

# シールドトンネルの施工時荷重の影響に関する一考察

石村利明\* 森本 智\*\* 角湯克典\*\*\* 真下英人\*\*\*\*

## 1. はじめに

大深度地下などの良好な地盤に建設されるシールドトンネルに作用する荷重は、水圧が主であり土圧が非常に小さいことが明らかになってきている<sup>1)</sup>。このため、従来の土圧、水圧などの外力だけを対象にした設計ではセグメントを薄肉構造とすることが可能となる。しかし、セグメントにはシールド掘進時のジャッキ推力、セグメント組立て時のエレクター操作荷重、裏込め注入圧などの施工時荷重が一時的に作用することとなり、薄肉構造となった場合には、これら施工時荷重の影響によりセグメントの欠け、ひび割れ等が発生する可能性がこれまで以上に高くなる。

本報文は、現在のセグメント設計では考慮できていない施工時荷重によるセグメントへの影響を把握するため、硬質粘性土(土丹)中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、シールド掘進に伴う施工時荷重がどの段階でどの程度作用しているのかについて実態を把握するとともに、多リングはりばねモデルを用いた骨組み構造解析を行い、施工時荷重がセグメント覆工に与える断面力について検討を行った。

## 2. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

### 2.1 検討方法

硬質粘性土(土丹)中を通過する2本のシールドトンネルの覆工に設置した土圧計、水圧計および鉄筋応力計から得られる現場計測結果をもとに、シールドトンネルの施工時荷重の実態を把握した。分析を実施したシールドトンネルの位置と地盤条件および諸元をそれぞれ表-1、図-1、図-2に示す。また、各シールドと計測リングとの位置関係は図-3、図-4に示すとおりである。

### 2.2 現場計測結果

#### 2.2.1 Aシールド掘進時における断面力の変化

表-1 シールドトンネル諸元

トンネル名	A	B
シールド外径(m)	13.05	6.36
シールド形式	泥水加圧式	泥水加圧式
土被りH(m)	52.1	34.4
土被り比H/D	4.0	5.4
地下水位(管頂より)(m)	44.9	30.3
掘削部の主な地質	洪積粘性土層	洪積粘性土層
セグメントの種類	平板型RCセグメント	平板型RCセグメント
セグメント外径D(m)	12.83	6.20
セグメント内径(m)	11.83	5.70
セグメント厚さ(m)	0.50	0.25
セグメント幅(m)	1.2	1.3
セグメント分割数	9	6
セグメントの組み方	2リツク千鳥	2リツク千鳥
継手形式(セグメント継手)	ボルト・金物結合	突き合わせ継手
継手形式(リング継手)	ピン継手	ピン継手

