

施工シミュレーションモデルを導入した大規模整地工事の 最適工程計画策定方法に関する研究

A Study on Development of Optimal Scheduling Method for Optimal Planning of
Large-Scale Earth-Moving Project Utilizing Simulation Model

春名 攻*, 滑川 達**, 伊藤壮央***

Mamoru HARUNA*, Susumu NAMERIKAWA** and Takeo ITOH***

1. 本研究の目的と概要

本研究では、大規模整地工事計画を対象として、概略計画レベルにおける最適な工程計画の策定をめざした研究を行った。すなわち、ここでは土量配分計画ならびに土工機械系の種類が既に決定されているとともに、単位作業として「掘削→積込→運搬→敷均」という一連のサイクリックな作業の流れによって構成される1組の施工ブロック間の運土作業を設定し、これらの技術的な施工順序が代替的に与えられている場合を取り上げている。ここで、運土作業間の技術的な施工順序とは、例えば工事の実行性を考えて表面の土から切土を行うといった物理的な問題、工事施工の稼働性を向上するために、運搬機械の積載走行時の運搬路に上り勾配が生じないよう谷部の盛土を先行的に実施していくといった経験的な問題、さらには住宅の販売方針等から要請される政策的な問題などから決定される施工順序であり、ここではこれらの方策にいくつかのバリエーションが存在するものとして、この技術的な施工順序を計画問題におけるパラメータと考える。また、工事全体に投入する資源量についても、ここでのパラメータとして設定し、標準的と考えられる投入量から徐々に変化させていくこととした。そして、本研究においては、以上のような前提条件のもとで計画変数を各運土作業の実施順序と投入する資源量として、指定された工期内で工事を終了することができる工程案の中で最も費用が安価となる工事用資源の運用計画と作業スケジュールを求めるこ

とのできる工程計画策定の方法を提案する。

そこでは、まず本研究がこれまで検討を加えてきたカット概念を導入することとした。すなわち、ここで取り上げる特定のカットは各運土作業の同時実施状態を表しており、計画変数としての各運土作業への資源配分パターンと一致する。そして、本研究では、この同時実施状態（カット）を土工シミュレーションモデルを用いてリアルに表現してみることで、このカットにおいて検討すべきすべての意味ある資源配分パターンの所要日数や土工機械系の移動状況とそれにもとづく稼働費用を求める。さらに、このような「異なるカットの時間的な配列」として求められるカットネットワークの表すカット間順序関係にしたがって、費用が最小となる最適経路の探索とその経路上における最適な資源配分パターンの選定を上述のようなシミュレーションモデルによるリアルな同時実施状態表現を行いながら進めていくことにより、現実の計画検討に十分な精度をもつ最適な運土作業の実施スケジュールを求めていくこととする。

2. 土工シミュレーションモデルの構築

ここでは、まず土の運搬を行う土工事における運土作業を実施する機械系の稼働状況や所要時間をリアルに表現することのできるシミュレーションモデルの構築について述べる。なお、具体的な土工機械としては、ブルドーザおよびモータスクレーパが選定されている場合を取り上げた。

(1) モデルの前提とインプット・アウトプットデータ

本土工シミュレーションモデルでは、次のよう

キーワード：計画手法論，施工計画・管理

* 正会員，工博 立命館大学理工学部環境システム工学科教授

(〒525-8577 滋賀県守山市野路東 1-1-1 TEL.077-561-2736, FAX.077-561-2667)

** 正会員，工博 立命館大学総合理工学研究機構 ストドクトラルED (同上)

*** 学生員，立命館大学大学院理工学研究科環境社会工学専攻 (同上)

表-1 インプットデータとアウトプットデータ

インプットデータ		
ブルドーザ (掘削)	スクレーバ	ブルドーザ (敷均・締固)
積込み作業準備時間	積込み作業準備時間	敷均し作業準備時間
ブッシング作業時間	積込み作業時間	敷均作業時間
リッピング作業準備時間	積載走行時間	転圧時間
リッピング作業時間	撤土作業準備時間	
整地作業準備時間	撤土作業時間	
整地作業時間	空車走行時間	
各後進時間	1回当り積込み量	

