

トンネル工事計画の不確実性問題に関する システム論的研究*

A Study on Uncertainty Problem of Construction Planning in Large-scale Tunneling Project*

春名 政**・辻井 裕***・竹林 弘晃****

By Mamoru HARUNA, Yutaka TSUJII, Hiroaki TAKEBAYASHI

1. はじめに

トンネル工事では、地山の状態や地質構造をはじめとして工事施工における不確実性に関わる要因が多い。このため、近年のトンネル工事においては、不確実性の削減を目指して、施工過程での計測情報を活用しての情報化施工が実施されている。しかし、トンネル工事施工においては、一旦投入機械を決定すると、地山状態の変化に応じて機械を変更することは不可能であり、施工延長を通じて固定的になるのが一般的である。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るので、事前に十分な検討をシステマティックかつ客観的に行っておくことが重要となる。本研究グループはこのような決定問題に着目し、施工シミュレーションモデルとデシジョンツリー図を活用して、工事施工の不確実性を考慮した工程計画の策定方法に関する方法論の研究を行ってきた。本論文はこのような研究成果をとりまとめたものである。

本論文においては、このような検討を行うにあたり、まず、トンネル工事施工における不確実性の要因を分析し、その結果を整理することによってこの不確実性の問題を検討する方法について考察した。すなわち、計画検討の手順が明確に定形化されていない問題に対しては、計画検討プロセスにおける意志決定の構造化を行ない、これを活用した知識推論型方法で検討を行うこととした。一方、計画手法が

明確に定形化されている問題に対しては、数理計画法やシステム・シミュレーションの方法を導入することによって、本研究グループが過去に開発したシステム¹⁾の高度化・自動化を図っていくこととした。

本システムは、3. 以下に述べるように、地山構造検討システム、工法選定システム、工程計画システムから成り立っている。以下においては、本システムの開発方針とその構成を述べるとともに、本システム（以下、新システムと呼ぶ）をモデル工事に適用することによって、過去に開発したシステム¹⁾（以下、旧システムと呼ぶ）との比較検討を行ない、新システムの効率性・有効性について検証した。さらに、ベイズ確率の概念を導入し、不確実性の削減のための追加調査の必要性や斜坑・立坑等の決定方法のプロセスについて提案した。

最後に、複数のトンネル工事にこれらの検討成果を適用することにより、新システムの有効性・妥当性の確認を行うとともに、本研究の研究成果を取りまとめて述べることとした。

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と工事計画システムの開発方針

(1) トンネル工事計画策定時における不確実性の種類

トンネル工事においての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、最も重要な事前情報の一つに地山状態に関する情報があげられる。つまり、掘削対象となる地山状態が施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支配要因となる。特に、岩盤分布や断層面・湧水状態等の地山状態は、工事施工にとって克服すべき最大の

* キーワード* 工事計画、トンネル工事、システム開発

** 正員 工博 立命館大学理工学部環境システム工学科教授
(〒525 滋賀県草津市野島町1916 Tel. 0775-61-2736)

*** 正員 工修 兵庫県都市住宅部市街地整備課
(〒650 神戸市中央区下山手通5-10-1 Tel. 078-341-7711)

**** 正員 工修 岡建設技術研究所
(〒540 大阪市中央区大手前1-2-15 Tel. 06-944-7777)

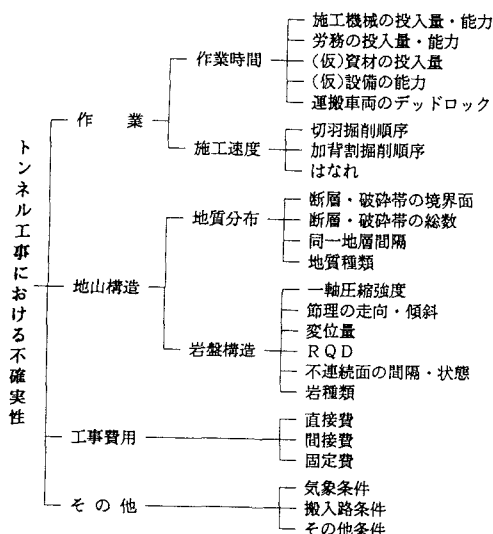


図-1 トンネル工事計画における不確実性問題の種類

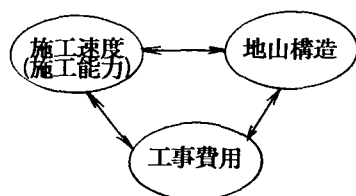


図-2 不確実性問題の要因の関連性

課題である。しかし、この地山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、地質情報の精度的問題が生じるため、非常に困難であるといえる。

そこで、計画段階で知り得る限りの地山情報で施工機械系を決定することが一般的となっている。しかし、従来の工事計画の策定方法は、平均的な岩質、あるいは、トンネル工事延長に占める割合が最も多い岩質に対して策定されるのが一般的であり、個別要素をどこまで検討対象に取り入れるかが課題とされていた⁴⁾。

一方、作業の所要時間や(管理的な)順序関係についても不確定要素が存在している。トンネル工事の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、最もリスクの小さな計画案を策定していくことが必要である。

そこで、ここでは、サイクル作業が繰り返す行わ

れるというトンネル工事施工の特性に着目し、施工工程の進捗プロセスに従って工事施工の不確実性の要因を分析し、図-1に示すような形に整理した。これらの不確実性の要因は、図-2に簡単に示したように複数の要因が重なり合って生じているものが多い。

以上のような考察にもとづき、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、以下の2要因

- ①地山構造(とそれに伴う施工法の選定方法)
- ②(投入機械系の決定による)施工速度

を変動要因の対象として取り上げて検討を行うこととした。

(2) 地山構造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と考えた。つまり、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が要求されると判断したのである。

