

## 岩石トンネル工事計画における機械系の 決定プロセスに関する研究

STUDY ON DECISION PROCESS OF MACHINE FLEET FORMATION  
FOR PLANNING ROCK TUNNELING CONSTRUCTION PROJECT

河原畠良弘\*・春名攻\*\*・岡本伸一\*\*\*

By Yoshihiro KAWARABATA, Mamoru HARUNA

and Shinichi OKAMOTO

### 1. まえがき

わが国における公共土木施設の建設工事のうちでも、トンネル工事の占める割合はきわめて大きく、かつその建設目的も多岐にわたっている。さらに、わが国の地形上の特徴を考え合わせればトンネル施設に対する需要は今後ますます増大するものと予想され、それに伴う工事量も増加の一途をたどるであろう。しかし、一方では労務者の絶対的不足が顕著になってきており、トンネル工事の作業環境の悪さとあいまって安定した労働力の確保を一層困難なものにしている。このような情勢からトンネル工事に対する省力化、機械化の要請が日増しに強まり、近年は特に安全施工の観点からも機械化を強力に推進しようとする動きが活発化してきた。これに伴いトンネル建設用機械の改良・開発には多大の努力が払われ、特に施工の急速化をめざした機械類の大型化や種類の多様化には著しいものがある。

こうしたいわばハード・テクノロジーとしての施工技術は長足の進歩を遂げたものの、これと表裏一体となって発展すべきソフト・テクノロジーとしての施工計画についてみれば依然、現場技術者の豊富な経験情報と直感力に頼る従来の方法が支配的である。しかし、このような方法では代替案の作成やその評価が一面的なものとなりやすいため、総合的にみて合目的度の高い施工計画を立案することがきわめて困難である。

こうした情勢を踏まえて、本研究では岩石トンネル工事における施工計画問題を取り上げ、計画立案過程のシステム化<sup>1)</sup>をめざしたものである。特に、岩石トンネル工事の施工計画問題の中でも施工機械系の決定問題が最

も重要で施工の成否にとって支配的であると考え、合理的な施工機械系の決定プロセスについて考察するとともに、その成果をとりまとめて報告するものである。具体的には、施工機械系の決定問題を機種や機械の台数、規模等を計画変数（要因）とするそれらの組合せ問題として認識する立場から代替案を構成する要素に対して時間とか費用に関する特性値を与え、システムティックに代替案を作成する方法、求めようとする解の存在する範囲を合理的に限定することによりプロセスを効率化して実用的なものとする方法、現実の施工の状態をシミュレートすることによって求める解の合理性を保証する方法などを開発・提案し、これらを総合的に構成して合理的な施工機械系決定のためのプロセス・システムを作成した。

なお、本研究において提案している方法の有効性を実際的に検討するために施工モデルとしてわが国の標準的な工法とされている底設導坑先進上部半断面工法による工事例を取り上げたが、ここで展開する方法論は他の施工法にも十分拡張し得るものであり、方法論自体は一般性を失うものではない。

### 2. 岩石トンネル工事施工のシステム分析と モデル化

#### (1) 岩石トンネル工事における施工計画問題の特徴

岩石トンネル工事における施工計画問題の特徴は大きく次の2つにまとめることができる。

① 施工計画要素のうち大半が環境条件に依存しているため、技術者の制御可能な部分はきわめて限られ、しかもこれらの因子は施工機械系に集中している。

② 他の建設工事と比較して作業空間が著しく制約されるため、作業干渉が発生しやすく、このことに起因し

\* 正会員 工博 (株)奥村組技術研究所所長

\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 (株)奥村組技術研究所企画室

て施工計画と実際の施工との間で差異が生じやすい。

これらの特徴から岩石トンネル工事における施工計画問題では施工機械系の決定問題が重要かつ支配的であると考えられる。また、特に②から施工計画立案の段階で作業干渉による影響について考察しておかなくてはならないことが明らかとなる。そこで、本研究では施工計画の望ましさの程度を評価するために運搬路を流れるずりおよびコンクリートの動きに着目し、これを反映した形でシステム・モデルを作成することにより合理的な施工機械系の決定プロセスを設計することにした。

次に、施工機械系の決定問題についてさらに詳しく分析する。まず、施工機械系を機械の種類、台数およびその組合せで表わすことにすれば、施工機械系としての代替案の数は膨大なものとなるため、望ましい計画案を効率よく、かつ確実に選定できる方法が必要である。次に、作業干渉の程度は施工機械系の内容と密接に関係していると考えられるため、事前に作業干渉の程度を定性的、定量的に把握して、これを施工機械系決定のための情報として有効に利用することが重要である。しかし、作業干渉は多くの因子が複雑に絡み合って発生するためこの現象をモデル的にとらえて数学的な方程式系で記述したり、解析的に解を求めるといった方法が現在のところ利用できない。そこで、本研究ではこのような特徴から考えて、システム・シミュレーションの方法が最も効果的であると判断し、これを用いることにした。従来にも施工空間が制約条件として卓越しないような工事について同様なシミュレーション手法を用い、全体工程の合理化を目的として機械系の選定問題を取り扱った例<sup>2)</sup>はあるが本研究は岩石トンネル工事における施工計画問題の特徴から機械系の決定問題そのものを取り扱っていることと、特に細長い空間に存在する運搬システムを中心としたモデル化している点に特徴がある。

## (2) 岩石トンネル工事の施工システムと構造的特性

岩石トンネル工事施工の全体システムは8つの坑内作業場所(切羽とよぶ)および2つの坑外設備のサブシステムとして、これらが共通の運搬路(線路)を通じて有機的に結合したものと考えることができ、各サブシステムはこの運搬路上においてのみ相互依存的な関係をもつと考えてよい<sup>3)</sup>。そして、運搬路の機能は施工システム全体の機能にとって支配的要因となっている。図-1に全体システムの模式構造を示す。

次に岩石トンネル工事における施工システムの構造的特性を明らかにしておくことが施工計画問

題を定式化するうえできわめて重要なことであると考え、ここでは施工システムの構造分析を行った。まず、サブシステム間の物理的位置関係は工程表によって規定され、この関係は原則として工期全体を通じて保持されるべきものである。本来このサブシステムの物理的位置関係を合理的に規定するための方法論が必要であるとも考えるが本研究では特に全体工期が与件として与えられる場合を想定しているため、工程そのものに対する計画の自由度が低くあえてこの問題は取り扱わないことにした。そこで、ここでは計画工程表が合理的な施工を実現するための要件を満たしているという前提に立ち、各サブシステムが工程表どおりに進行することが工事全体の工程を満足するための必要条件と考えることにし、これを確実に実施可能とする機械系の選定問題を中心に考えることにした。

さて、ここで個々のサブシステムについてみると、各サブシステムはパターン化された一連の作業がサイクリックに繰り返される構造となっている。このパターン化された一連の作業をサイクルとよぶことにし、それぞれのサイクルを構成する要素(作業)を図-2に示す。このサイクルが各サブシステムで繰り返されることによってトンネル全体の施工が進行する。この1サイクルに要する時間をサイクル・タイムとよぶ。また、1サイクルを終了することによって切羽が進行するわけであるからサイクル・タイムと1サイクル当たりの進行長が明確になればサブシステムの移動速度、すなわち、切羽の進行

