

# 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

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。検討にあたっては、硬質地盤中におけるシールドトンネルの現場計測結果の分析を通して、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による骨組み構造解析により施工時荷重がセグメントに与える影響について分析を行い、施工時荷重の評価方法を提案した。また、三次元シェルモデルにより施工時荷重によるセグメントへの影響を把握し、施工時荷重を考慮したセグメント設計法の提案を行った。

キーワード：シールドトンネル、施工時荷重、現場計測、はりーばねモデル、シェルモデル、セグメント損傷

## 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のジャッキ推力、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。検討にあたっては、硬質地盤中におけるシールドトンネルの現場計測結果の分析を通して、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による

骨組み構造解析により施工時荷重がセグメントに与える影響について分析を行い、施工時荷重の評価方法を提案した。また、三次元シェルモデルにより施工時荷重によるセグメント応力への影響を把握し、施工時荷重を考慮したセグメント設計法の提案を行った。

## 2. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

### 2.1 検出方法

硬質地盤を通過する4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に示す。

表-1 シールドトンネルの諸元

トンネル名	A	B	C	D
シールド外径(m)	6.36	13.05	13.23	12.04
シールド形式	泥水加圧式	泥水加圧式	泥水加圧式	泥水加圧式
土被りH(m)	34.4	52.1	21.8	51.4
土被り比H/D	5.4	4.0	1.6	4.3
地下水位(管頂より)(m)	30.3	44.9	9.4	38.4
掘削部の主な地質	洪積粘性土層	洪積粘性土層	洪積砂質土層 洪積砂礫土層	洪積砂質土層 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	平板型 RCセグメント	RCと鋼管の 鋼鉄との合成セグメント
セグメント外径D(m)	6.20	12.83	13	11.800
セグメント内径(m)	5.70	11.83	11.9	10.870
セグメント厚さ(m)	0.25	0.50	0.55	0.465
セグメント幅(m)	1.3	1.2	1.2	1.2
セグメント分割数	6	9	10	9
セグメントの組み方	21/27°千鳥	21/27°千鳥	21/27°千鳥	21/27°千鳥
継手形式(セグメント継手)	突き合わせ継手	ボルト・金物結合	ボルト・金物結合	水平横方式
継手形式(リブ継手)	ピン継手	ピン継手	ボルト・金物結合	アウタージョイント方式

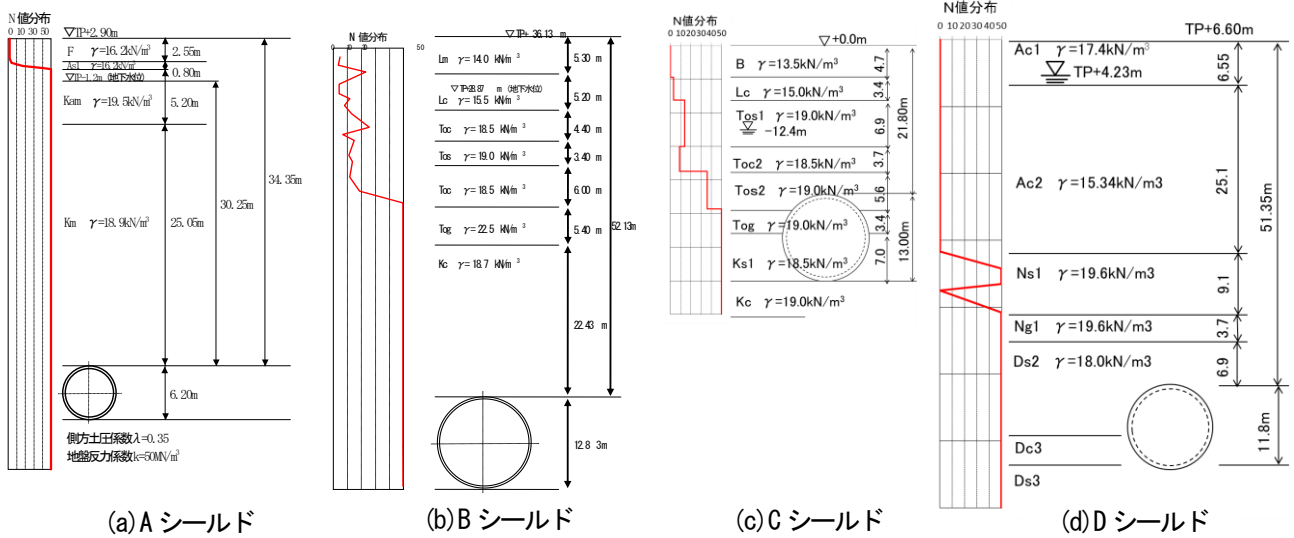


図-1 トンネル位置と地盤条件

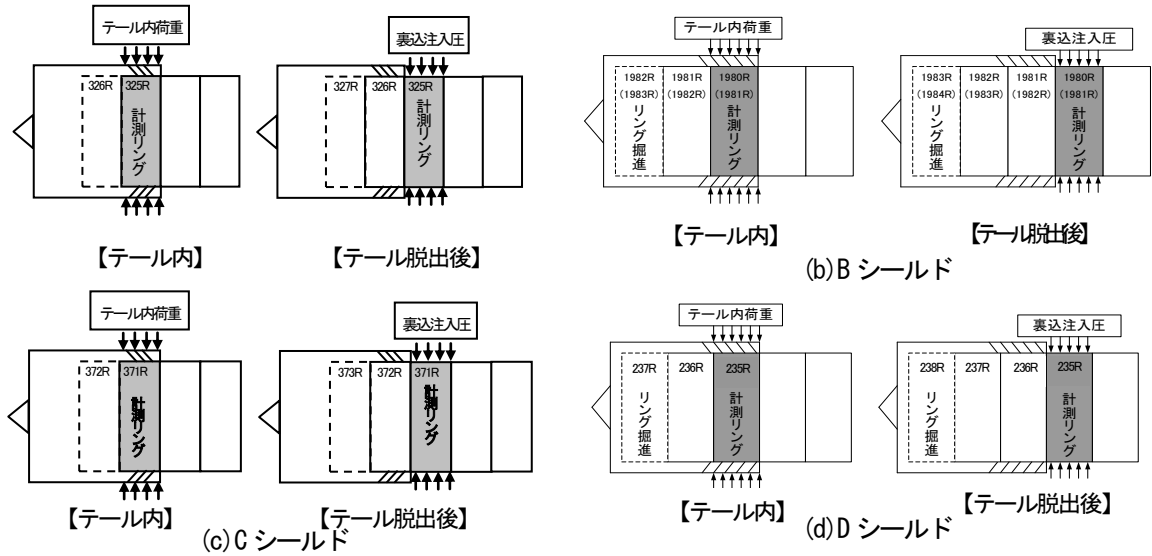


図-2 各シールドと計測リングの位置関係

計測結果の分析は、トンネル施工時の各段階における計測結果の変化から、どの段階でどのような大きさの施工時荷重がトンネルに作用するのかを把握した。また、計測はセグメント組立て前から実施しており、セグメント組立てによる施工時荷重の影響も分析した。

