

# ハニカムセグメントを用いた急速施工法の開発

畑山栄一\* 三澤孝史\* 荒川賢治\*\*  
奥野三郎\*\*\* 桜井省三\*\*\*\* 古賀 滋\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

最近のシールド工事では、都市部の過密化による立坑の用地確保の問題やトンネルの土被りが深くなることによる立坑築造費のコストアップなどを理由に、長距離で計画される工事例が増えている。

これまでのシールド工事は延長が1km程度で計画されることが多く、この数倍の距離を一度に施工すると、立坑とシールド機の台数を減らすことができ、工事費の低減を図ることができる。しかし、既存のシールド工法では施工期間が長くなり、工事費の大幅な低減が難しい。このため、シールドトンネルの長距離化を現実のものとするには、急速施工法の開発が必要である。

筆者らは急速施工法として、六角形のRCセグメント（以下、ハニカムセグメントと呼ぶ）を用いて掘進とセグメント組立を同時に行う方式に着目して大幅な工期短縮を図る施工法の開発に取り組んだ。この同時施工法の開発では、シールド機やこれに付随する機械設備の開発に留まらず、トンネルの覆工体となるハニカムセグメントの開発と実用化が課題になる。ハニカムセグメントについては、すでに従来のセグメントにない種々の特長を活用して施工実績を重ねている。

以上を背景に、今回、全自動組立方式と半自動組立方式の同時施工法を開発して現場で実証施工を行い、実用化の見通しを得たので以下に報告する。

## 2. 同時施工法の概要

### 2.1 開発目標と適用条件

エレクタ搭載型のシールド機を用いて同時施工を行い、通常の2倍の施工速度を確保することを開発目標とした。適用条件を以下に示す。

- i. 同時施工法では従来の逐次施工法に比べてシールド機械設備がやや割高となるため、施工距離は工期短縮に伴う経済効果が顕著となる2~3km以上とする
- ii. トンネル仕上がり内径が約3.0m以下の小口径トンネルではRCセグメントのハンドリングが難しく、適用トンネル径は中~大口径とする

### 2.2 ハニカムセグメントの特長と組立方法

ハニカムセグメントを図-1に、組立方法を図-2に、ハニカムセグメントの特長を以下に示す。

- i. 覆工内面が平滑で、継手金物の防食や防錆処理が不要で二次覆工省略に適している
- ii. 継手面に取り付けた凹凸形状のプラグ・ソケットのガイド機能により、精度良く組立てできる
- iii. 継手ボルトの本数が少なく、事前にセグメント内にセットされるため、組立時間が短縮される
- iv. 組立後すぐにシールドジャッキの载荷が可能で、掘進とセグメント組立の同時施工に適している

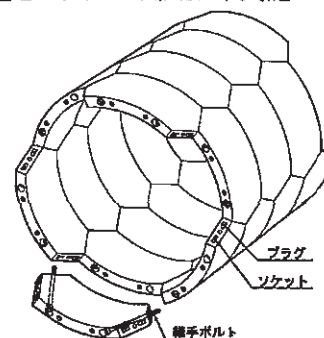


図-1 ハニカムセグメント

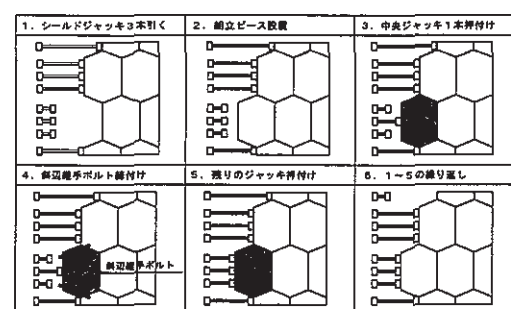


図-2 セグメント組立方法

### 2.3 シールド機の開発

経済的に成り立つ施工距離や適用するトンネル径に対応した同時施工の方式を考えるために、セグメントを全自動で組み立てる方式と、セグメントの供給・位置決めを作業員が行い、ボルトを自動締結する半自動で組み立てる方式の同時施工対応型シールド機を開発した。

