

施工時荷重作用時のRCセグメントへの 影響について

Influence of RC Segments under Shield Tunnel Construction

竹内友章¹・高橋晃¹・斉藤仁²・中川雅由³・須田悦弘³

Tomoaki Takeuchi, Akira Takahashi, Jin saito,
Masayoshi Nakagawa and Yoshihiro Suda

¹正会員 東京電力株式会社 建設部 (〒100-6530 東京都千代田区内幸町1丁目1-3)

E-mail: takeuchi.tomoaki@tepcoco.jp

²正会員 東京電力株式会社 東扇島火力発電所 (〒210-0869 神奈川県川崎市東扇島3番地)

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6丁目5-30)

We report the valuable knowledge concerning the load traveling mechanism in the effect on the segments, which we obtained in the analysis on the data of the continuous measurement of the reinforced concrete segments under the construction that was executed in the so called extra-deep shield tunnel with high water pressure. That is about the phenomenon of the incidence of the compound moment which consists of the in-plane moment and the longitudinal out-plane moment. Those result mainly from the deformation of the segments by the acting force from shield jacks and the stress of the tail seal in appearing with advancing of shield tunneling correlating with the relative position between the shield machine and the shield tunnel.

Key Words : *shield tunnel, construction loads, influence of RC segments, in-plane moment, longitudinal out-plan moment*

1. はじめに

大深度トンネルでは、高水圧下での掘進に伴う大きなジャッキ推力など、増大する施工時荷重の影響による部材の損傷やそれに伴う漏水発生など供用後の覆工性能に悪影響を与えるリスクが高くなる¹⁾。しかしながら、掘進地盤、深度、トンネル線形などの施工条件毎に異なる施工時荷重に対するセグメントの合理的な設計法は現段階では細部まで確立されているとはいえず、土木学会では、施工時荷重に対する設計体系化を目指して検討が進められている²⁾。

筆者らは、地下水圧が0.5MPa程度以上で線形がほぼ直線の典型的な大深度トンネルを、掘進組立同時施工機構を備えたシールドマシンで掘進した東京電力東西連絡ガス導管新設工事のうち富津工区において、施工時荷重に対するセグメントの発生応力を中心とした計測を実施した。

その結果、ジャッキ推力とテール部の拘束圧に伴いセグメントピースに発生する「面内曲げ（坑口側、切羽側の主筋ひずみの差）」と「軸方向曲げ」が計測された。

本論文では、計測結果とその結果から推論した施工時荷重による応力伝播メカニズムについて報告する。なお、扇島工区は、施工時荷重作用時のセグメント挙動計測結果について平成17年のトンネル工学報告集³⁾に報告しているので参考としていただきたい。

2. 工事概要およびセグメント、シールドマシンの諸元

(1) 工事概要

東西連絡ガス導管工事は、図-1に示すように、神奈川県東扇島火力と千葉県富津火力のLNG基地間を東京湾下の海底シールドトンネルによ

り関係するもので、富津（富津工区）、扇島（扇島工区）それぞれから外径3.44mのシールド掘進を延長9km行い、東京湾の中央部で地中接合したものである⁴⁾。

(2) セグメント、シールドマシンの諸元

本工事では、長距離、高水圧という条件のみならず、平均月進500m以上の高速施工を条件とし、セグメントおよびシールドマシンを設計した。

a) セグメント

セグメントは高速施工への対応として、幅1.35mに幅広化し、組立が簡易なワンパス型セグメントを採用した。なお、海域部では、発生断面力が軸力卓越となることから、セグメント継手を非締結式の突合せ継手（調芯機能付き）とした。セグメント緒元を表-1に示す。

b) シールドマシン

シールドマシンは高速施工への対応として、

セグメント組立同時掘進が可能な内胴スライド機構を有したマシンとした。内胴スライド機構は、図-2に示すように、内胴を介して切羽側の摺動ジャッキとテール側のシールドジャッキの独立した2種類のジャッキを有しており、両ジャ

表-1 セグメント緒元

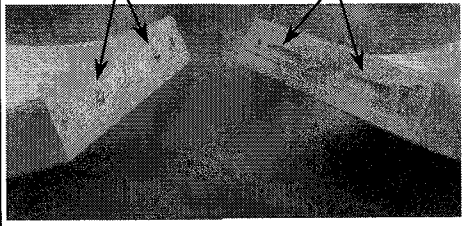
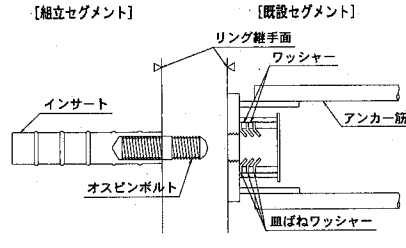
項目	緒元
内径	3000mm
幅	1350mm
厚さ	220mm
分割数	等6分割
セグメント継手	調芯機能付突合せ継手 エレクトロニクスガイド凸側 エレクトロニクスガイド凹側 (可動鋼球) (ガイド溝) 
リング継手	DS継手 [組立セグメント] [既設セグメント] 
シールド材段数	地山側1段 内空側1段

