

山間部大規模運土工事の C A D 計画システム開発に関する研究*

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

春名 攻**, 北岡 英基***, 迫間 幸昌****

By Mamoru HARUNA, Hideki KITAOKA, Yukimasa HASAMA

In this study computer-aided design system for constation planning of large-scale earth-moving is developed at the first step topography of moutian area to be developed is presented as three dimensional data for input data to computer programing system. At same time planning of land development is presented as three dimensional data for input data to computer programing system same as stated above. At the second step macro-scale blocking is designed aiming to inspectflow of earth-moving works calculating cutting and banking volume base on original land form and planned land form. At the third step base on the result inspected above construction sequence of above designed blocks to be excavated is determined by solving earthmoving-transportation problem. At the forth step transportation routs which satisfy those construction sequence among macro-scale bloks is designed by trials and errors method evaluating total work volume($m^3 \times m$). At the fifth step machine fleet for earth-moving work is planned based on average dayly taskforth and construction capacity valance between of machine fleet. At the final step construction shedule is planning simulating construction worksby machine fleet designed above evaluating construction period, const-
ruction cost and resource allocation plan.

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・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

*キーワード：山間部土工事、土量配分計画、
運土計画

**正会員 工博 立命館大学教授 理工学部
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

***学生員 立命館大学大学院 理工学研究科
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

****学生員 立命館大学大学院 理工学研究科
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

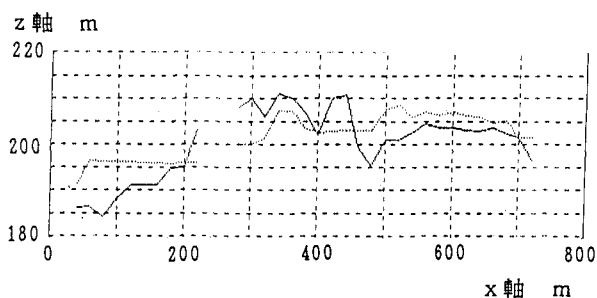


図-1 丘陵地の宅地造成工事の断面図 (Y=440m)

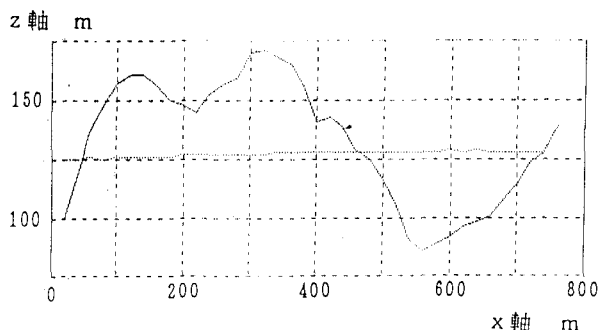


図-2 山間土工事の断面図 (Y=360m)

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。

また、地形が急峻かつ複雑なうえに、多種の土質構成であり、また、契約上の問題で土地買収の一部遅れにより施工最終段階に余儀なくされたり、地形の形状から施工初期段階において施工機械の施工性に影響を与えるため、投入場所に多くの制約をうける。

さらに、施工段階において、土工事の進捗にともない地形が大きく変化するため、各ブロックの施工順序を設定するための検討項目や、運搬機械の施工効率である運土距離、および、その勾配を考慮した工事用仮設道路の設定方法などの多くの不確定要素が存在する。

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。

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 of 施工効率にあた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の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、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、計画段階において、その与条件・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. 運土計画モデルの開発に関する考察

先に述べたように、山間部における大規模土工事では、急峻かつ複雑な地形であり、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、時間軸による地形変化にともなう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、施工空間を明確な表示を行い、計画者に容易な意思決定の情報とした。

(1) 与条件・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し、かつ、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。

まず、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わずに、図-4のように与条件を考慮して土量配分の策定を行なう。

また、運土距離の算出にあたっては、対象地域を山、谷単位で分割したブロック間の重心間の直線斜

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
スクレーパ	5	200
	5	500
トラック	10	5000

