

工事計画の不確実性問題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 Construction Planning System Considering Uncertain Problems in Tunneling Project*

春名 攻** 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、地山状態・構造をはじめとして工事施工における不確実性（あいまい性）が多い。このため、近年のトンネル工事においては、施工過程の計測情報を基にした情報化施工を実施することにより、不確実性の削減が図られている。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、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。

本論文においては、まず、トンネル工事施工における不確実性の要因を考慮することを基にして開発した工事計画システムの概要について述べることとする。つまり、地山構造のあいまい性を分析・検討するために、ファジイ理論とPhysicalシミュレーションから構成される地山構造検討システムや、エキスパートシステムを活用した工法選定システムを開発した。次いで、工事へ投入する施工機械系の選定を行なうにあたっての検討材料を効果的・効率的に作成することを目的として開発した施工シミュレーションモデルについて述べるとともに、これらの各サブシステムを活用した工程計画案の策定方法について述べることとする。そして、モデル工事に適用

することにより、本システムと過去に開発したシステム¹⁾との比較検討を行なうことにより、本システムの有効性について述べることとする。最後に、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により、本研究の研究成果を取りまとめて述べることとする。

2. 工事計画システムの構築

(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-1のような形に設計した。

すなわち、本システムは、過去の工事実績を整備した工事実績データベース、地山構造の分析・検討を行なう地山構造検討システム、地山構造から施工法や補助工法の選定を行なう工法選定システム、また、地山の安定性や投入資材の検討を行なう技術計算システム、及び以上の検討成果を計画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。

(2) 地山構造検討システム

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。地質分布については、3次スプライン関数の適用により地層面・断層面の検討を行なうこととしている。

一方、岩盤構造は、定量的なものについては、地山の応力分布及び湧水量の検討を行なうために、2次元有限要素法に代表されるPhysicalシミュレーションにより検討するものとする。また、定性的なものについては、トンネルの掘削対象部分をファジイ集合として捉え、RMR法をベースに開発した分類要因を説明要素として、日本道路公団の岩盤分類法を基準として岩盤等級を決定する過程を可能性扇形

* キーワード 施工計画・管理、システム分析

** 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 草津市野路町1916 Tel. 0775-61-2736 Fax. 0775-61-2736)

*** 正員 工修 大阪府土木部都市整備局都市整備課
(〒540 大阪市中央区大手前2-3-4) (06-941-0351 EX3987)

**** 学生員 立命館大学理工学研究科土木工専攻
(〒525 草津市野路町1916 Tel. 0775-61-2736 Fax. 0775-61-2736)

システムでモデル化した鈴木等の方法²⁾と同様にファジイクラスタリングを活用して、説明力のある岩盤分類を行なうこととした。また、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。

