

# ショベル掘削動作中のエネルギー効率分析

## Analysis of Energy Efficiency of an Excavator During Digging Operation

●佐野 裕介\* 呉 春男\*  
Yusuke SANO Chunnan WU



図1 模擬試験装置  
Mock test equipment

油圧ショベルの掘削作業における消費エネルギーは、土砂から受ける掘削反力(土圧)と油圧ショベル動作によるエネルギーの合計となる。したがって、掘削反力の発生メカニズムを明らかにすることで、効率の良い掘削軌道を生成することが可能になる。これまで、円弧による掘削軌道の土圧モデルを対象としていたが、水平引きを伴う掘削軌道の土圧モデルは考慮されていなかった。また、エネルギー効率の評価を目的として、模擬試験装置から得られた掘削反力データをもとに、消費エネルギーを検証してきたが、土圧モデルを用いて掘削反力を計算することができれば、模擬試験を実施することなく、掘削軌道からエネルギー効率を評価することが可能になる。そこで、水平引き軌道を伴う掘削軌道の土圧モデルを検証し、シミュレーションによってエネルギー効率を評価する方法を検証した。

Energy during excavation works of a hydraulic excavator is consumed by both the earth pressure and its operations. Therefore, after clarifying the mechanism to be generated excavation reaction, it'll be possible to generate an efficient excavation trajectory. However the earth pressure model of the excavation trajectory by arc had been targeted, horizontal sweep isn't considered on the model. In addition, to evaluate energy efficiency, the energy consumption is verified only based on data of excavation reaction force obtained from mock test. So, if the excavation reaction force can be calculated using the earth pressure model, it'll be possible to evaluate the energy efficiency from the excavation trajectory without mock tests. On this paper, both the earth pressure model of the excavation trajectory with horizontal sweep and simulation method for energy efficiency evaluation is verified.

### 1 まえがき

近年、労働人口の減少やインフラの老朽化によって、自律化された建設機械の開発が行われている<sup>(1)</sup>。建設機械の自動施工システムは、3次元計測や動作計画、電子油圧制御などにより複雑化してきている。油圧ショベルのように土砂を掘削する建設機械の場合、掘削対象からの反力が機械動作や消費エネルギーに影響するので、自動制御することは困難であ

る。したがって、掘削反力をモデル化し、自動制御における掘削軌道を評価する方法が必要となる。これに対し、過去の研究では油圧ショベルが円弧軌道で土砂を掘削するときのバケット内の土砂挙動の観察と反力計測を行い、クーロンの土圧理論をもとに掘削中の反力の定式化を行ってきた。また、掘削中の油圧ショベルの消費エネルギーを、土圧によるエネルギーとショベルの動作によるエネルギーの合計として表し、掘削反力の計測結果をもとにした掘削効率の評価も行ってい

