

PERT系スケジューリングモデルの改良・拡張に関する研究

山本幸司・池守昌幸

土木工学科

(1982年8月31日受理)

Modifications and Extensions of PERT-Type Scheduling Model

Koshi YAMAMOTO, Masayuki IKEMORI

Department of Civil Engineering

(Received August 31, 1982)

Almost two decades have passed since PERT was introduced to Japan as the scheduling model for construction planning. It may be said, however, that PERT-type scheduling model has two essential weak points; one is that it permits only one type of precedence relationship between activities, and the other is that it assigns only constant or any limited number of daily-required resources to each activity.

This paper has proposed two scheduling models in order to eliminate these weak points. A precedence network scheduling model is for the former weak point, and a heuristic scheduling model where daily resources to each activity are assumed as free variables is for the latter.

1. まえがき

一般に土木工事は、各作業の順序関係が一義的に決定できることからその施工工程のネットワーク表示が容易な工事と、作業間の順序関係が一義的に定まらないため施工工程がネットワークとしてうまく表現できない工事とに大別できる。このうち前者に対しては、その日程計画作成において、PERTに代表されるネットワーク型スケジューリングモデルが適用可能となるが、後者に対しては有効な手法がなく、各工事ごとにヒューリスティックな日程計画モデルを考えざるを得ない。

しかし、PERTも本来は土木工事の日程計画モデルとして開発された技法でないことから、「与えられた資源制約下で、工程ネットワーク上の各作業を適切な順序で実行し、可能な限り所要工期を短く、かつ、所要工費を低廉化する日程計画案を作成すること」¹⁾という土木工事の日程計画モデルが具備すべき要件を考えると、2.で考察するようにいくつかの本質的な問題点が挙げられる。そして、これがためにPERT系のスケジューリングモデルは十分実用に供しているとは言い難い現状にある。

そこで本研究では、まず2.においてPERT/Timeを中心とするPERT系のスケジューリングモデルを概説

するとともに各モデルが持つ問題点を明らかにし、さらにこれらの問題点を解決すべく提案されたいくつかのスケジューリングモデルを示す。次に、3.ではPERT系モデルの問題点の一つである“各作業間の順序関係ならびにネットワークの記述方法に自由度を欠く”という欠点を解決する技法として、Precedence Networkを用いた日程計画モデルを提案する。さらに、4.では“各作業に対する所要時間、必要資源量等に対する検討が不十分である”という欠点を解決する技法として、各作業への日々の投入資源量を変数として扱うヒューリスティックな日程計画モデルについて述べる。

2. PERT系を主とするスケジューリングモデル

2.1 PERT系スケジューリングモデルとその問題点

1950年代後半に米海軍のORチームによって開発されたPERTはいわゆるPERT/Time型のもので、土木工事に就いていけば時間的制約のみから当該工事の実行可能性を検討する日程計画モデルである。これは従来のバーチャート式日程計画と比較して、各作業間の順序関係が明確に表示できること、クリティカルパスを抽出することにより重点的な日程管理ができること、各作業に含まれる余裕時間の状況が把握できること、電子計算機に

よる処理が可能であること、等々多くの特徴を有するが²⁾、以下のような欠点を合わせ持つモデルである。

- ① 作業間の順序関係は先行作業の終了時刻と当該作業の開始時刻に対してのみ存在する。
- ② 各作業はその先行作業がすべて終了しなければ開始することができない。
- ③ 最遅先行作業の終了時刻と当該作業の開始時刻との間に時間遅れ (time lag) を認めない。
- ④ 工程ネットワーク内に feedback loop を認めない。
- ⑤ 各作業の所要時間を確定値で与える。
- ⑥ 各作業を実行するために必要な各種投入資源の量的制約を考慮していない。
- ⑦ 所要工期と所要工費との関係(一般的には trade-off 関係となる)が検討されていない。

