

岩盤トンネル掘削機の パラレルリンク推進システムの開発

Development of Parallel-Link Driving Jack System
for Tunnel Boring Machine

技術本部 石瀬文彦*¹ 本村士郎*²
田中昭夫*³
神戸造船所 西岳茂*⁴ 松浦武*⁵

岩盤トンネル掘削機による施工において、不良地盤における安定した掘進制御及び計画線に沿った線形制御等を実現するために、6自由度の位置姿勢制御が可能なパラレルリンクを適用した推進システムの開発を行った。岩盤トンネル掘削機では掘削時に推進力・回転トルク・ラジアル力などの複合大荷重が作用する。そこで、冗長軸を含む10軸のパラレルリンクを採用し、その機構解析・制御手法を確立した。また、ベンチ試験によりその妥当性を検証した。その結果、推進システムの負荷能力・負荷配分は計算値とほぼ一致していること、制御精度・位置姿勢保持能力に問題のないこと等を確認し、実機適用の見通しを得た。

To realize stable excavation control on unsound ground and linear control along with scheduled lines when excavation operations are performed with tunnel boring machines, etc., travelling systems have been developed as an application of parallel links which enable us to use position/attitude controls with 6 degrees of freedom. This tunnel boring machine is subjected to combined great loads such as travelling, rotational torque, radial forces, etc. during excavation operations. The method of structural analysis and the control approach have been finalized with redundant axes. Bench tests found the performance to be appropriate. As a result, the prospects of its application in production machines have been confirmed by ensuring that the load capacity of and load distribution of travelling systems will almost agree with calculated values, and that control accuracies and position/attitude holding capacities will have no problem.

1. ま え が き

近年、建設現場における作業環境の改善、安全性・経済性の追及が進められてきており、建設ロボットや自動化装置の開発・導入などが盛んに行われている。トンネル施工においても同様な課題がより厳しくなっており、岩盤トンネル掘削機（以下TBM）においても、不良地盤での施工効率の向上、急曲掘進への対応などが求められている。

TBMは後胴に設けられたグリッパで機体を支え、前胴の前面に設けたローラカッタを回転させながら岩盤に押付け掘削する機械であるが、推進システムは掘削反力を支えながら前胴をトンネルの計画線に沿って押出す必要がある。

そこで、施工効率・施工精度の向上及び方向制御の自動化を目指して、パラレルリンクによるTBMの推進システムの開発を行った。パラレルリンクはアクチュエータを並列に配置するので、大きな力を発生することが可能であり剛性が高いが動作範囲が狭いという特徴を持っている。ここでは、掘削時の大荷重に対して負荷の分散を図るために7軸以上でパラレルリンクシステムを構成することを前提とし、その機構解析手法並びに位置・姿勢の制御手法と評価結果について述べる。

2. パラレルリンク機構

図1にパラレルリンク推進システム構成の概念図を示す。エンドプレートの位置・姿勢の6自由度の動きを制御するためには、駆動リンクは6軸が必要・十分条件であるが、掘削時の大荷重を考慮して10軸のリンク構成（冗長パラレルリンク機構）とした。推力の計算、位置姿勢制御に必要な以下のキネマティクスとスタ

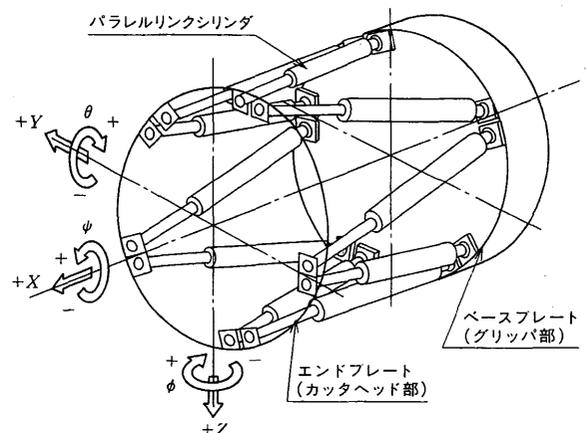


図1 パラレルリンク推進システムの概念図 10軸のパラレルリンクシステムの構成の概要を示す。
Concept of parallel-link system for TBM

