# 急曲線シールドトンネルにおける リング間補強部材の開発

平	野	勝	識		笹谷	輝 勝	
磯	崎	智	史	*1	藤 本	直 昭	*1
佐	藤		I.	*2	春田	俊哉	*2

概 要

都市部の下水道や雨水排水路のシールド工事において、立地条件等の制約から、急曲線の施工が必須事項となりつつある。 一方、二次覆工一体型セグメントは、工場生産により二次覆工コンクリートの品質が安定し、現場工期の削減、補修等の低減が 期待でき、高品質・高耐久、維持管理費の低減が求められる昨今、都市部におけるシールド工事で多くの採用が見込まれてい る。一方、二次覆工一体型セグメントのリング間接合部にワンパス継手を採用する場合、スペースの関係で設置可能な継手数に 制約がある。また、急曲線部では施工時にマシンテール部からリング間継手にせん断力を受ける。そのため、急曲線部では直 線部・緩曲線部に対してリング間接合部がせん断耐力不足となることがあった。そこで、筆者らは二次覆工一体型コンクリート中 詰め鋼製セグメントのリング間補強部材を開発し、実験による耐力検証を行うとともに、現場計測で実際の作用荷重とその要因と なるマシン制御との相関を確認した。

## Shear reinforcement of segment ring joint on sharply curving shield tunnel

#### Abstract

We have developed a reinforced component which is installed in a segment ring joint that is resistant to construction shear force from the machine tail. In order to clarify the structural performance of the reinforced component, we tested at full scale using actual construction loads. Moreover, we had done the field measurement of the strain of steel plate around segment ring joint, the tail clearance between machine and segment, and promotion jack load, and tried to estimate the actual construction load. As a result of the experiment, we clarified the applicability of the reinforced component to design load. And from the field meas-urements and frame analysis, we verified a correlation between the load from the shield machine and segment behavior, and the factors generating construction load.

キーワード:施工時荷重、二次覆工一体型コン クリート中詰め鋼製セグメント \*1 建設本部 土木エンジニアリングセンター\*2 東京支店 土木部

#### §1. はじめに

都市部の下水道や雨水排水路のシールド工事において、 立地条件等の制約から、急曲線の施工が必須事項となりつ つある。一方、二次覆工一体型セグメントは、工場生産によ り二次覆エコンクリートの品質が安定し、現場工期の削減、 補修等の低減が期待でき、高品質・高耐久、維持管理費の 低減が求められる昨今、都市部におけるシールド工事で多 くの採用が見込まれている。一方、二次覆工一体型セグメ ントのリング間接合部にワンパス継手を採用する場合、スペ ースの関係で設置可能な継手数に制約がある。また、急曲 線部では施工時にマシンテール部からリング間継手にせん 断力を受ける。そのため、急曲線部では直線部・緩曲線部 に対してリング間接合部がせん断耐力不足となることがあっ た。そこで、筆者らは二次覆工一体型コンクリート中詰め鋼 製セグメントのリング間補強部材を開発し、実験による耐力 検証を行い、現場計測で作用荷重とマシン制御との相関を 確認した。

## §2. 工事概要

本報の対象工事である雨水放流渠工事は最小土かぶり 6.64m、延長1539m、セグメント外径  $\phi$  7900mmの低土土 被り・大口径の泥水式シールド工事である。路線の大半は 砂町運河を横過するものであり、掘削地山は超軟弱な粘性 土地盤である。縦断線形は一定勾配であるものの、運河を 横過することから、土かぶりが急激に変化する護岸部や、 土かぶりが 1D を切る水底直下での急曲線部施工 (R=60m)など、難易度の高い工事である。

シールドは発進後 46m で運河下に入り、土かぶり 6.6m 程度で右 R=60m の急曲線を含む 900m の距離を水底下 で掘進する。掘削土質は、全線が有楽町下部粘性土層で あり、N 値=0~2 程度の非常に軟弱な粘性土である。

