

山間部大規模土地開発における 運土計画システムのC A D開発に関する研究

A Study on Development of Computer-aided Design system
for Construction Planning of Large-scale Earth-moving Construction in Mountain Area

立命館大学理工学部 春名 攻*
立命館大学大学院 北岡 英基**
立命館大学大学院 ○ 迫間 幸昌**

By Mamoru HARUNA, Hideki KITAOKA, Yukimasa HASAMA

近年における土地開発事業が、都市周辺の山間部や地方都市において盛んに展開されるようになってきているが、その急峻かつ複雑な地形や複数の土地・土質構成、さらには工事施工途中における時間的な地形や地質の変化などの施工条件が従来の土地開発工事計画とは大いに異なっており、大規模造成工事を合理的に進めるための工程計画の策定方法のシステム化が重要な課題となってきた。

そこで、本研究においては、時間の経過にともなう地形の変化の把握と運土ルートの設定方法に着目して、その変化に対応した合理的な工事施工を実現するための施工計画の策定を念頭においた運土計画モデルの開発を研究対象とした。ここでは、コンピュータ・グラフィックスを積極的に活用することで、急峻かつ複雑な山間部の地形を3次元的な施工空間として把握し、各種の与条件の検討を行なうとともに、地形の変化(施工順序)を設定することで、運搬機械の施工性を考慮した工事用仮設道路の設定が容易となるような形で運土計画の実験モデルの開発を実証的に検討したものである。

【キーワード】山間部土工事、土量配分計画、運土計画

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、住宅不足など都市部の抱える問題は益々大きなものとなっている。関西地方の学研都市や国文都市に見られるような山間部や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ニティ空港の建設など、新規都市開発事業のターゲットは、完全に都市部から

都市部周辺や地方都市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、さらには与条件を考慮した施工機械の施工性、走行性、安全性の確保が必要な工事用仮設道路の設定が可能な運土計画作業のシステム化を行った。

2. 山間部土工事の特徴についての考察

山間部土工事においては、図-1の丘陵地の宅地造成工事に比べ、図-2のように原地形と計画地形の高低差が非常に大きくなり、盛土高が高盛土施工の

* 正 員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)
** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(同上)

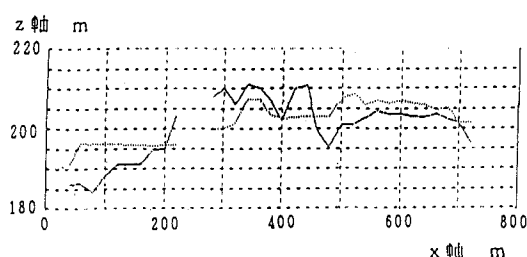


図-1 丘陵地土工の断面図 (Y=440m)

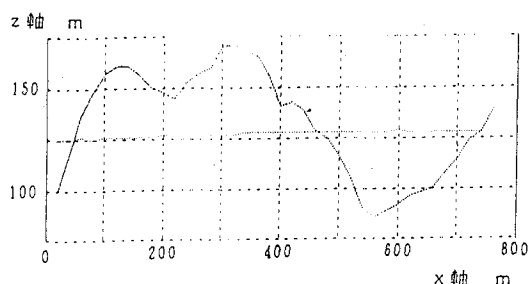


図-2 山間土工の断面図 (Y=360m)

ような施工条件を余儀なくされる。また、山あるいは尾根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鮮明に分割されるため、高さ方向も加えた三次元的な空間として土工事をとらえる必要がある。つまり、実施工においても時間の経過にとともに造成地形が複雑に変化していくため、施工空間や施工条件などの把握が非常に困難となり、それらの地形変化による機械の施工効率の影響を考慮することが不可能であるので、平面として捉えることには限界があると考えられる。そのため、現状においては、あまり効果的な工程計画立案のための方策がとられておらず、造成工事の工程計画立案の作成が非常に困難である。

さらに、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、中距離運土ではモータースクレーパ、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とともに、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。そのため、タイヤ系重機は、他の運土機械に比べ勾配や、ルートの施工効率にあた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、地形の形状を考慮しながら、かつ、運搬機械の施工性・走行性を損なわずにルートを設定を行なうこと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、機械の走行路もそれらに対応させて設定する必要がある。

