

土木工事の工程計画の方法に関するシステム論的考察

A STUDY ON SYSTEMS ANALYSIS OF CONSTRUCTION PLANNING
AND SCHEDULING METHOD

春 名 攻*・田坂隆一郎**

By Mamoru HARUNA and Ryuichiro TAsAKA

1. はじめに

土木工事の施工過程においては、各種施工技術の適用のもとに多種多様な資材、機械や専門的な技能を有する作業員など、多くの資源を集約的に用いて規定の品質の構造物を所定の工期内に納まるように合理的な施工活動を行うことが要求される。一般の土木工事現場における管理運営の問題は後述するように多重で多階層的な複雑な構造特性を有するとともに、これに伴って多目的性という特徴も含んでいる。そして、これらの問題の複雑さのために、これまではシステム論的な視点からの取り組みがほとんどなされておらず、いまだに施工計画・管理に関する諸問題に対して組織的かつ根本的な解決策がとられないでいるというのが現状であるといえよう。

筆者らのこれまでの研究によると、工事の管理対象である工程、原価、品質という3要素の間には、工事施工の過程をネットワークモデルを用いて明示的に表わすことによって、施工過程を媒介とするある有機的な関係が存在している。つまり、各作業の日程や各種の工事に用資源の運用に関わる計画・管理問題を施工工程という媒体のもとで原価管理や品質管理との関係において総合的にかつ実体的に認識・把握することができるのである^{1)~3)}。そしてわれわれは、工程計画の方法に関するこれまでの研究成果やそれらの実際工事への適用を通して全体工程を総括工程、詳細工程、週(月)間工程という3つのレベルに分解してとらえることが望ましくかつ効果的であると判断した⁴⁾。本研究においてはこのような考察を一步進めて多階層構造の概念を導入することによって、全体工程を構造論的・システム論的に把握・分析する方法について研究を行った。そして、実際の工事の管理・運営方針を策定するにあたって重要な役割をもつと判断される

総括工程の計画・管理問題に着目して、従来とは異なった観点から施工工程のネットワークモデル化の方法を体系的に整理して論じるとともに、そこで得られた工程計画の方法を実際の地下鉄駅部工事に適用して実証的な考察を行うこととする。

2. 工程計画の多階層構造

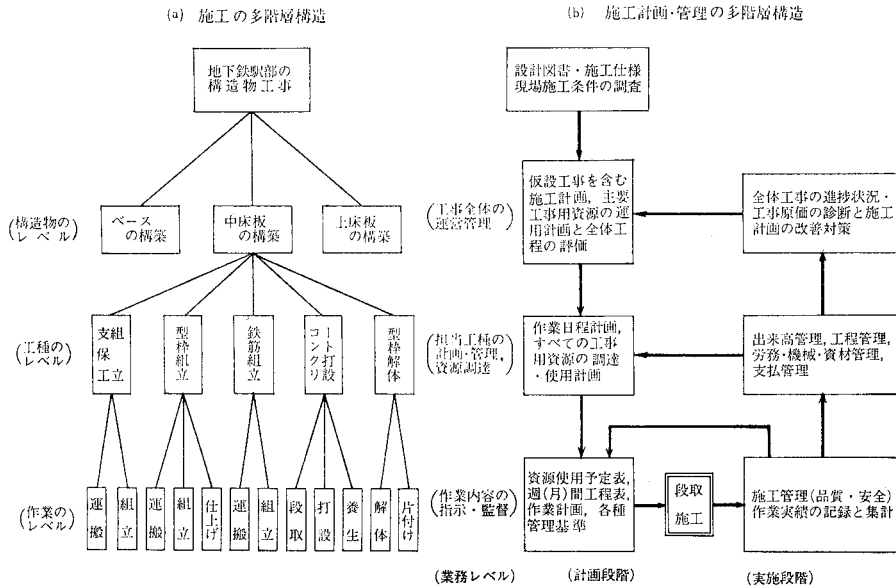
(1) 施工工程の多階層性

実際の土木工事を実施していく過程には工事の対象となる土木構造物の工事内容をより具体的なレベルへと順次ブレイクダウンしていき、日々の施工活動の計画・実施に至るまでの計画段階における一連の過程がある。一方、日々の施工活動の実績を積み上げて土木構造物全体が構築されていくという実施段階における一連の過程もある。理想的にはこれら両者の内容が互いに対応関係をもち整合していることが望ましいが、これらはいくつかのレベルからなる図-1のような多階層構造をもつ過程として認識することができる。この図-1(a)は地下鉄駅部工事の構築過程を、構造物の施工単位、工種別の作業単位、日々の施工活動に対応するところの3つのレベルに分けてツリー図として表わしたものである。

本研究では、このような土木工事の構築過程に認められる多階層構造という特性に着目することを基本的な視点とする。そして、工事施工に関わる多種多様な制約によって複雑な様相を呈する工事施工の計画・管理問題に対してこのような視点から構造論的・システム論的アプローチを行うこととする。つまり、図-1(a)の3つのレベルにおける工事施工の内容を工程系列という観点からとらえることによって、土木工事全体にわたる工程計画・管理問題をそれぞれのレベルに特有な部分的な工程計画・管理問題として分割的に取り扱うのである。そして、図-1(b)のように、土木工事の全体的な計画・管理

