

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 Starting Time and Period of Constructions

富田 安夫*, 寺嶋 大輔**

by Yasuo TOMITA, and Daisuke TERASHIMA

1. はじめに

建設工事では多量の残土が発生し、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、土砂を必要とする建設工事においても、採取地の不足などの同様な問題が深刻化している。そこで、これら両者の問題を少しでも解消するため、搬出および搬入工事間において、土砂の流用すなわち再利用を促進することが強く求められている¹⁾。

このための数理計画手法として、工事開始時期および工期を与件として、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)}などの開発がなされてきている。しかしながら、工事間での再利用の促進のためには、工事の計画段階において、工事開始時期および工期を調整し、決定することさえも必要となってきている。

そこで、本研究では工事の開始時期および工期の調整を考慮した残土輸送計画モデルを提案し、仮想データに基づく適用例を通してモデルの有用性を明らかにしている。

2. モデルの考え方および定式化

(1) モデルの考え方

建設残土の輸送計画においては、建設工事(搬出・搬入工事)、土砂の採取場・処分場のみでなく、時間調整のためのストックヤード、土質改良のための土質改良プラントを含めた総合的なモデルが必要となる。本研究では、図-1に示す各工事および

施設間の土砂の輸送パターンについて、総費用(輸送費用、採取費用、処分費用、ストック費用、土質改良費用)を最小化するための建設残土輸送計画モデルを策定することを目的とする。

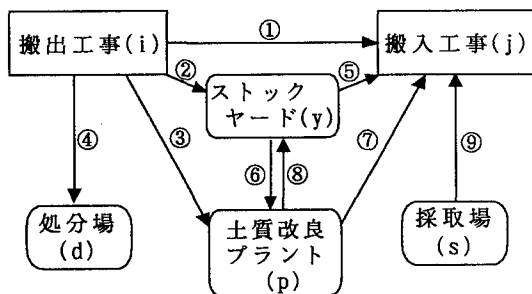


図-1 建設残土の輸送パターン

土砂の再利用にあたっては、工事間において土量、土質、時期が一致することが必要であり、本モデルでは、以下のように扱っている。

土量については、搬出・搬入工事、ストックヤード、土質改良プラントにおける土量の制約条件として与える。ただし、搬出・搬入工事については、工事開始時期および工期の調整が可能であるものと考えており、これに伴って時期別の土量は変化することになる。

土質についてはK段階に区分しており、搬出工事による土砂の土質が、搬入工事で必要とされる土質以上であれば再利用を認める。また、これを満たさない場合でも、土質改良プラントによって必要とされる土質以上に改良されれば再利用が可能となる。

時期については、計画対象期間を複数の期間に分割して扱っており、同時期の土砂においてのみ再利用を認め、搬出・搬入時期の一致しない場合には、ストックヤードを介して再利用されることになる。

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)

** 正会員 工修 (財)計量計画研究所

(〒162 東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9)

なお、再利用されなかった土砂は処分場において処分され、また、再利用の土砂のみでは不足する場合には、採取場からの採取土が用いられることになる。

(2) モデルの定式化

ここでは、搬出・搬入工事、ストックヤード、土質改良プラント、採取場および処分場に関する制約のもとに、総費用を最小化する問題を混合0-1型線形計画問題として定式化する。定式化にあたって、変数としては表-1に示す入力変数と、表-2に示す決定変数を用いる。

a) 目的関数

目的関数は総費用であり、これには輸送費用(Z_1)、ストック費用(Z_2)、土質改良費用(Z_3)、購入費用(Z_4)、処分費用(Z_5)を含んでいる。これらを土砂の輸送量($X_{ij}^{t,k}, \dots, X_{sj}^{t,k}, Q_y^{t,k}, R_p^{t,k' \rightarrow k}$)および輸送価格および施設使用料($C_{ij}, \dots, C_{sj}, C_y, C_p^{k' \rightarrow k}, C_s, C_d$)を用いて定式化すると次式となる。

