

地形変化を考慮した切土盛土工事の仮設道路と ダンプトラックの移動経路の最適化

Optimization of Temporary Roads and Dump Trucks' Routes in Earthwork Construction Considering Terrain Changes

○学 窪田 瞭 (東大)

谷島 諒丞 (東大)

正 ルイ笠原 純ユネス (東大)

正 永谷 圭司 (筑波大)

正 安 琪 (東大)

正 山下 淳 (東大)

Ryo Kubota, The University of Tokyo, kubota@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Ryosuke Yajima, The University of Tokyo

Jun Younes Louhi Kasahara, The University of Tokyo

Keiji Nagatani, University of Tsukuba

Qi An, The University of Tokyo

Atsushi Yamashita, The University of Tokyo

Cut and fill earthworks are the preliminary work of the construction projects in remote areas. Haulage costs typically accounts for around 30% of the total projects costs. The temporary haul road constructed on-site is one major factor influencing haulage costs. Planning efficient earth allocation, temporary roads, and dump trucks' routes remains an empirical design problem at present. This study aims to optimize not only the placement of temporary roads but also the construction timing of temporary roads, considering the possibility that temporary roads may disappear due to changes in the terrain. The optimization approaches are applied in a real-world project scenario and proven to reduce the cost of the projects.

Key Words: Earthwork, Automation, Optimization, Path Planning, Road Network

1 序論

建設業では労働力の不足、労働生産性の低さ、従業者の高齢化の問題がある^[1]。建設従業者の作業の中でも施工計画の立案は全体の生産性に大きく影響を与えるため、豊富な経験が必要になる。特に起伏が多い現場の造成工事はインフラ計画の総建設費の25%を占める重要な工事であるが^[2]、効率的な施工計画を立てる難易度が高い。従って人の経験によらず効率の良い施工計画を自動で立てるシステムが必要である。

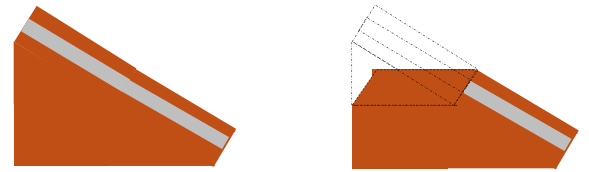
本研究では造成工事の中でもコストが多くかかる作業である切土盛土工事を対象とする。切土盛土工事とは図1(a)のように高い地盤を切り取る切土作業と図1(b)のように低い地盤を埋め立てる盛土作業によって現場全体を平坦な地形にする工事であり、費用を抑えることが求められる。この費用の内約30%は土砂運搬にかかる費用であるものの、最適な運搬計画を立てるのが難しく、課題となっている。現場内では複数の切土地点、盛土地点があるため、どの土をどこに運ぶか、どの順番で運ぶかという土砂配分計画を立てる。Henderson らは、Simulated annealing を用いて土砂の運搬経路を最小化する手法を提案した^[3]。Gwak らは、土砂の種類や外部との土砂のやり取りを考慮し、土砂配分計画を最適化する手法を提案した^[4]。Gwan らは、地形変化に伴う傾斜の変化を考慮した最適な土砂配分計画を強化学習により求める手法を提案した^[5]。また切土盛土工事を行う際には土砂を運搬するダンプトラックが安全かつ高速に運転できるように仮設道路を設置する。仮設道路は工事時間を短くし、人件費や機械費用を抑える効果があるが、道路の建設や維持に費用がかかるため、適切な位置に建設する必要がある。Liu らは工事現場をグリッド空間で表現し、仮設道路の配置を最適化する手法を構築した^[6]。また Yi らは現場への入り口に接続された仮設道路の最適化やパラメータの変動が最適な仮設道路と費用コストに与える影響を研究した^{[7][8]}。一方これらの研究では、切土盛土による地形変化が仮設道路に及ぼす影響を考慮せず、初めに建設した仮設道路がずっと残り続けるという設定で配置のみを最適化している。実際の現場では図2のように切土または盛土された地点上の仮設道路は除去されるので、仮設道路を建設するタイミングも含めて最



