

戦-3 油圧ショベルによる掘削作業の自動制御技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：技術推進本部先端技術チーム

研究担当者：山元弘、茂木正晴、大槻崇、邵輝

【要旨】

本研究は、土木工事における危険・苦渋作業を解消すること、自動化による施工の効率化と品質向上を図ることや若年労働者や熟練オペレータ不足への対応を目的に、遠隔からの簡単な作業指示により、自律した施工を行うロボット建設機械（油圧ショベル）を用いたIT施工技術の研究開発を行うものである。

平成 19 年度までに研究・開発されたプロトタイプは、自動制御を行うための要素技術として、IT 施工の操作システム、施工状況の 3 次元情報を計測するシステム、自動制御システムから構成されており、油圧ショベルの掘削・積込作業の自動化を実現させた。また、熟練オペレータの作業解析に基づく動作計画の改良による作業効率の向上、軌跡追従型動作計画として 3 次元計測システムとの連携による施工精度の向上を図った。

平成 20 年度では、自動化された油圧ショベルによる掘削作業が、作業内容・形状・範囲等の面から、広く適用可能な仕様になることを目的に、油圧ショベルの姿勢及び作業機の動作方法をパラメータとした、掘削抵抗とバケットリンク歪みの関係等を実験により求め、より汎用性を高めたシステム構築の検討材料とした。

キーワード：無人化施工、油圧ショベル、自動施工システム、動作計画

1. はじめに

平成 18 年度までの成果として、IT 施工システム（プロトタイプ）を構成する複数のコンポーネントの内、油圧ショベルの掘削・積込作業を対象とした制御技術として、設計情報と地形情報に基づく動作計画を生成するとともに熟練オペレータに対して掘削作業に関する作業形態に関する実態調査を実施し、その結果に基づく動作計画として粗掘削・仕上げ掘削作業を実現させた。

平成 19 年度では、熟練オペレータの作業解析に基づく動作計画の改良により、作業効率の向上、自動制御するための動作計画として地形情報の 3 次元計測システムとの連携による施工精度の向上を図り、IT 施工システム全体としての評価を行った。

その結果として、IT 施工システムにおける、地形等の計測、動作計画による掘削・積込み作業、作業状況表示等の機能を確認することができた。

現在までの検証実験は、土木研究所構内の掘削が容易な土質条件（関東ローム）による検証であったため、当初想定している災害現場での復旧（地震・降雨等による土砂災害、火山による災害）に必要な多様な土質、掘削条件に対応できるものとなっていない。このため、将来的に現場での適用を想定した場合、現行の動作計画では事象の変化に対応することが難しいと思われる。

そこで、油圧ショベルの姿勢及び動作方向をパラメータとして、掘削にかかる荷重とバケットリンクにかかる歪みの関係を実験で明らかなものにし、今後、現場での様々な事象（障害物等）に対応した動作計画構築のための基礎データを採取した。

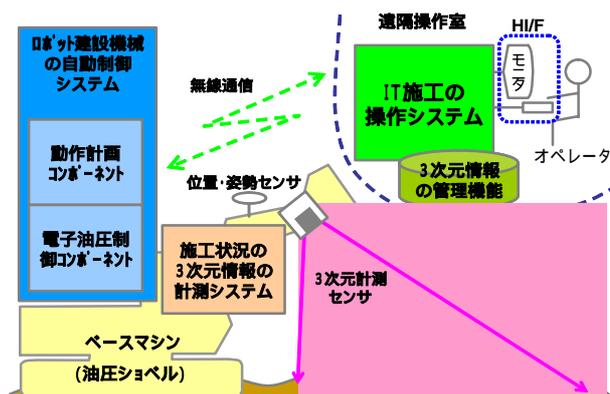


図-1 システム概要図

2. 研究内容

図-1 に示すように、システム構成は、3つの基盤要素によって構成されており、自動掘削としてIT施工システムの開発を進めており、写真-1 に示すプロトタイプを完成させた。

