

施工シミュレーションモデルを組み込んだ大規模整地工事の最適工程計画モデル

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

立命館大学理工学部
立命館大学大学院

正 員 春名 攻*
学生員 ○森澤健二**

by Mamoru HARUNA* and Kenji MORISAWA**

本研究では、大規模整地工事を対象として、制約工期内で工事を完了できる工程案の中で最小費用となる、現有の土工機械系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方法を開発した。そこでは、本研究でのこれまでの研究成果であるカットネットワークによる工程計画問題の変換方法を理論的基礎として、ここでの単位作業である各運土作業の同時実施状態として求められる各カットの状態を、土工シミュレーションモデルを導入してよりリアルに表現しながら、この同時実施状態（カット）の時間的連続構造として求められるカットネットワークの最適経路探索を進めることにより、所与の目的を達成し得る計画案の導出を試みている。

【キーワード】大規模整地工事、最適工程計画モデル、施工シミュレーション

1. はじめに

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案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、工事施工の稼動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稼動状況とそれにもとづく稼動費用を求める。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

*理工学部環境システム工学科 077-561-2736

**大学院理工学研究科 077-561-2736

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動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。

なお、ここで構築するシミュレーションモデルは、基本的に参考文献1)に準拠したものであるが、参考文献1)ではイベント・シーケンス型のGPSS¹⁾を用いているのに対して、本研究では、後の土工機械系の配分問題を含むスケジューリング問題との結合を考慮し、これをタイム・スライシング型に書き換え、C言語によるプログラミングを行っている。

(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、モータスクレーパ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み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、一日あたりの稼動時間を一律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。

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)	スクレーパ	ブルドーザ (敷均・締固)
積み込み作業準備時間	積み込み作業準備時間	敷均し作業準備時間
プッシング作業時間	積み込み作業時間	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回当り積み込み量	
・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
各機械の稼動状態および稼動費用
各作業の所要時間
工期
総費用

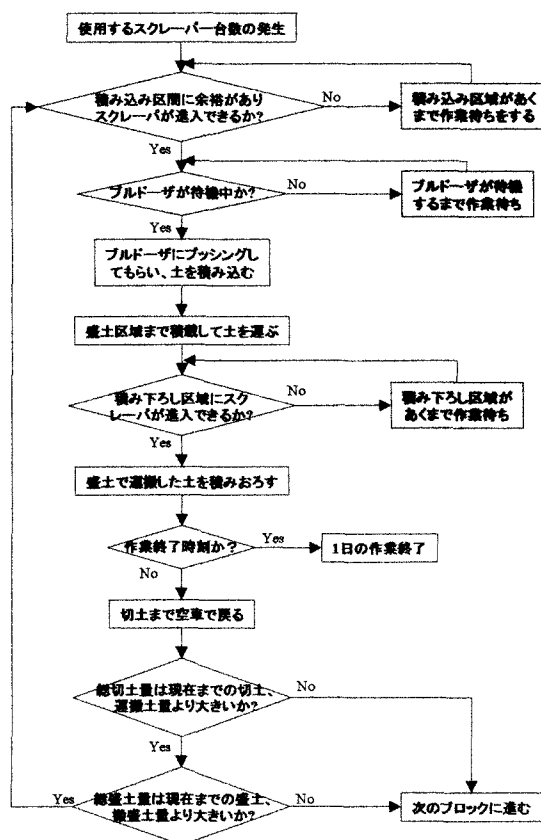


図-1 モータスクレーパのシミュレーションモデル

(2) モータスクレーパ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パ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。

各モータスクレーパは積込区域が開いていて、かつスクレーパ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

レーパ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パは、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パは走行体制に入り、撒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パ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否かを判断し、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、モータスクレーパと同様、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。

