

流量変化の近似データを入力としたファジィ推論による排泥ポンプ過負荷の評価

Evaluation of Mud Pump Overload Using Fuzzy System with Curve Fit Preprocess

大 塩 真
平 松 雄 二
松 永 義 憲

要 約

地中連続壁掘削機オペレータが排泥流量の変化から排泥ポンプの負荷状態を推測することに着目し、オペレータと同様に排泥ポンプの負荷を評価するシステムを構築した。システムは排泥流量データから適切な範囲を選択して最小二乗法による直線近似を行う前段部とファジィ推論によりポンプ負荷の評価を行う後段部から構成される。実測データによるシミュレーションの結果、オペレータの修正操作と合致した出力が得られ、実システム適用への技術的な見通しが得られた。

目 次

- I. はじめに
- II. オペレータによる排泥ポンプ負荷の推測方法
- III. 排泥ポンプ過負荷評価システム
- IV. シミュレーション
- V. おわりに

I. はじめに

地中連続壁の掘削において、掘削機オペレータには鉛直精度を許容範囲内に収め、かつ、できるだけ早く掘削を行うことが要求されている。

対象とした急速施工タイプの掘削機では、掘削カッタの能力が非常に高いため、掘削土を地上のプラントまで流体輸送する排泥ポンプの能力が相対的に低い。このため、掘削速度を速く設定すると、発生する土砂量が増加するため、流体の密度も高くなり、これにともない排泥ポンプの負荷が増大して、場合によっては排泥ポンプが過負荷の状態となり、排泥ラインが閉塞する恐れがある。理由は後述するが、これに対してオペレータは、排泥流量の変化から排泥ポンプの負荷を推測して、掘削速度を調整している。

本研究は、現在、熟練オペレータの技量や経験に依存している地中連続壁掘削機の運転を容易にすることを目的としており、今回、その一部として、オペレータの判断に近い形で排泥ポンプの過負荷を評価するシステムを構築した。

また、掘削中のオペレータは、常に多くの計器類を監視し続ける必要があり、本システムの適用により、排泥ポンプの負荷状況の把握が容易となり、さらに警報機能を付加することで、監視が必要な計器の数を減らすことができる。

本論文では、排泥ポンプの過負荷評価システムと実測データを入力としたシミュレーション結果について記す。

II. オペレータによる排泥ポンプ負荷の推測方法

前述したように、対象としたタイプの掘削機において、オペレー

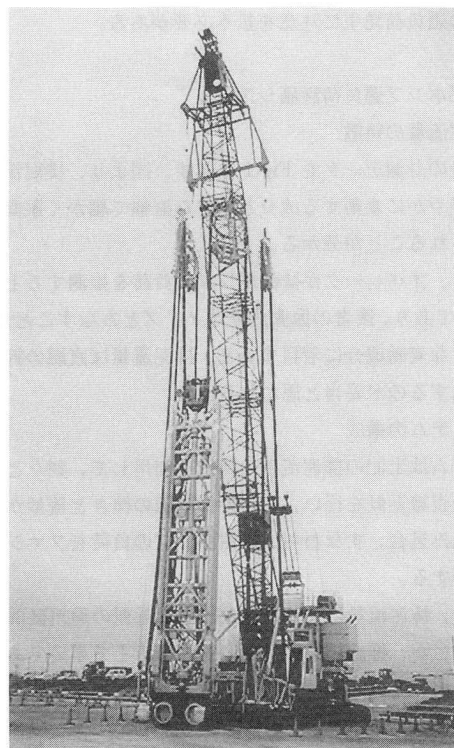


Photo 1 地中連続壁掘削機

(Excavation Machine for Underground Continuous Wall)

タは排泥流量の変化から、排泥ポンプの負荷を推測している。これは、土質が比較的軟らかく、掘削が容易な場合には、掘削速度の上限が排泥ポンプの能力で決まるためである。

このような場合、排泥ポンプは、常時、最大回転数に近い一定の回転数で運転されることが多く、排泥ポンプの負荷が大きくなると排泥流量が低下するため、排泥流量の変化から排泥ポンプ負荷を推測することができる。