ティクスについて検討を行った。

2.1 キネマティクス（運動学）

- 順キネマティクス：10軸のリンク長さからエンドプレートの位置・姿勢を求める演算。
 - 逆キネマティクス：エンドプレートの位置・姿勢から各リンク長さを求める演算。リンク長さの位置制御に必要。
- ベースジョイントの座標値を B_i 、エンドジョイントの座標値を E_i とするとリンクベクトル U_i は式(1)で表される。

$$U_i = E_i - B_i \quad (1)$$

したがって、リンク長さ L_i は

$$L_i = |U_i| \quad (2)$$

*1 高砂研究所建機研究推進室主務

*4 建設機械部主務

*2 高砂研究所機器・自動化装置研究室主務

*5 建設機械部開発課

*3 高砂研究所機器・自動化装置研究室

一方、順キネマティクスは通常解析的に求めることができないため、反復近似計算により求めた、リンク長 L とエンドプレートとの位置姿勢 X の微小変位の間に次の関係が成立つ。

$$\delta L = J \delta X \tag{3}$$

ここに、 J はヤコビアンである。エンドプレートとベースプレートは剛体と考えられ、任意の6本のリンクからエンドプレートとの位置姿勢が決める。式(3)より

$$\delta X^* = J^{*-1} \delta L^* \tag{4}$$

$$X_{(n)} = X_{(n-1)} + J^{*-1} \delta L^*_{(n-1)} \tag{5}$$

ここに、* は6本リンクにおける δX , δL , J を示す。式(4), (5)を用いて $|\delta L_i^*| < \epsilon$ となるまで反復計算を行った。

2.2 スタティクス (静力学)

- 順スタティクス：10軸のリンク推力からエンドプレートの発生力を求める演算。
- 逆スタティクス：エンドプレートの発生力から各リンク推力配分を求める演算。設計仕様に対するリンク諸元を求めるのに必要。

カベクトルを F , リンク推力を C とすると、

$$F^T \delta X = C^T \delta L \tag{6}$$

式(3), (6)より順スタティクス, 逆スタティクスは、

$$F = J^T C \tag{7}$$

$$C = (J^T)^{-1} F \tag{8}$$

リンク本数が7軸以上の機構では、エンドプレートの発生力を満足するリンク推力の組合せは一意に決まらない。式(8)はリン

ク推力の2乗和が最小となる解を与えるものであり、 $(J^T)^{-1}$ は疑似逆転置ヤコビ行列を示す。

前述した逆スタティクスの計算手法を用い、6軸及び10軸システムの計算結果の一例を図2に示す。図2では機構解析プログラムの一つであるDADS (Dynamic Analysis and Design System) による計算結果も併記した。両者の計算結果は良い一致を示しており本計算手法及び機構解析プログラムの活用により、リンク諸元の検討や動解析などが可能と考えられる。また、10軸の場合のリンク推力の値は6軸に比べ小さいことから、荷重の分散が図られていることが分かる。

3. 試験装置

前章で求めた冗長軸を含むパラレルリンクシステムの負荷能力, 負荷配分, 制御性等の検証のためにベンチ試験を実施した。

3.1 試験装置の構成

試験装置は $\phi 3.5$ m の実機の1/2スケールモデルを想定した。組立図を図3に、主要諸元を表1に示す。

パラレルリンクの各シリンダの両端は球面ジョイントでベースプレートとエンドプレートに結合し、各々に磁歪(じわい)式変位計・圧力計を取付けた。エンドプレートの左右には2本のスラスト負荷シリンダ及びラジアル負荷シリンダを設け、スラスト・ラジアル・トルクの3種類の負荷を単独あるいは複合して負荷することができる。また、ラジアル負荷シリンダの下部にはころ機構を設け、ラジアル及びトルク負荷をかけながらスラスト方向の動きが可能な構造とした。

3.2 制御装置

シリンダの駆動にはサーボ弁を用い、パソコンからの変位指令値とシリンダ変位計からのフィードバック信号をサーボ弁の入力信号とした。エンドプレートの目標値は、手動操作時にはジョイ

