

多リングはりーばねモデルを用いた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¹・森本 智¹・角湯克典²・真下英人³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: ishimura@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

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には、施工時荷重によるセグメントへの影響について把握することが重要である。本報文は、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、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、多リングはりー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を報告するものである。

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

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。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。

本報文は、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、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、多リングはりー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ものである。

2. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

(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。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リツ千鳥	2リツ千鳥
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(リツ継手)	ピン継手	ピン継手

(2)現場計測結果

a) Aシールド掘進時における断面力の変化

図-5 に A シールドの計測リングのセグメント組立て、後方リング掘進時のセグメント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を示す。図中には、図-6 に示す考えに基づいて計測リングの後方リング掘進に伴うセグメント組立て前後、シールド掘進前後の断面力の増減分を整理して示した。

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）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）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（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、計測リング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、隣接するリングが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により発生する断面力の伝達が考えられる。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。

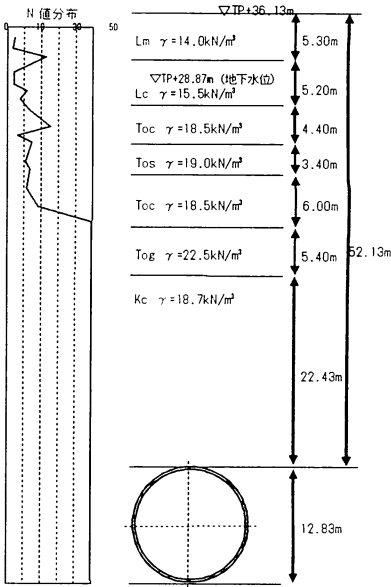


図-1 Aシールドの位置と地盤条件

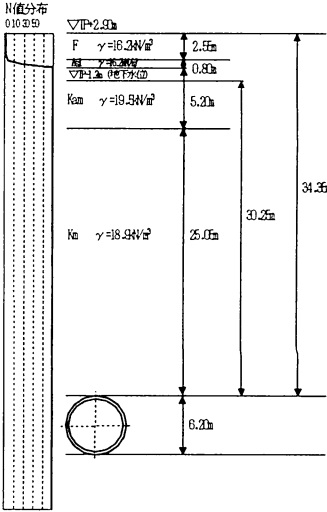


図-2 Bシールドの位置と地盤条件

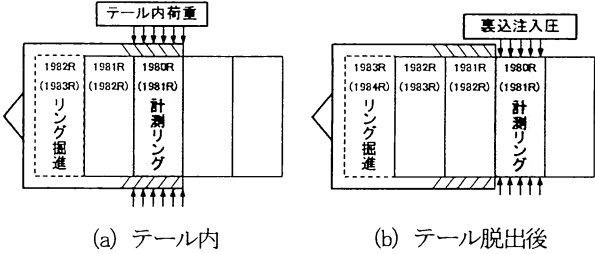


図-3 Aシールドと計測リングの位置関係

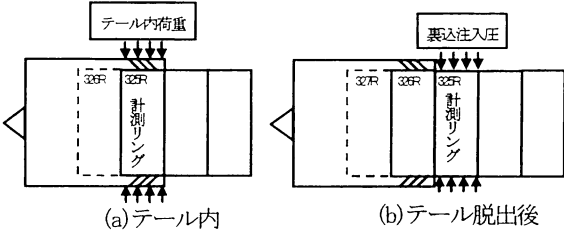


図-4 Bシールドと計測リングの位置関係

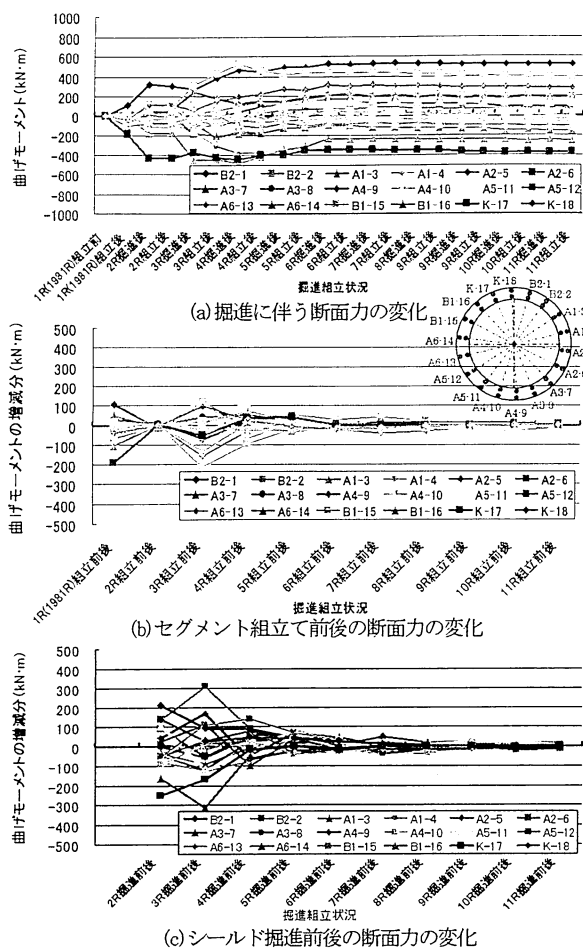


図-5 Aシールドの掘進に伴う断面力の変化

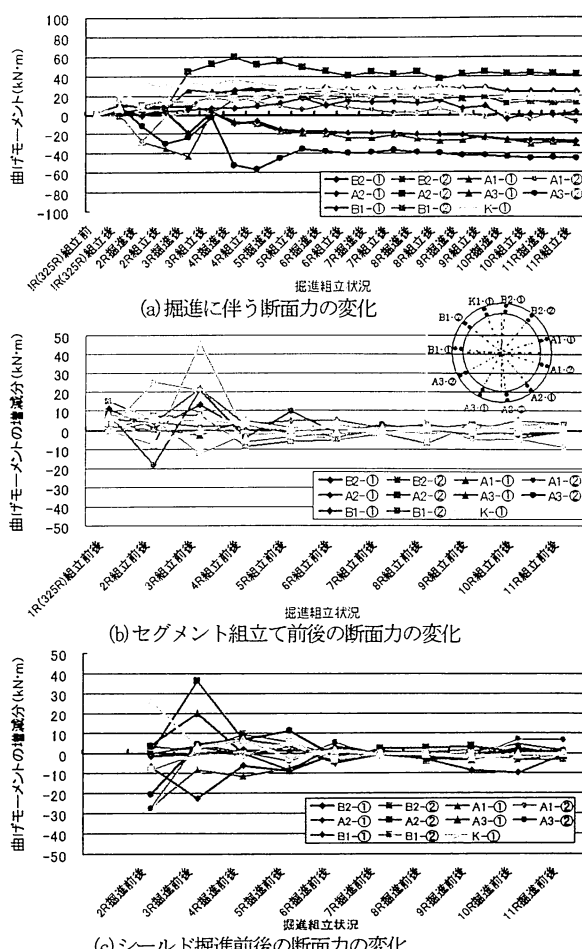


図-7 Bシールドの掘進に伴う断面力の変化

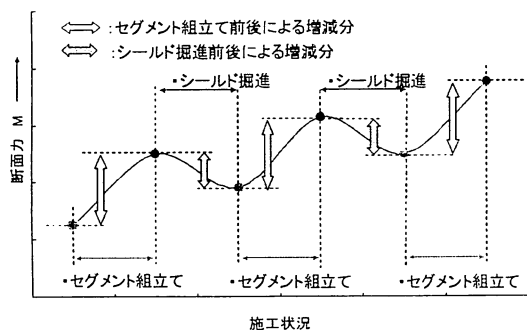


図-6 断面力の増減分抽出の考え方

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、主として1~2リング後方(2R~3R)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(3R~4R)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。

b) Bシールド掘進時における断面力の変化

図-7にAシールドと同様な考え方に基いて整理したBシールドの計測リングのセグメント組立て、後方リング掘進時におけるセグメント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評価

(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に示すように該当リングにセグメント自重、静水圧、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現場計測の土圧計で得られた値を単独で作用させた場合の解析とともに、全リングにセグメント自重を作用させるとともに該当リングに静水圧、テール圧、裏込め注入圧を同時に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¹⁾により、本対象のトンネルにおいては、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¹⁾によって算出した値を用いることとし、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

