

(II-8)

工事施工の不確実性を考慮した 工程計画の方法に関するシステム論的研究 — トンネル工事を対象として —

A Study on a Scheduling System Considering Uncertainty in Construction Process
of Tunneling Project

立命館大学理工学部 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**

By Mamoru HARUNA, Yutaka TSUJII, Takashi KOBAYASHI

トンネル工事では、地山状態・構造をはじめとして工事施工における不確定要素が多い。また、掘削工程の開始後では、たとえ不都合を発見したとしても、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段階での工事計画案の策定にあたっては、事前に不確実性・不確実性に関する十分な検討を行っておくことが必要である。

そこで、本研究においては、まず、トンネル工事を構成する全工種の中で、全体工期や工事費の割合が高い掘削工事を検討対象として取り上げ、工事へ投入する施工機械系の選定を行うにあたっての検討材料を効果的に作成することを目的として、施工過程のシミュレーションモデルの開発を行った。さらに、本モデルを活用したシミュレーション実験を系統的に実施するとともに、不確実性の取扱いに関する検討をデシジョンツリーの活用によって、行うという方法論開発の検討を行った。さらに、この段階におけるベイズ確率の導入によって、計画情報の精度の向上が可能なることを明らかにした。

【キーワード】 不確実性、工程計画、システム・シミュレーション、トンネル工事

1. はじめに

山岳トンネルにおいては世界最長といわれている東北新幹線の岩手トンネルをはじめとして、現在、各地でトンネル工事の建設、計画がなされており、トンネル工事の需要は鉄道、道路トンネルとも増加の傾向にある。また、最近のトンネル工事施工は、急速化施工や大断面化、大深度化をはじめとした施工諸条件の複雑化、多用化が進むとともに、技術革新や新技術の導入が著しい。しかし、トンネル工事

施工においては、投入機械を一旦決定すると地質状態の変化に応じて変化させることは不可能であり、トンネル延長を通じて固定的なものとなる。つまり、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り、当初計画案の策定時においては、未掘削地山の地質状態をはじめとする不確定要素が数多く含まれていることから、事前に十分な検討をシステムティックに行うことが重要である。

そこで、本研究においては、まず、トンネル工事を構成する全工種の中でも、全体工期や工事費の割合が高い、掘削工事を対象として、工事へ投入する施工機械系の選定を行うための施工過程の実験的検討を目指したシミュレーションモデルの開発を行った。さらに、本モデルを活用した、シミュレーション実験を系統的に実施するとともに、不確実性のこ

* 正 員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)

** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(同上)

の結果にもとづいて取扱いに関する検討を行うにあたり、デシ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うという、方法論の検討を行った。さらに、本論文においては、これらの不確実性の要素を削減するための方法論的検討成果を取りまとめて述べることにする。

2. トンネル工事計画における不確実性問題に関する考察

ここでは、工事計画の策定において、その検討プロセスに影響を与える不確実性に関する要因を考察し、これら不確実性に起因する問題を合目的に処理していくための施工計画システム開発のための検討を行っていくことにする。

(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。つまり、掘削対象となる地山状態が工法決定の支配的要因となるとともに、工程計画案策定時における施工速度の決定にとっても重要な要因となる。特に、断層や破碎帯、湧水等の自然条件は工事施工にとって克服すべき最

大の課題である。しかし、この地質状態をトンネル工事延長全体にわたって詳細に知ることは、ボーリング調査をはじめとする地質調査の技術的問題と経済的問題の双方からの制約を受けるため、地質情報の精度の問題が生じ、非常に困難である。

そこで、計画段階で知り得る限りの地山情報を活用して施工機械系を決定することになる。しかし、従来の検討方法では、断層や破碎帯等の地質を対象として工事計画を策定するのではなく、平均的なものあるいはトンネル工事延長に占める割合が最も多い地質に対して策定されるのが一般的であった。²⁾ また、工事を構成する作業の不確実性として、作業の所要時間の不確実性と(管理的な)順序関係の不確実性が挙げられる。

ここに、計画者が地山情報を判断することの難しさと、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うための困難さが理解される。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ことが必要であると考ええる。