排泥ポンプの負荷が増加すると、排泥流量が徐々に低下していき、

キーワード：地中連続壁，掘削機，ポンプ，ファジィ，
最小二乗法

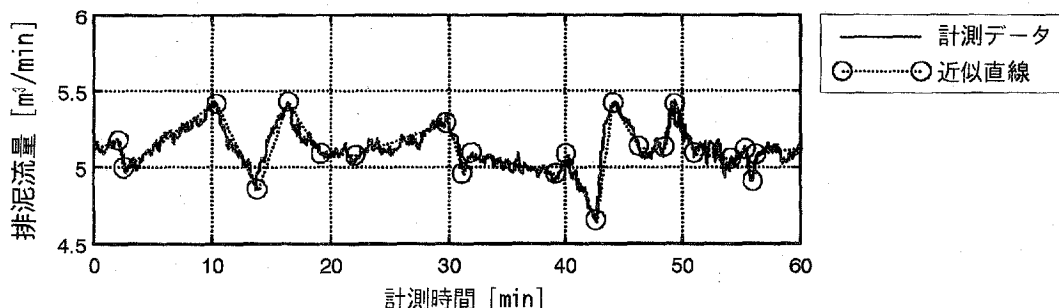


Fig.1 排泥流量の計測結果
(Measurement Result of Mudflow Rate)

過負荷の状態に近づくと排泥流量は急激に落ち込む。この時に速やかに掘削速度を低下させないと、排泥ラインの閉塞が発生する。

オペレータは常に排泥ポンプの能力を使い切るように掘削速度を高めて掘削を行っており、また、排泥ポンプが過負荷となる排泥流量は一定ではないため、掘削中は常に排泥流量計を監視して、排泥ポンプの過負荷発生に注意を払う必要がある。

III. 排泥ポンプ過負荷評価システム

1. 排泥流量の特徴

排泥流量の計測データを Fig.1 に示す。図より、排泥流量は大きな振幅で緩やかに変動する成分と小さな振幅で細かく振動する成分から構成されることが分かる。

このうち、オペレータが排泥ポンプの負荷を推測する上で重要なのは、前者であり、後者の振動成分はノイズとみなすことができる。

この大きな変動成分に着目すると、排泥流量は直線の折線グラフとして近似するのが妥当と思われる。

2. システムの構成

本システムは上記の排泥流量の特徴を利用して、刻々と変動する排泥流量の直線近似を行い、この近似直線の傾きと流量から排泥流量の落ち込み具合、すなわち、排泥ポンプの負荷をファジィ推論の手法で評価する。

このため、排泥流量のデータ列から直線近似の適用区間を適切に選択することが、推論結果の信頼度を高める上で重要である。

システムは、近似区間を選択して区分的に最小二乗法を適用する

前段部と、近似直線の傾きや流量などから、ファジィ推論を利用して排泥ポンプ負荷の評価を行う後段部から構成される (Fig.2)。

なお、システムの入力は「排泥流量値」で、出力は「排泥ポンプ過負荷の危険度」である。

3. 直線近似でのデータ列の選択アルゴリズム

システムの前段部では、排泥流量データの最小二乗法を用い、近似直線の勾配を後段部へ出力する。しかし、最小二乗法を適用する区間により、近似直線の勾配が大きく異なるため、区間選択を適切に行う必要がある。特に排泥流量を折線グラフと考えているので、折点部の抽出は重要である。

このため、この折点部を認識し、かつ、近似区間を適切に選択するアルゴリズムを構築したので、以下、その内容を説明する。

このアルゴリズムでは、予め設定した規則に基づき、排泥流量を「増加」、「減少」、「変化なし」の三つの状態で分類される区間として区切る。

具体的には、流量パラメータとして「区間内の最大流量値」と「区間内の最小流量値」を採用し、最新の流量値と逐次比較しながら、これらを更新していく。このとき、最大流量値と最小流量値の差が所定の基準流量値よりも大きくなった場合、その時点までを「増加」、あるいは「減少」の区間とする。また、一定時間内で「増加」、あるいは「減少」が認められない場合は、その時点までを「変化なし」の区間とする。

このようにして、区間が決定されると、その区間と一つ前の区間との状態の組合せ (3×3の9通り) により、予め定めた再設定規則に基づき、流量パラメータの再設定と、最小二乗法を適用する近似開始点 (終了点は現在の排泥流量値) を決定する。

Table 1 と Table 2 は理解を助けるために、再設定規則を流量パラメータと近似開始点に分けて示したものである。

なお、本アルゴリズムでは初期値が必要となるが、初期値の設定は、状態が「変化なし」、近似開始点と流量パラメータが「先頭データ」、「先頭データの流量値」としている。また、排泥流量に見られる小さな振動成分を除去するため、入力する排泥流量データは時間平均値を取っている。

