

(Ⅲ-8)

AI を利用した シールド機の自動方向制御システム

Artificial Intelligent Control of Shield Tunneling Machine

五洋建設(株) ○ 菊地 正俊*

佐野 泰三**

飯尾 正史**

田嶋 誠 ***

By Masatoshi Kikuchi, Taizo Sano, Masashi Iio, Makoto Tajima

従来よりシールド掘削機の方向制御は、ジャッキパターンを選択することにより行っている。このパターンは、土質等のマシン周辺の環境変化に合わせ調整していかなければならないもので、オペレータがみずからの経験と過去の運転記録をもとに総合判断し、現運転に適合するように選定されている。この選択操作が掘進運転上のノウハウとなっており、定量化し難く、方向制御の自動化を扱い難いものになっている。

本文では、ジャッキパターン選択(経験則)の根拠となっているモーメント(物理法則)を直接扱うことにより、適応制御¹⁾の概念でシステム設計でき、定量的制御性能の評価、制御環境変動に対する追従性および、制御ルールの汎用性が確保されることが実施々工をととして確認できたので報告する。

【キーワード】シールド、方向制御、AI、適応制御

1. はじめに

シールド掘削機(以下、マシンという)の方向制御の自動化は、シールド工法の全自動化を図る上で重要な構成要素である。しかし、自動化を図るには、シールド工事特有の密閉された環境下で制御に必要な適正情報が不足する、マシン周辺の土質の変化等、制御環境が不明確に常に変動しているなど、解決すべき多くの課題がある。

ところが、オペレータは、現運転のジャッキパターン(以下、JPという)を適正に選択し、マシンをほとんど計画どおり旋回させている。そのため、オペレータが行うJPの選択のノウハウをAIを利用することでコンピュータに取り込み、自動化を図ろうとする試みもある。

しかし、このアプローチには、①ルールがジャッキ総本数などマシン諸元に依存する、②汎用性のあるルールは、オペレータの経験則に基づく平均的な傾向になり易い、③実際の制御環境は、さまざまな要素の組み合わせで常に変動しており、想定しうる制御環境の分類の検討だけでも行き詰まる等の不安が常につきまとう。

もし、JPにより生成されるモーメントが直接利用できれば、方向制御のルールは、生じたマシンの偏差に対するモーメントの与え方についてであり、汎用性のある制御ルールが構築でき、定量的に制御し従来の制御概念で評価できるようになる。

システム設計に当たっては、制御環境の変動に追従して制御できること、推定できるパラメータ数が高々2であることを前提とした。

2. モーメントの利用方法

2.1 JP選択の根拠

* 情報システム部	03-3817-7655
** 技術研究所	03-3740-3619
*** 東京支店	0471-47-4821

掘進するマシンの断面は、図-1に示すようになっている。あるJPで掘進させているとする。マシンをさらに左旋回させれば、右側ジャッキの押し本数を漸次増やせばよい。公知の如く、マシンは徐々に左に旋回し始める。

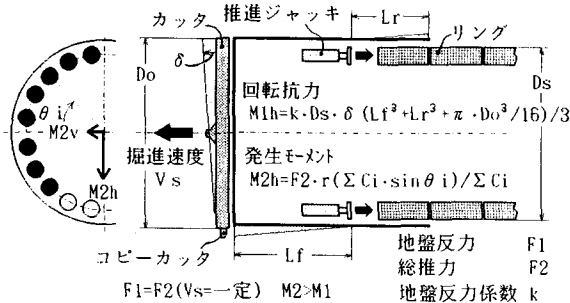


図-1 掘進するマシン

これは、マシンが一定速度 Vs で掘進していれば、地盤反力 $F1$ に釣り合うように総推力 $F2$ が発生し、その総推力 $F2$ とJPによる片押し度の積に比例したモーメント $M2$ が働き、モーメント $M2$ と地盤抵抗力 $M1$ との差によってマシンが旋回させられるからである。JP選択は、この物理法則を基盤にしている。

2.2 モーメントの性質

マシンの周辺に対角半径 r で一定位相角になるようジャッキ（総本数 Njk ）を配置し、これに天頂より時計廻りに番号を付与する。 i 番目のシリンダの位相角を θi [°]、押しジャッキ全体の総推力を F [T] とすると、JP選択により発生するモーメントの水平成分 Mh は²⁾、

$$Mh = \frac{F \cdot r \cdot Njk}{m} \sum_{i=1}^{Njk} Ci \cdot \sin \theta i = F \cdot r \cdot eqv_h \text{ [T-m]}$$