\*機電研究室 \*\*技術開発部 \*\*\*本社土木部 \*\*\*\*名古屋支店土木部 \*\*\*\*\*関西支社土木部

### 3. 半自動組立方式による実証施工

#### 3.1 適用工事の概要

半自動組立方式の同時施工対応型シールド機を下記の現場に適用した。

工事名：安威川流域下水道 摂津高槻雨水汚水幹線  
(第5工区) 下水管渠築造工事

発注者：大阪府北部流域下水道事務所

施工者：奥村組，東急建設，不動建設共同企業体

工期：平成9年10月～同12年8月

場所：高槻市三箇牧1丁目～唐崎南2丁目

工事内容：泥土圧シールド工法

L=1099.5m，曲線半径 250m，土被り 4.8～5.8m，  
仕上り内径 3500mm，トンネル外径 3900mm，汚水管布  
設工φ700mm，L=1102.2m

#### 3.2 地質概要

淀川氾濫源の低湿地帯で、地下水位はGL-2mである。  
掘削断面の土質はN値 20～30 の沖積砂層、掘削部上部  
はN値2～4程度の非常に軟弱な沖積粘土層である。

#### 3.3 セグメント

セグメントは外径 3900mm、桁厚 200mm、幅 1000mm、  
分割数6分割のハニカムセグメントを使用した。

#### 3.4 同時施工対応型シールド機

##### a. シールド機

シールド機の基本構造を図-3に、特徴を以下に示す。

- i. セグメントの供給、把持、旋回、位置決めは作業  
者が遠隔操作で行う
- ii. セグメントの継手ボルトは自動締結する
- iii. 掘進にともなってエレクタも移動することから、  
掘進速度と同じ速度でエレクタ把持部を後方に  
移動し、組み付けるセグメントを見かけ上静止  
状態に保つ掘進同調機構をエレクタに組み込む
- iv. シールド機の方向制御は中折れジャッキで行う

##### b. セグメント組立設備

###### (a) セグメント搬送装置

シールド機のスクリュコンベア下部に土砂圧送ポンプ  
を取り付けることから、エレクタへのセグメントの搬送

のスペースが狭くなる。従来のホイストを用いる方法だ  
けではセグメントの搬送が難しいため、ホイストとセグ  
メントキャリアの組合わせとした。セグメントキャリア  
はセグメントのストック（3ピース）とエレクタへの搬  
送機能を備えた装置である。

###### (b) エレクタ

基本構造を図-4に、仕様を表-1に示す。従来の旋  
回、伸縮、摺動、セグメント把持の機構に加え、掘進同  
調機構と自動ボルト締結装置を組込んだ。セグメントの  
把持は、セグメントに取付けたつば付きの把持ピンを把  
持部のミノに差込み、4本のサポートジャッキを張出し  
て行く。また、位置決め時には、このサポートジャッキ  
のストロークを調整して、すでに組立てたセグメントと  
の姿勢（ピッチングやローリング）を調整する。

###### (c) 掘進同調機構

エレクタの旋回フレームに掘進同調機構を取り付けた。  
左右に取り付けた2本の掘進同調ジャッキを伸縮するこ  
とで掘進同調フレーム内のガイドロッドを軸に把持した  
セグメントを切羽側および坑口側に移動する。掘進同調  
時はシールドジャッキの伸び速度をセンサで検出し、同  
じ速度で把持したセグメントを坑口側へ移動する。

