

建設発生土の再利用のための地域コーディネーションシステム

A Regional Coordination System for Recycle Use of Soil between Construction Projects

林 良嗣*・木村 稔**・富田安夫***新実佳朗**・原田健二****
Yoshitsugu HAYASHI*, Minoru KIMURA**, Yasuo TOMITA***, Yoshirou NIIMI**, Kenji HARADA****

ABSTRACT: 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.

This paper proposes a regional coordination model for recycle use of soil between construction projects. Then the application is presented by using the hypothetical data.

KEYWORDS: Recycle use of soil, Linear programming model, Regional planning

1. はじめに

建設工事においては、大量の土砂が採取場より採取され、処分場に処分されている。まさに、多量生産・大量消費・大量処分の典型である。しかし、近年、土砂採取場および処分場の不足や土砂の運搬距離の増大に伴う輸送費の増大が建設工事の実施にあたっての大きな問題となっている。また、自然環境保護の立場からは新たな自然土の採取はできるだけ抑制されるべきであり、海岸埋め立て等は海洋環境の保全からすれば最小限に押さえられるべきである。地球環境負荷の軽減のためにも、土砂の採取・輸送・処分のためのエネルギー消費が削減されることが望ましい。

これらの問題を軽減するためには、土砂を発生する建設工事(搬出工事)と、土砂を必要とする建設工事(搬入工事)間において、建設発生土の再利用を図ることが有効な方策である。建設業が「再生資源の利用の促進に関する法律」(リサイクル法, 1991年)の再利用を促進すべき特定業種に指定されたこともあり、従来に比べれば建設発生土の再利用は促進されつつある。しかしながら、建設省の建設副産物実態調査¹⁾によれば、平成5年度の建設発生土量は4億3,700万 m^3 のうち、再利用された土砂は47%に留まっており、他の建設副産物の再利用率(アスファルト・コンクリート塊78%, コンクリート塊67%)に比べても低く、一層の再利用の促進が求められている。

本研究では、建設発生土の再利用システムの現状と課題を整理し、建設発生土の再利用のための地域コーディネーションシステムの提案を行う。さらに、適用例を通してシステムの有効性について明らかにする。

2. 再利用システムの現状と課題

建設発生土問題に対する建設省の基本的対策^{2) 3)}は、表-1に示すように、土砂の発生量をできるだけ抑制し、発生した建設発生土については工事間で再利用を行い、それでも処分できない建設発生土は、その処分先および再利用先の拡大によって対処することになっている。建設発生土の再利用については、再利用情報システムを整備し、再利用施設としてのストックヤードや土質改良プラントの整備を促進することとされている。

再利用システムの最も簡単な形態として、現在、建設省の各地方建設局が中心となって、建設発生土の情報交換が行われている。定期的に予定公共工事の土砂の搬出・搬入情報を収集し、各事業者はこの情報の中から自分の工事の条件にあった工事を選び出し、建設発生

*名古屋大学工学部地圏環境工学専攻, **中部電力土木建築部, ***神戸大学工学部建設学科,
****不動建設ゾエソシエテ・アソシエテ事業本部

土を再利用している。しかしながら、現段階では、再利用は事業者の自発性に任されており、一層の再利用を図っていくためには、地域全体としての理論的根拠に基づいた最適な再利用計画を立案することが必要であり、そのための地域コーディネーションシステムの開発が求められている。

地域コーディネーションシステムに関する研究は、見波・嶋津⁴⁾、和田・山本^{5) 6)}などの研究がある。見波・嶋津の研究は先駆的であり、工事情報の確定度に着目して、3つのモデル、①確定的な工事情報が与えられた場合のLPモデル、②工事開始時期にあいまいさを含む場合のファジーLPモデル、③工事情報が不確かであるため工事間の調整に大きな負担がかかるような場合のための、最適な工事間の組み合わせのみを決定するモデルを開発している。また、和田・山本は、①建設発生土量に対するあいまいさに着目したファジーLPモデル、②土質改良プラントにおける処理遅れを組み込んだモデルを提案している。