・地形条件、土質条件、各作業の総土工量、各作業への配分機械台数

アウトプットデータ
各機械の稼働状態および稼働費用
各作業の所要時間
工期
総費用

な前提条件のもとで構築した。

- ①各機械の作業時間は平均値を与え一定値とする。ただし、モータスクレーバの運搬時間や空走時間は勾配、土質の違いによって変化するものとし、それぞれ係数を与えることとする。
- ②実際の工事では運土ブロック内において積込み区域および撒き土区域が徐々に変化するため、それに伴い運搬距離も変化していく。しかし、この変化については運土ルート上の運搬距離と比べると微小であると判断して、平均運搬距離を一律で与えることとする
- ③現場において運土作業を行う場合には昼休み

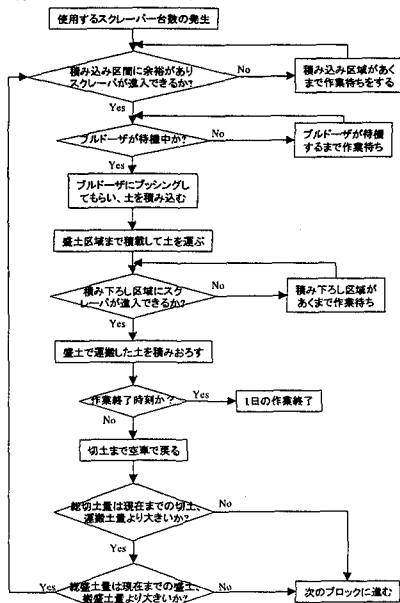


図-1 モータスクレーバのシミュレーションモデル

やオペレータ同士の打合せの時間などが存在し、連続的に作業が行える訳ではないが、それらは各現場作業で異なることや1つのまとまった作業は連続して行われることが多いため、本シミュレーションモデルでは、作業の途中休止については考慮せず、一日あたりの稼働時間を一律 8 時間として与えることとした。

また、以上のような前提のもとで、本シミュレーションモデルのインプットデータおよびアウトプットデータは表-1 のようである。

(2) モータスクレーバのシミュレーションモデル (図-1)

シミュレーションの開始にあたっては、投入するモータスクレーバの施工能力および台数を指定し、さらに、適当なインデックスを付加することによりそれぞれの機械を識別しておく。各モータスクレーバは積込区域が開いていて、かつスクレーバの積込容量分の土がほぐされている場合は直ちに進入し、すでにほかのモータスクレーバが積込作業中のため、新たに進入する余裕がなければ、区域外で待機する。積込区域へ進入したモータスクレーバは、ブルドーザが待機中かどうか判断し、待機中であれば積込作業に移る。ブルドーザが待機していないければ、その場で待機する。所定の土量を積載したモータスクレーバは走行体制に入り、撒き土区域まで積載走行作業をし、撒き土作業を行うが他のスクレーバが撒き土作業中のため、新たに進入する余裕がなければ待機する。また、進入する余裕があるならば、進入し、撒き土作業を行う。撒き土作業が終了した後は、その時点で切土区域にまだ運搬土が存在しているかを判断し、まだ存在していれば空車走行し再び積込区域に引き返す。

(3) 切土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル (図-2)

ブルドーザについても、モータスクレーバと同様、まず投入台数と施工能力を指定し、リッピング作業が必要か否かを判断し、必要ならばリッピング作業を行い、その後、後進する。そこで、ほぐされた土がスクレーバの積込容量分の土量に達

したならば、スクレーパの進入を許し、プッシング作業の準備を行う。ほぐされた土がスクレーパの積込容量分の土量に達していなければ、再びリッピング作業を行う。リッピング作業が必要でなければ、モータスクレーパが積込区域に到着しているか否かを判断し、到着している場合はプッシング作業を行う。そしてモータスクレーパの施工能力に応じたプッシング時間を経過した後、方向転換や後進を行い、次の作業に備える。モータスクレーパが到着していないときは、積込作業後の

