

地下鉄開削工事における掘削工程の システムミュレーション

SYSTEM SIMULATION OF EXCAVATION WORKS ON
OPEN-CUT SUBWAY CONSTRUCTION

春名 攻*・田坂 隆一郎**

By Mamoru HARUNA and Ryuichiro TASAKA

1. はじめに

近年、地下鉄道や高速道路のような市街地土木工事は盛んに行われているが、工事内容は複雑かつ高度な技術を要し、施工条件も従来に比べてますます厳しくなってきている。代表的な市街地工事である地下鉄工事の掘削・土留作業に対しては環境・公害の面からも種々の規制が加えられている。地下鉄工事の全体工程の中に占める比重の大きい掘削工事においては掘削工程計画の定量化を図り、構築工程との関係を把握することは全体工程を合理的に推し進めるうえで重要な事項であるといえる。

しかしながら、従来の施工計画作成法では本体構造物の構築工程を最重要視し、掘削工事はそれに伴う二次的な作業工程であるとの評価を受けてきた。施工計画の内容としては掘削工程の開始・終了時期、日平均施工量、投入機械系の機種と台数に関して概略の規模を決定するだけで、その計画・管理行為の主要な部分は施工途中の管理統制への努力に注がれていたといっても過言ではない。

したがって、掘削工程の定量化を図り、構築工程との関連性を把握して実行可能性の高い施工計画を作成することは、地下鉄工事の施工を合理化し、かつ工事の施工目的を達成するうえで必須の課題であるといえよう。

2. 掘削工事における計画問題

(1) 掘削工程の位置づけ

親杭横矢板による地下鉄工事の開削工法^{1),2)}は、図1に示すように、地表面から掘り下がり、所定の位置に

地下鉄構造物を構築した後にその頂部を埋戻して地表面を復旧する工法である。市街地工事の場合、工事現場の作業空間が狭いために、掘削作業に先立って打設した土留杭の間に木矢板を挿入して土留めするとともに、地表部に覆工版を敷設するのが普通である。

これらの工程において、掘削工事と構築工事は両者の工事期間を合わせると全体工期の80%程度を占めるこもあり、工期・工費の両面における主要工種であるといえる。また、構築工事は基礎底面まで掘削完了した部分から順次施工されるので、両者の工程は施工の単位、施工順序、工程のスケジュールにおいて直接に密接な関係を有しております。掘削工程の良否は地下鉄工事の施工目的である本体構造物の構築工程に多大の影響を与えることがわかる。

(2) 掘削工程計画の位置づけ

筆者らは、土木工事における計画・管理業務の内容を工事の実施される手順・業務内容の段階に従って、

① 計画情報作成段階、② 総括計画作成段階、③ 詳細計画作成段階、④ 施工管理段階、の4つに分類した³⁾。これらの中で、総括計画作成段階は工事全体の施

図-1 開削工法による地下鉄工事の施工順序

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科教室

** 正会員 工修 (株)鴻池組本社技術研究所 主任研究員

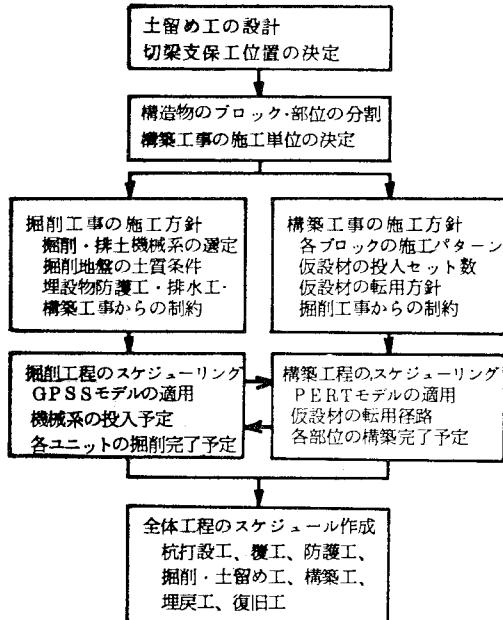


図-2 地下鉄工事（開削工法）における総括計画の作成手順

工方針を立案し、主要工種の計画要素の内容を決定するもので、地下鉄工事について示すと、図-2 のような手順によって掘削工事と構築工事の計画作成が中心となっている。

掘削工事は構築工事とは異なり、工種間の技術的順序関係や仮設資材転用順序の決定のように、事前に施工順序を規定すべき要素は少ない代わりに、土留工・排水工・埋設物防護工等の施工技術的条件、掘削工事の機械系の処理能力と投入台数、構築工事の施工方針などの工程上の制約となる諸条件、作業時間・騒音振動・残土処理に対する規制、交通事情の影響など、施工計画作成にあたって考慮すべき重要な多くの要素に取り囲まれている。