そこで、本研究においては、サイクル作業が繰り返行われるというトンネル工事施工の特性に着目して、施工工程の進捗プロセスに従って工事施工の

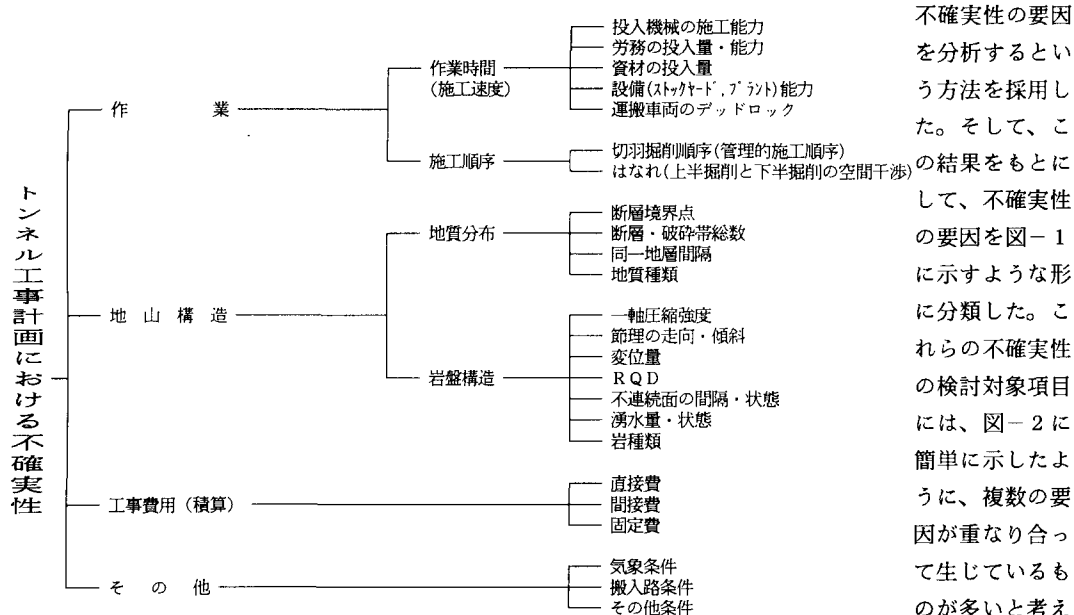


図-1 トンネル工事計画における不確実性要因の種類

て生じているものが多いと考えられる。

以上の考察から、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）施工速度（サイクル・タイム）の不確実性に対する検討方針

前述したように、作業の不確実性としては、作業の所要時間と管理的施工順序の２種類の不確実性が挙げられる。これまで、前者については、確率PERTやモンテカルロ型のシステム・シミュレーションモデルを活用した方法が、後者についてはブランチ・バウンド法を活用した方法等が研究されてきた。¹⁾ 本研究においては、前者のシステム・シミュレーションの方法を導入することにより、これらの検討を行うこととした。

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速度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。²⁾

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、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

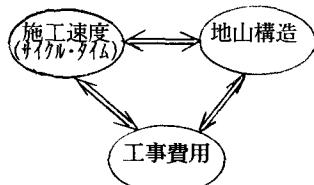


図-2 不確実性要因間の関連性

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。

一方、ベンチカット工法が採用されるような場合においては、施工性、安全性等を考慮して決定される、上半掘削と下半掘削とのはなれをどれぐらいに保つのかという空間干渉の問題がある。トンネル工事の場合は、追い抜き禁止型の順序付けモデルになるものと考えられるが、タイムラグやその他の制約条件から非線形モデルとなることが知られている。¹⁾ 近年のトンネル工事の掘削方式の主流が全段面掘削あるいは、ミニベンチカット掘削であることに着目して、ここでは、無理に高度化したり、自動化されたシステムとはせずに、システム・シミュレーションと座標式工程モデル²⁾との併用により、山均しの概念にもとづくヒューリスティックな方法で検討を行うこととした。

このような方針にもとづいて、後述する投入機械選定シミュレーションを設計し、シミュレーション実験を行うことにより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）岩盤状態における不確実性に対する検討方針

地質調査の方法が色々と開発・改良されているにも関わらず、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、地山構造を推定し、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。

地山構造は、図-1にも示したように地質分布と岩盤状態の２種類に分類される。地質分布は、断層や破碎帯等のようにトンネル工事計画を策定する上で、投入機械の選定をはじめ支保パターンを決定する上で非常に大きな要因となる。一方、岩盤状態は、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、投入機械の施工能力を決定する上での重要な要因である。これら不確実性の削減のため、図-3に示すような方法を開

発した。

a) 地質分布の不確実性に対する検討方針

一般に、地質分布はボーリング調査や物理探査等により作成された地質断面図として把握されている。この地質断面図は、ボーリングデータを整理してボーリング柱状図として表し、そこから地質境界線を表示する作業を通して作成される。一般的には、自在定規や曲線定規等で地質の境界点を結んでいるのが多いが、この方法で行うと、技術者の経験が活かされる反面、技術者によって異なったものが作成される可能性がある。そこに不確実性の要因が存在していることとなる。そこで、本研究では、技術者の相違をなくすことと、この作業の合理化を目指して、3次スプライン関数を導入することとした。スプライン関数は、グラフのプロット間の補間等に用いられる区分的多項関数であり、これを用いることにより各境界点を自然な滑らかな曲線で結ぶことが可能となる。⁸⁾ つまり、少ないデータ数でより精度の高い地層面の把握が可能となるとともに、このスプライン関数を積分することにより、ずり量の計算を行うことが可能となる。なお、土被りが深い断層によっては、スプラインとならない場合もあることから、従来の方法（最小二乗法による平面方程式の決定）も併用することとした。

