

急曲線シールドトンネルにおける リング間接合部せん断補強

菅井 雅之¹・平野 正彦²・佐藤 工³・春田 俊哉⁴・平野 勝識⁵

¹地方共同法人 日本下水道事業団 関東・北陸総合事務所 (〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-27)
E-mail:Sugai01@jswa.go.jp

²地方共同法人 日本下水道事業団 関東・北陸総合事務所 (〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-27)
E-mail:Hirano06@jswa.go.jp

³(株) フジタ 首都圏支社東京支店 土木工務部 (〒151-8503 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2)
E-mail:tasatou@fujita.co.jp

⁴(株) フジタ 首都圏支社東京支店 土木工務部 (〒151-8503 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2)
E-mail:haruta@fujita.co.jp

⁵正会員 (株) フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)
E-mail:khirano@fujita.co.jp

シールド工事急曲線部でマシンテール部からリング間接合部に作用する施工時せん断荷重に対して、セグメント継手に設置する補強部材を開発した。これらの補強部材の構造性能を把握するため、実際の施工荷重を模擬した実大実験により補強効果の検証を行った。また、実際にリング間に作用する施工時荷重を把握すべくリング間接合ボルト周辺の鋼板ひずみ、マシンとセグメント間のテールクリアランス、推進ジャッキ荷重を計測し、施工時作用荷重を間接的に推定する試みを行った。実験の結果、設計で想定した荷重に対する補強部材の有効性を確認し、現場計測、フレーム解析によりシールドマシン挙動とセグメント挙動の相互関係、マシンテール部からの作用荷重とマシン制御との相関を確認した。

Key Words : shield tunnel, construction load, contact between shield and segment, tail clearance

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・緩曲線部に比べてリング間接合部で高いせん断耐力が要求される。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東京都砂町水再生センター雨水放流渠工事の工事概要を写真-1に示す。工事は最小土かぶり6.64m、延長1539m、セグメント外径φ7900mmの低土かぶり・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IDを切る水底直下での急曲線部施工(R=60m：写真-2)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。

上述のような超軟弱粘性土、IDを切る最小土かぶり6.6mを考慮し、掘進中の地山の崩壊・沈下対策としてシールドマシンを表-1のような仕様とした。

表-1 シールド機仕様

項目	仕様
シールド外径	φ8070mm
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
コピーカータージャッキ	195kN × 20.6MPa × 120mm × 2本



写真-1 東京都砂町水再生センター雨水放流渠概要

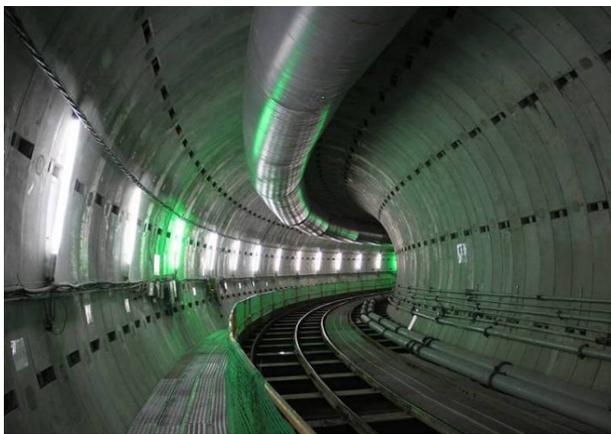


写真-2 急曲線区間 (右6OR)

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⁹⁾、現場で実測された事例⁴⁾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。

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

$$\tau = S_T / A$$

$$= \{ \sum(P_{ji} \cdot L_{ji}) - F \cdot L_G \} / (L_T \cdot A) \quad (2)$$

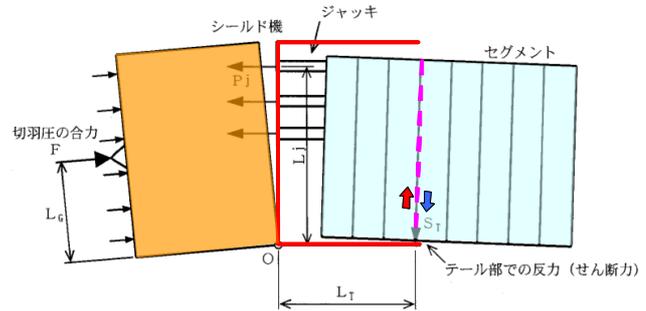


図-1 マシンテール部から受けるせん断力¹⁾

4. リング間接合部の補強

(1) 補強概要

施工時の設計せん断力^{2),3),4)}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-3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-3 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