平面線形は R=60m 急曲線が 2 箇所、R=100m 曲線が 2 箇所(S 字)であり、縦断線形は i=1‰の下り勾配である。 一般に軟弱な地盤における急曲線施工は、曲線外側の地 山反力が確保できないためにオーバーランしやすく、シー ルド機を計画線に乗せるために片側のジャッキを偏重して 使用し、セグメントに過大な負荷をかけることがないよう、厳 格かつ適切な掘進管理が必要とされる。

以上のような、軟弱かつ低土かぶりの地盤条件を考慮し、 掘進中の地山の崩壊・沈下対策として、中折れジャッキを 16 本装備したシールド機を採用した。マシンの仕様詳細を 表1に示す。

#### 表1 シールド機仕様

項目	仕様
シールド外径	$\phi$ 8070mm
シールドジャッキ	2500kN×34.3MPa×1800mm×24本
中折れジャッキ	3000kN×34.3MPa×650mm×16本
最大中折れ角度	左右4.5度, 上下0.5度
コピーカッタージャッキ	195kN×20.6MPa×120mm×2本



写真1 雨水放流渠 急曲線区間(右 60R)

#### §3.施工時作用荷重

下水道のシールド急曲線部の施工において、シールド マシンテール部からセグメントのリング間接合部に作用する 荷重は、図 1 に示すように切羽圧の合力と推進ジャッキ荷 重の O 点を中心とするモーメントの釣り合い(式1)から幾何 的にせん断力(式 2)を算定し、施工時設計作用荷重として いる。これらは、設計で考慮しているものの、実際にマシン テール部から作用する施工時せん断力は、直接計測するこ とが困難であり、既往の実験・解析例 5)、現場で計測され た事例 ゆにおいてもせん断力の直接計測は難しい課題で あることが伺える。

$$M_j = \Sigma (P_{ji} \cdot L_{jj}) = F \cdot L_G + S_T \cdot L_T$$
(1)

$$= \{ \Sigma(P_{ji} \cdot L_{ji}) - F \cdot L_G \} / (L_T \cdot A)$$

$$(2)$$



図1 マシンテール部から受けるせん断力 1)

-48-

# §4. リング間接合部の補強

#### 4.1 補強概要

施工時の設計せん断力<sup>2) 3) 4)</sup>を考慮したとき、ボルト本 数の増加は施工性に課題があるため、せん断力をボルト断 面だけでなく、リング間接合部に補強リングを設置しせん断 力を分担させるすることとした。写真2に、本工事で採用し た二次覆工一体型コンクリート中詰鋼製セグメントとリング間 接合部せん断補強金物を、図2にリング間接合部のせん断 補強詳細を示す。



写真2 二次覆工一体型コンクリート中詰鋼製セグメントと リング間接合部せん断補強金物



図2 リング間接合部せん断補強詳細

# 4.2 実験計画

接合部のせん断補強リングが所要のせん断耐力を保有 することを検証し、また別途実施する現場計測で得られた ひずみデータから作用荷重に変換するため、リング間接合 部の実大のせん断実験を行った。実験状況を写真 3 に示 す。試験体は実大セグメントのリング間接合部1箇所を挟む 1000mm を切り出した形状とした。鉛直ジャッキはシールド 機の推進ジャッキを、水平ジャッキはテールブラシからの反 力を想定している。接合部材に作用する荷重を実験で直接 計測することは困難であるため、写真4に示すように、接合 部周辺の鋼製セグメントの桁鋼板に放射状にひずみゲー ジを貼付した。ひずみゲージ貼付位置の決定に先立って、 写真5のような簡易な要素試験を行い、図3に示すような縁 端からの距離と荷重の関係を確認した。施工時の現場計測 では、接合部の遊びから、ほとんどひずみが発生しないこと も予想されたため、接触判断が可能で有効と思われるひず み量として、10kN で 200 $\mu$ 程度のひずみ量を発生する孔 中心で $\phi$ 75mm となる位置にひずみゲージを貼付する計 画とした。



