

完全情報下における建設工事主体の最適戦略を前提とした 工事間土量配分モデル

A Surplus Soil Transportation Model for the Coordination
between Construction Sites Based on Game Theory

富田安夫^{**}、徳永大輔^{***}

By Yasuo TOMITA and Daisuke TOKUNAGA

1. はじめに

都市内およびその周辺部では、大量の土砂が発生しその処分場の不足や遠隔化が問題となっている。一方で、土砂を必要とする工事においては、採取場の不足や採取土価格の上昇が大きな問題となっている。採取場・処分場の不足は工事の円滑な進捗に支障を及ぼし、また、その遠隔化は、土砂コストの増大、道路混雑の助長、輸送エネルギー消費の増大などの問題をもたらしている。そこで、工事間での土砂流用（再利用）を促進するとともに、その効率的な輸送が求められている。

そのための計画手法として、これまでにいくつかのモデル¹⁾²⁾が開発されてきている。これらのモデルは、都市内の建設工事全体をコーディネートして最適な工事間土量配分量を求めるものではあるが、個別の建設工事からみると、必ずしも最適な輸送計画とはなっていない。このようなモデルは、同一建設会社内で工事間土量配分の最適化を行う場合や、異なる建設会社間であっても工事間提携が成立している場合などには有効なモデルとなりうるが、各建設工事によって独自の意思決定を行っている場合にはあてはまらない。

本研究における工事間土量配分モデルは、各建設工事が完全情報を有しており、かつ、各工事が独自に最適戦略を行った場合における建設工事間の土量配分量を、ゲーム理論³⁾の考え方に基づいて定式化するものである。従来のモデルが建設工事主体全体

のシステム最適化モデルであるのに対して、このモデルは、個別建設主体にとっての最適化モデルである。

2. モデルの考え方および定式化

(1)モデルの考え方

都市圏内における建設工事間の土砂流用は、土砂搬出工事主体（プレーヤー）と土砂搬入工事主体（プレーヤー）による n 人非協力ゲームとして捉えることができる。本モデルでは、完全情報下における各建設工事主体の最適戦略の結果として得られる工事間土量配分量（ナッシュ均衡点）を求めている。この均衡点は、完全情報が与えられた場合に成立する現実的な土量配分である。

ここで、完全情報とは、都市圏内の建設工事に関する情報（すなわち、いつでもどのような土砂が発生したり必要となっているかという情報）を、すべての建設工事主体が有していることである。また、各建設工事主体にとっての最適戦略とは、それぞれの建設工事が、与えられた情報のもとで、自分の工事のみの都合を考えて、土砂の採取・輸送・処分に関わる費用を最小化した結果としての工事間土量配分量である。

建設工事間で土量調整（ゲーム）が行なわれるとした場合の過程を整理したものが図-1である。

まず、各搬出工事について、すべての搬入工事に関する情報を与件として最適な土砂流用土量を求め、同様に、各搬入工事についても、すべての搬出工事に関する情報を与件として最適な土砂流用土量を求める。これらは、搬出工事および搬入工事がそれぞれ勝手に最適な戦略を提示した状態であり、実際に

*: 施工計画・管理、計画情報

** 正会員 工博 神戸大学工学部建設学科

(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 Phone&Fax 078-803-1014)

*** 学生会員 神戸大学自然科学研究科

土砂流用が成立するのは、両者の提示した土量のうちのいずれか少ない土量であり、これが工事間流用均衡土量となる。もし、この均衡土量のすべてがゼロであれば、これ以上繰り返しても最適化は進まないと判断し、土量調整過程は終了する。しかし、ゼロでないものがあれば、各建設工事において、工事間流用されなかった土量（非流用土量）を改めて算定し、この土量をもとに、再度、搬出・搬入工事間で、上記と同様な過程を繰り返すことが、各搬出・搬入工事の費用を低下させることになる。このような繰り返し過程によって得られた土量配分結果をすべて足し合わせたものが、最終的な工事間流用均衡土量である。

