

泥土圧縦楕円シールド工法の開発

串山宏太郎¹・伊佐 秀²・馬場和徳³・宮下芳高⁴・玉井達郎⁵

¹工修 東京都下水道局 施設管理部管路管理課長 (〒163-01 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

²正会員 大成建設株式会社 技術本部技術開発第二部部长 (〒160 東京都新宿区百人町 3-25-1)

³株式会社奥村組 本社土木部次長 (〒545 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

⁴正会員 株式会社熊谷組 技術本部土木技術部シールド Gr. 課長 (〒162 東京都新宿区津久戸町 2-1)

⁵正会員 工修 鹿島 土木技術本部技術部技術開発課課長 (〒107 東京都港区元赤坂 1-2-7)

シールドの掘削機構に遊星カッター方式を用いることによって、円形のほか楕円形、矩形、馬蹄形など非円形トンネルを築造する“自由断面シールド工法”の開発に取り組み、最初の適用工事において縦楕円形シールド工法を、狭小道路下に大容量を確保でき流下特性としても有利な下水管渠を布設できる工法として採用し、実用化した。

本報文では、そのために実施してきた縦楕円シールド掘削機およびセグメントに関する設計検討と各種実験の結果、並びにこれらの結果を踏まえた実証実験工事の結果、そして最初の実工事の施工によって得られた知見について述べる。

Key Words : sewerage , elliptical section shield , segment , JIYU-DANMEN Shield

1. はじめに

近年、大都市では都市の進展と高度化による社会基盤施設の拡充が急がれている。しかし、これらの地域にある幹線道路の地下は、すでにさまざまな施設により立体的に利用されている。これから利用できる地下空間としては、これら既設構造物によってトンネル幅や高さに制約を受けるスペースあるいは大深度となる。

特に、自然流下を原則とする下水道においては、制約の多い幹線道路または狭小道路下に大容量の管渠布設が必要な場合が生じてきている。その解決策の一つとして、円形のほか楕円形、矩形、馬蹄形などさまざまな断面形状を可能とする“自由断面シールド工法”の研究開発に官民共同で取り組み^{1), 2), 3)}、下水道の自然流下の水理特性に有利な“縦楕円形シールド工法”を実工事に適用し、実用化した^{4), 5), 6)}。

そのために、まず模型シールドの掘削実験を土槽で行い、遊星カッター方式の設計データを収集した。また縦楕円形セグメント特有の断面力特性をパラメータ解析によって調べるとともに、曲げが卓越する場合のために合成セグメントについて、その単体曲げ試験、継手曲げ試験を実施して断面設計法を検討し、高剛性継手の適合性を調べた。

次に実証実験工事として、実規模のシールド掘削機(幅 3.16m×4.66m 泥土圧タイプ)により、長さ 50m のトンネルの試験施工を実施し、シールドの性能確認を行

うとともに、合成および鋼製セグメントの挙動計測を行って覆工設計計算法を検証した。

これらの結果を踏まえて、実工事として延長 560m の施工が行われ、その際のシールドの掘削性能や、掘進方向および姿勢制御の諸データから、実工事におけるシールドの施工性を把握した。またセグメントの諸計測データから設計計算を検討するとともに、施工時荷重に十分注意すべきであることを認識した。

本報文では、これらの過程において、縦楕円形シールドおよびセグメントの一連の開発で得られた成果、また実工事の施工を通じて得られた知見を述べる。

2. 縦楕円シールドの開発

(1) 掘削機構の概要

密閉型機械掘り式シールドによる非円形のシールド工法として、円形のカッターを複数組み合わせた方式がある。しかし、その方法では楕円形や矩形に対して未掘削部分が生じ、シールドの掘進は困難とされてきた。このため、密閉型機械掘り式シールドで非円形断面を掘削する工法として、遊星カッター方式の掘削機構の開発に取り組んだ。この方法は、円形の主カッターとその外周部分を掘削する遊星カッターを組み合わせることによって円形以外の断面でも掘削できるようにしようとしたものである。

図-1 にその概念図を縦楕円形について示すが、円形

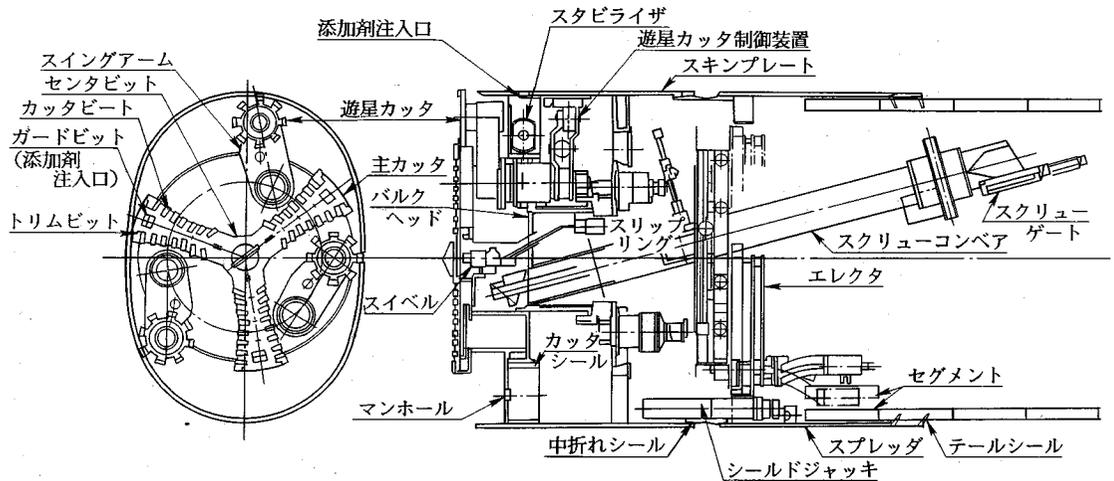


図-1 遊星カッター方式の縦楕円シールド概念図

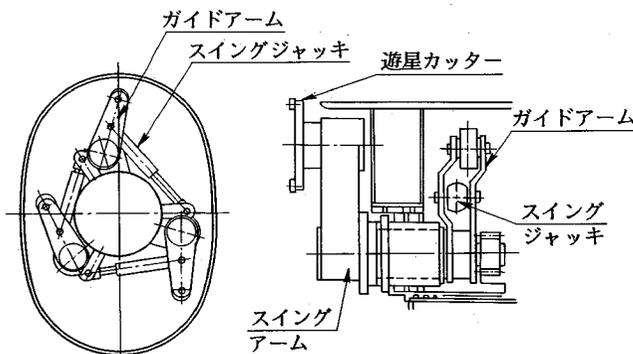


図-2 遊星カッターの軌跡制御機構

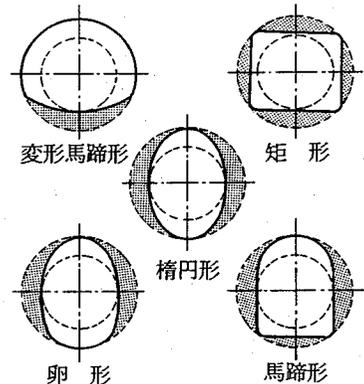


図-3 掘削断面形状例

遊星カッター外周

主カッターの支持部の外周近くに支持点を持つアーム（スイングアーム）の先端に遊星カッターを取り付け、このアームの角度を主カッターの回転と同調して調節し、遊星カッターの公転軌跡を制御することによって、円形以外の断面でも掘削できる機構としている。

軌跡制御機構を図-2、掘削断面形状例を図-3に示すが、主カッターと遊星カッターは各々独立した駆動装置を持ち、回転速度および回転方向を独自に制御できる。ただし、主カッターが等速回転するとき、遊星カッター中心はアームの出入りにより不等速に動く。この様子を楕円の場合について図-4に示す。この不等速による主カッターの負荷変動を平均化するために、遊星カッターは奇数個が適しており、 $\phi 3$ m級では3個装備した。

シールド形式は、シールド停止時の切羽の安定性および土質への適応範囲の広さ等を考慮し、泥土圧シールドを基本とした。

(2) 掘削形状とトンネル縦横比の選定

遊星カッター方式では、最小掘削径が円形の主カッター

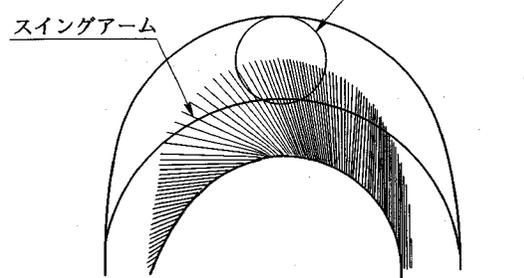


図-4 スイングアームの動き

一外径となり、最大掘削径は遊星カッターを最も拡大した場合の径となる。最小径と最大径に囲まれたドーナツ状の範囲内で掘削形状とトンネル縦横比を選定することができる。掘削可能なトンネル縦横比の最大値の目安としては、主カッター径が $\phi 3 \sim 5$ mの場合、楕円形で 1.5:1、馬蹄形で 1.35:1、矩形で 1.2:1 である。

表-1 模型機の仕様

(単位: mm)

		矩形	縦楕円
工 法		泥土圧	←
外形寸法	幅	1150	1000
	高さ	1000	1500
主カッター径		1000	1000
遊星カッター径		188	253

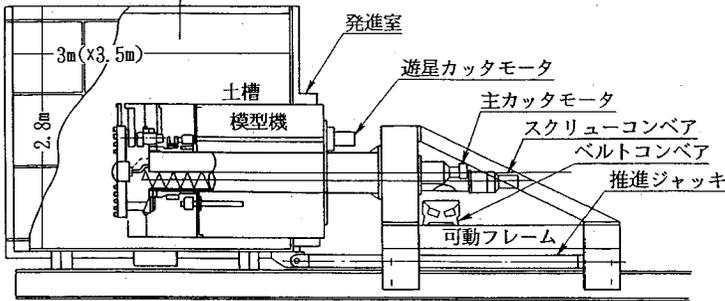


図-5 実験装置

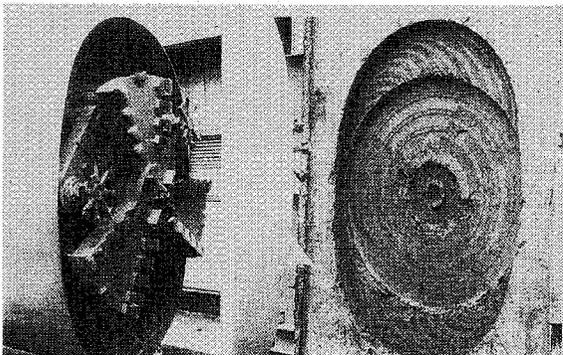


写真-1 模型実験機と切削条痕試験

(3) 模型機の掘削実験による設計データ収集

実機の計画に先行して、土槽を用いて模型シールド(縮尺 1/3~1/4)の掘削実験を行った。掘削対象材料は粘土にセメントを混合して作成した一軸圧縮強度 7~10kgf/cm²(0.69~0.98MPa)の低強度粘性土と、川砂を水締めした砂質土で、粘性土については切削条痕も調査した。実験での確認項目は以下のとおりである。