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なうこととしている。

なお、本研究で開発した方法を実際に施工された

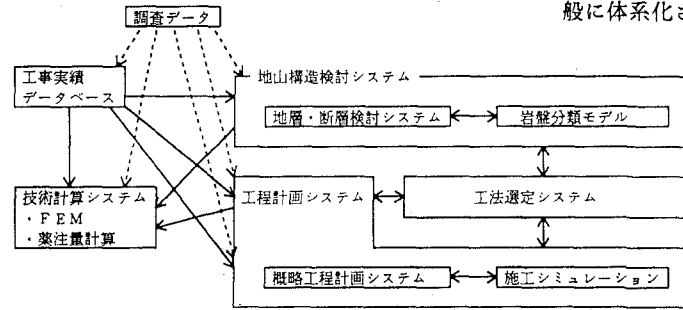


図-1. 工事計画システムの構成

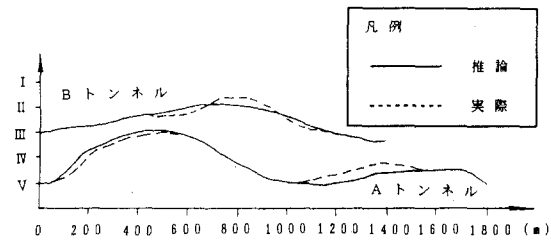


図-2. ファジイクラスタリングの適用結果

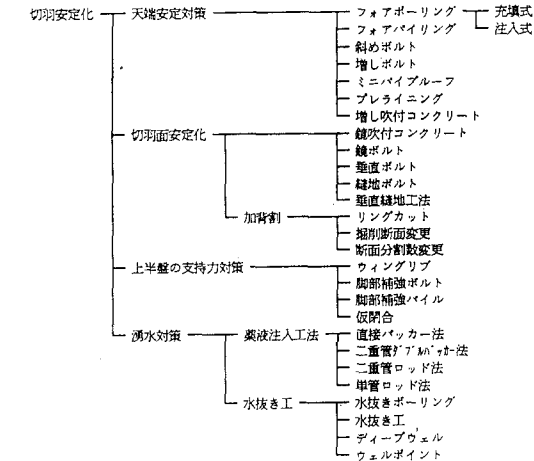


図-3. 補助工法のフレームモデル

トンネル工事の2例に適用したところ、図-2に示すとおり、有効性が確認されたことから、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

本研究においては、効率的に施工法・投入機械を決定するため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。

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。事実型知識は、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。例えば、地山構造の変化に応じて取られる補助工法については、図-3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。一方、規則型知識は、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。

なお、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、AHPを使って定めた評価テーブルを採用することとしている。

(4) 工程計画システム

以上の各個別システムからの情報を基に、概略工程計画システムと施工シミュレーションから成る工程計画システムにより工程計画案の策定を行なう。

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基に、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。なお、管理的施工順序の決定にあたっては、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-1に示すようなブランチ・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。

一方、施工シミュレーションは、機械稼働モデルにより構築されており、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稼働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。本モデルのトランザクションを追跡することにより、オブジェクト指向型のプログラミングが可能であり、また、FORTRAN との併用によって各プログラムのモジュール化を図っている。

さて、最も合目的な工程計画案としては、投入機械・労務・資材の和として構成される損料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ればよいこととなる。

3. モデル工事への適用に関する実証的考察

本研究で開発したシステムを実際工事へ適用するに当たり、以前に本研究グループで開発した施工シミュレーションモデルとデジソンツリーを活用し

表－1. 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
$P_{ij}^{Ri} \in P^{Ri}$
$\sum_{i \in Ri} \sum_{j \in Ri} P_{ij}^{Ri} \geq n_i - r_i$
競合作業の同時進行施設許可条件 (全体)
$LOOP(P^*) = 0$
○記号の説明
P : 順序行列 ($P = P' + P^*$)
P' : 技術的順序関係
P^* : 管理的順序関係
$P_{ij} \ (i, j \in P) = 1$ [i は j の先行作業]
$P_{ij}^* \ (i, j \in Ri)$
r_i : 作業グループ i の施工パーティ数
n_i : 作業グループ i の競合作業数

表－2. モデル工事の概要

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)

表－3. モデル工事の適用結果

CASE	旧システム		新システム	
	工期(日)	損料期待値(千円/㎡)	工期(日)	損料期待値(千円/㎡)
1	1,460	25.6	1,457	25.4
2	1,434	29.7	1,430	27.6
3	1,430	23.2	1,433	23.5
4	1,398	22.4	1,400	22.4

たシステムとの比較・検討を行なうために、表－2に示すような鉄道トンネル工事に対して適用することとした。

前回開発したシステムの工程計画案策定プロセスに従って、標準状態 (地山構造の変動が当初計画どおりである場合) における投入機械系の組み合わせが8ケースもあったが、今回開発したシステムにおいては、4ケースに絞り込まれている。なお、ここで絞り込まれた投入機械系は、前回のシステムにおいて検討されたものとほぼ同一のものであり、結果として損料の期待値が大きくなったものについては、除外されている。

また、本研究において開発した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も約1/10以下に削減されている。

そして、前回開発したシステムにおいては、これらの投入機械系を基に、地山構造が変化することにより工法や投入機械の選定と施工シミュレーションを行なうといったプロセスを経て、期待値を計算している。今回開発したシステムにおいては、ファジイクラスタリングにより同定された地山構造において、工法選定や機械系の設計を行ない、その結果を基に施工シミュレーションを実施していることから、この過程における処理時間も大幅に短縮され、約1/50程度になっている。なお、このプロセスにおける検討結果は、表－3に示されるとおりであるが、前回のシステムと同様の投入機械系において、今回開発したシステムの方が、工期、損料期待値とも若干の削減が見られる。これは、計画者の判断基準の客観性を保つことにより、その検討対象範囲が有意な水準において検討されるとともに、システムの同定が有効におこなわれたものと考えることができる。そして、これら各ケースの検討結果を概略工程計画表としてビジュアルな計画情報を作成することにより、計画者に提示することが可能となった。