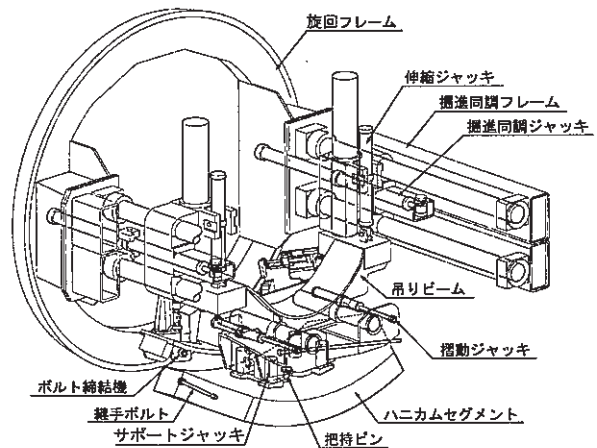


図-4 エレクタの基本構造

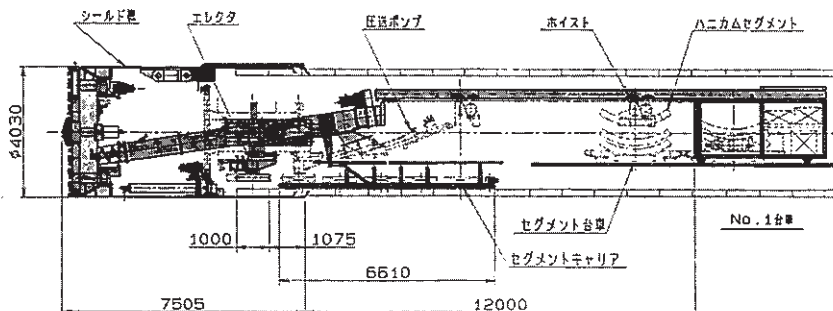


図-3 同時施工対応型シールド機（半自動組立方式）

表-1 エレクタの仕様

エレクタ	型 式	リングギヤ式
	最大取り扱重量	10kN
	旋 回 速 度	0.1~1 min <sup>-1</sup>
	伸 縮 ジ ャ ッ キ	48kN×600mm×2本
	摺 動 ジ ャ ッ キ	18kN×350mm×2本
	サ ポ ー ト ジ ャ ッ キ	23kN×60mm×4本
	掘 進 同 調 ジ ャ ッ キ	21kN×1400mm×2本
搬送装置	ボルト締結機	ボルト径:M20×2台 締結トルク:200N・m
	搬送ホイスト	吊り上げ荷重:15kN
	セグメントキャリア	搭載荷重30kN (セグメント3ピース) 送り速度:11.5 m/min

(d)自動ボルト締結装置

セグメントを位置決めした後、ボルト締結を開始すると、自動で締結機の揺動フレームがセグメントに密着し、継手ボルトと締結機の軸心を合わせ、ボルトを締結する。ボルトの締結トルクが所定の値に達すると、自動で締結を終了し、締結機がトンネル内空側に退避する。

(e) シールドジャッキのブロック制御

同時施工ではセグメント組立位置のシールドジャッキが使用できないため、シールド機に回転モーメントが発生して姿勢制御に悪影響を及ぼす。このため、セグメント組立位置の反対側のシールドジャッキを同数だけ無負荷追従し、その他のジャッキを全て載荷することで回転モーメントの発生をなくした。シールドジャッキが18本、セグメントが6分割であることから、シールドジャッキ3本を1つのブロックとし、各ブロックごとにシールドジャッキの伸縮操作が可能な油圧回路を組み込んだ。同時施工では、セグメントの組立箇所を作業者が選択すると、各ブロックごとにシールドジャッキの押し引き操作や油圧回路のバルブ切り替えを自動で行う。

c. 施工手順

セグメントの組立が可能な位置まで掘進すると、組立箇所のシールドジャッキを引く。エレクタを無線で操作してセグメントの把持、旋回、位置決めを行い、ボルト

を自動締結して、次のセグメントを受け取る作業に移る。セグメント組立箇所のシールドジャッキを押付け、次のセグメント組立て箇所のシールドジャッキを引く。掘進中にこの作業を繰り返し、同時施工を続ける。

3.5 施工結果

a. エレクタの基本性能

狭隘な作業空間での安全性の確保および掘進中の手動操作によるセグメントの不具合のない組立が課題であった。前者については、セグメントの把持・位置決めを遠隔操作化やボルト締結の自動化でシールド機内に作業者が入る必要がなく、エレクタ後方で操作が可能であり、安全性が確保できた。後者については、掘進中のシールド機の姿勢変動が少ないこと、トンネル軸方向から既設セグメントの斜辺をガイドに挿入して位置決めすることから、特に問題なく組立できた。

b. セグメント組立時間

セグメント組立時間を表-2に示す。これはセグメント2リング分についての各組立ピース毎の詳細をまとめたもので、1ピースの平均組立時間は約4.4分である。このうちセグメントの把持、セグメントの段差合わせ、およびボルト締結作業で約半分の時間を占めている。各ピースの組立時間のばらつきは、これらの作業時間に幅があることと組立位置の違いで旋回時間に差が生じるためである。なお、全リングにおける平均組立時間は1リング30分である。

c. 施工サイクルタイムと日進量の比較

1リング(6ピース)の施工サイクルタイムを表-3に示す。同時施工では逐次施工に比べてサイクルタイムが30分短くなり、約半分の時間で施工できた。昼夜施工における最大日進量は18m/日で、逐次施工の最大日進量に比べて1.5倍以上の実績が得られた。なお、今回の施工では、セグメントのストック設備や加泥注入などの後方設備について逐次施工を条件に1日最大18リングで計画しており、後方設備を充実させれば従来の2倍の日進量を確保することが可能と推定できた。