ここで、

$$Ci = 1 \text{ (押し)} = 0 \text{ (抜き)}$$

$$m = \sum_{i=1}^{Njk} Ci \text{ [本]}$$

$r \cdot eqv_h$; 水平成分の符号付き等価半径

$$= \sum_{i=1}^{Njk} r \cdot Ci \cdot \sin \theta i / m \text{ [m]}$$

鉛直成分 Mv も同様に算出される。(式-1)より、モーメントには次のような性質があることが分かる。

- ①総推力 F が一定であれば、JPを選択することは、モーメントの腕の長さを変えることである。
- ②モーメントは現実的な物理量で定量的に扱える。
- ③操作について、水平と鉛直成分に分離して考えることができる。

④各成分内で加算できる。すなわち、操作量の追加ができる。

2.3 JP発生器

周知のように、ジャッキ総本数 Njk が増加するにつれて選択可能なJP数がねずみ算式に増え、制御中にオンラインで要求するモーメントに適合するJPを算出することが不可能となってくる。³⁾

そこで、図-2に示すように、あらかじめ工夫したモーメント表を作成しておく必要がある。作成した表($Njk=20$)では、モーメントの大きさ方向で $0.02T\cdot m$ 、偏角方向で1°ピッチのメッシュに分割し、そのメッシュ内で1つのJPが抽出されている。

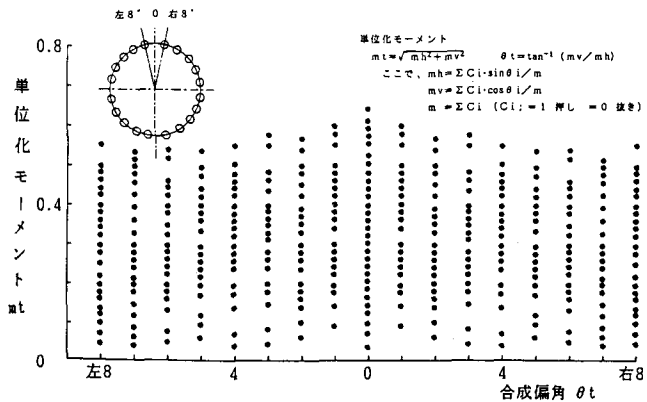


図-2 モーメント表作成例 ($Njk=20$)

もし、実際に要求される合成偏角がモーメント表にない場合、ジャッキの配置が点対称であることを利用して、該当する偏角 θt が見つかるまでファイルのJPを回転させればよい。

(式-1)に示すように、JPを選択することがモーメントの腕の長さを伸縮させることと等価であれば、図-3のように、等価半径に相当する遠隔操作レバーがあればよく、操作が簡単になる。そして、その内部では、先に整理したJPとモーメントの関係を示すモーメント表を参照し、レバーで設定した水平と鉛直のモーメントに該当するJPを抽出

し、それを出力すればよい。

2. 4 モーメント利用の特徴

従来の J P 選択は、物理法則に基づく経験則である。新たな局面に出会い、過去の経験を基に試行錯誤の運転操作をし、環境に適合する方法を見出したとき、1つの経験則（学習成果）を得る。

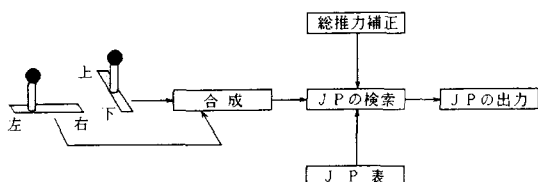


図-3 J P発生器の概念

しかし、汎用性のある学習方法はなく、ある学習方法が適性であったかは、同様な場面に何度か出会い検証する必要がある。汎用性のある学習方法の確立と妥当性の検証が困難と思われる。

J P発生器の概念が方向制御に適用できれば、J P選択操作が、泥水処理プラントの送泥ポンプ流速制御と同じようなイメージで制御することができる。このようなフィードバック制御⁴⁾では、正確な操作量（絶対値）を知る必要がなく、精妙なモデル化も

表-1 モーメント利用の特徴

No	項 目	適 用
1	容易な操作	J P 選択に関する熟練が不要になる。
2	汎用性（拡張性）	マシンが変わっても、基本的に制御ルールを変更する必要がない。
3	加算性（環境適応性）	モーメントの絶対値を考慮する必要がなく現在のモーメントにいくら追加すればよいかを考えるだけでよい。
4	合理性（関係解明）	J P の選択とその結果が定量的に明かせる
5	制御精度の改善	多彩な J P 選択が可能になることにより、大胆な制御からきめ細やかな制御まで可能になる。
6	水平／鉛直制御の独立性	水平方向と鉛直方向の制御を分離して考えることができるのでルールが簡明になる。