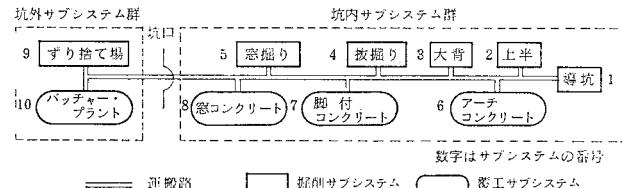


図-1 施工システムの模式構造

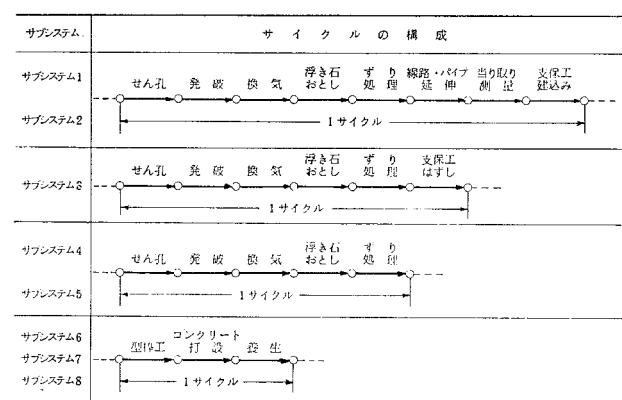


図-2 サイクルの構成

速度を求めることができる。これによって標準工程表で示されたサブシステムの移動速度と計画案のそれとを比較することによって計画案が全体工程を満足するかどうか判断できることになる。このように計画案が全体工程を満足するかどうかをサイクル・タイムで評価できることは岩石トンネル工事施工の構造的特性に起因する著しい特徴である。そこで、以下においてはこのサイクル・タイムに着目して施工の時間的側面をとらえていくことにする。

### (3) 施工機械系決定プロセスの概要

合理的な施工機械系の内容は合理的な施工を実現するという上位レベルの目的に合致したものでなくてはならないと考え、本研究では合理的な施工機械系を一般に施工計画や施工そのものの合理性を評価する場合の評価項目とされている i) 経済性, ii) 迅速性, iii) 実行可能性の面から検討していくことにする。ここで、経済性については工事に投入する機械系費用の総和を考えることにし、迅速性については全体工期が明示されるものと考え、これを制約条件として取り扱うことにする。また、実行可能性については必要な物理的制約条件を満たすように代替案を作成することにより、これを保証することにする。

さて、実際に合理的な施工機械系の決定プロセスを設計するためには、合理的な施工機械系の明確な定義と代替案として示された施工機械系の望ましさの程度を定量的に示す具体的な評価指標が必要となる。そこで、岩石トンネル工事のような大規模工事では機械系費用が実際現場償却として取り扱われ全体工事費の計算で機械の公表販売価格を用いて算出される機械系費用が支出の部分として重要な評価尺度となっているため、経済性を示す評価尺度として機械系を構成する個々の機械の公表販売価格の総和をとることにする。また、迅速性については先に述べたとおりサイクル・タイムをとることにするが、ここでは工期を与件と考え、これを制約条件として考えることにしたため、代替案のサイクル・タイムが後述する必要な評価基準としての必要サイクル・タイムを満たしているかどうかを判断すればよい。合理的な施工機械系の数学的な定義についても改めて後述する。

次に、施工機械系決定のプロセスを実際的で効率的なものとするため、ここでは全体プロセスを2つの段階に分けることにした。その第1段階では計画代替案を構成する要素に対して時間とか費用に関する特性値を与えるとともに、ある範囲の中で機械的に構成し得るすべての代替案を含む計画案の集合から（実行可能かつ）望ましい解を含む部分集合を実際的なレベルで構成する静的なプロセスを、また、第2段階ではシミュレーション手

法を用いて施工の動態をとらえることにより、合目的度の高い解をヒューリスティック（自己発見的）に導く動的なプロセスを設計することにした<sup>3)</sup>。

## 3. 施工機械系の決定問題のモデル化と決定プロセス<sup>4), 5)</sup>

### (1) 機械系稼動のモデル化

サブシステム1から5までの掘削サブシステムのグループ（掘削グループとよぶ）における機械系は削岩機、ずり積み機、けん引機関車、ずり車で構成されるが、ここではけん引機関車もずり車もおののおの単独ではその機能を果たし得ないため、これらを組み合わせてずり列車とよぶことにする。また、現実の施工を反映して1回の発破で発生するずりは原則として1列車で搬出するものとし、1列車で搬出できない場合にはどの列車も坑外のずり捨て場と坑内切羽とを往復しなくてもよいだけのずり列車を準備することを前提とした。

次に、サブシステム6から8までの覆工サブシステムのグループ（覆工グループとよぶ）における機械系はけん引機関車とコンクリート車であるが、上述と同様の理由によってこれらを組み合わせてコンクリート列車とよぶことにする。

さて、これらの機械系の稼動を岩石トンネル工事施工全体からみてモデル化したが、ここでは特に重要となるずり列車およびコンクリート列車の稼動モデルをそれぞれ図-3, 4に示す。

### (2) 機械系稼動における時間構造

ここでは機械系稼動の状況を示す詳細なモデルを設定し、その時間構造を分析することによって各サイクル・タイムを構成する個々の作業時間を求める方法について定式化した。ここではその基本的な考え方を示すこととする。

まず、ある1つのサブシステム*i*のサイクル・タイムを  $T_i(\text{min})$  とすれば、図-2より、

$$T_i = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^8 t_{ij} (i=1, 2, \dots, 5) \\ \sum_{j=9}^{11} t_{ij} (i=6, 7, 8) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$T_i = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^8 t_{ij} (i=1, 2, \dots, 5) \\ \sum_{j=9}^{11} t_{ij} (i=6, 7, 8) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

と表わすことができる。ここで式(1)は掘削グループについて、式(2)は覆工グループについて示している。また、 $t_{ij}$  はサイクルを構成する要素 *j* (作業 *j*) に要する時間を示している。そこでまず式(1)について、表-1に作業番号 *j* と作業の内容との対比を各サブシステムごとに示す。この表において空欄となっている部分は

