

建設残土の有効利用のための土量配分計画モデル

SOIL ALLOCATION MODELS FOR UTILIZATION OF SURPLUS SOIL IN CONSTRUCTION WORKS

見波 潔*・嶋津晃臣**

By Kiyoshi MINAMI and Akiomi SHIMAZU

Although enormous volume of soil is excavated and discharged from construction works, disposal sites for the surplus soil decrease in urban area year by year. With this point as background, it is desirable to establish soil recycling system, that is effective utilization of soil between construction sites where surplus soil is discharged and other sites where soil is used as material for embankment, landfill, etc. In this study, three models for soil allocation are proposed corresponding to certainty of input data. (1) Model I is based on presupposition that all the relevant data are known deterministically. (2) Model II determines proper soil allocation in consideration of adjustment of working time on condition that input data for start time of each construction work has uncertainty. (3) Model III determines proper matches of construction works from the viewpoint of effective utilization of surplus soil.

Keywords: discharged soil, earthwork planning, soil allocation, linear programming, fuzzy programming

1. はじめに

土の掘削を伴う建設工事からは大量の掘削土が残土として場外搬出されている。従来から残土の多くは臨海部の埋立て地もしくは内陸処分地に運ばれて処分されているが、埋立て計画にも自ずから限界があり、また環境問題等の理由から内陸処分地の確保も非常に困難になっている。このため、都市圏では残土処理が建設工事遂行上の大きな問題となっている。

一方、土を利用する工事（道路等の盛土工事、土地造成工事、埋戻し工事など）の側をみると、従来から土は各種の土木材料の中でも比較的安価で入手も容易な材料とされていたが、近年になって良質な山砂資源の保護に対する関心の高まりや、土取場の遠隔化に伴う土砂運搬費の上昇などの理由から、土は必ずしも安価で入手しやすい材料とはいえ、土の入手先の確保にも困難を伴う状況となっている。

このような問題に対処するために、残土を“処分”するというこれまでの考え方から、残土を資源として“有

効利用（以下、流用とよぶ）”するという考え方への転換の必要性が提唱されている^{1),2)}。そのための具体的な施策の1つとして、いくつかの大都市圏では土砂の搬出入を伴う工事の予定を事前に収集し、そのリストを関係機関に配布することによって流用の促進が図られている。これによって残土の流用がかなり行われるようになってきたものの、実際に流用を行うかどうかは個々の工事担当者の判断に委ねられているため、残土の流用を総合的かつ効率的に行うという段階に達しているとはいえない。

本研究は、上述した残土問題を個々の工事レベルでの問題としてではなく、多くの建設工事を統括・調整する立場に立って解決を図るべき問題としてとらえ、複数工事間の残土の流用を合理的に行うための土量配分計画モデルを提案するものである。土量配分計画では、入力データをどの程度の確からしきで入手できるかによって計画立案の考え方が異なると考えられることから、本研究では特に各工事の土工開始時期に関する入力情報に着目し、その確からしきの程度に応じた3種類の計画モデルを提案する。

2. 土量配分計画の基本的な考え方

本稿で述べる土量配分計画とは、残土を発生する複数

* 正会員 工修 建設省東北地方建設局道路部道路計画第二課長（〒980 仙台市二日町9-15）

** 正会員 工修 建設省土木研究所機械施工部長（〒305 茨城県つくば市大字旭1）

の工事（以下、搬出工事とよぶ）から地盤・盛土用資源として土を利用する複数の工事（以下、搬入工事とよぶ）への残土の合理的な流用計画をいう。残土の流用が成立するための条件は以下のように整理される。

- ① 搬出工事側と搬入工事側の流用土量が一致すること。
- ② 残土の土質が搬入工事側の土質条件を満たすこと。
- ③ 残土の発生時期と搬入工事側での利用時期が適合すること。

これらの条件に加えて、残土の合理的な流用を行うためには、

- ④ 客観的な評価基準の下で残土の最適な流用先を決定すること、

が必要である。

本研究では、これらの条件を考慮して土量配分計画問題をモデル化した。すなわち、条件①については個々の工事での土量条件をモデルの中に組み込んだ。条件②については、後述するような土質分類を考慮することで対処した。また、条件③については、計画対象期間を“期”に分割し、それぞれの期で条件①②を満足させることとした。また、ストックヤードを設けて搬出・搬入時期の調整も考慮できるようにした。

条件④に関しては、どのような評価基準を設定するかが重要な問題となる。現時点で考えられる評価基準としては以下のようなものが挙げられよう。

評価基準Ⅰ：総費用【(流用、購入、捨土時の土砂運搬費)+(ストック費)+(土砂購入費)+(捨土処分費)】の最小化

評価基準Ⅱ：総輸送量【(運搬土量)×(運搬距離)の総和】の最小化

評価基準Ⅲ：総流用土量の最大化

評価基準Ⅳ：土砂運搬距離の均衡化（工事間の土砂運搬距離に大きなばらつきが生じないように、最長運搬距離を最小化する）

いずれの指標を最適性の評価基準として設定するかは高位の意志決定にかかわる問題であり、残土問題に対す

る社会的なコンセンサスが形成される中で決定されるべきものと考えられる。土量配分計画問題はいずれの評価基準を用いてもモデル化が可能であるが、本研究では経済性の観点を重視するものとし、本稿では特に評価基準Ⅰを設定した場合についてのモデルを示すこととする。

3. 土量配分計画モデルの概要

土量配分計画を立案するにあたっては、一定期間内に予定されている工事から排出される残土およびその受け入れ可能性についての情報があらかじめ得られている必要がある。表一1は土量配分計画モデルへの入力情報の種類を整理したものである。

本研究で提案する土量配分計画モデルはこれらの情報が与件であることを前提としているが、計画立案時点でこれらの調査を行うと調査結果の精度に差が生じ得ると考えられる。特に、搬出工事、搬入工事にかかわる項目では、個々の工事計画が明確になっておれば「工事場所」「土量」のデータはかなりの正確さで得ることができるが、「工事時期」に関するデータについては調査時点によってはある程度の不確実性が含まれる可能性がある。

