

工程管理における工期短縮方法に関する理論的研究

立命館大学理工学部 正 員 春名 攻
立命館大学大学院 学生員 原田 満
立命館大学理工学部 学生員 ○荒川 和久

1. はじめに

土木建設産業は、工事ごとに異なる場所・異なる条件下での受注産業であり、施工計画・管理にあたっては、各建設地域での施工特性の考慮や各工事に応じた計画と管理が必要とされる。また、土木工事は施工空間・期間が大規模であることや、施工の対象が自然であるため、計画段階において細部にいたるまでの予測を行うことは難しく、その施工過程においては、事前の検討・計画と同様に施工段階における修正計画の策定方法、つまりフォローアップ機

能が重要な位置をしめている。

そこで、本研究においては、施工管理レベルに着目し、計画工程と施工実績との比較・予測によって修正が必要と判断された場合における、工程の修正計画の策定作業のシステム化を行うための基礎的研究として、グラフ理論を用いた工程短縮モデルの開発を中心に研究を行った。

2. 工程フォローアップ方法に関する考察

土木工事の場合、先述のように不確定な事項や条件が存在していることから、工事の実施段階において、工程計画の検討成果から要求される工程・工期より著しく実際工事の遅れが認められる場合には、全体工期、工事進捗状況の遅速、工所用資源の調達運用方針、各作業における処理能力の変化、施工計画の変更、関連工事や周辺環境からの制約を考慮して工程計画の更新処理、つまり計画工程のフォローアップを行なう必要が生じる。

現状の施工管理業務においては、全体、月間、日常の管理レベルが存在しており、それぞれの管理期間に対応した工事工程表を作成して施工の進捗を管理するのが通常となっている。合理的・効果的な工事施工を実現するためには、上記の要件を満足する機能、すなわち、施工実績情報分析と修正計画を策定するフォローアップ機能を備えている必要があると考えられる。工程案の見直しにあたっては、翌日・翌月など比較的早い時期に施工する作業を対象に、短縮がはかられていたが、より増加費用が少なく短縮効果の高い修正案を策定するためには、残工程すべてを対象にフォローアップ作業を行ない、その結果を月間工程計画表としてとりまとめることが望ましいと考える。

また、これまでにフォローアップ作業の実現を目指した研究事例は数多く存在しているが、施工能力の限界や短縮にともなう費用の増加を捉えた方法、必要短縮日数を段階的に短縮していく方法が一般的

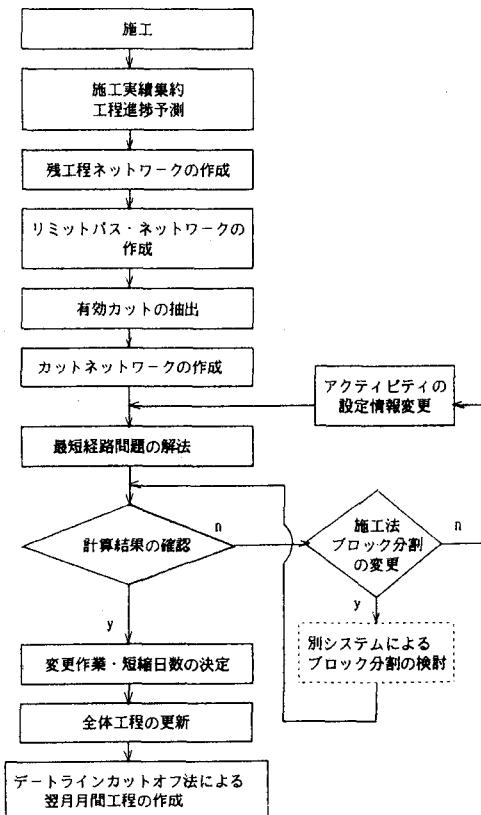


図-1 工程フォローアップ検討プロセス

Mamoru HARUNA, Mituru HARADA, Kazuhisa ARAKAWA

なものである。前者では、同時に時間短縮が可能な作業の組合せであるカットを用いて、短縮コストの最も安い単独のあるいは組合せとなった最小カットを探索することで短縮案を