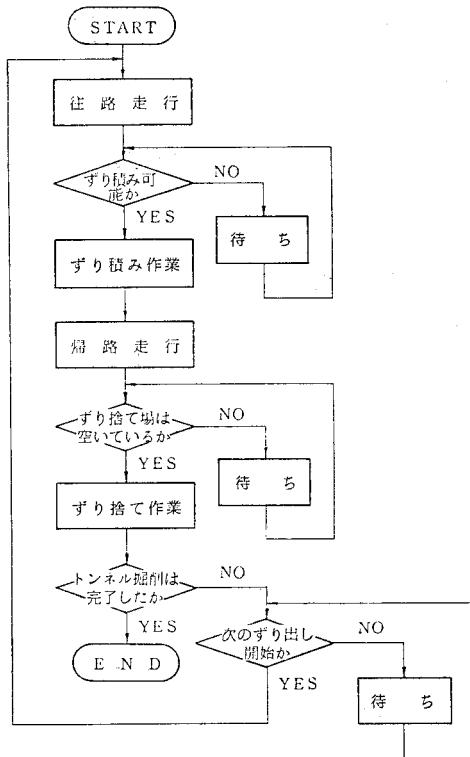


図-3 すり列車の稼動モデル

表-1 作業番号  $j$  と作業内容との対応

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8
1, 2						線路, バイブ延伸	当り取り測定	支保工
3	せん孔発破換気	浮き石おとし	ずり処理		支保工			
4, 5								

対応する作業のないことを示しており式(1)における  $t_{ij}$  はゼロと考えればよい。次に式(2)についてみれば、まず  $t_{ij}$  は型枠工を要する時間、 $t_{i10}$  はコンクリート打設作業時間、 $t_{i11}$  は養生時間を示している。ここで型枠工時間 ( $t_{i9}$ ) および養生時間 ( $t_{i11}$ ) は機械系の内容によらない一定の値をとるものと考えてよいから、施工機械系の決定問題という観点からはコンクリート打設作業時間 ( $t_{i10}$ ) のみを問題にすればよいことが判明する。そこで、コンクリート打設作業時間  $t_{i10}$  を改めて覆工サブシステムのサイクル・タイムとし式(2)を次式のように書き改める。

$$T_i = t_{i10} (i=6, 7, 8) \dots \dots \dots \quad (3)$$

### (3) 合理的な施工機械系の定義

本研究では合理的な施工機械系を経済性、迅速性、実行可能性の 3 つの側面から考えていくことを前述したが、ここではさらに詳しく考察し、その具体的な内容に

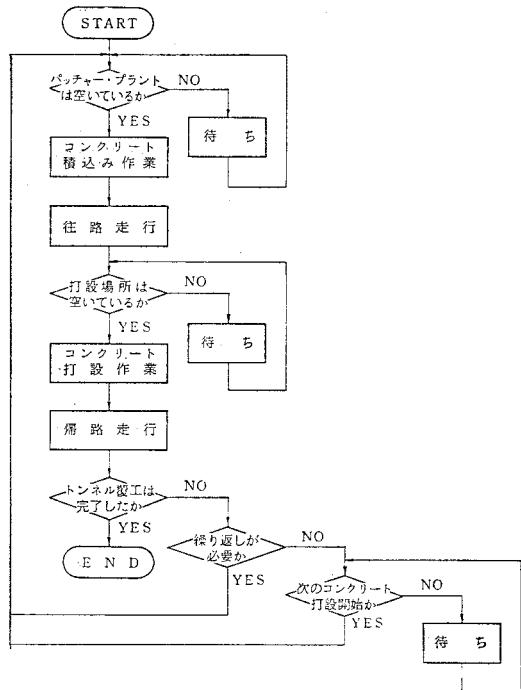


図-4 コンクリート列車の稼動モデル

ついて述べることにする。

岩石トンネル工事施工は各サブシステムにおいてパターン化された一連の作業が繰り返されて進行することを先に述べた。また、全体工期を満たし、かつサブシステム間の相対的な位置関係を保ちつつ施工するためには各サブシステムにおいて標準工程計画表に示された施工速度を確保し維持することが必要であること、また、これは合理的な施工の目標である迅速性という観点から制約条件として取り扱うことができることを述べた。また、その評価指標としてはサイクル・タイムが適切であることもすでに述べたとおりである。これらの考察に基づき、標準工程計画表から制約条件を満たすためにサイクル・タイムが超えてはならない値、つまりサイクル・タイムの上界値を各サブシステムごとに求め、この値を必要サイクル・タイム (CTR : Cycle Time Required) とよび実際の値を  $RT_i$  ( $i$  はサブシステムの番号) と表わすこととする。すなわち、各サブシステムにおいて実際の施工時におけるサイクル・タイム以下であれば迅速性を満たすものと判断することにする。

次に、1 つのサブシステム  $i$  において機械系  $\lambda_{ik}$  を投入した場合のサイクル・タイム  $PT_i(\lambda_{ik})$  (min) を、

$$PT_i(\lambda_{ik}) = f_i(\lambda_{ik}) \dots \dots \dots \quad (4)$$

と表わすことができる。ここで、 $f_i(\lambda_{ik})$  はサブシステムが独立で、かつ内部干渉がない場合にサブシステム  $i$  のサイクル・タイムを求める関数である。また、先のサイクルを構成する個々の作業に要する時間を見積る関数

を  $g_{ij}$  とすれば、式 (1), (3) は、

$$T_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^8 t_{ij} = \sum_{j=1}^8 g_{ij}(\lambda_{ik}) & (i=1, 2, \dots, 5) \\ t_{i10} = g_{i10}(\lambda_{ik}) & (i=6, 7, 8) \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ゆえに、式 (4) は、

$$P T_i(\lambda_{ik}) = f_i(\lambda_{ik}) = \sum_j g_{ij}(\lambda_{ik}) \dots \dots \dots (7)$$

と表わすことができる。この  $P T_i$  を計画サイクル・タイム (CTP : Cycle Time Planned) とよぶことにする。

さて、先に述べたとおり、サブシステムは必ず搬出路あるいはコンクリート運搬路として線路を共有することにより相互干渉を発生するため、実際の施工におけるサイクル・タイムは通常、計画サイクル・タイムより遅くなる。いま、サブシステム  $i$  についてこの干渉による遅れを  $d_i$  (min), 実際のサイクル・タイムを  $o T_i$  (min) とすれば、

$$o T_i = P T_i + d_i \quad d_i \geq 0 \dots \dots \dots (8)$$

と表わすことができる。ここで、 $o T_i$  を生起サイクル・タイム (CTO : Cycle Time Occurred) とよぶこととする。本研究ではシミュレーション手法を用いて施工の動態をとらえることによりこの  $o T_i$  を求めることにした。

さて、合理的機械系の選定は機械系を構成する機械の種類(定性因子)と台数(計数因子)を決定することである。いま、サブシステム  $i$  の機械系  $\lambda_{ik}$  を構成する機械  $k$  の公表販売価格を  $C_k$ (円/台), その投入台数を  $Y_k$ (台) として、

$$C_i(\lambda_{ik}) = \sum_k C_k \cdot Y_k, \quad k \in \lambda_{ik} \dots \dots \dots (9)$$

を経済性を示す評価指標として導入する。ここで、合理的な機械系をすべての  $i$  についてそれぞれ  $o T_i \leq R T_i$  を満たし、かつ、

$$\text{Min} \sum_{i=1}^8 C_i(\lambda_{ik}) \dots \dots \dots (10)$$

を与える機械系  $\lambda_{ik}$  の集合であると定義する。すなわち、すべてのサブシステムにおいて生起サイクル・タイムが必要サイクル・タイム以下であり、機械系の費用が最も安いものを合理的な機械系と考えることにする。図-5 は必要サイクル・タイム (CTR), 計画サイクル・タイム (CTP), 生起サイクル・タイム (CTO) および評価指標  $C$  の関係を示したものである。