掘進時における各シールドと計測リングとの位置関係は図-2に示すとおりであり、シールドマシン内には2~3リング分のセグメントリングが留まる。例えば、Aシールドでは325Rから1リング先のセグメント(326R)掘進時にテール圧、ジャッキ推力等が作用する。また、裏込め注入は325Rから2リング先のセグメント(327R)掘進時に作用することになる。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3時間、Bシールドで約6時間、Cシールドで約3時間30分、Dシールドで約1時間30分であ

った。

## 2.2 現場計測結果

### 2.2.1 シールド掘進時のデータの変化

Aシールドを一例として、計測リング(325R)組立て後12時間経過までの土圧計の変化を図-3に示す。

図より、325Rがテール内に存在するときはテール圧(テールシール反力、テールグリス圧)が、計測リングがテールから脱出した後は裏込め注入圧が作用している。裏込め注入圧は、裏込め注入が行われるトンネル掘進中に上昇し、掘進停止後に掘進前の状態に戻る。裏込め注入圧の影響は、テール脱出直後が最も大きく、徐々にその影響が小さくなり、その後、変動がわずかとなる。最終的には、裏込め注入圧の影響は徐々に低下し、圧力は一定値に収束する。鉄筋応力についても同様な挙動を示

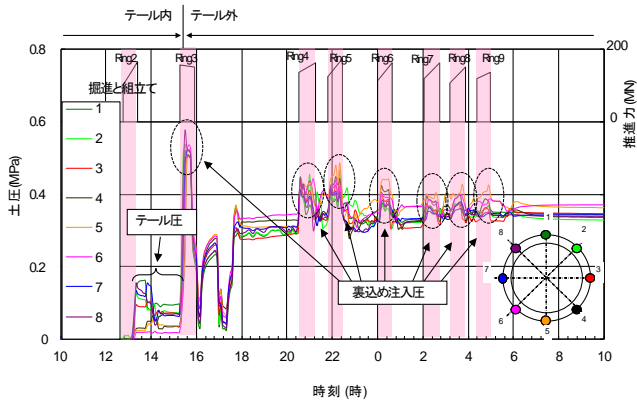


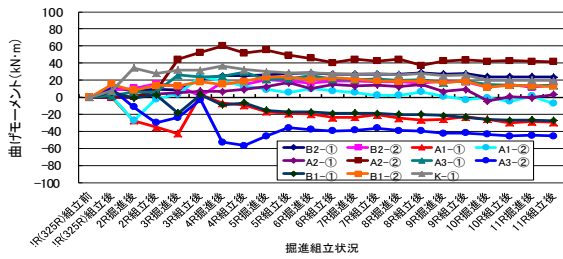
図-3 A シールド  
(325R 組立後 12 時間経過までの圧力の変化)

した。他のシールドについても、計測リングがテール内に位置する場合、テール外へ出た場合の土圧計、鉄筋計の挙動はほぼ同様な傾向を示した。

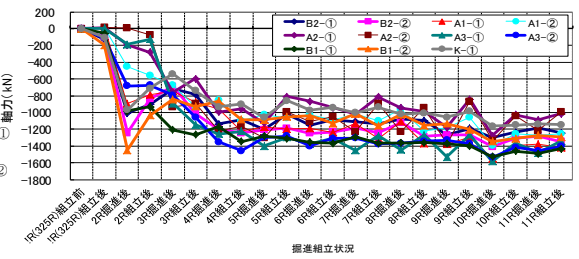
## 2.2.2 シールド掘進時における断面力の変化

図-4に各シールドのシールド掘進時における計測リングに発生する断面力(曲げモーメント、軸力)について、セグメント組立前から10リング後までの組立後、掘進後の変化を整理した。

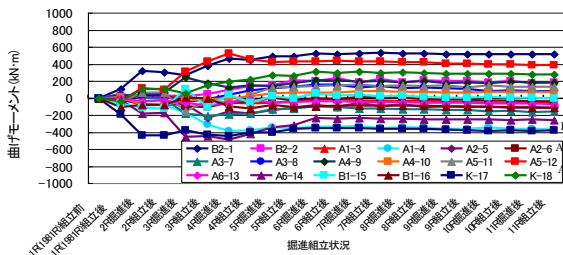
図より、掘進に伴う曲げモーメントの変化は、各トンネルともにセグメント組立て時から徐々に増加し3~4リング後(4R~5R)掘進時で最大となり、その後ある一定値に収束する傾向を示す。断面力の変化は、計測リング(1R)を組み立てた後、5~7リング後(6R~8R)程度までの組立、掘進を行う間に顕著であり、それ以降の大きな断面力の変化は認められない。軸力の変化も曲げモーメントと同様に5~7リング後(6R~8R)程度まで増減を繰り返しながらある一定値に近づく傾向がある。これらの



