

作業空間を考慮した工程計画立案 支援システムについて

A Development on Scheduling System Taking Work Space into Consideration

折田利昭*, 山本幸司**, 村林 篤*

by Toshiaki Orita, Koshi Yamamoto, Atushi Murabayashi

Project schedule utilized at job-sites is, may be said, roughly divided into three phases: master schedule, detailed schedule and monthly schedule. This paper develops a master scheduling system supported by personal computer, which is based on time-space diagram, where production rate is represented as the gradient. This is because the ordinate plots the time while the abscissa plots the location (space) of each activity. The system uses precedence diagram and enables to represent the required distance among activities with regard to time and space as to make sure of the feasibility as schedule. The system has been successfully applied to one of subway construction works.

1. まえがき

工事マネジメントにおいては工程計画・管理業務が中心的業務であり、効率的に工事を遂行するため合理的な計画の立案が要求されている。

工程計画は対象とする期間から ①全工事期間に関する工程計画と、②年間、季間、月間という限定した期間に関する工程計画に分類でき、さらにWBSの観点から①は、部分工事を表現単位とする総括工程計画および作業を表現単位とする詳細工程計画に分類できる¹⁾。

ここで、限定期間の工程計画は、全体期間の工程計画を参照して立案され、さらに全体期間の工程計画のうち詳細工程計画は、総括工程計画を展開して

* 正会員 棚鴻池組 技術研究所

(〒541 大阪市北区金町3-6-1)

** 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学
部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区)

立案される。したがって、総括工程計画は工事実施に対する基本方針と位置付けられ、その立案支援システムが重要と考えられる。

総括工程計画の立案プロセスにおける特徴としては、重要な工種から工程を割り付け、それを制約として他の工種を決定していく、すなわち、割付方式による場合が多いこと、ならびに機械等の占有領域を含めた作業空間を考慮して立案していることがあげられる。

本研究の目的は、作業空間を考慮した工程計画立案支援システムの開発であり、座標式工程表の利用とその拡張を提案するものである。

2. システム化の前提整理

工事中工当初の施工環境が不確定で、かつ施工準備業務の複雑な時期において、施工法や主要資機材の運用計画といった複数の代替案を迅速に立案し、それらの案の正確な評価を行っている段階が、総括

工程計画立案段階である。

ここで、施工法に関しては技術的検討により選択され、工程計画における重要な課題は主要資機材の運用計画となっている。

土木工事は、一般に複数の工種（例えば、基礎工、掘削工、躯体工、埋め戻し工）から構成されており、最適な工程計画を立案するためには各工種の主要資機材の組合せと運用順序について多数の代替案を比較検討することが必要となる。しかし、実際には、各工種に関して資機材の組み合わせ等を設定し、算出される各工種の工程を積み上げて全体工程を求める方式（積み上げ方式とよぶ）をとらず、定められた工事期間の中に経験から割り出された各工種の所要期間を割付け、全体的にバランスのとれた工程を求める方式（割付方式とよぶ）がとられている。つまり、経験から割り出された各工種の期間を目標として、目標を満足させる各工種に関する主要資機材の準備数、運用順序を立案しているといえる。

さらに、運用順序の代替案では、機械の移動、資材の運搬等資機材の動線を考慮することが必要であり、作業空間を把握しながら立案されている。

各代替案の評価においては、工期面の他に安全面、原価面の多面的評価を行っている。このうち原価面においては施工法自体に関する評価は別途行われており、ここでは工事用資源の運用という面から評価している。また、安全面に関しては、機械の輻輳等作業の占有領域、すなわち、作業空間の確保という評価を行っている。

これらから、総括工程計画立案支援システムの課題としては、以下の事項があげられる。

- ① 代替案を迅速に立案できること
- ② 割付方式に対応できること
- ③ 作業空間を代替案作成時に把握できること
- ④ 原価面からも評価ができること

3. システム化の方針

（1）座標式工程表をベースとしたシステム化

一般に広く利用されている工程表現には、ネットワーク表現、バーチャート表現、および座標式表現があるが、それぞれ長所短所を持っており、上述の課題を解決するシステム化にあたってはいずれをベースとするかが問題となる。

