

(II-3)

地方都市圏域における山間部を対象とした 大規模造成工事の工程計画方法に関する研究

A Study on Scheduling Method for Large-scale Earthmoving Project at Mountain Area

立命館大学 春名 攻*
立命館大学大学院 原田 満**
立命館大学大学院 ○堀 元治**

By Mamoru HARUNA, Mitsuru HARADA, and Motoharu HORI

都市部の人口集中にともない、近年の造成工事では、山間部での大規模土工事が増加してきている。そのため、従来の造成工事に比べ、切土・盛土高が非常に大きくなってきており、従来のように平面レベルを中心とする検討に加え、高さ方向の土工計画をも十分考慮した工程計画作成が必要となってきた。

本研究では、まず、山間部における造成工事特有の重要課題の整理を行い、山間部工事にも適用が可能な運土計画作業のシステム化を行った。特に、土質・地質条件や、平面的な方向と高さ方向に広がりを持つ地形条件への対応、さらには、山間部での機械の施工性の確保のための仮設道路の選定方法について検討を行い、効果的な土量配分モデルを開発した。本論文は、これらの検討成果を踏まえて、山間部における造成工事全般を対象とした概略工程計画の策定方法を総合的に取りまとめた。

【キーワード】 大規模造成工事、運土計画、工程計画

1. はじめに

都市部やその周辺での新たな開発対象地が皆無となった今日においては、都市中枢機能の集中による人口過密、住宅不足といった都市部の抱える問題は益々大きなものとなっている。一部では、より機能的な再編成を目指した再開発事業が進められているものの、早急な問題の解消には至らず、関西地方の学研都市や国文都市に見られるような山間・急峻な丘陵部におけるニュータウン開発や、さらには、地方都市の活性化を目指した地方コミュータ空港の建設など、新規都市開発事業のターゲットは、完全に都市部から都市部周辺の山間部へと移行してきていると言える。

本研究においては、今後拡大する傾向にある大規模造成工事の、合理的な工程計画・管理を行なうための方法論の開発を目指した。すなわち、新施工法の開発や施工機械の能力の向上といった著しい発展をみせるハード技術と、それらを支えるだけのソフト技術の双方の融合化した技術的方法が必要であると考え、そのような観点から、大規模造成工事の工程計画・管理の処理プロセスの改善について検討を行った。

特に本研究では、造成工事の中心である土工事に着目して、急峻かつ複雑な山間部の地形にも対応が可能な土量配分計画と運土計画の問題を検討するとともに、土質条件や地形条件、さらには施工機械の施工性を確保するために必要な仮設道路の設定を考慮することが可能なように、運土計画作業のシステム化を行った。

2. 山間部の造成工事課題の整理

土工事の工程計画・管理の研究は、これまでも

* 正員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 E X 3701)
** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(075-465-1111 E X 3701)

数多く存在している。そして、OR手法である線形計画法の輸送問題をういた土量配分計画の策定方法は、今日においても利用されており、その代表的なものと言える。

しかしこれまでの研究においては、対象地が比較的緩やかな地形であったことから、平面的な施工空間のみを検討の対象としていることが多い。そして、本来の地形の形状や、高さ方向に広がる立体的な空間に対する検討が不足し、実施工における有用性に欠ける場合も多くあった。地形が複雑で立体的な施工空間を持つ山間部における土工事の計画を考える場合には、従来方法を直接適用するには不十分であり、実用的な土工計画を策定するにあたっては、数多く改善の余地が残されている。

以下、山間部における造成工事の特性について検討を行うこととする。

(1) 対象地形モデルの立体化

山間部における造成工事では、原地形の山部と谷部の高低差が、丘陵地の造成工事と比較すると非常に大きくなる。このため、切土高・盛土高が50mを越えるような高盛土の設計となることが少なくない。そして、切土高・盛土高が大きくなるにともない、1つの平面ブロック内の土工量が増大するだけでなく、土質・地質の種類も増大するため、盛土部分の適正土質を確保する上でのマッチングや、力学的安定条件の確保など、重要度を増す検討項目が増加することになる。

