

三次元シェルモデルを用いた施工時荷重の影響に関する一考察

石村利明¹・真下英人²・森本 智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)

³国土交通省 北陸地方整備局 富山河川国道事務所能越国道出張所
(〒939-0116 富山県高岡市福岡町下蓑402)

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を把握することが重要である。本論文は、洪積粘性土（土丹）中を通過するシールドトンネルにおける現場計測結果を参考に、セグメント組立後からシールドテール通過時の圧力、裏込め注入圧等による施工時に作用する荷重を想定し、三次元シェルモデルを用いた解析により、これらの施工時荷重がセグメント応力、リング継手に与える影響について検討したので結果を報告するものである。

Key Words : shield tunnel, construction loads, in-site measurement, three-dimensional numerical analyses with shell elements

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¹⁾。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、セグメント組立時のエレクター操作荷重、形状保持装置による荷重、テール通過時の圧力、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、セグメントが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。

本論文は、洪積粘性土（土丹）中を通過するシールドトンネルにおける現場計測結果を参考に、セグメント

組立後からシールドテール通過時の圧力、裏込め注入圧等による施工時に作用する荷重を想定し、三次元シェルモデルを用いた解析により、これらの施工時荷重がセグメント応力、リング継手に与える影響について検討したので結果を報告するものである。

2. シールド掘進時における施工時荷重の把握

(1) 検討方法

主な掘削地盤として洪積粘性土（土丹）中の地盤を通過するシールドトンネルの覆工に設置した圧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。現場計測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。また、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、セグメント組立直後にはシールドのテール内に約2.5リング程度が収まることになる。これより、計測リングはリング3～4を掘進中にテール圧（テールブラシおよびテールグリス圧による圧力）、リング4を掘進中に裏込め注入圧による影響を受けるこ

表-1 シールドトンネル諸元

シールド外径(m)	13.05
シールド形式	泥水加圧式
土被りH(m)	52.1
土被り比H/D	4.0
地下水位(管頂より)(m)	44.9
掘削部の主な地質	洪積粘性土層
セグメントの種類	平板型RCセグメント
セグメント外径D(m)	12.83
セグメント内径(m)	11.83
セグメント厚さ(m)	0.50
セグメント幅(m)	1.2
セグメント分割数	9
セグメントの組み方	2リング千鳥
継手形式(セグメント継手)	ボルト・金物結合
継手形式(リング継手)	ピン継手

