

# トンネル工事における工程計画策定方法のシステム化に関する研究

立命館大学 春名 攻  
立命館大学大学院 ○辻井 裕  
立命館大学大学院 小林 隆志

## 1. はじめに

トンネル工事の工程計画案を策定するにあたっては、地山状態をはじめとする不確定要素が多く、掘削工程の開始後に投入機械を変更することは大変困難である。従って、施工機械系の設計を始めとする当初計画案の策定にあたっては、事前に、合目的に不確定性・不確実性に関する十分な検討を行うことが必要であることは言うまでもないことである。

本論文においては、まず、これまでの検討成果として、掘削工事を対象とした工事への投入機械グループの選定を行うたことを目的として開発してきた投入機械選定シミュレーションモデルの概要を述べることにする。さらに、不確定性・不確実性を伴う要素の削減を目指して行った工程計画の方法論的研究について述べることにする。すなわち、シミュレーション実験を系統的に実施するとともに、デンジョンツリーの活用によって実行可能性の高い工程計

画案策定作業を行なうという、方法論的検討成果を取りまとめて述べることにする。

## 2. トンネル工事の工程計画策定時における計画情報の検討

### (1) トンネル工事計画策定時における不確実性の種類とその対処方法

例えば、投入機械の最大施工能力は地山状態に応じて決定されるというように、トンネル工事計画の策定にあたって、最も重要な事前情報の一つに地山状態に関する情報が挙げられる。そこで、トンネル工事施工にあたっては、事前にボーリング調査を始めとする資料収集にもとづき、地山構造に対する検討が行われている。これら情報の精度的問題から、未掘削地山に存在していると考えられる断層や地下水を始めとして、限定された地質構造しか判明していない場合が多いのが現状である。また、複雑かつ膨大な処理プロセスから、工程計画案の策定作業に

対しても、必要十分な検討を行なうには困難な場合も見受けられる。

トンネル工事計画の策定を行うにあたっては、これらの不確実性を検討した上で、最もリスクの小さい計画案を策定していく必要がある。本研究においては、これらの不確実性の要因を図-1に示すような形で分類した。これらの不確実性の検討対象項目には、図-2に簡単に示したように複数の要因が重なり

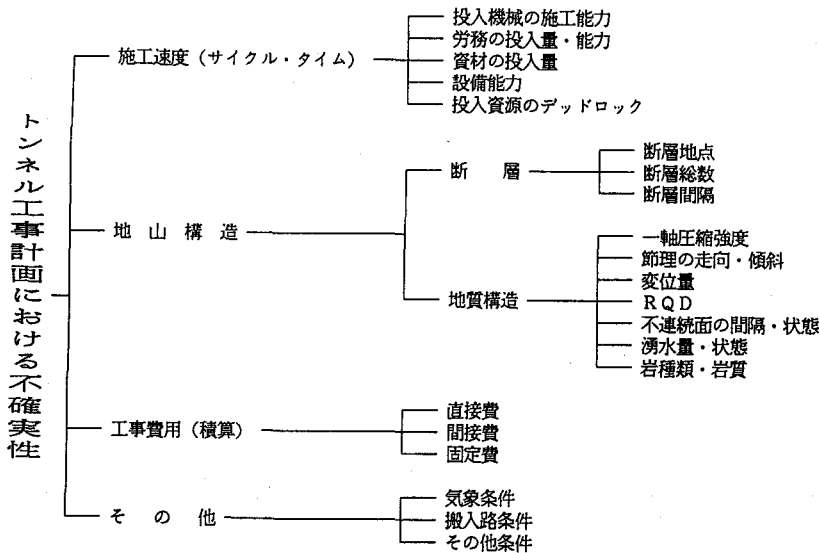


図-1 トンネル工事計画における不確実性検討対象項目の種類

合って生じているものが多いと考えられる。本研究においては、トンネル工事計画の策定において、特に工程に影響を与えると考えられる、①施工速度（サイクル・タイム）と②地山構造を対象として検討を行うこととした。そして、それぞれ個別に検討し、後でこれらの整合性のチェックを行うという方法で不確実性の検討を進めていくこととした。