b) 岩盤状態における不確実性の検討方針

岩盤状態の評価項目は、一軸圧縮強度や走向・傾斜のように定量的に表現することが可能な情報と風化の程度等のように定性的にしか表現できない情報とが混在している。一軸圧縮強度や湧水量に対しては、有限要素法に代表されるPhysicalモデルの導入により予測を行うことが可能である。一方、定性的

な項目をはじめとしてこれらの評価項目を総合的に予測していく方法は、精度の問題を含めて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(Rock Mechanics Rating)システム⁴⁾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、地山の岩盤状態の変化に対する定量的な情報の作成を行うこととした。

また、ここで得られた情報をデータベースとしてストックしておき、掘削工事の進捗に伴って得られる切羽情報と併用することによって、工事管理にも適用が可能であると考えた。

3. 工程計画案の策定方法に関する考察

(1) 工程計画案の策定プロセス

以上の概念にもとづき、本研究における工程計画案策定プロセスを、図-4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で行い、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。（工程計画システムの詳細については、例えば文献7)を参照されたい）

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、ボトムアップにより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、施工空間の大きさや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系の組合わせに関する機械情報の設定・検討を行うこととしている。次いで、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、システム・シミュレーションにより、投入機械の稼働状況の分析をはじめ稼働

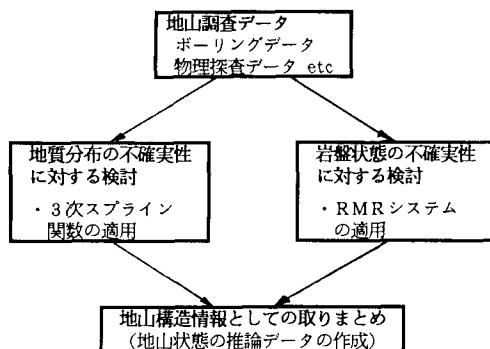


図-3 地山構造における不確実性の検討プロセス

情報の作成を行うこととした。

そして、これらの工程計画情報と地山状態の推論情報とを、デシジョンツリーの作成を通して意思決定支援情報として取りまとめることとした。

(2) 機械稼働モデルの開発

本研究では、前述したように、作業時間の不確実性の検討を行うために投入機械選定シミュレーションの方法を採用することとした。このときのシミュレーションモデルの設計方法としては、現在のところ、次の2つの方法がある。

まず、第一の方法は、作業時間のある種の確率分布として与えることにより、確率論的に取り扱う方法である。この方法はシステム全体の挙動をマクロ的に分析する場合は極めて有効な方法である。しか

し、この場合、論理的な作業時間分布が実際の作業時間をどれほど正確に表現できるかというあてはめの精度が問題となる。また、作業条件の均一性や十分なデータがそろわない場合が多いと考えられる。³⁾

もう一つの方法は、作業時間のばらつきを発生させるメカニズムをシステム・モデル内に組み込む方法である。²⁾ 個々の作業時間のばらつきとそのばらつきの累積が全体システムの評価にならないほど小さい作業要素に分割することができ、これらの作業要素間の関係が論理的に定義づけられる場合は、有効である。しかし、この場合はばらつきを発生させるメカニズムをどの程度まで論理モデルとして表現できるかという問題がある。つまり、システムとそれをとりまく環境が様々な変化した場合に作業間の