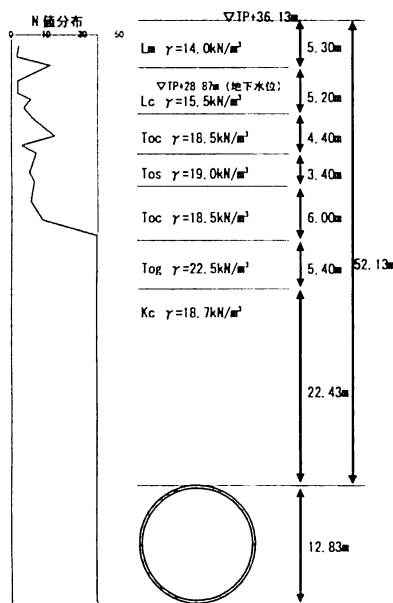


図-1 現場計測トンネルの位置と地盤条件

となる。なお、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約6時間であった。

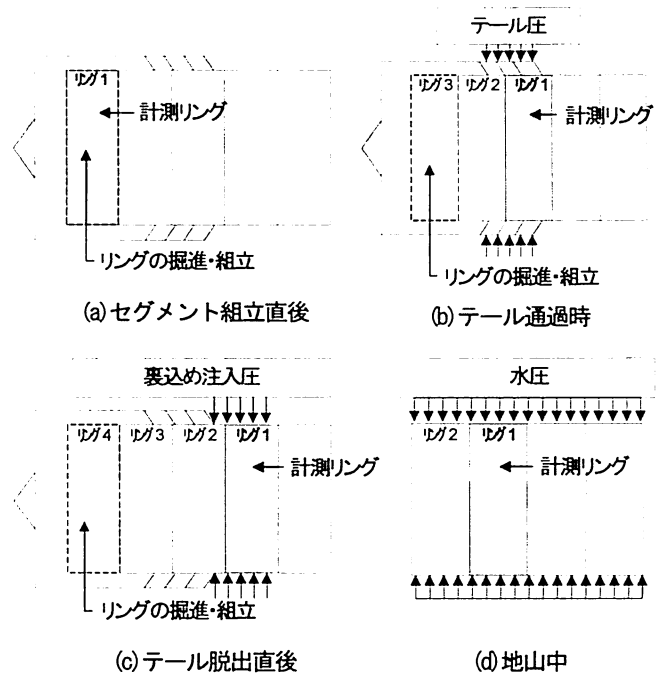


図-2 シールドと計測リングとの位置関係と各施工段階等に作用する荷重

(2) 現場計測結果

図-3にシールド掘進時におけるリング1の計測リングに設置した圧力計の変化を示す。図中には推進力の変化も示しており、推進力が上昇している時間帯が各リングの掘進中となる。これより、圧力計の値はリング3の掘進中に最大で約0.9MPa、およびリング4の掘進中に最大で約1 MPaそれぞれ上昇していることがわかる。この土圧の変化は、図-2に示した位置関係から、それぞれテール圧、裏込め注入による圧力による影響と考えることができる。

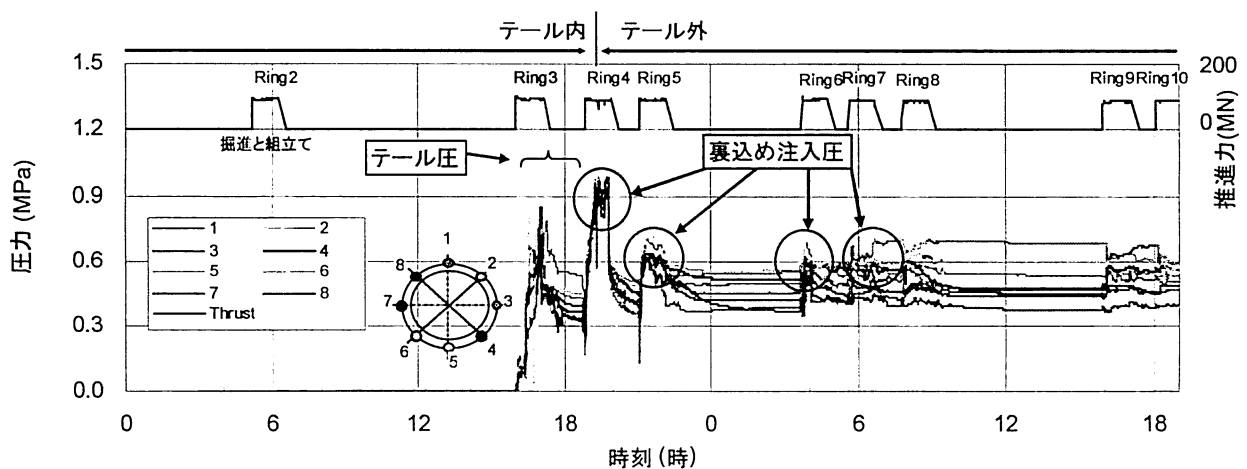


図-3 シールド掘進時における計測リングの圧力計の変化 (計測リング：リング1)

3. 三次元シェルモデルによる施工時荷重による影響検討

(1) 検討方法

検討は、2. で示した現場計測を実施 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 のシールドトンネルを対象とした。三次元 FEM 解析によるシールドトンネルモデルは、図-4 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。解析対象のトンネルの延長は、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-2 とした。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 解析により求めた $k_r=20\text{MN/m}^3$ を用いた。

トンネルに作用させる載荷荷重は、2. で示したシールド掘進時における圧力計の値を参考に、テール部を通過する際の荷重、裏込め注入圧による荷重を図-5 に示す載荷荷重として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、図-5 に示すようにその他の偏圧の作用として、ジャッキ中心

