

# シールド自動方向制御システム「FLEX」の開発

## Development of Shield Machine Direction Control System [FLEX]

西 明良\*<sup>1</sup>      岡 利博\*<sup>1</sup>      松 本 享\*<sup>2</sup>      宮 沢 義博\*<sup>2</sup>  
Akira Nishi      Toshihiro Oka      Tooru Matsumoto      Yoshihiro Miyazawa

天 野 裕史\*<sup>3</sup>      山 本 孝男\*<sup>3</sup>      林 尚 孝\*<sup>3</sup>      金 井 大輔\*<sup>3</sup>  
Yuuji Amano      Takao Yamamoto      Naotaka Hayashi      Daisuke Kanai

### 【要旨】

シールド自動方向制御システム「FLEX」は、運用開始から20年が経過し、平成23年7月現在、適用件数41件、自動方向制御による延施工距離は45kmになった。急曲線、大断面等の厳しい条件の工事に適用しながら改良を重ね、ほぼ全てのシールド工事に適用できるようになった。総合評価方式の入札案件（品質確保）では有効な差別化技術になっており、現在では掘進とセグメント組立を同時に行う「ロスゼロ工法」の中核技術として大口径長距離シールドの高速化に貢献している。本稿では、開発過程と最新システムの概要を述べるとともに、急曲線施工に採用した篠原雨水幹線工事、急勾配施工に採用した緑地共同溝工事の施工例を紹介する。

【キーワード】 シールド 自動化 ジャイロ 急曲線 急勾配

### 1. はじめに

シールド自動方向制御システム「FLEX」は、シールド姿勢管理システム「ジャイロマスタ」の開発を皮切りに、ジャッキ圧力制御方式の開発、掘進とセグメント組立の同時施工の開発へと発展した。システム運用期間は20年、適用件数41件、自動方向制御による延施工距離は45kmである（平成23年7月現在）。近年では品質確保を目的に採用する現場があり、総合評価方式の入札案件（品質確保）では有効な差別化技術になっている。20年の節目にあたり開発過程と最新システムの概要等を述べるとともに、「FLEX」を急曲線施工に採用した篠原雨水幹線、急勾配施工に採用した緑地共同溝の施工例を紹介する。

### 2. 開発過程

図-1に本システムの開発過程と施工実績を示す。1986年にジャイロコンパス（以下ジャイロと記す）を用いた姿勢管理システム「ジャイロマスタ」を開発し、約12年間、当社の標準システムとして現場展開し、基礎技術を確立した。自動方向制御システムは3年後の1989年より開発を行い、平成元年度建設技術評価制度「シールドトンネル掘削機の姿勢制御システムの開発」を取得した。1991年より現場展開に移り、問題点を克服しながら機能を向上させ、現在に到っている。

#### 2.1 姿勢管理システム「ジャイロマスタ」の開発と運用

時期：1986～1997年（開発部署 東京支店機電課、情報システム部、以下当時の部署名称）

検証：文京シールド（東京支店）、千葉シールド（東京支店）他20件超

概要：ジャイロによりシールドの掘進姿勢をリアルタイムに計測し、計画線との方向差をパソコン画面上に表示する。

効果：従来のジャッキストローク管理に比べ、シールドの姿勢を迅速かつ正確にオペレータに伝達でき、掘進精度の向上に貢献した。

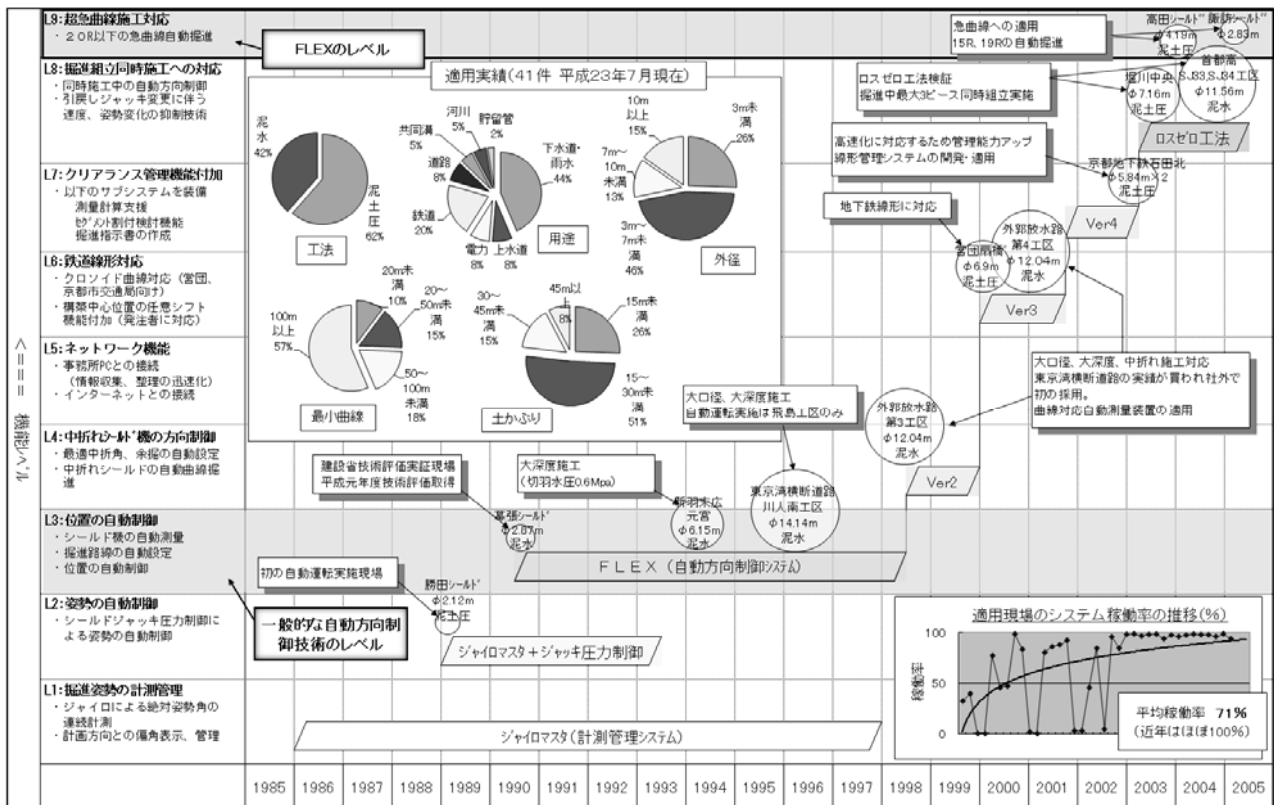
#### 2.2 ジャッキ圧力制御方式による自動方向制御システム「FLEX」の開発

