

建設発生土再利用のための土質改良プラントの規模および配置決定モデル

A Model to Determine Scales and Locations of Soil Improvement Plants for Soil Recycling

富田安夫*, 藤川八潮**

By Yasuo Tomita* and Yashio Fujikawa**

1. はじめに

建設工事間での土砂再利用のための土量配分モデルは、既にいくつか開発されてきている。例えば、見波・嶋津(1988)¹⁾、和田・山本(1993)²⁾、春名・辻井・竹林(1993)³⁾、富田・寺嶋(1996)⁴⁾などを挙げる事ができる。

しかし、これらのモデルは、いずれも土質改良プラント（以下、プラントと略す）の規模および配置は与件とされており、土質改良プラントの建設計画のためのモデルとしては適さない。

本研究では、富田・寺嶋の土量配分モデル⁴⁾を拡張して、プラントの規模および配置決定モデルを開発することを目的とする。

2. 富田、寺嶋モデルの概要

富田・寺嶋の土量配分モデル⁴⁾は、図-1に示す工事間の土砂流用パターンを前提として建設工事間での土量配分を最適化する線形計画モデルである。図-2にモデル式を、表-1に入力変数、表-2に出力変数を示す。

目的関数 ((1)式) は輸送費用 (Z₁)、ストック費用 (Z₂)、土質改良費用 (Z₃)、土砂採取費用 (Z₄)、土砂処分費用 (Z₅) の総和の最小化である。

制約条件は搬出・搬入工事、ストックヤード、土質改良プラントの搬出・搬入土量バランス制約 ((2)~(6)式) と、ストックヤード、土質改良プラント、土砂採取・処分場の容量制約 ((7)~(10)式) である。

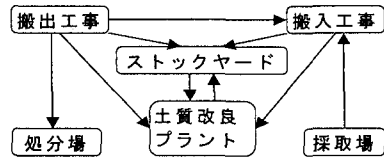


図-1 工事間の土砂の流用

【目的関数】

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

$$Z_1 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ij}^{t,k} + \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K c_{iy} x_{iy}^{t,k} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{k=2}^K c_{ip} x_{ip}^{t,k} \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^I \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K c_{id} x_{id}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{yj} x_{yj}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^P \sum_{k=2}^K c_{yp} x_{yp}^{t,k} \right. \\ \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{pj} x_{pj}^{t,k} + \sum_{p=1}^P \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K c_{py} x_{py}^{t,k} + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{sj} x_{sj}^{t,k} \right)$$

$$Z_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K c_y q_y^{t,k}, \quad Z_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k'=1}^K \sum_{k=1}^K c_p^{k' \rightarrow k} r_p^{t,k' \rightarrow k}$$

$$Z_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_s x_{sj}^{t,k}, \quad Z_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K c_d x_{id}^{t,k}$$

【制約条件】

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

$$\sum_{k'=1}^K \left(\sum_{i=1}^I x_{ij}^{t,k'} + \sum_{y=1}^Y x_{yj}^{t,k'} + \sum_{p=1}^P x_{pj}^{t,k'} + \sum_{s=1}^S x_{sj}^{t,k'} \right) = b_j^{t,k} \quad \dots (3)$$

$$q_y^{t-1,k} + \left(\sum_{i=1}^I x_{iy}^{t,k} + \sum_{p=1}^P x_{py}^{t,k} \right) - \left(\sum_{j=1}^J x_{yj}^{t,k} + \sum_{p=1}^P x_{yp}^{t,k} \right) = q_y^{t,k} \quad \dots (4)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ip}^{t,k'} + \sum_{y=1}^Y x_{yp}^{t,k'} = \sum_{k=1}^K r_p^{t,k' \rightarrow k} \quad \dots (5)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{pj}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y x_{py}^{t,k} = \sum_{k'=1}^K r_p^{t,k' \rightarrow k} \quad \dots (6),$$

$$\sum_{k=1}^K q_y^{t,k} \leq q_y^{\max} \quad \dots (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K r_p^{t,k' \rightarrow k} \leq r_p^{\max} \quad \dots (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{sj}^{t,k} \leq s^{\max} \quad \dots (9), \quad \sum_{i=1}^I \sum_{d=1}^D x_{id}^{t,k} \leq d^{\max} \quad \dots (10)$$