これらの研究に対して、本研究の特徴は、①モデルの目的関数の設定において社会的費用を考慮していること、②多時点、多土質レベルのもとで、複数の建設工事、ストックヤード、土質改良プラント、採取場、処分場を対象とした定式化がなされており比較的一般性が高いこと、また、3)仮想事例をもとに各種の感度分析がなされていることである。

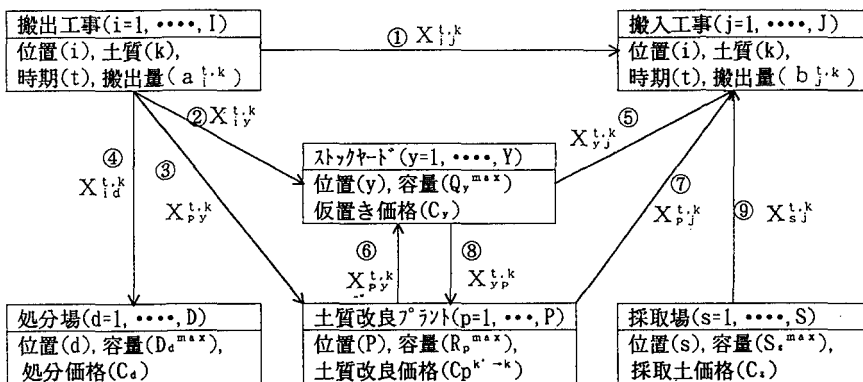
3. 建設発生土の再利用のための地域コーディネーションシステム

3.1 地域コーディネーションシステムとシステム導入効果

地域コーディネーションシステムとは、地域内における土砂を必要とする工事(搬入工事)と、土砂を発生する工事(搬出工事)との間で土砂の再利用を促進するための情報システムである。具体的には、図-1におけるような地域内の土砂の流れに対して、建設工事、ストックヤード、土質改良プラント、土砂採取場・処分場における土砂の入出量制約および容量制約

表-1 建設発生土対策

- 1) 土砂発生量の抑制
 - ① 土砂発生工事の抑制
 - ・土砂発生工事の事前チェック など
 - ② 工事現場内処理の促進
 - ・切盛バランスの促進、・カット量の削減、
 - ・埋戻し利用の促進 など
- 2) 輸送方法および輸送手段の改善
 - ① 効率的な配車計画
 - ② 船舶やベルトコンベア等の利用の検討
- 3) 工事間再利用の促進
 - ① 情報システムの整備
 - ② ストックヤード、土質改良プラントなど再利用施設の整備
- 4) 処分先・再利用先の拡大
 - ① 土砂利用工事の推進
 - ・海面埋立工事、・谷地の埋立工事
 - ・堤防の整備 など
 - ② 建設発生土の新規利用方法の開発
 - ・地盤改良での利用など
 - ③ 広域的輸送による土砂利用の拡大



(備考) $X_{ab}^{t,k}$: t期における各建設工事および施設 (a, b)間の土質(k)の土砂の輸送土量
 I, J, D, S, P, Y : 搬入工事数, 搬出工事数, 処分場数, 採取場数, 土質改良プラント数, ストックヤード数

図-1 地域内における建設発生土の流れとシステムの主な変数

のもとに、建設発生土の工事間の流れを最適化するためのシステムである。このようなシステムの導入によって、表-2のような効果が期待できる。

表-2 システムの導入効果

(直接効果)	(間接効果)
①建設発生土の処分量の削減	①受け入れ地の延命化、海面埋め立て等による環境破壊の軽減
②採取土の購入量の削減	②自然破壊の軽減、森林保全、地球環境保全への寄与
③採取土購入費・処分費・輸送費の軽減	③建設工事費の削減およびこれによる経済効果
④運搬交通量の削減	④交通エネルギー消費の削減、交通混雑の緩和、交通事故の減少、騒音・振動・大気汚染の軽減、地球環境負荷の軽減

3.2 工事間再利用のための条件

土砂の再利用の条件は、再利用の行われる工事間で、土量・土質・時期の3条件が一致することであり、本システム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。