こうした特徴を有する掘削工事の内容を定量的に表現するには、作業間の順序関係を事前にしかも詳細に規定して与える必要のある PERT 等のネットワーク手法によるよりも、システム内に用意されているクロックタイムと掘削工程の優先順位の規則を用いて作業間の順序関係をスケジュールの計算過程において選択することのできる GPSS (General Purpose Simulation System) 等によるシミュレーション手法を適用する方が都合がよい。

本研究においては、こうした考察に基づいて離散型シミュレーション言語 GPSS を用いて掘削工程の内容を記述し、掘削工程計画ならびに構築工程計画の作成に必要な情報を提供することをねらいとしている。

掘削工程計画は、1) 掘削工事に直接影響を与える土質性状、地下水の状態等掘削対象地盤の施工条件、2)

掘削工事に投入される機械系の機種・処理能力・台数、3) 掘削工事に先行する地下埋設物 や周辺地盤の防護や交通路の切換え、4) 掘削工事と併行して施工される土留工・切ばり支保工等の仮設計画、5) 掘削工事に後続して施工される地下鉄本体構造物の施工計画、など関係するすべての計画要素を検討して作成する必要がある。

(3) 機械系の選定と掘削工程のスケジューリング

通常、各作業に投入される機械群は 1 つのセットを構成して稼働することが多く、そのような場合には個々の機械・機種の処理能力がバランスするように、所要期間および所要費用の両面において最も望ましい組合せの機械系を選定することが要求される⁴⁾。

地下鉄の掘削工事においては、掘削押土、排土積込、搬出捨土の各作業に用いられる機械の機種、能力、台数が 1 つの主要な計画要素となる。

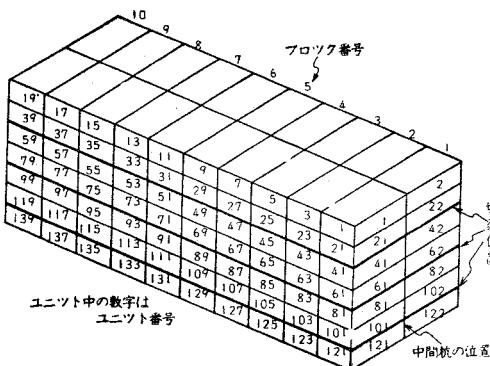
さて、掘削工程のスケジュール作成にあたっては、投入される機械系の機種、処理能力、台数、および掘削工事に先行する工事や後続する工事から加えられる制約を満足する工程代替案の中から、最も実行可能性の高い代替案を選択する必要がある。機械系の選定問題を解くにあたって掘削工程のスケジュールは計算されるが、これは最も望ましい機械系を投入し、かつ施工上の制約条件も標準的な状況を推定した場合のスケジュールであるから、掘削工程計画の作成にあたっては 1 つのめやすを与えるものではあっても、工程上の実行可能性を保証するものではないことに注意しなければならない。

3. 掘削対象地盤のユニット分割

掘削工事を行うにあたって、掘削対象地盤は地盤の土質、土留杭・中間杭位置、切ばり支保工位置、地下埋設物位置、掘削機械系の稼働性、構築工事の施工ブロック、などの諸条件によってある規模の施工単位に区分される。すなわち、路線方向では主として掘削機械系の稼働性と本体構造物の構築工事の施工単位の影響を受ける。機械系の選定においては掘削機械の施工能力が最も能率よく発揮できる規模とするのが望ましく、掘削工程のスケジュール作成においては構築工事の施工単位と対応づけておく必要がある。また、深さ方向には土留計画に基づいて架設される切梁支保工の位置と掘削面の安定性を保持するために設けられる段差によって区分される。

横断方向については中間杭の位置によって掘削対象地盤は分断されるから、掘削工程の施工単位の設定に影響を与える要素となる。

以上の考察から、掘削対象地盤は路線方向の分割面、切ばり支保工および土質条件によって設定される深さ方



5. GPSS による機械系選定のシミュレーション

(1) シミュレーションモデルの作成

さて、前章における分析から、掘削工程は掘削押土・排土積込・搬出捨土の掘削作業、切ばり架設作業、矢板組立作業によって構成されており、これらの作業は掘削土の動きを通して相互に関連している。掘削工程はこれらの作業を順次サイクリックに繰り返すことによって進むことになる。