ここで、ネットワーク手法は、計算プロセスの前に工事完成にいたるすべてのアクティビティに関する属性（例えば、施工量、順序関係）をデータとして設定する必要があり、積み上げ方式に適している。したがって、代替案において重要な工種から順次工程を設定していく割付方式に対しては、工種ごとの代替案を立案し、さらにそれぞれを結合して一つの代替案として評価する必要があり、迅速な評価が難しいと考えられる。

また、作業空間を考慮する場合には、筆者が提案したアクティビティごとに作業空間に関するデータを付加する方法²¹⁾により解決可能であるが、作業空間を把握できる工程表として表現することは困難である。

一方、座標式工程表は縦軸に工事の期間、横軸に構造物に沿った位置をとり、その座標上に作業をプロットした図表であり、作業の専有する時間・位置が明示されるため、作業の間隔つまり作業空間を把握できる。

このことから、複数の工種がある場合、重要な工種から工程を設定する割付方式に対して、設定された工程および必要な作業空間の制約を図表で把握し、他の工種を検討することが可能であり、代替案を迅速に立案できると考えられる。

上述のことから、割付方式を実現するために対話型で工程計画を立案する方法とし、座標式工程表をベースとすることにした。

（2）出来高曲線による総合評価

工期に関しては、工程表から評価が可能であり、原価に関しては、採用する施工法が影響するが、施工法等純技術的な側面については別途検討が必要となる。したがって、本システムでは、施工法に関しては与条件として捉えることとし、資機材の運用すなわち準備数、運用順序の原価的側面の評価を対象とすることにした。

さて、工程を原価的側面から評価する方法としては、代表例としてバナナカーブによる道路工事の評価方法があり、さらに田坂らの研究²²⁾においても出来高曲線の形状が工程計画の評価に利用可能であるという結果が得られている。

これらのことから総合評価の一環として出来高曲線の算出を組み込むこととした。

4. 座標式工程表の拡張

(1) 作業空間を考慮したシステムの研究状況

土木工事の工種は、大きく分けて機械を主体とする工種と人間を主体とする工種の2つに分けられ、運用順序に関しては、前者では続けて行う作業と作業の場所的間隔を小さくするすなわち作業場所の連続性を重視し、後者においては作業と作業の時間間隔を小さくするすなわち作業時間の連続性を重視するという特性があり、いずれも作業空間を考慮することが重要である。

座標式工程表は、作業空間を明示できるという特徴があり、水平方向に繰返しの多い線形構造物の工事（例えば、護岸工事、トンネル工事）に広く利用され、作業空間を考慮し座標式工程表を利用したシステムも Selinger³⁾、Stradal⁴⁾、奥山⁵⁾、吉川⁶⁾、須田⁷⁾らによって開発されている。

上述の研究において、吉川の研究以外は作業場所の連続性において、一方向に作業場所が移動することを前提としており、方向を変更する場合に対応していない。また、奥山の研究を除いて、作業時間の連続性に対応したシステムであり、スケジュール計算プロセス以前にすべての作業を場所により分割している、すなわち、ある一定の場所で行われる作業を前提としている。

さらに、いずれの研究も積み上げ方式を基礎としており、本研究の対象とする割付方式に対応していないのが現状である。

吉川の研究でも明らかにされているが、特に割付方式に対応するためには、対話型でヒューリスティックなシステムが必要であり、以下の課題があげられる。

- ① ある期間一定の場所で行われる作業に関して、作業時間の連続性を重視した対応をとる必要がある。
- ② 実行可能性を評価するためには作業空間を工程表上に表現する必要がある。
- ③ 一般に繰返し作業がある場合、習熟効果があるといわれており、習熟効果を組み込む必要がある。

