

Simulation Analysis on Mechanical Property and Waterproof Performance of Segment in the Shield Construction Tunnel

Tiecheng Li

China Railway Construction Engineering Group Co., Ltd., Tianjin
Email: 35151756@qq.com

Received: Feb. 20th, 2018; accepted: Mar. 7th, 2018; published: Mar. 14th, 2018

Abstract

As the main body of coal mine slant in the shield construction, segment need to bear the surrounding water pressure, soil pressure and various other loads. It has high requirements for mechanical property and waterproof performance of segment. In this paper, the simulation analysis was studied on mechanical property and waterproof performance of segment in the shield construction tunnel. Through analysis, internal force, deformation, seam opening and dislocation of the segment are obtained. It provides theoretical support for the implementation of the project.

Keywords

Shield Method, Segment, Mechanical Property, Waterproof Performance

煤矿斜井隧道管片力学性能及防水性能仿真分析

李铁成

中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津
Email: 35151756@qq.com

收稿日期: 2018年2月20日; 录用日期: 2018年3月7日; 发布日期: 2018年3月14日

摘要

在盾构法施工煤矿斜井隧道的过程中, 管片作为衬砌体系的受力主体, 需要承受隧道周围的水、土压力

和其他各种荷载, 对其力学性能和防水性能有较高的要求。本文采用数值模拟方法, 进行了盾构拆解区域管片力学性能和防水性能的仿真分析。通过分析, 我们得到了管片的内力、变形、接缝张开量和错位量等参数, 为工程的顺利实施提供了理论支撑。

关键词

盾构法, 管片, 力学性能, 防水性能

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

与传统的明挖法相比, 盾构法施工具有掘进速度快、开挖安全、对周围地层影响小、不影响地面交通和地下管线、施工不受天气条件限制等诸多优点[1], 因此在城市地铁隧道、公路铁路隧道、江河湖海底隧道及地下工程的建设中得到了广泛应用。在内蒙古神华新街台格庙矿区斜井隧道施工中, 盾构施工技术首次被运用到其中, 既开创了煤矿斜井建设的新模式, 也进一步丰富了盾构法施工这一技术领域[2] [3]。

盾构法施工隧道中的衬砌结构一般由预制的管片拼装而成。管片结构不仅要承受隧道上的基层载荷(水土压力、自重和地层反力等), 还要能够承受施工载荷(千斤顶推力、壁厚注浆压力等) [4]。由于该工程中煤矿斜井隧道具有使用年限长、长距离、大深埋等特点, 因此对管片结构的承载能力有较的要求。并且, 在外荷载作用下, 管片结构易产生变形, 导致管片接缝张开, 引起管片之间在接缝处发生渗漏水, 这将导致斜井隧道质量的降低, 影响斜井隧道的运营使用安全[5]。

本文以内蒙古神华新街台格庙煤矿斜井隧道的盾构法施工为工程背景, 对斜井隧道中管片的内力、变形、接缝张开量及错位量进行了仿真分析, 并对其力学性能及防水性能进行了评价, 为工程的顺利实施提供了借鉴。

2. 斜井隧道管片分析模型

在荷载结构法中, 常用的管片结构分析模型可以以管片接头力学处理方法为理论基础将其分为五种模型, 即均质圆环模型、等效刚度圆环模型、自由铰圆环模型、弹性铰圆环模型和壳-弹簧模型[6]。这五种衬砌管片结构分析模型的本质区别就在于它们在建立模型时针对管片接头的弯曲刚度存在不同的处理方式, 这五种分析模型将明显影响管片的弯矩, 但对管片轴力的分布影响却很小, 同时对管片轴力的大小影响也可以忽略。

1) 均质圆环模型是一种传统的计算模型, 但这种模型是不合理的, 而不合理的原因就在于管片接头的存在, 当以此模型为基础进行计算分析的时候, 计算分析得出的结构会偏于安全, 但这种结构却不经济。

2) 等效刚度圆环模型在一些细节部分会不太清楚, 过于笼统, 且其管片接头位置及受力情况比较模糊, 并且模型参数 η 、 ζ 的取值较难评判, 因此就导致了其计算结果不准确且存在较大的随意性, 但这种模型在一定程度上又是对均质圆环模型的一种修正。