地山構造は、図-1にも示したように地質分布と岩盤構造の2種類に分類される。まず、地質分布は、断層や破砕帯のようにトンネル工事計画を策定する上で、投入機械の選定は勿論、支保構造を決定する上で非常に大きな要因となる。一方、岩盤構造は一般に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、湧水量等々があげられ、投入機械の施工能力を決定する上での重要な要素である。

a) 地質分布の不確実性に対する検討方針

本研究では、地質分布の構造を明確化するために、技術者による判断の相違をなくすことと検討作業の合理化を目指して、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ように3次スプライン関数を導入することとした(なお、このスプライン関数を積分することにより、効率的にずり量の計算を行うことが可能となる)。

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、表-1に示したように一軸圧縮強度や走向・傾斜のように定量的に表現する

表-1 岩盤状態の評価項目

定量的表現	定性的表現
弾性波速度	岩石の種類
一軸圧縮強度	ハンマー打撃
割れ目間隔	割れ目状態
RQD	風化の程度
湧水量	湧水の程度

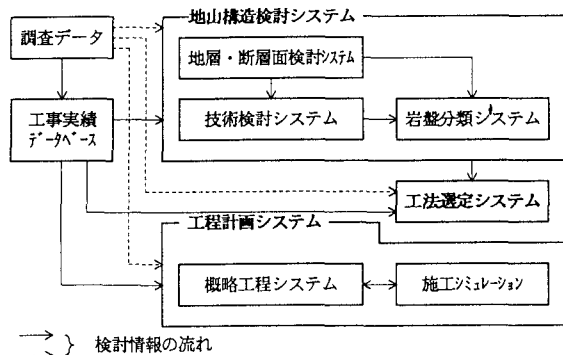


図-3 工事計画システムの構成

ことが可能な情報と、風化の程度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フィジカル・モデルの導入により検討を行うことは可能である。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、精度的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。そこで本研究においては、客観性の確保と説明力のある計画情報の作成のため、この問題解決のためのファジイ理論の導入を行うこととした。

また、ここで得られた情報をデータベース化することにより、この情報と掘削工事の進捗に伴って得られる切羽情報の併用によって、工事管理にも適用が可能であると考えた。

(3) 施工速度（施工能力）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種類の不確実性があげられる。これまで、前者については、確率PERTやモンテカルロ型のシミュレーションモデルを活用した方法が、また後者については、ブランチ・バウンド法を活用した決定方法が研究されてきた^{3) 4)}。

トンネル坑内という限定された施工空間内での工事施工が合理的に行われるためには、施工速度を一定に保つ必要があるといわれている。このためには、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の運搬車両の効率的運用が必要である。そこで、本研究においては、作業の所要時間の不確実性の削減と工事施工のプロセスの合理化・効率的な施工機械の運用を目指して、この検討を行うためにシステム・シミュレーションを導入することとした。

一方、長大トンネルにおいて見られるように工区分割が行なわれているような場合においては、その掘削順序（施工順序）が問題となる。この掘削順序は、技術的施工順序と管理的施工順序に分けることができる。まず、技術的施工順序については、地山構造にもとづく掘削方針により決定されることから、本研究においては、前述した地山構造の不確実性に対する検討方針にもとづいて検討された計画情報によって決定することとした。一方、管理的施工順序については、トンネル工事の施工プロセスの実態からみれば、追い抜き禁止型の順序付けモデル³⁾ともなり得るが、本研究では、ブランチ・バウンド法の適用により検討していくこととした。

3. 工事計画システムの開発

(1) 工事計画システムの概要

本研究においては、工事計画システムを図-3のような形に設計した。すなわち、過去の工事実績を整理した工事実績データベース、地山構造の分析・検討を行う地山構造検査システム、地山構造から施工法や補助法の選定を行う工法選定システム等々と、これらの検討成果を計画者の意思決定情報として取りまとめる工程計画システムにより構成されている。さらに、本システムの開発を行うにあたっては、現場への汎用性を考慮して、パソコンあるいはワークステーションレベルのハードウェアによって構成することとしているが、施工シミュレーションや技術計算のように大規模な計算が必要となるものについては、大型汎用コンピュータの活用により対応するものとしている。なお、本システムのハード構成は図-4に示すとおりである。

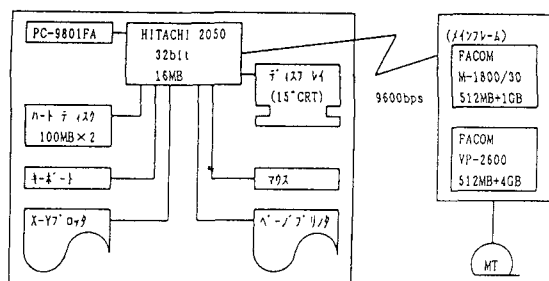
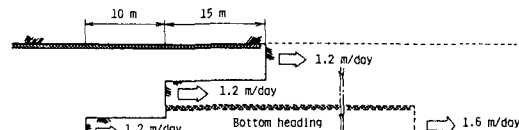
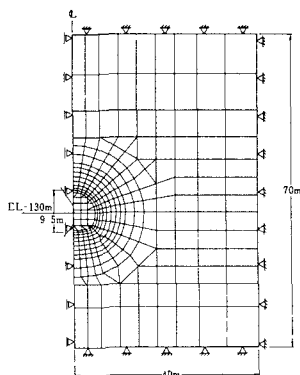


図-4 工事計画システムのハード構成



(1) トンネル断面及び掘削順序（リングカットのある場合）



(2) 2次元有限要素解析の要素分割

図-5 有限要素法による地山のモデル化

(2) 地山構造検討システム

前述したように、本研究においては地山構造の不確実性を地質分布と岩盤構造に分類している。また、地質分布については、前述したように3次スプライン関数の適用により地層面・断層面の検討を行うこととしている。