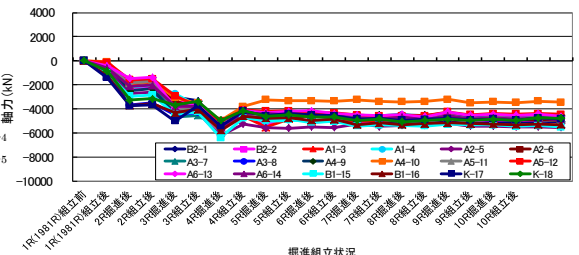
(a) A シールド掘進に伴う曲げモーメントの変化



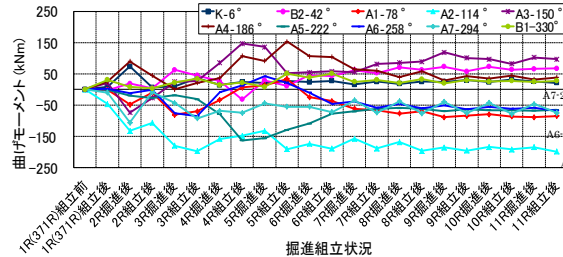
(b) A シールド掘進に伴う軸力の変化



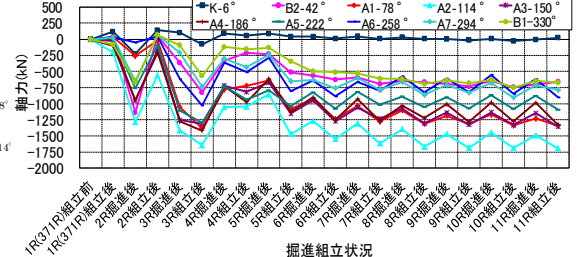
(c) B シールド掘進に伴う曲げモーメントの変化



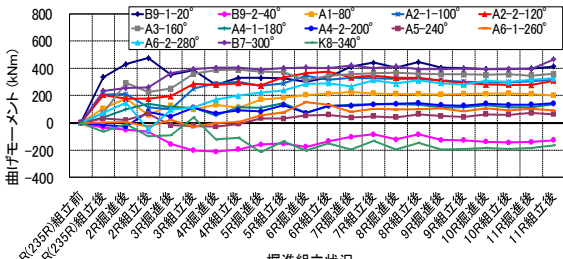
(d) B シールド掘進に伴う軸力の変化



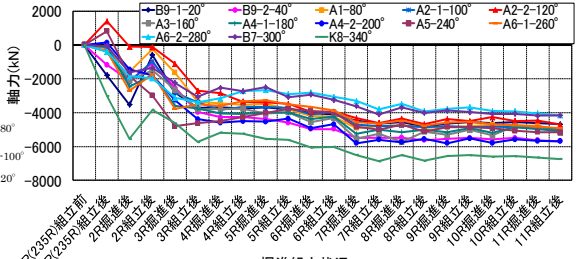
(e) C シールド掘進に伴う曲げモーメントの変化



(f) C シールド掘進に伴う軸力の変化



(g) D シールド掘進に伴う曲げモーメントの変化



(h) D シールド掘進に伴う軸力の変化

図-4 各シールドの掘進に伴う断面力の変化



計測リング組立てから 6R~8R 程度までの断面力の変動は、図-2 に示した計測セグメントとシールドとの位置関係から、計測リングが直接、もしくは後続のリング掘進時に間接的に推進ジャッキにより軸方向の荷重を受けることに加えて、計測リングの 1~2 リング後方 (2R~3R) のシールド掘進時に作用するテール圧が、2~3 リング後方 (3R~4R) のシールド掘進時に裏込め注入圧が作用することがあげられる。

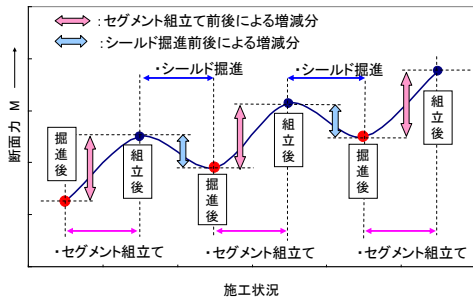


図-5 組立て前後・掘進前後の状態

セグメント組立て前後、掘進前後の状態を図-5 のように考えた場合、計測リングの組立て前後の曲げモーメント、軸力の断面力は、A、C シールドで比較的小さく、B、D シールドで比較的大きい。断面力の大小に関連する要因としては、セグメント自重・土被りの大きさ、セグメントの継手構造などがあげられる。A シールド、C シールドの断面力が比較的小さい要因は、A シールドは他のシールドに比べてトンネル外径、土被りともに小さく、セグメント自重、静水圧が小さいことにより、曲げモーメント、軸力がそれぞれ小さいものと考えられる。C シールドは、他のシールドセグメントのリング間継手が楔方式やピン継ぎ手構造を採用して組立直後から継手剛性が発揮される継手構造に対して、C シールドはボルト締結方式を採用しており、継手ボックスのボルト孔とボルトとの余裕代等によりリング間の断面力の伝達が小さいことなどで曲げモーメントが小さく、土被りが比較的大きくなく、静水圧が小さいことから軸力が小さいものと考えられる。

一方、B シールド、D シールドの断面力が比較的大きい要因は、両トンネルの外径が大きくセグメント自重が大きいため、リング間の断面力が伝達しやすいピン継手等のセグメントの継手構造により曲げモーメントが比較的大きく、50m を超える大きな土被りで静水圧が大きいため軸力が大きいものと考えられる。

次に、計測リングの後続リングの施工に伴う各リング施工時の組立時、掘進時の断面力の変化を見る。シールドによって異なるが、各シールドともに、計測リングの組立時、掘進時以上に後続のリングが施工されることにより断面

力が変化していることが分かる。例えば、B シールドはセグメント組立て前後の曲げモーメントの変化は、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) の組立前後で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曲げモーメント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曲げモーメント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曲げモーメント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、隣接するリングの曲げモーメント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。また、リング間継手構造の違いによるセグメント組立て直後の継手剛性の差により発生断面力が異なり、ボルト締結方式の継手構造は小さく、楔嵌合方式は大きくなる傾向があることと考えられる。

### 3. 施工時荷重を考慮したセグメント設計法

#### 3.1 多リングはリーバねモデルによる検討

##### 3.1.1 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て実施した。検討の対象トンネルは2. で示したA、B、C、Dトンネルとした。解析モデルは、図-6に示すはリーバ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リング以上をモデル化した。検討にあたっては、図-7に示すように、セグメントの自重のほか、これまで一般的な施工時荷重として考えられているテール圧 (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として現場計測の土圧計で得られた値を各施工時荷重として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、セグメントリ

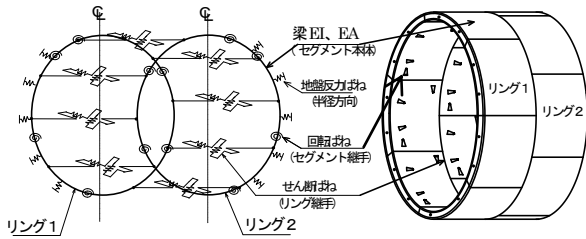


図-6 骨組み構造解析モデル

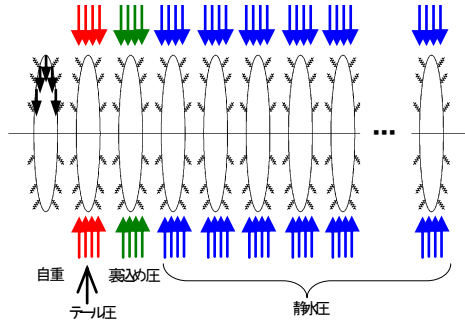


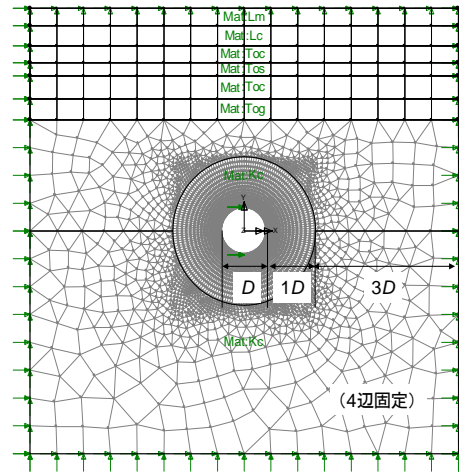
図-7 多リングはりばねモデルと荷重

表-2 各リングの地盤反力ばね値の設定

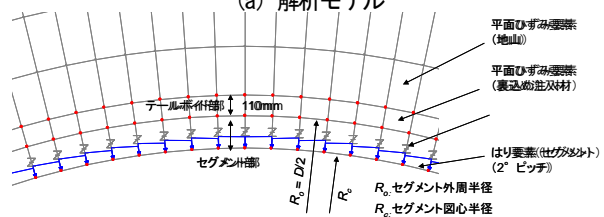
着目 リング	施工時 荷重ま たは外 力	地盤反力ばね (MN/m <sup>2</sup> )				状態・地盤反力係 数の設定の考え方
		Aシールド	Bシールド	Cシールド	Dシールド	
セグメント組立て Aシールド: 1リング Bシールド: 1リング Cシールド: 1リング Dシールド: 1リング	自重・ 組立	0	0	0	0	シールドテール内にある。基本荷重は隣接セグメントのリング継手による拘束、推進ジャッキによる拘束等が考えられるが、前者はリング継手自体で評価されていると考えられるので、地盤反力は考えない。
シールド内 Aシールド: 2リング Bシールド: 2リング Cシールド: 2リング Dシールド: 2, 3リング	テール 圧	5	5	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。
シールド外 Aシールド: 3リング Bシールド: 3リング Cシールド: 3リング Dシールド: 4リング	裏込め注 入圧	0	0	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、また硬化していないため地盤反力は考えない。
シールド外 Aシールド: 4リング以降 Bシールド: 4リング以降 Cシールド: 4リング以降 Dシールド: 5リング以降	静水圧	75 108	16 18	13 14	3 6	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。

