

33. 地中連続壁掘削制御の自動化システムの開発と適用

清水建設(株)：*出口 種臣・渡辺 俊雄
乾 純司

1、はじめに

掘削溝の形状がそのまま出来形となる地中連続壁では、その大深度化、薄壁化、変断面对応等の施工に伴い掘削精度の管理がますます重要性を増してきた。

当社では、従来の掘削精度管理システムにファジィ制御を導入し、掘削機の位置制御（偏位修正制御と呼ぶ）の自動化を図り、施工の簡易化と信頼性の向上を実現した。

掘削の自動化を図るためには、偏位修正制御のみでなく、掘削速度（または貫入力）制御を併せて行うべきである。どちらか一方のみの自動化では完全自律型システムにはならないが、今回の開発では全体システムはアルゴリズム構築に止め、偏位修正制御のみの自動化を図った。また、土質の特性の変化、機械の特性のバラツキ等が原因で起こる偏位修正制御の効き具合のバラツキを補正し、柔軟に機能させるためにゲインの調整制御を付加した。

2、システム概要

図1にシステム構成、写真1に計測装置（スライドベース）の設置状況、写真2に変断面对応型掘削機を示す。

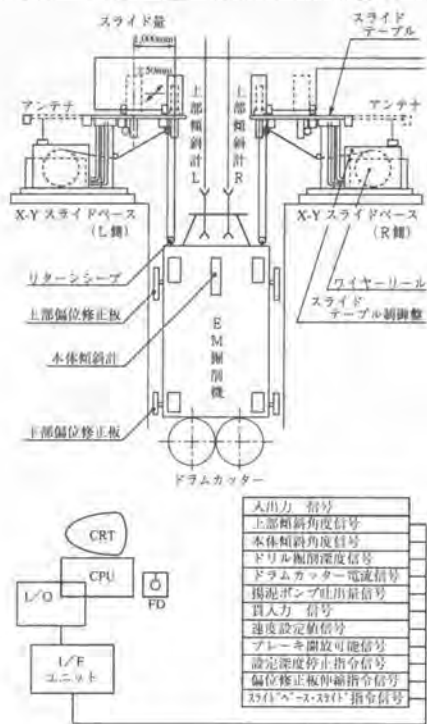


図1 システム構成

仮設山留・遮水を目的とした連続壁の構築において、連続壁の機能により壁厚を変えてコストダウンを図ることは、建設費低減からの要請の一つである。遮水機能のみを目的とする連続壁は山留壁に比べて薄くできる。

山留壁部は大型掘削機で厚壁を掘削し、遮水壁部は、その設定原点を保持しながら小型掘削機で薄壁を掘削するために、従来の掘削精度管理システムを改造し、小型掘削機の改造にあわせて自動偏位修正制御機構を付加したのが本システムである。

システムの特徴としては、地上に設置した上部傾斜計と掘削機に取り付けた本体傾斜計および深度計のデータから掘削機の先端の偏位量を求めるシステムで、次の機能を備えている。



写真1 計測装置の設置状況



写真2 変断面对応型掘削機

①、スライドテーブル無線操作機能

上部傾斜計を設置したスライドテーブルは高性能サーボモータにより前後左右に移動可能なため、掘削機の上げ下ろしのたびに計測装置全体を移動させる必要がない。スライドテーブルの設定位置は記憶され無線操作で自動的に設定位置に復帰可能なため、上部傾斜計の位置（原点）設定は1ガットにつき1回で済む。

②、掘削精度監視機能

掘削中における掘削機のドラムカッター中心位置両端の計画線からの偏位量、掘削機の姿勢、偏位量の履歴等を運転席のディスプレイにリアルタイムで表示する。

③、変断面連続掘削機能

大型掘削機で掘削した大断面掘削溝の偏位量データやその他の設定値類を小型掘削機の運転システムに記憶させる（フロッピー渡し）ことにより連続的に小断面掘削を継続できる。