そこで、本研究では「工事時期」に関するデータの不確実性の程度に着目し、表一2に示す3種類の土量配分計画モデルを考えた。

モデルⅠは、すべての入力情報が確定量として得られる場合に適用されるもので、特定の評価基準の下で最適

表一1 土量配分計画モデルへの入力情報

対象	入力情報の内容
搬出工事	・工事場所 ・残土量 ・土質 ・発生時期
搬入工事	・工事場所 ・土量 ・土質(用途) ・搬入時期
土質改良プラント	・設置場所 ・改良能力 ・改良費用 ・プラント内のストック可能量
ストックヤード	・場所 ・ストック費用 ・ストック可能量
捨土処分	・処分地の場所 ・規模(容量) ・土質の制約 ・処分単価
土砂購入	・土取場の場所 ・規模(容量) ・土質 ・購入単価
運搬	・運搬単価 ・サイクルタイム ・運搬距離上限値

表一2 土量配分計画モデルの種類と特徴

モデルの種類	入力情報の特徴	決定変数	目的関数	手法
モデルⅠ：土量配分計画モデル(基本モデル)	表一1に示す入力情報を確定量として与える。	X_{ij} ：第 <i>t</i> 期に搬出工事 <i>i</i> から搬入工事 <i>j</i> へ運ばれる土量	総費用の最小化	線形計画法
モデルⅡ：工期調整を考慮した土量配分計画モデル	・個々の工事の土工開始時期をあいまいな情報として与える。 ・総費用の志望水準を入力する。	① X_{ij} ：同上 ② 調整された土工開始時期	土工開始時期および総費用に関する帰属度の最大化	ファジィ線形計画法
モデルⅢ：搬出・搬入工事の最適組合せモデル	個々の工事の土工開始時期を確率的に与える。	δ_{ij} ：搬出工事 <i>i</i> の残土を搬入工事 <i>j</i> へ流用するとき1、そうでないとき0	総費用の期待値の最小化	0-1型整数線形計画法(割当て問題)

な土量配分を出力するものである。

モデルⅡは、個々の工事の開始時期に関する情報があいまいな情報としてしか得られず、しかも各工事の土工開始時期を一定の範囲内で調整することが可能な場合に適用されるものである。このモデルでは、最適な土量配分および各工事の調整された土工時期が出力される。

モデルⅢは、個々の工事の開始時期が確率的に与えられる場合に適用され、特定の指標の期待値を評価基準として搬出工事と搬入工事の最適な組合せを出力するものである。このモデルの場合、工事の組合せのみを決定するものであり、時期別の流用土量といった詳細な土量配分は当該工事間の調整に委ねることになる。

以下では、各モデルの定式化および適用事例を示す。

4. 入力情報が確定量として与えられる場合の土量配分計画モデル（モデルⅠ）

(1) 基本モデルの概要

残土の流用条件は2. に述べたとおりであるが、このような条件を満たす流用形態として次の3通りがある。

ア) 搬出工事から搬入工事への直接の流用

イ) ストックヤードを介して搬出・搬入時期の調整を行ったうえでの流用

ウ) 土質改良プラントで土質改良を行い、残土の土質と搬入工事側の土質条件を適合させたうえでの再利用

これら3つの流用形態を考慮に入れて基本モデルを構築した。モデル化にあたっての前提条件は次のとおりである。

i) 表—1 に示した入力情報が確定量として与えられるものとする。

ii) 計画対象期間を T 期に分割し、各期の流用土量、捨土処分量、土取場からの購入量を決定変数とする。

iii) 上記イ), ウ) の流用形態に関し、モデル中に複数のストックヤードと土質改良プラントを組み込むものとする。

iv) 土質に関しては、“土質レベル” という概念で表わすことにする。発生する残土の土質はあらかじめ設定した土質分類に基づいて表示すればよいが、搬入工事側での要求土質は用途に応じてある範囲を設定することが多く、これを土質レベルという概念で表わすことにした。すなわち、レベルの高い土質とは、搬入工事側での用途の広い土質を意味し、一般には砂や礫などが想定される。一方、レベルの低い土質とは、用途が限定される土質を意味し、含水比の高い粘性土などがこれに相当する。土質レベルの設定例を表—3 に示す。

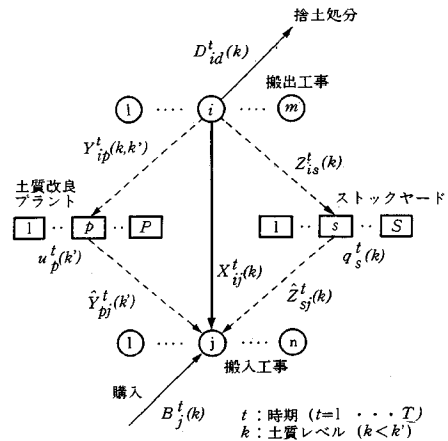
v) 2. に述べた①~③の流用条件をモデルの制約条

表—3 土質レベル設定の一例

土質レベル	残土の土質	搬入工事での要求土質
k = 3	礫、砂	礫、砂、または同等の改良土に限る。
k = 2	砂質土	礫、砂、砂質土、または同等の改良土に限る。
k = 1	粘性土	礫、砂、砂質土、粘性土のいずれでもよい。
k = 0	含水比が高い粘土など	—