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

ここで、

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

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

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

$$Z_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_s X_{sj}^{t,k}$$

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

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

b) 制約条件

制約条件は、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ついて設定しておりこれらを以下に示す。本研究では、搬出・搬入工事の工事開始時期および工期の調整を可能としていることから、これらに関する制約条件も定式化している。

表-1 入力変数

(搬出・搬入工事)	
A_i^k	搬出工事iの土質kの土砂の総搬出量(m^3)
B_j^k	搬入工事jの土質kの土砂の総搬入量(m^3)
$a_{ij}^{t,k}$	搬出工事i, 第t期, 土質kの土砂の搬出量(m^3)
$b_{ij}^{t,k}$	搬入工事j, 第t期, 土質kの土砂の搬入量(m^3)
ts_i^{min}, ts_i^{max}	工事iの最早および最遅開始時期
L_i^{min}, L_i^{max}	工事iの最短および最長工期
I, J	搬出工事数, 搬入工事数
(ストックヤード)	
Q_y^{max}	ストックヤードyの容量(m^3)
C_y	ストックヤードyにおける単位土量あたりストック価格(円/ m^3 ・期)
Y	ストックヤード数
(土質改良プラント)	
R_p^{max}	土質改良プラントpの最大処理量(m^3 /期)
$C_p^{k' \rightarrow k}$	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価格(円/ m^3)
P	土質改良プラント数
(採取場)	
S_s^{max}	採取場sの最大採取可能量(m^3)
C_s	採取場sにおける単位土量当たりの採取土価格(円/ m^3)
S	採取場数
(処分場)	
D_d^{max}	残土処分場dの最大処分可能量(m^3)
C_d	処分場dにおける単位土量当たりの処分価格(円/ m^3)
D	処分場数
(単位輸送費用)	
$C_{\alpha\beta}$	施設 α から施設 β への単位土量あたり輸送価格(円/ m^3) ($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$)
(その他)	
T, K	全対象期間数, 土質区分数

表-2 決定変数

$X_{\alpha\beta}^{t,k}$	施設 α から施設 β へ第t期に輸送される土質kの土量(m^3) ($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$)
$Q_y^{t,k}$	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(m^3)
$R_p^{t,k' \rightarrow k}$	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(m^3)
ts_i, ts_j	搬出工事iおよび搬入工事jの開始時期
L_i, L_j	搬出工事iおよび搬入工事jの工期
$\delta_{(ts_i, L_i)}$	工事iが第 ts_i 期に開始し、 L_i 期間続く場合に1、それ以外の場合は0を示す0-1型変数

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

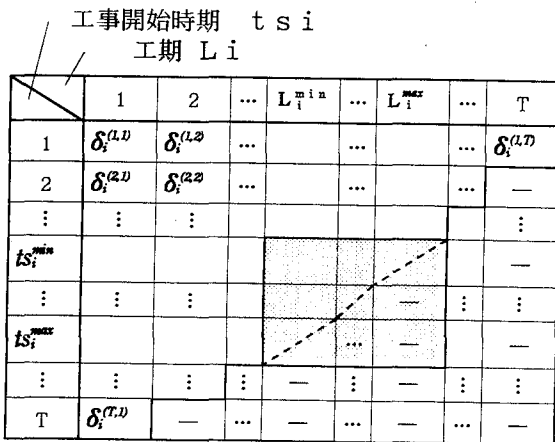
$$\sum_{j=1}^J X_{ij}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y X_{iy}^{t,k} + \sum_{p=1}^P X_{ip}^{t,k} + \sum_{d=1}^D X_{id}^{t,k} = a_i^{t,k} \quad (2)$$

本モデルでは、各工事の開始時期と工期についても変数として扱っており、 $a_i^{t,k}$ は、工事開始時期と工期によって変化することになる。工事開始時期および工期を記述する変数とし、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となる0-1変数 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ とする。工事開始時期と工期に組み合わせ(ts_i, L_i)は、工事が計画対象期間内に終了することを考慮すれば、図-2に示すとおりであり、これらのうち一組のみが1であり、これ以外は0である。このことより次式を得る。