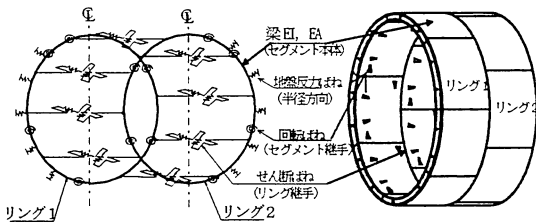


図-8 骨組み構造解析モデル

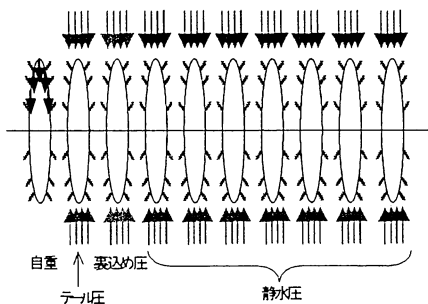
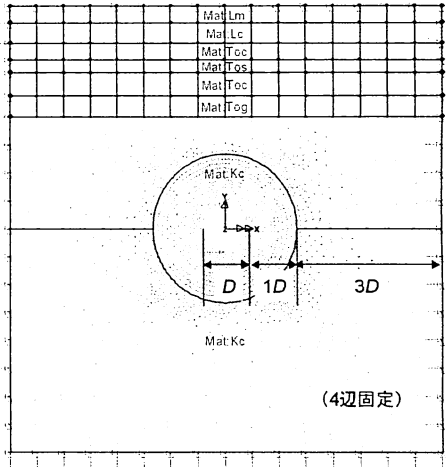
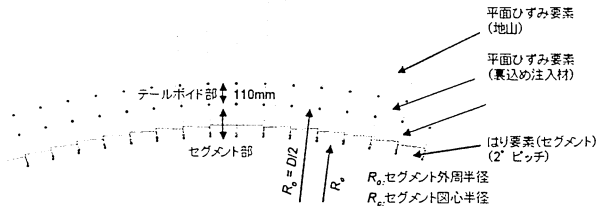


図-9 10リングはりばねモデルと載荷重



(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)

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)						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			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	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	2次元 FEM 解 析による結果 (16～18 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。

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。

(2) 検討結果

a) 各リングの断面力に与える各施工時荷重の影響

図-11、図-12に2リング目の地盤反力ばね値が 5MN/m^3 の場合について、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)

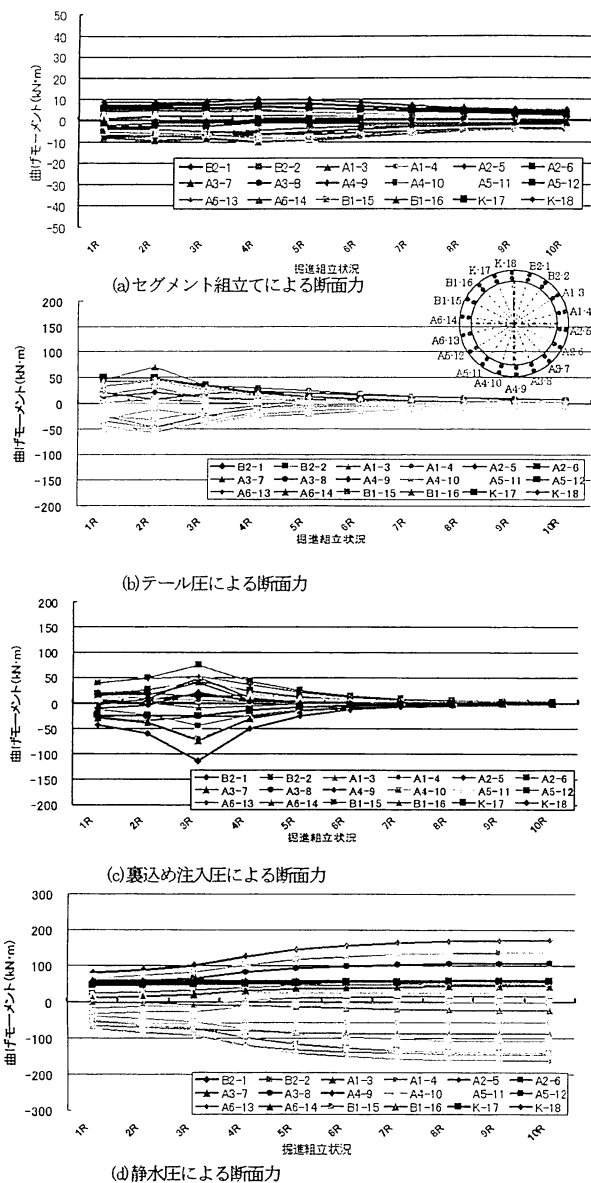


図-11 各施工時荷重等による発生断面力 (A シールド)

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、それぞれ載荷したときの各リングに発生する断面力を示す。

