

シールド姿勢制御の迅速化による セグメント組立品質の向上

IMPROVEMENT IN THE ACCURACY OF ERECTED SEGMENTS

BY QUICK POSTURE CONTROL OF SHIELD MACHINE

浦沢義彦* ・ 桑原弘昌* ・ 内藤幸弘*

Yoshihiko URASAWA, Hiromasa KUWABARA and Yukihiro NAITO

Since underground utilization in urban area is becoming deeper and deeper, both precise linear control and high accuracy of erected segments are indispensable to construct deep underground tunnels. In this point, automatic tunneling system with capability of sensitive posture control and quick response to swerves from the target points are being developed nowadays. However, to meet with severer specifications in the future, continuous efforts to renovate new systems, reacting relative position between the shield machine and segments, are highly required as mentioned in this paper.

keywords: automatic posture control, manual posture control,
linear precision of tunnelling, accuracy of erected segments

1. はじめに

シールドの曲線施工時において、掘進線形が計画線からずれた場合、セグメントは計画線形に沿って組み立てられるため、ある程度はクリアランスによって吸収されるが、これを過ぎると各リング間の継ぎ手の変位によって吸収される。セグメントの組立品質は、掘進線形の計画線形に対する精度に依存し、これの品質向上には掘進線形の計画線からの誤差、すなわち”ずれ”に迅速に対応し、修正を行うシールドマシンの姿勢制御が必要となる。

また、近年のシールドトンネルは深層化の一途をたどっており、これに伴い高水圧下での施工となるため求められる掘進線形精度・組立品質も高く、このようなシールド工事では迅速かつ緻密な掘進管理が要求され、オペレーターによる手動姿勢制御から、掘進管理データに基づく制御システムによる自動姿勢制御に移

* 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所 船橋工事事務所

行しているのが現状である。自動姿勢制御は、自動測量により微量なずれを感知し、ジャッキパターンを細かく変化させることによって姿勢制御を行うため、ジャッキパターンをほぼ一定にし、各リング単位の姿勢制御を行う手動姿勢制御に比べ、ずれへの対応インターバルが迅速となっている。これが結果的に掘進線形精度を向上させ、さらにはセグメントの組立品質精度を向上させる効果があるとの知見が得られたので、以下に報告するものである。

2. 自動姿勢制御システム（A I）による掘進線形修正の迅速化

2.1 シールド掘進線形管理

A Iによるシールド自動姿勢制御システムを導入したのは、船橋市の内陸部で建設中の地中送電用トンネルの一部区間であり、泥水加圧式シールドによってセグメント内径 3,650mm、延長 2,002m の洞道を建設する工事である。

平面線形については、R=100mの曲線部が 7箇所存在し、間隙水圧についても最大で3.4kgf/cm²と高い。また、経済性・施工速度を考慮し、直線部・R=100mの曲線部に幅 1,200mmのセグメントを用いている。

このように本工事は難しい条件下での施工となるため、迅速かつ緻密な掘進管理が特に要求され、自動測量をベースとしたA Iエキスパートシステムによる自動姿勢制御システムの導入を図った。

2.2 シールド自動姿勢制御システム¹⁾

本システムは、従来オペレーターが測量結果を基にシールドの姿勢制御を行っていたものを、A Iを用いることにより、高精度で緻密な制御にしたものであり、システムの主要構成要素はデータベース、知識ベースおよびエキスパートシステムであり、システムのフローチャート¹⁾を図-1に示す。

(a) データの供給とデータベースの構築
マシンの方向および位置のデータを自動測量システムから、マシンの速度、推力等のデータを自動計測システムから収集し（任意設定：本工事では13秒間隔に設定）データベースを構築している。

(b) 修正量の決定
マシンの現在位置のデータから、計画線とのずれ量（誤差）を算出し、滑らかに計画線に戻すための修正線を作成し、次にこの修正線にマシンを乗せるための修正量（修正偏角）を算出する（図-2参照）。

(c) トルクベクトルの算出
修正量が決まると、マシンの方向を変更するための必要トルク（回転力）を水平方向および垂直方向に分けて算出する。このとき使用するターントルク式（偏角一回転力式）は、地山の変化に対応させるため、最新のデータ（本工事では 100個）を基に、最小二乗法によって決定する。