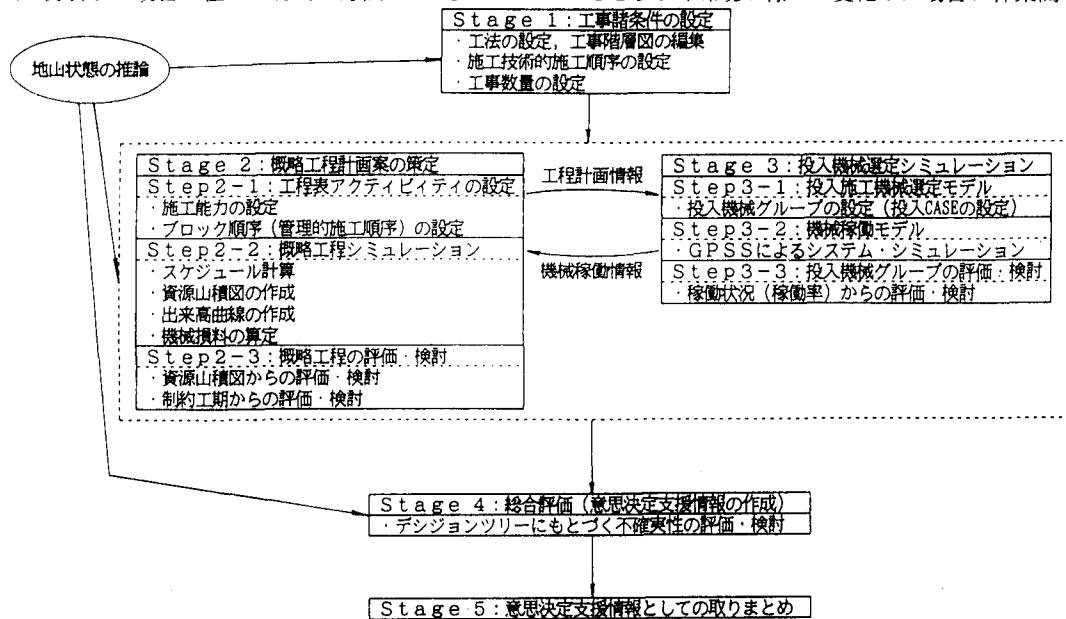


図-4 工程計画案策定プロセス

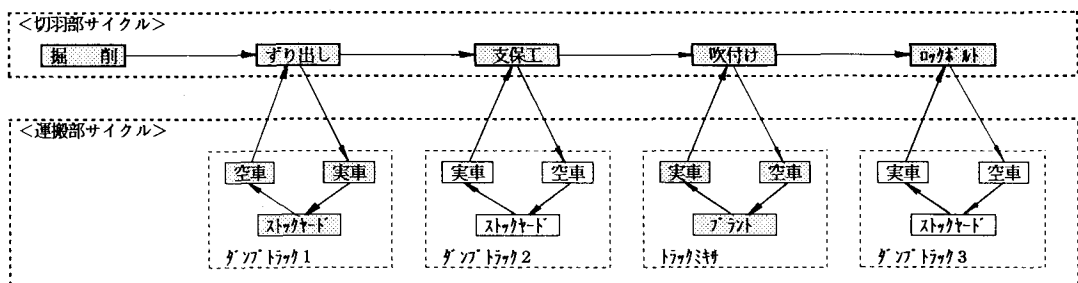


図-5 切羽部サイクルと運搬部サイクルの関連 (タイヤ工法の場合)

稼働モデルの対象作業

関係がどのように変化するかを正確に記述することが可能かという問題である。実際的に、あらゆる状態に対応できるものをあらかじめ準備することは不可能である。従って、問題が発生すればその都度モデルを修正していく必要がある。

以上の考察にもとづき、本研究においては、これら2つの方法を混成した方法でモデル開発を行うこととした。すなわち、図-5に示すように掘削作業を中心とする切羽作業に対しては、前者の方法を採用することとした。一方、ダンプトラックやトラックミキサ等の運搬作業においては、トンネル坑内が極めて限定された空間であることから、図-6に示すような運搬車両のデッドロック状態が生じる可能性がある。また、運搬車両は、複雑な挙動を示すことが

多い。以上のことから、運行状態に対しての検討を行う必要がある。そこで、後者の方法によって検討を行うこととした。

そして、これら切羽部と運搬部の両者の作業間の干渉に対しての検討を加えることによって、サイクル・タイムを決定することとした。

以上の検討をもとにして、イベントシーケンス型のモンテカルロ・シミュレーションによりモデル分析を行うこととした。近年、GPSS, SIMSCRIPT, SLAM II等様々なシミュレーション言語が開発されてきているが、本研究においては、モデルの構築が比較的容易でFORTRANとの併用が可能なGPSSを用いることとした。なお、稼働シミュレーション（シミュレータ）における入出力情報を図-7に示す。

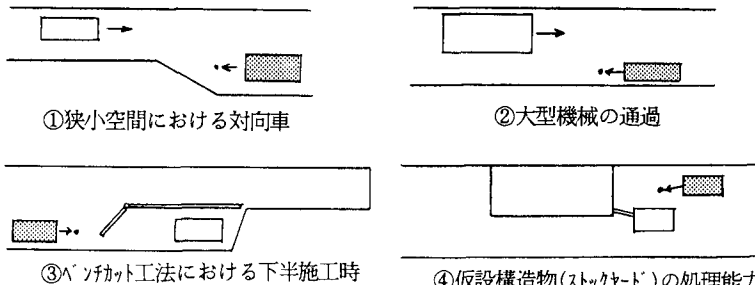


図-6 デッドロックの一例

(3) 工法変更、機械変更時の選定モデルの開発

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。

これらの対応策の実施にあたっては、制約工期を満足することは勿論、工事費用の増加

（あるいは、減少）を生じることから、その増加を最低限に納めるようにする必要がある。そこで、現場技術者に対して、これらの対応策とその判断方法に対してヒアリングを実施した。その結果、対応策を表-1のようにとりまとめた。また、その判断基準の明確化と意思決定の合目性を確保するために、過去に適用事例があるAHPモデル（階層化意思決定法）⁶⁾を活用することとした。