リングがシールド外にある裏込め注入圧を载荷したリング以外のセグメントリングに対しては、外力として明らかに作用している荷重として静水圧を作用させた。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に示す考え方に基いて設定した。

なお、セグメントリングがシールド外にある4リング目もしくは5リング目以降の地盤反力ばねは、図-8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



(a) 解析モデル



(b) セグメント近傍のメッシュ図

図-8 2次元FEM解析のモデル (Aシールドの場合)

ときの地盤反力ばね値を算出して用いた。

### 3.1.2 検討結果

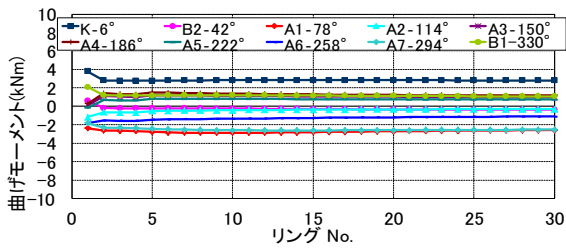
#### (1)各リングの断面力に与える各施工時荷重の影響

各施工時荷重等をそれぞれ該当するリングに载荷した場合の発生断面力の変化について一例としてCシールドの結果を図-9に示す。ここで、図中の(a)(b)はセグメント自重を1リング目に载荷したときの各リングに発生する断面力を、(c)(d)はテール圧、(e)(f)は裏込め注入圧、(g)(h)は静水圧をそれぞれの該当リングに作用させたときの各リングに発生する断面力を示している。各図より、各施工時荷重等によって、リング継手の添接効果等により曲げモーメントおよび軸力が伝達することにより、载荷リング以外の断面力へ影響を与えており、特に、シールド外のリングに作用する静水圧による影響が最も大きいことが分かる。

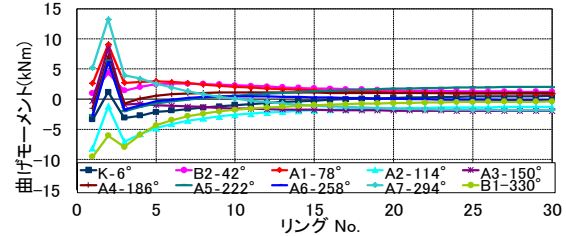
なお、他のシールドについても、各施工時荷重による断面力の大きさは異なるが、荷重を载荷するリング以外の隣接するリングへの断面力の影響は同様な結果であった。

#### (2)シールド掘進時における断面力の変化

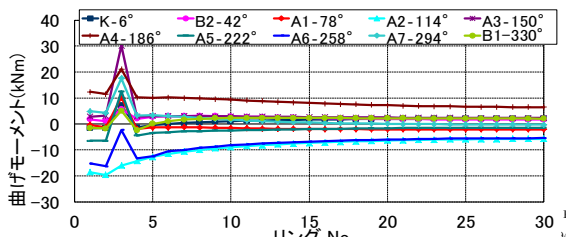
各施工時荷重、静水圧によって作用するリング以外の隣接するリングに影響を与えていることが分かった。次に各施工時荷重、静水圧を加味した場合の各リングに発生する断面力について検討する。図-10にCシールドにつ



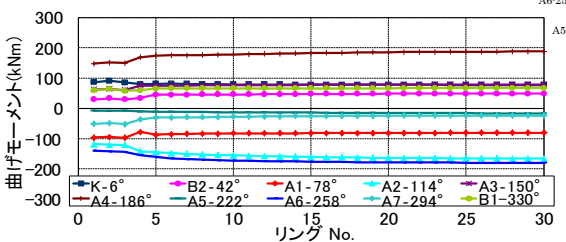
(a) セグメント自重による断面力 (曲げモーメント)



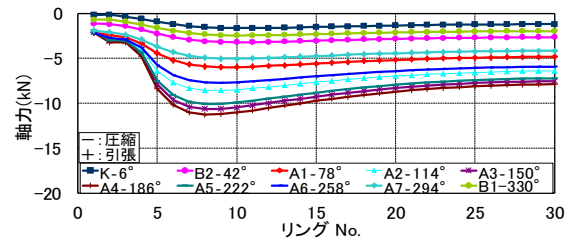
(c) テール圧による断面力 (曲げモーメント)



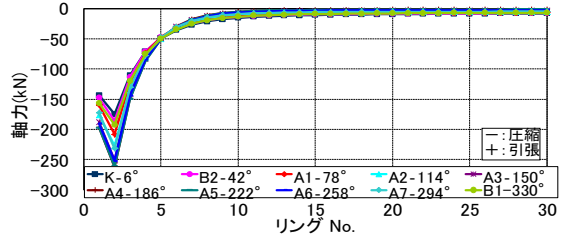
(e) 裏込め注入による断面力 (曲げモーメント)



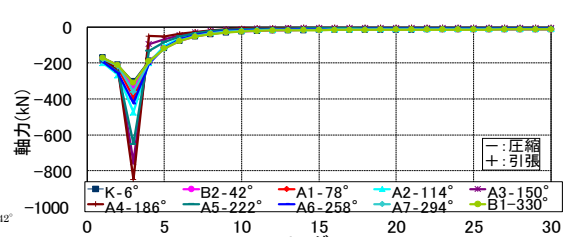
(g) 静水圧による断面力 (曲げモーメント)



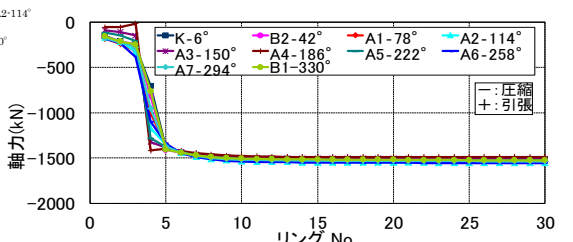
(b) セグメント自重による断面力 (軸力)



(d) テール圧による断面力 (軸力)



(f) 裏込め注入による断面力 (軸力)



(h) 静水圧による断面力 (軸力)

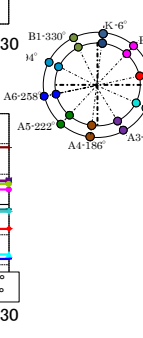
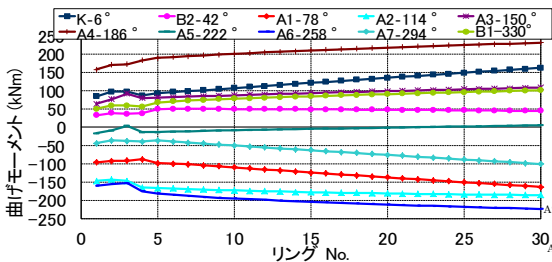


