

コンピュータ・シミュレーションによるトンネル施工システムの解析

(株) 奥村組技術研究所 正員 河原畑 良 弘
 京都大学工学部 正員 春 名 政
 (株) 奥村組技術研究所 正員 ○ 岡 本 伸 一

1. まえがき

トンネル施工における施工設備計画は各現場において経験的に決定されているのが現状である。これは岩質、湧水などの不確定要因もさることながら、投入機械の種類、数量が多く、その組み合わせは膨大な数になるため機械設備の有効な決定方法が存在しないというのが一つの理由である。

また、トンネル工事は他の建設工事と比べて作業空間が著しく制約されるため、作業間に物理的干渉が生じやすい。この物理的干渉の程度は設備機械と空間に依存すると考えられ、同時に工期全体にも重大な影響を及ぼすものである。しかし、この物理的干渉を定性的、定量的には握ることが十分なされていないため機械系選定にとって重要な情報が不足していたというのも事実である。

本論文では多くの機械系のなかから合理的な機械系を選択するための有効な情報をコンピュータ・シミュレーションによって得ようとしたものである。

2. トンネル施工システム

トンネル施工システムは一つの分類方法として工法別施工システムが定義されるが、本論文では長大トンネルを対象とし、その場合最も一般的である底設導坑先進上部半断面掘削工法をとりあげることにした。

(1) トータル・システムの構造

トータル・システムは8つの坑内サマシステムと2つの坑外サマシステムで構成される。これらのサマ

システムはすり運搬路あるいはコンクリート運搬路として線路を共有することにより互いに相互干渉を発生すると考えられる。図-1はトータル・システムの構造を示す模式図であり、表-1は各サマシステムと作業場所との対応表である。

(2) サマシステムの構造

サマシステムは坑内サマシステム群(サマシステム1~8)と坑外サマシステム群(サマシステム9,10)にわかれる。坑内サマシステム群と坑外サマシステム群は前者をメインとする補充システムを形成する。ここではメイン・システムである坑内サマシステム群だけを取扱うことにする。坑内サマシステム群は掘削作業グループ(サマシステム1~5)と覆工作業グループ(サマシステム6~8)に分けることができる。掘削作業グループと覆工作業グループの構造をパターン化して図-2, 3に示す。

トンネル施工は各サマシステムにおいて図-2, 3に示されるパターン化された一連の作業(これを1サイクルとよぶ)がサイクルリックに行われるものである。

サマシステムNo	シンボル	作 業 場 所
1	D	導坑切端
2	J	上半切端
3	O	大背切端
4	N	土半掘り切端
5	M	土半掘り切端
6	A	アーチコンクリート打設切端
7	F	脚付コンクリート打設切端
8	W	底コンクリート打設切端

表-1 サマシステムと作業場所との対応

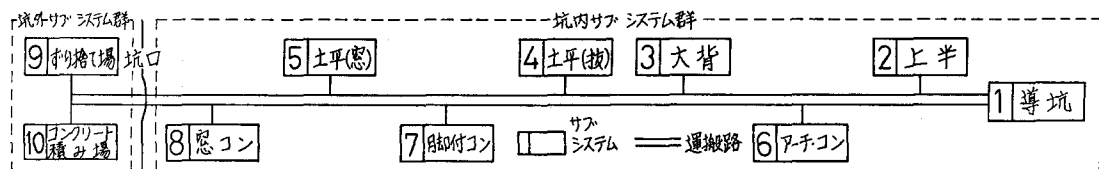


図-1 トータル・システムの構造

1サイクルに要する作業時間をサイクル・タイムとよび掘削作業グループのサイクル・タイムを $T_E(\text{min})$ 、覆工作業グループのサイクル・タイムを $T_L(\text{min})$ とすれば、

$$T_E = \sum_{i=1}^j t_{Ei} \quad j = \begin{cases} 8 & (\text{サスシステム1, 2}) \\ 5 & (\text{サスシステム3~5}) \end{cases}$$

$$T_L = \sum_{i=9}^{11} t_{Li}$$

で表わされる。ただし t_i はサイクルを構成する個々の作業に要する時間を示す。

3. 標準工程表と必要サイクル・タイム

工期が与えられると切端間のはなれから標準工程表が得られる。標準工程表は各サスシステムに許される工期を外生的に与えるという点で施工計画における機械系の選定にとって重要な意味をもつものである。