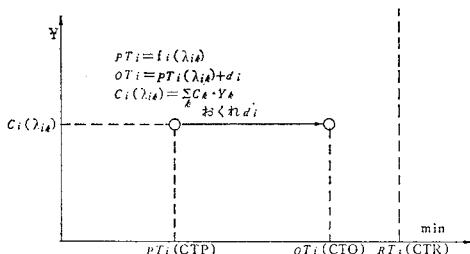


図-5 各サイクル・タイムと評価指標  $C$  の関係

#### (4) 合理的な施工機械系の決定プロセス

本研究では合理的な施工機械系の決定プロセスの中心となる部分を、i) フィルタリングのプロセス、ii) 初期解探索のプロセス、iii) 初期解改善のプロセスの3つのサブプロセスで構成した。すなわち、i) ではプロセスの効率化を図るために計画代替案の母集合よりシミュレーションの対象となる部分集合を構成する。ii) ではまず i) で構成した部分集合の中に合理的な施工機械系が存在するか否かを判断し、存在する場合のみを取り扱い初期解を求める。続いて iii) において ii) で求めた初期解としての機械系より合理性の高い機械系の構成が可能であるかどうかを検討し、可能であればこれを求める。以下においては、これらの各サブシステムの具体的な内容について述べる。

##### i) フィルタリングのプロセス

1つのサブシステム  $i$  について、そのサイクル・タイムに関係する制御因子の数は有限であり、おのおのの因子のとり得る水準もまた有限である。したがって、これらの制御因子の組合せによって示される機械系の数は有限であり、機械的に構成し得るすべての機械系からなる集合は有限集合である。これを  $R_i^n$  とし、その元を  $\lambda_{ik}$  ( $P T_i(\lambda_{ik}), C_i(\lambda_{ik})$ ) と表わすことにすれば、機械系  $\lambda_{ik}$  が合理的機械系であるための必要条件は式 (8) に基づいて、

$$P T_i(\lambda_{ik}) \leq R T_i - d_i \leq R T_i \dots \dots \dots (11)$$

ゆえに、

$$P T_i(\lambda_{ik}) \leq R T_i \dots \dots \dots (12)$$

となる。ここで、 $R_i^n$  から式 (12) を満たさない機械系を除いて得られる集合を  $S_i$  とすれば、明らかに、

$$S_i \subseteq R_i^n, \quad S_i \{ \lambda_{ik} | P T_i(\lambda_{ik}), C_i(\lambda_{ik}) | P T_i(\lambda_{ik}) \leq R T_i \} \quad \dots \dots \dots (13)$$

である。いま、 $\lambda_{ik} (P T_i(\lambda_{ik}), C_i(\lambda_{ik})) \in S_i$ ,  $\lambda_{i,k+1} (P T_i(\lambda_{i,k+1}), C_i(\lambda_{i,k+1})) \in S_i$  として、

$$P T_i(\lambda_{ik}) > P T_i(\lambda_{i,k+1}), \quad C_i(\lambda_{i,k+1}) > C_i(\lambda_{ik}) \quad \dots \dots \dots (14)$$

の関係が元の間に成立するように集合  $U_i$  を構成し、この集合  $U_i$  に含まれるすべての元を合理的機械系探索の対象とする。しかし、ここで棄却された機械系が合理的機械系とはならないという確実な保証はないが、集合  $R_i^n$ , 集合  $U_i$  のいずれを対象にして合理的機械系を決定しても、その結果については実際面、精度面からみて合理性に有意な差はないといふ判断し、プロセスの効率化を重視する立場から、ここで示したような考え方をとることにした。以上のプロセスをフィルタリングのプロセスとよぶことにし、その概念を図-6 に示す。これによっ

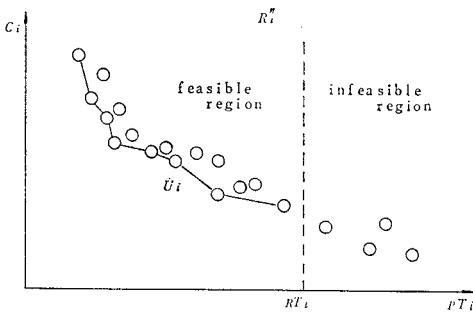


図-6 フィルタリングの概念

て満足できる確からしさをもって合理的な機械系となり得る機械系の部分集合を構成することができ、決定プロセス全体の効率化を図ることができる。

#### ii) 初期解探索のプロセス

フィルタリングの結果得られる集合  $U_i$  の元の数を  $N_i$  とすれば、集合  $U_i$  の元の間には、

$$C_i(\lambda_{ik}) < C_i(\lambda_{i,k+1}) \quad (k=1, 2, \dots, N_{i-1}) \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

が成立している。ここで、すべての集合  $U_i$  ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) から  $k=1$  の機械系  $\lambda_{i1}$  を取り出して全体の機械系群を構成し、これを集合 SET/1 とよぶことにする。すなわち、集合 SET/1 は、

$$\text{SET}/1\{\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}, \lambda_{61}, \lambda_{71}, \lambda_{81}\}$$

である。上記の集合 SET/1 の作成プロセスを図-7に示す。これからも明らかなように機械系群 SET/1 は構成し得る機械系群の中で費用の最も安いものである。この SET/1 についてシミュレーションを実施し、その結果、 $\text{CTO} > \text{CTR}$  となるサブシステムが1つでも存在すれば、すべてのサブシステムについて  $k=2$  の機械系  $\lambda_{i2}$  を取り出して全体の機械系群 SET/2 を構成し、シミュレーションを実施する。このような操作をすべての

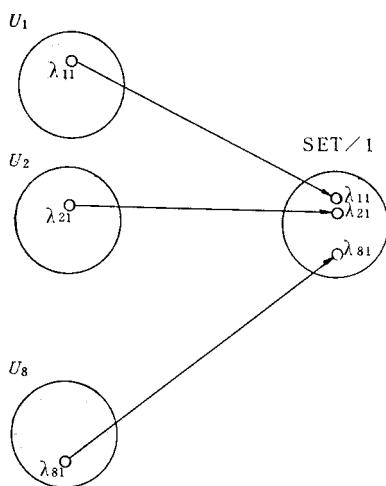


図-7 SET/1 の作成プロセス

サブシステムにおいて  $\text{CTO} \leq \text{CTR}$  になるまで繰り返し、最初にこれを満たす機械系群 (SET) を初期解とする。ただし、構成し得るすべての SET についてシミュレーションを実施してもこの条件を満たすものがない場合には前提となる全体工期そのものについての検討が必要であり、初期解は存在しないものと考える。また、 $\text{SET}/N(N=N_i)$  において、 $\text{oT}_i(\lambda_{i,N_i}) \leq \text{RT}_i$  であり、 $\text{oT}_j(\lambda_{j,N_i}) > \text{RT}_j$  の場合、 $N_j > N_i$  であれば  $\text{SET}/N_{i+1}$  ではサブシステム  $i$  の機械系として  $\lambda_{i,N_i}$  を用い、サブシステム  $i$  の機械系は  $\lambda_{i,N_{i+1}}$  を用いることにする。結局、このプロセスではフィルタリングの結果構成される部分集合の中に合理的な機械系が存在するか否かを明らかにすることができる。このプロセスを初期解探索のプロセスとよぶ。なお、ここで初期解として求められた機械系の費用を  $C^*$  とする。

