研究報告

油圧式多機能シリンダの掘削効果について —振動掘削に関する研究—

佐々木 芳 宏,* 小 池 哲 朗,** 高 橋 義 雄*

Digging Effect of Oil Hydraulic Multi-Function Cylinder — A Study on Vibration Digging —

by

Yoshihiro SASAKI†, Tetsuro KOIKE†† and Yoshio TAKAHASHI†

Recently, the oil hydraulic control system has been widely applied to the mining industry, civil engineering and construction industry. Especially, robotized machines have been required to improve labor-saving, safety and production in mining and construction works.

The aim of this study is to design the oil hydraulic multi-function cylinder which corresponds to the robotized machines. The experiment was made with variations of the supply pressure, the vibration frequency and the bias voltage under some levels of constant loads. As a result, the quantitative properties affecting the fundamental properties of oil hydraulic multi-function cylinder, namely, the vibration amplitude, feed speed, the maximum pushing force and the acceleration were made clear.

This paper is to investigate the digging effect in case that the oil hydraulic multi-function cylinder is applied to the experimental system assumed as an actual hydraulic excavator, and the quantitative properties of the vibration cylinder caused by the multi-function cylinder were compared with those of no-vibration cylinder.

Key Words : Oil Hydraulic Cylinder, Vibration Control, Multi-Function, Mining Machine, Proportional Control Solenoid-Valve, Digging Effect

平成6年10月3日受付

* 秋田大学鉱山学部機械工学科

〒010 秋田市手形学園町1-1

** 川崎重工業(株)

〒673 川崎市明石

† Department of Mechanical Engineering, Mining College,
Akita University, 1-1 Tegata Gakuencho., Akita 010
Japan

†† Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki, Akashi 673
Japan

1. はじめに

鉱業界, 土木建設業界では, 作業の複雑化, 多岐化にともない, 苛酷で危険な作業, 仕事量の増大等による労働力の不足が深刻化しており, それらの問題の解決が重要な課題の一つになっている。これらの作業上の能率化をはかるうえで, 近年, 油圧制御機器が数多く使用されるようになってきている。

これらの業界で良く使用されている油圧ショベルを設計製作する場合、その性能を左右する掘削能力を最大限に発揮するためには、どのような条件が必要であるかという検討は非常に重要となっている。すなわち、機械本体の大きさ、重量、エンジン出力および車体の安定性などから、適正な掘削力、あるいは掘削能力はいかにあるべきか、また掘削能力の限界をどのように見極めればよいかという問題は、油圧ショベルの開発当初からの課題¹⁾であった。油圧ショベルが対象とする土壌は、いわゆる複合材料であるため、掘削という物理現象を評価する場合、解析に必要な物理量が未知であることが非常に多く、その評価は十分に行われていないのが現状である。この様な中で、特に油圧ショベルのバケットによる掘削は熟練者の経験と勘によって処理されているのが現状であると言っても過言ではない。

本研究においては油圧ショベルの掘削における作業能率の向上と、それらのロボット化などに対応できる油圧式多機能シリンダの開発を目的としている。先に著者らは比例電磁弁・シリンダ系の実験装置を用いることで、多機能シリンダの振動振幅、送り速度などの基本特性について明らかにしている²⁾。

本報では、その基本特性の結果に基づき、著者らが提案した多機能シリンダを用いて、その振動現象を油圧ショベルに応用し、現状における掘削機能の限界を向上させ、さらにその作業の高効率化をはかる一種の油圧ショベルのインテリジェント化を考えるものである。そこで、比例電磁弁・シリンダ系の実験装置（以下、負荷試験装置と称す）を実際に油圧ショベルで土壌を掘削する場合のモデルと考え、多機能シリンダの振動機能を働かせた場合と働かせない場合の基本特性を実験によって求め、その両者を比較検討することで、土壌の掘削におよぼす振動効果を考察した。

2. 加振による土壌の掘削抵抗の低減

一般に、切削対象が金属の場合、宮坂ら³⁾は難削材の振動切削において、切削に3分力である主分力、送り分力、背分力が無加振の比べて各分力とも $1/4 \sim 1/8$ と小さい値になり、難削材の振動切削に極めて効果的であると指摘している。また、山田⁴⁾は、振動圧縮成形機を使用して、材料を加圧する際に微振動を加えながら圧縮成形することにより、被加工物のガス

