

## 49. 連壁用モデル掘削機の位置制御と地盤特性

愛媛大学：\*深川 良一・室 達朗  
（株）鴻池組：松生 隆司

### 1. はじめに

連壁用掘削機の位置制御結果に影響を及ぼす諸要因について検討するためにモデル掘削機による室内試験を実施した。初期条件として掘削機に基準状態からある偏差を与え、その偏差を解消するように自動制御を実施させた。既報<sup>1)</sup>では、掘削機が基準状態に復帰してからのやや安定した状態に対する制御結果について考察しているが、本報では基準状態に復帰するまでの復帰過程（と呼ぶ）に対する検討を加えた。地盤中での位置制御動作に対する掘削機本体の変位を簡単な力学モデルによって表現し、制御結果と地盤特性との関係が合理的に説明できることを示した。

### 2. 実験装置

実験装置の概略を図-1に示す。実際の掘削装置は前後、両側面に各4個、合計16個の位置制御用アジャスタブルガイドを有するが、ここでは単純化のために左右両側面に各1個のみのアジャスタブルガイドを有する実験装置を使用している。掘削装置は、支点回りに左右のみに変位でき、前後への変位はほとんど生じない。油圧シリンダは内径32mm、ストローク長30mm、最高使用圧力35.7kgf/cm<sup>2</sup>のものを用いた。載荷板寸法は縦100mm、横65mmである。実験装置及びシステムの詳細については文献1)を参照されたい。

プログラムはBASICで作成した。制御動作としては比例制御動作を用いた。プログラムは大きく分けて入力信号処理、計算（比例動作処理）、出力信号処理の3つより構成される。載荷板の変位量は-5V～+5Vの電圧で表され、それがモータ回転数を制御する電圧に比例することから