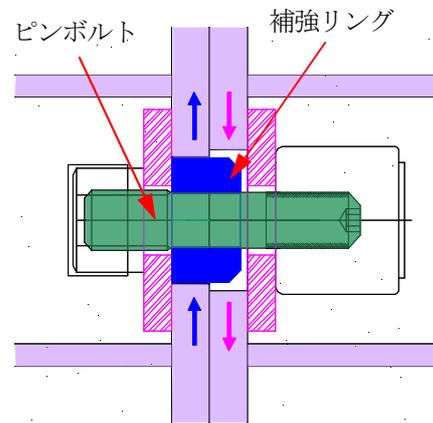


図-2 リング間接合部せん断補強詳細

(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-4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ブ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-5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-6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 μ 程度のひずみ量が発生する孔中心で ϕ 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-4 実大せん断実験

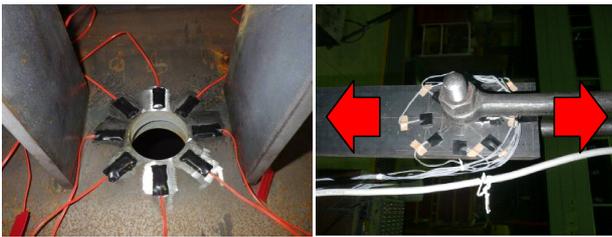


写真-5 桁鋼板のひずみゲージ 写真-6 簡易要素試験

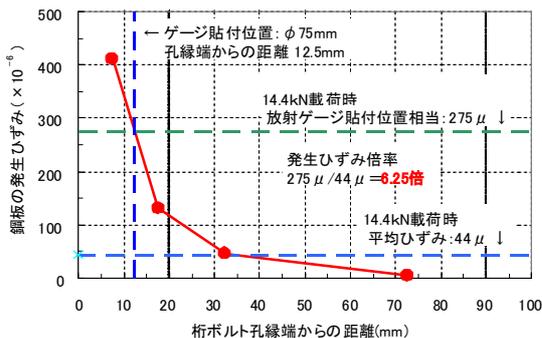


図-3 鋼板縁端距離とひずみの関係

(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 $F_s = 1,156 \div 746 = 1.54$)。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 μ 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。

