

新しい工程管理の技法

Program Evaluation and Review Techniques Critical Path Method

—Network Planning—

九州地方建設局道路計画課

藤井 崇弘

1. はじめに

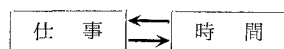
- (1) われわれが建設事業（工事）を進めるにあたって、日程計画や工程管理の方法は、極端にいうと20世紀の方方今日まで見るべきものはなかった。
- (2) わずかに横棒工程表 {Bar Chart} の手法が工程管理の指標として使われてきたにすぎない。
- (3) 特に世は技術革新の時代に入り、わが建設工事もその時代の潮に洗われつつあるが、建設工事のように
 - (a) 工事の規模が大型化し、しかも多様性かつ複雑化している。
 - (b) 変更要因がきわめて多い。
 - (c) 今まで未経験であった新しいものを建設する。
 - (d) 時間に一定の制限がある。すなわち、工期内の工事完遂、さらには工期短縮の要請が起っている。このような特性を持つ企業（事業・工事）の日程計画・工程管理を行なう場合、従来のような「経験」と「勘」のみに頼っていたのでは、いつの日か破局に直面せざるを得なくなろうと思われる。
- (4) なぜなら、旧来の {Bar Chart} による方法では、つぎつぎに入って来る計画や設計の変更・条件の変化に即応できないような組立てになっているからである。
- (5) さて、ここに取りあげた {PERT/CPM} という「新しい工程管理の技法」は、旧来の {Bar Chart} よりはるかに多くの判断資料を与えてくれ、しかもこの {PERT/CPM} の手法そのものが科学的論理性に貫かれており、建設工事のように時間（工期・納期）に制約がある場合にきわめて有効な手法であろうと思われる。
- (6) しかも、われわれ建設マン（実際家）の眼からみて、理論的な興味があるばかりでなく、「これは自分の現場で使える！」ということが素直に認められ、つまりこの {PERT/CPM} はわれわれで実行可能（feasible）だ、ということである。

- (7) 今回は、われわれの工事現場で {PERT/CPM} を実際に結びつける場合に、知っておくべき理論の Point と、実際に使う立場に立ったときに起きてくる実務上の問題点を、実際家の立場からお話し、さらにこの手法の根底にある数学的基礎と、その理論的拡張面を少しばかり紹介したいと思う。

2. PERT の考え方

(1) 時間と活動

- (a) 人間の活動（これを大きくみれば、工事・事業・企業になる）には必ず時間が要る。すなわち、時間（time）がなければ、仕事（job）や活動（activity）ができない。



すなわち、仕事と時間とは必ず相い対応している。

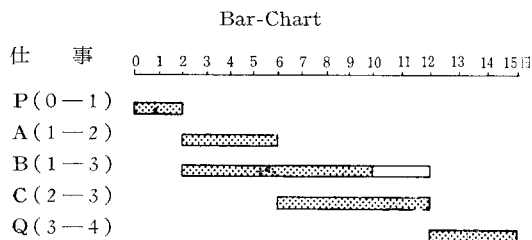
- (b) 人間はある目的を果すために活動しますが、その仕事とか活動には、時間のほかに必ず（人＝人員、金＝資金・費用、物＝資材・材料・機械・用具）の3大要素と場所・空間・立場・人間関係・大義名分・理由などが伴う。
- (c) その活動を時間以外の人・金・物・etc で管理するのは要素が多すぎるし、複雑化するので、特に「時間」（when?）に着目し、時間の factor で管理する。

すなわち、5W・1Hのうち「When」に注目する。

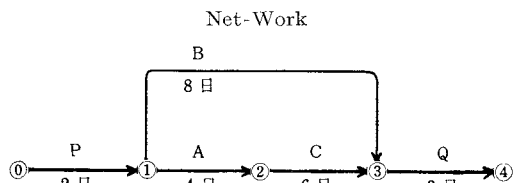
5W・1H とは、

5W	When (何時に?)	時間
	Where (何処で?)	場所
	Who (誰が?)	主体者
	What (何を?)	目的
	Why (何故に?)	理由
1H	How (如何に?)	方法

(2) 旧来の Bar-Chart と新しい Net-Work



※Bの仕事には2日の free float がある。



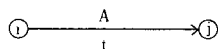
仕事P→A→C→Qが Critical Path である。

3. Net-Work の書き方

(1) 矢線表示と円表示

1. 矢線表示 (Arrow Notation)

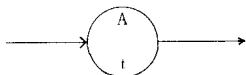
矢線図 (Arrow Diagram)



- A : 仕事名, 仕事量 (job)
- t : 期間 (duration)
- (i), (j) : 出来事, 進捗した仕事の状態 (Event)