このアルゴリズムにより、区間のデータ点数が極端に少ない場合を除いて、最小二乗法の適用範囲を適切に選択でき、近似直線の勾配を精度よく把握することができた。

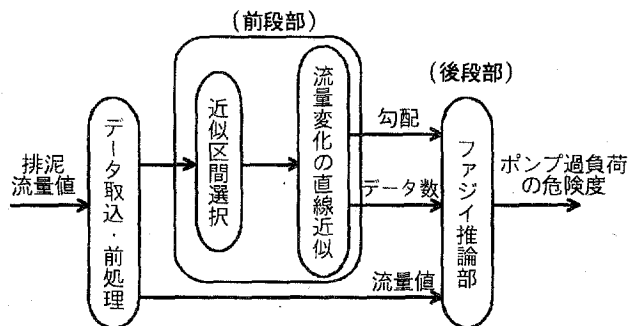


Fig.2 排泥流量評価システムの構成
(System Flow)

Table 1 パラメータ再設定規則
(Resetting Rules for Parameters)

		新しい区間の状態		
		増加	減少	変化なし
前の状態	増加	最新値に更新	最新値に更新	現在値を維持
	減少	最新値に更新	最新値に更新	現在値を維持
	変化なし	最新値に更新	最新値に更新	現在値を維持

※最小値、最大値とも設定規則は同じ

※最新値：状態確定時に入力された排泥流量の値

4. データ列選択の例

Fig.3 はこのアルゴリズムに従って、近似範囲が動的に変化していく例を图示したものである。

まず、区間A（状態未確定）において、最大・最小値を適宜更新しながら、近似開始点がa点のまま、近似範囲が更新される。そして、e点において、排泥流量の変動が基準流量幅を越えないまま、基準時間に到達したため、区間Aの状態が「変化なし」と確定される。このとき、前区間の状態が「変化なし」であったため、再設定規則に基づき、近似開始点はa点のままで、最大・最小値も現在値を維持される。

区間B（状態未確定）においても、近似開始点がa点のまま、順次パラメーターが更新されていくが、f点において、排泥流量の変動が基準流量幅を上回ったため、この時点で区間Bの状態が「減少」と確定される。そして、再設定規則により、近似開始点は最大値の点、すなわち、d点からとなり、最大・最小値はf点の値に更新される。

このようにして、近似開始点を動的に更新していき、排泥流量を折線グラフとして近似することができる。

Table 2 近似開始点の再設定規則
(Resetting Rules for Curve Fit Start Point)

		新しい区間の状態		
		増加	減少	変化なし
前の状態	増加	変更せず	最大値から	最大値から
	減少	最小値から	変更せず	最小値から
	変化なし	最小値から	最大値から	変更せず

5. ファジィ推論による排泥ポンプ過負荷の評価

後段のファジィ推論部は、「排泥流量値」、前段部の出力である「排泥流量の近似直線の勾配」、及び「近似に使用したデータ数」を入力として、「排泥ポンプ過負荷の危険度（直接的には排泥流量低下の危険度）」を出力とする。

ファジィ推論部には一般的な形式のものを用いた。すなわち、各メンバーシップ関数は3角形と台形形状のものを3、または5個組み合わせたもので、推論手法はMax-Min 合成演算、非ファジィ化手法には重心法を使用している。

推論ルールは、基準となる危険流量値を設定し、現在の「排泥流量値」と「排泥流量の近似直線の勾配」から、危険流量値に到達する可能性を推論する。ただし、前述した様に、近似点数が少ない場合には勾配の精度が低下するため、この状態では、近似直線の勾配の信頼度が低いとみなし、出力が安全側にならないようなルールを加えている。

また、排泥流量が長い時間に渡って低下を続ける状況では、排泥流量に余裕がある場合でも、オペレータは「排泥ポンプ過負荷発生の可能性あり」と判断することがある。このため、この条件に該当するルールについては、出力が大きくなるように設定した。