抜きを容易にし、緻密で均一な構造にすることが可能で、さらに、従来機に比べて加工時間を $1/2 \sim 1/4$ に短縮することができる利点に加え、プレス力を40%も大幅に低減できたと報告している。これら加振による加工効率の向上の結果は、一種の不良現象である「振動」を逆利用した新たな加工法となっている。

一方、掘削対象が土壌の場合、振動機能を与えることにより土壌の掘削抵抗が低減することは、古くから数多くの研究によって明らかにされている。例えば、Dubrovskii⁵⁾は、掘削条件として振動周波数60 Hz、振幅24 mmの場合、その掘削抵抗は無加振の場合と比較し10%以下に低減することを見出し、また、Söhne⁶⁾は、加振することで摩擦抵抗が50%低減したのをうけ、その掘削抵抗は70%程度になると評価し、さらにShkurenko⁷⁾は、垂直方向または水平方向の振動周波数がかかなり高い場合の掘削抵抗は、無加振時の40~50%の値を持つことを指摘している。一方、我が国においても、金須ら⁸⁾は振動掘削の1サイクル（未耕土掘削→既耕土後退→既耕土前進→未耕土掘削）中の各相の掘削抵抗について分析しており、既耕土後退（切削刃が後退してから既耕土中を前進し始めるまでの行程）では約25%、既耕土前進（掘削された溝の中を前進する行程）では、土壌との摩擦抵抗、及び膨軟化された土壌、すなわちいったん圧縮された土壌が弾性回復したもの⁹⁾を圧縮するための抵抗により、後退時の抵抗よりも大きい50%程度、さらに、未耕土掘削（切削刃が未耕土を掘削する行程）では、切削刃が未耕土を掘削するために掘削抵抗は急激に増加し、無加振時の110%に達するもののその後急激に減少するということを報告している。このように無加振時を100とした時の加振時の掘削抵抗の値が大きく異なることは、各研究者が検証する時に対象とした土壌の状態や環境、切削刃の形状および振動方向等の掘削条件が異なるため、掘削抵抗低減効果の定量的な評価が困難であることを示しているものと考えられる。

しかしながら、土壌に対する振動は、掘削抵抗の低減化を引き起こす。熟練オペレータ不足の解消、労働環境改善による疲労低減策、作業の効率化、低コスト化等が要求されている鉱業界および土木建設業界において、このような振動に着目した油圧技術のメカトロ化を先取りすることは、大幅な付加価値の向上が期待でき、特に作業能率を考えた場合、非常に有効である

と考えられる。

3. 振動効果の検証のモデル化

土壌の掘削における振動効果について論ずる場合、土壌に関する物理的諸条件が明確でなければならない。しかしながら、最近の土質力学によっても、土壌の性質を一義的に定義するのは困難である。この様な理由から、本報では使用した負荷試験装置を実際の振動切削作業に対応させることで油圧機器による振動効果の特性の相違について着目することにした。

負荷試験装置と実機による実際の作業との対応を次のように考える。まずモデル化にあたり、負荷試験装置の多機能シリンダは、実際の建設機械としてショベルの各アームを連結しているシリンダに、負荷シリンダからの一定負荷はバスケットで土壌を掘削する時の抵抗に、多機能シリンダと負荷シリンダを連結しているテーブルの移動はバケットの移動にそれぞれ対応させ、移動方向は、多機能シリンダ側から負荷シリンダ側への方向を前進、その逆を後退とした。

バケット切削刃の刃先に作用する切削抵抗と、バケットの外底面と外側面が受ける土壌との摩擦抵抗は、現状の負荷試験装置ではモデル化することが困難であるため、従来の研究結果⁵⁾を基にして、掘削抵抗と摩擦

抵抗を同時に考慮した切削抵抗（負荷シリンダがこの一定負荷に相当）で評価し、加振時の掘削抵抗を無加振時の50%低減とした一定値に固定することで模擬した。

4. 実験装置および方法

4.1 実験装置

実験装置は、図1に示すシリンダ対向型負荷試験装置を用いた。本実験装置は、2本の片ロッド形復動シリンダをボールベアリングの上に置かれたテーブルを挟んで、対向させている。一つは振動を発生させる多機能シリンダであり、他の一つは負荷を与える負荷シリンダである。両シリンダは、行程300 mm、シリンダ内径40 mm、ロッド外径22.4 mmの同一寸法で、それぞれ独立した油圧発生装置を持つ。多機能シリンダに振動機能を与える制御弁は比例電磁弁（最大流量40 l/mm）であり、この制御弁でもってすべて振動の制御を行う。また、負荷試験装置には、変位センサ、圧力センサおよび加速度センサが取り付けられており、この時の各種特性値の測定が可能である。