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 (株) 鴻池組技術研究所 主任研究員



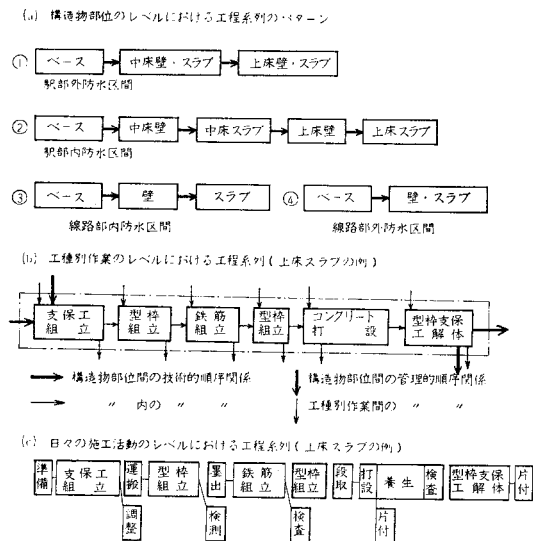
図一 土木工事における構築過程の多階層構造

問題をそれぞれのレベルにおける部分的な計画・管理問題に帰着させることによって、施工計画・管理の合理化やシステム化を効果的に推進しようと試みるのである。

(2) 全体工程計画の構成

実際の工事を対象として作成されるいくつかの種類別の工程計画を、作成時期とその計画内容という観点から分類すると、次のような3つの段階に分けることができる⁵⁾。

- ① 総括工程計画
- ② 詳細工程計画
- ③ 週(月)間工程計画



図二 構築過程の各レベルにおける工程系列

一方、土木工事の施工工程は、たとえば 図一(a) に示した構築過程の3つのレベルと対応して、図二に示すような3つのレベルの工程系列に分解して表わすことができる。

上記の3種類の工程計画の内容を 図二に示した各工程系列との対応関係に注目して述べると以下のような。

a) 総括工程計画

工事の実施が決定すると工事現場では、まず設計図書、仕様書、現場施工条件、適用可能な施工法、必要工種とその施工量など、施工計画の作成にとって必要な各種の事項を調査・整理しなければならない。そして、主要な工所用資源の概略的な運用計画を作成するとともに、工事全体にわたってのバランスのとれた工事運営方針を確立しなければならない。

不確定な要素の多いこの計画作成段階で工所用資源の運用計画を作成する場合、個々の工所用資源の調達・運用に関する計画要素については概略的で標準的な内容のみが一般に考慮されていた。このため従来においては、この計画段階が以後の施工計画のわく組みを規定する重要な役割をもつにもかかわらず、単にバーチャート工程表などのような簡単な方法を用い工事期間の割り振りや大雑把な施工進捗状況を想定して検討をするに留まっていた。これに対して本研究では 図二(a) に示すような構造物レベルと対応する単位工程を要素とする総括工程計画の作成法を提案しており、これを基礎として工程計画の方法の体系化を図ろうとするものである。

b) 詳細工程計画

総括工程計画の案が作成されると、次にはこれを受け

てより詳細で具体的なレベルの詳細工程計画を作成することになる。この時点ではすべての工事に用資源の調達予定や使用予定まで明らかにしておかなければならない。いま、図-2に示すように各構造物部位を工事施工の内容に従って工種別の作業に分解して工種別作業を要素とする詳細工程計画が得られたものとする、それは構造物部位と対応する単位工程を用いて作成した総括工程計画のわく内に納まることは容易に推察できよう。

PERTをはじめとしてこのレベルにおけるネットワーク手法の適用事例は非常に多く、筆者らも詳細工程計画の作成段階を4つのプロセスに分けたネットワークモデルによる施工計画の作成法を提案している⁶⁾。

c) 週(月)間工程計画

週(月)間という短期間の工程計画を必要とするこの段階は工事がすでに進行中の段階であり、実施・管理と結びついた実際の具体的な作業工程の計画化を目指すものでなければならない。つまり、総括工程計画や詳細工程計画の目指す計画化の内容とは異なって、週(月)

間工程計画では図-2(c)に示すような日々のすべての施工活動を対象とする。そして作業不能日や休日等も含めた1週間から1か月程度までの短期間の作業日程や作業段取りを示す実施工程表を作成することになる。そして作業員、機械、資材などのすべての工事に用資源がこの日程表に基づいて調達されそれぞれの作業が確実に実施されるように配慮しておかなければならないのである。

このような観点から全体工程計画との関連のもとで週(月)間工程表を作成する方法の一つに Date-line Cutoff 法の考え方をネットワークモデルに適用した方法がある^{7),8)}。

図-3は、上述の総括工程、詳細工程、週(月)間工程という3

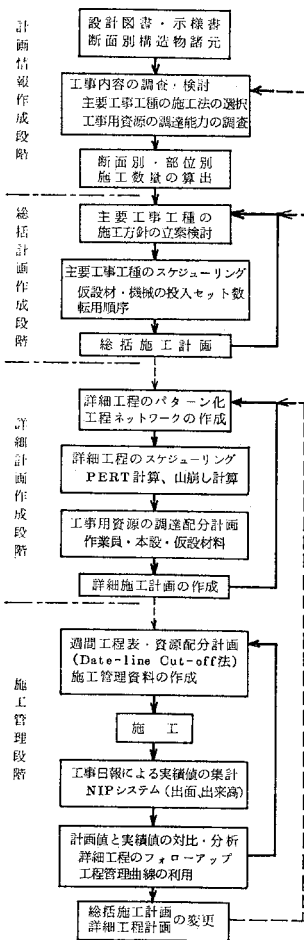


図-3 工程計画作成のシステムフロー

つの種類の工程計画の内容を単純化して整理したものである。図中の実線は各計画レベルにおける工程計画の作成手順を示しており、破線は実際の工事における各工程計画の作成時期および施工実績情報が各計画レベルにフィードバックされる期間が異なっていることを明示するために示したものである。

