

山間部における大規模土工運土計画モデルの開発研究

立命館大学理工学部 正員 春名 攻
(株)大林組 正員 原田 満
立命館大学大学院 学生員 ○堀 元治
立命館大学大学院 学生員 北岡英基

1. はじめに

近年の都市部における地価は、バブル経済の崩壊にともない、上昇率は停滞状態となったものの、依然地域によっては高価なものとなっている。また、都市部での大規模な土地の確保の困難さ等の問題から、土地開発事業も、都市部周辺の丘陵地から山間部での開発が増加してきている。

従来、丘陵地の土地開発事業における造成工事では、工事対象地域を平面的なものとして捉え、工程計画案を作成してきた。しかし、山間部における造成工事では、切土高、盛土高が従来の丘陵地における工事に比べ、非常に大きいことから対象地域を3次元的に捉えることが必要となってきた。また、これら工事の進捗にともなう施工空間、施工条件の変化等の把握が計画段階では非常に困難であるため、あまり効果的な工程計画立案のための方策がとられていない。従って工程計画策定においては、経験工学的な熟練技術者の経験や勘に多く依存しており、計画案作成のための作業が非常に多いのが現状である。山間部における工事の工程計画立案に対しては、これらの把握が必要となってくる。

そこで、本研究においては、造成工事の工程計画での中心的計画となる土工の運土計画を取り上げ、計画者の意志を反映することが可能な方法として、

計画者の意志決定場面により多くの情報の提供を可能とするために、グラフィックスを用い、ヒューリスティックな運土計画モデルの開発について検討することとした。

2. 山間部における土工についての考察

造成工事において、その工事の対象となるのが「土」であることから、土工がその支配的工事であると考えられる。その土工の作業は図-1のように「掘削→積み込み→運搬→散土→整地」といった単純な作業として整理することができ、その作業の繰り返しで構成されていると考えられる。これらの作業は、対象地域の地形の形状・土質の分布などに非常に影響を受け、作業形態も変化してくるため、これらをより明確に把握するためには、土工を平面的な工事として捉えるのではなく、高さ方向も加えた3次元的な施工空間として捉える必要がある。また、これら施工条件も工事の進捗に従い高さ方向で変化の激しい山間部での土工では、以前にもましてこれらを検討する必要がある。すなわち、山間部における土工の工程計画を作成するためには、従来の丘陵地における土工の工程計画方法に山間部工事の特性を考慮して検討を行う必要がある。

そこで、山間部の土工における特性について次のような考察を行った。

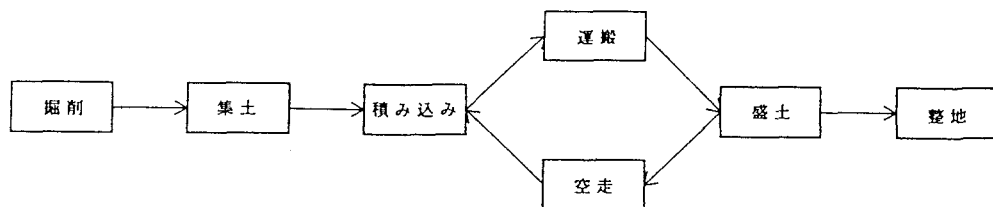


図-1 運土作業のサイクル

従来の運土作業においては、一般的に、短距離運土ではブルドーザ、中距離運土であればモータースクレーバ、長距離運土であればダンプトラックといったように、運土距離に応じて運土機械の設定を行ってきた。しかし、近年の土工事における土工量の増加や機械の大型化による性能の向上などにもない、中距離運土でもダンプトラックの使用が多くなってきている。一般にタイヤ系重機は、他の運土機械に比べ勾配や、ルートへの施工効率に与える影響が大きいため、大型タイヤ系重機の走行路の確保といった問題が重要視されるようになってきた。機械の