離散型シミュレーション言語 GPSS を用いて機械系選定のためのシミュレーションモデルを作成する場合、プログラムシステム内を移動するもの（トランザクション）として掘削工程の内容をよく表わし、かつ機械系の選定に適切な情報を与えうるものを取り上げなければならぬ。ここでは掘削押土・排土積込に関してはトラック 1 台分の掘削土を、矢板組立作業および切ばり架設作業に関してはそれぞれ 1 施工単位の施工量をトランザクションとして設定することにした。このようにトランザクションの単位を設定したのは、主としてシミュレーションモデルのプログラマ化を行う場合の技術的問題と計算機容量による制約のためであるが、機械系選定のための種々の分析を行うにあたっても精度上の問題は生じないと判断したためである。また、排土積込を行うクラムシェルの動きについては、クラムシェルはブルドーザによって掘削押土された土をダンプトラックの到着を待って取扱うのであるから、ブルドーザの動きに後続し、ダンプトラックの移動に支配される。このために、クラムシェルの動きに関しては独立したトランザクションを与えないことにした。

図-4 は、こうした考察のもとに機械系選定のためのシミュレーションモデルの内容をフロー図の形で表わしたものである。図中の実線はトランザクションの流れを示し、点線はシミュレーションモデルにおけるトランザクションに対するコントロールの方向を示している。また、ダンプトラックを表わすトランザクションはトラック台数分だけ発生させて、積込ステージと土捨場の間を往復してサイクリックに動く様子を表わすために計算過程で消滅しないようにしている。図中ではトランザクションの記号として T_r を用い、待ち状態から解放される場合には Y で示し、トランザクションの動きをコントロールする場合には Y と N を用いて表わしている。

(2) シミュレーション実施におけるパラメーター

さて、シミュレーションの実施にあたって代替案を構

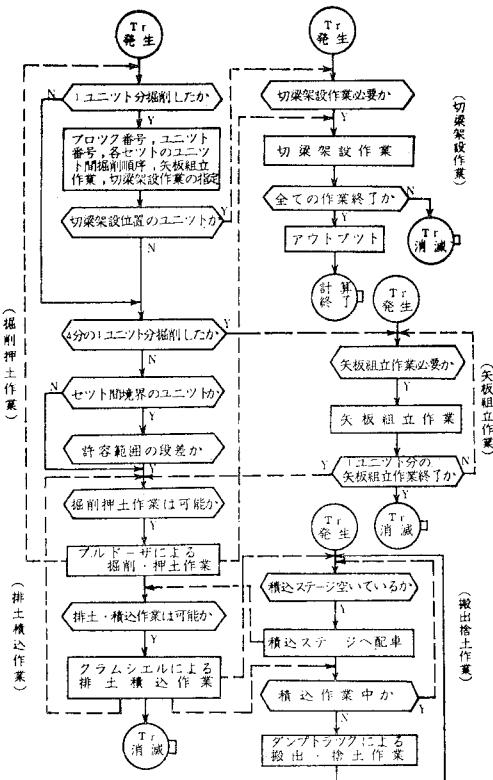


図-4 機械系選定におけるシミュレーションフロー

成する一般的な要素としては、① ブルドーザの機種、能力、② ブルドーザ台数、③ クラムシェルの機種、排土能力、④ クラムシェル台数、⑤ 機械系の掘削分担ブロック、⑥ ユニット間の掘削順序、⑦ ユニットの規模、⑧ トラックの積込み能力、⑨ トラック台数、などが考えられる。

ここでは機械系の選定問題をシミュレーションの目的としているので、以下のような考え方によって計画変数の数を減らすこととした。

まず、ブルドーザについては、ブルドーザとその補助機械がクラムシェルとセットとなって稼働するものとする。すなわち、ブルドーザ台数とその掘削押土能力はクラムシェルの排土能力に十分見合うものを投入する。

掘削分担ブロックの設定の仕方としては、① 各セットの分担するブロックを固定する、② 掘削残土量が各セットにほぼ等しくなるようにスケジュール計算のつど各セットの掘削分担ブロックを設定する、という 2 つの考え方をすることができる。機械系の選定問題を端的に把握するためにここでは① の考え方を採用することとし、② については後述の掘削工程のスケジューリングにおいて適用することとした。