①掘削方式の適合性の確認として

- ・掘削形状 ・切羽の安定 ・土砂の流動

②掘削方式の特性値の把握として

- ・駆動力(トルク・速度)の最適組合せ

③土質への対応性の確認として

- ・砂質土、粘性土、礫混入土の掘削状況

④スイングアームの位置制御方式の適用性検討として

- ・機械式の微い制御方式、自動制御方式

掘削実験は、まず矩形の場合を先行した。矩形は掘削機構上、形状制御の困難度は高いが、形状制御を確実に行うことができれば他の形状は容易に制御できるからである。その後、縦楕円形に移行した。

図-5 に実験装置、表-1 に模型機の仕様、写真-1 に粘性土での縦楕円の切削結果を示すが、切羽の安定、チャンバー内土砂の流動性は円形との差異は認められな

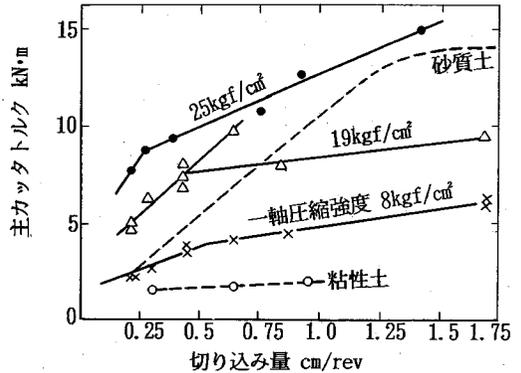


図-6 主カッターの掘削トルク

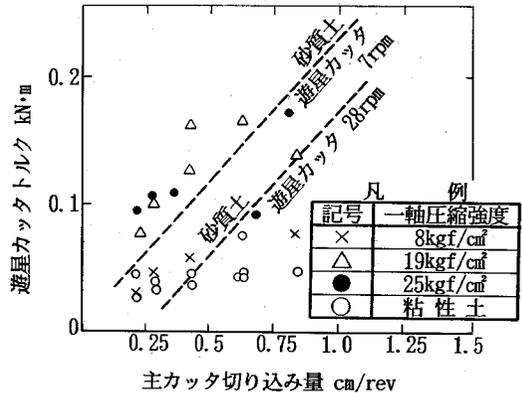


図-7 遊星カッターの掘削トルク

かった。また図-6、図-7 に縦楕円において砂質土・粘性土の強度を変えた時の切削条件と主カッターおよび遊星カッターの掘削トルクの関係を示すが、これについても同様に円形シールドとの差異は見られなかった。

なお、スイングアームの位置制御機構としては、微い方式では、主カッターの回転方向によって駆動トルクに著しい差異が生じた。

これらの結果をもとに、実機設計に際しては以下を基本とした。

- ・主カッタートルクは断面積の等しい円形(等積円)相



図-8 遊星カッタービットの形状

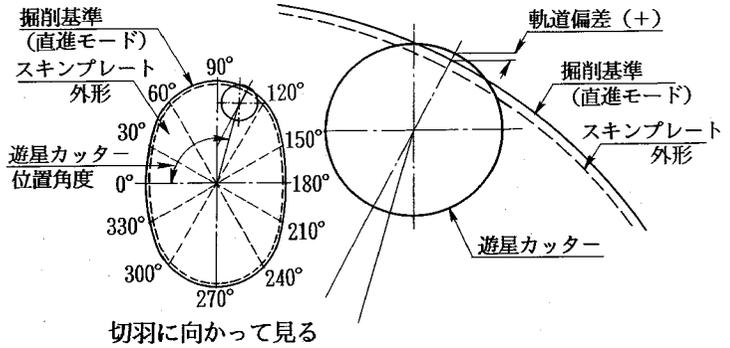


図-9 掘削形状制御結果表示の説明図

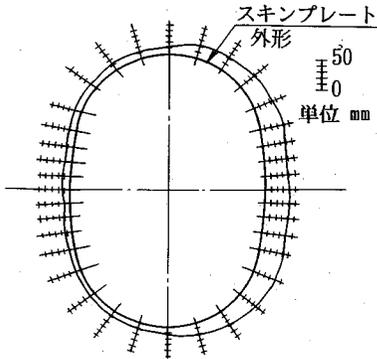


図-10 遊星カッター軌跡の実測値 (右側余掘りの例)

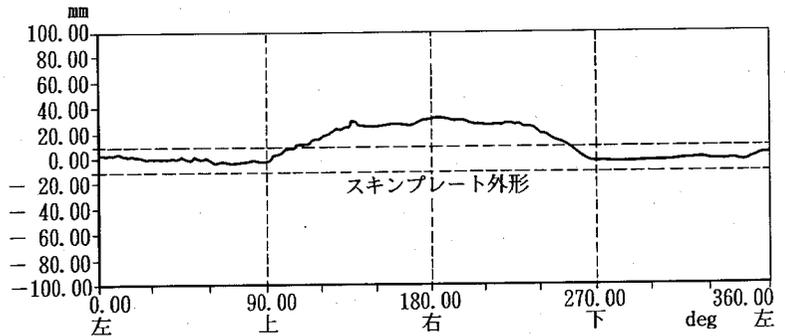


図-11 遊星カッター制御結果の表示例 (右側余掘りの例)

当とする。

・遊星カッター，スイングアームの動力性能は，各々寸法に対する一般的な3乗則，2乗則を基本とする。

(4) 縦楕円形シールドの仕様設定

実証実験工事に供した実規模のシールドの仕様は，模型機の掘削実験結果を反映させた。表-2 に主な仕様を示す。また，主要装備は以下のとおりである。

・遊星カッターの軌跡制御は，経済的な機械式の倣い方式と，高度な制御技術が必要であるが，掘削形状選択の自由度が高く，余掘りの量および形状についても自由に設定することが可能な自動制御方式の両方を装備した。両方式について無負荷回転時の必要動力，掘削形状精度の計測を行った結果，後者では前者のガイドローラの反力による主カッタートルクの変動分だけ動力損失が小さいこと，また実用精度が得られることを確認し，以後は自動制御方式を用いることとした。

・曲線施工は，R=50m までの対応を想定し，本体にピン式の中折れ装置を設け，余掘りは遊星カッターの軌跡を変更することとした。

・姿勢制御装置としては，左右各4本のシールドジャッキ作用方向を偏可能な構造(軸芯移動装置)とした。

・エレクターは通常の円形セグメント組立てに必要な機

表-2 泥土圧縦楕円シールドの仕様

工 法	泥 土 圧
外形寸法	幅 3.16m×高さ 4.66m
ジャッキ推力	1380tf (113tf/m ²)
主カッタートルク	(常用) 130tf-m ($\alpha=2.12$) (最大) 162tf-m ($\alpha=2.65$)
主カッター回転数	1.5rpm
遊星カッタートルク	(常用) $3 \times 1.6tf-m$ ($\alpha=3.13$) (最大) $3 \times 2tf-m$ ($\alpha=3.91$)
遊星カッター回転数	17rpm

構に加え，旋回リング部の昇降およびセグメント把持装置の左右スライド機構を装備した。

一方，実工用シールドは，実証実験工事の実績をもとに次に示す改良を施した。

・急曲線 (R=20m) 対応として，中折れ装置を追加 ($4^\circ + 9^\circ$) し，2 段中折れタイプに改造した。また，中折れ装置の追加に伴い，スクリュウコンベアの干渉を解消するため，コンベア長を短縮しロータリーポンプを直結する泥土圧送方式とした。

・遊星カッタービットは，砂礫層に対応するために超硬チップの厚みを増し，埋め込みタイプとした。図-8 にカッタービットの形状を示す。

・姿勢制御は，シールドの重心が切羽側にあることから，

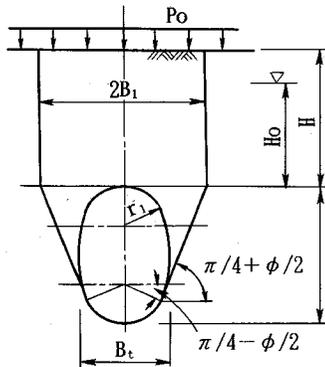


図-12 ゆるみ幅算定図

マシンの前下がり傾向改善のためフード下部にソリ板を追加した。

・遊星カッターの軌跡制御は、目標軌跡に対して±10mmの範囲で容易に微調整可能な機能を追加した。この機能は曲線施工時の余振り量や掘削形状の修正にも適用できるものである。

なお、実工事への供用開始時に、無負荷運転状態で測定した遊星カッター位置制御結果を図-9～図-11に示す。図-9は掘削形状制御結果の表示を説明したものであり、図-10はスキンプレート外形より遊星カッターの出代を実測した値を10倍に拡大表示し、連続曲線で結んだものである。図-11は制御用コンピューターからの出力図である。

3. 楕円形セグメントの検討

(1) 設計での特徴的事項

a) 鉛直土圧下限の設定

砂質土で土被りがトンネル寸法に比して大きい場合は、Terzaghiのゆるみ土圧式を適用し、図-12に示すようにゆるみ幅を次式で算定することとした。

$$B_1 = r_1 \sin(\pi/4 + \phi/2) + \frac{H_t - r_1 \{1 - \cos(\pi/4 + \phi/2)\}}{\tan(\pi/4 + \phi/2)} \quad (1)$$