3) 自由铰圆环模型的优势就在于其考虑了管片接头位置的影响, 但此模型却也存在了一个不足之处, 即没有考虑到接头的弯曲刚度。该模型在地层能提供良好抗力的情况下进行计算时是较为适用的, 管片环上所受的外力在良好的岩层抗力作用下几乎会全部转化为管片轴力, 这时候管片环上的弯矩会接近于

0, 管片按构造配筋即可。因此, 在岩层抗力良好的情况下, 要使盾构隧道的设计最为经济就需要采用该种模型进行设计。

4) 弹性铰圆环模型的优势则在于此模型同时考虑了管片接头刚度、接头位置及错缝拼装效应, 因此其计算结果会较为精确, 是一种较为合理的计算模型, 利用这种模型进行计算将在各种地层中得到较为理想的结果。

5) 壳-弹簧模型不但具有弹性铰圆环模型的优势, 即同时考虑管片接头刚度、接头位置及错缝拼装效应, 并且将管片衬砌内力分析拓展到了三维壳体结构。

在煤矿斜井隧道中, 如果忽略接头的影晌可能造成计算结果偏差过大, 并且斜井采用错缝拼装, 整体围岩等级较差, 采用弹性铰模型或壳-弹簧模型可对管片接头、斜井的错缝拼装进行模拟。因此, 本文计算时分别采用弹性铰模型及壳-弹簧模型对斜井结构进行分析。

3. 仿真分析模型

3.1. 斜井隧道管片设计参数

如图 1 所示为本工程中的管片形状, 整环管片结构由 7 块管片拼装而成, 环间所采用的拼装方式为错缝拼装, 设计参数见表 1, 拆解段防水密封垫要求如表 2。

3.2. 斜井隧道管片结构计算模型

斜井隧道管片结构内力计算采用弹性铰圆环模型及壳-弹簧模型进行模拟, 两种计算模型的横截面示意图见图 2。

弹性铰圆环模型的计算模型及模型的接头模拟见图 3 所示: 取五环衬砌作为一个计算单元; 假定衬砌为小变形弹性梁, 衬砌离散为足够多个等厚度的直梁单元; 模型的建立需要模拟围岩对衬砌的约束作用, 本模型在模拟时采用的是弹簧单元, 而这些弹簧单元布置于各节点上, 这模拟的围岩对衬砌的约束作用反映的是它们之间的相互作用。壳-弹簧模型的计算模型及模型的接头模拟见图 4。取五环衬砌作为一个计

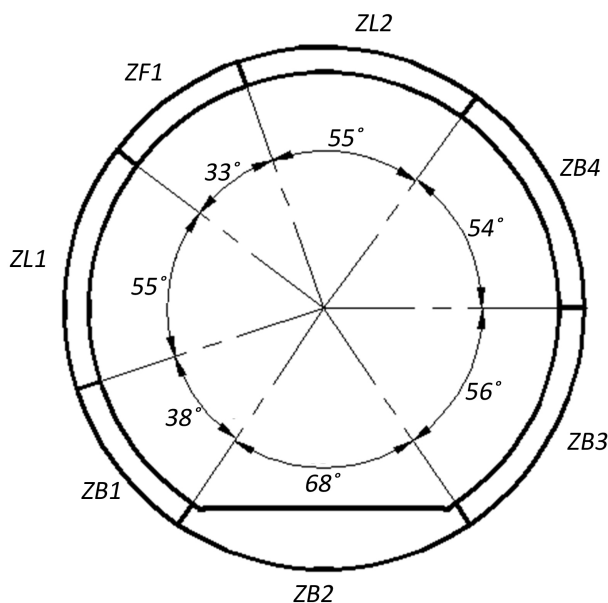


Figure 1. Segment shape
图 1. 管片形状图

Table 1. Segment design parameters
表 1. 管片设计参数

项目	特征
管片内径	$\phi 6600$ mm
管片外径	$\phi 7300$ mm
管片厚度	350 mm
管片分块	7 块
管片宽度	1500 mm
管片拼装方式	错缝拼装
管片连接形式	螺栓连接
管片混凝土材料	C40
环、纵向螺栓类型	机械性能等级 5.8 级普通螺栓