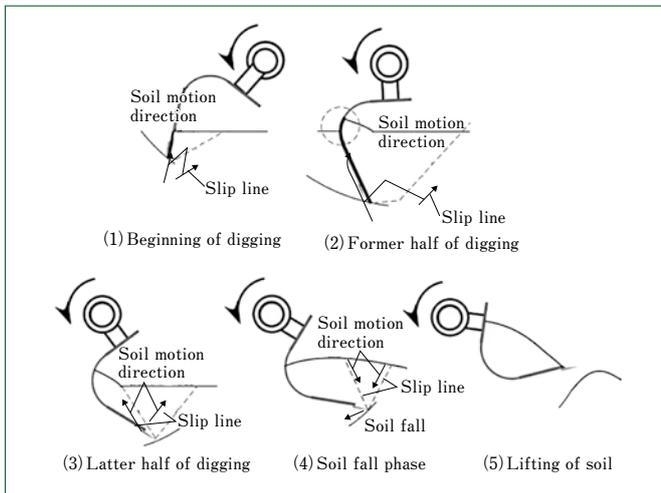


図2 掘削中の土砂挙動過程  
Soil behavior phases during excavation

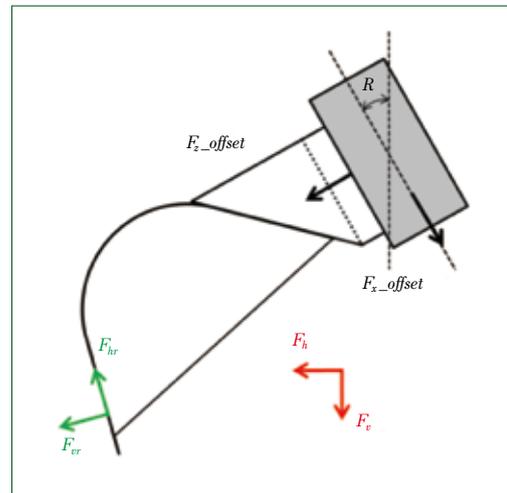


図3 掘削反力座標系  
Coordinate system of reaction force

た。しかし、それらの検討では水平引きの掘削軌道については考慮されていなかった。

水平引きの土圧モデルは、掘削中のバケット前方に堆積する土砂量に依存することから、堆積土砂量の考慮が必要になる。また、エネルギー効率の評価では、水平引きの掘削軌道について消費エネルギーの比較実験を行い、試験装置から得られた実験データを掘削反力としていたが、水平引き軌道の土圧モデルを用いることによって実験をすることなく掘削軌道からエネルギー効率の計算を行うことが可能となる。そこで、水平引きの掘削反力を検証し、水平引きの掘削軌道における土圧モデルを作成した。また、土圧モデルによる消費エネルギーと油圧ショベル動作による消費エネルギーから、掘削軌道のエネルギー効率の評価を行った。

## 2 実験環境

図1に、本実験で使用した掘削模擬試験装置を示す。掘削機構は水平方向に移動するX軸、垂直方向に移動するY軸とバケットを回転させるR軸の3軸で構成される。各軸に変位および速度を与えることで、油圧ショベルの掘削運動を再現することが可能である。装置下部に設置された土砂容器は装置駆動範囲と同等の大きさで、容器片側の壁面がポリカーボネート製である。これにより、土中の土砂挙動を観察することが可能である。ステンレス製のバケットは実機のスケールモデルであり、取外し可能な側板が取り付けられている。また、基礎実験の結果から、砂とバケットとの動摩擦角と停止安息角は、それぞれ $23^\circ$ 、 $32^\circ$ と求められた。

## 3 掘削中の土砂挙動と土圧モデル

油圧ショベルの掘削運動を再現した模擬試験動画から、バケット内部における土砂挙動の観察を行った。その結果から、掘削反力を定式化するには、図2に示すような掘削過程に分割する必要があることが分かった。それぞれのフェーズにおいて反力の定式化を行い、実験値との比較によりその妥当性を検証した。

土圧モデルは、クーロンの受働土圧の式をもとに三角形を

複数使用したモデルを使用することで、高い計算精度が得られることが分かっている<sup>(2)</sup>。このクーロンの受働土圧モデルをもとに、掘削反力の理論値が計算される。まず、バケット面での土砂の滑りを想定し、受働土圧を計算する。次に、土砂の内部での滑りを想定した受働土圧を、爪先の掘削軌道が安息角となるまで計算する。これらの区間では、実際には受働土圧が小さい方の現象が発生する。受働土圧の決定には、バケット前方の地表に堆積している土砂量が必要であり、受働土圧の計算では堆積した土砂量の影響が非常に大きい。土砂挙動の観察結果および掘削反力測定データから、掘削開始後の貫入軌道ではバケット前方に堆積する土砂量は考慮せず、水平軌道到達後から、バケットによる掃引体積の0.7倍がバケット前方の地表に堆積すると仮定した。さらに、堆積する土砂の形状は滑り線形状から算出された。この仮定によって、水平引きの距離に応じた掘削反力の計算が可能となる。バケット爪先の軌道が安息角を超えると、爪先の下方の空間で土砂の崩落が発生することから、爪先の上部の土砂が下方に流れ始める。このとき主働土圧が発生し、その後、掘削反力は主働土圧よりもさらに小さくなる。爪先が地上に出ると水平方向の反力がなくなり、垂直成分はバケット内部に残った土砂の重量となる。これにより、掘削反力の垂直成分の最終値はバケットの積載土砂重量となるが、理論値ではゼロとしている。