本研究では、このプロトタイプを利用し、掘削にかかる荷重とバケットリンクの歪みの関係等を明らかにすることにより、掘削時に障害となる岩塊、地盤の固さ、礫、コンクリートなどの事象に対応した、動作制御計画を生成することを目的とした基礎実験を行った。



写真-1 プロトタイプの全景

2.1 実験の概要

本実験は、油圧ショベルの掘削にかかる荷重を推定することを目的に油圧ショベルの姿勢及びバケットの動作方向をパラメータとして、掘削荷重とバケットリンク歪みの関係を求めたものである。

具体的な手法としては、油圧ショベルのバケット先端に作用する垂直・水平荷重をロードセルで計測する荷重実験とプロトタイプの動作計画を利用した掘削実験を行うこととした。

実験では、共通して図-2 に示すバケットリンクの掘削抵抗（圧縮引張歪み）を計測した。このリンクは、バケット油圧シリンダの変位をバケットの回転に変換するリンクで、バケットに掘削荷重が作用する際に発生するリンクの歪みを計測したものである。

荷重実験については、油圧ショベルのバケット先端に作用する荷重をロードセルによって計測した。荷重方向は鉛直（重力方向）と水平方向である。図-3 に姿勢概念を示す。

掘削実験については、図-4 に示すような実掘削に伴う歪みを計測するとともにバケットリンクに作用する水平・垂直加重と油圧ショベルの姿勢による掘削限界を実験により明らかにした。

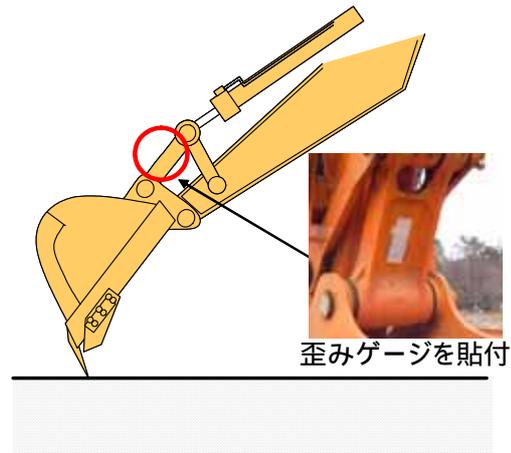


図-2 歪みの測定位置

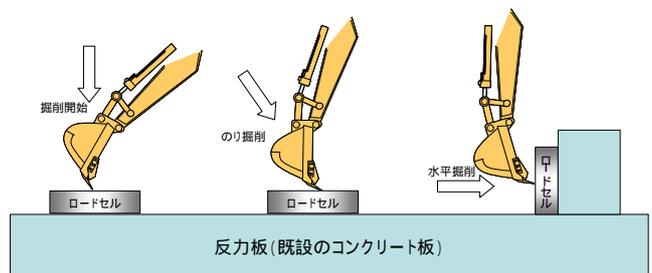


図-3 姿勢概念

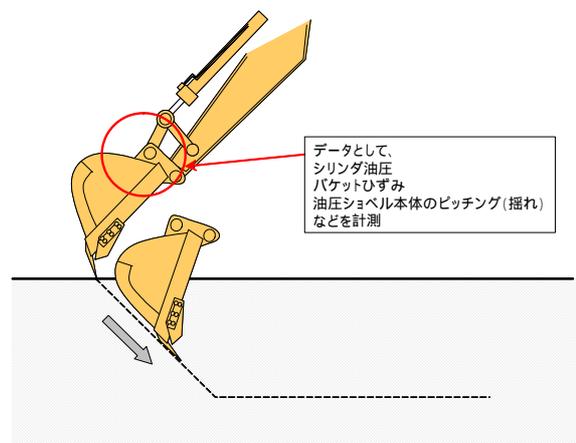


図-4 掘削実験の概要

2.2 実験内容

2.2.1 荷重実験

荷重実験において、鉛直荷重実験では、盛土（反力板より1m）の上に油圧ショベルを設置し、主としてブーム操作でロードセルを下方に押しつける操作を行った。荷重によって油圧ショベルの前方がピッチング（油圧ショベルの本体が持ち上がる）した段階が荷重限界に達したものと判断し、操作を終了した。