3. 各計画レベルにおける単位工程の内容

すでに述べたように本研究では総括工程を中心とする実際的かつ合理的な工程計画の作成法をシステム論的に体系化することを目指している。このためには、総括工程の基本的な要素である単位工程の内容を工事全体の施工過程との関係において定量的に表わしておく必要がある。ここでは、このための準備作業として図-1(a)に示したような土木工事の構築過程に現われる施工ブロック、構造物部位、工種別作業(または単に工種)、補助作業(または単に作業)などの工事施工上の要素をもう少し詳しく説明しておくことにする。

a) 施工ブロック

工事全体の施工計画の作成にあたっては、施工対象となる構造物全体をいくつかのブロックまたは区間に分割する。そして、それぞれのブロックに特有な工事内容や制約を調査するとともに、これに基づいて工事全体の管理・運営の構想を立案することとなる。このようなブロックの設定の方法としては一般的には工事種類や構造物の規模・形状、仮設計画の内容、資材の規格・寸法等々に基づいた経験的な判断基準による場合が多い。ここではこのブロック分割の大きさを一意的に決定して与えることとしてこれを施工ブロックとよぶ。そして、この施工ブロックを主として工程計画作成にあたっての制約条件を考える場合に有効に用いるものとする。

b) 構造物部位

施工ブロックによって分割される構造物では普通、図

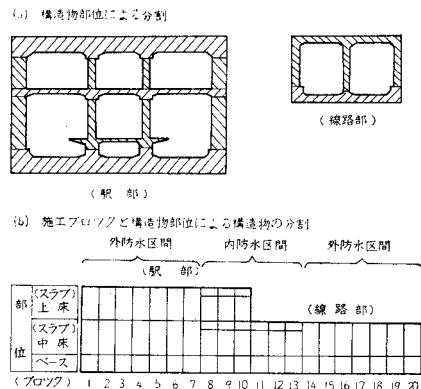


図-4 構造物の施工ユニットへの分割

①パターニング（ベース、等）

鉄筋組立	型枠組立	コンクリート 打設・養生	型枠 解体
------	------	-----------------	----------

②スラブ（壁）

外型枠 組立	鉄筋組立	内型枠 組立	コンクリート 打設・養生	型枠 解体
-----------	------	-----------	-----------------	----------

③スラブ（中床スラブ、上床スラブ）

支保工 組立	鉄筋組立	型枠組立	コンクリート 打設・養生	型枠支保 工解体
-----------	------	------	-----------------	-------------

④パターニング（壁スラブ同時施工）

外型枠 組立	鉄筋組立	内型枠 組立	支保工 組立	型枠組立	鉄筋組立	型枠 組立	コンクリート 打設・養生	型枠支保 工解体
-----------	------	-----------	-----------	------	------	----------	-----------------	-------------

図一五 各種の施工ユニットにおける作業内容の構成（地下鉄工事の例）

—4(a) に示すような施工継目が設けられ、いくつかの構造物部位に分けて施工される。このような構造物部位は構造物の形状を示す最小の施工単位であるので、ここではこれを施工ユニットとよぶことにする。図—4 (b) は地下鉄の構造物工事の施工ユニットへの分割状況を示したものである。また、図—5 は分割された施工ユニットに含まれる作業内容を各種の構造物部位の施工内容に従ってパターン化して示したものである。この図をみると、型わく材を必要とする施工ユニットについては型わく支保工をも含めての型わく材の拘束日数と当該施工ユニットの所要日数はほぼ一致していることがわかる。したがって、施工ユニットを単位工程とする工程ネットワークを作成することによって、総括工程計画の主要な内容を構成する型わく材などの仮設資材の運用計画を検討するのに利用できるということが理解されよう。

c) 工種別作業

一般に、各種構造物部位の構築には複数工種の作業を必要とするのが普通である。各工種の作業は、その工種に特有な技能職種の作業員で編成された作業グループによって、その工種別作業に投入される種類・規格の資材を用いて、作業計画に基づいた作業方法で行われる。各技能職種ごとの作業グループは特定工種の作業のみを対象として用いられる。このため、土木工事の施工工程には以下のような資源運用特性が認められることになる。すなわち、各施工ブロックを構成する構造物部位間の施工順序や各構造物部位の構築に必要な工種別作業間の施工順序は施工技術的側面からほぼ一意的に決定されるので、工事の計画段階・実施段階において固定的な要素として取り扱うことができる。一方、特定工種の作業に投入される作業グループや仮設資材は工期の短縮や工事用資源の効率的運用という管理的側面から最も望ましい運用順序を決定するのであり、工事の実施段階においてはその進捗状況に合わせて操作することのできる可変的な要素であるといえる。筆者らは、前者の作業間順序関係を技術的な順序関係とよび、後者の作業間順序関係を管理的な順序関係と称し、土木工事の施工工程を、ちょうど縦糸と横糸の関係のように、両者を重ね合わせたもの

として取り扱っている⁹⁾。このように、工種別作業は工程計画作成にあたっての基本的な単位であり（ここではこれを単位作業とよぶことにする）、工種別作業のレベルで作成した工程ネットワークは各作業の日程や時間的相互関係のみならず各種工事用資源の運用状況を定量化して表わすのに用いることができる。

d) 補助作業

工種別作業を単位として施工していくとき、一般にはそれぞれの作業の実施に先立って資・機材の運搬や墨出し等の前作業が行われる。そして、作業実施後には仕上げや跡片付け等の後作業を必要とする。これらの作業は本体構築における単位作業の実施に対して補助的な内容の作業であるが、現実の日々の施工活動には不可欠なものである。そして、その作業の内容やそこで用いられる作業員・機械などは本作業のそれとは異なっている場合が多く、工種別作業のレベルにおける単位工程は施工活動全体を本作業でもって便宜的にかつ包括的に表現したものであるといえる¹⁰⁾。したがって、週（月）間という短期間における日々の作業予定や各種の工事用資源の調達予定を対象とする週（月）間工程計画ではこの補助作業を含めて作業工程の計画を作成する必要がある。

以上の考察からも明らかなように工事施工の内容は、施工ブロック、構造物部位、工種別作業、補助作業という4種類の要素に合理的に分解される。このような分解を行うことによって、各レベルの工程計画に適した施工ユニット、単位作業、補助作業という3つの単位工程を合理的に設定することができ、それらの相互間の分割・統合の関係も明確に規定しておくことができる。本研究では、このような考えに基づき施工ユニットを単位工程とする工程ネットワークとそれに基づく総括工程計画の内容をまず規定し、逐次、詳細工程、週（月）間工程レベルの計画内容の規定へとブレイクダウンしていくという体系的な工程計画の方法に着目したのである。