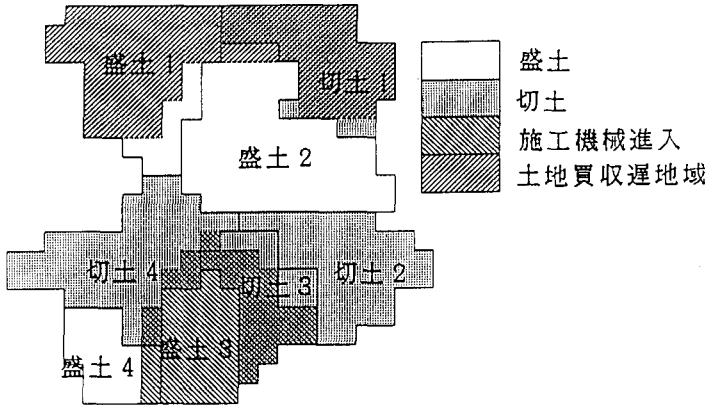


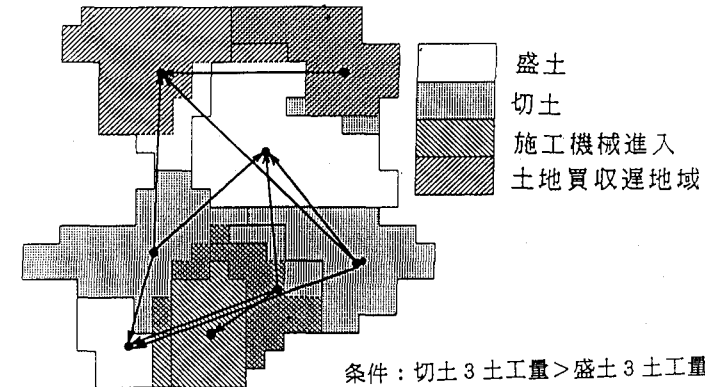
図-3 与条件・施工性を考慮した対象地のモデル化

距離とするが、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、迂回させてルートを設定する。

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-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-5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。

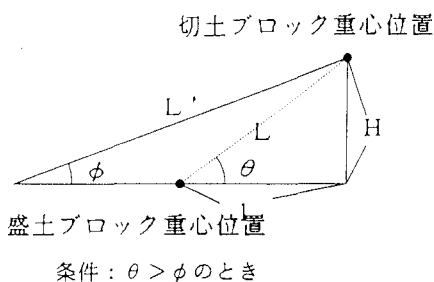
また、施工段階において運搬機械は、上り勾配では施工効率が低下し、また、下り勾配では施工効率が向上するといった機械の施工性についての検討も必要である。

このことにより、土量配分計画



条件：切土3土工量>盛土3土工量
盛土1土工量>切土1土工量

図-4 与条件を考慮した土量配分計画策定のための距離の設定



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

- 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-5 重心間斜距離と走行可能距離との関係

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。

なお、これらの考え方を、工事の対象となる対応土質別に適用土量配分計算を行うことにより、土質の考慮も可能であると判断している。

(2) 運土実験モデルの開発

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前仮設道路の設定、投入機械の設定とスケジュール計算、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前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前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、実際には図-3のように、与条件

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

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-6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-7のような地形に変化し、さらに、施工が進むと図-8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。

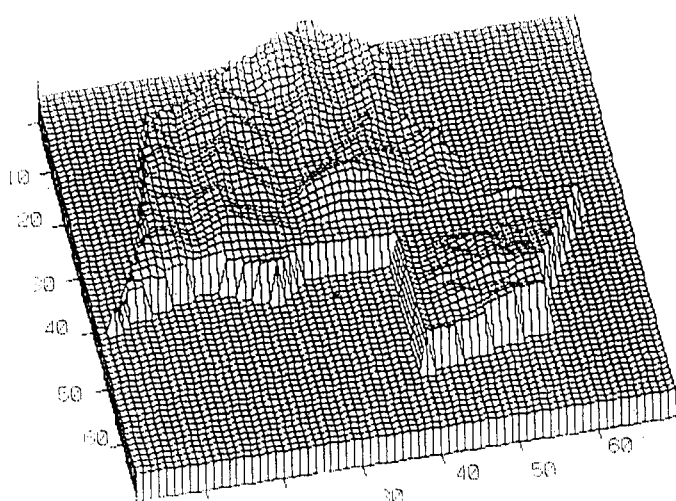


図-6 工事前の原地形の形状

また、各施工段階ごとに、投入運搬機種の施工性に影響を与える勾配を考慮しながら、メッシュ間ごとに注目して、工事前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前仮設道路のルートの設定についての評価として、その工事前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。

