

## 戦-30 施工時荷重を考慮したセグメント設計に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典、石村利明、森本智

### 【要旨】

本研究は、良好な地盤に建設されるシールドトンネルの長期耐久性に優れたセグメント設計を行うため、トンネル掘進に伴う施工時荷重の影響を把握し、この影響を考慮した合理的なセグメント設計方法について検討するものである。本年度は、硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、トンネル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。

キーワード：シールドトンネル、施工時荷重、現場計測、多リングはりばねモデル

### 1. はじめに

近年、大都市圏の大深度地下において道路をはじめとするシールドトンネルの建設が見込まれている。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。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・セグメント組立て時にジャッキ推力、裏込め注入圧、エレクター操作荷重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り、将来の維持管理にかかるコスト増加や長期耐久性の面で問題となる。したがって、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について把握し、この影響を考慮した長期耐久性の高いセグメント設計法を確立することが必要である。

本研究は、良好な地盤に建設されるシールドトンネルの長期耐久性に優れたセグメント設計を行うため、トンネル掘進に伴う施工時荷重の影響を把握し、この影響を考慮した合理的なセグメント設計方法について検討するものである。本年度は、硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、トンネル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。

### 3. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

#### 3.1 検討方法

硬質地盤（土丹）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。なお、各シールドの1リングあたりの掘進からセグメント組立てのサイクル時間はAシールドで、約6時間、Bシールドで約3時間であった。

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リング千鳥	2リング千鳥
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

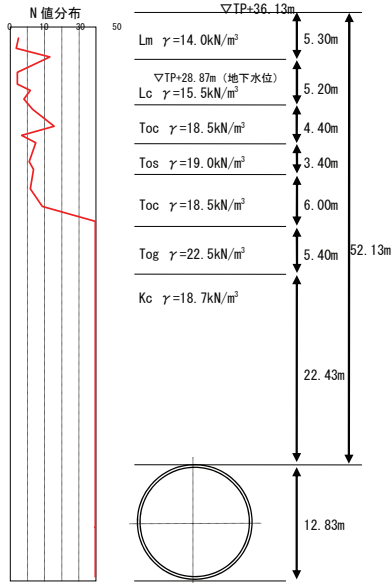


図-1 Aシールドの位置と地盤条件

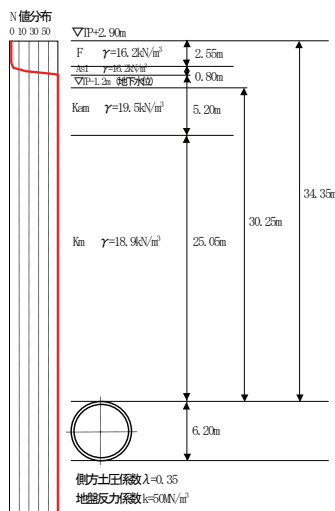


図-2 Bシールドの位置と地盤条件

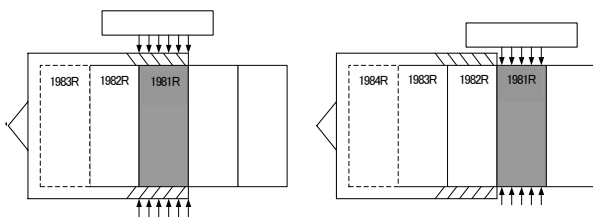


図-3 Aシールドと計測リングの位置関係

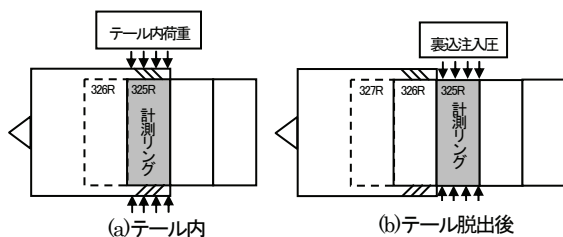


図-4 Bシールドと計測リングの位置関係

### 3.2 現場計測結果

#### 3.2.1 Aシールド掘進時における断面力の変化

図-5にAシールドのセグメント組立て時から10リング後方掘進までのセグメントに発生する断面力の変化を示す。図には、図-6に示す考えに基づいて、各リング掘進に伴ってセグメント組立て、シールド掘進前後の断面力の増分を整理し、各施工時における影響を把握した。

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。セグメント組立て前後の断面力の変化は、計測リング(1981R)