策定している。しかし、機械的に処理を行えるもののそのアルゴリズムは非常に難解なものとなっているため個別現場へもちこむことは、難しいのが実状である。一方、後者は、ロジカルに計画者が短縮する方法を示している。通常、トータルフロートが0である作業は、クリティカルパスであることを示すが、このクリティカルパスの短縮だけでは、必要な日数を完全に短縮することは、不可能である。そのため、この方法では最終作業の最遅終了時刻を工期として後進計算を行ない、マイナスフロートの発生する作業を工程短縮の対象作業として捉え、これらをネットワーク上に図示したものをリミットパス・

ネットワークと呼んでいる。しかし、実際の短縮方法については、費用の概念までとりいれられていないだけでなく、決して有効で効率の高い方法であるとは言い難い。

個別現場において容易に取り扱うことが可能なフォローアップシステムを開発するためには、CPMの持つカット概念とリミットパスのような単純さを合わせ持つことが必要である。

3. 短縮カットの探索に関する考察

グラフ理論では、接続行列、閉路行列、カット行列の3つの行列のお互いの関係である

$$\text{接続ベクトル} \cdot \text{閉路ベクトル} = 0$$

$$\text{閉路ベクトル} \cdot \text{カットベクトル} = 0$$

を用いれば、カットの自動探索が可能であることが示されている。しかし、接続行列はアロー型ネット

ワーク固有の関係行列であるため、他の種類の工程表への適用は不可能である。そこで本研究では短縮カットの自動探索方法を以下のように考えた。カットの成立する条件を整理すると、

条件1. 任意のカット m_i は、工程ネットワークを2分することが理解できる。すなわち、任意のカットに含まれる全作業の先行集合と可達集合の和集合は、工程ネットワークを構成する全作業を含んだものでなくてはならない。ここで、順序行列および可達行列とは、各作業の順序関係からある任意の作業に対する全ての後続作業の集合を、行列で表したものであり。これらの行列は、工程表の種類にとらわれず、必ず存在している。この関係と先の条件とを用いれば、順序行列の可達行列を求めることにより、自動的にカット行列を求めることが可能である。

しかし、この方法で求めたカットは、CPMのような逆向きカットが含まれているため短縮とは反対に所要日数を長くすることによって、工程短縮を行う難解なアルゴリズムを持つこととなる。本研究がモデル開発の初期段階であることを考慮して、今回はこの逆向きカットを除外したカットを対象とすることとした。

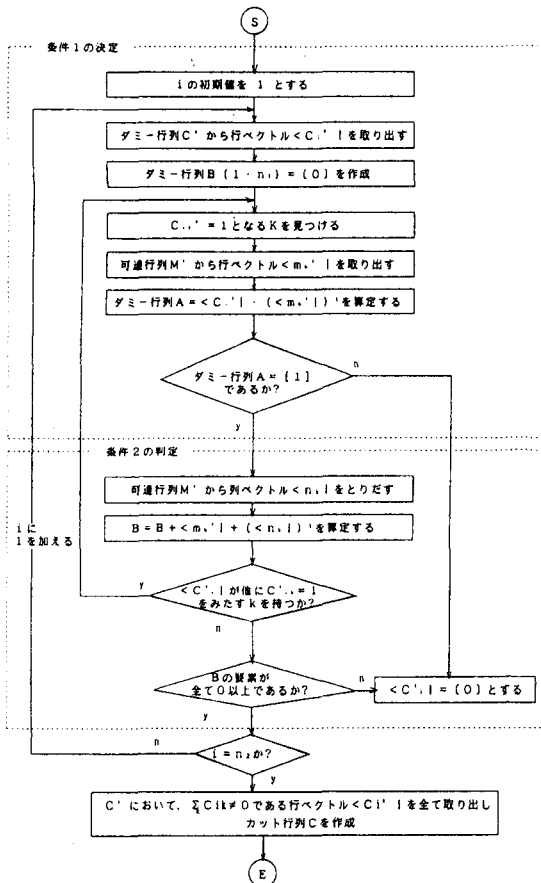


図-2 有効カット探索プロセス

条件2. 任意のカット m_i に含まれる作業 J_j の可達集合 $R(J_j)$ には、作業 J_j 自身以外、カットに含まれる作業は存在しない。すなわち、カット上の作業間には順序関係が成立しない。という条件を用いて、短縮カットの自動探索の手順を、図-2のようにとりまとめた。