#### iii) 初期解改善のプロセス

初期解はその探索プロセスからもわかるとおり、一般に過剰能力を有する機械系を含むことになる。したがって、この初期解を合理的な機械系の条件をさらに高度に満足するように改善することが必要である。いま、初期解探索のプロセスで各サブシステムにおいて最初に  $\text{CTO} \leq \text{CTR}$  となった機械系（たとえばサブシステム  $i$  のものを  $(\lambda_{i,f})$  と表わすこととする）を集めて1つの機械系群を作り、これを MSET (Modified Set)/1 とする。もちろん、初期解探索のプロセスにおいて SET/1 が初期解となった場合には初期解改善のプロセスは不要となり、SET/1 を合理的機械系と考えることにする。ここで MSET/1 の機械系群の総費用を  $C_1^*$  とすれば、

$$C_1^* = \sum_{i=1}^8 C_i(\lambda_{i,f}) \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

と表わすことができる。MSET/1 を構成したあとシミュレーションを実施し、その結果、すべてのサブシステムにおいて  $\text{CTO} \leq \text{CTR}$  であればこれを全体システムからみて高いレベルで合理的機械系の要件を満たすものと考え合理的機械系とする。一方、あるサブシステム  $i$  において  $\text{CTO} > \text{CTR}$  となつていれば、このサブシステムの機械系を  $\lambda_{i,f+1}$  として次の機械系群 MSET/2 を構成する。新しく構成した機械系群 MSET/2 の費用を  $C_2^*$  として  $C_2^* < C^*$  であればシミュレーションを実施し、 $C_2^* \geq C^*$  であれば初期解を合理的機械系と考えることにする。このプロセスに従えば最終的に合理的機械系に到達することが保証される。結局、初期解改善のプロセスでは部分的に（サブシステム単位で）機械系を変化させている。

以上の決定プロセスの全体フローを図-8に示す。図に示すとおり、標準工程表の作成からフィルタリングまでは静的モデルを利用したプロセスであり、シミュレー

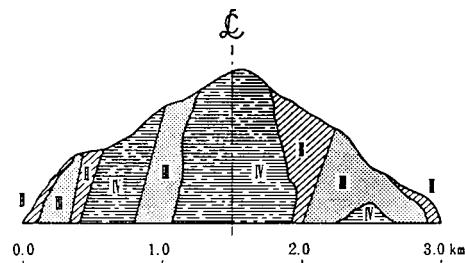
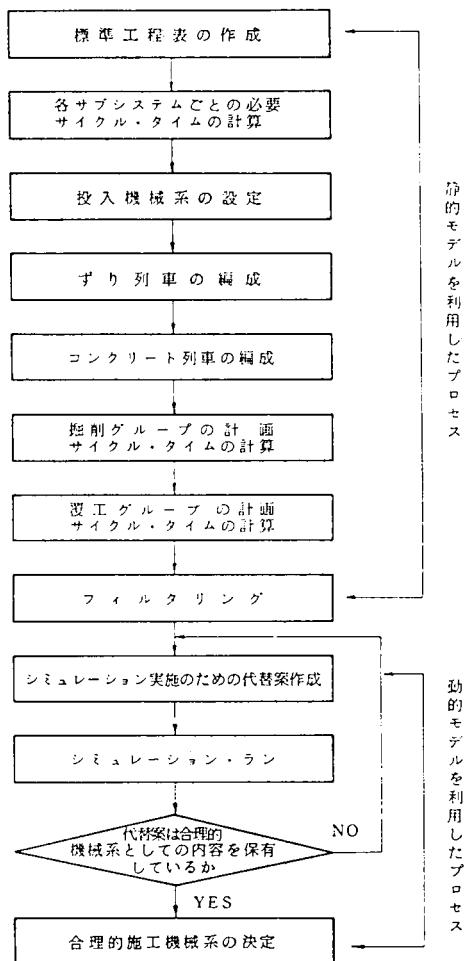


図-9 岩質分布

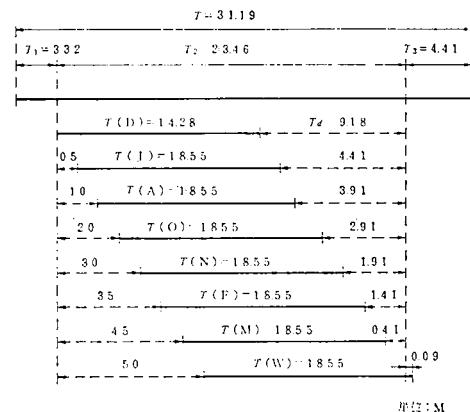


図-10 標準工程表のモデル

すでに提案した合理的な施工機械系の決定プロセスではシミュレーション手法を用いた動的な評価が重要なポイントとなっている。そこで、本研究では現実に即した岩石トンネル工事を想定してシミュレーションを実施し、実際的な場面での検討を行った。まず、そのモデルとして設定した岩石トンネルの概要とシミュレーションのための前提について示すこととする。ただし、できるだけ現実の施工を反映したものとなるように各側面から検討を行い、以下のような内容をもつモデル工事を設定した。

- トンネル断面……新幹線型標準断面<sup>7)</sup>とする。
- トンネル延長……1工区当たりの標準的な延長として3kmをとる<sup>8)</sup>。
- 岩質分布……図-9に示す。ただし、岩分類は国鉄岩分類に従った。
- 施工法……底設導坑先進上部半断面工法とする。
- トンネル勾配……全延長を通じて12%の上り勾配とする。
- 標準工程……図-10に示す。図においてサブシステム8の工期が0.09か月付帯作業期間に入っているがサブシステム8が不連続作業であることから精度上問題ないと判断してこのまま用いることとする。
- 必要サイクル・タイム……表-2に示す。

図-8 合理的な施工機械系決定のプロセス

ション実施のためのインプット情報を特に作業時間の面から取り扱っている。また、シミュレーション実施のための代替案作成のプロセス以降は機械系稼動の動態をシミュレートする動的モデルを利用したものである。ここで提示した合理的な施工機械系の決定プロセスはシミュレーション結果から得られる情報を次の代替案作成のための有効な情報として利用するという段階的でヒューリスティック（自己発見的）な点に特徴があり、このように代替案の構成、探索、選択等において学習過程を重視することによってプロセスの合理的な効率化を図っている。