ここで、以上のような PERT/Time の欠点を整理すると、①作業間の順序関係ならびにネットワークの記述方法に対する自由度を欠いていること、および④各作業に対する所要時間、必要資源量(工費も含む)等に関する検討が不十分であること、に大別することができる。そしてこのうち欠点①に関しては、PERT/Time を基本形とする PERT/Manpower, PERT/Cost, CPM, RAMPS などが提案された。これらは PERT 系モデルとよぶべきもので、その概要は以下のとおりである³⁾。

PERT/Manpower は日々の所要資源量が投入可能資源量を越えないよう考慮していく日程計画モデルであり、具体的にはまず PERT/Time 計算を行い、当該日に実行可能となった作業群に対して優先順位をつけ、緊急を要する作業から順次資源割当てを行うという手順をとる。しかし、各作業の所要日数ならびに日々の投入資源量は一定値として扱われている。PERT/Cost は工事資金の円滑な運営を行うために各作業の所要費用を Manpower と同様に取り扱う日程計画モデルである。CPM は各作業の所要時間と所要費用との線形 trade-off 関係を想定し、工費の低廉化を目的として工費と工期との関係を分析するモデルであるが、資源制約は考慮されていない。RAMPS は各作業の所要日数および日々の投入資源が一定値であるという PERT/Manpower の欠点を補うべく、各作業の投入資源量と施工量が比例するという前提のもとに、3通りの施工速度 (speed-up, normal, slow-down) を考慮するモデルである。当然、PERT/Manpower よりも投入資源の有効利用が可能となるが、各作業の施工速度が3通りであることを意味する。このため各作業への日々の投入資源量を変数として扱う日程計画モデルがいくつか開発されたが、その一例が CPRSA である⁴⁾。

2.2 PERT 系以外のスケジューリングモデル

一方、PERT/Time の欠点①を解決するためのスケジューリングモデルとしては、DCPM, LFG, GERT, Precedence Network などが開発された⁵⁾。しかし、これらはいずれも土木工事の日程計画モデルとして提案されたものではないため、特に前3者に関しては我国ではまだ適用事例もほとんど見受けられない状況にある。また資源制約を直接的に考慮できないこともこれらの欠点である。

最後に本章で示した各スケジューリングモデル相互間の関連を図示したのが Fig. 1 である。

3. Precedence Network によるスケジューリングモデル

3.1 Precedence Network の概要

従来の PERT 系日程計画モデルでは、「各作業はその先行作業がすべて終了するまで開始できない」という一通りの順序関係しか認められず、作業間の時間遅れも存在しなかった。しかし、これでは実施工段階での複雑な作業順序関係に十分対応することができない。これに対して Precedence Network は Table 1 に示すような4通りの順序関係と時間遅れの存在を認めたいうで、PERT と同様に各作業の最早開始時刻 ES, 最早終了時刻 EF, 最遅開始時刻 LS, 最遅終了時刻 LF を算出する日程計画モデルである。しかし、Precedence Network は

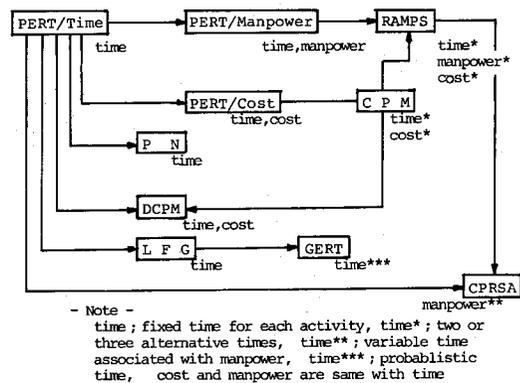


Fig. 1 Relationship between scheduling models

Table 1 Relationships in precedence network

Precedence Network	Definition
	FS=n Finish to start: job B cannot start until n days after job A is finished
	SS=n Start to start: job B cannot start until n days after job A is started
	FF=n Finish to finish: job B cannot finish until n days after job A is finished
	SF=n Start to finish: job B cannot finish until n days after job A is started

PERT/Time の計算アルゴリズムを準用するモデルであるため、LFG や GERT では認められる feedback loop の順序関係が存在する場合には日程計算が不可能となる。なお、表より PERT/Time は、「FS 関係のみが許され、かつ、遅れ時間が 0」という Precedence Network の特殊な場合であることがわかる。