表-2 セグメント組立時間

項 目	サイクルタイム										平均
	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	4月21日	
日 付	214.0R	214.0R	214.0R	214.5R	214.5R	214.5R	215R	215R	215R	215R	
リング数											
セグメント位置 (坑口から切羽を望む)											
	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間	実時間
	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒	秒
エレクタ一定位置	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
同調後退・セグメント把持	終了	25	30	20	30	15	55	30	60	90	39
同調前進	終了	15	20	10	40	40	95	45	65	40	41
旋回	開始	30	2	20	0	5	25	5	5	5	11
旋回	終了	5	8	30	0	15	15	5	5	10	10
組位置決め	終了	15	5	15	5	15	5	15	5	35	13
セグメント段差合わせ	終了	45	45	55	75	45	65	40	70	60	56
ボルト締結	終了	50	50	35	50	45	55	50	35	50	47
サポートジャッキ引き込み	終了	5	5	5	25	5	10	5	10	10	9
セグメント把持ピン解除	終了	15	15	15	5	15	5	20	30	25	16
エレクタ一定位置へ移動	終了	10	20	20	10	30	40	20	10	35	22
計		215	200	225	240	230	370	235	295	360	263

表-3 施工サイクルタイムの比較

	掘削時間	組立時間	サイクルタイム	比
逐次施工	33分	30分	63分	1
同時施工	33分	(30分)	33分	0.52

セグメント幅: 1000mm      掘進速度 3cm/min

d. シールド機の方向制御

シールド機前胴部にジャイロを搭載してシールド機の姿勢を計測するとともに、坑内に自動追尾式のトータルステーションを設置して計画線形に対するシールド機のずれをリアルタイムに測量した。

同時施工ではシールドジャッキのパターン選択による方向修正ができないため、測量結果をもとに中折れジャッキで前胴を屈曲させ、前胴部側部に生じる地盤反力によって方向を制御した。シールド機のピッチングと鉛直変位を図-5に示す。455~463 リング、470~480 リングが逐次施工、463~470 リングが同時施工による結果で、方向制御は全て中折れ量を制御する方式で行った。シールド機の水平変位についても同様の結果が得られ、全施工を通しての計画線形に対する鉛直・水平のずれは±30mm以内に収めることができた。

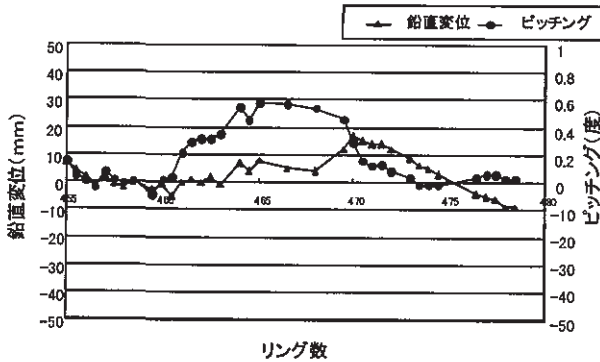


図-5 シールド機のピッチングと鉛直変位

4. 全自動組立方式による実証施工

4.1 適用工事の概要

セグメントの搬送からボルト締結、および組立時のシールドジャッキの伸縮動作をすべて自動化した同時施工対応型シールド機を下記の現場に適用した。

工事名: 桑名地区洞道新設工事 (第3工区)

発注者: 中部電力株式会社中央送変電建設所

施工者: 奥村組・フジタ・竹中土木・徳倉

ヒメノ共同企業体

工期: 平成9年7月~同12年5月

場所: 三重県桑名市大字蓮花寺字岩坂 1641

~ 同 西別所字駒廣 2119

工事内容: 泥土圧シールド工法

L=1386m、曲線半径 80m、300m、600m 仕上がり内径 4200mm、4120mm (盛り土部 L=330m)、トンネル外径 4680mm、RCセグメント (ハニカム、平板形)