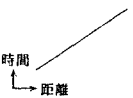
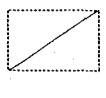
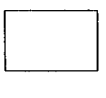
本研究では、上述の課題に対して以下の方法により解決を図った。

(2) 座標式工程表の拡張

a) ネットワーク手法との結合

座標式での作業表現は「線」だけであるため、ここではある期間一定の場所で行われる作業を「箱」で表現することにした。また、データの内容は「箱」に準ずるが、表示は「線」とする一般的な傾向のある作業（例えば、高架橋下部工における基礎杭工）に対しては、「線表示箱」と呼ぶことにし、「箱」で表示するものを「箱表示箱」と呼んで区別している。これらを整理して示すと、表-1のようになる。

表-1 作業の表示方法

分 類	線	線表示箱	箱表示箱
表示方法			
代表例	盛土撤去	基礎杭工	構造物工

ここで、「箱」はプレゼンシス型ネットワークにおけるアクティビティと同じであり、計算プロセス以前に作業の属性を設定する必要があり、場所（例えば、構造物の部位）に属していることになる。そこで、「箱」と「箱」の順序関係は、ある場所からある場所への資機材の移動とみなせ、場所を指定することにより設定できるようにした。さらに、指定した場所の順番が先行と後続の関係を示すこととし、座標式工程表上で先行の「箱」の上端座標（終了日に対応）に後続の「箱」の下端座標（開始日に対応）を一致させる処理を行い、開始日・終了日を求められるようにした。

b) 作業干渉の表示

座標式工程表上に「線」または「箱」の図形が表示されている部分は、その図形の表示された範囲を占有して作業が行われていることを表している。したがって、この図形どうしが重なりあうような作業の設定を行うと、互いの作業に支障をきたすことになり、計画は実行不可能と考えられる。

実際には、作業の行われている範囲よりもさらに大きな範囲を必要とする場合、例えば地盤安定処理を行った後地盤が安定するまで次の作業が行えない、あるいは大型機械の作業空間確保のために隣接位置での作業ができない等がある。

ここでは、前者の範囲を時間的干渉、後者の範囲

を空間的干渉と呼び、表-2のように干渉範囲を含む作業空間を表現し、工程表上で容易に実行可能性を把握できるようにした。

表-2 時間的干渉と空間的干渉

	干渉なし	時間的干渉	空間的干渉
「線」 時間 ↓ 距離			
「箱」 時間 ↓ 距離			

c) 習熟効果の組込

習熟効果は習熟曲線であらわされることが、実績データからいわれている。

ここで、縦軸に標準施工速度すなわち平均的な施工速度（単位施工量当りに要する時間）を 1.0 とした比をとり、横軸に全体施工量に対する比率をとって、習熟曲線を示すと図-1 のようになる。

図-1 の曲線は、施工量が全体施工量に対してある比率となる時点までの平均施工速度を表していることとなる。

座標式工程表上で正確に習熟効果を表現すると直線ではなく曲線となるが、本システムでは、習熟効果を加味した施工速度を、図-1 のように工事を前半（0%から25%まで）、中盤（25%から50%まで）、後半（50%から100%まで）のように区間ごとに標準施工速度に対する比を段階的に変化させ、折線で近似することにした。なお、施工速度を変化させる範囲は、必要なだけ詳細に分割することは可能である。

標準施工速度により求めた「線」と図-1 のように施工速度の変化を与えて習熟を加味した「線」を示すと図-2 のようになり、習熟効果を加味した工程が実際に近く、進捗管理において有効となる。

なお、この方法は施工速度の段階的変化を考慮した方法であり、施工区間によって工事の難易度が異なる、すなわち、施工速度の変化するトンネル工事にも、対応できることになる。

