

トンネル工事における工程計画策定方法に関する研究
ー投入機械選定問題を中心としてー

立命館大学 正 員 春名 攻
立命館大学大学院 学生員 〇辻井 裕
立命館大学大学院 学生員 小林 隆志

1. はじめに

本研究を着手するまでに、われわれの研究グループは、現場マネジメント業務の中核である工程計画に着目し、計画者の経験を有効活用するヒューリスティックな概略工程計画策定のための支援情報システムの開発を行ってきた。

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ことから、当初計画案の策定にあたって、事前に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。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、工事への投入機械グループの選定を行うためのシミュレーションモデルの開発を行った。さらに、シミュレーションモデルを活用した、不確実性の検討結果にデシジョンツリーを用いることにより、実行可能性の高い工程計画案策定作業を行なうという、システム化のための方法論的検討を行った。

2. 投入機械選定シミュレーションモデルの開発

(1) 投入機械選定シミュレーションのプロセス
前述の概念にもとづき、本研究における工程計画案策定フローを、図-1に示すような形で整理した。すなわち、本研究グループでこれまでに開発した工程計画システムと連動する形で、新たにシステム

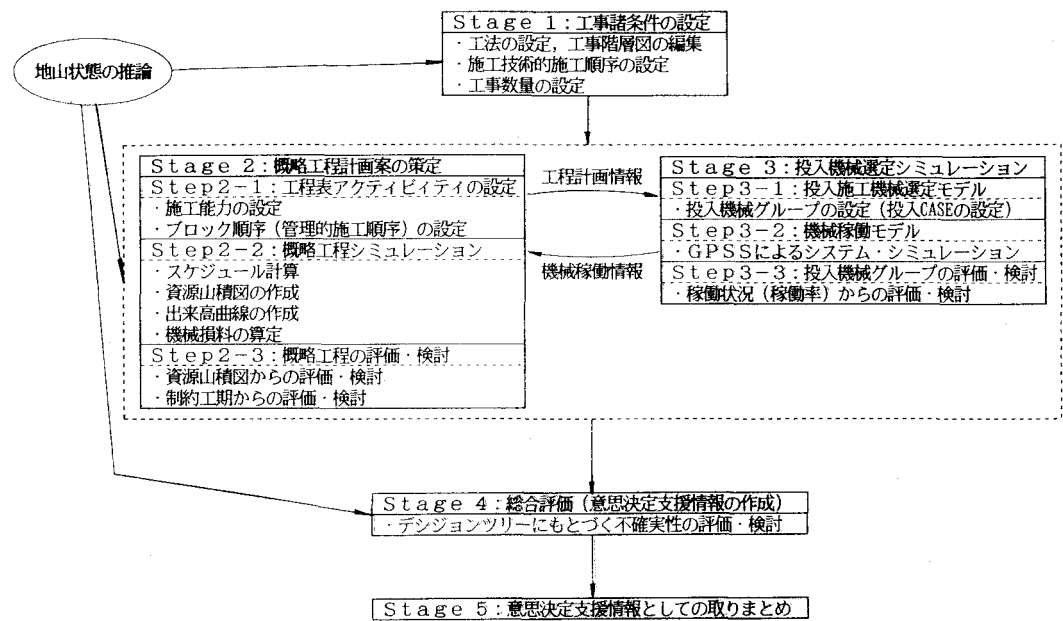


図-1 工程計画案策定フロー

内にシミュレータを組み込み、ボトムアップ的なアプローチによる検討を可能とした。

つまり、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、投入資源等の決定を行い、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る。投入機械選定モデルにおいては、概略工程の検討から、実行可能性が高いと考えられる投入機械グループ構成等機械情報に関する検討を行なうこととしている。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、稼働状況の分析や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る必要があることから、工事区間全域を対象として行なうのではなく、以下の①、②の2パターンを対象とし、最大能力が要求される区間を対象に、前後10日間のシミュレーションを行なうこととした。すなわち、

①掘削ずりが最大となる区間。

②出来高50%（最盛期）の区間。

さらに、シミュレーションの結果を、工程計画情報として工程計画システムに入力し、概略工程計画案の策定を行うこととする。

（2）機械稼働モデルの開発

トンネル工事における掘削工事の施工過程は、図-2に示すようなパターン化された一連の作業が、サイクルに繰り返される構造となっている。そして、このサイクルが、各工種あるいはブロックにおいて繰り返されることによってトンネルの施工は進行していく。つまり、トンネル工事においては、1サイクルが終了することによって、始めて切羽が進行するわけであるから、サイクル・タイムと1サイクル当りの進行が明確になれば、各工種（ブロック）の移動速度すなわち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、一般に施工が