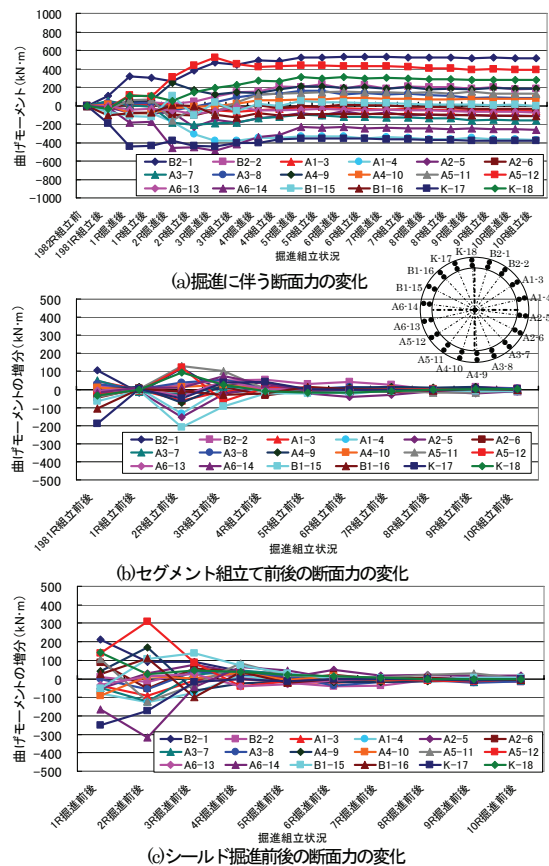


図-5 Aシールドの掘進に伴う断面力の変化

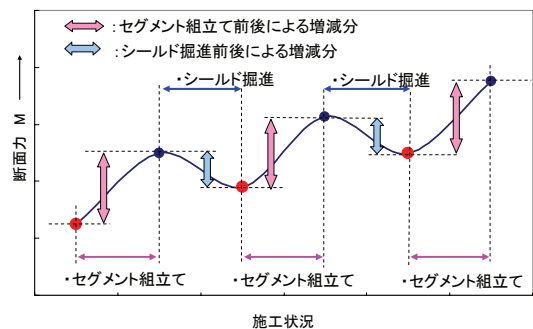


図-6 断面力の増減分抽出の考え方

組立て時にリング閉合するために最後に挿入するセグメント（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、1リング後方の組立前後には大きな変化はないが、2リング後方の組立前後で再び大きく変化し、7リング後方のセグメント組立前後まで影響している。計測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間同士の接触等による局所的な偏荷重の作用等の影響が、計測セグメント後方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、隣接するリングはリング間継手で連結されていることにより、他リングで作用している荷重、もしくは一時的に作用した荷重等により発生する断面力の伝達等が考えられる。これらより、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。また、その大きさは、セグメント自重やセグメントの組立て精度や変形状況等に応じて変化すると考えられる。

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、主として1～2リング後方の掘進時にテール圧（テールシール反力・テールグリス圧）やジャッキ推力等が、2～3リング後方の掘進時に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。

### 3.2.2 Bシールド掘進時における断面力の変化

図-7にBシールドのセグメント組立て時から10リング後方掘進までのセグメントに発生する断面力の変化、各リングのセグメント組立て前後、シールド掘進前後の断面力の変化を示す。

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4～5リング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シールドに比較して非常に小さい値となっている。これは、トンネル規模がAシールドに比較して小さいこと、セグメント自重が軽量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シールドの結果と傾向が近似しており、隣接セグメント間での