(a) Cut earthwork

(b) Fill earthwork

Fig. 1: The figure of cut and fill earthworks



(a) Before terrain change

(b) After terrain change

Fig. 2: Terrain change's effect on temporary road

適化する必要がある。

本研究では地形変化を考慮した切土盛土工事の最適化を目的とし、土砂配分計画、仮設道路の配置、建設タイミングを最適化する手法を提案する。

2 提案手法

2.1 問題設定

本研究では切土盛土する現場をセルに分割していき、各セルにおいて土量を設定する。各セルに対して、土量が正の場合には切土地点、負の場合には盛土地点とみなし、それぞれに対し

S_{f_2}	S_{f_5}	S_{f_7}	S_{c_7}
S_{f_1}	S_{c_2}	S_{c_4}	S_{c_6}
S_{f_0}	S_{f_4}	S_{c_3}	S_{c_5}
S_{c_0}	S_{f_3}	S_{f_6}	S_{f_8}

Fig. 3: An example of soil's problem setting

て番号を割り当てる。割り当てられた番号を基に、切土地点を $c_i (i \in [0, N_c])$ 、盛土地点を $f_j (j \in [0, N_f])$ とし、各地点における土量を $S_{c_i} (> 0)$ 、 $S_{f_j} (< 0)$ とする。(図 3) N_c 、 N_f はそれぞれ切土地点、盛土地点の総数を表す。本研究では全ての地点の土量の和は 0 であり、外部との土のやり取りはないものとする。切土地点と盛土地点には油圧ショベルが配置され、その間をダンプトラックが移動し、土砂を運搬する。油圧ショベルの移動は考慮しない。ある切土地点からある盛土地点への土砂運搬作業は並列的に行われず、複数台のダンプトラックがあっても各ステップで 1 つの運搬作業を行う。また、このダンプトラックの台数 n は通常、工事を行う企業や現場の規模などで決定されるため、本研究では決定済みとする。

以上の問題設定を基に本研究で扱う変数は以下の通りである。

1. 土砂配分計画 $v = \{v_{i,j}^t \mid t \in [0, T], i \in [0, N_c], j \in [0, N_f]\}$
2. 仮設道路の配置 $p = \{p_k \mid k \in [1, N_{road}]\}$
3. 仮設道路の建設タイミング $t = \{t_k \mid k \in [1, N_{road}]\}$
4. ダンプトラックの移動経路

N_{road} は仮設道路の総数を表す。土砂配分計画では、各ステップ t で各切土地点から各盛土地点へ運ばれる土量 $v_{i,j}^t$ を決定する。例えば、 $v_{0,2}^0 = 10$ のときはステップ 0 で切土地点 1 から盛土地点 2 へ 10 の土量を運ぶことを意味する。各仮設道路の配置 p_k は図 4(a) のように上下斜めの隣接したセルの中心間を結んでいる位置のみに配置する。図では A-B、B-C の点を結ぶように仮設道路が設置されている。建設タイミングは土砂運搬の前である。 t_k は $\{t_k^0, \dots, t_k^T\}$ と表され、 t_k^t が 0 の時は建設されず、1 の時は建設されることを表す。例えば、 $t_k = \{0, 0, 1\}$ の時は k 番目の仮設道路がステップ 2 の土砂運搬の前に建設されることを意味する。ダンプトラックの移動は図 4(b) のようにあるセルから左右上下斜めに隣接したセルの中心の 8 方向の移動によって行われる。また、ダンプトラックが仮設道路上を移動する際には、仮設道路がないセル間よりも速くなる。

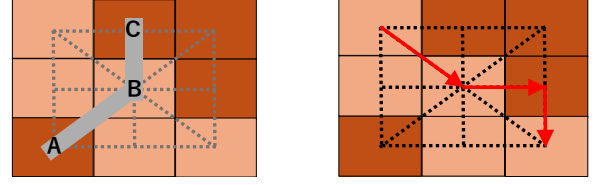
目的関数について説明する。本研究では、切土盛土工事全体を通しての費用コスト C_{all} を目的関数とし、これを最小化する。 $C_{all} = C_{operation} + C_{road}$ であり、費用コストは工事時間に比例する $C_{operation}$ と仮設道路の建設した長さに比例する建設費用 C_{road} の和で表される。仮設道路上では、ダンプトラックの移動が速くなるため $C_{operation}$ は減少されるが、仮設道路を建設すると C_{road} が増加するため、仮設道路を適切な位置とタイミングに建設する必要がある。