表—4 記号の定義（決定変数）

記号	定義
$X_{ij}^t(k)$	第 t 期に搬出工事 i から搬入工事 j へ流用される土質レベル k の土量 (m ³)
$Y_{ip}^t(k, k')$	第 t 期に搬出工事 i から改良プラント p へ運搬され、土質レベル k から k' に改良される土量 (m ³)
$\hat{Y}_{pj}^t(k')$	第 t 期に改良プラント p から搬入工事 j へ運搬される土質レベル k' の土量 (m ³)
$u_p^t(k')$	第 t 期における改良プラント p での土質レベル k' のストック土量 (m ³)
$Z_{is}^t(k)$	第 t 期に搬出工事 i からストックヤード s へ運搬される土質レベル k の土量 (m ³)
$\hat{Z}_{sj}^t(k)$	第 t 期にストックヤード s から搬入工事 j へ運搬される土質レベル k の土量 (m ³)
$q_s^t(k)$	第 t 期におけるストックヤード s での土質レベル k のストック土量 (m ³)
$D_{id}^t(k)$	第 t 期に搬出工事 i から処分地 d へ捨土処分される土質レベル k の土量 (m ³)
$B_{bj}^t(k)$	第 t 期に土取場 b から搬入工事 j へ搬入される土質レベル k の土量 (m ³)



図—1 モデルの決定変数

件とし、総費用の最小化を目的関数とする。このうち土質条件に関しては、「残土の土質レベルが搬入工事側の要求土質レベルよりも高いこと」が流用が成立するための必要条件となる。

以上の前提条件のもとで、土量配分計画モデルを線形計画問題として定式化した。紙面の都合上、定式化の詳細は省略し、モデルの決定変数のみを表—4、図—1 に示す。

(2) 適用事例

(1) に示した基本モデルでは、土質改良を施したうえでの再利用も考慮に入れているが、土質改良を行う工

種は道路占用工事（管理設工事）などに限定され、一般の工事では土質改良を伴わない流用が主体となる。本稿では、一般の工事を対象にした土量配分計画について述べることにし、基本モデルから土質改良プラントに関する項を除いてモデルを適用した例を示すことにする。なお、対象を道路占用工事に限定し、改良土の再利用を主体とした土量配分計画に対して本モデルを適用した事例については参考文献3)を参照されたい。

a) 事例計算の対象

本モデルをS県東南部（東西25 km, 南北35 kmの区域）の土量調査データに対して適用した。この調査は、次年度に予定されている搬出工事と搬入工事の場所、工事時期、搬出・搬入土量、土質などを毎年調べているもので、その結果を土量調査リストにして関係機関に配布し、残土の流用促進を図っている。本モデルにはこのような土量調査データが入力されるわけであるが、一般に県域レベルの広がりをもつ地域ではかなりの件数の工事情報が収集され、工事規模（搬出・搬入土量）にもかなりのばらつきがみられる。調査されたすべての工事を同時に考慮して本モデルを適用することは理論上は可能であるが、計算時間の面で必ずしも実際的とはいえない。そこで、計画作成のプロセスを図-2に示すように3つのステップに分け、大規模工事から順次土量配分計画を作成していくのが本モデルの現実的な適用方法と考える。以下では、この3つのケースを想定してモデルを適用した結果を示すことにする。

なお、本事例では計画対象期間を1年としており、これを12期に分割して1か月単位で工事時期のデータを扱うことにした。また、土質レベルについては表-3に示した分類に従うこととした。

b) 計算結果

i) 大規模工事を対象にしたケース

ここでは搬出・搬入土量が2万m³以上の工事を大規模工事とし、上述した土量調査リストの中から19件の搬出工事（総搬出土量104万m³）と20件の搬入工事（総搬入土量114万m³）を抽出した。モデルの適用にあたっては、残土を流用する際の搬出・搬入工事間の距離の上限をパラメーター（10 km, 20 km, 30 km）とするとともに、対象地域のほぼ中央にストックヤードが有る場合と無い場合を想定した。捨土処分費、土砂購入費については現在の標準的な価格のほかに、将来の高騰を想定して5割増しの値を設定して試算を行った。

本モデルからは各期の流用土量 $X'_i(k)$ などが出力されるが、これをすべて図示することは紙面の都合上不可能なので、ここでは総流用土量および総費用のみを示すことにする。図-3は、残土を流用する場合の工事間距離の上限値をパラメーターとして総流用土量と総費用を

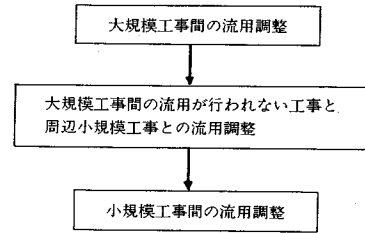
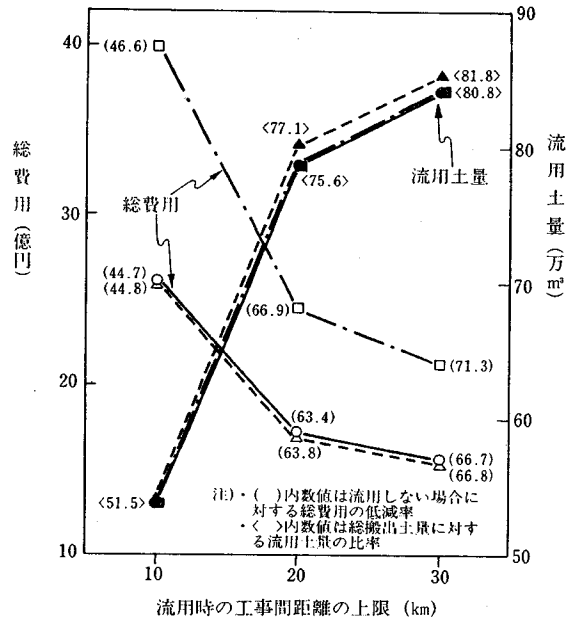


図-2 土量配分計画作成のプロセス



凡例	試算条件	記号
	現状費用, ストックヤード無	○—○ ●—●
	現状費用, ストックヤード有	△—△ ▲—▲
	割増し費用, ストックヤード無	□—□ ■—■