ユニット間の掘削順序は掘削分担ブロックの設定の仕方、各ブロックの掘削開始可能期日、掘削終了期限など

表-1 機械系選定におけるパラメーター

機械系 ケース 番号	ブルドーザ (セット)	クラムシェル の能力 (m³/サイクル)	各クラムシェルの掘削分担ブロック番号				ダンプトラックの投入台数
			第1セット	第2セット	第3セット	第4セット	
1	2	0.6	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 8, 9, 10			10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
2	3	0.6	1, 2, 3, 4	5, 6, 7	8, 9, 10		同上
2'	3	0.8	1, 2, 3, 4	5, 6, 7	8, 9, 10		同上
2''	3	0.6	1, 2, 3	4, 5, 6, 7	8, 9, 10		同上
3	4	0.6	1, 2, 3	4, 5	6, 7	8, 9, 10	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18

の見通し、掘削段差の許容条件の設定の仕方を変えることによって変わるが、機械系の選定にあたってはこれらの諸条件を固定するか、制約条件として与えない場合には経験上考えられる掘削順序を想定して与えることができる。

各ユニットの規模については、機械系の稼働性、掘削対象地盤の土質条件・排水条件および構築工事の施工単位を検討して定める必要があるが、ここでは通常の掘削段差およびブルドーザの施工性を考慮して前述の図-3に示した規模のユニットを用いることにした。

ダンプトラックの積載能力は 10 トン車 (7 m^3) のものとし、また、クラムシェルは 0.6 m^3 のものを基本として 0.8 m^3 の能力のものと比較することにした。

表-1 は適用工事の規模、施工期間を考慮して上述の考察に基づいて定めたシミュレーション実施にあたってのパラメーターを一覧にして示したものである。

(3) シミュレーション結果の考察

a) 掘削作業日数と機械系費用の関係

機械系費用としては、ブルドーザ、クラムシェル、ダンプトラックの各機械の使用損料にそれぞれの延べ拘束日数を乗じたものを用いている。

クラムシェルの投入台数およびダンプトラックの投入台数をパラメーターとして、掘削作業日数と機械系費用との関係を示したものが図-5 および図-6 である。

図-5 からは、日数と費用との間には明確なトレードオフの関係が認められ、クラムシェルとブルドーザを 1 セット増加すると、クラムシェルの能力を 0.6 m^3 から 0.8 m^3 に増加するのとでは作業日数では同等の短縮効果があるが、費用的には後者の方が優れていることがわかる。また、図-6 から、トラック台数を固定してクラムシェルの投入セット数を変化させた場合、トラック台数 13 台まではクラムシェル 3 セット投入するのが望ましいことがわかる。

b) クラムシェルの稼働率とトラックの待ち時間分布

トラック台数とクラムシェルの稼働率の関係を示すと、図-7 (1)～(3) のようである。クラムシェルの分担するブロック数が等しくない場合には稼働率の低いクラ

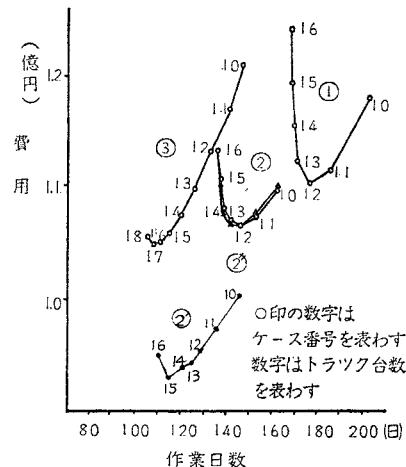


図-5 作業日数と費用のトレードオフの関係
(パラメーター： トラック台数)

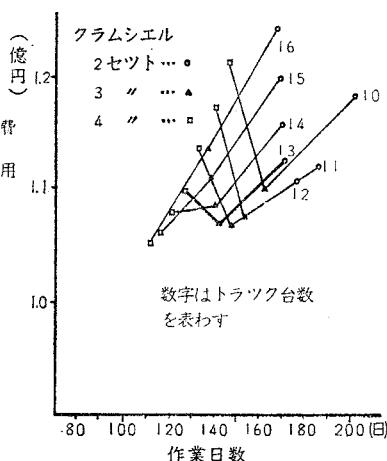


図-6 作業日数と費用の関係 (パラメーター：
クラムシェルセット数)

ムシェルが出てくる。

また、トラック 13 台の場合について、各ケースのトラックの待ち時間分布を求めたものが図-8 (1)～(3) である。ケース 1 ではトラックはほとんどの場合待ち時間があり、ケース 2 では待ち時間のない頻度が最も大きい指数形の分布形となる。4 セット投入の場合ダンプト