表-2 マシン仕様

項目		仕様
型式		内胴スライド式 同時掘進対応機
機長		12180mm
シールド ジャッキ	推力	1225kN/本
	本数	18本
	総推力	22050kN
テールクリアランス		30mm
テールシール		全4段

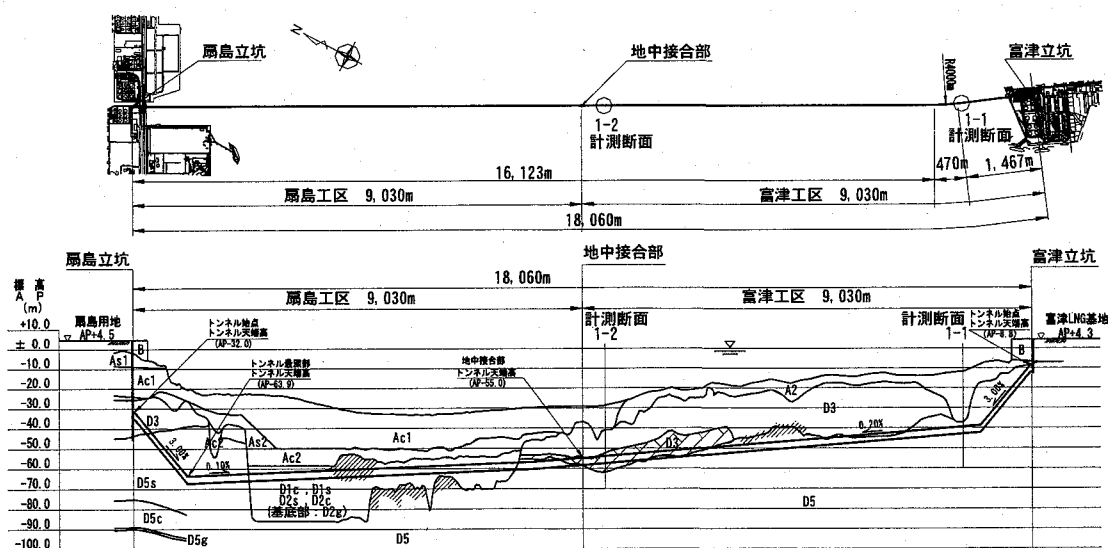


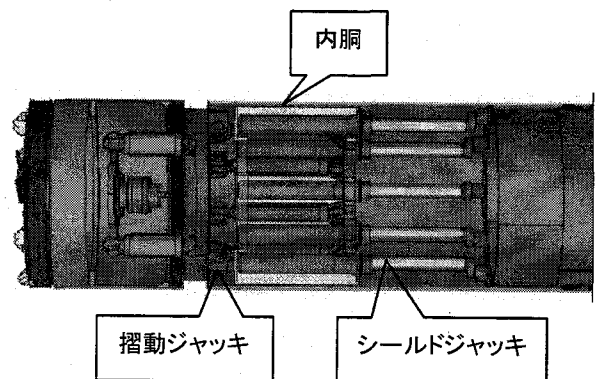
図-1 工事概要図

ッキの伸縮を制御することにより、同時掘進を可能としている。シールドマシンの仕様を表-2に示す。

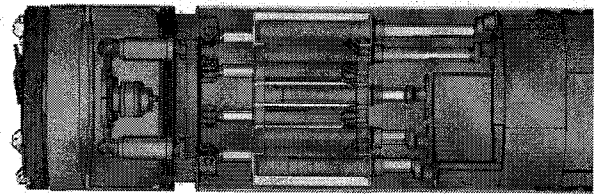
3. 計測計画

富津工区における計測は、図-1に示した1-1、1-2断面で実施した。各断面におけるトンネル管頂から海水面までの距離は、それぞれ約45m、58mであり、掘削部の土質は、それぞれ沖積粘性土層、洪積粘性土層である。また、1-1断面では逐次掘進で、1-2断面では掘進組立同時掘進で施工した。各断面の計測機器の配置は、施工時荷重によるセグメント発生応力を把握するため、表-3に示すように、施工時荷重に対するセグメント発生応力のモードを考慮し、図-3に示した計測配置とした。1-1断面と1-2断面の計器配置を変えたのは、1-2断面では、掘進組立同時施工におけるセグメントピース組立毎の断面力発生モードを詳細に把握するため、組立前からデータの収集が可能となる動ひずみレコーダを用いた計測を実施したことから、計測点数に制限があったためである。

