

積込待機時間を考慮した油圧ショベルの掘削動作計画

○松田 恭岳, 谷島 諒丞, 王永東, ルイ笠原 純ユネス,
永谷 圭司, 安 琪, 山下 淳 (東京大学)

Digging Motion Planning for Excavators Considering Loading Wait Time

○ Yasutake MATSUTA, Ryosuke YAJIMA, Yongdong WANG, Jun Younes LOUHI KASAHARA,
Keiji NAGATANI, Qi AN, and Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo)

Abstract: In excavation work, excavators face waiting periods for loading while dump trucks are hauling, leading to inefficiencies. This study proposes an action planning method for autonomous excavators, utilizing the waiting periods to perform preparatory work by moving soil positions. It was found that digging and depositing soil in appropriate locations during these intervals reduces the time required for excavation work.

1. 序論

1.1 背景

建設業では、その生産性の低さや人手不足が問題となっており、その対策として、建設現場のオートメーション化が研究されている^[1]。建設機械（以下、建機）の中でも、油圧ショベル（以下、ショベル）はその台数の約7割を占める^[2]ことから、油圧ショベルの自動化は、建設現場のオートメーション化において重要である。本研究では、ショベルのタスクとして、土砂を掘り下げる掘削工事に着目する。掘削工事は、ショベルとダンプトラック（以下、ダンプ）の組み合わせのもと、主に、ショベルが土砂を掘削し、ダンプへと積み込む積込作業と、ダンプによる土砂の運搬作業からなり、作業完了までこれらの掘削・積込・運搬のサイクルが繰り返される。掘削工事は長時間の作業となることが多く、コスト削減などの観点から、現場では作業の所要時間短縮が求められている。

掘削工事においては、ショベルが掘削した土砂はダンプが運搬するが、この際、次にダンプが積込位置に到着するまで、ショベルは土砂をダンプに積み込むことができない、積込待機時間が発生する。掘削工事において、ショベルの状態は、掘削・積込作業中のような productive な状態、積込待機時間中などにおける、建機がアイドル状態で待機する non-productive な状態、建機が移動や土砂の管理を行うといった、semi-productive な状態^[3]のいずれかに分けられる。これらの状態の組み合わせや、各状態における作業内容は、所要時間に影響を及ぼすため、所要時間の短縮を考える上で重要である。

1.2 関連研究

畠らは、建機の台数や建機のタスクの組み合わせを最適化する、施工計画の最適化手法を提案した^[4]。畠らの手法は、積込待機時間中に、建機が何もせずにアイドル状態で待機する時間を減らす最適化である。しかしながら、現場においては、運搬路の状況や機器の状態など、様々な原因によりダンプの作業に遅延が発生しうる^[5]ため、積込待機時間が存在しないことは考えにくい。また、畠らは積込待機時間をショベルがアイドル状態で待機する、non-productive な状態、すなわち無駄な時間として扱っている。一方で、積込待機時

間中も、ショベルは積込待機時間中の作業、すなわち準備作業を行い、semi-productive な状態を取ることが可能である。しかし、積込待機時間中に、ショベルがどのような準備作業をすれば良いのかについては研究されてこなかった。

積込作業中の1回の掘削に関して、Feng らは、所要時間やエネルギー消費量などに対して多目的最適化問題を解き、掘削軌道を計画する手法を提案した^[6]。また、Lee らはモデル予測制御を使用して、リアルタイムに掘削量を最大化する手法を提案した^[7]。一方で、準備作業中の掘削を考慮する場合は、積込作業時や準備作業時に、ある場所をどのように掘るのかだけでなく、どこに土砂を移動させるのか、どこから掘削するのかという、掘削・放土を行う場所や順序の観点も必要となる。

Kim らは、経路計画との類似性に着目し、掘削工事の作業範囲を分割し、ショベルの移動経路を最適化する手法を提案した^[8]。ショベルの移動自体は、準備作業の1つと考えられる。しかしながら、この研究では、土砂は掘削されるのみで、別の場所に放土・移動されることは想定されていない。また、この研究は、移動経路による所要時間の短縮効果のみを考慮しており、建機の移動が個々の積込作業の所要時間に与える影響を考慮するものではない。