図より、(a)、(b) のセグメント組立ておよび裏込め注入圧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、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、載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 シールドについては、図-11 (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 $\pm 50 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 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 リング目に最大セグメント $\pm 100 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 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

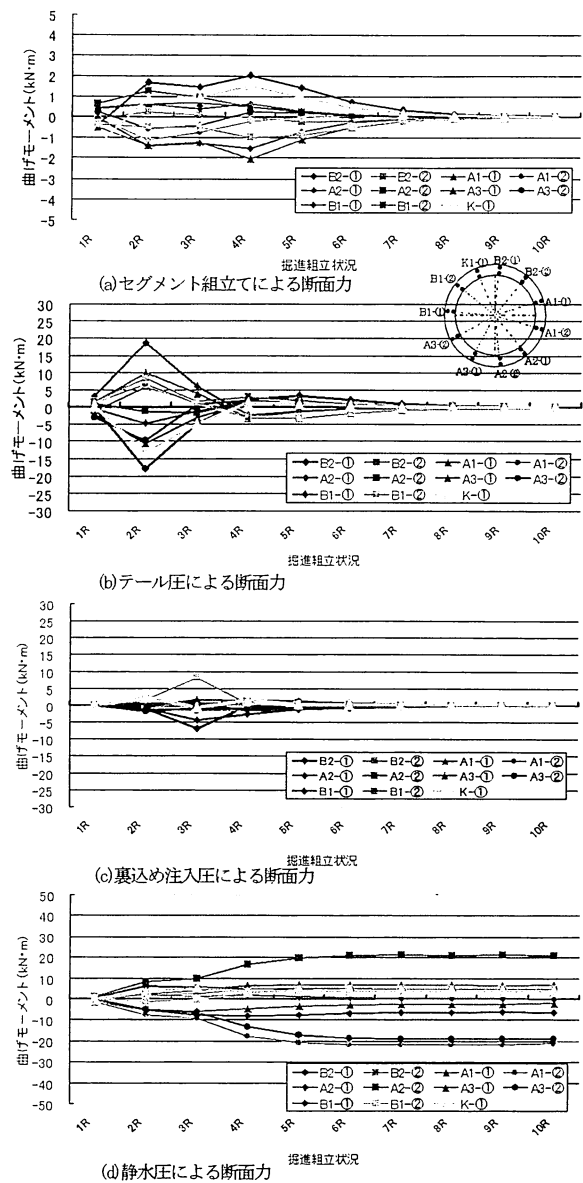
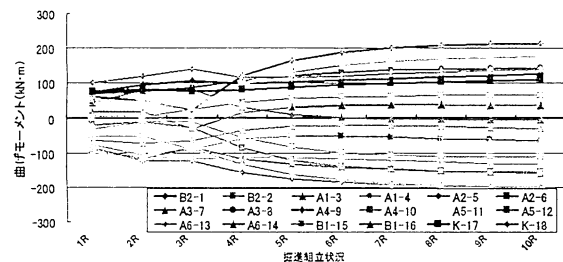


図-12 各施工時荷重等による発生断面力 (B シールド)

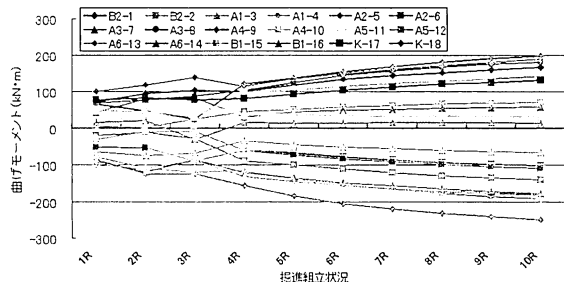
は、一時的な施工時荷重や静水圧等の荷重によって既に変形した既設リングにセグメントを組立てるため、既設リングの影響を受けて当該リングのセグメント自重のみにより発生する断面力よりも大きい断面力が発生することを示している。これは、図-5 (a) の 1R 組立後の計測結果と概ね整合している。

b) シールド掘進時における断面力の変化

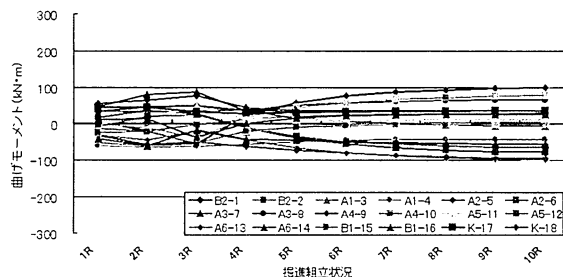
各施工時荷重、静水圧が作用するリング以外の隣接リングの断面力に影響を与えていることが分かった。ここでは、各施工時荷重、静水圧を加味した場合の各リングに発生する断面力について検討する。図-13、図-14 に 2 リング目の地盤反力ばね値が 5 MN/m^3 の場合について、施工時荷重を加味した断面力を示す。ここで、図中の (a) は各施工時荷重をそれぞれ該当リングに作用させた場合を加味して、セグメント自重、テール圧、裏