時期：1989～1991年（開発部署 技術開発部）

検証：勝田シールド（東京支店）、幕張シールド（東京支店）、東京湾横断道路（東京支店）他

概要：個々のシールドジャッキの圧力をコンピュータ制御する方式を開発し、国内工事に初めて適用した。従来のジャッキパターン選択方式に比べ、適切なジャッキモーメントでシールド姿勢を制御する。自動追尾式トータルステーションを装備する。（登録特許3件）

効果：シールド自動方向制御を実用化した。オペレータが他の管理に集中できるため非熟練作業員でも適切なシールド掘進管理が可能になった。



図ー1 開発過程と施工実績

### 2.3 中折れシールドへの対応

時期：1998～1999年

検証：外郭放水路第3工区（北関東支店）

概要：最適中折れ角、余掘量を算出し、オペレータに操作を指示する。システム側では中折れを考慮して姿勢を自動制御する。

効果：中折れ装置を装備したシールドによる曲線の自動掘進を可能にした。現場毎に検討していた中折れ曲線施工の管理基準を統一化し、施工ノウハウの蓄積とフィードバックを可能にした。中折れ姿勢管理基準の不備による施工トラブル防止に貢献した。

### 2.4 情報化施工（ネットワーク化）機能の装備

時期：2000～2001年

検証：外郭放水路第4工区（北関東支店）

概要：LANによるPC間の接続、インターネットを利用した外部PC、携帯電話との接続を可能にした。事務処理用ソフト（エクセル、アクセス）と連携し、掘進データの分析処理能力の向上を図った。

効果：情報伝達、データ整理を迅速に行えるようになった。また、遠隔地から操作およびメンテナンスが可能となり、技術支援、トラブル対応時間を大幅に短縮した。

### 2.5 適応線形の拡大

時期：2000～2003年

検証：営団扇橋（関東土木支店）、京都地下鉄石田北（大阪支店）

概要：平面クロソイド曲線、縦断単曲線に対応し、構築中心線への任意シフト機能を設け、発注者毎に異なるカントによる平面・縦断線形に対応した。

効果：軌道中心線にクロソイド曲線を採用する鉄道工事に適用できるようになった。

### 2.6 測量計算、セグメント割付管理支援機能の強化

時期：2002～2003年

検証：京都地下鉄石田北（大阪支店）

概要：複雑な地下鉄線形の測量計算、セグメント組立割付シミュレーション、掘進指示書・蛇行表の自動作成等、管理作業をシステム化した。

効果：日々行われる測量管理（測量計算、掘進管理値およびセグメント割付位置の検討、蛇行表、指示書作成等）を簡素化し、シールドとセグメントの一元管理、計算作業の軽減、指示遅延の防止、管理機能の向上が図れた。

### 2.7 急曲線施工（R=20m未満）への対応

時期：2003～2006年

検証：高井田シールド R=19m（大阪支店）、諏訪シールド R=15m（大阪支店）、篠原雨水幹線 R=15m（名古屋支店）

概要：曲線入口と出口部に緩和曲線を設け、無理なく掘進できる管理計画線を設定し、シールドの姿勢制御、セグメントの組立割付管理を行う。

効果：シールドの掘進軌跡とセグメント組立軌跡を一

致させることにより急曲線の入口、出口部において生じるシールドテール部とセグメントとのセリを防止した。曲線入口、出口部におけるセグメントのひび割れ、漏水が減少し、急曲線施工の品質向上に貢献した。

## 2.8 掘進とセグメント組立同時施工「ロスゼロ工法」の開発

時期：2003～2006年（開発部署 機電部）

検証：堀川シールド（大阪支店）、本町シールド（関東土木支店）

概要：シールドジャッキ圧力制御の利点を生かし、シールド掘進と同時にセグメントを組み立てる同時施工を可能にした。

効果：シールドマシン本体構造、セグメント形状や継手に特殊な機構を設けず、一般のシールドで効率的な高速施工（施工サイクル20～30%短縮）を可能とした。（特許登録1件）

## 2.9 自由線形への対応

時期：2009～2010年

検証：他社シールド工事

概要：任意に与えられた構築中心点（コントロールポイント）からシールド掘進可能な平面線形、縦断線形を設定し、シールドの中折れ操作、姿勢制御、セグメントの割付管理を行う。

効果：あらゆる計画線形の工事に適用可能とした。

## 3. 概要

### 3.1 システム構成

図-2にシステム構成を示す。FLEXは姿勢制御、自動測量、線形管理の3つのサブシステムから構成される。姿勢制御システムは、シールドジャッキの圧力を制御してシールドの姿勢を自動制御する。自動測量システムは、自動追尾式トータルステーションによりシールドの位置を自動測量し、掘進姿勢の目標値を修正する。線形管理システムは、掘進計画線の設定、測量計算の支援、セグメント割付検討等、後工程の管理作業を自動化する。

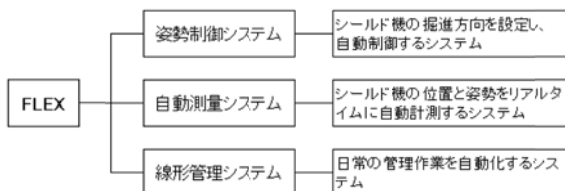


図-2 システム構成

### 3.2 機器構成

図-3に機器構成を示す。シールドマシンに姿勢検出

用ジャイロコンパス、圧力制御用油圧機器、自動測量用ターゲットを装備し、後続台車にデータ送受信の伝送装置を装備する。後方のセグメント上部または側部に自動追尾式トータルステーションを設置し、中央制御室等の遠隔地に演算用パーソナルコンピュータと伝送装置を設置する。遠隔地と切羽間の通信はケーブル（有線）を介して行う。盛り替え作業を考慮しトータルステーションは無線方式を採用している。