施工性を考慮すると、直線ルートを通ることは少なく、地形形状に応じたルートの設定方法が重要となってくる。また、それらの条件も工事の進捗により変化するため、機械の走行路も変化してくる。しかし、運土計画段階では、これらの把握が困難であることから、工事施工段階で順次、走行路の設定を行っているのが現状である。また、その設定にあつたは、経験工学的に熟練技術者の経験や勘に大きく依存しており、莫大な作業量となっている。

そこで、運土計画段階において、その施工条件等を取引的に把握し、より容易な計画者の判断が可能な方策が必要である。

3. 土量配分計画における問題点

従来の土量配分計画では、仕事量最小化を目指した線形計画法・輸送問題が最も一般的なものであ

ると考えられる。この方法ではまず、工事の対象地域を切土ブロック、盛土ブロックに平面分割したのち、各ブロックの重心、土量、切土、盛土ブロックの重心間の直線距離を求め、

$$(\text{仕事量}) = (\text{運土距離}) \times (\text{運土量})$$

を最小とする目的関数を解き、土量配分を決定する。

しかし実際には、運土ルートが下り勾配であれば施工効率は向上するが、上り勾配であれば施工効率は低下するといったことが見受けられ、各ブロックの重心どうしを結ぶ2点間の直線距離として算定される運土距離のみを対象とする従来の方法では、前述した機械の施工性を考慮することが不可能である。

例えば、同じ水平距離を持つ運土ブロック(切土ブロックと盛土ブロックのペア)であっても、高低差が異なれば、2点間の直線距離を算出した場合には、高低差の大きい運土ブロックの方が距離は長く

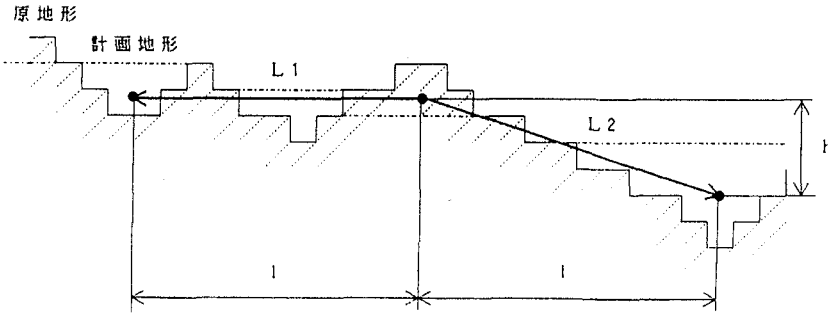


図-2 仕事量最小化における問題点

表-1 土量配分モデルの定式化

○ 目的関数	
$F(x) = (1 + a \text{TAN} \theta) \times L_{ijk} \times w \times x_{ijk} \rightarrow \min$	
○ 制約条件	
・ 盛土ブロック土量	$\sum \sum x_{ijk} = \alpha_k$
・ 切土ブロック土量	$\sum x_{ijk} = \beta_{ij} \times C_{ij}$
・ 運土量	$x_{ijk} \geq 0$
	$\sum \alpha_k = \sum \sum (\beta_{ij} \times C_{ij})$
○ 変数及び定数の定義	
a	: 勾配による影響度(効率低下度)を表す係数
α_k	: kブロックの盛土量 (m^3)
β_{ij}	: iブロックのj層目の切土量 (m^3)
C_{ij}	: 締固めた土量/地山状態の土量
L_{ijk}	: 運土距離 (m)
x_{ijk}	: 運土量 (m^3)
TAN θ	: 勾配
w	: 土の単位体積重量 (kg/m^3)