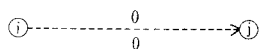
◎ 矢線表示の方が、われわれの概念にピッタリ合う。なぜなら時の流れ (時系列) を1本の Arrow で (すなわち線分で) 示すからである。

2. 円表示 (Circle Notation)



(2) ダミー (dummy) の使い方

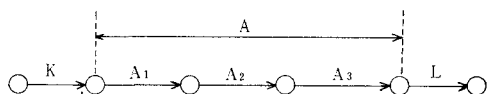
1. ダミーとは、仕事量0、時間0の仮空の仕事を想定したものという。



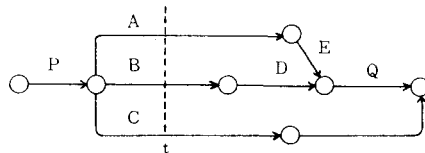
2. ダミーは仕事の順序関係を示す。

(3) Net-Work 作図上の手法

(a) 作業の分割性

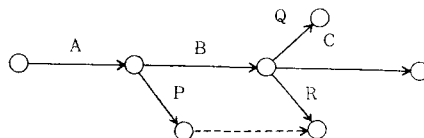


(b) 作業の同時性

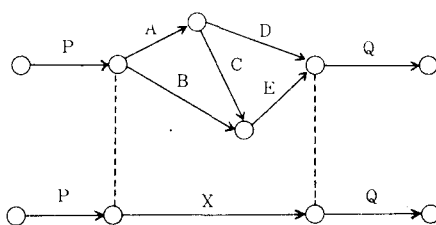


t という時間断面で切ると、A, B, C の3つの作業が同時に進んでいることを示す。

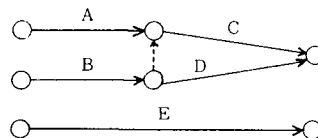
(c) 作業の分岐性



(d) 作業の集約・分解性

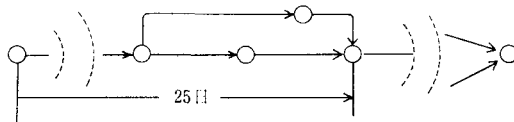


(e) 作業の従属・独立性



C は A, B に従属している。
D は B のみに従属している。
E は A, B, C, D の系とは独立にある。

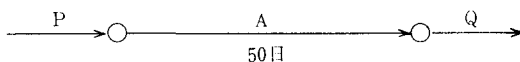
(f) 作業期間の制限の表示



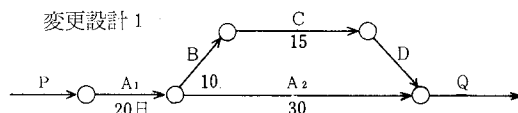
◎ 作業に着手して25日間で完成させたい。

(g) 変更要因の表示

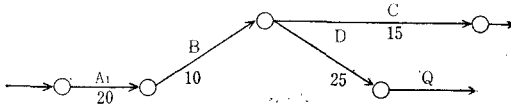
元設計



変更設計1



変更設計 2



(4) Main Network と Sub Network

- ◎ Sub-Network をいくつか合成して 1 つの大きな新しい Network を組むことができる。

(5) 演習問題

第 1 問「ダミーの使い方」

この例題は、土木工事（ダム建設）の一部を採ったものである。

次の作業をアロー型でネットワークにしてください。

- A) 現在 {仮設コンクリートプラント設置} と {型枠加工組立(1)} が同時に行なわれている。
- B) {仮設コンクリートプラント設置} 及び {型枠加工組立(1)} が終ると、{コンクリート打(1)} が始められる。
 {型枠加工組立(1)} の後には続いて行なわれる {型枠加工組立(2)} がある。
- C) {コンクリート打(1)} の後には {養生解体(1)} があるが、他方(B)の {型枠加工組立(2)} を使って {コンクリート打(2)} をやることになる。コンクリートを打つ順序は(1)(2)の順序で進めることにする。
- D) {コンクリート打(2)} の後には {養生解体(2)} が続く。

第 2 問「Net-Work の組み方」

この例題は、ある土木工事の一部から採ったものである。

(工事の主題)

この工事は水道本管を埋設するものであるが、工事の性質上、平坦な土地にパイルを打つため 70 m 根伐り、その後パイルを打って掘削し、捨コンを打つ所までを考える。

- (1) 施工は立地条件を考え、70m を 40m と 30m との 2 つに分け、片側から進んでいき、掘削は 1 台の機械（ブルドーザ）によって行なわれる。
- (2) 最初の 40m 部分については、{根伐 1} が終わると {パイル打 1} を始めるが、{パイル打 1} には {ヤグラ (1 台) の搬入組立} と {パイルの搬入} を完了しておく必要がある。そして {パイル打 1} が終ると {掘削 1} をし、それに続いて {捨コン 1} を打っていく。

