

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 with 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・輸送費の増大が問題となっており、建設省^{1),2)}が中心となって工事現場間（以後、工事間と略す。）の土砂流用が進められており、今後一層の促進が求められている。

工事間土砂流用計画を立案するための手法として、これまでに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。これらのうち、建設工事の開発時期・工期・土量を操作可能な変数として扱っているモデルとしては、例えば、和田・山本(1991)³⁾によるファジーLPを用いたモデル、春名・辻井・竹林(1993)⁴⁾による工事開始時期・工事速度を制約条件とした非線型計画モデル、富田・寺嶋(1996)⁵⁾による0-1型混合整数計画法を用いたモデルなどが提案されている。

しかしながら、建設省土木研究所の調査⁶⁾によれば、事前調査に基づいて工事間土砂流用計画を立案する場合には、工事開始時期、工期、土量に関する情報には不確実性が伴っていることが報告されている。この不確実性の程度によっては、この影響を無視することができない場合がある。ところが、このような不確実性による影響を考慮したモデルの開発はほとんどなされておらず、見波・嶋津(1988)⁷⁾を挙げることができる程度である。このモデルでは、工事開始時期の不確実性は考慮されているものの、工期や土量の不確実性については扱われておらず、やや一般性に欠ける。

本研究では、見波・嶋津のモデルを拡張することによって、工事開始時期・工期・土量についての不確実性を対象とした一般的なモデルの開発を目的とする。

2. モデルの考え方及び定式化

(1) モデルの考え方および前提条件

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（輸送費・処分費・採取費）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。

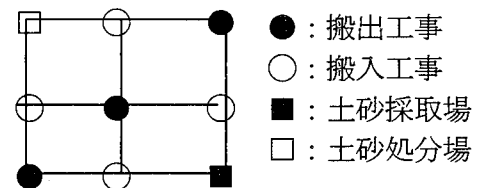


図-1 対象地域の設定例

工事間土砂流用のためには、情報収集、計画立案、事前調整などのための一定期間（半年～1年程度）が必要であることから、計画立案段階における工事情報（工事開始時期、工期、土量）には不確実性が伴うものと考えられる。このことは前述のとおり建設省土木研究所の調査⁶⁾によっても確認されている。

また、工事開始時期が近づいた段階における計画の変更は、他の工事への連鎖的な変更をもたらす可能性のあることや、工事間の調整には当事者間による調整期間が必要であることから、工事開始が近づいた段階での変更にはいくらかの困難性を伴うものと考えられ、工事情報の不確実性については、これを完全に回避することは困難であると考えられる。

本モデルでは、このような状況を前提として、工事開始の一定期間（半年～1年程度）前に、不確実性を伴った工事情報に基づいて、合理的な工事間土量配分計画を立案するためのモデルを提案するものである。

モデル化にあたっては、さらに、以下の前提をおいている。

- ① 不確実性を考慮した場合における土砂費用（輸送費・処分費・採取費）の期待値の最小化を目的関数とする。
- ② 土砂流用にあたっては一定の調整期間が必要で

Keywords: 施工計画・管理, 計画情報, 建設発生土

*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)

**正会員 工修 西松建設(株)

あり直前の変更は困難であるものと仮定し、2つの工事間においてのみ土砂流用を認める。

- ③ 簡便化のため、工事開始時期、工期、土量に関する不確実性について、それぞれを離散的な確率として与える。
- ④ 簡便化のため、土質改良プラント、ストックヤードは考慮しない。
- ⑤ 便宜上、搬出あるいは搬入土量は工事期間を通じて一定とする。

(2) 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

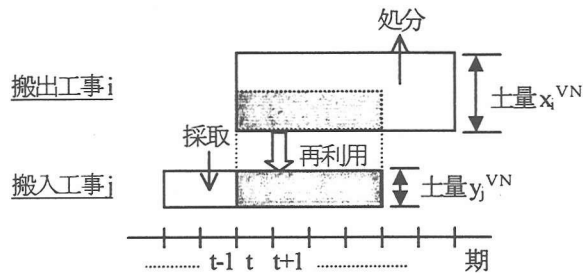


図-2 工事間の土砂流用の考え方

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。

この期待費用 C_{ij} を用いれば、総期待費用を最小化するモデルは、(1)式を目的関数とし、(2)式を制約条件とする割り当て問題として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。

