

# 大規模土工における土砂運搬マネジメント ～ 土量配分の最適化へのアプローチ ～

奥尾 展保<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関東地方整備局 常総国道事務所 調査課 (〒300-0033 茨城県土浦市川口 1-1-26 アーバンスクエア土浦ビル 4F)

東関東道事業では、土工事で発生する大量の土砂処理が事業遂行上のリスクとなっている。これは、土砂置場の不足や遠隔化に伴う運搬費や環境負荷の増加である。一方、これまでの土工計画は、計画段階での工事進捗に伴う土砂需給量や時期の変化の把握が困難なため、技術者の経験や主観的な判断に依存しているところが多い。また、土砂需給量と運搬費の管理に関する具体的な計画手法が確立していないため、計画策定や工事間調整に多くの労力と時間を要している実態がある。そこで本稿では、事業計画を見直しつつ、複数工事間の土砂流用を合理的に行うための土量配分計画を提案する。

キーワード 土量配分計画, 数理最適化手法, 段階的詳細化, 総仕事量最小化, コスト縮減

## 1. 背景

東関東道水戸線(潮来～銚田)は、茨城県潮来市を起点に同県銚田市に至る延長 30.9km の道路建設事業である。事業を工種別にみると、切土区間延長は約5割、盛土は約4割、残り1割は構造物となっている。また、土工事で発生する土砂は、東京ドーム3杯分に相当するため、多量の土砂処理が事業遂行上のリスクとなっている。これは、土砂の需給時期のずれによる外部搬出量の増大、発生地から使用地までの運搬距離の遠隔化、大型車運搬による騒音振動などの社会問題や受入地周辺住民からの苦情といった諸問題である。

一方、適時適切な土砂需給のための土量配分計画は、これまで工事工程を調整しながら運搬距離が最短となるように繰り返し検討が行われてきた。しかしながら、土砂需給量と運搬費の管理については最適かつ具体的な計画手法が確立されていないため、担当者の主観や経験に依存するところが多い。また、複数工事間の土量調整や土量配分検討に多くの時間と労力を費やしている実態がある。

以上を踏まえ、本稿では土砂需給を当該事業の多くの工事を統括、調整する立場で解決すべき問題としてとらえ、建設生産システムのさらなる高度化と土工事に欠かせない土砂運搬の効率化を目指し、土量配分の最適化にアプローチした結果について述べる。

## 2. 目的

検討の目的は、第一に、土工の実態把握と事業遂行上のリスク要因の抽出である。従前は、年度単位の土収支整理であったが、月次単位のより細かな整理を行うことで土の動きを詳細に把握する。第二に、合理的

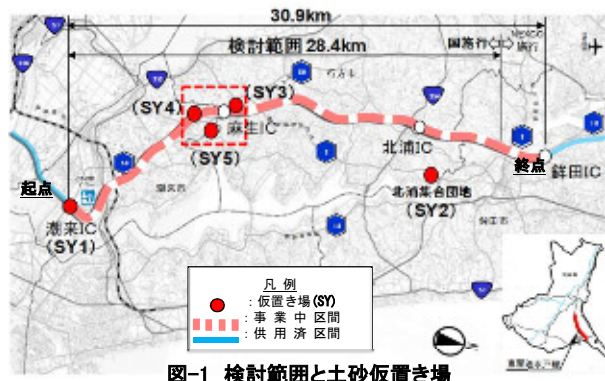


図-1 検討範囲と土砂仮置き場

な手法による土量配分の導出である。具体的には、経済的かつ環境負荷を最小にする最適な土量配分となるように、土量配分計画への数理最適化手法<sup>1)</sup>(以後、線形計画法と称す)の適用可能性を探る。さらに、土砂運搬が沿道環境に与える負荷を定量的に把握する。第三に、今後、本手法を用いて実際の複数工事間の土量調整を行うにあたっての課題整理である。

## 3. 土工の平準化

検討の対象範囲は、図-1 に示す国施行区間の 28.4km である。その区間で発生する土砂は約 360 万 m<sup>3</sup> におよぶが、全て事業地内の工事に流用するため、発生土と使用土の土収支のバランスは概ね取れている。