写真3 実大せん断実験



写真4 桁鋼板のひずみゲージ 写真5 簡易要素試験



# 4.3 実験結果

実験に先立ってピンボルトと補強リングのない状態でリ ング間接合部の推進ジャッキ(軸力)による摩擦力を確認し た(図 4)。摩擦係数は 0.32 であり、各軸力水準においても 安定した値を示した。実験結果として、荷重~変位関係を 図 5 に示す。実験結果から継手 1 本あたりの耐力は 1,156kN であり、図 1 の設計モデルにより算定された設計 施工時最大せん断力 746kN に対して、安全率 1.5 を確保 できた(安全率 Fs = 1,156÷746=1.54)。実験時の桁鋼 板の発生ひずみ分布を図6に示す。設計荷重に対して、補 強リングと鋼板の接触する点は部分的に高いひずみが発 生するが、全体としては1000  $\mu$  以下の水準である。また、こ のせん断力と鋼板ひずみの関係を、施工時計測の荷重算 定に使用することとした。











図6 桁鋼板の発生ひずみ分布(1の方向に加力)

# §5. 現場計測

# 5.1 計測計画

施工時にセグメントリング間に作用するせん断力を定量 的に把握するために現場計測を行った。計測リングの詳細 な位置を図7に示す。計測は路線終盤の左R60の急曲線 区間において、曲線の中間(1295 リング)と終了(1382 リン グ)の2リングについて計測を実施した。

計測は実験で実施した方法と同様に、リング間ボルト 25 箇所の桁鋼板に放射状に貼付したひずみゲージにより、ひ ずみを計測した(図 8)。計測は1分間隔とした。



図7 現場計測リング位置(左 60R)



#### 5.2 ひずみ計測結果

計測結果の一例として、1295リングの No.9 ボルトおよび No.10 ボルト周辺のひずみの経時変化を図 9 に、図 10 に 示す。テールブラシの接触時間を色付部で示している。 No.9 ボルトは特にひずみが発生したボルトであるが、テー ル接触開始時から一箇所のひずみが漸増し、テールブラ シ接触後に最大値を示し、その状態を維持している。

その隣の No.10 ボルトは、ほとんどひずみが発生してい ないが、一旦発生したひずみは、そのままの状態を維持し ている。



図9 桁鋼板ひずみの経時変化(1295リング)

#### 5.3 換算荷重分布

得られたひずみを計測の事前に実施した実験結果にもと づき、荷重換算し荷重分布とした。結果の一例を図 10、図 11に示す。図10は1295リングの掘進開始から最大値のと きまでの水平方向の荷重(右方向正)の経時変化を示して いる。全体としては低水準の荷重であるが、No.9、No.22ボ ルトで他よりも高い値を示しており、セグメント製造時、組み 立て時の微小な誤差が計測値に影響を及ぼしていることも 予想される。図11は1382リングの最大時の鉛直方向、水 平方向の荷重分布である(右方向・上方向正)。1295 リング より全体として低い荷重水準であることがわかる。 これらの荷重分布を総合し、全体としての荷重合力と方 向を示したのが図 12 であり、1295 リングは右上方へ 738k N、1382 リングは左下へ 347kN であった。1295 リングと 1382 リングは同じ曲線であるが、荷重の大きさ、作用する 方向が異なっている。これは、後述する1295リング(曲線初 期)と1382 リング(曲線終盤)の違いによる掘進制御の相違 が影響したものと考えられる。



図 12 各リングの最大時の荷重合力と方向

-51-

#### 5.4 荷重の経時変化

図 13 に 1295 リングの水平方向、鉛直方向の荷重合力の経時変化を示す。テール接触手前の段階から荷重増加し、接触終了後しばらく後に最大値を示すことがわかる。



#### 5.5 施工時外力の推定

実大実験時に、ジャッキ推力の 30%程度がリング間の摩 擦力として作用することを確認したため、ジャッキ推力とひ ずみから換算した作用荷重から、施工時のせん断力を推定 し、リング間接合部のせん断耐力と比較した。計測値と設計 せん断力に一定の整合性が認められる。また、摩擦を考慮 したリング全体の安全率は 5.5 であった。