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

$$(T^* = T - ts_i + 1)$$

また、工事開始時期および工期の調整範囲として、最早・最遅開始時期($ts_i^{\min}$ 、 $ts_i^{\max}$)、ならびに最短・最長工期($L_i^{\min}$ 、 $L_i^{\max}$)が与えられている場合には、 $\delta_i^{(ts_i, L_i)}$ が1をとりうる範囲は、図-2の網掛け部分に限定されることになる。



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

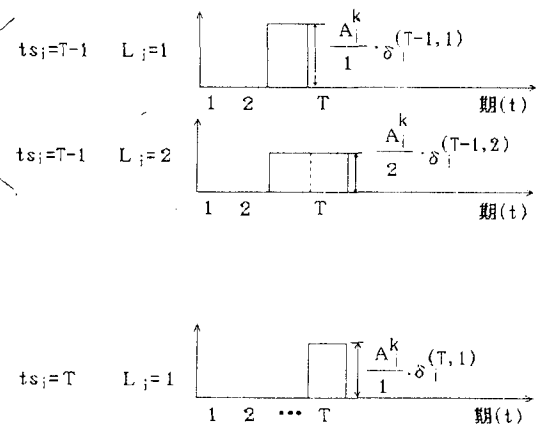
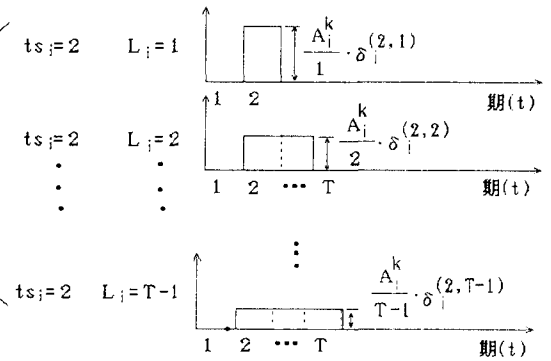
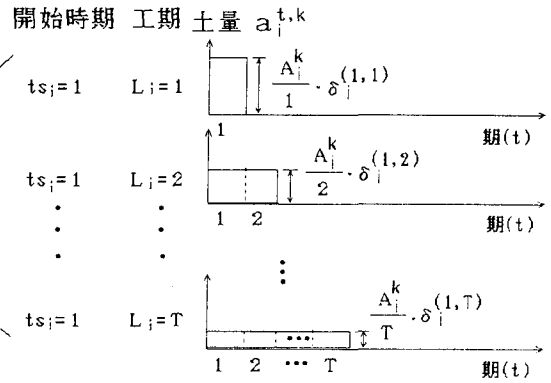


図-3 開始時期・工期別の搬出土量の時間的パターン

これを定式化したものが次式である。

$$\sum_{ts_i=ts_i^{\min}}^{ts_i^{\max}} \sum_{L_i=L_i^{\min}}^{L_i^{\max}} \delta_i^{(ts_i, L_i)} = 1, \quad \delta_i^{(ts_i, L_i)} = 0 \text{ or } 1 \quad (4)$$

次に、上述の変数($\delta_i^{(ts_i, L_i)}$)を用いて搬出量($a_i^{t,k}$)の定式化を行う。図-3は、図-2に示した工事開始時期および工期の組み合わせごとに $a_i^{t,k}$ を示したものである。ここでは、簡便化のために工期(L_i)の全体を通して、均等に土砂が発生するものとしており、各期の搬出量は、総搬出量を A_i^k とすると(A_i^k / L_i)となる。また、図中の工事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一つのみであり、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。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)において合計することにより $a_i^{t,k}$ が求まる。これが(5)式である。

$ts_i \leq t < ts_i + L_i$ のとき

$$a_i^{t,k} = \sum_{ts_i=1}^T \sum_{L_i=1}^{T^*} \frac{A_i^k}{L_i} \cdot \delta_i^{(ts_i, L_i)} \quad (5)$$

($T^* = T - ts_i + 1$)

