

建設残土の再利用計画策定モデル*

RECYCLE MODEL OF SURPLUS SOIL PRODUCED BY CONSTRUCTION WORKS*

和田かおる**, 山本幸司***

by Kaoru Wada, Koshi Yamamoto

1. はじめに

都市土木工事の需要拡大に伴い、建設残土の発生量も年々増加の一途をたどっており、大きな社会問題の一つとなっている。そこで残土利用の拡大を図るべく工事現場間での残土の相互利用を進めなければならない¹⁾²⁾。しかしながら、残土利用の際には必要な品質を確保できること、必要な時期に必要な量を供給できることが不可欠である。これらの条件を満たすためには、要求される土質に残土を改良する再処理施設、残土の利用時期を調節するストックヤード（不良土置場、適性土置場）を含めて総合的に残土再利用計画を策定する必要がある。

現在、首都圏をはじめとする大都市圏では建設残土を再利用するためのシステムが構築されつつある。しかしながら、現段階では工事現場からの残土の発生量、発生時期、および埋戻量、埋戻時期に関する情報の収集、提供を行う情報センターとしての機能を有するのみとなっている。そこで本研究では、これらの情報をもとに複数の再処理施設およびストックヤードを含めた建設残土の配分計画を立案するモデルの策定を目的とする。

2. 複数の再処理施設、ストックヤードを設けた残土再利用計画モデル

(1)建設残土の再利用方法

建設残土を埋戻し材として再利用するには上述の通り、品質、時期、量の調整が問題となる。品質については再処理施設で必要な処理を行えばよいが、

* キーワード：計画手法論，施工計画・管理

** 正員 工修 名古屋工業大学 社会開発工学科

*** 正員 工博 名古屋工業大学 社会開発工学科

〒466 名古屋市昭和区御器町

Tel, Fax 052-735-5496

残土が掘削地から埋戻地へ直接輸送されるのではなく、掘削地から再処理施設を経由して埋戻地へ輸送されること、さらに、処理により掘削地からの供給時期と埋戻地での需要時期にズレが生じることに留意する必要がある。そこで本研究では、時期と量の調整については図-1に示すように、工事期間をいくつかの計画期に分割し、各計画期毎に残土計画を考えて行くことにする。

しかしながら、各計画期で掘削量、埋戻量などがバランスしないことも考えられるため、次のように対応する。まず、掘削地から直接供給可能な良質土と再処理施設で土質改良された改良土の総土量が埋戻量を上回る場合には、これらを一時保管するための適性土置場を設ける。一方、1計画期では必要な埋戻量を満たせない埋戻地については、次期計画期以降、優先的に埋戻し材を搬入する。さらに、再処理施設に対しては、その処理能力を超える不良土が発生した場合にこれらを一時保管するための不良土置場を設定する。また土質改良に必要な処理時間は土質状態によって異なるが、本研究ではとりえず1計画期分とする。なお、本研究では総掘削量と総埋戻量はバランスするという仮定のもとで、モデルを作成する。図-2はこのような対応に基づく残土の流れを示したものである。

(2)モデル化の前提条件

残土再利用計画を策定する際には、図-2に示し

計画期	1	2	3		
日程	1	2	3	・	・
掘削地	1				
	2				
埋戻地	M ₁				
	1				
	2				
	N ₁				

図-1 工事期間の分割

た残土の流れに対し、掘削地から埋戻地へ至るまでの時間のズレを考慮してモデル化を行うことになる。ここで問題となるのが、再処理施設での処理時間であり、特に最終計画期（T期）に掘削地から不良土が発生するとT期以降に処理遅れが生じる。モデル化においては、この処理遅れを事前に把握する必要から、次のように計算しておく。ここで、T期に不良土置場へ供給される不良土量を R^T 、再処理施設へ供給される不良土量を S^T 、再処理施設の処理能力をP、処理遅れをLとする。

- ① $S^T = 0$ のとき、 $L = 0$ 。
② $R^T = 0, S^T \neq 0$ のとき、 $L = 1$ 。
③ $R^T > 0$ のとき、

$$R^T = \alpha \cdot P + \beta \tag{1}$$
（ α, β ：処理回数を算定するための整数パラメータ、 $\alpha \geq 0, P > \beta \geq 0$ ）
と表わすと、 $\beta = 0$ のとき、 $L = \alpha + 1$ 。
 $\beta \neq 0$ のとき、 $L = \alpha + 2$ 。

