

## 大規模整地工事計画のシステム化に関する研究

### A SYSTEM APPROACH TO THE CONSTRUCTION PLANNING OF LARGE-SCALE EARTH-MOVING

春 名 攻\*・山 本 幸 司\*\*

By Mamoru Haruna and Koshi Yamamoto

#### 1. 緒 言

一般に、土木工事計画には複雑な計画要素が多く含まれており、そのために計画の作成手順を基準化、標準化することが困難であるとされてきた。このような土木工事計画は階層的構造としてとらえることができるといわれており、本研究で対象とした整地工事においても施工のための計画を作成する場合、後述する 図-1 のようなプロセスが考えられる。本研究ではこれを 1 つのシステムとしてとらえ、整地工事計画システムとよぶこととした。すなわち、整地工事計画システムとは、設計仕様と与件とし、具体的な工事実施計画に対して科学的な情報を与えていくことを目的とした計画作成プロセスである。

本研究でとりあげた整地工事は、「土」を空間的な広がりの中で合理的に切土し、運土し、盛土していくことにより、設計仕様どおりの地形を造成していくことが要請されているが、不確実な要素が特に多いとされている「土」を直接の対象としているため、工事計画の中でも重要な要素である切土量、盛土量などを正確に算定することがなかなか困難である。また、これらを計画情報とする土量の配分方法にも非常に大きな自由性が残されている。さらに、このような整地工事を施工するためには、計画全体からみて合理的と考えられるなんらかの評価基準のもとに、個々の運土作業に対して適切な土工機械を選定するとともに、適切な施工順序を設定する必要がある。

いま、このような整地工事計画を 1 つのシステムと考えるならば、システムへのインプットとしては、原地形、計画地形などを示した設計仕様、および現場の施工条件などの情報が考えられ、またそのアウトプットとし

ては、完成後の地形、工事所要日数、所要費用など工事を実施していくうえに必要な情報が考えられる。さらに、システムの操作変数としては、土量配分方法（運土量および運土方向）、投入資源量（土工機械の機種や組合せおよび投入台数）、施工方法（作業方式、施工順序）などが考えられる。

このような整地工事計画の合理化を考えていくためには、それぞれのインプットおよび工事構成要素間の有機的な関係を明らかにするとともに、実行可能な範囲内で操作変数を変化させたとき、アウトプットがどのような影響を受けるかを十分に検討する必要がある。さらに、施工目的を最も満足するようなアウトプット値を示す代替案を実施計画として選択するという方法をとることが必要であると考えられる。

したがって、たとえば十分な計算精度を保持する合目的な土量配分計画が立案されても、それが現場の施工条件を十分に反映していないものであれば、あるいはそれを計画情報とすべき作業計画および工程計画の精度が低ければ、整地工事計画システム全体としての合目的性、実行可能性を保証することは不可能である。

本研究はこのような点に着目し、整地工事の計画作成方法のプロセス・システム化をはかるとともに、各プロセスにおける情報処理の方法に対するシステム・アプローチを試み、さらに、全体システムという観点からこれらの総合化をはかるとにより、実行可能性が高く、かつ合目的な施工を保証しようとするような整地工事計画の方法論を提案しようとするものである。

このような工事計画作成のためのシステムは、その中に多数のハードウェアを組入れたソフトウェアによって統括形成されるべきものであり、ハードウェアはソフトウェアを得て現実価値を持ち、ソフトの前提のないハードは意義を持たないと考えられている。したがって、本研究においても、大規模整地工事計画作成システムに組み入れられているハードウェアの部分は積極的に電

\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

子計算機を利用することにより省力化とモデルの精度向上をはかるとともに、多側面からの検討を必要とし、かつ人的能力を十分に発揮することが要請されるトータルシステム（ソフトなゆえに定形化が非常に困難であるが）に関する研究を試みている。

## 2. 整地工事計画のプロセス・システム

1. で定義したように、整地工事計画とは設計仕様と与件として、具体的な実施計画に対する科学的な情報を与えるための計画作成プロセスを意味するものであり、その内容としては次のようなプロセスが考えられる。

- ① 現場の施工条件（特に整地工事に重要な土質状態や原地形状況など）を計画へのインプット情報として明確化するプロセス。
- ② 土量配分計画と投入すべき土工機械系の選定を行うプロセス。
- ③ 実施工の最終的な手段となる単位作業とその具体的内容を決定する作業計画のプロセス。
- ④ 他の関連工事との関係のもとで工程ネットワークを作成し、工程計画の代替案を作成するプロセス。
- ⑤ 工事全体の所要費用、所要時間、および工事の実行可能性を総合的に評価し、実施計画を決定するプロセス。

従来、整地工事計画の作成における重要事項としては、上記のプロセスの中でも特に土量配分計画と土工機械系の選定などが重視されてきた。しかし、工事施工の合目的度を実際に評価しうるのは施工工程が決定され、それに基づいて整地工事が実施される段階であることを考慮すると、計画システムにおいては工程計画を核とする作成手順を考えるべきであろう。

このような考え方に基くと、土量配分計画や土工機械の選定などは施工実施段階における施工状況を十分に勘案して決定することが重要であることはいまでもなく、これらをあらためて作業計画および工程計画への計画情報として明確に位置づけることが必要であると考えられる。このような認識のもとに、整地工事計画作成の概括的なプロセスをとりまとめてフロー図で示したのが図-1である。以下においてはこの図に基づいて各プロセスの内容を簡単に示す。

### (1) 計画へのインプット情報の作成

これは、作業計画・工程計画へのインプット情報としての各種土質調査・試験の実施や設計仕様の作成およびその検討を行うプロセスである。このうち、土質調査・試験は、造成地域の地質構成の把握、材料土特性の把握、地すべりその他防災的見地からの土質工学的な問題

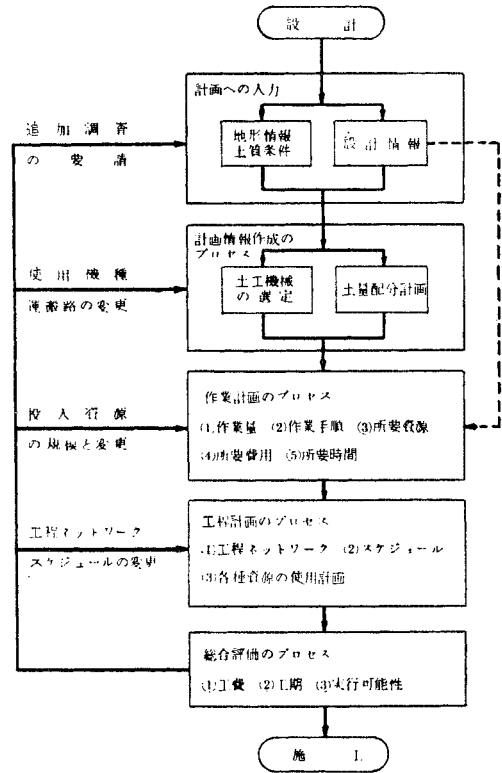


図-1 整地工事計画システムのプロセス

への対策等を目的として実施するもので、地表踏査、機械ボーリング、テストピット、スウェーデン式サウンディングテスト、含水比測定、粒度分析試験、圧縮試験、現場圧密試験などが考えられる。本研究では、緒言で述べたように、設計仕様も含めて本プロセスの内容を工事計画段階では変更不可能な与件として取扱うこととした。

### (2) 計画情報の作成

土量配分計画は主として作業計画の構成要素の一つである作業量の決定を行うプロセスであり、また、土工機械系選定の問題は同じく整地工事に投入すべき所要資源の内容を決定するプロセスである。

#### a) 土量配分計画の作成

これは計画へのインプット作成プロセスにより得られた情報から工事対象となる運土量を算定し、なんらかの評価基準のもとに合理的な土量配分方法を決定するプロセスである。したがって、このプロセスへのインプット情報としては、原地形および計画地形形状況、現場施工条件（特に土質）などが考えられ、一方アウトプットとしては、土量配分計画図（運土作業の方向と土量を図示したもの）、距離別運土量、土質別運土量など、所与の計画地形を得るために必要な運土作業に関する情報と機械

系を選定するために必要な情報などが考えられる。

b) 機械系選定のための情報作成

これは工事施工の実行可能性を保証し、しかも工事施工目的を十分に達成するためには、数多い土工機械の中からどの機種を選定し、それらをどのように組合せて機械系を構成し、全体として何台の機械を投入すべきかを決定するため、まず機械稼働に関する情報を作成するプロセスである。すなわち、土工機械系を選定するために当該工事の施工条件と各種土工機械の稼働特性との関係を求めるプロセスである。