標準工程表から各サスシステムごとの工期が決定されるとサスシステムの構造から1サイクルあたりそれ以上の時間をかけることのできない値(サイクル・タイムの上界値)が求まる。この値を必要サイクル・タイム(CTR - Cycle Time Required)とよぶ。結局各サスシステムにおいてサイクル・タイムが CTR 以下であればトータル・システムとしての全体工期を満たすことになる。

4. 合理的機械系

機械系の選択は機種と台数の両面で考えられる。掘削作業グループの機械系を構成する要素、すなわち、

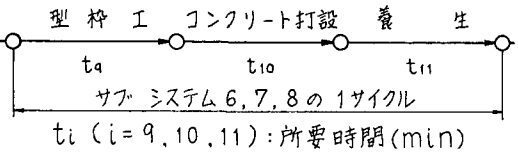


図-3 覆工作業グループの構造

個々の機械で施工能力と密接に関係すると思われるものは削岩機、すりトロ、ロコ、すり積み機であり、覆工作業グループにはコンクリート運搬車、ロコであり型枠も含められる。トンネル工事における機械系は一般にサスシステム単位で構成されるものであり、複数のサスシステムに1つの機械系を共有させることはない。1つのサスシステム i において、ある機械系 λ_j を投入した場合の仮想的な計画サイクル・タイム(CTP - Cycle Time Planned) $pTi(\text{min})$ は、

$$pTi = f_i(\lambda_j)$$

で求められる。ここで f_i は各サスシステムが独立でかつ内部干渉が無い場合のサスシステム i のサイクル・タイムを求める関数である。トータル・システムの構造で述べたように運搬路を共有することによりサスシステム間に干渉が生じるため、実際のサイクル・タイムは通常 pTi よりおそくなる。この干渉によるおくれを $\alpha_i(\lambda_j)$ とすれば実際の仮想的な生起サイクル・タイム(CTO - Cycle Time Occurred) $oTi(\lambda_j)(\text{min})$ は、

$$oTi(\lambda_j) = pTi(\lambda_j) + \alpha_i(\lambda_j) \quad \alpha_i(\lambda_j) \geq 0$$

となる。 CTP 、 CTO 、 CTR の関係を図-4に示す。

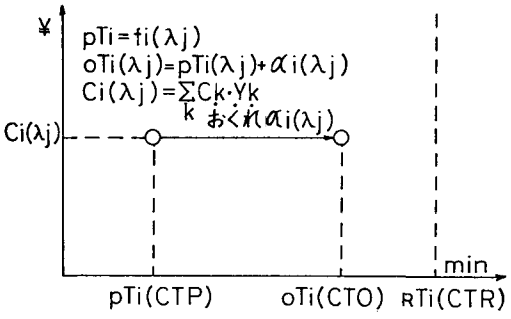


図-4 各サイクル・タイムの関係

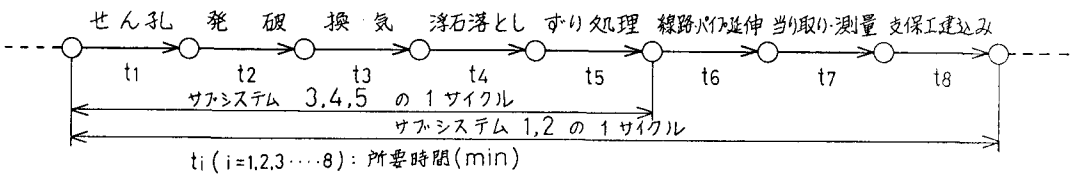


図-2 トータル・システムの構造

一方機械系 λ_j を構成する機械 k の公定価格を C_k (円/台), その投入台数を Y_k (台)として,

$$C_i(\lambda_j) = \sum_k C_k \cdot Y_k \quad k \in \lambda_j$$

を評価指標として導入する。ここに合理的と考えられる機械系をすべての i について

$$\min \{ C_i(\lambda_j) \mid O_i(\lambda_j) \leq R_i \}$$

を与える機械系 λ_j の集合であると定義する。

5. シミュレーション・モデルの概要

(1) GPSSによるシミュレーション・モデル

本プログラムは列車をトランザクションとし、線路をファミリーの連続したものとしてモデル化している。そのモデルの概略を図-5に示す。図中31は山側線路と32は海側線路を示し、311は31のうち坑口から数えて1番目のファミリーを示すものである。列車はポイントで待つかどうか、作業場所はどこであるかなどを判断して進むことになる。