- (3) 30m 部分については、40m 部分の {根伐 1} が終わった後、すぐ 30m 部分の {根伐 2} を始め、40m 部分と全く同じ工程で進む。もちろん 30m 部分の {パイル打ち} は 40m 部分の {パイル打 1} が終わってからでないと着手できないが、同じ事は {掘削 2} {捨コン 2} についてもいえる。

- (4) さらに仕事を始める前に {計画} をたて、最初の 40m 部分の {根伐 1} の前に仕事を始めるについての {準備} を入れてください。

第 2 問の（ヒント）

- A) まず第一に {計画} を樹てる。
- B) {計画} が終ると {根伐 1} 等の {準備} 及び {ヤグラ搬入・組立} {パイル搬入 40m} {パイル搬入 30m} {掘削機械搬入} の 5 つの作業が始められる。
- C) {準備} に引き続いて {根伐 40m} が始められる。
- D) (C) の {根伐 40m} が終ると {根伐 30m} と {パイル打 40m} が始められる。ただし、{パイル打 40m} を始めるには、この {根伐 40m} と (B) の {パイル搬入 40m} 及び {ヤグラ搬入・組立} の 3 つの作業が終っていないとてはならない。
- E) (D) の {パイル打 40m} と (B) の {掘削機械搬入} が終ると {掘削 40m} が始められる。又、(D) の {根伐 30m} が終ると {パイル打 30m} が始められる。ただし、この場合も {パイル打 30m} を始めるには (B) の {パイル搬入 30m} と (D) の {パイル打 40m} の作業も同時に終わってなくてはならない。
- F) (E) の {掘削 40m} が終ると {捨コン 40m} が始められる。又同じく (E) の {パイル打 30m} が終り、かつ {掘削 40m} が終ると {掘削 30m} が始まる。
- G) (F) の {掘削 30m} と {捨コン 40m} が終ると {捨コン 30m} が始められる。

4. フロート (float, 余裕) の考え方

- (1) フリー・フロート (Free float) F. f.

他の工程に影響を及ぼさない自由な時間余裕のこと。従って貯めこみが効かない。

- (2) インターフェアリング・フロート (Interfering float) I. f.

他の工程に影響・干渉を与える時間余裕のこと。従って貯めこみが効く。貯めこんでおけばどこかで使える。

$$T.f. = F.f. + I.f.$$

T.f.: Totalfloat (フロートの合計)

5. PERT の手順

(1) プランニング (Planning)

実際の作業 (仕事, 活動) の相互関係 (inter-relations) を Network 化し, 時間見積を入れることまでをいう。

すなわち, Network を組んで, 各矢線に工期 (納期) に関係なく標準状態でその作業を遂行するに要する所要時間を見積って入れることをいう。

(2) スケジューリング (Scheduling)

Planning の段階で 1 つの Network を通して標準状態でその仕事を完成するに要する工期が計算されるが, この工期では, 果して納期に間に合うか合わないか, 一般には分らない。

この工期で間に合えばよいのですが (実はまだ Minimum Cost で遂行するには, 工期をいくりに納めるかという時間と費用の問題は解決されていない), 間に合わない場合には納期に間に合わせるため, 作業群の中から特定の作業 (Activity) を順航ペースより早めて納期に合うようなプラン (startingplan) に修正する必要が起きてくる。この手続きをスケジューリングという。すなわち, 特定の作業を選び工期に間に合うように必要日数まで短縮することがスケジューリングである。

(3) フォロー・アップ (Follow-up)

Follow-up の言葉の意味は「追跡する」ということである。

Starting Plan をもって出発した仕事, ある時間を経過した時に, その時点での工事の遅れ, 進みすぎなどいわゆる進捗状況が, 最終工期にどう影響するかを読み取り, 工事の局面をある時間断面で区切ったときに工事主体者が次に打つべき手の合理性を検出することをいう。

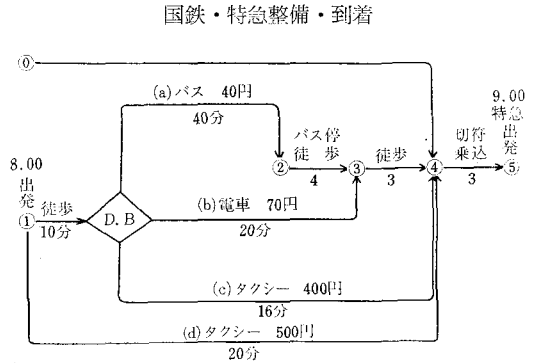
つまり, 一度画いた Network は 1 つのプランですが, プランはあくまでプランで, そのとおりに現実の姿が展開するとは限らない。工程の進行途中に必ず設計変更や種々の変更要因が入って来, これらを全工程の中に取り入れて, control し, check することであ

