

東大工学部	正員	島田治郎
	学生員	太田香榊
電々公社	正員	○田中重治
東大工学部	正員	橋本恒郎

### 1. 模擬施工の意義

トンネル施工は多くの作業箇所を有し、かつ空間的に限定された運搬路レが持たれているといふ点、その特徴がある。したがってそのシステムはきわめて複雑である。仮りに作業時間が何分一定であるという仮定を置くならば、施工の進捗状況を解析的の方法で予想することは可能であろうかと思われ、実際にはトンネル施工の諸作業に要する作業時間は掘削の進行に伴って変化する諸条件によって、著しく変動する。この点の解析的方法を用いることは困難である。しかし、作業は施工の進捗に従って時々刻々変化はするが、トンネル施工は基本的にはほぼ同じような種類の作業のくり返しである。このような特徴を持つシステムの解析に適した一つの手法として、電子計算機を使った模擬施工、すなわち同上施工（シミュレーション）を行って解析することが考えられる。この方法は、詳細な作業手順と基本的な作業時間分布を計算機に記憶させ、乱数を用いてトンネル施工をできる限り忠実に再現させようとするものである。すなわち、掘削・覆工作業の進捗とともに必要となる運搬車（トロッコ、アジテータ等）と実際に同上で動かして、それらと互いに影響しあつて作業を進めていく様子、すなわちそのような状況を定量的に把握しようとするものである。したがって、シミュレーションの結果は、計算機に記憶する作業手順（施工法）と作業時間分布のデータによって決まる。作業時間分布は作業の性質や作業の対象、管理の程度によって一般化はできらぬ。データとして計算機に記憶させる作業時間分布についての議論は別の機会に行うべき。

このようにシミュレーションによる施工研究は、いろいろな作業手順（施工法）の比較検討を行つたり、ある作業手順に対して、作業時間分布のデータといろいろな環境とを比較検討する場合に有用であろう。しかし、シミュレーションはあくまで設定された場合（case study）だけについてのものであるから、一般の比較検討に用いることはできず、あるトンネルの施工管理のための判断の参考資料としてとか、従来施工工法のことやいろいろな長大なトンネルなどに対して、ある条件のもとでの施工法選択のための参考資料として用いる場合に有用であろう。

### 2. 模擬施工の手法

たとえは導坑切羽に於けるすり橋を行つたところトロッコは、必要に応じて切羽と坑口の間を往復し、その間にその運行をさすけりいろいろの要素と出会つて行かう。これらの要素は作業の手順（施工法）によって、またその時々刻々のトンネル全体の施工の状態によって異なるが、通常の上昇掘削、覆工、大管・土管掘削、側壁コンクリート打設などの諸作業や、脱線その他事故等によってこれに相当する。また単線と複線をつなぐポイントの位置とこの線路の配置によつても、他の運搬車との競合関係が