(4) 工程計画案の評価方法

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、

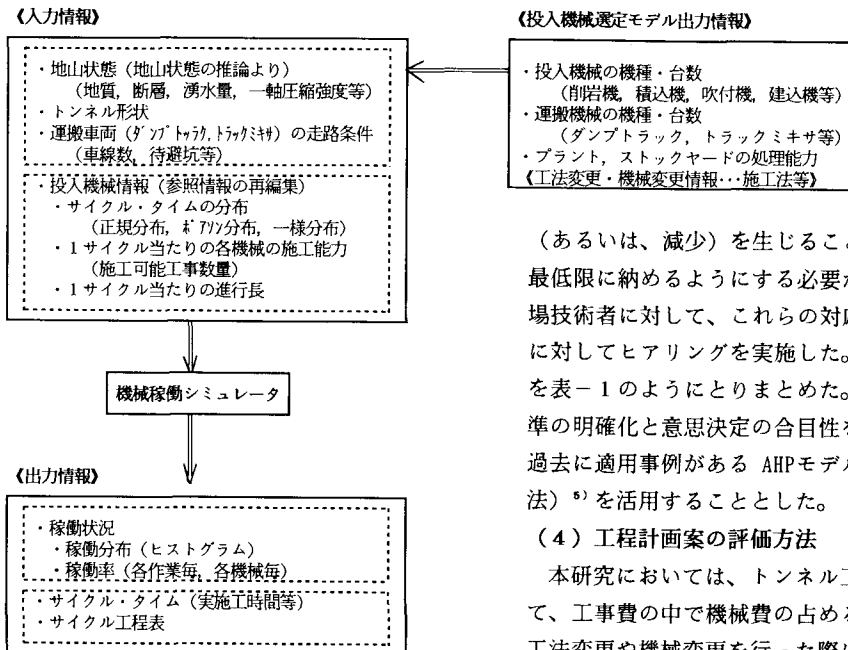


図-7 機械稼働シミュレータにおける入出力情報

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-2に示す(1)、(2)式を使ってこれらの検討を行うこととした。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 地山構造が変化したときの対応策(一例)

工 法 の 変 更	掘削工法の変更	静的破碎工法（SD工法等） 低振動発破工法	工 法 の 変 更	鏡面の安定化	鏡吹付けコンクリート フェイスボーリング 垂直ボルト
	施工上の変更	ベンチ長の変更 1 掘削長の変更 核残し リングカット インバートの施工 掘削断面積の変更 断面分割数の変更		湧水対策	釜場と集水ポンプの設置
				湧水対策 (滞水時における)	薬液注入工法（直接パッカー法） 薬液注入工法（二重管ダブルパッカー法） 薬液注入工法（二重管ロッド法） 薬液注入工法（単管ロッド法） ウェルポイント ディープウェル 水抜きボーリング
	天端の安定化	縫地ボルト フォアパイリング 斜め打ちボルト 増しボルト 増し吹付けコンクリート ミニパイプグループ		掘削機械の変更	油圧ジャンボ（蜂の巣状削孔等） 自由断面削岩機 割岩削岩機（ブレーカ） スロット削孔機

注) 上記工法、機械の変更に従って支保工等の作業も変更する。また、掘削機械の変更は、これら機械の併用も含む。

表-2 期待値による評価方法

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

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

ここに、 $E[a_j | \theta]$: 1m当りの機械損料期待値(円/m)
 $D_e(a_j)$: 1m当りの機械損料(円/m)
 $D_r(a_j)$: 工法変更、機械変更1m当りの損失費用(円/m)
 $S_i[a_j | \theta]$: 労務iの労務費期待値(円/m)
 w_i : 労務iのウェイト(計画者判断)
 $S_e(a_j)$: 1m当り労務iの費用(円/m)
 $S_r(a_j)$: 工法変更、機械変更1m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)

$$\textcircled{1} \min E[a_j | \theta]$$

$$\textcircled{2} \min \sum_i^n S_i[a_j | \theta]$$

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。

5. モデルの適用に関する実証的検討

(1) 対象工事の概要

対象工事とするトンネル工事は、鉄道トンネルであり、制約工期は4年2カ月である。掘削方式としては、近隣の振動・環境対策等の関係から、機械掘削を採用している。また、構造上の特徴として、複線部と単線部に分けられ、ずり出し方式として前者はタイヤ工法、後者はレール工法を