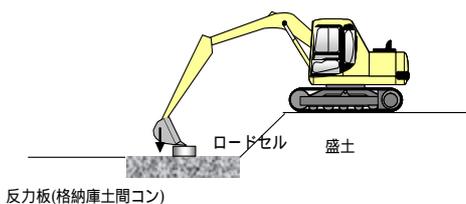


図-5 垂直荷重作用時の姿勢



写真-2 垂直荷重実験状況

水平荷重実験では、ロードセルを盛土（礫混じり土で造成）の鉛直面に立てた鉄板に置き、図-6のように主としてアームで荷重を作用させる。この実験では、ロードセルの保護用に設置した木材合板（厚さ 40mm）にバケット先端爪が食い込む状態を荷重限界とした。

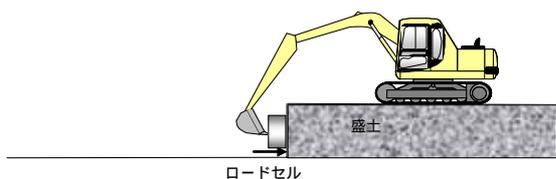


図-6 水平荷重作用時の姿勢



写真-3 水平荷重実験状況

垂直荷重及び水平荷重では、原則としてショベルのクローラ先端からバケットフットピン位置までの距離を、最小値から 1m ピッチで、最遠距離までとした表-1 に示す実験ケースで行った。

表-1 荷重実験ケース

実験条件	バケットフットピン座標		バケット角(°)	ピッチ(°)	ヨー(°)	
	水平(mm)	垂直(mm)				
水平	0点					
	Cal					
	1m	1270	23	60.2	4.8	
	1m	1320	182	61.9	4.7	
	2m	2060	210	62.6	3.6	
	3m	2860	297	66.5	2.8	
	4m	4010	264	68.4	0.4	
	5m	4850	360	76.6	-0.7	
垂直	2m	1880	493	-19.9	2.4	1.4
	3m	2860	385	-34.9	2.6	1.3
	3m	3340	210	-49.2	2.8	1.3
	4m	4290	129	-44.0	2.7	1.3
	5m	4815	400	-82.6	2.9	1.2

2.2.1 掘削実験

掘削実験については、バケット侵入角度、掘削深さ、旋回中心からバケット先端部での距離をパラメータとして、表-2 に示すような実験ケースにより掘削時に発生する掘削荷重をバケットリンクの歪みから推定する方法について検証した。

本実験における掘削条件としては、予め設定する 2 点間（のり掘削の始終点）を既存の動作計画制御プログラムを用いて実施しており、掘削速度は、自動掘削（粗掘削）時に設定されている 0.4km/h にて行った。



写真-4 掘削実験時の姿勢



写真-5 掘削実験状況

表-2 掘削実験ケース

掘削開始距離	5.0m				5.5m				6.0m				6.5m				7.0m			
バケット角度	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80
掘削深さ設定	1.0m																			