さらに、その地形変化をもとに詳細な検討項目として、切土ブロックについては、山を切り崩すことで、施工面積等の施工条件が変化するため、ブロック内の土質を考慮して高さ方向に層分割を行い、施

工機械の台数の設定などの検討を行なうこととした。また、盛土ブロックについては、その切土ブロックの層の土工量から、運ばれる盛土ブロックの盛られる高さを算出し、盛土ブロックを層分割し切土ブロックと同様に施工機械の台数等の検討を行なう。

また、計画段階において、計画者も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。

4. 概略工程計画策定の概要

以上の考察をもとに本研究では、図-9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

ここでは、土質別の土工量の算定を行ない、対象地をモデル化することで、次のステージの与件情報を行うこととする。

土工量の算定にあたっては、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。なお、各メッシュの土工量は、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：ブロック分割の策定

このステージでは、土量配分計画策定のための情報として、対象地をブロック分割を行うこととしている。

まず、ステージ1で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、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。

ついで、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

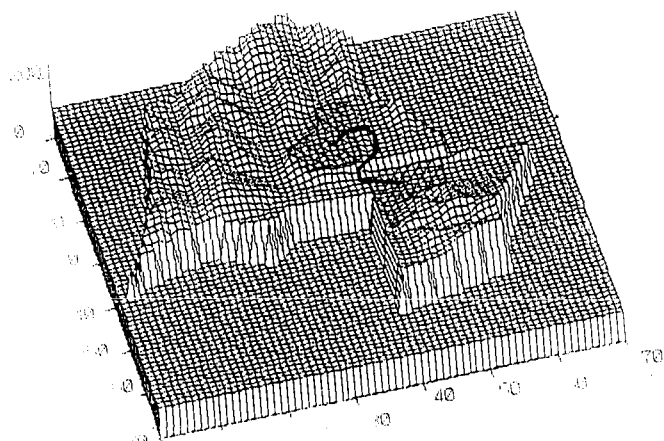


図-7 工事途中の地形形状の変化(その1)

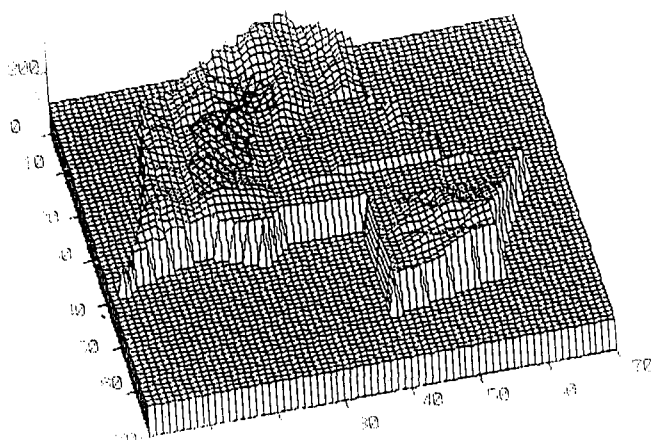


図-8 工事途中の地形形状の変化(その2)

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、迂回路を設定しその距離と平均勾配を算出する。

しかし、施工段階での運搬機械の施工性・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

このステージでは、運土計画策定のための情報として、概略の土量配分を行うこととしている。

まず、ステージ2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。

また、与条件により、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、線形計画法による表-3の定式化をもとに土量配分を求め、土のマクロな動きを見ることとしている。

(4) ステージ4：運土計画の策定

ここでは、ステージ3で求められた概略の土量配分をもとに、ブロックの施工順序、運土ルート（仮設道路）の設定を行い、それらを評価することで運土計画を策定することとしている。

施工順序の設定については、ステージ3の土量配分案をもとに、与条件を考慮して、運土について施工順序を設定して、概略的な地形変化の把握を行なう。

さらに、その地形の変化を評価するために、運搬機械の施工性・走行

性に影響を与える勾配を考慮して、工事用仮設道路を施工段階ごとに設定し、その距離と勾配からステージ3の土量配分で用いた目的関数に再度入力することにより、運土計画案を評価することとした。