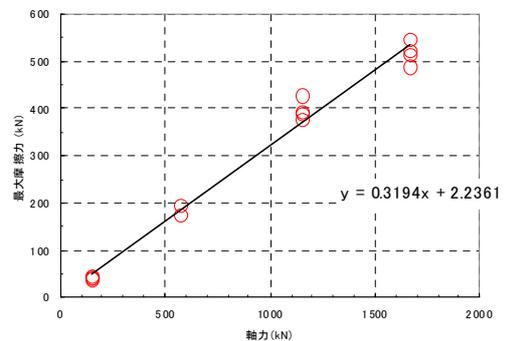


図-4 軸力と摩擦力の関係

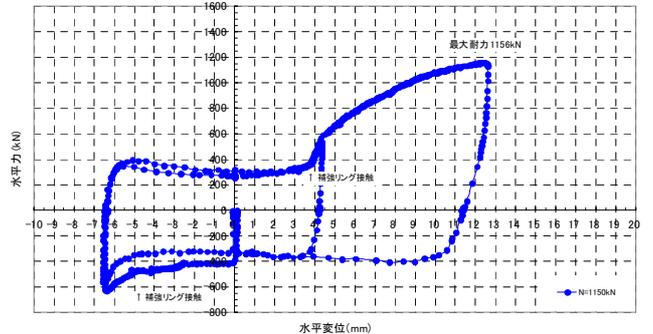


図-5 荷重～変位関係

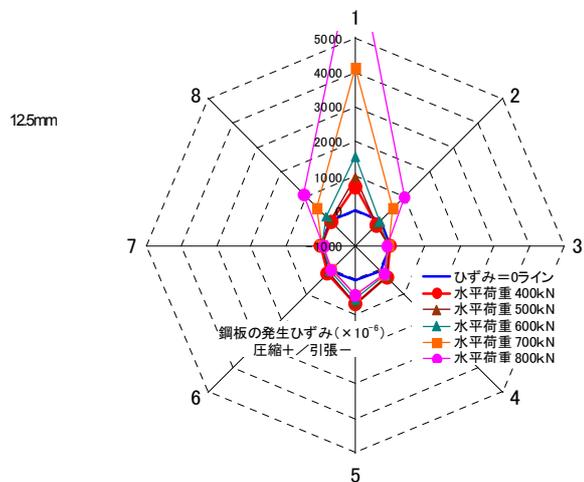


図-6 桁鋼板の発生ひずみ分布 (1の方向に加力)

5. 現場計測

(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。

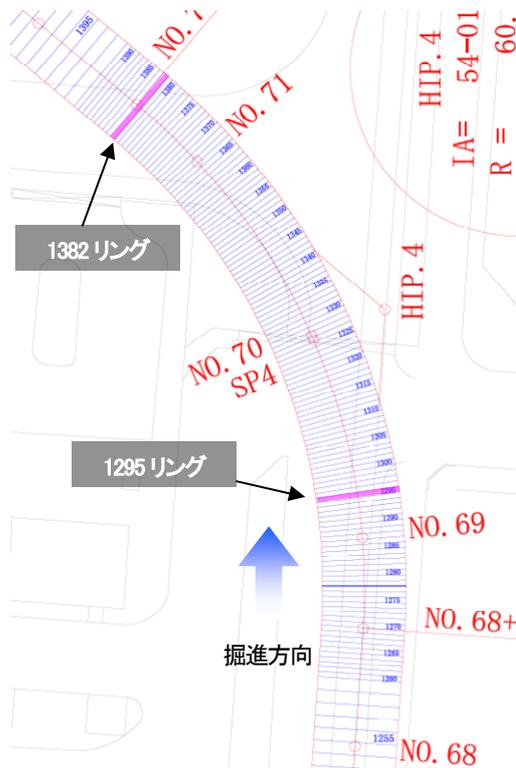


図-7 現場計測リング位置 (左60R)

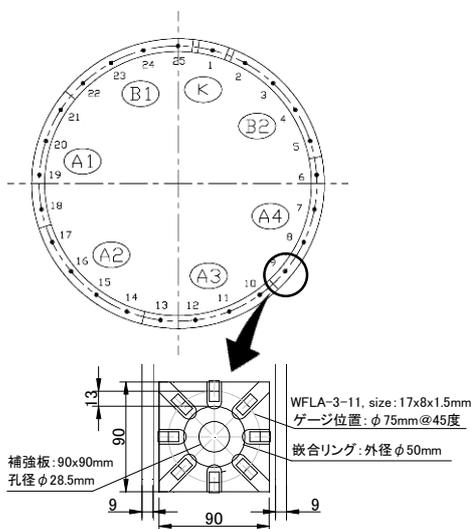
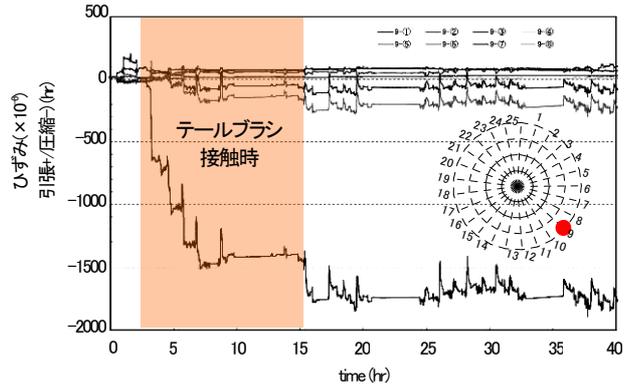