土量配分計画と機械系選定情報の作成とは図-1に示すごとく整地工事計画システムとしては同一レベルに位置するが、全く独立に取扱うべきではなく、相互に情報のやりとりを行い、かつ、現実の作業工程を十分にシミュレートしつつ計画作業を進めなければならない。

(3) 作業計画の作成

これは、土量配分計画で得られた結果から実施工の対象となる単位作業を決定するプロセスである。ここでは、おのおのの運土作業に対する運搬路を想定し、これに基づく作業状況のシミュレーションの結果、作業時間・所要費用など運土作業の特性値を求める。

(4) 工程計画の代替案の作成

各運土作業の順序関係のうち、まず施工技術的な観点や工事現場における施工条件を勘案し、技術的順序関係を決定する。さらに、効率的な工事施工を行うために投入資源の運用計画および並行・後続工事の作業工程を規定する管理的な順序関係を決定するのが本プロセスである。したがって、ここで決定する事項は、この段階で合理的と考える複数の整地工事の工程ネットワークと、これに基づく作業スケジュール、土工機械の運用計画などの代替案である。

(5) 総合評価および実施計画の選定

以上のプロセスを経て作成しうるのは施工計画の代替案であるため、施工目的に対応するいくつかの評価基準のもとに、施工目的を十分に満足しうる合理的な代替案であるかどうかを評価・検討していくのが本プロセスである。一般に、工事施工目的としては、経済性、迅速性、および確実性などがあげられているが、ここでも、

- ① 工事所要時間(日数)が所与の工期以内となっているか、
  - ② 工事所要費用が十分に低廉か、
  - ③ 工事実行可能性を十分に保証しうるか、
- という3つの側面から総合的に評価する。そして、作成した代替案の合目的度が低いと判定される場合には、

図-1に示すようにその内容および程度にしたがって、合目的度低下の原因となっている計画要素を取扱っているプロセスへフィードバックし、新たな代替案を効率よく作成することにする。

3. 計画情報の作成プロセス

(1) 土量配分計画

土量配分計画に関しては、土量配分方法の数学モデルによる定式化にはじまり、土量配分計算の電算化、さらには計算結果の自動作図などに関するアプローチが本研究を含めて各方面で展開されている。いまこのような土量配分計画のプロセスをフロー図で示したのが図-2である。

本プロセスは運土作業の対象となる土量計算とその結果をインプット情報とする土量配分計算とに分かれる。

前者は作業量こそ多いが単純計算である。ここでは原地形および計画地形をインプット情報としてどのように取扱うか、さらには土工機械の稼働を考えていく際に実

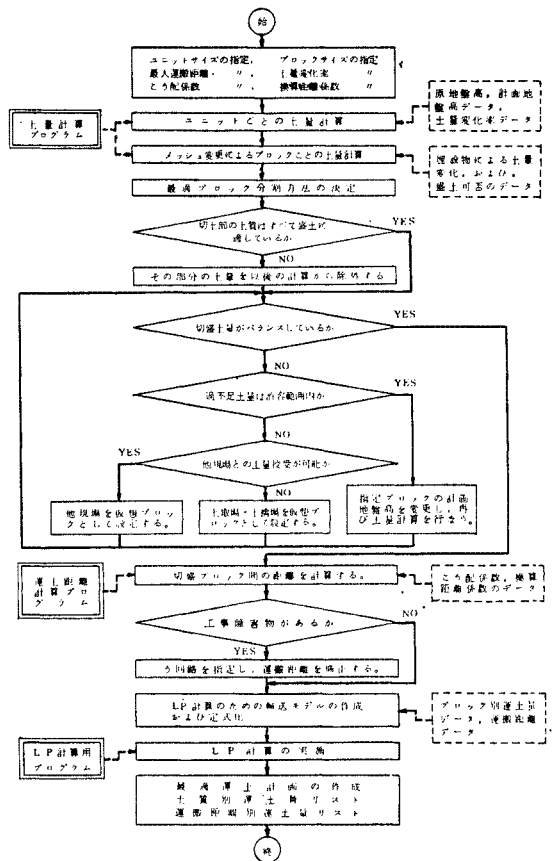


図-2 土量配分計画のプロセス

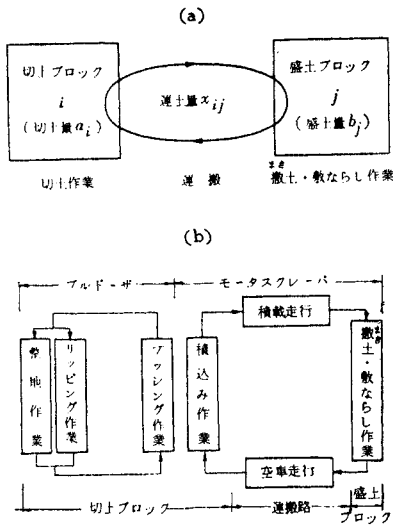


図-3 運土作業のモデル化

施工の単位となるブロック，したがって，土量配分計算の対象となる施工ブロックをどのように設定するかが大きな問題点としてあげられる。

ここでの土量計算においては，現地平面図を一辺 5m（地形が急しゅんな場合）から 25m（地形が平坦な場合）程度の等間隔メッシュでおおい，その結果得られる正方形ユニットの中心部の地盤高によって原地形，計画地形の平均値を近似的に表現する方法をとった。また，これと対応して運土作業を図-3のようにモデル化して表現するとともに，積土作業に不可欠なブルドーザの最適稼働距離を考慮することによって施工ブロックとして一辺 50~80m 程度の正方形を仮定した。これらは，すべて実際の工事現場における土工機械の稼働状況の観測実験をもとに決定したものである。

さて，後者の土量配分計画のモデルは下記のように輸送問題といわれる線形計画モデルとして定式化できる。

制約条件

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &= a_i, \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \\ x_{ij} &\geq 0, \quad i \in B_c, \quad j \in B_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで，

$x_{ij}$ ：切土ブロック  $i$  から盛土ブロック  $j$  への運土量 ( $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ )

$a_i$ ：切土ブロック  $i$  における切土量

$b_j$ ：盛土ブロック  $j$  における盛土量

$B_c$ ：切土ブロック  $i$  の集合

$B_b$ ：盛土ブロック  $j$  の集合

評価関数

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \dots\dots\dots(2)$$

ここで評価関数  $z$  の内容としてどのような尺度を用いるかが問題となるが，この段階で想定しうる尺度としては，

- ① 運土作業における全仕事量（単位： $m \times m^3$ ）
- ② 運土作業に要する費用（単位： $円/m^3 \times m^3$ ）

などがあげられよう。

いずれの尺度を用いる場合でもその係数  $c_{ij}$  の算定方法が問題となる。ここではその詳細は述べられないが，費用係数に関してはその精度に問題のある場合の多いことが欠陥としてあげられ，また，作業計画や工程計画を作成する際には仕事量を中心に検討をすすめていかなければならないことなどから，この段階での評価基準として仕事量を採用するほうが望ましいと考える。このため，本システムにおいて評価関数における係数としては各ブロック間の運搬距離を ( $d_{ij}$ ) 使用することとした。

(2) 土工機械系の選定情報の作成

対象となる主要機械としてはモータスクレーパ（以下，MS と略す）およびキャリオールスクレーパ（以下，CS と略す），補助機械としてはブルドーザ（以下，PD と略す）という土工機械系を対象とするが，このような大型土工機械を整地工事に投入する目的としては，工事費の低減，工期の短縮，施工の質的向上，施工可能性の拡大などが考えられる。特に機械系の選定においては経済的な機種 の選定 が基本事項であるとされているが，同時に主要機械と補助機械の施工能力のバランスを考えなければかえって時間的効率の面で不都合が生じ，

