

報文

シールドトンネルのセグメント設計における施工時荷重の影響

石村利明・真下英人・森本 智

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が薄肉構造となる場合がある。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トー操作荷重、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。このため、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。

本報文は、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、施工時荷重を想定し、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の検討結果を報告するものである。

2. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

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、シールド機とセグメントとの位置関係は図-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機のテール内に約2.5リング程度が収まることになる。これより、セグメント位置がリング2～3にある時にテール圧（テールブラシおよびテールグリリス圧による圧力）、リング4にある

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

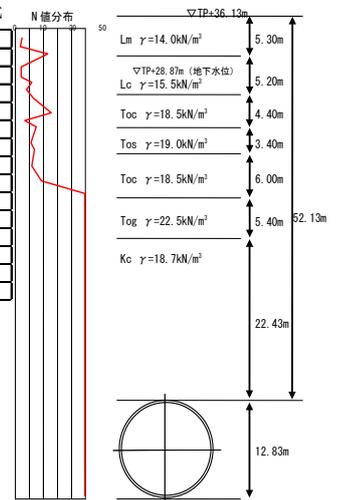


図-1 現場計測トンネルの位置と地盤条件

時に裏込め注入圧による影響を受けることになる。

図-3に圧力計を設置したセグメントで組み立てたリング（計測リング）で計測されたシールド掘進時の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圧力計を設置した計測リングに後続する各リングを掘進中となる。

図より、圧力計の値はリング3の位置で最大約0.9MPaまで、およびリング4の位置で最大で約1MPaまで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。