図-2 モデルの定式化

Keywords: 計画手法論, 施工計画管理, 環境計画

*正会員 工博 神戸大学工学部建設学科助教授

(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 TEL 078-803-6014)

**学生会員 神戸大学自然科学研究科建設学専攻

表-1 入力変数

$a_i^{i,k}$	搬出工事 i 、第 t 期、土質 k の土砂の搬出量 (m^3)
$b_j^{i,k}$	搬入工事 j 、第 t 期、土質 k の土砂の搬入量 (m^3)
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 におけるストック価格 (円/ m^3 ・期)
r_p^{max}	土質改良プラント p の容量 (m^3)
$c_p^{k' \rightarrow k}$	土質改良プラント p において、土質 k' から土質 k へ改良する際の改良価格 (円/ m^3)
s_s^{max}	採取場 s の最大採取可能量 (m^3)
c_s	採取場 s における採取土価格 (円/ m^3)
d_d^{max}	処分場 d の最大処分可能量 (m^3)
c_d	処分場 d における処分価格 (円/ m^3)
$c_{\alpha\beta}$	施設 α から施設 β への輸送価格 (円/ m^3) ($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$)
T, K	シミュレーション期間、土質区分数
I, J	搬出工事数、搬入工事数
Y, P	ストックヤード数、土質改良プラント数
S, D	採取場数、処分場数

表-2 出力変数

$x_{\alpha\beta}^{i,k}$	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) ($\alpha, \beta = i, j, y, p, s, d$)
$q_y^{i,k}$	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)
$r_p^{i,k \rightarrow k'}$	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)

3. 土質改良プラントの規模および配置決定モデル

(1) モデルの考え方

本モデルは、富田・寺島モデルに、新たにプラント建設予算制約および採算性制約を追加し、これらの制約条件下で最適なプラント規模および配置を決定するモデルである。本モデルの富田・寺島モデルに対する変更点は以下のとおりである。

①富田・寺島モデルの目的関数をそのまま適用すると、期ごとのプラント利用量のうちの最大値によって、プラント規模が決定されることになる。このような場合には、過剰投資になる恐れがある。そこで、本モデルでは、目的関数に、プラントが遊休状態にあることの機会費用をプラント遊休費用として新たに追加している。

②プラントの規模決定モデルとするため、富田・寺島モデルでは与件とされていたプラント容量(r_p^{max})

を内生変数として扱っている。

③プラント配置の決定にあたって、都市内における利用可能な候補地をすべて列挙しておき、これら

すべてを考慮してモデルを適用する。その結果、プラント容量が正値をもつ候補地への配置が最適配置となる。このように候補地を限定して扱うことは、都市内におけるプラント用地の取得可能性が限られていること考えれば現実的な仮定である。

(2) 目的関数

富田・寺島モデルでは、目的関数にプラント遊休費用は考慮していないが、プラントが稼働していない場合でも、施設が遊休状態にあることによる機会損失を考慮する必要がある。そこで、本モデルでは、これを遊休費用 (Z_6) として新たに定式化した目的関数 (図-2 の(1)式) に追加する。遊休費用は、プラントの処理容量から実際の利用量を差し引いた遊休土量分の総量に、プラント遊休単価 c_p^{loss} を乗じること