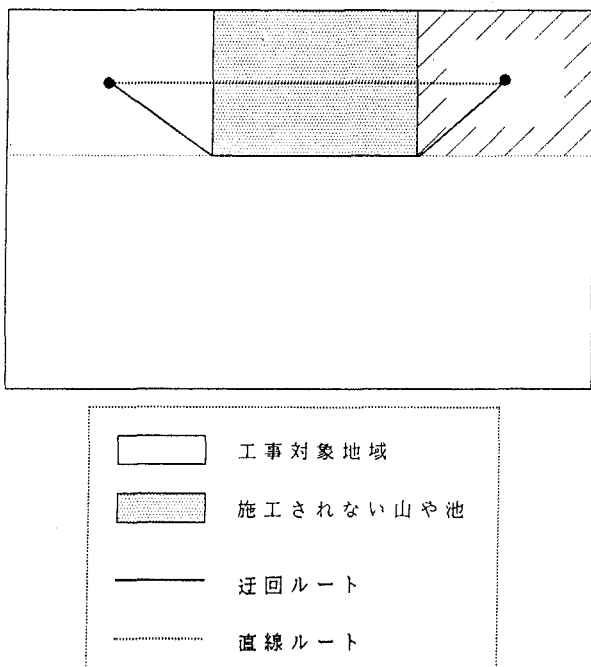
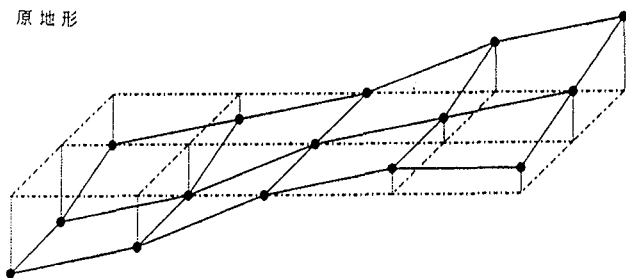
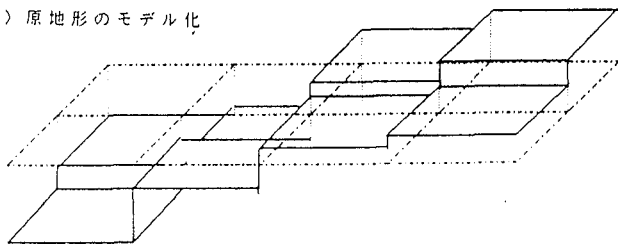


図-3 迂回路の設定方法

a) 原地形



b) 原地形のモデル化



- 原地形及び計画地形の測点
- 原地形
- - - 計画地形
- 測点における土工高

図-4 対象地形のモデル化

なり、機械の施工効率とは異なる結果となる(図-2)。また、同じ上り勾配を持つ運土ルート想定した場合には、当然のことながら、積載時は空走時よりも著しく走行抵抗を受け、施工効率が低下することは当然のことであり、積載時には下り勾配、空走時には上り勾配を持つ運土ルートの選択を事前に行っておく必要がある。

特に、山間部の土工事では、ブロックの高低差は大きく、運土距離だけで評価基準を設定した仕事量最小化は、必ずしも最適な土量配分結果を与えるとは考えにくい。

また、前述の問題に対して目的関数の変更を行ったとしても、施工過程を完全に掌握した最適な土量配分が行えるものではないと考えられる。最適化問題で解く場合には、土工量バランスの関係する制約条件を満足するだけの解を一度に定めてしまうため、施工過程を無視した状態になる。実際に切土ブロックの表面から順時運土作業を進めて行くに従い、ある切土ブロックでは土砂が削られ、土砂が盛られることにより地形は変化して、施工が可能な状態、不可能な状態を示すとともに、運土可能ルートも同時に変化する。より合理的な運土作業の実現のためには、時間軸での施工過程を見据える必要があると考える。

4. 施工性を考慮した土量配分モデルに関する考察

山間部における土工事に、従来の仕事量最小化を適用した場合、高さ方向による施工性の検討が不足し、地形変化にともなう施工条件等の検討も不足する。

そこで本研究において、土量配分計画では対象地域が大きいためマクロな土の動きを捉え、その土量配分を土の理想的配分として考え、時間軸で変化する地形形状、施工条件、あるいは機械の設定については、運土計画の段階