4.2 実験方法

実験を行うにあたり、設定した各条件を表1に示す。多機能シリンダを駆動するための比例電磁弁への入力

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

Type		Proportional control solenoid-valve	
Set Point		With Vibration	Without Vibration
Input voltage	E_i (V)	± 1.0 (AC)	+ 0.78 (Constant)
Frequency	f (Hz)	2.5, 7.5	—————
Bias rate Br	(+ : -)	2 : 1	—————
Supply pressure	P_s (MPa)	4.90, 6.37	
External Load	L (kN)	0.74, 1.48, 2.22, 2.96	1.48, 2.96, 4.44 to 5.92 (at 0.12 kN intervals)
			1.48, 2.96 to 4.44, 5.92 (at 0.12 kN intervals)
Oil temperature	T (°C)	40

Fig. 2 Relationship between input voltage and flow rate of proportional control solenoid-valve.

信号は関数発生器からの電圧信号である。この場合の供給圧力は、ポンプ側に取り付けているリリーフ弁で設定した。また、多機能シリンダに対向させる負荷は、負荷シリンダのピストンヘッド側に取り付けたバランシング弁によって設定した。図2は入力電圧 E_i と弁通過流量 Q との関係で供給圧力 P_s をパラメータとして示したものである。この弁はゼロラップ弁であり ± 1 V 程度まで良好な直線性を示す。図中の破線は、弁の静特性試験装置に用いられている流量計では測定で

きない範囲を示している。この結果より、比例電磁弁から多機能シリンダへ流入する油の流量は入力電圧に比例するものと考えられる。

多機能シリンダを振動させるための比例電磁弁への入力信号はオフセットをかけた ± 1.0 V の正弦波であり、その信号により負荷シリンダに対向させて多機能シリンダを駆動した。

一方、シリンダを振動させない場合の特性と振動させた場合のそれとを比較する場合、多機能シリンダへ入力する動力を同一にする必要があると考えられる。

一般に、油圧シリンダの動力は、供給圧力と油の流入量との積で与えられる。供給圧力はリリーフ弁で一定に設定できるので、油の流量を両者とも同一にする必要がある。

本研究では、交流理論で用いる実効値の概念を適用し、振動を加えるために比例電磁弁に入力した正弦波状の電圧と等価な直流電圧に変換することで、振動を加えない場合の入力信号を決定して、加振と無加振の動力を同一になるようにした。

以上の各条件で、加振と無加振における送り速度および多機能シリンダが負荷を押し付ける最大押し付け力を負荷試験装置に取り付けた変位センサ、圧力センサによって、それぞれ測定した。そして、振動の機能を油圧ショベルへ適用したときの作業効率の向上に対する可能性について検討した。

Fig. 3 Relationship between external load and feed speed.

5. 実験結果および考察

5.1 送り速度

図3(a), (b)は、従来の振動掘削に関する研究結果⁵⁾を基に切断抵抗と摩擦抵抗を同時に考慮した掘削抵抗(負荷シリンダの一定負荷に相当)を振動効果によって50%低減した場合の一定負荷 L に対する送り速度 V の関係を示したものであり、一例として(a)供給圧力 $P_s = 4.90$ MPaの場合、(b) $P_s = 6.37$ MPaの場合についての相違を見たものである。ここで、 $P_s = 4.90$ MPaにおける加振動時の最大振動振幅は、振動周波数が2.5 Hzの場合8.68 mm、7.5 Hzでは2.56 mmである。一方、 $P_s = 6.37$ MPaの場合、加振時の最大振動振幅は、振動周波数が2.5 Hzの時で9.82 mm、7.5 Hzで3.53 mmである。図中、破線部より上(プラス)側の領域は、多機能シリンダが負荷シリンダを押している状態(前進)であり、逆に下(マイナス)側の領域は、負荷シリンダに押されている状態(後退)を意味する。

一定負荷を軟弱な土壌から硬質な土壌に対応するよ

うに徐々に増加して、加振と無加振における送り速度の相違を見た場合、低負荷の領域では無加振の方が加振に比べて送り速度が大きく、多機能シリンダに振動の機能を加えなくても十分な切削作業が達成できることを示している。