3. 実験結果

3.1 荷重実験

図-7,8 に荷重と歪みの関係を示す。図中の回帰式は、切片を0とした場合の回帰式である。図(代表例)に示すように全ての実験事例で比例関係を確認することが出来た。

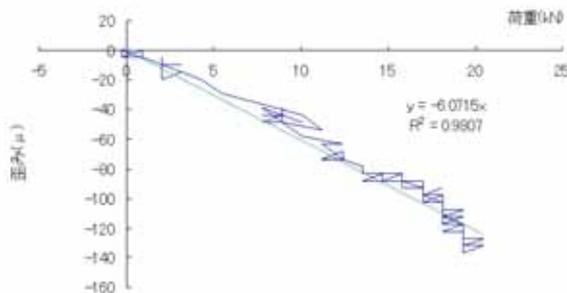


図-7 垂直掘削抵抗

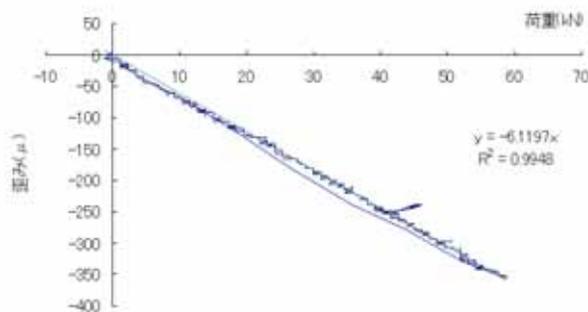


図-8 水平掘削抵抗

図-9,10 は、油圧ショベルの姿勢(バケット位置)と荷重 - 歪み間の勾配との関係を求めたものである。図が

ら水平荷重時には距離に関係なく掘削抵抗と歪みには一定の関係があることが分かった。

垂直掘削の場合、水平距離が長くなるほど勾配が大きくなる傾向を示す。これは、水平掘削ではバケット角度に大きな変化がないのに対し、垂直掘削では距離によってバケット角度が変化することが原因と考えられ、当然な結果となった。

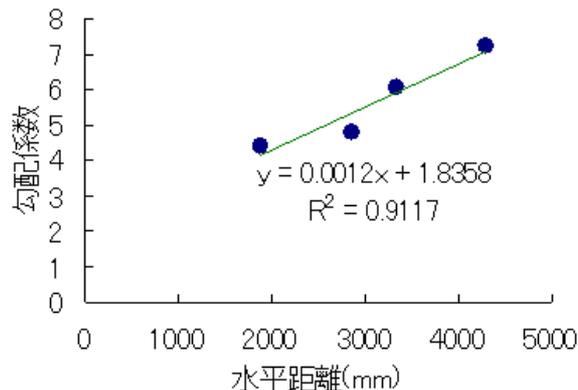


図-9 水平距離と垂直掘削抵抗の勾配係数

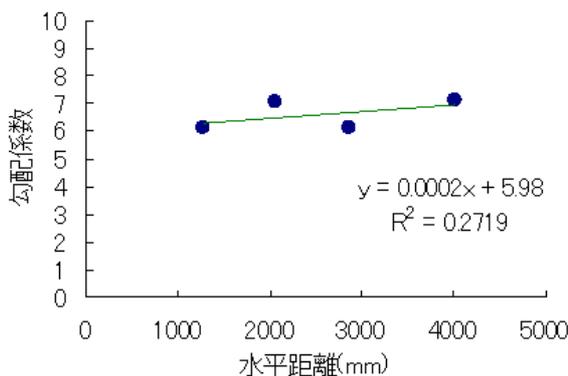


図-10 水平距離と水平掘削抵抗の勾配係数

3.2 バケットリンク角度による軸力分解

荷重実験では、バケット先端荷重と歪みによる関係を実験により分析したものであるが、荷重 - 歪みの関係はバケット先端部荷重に依存するため、バケット角度が変化することによる荷重変動が発生してしまう。

したがって、掘削実験での実掘削を行った場合に発生する荷重を歪みから算出しようとする場合、バケットリンク角度による軸力分解が必要となる

油圧ショベルのブーム、アーム及びバケットで構成されるフロント部を一つのビームとみなすと、バケット先端に作用する荷重(図-11 では鉛直)とバケットリンクに作用する力は、モーメントの釣り合いによって説明され

る。バケット先端に作用する垂直荷重を生成させる力は、油圧ショベルの重量 M_g であり、バケット先端に作用する荷重 F_{BP} によって油圧ショベルが履帯後端を中心として回転(ピッチング)すると考えれば、モーメントの釣り合いから、