土質については、各搬入工事が必要とされる土質以上であれば再利用が認められるが、満たさない場合には、土質改良プラントによって利用可能な土質以上となれば再利用が可能となる。

時期については、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の再利用は、ストックヤードを介してなされる。再利用されなかった土砂は処分場で処分される。また、再利用の土砂のみでは不足する場合には、採取場からの土砂を用いることになる。

以下において、本システムの目的関数および制約条件の定式化を行っており、その際に用いられる主な変数は図-1の表記に基づいている。

3.3 目的関数

建設発生土の再利用にあたって、社会的にみて最適な再利用を達成するためには、目的関数として、社会的総費用を用いることが必要である⁷⁾。建設工事の土砂調達・運搬・処理に関する主な直接費用としては、①輸送費、②ストック費、③土質改良費、④土砂購入費、⑤土砂処分費を挙げることができ、また、社会的な間接費用としては、①土砂の処分・採取に関わる環境破壊による地域環境および地球環境負荷の費用、②土砂運搬に伴う交通混雑および交通事故による損失費用、③土砂運搬に伴う騒音・振動・大気汚染等による沿道環境低下による費用、④交通エネルギーを消費することによる地球環境負荷の費用などを挙げることができる。ここで、間接費用の厳密な算定は困難であることから、間接費用は直接費用に比例するものとして定式化すると、次式のように定式化できる。

$$\begin{aligned}
 \text{社会的総費用}(Z) &= (\text{土砂調達・運搬・処理に関する直接費用}) \\
 &\quad + (\text{土砂調達・運搬・処理活動の活動に伴う社会的な間接費用}) \\
 &= (1+\alpha) \cdot (\text{直接的輸送費}) + (1+\beta) \cdot (\text{直接的ストック費}) \\
 &\quad + (1+\gamma) \cdot (\text{直接的土質改良費}) + (1+\delta) \cdot (\text{直接的土砂購入費}) \\
 &\quad + (1+\varepsilon) \cdot (\text{直接的土砂処分費}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$: 各費用項目における間接費用比率 (= 間接費用 / 直接費用)

$$\text{輸送費} : Z_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^K \left(\sum_{i=1}^J C_{ij} X_{ij}^{t,k} + \dots + \sum_{s=1}^S C_{sj} X_{sj}^{t,k} \right),$$

$$\text{ストック費} : Z_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K C_y Q_y^{t,k}, \quad \text{土質改良費} : Z_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K C_p^{t,k} R_p^{t,k-k}$$

$$\text{土砂購入費} : Z_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_s X_{sj}^{t,k}, \quad \text{土砂処分費} : Z_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K C_d X_{id}^{t,k}$$

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

(注2) C_{ij} : ij 間の輸送費, $Q_y^{t,k}$: ヤード y における t 期、土質 k の土砂のストック量, $R_p^{t,k-k}$: プラント p において t 期に土質 k' から土質 k に改良された土量 (他の変数は図-1のとおり)

3.4 制約条件

a) 搬出および搬入工事に関する制約

t期における搬出工事(i)の土質kの搬出量($a_{i,k}^t$)は、搬出工事(i)から各施設(β)へ搬出される輸送土量($X_{i,\beta}^t$, $\beta = j, p, y, d$) (図-1の①～④)の合計に等しいことから、(2)式が成立する。また、t期における搬出工事(i)の土質kの搬入量($b_{i,k}^t$)についても同様に、(3)式が成立する。ただし、搬入工事では、必要とされる土質レベル(k:数値の小さいほど良質と仮定)以上であれば利用可能であることから、(3)式の左辺については、土質($k' = 1, \dots, k$)について和がとられている。

$$\sum_{j=1}^J X_{i,j}^t + \sum_{y=1}^Y X_{i,y}^t + \sum_{p=1}^P X_{i,p}^t + \sum_{d=1}^D X_{i,d}^t = a_{i,k}^t \quad (2)$$