しかし、事業の初期段階では構造物掘削や工事用道路の切土工事が先行するため、余剰土が増えて土砂仮置き場の容量を圧迫する懸念があった。そこで、土工事で発生する土量の実態を把握するため、事業工程の計画期間を月次単位に細分割し、外部に搬出する累積土量の変化を図-2 に示ように可視化した。なお、累積土

量は、切土工事での切土量、構造物工事での掘削土量、埋戻し工事での埋戻し土量と盛土工事での盛土量を計画期ごとに集計し、発生土量から使用土量を差し引いた累積土量で表示している。また、図中の実線は仮置き場の容量の上限値を累積して表示している。

その結果、当初事業計画における累積土量の変化はピーク時に 100 万 m<sup>3</sup> を越え、現存する仮置き場の容量を超過することが判明した。この容量超過対策としては、用地未買収箇所や工事工程上の制約に考慮しつつ、盛土工事の着手時期を早め、切土工事の工程を後ろ倒しにする措置をとった。その結果は図中の丸印に示す通り、土量のピークを緩和し平準化を図ることができた。ただし、一時的に 10 万 m<sup>3</sup> ほど容量不足になるため、新たに仮置き場を整備するべく準備を進めている。

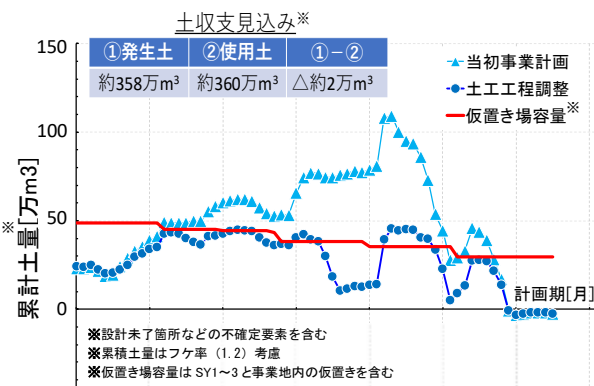


図-2 土収支見込みと土量の変化

#### 4. 土量配分の最適化

##### (1) 基本的な考え方

本稿で述べる土量配分の最適化とは、土砂が発生する複数の工事から盛土用資材として土砂を使用する複数の工事への合理的な土量配分計画のことであり、検討にあたっては、運搬に要する総仕事量(運搬費)の最小化を目指すとともに、計画そのものの自体を客観的に評価できるように、線形計画法の適用を試みた。なお、本手法は、特定の目的である運搬土量と運搬距離の積の総和を目的関数として定式化し、複数の手段である各工区間の土砂需給の配分パターンのなかから目的関数が最小になるケースを見出すものである。

土量配分計画への線形計画法の適用は、これまで多くの学識経験者らが取り組んできた問題であり、数理最適化モデルに関する様々な提案<sup>2)~6)</sup>がなされている。しかしながら、当該と同規模以上の土工事に適用された事例は見あたらず、また、それら提案の全てを取り込んだ検討には、実行可能性の面から課題があった。例えば、土質改良プラントの処理速度や運搬車両の回転率などである。さらには、工区数や計画期の細分化による計算処理上の課題もあった。

##### (2) 段階的詳細化

以上を踏まえ、数理最適化モデルは土量配分計画への線形計画法の適否判断と、意思決定を円滑にするため、表-1 に示すように段階的に詳細化した。

第一段階では、土量配分の巧拙による運搬費のバラツキを把握するため、事業延長を3つの工区に大分割し、時間軸を考慮せずに運搬費が最大もしくは最小となる土量配分を試算した。その結果、運搬費の最大は 81 億円、最小は 46 億円となった。土量配分の仕方によっては 35 億円の範囲でばらつくことが判明した。

第二段階は、仮置き場の必要性和効果、沿道環境に与える影響を定量把握するため、事業延長を 21 工区、計画期を四半期に分割して試算した。なお、試算条件と結果については次項で詳述する。

第三段階は、実際の複数の工事間の土量調整への適用を想定している。事業延長は 120 程度の工事ロット相当に細分化し、計画期についても月次単位に細分割して試算する予定である。

表-1 数理最適化モデルの段階的詳細化

段階	分割数		目標
	工区	計画期	
1)大工区	3	なし	土砂運搬費の実行可能解の範囲を把握
2)中工区	21	四半期	仮置き場の必要性和運搬車両の走行台数を把握
3)小工区(今後予定)	120	月次	複数の工事間の土量調整に用いることを想定

