

工事開始時期・工期・土量の不確実性を考慮した建設発生土の工事間土量配分モデル
A Surplus Soil Coordination Model between Construction Sites Having Uncertainties
Related to Construction Commencing Time, Duration and Soil Volume

富田 安夫^{**}, 徳永 大輔^{***}

By Yasuo Tomita and Daisuke Tokunaga

1. はじめに

都市圏内の建設工事では、土砂採取場・処分場の不足やこれに起因した輸送距離・輸送費の増加が問題となっており、建設省が中心となって工事間の土砂流用の促進が進められており、今後とも一層の進展が求められている。

工事間土砂流用計画を効率的に立案するための手法として、いくつかの工事間土量配分モデルが開発されてきている。これまでは、建設工事の開始時期・工期・土量を操作可能な変数と考え、これを最適化するためのモデルが多く開発されてきている。例えば、見波・嶋津(1988)¹⁾、和田・山本(1991)²⁾はファジーLPを用いたモデルを、春名・辻井・竹林(1993)³⁾は工事開始時期・工事速度を制約条件とした非線型計画モデルを、富田・寺島(1996)⁴⁾は0-1型混合整数計画法を用いたモデルを提案している。

しかしながら、工事開始時期、工期、土量は必然的に不確実性を伴っており、予め工事開始時期が設定されていても変更される可能性があり、工期についても同様である。また、土量についても、事前に予定した土質の土砂がどれだけ得られるかは不確実性を伴っている。このような不確実性を考慮したモデルは数少ないが、例えば、見波・嶋津(1988)¹⁾を挙げることができる。このモデルは工事開始時期の不確実性を扱っており、割り当て問題として定式化している。本研究では、このモデルを、工事開始時期に加えて、工期・土量の不確実性をも含めたモデルへと拡張している。

2. モデルの考え方および定式化

(1) モデルの概要

工事間土量配分モデルとは、図-1に示すような建設工事間の土砂費用(運搬・採取・処分)を最小化する工事間土量配分を決定するためのモデルである。本モデルでは、工事開始時期・工期・土量のすべてについて不確実性を考慮しており、最小化すべき費用は期待費用として与えられる。

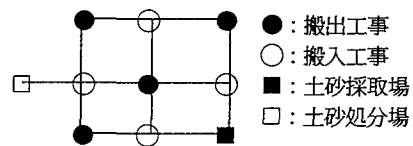


図-1 対象地域の設定例

(2) モデルの前提条件

モデル化にあたっての前提条件は以下のとおりである。

- ① 全期間を通して2つの工事間においてのみ土砂流用を認める。
- ② 地域全体の土砂流用費用(輸送費、処分費、採取費)の期待値の最小化する。
- ③ 工事開始時期、工期、土量に関する不確実性をそれぞれについて離散的な確率として与える。
- ④ 土質改良プラント、ストックヤードは考慮しない。
- ⑤ 計画対象期間をT期に分割する。
- ⑥ 工事期間内の土量は、便宜上、一定とする。

(3) モデルの定式化

(a) 割り当て問題としてのモデルの定式化

本モデルでは、土砂流用は2工事間でしか認めな

* キーワード 施工計画・管理、システム分析

** 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/fax 078-803-6014)

*** 正会員 西松建設(株)

いので、任意の搬出工事 (i) と搬入工事 (j) が与えられれば、その土砂流用費用を決定することができる。図-2において、斜線部分の土量については工事間流用がなされ、その他の部分の土砂は、採取あるいは処分されることになる。これらの費用の合計が C_{ij} である。この費用は、本モデルにおいては、工事開始時期・工期・土量の不確実性を考慮して決定されることになるので、期待費用として求められる。

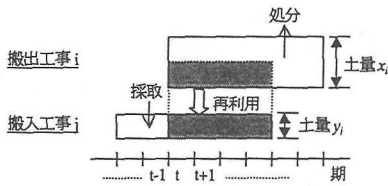


図-2 工事間の土砂流用の考え方

工事間の期待費用 C_{ij} を用いれば、総期待費用を最小化するモデルとして、次式のように定式化することができる。(1)式は期待費用を、(2)式は2つの工事間でのみ土砂流用を認めることを表している。このように定式化されたモデルは割り当て問題であり、総期待費用を最小化する最適な工事の組み合わせを求める問題である。

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} \cdot \delta_{ij} \rightarrow \min \quad \dots (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^I \delta_{ij} = 1, \quad \sum_{j=1}^J \delta_{ij} = 1, \quad \delta_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \dots (2)$$

ここで、 C_{ij} : 搬出工事 i と搬入工事 j との間で流用を行う場合の期待費用、 Z : 総費用の期待値 (目的関数)、 δ_{ij} : 搬出工事 i と搬入工事 j との間で流用を行うとき 1 そうでないとき 0 とする変数

