

施工時荷重によるシールドトンネル覆工の 挙動事例とその解析方法の提案

長屋 淳一¹・橋本 正²・小山 幸則³・建山 和由⁴・塚田 泰博⁵

¹正会員 株式会社地域地盤環境研究所所長代理 (〒113-0034 東京都文京区湯島1-8-4)
E-mail:nagaya@geor.co.jp

²正会員 株式会社地域地盤環境研究所所長 (〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2)
E-mail:hasimoto@geor.co.jp

³正会員 立命館大学客員教授 総合科学技術研究機構 (〒113-0034 東京都文京区湯島1-8-4)
E-mail:yukinori.koyama@gmail.com

⁴正会員 立命館大学教授 総合理工学院・理工学部 (〒525-0058 草津市野路東1-1-1)
E-mail:tateyama@se.ritsume.ac.jp

⁵正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail:tsukada.yasuhiro@ad-hzm.co.jp

シールド掘進に伴う施工時荷重の影響は、必ずしも一時的なものではなく残留する場合がある。この要因として考えられる施工時荷重としては、トンネル覆工組立時に前リングの変形状況に依る際の付加荷重、Kセグメント挿入時の付加荷重、テール通過中の競り荷重の影響が考えられる。

本論文では、シールドトンネル覆工組立時からテール通過後までの計測データを分析することにより、これらの施工時荷重に伴う影響の定量的な評価を行い、その影響度合いが大きいことを示した。また、計測データの評価結果に基づいて、組立時に前リングの変形に依ることにより発生する荷重、Kセグメント挿入時の付加荷重、テール通過中の荷重、とくに競り荷重を考慮したシールドトンネルの解析モデルを提案し、その妥当性と適用性について示した。

Key Words : shield tunnel, construction loads, segment and ring joint, beam-spring model, in-site measurement data

1. はじめに

既往のシールドトンネル設計法において考慮する主たる荷重は、トンネル覆工自重と土水圧（地盤反力、上載荷重の影響を含む）である^{1) 2)}。しかし、実際にトンネル覆工に作用する荷重には、自重と土水圧以外にも、シールド掘進時のジャッキ推力、覆工組立時のエレクター操作荷重、形状保持装置による荷重、テール通過中の圧力、裏込め注入圧等の施工時荷重がある^{3) 4) 5)}。また、平面および縦断線形に応じて曲線施工を行う際、トンネル覆工は、シールドマシンとの競りによる影響を受ける場合があり、これも施工時荷重の一種である。

これらの施工時荷重は、施工時の短期的に作用する荷重であり、その影響は自重と土水圧に比べて小さいと考えて上記のような自重と土水圧を考慮した設計法が確立している。しかし、施工時荷重の作用による断面力や変

形への影響は、必ずしも一時的なものではなく残留することがあり、土水圧以上に大きな影響をもたらす場合がある。また、前リングの変形に依ってトンネル覆工を組立てるため、組立時に断面力および変形が発生し、残留する可能性があることから、これも施工時荷重の一種と考えることができる。さらには、覆工組立時におけるKセグメント挿入時の影響も施工時荷重と考えられる⁶⁾。

これら施工時荷重による影響については、シールドトンネルに関する基準類に記述があるものの、具体的かつ定量的な記述がほとんどないのが現状であった。そこで、文献5)では、施工時荷重に関するデータの収集および評価、施工時荷重影響予測法（解析）の研究、施工時荷重のセグメント設計への導入方法の検討等が行われた。

本論文では、これら施工時荷重のうち、トンネル覆工組立時に前リングの変形に依ることによって発生する荷重、Kセグメント挿入時の付加荷重やテール通過時の荷

重に着目し、その影響を定性的および定量的に検討する。そのため、シールドトンネル施工現場で計測したトンネル覆工断面力、発生応力および内空変形を分析し、施工時荷重の影響を評価する。その結果を踏まえ、施工時荷重を考慮した解析モデルを提案し、このモデルの適用性について検討する。

2. トンネル覆工計測

洪積砂・砂礫層と洪積粘土層の互層地盤中をシールド掘削した際のトンネル覆工計測結果を以下に示す。

(1) トンネル覆工諸元と地盤条件

図-1にトンネル覆工計測を実施したトンネルの構造図を示す。トンネル覆工はRCセグメントであり、外径8.8 m、内径8.0 m、桁高0.4 m、幅1.6 mである。トンネル覆工分割数は7等分割であり、Kセグメント（天端左側、軸方向挿入型）が大きく、他のセグメントピースと同様の大きさを有する構造である。主鉄筋は、外側、内側ともに被り65 mmで、鉄筋径D25×8本+D22×4本である。また、セグメント間継手（コーンコネクター）とリング間継手（TA-Sリング）はくさび締結方式であり、ボルトによる締結を伴わない構造である。

シールド掘進地盤の諸条件を図-2に示す。シールド掘進対象土層は、三軸圧縮強度 $c_u \approx 150 \sim 170 \text{ kN/m}^2$ ($N = 15 \sim 20$ 程度)の洪積粘土層と、 $N \geq 30$ （一部、60を超過）の洪積砂・砂礫層の互層状態にある。地下水位は、各帯水層ともおおむねGL-8m付近に位置している。

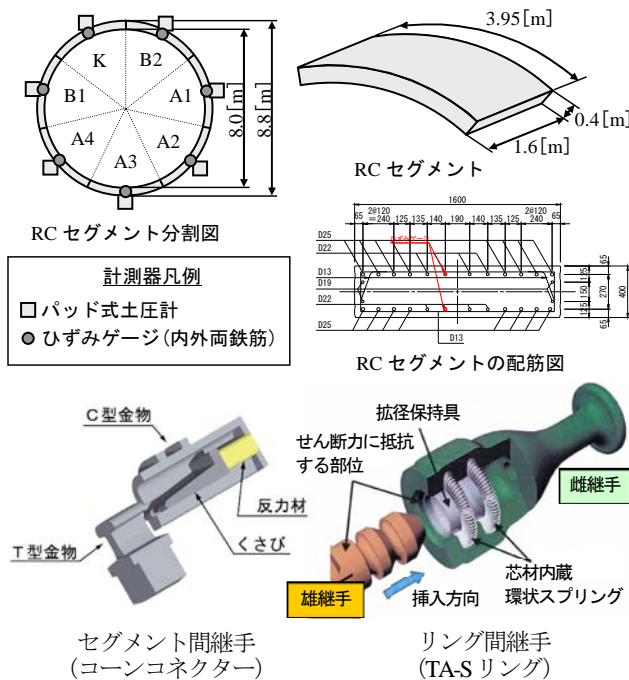


図-1 トンネル覆工構造

(2) トンネル覆工計測器の配置

トンネル覆工に設置した計測器の配置を図-1に示す。トンネル覆工に設置した計測器は、トンネル覆工作用圧を測定するパッド式土圧計[®]と、トンネル覆工発生応力を測定するひずみゲージである。

パッド式土圧計の設置位置は、トンネル覆工外面の中央であり、7つのセグメントピース全てに設置した。一方、ひずみゲージの設置位置もセグメント中央付近の主鉄筋（内側および外側）であり、7つのセグメントピース全てに設置した。主鉄筋に発生するひずみにヤング係数を乗じて応力度を算出し、それに主鉄筋とコンクリートのヤング係数比およびトンネル覆工の断面諸元を考慮することによって、断面力を算出した。

(3) トンネル覆工計測結果

組立完了時、テール通過中およびテール通過以降におけるトンネル覆工作用圧および断面力の計測結果を図-3

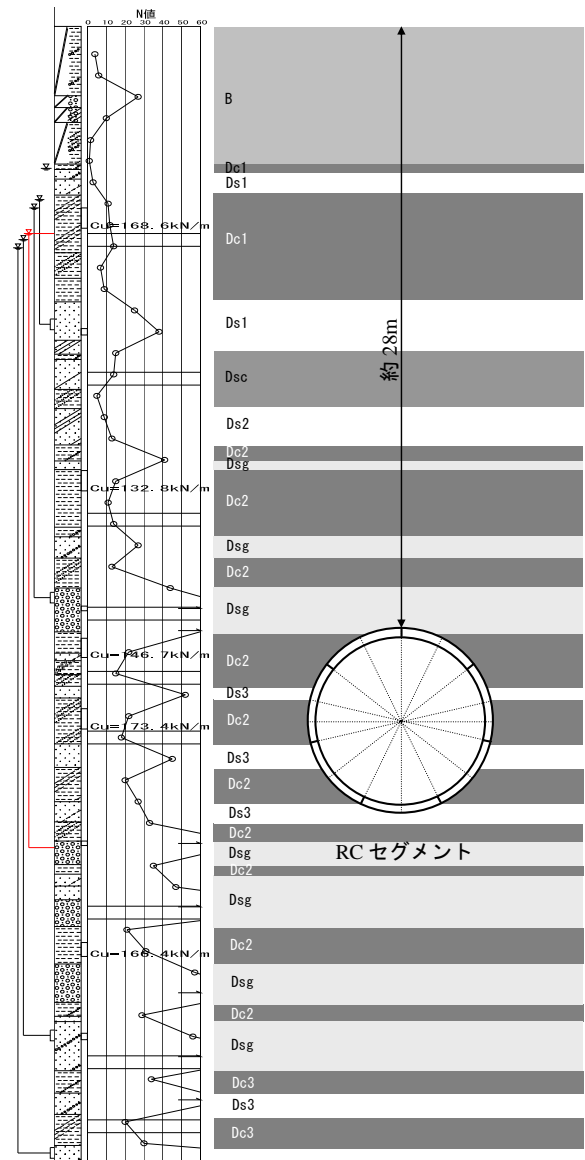


図-2 シールドトンネル掘削地盤

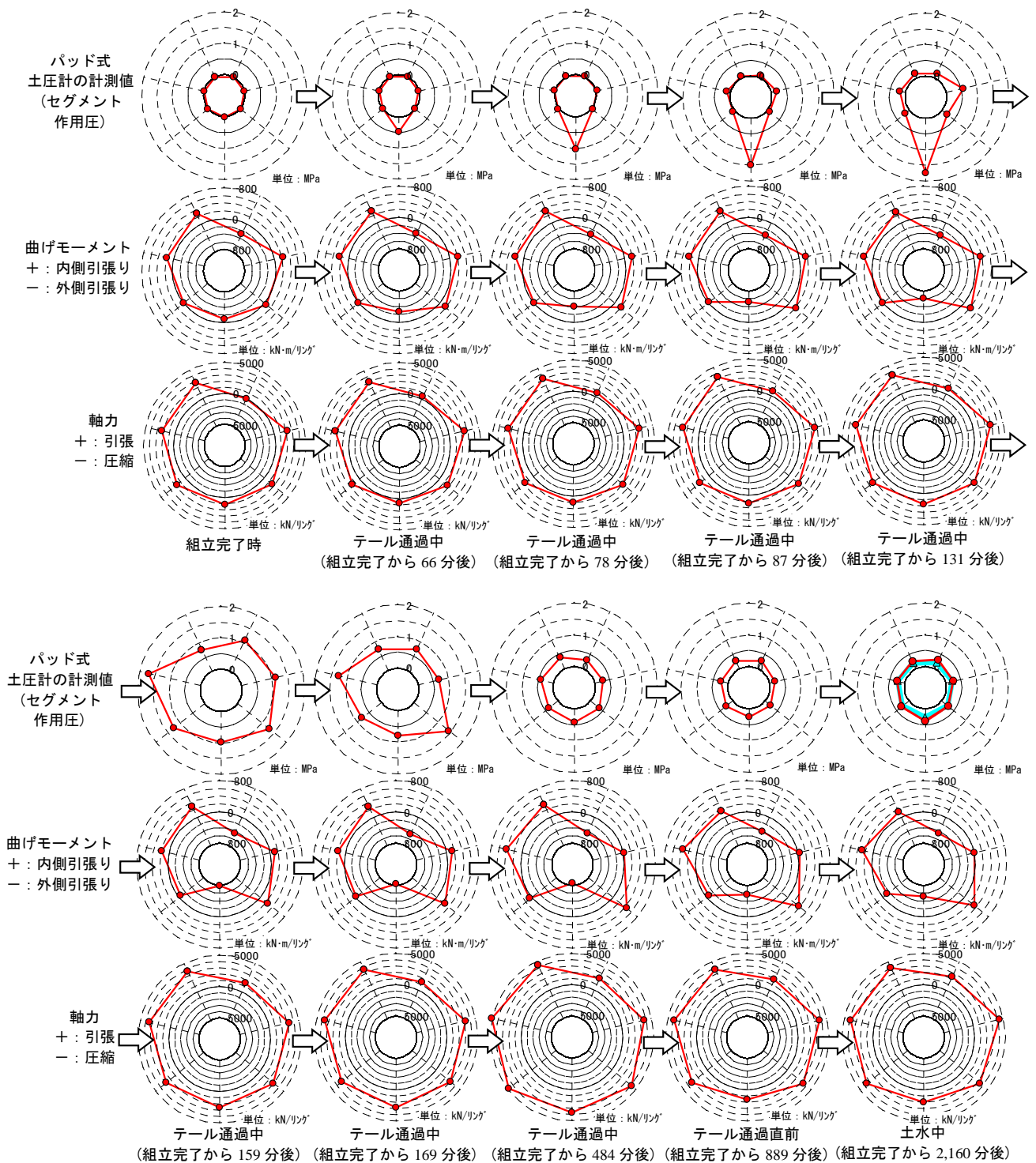


図-3 トンネル覆工 (RCセグメント) の計測結果

に示す。トンネル覆工作用圧は、トンネルにはテールシール圧が作用するまでは外圧は作用しないことから組立完了時に初期値を設定した。一方、トンネル覆工断面力は、組立前を初期状態と仮定した。なお、組立完了からテール通過までに889分を要したのは、計測セグメントにテールシールが接触してから離脱するまでの掘進に約2リングを要し、その間に休日を挟んだためである。