【計測せん断力】

・桁ひずみからの推定外力 738kN ・摩擦力 14,000kN ×0.32 = 4,480kN ・推定外力 738kN + 4,480kN = 5,218kN 【設計せん断力】稼働ジャッキから式(2)より算出  $\tau = \{\Sigma(P_{ji} \cdot L_{jj}) - F \cdot L_{cs}/(L_T \cdot A) = 5,211kN$ 【せん断耐力】(実験値) ・ボルト1本の耐力  $P_u = 1,156kN$ ・ボルト25本の耐力 1,156×25本 = 28,900kN 【安全率】 $F_s = 28,900/5,218 = 5.54$ 

#### 5.6 掘進ジャッキパターン

本報のシールドマシンは、24本のジャッキで推進している。 計測セグメントがテールブラシを通過する際に稼働させた ジャッキパターンを図 14 に示す。ジャッキは稼働、未稼働 の切り替えのみの制御であり、総推力を稼働ジャッキ本数 で割った値が一本当たりのジャッキ推力となる。

#### 5.7 掘進ジャッキストローク

稼働ジャッキの計測セグメントがテールブラシを通過する 際の左右ジャッキのストローク差を図 15 に示す。

1295 リング(曲線途中)は、シールド機の中折れ角を

4.4°とし、左右の掘進ジャッキストローク差を有する掘進制 御を行った。一方、1382 リング(曲線出口)は中折れ角 0°、 左右の推進ジャッキストローク差をゼロとする掘進制御を行 った。そのため、同一曲線区間内であっても、ひずみから 算定したリング間せん断力の大きさ、作用する方向が異な る結果となったものと考えられる。

これらの結果は、左右均等の掘進制御をすることにより、 実際に生じるリング間せん断力を非常に小さく制御できるこ とを示唆しているものと考えられる。



図14 掘進ジャッキパターン例(テールブラシ通過時)



#### 5.8 掘進時のテールクリアランス計測

計測対象セグメントについて、計測セグメント組立から 計測セグメントがマシンテール部を抜けるまでの間のテー ルクリアランス分布を図 16 に示す。計測セグメントのテール ブラシへの接触などの作用せん断力に影響があると思われ る各段階毎にピックアップした。グラフは2つの計測セグメン トを同じ図に示している。

## §6. セグメント組の影響評価

#### 6.1 解析概要

リング間接合部に作用する荷重におけるセグメント千鳥 配置の影響を検討するために、はりーばねモデルによるフ レーム解析を行った。セグメント間には"ばね"を設定した。 解析設定外力を図 17 に、解析荷重条件を表 2 に、解析モ デルの考え方を図18に示す。

リング節点は 200 節点とし、リング間にばねを設定した。 節点間には、セグメント継手には回転ばね、リング間継手に はせん断ばね、地盤セグメント境界には半径方向に地盤反 力ばねを設定している。荷重条件は施工時を想定し、管内 は空水状態としたため、内水圧は作用しないものとした。そ の他の条件としては、側方土圧係数=0.75、土の単位体積 重量 $\gamma = 16$ kN/m<sup>3</sup>、粘着力 C=54kN/m<sup>3</sup>とした。



(3)テールブラシ離脱時
 (4) 掘進終了
 赤:1295 リング、青:1382 リング(1目盛=20mm)
 図 16 テールクリアランス計測結果例(1295 リング)



表2 解析荷重条件

基本荷重	単 位	空水状態
鉛直荷重 Pvi	kN/m <sup>2</sup>	275.681
水平荷重(頂部) Pm	kN/m <sup>2</sup>	209.161
水平荷重(底部) Pn2	kN/m <sup>2</sup>	299.161
底部反力 Pv2	kN/m <sup>2</sup>	275.681
自重 Wg	kN/m <sup>2</sup>	12.000
自重反力 Pg	kN/m <sup>2</sup>	37.699
側方地盤反力 q	kN/m <sup>2</sup>	0.000