一方、前述したように岩盤構造は、定量的表現が可能なものと定性的表現が可能なものに分類されるが、定量的表現については、有限要素法に代表されるフィジカル・シミュレーションにより検討するものとした。また、定性的表現については、検討内容の性格によりファジイ理論を導入し、検討していくものとしている。そして、これら両方の検討結果を統合することによって、工法選定や投入機械を決定する計画情報となる岩盤分類を行うこととしている。

a) フィジカル・シミュレーションの概要

本研究において開発したシステムにおいては、地山の応力分布及び湧水量の検討を行うためのフィジカル・シミュレーションとして有限要素法を活用することとしている。

さて、トンネルの掘削部（切羽）周辺は、一般に3次的に広がりを持つ幾何学的形状をしており、さらにその形状は掘削とともに変化する。したがって、単純な2次元問題として取り扱うことには大きな問題がある。しかし、厳密には3次元問題として取り扱う必要があるが、材料特性の不明確さを考慮すれば、ただ単に幾何学的形状のみを厳密に考慮しても無意味である。それよりも、近似的であっても2次元解析において掘削の影響を考慮することのできる解析法の開発が望ましい。この目的のために開発されたモデルとしては、大西・岸本のモデル⁶⁾や桜井・蓮井・近藤のモデル⁸⁾等があり、一部においては、実用化されている。本研究においては、これらのモデルと同様に図-5に示したような形でモデル化を行ない、掘削ステップを考慮した2次元有限要素法により検討していくこととした。

b) 岩盤分類へのファジイ理論の導入

旧システムにおいては、岩盤構造の不確実性を Bieniawski の RMR 法¹²⁾ を活用し、この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もとづいた一対比較によって主観確率を検討し、この主観確率を逐次変更することで、地山構造の変化に対する定量的な情報の作成を行うといった方法をとっている¹⁾。しかし、この方法で検討を行なった場合、岩盤構造が複雑である場合等においては、検討項目が指数的に増加し、計画者の作業量も膨大なものになってしまう。そこで、本研究においては、この不確実性の検討を行うために、ファジイ理論を導入することによって、システムの自動化や高度化を図ることとした。

さて、岩盤構造の不確実性の検討に、ファジイ理論を導入した研究事例には、RMR法を岩盤分類の基準としてファジイ測度とファジイ積分を活用した清水・桜井の方法⁷⁾や、岩盤等級を決定する過程を可能性線形システムでモデル化した鈴木等の方法⁸⁾、ファジイクラスタリングを応用した変状予測モデルを開発した鈴木等の方法⁹⁾等々がある。

表-2 ファジイ岩盤分類の分類要因と判定区分

判定区分	—非常に良好な岩盤—				
	I	II	III	IV	V
X ₁ 弾性波速度 (km/s)	非常に速い (3.4~2)	速い (3.4~4.2)	中程度 (2.4~3.4)	遅い (1.2~2.4)	非常に遅い (1.2)
X ₂ 一軸圧縮強度 (Mpa)	非常に大きい (>250)	大きい (100~250)	中程度 (50~100)	小さい (25~50)	非常に小さい (25)
X ₃ R Q D (%)	非常に良い (>90)	良い (75~90)	普通 (50~75)	悪い (25~50)	非常に悪い (25)
X ₄ 4'~リット 27	非常に良い (>90)	良い (75~90)	普通 (50~75)	悪い (25~40)	非常に悪い (20)
X ₅ 4'~リット 27形状 (角型程度) (cm)	完全な柱状 (>20)	棒状 (10~20)	岩片状 (5~10)	地片状 (1~5)	なし (1)
X ₆ 亀裂本数 (50cm四方)	非常に少ない (1)	少ない (2~3)	普通 (4~5)	多い (6~8)	非常に多い (9)
X ₇ 地山強度比	5	4~5	3~4	2~3	1

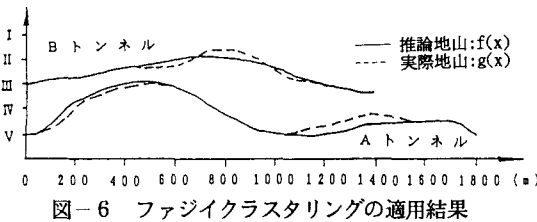


図-6 ファジイクラスタリングの適用結果

本研究においては、トンネルの掘削対象部分をファジイ集合として捉え、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RMR法をベースに開発した分類要因を説明要素とし、鈴木等の方法⁹⁾と同様に、ファジイクラスタリングを活用して、客観性が高く説明力のある岩盤分類を行うこととした。

本検討で用いたファジイ岩盤分類の分類要因と判定区分は、表-2に示すとおりである。なお、ファジイクラスタリングのアルゴリズムとしては、ファジイc-means法を採用した。つまり、施工時の変形状態を境界の曖昧なクラスターに分類し、切羽の各クラスターへの所属度を用いて変状可能性に関するメンバシップ関数を作成するものである。(なお、ファジイc-means法の詳細については、例えば、文献10)を参照されたい。)そして、メンバシップ関数の重心を評価値とし、3次スプライン関数により連続関数として表示し、地山の岩盤構造を表現した。

ここで、推論地山と実際地山の整合性を検討するために、整合度 ρ を次式で定義する(なお、 $f(x)$ と $g(x)$ の交点単位で計算し、総和を求める)。

$$\rho = \sum |f(x) - g(x)| / \sum g(x) \times 100 \dots (1)$$

ここに、 $f(x)$: 推論した地山構造

$g(x)$: 実際の地山構造

| |: 絶対値記号

本研究で開発した方法を実際に施工されたトンネル工事の2例に適用したところ、図-6に示すとおり、Aトンネルで $\rho=3.56$ 、Bトンネルで $\rho=2.56$ と施工過程を的確に再現していることから、本モデルを工事計画システムに取り込むこととした。

(3) 工法選定システムの概要

トンネル工事においては、地山構造に応じてその施工法、投入機械が決定される。さらに、この地山構造が掘削過程において変化した場合においては、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・変更あるいは施工法の追加・変更などの手段が講じられる。

これらの対応策の実施では、制約工期を満足することは勿論、工事費用の増加を最低限に納めるようにする必要がある。旧システムにおいては、現場技術者のヒアリング結果を一对比較により整理し、AHPモデルの活用により検討している。ところが、前述したように、地山構造が複雑であり、補助工法等が多用される場合においては、その検討プロセスは膨大なものとなり、比較検討対象が指数的に増加する可能性が大きい。そこで、このことに対応するために、本研究においては、工法選定エキスパートシステムを以下のように開発した。