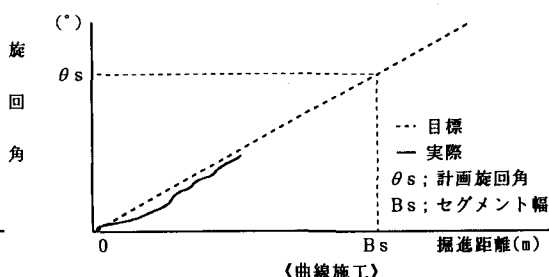
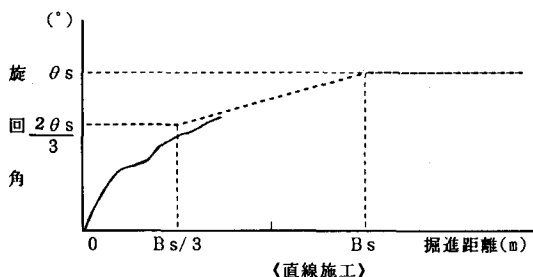


図-5 方向制御目標の設定

不要である。

したがって、物理法則であるモーメントと旋回角の関係を直接推定し利用するのが、分かり易く制御システム設計がし易いと云えよう。

モーメント利用の特徴を表-1に示す。

3. 方向制御システム

3. 1 方向制御の役割

図-4に手動運転操作のモデル化を示す。

オフライン・偏位制御（メジャー）ループでは、テールクリアランスの余裕と施工計画路線（計画路線とマシンの偏差をもとに施工上決めた路線）に沿って掘進するのに必要なマシンが維持すべき姿勢を推定の上、次のリングの掘進完了時の最終目標角度を設定する。この角度には、マシンの偏位修正分も含まれている。

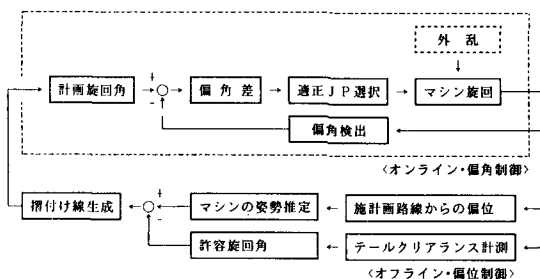


図-4 自動姿勢制御システム

オンライン・偏角制御（マイナー）ループでは、最終目標角度から制御開始時マシン角度（初期角度）の差を修正量（計画旋回角）として、1掘進の間に計画に沿ってマシンを角度修正する。これが、従来の手動運転操作に当たり、方向制御と呼ばれている。マシンを最終目標角度まで旋回させても偏位が計画

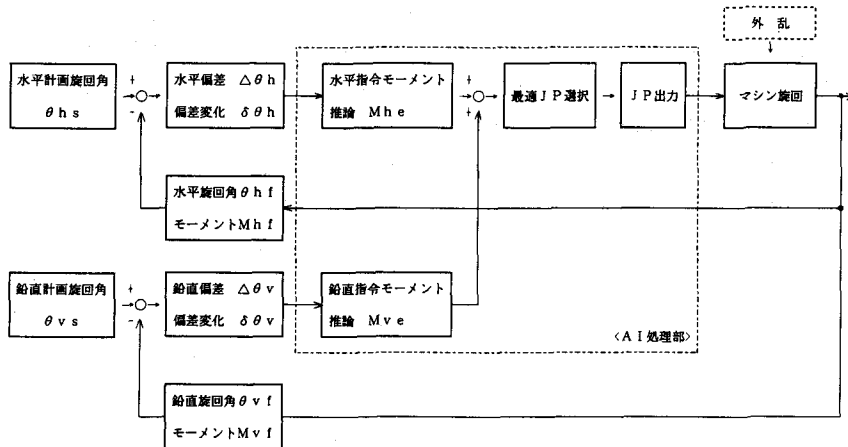


図-6 自動方向制御システム

どおり修正されない場合、その情報は、メジャーループにフィードバックされ、姿勢の修正と次のマシンの最終目標角度を決める情報となる。

したがって、マイナーループにおいてマシンを計画どおり旋回させることが、メジャーループを適正に機能させるための必要条件となる。

3.2 旋回角の管理

初期角度から最終目標角度に向けてマシンを滑らかに旋回させる目標線を考える。

図-5に示すように、横軸に制御開始からの掘進距離を、縦軸に初期角度からのマシンの旋回角を取る。点線がその掘進距離での目標旋回角で、実線が制御開始時からの実際のマシン旋回角（現在旋回角）である。方向制御中は、実線が常に点線と一致するように制御する。