入力データ	捨土処分単価 (円/m ³)	土砂購入単価 (円/m ³)
現状費用	600	2,100
割増し費用	900	3,000

注)・現状費用は実態調査に基づく平均的な費用。
 ・割増し費用は事例計算のために想定したもので、現状費用の5割増しとしている。

図-3 大規模工事へのモデルIの適用結果

示したものである。この図から、流用時の工事間距離に関する制約を緩くするほど多量の流用が可能となり、これに伴って捨土処分量および土砂購入量が減少するために総費用が大幅に低減されることがわかる。すなわち、地域全体の土砂処分調達費の低減化という観点からみると、できるだけ広い範囲で残土の流用調整を行う方が費用効果が大きいといえる。特に、全く流用しない場合に対する総費用の低減率をみてわかるように、大規模工事間の残土流用による費用効果は非常に大きく、この結果からも流用調整の重要性が認識される。

次に、ストックヤードの有無による差違をみると、こ

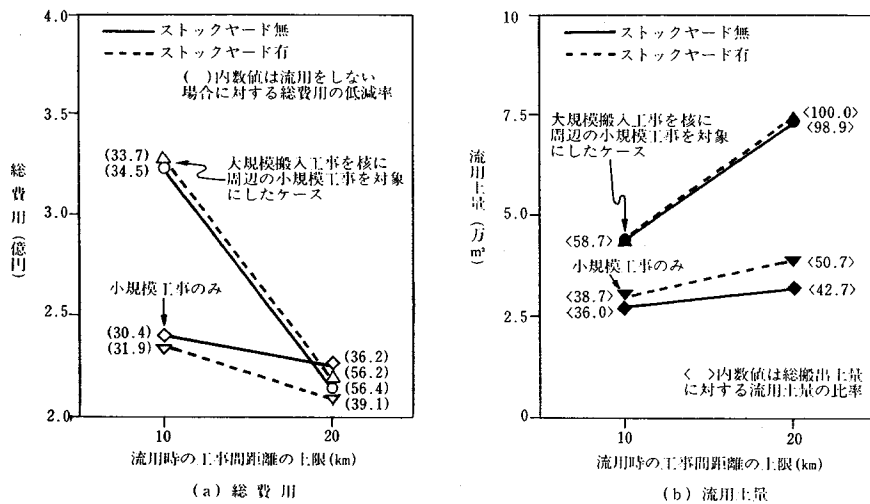


図-4 モデル I の適用結果

の事例ではほとんど差が認められない。これは大規模工事の場合は一般に工期が長いために、ストックヤードを経由して搬出・搬入時期の調整を行う必要性がほとんど生じないためである。

また、費用関係のデータを現状値よりも5割高く見積って本モデルを適用したところ、全く流用しない場合に対する総費用の低減率は現状費用のケースに比べて大きくなっている。このことから、将来的に残土処理および土砂購入にかかわる費用がますます上昇するようであれば、残土の流用はいつそう費用効果を高めるものになるといえる。

ii) 大規模搬入工事を核に周辺の小規模工事を対象にしたケース

土量調査リストの中から、搬入土量約7万 m³の土地造成工事を核として周辺20 km圏内の小規模工事（搬入土量1000 m³～1万 m³の工事33件、総搬入土量85500 m³、搬出土量1000 m³～3000 m³の工事41件、総搬出土量74700 m³）を抽出し、合計75件のデータに対して本モデルの適用を試みた。

計算結果を図-4に示す。i)のケースとは工事規模が異なるので費用効果の大きさなどは異なっているが、計算結果を総括すると、i)のケースと同様のことがいえる。すなわち、流用時の工事間距離の上限値を大きくして流用の対象となる工事の範囲を広くするほど多量の流用が可能となり、それに伴って捨土処分量および土砂購入量が減少し、総費用はかなり低減される。また、ストックヤードの有無による差違をみると、この事例では工期の長い大規模搬入工事と工期の短い複数の小規模搬出工事との間の流用が主体となっているため、搬出・搬入時期の調整のためのストックヤードを設けても効果の

少ないことがわかる。

iii) 小規模工事を対象にしたケース

複数の小規模工事に対して本モデルを適用した場合の例を示すために、ここではii)で用いたデータの中から大規模搬入工事だけを除いたケースを設定した。計算結果は図-4に示されている。

この事例で取り上げた小規模工事はいずれも工期が2～3か月程度と短いため、搬出・搬入時期の条件が適合する工事の組合せは必然的に少なくなる。このため、残土を流用する場合の工事間距離の制約を緩めて流用可能な工事の対象を広げても流用土量はあまり増えないことが計算結果からわかる。一方、搬出・搬入時期のずれを調整するためにストックヤードを設けると流用土量をかなり増やすことが可能となり、その結果として総費用もかなり低減できることがわかる。これはケース i), ii)にみられない特徴である。

5. 工期調整を考慮した土量配分計画モデル (モデル II)

(1) モデル開発の背景

4.に述べた土量配分計画モデルを適用するためには、表-1に示した情報が正確に把握される必要がある。しかしながら、扱われる情報の多くは工事予定にかかわるものであり、種々の理由からこれらにある程度の不確実性が存在してもやむを得ない場合が想定される。本研究では、公共土木工事を対象として調査された工事情報と1年後に追跡調査された各工事の土砂処分・調達の実績を対比し、工事着工前に収集された情報の不確実性の程度を相対的、定性的に評価した。評価に用いたデータは、関東地方1都4県を対象として調査された「土量調査リ

表-5 土量配分計画における入力情報の精度

情報項目	計画時点で得られる情報の特性	不確実性の程度
工事場所	確定情報として得られる。	確定的
土量	工事内容が確定していれば、土量はほぼ正確に把握されている。	小
土質	土質調査が不十分なときは正確な把握が難しいこともある。	小
土工開始時期	工事全体の進捗状況、気象条件などの外的要因により当初計画から変更されることが多く、計画時点で確定的な情報として得にくい。	大
土工期間	関連工種の進捗、気象、土質などの条件により当初計画から変更されることがある。	中
その他	ほぼ正確に把握できる。	確定的

スト」およびその追跡調査結果である。表-5は評価の結果をまとめたもので、表に示すように、土量配分計画の立案に必要な工事情報のうち不確実性の程度が最も大きいのは土工開始時期であると判断された。