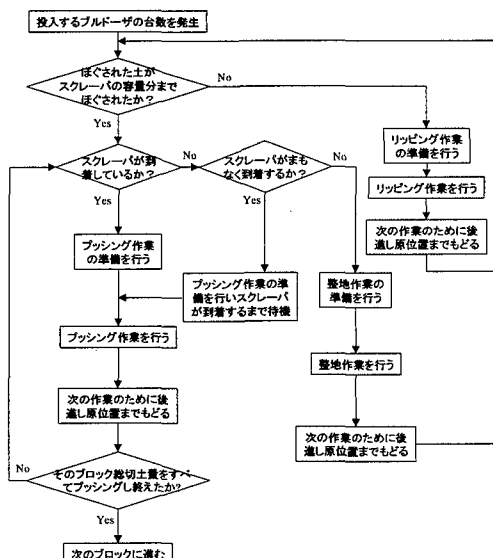


図-2 切土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル

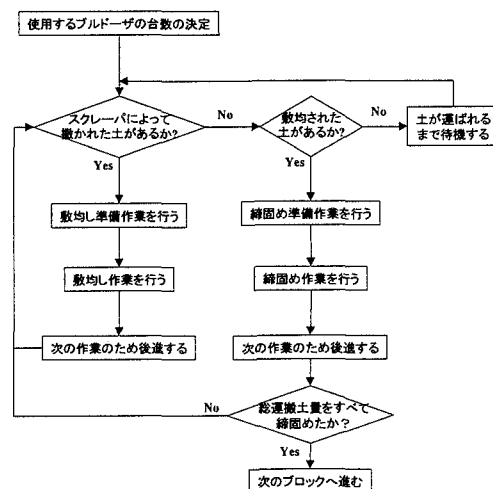


図-3 盛土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル

路面を整備したり、次のプッシング作業の段取りを行い、モータスクレーパが到着するまで待機する。

(4) 盛土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル (図-3)

上記同様、まず、ブルドーザの投入台数と施工能力を指定し、モータスクレーパによって積載運搬され、撒かれた土があるか否かを判断し、撒かれた土がある場合は敷均し作業を行う。そして、その撒かれた土を敷均すまで敷均し作業を行い、終了すれば方向転換や後進を行い、次の作業に備える。また、撒かれた土がない場合には、締固めなければならない土があるか否かを判断し、締固めなければならない土があるならば締固め作業を行う。締固めなければならない土がなければ、次の敷均し作業の段取りを行うか、または、土がスクレーパによって積載運搬されて、撒かれるまでそのまま待機する。

3. 土工シミュレーションモデルを導入した工程計画策定方法に関する検討

以上のように構築したシミュレーションモデルを用いて、各運土作業の実施スケジュールを検討するためには、各作業への土工機械系の配分計画の代替案を作成し、代替案それぞれのシミュレーション結果を比較することが必要である。なお、ここでの評価基準としては、工事費用をとりあげ、より安価な工程計画の策定をめざすこととしている。しかし、この配分計画の代替案は膨大な数が考えられるため、すべての代替案に対してシミュレーション計算を実施することは不可能である。このため、各運土作業ごとに投入量を決定した上で、山崩し法などによって資源運用の実行可能性を確保する発見的なアプローチが採られていた。

以上のような問題認識のもと、本研究では、実行可能な計算量で概略レベルではあるが最適な計画案を作成できるモデル分析の方法を提案する。そこでは、本研究がこれまで研究を進めてきたカットネットワークを効果的に用いることとする。すなわち、本研究では、これまで技術的に同時実施可能な作業の集合として求められる「カット間