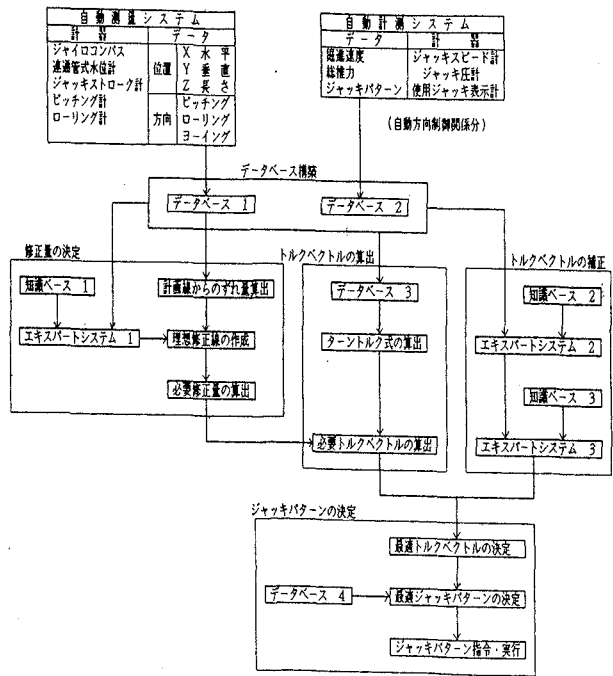


図-1 シールド自動姿勢制御
システムフローチャート

この式より、修正に必要な水平および垂直方向のトルクを算出して、トルクベクトルに合成する（図-3参照）。

(d) トルクベクトルの補正

マシンの姿勢を制御するとき、マシンの持つ癖や地山の特性・変化を考慮する必要がある。よって過去のデータと経験的知識とからトルクベクトルの補正量を決定する。

(e) 最適ジャッキパターンの決定

トルクベクトルの補正を行って最適トルクベクトルを決定し、これに見合うジャッキパターン（本工事では、ジャッキの総数16・最低選択数6とし、これから類似パターンを除外した7,478種類）から抽出して指令・実行する。

(f) 変化量のフィードバック

実行したジャッキパターンによるマシン方向の変化量のデータを、修正量の決定、トルクベクトルの算出およびトルクベクトルの補正のためにフィードバックする。

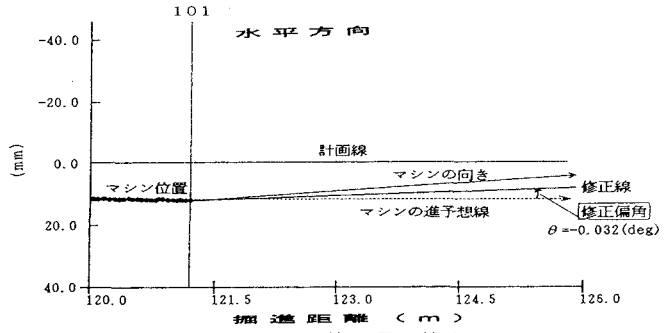


図-2 修正量の算出

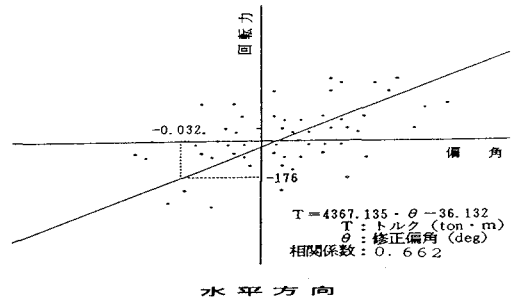


図-3 ターントルク式の例

2.3 自動制御と手動制御の比較

実際の施工において、データ比較のために、1回目のR=100mの曲線部で熟練オペレーター（経験15年）による手動制御での掘進を、2回目以降の曲線部からは、自動制御による掘進を行った。

AIエキスパートシステムによるシールドの姿勢制御は、自動測量によりシールド位置がリアルタイムに把握でき、またシールドジャッキを全ジャッキ追従式としているため、ジャッキパターンの変更に即座に対応できる。このため、手動制御に比べ、はるかに短いインターバル（今回は13秒）での姿勢制御が可能となっている。

図-4は曲線区間での、左右のシールドジャッキストローク量の差（掘進終了時）のヒストグラムであるが、自動制御の方が設定ストローク量に対する変動が小さく、姿勢制御の迅速化の効果があらわれている。