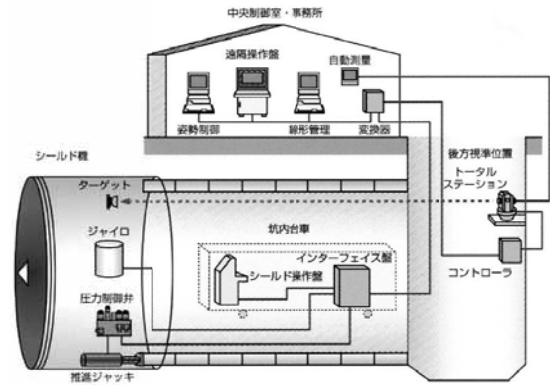


図-3 機器構成

### 3.3 特徴

本システムの最大の特徴は、シールドジャッキの圧力制御である。一般のシールドではジャッキの作動と停止を選択するジャッキ選択方式が用いられている。図-4と図-5にジャッキ選択方式と圧力制御方式のイメージを示す。ジャッキ選択方式は、作動または停止ジャッキの配置により姿勢の修正方向が制約されるため、目標方向への最適な微調整ができない。また曲線施工ではセグメントに部分的な偏荷重がかかり目開きやひび割れが生じ易い。これに対してジャッキ圧力制御方式は、個々のジャッキ圧力を制御して推力を緩やかに配分し、あらゆる方向、強さのジャッキモーメントを設定できる。これによりセグメントに偏荷重をかけず高精度にシールドの姿勢を制御できる。

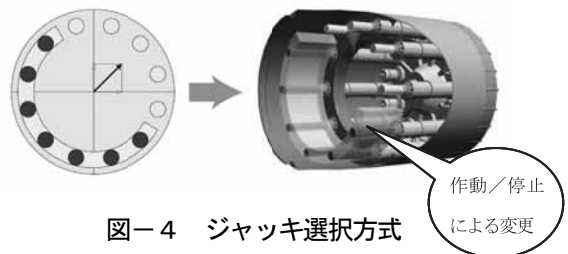


図-4 ジャッキ選択方式

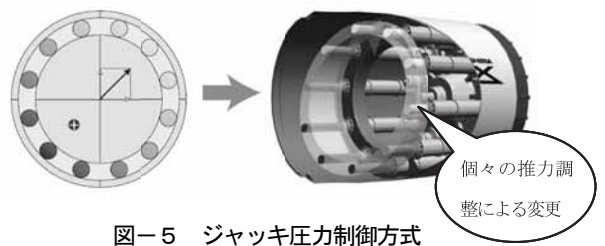


図-5 ジャッキ圧力制御方式

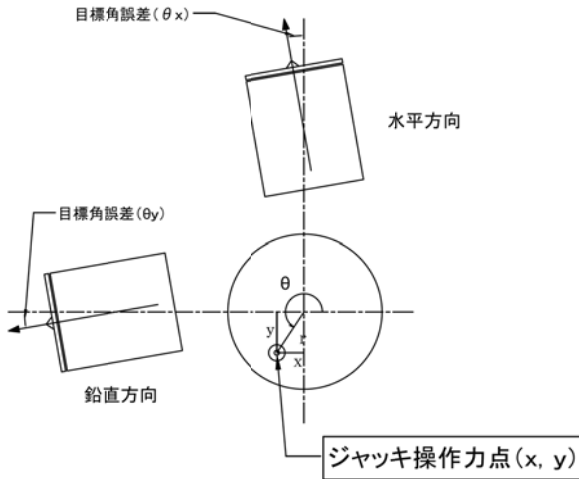


図-6 姿勢と操作力点の関係

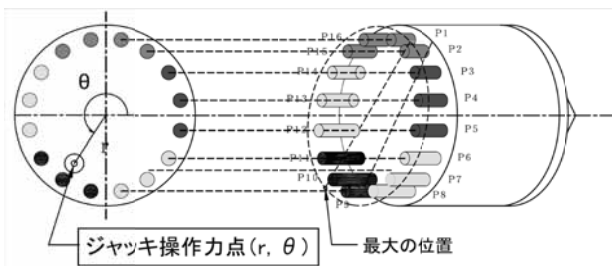


図-7 操作力点と推力配分の関係

図-6は、シールドの姿勢とジャッキの操作力点の関係を示したものである。計画方向に対する水平方向と鉛直方向の目標角偏差を $\theta_x$ 、 $\theta_y$ とすると、その偏差を修正するジャッキ操作力点 $x, y$ は次のPI(比例, 微分)制御演算式により求まる。

$$x = B_x(\theta_x + T_x \int \theta_x dt)$$

$$y = B_y(\theta_y + T_y \int \theta_y dt)$$

$B_x, B_y$  は比例定数,  $T_x, T_y$  は積分定数

図-7は、ジャッキの操作力点と推力配分(圧力制御)の関係を示したものである。上記の操作力点 $x, y$ を極座標の $r, \theta$ に変換する

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$r$ を変数とする推力勾配を定義し、その最大方向を $\theta$ とすれば、各位置に配置されているジャッキの推力が求まる。

表-1に、中央環状新宿線 SJ33 工区・SJ34 工区(発注者:首都高速道路(株), シールド外径 $\phi 11.56m$ , 泥水式シールド, ジャッキ本数:36, 13ブロック分割制御)のジャッキ稼働状況(曲線半径  $R=1,995m$  掘進時)を示す。図

図-8は最大モーメント時の圧力制御方式(実測値)とジャッキ選択方式(想定値)のジャッキ推力について比較したものである。隣り合うジャッキの推力差は、ジャッキ選択方式では1750kNになるのに対し、圧力制御方式は359kNに抑えられることがわかる。

表-1 ジャッキ稼働状況

	平均値	最大値	最小値
合成モーメント(kN・m)	29,538	54,456	63
水平モーメント(kN・m)	5,851	45,489	-38,477
鉛直モーメント(kN・m)	14,113	37,394	-43,251
推力(kN)	42,099	18,280	16,220

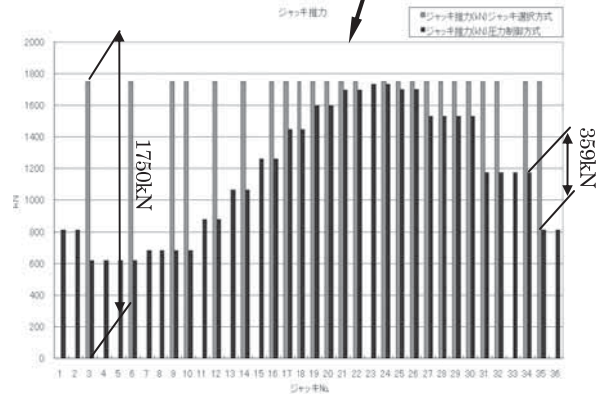


図-8 ジャッキ推力の比較

#### 4. 急曲線施工 (R=15m) への適用

急曲線施工では、シールド掘進を容易にするため曲線外側の反力確保と崩壊防止を目的に周辺地盤を改良する。しかし当工事は、地下埋設物の状況や交通に対する影響等から地上からの地盤改良を行わず、坑内補助工法(余掘部充填+同時裏込注入+セグメント固定装置)と自動方向制御「FLEX」による急曲線施工を行った。