$$\sum_{k'=1}^k \left(\sum_{j=1}^J X_{i,j}^t + \sum_{y=1}^Y X_{i,y}^t + \sum_{p=1}^P X_{i,p}^t + \sum_{s=1}^S X_{i,s}^t \right) = b_{i,k}^t \quad (3)$$

b) スtock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)は、(t-1)期のストック量(Q_y^{t-1})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(4)式となる。また、ストックヤードの容量制約は(5)式となる。

$$Q_y^{t-1,k} + \left(\sum_{i=1}^I X_{i,y}^t + \sum_{p=1}^P X_{p,y}^t \right) - \left(\sum_{j=1}^J X_{y,j}^t + \sum_{p=1}^P X_{y,p}^t \right) = Q_y^t \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_y^t \leq Q_y^{\max} \quad (5)$$

c) 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($\sum_{k=1}^K R_{p,k' \rightarrow k}^t$)に等しいことから、(6)式が成立する。

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($\sum_{k'=1}^K R_{p,k' \rightarrow k}^t$)に等しいことから、(7)式が成立する。また、プラントの処理能力制約式を示したものが(8)式である。なお、土質(k)はその値が小さいほど土質レベルが高いものとする。

$$\sum_{i=1}^I X_{i,p}^t + \sum_{y=1}^Y X_{y,p}^t = \sum_{k=1}^K R_{p,k' \rightarrow k}^t \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{p,j}^t + \sum_{y=1}^Y X_{p,y}^t = \sum_{k=1}^K R_{p,k' \rightarrow k}^t \quad (7)$$

$$\sum_{k'=1}^K \sum_{k=1}^K R_{p,k' \rightarrow k}^t \leq R_p^{\max} \quad (k < k') \quad (8)$$

d) 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。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K X_{s,j}^t \leq S_s^{\max} \quad (9)$$

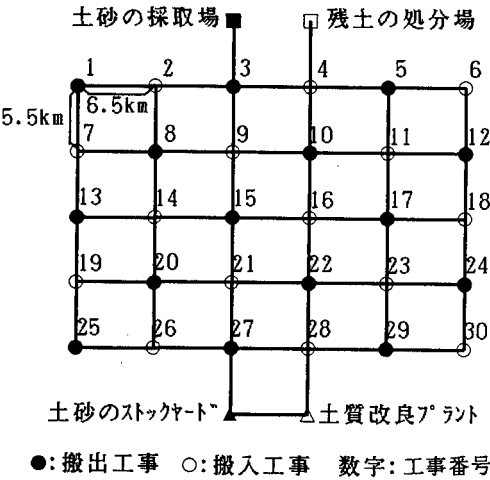
$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K X_{i,d}^t \leq D_d^{\max} \quad (10)$$

4. システムの適用

4.1 適用条件

システムの適用は、搬出工事(15箇所),搬入工事(15箇所),ストックヤード(1箇所),土質改良プラント(1箇所),土砂採取場(1箇所),処分場(1箇所)が、図-2のように位置する地域を想定し、次のような前提条件のもとに行った。

- 1)期間区分は6期間とし、この期間内に工事は開始され終了するものとする。
- 2)土質区分は良質土(k=1)と不良土(k=2)の2区分とし、不良土は土質改良プラントで改良すれば再利用可能とする。



●:搬出工事 ○:搬入工事 数字:工事番号

図-2 地域設定

表-4 施設の利用価格・容量
および輸送費

ストックヤード	
容量 Q_{p}^{***}	5,000 (m ³ /期)
価格 C_y	1,500(円/m ³ ・期)
土質改良プラント	
最大処理能力 R_p^{***}	1,500 (m ³ /期)
改良価格 $C_p^{k \rightarrow k}$	5,000 (円/m ³)
採取場	
採取可能量 S_p^{***}	14,700 (m ³)
採取土価格 C_s	4,000 (円/m ³)
処分場	
容量 D_p^{***}	15,200 (m ³)
処分価格 C_d	2,000 (円/m ³)
単位輸送費	200(円/km・m ³)

