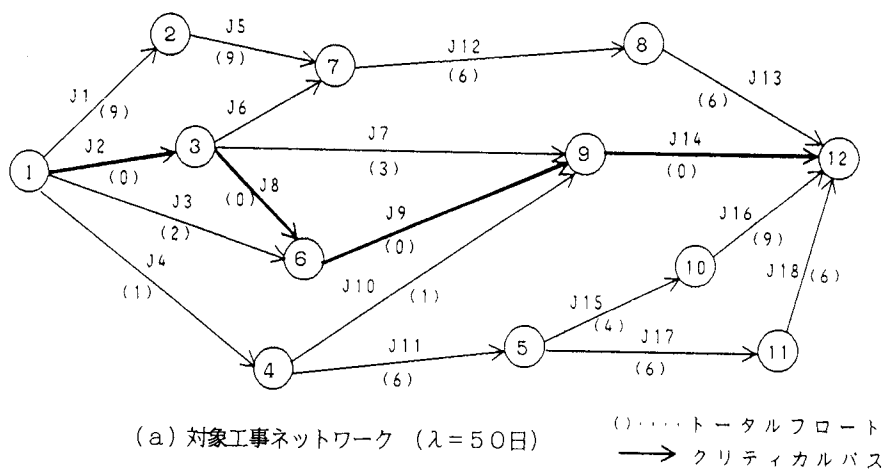


図-2 検討対象ネットワーク

” J3→J9→J14” の経路で3日、

” J4→J10→J14” の経路で4日、

を短縮することで、全体を5日短縮することが可能である。すなわち、工程短縮問題は、マイナスフロー作業により構成される、複数経路の同時短縮問題であると言える。

(2) 複数経路の同時短縮問題に関する検討

a) 工程短縮カット

複数経路の同時短縮を考えるにあたっては、従来より、CPM手法を中心に短縮カットをツールとした検討が行われている。一般に、工程ネットワークで通常用いられる短縮カットと、グラフ理論で定義されるカットとは異なり、図-2(b)に示すように、単に工程ネットワークを2分するだけでなく、片方の領域に工程の始点、もう一方の領域に終点が含まれるようにひかれたライン上にある、アクティビティの集合に限定されている。

そして、短縮時にはカットに含まれる全ての作業は同時に短縮され、カット日数は全体の短縮日数に等しい。このような特徴を活用して、本研究においても、上述のような短縮カットを用いた工程短縮モデルの検討を行うこととした。

b) 短縮カットの自動探索

工程ネットワーク(アローダイアグラム)と同じグラフ構造である有向グラフは、頂点の接続関係を示す接続ベクトル $N_i = [n_{ij}]$ 、グラフの閉路を示す閉路ベクトル $L_i = [l_{ij}]$ 、カットベクトル $C_i = [c_{ij}]$ 、というグラフ理論に取り上げられるのと同じ要素を有している。

これらベクトルの要素が1あるいは、-1である場合、接続行列では、辺 e_j が頂点 n_i に接続していることを、閉路行列では、閉路 l_j に辺 e_j が属していることを、カットベクトルでは、カット c_j が辺 e_j を含んでいることを示している。それぞれの正負は、グラフに属する辺の向きに対応したものである。これらの行列の間には、

(接続ベクトル)・(閉路ベクトル) = 0 (内積)

(閉路ベクトル)・(カットベクトル) = 0 (内積)

といった相互関係があり、接続ベクトルのみが既知であれば、閉路ベクトルおよびカットベクトルの自動探索が可能である。

グラフ理論における頂点、辺、閉路は工程ネット

ワークのノード、アクティビティ、ループと同等のものであるが、グラフ理論で定義されるカットには、工程短縮とはならない不必要なカットが含まれている。したがって、工程ネットワークに上述の関係をそのまま適用することは、不可能である。

しかし、本研究で考える処理プロセスを、将来的に実用化するためには、グラフ理論と同様に短縮カットを、自動探索出来る機能を保有していることが望ましいと考えた。

本研究においては、工事内容の検討レベルによっては、工程の種類も異なることが多いと判断して、アローダイアグラム固有のノード対象とした接続行列の形式だけでなく、作業間の順序関係を示した順序行列を中心に検討することが可能な、汎用性のある短縮カットの自動探索方法の開発を行った。