さらに図-2から、再処理施設、不良土置場、適性土置場では残土の搬入、搬出が見られるが、これらは残土供給と残土需要両方の役割を果たしていることがわかる。したがって、これらを供給地および需要地として扱い、i計画期に需要した残土をi+1計画期に供給することにする。以下、掘削地および供給地の役割を果たす場合の再処理施設、ストックヤードをまとめて供給地と呼び、一方、埋戻地および需要地の役割を果たす再処理施設、ストックヤ

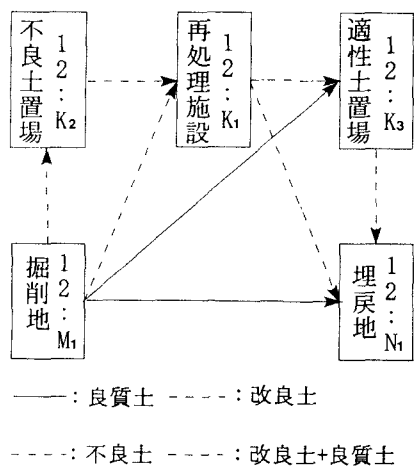


図-2 建設残土の流れ

ードをまとめて需要地と呼ぶことにする。
図-3は図-2に基づいて残土の輸送パターンを示したもので、残土輸送が起り得るパターンは10通りである。ところで、⑧、⑩はそれぞれ不良土や適性土が各計画期で供給過剰となる場合に、輸送されずにそれぞれのストックヤードに1計画期間据え置かれることを意味している。したがって、ここでの輸送単価は0にすればよい。また、これらの輸送パターンの中にも需要時期と供給時期が異なる場合には輸送が起り得ない組合せ要素があるため、モデル化の際にはこれらを除外することでモデル内の変数の数を減少させることができる。なお、図中の計画期は処理遅れを考慮したとき、T+L期で供給が終了するために必要な最終の需要時期あるいは供給時期である。

なおモデル化に際しては目的関数としていくつかの評価基準が考えられるが、本研究では建設残土の総輸送費用および処理費用、保管費用を含めた総運営費用を用いることにする。

(3)残土再利用計画モデル

通常、最適な土量配分計画を求めるためには輸送問題によって定式化することが多く、残土再利用計画においても著者等は輸送問題を適用してきた⁹⁾。ところで、古典的輸送問題の場合、制約条件が等号

		需要地			
		埋戻地 1・・・N ₁	再処理施設 1・・・K ₁	不良土置場 1・・・K ₂	適性土置場 1・・・K ₃
供給地	計画期	1・・・T	1・・・T+L-1	1・・・T+L-2	1・・・T-1
	掘削地 不良土 1 : M ₁	1 : T	1	2	4
	再処理施設 良質土 1 : K ₁	3	5	6	6
	不良土置場 1 : K ₂	2 : T+L-1	7	8	8
	適性土置場 1 : K ₃	2 : T	9	10	10

図-3 残土輸送パターン

のみで構成されているため、需要量、供給量は与件として扱うことになる。しかしながら、再処理施設やストックヤードが複数になると、各計画期での残土量が再処理施設の処理能力や埋戻地での必要量に満たない場合、その能力以下の残土量が割り当てられるが、事前にこれらの量を把握することは不可能である。したがって、古典的輸送問題を適用する場合には、あらかじめ再処理施設およびストックヤードに優先順位を設定し、それに従ってその能力量を割り当てることにより、事前に各計画期の残土量を決定していたことから、モデル上での総運営費最小化は図れたものの、残土再利用計画としては総運営費最小は保証されなかった。

そこで、本研究では各再処理施設およびストックヤードへの供給量を処理能力あるいは保管能力以下に保つという条件を用いることにより、線形計画法によってモデル化を行うことにする。

(目的関数)

$$Z = \sum_{i=1}^{T+L} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (c_{ij} + d_j) \times x_{ij(rk)}^t \rightarrow \min \quad (2)$$

(制約条件)

$$\sum_{j=1}^{N_1} x_{ij(rk)}^t = a_i^t \quad (3)$$

$$\sum_{j=N_1+1}^N x_{i(j)rk}^t \leq P_{rk} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{M_1} x_{ij(rk)}^t = b_j^t \quad (5)$$

$$\sum_{i=M_1+1}^M x_{i(j)rk}^t \leq P_{rk} \quad (6)$$

$$\sum_{j=N_1+1}^N x_{i(j)rk}^{t+1} = \sum_{i=M_1+1}^M x_{i(j)rk}^t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} x_{(ij)rk}^t = S_r^{t-1} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} x_{(ij)rk}^t = S_r^t \quad (9)$$

$$x_{ijrk}^t \geq 0 \quad (10)$$

ここで、

Z : 総輸送費用および処理費用、保管費用を含めた総運営費

i, j : 供給地番号, 需要地番号(計画期単位で計数)