以上に述べたような背景のもとで、本研究では各工事の土工開始時期に関する情報に“あいまいさ”があるものとし、土量配分計画の立案時点において土工開始時期の調整を同時に行うことを前提として、工期調整を考慮した計画モデルを開発した。

(2) モデル化のための基本方針および前提条件

本モデルでは、ある時期の搬出・搬入土量に関する制約条件をモデルⅠのように「 a (m³) でなければならない」という確定的な条件ではなく、「なるべく a (m³) にしたい」というあいまい (ファジィ: Fuzzy) な制約条件として扱い、これによって土工時期に自由度をもたせることにした。一方、土量配分計画の最適性の評価基準については、モデルⅠでは土砂処分調達にかかわる総費用の最小化を設定したが、本モデルでは「なるべく総費用が安くなるように土量を配分したい」という“あいまいさ”のある満足度基準を設定することにした。

事象の“あいまいさ”を表現する手法として、ここではファジィ集合を用いた。ファジィ集合はあいまいな境界をもつ集合を意味し、個々の要素がその集合に属する度合いを帰属度として表現するもので、この考え方を一般の線形計画問題 (LP) に応用したのがファジィ線形計画問題 (Fuzzy-LP と記す) である。Fuzzy-LP では、制約と目標を区別することなく両方に“あいまいさ”を考慮するのが特徴である⁴⁾。

モデル化のための前提条件をまとめると以下のとおりである。

- i) 複数の搬出・搬入工事間の合理的な土量配分問題を考えるものとし、その際には個々の工事の全体工期や工費に影響を及ぼさない範囲内で土工時期の調整を認めるものとする。
- ii) 計画対象期間を T 期に分割し、各期の配分土量 X_{ij}^k (第 t 期に搬出工事 i から搬入工事 j へ運

ばれる土質レベル k の土量) を決定変数とする。なお、表記を簡略化するために、以下では土質レベルの表示を省略する。

- iii) 各工事の土工開始時期に関する情報が“あいまい”な場合を想定し (例: だいたい 8 月 1 日 ごろ 土工を開始する), 土工開始時期に関する条件が満たされる度合いを帰属度で表わす。
- iv) 各工事の土工開始時期を第 t_s 期初日, 土工終了時期を第 t_e 期末日としてデータ入力するのを基本とし, 工期調整によって前後 1 期以内の変更を認めるものとする。このとき, 工事 i に関して「なるべく第 t_{st} 期初日に搬出を開始したい」という条件を「第 t_{st} 期の搬出土量をだいたい a_i にしたい」という土量条件に置き換える。いま, 工期調整を認めない場合の土量配分を図-5(a) のように考えると, その土量条件は,

$$\sum_{j=1}^n X_{ij}^t = a_i^t, \quad \sum_{t=t_{st}}^{t_{et}} a_i^t = A_i, \quad a_i^t = \bar{a}_i \dots \dots \dots (1)$$

(ここに、 A_i : 工事 i の総搬出土量)

として表わされるのに対し、工期調整によって開始遅れを認める場合には図-5(b) のような搬出土量となり、このときの土量条件は式 (2) で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n X_{ij}^t &= a_i^t, & \sum_{t=t_{st}}^{t_{et}+1} a_i^t &= A_i \\ \bar{a}_i - \alpha_i \bar{a}_i &\leq a_i^{t_{st}} \leq \bar{a}_i \\ a_i^t &= \bar{a}_i & (t = t_{st}+1, \dots, t_{et}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

なお、ここでは問題を単純化するために、第 t_{st} 期と第 $t_{et}+1$ 期を除く各期の土工量 a_i^t は各工事の平均土工量 \bar{a}_i に等しいものとしている。また、開始遅れに伴う土工量変更の許容範囲を $\alpha_i \cdot \bar{a}_i$ としている。

- v) 土砂処分調達および運搬費用の総和 Z が、ある志望水準 Z_a をあまり超えないようにする。

(3) モデルの定式化

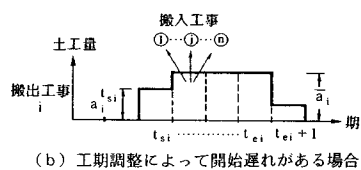
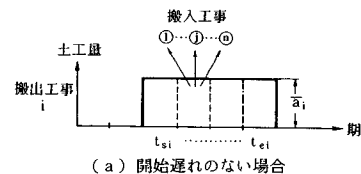


図-5 土工開始遅れを認める場合の土工量の設定

以上の条件を前提として土量配分計画問題を整理すると、「土量に関する制約条件の一部にあいまいな領域を認めたくえで総費用をだいたい Z_a 以下にしたい」という問題となり、これは式 (3) で示されるような Fuzzy-LP として定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} Ax = b \\ Cx \leq Z_a \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A : 係数行列、 x : 変数ベクトル、 b : 定数ベクトル、 C : 費用係数ベクトル (行ベクトル)、 Z_a : 総費用の志望水準、であり、 $=$ は「だいたい等しくしたい」、 \leq は「あまり超えてはいけない」ことを表わす便宜的な記号である。

この問題を解くにあたっては制約条件 (土量条件) と目標 (総費用) をファジィ集合として扱い、その帰属度 λ を最大にするような代替案を選択する。すなわち、個々の帰属度のうち最小のものを最大にするという考え方を基本とする。

次に、上記iv), v) に示したファジィな条件を定式化するためには、何らかの帰属度関数を設定する必要があるが、帰属度関数は制約条件および目標に対する計画立案者の考え方が反映される部分でもあり、一義的な設定法は存在し得ないものと思われる。ここでは、すべての帰属度関数が線形の場合を考えると、Fuzzy-LP は以下に示す通常の線形計画問題として定式化される。