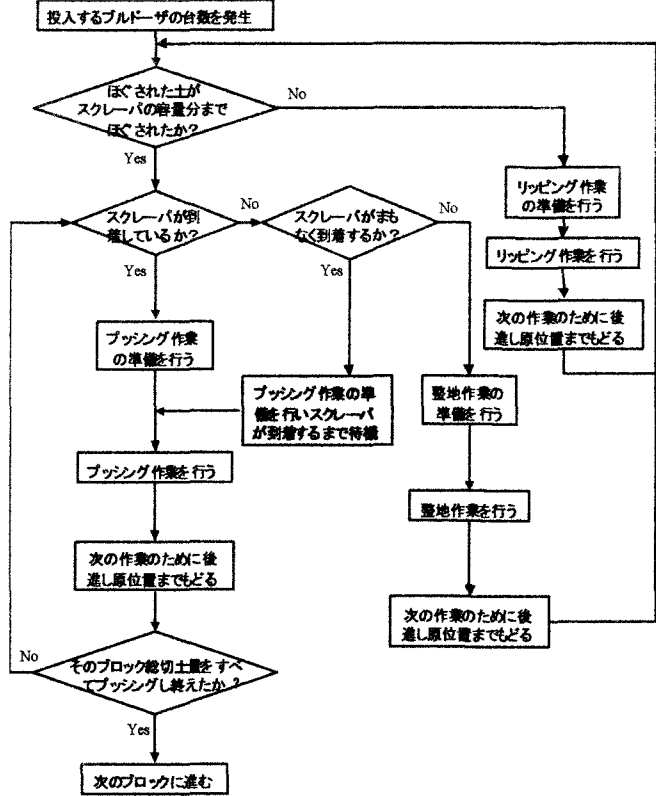
そこで、ほぐされた土がスクレーパの積込容量分の土量に達したならば、スクレーパの進入を許し、プッシング作業の準備を行う。

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。

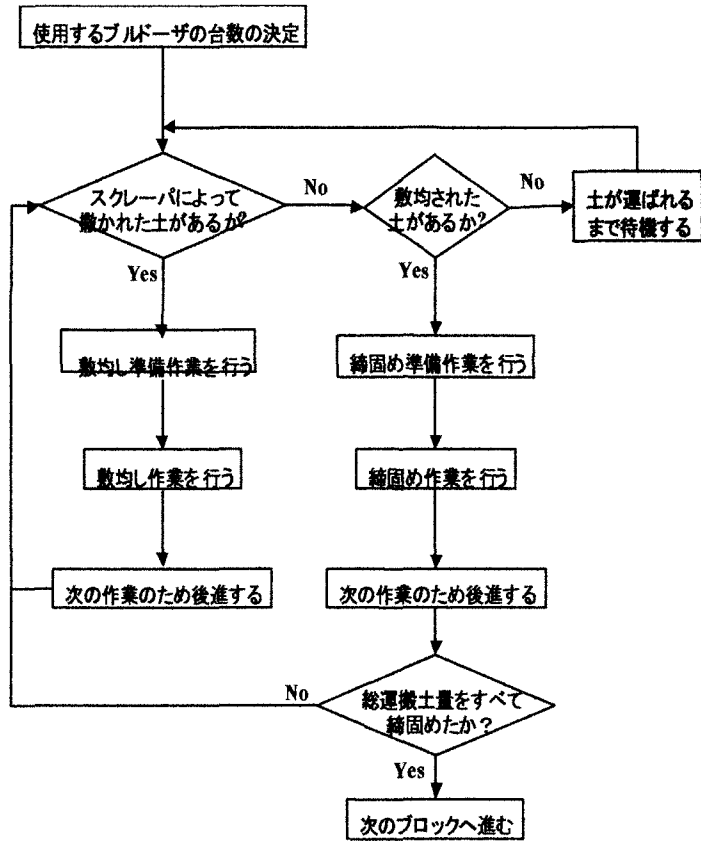
そしてモータスクレーパの施工能力に応じたプッシング時間を経過した後、方向転換や後進を行い、次の作業に備える。モータスクレーパが到着していないときは、積込作業後の路面を整備したり、次のプッシング作業の段取りを行い、モータスクレーパが到着するまで待機する。