4. 総括工程のネットワークモデル

(1) 単位工程のモデル化と特性値の算定

これまでの筆者らの実証的な研究をもとに、工程計画の内容を規定する主要な要素を以下のような項目に取りまとめることとした¹¹⁾。

- ① 施工法
- ② 施工ブロックおよび構造物部位分割の判断基準
- ③ 各単位工程の施工数量および投入資源量
- ④ 作業員および建設機械の処理能力
- ⑤ 職種別作業員の投入員数および運用方法
- ⑥ 仮設資材や建設機械の投入数および転用方法

さらには、これらの内容と対応して規定されてくる特性値としての

- ⑦ 各単位工程の所要日数
- ⑧ 各単位工程の所要費用（直接費用）

次に、ネットワークモデルを用いて工程計画の内容を表わす場合、これらの工程計画の構成要素を

- i) 作業内容を規定する要素
- ii) 作業間の順序関係を規定する要素

の2つに分けて取り扱うことが重要であると考えた。

ここでは、前者の作業内容と対応して規定されてくる特性値の中で特に重要であると考えられる単位工程の所要日数に着目し、その構造的特性について若干言及することとする。

いま、工程計画の基本となる工種別作業の所要日数について考えると、次式に表わされるような単純な平均的関係を考慮することができる。すなわち、ある工種別作業 s の所要日数 d_s は当該作業の施工量（施工数量）を v_s 、作業員（または機械）1 単位当たりの処理能力を w_s 、作業員（または機械）の投入数を m_s とすると、式 (1) のような簡単な関数関係が成り立つとするものである。これは過去の施工経験や実証的な分析からこのように平均的に表わしても実用上はほとんど問題がないという理由に基づいている¹²⁾。

$$d_s = (v_s/w_s)/m_s \dots\dots\dots(1)$$

上述の諸要素の中で施工量は施工法と施工ブロック・構造物部位の分割基準が与えられるとほぼ定まってくる。また、作業員（または機械）の処理能力は投入される作業グループ（または機械系）の構成内容と対応して推定することができる。つまり、工程計画の作成にあたっての基本的な要素である工種別作業の所要日数は作業員（または機械）の投入数を与えることによって平均的で概略的な値として求められることがわかる。

表-1 は、本研究の適用対象とした地下鉄駅部の工事の施工内容¹³⁾を前章で述べた施工ブロック、構造物部

位、工種別作業、補助作業の4つの要素に分解するとともに、それぞれの要素においては項目間の一意性が保たれるように整理して示したものである。

いま、この表に示す4つの要素を i, j, k, l で表わしそれぞれの要素の中では一意的であるように番号付けをすれば、単位作業 s は施工ブロック i 、構造物部位 j 、工種別作業 k の組合せによって工事全体の構築過程の中で一意的に表わされることになる。このとき式 (1) は次式のように表わすことができる。

$$d_{ij}^k = (v_{ij}^k/w_{ij}^k)/m_{ij}^k \dots\dots\dots(1)'$$

さて、総括工程計画は以後の施工計画や工程計画のわく組みを規定する重要な役割をもっているが、現在のよう工程関連の施工実績情報が十分には蓄積・整理されていない場合には、この計画の単位工程であるところの施工ユニットの所要日数を工程関連資料から直接に算定することは困難である。そこで、ここでは前述した式 (1)' を用いて、まず工種別作業レベルの各単位作業の所要日数を求めることにより、各施工ユニットの所要日数を次のようにして算定することにした。すなわち、工事全体の単位作業すべてについてその所要日数 d_{ij}^k を算定することが可能な場合には、次式によって各施工ユニットの所要日数 d_{ij} を求めようとするものである。

$$d_{ij} = \sum_k d_{ij}^k \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 k は各施工ユニットに含まれている工種別作業を表わすものとなる。

もし当該構造物の標準断面以外の施工ユニットに対し上式を適用することができない場合には、それらの施工ユニットの所要日数については各構造物部位の施工量の比率から次式を用いて簡単に求めることにする。

$$d_{ij} = (v_{ij}/v_{0j}) \cdot d_{0j} \dots\dots\dots(2)'$$

ただし、添字 0 は標準断面を示し、 d_{0j} は $\sum_k d_{0j}^k$ として求めるものとする。

通常総括工程計画は工事に着手して間もない時期に作成されるので、すべての施工ユニットに関して工程計画関連の詳細な資料を得ることは困難な場合が多い。したがって、実際の工事への適用性を考えると式 (2) よりも式 (2)' の方が現実的であり、しかも精度的にみても十分許容されるものであると考えられる。

また、地下鉄のようなコンクリート構造物の工事においては、所要日数がほぼ施工量に比例するような単位作業群と所要日数がほぼ一定であるような単位作業群とからなっているのが普通である。本研究では、このような工事に対しては次のような方法によって各施工ユニットの所要日数を求めることにする。すなわち、まず、構造物の標準断面を含む施工ユニットに対して各単位作業の所要日数を算定する。それらの単位作業を上記の2つの作業群に分け、所要日数が施工量にほぼ比例する作業

表-1 工事施工内容の4つの要素への分解
(地下鉄駅部)

ブロック (i)	構造物部位 (j)	工種別作業 (k)	補助作業 (l)
1	基礎	鉄筋工	小運搬
2	ピット部	加工組立	加工
3	底床部	型わく支保工	墨出し
4	中床側頂部	〃	足場組
5	〃内壁	型わく工	組立 I
6	〃外壁	〃	組立 II
7	〃中壁	コンクリート工	打設準備
8	〃柱	〃	打設
9	上床側頂部	鋼管柱	据付
10	〃内壁	〃	仕上げ
11	〃外壁	盛替工	チッピング
12	〃中壁	〃	水洗い
13	〃柱	防水工	足場撤去