ここに、 B_1 :ゆるみ幅の1/2, H_t :トンネル縦径,

r_1 :小円部の覆工外半径, ϕ :土の内部摩擦角

また、ゆるみ高さの下限値を、次のような考えに基づいて与えることとした。すなわち、Terzaghiによると、ゆるみ高さ h は、トンネル掘削断面の幅 B_t と掘削断面の高さ H_t の和に、地山条件による係数 α を乗じたものとして、次式で与えられている。

$$h = \alpha (B_t + H_t) \quad (2)$$

一方、円形シールドトンネルにおける土木学会、日本下水道協会におけるゆるみ高さの下限値は、次式によ

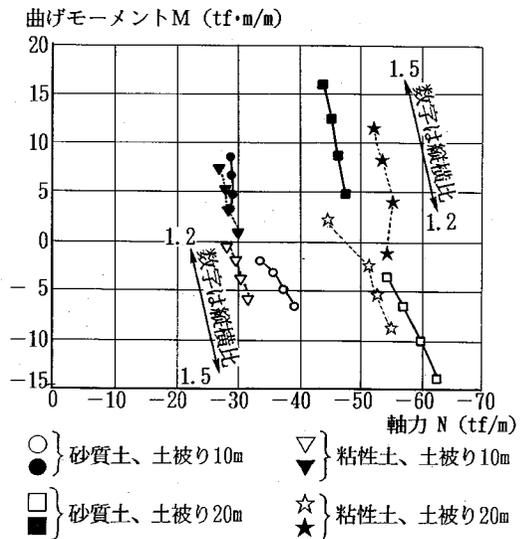


図-13 正・負の曲げモーメント最大点における軸力と曲げモーメントの関係

ている。

$$h = 2 \cdot D_0 \quad (3)$$

ここに、 D_0 :トンネル外径

そこで、非円形に対する式(2)と円形に対する式(3)との整合性を考慮し、 $\alpha=1$ としてゆるみ高さの下限値 h を次式のようにトンネル横径 B_t とトンネル縦径 H_t との和とした。

$$h = B_t + H_t \quad (4)$$

b) 断面力算定における地盤反力の扱い方

断面力の算定は、円形セグメントと同様、セグメント自重と外荷重に分けて行う。外荷重解析では、縦楕円形の場合、縦横比(縦径/横径)が大きいと通常の円形とは逆に縦方向に変形し、トンネル頂部および下部付近に地盤反力が発生することになる。その際、トンネル頂部付近に地盤反力が期待できるか否かは、土被りの大きさ、土質、施工条件などを判断して設計上危険側にならないように定めることとし、地盤反力を考慮する場合はトンネルが地山側へ変位する領域のみ有効としてセグメントと地山との相互作用解析を行うものとした。

(2) 断面力の特性

縦横比1.2から1.5までの範囲で、土被り、土質条件等を変えたパラメータ解析により断面力の特性を調べると図-13のようになる。すなわち、

- ①正、負の最大の曲げモーメントは、縦横比の増加とともに著しく大きくなる。その場合、正曲げ最大点の軸力はほぼ一定で、負曲げ最大点の軸力は縦横比の増加とともに漸増する。したがって、縦横比が大きくなる

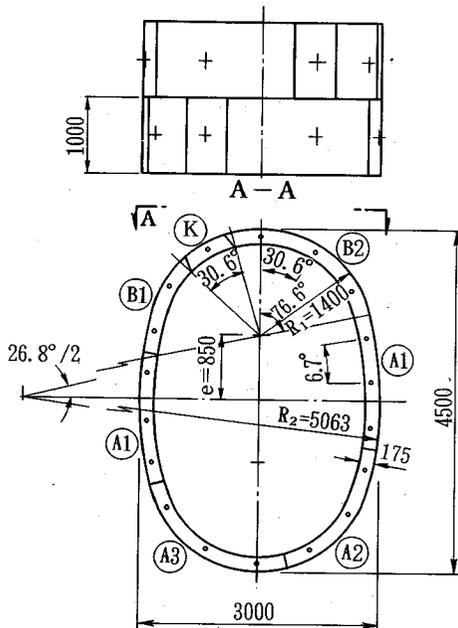


図-14 合成セグメント組立図

につれ曲げ卓越型の傾向が強くなる。

- ②頂部に負の曲げモーメントが生じる場合は、鉛直土圧を大きくするとモーメントが小さくなり、セグメントの設計上危険側になることがあるので、注意を要する。
- ③地下水圧の増大による断面力への影響は、円形セグメントでは軸力のみ増加するが、縦楕円形セグメントでは軸力に加えて曲げモーメントも発生し、縦横比の増加とともに著しく大きくなる。したがって、裏込め注入圧、将来回復が予測される地下水位等について十分な検討が必要となる。

(3) 実証実験工事でのセグメントの設計検討

a) セグメントの種類および継手構造

セグメントの種類は、曲げモーメント卓越型の大断面力に対処できる合成セグメントおよび鋼製セグメントとし、合成セグメントの継手には剛性が高く、かつ継手部の抵抗モーメントが大きい高剛性継手も用いて、その適合性を調べることにした。

b) 断面形状およびセグメントの分割

縦楕円形状はセグメントの製作等を考慮し、2種類の半径で各々2つずつよりなる4つの円弧で組合された4芯円の複合円弧とした。

セグメントの分割は、下記事項を考慮して決定した。

- ・セグメントの坑内運搬および組立て時の施工性
- ・千鳥組立てによる添接効果、曲線施工に対する安全性、止水性、製作性および施工性などを考慮したリング継手

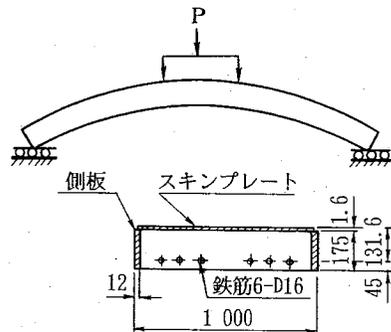


図-15 試験方法および本体構造

表-3 単体曲げ試験の解析値および結果

発生	中立軸		X (cm)	6.36
	応力度 (tf・m)	コンクリート圧縮応力度		σ_c (kgf/cm ²)
スキンプレート応力度		σ_{sk} (kgf/cm ²)	-1938	
M=10 載荷時	鉄筋応力度		σ_s (kgf/cm ²)	2074
	側板応力度		σ_{sa} (kgf/cm ²)	3446
抵抗 モーメント	鉄筋より決まる抵抗モーメント		M_{Rss} (tf・m)	8.68
	側板より決まる抵抗モーメント		M_{Rss} (tf・m)	5.51
破壊 モーメント	鉄筋より決まる破壊モーメント		M_{Us} (tf・m)	14.5
	側板より決まる破壊モーメント		M_{Uss} (tf・m)	9.58
値	塑性抵抗モーメント		M_p (tf・m)	17.3
	頂点変位 (mm/tf・m)	初亀裂発生前の剛性	E: 350000(kgf/cm ²) I: 59205(cm ⁴)	0.144
初亀裂発生後の剛性		E: 350000(kgf/cm ²) I: 23086(cm ⁴)	0.370	
実結	初亀裂確認載荷モーメント		M_{cs} (tf・m)	3.03
験果	最終載荷モーメント		M_{cl} (tf・m)	18.5

のピッチ間隔

その結果、合成セグメントの組み立てを図-14のとおりとした。また、鋼製セグメントについては、リング継ぎボルトの数量を2倍とした。

(4) 実証実験セグメントの部分性能確認試験

土被り4.5m、縦径4.5m、横径3m(縦横比が1.5:1)の縦楕円形セグメントの断面設計を行って、本体強度を確認するための単体曲げ試験と、継手の剛性および強度確認のための継手曲げ試験を行った。

試験対象の供試体は、図-14に示したA1型合成セグメントである。

a) 単体曲げ試験

試験方法は、図-15に示すように平面上で両端可動支持とし中央部に2点載荷した。計測項目は頂点鉛直変位、支点鉛直・水平変位、頂点における各部材のひずみである。試験結果および解析値を表-3、図-16~18に示す。

表-3の解析値のうちの発生応力度は、鉄筋コンクリートとしての応力算定と同一の仮定条件により計算した

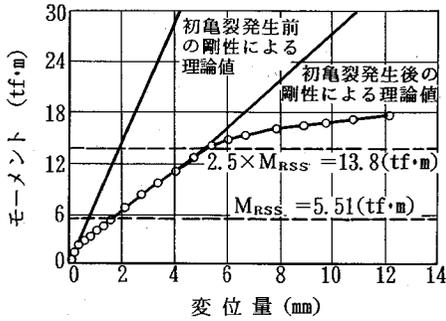


図-16 曲げモーメント頂点鉛直変位量

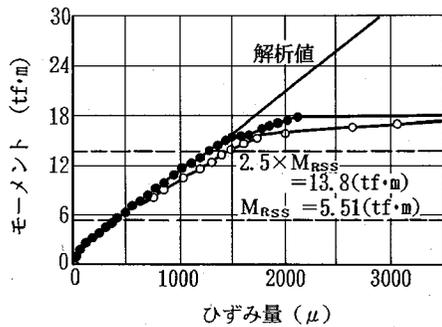


図-17 曲げモーメント頂点側板ひずみ

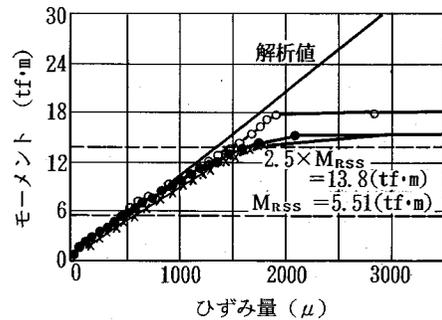


図-18 曲げモーメント頂点鉄筋ひずみ

値である。また抵抗モーメントおよび破壊モーメントは、それぞれ部材が許容応力度、降伏応力度に達するときの値である。そして、塑性抵抗モーメントは、側板引張り縁および引張り鉄筋の降伏に伴い、中立軸距離が減少し圧縮縁で極限ひずみに達した時の値である。

試験結果を解析値と比較すると、変位については、初亀裂発生前は全断面有効とし、初亀裂発生後はコンクリートの引張り部を無視した断面として算出した勾配に一致している。また、各部材の発生応力度については、主鉄筋および側板とも概ね解析値に近い。

b) 継手曲げ試験

試験方法は、表-4 に示すようにセグメント2 ピースを平面上で両端可動支持とし中央部に2点载荷した。また、試験時のボルトの応力は許容応力度 $\sigma_b = 3000 \text{ kgf/cm}^2$