片押し的に進行する場合が多いことから、切羽の進行速度を施工能力と考えても何ら問題はない。

そこで、投入機械選定シミュレーションにおいては、掘削工事を対象としてサイクル・タイムの検討を行うことにより、投入機械選定のための有効な情報を求めて活用することとした。

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、掘削により排出されたずりの運搬や吹付けコンクリートの運搬が、掘削機の進行を妨げないようにするだけでなく、インパートコンクリートの施工による運搬車両の使用制限についても考慮する必要がある。すなわち、サイクル・タイムの構成要素を切端部と運搬部に分けて、サイクル・タイム間の相互のバランスを考慮することとした。

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型シミュレーション言語のGPS Sによって、モデル分析を行うこととした。

（3）機械稼働モデルの整合性

モンテカルロ型シミュレーションの実施にあたっては、乱数発生方法の検討が非常に重要である。そこで、実証的検討を行なう前に、GPS Sプログラム中の乱数発生系列を種々に変更して、50ケースのシミュレーションを行い、その絶対経過時間の変動係数（＝標準偏差／平均）を求めたところ、0.020であったため、本モデルは十分に安定であると判断した。さらに、後述する対象事例において、現在施工が行われている斜坑に対して適用したところ、実施工とほぼ類似の挙動を示したことから、本モデルを適用していくこととした。

3. 工程計画案における不確実性の検討

（1）トンネル工事施工における不確実性

トンネル工事施工にあたっては、事前にボーリング調査などの調査を実施することにより、地山の地質構造に対する検討を行っている。しかし、これらの情報の精度から、切羽前方に存在していると考えられる、断層破碎帯や走向傾斜、地下水を始めとし

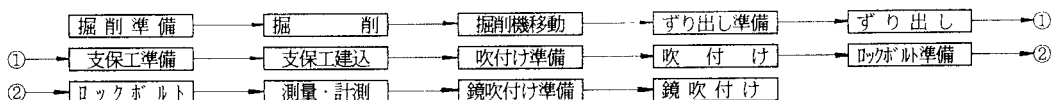


図-2 掘削工事の作業構成（一例）

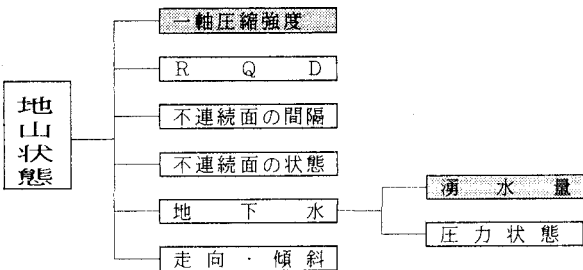
て、限定された地質構造しか判明しておらず、不確実性を伴う要因が数多く含まれている。従って、工程計画案の策定においては、これらの不確実性を考慮して、検討を行っていく必要がある。特に、機械の施工能力については、地山状態によって決定されるため、これらの状態を推定し、定量的なデータとして、把握することが重要である。

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、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、一意的かつ効果的な決定方法はないが、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、RMR法を用いることとした。事前調査の情報をもとにして、これらの評価式を構成しているパラメータ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データの作成を行うこととした。

(2) 代替案の評価方法

本研究においては、トンネル工事施工の特徴として
表－1 投入機械選定シミュレーション結果

CASE	掘削工期(日)	1進行長・掘削 平均サイクルタイム(分)	切羽関係機械 損料(万円/m)	全体工期(日)
1	1020	128	21.7	1580
2	969	100	23.6	1521
3	995	119	22.3	1554
4	1005	118	22.0	1557
5	989	110	22.5	1538
6	1013	120	21.9	1573
7	972	108	23.2	1528
8	1017	122	22.0	1576



図－3 地山状態を決定するパラメータ

て、工事費の中でも機械費の占める割合が高いことに着目して、機械損料を評価指標として取り上げることとした。すなわち、ある実行可能な工程計画代替案 a_j を選択して、地山状態 θ が真であるときの機械損料の期待値を $E[a_j | \theta]$ (円/ｍ)とすれば、次式で検討を行なうことが可能である。

$$E[a_j | \theta] = D_o(a_j) + D_f \times P_r(t) [a_j | \theta]$$

ここに、 $D_o(a_j)$ ：1 m当りの機械損料 (円/ｍ)