変化する。このように通行の妨げと成るような要素により、トロッコはその地裏で待機をしなければならぬ。この場合、その妨害の発生する可能性のある箇所はその施工法・線路配置を以てし、あらかじめ予想することはできる。シミュレーションにおいては、このようにトロッコの待機を起す可能性のある箇所を Gate と設け、gate の閉鎖によりトロッコの進行を制する。すなわち他の作業、その他の要因によりトロッコの進行の妨げられるときは gate を閉じて進行を止め、トロッコが通行可能な条件がそろえば gate を開く。gate を通過したトロッコは次に予定されている作業（たとえばすりつき、土捨てなど）を、単なる区間を走行するのではなく作業も含むとして行う。このための必要な作業時間はあらかじめデータとして与えられた作業時間分布から乱数によって与えられる。トンネルでは作業箇所が数箇所あり、それぞれ一つの作業箇所のために一台のトロッコが動く。互いに影響を及ぼして作業を進めなく。これらの動きは実際には同時に併行して行われるが、計算機の中で個別的に順次計算していかざるを得ない。ここでは単位時間ごとの各作業の進捗を抜きとら進める方法ではなく、一つの作業と他の作業は無関係に行きうる範囲において、一括して作業を進める。そしてこれらの一連の作業の終了時刻、すなわち次に行動を開始する予定時刻を記憶しておく。その次に行動する時刻がもっとも早いものから順に作業の計算を行う。具体的にはトンネル施工を各作業と他の作業と無関係に行きうる範囲において一連の作業に区切り、施工システムの中を移動して作業をこなすものの流れ、実行される一連の作業の順序をブロック・ダイアグラムで表現することは出来る。模擬施工はブロック・ダイアグラムによって指定された一連の作業の順序（作業の予順、すなわち施工法）を以てして多くの作業を行なうための行動要素 (transaction) を移動させることとして行われる。transaction はブロック・ダイアグラムで表わされるシステムの中を移動する作業を順次にこなすことをその総称であり、運搬車やその例である。しかし、たとえば、ある種の transaction は切羽や上り下りすりつき以外の作業を進捗させるための一連の作業を意味することもあり、また、税線争取などもある種の transaction がシステム内を移動し、モデル化されたトンネル内の各所にある gate の logical switch (transaction の前進・待機を指示する信号機のようなものであり待機を指示する set と前進を指示する reset のいずれかの状態にある) を閉鎖して行われることとして生じさせられる。このように多くの transaction が各作業をあらかじめ定められた順序で行なっていく。たとえばすりつき切羽では切羽を走行し、切羽に到着すると、すりつき作業が始まるまで待機し、すりつきが完了すれば土を積み、さらに走行して坑外へ出、土捨てを行なう。これだけの作業をトロッコが transaction の一つで行なうのである。ある作業の完了する時刻は、その作業の始まる時刻に乱数によって与えられた作業時間を加えて定められる。このようにして transaction はその定められた順序に従って順次作業を行なってゆく。ある transaction が現在こなしている作業を終了する時刻をその予定時刻として記憶する。システム内には多くの transaction が動き回っており、それぞれが作業完了予定時刻を覚えて記憶されている。多くの transaction のうち、次の作業をこなすために前進させられる transaction はその予定時刻のうち最も遅い将来に起るものをその transaction が受け持つ。このようにして、次々と transaction が動くことでゆくことで、順次模擬施工が行われゆく。模擬施工の進行とともに、トンネルの施工システムそのものが次第に変化していく（たとえば切羽の位置、

と他の作業の所へ位置が変化しにくくなる)。したがって、2 あるいはそれ以上の transaction はシステムそのものに順次変化させてゆく機能をも果す。

### 3. プログラムの説明

本シミュレーションは静的要因としてのプログラムと動的要因としての transaction とで構成される。ここには主要なプログラムの機能を説明する。

#### (1) ADVANCE block

advance block に transaction が入るとその transaction が advance block にとどき時間計算され、transaction の次の行動開始時刻が与えられる。advance block には次のような sub program がある。

##### • RUNTIM (DS(a), DS(b))

作業箇所 a から b までの距離を走行速度で除して与えられる。

##### • MUCKING TIME (a)

作業箇所 a におけるすりつみ時間と、あらかじめ与えられる作業時間の合算形に従って与える。

#### (2) Transaction の発生、消滅に関する block

##### • GENERATE , SPLIT

この 2 つは共に transaction を発生させる。これらのプログラムの中で発生した transaction が行動要素として順次動かされる。

##### • TERMINATE , SKIP

transaction を消滅させる block であり、ここでも消滅させられた transaction はもはや行動する対象からはずされる。

#### (3) Transaction の制御に関する block

##### • GATE (LS1, b)

作業の状態がどにより transaction を停止させるために設ける。この gate を構成する logical switch LS1 が閉じている場合は通過でき、開いていれば b という名前を持つ行列に入ると LS1 が開くまで gate を並ぶ。gate の待ち行列に入ると transaction は skip されて行動する対象からはずされる。

##### • TRANSFER (LS1, LS2, b)

作業の状態がどにより transaction を停止させるために設ける。この block を構成する logical switch LS1, LS2 のどちらかが閉じている方へ transaction は動く。どちらとも開いていない場合は b という名前の待ち行列に入り skip される。

##### • RESET (LS1, b)

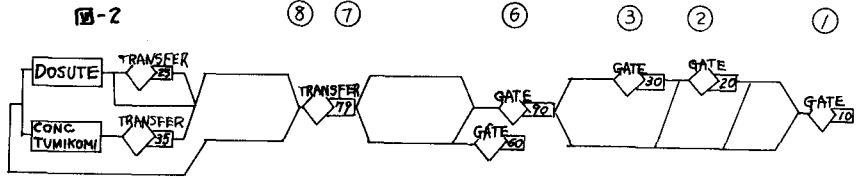
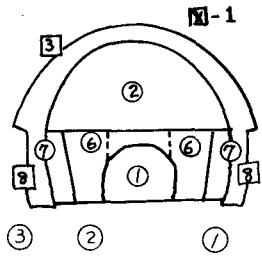
logical switch "LS1 が閉じている状態を通行可能にする。それによって LS1 が開いていない状態の待ち行列に入ると transaction のうち一番前のものを行動する対象に復帰させる。