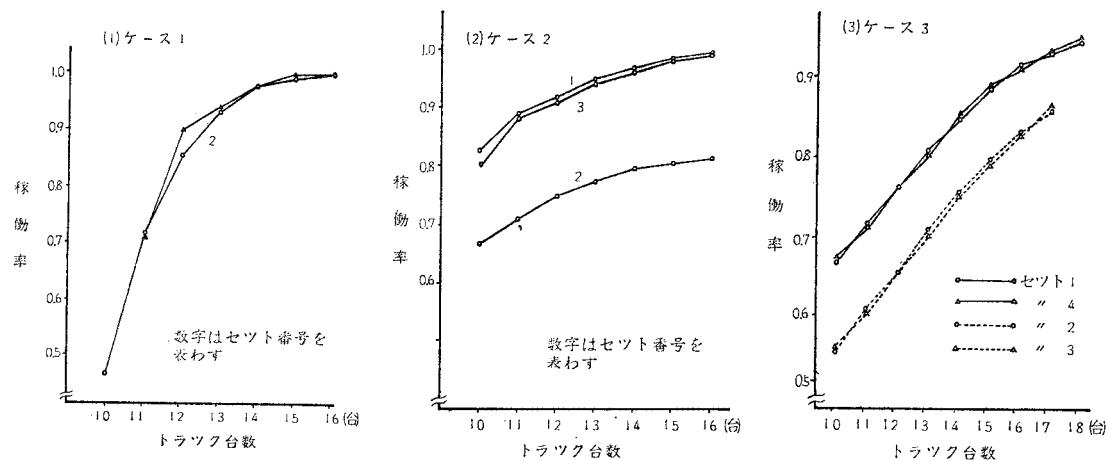


図-7 トラック台数によるクラムシェル稼働率の推移

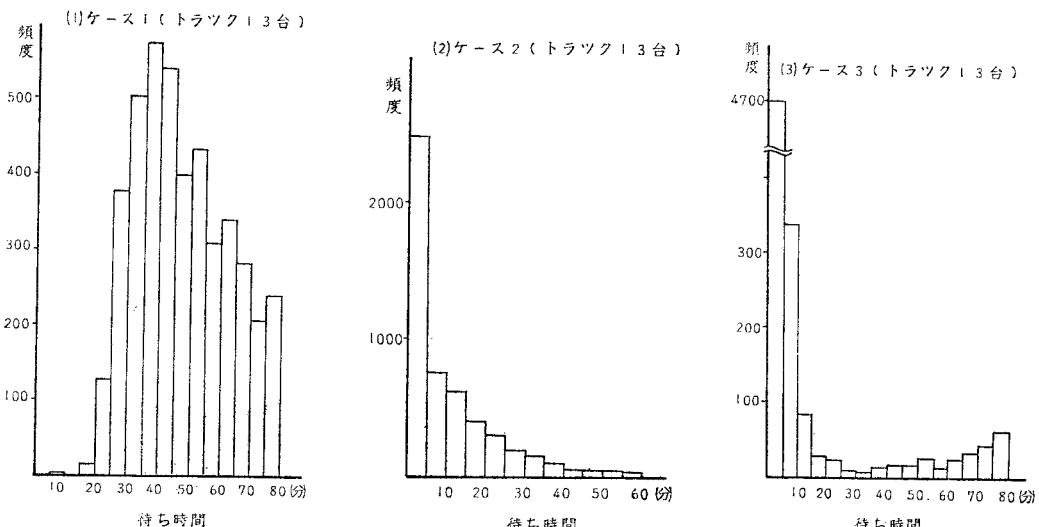


図-8 トラックの待ち時間分布

ラックはほとんど待ち時間なく積込み作業を受けるが、セット間の段差許容条件、切ばり架設による掘削作業の中斷があると待ち時間を生じる場合のあることがわかる。

6. 掘削工程スケジュール作成のためのユニット分割

掘削工程のスケジュール作成段階では掘削対象地盤の土質条件、掘削方法、構築工事の施工単位となるブロック分割等が明らかにされているのが通常である。機械系の選定にあたっては機械系の稼働距離を路線方向のユニット分割の基準として考えたが、掘削工程のスケジュール作成にあたっては、後続の構築工事との関係を強く意識する必要があるので、構築工事のブロック分割の長さ

が投入機械系の稼働距離を満足するのであればブロック分割長をそのまま掘削工程のユニット分割に用いる方が望ましい。また、掘削対象地盤の土質が機械系選定にあたって想定したものより良好な条件であれば掘削段差を大きく取ることも可能であり、また反対に当初想定したものより相当軟弱であれば各ユニットの深さを小さくするなど、実際の条件に合わせてユニット分割の基準を修正する必要がある。また、横断方向は通常中間杭等によって2分割された形で施工されるが、切ばり支保工の架設時期には両側の掘削面は等しくされることになる。図-3に示した3次元の一般的なユニット分割は、これらの状況を考慮すると、2次元のユニット分割として取扱うことが可能となる。このようにすると、各ユニットは切ばり支保工の位置と対応する掘削段階番号 i と構築工事における施工ブロック番号 j の組合せによって、マ