このように Precedence Network は PERT/Time と比較して各作業間の順序関係の記述に自由度を持たせるスケジューリングモデルではあるが、投入資源量の量的制約を考慮していないという欠点が残される。したがってこの問題に対しては PERT/Manpower 等のアルゴリズムを準用していくことを考えなければならない。

3.2 スケジューリングモデルのアルゴリズム⁶⁾

Precedence Network による日程計算は、PERT/Time と同様に forward pass による ES, EF 値の計算と backward pass による LF, LS 値の計算が主体となる。しかし、PERT/Time では各作業の中断を認めると所要工期が延びるため作業中断不可として日程計算を行うのに対し、Precedence Network では作業中断が所要工期の短縮をもたらす場合もあるため、ここでは工程ネットワークを構成する各作業の中断の可否にかかわらず適用可能な計算アルゴリズムを提案する。ここに、添字 j は ES, EF, LF, LS 値を求めるべき当該作業を、また i はその先行作業を、 k は後続作業を表わすものとする。以下 STEP 1 ~ STEP 3 は forward pass によって ES_j , EF_j を求めるアルゴリズムであり、STEP 4 ~ STEP 6 は backward pass によって LS_j , LF_j を求めるアルゴリズムである。

なお、本稿ではその工程ネットワークにおいて SF 関係を持つ土木工事が現実的に少ないこと、および SF 関係は FF 関係で表現できることより、本モデルから SF 関係を除外することにした。

STEP 1: 先行作業 i の ES, EF がすでに算出されている作業 j に対して、 F_iS_j 関係が存在する場合は式(1)で、そして S_iS_j 関係が存在する場合は式(2)で \overline{ES}_j を求め、式(1), (2)で得られる \overline{ES}_j の最大値を ES_j の候補値 \widetilde{ES}_j とおく。

$$\overline{ES}_j = EF_i + F_iS_j \quad (1)$$

$$\overline{ES}_j = ES_i + S_iS_j \quad (2)$$

STEP 2: F_iS_j 関係もしくは S_iS_j 関係が存在する場合は式(3)で \overline{EF}_j の候補値 \widetilde{EF}_j を求める。一方、 F_iF_j 関係が存在する場合には式(4)によって \overline{EF}_j を求めておく。ここに t_j は作業 j の所要時間である。

$$\widetilde{EF}_j = \widetilde{ES}_j + t_j \quad (3)$$

$$\overline{EF}_j = EF_i + F_iF_j \quad (4)$$

STEP 3: 式(4)で得られる \overline{EF}_j の最大値が式(3)の \widetilde{EF}_j

よりも大きいときは \overline{EF}_j を EF_j とおく。そして j が本来中断不可能な作業であるときは式(5)によって ES_j を得る。

$$ES_j = EF_j - t_j \quad (5)$$

一方、作業 j が中断可能であるならば **STEP 1** の \widetilde{ES}_j を ES_j とおく。また、式(3)の \widetilde{EF}_j の方が式(4)の \overline{EF}_j よりも大きいときは \widetilde{EF}_j , \widetilde{ES}_j をそれぞれ EF_j , ES_j とおく。

以上によって F_iS_j , S_iS_j , F_iF_j いずれの関係に対しても ES_j , EF_j が算出できることになる。

STEP 4: 後続作業 k の LF, LS がすでに算出されている作業 j に対して、 F_jS_k 関係が存在する場合は式(6)で、そして F_jF_k 関係が存在する場合は式(7)で \overline{LF}_j を求め、式(6), (7)で得られる \overline{LF}_j の最小値を LF_j の候補値 \widetilde{LF}_j とおく。

$$\overline{LF}_j = LS_k - F_jS_k \quad (6)$$

$$\overline{LF}_j = LF_k - F_jF_k \quad (7)$$

STEP 5: F_jS_k 関係もしくは F_jF_k 関係が存在する場合は式(8)で LS_j の候補値 \widetilde{LS}_j を求める。一方、 S_jS_k 関係が存在する場合は式(9)で \overline{LS}_j を求めておく。