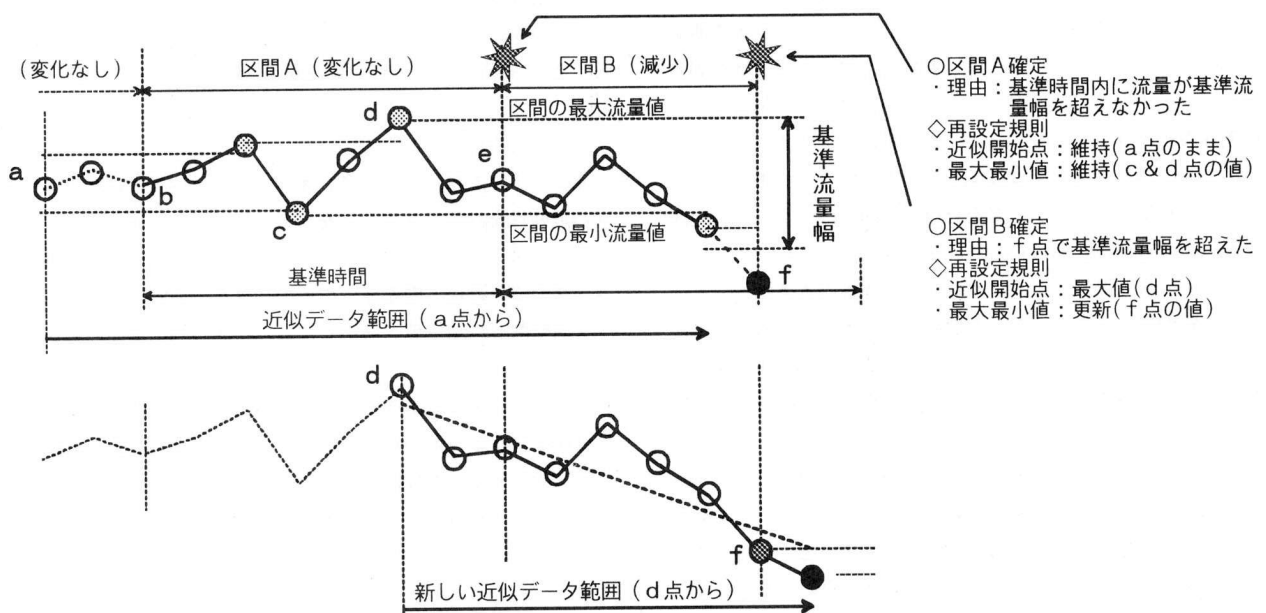


Fig.3 動的なデータ範囲の選択の例
(Change of Data Grouping by the Developed Algorithm)

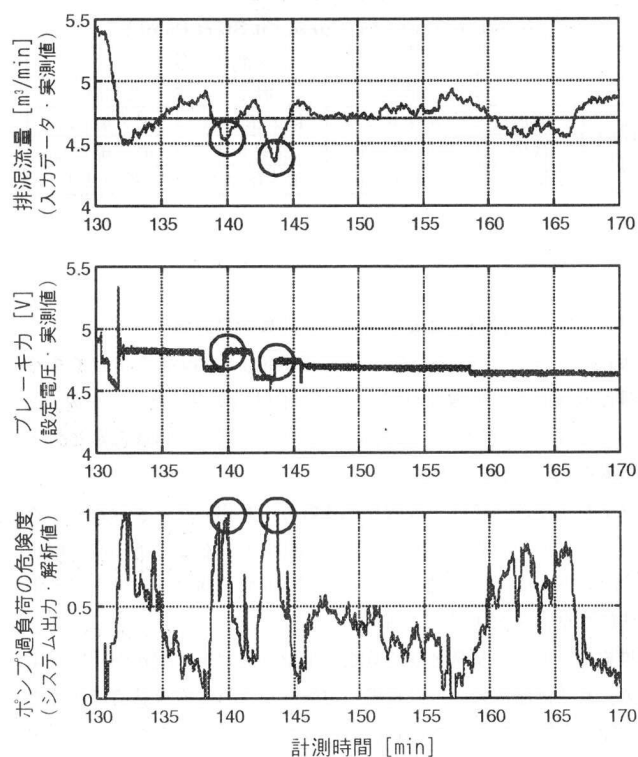


Fig.4 シミュレーション結果の例 (その1)
(Example of Simulation Results No.1)