④、自動偏位修正制御機能

偏位修正制御機能および修正効果学習機能（ゲイン調整機能）にファジィ制御を導入して自動化を図った。

⑤、グラフ・帳票作成機能

オンラインシステム（運転システム）で収集したデータをフロッピーシートに吸い上げ、オフラインシステム（管理システム）に読み込ませることによりガット単位の種々の管理用グラフ・帳票を作成できる。

3、自動偏位修正制御システム

制御システムブロックを図2に、偏位修正板および偏位量の座標の定義を図3に示す。

手動運転の場合を想定し、偏位修正操作の実感（チョンチョン操作：インチング操作）をダイナミックに伝える目的で、偏位量、掘削機の姿勢等の表示を300msecで更新している。また、ファジィ制御による偏位修正制御、ゲイン調整制御の周期はそれぞれ10sec、50secとしている。データサンプリングの基本周期は約650μsecである。

(1)、ファジィシステムのマクロ構造

$$\Delta U(i) = G(k) * F1(i), \quad F1(i) = f1\{Y(i), \Delta Y(i)\}$$

$$G(k) = G(k-1) + \Delta G(k), \quad \Delta G(k) = f2\{V(k-1), M(k-1)\}$$

ただし、

$\Delta U(i)$: 最終決定操作量

$F1(i)$: 偏位量と偏位量の変化率から導出した操作量で、ファジィ制御による偏位修正制御項

$G(k)$: ゲイン調整制御で導出したゲイン量

$\Delta G(k)$: ファジィ制御によるゲイン調整制御項

$Y(i)$: 目標値 ($R=0$) に対する偏位量

$\Delta Y(i)$: 偏位量の変化率

$V(k-1)$: 絶対偏位量の期間平均値

$M(k-1)$: 偏位量の期間内符号反転度数

$i=10*T$: 偏位修正制御周期 ($T=1\text{sec}$)

$k=50*T$: ゲイン調整制御周期 ($T=1\text{sec}$)

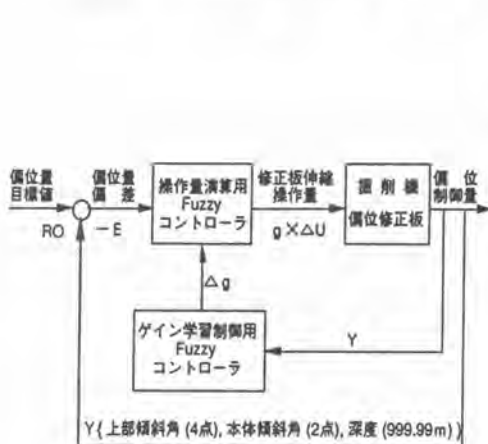


図2 制御システムブロック図

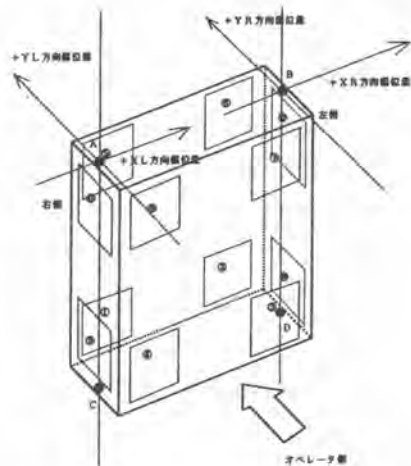


図3 座標の定義図

(2)、偏位修正制御

メンバーシップ関数として制御量、操作量ともに7山三角形で定義する。

①、制御量（入力データ）

- ・ 偏位量 : Y (台集合: -60mm~+60mm 設定可変)
- ・ 偏位量の変化率 : ΔY (台集合: -50mm/10sec~+50mm/10sec 設定可変)

②、操作量（出力データ）

- ・ オイル供給時間 : ΔU (台集合: -7sec~+7sec 設定可変)

