

工事開始時期と工期の調整を考慮した建設残土輸送計画モデル

Surplus Soil Transportation Model Considering the Coordination of Start Time and Period of Constructions

富田 安夫^{*}、寺嶋 大輔^{**}、能沢 昌和^{***}

by Yasuo TOMITA, Daisuke TERASHIMA and Masakazu NOZAWA

1. はじめに

建設工事のうち土砂を搬出する工事においては、近年、多量の残土が発生しており、その処分地の不足や遠隔化、これによる運搬費用の増大などの問題が深刻化している。一方、土砂を搬入する工事においても、採取地の不足や遠距離化、これに伴う運搬費用の増大が著しい。そこで、搬出および搬入工事間での土砂の流用（再利用）を促進することが求められている¹⁾。

このための計画手法として、確定的な入力情報のもとで、工事間の輸送量を最適化するモデル^{2) 3)}や、工事開始時期や工事土量のあいまいさを考慮したモデル^{2) 4)}の開発がなされてきている。

しかしながら、工事の計画段階では、工事開始時期および工期の見直しは十分可能であるから、確定情報やあいまいな情報として扱うのではなく、工事開始時期や工期についても同時に最適化を行い、積極的に調整することで、より一層の最適化を図ることが可能であると考えられる。

そこで、本研究では工事の開始時期と工期の調整を考慮した残土輸送計画モデルを提案する。工事開始時期および工期についても決定変数として扱っているところに特徴がある。

2. モデルの考え方および定式化

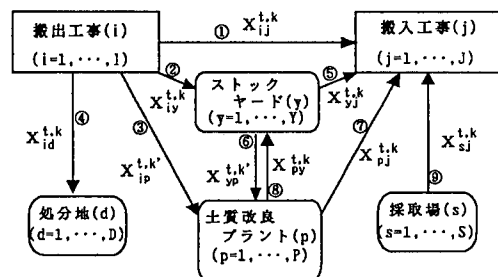
(1) モデルの考え方

本モデルは、複数の搬出・搬入工事(i, j)に加え、土砂を一時的に蓄えておくストックヤード(y)、土質を改

良するための土質改良プラント(p)、土砂の採取場(s)、残土の処分場(d)の各施設を対象としており、土砂の輸送パターンは図-1に示す9通りを考えている。

本モデルでは表-1に示すような、各工事における総搬出・搬入土量とその土質(A_i^k, B_j^k)、各施設の容量($Q_{\alpha}^{max}, R_p^{max}, S_s^{max}, D_d^{max}$)、施設間輸送費用($C_{\alpha\beta}$)などを与件として、総費用（輸送費、ストックヤード費用、土質改良費用、土砂購入費用、土砂処分費用）の最小化を行っており、その結果として、表-2に示すような工事開始時期・工期(ts_i, L_i)、および施設間輸送土量($X_{\alpha\beta}^{t,k}$)などが求められる。

なお、工事間で土砂の流用を考える場合、搬出・搬入の土量、時期、土質の3条件が一致することが必要である。本モデルでは、土量はストックヤード、採取場、処分場によって、時期は工事開始時期および工期の調整およびストックヤードによって、また、土質は土質改良プラントによって調整がなされる。



注) $X_{\alpha\beta}^{t,k}$ ($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$)については α, β が異なる場合は別変数を意味する

図-1 残土の輸送パターン

定式化の前提条件は以下の通りである。

a) 計画対象期間

計画対象期間を1, ..., TのT期間に区分し、すべての建設工事はこの期間内に終了するものとする。

b) 土質区分

土質区分はK段階(1, ..., K)とし、その値が小さい

キーワード 計画手法論、施工計画・管理

* 正会員 工博 神戸大学工学部建設学科

(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科

*** 熊谷組

(〒162 東京都新宿区津久戸町2-1)

ほど良質な土質を意味する。搬入工事においては、必要とする土質以上のものであれば利用可能である。

c) 搬出・搬入工事における土質の限定

搬出工事において搬出される土質は1種類に限定する。同一工事において2種類以上の土質が搬出される場合には、便宜上、別工事として扱う。

また、搬入工事においても、必要とする土質は1種類に限定する。ただし、搬入される土質は、必要とする土質以上のものであればかまわない。

d) 搬出・搬入土量の時間的パターン

搬出・搬入工事の工事開始時期および工期については、モデル内で決定されるが、工事期間中の土量の搬出・搬入の時間的パターンは一定であるものとする。ここでは各期ごと均等に搬出・搬入されるものと仮定する。

e) ストックヤードの使用期間と費用

ストックヤードに搬入された土砂は最低1期間はストックされ、費用はストック期間に応じて課される。

f) 土質改良の処理期間および費用

土質改良プラントへ搬入された土砂は、期内に処理されタイムラグは考えない。ただし、処理待ちの発生については、搬入前においてストックヤードにストックされているか否かによっており、モデル内で内生的に決定される。また、土質の改良費用についてはその改良の程度に応じて設定する。