表-3 搬出・搬入工事の土量データ

(a)搬出工事

工事番号	総搬出量 (m ³)	土質	工事開始時期(期)	工期(期間)
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	-	-	-

(b)搬入工事

工事番号	総搬入量 (m ³)	土質	工事開始時期(期)	工期(期間)
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	-	-	-

表-5 間接費用比率

項目	比率
輸送費 (α)	0.3
ストック費 (β)	-
土質改良費 (γ)	-
採取費 (δ)	0.2
処分費 (ε)	0.3

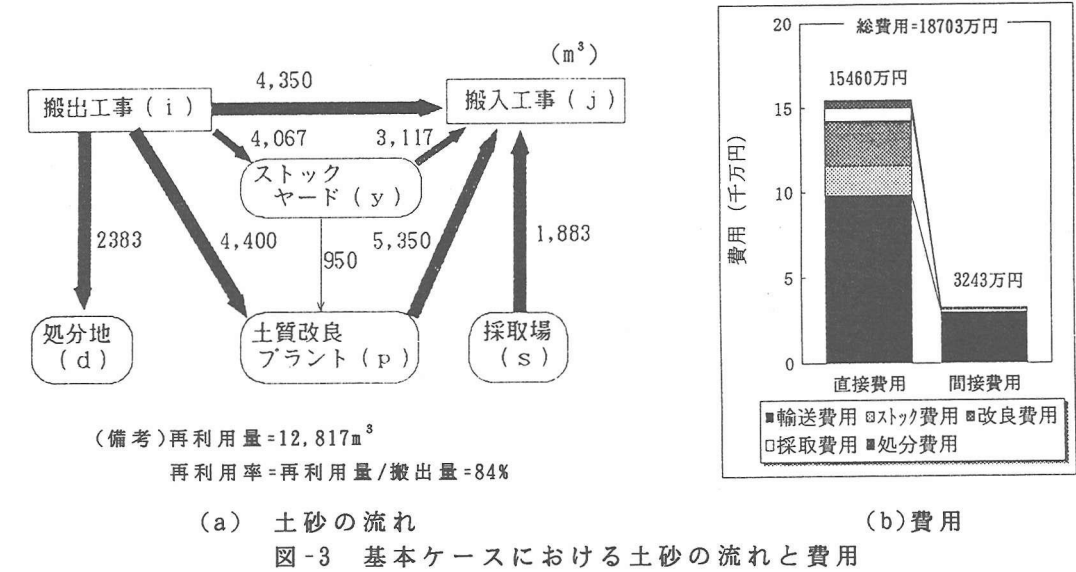
(備考)間接費用比率
=間接費用/直接費用

- 3) 搬出・搬入工事の土量データは、表-3のとおりである。
- 4) スtockヤード、土質改良プラント、土砂採取場、処分場の容量および価格等は、積算資料等をもとに表-4のように設定する。
- 5) 間接費用比率については、表-5のように仮定する。なお、土砂ストックおよび土質改良の間接費用はその他に比べ十分小さいためゼロと仮定する。

4.2 試算結果

(1) 基本ケース

前節の条件に基づいて、試算した結果を基本ケースとする。基本ケースにおける土砂の流れを整理したものが図-3(a)であり、再利用率(=再利用土量/搬出土量)は84%である。また、システムによって最小化された費用は、図-3(b)のとおりである。総費用のうち直接費用が83%、間接費用が17%を占めている。費用項目別にみると、輸送費用の割合が最も高く68%を占めており、次いで、改良費用(14%)、ストック費用(9%)、採取費用(5%)、処分費用(3%)の順である。

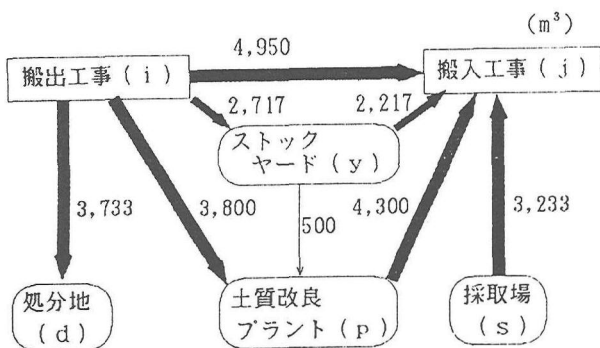


(2) 目的関数の違いによる比較

基本ケースにおける目的関数は、直接費用と間接費用を合わせた社会的費用を用いているが、ここでは、直接費用分のみとした場合についての試算を行い、基本ケースとの比較を行っている。