図中の負の値は、計画線形の曲線に対し、シールドマシンが逆の方向を向いていることを意味する。これは掘進線形が計画線形に対して曲がり過ぎたため、これを修正する時の状態であり、正の過大な値はこの逆の場合である。つまりこれらは掘進線形

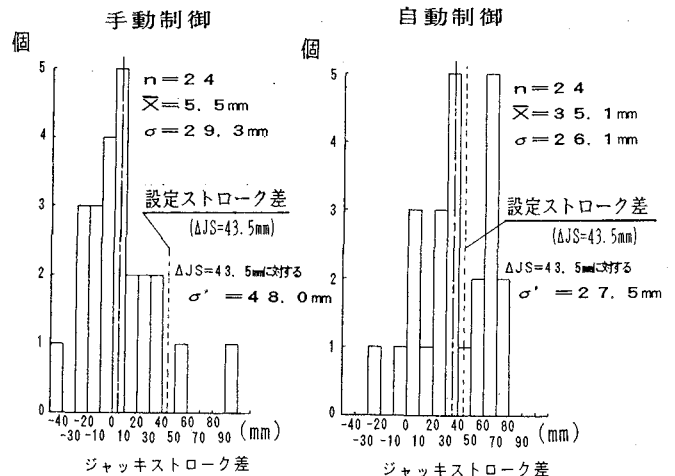
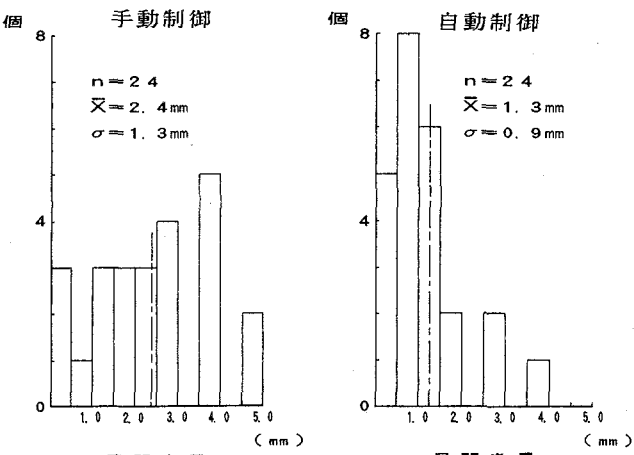


図-4 ジャッキストローク差 - R=100m区間-
(左右・掘進終了時)

の蛇行（ずれ）を表しており、設定スト
 ローク差に対する変動の小さい自動制御
 の方が、掘進線形の精度が高いといえる。

3. セグメント組立品質の向上

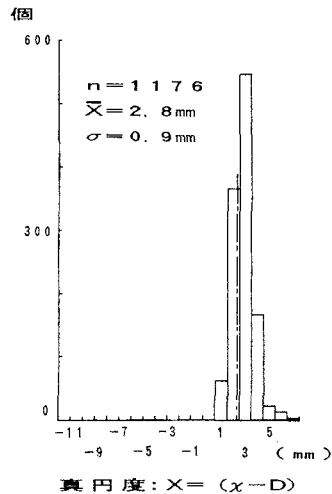
A I エキスパートシステムによるシー
 ルド姿勢制御は、掘進線形のずれの修正
 を迅速に行うために、掘進線形精度が、
 従来のオペレーターによる手動制御に比
 べて高く、その効果はセグメントの組立
 品質にも現れている。