上記以外 $a_i^{t,k} = 0$

【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。搬入工事に関する制約式を列挙すると以下の通りである。ここで、(6)(7)(8)(9)式は、搬出工事の(2)(3)(4)(5)式に対応している。ただし、(6)式については、搬入工事の場合、必要としている土質(k : 数値の小さいほど良質土)以上のものであれば利用可能であることから、式の左辺が土質 k' ($k' = 1, \dots, k$) について和がとられている。

$$\sum_{k'=1}^k \left(\sum_{j=1}^I X_{ij}^{t,k'} + \sum_{y=1}^Y X_{yp}^{t,k'} + \sum_{p=1}^P X_{pj}^{t,k'} + \sum_{s=1}^S X_{sj}^{t,k'} \right) = b_j^{t,k} \quad (6)$$

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

($T^* = T - ts_j + 1$)

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

$ts_i \leq t < ts_i + L_i$ のとき

$$b_j^{t,k} = \sum_{ts_j=1}^T \sum_{L_j=1}^{T^*} \frac{B_j^k}{L_j} \cdot \delta_j^{(ts_j, L_j)} \quad (9)$$

($T^* = T - ts_j + 1$)

上記以外 $b_j^{t,k} = 0$

【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。

$$Q_y^{t-1,k} + \left(\sum_{i=1}^I X_{iy}^{t,k} + \sum_{p=1}^P X_{py}^{t,k} \right) - \left(\sum_{j=1}^J X_{yj}^{t,k} + \sum_{p=1}^P X_{yp}^{t,k} \right) = Q_y^{t,k} \quad (10)$$

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は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。

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

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。

$$\sum_{j=1}^J X_{pj}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y X_{py}^{t,k} = \sum_{k'=1}^K R_p^{t,k' \rightarrow k} \quad (13)$$

プラントの処理能力制約式は、次式の通りである。

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

【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。

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

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

(3) 計算方法

上述のモデルは、混合0-1型整数線形問題として定式化されている。計算にあたっては、茨木・福島⁵⁾により開発された計算プログラムを用いる。このプログラムは、整数計画問題の解法として一般的な分枝限定法を用いて作成されている。分枝限定法は、整数計画問題を部分問題に分解し、効率よく最適解を探索する方法である。この方法は、完全数え上げ法の一つであるため、大きな問題に対しては計算時間を要するものの、必ず厳密解に到達することが保証されている。

3. 適用事例

(1) 仮想事例の設定

仮想事例に基づいて、a)工事開始時期および工期の調整を行わない場合、b)調整を行った場合の2ケースについてモデルの適用結果を比較することにより、モデルの有効性を明らかにする。

図-4に示すような搬出・搬入工事、土質改良プラント、ストックヤード、採取場・処分場の配置を想定

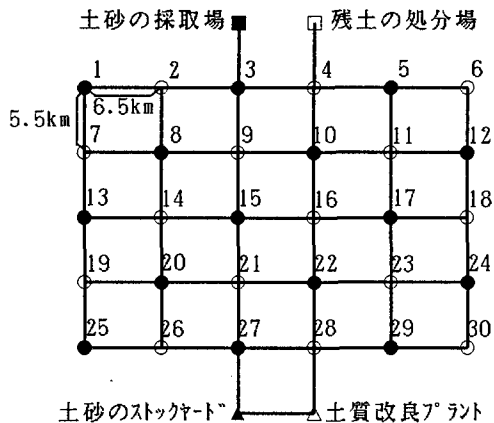


図-4 地域設定

表-3 搬出工事の土量データ

搬出工事				
ノード番号	総搬出量 A_i^t (m³)	土質 k	工事開始時期 ts_i	工期 L_i
1	500	1	2	1
3	1,000	1	3	2
5	700	2	4	2
8	1,200	1	1	3
10	1,200	2	5	2
12	300	1	1	1
13	2,000	2	1	3
15	400	1	3	1
17	700	2	5	2
20	500	1	2	2
22	1,700	2	3	2
24	2,500	1	1	2
25	500	2	2	2
27	800	2	4	3
29	1,200	1	1	3
合計	15,200	-	-	-