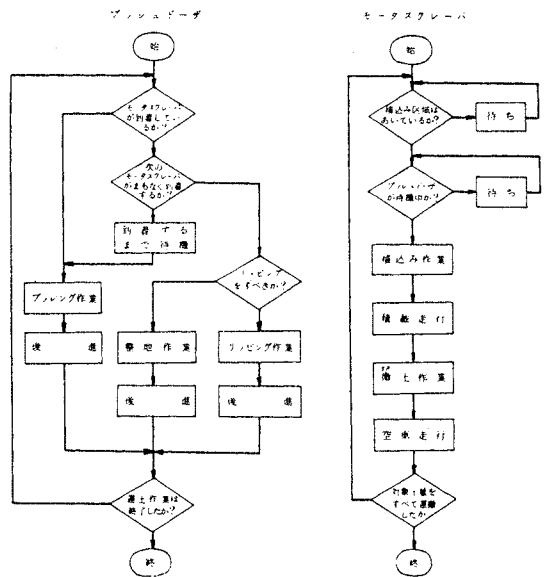


図-4 運土作業の機械稼働モデル

経済的に不利な結果を生むことになる。さて、運土作業の解析方法としては、機械稼働状況が図-4のごとくサイクリックな待ち行列モデルとして把握できることから待ち合せ理論 (Queuing Theory) を適用する方法とシステム・シミュレーションによる方法とが考えられる。

しかし、われわれの行った現場実験 (メモーションカメラなどによるモーションスタディおよびタイムスタディ) によると、待ち合せ理論では積載走行や撤土作業および空車走行の状況を具体的かつ十分にモデル化できないことが明らかになったこと、さらには各作業時間が解析に便利な理論分布を示さないことなどの理由から、定式化は可能であってもその解法は困難であると考えた。このため本研究ではシステムの構成要素の変更に対して機械稼働の特性値を直接アウトプットすることが可能のように、モンテカルロ法によるシステム・シミュレーションの手法を採用している。そのプロセスを示したのが図-5である。実際の計算においては、待ち合わせ系現象のコンピュータ・シミュレーションに適したGPS (General Purpose Simulation) 系汎用シミュレータによってプログラム化している。この場合、作業条件の変化を直接的には表現しえないので、これに対応する作業時間の変化として与えることによって運搬路や土質の状態を間接的にシミュレートするという方法をとった。

さらにシミュレーションのインプットおよびアウトプットとしては後の情報処理に十分のように表-1のよ

表-1 シミュレーションのインプットおよびアウトプット

インプット・データ	アウトプット・データ	
スクレーパ	① スクレーパの切土区域への進入待ち ② 切土区域での積込み待ち ③ ブッシュドーザの作業待ち ④ 所要作業時間	
① 積込み作業時間		} に関する各種統計量
② 運搬時間		
③ 撤土時間		
④ 空車走行時間		
⑤ 1回当り積土紙		
ブッシュドーザ		
⑥ 積込み準備作業時間		
⑦ リッピング作業時間		
⑧ 整地作業時間		
⑨ 後進時間		
⑩ プッシング作業時間		

うな内容を取りあげた。またシミュレーション実験における操作変数としては下記の施工条件を考慮している。

- ① 作業条件 (運搬路の状況や距離の変化に対応する運搬時間の変更)
- ② 土工機械系の機種、台数・組合せ (過去の工事実績を参考に MS (もしくは CS) と PD の組合せ台数比を変更)
- ③ 作業方式 (特定の作業方式を指示する場合としない場合)

まず、①に関しては切土・盛土区域の土質の影響についても検討する必要があるが、ここでは運搬時間の変更に限って検討を加えることにした。また、②のうち主要機械の機種としては 24m<sup>3</sup> 級の MS と 24m<sup>3</sup> 級の CS を対象とし、台数・組合せに関しては過去の工事実績から MS (もしくは CS) 3台に対して PD 1台という台数比を中心に組合せ内容の変更を取りあげていくことにした。③における特別な作業方式としては、安全確保のため運搬路での追越しを禁止する方式 (追越禁止方式)、スクレーパの作業待ち時間を減少させるため、スクレーパが切土ブロック近くの特定点までどったとき、フォアマンの指示により PD の動きをスクレーパの動きに従わせる方式 (X点方式) を検討している。

(3) 土工機械の選定情報の実例

ここでは上述した方法に基づくシミュレーション結果から土工機械系の選定に役立つと思われる情報のいくつかを例示することにする。

図-6 は 5000 m<sup>3</sup> の運土作業に要する MS の所要時間と所要費用とのトレードオフの関係を示したものである。この図より同一作業条件下でも機械の台数・組合せによって運土作業の特性値 (所要時間・所要費用) が大きく変動し、ある台数・組合せにおいてそれぞれが最小値を示すことがわかる。また、この場合同一機械系に対してはX点方式が最も経済的であることを示している。

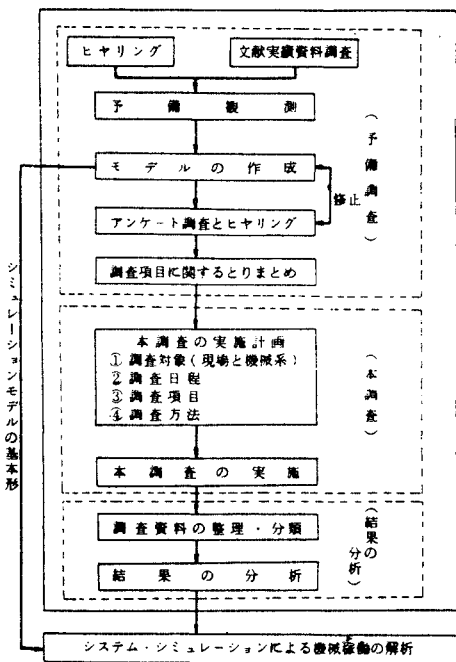
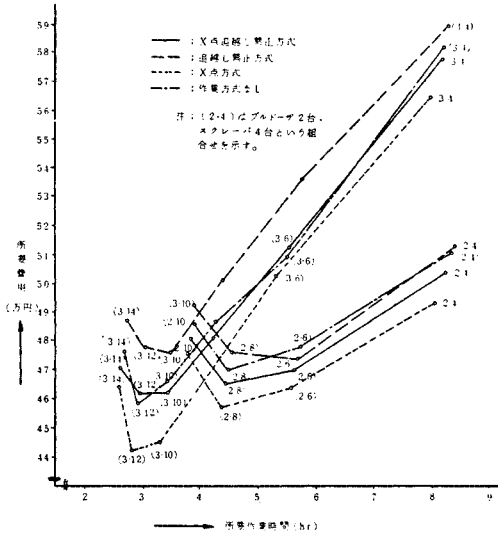
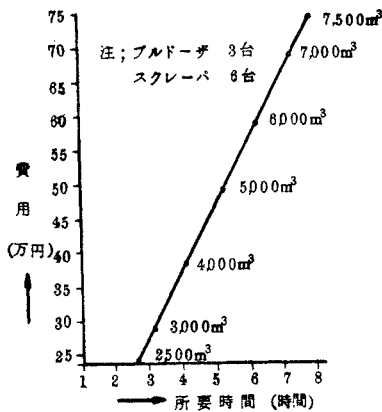


図-5 機械稼働のシステム分析のプロセス・フロー



図一6 所要時間と所要費用の関係(その1)

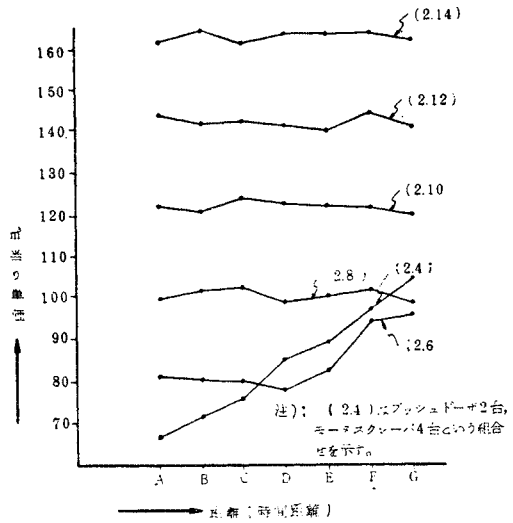


図一7 所要時間と所要費用の関係(その2)

次に、図一7はMS 6台、PD 3台の場合を例にとり、運搬土量をパラメータとして運土作業の特性値を比較したものである。この結果、所要費用と所要時間との間にほぼ線形性が成立すると仮定してもよいということが示されている。