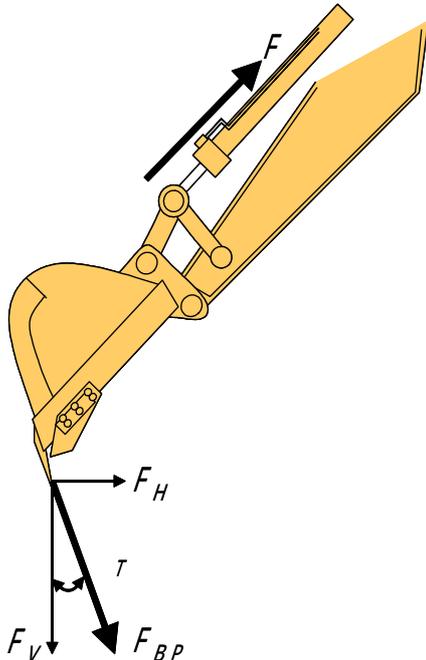


図-11 軸力分解 (バケットに鉛直荷重が作用)

$$F_{BP} = Mg \frac{L_G}{L_{BP}}$$

として推定される。ここで、 L_G は、履帯後端から油圧ショベルの重心までの距離、 L_{BP} は、ケット先端までの距離である。ケットリンクの軸力の垂直成分は、このモーメントによって派生することから、バケット先端に作用する垂直反力(荷重)に比例した値となると想定される。

リンクに作用する軸力は、リンクに歪みゲージを貼付して測定した。歪みから軸力 F への換算は、

$$F = \varepsilon AE$$

である。ここで ε は歪み、 A 、 E は、リンクの断面積と材料の縦弾性係数である。実際の計測は、動歪み計を使用して、電圧信号として計測するが、信号電圧と歪みの関係式は、

$$e = \frac{V}{2} K_s \varepsilon$$

である。 V は、ブリッジ電圧(2V)、 K_s はゲージ率(約2.0)である。歪み計は、2枚ゲージ式であるので、1枚ゲージの場合の2倍の出力電圧が発生する。

測定したリンク荷重を軸力分解(垂直分力と水平分力)

にわたるためには、油圧ショベルの姿勢によるリンクの角度の測定(決定)が必要である。油圧ショベルのバケット角度は、バケットフットピンではなく、リンクピン(図-11)で測定されている。

測定結果を整理し、図-12 に示す鉛直荷重試験では、バケット先端の鉛直荷重とリンクの鉛直分力、図-13 に示す水平荷重試験では、バケット先端の水平荷重とリンクの水平分力の関係を求めた。

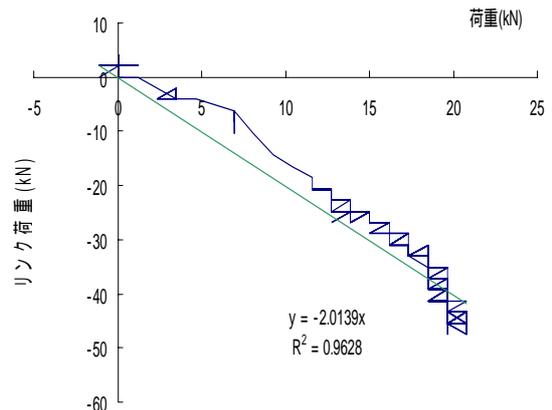


図-12 バケット垂直荷重とリンクの垂直軸力

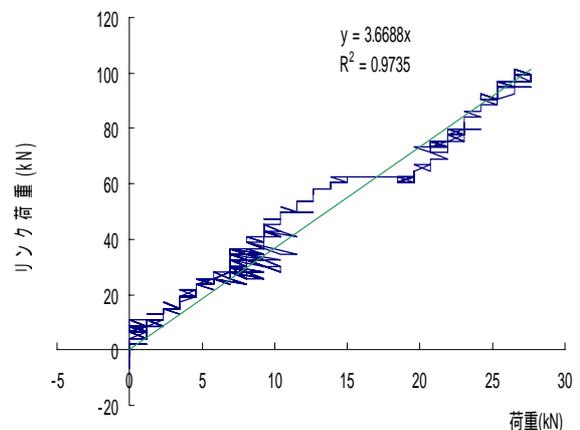


図-13 バケット水平荷重とリンクの水平軸力

バケットリンクに作用する軸力を、リンク角度を元に垂直分力と水平分力に分解した。バケット先端荷重を垂直力とした実験では、バケット垂直荷重とリンクの垂直軸力、水平荷重実験分については、バケット水平荷重とリンクの水平分力の関係を求めている。