図9 各施工時荷重等による発生断面力 (C シールド)

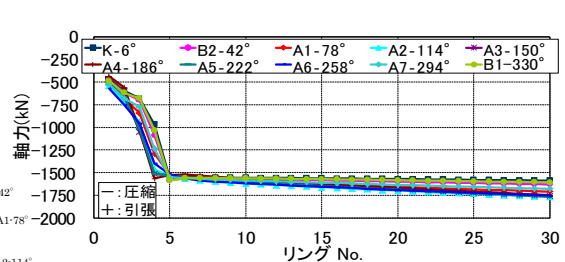
いて各施工時荷重等を加味した場合のセグメントの断面力を示す。ここで、図中の(a)(b)は各施工時荷重をそれぞれ該当リングに作用させた場合を加味して、セグメント自重、テール圧、裏込め注入圧、静水圧によって各リングに発生する断面力の合計値を示している。なお、自重によって発生する断面力は、1リング目のみの载荷による解析値であるので各リングに発生する断面力を求める際には後ろのリングの影響をそれぞれ累積している。

図より、1リング目から曲げモーメント、軸力がある程

度発生していることが分かる。その後、曲げモーメントについては、5リング程度までの間に、軸力については5リング程度までの間に大きな変動が生じた後、ある一定値に収束する傾向がある。これより、組立てから5リング程度までの挙動について計測値(図-4(e)(f))と比較すると、曲げモーメントについては、計測値はセグメント組立て直後の値は小さく、その後、徐々に増加してある値に収束する傾向があるが、解析値はセグメント組立直後から大きな値が生じている。軸力については、計測値は2リング組立前



(a) 自重累積+テール圧+裏込め注入+静水圧 (曲げモーメント)



(b) 自重累積+テール圧+裏込め注入+静水圧 (軸力)

図10 シールド掘進における断面力の変化 (C シールド)



後、4リング掘進前後で引張側へ推移しているが、解析値は引張側への変化は見られない。

ここで、Cシールドのセグメント組立てから5リング程度までの曲げモーメント・軸力の値が計測値と近似していない要因を考察する。計測値の軸力が一時的に引張側に移行していることを考えると、トンネル内部から外部の方向に何らかの荷重が作用しているものと想定される。現在、考慮している施工時荷重以外にトンネル内部から外部の方向に作用する施工時荷重としては形状保持装置による荷重があり、以下に形状保持装置の荷重による影響を検討する。前述の図-7に示した3リング目に内部から荷重を作用させたときの発生断面力を把握する。内部荷重は、上下方向に天端と下端から左右45°の範囲に150kN/m、200kN/m、300kN/mとし、他の解析条件は前記と同様とした。

図-11に主な計測点の結果を示す。図より、内部荷重が大きくなると各リングの曲げモーメント、軸力に与える影響が大きくなることがわかる。内部荷重によっては、前述のテール圧、裏込め注入圧の施工時荷重により発生する断面力以上の断面力が発生しており、内部荷重の影響は無視できないものと考えられる。

当該シールドでの形状保持装置の油圧ジャッキ能力は最大約150kN/m程度である。内部荷重が150kN/mの場合のシールド掘進における断面力の変化について図-10と同様に整理した結果を図-12に示す。内部荷重が150kN/mでは、軸力の特徴的な結果である4リング付近

の引張側へ変化する傾向など、一致しない部分があるが、曲げモーメント内部荷重を載荷した3リングおよびその周辺のみ値が図-10の内部荷重を考慮しない場合に比べて計測断面力に若干近づいていることが分かる。内部荷重としては、形状保持装置による荷重のほか、後続台車の重量などが考えられるため、今後、これらの荷重等についても考慮することで、さらに計測断面力に近似するものと考えられる。

以上より、本解析下において、セグメント組立後から施工時荷重が作用する後続のリング周辺までを対象とした施工時荷重による各リングに発生する断面力の評価を行う場合には、10リング程度以上の多リングー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等を載荷する方法により隣接するリング間で伝達する断面力を考慮した評価が可能であることが分かった。さらに、リング間で形状保持装置等による内部荷重を考慮することで計測結果に近づくことが分かった。

### 3.2 2リングはりばねモデルによる検討

#### 3.2.1 検討方法

現在、セグメント設計を行う際に図-6に示した骨組構造解析による2リングはりばねモデルで行うことが多い。ここでは、前述した各シールドの現場計測で得られた結果を参考に施工時荷重を考慮したセグメント設計を行う際的设计断面力について検討する。

検討にあたっては、セグメント組立後から裏込め注入

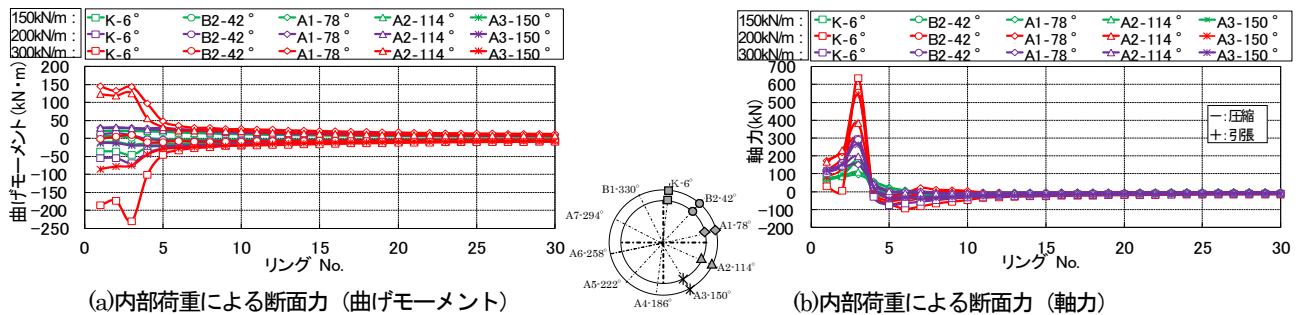


図-11 形状保持装置等の内部荷重による断面力の変化 (Cシールド)

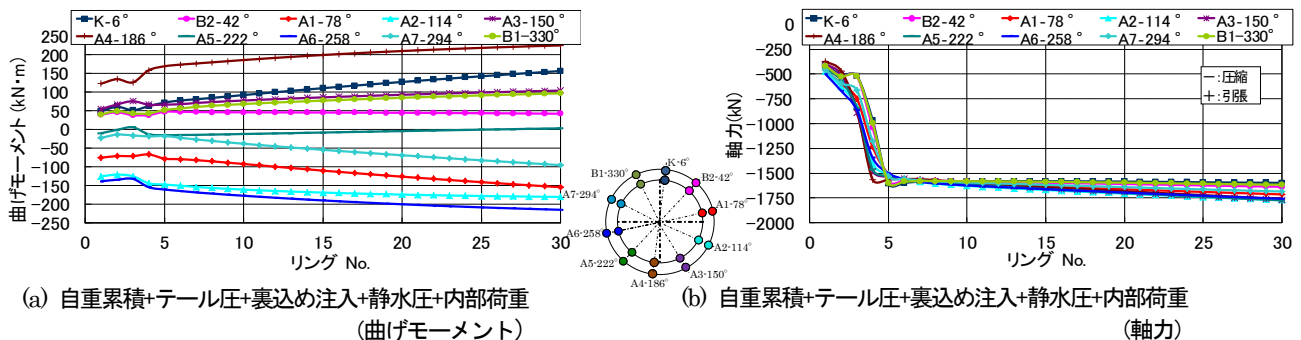


図-12 内部荷重(150kN/m)を考慮した場合のシールド掘進における断面力の変化 (Cシールド)