目的関数を直接費用のみとした場合の試算結果は、図-4のとおりである。基本ケースと比較すると、土砂の再利用量は基本ケースの12,817³から11,467³へと11%減少しており、社会的費用の最適化(基本ケース)の方が、直接費用のみの最適化に比べ、土砂の再利用率が高いことがわかる。

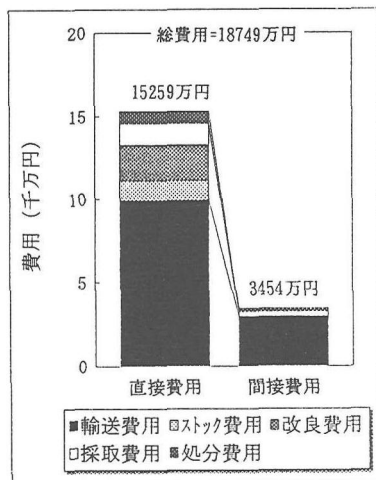
また、費用については、直接費用は基本ケースの15,460万円が15,259万円へと1.4%減少しているが、間接費用は、逆に3,243万円が3,454万円へと6.5%増加しており、後者が前者を上回る結果として全体では18,703万円から18,749万円へとわずかではあるが増加する。目的関数の設定より明らかなことではあるが、直接費用のみの最小化がなされた場合には、間接費用まで含めた社会費用は最適されていない。現状の土砂の流れが主に直接費用の最小化によっているものとすれば、税金等を課すことによって、間接費用の内部化を図ることによって、社会的最適化が達成できることを意味している。



(備考)再利用量=11,467 m^3

再利用率=再利用率/搬出量=75%

(a) 土砂の流れ

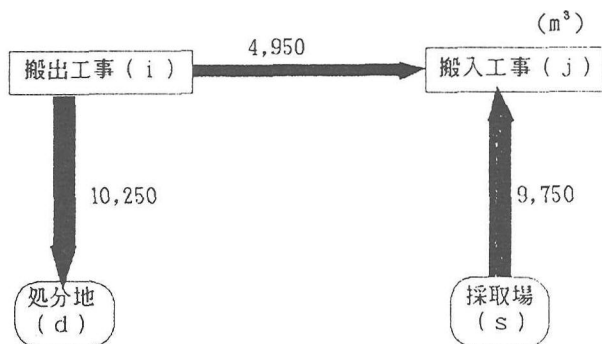


(b) 費用

図-4 目的関数として直接費用のみを用いた場合の土砂の流れと費用

(3) ストックヤードおよび土質改良プラントの有無による比較

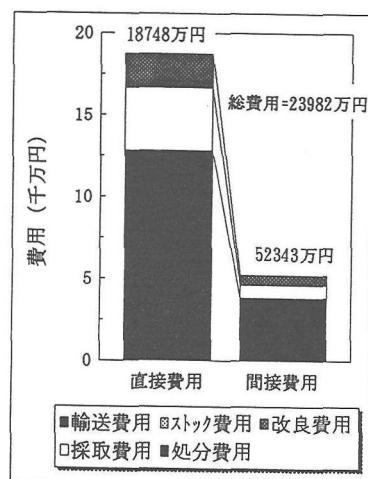
ここでは、ストックヤードおよび土質改良プラントが無かった場合について試算し、基本ケースと比較している。試算した結果、土砂の流れおよび費用は図-5に示すとおりである。基本ケースではストックヤードおよび土質改良プラントを経由して再利用されていた土砂が、すべて処分地へ処分されており、土砂の再利用量は基本ケースの12,817 m^3 から4,950 m^3 へと約0.4倍に減少している。その結果、費用は、18,703万円から23,982万円へと1.3倍に増加している。この差分は、ストックヤードと土質改良プラントの整備効果を意味しており、再利用施設の整備によって社会的総費用の減少がもたらされることを示している。