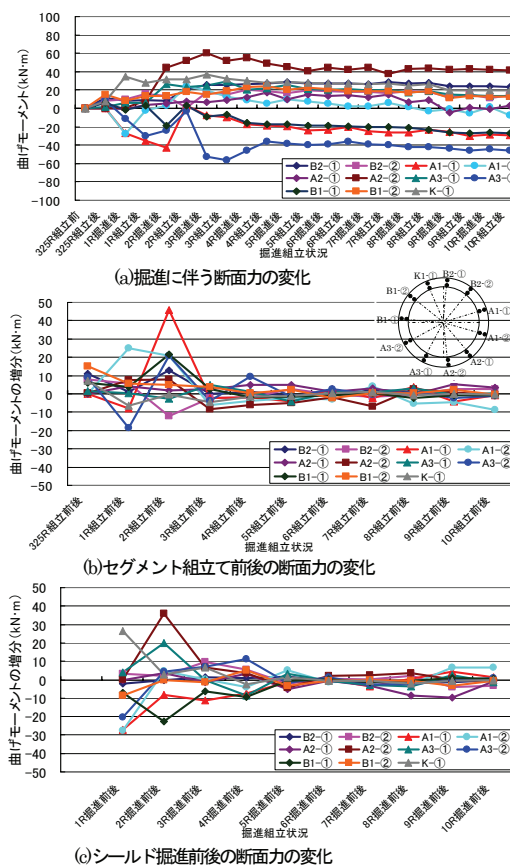


図-7 Bシールドの掘進に伴う断面力の変化

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。

## 4. 多リングはりばねモデルによる施工時荷重の評価

### 4.1 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に示すようにセグメント自重、テール圧（テールブラシ圧、テールグリス圧）および裏込め注入圧の各施工時荷重に相当する荷重を現場計測の土圧計で得られた値を該当する解析リングに同時に作用させた場合、各施工時荷重を単独で作用させた場合の解析を行い、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を作用させているのは、過去の検討結果<sup>1)</sup>により、本対象のト

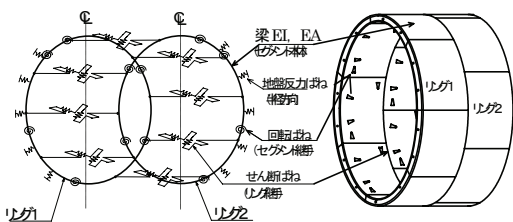


図-8 骨組み構造解析モデル

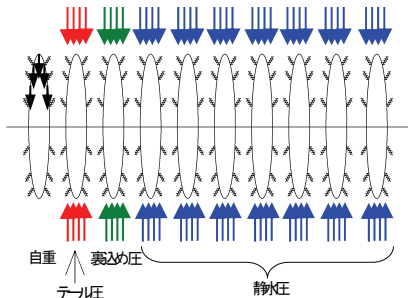


図-9 10リングはりばねモデルと载荷重

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	地盤反力ばね値 (MN/m <sup>3</sup> )						状態・地盤反力係数の設定の考え方
		Aシールド			Bシールド			
1リング目	自重・組立	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、前者はリング継手は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	2	5	10	2	5	10	シールドテール内にある。テールブラシ、テールグリスタ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						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	2次元FEM解析による結果(16～188の範囲)で変化			2次元FEM解析による結果(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。

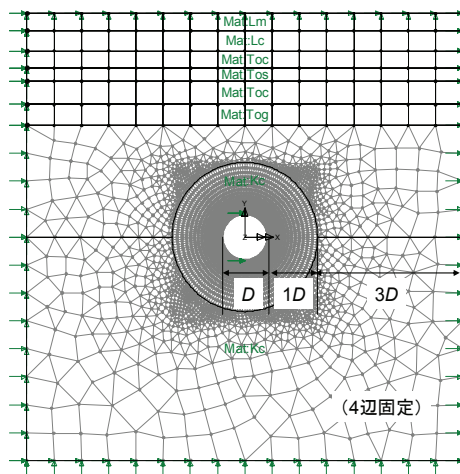
ンネルにおいては、土圧は作用していないか、作用しても非常に小さいことが報告されていることによる。

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、図-10に示す領域をもつ解析モデルによる2次元FEM解析に基づく方法<sup>1)</sup>によって算出した値を用いた。また、裏込め注入材の硬化過程を考慮して、図中に示すテールボイドの厚さに相当する要素に1リングのサイ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を算出した。