また、山間部では、山部あるいは尾根部を中心とする切土ブロックと谷部を中心とする盛土ブロックとに、かなり鮮明に分離される。このため、一度に広域的な運土作業を実施することは難しい状況下にある。

工事の対象地域を、適当な大きさのブロックに平面分割した後に、ブロック間の土量配分を決定するといった従来の土量配分計画では、もはや山間部における土量配分計画には対応できないと考えられる。対象地形を等高線のように平面モデルとして捉えるのではなく、高さ方向にも空間を持たせた立体的モデルとして捉える方が必要である。

(2) 機械性能の向上による運土作業の変化

従来の運土作業では、運土距離に応じてブルドーザー（短距離運土）、モータースクレーパ（中距離

運土）、ダンプトラック（長距離運土）を使用してきた。しかし、近年における、土工量の増加や運土機械の性能の向上は著しく、中長距離の運土作業には、大型のダンプトラックが用いられることが多くなっている。これらは、一度に大量の土砂を、短時間に運土出来ることが最も合理的である、と判断されたことによるものであり、施工機械の大型化が進展してきている。

これらの変化は、運土作業そのものにも変化を与え、タイヤ系重機のため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ていることによるものである。

すなわち、モータースクレーパであれば、平地部では多少の走行路の不安定さや急傾斜である運土が可能であり、最短ルートである直線状の運土が出来た。しかし、山間部でのダンプトラックの運土を考えると、整備された仮設道路は不可欠の条件となる。原地形の形状が複雑で勾配が大きい場合には、直線ルートの確保が困難となることや、仮設道路の整備によって運土機械の施工性が異なるなどを考慮すれば、今後は、仮設道路計画が、土量配分問題以上に重要であると考えられる。

(3) 仕事量最小化における問題点

従来の土量配分計画では、総仕事量の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る。したがって、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は不可能である。

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）でぶっても、高低差が異なっておれば、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

は長くなり、機械の施工効率とは異なる結果となる（図-1）。また、同じ上り勾配を持つ運土ルートを想定した時には、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を選択を事前に行っておくことが必要である。

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次運土作業を進めていくと、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。

3. 対象地形のブロック分割の方法

本研究では、対象地形を

立体的なモデルとして捉えることが必要であると考え、以下に示すように従来と同様に行なう平面的な分割と、土質の層に着目して高さ方向に分割を行なう層分割により、切土・盛土ブロックを設定することとしている。立体モデルの作成にあたっては、まず、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法を用いることとした。この方法では、図-2のように施工対象地域を正方形メッシュに分割したのちに、原地形（地形図）と計画地形（設計図書）を重ね合わせ土工高を算定する方法であり、切土地域、盛土地域の分割をはじめ、立体的に地形を捉えることが可能である。

この立体化された地形モデルを用いて地形分析、土質の分布を把握し、前

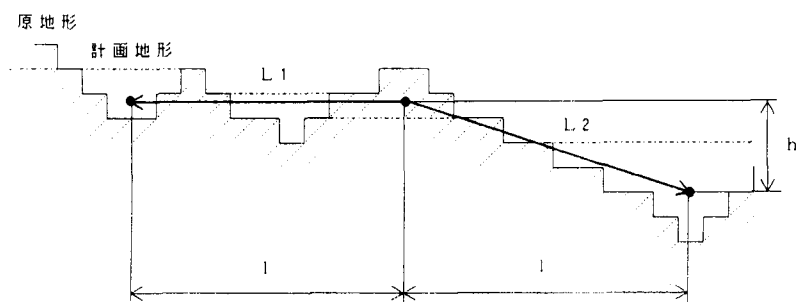
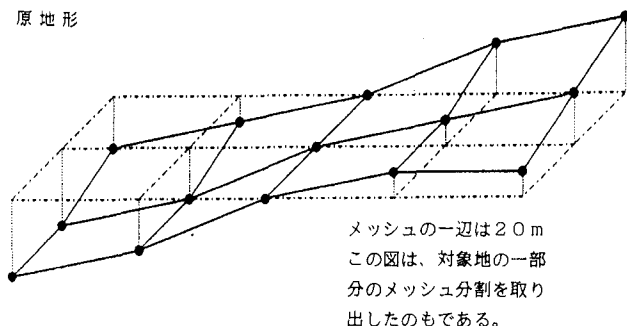