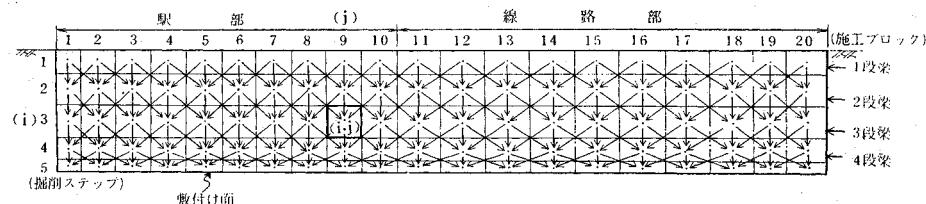


図-9 掘削工程のスケジュール作成のためのユニット分割と掘削順序のモデル化

トリックス (i, j) の形で表わすことができる。

また、各ユニットの施工技術的側面からの制約条件としては隣り合うユニット間の段差のみを取り上げればよいが、その値が 1 ユニット深さまで掘削可能という条件は、「あるユニットは、同じ施工プロックの直上のユニットの掘削と切替り支保工の架設が完了し、左右両隣りのブロックの 1 段上のユニットの掘削が完了すれば、掘削可能な状態となる」と表現することができる。ユニット分割を掘削ステップ i と施工プロック j によるマトリックスの形で示し、さらに掘削段差の許容条件を矢線で示して掘削工程の施工順序をモデル化すると図-9 のように表わすことができる。もし、局的に軟弱な地盤が存在する場合にはその部分の段差の許容条件を満足するように矢線を付すればよい。プログラム上では各ユニットに入ってくる矢線の数の数字を各ユニットに与えると、その値が 0 になれば掘削可能な状態になったと判定される。次に掘削されるユニットはこれらのユニットの中で、施工管理上の制約条件を満足し、構築工事の優先順位の最も高いブロックに属するものである。

7. GPSS による掘削工程のスケジューリング グ¹⁰⁾

(1) 掘削工程のシミュレーションモデルの特徴

ユニット分割と掘削順序の選択に関して、掘削工程のスケジュール作成モデルと機械系選定モデルとの相異点について触れたが、シミュレーションの内容に関してもいくつかの異なる点がある。すなわち、

① 機械系選定モデルではスケジュール計算の単位を分とし、1 日 8 時間稼働として日換算を行ったが、掘削工程のスケジュール作成モデルでは 1 ユニットの所要時間を検討してスケジュール計算の単位を日としている。

② 掘削対象地盤の土質を粘性土と砂質土に区分し、ブルドーザとクラムシェルの処理能力をそれぞれの土質に対応するように与えている。排土工法ではホッパーを有する場合とそうでない場合のそれぞれに適用できる。