次に両者の間の比例係数(回帰直線の勾配)を油圧ショベルの姿勢との関係で求め、その勾配がわかれば、リン

ク荷重からバケット先端荷重が計算出来る。このとき、その勾配はバケットの水平位置によって異なるので、その補正関係を図-14 及び図-15 に示している。

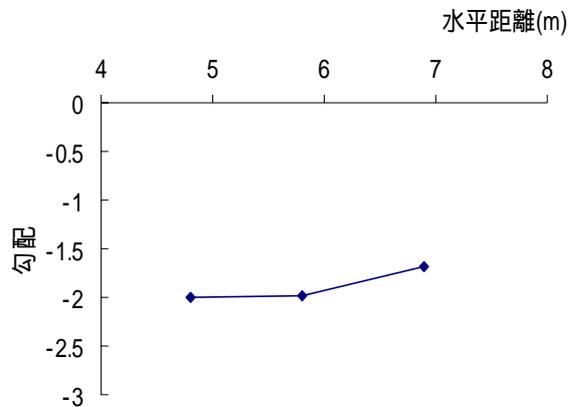


図-14 バケット位置と垂直力勾配の関係

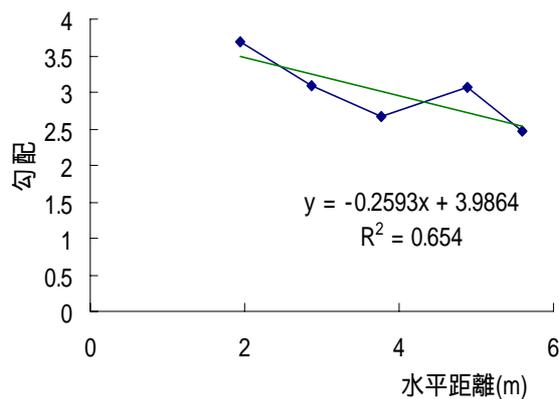


図-15 バケット位置と水平力勾配の関係

水平距離を X として、勾配を求め、その勾配でリンク荷重を割れば、以下に示すようなバケット先端荷重公式となる。(図-11 参照)

$$F_V = \frac{F_{Link}}{(2.76 - 0.15X)} \times \cos \theta_T \quad \text{垂直荷重}$$

$$F_H = \frac{F_{Link}}{(3.99 - 0.26X)} \times \sin \theta_T \quad \text{水平荷重}$$

3.3 掘削実験

表-2 に基づくケースによって、実施した掘削実験で

は、掘削荷重をバケットリンク角度、掘削開始距離をパラメータとしてバケットリンクの歪みと実掘削状況から推定するとともに、荷重実験によって得られた結果を掘削実験結果に利用して、掘削限界で発生している荷重を明らかにするものである。(図-16)

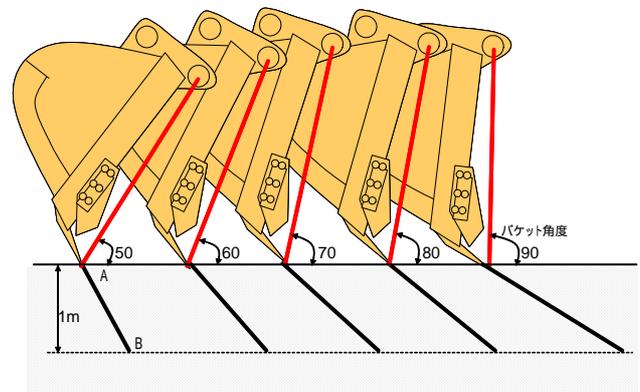


図-16 実験時のバケット角度

実験の結果、表-3 に見られるように掘削可能な領域は、掘削開始距離が 5.5m~6.5m、バケット角度 80°~90° が掘削可能領域という結果が得られた。

表-3 に示す掘削可能領域及び不可領域を大きく分類整理するとバケットの姿勢、掘削開始距離により図-17 に示すような現象が見られた。図-17 1) については、目標とする掘削軌跡 A-B において掘削作業が可能な姿勢におけるバケットの状態を示したもので、バケット底部の接圧若しくはバケット内部に堆積する掘削土による荷重によって作業が停止したものである。