で時間軸に従って具体的に検討するといった2段階でこの問題に対応することとした。

その土量配分計画については、ルートが上り勾配であれば運土作業の効率が低下し、下り勾配であれ

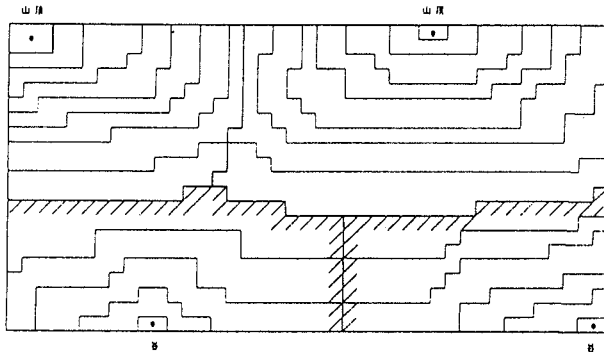
ば逆に運土作業の効率が向上するといった施工性に着目し、表-1に示すような定式化を行った。

運土距離については、直線ルートが最も効率的で理想的な走行路として考えられる。そこで基本的には

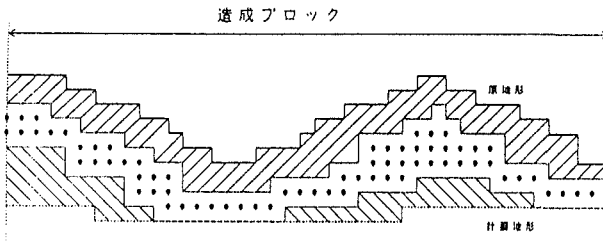
切土ブロックと盛土ブロックの重心間の直線距離を算出することとしブロック間の勾配については、重心の高低差を2点間の水平距離で割ることにより求めることとした。しかし、図-3のように、ブロックの重心間の直線ルートが工事対象外の山や谷、あるいは池を通るような運土が不可能な場合、より実際的な検討を加えるために、迂回させてルートを設定することとした。その迂回ルートについては、障害物を最短で迂回するような距離を算出することとした。また、迂回路を設定したブロック間の勾配については、重心の高低差を迂回路の水平距離で割ることにより求めることとした。

対象地域のブロック分割については、従来に比べ大規模なブロック分割を行うことにより、マクロな土の動きをみることにした。また、運土作業は図-1に示すようなサイクルとして捉えられることから、同一ブロック内に切土と盛土が存在すると、そのサイクルの把握が困難となる。さらに、一度切り崩した山は水を含みやすくなるため、ある程度の切り崩しが完了するまで連続施工することが考えられる。そこで、原地形、計画地形、土質分布の把握が必要である。地形のモデル化にはメッシュ法や断面法などが使われているが、本研究では原地形の測点を有効に利用できるとともに、土工量の算定が容易なメッシュを用いることとした。まず、対象地域をメッシュに分割を行い、図-4に示すようなモデル化を行い、そのメッシュ単位で切土と盛土の判別を行い、切土地域、盛土地域に分割を行なうこととした。さらに、ブ

a) 対象地の平面図



b) 造成ブロック分割 (断面図)



c) 造成ブロック層分割 (断面図)

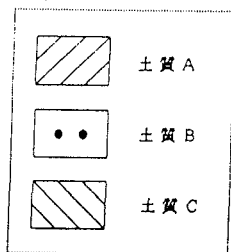
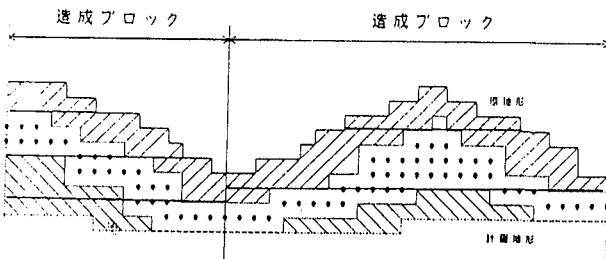