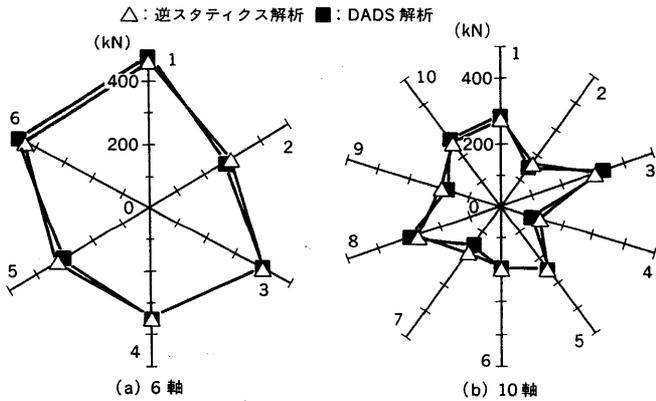


図2 シリンダの推力配分計算結果 逆キネマティクスとDADSによる計算結果から10軸の場合荷重の分散が図られている。 Result of calculation of cylinder force distribution

表1 試験装置の主要諸元 Dimension of testing apparatus

	試験装置諸元	実機諸元
パラレルリンク P.C.D	$\phi 1390$ mm	$\phi 3500$ mm
パラレルリンクストローク	600 mm	1200 mm
負荷能力	スラスト	2180 kN
	ラジアル	50 kN
	トルク	125 kN·m
リンクシリンダ寸法	$\phi 125$ mm/ $\phi 71$ mm	—

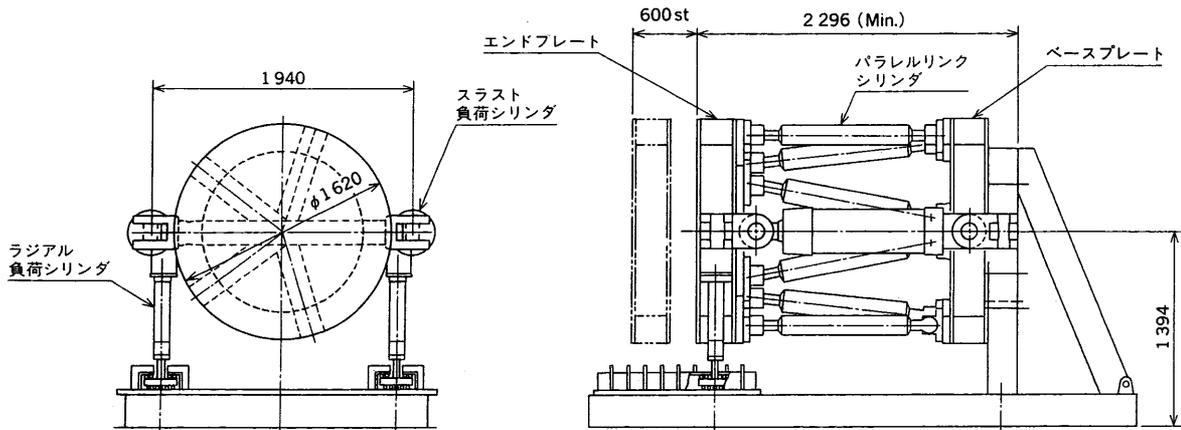
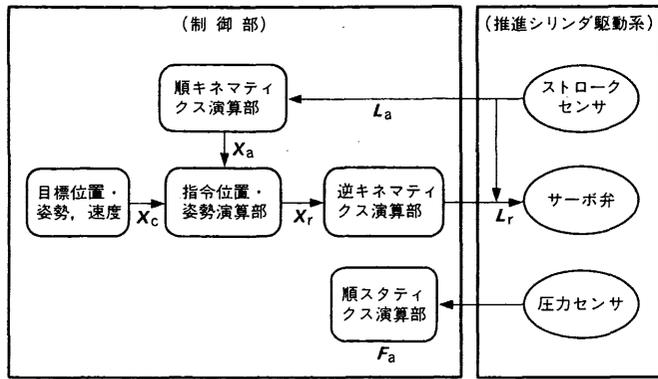


図3 試験装置の組立図 10軸のパラレルリンクシステムの推力を負荷シリンダで支えながら前進が可能である。 Assembly drawing of testing apparatus