表-2 継手のモデル化と設定値

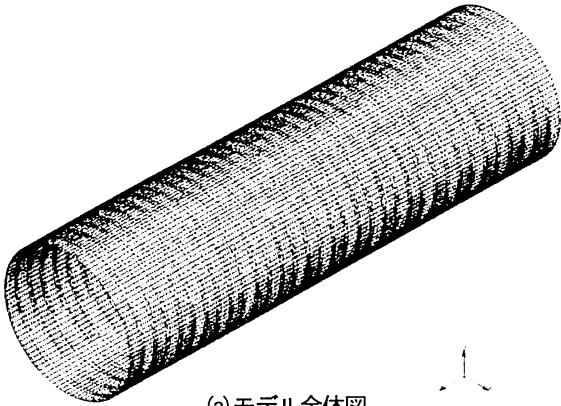
継手	ばね	記号	設定値	
			第一勾配 (K01)	第二勾配 (K02)
セグメント継手	回転ばね	θ (rad)	-	0.001305
		$M(\text{kN} \cdot \text{m})$	500	518
		$k\theta$ (kN・m/rad)	∞	14000
	圧縮ばね	k_c (kN/m)	∞	
	引張ばね	k_t (kN/m)	800,000	
リング継手	せん断ばね	k_s (kN/m)	60,000	
	圧縮ばね	k_c (kN/m)	100,000,000	
	引張ばね	k_t (kN/m)	600,000	
	せん断ばね	k_s (kN/m)	50,000	

表-3 解析ケース一覧

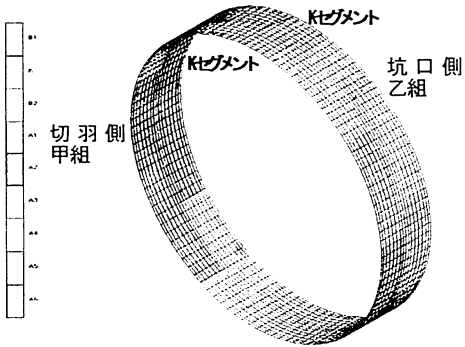
ケース	平面線形	セグメント厚さ(mm)	稼働推進ジャッキ (%)	偏圧作用した場合			
				推進ジャッキ	ジャッキ偏角	ジャッキ偏心量	テール偏圧
1	直線	500	100				
2	曲線(R=240m)	500	100				
3	直線	500	70	○			
4	曲線(R=240m)	500	70	○			
5	直線	500	100		○		
6	直線	500	100			○	
7	直線	500	100				○
8	直線	500	100				
9	直線	300	100				○
10	直線	300	70	○			
11	直線	300	100			○	
12	直線	300	100				○
13	直線	300	100				
14	直線	500	70	○	○		○
15	直線	300	70	○	○		○
16	曲線(R=240m)	500	70	○	○		○
17	曲線(R=240m)	300	70	○	○		○

※平面線形が曲線のケースはテーバーセグメントを使用してモデル化

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。解析ケースは、平面線形、セグメント厚さを変化させた表-3 に示すケースとした。



(a) モデル全体図



(b) 甲組・乙組の拡大図

図-4 三次元シェルモデル

載荷荷重	ジャッキ推力	テール圧	裏込め注入圧	静水圧
載荷リング	1リング	2リング	3リング	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載荷方向に偏りが生じた場合 (直線:0.2度, 曲線:1.3度を設定)

図-5 載荷荷重および偏圧のパターン

(2) 検討結果

a) セグメントに発生する主応力

図-6 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，推進ジャッキ 100%），ケース 2（曲線，推進ジャッキ 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。推進ジャッキの偏圧がない場合の平面曲線による差は， $R=240m$ 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（推進ジャッキ，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ている。圧縮応力については若干の増加に留まる程度で許容応力度（ $-27N/mm^2$ ）を超えることはないものの，引張応力については許容応力度（ $3N/mm^2$ ）を超えている場合がある。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。

次に，セグメント厚さを 500mm から 300mm と薄くした場合について考察する。基本ケースとして考えられるケース 1 (500mm) とケース 9 (300mm) を比較すると，圧縮，引張ともに主応力がセグメントが薄いケース 9 がケース 1 の約 1.7～2 倍程度増加していることがわかる。また，施工時荷重が偏圧として作用するセグメント厚さが異なる同条件のケース 6～8 とケース 11～13 を比較すると，基本ケースと同様にセグメントが薄い条件で主応力が増加しており，一部のケースで引張応力のみならず，圧縮応力の許容応力度を超えている。これより，セグメントが薄い条件では施工時荷重が偏圧として作用する施工条件となった場合には，許容応力度を超える場合があり，セグメントの損傷等の可能性が高まることがわかった。

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%の条件下で各施工時荷重を同時に載荷した場合（ケース 14～17）について考察する。セグメント厚さ 500mm の場合（ケース 14, 16）は，推進ジャッキ 70%単独の場合（ケース 3）に比べて，引張応力，