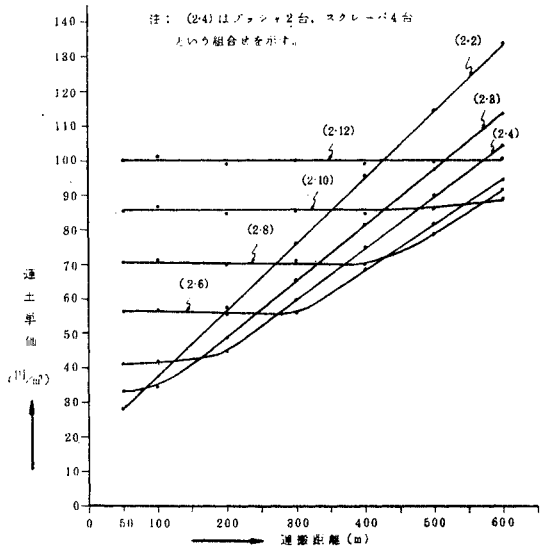
また、図一8はMSの台数をパラメータとして運搬距離と運土単価との関係を示したものであり、図一9はCSの場合のものである。これらより各運土作業それぞれの運搬距離に対して最も経済的な機械系の存在が確認しうるものとする。

最後に例示した図一10は運搬距離と所要時間との関係を求めたものである。この図より、機械台数を増加すればもちろん所要時間を短縮することが可能であるが、その割合は台数増加に対して徐々に低減し、機械系個有的な台数を越えると運土作業における機械稼働システムが飽和状態に達することとなり、もはや所要時間の短



- A: もとの基準距離より運搬時間に換算して 150 秒短縮した距離
- B: " " " 125 " "
- C: " " " 100 " "
- D: " " " 75 " "
- E: " " " 50 " "
- F: " " " 25 " "
- G: もとの基準距離でその値は約 1500 m である

図一8 運搬距離と運土単価との関係(その1)



図一9 運搬距離と運土単価との関係(その2)

縮を期待できなくなることが理解できる。

以上は情報としてはほんのわずかなものを例示したにすぎないが、これらの結果を有効に利用することにより、後の作業計画にとって合理的な機械系を選定することが可能となる。

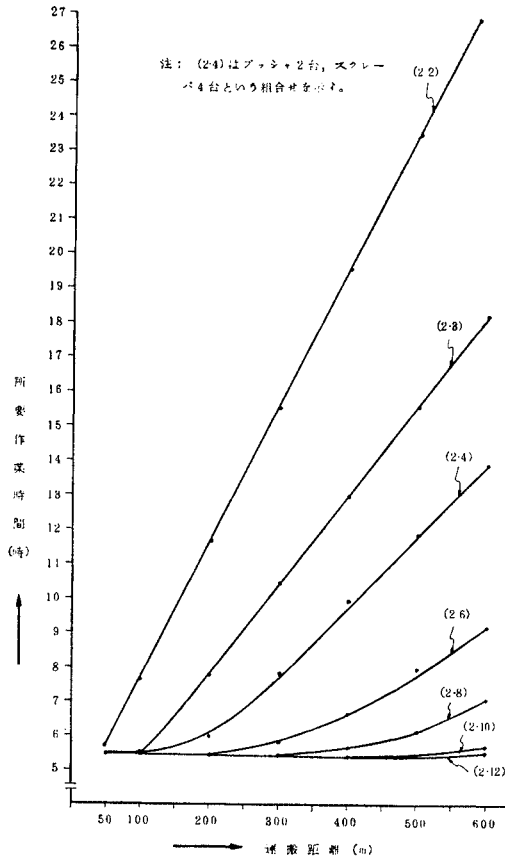


図-10 運搬距離と所要時間との関係

#### 4. 作業計画・工程計画のシステム化と総合評価

##### (1) 作業計画・工程計画の問題点

土量配分計画は前述のような評価基準のもとでの土量配分の結果に関する一つの案を示すものであるが、土量配分の過程に関連の深い運搬路の設定、投入機械の決定、施工順序の決定などの詳細に関しては十分に考慮されていない。また、従来においては配分過程に関する決定が現場フォアマンにゆだねられることが多く、工事計画が作成されたといってもその具体的な施工過程の内容にまで検討が加えられることはごくまれである。そのため、土量配分計画においてめざした最適性が実作業レベルにまでブレイクダウンした時点ではずれる場合も多存在した。

その大きな原因としては、まず工程計画の方法が明確でないことがあげられよう。このため、あらかじめ実施工状況の予測をどのようにとらえてよいかわからず、作業レベルにブレイクダウンした場合の実施工状況の変化

に対応する土量配分計画の評価尺度の変化の程度、すなわち感応度を事前に分析することが不可能である場合が多い。さらに、プロセス間で斉合のとれた計画方法が確立していないということは、作業計画や工程計画のレベルで初めて明らかになるような施工情報を土量配分計画へフィードバックし、計画を改善するという方法をとることができない原因にもなる。このような点から、斉合性のとれた工程計画方法を確立していくことが重要な課題となることが認識できよう。

さて、以下においてはすでに図-1で示した計画システムのフレームに基づいた作業計画・工程計画の内容について考察をすすめ、合理的と思われる作成法を提案することにする。

##### (2) 作業計画・工程計画の内容

作業計画とは、「設計仕様」と「工事施工」との対応関係を充足させるための具体化の最終段階に位置し、この点をよく認識して個々の作業内容を決定する行為である。また、工程計画とは工事を合理的に遂行するために工事用資源の運用計画などを考慮し、個々の作業をどのように配列すべきかを決定する行為である。

ここでは、このような事項を十分に留意して整地工事の作業計画および工程計画の内容として以下のような項目をとりあげた。

###### ① 作業計画

1. 単位運土作業の決定
2. 工程ネットワークの構成要素としてのアクティビティの決定
3. アクティビティへの土工機械系の割付け
4. 所要時間(日)の算定
5. 所要費用の算定

###### ② 工程計画

1. 技術的順序関係の決定と作業工程のネットワーク化
2. 管理的順序関係の付加とスケジュール計算

##### (3) 土量配分計画と作業計画・工程計画の斉合性

作業計画および工程計画の作成においては土量配分計画をインプット情報として利用するが、両者の最適性に関するシステムの斉合性を保持できない場合がある。その主たる原因としては以下の2点が考えられる。

① 土量配分計画の段階で想定しえなかった未買収地や工事障害物が出現すると、運搬路の変更を余儀なくされ計画モデルにおける係数(運搬距離の値)が変化する。

② 土工機械の錯そう、作業段取り上のむだ、機械系の運用計画の複雑化などを防止するために、現実には施

工条件が類似し、かつ隣接する運土作業を一つの集合作業としてまとめて取扱うほうがより实际的であり実行可能性も大きい。しかし、この場合には土量配分計画モデルの係数が部分的に変化してしまう。

このような問題に関しては、まず土量配分計画の係数に関する感応度分析を行い最適性をチェックする方法が補助的な手段として考えられる。しかし、式(1)、(2)で示した土量配分計画モデルの基底変数  $x_{ij}$  に対する係数  $c_{ij}=d_{ij}$  の増減  $\pm \Delta d_{ij}$  は作業計画を作成する過程においてはじめて明らかになるが(すなわち、 $d_{ij}^*=d_{ij} \pm \Delta d_{ij}$ )、非基底変数  $x_{ij}$  に対する係数  $d_{ij}$  は作業計画段階で現実の作業工程をシミュレートすることが困難であるため、その増減  $\pm \Delta d_{ij}$  を想定することは事実上不可能といえる。したがって、感応度分析の結果に基づいて新たに解を改善していく場合には、

$$c_{ij}=d_{ij}^*=\begin{cases} d_{ij} \pm \Delta d_{ij}; & (i, j) \in \text{基底部} \\ d_{ij}; & (i, j) \in \text{非基底部} \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \end{cases} \quad (3)$$

のように部分的に係数変更して再計算せざるを得ない。

しかしながら、このようにして新たに求めた土量配分計画も、これをもとに作業計画を作成すると、やはり後になって最適性のくずれる可能性が残る。感応度分析→作業計画の作成(新たに基底に入れられた  $x_{ij}$  に対する  $c_{ij}$  の変更)→解の改善というプロセスを繰返せばいつかは最適解に到着するであろう。しかし、それに要する手間(費用と時間)、および現状での工事計画と実施工との間に潜在する少なからぬギャップを考えると、現段階では、計画における最適性の追求よりも計画の実行可能性や計画作業の合理化などに重点を置いて努力を払うべきであると考えられる。ここでは、未買収地や工事障害物の出現、あるいは設計変更などによって土量配分計画モデルが大幅に変化する場合についてのみモデルの一部を変更し、土量配分の再計算を行うという方法をとった。