※太線囲は 4 (3)~(5)項で詳述

##### (3) 検討条件

中工区の検討に用いる数理最適化モデルは、土砂を搬出する発生工区、土砂を搬入する使用工区と仮置き場を考慮して図-3 に示すようにモデル化した。なお、工区分割は本線を主要幹線道で区切った 21 工区とし、土砂配分パターンは発生工区から使用工区への直接運搬、発生工区から仮置き場を介して使用工区へ運搬する場合に考慮した。なお、土質改良プラント<sup>7)</sup>などは、次段階で考慮する予定である。

仮置き場は、現存する潮来 IC(SY1)、北浦複合団地(SY2)の2箇所に加え、麻生 IC 付近に新設予定の3箇所(SY3~5)を考慮した。(図-1 参照)

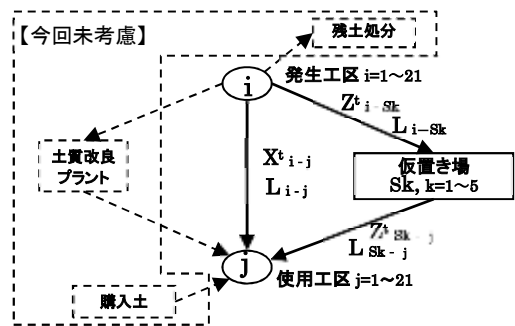


図-3 数理最適化モデルのイメージ

**a)目的関数**

目的関数は、計画期における発生土量と運搬距離の積として(a)式に示ように定式化し、その総和である総仕事量(運搬費)の最小化を目指す。

$$\Sigma \{ \Sigma [(X_{ij}^t \times L_{ij}) + (Z_{i-Sk}^t \times L_{i-Sk}) + (Z_{Sk-j}^t \times L_{i-Sk})] \} \Rightarrow \min \quad (a)$$

ここに、X:発生工区から使用工区への搬出土量  
 Z:仮置き場を介した搬出土量, L:運搬距離  
 発生工区:i=1~21, 使用工区:j=1~21  
 仮置き場:k=1~5, 計画期:t=全期間/四半期

**b)制約条件**

土量の制約条件は、(b)式に示ように計画期毎の発生工区側の総土量と使用工区側の総土量が等価となる。仮置き場の制約条件は、仮置き容量に制限値を設けて(c)式に示すように定式化した。なお、検討の前提となる土量は、土工平準化後の事業工程に基づいている。(図-2 参照)

(発生土量の合計) = (使用土量の合計)

$$\Sigma X_{i-j, i=1-21, j=1-21}^t + \Sigma Z_{i-Sk, i=1-21, k=1-5}^t = \Sigma X_{j-i, i=1-21, j=1-21}^t + \Sigma Z_{Sk-j, j=1-21, k=1-5}^t \quad (b)$$

(仮置き土量)

$$= (\text{一期前までの残土量}) + \Sigma Z_{i-Sk}^t + \Sigma Z_{Sk-j}^t \leq \text{仮置き容量} \quad (c)$$

**(4)土量配分の最適化結果**

試算ケースは、仮置き場の活用による運搬費の削減効果を把握するため、表-2に示すように麻生 IC 付近に仮置き場を新設(SY3~5)した場合、現存する北浦複合団地(SY2)を拡張して利用する場合の2ケースについて実施した。

表-2 試算ケース

試算ケース	仮置き容量 [万 m <sup>3</sup> ]			備考
	潮来 SY1	北浦複合 SY2	麻生(新) SY3~5	
ケース 1	8	21	40	麻生 IC 付近に新設
ケース 2	8	無制限	-	北浦複合団地を拡張

累積土量が最も多くなる計画期に着目した土量配分結果を図-4に示す。土の運搬先の選択はマクロに確認する限り、できるだけ近くに運搬されている。具体的には、麻生IC付近に仮置き場のあるケース1では、新設の仮置き場(SY3~5)が活用されている。麻生 IC 付近の仮置き場がないケース2では、起点側寄りで発生した土砂は潮来 IC の仮置き場(SY1)、終点側よりで発生した土砂は北浦複合団地の仮置き場(SY2)を活用している