表-4 試験方法

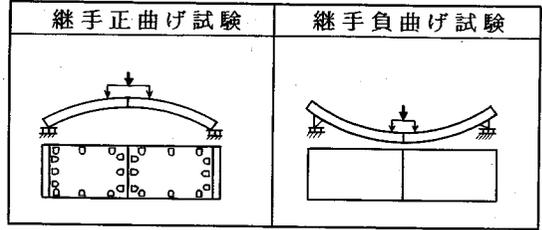


表-5 高剛性継手と従来継手の比較

	高剛性継手	従来継手
斜視図	<p>アンカー筋 ボルト孔 継手金物ドーム部 継手金物底板部</p>	<p>アンカー筋 継手板 ボルト孔 補強板</p>
構造の特徴	継手金物は底板部、ドーム部が一体になっており、ボルト穴は通し穴となっている。	継手板に補強板が、補強板にアンカー筋が溶接され、継手板にボルト孔があけられている。

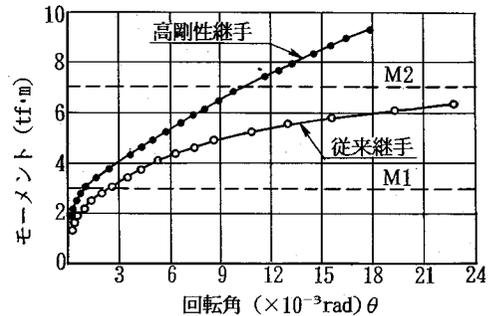


図-19 曲げモーメント～回転角

(294 MPa)相当として試験に供した。比較検討した高剛性継手と従来継手の構造を表-5 に示す。計測項目は頂点鉛直変位、支点鉛直・水平変位、継手面引張り側・圧縮側目開き、ボルト引張りひずみ、継手金物ひずみ、アンカー筋ひずみ、継手面近傍のスキンプレートおよびコンクリートのひずみである。

試験結果および解析値を表-6、図-19 に示す。表-6 の解析値のうちのM1は、図-20 に示す断面において、鉄筋コンクリートの応力算定と同一の仮定により算出したボルトの応力が許容応力度に達するときのモーメントである。図中のxは圧縮縁から中立軸までの距離である。同様に、M3は規格降伏応力度に達するときの値である。M4は図-21 に示す断面のアンカー筋の応力が規格降伏応力度に達するときの値である。M2はセグメントの設

表-6 継手曲げ試験の解析値および結果

試験の種類		正曲げ試験		負曲げ試験	
継手構造		高剛性継手	従来継手	高剛性継手	従来継手
解析値	ボルトが許容応力度に達するモーメント M1 (tf・m)	3.07		2.04	
	設計破壊モーメント M2 (tf・m)	7.06		3.53	
	ボルトにより決まる破壊モーメント M3 (tf・m)	9.21		6.13	
	アンカー筋により決まる破壊モーメント M4 (tf・m)	8.58		4.83	
実験結果	最大載荷モーメント M _L (tf・m)	9.36	6.65	6.38	5.02
	継手回転バネ定数 (tf・m/rad)	M = 0 ~ 1.86 (tf・m) K _{θ1}	5458	2550	
		M = 1.86 ~ 3.13 (tf・m) K _{θ2}	1213	525	
		M = 3.13 ~ 7.10 (tf・m) K _{θ3}	406	149	
	M = 3.13 ~ 6.40 (tf・m)	2767	1010		
	M = 0 ~ 0.86 (tf・m) K _{θ1}				
	M = 0.86 ~ 2.04 (tf・m) K _{θ2}			529	
M = 2.04 ~ 3.53 (tf・m) K _{θ3}	245	140			
破壊状況	ボルトの降伏	継手板の曲げ降伏	ボルトの降伏	継手板の曲げ降伏	

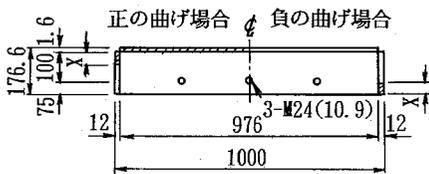


図-20 継手有効部材断面図

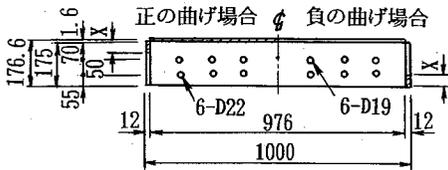
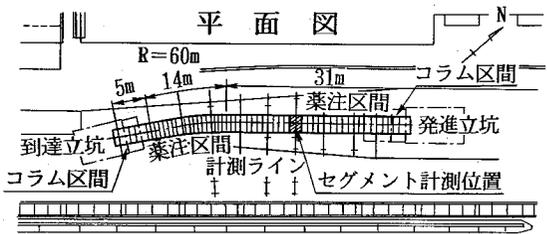


図-21 鉄筋アンカー筋部材断面図



推定土層断面図



図-22 実証実験平面および土質縦断面図

計上設定された破壊モーメントである。

試験の結果、最大載荷モーメントの発生は高剛性継手供試体ではボルトの降伏時点であったが、従来継手供試体では継手金物の曲げ降伏時点であり、低い値となった。また変形特性についても、高剛性継手は従来継手に比べて目開きが少なく、継手の回転ばね定数は約 2~3 倍であった。

これらのことから、曲げモーメント卓越型の断面力に対して、合成セグメントは高剛性継手との組み合わせで対処すればよいことが判った。

4. 施工性に関する検討および考察

(1) 実証実験工事および実工事の概要

実証実験工事を兵庫県高砂市の(株)神戸製鋼所内で行い、その成果を実工事である東京都下水道局の「新大森幹線その4工事」に適用した。それぞれの工事概要を以下に示す。

a) 実証実験工事

施工延長は 50m で直線部 36m、曲線部 14m とし、曲線半径はトンネル横径の 20 倍で、60m とした。また、土被りはトンネル縦径に相当する 4.5m に設定した。

トンネル通過断面の土質は上部が N 値 0~1 の沖積粘性土、下部が N 値 6~20 の沖積砂質土となっている。地下水位は平均 GL-1.5m で潮位の影響を受けている。路線の平面図および土質縦断面図を図-22 に示す。

b) 実工事「新大森幹線その4工事」

路線は J R 京浜東北線大森駅の南側、都道環状 7 号線の北側に沿った地域に位置し、大森北五丁目の春日橋児童公園に設置した発進立坑から区道下を東に進み、曲線半径 20 m の急曲線部を経て大森北六丁目先、環状 7 号線下の既設人孔に達する全長約 560m である。途中、既



図-23 新大森幹線管路路線図

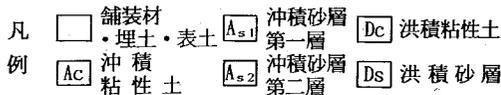
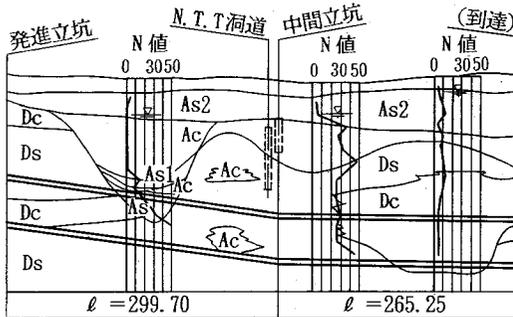


図-24 新大森幹線土質縦断面図

設大森北2号幹線取り入れの中間立坑を設置する。土被りは9~12mで、管渠勾配は最大1.18%である。

トンネル通過断面の土質は大部分がN値50の洪積細砂層、N値7~20の洪積粘性土層で、一部埋没谷の軟弱層を通過する。地下水水位はGL-1.5~4.2m付近にありシールド天端における地山間隙水圧は0.5~1.0 kgf/cm² (49~98 kPa)となっている。管路路線図を図-23に、土質断面図を図-24に示す。

(2) 掘進経過

a) 実証実験工事の場合

初期の一部区間を除いて、直線部、曲線部とも30~40mm/minの速度で掘進した。途中で予期しなかった150~200mm大の玉石に遭遇したが、掘進状況に大きな変化はなく、全体的に円形の泥土圧シールドと同様な管理で掘進できた。

セグメントの組み立ては、下記事項の影響を受け、1リングの組立て時間は平均で約75分を要した。

- ・エレクター全体が昇降する動作が加わっていること
- ・シールドが45°ローリングするとテールクリアランスがなくなってしまうこと

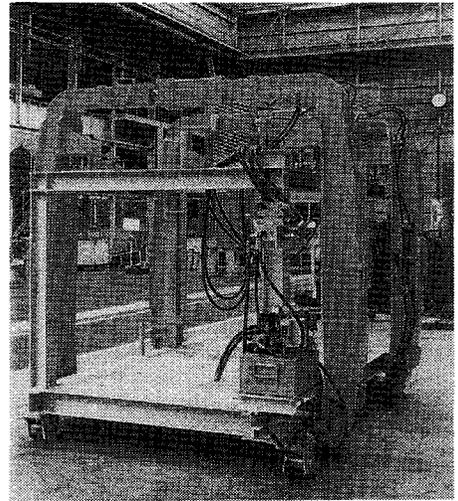


写真-2 セグメント形状保持装置

- ・セグメントが横方向荷重(特に裏込め注入)によって内側に変形しやすい形状であり、セグメントの変形を防止するために使用したサポートジャッキの装着・撤去到約30分を要したこと

- ・簡易型の後続設備を用いているため、足場が不十分であったこと

b) 実工事の場合

掘進開始後まもなく推進抵抗が大きくなり、シールドジャッキの使用本数を増やす必要が生じたが、同時にシールドのローリングや上向き傾向が強くなったためジャッキ選択が制約された。その結果推進力が不足がちとなり、掘進速度は10~20mm/minに抑えられた。途中、埋没谷と見られる軟弱層部では30mm/min近い掘進速度が得られたが、中間立坑までは概ね同様な傾向であった。