4. カット間の順序関係に関する考察

従来のカット概念は、同時に短縮が可能な作業集合にとどまっており、カット間の有機的な関係には考慮していない。そこで本研究では、カットそれぞれを単独で取り扱わずに、カットの相互関係を考慮することで、より短縮過程が把握しやすくなると考え、カット間にネットワークポロジの考えを導入した方法を検討することとした。

カットは、工程短縮には非常に有効なツールであり、重々しく捉えるが、カットそのものはあくまでも作業の集合であることに着目すれば作業および工程ネットワークの特性を兼ね備えていることが推測できる。例えば、カットの定義ではカットに含まれる作業間には順序関係がないことを条件としていたが、逆を返せば、異なるカット間においては、作業の順序関係が成立することを立証するものである。すなわち、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が可能であり、この関係を用いれば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、定義されたカットが工程ネットワーク上で交錯する場合は、カット間で順序関係を持たないことが理解でき、カットネットワークは、工程ネットワークの始点から交錯しないカットを順にとりだした経路を持つことが解る。

なお、カットネットワークの作成するにあたっては各カット間の順序関係は、カット行列と作業の可達行列との関係から機械的に算出することが可能である。すなわち、 m_i カットが所有する全ての作業が、 m_j の所有する作業の可達集合にすべて含まれる場合、 m_i は m_j の後続関係にあるという条件を用いればよい。

5. 工期短縮モデルの定式化

本問題のような経路問題の解法には、種々のもの

があるが経路内での移動する事象は1つであることに注目すれば、多段階決定問題とした動的計画法で解くことができる。動的計画法を用いた場合においても、従来のCPMと同様に工期を満足する最小費用の短縮案を策定することには変わらず、まず、ネットワーク中の個々の作業について短縮費用と短縮時間との関係を明らかにする必要がある。

施工能力の変更は、資源の増投入によって施工チームを拡大する手段であるが、さらに短縮を要する場合は施工空間をブロック分割して新たな施工チームを投入するという手段が用いられる。そのため、費用と時間の間においては、連続的な線形とはならず、施工能力の限界時をこえると、急激に短縮費用が増加する離散型の数値関数のようになる。このような、ブロック分割を行った場合には、必要以上に工程を短縮することも予想される。これらの関係は、あらゆる作業に存在しており、作業 J_{ij} の1日当りの短縮費用は、ある区間ごとに異なるものとする。カットネットワークを対象とした本問題を解くためには、これらの費用をカット m_i の1日短縮費用として算定しなければならない。

$$G_i = \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \quad \text{----- (1)}$$

・ G_i ; カット m_i における1日当り短縮費用

・ Q_{ij} ; 作業 J_{ij} の1日当り短縮費用

・ n_i ; カット m_i に含まれる作業数

また、各カット m_i の短縮可能範囲を決定するには、必要短縮日数によって作成されるリミットパス・ネットワークの性質、を考慮しなければならない。一般には、カット m_i の短縮日数 X_i のとりうる範囲には、リミットパス・ネットワークのマイナスフロートが最も影響を与へ、

$$0 \leq X_i \leq V_i \quad \text{----- (2)}$$

として決定することができる。

・ X_i ; カット m_i における短縮日数

・ J_{ij} ; カット m_i に含まれる作業

・ V_i ; カット m_i に含まれる作業群で

のマイナスフロートの最小値(絶対値)

さらに、必要短縮日数を(a 日)とすると、リミットパス・ネットワーク中のマイナスフロートの最大値(絶対値)は、 a (必要短縮日数)となる。また、 a 以外のマイナスフロート b は k 種類存在して