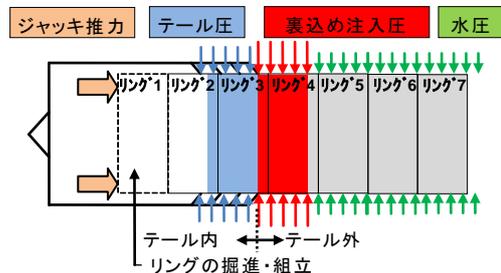


図-2 シールド機とセグメントの位置関係と作用する荷重

3. 三次元シェルモデルによる施工時荷重の影響検討

(1) 検討方法

検討は、2.で示した現場計測を実施¹⁾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。

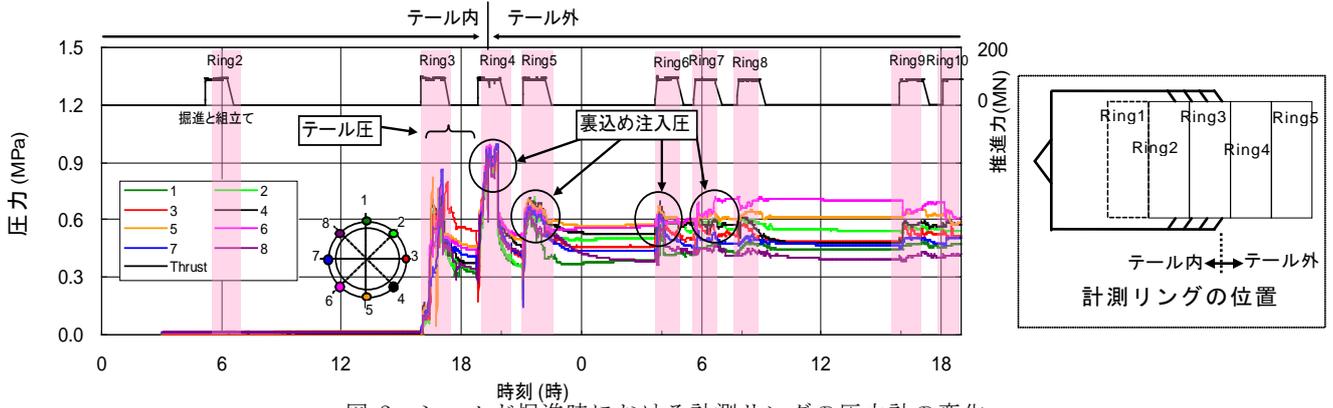


図-3 シールド掘進時における計測リングの圧力計の変化

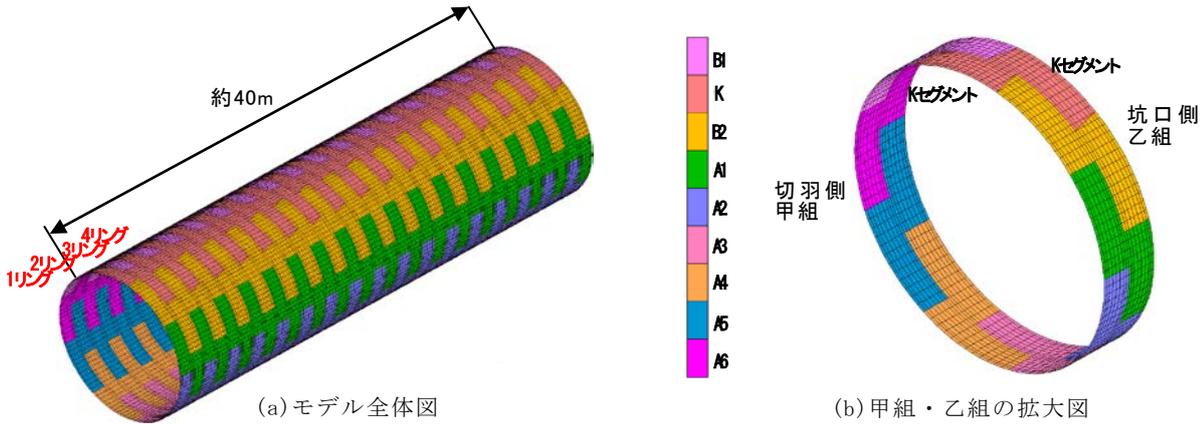


図-4 三次元シェルモデル

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はセグメントの組み方（甲組・乙組）を考慮したシェル要素でモデル化し、継手部は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実験値等を参考に表-2の値を設定し、トンネルと周辺地盤との相互作用を地盤

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 (kN·m)	500	518
	圧縮ばね	$k\theta$ (kN·m/rad)	∞	14000
		kc (kN/m)	∞	
リング継手	引張ばね	kt (kN/m)	800,000	
	せん断ばね	ks (kN/m)	60,000	
	圧縮ばね	kc (kN/m)	100,000,000	
	引張ばね	t (kN/m)	600,000	
	せん断ばね	ks (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	ジャッキ偏心率	テール偏圧	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	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パセグメントを使用してモデル化

ばねによってモデル化した。また、地盤ばねの値は、FEM解析により求めた $kr=20MN/m^3$ を用いた¹⁾。

トンネルに作用させる荷重荷重は、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テール圧、裏込め注入圧による荷重を図-5に示す荷重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、施工時荷重が偏圧して作用した分布荷重も想定した。また、ジャッキ偏心率、ジャッキ偏角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

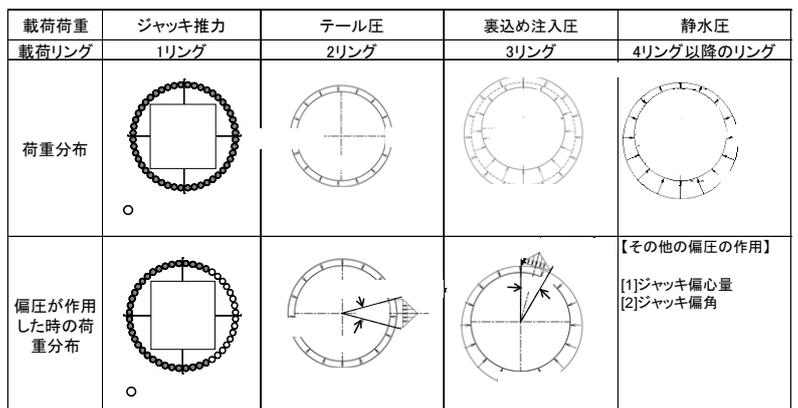


図-5 荷重荷重および偏圧が作用した場合の荷重パターン

とした。

(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直線と曲線との平面線形の差は、 $R=240m$ の曲線がある場合（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する。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（ $-27MPa$ ）を超えていないが、引張応力については許容応力度（ $3MPa$ ）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、セグメント厚さが異なることの差違として、基本ケース 1（ $500mm$ ）とケース 9（ $300mm$ ）を