図－5 目開き量（左右）－R=100m区間－

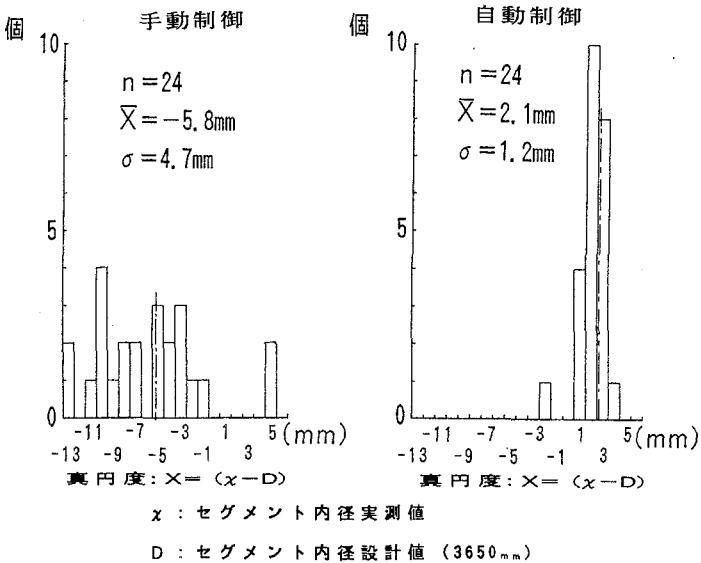
3.1 リング継手間の目開き・目違い

図－5は曲線区間での、セグメントリング継手間の目開き量（左右の大きい方の値）のヒストグラムである。手動制御の場合は平均で2.4mmであり、これに対して自動制御の場合は平均で1.3mmと小さく、分散についても $\sigma=1.3\text{mm}$ に対し $\sigma=0.9\text{mm}$ となっており、自動制御の方が平均値および分散も小さい。また目違いについても手動制御：平均値=3.4mm、分散 $\sigma=1.3\text{mm}$ 、自動制御：平均値=2.3mm、分散 $\sigma=1.2\text{mm}$ と同様な傾向が見られた。



x : セグメント内径実測値
 D : セグメント内径設計値
 (3650mm)

図－7 組立真円度（水平方向）
 －直線区間－



図－6 組立真円度（水平方向）－R=100m区間－

3.2 組立真円度

図－6は曲線区間（R=100m）でのセグメントの真円度（水平方向）のヒストグラムで、図－7は直線区間でのものである。これらのデータは、マシンテールエンド部にあるセグメントの状況が影響する、組立直後のものを用いた。

手動制御のものは水平方向に平均で約6mm縮まっているが、逆に自動制御については約2mm、直線区間においては約3mm広がっている。

これは過大なシールドマシンの蛇行により、”せり（シールドマシンのテールとセグメントの接触）”が発生し、水平方向にセグメントリングを押しつぶす現象が、手動制御の場合に見られた事を示しており、自動制御の場合はこれに比べ、直線区間のもと類似しており、セグメントの組立状況が良好であったことが伺える。

3.3 リング継手間のしみ（にじみ）

図－8は船橋内陸部での、地中送電用トンネル建設工事全体の平面線形とリング継手間の漏水発生率の関係図である。ここでいう漏水とは、しみ（にじみ）を意味する。また、全ての工事で 1,200mm 幅のRCセグメントを使用しており、地盤特性も類似している。

漏水の発生率は図のように、平面線形の曲率半径が小さくなるに従って高くなっている。なお、図中の▲が本工事の手動制御の場合の漏水発生率であり、厳しい条件下での施工であった事が伺える。これに対し、●は自動制御のものであり、約半分程度に減少している。

このように、セグメントの組立品質である真円度、リング継手間の目開き・目違い、および”しみ”の発生に、自動制御による向上が確認できた。しかしながら、図－8に見らるように、しみの発生率は減少はしているが無くなったわけではなく、セグメント組立品質向上面から自動姿勢制御システムあるいはセグメント構造（リング幅・桁高）を含め、まだ改良すべき問題が残っていることを意味している。

4. 自動姿勢制御システムに求められる今後の課題、および展望

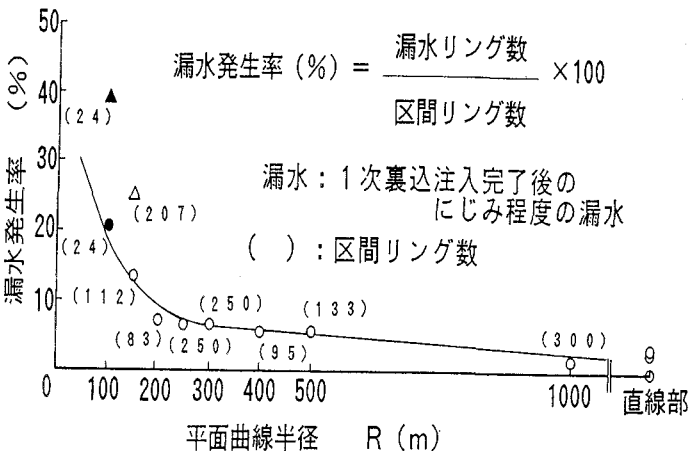
AIエキスパートシステムを用いたシールドマシンの自動姿勢制御は、掘進線形のずれの修正を迅速に行うため、トンネルの掘進線形の精度を高め、さらにはセグメントの組立品質を向上させる内容について述べてきたが、今後の課題・問題点を考える。