図-8 計測箇所詳細図

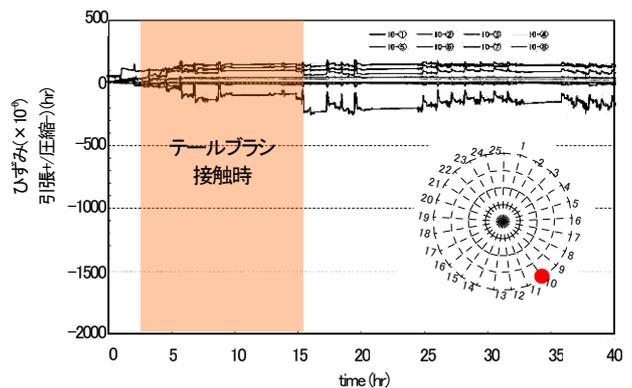
(2) ひずみ計測結果

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に示す。テールブラシの接触時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。



(1) No.9ボルト



(2) No.10ボルト

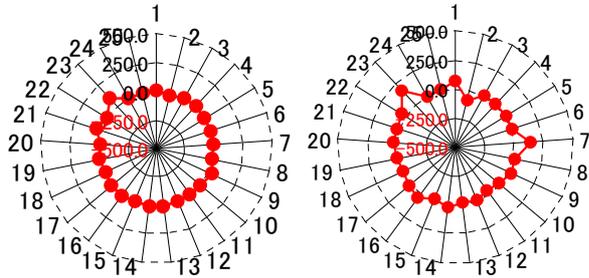
図-9 桁鋼板ひずみの経時変化 (1295リング)

(3) 換算荷重分布

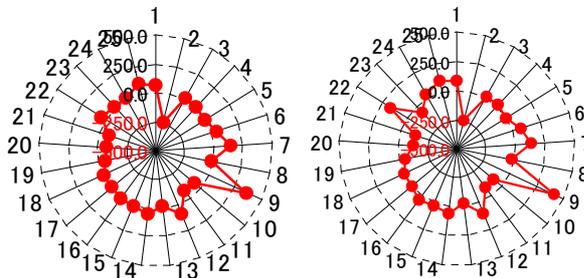
得られたひずみを計測に先立って実施した実験結果にもとづき、荷重換算し荷重分布とした。結果の一例を図-10、図-11に示す。図-10は1295リングの掘進開始から最大値のときまでの水平方向の荷重(右方向正)の経時変化を示している。全体としては低水準の荷重であるが、No.9、No.22ボルトで他よりも高い値を示しており、セグメント製造時、組み立て時の微小な誤差が計測値に影響を及ぼしていることも予想される。図-11は1382リングの最大時の鉛直方向、水平方向の荷重分布である(右方向・上方向正)。1295リングより全体として低い荷重水準であることがわかる。

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

738 kN, 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）の掘進制御の差が影響したものと考えられる。