る。

6. CPM の考え方

(1) 日常生活の実例

(例) A君が午前 9.00 の特急に乗込むために家を午前 8.00に出発した。さてその特急に乗込むまでの時間設計 (全工程60分) を考えてみよう。



D. B = Decision Box

交通手段	費用	所要時間				乗車 cost slope	全時間 cost slope
		乗車時間	徒歩	切符乗込	計		
バス	40	40	17	3	60	1.0	0.7
電車	70	20	13	3	36	3.5	1.9
タクシー (徒歩あり)	400	16	10	3	29	25.0	13.8
タクシー (徒歩なし)	500	20	0	3	23	25.0	21.7

◎ 時間は資源 (resources) である。

◎ ある活動をなす場合に, 時間を短縮しようと思えば, それだけ費用が増加する。

◎ 時間を短縮する場合に, これ以上短縮すれば破壊するという点 (Crash Point) がある。

(2) Critical Path とは何か

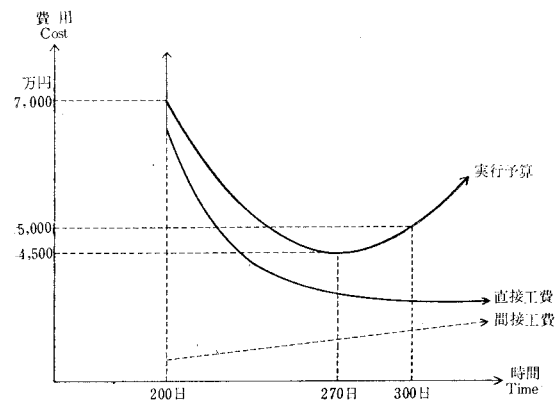
1 つの工事を着工してから竣工するまで時間が最も長くなる経路をいう。その経路がすなわち時間に着目したときの Critical (制限時間一杯の, ある危険状態に達するギリギリの) な状態となり工事の施工期間となるからである。

(3) 時間見積 (Time Estimation) の方法

- 1 発見積り (Single Estimate)
- 2 3 点見積り (Three Estimate)

(4) 時間と費用との関係

(Cost: 万円 Duration: 日)



(実行予算) = (直接工費) + (間接工費)

標準工期 T = 300日 C = 5,000万円

Crash point T = 200日 C = 7,000万円

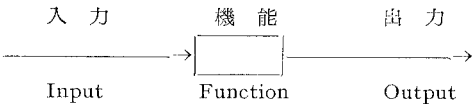
最適工期 T = 270日 C = 4,500万円

(Minimum Cost)

◎ 人が活動する場合に、必ず制約条件 (時・人・金・物) を伴うが、この制約条件の中である目的を達するためには必ず実行可能な最適解 (feasible Optimum Solution) が存在する。