図-1 仕事量最小化の土量配分における問題点

a) 原地形



b) 原地形のモデル化

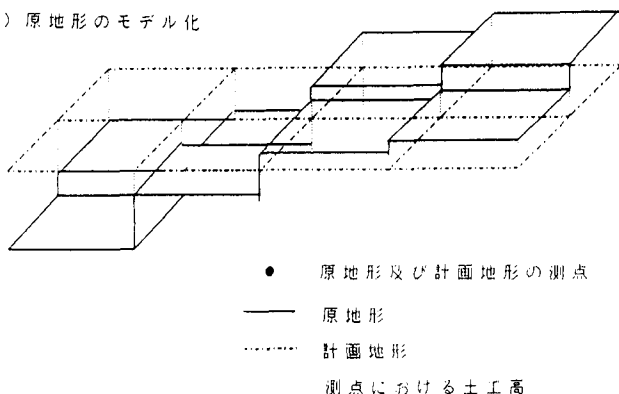


図-2 原地形のモデル化

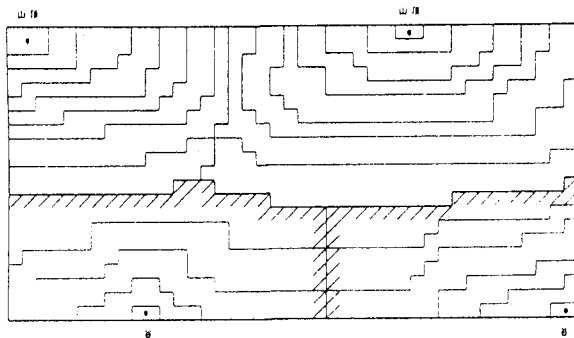
述のように、対象地を平面と立面方向について２段階にブロック分割を行なう。

(１) 平面ブロック分割

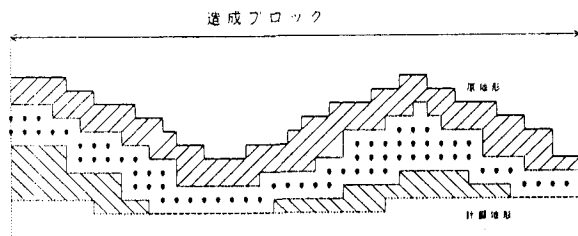
一度切り出しをはじめた山は、表面の森林の伐採などから水を含み易く、地山の崩壊が起こり易い状態となっている。このため、地山から切土を行う場合には、まず、切り出す山を選定し、樹木の伐採→

徐根→土砂の切り出し、といった施工過程が通常となっている。また、ブ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－３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－３のａ)に示すように、

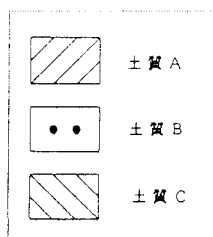
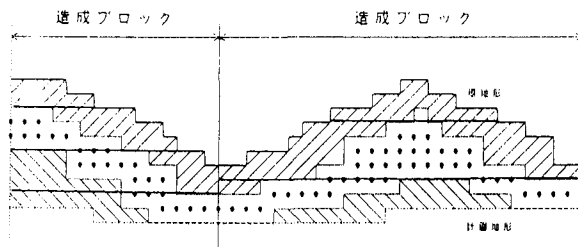
ａ) 対象地の平面図



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－３ 造成ブロックの分割方法（断面図）

画一的な分割は行わずに技術的な制約を考慮して、切土地域では山ごとに分割することとした。盛土についても切土と同様の方法により、盛土地域では谷ごとに分割を行うこととした。本研究で示す平面分割方法は、従来の方法と比較して、分割寸法が大きなブロックとなるが、次に行う立面方向の分割時に層で分断されず、また機械の施工性を考慮した平面分割が可能である。