① 搬出工事 i について

土工期の遅れを認める場合、遅れに伴う土量の調整許容範囲を $\alpha_i \cdot \bar{a}_i$ とし、第 t_{si} 期と第 $t_{ei}+1$ 期の土量条件の帰属度関数を図-6 に示すように設定すると、土量条件は式 (4) で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \leq 1 + \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}^{t_{si}} - \bar{a}_i}{\alpha_i \bar{a}_i} \\ \sum_{j=1}^n X_{ij}^t = \bar{a}_i \quad (t = t_{si} + 1, \dots, t_{ei}) \\ \lambda \leq 1 - \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}^{t_{ei}+1}}{\alpha_i \bar{a}_i} \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

なお、土工期の早まりを認める場合についても同様の考え方で定式化ができ、さらに、土工期の早遅を同時に考慮する場合には 0-1 型変数 δ_i (土工期の遅れを認めるとき 1, そうでないとき 0) を制約

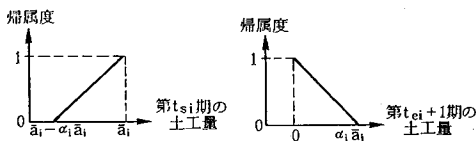


図-6 土量条件に関する帰属度関数

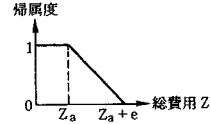


図-7 総費用に関する帰属度関数

条件式の中に組み込むことによって対処することができる。

② 搬入工事 j について

搬出工事の場合と同様なので、ここでは省略する。

③ 総費用について

総費用の志望水準 Z_a および費用制約の許容範囲 e を設定し、図-7 に示すような帰属度関数を仮定することにより、次式のように定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \leq 1 - \frac{Z - Z_a}{e} \\ Z = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n C_{ij} X_{ij}^l \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

④ 目的関数

$$\lambda \rightarrow \text{Max.} \dots\dots\dots (6)$$

なお、以上に示した定式化では、搬出工事 i には土取場を、搬入工事 j には捨土処分地を含んでいる。

(4) 適用事例

一般に搬出・搬入土量が多い大規模工事では工事着手のかなり以前に施工計画が明確にされているのに対し、搬出・搬入土量の少ない小規模工事の場合には情報の入手時点で土工開始時期に関する情報にあいまいさが含まれる可能性が大きい。そこで、比較的小規模な工事の集合に対して本モデルの適用を試みることにし、工事場所、搬出・搬入土量、土質、運搬費用などのデータは 4. (2) iii) でモデル I を適用した事例と同一のものを用いた。なお、計画対象期間の分割単位は 1 か月とした。

本事例計算では、土工開始時期に関する情報のあいまいさが土量配分結果に及ぼす影響をみるために、開始期における土工量の調整許容範囲 α_i を種々設定して計算を行い、工期調整を行わずに土量配分を行った場合 (モデル I) との比較を行った。ただし、 α_i は全工事に共通の値を使用した。また、総費用の志望水準 Z_a はモデル I の解 Z_0 (=234 208 千円) を基準値にして、

$$Z_a = Z_0 - e = (1 - \beta) Z_0 \dots\dots\dots (7)$$

として設定することとし、 β をパラメーターとして以下の計算を行った。

図-8 は、 α_i を 100% に固定し、 β を 10%, 20%, 30%, 40%, 50% の 5 段階に設定して計算を行った結果を示したものである。図からわかるように、工期調整を考慮に入れることによってモデル I に比べて総費用の低減化および流用土量の増大化をいっそう図ることができる。

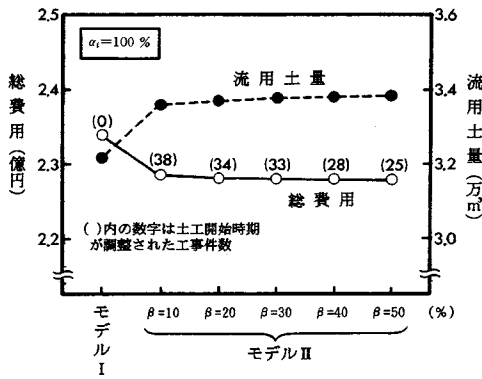


図-8 モデル II の適用結果 (α_i 一定)

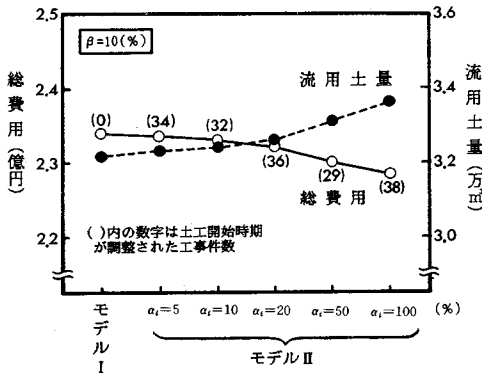


図-9 モデル II の適用結果 (β 一定)

ただし、この事例では β に対する感度は鈍く、総費用の志望水準 Z_a の設定が解に与える影響は少ないといえる。

一方、 β を 10% に固定し、 α_i を 5%、10%、20%、50%、100% の 5 段階に設定して計算を行った結果を図-9 に示す。総費用はいずれのケースともモデル I より小さい値が得られており、工期調整による費用低減効果が表われている。また、 α_i の値が大きいほど工期調整の効果が大きいことがわかる。たとえば、工期調整の範囲を最も大きく設定した場合 ($\alpha_i = 100\%$)、モデル I に比べて総費用は 2.5% 低減され、流用土量は 4.5% 多くなっている。この計算結果より、本モデルが有効に機能しているといえよう。

6. 搬出・搬入工事の最適組合せモデル (モデル III)

(1) モデル開発の背景

4. では土量配分計画の立案に必要な入力情報が確定的に与えられる場合の計画モデルを提案し、5. では土工開始時期に関する情報にあいまいさがあることを前提に工期調整を考慮した計画モデルを提案した。これら 2