① 掘進開始



② 掘進・組立中



③ 1 Ring組立終了

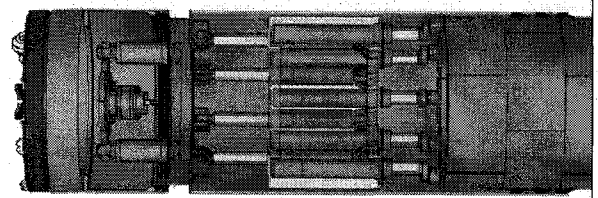
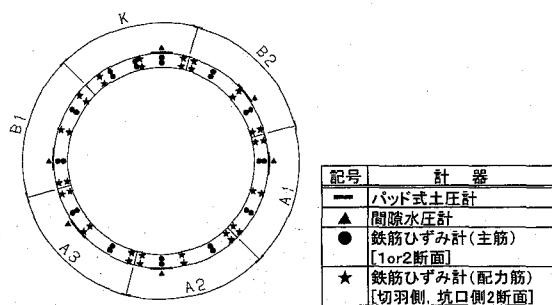


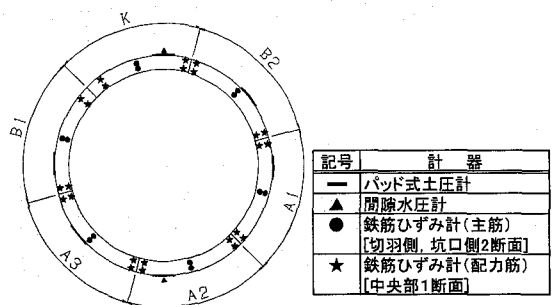
図-2 内胴スライド機構

表-3 施工時荷重に対する計器配置の考え方

主な施工時荷重	施工時荷重による断面力発生モード	計測器配置の考え方
ジャッキ推力	- トンネル軸方向圧縮 - 偏心によるトンネル軸方向の曲げ	- ジャッキ推力のセグメント内の伝播を確認するため、セグメント断面方向の中央部と端部の配力筋ひずみを計測。 - トンネル軸方向の曲げ発生分布を確認するため、切羽側、坑口側に分けた配力筋ひずみを計測。
裏込注入圧	- 裏込め注入圧に対するトンネル断面方向の軸圧縮 - 偏圧が作用した場合のトンネル断面方向の曲げ	トンネル軸方向の裏込め注入圧分布を確認するため、トンネル軸方向の切羽側、中央、坑口側に分けた主筋ひずみを計測。
エレクターの操作荷重	セグメント組立時の衝撃による発生断面力	衝撃荷重による発生断面力を確認するため、動ひずみレコーダを用いた主筋、配力筋ひずみを連続計測（1-2断面で実施）。
テール部に起因する荷重	テールシールの反力、テールグリス圧、シールドテールとセグメントの接触によるトンネル断面方向の軸圧縮および曲げ	- テールシールの反力、テールグリス圧を確認するため、主筋ひずみを計測。 - シールドテールとセグメントの接触によるトンネル軸方向の曲げを確認するため、配力筋ひずみを計測。 - テールシールの反力、テールグリス圧などの施工時荷重を確認するため、パッド式土圧計により作用荷重を計測。
エアバック荷重	シールドマシン内でセグメントに軸力を挿入するエアバックによる断面方向の軸圧縮および曲げ	- トンネル断面方向の軸力導入状況を確認するため、軸ひずみを計測。 - エアバック圧による施工時荷重を確認するため、パッド式土圧計により作用荷重を計測。