## （２）施工能力（サイクル・タイム）の不確実性に対する検討方針

トンネル工事における掘削工事の施工過程は、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。そして、サイクル・タイムと1サイクル当たりの進行が明確になれば、切羽の進行速度がわかることになる。トンネル工事においては、施工が片押し的に進行していくことから、切羽の進行速度を施工能力と考えても何ら問題はない。サイクル・タイムを決定する要素としては、前述した地山構造をはじめ投入機械の種類、投入台数、施工能力等が挙げられ、これらの組合せによって決定されることになる。

トンネル坑内という限定された施工空間内での掘削工事の施工が合理的に行われるためには、前述したように施工速度をコンスタントに保つ必要があるといわれている。そのためには、切羽作業の中核をなす掘削作業の合理化を目指すとともに、切羽作業の施工を支援するために運搬車両の効率的運用が必要である。掘削により排出されたずりや吹付けコンクリート等の運搬機械が、掘削機等の施工を妨げないようにするための運搬車両のデッドロックの防止などについても考慮する必要がある。

そこで、本研究においては、サイクル・タイムの構成要素を切羽部と運搬部とに分けて、これらのサイクル・タイム間相互のバランスを検討することとした。

このような方針にもとづいて、後述する投入機械

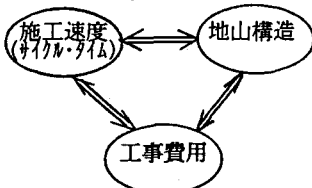


図-2 不確実性要因間の関連性

選定シミュレーションを設計し、シミュレーションの実施を通して施工能力の不確実性を削減を検討するとともに、工程計画

案のリアリティの確保を目指すこととした。

## （３）地山構造における不確実性に対する検討方針

未掘削地山に対する調査方法が色々と開発・改良されているにも関わらず、前述したように、計画情報に対する様々な不確実性を伴っているのが現状である。従って、地山状態を推定し、的確な情報として把握する方法を開発することは重要である。また、工程計画案の策定作業にあたっては、これらの不確実性を極力排除していくことも要求されると考える。

一般に、地山状態は岩盤分類として把握されており、その評価項目としては、岩の圧縮強度や切羽の割目状態、節理の走向・傾斜、湧水量等々が挙げられる。しかし、評価項目が多岐に渡るため、現在のところ、一意的かつ効果的な決定方法は存在していない。このような状況に対し、本研究においては、評価項目間の定量的な検討が可能で信頼性が高いとされている、Bieniawskiの提案したRMR法<sup>2)</sup>を用いることとした。

この方法を適用することによって、次のような方法を開発した。すなわち、事前調査の情報をもとにして、評価式を構成しているパラメータを、計画者の判断基準に基づき一対比較によって主観確率を検討し、これらを逐次変更して行くことにより、地山の地質構造上の変化に対する定量的な情報の作成を行うこととした。

## 3. 工程計画案の策定方法

### （１）工程計画案の策定プロセス

前述の概念にもとづき、本研究における工程計画案策定プロセスを、図-3に示すような形に設計した。

つまり、3段階の検討Stepから成る工程計画システムにおいて、概略工程、施工順序、施工開始日・終了日、投入資源等の工程計画に関する全体的なデザインをトップダウン的に行い、これらの工程計画情報を投入機械選定シミュレーションの入力情報として取り扱うこととした。一方、投入機械選定シミュレーションは、投入機械選定モデルと機械稼働モデルから成り、ボトムアップ的に作業全体を積み上げていき検討を行うこととしている。

まず、投入機械選定モデルにおいては、施工空間の大きさと概略工程の検討にもとづき、実行可能性

が高いと考えられる投入機械グループ構成などの機械情報に関する検討を行なうこととしている。ついで、機械稼働モデルにおいては、設定された機械情報を用いて、イベントシーケンス型のモンテカルロ・シミュレーションをGPSSによって行うこととする。そして、この結果にもとづき、掘削工事におけるサイクル・タイムや稼働状況の分析、稼働情報の作成を行うこととした。なお、本シミュレーションの実施にあたっては、最大能力が要求される区間を満足するように投入機械の組合せを決定すればよいので、工事区間全域を対象としてシミュレーション実験を行なうのではなく、最大能力が要求される区間のみを対象とすればよいこととなる。