X_a : エンドプレートの姿勢ベクトル, F_a : エンドプレートの力ベクトル
 L_c : 各シリンダ長さ, c : 指令値, r : 指令値, a : 実測値

図4 制御プログラム構成の概略 制御部でエンドプレートの目標値をシリンダ長さに変換し、サーボ弁に長さの指令値を出力する。
 Summary of control program constitution

スティックから、自動運転時にはパソコンから入力した。試験では負荷シリンダを圧力制御しながらパラレルリンクシリンダを変位制御した。

3.3 制御プログラム

制御プログラム構成の概要を図4に示す。自動運転の制御サンプリングタイムは20msである。また、順キネマティクスの繰返し線形近似計算の1ループ当たりの演算時間は1msであり、初期値が不明な場合は4~5回の繰返し計算を要するが、リアルタイムの制御中は、1~2回程程度の繰返し計算で収束した。順キネマティクスの繰返し線形近似計算法で十分にリアルタイム性を確保できる見通しがあると言える。

4. 試験項目及び結果

前章で述べた試験装置及び制御プログラムを用いて下記の実験を行った。作動中のシリンダの実測長さと言指令長さ、シリンダ推力と負荷シリンダ圧力は、制御装置内のハードディスクに記録し、試験終了後にデータ処理プログラムにより負荷特性、位置姿勢を計算処理した。

4.1 負荷能力試験

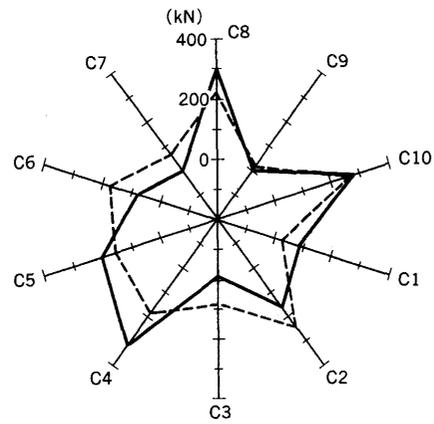
エンドプレートの荷重支持能力を確認するために、エンドプレートを一定の位置姿勢に保持しながら、スラスト負荷、ラジアル負荷及びトルク負荷を単独あるいは複合させて加え、エンドプレートの変位及び各シリンダの負荷配分を計測した。ストローク500mm位置で、スラスト、ラジアル及びトルク負荷を複合させて加えたときのシリンダの推力配分の実測値と計算値を図5に示す。実測値と計算値はほぼ一致しており、2章で用いた解析手法がほぼ妥当なものであると考えられる。

4.2 ステップ負荷試験

動的な荷重が負荷されたときの位置姿勢保持能力を確認するために、エンドプレートを一定の位置姿勢に保持しながら負荷をステップ状に変化させ、エンドプレートの変位及び各シリンダの推力を計測した。ストローク500mm位置で、スラスト負荷を加えたときの負荷力の実測値と、シリンダ推力から計算したエンドプレートの発生力を図6に示す。負荷力に発生力は良く追従している。また、このときの位置姿勢の変化はわずかであり、設計どおりの位置姿勢保持能力を有していると言える。

4.3 直進及び曲進試験

実際の掘削状態を考慮して、エンドプレートに一定負荷を加え



—: 推力実測値 ---: 推力計算値

図5 シリンダの推力配分計測結果 シリンダの推力配分の計測結果と解析結果はほぼ一致している。
 Measuring result of cylinder force distribution

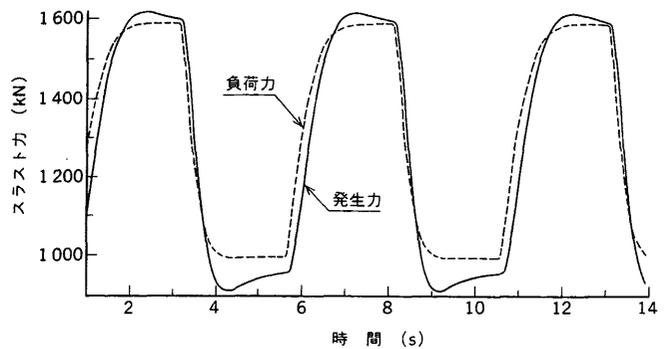


図6 エンドプレートの発生力計測結果 エンドプレートの発生力は負荷力によく追従しており、エンドプレートを支持している。
 Measuring result of endplate thrust force