$$\widetilde{LS}_j = \widetilde{LF}_j - t_j \quad (8)$$

$$\overline{LS}_j = LS_j - S_jS_k \quad (9)$$

STEP 6: 式(9)で得られる \overline{LS}_j の最小値が式(8)の \widetilde{LS}_j よりも小さいときは \overline{LS}_j を LS_j とおく。そして j が本来中断不可能な作業であるときは式(10)によって LF_j を得る。

$$LF_j = LS_j + t_j \quad (10)$$

一方、作業 j が中断可能であるならば **STEP 4** の \widetilde{LF}_j を LF_j とおく。また、式(8)の \widetilde{LS}_j の方が式(9)の \overline{LS}_j よりも小さいときは \widetilde{LS}_j , \widetilde{LF}_j をそれぞれ LS_j , LF_j とおく。

以上によって F_jS_k , S_jS_k , F_jF_k いずれの関係に対しても LS_j , LF_j が算出できることになる。

3.3 各作業の中断日数ならびに余裕日数に関する考察

Precedence Network では、作業中断を認めた場合の所要工期の方が認めない場合よりも短くなることがある。これを forward pass の場合について示したのが **Fig. 2** である。いま F_iF_j 関係によって EF_j が決定され、かつ、

$$\max \{ (EF_i + F_iS_j), (ES_i + S_iS_j) \} < (EF_j - t_j) \quad (11)$$

が成立する場合を考えると、作業 j が中断不可の場合には **Fig. 2(a)** のように ES_j が時刻 B に後退するのに対し、中断可の場合には **Fig. 2(b)** のように ES_j が時刻 A となり、作業 j は中断日数を持つことになる。このことは作業 j と k の間に S_jS_k 関係が存在する場合、作業 k の開始時

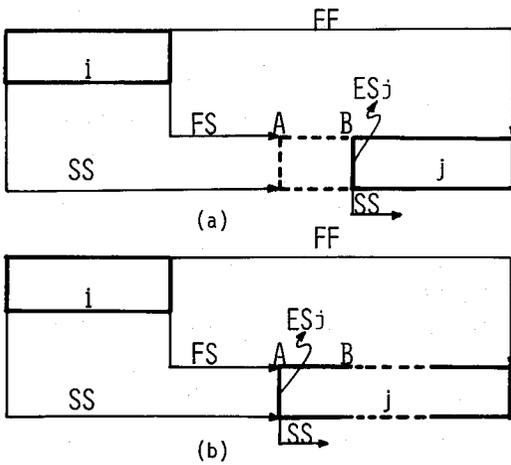


Fig. 2 Shortening of project completion date in case of forward pass

刻を早めることにつながる。ここでは省略するが、backward passにおいても同様の可能性を持つことが容易に説明できる。

Precedence Network では任意の作業が中断する場合、当該作業はその開始時刻と終了時刻の範囲内であればどの時点で中断日数を消化してもよい。これはスケジューリングモデルとしての厳密性を欠くようにも思えるが、資源制約下での日程計画モデルへ発展させるためにはこの自由性が逆に有効となる。

次に PERT/Time ではトータルフロートが $(TFS_j = LS_j - ES_j)$ もしくは $(TFF_j = LF_j - EF_j)$ で求められ、 TFS_j

と TFF_j の値が一致するのに対し、Precedence Network では作業中断を認める場合これらの値が必ずしも一致しなくなる。これはクリティカルパスを PERT/Time のように一義的には定義できないことを意味するものである。

3.4 適用事例および考察

Fig. 3 に示すようなコンクリートスラブ 2 基の連続打設工に対して本モデルを適用した。Table 2 は各作業の中断を認める場合の計算結果である。表より、ほとんどの作業においてトータルフロート TFS_j , TFF_j の値および中断日数 ITS_j , ITF_j の値が異なっていることがわかる。なお本事例においては、各作業を中断不可とする場合の工期が 46 日であるため、中断を認めることにより工期が 3 日間短縮されることになった。