$$\text{Vol.0} = \text{Gain} \times \text{Vol.1}$$

とすることができる（図-2参照）。ここに、

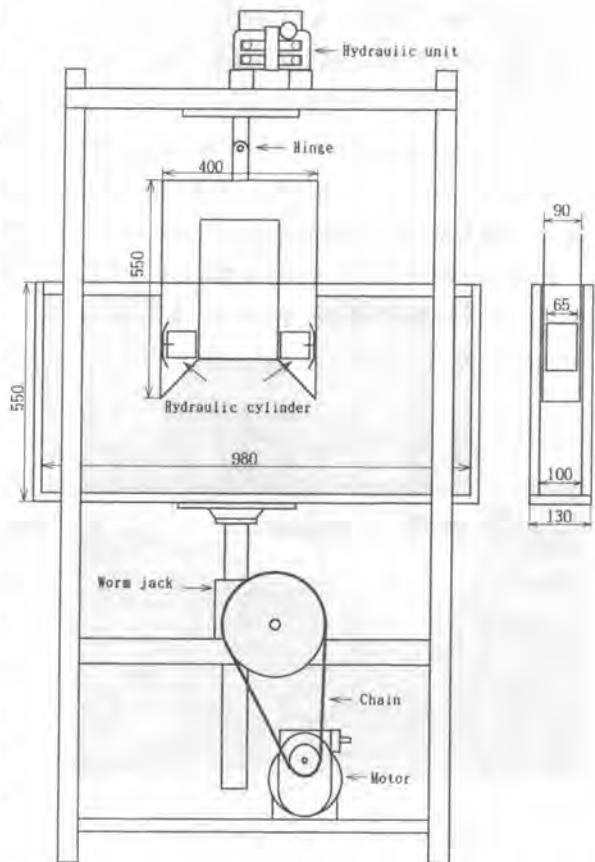


図-1 実験装置

Vol. 0: 出力電圧(V), Gain : 比例感度, Vol. 1: 入力電圧(V)である。

本実験における制御においては、載荷板は次のように作動する。例えば、図-2において、感度(Gain)が5の場合を考えよう。掘削機先端が基準状態から1mm右に変位したとすると、0.5Vが入力信号として入力される。すると、それに対応して2.5Vが出力され、最終的に0.6secだけ載荷板が作動(伸長)することになる。油圧シリンダへのポンプ圧は一定であるから載荷板の作動速度も一定(26.1mm/sec)である。またシリンダの最大作動距離は30mmである。したがって、この場合の0.6secの作動時間は15.7mmの作動距離を意味する。シリンダ(載荷板)は所定の作動時間が経過すると、ほぼ瞬時に収縮を始める。収縮速度も伸長速度にほぼ等しい。もし、掘削機が基準状態から大きくずれており、かつ制御が容易でないならば、位置制御用載荷板はその30mmという最大限の伸長、収縮を繰り返すことになる。

### 3. モデル地盤

#### (1) 使用材料

豊浦標準砂、発泡スチロールビーズ、川砂、ポリエチレンビーズの4種類の材料を用いて実験を行った。これらの材料の諸元を表-1に示す。発泡スチロールビーズ及びポリエチレンビーズは、もとより建設材としてさほど現実的な建設材料ではないが、制御命令に対する応答の特徴及び範囲を把握するには適当な材料であると判断できる。

#### (2) モデル地盤の作成

各材料とも所定の密度が得られるようモデル地盤の作成方法を統一した。最終的に得られたモデル地盤の平均密度、相対密度を表-1に示す。発泡スチロールビーズについては、通常の方法で作成された地盤では掘削機の位置制御を実施するための地盤反力が得られないため、地表面上に段ボール紙100×300mmを置きその上にビニール袋につめた水1100gfを載せて実験を行った。

#### (3) 地盤力学特性の評価

地盤の力学特性を評価するために水平方向平板載荷試験を実施した。油圧ユニット、油圧シリンダおよび載荷板などは位置制御試験で使用したものと同一のものを使用した。実験装置および実験方法の詳細については文献1)を参照されたい。実験の結果得られた地盤反力係数は、豊浦砂、発泡スチロールビーズ、川砂、ポリエチレンビーズに対して各々0.130、0.0086、0.259、0.0378kgf/cm<sup>3</sup>となった。

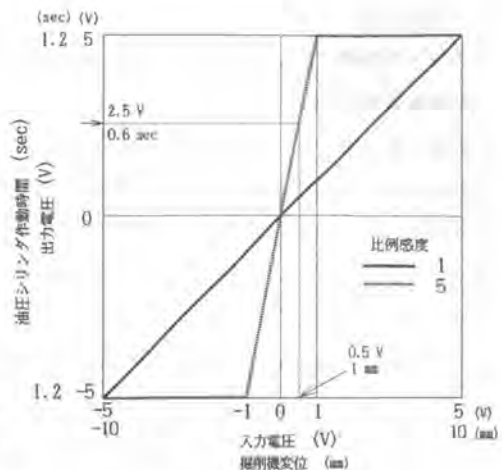


図-2 位置制御における入出力信号

表-1 供試材料の諸元

	Specific gravity	$\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Relative density of tested ground (%)
Stylofoam beads	0.0218	0.0108	0.0112	34
Polyethylene beads	0.896	0.577	0.636	23
Toyoura Sand	2.569	1.345	1.625	86
River Sand	2.635	1.423	1.728	36

#### 4. 実験方法

すべての地盤において掘削機の初期条件は同一とした。つまり掘削機を地盤中に230mm埋め込み、さらに掘削機下端を基準状態から時計の逆回転方向に10mm変位させた状態から実験を行った。基準状態とは、掘削機上部中央のヒンジの鉛直下方に自然に吊り下がった状態を指す。制御条件、実験条件としては、比例感度及び掘削機貫入速度を種々変化させた。比例感度については、10, 50, 100の3種類を基本とし、その制御結果の傾向を見て他の感度に対する追加実験を行うこととした。貫入速度は、0.35, 0.6, 1.0 mm/secと3種類変化させた。ちなみに実際の鉛直掘削機の標準貫入速度は2.0m/hour (0.56mm/sec) 前後である。