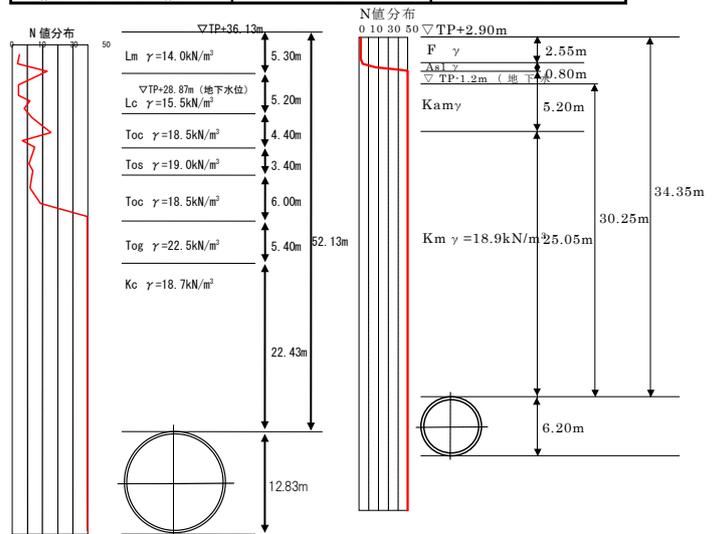


図-1 Aトンネルの位置と地盤条件

図-2 Bトンネルの位置と地盤条件

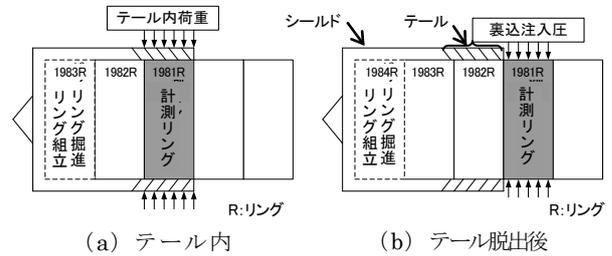


図-3 Aシールドと計測リングの位置関係

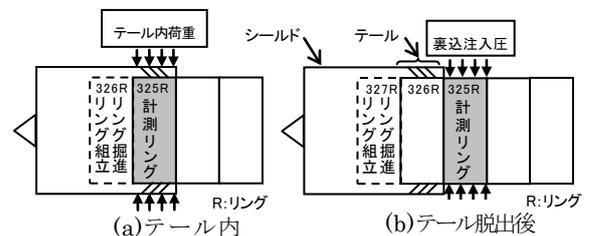


図-4 Bシールドと計測リングの位置関係

図-5 に A トンネルの計測リングに発生する断面力について、計測セグメント組立てから 10 リング後方掘進までの変化、計測リング後方のセグメント組立て前後、シールド掘進前後の変化を示す。なお、図中の各状態における増減値は、図-6 に示す考えに基づいて整理した。

図より、掘進に伴う断面力の変化は、セグメント組立て時から徐々に増加し 3リング後方(4R(R:リング))の掘進時で最大となり、その後ある一定値に収束する傾向を示す。

セグメント組立前後の断面力の変化は、計測リング(1981R)組立時にリング閉合するために最後に挿入する Kセグメントおよびトンネル天端付近で最大で約 100~200kN・m と比較的大きな値を示す。その後、各セグメントの組立状況に応じて変化している。本トンネルでは、1リング後方(2R)の組立前後には大きな変化はないが、2リング後方(3R)の組立前後で再び大きく変化し、7リング後方(8R)のセグメント組立前後まで影響している。計測リングのセグメント組立前後に断面力が発生する要因としては、当該リング組立てセグメントの自重、リング閉合時によるセグメント

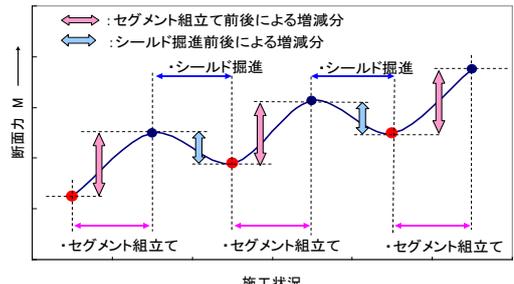


図-6 断面力の増減分抽出の考え方

間同士の接触等による局部的な偏荷重の作用等の影響が、計測リング後のセグメント組立て時に断面力が発生する要因としては、隣接するリングがリング間継手で連結されていることにより、組立リングにおける自重や局部的な偏荷重等によって発生する断面力の伝達等が考えられる。これらることより、新規に組み立てるセグメントは、隣接するリングの断面力に影響を与えていることが考えられる。

シールド掘進前後の断面力の変化は、顕著な影響があるのは 1~4 リング程度後方(2R~5R)のリング掘進時までとなっているが、掘進による影響は 7 リング後方(8R)まで見られる。図-3 に示した計測セグメントとシールドとの位置関係から、計測リング(1981R)を基準とすると、セグメントには、主としてシールド掘進時のジャッキ推力、1~2 リング後方(2R~3R)の掘進時のシールドテール(シールド後部)でのテール圧(テールシールド反力、テールグリス圧)、また、シールド 2~3 リング後方(3R~4R)のシールドテール脱出後での裏込め注入圧等が作用している。このことから、これらの掘進時の断面力の変化は、計測リングがテール部を通過することや裏込め注入圧が大きく影響していると考えられる。