計測リングにおけるトンネル覆工組立時の自重による内空変形およびテール通過後の内空変形を図-4左図に示す。なお、同変形図は、写真測量により計測したもので

ある。

上記の各計測結果図を組立完了時、テール通過中、テール通過後に大別して整理すると以下のようになる。

a) 組立完了時

組立完了時は、トンネル覆工に外圧が作用していないが、曲げモーメント図や軸力図からもわかるように、組立完了時においてすでに断面力が発生している。また、設計における自重時の内空変形が上下方向に2.4mm収縮、左右方向に3.3mm伸張であるのに対して、計測値は上下方向に30 mm収縮、左右方向に33 mm伸張であり、設計

値に比べて大きな内空変位が発生しており、変形モードは、右斜め上および左斜め下から押された斜め横長の変形形状を呈している。これは、対象となるシールド掘進区間が、**図-5**に示すような平面曲線かつ縦断線形も上り勾配の曲線を描く複合曲線施工区間にあったことが原因として考えられる。

トンネル覆工に外圧が作用しない組立時においても、前リングが曲線施工等の影響により内空変形が生じている場合、前リングの内空変形形状に倣って計測リングが組立てられることにより、組立時において前リングと同程度の内空変形が発生することとなる。この計測事例においても前リングで上下36 mm収縮、左右26 mm伸張に対して、計測リングで上下30 mm収縮、左右33 mm伸張であり、計測リングの内空変形と前リングの内空変形と同程度であることを確認している。つまり、トンネル覆工は、曲線施工等の影響により前リングが変形している

場合には、セグメントを組立てた時点ですでに内空変形が発生することとなる。また、このような組立時に内空変形が大きく発生する要因として、セグメント組立時のセグメント間およびリング間継手の剛性が柔軟であることが考えられる。

一方、組立完了時における断面力は、上半**B2**セグメントでの曲げモーメント（正曲げ）が他の計測点に比べて大きく、**B2**セグメントの左隣に位置する**K**セグメントでの曲げモーメント（負曲げ）と比較して極性が反転している。左側（**K**セグメント側）は、外側引張になる負曲げであり、右側は内側引張になる正曲げが発生している。軸力についても、天端を境に発生傾向が逆転しており、左側では軸力が大きく発生しているが、右側は軸力がほとんど発生していない。

トンネル上半の断面力が変化に富んだ分布となる理由は、斜め横長に変形した前リングに倣って計測リングを

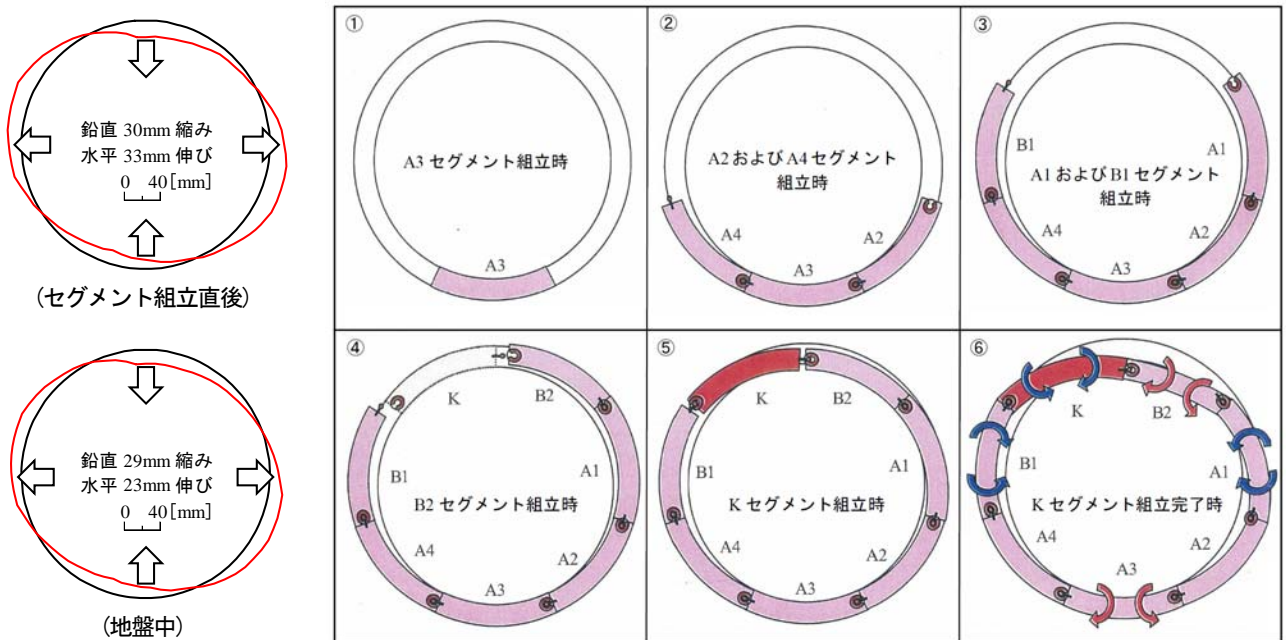


図-4 計測リングにおける組立時の自重による内空変位計測結果およびセグメント組立状況イメージ図

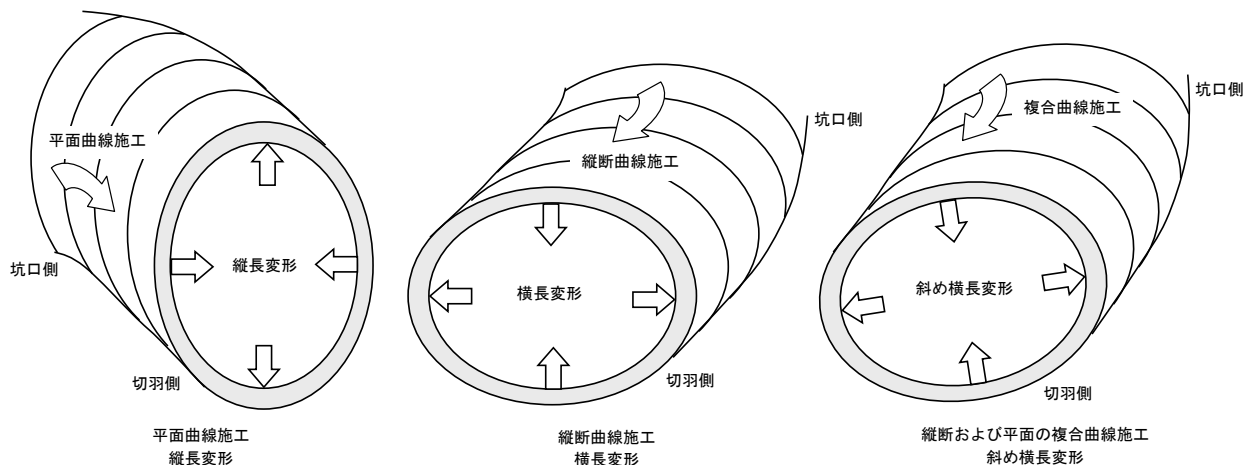


図-5 トンネルの平面曲線および縦断勾配によるトンネル覆工の内空変形状況

組立てることによる影響が考えられる。とくに、上半断面力の変化が著しいことを考慮すると、Kセグメント挿入位置とその大きさによる影響が大きいと推測できる。Kセグメントを挿入するまでの組立状況を概略的に整理すると、図-4右図のようになる。同図より、Kセグメント挿入直前(図-4④ステージ)のB1およびB2セグメントは、前リングの変形に倣いながら、トンネル覆工自重に伴って変形し、Kセグメントの挿入が困難な形状になっていた。さらには、Kセグメントが大型であるため、B1およびB2セグメント間の挿入スペースが広く、これを適切に管理することは難しかったと考えられる。

このままの状態ではKセグメントを挿入できないため、実施工ではジャッキ制御やエレクター操作によってリング形状を修正してから、Kセグメントを挿入している(図-4⑤ステージ)。したがって、リング形状を修正する際のジャッキ制御やエレクター操作に伴い発生した荷重により、上半に大きな曲げ変形が発生し、曲げモーメントも増加したと推測される。トンネル上半の軸力分布の変化が大きいのも、同様の理由によると考えられる。一般に、大型のKセグメントを用いると、組立時に施工時荷重が作用する可能性が高くなることが指摘されており、本現場でもこの影響が大きかったと考えられる⁷⁾。

シールドトンネルの基本設計計算において、組立時の荷重条件として通常トンネル覆工自重を考慮するのが一般的である。しかし、本計測結果から自重の影響はもちろん、前リングの内空変形に倣う際に発生する施工時荷重や、Kセグメント挿入時の施工時荷重の影響の方が顕著だと言える。したがって、組立時の挙動を制御するためには、これらの施工時荷重に対し十分に配慮する必要がある。

b) テール通過中

トンネル覆工作用圧分布図より、テール通過に伴ってインバート付近の作用圧が増加し、組立完了時から131分後にピーク値を示す。この間の挙動は、インバート部の作用圧が増加するのみで、他の計測点はほとんど変化がない。インバート部の作用圧は、ピーク後に減少傾向

を示すが、左側スプリングライン上部および右側スプリングライン下部の作用圧が増加し、組立完了から159分後にピーク値を示す。その後、テール通過時までには作用圧は減少し、ほぼ静水圧状態に落ち着いている。

このようにテール通過初期においてインバート部の作用圧が増加したのは、「競り」による影響が考えられる。ここでの「競り」とは、シールドのテール部(テールスキンプレート、テールシール取り付け部のテールプレート、テールシール間に固結した裏込め注入材等)とトンネル覆工との局所的な接触と定義付け、「競り力」とは、接触しているトンネル覆工に対して局所的に作用する集中荷重と定義する。また、所定のテールクリアランスが確保できていない場合について、競りが発生すると仮定した。図-6に計測リングのテール部における競り状況のイメージ図を示す。本計測におけるテール通過前のテールクリアランスは、天端側で70 mm、下床側で48 mmであり、下床側のクリアランスが小さかった。これは、計測リング付近では縦断方向の曲線施工であったため、図-6に示すようにインバート部のクリアランスが小さくなり、裏込め注入材が固着し、硬化したテールブラシ圧がトンネル覆工のインバート部に強く作用したと考えられる。縦断および平面方向の曲線施工では、シールドマシンの掘進角度の変化やジャッキの偏圧操作によるシールドマシン自体の変位によって既設セグメントシールドマシンのテールクリアランスが小さくなり、トンネル覆工に大きなテールシール圧が作用することが考えられる。