次に制約条件について説明する。ダンプトラックは切土地点から盛土地点への土の運搬を行い、全地点での土量が 0 になるように運搬する。また、切土盛土作業が地形及び仮設道路に与える影響も考慮する。具体的には、切土されたセルの高さは減少し、盛土されると増加する。また、切土盛土された地点上の仮設道路は図 2 のように除去される。セル空間においては図 5 のように切土または盛土されたセル上の仮設道路を除去することで表現する。

2.2 提案手法の概要

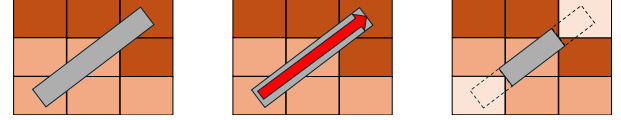
本研究で扱う問題は多数の変数が存在し、それぞれの変数に膨大なパターンが存在する。そこで本研究では、全てのパターンを考えるのではなく、効率的にそれぞれの変数の最適解を決定及び探索していく。以下のように最適解を求める。

- ① 目的関数に関するパラメータ入力
- ② 土砂配分計画の決定



(a) An example of roads placement (b) An example of dump truck's route

Fig. 4: An example of variables



(a) Before allocation (b) During allocation (c) After allocation

Fig. 5: The effect of terrain change on temporary road

- ③ 仮設道路の配置・建設タイミング・ダンプトラックの移動経路の最適化

②の土砂配分計画では仮設道路を考慮せずに直線距離で計画の時間が最小になるように土量を決定する。仮設道路があったとしても、基本的に直線距離で近い地点同士で土砂配分をするのが効率的であるため、このように計画を立てる。③において、仮設道路の配置は膨大なパターンが存在するため、メタヒューリスティックの 1 つである Simulated Annealing (SA) によるランダム探索により最適化する。仮設道路の建設タイミングに関しても、膨大なパターンが存在するので、配置と合わせてランダム探索することが難しい。そこで、仮設道路は基本的に利用する直前に建設するのが最適であるという特性を用いて、局所最適化により求める。

ダンプトラックの移動経路に関しては、以上の変数全てが決定すれば、各ステップでのダンプトラックのスタート地点とゴール地点、各セルへの移動時間が決まるため、厳密最適解が求まる。特定の点からゴールまでの最短距離を求めるのに適した A* アルゴリズムを用いて最適化する。

詳しい説明は次項以降で行う。

2.3 土砂配分計画

土砂配分計画では、各ステップ t で切土 $c_i (i \in [0, N_c])$ から盛土 $f_j (j \in [0, N_f])$ に運ばれる土量 $v_{i,j}^t$ を決定する。土砂配分計画では、仮設道路を考慮せずに直線距離で計画の時間が最小になるように土量を決定する。この際、 $C_{road} = 0$ となり、工事の費用コスト $C_{all} = C_{operation}$ となる。

土砂配分計画は次のように決定する。

- ① ダンプトラックの移動時間が最小になるように各切土地点から各盛土地点へ運ぶ土量 $v_{i,j}$ を決定
- ② 工事計画者が用いるヒューリスティックルールに基づき、運搬の順番を決定し、 $v_{i,j}^t$ を決定

例えば、①で $v_{0,0} = 1$ 、 $v_{1,1} = 2$ と決定した場合、切土地点 0 から盛土地点 0 へ 1 の土量を運び、切土地点 1 から盛土地点 1 へ 2 の土量を運ぶことを意味する。②で $v_{0,0}^0 = 1$ 、 $v_{1,1}^0 = 0$ 、 $v_{0,0}^1 = 0$ 、 $v_{1,1}^1 = 2$ と決定した場合、ステップ 0 で切土地点 0 から盛土地点 0 へ 1 の土量を運び、ステップ 1 で切土地点 1 から盛土地点 1 へ 2 の土量を運ぶことを意味する。