Table 2. Waterproof gasket requirements
表 2. 拆解段防水密封垫要求

位置	防水密封垫要求
仰拱块与相邻管片间	接缝张开 6 mm、错位 10 mm 条件下，设计使用年限内能够抵抗 0.5 MPa 的水压
其他管片间	接缝张开 8 mm、错位 15 mm 条件下，设计使用年限内能够抵抗 0.7 MPa 的水压

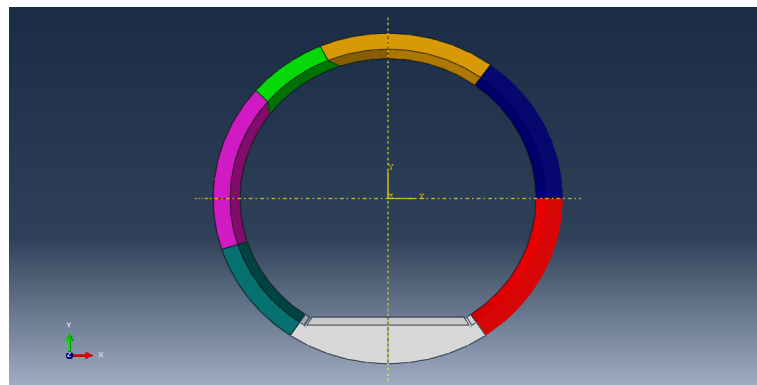


Figure 2. Calculate model cross section schematic
图 2. 计算模型横截面示意图

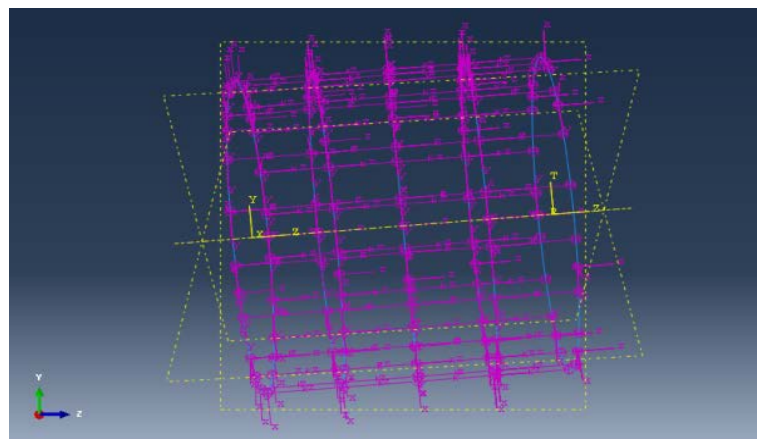


Figure 3. Calculate model cross section schematic
图 3. 计算模型横截面示意图

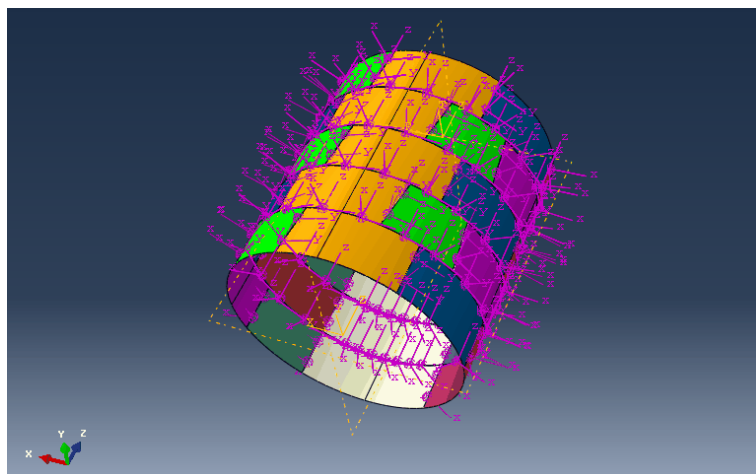


Figure 4. Shell-spring model and joint simulation
图 4. 壳 - 弹簧模型及接头模拟

算单元；假定衬砌为小变形弹性壳，同样的将衬砌模拟为等厚度的壳体单元；这时候需要模拟围岩对衬砌的约束作用，在此模型中，本文是用布置于各节点上的弹簧单元来实现的，以反映围岩与衬砌之间的相互作用。

