

ネットワークモデルによる施工計画
システムに関する研究STUDY ON A CONSTRUCTION PLANNING SYSTEM
BY NETWORK MODEL川崎 健次*・春名 攻**・田坂隆一郎***・笹嶋 博****
By Kenji Kawasaki, Mamoru Haruna, Ryuichiro Tasaka and Hiroshi Sasajima

1. 緒 言

近年における土木工事の大規模化・複雑化の傾向は著しく、土木技術の内容も大きく変化してきている。すなわち、大規模な土木工事の複雑な施工工程を効率的に実施していくために、従来は想像もしえなかったような大型・特殊建設機械が開発され、土木工学の発展に基づいて数多くの新しい工法や材料が開発されてきた。このように、技術の革新は主として土木技術における施工技術の開発の面で急速に進展した。しかしながら、施工技術を駆使することによって、土木工事を合理的に実施することをその機能とするところの施工計画・管理技術は、これら施工技術の進歩に比して低い水準に甘んじているのが現状である。

従来、土木工事における施工計画・管理の技術の発展に対する努力の多くの部分が、工程・原価・品質などのように個別に設定された管理目標の水準を達成するための技術の確立に向けられていた。しかし、近年のように工事規模が大型化し、工事内容が複雑・多様化してくると、工程・原価・品質などの管理目標を設定して管理を行なう方法や、工事の出来高を管理の指標とする管理の方法、あるいは経験豊富な工事管理者の個人的な能力にたよるような管理体制だけでは、工事のメカニズムを実体的にとらえることができなくなっている。すなわち、各管理目標と工事施工における努力目標との相互の関係を明らかにすることができず、結果的には工事施工の目的性を保証しえなくなっているのが、現状であると考えられる。したがって、今後においては早急にこれらの管理目標と努力目標相互の関連を明らかにすると

もに、これに適応したシステムティックでしかも施工計画・管理の目的を総合的に追求することのできるような技術を確立していくことが必要であろう。

2. 施工計画・管理における工程計画の位置づけ

さて、現実の工事においては、管理目標としてあげられる原価・品質と施工工程との間には以下のような有機的な関係が存在している。すなわち、工事原価は工程を構成している各作業に投入される各種資源の量と、これらの資源の時間拘束の関数として表わされる。つまり、同一工事でも工程の内容が異なると、たとえ投入資源の種類や数量が同じであっても工事原価が大きく異なってくる。また品質に関しては、構造物が一度できあがった後に、品質の改善を行なうことは多くの手間と費用が必要となるため、構造物の建設過程、すなわち工程をとおして原材料の品質の検査と作業管理を行ない、構造物の品質を保証することが必要となる。

このように、工程はもちろんのこと原価・品質などの計画・管理における努力目標は、施工工程とこれら原価・品質の間の有機的なメカニズムを通して、はじめて総合的にかつ実的に追求していくことができる。また、このようなメカニズムは、ネットワークモデルを導入して工程計画のプロセス化をはかることにより、かなりの精度をもって求めることが可能である。また、ネットワークモデルによって工程計画を表わすと、各作業の実施過程やすべての資源の使用状況が容易に求められるので、それに基づいて原価管理や品質管理を実施することが可能となる。

一方、工程計画は、施工技術的な制約や工期、さらには工用資源に対する制約など、工事施工に対するあらゆる制約条件を満足するようにすることが必要である。一般的にはこれらの制約の中でも、工期や工事費用に対する制約が最も強い制約条件となっており、また、工事

* 正会員 (株) 鴻池組 技術研究室次長
** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室
*** 正会員 工修 (株) 鴻池組 技術研究室
**** 正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所

の実施段階では構造物の設計値や施工法はすでに決定されていて、投入される各資源の量も決められている場合が多い。さらに、これらの投入資源の運用計画は工程計画に基づいてなされるが、その結果として求められる工事完了時刻と工事費との間に強い相関関係のあることが、これまでの事例研究によって認められている。すなわち、工事期間を通じて一定量の資源を投入する場合、完了時刻が短くなるように工程を定めると、工事費用が少なくなり、経済的にも好ましい結果を与える可能性が大きくなるのが導かれている。

以上のように、工程計画は施工計画や管理に対して大きな意味をもつ。このような観点から、本研究においてはネットワークモデルを導入して計画作成のためのシステムモデルを作成するとともに、それらを中心とする施工計画のシステム化に関する考察をすすめることにした。

3. 工程計画を中心とする施工計画のシステム化

本研究においては、施工計画の構成を以下に示すようなプロセスとして具体化した。

- (1) 工程計画の代替案作成のプロセス
- (2) 施工計画の代替案作成のプロセス
- (3) 施工計画の総合評価のプロセス
- (4) 実施計画の決定のプロセス

さて、以上の各プロセスによって、施工計画の合目的性を総合的に追求していくためには、これらのプロセスを通しての一貫した評価基準が必要である。いま、通常状態の下で、通常の実行を行なうという前提のもとでは、これらの評価基準として、