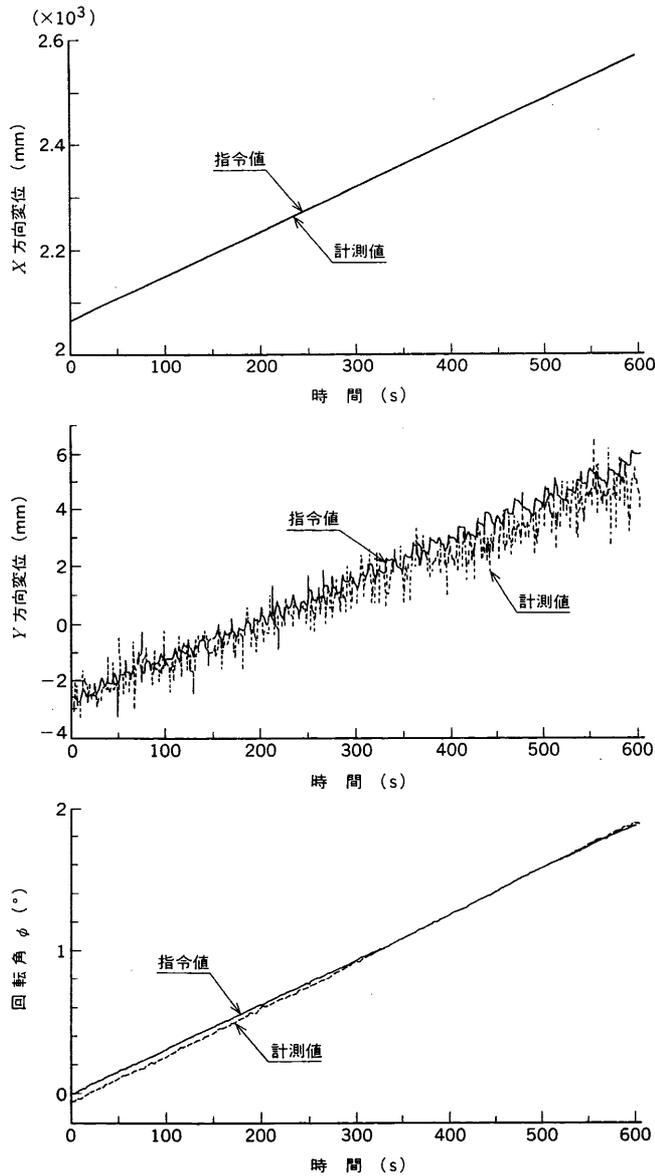
ながら、エンドプレートを速度50mm/minで前進させ、エンドプレートの位置姿勢及びシリンダ推力を計測した。直進と曲進の2ケースを実施し、ストロークは500mmである。曲進ではエンドプレートの中心軌道をR15mに沿った円弧の始点と終点を結んだ直線とし、エンドプレートの面が常に曲率半径の中心を向くように姿勢を変えながら前進させた。図7(a)に複合荷重をかけながら右向きに曲進したときの位置姿勢の変化を示す。制御精度は2~3mmであり、全ストロークにわたり許容値(±5mm)以下に制御されていることが確認できた。また、エンドプレートは右方向に約7mm、角度が約1.9°変位及び回転しており、指令値どおりに曲進しているのが分かる。このときのシリンダ推力の変化を図7(b)に示す。各シリンダの推力には過大力もなく、ほぼ滑らかに変化しており、各シリンダが協調して負荷を支えながら前進していることが分かる。