$v_{i,j}$ は次のように混合整数線形問題 (MILP) として定式化し、計算することで決定する。切土地点 c_i から盛土地点 f_j への距離を $d_{i,j}$ 、運搬土量を $V_{i,j}$ 、ダンプトラックの積載量を v_{truck} 、ダンプトラックの台数を n とすると式 (1) のように目的関数 $C_{operation}$ を最小化する。ここで、ステップ t の土砂配分が終わり、ステップ t の盛土地点から次のステップ $t+1$ の切土地点に行く距離は

影響が小さいため考慮しない。また、最終的に全地点での土量が0になるため、式(2)(3)のような制約を設ける。式(2)は切土地点、式(3)は盛土地点の土量に関する制約条件である。この問題は以上のように定式化されるため、MILP ソルバーを用いて解く。

次に土砂配分 $v_{i,j}$ を基に、各ステップでどの土砂配分を行うかを決定し、 $v_{i,j}^t$ を求める。工事計画者は工事を行う際に、入り口から遠い地点から作業し、立ち入る範囲を狭くしていく。このヒューリスティックルールに基づいて順番を決定する。これにより、 $v_{i,j}^t$ として v を決定する。

$$\text{Min } C_{\text{all}} = \sum_{i=0}^{N_c} \sum_{j=0}^{N_f} d_{i,j} v_{i,j} / v_{\text{truck}}, \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^{N_f} v_{i,j} = S_{c_i} \quad \forall i \in [0, N_c], \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{N_c} v_{i,j} = -S_{f_j} \quad \forall j \in [0, N_f]. \quad (3)$$

2.4 仮設道路の配置・建設タイミング最適化

次に決定された土砂配分計画 v を基に仮設道路の配置・建設タイミング、ダンプトラックの移動経路を最適化する。

目的関数 C_{all} は式(4)のように表される。 $C_{\text{operation}}$ は時間当たりのコストを $C_{\text{hour}} [\$ / h]$ 、各ステップ t で仮設道路上、仮設道路外を走った長さ、速度をそれぞれ l_{pave}^t , V_{pave}^t , l_{rough}^t , V_{rough}^t 、運んだ土量を v^t 、ダンプトラックの最大荷量を v_{truck} とすると、式(5)のように表される。また C_{road} は仮設道路のコストを $C_{\text{length}} [\$ / m]$ 、各ステップ前で建設した仮設道路の長さを l_{built}^t とすると、式(6)のように表される。

$$\text{Min } C_{\text{all}} = C_{\text{operation}} + C_{\text{road}}, \quad (4)$$

$$C_{\text{operation}} = C_{\text{hour}} \sum_{t=0}^T \left(\frac{l_{\text{pave}}^t}{V_{\text{pave}}^t} + \frac{l_{\text{rough}}^t}{V_{\text{rough}}^t} \right) \frac{v^t}{n \cdot v_{\text{truck}}}, \quad (5)$$

$$C_{\text{road}} = C_{\text{length}} \sum_{t=0}^T l_{\text{built}}^t. \quad (6)$$

次に最適化手法について説明する。仮設道路の配置・建設タイミングのパターンはセルの総数に対して指数関数的に計算量が増え、NP 困難であるため厳密最適解を求めることは難しい。そこで本研究では、配置と建設タイミングを SA と局所探索の組み合わせによって最適化する。また、ダンプトラックの移動経路は A* アルゴリズムを用いて最適化する。

本研究では、図6に示すようなフローチャートで、最適化を行う。ここでは、仮設道路の配置を SA の中でランダム探索すると同時に、建設タイミングに関する局所探索を行い、配置とタイミングに関する近傍解を生成する。その後、その解に対する最適なダンプトラックの移動経路を求め、費用コストを計算する。この近傍解のコストが現在解よりも良い場合は採用し、悪い場合も一定の確率で採用する。これを終了条件を満たすまで繰り返す。本研究では既定の回数分ループを行うことを終了条件とした。