ただ、<時か、人か、金か、物か、名分か、etc>のうち何をもって適正とするかに個々の立場で異なる。

7. <PERT/CPM>と電子計算機



INPUT

T発電所建設工事CPMデータ

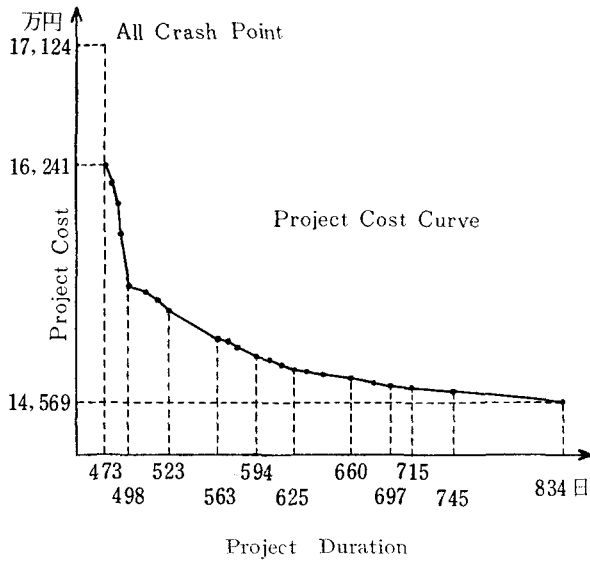
※Normal から Crash にいたる Cost 増は人件費のみを対象。

※Cost Slope は計算機が計算してくれるからデータとしては必要でない。

Code		Duration		Cost		Cost Slope
i	j	Normal date	Crash date	Normal Cost	Crash cost	
1	2	60	40	52.5	90.0	1.87
2	3	100	50	40.0	65.0	0.50
2	4	100	60	350.0	400.0	1.25
2	5	120	60	1,770.0	2,000.0	3.83
3	4	0	0	0	0	0
4	6	100	30	270.0	350.0	1.14
4	7	200	60	80.0	140.0	0.42
5	7	65	50	39.0	48.0	0.56
5	8	35	25	200.0	245.0	4.50
5	9	280	150	750.0	1,000.0	1.92
5	12	110	60	35.0	40.0	0.10
6	10	20	15	12.0	14.2	0.44
7	12	34	28	34.0	37.0	0.50
8	12	90	20	14.0	60.0	0.65
9	22	30	5	6.0	23.5	0.70
10	11	45	10	130.0	165.0	1.00
10	12	25	18	70.0	85.0	2.14
11	13	95	50	69.0	80.0	0.24
12	15	45	20	1,800.0	2,540.0	29.6
13	14	40	10	17.0	35.0	0.60
14	16	12	5	9.0	13.5	0.64
14	17	9	3	15.0	22.0	1.16
15	21	75	10	10.0	70.0	0.92
15	31	275	250	1,400.0	1,500.0	4.00
16	17	0	0	0.	0.	0
16	18	20	10	10.0	13.0	0.30
17	19	70	20	60.0	120.0	1.20
18	20	0	0	0.	0.	0
18	23	40	20	40.0	49.0	0.45
19	20	0	0	0.	0.	0
19	24	6	2	2.4	3.0	0.15
20	23	30	20	30.0	40.0	1.00
21	25	120	75	360.0	450.0	2.00
21	31	220	200	5,200.0	5,300.0	5.00
22	29	60	30	35.6	70.0	1.14
23	24	35	26	920.0	1,000.0	8.88
24	26	10	4	8.9	12.5	0.60
25	28	75	15	20.0	85.5	1.09
26	27	30	10	14.0	23.0	0.45
27	30	18	5	18.5	40.0	1.65
27	31	35	10	27.0	60.0	1.32
28	31	80	50	275.0	400.0	4.16
29	31	120	95	30.0	55.0	1.00
30	31	10	3	115.0	125.0	1.42
31	32	45	15	230.0	255.0	0.83

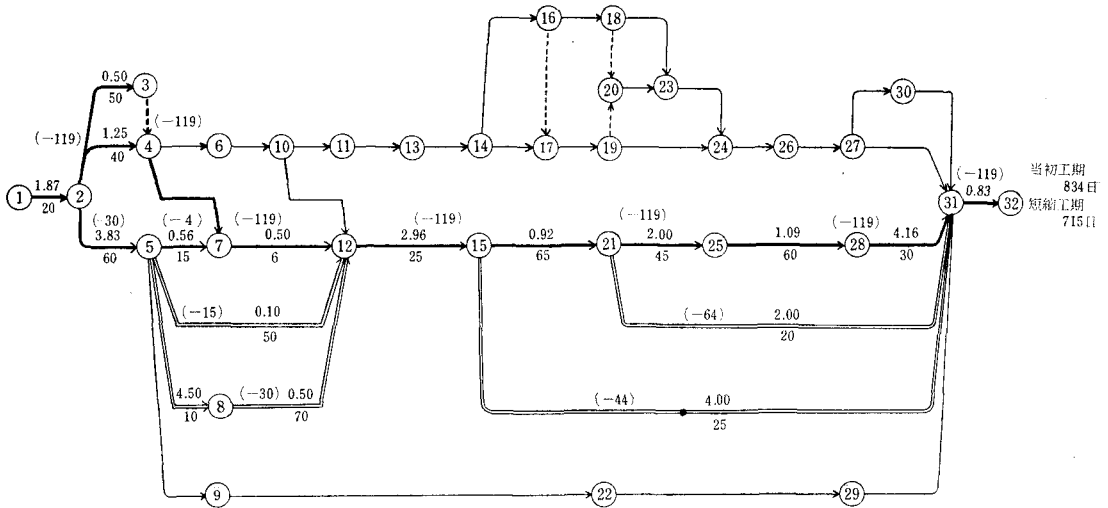
OUTPUT

SCHEDULE NUMBER	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PROJECT DURATION	834	745	715	697	685	660	640	632	630	627	625	615	605
DIRECT COST	14569	14607	14632	14649	14663	14709	14747	14764	14769	14776	14781	14807	14841
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
	594	588	585	573	563	523	515	498	485	479	476	473	
	14879	14900	14912	14970	15024	15247	15307	15437	15854	16047	16143	16241	