3.3. 荷载计算

作用在斜井隧道结构上的荷载包括管片自重、围岩压力、土压力。围岩为 V 类围岩，取围岩重度为 23.85 kN/m^3 ，根据荷载结构法，计算荷载如下：

- 1) 拱顶垂直围岩压力： $23.85 \times 0.45 \times 21 \times \omega = 211.2 \text{ kPa}$ 。
- 2) 水平围岩压力：随深度递增，侧压力系数取 0.4。
- 3) 拱顶水平围岩压力 $211.2 \times 0.4 = 84.4 \text{ kPa}$ 。
- 4) 拱底水平围岩压力： $84.4 + 7.3 \times 23.85 \times 0.4 = 154.0 \text{ kPa}$ 。
- 5) 水压力：由于采用的是泄水降压式管片，最大水压力 0.5 MPa 时开始泄水，拱顶、拱底水压力取 0.5 MPa。
- 6) 弹性抗力系数 K 取 150 MPa/m 。

3.4. 接头参数

每个接头单元建立相应的局部柱坐标系，其中 R 为沿斜井径向；T 为沿斜井切向；Z 为沿斜井纵向，局部柱坐标系示意图见图 5。

管片接头连接单元(环向接头)模拟管片接头绕 Z 轴的转动、沿 T 轴的拉压、沿 R 轴、Z 轴的剪切。管片环间接头连接单元(纵向接头)模拟管片接头沿 Z 轴的拉压以及沿 R 轴、T 轴的剪切。接头参数见表 3。

4. 斜井隧道管片内力分析

取五环管片其中的第三环内力计算结果进行分析，采用弹性铰模型的内力计算结果如图 6 所示，采用壳 - 弹簧模型的斜井管片内力计算结果如图 7 所示。计算截面配筋为 II 型，对不同环向配筋块的最不利内力组合进行截面配筋验算见表 4。

由验算结果可知，计算工况采用弹性铰模型(梁 - 弹簧模型)进行内力分析及结构安全验算时，最小安全系数为 2.4，满足安全性的要求(规范要求安全系数为 2.4)；采用壳 - 弹簧模型进行内力分析及结构安全验算时，最小安全系数为 4.0，满足安全性的要求；采用壳 - 弹簧模型计算所得结构配筋安全系数整体较弹性铰模型计算所得安全系数大。

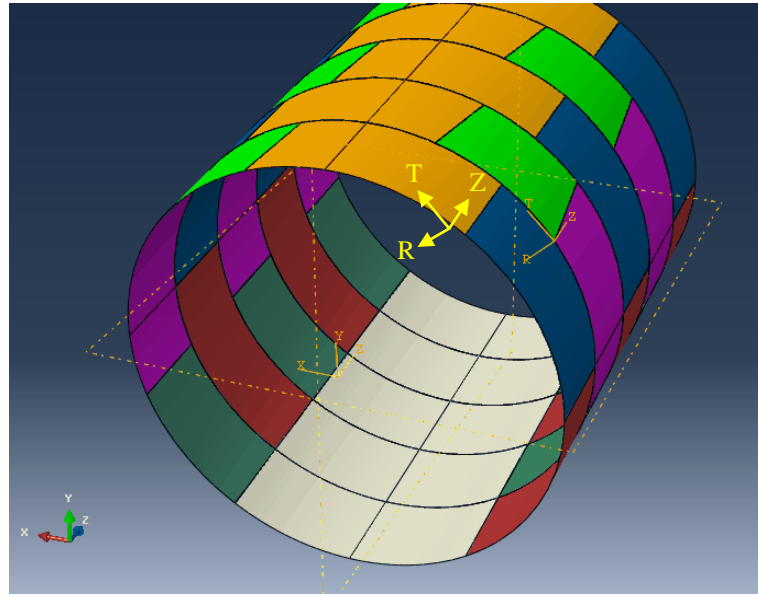


Figure 5. Local cylindrical coordinate system
图 5. 局部柱坐标系

Table 3. Connector parameter list
表 3. 接头参数表

拉压 N/m	剪切 N/m	转动 N·m/rad
1.0e10	5.0e9	1.6e7

Table 4. Computation of internal force combinations and cross-section reinforcement checking
表 4. 计算工况内力组合及截面配筋验算