(a) 1-1断面



(b) 1-2断面

図-3 計測断面図

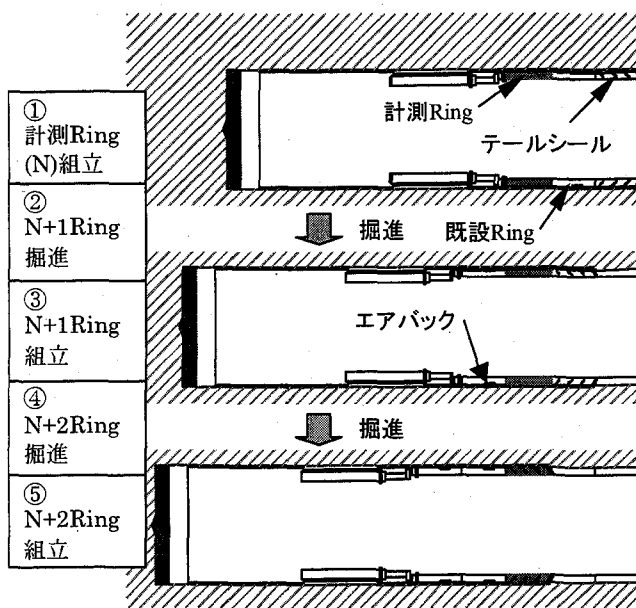
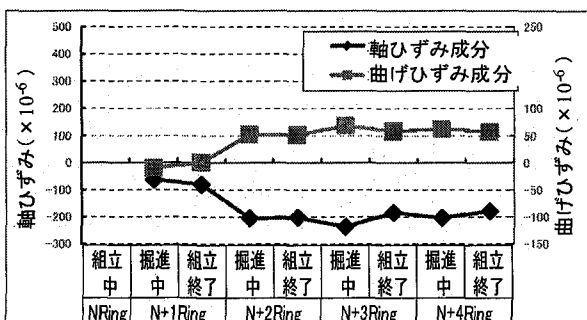
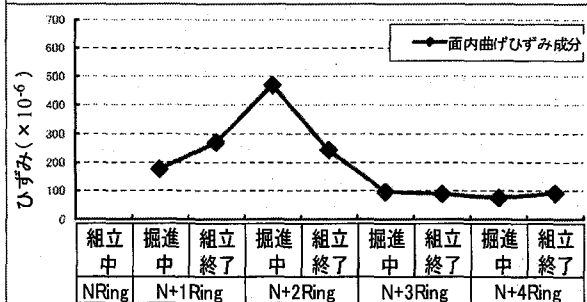


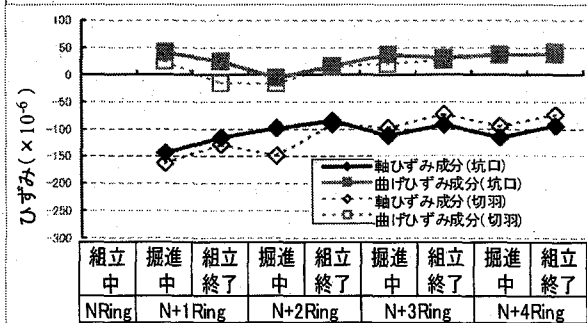
図-4 施工ステップ図



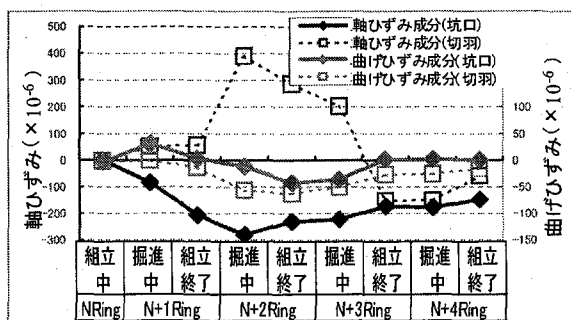
(a) 断面方向軸・曲げひずみ成分推移(1-1断面)



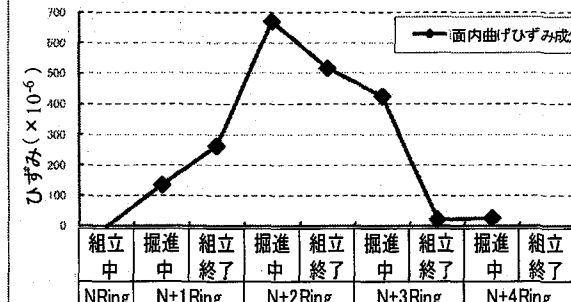
(b) 面内曲げひずみ成分推移(1-1断面)



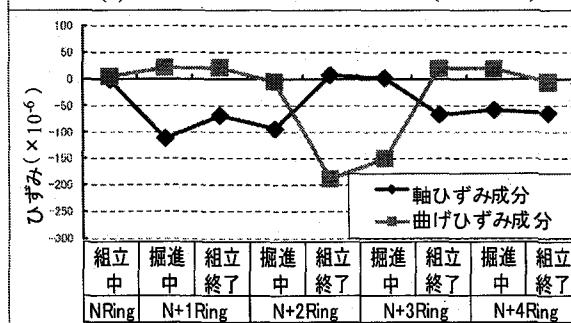
(c) 軸方向軸・曲げひずみ成分推移(1-1断面)



(d) 断面方向軸・曲げひずみ成分推移(1-2断面)



(e) 面内曲げひずみ成分推移(1-2断面)



(f) 軸方向軸・曲げひずみ成分推移(1-2断面)