土砂の移動を物体の配置と捉えると、類似する問題として、ピッキング作業を行う、倉庫の割り当て問題が考えられる。Carlo らは、待機時間に倉庫内の再配置を行う手法を提案した^[9]。ピッキング作業では、需要に応じて製品が取り出されることから、再配置前の状態は受動的に定まる。一方で、掘削工事では、待機時間に準備作業を行う場所だけでなく、積込作業として掘削を行う場所も、能動的に決定可能であり、双方を考慮して作業を進めることで、所要時間の短縮が期待される。また、ピッキング作業では、製品ごとの移動の所要時間に焦点が向けられるが、掘削工事では全ての作業が完了するまでの所要時間が重要である。

1.3 研究目的

本研究では、掘削工事に着目し、掘削・積込・運搬サイクルの効率化が可能な、積込待機時間を考慮した油圧ショベルの掘削動作計画手法の提案により、作業全体の所要時間の短縮を目指す。ここでは、積込待機

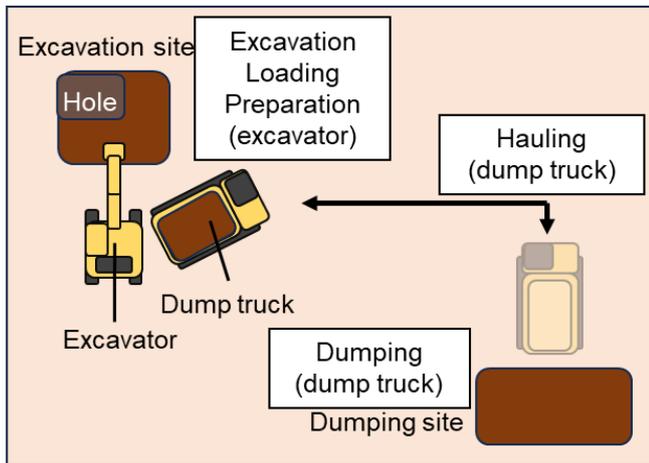


Fig. 1 Schematic representation of excavation work process.

時間中に実行する準備作業として、土砂の移動に着目する。本稿では、掘削動作計画の初段階として、ショベルが機体位置を変えずに、掘削・放土を行う土砂の場所のみを変えた場合に、準備作業が所要時間に与える影響について考察する。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究では、掘削工事の所要時間が最短となるような、土砂の掘削・放土順序を考える。ここでは、土木作業環境をモデル化した環境を使用し、位置情報を持つブロック化した土砂を用いる。各土砂の位置から推定した各作業の所要時間を使用し、積込作業と積込待機時間中の準備作業の際に行う、掘削と放土による土砂の移動順序を最適化することを考える。

2.2 問題設定

本研究では、図1のように、掘削工事を、ショベル1台と、ダンプ1台によって遂行することを考える。ショベルは、指定した位置から、指定範囲（掘削指定範囲）の土砂の掘削・積込を行う。一方、ダンプは、指定した位置（積込指定位置）で土砂が積み込まれ、また、積み込まれた土砂の運搬を行う。なお、ダンプが運搬に出発し、積込指定位置に戻るまでの時間である、積込待機時間は既知と仮定する。これらの掘削・積込・運搬は、掘削指定範囲の掘削が完了するまで繰り返される。なお、本稿において、ショベルは作業全体を通して機体の位置を動かさないことを仮定し、ショベルは指定した位置から掘削指定範囲内の全ての土砂を掘削・積込可能であるとする。評価指標としては、作業の所要時間を使用する。

2.3 モデル化

既存の土木シミュレータは処理量が多く、掘削工事のような長時間の作業の処理に向かないため、処理には工事環境をより単純にモデル化した環境を使用する。このモデル化環境において、地面や建機の位置といった作業環境の状態を、離散化し、グリッドベースで考える。掘削指定範囲の空間を、事前に設定した同じサイズのブロックに分割し、各ブロックの位置はその代表点の位置で表す。このブロックを、ショベルの掘削が可能範囲内、掘削指定範囲に関して地面に垂直な方向に拡張する。各ブロック内に土砂が存在するとき、その地点で掘削が可能であるとし、ブロック単位

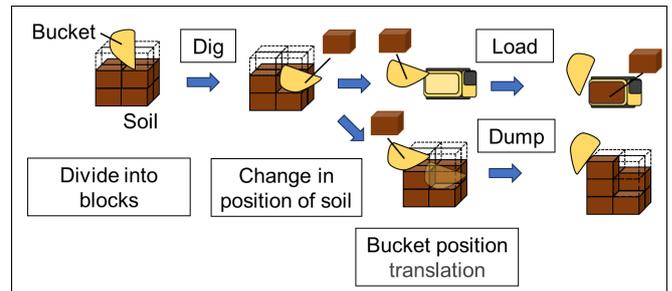


Fig. 2 Sequential task progression in a simulated excavation environment.