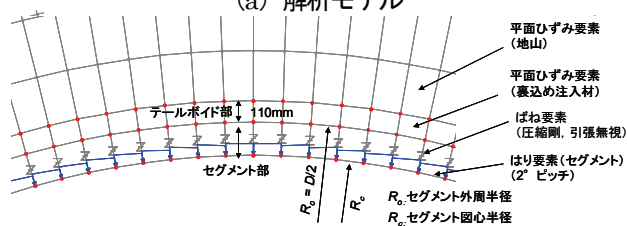
## 4.2 検討結果

### 4.2.1 シールド掘進時における断面力の変化

2リング目の地盤反力ばね値が5MN/m<sup>3</sup>の場合について

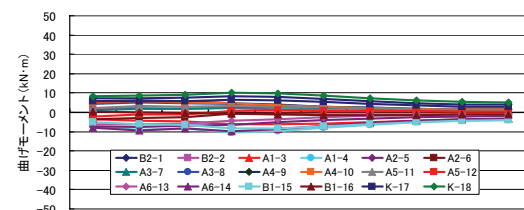


(a) 解析モデル

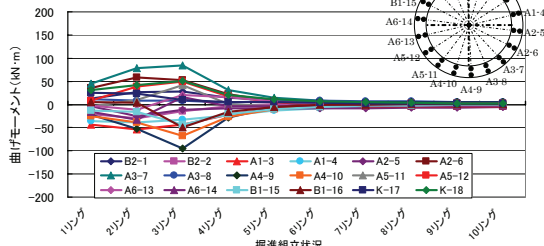


(b) セグメント近傍のメッシュ図

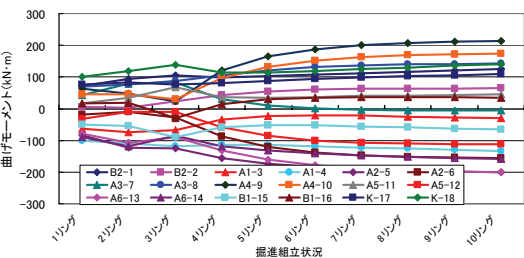
図-10 2次元FEM解析のモデル(Aシールドの場合)



(a)セグメント組立てによる断面力



(b)テール圧・裏込め注入圧による断面力



(c)各施工時荷重を加味した断面力  
(自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧)

図-11 Aシールドの各施工時荷重による発生断面力

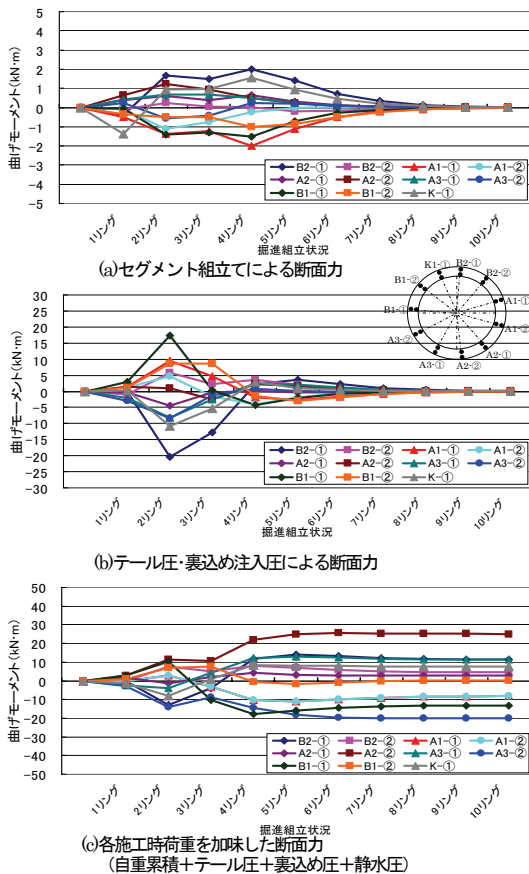


図-12 Bシールドの各施工時荷重による発生断面力

て、各施工時荷重をそれぞれ該当するリングに載荷した場合、および施工時荷重を加味した断面力の変化を図-11、図12に示す。ここで、図中の(a)はセグメント自重を1リング目に載荷したときの各リングに発生する断面力を、(b)はテール圧、裏込め注入圧をそれぞれ2リング目、3リング目に作用させたときの各リングに発生する断面力を、(c)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ている。なお、自重によって発生する断面力は、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をそれぞれ累積している。