（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、



図－２ 切土区域でのブルドーザ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

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。

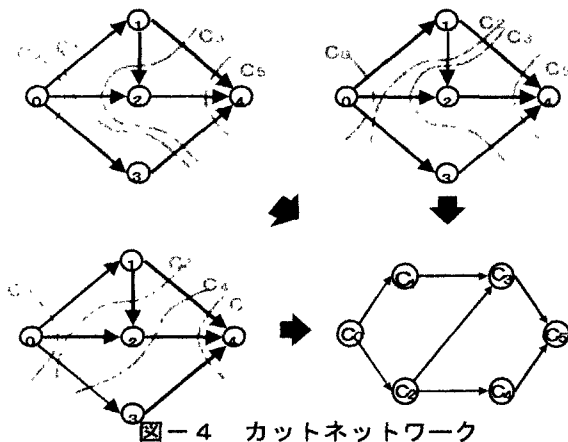


図-4 カットネットワーク

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。

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

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

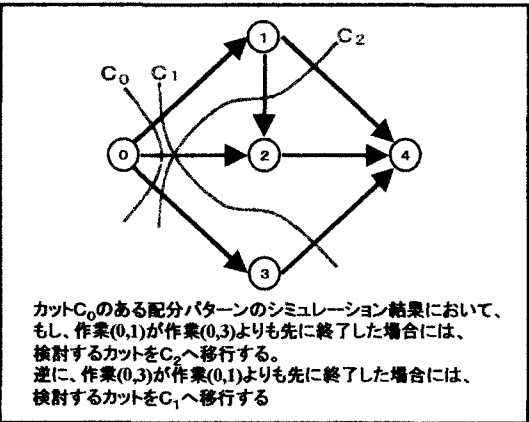
t_{ik}^p ; カット k における配分パターン p での施工パ

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

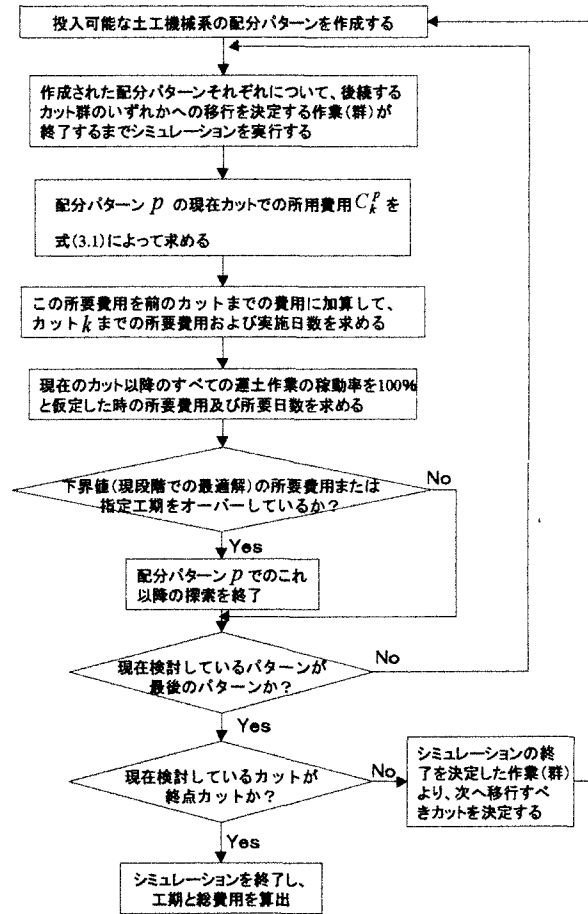
なお、 t_{ik}^p および T_k^p はステップ2でのシミュレーション結果から与えられる値である。そして、この所要費用を前のカットまでの費用に加算して、カット k までの所要費用を求める。また、工事の実施日数についても同様に求め、もし指定工期をオーバーしている場合には以降の探索を終了する。

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

図－6のプロセスに従って、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 等の各種条件設定のもとで、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。また、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－6 工程計画策定プロセス

5. 大規模工程ネットワークでの適用計算

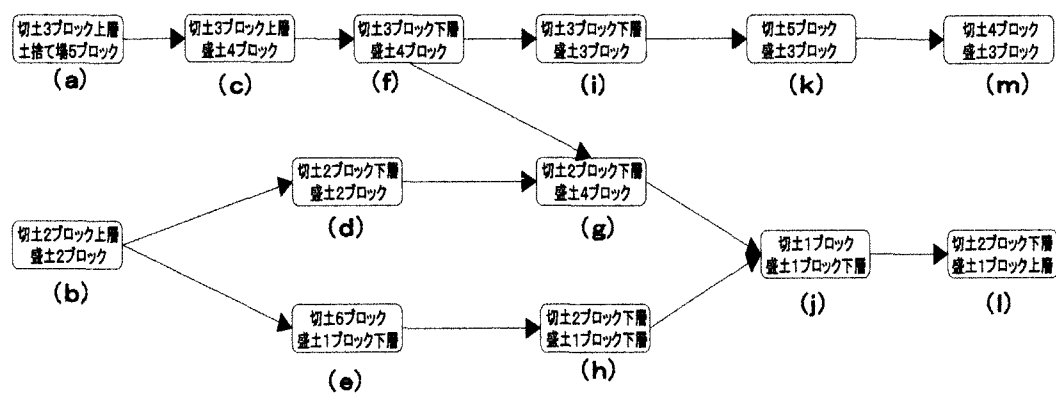
ここでは、大規模整地工事計画の例を用いて、構築したシミュレーションモデルを活用した適用計算を行った。すなわち、ここでは土量配分計画ならびに土工機械系の種類が既に決定されているとともに、単位作業として「掘削→積込→運搬→敷均」という一連のサイクリックな作業の流れによって構成される1組の施工ブロック間の運土作業を設定し、これらの技術的な施工順序が代替案的に与えられている場合を取り上げている。ここで、運土作業間の技術的な施工順序とは、例えば工事の実行性を考えて表面の土から切土を行うといった物理的な問題、工事施工の稼動性を向上するために、運搬機械の積載走行時の運搬路に上り勾配が生じないように谷部の盛土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。