(4) 作業計画・工程計画の作成

宅地造成では、整地工事(特に粗土工)がある程度完了するまで構造土工などの他工種に着手できないため、その工事計画の作成において整地工事の作業計画・工程計画は、特別な場合を除いては他工種と独立に考えてもなんらさしつかえない。ここでは、整地工事に対する作業計画と工程計画を独立した一連のプロセスとしてとりまとめて考慮してもよいと判断した。これらのプロセスは図-11に詳述してあるが、以下ではその中でも重要と考えられる個所を重点的に説明することにする。

a) 単位作業の決定

すでに述べたように、実行可能性が高くかつ精度の高

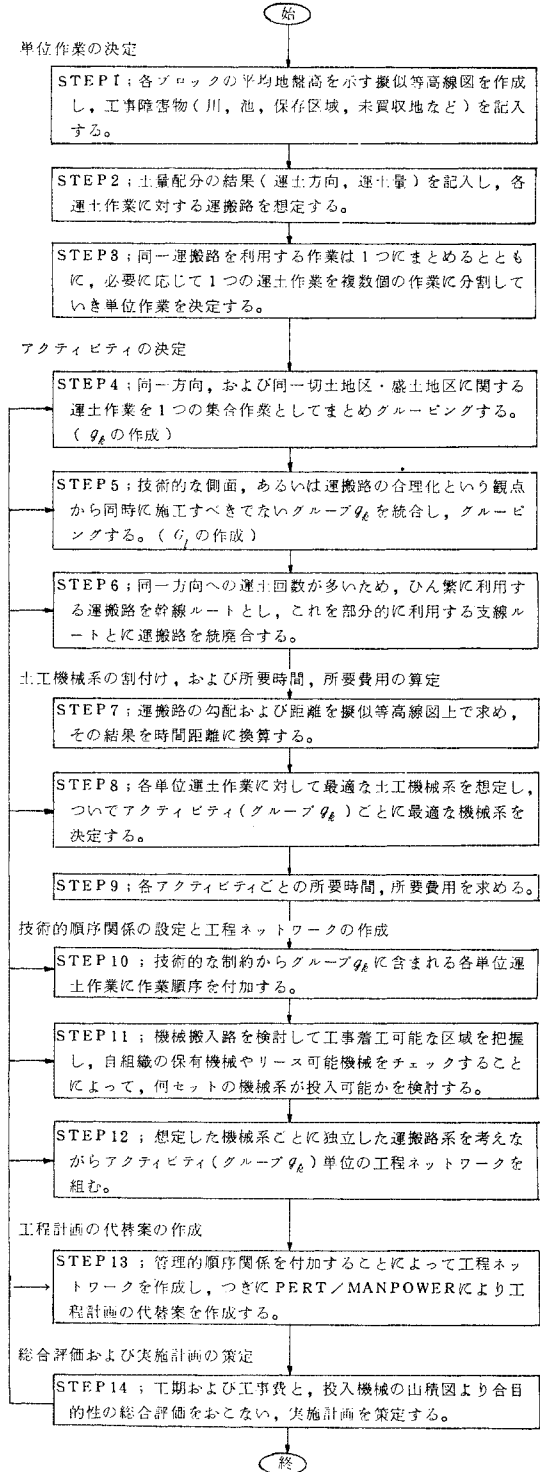


図-11 作業計画・工程計画作成のプロセス

い計画を作成するためには、運搬路の位置と勾配の程度、工事障害物による運搬路変更の可能性、隣接する運土作業との相対的な施工順序など、作業の実施過程をで



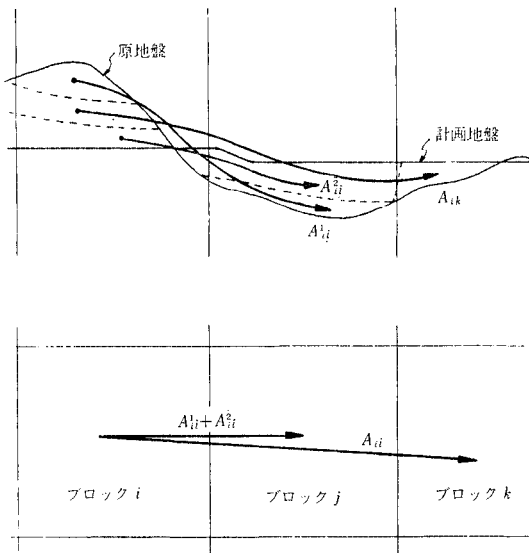


図-12 単位運土作業へのブレイクダウン

きる限り想定し、その範囲内で最も合理的と考えられる作業計画を具体的に検討していく必要がある。ここでは、必要な要件（土量配分計画の結果、工事障害物、原地形の概要など）を記述した擬似等高線図を作成し、必要な作業状況をこの図上で繰返しシミュレートしていく方法をとることにした。その具体例として、図-12に示すような運土作業については、切土作業や積載走行時にできるだけ下り勾配を利用するというような作業効率上の原則を十分に配慮していくつかの作業に分割していくこととした（なお、この段階で再編成された運土作業を以下では単位運土作業とよぶ）。

b) アクティビティの決定

次に実際の施工過程に関する現場観測・実験をもとに土量配分計画の結果を検討した結果、実施工の一施工単位は単位運土作業レベルで計画するよりも、もう少し大きな区域を対象とするほうが合理的と考えられたため、同一方向もしくは同一切土地区・盛土地区に関係するすべての単位運土作業をグループ化 ( $g_k; k=1, 2, \dots$ ) し、これらを工程計画におけるアクティビティと定義して計画化をすすめることにした。さらに、技術的な側面から同時着工の不可能なグループ、あるいはおのおのに対する運搬路をまとめて考えたほうがより合理的であると判断されるグループ  $g_k$  をいくつか統合し、新たなグループ  $G_l (l=1, 2, \dots)$  を求めた。このグループ  $G_l$  は後にも詳述するが、機械の運用方法を考慮する場合に必要な作業の集合を規定するのに大いに役立つ。

さらにこのグループ化と併行して、図-13に示すように幹線ルートと支線ルートからなる機械稼働のための運搬路系を設定する。その理由としては、幹線運搬路を

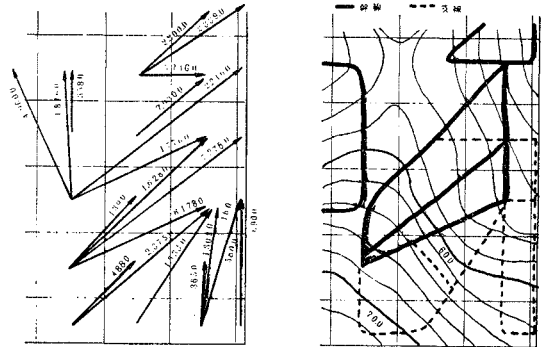


図-13 幹・支線系運搬路

設けることによって、運搬路の好ましい整備状況を維持し走行の効率を高める目的と、機械稼働の錯そうを避けようとする目的があげられる。また工事全体からみた場合にも、将来に幹線街路となる道路を幹線運搬路として極力利用するほうが他の関連工事にとっても好都合であろうと考えられたためである。

c) 土工機械系の割付けと所要時間、所要費用の算定  
 すでに述べたように、実施レベルでの機械の管理・運用を考えると単位運土作業よりも少し大きなまとまりを対象としたアクティビティ、すなわちグループ  $g_k$  レベルに対して機械系の割付けを行うのが最も合理的である。そのため、アクティビティの内容と次式で得られる各グループ  $g_k$  ごとの平均運搬距離 ( $AL_k$ ) とを検討することにより、各アクティビティに対して最適な機械系を割付け、あわせて所要時間、所要費用を算定することにした。これらの決定に対しては図-9, 10に示したような機械系選定に関する情報を大いに利用する。

$$AL_k = \sum_{u \in g_k} d_u x_u / \sum_{u \in g_k} x_u \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $x_u$  はグループ  $g_k$  内の単位運土作業  $u$  の運土量であり、 $d_u$  はその運搬距離である。

d) 工程計画の作成

各アクティビティに対する施工順序の決定に際しては、次のような技術的観点からの順序関係を付加することから始める。

- ① 同一方向への単位運土作業は遠距離の作業を優先させる。
- ② 土工機械の搬入路に近接するブロックの作業を優先させる。
- ③ 防災工事の対象となる区域の単位運土作業を優先させる。
- ④ 工事に対する工程計画の合理化という観点から、構造物工を早急に開始すべき区域の運土作業を優先させる。

