

39. 地中連続壁工法の高精度掘削管理システム

（株）鴻池組：*松生 隆司・外蘭 伸二
鶴留 久夫

1. はじめに

地中連続壁工法はジオフロント開発のための有力な基盤技術として注目されており、大深度地下構造物への利用を目指して施工技術の大深度化・大壁厚化が急がれている。この新しい開発動向に対処するため、当社では、深さ150m・壁厚2m規模の施工を可能とする大深度地中連続壁工法（KSW-G工法）を開発した。地中連続壁工法では壁体相互を連続して接合する必要があるため、掘削精度の確保が取りわけ重要である。そこで、大深度施工を高精度に実現するための支援システムとして、掘削機の位置・姿勢を正確に検知してこれを精密に制御するための掘削管理システムを開発している。¹⁾

本システムでは、掘削精度管理として設計値からの掘削機の偏位量を30～50mm以内に抑えることとし、マン・マシンによる制御・管理機能を用いて掘削作業を効率よく支援する。

今回、当システムの適用範囲を拡張するとともに、掘削機ねじれ角の検出精度を向上させるために、掘削機の両側面に分割して設置する方式の機体位置検出装置を新たに開発し、水平多軸回転カッター方式のエレクトロミル掘削機（以後、EM掘削機と呼ぶ）および垂直多軸回転カッター方式のBW掘削機に適用した。

2. 高精度掘削管理システムの概要

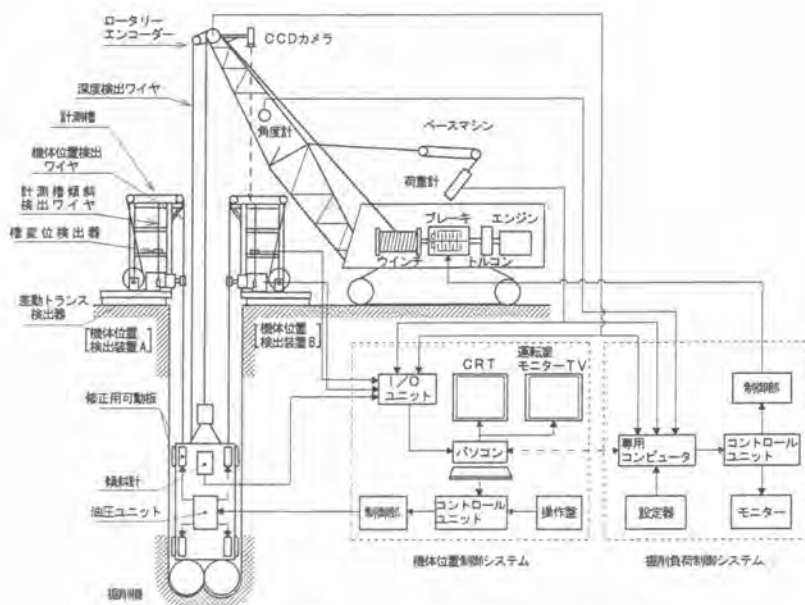


図-1 EM掘削機用高精度掘削管理システムの構成

地中連続壁工法の掘削においては、掘削機の水平方向の偏位量を正確に把握することが重要であり、大深度になるほどその必要性が増してくる。一般に、大深度施工では水平偏位 50～100 mm以内あるいは鉛直精度 1/1000～1/2000 以内の掘削精度が必要といわれているが、本システムでは、精度管理として掘削設計線からの偏位量を 30～50 mm以内に抑えることを目標にしている。

EM 掘削機に適用する高精度掘削管理システムは、機体位置制御システムと掘削負荷制御システムから構成され、BW 掘削機には機体位置制御システムを搭載した。図-1、2 に各々のシステム構成を示す。

