知能化掘削機械に必要な掘削機構の解明*

(第1報, モデルバケットによる土の二次元掘削時の力学量の測定)

畑村 洋太郎^{*1}, 花 本 忠 幸^{*2}, 山 本 佳 男^{*3}

Analysis of Excavation Processes for the Purpose of Realizing Intelligent Excavation Machinery (1st Report, Measurement of Physical Parameters in Two-Dimensional Excavation Using a Model Bucket)

Yotaro HATAMURA, Tadayuki HANAMOTO and Yoshio YAMAMOTO

In order to investigate problems involving soil and construction machinery such as a hydraulic excavator, understanding of the physical interactions between the soil and the machine is essential. The purpose of this study is to experimentally examine actual excavation processes by examining various physical parameters, for the purpose of realizing an intelligent excavation machine whose performance is not only automatic but also optimal in terms of energy consumption, operation time and excavation trajectory. In this article we present experimental results using a model-sized bucket and two different soil types, sand and loam. Various sensing devices and experimental apparatus were developed for the experiments. Excavation load and stress distributions were examined.

Key Words: Construction Machinery, Force Sensor, Excavation, Measurement, Intelligent System

1. 緒 言

近年‘知能化’という言葉が頻繁に使われる。その言葉の意図する内容は千差万別であり、知能化の度合も、簡単なセンサ情報に基づくオンオフ制御から、自ら意思決定・行動生成を行う能力を有する高度な知能機械システムに至るまで、非常に多岐にわたっている。機械の知性は、一般的にシステムの具備するセンサ、アクチュエータ、機構、制御系、学習能力などに深く関連する場合が多い。本論文において対象とする知能化機械の定義は以下のとおりである。実際に起こっている現象に関する情報をセンサを通じて抽出し、それをあらかじめ用意された知識に当てはめ、今後どのような動きをとるべきかを自ら判断して行動する機能を有する機械を知能化機械と呼ぶものとする。センサ情報に基づき構築された知能化建設機械のシステム構成の概略を図1に示す。

機械の知能化の基本三要素はセンサ・アクチュエータ・知識の三つであり、それらを組合せてシステムを

作り上げると図1のようになる。すなわち、作業対象(掘削)から得られるセンサ情報を、物理法則や経験に基づく知識・モデルに適用し、その出力としてアクチュエータの入力を生成する。誤った結果を出力したときには知識・モデル・制御系に対し修正を加え、正しい判断をした場合は何もしないか、あるいはその判断を強化する(reinforce)ようなフィードバックを与える。

本研究は、パワーショベルによる掘削作業の知能化を念頭において、バケットによる掘削機構の解析を行うことを目的とする。掘削機構の解析に関する文献はこれまでいくつか見られるが^{(1)~(5)}、いずれも十分な精度を有する測定がなされていない。これは主に所望の測定に適したセンサが存在しないことが理由である。著者はこれまで重機械から高精度機械に至るまで、さまざまな力・トルクセンサの開発を行ってきた^{(6)~(8)}。本研究では掘削抵抗測定用に二方向ロードセルを、壁面圧力・摩擦力測定用におおの圧力計と摩擦力計を開発し、モデルバケットに取付けることにより掘削中の掘削抵抗・壁面応力の変化を測定した。本報では、開発した検出器および2種類の土(砂とローム)を用いて行った掘削計測実験に関する結果について報告する。

* 原稿受付 1996年6月26日。

^{*1} 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

^{*2} 正員, コマツ中央研究所 (〒254 平塚市万田 1200)。

^{*3} 正員, 茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町 4-12-1)。

Fig. 1 Conceptual structure of the intelligent excavation system based on the sensory information

Fig. 2 The schematic of the friction test apparatus

2. 理想的な掘削とは

緒言でも触れたように、本研究では図1に提示したシステムを前提として掘削機械の知能化を考えていく。まず望ましい掘削とは何かを定義する。次に所望の掘削を実現するために、掘削にかかわる物理現象を知ることが必要となり、そのための計測装置の開発が不可欠となる。

理想的な掘削の定義は作業目的に依存するため、必ずしも一意的には決められない。例えば作業時間の短縮を目的とする場合、一回当たりの土の掘削量が重要となり、居住区での作業であれば静かで粉塵の少ない掘削を心掛ける必要がある。

掘削効率 Q_e は一般的に次のように定義される。

$$Q_e = \frac{M_e}{R_m} = \frac{M_e}{R_e / \mu_m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで M_e は実際の掘削量、 μ_m は機械効率、 R_m は機械の消費エネルギー(実効エンジン出力馬力と稼働時間の積)、 R_e は機械消費エネルギーと機械効率の積