2.2.2 Bシールド掘進時における断面力の変化

図-7にAトンネルと同様な考え方に基づいて整理したBシールドの計測リングに発生する断面力について、計測セグメント組立てから10リング後方掘進までの変化、計測リング後方のセグメント組立て前後、シールド掘進前後の変化を示す。図より、掘進に伴う断面力の変化は、セグメント組立て時から徐々に増加し3~4リング後方(4R~5R)掘進時で最大となり、その後、ある一定値に収束する傾向を示す。断面力の大きさは、Aトンネルに比較して非常に小さい値となっている。

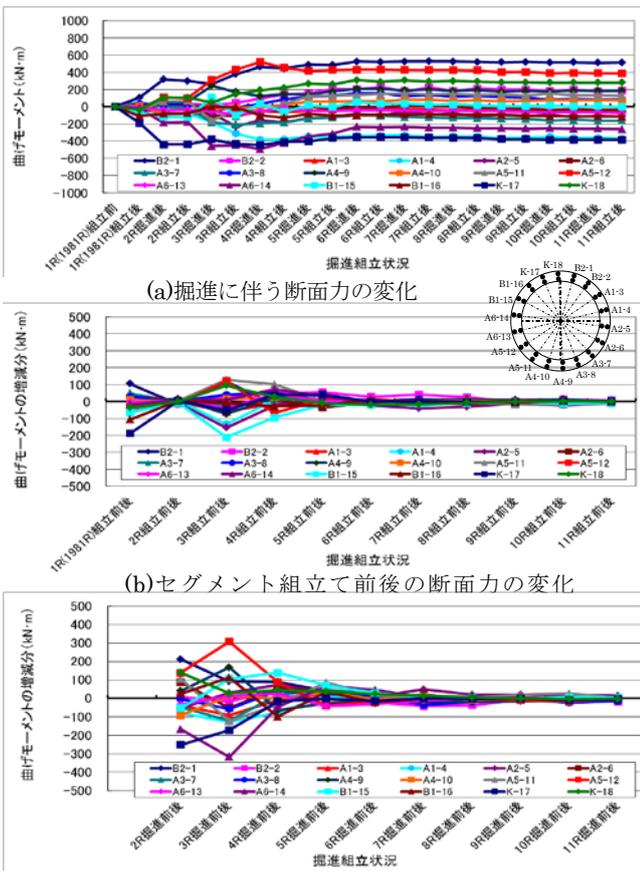


図-5 Aシールドの掘進に伴う断面力の変化

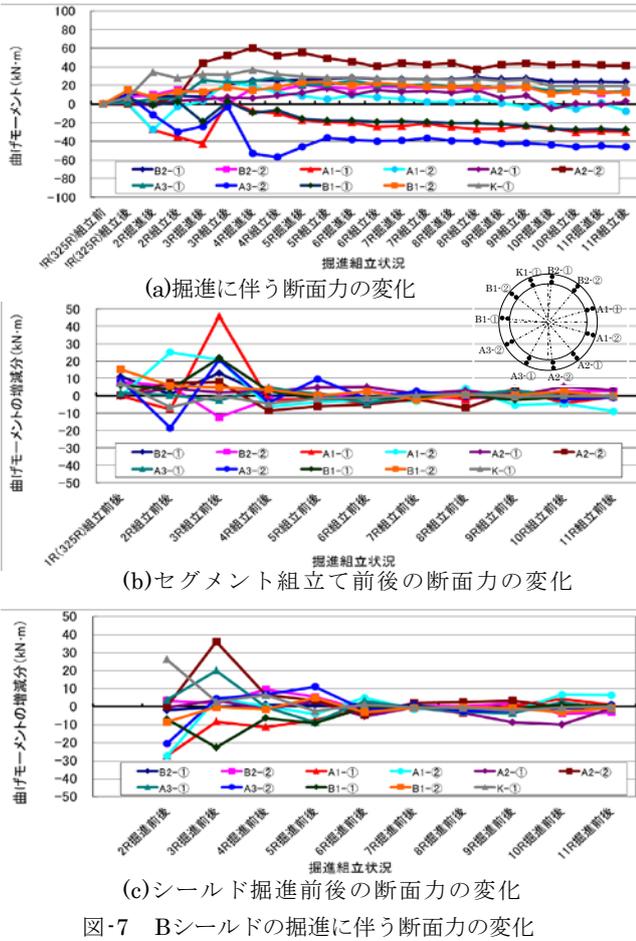


図-7 Bシールドの掘進に伴う断面力の変化

これは、トンネル規模がAトンネルに比較して小さいこと、セグメント自重が軽量(約1/12程度)によること等が考えられる。セグメント組立て前後の断面力の変化、掘進前後の断面力の変化は、概ねAトンネルの結果と傾向が近似しており、隣接セグメント間での断面力の伝達と、テール圧やジャッキ推力による一時的な施工時荷重の作用圧が大きく影響していると考えられる。