T : 計画期

t : 計画期を示すパラメータ

L : 処理遅れ

M, N : 総供給地数, 総需要地数(ただし, 供給地については良質土, 不良土の両方が発生する掘削地を2ヶ所の掘削地と見なして計数する)

M₁, N₁ : 掘削地数, 埋戻地数(ただし, 掘削地数は上述の通り計数する)

r : 1=再処理施設, 2=不良土置場, 3=適性土置場

k : 再処理施設, 不良土置場, 適性土置場それぞれの番号 (k = 1 ~ K_r)

a_i^t : 供給地 i の t 期における供給量

b_j^t : 需要地 j の t 期における需要量

c_{ij} : 供給地 i から需要地 j への輸送単価

d_j : 処理単価あるいは保管単価

x_{ij(rk)}^t : t 期の供給地 i から需要地 j への運搬量

P_{rk} : 処理能力あるいは保管能力

S_r^t : t 期に処理あるいは保管される残土量

前述のとおり、本モデルでは総運営費の最小化を目的としていることから、目的関数は式(2)のように輸送単価 c_{ij} に処理単価および保管単価を示す d_j を加えることで表現できる。また、制約条件の持つ意味を以下に示す。式(3)、(5)は掘削地、埋戻地で各計画期に供給あるいは需要する残土量を示している。式(4)、(6)は各計画期での各再処理施設、ストックヤードの供給量、需要量の総量が処理能力あるいは保管能力以下となることを示している。なお、ここでは各再処理施設、ストックヤードに変数を対応させるため、式(4)、(6)ではそれぞれ i, j の代りに r, k によって右辺と左辺の対応を行っている。式(7)は t 期に再処理施設、ストックヤードへ供給された残土を t + 1 期にこれらから供給することを示している。ここでも両辺の対応は r, k によって行うことにする。式(7)より、計算上は式(4)あるいは(6)のどちらか一方を制約条件として採用すればよい。式(8)、(9)は各計画期での総処理量あるいは総保管量を示しており、これもどちらか一方の制約条件を採用すればよい。この2式については r によって両辺の対応を行う。ところで、不良土の発生量が再処理施設の処理能力を超える計画期では、式(4)、(6)の r = 1 については等号条件

となり、 $r = 1$ に対する式(8)、(9)は不要となるため、この場合についても制約条件を減らすことができる。

3. モデルに対する適用事例とその考察

(1)適用事例

本章では、第2章で示したモデルを以下に示す仮想事例に対して適用する。

- ・計画期： $T = 3$
- ・再処理施設： $K_1 = 2(P_{11} = 10, P_{12} = 30)$
- ・不良土置場： $K_2 = 2(P_{21} = 30, P_{22} = 50)$
- ・適性土置場： $K_3 = 2(P_{31} = 30, P_{32} = 20)$
- ・掘削地： $3(A_1, A_2, A_3)$
- ・埋戻地： $3(B_1, B_2, B_3)$

各計画期の掘削量、埋戻量および輸送単価、処理・保管単価は図-4の通りである。再処理施設、不良土置場、適性土置場については処理能力あるいは保管能力を記載している。なお、本事例では A_1 からは良質土および不良土が発生するものとし、それぞれを A_{1-1} 、 A_{1-2} としている。また、 A_2 は不良土、 A_3 は良質土のみが発生することとする。ここでは、1～5期で不良土が処理能力以上となるため、制約条件は式(4)もしくは式(6)の等号条件を用いることで、式(8)もしくは式(9)は不要となる。

図-4に関して各計画期ごとの需要地、供給地との対応を考慮して輸送パターンを削除していくと、図-5に輸送単価が記入されているパターンのみが輸送対象となる。したがって、これに対する x_{ij} がモデルにおける決定変数となる。ここで、再処理施設の4～6期から埋戻地の3期に対して輸送単価が記入されているのは、3期に必要量が供給されなかったため、4期以降からも残土が供給され、最終的には6期で埋戻しが完了するケースが生じることを示している。

(2)適用事例の結果

図-5をもとに、目的関数、制約条件を作成し、シンプレックス法^{4),5)}を用いて計算を行うと、目的関数値は3600となり、図-6に示す最適解が得られた。この結果から、埋戻地 B_3 では3期で埋戻しが完了するが、埋戻地 B_1 、 B_2 では残土の処理による