によって求めることができる。これを示したものが(11)式である。ここで、(11)式中のプラント遊休単価 c_p^{loss} は、プラントの稼働率 100%を仮定した場合に、プラント建設費を総処理土量で除した値であるものと仮定する。

$$Z_6 = c_p^{loss} \sum_{t=1}^T \left(r_p^{max} - \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^{K'} r_p^{i,k' \rightarrow k} \right) \quad \dots (11)$$

$$c_p^{loss} = H_p(r_p^{max}) / (r_p^{max} \cdot T)$$

ここで

c_p^{loss} : プラント遊休単価

T : シミュレーション期間

K : 土質区分数

r_p^{max} : プラント p の容量

$r_p^{i,k' \rightarrow k}$: t 期におけるプラント p の改良土量

$H_p(r_p^{max})$: プラント p (容量 r_p^{max}) の建設費用

(3) プラント建設予算制約および採算性制約

プラント建設予算制約式は、各プラントの建設費用の総和が、建設予算総額以内となることであり、次式で与えられる。

$$\sum_{p=1}^P H_p(r_p^{max}) \leq H \quad \dots (12)$$

ここで

$H_p(r_p^{\max})$: プラント p (容量 r_p^{\max}) の建設費用

H : 建設予算総額

また、採算性制約式は、プラント経営による純収益がプラント建設費と一致することを表したものでありこれが(13)式である。富田・寺島モデルでは、

土質改良単価 ($c_p^{k' \rightarrow k}$) を与件としていたが、本モデルでは内生変数として扱い、採算性を満たすような土質改良単価が決定されるものと考えている。採算性を満たさないプラントは建設不可能である。

また、採算性を満たさないプラントは建設不可能である。

$$\gamma \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{k'=1}^K \sum_{k=1}^K c_p^{k' \rightarrow k} \cdot r_p^{t, k' \rightarrow k} = H_p(r_p^{\max}) \quad \dots (13)$$

ここで

- γ : 土質改良粗収益に占める純収益比率
- $c_p^{k' \rightarrow k}$: プラント p における土質改良単価
- T : シミュレーション期間
- K : 土質区分数
- r_p^{\max} : プラント p の容量
- $r_p^{t, k' \rightarrow k}$: t 期におけるプラント p の改良土量
- $H_p(r_p^{\max})$: プラント p (容量 r_p^{\max}) の建設費用

(4) 計算方法

(11)式, (13)式は非線形式であり、また、(12)式においても、費用関数 $H_p(\cdot)$ が非線形の場合には非線形制約式となるが、本研究では、変数を順次近似しながら線形問題を繰り返して解く逐次近似解法によって解を求めることとする。

4. 適用例

(1) 条件設定

a) 工事配置と土量

適用例として、図-3に示すような地域を想定した。搬出工事5ヶ所、搬入工事4ヶ所、プラント候補地2ヶ所、ストックヤード1ヶ所、土砂採取・処分場各1ヶ所の地域である。また、各工事における土量を表-3に示す。ここでは、土量はシミュレーション期間にわたって等分に搬出入されるものと仮定する。

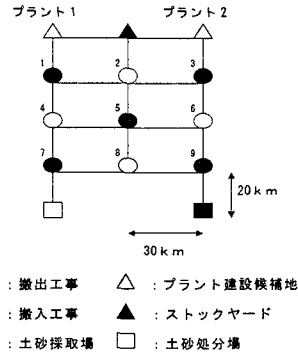


図-3 工事配置

表-3 工事条件

搬出工事		搬入工事	
工事番号	搬出土量	工事番号	搬入土量
1	4,000	2	8,000
3	8,000	4	12,600
5	10,000	6	10,000
7	8,800	8	6,400
9	7,200		

b) 施設条件の設定

各施設の利用料および容量等は表-4に示すとおりである。また、プラント建設費用は、(14)式に示すように容量に比例するもの仮定し、これを用いてプラント建設予算制約式および採算性制約式を表すとそれぞれ(15)式, (16)式のようななる。

表-4 施設利用料/容量および輸送単価

ストックヤード	容量	5,000 (m ³)
	ストック費	1,500 (円/m ³)
土砂採取場	容量	10,000 (m ³)
	採取費	8,000 (円/m ³)
土砂処分場	容量	10,000 (m ³)
	処分費	4,000 (円/m ³)
輸送単価		100 (円/m ³)
土質改良プラント	建設予算	13,000,000 (円)
	純収益率	0.2