(2) モデルの定式化

上記の最適化問題の目的関数および制約条件は以下の通りである。なお、定式化にあたっては表-1および表-2に示す変数を用いており、式中の変数の説明は省略する。

a) 目的関数

目的関数は、輸送費用(Z_1)、ストック費用(Z_2)、土質改良費用(Z_3)、土砂購入費用(Z_4)、土砂処分費用(Z_5)を含む総費用とし、これを最小化する。

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、

$$Z_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} X_{ij}^{t,k} + \dots + \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D C_{sd} X_{sd}^{t,k} \right)$$

$$Z_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K C_y Q_y^{t,k}$$

$$Z_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^{K'} C_p^{k' \rightarrow k} R_p^{t,k' \rightarrow k}$$

$$Z_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{d=1}^D C_s X_{sd}^{t,k}$$

$$Z_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K C_d X_{id}^{t,k}$$

(注1)変数については表-1および表-2参照。

(注2) Z_1 の各項は図-1の輸送パターン(①～⑨)の輸送費用に対応する。

b) 制約条件

制約条件としては、搬出・搬入工事、ストックヤード、土質改良プラント、土砂の採取場および処分場に関する条件を考慮しており、これらを以下に示す。

【搬出工事に関する制約】

t期における搬出工事(i)の土質kの搬出量($a_{ij}^{t,k}$)は、搬出工事(i)から各施設(β)へ搬出される輸送土量($X_{ij}^{t,k}$, $\beta = j, y, p, d$) (図-1の①～④)の合計に等しいことから、次式が成立する。

表-1 入力変数

A_i^k	搬出工事iの土質kの土砂の総搬出量
B_j^k	搬入工事jの土質kの土砂の総搬入量
ts_i^{min}, ts_i^{max}	工事iの最早、最遅開始時期
L_i^{min}, L_i^{max}	工事iの最短、最長工期
Q_y^{max}	ストックヤードyのストック容量
R_p^{max}	土質改良プラントpの1期あたり最大処理量
S_s^{max}	土砂採取場の最大採取可能量
D_d^{max}	残土処分場の最大処分可能量
$C_{\alpha\beta}$	施設 α から施設 β への単位土量あたり輸送価格($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$) 変数 $C_{\alpha\beta}$ は α, β が異なれば別変数
C_y	ストックヤードyにおける、単位土量1期あたりストック費用
$C_p^{k' \rightarrow k}$	土質改良プラントpにおいて、土質 k' から土質 k に改良する際の単位土量あたり改良費用
C_s	採取場sにおける単位土量あたりの土砂の購入費用
C_d	処分場kにおける単位土量あたりの土砂の処分費用

表-2 出力変数

$X_{ij}^{t,k}$	t期において施設 α から施設 β への土質kの輸送土量($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$) 変数 $X_{ij}^{t,k}$ は α, β が異なれば別変数
$a_{ij}^{t,k}$	t期における搬出工事iの土質kの搬出量
$b_{ij}^{t,k}$	t期における搬入工事jの土質kの搬入量
$\delta_i^{t,1,0}$	工事iが第ts _i 期に開始し、工期が L_i の場合に1、それ以外の場合は0を示す0-1型変数
$Q_y^{t,k}$	ストックヤードyのt期における土質kの土砂のストック量
$R_p^{t,k' \rightarrow k}$	土質改良プラントpにおけるt期に土質 k' から土質 k へ改良する土量

$$\sum_{j=1}^J X_{ij}^{j,k} + \sum_{y=1}^Y X_{iy}^{y,k} + \sum_{p=1}^P X_{ip}^{p,k} + \sum_{d=1}^D X_{id}^{d,k} = a_i^{i,k} \quad (2)$$

$a_i^{i,k}$ を決定するためには、工事開始時期と工期を決定する必要がある。そこで、工事開始時期および工期の変数として、工事開始時期が ts_i 、工期が L_i である場合に1をとり、それ以外の場合は0を示す0-1変数 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ を用いる。これを定式化すると次式となる。

$$\sum_{ts_i=1}^T \sum_{L_i=1}^T \delta_i^{(ts_i, L_i)} = 1, \delta_i^{(ts_i, L_i)} = 0 \text{ or } 1 \quad (3)$$