### 3. 多リングはりばねモデルによる施工時荷重の影響

#### 3.1 検討方法

本解析は、シールド掘進に伴ってセグメント覆工に一時的に作用する施工時荷重がセグメントに発生する断面力にどの程度の影響を与えるかを把握することを目的とした。解析モデルは、図-8に示すはりばねモデルを用いた骨組み構造モデルを基本とし、施工時荷重の影響が小さくなると考えられる10リングまでをモデル化した。検討にあたっては、図-9に示すようにA・Bトンネルともに、テール内のリング数を1リングとしたモデルを考えて、該当リングにセグメント自重、静水

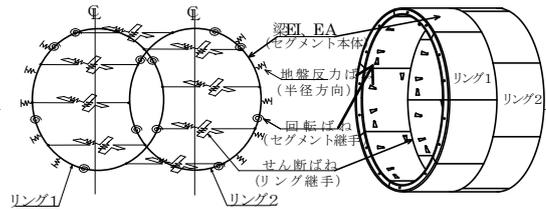


図-8 骨組み構造解析モデル

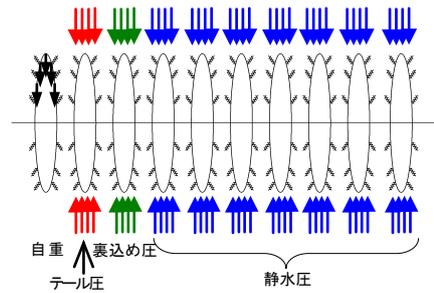


図-9 10リングはりばねモデルと載荷重

表-2 各リングの地盤反力ばね値の設定

着目リング	施工時荷重または外力	地盤反力ばね (MN/m <sup>2</sup> )		状態、地盤反力係数の設定の考え方
		Aシールド <sup>1)</sup>	Bシールド <sup>2)</sup>	
1リング目	自重、組立	0	0	シールドテール内にある。基本的には隣接セグメントのリング継手による拘束、推進ジャッキによる拘束等が考えられるが、前者はリング継手ばねで評価されていると考えられるので、地盤反力は考えない。
2リング目	テール圧	5	5	シールドテール内にある。テールブラシ、テールグリス圧により拘束されている。これまでの解析結果を参考に設定する。
3リング目	裏込め注入圧	0	0	シールドテールを抜けて、地盤側へ出た状態。裏込め注入材を所定の圧力で注入した状態。裏込め注入材は注入後1時間程度以内であり、まだ硬化していないため地盤反力は考えない。
4リング目～10リング目	静水圧	16～18の範囲で変化	75～108の範囲で変化	地盤側へ出た状態。トンネル周辺は裏込め材料を介して地盤反力を伝達する。各リングともに、注入後の時間に応じた裏込め注入材の強度が異なるため、裏込め注入材の硬化過程を考慮した地盤反力ばねの設定を行う。

圧、およびテール圧(テールブラシ圧、テールグリス圧)、裏込め注入圧の各施工時荷重に相当する荷重を与えた解析を行い、隣接するリングに発生する断面力の大きさを把握したうえで、各施工時荷重が隣接リングに与える影響を加味したセグメントの断面力について検討した。なお、4リング目～10リング目に外力として静水圧のみの作用としたのは、過去の検討結果<sup>1)</sup>より、当該トンネルでは、土圧は作用していないか、作用しても非常に小さいことが報告されていることによる。