群の所要日数の和 d_{0j}' および所要日数が施工量によらずほぼ一定の作業群の所要日数の和 δ_{0j} を求める。次に、標準断面を含まない施工ユニットについてはコンクリート量を各施工ユニットの施工量と見なすことによって、次式を用いて近似的に各施工ユニットの所要日数を求めることにする¹⁴⁾。

$$d_{ij} = (v_{ij}/v_{0j}) \cdot d_{0j}' + \delta_{0j} \dots\dots\dots (2)''$$

(2) 総括工程に関わる制約と評価要素

ネットワークを用いて工程計画の内容を記述するとき、文献 1) および 2) に詳述しているように、作業間の順序関係を規定する要素に関して工事の所要期間 λ は次のような関数として表わされる。すなわち、 λ は技術的な順序関係の制約のもとで仮設資材、機械、作業員などの工費用資源の効率的な運用を表わす管理的な順序関係の集合 $P^{(R)}$ の関数として次式で表わされるとするものである。

$$\lambda = \lambda(P) = \lambda(P^{(R)}) \dots\dots\dots (3)$$

このような観点から、工費用資源の運用という点で競合関係にある作業群の集合が一次的に与えられている場合には、工事の所要期間 λ を最小とする管理的な順序関係を求める解法としてはすでにいくつかの方法が開発されている。すなわち、巡回セールスマン問題としてモデル化して DP を応用する解法や下界値を設定して逐次探索を行っていくブランチ・バウンド法による解法などである¹⁵⁾。

しかしながら、実際の工事においては施工技術的側面からの制約や全体工程の資源配分のバランス、さらには主要工費用資源の調達に伴う各種の制約、先行工事や後続工事との関連性など、工程計画の作成にあたって考慮すべき多くの状況が存在している。さらに、これらの状況にしても必ずしも一次的に与えられることは少なく、ある範囲からの選択が求められるのが普通である。これらのことを考えると、工程計画の作成にあたっては、計画内容の最適化を追求することよりも、むしろ、それらの多くの状況によく適合するような計画の代替案を求めていくことの方が実際上望ましい方法であるといえよう。つまり、考慮の対象とすべき「意味のある」計画の代替案をすべて列挙して、それらの中から工事の管理運営上最も望ましい案を効率よく選択するという方法を取ることが、工事施工の実行可能性を保証し目的性の高い工程計画案を採用することになると考えるのである。

本研究においては、詳細工程計画の作成にはすでに開発されているシステム論的方法を用いることにするが、工事施工上の制約に選択の余地の多い総括工程計画については上述のような観点から計画の作成にあたって考慮すべき制約と評価要素を以下のように取りまとめて整理

することにした。

- a) 工程計画の作成において考慮すべき制約
 - i) 工事の先行・後続関係に基づく工程上の制約
 - ① 当該工事の全体工程に許容される工期 $T_g (\geq \lambda)$
 - ② 各施工ブロック i の開始日 sT_i と終了日 eT_i
 - ii) 工費用資源の投入可能数量に関わる制約
 - ① 仮設資材や機械の投入可能なセット数の上限値 r_a^k および下限値 r_b^k
 - ② 職種別の作業員の 1 日当りの投入可能な員数の上限値 r_a^k および下限値 r_b^k
 - iii) 仮設資材の転用順序に関わる制約

型わく材等の仮設資材の転用にあたって運搬経路途中の施工ユニットが施工状態にあるために生じる転用作業上の障害
 - iv) 作業の確実性に関連する制約

隣接する施工ユニットの構築が完了していないと当該施工ユニットの作業足場が確保できないという他の単位工程への依存性

b) 工程計画における評価要素

- i) 作業工程上の制約 T_g, sT_i, eT_i などを満足する工程計画代替案の中で経済的な工程を選択するための工費用資源 k の投入数 r^k (ただし、 $r_b^k \leq r^k \leq r_a^k$)
- ii) 工費用資源の運用効率 (仮設資材の各セットの転回数、職種別の作業員の調達余剰数、機械の稼働率など)

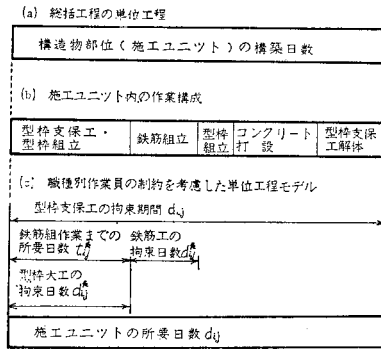
総括工程計画の作成にあたっては、当該工事の工程に関わる上記の諸制約の実態を調査するとともに、それらを工程ネットワークに対する制約条件として適切に組み込まなければならない。そして、そのような制約条件のもとに作成される工程計画の代替案に対して上に述べた評価要素について比較検討し、その中から工事の管理運営上最も望ましい案を選択することになる¹⁶⁾。

次章においては、このようなシステム論的方法を実際の工事の工程計画に適用することを目的として、投入資源に関する制約が厳しい場合の総括工程のスケジューリングについて述べることにする。