(２) 立面層分割

平面分割されたブロックについて検討を加えると、切土ブロックでは、表面から順次土砂を掘削するといった技術的な順序が存在している。さらに、土質は、地盤の深さによって異なっており、層状に分かれていることが多い。一方、盛土ブロックでは、土構造物が安定となるように地形設計が行われており、切土ブロックに対して、運び込まれてくる土を順に散土・整地していけばよいという従属的な関係を持っている。両者とも向きは異なるが、高さ方向に技術的順序関係が存在しており、１つの平面切土ブロックでも、どの辺りの高さにある土をいつ、何処の盛土ブロックのどの辺りの高さに運ぶか等々のといった検討が必要となる。両者とも立面に層分割することが可能であるが、同時に層分割した場合には、かえって運土作業の自由度を損なうものと考え、本研究では、支配的な関係にある切土ブロックのみを立面方向の分割対象とすることとした。(図－３ｃ))

また、土質の種類によって、運土ブロックだけでなく、施工法や施工効率も異なることが考えられるので、層分割されたブロック内の土質は、できるだけ同一の土質で

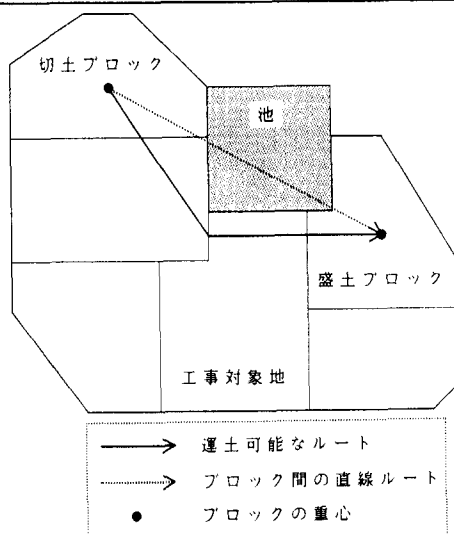
構成されることが望ましいと考えた。そこで、深さが均一な分割とはせずに、土質を考慮して立面方向に分割することとした。複数の土質が存在してしまう場合には、土質別に土工量を求めることで、対応が可能であるとする。

4. 仮設道路の設定方法に関する考察

2. に述べたように、山間部における造成工事においては、仮設道路計画が非常に重要なウェイトを持っている。仮設道路の設定方法について、次下に検討を加えた。

表－1 略式土量配分の定式化

○ 目的関数	
$F(x) = (1 + \tan\theta \times 100) \times L_{i,j,k} \times w \times x_{i,j,k} \rightarrow \min$	
○ 制約条件	
・ 盛土ブロック土量	$\sum x_{i,j,k} = \alpha_k$
・ 切土ブロック土量	$\sum x_{i,j,k} = \beta_{i,j} \times C_{i,j}$
・ 運土量	$x_{i,j,k} \geq 0$
	$\sum \alpha_k = \sum \beta_{i,j} \times C_{i,j}$
○ 変数及び定数の定義	
α_k	: kブロックの盛土量 (m ³)
$\beta_{i,j}$	: iブロックのj層目の切土量 (m ³)
$C_{i,j}$	: 締固めた土量/地山状態の土量
$L_{i,j,k}$	: 運土距離 (m)
$x_{i,j,k}$	: 運土量 (m ³)
$\tan\theta$	: 斜面勾配
w	: 土の単位体積重量 (kg/m ³)



図－4 運土可能ルート探索 (平面図)

工事対象地域内に既存の林道などがある場合には、それを仮設道路として利用することにより、工事費用の低減、工期の短縮が可能となり最も合理的であると考えられる。しかし、そのような林道が存在しない場合や、存在しても効果的でないと考える場合には、どのようなルートで、どのような幅員、勾配の仮設道路を設定するかは、技術者の判断に頼らざるを得ないのが現状である。また、判断のもととなる情報は、原地形と計画地形の形状のみであり、非常に限られた情報で検討することになる。

