

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

(独)土木研究所 正会員 ○石村利明, 森本 智, 角湯克典

1. はじめに

大深度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、土圧よりも水圧が卓越するため、従来の土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になる傾向がある。一方で、シールド掘進・セグメント組立て時にジャッキ推力や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、セグメントの欠け、ひび割れ等が発生する可能性が高くなるため、施工時荷重を評価した合理的なセグメント設計を行うことが必要である。しかし、これら施工時荷重の影響を考慮した設計法は確立されていないのが現状である。そこで、本稿では、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について検討したので結果を報告する。

2. 三次元シェルモデルによる検討方法

本検討は、過去に現場計測が実施¹⁾された洪積粘性土(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。主なトンネル条件は表-1、図-1 に示すとおりである。三次元 FEM 解析によるシールドトンネルモデルは、図-2 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 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 解析により求めた $kr=20\text{MN/m}^3$ を用いた¹⁾。

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図-3 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-3 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-3 に示す。

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	kc (kN/m)	∞	
	引張ばね	kt (kN/m)	800,000	
リング継手	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	

3. 検討結果

図-4 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、 $R=240\text{m}$ の平面

キーワード シールドトンネル, 施工時荷重, 三次元 FEM 解析, シェルモデル

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (独) 土木研究所 TEL 029-879-6791

表-1 対象トンネル

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リツ千鳥
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

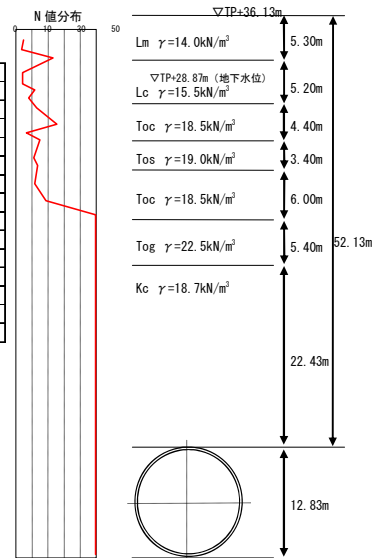


図-1 現場計測トンネルの位置と地盤条件

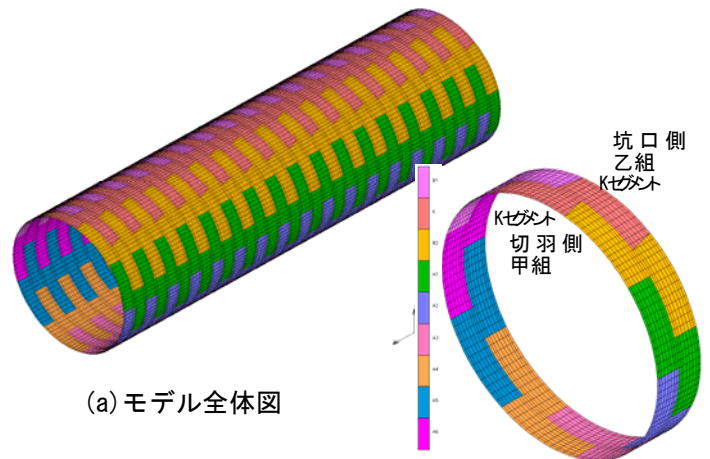


図-2 三次元シェルモデル (a) モデル全体図 (b) 甲組・乙組の拡大図

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载荷した場合(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-5 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。

4. まとめと今後の課題

本検討により各施工時荷重によるセグメント応力に与える影響が把握できた。今後、継手に発生する応力や変形結果を含めて検討するとともに、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、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)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，pp235-242，2008.11
- 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/pp109-120，2010.11

図-3 载荷荷重および偏圧のパターン

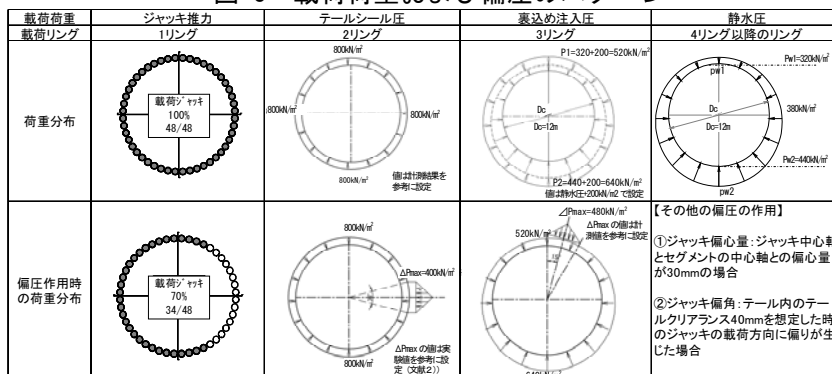


表-3 解析ケース一覧

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	ジャッキ偏心量	テールシールド偏圧
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	○	○	○	○

※平面線形・曲線のケースはテールセグメントを使用してモデル化

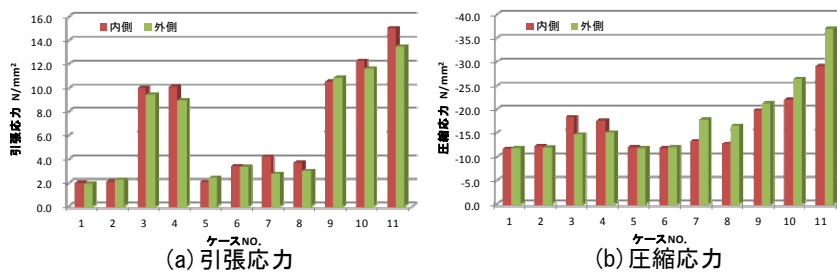


図-4 セグメント本体に発生する主応力の最大値

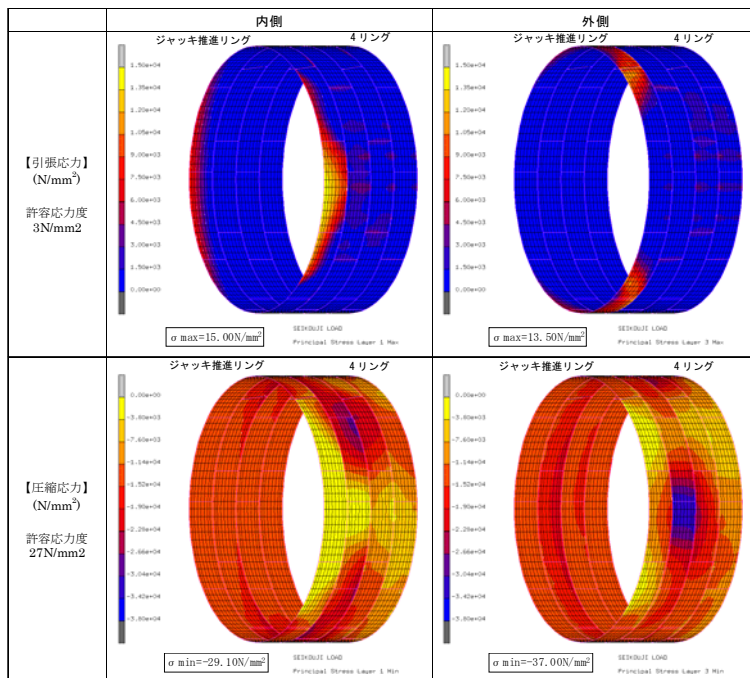


図-5 セグメント本体の主応力分布(ケース 11)