- ① 経済性・じん速性・確実性等の合目的性
- ② 実行可能性 (Feasibility)
- ③ 管理のしやすさ (Controlability)

などをあげることができる。本システムにおいては、システム中の各プロセスのレベルに応じて、これらの評価基準に対応する評価要因をとりあげるとともに、総合化をはかることにする。

(1) 工程計画の代替案作成のプロセス

建設工事は単位となる数多くの作業によって構成されているが、工事施工におけるこれらの作業間の関係を強く規定するのが工程である。現実には工事が与えられ、設計図・示方書ならびに現場の施工条件などが明らかにされると、まず必要なことは、これらの情報に基づき、構造物を施工技術的な観点から、いくつかの単位の施工ブロックに分割していくことである。次には、各施工ブ

ロックに含まれているあらゆる工種について単位となる作業を各工種ごとに求めなければならない。

すべての作業が求められると、各作業ごとの作業計画として、以下に示す5つの作業特性を決定する必要がある。すなわち、まずはじめに作業内容そのものを規定するところの、

- ① 作業量
- ② 作業手順
- ③ 所要資源 (建設機械・仮設材・材料・作業員) の種類と規格・数量

などを決める。次に、これらの作業内容にしたがって、作業を実施するために必要な

- ④ 所要費用 (直接費用)
- ⑤ 所要時間

などを求める。

このようにして、各単位の作業の計画が作成されると、次にこれらを実施するために必要な順序関係にしたがって、これらの作業をネットワークとして組立てていき、工程計画を表わす工程ネットワークを作成しなければならない。

ところで、工程ネットワークを規定する作業の順序関係には、施工法・施工技術的側面から決定され、あるいは現場の環境条件に対する施工の安全確保さらには技術的現実性を追求するための手段として決定される技術的な順序関係と、各種工事用資源の効率的な管理・運用をはかるために計画される管理的な順序関係が存在する。ここで、技術的順序関係はあまり選択の余地がなく、作業計画の内容が明らかになるとほぼ一意的に決まってくる順序関係であるが、一方の管理的順序関係は、各種投入資源の運用順序に基づいて決まるものであり、運用対象となる資源の内容や運用方法を変えることによって順序関係に種々の代替案を考えることができる。そして、工程計画の代替案はこの管理的順序関係の内容によって規定される。したがって、考えられる限りの工程計画の代替案をすべて求めようとすると、その数は膨大なものになってしまう。計画の作成を実行可能なものとするためには、このように膨大な代替案の数を減少せしめるような適切な手段を講じることが必要である。さらに、この段階で運用計画の対象として取り上げるべき資源としては、過去の経験から、① 運用計画の良否が工程計画の良否に大きく影響すると考えられる資源、② その費用が全工事費用に占める割合の大きな資源、③ 量的な制約が特に厳しい資源などに限定することが望ましい。

さて、工程ネットワークが求められると、すでに求めた所要時間を用いて作業スケジュールは容易に計算されるので、工程計画の代替案の数を合理的に減少させるためには、与えられた工期と代替案の作業スケジュールと

を比較すればよい。そして、工期の制約を満たすような工程計画のみを実質的な代替案として採用すればよい。

(2) 施工計画の代替案作成のプロセス

いま、施工計画の代替案を作成するためには、上述の手順によって求められた工程計画の代替案に基づいて、次のような諸計画を作成することが必要である。

- ① 工程計画 ② 作業要員計画
- ③ 機械計画 ④ 資材計画
- ⑤ 現場設備配置計画 ⑥ 資金計画

これらの諸計画は、すでに求められている作業計画や工程計画に基づいて比較的容易に作成することができる。ここで、各計画の作成方針を述べると次のようである。すなわち、工事施工における中心的な課題は工程計画に規定されている各作業を円滑にかつ不都合の生じないように実施していくことであるから、工程計画以外の諸計画(ここでは、これを関連諸計画と呼ぶことにする)の作成においては、工程計画で決定される要素以外の管理要素、たとえば機種別の作業要員数、機材の投入数量などを対象とすること、さらにこれらを対象として各計画個別の計画作成基準に基づいて計画作業を進めることが必要である。しかし、各関連諸計画にはさまざまな計画作成基準が存在しており、一つの工程計画が与えられたとしても、そこには種々の計画内容を想定しうるが、工程計画がすでに求められているという前提のもとでは、これに反しない限り、諸計画は個別に最適化をはかることは可能である。したがって、結果的には工程計画の代替案と、定められた枠内での最適な各関連諸計画を1対1に対応させて求めることができると考えても問題はないものと考えられる。以上のことから、各関連諸計画の作成にあたっては、工程計画にしたがって行なわれる工事施工が合目的に遂行されるようにすることを第一の目的とし、その目的を充足できる範囲において、各関連諸計画の合目的性を追求することによって施工計画の代替案を求めていくことが合理的であるといえよう。