计算模型	位置	截面尺寸(mm ²)	弯矩(kN·m)	轴力(kN)	配筋	安全系数 K	规范要求 安全系数	
弹性铰模型 (梁-弹簧模型)	ZL1/ZB1/ZB3/ZB4	最大正弯矩	1500 × 350	68.2	-4395	内侧: 4Φ18 + 6Φ16 外侧: 4Φ18 + 6Φ16	3.4	2.4
		最大负弯矩		-115.0	-4181		3.3	
	ZB2	最大正弯矩	1500 × 350	1.0	-4451.0	内侧: 4Φ22 + 6Φ20 外侧: 4Φ20 + 6Φ18	3.8	
		最大负弯矩		-170.8	-5909		2.4	
	ZF/ZL2	最大正弯矩	1500 × 350	45.6	-4033	内侧: 4Φ18 + 6Φ16 外侧: 4Φ18 + 6Φ14	3.8	
		最大负弯矩		-189.2	-5002		2.6	
壳-弹簧模型	ZL1/ZB1/ZB3/ZB4	最大正弯矩	1500 × 350	53.1	-2200	内侧: 4Φ18 + 6Φ16 外侧: 4Φ18 + 6Φ16	6.5	
		最大负弯矩		-83.0	-2207		5.9	
	ZB2	最大正弯矩	1500 × 350	15.0	2952.0	内侧: 4Φ22 + 6Φ20 外侧: 4Φ20 + 6Φ18	5.7	
		最大负弯矩		-115.0	-3127		4.4	
	ZF/ZL2	最大正弯矩	1500 × 350	56.1	-2030	内侧: 4Φ18 + 6Φ16 外侧: 4Φ18 + 6Φ14	6.8	
		最大负弯矩		-138.3	-3211		4.0	

5. 斜井隧道管片变形及防水分析

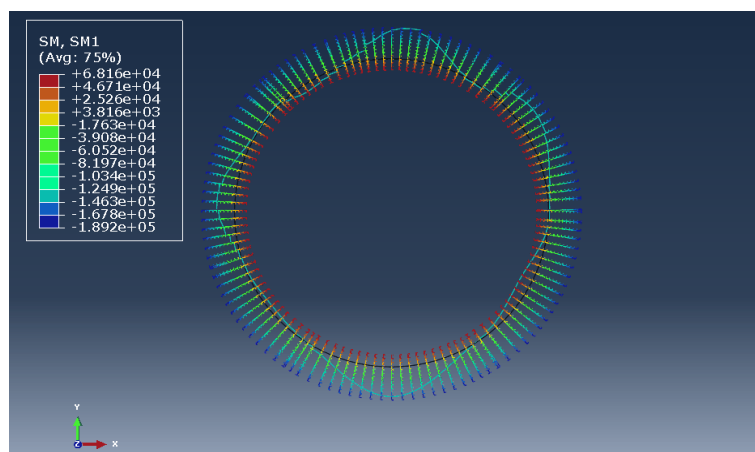
5.1. 管片结构变形分析计算模型

上节分析中采用的管片结构分析模型优势在于能够计算结构的受力(轴力、弯矩)和变形情况,便于计算结构安全系数,但接缝张开量和错位量并不能直观地显示。实体单元相对于梁单元和壳单元,能够直观地显示接触面的张开量和错位量,因此本节接缝张开量的计算分析选用实体单元对斜井隧道管片进行模拟,管片相邻块之间以及相邻环之间采用接触面进行模拟,接头螺栓采用梁单元模拟。采用荷载结构法,建立包括盾构斜井、螺栓、钢筋的计算模型见图 8。