で土砂を掘削する。ここで、地点とは各ブロックのことである。なお、ブロックのサイズはバケットの容量よりも大きく設定し、掘削形状が統一されるように設定する。

ショベルは土砂に対して、掘削・積込・放土を行うことが可能であるとする。土砂の掘削・積込・放土はそれぞれ、対象とする地点を選択することにより表現する。この処理のイメージを図2に示す。掘削は選択された地点の土砂を地面から削除し、バケットに保持する。積込は、バケット内の土砂をダンプに移動する。放土は、バケット内の土砂を無くし、選択された地点に追加する。このとき、掘削は地表の真下を含む地点、放土は地表の真上にある地点のみ選択可能である。

2.4 ショベルの行動パターン

掘削工事は、掘削・積込・運搬を、掘削指定範囲に存在した土砂がなくなるまでショベルとダンプが繰り返す作業と考えることができる。そこで、ショベルの行動パターンを図3に示すフローチャートで表す。図3(a)は全体の流れを示す。ショベルは作業開始後、ダンプの積載指定量 V_{\max}^{dump} [m³] まで積込作業を行う。積込作業時の流れを図3(b)に示す。積込作業は、選択した地点の土砂を掘削しダンプに積み込むことを想定し、土砂の掘削地点の決定、掘削地点へのバケットの移動、掘削動作の実行、積込地点へのバケットの移動、ダンプへの土砂積込動作の実行により構成される。これらの一連の動作を積込作業と呼び、ダンプへ積み込んだ土砂量がダンプの積載指定量に達するまで繰り返し実行する。なお、積込作業中に、ダンプが運搬中などの理由により積込指定位置に不在の場合は、ショベルは土砂積込動作を実行直前の状態で待機し、ダンプが到着後すぐに土砂積込動作を実行する。積載指定量の積込後、ダンプは積込指定位置から出発し、積込待機時間 T_{interval} [s] をかけて土砂を運搬する。

作業が未完の場合、ダンプが土砂の運搬中、すなわち、積込待機時間中に、ショベルは準備作業に移行する。準備作業時の流れを図3(c)に示す。準備作業は、選択した地点の土砂を掘削し、別の選択した地点に放土、移動することを想定し、土砂の放土地点の決定、掘削地点の決定、掘削地点へのバケットの移動、掘削動作の実行、放土地点へのバケットの移動、放土動作の実行により構成される。これらの一連の動作を準備作業と呼び、ショベルは、積込待機時間中に準備作業を繰り返し実行する。ショベルは、ダンプが到着する T_{arr} [s] 手前で準備作業を切り上げ、積込作業に移行する。ここでは、ダンプ到着後はすぐに土砂積込動作が実行されることを想定し、ダンプの運搬出発から積込

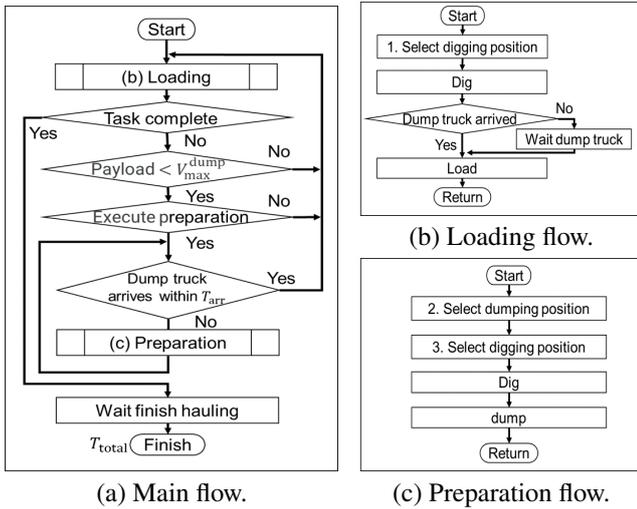


Fig. 3 Flow chart of excavator action.