(3) 代替案の総合評価のプロセス

以上のプロセスによって、施工計画の代替案が作成される。次に、工事施工における制約条件に関する検討、さらには合目的性や実行可能性に関する検討をさまざまな側面から行なうことによってこれらの代替案の中から実施計画の選択対象となる代替案をとりださなければならない。

さて、工事施工における制約的条件としては、まず工期の制約がとりあげられるが、工期の制約に関しては、前のプロセスにおいてすでに評価がなされているので、このプロセスでは検討の必要はない。しかしながら、工

事施工が不確実な施工条件下で実施されることに起因するスケジュールの不確実性に関しては検討されていないので、もし必要があればこのプロセスにおいて検討を加える。検討の結果、目標の基準より低い信頼度を示すような代替案は棄却することが必要である。次に、近年不足する傾向にある作業要員、特に熟練を要する作業要員の所要人数の最大値が、現実に確保しうる人数と比較して、所要人数のほうが多い場合にはその代替案は棄却しなければならない。また、工期をとおしての資源の運用計画において、所要人数にあまり大きな変動があるものは現実性に乏しいので選択対象からはずすことにする。建設機械や資材に関しては、所要数量や拘束期間さらには稼働率等を対象として評価・検討を行なう。また、工事中の稼働空間や保管のための空間を現場内で確保しうるかどうかを検討して、適切でないものは除外する。工事資金に関しても資金調達計画が不可能に近いものであったり、現実性の乏しい場合にはその代替案を除外する。このように、作成された施工計画の代替案が、与えられている制約的な条件を満足させなかったり、合目的性や実行可能性に問題があるような場合には、それらの代替案はすべて除外する。そして、このプロセスを経たのちに残されたものだけを実施計画の最終的な選択対象とする。

(4) 実施計画の決定のプロセス

以上のプロセスを経たのちに残された代替案は、実行可能性、合目的性その他の側面から総合的な評価を経て選択された施工計画案である。したがって、いずれの計画を実施計画として選択したとしても何らの不都合はない。しかし、実施計画の選択対象となる代替案が複数個存在する場合には、それらの中から最も合目的な計画を選択しなければならない。このような場合には、以下に示す二つの方法のうちいずれかによって実施計画を選択すればよい。

第一の方法は、たとえば工事費用あるいは工事期間のように工事遂行上最も重要と考えられる評価基準を設定することによって、望ましいと思われる実施計画をただ一つ選択する方法である。他の方法は、施工計画を構成しているいくつかの個別計画に対して合目的性、実行可能性などのあらゆる側面からの評価を行ない、各計画に評点を与え、その評点の総和をもって施工計画の望ましさの程度を表わすとともに、それによってただ一つの実施計画を選択する方法である。一般に各計画は、それぞれ独自の評価基準を有しており、統一的な評点の与え方は困難であることも多いが、各計画の工事遂行上の重要度を前もって設定しておくか、あるいは主任技術者の判断にまかせてもよい。

以上は施工計画作成における合目的性を可能な限り追求するための合理的な手段をプロセスシステム化したものである。また、このようなシステムにおいては、合目的な工程計画の作成が中心的な課題となることが明らかである。このため、本研究においては、工程計画の代替案を作成していくためのシステムモデルを以下に示すようなネットワークモデルを導入することによって作成することにした。

4. 工程計画の代替案作成のためのモデル

(1) 工程のモデル化

工程をネットワークモデルで表現するとき、ネットワークの構造を行列表示すると便利である。このため、以下においてはこの行列表示を用いて代替案作成のためのシステムモデルを作成していくことにする。

さて、工程ネットワークを規定する作業間の順序関係は、対象工事が与えられるとほぼ一意的に定められると考えられる技術的順序関係と、施設・機械、要員などの運用という管理的な側面から決められる管理的な順序関係とから構成されていることはすでに述べた。したがって、工程計画の作成にあたってはこの点に着目していくことが、管理者の管理行為を検討し、管理上の問題点を解決していくうえできわめて重要なことであるといえる。

いま、作業間の技術的順序関係を示す次のような行列 $P^{(T)}$ が与えられているとする。

$$P^{(T)} = (p_{ij}^{(T)}),$$

$$p_{ij}^{(T)} = \begin{cases} 1, & i \leq j \text{ (作業 } i \text{ が作業 } j \text{ に直接先行している場合),} \\ 0, & \text{その他の場合,} \end{cases}$$

$$i, j \in J. \tag{1}$$

ここで、 J はプロジェクトに含まれる作業の集合である。次に、ある特定の作業を遂行するためにグループとして投入され、しかも一つの作業の実施が終れば次の作業の実施のために運用されるような機械・資材と作業要員（たとえばベント杭打設作業におけるベント機とオペレーター、土工、弋工）を作業グループと名づける。そして同じ種類の作業グループを必要とするために、互いに競合関係にあるような作業からなる集合を $J^{(R)}$ と定義し、これを競合作業集合と呼ぶ。このように $J^{(R)}$ を定義すると作業グループ l に対応する競合作業集合 $J^{(R)}$ に含まれる作業間の管理的順序関係は次のような行列 $P^{(R)}$ として求められる。

$$P^{(R)} = (p_{ij}^{(R)}), \quad \}$$

$$p_{ij}^{(R)} = \begin{cases} 1, & i \leq j, \\ 0, & \text{その他の場合,} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$i, j \in J.$$