3 実験

3.1 実験環境

先行研究^[6]を参考に、図7のような土量設定で実験を行った。図は各セルごとの土量を示している。この土量は実際の工事計画をもとに作成されている。1セルのサイズは 150 m × 150 m であり、横 12 セル、縦 4 セルの計 48 セルの環境で実験を行った。入り口地点は (0, 0) (図7の Cell1) にある。また目的関数にかかわるパラメータとしては、 $C_{\text{hour}} = 2000 \$ / h$ 、 $C_{\text{const}} = 17.5 \$ / m$ 、仮設道路上でのダンプトラックの速度を $v_{\text{pave}} = 36 \text{ km/h}$ 、仮設道路外でのダンプトラックの速度を $v_{\text{rough}} = 24 \text{ km/h}$ 、ダンプトラックの台数を 1 台、ダンプトラックの積載量を $v_{\text{truck}} = 40 \text{ m}^3$ とした。仮設道路がない状態を初期解とした。

3.2 実験結果

以上の設定で最適化を 5 回行ったところ得られた解はすべて同じ結果が得られた。土砂配分計画は図9に示す。矢印は各ス

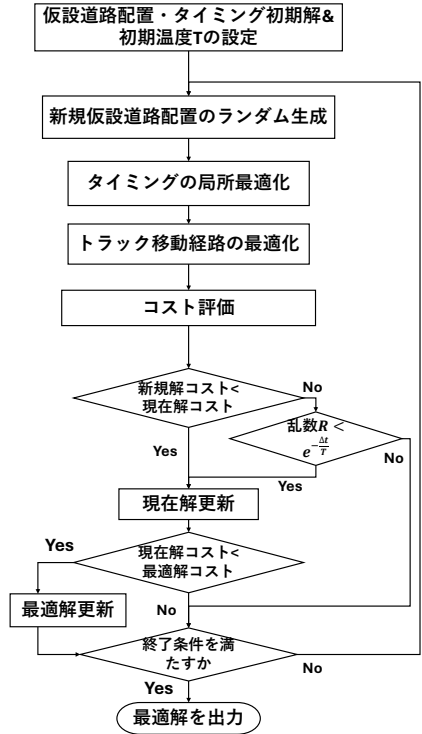


Fig. 6: Flowchart of proposed method

Cell 1 -15000	Cell 2 -3700	Cell 3 +3700	Cell 4 +9000	Cell 5 +9000	Cell 6 +8000	Cell 7 -1000	Cell 8 -11200	Cell 9 -2300	Cell 10 -22000	Cell 11 -6900	Cell 12 +11200
Cell 13 -62600	Cell 14 +22500	Cell 15 +33800	Cell 16 +36000	Cell 17 +23000	Cell 18 +22200	Cell 19 +8100	Cell 20 -24800	Cell 21 -9900	Cell 22 -2200	Cell 23 +14300	Cell 24 -7900
Cell 25 -3700	Cell 26 +22500	Cell 27 +28100	Cell 28 +23000	Cell 29 +24300	Cell 30 +14200	Cell 31 -12400	Cell 32 -34400	Cell 33 -72500	Cell 34 -28500	Cell 35 -2500	Cell 36 0
Cell 37 0	Cell 38 +1400	Cell 39 +2300	Cell 40 +1200	Cell 41 +9000	Cell 42 -5900	Cell 43 -9900	Cell 44 -2700	Cell 45 +2300	Cell 46 -100	Cell 47 0	Cell 48 0

Fig. 7: Cut and fill soil volume for each cell^[6]

テップで運搬を行う切土地点から盛土地点を表している。矢印の上の数字はその土砂配分のステップを表している。仮設道路の配置（黒線）とダンプトラックの移動経路（赤矢印）は図10に示す。仮設道路を建設したタイミングを表1に示す。表1の Step はそのステップの土砂配分の前に仮設道路を建設することを、Allocation は土砂配分でのスタートとゴール地点を、Volume は運ばれた土量を、Path はダンプトラックの経路を、Built Coord Pair はそのステップで建設される仮設道路の座標を示している。例えば、Step35 の場合では、Step35 の土砂配分が行われる前に (0,1) と (1,1) の間に仮設道路が立てられ、土砂配分では (2,2) から (0,1) へ 2500 m³ の土砂を運び、(2,2) → (1,1) → (0,1) の経路が取られたことを示している。