待機時間 T_{interval} 経過後に、ショベルが土砂積込動作を実行する直前の状態に達するような時間で、準備作業を切り上げる。

2.5 所要時間の計算方法

以下、作業全体の所要時間を全体所要時間と表記し、各作業・動作の所要時間を各作業・動作の所要時間と表記する。例として、積込作業の所要時間は、積込作業の所要時間のように表記する。作業開始時点から、掘削指定範囲の掘削工事が完了し、ダンプが運搬を完了した時点までの時間を、全体所要時間 T_{total} [s] とする。全体所要時間は、掘削工事における掘削・積込・放土・運搬・待機の各作業の所要時間の合計により求まる。

掘削～積込地点間の旋回角は、積込作業の所要時間に影響する一因であり、一定角度以上の旋回角度では、旋回角の増加に伴い積込作業の所要時間が増加する^[10]。ここで、バケットで土砂を掬う、土砂を空けるといった掘削・積込・放土動作が、土砂の位置・形状によらず一定時間をかけて行われると仮定する。このとき、積込作業の所要時間は、掘削～積込地点間のバケット移動距離、すなわち掘削地点と積込地点の位置から推定することが可能である。ここで、ブロック化した地面の各地点を、地点 $x_i \in \mathbb{N}$ のように番号で表す。このとき、バケットがある地点 x^{start} からスタートし、ある地点 x_i の土砂を、ダンプ上の積込地点 x^{load} に積み込む、積込作業の所要時間 $T_{\text{load}}(x_i)$ を、以下の式 (1) のように算出する。

$$T_{\text{load}}(x_i) = T_{x^{\text{start}} \rightarrow x_i}^{\text{swing}}(x_i) + t^{\text{dig}} + T_{x_i \rightarrow x^{\text{load}}}^{\text{swing}}(x_i) + t^{\text{load}}, \quad (1)$$

ここで、 $T_{x^{\text{start}} \rightarrow x_i}^{\text{swing}}(x_i)$ はスタート地点 x^{start} から掘削地点 x_i への旋回動作の所要時間、 t^{dig} は掘削動作の所要時間、 $T_{x_i \rightarrow x^{\text{load}}}^{\text{swing}}(x_i)$ は掘削地点 x_i から積込地点 x^{load} への旋回動作の所要時間、 t^{load} はダンプへの土砂積込動作の所要時間である。各旋回動作の所要時間は、対象とする地点間の、バケットの移動軸に沿った変位量を、平均移動速度で除することにより算出する。

同様に、準備作業の所要時間を、掘削地点と放土地点の位置から推定する。ここでは、バケットがある

地点 x^{start} からスタートし、ある地点 x_i の土砂を掘削し、放土地点 x^{dump} に放土する、準備作業の所要時間 $T_{\text{prep}}(x_i)$ を、以下の式 (2) のように算出する。

$$T_{\text{prep}}(x_i) = T_{x^{\text{start}} \rightarrow x_i}^{\text{swing}}(x_i) + t^{\text{dig}} + T_{x_i \rightarrow x^{\text{dump}}}^{\text{swing}}(x_i) + t^{\text{dump}}, \quad (2)$$

ここで、 $T_{x_i \rightarrow x^{\text{dump}}}^{\text{swing}}(x_i)$ は掘削地点 x_i から放土地点 x^{dump} への旋回動作の所要時間、 t^{dump} は土砂放土動作の所要時間である。

2.6 掘削・放土地点の決定方法

全体所要時間に影響する要因は様々考えられるが、ここでは最初の取り組みとして、積込にかかる時間のみを考慮する。すなわち、積込作業中に掘削を行う地点と積込地点との距離が、全体所要時間を左右すると考える。そこで、本手法では、複数種類の決定方法に基づいて、積込作業・準備作業時に掘削や放土を行う地点の決定を行う。

掘削と放土を行う地点の決定は、以下の 1 から 3 の場合を考える。

1. 積込作業時の掘削地点決定
2. 準備作業時の放土地点決定
3. 準備作業時の掘削地点決定

1. 積込作業時の掘削地点決定は、図 3(b) に示すように、積込作業時の掘削直前に行われる。積込作業時の各回の掘削地点 x_i^{load} を、次に示す①から⑤のいずれかの決定方法に従い決定する。

- ①ダンプから最短の地点を選択
- ②ダンプから最長の地点を選択
- ③列ごとに地点を選択
- ④行ごとに地点を選択
- ⑤ランダムに地点を選択

決定方法①から決定方法④のイメージを、図 4 に示す。ここでは、決定時点で掘削が可能な地点の集合 R^{dig} に対して、 $x_i \in R^{\text{dig}}$ となる全ての地点の中から、各決定方法に従い掘削する地点を 1 つ選択する。なお、作業全体を通し決定方法は一貫し、作業の途中で変更することは考えない。