図-5 計測結果の全体評価

4. 施工状況

施工ステップ毎のシールドマシン、計測リング(NRing)および地山の位置関係を図-4に示す。通常のシールドマシンでは、セグメントを組立て掘進を開始するとリングを形成したセグメントは、テール部による拘束力を受けることとなるが、当該工事では、掘進組立同時施工の機構を備えていることから、リングを形成した状態で半径方向の拘束を受けないリングが存在する。この状態を解消するため、エアバックにより約0.4N/mm²相当の荷重を作用し、セグメント断面方向に軸力を発生させている。

図-4には、逐次掘進時の施工ステップを示し

ているが、掘進組立同時施工時は、図中の①と②、③と④を同一ステップで実施することとなる。

5. 計測結果

図-5は、1-1、1-2断面における施工時荷重による発生ひずみの推移をひずみ成分毎にまとめたものである。なお、今回の計測では、ピース毎の発生ひずみが同様な傾向を示したことから、図-5には全ピースの平均値を示している。以下にひずみ成分毎の計測結果の特徴を示す。また、施工ステップ毎の断面力発生状況を表-4に示す。

表-4 施工ステップ毎の断面力発生状況

施工ステップ	主な施工時荷重	計測結果および分析
NRing組立前	・構内での搬送、吊上による衝撃荷重など ・エレクターの操作荷重(把持、旋回まで)	① セグメント組立前(構内での搬送、吊上げ、エレクターによる把持など)によって発生するひずみは、10μ以下であり、後工程で発生するひずみに比べて僅かであった。
N+1Ring掘進 NRing組立	・エレクターの操作荷重(組立時の衝撃荷重など) ・ジャッキ推力 ・エアバック荷重	① セグメントを組立段階でひずみの発生を確認できるが、衝撃荷重によるひずみは確認できなかった。組立によるセグメントピース自重によるものと判断している。 ② ジャッキ推力により、トンネル軸方向に軸力、曲げが発生した。 ③ ジャッキ推力は、各セグメントに不均等に伝播された。組立精度やジャッキとセグメントの接触状態によるものと考えている。 ④ ジャッキ推力データからのトンネル軸方向ひずみの計算値と配力筋ひずみの計測値の平均はほぼ等しい値であった。 ⑤ 1-1断面ではリング組立後の計測開始直後から、1-2断面では各セグメント計測直後から、セグメントの面内曲げ(切羽側と坑口側の主鉄筋ひずみの差)が計測された。 ⑥ 1-2断面では、N+1Ring掘進終盤にかけて坑口側の断面方向軸力のみが増加した。また、1-1断面において同じような現象は、N+1Ring組立時に発生している。これは、隣接する先行リングがテールブラシによる拘束力を受ける影響と考えている。 ⑦ エアバックによってピース間目開きの減少が確認できた。
N+2Ring掘進 N+1Ring組立	・ジャッキ推力 ・テール部に起因する荷重	① NRingがテールブラシ中に移動するにしたがい、セグメントの内面内側が引張方向となるトンネル軸方向曲げが確認できた。この段階では、ジャッキ推力が一定であるにもかかわらず、トンネル軸方向軸力が徐々に減少した。これは、テールシールの拘束による影響と考えている。ただし、この事象は計器配置の関係から1-2断面のみで確認できた。 ② 1-1、1-2断面とも一時的に切羽側の主鉄筋に大きな引張ひずみが発生した。このひずみは、掘進が進行し切羽側もテール部の拘束の影響を受けるにしたがい減少した。
N+3Ring掘進 N+2Ring組立	・ジャッキ推力 ・テール部に起因する荷重 ・裏込注入圧	① NRingがテール部を脱出し、セグメントに土水圧作用する段階で、N+2Ring掘進、N+1Ring組立時に確認された、トンネル軸方向のセグメント内面が引張となる曲げおよび切羽側の主方向の引張ひずみは完全に解消された。 ② この段階で裏込注入圧の影響を受けるが、はっきりとした傾向は確認できなかった。これは、テール拘束力の解放による影響が大きかったためと考えている。
N+4Ring掘進 N+3Ring組立	・ジャッキ推力	① ジャッキ推力やセグメント組立の影響によるトンネル軸方向軸力の変動は確認できるものの、その値は前ステップに比べて非常に小さいものであった。

(1) 断面方向軸・曲げひずみ成分(図-5(a), (d))

断面方向軸成分は主筋の内外ひずみの平均, 曲げ成分は主筋の内外ひずみの差を示したものである。

この結果から, 断面方向については, 軸, 曲げひずみ成分とも両計測断面においてテール部での拘束を受けるN+2Ring掘進～N+3Ring掘進にかけて大きな値を示していることがわかる。