おり、マイナスフロート b_k を持つ作業の経路では、 b_k 日以上短縮したとしても全体的な工期の中ではその短縮は無駄となる。(ここで、 $k=0 \sim$ マイナスフロートの種類数) このような、リミットパス・ネットワークの性質から制約条件式は、

$$A: \sum_{i=1}^{n_2} X_i = a \quad \text{-----} \quad (3)$$

(n_2 は、カットの本数)

$$B: \sum_{j=1}^{n_3} X_j \leq b_k \quad \text{-----} \quad (4)$$

(n_3 は、 m_j の本数)

と定義される。

また、構造化手法を用いてつくられた各カットの階層構造における各レベルを段階数として捉え、各段階においての X_i のとりうる範囲を次のように決める。

$$X_n \leq \min. (A_n - 0, V_i, B_n - 0)$$

(ここで n は、段階数)

最終的に目的関数は、総短縮費用の最小化問題として、

$$C(X_1, X_2, \dots, X_{n_4}) = G_1(X_1) + G_2(X_2) + \dots + G_i(X_i) \rightarrow \min. \quad (n_4 \text{ は、} 1 \sim i)$$

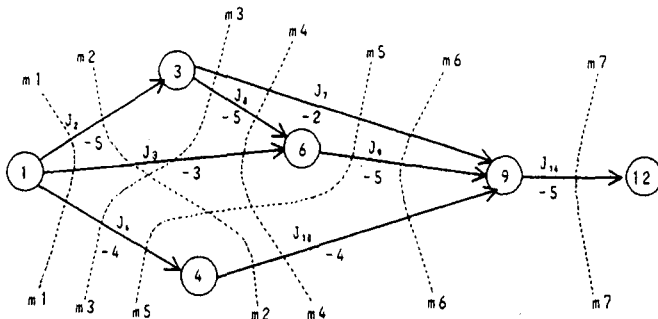


図-4 対象工事のリミットパス・ネットワークとカット

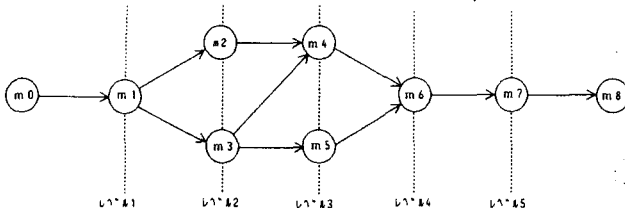


図-5 図-4 に示したすべてのカットを要素(ノード)とする対象工事のカットネットワーク

のように定式化できる。

6. 仮想工事への適用による実証的検討

本モデルの有効性を検証するために、18のアクティビティをもつ仮想工事を対象にして、実証的検討を行った。ここでは、5日の短縮問題を考えて、図-4に示すようなリミットパスネットワークを得た。“ $J_0 \rightarrow J_2 \rightarrow J_8 \rightarrow J_9 \rightarrow J_{14} \rightarrow J_E$ ”の経路はマイナスフロートが-5日であり、従来のクリティカルパスを示している。また、図中には各短縮カットを示したが、カット m_2 と m_3 および m_4 と m_5 が交錯していることが解る。次いで、このカットからカットネットワークを求めた結果、図-5のようになり5段階の決定問題として定式化された。本問題を動的計画法によって解いたところ最終的には“ $m_0 \rightarrow m_1 \rightarrow m_3 \rightarrow m_5 \rightarrow m_6 \rightarrow m_7 \rightarrow m_8$ ”の経路が選択され、また、最小カットから m_1 で3日、 m_5 で2日の短縮という案(カット日数の割当て案)が最も短縮費用が安くなり、7億3500万円となった。すなわち、作業 J_2 と J_3 は3日、 J_4 は5日、 J_7 と J_9 は2日を短縮することとした。

7. おわりに

本研究では、工程フォローアップ作業のシステム化にあたって、グラフ理論を用いた工期短縮モデルの開発を行った。本モデルは、工程表の種類を問わず適用が可能であり、短縮方法も施工能力の変更だけでなくブロック分割に対してもわずかではあるがその適用範囲を広げていることから、より幅広い検討が行えるものとする。

また、今後は作業の短縮のみを考えるだけでなく、CPMのフローアルゴリズムのように短縮作業と延伸作業の組合せて工期短縮を考える方法の検討を進め、さらに、モデルの拡充と向上をはかっていく考えである。