5. 考察

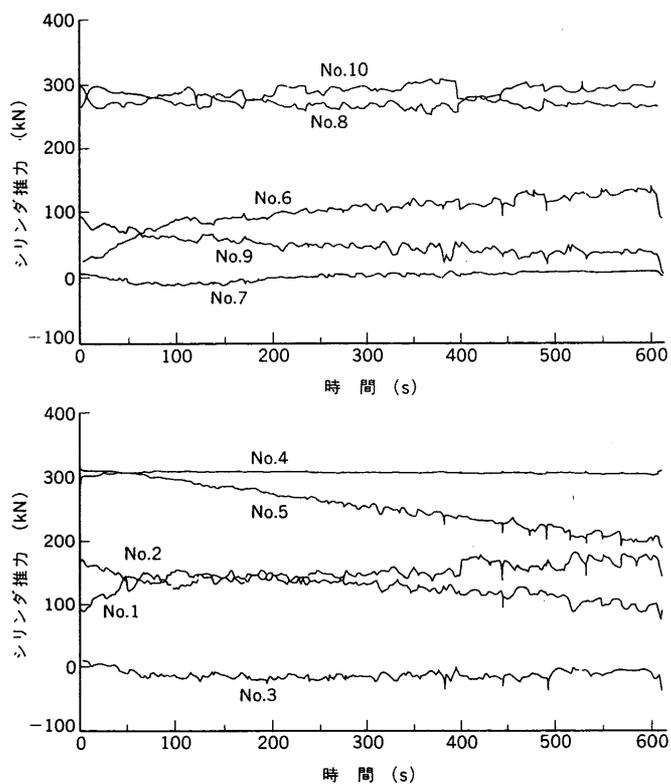
以上の解析及び実験結果により判明した項目を以下に示す。

(1) リンクの配置方法

7軸以上の冗長軸を含むパラレルリンクシステムの一例として10軸のシステム検討を行ったが、ここで用いた手法は10軸以外にも用いることができる。TBMの仕様によって適切な軸数を選ぶことができ、リンク配置に自由度を持った設計が可能であると考えられる。



(a) 曲線時のエンドプレートの位置姿勢の変化



(b) 曲進時のシリンダ推力の変化

図7 曲進時のエンドプレートの位置姿勢及びシリンダ推力の変化
 エンドプレートは目標値に対し許容値以下に制御されており、シリンダ推力は過大力もなくほぼ滑らかに変化している。
 Measuring result of position, rotation and cylinder force on curvilinear motion

(2) リンクの負荷能力・負荷配分

推進システムの負荷能力・負荷配分は計算値どおりの値を示しており、十分な剛性を有している。このことから、冗長軸を含むパラレルリンクの解析手法の妥当性が確認できたと考えられる。大荷重が作用する中・大口径TBMへの適用においても、実機の仕様に応じた推進システムの設計が可能であると考ええる。

(3) 制御方法

本試験のステップ負荷におけるエンドプレートの変位挙動や直進・曲進時の制御精度は目標値内であることが分かった。これより、本制御手法で冗長軸を含むパラレルリンクシステムの位置制御が可能であると考ええる。

(4) 外力の把握

パラレルリンクによる推進システムでは、エンドプレートに作用する負荷の6成分をシリンダ推力から計算できるので、カッタヘッドを支持するメインベアリングの負荷を常時求めることができる。そのため、メインベアリングの寿命管理が可能で

ある。また、掘削中の土質の状況把握などのデータ取得にも利用できると考える。

(5) 方向制御システム

従来の力制御による方向制御に比べカッタヘッドの位置を直接制御するため、計画線に沿った線形制御機能の改善などTBMの施工管理の向上が期待できる。また、パラレルリンクシステムでは、オペレータはシリンダ推力の変化から、エンドプレートの推進方向をつかむことは困難であり自動方向制御は不可欠である。制御システムと測量データのリンクにより自動方向制御は可能と考える。

6. あとがき

パラレルリンクを適用したTBMの推進システムの開発を行い以下の成果を得た。

- (1) 冗長軸を含む10軸のパラレルリンクシステムの機構解析、位置姿勢制御手法を確立できた。
- (2) ベンチ試験において推進システムの負荷能力、制御精度に問題のないことを確認し実機適用の見通しを得た。
- (3) 本研究で用いた手法は、10軸以外のシステムにも拡張が可能と考えられる。

今後、本システムの機能を有効に活用し、グリッパを含めた機体の方向制御や施工管理システムなどの開発を進めていく予定である。