しかし、工程計画策定においては経験的な熟練技術者の経験や勘に多く依存しており、計画案の作成のための作業が非常に多く、明確で分かりやすい方法による検討が行なわれていないのが現状である。

そこで、工程計画策定のための検討項目を下記に示す。

(1) 土量配分計画における問題点

土量配分計画において、従来は対象地を適当なブロックに分割した後、そのブロックを施工の単位としてブロック間の直線距離を運土距離として算出し、目的関数を

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

とした総仕事量最小化を目的関数とする線形計画法輸送問題として解いて計画案を求める方法が用いられてきた。しかし、山間部の土工事では、この仕事量最小化では、上り勾配や下り勾配などによる機械の施工性の検討が不足したり、時間の経過による地形の変化にともなって運土ルートや運土距離も変化するという点に対する検討も不足する。また、運土計画策定において、地形条件に運土ルートの制約を受けることも多く、タイヤ系重機のための工事用仮設道路に対応した運土距離との整合性も再検討する必要があると考えられる。

さらに、実際には、計画段階において、与条件から一部の地域の土地買収の遅れによる施工最終段階への検討や、施工初期段階において地形の形状等から、施工機械の投入場所に制約があるために、各種の与条件の検討を考慮しなければならないが、土量配分計画の段階ではそれらの施工順序の検討は困難である。

そこで、山間部の造成工事では、これらのブロック間の勾配やルートの運土距離を評価基準にした仕事量最小化では必ずしも最適な土量配分とは考えにくい。ため、より実施工に近い工事用仮設道路の運土距離との整合性を検討する必要がある。また各種の与条件を考慮することで、よりリアリティの大きな

土量配分計画を検討する必要があると考えられる。

(2) 運土計画における問題点

先に述べたように、山間部の土工では、施工の自由度が極めて大きく、工事用仮設道路のルートや施工順序等の不確定要素が多い。このため、計画の

検討においても試行錯誤的な方法が一般的となっており、定型的な処理プロセスが存在してはなく、工事用仮設道路の設定においても工事施工段階で経験工学的に熟練技術者の経験や勘をもとに順次、走行路の設定を行っているのが現状である。そこで、山

間部の土工においては、運土作業が進展するにつれて地形の形状が変化し、その地形の変化に応じた工事用仮設道路の設定を検討することが重要である。

また、山間土工においては、1つのブロック内の土工量も増大するだけでなく、土質・地質の種類も増加する。そして、これに起因して、盛土部分の適正土質を確保する上での土質間のマッチングや、力学的な土質安定条件の確保など、重要度を増す検討項目が各時間・各断面において変化することになる。そのため、造成工事の経済性、敏速性、品質といった総合的なバランスのとれた最適運土計画の策定方法や定型的な処理プロセスの開発が必要とされる。

そこで、本研究においては、以上の検討項目を考慮することで、概略的な「土」の動きに着目した工程計画策定の方法について検討を行なった。すなわち、3次元施工空間における適切な土量配分案の策定方法や運土計画策定における時間経過にともなう施工条件の変化状況の情報を、コンピュータ・グラフィックスを用いて、先取的に予測し、計画者の施工に対する意志を反映することができるようなヒューリスティックな運土計画の実験モデルの開発を行なった。