(等価的に掘削抵抗 F_e と掘削距離 d_e の積)を表す。

式(1)より掘削効率は以下の方法により改善することが可能である。

- M_e の増加 バケットの形状を変えるか掘削土の内壁への付着を低減する。
- 掘削抵抗 F_e の低減 バケットの刃先形状や材質を工夫してバケット表面と土の摩擦を低減する。
- 掘削距離 d_e の低減 掘削軌道を最適化する。
- 機械効率 μ_m の増加 機械そのもの、および環境的な改善。

その他の掘削の尺度としては、燃料消費や刃先の磨耗速度などに基づく掘削コストの最小化、あるいは掘削時における埋設物の回避や掘削軌跡の誤差などが考えられる。また、昨今の例に見られるように災害時における復旧・救出作業、特に二次災害の恐れのある場合など人間の負担および危険を最小化できる建設機械の意義は非常に大きいと思われる。

3. 二次元バケットモデルによる掘削計測実験

本実験の目的は、掘削抵抗や壁面の応力分布、土の変形の様子や土中の応力状態が掘削の進行に伴いどのように推移するかを動的に観察することにある。最初にバケット壁面の粗さと材質を変化させて壁面と土の摩擦力測定を行い、次に砂とロームを用いた土槽内の二次元モデル掘削実験を行う。さらに掘削効率の向上を図るため、電気浸透法を用いて2章で述べた掘削抵抗の低減を試みる。

3.1 実験方法および実験装置

(1) バケット壁面と土の摩擦力試験 まず最初にバケット表面と土(砂とローム)の間に働く摩擦力試験を行う。試験装置の概略を図2に示す。

試験片には以下の5種類を用いた。括弧内の数字は表面粗度を平均粗さで表示したものである。

1. 滑らかな鋼板(0.5 μm R_a)
2. やや粗い鋼板(2.2 μm R_a)
3. 非常に粗い鋼板(10 μm R_a)
4. アクリル板(0.1 μm R_a)
5. 黄銅板(0.4 μm R_a)

まず回転カップ内に土を平坦に充てんし、二方向ロードセル**1を取付けた試験片表面が荷重零の状態ですと接触するように設定する。摩擦速度は0.1~30 mm/sの間で歯車列により6種類に変化させることが可能である。試験片にかかる垂直応力を0~200 kPaまで連続的に変化させ圧力と摩擦応力の関係を測定する。

(2) 二次元モデル掘削実験 本実験において測定した項目、および測定方式・装置名を表1に示す。図3に実験に用いた土槽および装置構成の概略を示

Table 1 Measured items and their methods for measurement

Measured items	Measurement methods and devices
Forces exerted to the bucket	Two-axis load-cells (4 pieces)
Stress distributions on the bucket surface	Friction-cell and pressure-cell (7 pieces each)
Stress distributions in the loam/sand	Stress-cell (one inclinometer and three-axis stress) embedded in the loam/sand
Deformation of the loam/sand	Deduce the strain distribution of the loam/sand from the change of the lattice pattern painted in vertical section
Attitude and motion of the bucket	Linear potentiometer and photos

**1 ここでいう二方向ロードセルは、後述のL字形バケットに用いるものとは異なり、摩擦力試験用に作製した小形のものです。構造・定格ともに後述のセンサとは異なっている。

す⁽⁹⁾。バケットは油圧により駆動され、その姿勢はシリンドラの変位から算出する。図4に示すとおり、モデルバケットはL字形の底板と側板から構成される。底板は4箇所配した二方向ロードセルを介して側板に結合され、圧力・応力計は底板上の丸で示した位置に取付けられる。応力・応力計の数に限りがあるため、掘削時のセンサの配置は応力分布の有効な計測を念頭に決定された。図5に2方向ロードセルの外観を、さらに図6に壁面圧力計および摩擦力計の断面図を示す。いずれも検出にはひずみゲージを用いている。二方向ロードセルは平行平板構造をしており、圧力計は受圧面から鋼球を介して検出面に伝達される力をひずみゲージにより測定している。摩擦力計は水平方向にのみたわむ支持体で受圧板が支えられ、力の伝達方向が水平方向に変わることを除けば、構造的には圧力計と同じである。

二方向ロードセルの定格荷重を垂直方向・横方向ともに1000 μst で1600 Nと設定した。垂直荷重に対する平均感度が仕様の約1/3と低めであったことを除けば、線形性、非履歴性、方向分離性いずれにおいても極めて優れた性能を有している。

圧力計・摩擦力計は定格出力が応力100 kPaに対し約1000 μst となるように設計した。その結果、圧力計の平均出力が100 kPaに対し835 μst 、摩擦力計