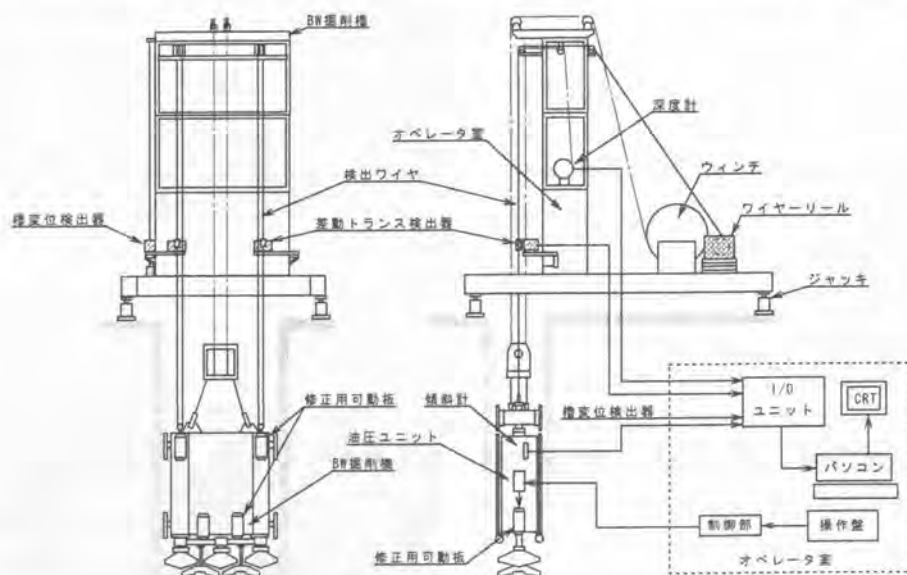


図-2 BW掘削機用高精度掘削管理システムの構成

(1) 掘削負荷制御システム

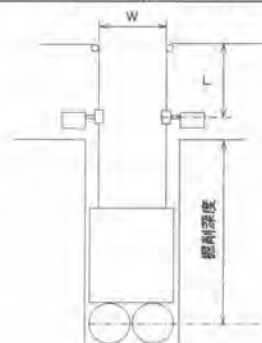
EM 掘削機のベースマシン(クレーン)に搭載された掘削負荷制御システムは、掘削機の降下速度(掘削速度)と地盤への貫入力(掘削荷重)をコントロールする。掘削速度は運転席にある設定器で任意に設定され、設定値と降下速度が等しくなるようにエンジンのトルクコンバータ出力軸に取り付けた湿式多板ブレーキクラッチの制動力が自動的に調節され、同時に速度制御中の貫入力についても設定値以下に保たれる。

(2) 機体位置制御システム

掘削管理の中核となる機体位置制御システムは、機体位置検出装置と掘削管理装置から構成され、地中にある掘削機的位置姿勢を正確に検知し、掘削機が計画線に沿って掘削できるように掘削機の修正用可動板を操作することにより機体制御を行うものである。

表-1 検出ワイヤの張設スパン

	EM 掘削機	BW 掘削機
W mm	2100	3200
L mm	4000	4400



機体位置検出装置は位置計測槽と検出ワイヤで構成され、検出ワイヤは位置計測槽の頂部から掘削機本体の頂部に取り付けたシーブを介して再び位置計測槽の頂部まで戻し、計測槽に装備した定トルクワイヤリールによって一定張力で巻上られ、かつ掘削機の降下に同調して繰り出される。掘削機の位置は、2本の検出ワイヤを基準ラインとし、掘削機の移動に伴う検出ワイヤの地上での水平変位量を差動トランス検出器により精密に測定し、この検出値を比例倍することによって求められる。EM掘削機では、位置計測槽を掘削機の両側に設置し、2本の検出ワイヤを機体の左右に張設して掘削機ねじれ角の検出精度を向上させている。BW掘削機では、BW掘削槽に機体位置検出装置を全て搭載し、掘削槽の高さを検出ワイヤの測定スパンとして最大限に利用して検出精度を確保するとともに、機動性・利便性を高めている。各機体位置検出装置の検出ワイヤの張設および測定スパン値を表-1に示す。ここに、EM掘削機用機体位置検出装置では、深度100mの地点で掘削機が50mm移動した場合の計測位置での検出ワイヤの移動量は約2mmとなる。写真-1および写真-2にEM掘削機用の機体位置制御システムを、そして写真-3にBW掘削機用の機体位置制御システムを示す。