4. 投入資源の有効利用を考慮したスケジューリングモデル

4.1 モデル化の前提

資源制約下における合理的な日程計画を作成するためには、PERT/Manpower のように各作業への投入資源量を固定的に与えるスケジューリングモデルでは不十分であり、これを変数として扱うモデルが必要となる。しかし個々の作業に対する日々の投入資源量と所要日数の組合せは数多く存在するため、工程ネットワーク全体を考えると、このような資源制約下の日程計画問題を整数計画法などの最適化手法によって定式化し厳密解を求めることは事実上不可能である。そこで、本稿では比較的

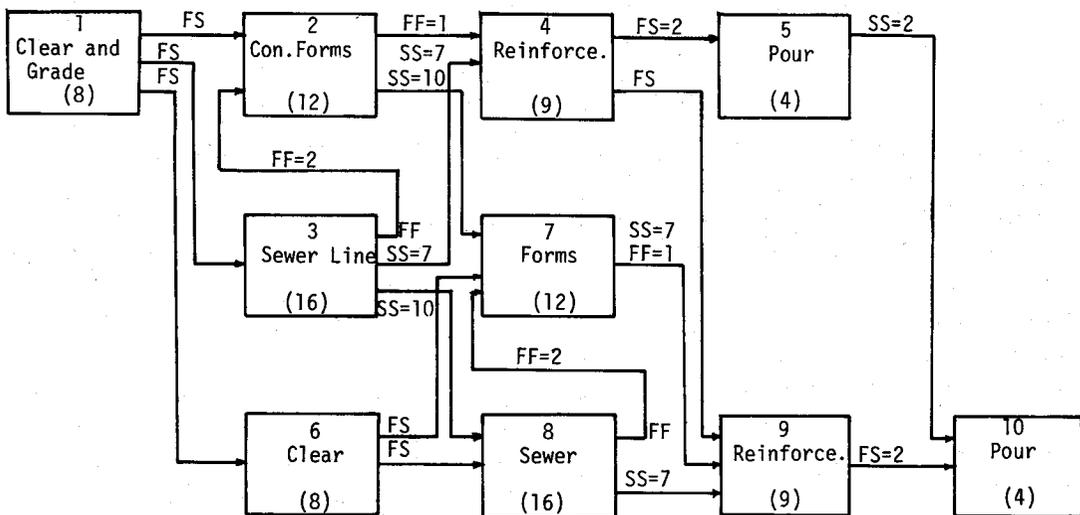


Fig. 3 Precedence network of case study

Table 2 Calculated schedule in case of interruption permitted

I	DUR	ES	EF	LS	LF	TFS	TFF	ITS	ITF
1	8	0	8	0	8	0	0	0	0
2	12	8	26	11	27	3	1	6	4
3	16	8	24	8	25	0	1	0	1
4	9	15	27	19	28	4	1	3	0
5	4	29	33	37	43	8	10	0	2
6	8	8	16	10	18	2	2	0	0
7	12	18	36	21	36	3	0	6	3
8	16	18	34	18	34	0	0	0	0
9	9	27	37	28	37	1	0	1	0
10	4	39	43	39	43	0	0	0	0

少ない計算時間で近似解を求める方法としてコンピュータシミュレーションによるヒューリスティックなモデルを提案することとする。

いま各作業 j の遂行に必要な資源 i の延投入量を W_{ij} , 作業 j を開始後第 k 日目の資源 i の投入量を M_{ijk} , 作業 j の所要日数を D_j とおけば、一般に、