遅れのため4期以降からも供給が続き、最終的には6期で埋戻しが完了することになる。また、再処理施設、不良土置場、適性土置場についてはそれぞれ処理能力あるいは保管能力以下の需給量となっており、輸送問題では対応できなかった‘能力以下’という制約条件が満たされている。

4. おわりに

本研究では、建設残土の再利用に対して需給の時間的なズレや、再処理施設での土質改良による処理遅れを工事期間を分割することで考慮し、その配分計画を線形計画問題として定式化し、シンプレックス法を用いて解くことを試みた。その結果、工事期間の分割によって、掘削地、埋戻地における残土の搬入時期の違いや再処理施設での処理遅れといった時間のズレが考慮可能となった。このような考え方をを用いると動的な問題を線型計画法によって解くことができ、問題が複雑にならず定式化やコンピュータ・プログラム化が容易となった。さらに、従来、土量配分計画で用いられることの多い古典的輸送問題と比較して、線型計画法を適用することで複数の再処理施設を運用する場合に柔軟に対応することができた。しかしながら、今後は以下に示す課題に対応する必要がある。

- ①供給が不足する計画期には山砂等の購入を、供給が過剰の場合には、適性土置場で最終計画期以降も残土を保管することも考慮に入れる。
- ②土質による処理時間の差異を考慮に入れる。
- ③実際の残土処理問題では、計画期 $T = \infty$ という状況にあるため、これに対応する。
- ④計画を評価する際、総運営費用を用いたが、他の評価基準による計画案の策定も検討する。
- ⑤1計画期の期間が計画策定に大きな影響を及ぼすことから、期間長を検討する必要がある。

ここで、①については、山砂等の採取場を供給地と見なし、輸送単価と購入単価の合計値を c_{ij} とすることで対応できる。なお、現在これに対応すべくプログラムを拡張中である。②についても、処理時間を計画期単位で設定可能であれば現モデルで対応可能であると考ええる。③については、 $T = \infty$ の状態でのモデル化は可能であるが、実際にコンピュー

タ・プログラム化して解くことはできない。したがって、ある計画期間で計画を策定し、最終計画期（T期）での掘削地、埋戻地、再処理施設およびストックヤードの状況を再現し、次の計画策定においてそれを第1計画期と見なせば同様に計算できる。このようにして数計画期ごとに順次計画を策定すればよい。④については、今後、別の評価基準を設定すること、さらにその基準を用いてどのようにモデル化を行うかを検討する必要がある。⑤については、モデル化に際しては問題とはならないが、実際の現象を表現するためには、これを考慮することが必要であることから、今後、再処理時間等を調査し検討する予定である。

最終的には、現在各地域で運用されている残土に関する情報の収集・提供を中心とした情報センター

のシステムの中に残土配分計画を組み込み、残土の配分に関しても情報を提供できる総合的なリサイクルシステムの開発が望まれる。

【参考文献】

- 1) 前田正博：東京都における建設残土対策，土木学会誌，vol. 77，pp. 46-49，1992.
- 2) 本多淳裕，山田優：建設副産物・廃棄物のリサイクル，(財)省エネルギーセンター，1994.
- 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，pp. 255-262，1993.
- 4) 吉川和広：最新土木計画学，森北出版，1975.
- 5) 樗木武，渡辺義則：土木計画数学2，森北出版，1984.

建設残土の再利用計画策定モデル

和田かおる，山本幸司

都市土木工事の需要拡大に伴い、建設残土の発生量も年々増加の一途をたどっており、大きな社会問題となっている。そこで残土利用の拡大を図るべく工事現場間での残土の相互利用を進めなければならない。残土を利用する際には、要求される品質を確保するための再処理施設、さらには需給の量および時期を調整するためのストックヤードを含めて総合的に残土再利用計画を策定しなければならない。そこで本研究では、複数の再処理施設およびストックヤードを考慮した残土再利用計画を線型計画法によって定式化し、総運営費を最小とする最適計画案が得られることを明らかにする。

Recycle model of surplus soil produced by construction works

kaoru Wada, Koshi Yamamoto

Recently, the volume of soil surplus has become larger and larger with increase of construction works in urban area, and the disposal of soil surplus becomes a big social problem to be settled. This paper proposes a comprehensive recycle planning model of soil surplus considering time lag among supply, demand and treatment of soil surplus, and makes it clear that an optimal plan to minimize total management cost can be obtained by Linear Programming.