一方、図-17 2) は、目標とする掘削軌跡 A-B において掘削作業が不可能となる姿勢におけるバケットの状態を示したもので、掘削に必要な荷重が得られずに作業停止となった。

表-3 掘削可能領域

バケット角度		50	60	70	80	90
掘削開始距離	5.0m	x	x			
	5.5m	x	x			
	6.0m	x	x			
	6.5m	x	x			
	7.0m	x	x			

○ : 掘削可能な状態
 □ : バケット底面が地盤圧接等による掘削停止
 x : 掘削不可能な状態

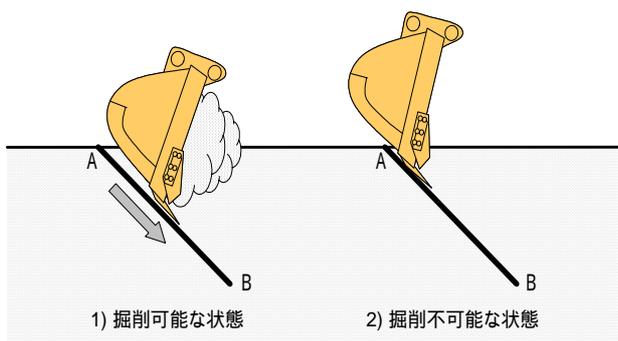


図-17 掘削状況



写真-8 掘削に必要な荷重が得られない状態



写真-6 掘削可能な状態



写真-7 バケット底部に発生した接圧によって停止

4. 実験からの考察

荷重実験によって、掘削時の各種姿勢とバケット角度における掘削荷重とフットピンにかかる歪みを計測し、検証の結果、掘削荷重 - 歪みに相関があるものと判断できる。

この結果、実際の掘削実験において計測した歪みを荷重に換算し、「土が硬い、何か障害物がある」といった状況時に独自の荷重変化が現れ、掘削限界になると停止する状況の変化を観測することができた。これを利用して、発生する歪みの挙動から「土が硬い、何か障害物がある」といった状況をイベントとして位置付けし、別の動作に移行するシステム構築の考え方（アルゴリズム）が整理できるものとする。

また、掘削実験によって得られた知見として、歪みをバケット先端の垂直、水平荷重に換算した図-20,21 に示すグラフは、掘削時にバケット底面に接圧が発生したために作業停止となった状況を角度毎に示したものである。（CASE6.0m）

図-18 に示すように、バケット先端角度によって、それぞれの水平移動距離で荷重の変動が見られた。特にバケット先端角度 70° では、5,200mm 付近での変動があるが、この変動については、実験時の目視での確認でバケット底面の地盤との接圧によるものと考えられたが、その後、図-20 の掘削軌跡に示すように停止せず掘削が継続された。これは、他のバケット先端角度においても同様な現象として捉えられた。図-19 は、バケット先端の水平荷重を示したものであるが、荷重に大きな変動が見られないことから、水平時における荷重変動障害の要因となるものがないと考えられる。

本実験における停止現象は、荷重変動後に図-20 のバ

ケット先端軌跡に示すように、更に掘削作業が継続されていることや、掘削時におけるケット先端の軌跡をみると水平方向と深さ方向（Z 軸）が、ほぼ比例関係になっていることから、土質の崩壊、せん断、滑り等の発生によるものが、要因となったと推測される。