Fig. 3 The schematic of the whole experimental setup

Fig. 4 L-shaped model bucket

の平均出力が $645 \mu\text{st}$ であった。圧力計はいずれも優れた線形性および非履歴性を示していたが、摩擦力計の場合、受圧面が横方向に可動である必要性から、受圧面とケーシングの間に流体ゴムを充てんしており、これが非履歴性の原因となっている(出力比5~7%)。

実験条件は表2に示すとおりである。通常の掘削実験に加え、図3に示すように、土中に電極を埋めて電気浸透による摩擦低減の効果を検証する。電極には黄

Fig. 5 Two-axis load cell

(a) Pressure sensor

(b) Friction sensor

Fig. 6 Pressure sensor and friction sensor

銅棒($\phi 26 \text{ mm}$)を使用し、これを陽極、バケット刃先に取り付けた絶縁された黄銅板を陰極として直流電圧 100 V を印加する。

モデル掘削と実機掘削の寸法差に基づく力学的な相似性に関しては、掘削時の変形について相似則が成り立つことが知られている⁽¹¹⁾。また被削物としての土の破壊特性については、砂が堆積した土の量に影響を受けるのに対し、ロームの場合堆積した土量によらずほぼ一意的に決まることが知られている⁽¹³⁾。しかし通常は両者の特性の混在した形となる。ここではおもに変形に関する相似則を前提とするが、破壊条件・境界条件を加味した摩擦条件に関する相似則は考慮していない。

3・2 実験結果

(1) 摩擦力試験 砂の場合の圧力と摩擦応力の関係を図7に示す。壁面の材質によらず圧力と摩擦応力はほぼ比例関係を示している。摩擦係数は $0.3 \sim 1.0$ まで変化し、予想どおり表面粗度の最も粗い銅板において摩擦が最大となっている。しかし摩擦速度による顕著な影響は見られなかった。

次にロームの結果を図8に示す。圧力と摩擦応力の比例関係は砂の場合と同様であるが、砂と大きく異なる点として、ロームの場合、圧力が零になっても摩擦が残存すること、結果には載せていないが表面が粗く

Table 2 Excavation conditions

Soil	Sand	Loam
Type of motion	Rotation and excavation	
Depth of excavation	80 mm, 120 mm	80 mm
Tip velocity	42.6 ~ 68.9 mm/sec	
Number of experiments	Three times each

Fig. 7 Pressure versus frictional stress (sand)

Fig. 8 Pressure versus frictional stress (loam)

Fig. 9 Variation of the excavation torque (sand)

なるほど摩擦速度の影響が顕著に現れること等が挙げられる。この摩擦速度の影響は、滑らかな鋼板ではほとんど見られない。また試験前に初期圧力(例えば 100 kPa)を加えておくと、摩擦が低減することが確認された。この傾向は試験片の表面粗さが滑らかになるほど顕著に観察された。

(2) 二次元モデル掘削実験 砂を掘削したときのバケットに加えられた掘削トルクの変化を2種類の掘削深さについて図9に示す。掘削トルクは深さ80 mmの場合バケット角度約 -50° のとき、深さ120 mmの場合約 -60° のときに最大値となる。図10に掘削の進行に伴うバケット内壁面上の応力分布を示す。バケット角度(掘削面が水平面となす角度) $-60^\circ \sim -40^\circ$ において刃先近傍に大きな荷重が集中していることがわかる。

ロームを掘削した場合の同様な図を図11, 12に示す。図11では通常の掘削と電気浸透を用いた掘削のトルクを併せて示している。最大掘削トルクはいずれも同じような角度($-50^\circ \sim -40^\circ$)において生じているが、電気浸透を用いることにより10%から20%程度のトルク低減が達成されている。図11より電気浸透の効果は、バケット角度が -70° 以下になって現れていることがわかる。図12を図10の砂の結果と比較することにより、砂の場合は応力が刃先付近に集中しているのに対し、ロームの場合は刃先から遠ざかるに連れ、応力が緩やかに減少していく様子が見られる。

図13は土中応力セルを用いて測定した砂の掘削時

Fig. 10 Surface stress distribution during excavation (sand)

Fig. 11 Variation of the excavation torque (loam)

Fig. 12 Surface stress distribution during excavation (loam)

の土内応力分布を示している。圧縮の主応力方向がバケットの刃先方向を向いている様子が観察できる。この結果は前述した刃先付近での応力集中(図10)の様子とよく一致している。

図14はロームを掘削した場合の土中の応力分布およびひずみの分布を表している。いずれも電気浸透は使用していない。ひずみの分布図は、ローム側壁に描いた格子パターンの変化を目視観察をもとに作成し

Fig. 13 Internal stress distribution of the sand

(a) stress distribution

(b) strain distribution

Fig. 14 Internal stress and strain distributions of the loam

た。砂とロームの場合の内部応力状態の違いは図13と図14(a)を比較すれば一目瞭然である。この差異は明らかに、図10および12で観察された壁面応力状態の違いに対応するものである。