#### 4. 岩石トンネル工事における実証的研究<sup>6)</sup>

ここでは前節までに述べたプロセス・システムが実際の施工において有効に利用し得ることを実証的研究を通して確認したのでその内容について述べることにする。

表-2 必要サイクル・タイム (CTR)

(単位: min)

サブシステム	1	2	3	4	5	6	7	8
CTR	210	281	187	200	300	600	600	600

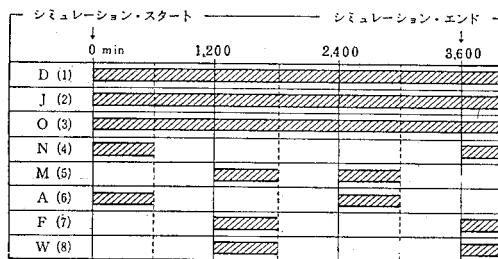


図-11 シミュレーション実施期間の工程

h) シミュレーションの実施期間……上半切羽が坑口から 1,500 m の地点にさしかかった時点から 3 日間とする。3 日間の工程は 図-11 のとおりとする。図中斜線を施した部分が実際に作業を行うところを示している。

i) 投入機械……表-3 に示す。各機械についてそれぞれ低、中、高能力の 3 機種を考え、表中に示した記号で表わすことにする。

次に、実際のシミュレーションによる合理的機械系の決定プロセスについて具体的に述べることにする。まず、岩石トンネル工事の施工においては運搬路上で発生する作業干渉が施工機械系の決定にとって重要な要素であることを前述したが、運搬路そのものの特性は一般にポイント間隔で規定される。現行ではこれを経験的に 300 m 前後に設定している。したがって、ここではまずポイント間隔を 300 m として先に述べたプロセスに従って合理的な機械系を決定する。ただし、フィルタリングまでのプロセスにおいて実際に取り扱った情報量があまりにも多いことや、本研究で提案している方法の特徴が第 2 段階にあることから、シミュレーション実施のための代替案を作成するプロセス以降について述べることとする。

まず、先に述べた機械系の構成の仕方に従い、機械系群 SET/1 を構成し、その内容を 表-4 に示す。このシミュレーション結果は 表-5 に示すとおりであるが、表中、判定の欄の○印は  $CTO \leq CTR$  であることを、また、×印は  $CTO > CTR$  であることを示している。ケース欄の P 300 はポイント間隔が 300 m であることを示しており、以後これに従うものとする。表-5 からも明らかのように SET/1 は初期解としての条件を満たしていないため、前述した初期解探索のプロセスに従って初期解に到達するまでシミュレーションを繰り返す。この結果、ケース P 300=SET/3 で初期解が得られたの

表-3 使用機械一覧

機械種類	使用するサブシステム	能力		
		低能力	中能力	高能力
削岩機	1 ~ 5	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
すり積機	1 2 ~ 5	R <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	R <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	R <sub>3</sub> S <sub>3</sub>
けん引機関車	1 ~ 8	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
すり車	1 ~ 5	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
コンクリート車	6 ~ 8	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>

表-4 機械系群 SET/1 の内容

サブシステム	列車編成	ジャンボセット	すり積機	CTP (min)	機械系費用 (百万円)
1	L <sub>2</sub> +T <sub>2</sub> ×5	D <sub>2</sub> ×7	R <sub>2</sub> ×1	207	79.6
2	2×(L <sub>2</sub> +T <sub>1</sub> ×9)	D <sub>1</sub> ×12	S <sub>1</sub> ×2	280	113.3
3	L <sub>1</sub> +T <sub>1</sub> ×5	D <sub>3</sub> ×1	S <sub>1</sub> ×1	175	40.2
4	L <sub>2</sub> +T <sub>1</sub> ×9	D <sub>2</sub> ×3	S <sub>1</sub> ×1	195	52.5
5	2×(L <sub>2</sub> +T <sub>1</sub> ×8)	D <sub>1</sub> ×5	S <sub>1</sub> ×1	286	83.7
6	2×(L <sub>1</sub> +P <sub>3</sub> ×1)			496	56.4
7	L <sub>1</sub> +P <sub>1</sub> ×1			331	22.9
8	L <sub>1</sub> +P <sub>1</sub> ×1			598	22.9
					471.5

表-5 ケース P 300=SET/1 のシミュレーション結果  
(単位: min)

ケース	サブシステム	CTO	CTP	CTR	$\frac{d}{(CTO-CTP)}$	$\frac{D}{(CTR-CTO)}$	$\alpha(\%)$	$(100 \times \frac{d}{(CTP)})$	判定
P 300	1	212	207	210	5	-2	2.4	×	
	2	285	280	281	5	-4	1.8	×	
	3	181	175	187	6	6	3.4	○	
	4	204	195	200	9	-4	4.6	×	
	5	307	286	300	21	-7	7.3	×	
	6	671	496	600	175	-71	35.3	×	
	7	341	331	600	10	259	3.0	○	
	8	618	598	600	20	-18	3.3	×	

表-6 機械系群 SET/3 の内容

サブシステム	列車編成	ジャンボセット	すり積機	CTP (min)	機械系費用 (百万円)	
SET/3	1	L <sub>2</sub> +T <sub>2</sub> ×5	D <sub>2</sub> ×7	R <sub>2</sub> ×1	202	88.2
	2	2×(L <sub>2</sub> +T <sub>1</sub> ×9)	D <sub>2</sub> ×11	S <sub>1</sub> ×2	274	118.3
	3	L <sub>1</sub> +T <sub>1</sub> ×5	D <sub>2</sub> ×2	S <sub>1</sub> ×1	147	41.6
	4	L <sub>2</sub> ×T <sub>1</sub> ×9	D <sub>1</sub> ×5	S <sub>1</sub> ×1	178	54.6
	5	2×(L <sub>2</sub> +T <sub>3</sub> ×4)	D <sub>1</sub> ×5	S <sub>1</sub> ×1	276	86.1
	6	2×(L <sub>2</sub> +P <sub>3</sub> ×2)			423	94.6
	7	L <sub>1</sub> +P <sub>3</sub> ×1			142	28.2
	8	L <sub>1</sub> +P <sub>3</sub> ×1			256	28.2
					539.8	

表-7 ケース P 300=SET/3 のシミュレーション結果  
(単位: min)

ケース	サブシステム	CTO	CTP	CTR	$\frac{d}{(CTO-CTP)}$	$\frac{D}{(CTR-CTO)}$	$\alpha(\%)$	$(100 \times \frac{d}{(CTP)})$	判定
SET/3	1	205	202	210	3	5	1.5	○	
	2	275	274	281	1	6	0.4	○	
	3	147	147	187	0	40	0.0	○	
	4	178	178	200	0	22	0.0	○	
	5	280	276	300	4	20	1.4	○	
	6	493	423	600	70	107	16.5	○	
	7	145	141	600	4	455	2.8	○	
	8	272	256	600	16	328	6.2	○	

