

## 施工計画における最適工法選択に関する一考察

### STUDY ON SELECTION OF OPTIMUM METHOD IN CONSTRUCTION PLANNING

石川 六郎\*  
By Rokuro ISHIKAWA

#### 1. はじめに

一般に施工計画立案の際には、技術者の豊富な経験、高度な知識をもとにした適切な状況判断が最も重要なこととされるが、限られた時間で

- (1) 過去の工事における実績
- (2) 新技術導入の可否
- (3) この工事に与えられている制約条件
- (4) 優先的に考慮すべき施工条件

などを総合的に判断し、最適工法を選択することが困難な場合が多い。

近年における土木工事の量的拡大と質的变化は、工事の計画、管理面での技術革新を要請しており、これに応じて、LP, PERT, シミュレーションなどの OR や統計的手法、コンピュータによる処理などの新技法の導入が試みられている。これらの新技法の導入は PERT のように部分的にはかなりの成功を収めたものもあるが、これらの手法が完全に根をおろすには至っていないように思われる。

たとえば、PERT, CPM に代表されるネットワーク手法は

- (1) 各作業の緩急の度合いや相互関係が表示できる。
- (2) 必要資源の最適使用計画が検討できる。
- (3) 工程計画管理のみならず原価計画管理まで総合的に処理できる。

といった優れた特性を有している。しかし現実には PERT, CPM を使用する上では

- (1) 各作業ごとの細かいデータを多量に必要とする。
- (2) 電子計算機で処理するにしても、膨大な量の計算を必要とする。

などの複雑さがあり、さらに

(3) ネットワークの構造自体が必ずしも確定的でない。

(4) 個々のデータの見積り精度が問題となる。などのように不確実な要素も確定的に扱わざるを得ないので、施工計画立案の時点では施工条件の変化などに対する柔軟性に欠けていることが大きな欠点である。

そこで本論文では、PERT, CPM などによる施工計画の詳細検討の前の段階として、施工計画立案の際の最適工法プロセスに着目して施工をマクロ的にとらえ、その時点で入手可能ないくつかのデータを有効に活用して経済性の面から有力なプロセスを選択する手法について考察した。さらに、これらの使用されるデータの変化が、最適工法選択に及ぼす影響を数量的に把握し、従来は経験と勘に依存しがちであった工法選択のプロセスにより客観的な評価方法を導入することを目的とした。また、詳細な実施計画を作成する以前の段階で、本論文で述べる手法を利用することにより、実施計画段階における PERT, CPM の優れた特性を、より有効に発揮させることができるであろう。

#### 2. 最適工法選択プロセスの定式化

##### (1) 定式化

1つの工事に含まれる工種あるいは作業について、考慮すべきいくつかの組合せをすべて表現した経路図を作成する。これらの経路をそれぞれの作業の作業量が開始点から終了点に向かって流れていくにしたがって、各作業によって付加されるコストが累積されていくと考える。

たとえば図-1 に示す経路図においては、X, Y, Z という3種の構築物を建設するための各種作業経路の組合せが A, B, C, D, E の5種類の作業を開始点として整

\* 正会員 (株)鹿島建設副社長

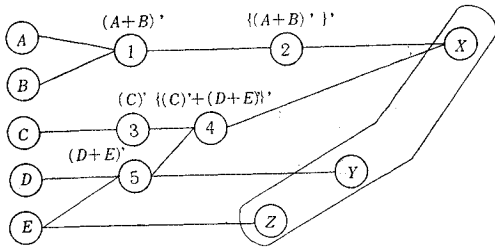


図-1

理されている。それぞれの経路の中間で適当な作業の変わり目ごとにチェックポイント①～⑤を設け、これらの点を流れる作業量を媒介として各経路の概算工費を見積る。そして最も経済的な経路を選定する問題として、最適工法を選択する問題を検討する。図-1 に示すような経路図の意味を以下で説明する。

a) 定義ならびにルール

① 節 点

経路上のチェックポイントを節点とよぶ。節点には開始点(図-1 の A~E)、中間点(図-1 の ①~⑤)、終了点(図-1 の X~Z)の3種類があり、一般に1つの開始点に対して多数の中間点ならびに終了点が存在する。