(なお、不確実性の削減を目指して、ベイズ確率の概念の導入によって、追加調査の決定方法や斜坑等の検討を行っているが、紙面の都合上、発表時に説明することとする。)

表-4. システムの適用結果

No.	トンネル種類	施工延長 (m)	地山分類	立坑、斜坑、作業坑等	掘削工法→ずり出し方式	投入人・材数 (max)	計算工期 (日)	損料期待値 (千円/m ³)	実工期 (日)	実工期/ 計算工期	地域	備考
1	道路(2車線)	955	Ⅲ,Ⅳ		機械→付	1	490	27.5	528	1.078	北海道	土被り薄いため補助工法多用
2	鉄道(複線)	8,090	Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ	斜坑-2本,立坑-1本	発破→付,発破→付,機械→付	8	1,523	19.8	1,497	0.983	東北	想定地山より変化が少
3	水路	740	Ⅱ,Ⅲ		TBM→付	1	70	35.1	71	1.014	関東	
4	水路	2,240	Ⅲ,Ⅳ		機械→付	2	1,398	27.6	1,724	1.233	関東	加背削変更、補助工法多用
5	鉄道(複線)	410	Ⅲ,Ⅳ		機械→付	1	457	25.3	466	1.020	関東	
6	鉄道(複線)	2,500	Ⅰ,Ⅱ		発破→付	2	1,472	23.4	1,920	1.304	中部	関連事業による住民対策
7	道路(2車線)	390	Ⅲ,Ⅳ		機械→付	1	420	26.1	417	0.993	中部	
8	道路(2車線)	1,030	Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ		発破→付	1	653	27.2	679	1.040	近畿	湧水量が多
9	鉄道(複線)	1,470	Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ		発破→付	1	778	24.7	766	0.985	近畿	
10	道路(2車線)	4,560	Ⅱ,Ⅲ	斜坑-2本	発破→付	4	1,100	22.9	1,085	0.986	中国	
11	水路	7,750	Ⅱ,Ⅲ		TBM→付	1	732	24.3	718	0.981	四国	
12	道路(2車線)	1,800	Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ		発破→付	1	1,165	24.1	1,252	1.075	四国	湧水量が多
13	道路(2車線)	6,210	Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ	斜坑-2本,作業坑-1本	発破→付	8	1,307	19.7	1,435	1.098	九州	湧水量が多
14	地下空洞 (地下発電所) ×180	33.5×51	Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ	注1)	発破→付,機械→付	4	1,780	23.5	2,010	1.129	関東	想定地山より硬
15	地下空洞 (石油タンク) 1030~1315	20.5×30×	Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ	注2)	発破→付,機械→付	15	2,312	21.6	2,193	0.949	九州	

注1)加背削→付(1,2段),バツ(10段),作業坑→2本,換気立坑→3本

注2)加背削→付(1,2段),バツ(5段),岩盤→付(1本,水封→付(5本,4-ビス→付(1本,タテ連絡→付(8本,立坑→9本,作業坑→2本

4. 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、以上のようなプロセスにより工程計画案の策定を行なうシステムの開発を行なった。今回開発したシステムを、前述したモデル工事以外の他のトンネル工事において適用することは、大変重要なことであり、システムの汎用性を高めることとなり得ると考える。

そこで、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-4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・妥当性の確認を行なうこととした。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適用を行ない検討を行なうこととした。

今回の事例検討を行なうにあたっては、本システムの有効性・妥当性の確認のために行なうことから、施工計画策定当初の情報を基にしてシステムの運用実験を実施している。そして、この運用結果と工事竣工時の実際の工程と比較することにより、システムの有効性・妥当性の検討を行なうこととした。以上の対象工事への適用結果は、表-4に示すとおりであるが、当初想定していた社会的要因による工事の遅延以外については、概ね1割以内の範囲にあることから、適用性の高いシステムであると考えることができよう。

5. 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、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) システム構築の方法として、知識推論型方法と数理計画手法、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って、より合目的かつ効率的な工事計画システムの開発を行なうことができた。

(2) 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・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なうことが可能になるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 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；1992年12月
- 2) 鈴木、古川、井上、中川；ファジィクラスタ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；1990年 6月
- 3) 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
- 4) Bezdek, J.C; Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press. 1981.