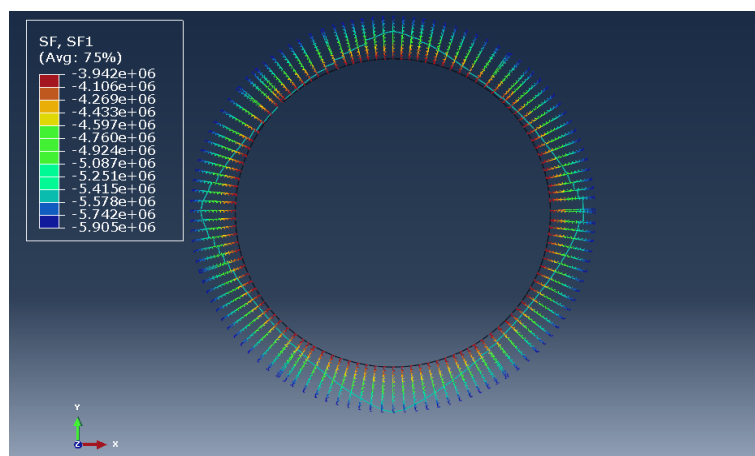
5.2. 结构变形分析

取上述计算模型中第 10 环与第 11 环的计算结果对结构变形进行分析,放大 450 倍的结构竖向变形见图 9,结构收敛变形见图 10。

由《地铁隧道设计规范》可知,衬砌环计算直径变形 $\leq 3\%D$ (D 为衬砌环外径)。由图 9 可见,管片直径竖向收敛变形为 $6.6 \text{ mm} = 0.9\%D < 3\%D$,由图 10 可见,管片直径水平收敛变形为 $2.8 \text{ mm} = 0.38\%D < 3\%D$,管片环计算直径变形满足规范要求。



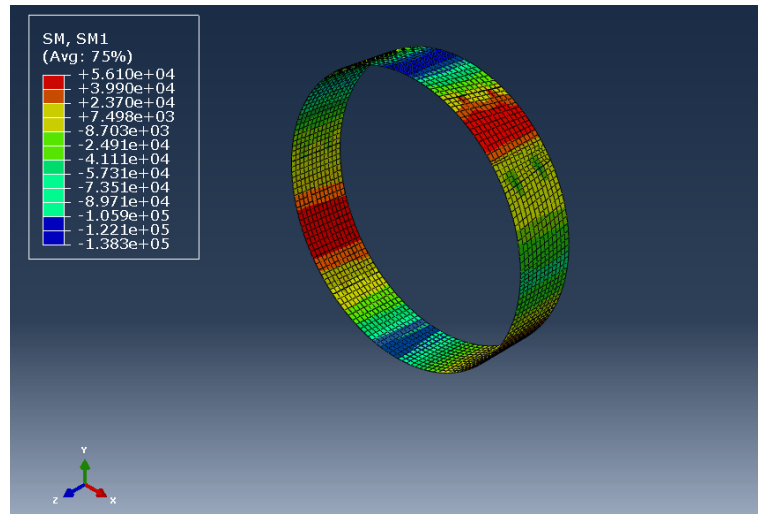
(a) 弯矩图(kN·m)



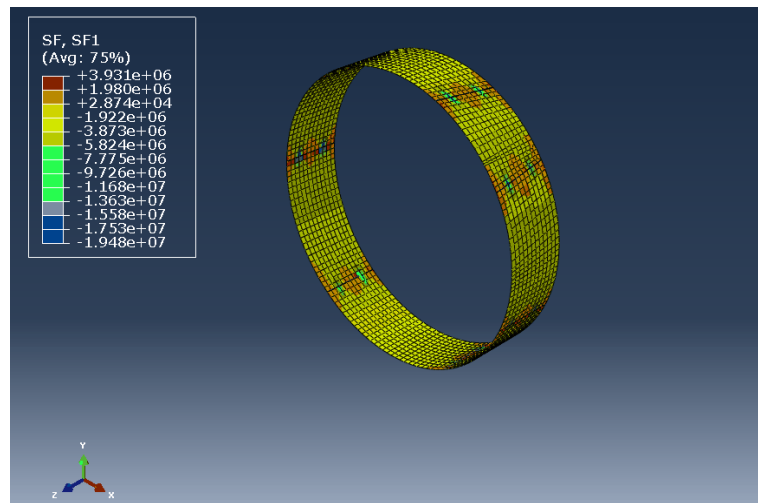
(b) 轴力图(kN)

Figure 6. Internal force calculation result of flexible hinge model

图 6. 弹性铰模型的内力计算结果



(a) 弯矩图(kN·m)



(b) 轴力图(kN)