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

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

ここで、

C_{ij} : 搬出・搬入工事 i, j 間で流用を行なう場合の期待費用

Z : 総費用の期待値

δ_{ij} : 搬出・搬入工事 i, j 間で流用を行うとき 1, それ以外のとき 0 であるダミー変数

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、期待費用 C_{ij} を定式化する。

(b) 期あたりの発生土量

ある建設工事について、その開始時期を s 期、工期を n 期間とする。この工事の開始時期が S 期分だけ遅れる可能性をその確率 $P_S(S)$ で表す。また、土量が当初の予定の V% となる可能性をその確率 $P_V(V)$ で表す。さらに、当初予定の工期 n 期間が N 期間だけ延長される可能性をその確率を $P_N(N)$ で表現する。

このとき、工事に伴う土砂搬出(搬入)総量を X とすると、土量が予定の V% となり、工期が N 期間延長される場合における 1 期当たりの平均土量 x^{VN} は、次式で与えられる。

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

(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) 期間の工事について、開始時期が最大 S 期遅れる可能性があるとき、各期 t の土量は工事期間内に入れば、土量 x^{VN} であるが、それ以外の場合には 0 であり、それぞれ

の確率を $q^t(x^{VN})$ 及び、 $q^t(0)$ と表す。次に、これ

らの確率を、図-3 を用いて定式化する。図-3 は開始時期別(開始時期の遅れ別)の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 期に

において土量 x^{VN} である確率 $q^{s+2}(x^{VN})$ は、その期が工事期間内に入る確率(図の網掛け部分)の合計であることから $q^{s+2}(x^{VN}) = P_S(0) + P_S(1) + P_S(2)$ となる。

これを一般的に表したのが (4) 式である。これ以外の場合は、土量が 0 である確率であり、(5) 式となる。

$$q^t(x^{VN}) = \sum_{S=t-(s+n+N)+1}^{t-s} P_S(S) \quad \dots(4)$$

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

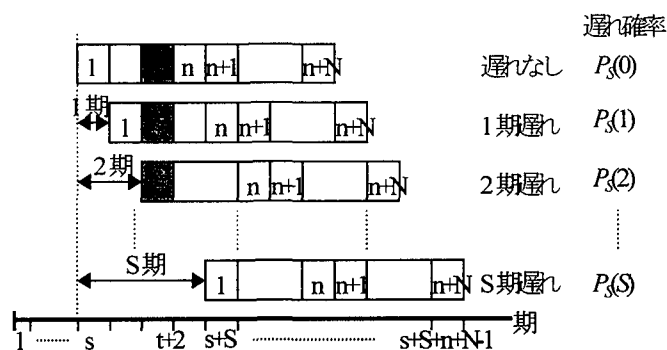


図-3 工事開始の遅れ別の土量発生状況

(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 x_i^{VN} とその発生確率 $q_i(X_i^{VN})$ 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。工事間の土砂の流れは、図-2(前出)に示したように、3つの場合が考えられる。

- ① 搬出量 x_i^{VN} 、搬入量 y_j^{VN} の場合であり工事間で再利用がなされる場合、
- ② 搬出量 x_i^{VN} 、搬入量 0 の場合であり搬出土量のすべてが処分される場合
- ③ 搬出量 0、搬入量 y_j^{VN} の場合であり搬入土量のすべてが採取土によって賄われる場合

図-2(前出)は「搬出土量 $x_i^{VN} > \text{搬入土量 } y_j^{VN}$ 」の場合を図化したものであるが、上記の各ケースごとに、その費用及び発生確率を掛け合わせて合計したものが期待費用であり(6)式となる。式中の [] 内の第1項は①の場合、第2項は②の場合、第3項は③の場合についての期待費用を定式化したものである。また、同様に、「搬出土量 $x_i^{VN} < \text{搬入土量 } y_j^{VN}$ 」