- i) 開始点は出力としての作業量だけが存在する。
- ii) 中間点には入力としての前工程の作業量とこれまでのプロセスの累積コストならびに出力としてのこの作業の作業量の両方が存在する。
- iii) 終了点には入力としてのこれまでの経路を流れてきた作業量と累積コストが存在する。前者を出来高数量  $D_k$  後者を総コスト  $Y_k$  とよぶ。

② 流 れ

節点  $i$  から節点  $j$  への流れ(すなわち作業量)を  $x_{ij}$  で表わす。 $x_{ij}$  は一般には変数で計算によって求められる量とするが、定数でも与えられるとする。また1つの節点への各入力または1つの節点からの各出力はそれぞれ同じディメンジョンをもち、終了点における単位は出来高数量の単位と一致するものとする。

③ 節点における流れのバランス

開始点  $S$  では次式が成立する。

$$A_S = \sum_j x_{Sj} \quad (S=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

ここで  $A_S$  は  $S$  からの総出力を示し、 $x_{Sj}$  はその内訳となる。同様に終了点  $F$  では次式が成立する。

$$D_F = \sum_i x_{iF} \quad (F=1, 2, 3, \dots, m) \quad (2)$$

ここで  $D_F$  は終了点  $F$  への総入力を示す。ただし、 $A_S$ 、 $D_F$  は変数、定数の両方をとり得るものとする。中間点としては次の2種類を考える。

- i) 入力量=出力量、すなわち、 $\sum_i x_{ij} = \sum_k x_{jk} = A_j$

=  $D_j$  となる中間点

- ii) 入力量≠出力量である中間点

また、中間点  $j$  からの出力量の、中間点  $j$  への入力量に対する比率を  $r_j$  とし、これを変換効率と称する。

$$\sum_k x_{jk} / \sum_i x_{ij} = r_j \quad (3)$$

④ 変換効率

変換効率には2種類の意味をもたせる。その1つは作業を遂行する上での効率を示すもので単位は無名数であり、量的な変化や歩留まりを表示する場合に使用する。たとえば  $E \text{ m}^3$  の土を運搬して  $F \text{ m}^3$  の盛土を完成した場合の  $F/E=r$  がこれにあたる。他の1つの使用法は単位の変換に使用する場合である。たとえば  $G \text{ m}^3$  の砕石を搬入して  $H \text{ m}^2$  の路盤を仕上げる場合の  $H/G=r$  となり、 $r$  は  $\text{m}^{-1}$  の単位をもって  $\text{m}^3$  を  $\text{m}^2$  に変換する役目をする。

⑤ 節点を通過した流れのコスト

節点  $i$  を流れ  $x_{ij}$  が通過したとき、 $x_{ij}$  には  $(a_i \cdot x_{ij})$  のコストがかかると考える。 $a_i$  を「節点  $i$  における作業単価」と称する。作業単価  $a_i$  は一般にデータとして与えるものとする。

b) 複合単価

複合単価  $d_j$  は次式で定義される。

$$d_j = \frac{\text{終了点へ入る各ルートの総コストの和}}{\text{終了点へ入る各ルートの作業量の和}} \quad (4)$$

以下で簡単な経路図について、複合単価の計算方法を説明する。

① 変換効率がなく経路が直列の場合(図-2)

変換効率がないので次式が成立する。

$$x_{12} = x_{23} = x_{34} = D_4 \quad (5)$$

終了点における総コストの和  $Y_4$  は次式で与えられる。

$$Y_4 = a_1 x_{12} + a_2 x_{23} + a_3 x_{34} = (a_1 + a_2 + a_3) D_4 \quad (6)$$

したがって、複合単価  $d_4$  は次式で与えられる。

$$d_4 = Y_4 / D_4 = a_1 + a_2 + a_3 \quad (7)$$

② 変換効率があり経路が直列の場合(図-3)

$$a_1 x_{12} + a_2 x_{23} + a_3 x_{34} = Y_4 \quad (8)$$

$$r_3 x_{12} = r_3 x_{23} = x_{34} = D_4 \quad (9)$$

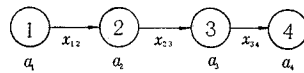


図-2

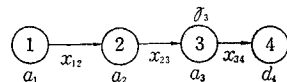


図-3

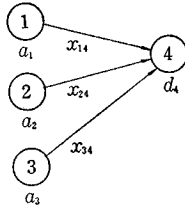


図-4

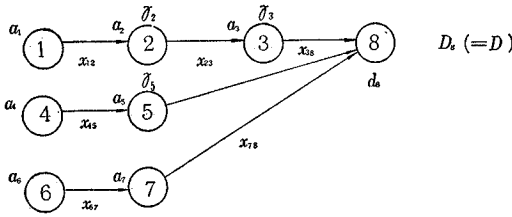


図-5

$$\begin{aligned} \therefore d_4 &= Y_4 / D_4 \\ &= \frac{a_1}{r_3} + \frac{a_2}{r_3} + a_3 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