##### 4.1 工事概要

名古屋市市中川区太平通一丁目から七丁目まで(名古屋環状線)の約1,900mの区間を $\phi 3,940mm$ の泥土圧式シールド工法にて下水道管渠(仕上り内径 $\phi 3,000mm$ )を築造する。

工事名: 篠原雨水幹線下水道築造工事

発注者: 名古屋市上下水道局

工期: 平成17年4月~平成19年3月(一次覆工)

シールド:  $\phi 3,940mm$  X 中折れ型 泥土圧式(写真-1)

総推力: 14,000kN (1,000kN×14本)

カットトルク: 595.6/895.5kN-m ( $\alpha: 9.7/14.6$ )

中折角度: 左右 $10.8^\circ$ , 上下 $1.0^\circ$  (1500kN×8本)

コピーカッタ: ストローク 250mm

裏込同時注入管: 左右2箇所

余掘充填注入孔: 前胴側部4箇所

セグメント外径: 急曲線部  $\phi 3,780mm$  (縮小径)

一般部  $\phi 3,800mm$



セグメント幅：急曲線部 300mm（スチール）  
 一般部 1,000mm（RC）  
 主桁高さ：125mm, t=14mm（スチール）  
 グラウトホール：全 8 箇所



写真-1 シールドマシン（中折れ仕様）

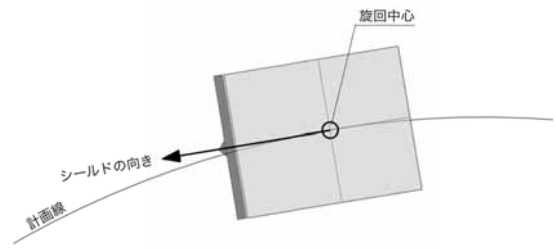


図-9 FLEXの姿勢制御

#### 4.2 適用上の課題

表-2に当工事における急曲線施工の課題をまとめた。地盤改良を行わないため、シールドジャッキの反力確保（テール直後のセグメント固定）が不十分であること、余掘部の崩壊が想定されることから、シールドの横流れや地表面の沈下が懸念された。また、急曲線では掘進管理の不良によりシールドが蛇行しやすく、その場合、セグメントの損傷や進捗の遅れ等、後工程への影響も大きい。そこで、坑内補助工法とともに FLEX による厳密な曲線掘進管理を適用した。

FLEX は、図-9に示すようにシールドの向きを計画線の方向に向ける姿勢制御である。姿勢と掘進する方向との間に一定の関係が成立しないと、いかに正確に姿勢を自動制御しても掘進精度を維持できない。曲線施工でジャッキの片押しが大きくなるとセグメントの継手部に目開きが生じ、姿勢と無関係な方向に掘進し易くなる。したがって急曲線では適切な中折れ操作とそれと連動したジャッキ制御の適用が不可欠になる。

中折れシールドは、図-10に示すように本体を前胴と後胴に分割し、中折れできる構造にしたものである。前胴がソリのような効果を発揮して曲線施工を容易にするが、挙動が複雑で管理が難しい。図-11～図-13に直線から曲線の入口部における一般的な中折れ手順を示す。前胴と後胴に旋回中心を設け、前胴の中心が BC（曲線開始点）を通過する地点より中折れを開始する（図-11）。前胴部が掘進する曲線線形に合わせて中折れを変更する（図-12）。後胴の旋回中心が BC に到達した地点で中折れを完了する（図-13）。以後、中折れを維持したまま曲線を掘進する（図-10）。この手順では、前胴と後胴の姿勢が常に計画線の方向を向いており、無理のない掘進ができるように思われるが実際にはシールドは異なる挙動を示す。そのため実施工では中折れを早めにかける等、安全側の管理を行っている。

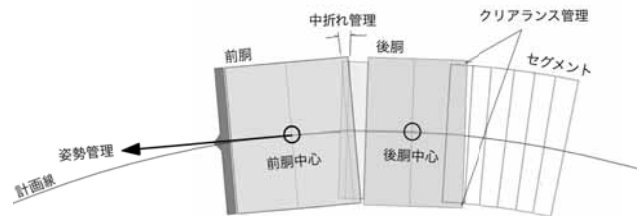


図-10 中折れシールドの管理

表-2 急曲線施工の課題

施工上の課題	問題点	FLEXにより期待される効果
(1) 線形精度の確保 (±100mm 以内)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆地盤改良を行わないことによる影響 シールドジャッキの反力確保の不足、余掘部の崩壊が想定される。そのため、地表面沈下やシールド機の横流れ現象が懸念される。</li> <li>◆シールド姿勢制御の不良による蛇行発生 急曲線では姿勢の変化量が大きいため、掘進管理の不良により掘進精度が大きく低下するおそれがある</li> <li>◆中折れ管理の不良による曲線入口、出口部の蛇行発生 中折れ管理が困難なため、曲線入口、出口における掘進精度が低下し、テールクリアランスの確保ができなくなる シールドメーカー提供の中折れ手順は実施工に基づく適切な修正を必要とするが急曲線の施工経験者がいないため困難である。また、適切な修正基準もない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇シールド姿勢を高精度に自動制御するため、制御不良による蛇行を抑えることができる。</li> <li>◇適切な中折れ管理とジャッキの連動制御により曲線入口、出口部の蛇行を抑え、クリアランスを確保することができる。</li> <li>◇施工未経験者でも急曲線掘進管理を適切に行うことができる。</li> </ul>
(2) 覆工品質の確保 (セグメント損傷防止)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆過大なジャッキ推力によるセグメントの損傷 極端な方向修正、ジャッキの片押しを行うと過大な荷重がセグメントにかかり損傷が懸念される。</li> <li>◆テールクリアランスの不足によるセグメントの損傷 シールド機とセグメントの隙間（テールクリアランス）が不足すると拘束力によりセグメントにひび割れが発生する。また、組立形状が変形し、同様にセグメントにひび割れが発生する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇全ジャッキ推進による圧力制御によりセグメントへの偏荷重を抑え、ジャッキの片押し制限により目開き、ひび割れを抑えることができる。</li> <li>◇クリアランス予測管理とセグメント割付管理によりテールクリアランスを適切に確保することができる。</li> </ul>
(3) 進捗の確保 (曲線部日進 10R)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆セグメント組立トラブルによる工程遅延 シールド機とセグメントの隙間（テールクリアランス）が不足するとセグメントの組立に支障が生じ、進捗が確保できない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇上記の適用効果により組立トラブルを防止することができる。</li> </ul>