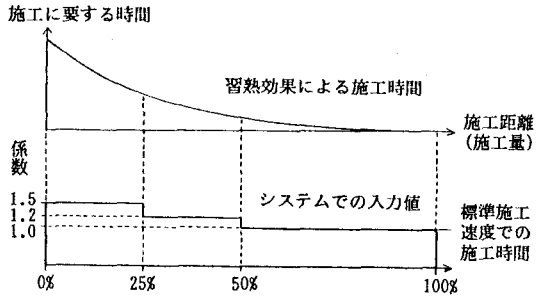


図-1 習熟効果の設定方法

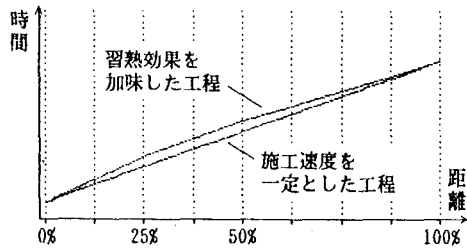


図-2 習熟効果の表示

5. システムの全体概要

本システムは、利用場所は現場、利用対象者は工事技術者を考えていることから、操作性の良いシステムであることが必要であり、機器は PC-9801 とグラフィック画面との対話における入力機器としてのマウスで構成している。

(1) システムの概略フロー

本システムは、初期データ入力部と対話型処理部の2つで構成している。初期データ入力部においては、過去の類似工事のデータを蓄積した「参考データ」、当該工事の基本となる「一般データ」および個々の工程表現の単位となる「個別データ」の3つのデータファイルを用意し、以下のようにデータ入力の簡便化を図った。

「一般データ」は「参考データ」を基に該当する工事の現場条件に合わせ、施工速度等の標準値を表形式によるデータ修正という形で入力できるようにしている。つまり、作業の種類について作業名称が抽出される図-3 ような WBS 構造をとり入れた。さらに、「個別データ」においては、ブロック区分と対応できる作業について、前述の「一般データ」を利用し、ブロック毎の施工数量等を表形式で入力できるようにしている。

対話型処理部では、これら初期データをもとに、

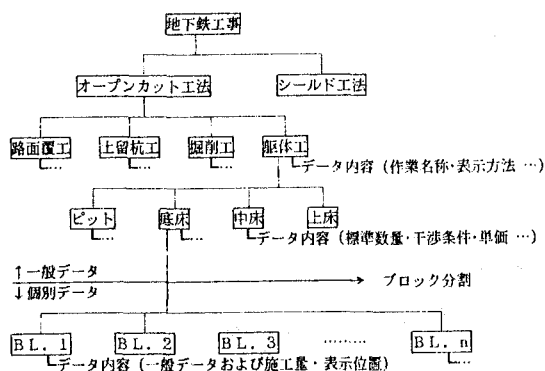


図-3 データ構造図

グラフィック画面を通して実行可能性、工期面および原価面を立案者が正確に評価し、後述する機能を利用して追加・修正を繰り返すことにより適切な計画を立案できるようにした。

ここで、画面表示には、全体工程の評価用として、座標式工程表と工種別バーチャートを重ね書きした出来高曲線、および工程の修正用として、一部分を拡大した座標式工程表があげられる。なお、対話型でデータを修正することが肝要であることから、座標式工程表とデータは相互に連動して修正できるようにしている。しかし、評価用である出来高曲線の図についてはグラフへの一方的な表示としている。