## 4 掘削反力計測

掘削中の土圧モデルの妥当性を評価すべく、模擬試験装置による実験を行った。掘削反力は、バケット根本に取り付けられた6軸力覚センサによって計測される。このとき、計測された力データからバケット重量などの補正を行っている。計測された反力の絶対座標における水平、垂直成分 $F_h$ 、 $F_v$ および、バケット底面を基準とした $F_{hr}$ 、 $F_{vr}$ の座標系を図3に示す。これらの変換は回転行列を利用して計算される。土圧モデルの妥当性を検証すべく、計測データと理論値の比較を行った。図4に掘削反力の計測結果と理論値の水平方向成分を、図5に垂直方向成分を示す。

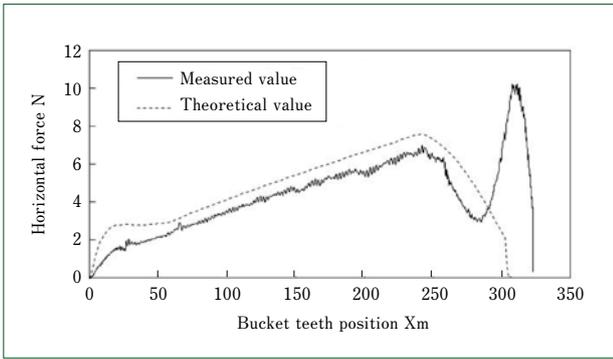


図4 水平方向反力  
Reaction force of horizontal direction

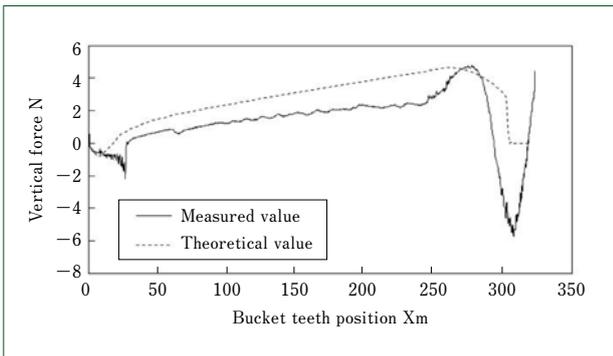


図5 垂直方向反力  
Reaction force of vertical direction

図4を見ると、爪先位置が280mmから290mmの間で主働土圧が発生し、およそ300mmで爪先が地表に到達している。爪先位置が200mm以降の反力増加は、土砂を持ち上げる段階で発生しており、これは土砂とバケットの接触によって発生している。しかし、掘削軌道はバケットと土砂が接触しない条件で生成されていることから、掘削後に土砂が崩落したことによる影響と考えられる。理想的には、掘削軌道上に土砂は存在しないので、理論値では影響を考慮していない。この結果から、爪先位置が240mmまでの受働土圧データはおおよそ一致していることが分かる。垂直方向反力では、受働土圧の滑り線内側の重量の見積もりが計測データに合わせて調整されている。しかしながら、滑り線内側の重量の差によって、掘削反力の理論値は実測値よりも大きな値となってしまう。また、主働土圧の値は非常に小さく、ほとんどがバケット内土砂重量に支配される。

## 5 モデル化および消費エネルギー計算

油圧ショベルのアタッチメントはブーム、アーム、バケットの3軸で構成され、油圧シリンダの伸縮により各関節が回転することから、3リンクマニピュレータとして扱うことができる。図6に、ブームの駆動部を原点としたときのモデルを示す。ただし、バケット長さ $L_3$ はバケット関節から土砂反力の作用点までの距離である。掘削軌道は、掘削軌道に対してバケットの姿勢が一意に決定されるように生成された。バケットの姿勢となる第3関節の角度が決定されるので、残りの関節角度は逆運動学によって導出される。