以下に、直接的な作業の順序関係を示した順序行列から、間接的な順序関係をも取り込むことによって求められる可達行列 M' を対象に探索する方法を概説する。

まず、短縮カット C_i が、工程ネットワークを2分することに着目する。このことは、任意のカット c_i に含まれる全作業の先行集合(先行作業の集合)と、可達集合(後続作業の集合)の和集合に、工程ネットワークを構成する全ての作業が含まれることによって満足される。

しかし、この方法で求めたカット群には、CPMと同様に、逆向き作業を持つカットや始点と終点が分離されず同じ領域内に存在するカットが含まれて求められてしまうこととなる。CPMと同様に、逆向き作業の短縮を行う場合には、短縮とは反対に所要日数を長くすることが必要である。しかし、実際の施工レベルでは、合理的に実務を遂行する立場からみれば、短縮は行っても、当初予定能力を引き下げのような検討はあまり行なわないのが現状である。

そこで本研究では、同一カット上にある作業の間には、順序関係を持たないようにルール化することにより、作業時間を伸ばす必要のあるアクティビティを含むカットを、全て除外することとした。そして、任意の短縮カット c_i に含まれる作業 J_j の可達集合には、作業 J_j 自身以外、カットに含まれる作業は存在してはならないといった条件を設け、カットベクトルと順序行列間の検討を行うこととした。

また、短縮カットは、作業の組合せ集合として捉えることができる。そして、短縮カットに含まれる作業はすべて同じ向きをもつことから、求める短縮カットベクトルの要素は、0あるいは1として示されることになる。したがって、要素が0と1との組合せとなるようなベクトルを定義したのちに、このベクトルが、先の2条件を満足するかどうかを判定することによって、工程短縮カットを自動探索することとした。その結果、図-2(b)のように、7つのカットが求められた。

(3) 最適化問題としての解法に関する検討

a) カットネットワークへの等価変換

従来、短縮カットは、複数経路を同時短縮するための有効なツールであるが、短縮カットはあくまで

も作業の集合であることに着目すれば、短縮カットも工程ネットワークの1つのアクティビティと同様な性格を持つものと考えられる。

短縮カット上の作業の順序関係を集約すれば、短縮カットも作業と同様に順序関係を持つこととなり、もとの工程ネットワーク(リミットパス・ネットワーク)の順序関係は保持される。すなわち、短縮カットには作業および工程ネットワークのトポロジカルな特性が写像されており、工程ネットワークにおける作業の順序関係は、そのままカット間の関係においても成立する。

このことから、この関係を用いれば、図-2(c)に示すように、短縮カットも工程ネットワークと同様に1つのネットワークとして描くことが可能である。

また、定義された短縮カットが工程上で交錯する場合は、それら短縮カット間で順序関係を持たないことであると理解できる。短縮カットネットワークは、工程ネットワークの始点から短縮カット同士が交錯しないように順次取り出した複数の経路を重ね合わせたものであると言える。

なお、カットネットワークを作成するにあたっては、カット同志の一対比較により、短縮カットベクトルと作業の可達行列との関係から、カット間の順序関係を機械的に算出することも可能である。すなわち、カット c_i に含まれる全ての作業がカット c_j の所有する作業の可達行列に全て含まれる場合、カット c_i はカット c_j の後続関係にあるという条件を用いればよいこととなる。

(b) 動的計画法を用いた

最短経路問題の定式化

前述のように、単純化されたカットネットワークには、工程ネットワークのトポロジカルな特性が保持されていることから、カットネットワークの始点から終点に向かう経路探索問題は、工程ネットワークの施工順序選択に等しいものと考えられる。すなわち、カットネットワーク上の始点と終点を結ぶいずれかの経路を通過することで、工程ネットワーク上の作業を全て通過したことになる。

そこで本研究においては、カットネットワ

表-1 DPによる最短経路問題の定式化

<目的関数> $C(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^n \{G_i(X_i)\} \rightarrow \text{MIN.}$ X_i: 短縮カットc_iの短縮日数 $G_i(X_i)$: 短縮カットc_iのX_i日短縮時の短縮費用
<制約条件> $\sum_{i=1}^n X_i = \alpha, \quad X_i \geq 0,$ α: 総短縮必要日数 d_{kj}: 工程ネットワークの経路kに属する作業J_{ij}の短縮日数
<関数方程式> $C_N(K_N) = \min_{0 \leq X_i \leq K_N} \{G_N(X_i) + C_{N-1}(K_N - X_i)\}$ $C_N(K_N)$: レベルNまでにK_N日短縮した時の総短縮費用 $G_N(X_i)$: レベルNでのX_i日短縮時の短縮費用 $G_N(X_i) = \sum_{t=A+1}^{A+B} Q_{ijt}$ Q_{ijt}: 作業J_{ij}の第t日目の1日短縮費用 A: レベル$(N-1)$までの作業J_{ij}の累積短縮日数 B: X_i日短縮時における作業J_{ij}の短縮日数 $\sum d_{kij} < (K_N - X_i)$であれば、 作業$J_{ij}$は短縮の対象作業 $(\alpha - TF_{ij}) \leq (K_N - X_i)$ $\therefore B = X_i$ $(\alpha - TF_{ij}) > (K_N - X_i)$ $\therefore B = X_i - (\alpha - TF_{ij})$