一方、地山構造が変化した場合においては、必要に応じて必要に応じて労務資源の追加・変更をはじめ、投入機械の追加・変更（機械変更）あるいは施工法の追加・変更（工法変更）などの手段が講じられることがある。

本研究においては、あらかじめこれら対応策のケースを列挙しておき（事前に現場技術者に対して、ヒアリングを実施している）、計画者の

判断基準にもとづきこれらの対応策を選択し、前述した投入機械選定シミュレーションを通して繰り返して検討を行うこととしている。

## (2) 計画案の評価方法

本研究においては、トンネル工事施工の特徴として、工事費の中で機械費の占める割合が高いことと、工法変更や機械変更を行った際には特殊作業員の追加等労務資源が変更されること等々に着目して、機械損料と労務費を評価指標として取り上げることとした。すなわち、表-1に示す(1), (2)式を使ってこれらの検討を行なうこととした。なお、機械損料については、機械メーカーの公示価格により算定することとした。

表-1 期待値による検討方法

$$E [a_j | \theta] = D_c(a_j) + D_r \times P_r(t) [a_j | \theta] \quad (1)$$

$$\sum_i^n S_i [a_j | \theta] = \sum_i^n (w_i \times S_c(a_j)) + \sum_i^n (w_i \times S_i \times P_r(t) [a_j | \theta]) \quad (2)$$

ここに、 $D_c(a_j)$  : 1 m当りの機械損料 (円/m)  
 $D_r(a_j)$  : 工法変更、機械変更 1 m当りの損失費用 (円/m)  
 $S_i [a_j | \theta]$  : 労務 i の期待値 (円/m)  
 $w_i$  : 労務 i のウェイト (計画者判断)  
 $S_c(a_j)$  : 1 m当り労務 i の費用 (円/m)  
 $S_i(a_j)$  : 工法変更、機械変更 1 m当りの損失費用 (円/m)  
 $P_r(t)$  : 地山状況が変化する生起確率 (計画者の主観確率)

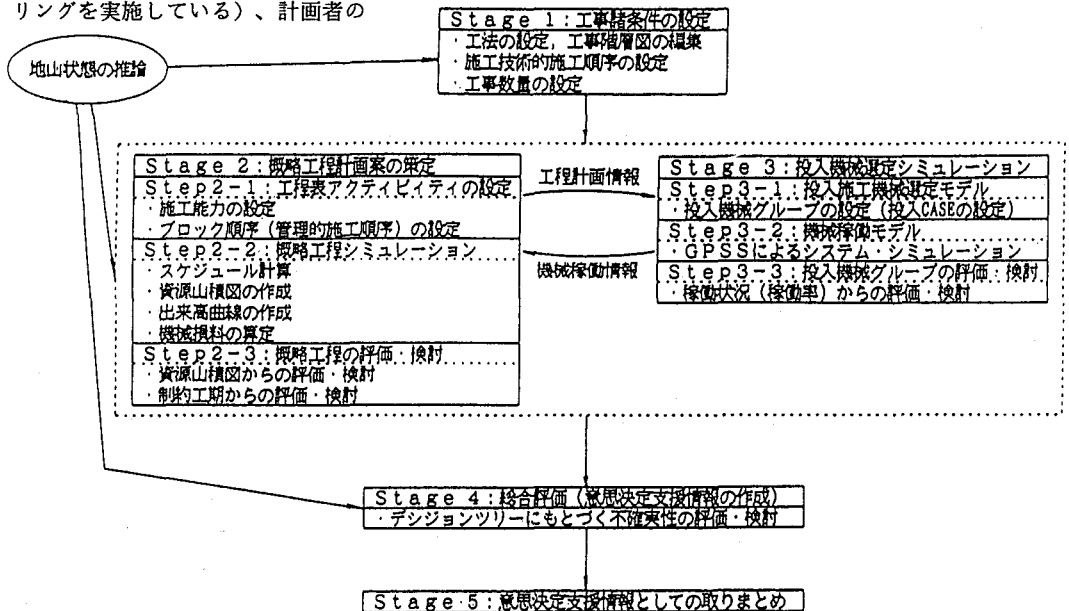


図-3 工程計画案策定フロー

さて、最も合目的な工程計画案としては、上の2式において機械損料の期待値が最小となり、労務費用の期待値が最小となるようなベイズ・リスクを最小化する計画案を採用することとした。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{① } \min E [a_j | \theta] \\ \text{② } \min \sum_i S_i [a_j | \theta] \end{aligned}$$