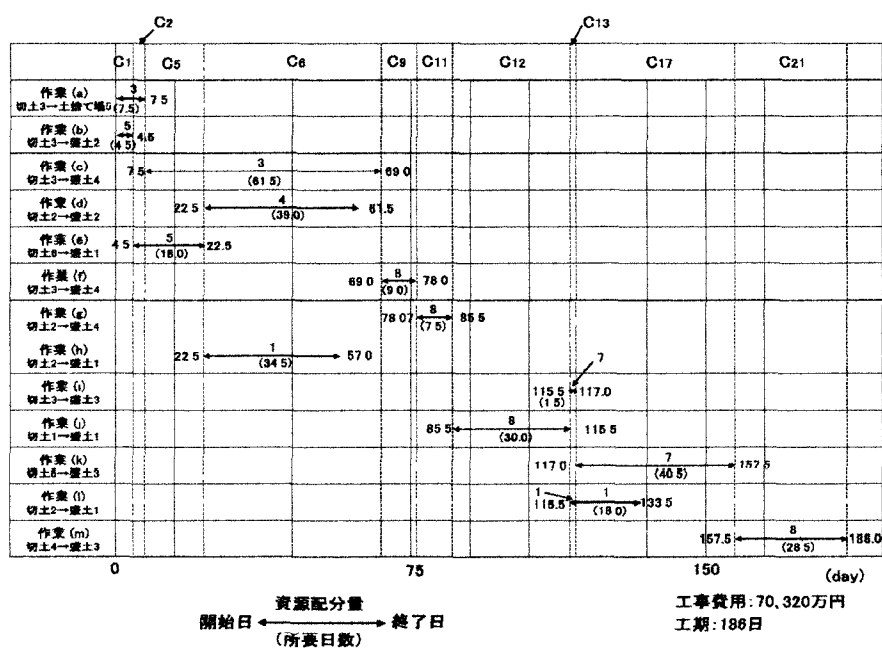
経験工学的な制約を考慮した運土作業の順序関係を整理したものが図－7に示したものである。

また、投入する機械の各作業時間と施工能力および施工単価に関しては、土木積算標準便覧表を参考にしている。その中で初期値として対象工事に投入する施工パーティ構成は、切土で掘削・リッピング作業を行う機械には21tブルドーザ2台、運搬機械としては16t級スクレーパ1台、また盛土で敷均し・締固め作業に関しては21tブルドーザ2台とした。

適用計算の結果、後期は186日、最小工事費用70,320万円が求められ、このときの各作業のバーチャートは図－8。また、カットネットワークの最適経路は図－9、資源山積図は図－10のようであった。このときの最適投入パーティ数は8パーティでパーティ構成は、切土でのブルドーザ21t級2台、スクレーパ16t級1台、盛土でのブルドーザ21t級2台であった。