4.2 地質概要

掘進対象土質は第三紀鮮新世東海層群と呼ばれるN値50以上の非常に硬質な砂質土層、および固結粘性土層と砂礫層の互層で、砂礫層は想定最大礫径100mm程度である (図-6参照)。

4.3 セグメント

発進・到達の急曲線部を除く一般部 (L=1,257m) でハニカムセグメントを使用した。セグメントは外径4680mm、桁厚240mm (一部盛り土区間は280mm)、幅1200mm、分割数は6分割である。

4.4 同時施工対応型シールド機

a. シールド機

シールド機の基本構造を図-7に、特徴を以下に示す。

- i. 1リング分のセグメントをセグメント自動供給装置にストックし、セグメント自動組立装置 (以下、エレクタ) に上部から自動供給する

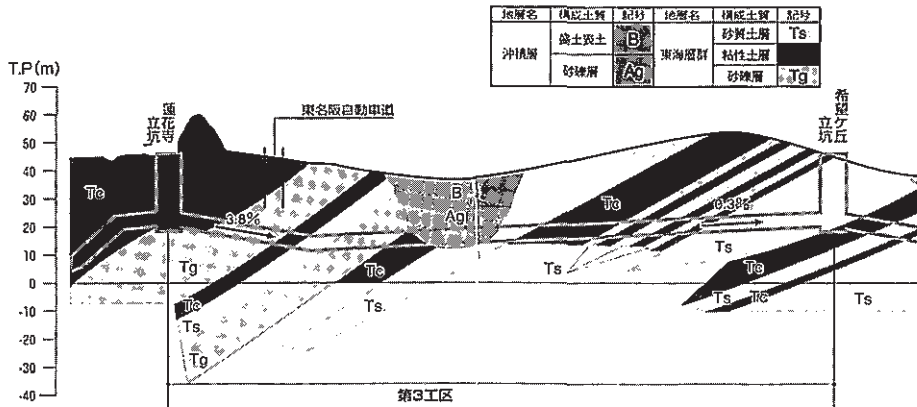


図-6 地質縦断



- ii. ハニカムセグメント用に開発したセグメント自動組立装置<sup>1)</sup>(石川島播磨重工業と共同開発)を用いて、セグメントの把持、旋回移動、位置決め、ボルト締結を自動で行う
  - iii. エレクタに掘進同調機構を組み込む
  - vi. シールド機の姿勢制御は中折れジャッキで行う
- b. セグメント自動供給装置
- セグメントを搬送コンベアに載せるターンリフター、1リング分(6ピース)のセグメントのストックとセグメントをエレクタに送る搬送コンベヤ、エレクタにセグメントを供給する受け渡し装置で構成される。
- c. セグメント自動組立装置

同時施工に対応するために掘進同調機構を旋回フレームに取り付けた。また、固定式のボルト締結機をセグメント把持部の切羽側に2台取り付けた。本エレクタの特徴はエレクタ把持部に取り付けた2本のガイドバーとセグメント斜辺部を利用して既設セグメントの内面および斜辺部に倣わせてはめ込む力制御を用いたことであり、同時施工でのセグメント組立中のシールド機の姿勢変動を力制御で吸収する(写真-1、表-4参照)。