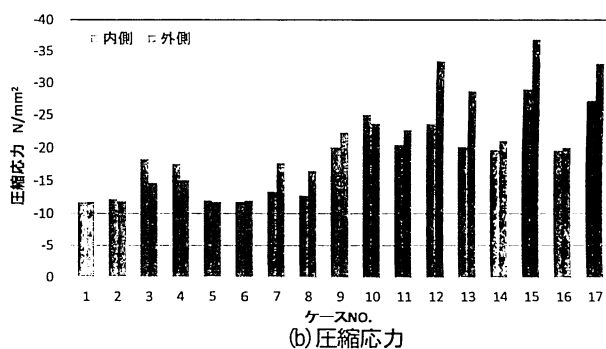
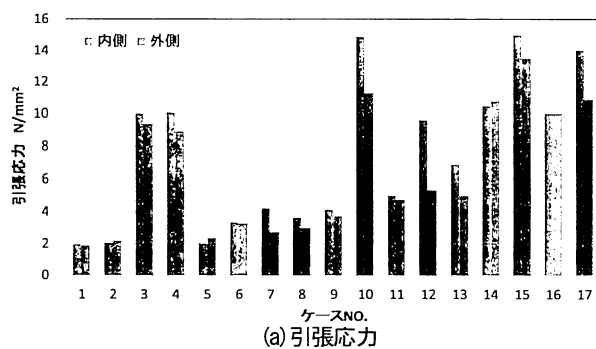
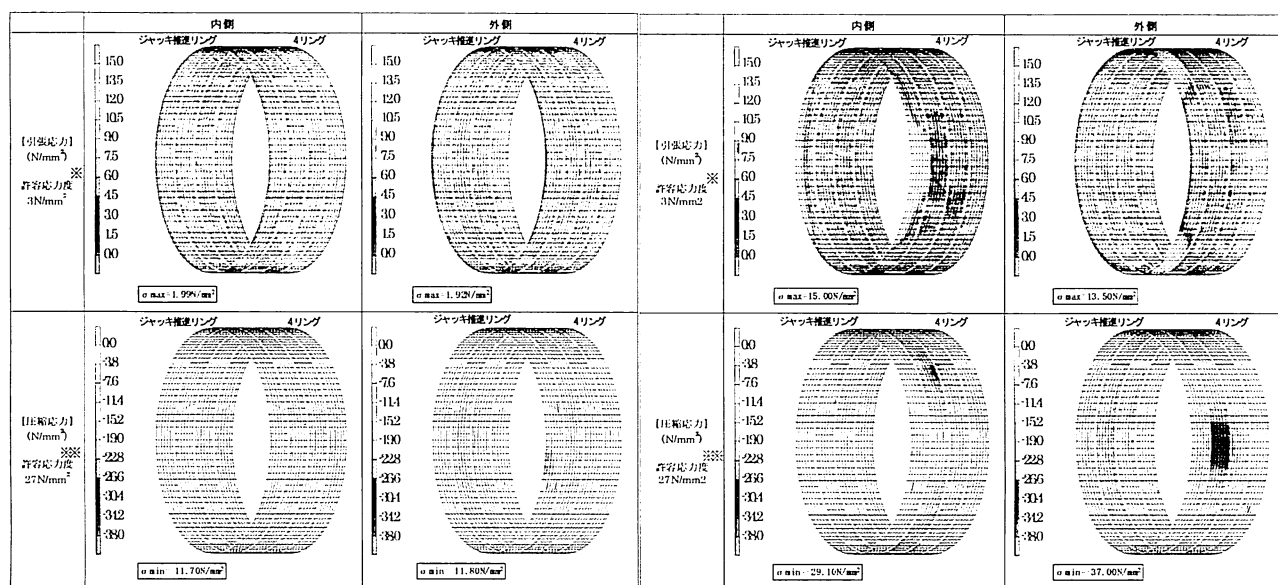


図-6 セグメント本体に発生する主応力の最大値



※ 引張許容応力度：コンクリート標準示方書「構造用部材」(2011年版)を参考に，コンクリートの設計基本強度から算出した引張強度を引張許容応力度とした。
※※ 圧縮許容応力度：コンクリートの設計基本強度より定まる許容圧縮応力度 σ_{cm} (MPa) に 1.05 倍した値を圧縮許容応力度とした。

(a) ケース 1

(b) ケース 15

図-7 セグメント本体の主応力分布

圧縮応力と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。それに対してセグメントが300mmの場合（ケース15,17）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。