図18 解析モデルの考え方

#### 6.2 解析結果

解析結果を図 19 に示す。図には半径方向の発生せん 断力を示している。荷重は±5kN 以内に収まっており、施 工時の設計せん断力の 1%以内であった。これを図 10、図 11 に示したリング間接合部の荷重分布と比較すると、荷重 オーダーは異なるものの、荷重発生傾向が類似する箇所も あり、セグメントの千鳥組によって初期状態の変形が決定づ けられている可能性がある。



単位:kN(外向き正) 図19 半径方向のリング間接合部の発生せん断力

## §7. おわりに

本報は、新たに開発したリング間接合部の補強部材の構造性能を確認するとともに、急曲線区間での施工時計測により、セグメントリング間に作用する施工荷重の推定を試みた。テールせん断力の発生要因(テールクリアランス、稼働ジャッキ位置、左右ジャッキストローク、中折れ角、他)のうち、カッターフェイス面の角度に直接影響するジャッキストロークと中折れ角の影響が大きいと推察された。"シールド急曲線部の設計検討の手引き"1<sup>)</sup>による施工時荷重は、接合面摩擦力を考慮することで、現場計測結果と一定の整合性が認められた。詳細を以下に示す。

- (1)リング間接合部の補強部材は局所的に大きな荷重を受ける箇所があるものの、摩擦を考慮したリング全体としての安全率は5.5 であった。
- (2)荷重はテールブラシ接触中から漸増し、テール部抜け 以降の段階で最大となる。
- (3) 一旦作用した荷重は、その後も維持される。
- (4) ほとんどの接合ボルトでのせん断力は小さく、方向と大きさに一定した傾向は認められない。
- (5) 一部の大きなせん断力を受ける接合ボルトでは、マシン 制御による影響が認められる。
- (6)荷重の大小のばらつきは、セグメント製作精度の範囲の 微小な初期条件に起因すると推定される。
- (7)テールせん断力の要因(テールクリアランス、稼働ジャッキ位置、左右ジャッキストローク、中折れ角、他)のうち、カッターフェイス面の角度に直接影響するジャッキストロークと中折れ角の影響が大きいと推察される。
- (8) 左右ジャッキストロークに差を付けない制御で、テール せん断力を大幅に低減できる可能性がある。
- (9) "シールド急曲線部の設計検討の手引き"による施工時 荷重は、接合面摩擦力を考慮することで、一定の整合 性が認められた。
- (10)施工時のセグメントの千鳥組のリング間接合部への影響は、はりーばねモデルによる解析により荷重は軽微であるが、セグメントの千鳥組によって初期状態の変形が決定づけられている可能性がある。

謝辞:本研究を進めるにあたり、早稲田大学小泉淳教授、 日本シビックコンサルタント(株)大塚孝義氏から多大なるご 指導を賜った。また、データ整理、数値解析にあたってフジ タ 建設本部トンネルシールド部の片岡希誉司氏に協力い ただいた。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1)東京都下水道局建設部:「シールド急曲線部」の設計検討の手引き、平成14年9月
- 2)東京都下水道サービス株式会社:下水道シールド工事用
   二次覆工一体型セグメント設計・施工指針、平成21年2月
- 3) 土木学会:トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説、 平成8年
- 4)小泉淳,村上博智,石田智朗,高松伸行:急曲線施工用
   セグメントの設計法について,土木学会論文集,No.448
   /Ⅲ-19, pp.111-120, 1992.6
- 5) 木股浩孝、仲山貴司、津野究、粥川幸司、小西真治:シー ルドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解 析的検討、土木学会論文集 F1(トンネル工学)、Vol.69, No.1, pp.73-88, 2013.



# ひとこと

ー見ランダムな現場データから、意 外なほど計算値との一致が見られま した。安定した摩擦力を有効活用し、 施工時せん断力をゼロとするジャッキ 制御も可能になるかもしれません。

平野 勝識