- ③ 変換効率がなく経路が並列の場合 (図-4)
  - $a_1 x_{14} + a_2 x_{24} + a_3 x_{34} = Y_4 \dots\dots\dots (11)$
  - $x_{14} + x_{24} + x_{34} = D_4 \dots\dots\dots (12)$
  - $\therefore d_4 = a_1 \alpha_1 + a_2 \alpha_2 + a_3 \alpha_3 \dots\dots\dots (13)$

ただし,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= x_{14} / D_4, \quad \alpha_2 = x_{24} / D_4, \quad \alpha_3 = x_{34} / D_4 \dots\dots\dots (14) \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 1 \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

- ④ 変換効率があり経路が並列の場合 (図-5)
  - ルート (1)-(2)-(3)-(8) の複合単価  $d'$  は次式で与えられる。

$$d' = \frac{a_1}{r_2 r_3} + \frac{a_2}{r_3} + a_3 \dots\dots\dots (16)$$

ルート (4)-(5)-(8) の複合単価  $d''$  は次式で与えられる。

$$d'' = \frac{a_4}{r_5} + a_5 \dots\dots\dots (17)$$

ルート (6)-(7)-(8) の複合単価  $d'''$  は次式で与えられる。

$$d''' = a_6 + a_7 \dots\dots\dots (18)$$

終了点⑧の複合単価  $d_8$  は次式で与えられる。

$$d_8 = d' \alpha_1 + d'' \alpha_2 + d''' \alpha_3 \dots\dots\dots (19)$$

ただし

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 1 \dots\dots\dots (20) \\ \alpha_1 &= x_{38} / D_8, \quad \alpha_2 = x_{58} / D_8, \quad \alpha_3 = x_{78} / D_8 \dots\dots\dots (21) \\ D_8 &= x_{38} + x_{58} + x_{78} \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

(2) 経路図の作成と制約条件

作業のプロセスを示す経路には、各作業が直列的に連続して行われる場合と、ある節点に至るプロセスが複数

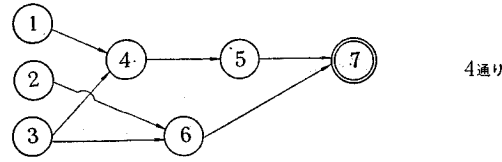


図-6 (1)

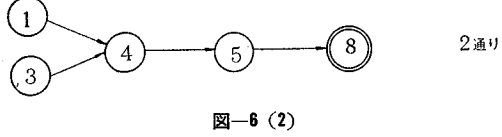


図-6 (2)

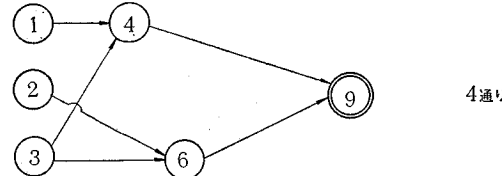


図-6 (3)

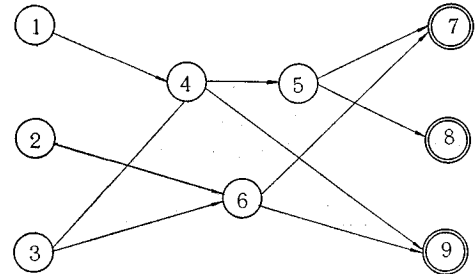


図-7

本存在する場合がある。開始点から終了点まで直列で示されたプロセスが1本しか存在しない場合はルートの選択の余地はない。しかし、一般にはある構築物を完成するプロセスが何通りか考えられ、このうちの何本かの組合せで施工が行われる場合が多い。簡単な例として図-6の(1)~(3)に対象となる構築物⑦,⑧,⑨をそれぞれ完成する場合の考えられるプロセスを示した。したがって、最終構築物⑦,⑧,⑨を完成する工事の経路図は図-7のように表わされ、それぞれ4通り、2通り、4通りの独立したプロセスの各1本または数本ずつの組合せで施工可能である。しかしながら、現実には施工用設備に制限がある場合や工法があらかじめ指定される場合が少なくない。このような場合にはその経路を流れる作業量  $x_{ij}$  の値をあらかじめ指定しておき、これを制約条件と考える。経路図における制約条件としては、 $x_{ij}$  の値の指定のほかにすべての終了点の出来高数量、中間点における変換効率および終了点を除く各節点の作業単価の3種類がある。変換効率は作業が各経路を流れる際に量的に増減するか、あるいは作業内容が変更する場合の制約条件で、量的な増減あるいは作業内容に変更がなければ