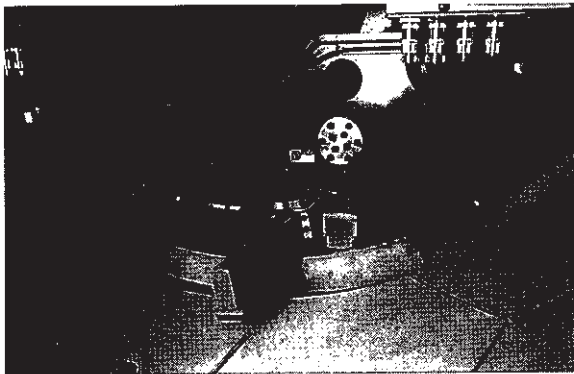


写真-1 セグメント自動組立装置

表-4 セグメント自動組立装置の仕様

自動組立装置	型 式	リングギヤ式
	最大取り扱い重量	20kN
	旋 回 速 度	0~2 min <sup>-1</sup>
	伸 縮 ジャ ッ キ	134kN×680mm×2本
	摺 動 ジャ ッ キ	41kN×415mm×2本
	微 調 ジャ ッ キ	83kN×55mm×4本
掘進同調ジャッキ	65kN×500mm×2本	
ボルト締結機	セグメント桁厚 240mm ボルト径:M22×2台 締結トルク:270N・m	
	セグメント桁厚 280mm ボルト径:M24×2台 締結トルク:350N・m	
供給装置	上部供給方式	
	吊り上げ速度	9m/min
	反転速度	2min <sup>-1</sup>
	セグメント送り速度	12m/min

#### 4.5 施工手順

セグメント台車で坑内に運搬したセグメントをターンリフターで搬送コンベアに載せる。掘進を開始すると、組立位置のシールドジャッキを引くと同時に搬送コンベア上のセグメントをエレクタに自動供給する。次にエレクタで把持したセグメントを所定の組立位置まで旋回移動し、既設セグメントとの位置決めを行う。その後、シールドジャッキ1本を組立ピースに押し付け、トンネル軸方向からセグメントのボルト締結を行い、最後に残り2本のシールドジャッキを押し付け、他のピースの組立へと移行する。

#### 4.6 施工結果

##### a. セグメント自動組立システムの性能

同時施工を実施する前に、掘進と組立を交互に行う従来の施工形態でセグメント自動組立システムの調整を行い、性能を確認した。実施工の初期段階では斜辺部の組立誤差(段差)が1~3mmにばらついた。このため、斜辺部に設けた位置決め用の凹凸形状のプラグとソケットの隙間を少なくすることで精度向上を図った。その結果、位置決め精度は1mm程度に収まり、セグメント供

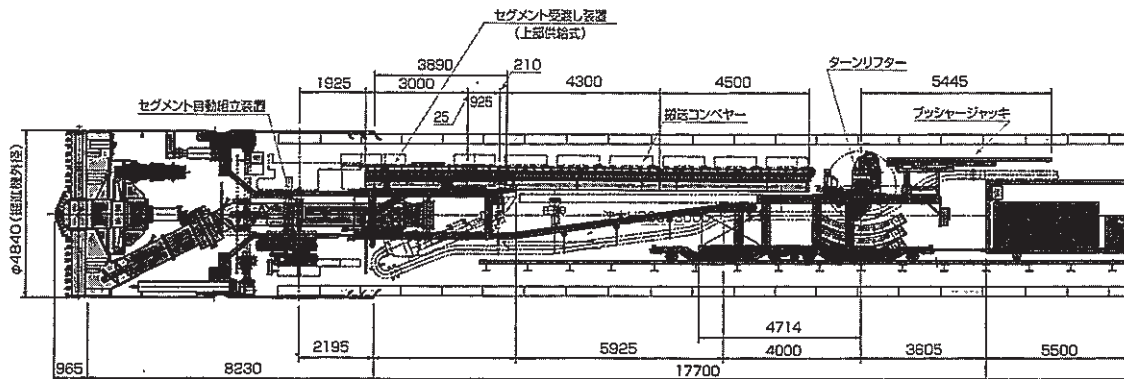


図-7 同時施工対応型シールド機(全自動組立方式)

給からボルト締結まですべて全自動で実施出来た。セグメント1ピースの平均組立時間は表-5に示すように4分で、1リングの組立時間は24分である。

表-5 セグメント1ピースの平均組立時間

	セグメント供給・把持	旋回・粗位置決め	微位置決め	ボルト締結	把持解除	荷重位置へ移動	合計
1ピース平均組立時間	52	16	113	28	15	16	240(4分)

単位:秒

b. 同時施工の実施

同時施工では、掘進速度と同じ速度でエレクタを後方に移動し、エレクタを見かけ上セグメント組立位置に対して静止状態に保ちながらセグメントを組み立てた。シールド機の姿勢変動を図-8に示す。開発当初から、掘進中にセグメントを組み立てることによるシールド機の姿勢変動への対応が課題になったが、エレクタ各軸の油圧ジャッキにクッション機能を持たせる力制御を採用することで、掘進中の姿勢変動に影響を受けることなく、位置決めやボルト締結ができた。