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^{D_j} M_{ijk} \tag{12}$$

という関係式が成立する。しかし M_{ijk} には当然上下限が存在し、ある値以上に増加すればもはやそれに伴う作業能率の向上および所要日数の短縮が期待できず、逆にある値以下では作業能率が極度に劣化したり作業が実行不可能となるであろう。そこで上限値を最大投入量 M_{ijk}^{max} , 下限値を最小投入量 M_{ijk}^{min} とおけば、 M_{ijk} は次式を満たす範囲内で決定されなければならないことになる。

$$M_{ijk}^{min} \leq M_{ijk} \leq M_{ijk}^{max} \tag{13}$$

$$\sum_{j^*} M_{ijk} \leq M_i^* \tag{14}$$

ここに、 M_i^* ; 任意時刻における資源 i の投入可能量
 J^* ; 任意時刻に実行中の作業集合

なお、数種類の資源が施工パーティを組み、そのいずれの資源が不足しても実行が困難となる作業に対してはすべての資源に対して式(13)が成立しなければならない。また、コンクリート養生のように所要日数を変数と考えることが適切でない作業やダミー作業に関しては M_{ijk}^{max} 値と M_{ijk}^{min} 値を等しく設定すればよい。なお、すでに触れた CPRSA ではこれらに関する検討が十分であるとはいえなかった。

以上により、工程ネットワーク上のすべての作業に対して M_{ijk} が計算できることになる。

4.2 スケジューリングモデルのアルゴリズム⁷⁾

しかし、投入資源の有効利用を考慮した日程計画モデルを作成するためには、

- ① 式(13), (14)という制約条件のもとで M_{ijk} の値を具体的にどのような方法で算出すればよいか、
 - ② 資源割当て上コンフリクトな状態に陥った作業群に対してどのように優先順位づけを行うか、
- に関して検討する必要がある。以下ではこれらを中心に本モデルのアルゴリズムを概述する。

1) 前処理計算プロセス

これはモデルに必要なデータを作成し、当初の PERT/Time 計算を行うプロセスである。本モデルでは D_j が M_{ijk} の値に応じて変化するため explicit に PERT/Time 計算を行う必要はないが、後述するように資源割当て上のコンフリクト作業群に対する優先順位づけの基準として各作業のトータルフロート TF, フリーフロート FF を算出する必要がある。このため、作業 j を M_{ijk}^{max} で実行するときの所要日数 D_j^{max} に対して PERT/Time 計算を実施する。 D_j^{max} を用いるのはあらかじめ最短工期を把握しておくためである。

2) 実行可能性検討プロセス

工程ネットワークの順序関係から各作業の実行可能性を検討するプロセスで、実行可能な作業とは先行作業がすべて完了したため日程的に着手可能状態となった作業およびすでに実行中の作業をいう。ここで各作業 j が完了したかどうかは各作業 j に対する延投入量 W_{ij} をすべて割当てたかどうかによって判断することができる。

3) 優先順位づけプロセス

資源割当て上コンフリクトな作業群に対していずれの作業を優先すべきかを判断するプロセスである。当然工期を遅延する可能性の大きい作業に対して優先的に投入資源を割当てるべきであり、ここではその判断基準として以下のような5つのレベルを考えることにした。

- レベル1: 進行中で中断不可能な作業
- レベル2: TF 値が小さい (0 または 1) 作業
- レベル3: 施工パーティ単位で資源が必要な作業
- レベル4: 進行中で中断可能な作業
- レベル5: 後続作業の多い作業

4) 割当て予定量計算プロセス

投入資源の制約を考慮せず、当該日に実行可能な作業群に対して割当て予定量を計算するプロセスである。なお、割当て予定量は投入資源量 M_{ijk} と区別するために \overline{M}_{ijk} とおくことにする。 \overline{M}_{ijk} の計算方法として本研究では、まず特に重要と考えるべき作業を設定し、その作業数の多少によって算定式を変更する方法を考えた。すでに 2.1 で触れた CPRSA はコンフリクト作業すべてに対して M_{ijk}^{max} を割当てるモデルであるが、この方法では