Figure 7. Internal force calculation result of shell-spring model

图 7. 壳 - 弹簧模型的内力计算结果

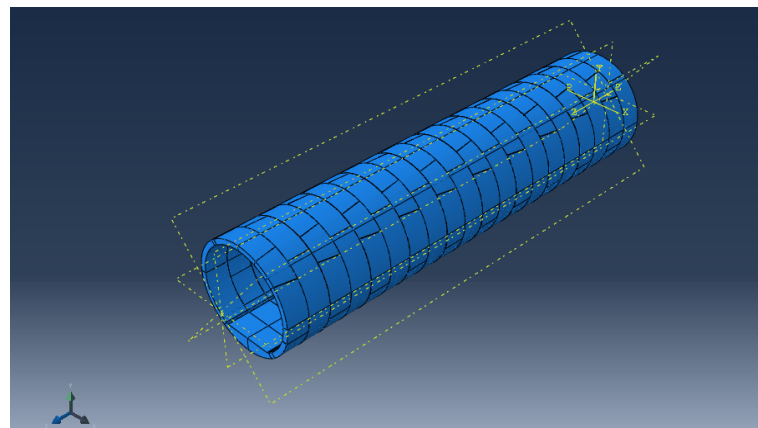


Figure 8. Structural deformation and open-volume analysis model

图 8. 结构变形及张开量分析模型

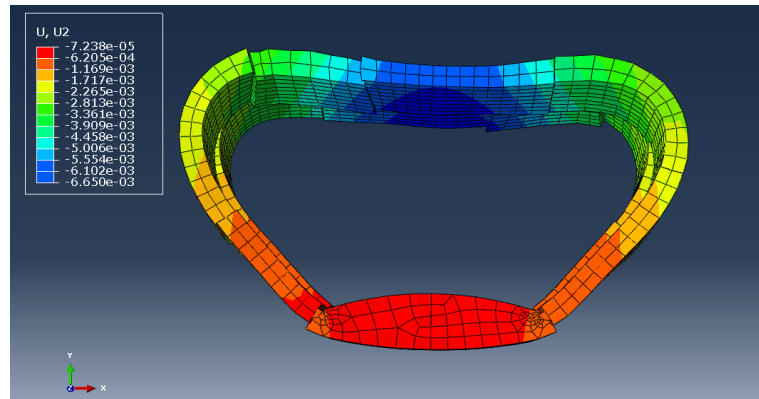


Figure 9. Vertical deformation of solid model structure
图 9. 实体模型结构竖向变形图

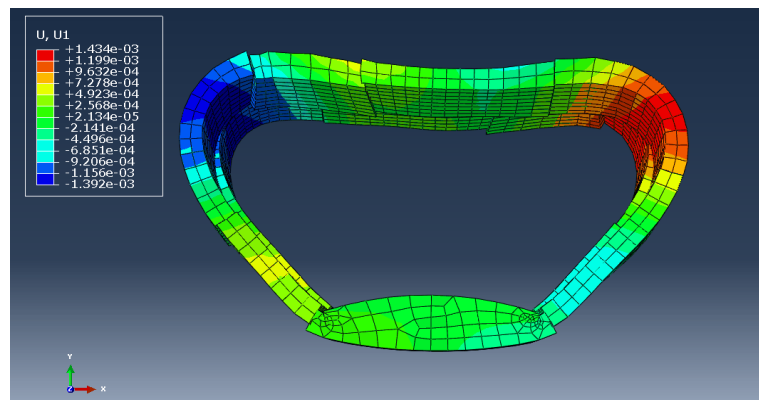


Figure 10. Entity model structure convergence deformation
图 10. 实体模型结构收敛变形图

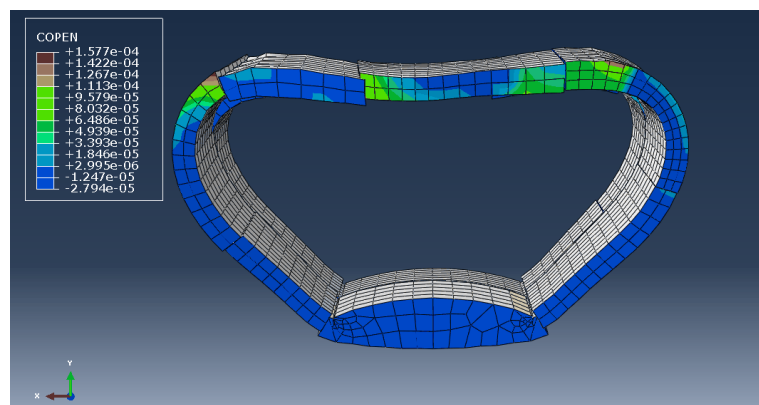


Figure 11. Seam opening amount of solid model
图 11. 实体模型接缝张开量

5.3. 接缝张开量和错位量分析

取上述计算模型中第 10 环与第 11 环的计算结果对接缝张开量进行分析, 放大 450 倍的接缝张开量见图 11, 放大 450 倍的接缝错位量见图 12~图 13。