システム全体の流れをフロー図として示すと図-4のようになる。

(2) 対話型工程計画立案の機能

本システムは、対話型で工程計画を立案するプロ

セスを支援するものであり、グラフィック画面へ表示される座標式工程表（以後、工程表と呼ぶ）に作業の日程を設定する操作を基本としている。その操作を支援するために以下の機能を設けている。なお、工程表上での座標の指定はすべてマウスを利用して行うものである。

a) 新規設定に対する機能

作業の開始場所および終了場所は、「線」では工程表上の横座標、「箱」では原則として工程表上のブロック単位すなわちブロックとして設定した横座標の範囲内の一点で指定できる。作業の開始日は工程表上の縦座標で設定する必要があるが、その作業の終了日については標準施工速度等を基として自動的に計算され、指定は不要としている。さらに、ブロック間の運用順序に伴う日程については、工程表上でブロック（横座標における範囲内の一点）を順次指定することにより、ネットワーク計算の前進計算および後退計算に該当する処理を行い、容易に設定できる。

b) 修正に対する機能

ここでは修正対象作業の指定と修正方法が重要であり、前者は工程表上で対象とする作業の端部つまり「線」では両端の点、「箱」では4つの頂点のいずれかを指定することにより、認識できるようにしている。

一方、修正方法については、基本修正となる作業の日程変更と作業の所要期間の変更および応用修正となる作業の分割・統合について対応できるように

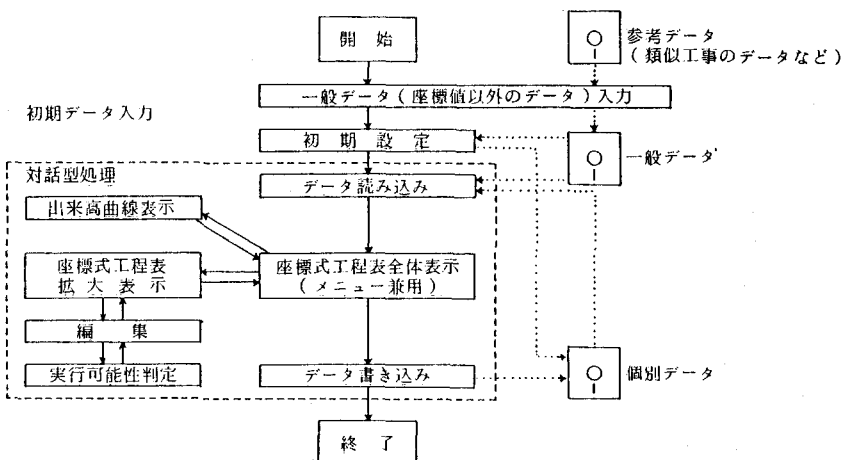
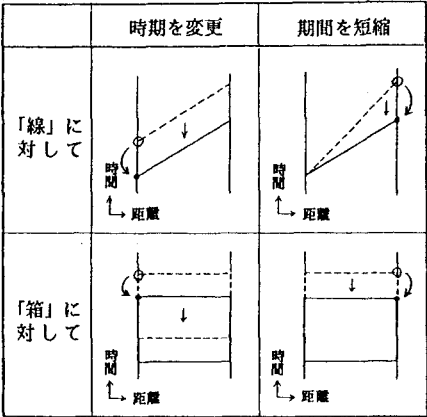


図-4 システムの概略フロー

している。ここでは、基本修正についてのべる。

基本修正では、上述の対象作業の指定ならびに修正する方法を選択し、その後表-3に示すように端部の移動させたい日を座標軸上で指定するという操作により、簡単に修正できるようにしている。

表-3 作業の変更



注)・点は変更させたい日を表す

作業の日程の設定後に空間的干渉あるいは時間的干渉が発生した場合、干渉を回避することが必要である。干渉状態の回避に対しては、干渉している日・場所を求める必要があり、このため任意の2直線(例えば、「線」、「箱」の一边)の交点を自動的に図-5のように工程表上に表示し、何日ずらせば干渉を回避できるかという日程変更作業の簡便化を図っている。