一般に、現場技術者の知識は、事実型知識と規則型知識の2種類に分類することができる。まず、事実型知識として分類されるものは現場技術者の間で広く事実として認められている知識である。このような知識は、一般に体系化されているのでフレームモデルにより表現することが可能である。ここでは、地山構造の変化に応じて取られる補助工法について図-7に示すようにフレームモデルとして階層構造として表現することとした。

また、規則型知識は、現場技術者が数多くの工事を通じて得られた判断理論あるいは計画手法である。このような知識は、条件が与えられて結論を導き出すというものであることからIF~THEN形式のプロダクションルールにより表現することとした。

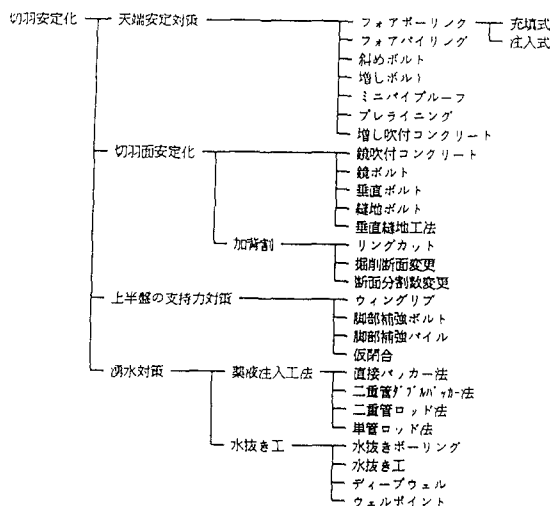


図-7 補助工法のフレイムモデル (一部分)

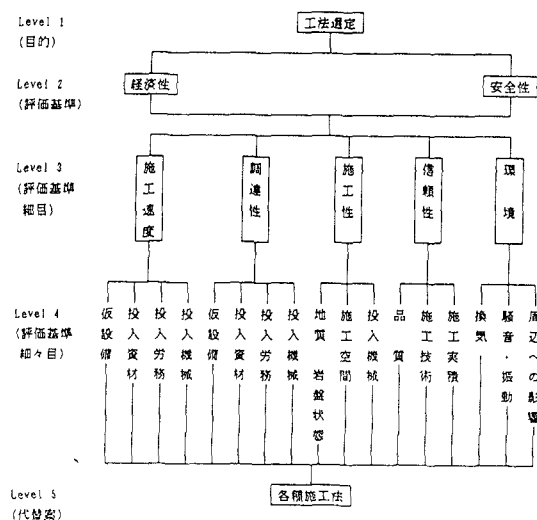


図-8 工法選定の階層図

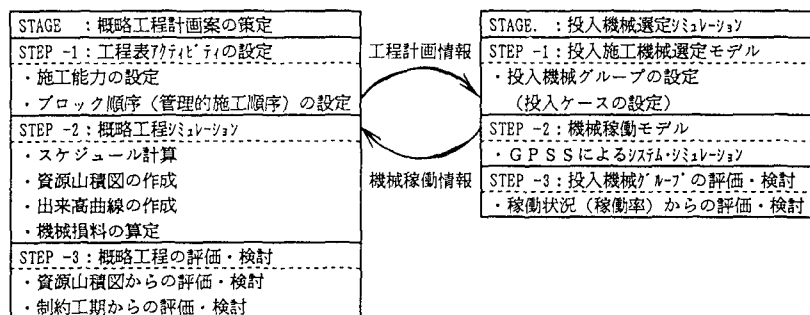


図-9 工程計画システム

また、個々の推論結果の評価を明確にし、妥当性を保証することが必要であることから、図-8に示したような階層図から成るAHPを使って定めた評価テーブルを採用することとした。(なお、序数尺度や名義尺度を間隔尺度へ変換するにあたっては、一対比較が最もよく使われる方法であるが、この方法においては選択肢の数が多くなると、その組み合わせ回数が指数的に増大することが多い。そこで、本研究においては、このための対処方法として斉藤の順序付け法¹¹⁾により計算を行うこととしている。)

なお、エキスパートシステムの構築は、PrologやC言語等により行うことも可能であるが、本システムにおいては、エキスパートツールとして定評のあるES/KERNEL/W¹³⁾を使用することとした。

(4) 工程計画システム

工程計画システムを図-9に示したような形で設計した。つまり、工程計画システムにおいては、工法選定システムにおいて得られた、施工法、投入機械系等の工程計画情報をもとに、概略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ない、これらの工程計画情報を施工シミュレーションへの入力情報として取り扱うこととした。

ここで、施工シミュレーションは、機械稼働モデルとして構築したが、前述までの各プロセスにより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とする計画情報の作成を行うこととしている。なお、機械稼働モデルの構築にあたっては、GPSSを用

いることとした。

管理的施工順序の決定にあたっては、前述したように、順序付けモデルとして、最小工期を与えるモデルとして表-3に示すようなカット概念を用いたブランチ・バウンド法により定式化し、この方法により決定することとしている。なお、カット概念を用いたブラン

表-3 ブランチ・バウンド法による定式化

目的関数： $\lambda = \lambda(P) \rightarrow \min$
制約条件 $P_{ij}^{R1} \in P^{R1}$ $\sum_{i \in R1} \sum_{j \in R1} P_{ij}^{R1} \geq n_1 - r_1$ (競合作業の同時施工許可条件：全体) $\sum_{i \in R1} \sum_{j \in R1} P_{ij}^{R1} \geq n_1 - r_1 \quad (i, j \in C_k)$ (競合作業の同時施工許可条件：カット) $LOOP(P^R) = 0$ (サイクル順序関係の禁止)
記号の説明 P：順序行列 ($P = P^t + P^R$) P^t：技術的順序関係 P^R：管理的順序関係 P_{ij} ($i, j \in P$) = 1 i は j の先行作業 P_{ij}^R ($i, j \in R_1$) 競合作業集合に属する順序行列の要素 r_1：作業グループ1の施工パーティ数 n_1：作業グループ1の競合作業数 C_k：カット k