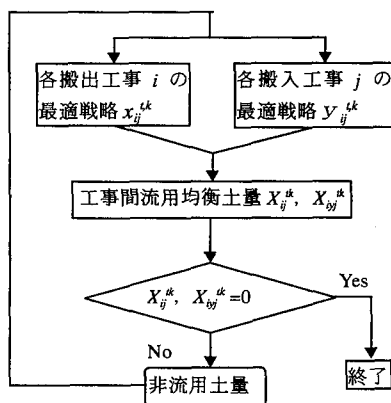


図-1 建設工事間の土量調整過程

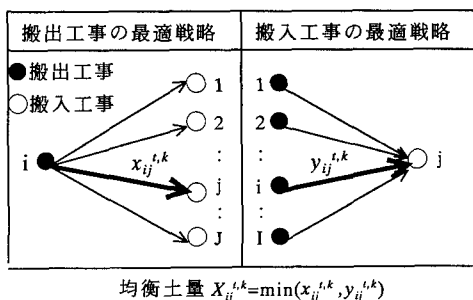


図-2 直接流用の場合の均衡土量

図-2は、搬出工事 i と搬入工事 j との間で土砂が直接流用される場合の土量調整の考え方について模式的に図示したものである。両工事の最適戦略を求めた結果として、搬出工事 i にとっての搬入工事 j への最適な搬出土量は $x_{ij}^{t,k}$ （第 t 期での土質 k の土砂の搬入工事 j への搬出土量）と求め、逆に、

搬入工事 j にとっての搬出工事 i から最適な搬入土量は $y_{ij}^{t,k}$ （第 t 期での土質 k の土砂の搬出工事 i からの搬入土量）として求められ、この両者のうちの小さい方の値が両者の工事間流用土量 $X_{ij}^{t,k}$ になる。このような均衡点は、プレーヤーの最適戦略の結果としての均衡点であることからナッシュ均衡点であると言える。

図-3は、時期調整のためのストックヤード y を介して、 $(t-1)$ 期の搬出工事 i と t 期の搬入工事 j との間で土砂流用がなされる場合の均衡土量の考え方を模式的に示したものである。2 期間に渡って土砂の動きがみられるが、基本的な考え方は、図-2の場合と同様である。

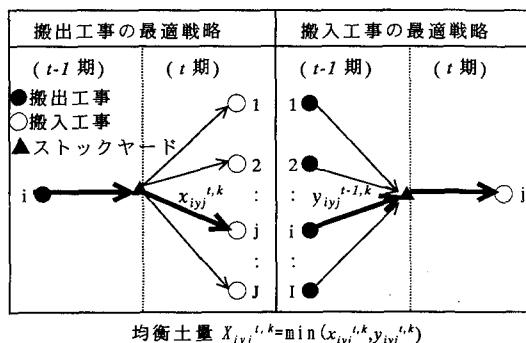


図-3 スtockヤードを介して流用した場合の均衡土量

(2) 搬出・搬入工事の最適戦略の定式化

前節で示した土量調整過程のうち、搬出・搬入工事の最適戦略の求め方については、定式化を必要とする。

(a) 定式化の前提条件

定式化にあたって、搬出工事数 I 、搬入工事数 J 、土砂採取場数 S 、土砂処分場数 D 、ストックヤード数 Y 、期間 T 、土質レベル数 K としている。土質レベルは、その数値が小さいほど便宜上、良質な土砂であるものとする。建設工事間の土砂流用は、時期及び土質が一致したものについて流用可能としており、時期が異なる工事間においてもストックヤードを介して土砂流用をすることが可能である。工事間流用で賄えない場合には、土砂採取場からの採取、あるいは、土砂処分場への処分によって賄われるものとする。

なお、定式化にあたっては、表-1に示す変数を用いる。

表-1 モデル変数の設定

《入力変数》	
$c_{\alpha\beta}$	α, β 間の単位土量あたりの土砂輸送費用
c_y, c_s, c_d	ストックヤード(y)、採取場(s)、処分場(d)における単位土量あたりの取扱費用
$a_i^{t,k}$	搬出工事 i、第 t 期、土質 k の土砂搬出量
$b_j^{t,k}$	搬入工事 j、第 t 期、土質 k の土砂搬入量
δ_1, δ_2	輸送費、ストックヤード費の搬出工事側の負担割合 ($0 \leq \delta_1, \delta_2 \leq 1$)
《決定変数》	
$x_{\alpha\beta}^{t,k}$	搬出工事における第 t 期での土質 k の土砂の工事/施設 (α, β) 間における輸送土量
$y_{\alpha\beta}^{t,k}$	搬入工事における第 t 期での土質 k の土砂の工事/施設 α, β 間における輸送土量
$q_{ly}^{t,k}$	建設工事 $l(l=i, j)$ における第 t 期でのストックヤード y における土質 k の土砂のストック量