代表的な主応力分布図を図-7に示す。図中には基本ケースとして考えられるケース1（直線、ジャッキ100%）と本解析条件下で主応力の高い場合（ケース15）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示した。内側、外側の主応力分布から、基本ケースのケース1は、内側、外側の主応力分布ともに高い応力が発生している部分はない。一方、ケース15は、引張応力、圧縮応力ともに部分的に大きな値が発生している。高い引張応力が発生する部分は、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、一般的なセグメント損傷例として報告されているリング継手周辺のボルトボックス部のひび割れ・剥離の発生要因の一つとして考えることができる。

b) セグメントの軸方向応力

図-8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軸方向応力（最小値、最大値）を示す。セグメントの軸方向応力の発生パターンは、2つに分類できる。第1のパターンは引張、圧縮ともに発生するケース、第2のパターンは圧縮応力のみが発生するケースである。第1のパターンは、主に稼働推進ジャッキに偏りがあるケース（ケース3,4,10,11,14～17）であることがわかる。第2のパターンは、基本ケース（ケース1,2,9）と推進ジャッキを除く各施工時荷重（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ケース（ケース5～8,12,13）となっている。

第1のパターンのケースは、セグメントの主応力（引張）が比較的大きいケースと一致しており、稼働推進ジャッキの偏り等がトンネル軸方向の応力に対しても影響を与えることがわかった。また、セグメント厚さが300mmのケース（ケース9～13,15,17）における軸方向応力は、圧縮側の許容応力度（ -27N/mm^2 ）までに達す

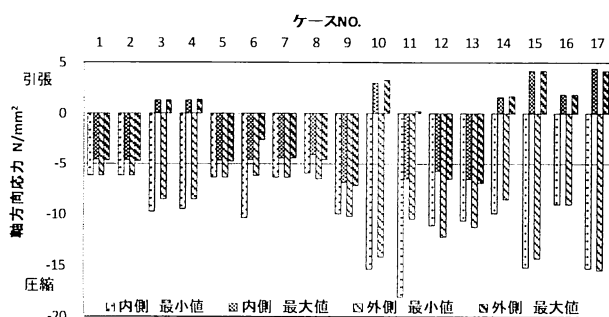


図-8 セグメントの軸方向応力

ることはないものの、それぞれ同条件の施工時荷重が偏圧として作用したケース（ケース3, 6～8, 14, 16）と比較して全体的に応力が大きくなっている。また、引張側の応力は許容応力度を超えており、リングの輪切り方向にひび割れ等が生じる可能性がある。

c) リング継手のボルトのせん断力

図-9にリング継手のボルトのせん断力について各リング間の最大値、最小値を示す。ボルトのせん断力は、施工時荷重が作用する1～5リングまでの各リング間の値が大きいことがわかる。そこで、各解析ケースについて1～5リングまでのリング継手のボルトに発生するせん断力の最大値を図-10に示す。図中の結果は、1～5リングまでの各リング間に存在する27個のボルトに発生するせん断力の最大値を示したものである。