決定方法①は、ダンプへの土砂の積込にかかる時間が最も短い地点を選択する。この地点を、ダンプから最短の地点と表現する。ここでは、バケットのスタート地点 x^{start} をダンプ上の積込地点 x^{load} として、その地点の土砂の積込にかかる時間 $T_{\text{load}}(x_i)$ を式 (1) に従い計算し、その中で最も値が小さい地点を選択する。なお、 $T_{\text{load}}(x_i)$ の値が同じ地点では、③と同様に、ダンプと最も反対側の列で、ショベルに対して最も奥の地点が優先される。

決定方法②は、ダンプへの土砂の積込にかかる時間が最も長い地点を選択し、この地点をダンプから最長の地点と表現する。ここでは、 $T_{\text{load}}(x_i)$ の値が最も大きな地点を選択する。

決定方法③は、各地点をショベルに対して列ごとに掘削することを考え、ダンプと最も反対側の列から、ショベルに対して最も奥の地点を選択する。

決定方法④は、各地点をショベルに対して行ごとに掘削することを考え、ショベルに対して最も奥の行から、ダンプと最も反対側の地点を選択する。

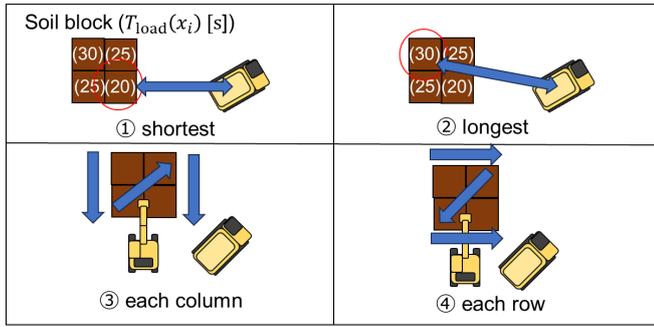


Fig. 4 Optimal selection strategies for excavation target soil blocks.

決定方法⑤は、ランダムに地点を選択する。

図 3(c) に示すように、準備作業時の掘削直前に、2. の放土地点、3. の掘削地点の順で各回の放土・掘削地点をそれぞれ決定する。これは、土砂の移動先である放土地点を優先して決定するためである。

2. 準備作業時の放土地点決定では、準備作業時の各回の放土地点 x_i^{dump} を、1. と同様に①から⑤のいずれかの決定方法に従い決定する。ここでは、決定時点で放土が可能な地点の集合 R^{dump} に対して、 $x_i \in R^{\text{dump}}$ となる全ての地点の中から、放土する地点を1つ選択する。

3. 準備作業時の掘削地点決定では、準備作業時の掘削地点 x_i^{prep} を、同様に①から⑤のいずれかの決定方法に従い決定する。ここでは、決定時点で掘削が可能な地点の集合 R^{dig} の中で、放土地点と異なる地点、すなわち、 $x_i \in R^{\text{dig}}$ かつ $x_i \neq x_i^{\text{dump}}$ となる全ての地点の中から、掘削する地点を1つ選択する。

2.7 全体所要時間が最短となる掘削・放土順序

全体所要時間 T_{total} が最短となるような、ショベルが掘削・放土する土砂の選択順序を求める。ここでは、2.6 節で説明した掘削・放土地点の決定方法の組み合わせによって、掘削・放土を行う地点の順序が変化することで、全体所要時間が変化すると考えられる。なお、 T_{total} は、ある掘削・放土地点の決定方法の組み合わせのもと、モデル化した環境上でシミュレータを実行することにより得られる。そのため、全体所要時間が最短となる掘削・放土地点の決定方法の組み合わせを求める。

3. 実験

3.1 概要

本実験では、各掘削・放土地点の決定方法に基づいた準備作業を行うことにより、全体所要時間の短縮が見込まれるかを検証する。また、積込待機時間 T_{interval} の長さにより、最適な掘削・放土地点に違いが見られるかを検証する。複数の条件のもと、積込時・準備作業時の掘削・放土地点を逐次決定し、シミュレータで全体所要時間を算出し、比較する。条件としては、積込待機時間 T_{interval} を 60 s から 240 s まで 20 s 間隔で変更しながら、準備作業有り（提案手法）の場合と、準備作業無しの場合で全体所要時間を比較した。なお、準備作業無しの場合について、積込作業時の掘削地点決定は、決定方法①と同じく、ダンプから最短の地点の土砂を選択した。準備作業有り（提案手法）の場合には、各掘削・放土地点の決定方法の組み合わせに対してグリッドサーチを行い、全体所要時間が最短となる