の場合についても定式化することができる。

$$C_{ij} = \sum_i \sum_{N_i} \sum_j \sum_{N_j} \sum_{t=1}^T \left\{ \left[y_j^{VN} U_{ij} + (x_i^{VN} - y_j^{VN})(U_{id} + D_d) \right] \times q'_i(x_i^{VN}) q'_j(y_j^{VN}) + x_i^{VN} (U_{id} + D_d) q'_i(x_i^{VN}) q'_j(0) + y_j^{VN} (U_{bj} + B_b) q'_i(0) q'_j(y_j^{VN}) \right\} \times P_V(V_i) P_N(N_i) P_V(V_j) P_N(N_j) \quad \dots(6)$$

ここで、

U_{ij} : i, j 間の単位土量あたり輸送価格(円/m³)

D_d : 処分場 d における単位土量当たりの土砂処分価格(円/m³),

B_b : 採取場 b における単位土量当たりの土砂購入価格(円/m³)。

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。各工事の土量・土質・工期については、付表-1に示す。搬出・搬入工事の総土量は、それぞれ 2.81 万 m³、2.55 万 m³であり、搬出土量が搬入土量を上回っている。

②諸費用および容量

土砂採取場・処分場の容量・価格、輸送費価格は、積算資料等^{8),9)}に基づいて表-1のように設定した。

表-1 諸費用および容量

土砂採取場	容量	10,000 (m ³)
	採取価格	4,000 (円/m ³)
土砂処分場	容量	10,000 (m ³)
	処分価格	2,000 (円/m ³)
土砂輸送価格		100 (円/m ³)

a) ケース 1 (不確実性・無し)

b) ケース 2 (不確実性・小)

c) ケース 3 (不確実性・大)

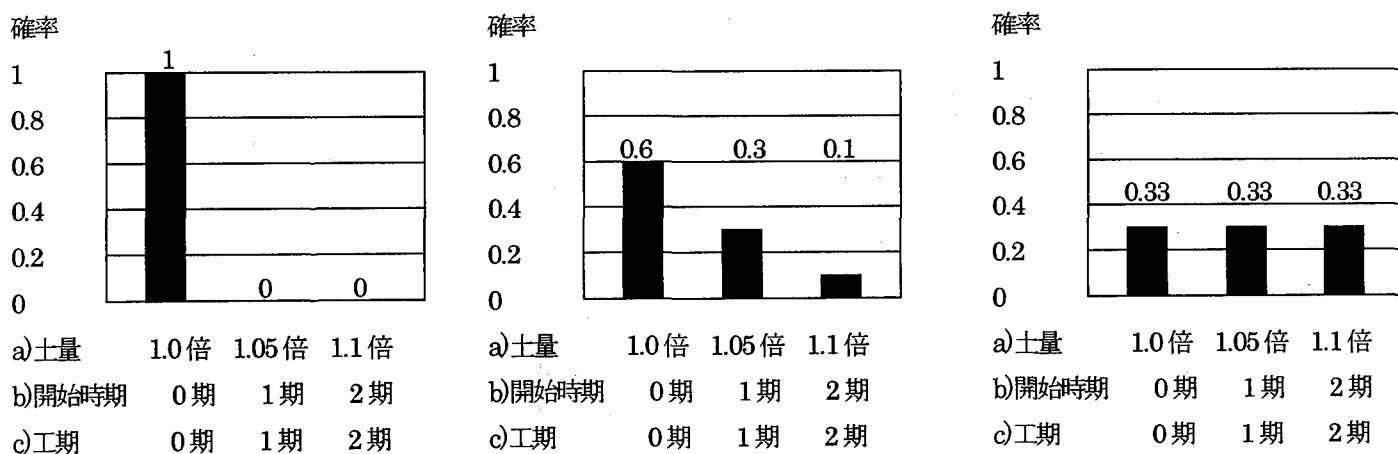


図-4 工事開始時期・工期・土量の不確実性の設定

③工事開始時期・工期・土量の不確実性

工事開始時期・工期・土量の不確実性については、図-4 に示すように、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。ここでは、一例として、土量は増加傾向、開始時期は遅れる傾向、工期は延長傾向のみの不確実性を仮定した。