を同時に満足する計画案を最適案として選択することとした。ただし、これら両方を満足しない場合については、意志決定情報を計画者に提供し、計画者の判断により決定することとしている。

なお、デシジョンツリーを活用した本プロセスにおける検討過程における一例を図-4に示す。

また、本稿の事例においては、地山構造の不確実性に対する検討を、事前調査データをもとにした計画者の主観確率によってのみの検討方法しか示していないが、これに加えて事後確率が明らかになれば、さらにリスクを削減していくことが可能となる。

すなわち、 $\theta$ に関する統計量 $z$ の尤度関数が既知のとき、 $n$ 個のデータが得られると、この情報によって事前情報の主観確率を修正することが可能とな

る。つまり、 $n$ 個のデータからの統計量 $z_n$ の尤度関数を $h [z_n | \theta]$ とすれば、事後確率 $f^*z(z)$ を事前確率 $f'z(z)$ からベイズの定理から、次のようにして推定することができる。

$$f^*z(z) = h [z_n | \theta] f'z(z) \quad (3)$$

そこで、本研究においては、ボーリング調査を取り上げ、過去の実績データから1回毎の調査により得られる不確定要素の解明度を仮定することとした。そして、これを用いて不確定要素の削減と工事費用の関係をパラメトリックに分析をしている。この結果から、不確定要素の削減のための追加調査の規模の検討が可能となるものと考えられる。つまり、斜坑等の掘削を工期や費用の側面からのみ検討するのではなく、不確定要素の削減といった側面からも捉える必要があることを予見した。

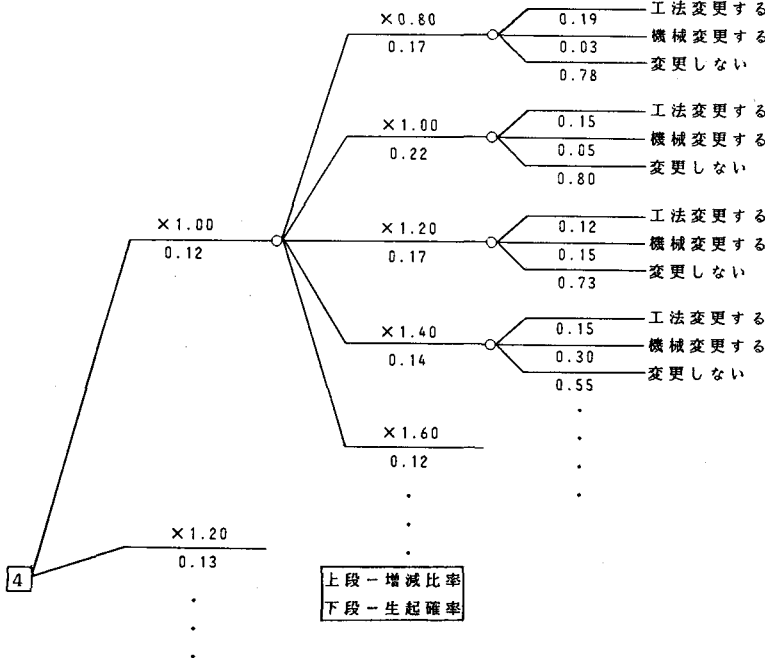
#### 4. おわりに

本研究においては、不確定要素が数多く含まれているトンネル工事を対象として、合目的な投入機械の組合せの決定方法を中心として工程計画案策定方法について検討を行った。なお、紙面の都合上、実

証的検討の詳細な内容については、講演当日に発表することとする。

#### 【参考文献】

- 1) 春名、辻井、小林 ; トンネル工事における工程計画策定方法に関する研究-投入機械選定問題を中心として- ; 平成4年度土木学会関西支部年次学術講演概要 ; 1992年6月
- 2) Bieniawski, Z. T. ; Rock mechanics design in mining and tunneling, Balkema (Rotterdam), 1984



【代替案 $\alpha$ -2No】    【一軸圧縮強度】    【湧水量】    【施工中の変更-有無】

図-4 デシジョンツリーによる検討 (一部分のみを示す)