制御試験は、先に述べたように、基本的に初期に掘削機の先端を基準状態から右側へ10mmふらした状態から開始させた。開始後、掘削機は直ちに制御を始め、ある時間後に基準状態へ復帰する。復帰後は、ケースバイケースではあるが、基準状態回りでのやや安定した制御が実験終了まで続く。この復帰までの過程を復帰過程、やや安定した制御過程を安定過程と呼ぶことにする。本論文では、復帰過程における挙動のみについて記述している。

#### 5. 復帰過程での制御性の検討

##### (1)位置制御用油圧シリンダの伸張に対する掘削機変位の理論的検討

先に述べたように復帰過程（特にその初期の段階）では制御用油圧シリンダは30mmのフルストロークでの伸長、収縮を繰り返す。この過程での油圧シリンダ（掘削機本体の左側に装着された、図-3参照）の1伸長に対する掘削機本体の戻り量を理論的に表現し、実験値との比較を試みた。

掘削機本体の戻り量算定までの大まかな流れを図-3に示している。基本的には、掘削機の左側に位置する位置制御用油圧シリンダによる左側地盤への作用力とそれに対する掘削機右側側板の右側地盤への作用力のモーメントの釣合に基づいてモデルを構築している。掘削機本体の戻り量を計算するためには、さらに、載荷板あるいは掘削機側板に任意の荷重が作用した場合の荷重～変位関係が予測できなければならない。これらは通常の平板載荷試験結果を説明するために用いられた指数分布曲線式<sup>2)</sup>（図-3中の式(1)）に基づいて算定している。この指数分布曲線式については文献3), 4)に詳しい。図-3の前半はこの指数分布曲線式の推定に関する部分、後半は推定された荷重～変位関係に基づく掘削機本体の変位の計算に関する部分である。この算定法はこれ以外にもいくつかの仮定に基づいている：i)左側載荷板及び掘削機右側側板での土圧分布を図-3のように仮定した、ii)指数分布曲線式を規定する $\delta_0$ は載荷深度の影響を受けず、また $p_{max}$ は載荷深度に比例して増加する、などである。