3. 運土計画作成のための実験モデルの開発

先に述べたように、山間部における大規模土工では、急峻かつ複雑

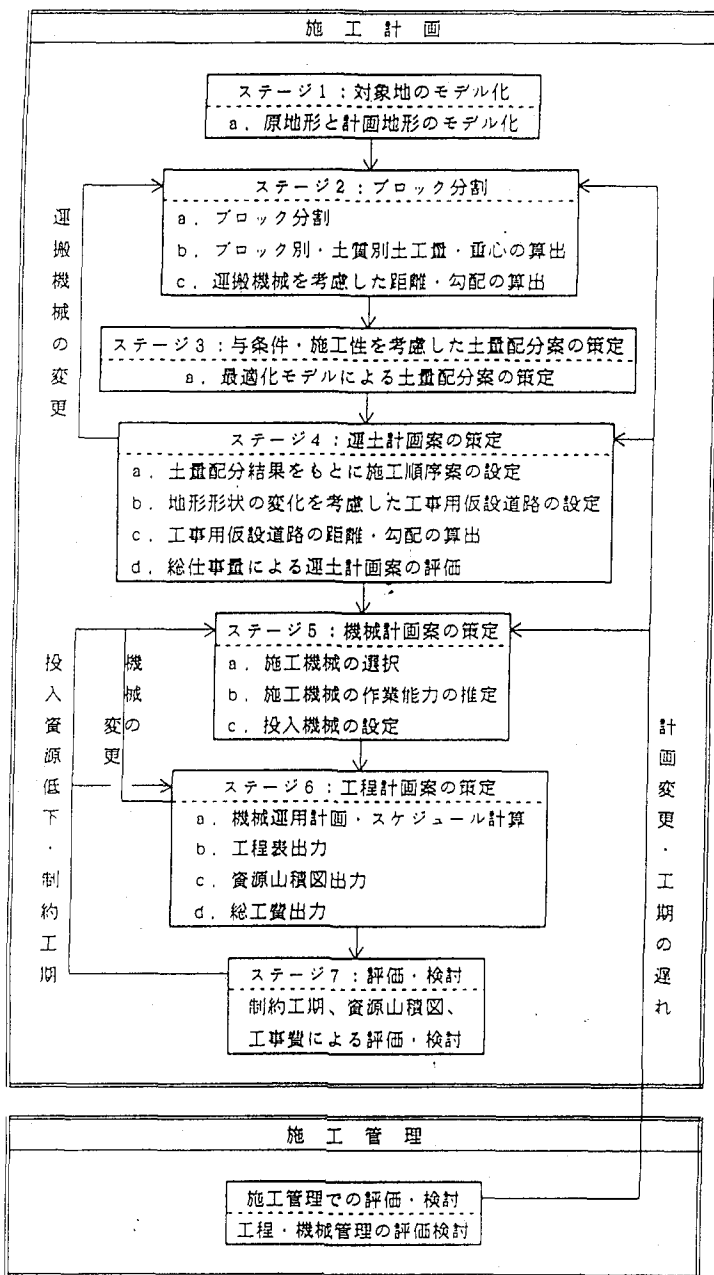


図-3 概略工程計画策定プロセス

な地形であり、時間軸による地形の変化、および、複数の土質構成など高さ方向も考慮した3次元的な検討を加えた運土計画を策定する必要がある。

本研究においては、まず対象地域のモデル化を行ない、与条件や地形の形状による機械の施工性・走行性を考慮する土量配分計画と、時間の経過にともなう地形の変化や施工条件などを考慮して具体的な検討を行なう運土計画との2段階で検討を行うこととした。さらに、コンピュータを活用して、施工空間の明確な表示を行い、計画者に容易な意思決定の情報とした。

以上の考察をもとに本研究では、図-3に示すような工程計画作成プロセスをデザインした。

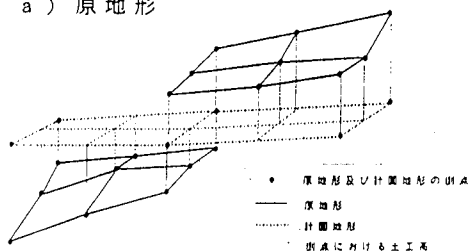
(1) ステージ1：対象地のモデル化

本モデルでは、どの土が何処にどのような地形状態で存在するかといった原地形における土に対する諸情報や、計画地形を構成するための土に関する諸情報を3次元座標をベースに容易に把握できる方法が必要である。そこで、本研究においては、地形測量の測点を有効に利用でき土量も把握しやすいメッシュ法による地形表現の方法を用いることとした。すなわち、土の大きさの最小単位として、図-4に示すように適切な大きさのメッシュを設定し、対象地のモデル化を行なうこととした。

①土質別にモデル化を行ない、データ化を行なう。

②原地形データ、計画地形データを使って、切盛り

a) 原地形



b) 原地形のモデル化

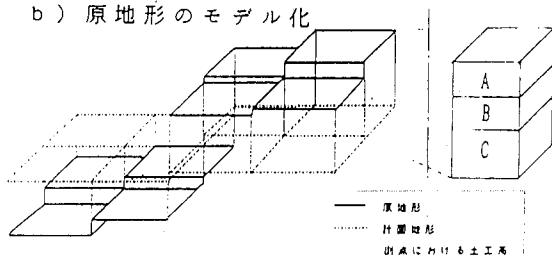


図-4 測点データのメッシュ法処理

状態のグラフィックス表示を行なう。

③施工対象地の把握を、図-5のようなグラフィックス表示結果を用いて確認をし、図-6のように与条件・施工性を考慮した対象地のモデル化を行なうことで、ブロック分割、運土ルート設定の予測のための与件情報とする。