表-4 新システムと旧システムの比較

	旧システム	新システム
地質分布	地層面・断層面を3次スプラインで決定	地層面・断層面を3次スプラインで決定
岩盤分類	RMR法を活用し、計画者の判断により主観確率を決定 (パターン毎に検討が必要)	RMR法技術検討システムの活用と「ファジィ・ロジック」によりモデル化
工法選定	計画者の判断により一対比較し、AHPにより代替案を検討	工法選定エキスパートシステムにより検討
施工順序 (管理的施工順序)	計画者の判断による	追い抜き禁止型順序付けモデルとして、「ブランチ・バウンド」法を適用
施工能力 (施工シミュレーション)	GPSS	GPSS

表-5 モデル工事の概要 (システムの適用性の検討)

工事名称	鉄道トンネル工事 (複線・単線)
施工延長	2.175m
地山区分	Ⅲ, Ⅳ, V
制約工期	4年2月 (暦日)
備考	斜坑1本 複線部と単線部に分かれる (単線部は並行して2本掘削する)

チ・バウンド法の解法については、図-10に示す通りである。(カット概念を用いたブランチ・バウンド法の詳細については、文献14)を参照されたい。) なお、以上において述べてきた新システムの特徴

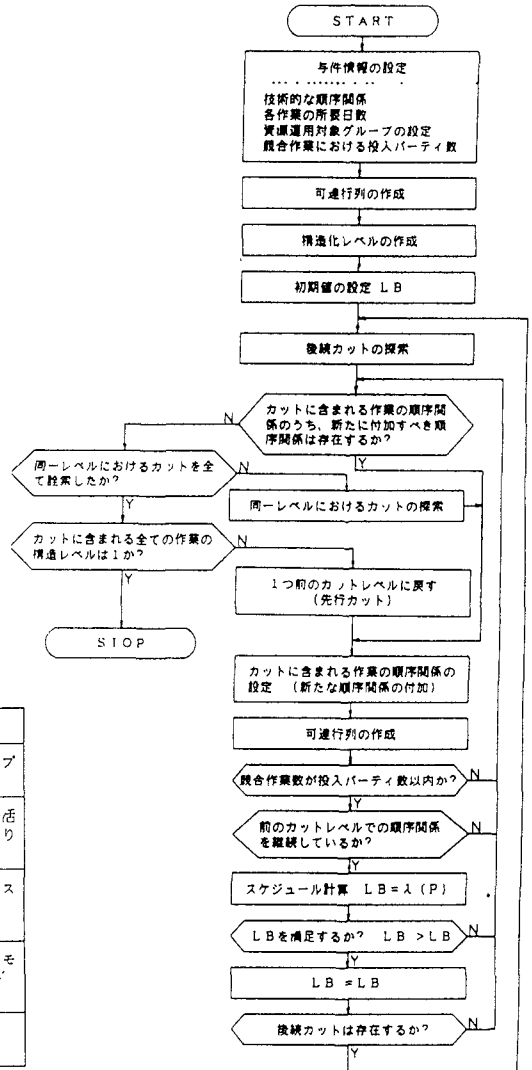


図-10 ブランチ・バウンド法の解析フロー

を旧システムと比較して整理すると表-4に示すとおりになる。

4. モデル工事への適用に関する実証的考察

本研究で開発した新システムを実際工事へ適用するに当たり、表-5に示すような鉄道トンネル工事に対して適用することにより、旧システムとの比較・検討を行った。なお、このトンネル工事は、旧システム開発時における適用事例と同一のものである。

表-6 モデル工事への適用結果

CASE	旧 シ ス テ ム			新 シ ス テ ム			計 算 比
	地山 整合度	工 期 (日)	損料期待値 (円/m ³)	地山 整合度	工 期 (日)	損料期待値 (円/m ³)	
1	4.023	1,460	25.6	3.100	1,457	25.4	1/11.8
2	5.567	1,434	29.7	2.987	1,430	27.6	1/12.6
3	5.480	1,430	23.2	2.012	1,433	23.5	1/10.5
4	3.989	1,411	22.4	1.988	1,400	22.4	1/ 9.7
5	5.601	1,501	23.9	代替案なし			—
6	4.210	1,510	25.8	代替案なし			—
7	4.007	1,468	26.7	代替案なし			—
8	5.013	1,508	24.8	代替案なし			—

注) 計算時間比とは、各CASE毎の新システムと旧システムとの処理時間(データ作成から演算までの総時間)比を示す。

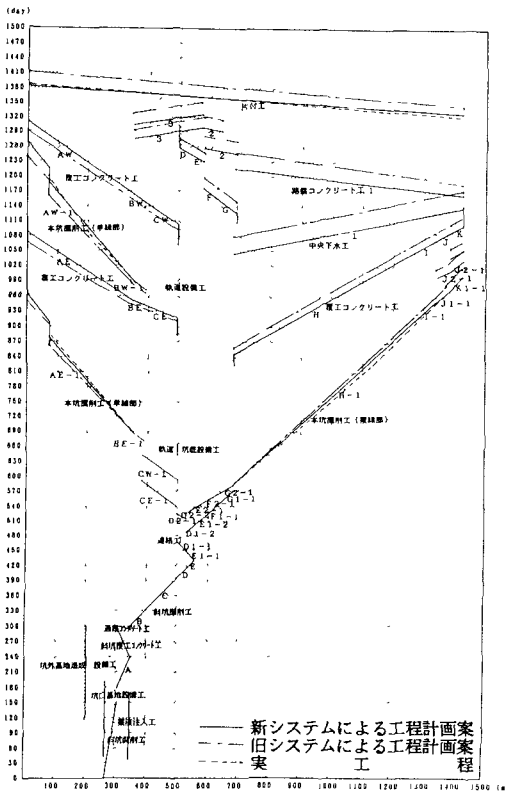


図-11 新システム、旧システムの工程計画案と実工程のオーバーレイの結果

旧システムと新システムの適用結果は、表-6に示す通りである。投入機械系の組合せが、旧システムにおいては8ケース(地山構造の変動が当初計画通りである標準状態時であり、旧システムの場合は、地山構造を逐次変化させていくため、投入機械系の組合せは「8×n 通り:nは地山構造の変化数」ケースのシミュレーションが必要となる)であったが、今