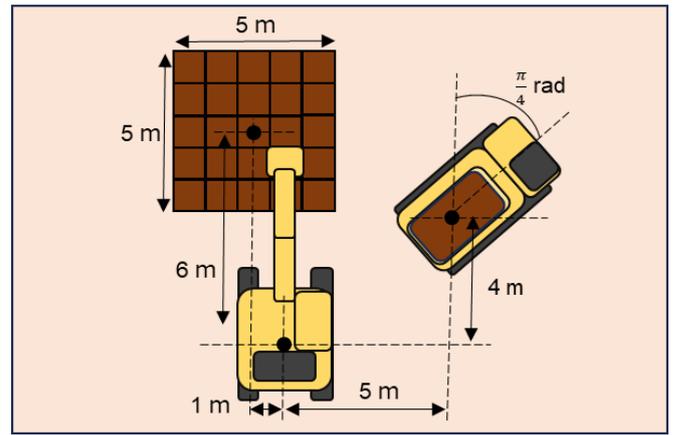


Fig. 5 Experimental setup and spatial arrangement of excavator and dump truck.

掘削・放土地点の決定方法の組み合わせを求めた。

3.2 実験設定

ショベル1台とダンプ1台を使用し、幅5m、奥行5m、深さ2mの土砂を掘削することを考える。ショベルとダンプの配置は図5の通りである。実験設定を表1に示す。土砂ブロックのサイズは、1m角の立方体とした。シミュレータの時間分解能 t_{res} は0.1sと設定した。バケットの移動軸は、地面と平行な2次元平面上で、ショベル機体に対して前後の伸縮と左右の旋回を考え、前後方向の平均移動速度 \bar{v}_r を0.5m/s、旋回方向の平均移動速度 \bar{v}_θ を $\pi/8$ rad/s に設定した。ここでは、土砂に対する掘削・放土動作の所要時間は、土砂ブロックの高さに依存しないと仮定した。ダンプの積載上限 $V_{\text{max}}^{\text{dump}}$ は 5 m^3 に設定した。これは、積載量が10tのダンプを想定した。ショベルのバケット容量 $V_{\text{max}}^{\text{bucket}}$ は 0.5 m^3 とした。土砂ブロック1個あたり、2回の掘削で積み込み、5ブロック分の土砂でダンプの積載上限に達することを想定した。

2.4 節で、準備作業有り（提案手法）の場合、ダンプの到着時に、ショベルが土砂積込動作の実行直前状態にたどり着くことを仮定した。そこで、準備作業の終了判定は、掘削・放土地点として取りうる全地点に対し計算した、積込作業の所要時間の最大値 $T_{\text{max}}^{\text{load}}$ [s] と、準備作業の所要時間の最大値 $T_{\text{max}}^{\text{prep}}$ [s] から、 $T_{\text{arr}} = T_{\text{max}}^{\text{load}} + T_{\text{max}}^{\text{prep}}$ を用いて判定した。

なお、本実験に用いたプログラムはPython3.11を用いて実装した。

Table 1 Experimental setup

item	value
size of soil blocks	1 m × 1 m × 1 m
t_{res}	0.1 s
\bar{v}_r	0.5 m/s
\bar{v}_θ	$\pi/8$ rad/s
t^{dig}	5 s
t^{load}	5 s
t^{dump}	5 s
$V_{\text{max}}^{\text{dump}}$	5 m^3
$V_{\text{max}}^{\text{bucket}}$	0.5 m^3

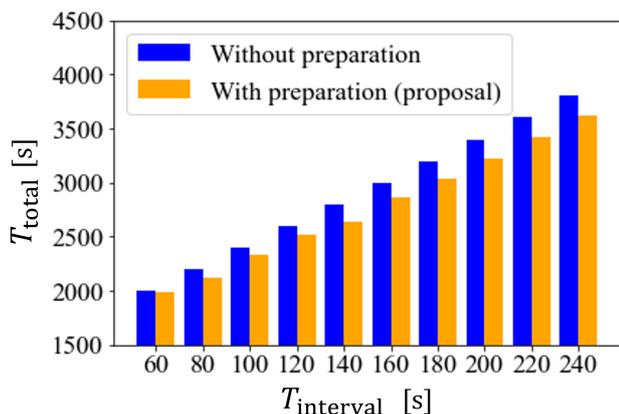


Fig. 6 Relationship between loading waiting time and required time.