また、各リングの地盤反力ばねの値は、セグメントの拘束状態を考慮し、表-2に示す考え方に基づいて設定した。なお、4リング目以降の地盤反力ばねは、2次元FEM解析に基づく方法<sup>1)</sup>により裏込め注入材の硬化過程を考慮して、テールボイドの厚さに相当する部分に1リングのサイ

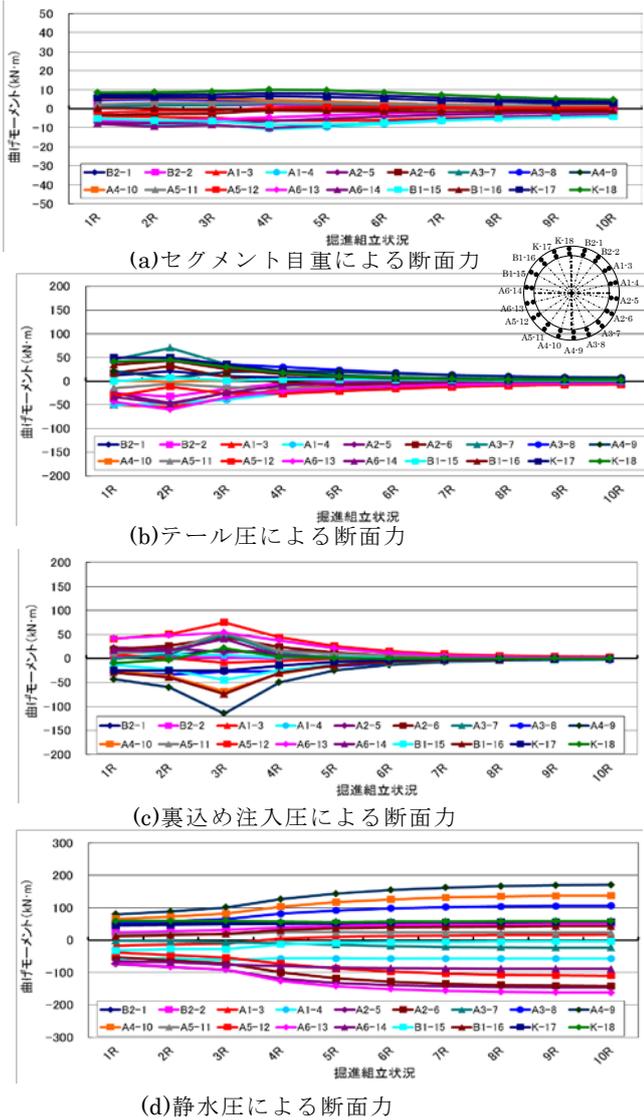


図-10 各施工時荷重等による発生断面力 (Aトンネル)

クル時間を考慮した経過時間毎に各リングの裏込め注入材の変形係数を与えたときの地盤反力ばね値を算出して用いた値を用いた。

### 3.2 検討結果

#### 3.2.1 各リングの断面力に与える各施工時荷重の影響

図-10、図-11 に各施工時荷重および静水圧がそれぞれ該当するリングに作用した場合の隣接するリングに対する断面力の変化を示す。ここで、図中の(a)はセグメント自重を 1 リング目に、(b)はテール圧を 2 リング目に、(c)は裏込め注入圧を 3 リング目に、(d)は静水圧を 4 リング目以降に、それぞれ载荷したときの各リングに発生する断面力を示す。

図より、セグメント組立て、裏込め注入圧等のそれぞれの荷重によって発生する各リングの断面力は、断面力の大きさは異なるものの、リング継手の添接効果等による曲げモーメントが伝達する

