

京都大学工学部 正員 工博 吉川 和広
 京都大学工学部 正員 工修 春名 攻
 京都大学大学院 学生員 笹嶋 博
 京都大学大学院 学生員 山本 幸司

1. はじめに

近年、宅地造成はその需要増大に伴っています。大規模化しつつあり。またその工事施工においては大型土工機械による機械化施工の傾向が著しい。このような大規模な工事計画の作成において、従来は経験や勘に基づいて行なわれることが多かった。しかし、計画を合理的に作成するためには近年著しい発達をみせているシステム工学などを用いた科学的な手法の導入が必要であると考えられる。すでに、いくつかの建設業において運土量の配分計算に関しては線形計画法を用いて計画を作成する努力が払われつつあるが、インプットデータである土量計算に対する検討はあまり行なわれておらずその考察はまだ不十分である。また策定した工事計画を実施する段階に対する考察はほとんど欠如しているように思われる。計画作成にあたっては運土作業遂行のための機械の合理的な稼働スケジュール作成段階まで一環して捉え、全体としての最適性をめざすことが必要である。しかし、この問題に対する考察研究は少ない。本研究においては特に上述した2つの点に注目し、主として整地工事の運土作業を対象とする造成工事計画の作成方法に関する考察を行なった。

2 運土計画システム

整地工事は原地形を計画地盤高に示される地形どおりに施工するものであるから、どうしても切土・盛土および数きならし作業を必要とする区域が生じる。計画対象となるこれらの切土区域・盛土区域の設定に際しては原地形の起伏状態および機械の稼働性を考慮する必要がある。以下においてはブロックと呼ぶ単位施工区域を設定し、これらに対して切土量・盛土量を計算し、最終的にブロック間の運土計画を作成する。このような運土システムを数学モデルで記述すると次のようになる。いま切土ブロック i の切土量を a_i ($i=1, 2, \dots, n$)、盛土ブロック j の盛土量を b_j ($j=1, 2, \dots, m$)、さらに切土ブロック i から盛土ブロック j への運土量を v_{ij} で示すと、

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^m v_{ij} &= a_i, & \sum_{i=1}^n v_{ij} &= b_j, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} &= \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

のように定式化される。しかし、現実には現場全体で切土量・盛土量がバランスするのは稀であるが、計画地盤高を許容範囲内で変更するか、土取場もしくは土捨て場を設け、それを一つのブロックとみなすことによりこれらの場合も上式①で示すことが可能である。

他り工事計画と同様に整地工事計画の作成においても全体計画の位置づけにおける整地工事計画のレベルに対応する目的を設定し、この目的にかなうような施工計画を作成する必要がある。いさかりにその目的を量的に記述することができ、それが図で表わされたと

あるとすれば上述した V_{ij} の関数としてとり扱うことができ、

$$Z = f(V) \quad ; \quad V = (V_{ij}), \quad (2)$$

と表わされる。したがって合目的な運土計画作成のためにはまず目的関数 Z を最大あるいは最小にするような運土量 V を求める必要がある。 V を求めることができれば施工機械の機種・規模・台数の決定、施工順序の決定等を行なうことにより運土工事計画が作成できる。

3. 運土対象土量計算およびその土量配分計算

(1) ユニットの土量計算 運土工事においては運土対象土量決定の自由度が大きく、また工事の途中段階における出来高管理が困難であるため運土対象土量も正確に把握することが困難であった。しかし、運土計画を作成するうえには土量計算の精度がかなり大きく影響するため、できるだけ正確なしかも簡便な計算方法をとる必要がある。土量計算の精度をあげるためには、原地形および計画に示された地形を3次元の連続関数で表わし、兩者の差を積分することにより前述した Δz を求める方法も考えられるが、造成工事が大規模になるに従い計算も繁雑となり好ましくない。従来行なわれている一般的な方法を述べると、① 現場地形図上に地形状況を考慮して5~20m間隔にメッシュを入れる。