ただし、工事開始時期および工期について制約がない場合には、変数 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ の変域は図-2のすべての範囲となるが、現実には工事開始時期および工期の調整範囲にはある程度の限界があると考えられる。そこで、これらの調整可能範囲として、最早・最遅開始時期($ts_i^{\min}$ 、 $ts_i^{\max}$)、ならびに最短・最長工期($L_i^{\min}$ 、 $L_i^{\max}$)を設定する。この場合、 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ の変域は、図-2の網掛け部分に限定されることになる。これを定式化したものが次式である。

$$\sum_{ts_i=ts_i^{\min}}^{ts_i^{\max}} \sum_{L_i=L_i^{\min}}^{L_i^{\max}} \delta_i^{(ts_i, L_i)} = 1 \quad (4)$$

次に、上述の変数($\delta_i^{(ts_i, L_i)}$)を用いて、搬出量($a_i^{i,k}$)の定式化を行う。図-3は、工事開始時期および工期の設定ごとに、 $a_i^{i,k}$ を示したものである。ここでは総搬出量(A_i^k)は、簡便化のために工期(L_i)に均等に分布するものと仮定しており、各期の搬出量は、工事(i)の総搬出量を工期で割った土量(A_i^k / L_i)となる。また、図中の工期開始時期および工期の組み合わせのうち、実際に成立するのは、いずれか1つのみであり、これを工事開始時期および工期の変数($\delta_i^{(ts_i, L_i)}$)が規定していることから、変数($\delta_i^{(ts_i, L_i)}$)を搬出量に乗じている。以上の図-3において、工事開始時期および工期別の搬出量を、各期(t)において合計したものが $a_i^{i,k}$ であり、これを表したものが(5)式である。ただし、工事開始前($t < ts_i$)、もしくは工事終了後($t \geq ts_i + L_i$)では、土砂の搬出はないことから、 $a_i^{i,k} = 0$ である。

工期 L_i

	1	2	...	$L_i^{\min}$	...	$L_i^{\max}$	...	T
工事開始時期								
1	$\delta_i^{(1,1)}$	$\delta_i^{(1,2)}$	...		...		...	$\delta_i^{(1,T)}$
2	$\delta_i^{(2,1)}$	$\delta_i^{(2,2)}$	...		...		...	$\delta_i^{(2,T)}$
...	...	...	...		...		...	...
$ts_i^{\min}$								
...	...	...	...		...		...	...
$ts_i^{\max}$								
...	...	...	...		...		...	...
T	$\delta_i^{(T,1)}$	$\delta_i^{(T,2)}$	...		...		...	$\delta_i^{(T,T)}$

注)図中の網掛け部分は工事開始時期および工期の制限を与えた場合に $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ が1をとりうる範囲を示している。

図-2 工事開始時期と工期の設定変数 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$

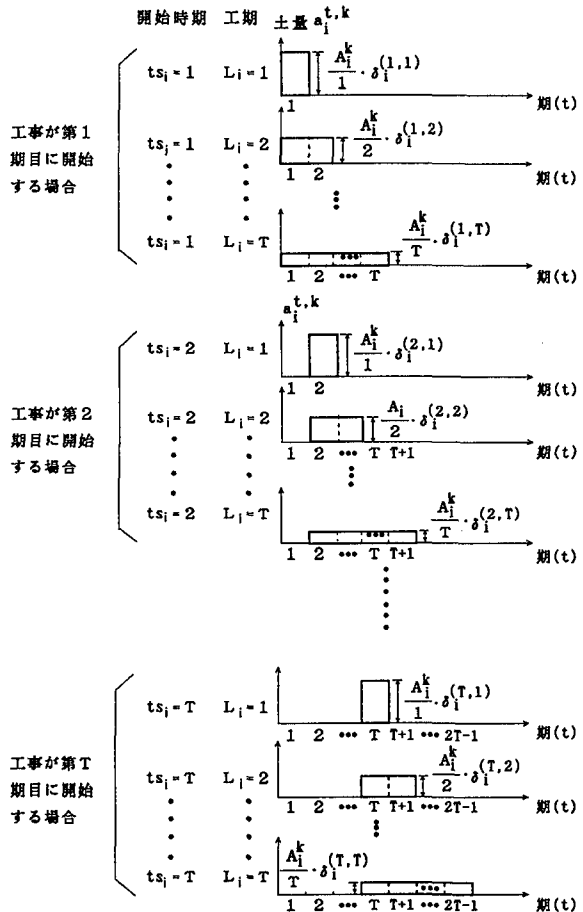


図-3 開始時期・工期別の搬出土量の時間的パターン

$$\left. \begin{aligned} a_{i,j}^{t,k} &= \sum_{ts_i=1}^T \sum_{L_j=1}^T \frac{A_i^k}{L_i} \cdot \delta_{(ts_i, L_j)}^{(ts_i, L_j)} (ts_i \leq t < ts_i + L_i) \\ a_{i,j}^{t,k} &= 0 \quad (t < ts_i, t \geq ts_i + L_i) \end{aligned} \right\} (5)$$