優先順位の高い作業に資源割当てが片寄ってしまう可能性が強くなる欠点がある。具体的に本モデルでは、レベル1および2に該当する作業を最優先作業と定義し、最優先作業群 J^{**} の M_{ij}^{max} の総和と M_i^a との比の最大値（これを Rate とよぶ）によって \overline{M}_{ijk} の計算式を変更することにした。Rate の計算式ならびに \overline{M}_{ijk} の計算式の一例は以下のとおりである。

$$\text{Rate} = \max_i \left\{ \sum_{j^{**}} M_{ij}^{max} / M_i^a \right\} \quad (15)$$

$$\overline{M}_{ijk} = \min_i \left\{ [(M_{ij}^{max} + M_{ij}^{min}) / 2], W_{ij}^* \right\} \quad (16)$$

ここに W_{ij}^* は作業 j に対する資源 i の未割当て量である。

ここに [] はガウス記号である。

5) 資源割当ておよび関連処理計算プロセス

まず、指定された優先順位の高い作業から次式が成立するかどうかをチェックする。

$$\overline{M}_{ijk} \leq M_i^a \quad (17)$$

そして式(17)が成立する場合は \overline{M}_{ijk} を M_{ijk} に置きかえ、当該作業の W_{ij} および M_i^a をその分だけ修正する。一方、式(17)が成立しない資源が生じたときはその資源 \hat{i} に対して、

$$M_{\hat{i}j}^{min} \leq M_{\hat{i}jk} \leq \overline{M}_{\hat{i}jk} \quad (18)$$