ークを1つの経路網として考え、最小費用を与える経路探索と、その経路での短縮日数の割り当て問題を解くこととした。

そして、本問題の解法には、最適性の原理を用いたDP（動的計画法）を用いて、表-1のような定式化を行った。DPを用いることによって、よりきめ細やかな検討が可能になり、総短縮費用の最小化や最適経路の選択は勿論のこと、各短縮カットの短縮日数・費用、さらには、具体的な作業の短縮日数

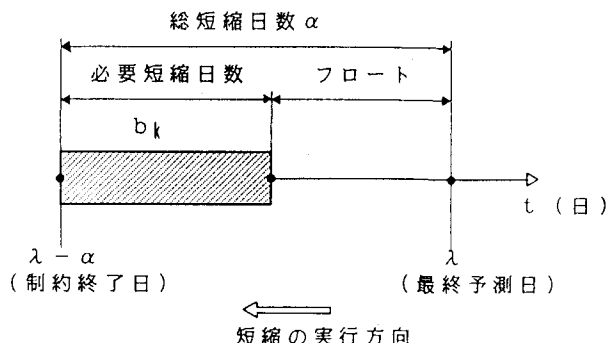
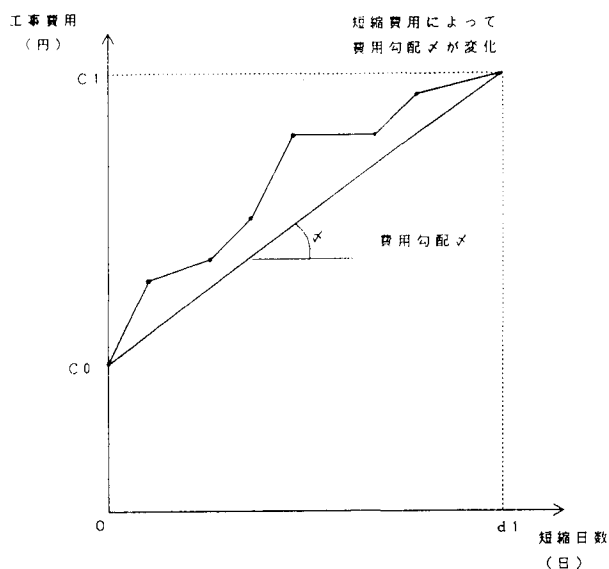


図-3 短縮カットの自動探索の方法



C0: 計画段階における見積費用
C1: 最大施工能力時の費用
d1: 最大施工能力時の短縮日数
C: 短縮日数 d における費用
($C = C0 + \Delta C$)

図-4 短縮費用勾配

・費用の算定を行うことができる。

本問題を解くにあたっては、以下の内容を考慮する必要がある。

対象となるリミットパス・ネットワークにおいては、全経路の短縮日数は同値ではなく、経路によって必要な短縮日数 (b_k) が異なっているため、本研究においては、全短縮カットの短縮日数の総和が工程全体の必要短縮日数 α 日に等しいという制約条件だけでは、経路 k を過剰に短縮してしまう可能性がある。

図-4 に、経路 k における短縮過程の概念を示したが、工程全体での短縮日数 α 日とクリティカルパスでない経路 k の必要短縮日数 b_k との間には、短縮に不必要なフロートが生じる。短縮を実行していく過程では、まず、 $(\alpha - b_k)$ 日のフロートが消化され、フロートが負となる状態から経路 k の短縮が実行されることとなる。このことは、関数方程式を解くにあたって、第 N 段階で短縮カット c_i を x_i 日短縮した時の短縮費用 ($G_N(X_i)$) を求める場合にもっとも考慮すべき点である。短縮カット c_i に含まれる作業 J_{ij} の短縮日数は、必ずしも x_i とは一致せず、経路の短縮状態によって、その値が異なる。