が硬化するまでの一時的な施工時荷重が作用する短期間におけるセグメント設計を行う際の目安の断面力（ここでは、以下「短期」という）に対する仮想付加荷重について検討する。短期における目安の断面力は、セグメント組立後からシールド外で裏込め注入圧を受けた後の数リング程度の間最大曲げモーメントの絶対値が発生した時刻の計測断面力とした。

仮想付加荷重の設定にあたっては、施工時荷重として考えられるテール圧、裏込め注入圧等があるとともに、確実に作用している圧力としてシールド前面での切羽圧力、テール外におけるセグメントへの静水圧が考えられ、これらを基本とした値を想定した。

付加させる仮想荷重の大きさ・分布は定まったものがないことから、ここでは、シールド施工時に切羽前面に作用させる切羽圧力の上限值として静水圧+静止土圧+予備圧を、下限値として静水圧+主働土圧+予備圧を想定していること、裏込め注入圧は、切羽圧力+0.2MPa程

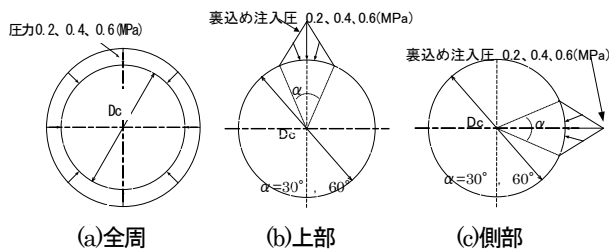


図-13 仮想付加荷重の設定

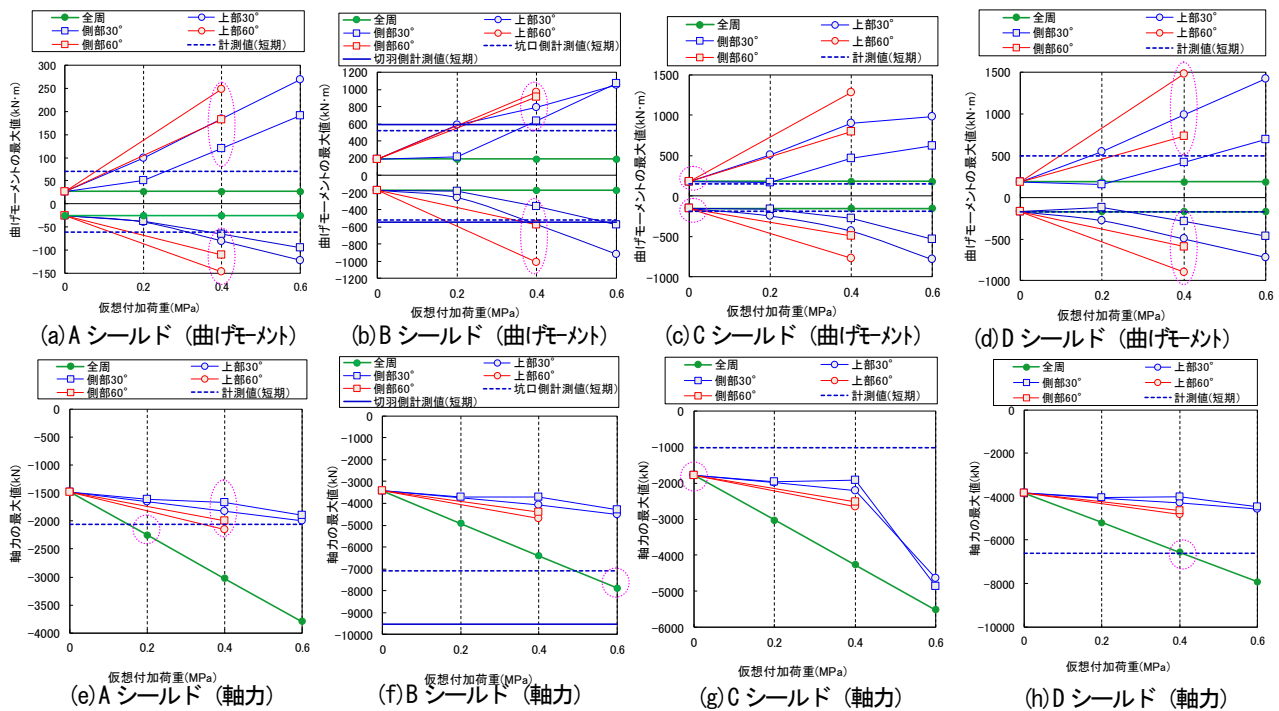


図-14 各トンネルの現場計測時の最大断面力と解析結果の比較

度としていることから、静水圧を基本として図-13に示すような静水圧にトンネル全周に一定の圧力を付加させたケース（静水圧+0.2MPa、静水圧+0.4MPa、静水圧+0.6MPa）、裏込め注入が均等に注入されずに、天端、側部においてトンネル外周面の30度、60度の限定された範囲で裏込め注入圧相当の偏圧が作用したケースを仮想荷重として設定した。

なお、セグメント自重に対する地盤反力の値は、各トンネルのリング継手の剛性をもとに算定する方法<sup>2)</sup>して算出した値を、仮想荷重に対する地盤反力の値は、前述した2次元FEM解析に基づく方法<sup>1)</sup>により算出した値を使用した。

### 3.2.2 検討結果

図-14に各トンネルの現場計測の短期における断面力と仮想付加荷重による解析断面力の比較を示す。これより、今回の想定付加荷重の範囲では同一の荷重では曲げモーメントと軸力ともに計測値と近似する断面力となることが分かる。曲げモーメントは、Cシールドで仮想付加荷重なし、A、B、Dシールドで概ね0.4MPa程度の裏込め注入圧の偏圧を、軸力については、Aシールドで概ね0.4MPa程度の裏込め注入圧の偏圧か全周に0.2MPa程度を、Bシールドで全周に0.6MPa程度を、Cシールドで仮想付加荷重なし、Dシールドで全周に0.4MPa程度を想定することで計測値に近似する断面力となることが分かる。

計測値の断面力は、セグメント組立時、ジャッキ推進



時等にごく短時間に限られた部分で発生した断面力であるため、どの段階の断面力でセグメントの設計を行うかという課題があるが、安全側のセグメント設計を行ううえで、ある程度の仮想付加荷重を見込む必要があると考えられる。