差動トランス検出器は検出ワイヤの動きを100mm×100mmの2次元範囲内で自動追尾し、0.1mm以内の測定精度(実測検定±0.05mm)で測定することができる。この検出器は、非接触の磁気検出方式を採用しているため、泥水の飛散などの外乱による検出精度の低下はほとんどなく、全天候下での安定した計測を実現することができる。

検出ワイヤによる機体位置の検出精度は、ワイヤの頂部固定点(槽側頂部シーブ)の設置位置の変動に大きく影響を受ける。特に、夏季においては日照変化に伴う槽フレームの熱膨張歪により槽頂部が微小変位し、槽全体としては約40~100秒の倒れが発生する場合がある。さらにBW掘削機の場合は掘削中の荷重変動による槽の撓みが付加される。槽頂部が

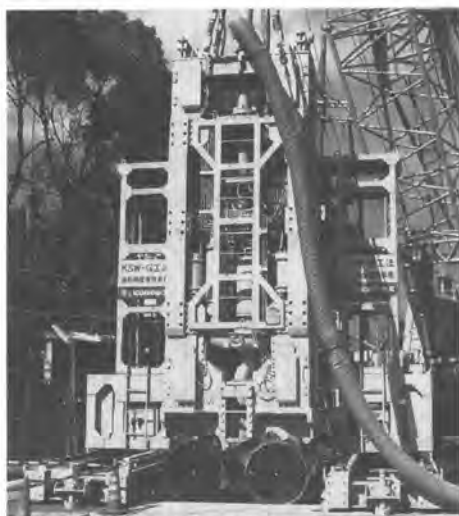


写真-1 EM掘削機用機体位置制御システム



写真-2 施工状況 (EM掘削機)



写真-3 BW掘削機用機体位置制御システム

40秒倒れた場合、深度100m下で約2cmの位置検出誤差が発生する。そこで、櫓フレームに櫓変位検出器を設置し、櫓の倒れが常に20秒以内に収まるよう櫓据付水準をジャッキ調整して常時管理することにより、検出精度の向上を図っている。

掘削管理装置は、掘削機、掘削機位置検出装置およびベースマシンの各所に配置したセンサーから掘削データを収集し、掘削機の操作に必要なデータをリアルタイムにモニターTV画面に表示する。写真-4にEM掘削機用出力画面を、写真-5にBW掘削機用出力画面を示す。

掘削管理において最も重要な項目である掘削機の移動量は、検出ワイヤの変位量、機体傾斜角および掘削深度を用いて、カット中心での前後左右方向の偏位量として演算される。さらに2本の検出ワイヤの水平変位量を比較演算することにより機体のねじれ角を求める。オペレータはこれらの情報を監視しながら掘削機を適切に運転制御する。

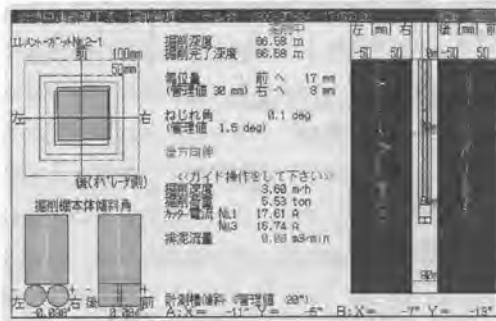


写真-4 EM掘削機用掘削管理画面

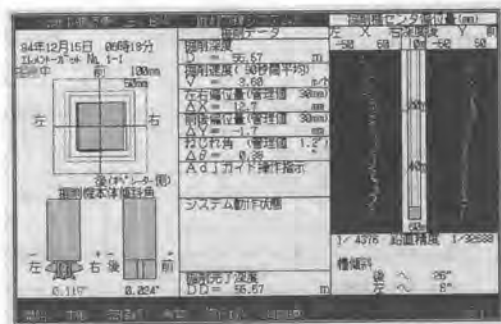


写真-5 BW掘削機用掘削管理画面

3. 掘削精度管理結果

本システムをBW機連壁工事(深度55.7m RC連壁、深度60.5m鋼製連壁)およびEM機連壁工事(深度69.5m鋼製連壁)に適用した。BW機連壁における掘削精度管理結果の1例として、深度1m毎の掘削機の位置検出値と超音波溝壁測定結果から読み取った溝壁中心位置との比較を図-3に示す。掘削データと溝壁測定結果はよく一致しており、高い検出精度を有していることが確認できる。2エレメント6ガットの掘削における深度1m毎のオペレータのBW掘削機の制御・管理結果を図-4に示す。掘削機位置検出値は管理目標とする30mm以内に収まっており、その標準偏差は21.3mmである。この結果から、オペレータは高精度な運転制御を行っており、本システムのマン・マシンによる制御・管理機