また、従来のモデルでは、限界短縮日数にいたるまでは、ある一定量にしたがって短縮費用が増加するような費用勾配が仮定されている。しかし、実務レベルでは、一定でなく、非線形であることが明らかにされている。

そこで本研究においては、先の問題とも合わせ、第 N 段階における短縮カット c_i についての短縮費用を求めるにあたっては、以下のような方法をとることとしている。

まず、第 (N-1) 段階でのリミットパス・ネットワークの状態を考える。カット c_i に含まれる作業 J_{ij} が経路 k に属しているときには、その経路 k の総短縮日数 ($\sum d_{kij}$) が、第 (N-1) 段階における総短縮日数 ($K_{n-1} - x_i$) より小さい場合は、経路 k は、短縮の途中段階にあるので、

作業J₁₁を短縮の対象としてとりあげる。

そして、第N段階においてカットc_iをx_i日短縮したときの作業J₁₁の短縮日数を求める。第(N-1)段階で、作業J₁₁のフロート($\alpha - |TF_{11}|$)と等しい、あるいはそれをこえる日数の短縮が行われている場合には、作業J₁₁も同様にx_i日の短縮を行なう。一方、フロートの日数に満たない短縮の状態では、作業J₁₁の短縮日数はx_i日からフロートを減じた日数となる。

また、N段階での問題を解く場合には、(N-1)段階までの事象は決定済みであり、作業J₁₁の累積短縮日数Aは容易に求められる。作業J₁₁の短縮日数をBとおけば、最終的に、カットc_iをX_i日短縮したときの作業J₁₁の短縮費用は、(A+1)日目から、(A+B)日目までの増加分の総和となる。そして、カットc_iに含まれる作業J₁₁全てについて、同様に求めた短縮費用の総和を求めればよい。図-2に示す、ネットワークに、表-2のような費用データを与えて本モデルを適用したところ、総短縮費用は 405万円となり、

”C₁→C₃→C₅→C₆→C₇”

の経路が最適経路として求められた。

各カットの短縮日数および、短縮費用は、

C₁・・・2日短縮で、 190万円
(J₂を2日短縮、J₄を2日短縮)
C₃・・・0日短縮で、 0万円
C₅・・・1日短縮で、 85万円
(J₉を1日短縮、J₄を1日短縮)
C₆・・・2日短縮で、 130万円
(J₉を2日短縮、J₁₀を1日短縮)
C₇・・・0日短縮で、 0万円

表-2 仮想工事の費用データ

アクティビティ	施工数量 m ³	標準 施工能力 m ³ /日	標準 所要日数	最大施工 能力	最小 所要日数	追加費用 円/日
J2	300	27.2	11	37.5	8	45.0
J3	450	20.5	22	25.0	17	60.0
J4	150	15.0	10	21.5	7	50.0
J7	400	20.0	20	23.5	17	50.0
J8	230	17.7	13	23.0	10	40.0
J9	280	28.0	10	40.0	7	35.0
J10	500	22.0	23	28.3	19	60.0
J14	300	18.7	16	23.0	13	160.0

◎リミットパスネットワークに存在する作業

各短縮作業の短縮日数の総和は、

J₂・・・2日 J₄・・・3日
J₉・・・3日 J₁₀・・・1日

のような結果を得た。

3. 本モデルの実務分野への適用に関する検討

前章で述べた工程短縮モデルは、工事費用による工程案の評価を可能にしており、制約工期内の完成は勿論のこと、工程案の工事費用の低減をはかれることから、非常に有効なモデルであると考えている。さらに、その処理方法も従来のCPMと比較して、非常に簡単なものとなっている。当初計画案の策定、及び施工の進捗にともなう修正計画の、いずれの段階においても制約工期内に工事が完了するような工程案の策定を行う必要があり、本モデルの適用範囲も非常に広範囲であると考えられる。

ここでは、実務レベルにおいて本モデルを適用することが可能な具体的な範囲とその周辺、及び機能性について検討を行うこととする。

近年においては、施工実績情報の有効な活用をはかり、計画・管理業務を合理化することを目的とした、計画・管理情報の標準化や、それに対応したデータベース化が進められている。さらに、処理作業のプロセスも標準化され、人間の判断や実行をとまなわれない単純な機能群についての各種支援情報システムもかなり確立されてきている。当初計画案の策定時においては、計画情報データベースと工程計画システムを併用することで、過去の施工実績に基づいた検討が可能であり、標準的であると考えられる計画案を策定することができる。しかし、このような標準工程も、完全に個別工事に対応したものではなく、計画者の熟練な実績経験を活用して、ヒューリスティックに工程の改善を行っている。処理の完全な自動化は、検討の幅を縮小させるとともに、個別工事の特殊性を考慮できない場合も考えられるので、標準工程が策定された段階で計画者に提示する一つの情報を提示するシステムとして、本モデルを適當することが望ましい。すなわち、本モデルで策定した工程案を、工事費用からみた最適工程として捉えることにより、その後の検討過程がより明らかになるものとする。しかし、計画段階においては、延べ資源量によって工事費用が算定されるため、資源種類を変更しない限りは、工事費用は一定として