(2)適用結果

モデルを用いて各ケースにおける土砂流用のための最適な工事の組み合わせを求めた。図-5 はケース1、図-6 はケース2 およびケース3 の結果を示したものである。ケース2 およびケース3 では不確実性の程度が異なっているものの工事間の組み合わせとしては同じであった。図-6 における実線の矢印は、ケース1 とケース2、3 とにおける工事組み合わせの差異を示している。このような不確実性を考慮することによって最適な工事の組み合わせは異なってくる。なお、各ケースにおける工事間土砂流用量、採取土量、処分土量の期待値については付表-2 に示すとおりである。

図-7 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、工事間土砂流用の機会減少をもたらし、再利用土量が減少することになる。その一方、採取および処分土量は増大している。

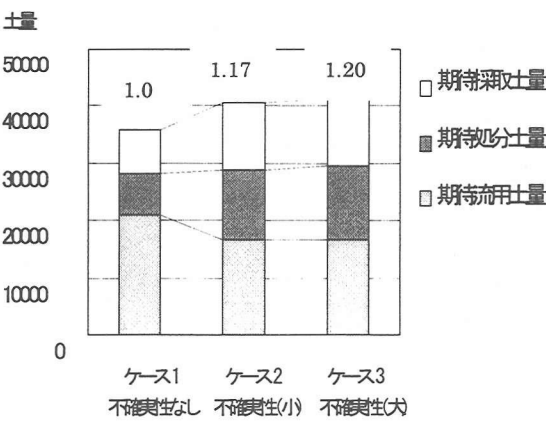


図-7 ケース別の土量比較

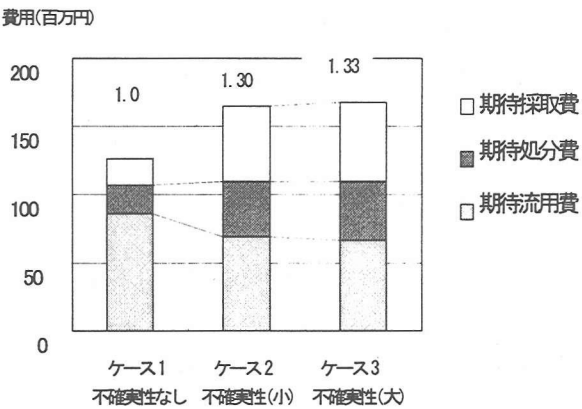


図-8 ケース別の費用比較

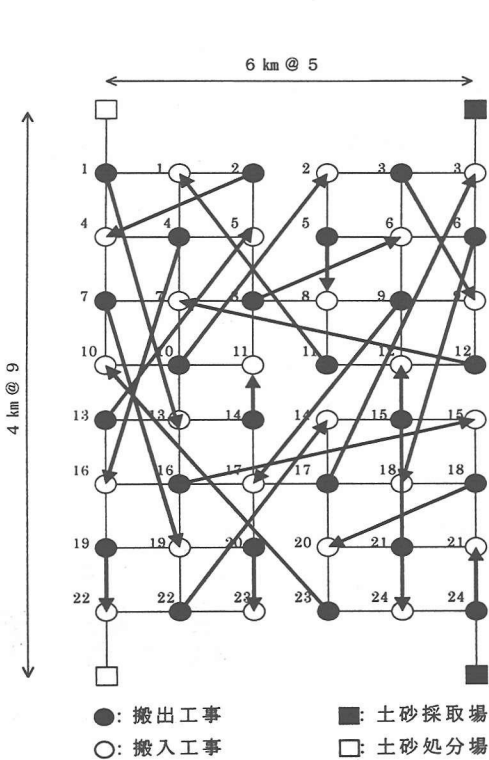


図-5 建設工事の最適組み合わせ(ケース1)