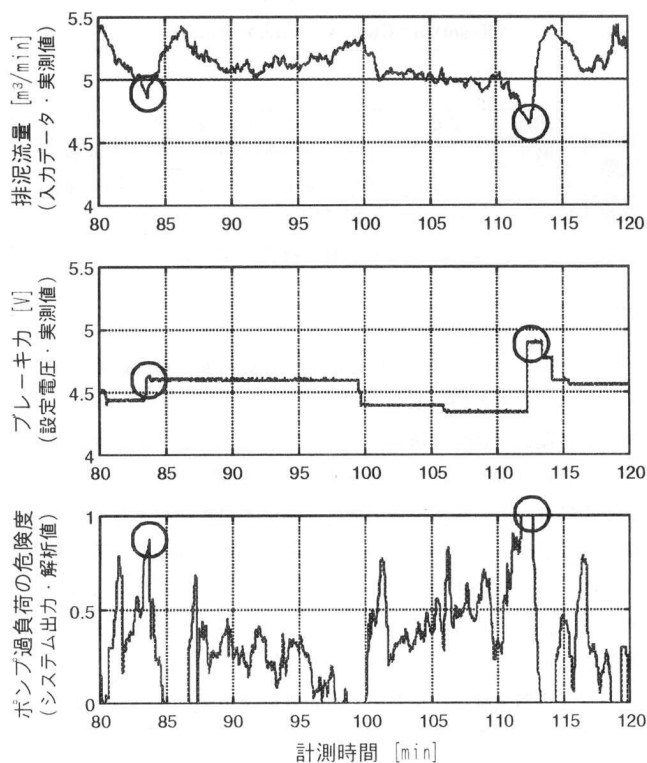


Fig.5 シミュレーション結果の例 (その2)
(Example of Simulation Results No.2)

Ⅳ. シミュレーション

システムの動作を確認するため、排泥流量の実測データを入力としたシミュレーションを実施した。

Fig.4 と Fig.5 は、同一現場の異なる掘削個所での実測データを入力としたシミュレーションの結果である。

図中、上段の排泥流量はシミュレーションの入力データで実測値である。また、中段のブレーキ力は、掘削機本体の下降速度を調整するオペレータの操作量で、ブレーキ力が小さい程、下降速度、つまり掘削速度が大きいことを示し、これも実測値である。そして、最下段のポンプ過負荷の危険度は本システムの出力、つまり、シミュレーション結果である。ポンプ過負荷の危険度は0から1の範囲で表され、1に近い程、過負荷の危険が高いことを示す。

シミュレーションでは、ポンプ過負荷の危険度の大きさと、オペレータが危険を感じてブレーキ力を増加させた部分との相関を定性的に評価した。なお、掘削場所等の条件の違いにより、排泥ポンプ過負荷の目安となる流量値が異なる場合があり、今回はこの流量値を個別に設定してシミュレーションを行った。

Fig.4 の例では、140 分と 143 分付近で排泥流量が低下したため、オペレータはブレーキ力を増加させているが、このときのシステムの出力も 1 近くと危険が非常に高いことを示している。一方、157 分過ぎから排泥流量がなだらかに減少していき、急低下することなく自然に回復している部分が見られるが、このときのシステムの出力は、流量が低下したために大きくなってはいるが、先の場所と比較すると低い値をしめしている。これは、本システムでは流量値だけでなく、流量低下率も考慮して、危険度の大きさを決めている

ため、シミュレーション結果からもこの特徴が確認された。

Fig.5 の例でも、83 分と 112 分付近で、オペレータがブレーキ力を増加させているが、いずれの場合にもシステムの出力が大きくなっている。その他の区間についても、定量的に評価することは難しいが、感覚的には違和感のない出力を得ることができた。

シミュレーションの結果から、危険と認識される流量値を設定することで、排泥ポンプの負荷状況を適切に評価できると考えられる。

Ⅴ. おわりに

本システムを用いることで、オペレータと同様に排泥ポンプ過負荷の危険性を評価できることをシミュレーションで示した。

警報システムへの実用化については、基準流量値などの各種パラメータの設定方法、警報発令の出力レベルの設定、排泥ポンプやカット回転数等の指令値を利用した掘削状態の判別機能の追加等の検討が必要である。

特に運用面を考慮すると、パラメータについては現場ごとに異なる可能性があり、オペレータがパラメータを設定可能な機能を追加する必要があると思われる。

以上のことを踏まえて、今後はシステムの実用化に向けて、また、ここで得られた技術を他の分野へ応用すべく、研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 多田 浩彦, 大志万 和也, 岡原 美知夫; 地中連続壁基礎工法ハンドブック 施工編, 総合土木研究所, 1991.