5. 総括工程のスケジューリング——投入資源に関する制約が厳しい場合

(1) 単位工程のモデル化

近年の地下鉄工事のように型わく材等の仮設資材の運用のみならず鉄筋工や大工等の作業員の調達に対する制約も厳しくなってくると、工事着工後の早期の段階にお



図一六 総括工程における単位工程モデル

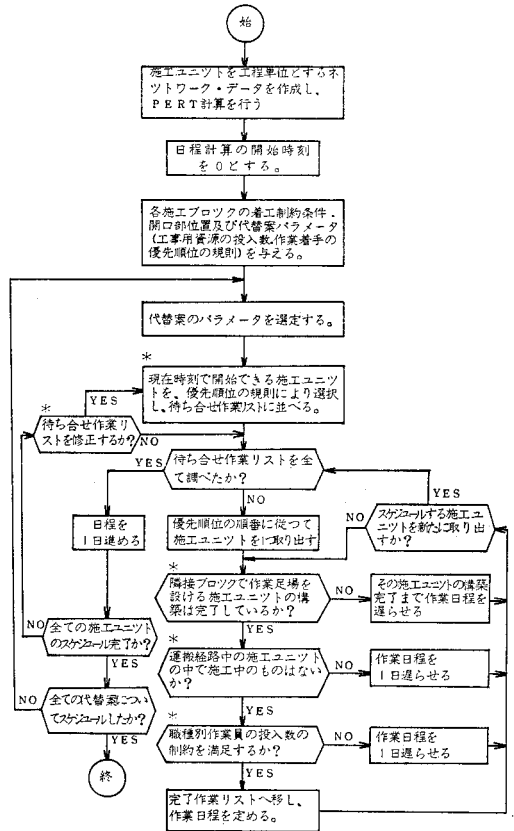
いて仮設資材の運用方法の検討に加えて職種別の作業員の調達への制約についても検討しておかなければならない。

すでに述べたとおり、各施工ユニットの所要日数は型わく材（型わく支保工も含む）の拘束期間と一致するので、施工ユニットを単位工程とする工程ネットワークを作成し、それを用いて PERT 計算や山崩し計算を行った結果は型わく材の運用を考慮した総括工程計画を与えるものとなる。

次に、型わく材および職種別作業員の制約が厳しくてこれらの運用方法を同時に検討する必要がある場合には各施工ユニットの職種別の作業員投入数とその拘束期間を与えることによって PERT/MANPOWER の山崩し法のアルゴリズムを参照とした次のような方法を用いることができる。すなわち、この方法のアルゴリズムでは図一六に示すように、まず各施工ユニットの作業構成に基づいて各单位工程の作業開始から当該工種の作業着手までの所要日数 t_{ij}^k を求めておく。そして現在時刻を t_0 とするとき、 t_0 において型わく材を移動させるべき次の施工ユニットを選択する。ついで、その施工ユニットに含まれる資源制約の与えられている職種 k について $(t_0 + t_{ij}^k)$ 時点での投入数の制約を調べるのである。もしそのとき、制約が満たされないために当該工種の作業が実施できない場合には、当該施工ユニットの作業着手を遅らせるか、あるいは当該工種の作業着手の延伸日数にあたる Δd_{ij}^k を求めその施工ユニットの所要日数 d_{ij} を次式で d_{ij}' に変えて作業着手とすることになる。

$$d_{ij}' = d_{ij} + \Delta d_{ij}^k \dots \dots \dots (4)$$

本研究においては、ネットワークモデルのタイプとして単位工程とネットワーク上のノードが1対1の対応をしているプレシーデンス型のネットワークを用いている^{17), 18)}。このために、施工ユニットに対応する単位工程を改めて工種別作業のレベルに再分割することなく、容易に上記の操作を行うことができるのである。図一七は、仮設資材の転用順序の選択と工種別の作業員の山崩



図一七 総括工程計画の作成法のフローチャート

し計算とを同時に行うことのできる総括工程計画の作成法のプロセスをフローチャートとして図示したものである。図中に*印を付した項目は計画対象工事の工事内容、施工方法および工程上の制約などによる工程計画への影響度に応じて必要な項目を選択し、それらの項目の組合せを任意に行い得るようにパラメーターによる指定ができるようにしたものである。

(2) 仮設資材の転用順序選択の基準

ネットワークモデルを用いて仮設資材の転用順序や職種別作業員の調達数の制約の検討を行う場合、単位工程の作業着手の選択基準として2つの側面が考えられる。その1つは工事用資源の効率的な運用管理を行うための運搬経路の選択に関するものであり、他の1つは工程ネットワークの山崩し計算を行うにあたっての作業着手の優先順位の規則に関するものである。

a) 運搬経路の選択に関する基準¹⁹⁾

運搬経路の選択にあたって考慮すべき事項としては、運搬経路途中の施工ユニットの作業状態、仮設資材の移動距離および転用範囲などが考えられる。

i) 経路途中の作業状態のチェック

これは運搬経路の途中にある各施工ユニットの作業状態をチェックして、作業中の施工ユニットのある経路を選択対象から除外するためのものである。すなわち、施工ユニット (i, j) の作業開始時刻を ST_{ij} 、作業終了時刻を FT_{ij} 、現在時刻を t_0 とすると、経路途中の施工ユニットの作業状態は次式でチェックすることができる。

- ① 未着手： $ST_{ij} > t_0$
- ② 施工中： $ST_{ij} \leq t_0 \leq FT_{ij}$
- ③ 施工完了： $t_0 > FT_{ij}$

ii) 仮設資材の移動距離

仮設資材を転用する場合、できるだけ近い施工ユニットを選択することは運搬経費、作業時間および作業手間を軽減するばかりでなく、現場内の作業動線の錯綜を避けることにもなって施工管理上都合がよい。

作業状態がすでにチェックされている運搬経路の長さを比較するには近似的に次式によることができる。すなわち、後出の図-8に例示するように、現在の施工ユニットを (i_1, j_1) 、移動先の施工ユニットを (i_2, j_2) 、資機材搬出入用の開口部を設ける施工ブロックを i_0 、運搬経路の長さを示す指標を $L_{1,2}$ で表わすと、

$$L_{1,2} = \begin{cases} |i_1 - i_0| + |i_0 - i_2|, & j_1 \neq j_2 \text{ かつ } i_1 \text{ と } i_2 \text{ の} \\ & \text{間の施工ユニットがす} \\ & \text{べて完了の場合,} \\ |i_1 - i_2|, & \text{その他の場合.} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

b) 作業着手の優先順位の規則

工程ネットワークの山崩し計算法における作業着手の優先順位の規則としては、トータルフロートや所要日数などに着目した工期の延伸に関する指標をヒューリスティックに用いているのが実情である。

ここでは、工程ネットワークの山崩し計算の過程で必要とされる優先順位を選択するための指標としてトータルフロートを用いることにする。そして、その算出方法として次の2つの方法を考えることにする。