また、左側スプリングライン上部および右側スプリングライン下部の作用圧が増加した要因としては、計測セグメントが組立時に斜め横長に変形したため、そこでのクリアランスが小さくなり、大きなテールブラシ圧が作用したと考えられる。なお、組立時におけるスプリングラインのクリアランスは左側で38mm、右側で19mmであった。左右スプリングラインにおけるテールクリアランスは、上下のテールクリアランスよりも小さいが、これはセグメント組立時に斜め横長に変形していたためである。また、計測リング付近では、平面線形よりも縦断線

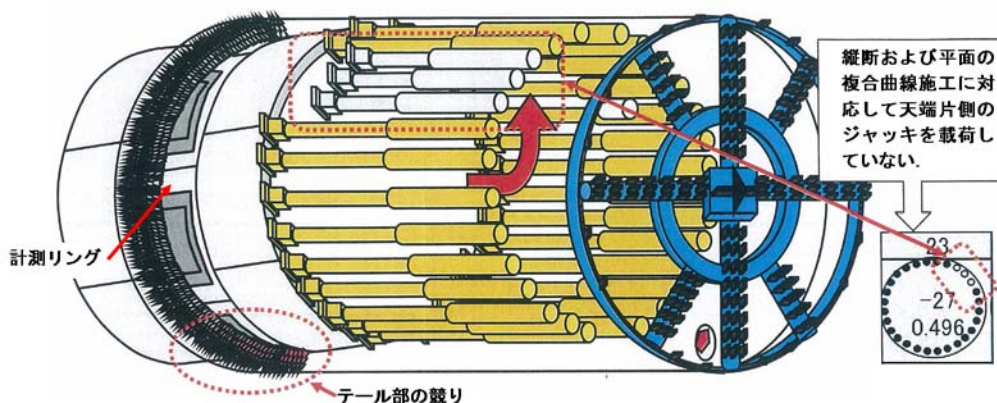


図-6 計測リングのテール部における競りの状況

形の方が厳しい曲線施工条件にあったため、上述したテールクリアランスだけでは判断できないインバート部の競りの影響があったと考えられる。

なお、組立完了から131分後までインバート部に競りによる局所的なセグメント作用圧が作用しているが、159分後にかけて作用圧が再配分されて全周に作用した後、テールシールがセグメントから外れるとともに裏込め注入圧に移行されて作用圧が低減している。

このように、競り圧を受けてトンネル覆工が変形し、テールクリアランスが変化することにより、インバート作用圧がピーク値を示した後は、最大作用圧の発生位置がスプリングライン付近に移ったと考えられる（たとえば、組立完了後から159分後の左側スプリングライン付近の作用圧が最大となっている）。このような傾向は、断面力図にも現れている。つまり、インバート部の曲げモーメントが増大し、トンネル覆工作用圧がピーク値を示す組立完了から169分以降も増加し続け、484分後に最大曲げモーメントを示してから低下する。しかし、テール通過直前でもインバート部の曲げモーメントが残留しており、組立時の状態には戻っていない。これは、前リングに作用している裏込め注入圧（固結状態に移行中の状態）や部分的に固化した裏込め注入材によってトンネル覆工の変形が拘束されてしまうことによる圧力が原因として考えられる。

一方、軸力は、組立完了時から484分後までは、テールシール圧が全周にわたって増加している。その後、テールシール圧から裏込め注入圧に移行し、トンネル覆工作用圧が減少するとともに、軸力も減少する傾向にある。

c) テール通過後

テール通過後のトンネル作用圧は、図-3に示すようにほぼ静水圧状態に収束しており、テール通過時のトンネル覆工作用圧は残存していない。しかし、断面力は、テール通過中に受けた競り圧とテールシール圧の影響が全て消散することなく残留している。これは、前リングのテールボイドに注入された裏込め注入材が大きくなると、計測リングの変形を拘束するためと考えられる。

つまり、トンネル内空変形は、前リングの内空変形に倣うことによって組立時に大きく発生するのに対して、地盤中でのその進展が鈍化している。以上のことから、曲線施工等によりトンネル内空変形が大きくなると次リング以降もその変形に倣うため、組立時に大きな変形が生じる場合も考えられる。

一方、断面力は、組立時に前リングに倣った変形形状になることと、Kセグメント挿入時の影響に伴って増加し、テール通過中のテールシール圧と競り圧に伴って発生する断面力が残留することが確認できた。組立時とテール通過中に発生する断面力は、地盤中に出たテール通過後約21時間後に発生する断面力に比べて大きいため、

シールドトンネル設計時には、これらを適切に評価することが重要である。

3. トンネル覆工組立時のフレーム解析

トンネル覆工がテール通過後、地盤中に出るまでに発生する内空変形の大部分は、トンネル覆工組立時に発生している。これは、前リングの変形に倣って計測リングが組立てられることが原因であることを指摘した。

しかし、前リングの変形に倣ってセグメントを組立て、大型のKセグメントを挿入する等、所定の組立精度を確保するためには、セグメント間継手およびリング間継手の柔軟性が必要である。

セグメント組立時における継手の実挙動は、セグメント間継手の剛性が組立中の軸力導入状態に依存して変化し、リング間継手は継手金物の構造上の隙間（あそび）の影響から変化する可能性がある。とくに、セグメント間継手は、Kセグメントを挿入し、セグメントリングを閉合するまでの間は軸力が発生しない可能性が高く、セグメント組立時の自重による変形挙動に対してはこの影響が大きいと考えられる。

本章では、セグメント間継手およびリング間継手の剛性に着目した数値解析およびセグメント組立過程を追跡する数値解析を行い、組立時の挙動を評価する。

(1) セグメント間およびリング間継手の剛性

セグメント間継手は、トンネル覆工構造上、曲げに抵抗するものであり、フレーム解析モデルでは回転ばねで表現する。ただし、セグメント間継手の回転ばね剛性は、軸力の導入状態に依存して変化するものである。したがって、セグメント組立中の軸力が作用していない状態では、回転ばねは軟らかく、Kセグメントを挿入してトンネル覆工リングを閉合した際に、初めて軸力が導入されて回転ばねの剛性が大きくなると考えられる。

一方、リング間継手は、リング間のせん断に対して抵抗し、フレーム解析モデルではせん断ばねにより表現する。しかし、ここで対象とするリング継手にはあそびがあるため、トンネル覆工組立時にはリング間継手の変位はあそびの範囲内にあり、リング間継手面の摩擦は小さく、リング間のせん断抵抗（添接効果）は発生しない。なお、対象現場で用いたRCセグメントのリング間継手のあそびは、1.5 mmであった。また、リング間継手位置を除くリング間は、ジャッキ推力が作用していないと仮定し、せん断ばねを無視する。

上記のことから、トンネル覆工の組立完了までの間、セグメント間継手とリング間継手は、ともに柔軟な状態にあるため、前リングの変形形状に倣って組立

ることができたと考えられる。

一方、テール通過中以降は、テールシール圧や土水圧がセグメントリング全周に作用するために軸力が増加し、セグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなる。また、テール通過中以降は、リング間継手も組立時の変形に伴ってあそびが無くなりせん断抵抗が増加するとともに、リング間継手位置を除くリング間にはジャッキ推力により継手面の摩擦力が大きくなるためせん断剛性が増加する。

このように継手の回転剛性が大きくなるため、組立時の内空変形が支配的になり、テール通過中以降の変形はほとんど発生しなくなると考えられる。

(2) トンネル覆工組立を考慮した解析モデル

上記のことから、セグメント組立時の自重による変形は、前リングの変形に依うことと、継手剛性が柔軟であることに起因している可能性が高い。これらの影響を確認するため、以下に示す2種類の解析モデルを提案した。

a) トンネル覆工の組立過程を考慮した解析モデル

変形した前リングにセグメントピースを組み付けていく過程を表現した2リングモデルを図-7に示す。この2リングモデルでは、一方のリングを計測リング（セグメント組立リング）、他方を前リング（組立済みで内空変形が発生しているリング）とし、トンネル覆工を梁要素で、セグメント間継手を回転ばねで、リング間継手をせん断ばねで、地盤を地盤ばねで表現している。


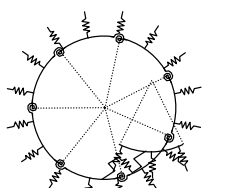

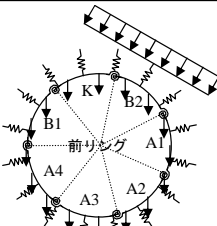

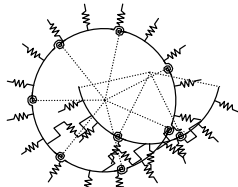

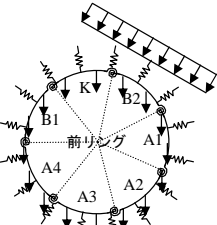

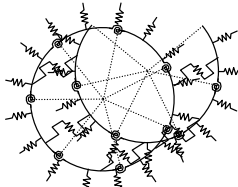
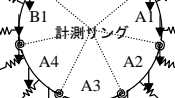
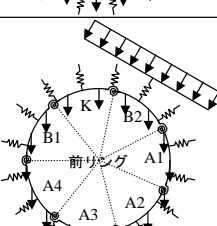
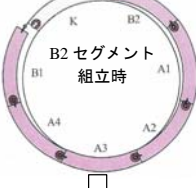
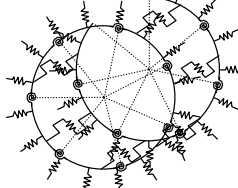
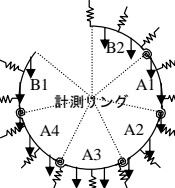
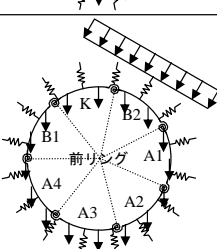

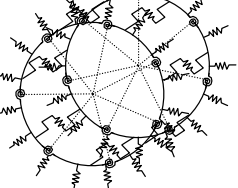

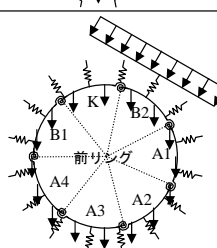
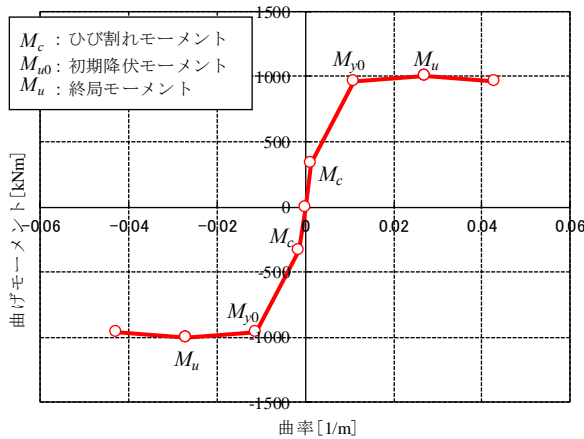
| セグメントの組立状態 | 2リングモデル | 計測リング | 前リング | 解析条件 |
|---|---|--|--|---|
|  <p>A3 セグメント組立時</p> |  |  <p>計測リング</p> |  | <p>【計測リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 下床側の A3 セグメントピースのみ組立 セグメントの自重のみ载荷 <p>【前リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 全てのセグメントピースを組立てた状態 自重と計測内空変形を再現するための右斜め上からの荷重を载荷 |
|  <p>A2 および A4 セグメント組立時</p> |  |  <p>計測リング</p> |  | <p>【計測リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 下部の A2 および A4 セグメントピースを組立 セグメントの自重のみ载荷 <p>【前リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 全てのセグメントピースを組立てた状態 自重と計測内空変形を再現するための右斜め上からの荷重を载荷 |
|  <p>A1 および B1 セグメント組立時</p> |  |  <p>計測リング</p> |  | <p>【計測リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 上半部の A1 および B1 セグメントピースを組立 セグメントの自重のみ载荷 <p>【前リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 全てのセグメントピースを組立てた状態 自重と計測内空変形を再現するための右斜め上からの荷重を载荷 |
|  <p>B2 セグメント組立時</p> |  |  <p>計測リング</p> |  | <p>【計測リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 天端右側の B2 セグメントピースを組立 セグメントの自重のみ载荷 <p>【前リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 全てのセグメントピースを組立てた状態 自重と計測内空変形を再現するための右斜め上からの荷重を载荷 |
|  <p>K セグメント組立時</p> |  |  <p>計測リング</p> |  | <p>【計測リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 天端右側の K セグメントピースを組立 自重と計測内空変形を再現するための右斜め上からの荷重を载荷 <p>【前リング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 全てのセグメントピースを組立てた状態 計測リングと同じ荷重条件 |