また、運搬機械の変更によるフィードバックも可

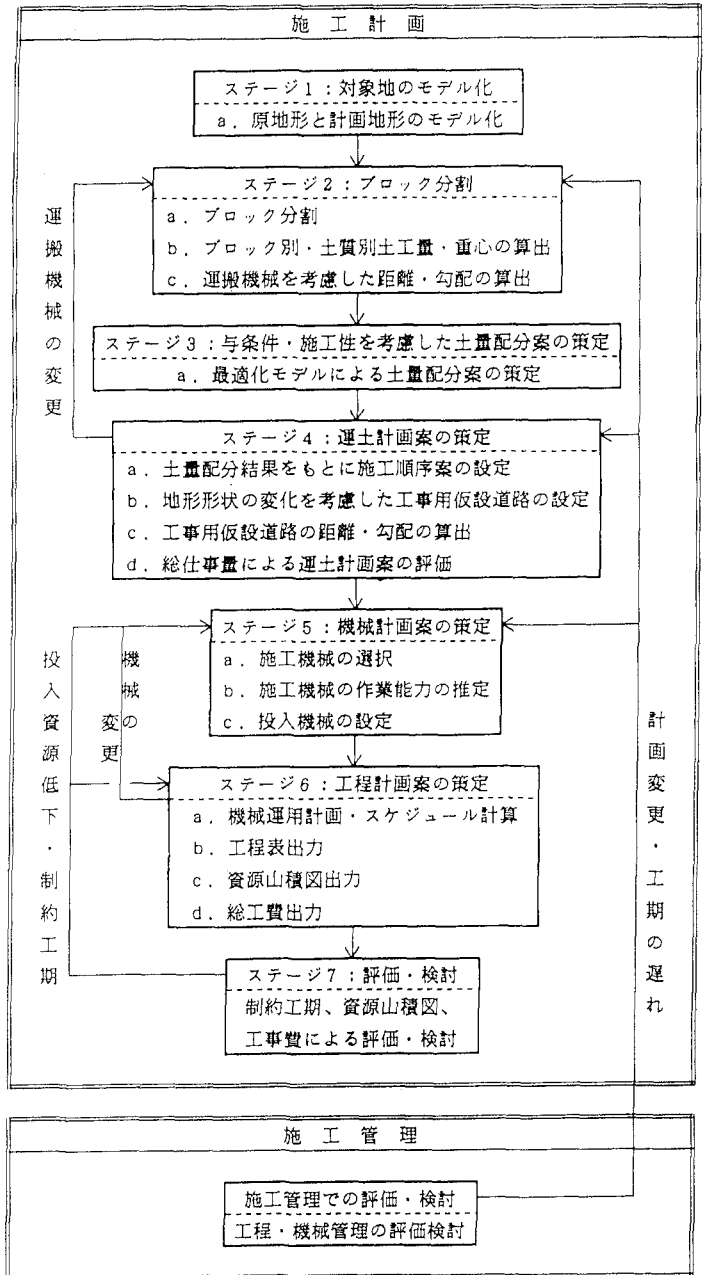


図-9 概略工程計画策定プロセス

能としている。

(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

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	
$F(X) = \sum_i^n \sum_j^m (1 + \alpha \tan \theta_{ij}) \times L'_{ij} \times X_{ij} \rightarrow \min$	
制 約 条 件	
① 総切土量と総盛土量のバランス	
$\sum_i^n \sum_j^m X_{ij} \times C = \sum_i^n \sum_j^m X_{ij}$	
② 切土ブロックの土量バランス	
$\sum_j^m X_{ij} = VB_i$	
③ 盛土ブロックの土量バランス	
$\sum_i^n X_{ij} = VB_j$	
$X_{ij} \geq 0$	
④ 走行可能距離への変換	
$\theta > \phi \text{ のとき}$	
$L' = \frac{\sin \theta}{\sin \phi} \times L$	
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
VB_i	: 切土ブロックiの土量 (m ³)
VB_j	: 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

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。

5. 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) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 春名、堀、北岡：コンピュータグラフィックスを用いた大規模土工事の運土計画化の実験モデルの開発研究，平成4年度関西支部年次学術講演会 講演概要，1992.5
- 7) 春名、原田、堀：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，土木計画学研究・講演集14，1991.11