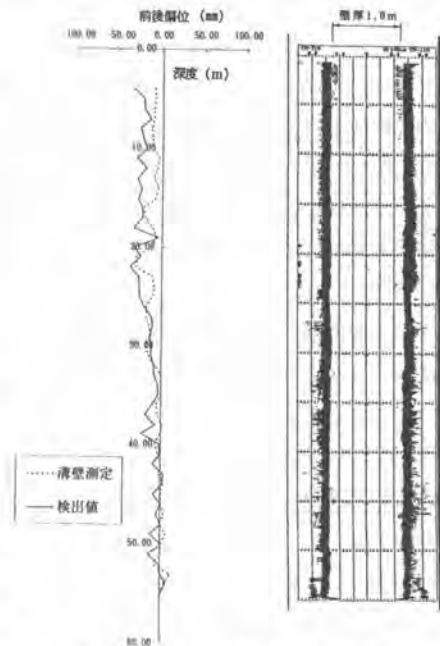


図-3 溝壁測定結果と機体位置検出値の比較

能が十分に発揮されていることが確認できる。

EM 機連壁工事の掘削精度管理結果については省略するが、結果では BW 機を上回る精度が得られた。また、ねじれ角については検出ワイヤの左右分割方式による検出精度の向上が確認され、 1.5° 以内に精度管理が行えた。

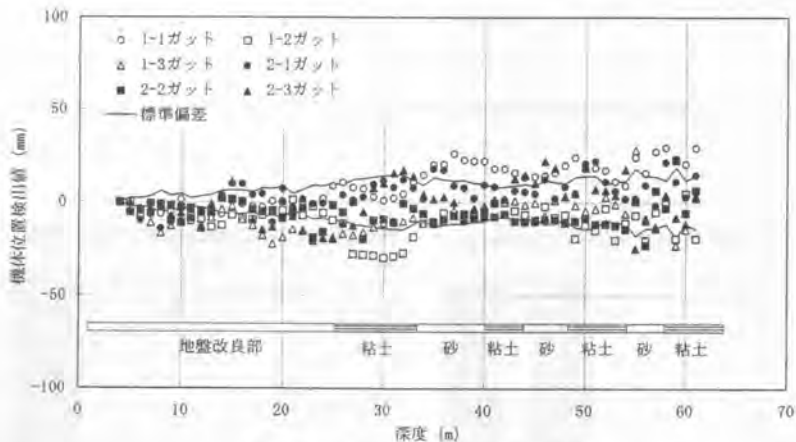


図-4 BW 掘削機の制御管理結果

4. 自動掘削管理システム

前述の掘削管理システムは、掘削機の姿勢制御をオペレータの手动操作に委ねた半自動方式であり、掘削精度の飛躍的な向上に伴い従来にも増してオペレータに緊張感を与える傾向が見られる。そこで掘削作業の省力化を中心に地中連続壁工法の合理化をさらに進めるため、自動掘削管理システムを開発した。このシステムは、EM 掘削機の姿勢制御にファジィ制御を適用して、姿勢修正操作機能を自動化するものであり、熟練オペレータと同等以上の制御性を目指している。

機体位置検出装置で検出する掘削機の偏位量、ねじれ角および掘削速度、掘削負荷などの掘削機の運転状況に関するデータ、ならびに掘削中の地盤性状等を制御条件とし、掘削機の修正用可動板の制御量をファジィ推論し出力する。図-5 に掘削機の制御対象項目を示す。