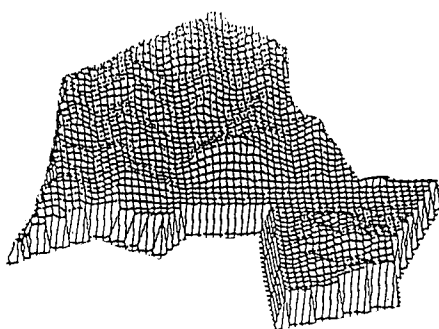


図-5 原地形のモデル化(3次元グラフィックス)

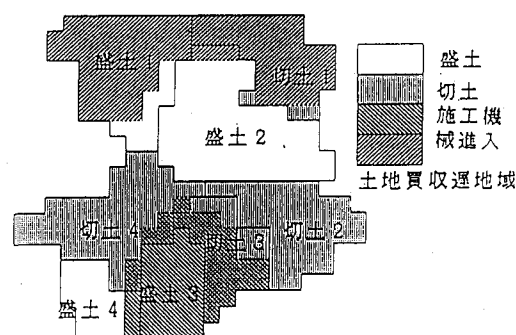


図-6 与条件・施工性を考慮した対象地のモデル化

(2) ステージ2：ブロック分割の策定

土量配分を適切に行なうためには、現実的な運土距離の設定が重要となる。しかし、先に述べたように従来の方法では、この段階において時間の経過にともなう地形の変化を予測することができない。すなわち、土のブロックをミクロに考えすぎると施工順序および運土距離に制約をつけてしまうことになる。そのため、施工段階と計画段階において矛盾が生じる。そのため、このような検討上の矛盾を避けるために土の動きをマクロに捉える必要がある。すなわち、本研究においては、大きなブロックで対象地をマクロに分割することで、予測不能な地形形状の影響をできるだけ無視した形で、ブロック間の運土ルートが求められるような方法で検討した。

a) ブロック分割と運土ルートの設定

①対象地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、図-2のように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各ブロックの重心の算出を行い、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、ブロック間に工事対象外の山、谷あるいは池などがある場合には、図-7のような迂回路を設定しその距離と平均勾配を算出する。

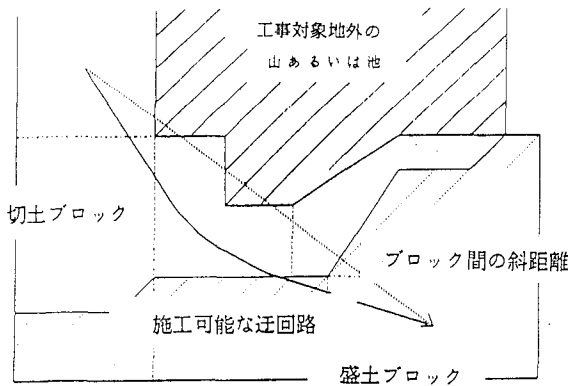
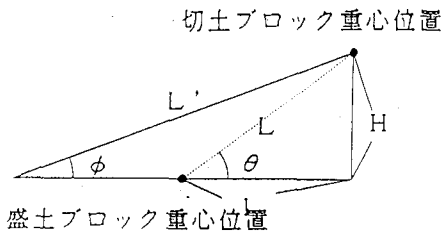