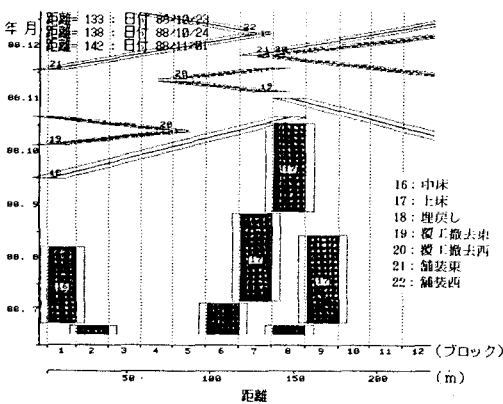


図-5 干渉状態の表示例

(3) 出来高算出に関する機能

出来高算出は時期すなわち工程と連動して行う必要があり、その算出パターンとしては、

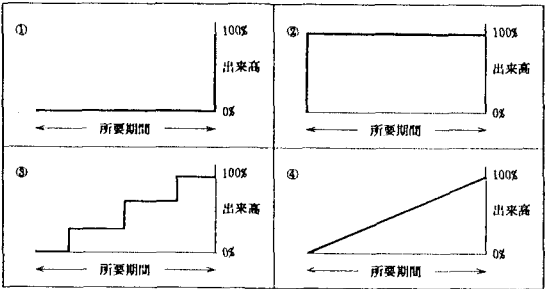
- ① 作業途中は0%とし、終了時に100%を計上

する。

- ② 作業開始時に100%を計上する。
- ③ マイルストーンを設定し、その時点に対応した比率を計上する。
- ④ 作業期間全体にわたって、完了した比率に応じて計上する。

があり、これらを示すと表-4となる。

表-4 出来高算出パターン



ここで、「線」の場合、距離に比例して出来高が定まることから、算出パターン④に基づいて出来高を算出している。

一方、「箱」の場合、複数の作業を含んでいるため、代表する数量(例えば、コンクリート量)に応じた出来高が必要となり、算出パターン①に基づいて出来高を算出している。

なお、出来高曲線については、工種ごとのバーチャートとの併記が管理の面から一般的であるため、ここでは座標式工程表から工種の開始日、終了日を算出し、図-6のように両者を同時に表示できるようにしている。

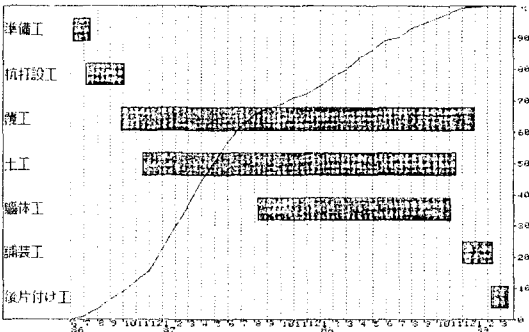


図-6 バーチャートを併記した出来高曲線

6. 地下鉄工事への適用事例

ここでは、本システムを地下鉄工事へ適用したの

参考データ(線)			
データ No. 3			
工段表 工種 番号	2	名称	杭打設
出基高 工種 番号	2	名称	杭打設工
表示方法	1		
色	4		
標準速度(数量)	5		
標準日数 全体	0		
固定部	0		
干渉範囲 左側	0		
右側	0		
全体数量	0		
施工延長(B.L.)	0		
単価	---		
先行工種番号	0		
順序関係形式	0		

一般データ(線)			
データ No. 3			
工段表 工種 番号	2	名称	杭打設
出基高 工種 番号	2	名称	杭打設工
表示方法	1		
色	4		
標準速度(数量)	5		
標準日数 全体	0		
固定部	0		
干渉範囲 左側	0		
右側	0		
全体数量	222		
施工延長(B.L.)	316		
単価	---		
先行工種番号	0		
順序関係形式	0		

施工速度変更データ			
距離	係数		
79	1.5		
158	1.2		
316	1.0		

参考データ(箱)			
データ No. 16			
工段表 工種 番号	15	名称	底床
出基高 工種 番号	5	名称	底床工
表示方法	3		
色	5		
標準速度(数量)	250		
標準日数 全体	25		
固定部	7		
干渉範囲 左側	0		
右側	0		
全体数量	0		
施工延長(B.L.)	0		
単価	---		
先行工種番号	0		
順序関係形式	0		