図-7 トンネル覆工の組立過程を考慮した解析モデル

トンネル覆工の曲げ剛性は、**図-8**に示すように曲率の増加に伴って曲げ剛性が低減する非線形曲げ剛性（テトラニアモデル）⁹⁾の考え方をういた。トンネル覆工の



| 曲げモーメントの種類 | | 曲げモーメント (kNm) | 曲率 (1/m) |
|------------|-----------|---------------|-----------|
| 正の曲げモーメント | - | $M_{y,0}^+$ | 965.674 |
| | 終局モーメント | M_u^+ | 1004.582 |
| | 初期降伏モーメント | $M_{y,0}^+$ | 965.674 |
| | ひび割れモーメント | M_c^+ | 333.179 |
| - | - | - | 0.0 |
| 負の曲げモーメント | ひび割れモーメント | M_c^- | -333.179 |
| | 初期降伏モーメント | $M_{y,0}^-$ | -965.674 |
| | 終局モーメント | M_u^- | -1004.582 |
| | - | $M_{y,0}^-$ | -965.674 |

図-8 トンネル覆工の非線形曲げ剛性モデル

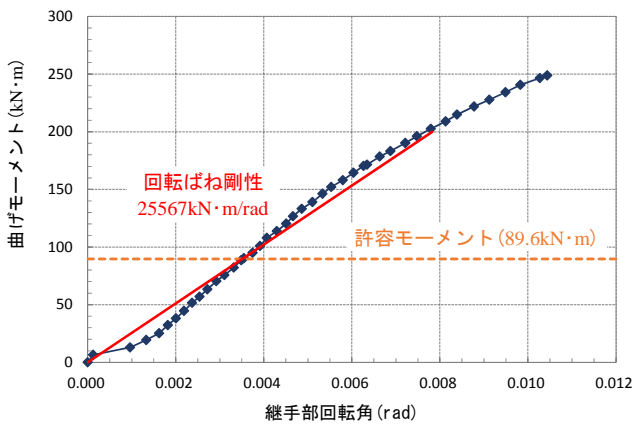


図-9 セグメント間継手の曲げ試験による回転ばね剛性

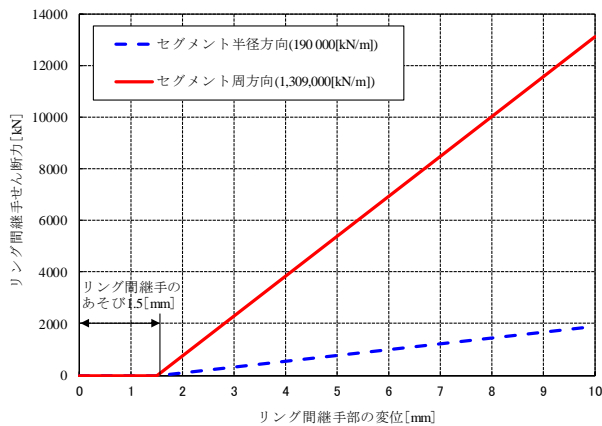


図-10 リング間継手のせん断ばね剛性

非線形曲げ剛性は、計測リングで得られている7測点の軸力平均値とRCセグメントの断面特性および材料特性を用いて算出した。軸力は、施工中刻々と変化するため、ここではテール通過後、トンネル覆工の挙動が定常状態に至った際の軸力の平均値を採用した。

トンネル覆工の軸剛性は、RCセグメントのヤング係数と断面積から設定しており、曲げ剛性のような非線形特性は考慮していない。セグメント間継手の回転ばね剛性は、当該トンネル覆工に対して実施した継手曲げ試験の結果より得られた**図-9**の回転ばね剛性をういた。なお、この継手曲げ試験では、軸力を導入していないことから、得られた回転ばね剛性は柔軟なものであると考えられる。

一方、ジャッキ推力が作用しないセグメント組立時におけるリング間継手部には、リング間継手金物にあそび（構造上の隙間）が1.5 mm程度あるため、あそび分の変位が生じるまでは、リング間継手部のせん断ばねは働かないと仮定し、**図-10**に示すバイリニアのせん断ばね剛性を採用した。

本解析モデルは、計測リングが組立中、前リングはテール通過中に対応するため、地盤ばねを考慮する必要はない。しかし、拘束条件として下床側の変形を抑制することから、当該トンネル覆工の設計における地盤ばねが40000 kN/m³であることを踏まえ、その1/10の4000 kN/m³に設定した。自重による変形に対する地盤反力係数については、現状明確に規定された基準類はなく、現場での施工状況を考慮した解析および現場計測等を踏まえて標準値を設定することが望ましい。ここでは、本トンネル工事およびトンネル掘進地盤条件が類似している文献⁹⁾を参照にして、組立中の地盤反力係数をこのように設定した。なお、地盤ばね反力が引張状態になった際には、**図-11**に示すとおりテンションカットするバイリニアモデルとした。

以上に示した各部の材料特性を表-1に示す。

荷重条件は、計測リングの変形形状に倣うことを考慮し、前リングが**図-4**左図の内空変形モード（斜め横長変

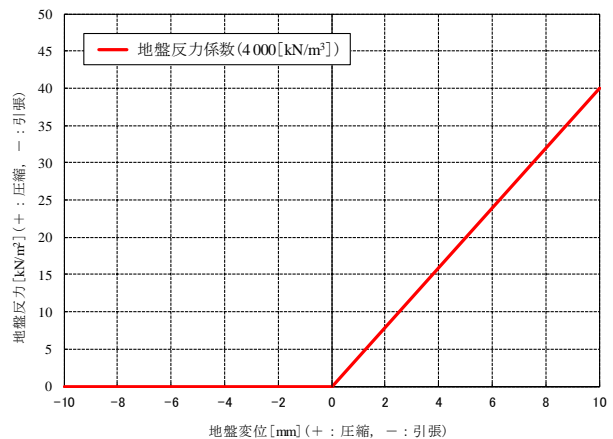


図-11 セグメント組立時の地盤ばね

形、鉛直30 mm収縮、水平33 mm伸長) のようになる荷重を設定した。設定した荷重分布は、図-7に示すように斜め右上(天端から時計回りに30° 傾いた状態)からの等分布荷重である。計測リング、前リングともにトンネル覆工自重を考慮した。

b) 軸力導入に伴うセグメント間継手の回転ばね剛性の増加を考慮した解析モデル

セグメント間継手の回転ばね剛性は、軸力の導入に伴って大きくなっていくのが実際の挙動と考えられる。軸力と回転ばね剛性の関係は、レオンハルトら¹⁰⁾により示されており、軸力導入に伴って回転ばね剛性は大きくなる。セグメント組立時は、下床側から天端に向かってセグメントピースを組立てていくが、最後にKセグメントを挿入するまでは、セグメントリングが併合されていないため、軸力は極々小さいと考えられる。つまり、Kセグメント挿入に伴ってセグメントリングを閉合して初めてセグメントの周方向に力が伝達し、セグメント間継手が密着して剛性が大きくなると推測できる。

ここで提案する解析モデルも、2リングモデルであるが、上記のモデルのようにセグメントの組立過程を追跡

表-1 各部の材料特性

| 材料特性項目 | | 設定値 | |
|---------------|-----------|---|-------------------------------|
| セグメント剛性 | 曲げ剛性 EA | 非線形曲げ剛性 テトラリニアモデル | |
| | 軸剛性 EI | コンクリートヤング係数 : $E = 3.9 \times 10^7$ [kN/m ²] セグメント断面積 : $A = 1.6 \times 0.4$ [m ²] | |
| ピース間継手回転ばね剛性 | 自重および組立時 | 25 567 | [kN・m/rad] |
| リング間継手せん断ばね剛性 | セグメント半径方向 | 継手の初期あそび あそび消失後 | 1.5 [mm] 190 000 [kN/m] |
| | セグメント周方向 | 継手の初期あそび あそび消失後 | 1.5 [mm] 1 3090 000 [kN/m] |
| 地盤反力係数 | 自重および組立時 | 4 000 | [kN/m ³] |

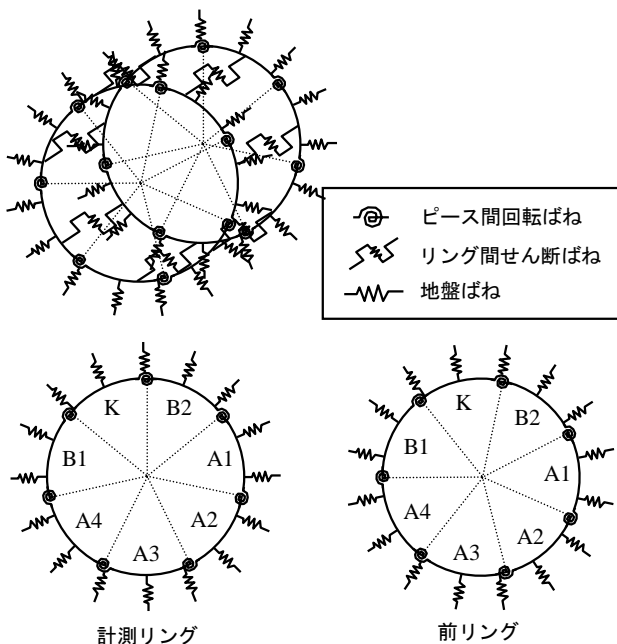


図-12 セグメント組立過程を考慮しない2リングモデル

せず、Kセグメントを挿入して計測リングを閉合した状態で解析を実施する(図-12参照)。

セグメント間継手の回転ばね剛性を除き、セグメントおよび継手のリング間継手の構造特性は、セグメント組立過程を考慮した解析モデルと同じである。なお、セグメント継手部において、軸力導入がなく引張状態にある場合については、回転ばね剛性は無効と仮定した。セグメント間継手の回転ばね剛性は、式(1)のレオンハルトの式¹¹⁾により軸力の導入状態に伴って変化するモデルとした。

$$K_{\theta} = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^3bE_0}{8s} \times m(1-2m)^2 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の記号は図-13に示す以下の内容を示すものである。

- K_{θ} : 継手の回転ばね定数
- M, N : 曲げモーメント, 軸力
- α : 回転角
- a, b : 継手接触面の長さ, セグメント幅
- s : 圧縮応力の影響範囲(=2a)
- E_0 : コンクリートのヤング係数
- m : 荷重偏心率, $m = M / (N \cdot a)$

レオンハルトの式では、曲げモーメントと軸力の比により荷重偏心率が得られる。つまり、軸力が大きいほど荷重偏心率が小さくなり、セグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなる(図-14参照)。なお、レオンハルトの式に入力する軸力は、セグメントリングの7箇所のセグメント間継手において発生する軸力の平均値を用いた。