(a) 自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧

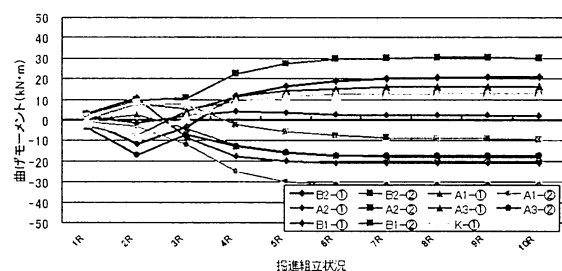


(b) 自重累積+(テール圧+裏込め圧)4リング以降累積+静水圧

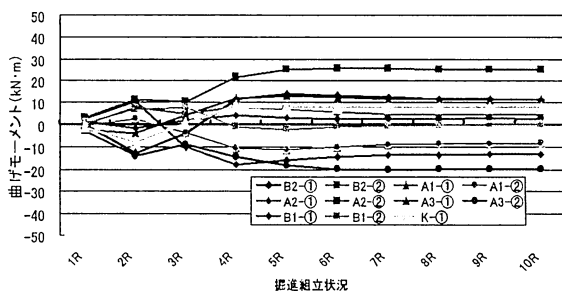


(c) 全荷重を一括載荷

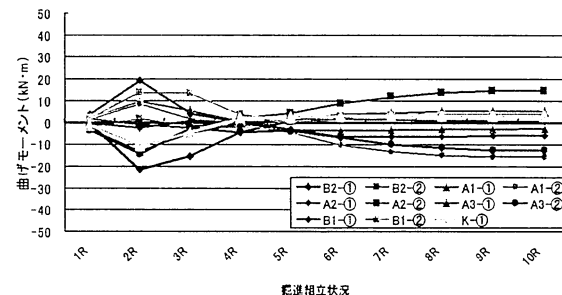
図-13 施工時荷重を考慮した発生断面力 (A シールド)



(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



(c) 全荷重を一括載荷

図-14 施工時荷重を考慮した発生断面力 (B シールド)

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。(b)は各施工時荷重により発生した断面力が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)のみの荷重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。また、

(c)には全リングにセグメント自重を作用させるとともに該当リングに静水圧、テール圧、裏込め注入圧を同時に一括載荷した場合の結果も示した。

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))と類似した傾向を示している。一方、各施工時荷重と静水圧を一括して載荷した場合は、各リングに発生する断面力も比較的小さく、その変化とともに現場計測結果と若干異なっている。

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載荷させた場合の断面力(解析値③)と計測値との比較を図-15、図-16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概ね整合している。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載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ことがわかる。