#### (4) Output data 用の block

その他、Fortran Statement を用いることが出来る。

#### 4. 導坑先進上部半断面工法のモデル化例

作業箇所は図-1で示される。モデル化したGATEの配置は図-2で示される。図-2のまゝの中の数字は作業箇所を示し、図-1の番号と一致する。すなわち導坑切羽、上半切羽、上半覆工、大背、土平、坑口とそれぞれ、gate 10, gate 20, gate 30, gate 40, gate 60, gate 79, transfer 79, transfer 25,



transfer 35がある  
 乙、運搬車の走行を妨げる。

(transferは複数個のgateに相当する。) gate 10は1列車ずつすり越しをさせる。すり越し以外の作業のときには待機させる。脱線線と他の事故とによって閉じる。などの働きをし、gate 20, 30, 60は1列車ずつ作業をさせる働きをする。gate 40は大背の登破のときや脱線事故のとき閉じる。土平付近のtransfer 79においては、土平登破時や側壁コンクリート打設のためのアジテ-ブカ-による複線の線路のいすれもふさぐれれとりに閉じる。坑口のtransfer 25は導坑以外のすりつみトロツエ適当に必要なところへ配合し、transfer 35はアジテ-ブカ-を適当に必要なところへ配合する。以上の運搬車の走行を制御するおもなものであるが、このモデルをプログラミングに表わすと、315個のプログラムが必要とし、紙面の都合で書くことができないので省略する。このようにトンネル施工のシミュレーションのためのプログラムはかなりの複雑になるが、実際の施工をかなり忠実に表現しようとする実用的には有用ではなかと思われる。

#### 5. 計算例

施工管理の影響を知りたい事故(脱線その他)の発生間隔と事故の継続時間と作業の稼働率を調べた例が図-3と図-4である。

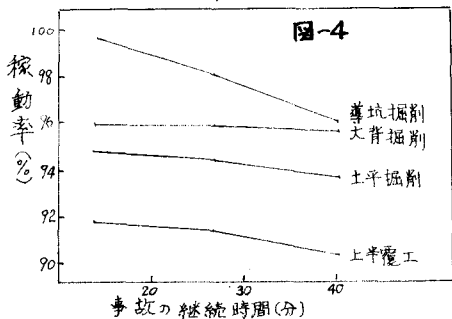
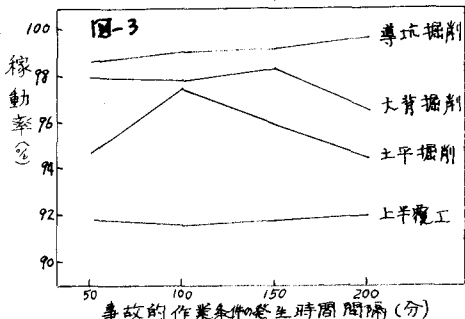
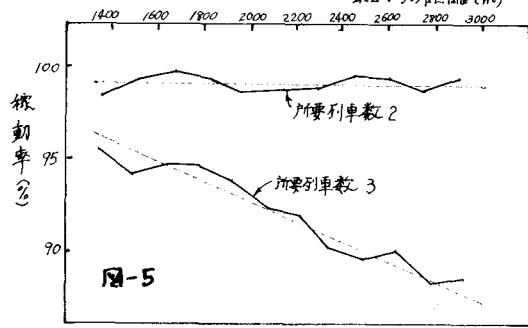


図-3より事故の発生間隔は作業の稼働率にそれ以上影響を与えないことがわかる。図-4は事故の継続時間が与える影響は、坑奥の作業に於てより大きいことを示している。

図-5は導坑のすり越しに必要な列車数(進行によって異なる)とその現場で使用している列車数が切羽の稼働率に与える影響を進行とともに示したものである。これらの例は単にあり1つのcase studyの結果を示したもので、施工法やinput dataによつて別の結果もありうることをことわっておかなくてはならない。

導坑掘削 使用列車数2



モデル化をする際に、さらに現実に近く表現することは別の結果が出るであろう。