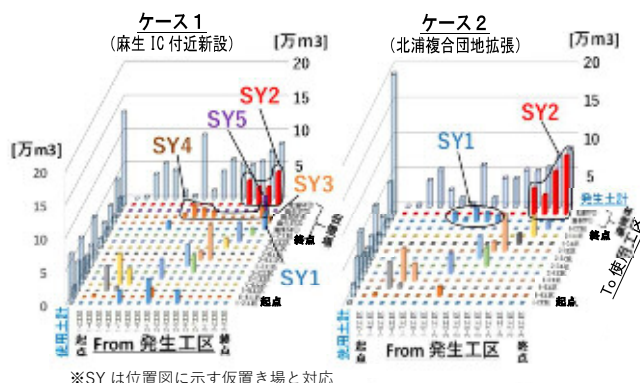


図-4 土量配分の最適化結果

傾向を確認できる。また、ストックヤードの容量制約は満たされているので、計算としては問題のない結果が得られている。

両ケースの総運搬費を表-3に示す。総運搬費の差は0.5億円であり仮置き場の設置箇所による差が出にくい結果となっている。これは、ケース2では北浦 IC よりの工区で発生土量が多くなる時期に距離の近い北浦複合団地の仮置き場(SY2)に搬出されたことによる。つまり、発生箇所と時期、仮置き場所により土量配分が最適化されたためと考えられる。

一方、発生土量が多くなる時期の交通集中路線の平均運搬台数は、仮置き場を分散させたケース1と分散させないケース2とでは、平均運搬台数に163台/日の差があった。よって、仮置き場は分散して設置した方が大型車交通の集中を緩和できることが判明した。なお、対象路線は、北浦 IC 付近の主要幹線道路である。(図-5 参照)

表-3 中工区の試算結果

試算ケース	総運搬費 <sup>※1</sup> [億円]	運搬台数 <sup>※2</sup> [台/日]	備考
ケース 1	39.5	751	麻生 IC 付近に新設
ケース 2	40.0	914	北浦複合団地を拡張
差	-0.5	-163	ケース1-ケース2

※1) Σ 運搬土量 × 運搬距離の最小値。同一工区内の運搬費は除く。  
 ※2) 国道 354 号の土量の多くなる計画期 (24 ヶ月) の平均日運搬台数

**(5)土量配分結果に基づく運搬予測**

発生土砂の運搬計画にあたっては、運搬車両の走行が沿道環境に与える影響の把握が重要となるため、土

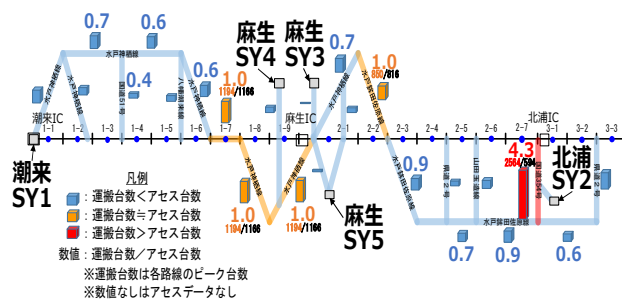


図-5 土砂運搬シミュレーション

量配分の最適化結果をもとに運搬経路別の運搬台数をシミュレーションした。なお、運搬車両1台あたりの運搬土量は6m<sup>3</sup>/台(≒10トン÷1.6t/m<sup>3</sup>)とした。運搬台数は各計画期の土量を運搬経路別に集計して日当たり台数にて計上し、環境アセスメント(以後、アセスと称す)で想定している台数との比率で整理した。

その結果は図-5に示す通り、一部の路線でアセスの想定台数を超過している。特に朱塗りの路線では、運搬土量の多くなる計画期に約2,600台/日、アセスの想定台数の4倍以上となっている。この交通集中は、沿道環境はもとより旅行速度の低下を招き、運搬効率が低下する。よって、次段階では車両台数の制限、代替経路の選択、運搬経路に応じた運搬サイクルにも考慮して検討すべきという課題が抽出された。