コストは表2に示す。提案手法は仮設道路がない場合に対して 10%、先行研究の配置に対して、7.7%のコストを削減した。先行研究では仮設道路の配置（図8）のみの結果のため、建設タイミングは本研究と同じ手法で最適化した。

また平均計算時間は 14.08 秒であり、最長でも 17.02 秒であった。以上のように十分な計算速度でコストが削減され、本手法の有効性が確認された。

3.3 考察

仮設道路が建設されるかどうかはその仮設道路を利用して運ぶ土量に依存する。つまり運ぶ土量が多ければ、 $C_{\text{operation}}$ の減少量が C_{road} の増加量を超え、建設が有効になる。今回のパラメータでは基本的に 1 回建設した道路で約 15000 m³ 以上運べば仮設道路の建設が有効になる。提案手法では、Step38 のように多くの土量を運ぶところに建設されることが確認できた。一方先行研究の結果では、有効でない位置に仮設道路を多く配置しているため、コストの削減が小さかった。

Table 1: Optimized construction timing

Step	Allocation	Volume[m ³]	Path	Built Coord Pair
8	(3,1) → (9,2)	8800	(3,1) → (4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,2) → (8,2) → (9,2)	[(4,1),(5,2)],[(5,2),(6,2)], [(6,2),(7,2)],[(7,2),(8,2)]
9	(5,0) → (9,0)	8000	(5,0) → (6,0) → (7,0) → (8,0) → (9,0)	[(6,0),(7,0)],[(7,0),(8,0)]
13	(4,2) → (8,2)	24300	(4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,2) → (8,2)	[(4,2),(5,2)],[(5,2),(6,2)], [(7,2),(8,2)]
14	(4,1) → (8,2)	17400	(4,1) → (5,2) → (6,2) → (7,2) → (8,2)	[(4,1),(5,2)],[(7,2),(8,2)]
15	(3,1) → (8,2)	16600	(3,1) → (4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,2) → (8,2)	[(4,1),(5,2)],[(7,2),(8,2)]
17	(3,1) → (8,1)	1800	(3,1) → (4,1) → (5,1) → (6,1) → (7,1) → (8,1)	[(5,1),(6,1)]
19	(2,2) → (7,3)	2700	(2,2) → (3,2) → (4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,3)	[(3,2),(4,2)],[(4,2),(5,2)]
21	(3,2) → (7,2)	22100	(3,2) → (4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,2)	[(6,2),(7,2)]
22	(2,2) → (7,2)	6700	(2,2) → (3,2) → (4,2) → (5,2) → (6,2) → (7,2)	[(3,2),(4,2)],[(6,2),(7,2)]
24	(3,1) → (7,1)	2600	(3,1) → (4,1) → (5,1) → (6,1) → (7,1)	[(5,1),(6,1)]
29	(2,2) → (6,2)	12400	(2,2) → (3,2) → (4,2) → (5,2) → (6,2)	[(3,2),(4,2)]
35	(2,2) → (0,1)	2500	(2,2) → (1,1) → (0,1)	[(0,1),(1,1)]
38	(2,1) → (0,1)	30100	(2,1) → (1,1) → (0,1)	[(0,1),(1,1)],[(1,1),(2,1)]
41	(1,1) → (0,0)	11300	(1,1) → (0,0)	[(0,1),(1,1)]