以上より、4つのシールドの現場計測結果から、硬質粘性土（土丹）、砂質土層の硬質地盤を対象として施工時荷重を考慮したセグメント構造とする場合には、トンネル条件、シールド施工条件等によって異なるが、通常、実施される土圧、水圧等によるセグメント設計を基本として、静水圧と裏込め注入圧による偏圧などを考慮した仮想付加荷重に対しても照査することが一つの方法である。

### 3.3 三次元シェルモデルによる検討

#### 3.3.1 検討方法

本検討は、長期耐久性の高いセグメント設計法を検討するため、三次元シェルモデルを用いた解析により施工時荷重がセグメントの発生応力に与える影響を把握することを目的とした。検討は、表-2、図-1に示した洪積粘性土（土丹）中を通過する土被り約52m、直径約12.8mのBシールドを対象とした。三次元FEM解析によるシールドトンネルモデルは、図-15に示すようにセグメント本体をシェル要素でモデル化し、継手部をばね要素でモデル化して接続した。トンネルの延長方向のモデル化は、隣接リングから伝達する断面力の影響を加味するとともに、最終リングの境界条件による影響を受けない概ね40mとした。セグメント継手およびリング継手の各定数については表-3を設定した。また、トンネルと周辺地盤との相互作用を地盤ばねによってモデル化した。地盤ばねの値は、FEM解析<sup>1)</sup>により求めた $kr=20MN/m^3$

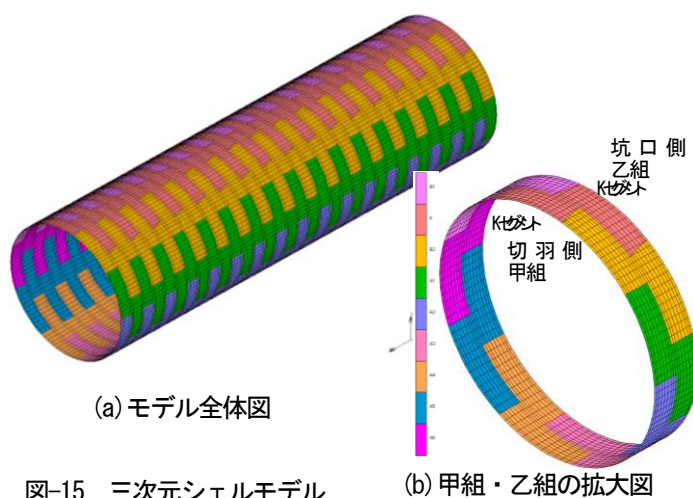


図-15 三次元シェルモデル

を用いた。

トンネルに作用させる載荷荷重は、シールド施工時の状況を勘案し表-4に示す載荷荷重を該当リングに作用させた。また、さらに厳しい条件として、現場計測結果等を参考にジャッキ推力、裏込め注入等の偏圧が作用した分布荷重も想定した。なお、偏圧については、表-4に示すようにその他の偏圧の作用として、ジャッキ中心軸とセグメントの中心軸との偏心量を30mmと仮定した場合、シールド機が蛇行しテールクリアランス40mm分の偏角が生じた場合を想定して、ジャッキの載荷方向を変えた場合も行った。解析ケース一覧を表-5に示す。

#### 3.3.2 検討結果

図-16に各解析ケースについてセグメント本体の内側と外側に発生する主応力（引張応力、圧縮応力）の最大値を示す。これより、基本ケースとして考えられるケース1（直線、ジャッキ100%）、ケース2（曲線、ジャッキ100%）では、引張応力、圧縮応力ともに、それぞれの許容応力度を超えていない。平面曲線による差違は、 $R=240m$ の平面曲線がある場合（ケース2）でも直線の場合（ケース1）に比べて、引張応力、圧縮応力ともに若干増加するものの、本条件下での主応力の最大値の顕著な差は認められない。

一方、各施工時荷重（ジャッキ偏角、ジャッキ偏心量、テール偏圧、裏込め注入偏圧）が偏圧としてトンネルに作用した場合（ケース3～ケース8）は、基本ケースに対して主応力が増加し、引張応力が許容応力度を超える場合があることが分かる。特に、推進ジャッキが70%と偏圧でセグメント推進を行った場合は、引張応力の増加が著しいことが分かる。さらに、施工時荷重による偏圧が厳しい条件下を想定し、ジャッキが70%の条件で各施工時荷重を同時に載荷した場合（ケース9）は、ジャッキ70%単独の場合（ケース3）に比べて、引張応力、圧縮応力ともに若干増加するものの、主応力の最大値の顕著な差は認められない。

また、上記に加えてさらに厳しい条件として、セグメント厚さを400mm、300mmと薄くした場合（ケース10、ケース11）は、引張応力、圧縮応力ともに最大値が増加し、引張応力のみならず、圧縮応力も許容応力度を超える状況になることが分かる。本解析条件下で最も主応力の高い場合（ケース11）について、ジャッキ推進リングの1リングから4リングまでの主応力分布図を図-17に示す。内側、外側の主応力分布から、高い引張応力が発生する部分は、ジャ

表-3 継手のモデル化と設定値

継手	ばね	記号	設定値	
			第一勾配 (K01)	第二勾配 (K02)
セグメント継手	回転ばね	$\theta$ (rad)	-	0.001305
		$M(kN \cdot m)$	500	518
		$k\theta$ (kN · m/rad)	$\infty$	14000
	圧縮ばね	$kc$ (kN/m)	$\infty$	$\infty$
	引張ばね	$kt$ (kN/m)	800000	800000
リング継手	せん断ばね	$ks$ (kN/m)	60000	60000
	引張ばね	$t$ (kN/m)	100,000,000	600,000
	せん断ばね	$ks$ (kN/m)	50,000	50,000

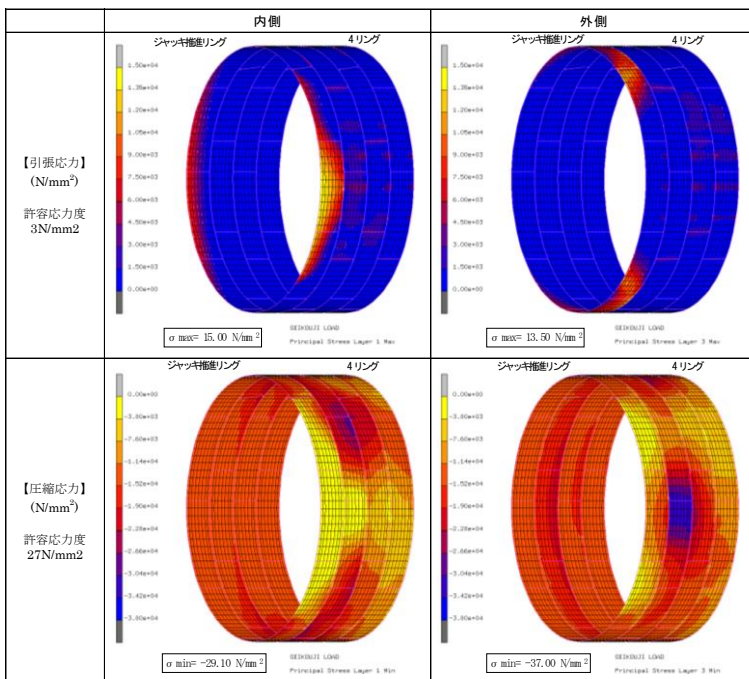
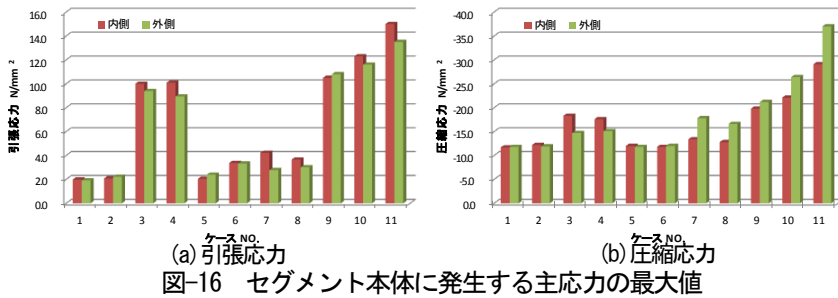
表-5 解析ケース一覧