回開発した新システムにおいては、4ケース(新システムの場合は、地山構造の変動を地山構造検討システムで同定するため、4ケースのみのシミュレーションで済む)に絞り込んだ。

ここで、CASE4の計画案を新システムによるアウトプット情報である工程計画案、旧システムによる工程計画案及び、実工程の工程計画をもとに図-11に示すようにオーバーレイした。この結果については、表-6に示すように、新システムによるアウトプット(工程計画案)の方が、より実際の地山構造を的確に表現しているとともに、工期、損料期待値とも旧システムよりも改善されていることが明らかとなった(旧システムについては、整合度の検討は行っていないが、逐次変化させた地山構造の確率分布の2次モーメントを求め、3次スプライン関数により連続関数として表示し、新システムと同様な方法により整合度を求めることとしている)。これは、新システムにおいては、ファジイ理論やエキスパートシステムの導入により、計画者の判断過程の客観性の確保とシステムの自動化が図られていることから、設計代替案の総数も削減されるとともに、この段階における処理時間(入力データの作成時間についても含む)も約1/10以下に削減されている。

4. 不確実性の削減方法に関する考察

地山構造の不確実性の削減するにあたっては、この不確実性の検討を行うための情報量を増加させることによって行うことが可能である。例えば、ボーリング調査や物理探査等の事前調査項目を増やすことによって、情報量を増加させることが可能となる。また、斜坑や立坑、作業坑の掘削による情報量の増加によって、不確実性の削減が可能となる。しかし、前述したように、事前調査数の増加や、斜坑や立坑の掘削を行うことは、技術的問題と経済的問題の双方からの制約を受けることとなる。

(1) ベイズ確率の導入による地山構造の不確実性の削減方法

3. 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検討方法を示した。これに加えて事後確率が明らかになれば、さら

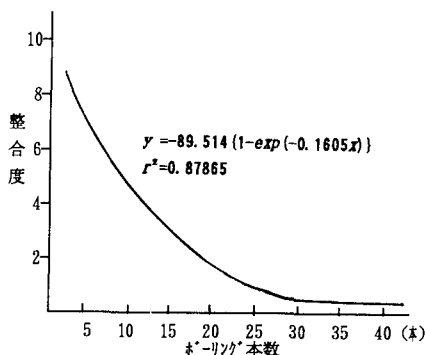


図-12 ボーリング調査と地山構造の整合度の関係

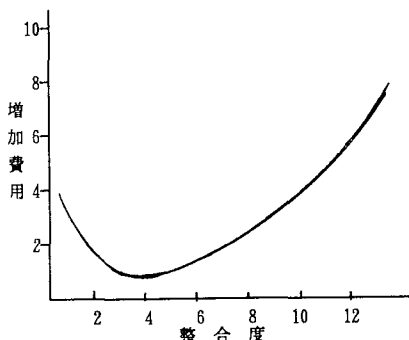


図-13 地山構造の整合度と投入費用の関係

表-7 モデル工事への適用結果（ベイズ確率の適用）

CASE	事前情報を考慮しない場合			事前情報を考慮した場合		
	地山整合度	工期 (日)	損料期待値 (千円/㎡)	地山整合度	工期 (日)	損料期待値 (千円/㎡)
1	3.100	1.457	25.4	2.431	1.387	23.1
2	2.987	1.430	27.6	2.011	1.360	24.7
3	2.012	1.433	23.5	1.463	1.361	20.7
4	1.988	1.400	22.4	1.125	1.329	19.0

に不確実性の要素の削減が可能となり、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次式により修正することが可能となる。

$$f''(z) = h[z|\theta] \times f'(z) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $f''(z)$: 事後確率

$f'(z)$: 事前確率

$h[z|\theta]$: 尤度関数

なお、このベイズ確率については、情報がスカラー、ベクトルのどちらにおいても成立し、また、ファジイな状態においても適用可能である。

(2) ボーリング調査を対象とした分析

ボーリング調査は、地表踏査によって地質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、ボーリング技術者の経験差や地質構造が異なる工事を単純に比較することは難しいが、ここでは、分析的に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50例の施工実績データから1回の調査により得られる不確実性要因についての整合度 ρ について、回帰分析を実施し、図-12に示すような関係として仮定することとした。

そして、これを用いて地山構造の整合度と全体工事に対する増加費用の割合をパラメトリックに分析した。その結果、整合度と全体工事に対する増加費用の関係が、図-13に示すようなトレードオフの関係となっていることが明かとなった。すなわち、整合度が2～5程度の範囲にある場合は、投入費用の増加は、それほど大きくはない。また、ボーリング調査を30本以上行っても整合度を下げることは困難であり、大きな効果は期待出来ず、整合度を向上させるためには、斜坑掘削等の手段による検討が必要と考えられた。なお、これらの情報にもとづき、前述したモデル工事に適用したところ表-7に示すような結果となり、工期で約5%の短縮が可能となるとともに、損料の期待値においては、約10%の低減が可能となった。

(3) 斜坑、立坑掘削による不確実性の削減方法に関する検討

一般に、斜坑や立坑、作業坑等の掘削は、長大トンネルの場合等において、その用途や工期、費用の側面から検討されることが多い。本研究においては、前節の概念にもとづき、斜坑、立坑及び作業坑の掘削による不確実性の削減方法についての検討を行うこととする。

前述したように、過去の実績データを回帰分析等により尤度関数を定めれば、ベイズの定理の活用により、不確実性の削減に関する検討を行うことができる。そこで、本研究においては、地山構造の明確化と、工期と工事費用の側面から斜坑や立坑、作業