本工事での自動制御システムでは、掘進線形からずれが生じた場合、緩やかに計画線形に戻すようプログラムされている。これは緩やかに修正を行った方が、セグメントの組立品質に支障が少ないという想定に基づいて行われている。しかし実際には、セグメントの組み立てられた向きによっては、さらに急な修正が必要な場合、あるいは緩やかな修正が必要な場合があり得る。現在のシステムでは、修正距離の任意設定が可能ではあるが、セグメントの組立品質を考慮したものではないため、この品質に悪影響を与えてしまう状況が考えられる。つまり効率的な掘進線形の修正、さらなるセグメントの組立品質の向上を行うには、これらのシールドマシンとセグメントの相対位置関係の把握と活用必要性がある。

図－9は実際のシールドマシンとセグメントの位置関係を示したものである。図に従ってセグメントが理想的に組立てられたとして、テールエンドクリアランス（CT）を考えると、以下のとおりとなる。

$$CT = TC - KT_1 - KT_2$$

$$KT_1 = LE \tan \theta_1, \quad KT_2 = LS \sin \theta_2$$



図－8 平面線形と漏水発生率の関係
(▲△を除き自動姿勢制御システム)

$$\begin{aligned}
LE &\approx (Lb_2 + Lk - JS) \\
CT &= TC - (Lb_2 + Lk - JS) \tan \theta_1 - LS \sin \theta_2 \\
\theta_2 &= \theta_1 - \theta_{t1} - \theta_{t2} \\
\theta_1 &= \theta_k + \theta_{t1} \\
\theta_2 &= \theta_k - \theta_{t2} \\
\text{また } \theta_k &= \tan^{-1} (\Delta JS / DJ) \text{ より} \\
\theta_1 &= \tan^{-1} (\Delta JS / DJ) + \theta_{t1} \quad \text{これは任意設定が可能ではあるが、} \\
\theta_2 &= \tan^{-1} (\Delta JS / DJ) - \theta_{t2} \\
\therefore CT &= TC - (Lb_2 + Lk - JS) \tan [\tan^{-1} (\Delta JS / DJ) + \theta_{t1}] \\
&\quad - LS \sin [\tan^{-1} (\Delta JS / DJ) - \theta_{t2}]
\end{aligned}$$

TC : 実測テールクリアランス量 (組立時)

Lk : Kセグメント挿入長

ΔJS : 左右のジャッキストローク長差

LS : セグメントの軸方向長

θ_{t2} : iセグメントの片側テーパ量

Lb₂ : マシンテールエンド長

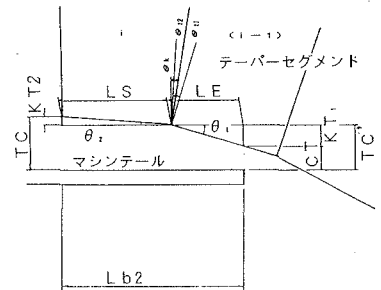
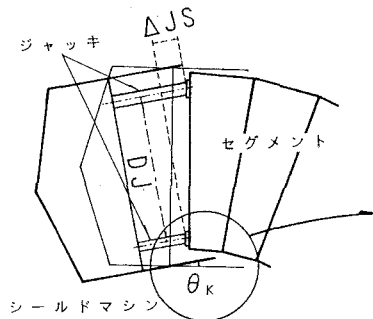
JS : ジャッキストローク長

DJ : 左右のジャッキ中心間距離

θ_{t1} : (i-1)セグメントの片側テーパ量

θ_k : シールドマシンの方向変化量

この式によってセグメントとシールドマシンの相対位置が把握でき、せり(セグメントとマシンテールの接触)の判定予測が可能となる。つまりこの式および必要なデータを入手する計測装置を組み込んだシステムを導入すれば、セグメントの組立品質を優先した自動姿勢制御システムが可能となる。



シールドマシンテールとセグメントの関係

図-9 シールドマシンテールとセグメントの位置関係

現在、同じ船橋市の内陸

部での地中送電用トンネル建設工事にシールドマシンとセグメントの相対位置関係を把握するための測量装置の設置を予定している。この測量結果、前述の式の信頼性、およびシステムの展望等を次の機会に報告できればと考えている。

(参考文献)

1) 浦沢義彦 矢吹忠平 淵上誠二 : AIとファジイとを使ったシールド自動掘進システム,

土と基礎, 1993.5