この原因は、中間立坑での調査によれば硬質土層でのオーバーカット量の不足や同時裏込め注入装置の弊害ではないかと推察されたため、同時裏込め注入装置を撤去し、オーバーカットの管理値を変えた結果、それ以降この現象は解消され順調な掘進が可能となった。R=20mの急曲線部でも直線部と変わらない掘進が可能であった。

セグメントの組み立てに対しては、実証実験工事の経験をもとに、後続台車に写真-2に示すような油圧拡張式の形状保持装置を装備した。中間立坑まではシールドのローリングの影響が大きく、1リング平均して約80分を要したが、中間立坑以降では、作業の習熟度向上も伴って60~70分に短縮できた。なお、急曲線部においては幅350mmの短いセグメントを使用した。幅1000mmの一般部のセグメントの場合との時間差はほとんどない。

掘進およびセグメント組み立て時間の平均値を表-7に示す。

表-7 掘進およびセグメント組立て時間平均値

(単位: min)

		掘進		セグメント組立	
初期掘進	直線部	111	115		
	曲線部	107	183		
	全体	110	139		
	直線部	50	79		
	曲線部	65	79		
	直線部	50	73		
	曲線部	39	59		
	全体	51	75		
	*急曲線部	22	76		

*セグメント幅: 350mm

表-8 掘削トルクと攪拌トルクの比較

(単位: tf・m)

種類	RNo.	掘削トルク		攪拌トルク		無負荷トルク	正味トルク	
		平均	①	平均	②		掘削	攪拌
主カッター	190	31~41	①	27~35	②	24	6	8
	191	34~44	38	31~39	32			
	199	32~44		26~35				
遊星カッター	190	0.41~0.48	0.45	0.36~0.39	0.37	0.18	0.08	0.19
	191	0.41~0.51		0.36~0.37				
	190	0.40~0.48		0.35~0.36				

* A=①-②, B=②-③

表-9 掘進データ

区分 項目	実証実験				新大森								中坑			
	1~9R	10~17R	18~27R	28~41R	1~41R	111~120R	121~136R	171~184R	185~200R	251~269R	272~280R	311~330R	341~370R	381~395R	401~430R	
主な平面線形	直線	直線	直線	左曲線 R=60m	直線	左曲線 R=200m	直線	直線	直線	直線	左曲線 R=100m	右曲線 R=60m	直線	直線	右曲線 R=20m	右曲線 R=20m
主カッタートルク(tf・m)	38	59	54	52	41	42	41	28	37	37	29	33	19	20	27	27
遊星カッタートルク(tf・m)	0.58	0.59	0.65	0.63	0.75	0.66	0.66	0.43	0.48	0.44	0.33	0.52	0.36	0.37	0.43	0.43
主カッター回転数(rpm)	0.6	0.6~1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
遊星カッター回転数(rpm)	10	10~14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	13	10	10	10
推進力(tf)	276	408	382	371	636	537	642	531	640	666	561	428	393	324	568	568
添加剤注入率(%)	25	21	9	10	15	19	17	10	8	19	17	23	31	35	21	21
掘進速度(mm/min)	14	29	31	34	14	18	30	27	28	17	8	18	18	14	25	25
土質(推定)	砂質土	粘性土	粘性土	砂、砂質粘土	砂、砂質粘土	細砂	砂質粘土	砂	砂	シルト	シルト	細砂	細砂	上部:粘性土 下部:細砂	上部:粘性土 下部:細砂	上部:粘性土 下部:細砂
M値	6~19	0~1	0~1	粘土=10~20	砂>50 粘土=10~20	上=30 下>50	粘土:≒0 砂:≒10	粘土:≒0 砂:≒10	砂:20~40 シルト:8~10	砂:20~40 シルト:8~10	砂:20~40 シルト:8~10	30~40	30~40	30~40	30~40	30~40

●土圧計

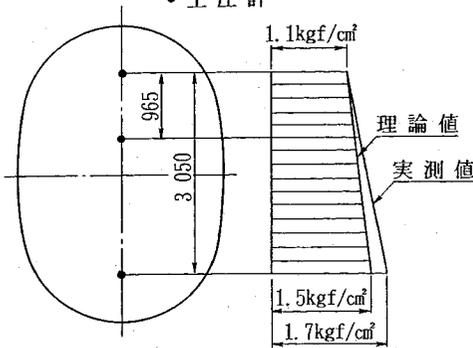


図-25 チャンバー内土圧分布の一例

(3) シールドの掘削・排土機能

a) 切羽の安定

切羽の安定用として、管理土圧は理論値である(静止土圧)+(水圧)相当としているが、実証実験結果からは、図-25に示すように隔壁に取り付けた土圧計はチャンバ下方に行くほど理論値より高めの値を示す傾向にあった。遊星カッター公転速度はコーナー部で速くなる特性があり、主カッターの回転数が1.2rpmのとき最大約0.8m/secとなる。模型実験ではこの動きに連れてチャンバー内の土砂が写きずられる様子が観察されたので、下

部において土圧増加として現れたものと推察される。このため実工事の際には最も影響が少なかった隔壁最上部に取り付けた土圧計を用いて、その値が理論値を下回らないように管理した。

b) カッタートルク

主カッター遊星カッターとも、トルクはその回転数およびチャンバー内の土砂の流動性にかかなり影響された。

表-8は掘進中のトルク(掘削トルク)と推進を停止した状態でカッターを回転させた時のトルク(攪拌トルク)を比較したもので、正味トルクは攪拌に要する方が大きくなっていることがわかる。攪拌トルクはチャンバー内土砂の流動性に関連があり、表-9の掘進データからも判るように、掘進速度が遅く攪拌時間が長い場合、添加剤の注入量が多い場合、地山の土性が流動性に富んでいる場合などでは、攪拌トルクは低下した。

主カッタートルクは軟弱土の実証実験工事よりも硬質土の実工事での値の方が低くなっているが、カッター回転数、掘進速度等の影響によるものと思われる。

遊星カッタートルクは、実工事初期の硬質土において比較的大きな値を示した。遊星カッタービットの形状は、コンピュータによって解析したビットの動きから耐摩耗性を切削性に優先して設定しており、その影響が出ているのではないかとと思われるが、装備トルクに影響を及ぼ

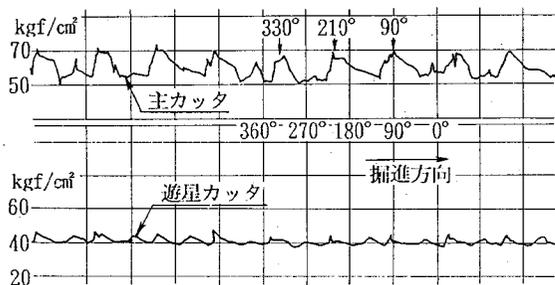


図-26 カッターの油圧波形図

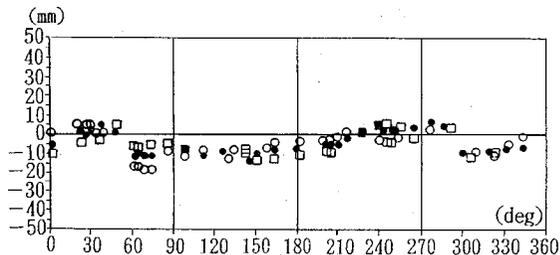


図-27 遊星カッター軌跡図 (工場検査時)

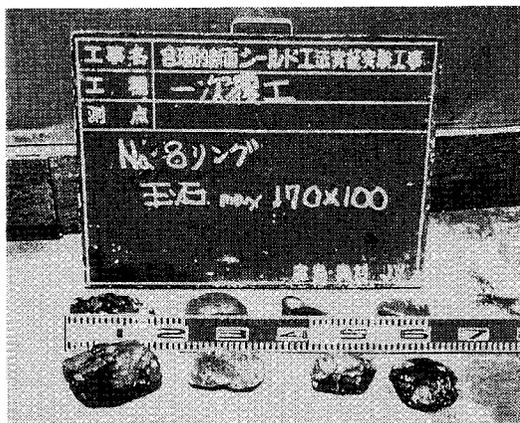


写真-3 実証実験での玉石

すようなものではなかった。

また、図-26は油圧の波形図を示したものであるが、波形の山は1回転に3回現れ、遊星カッターの1つが右下(進行方向に向かって)の高速部を移動し終える付近がピークとなっている。ピークとなっている点は掻き揚げ動作の点と一致しており、遊星カッターおよびスイングアームによるチャンバー内下部土砂の掻き揚げを反映しているものと推察される。この時の油圧の変動幅は主カッターの方が大きかったが、最大値は平均値の20~30%増に納まっており、これも装備トルクに影響を及ぼすようなものではなかった。

c) 排土

遊星カッター軌跡制御の機構上、スクリューコンベアの取り込み口をシールドの中央付近に設けているため、チャンバー下部の土砂取り込みはスイングアームの掻き揚げに期待した。結果は全く問題なく、実証実験工事で100~200mm大の玉石(写真-3参照)に遭遇した時も順調な排土が可能であった。

d) 遊星カッターの軌跡制御

遊星カッターは、これまでにない大容量での油圧制御となるため、±10~15mmの制御誤差を許容した。

管理方法として、工場試運転時に軌跡を実測し、その時のコンピュータ波形図と掘削時のコンピュータ波形図

表-10 ビットの摩耗量

(単位: mm)

種類	チップ(大)	チップ(小)	合金	肉盛部
遊星カッター(A):左側	0.90	0.20	2.70	1.30
" :右側	0.80	0.20	3.30	1.50
遊星カッター(B):左側	0.60	0.10	2.90	1.40
" :右側	0.50	0.20	2.80	1.70
トリムビット	1.20	0.40	1.80	0.30