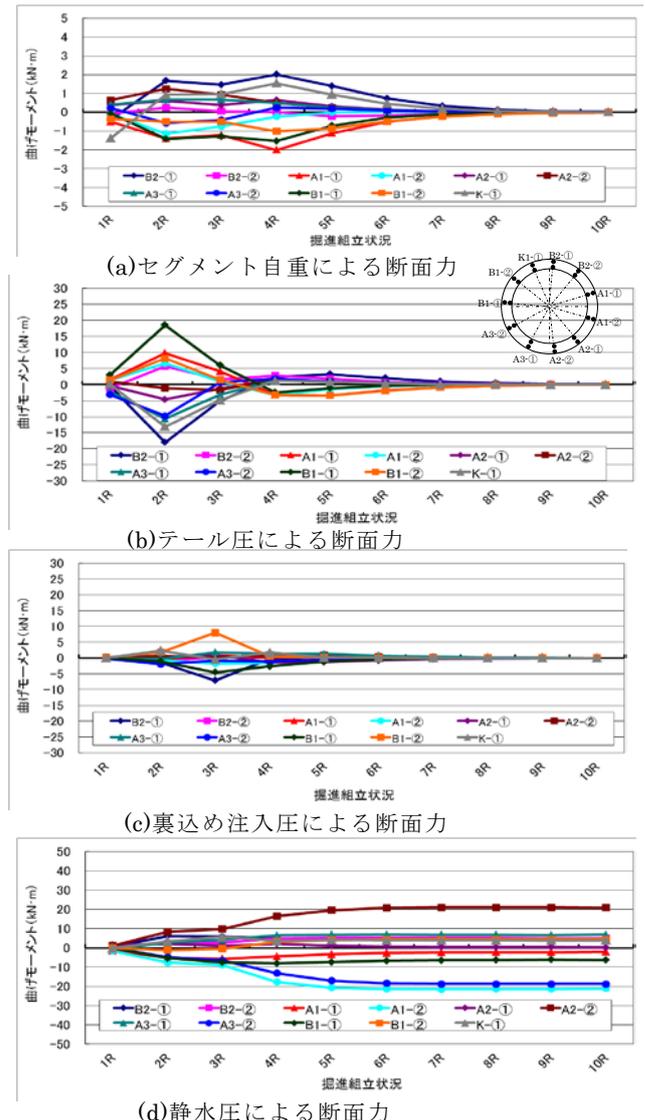
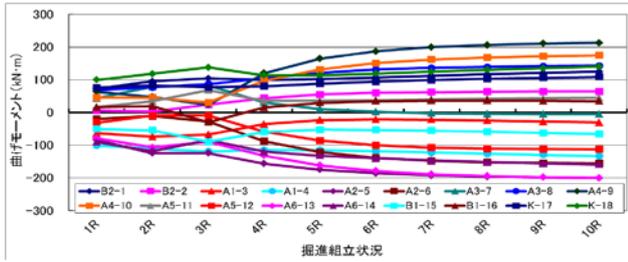


図-11 各施工時荷重等による発生断面力 (Bトンネル)

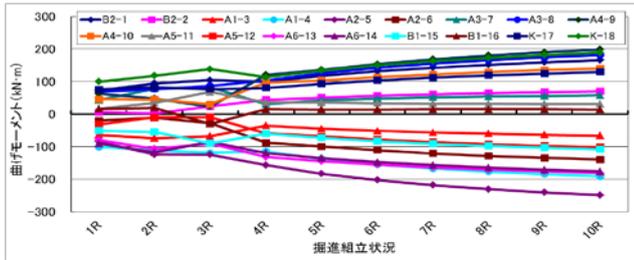
ことにより、载荷リング以外の断面力へ影響を与えていることがわかる。ここで、A トンネルについては、図-10(b)、(c)の 2 リング目、3 リング目に作用させたテール圧、裏込め注入圧によって 1 リング目に最大±50kN・m の断面力を発生させている。また、シールド外のリングに作用させた静水圧によって 1 リング目に最大±100kN・m と比較的大きな断面力を発生させている。これらのことは、新設のセグメント組立てを行うリングには、一時的な施工時荷重や静水圧等の荷重によって既に変形した既設リングに隣接してセグメントを組立てるため、既設リングの影響を受けて当該リングのセグメント自重のみにより発生する断面力よりも大きい断面力が発生することを示している。

#### 3.2.2 シールド掘進時における断面力の変化

各施工時荷重、静水圧が作用するリング以外の



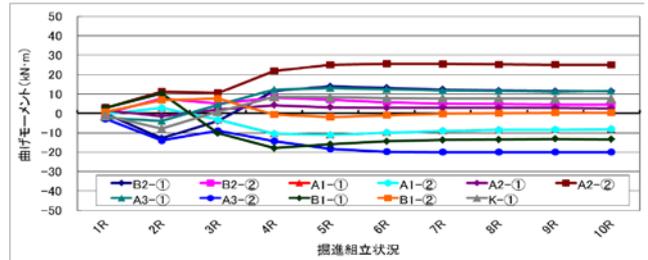
(a)自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧