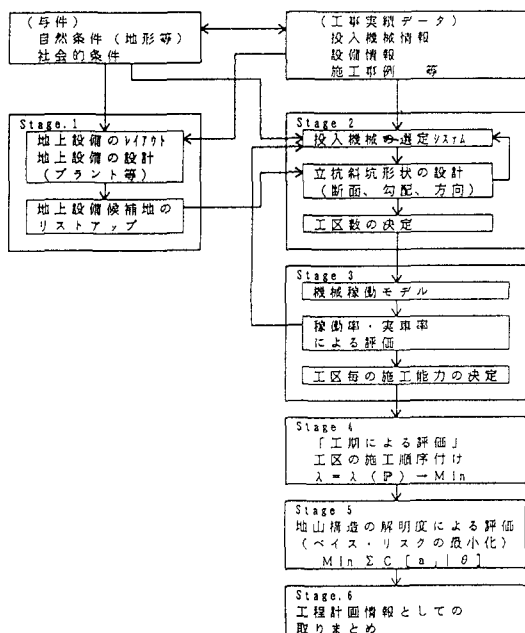


図-14 斜坑、作業坑等の検討プロセス

表-8 モデル工事の概要（斜坑の検討）

工事名称	道路トンネル
施工延長	8, 200 m
地山区分	Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ
制約工期	4年7月(曜日)
備考	自動車専用道(3車線×2本) 斜坑2本、作業坑1本

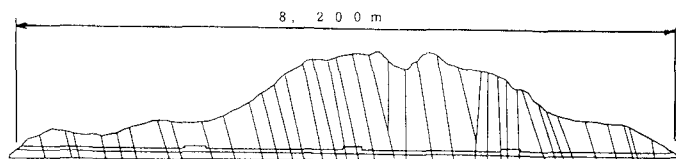


図-15 モデル工事の概要（縦断面図）

表-9 モデル工事の適用結果（斜坑の検討）

CASE	地山 整合度	工 期 (日)	損料期待値 (千円/m)	斜坑パターン
1	1.758	1,590	22.1	
2	2.545	1,683	25.4	
3	2.899	1,624	27.2	
4	1.612	1,657	20.7	

坑等の掘削方法に関する検討プロセスを図-14のよう
に設計した。

以上の方法を表-8、図-15に示すトンネル工事

に適用したところ、表-9に示すとおりになった。
なお、前述した斜坑等の検討プロセスに従って、斜
坑の形状から4つのCASEに分類し、シミュレーシ
ョン実験を実施した。これらの結果から、本プロセ
スを適用すれば、斜坑の合理的かつ合目的な設計が
可能となり、効率的な投入機械系の設計や運用が行
なえることが分かった。

5. 複数のトンネル工事への適用による検討

本研究においては、過去に竣工したトンネル工
事を対象に表-10に示すような13事例に対して、今
回開発したシステムを適用することによって、この
システムの有効性・妥当性の確認を行うこととした。
なお、トンネル工事と施工プロセスが類似である地
下空洞工事についても2事例に対して、適用を行う
こととした（なお、これらのトンネル工事は、地元
対応等の社会的要因による遅延がなく、トンネル工
事を15年以上経験している現場技術者がいる工事を
対象としている）。

今回の事例検討を行うにあたっては、本システ
ムの有効性・妥当性の確認のため、施工計画策定当初
の情報をもとにしてシステムの運用実験を実施した。
そして、この運用結果と旧システムの運用実験の結
果とを工事竣工時の実際の地山構造と工程とを比較
することにより、システムの有効性・妥当性の検討

を行うこととした。以上の対象工事へ
の適用結果は、表-10に示すとおりで
ある。この結果旧システムと比較して
新システムの方が地山構造の整合度
が高く、工程計画案についても工期、投
入費用（損料期待値）改善されている

ことが明らかとなった。また、新システムの運用実
験結果が、より実工程と類似しており、現場技術者
の経験を効率的に取り入れたシステムとなっている
ものと考えられる。以上の運用実験から、より、汎
用性の高いシステムとなったものと考えられた。

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

表-10 システムの運用実験結果

No.	トンネル種類	施工延長 (m)	地山 分類	立坑、斜坑、 作業坑など	掘削工法-ずり出し方式	新 シ ス テ ム			
						投入ヘーティ値 (max)	地山 整合度	計算工 期(日)	損料率 (千円/m ³)
1	道路(2車線)	955	I, N		機械-タイヤ	1	2.100	490	27.5
2	鉄道(複線)	8,090	I, I, N	斜坑-2本, 立坑-1本	岩盤-レーン, 岩盤-タイヤ, 機械-タイヤ	8	2.512	1,523	19.8
3	水路	740	I, I		TBM-レーン	1	1.012	70	35.1
4	水路	2,240	I, N		機械-タイヤ	2	2.301	1,398	27.6
5	鉄道(複線)	410	I, N		機械-タイヤ	1	3.005	457	25.3
6	鉄道(複線)	2,500	I, I		岩盤-タイヤ	2	2.012	1,472	23.4
7	道路(2車線)	390	I, N		機械-タイヤ	1	2.057	420	26.1
8	道路(2車線)	1,030	I, I, N		岩盤-タイヤ	1	3.120	653	27.2
9	鉄道(複線)	1,470	I, I, N		岩盤-レーン	1	4.512	778	24.7
10	道路(2車線)	4,560	I, I	斜坑-2本	岩盤-タイヤ	4	2.580	1,100	22.9
11	水路	7,750	I, I		TBM-レーン	1	1.001	732	24.3
12	道路(2車線)	1,800	I, I, N		岩盤-タイヤ	1	2.565	1,165	24.1
13	道路(2車線)	6,210	I, I, N	斜坑-2本, 作業坑-1本	岩盤-タイヤ	8	3.100	1,307	19.7
14	地下空洞 (地下発電所)	33.5x51 x160	I, I, I	注1)	岩盤-タイヤ, 機械-タイヤ	4	1.020	1,780	23.5
15	地下空洞 (石油タンク)	20.5x30x 1030-1315	I, I, I	注2)	岩盤-タイヤ, 機械-タイヤ	1.5	1.897	2,312	21.6