図-5 ブロック分割の方法

ロック分割にあたっては、原地形の形状、原地形の土質分布を考慮する必要があるが、原地形の形状によっては、図-5のb)のように立面方向に分割した際、層で地形が分断され、ブロックの位置を把握するのが困難となるといったことも起こる。そこで図-5のa)に示すように、画一的な分割は行わずに技術的な制約を考慮して、切土地域については山単位で、盛土地域は谷単位で分割することとし、それらのブロックを土量配分計画における施工の単位と考えることとした。そして本研究では、高さ方向にも検討を加えるためにこれらのブロックをさらに層で分割を行うこととしているが、この段階で分割した場合には、ブロック間の距離・勾配が実際の施工性とは異なった条件の設定となることが考えられる。従って、土量配分計画段階では、ブロックの層分割を行わずに、次の段階である運土計画において層分割を行うことで、より詳細な高さ方向での検討を加えることとした。

なお、山間部での土工事では従来の工事に比べ、切土高・盛土高が非常に大きいことから土質の種類が増えると考えられるが、これら土質については、土量配分計算を土質別に適用することで土質の考慮も可能である判断している。

5. 運土計画モデルの実証的開発

マクロに計画された土量配分を、運土計画として取りまとめていくためには、前述の土量配分に加えて運土ブロックの施工順序や投入機械の種類・台数・組合せ等の設定を行ないそれらをもとにスケジュール計算、工程表の出力といったプロセスについても検討していく必要がある。

山間部における土工事においては運土作業が進むにつれ、地形形状が変化し、それににともない切土ブロックや盛土ブロックの土質や施工面積あるいは、運土ルートに勾配等の施工条件が異なってくる。このため投入機械の種類・台数・組合せの設定および運土ルートの設定については、これら施工条件の把握、検討が必要である。しかし、計画段階でその地形変化の把握が困難であることから、運土計画策定に効果的な方策が取られておらず、運土計画そのものの検討が非常に困難となっているのが現状である。

そこで本研究では、これらの把握、検討を可能と

するためにコンピュータ・グラフィックスを用いて図-6に示すような運土計画策定プロセスをデザインした。

ここでは、先に求められた土の理想的配分として求められた土量配分計画をもとに、運土計画を策定することとしているが、土量配分計画ではマクロな土の配分であることから、切土ブロックをさらに層分割を行ない、そのブロックを施工単位として運土計画を策定して行くこととした。

層分割については、それぞれのブロックで地形の形状や土質の分布が異なることから、全てのブロックについて均一に分割するのではなく、まず計画者に判断で施工開始ブロックの指定を行い、そのブロックのついてブロック内の土質を考慮して分割を行い、段階を追って分割することとした。この切土ブロックに対応する盛土ブロックまでの地形形状を検討し、仮設道路の設定を行うこととした。次いで投入機械の設定を行なうにあたっては、運搬機械の待ち時間を低減するよりは、積込み機械の待ち時間を低減することが効率的な運土作業につながることから、積込み機械を運土作業の支配的機械と考え、その積込み機械に合わせた形で他の機械を設定することとした。その設定をより容易にするために、先取りの検討として、総土工量から制約工期を割ることにより、目標日土工量の算出を行うこととした。また掘削機械、積込み機械、整地機械等の台数は施工面積等で変化してくる考えられるので、これらの条件も層で分割されたブロック単位で検討を加えて設定することとした。これらの機械の種類・台数の設定を行ない、各運土ブロックの所要日数を算出することとした。これらを施工終了となるブロックまで繰り返すことにより、運土計画案を作成して行くこととした。