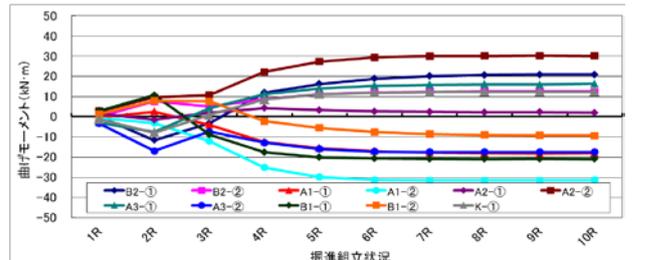
(b)自重累積+(テール圧+裏込め圧)4リング以降累積+静水圧

図-12 施工時荷重を考慮した発生断面力 (Aトンネル)

隣接リングの断面力に影響を与えていることが分かった。ここでは、各施工時荷重、静水圧を加味した場合のリングに発生する断面力について検討する。図-12、図-13 に施工時荷重を加味した断面力を示す。ここで、図中の(a) は各施工時荷重をそれぞれ該当リングに作用させた場合を加味して、セグメント自重、テール圧、裏込め注入圧、静水圧によって各リングに発生する断面力の合計値を示した。(b)は各施工時荷重により発生した



(a)自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧



(b)自重累積+(テール圧+裏込め圧)4リング以降累積+静水圧

図-13 施工時荷重を考慮した発生断面力 (Bトンネル)

断面力が、予期せぬ一時的な過大な偏荷重等の施工時荷重等によってリングの変形状態が拘束されるなど、何らかの形で残留する場合を考慮し、一例として4リング目以降のテール圧、裏込め注入圧によって発生する断面力を累積した値を示した。なお、(a)、(b)ともに自重によって発生する断面力は、セグメント組立てリング(1リング目)のみの載荷による解析値であるので各リングに発生する断面力を求める際には後方のリングの影響

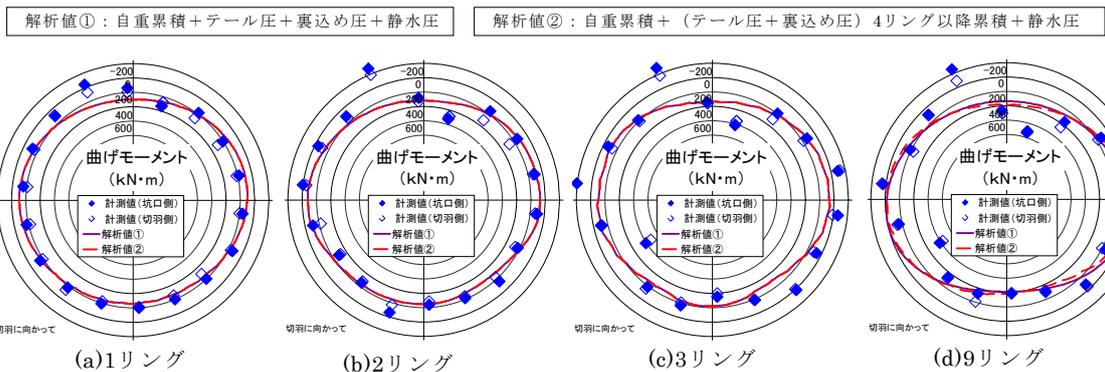


図-14 Aトンネルの各リングに発生する断面力の比較 (曲げモーメント)