ここで、競合作業集合 $J^{(R)}$ と他の競合作業集合 $J^{(R')}$ は互いに共通な作業を含まないように定められているものとする（これは現実にも可能である）。すなわち、

$$J^{(R)} \cap J^{(R')} = \emptyset \text{ (空集合)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、上述における演算の加法則には

$$1+1=1, 1+0=1, 0+1=1, 0+0=0 \dots\dots\dots (4)$$

を用いることにする。

工程ネットワークの関係を以上のように表わすとき、工程ネットワークにおける作業間の順序関係 P は $P^{(T)}$ と $P^{(R)}$ のすべての重ね合わせによって求められる。

$$P = P^{(T)} + P^{(R)} = P^{(T)} + \sum_l P^{(R_l)} \dots\dots\dots (5)$$

(2) 工程計画の代替案の作成

a) 制約条件

いま、各作業の所要時間や投入される資源と作業間の技術的順序関係 $P^{(T)}$ はすでに与えられていると仮定すると、工事完了時刻 λ は管理的順序関係 $P^{(R)}$ の関数として表わされる。

$$\lambda = \lambda(P) = \lambda(P^{(R)}) \dots\dots\dots (6)$$

次に、モデルにおける制約条件としては工期に対する制約条件 ($T \geq \lambda$) のほかに、作業間の順序関係に関する制約条件を取り上げなければならない。順序関係に関する制約条件式の系は、

$$\left. \begin{aligned} \text{① } & \sum_{i \in J^{(R)}} p_{ij}^{(R)} \leq 1, \quad \sum_{j \in J} p_{ij}^{(R)} \leq 1, \\ \text{② } & L(P) = 0, \quad L(P^{(R)}) = 0, \\ \text{③ } & \sum_{j \in J^{(R)}} \sum_{i \in J^{(R)}} p_{ij}^{(R)} = n_l - r_l \\ \text{④ } & \lambda(P) \leq T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

のように表わされる。

ここで式(7)の第1式は一つの作業グループによって処理される競合作業が順次連続して施工されていくための条件を表わしている。第2式は作業間順序関係 P および $P^{(R)}$ がサイクルを構成しないための条件を $L=0$ を用いて表わしたものである。第3式は n_l 個の競合作業に対して r_l 個の作業グループを投入するとき、全体として付加しなければならない順序関係の数を示す条件である。また、第4式は工事完了時刻 λ に対する制約条件式である。

さらに、 T には指定工期 T_0 を与える場合もあり、工程計画の代替案の中から最小完了時刻 λ_{opt} に対して管理者が過去の経験や資料に基づいて見込んでおくことが必要であると判断した期間 δ を加えて、

$$T_0 \geq T = \lambda_{opt} + \delta \dots\dots\dots (8)$$

のように定めることもできる。したがって、 λ は一般に次式の範囲内で設定されることになる。

$$\lambda_{opt} \leq \lambda \leq T \leq T_g \dots\dots\dots(9)$$

実行可能な工程計画の代替案は、以上の方程式系を満足するような管理的順序関係を取り出すことによって、求めることができる。

b) 代替案の作成法

上述の制約条件式を満たし、かつ最小完了時刻 λ_{opt} を与えるような最適順序関係を求めるための解法は、すでにブランチ・バウンド法を導入した解法として開発されている。その解法に関する詳細は参考文献にゆずることにして、ここではそれらの研究成果に基づき、上述の要求を満たすような工程計画の代替案作成のためのシステムモデルを示すことにする。すなわち、式(7)および(9)に示した制約条件を満たす管理的順序関係を求めるプロセスを図-1に示したが、紙面の関係上この図に関する説明はこれらの中の記号についての簡単な説明にとどめる。