次にこの結果に基づいて作業工程をネットワーク化するが、その場合、作業段取りの合理化を考え、1つのグ

ループ  $G_i$  内に含まれるグループ  $g_k$  は連続的に施工していくものとする（必ずしも時間的に連続する必要はない）。

このようにして技術的な順序関係は付加できるが、グループ  $g_k$  をアクティビティとする工程計画を作成するためには、さらに管理的な側面からの施工順序を付加しなければならない。

いま、工程計画上の具体的な問題をモデル的にとらえると次のようになる。すなわち、この問題は投入機械台数および各施工時間断面における機械台数の変動を小さくし、かつプロジェクト完了時刻が短くなるような施工順序を求める問題となるが、同時に以下の条件を満足しなければならない。

条件 1：1つのグループ  $G_i$  を構成する各グループ  $g_k$  は連続的に施工すること。

条件 2：投入可能な範囲内であれば、土工機械は同一時間断面で何セット稼働中であってもよい。

条件 3：隣接するグループ  $g_k$  以外はステップ 10 で述べた技術的順序関係を満たす限り同時着工可能となる。

条件 4：グループ  $G_i$  レベルでは必ず隣接するグループへ施工順序をつけなければならない。

ここで、条件 1 は作業段取りをできるだけ少なくし、かつ早急にその区域の後続工事に着手することを可能ならしめるため、1つのグループ  $G_i$  の運土作業が完了するまで他のグループ  $G_i$  へ移ることを禁止するものである。また、条件 2 は状況に応じて機械系の構成を変更してもよいことを示しており、条件 3 は切土区域や盛土区域が隣接しない作業グループ  $g_k$  については自由に施工順序をつけることを示している。これは、工程計画においていくつかの代替案が考えられることを意味する。最後に、条件 4 は相互に離れたグループ  $G_i$  間での施工順序をつけると作業段取り上種々の支障をきたすので、それを禁止するものである。

ここで、条件 2、条件 3 に基づけば工程計画の内容に多数の組合せが存在し、結果として数多くの代替案を想定しなければならないことになる。しかし、より合目的度の高い実行可能計画をこのような代替案の中から求めることはあまり容易でないので、本研究では、最適性の保証よりも実行可能性および計画作成プロセスの簡略化のメリットを重要視することとして、各グループ  $G_i$  に含まれるグループ  $g_k$  に対してはあらかじめ一意的な順序関係を付加することにした。このような方法を用いることにより、この問題は一種の資源配分問題として定式化されることになる。この種の問題の技法としてはいくつかの方法が開発されているが、先にも述べたように、あまり厳密さを追求しても意味をもたないという点を考

慮して、ここでは資源制約量を考慮することのできる PERT/MANPOWER 手法を利用して工程計画化をはかることにした。

#### e) 総合評価

以上のプロセスによって得られる代替案に対して、作業工程の実行可能性、整地工事全体としての工期および工事費という3つの側面から総合的に評価・検討を加えることが必要である。また、検討の結果、必要があれば、図-11 に示したステップ 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13 などへもどって計画を修正し、最終的に1つの作業計画・工程計画を決定するという方法をとらねばならない。

以上に述べた方法によって、現場の作業条件、投入機械の稼働特性および調達可能度、あるいは作業工程の進行状況などを十分に盛込んだ実行可能性の高い工程計画を作成することができるものとする。

## 5. 適用事例と考察

以上において論述してきた整地工事計画システムを実際工事へ適用することによって計画作成の過程を例示するとともに、いくつかの考察を加えることによって本システムの有効性の実証的検討を試みた。

ここでは比較的傾斜のゆるやかな丘陵地における一整地工事を対象事例とした。工事の概要は表-2 に示すとおりである。

表-2 対象工事の概要

項目	数 量 等
総 工 費	約 22 億円 (うち土工費は約 21%)
総 土 工 量	300 万 m <sup>3</sup>
総 土 工 面 積	100 万 m <sup>2</sup>
保 存 部 池・河川等	3 万 m <sup>2</sup> 4 万 m <sup>2</sup>
最 大 高 低 差	40 m
土 質 状 態	大阪層群 (砂れき・砂・シルト・粘土) で N 値はどこをとっても 50 以下

### (1) 土量配分計画の作成

土質調査の結果、現場の土質は区域全体でほぼ一様とみなすことのできる粘土まじり砂質土であったため、土量変化率  $1/c$  も現場全体に対して一律に 1.04 として土量計算を行った。実際計算にあたっては、まず設計図に縦横 10 m 間隔のメッシュを入れて現場を一辺 10 m の正方形ユニット群に分割し、その中心点の地盤高によって各ユニットの原地形および計画地形を近似表現した。次に、ブロックの大きさを一辺 60 m の正方形として土量計算を行ったところ、切土が若干過剰であること

がわかったため、図-2 のフローに従って盛土区域に属する公園地区および小学校地区の計画地盤をかき上げることによって現場全体としての土量バランスをはかった。計算の結果、切土ブロック数は 92、盛土ブロック数は 107、ブロック間運土作業の対象土量は約 1 500 000 m<sup>3</sup> となった。

土量配分計画モデルにおける評価基準としては、すでに考察した仕事量を採用するとともに、機械系の内容から 500 m という最大運搬距離を制約条件として与えた。これは、原地形や施工空間および切土・盛土量の分布を検討したところ、短・中距離運土作業が多くなることが予想されたこと、粘質土はモータスクレーパ工法に適さないことなどを考察することによって、キャリオールスクレーパ工法が適していると判断したためである。

土量配分計算の結果から距離別運土量の分布を示したのが図-14 であり、その平均運搬距離は 175 m であった。結果からみると、この値は制約として与えた 500 m からかなりへだたっており、ここでキャリオールスクレーパ工法を想定したことはまず妥当であると考えることができた。しかし、平均運搬距離が最大運搬距離の値近くなったり、キャリオールスクレーパ工法の想定により設定した最大運搬距離のために配分計算が実行不可能となるような場合にはモータスクレーパ工法を再検討すべきであろう。

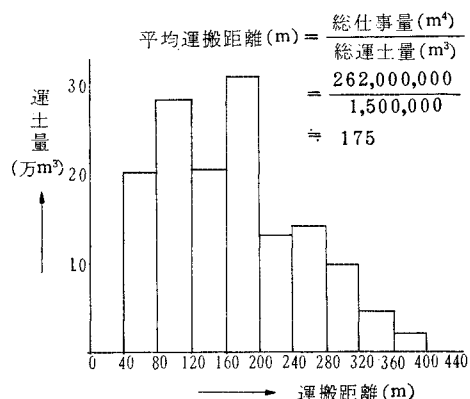


図-14 距離別運土量

(2) 機械系選定のための情報の作成

本プロセスは、すでにその概略を述べたように、アクティビティとしての各作業グループ  $g_k$  に適切な土工機械系を割付けるための情報を求めるプロセスである。一般的な条件下で機械系の割付けを行っていくためには、想定しうるかぎりの施工条件と機械系に対しての図-6~10 のような機械稼働特性値を求めていく必要があり、このような情報が求められると本プロセスは整地工事計画システムの中へ「陽 (Explicit)」に含める必要がな

表-3 対象工事の作業計画表

グループ G	グループ g	運搬土量 (m <sup>3</sup> )	しごき量 (m <sup>3</sup> )	平均運搬距離 (m)	投入台数 (台)	所要日数 (日)	所要費用 (万円)
1	1	39 783.5	5 467 451.0	137.4	3	7	175.0
	2	48 645.6	6 020 260.0	185.4	4	8	243.2
	3	30 310.4	7 303 916.0	241.0	5	5	179.0
2	1	53 858.0	8 937 108.0	165.9	5	8	286.4
	2	90 913.2	28 465 096.0	313.1	5	16	572.8
	3	7 168.0	2 293 760.0	320.0	5	2	71.6
	4	1 956.4	273 896.0	140.0	3	1	25.0
3	1	12 524.0	2 568 228.0	205.1	4	2	60.8
	2	16 517.7	3 506 728.0	212.3	4	3	91.2
	3	4 959.2	558 048.0	112.5	3	1	25.0
4	1	17 636.0	3 580 772.0	203.0	4	3	91.2
	2	55 360.8	18 177 232.0	328.3	6	8	329.6
	3	16 992.8	3 398 560.0	200.0	4	3	91.2
5	1	64 843.2	15 916 684.0	245.5	4	11	334.4
	2	79 420.8	14 827 224.0	186.7	4	12	364.8
	3	46 097.2	4 923 040.0	106.8	3	7	175.0
	4	23 397.6	2 772 816.0	118.5	3	4	100.0
	5	19 297.2	1 543 776.0	80.0	3	3	75.0
6	1	57 790.8	5 734 716.0	99.2	3	8	200.0
	2	6 604.4	1 306 656.0	197.8	4	1	30.4
	3	124 564.8	21 674 744.0	174.0	4	19	577.6
	4	27 360.0	3 082 264.0	112.7	3	4	100.0
	5	15 352.8	1 190 712.0	77.6	3	3	75.0
	6	24 455.2	3 111 404.0	127.2	3	4	100.0
7	1	13 440.0	2 256 960.0	167.9	4	2	60.8
	2	64 576.0	21 387 136.0	331.2	5	11	393.8
	3	2 385.2	143 112.0	60.0	3	1	25.0
	4	11 950.4	2 151 072.0	180.0	4	2	61.6
8	1	3 036.4	303 720.0	100.0	3	1	25.0
	2	55 634.8	14 885 806.0	267.6	5	9	322.2
	3	64 740.9	14 572 900.0	225.1	4	12	364.8
	4	200 405.3	60 471 358.0	301.7	5	33	1 181.4
	5	71 870.8	18 306 256.0	254.7	5	12	322.2
	6	7 305.0	1 461 120.0	200.0	4	1	30.4
	7	53 022.0	15 906 600.0	300.0	5	9	322.2
	8	79 276.8	13 879 264.0	175.1	4	12	364.8
	9	3 017.2	482 752.0	160.0	3	1	25.0