図-7 迂回路の設定

b) 運搬機械を考慮した距離勾配の算出

しかし、実際の施工段階では、運搬機械が土量配分段階での運土ルートを走行することではなく、表-



条件： $\theta > \phi$ のとき

$$L' = \frac{\sin \theta}{\sin \phi} \times L$$

L : 重心間斜距離

L' : 走行可能距離

θ : 重心間勾配

ϕ : 作業勾配

図-8 重心間距離と走行可能距離との関係図

表-1 運搬機械の作業勾配・作業距離

機 種	作業勾配(ϕ)	作業距離(m)
ブルドーザ	10	50
スクレーバ	5	200
	5	500
トラック	10	5000

表-2 斜距離に対する

走行可能距離の変換係数

重心間勾配(θ)	変換係数
40	3.70
35	3.30
30	2.88
25	2.43
20	1.97
15	1.49

1のように運搬機械の作業勾配を考慮したルートを走行するために、土量配分計画での運土ルートの距離とに矛盾が生じる。そのため、運搬機械の施工性、および、走行性を考慮するためには、図-8のようにブロック間の勾配が運搬機械の作業勾配を超える場合には、ブロック間の斜距離から運搬機械の走行可能距離に変換することとしている。ここで、ダンプトラックを例に横断勾配を10%に設定した場合の斜距離に対する走行可能距離への変換係数を表-2に示す。

したがって、施工段階において運搬機械の施工性・走行性を考慮する必要があるため、運搬機械による作業勾配を考慮して、ブロック間の重心間斜距離から作業機械の走行可能距離に変換することで、運土計画において設定する工事用仮設道路の距離との整合性が確保できると考えられる。

(3) ステージ3 : 与条件・施工性を考慮した

土量配分案の策定

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、高さ方向の検討が不足するため、技術上いくつかの問題が生じる。つまり、機械的に求められた解には、地形の変化を捉えた施工性に関する検討が不足することになる。また、実際においては、計画段階で、与条件である土地買収の一部遅れ

による施工最終段階への検討や、施工初期段階において地形の形状等から、施工機械の投入場所に制約があるために、与条件の検討を考慮しなければならないが、土量配分計画の段階ではそれらの施工順序の考慮は困難である。

そこで、本研究においては、土量配分計画の段階での運土ルートと運土計画策定段階での工事用仮設道路の距離との整合性をめざすとともに、運土計画における施工順序の設定が容易となる情報提供として、与条件・施工性を考慮した土量配分計画を行なうこととした。

a) 与条件の検討

与条件の検討として、対象地形をモデル化することで、原地形の形状を把握し、図-3のように施工初期段階での施工機械の投入場所を勾配等を考慮しながら選定する。また、計画段階における土地買収の一部遅れにより、施工最終段階への検討を行なう。そのため、全ブロックごと（切土ブロック4つ盛土ブロック4つの場合には、16通りの検討）に対して土量配分の検討を行なわずに、図-9のように与条件を考慮して土量配分の策定を行なう。

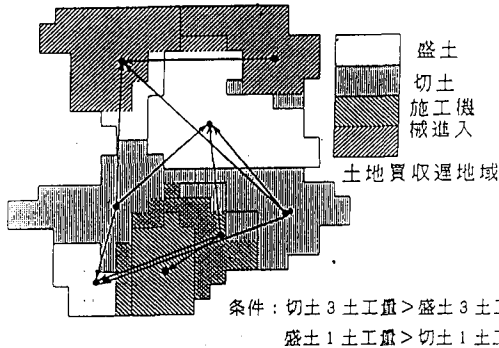


図-9 与条件を考慮した運土距離の設定

b) 土量配分モデルの定式化の検討

施工段階において運搬機械は、上り勾配では施工効率が低下し、また、下り勾配では施工効率が向上するといった機械の施工性についての検討も必要である。そこで、運土作業機械の勾配による土質別の施工効率を考慮して、表-3に示すような土量配分モデルの定式化を行ない、次のような手順で設定した。

①運土作業機械について、勾配による土質別の施工効率を算出する。

表-3 土量配分モデルの定式化

目的関数	
総仕事量の最小化	$F(X) = \sum_i \sum_j^m (1 + \alpha \tan \theta_{ij}) \times L'_{ij} \times X_{ij} \rightarrow \min$
制約条件	
①総切土量と総盛土量のバランス	$\sum_i \sum_j^m X_{ij} \times C = \sum_i \sum_j^m X_{ij}$
②切土ブロックの土量バランス	$\sum_j X_{ij} = VBi$
③盛土ブロックの土量バランス	$\sum_i X_{ij} = VBj$
	$X_{ij} \geq 0$
④走行可能距離への変換 $\theta > \phi$ のとき	$L' = \frac{\sin \theta}{\sin \phi} \times L$
変数及び定数の定義	
L_{ij}	: ブロック間の重心間斜距離 (m)
L'_{ij}	: 運搬機械の走行可能距離 (m)
X_{ij}	: 運土量 (m ³)
α	: 施工効率
$\tan \theta_{ij}$	: ブロック間の重心間勾配
$\tan \phi_{ij}$	: 運搬機械の作業勾配
C	: 締め固めた土量/地山の状態
VBi	: 切土ブロックiの土量 (m ³)
VBj	: 盛土ブロックjの土量 (m ³)
n	: 切土ブロックの総数
m	: 盛土ブロックの総数