曲線施工では曲率一定の軌跡を描かせるよう、直線施工ではリング組立によって生じたと推定される偏差を早めに修正させるように目標線を決めた。

3.3 系統

JP発生器の概念を利用する方向制御システムのモデルを示すと、図-6のようになる。

もし、メジャーループのテールクリアランスの余裕とマシンの姿勢をオペレータが判断し、計画旋回角を設定するなら、従来の手動運転操作の代行（半自動）となる。

3.4 同定

掘進するマシン周囲のモーメントと力のバランスを状態方程式で記述でき（モデル化⁸⁾）かつ、その

パラメータが精度よく推定（同定⁹⁾）できれば、マシンの挙動を相当の確度で予測もでき方向制御が容易なものとなる。しかし、現実には、地盤反力のばらつき、マシンの重力と浮力の関係、コピーカットの使用状況、路線形状等が対象を表現する無視できない要素としてあり、モデル化が困難となっている。

しかし、オペレータの操作判断を観察すると、これらの要因を総合した結果にのみ着目し、ほとんど計画どおりマシンを旋回できている。この点から、学習に替え、次の2つのパラメータ推定を考える。

(1) 釣合モーメントの推定

オペレータが、運転記録からJPの共通点とトレンドを抽出し、次の掘進運転の基本的なJPを決めていることから、本システムでは、これに対応する釣合モーメントなる概念を導入する。

釣合モーメントは、あるモーメントで次の掘進運転をした場合、マシンが目標線に沿って旋回しうる可能性が高いとされるモーメントの推定値である。この値を平均とトレンドの両者が反映できる自己回帰分析により決める。

(2) 加算モーメントの推定

釣合モーメントを与えて掘進させても、本質的にマシン偏差は生じるものである。この偏差が発生したとき、どの程度のモーメントを加算すればこの偏差が解消できるか、その量を推定することは重要である。必要以上に大きなモーメントを与えるとマシンが操作ごとにハンチングし、小さいと偏差がいつまでも解消されないからである。

本システムでは、(式-1)で示す計算上のモーメントを与えたとき、旋回したマシンの旋回角との実績比較で相関を見ることにし、水平と鉛直成分に分離して単回帰分析により求める。³⁾その結果得られた傾きは、マシンを1m掘進させる間に1°旋回させるのに要するモーメントの大きさのことである。

加算モーメントは、制御間隔をもとに、どの程度掘進する間に偏差が解消されるようにするか収束距離を設定し定める。

この加算モーメントの中に、マシン周辺の平均的抗力の情報と対象を一次遅れ系とみなしたときの時定数要素が含まれる。

3. 5 予測制御

オペレータの操作判断を観察した結果、釣合モーメントと加算モーメントのみの簡略モデルではほぼ記述できるようだ。

本システムでは、この2つのパラメータのみが真(問題解決の手がかり)であると仮定し、偏差が生じるのはすべて外乱によるものとする。推定した釣合モーメントで掘進を開始し、外乱により目標線に対するマシンの偏差とその変化が生じたとき、その後の偏差の変化を予測の上、加算モーメントを参照し、追加すべき適正なモーメントを推定するものとする、その推定値は、これらの関数で表現される。

しかし、経験的にみて、この関数を数理モデルで表現することが困難と考えられ、ルール形式(いわゆる、AI処理)で表現することにする。

3. 6 AI処理部

この予測制御の特徴は、AIの手助けにより数少ない推定パラメータをもとに、現在の偏差とその変化に対して、現在のモーメントにいくら追加したらよいかを決める汎用性の高いものである。

こうすれば、時変系や非線形な対象にも広範囲に適用できる他、たとえ与えるモーメントの絶対精度が悪くても、JP間のモーメントの大小関係が明白であれば追従性のよい制御が可能となる。

図-6に示す方向制御システムの内、AI処理部の構成を示すと、表-2のようになる。この処理は、最終的に追加すべき適正モーメントを推定するためにある。

また、エキスパートシステム⁷⁾やファジィ制御⁸⁾のルールは固定で、同定の結果はルール変数を設定

するために使用される。

表-2 AI処理の構成

No	処理項目	適用
1	エキスパートシステム	・路線形状や変曲点付近の判別により使用するべきルール群を選定する。 ・当該ルール群の中で状況に見合ったルールを起動(発火)させる。
2	ファジィ制御	・偏差に対する追加モーメントを決める。 ・通常処理と割り込み処理に分かれる。
3	推定機構	・釣合モーメントを推定する。 ・加算モーメントを推定する。

3. 7 システムの特徴

表-3は、本システムを使用する場合の特徴をまとめたものである。

表-3 本システムの特徴

No	項目	適用
1	短期間の学習	・モーメントと旋回角の相関が決まれば自動運転可能である。決まらないとき2日程度の手動運転を要する。 ・手動運転中も推定機構が働くので、即自動に切り替えできる。
2	環境変動に強い	・掘進速度変動の影響を受け難い。 ・大幅な計画旋回角変更に追従できる。 ・路線変更時も自動運転ができる。 ・土質の影響を受け難い。
3	制御量の選択	・水平成分では、ストロークかジャイロを選択できる。 ・鉛直成分では、ピッチングかレベルを選択できる。
4	自動/半自動の選択	・姿勢制御の一部として使用できる。 ・従来どおり旋回角設定で運転できる。 ・水平と鉛直について別々に選択できる