- ① PERT 計算の結果得られるトータルフロートの値をそのまま山崩し計算の指標とする。
- ② PERT 計算の結果得られるトータルフロートの値を山崩し計算のつど計算し直して指標とする。

また、山崩し計算のスケジュールの方法として、ここでは、現在時刻で資源制約を満たさない作業はスケジュールしないという方法と、資源制約を満たす時刻まで遅らせてその時刻にスケジュールするという方法の2つを

表-2 優先順位の規則および転用順序の設定等に関する事項

項目	内容
① 優先順位の設定方法	a. トータルフロート (TF) の小さい順 b. 運搬距離 $(L_{1,2})$ の小さい順 c. 第1基準 TF, 第2基準 $L_{1,2}$ の小さい順 d. 第1基準 $L_{1,2}$, 第2基準 TF の小さい順
② T F の算定方法	a. TF を時刻ごとに逐次再計算する。 b. PERT 計算結果の TF をそのまま用いる。
③ スケジュールの方法	a. 現在時刻で資源制約を満たさない作業はスケジュールしない。 b. 現在時刻で資源制約を満たさない作業は資源制約を満たす時刻にスケジュールする。
④ 転用順序の設定方法	a. 本研究による方法を用いる。 b. 現場技術者が過去の施工経験に基づいて一意的に与える。

考慮する。

以上に述べた転用順序の設定および優先順位の規則に関する諸事項を取りまとめて示すと表-2 のようである。

6. 地下鉄開削工事における適用事例とその考察

(1) 適用工事の概要

適用対象として取り上げたモデル工事は大阪市東部に位置する地下鉄駅部の構造物工事である。図-8に当工事の平面図および構造物本体の施工ユニットの分割図を

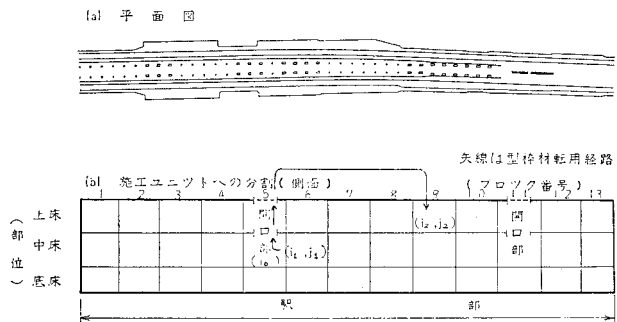


図-8 適用対象工事の平面図および施工ユニット分割

表-3 総括工程計画作成における制約条件

制約条件	ブロック番号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
構築開始ブロック						○								○
掘削工の制約による遅れ(日)	40	30	20	10	0	10	20	30	40	40	30	20	10	
開口部の位置						○						○		
埋戻し工の制約	約2か月間を見込む。													
工事用資源の投入可能数	型わく大工:1~2班(1班20人編成を基準とする) 鉄筋工:1~2班(1班20人編成を基準とする) 型わく支保工:5~7セット(6セット投入を基準とする)													

示す。

当工事においては、先行する掘削工事についてはすでに開発した GPSS によるシミュレーションモデルを用いて掘削工程計画を作成し²⁰⁾、その結果を構造物工事の総括工程計画に対する掘削工事による制約として与えた。総括工程計画作成にあたっての制約条件および工事用資源の投入に関する制約を一覧にして示すと表-3 のようである。これらの制約と工事全体の工期の制約が厳しいことから、構造物工事の総括工程レベルの問題点として、型わく支保工の転用計画と主要職種である鉄筋工・型わく大工の調達計画を取り上げた。

(2) 総括工程計画の作成

構造物工事の総括工程計画は以下に示す手順に従って作成した。すなわち、

① 構造物本体は図-8に示すように各施工ユニットに分解されており、各施工ユニットに必要とされる工種別作業は図-5に示したような構成となっている。

② 主要職種である型わく大工と鉄筋工はそれぞれ1班 22 人の編成としてその拘束期間を求める。そして、式(2)'を用いて各施工ユニットの所要日数を算定するとともに、図-6に示した単位工程モデルを適用するのに必要な工程データを作成する。

③ 型わく大工の投入数のみに制約を与え、他の職種の制約は与えない状況の下で工期を試算する。

④ ③の試算結果に基づいて型わく大工の投入班数を固定し、鉄筋工の投入班数の制約を与えて工期を試算する。

⑤ ④の試算結果に基づいて型わく大工と鉄筋工の投入班数を固定し、それぞれの制約のもとで型わく材の投入セット数と転用順序を求める。このときの計算にあたっては図-7に示したフローチャートの方法を用い、優先順位の規則の設定や転用経路の選択にあたっては表-2に示した項目を組み合わせ、それをパラメーターによって指定するものとする。

このような計画作成手順に従って、ステップ①、②、③および④の結果として求められたものが表-4である。この表に示すように、職種別作業員については型わく大工2班と鉄筋工1班を投入することにした。

表-4 職種別作業員の投入数の選定

項目 ステップ	型わく大工の投入数(班)	鉄筋工の投入数(班)	工期 λ(日)	構造物工事の許容工期 T _g (日)
I	2	—	232*	340
	1	—	332	
II	2	2	241	
	2	1	311*	

* 各計算ステップにおける選択案(表-5も同じ)

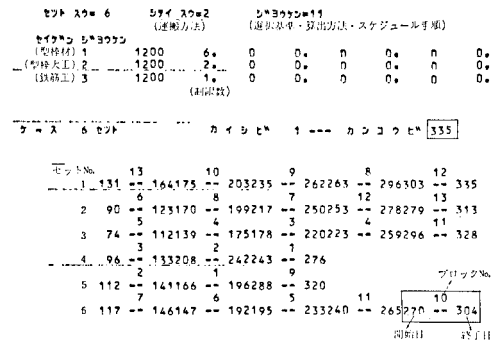


図-9 スケジュール計算結果のアウトプット例

表-5 各ケースにおける工程計画代替案の比較と評価結果

④ 転用の順序設定	③ スケジュールの方法	① 優先順位の設定		a	b	c	d
		② TF の設定	TF				
a (本研究の方法)	a	a	354	352	354	351	
		b	359	328	335*	340	
b	b	a	344	—	—	—	
b	b	a	345	—	—	—	