図－7 ブロック間順序関係



図－8 バーチャート表

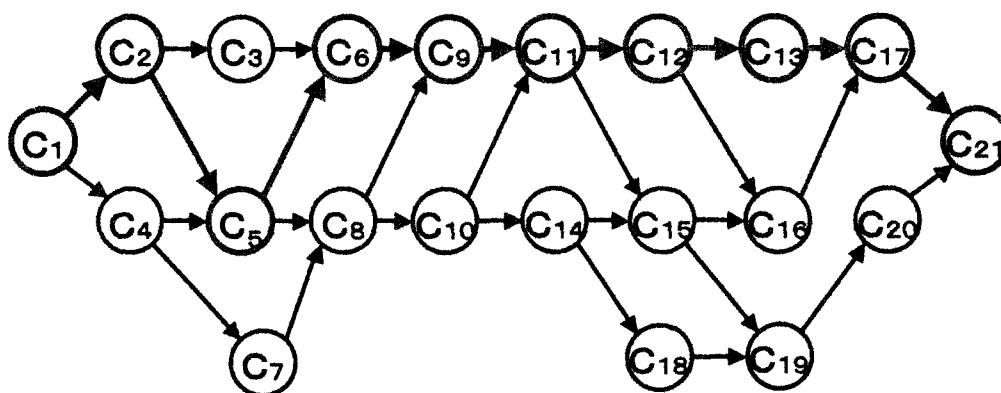


図-9 カットネットワークの最適経路

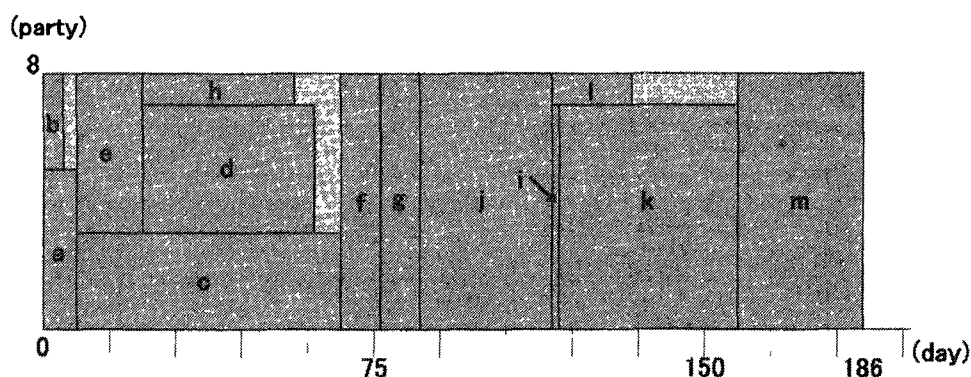


図-10 資源山積図

6. おわりに

本稿においては、本研究がこれまで進めてきた PERT/MANPOWER 問題を含む工程ネットワークへの工事用資源配分問題の最適解法の開発に関する研究の過程で得られた理論的成果をベースとして、実際レベルの大規模工程ネットワークを対象とした大規模数値演算にも耐え得る効率的な解法アルゴリズムの開発を行った。

そこでは、まず山崩し法によって算出される妥当解を基準値として、ブランチ&バウンド法における下界値と同様の考え方のもと、それ以降の計算を行うに値しないカットネットワークの経路の探索を中止することにより、計算量の削減を図る方法を提案した。

さらに、これまでの研究成果として理論的に保証されているカットネットワークの存在を前提として、以上のように変更を加えた DP^[2]の計算過程の中で破棄される経路上の無駄なカットを抽出することなく必要とするカットのみを逐次生成しながら最適経路を求める方法を示し、これを解法アルゴリズムの中に導入した。

以上のように変更を加えた最適解法を大規模な整地工事の工程ネットワークに適用したところ、大幅な計算時間の短縮が確認された。

注釈

- [1]GPSS : General Purpose Simulation System
- [2]DP : Dynamic Programming

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
- 2) 春名攻,滑川達,櫻井義夫:PERT/MANPOWER問題の最適解法の開発研究-カットネットワークにおける最適資源配分問題への変換を用いた新しい解法-,土木計画学研究・論文集,1998
- 3) 春名攻,滑川達,櫻井義夫:工事用資源の最適投入量用決定問題に関する理論的研究,建

- 設マネジメント研究・論文集 vol.5, 土木学会
建設マネジメント委員会, 1997
- 4) 春名攻, 滑川達: ネットワーク工程表の構造
特性分析と最適工程計画モデル構築に関する
理論研究, 建設マネジメント研究・論文集
vol.4, 土木学会建設マネジメント委員会,
1996
- 5) 春名攻: 建設工事における施工計画に関する
システム論的研究, 京都大学学位論文, 1971

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

In this study, it is aimed to develop a new type method for obtaining project scheduling with minimum cost under restrictions such as project duration and recourses on the large-scale earth-work project. In this method optimal route on the cut-network is searched through the calculation of simultaneous execution-state among multiple activities included in the arbitrary independent-cut utilizing simulation model.