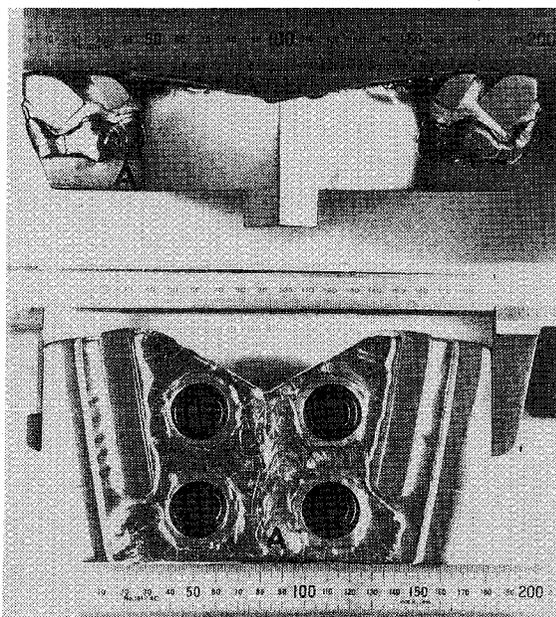


写真-4 遊星カッタービットの摩耗状況

とを比較するとともに、遊星カッターの動きをモニターで監視する方法を採用した。

図-27に工場検査時の軌跡図を示す。図中の印は3個の遊星カッターそれぞれの動きを表している。スキンプレートの外側10mmを基準としており、-10mmの位置がスキンプレートの外側となる。

制御結果は実証実験工事では特に問題なかったが、実工事では中間立坑での実測の結果、全体的に軌跡が小さ

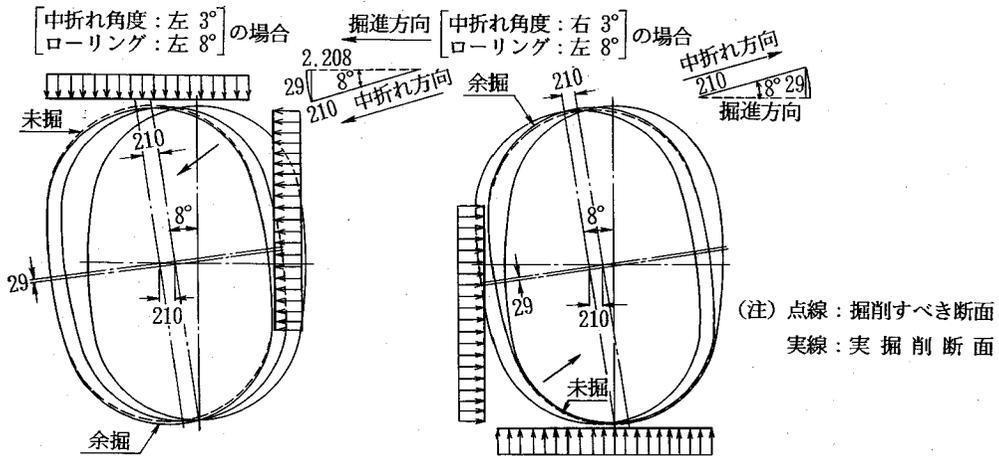


図-28 ローリングと中折れによる掘削断面のずれ

くなってオーバーカット不足が生じていた。原因は、制御機器交換時の初期設定ミスであり、これを修正した中間立坑以降は問題が解消された。

e) 遊星カッタービットの耐久性

中間立坑到達時の摩耗量を表-10に、摩耗状況を写真-4に示す。遊星カッタービットは主カッタービットに比べて摺動距離が長く、地山の掘削方向も異なっているが、実工事の中間立坑までの結果では、チップの摩耗は主カッターの外周ビット（トリムビット）より少なかった。今回のような土質での耐久性は十分であるといえる。

(4) 縦楕円シールドの方向・姿勢制御

a) ピッチング、ヨーイング

縦楕円形シールドは円形に比べてシールドの重量を受ける接地面積が小さい。また、隔壁背面に装備した遊星カッター制御機構により重心が前方となり、かつ重量が大きくなることから、実証実験工事では前下がりの傾向が強く、シールドジャッキの選択のみの対策では不十分で、中折れ装置を上向きに働かせる必要があった。

このため、実工事ではフード下部に19mm厚の固定ソリを設けた。硬質土での固定ソリの装備はマシンを上向きにする弊害を生じさせ易いが、遊星カッター方式では任意のオーバーカット領域が設定でき、問題なく硬質土に対応できた。

b) ローリング

実証実験工事の軟弱土においては、シールドは小さな外力でローリングを生ずる反面、修正力も小さくて済み、数リング毎のカッター反転で修正が可能であった。直線部、曲線部（ $R=60m$ ）ともに $\pm 10^\circ$ 以内で制御できており、シールド下端を支点として左右に傾く性状を示した。

実工事の硬質土においては、掘進開始まもなく 2° のローリングが生じ、中間立坑前のS字曲線部で中折れ装置を最大中折れ角度 3.3° で使用した時、ローリングが急激に増加して 10° を超えた。このときローリングの中心はシールド下端ばかりではなく、シールド断面内にも位置していた。

このローリングの生じる原因としては、シールド外側の同時裏込注入管の存在やオーバーカット領域のアンバランスが考えられた。

またローリングの増大の要因としては、以下のような現象が推察される。

ローリングした状態で中折れ装置を使用するとシールド機の向きは計画線に対してずれを生ずる。図-28に中折れ角 3° 、ローリング 8° の例を示す。左にローリングした状態で左方向への中折れを使用した場合には、掘削すべき断面（図の点線）に対してカッターは下方に位置する状態（図の実線）になって、上方には未掘削部が、また、下方には過剰掘削部が生ずる。この姿勢のまま基線に沿って掘進すると、シールド右上方の地山反力が左方向のローリング力となって作用する。また、左へローリングした状態で右方向の中折れを使用した場合は、逆に下方に未掘削部、上方に過剰掘削部が生じて、左下の地山反力によりやはり左方向のローリング作用力が作用する。このように、ローリングした状態で中折れ装置を使用すると中折れの方向にかかわらずローリングが増大する方向に力が作用する。この時、地山の性状やオーバーカットによって周辺の地山が軟らかくなっている場合には作用力は緩和されるが、実工事の場合は、遊星カッター誤作動による掘削面のズレがオーバーカットの効果を上回り、ローリングが増大していく結果になったもの

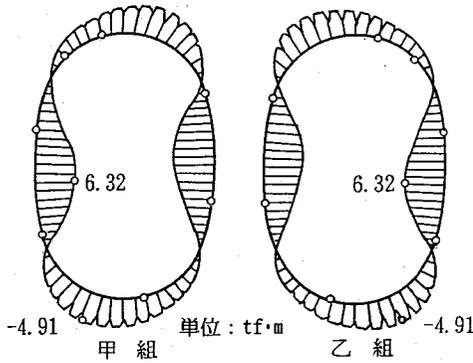


図-33 セグメントの曲げモーメント図 (完成時)

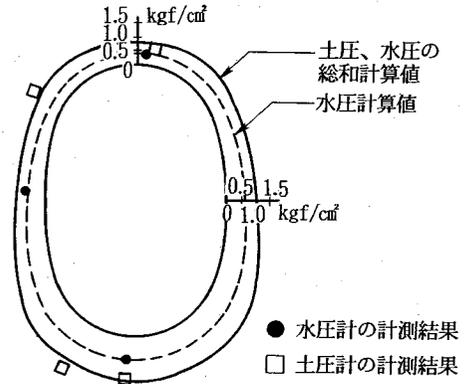


図-35 セグメントに作用する土圧・水圧計測結果

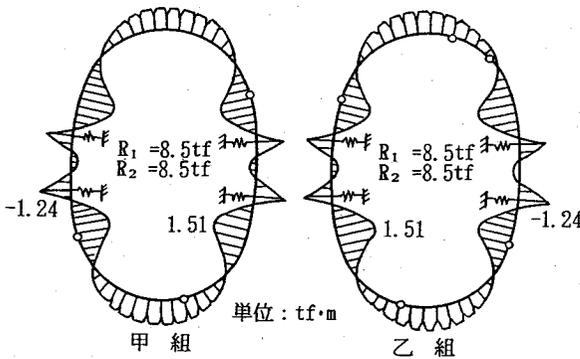
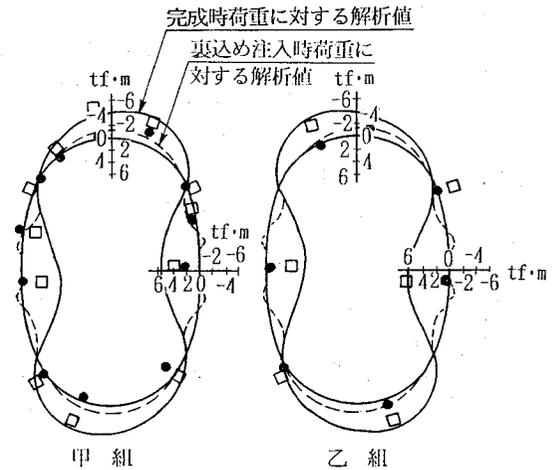


図-34 セグメントの曲げモーメント図 (施工時)



□ 完成時荷重に対する曲げモーメント値
● 裏込め注入時荷重に対する曲げモーメント値

図-36 セグメントに発生する曲げモーメント図

a) セグメントの挙動予測

設計用作用荷重として、完成時のセグメントに作用する土・水圧は、トンネル通過部の土質が主に砂質土であり、土水分離として算出した。その結果を図-30に示す。

また施工時荷重として、裏込め注入圧を考え、トンネル天端での注入圧 P_1 を 2.0 kgf/cm^2 (0.196 MPa)、トンネル底部での注入圧 P_2 を 2.5 kgf/cm^2 (0.245 MPa)とし、上方と下方との鉛直方向荷重の差によりトンネル天端側に地盤反力が作用するとして扱った。また、裏込め注入時は水平方向の支保工をスプリングラインを挟んで上下対象の位置に2か所配置した。この状態を図-31に示す。

セグメントに発生する断面力算定には、セグメントリングの解析モデルとして、セグメント本体部を多角形のはり(はり部材数は解析上十分な精度が得られるように配慮する)に、セグメント継手を回転ばねに、リング継手を接線方向と法線方向の2方向の剪断ばねに置き換えたはり-ばねモデルとした。解析モデルを図-32に示す。

断面力の解析結果のうち、完成時荷重に対する曲げモーメントを、図-33に示す。また、施工時(裏込め注入時)荷重に対する曲げモーメントおよび支保工の支点到

作用するばね反力図を、図-34に示す。

b) セグメント計測結果

セグメントに作用する土・水圧として、裏込め注入終了後の土圧計、水圧計の計測結果を図-35に示す。水圧計の計測値は挙動予測とよく対応し、土圧計の計測値についても土圧と水圧の和の予測値とよく対応している。