各項目の記号の内容については表-2 参照

次に、型わく支保工については施工ユニット数や型わく大工の投入班数との関係から6セットの投入を第1案としてステップ⑤の計算を行うことにした。スケジュール計算の結果は図-9に示すように工期、各施工ユニットの開始日・終了日、型わく支保工各セットの転用順序をプリンターを用いて出力するとともに、工程表についてはプロッターを用いて出力した。この工程表から型わく支保工5セットを投入したのでは工期の制約を満たさないことが明らかとなった。

そこで、型わく支保工は6セット投入するものとして表-5に示すような組合せの各ケースについてスケジュール計算を行った。表-5には各ケースの工期を示したが、転用経路の制約、職種別作業員や型わく支保工の投入数の制約、型わく支保工の転用順序および転回数などという観点からみて、表中の*印を付した案が最も望ましい計画案を与えるものと判断した。また、表中の最下段の案は隣接ブロックへ順次転用させていくという普通経験的に考えられる方法である。しかし、この方法では工期を超過することになって望ましくないことがわかるであろう。

7. おわりに

本研究においては、まず施工ブロック、構造物部位によって区分される施工ユニット、工種別作業を表わす単位作業、および補助作業という施工過程の3つのレベル

に対応させて施工工程を総括工程，詳細工程および週（月）間工程よりなる多階層構造として認識する概念について述べた。また，それぞれの工程をネットワークモデルを用いて表わすことにより，施工計画の基本的方針の決定から日々の施工活動に至るまでの一連の現場業務と対応する工程計画が得られることを明らかにした。

工事施工の基本的方針を定めるにあたって重要な役割をもつところの総括工程については，資源制約が特に厳しくなっている地下鉄工事を対象として本研究において提案した総括工程計画のシステム論的な方法の有効性を実証した。また，地下鉄構造物工事への適用と併行して掘削工事の工程計画に対してもすでに開発しているシミュレーション手法による方法を適用することによって，地下鉄工事の全体工程計画の実行可能性や目的性を評価・検討することができた。

今後は，本研究の成果を基礎として土木工事における施工実績情報の体系的な処理方法をシステム論的な視点からの確立を図ることによって，計画と管理を統合した工事管理のシステム化へと発展させていくことが急務と考えられる。

最後に，本研究に対して種々の貴重なご意見を賜った京都大学工学部 吉川和広教授ならびに（株）鴻池組常務取締役 川崎健次技術研究所所長に深甚なる謝意を表するとともに，地下鉄工事の工程計画に対して種々の助力をしていただいた（株）鴻池組技術研究所 折田利昭研究員，および実際工事への適用にあたって種々のご援助をいただいた同地下鉄長田事業場 佐幸田泰明主任に謝意を表する次第である。

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，学位論文，1971年9月。
- 2) 川崎健次・春名 攻・田坂隆一郎・笹嶋 博：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，土木学会論文報告集，第204号，1972年8月。
- 3) 川崎健次：建設工事における工務管理の合理化に関するシステム論的研究，学位論文，1974年11月。
- 4) 春名 攻・田坂隆一郎：土木工事における施工計画・管理のシステム構成と計画化のプロセスについて，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集第4部，1979年10月。
- 5) 川崎健次・春名 攻・西野久二郎・田坂隆一郎・折田利昭・安井英二：土木工事における施工計画・管理システムに関する研究，第1回土木計画学研究発表会講演集，土木学会，1979年1月。
- 6) 前出2)。
- 7) Fondahl, J. : Networking Techniques for Project Planning, Scheduling, and Control, Handbook of Construction Management and Organization, Chap. 17, Van Nostrand Reinhold Co., 1973.
- 8) 川崎健次・田坂隆一郎・折田利昭：ネットワーク手法による施工進度管理法に関する一考察，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第4部，1977年10月。
- 9) 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，1970年10月。
- 10) ケーソン工事の省力化研究委員会：ケーソン工事の省力化に関する可能性の検討と具体案の提起，第2次報告書，（社）建設コンサルタンツ協会大阪支部建設技術資料センター，1974年8月。
- 11) 前出1)，2) など。
- 12) 前出3)。
- 13) 渡辺 健・塚田 章・和田一郎・猪瀬二郎：土木施工法講座 15 地下鉄道施工法（上），（下），山海堂，1975年。
- 14) 川崎健次・田坂隆一郎・折田利昭：サークル型ネットワークによる工程計画・管理のシステム化，昭和49年度関西支部年次学術講演会講演概要，土木学会，1974年。
- 15) 前出9)。
- 16) 山本幸司・田坂隆一郎・初沢 実：施工法の組合せによる工程計画の評価方法について，第8回（昭和50年度）業務研究発表会論集，（社）建設コンサルタンツ協会大阪支部建設技術資料センター，1975年8月。
- 17) Moder, J.J. and C.R. Phillips C.R. : Project Management with CPM and PERT, Second Edition, Van Nostrand Reinhold Co., 1970.
- 18) Wiest, J.D. and F.K. Levy : A Management Guide to PERT/CPM : with GERT/PDM/DCPM and other Networks, Second Edition, Prentice-Hall, 1977.
- 19) 川崎健次・田坂隆一郎・折田利昭：総括工程計画作成の方法に関する一考察，第34回年次学術講演会講演概要集第4部，土木学会，1979年10月。
- 20) 春名 攻・田坂隆一郎：地下鉄掘削工事における掘削工程のシステムシミュレーション，土木学会論文報告集，第293号，1980年1月。

(1980.5.19・受付)