特徴としては, 1-2断面の計測結果から, テール部の拘束による影響を切羽側より先に受ける坑口側の軸力が切羽側に比べ先行して圧縮側のひずみを計測し, この段階で切羽側の軸力が引張側に推移することである。

これらの発生したひずみは, テールから脱出するにしがたい減少する傾向にあった。

(2) 面内曲げひずみ成分(図-5(b), (e))

面内曲げ成分は, 切羽側, 坑口側の主筋内外ひずみのそれぞれの平均値の差を示したものである。

面内曲げ成分は, N+2Ring掘進中に最大となり, その後は減少する傾向であった。

今回の計測の特徴の一つである面内曲げについては, 次章で発生メカニズムについて考察する。

(3) 軸方向軸・曲げひずみ成分(図-5(c), (f))

軸方向軸成分は配力筋の内外ひずみの平均, 曲げ成分は配力筋の内外ひずみの差を示したものである。

トンネル軸方向軸ひずみ成分は, 1-1断面では施工中を通してほぼ一定であったが, 1-2断面においては, N+2Ring掘進中に一時的な減少傾向

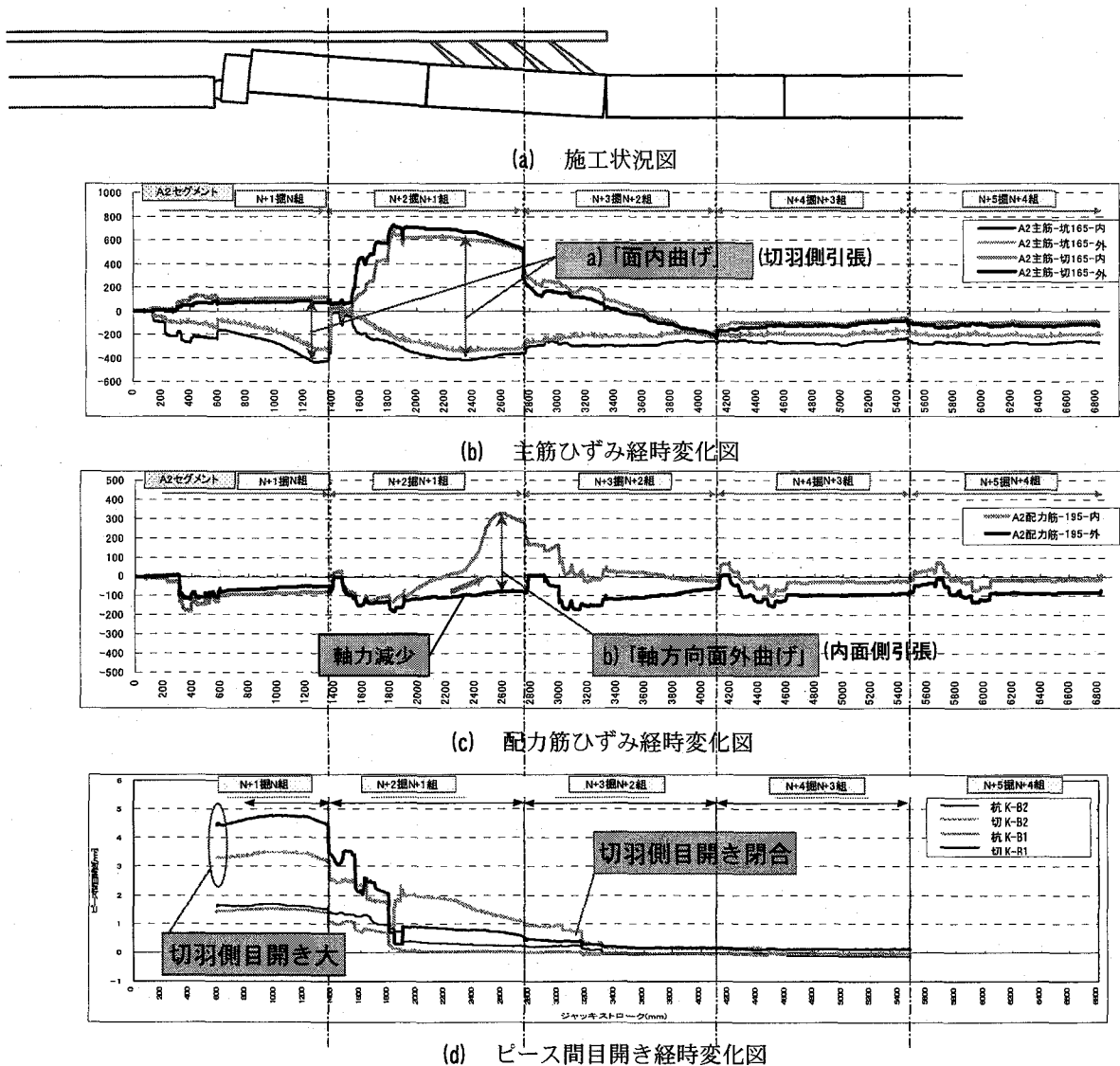


図-6 1-2断面A-2セグメントの計測経時変化図

が確認され、軸方向の曲げひずみ成分も同時期に大きな値を示している。

軸方向の軸ひずみおよび曲げについても、次章で発生メカニズムについて考察する。

6. ひずみ発生メカニズムについての考察

今回の計測結果の特徴の一つとしては、面内曲げと軸方向曲げを計測で捉えられたことが挙げられる。代表的な計測結果として、1-2断面A-2セグメントの主筋および配筋ひずみの経時変化図を図-6に示す。なお、図-6には、施工状況とKセグメントまわりで実施した目開き計測結果もあわせて示す。

図-6から、両事象とも引張側のひずみが 200μ を超える計測値を示しているが、現場観測の結果では、特にひび割れは確認されていない。