② メッシュで区切られたユニットごとに地形図から原地盤高を読みとる。

③ 各ユニットに対して設計値より得られる計画地盤高を与え、ユニット毎の切盛土量計算を行なう。

この方法によると、地形図からの原地盤高の読み取り精度および地形図そのものの精度が土量計算の精度に強く影響するが計算が簡便であり精度もそれ程落ちないようすることができる。しかし、この方法においても土量変化率や圧密沈下は考慮する必要がある。

(2) ブロックの土量計算 一般に整地工事においては、このようなユニットごとの小土量を対象とするのではなく適当な大きさのブロック(いくつかのユニットの集合体)の土量を対象とする。現場全体の土量はブロック間の運土対象土量とブロック内での敷きならし土量とに分けられるため、ブロックの設定方法によっては運土対象土量が変化することが予想される。従来は運土対象土量のできるだけ少ない方が経済的合理的な工事を実施できると考えられていたが、ブロック内の土処理をも考慮すると信ぴょう性は薄いといえる。したがって、本研究においては事例研究を通してブロック分割方法を変更した場合に運土対象土量の変化を示し、運土量配分計算においてもブロック内処理土量を加味してより合目的な運土計画作成をめざしている。一般に施工機械としては、ブルドーザとスクレーパの組み合わせが用いられること、またブロック内の敷きならし作業はブルドーザで行なわれることを考え合わせると、ブロックの大きさを1辺50mの正方形と仮定することが妥当であると考えられる。(ブルドーザの最適稼働距離は50mであるという実績研究が多い) しかし、機械の配置方法によっては50m以上ブロックも考えられるので、事例研究においては60m, 75m, 100mの場合との比較を行なった。次に、ブロックの分割方法としては、ブロック割りのメッシュをずらしていく方法やメッシュを回転させる方法などが考えられるが、メッシュを回転させる方法はユニットごとの土量計算からやり直す必要がある。本研究ではメッシュをずらしていく方法

をとった時の運土量のバラツキを調べた。

(3) 土量配分計算 2 において述べたように、運土計画は式①および式②のように数式モデル化できる。これはヒックアップ・プッシュの輸送問題である。したがって運土量配分計算(どの切土ブロックからどの盛土ブロックへいくら運土すべきか)は式①の制約条件のもとに式②を最大もしくは最小にするような解 V を求めることになる。ここで、目的関数 Z を運土対象土量 V の関数としてどのように表わすかが問題となる。本研究においては目的関数として運土費用 $Z_c (= \sum C_{ij} V_{ij})$ をとった場合の費用係数として実験値より $C_{ij} = \alpha \cdot d_{ij} + \beta$ 、また仕事量 $Z_w (= \sum d_{ij} V_{ij})$ をとった場合の距離係数としては i ブロックから j ブロックへの直線距離を仮定した。しかし、距離係数に関しては施工機械の最小半径回転半径や運搬路の起伏などを考慮した換算距離を求める必要があろう。ブロック分割のメッシュのざらレ方による運土量変化に対してその最大、平均、最小の場合の配分計算結果は講演当日示す。

4. 運土作業のスケジューリング

機械の稼働効率や施工の実行可能性を考えると、運土量のLP計算における最適解が必ずしもより合目的であるとは限らない。すなわち1.において述べたように、運土工事の施工に対して最も合目的な運土計画を立てるためには運土量計算とスケジューリングを一体化して考えなければならない。すなわち運土量計算のブロック分割の段階でスケジューリングについても考慮し、ブロック設定とスケジューリングの最適解を同時に検討できるようなシステムを作成する必要がある。これについては現在研究中であるが発表できる段階には至っていないので、ここでは3.により運土計画が与えられたときのスケジュール作成法に関する考察を加えることにする。いま3.の結果、切土ブロック i から盛土ブロック j への運土量 V_{ij} が与えられると、これらの運土作業に対して何らかの方法により作業順序が決定されれば運土工事に実体的に表わされ、その出来高管理だけでなく工期や具体的なスケジュールをも管理することができる。本研究においては運土工事のスケジュール作成にあたって次のようなプロセスを考えた。