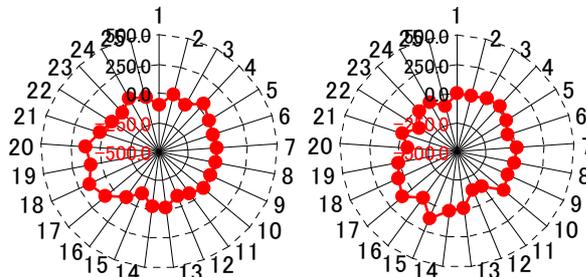


(1) 屈伸開始 (2) テール接触開始



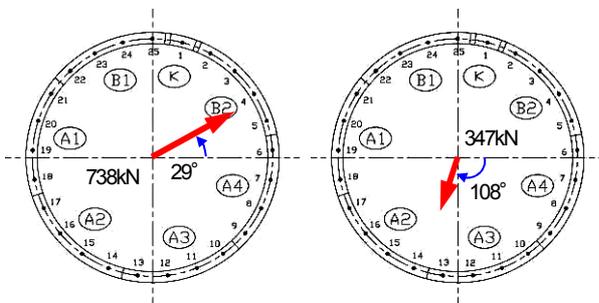
(3) テール接触終了 (4) 最大時

図-10 1295リングの水平荷重分布（右方向正）



(1) 水平方向 (2) 鉛直方向

図-11 1382リングの荷重分布（最大時）



(1) 1295リング (2) 1382リング

図-12 各リングの最大時の荷重合力と方向

(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していることがわかる。

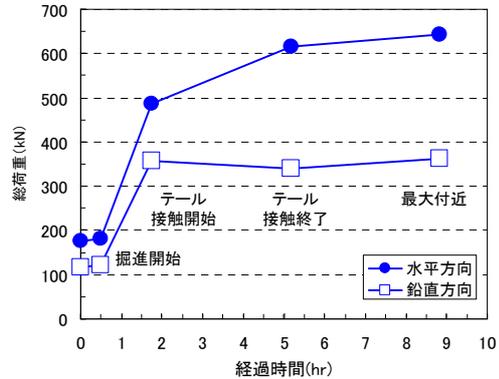


図-13 1295リングの荷重経時変化

(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 738 kN
- ・摩擦力 $14,000 \text{ kN} \times 0.32 = 4,480 \text{ kN}$
- ・推定外力 $738 + 4,480 = 5,218 \text{ kN}$

【設計せん断力】稼働ジャッキから式(2)より算出

$$\tau = \{ \sum (P_i \cdot L_i) - F \cdot L_G \} / (L_T \cdot A) = 5,211 \text{ kN}$$

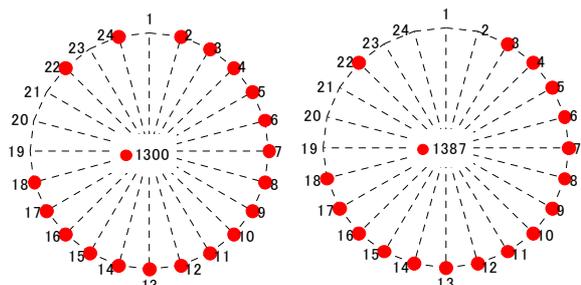
【せん断耐力】（実験値）

- ・ボルト1本の耐力 $P_u = 1,156 \text{ kN}$
- ・ボルト25本の耐力 $1,156 \times 25 \text{ 本} = 28,900 \text{ kN}$

【安全率】 $F_s = 28,900 / 5,218 = 5.54$

(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。



(1) R1295

(2) R1382

図-14 掘進ジャッキパターン例（テールブラシ通過時）

(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° ，左右の掘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。

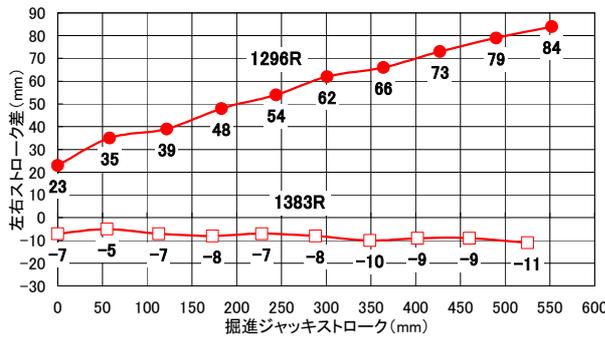


図-15 掘進ジャッキ左右ストローク差
(テールブラシ通過時, 右-左)

(8) 掘進時のテールクリアランス計測

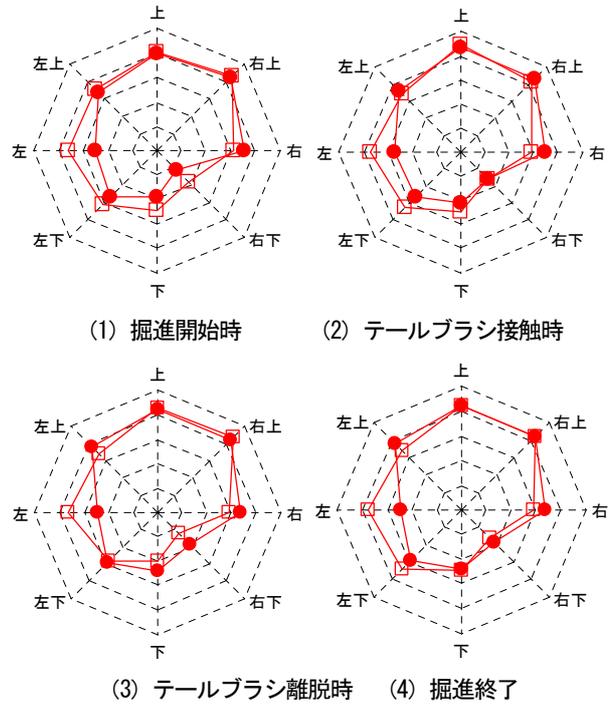
計測対象セグメントについて、計測セグメント組立から計測セグメントがマシンテール部を抜けるまでの間のテールクリアランス分布を図-16に示す。計測セグメントのテールブラシへの接触などの作用せん断力に影響があると思われる各段階毎にピックアップした。グラフは2つの計測セグメントを同じ図に示している。リング毎の顕著な差は認められなかった。