そこで、本研究では、事前に略式的な土量配分問題解き、このマクロな土の動きと原地形の形状を仮設道路設定のための参照情報として、計画者に与えることとした。

略式土量配分問題は、仕事量最小化問題であるが、表－1に示すように、運土距離に加え、勾配による施工効率を目的関数に組み入れることによって、施工性を考慮することが可能である。ここでは、従来問題と同様に基本的には、2ブロック間の直線ルートを運土ルート、その2点間の距離・平均勾配を、運土距離や勾配とするが、その直線ルートが対象地域外を通る場合には、施工機械の走行が禁止されることから、迂回路を設置することになっている。(図－4)

そして、上述のように求められたマクロな土の動きを1つの参照情報として、計画者の意志判断決定にもとづき、任意に複数の仮設道路案を策定する。この仮設道路案の評価については、次章において述べることとする。

5. 土量配分モデルの開発

従来の仕事量最小化の土量配分計画は、山間部における土工事には不向きであることや、最適化問題による弊害についても前述のとおりである。一時的には、両者の問題を同時に満足するような策定方法が望ましいが、実際上は大変難しいことである。そこで、時間軸における施工過程の検討は、他工事の工程計画方法と等しいものと考え、まず、土量配分計画を最適化問題として定式化し、土量配分案を求める。次いで、時間軸を考慮しつつ運土計画(工程計画)を策定する、といった2段階の処理により決定することとした。

ここでは、まず、土量配分計画について述べることにする。先の略式土量配分では、仮設道路案設定のための1つの参照情報にすぎなかったが、この段

表-2 土量配分モデルの定式化

○ 目的関数	
・ 総運土時間の最小化	$F(x) = \sum (k_{ijk} \times x_{ijk}) \rightarrow \min$ $k = (T_{ij1} + T_{ij2}) / x_{ijk} \times (L_{ij} / C_{ij})$
○ 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	$\sum x_{ijk} = \beta_{ij} \times C$
・ 運土量	$x_{ijk} \geq 0$
	$\sum \alpha_k = \sum \sum (\beta_{ij} \times C)$
○ 変数及び定数の定義	
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)
x_{ijk}	: 投入機械の1回に運べる土量 (m ³)
C_{ij}	: 締固めた土量/地山状態の土量
L_{ij}	: ほぐした状態の土量/地山状態の土量
x_{ijk}	: 運土量 (m ³)
F	: 走行抵抗 (kg/t)
但し	
$F = R - 10 \times (\tan \theta \times 100)$	
R	: 土と機械によるよごり抵抗 (kg/t)
$\tan \theta$	: 斜面勾配
v_{i1}	: 積載時の走行速度 (km/h)
v_{i2}	: 空走時の走行速度 (km/h)
但し	
$v_{i1} = k \times F + a$	
$v_{i2} = k \times F + a$	
k, a	: 定数
L_{ij1}	: 運土ルートの往路の距離 (m)
L_{ij2}	: 運土ルートの復路の距離 (m)
T_{ij1}	: 積載時間 (h)
T_{ij2}	: 空走時間 (h)
但し	
$T_{ij1} = L_{ij1} / (v_{i1} \times 1000)$	
$T_{ij2} = L_{ij2} / (v_{i2} \times 1000)$	

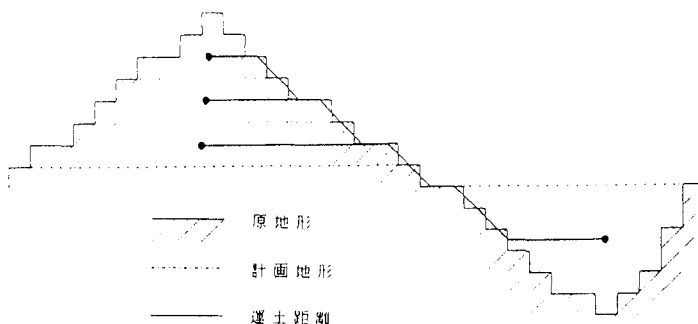


図-5 運土ルートの距離算出

階における土量配分問題では、計画者によって任意に設定された複数の仮設道路案の評価が可能のように、仮設道路ルートを運土ルートとして捉えて、表-2のような定式化を行った。