なお、運土計画案の策定にあたっては、工期、資源山積み図から制約工期、投入資源の有効活用などの評価・検討を行ない、代替案を作成することとしている。

6. 概略工程計画システムの概要

これまでの検討成果から、本研究では、土工量算出から概略工程計画に至るまでのトータルプロセスを図-7のような5つのステージとしてデザインし

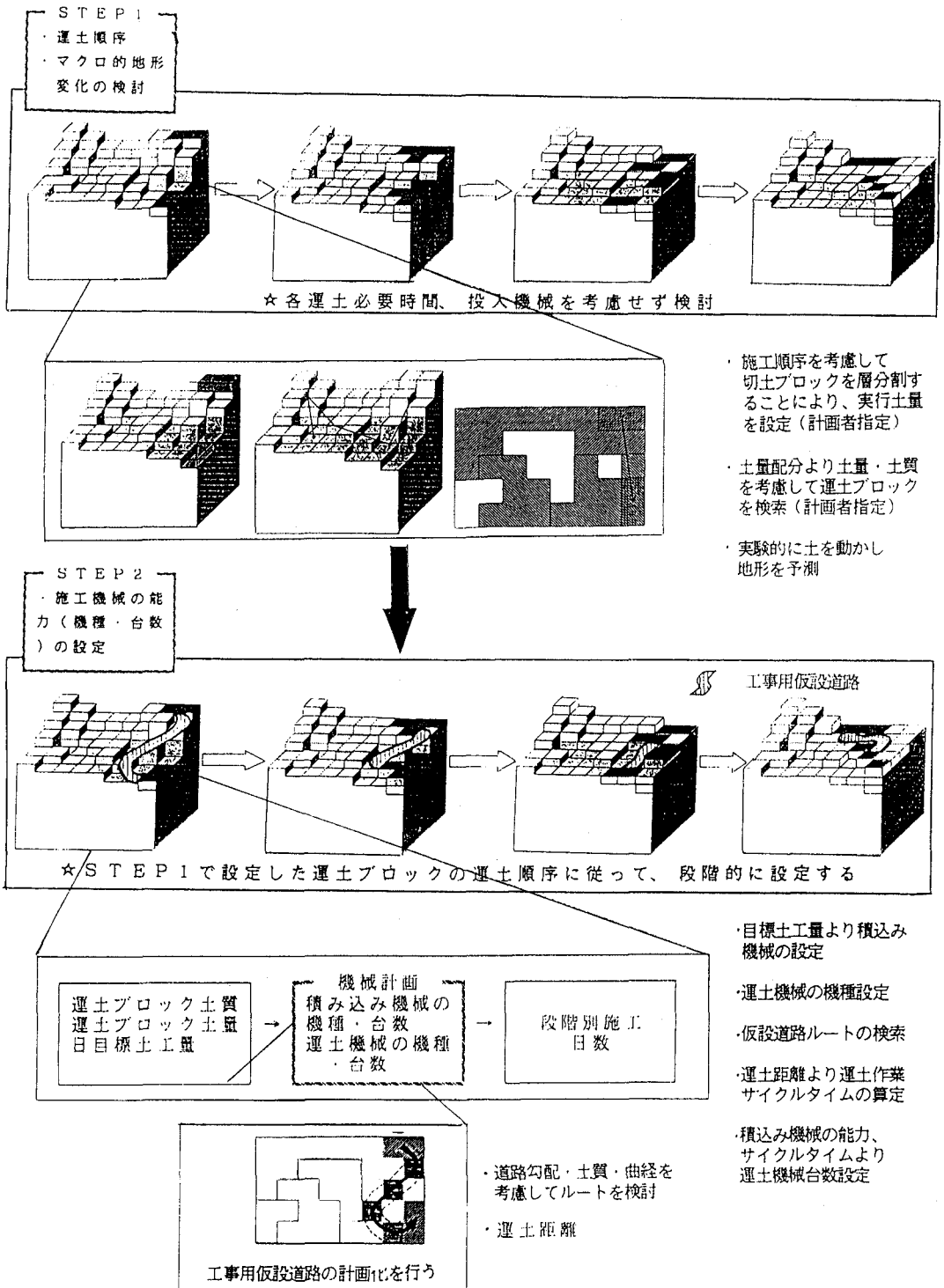


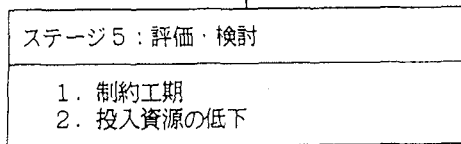
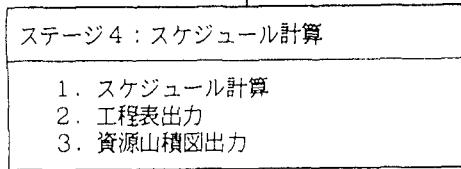
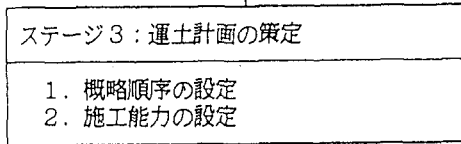
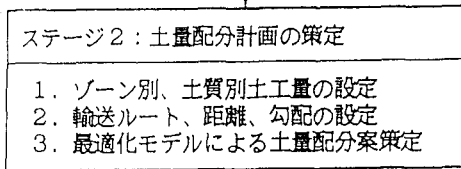
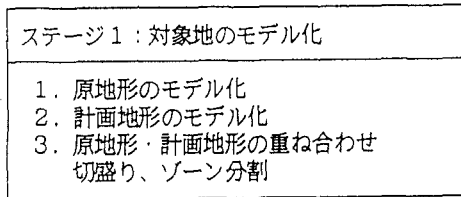
図-6 運土計画作成プロセス

ており、一貫した処理体系の確立とともに、迅速な計画策定作業が可能であると考えられる。

まず、対象工事を把握するための地形・地質情報の設定を行う。地形情報は、地図情報とともに原地形での計測データについても設定したものであり、計画地形情報も合わせて設定を行う。地盤情報は、ボーリング調査をもとにした情報である。また、対象工事固有の条件をはじめとする工事全体に関わる施工条件や標準データの設定を行い与件情報の明確化を行う。