表-3 投入機械の組合わせ(標準時; 地山構造が全く変化しない場合)

CASE	複 線 部			単 線 部		
	自由断面削岩機	サイドダンプローダ	ダンプトラック	自由断面削岩機	ダンプトラック	レール掘削機
1	A社 1	1.5m ³ 1	2	C社 1	0.4m ³ 1	5
2	A社 1	2.3m ³ 1	3	C社 1	0.4m ³ 1	6
3	A社 1	1.5m ³ 1	4	D社 1	0.6m ³ 1	5
4	A社 1	1.5m ³ 1	3	D社 1	0.4m ³ 1	5
5	B社 1	1.5m ³ 1	4	C社 1	0.6m ³ 1	5
6	B社 1	1.5m ³ 1	3	C社 1	0.6m ³ 1	3
7	B社 1	2.3m ³ 1	3	D社 1	0.4m ³ 1	6
8	B社 1	1.5m ³ 1	2	D社 1	0.4m ³ 1	4

注) ダンプトラックについては、切羽～ストックヤード間を往復するものに対して検討を行っている。
(坑内ストックヤード～ずり捨て場間は、検討対象外である。)

表-4 地山構造を決定する検討項目の範囲

項 目	可能性の範囲**	当初案策定時
一軸圧縮強度	0.6~4.0	35 MPa
湧 水 量	0.6~3.0	40 t/hr
R Q D	0.6~3.0	40 %
節理の走向・傾斜*	1 ~ 5	2

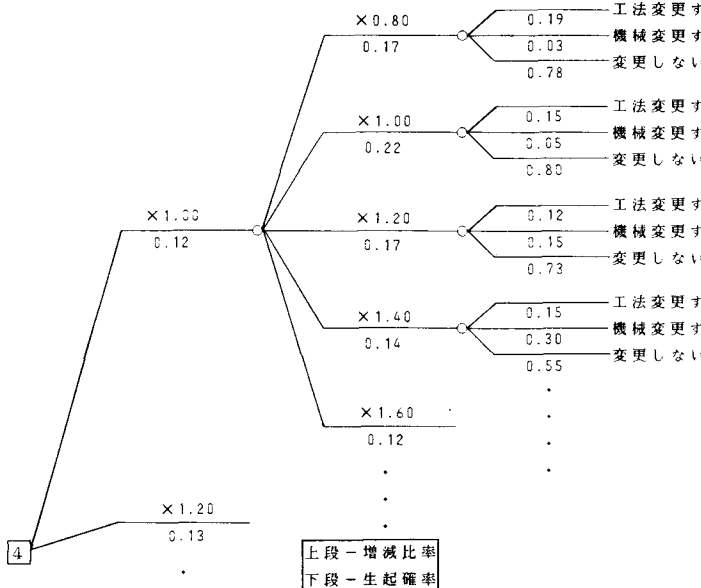
*: 評点による。
 **: 当初案策定時=1.0
 (複線部のみを示している)

表-5 検討結果

CASE	掘削工期(日)*	全体工期(日)**	切羽関係機械損料(万円/m)	切羽関係機械損料期待値(万円/m)	労務資源費用期待値(万円/m)
1	1030	1460	21.7	33.1	5.65
2	969	1401	23.6	34.4	6.32
3	995	1434	22.3	33.3	5.90
4	1017	1430	22.0	32.3	5.28
5	989	1418	22.5	33.8	5.86
6	1023	1453	23.9	35.7	6.12
7	972	1398	23.2	34.1	6.05
8	1027	1446	22.0	33.3	5.94

*: 標準時における工期(斜坑掘削工事を含む)。

** : 標準時における工期(覆工コンクリート工事等その他工種を含む)。



【代替案7~2No】

【一軸圧縮強度】

【湧水量】

【施工中の変更-有無】

図-8 デシジョンツリーによる検討(一部分のみを示す)

採用しており、トンネル延長は斜坑工事を含めて2,175.0mとなっている。地質区分は、J Rの地山区分方式⁵⁾でI_N(特)~II_Nに分類されており、地質変化は少ないものと考えられているが、構造上の特徴から断面変化が多い。

(2) 掘削工事への適用

ここでは、上述した対象工事において、本研究で開発したモデルの適用事例について述べることとする。前述したプロセスに従って、標準状態における

投入機械の組合せを表-3に示

すような、8ケース(但し、CASE1は、当初策定した概略工程計画における投入機械である)に絞り込んだ。

続いて、地山状態の判断過程における不確実性に対する検討を行うこととしたが、本研究では、先に現場技術者に対して、ヒアリングを実施している。その結果、今回の対象事例においては、特に不確実性の高い問題点として、一軸圧縮強度と湧水量、R Q D、節理の走向・傾斜