1とする。このような条件のもとで経路図を構成している各作業のプロセスに従い、それぞれの作業に伴うコスト（作業単価×作業量）が付加されていくと考える。したがって、最終構築物の単位当たりコストすなわち複合単価はこれまで経てきたプロセスに含まれた各作業単価の加重平均としての意味をもつ。

### (3) 作業単価の見積りと感度分析

作業単価は対象となる現場の施工条件のもとで作業を行う場合のコストとして見積ればよいが、一般に1つの確定した適切な値を決めることは困難な場合が多い。すなわち最適経路の選択が問題となるのは一般に詳細な施工計画を検討立案する前の段階であり、したがって作業単価も過去の実績や現在の相場等を勘案して、ある幅をもった値としてマクロ的にとらえられることが多い。このように制約条件としての作業単価の見積りが確定的でないとするれば、これらの集積として求められる複合単価もある幅をもって考えなければならない。したがって、場合によっては作業単価の与え方により最適経路の変更も起り得る。このような場合には、考えられる複合単価の幅の範囲で得られたいくつかの最適経路のすべてを検討の対象とし、次の段階の詳細施工計画でこれらの優劣を比較することが必要である。言い換えれば、制約条件

の1つである作業単価をどの程度の精度で見積れるかによって最適経路の候補となるプロセスの数が影響を受けることになる。そこで本研究では作業単価の見積り幅の影響度をあらかじめ把握するため、結果に大きな影響を及ぼすと思われる主要な作業について作業単価の変化が複合単価にどのような影響を及ぼすかについて検討することとし、これを作業単価の複合単価に対する感度分析とよぶことにする。感度分析の方法としては次の2通りがある。

- 作業単価の修正前と同じ経路で複合単価を求める方法
  - 作業単価の修正により新しい最適経路が求められた場合はその経路による新しい複合単価を求める方法
- 両者の結果を勘案して最も適当と思われるプロセスを選択する。