くなるものとする。

しかし、現段階では対象工事において想定しうる一応の条件下での情報を得るにとどまらざるをえない。このためここでは事例対象としたキャリオールスクレーパ工法に関しての情報を、24 m<sup>3</sup> 級の CS および 40 ton 級の PD という機械系に関して求めたところ、図-9, 10 のようであったのでこれを有効に利用して、機械系の割付けを表-3 のように求めた。

(3) 作業計画・工程計画の作成

a) 擬似等高線の作成と制約条件の検討(ステップ 1)  
 比較的平坦な現場であるため 2 m 間隔の擬似等高線図を描いた。これには、各ブロックの中心点を 3 次元座標で表せば X-Y プリンターによって自動作図が可能となるアプリケーション・プログラムを利用した。また、工事障害物としては、鉄塔、未買収地、および現場

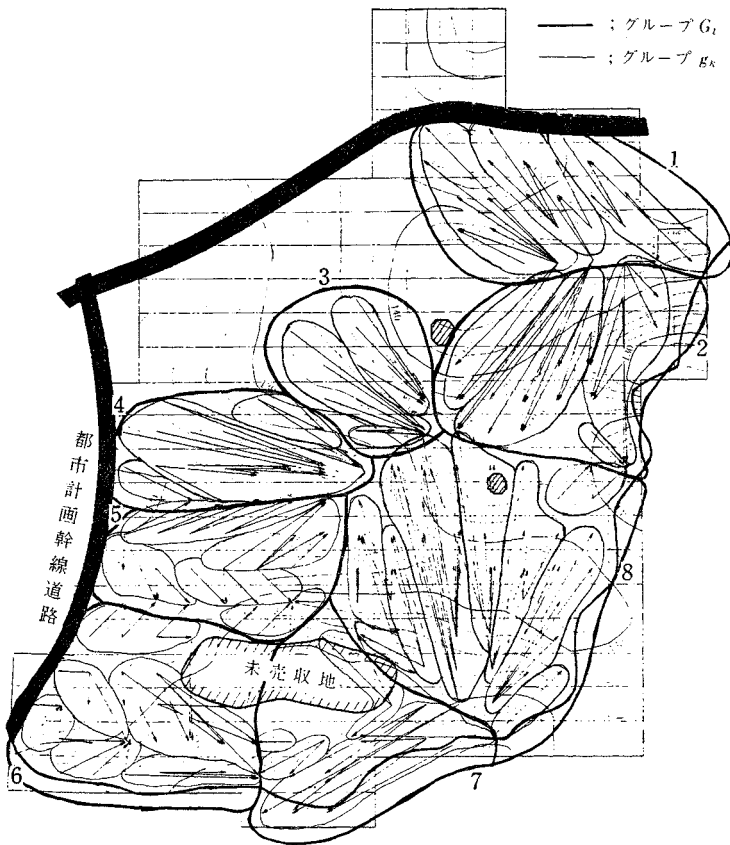


図-15 制約条件およびグルーピング

境界にある都市計画幹線道路が考えられ、これらをあわせて図示したのが図-15である。

b) 単位作業の設定とグルーピング (ステップ 2~5)

同一幹・支線系運搬路を使用する運土作業を1つの作業にとりまとめ、4. で述べた方法によってグルーピングした結果 37 個の作業グループ  $g_k$  が得られた。さらにこれらをステップ5で8個のグループ  $G_i$  として統合し、この結果も図-15に併記した。 $G_i$  レベルへのグルーピング方法は必ずしも一通りとは限らないので、これを合理的に決めていくためには、工事管理者や経験豊かなオペレータの判断を参考にすることが望ましく、また場合によってはいくつかの代替案を提示する必要がある。

c) 幹・支線系運搬路の設定 (ステップ 6)

図-15上で作業手順を繰返しシミュレートしながら各单位作業に対する運搬路を統廃合し、幹・支線系運搬路を設定したのが図-16である。なお、この段階で、計画作業に着手後明らかになった未買収地に関する運土作業に対して迂回路を設けたが、この問題は非常に微妙な問題である。すなわち、解決の可能性がいつ判明するかによって、土量配分段階で考慮すべき場合もあり、この段階までその判断を遅らせざるをえない場合もある。

d) 最適機械系の選定 (ステップ 7, 8)

土工機械系の機種に関してはすでに CS と決定できているため、ここでは主要機械 (CS) と補助機械 (PD) の組合せ台数を決定する。まず、グループ  $g_k$  に含まれる各单位

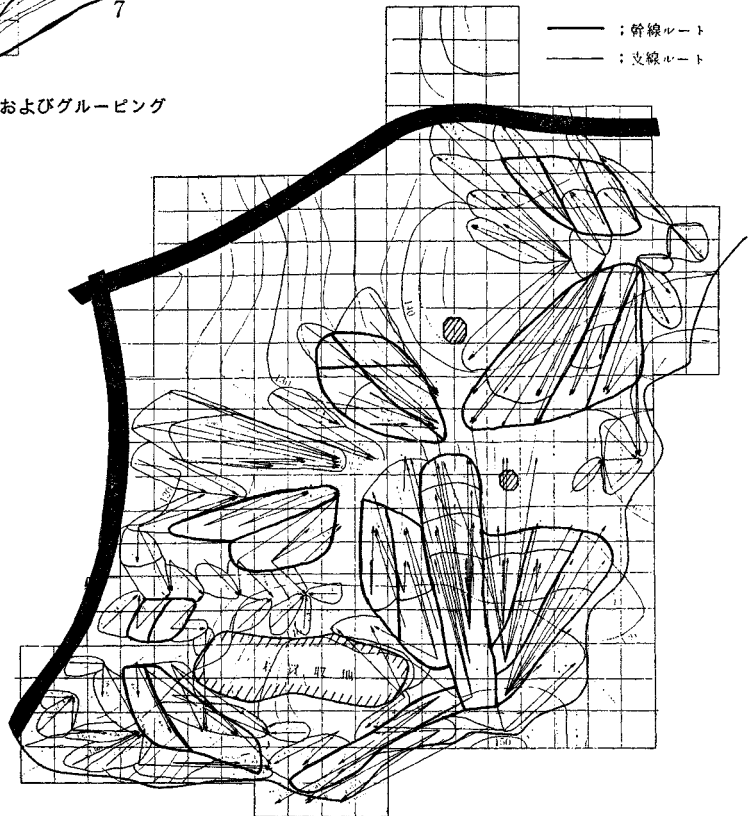


図-16 幹・支線系運搬路

運土作業の運搬距離を求め、図-9を参考にそれぞれの作業に対して最適と考える機械系を想定した。次に式(4)で得られるグループ  $g_k$  の平均運搬距離に対しても同じく最適な機械系を想定し、両者から最終的に各グループ  $g_k$  に対して1つの機械系を割付けた。

e) 所要作業日数および費用の算定 (ステップ 9)

各グループ  $g_k$  の所要作業時間を図-10より求め、1日の稼働時間を8時間として所要日数を算定した。また、図-9より各グループ  $g_k$  の所要費用も概算した。