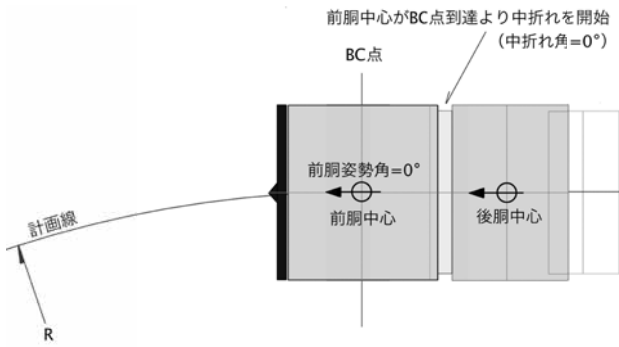


図-1-1 手順1 (中折れ開始)

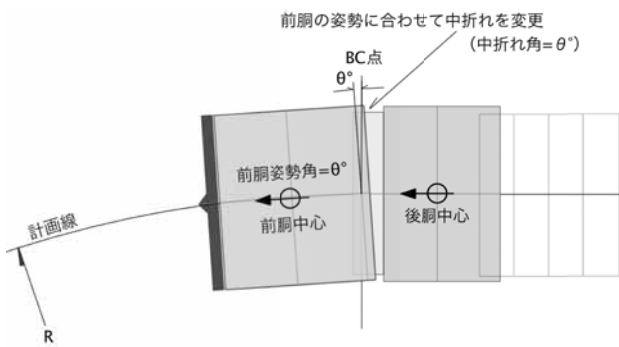


図-1-2 手順2 (中折れ変更)

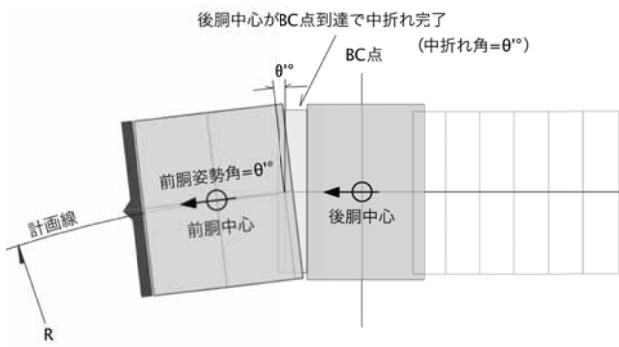


図-1-3 手順3 (中折れ完了)

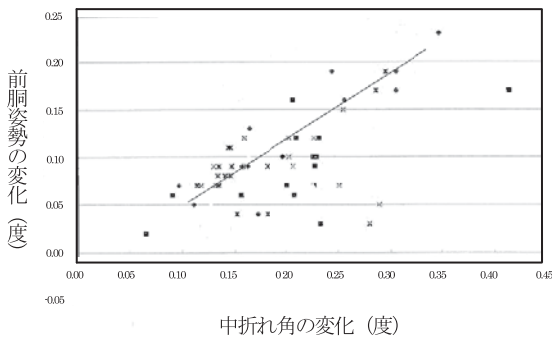


図-1-4 中折れと前胸姿勢の変化の関係

表-3 線形比較データ表

元設計の線形			
線形	線分長 (m)	始点曲率半径 (m)	終点曲率半径 (m)
直前の直線長	23.595		
単曲線	22.742	15.0	15.0
直後の直線長	984.050		
緩和曲線を挿入した線形			
直前の直線長	20.759		
緩和曲線	5.679		14.910
単曲線	16.927	14.910	14.910
緩和曲線	5.679	14.910	
直後の直線長	981.214		

### 4.3 対策

前項の図-1-1において、前胴部はいきなり規定の急曲線を掘進することになるが、この時点では中折れがほとんどかかっていないためジャッキの片押しは当然強くなる。図-1-4は、前項の手順で施工した中折れシールドの中折れ角と前胴の姿勢変化の関係を示したものである。これによると中折れ角に対する前胴の姿勢変化は60%に過ぎず、残りは後胴側が変化する。このことからシールドは中折れに応じた曲線線形で掘進しないとジャッキの片押しが大きくなり、セグメントの目開きが生じ易くなると考えられる。そこで中折れを変更する掘進区間に緩和曲線を挿入して中折れと掘進線形を一致させ、その上でFLEXによるシールド姿勢制御を適用した。

### 4.4 施工結果

#### (1) 挿入した緩和曲線

緩和曲線(クロソイド曲線)の設定は、曲線長を1機長(5.679m)とし、元設計との差異となるシフト量を90mm(発注者の許容値100mm以下)とした。表-3と図-1-5に元設計の線形と緩和曲線を挿入した線形を示し、また表-4と図-1-6にセグメントの割付を示す。緩和曲線部に単曲線部(R14.91m)のセグメントをS:T=5:10で振り分けた。急曲線の出口部はシールドの偏荷重がかかり易くひび割れや欠け、目開き発生の恐れがある。また急曲線で使用する縮小径のセグメントから通常のRCセグメントに戻す時、テールシール圧が上昇し、RCセグメントを破損させた事例があることから、出口部にSTセグメントを4リング使用し、曲線から直線への緩衝とした。

図-1-7は曲線入口部における元線形と緩和曲線を挿入した線形の中折れ計画を比較したものである。緩和曲線を挿入した線形は中折れ角度の変化が緩やかになり片押しを軽減する効果が期待できる。