一般データ(箱)			
データ No. 16			
工段表 工種 番号	15	名称	底床
出基高 工種 番号	5	名称	底床工
表示方法	3		
色	5		
標準速度(数量)	250		
標準日数 全体	25		
固定部	7		
干渉範囲 左側	0		
右側	0		
全体数量	4186		
施工延長(B.L.)	16		
単価	---		
先行工種番号	0		
順序関係形式	0		

個別データ			
ブロック名	数量		
1	190.3		
2	237.4		
3	287.7		
4	232.2		
5	230.9		
6	230.9		
7	231.6		
8	236.1		
9	231.6		
10	234.9		

図-7 初期データ作成のフロー

で、その手順および結果についてのべることにする。
適用した工事の概要を以下に示す。

- ① 工事期間：3 4 ヶ月
- ② 工事延長：316.1m(線路部78.4m, 駅部237.7m)
- ③ 施工法：親杭横矢板工法
- ④ 防水：外防水

(1) 初期データ入力

「参考データ」から当該工事に必要な工種を検索し、抽出する。それをもとに当該工事での施工速度等に関する標準値を修正し、「一般データ」を作成する。ブロック区分対応の「箱」に関しては表形式で施工数量を入力して、「個別データ」を作成するが、「線」に関しては対話型処理において作業の施工区間を指定することにより、個別データが作成されることになる。

上述のフローを示すと図-7のようになる。

(2) 対話型処理

ネットワーク手法をベースとするシステムでは、正確な順序関係等のデータを確認しながら行わなければならない作業の新規作成、変更および分割・統合という操作を、ここでは座標式工程表上だけで正確に行え、画面切り替えにより実行可能性の表示画面(前出図-5)および工種別バーチャート(前出図-6)を見ながら適切な計画を立案できる。

上述の実行可能性に対して、類似工事のデータがある場合、実際に考慮しなければならない作業空間が「参考データ」から抽出・表示されるため、未経験者でも正確に把握することができる。