(b) 搬出工事の最適戦略

任意の搬出工事 i^* の最適戦略は、搬入工事等の条件が与えられた場合の費用最小化問題（図-4）の解として与えられる。

この目的関数は、図-4の(1)式であり、輸送費用(Z_{i^*1})、ストックヤード費用(Z_{i^*2})、土砂処分費用(Z_{i^*3})の総和の最小化である。ここで、輸送費用に

【目的関数】

$$Z_{i^*} = Z_{i^*1} + Z_{i^*2} + Z_{i^*3} \rightarrow \min \quad \dots (1)$$

$$Z_{i^*1} = \sum_{t=1}^T \left[\delta_1 \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ij}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K c_{iy} x_{iy}^{t,k} + \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K c_{id} x_{id}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \delta_2 c_{yj} x_{yj}^{t,k} \right]$$

$$Z_{i^*2} = \delta_2 \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K c_y q_{iy}^{t,k}, \quad Z_{i^*3} = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K c_d x_{id}^{t,k}$$

【制約条件】

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

$$\sum_{k=1}^K x_{ij}^{t,k} \leq b_j^{t,k} \quad \dots (3)$$

$$q_{iy}^{t-1,k} + x_{iy}^{t,k} - \sum_{j=1}^J x_{ij}^{t,k} = q_{iy}^{t,k} \quad \dots (4)$$

$$(j=1, 2, \dots, J, k=1, 2, \dots, K, y=1, 2, \dots, Y)$$

図-4 搬出工事の最適戦略の定式化

については、工事間流用がなされる場合には、その輸送費用を、搬出・搬入工事のいずれかで負担する必要があることから、その搬出工事による負担割合を δ_1 としている。また、同様に、ストックヤード費用についても、その搬出工事による負担割合を δ_2 としている。

制約条件については、まず、搬出工事 i^* の搬出土量が、搬入工事等 ($\beta=j, y, d$) へ搬出される土量の合計に等しいことから(2)式が成立する。次に、搬出工事 i^* から搬入工事 j へ搬出できる土量は、搬入工事 j が必要とする土量以下であることから(3)式が成り立つ。また、ストックヤード y において第 t 期のストック量は、 $t-1$ 期のストック量に t 期の搬出工事 i^* からの搬入量を加え、搬入工事 j への搬出量を減じたものであることから、(4)式が成り立つ。

(c) 搬入工事の最適戦略

任意の搬入工事 j^* の最適戦略は、前述の搬出工事の場合と同様に、費用最小化問題（図-5）の解として求められる。

この目的関数は、図-5の(5)式であり、輸送費用(Z_{j^*1})、ストックヤード費用(Z_{j^*2})、土砂採取費用

【目的関数】

$$Z_{j^*} = Z_{j^*1} + Z_{j^*2} + Z_{j^*4} \rightarrow \min \quad \dots (5)$$

$$Z_{j^*1} = \sum_{t=1}^T \left[(1-\delta_1) \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K c_{ij} y_{ij}^{t,k} + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K c_{sj} y_{sj}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (1-\delta_1) c_{iy} y_{iy}^{t,k} \right]$$

$$Z_{j^*2} = (1-\delta_2) \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K c_y q_{jy}^{t,k}, \quad Z_{j^*4} = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K c_s y_{sj}^{t,k}$$

【制約条件】

$$\sum_{i=1}^I \left(\sum_{t=1}^T y_{ij}^{t,k} + \sum_{y=1}^Y y_{iy}^{t,k} + \sum_{s=1}^S y_{sj}^{t,k} \right) = b_j^{t,k} \quad \dots (6)$$

$$\sum_{i=1}^I y_{ij}^{t,k} \leq a_i^{t,k} \quad \dots (7)$$

$$q_{jy}^{t-1,k} + \sum_{i=1}^I y_{ij}^{t,k} - y_{jy}^{t,k} = q_{jy}^{t,k} \quad \dots (8)$$

$$(i=1, 2, \dots, I, k=1, 2, \dots, K, y=1, 2, \dots, Y)$$

図-5 搬入工事の最適戦略の定式化

(Z_i^*)の総和の最小化である。ここで、輸送費用、ストックヤード費用については、搬出工事の場合と同様の理由により、搬入工事の負担分のみを負担している。

制約条件についても、搬出工事の場合と同様に定式化できる。ただし、(6)式において、搬入工事では必要土質 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、左辺において土質 $k'(k'=1, \dots, k)$ について和をとっている点が異なる。