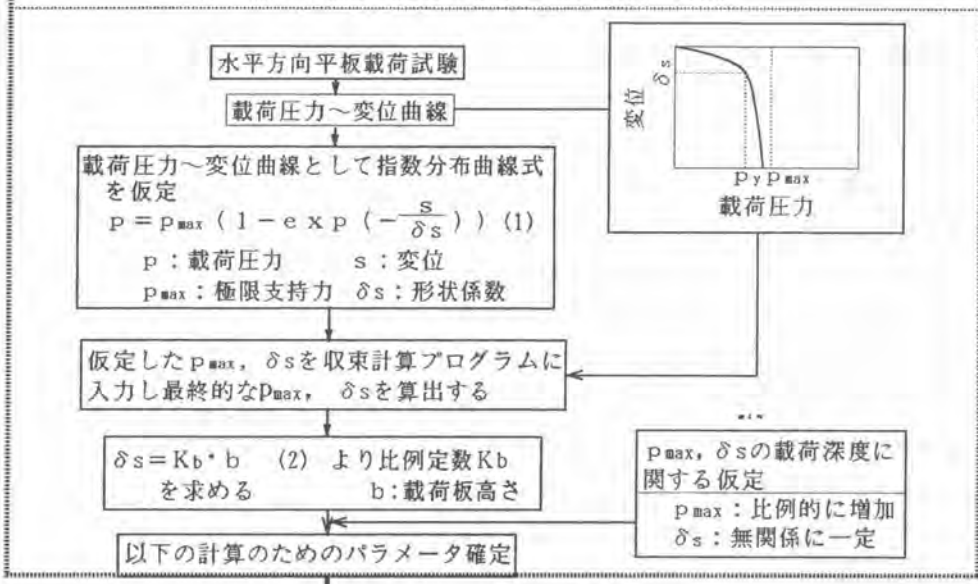
##### (2)油圧シリンダ1伸長ストロークに対する掘削機変位量の計算

油圧シリンダの1伸長ストロークに対する掘削機変位量の具体的計算手順を以下に示す。

1)位置制御試験における初期の地盤条件と同じ条件のもとで実施された水平方向平板載荷試験より荷重～変位曲線を求める。その曲線から指数分布曲線式を推定するための初期入力パラメータ $p_{max}$ ,  $\delta_0$ を決定し、収束計算プログラム<sup>9)</sup>を用いて最終的に最も良く実測値を説明するパラメータ $p_{max}$ ,  $\delta_0$ を求める。さらに式(2)より比例定数 $K_0$ を求めれば、載荷板高さ $b$ が変化しても $\delta_0$ が決定できる<sup>8) 4)</sup>。

2)以上の手順により式(5)の $S_0$ を決定する全てのパラメータが求められたので、想定した実験での境界条件に留意しながら式(5)に従って、初期状態および15mm掘削機を貫入させた位置での計算を行い、 $S_0$ を

水平方向平板載荷における荷重～変位関係の推定



推定された荷重～変位関係に基づく掘削機本体の変位の計算

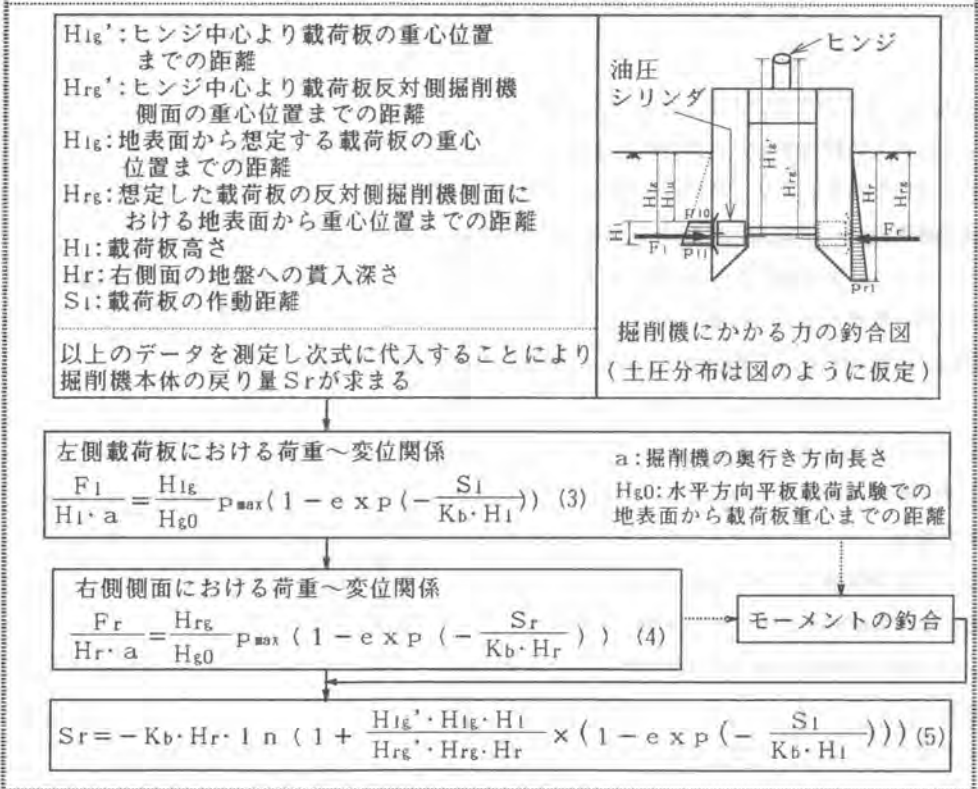


図-3 油圧シリンダ1伸長ストロークに対する掘削機変位量の計算

決定した。これらは、図-4中の $H_{10} = 72, 87\text{mm}$ に対応する。実測値のデータとしては、貫入速度 $1.0\text{mm/sec}$ の実験で最適感度の得られた実験に対応する結果を採用した。なお式(5)は左側載荷板における荷重～変位関係(式(3))および右側側面における荷重～変位関係(式(4))を考慮することによって得られる。