さて、このプロセスは大きくわけて、① ブランチ・バウンド法を用いて最小完了時刻 λ_{opt} を求めるプロセス

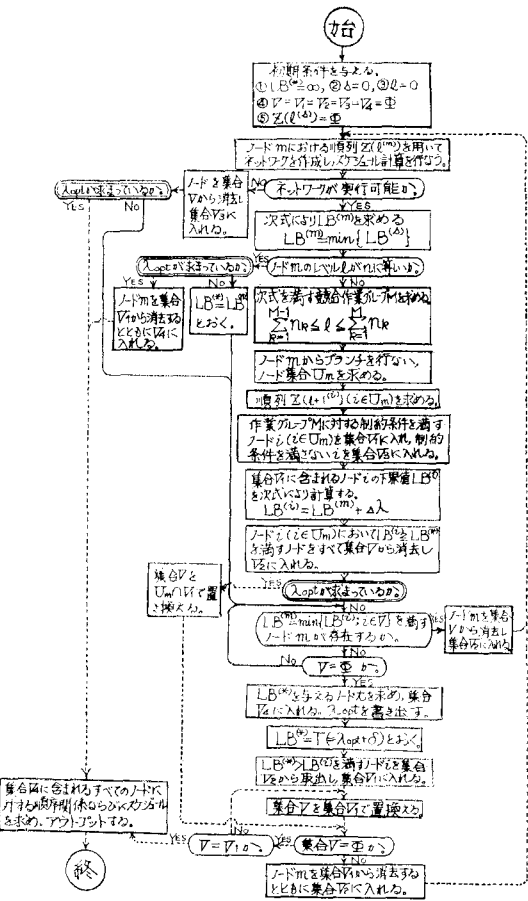


図-1 代替案作成のためのフローチャート

と、② λ_{opt} が求められた後に工程計画の代替案を選択していくプロセスとから成り立つ。このうち特に②のフローは破線 → で示してある。

さて、作業グループ $R_k (k=1, 2, \dots, L)$ を必要とする競合作業の数は n_k であるとし、競合作業集合を、

$$J^{(R_k)} = \{j_l; l=l_{k-1}+1, l_{k-1}+2, \dots, l_k, l_k=l_{k-1}+n_k\} \dots\dots\dots(10)$$

で表わしている。また、 $J^{(R_k)}$ に含まれる一つの競合作業 j_l に対応して、ブランチ図のレベル l にある各ノード i には、 $J^{(R_k)}$ に含まれる j_l 以外の競合作業と作業 j_l との間の順序関係に対応させるようにした。このようにしてブランチ図のノードへ対応させる順序関係を $I(l)$ で表わすことにすると、レベル l までに決められてくる一連の管理的順序関係 $z(l)$ は、始点ノード 0 からレベル l にあるノード i までのノードとブランチの結合状態によって、

$$z(l) = (I(1)I(2)\dots I(l)) \dots\dots\dots(11)$$

のように、 $I(l)$ を要素とする順列として表わされる。以上のように $z(l)$ を定義すると、最終的に求めるべき管理的順序関係はブランチ図の最終レベル $n (n = \sum_{k=1}^L n_k)$ における順列 $z(n)$ によって求めることができる。ただし、ここでは投入される作業グループの種類を L 種類であるとしている。

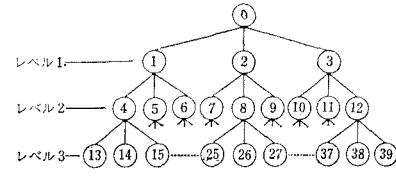


図-2 ブランチ図 (n=3 の場合)

いま、 L 種の作業グループを投入した場合に、式(7)、(9)を満足するような管理的順序関係のすべてを求めるためには、競合作業間の順序関係をすべて列挙しなければならず、多数の順列を調べなければならない。したがって、膨大な単位作業を含む一般の土木工事においてこのようなことを実施することは実際上不可能である。これに対して、最小完了時刻を求める解法におけるブランチ・バウンド法は、ブランチ図を用いて作業の順序関係を求める方法に下界値の考え方を導入し、完了時刻に対する評価基準とすることによって必要な列挙数を大幅に減少させるとともに、効率よく工事完了時刻の最適解を求めようとするという方法をとっている。したがって、本モデルにおいてもこの方法を導入し拡張していくことにより効率的に代替案を求めるという方法をとっている。

さて、 λ_{opt} が求まると、破線で示される代替案作成のためのフローへと移るが、これは最小完了時刻 λ_{opt} を

求めるために用いた計算手順を若干変更しただけであり、これによって容易に代替案を作成することができる。すなわち、①のプロセスで用いた下界値 $LB^{(*)}$ をすでに述べた $T(T_0$ あるいは $\lambda_{opt} + \theta$) に固定することによって、 T を越えるような完了時刻を有する順序関係をすべて消去し、式(9)を満足するような順序関係のみを、ブランチ図の最終レベルにおいて代替案として選択されるようにした。

ここで、図-1に用いた記号 V, V_1, V_2, V_3, V_4 について簡単に説明を加えておくことにする。 V は計算においてブランチを行なって求めたすべてのノードの集合である。 V_1 は競合作業に投入される作業グループに対する制約条件を満たすような順序関係を有するノードの集合である。 V_2 は V および V_1 に含まれるノードの中で、その完了時刻が計算途中で求められた現段階での最小の値をもつ下界値 $LB^{(*)}$ より大きな値を与えるようなノードの集合を表わす。つまり、計算途中において、現在の $LB^{(*)}$ の値が変わらない限り、 V_2 に含まれるノードからのブランチは行なわれない。次に、 V_3 は制約条件を満たさないような順序関係を有するノードの集合である。最後に V_4 は工程の代替案として選択された作業の順序関係に対応するノードの集合である。