偏位の修正操作量は偏位修正板の性能で決まるが、その作用の応答性能は掘削した地山から得られる反力に左右され、経験的には修正板の伸縮ストローク（トータル操作量）と偏位量（偏位量）の関係は線形にはならない。また、偏位を修正する場合、一般的には4ないし6箇所の修正板を同時に操作する。同一の油圧ユニットから、電磁弁の開閉によりオイルを分配供給するため、同一時間オイルを供給したとしても修正板のストロークにバラツキが発生する。これらのバラツキを解消するために、後から述べるゲイン調整制御でそれぞれ個別の修正板の効果を評価して操作量の調整を図っている。

修正板の有効ストロークは100mmであり、リンク機構を構成する油圧シリンダーにより駆動する。操作量としては電磁弁の開時間を採用し、操作量の符号により正逆（裏表）いずれの修正板を出すかを次のように定義している。正の操作量では③④⑦⑧⑨⑩、負の操作量では①②⑤⑥⑪⑫の修正板をそれぞれ伸操作する。

③、ファジィ推論

推論過程およびデファジィはmin-max重心法を用いた。

(3)、ゲイン調整制御

偏位修正制御では掘削機の4つのポイントに対してそれぞれ独立にY軸方向へ4つの操作量、上下2つのX方向へ操作量を決定している。これらの制御結果から時々刻々変わる制御性能を評価して効き具合を調整するのがゲイン調整制御である。4つのポイントに対し6つのゲイン増減分をそれぞれ独立に決定している。初期状態のゲインは1である。

①、制御量

- ・ 偏位量の絶対値の期間平均値 : V (台集合: 0mm~60mm 設定可変)
- ・ 偏位量の期間符号反転度数 : M (台集合: 0回~4回 設定可変)

②、操作量

- ・ ゲイン調整量 : ΔG (台集合: -0.5sec~+0.5sec 設定可変)

メンバーシップ関数としてV、M、 ΔG はそれぞれ3山、2山、5山の三角形で定義した。

③、ファジィ推論

推論過程およびデファジィはmin-max重心法を用いた。

偏位修正制御、ゲイン調整制御いずれの場合にも、チューニング手段としては「メンバーシップ関数の形状変更による調整」、「台集合の変更による調整」、「ファジィ制御規則の変更による調整」等があり、状況によって選択して調整する。

4、施工事例

東京電力（株）新豊洲変電所新設関連山留壁工事における変断面連続壁の掘削施工事例について述べる。

（１）、山留壁概要

- ・構造 : 鉄筋コンクリート造
- ・掘削深度 : 約70m
- ・壁厚 : 上部2.4m (GL±0m～GL-44m)
下部1.2m (GL-44m～GL-70m)
- ・内法寸法 : φ144m
- ・周長 : 約460m
- ・エレメント数 : 78E (先行: 39E、後行: 39E)
- ・継手処理 : コンクリートカッティング方式

（２）、掘削施工事例

自動制御データ（偏位量、操作量、ゲイングラフ）を図4、偏位量－深度のグラフを図5に、超音波測定データを図6に示す。

図4の横軸は時間で一目盛100秒、1000秒間のデータである。この間に掘削深度は64.40mから64.90mとなっている。約470秒から偏位量がプラス方向に偏り、不足制御状態と判断してゲイン項が50秒周期で上昇し、750秒でやや過制御となり950秒で安定推移している。この状態を偏位量の推移状態のみに着目したグラフが図5である。このグラフからも解るように、以後±10mm程度の偏位量で最終深度70mまで制御状態が良好に推移している。

図6は同一ガット（掘削溝）の全深度（0m～70m）にわたる偏位量の超音波測定データである。

5、おわりに

紙面の都合で、施工中に顕在化し、改良を加えたいいくつかの改善点については割愛した。今後さらに簡便で信頼性の高いシステム（例えば、フィードバックのみでなくフィードホワード制御も取り入れたシステム等）に改良していく計画である。