理論式による計算結果と実測値を図-4に示す。実測値については、貫入距離 $0 \sim 15\text{mm}$ の間の値の範囲およびその平均値を図に示した。また計算結果としては貫入距離 $0, 15\text{mm}$ の時点での計算値およびそれらの平均値を示している。発泡スチロールの場合のように計算値が実測値の幅の中に入っていない場合もあるが、全体の傾向としては実測値と良好に一致したと判断できる。したがって、載荷板の面積と地盤の状態およびシリンダのストローク量が分かれば、以上の簡単な計算式により掘削機本体の変位量が前もって分かり、位置制御システムの制御性を判断する上で有益な情報が得られることになる。

### (3)油圧シリンダ収縮過程における本体戻り量

シリンダを収縮させるとき掘削機本体は多少逆方向に戻る傾向を示す。シリンダが $30\text{mm}$ 収縮した場合の本体戻り量を図-5に示す。これも図-4と同じケースを対象としており、掘削機を $0 \sim 15\text{mm}$ 貫入させた場合に得られた値の範囲とその平均値を示している。柔らかい地盤ほど本体リバウンド量が多いという傾向があるが、シリンダが伸長したときの本体変位量との差を調べることによって復帰性を総合的に判断できる。

1サイクル(1往復)のシリンダ伸縮に対する掘削機変位量は、シリンダが伸長したときの本体変位量からシリンダが収縮したときに生じた本体変位量を引くことによって求められる。それを図-6に示す。ここでは、図-4の平均値から図-5の平均値を引いて求める値を算出している。発泡スチロールは特殊な材料であるので考慮から外すと、地盤が柔らかすぎてもまた硬すぎても復帰性が悪くなることが判る。地盤反力係数が $0.1 \sim 0.2\text{kgf/cm}^2$ ぐらいであれば復帰量は大きいが、