5. 施工計画の作成法と評価

(1) 施工計画の作成基準

前述のプロセスによって求められたそれぞれの工程計画の代替案を中心とする施工計画の作成手順は以下のようである。すなわち、個々の作業はスケジュールにしたがって実施されるが、各時刻において使用される機械・資材・作業要員等の投入資源の総和は各時刻において実施される作業それぞれの必要量の総和として求められる。つまり、各時刻における各投入資源の使用状況を表わす山積図は、各時刻ごとに実施されている作業のすべてに対してその所要資源量を積み上げることによって求められる。したがって、一つの計画についてはただ一つおりの山積図が求められることになる。

工程計画以外の関連諸計画は、これらの山積図を情報として各計画独自の計画作成基準にしたがって作成される。ここで、計画の作成基準は、施工計画の評価基準との斉合性を満たすように定められていることが必要であるが、そのほかに、対象とするものによって独自の評価基準を具体的に示したものでなければならない。各関連諸計画作成基準と計画作成にあたっての方針を簡単に示すと以下のようである。

a) 作業要員計画

次の点に注意して計画を作成する。① 職種別山積図に資材の準備加工などの直接工程に関係しない作業に必要な要員数を加える。② ①の山積図をもとに、10日あるいは1カ月という一定期間に一定要員数を拘束するように使用計画を作成する。③ 計画延べ要員数と必要延べ要員数との差を最小にするような計画を作成するが、さらに、④ 管理上望ましい作業要員計画として工事の初期から中期にかけて漸増状態をとり、中期においてほぼ一定数を維持し、終了期に近づくにつれて漸減するというようなパターンになるように努める。

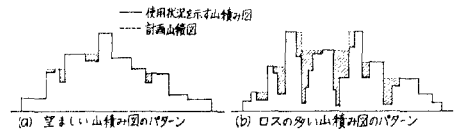


図-3 山積図のパターン

b) 機械計画

まず、機械を以下のように分類する。① 機械力による施工が建設工事推進の主力となるもの。② 機械の管理運用方法が工事内容に重大な影響をおよぼすもの。③ どのような工事でも常時使われる小規模の機器で、種類や投入台数をかなり自由に選択できるもの。ここで、①②についてはすでに計画されているので、ここでは③の機器について次のように計画する。(i) 機器の使用状況を求め、機器類の入手の難易、保管場所、維持修理の手間などに関して実行可能かどうか検討する。(ii) 運搬経費、現場拘束による損料を算定し最も経費の安い機種を選択する。

c) 資材計画

① 仮設資材計画：まず、工程計画作成のとき検討しなかったものについて、現場において準備加工を必要とするものとし、分類し、準備加工が必要なものについては、準備加工を一つの作業とし、山積図にその部分の修正を加える。また、準備加工作業は主工程の作業要員の手待を利用するが、利用できない時のみ専門作業要員の調達計画を作成する。また、現場における延べ保管数が最小となるように使用計画を作成する。

② 材料計画：現場加工を必要とする材料と工場生産材料とに分類し、前者については①に示したと同様な考えを適用して計画を作成する。後者については、さらに保管場所の確保や長期在庫、調達期間と調達量、現場への搬入路、1回当たり運搬量等に留意して計画を作成する。

d) 現場設備配置計画

まず、各現場設備用地の確保の可能性についての検討を行なうとともに、現場取付道路位置、作業場所までの運搬経路、機材・要員の現場内での動線等を考慮した配

いずれを実施計画としても不都合は生じないが、施工計画・管理の立場からは最も合目的な施工計画を実施計画として採用することが望ましい。また、実施計画の選択方法として二つの方法が考えられることを示したが、どちらの方法を用いても合目的で実行可能性が大きくかつ管理も行ないやすい計画が選択されることになる。

6. 施工計画システムの適用例

前節までに示した施工計画システムを、兵庫県における山陽新幹線高架橋工事へ適用することにより実証的考察を加えることにする。

さて、高架橋工事の対象となる構造物の断面図を示すと図-4 のようである。図に示されているように、この構造物はベノト杭基礎を有し、36 スパンからなる鉄筋コンクリート構造様式が採用されている。施工にあたっては、作業効率という観点から連続する3 スパンを一施工ブロックとして計画し、作業を進めることにしたので、プロジェクトは12の施工ブロックを含むことになった。各施工ブロックは図-5 に示すような作業工程によって建設される。

施工計画は、これらの12の施工ブロックを建設していくために必要な372の単位作業と、本工事に打ちかかるまえに必要な準備作業、およびすべての単位作業を終えた後の跡片付け作業によって構成されている。

作業計画作成の結果、各作業の所要時間、要員数、機械台数、仮設資材および材料に関する作業特性値が求められたが、その一部を示したものが表-2である。さらに、各施工ブロックにおける作業順序ならびに現場条件を考慮することによって、これらの作業の技術的な順序関係を求め、ネットワーク表示すると、図-6 のようになった。