②ステージ2で求めた運土距離、勾配、ブロック土量から線形計画法輸送問題により土量配分案を算出する。

以上から、土量配分計画の段階で与条件・施工性を考慮することで、より実務レベルでの検討に近づけている。

(4) ステージ4：運土計画の策定

マクロに計画された土量配分を、概略の運土計画としてと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工事用仮設道路の設定といったプロセスについても検討する必要がある。

山間部においては、運土作業が進展するにつれて地形形状が変化し、その地形の変化に応じた工事用仮設道路の設定を検討することが重要である。しかし、現状では、その地形変化の把握や工事用仮設道路の設定は決して容易ではなく、運土計画そのものの検討が非常に困難となっている。

そこで本研究では、まず、地形形状の変化を把握

するために、運土ブロックの順序の設定を行うこととした。その施工順序の設定については、はじめに、与条件からの情報として土地買収の一部遅れによる施工最終段階への検討や、施工初期段階において原地形の形状から、施工機械の投入位置の制約等を検討して、与条件から影響を受けるブロックについての施工順序を設定する。

つぎに、他の運土についても、切土ブロックについては地盤が崩れないこと等を考慮して、一度切り崩した山は最後まで切り崩し、また、盛土ブロックについては隣接するブロックとのり面等を考慮して、施工順序案を設定する。

例えば、図-5に示すような地形に対し、対象地の中央部分のブロックから施工すれば、図-10のような地形に変化し、さらに、施工が進むと図-11のような地形となるといったようにコンピュータ上で地形の変化を把握することとした。

また、各施工段階ごとに、投入運搬機械の施工性に影響を与える勾配を考慮しながら、メッシュ間ごとに工事用仮設道路の設定を行うこととした。

それらをもとに、その地形の変化の様子と工事用仮設道路のルートの設定についての評価として、そ

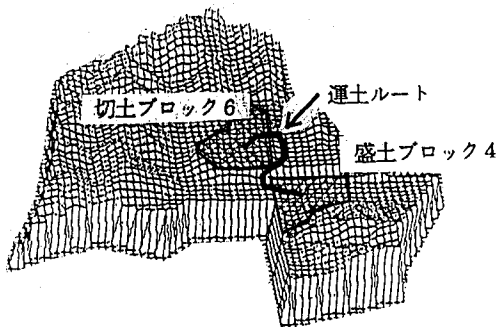


図-10 工事途中の地形形状の変化(その1)

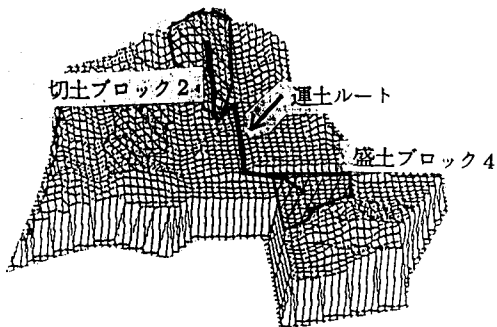


図-11 工事途中の地形形状の変化(その2)

の工事用仮設道路の距離と勾配、および、土量配分結果での運土量をもとに、土量配分計画で用いた目的関数に再度入力し、総仕事量の観点で運土計画案を評価することとした。

また、計画段階において、計画者の判断で運搬機械の変更を検討できるように、フィードバックできるものとしている。そして、ステージ2の概略的運搬機械の設定を再度行ない、その距離と勾配を算出し、前に述べた工程を繰り返す。