以下、各ステージについて略述することとする。

(1) ステージ1：対象地形のモデル化



代替案
策定の
ための

図-7 概略工程計画作成プロセス

ここでは、土質別の土工量の算定と、施工ブロックの分割を中心とした検討を行うこととする。土工量算定にあたっては、メッシュ法（柱状法）を用いて、計画地形と原地形の平均標高差から土工高を求め、メッシュ単位で土工量を算出するものとする。対象地形をモデル化することによって分割された対象地域の切土地域と盛土地域を、原地形の地形形状を考慮し、切土地域については山ごとに、盛土地域については谷ごとに造成ブロックに平面分割する。なお、各ブロックの土工量は、与件情報からの土質データをもとに土質別に算出する。

(2) ステージ2：土量配分計画の策定

このステージでは、土の理想的な土量配分として捉え最適な概略土量配分を決定することとしている。

まず、ステージ1で算出した土工量および土質条件から土量体積変化率を算出する。ついで、各ブロックの重心を算出の算出を行い、その重心からブロック間の2点間の距離と平均勾配を算出する。また、迂回路の設定が必要な場合には、ここで設定しその距離と平均勾配を算出する。それらを表-1に示した目的関数に代入し線形計画法により土量配分を行い、土のマクロな動きをみることにしている。