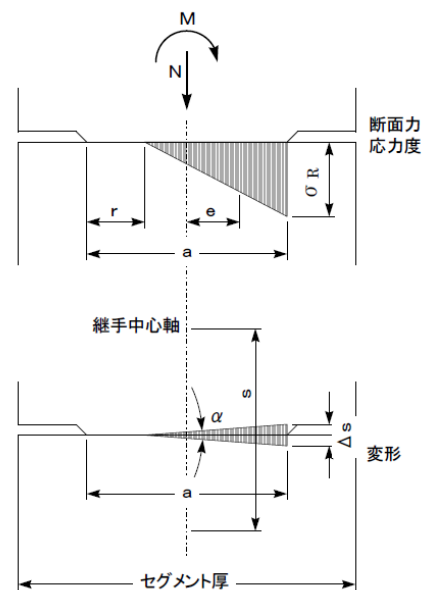


図-13 レオンハルトの式中の記号の定義

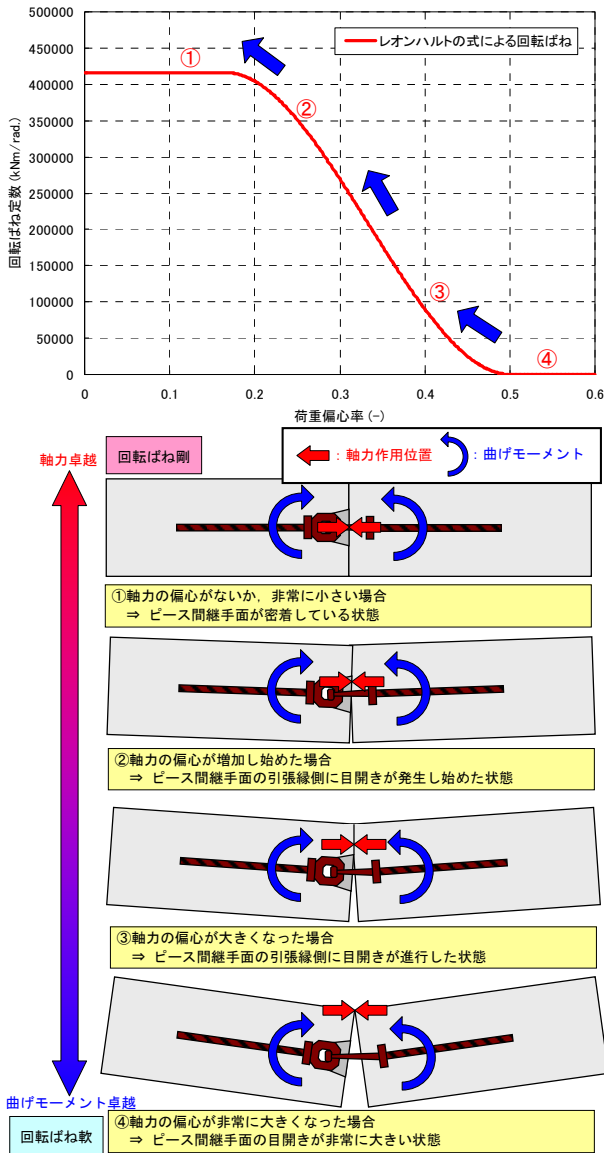


図-14 レオンハルト式によるセグメント間継手の回転ばね剛性変化

荷重条件は、以下に示す仮定の下に設定した。つまり、セグメント間継手ばねは、荷重（軸力）の荷重偏心率の関数になっているため、軸力に対し曲げモーメントが卓越した状態にあれば荷重偏心率が大きくなり、継手回転ばねが小さくなる。逆に、曲げモーメントに対し軸力が卓越した状態では、荷重偏心率が小さくなり、継手回転ばねが大きくなる。

組立時の継手ばね剛性が徐々に大きくなるとするならば、組立初期に曲げ変形を引き起こす荷重を受けて曲げモーメントが卓越し、その後、軸圧縮を引き起こす荷重が作用して、軸力増加に伴って荷重偏心率が小さくなる。実施工における組立時の状況と比較すると、曲げ変形を引き起こす荷重は、前リングに依って組まれる際の荷重状態に対応する。一方、軸圧縮を引き起こす荷重は、Kセグメント挿入時の荷重状態に対応すると考えられる。

上記のことから、図-14に示すように、曲げ変形を引き起こす荷重が卓越した状態でトンネル覆工変形が始まり、曲げ変形が落ち着くにしたがい、軸圧縮を引き起こ

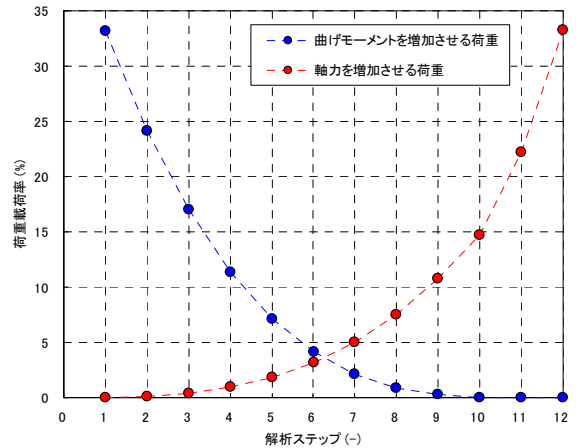
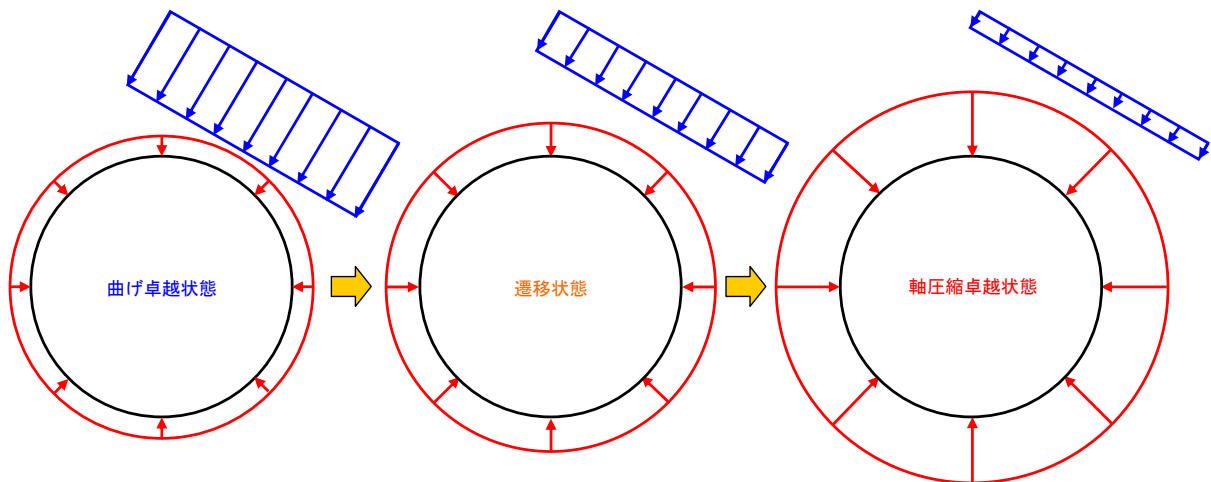


図-16 曲げ荷重と軸圧縮荷重の変化



④ ⇒ ③の過程における荷重条件

$$K_{\theta} = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^3bE_0}{8s} \times m(1-2m)^2 \quad (\text{小})$$

m : 荷重偏心率 $m = M / (N \cdot a)$ (大)

③ ⇒ ②の過程における荷重条件

$$K_{\theta} = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^3bE_0}{8s} \times m(1-2m)^2$$

m : 荷重偏心率 $m = M / (N \cdot a)$

② ⇒ ①の過程における荷重条件

$$K_{\theta} = \frac{M}{\alpha} = \frac{9a^3bE_0}{8s} \times m(1-2m)^2 \quad (\text{大})$$

m : 荷重偏心率 $m = M / (N \cdot a)$ (小)

図-15 セグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなることを考慮した荷重条件

す荷重が作用する荷重条件を設定した。曲げ変形が発生する荷重は、図-4左図の内空変形分布を定性的に表現することができる斜め右上（天端から時計回りに30°傾いた状態）からの等分布荷重を仮定して与えた（図-15参照、図中の丸数字は、図-14中の丸数字に対応）。一方、軸圧縮を引き起こす荷重は、図-16に示すように最終ステップでセグメント間継手の回転ばね剛性が上限値に達するように設定した。

(3) 解析結果

a) トンネル覆工の組立過程を考慮した解析結果

解析結果を図-17に示す。同図より、A3セグメント組立時は、前リングの変形形状に倣うことによる影響がほとんどなく、トンネル覆工自重の影響でトンネル覆工形

状と逆に反り、正曲げ（内側引張になるモーメント）が発生する。しかし、セグメント組立進行に伴って自重の影響よりも前リングに倣うことの影響が大きくなり、Kセグメント挿入直前（B2セグメント組立時）において、セグメントリング右半は、計測による組立時の自重による変形とほぼ同様の変形モードを呈する。自重のみの影響であれば、左右対称に変形するが、左右の変形が非対称でもあることからわかるように、前リングに倣うことの影響が確認できる。また、曲げモーメント図においても同様のことが言え、セグメントピースの組立が進むにつれて曲げモーメント分布の非対称性が顕著に現れる。

セグメント組立中の挙動については、計測データを得ていないため検証することはできないが、図-17に示すセグメント組立状況の模式図のように、Kセグメントの


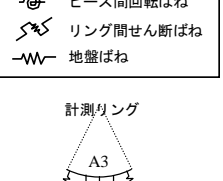
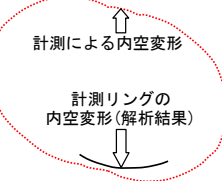
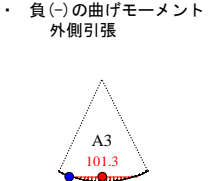

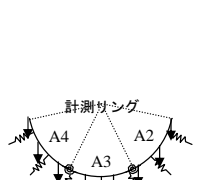
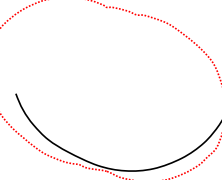
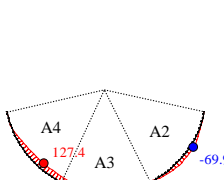

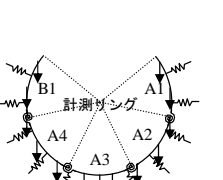
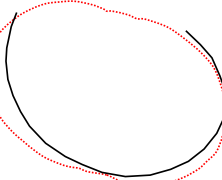
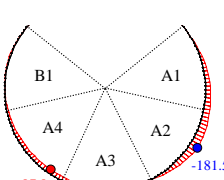

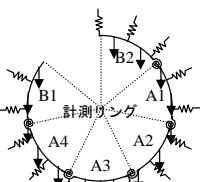
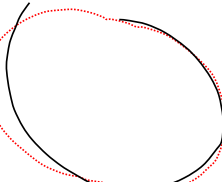
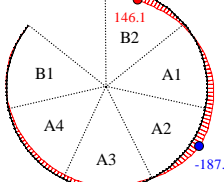

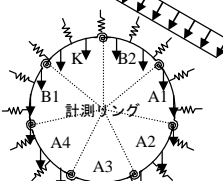
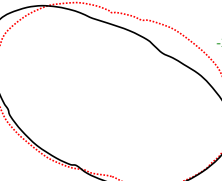
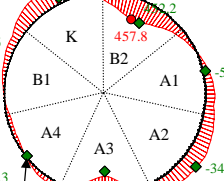
| セグメントの組立状態 | 計測リング | 計測リングの変形図 | 計測リングの曲げモーメント図 | 考察 |
|--|---|--|---|---|
|  <p>A3セグメント組立時</p> |  <p>計測リング</p> <p>ピース間回転ばね リング間せん断ばね 地盤ばね</p> |  <p>計測による内空変形</p> <p>計測リングの内空変形(解析結果)</p> |  <p>正(+)の曲げモーメント 内側引張 負(-)の曲げモーメント 外側引張</p> <p>A3 101.3 -17.4 単位: kNm</p> | <p>【変形図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 自重により変形するが、変形量は微小 <p>【曲げモーメント図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 曲げモーメントも変形同様に微小であるが、中央部で正の最大曲げモーメントが得られており、セグメント形状と逆に反っていることがわかる。 |
|  <p>A2およびA4セグメント組立時</p> |  <p>計測リング</p> |  |  <p>A4 127.4 A3 A2 -69.9 単位: kNm</p> | <p>【変形図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 変形形状が左右非対称になっているため、自重の影響だけでなく、前リングの変形形状に倣っていることの影響が現れている。 <p>【曲げモーメント図】</p> <ul style="list-style-type: none"> A3およびA4セグメントには正の曲げモーメントが発生し、セグメント形状と逆に反っていることがわかる。 A2セグメントは、前リングの変形に倣い負の曲げモーメントが発生。 |
|  <p>A1およびB1セグメント組立時</p> |  <p>計測リング</p> |  |  <p>B1 A4 A3 A2 A1 -181.5 87.8 単位: kNm</p> | <p>【変形図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 変形形状の左右非対称性が顕著になり、組立時に計測された内空変形モードに近づいている。 <p>【曲げモーメント図】</p> <ul style="list-style-type: none"> A3およびA4セグメントの正の曲げモーメントが発生状況は変わらない。 A1およびA2セグメントは、前リングの変形に倣い負の曲げモーメントの発生が顕著。 B1セグメントは、自重と前リングの変形により負の曲げモーメント発生 |
|  <p>B2セグメント組立時</p> |  <p>計測リング</p> |  |  <p>B2 146.1 B1 A4 A3 A2 A1 -187.1 単位: kNm</p> | <p>【変形図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 変形形状の左右非対称性がさらに顕著になり、右側は計測された組立時の内空変形モードとほぼ一致。 Kセグメントの挿入が困難な形状 <p>【曲げモーメント図】</p> <ul style="list-style-type: none"> 新たに組立てられたB2セグメント以外の曲げモーメント分布には変化がない。 B2セグメントは前リングの変形形状に倣うため、正の曲げモーメントが発生 |
|  <p>Kセグメント組立時</p> |  <p>計測リング</p> |  |  <p>K 457.8 B2 133.4 B1 A4 A3 A2 A1 -397.4 -324.6 -53.0 -343.1 23.3 計測値 単位: kNm</p> | <p>【変形図】</p> <ul style="list-style-type: none"> Kセグメントの挿入により、斜め横長変形を呈し、計測された組立時の内空変形モードとほぼ一致 左右スプリングライン付近の負の曲げ変形が顕著になる <p>【曲げモーメント図】</p> <ul style="list-style-type: none"> B2セグメントの正の曲げモーメント、Kセグメントの負の曲げモーメントが顕著に スプリングライン付近の負の曲げモーメントも含め、上半の曲げが顕著 |