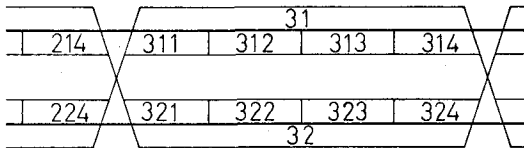


図-5 坑内線路モデル

(2) インストットデータと前提条件

a. 岩質分布---山陽新幹線・新大阪~博多間のトンネルについて国鉄岩分類によりクラス分けし、その結果と考慮して平均的な岩質分布として図-6のように決定した。

b. 断面---新幹線標準断面とする。

c. トンネル延長---長大トンネルの工区割りの実績から3km前後の工区延長が最も多いことから、モデ

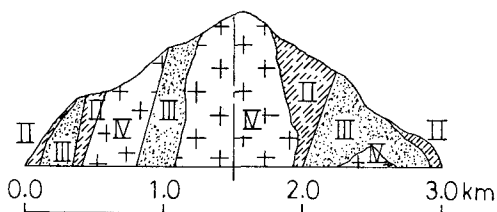


図-6 岩質分布

ルトンネルの延長を3kmとする。

d. 工法---仮設導坑先進上部半断面掘削工法とし、ずり搬出およびコンクリート運搬は履帯レール方式とする。

e. 標準工程---過去の実績から10年後の標準工程と月あたりの平均進行長を想定し、図-7のような施工工程にする。又、サブシステム4, 5の施工順序を図-8のように定める。

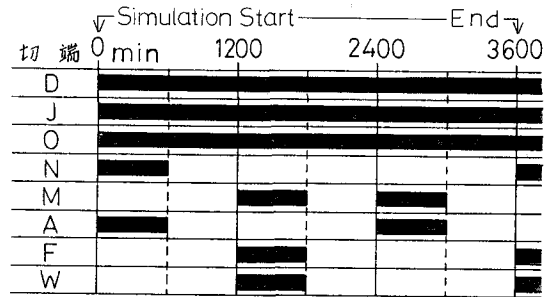


図-7 施工工程

f. シミュレーション断面---上半切端がトンネル延長の半

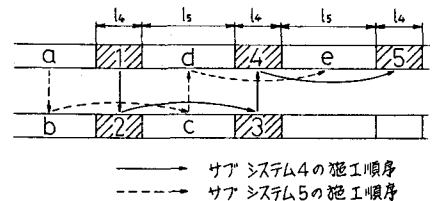


図-8 サブシステム4,5の施工順序

分(坑口から1.5 kmの地点)にさしかかった時点とする。これはこの時点で工事が最盛期になると考え、全くの作業が始まった時点も想定したものである。この時点の各切端の坑口からの位置を示せば表-2のようになる。

切端	位置	切端	位置
D	206186	M	85162
J	150000	A	141960
O	126071	F	101769
N	110119	W	77655