(3) ステージ3：運土計画の策定

ここでは、ステージ2で求められた概略の土量配分計画をもとに、運土ブロックの施工順序、投入機械の種類・台数の設定を行い、運土計画を策定していくこととする。

まず、切土ブロックの層分割を行い、地形形状と地形勾配の検討し、仮設道路の設定を行う。ついで、総土工量と制約工期から目標日土工量を算出し、投入機械の種類の設定を行い、各機械のサイクルタイムを算出し、積込み機械の台数を設定する。その積込み機械の待ち時間を低減するように各機械台数の設定を行い、施工終了までこの作業を繰り返すこととした。

(4) ステージ4：スケジュール計算

ここでは、ステージ3で作成された運土計画をもとに、各運土ブロックのスケジュール計算を行い、工程表、資源山積み図の出力を行う。

(5) ステージ5：評価・検討

ここでは、ステージ5で取りまとめられた工程表、および資源山積み図の評価・検討を行い、代替案の作成を行う。

スケジュール計算の計算結果が、工期を満足しない場合や資源の1日当りの投入量が多い場合には、変更可能な運土段階に戻り、投入チーム数・投入機械台数の変更を行い、また、運土ブロックの施工順序の設定変更により、工期短縮および資源山崩しを行い、概略工程計画案として取りまとめることとしている。

7. 施工管理段階への適用方法

本研究においては、施工計画段階での計画検討作業の迅速化と効率化を中心に検討を行ってきたが、施工管理段階においても、本モデルを適用した検討が有効であると考えている。すなわち、与件情報の土質状態とは異なった土質状態であった場合や、資源の制約の変更、あるいは天候や突発事故による工期の延長など計画段階との施工条件の変化により、計画の修正を余儀なくされた場合、各計画のどの段階において修正を加える必要があるかといった検討を容易に行うことが可能である。さらに、実施工段階の地形を、その実績データよりコンピュータ・グラフィックスで表示し、それを計画段階における予測地形と比較することで、工事の進捗情報・機械の適合性などを迅速に管理することが可能で、より実務レベルに近い管理システムの構築が可能であると考える。

8. おわりに

本研究では、山部と谷部の高低差が大きく急峻な地形となる山間部での造成工事を対象とし、大規模土工の運土計画に対して、計画化の各プロセスを通して、一貫性や整合性を図れることを目的とした支援情報システムの開発研究を行った。そして、施工計画段階ではなかなか把握が困難であった、工事の進捗にともなう地形形状や施工条件等の把握が、コンピュータ・グラフィックスを活用した運土計画モデルの開発により可能となった。また、土量配分計画において、対象地域の平面のブロック分割を行い、運土計画でそれをさらに層分割し、そのプロッ

クを施工の単位とすることにより、仮設道路の設定および投入機械の設定が、ブロックごとに地形形状や施工条件の変化等の時間軸を考慮して検討が可能となった。さらに、土量配分計画において、高低差によるルート勾配を考慮にいたれた定式化により、施工性を考慮した土量配分を行うことが可能となった。

今後の課題として、仮設道路のルートについては検討が可能となったものの、幅員・勾配を検討するまでには至っておらず、これらを決定する方法論を構築することが必要がある。また、施工順序の自動探索などの研究を進め、さらには、代替案作成のための検討項目を整理し分析を行い、システムに組み入れることで、管理段階にも適用を可能とするシステムの構築・向上を図りたいと考える。

《参考文献》

- 1) 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、学位論文（京都大学工学博士）1971年7月
- 2) 石川六郎：システムズアプローチによる工事管理、鹿島出版会 1977年7月
- 3) 山本幸司：土木工事における施工計画のシステム化に関する研究、学位論文（京都大学工学博士）1978年11月
- 4) 伊丹康夫：建設機械の運営管理と経費の算定資料、財団法人 建設物価調査会 1980年10月
- 5) C.William.IBBS:Conceptual Approach for Cost/Schedule Integration in project Control Systems、土木学会論文集 No.425/ IV-15:1991.1.
- 6) 春名 攻、原田 満、堀 元治：山間部における大規模造成工事の運土計画モデルの開発に関する研究、第14回土木計画学研究発表会講演集 1991年11月