図-17 トンネル覆工の組立過程を考慮した解析結果

挿入が困難な変形状況が再現できている。

Kセグメント挿入によりトンネル覆工が閉合すると、トンネル左半の変形モードも計測による変形モード(斜め横長変形状)とほぼ一致する。また、Kセグメント挿入により前リングの変形状に完全に似た状態になると、トンネル上半の曲げ変形が増加して図-3に示す組立完了時の曲げモーメント図と同様の傾向になる。つまり、B2セグメントにおいて正曲げが増加し、セグメント間継手を挟んで曲げモーメントの符号が逆転し、Kセグメントにおいて負曲げが増加する。スプリングライン付近は負曲げが卓越している。

よって、組立完了時の内空変形と断面力を定量的に評価するためには、セグメント間およびリング間継手の柔軟性を考慮する必要がある。

b) 軸力導入に伴うセグメント間継手の回転ばね剛性の増加を考慮した解析結果

解析結果を図-18に示す。同図より、6ステップまでは曲げに大きく寄与する荷重が卓越するために曲げ変形が

発生し、これに伴って曲げモーメントも増加する。一方、軸圧縮を伴わないため、軸力はほとんど発生しない。

曲げモーメントが軸力に対して卓越するため、荷重偏心率が大きくなり、セグメント間継手の回転ばね剛性もほとんど増加せず、柔軟な状態にある。7ステップ以降は、軸力だけを增加させる荷重が卓越するため、軸力が曲げモーメントに対して卓越した状態になり、荷重偏心率が小さくなる。このため、解析ステップを経るごとにセグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなり、最終ステップにおいて上限値の回転ばね剛性を得る。また、解析最終ステップにおける内空変形量、曲げモーメント分布、軸力分布を計測結果と比較すると、定性的には整合性が取れていることがわかる。

ここに示した解析モデルは、「セグメント組立時にトンネル覆工作用荷重を曲げ荷重と軸圧縮荷重に分解して与える」という仮定の下で提案したものである。組立中の計測データを得ていないため、モデルの詳細検証はできていないが、以下の点について確認することができた。

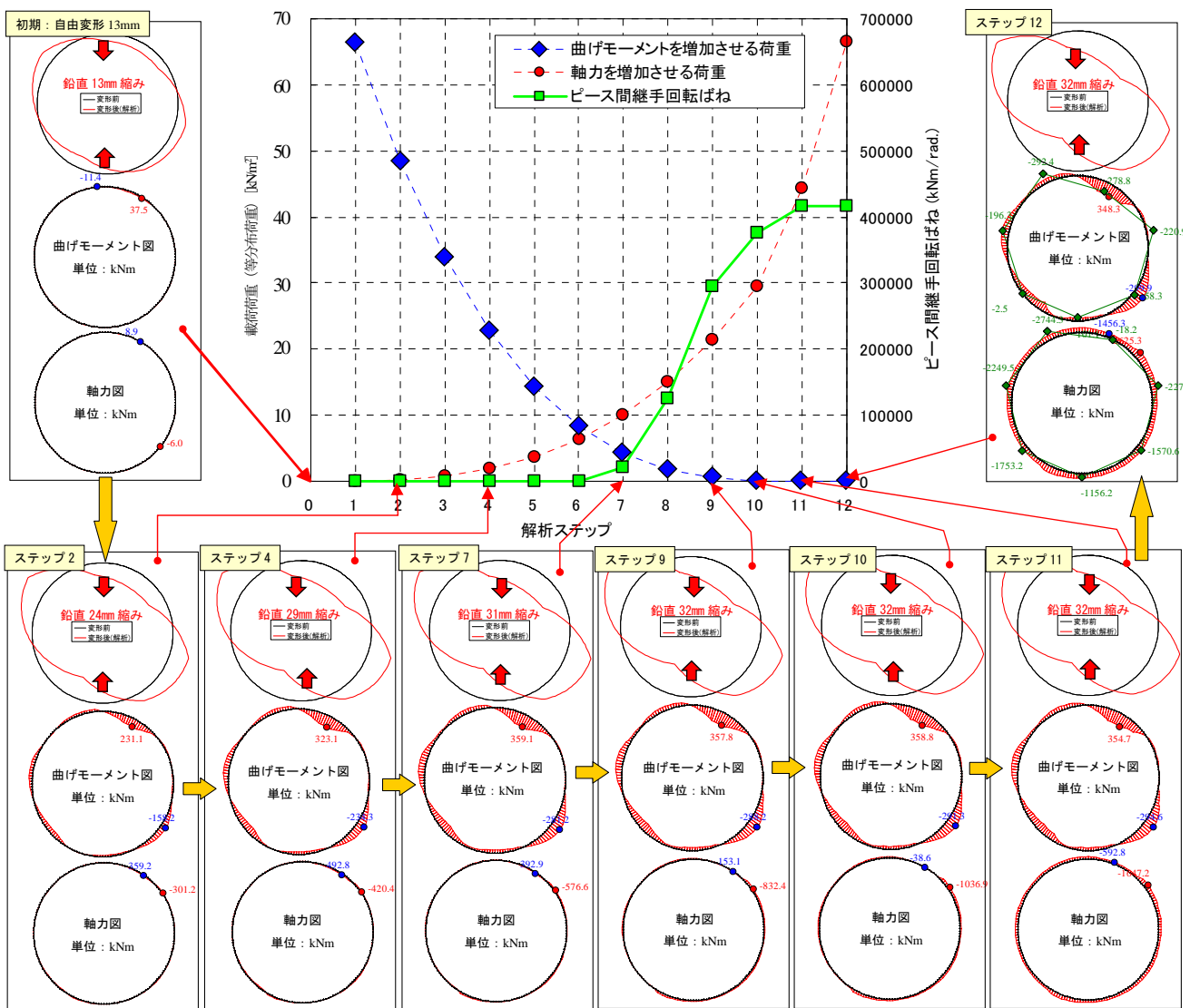


図-18 軸力導入に伴うセグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなることを考慮した解析結果

組立時の挙動について、セグメント組立中はセグメント間継手の回転ばね剛性は柔軟な状態にあり、この状態で曲げ変形の大部分が発生すると考えられる。その後、Kセグメント挿入に伴ってセグメントリングが閉合する際に軸力が導入され、セグメント間継手の回転ばね剛性が大きくなる可能性が高いと推測する。したがって、セグメントリングは、セグメント組立に伴って曲げ卓越の柔軟な状態から軸圧縮卓越の剛な状態へと変化していくと考えられる。

c) 両解析モデルによる解析結果の比較

上記の2つのモデルによる解析結果より、組立時の挙動予測の際には、柔軟な継手剛性を与える必要があることがわかった。一般的な設計においては、セグメントおよび継手に発生する応力に対しては応力度照査を実施するが、内空変形に対する許容値を厳密に定義する例は少ない。このため、継手剛性を大きく設定し、安全側のトンネル覆工断面力および継手発生力を評価する傾向にある。しかし、トンネル内部に設置する付帯設備や建築限界を考慮すると、適切な内空断面を確保する必要がある。この観点からも、内空変形量を正確に予測できる柔軟な継手剛性を考慮した解析が必要である。

また、リング間継手せん断ばねについては両モデルとも同じ剛性を与えているが、セグメント間継手の回転ばねについては異なる剛性を設定した。しかし、内空変形量、断面力発生状況ともにほとんど差がなかった。組立過程を考慮したモデルの回転ばね剛性は一定値の25 567 kN・m/radとした。これに対し、回転ばね剛性変化モデルでは0～約40 000 kN・m/radとしたため、中間値は約20 000 kN・m/radとなる。したがって、セグメント組立中を通じて回転ばね剛性が25 567 kN・m/radであった場合と回転ばね剛性が徐々に大きくなる場合の平均的な剛性にあまり差がなかったと考えられる。このように、今回の解析結果にはほとんど差がないため、軸力が導入されていないセグメント間継手の回転ばね剛性をを用いる手法は、モデルの簡便性を考慮する解析手法の一つとして使用可能と考える。なお、トンネル完成後の供用時の状態においては、剛性の大きい通常の回転ばねを用いる必要がある。

4. 施工時荷重を考慮したフレーム解析

ここでは、施工時荷重を考慮したフレーム解析モデルを提案し、提案モデルによる計算結果と実測値を比較することによって、その妥当性について検討する。

(1) 施工時荷重を考慮したフレーム解析モデル

シールド内では、セグメント組立時に前リングの変形形状に倣って変形が発生するが、これに加えて、テール

通過中にはテールシール圧（テールブラシ圧およびグリス圧）と競り圧が作用する。また、テール通過時に形状保持装置を作動させる場合には、その圧力も作用することになる。一方、テール通過後（地盤中）は、テールシール圧および競り圧が除荷され、土水圧が作用する。また、前リングは固化した裏込め注入材で囲まれた状態にあるため、変形が抑えられた状態にあると考えられる。

トンネル覆工組立時、テール通過時およびテール通過後において、トンネル覆工作用圧の変遷を考慮して、図-19に示す解析モデルを提案した。本モデルは、トンネル覆工組立時の解析モデルと同じ2リングの梁ばねモデルである。また、解析ステップは、計測リングの荷重状態に着目し、図-19に示すように組立時、テール通過時およびテール通過後（地盤中）の3ステップとした。各計算ステップにおける条件設定方法と根拠を以下に示す。

a) 組立完了時

セグメント組立時のセグメント間継手の回転ばねは、前述のように軸力導入状態に応じて変化していくのが実挙動と考えられるが、設計計算等でこの評価手法を用いることは、モデルの簡便性や有用性の観点から適切とは言いがたい。そこで、組立時のセグメント間継手の回転ばねは、軸力が作用していない状態で実施した継手曲げ試験より得られた回転ばね定数を用いることにした。

一方、リング継手せん断ばねは、セグメント組立時の解析同様にあそびを考慮した剛性をを用いた。また、荷重条件はトンネル覆工自重と、Kセグメント挿入時の影響および前リングの変形に倣うことを考慮して、右斜め上30°から等分布荷重を与えた。

地盤ばねについては、前述のセグメント組立時のフレーム解析と同様に設定した。つまり、トンネル掘削地盤の地盤反力係数の1/10、地盤反力が引張状態になる場合には地盤反力係数がゼロになる。

b) テール通過中

計測リングのテール通過中には、前リングには形状保持装置を作動するため、形状保持装置の油圧ジャッキが上限圧力にいたるまでは、テール通過中の内空変形が抑制される。形状保持装置は油圧上限値に達するまでの変位は微少であることから、これに相当する十分に硬い地盤ばねとして、設計における地盤ばねの20倍を仮定した（表-2参照）。なお、油圧ジャッキが上限の圧力に到った場合には、内空変形を拘束できなくなるため、上記のばね反力が引張状態になった場合には、地盤ばねがゼロになるバイリニアモデルを用いた。