③ ブルドーザ、クラムシェル、ダンプトラックの投

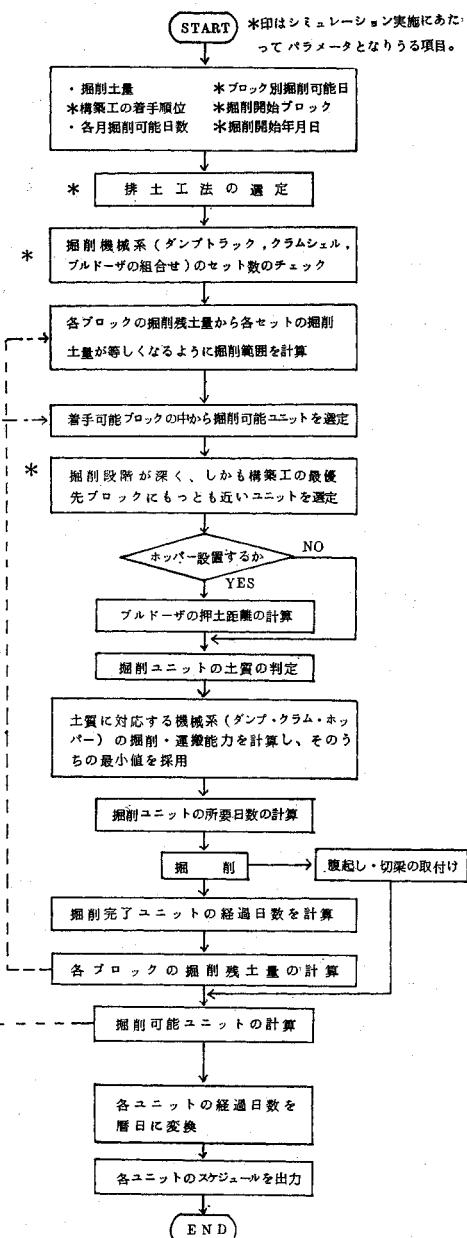


図-10 掘削工程のスケジューリングのためのシミュレーションフロー

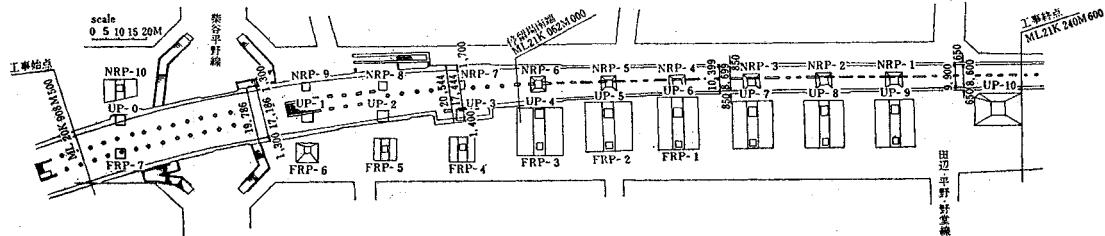


図-11 適用対象とした地下鉄工事の平面図

表-2 掘削工程のスケジューリングに与えた制約条件

ブロック番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
掘削開始ブロック						○									○					
掘削開始日からの遅れ日数	45	55	75	50	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	40
構築工事の着工順位		5				2			1		4				3				6	
機械系の投入台数	ブルドーザおよびクラムシェル……工事期間中各2セット ダンプトラック……1~30日 6台, 31~70日 8台, 71~130日 12台, 131日~6台																			

入台数を期間別に変更できるようにして、掘削工事の施工能力は各機種のうち最小能力に従うものとしている。また、各セットの掘削範囲は掘削残土量が等しくなるように設定している。

④ 各ブロックの掘削可能時期は、杭打設工や各種防護工のように掘削工事に先行する工事の影響による、掘削開始日からの遅れ日数を与える。

⑤ 構築工事のスケジュール計算結果から各構築ブロックの着工順位を求め、それを掘削優先規準として与えている。

⑥ 掘削工事と併行して行われる土留工、切ばり支保工の各作業の中で、土留工は各ユニットの日々の掘削作業の中で処理するものとして省略している。

⑦ 各ユニットのスケジュールはユニット分割と同様の形のマトリックスで出力される。その場合、掘削開始年月日と各月掘削可能日数を与えることによって、掘削開始日から掘削完了日までの正味日数による表示と歴日表示の両方のアウトプットが得られる。

図-10は、上記の項目を組込んだ掘削工程スケジューリングのためのシミュレーションプログラムのフローを示したものである。図中の*印および・印の付した項目はインプット項目を示したものであり、特に*印は工程制約条件の変化と対応してシミュレーションのパラメーターとなりうる項目を表わしている。

(2) 適用工事の概要

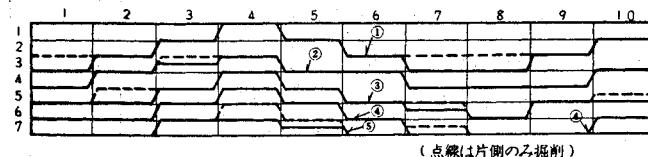
図-11は、機械系の選定および掘削工程のスケジュール作成のためのシミュレーションモデルの適用対象として取り上げた地下鉄工事の平面図である。

掘削工程のスケジュール作成にあたっては、機械系の選定時点と異なり、種々の制約条件が具体化していた。シミュレーションの実施に際して与えた制約条件を取りまとめて示すと表-2のようである。

(3) シミュレーション結果の考察

掘削工程のシミュレーション結果は施工ブロックと掘削段階を行と列とするマトリックスの形で出力される。スケジュールは各ユニットごとに正味日数と歴日数の両者で表示されるようになっている。

(a) 機械系選定によるスケジュール (クラムシェル3台 トロツク13台)