の4項目に集約することができ

た。また、岩盤状態が変化する可能性の範囲について、当初計画時状態を1.0とすることによって、増減比率を決定し、

これらを表-4に整理した。なお、これらの生起確率P_r(t)については、

一対比較を行うことにより整理している。結果集合としては、①工法変更、②機械変更、③変更なしの3タイプを想定し、地

山状態に応じた機械選定シミュレーションを行うことにより、機械損料と

労務費を算出した。

以上の入力情報をもと

にして、デシジョンツリーを図-8のように作成し、機械損料と労務費の期待値を求めたところ、表-5に示すように、ケース4の投入機械系において、期待値が最小となることから、この組合せを望ましい

計画案として採用することとした。なお、このときにおける概略工程表を図-9に示す。

6. 不確実性の削減方法に関する考察

(1) ベイズ確率の導入

ここまで、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を示してきた。これに加えて事後確率が明らかになれば、さらに不確実性要素の削減していき、リスクをより小さくする工程計画案の策定が可能になる。

そこで、本研究においては、ベイズ確率を導入することによって、検討を行うこととした。すなわち、 θ 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

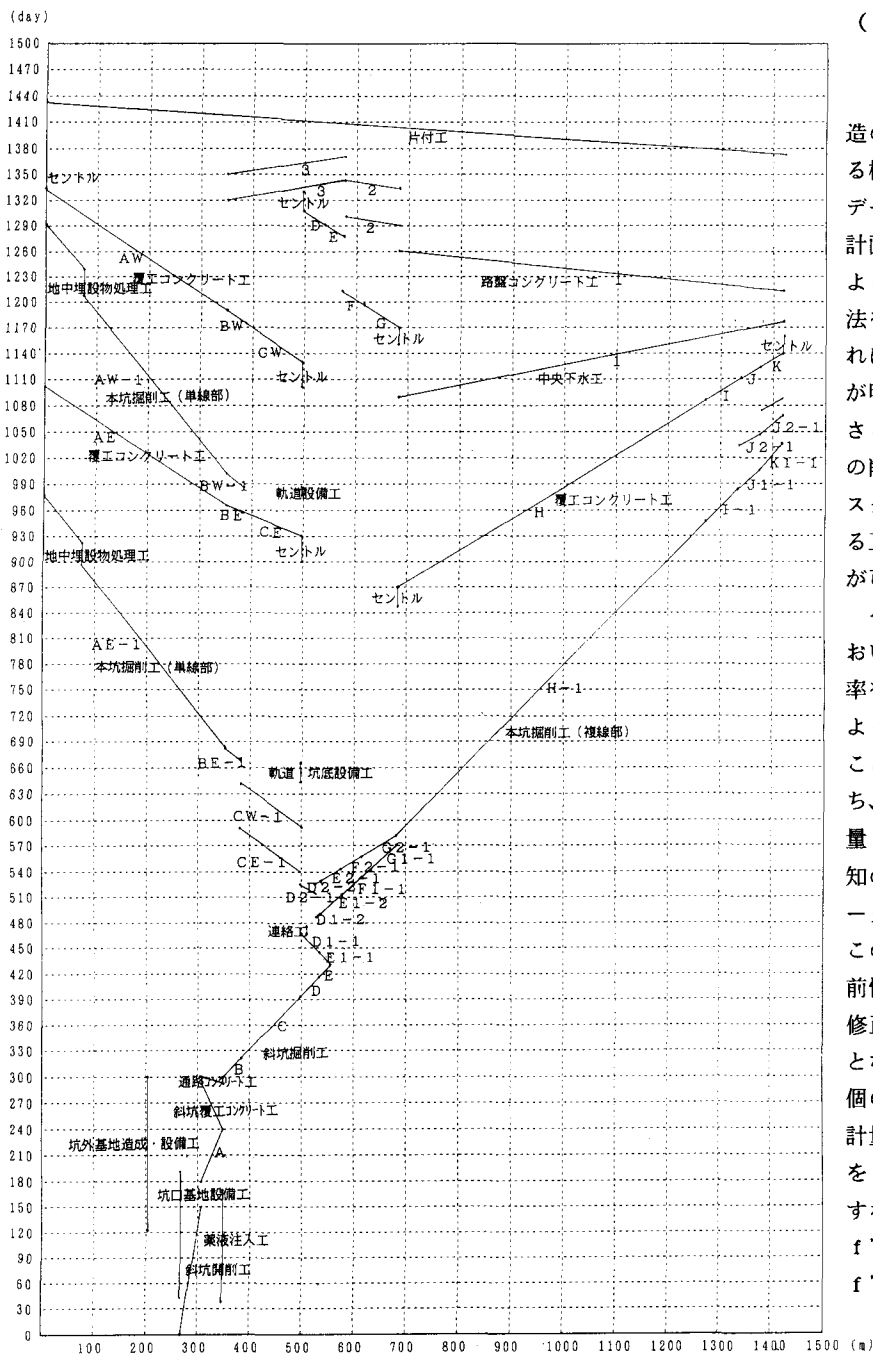


図-9 概略工程計画案 (座標式工程表)