荷重条件は、計測リング全周にテールシール圧を設定した。テールシール圧は、天端のトンネル覆工作用圧を参照して0.7 MPaとした。これは、トンネル天端部はテールクリアランスが大きいので、競りの影響がなく、テールシール圧のみが作用していると考えたためである。

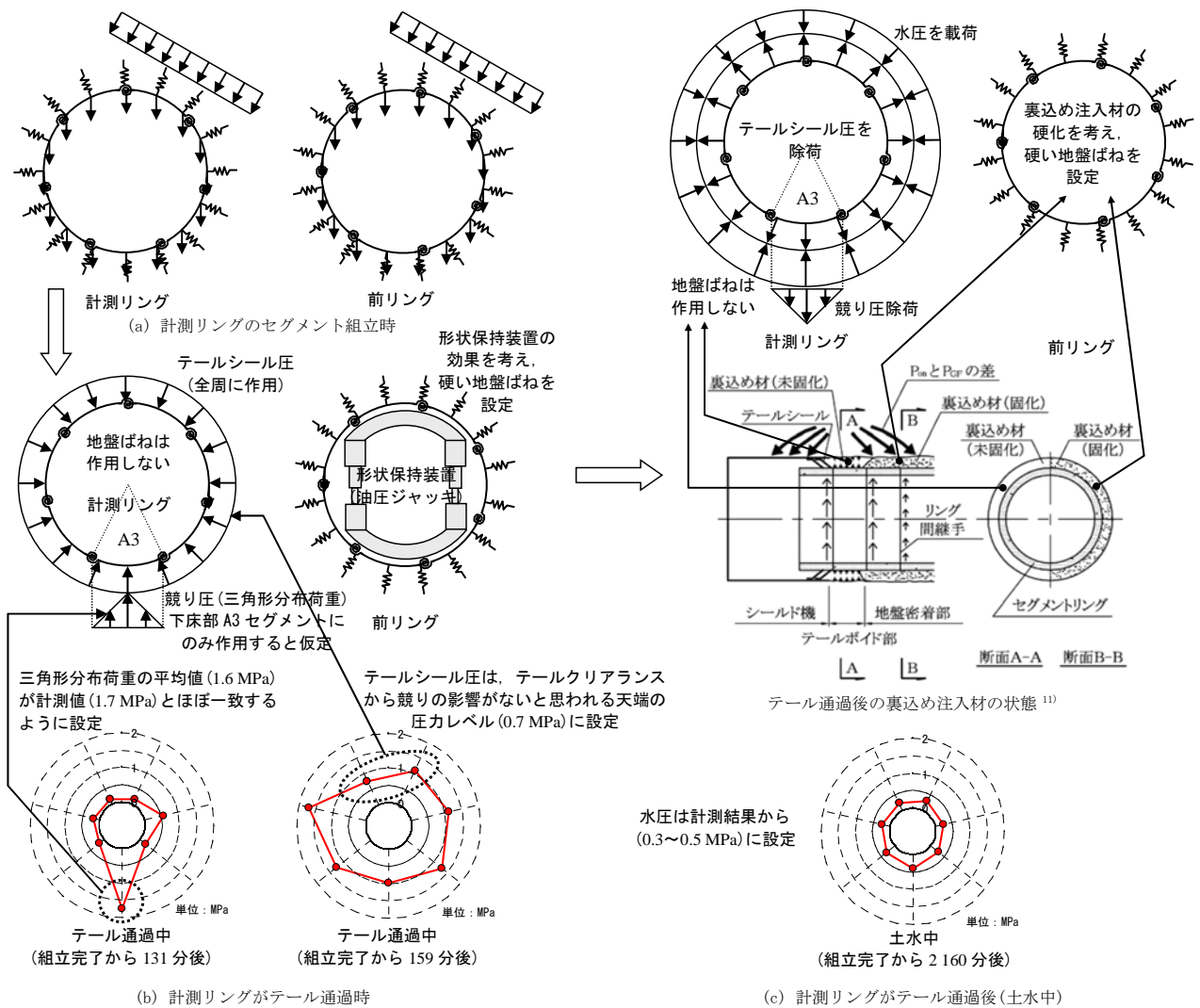
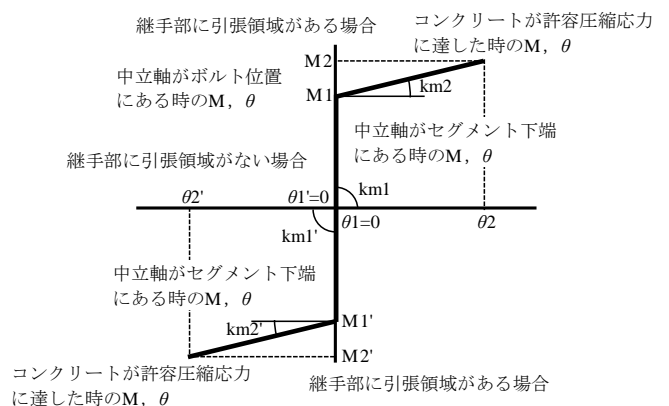


図-19 2リングモデルの解析ステップと荷重条件

また、計測結果から競りに伴う荷重を確認したため、競り圧も荷重として考慮する。競り圧は、三角形分布荷重¹³⁾の頂点の圧力は3.2 MPaに、作用範囲の平均圧力は1.6 MPaに設定した。計測結果では、下床版のトンネル覆工作用圧が1.7 MPaであるが、パッド式土圧計は受圧面積が広いので、局所的な圧力を計測しているわけではない。このため、上記の平均圧力1.6 MPaと計測値1.7 MPa間の整合性を取った。また、A3セグメントのみを競り圧の作用対象としたのは、テール通過時の初期段階ではA3セグメントにおけるトンネル覆工作用圧だけが急激に増加していたためである。

一方、前リングはトンネル覆工全周への作用圧に対して形状保持装置で鉛直方向の変位を抑え、トンネル覆工は軸力が卓越した断面力分布となり、水平方向にも大きな変形は発生しないと考え、荷重を設定しなかった。

セグメント間継手の回転ばねは、テール通過中のテールシール圧に伴う軸力導入状態を考慮し、図-20に示すバイリニアの回転ばね剛性を与えた。一方、リング継手せん断ばねは、組立時と同様、あそびを考慮した剛性を



| | | 第1勾配 | 第2勾配 |
|-----|----------------|----------|---------|
| 正曲げ | M1 [kN・m] | 188.30 | — |
| | km [kN・m/rad] | ∞ | 140 000 |
| 負曲げ | M1' [kN・m] | -188.30 | — |
| | km' [kN・m/rad] | ∞ | 140 000 |

図-20 軸力導入時のセグメント間継手の回転ばね剛性

用いたが、組立時の自重による変形に伴って消失するため、テール通過中の挙動は剛性の大きいせん断ばねの下で計算される。

c) テール通過後（地盤中）

テールを通過して地盤中に出た後は、¹²⁾前リングに作用していた裏込め注入圧が消散し、裏込め材が固化した状態になる。このため、前リングの地盤ばね剛性を大きくし（テール通過中と同様）、地盤ばね反力が引張状態になった場合も抵抗力があるものとして、地盤ばね反力の圧縮、引張に無関係に地盤ばね剛性を設定する。これは、トンネル覆工と裏込め注入材の境界部が一体化していると仮定している。つまり、裏込め注入材の硬化（トンネル内空変形の拘束）をモデル化するために地盤ばね剛性を大きく設定した。

一方、計測リングのテールボイドに注入した裏込め注入材は、未固化の状態にあるため、地盤反力が期待できない。なお、計測リングには形状保持装置を設置しているが、トンネル内空が収縮する方向に対しては抵抗して効果があるものの、テールシール圧の除荷に伴って内空が伸長する場合には抵抗しない。このため、計測リングには地盤ばねを設定しなかった。

テール通過後の計測リングにおける荷重条件は、トンネル覆工作用圧と地盤内間隙水圧が計測の結果、同等であったことから、0.3~0.5 MPaの水圧相当を作用させた。実際には裏込め注入圧も作用しているが、この圧力は、裏込め注入圧の固化に伴って消散するため、ここでは考慮しない。一方、テール通過後の前リングにおける荷重条件は、すでに裏込め注入圧が消散して水圧下にあると考へ、荷重設定しなかった。

各部の材料特性をまとめると表-2のようになる。

(2) 解析結果

施工時荷重を考慮した解析モデルを用いたフレーム解析結果を図-21に示す。

表-2 各部の材料特性

| 材料特性項目 | | 設定値 | |
|---------------|----------------------|---|--|
| | | 計測リング | 前リング |
| セグメント剛性 | 曲げ剛性 EA | 非線形曲げ剛性 テトラリニアモデル | |
| | 軸剛性 EI | コンクリートヤング係数 : $E=3.9 \times 10^7$ [kN/m ²] セグメント断面積 : $A=1.6 \times 0.4$ [m ²] | |
| ピース間継手回転ばね剛性 | 自重および組立時 | 25 567 [kN・m/rad] | |
| | テール通過時および土水中(テール通過後) | バイリニアモデル | |
| | | 第1勾配 | ∞ [kN・m/rad] |
| 第2勾配 | 140 000 [kN・m/rad] | | |
| リング間継手せん断ばね剛性 | セグメント半径方向 | 継手の初期あそび | 1.5 [mm] |
| | セグメント周方向 | あそび消失後 | 190 000 [kN/m] |
| | | 継手の初期あそび | 1.5 [mm] |
| あそび消失後 | 1 309 000 [kN/m] | | |
| 地盤反力係数 | 自重および組立時 | 40 000 [kN/m ³] | |
| | テール通過時 | 0 [kN/m ³] (地盤ばねを設けない) | 800 000 [kN/m ³] (形状保持装置を考慮して地盤ばねを硬化。ただし、油圧ジャッキは、設定最大圧に達すると油圧が抜けるため、ばね反力が引張状態になった場合は、地盤ばねを無効にする。) |
| | | | 800 000 [kN/m ³] (裏込め注入材の硬化を考慮して、地盤反力係数を硬化) |
| 土水中(テール通過後) | | | |

a) 組立完了時

セグメント間継手の回転ばねは軸力の導入に伴い剛性が大きくなるが、モデルの簡便性および有用性の観点から、本解析モデルではセグメント間継手の回転ばねを軸力を導入しない継手曲げ試験より得られた剛性を用いて設定した。解析結果は、内空変位および断面力の計測結果を再現できており、組立完了時の状況を評価できる。

b) テール通過時

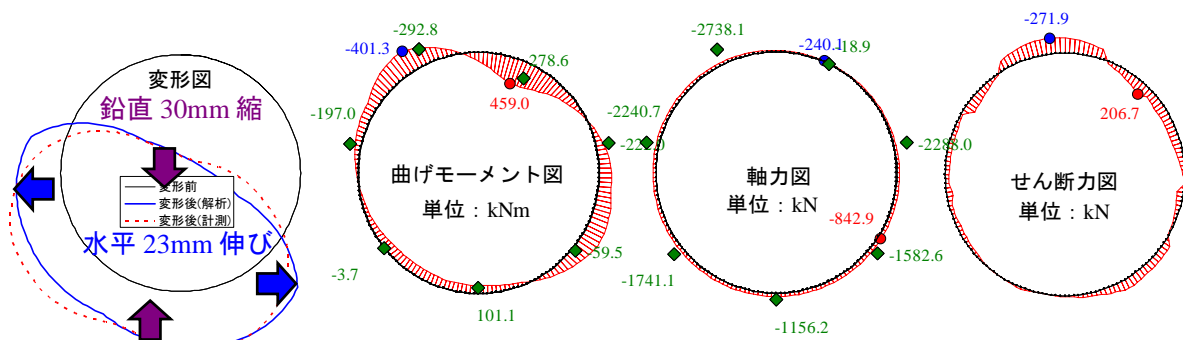
テール通過時のテールクリアランスの計測結果から、組立時から2 mm鉛直内空変形が増加し、32 mmになっていた。これに対し、図-21に示すテール通過時の変形図では、鉛直内空変位が内空変形は32 mmであり、計測結果との整合性が取れている。