(b) 実際の制約条件を組込んだ掘削工程のスケジュール

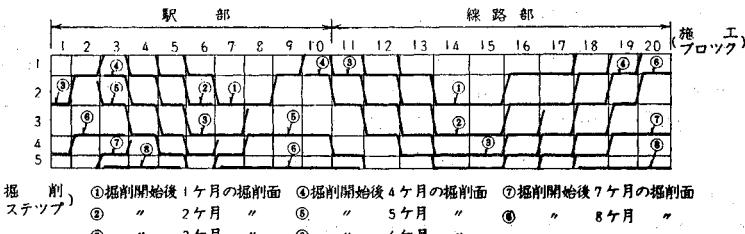


図-12 掘削工程のスケジュール (1か月ごとの出来高表示)

掘削工程の進行状況を視覚的に捉えるために、工事開始後 1 か月ごとの出来高を図示すると、図-12 のようである。図-12 の (a) は機械系の選定にあたって、作業日数および費用の両面からもっとも望ましい組合せとして判断されたクラムシェル 3 台とダンプトラック 13 台（ブルドーザ 3 セット）の機械系を用いた場合のスケジュールである。このケースでは表-2 に示した掘削工事に対する制約条件は与えていない。また、図-12 の (b) は表-2 に示した制約条件のもとでの掘削工程のスケジュールである。掘削順序や敷付け面の到達時期については実際の工事の進行状況とよく合致していた。このような掘削工程の進捗状況図を作成することにより、工事管理者は計画内容の確認を行うことができ、掘削工事の工程を定量的に把握するのに役立てることができる。

8. おわりに

本研究においては、掘削工程計画における主要な課題として、機械系の選定および掘削工程のスケジューリングの問題を取り上げ、それぞれに対してシミュレーションモデルを作成することにより、掘削工程計画の体系化を図った。

前者においては、ブルドーザ、クラムシェル、ダンプトラックにより構成される機械系において作業日数と費用との間にトレードオフの関係が認められ、それにより両者からみて最も望ましい組合せの機械系の存在することが明らかとなった。

また、後者においては、掘削工程の主要な制約条件を組込んだシミュレーションプログラムを作成することにより、従来現場技術者の豊富な経験に基づいて施工されていた掘削工程を定量的に把握することができ、後続する構築工事の工程計画作成に必要とされる情報を提供することが可能となった。

今後は、掘削工事における排水条件等の導入を図ること、さらに種々の形態の地下鉄工事に適用することに

より、全体工程へのシステム化へと発展させていく必要があろう。

最後に、土木計画学研究委員会施工計画問題分科会の場のみならず日常の研究においてもご指導・ご鞭撻を賜った京都大学土木工学教室 吉川和広教授ならびに（株）鴻池組技術研究所 川崎健次所長に深甚の謝意を表するとともに、機械系選定問題に携った清水建設（株）梶谷幸生氏、本研究の適用にあたって種々の助言をいただいた（株）鴻池組地下鉄平野事業場主任 佐幸田泰明、黒川弘の両氏、および技術研究所折田利昭氏に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木施工編集委員会編：'78 土木工事施工例集 4 トンネル・地下鉄道編、山海堂、1978.7.
- 2) 渡辺 健ほか：土木施工法講座、地下鉄道施工法（上）・（下）、山海堂、1975.9.
- 3) 川崎健次・春名 攻・西野久二郎・田坂隆一郎・折田利昭・安井英二：土木工事における施工計画・管理システムに関する研究、第 1 回土木計画学研究発表会講演集、土木学会、1979.1.
- 4) 川崎健次・田坂隆一郎・笛嶋 博：大規模ケーソンにおけるコンクリート打設作業の解析シミュレーション手法の適用、第 5 回（昭和 47 年度）業務研究発表会、建設コンサルタント協会大阪支部、1972.8.
- 5) 山本幸司・田坂隆一郎・初沢 実：施工法の組合せによる工程計画の評価方法に関する一考察、土木学会第 29 回年次学術講演会講演概要集、1970.10.
- 6) 恵羅嘉男ほか：システムシミュレーション—GPSS 入門—日刊工業新聞社、1970.7.
- 7) 日本電気：ACOS シリーズ 77, NEAC アプリケーションシステム ACOS-6、離散型シミュレーション言語説明書〈GPSS/V-6〉、1977.6.
- 8) McMillan, C. and R.F. Gonzalez : Systems Analysis—A Computer Approach to Decision Models—, Irwin.
- 9) 吉川和広・春名 攻・梶谷幸生：地下鉄工事計画のための掘削工程のシステムシミュレーション、土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集、1977.10.
- 10) 春名 攻・田坂隆一郎・折田利昭：地下鉄開削工事における掘削工程のシミュレーション、土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集、1978.9.

(1979.1.22・受付)