## 3. 電子計算機による最適工法選択とケーススタディ

### (1) 電子計算機システムの概要

前章で述べた最適工法選択のプロセスを電子計算機で処理するため、図-8の概略フローチャートに示すよう

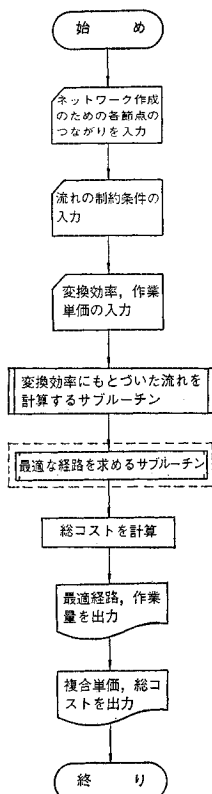


図-8 概略フローチャート

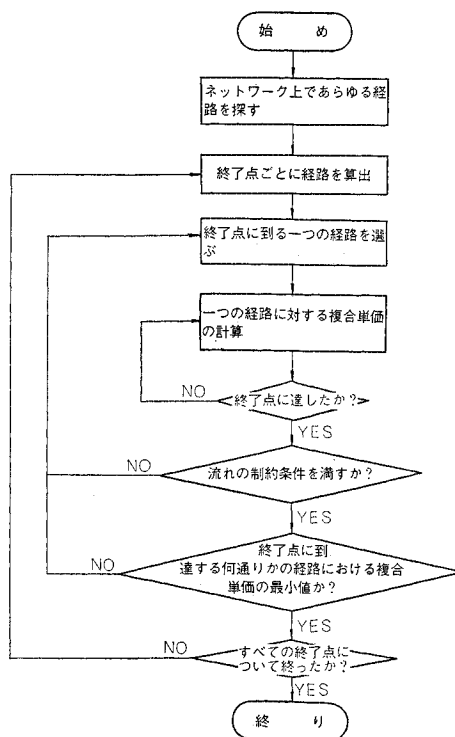


図-9 最適経路の探査フローチャート

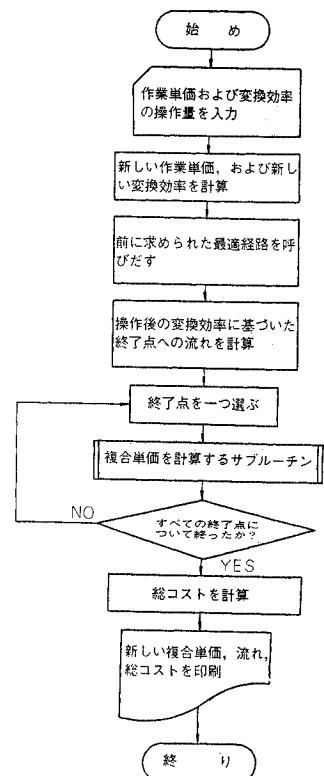


図-10 感度分析フローチャート

なプログラムを開発した。図-8 の点線で囲んだ部分は最適経路の探索部分であり、その内容は図-9 に示すとおりである。また、結果に大きな影響を及ぼすと思われる主要な作業については、作業単価の変化が複合単価に及ぼす影響を把握するため 図-10 にその一部を示したようなサブシステムを作り感度分析を行うことにする。

(2) インプットデータ

インプットデータとしては、ネットワーク作成のための各節点のつながり(経路図)と制約のある作業量、出来高数量、作業単価、変換効率などの制約条件と、感度分析を実施するための作業単価ならびに変換効率の考えられる変化幅の2種類がある。

(3) 最適経路選択の計算処理

図-7 に示した経路図をモデルとして以下に最適経路選択の計算処理の概要を示す。

制約条件として表-1 に示す3つの作業量、3つの中間点における変換効率、すべての開始点、中間点の作業単価およびすべての終了点の出来高数量を与える。これ

表-1 インプットデータ(制約のある作業量, 変換効率, 作業単価, 出来高数量)

**CASE (1) NO INPUT DATA**					
**CONSTANT FLOW-X(I, J)**					
	X(3, 4)	=	200.0		
	X(3, 6)	=	200.0		
	X(6, 9)	=	500.0		
**HENKAN KOORITU-R(I, J)**					
	R(4)	=	0.95		
	R(5)	=	0.70		
	R(6)	=	0.80		
**SAGYOO TANKA-A(I, J)**					
	A(1)	=	80.00		
	A(2)	=	60.00		
	A(3)	=	800.00		
	A(4)	=	85.00		
	A(5)	=	95.00		
	A(6)	=	80.00		
**DEKIDAKA SUURYO**					
	D(7)	=	97 390		
	D(8)	=	14 780		
	D(9)	=	2 505		

表-2 最適経路による総コスト

*ROUT NUMBER*	*FLOW*	**ROUT**			
1	0	7	5	4	1
2	0	7	5	4	3
3	97 390	7	6	2	—
4	0	7	6	3	—
5	14 647	8	5	4	1
6	133	8	5	4	3
7	2 005	9	4	1	—
8	5	9	4	3	—
9	340	9	6	2	—
10	160	9	6	3	—
**TOTAL COST=20 781 075 YEN**					

らのインプットデータをもとにし、図-8, 9 のフローに従って経路図上のあらゆるルートについて流れの分配量と総コストが最小となる複合単価を求める。手順としては、指定された作業量を割り付け可能な各経路に配分し、出来高数量からこれをさし引き、残数量をその他の作業量の制限を受けない各経路で求めていく。各経路の作業量は、総コスト最小という制約で割り付けられたものであるため、求められる複合単価は与えられた条件のもとにおける最小の値となる。結果は表-2 に示す通りである。

(4) 感度分析の計算処理

前項の計算で与えた制約条件のうち中間点④, ⑥の作業単価が20% 上り, 中間点⑥の変換効率が20% 下った場合の最適経路の変化ならびに総コストの変化を分析するケースを例として述べる。まず制約条件の変化率をインプットして制約条件を修正しておき、前節で求めた最適ルートと同じ経路を通った場合の総コストを計算してこの増減の度合いを検討する。この結果は表-3 に示す通りである。