【搬入工事に関する制約】

搬入工事についても、搬出工事と同様の制約条件が成立するが、搬入工事については、要求している土質(k)に対して、それ以上の土質であれば利用できる点が異なっており、これは(6)式に示されている。搬入工事に関する制約条件を列挙すると以下の通りである。

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J X_{ij}^{t,j} + \sum_{y=1}^Y X_{iy}^{t,y} + \sum_{p=1}^P X_{ip}^{t,p} + \sum_{s=1}^S X_{is}^{t,s} \right) = b_{ij}^{t,k} \quad (6)$$

$$\sum_{ts_j=1}^T \sum_{L_j=1}^T \delta_{(ts_j, L_j)}^{(ts_j, L_j)} = 1, \quad \delta_{(ts_j, L_j)}^{(ts_j, L_j)} = 0 \text{ or } 1 \quad (7)$$

$$\sum_{ts_j=ts_j^{\min}}^{ts_j^{\max}} \sum_{L_j=L_j^{\min}}^{L_j^{\max}} \delta_{(ts_j, L_j)}^{(ts_j, L_j)} = 1 \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} b_{j,i}^{t,k} &= \sum_{ts_j=1}^T \sum_{L_j=1}^T \frac{B_j^k}{L_j} \cdot \delta_{(ts_j, L_j)}^{(ts_j, L_j)} (ts_j \leq t < ts_j + L_j) \\ b_{j,i}^{t,k} &= 0 \quad (t < ts_j, t \geq ts_j + L_j) \end{aligned} \right\} (9)$$

【ストックヤードに関する制約】

ストックヤードのt期のストック量($Q_y^{t,k}$)は、(t-1)期のストック量($Q_y^{t-1,k}$)に、t期の搬出工事および土質改良プラントからの搬入量(図-1の②⑧)を加え、搬入工事および土質改良プラントへの搬出量(図-1の⑤⑥)を減じたものであり、これを定式化すると次式となる。

$$Q_y^{t-1,k} + \left(\sum_{j=1}^J X_{ij}^{t,j} + \sum_{p=1}^P X_{ip}^{t,p} \right) - \left(\sum_{j=1}^J X_{ij}^{t,j} + \sum_{p=1}^P X_{ip}^{t,p} \right) = Q_y^{t,k} \quad (10)$$

また、ストックヤードの容量制約は次式となる。

$$\sum_{k=1}^K Q_y^{t,k} \leq Q_y^{\max} \quad (11)$$

【土質改良プラントに関する制約】

土質改良プラントに関して、土質改良前後において2つの条件式が成立する。

土質改良前に着目すると、t期にプラントに搬入された土質(k')の土量(図-1の③⑥)は、プラントによって土質(k')から他の土質へ改良された総土量($\sum_{k=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k}$)に等しいことから、次式が成立する。

$$\sum_{i=1}^n X_{ip}^{t,i,k'} + \sum_{y=1}^Y X_{yp}^{t,y,k'} = \sum_{k=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k} \quad (12)$$

また、土質改良後に着目すると、t期におけるプラントからの土質(k)の搬出土量(図-1の⑦⑧)は、プラントにより土質(k)に改良された総土量($\sum_{k=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k}$)に等しいことから、次式が成立する。

$$\sum_{i=1}^n X_{ip}^{t,i,k} + \sum_{y=1}^Y X_{yp}^{t,y,k} = \sum_{k=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k} \quad (13)$$

また、プラントの処理能力制約は、次式のとおりである。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k} \leq R_p^{\max} \quad (k < k') \quad (14)$$

【採取場、処分場に関する制約】

採取場、処分場の容量制約は次式の通りである。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K X_{sj}^{t,k} \leq S_s^{\max} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K X_{id}^{t,k} \leq D_d^{\max} \quad (16)$$

3. おわりに

本稿では、工事の開始時期と工期の調整を考慮した残土輸送計画モデルを、混合0-1線形計画問題として定式化した。試算例によって本モデルの有効性について確認しているが、これについては講演時に発表する。

今後は、モデルの効率的な計算手法の開発および実際問題への適用分析を考えている。

【参考文献】

- 1)建設省建設経済局：総合的建設残土に関する報告書，1990.6
- 2)見波潔，嶋津晃臣：建設残土の有効利用のための土量配分モデル，土木学会論文集，第395号／IV-9，pp65-74，1988.7
- 3)和田かおる，山本幸司：建設残土の再利用計画に対する輸送問題の適用に関する研究，土木計画学研究・論文集，NO.11，pp255-262，1993.12
- 4)和田かおる，山本幸司：切盛土量にあいまいさを含む土工計画へのファジィ理論の適用，土木計画学研究・論文集，No.9，pp189-196，1991.11