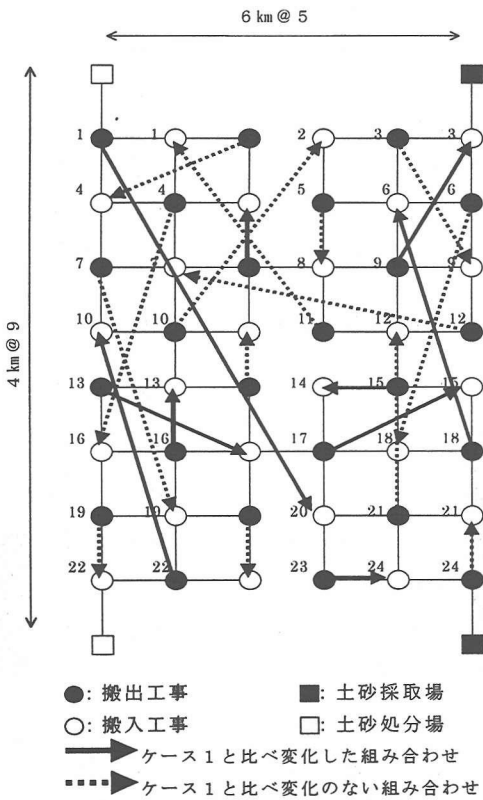


図-6 建設工事の最適組み合わせ(ケース2,3)

図-8 はケース別の費用（採取費・流用費・処分費）を比較したものである。上述の土量配分結果に対応して、不確実性の増大は、採取費用・処分費用の増大をもたらし、その結果、総費用を増大させている。ケース2はケース1の1.3倍、ケース3は1.33倍の費用増加となった。

4. おわりに

本研究では、建設工事に伴う工事開始時期・工期・土量に関する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開発した。また、適用例を通してモデルの適用可能性について確認した。このモデルによって、工事情報に不確実性が伴う場合における合理的な工事間土砂流用計画の立案の可能性が高められた。

今後の課題としては、モデルの適用性を一層高めるため、建設工事の不確実性の程度を定量的に評価する方法の開発が必要である。

付録

付表-1 建設工事条件

a) 搬出工事

工事 番号	搬出工事		
	土量 (m ³)	開始 時期	工期
1	500	2	1
2	1000	3	4
3	2500	2	5
4	1200	1	3
5	1200	2	3
6	300	1	1
7	2100	1	3
8	800	3	2
9	800	5	2
10	600	2	3
11	1800	3	3
12	2500	1	5
13	1200	4	3
14	500	1	3
15	1000	2	4
16	800	1	4
17	300	5	2
18	600	3	1
19	2000	4	3
20	800	1	4
21	1600	3	4
22	1200	2	3
23	1600	2	4
24	1200	1	3
合計	28100	—	—

b) 搬入工事

工事 番号	搬入工事		
	土量 (m ³)	開始 時期	工期
1	1200	3	3
2	800	2	2
3	1000	5	2
4	800	3	4
5	600	4	2
6	600	3	2
7	2000	1	5
8	800	2	2
9	1600	4	3
10	1200	3	3
11	500	1	2
12	2400	4	3
13	500	2	1
14	1000	3	2
15	700	4	2
16	1200	1	3
17	1200	5	2
18	300	1	1
19	2000	1	3
20	400	3	1
21	800	1	4
22	2500	2	5
23	600	4	2
24	800	3	4
合計	25550	—	—

付表-2 ケース別土量

a) ケース1（不確実性・無し）

搬出→搬入	再利用土量	採取土量	処分土量
1→13	500	0	0
2→4	800	0	200
3→9	1,500	100	1,000
4→16	1,200	0	0
5→8	800	0	400
6→18	300	0	0
7→19	2,000	0	0
8→6	600	0	200
9→17	800	400	0
10→2	400	400	200
11→1	1,200	0	600
12→7	2,000	0	500
13→5	600	0	600
14→11	333	167	167
15→24	600	200	400
16→15	200	500	600
17→3	300	700	0
18→20	400	0	200
19→22	1,500	1,000	500
20→23	200	400	600
21→12	1,200	1,200	400
22→14	800	200	400
23→10	1,200	0	400
24→21	600	200	600
合計	20,033	5,467	8,067