(備考)再利用率=4,950 m^3

再利用率=再利用率/搬出量=32%

(a) 土砂の流れ



(b) 費用

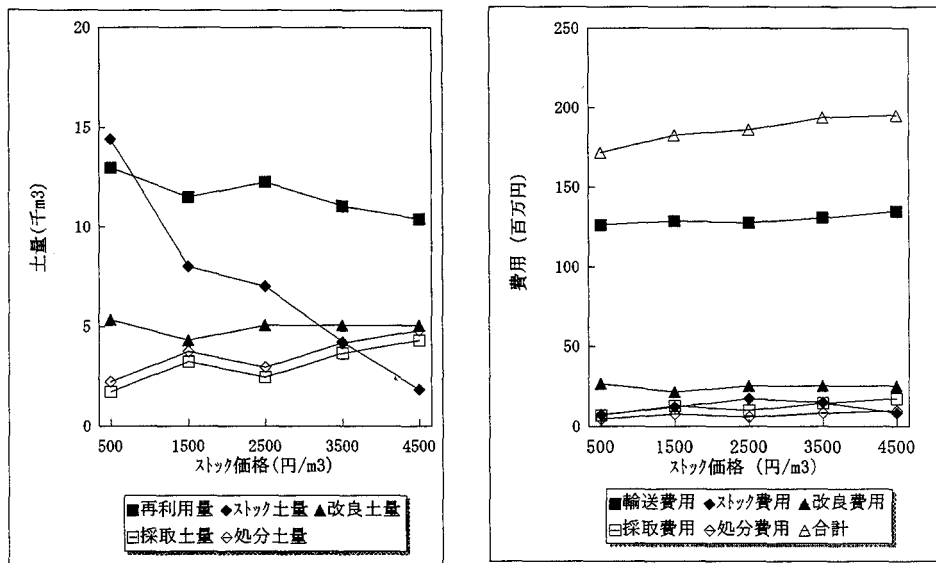
図-5 ストックヤードおよび土質改良プラントが無い場合の土砂の流れと費用

(4) ストック価格に関する感度分析

ここでは、ストック価格(ストックヤードの利用価格)の変化に対する土砂の流れおよび費用の感度分析を行っている。図-6は、ストック価格を500円/㎡から4,500円/㎡まで変化した時の土量および費用の変化を示したものである。

ストック価格の増加はストック土量(ストックヤードの利用土量)を減少させ、土砂の再利用量の減少をもたらす。一方、再利用量の減少は採取土量および処分土量の増加となる。図-6(a)はこの関係を示している。ストック価格の9倍の増加に対して、ストック土量は約1/8となっている。価格が500円/㎡のときのストック土量が再利用量を上回っているが、これは、ストックヤードでは複数期に渡って仮置きされる場合があるので、延べ(㎡・期)の値として土量を算定しているためである。

また、図-6(b)は費用の変化を示したものであり、ストックヤードの価格上昇は総費用、採取費用、処分費用の増加をもたらしている。改良費用については再利用量の減少のため、やや減少している。ストック費用については、2500円/㎡の時に最大値を示している。これは、ストック価格の増加は、費用増加をもたらす一方で、利用量の減少による費用減少をもたらし、その結果、上記価格において最大となったためである。ストック費用はストックヤードの経営からみれば収入であり、上記価格において最大収入が得られることを意味している。