最後に、今回の新たなチャレンジに対し、御指導、御支援下さった東京電力（株）をはじめとする関係者の皆様方に心より感謝致します。

参考文献

- 1)、「地中連続壁基礎工法ハンドブック施工編」
(株)総合土木研究所 発行
- 2)、菅野道夫著「ファジィ制御」
日刊工業新聞社 発行
- 3)、出口種臣「高精度位置管理システム」建設機械1995年3月号
日本工業出版(株) 発行

4)、出口種臣「地中連続壁掘削のファジィ制御による自動化」第5回建設ロボットシンポジウム論文集

(社)日本建設機械化協会、(社)日本ロボット学会、(社)日本建築学会、(社)土木学会、(社)日本ロボット工業会、(財)先端建設技術センター (順不同) 主催

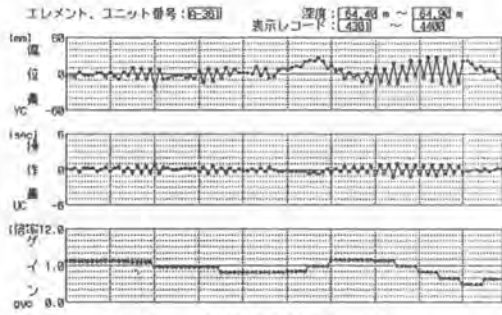


図4 自動制御データ

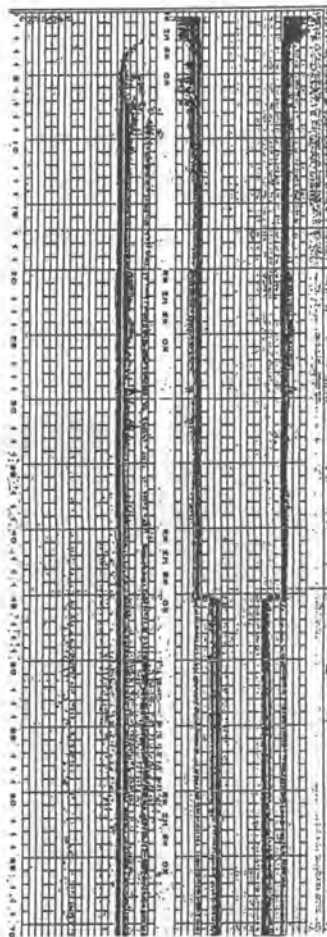


図6 超音波測定データ

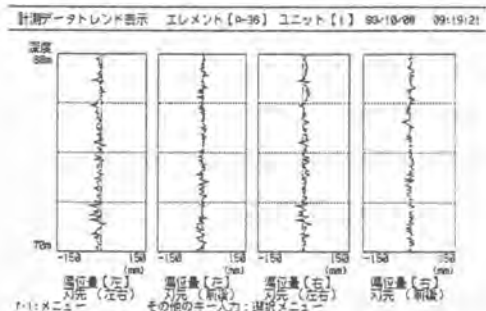
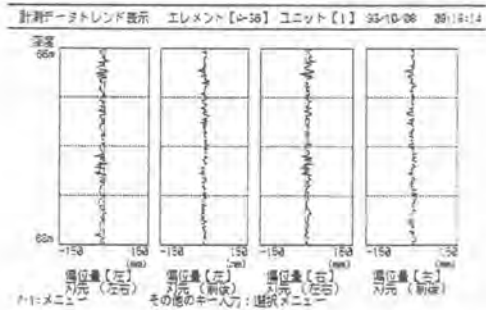
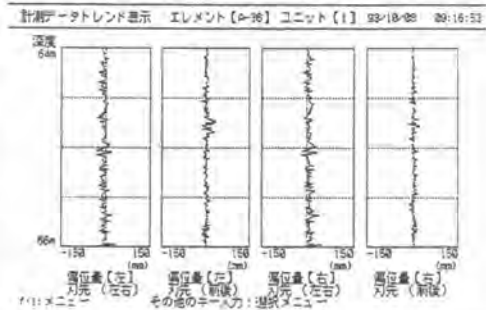


図5 偏位置-深度データ