取り扱われている。費用勾配の算定方法について、今後の大きな課題であるとも言える。

また、本モデルでは、工程ネットワークの構造とトポロジカルな特性に着目していることから、ブロック分割や広域にわたる施工法の変更など、もとの工程ネットワークの構造を変化させるような検討を行うことは不可能である。このような場合には、マスターネットワークとサブネットワークといった概念のもとで、工程アクティビティの検討レベルを変えて、それぞれのネットワークについて、本モデルを適用することが可能である。すなわち、工種あるいはそれより概略的なレベルで、施工法、およびブロック分割に対する検討を行うこととして、ブロックのレベルでは、各ブロックに投入する施工チームの内容やチーム数について、検討を行うことができる。

本モデルにおいては、短縮日数によって費用勾配が異なるような、非線形な費用関数を示す費用勾配についても対応することが可能である。

工種や施工ブロック程度の概略的なレベルをアクティビティにとった、全体工程レベルでの検討について考えると、ここで取り扱われるデータ・情報は、詳細な作業についての検討内容をそれぞれ集約したものであるから、費用曲線も統計的データとして整備され、図-4に示したような形態となることが予測される。この様な費用データを用いることにより、本モデルの適用は可能となるが、ブロック分割や工法の検討にあたっては、工事費用以外にも、出会い帳場のような安全空間確保等の施工空間上の制約、概略的な資源配分の観点から、評価・検討を行なう必要がある。線形構造物工事であれば、本モデルの適用後、直ちに座標式工程表に置き換えて、施工空間の確保に関するシミュレートを実施する等の、サポート的な機能を付加させることによって、実行可能性に対する評価が行えるとともに、合目的な工程案の策定が実現するものと考えられる。

ついで、施工管理段階におけるフォローアップ作業について考えることとする。フォローアップ作業のプロセスでは、まず、工事進捗状況に遅れを生じさせている原因を明らかにし、計画時の作業能力と実作業の能力との対比分析を行うことによって、工程の超過日数の予測を行う。そして、その超過日数

の短縮のための手段をこうして、制約工期を満足する工程案の策定を行っている。

また、短縮過程においては、最適な短縮方法が明確に示されていないことや、多忙な現場業務の中で全体工程の検討に費やす時間がとれないといった理由から、遅れの原因となっている作業のみを短縮の対象としていることが多いのが現状である。フォローアップ作業であっても、計画段階と同様に、工程の進捗予測や短縮の手段といった部分的にはボトムアップ的な考え方が必要であるが、全体的には、概略的な検討から、順次詳細部を明確にするトップダウン的な検討が合理的であると考えられる。すなわち、本研究では、前述のように、まず、工種レベルを対象とした概略的な日数の割付を行い、ついで、ブロックを検討レベルにとって、本モデルの適用を行うことにより、最適工程計画案の策定を行うことが効果的であると考えられる。

4. おわりに

本研究においては、工程短縮問題を取り上げて、最適工程を目指したスケジューリングモデルの開発を中心に検討を行った。本モデルは、ネットワークロジックの考えを取り入れた新しいタイプの工程短縮モデルであり、従来モデルより簡略化されたアルゴリズムを持つだけでなく、DPを解法に持つことで、きめ細かな検討を可能にした。

しかし、実務レベルへ適用するためには、費用勾配の設定方法等、検討の余地が残されている。今後は、実用化に向けたモデルの拡充と向上をはかるとともに、工事費用以外にも評価基準を設けた工程計画案の最適化探索問題について、理論的な研究を進めていく考えである。

〔参考文献〕

- 1) 吉川和広；土木計画学演習 森北出版（株）
1985年2月
- 2) 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、学位論文（京都大学工学博士）
1971年7月
- 3) 尾崎 弘，白川 功；グラフとネットワークの理論、コロナ社 1973年10月
- 4) 加藤昭吉；PERTの知識、日本経済新聞社