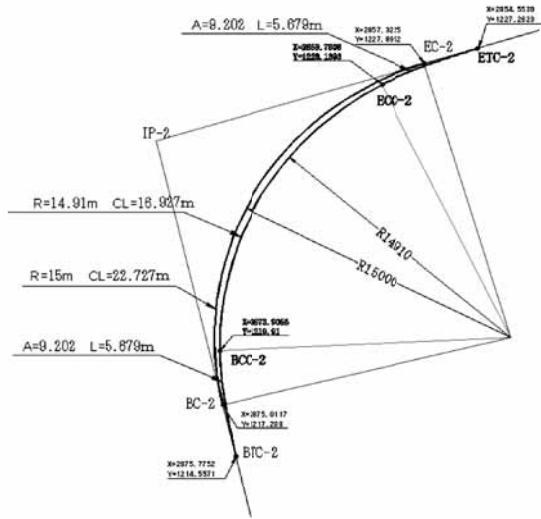


図-15 線形比較図

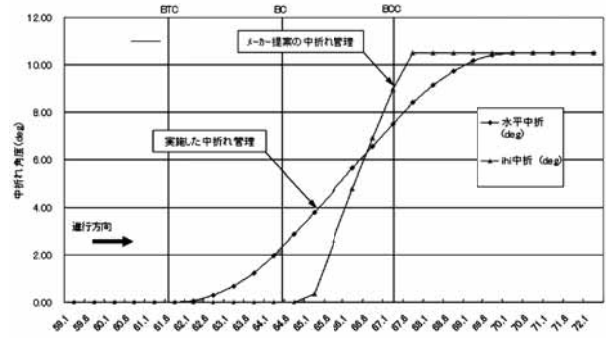


図-17 中折れの比較

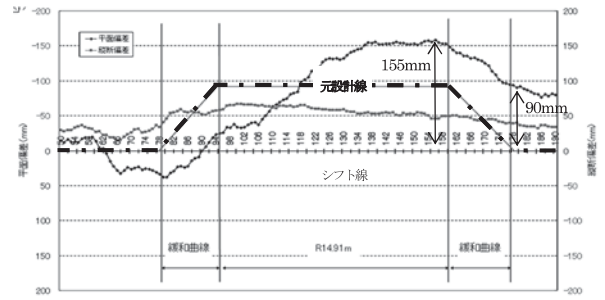


図-18 掘進精度の実績

表-14 セグメント割付表

種類	当初計画				単距離
	RC セグメント	ST セグメント			
規格	C29	S54 特			18.000
幅	1.000	1.000	0.300	0.260	
記号	S	S	S	TT80	
直線	18				18.000
N4 人孔 開口補強		4	4		5.200
IP2			7	79	22.640
直線	916	4	4		921.200
合計	934	8	15	79	
緩和曲線挿入					
直線	18				18.000
N4 人孔 開口補強		2			2.000
緩和曲線 (入口)		2	5	10	5.800
単曲線			5	59	16.840
緩和曲線 (出口)		2	5	10	6.100
直線	916	2			918.000
合計	934	8	15	79	

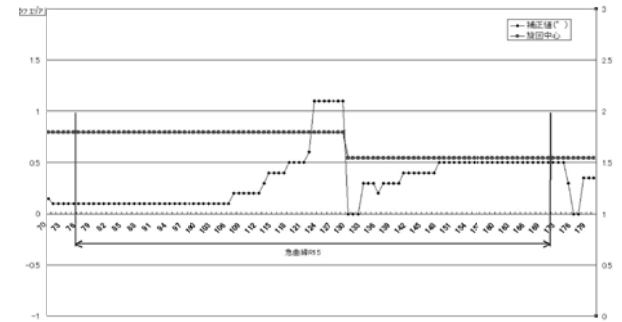


図-19 水平の姿勢管理値

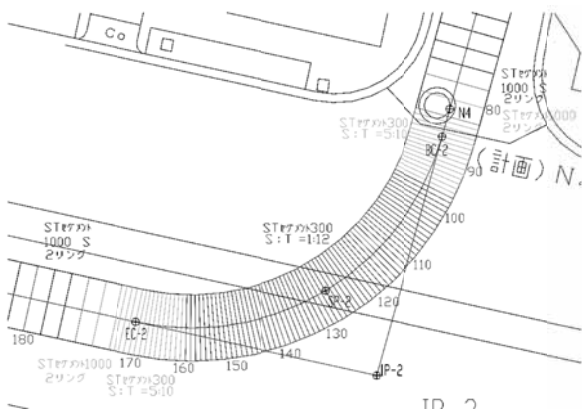


図-16 セグメント割付図

## (2) 掘進結果

図-18に急曲線区間の掘進精度を示す。平面線形は、緩和曲線を挿入した線形(90mm内側にシフト)に対して最大で155mm外側に偏差が生じたが元設計の線形に対しては最大90mmとなり、管理値内に収めることが出来た。図-19に水平の姿勢管理値(ジャイロ目標の補正值と前胴の旋回中心の位置)の推移を示す。平面線形がカーブの外側に推移した原因は旋回中心の位置(当初先端より0.8m、130リング付近より0.55mに修正)の不適合(曲げのタイミングが遅い)であり、早期に測量結果をフィードバックし、最適化していれば偏差を抑えることができた。

## (3) 覆工品質

図-20に目標姿勢(ジャイロ、ピッチング管理値)との偏差を示す。入口部より曲線内の区間は、旋回中心を変更した130リング付近を除きほぼ±0.05度以内を維持した。出口部において最大0.2度の偏差が生じたが、ジャッキの過度な片押しを生じさせないように姿勢の修



正動作を制限した結果である。

図-21にこのときのジャッキモーメントを示す。入口部より曲線内の区間は、水平のジャッキモーメントは1000~1500kN-mを推移し、片押しを制限できたことがわかる。出口部において姿勢の修正動作が大きくなり若干大きなモーメントが生じたが目開き等の問題は生じなかった。テールクリアランスも十分に確保でき、セグメントがシールドテール部で拘束されることもなく、施工後の曲線部全区間の検査においても掘進の影響によるセグメントの損傷、漏水は全く見られなかった。

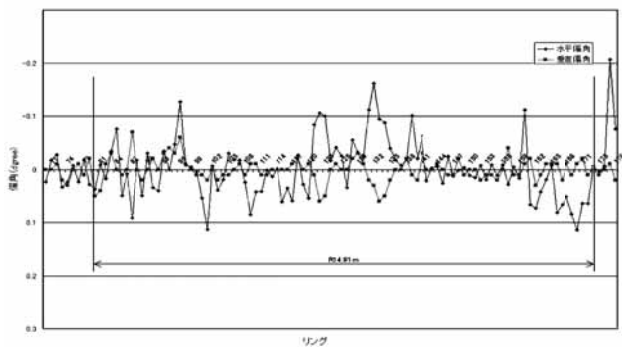


図-20 目標姿勢との偏差

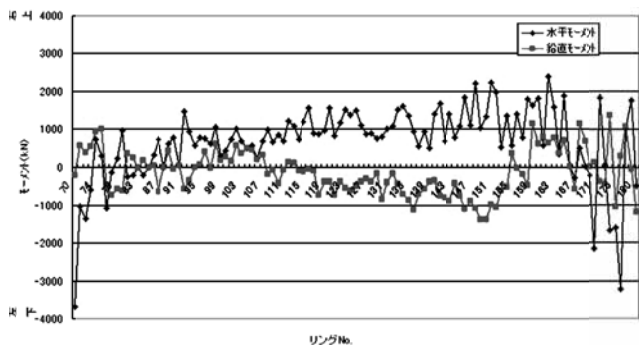


図-21 ジャッキモーメント

当工事は、名古屋市緑区大高町山之田付近の緑地立坑より発進し、途中坊主山立坑（中間立坑）を経由して大高町殿山付近の殿山立坑に到る工事延長 926m のシールドトンネルを建設する。