で SET/3 の内容とシミュレーション結果をそれぞれ表-6, 7 に示す。なお、このときの機械系の総費用  $C^*$  は 539.8 (百万円) である。

次に、前述した機械系の初期計画案を改善するプロセスに従って合理的機械系を決定する。表-8 にこのプロセスにおいて第1回目にシミュレーションを実施する機械系群 MSET/1 の内容を示す。MSET/1 の費用  $C_1^*$  は 518.8 (百万円) である。この MSET/1 についてのシミュレーション結果を表-9 に示すが、この表からわかるとおり、サブシステム 2 において CTO>CTR となっているため、これを合理的機械系とはできなない。したがって、次の機械系として MSET/2 を構成し、その内容を表-10 に示す。MSET/2 の費用  $C_2^*$  は 521.5 (百万円) であり、 $C_2^* < C^*$  であるからシミュレーションを実施し、その結果を表-11 に示す。この表から、すべてのサブシステムにおいて CTO<CTR となっていることがわかる。したがって、MSET/2 を

表-8 機械系群 MSET/1 の内容

サブシステム	列車編成	ジャンボセット	ずり積機	CTP (min)	機械系費用 (百万円)
1	$L_2 + T_2 \times 5$	$D_3 \times 7$	$R_2 \times 1$	202	88.2
2	$2 \times (L_2 + T_1 \times 9)$	$D_2 \times 11$	$S_1 \times 2$	274	118.3
3	$L_1 + T_1 \times 5$	$D_3 \times 1$	$S_1 \times 1$	175	40.2
4	$L_2 + T_1 \times 9$	$D_1 \times 4$	$S_1 \times 1$	188	52.6
5	$2 \times (L_2 + T_4 \times 4)$	$D_1 \times 5$	$S_1 \times 1$	276	86.1
6	$3 \times (L_1 + P_1 \times 1)$			462	84.5
7	$L_1 + P_1 \times 1$			331	22.9
8	$L_1 + P_2 \times 1$			341	26.0
					518.8

表-9 ケース P 300=MSET/1 のシミュレーション結果  
(単位: min)

ケース	サブシステム	CTO	CTP	CTR	$\frac{d}{(CTO-CTP)}$	$\frac{D}{(CTR-CTO)}$	$\alpha(\%) (100 \times \frac{d}{CTP})$	判定
P 300	1	208	202	210	6	2	3.0	○
	2	284	274	281	10	-3	3.6	×
	3	183	175	187	8	4	4.6	○
	4	192	188	200	4	8	2.1	○
MSET/1	5	277	276	300	1	23	0.4	○
	6	582	462	600	120	18	26.0	○
	7	423	331	600	92	177	27.8	○
	8	352	341	600	11	248	3.2	○

表-10 機械系群 MSET/2 の内容

サブシステム	列車編成	ジャンボセット	ずり積機	CTP (min)	機械系費用 (百万円)
1	$L_2 + T_2 \times 5$	$D_3 \times 7$	$R_2 \times 1$	202	88.2
2	$2 \times (L_2 + T_1 \times 9)$	$D_2 \times 12$	$S_1 \times 2$	269	121.0
3	$L_1 + T_1 \times 5$	$D_3 \times 1$	$S_1 \times 1$	175	40.2
4	$L_2 + T_1 \times 9$	$D_1 \times 4$	$S_1 \times 1$	188	52.6
5	$2 \times (L_2 + T_4 \times 4)$	$D_1 \times 5$	$S_1 \times 1$	276	86.1
6	$3 \times (L_1 + P_1 \times 1)$			462	84.5
7	$L_1 + P_1 \times 1$			331	22.9
8	$L_1 + P_2 \times 1$			341	26.0
					521.5

合理的機械系とする。なお、合理的機械系 MSET/2 は初期解より 1830 万円安くなっている。

さて、一般に運搬路そのものの特性はポイント間隔によって規定されることは前述したとおりであるが、作業干渉の程度はこの運搬路特性と密接に関係していることは明らかである。すなわち、ポイント間隔を短くすれば作業干渉による遅れ時間は減少し、逆に長くすれば増大することが予想される。これはポイント間隔が短くなればなるほど列車稼動の自由度が増すということから予想されることである。結局、合理的機械系の費用とポイントに要する費用の間にトレー・ド・オフの関係が成立するものと思われる。そこで、ポイント間隔を変化させて合理的機械系を決定し、その結果について考察を加えることにした。

ポイント間隔を 150 m, 450 m とした場合の合理的機械系を前述のプロセスに従って決定し、その結果を表-12 に示す。この表からポイント間隔 150 m の場合は MSET/1 が、450 m の場合には MSET/2 が合理的機械系となっていることがわかる。ここで、ポイント間隔 150 m, 300 m, 450 m の各ケースについて合理的機械系の費用、ポイントに要する費用、およびこれらの和を全

表-11 ケース P 300=MSET/2 の結果

(単位: min)

ケース	サブシステム	CTO	CTP	CTR	$\frac{d}{(CTO-CTP)}$	$\frac{D}{(CTR-CTO)}$	$\alpha(\%) (100 \times \frac{d}{CTP})$	判定
P 300	1	207	202	210	5	3	2.5	○
	2	281	269	281	12	0	4.5	○
	3	182	175	187	7	5	4.0	○
	4	192	188	200	4	8	2.1	○
MSET/2	5	299	276	300	23	1	8.3	○
	6	583	462	600	121	17	26.2	○
	7	422	331	600	91	178	2.7	○
	8	352	341	600	11	248	3.2	○

表-12 ケース P 150, P 450 の場合の MSET のシミュレーション結果

(単位: min)

ケース	サブシステム	CTO	CTP	CTR	$\frac{d}{(CTO-CTP)}$	$\frac{D}{(CTR-CTO)}$	$\alpha(\%) (100 \times \frac{d}{CTP})$	判定
P 150	1	210	207	210	3	0	1.4	○
	2	278	274	281	4	3	1.5	○
	3	175	175	187	0	12	0.0	○
	4	196	195	200	1	4	0.5	○
MSET/1	5	286	286	300	0	14	0.0	○
	6	597	496	600	101	3	20.4	○
	7	340	331	600	9	260	2.7	○
	8	352	341	600	11	248	3.2	○
P 450	1	203	191	210	12	7	6.3	○
	2	273	251	281	22	8	8.8	○
	3	180	175	187	5	7	2.9	○
	4	196	195	200	1	4	0.5	○
MSET/2	5	288	286	300	2	12	0.7	○
	6	561	423	600	138	39	32.6	○
	7	329	209	600	120	271	57.4	○
	8	359	341	600	18	241	5.3	○

表-13 施工システム全体の費用 (単位:百万円)

ポイント間隔	合理的機械系の総費用	ポイント費用	全体費用
150 m	479.6	33.3	512.9
300 m	521.5	17.3	538.8
450 m	617.3	12.5	629.8