①与条件・施工性を考慮した地形の変化(施工順序)の設定する。

②各施工段階において、メッシュ間ごとに勾配を考慮して工事用仮設道路の設定をおこなう。

③工事用仮設道路の運搬距離と勾配を算出する。

④総仕事量の観点から運土計画案の評価・検討を行なう。

(5)ステージ5：機械計画案の策定

ステージ4で策定された運土計画案に対して、ここでは、地形の形状の変化による施工条件を考慮して投入機械の台数・チーム数の設定を行うこととしている。

まず、各施工段階ごとに、ブロックを層に分割を行い、平均切り場および盛り場の面積を算定する。そして、その面積を考慮して掘削機械、積み込み機械、および埋立機械の機種と台数を設定し、その能力算定の確認を行なう。

(6)ステージ6：工程計画案の策定

ここでは、ステージ5までに設定された計画案に対して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。

まず、ステージ5の各施工段階ごとのブロックの層分割をもとに、運搬機械の走行性および施工性を考慮して、工事用仮設道路の設定を詳細に検討し、その距離の算定を行なう。

つぎに、工事用仮設道路の距離と掘削・積み込み機械の機種と台数から運搬機械の機種および台数の設定を行ないスケジュール計算を行なう。また同時に、工事用仮設道路の規模の設定も検討する。

それらをもとに、工程表、資源山積み図、および総工事費用の出力を行なう。

(7)ステージ7：検討・評価

ここでは、ステージ6で取りまとめた工程表、お

および資源山積み図の評価・検討を行い代替案の策定を行うこととしている。

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、変更可能や運土段階に戻り、投入チーム数・投入機械台数の変更を行い、また、ブロックの施工順序の変更等により、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。

(8) 施工管理

さらに、本研究においては、この工程計画策定プロセスを施工管理段階にも対応することを前提にしている。

そこで、管理段階において、作業能力にともなう誤差、作業能力と機械単価の相関、および機械単価の推定精度の向上等の機械管理に関しては、機械計画にフィードバックし、また、設計変更や工期の遅れ、降雨日数の前提条件との誤差、稼働日数率の前提との相違、および対象土質の前提との相違等の工程管理に関しては土量配分計画および運土計画にフィードバックすることとして検討を加えている。

4. おわりに

本研究では、計画内容の合目的性や実行可能性の程度を検討するための判断材料を提供して、検討目的の達成度を高めるためにコンピュータ・システムやコンピュータ・グラフィックスを中心とする情報処理機器を有効に利用した地形情報システムの導入をはかった。

そこで、時間軸で施工条件が変化してくるため、実態が捉えにくいとされてきた大規模土工事の運土計画策定に対して、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、コンピュータを活用することで、従来、土工事において課題とされてきた施工順序による地形変化の把握や、施工順序による地形形状を考慮した工事用仮設道路の設定および時間軸での変化にともなう工事用仮設道路の変化、さらに施工条件の変化にともなう投入機械の台数等を計画段階で把握し、運土計画化のための運土実験が可能となり施工順序や工事用仮設道路の相違による案群を比較し評価・検討が可能になったと考えられる。

土量配分計画においては、従来の仕事量最小化を目的関数とする輸送型線形計画法により求められてきたものに、勾配による施工効率を目的関数に導入することにより、機械の施工性を考慮することが可能となった。また、土量配分計画において算出した運土ルートとの距離と、運土計画時に設定した工事用仮設道路の距離との整合性をはかるために、ブロック間の重心間距離を運搬機械の作業勾配を考慮した走行可能距離に変換することで運搬機械の走行性が確保されたと考える。さらに、与条件を考慮することで運土計画の施工順序の設定を容易にし、より実際の土量配分計画になったと考える。

今後の課題として、ブロック分割の設定方法と運土ブロックの施工順序、運土ルートをより効率的に設定する方法、さらに工事用仮設道路の整備に関して検討を加える必要があると考える。また、施工順序の相違による運土計画案群を総仕事量の観点で比較して評価・検討をしたが、最終的には機械の張り付けを行なったのち、工程計画を行ない評価・検討して最終案を決定できる方向としたい。今後、これらの検討をシステム論的に整理を行ない、さらなるシステムの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
- 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
- 3) 三島八郎：宅地造成工事の調査と設計と施工，鹿島出版会，1985.9
- 4) 伊丹康夫：建設機械の管理と施工（追補），財団法人建設物価調査会，1988.10
- 5) 春名、堀、北岡：情報システム・CAD化手法を用いた土工事工程計画のシステム化に関する研究，第10回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集，1992.12.
- 6) 春名、原田、堀：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，第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集，1991.12.