以上に求めた作業計画の各要素値をまとめたのが表-3である。

f) 工程パターンの設定 (ステップ 10~12)

まず、グループ  $g_k$  内の単位運土作業に対して一意的な技術的順序関係を付加した。次に図-16より機械搬入路を検討した結果、グループ  $G_1, G_4, G_6$  が工事開始候補地点として考えられ、さらに原地形状況や後続工事の作業段取りなどを4.(4)に示した制約のもとに検討した結果、図-17に示すような3つの作業パターンが得られた。

g) 工程計画の代替案の作成 (ステップ 13)

原地形および各作業グループ  $G_i$  の施工区域面積を検討した結果、あまり稼働空間が広くないので、1つのグループ  $G_i$  には同時に1セットの機械系しか投入できないという制約を設けた。したがって、図-17から明らかのように、現場全体としては最大限3セットの機械系が投入可能となる。ここでは、できるだけ合目的な施工計画の作成を意図しているため、ステップ12で得た3つの工程パターンに対し、機械系(制約量)をパラメー

タとして PERT/MANPOWER 計算を行った結果、15種類の工程計画の代替案が得られた。

h) 総合評価 (ステップ 14)

いま、工程計画の各代替案を比較したのが表-4である。その結果、たとえば経済的には「パターン1の9台」が最適であり、工期の面から時間的には「パターン2の15台」という代替案が最適であろうと考えられる。しかし、この段階で1つの実施計画を選択するのが困難な場合には、それらの代替案に対する日程計画や各資源(たとえば機械)の山積図を作成し、後続工事の作業段取り上好ましい施工工程を示す代替案、あるいは山積図にむだがなく資源運用計画上好ましいと考えられる代替案を実施計画として選択すればよい。

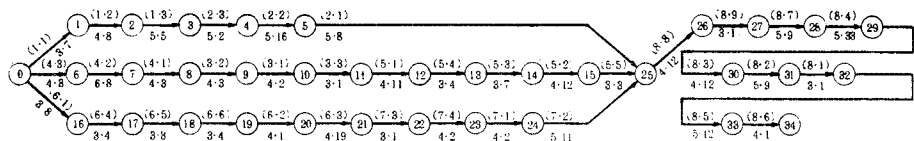
このようにして作成された整地工事の計画をもとに、次にはその並行あるいは後続作業である各種構造物工事の施工計画を作成する必要がある。ここでは以下のような理由により、宅地造成における道路配置の計画を参考として、道路建設を軸とした工程計画化をすすめるのが望ましいと考えた。

- ① 1つのグループ  $G_i$  の整地工事が終了すると、他

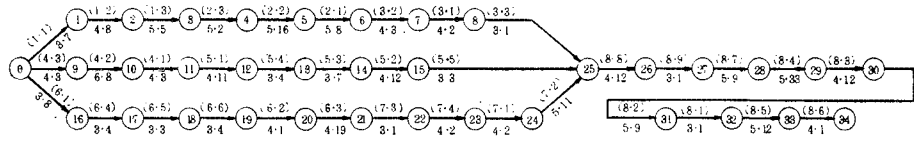
表-4 対象工事の工程計画の代替案

CS 台数 (台)	単価 (万円/日)	パターン 1		パターン 2		パターン 3	
		日数	費用 (万円)	日数	費用 (万円)	日数	費用 (万円)
9	75.0	174	13 050.0	179	13 425.0	182	13 650.0
10	80.4	168	13 507.2	167	13 426.8	182	14 632.8
11	85.8	165	14 157.0	163	13 985.4	182	15 615.5
12	91.2	156	14 227.2	157	14 518.4	182	16 598.4
15	96.6	147	14 200.2	145	14 007.0	182	17 581.2

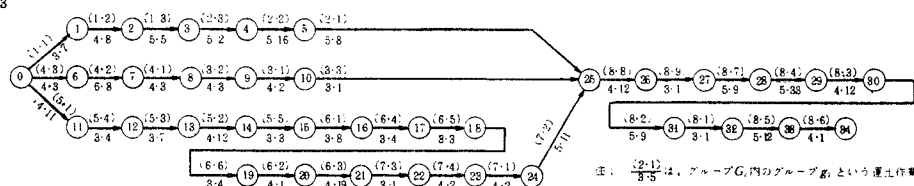
パターン 1



パターン 2



パターン 3



注: (2-1)は、グループ  $G_1$  内のグループ  $g_1$  という運土作業に対してキャピタルスケルバを3台投入し、作業日数は5日であることを意味する。

図-17 運土作業工程のアロー・ダイアグラム

のグループ  $G$  とは全く独立にそのグループ  $G_i$  の構造物工事を開始できる。したがって、整地工事と構造物工事の斉合性が保持され、グループ  $G$  単位の施工管理が可能となる。

② グループ  $G$  単位では施工面積が大きすぎてきめ細かな計画立案が困難な場合は、整地工事計画におけるグループ  $g$  に相当する小規模な施工区域を設定すればよい。

③ 各種構造物工事（のり面・擁壁工事，地下埋設物工事，給・排水施設工事，街路築造工事など）がいずれも計画道路に沿って施工されるので，計画道路によって分割される区域を施工計画の単位とすればよい。

## 6. 結 言

本研究は，工事計画のシステム化の一例として，近年ますます大規模化する傾向にあり，合理化が強く望まれながらその計画構成要素の把握が困難なために，合理的な施工計画の作成法が確立されていなかった整地工事計画のシステム化に関する一方法論を提案したものである。

しかし，本研究で提案した整地工事計画システムにおいては，計画作成プロセスのすべてを OR などの手法によってハード化することは不可能であり，その一部に OR 等のハードウェアを組み込んだソフトなシステムとならざるを得なかった。このようにシステム自体がソフトなるがゆえ，十分に汎用性を持ったシステムとして定形化することは困難であった。

したがって，本研究はあくまでも整地工事の計画作成プロセスをシステムとして把握し，分析していくための一提案を行ったものであるが，同時に事例研究を行うことにより，このシステムによって求められるアウトプットが実際の施工計画の有用な情報となるよう努めた。

最後に，今後この研究を継続するにあたって考慮しなければならない点を以下に略述すると，

(1) 整理工事計画システムとしては，各プロセスで指摘した問題点を解決すること，特に機械系選定のため

の情報作成プロセスの充実化，および土量配分計画と作業計画との間の斉合性の保持などについて考えること，

(2) 整地工事のみを対象とするのではなく，他工事との関連づけを十分に考えることにより，宅地造成工事全体としての工事計画システムへ発展させること，

(3) 工事計画のシステム化だけではなく，その施工管理方法に対してもシステム論的な研究を進め，設計・計画段階から実施段階までを総合化する方向を示すこと，  
などとなる。

本研究を行うにあたり，終始適切なお指導と助言を賜った京都大学工学部土木工学教室 吉川和広教授に感謝の意を表します。また，研究活動を通じてご助言を頂いた建設コンサルタンツ協会大阪支部施工管理研究委員会委員各位，特に奥村組 河原畑良弘氏，鴻池組 田坂隆一郎氏に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 吉川和広：土木計画と OR，丸善，1969.
- 2) 建設省土木研究所企画部：土木計画とそのシステム（初稿），土木研究資料第 694 号，1972.
- 3) 春名 攻：建設工事における施工管理に関するシステム論的研究，京都大学学位論文，1971.
- 4) 山本幸司：整地工事計画のシステム化に関する研究，京都大学修士論文，1973.
- 5) 総合建設技術研究会：宅地造成設計施工の手引，大成出版，1970.
- 6) 施工管理研究委員会第 4～6 次報告書，建設コンサルタンツ協会大阪支部，1970.
- 7) 春名 攻：土工計画の基本的な考え方，土と基礎，Vol. 20, No. 11, 1972.
- 8) Willenbrock, J.H.: Estimating Costs of Earthwork via Simulation, A.S.C.E. Co., Vol. 198, No. 1, 1972.
- 9) Dantzig: Linear Programming and Extensions, Princeton Univ. Press, 1963.
- 10) 河原畑良弘・田村正隆：電子計算機による最適運土計画，土木学会関西支部年次学術講演会概要，1970.
- 11) 佐用泰司：機械化施工合理化の研究，鹿島出版，1960.
- 12) 恵羅嘉男他：システムシミュレーション，日刊工業新聞，1970.
- 13) 吉川和広・春名 攻：施工計画における最適ネットワークの作成法，土木学会論文報告集，第 182 号，1970.

(1973.11.30・受付)