表-2 切端位置

単位: cm

g. 必要サイクル・タイム---以上の前提から各サブシステムの必要サイクル・タイムは表-3のように計算される。

切端	CTR	切端	CTR
D	210.7	M	300.0
J	282.1	A	600.0
O	188.1	F	600.0
N	200.0	W	600.0

表-3 CTR

単位: min

h. 機械系---投入機械系は低能力、中能力、高能力の3種類をとり、スパン長はアーチ部を15mに固定

した。

6. シミュレーション結果の解析

(1) ポイント間隔の変化に対するシステムの挙動

図-9はポイント間隔をパラメータとして同一の機械系で3日間(実働60時間)のシミュレーションを行った場合のおくれの割合を示すグラフである。おくれの割合

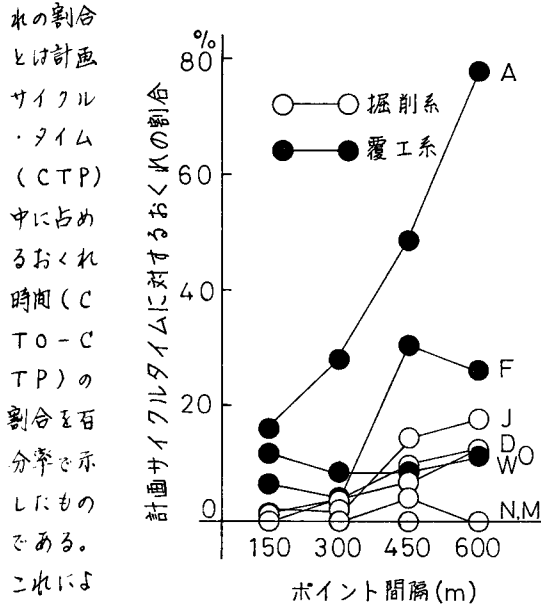


図-9 ポイント間隔とおくれの割合の関係

クリート打設作業(A)のおくれの割合とポイント間隔の間には強い相関がみられる。即ち、ポイント間隔が増大すればおくれの割合は加速度的に増大する。又導坑(D)、上半(J)、大管(O)についてもポイント間隔の増大にともな、ておくれの割合も増加するがアーチ部(A)ほど顕著ではない。これは覆工関連作業の1サイクルの大部分が列車の坑外作業場所と坑内作業場所との往復によって形成されるため運行上のおくれがサイクル・タイムのおくれとして累積し反映しやすい形態であるのに対し、掘削関連作業は原則として1列車で1発破分のすり出しを行うという前提のため、切端が解放されさえすれば列車運行上のおくれがサイクル・タイムに影響しないという著しい列車運行形態の相違によるものと考えられる。従って、胸付コンクリート打設作業(F)のおくれの割合の変化が激しいのもこのような結果によるものと解釈される。

(2) 合理的機械系の探索

合理的機械系探索の結果の一部を図-10, 11に示す。図-10は導坑, 図-11はアーチ部について示したものである。ケースと機械系Nの対応を表-4に示す。表-4において影をほどこした部分はCTRを満たさない機械系である。(○印は合理的機械系)

ケース	切端							コスト (百万円)
	D	J	O	N	M	A	F	
1			N1				N1	486.5
2			N2	N2		N2	N2	530.1
3	N3	N3	N3	N3	N3	N3	N3	554.8
4	N3	N3	N1	N2	N3	N2	N1	533.8
5	N3	N4	N1	N2	N3	N2	N1	536.4

表-4 ケースと機械系の対応

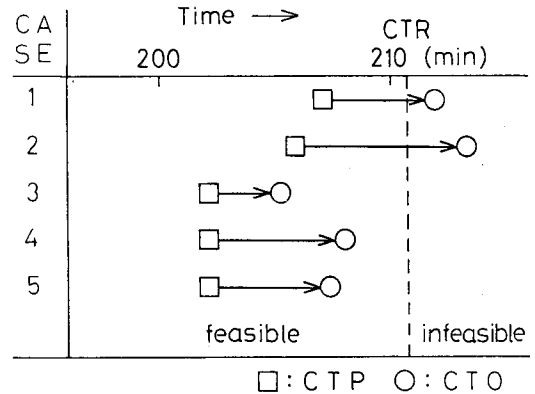


図-10 導坑(D)のシミュレーション結果

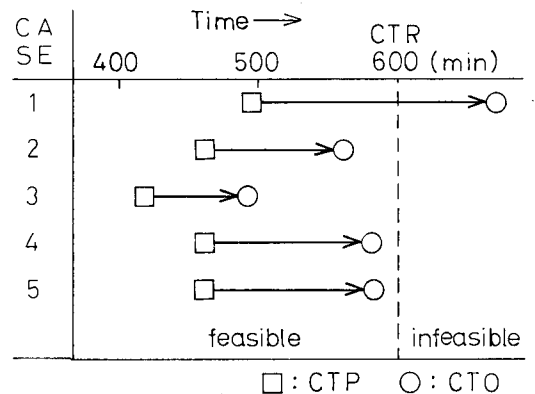


図-11 アーチ部(A)のシミュレーション結果

7. あとがき

極めて多くの要因が錯綜するトンネル工事の解析にはシミュレーション手法が有効であるが、今後はさらに多くのケースをシミュレートし、結果に対して十分な評価・検討を加える必要がある。