4. 実施結果

本システムを導入し、約1ヶ月の調整期間を経て、以後、自動運転している。

本文では、曲線施工(水平;左450R、鉛直;登り1%)における方向制御の性能確認について行った施工の一部を述べる。

なお、添付した資料は、ルール調整段階のものもあり、現システムの性能を的確に表しているものではない。

4. 1 工事概要

実施々工のため借用した工事現場の概要を表-4に、平面縦断面図を図-7に、そしてマシンの諸元を図-8に示す。

表 - 4 工事の概要

工事内容

掘進延長	L = 1 5 9 2 . 2 m
最小曲率半径	R = 1 0 0 m
縦断勾配	i = 1 ~ 2 7 . 9 %
土破り	D = 1 2 . 9 ~ 3 6 . 2 m

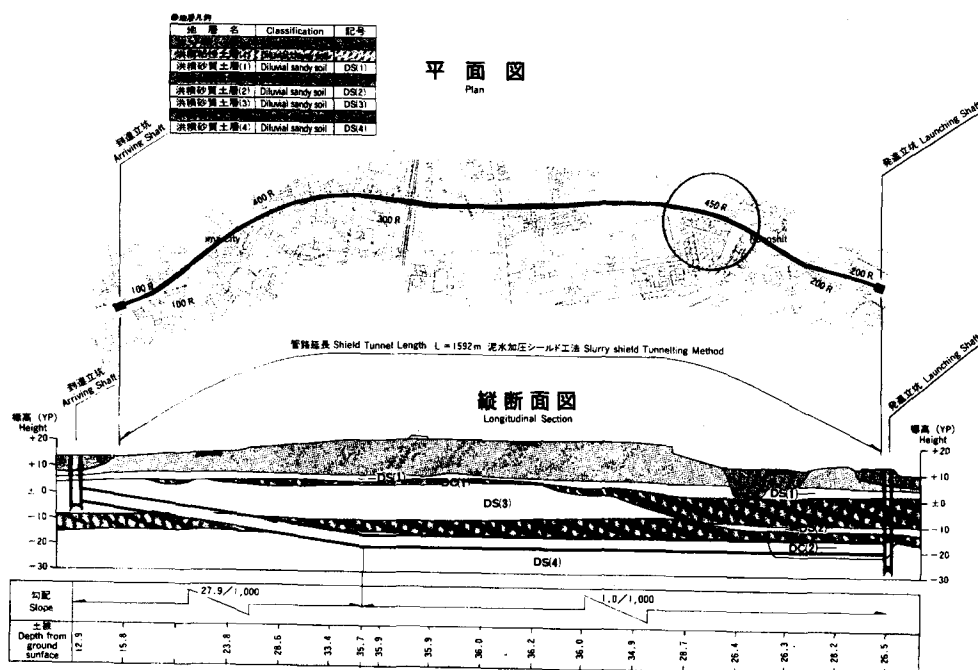


図 - 7 路線の平面縦断図

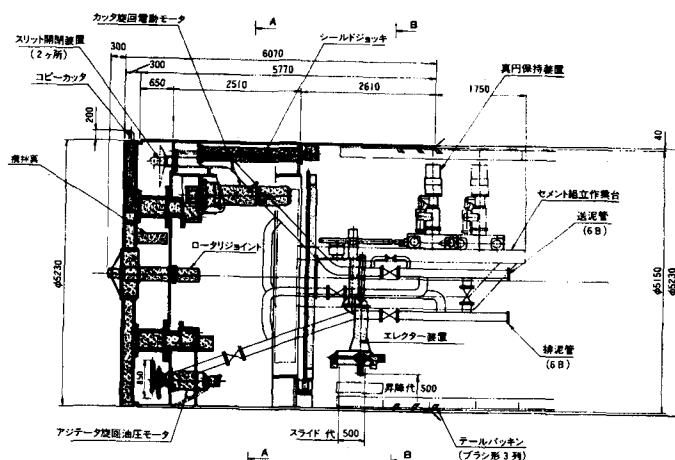


図 - 8 シールド掘削機の諸元

4.2 実証結果概要

(1) システム構成

施工実施に使用したシステム構成を図-9に示す。

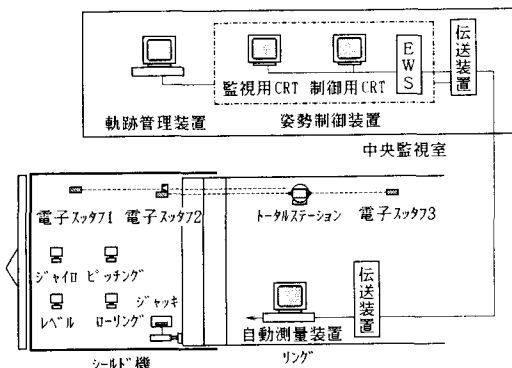


図-9 システム構成

(2) 実証項目

性能試験項目を表-5に示す。

表-5 性能評価項目

No	項目	内容
1	水平／鉛直制御の独立性	成分の一方のみ偏差があるとき、他方のモーメントに変化がない。
2	釣合モーメントの探索(加算性)	大幅な計画旋回角変更や釣合モーメントの推定が不適性でも自動的に釣合点を探索できる。
3	通常処理と割り込み処理	掘進運転中、偏差修正制御できる。 偏差修正が困難と判定したとき、速やかに割り込み処理改善を図れる。
4	J P 不足時処理	追加指令モーメントに適合するJPが存在しないとき、偏差が改善されるまで指令値を加算する。
5	掘進速度による影響	掘進速度が漸次変更されたときでも追従制御できる。
6	コピーカット使用による影響	曲線施工に向けてコピーカットを使用開始したとき、この変化に対応できる。
7	路線変更による影響	路線変更箇所でも、変更を追従して適性に制御できる。
8	非線形制御環境に対する制御	非線形対象において、本システムで適性に制御されている。

4.3 実施々工結果

(1) 施工実績

左450R曲線施工における自動方向制御施工実績を表-6に示す。

表-6 施工実績