以下では、不確実性下における工事の発生土量およびその発生確率を定式化した後、図-2の考え方に基いて期待費用 C_{ij} を定式化している。

(b) 期あたりの発生土量

ある工事の開始時期を第 s 期、工期を n 期とする。この工事の開始時期が S 期遅れる可能性があるとし、その遅れる確率を $P_s(S)$ とする。また、土量の発生量が当初の予定より $V\%$ 増減する可能性があるものとして、その確率を $P_N(V)$ とする。さらに、当初の予定の工期を n 期とし、この工事の工期が N

期間長くなる可能性がありその確率を $P_N(N)$ とする。

このときの工事に伴う土砂搬出 (搬入) 総量を X とすると 1 期当たりの平均土量 x^{VN} は次式となる。

$$x^{VN} = VX / (n + N) \quad \dots (3)$$

(c) 期ごとの土量発生確率

工事開始時期については、発生土量には影響を及ぼさないが、各期における土砂の発生確率に影響を及ぼす。

工事開始時期が第 s 期、工期が $n+N$ 期の工事について、開始時期が最大 S 期遅れる可能性があるとき、各期 t の土量は、土量が x^{VN} となるか、あるいは、土量が 0 となるかのいずれかであり、その確率を $q'(x^{VN})$ 及び $q'(0)$ とする。

図-3 は開始時期別 (時期の遅れ別) に、土量の発生状況を示したものである。例えば、ある工事の第 $s+2$ 期での確率 $q^{s+2}(x^{VN})$ は、その期で工事が行われる確率 (図の網掛け部分) を合計したものであり、 $q^{s+2}(x^{VN}) = P_s(0) + P_s(1) + P_s(2)$ となる。

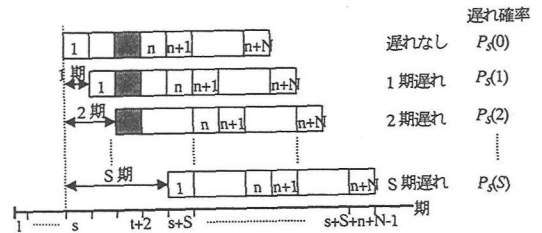


図-3 工事開始時期の遅れ別の土量発生状況

これを、一般的に表したものが (4) 式であり、土量が 0 である確率は (5) 式となる。

$$q'(x^{VN}) = \sum_{S=t-(s+n+N)+1}^{t-s} P_s(S) \quad \dots (4)$$

$$q'(0) = 1 - q'(x^{VN}) \quad \dots (5)$$

(d) 期待費用 C_{ij}

以上により、任意の工事 (i) について、期ごとの発生土量とその発生確率が求められたことになる。これらを用いれば、搬出工事 (i)、搬入工事 (j) の期待費用 C_{ij} を定式化できる。

2 工事間の土砂の流れは、図-2 (前出) に示したように、①搬出量 x_i^{VN} 、搬入量 y_j^{VN} 間での再利用、②搬出量 x_i^{VN} 搬、搬入量 0 の結果としてすべて処分、③搬出量 0、搬入量 y_j^{VN} の結果としてすべて採取、

の3通り考えられる。例えば、「搬出土量 $x_i^{VN} > \text{搬入土量 } y_j^{VN}$ 」の場合（図-2）について、これらのケースごとの費用およびその費用の生じる確率を掛け合わせて合計したものが（6）式である。式中の〔 〕内の第1項はケース①、第2項はケース②、第3項はケース③の費用を表している。また、「搬出土量 $x_i^{VN} < \text{搬入土量 } y_j^{VN}$ 」の場合についても同様に定式化できる。

$$C_{ij} = \sum_{Vi} \sum_{Ni} \sum_{Vi} \sum_{Vj} \sum_{i=1}^T \left[\left\{ y_j^{VN} U_{ij} + (x_i^{VN} - y_j^{VN}) (U_{id} + D_d) \right\} \right. \\ \times q_i^t(x_i^{VN}) q_j^t(y_j^{VN}) + x_i^{VN} (U_{id} + D_d) q_i^t(x_i^{VN}) q_j^t(0) \\ \left. + y_j^{VN} (U_{bj} + B_b) q_i^t(0) q_j^t(y_j^{VN}) \right] \times P_V(V) P_N(N) P_V(V) P_N(N) \\ \dots (6)$$

ここで、 U_{ij} : i, j 間の単位土量あたり輸送価格（円/㎡³）、 D_d : 処分場 d における単位土量当たりの土砂の処分価格（円/㎡³）、 B_b : 採取場 b における単位土量当たりの土砂の購入価格（円/㎡³）。

3. 適用例

（1）前提条件

①建設工事

搬出工事 24 箇所、搬入工事 24 箇所、土砂採取場 2 箇所、土砂処分場 2 箇所を設定した。各建設工事の土量・土質・工事開始時期については、その一部を表-1 に示す。搬出・搬入工事の総土量は、2.81 万 ㎡³、2.55 万 ㎡³である。

③施設利用料/容量および輸送価格

表-2 のように設定した。

④工事開始時期・工期・土量の不確実性の設定

工事開始時期・工期・土量の不確実性については、図-4 に示すような、不確実性のない場合（ケース1）、小さい場合（ケース2）、大きい場合（ケース3）の3ケースを設定した。