工程計画作成モデルにおいて、次に示す管理上重要と思われる5種類の投入資源を運用計画の対象として取りあげ、その管理的順序関係を求めることにした。

k	投入資源	投入量 q_k
1	ベノト杭打設機	1 台
2	根掘機械	1 台
3	基礎コンクリート用型わく	1 組
4	柱コンクリート用型わく	1 組
5	ダクトコンクリート用型わく	1 組

工程計画の代替案を作成していくときに必要なプロジェクト完了時刻 s の上限値 T を200日として、これより小さい工事完了時刻を与える施工工程を工程計画代替案として選択した。この上限値200日は、経験の豊富な主任技術者が工事内容や与えられた工期を考慮した結果決定したものである。

以上のようなインプットデータのもとで電子計算機による計算を行なった結果、プロジェクト最小完了時刻 s_{opt} として189日が求められるとともに、表-3 に示すような12とおりの代替案を求めることができた。

これらの工程計画の代替案に対して各種の投入資源の使用状況を電子計算機によって計算するとともに、前節で示した計画作成基準に基づいて各種の関連諸計画を作成した。さらに表-1 に示した各種の関連諸計画の評価基準に基づいて、すべての制約条件を満たす代替案を求めた。その結果、2つの代替案が実施計画の選択対象として求められた。これら2つの代替案のうちどちらを実施計画として選択するかという問題に関しては、工事費用をプロジェクト完了時刻をも考慮したうえで比較することによって決定することにした。

こうした結果、図-7 に示した代替案を実施計画として採用することが妥当であると判断した。図-8 にはこの関連諸計画を示した。

以上のように、われわれが提案した施工計画システムによれば、施工管理上考慮しなければならないあらゆる

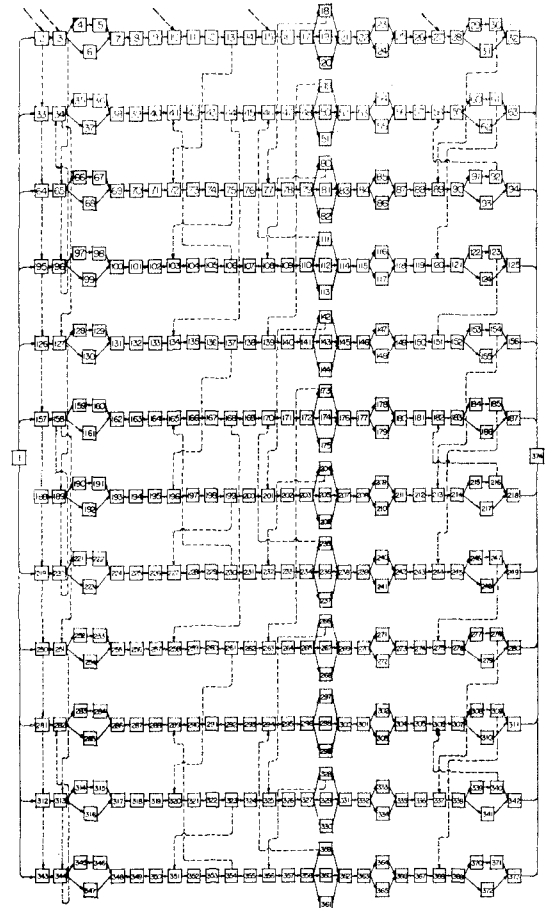


図-7 実施計画として採用した工程計画

制約条件について検討を加えることができ、実施計画の選択に際しても比較的容易にかつシステマティックに代替案を作成して選択していくことが可能であることがわかった。また、このような選択過程を取るることによって、従来は数学モデルに組み込むことが困難であった計画作業時における主任技術者の判断をも十分取り入れる