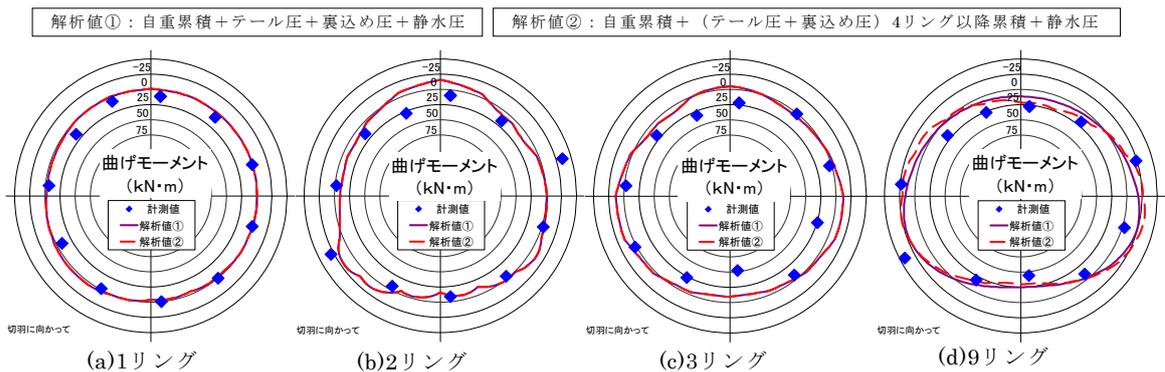


図-15 Bトンネルの各リングに発生する断面力の比較 (曲げモーメント)

をそれぞれ累積している。

図より、(a)、(b)の各施工時荷重を加味した断面力は、最大の断面力等の値は必ずしも一致していないが、前述の現場計測のシールド掘進時の断面力(図-5、図-7の(a))の変化の傾向と類似した傾向を示している。

次に、上記の結果を用いて、施工時荷重が作用する1リング、2リング以降累積+静水圧リング、3リング、および短期的な安定時として9リングの各リングの断面力について、計測値との比較を図-14、図-15に示す。

図より、Aトンネル、Bトンネルともに、最大を示す一部の箇所では整合していないものの、各解析値は計測値と概ね整合している。また、Aトンネルのセグメント組立て時に相当する1リング目の断面力については、解析値に既設リングが荷重を受けることによって発生する断面力の影響を考慮することで計測値と整合することが分かった。

以上より、セグメント組立後から施工時荷重が作用するリング周辺での施工時荷重による各リングに発生する断面力の影響を把握する場合には、隣接するリング間で伝達する断面力を評価できる多リングはりばねモデルを用いた方法等が考えられる。

#### 4. まとめ

硬質粘性土(土丹)中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、シールド掘進に伴う施工時荷重がどの段階でどの程度作用しているのかについて実態を把握するとともに、多リングはりばねモデルを用いた骨組み構造解析を行い、施工時荷重がセグメント覆工に与える

断面力について検討を行った結果、以下のことが分かった。

- ①新規に組み立てるセグメントの自重、既設リングの組立て精度や変形状況によって、隣接リングにセグメント組立による影響を与える。
- ②解析結果より、新規に組み立てるセグメントリングには、既設リングの変形状況の影響を受けて当該リングのセグメント自重のみにより発生する断面力よりも大きい断面力が発生する。
- ③掘進前後の断面力は、1~4リング程度先のリング掘進時まで顕著な増減がある。その変化の主な要因は、テール部通過、裏込め注入圧によると考えられる。
- ④セグメント組立後から施工時荷重が作用するリング周辺での施工時荷重による各リングに発生する断面力の影響を把握する場合には、隣接するリング間で伝達する断面力を評価できる多リングはりばねモデルを用いた方法等が考えられる。

今後は、セグメント組立て、テール通過時の施工時荷重の定量的な評価を行うために、テールボイド部の裏込め注入材の地盤反力ばね値の影響、施工時荷重によって発生する断面力の残留等をどのように加味するかを検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 石村利明、真下英人：硬質地盤中のシールドトンネルの作用荷重に関する一考察、トンネル工学報告集、第18巻、pp.235~242、2008.11

石村利明\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術研究グループトンネル  
チーム 総括主任研究員  
Toshiaki ISHIMURA

森本 智\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術研究グループトンネル  
チーム 研究員  
Satoshi MORIMOTO

角湯克典\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術研究グループトンネル  
チーム 上席研究員  
Katsunori KADOYU

真下英人\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所道路技術研究グループ長、工博  
Dr. Hideto MASHIMO