4. 検 討

今回のモデル実験を通じて得られた知見について整理すると次のとおりである。

掘削抵抗

・砂、ロームいずれの場合もバケット角度 -60° ～ -40° で掘削抵抗が最大値となる。したがって、掘削エネルギーの低減を図るには、その角度領域における抵抗の削減が効果的と思われる。

・電気浸透法により10～20%の掘削トルクの低減が達成される。その効果はバケット角度が -70° あたり

から顕著に現れる。これは電気浸透が、バケットの刃先が土中に突き刺さるような動きよりも、むしろ横方向に移動するような動作に対しより効果的であることを示している。

壁面応力分布

・砂の場合、掘削抵抗に基づく応力が刃先付近に集中しているのに対し、ロームの場合、刃先から遠ざかるに従い緩やかに減少していく。この事実は砂の内部応力観察結果ともよく一致している。したがって掘削抵抗(壁面応力)の低減を考慮する際、掘削対象の種類に応じて異なる対策が考えられる。例えばバケット内壁面の低摩擦化を図る場合、砂では刃先近傍の低摩擦化が非常に効果的であるのに対し、ロームの場合は砂に比べより広い範囲にわたる低摩擦対策が求められる。

これらの知識(実態観察に基づく事象の因果関係)を、建設機械が制御システムの一部、すなわち物理モデルやプロセス情報として具備することにより、人間から与えられる高度なあるいは不完全な作業指示に対しても、正確に作業を行うことができる。さらに知識構築の過程を記述するメタ知識を導入すれば、未知の土質に遭遇した場合に新しい知識の自律的抽出および学習も可能となる。

5. 結 言

知能化掘削機実現の基礎となる掘削機構に関する知識の習得のため、二方向ロードセルおよび壁面応力計をモデルバケットに取付けて、砂・ロームを回転掘削したときの掘削抵抗および壁面応力の変動の様子を実測した。その結果、砂とロームでは掘削時の応力分布状態が異なるが、掘削トルクはいずれも -60° ～ -40° で最大になることがわかった。また電気浸透を用いることにより、ローム掘削時の抵抗を低減できることを確認した。今後は実機サイズのバケットに同様な検出器を取付けて、より実際の掘削状態に近い状態で三次元的な応力分布等を計測し、知能化掘削機械構築のための情報収集を進めていく。

文 献

- (1) 例えば、建設ロボットシンポジウム論文集、(1990)、土木学会。
- (2) 室達朗・荒井克彦・深川良一・建山和由、最新建設施工学(ロボット化・システム化)、(1994)、朝倉書店。
- (3) 畠昭治郎、掘削機構の解明、建設の機械化、135(1961)71-74。
- (4) 建設機械と土質(機械土工理論の基礎と発展)、(1976)、日本工業出版。
- (5) 畠昭治郎、振動を利用した掘削のメカニズム、建設機械、5(1977)、19-22。
- (6) 畑村洋太郎・飯野謙次・小野耕三・高田龍二、ロボット

- 用六軸力計の試み, 機論, **54**-497, C (1988), 241-246.
- (7) Mitsuishi, M., Hatamura, Y. and Nagao, T., Development of a sensor integrated manufacturing robot. *Proc. the 20th Int. Symp. Industrial Robots*, (1989), 111-118, Tokyo, Japan.
- (8) Hatamura, Y. and Hanamoto, T., Development of a 3-directional stress cell and measurement of stress distribution on a back hoe bucket. *Proc. the 10th Int. Conf. the ISTVS*, (1990), 1071-1078, Kobe, Japan.
- (9) Chijiwa, K., Hatamura, Y. and Hasegawa, N., Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting. *Trans. the Iron and Steel Institute of Japan*, **21** (1981), 178-186.
- (10) 畑村洋太郎・千々岩健児, 土の切削機構の解明(第1報, 土の切削パターンについて), 機論, **40**-338 (1974), 2945-2953.
- (11) 畑村洋太郎・千々岩健児, 土の切削機構の解明(第2報, 切削による土の変形および土の内部の応力について), 機論, **41**-349 (1975), 2749-2757.
- (12) 畑村洋太郎・千々岩健児, 土の切削機構の解明(第3報, 切削によって刃物にかかる応力の分布および切削抵抗について), 機論, **42**-355 (1976), 971-978.
- (13) 畑村洋太郎・千々岩健児, 土の切削機構の解明(第4報, 切削に関与する土の性質について), 機論, **42**-357 (1976), 1607-1613.
- (14) 畑村洋太郎・千々岩健児, 土の切削機構の解明(第5報, 土の切削理論について), 機論, **42**-359 (1976), 2258-2265.
-