ケース	平面線形	セグメント厚さ(mm)	稼働推進ジャッキ (%)	偏圧が作用した場合				
				推進ジャッキ	ジャッキ偏角	ジャッキ偏心量	テールシール偏圧	裏込め注入偏圧
1	直線	500	100					
2	曲線 (R=240m)	500	100					
3	直線	500	70	○				
4	曲線 (R=240m)	500	70	○				
5	直線	500	100		○			
6	直線	500	100			○		
7	直線	500	100				○	
8	直線	500	100					○
9	直線	500	70	○	○	○	○	○
10	直線	400	70	○	○	○	○	○
11	直線	300	70	○	○	○	○	○

※円環状の継手ケースおよびセグメントを併用してモデル化

表-4 载荷荷重および偏圧のパターン

载荷荷重	ジャッキ推力 1リング	テールシール圧 2リング	裏込め注入圧 3リング	静水圧 4リング以降のリング
荷重分布				
偏圧作用時の荷重分布				【その他の偏圧の作用】 ①ジャッキ偏心量: ジャッキ中心軸とセグメントの中心軸との偏心量が30mmの場合 ②ジャッキ偏角: テール内のテールクリアランス40mmを想定した時のジャッキの载荷方向に偏りが生じた場合



ジャッキ推進リング、および 2~3 リングのリング継手周辺部に現れていることが分かる。これは、セグメント損傷事例として報告されている<sup>3)</sup>リング継手周辺のボルトボックス部のひび割れ・はく離の発生要因の一つとして考えることができる。

以上より、ジャッキ推力、裏込め注入等の偏圧作用時にリング継手周辺部に高い引張主応力が増加し、セグメント厚さが薄くなると圧縮主応力も許容応力を超えるなど、ひび割れ・はく離要因の可能性があるので、セグメント厚さをむやみに薄くすることがないようにする必要があります。さらに合理的なセグメント設計を行うためには施工時におけるジャッキパターン、ジャッキ推力稼働方法などの施工条件に応じた施工時荷重の想定

し、本検討で用いた実施した三次元シェルモデル等による解析によりセグメント本体、および継手部の強度等について照査することが必要である。

#### 4. まとめ

良好な地盤に建設されるシールドトンネルを対象として、現場計測結果に基づいた解析とともに、多リングはり一ばねモデル、三次元シェルモデル等による解析により検討した結果をまとめると以下に示すとおりである。

##### ・施工時荷重の評価方法

1) シールド掘進により変動するセグメントの断面力の変動は、推進ジャッキによる軸方向の荷重に加えて、1~2 リング後方 (2R~3R) のシールド掘進時に作用するテール圧が、2~3 リング後方 (3R~4R) のシールド掘進

時に作用する裏込め注入圧が主な要因である。

- 2) 新規に組み立てるセグメントと既設のセグメントは、隣接するリング間でリング継手によって連結されるため、互いのリングに発生する断面力の影響を受けている。
- 3) 新規に組み立てるセグメントには、既に組み立てられた既設リングが受けている施工時荷重や静水圧等による変形の程度によって、組立て時点で当該セグメント自重以外の断面力が発生する。

・施工時荷重を考慮したセグメント設計法

- 1) セグメント組立後から施工時荷重が作用する後続のリング周辺までを対象とした施工時荷重による各リングに発生する断面力の評価を行うには多リングはりーばねモデルによる方法がある。その場合には、形状保持装置等による内部荷重を考慮することでさらに計測結果に近似する。
- 2) 硬質粘性土（土丹）、砂質土層の硬質地盤を対象とした施工時荷重を考慮したセグメント構造とする場合には、トンネル条件、シールド施工条件等によって異なるが、通常、実施される土圧、水圧等によるセグメント設計を基本として、静水圧と裏込め注入圧による偏圧などを考慮した仮想付加荷重に対しても照査することが一つの方法である。
- 3) ジャッキ推力、裏込め注入等の偏圧作用時にリング継手周辺部に高い引張主応力が増加し、セグメント厚さが薄くなると圧縮主応力も許容応力を超えるなど、ひび割れ・はく離要因の可能性があるので、セグメント厚さをむやみに薄くすることがないようにする必要がある。
- 4) 合理的なセグメント設計を行うためには施工時にお

けるジャッキパターン、ジャッキ推力稼働方法などの施工条件に応じた施工時荷重の想定し、本検討で用いた実施した三次元シェルモデル等による解析によりセグメント本体、および継手部の強度等について照査することが必要である。

## 5. 今後の課題

本検討により施工時荷重を考慮したセグメント構造とするための提案を行った。今後、リング継手に発生する応力や変形結果を含めた検討を行うことにより、セグメント幅、セグメント厚さ等による影響を定量的に把握したうえで、安全で耐久性の高いセグメント設計方法の検討が重要である。最後に、本検討にあたって対象トンネルの諸条件、現場計測データ等を提供いただいた首都高速道路(株)ほか関係各機関の各位に深甚の謝意を表わします。

### 【参考文献】

- 1) 石井伸明・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、(社)土木学会トンネル工学報告集第18巻、pp235-242、2008.11
- 2) シールド構造物設計要領（シールド工法編）、首都高速道路株式会社、平成20年7月
- 3) シールドトンネルの施工時荷重、(社)土木学会トンネルライブラリー第17号、平成18年10月
- 4) 高橋正朗・大塚努・藤沼愛・小泉淳：シールドのテールシールドがセグメントに与える影響に関する研究、土木学会論文集F1（トンネル工学）特集号Vol.66 No.1/pp109-120、2010.11



# 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 the study, actual conditions as to amount of construction loads in each step were grasped with analysis of on-site measurement results on shield tunnels in good ground. After that, the influence of construction loads on segment was examined with three dimensional structural analyses of multi-ring beam-spring model and shell model. From the results, the evaluation method for construction loads and the segment design method have been proposed.

**Keywords:** shield tunnel, construction loads, on-site measurement, beam-spring model, shell model, segment damage