6. セグメント組の影響評価

(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、リング間にバネを設定した。節点間には、セグメント継手には回転バネ、リング間継手にはせん断バネ、地盤セグメント境界には半径方向に地盤反力バネを設定した。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。その他の条件は、側方土圧係数 $=0.75$ ，土の単位体積重量 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ ，粘着力 $C = 54 \text{ kN/m}^3$ とした。



● : 1295リング, □ : 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)

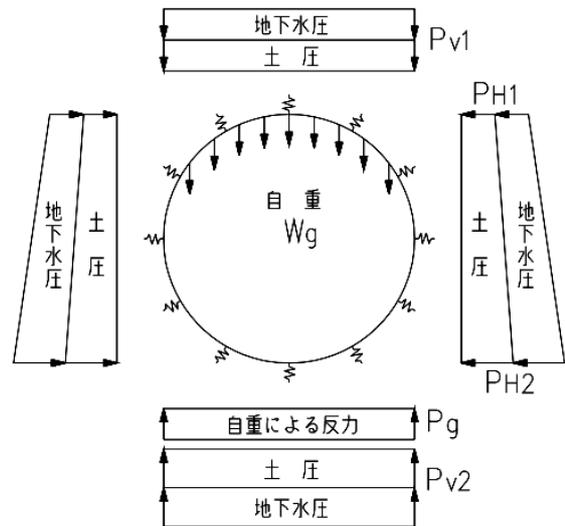


図-17 解析設定外力

表-2 解析荷重条件

基本荷重	単位	空水状態
鉛直荷重 P_{v1}	kN/m^2	275.681
水平荷重(頂部) P_{H1}	kN/m^2	209.161
水平荷重(底部) P_{H2}	kN/m^2	299.161
底部反力 P_{v2}	kN/m^2	275.681
自重 W_g	kN/m^2	12.000
自重反力 P_g	kN/m^2	37.699
側方地盤反力 q	kN/m^2	0.000

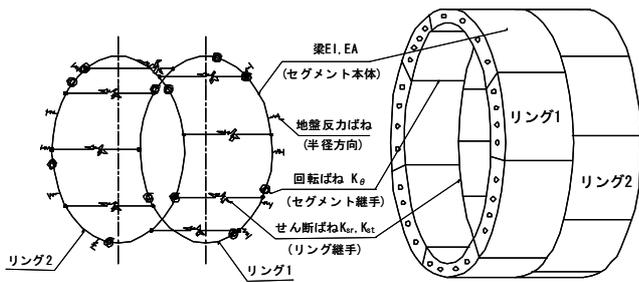
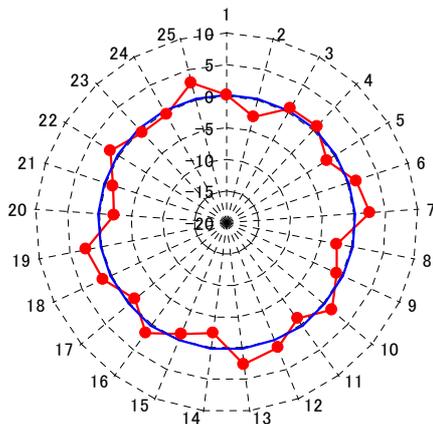


図-18 解析モデルの考え方

(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. まとめ

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⁾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、梁バネ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(株)フジタ 磯崎智史氏、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.

(2013.9.2 受付)

SHEAR REINFORCEMENT OF SEGMENT RING JOINT ON SHARPLY CURVING SHIELD TUNNEL

Masayuki SUGAI, Masahiko HIRANO, Takumi SATOH, Toshiya HARUTA
and Katsunori HIRANO

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 measurements and frame analysis, we verified a correlation between the load from the shield machine and segment behavior, and the factors generating construction load.