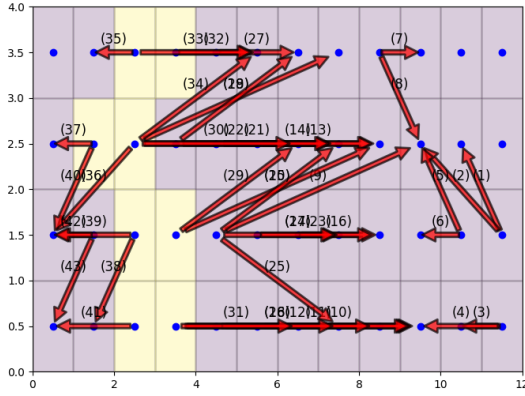
Fig. 8: Result of previous research^[6]

Fig. 9: Result of earth allocation

また、step19 や 35 のように運ぶ土量が少なくても、後に運ぶ土量が多ければ、その配置に建設することも確認された。しかし、[(0,1),(1,1)] に step35 で建設しても、その直後、道路は消滅し元が取れないため、このタイミングで建設しない方がコストが小さくなる。これは、本手法の局所探索の課題であるため、改善が必要である。

4 結論

これまでの切土盛土工事の仮設道路に関する研究では仮設道路の配置のみを最適化しており、地形変化に伴い仮設道路がなくなるということを考慮せず、仮設道路の建設タイミングを最適化する研究は行われていなかった。本研究では地形変化を考慮し、仮設道路の配置、建設タイミングとダンプトラックの移動経路の最適化を同時に行うことで、切土盛土工事全体の最適化を行った。また実際の工事計画に基づく実験環境での実験を行い、本手法の有効性を示した。

今後は、建設タイミングの最適化を行っている局所探索の手法の改善、土砂配分計画も含めた最適化や、入り口へのアクセス、障害物の存在など現実的な状況を反映させる必要がある。

参考文献

- [1] 国土交通省, “建設業の働き方改革の現状と課題,” <https://www.kensetsu-kikin.or.jp/news/57a42379796b2a6c1d23286d40ea5b611f163364.pdf>, 2022, 最終閲覧日:2024 年 2 月 25 日.

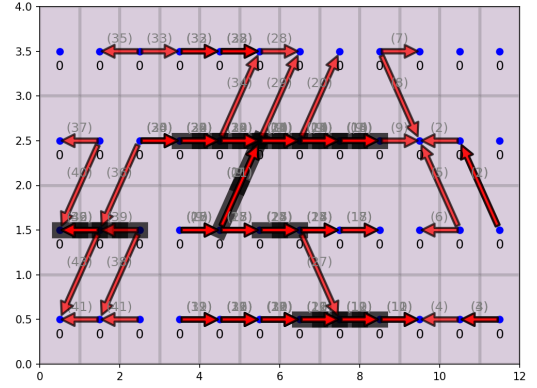


Fig. 10: Result of optimized temporary road placement and a dump truck's route

Table 2: Result of costs

Layout Option	Total Cost(\$)
No Temporary Road	426134
Previous Research	415262
Proposed Method	383129

- [2] W. Hare, V. Koch, and Y. Lucet, “Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming,” *European Journal of Operational Research*, vol. 215, no. 2, pp. 470–480, 2011.
- [3] D. Henderson, D.-E. Vaughan, S.-H. Jacobson, and E.-C. S. R-R. Wakefield, “Solving the shortest route cut and fill problem using simulated annealing,” *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp. 72–84, 2003.
- [4] H.-S. Gwak, J. Seo, and D.-E. Lee, “Optimal cut-fill pairing and sequencing method in earthwork operation,” *European Journal of Operational Research*, vol. 215, no. 2, pp. 470–480, 2011.
- [5] G. Choi and S. Han, “Reinforcement learning-based dynamic planning of cut and fill operations for earthwork optimization,” *Automation in Construction*, 2023.
- [6] C. Liu and M. Lu, “Simulation and optimization of temporary road network in mass earthmoving projects,” *In Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, pp. 3181–3190, 2014.
- [7] C. Yi and M. Lu, “A mixed-integer linear programming approach for temporary haul road design in rough-grading projects,” *Automation in Construction*, vol. 71, no. 2, pp. 314–324, 2016.
- [8] C. Yi and M. Lu, “Mixed-integer linear programming-based sensitivity analysis in optimization of temporary haul road layout design for earthmoving operations,” *American Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 3, 2019.