本問題では、総運土時間の最小化を行っており、本モデルを適用するにあたっては、まず、切土ブロックの重心からその仮設道路をへて盛土ブロックに至るまでのルート上の距離を、各運土に対して算出する。(図-5)そして、ルートの距離に応じて、短距離運土であればブルドーザー、長距離運土であればダンプトラックといったように、投入機械の種類を設定することにより、各運土の所要時間を求めることにしている。

なお、本研究では、1セットの運搬機械が切土ブロックと盛土ブロック間の往復に要する時間を、1運土所要時間とした。そして、運土時間の算定にあたっては、1%勾配につき10Kg/㎡かかる勾配抵抗と路面状態による摩擦抵抗をあわせた走行抵抗から求められる機械の走行速度を往路と復路のそれぞれについて求めることにした。

また、一般に土量は、地山の状態と締め固めた状態、さらには運土時のほぐした状態とでは土の体積が異なっているが、この問題に対しては、土量変化率を目的関数に組み入れることにより、対応を可能にしている。

以上のような土量配分モデルを、仮設道路案すべてに適用を行うことにより、各道路案について最小運土時間となる最適土量配分を求めることが可能である。そして、これら代替案の評価にあたっては、要求される個別工事の条件にあわせ、計画者が、最小運土時間のみならず、仮設道路の建設時間や建設

費用を総合的に判断して、1案を選択することとした。

6. 運土計画の策定に関する検討

本研究では、土量配分結果によって決定される運土ブロックを工程アクティビティとして捉えることにしているが、アクティビティ間の施工順序と施工能力を設定することによって、工程計算が可能である。工程をシミュレートすることにより、施

工過程に対する検討が可能となる。

切土ブロックについては立面方向に層分割していることから、切土頂部のブロックから順に下層のブロックが施工可能となる技術的な順序関係が存在している。この技術的順序から得られる基本ネットワークは、同一切土ブロックの層間にもみ順序関係があり、各切土造成ブロックは平行作業の関係を持つものである。ついで、どの時期にどの運土を行うか、といった個別工事に対応する管理的な順序関係の設

定によって、工程ネットワークを作成する。工事施工を計画的に実施する上で必要な管理順序の決定にあたっては、地盤の安定性に関する検討が必要である。造成ブロックが隣接している場合、一方のブロックのみを先行して施工していくと、未施工の造成ブロックとの境界に段差が生じ、その段差が大きいと地盤が不安定となるだけでなく、円弧すべり等の危険性をともなうことになる。隣接している造成ブロックの切土高、盛土高に対して、ある一定の制約を設計、地盤安定の検討を随時行うことが必要である。

7. 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-6のような5つのステージとしてデザインしており、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。

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0：与件情報の明確化

ここでは、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、ボーリング調査を基にした情報である。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もここで設定を行う。

(2) ステージ1：対象地形のモデル化

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定するものとする。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。さらに切土ブロックについては、土質を考慮し立面方向に層分割を行うものとする。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。