No	項目	リング数	延長
1	自動運転	216r	195m
	a)自動制御	203	
	b)比較データ(手動)	13	
2	手動運転	26r	23m
	a)ルール変更	14	
	b)システム外トラブル	8	
	c)その他	4	
合計		242r (89.3%)	

(2) 性能評価結果

1) 基本性能

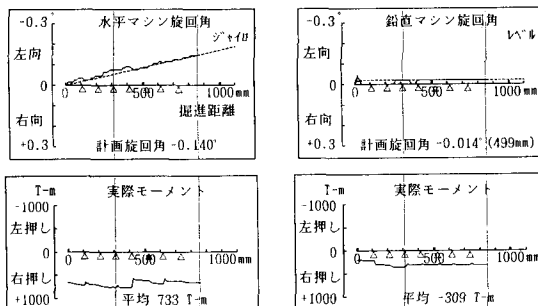
①水平／鉛直制御の独立性

鉛直成分で偏差がないとき、現鉛直モーメントを変更せず、水平成分のみ偏差改善のためにモーメントを変化させており、操作の独立が確保されている。

記録を解析すると、一方の操作(偏差の修正)結果が他方の結果(新たな偏差の発生)に影響を与えているケースが散見される。

水平／鉛直制御の独立性

実施日:91.08.27
路線形状:曲線(450R:コピーなし)
掘進:900mm



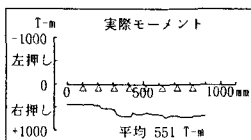
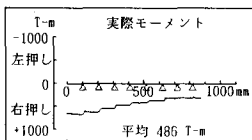
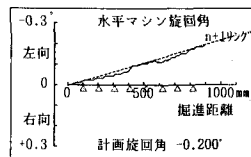
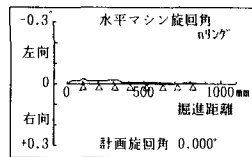
②釣合モーメントの探索(加算性)

前掘進において計画旋回角左0.11°を旋回した。推定釣合モーメントが右645T-mであったが、nリング掘進では、計画旋回角ゼロを与えて掘進を開始させた。その結果、釣り合わなかったため、左モーメントを追加しながら釣合点を自動探索した。

次のn+1リング掘進では、逆に、通常の2倍の計画旋回角0.200°を設定したが、ここでも自動探索に成功している。

適正モーメントの探索

実施日: 91/08/24
路線形状: 曲線(450R; 右側なし)
掘進: 900 mm



③ 通常処理と割り込み処理

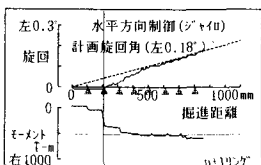
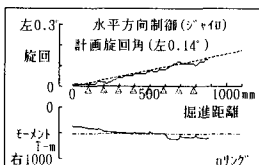
n リング掘進は通常処理内で掘進できた。そのときの推定釣合モーメントは右500T-mであった。

n + 1 リング掘進開始前に外部より同モーメントを強制的に左10T-mにした。その結果、システムは、制御開始より200mm掘進したとき、目標達成が不可能と判断し、通常処理に割り込んで偏差の改善を図った。(割り込み処理)