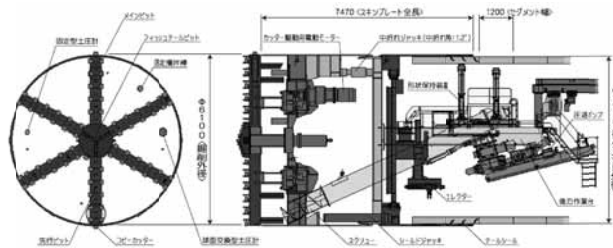


図-22 シールドマシン図

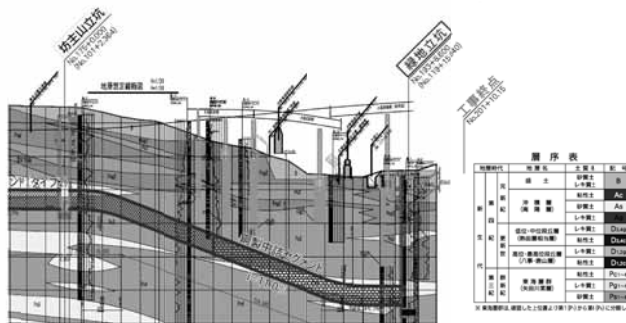


図-23 地質縦断面図

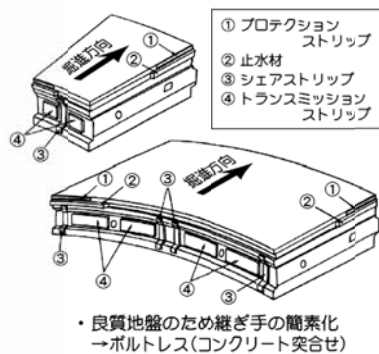


図-24 RCほぞ付きセグメント

## 5. 高水圧急勾配施工への適用

### 5.1 概要

#### (1) 工事概要

工事名：平成 20 年度 302 号緑地共同溝工事  
 発注者：国土交通省中部地方整備局愛知県道事務所  
 工事場所：愛知県名古屋市緑区大高町  
 工期：平成 21 年 3 月 3 日～平成 24 年 3 月 16 日  
 シールド外径：φ6,100mm (セグメント外径：5,950mm)  
 シールド延長：L=926m (R=200m)  
 工法：泥土圧シールド (図-22)  
 シールド勾配：上り最大 11.034%，最小縦断 R=420m  
 土かぶり：16.4m～34.5m  
 発進立坑：外径φ18m×深さ 44.5m，ニューマチックケーソン工法

#### (2) 地質概要

地形的に工区全体は概ね有松丘陵上に位置するが、緑地立坑位置となる大高地区は有松丘陵端部の沖積低地に相当する。当工区のシールド掘削対象地盤は、新第三紀層（東海層群、矢田川累層）のシルト、砂、砂礫が互層に分布する地層である。シルト層のN値は14以上を示し深度に比例して値を増す固結状態である。砂層、砂礫層はN値25以上で中位～非常に密な状況で含まれる最大礫径は30mm以下と考えられる。シールド通過土質は、0～140mは固結シルト層と礫混じり砂層の互層、140～320mは全断面固結シルト層、320m～600mは砂混じりシルト層と砂層の互層、600～840mは全断面固結シルト層、840～932mは全断面シルト混じり砂である。地下水位はGL-3.3m、最大土かぶりは34.5mである。(図-23)



## 5.2 適用上の課題

当工事は、高水圧（シールド中心部 0.34Mpa）下において 11.034% の上り急勾配を泥土圧シールド工法にて施工する。また、内面平滑性の向上と露出する金属を無くすことを目的に RC ほぞ付きセグメント（リング継手部に凸凹のほぞを設け、そのかみ合わせによりセグメントリングを縦断方向に連続させる構造、図-24）を採用している。このような条件下では、推力の偏りによるセグメントの目開きによりセグメント本体のひび割れ、継手部からの漏水が懸念された。特に勾配変化部における止水性の向上は重要な課題であり、高いシールド縦断掘進精度、テールクリアランス管理精度が要求された。なお、発進から急勾配の中間付近までは鋼製中詰セグメントを使用している。

## 5.3 対策

以下の計測管理システムを追加装備して対応した。

### (1) テールクリアランス計測管理システム

テールクリアランスが不足するとシールドテール部にセグメントが拘束され組立形状の変形やひび割れが生じる。そこでシールド内の3カ所（上、右下、左下）に写真-2に示すクリアランス測定装置を装備し、テールクリアランスを自動計測するようにした。



写真-2 クリアランス測定装置

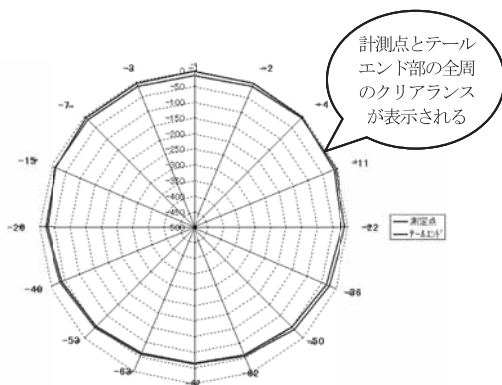


図-25 テールクリアランスの予測管理グラフ

図-25にテールクリアランスの予測管理グラフを示す。3点のクリアランス計測値からセグメント組立中心と組立形状（楕円に近似）を算出し、全周のテールクリアランスを予測する。さらに3点のジャッキストローク値からテールエンド部の組立セグメント位置を割り出し、実際に問題となるテールエンド部におけるクリアランスを把握できるようにした。また組立中心のリング推移をグラフ化し、今後の変化を予測できるようにした。