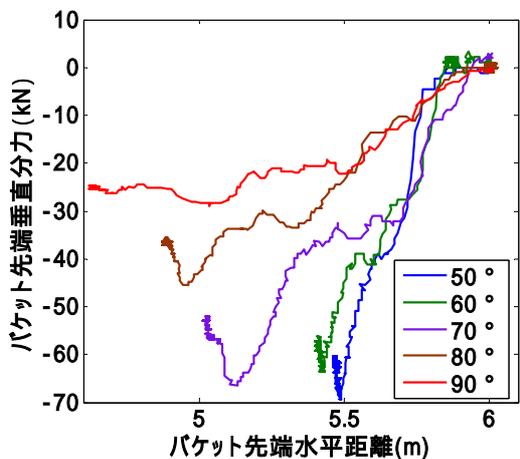


図-20 リンクに作用した垂直荷重

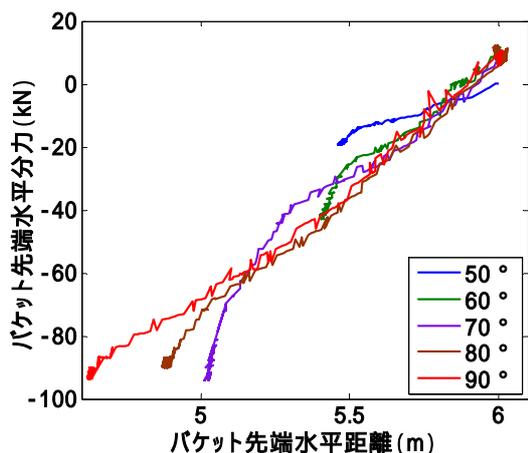


図-21 リンクに作用した水平荷重

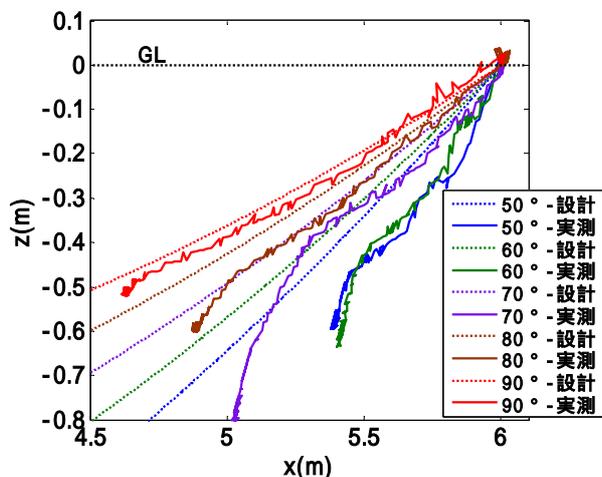


図-22 バケット先端の軌跡

4.まとめ

本研究では、荷重実験と掘削実験により、油圧ショベルの姿勢及び掘削動作時のパラメータとなる掘削抵抗とケットリンクの歪みの高い相関関係を明らかにした。

掘削作業において、荷重の計測を歪みに置き換えることで様々な現場での事象に対応した動作計画構築が可能になるものと考えられる。

また、掘削時の接圧による現象として、土質の崩壊、せん断、滑り等を考察（もしくは、ケット内部に堆積する掘削土による荷重）しているが、この現象を更に解析し、その成果を反映した物理モデルの構築が事象に対応した動作計画構築において必要になると思われる。

今後は、動作計画の構築を行ううえでの物理モデルの作成と併せて、他の動作パターンにおける相関等について実験による検証を行う必要がある。

RESEARCH ON AUTOMATIC EXCAVATION OF HYDRAULIC SHOVEL

Abstract : Civil engineering work involves many dangerous and grueling tasks, so improving work environments and ensuring safety are challenges facing this field. It is necessary to introduce automation technology to construction industry that will prepare for the aging of construction workers and the shortage of young experienced workers, boost efficiency, cut costs and improve quality levels. In a bid to address this issue, combining simple remote operation, the research and development of IT construction technology was carried out with autonomous construction machinery.

In 2007, to achieve the above goal, research was performed to develop the basic technologies: system to measure three-dimensional information, display/operating system and automatic control system, these were integrated to develop a prototype system. Then autonomous excavation and loading soil was achieved. During that, based on operating data analysis of skillful operator the action planning was improved making the construction accuracy and efficiency increased.

In 2008, in order to extend the application of automatic excavator in different soil conditions or to different work contents, a series excavation investigation was performed monitoring the excavation distance, the bucket posture, the resistance force of the bucket tip and the resistance force of the bucket link. From that, we can get the relationship of the resistance force between the bucket tip and the bucket link. Combing numerical investigation results, the dexterously automatic system will be constructed.

Key words : Unmanned construction, Hydraulic shovel, Automatic construction system, Action planning