その後は通常処理で対応できると判断し、通常処理に制御を移管し、釣合に成功している。

通常処理と割り込み処理

実施日: 91/08/26
路線形状: 曲線(450R; 右側なし)
掘進: 900 mm



④ J P 不足時処理

これは、図-2に示すモーメント表のデータ点数が少なかった施工当初に発生したものである。

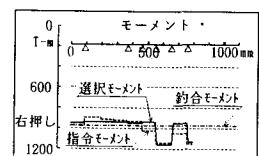
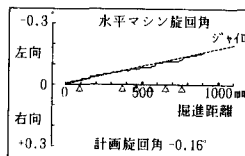
モーメント増加指令を出しても該当するJ Pが見つからないので事態が改善されていない。指令に対応する選択モーメントが存在しないためである。

そこで、追加指令値を改善されるまで加算させた結果、大きめのJ Pが見つかり偏差が改善された。

この方法は、ジャッキ本数が比較的小さい小口径に適用できると考えられる。モーメントの大きさ方向でデータ間が0.05T-m以上の開きがあると、滑らかな制御が難しいことが分かった。

J P 不足時の処理

実施日: 91/08/21
路線形状: 曲線(450R; 右側なし)
掘進: 900mm (439リング)



2) 制御環境変動への追従性

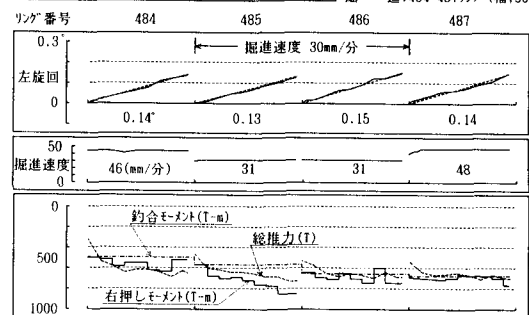
① 掘進速度による影響

砂質土において、掘進速度のみ変更してみたが、環境変化が認められなかった。したがって、制御上変化はない。

通念では、掘進速度を下げると、図-1に示すマシン前面抗力の低下により総推力が下がりその結果、釣り合うモーメントが小さくなると推察されたが意外であった。通念や経験則に基づき制御ルールを作成すると、このように期待に反する状況が出現し、環境に適正に対応しえない制御をする可能性が常にある。

掘進速度による影響

実施日: 91/08/24
路線形状: 曲線(450R)
掘進: 484-487リング (幅: 900)



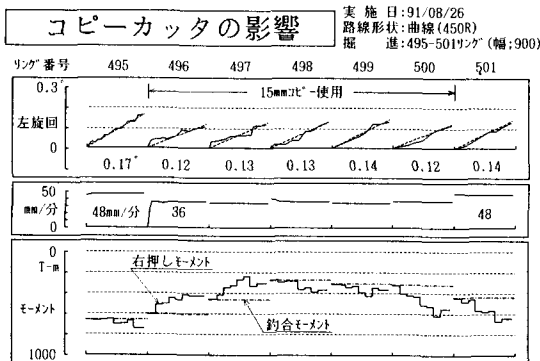
② コピーカット使用による影響

加算モーメントを変更せず、突然コピーカットを使用しどこまで追従できるか評価した。結果から見ると、目標線に対してマシン旋回角が変動しているものの追従制御ができていることが分かる。実際の運用では、加算モーメントを適宜変更していけば変動を充分抑制できる。

図-1の回転抗力の式によれば、コピーカットの使用を開始したときから、旋回側抗力が掘進中に3次関数的($\propto L^3$)に常に減少する。現土質では、掘進速度による影響はないといえるので、本マシン

の場合、1掘進完了で65%、2掘進完了で95%の減少が推定される。実際のモーメントの履歴をみると、その傾向が顕著に現れており、旋回側抗力に合わせて釣合モーメントも漸次減少している。釣合モーメントを1掘進中一定とみなすことができないことがよく分かる。

制御システムのモデル化において、通常、状態方程式を微分方程式で記述するのは、システムは本質的にダイナミックであるという考えに基づくものである。定量解析の結果、方向制御もシステムとして扱う必要があることが分かる。



③路線変更による影響

路線変更区域の目標線は、曲線施工と同様であるべきであったが、データ設定ミスにより直線施工と同様になっていた。本文では割愛するが、設定した計画旋回角値は正しく、適正な制御結果が得られている。

性能について言えば、釣合モーメントの探索(加算性)資料から分かるように、計画旋回角の大幅変更が、曲線(450R)→直線→曲線(250R)に相当する変化であり、追従性能が確保されていることが分かる。