セグメントリングの断面力は、セグメントの本体部のひずみ計測値および継手ボルトのひずみ計測値から、曲げモーメントを算出した。

すなわち、完成時荷重に対する断面力としては、計測セグメントの裏込め注入終了後計測値がほぼ安定したときの計測値から求め、施工時(裏込め注入時)荷重に対しては、裏込め注入時の計測値から求め、予測解析値とともに図-36に示す。両者はよく対応しており、セグメントの設計計算法の妥当性を確認できた。

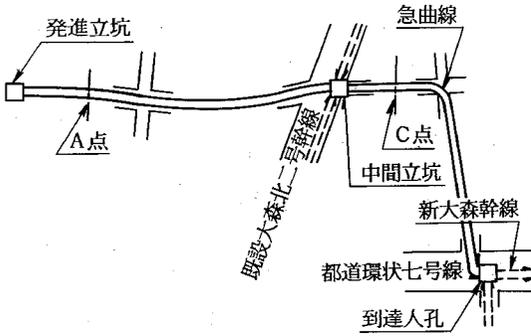


図-37 計測位置図

表-11 測定点数一覧表

計画断面	項目	計器名	リング数	測定数	計測位置
A No. 77R	土圧	土圧計	1	4	上下、左右
	水圧	水圧計	1	4	"
	桁応力	ゲージ(1軸)	1	36	主桁、中主桁
	継手応力	ゲージ(2軸)	1	24	継手板上下、左右
		ゲージ(1軸)	1	6	継手補強板
	ボルト	ボルトゲージ	1	14	リング継手
リング変形	内空変位計	3	6	上下、左右	
小計				94	
C No. 343 (甲)	土圧	土圧計	1	6	上下、左右
		パッド式土圧計	1	2	左右
	水圧	水圧計	1	4	上下、左右
	桁応力	ゲージ(1軸)	1	40	主桁、中主桁
	継手応力	ゲージ(2軸)	1	56	継手板上下、左右
		ゲージ(1軸)	1	14	継手補強板
C No. 344 (乙)	ボルト	ボルトゲージ	1	14	リング継手
	リング変形	内空変位計	3	6	上下、左右
	小計				142

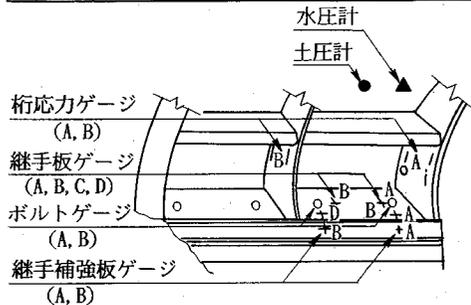
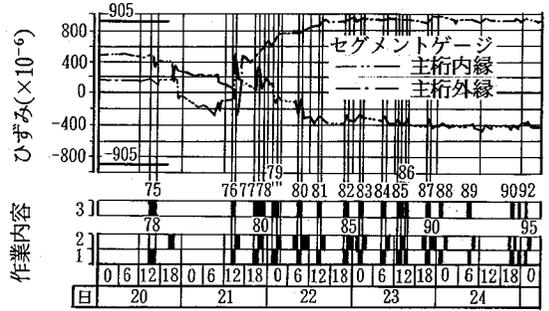


図-38 計器配置説明図

(7) 実工事でのセグメント計測

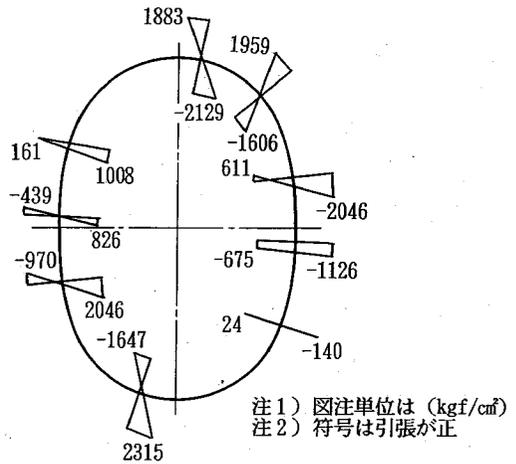
実工事の「新大森幹線その4工事」のトンネル断面は、実証実験工事と同一形状であり、セグメントの外形状寸法、分割も同一となっている。セグメントは主断面の抵抗モーメントが大きいこと、路線にR=20mの急曲線が存在すること等により、中桁を有する3本主桁構造の鋼製セグメントになっている。

前述したように断面力は円形断面と違って、曲げモーメント卓越型であり、作用荷重(土圧、水圧等)の変化に対して鋭敏であるため、路線長は560m程度であるがセグメントは主断面の抵抗モーメントが1m当たり7.39



作業内容凡例 3:裏込め注入中 2:組立中 1:掘削中

図-39 セグメント応力経時変化図
(主桁ゲージ) : A断面



注1) 図注単位は (kgf/cm²)
注2) 符号は引張が正

図-40 主桁、中桁の縁応力度

~10.89tf・m(72.5~106.8 kN・m)の範囲で異なる3タイプになっている。

この実工事においても、セグメントの安全性確認とともに設計と対比して今後の技術資料とするため、計測断面を設定して作用土圧・水圧、セグメント本体および継手ボルトの応力、セグメントリングの変形等を計測した。

a) 計測断面の設定

計測断面は、図-37に示すようにA断面、C断面の2断面を設定した。A断面は、初期掘進時でのセグメントの安全性の目処を把握し、定常掘進時の掘進管理にデータをフィードバックするもので、No.77(甲組)の1リングを対象とした。C断面は、定常掘進時の作用荷重と安全の確認を行う他、セグメントの設計について検討するため、No.343、No.344の甲乙組の連続した2リングを対象とした。

b) 計測項目

計測項目は表-11に示すとおりである。測点については以下のように考え配置した。

・荷重分布を把握するため、セグメントの上下・左右の土圧・水圧分布を測定する。特に、C断面では左右のス

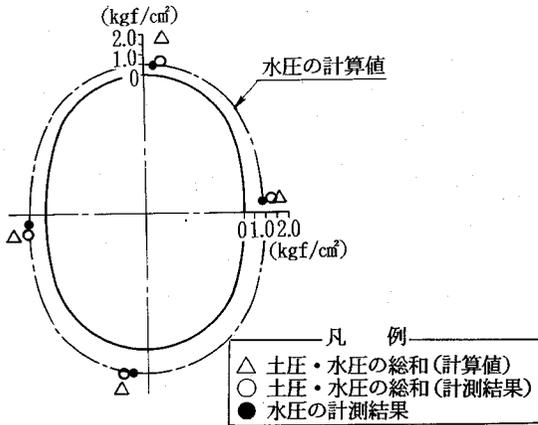


図-41 セグメントに作用する土圧・水圧計測結果

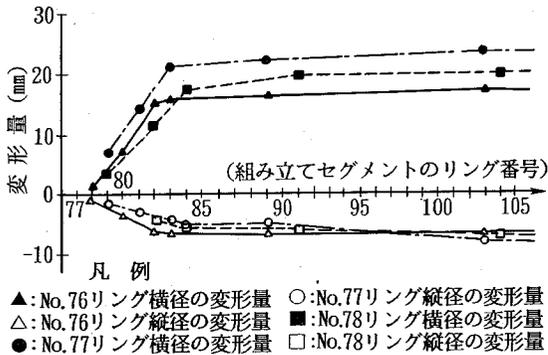


図-42 セグメントの内空変位測定結果：A断面

プリングライン付近に受圧面積の大きなパッド式土圧計を取り付け、セグメントに作用する土圧をできるだけ正確に測定する。

- ・断面力分布もさることながら、曲げが最大と予想される位置の応力を把握するために、継手隣接位置付近の主桁・中桁および継手板、補強板の応力と継手ボルトの軸力を計測する。これら計器配置の詳細を図-38に示す。
- ・縦楕円セグメントリングの変形状況把握のため、上下、左右の内空変位を計測する。

c) A断面計測結果

計測リングである No.77 の組み立て直後のリング底点付近の主桁ひずみ経時変化を図-39に示す。図から、No.81 までは裏込め注入時の応力の増加が特に大きく、No.87 の裏込め注入まで増加して、ほぼ、一定値となる。

一定値となった状態のひずみ計測値から、断面の平面保持を仮定して主桁、中桁の縁応力度に換算した結果を図-40に示すが、かなり大きな応力が底点付近に発生している。

この状態での土圧・水圧の計測結果を図-41に示す。水圧は設計値に対応しているが、土圧(土圧・水圧の総

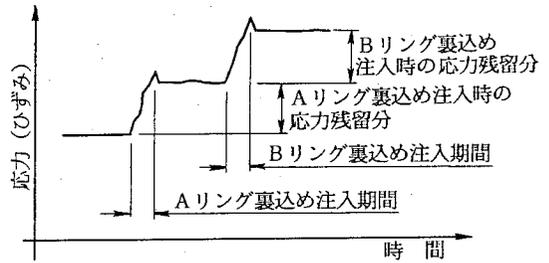


図-43 応力経時変化パターン

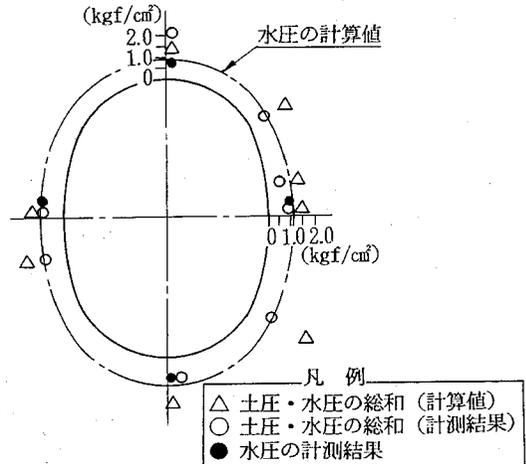


図-44 セグメントに作用する土圧・水圧計測結果

和)は、設計値の40~80%であり、大きな応力の発生とは整合していない。

しかし、内空変位計により測定したセグメントリングの変形は、図-42に示すように、横径の縮小が17~23mmで(横径の約0.7%)、縦径の伸びが7~8mm(縦径の約0.2%)となっており、大きな応力の発生と対応している。