掘削機姿勢制御の基本条件として、以下の点を挙げている。

- ①掘削機の偏位量、ねじれ角が許容範囲内に収まるように修正用可動板を自動制御する。
- ②掘削状況から地盤性状を推定する。
- ③地盤性状を考慮して修正用可動板の制御量を調節する。

制御条件から求めたファジィ制御演算のフローを図-6 に示す。基本条件の項目に対応して、推論部は3群に分けている。

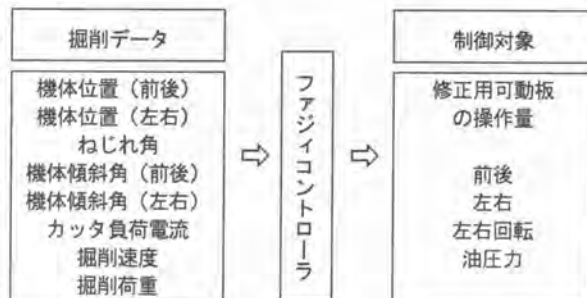


図-5 EM 掘削機の自動制御対象項目

ファジィ推論方式はファジィシングルトン型推論法で、前件部において4種類のメンバーシップ関数を7ラベルで、後件部は重み値を付加したシングルトンを13ラベルで簡略化したルールで記述し、推論速度の高速化を図っている。制御ルールの構築プログラムの特徴として、掘削中に制御ルールの適否を確認しながらリアルタイムで調整することができ、短時間で制御ルールの最適化が行える。

当システムを実用化により、オペレータは掘削機の運転状況を監視するのみとなり、現状における長時間の姿勢制御による緊張から開放されるだけでなく、過剰な修正操作による溝壁への悪影響や、オペレータの技量差による精度のばらつきなどが解消され、均一かつ高品質な地中連続壁の構築が期待できる。

現在、自動掘削管理システムは実工事に適用中であり、この成果については稿を改めて報告する。

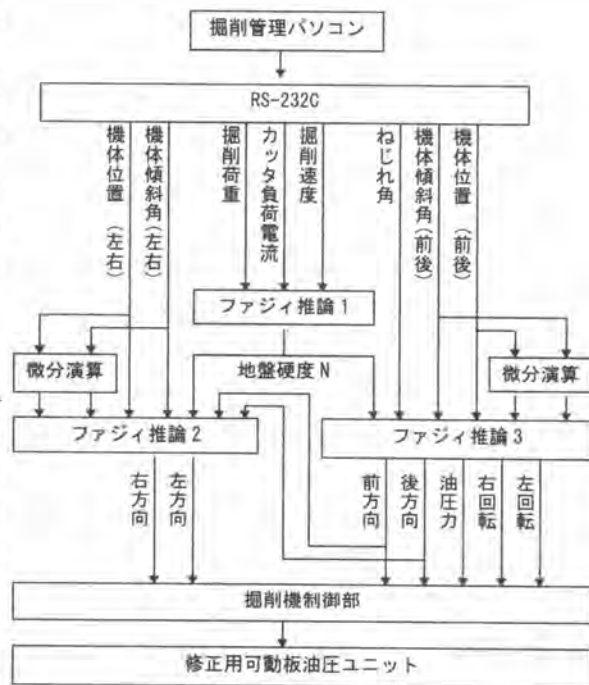


図-6 ファジィ制御演算部のフロー

5. おわりに

地中連続壁工法は将来ますます利用形態が拡大し、大規模地下構造物への適用事例も増えてくると予想される。本システムは、良質な大型の地中連続壁を提供するために必要不可欠なものであり、今回実施したシステムの拡充により、薄壁から超大型の地中連続壁に対応することが可能になった。今後、自動掘削管理システムの完全自動化を向けてより一層の技術開発に努めたい。

おわりに、自動掘削システムの研究を進めるにあたり、ご指導をいただいた愛媛大学工学部土木海洋工学科 室 達郎教授ならびに深川良一助教授に深甚なる感謝の意を表するとともに、開発にご協力いただいた関係各位に深く感謝します。

6. 参考文献

1) 松生・大橋・鷺見・澤：大深度地中連続壁工法の掘削管理システム，平成4年度建設機械と施工法シンポジウム pp. 134～137.