T. Power Station Constructing Plan

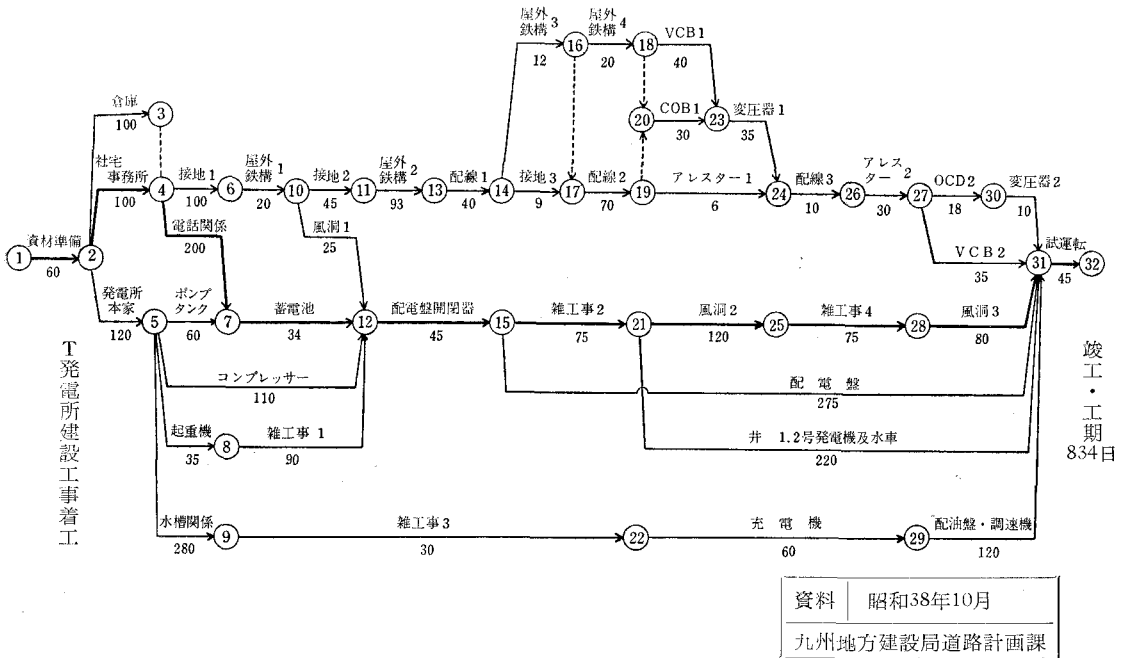
Project Duration days days
834 → 715



(注)

1. 太線が Critical Path である。
2. 太線の上の数字は Cost Slope (万円/日), 下の数字は短縮可能日数 (Normal Duration-Crash Duration) を示す。

T 発電所建設工事 Arrow Diagram<Network Planning>



8. <PERT/CPM> の真価はどこにあったか

(1) 実例による紹介

- (a) T 発電所建設工事の場合
- (b) 名神高速道路建設工事の場合

(2) <PERT/CPM> の真価

(a) PERT 適用による一般的効果

- (i) Network で各 job を表現することによって、仕事の相互関連の明確化、問題点が浮彫りにされるので打合せや問題検討会などの会議で、本質的な内容を論議するようになった。
- (ii) 企業（官庁・会社・事業団・工事現場）の幹部が計画の内容を把握することが容易になり、評価しやすくなった。
- (iii) 1つの工事に関係する全員の理解と協力を得、みんなが他人の仕事について再認識し始めた。特に1つの企業内での連帯意識の向上が目覚ましくなった。
- (iv) 1つの企業内、あるいは官庁の仕事の流れの中で、Weak Point というか Neck となる個所が明確に打ち出されてくるので、当該 Project 以外の関係者の協力を得やすくなった。さらにその Neck 部を重点管理するようになった。

- (b) 工程管理に当って Critical Path が最も重要な工程であり、Critical Path を重点的に管理してゆけばよいが、Network を眺めれば Critical Path に至る各人の仕事の分担がハッキリと図示されているので、全体の中の自分の位置が明らかになり各人が責任をもって己の仕事を実行するようになる。
- (c) 仕事の順序関係、緩急の度合いがハッキリ図示されるので、つまり日程的に全然余裕のない工程と、納期を遅延させることなしに日程的に手を抜ける工程とを明確に区別されるので、今、何が急ぐのか、どの仕事を休んでよいのか、が把握でき時間を有効に使い得、仕事を Smooth に進捗させ得る。
- (d) 特にこの <PERT/CPM> が建設工事に有効と思われる点は、一度画いた Network に設計変更その他の変更要因を手軽に折りこむことができる点であり、しかも工程がすすむにつれて、Follow-up してゆくので工事（企業）の適切かつ timely な（適時な）打つべき手を発見し得ることにある。
- (e) 当初、合議制のもとに Network を組むから、仕事の拾い落しが無い。従って竣工間際になってあわてて残業することがない。
- (f) 当初工程を短縮する場合でも、どこを短縮した