表-4 搬入工事の土量データ

搬入工事				
ノード番号	総搬入量 B_j^t (m³)	土質 k (*)	工事開始時期 ts_j	工期 L_j
2	1,000	1	4	2
4	500	1	1	1
6	1,000	1	2	2
7	800	1	2	3
9	300	1	5	1
11	600	1	3	1
14	2,000	1	4	3
16	800	1	5	2
18	1,700	1	5	2
19	200	1	4	1
21	400	1	1	2
23	2,500	1	2	3
26	1,000	1	4	3
28	700	1	4	2
30	1,200	1	4	3
合計	14,700	-	-	-

(*) $k=1$ (良質土), $k=2$ (低質土)

表-5 施設容量・費用および輸送費の設定

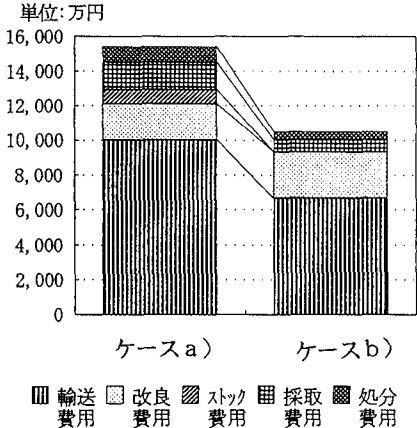
ストックヤード	
容量 Q_p^{max}	5,000 (m³/期)
価格 C_v	1,500(円/m³・期)
土質改良プラント	
最大処理能力 R_p^{max}	1,500 (m³/期)
改良価格 $C_p^{k \rightarrow k}$	5,000 (円/m³)
採取場	
採取可能量 S_s^{max}	14,700 (m³)
採取価格 C_s	4,000 (円/m³)
処分場	
処分場容量 D_d^{max}	15,200 (m³)
処分価格 C_d	2,000 (円/m³)
輸送費 γ	200(円/km・m³)

し、搬出・搬入工事の土量等は表-3および表-4のように与える。計画対象期間(T)は全期間で6期、土質区分(K)は2区分とする。また、各施設の容量・使用価格および残土の輸送価格については、積算資料⁶⁾等をもとに表-5のように設定する。

なお、上述のケースb)における工事開始時期および工期の調整範囲としては、前後あるいは長短1期間の調整のみを認めている。ただし、その調整は工事期間が計画対象期間内となる場合に限られる。

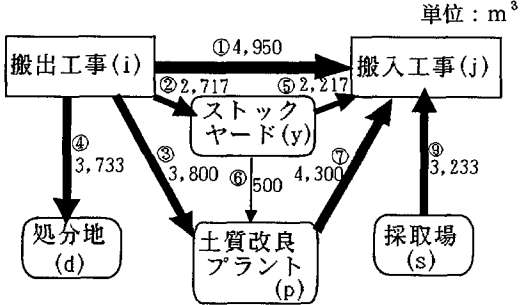
(2) 計算結果

上述の2つのケースについてモデルを用いて計算した。費用については、図-5に示すように、改良費用を除くすべての費用項目が削減された結果として、工事開始時期および工期を調整した場合は、調整しない場合に比べ約0.7倍となった。次に、土量の動きをみると、図-6に示すように、調整を行った場合の残土の再利用量 $12,933\text{m}^3$ (図-6のb)での①③の和)は、調整を行わなかった場合の $11,467\text{m}^3$ (図-6のa)での①②③の和)の約1.13倍になっており、調整によって再利用量が増加したことがわかる。工事間での直接的再利用 (図-6のa)b)での①)のみでみると、調整する場合は約1.5倍に増加している。このような再利用量の増加は、開始時期および工期の調整の結果であり、これを図示したものが図-7である。これをみると、調整が