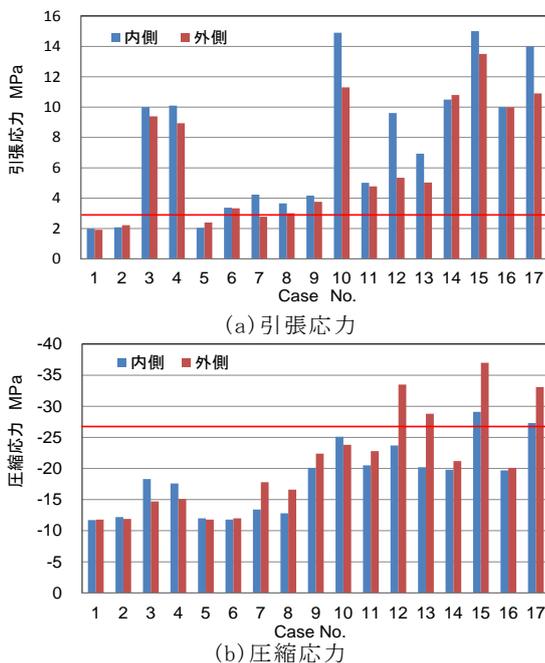


図-6 セグメント本体に発生する主応力の最大値

比較すると、圧縮、引張ともに主応力がセグメント厚の薄いケース 9 がケース 1 の約 1.7~2 倍程度増加している。また、施工時荷重が偏圧として作用する場合、セグメント厚さが異なるケース 6~8 とケース 11~13 を比較すると、セグメントが薄い条件で主応力が増加し、一部のケースで引張応力のみならず、圧縮応力も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施工時荷重が偏圧として作用する施工条件の場合には、主応力が増加し、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て、推進ジャッキが 70%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 $500mm$ 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、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。一方、 $300mm$ 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。

図-7 に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である 1 リングから 4 リングの主応力分布図を示す。図より、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

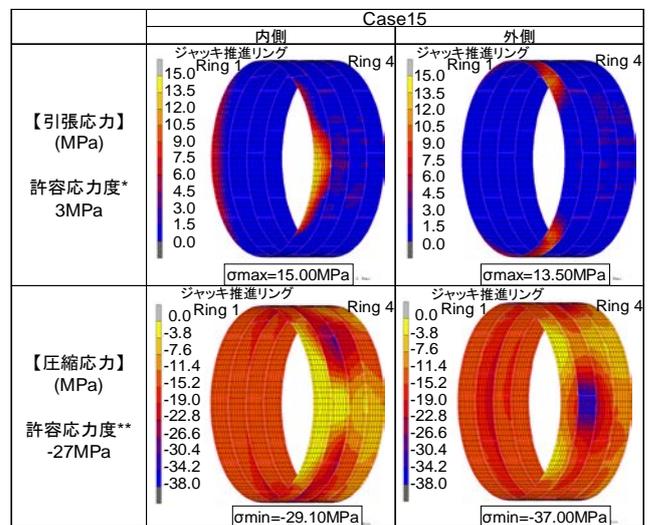


図-7 セグメント本体の主応力分布

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・はく離の発生要因の一つとして考えることができる。

b)リング継手のボルトのせん断力

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-8に示す。図中の結果は、各リング間の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。図中には本シールドのリング継手ボルトのせん断耐力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耐力を超えていることがわかる。許容せん断耐力を超えるケースは右側壁部で大きな値を示した。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たためと考えられる。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もせん断力が大きく、セグメント損傷が生じやすいことがわかる。

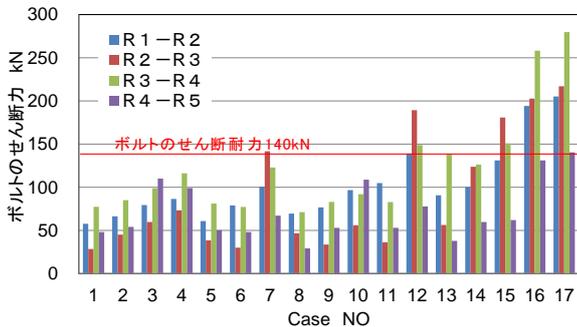


図-8 リング継手のボルトのせん断力 (最大値)

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、セグメント応力等に

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、直線と曲線の平面曲線による差違(直線、R=240m)の顕著な差は認められない。
- ②各施工時荷重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、主応力が増加し、セグメントの損傷等の可能性が高まる。
- ④リング継手のボルトのせん断力は、局所的な偏圧等が作用する条件で大きく、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、pp.235～242、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、pp.109～120、2010

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

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

森本 智



国土交通省北陸地方整備局
富山河川国道事務所(前 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