プロセス1 i ブロックから j ブロックへ切土→運土→敷きならしという運土量 V_{ij} の運土作業を1つの集合作業としてとらえ、これをプロジェクトにおける単位作業としてまずスケルトンネットワークを作成する。

プロセス2 全施工量を所与の工期内で完成させるために必要な作業機械系の投入数および施工能力を求める。

プロセス3 各単位作業について、各種施工条件より優先的に施工すべき作業に対して優先順序をつけ、それらを1つのまとめた単位作業と考える。

プロセス4 投入された機械系において作業完了時刻ができるだけ均しくなるように全施工量をそれぞれの機械系に配分する。

プロセス5 各機械系に対して待ち時間が生じないように、さらにできるだけ隣接した作業に移れるように単位作業間に順序関係をつけていく。

プロセス5における順序関係策定法としては、試行錯誤で行なうこともできるし、プランケ&バウンド法を利用することも可能である。またプロセス3における優先順序をつけ

るべき運土作業としては、

- ① 防災工事に関係する区域の運土作業、
- ② 同方向への運土作業が複数存在する場合、遠方への運土の運搬路を確保するための近接ブロックへの運土作業
- ③ 現場への機械の搬入路が限定される場合の搬入路近くの運土作業、
- ④ 運土作業を示す動線が交差する場合のどちらか一方の運土作業、
- ⑤ 運土作業にとって障害となるような物件が存在する区域の運土作業、
- ⑥ 構造物工、排水工、街路築造工など整地工事の並行もしくは後続作業の伴なう区域の運土作業、

などが考えられる。また工事費については直接費用と間接費用の関係より最速工期というものが存在するが、一般にはプロジェクト完了時刻と短かくすると工事費用が減少すると考えられる。したがって経済的な面から与えられた工期内に工事を完成させるためにもプロジェクト完了時刻のできるだけ短い工程計画の作成が望ましい。そのためにはプロセス4において、機械系Pの施工量を W_p 、時間当り施工能力を g_p としたとき、 W_p/g_p がすべての機械系で等しくなるように W_p 、 g_p を策定する。しかし、 g_p は機械系Pへの投入機械台数を一定にすると施工中の各段階において異なることが予想され、地形・土質状態や運搬距離の長短によって待ち時間の生じる恐れがある。また、工事の途中段階での出来高策定方法も確立しておく必要があり、これらについては現場における施工機械の稼働調査を行なっている段階である。なお、本研究におけるシミュレーションの結果ならびに考察は講演当日示すことにする。

5. おわりに

本稿においては、宅地造成工事における運土作業の計画を作成する手順を示すとともに、特に問題と考えられている切土・盛土量の計算方法およびスケジューリングの方法について示した。土量計算において今後考察をすすめていかなければならない課題としては、

- ④ 地形条件が切土・盛土の量的・位置的分布状況におよぼす影響、
- ⑤ 土量計算における精度（メッシュの大きさ）、
- ⑥ 土質による実質運土量の推定精度、
- ⑦ 1ブロックの規模と位置の最適決定法

等に関する問題に残されている。さらに運土の計画作成に対しては、

- ① 各ブロック間の運土量の決定と機械稼働計画を同時に行ないうるようなスケジューリングの手法の開発、
- ② 機械系投入台数およびその施工能力の策定法、
- ③ 工事施工の途中段階における運土の出来高策定法、
- ④ すべての場合についてLP計算を行わなくても最適に近いような実行可能な計画を作成することのできるシステムの開発、

等について研究を進めていく必要がある。最後に、本研究に対する建設コンサルタント・建設技術センター・施工管理研究委員会の諸氏の御協力に感謝します。