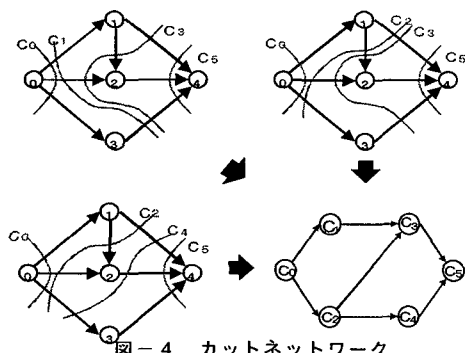


図-4 カットネットワーク

の時間的配列」を表すカットネットワークがもとの工程ネットワークとトポロジカルな関係として求められるとともに、このカットネットワークの一つの経路は工事の1つの実施過程を表現していることを明らかにしてきた(図-4)。このようなカットネットワークの性質を利用して、本研究では以下のような工程計画の策定方法を開発した。

ステップ1；カットネットワーク上で、現在検討しているカットに含まれている作業を対象として、投入可能な土工機械系の配分パターンを作成する。このとき、カット内での配分パターンは次のカットへ移るまで一定であるものと仮定する。また、配分パターン作成の原則として、次のようなルールを設定することとした。

- ①配分する土工機械系の単位としては、切土用ブルドーザ・運搬用モータスクレーパ・盛土用ブルドーザから構成される施工パーティを採用する。
- ②投入可能な施工パーティの遊休は考慮せず、すべての施工パーティを配分する。
- ③前のカットで既に実施されている作業の休止およびそこに配分されている施工パーティの移動は考慮せず、どの作業にも配分されていない施工パーティのみの移動を考え配分パターンを作成する。

ステップ2；ステップ1で作成した配分パターンそれぞれについて、後続するカット群のいずれかへの移行を決定する作業(群)が終了するまでシミュレーションを実行する。

ステップ3；ステップ2のシミュレーション結果により、現在検討しているカットにおける配分パターン p の所要費用 C_k^p を次式によって求める。

$$C_k^p = c^1 \sum_{i=1}^W t_{ik}^p + T_k^p \cdot W \cdot c^2$$

ここで c^1 ；1日あたりの施工パーティの運転損料、 c^2 ；1日あたりの施工パーティの供用損料、 W ；投入可能な施工パーティ数、 t_{ik}^p ；カット k における配分パターン p での施工パーティ i の稼動日数、 T_k^p ；カット k における配分パターン p の実施日数である。なお、 t_{ik}^p および T_k^p はステップ2でのシミュレーション結果から与えられる値である。そして、この所要費用を前のカットまでの費用に加算して、カット k までの所要費用を求める。また、工事の実施日数についても同様に求め、もし指定工期をオーバーしている場合には以降の探索を終了する。

ステップ4；カット k における配分パターン p のシミュレーションの終了を決定した作業(群)がカット k に後続するどのカットへの移行を決定する作業(群)であるかを調べ、移行すべきカットを決定する(図-5)。なお、このように各配分パターンそれぞれの後続カットを一意に決定することは、できる限り施工パーティの遊休を生じさせない運用計画のみを検討することを意味している。

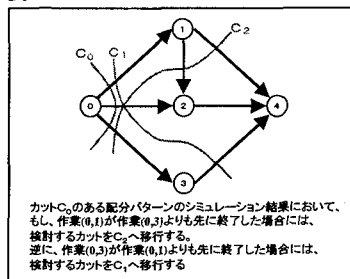


図-5 移行すべきカットの決定方法

以上のようなステップを運土作業間の技術的な順序すなわちカットネットワークおよび全体工事への投入施工パーティ数 W の各種パラメータ設定のともでカットネットワークの始点カットから終点カットに至るまで繰り返し、最も費用が安価となる配分パターンの時間的配列を求めるとともに、そのときのシミュレーション結果からこれまで設定してきた条件下での最適な作業実施スケジュールを作成する。なお、具体的な適用計算結果については、紙面の関係上割愛し、発表時に示すこととする。

参考文献

- 1) 春名攻, 山本幸司；大規模整地工事計画のシステム化に関する研究, 土木学会論文報告集第227号, 1974, pp71-84