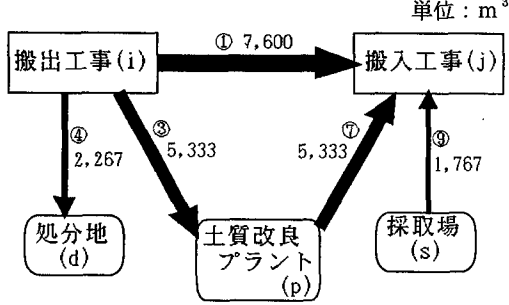


ケースa) 工事開始時期および工期を調整しない場合
 ケースb) 同 上 を調整する場合

図-5 費用

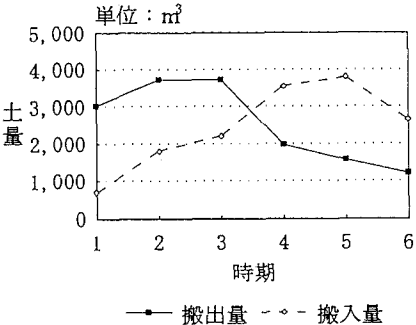


a) 工事開始時期と工期の調整を行わない場合

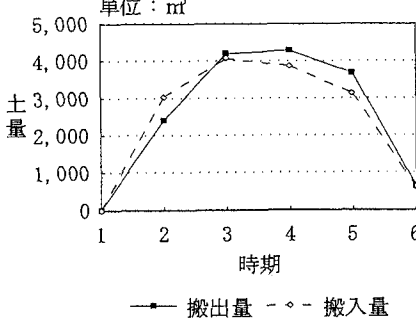


b) 工事開始時期と工期を調整を行う場合

図-6 土砂の輸送量



a) 工事開始時期と工期の調整を行わない場合



b) 工事開始時期と工期の調整を行う場合

図-7 時期別の搬出・搬入量

なされる前には、各期ごとの搬出土量と搬入土量の間に大きな過不足が存在していたが、調整によって、両者がほぼ一致している。

4. おわりに

本論文では、建設残土の再利用を促進させるために、建設工事の工事開始時期および工期の調整を考慮した建設残土輸送計画モデルを提案した。このモデルの特徴は、工事開始時期および工期の調整を行うことにより、再利用の一層の促進を図れること、また、複数の搬出・搬入工事、ストック、土質改良プラント、採取場および処分場を対象とし、多時点での定式化がなされており、極めて一般性の高いことである。

今後の課題としては、現実データへのモデルの適用を行うことであり、その際、膨大な建設工事を同時に扱うことが必要となることから、計算機の記憶容量の不足や計算処理時間の顕著な増大などの問題が予想されるため、新たな効率的な計算処理手法の開発が必要であると考えている。

最後に、本論文は、松尾稔教授(名古屋大学)を主査とする建設発生土再利用のための研究会における研究活動の一部として行ったものであり、研

究会活動を通して、主査の松尾稔教授はもちろんのこと、林良嗣教授(名古屋大学)をはじめとするメンバーの方々より貴重なご意見を賜っている。また、研究発表会等の機会を通じて、春名攻教授(立命館大学)、島崎敏一教授(日本大学)、山本幸司教授(名古屋工業大学)より貴重なコメントを頂いている。以上、ここに記して深謝する次第である。

《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
- 5)茨木俊秀，福島雅夫：FORTRAN77最適化プログラミング，岩波書店，pp395-452，1991
- 6)経済調査会：積算資料，1994.4

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

富田 安夫、寺嶋 大輔

建設工事では多量の土砂が発生し、その処分地の不足や運搬費の増加が大きな問題となっている。一方、土砂を必要とする工事では、土砂採取場の不足などの問題が深刻化している。そのため、これらの工事間で土砂の再利用をすることが強く求められている。また一層の再利用の促進のためには、工事の計画段階において、工事開始時期および工期の調整さえも必要となってきている。本論文においては、工事開始時期および工期の調整を考慮した建設残土輸送計画モデルを混合0-1型整数線形問題として定式化し、仮想データに基づく適用例を通してモデルの有用性を明らかにした。

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

by Yasuo TOMITA, and Daisuke TERASHIMA

Disposing a large quantity of surplus soil, generated by constructions, has become problems of the increase of transportation cost and lacking of disposal sites. On the other hand, supply of soil to some construction sites have also become a serious problem. Therefore the recycle of surplus soil from a construction site to another construction site is necessary. It is necessary to coordinate the starting time and period of constructions in the planning stage. This paper proposes surplus soil transportation model, considering the coordination of starting time and period of constructions with "mixed 0-1 integer linear programming model". The application is then presented by using the hypothetical data.