地下鉄工事における代替案の検討結果を示したのが図-8であり、座標式工程表の特徴である「線」

の作業に関して、機械運用における場所の連続性が確保された工程となっている。

(3) 考察

適用事例を通して、以下のことがわかった。

- ① グラフィック画面上での対話型処理であるため手書き感覚で工程計画を作成できる。
- ② 重点工種から割付けことができ、その工程

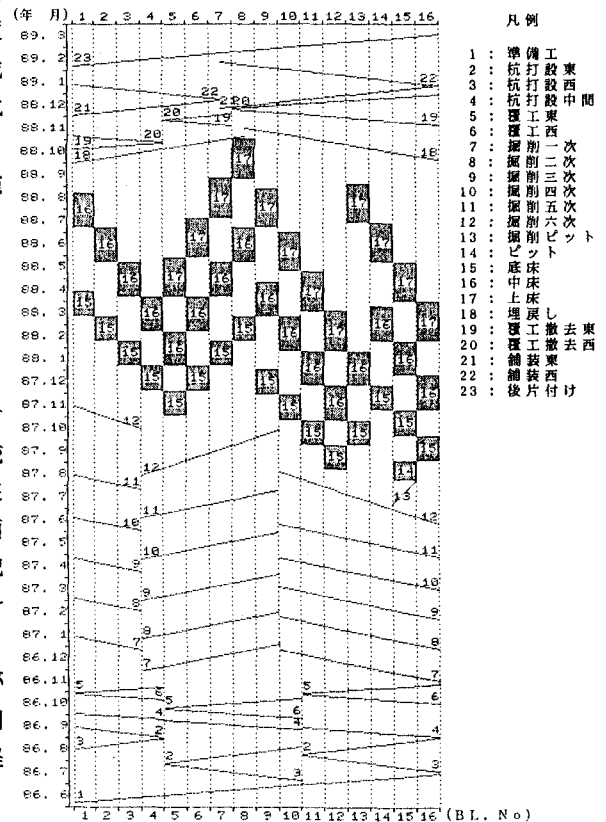


図-8 座標式工程表の出力例

を制約として、他工種を割付けることができる。

- ③ 「線」の作業については、機械の開始場所および機械の作業分担範囲等が代替案の要素であり、マウスにより場所を自由に設定できることから、多数の代替案を検討することができる。
- ④ 作業を実施するために機械が必要とする占有場所を表示できるため、作業空間に関する障害を把握することができ、実行可能性の高い計画を作成することができる。

7. あとがき

工程計画において最も基本となるのが総括工程計画であるが、その工程計画立案作業をシステム化するにあたっての課題として、①複数の代替案を迅速に立案できること、②代替案作成時に作業空間を考慮できること、③原価面からも評価が行えること、が挙げられる。本研究ではこれらの課題を解決した総括工程計画立案支援のパソコンシステムを開発した。

開発したシステムでは、上記①には工程表を見ながら、一部分を修正できる対話型処理で対処し、②に対しては座標式工程表の持つ、作業の時間・場所および作業の間隔を明確に表現できるという特徴を利用し、工程表上に作業の必要な範囲を表示して対処した。

また、③に対しては出来高の算出機能を組み込み、立案途中においても出来高曲線の形状を見ながら、工程計画を検討できるようにした。

さらに、より正確な工程の立案を行うために、作業の習熟効果を考慮できるものとし、習熟効果のデータを含め、過去の類似工事のデータを参照することにより、該当工事のデータを簡便に作成できるようにした。

画面上に示される工程表との対話型処理では、座標式工程表で主に対象とされる、作業の進行にともない場所が移動するような作業を「線」で表現し、施工速度を明確に把握可能とし、一方、ネットワーク工程表で主に対象とされる、ある一定の期間一定の場所で行われるような作業を「箱」で表現し、「箱」をプレジデンス型ネットワークのアクティビティとみなした処理すなわちPERT計算の最早開始日・最遅終了日の計算を可能とした。換言すると

本システムは座標式工程計画手法とネットワーク手法両者を結合したシステムといえる。

パソコンのグラフィック画面上にマウスを用いて重要工種から割付けていくことのできる本システムは、地下鉄工事への適用事例を通して、代替案を多数検討する総括工程計画立案段階において有効であることが実証された。

今後は、工程修正の履歴を蓄積し、計画立案にあたっての重点の置き方等専門家のノウハウを知識として獲得し、工程計画立案エキスパートシステム構築を検討していくつもりである。

【参考文献】

- 1)折田利昭：小型コンピュータによる総括工程計画作成システム，土木工事のマネジメント問題に関する研究討論会講演・資料集，pp201~208，1983.11
- 2)田坂隆一郎，安井英二：出来高曲線による施工進度管理法に関する一考察，昭和51年度土木学会学術講演会講演集IV，pp84~85，1976.10
- 3)Shlomo Selinger：Construction Planning for Linear Projects，ASCE，Journal of the Construction Division，pp477~487，Dec.1980
- 4)Oldrich Stradal，Josef Cacha：Time Space Scheduling Method，ASCE，Journal of the Construction Division，pp445~457，Sep.1982
- 5)奥山育英，佐藤恒夫，中西克也：港湾工事等における工程計画作成手法の開発と応用，第5回土木計画学研究発表会論文集，pp633~637，1983.1
- 6)吉川和広，春名攻，武政功：座標式工程表を用いた工事施工のスケジューリングに関する理論的検討，第5回土木計画学研究発表会論文集，pp648~656，1983.1
- 7)須田熙，湯沢昭：メッシュ式工程管理モデルによる港湾工事の工程管理，土木学会論文集，No.359/IV 4，pp71~80，1985.7