3.3 結果

積込待機時間 T_{interval} の各条件ごとの全体所要時間 T_{total} を図 6 に示す。図中の青色が準備作業無しの場合、橙色が準備作業有り（提案手法）の場合の全体所要時間を示す。また、各積込待機時間 T_{interval} ごとの、全体所要時間の短縮結果と、全体所要時間が最短となった掘削・放土地点の決定方法の結果を表 2 に示す。表 2 は左から、全体所要時間 T_{total} 、準備作業無しと比較した、準備作業有り（提案手法）の全体所要時間の差 ΔT_{total} 、 ΔT_{total} の全体所要時間 T_{total} に対する割合、全体所要時間が最短となった掘削・放土地点の決定方法の組み合わせ、積込待機時間中 1 回あたりに、準備作業として掘削・放土を行った平均地点数 \bar{n}_{prep} を示す。

準備作業有り（提案手法）の場合は、準備作業無しの場合と比較して全体所要時間が短縮された。全体所要時間の短縮割合に関しては、 $T_{\text{interval}}=200$ [s] まで増加傾向が見られ、 $T_{\text{interval}}=200$ [s] 以降は減少傾向が確認された。

3.4 考察

全ての T_{interval} の条件下で、準備作業有り（提案手法）の場合、準備作業無しの場合と比較して、全体所要時間の短縮が見られたが、その時の掘削・放土地点の決定方法の組み合わせは T_{interval} により異なった。例として、 $T_{\text{interval}}=200$ [s] の場合は、1. 積込作業時の掘削地点は、積込にかかる時間が最も短い、①ダンプから最短

の地点を、2. 準備作業時の放土地点は、積込にかかる時間が最も短い、①ダンプから最短の地点を、3. 準備作業時の掘削地点は、積込にかかる時間が最も長い、②ダンプから最長の地点をそれぞれ選択すると、全体所要時間が最も短いことが分かった。 $T_{\text{interval}}=200$ [s] では、準備作業時間中に約 5 地点分の土砂を移動しており、本来積み込みに時間がかかる地点の土砂が、より時間のかからない地点に移動され、この移動した土砂の分だけ、積込作業の所要時間が短縮されたと考えられる。

一方で、 $T_{\text{interval}}=180$ [s] の場合は、3. 準備作業時の掘削地点は、③列ごとに掘削地点を選択する場合が最短となった。この場合、準備作業時に、 $T_{\text{interval}}=200$ [s] の時のように、ダンプから最長・最短の地点間で掘削・放土を行うよりも、より近い地点間で掘削・放土が行われた。準備作業として、近い地点間で掘削・放土を行うことは、準備作業の所要時間が短いことから、一定時間内に行うことが可能な準備作業の地点数・回数が増加する。そのため、列ごとに掘削地点を選択する場合は、土砂の移動 1 地点あたりの短縮効果と、準備作業の地点数のバランスが最も良く、全体所要時間の短縮効果が最大となったと考えられる。そのため、本稿では考慮しなかったが、準備作業の地点数に影響する、各地点に対する準備作業の所要時間 $T_{\text{prep}}(x_i)$ を考慮して掘削・放土地点を決定することも必要であると考えられる。

なお、 $T_{\text{interval}}=60$ [s] では、全体所要時間の短縮がほとんど見られなかったが、これは積込待機時間が短く、準備作業が行えていないためである。積込待機時間が短い場合も含めて、準備作業の有効性を検証するためには、準備作業の終了判定条件を改良し、ダンプ到着後も掘削動作やバケットの移動動作が可能な状況も考慮したうえで、改めて全体所要時間の比較を行う必要があると考えられる。なお、このような積込待機時間が短い場合は、ショベル 1 台に対してダンプが複数台存在し、常にダンプが交代待ちをするような状況や、ダンプの土砂運搬地点が極端に近い場合が考えられるが、現実において、このような状況は多くない。

全体所要時間の短縮時間は、 T_{interval} に従い徐々に増加し、 $T_{\text{interval}}=180$ [s] で約 180 s に達した。 T_{interval} が長いほど、準備作業の平均地点数 \bar{n}_{prep} が多いことから、準備作業回数が増えたことが短縮時間増加の要因であると考えられる。なお、180 s の短縮は、全体所要時間に対しては約 5% の削減であり、全体所要時間から積込待機時間、すなわちダンプの運搬時間を除いた、ショベルの積込作業の累計時間に対しては、約 13% の削減となった。このことから、積込待機時間中に、提案手法のように土砂を移動させる準備作業を行うことは、所要時間の短縮に有効であることが分かった。