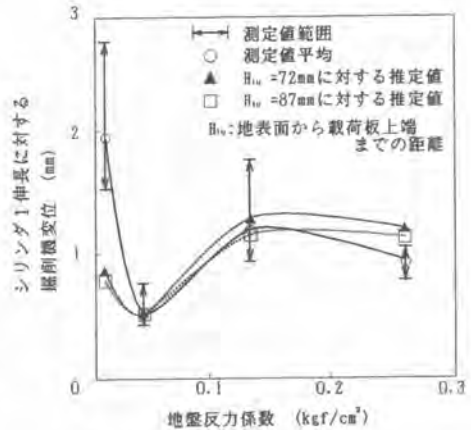


図-4 掘削機変位量の実測値と理論値の比較

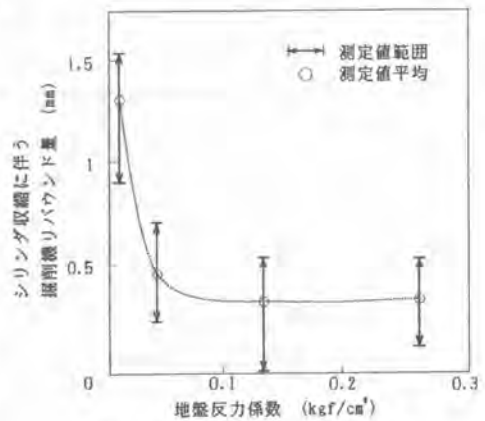


図-5 油圧シリンダ収縮過程での掘削機リバウンド量

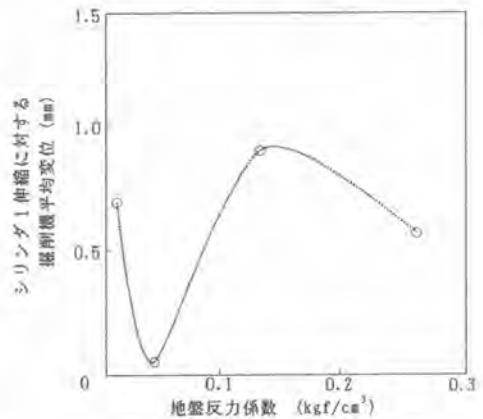


図-6 シリンダ1伸縮サイクルに対する掘削機変位量

それ以下あるいはそれ以上の変形係数であれば、必要なら何らかの復帰量を促進する対策を講じなければならない。

#### (4) 復帰貫入距離

復帰貫入距離（初期変位10mmから基準値に復帰するまでに要した貫入距離）を貫入速度1.0mm/secの場合に対して図-7に示す。他の貫入速度に対しても同様な整理を試みたが、結果的に貫入速度が変化しても大きくは復帰貫入距離は変わらないことが判った。

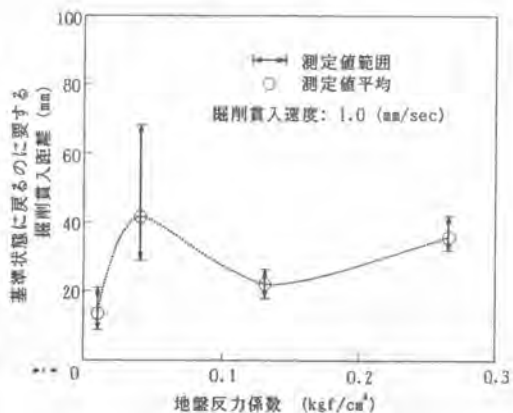


図-7 基準状態への復帰に要した貫入距離

1 サイクルのシリンダ伸縮に対する掘削機変位量を示している図-6と図-7を比較してみると、良好な対応関係を示すことが判る。つまり、1回のシリンダの伸縮で生じる掘削機の本体の変位量が小さければ、その集積結果として生じる復帰貫入距離は長くなるのである。

以上のように、復帰過程における制御結果の検討から、現象間の因果関係のある程度明らかになった。これらの結果は、例えば基準位置に対するある初期変位が与えられたとき、その変位を基準位置に戻すために必要な貫入距離が地盤条件あるいは制御条件を媒介として予測可能であることを表している。

#### 6. まとめ

以上の実験により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 掘削機本体の戻り量を理論的に表現し、実測値との比較を試みたがほぼ実測値と同じ応答を示した。つまり理論的な予測がかなり期待できることが判った。
- (2) それぞれの地盤条件に対して、制御用油圧シリンダ1伸縮に対する掘削機変位量の傾向が復帰貫入距離の傾向と整合性を示すことが判った。

#### 参考文献

- 1) 深川, 室, 鈴木, 松生, 澤: 地中連続壁掘削機の位置制御に及ぼす地盤特性の影響, 第3回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.175-184, 1993.
- 2) Janosi and Hanamoto: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils, Proc. 1st Int. Conf. of Mech. Soil-Veh., Torino, Italy, pp.707-771, 1961.
- 3) 近藤, 佐藤, 杉山: 平板貫入試験の寸法効果について, テラメカニクス7号, pp.33-39, 1987.
- 4) 深川, 室, 加藤, 森田: 地盤破壊を考慮したクレーン車の転倒条件解析, 土木学会論文集, 投稿中.
- 5) 加藤: 地盤破壊を考慮したクレーン車の転倒条件に関する研究, 愛媛大学卒業論文, 1993.