ことができるようになった。

7. 結 言

施工管理の対象にはその目的とする内容によって、工事を構成する個々の作業に対する管理と工事目標を達成

表-3 作成された代替案

代 替 案																							
1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j
2	95	2	64	2	95	2	64	2	33	2	33	95	2	95	2	64	2	64	2	95	64	2	33
95	33	64	95	95	64	64	33	33	95	33	64	2	64	2	33	2	95	2	33	64	2	33	64
33	64	95	33	64	33	64	33	95	64	64	95	64	33	33	64	95	33	33	95	2	33	64	95
64	126	33	126	33	126	95	126	64	126	95	126	33	219	64	219	33	188	95	188	33	219	95	126
126	219	126	188	126	219	126	188	126	157	126	157	219	126	219	126	188	126	188	126	219	188	126	157
219	157	188	219	219	188	188	157	157	219	157	188	126	188	126	157	126	219	126	157	188	126	157	188
157	188	219	157	188	157	157	219	219	188	188	219	188	157	157	188	219	157	157	219	126	157	188	219
188	250	157	250	157	250	219	250	188	250	219	250	157	343	188	343	157	312	219	312	157	343	219	250
250	343	250	312	250	343	250	312	250	281	250	281	343	250	343	250	312	250	312	250	343	312	250	281
343	281	312	343	343	312	312	281	281	343	281	312	250	312	250	281	250	343	250	281	312	250	281	312
281	312	343	281	312	281	281	343	343	312	312	343	312	281	281	312	343	281	281	343	250	281	312	343
3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65	3	65
65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96	65	96
96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34	96	34
34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	127	34	189	34	127
127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189	127	189
189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220	189	220
220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158	220	158
158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	251	158	313	158	251
251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313	251	313
313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	313	344	251	344	313	344
344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282	344	282
13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72	13	72
75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103	75	103
106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41	106	41
44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134	44	134
137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196	137	196
199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227	199	227
230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165	230	165
168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258	168	258
261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320	261	320
323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351	323	351
354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289	354	289
18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77	18	77
80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108	80	108
111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46	111	46
49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139	49	139
142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201	142	201
204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232	204	232
235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170	235	170
173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263	173	263
266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325	266	325
328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356	328	356
359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294	359	294
30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89
92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	58	92	120
61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	61	120	60	120	123	58
123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	123	151	61	151
154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213	154	213
216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	182	216	244
185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244	185	244
247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	247	275	185	275
278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337	278	337
340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	306	340	368
309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368	309	368

(iは先行作業、jは後続作業をあらわす)

するために総合的な観点にたって行なう管理とがある。われわれが対象とした工程計画の作成から実施計画の選択にいたるまでのプロセスは後者の管理レベルにおいて作成される。このプロセスは、工程計画の代替案を作成するためのモデル、実施計画の選定の対象となる代替案作成のためのモデル、実施計画選定のための手順等が中心となっている。このような施工計画システムモデルを山陽新幹線における高架橋工事に適用するにあたっては、主任技術者の豊富な経験を有効に取り入れ、工事施工に対する種々の制約条件を考慮することによって、実行可能で、かつ合目的な計画を作成しうることが実証された。

また、各プロセスにおいて用いられているこれらのいずれの方法も、従来の研究や工事管理者の豊富な経験に基づいて行なったシステムズアプローチの結果提案されたものであり、建設工事の施工管理状況の実態にかなりの適合性を示していると考えられる。

今後、進むべき研究の方向としては、作業研究、時間研究を通しての施工計画システムの基礎となる作業計画の作成プロセス、工事施工の計画・管理のために必要な情報収集のプロセス、さらには工事施工に伴って発生するネットワークのリプランニング (Replanning) に関する手法など、土木工事の計画管理特性を解明することによって、ネットワークプランニングの土木工事における適用性を高めていくことが必要であろう。

最後に、本研究を進めるにあたって、御指導・御鞭撻を賜った京都大学工学部教授吉川和広先生に対して厚く

感謝致します。また、現場の施工管理に関する資料の収集・整理に助力をいただいた京都大学大学院学生 山本幸司氏、(株)鴻池組 森田道弘氏、西野久二郎氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Ignall, E. and Schrage, L. : Application of the Branch and Bound Technique to Some Flow Shop Scheduling Problem, JORSA, Vol. 13, 1965.
- 2) Lawler, E.L. and Wood, D.E. : Branch and Bound Method : A Survey, JORSA, Vol. 15, 1967.
- 3) Kazuhiro Yoshikawa and Mamoru Haruna : Study on Process of Construction Planning and its Application, Memoir of the Faculty of Engineering Kyoto University, Vol. XXXIII, Part 2, 1971.
- 4) 吉川和広・春名 攻 : 施工計画における最適ネットワークの作成法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 182 号, 昭和 45 年.
- 5) 春名 攻・笹嶋 博 : 工程ネットワークの作成法, 技術研究委員会施工管理分科会 第三次報告書, 建設コンサルタンツ協会大阪支部, 昭和 45 年.
- 6) 吉川和広・春名 攻・田坂隆一郎・笹嶋 博 : 工事計画システムと評価のプロセスに関する一考察, 昭和 46 年度関西支部年次学術講演概要, 土木学会関西支部, 昭和 46 年.
- 7) 有江義晴編 : 仮設工事ガイドブック 1—建設工事の段取り—, 近代図書, 昭和 44 年.
- 8) 有江義晴編 : 仮設工事ガイドブック 10—仮設工事の積算見積り—, 近代図書, 昭和 45 年.
- 9) 有江義晴編 : 仮設工事ガイドブック 2—コンクリート工事の段取り—, 近代図書, 昭和 45 年.
- 10) 有江義晴編 : 仮設工事ガイドブック 6—給気・給水・排水・給電・設備計画—, 近代図書, 昭和 45 年.
- 11) アメリカ土木学会建設部門編 (片岡明訳) : 建設工事費の管理, 山海堂, 昭和 38 年.

(1971.9.20・受付)