なお、 $T_{\text{interval}}=180$ [s] 以降は全体所要時間の短縮時間は伸びなかったが、これは、1 回の運搬に必要とされる積込作業の回数に対して、準備作業の回数 \bar{n}_{prep} が多くなり、準備作業の効果の限界に達したためだと考えられる。この場合、準備作業の全体所要時間短縮効果を活用する方法として、ダンプの台数を増やすことが考えられる。このように、準備作業の効果をもふまえ、ショベルとダンプの台数の調整につなげることも可能である。

本研究では、建機の場所の移動を考えなかったが、

Table 2 Experimental results at different intervals T_{interval}

T_{interval} [s]	ΔT_{total} [s]	rate [%]	1.	2.	3.	\bar{n}_{prep}
60	-17.0	-0.8	⑤	①	③	0.0
80	-77.8	-3.5	⑤	①	②	1.0
100	-66.8	-2.8	⑤	①	②	1.1
120	-87.9	-3.4	①	①	②	2.0
140	-122.0	-4.4	①	①	②	3.0
160	-137.8	-4.6	①	①	③	3.3
180	-185.0	-5.2	①	①	③	4.3
200	-180.0	-5.3	①	①	②	4.8
220	-183.6	-5.1	①	①	②	5.6
240	-184.7	-4.9	①	①	②	6.3

掘削指定範囲を広げ、準備作業として建機の移動も考慮する設定に拡張することで、さらに準備作業の効果が高まることが期待される。

また、本実験設定では、積込待機時間の終盤、ダンプ到着直前に行う土砂の掘削にかかる時間は、全体所要時間に影響しない。そのため、積込作業時の掘削地点に対して、ダンプ到着直前と到着後で別の決定方法を適用することや、積込作業と準備作業を別々ではなく、統合して行動計画を立てることにより、さらなる全体所要時間の短縮が期待される。

なお、本稿では、土砂ブロックのサイズを、バケット容量に比べ大きく設定した。さらに、毎回の掘削量や掘削動作の実行時間は同じことを仮定した。しかしながら、現実の掘削においては、掘削時の所要時間や、掘削量は、土砂の場所や形状により異なることが考えられる。そのため、より現実に即した状況を考える場合は、各回の掘削で、地点ごとの掘削量や掘削時間を考慮するようなシステムに拡張することが求められる。

4. 結論

本研究では、積込待機時間中の準備作業を考慮し、積込作業・準備作業の各作業において、掘削・放土を行う地点の選択順序を決定する手法を提案した。準備作業として、適切な順序で土砂の移動を行うことにより、全体所要時間の短縮が見込まれることが分かった。

今後は、各掘削・放土地点の決定方法を改良し、準備作業の回数も考慮した手法や、積込作業と準備作業を統合して計画を立てる手法へと拡張する予定である。また、準備作業として、ショベルの位置の移動を考慮した手法にも取り組む予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省: “「i-Construction 2.0」を策定しました”。 Accessed on 24.09.2024. (2024). URL: https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html.
- [2] e-Stat: “建設機械動向調査 / 令和3年度 建設機械動向調査”。 Accessed on 24.09.2024. (2023). URL: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600080&tstat=000001130295&cycl>.
- [3] J. Kim and S. Chi: “Multi-camera vision-based productivity monitoring of earthmoving operations”. *Automation in Construction* 112, p. 103121, (2020).
- [4] 畠昭治郎, 井克彦: “土工機械の待合せに関する基礎的考察”. 土木学会論文報告集 1971.194, pp. 127–140, (1971).
- [5] S. V. Manyele: “Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time”. *Engineering* 9.7, pp. 599–624, (2017).
- [6] H. Feng, J. Jiang, N. Ding, F. Shen, C. Yin, D. Cao, C. Li, T. Liu, and J. Xie: “Multi-objective time-energy-impact optimization for robotic excavator trajectory planning”. *Automation in Construction* 156, p. 105094, (2023).
- [7] D. Lee, I. Jang, J. Byun, H. Seo, and H. J. Kim: “Real-time motion planning of a hydraulic excavator using trajectory optimization and model predictive control”. *Proceedings of the 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. (2021), pp. 2135–2142.
- [8] J. Kim, D. Lee, and J. Seo: “Task planning strategy and path similarity analysis for an autonomous excavator”. *Automation in Construction* 112, p. 103108, (2020).
- [9] H. J. Carlo and G. E. Giraldo: “Toward perpetually organized unit-load warehouses”. *Computers & Industrial Engineering* 63.4, pp. 1003–1012, (2012).
- [10] J. Yoon, J. Kim, J. Seo, and S. Suh: “Spatial factors affecting the loading efficiency of excavators”. *Automation in Construction* 48, pp. 97–106, (2014).