体費用として表-13に示す。ただし、ポイント費用はダイヤモンド・クロッシング1基当たり1.6(百万円)、Y型スライド・ポイント1基当たり1.3(百万円)とし、トンネル延長すべてを施工するのに要する費用とした。この結果、ポイント間隔150mの場合の全体費用が最も安いこと、また、ポイント間隔が増大するに従って機械系費用、全体費用とも増大することが明らかとなった。これはポイント間隔を長くしてポイントに要する費用を減少させるよりも、ポイント間隔を短くして合理的機械系の費用を減少させる方が効果的なことを示している。そこで、現実的ではないがポイント間隔を1列車の占有する長さ、すなわち、下限値として75mに設定し全体費用について考察しておくことにする。この場合には次に示す理由によってシミュレーションを実施する必要のないことが明らかとなる。すなわち、ポイントに要する費用は固定的であり、これを求めるとき65.3(百万円)である。また、作業干渉のまったく発生しない理想的な状態を想定すれば、合理的機械系はその定義や決定プロセスからわかるところより一意的に決定できることになり、SET/1の機械系となる。SET/1の費用は471.5(百万円)であり、これより安価な合理的機械系は存在しない。ここで、全体費用を求めれば536.8(百万円)となり、これはポイント間隔150mの場合の全体費用より高くなっている。したがって、ポイント間隔の変化も含めて全体としての合理的な機械系を決定するという目的からポイント間隔75mのケースについてシミュレーションを実施する必要はない。

以上の結果を総合して図-12に示す。この図からポイント間隔150mの場合の合理的機械系が最も望ましいことが明らかとなる。現実的にはポイント間隔150mから300mくらいの範囲で合理的な施工機械系を決定すれば全体システムとしてもほぼ満足できる施工システムが得られることが判明した。

以上の実際的な検討を通して本研究で提案した合理的な施工機械系の決定プロセスが実際の施工においても有効に機能するであろうことが確認された。ただし、ここで示した実証的研究はあくまでも1つのケース・スタディであり、この機械系決定の方法を実際の工事へ適用する場合にはその都度現場の実状を十分分析するとともに、この方法で求めた機械系計画案に計画立案者の経験情報を総合するという柔軟でより現実的な対応が望まれる。また、ここで提示したシミュレーション・モデルは

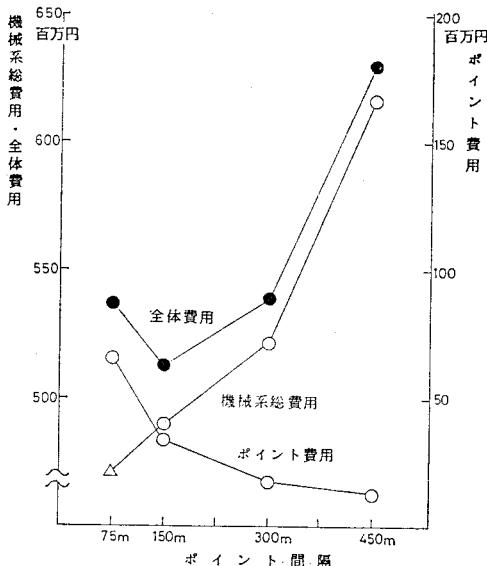


図-12 ポイント間隔と全体費用の関係

計画立案者が従来の方法に基づいて作成した代替案を動的に分析し、新しい知見を得たり、事前の考えあるいは予想を確認するための道具としても十分に機能するものである。

## 5. あとがき

本研究では岩石トンネル工事における施工計画問題の中でも重要かつ支配的と考えられる施工機械系の決定問題について考察し、合理的な施工機械系の決定プロセスに関するシステム論的研究を行ったものである。

従来の施工機械系の決定方法は経験あるいは直感力といった施工計画立案者個人に依存する限られた計画情報に基づくものであるが、このような方法では決定した施工機械系の合目的性を十分に保証することは困難であり、説得力に乏しいといわなければならない。また、従来の方法で重要な経験情報はいまでもなく個人の体験を通じて獲得、蓄積されるものであり、直感力はきわめて不確定な情報であることを考えれば、施工機械系の決定は多分に主観的なものとなってしまうおそれがある。さらに、岩石トンネル工事施工では他の工事と比較して施工空間が著しく制約されるため、作業干渉が発生しやすく、これは運搬線路上において発生するという特徴を有している。同時に、この作業干渉は施工機械系の内容と密接に関係しているため、運搬線路上を流れるずりあるいはコンクリートの動態を事前にとらえて機械系決定のための有効な情報として利用することが重要であると考えた。そこで、本研究ではシステムズ・アナリシスの手法を用いて合理的な施工機械系の決定プロ

セスを設計し、その方法についてとりまとめた。実質的には代替案をシステムティックに作成するために必要となる基礎情報を得るための静的なプロセスと、システム・シミュレーションを用いて施工の動態をとらえ、全体システムのバランスという観点から施工機械系を決定するための動的なプロセスとを組み合わせて全体の合理的な施工機械系を決定できる有効な方法を開発・提案した。なお、本研究では機械の組合せを変数とする決定論的なシミュレーションを採用したが、これは以下の理由によるものである。すなわち、実際現象の中の不確定性には個々の時間、動作の変動と組合せ状態による変動という2種類の不確定性があるが、本研究のように機械系選定を行う場合のシミュレーションではまず組合せ状態に関する不確定性を追求すべきであると考えたこと、また、これら両者の不確定性を配慮したシミュレーションは膨大な計算時間を必要とし事実上不可能であること、さらに、後者の不確定性に比して前者の不確定性は経験的にみて確定値として取り扱っても十分有用な情報が得られると判断できることなどである。しかし、前者の不確定性に対する計画案の感度分析的な検討も作業時間分布や機械の故障確率を現実と乖離することなく設定することができればきわめて有用な情報を得ることが可能であり今後に残された課題であると考えている。また、システム論的なアプローチを基本として経験情報あるいは直感力をもシステムに盛り込み、これらを効果的に利用

できる総合的な施工計画システムを構築していくことも重要な課題である。

なお、本研究をまとめるにあたって終始ご指導とご鞭撻を賜わった京都大学教授・吉川和広先生に深甚なる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、京都大学学位論文、1971。
- 2) 春名 攻・田坂隆一郎：地下鉄開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。
- 3) 河原畑良弘・春名 攻・岡本伸一：トンネル工事における機械系選定のためのシミュレーションの方法についての一考察、昭和53年度年次学術講演会講演概要、土木学会関西支部、1978。
- 4) 河原畑良弘・春名 攻・岡本伸一：コンピュータ・シミュレーションによるトンネル施工システムの解説、第3回電算機利用に関するシンポジウム講演概要、土木学会、1978。
- 5) 河原畑良弘・春名 攻・岡本伸一：岩石トンネル工事における合理的な施工機械系の決定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。
- 6) 河原畑良弘：施工計画・管理システムの合理的な設計法に関する実証的研究、京都大学学位論文、1979。
- 7) 斎藤 徹ほか：トンネル工事ポケット・ブック、山海堂、1974。
- 8) 斎藤 徹：長大鉄道トンネルの施工計画に関する研究、鉄道技術研究報告、No. 965、1975。

(1981.7.13・受付)