## 5. まとめ

本稿では、大規模土工に潜在する課題を抽出するとともに、土量配分計画への線形計画法の適用性について検討した。新たに得られた知見を以下にまとめる。

- (1)土の動きを可視化することで土量配分に起因する事業遂行上のリスク要因を抽出し、土工事平準化の目標を明確にすることができた。
- (2)数理モデルの段階的詳細化により、線形計画法を本事業の土量配分計画に適用することができた。
- (3)線形計画法の適用により、土砂運搬の総仕事量(運搬費)を最小化する合理的な土量配分計画を導出することができた。
- (4)リスク低減策である仮置き場の位置が運搬費と運搬台数に与える影響を定量的に把握することができた。
- (5)土砂運搬シミュレーションにより沿道環境面の課題を抽出することができた。

上述より、線形計画法を用いた土量配分計画は、事業計画の策定に対して有効なツールになり得ることが分かった。

## 6. 今後の課題

今後、当該事業では工事量と運搬土量が多くなる。土工事は発注ロットの制約から数十に及ぶと想定され、複数の工事現場における調整が必要となる。ここでいう調整とは、土の情報のトレーサビリティ<sup>8)</sup>、土砂の需給調整、使用土の土質条件、運搬車両の調達台数、走行経路などである。この現場調整には多大な労力を費やすことが想定される。また、工事工程は工事発注時期や機械、労務、材料の調達状況によっても変わる。工事工程に変更があれば土砂需給のタイミングがずれるため、土量配分の再調整が必要になる。よって、この動的な工事工程に対応できるシステムの構築が急務である。

次段階では図-6に示すような土量配分最適化システムを構築し、土量管理の効率化、省力化を目指していきたい。

今後の汎用策としては、対象範囲の広域化があげられる。当該事業にとどまらず複数の事業者間の土砂需給調整に適用し、最適な土量配分の情報提供が可能になれば、運搬に要す総仕事量(運搬費)を縮減し、もって生産性向上に貢献できると考えている。さらに将来的には、運搬車両の日々の運行管理<sup>9)</sup>にまで活用の幅を広げれば、さらなる施工の合理化が可能になると考える。

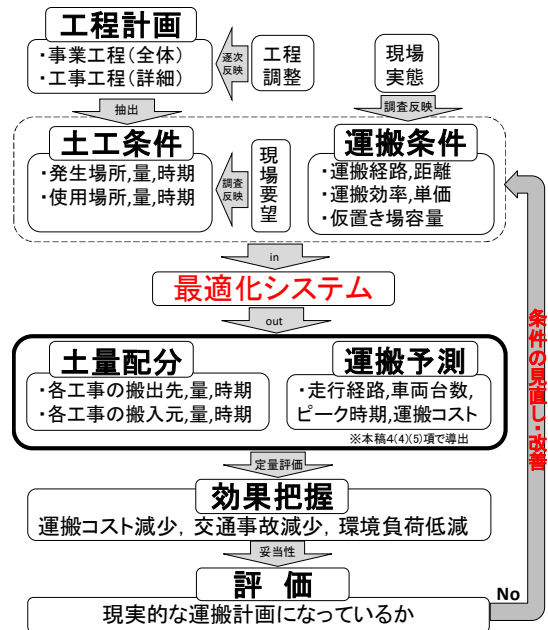


図-6 土砂運搬マネジメントシステム

## 参考文献

- 1)藤井聡, 改訂版 土木計画学 公共選択の社会科学, 学芸出版社, 2018.08.31.
- 2)見波潔・嶋津晃臣:建設残土の有効利用のための土量配分計画モデル, 土木学会論文集第395号/IV-9, 1988.7.
- 3)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, 1996.8.
- 4)和田かおる・山本幸司:建設残土再利用計画システムの構築に関する一考察, 建設マネジメント研究論文集 Vol.4 1996
- 5)富田安夫・寺嶋大輔: Dantzig-Wolfeの分解原理を用いた時間軸階層化による工事間土量配分モデルの計算方法, 土木計画学研究・論文集No.14, 1997.9.
- 6)富田安夫・徳永大輔: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, 土木計画学研究・論文集No.17, 2000.9.
- 7)建設発生土利用技術マニュアル(第4版):独立行政法人 土木研究所 編著, 2013.12.1.
- 8)丸田知也:圏央道盛土区間における現場マネジメントについて, 平成28年度スキルアップセミナー関東, 2016.6.23.
- 9)三浦剛志・樺澤孝人・八木勝良,土砂運搬車両運行管理システムの導入(試行)について—システムの導入目的と活用効果—, 第53回(平成21年度)北海道開発局技術研究発表会, 2010.2.25.