(3) ステージ2：仮設道路計画の作成

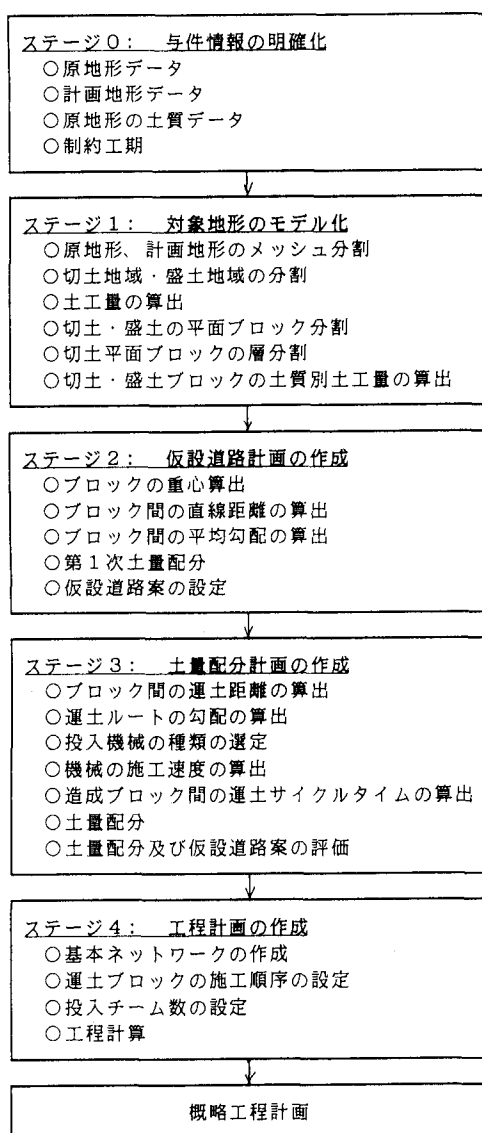


図-6 概略工程計画作成プロセス

このステージでは、まず概略的な土量配分を行い、その土量配分を情報として、計画者が任意に複数の仮設道路ルート案の設定を行うこととしている。

まず、ステージ1で算出した土工量及び土質条件から、土量体積変化率を算出する。ついで、各ブロックの重心からブロック間の2点間の距離と平均勾配を算出し、表-1に示した略式土量配分によって、マクロ的な土の動きをみる。そして原地形の形状とその略式的な土量配分を情報として仮設道路案を設定する。

(4) ステージ3：土量配分計画の作成

このステージでは、ステージ2で設定した仮設道路案と土量配分を評価し、概略土量配分を決定することとしている。

まず、各運土について仮設道路を通る運土ルートの距離・ルートの勾配、路面状態を求め、これらをもとに、走行抵抗および、投入機械の走行速度を算出する。走行速度と運土距離から各運土時間を求めた後、表-2の土量配分モデルによって、最適土量配分を求める。最終的に、仮設道路の建設コスト、時間を合わせて、複数仮設道路案の評価を行い、仮設道路ルート及び、土量配分と同時に決定する。

(5) ステージ4：工程計画の作成

このステージでは、基本ネットワークをもとに運土ルートの確保が可能なブロックの施工順序の設定と施工能力の設定によって工程計画案を算出する。

まず、切土ブロックの立面方向の層分割による、技術的順序のみを考慮した基本的ネットワークの作成を行う。そして、施工空間を考慮した投入チーム数の設定と、施工による地盤の安定を考慮した施工順序の設定する。ついで、スケジュール計算を行い、制約工期、資源山積み図より評価を行う。スケジュール計算結果が、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、投入チーム数・投入機械台数の変更、運土ブロックの施工順序の変更により、工程短縮および資源山崩しを行い、概略工程計画案としてとりまとめることとしている。

8. おわりに

本研究では、複雑で山部と谷部の高低差が大きい地形となる、山間部での造成工事を対象にしたことから、造成ブロックを平面と層の2段階で分割する

こととした。それにより切土ブロックの土を、いつどの辺りの高さまでの土を運ぶかといった工程の要素を土量配分計画に取り入れることが可能となり、さらに、原地形の深さ方向で変化する土質の検討も可能になったと考える。また、これまで平面的に取り扱われがちであった造成工事の対象地形を3次的に捉えることが可能になった。そして、山間部における運土作業にとって、施工性、安定性の面から重要となる仮設道路の設定についても検討が可能になったと考える。さらに、従来モデルにはない機械の施工性についての検討が可能で、運土時間を目的関数に組み入れ、総運土時間を最小とする運土計画モデルの開発を行った。本モデルでは、より実際の検討が可能であり、立体的な運土作業を捉えることができたと考えている。

しかし、仮設道路のルートについては検討が可能になったものの、幅員・勾配を検討するまでにはいならず、これらの決定する方法論を構築することが必要である。さらに、本研究で示したステージ4の工程計画の立案に対しては、機械稼働効率等、まだまだ検討の余地が残されているものと考えている。運土による地盤高の変動の捉え方や、施工順序の自動探索などについてもさらに検討を進め、システムの向上をはかりたいと考えている。

[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) 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 1991年11月