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。

c) 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

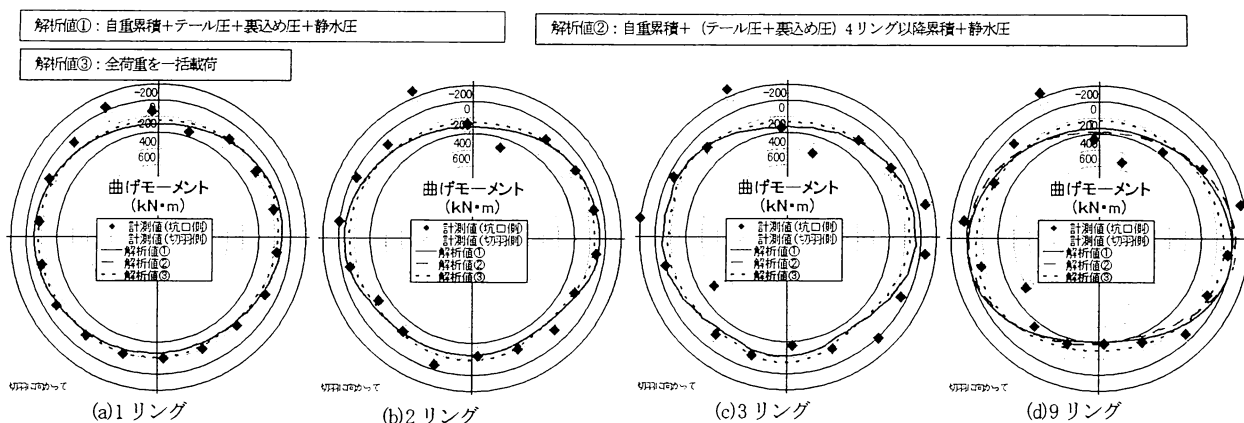


図-15 Aシールドの各リングに発生する断面力の比較（曲げモーメント）

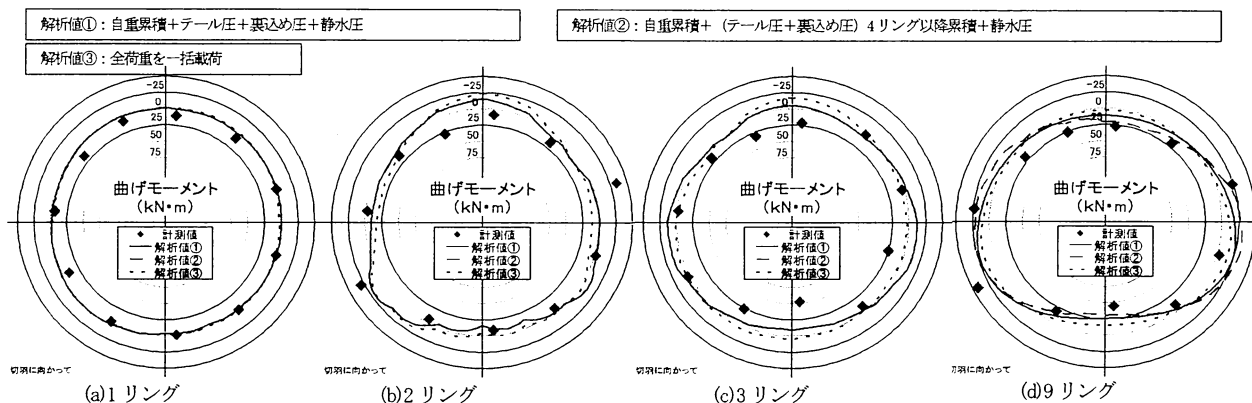


図-16 Bシールドの各リングに発生する断面力の比較（曲げモーメント）

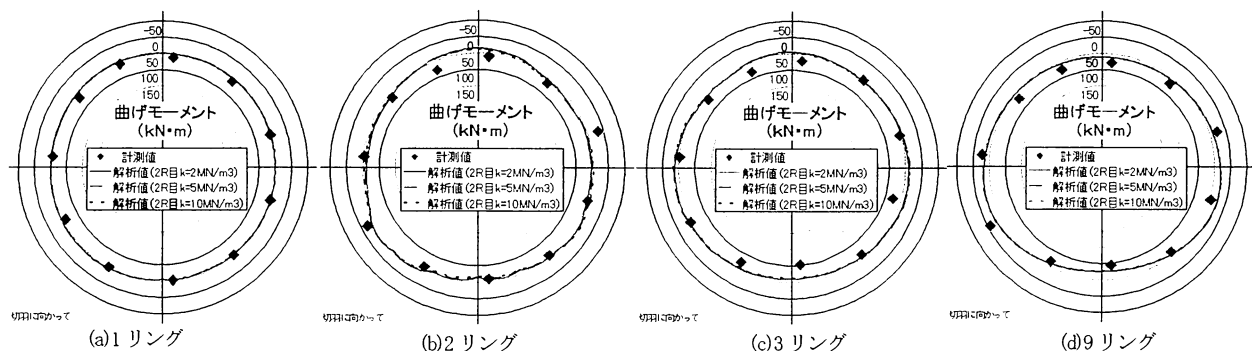


図-17 Bシールドの各リングに発生する断面力の比較（2リング目の地盤反力ばね値の影響）

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¹⁾等を参考に2, 5, 10 MN/m³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-17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り、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。

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、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載荷

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，pp235-242，2008.11

A STUDY ON THE LOAD OF SHIELD TUNNEL CONSTRUCTED IN THE HARD GROUND

Toshiaki ISHIMURA, Satoshi MORIMOTO, Katsunori KADOYU
Hideto MASHIMO

This paper describes, shows 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) Cross section force occurred in the past ring acted by load transferred to the one in new set-up ring. 2) 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.