表-1 建設工事の条件

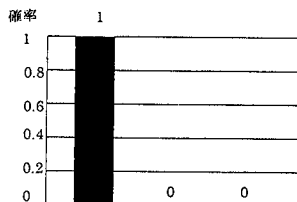
a) 搬出工事

工事 No.	搬出工事		
	土量 (㎡ ³)	開始 時期	工期
1	500	2	1
2	1000	3	4
3	2500	2	5
...	...	...	...
23	1600	2	4
24	1200	1	3
合計	28100		

b) 搬入工事

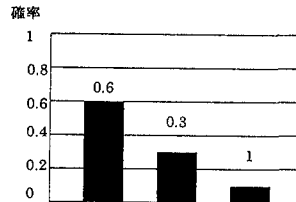
工事 No.	搬入工事		
	土量 (㎡ ³)	開始 時期	工期
1	1200	3	3
2	800	2	2
3	1000	5	2
...	...	...	...
23	600	4	2
24	800	3	4
合計	25500		

a) ケース1（不確実性・無し）



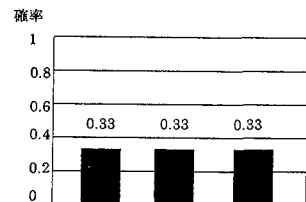
a) 土量 1.0 倍 1.05 倍 1.10 倍
b) 開始時期 0 期 1 期 2 期遅れ
c) 工期 0 期 1 期 2 期延長

b) ケース2（不確実性・小）



a) 土量 1.0 倍 1.05 倍 1.10 倍
b) 開始時期 0 期 1 期 2 期遅れ
c) 工期 0 期 1 期 2 期延長

c) ケース3（不確実性・大）



a) 土量 1.0 倍 1.05 倍 1.10 倍
b) 開始時期 0 期 1 期 2 期遅れ
c) 工期 0 期 1 期 2 期延長

図-4 工事開始時期・工期・土量の不確実性の設定

表-2 施設利用料/容量および輸送価格

土砂採取場	容量	10,000 (m ³)
	採取費	4,000 (円/m ³)
土砂処分場	容量	10,000 (m ³)
	処分費	2,000 (円/m ³)
輸送費		100 (円/m ³)

(2) 適用結果

図-5は、ケース2、3における最適な工事間組み合わせを示している。図中の実線の矢印は、ケース2、3においてケース1と比較して、変化した組み合わせであり、破線の矢印は変化しなかったものを示している。

図-6はケース別の土量（採取・流用・処分）を比較したものである。不確実性の増大は、工事間流用土量の減少をもたらし、その一方で、採取および処分土量を増大させている。図-7はケース別の費用（輸送費・採取費・処分費）を比較したものである。不確実性の増大は、採取費用・処分費用を増大させ、その結果、総費用が増大していることがわかる。ケース3はケース1の1.32倍の費用を必要としている。不確実性の増大は、費用増加をもたらした。

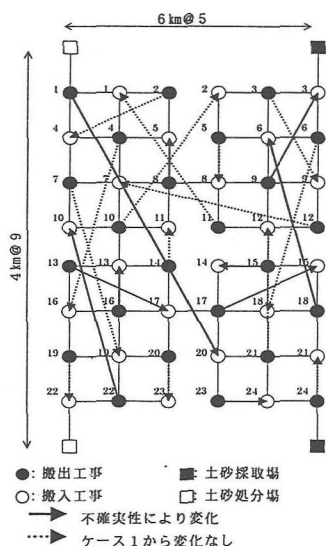


図-5 建設工事の最適組み合わせ

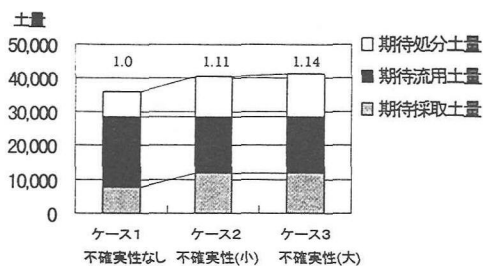


図-6 ケース別の土量比較

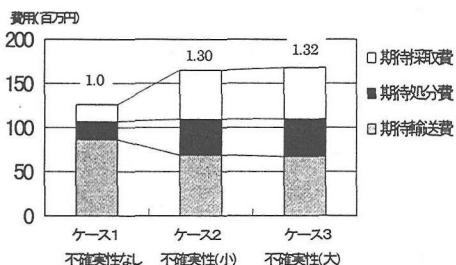


図-7 ケース別の費用比較

4. おわりに

工事開始時期・工期・土量の不確実性を考慮した建設発生土の工事間土量配分モデルを提案し、適用例を通してモデルの適用可能性を示した。このモデルによって、不確実性下におけるモデルの適用性を高めることができたと言える。

なお、モデルの適用精度を高めるためには、建設工事の不確実性自体の評価が問題となるが、その評価方法については今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 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, pp.65-74, 1988
- 2) 和田かおる・山本幸司:切盛土量にあまいさを含み土工計画へのファジー理論の適用, 土木計画学研究・論文集, No.9, pp.189-196, 1991
- 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.11, 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, 1996