この原因は、形状保持装置を稼働させていたものの、図-43のように裏込め注入圧による応力は注入終了後に若干低減するが大半が残留し累積しており、注入圧が後方のセグメントまで伝播してセグメントの変形を生じさせ、ここに裏込め材料が回り込んで、注入の度毎に変形が累加していくこととなり、曲げ卓越型の縦楕円では変形しやすいためにこの影響が生じていると考えられる。

このため、以後のセグメントに対しては主桁を補強して安全を期した。

d) C断面の計測結果

土圧計および水圧計の取束時における計測結果を図-44に示す。

土圧計は、パッド式土圧計も含めて、天端付近を除いて設計値より低い値を示し、その値は水圧計の値に近く、地山が自立していたものと考えられる。

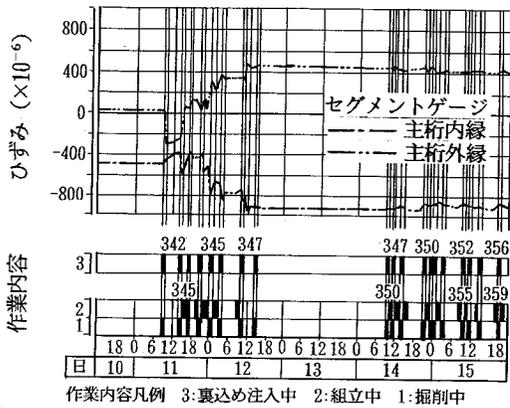


図-45 セグメント応力経時変化図
(主桁ゲージ) : C断面

計測リングである No. 343 の組み立て直後のリング底点付近の主桁ひずみ経時変化を図-45 に示す。この経時変化も計測セグメントの後方7リングの掘進まで顕著に増加し、その後の増加は少なくなり、後方約20m で一定の値になった。

主桁・中桁の縁応力度としては、A断面と同様の傾向が見られ、計測リングの組み立て後、次リング (No. 344) 掘削時には底部位置で最大 1354 kgf/cm^2 (133 MPa) と大きな応力が発生し、収束時には最大 2282 kgf/cm^2 (224 MPa) を示した。

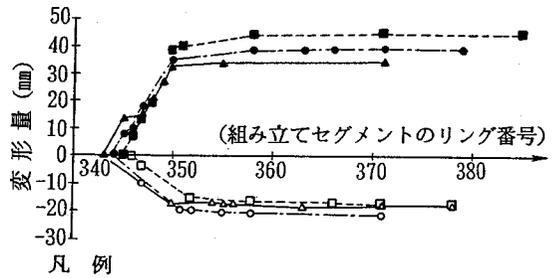
内空変位計でのセグメントリングの変形測定結果は図-46 に示すように、水平方向に 40mm 程度縮み、鉛直方向に 20mm 程度の伸びとなった。

当C断面においても作用土圧が水圧程度と低いにも拘らず、大きな応力が発生しており、施工時の荷重の作用が影響していることが再確認された。これは、テール部とセグメントのせりによる偏荷重や、形状保持装置の盛替えに伴うセグメントの影響も考えられるが、裏込め注入に応じて応力が累積していく過程から、主原因としては裏込め注入圧力の影響と見るのが妥当であろう。

このような現象を防ぐには、セグメントの設計に付加荷重に対する項目を設ける (安全率をみる) 方法もあるが、より効果的・経済的な見地からすると、施工時の影響がなくなるまで (今回の実工事条件では 5~7 リング程度後方まで) 形状保持装置をセグメントに取り付けておくという方法が適当かと思われる。

5. まとめ

遊星カッター方式による“自由断面シールド工法”の開発に取り組み、下水管渠用として狭小道路下に大容量を確保でき、流下特性としても有利な縦楕円シールド工法を実用化した。



凡例
▲: No. 343リング横径の変形量 ○: No. 344リング縦径の変形量
△: No. 343リング縦径の変形量 ■: No. 345リング横径の変形量
●: No. 344リング横径の変形量 □: No. 345リング縦径の変形量

図-46 セグメントの内空変位測定結果: C断面

そのために実施してきたシールドおよびセグメントの設計検討ならびに各種実験と実証実験工事によって得られた主要事項、また、その最初の実工事を通じて得られた主な知見を列挙すると以下のとおりである。

(1) シールドについて

- ①主カッターは等速回転し、遊星カッターは不等速に動くため、負荷の変動が生じる。その平均化を図るためには遊星カッターの奇数配置が適しており、主カッターがφ3m級では3個配置となる。
- ②スイングアームの制御は、機械式の倣い方式ではガイドローラーの反力が主カッターのトルク変動に影響を及ぼし、回転方向によって著しい差異が生じた。一方、自動制御方式では、トルク変動がその分緩和され、余掘りの形状を自由に設定できるため後者の方が適している。
- ③主カッターおよび遊星カッターともトルクは、地山切削用より攪拌用の方が大きく、チャンパー内土砂の流動性にかかなり影響される。また、攪拌トルクはスイングアームがチャンパー内下部の土砂を掻き揚げる時に最大となるため、土砂の流動性の調整が装備トルクとの兼ね合いで重要である。
- ④装備トルクは、模型実験の結果に基づいて設定したが、施工実績から判断して妥当なものであった。

(2) セグメントについて

- ①縦楕円形の覆工構造は、縦横比によっては設計荷重下において縦長に変形し、曲げモーメントは頂部、底部において負曲げの分布となる。
- ②断面力特性に関するパラメータ解析で、縦横比の増加とともに、軸力は余り変化しないが曲げモーメントは著しく増大し、曲げ卓越型となる。
- ③曲げモーメントの増大に応じて部材断面強度も大きくなるので、縦楕円形としての機能要求からの縦横比と、

経済性から見た部材断面との兼ね合いの調整が必要である。

- ④大きな曲げモーメントに対応するためには、合成セグメントや高剛性継手が適しており、合成セグメントの断面設計にはRCセグメントの設計手法を準用することができる。
- ⑤覆工構造の設計法としても、円形シールドでの設計計算法を準用することができるが、曲げモーメント分布の特徴から、鉛直荷重を大きめに設定すると設計上危険となる場合がある。また、等分布荷重でも曲げモーメントが発生するため、裏込め注入圧や地下水圧の回復等についても十分留意して検討する必要がある。

(3) 施工上の知見について

- ①掘進時の主カッタートルクは、等積の円形シールドと概ね同等であり、攪拌トルクが増加するスイングアームの掻き揚げ時においても、平均値の20~30%増で納まった。
- ②スクリーコンベアは、機構上スイングアーム稼働範囲より内側のチャンバー中央付近に取り付けざるを得ないが、チャンバー下部の土砂の取り込みは、スイングアームの掻き揚げ効果が期待でき、 $\phi 100\sim 200\text{mm}$ の玉石でも容易に排土できた。
- ③裏込め注入圧によりセグメントが縦長に変形することを抑制するため、2リング分の形状保持装置を装備したが、それより後方でも裏込め注入圧による付加応力の累積が見られた。このため、影響が少なくなるまで形状保持装置を稼働させておくことがセグメント設計上合理的である。
- ④遊星カッターおよびその制御機構がシールド前方にあるため、シールド重心も前方寄りになり、軟弱地盤では前下がり傾向が見られた。これに対しては、中折れ装置の上向き作動が効果的であった。
- ⑤曲線施工時に、ローリングしている状態で中折れ装置を作動させると、幾何学的関係からそれを増幅させる

作用が働き、その影響は硬質地盤において顕著であった。

- ⑥ローリングの修正には曲線区間進入前の姿勢管理が重要であり、対策としては、遊星カッターによる余掘りが効果的であった。
- ⑦急曲線($R=20\text{m}$)施工では、補助工法に加え、余掘り形状管理を主体とした掘進管理により、ローリングを含めた線形管理は容易であった。
- ⑧周辺地盤変状については、円形シールドと変わる傾向は見られなかった。
- ⑨セグメント組み立てにはエレクター旋回リング自体の昇降工程が加わるため、施工能率としては、 $\phi 3\text{m}$ 級で等積円形の80%程度の日進量となった。

謝辞： なお当シールド工法は、東京都下水道局、(財)土木研究センターと民間(現在37社)が共同で開発を進めてきたもので、都下水の実工事にあたっては、山本稔都立大名誉教授、小泉淳 早稲田大教授に種々ご指導をいただきました。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 奥田 康, 千田昌平, 伊佐 秀: 自由断面シールド工法の研究開発, トンネルと地下, No.22, Vol.7, 1991.7.
- 2) 石川 旭, 秋山敦朗, 田代 昇, 中尾 努: 自由断面シールド工法の現場実証実験, トンネルと地下, No.22, Vol.11, 1991.11.
- 3) 石川 旭, 千田昌平, 萩原英樹, 山本進: 自由断面シールド工法の開発, 建設の機械化, 1992.6.
- 4) 井上英雄, 辰野政信, 赤星三雄: わが国初の泥土圧縦楕円シールドの施工, トンネルと地下, No.24, Vol.6, 1993.6.
- 5) 内山 洋, 井上英雄: 泥土圧縦楕円シールド工法による新大森幹線工事, 土木施工, 34巻, 9号, 1993.9.
- 6) 石川 旭: 縦楕円シールドの施工—都下水道新大森幹線その4工事—, トンネルと地下, No.25, Vol.5, 1994.5.
- 7) 上田征治, 秋山敦朗, 並木和夫: 自由断面シールド機模型実験, R・D神戸製鋼技報, Vol.41, No.4, 1991.

(1995.1.24 受付)

DEVELOPMENT OF VERTICAL ELLIPTICAL-SECTION TUNNELLING METHOD BY SOIL PLASTICIZING SHIELD

Kotaro KUSHIYAMA, Hiizu ISA, Kazunori BABA, Yoshitaka MIYASHITA and Tatsuro TAMAI

It is essential to use the space under narrow streets most effectively in big cities such as Tokyo.

The development of "the JIYUU-DANMEN SHIELD METHOD", which is a method to construct shield tunnels with non-circular sections such as elliptical, rectangular or horseshoe shapes, is under way for that purpose. As the first practical use, the Elliptical Shield Method using planetary diggers was applied to a trunk sewer tunnel under a narrow street in Tokyo.

In this paper, the design procedure of the shield machine and segments for the shield tunnel with elliptical shape is described together with experimental studies carried out to verify the said design procedure. Several important findings obtained through the actual construction are also described.