ら全工程が縮まるかその要点を発見し得、同じ工程短縮日数ならば最小費用 (Minimum Cost) でなし得る。

ある工事で標準工期を3割短縮する場合でも、全工程の3~4%の作業箇所を当れば事足りる結果となり、今までのように何でもかんでも残業というロス (損失) を防げる。

(g) 発注者が納期短縮を要望する場合に、時間を縮めればそれだけ費用が要するというバック・データ (back data) を受託者は示すことができ、時間と費用との関連をハッキリさせることができる。

(h) 私たちは応々にして問題点が大きくなって、こみ入ってくるまで手をつけようとしないう傾向がある。この対策として事前に問題点を摘出し、手を打つことが必要である。

この点、PERT はシステムの体系的関連を示してくれ順序関係、時間余裕、人員対策などの問題点を正確に示してくれる。つまり問題点の発見に非常に有効な手段である。

9. わが国における〈PERT/CPM〉の普及経過と将来

(1) Linear Programming の問題

(2) Machine Scheduling の問題

(3) 計画問題への確率の導入

10. 実際に現場で使う場合の注意事項

(1) まず〈PERT/CPM〉の手法が理解できたならば、各現場の事情に即応した形で適宜使ってみることで、最初は Network を画くこと自体に意義があり、いろいろの Merit を発見できる。

(2) Network 化の練習としては、まず手近かなやさしい問題 (工事) から画いてみることです。例えばコンクリート工ならば、(掘削5日) (型枠・鉄筋組立2日) (Co. 打設1日) (養生3日) (型枠はずし0.5日) などの主線を描く。これに Co. 打設ならばセメントや細粒骨材の発注入荷が終っていないければならぬし、一方 Co. Mixer の準備が必要で、さらに Mixer を廻すには電力を手配しておかねばならない。他方 Co. を練るには水がいるから用水を確保しておく必要がある。といった具合に順次、主線に Arrow を流しこんでゆく。

(3) 次に Network を画く上で、Activity をどの程度に細分するか、あるいは、まとめるかが問題になるが、これは工事や企業の性質により、どこまで細分化

するか適宜判断して取捨選択すべきである。

(4) Network 作図上では、特に dummy の使い方に十分習熟し、Activity の独立、従属関係を適確に表示できるようになっておく必要がある。また Event の1 Pair (1組) には1つの Activity しか画いてはならないから、もし (i~j) 間に2の Activity に入っているときには新たに Event を設けてあとは dummy で処理することも必要である。

一方、特に機械・人員のやりくりを Network におこむ場合、この関係を dummy をもって表わしておかないと、現実から離れた Network ができてしまうので注意を要する。

例えば、Aカ所とBカ所の Co. 打設は理論的には同時に平行して進めるとしても、Co. Mixer と人員に制限があってAカ所の人員を、Aカ所の仕事ですんだ後にBカ所で使うとすれば、この関係を予め dummy をもって表示しておかねばならない。

(5) 時間見積りには1発見積り (single estimate) と3点見積り (three estimates) とがある。3点見積りを採れば計画工程が期日までに完成する確率を求めうる利点 (probabilistic な体系として扱う利点) があるが、1発見積り (Deterministic な体系として扱う) の場合と実際にはそんなに差異はないので1発見積りで進んでよいと思う。

時間見積りは単なる約束ではなく、あくまでも少掛りから日数を計算する技術上の見積りであることが必要で、現場内での合議制によって決めることが大事である。

(6) 1発見積りの場合でも、仕事の納期を意識することなしに矢線の示す作業を標準状態で遂行する場合の時間見積りを入れることが肝要である。工期に間に合わせるためどの作業日程を短縮したらよいかは CPM の問題である。

(7) 1発見積りの場合、不確定要因を時間見積りの中にどう取入れるか問題があるが、雨天障害などの不確定要因による作業休止時間は Network の最後に示すのがよいと思う。

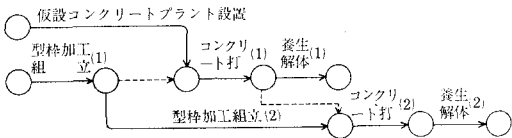
(8) この新手法 PERT を広める場合に注意することは、相手に身近かな例から説明を起し、この新手法の本質を十分に納得させた上で用いてゆくことだと思う。特に、今まで長い間「経験」と「勘」で計画を立案して来た人には、この新手法の本質を十分に理解させ、在来「勘」的要素とこの Network を結びつけて適用させることが肝要で、PERT を活用しようとする感情的動機を好ましい形でもってゆくことが案外抵抗なく採り入れさせるコツだと思う。