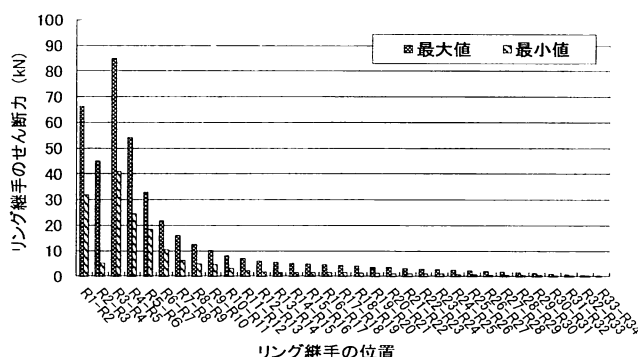


図-9 リング継手のボルトのせん断力（ケース1）

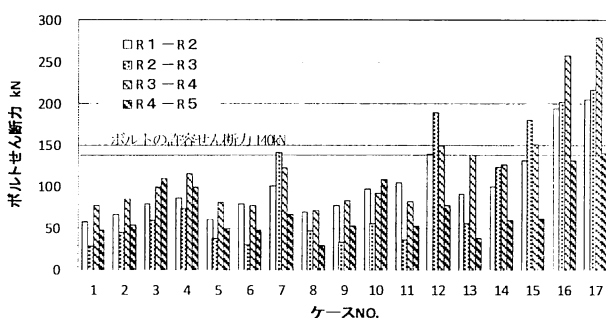


図-10 リング継手のボルトのせん断力（最大値）

せん断力の最大値を示したものである。図中には本シールドのリング継手ボルトの許容せん断力140kNのラインも合わせて示した。

これより、ケース7, 12, 15～17でボルトのせん断力が許容せん断力を超えていることがわかる。これらの代表的なケースを含むリング継手のせん断力分布を図-11に示す。図-11より、ケース1の施工時荷重の偏圧が作用しない場合は、概ね平均的なボルトのせん断力が発生するのに対し、許容せん断力を超えるケースは右側壁部が大きい特徴がある。これは、右側壁に局部的に作用するテール圧の偏圧による影響を大きく受けられていると考えられる。曲線施工時のセグメントが薄いケース17は、右側壁部に限らず他の箇所のせん断力が大きく、セグメント損傷が生じやすいことがわかる。

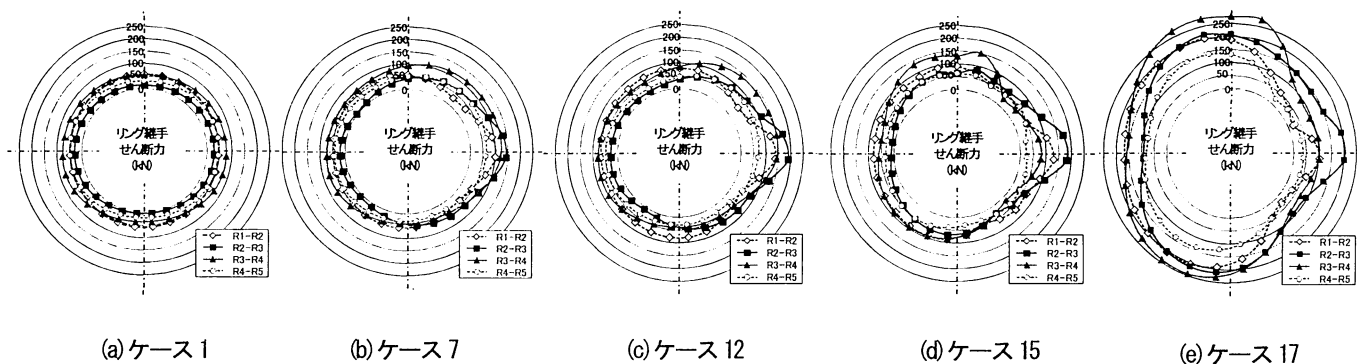


図-11 リング継手のボルトのせん断力分布（最大値）

4. まとめ

洪積粘性土（土丹）中における現場計測結果を参考に施工時荷重を想定した場合の、三次元シェルモデルによる解析を行い、セグメント応力等と与える影響について考察した。その結果、本条件下では以下のことがわかった。

- ①リング全体に推進ジャッキが均等に作用する場合のセグメントに発生する主応力は、平面曲線による差（直線， $R=240m$ ）の顕著な差は認められない。
- ②各施工時荷重（推進ジャッキ，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のセグメントの引張応力は許容応力度を超える場合がある。特に，推進ジャッキが偏圧で作用する場合で顕著である。
- ③セグメントが薄い条件で施工時荷重が偏圧として作用する場合は，許容応力度を超える場合があり，セグメントの損傷等の可能性が高まることがわかった。
- ④推進ジャッキの偏圧によりトンネル軸方向に曲げが生じるような場合で，セグメント厚さが薄い場合はセグメント軸方向に引張応力が生じることがあり，リングの輪切り状のひび害れが生じる可能性がある。

⑤リング継手のボルトのせん断力は，局所的な偏圧等による施工時荷重の影響により大きな値となることがある。特に，曲線施工時のセグメントが薄い条件で顕著である。

今後，トンネルの変形結果を含めて検討するとともに，セグメント幅等による影響を定量的に把握し，安全で耐久性の高いセグメント設計方法の検討を行うことが重要である。

謝辞：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）の関係各位に深甚の謝意を表わします。

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，（社）土木学会トンネル工学報告集第18巻，pp235-242，2008
- 2) 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

（2012.9.3 受付）

A STUDY ON SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION LOADS USING A THREE-DIMENSIONAL SHELL MODEL

Toshiaki ISHIMURA, Hideto MASHIMO, Satoshi MORIMOTO

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 This paper, the influence of construction loads on segment stress was examined through three-dimensional numerical analyses with shell elements. In addition, design method with the construction loads taken into account was also examined with the results from the analysis and on-site measurements.