(a) 土量

(b) 費用

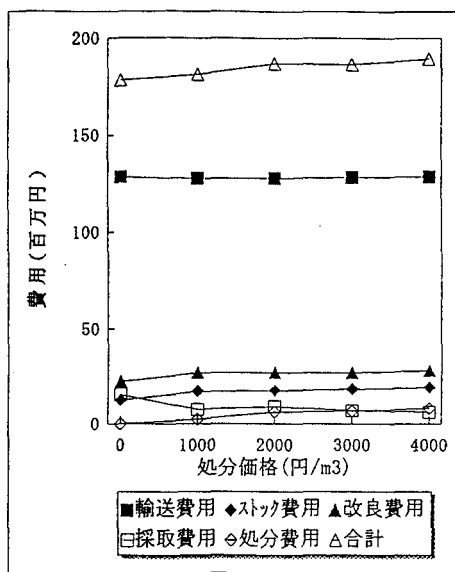
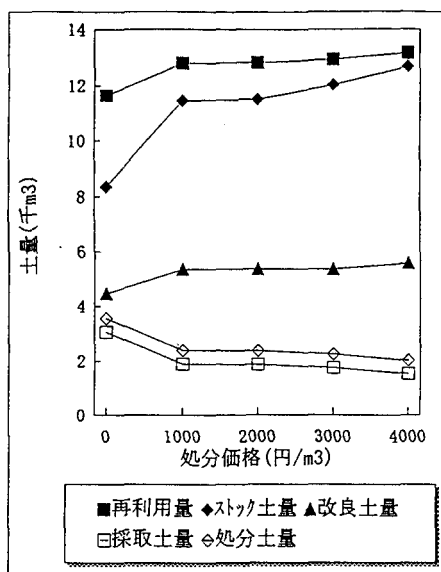
図-6 ストック価格に対する感度分析結果

(5) 処分価格に関する感度分析

ここでは、処分価格の変化に対する土砂の流れおよび費用の感度分析を行っている。図-7は、処分価格を0円/㎡から4,000円/㎡まで変化した時の土量および費用の変化を示したものである。

処分価格の増加は、処分土量を減少させ再利用量, ストック土量, 改良土量を増加させる。また、この影響で採取土量は減少することになる。図-7(a)はこの関係を示している。価格の変化(0円/㎡~4,000円/㎡)によって、処分土量は約1/2に減少している。

また、図-7(b)は費用の変化を示したものであり、土量の変化と対応した変化を示している。処分費用は増加し続けており、上記の処分価格の変化の範囲内では、処分価格の増加による費用増加の方が、処分量の減少による費用減少を上回っていることを意味している。



(a) 土量

(b) 費用

図-7 処分価格に対する感度分析結果

5. おわりに

本研究では、建設発生土の再利用のための課題を整理し、建設発生土の再利用のために有効な地域コーディネーションシステムを提案し、さらに、適用例を通してモデルの有効性および特性を明らかにした。今後は、現実データへのモデル適用が課題であり、社会的な間接費用の厳密な算定や、大規模な数理計画問題を効率的に解くための計算手法の開発が必要であると考えている。

最後に、本論文は、建設発生土類の再利用のための研究会(主査:松尾稔教授(名古屋大学))における研究活動^{8) 9) 10)}の一環として行ったものであり、主査の松尾稔教授をはじめ研究会のメンバーの方々より多くの貴重なご意見を賜っている。ここに記して深謝する次第である。

(参考文献)

- 1)建設省:建設副産物実態調査,1995
- 2)総合的建設残土研究会:総合的建設残土対策に関する報告書,1992
- 3)新藤範義:建設残土処理対策の課題,「建設廃棄物に関する問題」(土木学会関東支部講習会テキスト), pp23-35, 1985
- 4)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
- 5)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
- 6)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
- 7)新沢秀則:環境資源制御システムの理論と応用,環境計画論(末石富太郎,環境計画研究会著)4章,森北出版,1993
- 8)今井一之,片岡賢一,花木道治:建設発生土の現状と問題点,環境システム研究,Vol.24,1996
- 9)本城勇介,小川俊二,永瀬信一建,渡辺浩二:建設発生土類再利用センターの必要性と機能,環境システム研究,Vol.24,1996
- 10)近藤寛道,木村稔,大塚悟,新実佳朗,堤博恭:石炭灰有効利用のための改良材としての土質試験,環境システム研究,Vol.24,1996