一方、断面力についても、以下に示すように計測結果を概ね再現できている。曲げモーメント図においては、左スプリングライン付近の計測値と解析値に違いがあるものの、その他6箇所の計測点における計測値と解析値はほぼ一致している。とくに、競り圧により増加したインバート部(A3セグメント)の曲げモーメントについては、一つの方法として競り圧を三角形分布荷重として局所的に作用させることにより、計測値の傾向を精度よく表現することができることを確認した。また、軸力はインバート部の計測点における計測値と解析値に違いがみられるが、その他6箇所の計測点における計測値と解析値はほぼ一致している。

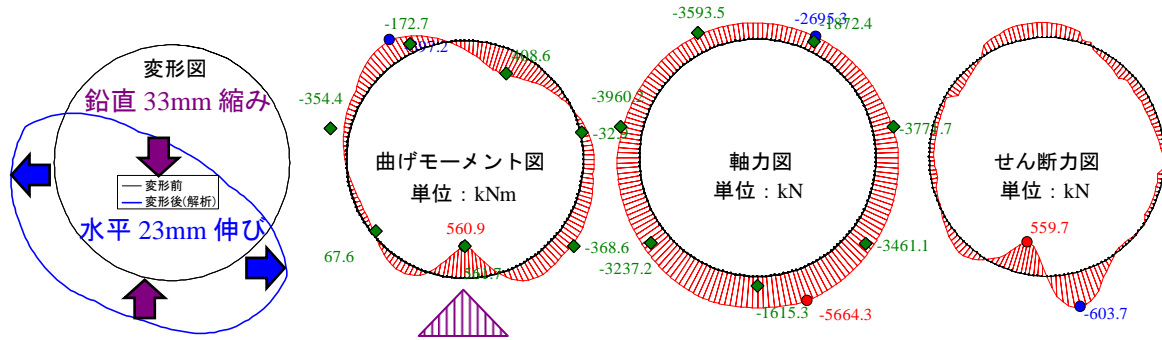
7箇所の計測点のうち1箇所の計測点において、曲げモーメント、軸力ともに計測値と解析値が一致しなかったのは以下の理由が考えられる。

本解析モデルにおいては、全周均一にテールシール圧を与えており、競りの発生している部分にのみ別途三角形分布荷重を設定して荷重を付加している。しかし、実挙動においては、競っている部分は、テールクリアランスの減少に伴ってテールシール圧が増加するが、逆にテールクリアランスが大きくなる部分では、テールシール圧は小さくなると考えられる。したがって、テールシール圧の大きさは、テールクリアランスの大きさに依存して変動するが、本モデルでは簡易的に特徴的な挙動を捉えた分布荷重を想定している。このような仮定条件が、一部の計測断面力を再現しきれていないことの一因として考えることができる。

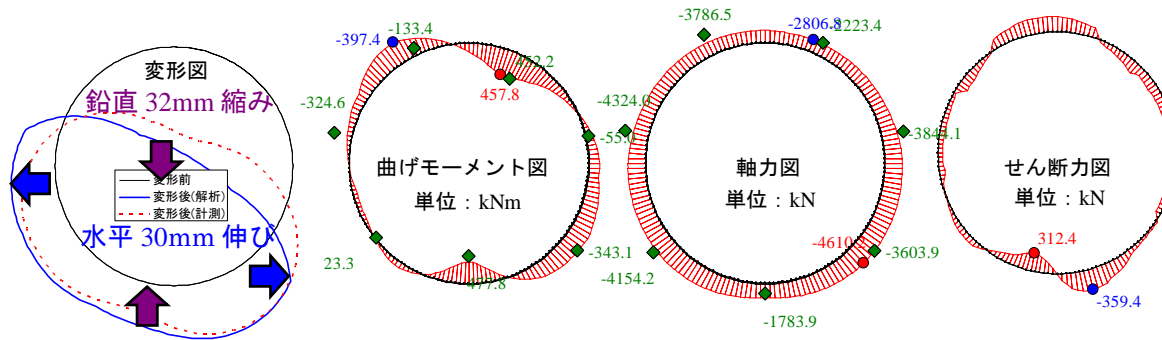
また、セグメント間継手についても同様であり、7箇所のセグメント間継手の回転ばね剛性を全点同じと設定しているが、実際には各セグメント間継手部における導入軸力が異なるため、回転ばね剛性も異なっている。これも、上記の計測値と解析値の違いの原因の一つとして考えることができる。



(a) セグメント組立時の自重による変形図および断面力図



(b) テール通過時の変形図および断面力図



(c) テール通過後(地盤中)の変形図および断面力図

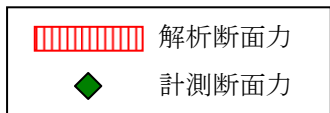


図-21 計測リングにおける計測結果と解析結果の比較

c) テール通過後 (地盤中)

テール通過後の地盤中では、テールシール圧および競り圧が除荷されて、トンネル覆工には水圧のみが作用する状態になる。このため、テール通過時にインバート部で増加した曲げモーメント（競り圧の影響）は減少するが、テール通過前の組立時の状態には戻らない。これは、前リングの裏込め材の硬化を想定して地盤反力係数を大きく設定したためであり、前リングの地盤ばねが非常に大きいため、テールシール圧および競り圧を除荷しても、テール通過時の変形が残留する。本挙動は、図-3の計測結果が示す挙動とも一致しており、図-21に示す計測値と解析値の比較図においてもほぼ一致している。

一方、軸力については、テール通過時はインバート部の軸力の解析値が増加し、計測値との違いが大きかったが、テールシール圧および競り圧の除荷に伴い軸力が低下し、計測値との整合性が取れている。

d) 組立時からテール通過後まで

本解析モデルは、①組立時に前リングの変形に倣う際の施工時荷重、②Kセグメント挿入時の施工時荷重の影響、③テール通過時の競り圧の影響に重点を置いて提案したものである。このモデルは、セグメントリングを梁要素で、地盤、形状保持装置、固化した裏込め注入材等の抵抗を地盤ばねにより表現した2リングモデルであり、簡便なモデルではある。しかし、本モデルを用いることにより、各施工段階における計測値（内空変形と断面力）を再現できることがわかった。ただし、荷重条件等の解析条件は、詳細な計測結果が得られていたため設定できたのであり、設計に用いるためには、これらの条件およびその根拠を事前に設定する手法が必要である。

5. まとめ

本論文では、セグメント組立時、テール通過時、テール通過後の施工時荷重の影響を検討するため、シールドトンネル覆工の計測結果について考察した。また、本計測結果に基づいて、施工時荷重の影響を考慮した2リング梁ばねモデルを提案し、本モデルの適用性について検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) RCセグメントの計測結果

- ① トンネル覆工組立時の自重による変形は、トンネル自重の影響以外に前リングの変形に倣うことで発生している。このため、前リングの変形が大きいと必然的に大きな内空変形が生じる。
- ② Kセグメントが他のセグメントと同じ大きさであったため、組立時のKセグメント挿入の影響が大きく、Kセグメントとその両側のセグメントにおいて曲げモーメントが大きく発生し、軸力がほとんど発生しない部分があった。
- ③ 組立時の内空変位量は、テール通過後に地盤中へ出るまでの間に発生する内空変形量と大差がなかった。よって、セグメント組立時の自重による変形が主となることに注意を要する。
- ④ テール通過中はテールシール圧と競り圧の影響を強く受け、とくにテールクリアランスの狭い部分では、競り圧の影響から大きな曲げモーメントが発生する。
- ⑤ 競り圧に伴い増加した曲げモーメントは、テール通過に伴い緩和されるが、完全に消散することなく残留する。これは、前リングの裏込め材が硬くなることにより、競り圧による変形形状が保持されたためと考えられる。
- ⑥ テール通過後、競り圧に伴う曲げモーメントは残留するが、トンネル覆工作用圧は水圧程度に落ち着く。

(2) 施工時荷重を考慮したフレーム解析

- ① 組立時の挙動を再現するため、セグメント間継手の回転ばねを軸力導入状態を考慮してモデル化し、リング間継手を構造上のあそびを考慮してモデル化した。同モデルを用いることにより、セグメント組立過程における継手の状態が柔軟であり、内空変形が発生しやすいことを示した。
- ② 前リングに倣った変形状況およびKセグメント挿入時の影響を右斜め上 30° からの等分布荷重で表現することにより、内空変形と断面力の発生状況が再現できた。つまり、Kセグメント挿入時には、Kセグメントとその周囲のセグメントに大きな施工時荷重が作用していると考えられる。
- ③ テール通過時の競り圧を三角形分布荷重で表現し、

形状保持装置を考慮して前リングの地盤反力係数を大きくすることにより、テール通過中の変形と断面力の発生状況が再現できた。

- ④ テール通過後は、計測リングに地下水圧を載荷し、前リングの裏込め材が硬くなる、つまり地盤ばねを大きくすることにより、競り圧による曲げモーメントの残留状況が再現できた。

施工時荷重による影響は、一時的に作用して残留しないとする場合が多いが、土水圧以上に大きな影響をもたらす場合を本論文で示した。昨今、コスト削減の観点からシールドトンネル設計も許容値に近い状態で実施される傾向にあり、これらの施工時荷重の影響を十分に考慮しないと、大事故につながる懸念がある。荷重条件等の解析条件は、今回、詳細な計測結果から設定できたが、設計時にはこれらの施工時荷重等の条件およびその根拠を設定する手法が必要である。今後、本論文に示した解析方法も含めて、現行設計法のさらなる検証が望まれる。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法〕・同解説，pp.75-81，2006。
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－シールドトンネル，pp.47-60，1997。
- 3) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法〕・同解説，pp.47-49，2006。
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－シールドトンネル，pp.61-62，1997。
- 5) 土木学会：トンネルライブラリー17 シールドトンネルの施工時荷重，pp.1-5，2006。
- 6) 橋本正，矢部興一，山根昭彦，伊藤博昭：パッド式シールドセグメント用土圧計の開発，第28回土質工学研究発表会講演概要集，pp.2055-2058，1993。
- 7) 譽田孝宏，粥川幸司，杉本光隆，中村益美，岡田章：急曲線シールド掘進に伴うトンネル覆工挙動の現場計測，トンネル工学報告集第15巻，pp.347-354，2005。
- 8) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法〕・同解説，pp.293-294，2006。
- 9) 首都高速道路公団：首都高速道路トンネル構造物設計要領（シールド工法編），2003。
- 10) Leonhard, F., Reimann, H., : "Betongelenke", Der Bauingenieur, Vol. 41, pp. 49-56, Alemania, 1966.
- 11) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－シールドトンネル，pp.149-152，1997。
- 12) 矢萩秀一，入江健二，大門信之，中村兵次，鈴木久尚：施工過程を考慮したシールドトンネル覆工の応力計算方法，土木学会論文集 F, Vol.65, No.2, pp. 128-147, 2009。
- 13) 石村利明，真下英人，森本智：三次元シェルモデルを用いた施工時荷重の影響に関する一考察，トンネル工学報告集第22巻，pp.303-308，2012。

(2015. 5. 18 受付)

BEHAVIOR OF SHIELD TUNNEL LINING DUE TO CONSTRUCTION LOAD AND ITS SIMULATION TECHNIQUE

Jun-ichi NAGAYA, Tadashi HASHIMOTO, Yukinori KOYAMA,
Kazuyoshi TATEYAMA and Yasuhiro TSUKADA

The effect of construction load due to shield tunnel excavation is not necessarily temporary rather it continues as a residual effect. The construction loads include the load at the time of assembling the segment associated with the deformation of the previous segment, the load during insertion of the key segment, the load due to the scraping and thrusting between shield tail and segments during tail passing, and so on.

In this paper, by quantitative evaluation of the monitoring data starting from assembling the segment to the tail passing, it is observed that there is a significant influence of the above mentioned construction loads in shield tunneling. Based on the evaluation of the monitoring data a simulation model has been proposed considering the construction loads, and the validity and applicability of the model is verified.