[土質改良プラント建設費用]

$$H_p(r_p^{\max}) = 5,000 \times r_p^{\max} \quad \dots (14)$$

[土質改良プラント建設予算制約式]

$$\sum_{p=1}^2 (5,000 \times r_p^{\max}) \leq 13,000,000 \quad \dots (15)$$

[土質改良プラント採算性制約式]

$$0.2 \times \sum_{p=1}^{12} c_p^{2 \rightarrow 1} \cdot r_p^{(2 \rightarrow 1)} = 5,000 \times r_p^{\max} \quad \dots (16)$$

(2) 適用結果

1) プラント遊休費用を考慮しない場合

本モデルは非線形計画問題となるので、これを逐次近似解法により解を求めた。解の収束過程を示したものが図-4～図-6である。図-4は、プラント1および2プラント容量の収束値が正であることを示しており、それぞれの容量のプラントを両地域に配置することが最適であることを意味している。図-5、図-6は、改良土量および改良単価の収束過程を示している。改良単価が減少すれば改良土量が増加するという関係またはその逆の関係が示されており妥当な関係であると言える。

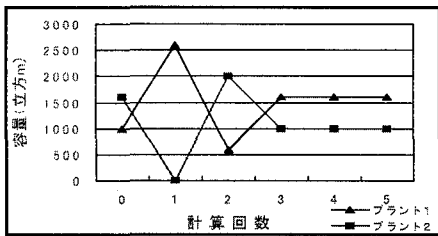


図-4 プラント容量

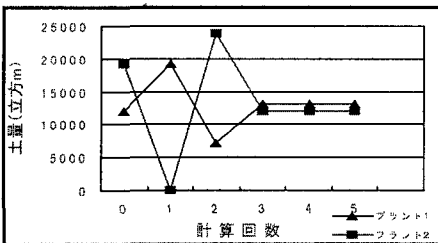


図-5 改良土量

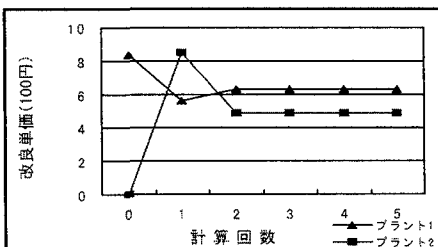


図-6 改良単価

2) プラント遊休費用を考慮した場合

遊休費用を考慮することは、最終的にはプラントの最適規模に影響をもたらすものと考えられる。そこで、ここでは簡便な計算方法として、プラント容量の削減率を外生的に与え、各ケースにおける総費用を算定し最適な容量削減率を近似的に求めることにした。容量削減率は (0.1, 0.2, 0.3) の3ケースを設定した。図-7は容量を削減することによってプラント遊休費用が減少することを示している。しかし、この一方で、これを上回る輸送費用の増加がみられたことから、トータル費用としては、削減率がゼロのときにもっとも費用が最小となった。本ケースにおいては遊休費用を考慮したことの影響は現れなかった。ただし、このような結果は、ケース設定に依存することに留意する必要がある。

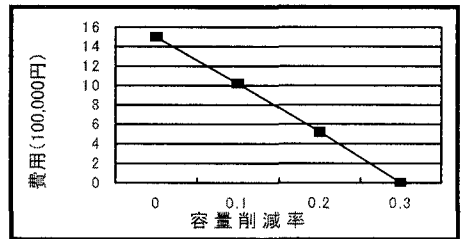


図-7 施設遊休費用

5. おわりに

本研究では、富田・寺島モデル(1996)を拡張することにより、土質改良プラントの規模および配置決定モデルを開発した。その際、プラントの遊休費用、建設予算制約および採算性制約を新たに追加している。モデルの妥当性については、適用例を通して確認できた。

【参考文献】

- 1) 見波潔ほか：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，pp. 65-74，1988
- 2) 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，pp.255-262，1993
- 3) 春名攻，辻井裕，竹林弘晃：ハイブリッド型建設工事行程計画モデルの開発に関する実証的研究，土木計画学研究・論文集，No.9，pp.263-270，1993
- 4) 富田安夫，寺嶋大輔：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，土木計画学研究・論文集，No.13，pp331-337，1996