の範囲内で資源割当てを検討する。もし、式(18)をも満足できない場合は当該作業の実行が不可能となるため、作業 j が中断可能ならば当日の資源割当てを中止し、中断

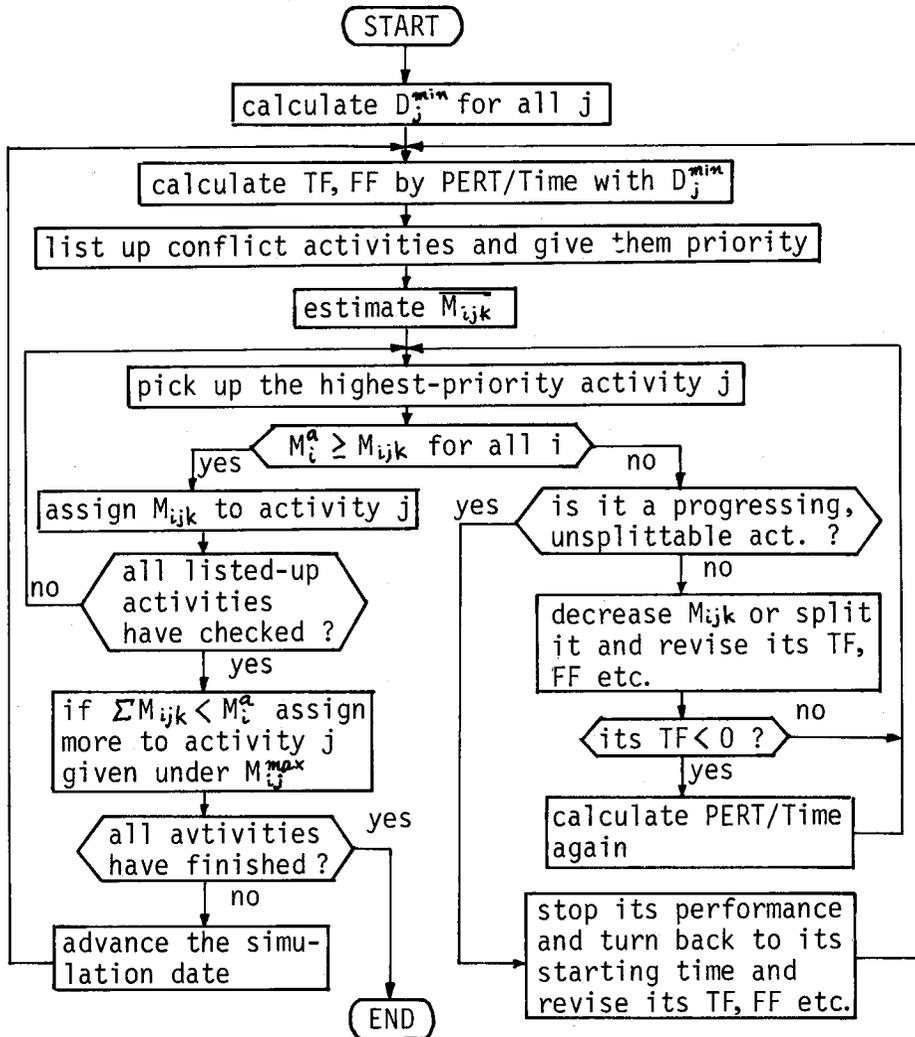


Fig. 4 Basic flow-chart for computer programming

不可能な場合には作業 j を開始した時点まで日程をさかのぼり、資源割当て方法を再検討することになる。逆に、すべてのコンフリクト作業に \bar{M}_{ij} を割当てた後も M_j^q に余裕がある場合には、 M_j^{max} を越えない範囲で余剰資源の追加配分を行うことが望ましい。

なお、本モデルでは各作業の所要日数が D_j^{min} を越えてくる場合があるが、これは当初の PERT/Time 計算スケジュールが実行不可能となったことを意味するため、この時点で PERT/Time 再計算を実施しなければならない。

以上のようなスケジューリングモデルの概要をフローチャートで示したのが Fig. 4 である。

4.3 適用事例に関する考察

紙面の都合上その詳細は省略するが、本研究では高架橋工事等いくつかの工事に対して本モデルの適用を試みたが、その結果以下のことが明らかとなった。

- ① 同一資源制約下では PERT/Manpower よりも工期の短縮が可能となる。また、投入可能な資源制約量をわずかに増加させるだけでもその効果を発揮する。
- ② 本モデルは必要な資源の種類が多い程、さらに資源制約が厳しい程その特徴を發揮できる。
- ③ 資源割当て上コンフリクトな作業の優先順位づけ方法に対して工程ネットワークの形状や投入資源の経済性などを考慮することができる。
- ④ 割当て予定資源量の算出方法をパラメトリックに換えるため、工程ネットワークの形状や個々の作業に応じた資源配分方法を考慮できる。

しかし一方では、 M_j^{max} 、 M_j^{min} 、 W_{ij} を具体的にどのよう算定すればよいか今後の課題として残されている。

5. あとがき

本稿は、従来の PERT 系スケジューリングモデルが土木工事の日程計画モデルとしては不十分であることを指

摘するとともに、それを解決する技法として Precedence Network を用いたスケジューリングモデルと投入資源の有効利用を考慮したヒューリスティックなスケジューリングモデルを提案した。これら2つのモデルが PERT 系モデルの問題点をすべて解決しうるものであるとはいえないが、少なくとも新しい方向性を示すことができたと考える。今後の課題としては、それぞれのモデルに対して事例研究を追加しその汎用性を検討するとともに、両者の特徴を生かすためにこれらを1つのスケジューリングモデルとして結合することを考えている。

なお、コンピュータプログラミングに関しては、3. のモデルは工事現場におけるマイクロコンピュータの利用を前提として BASIC 言語を用いたが、4. ではモデルが比較的大規模となることから大型電子計算機の利用を前提として FORTRAN 言語を用いた。

文 献

- 1) 矢野信太郎：土木施工システム論，pp. 112～116，鹿島出版，1971
- 2) 吉野次郎：施工計画と工程計画，pp. 83～90，山海堂，1981
- 3) C. Popescu & A. G. Borcherding：Development in CPM, PERT and Network Analysis, J. of ASCE, Co. 2 pp. 275～286, 1972
- 4) F. L. Bennett：Critical Path Resource Scheduling Algorithm, J. of ASCE, Co. pp. 161～180, 1968
- 5) J. D. Wiest & F. K. Levy：A Management Guide to PERT/CPM, pp. 133～162, Prentice Hall, 1977
- 6) 山本幸司・池守昌幸：マイコンを利用した Precedence Network による日程計画モデル，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第4部，pp. 95～96, 1982
- 7) 山本幸司・吉川和広：MAN, DAY を変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察，土木学会論文報告集，第256号，pp. 49～58, 1976