しかしながら、一定負荷を増大させて硬質な土壌へと移行していくと、無加振時の送り速度はある一定負荷のところで急激に低下し、いわゆるブレイク・ダウンの現象が生じ、最後にはそれ以上テーブルが前進できなくなる領域が存在する。すなわち、無加振の場合は負荷変動に対して著しく弱く、軟弱な土壌に相当する低負荷の場合のみ、掘削が可能であることを示唆しているものと考えられる。ただし、(b)図に見られるように、供給圧力を高くして多機能シリンダの押し付け力を増加させると、負荷に対するブレイク・ダウンの点が高負荷側に推進し、より硬質の土壌の掘削が可能となる結果が得られた。

一方、多機能シリンダに振動を加えた場合、無加振ではシリンダが動かなかった領域においても前進が可能となり、一定負荷を増加させてもその送り速度の変

化の割合が少なく、安定した送り速度が認められた。また、いずれの供給圧力においても、振動周波数が小さく振動振幅が大きいほど送り速度は大きい²⁾が、それに対する負荷変動による影響も小さく、一定負荷の増大とともに直線的に送り速度は減少している。このことは、軟弱な土壌から比較的硬質な土壌にいたるまで、シリンダに振動の機能を与えることによって、安定した作業能率が図れるものと考えられる。

さらに、(a) 図において、シリンダを振動させない場合、一定負荷 $L = 3.75 \text{ kN}$ で送り速度が $V = 0 \text{ mm/s}$ となり、テーブルが停止しているが、振動を加えた場合には、その掘削抵抗が50%低減したと仮定した $L = 3.75/2 = 1.875 \text{ kN}$ でも $V = 15 \sim 20 \text{ mm/s}$ でテーブルが前進している。すなわち、加振の場合、掘削している状態となっており、振動機能の効果が現れたものと考えられる。

また、前述のように、無加振時においてブレイク・ダウンの点は供給圧力を増加させることである程度改善できるが、多機能シリンダの鉱山機械や土木建設機械への応用を考えた場合、油圧源の供給圧力のみで掘削を制御する方法では、その広範囲の制御が困難であ

るため、現実的ではないと考えられる。したがって、入力信号を必要に応じて比例電磁弁に入力して多機能シリンダを制御し、振動掘削で安定な作業能率の向上が図れれば、土壌の掘削作業の制御システムとして、多機能シリンダは非常に有効であり、かつロボット化に対応できるものと考えられる。

5. 2 最大押し付け力

最大押し付け力とは、実際にはシリンダの圧力でバケットを押すときの主掘削力に相当すると考えられる。その力が掘削前方の土壌の破壊強度を上回った場合、その部分で局部的な破壊を生じさせることが可能であれば、最大押し付け力の大小は、土壌の掘削作業の作業能率に大きく関与してくるものと考えられる。

図4 (a), (b) は前節で述べた送り速度の実験条件と同じように振動効果によって切削抵抗が、50%低減した場合の一定負荷に対する最大押し付け力 F_{max} の関係を示したものであり、各提供圧力の場合についての相違を見たものである。

この場合、圧力ポンプのリリーフ弁で供給圧力を一定に設定し、比例電磁弁への入力電圧を制御して加振と無加振における多機能シリンダの動力を同一の条件

Fig. 4 Relationship between external load and maximum pushing force.

で比較したものである。

図において、加振、無加振いずれの場合も一定負荷の増加とともに最大押し付け力は増大する傾向が認められる。シリンダに振動を加えることによって、振動周波数が $f = 2.5 \text{ Hz}$ の最低負荷の条件の場合を除いて、すべての最大押し付け力は振動を与えない場合より大きく、また供給圧力および振動周波数が増加し、振動振幅が小さくなるほどその力が増大する傾向にあった。このことは、シリンダを高周波数で振動させるほど負荷シリンダを押す速度がより速くなり、その反力が多機能シリンダ内の圧力を増大させ、結果として最大押し付け力を増加させたものと考えられる。換言すれば、油圧シリンダに入力する同一の動力の条件で、シリンダに振動を加えた場合とそうでない場合での最大押し付け力の相違は、動的な力と静的な力の差にそれぞれ相当するものと考えられる。したがって、図3の送り速度のところで述べたように、無加振ではテーブルが停止していた領域においてもシリンダに振動を与えることによって最大押し付け力が増大して、土壌の掘削状態が得られたものと考えられる。

このように、最大押し付け力の増大は、土壌の破壊強度が大きく無加振では掘削不可能な土壌に対しても、その部分における局所的なより大きな掘削力を生じさせることが可能となったものと考えられる。その上、一般にいわれている振動による土壌の流動化現象が伴えば、さらに抵抗が減少して掘削が容易になり、その効果は著しく増加するものと考えられる。したがって、多機能シリンダに振動の機能を持たせることは、土壌の掘削作業の能率を向上させ得るものと期待できる。