(単位：M**3)

b) ケース2（不確実性・小）

搬出→搬入	再利用土量	採取土量	処分土量
1→20	115	295	397
2→4	665	155	360
3→9	1,292	348	1,271
4→16	862	368	368
5→8	610	210	620
6→18	127	181	181
7→19	1,465	585	688
8→5	316	299	504
9→3	523	502	297
10→2	361	459	254
11→1	944	286	901
12→7	1,737	313	826
13→17	671	559	559
14→11	293	219	219
15→14	526	499	499
16→13	256	257	564
17→15	169	548	138
18→6	256	359	359
19→22	1,375	1,188	675
20→23	240	375	580
21→12	1,278	1,382	562
22→10	732	498	498
23→24	607	213	1,033
24→21	557	263	673
合計	15,976	10,361	13,026

(単位：M**3)

c) ケース 3 (不確実性・大)

搬出→搬入	再利用土量	採取土量	処分土量
1→20	147	273	378
2→4	648	192	402
3→9	1,303	377	1,322
4→16	823	437	437
5→8	587	253	673
6→18	123	192	192
7→19	1,401	699	804
8→5	337	293	503
9→3	501	549	339
10→2	369	471	261
11→1	918	342	972
12→7	1,707	393	918
13→17	685	575	575
14→11	295	230	230
15→14	558	492	492
16→13	301	224	539
17→15	182	553	133
18→6	270	360	360
19→22	1,424	1,201	676
20→23	281	349	559
21→12	1,098	1,422	582
22→10	740	520	520
23→24	620	220	1,060
24→21	563	277	697
合計	15,882	10,893	13,623

(単位：M**3)

- 1) 先端建設技術センター編：建設副産物適正処理要項の解説（建設省監修），大成出版社，1993
- 2) 建設省：建設副産物対策行動計画（リサイクルプラン 21），1996
- 3) 和田かおる・山本幸司：切盛土量にあいまいさを含む土木計画へのファジィ理論の適用，土木計画学研究・論文集，No9, pp189-196, 1991
- 4) 春名 攻・辻井 裕・竹林弘晃：ハイブリット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，No11, pp263-270, 1993
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 建設省土木研究所：建設残土の利用計画に関する研究，土木研究所資料第 2740 号, pp6-9, 1989
- 8) 積算資料臨時増刊，建設副産物，経済調査会，1994
- 9) 本多淳裕・山田優共著：建設副産物・廃棄物のリサイクル，省エネルギーセンター，1994

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

富田安夫，徳永大輔

工事間土砂流用計画を立案するための手法として，数理計画手法を用いた工事間土量配分モデルが開発されてきている．しかしながら，建設工事の開始時期・工期・土量に関する不確実性を扱うことのできるモデルは，見波・嶋津（1988）のモデルを除いてほとんどなく，このモデルにおいても工事開始時期に関する不確実性を考慮しているに過ぎない．そこで，本研究では，見波・嶋津のモデルを拡張することによって，工事開始時期・工期・土量の不確実性を考慮したモデルを開発し，適用例を通して適用可能性について確認した．

A Surplus Soil Coordination Model between Construction Sites with Uncertainties Related to Construction Commencing Time, Duration, and Soil Volume

By Yasuo TOMITA and Daisuke TOKUNAGA

Some surplus soil coordination models between construction sites have been developed in order to make efficient soil transport plan for recycling of surplus soil. However these models can't consider the uncertainties related to construction commencing time, duration, and soil volume, except of Minami and Simazu Model (1988) that can deal with the only uncertainty of construction commencing time. In this study, a model dealing with all of the above uncertainties was developed by improving the Minami and Simazu model. Then the model's applicability was shown through the application.