きる。

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

(2) ボーリング調査を対象とした実証的考察

ボーリング調査は、地表踏査によって地山構造の解明が困難であると考えられる地点を中心として実施される。従って、地山構造が異なる工事を単純に比較することは難しい。ここでは、事前確率と事後確率の差異を比較することを目的としていることから、次のような方法によって行うこととした。すなわち、鉛直ボーリング調査を取り上げ、過去の150例の施工実績データを回帰分析によって、1回毎の調査により得られる不確定要素の解明度を図-10に示すような関係として仮定することとした。^(注)

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行った。図-11に示す結果から、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。従って、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う側面からも捉える必要があることが予見された。

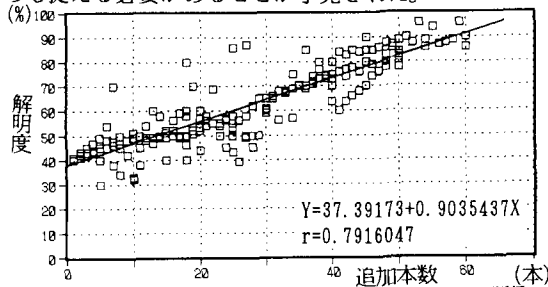


図-10 ボーリング調査と不確定要素の解明度の関係

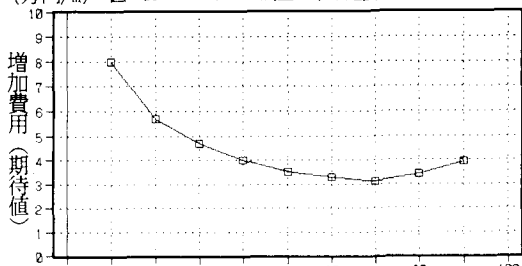


図-11 不確定要素の解明度と増加費用 (期待値) の関係

7. おわりに

本研究においては、工事計画作業での計画者の判断過程における不確定要素が数多く含まれているト

^(注) 本研究では、工事開始前の調査時における地質断面図と竣工後の地質断面図を比較して、竣工後の地質分布を100%として地質分布状態の整合の度合を表したものを解明度と定義した。

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を目指して、その方法論的検討を行った。この検討をとおして次のような成果を得た。

(1) 掘削工程を対象とした投入機械選定シミュレーションを行うことにより、投入機械の稼働状況の分析を可能とした。さらに、本シミュレーションを実施することにより、これまでに開発を行ってきた工程計画システムの機能の向上のみならず、計画案のリアリティを確保することが可能となった。

(2) デシジョンツリーの作成をとうして、未掘削地山における地質状態の不確実性を考慮することにより、合目的な投入機械の組合せを検討する方法を示した。

今後は、以下の項目について検討を行い、システム機能の向上を図りたいと考えている。

(1) 本研究においては、作業時間と地山構造に対しての不確実性のみを取り扱ったが、工事費用に対しても不確定要素が存在している。従って、工程と連動する工事費用算定の方法について検討を進め、より合目的な工程計画案の策定を目指す必要がある。

(2) 本研究においては、地山構造に関する事前情報の不確実性を削減するための方法として、ベイズ確率の導入を提案した。今回の検討事例においては、ボーリング調査のみを取り上げたが、今後は、不確実性の削減を目指した、斜坑や立坑の掘削計画の策定方法についても検討を行っていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 春名 政; 建設工事における施工管理に関するシステム論的研究, 京都大学博士論文; 1971年 9月
- 2) 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, 京都大学博士論文; 1978年11月
- 3) 畠、太田、中垣、日浦; トンネル掘削の作業時間分布について; 昭和48年度年次学術講演概要; 土木学会関西支部; 1973年 6月
- 4) 例えば、Bieniawski, Z. T.; Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling; Proc. 3rd Cong. ISRM, Vol. IIA; 1974
- 5) 例えば、吉井、林; 建設工事における最適工法選定に関する一考察; 第10回土木計画学研究・講演集; 1987年11月
- 6) NATM工法の調査・設計から施工まで; 土質工学会; 1990年 7月
- 7) 春名、浅海、原田、辻井; トンネル工事を対象とした工程計画・管理方法のシステム化に関する研究; 第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集; 1991年11月
- 8) 谷本、安藤、戸水; 岩盤情報のデータベース化とその応用; 平成4年度年次学術講演概要; 土木学会関西支部; 1992年 6月