各関節が行う仕事は、関節変位とトルクの積で表される。

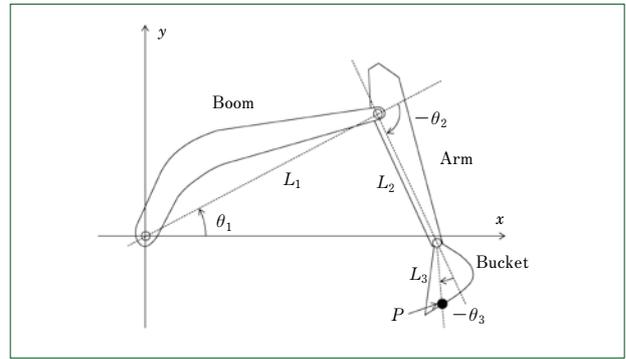


図6 ショベルモデル  
Kinematic model of excavator

関節の回転方向とトルクを受ける方向が異なる場合はエネルギーを出力するが、同じ方向の場合には外部からエネルギーを受けることになる。しかし、実際は関節を目標角度に保つことによるトルクが発生する。このことから、エネルギーを貰うようにトルクを受けた場合でも関節はこれに対抗するトルクを出力し、本来貰うはずのエネルギーを消費する。これは負のエネルギーと呼ばれる<sup>(3)</sup>。よって、動作による仕事量を求めるには、関節変位とトルクの積の絶対値を積分する必要がある。ショベルの動作に必要な仕事量は土圧とショベルの動作による合計で表されることから、ショベルモデルでの仕事量は式(1)で表される。

$$|\Delta \theta^T \tau_{ext}| = \sum_{k=1}^3 |\Delta \theta_k| |\tau_{extk}| + |\Delta \theta_k| |\tau_{mechk}| \dots \dots \dots (1)$$

負のエネルギーは作業装置の姿勢、進行方向および外力の方向によって発生するので、負のエネルギーの発生量を最小にする掘削開始地点がエネルギー効率を最大化することになる。

## 6 効率の良いすくい取り軌道

土砂反力に影響を及ぼす因子は、バケットの姿勢と掘削深さである。このことから、掘削反力を低減しエネルギー効率を高めるには、掘削深さを小さくし、掘削中のバケットを寝かせる必要があることが分かっている<sup>(4)</sup>。水平引き軌道を伴う土圧モデルをもとに、生成された掘削軌道のエネルギー効率の評価を行った。

図7に土圧モデルのシミュレーションに適用する掘削軌道を、表1に軌道条件を示す。一定以上の土砂量を掘削するには、持ち上げ動作までの掘削する体積をバケット体積より大きくする必要がある。このことから、掘削体積 $S_s$ とバケット体積 $S_b$ の比率を軌道パラメータとした。掘削深さと掘削体積を組み合わせた2パターン掘削軌道を生成した。表2に、シミュレーションと比較した実験結果を示す。この結果は、掘削軌道を適用したときに模擬掘削装置で発生する消費エネルギーであり、土圧による消費エネルギーのみを示しており、ショベル動作による消費エネルギーは考慮されていない。

それぞれの軌道に対してシミュレーションを行い、エネルギー消費の評価を行った。表3に、Test 1を基準としたとき

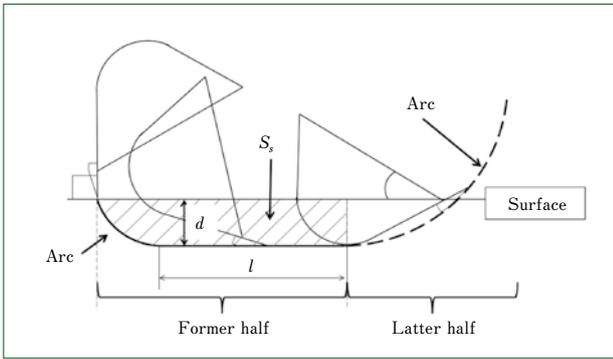


図7 掘削軌道  
Excavation trajectory

表1 掘削軌道条件  
Excavation trajectory conditions

Test	$S_s / S_b$	$l$ (mm)	$d$ (mm)
1	2	208	23.5
2	1	47.5	33.5

表2 掘削試験結果  
Experimental results of excavation

Test	Scooped soil (g)	Works (J)	Energy efficiency (g/J)
1	486	2.97	164
2	450	2.99	151

表3 シミュレーション結果  
Simulation results of excavation

Test	Works ratio	Works ratio	
		earth pressure	gravity
1	1	1	1
2	0.486	1.099	0.408