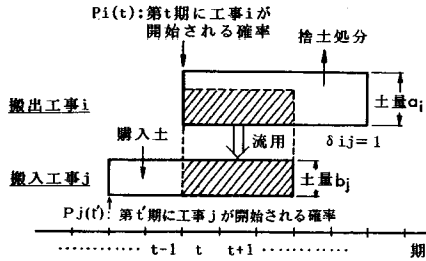
つのモデルに共通しているのは配分土量 $X_{ij}^*(k)$ を決定変数としている点である。ところが現実の搬出・搬入工事の実施状況を見ると、5.(1)でも述べたように、土工開始時期が当初予定と異なるケースがしばしば生じており、このような場合に $X_{ij}^*(k)$ を決定変数として土量配分計画を立案しておくで個々の工事の施工計画に変更があった場合に対処しづらくなるおそれがある。

そこで、本研究では 1 つの搬出工事からの残土受け入れ先としての搬入工事を 1 工事のみに限定し、それらの最適組合せを求めるモデルを考えた。本モデルは、個々の工事の施工計画がまだ十分に明確になっていない時点で土量配分計画を立案することを前提としており、このモデルによって最適組合せと認められた搬出・搬入工事のペアは、工実施の時点で各時期の搬出・搬入土量といった詳細な配分内容を検討することになる。このように搬出・搬入工事の最適組合せのみを求めておき、その後に個々の工事の施工計画の変更が生じても当事者間の調整で対処しようとするのが本モデルの根底にある考え方である。

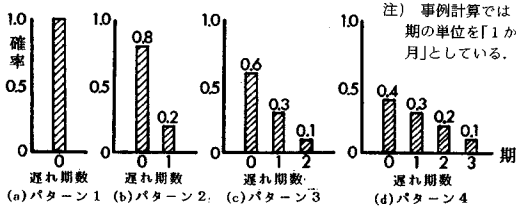
(2) モデル化のための前提条件と定式化

モデル化にあたっての前提条件は以下のとおりである。

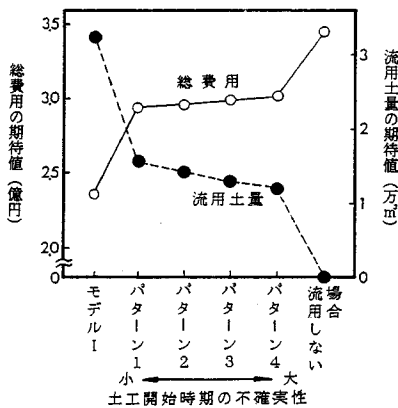
- i) 本モデルは同程度の搬出・搬入土量をもつ工事の集合に対して適用するものとし、当該工事から搬出される残土の流用先 (搬入工事) は 1 工事のみとする。大規模工事が含まれる場合には、これを適当な数の工事に分割することによって工事規模のレベルを合わせるものとする。
- ii) 最適性の評価基準として期待総費用の最小化を考える。
- iii) 入力情報のうち、各工事の土工開始時期については確率分布として与えるものとする。
- iv) 土質条件の考え方および計画対象期間の分割の考え方はモデル I、モデル II と同様とする。ただし、ここでは土質改良プラントおよびストックヤードは考慮に入れてない。
- v) 搬出工事・搬入工事ともそれぞれの土工期間内において各期の土工量は等しいものとする。このような前提条件を設けたのは、土工開始時期の不確実性を考慮するような計画問題では、個々の工事の期ごとの土工量に関する情報を十分な精度で入手することが困難と考えられるためである。なお、前述した「土量調査リスト」およびその追跡調査結果をもとに各工事の土工量の時系列的変動を調べたところ、全体的に有意な傾向は認められず、一般に土工量は期間内ではほぼ平均しているという結果が得られた。したがって、この前提条件はおおむね妥当なものとする。



図一〇 費用係数算出における土砂処分調達の考え方



図一〇 土工開始時期の遅れの確率パターン



図一〇 モデルⅢの適用結果

いえる。

以上の前提条件のもとで、土量配分計画モデルを次に示す“割当て問題”型の線形計画問題として定式化した。

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot \delta_{ij} \rightarrow \text{Min.} \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \delta_{ij} &= 1, \quad \sum_{j=1}^n \delta_{ij} = 1 \\ \delta_{ij} &= 0 \text{ or } 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 C_{ij} ：搬出工事 i と搬入工事 j との間で流用を行う場合の費用の期待値（定数）、 Z ：総費用の期待値（目的関数）、 δ_{ij} ：搬出工事 i と搬入工事 j との間で流用を行うとき 1、そうでないとき 0 とする変数、である。 C_{ij} は、搬出工事 i と搬入工事 j の組合せごとに図一〇に示すように流用量、捨土処分土量、購入土量

期を乗じることによって求められる。たとえば、図一〇のように搬入工事 j の開始時期 t' が搬出工事 i の開始時期 t より常に早く、かつ土量が $a_i > b_j$ となっている場合には、 C_{ij} は次式で求められる。

$$\begin{aligned} C_{ij} = & \sum_t \sum_{t'} P_i(t) \cdot P_j(t') [CB_j \cdot b_j (t - t') \\ & + CD_i \{(a_i - b_j)(t + T_j - t) + a_i(t + T_i - t' - T_j)\} \\ & + CR_{ij} \cdot b_j (t' + T_j - t)] \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 CD_i ：搬出工事 i から捨土処分する土の処分単価、 CB_j ：搬入工事 j で購入する土の購入単価、 CR_{ij} ：搬出工事 i から搬入工事 j へ流用する土の運搬単価、 T_i, T_j ：工事 i および j の工期、である。