次に図-8 に示したプログラムにより修正された制約条件のもとでの最適経路を求めて、先に求められた表-3 と比較することにより、ルートの変更の状況ならびに総コストの減少の度合いを把握する。修正されたルート

表-3 感度分析による各経路の作業量と総コスト(ルート固定の場合)

*ROUT NUMBER*	*FLOW*	**ROUT**			
1	0	7	5	4	1
2	0	7	5	4	3
3	97 390	7	6	2	—
4	0	7	6	3	—
5	14 647	8	5	4	1
6	133	8	5	4	3
7	2 005	9	4	1	—
8	0	9	4	3	—
9	340	9	6	2	—
10	160	9	6	3	—
**TOTAL COST=24 612 760 YEN**					

表-4 感度分析による各経路の作業量と総コスト(ルートが変更する場合)

*ROUT NUMBER*	*FLOW*	**ROUT**			
1	0	7	5	4	1
2	0	7	5	4	3
3	97 262	7	6	2	—
4	128	7	6	3	—
5	14 647	8	5	4	1
6	133	8	5	4	3
7	2 005	9	4	1	—
8	0	9	4	3	—
9	500	9	6	2	—
10	0	9	6	3	—
**TOTAL COST=24 575 772 YEN**					

と総コストは表—4に示す通りである。

以上のケーススタディによれば、図—7の経路図で表—1の制約条件のもとでの最適経路は表—2のように求められ、その場合の総コスト  $Y$  は 20,781,075 円となる。しかし与えた制約条件のうち中間点④、⑥の作業単価を 20% 上げ、中間点⑥の変換効率を 20% 下げると同じ経路をとった場合の総コスト  $Y'$  は 24,612,760 円と約 18% 増加し、これらの修正された制約条件のもとでは、最適経路の組合せのうち終了点⑦に至る③-⑥-⑦のルートが新たに発生し、終了点⑨に至る③-⑥-⑨のルートが消滅して総コスト  $Y''$  も 24,575,772 円となって約 0.15% 減少している。したがって、このような制約条件の変化が予想されるような場合には、表—3 と表—4 に示されたような 2 組の最適経路の組合せについて、次の詳細施工計画の段階でその優劣を比較する必要があることを示している。

#### 4. おわりに

本研究は施工計画の中で基本方針を決定する際の最適工法選択のプロセスに着目し、この内容ならびに現状における問題点を分析し、従来はベテラン技術者の経験と勘に依存していた最適工法選択のプロセスを、より総合的、客観的に評価する一手法について考察を進めた。すなわち、対象となる工事に対して与えられた施工条件のもとで、考えられるすべての作業プロセス代替案を経路図に表現し、各作業の作業量と作業単価をマクロ的に見積り、最も経済的となるプロセスを最適経路として自動的に選定するとともに、経路選択の基礎となった制約条件の変化が最適経路ならびに総コストに及ぼす影響を把

握できる手法を開発した。また、この操作を電子計算機により、ごく短時間で処理する方法も開発した。本論文で得られた結果により理論上の目的を達し得たと思われるが、実際の施工計画立案に活用するためには今後の研究に待つ部分が少なくない。

残された主な問題点としては次のものが挙げられる。

(1) 適切な経路図の作成方法

(2) 現実に即した流れの制限と適切な作業単価の見積り

(3) 感度分析の活用による不確定性の評価

これらの問題点については、今後、数多くの工事に適用しつつ処理方法を実践的に改善していく必要があるが、特に (2)、(3) の問題点を理論的に解明するためには、制約条件を決定する際の不確定性を主観的確率によって表現し、(3) の感度分析にシミュレーション手法を導入して、選択された最適経路の確度を確率で表現するような手法が考えられるであろう。また、本論文で述べた手法を大規模な工事に適用する際には、経路図が複雑化し、すべての作業の組合せを列挙することが繁雑になることが明らかである。今後、この手法の実際の工事に対する適用を重ねた上で、この手法を適用する工事規模や適用レベルなどの妥当性が検討される必要があろう。

#### 参考文献

- 1) Basacker, R.G., Saaty, T.L. (矢野ほか訳): グラフ理論とネットワーク, 培風館, 1971.
- 2) 吉川ほか: 工事計画システムとその実証例について, 土木学会第 26 回学術講演会講演集, 1971.
- 3) 日本建設機械化協会編: 建設工事の計画と実施, 日本建設機械化協会, 1963.

(1973.12.14・受付)