3. 計算例

(1) 計算条件

図-6の仮想地域、表-2の土量データおよび費用係数により、モデルを用いた簡単な試算を行なった。なお、この試算では、工事期間、土質条件およびストックヤードは省略したが、モデルにおいては考慮されている。

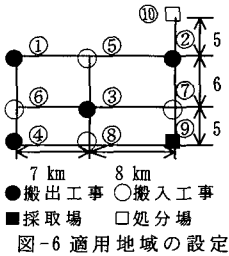


表-2 土量データおよび費用係数

工事番号	総土量(m^3)	採取場費用
搬出 ①	5	$C_s 4,000 (\text{円}/m^3)$
搬出 ②	10	
搬出 ③	12	
搬出 ④	20	
搬入 ⑤	10	$C_d 2,000 (\text{円}/m^3)$
搬入 ⑥	15	
搬入 ⑦	3	
搬入 ⑧	20	

単位輸送費用
 $100 (\text{円}/m^3 \cdot km)$

(2) 計算結果

図-7はモデルによる計算過程を示したものである。まず、各搬出・搬入工事の最適戦略(図-7の表 a), b)) が求められ、両戦略のうちその小さな値が均衡土量として成立する。これを示したものが工事間流用均衡土量(図中の表 c))である。この均衡土量以外の工事間流用の成立しなかった土量を示したものが非流用土量(図中の表 d))である。この非流用土量について、再度、同様な計算過程を繰り返し、均衡土量(図中の表 c))を求めたとき、その値がすべてゼロとなるまで繰り返す。このような計算過程で得られる均衡土量をすべて足し合わせたものが、図-8に示す最終的な工事間流用均衡土量であり、この計算例では3回の繰り返し計算の結果として得られた。

a) 搬出工事の最適戦略(x_{ij})

		⑤	⑥	⑦	⑧	計
搬出工事	①		5			5
	②	7		3		10
	③				12	12
	④		15	5		20

b) 搬入工事の最適戦略(y_{ij})

		⑤	⑥	⑦	⑧	計
搬入工事	①					
	②			3		
	③	10				12
	④		15			8
	計	10	15	3	20	

(2回目の計算へ)

c) 工事間流用均衡土量(X_{ij})

d) 非流用土量

		⑤	⑥	⑦	⑧	計
搬出工事	①	5				5
	②	7		3		10
	③	0			12	12
	④	0				0
搬入工事	⑤					0
	⑥					0
	⑦					0
	⑧					3

		⑤	⑥	⑦	⑧	計
搬出工事	①					0
	②			3		3
	③				12	12
	④		15	5		20
	計	0	15	3	17	15

図-7 計算過程(繰り返し1回目)

		⑤	⑥	⑦	⑧	計
搬出工事	①	5				5
	②	5		3	2	10
	③				12	12
	④		15	5		20
処分場					1	1
計		10	15	3	20	48

図-8 工事間流用均衡土量

4. 終わりに

本研究では、完全情報下において、各建設工事主体が独自に土砂流用戦略を行なった場合に生ずる建設工事間の土量配分を推計するモデルを提案した。このモデルは、現実における土砂の流れを分析するためのひとつの方法として有効であると考えられる。

本モデルで得られる各建設工事主体ごとの個別最適化の状態は、適切な便益分配を行なうことによって、建設工事全体としてのシステム最適化の状態へと誘導することが社会的には望ましいと考えており、今後は、そのような便益配分方法として、協力ゲームの理論を応用した方法を提案する予定である。

【参考文献】

- 1) 和田・山本: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, 1993.
- 2) 富田,寺嶋: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, 1996
- 3) 鈴木:新ゲーム理論,勁草書房 1994