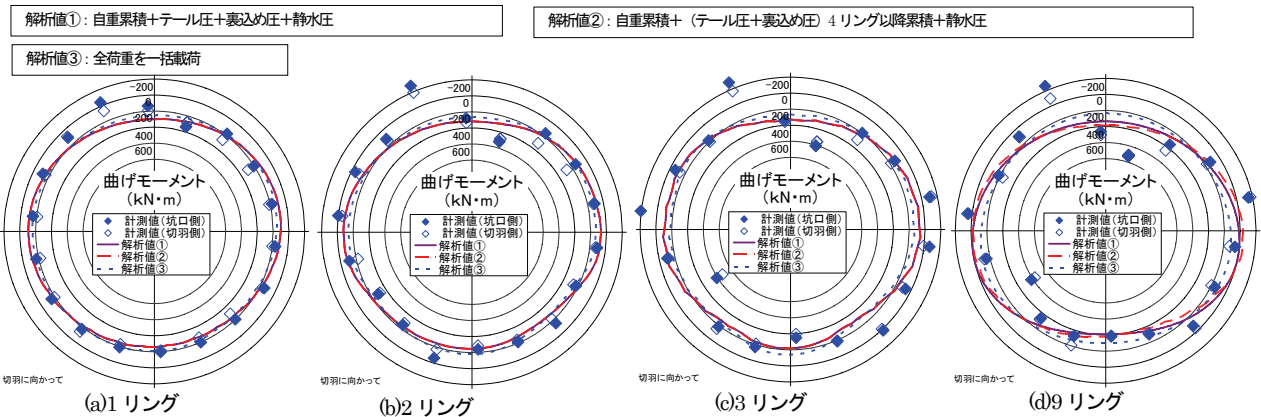


図-13 Aシールドの各リングに発生する断面力の比較 (曲げモーメント)

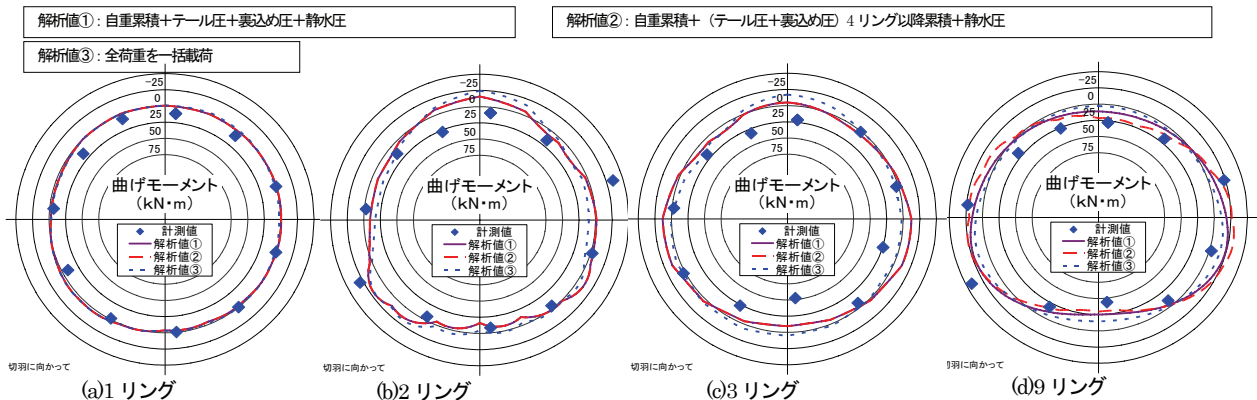


図-14 Bシールドの各リングに発生する断面力の比較 (曲げモーメント)

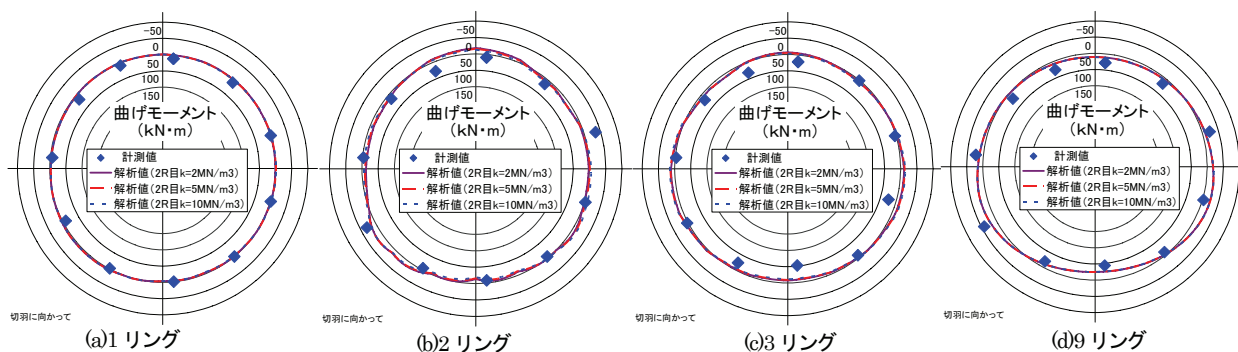


図-15 Bシールドの各リングに発生する断面力の比較（2リング目の地盤反力ばね値の影響）

(a)、(b)のセグメント組立ておよび裏込め注入圧によるそれぞれの荷重によって発生する各リングの断面力は、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ことにより、断面力の大きさは異なるものの、载荷リング以外の断面力へ影響を与えており、前述の現場計測結果（図-5、図-6の(b)(c)）と同様の傾向を表していることがわかる。ここで、図-11(b)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±50 kN・mの断面力を発生させている。このことは、新設のセグメント組立てを行うリングに対して推進ジャッキによる掘進時の断面力の増分とともに、既設リングが荷重を受けて発生した断面力が伝達していると考えられる図-5(c)の計測結果と整合している。図-11、12の(c)の各施工時荷重を加味した断面力も各施工時荷重を作用させた場合と同様に、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-6の(a)）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、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、隣接リングに与える影響を加味した断面力（解析値①、解析値②）、および全荷重を一括载荷させた場合の断面力（解析値③）と計測値との比較を図-13、図-14に示す。