のTest 2の消費エネルギー比率を示す。シミュレーション結果は実機スケールに換算された値であり、土圧による消費エネルギーの比とショベル動作による消費エネルギーの比を示している。Test 1は「長く浅い」軌道であり、Test 2は「深く短い」掘削軌道である。

シミュレーション結果から、掘削深さが浅く水平引き距離が長いTest 1よりも、掘削深さが深く水平引き距離が短いTest 2の消費エネルギーが小さいことが分かる。図8に、掘削中の各爪先位置での消費エネルギーを示す。この値の合計面積が掘削動作の消費エネルギーとなる。この結果から、同じ位置での消費エネルギーはTest 1の方が小さいものの、合計の消費エネルギーでは掘削距離が長いTest 2の方が小さいことが分かる。これは掘削反力の特性と異なるが、負のエネルギーの影響と考えられる。土圧による消費エネルギーは、ほとんど同じ比率となっており、最大値は深い掘削軌道であるTest 2の方が大きい、合計では同程度となっている。表2の模擬試験装置による実験結果は、土圧のみによる消費エネルギーを表しているが、どちらの軌道も同程度の消費エネルギーとなっており、シミュレーション結果と実験結果が同様の傾向を示していることが分かる。この結果から、土圧モデルによるエネルギー効率の比較が可能であると考えられる。重力に起因する消費エネルギーは、Test 1ではTest 2の2倍

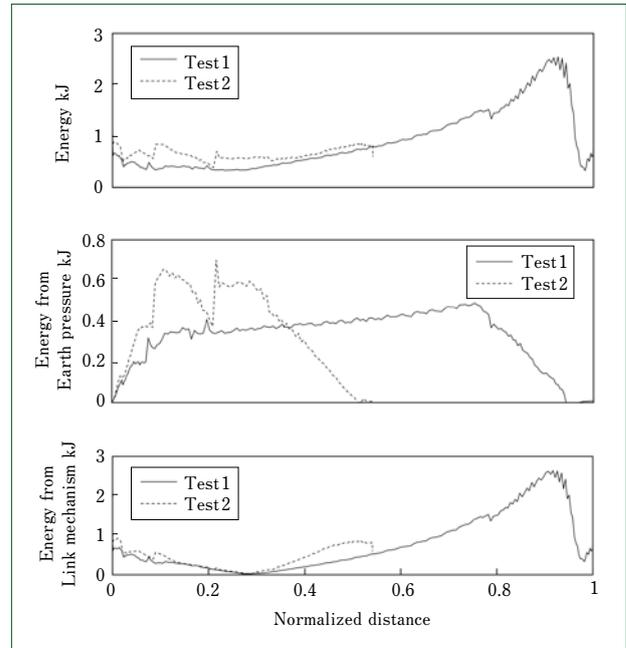


図8 シミュレーションによる消費エネルギー  
Energy consumption by simulation

以上である。これは、水平引き距離が長い条件では、負のエネルギーによって消費エネルギーが増加したことによると考えられる。これらの結果から、土圧モデルを用いた掘削効率の評価が可能であり、ショベル動作による消費エネルギーを考慮することで、深く短いTest 2の掘削軌道の方がエネルギー効率が良いことが分かった。

## 7 むすび

- (1) 模擬試験装置の反力結果から、水平引き軌道における掘削反力をモデル化し、モデルと実験結果がほぼ一致することを確認した。
- (2) 導出された土圧モデルを用いて、掘削軌道のエネルギー効率を評価し、土圧による消費エネルギーがシミュレーションと実験で同じ傾向となることを確認した。
- (3) 土圧モデルによる掘削効率の評価結果において、ショベル動作による消費エネルギーの影響によって、短い掘削軌道のエネルギー効率が高いことを示した。

本研究を進めるに当たり共同研究を実施させていただいた中央大学の久松久教授に心より感謝申し上げます。

### (参考文献)

- (1) 藤野健一, 独立行政法人土木研究所における建設ロボット調査研究について, 建設マネジメント技術, pp.23-28, 2013年6月号.
- (2) 岩瀬裕史他, バックホーにおける土砂掘削反力の解析, 第15回建設ロボットシンポジウム, 2015.
- (3) 広瀬重雄, 梅谷陽二, 歩行機械エネルギー効率に関する基本的考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.15, No.7, pp. 928-933, 1979.