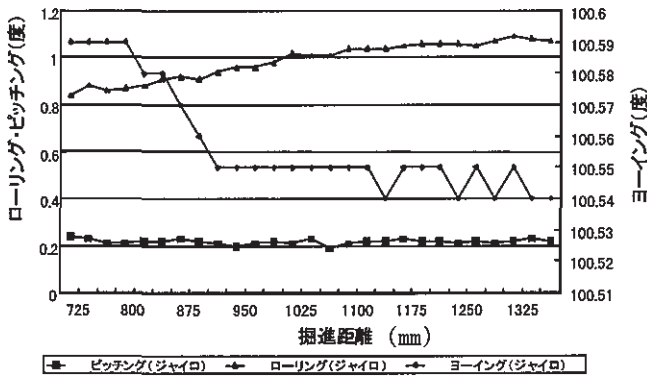


図-8 シールド機の姿勢変動

c. 施工サイクルの比較

セグメント1リングあたりの逐次施工および同時施工のサイクルタイムを表-6に示す。掘進時間が当初計画の30分に対し、40~60分になり、同時施工の時間短縮割合は0.62~0.71になった。これは、掘削地盤が予想に比べて非常に硬質な地盤で、計画掘進速度4cm/minに対して実掘進速度が2~3cm/minとなったためである。通常の洪積や沖積の比較的掘進が容易な地盤条件では掘進時間が25分程度になることから、従来の掘進とセグメント組立を分離した施工形態に比べて2倍の施工速度を確保できることがわかった。

表-6 施工サイクルタイムの比較

	掘進時間	組立時間	計	比
逐次施工	40~60	24	64~84	1
同時施工	40~60(組立24含む)		40~60	0.62~0.71

単位:分

d. セグメントの出来形

セグメントの内空変位を図-9に示す。セグメントのローリングは掘進管理を綿密に行うことで、管理基準値(max100mm)に対して最大で60mmに収まった。また、組立精度は非常に良好で、継ぎ手目開き1mm以内、内空変位10mm以内であった。

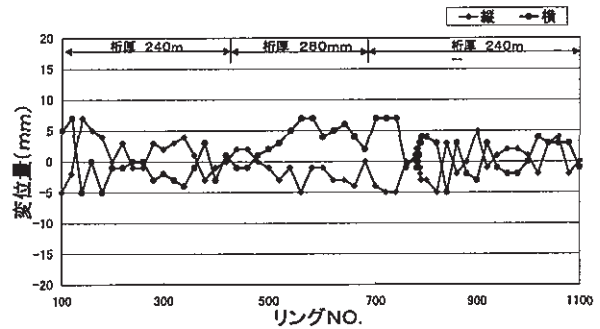


図-9 セグメントの内空変位

5. まとめ

今回の実証施工結果をまとめると以下のようである。

- i. 半自動組立方式および全自動組立方式による同時施工法が可能である
- ii. 同時施工で従来の2倍の日進量を確保できる
- iii. 同時施工においても、中折れジャッキで前胴を屈曲させる方法でシールド機の方角制御が可能である

6. おわりに

同時施工法の実証施工を行い、本工法の性能及び実施工への適用性を検証するとともに従来の2倍の日進量を確保できることがわかった。今後、同時施工法をより実施工に適したものとするには、逐次施工に比べて連続作業が増えることによる坑内および坑外の作業員配置の見直し、立坑から切羽へ掘進時間内に効率よくセグメントを搬送する設備の導入、日進量が増加することによる掘削残土の処理能力やセグメントストック量の増大、作業基地からの土砂の搬出方法など、シールド施工全体としての総合的な計画と検討が必要である。

最後に、2カ所のシールド工事現場で、同時期にセグメント組立方式の異なる2通りの同時施工法を実証する機会を得たことについて、発注者ならびに工事関係各位に深く謝意を表す。今後、シールドの急速化を狙いとした同時施工の実績を重ね、シールド工事の効率化やコスト低減に寄与したいと考えている。

【参考文献】

- 1) 畑山栄一ほか、「ハニカムセグメント自動組立装置の開発」、奥村組技術研究年報、No. 22、pp43-48、1996