図より、Aシールド、Bシールドともに、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整合している。ただし、各リングの断面力は、解析値③の全体リングに同時に荷重を载荷した場合に比べて、解析値①、解析値②の施工時荷重による隣接リングに与える影響を加味した断面力のほうが、全体的な分布形状は近似していることがわかる。

また、Aシールド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、計測値とよく整合しており、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必要がある。

以上より、各リングに発生する断面力の評価を行う場合には、隣接リング相互の影響を考慮することが必要であることがわかった。

#### 4.2.2 テール内の地盤反力ばね値の影響

本解析においては、地盤反力ばね値の設定にあたりテール内（2リング目）における地盤反力ばね値の設定方法が、特に定まった考え方がないため、これまでの検討結果<sup>1)</sup>等を参考に2、5、10 MN/m<sup>3</sup>を設定した。ここでは、2リング目の地盤反力ばねの値が各リングの断面力に与える影響を確認する。

Bシールドについて2リング目に設定した地盤反力ばね値の違いが断面力に与える影響を図-15に示す。図は、各施工時荷重を加味した断面力（自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧）を示した。

図より、(b)の2リングの場合に地盤反力ばねの違いにより、わずかではあるが断面力に差が生じているものの、他の状態ではほとんど変化がなく、本解析で設定した範囲内であれば、地盤反力ばねによる断面力への影響はないことが分かった。また、Aシールドについても同様な結果であった。したがって、本解析手法による検討を行う場合、テール内の地盤反力ばねの値による影響は小さいことが分かった。

### 5. まとめと今後の課題

硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、トンネル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セグメント組立てによる影響は、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、隣接リングに影響を与える。

- ②新規に組み立てるセグメントリングに発生する断面力には、既設リングが荷重を受けて発生する断面力が伝達する。
- 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シールド掘進に伴うセグメントの断面力を評価するためには、10リング程度の多リングはりばねモデルを用いて該当リングに想定される施工時荷重を载荷する方法等により、隣接するリング間で伝達する断面力を適切に評価することが必要である。
- ⑤本報告で提案した10リング程度の多リングはりばね

モデルによる解析手法によりセグメントの断面力の検討を行う場合、テール内の地盤反力ばね値の影響は小さい。

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、pp235-242、平成20年11月

# STUDY ON SEGMENT DESIGN OF SHIELD TUNNEL IN CONSIDERATION OF CONSTRUCTION LOADS

**Budgeted:** Grants for operating expenses  
General account  
**Research Period:** FY2008-2011  
**Research Team:** Road Technology Research  
Group(Tunnel)  
**Author:** Katsunori KADOYU  
Toshiaki ISHIMURA  
Satoshi MORIMOTO

**Abstract** : This research aims to establish the rational design method, considering the loads during excavation, in order to design high-durability segment constructed by shield tunneling method in good ground condition. In FY 2009, the situation of the load during excavation, acting on segments was examined with the measurement data in site with two shield tunnels in good ground and the cross section force influenced by the load during excavation was studied through the numerical analysis with frame model. The results were obtained as follows:

- 1) Setting up segment influenced on the behavior of next ring by the self load of new set-up segment, the accuracy and the deformation of past set-up rings.
- 2) Cross section force occurred in the past ring acted by load transferred to the one in new set-up ring.
- 3) Cross section force with excavation fluctuated by the excavation of 1 through 4 rings forward and the main reasons of fluctuation were influenced by pressure of tail part and back filling.
- 4) The cross section force should be evaluated by the modeling with the action of the loads during excavation and the beam-spring modeling considering many rings
- 5) The ground springs in tail tends to have small influence on the cross section force in case of this modeling.

In future, the influence of ground spring of back filling in tail voids, the residual force induced by the loads during excavation will be examined to evaluate quantitatively the loads during excavation in setup segments and passing of tail.

**Key words** : Shield tunnel, Construction loads, In-site measurement , Beam-spring modeling considering many rings