(次の曲線施工で性能確認の予定)

④非線形性制御環境への対応

単位角度修正モーメント量が旋回方向で異なり、ある程度以上のモーメントが追加されないと、マシンが旋回しない。(不感帯)

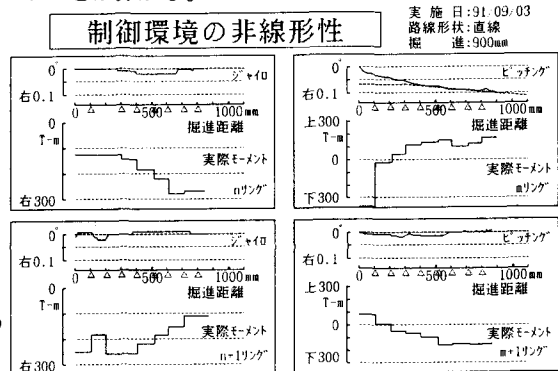
水平方向では、マシンを右押し加減にする必要がある。(片寄り)

鉛直方向では、前の掘進で築かれてマシンの経路(穴)の影響を受け、姿勢を保持するモーメントが前回と大幅に異なっている。リング組立時のマシンのレベル変化が次の姿勢に大きく影響を与えてい

るからである。(ヒステリシス)

この結果、偏差やその変化に対応して固定したモーメントやJPを与えるのでは、精妙な制御行い難いことが分かる。

制御環境の非線形性



4.4 今後の展開

現システムのルールは、性能確認と汎用性確保のために具備すべき最小限のもので構成してある。今後、次の項目について改善し、制御をより精妙なものにしていきたい。

(1) 方向制御

- ①JP選択制限下でのJP選択
- ②コピーカッタ不使用における曲線施工の反旋回補正係数の追加
- ③直線施工におけるストローク差制御
- ④片押し度による制御

(2) 姿勢制御

- ①マシン姿勢の推定と履歴
- ②テールクリアランスの推定精度とその制限内での制御
- ③姿勢制御の結果と出来形

4.5 まとめ

今回の自動方向制御実証結果における定量解析の結果、次のようなことが分かった。

①制御の基本性能確認

JPに無関係にモーメントの大きさのみで適正に偏差修正できるかが本システムの大きなテーマであったが、まったく問題ないという結果が得られた。このことは、適応制御の概念を利用し、従来の機械制御の範囲で検討できるということである。

機械制御として必要な基本性能を挙げ、評価した結果は前述の如く予想どおり良好なものであった。この結果、マシンに依存しない汎用性の高い制御シ

システムが実現可能であることが分かる。

②制御環境への適応性

制御環境の主な変動要因として、計画旋回角の大幅変更、路線形状の変化、掘進速度の変更、後方牽引台車の影響、コピーカッタの使用、土質の特性および、土質の漸次変化が挙げられる。

これらについて、各項目ごとに評価した結果、良好に追従制御ができた。

③定量解析

方向制御において、定量解析には作用の定量化（モーメント）が必須である。これまで理論でしか判断できなかった土の動的挙動の一部が解明できた。

5. おわりに

今回、制御工学の観点に立脚した自動方向制御システムを提案した。学習を基にした経験処理から物理法則を基盤にした適応制御への転換である。

現在、500mをこえて自動運転を継続し、直線施工において姿勢制御の実施々工をしている。曲線制御完成まで多少の改善・確認課題が残ったが、これらの課題は次の曲線施工で解決できる見通しがたっている。

この実証結果をとおして、中口径一体型マシンで100R曲線施工までの自動化が完成されるものと予想している。この手法は、制御環境の変動に強く、制御ルールに汎用性があり、大口径へも充分適用可能と考える。さらに、モーメントや制御の経過が定量的に分かることから、直接、制御性能の評価することやこれまで理論でしか分からなかった地盤との力学的関係を解明する手助けになると期待している。

最後に、本工事現場を借りて実施々工を行い、現在も自動運転を継続できるのも、施主殿を始めとする施工関係者の皆様の暖かいご支援とご理解の賜と紙面を借りて深謝する次第である。

参考文献

- 1) ロボット適応制御入門; 金井著, オーム社
- 2) 急曲線シールド工法; 日本プロシエクト・リサーチ
- 3) AI利用によるシールドの姿勢制御エキスパートシステムと施工実績; 第8回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論講演集, 土木学会
- 4) 理工学講座 制御工学; 深海監修, 東京電機大学出版局

5) 新体系土木工学 18 土の力学; 龍岡・足立共著, 土木学会

6) 応用カマルソワイルド; 片山著, 朝倉出版

7) エキスパートシステム; ヘイス他, 産業図書

8) ファジィシステム入門; 寺野・浅居・菅野共著, オーム社