$D_f(a_j)$ ：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

なお、地山状況が変化する生起確率 $P_r(t)$ については、計画者判断にもとづく、一対比較により設定を行なうこととした。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。

最も合目的な工程計画案は、上式において機械損料の期待値が最小となるものを選択すればよい。

4. 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4カ月である。掘削工法としては、近隣の環境対策等の関係から、機械掘削工法を採用している。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、 I_N (特)～ II_N に分類されているが、構造上の特徴から断面変化が多い。

(2) トンネル掘削工事への適用

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にする。前述したプロセスに従って、投入機械の組合せを8ケース(但し、CASE 1は、当初計画案における投入機械である)に絞り込んだ。機械稼働モデルにおいて、これらのケースごとにシミュレーションを実施したところ、表－1に示すような結果が出力された。

続いて、不確実性に対する検討を行なうこ

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。地山状態は、図-3に示す各パラメータによって決定されるが、今回の対象事例におけるような地山構造の場合において、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の2点に集約することができた。また、地山構造が変化する場合の範囲についても、当初計画時状態を1とすることによって、増減比率を表示し、これらを表-2に整理した。また、前述したようにこれらの生起確率 $P_r(t)$ については、一対比較を行うことにより整理した。また、結果集合として、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、機械損料を算出した。

これらのヒアリング結果をもとにして、デシジョンツリーを図-4のように作成し、機械損料の期待値を求めたところ、ケース4の投入機械の組合せにおいて、期待値が最大となる場合があったことから、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。

5. 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に、投入機械選定シミュレーションを利用した方法を導入した。そして、これにより機械稼働状況の分析を行うとともに、未掘削地山の不確実性を考慮

したデシジョンツリーを作成することによって、検討が可能なことを示した。しかし、この方法によっても生起確率の設定については、一対比較で行ったことから、複雑な地山構造を有していたり、長大トンネル等の現場においては、かなりの作業量になるものと考えられる。また、不確実性の状態を岩盤分類によって行なったが、この妥当性の検討を行なう必要があると考える。今後は、より合理的、機能的に代替案を検討するために、不確実性の状態を数理計画手法を用いて定式化し、ハイブリッド型の工程計画モデルとして開発していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 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12月
- 2) NATM工法の調査・設計から施工まで; 土質工学会; 1990年 7月
- 3) Bieniawski, Z.T.; Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling; Proc.3rd Cong, ISRM, Vol. IIA; 1974

表-2 地山状態を決定する際の
問題点と増減可能性の範囲

問題点	可能性の範囲*
一軸圧縮強度	0.6~4.0
湧水量	0.6~3.0

* : 当初案策定時=1.0

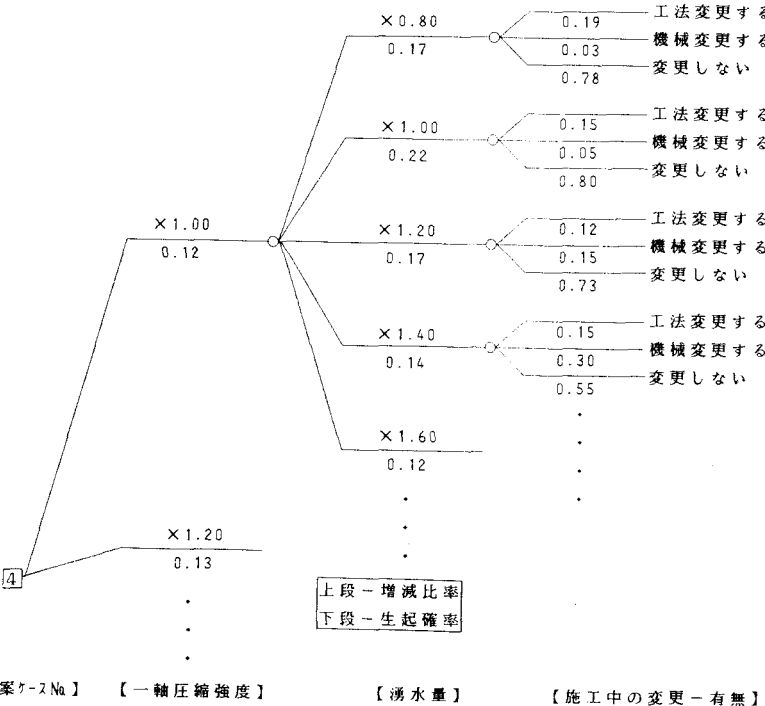


図-4 デシジョン・ツリー (一部分のみを示す)