同一の入力エネルギーに対する振動掘削の作業能率に関する一考察として、金須ら⁹⁾は次式より求まるピッチ振幅比 (PA 比) を用いて、振動掘削における掘削抵抗と PA 比の関係を見出している。

$$PA \text{ 比} = \frac{P}{A} = \frac{V}{f \cdot A} \quad (1)$$

ただし、 P : ピッチ

A : 振動振幅

V : 送り速度

f : 振動周波数

これによると、振動振幅、送り速度、振動周波数を最適な条件に設定することで、最も多くのエネルギーが土壌に伝達されるとしている。本報においては、土壌

に対する振動掘削の諸条件は3章で述べたようにモデル化して取り扱っているため、振動掘削に対する最適パラメータの設定に際し今後検討の余地を残すが、多機能シリンダと土壌の系に加える振動を振動振幅、送り速度、振動周波数の3つのパラメータで実現させることで、単に加振するだけの作業能率に比べ、エネルギーにより高効率な作業能率が実現できる可能性があるとも考えられる。

6. 実機への応用

本研究では、必要な時にシリンダに振動機能を加え、多機能シリンダの基礎的特性を制御できる因子について検討し、それを本報では油圧ショベルでバケットにより土壌を掘削することへの応用を考えた。本報の結果から、多機能シリンダを加振させることによって発生する最大押し付け力が無加振の場合に比べ大きく、しかも連続的に与え続けることができるため、その力が土壌の破壊強度を超過した時、無加振では掘削不可能である土壌に対しても、その部分で局所的な破壊を生じさせる可能性があり、本研究で用いた多機能シリンダは作業能率の向上に有効であると考えられる。

実際に多機能シリンダによる振動作用を実機に応用する際は、本システムを掘削作業全体にマッチさせることと、振動効果を最大限発揮させることが必要である。そのためには、実機が土壌を掘削する時の機構、例えば、土壌の種類による掘削パターン分け、掘削による土壌の変形の仕方、掘削によってバケットにかかる応力の分布、掘削抵抗など⁶⁾を解明するとともに、振動効果と土壌の内部摩擦の関係、土壌の種類と振動による掘削作用の関連、土中における振動の伝播あるいは減衰、機械の特性と掘削効果の関連などを検討することが必要である。

7. おわりに

振動現象を容易に実現可能とする安価でゴミに強い油圧式比例電磁弁に着目し、負荷試験装置を実際の振動掘削作業としてモデル化することで、土壌の掘削における振動効果について検討、考察した結果、主に次のような結論を得た。

- (1) 送り速度の特性結果から、無加振では、高負荷の領域において送り速度が急激に低下する点が存在し、それ以上の負荷に対しては送り速度が零の領域が存

在する。一方、振動を加えた場合、無加振でシリンダが作動できなかった領域においても多機能シリンダの前進が可能となり、かつ負荷の変動に対し送り速度の変化の割合が小さく、安定した作業能率を得られることが確認できた。

- (2) 明らかに無加振時よりも加振時の方が最大押し付け力が大きくなる。すなわち、供給圧力が高く振動周波数が増加して振動振幅が小さくなるほど、最大押し付け力が増大する傾向を示した。

最後に、本研究を行うに当たり貴重なご助言、ご協力を賜りました㈱不二越油圧製造所 大住真次技術部長はじめ関係者の方々に深甚なる謝意を表する。なお、本研究は文部省科学研究費補助金一般研究（B）研究課題番号03452237にて行った。記して謝意を表する。

References

- 1) Yamato, K. : “Kensetsukikai To Doshitsu”, P. 139-46, Nippon Kogyo (1974)
- 2) Takahashi, Y., Sasaki, Y., Koike, T. and Yamaguchi, K. : *J. Mining and Materials Processing Inst., Japan*, **109**, 11 (1993)
- 3) Miyasaka, K., Kasuya, U., Yoshikawa, T. and Asao, F., : Report of Machine Technical Lab., **42**, 1-8 (1988)
- 4) Yamada, O. : JSMI Inst. The Tokai Branch, P. 149-59 (1992)
- 5) Kanesu, M., Fukuchi, H., Ito, Y. and Kato, H. : Agr. Eng. Reports of Hirosaki Univ., **48** (1987)
- 6) Hatamura, Y. : “Kensetsukikai to Doshitsu”, P.64-75, Nippon Kogyo (1974)