### (2) セグメント組立割付シミュレーションシステム

セグメントは、全方向の幅を均一にした直線用（S）と幅の異なる曲線用（T）があり、線形に合わせて寸法、使用数量をあらかじめ計画する。実施工ではシールドの掘進線形に合わせて組立角度、割付順序を変更しなければならないが予測計算が複雑で適切な管理が難しい。そのためテールクリアランスを十分に確保できない場合が生じる。そこで組立セグメントの位置と方向をシミュレーションするシステム（図-26）を装備し、常に最適なセグメントの組立割付管理を行えるようにした。

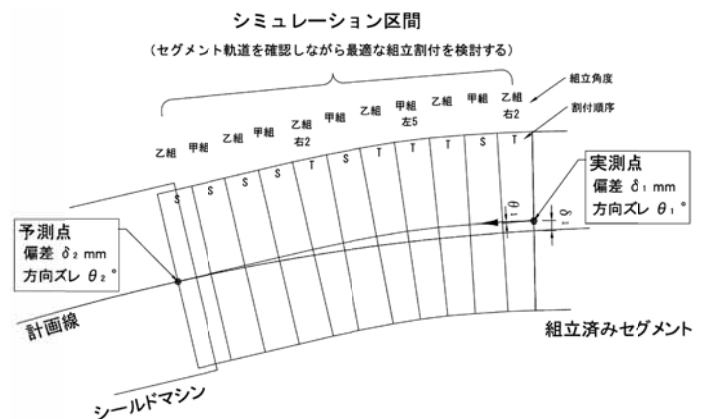


図-26 セグメント割付シミュレーション

## 5.4 施工結果

### (1) 掘進および姿勢制御の精度

自動測量システムによりシールド縦断位置をリアルタイムに計測し、目標姿勢を迅速に修正した。その結果、勾配変化部における平面、縦断方向の蛇行を抑え、姿勢制御も高精度（標準偏差：水平 0.026°、鉛直 0.016°）に行うことができた。

### (2) ジャッキモーメント

図-27に勾配変化部における鉛直方向のジャッキモーメントを示す。勾配変化部において最大値 8600kN-m を示したが、11.034%の急勾配部ではバラツキが小さくなり、片押しを制限して掘進することができた。シールドマシンの重量バランスも良く、平均値はほぼ 0

であった。その結果、懸念された勾配変化部におけるセグメントの目開き、漏水の発生を抑えることができた。なお、8600kN-mはジャッキ選択方式に換算すると2本のジャッキを停止させたときに発生する最大モーメント(8550 kN-m=推力 1500 kN×2本×取付半径 2.85m)と同程度である。

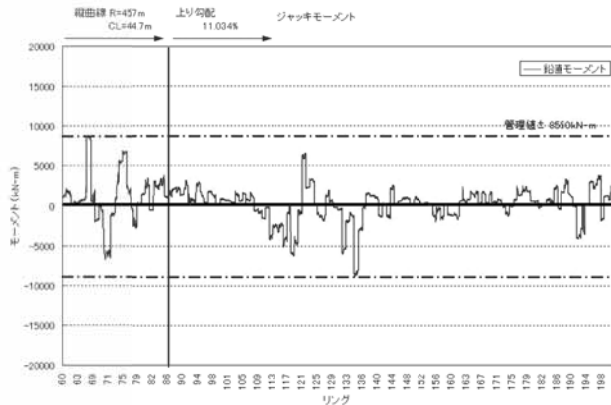


図-27 勾配変化部のジャッキモーメント

### (3) テールクリアランス

図-28に勾配変化部のセグメント組立中心を示す。テールクリアランスの予測管理とセグメント割付シミュレーションによりテールクリアランスを適切に管理した。RCほぞ付きセグメントの組立形状は、全般に上下方向に潰れる傾向が見られたが十分なテールクリアランスが確保でき、テール部での拘束を起因とするセグメントのひび割れ、漏水等は発生しなかった。

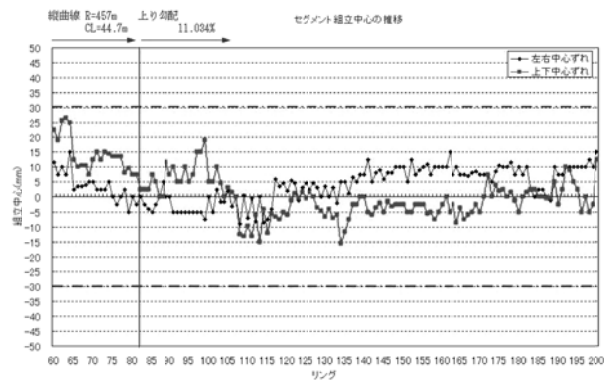


図-28 勾配変化部のセグメント組立中心

## 6. おわりに

我が社のシールド自動方向制御技術は、20年間現場で運用され実用化の域に達した。高水圧、大口径、急曲線、急勾配の経験を通じて、ほぼすべての工事に問題なく適用できるようになった。ここまで本格的に実用化された自動方向制御システムは他にないと考える。現在は掘進とセグメント組立を同時に行う「ロスゼロ工法」へと発展し、首都高速中央環状新宿線(φ11.56m, L=750m×2)、同品川線(φ12.55m, L=8km)に採用され、大口径長距離シールドの高速施工に貢献している。さらに本システムの適用性、信頼性を高め、技術力向上と発展に努めていく所存である。

### 【参考文献】

- 1) 西明良：圧力制御推進方式によるシールド大断面、大深度工事の施工，平成7年度建設機械と施工法シンポジウム論文集，日本建設機械化協会
- 2) 西明良：大口径、中折れシールドの自動方向制御，プロジェクトリサーチ1999論文集，プロジェクトリサーチ

**Summary** FLEX, an automatic shield direction control system, has been in operation for more than 20 years. As of July 2011, the system has been applied in 41 cases and the distance of tunnels constructed using the system has reached 45 km. The system has been improved while applied under severe conditions including sharp curves and large cross section. It is now applicable to almost all types of shield tunneling. FLEX is an effective discriminatory technique in the bidding based on proposal evaluation. It helps accelerate the construction of shield tunnels of large cross section as a central technique in the “Loss-Zero Method” that enables simultaneous implementation of excavation and segmental ring assembly. This paper describes the process of system development and outlines the latest system. Case studies of system implementation are also presented: work for a main rainwater drain with the system adopted in construction in a sharp curve and work for a utility tunnel in a green zone with the system adopted in construction on a steep slope.

**Key Words :** Shield, Automation, Gyrocompass, Sharp Curve, Steep Grade