(1) 面内曲げ

今回の計測で顕著となった面内曲げは、切羽側の内外の主筋ひずみが引張側を計測し、逆に坑口側の内外の主筋ひずみが圧縮側を計測したことであり、この事象は、1-1断面では、リング組立後の計測開始直後から、1-2断面では、各セグメントピース組立直後からこの傾向が確認された。

この面内曲げの発生メカニズムは、計測セグメントの坑口側においてテール部による拘束の影響を強く受け、図-7に示すような計測Ringと先行Ringとの接触状態が計測セグメントの坑口側中央部を支点とした局部接触状態になり、図-8のようなメカニズムにより内面曲げが大きくなったものと考えている。

このような局部接触状態を現す計測データとして、配筋ひずみ変化とピース間目開き計測結果を以下に整理する。

a) 配筋ひずみの増分

図-9は、1-1断面坑口側配筋のN+1Ring掘進前後の軸ひずみ成分の割合をプロットしたものである。1-2断面では、配筋ひずみ計測を各セグメントピースにおいて幅方向の中央部のピース間継手側端部2箇所で行っているため、配筋のひずみを詳細に計測した1-1断面のデータで検証した。これからN+1Ringの掘進過程で全てのセグメントの中央でひずみが増加したことが確認できる。これは、図-8に示すように計測Ringと先行Ringとの接触状態が計測Ringの坑

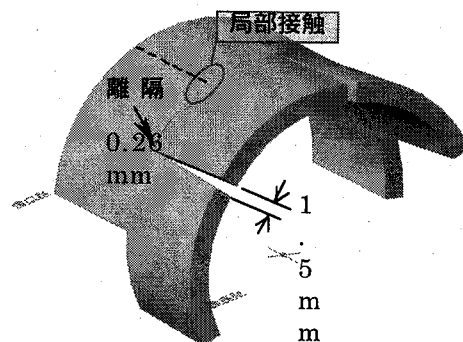


図-7 先行リングとの局部接触状況

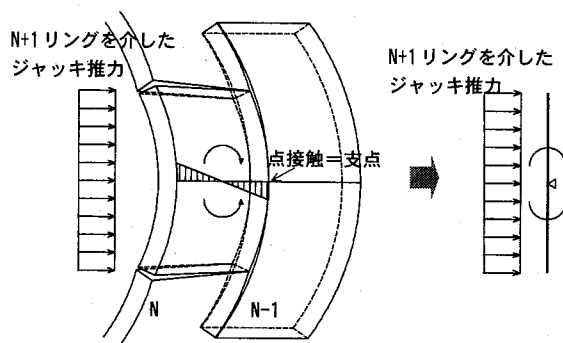


図-8 面内曲げ発生メカニズム

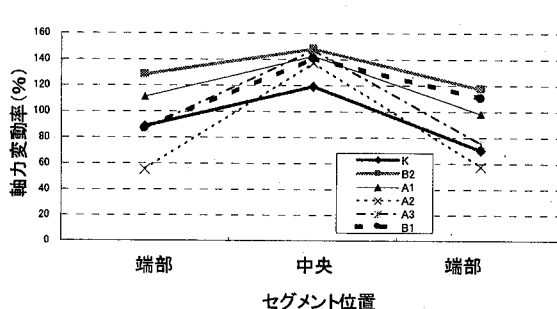


図-9 N+1Ring掘進前後の軸力推移
(1-1断面坑口側)