No.	旧 シ ス テ ム				参考(実際工事)		
	投入ヘーティ値 (max)	地山 整合度	計算工 期(日)	損料率 (千円/m ³)	新システム 旧システム	投入ヘーティ値 (max)	実工期 (日)
1	1	3.120	502	28.2	1/56.1	1	528
2	8	3.451	1,555	20.3	1/89.3	8	1,497
3	1	2.000	73	35.1	1/62.0	1	71
4	2	3.120	1,500	27.8	1/58.9	2	1,724
5	1	4.012	472	25.8	1/78.2	1	466
6	2	2.568	1,562	24.0	1/56.3	2	1,920
7	1	2.897	425	26.5	1/74.3	1	417
8	1	3.312	664	28.2	1/62.8	1	679
9	1	5.100	781	26.7	1/54.6	1	766
10	4	3.642	1,151	24.9	1/68.3	4	1,085
11	1	1.345	746	27.3	1/50.2	1	718
12	1	2.979	1,300	24.1	1/52.7	1	1,252
13	8	3.542	1,372	20.2	1/81.5	8	1,435
14	4	2.856	2,031	25.0	1/92.4	4	2,010
15	1.5	2.877	2,459	24.3	1/168.0	1.5	2,193

注1) 加背割-7子(1,2段), ベン(10), 作業坑-2本, 換気立坑-3本

注2) 加背割-7子(1,2段), ベン(5段), 岩盤タック-7本, 水封トラ-5本, サービストラ-1本, タコ連絡トラ-8本, 立坑-9本, 作業坑-2本

注) 計算時間比とは、データ作成から代替案比較検討までの総時間の新システムと旧システムとの処理時間比

注) 斜坑、立坑、作業坑等のパイロットトンネルの本数については、新システム、旧システム、実際工事とも同じものとなっている。

ンネル工事を対象として、合目的・効率的な工事計画案の策定を目指しての方法論的研究を行なった。この検討をとおして次のような成果を得た。

(1) システム構築の方法として、知識推論型方法と数値計画手法、システム・シミュレーション手法の両面からアプローチすることにより、より合目的かつ効率的な工事計画システムの開発を行うことができた。また、システム開発のツールとして、エキスパートシステムやファジイ理論の導入により、システム機能の高度化・自動化を図ることが可能となった。

(2) 複数のトンネル工事に適用することにより、本システムの有効性・妥当性を確認することができた。

(3) 入札・契約制度の改善が進められている中で、本システムの適用によって、効果的なプロポーザルを行うことが可能になるものと考えられた。

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

(1) 今回の研究をとおして、今回開発した工事計画システムの有効性が確認されたことから、システムの現場への導入促進を図り、システムの運用機能

の向上や工事計画以外の現場業務への対応方法についても検討していく必要がある。

(2) 今回の研究においては、トンネル工事を対象として検討したが、今後は、面的・立体的な広がりを持つ工事に対しても検討を進めていく必要がある。

最後に本研究を行うにあたり、データ整理等の資料整理をして頂いた小林隆志氏(現大成建設)、システム開発にあたって助言を頂いた京都大学計算機センターの各位に対してお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 例えば、春名、辻井、小林；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—、第10回建設マネジメントに関する研究発表・討論会講演集 p.209-218；1992年12月
- 2) 石塚；曖昧な知識の表現と利用，情報処理 26, 12p. 1418-1486；1985年12月
- 3) 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，京都大学博士論文；1971年 9月

- 4) 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
- 5) 大西有三、岸本英明；トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した2次元有限要素解析，トンネルと地下Vol.11, No.12 p.7-12；1980年12月
- 6) 桜井、蓮井、近藤；3次元的な掘削手順を考慮したトンネルの有限要素解析，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第3部 p.244-245；1981年10月
- 7) 清水則一、桜井春輔；ファジイ理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究，土木学会論文集No.370/Ⅲ-5 p.225-232，1986年
- 8) 鈴木、吉川、井上、中川；ファジイ回帰モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案，土木学会論文集No.418/Ⅲ-13 p.181-190；1990年 6月
- 9) 鈴木、吉川、井上、中川；ファジイクラスターリングを用いたトンネルにおける変状可能性の定量的評価法に関する提案，土木学会論文集No.421/Ⅵ-13 p.181-190；1990年 6月
- 10) Bezdek, J. C；Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, 1981.
- 11) 齊藤参郎；正値逆比行列を用いた順序付き多肢選択データの比率尺度構成とその分解法，福岡大学経済学論叢Vol.33 No.1 p.1-45, 1988年
- 12) 例えば、Bieniawski, Z. T.；Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling；Proc.3rd Cong. ISRM, Vol. II A p.27-32；1974.
- 13) ES/KERNEL マニュアル；日立製作所，1988年 7月
- 14) 春名、原田、荒川、黒田；工事施工空間の干渉問題と効率的資源運用問題を考慮したスケジューリングモデル開発；1992年 5月，平成4年度関西支部年次学術講演会 講演概要 p.Ⅱ-30

トンネル工事計画の不確実性問題に関するシステム論的研究

春名 攻、辻井 裕、竹林 弘晃

本研究においては、まず、トンネル工事における不確実性問題の要因について外観するとともに、その取扱方針について検討を行なった。次いで、この検討結果を基に、システムの自動化と計画者の客観的な意志決定を支援するためにエキスパートシステムやファジイ理論を導入するとともに施工シミュレーションの活用により、リアリティの確保を目指した工事計画システムを開発した。また、ベイズ確率の概念の導入により、計画情報の精度の向上が可能なことを明かにした。そして、最後に、複数のトンネル工事に適用することによって、本システムの有効性を確認した。

A Study on Uncertainty Problem of Construction Planing in Large-scale Tunneling Project

Mamoru HARUNA, Yutaka TSUJII, Hiroaki TAKIBAYASHI

In this paper a method for construction planning system is discussed focussing on uncertainty in construction process of tunneling project. Aiming to obtain a system model of effective process for risk-minimum construction planning. This system model is organized by expert-system, fuzzy-model and sysytem-simulation. And also aiming to obtain a risk-minimum construction planning Bayes' probability and Bysian desision process is introduced. Finally it is shown that desirable and feasible planning and sheduling for tunneling projects can be obtain through these planning system developed in this study.