(9) また、PERT の新手法によって、自動的に問題が解決したり、改善されたりするものではなく、極言すればあくまでも問題解決の情報を示したにすぎない、ということである。すなわち、適確な情報（入力: In·put）が入ったからにはこれを直ちに実行（出力: Out·put）に移さねば意味がない。時期を失った情報は何の役にも立たないからである。

要するに<PERT/CPM>というこの手法はあくまでも実施を前提にしたときの新しい工程管理方法だということである。

演習問題の基準解答

第1問（ダミーの使い方）

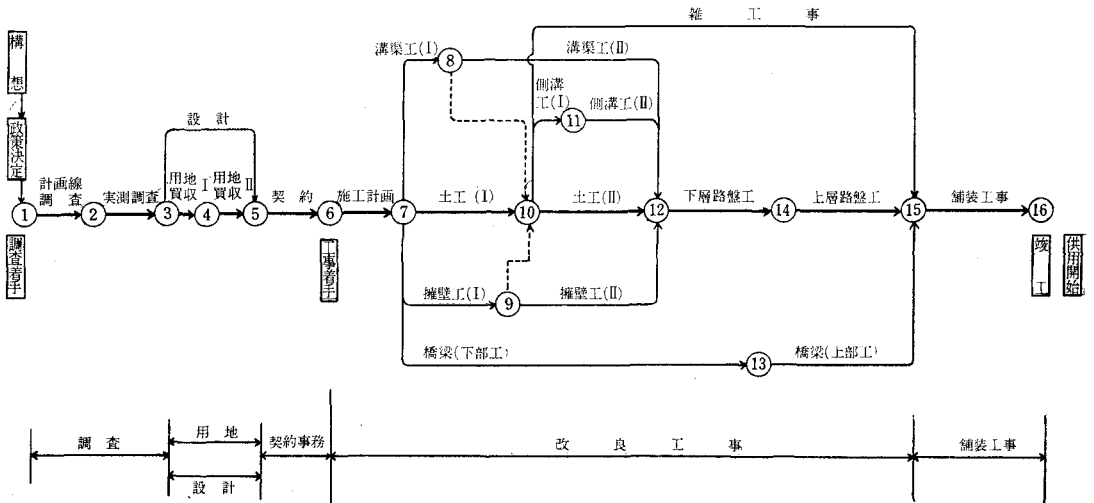


1 級国道の改築計画

Net Work Planning

Arrow Diagram

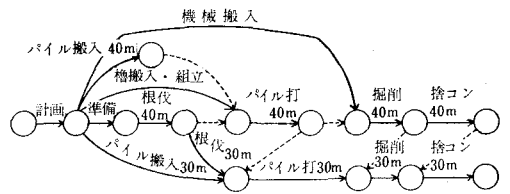
Main Net-Work



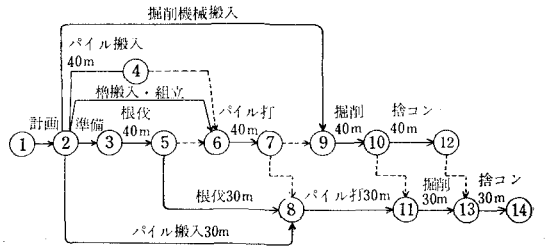
資料 昭和 38 年 10 月
九州地方建設局道路計画課

第2問（Net-Work の組み方）

フリーハンド



清書



1 級国道10号線大分国道清水原地区改良工事（現道拡巾）

クランチャー・ラン生産貯積

基礎渠石発注入荷

（電々公社施行地下ケーブル線路設）

現道整備及び（電々公社施行マンホール埋設）
（この期間内に完成を要す）

土工Ⅰ 施工計画 準備 床掘Ⅰ 床掘Ⅱ 渠石敷均し 型枠組立 検 測 Co打設 養生 型枠はずし 埋戻し 側溝工Ⅱ 路盤工

2日 7 2 3 1 5 1 3 1 2 2

配管工（水道管・ヒューム管）

セメント・粗細骨材発注入荷

電源・用水確保、Mixer搬入設置
Co運搬車整備・その他パイプレータなど

準備7日

1. 現場事務所仮設
2. 現地実測
3. 工事標識設置
4. 作業用具の調達
5. その他

側溝工（1,000m）の工期27日
Normal duration 27日
Crash duration 17日

九州地方建設局道路計画課

九州地方建設局道路計画課