口側中央部で局部接触状態となったことを裏付けていると考えられる。

b) ピース間目開き計測

図-6(d)で示した目開き計測の結果から、ピース間目開き量は、坑口側に比べ切羽側の方が大きい値を示している。ピース間目開き量の推移は、テール部での拘束を受けはじめる段階で、坑口側の目開きが減少し、これにともない断面方向の圧縮ひずみが増加する。また、テール部の拘束の影響をあまり受けていない切羽側では、この段階でも目開きが残存し、セグメントリングの坑口側が絞られ、切羽側が開くラップ状態

を呈することとなる。ラッパ状態については、断面方向の軸ひずみ成分の計測結果においても、テール部による拘束の影響を切羽側に比べ先に受ける坑口側の軸圧縮ひずみが増加し、その段階で切羽側の軸ひずみが引張側に推移することからも裏付けられる。

この状態になると、図-7で示した計測Ringの坑口側中央部を中心とした局部接触状態となり面内曲げが発生すると考えられる。

(2) 軸方向曲げ

N+1Ring掘進NRing組立時にはほとんど確認されなかったトンネル軸方向の曲げ（配力筋の内外のひずみ差）がN+2Ring掘進N+1Ring組立時に確認された。これは、図-10に示したテール部の拘束とジャッキの偏心による曲げと考えられる。

この施工ステップにおける曲げの発生は、図-6(c)に示したようにセグメント内側の配力筋の引張方向への増加によるものである。この段階では、外側の配力筋の圧縮方向へのひずみ増加が確認できず、計測位置での軸ひずみ（配力筋の内外ひずみの平均）が減少するような傾向を示している。この施工過程ではジャッキ推力の変動がないことから、トンネル軸方向の軸力全体が減少したとは考え難い。これは、セグメント坑口側中央部での接触状態から、図-11で示した軸方向の応力伝播により、ピース間継手部付近の配力筋ひずみが減少したためと考えている。この事象は、図-9に示した1-1断面における配力筋の計測データからも裏付けられる。

また、軸方向内側に発生する引張ひずみは、いずれのセグメントにおいても、N+2Ring掘進中に最大値を示し、掘削完了時には減少傾向に転じ、N+3Ring掘進終了時には、切羽側、坑口側のひずみがほぼ同等となった。掘進の進捗により、切羽側もテールの拘束や水圧による拘束を受け、ラッパ状態が解消されたものと考えられる。

6. おわりに

今回の計測から、先行リングとの接触状態により、面内曲げが発生すること、また、軸方向の曲げはテール部の拘束の影響が大きいことを

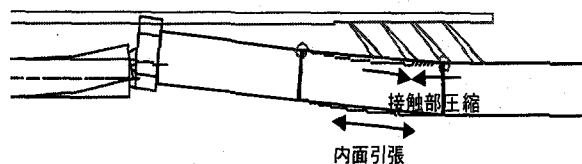


図-10 テール圧による軸方向曲げの発生メカニズム

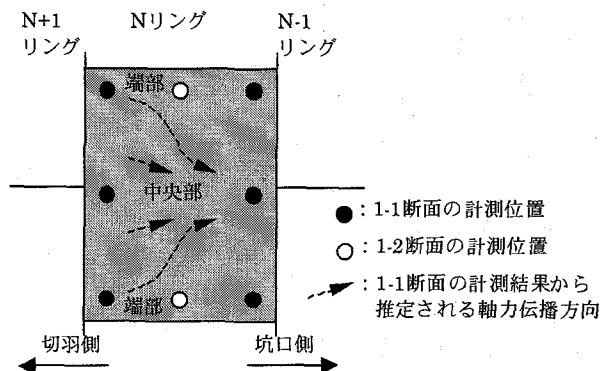


図-11 軸力伝播状況

示した。これらの事象は、トンネルの大深度化によりジャッキ推力とテール圧が増大した場合に、セグメントの品質に大きな影響を与えることが想定される。

今回の工事では、面内曲げと軸方向曲げの発生を計測により確認したが、トンネル全体の完成出来高については、ひび割れ、漏水などもほとんど無い良好な状況であった。

また、逐次と掘進組立同時という掘進工法の相違によるセグメント発生応力の違いは、今回の計測においては明確な差は確認されていない。

今後は、前回報告した扇島工区の挙動と今回計測結果を比較・分析し、施工時の挙動や発生応力について検討を深めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) (社)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.
- 2) (社)土木学会トンネル工学委員会技術小委員会シールドトンネル施工時荷重検討部会：シールドトンネルの施工時荷重に関する研究中間報告資料，2005.
- 3) 斉藤仁，中島崇，高橋晃，竹内友章，白井伸一：施工時荷重作用時のセグメントの挙動について，トンネル工学報告集，第15巻，pp315-322, 2005.
- 4) 白井伸一，富所達哉，野口和博，東西連係ガス導管新設工事の計画概要，トンネルと地下，vol.34-no11，pp.39-47, 2003.