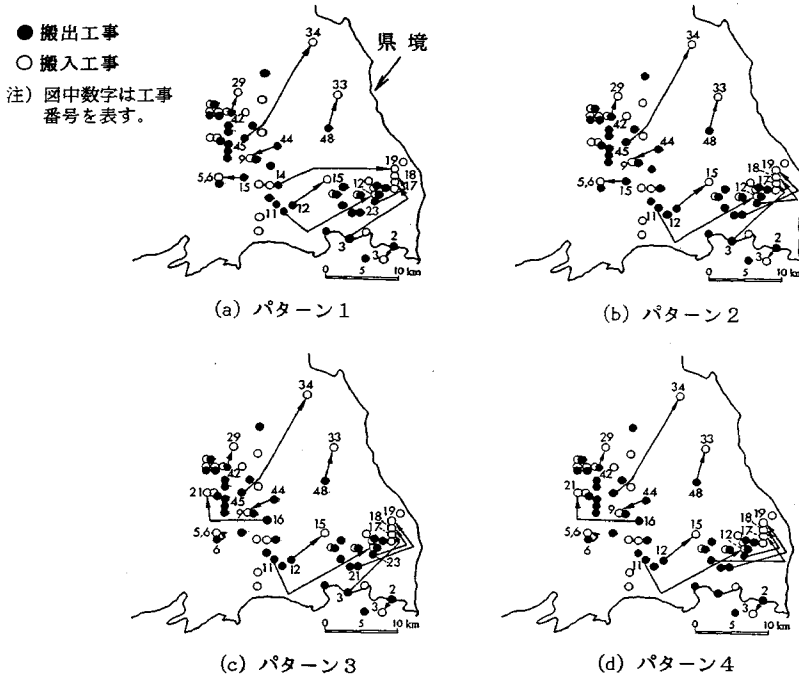
(3) 適用事例

一般に小規模工事ほど土工開始時期に関する情報に不確実性を伴う可能性が高く、本モデルの適用に向いていると考えられる。そこで、ここでは小規模工事の集合を計算の対象として取り上げることとし、4.(2) iii) および 5.(4) でモデルⅠ、モデルⅡを適用したのと同じの事例（搬入工事 33 件、総搬入土量 85 500 m³、搬出工事 41 件、総搬出土量 74 700 m³）に対して本モデルを適用した。費用関係等のデータもこれまでと同一のものを使用した。

ここでは土工開始時期の確率分布の違いが搬出・搬入工事の組合せにどの程度の影響を及ぼすかを調べるために、土工開始時期が確定的に与えられる場合（パターン 1）と図一〇に示すように土工開始時期の遅れが確率的に与えられる場合（パターン 2, 3, 4）について計算を行い（パターンは全工事に共通）、さらに比較のためにモデルⅠによる計算も行った。

図一〇に事例計算結果を示す。本モデルは工事単位で残土の流用先を決定するため、当然のことながらモデルⅠに比べて流用量は少なく、総費用が高い結果となるものの、所期の目的にかなう結果が得られた。次に、土工開始時期の確率パターン 1~4 を用いて本モデルを適用した結果を比較すると、パターン 1 の場合に総費用の期待値が最も小さく、全く流用しない場合に比べて約 5 千万円の費用節減が期待できることがわかる。また、遅れる期数が多くなるほど、すなわち土工開始時期の確率が低くなるほど総流用量の期待値は減少し、総費用の期待値は増加する傾向にあるという結果が得られた。

なお、本事例では土工開始時期の確率パターンごとに図一〇に示すような 11~12 件の組合せが最適解として出力され、組合せ結果はパターンによって若干異なるものであった。したがって、確率パターンは計画上の重要な因子と考えられるが、本事例の結果をみる限りにおいては総流用量や総費用の期待値にはあまり大きな影響



図—13 モデルⅢの適用結果（搬出・搬入工事の組合せ）

を与えないことがわかる。

7. おわりに

年々深刻化しつつある建設残土問題に対処するための施策の1つとして、複数工事間での残土の積極的な流用の必要性が強く認識されており、本論文では合理的な流用を行うための計画モデルの提案を行った。その概要をまとめると以下のとおりである。

(1) すべての入力情報が確定量として得られる場合を想定し、線形計画法を用いた計画モデル(モデルⅠ)を提案した。また、本モデルが有効に機能することを事例計算によって示した。

(2) 土量配分計画の立案時点において各工事の土工時期を調整することを前提とした計画モデル(モデルⅡ)を提案した。このモデルでは土工開始時期の条件と総費用の目標に“あいまいさ”があるものとしてファジィ線形計画法を用いている。事例計算を通して、工期調整を考慮することによってモデルⅠよりも費用低減された計画が立案できることを示した。

(3) 入力情報に不確定要素が多く含まれる場合には、詳細な土量配分計画を立案するよりも搬出工事と搬入工事の最適な組合せを求めておくことが重要と考え、そのための割当て問題型の計画モデル(モデルⅢ)を提

案した。また、事例計算によって所期の目的になかった解が得られることを示した。

本論文で提案したような計画モデルを実際の問題に適用する場合、出力結果の信頼性はモデルに入力される工事情報の精度に大きく依存する。したがって、計画対象期間内に実施される搬出・搬入工事の情報がどの程度の確からしさで収集され得るかが重要な課題となる。現行の体制では精度の高い情報収集はまだ困難かもしれないが、残土問題がさらに深刻化するようであれば、工事情報の収集体制の改善についての検討も必要になってこよう。

謝 辞：本研究の成果の一部は、建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への廃棄物

利用技術の開発」の研究成果の一部であり⁵⁾、貴重なご意見ならびにデータの提供をいただいた関係各位に感謝する次第である。また、本論文をまとめるにあたっては、名古屋工業大学 山本幸司 助教授に貴重なご助言をいただくとともに、建設省土木研究所下坪賢一氏には多大なご助力をいただいた。記して深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 浅川美利：現場発生土の有効利用，土と基礎，第29巻，第11号，土質工学会，pp.9~12，1981年11月。
- 2) 新藤範義：建設残土処理対策の課題—首都圏における処理実態と将来展望—，土木学会関東支部講習会「建設廃棄物に関する問題」，土木学会関東支部，pp.23~35，1985年3月。
- 3) 見波 深・嶋津晃臣・下坪賢一：道路占用工事における残土処理計画，土木計画学・講演集8，土木学会，pp.537~543，1986年1月。
- 4) 西田俊夫・竹田英二：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978年11月。
- 5) 建設省：建設事業への廃棄物利用技術の開発報告書，1986年3月。

(1987.10.2・受付)