由图 11~图 13 可见, 管片纵缝最大张开量为 $0.012 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$, 最大错位量为 $0.347 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$;

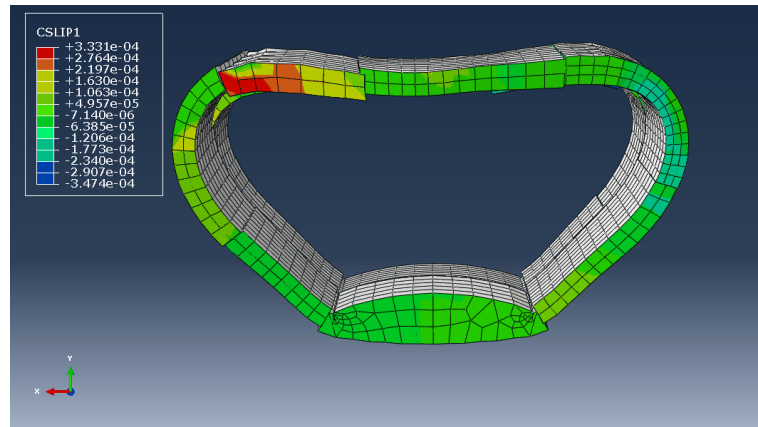


Figure 12. Seam opening amount of solid model

图 12. 实体模型接缝张开量

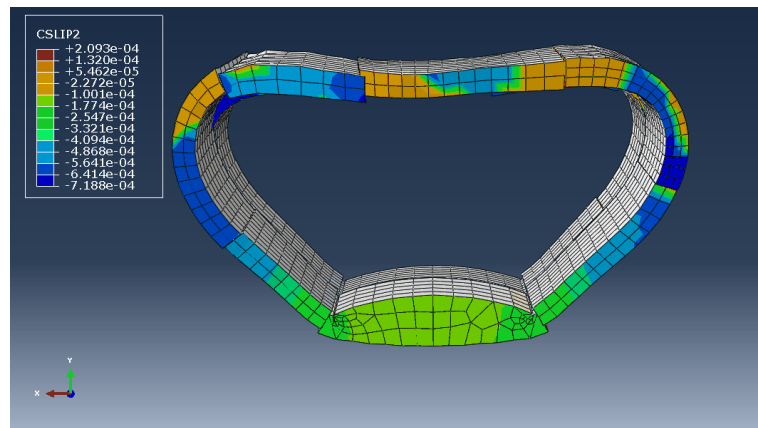


Figure 13. Seam opening amount of solid model

图 13. 实体模型接缝张开量

管片环缝最大张开量为 $0.158 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$ ，最大错位量为 $0.719 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$ ；结合表 2 中拆解段防水密封垫要求，认为盾构拆区域斜井管片纵向接缝及环向接缝处有足够的防水能力。

6. 结语

本文依托内蒙古神华新街台格庙矿区长距离煤矿斜井工程，采用弹性铰圆环模型、壳-弹簧模型对斜井隧道的管片结构内力、变形、接缝张开量及错位量进行了数值模拟分析，结果表明：管片结构具有足够的安全储备，斜井纵向接缝及环向接缝最大张开量、最大错位量均满足设计要求，有足够的防水能力。以上结论为本项目的顺利实施提供了理论支撑。

基金项目

国家科技支撑计划资助项目(2013BAB10B01)。

参考文献

- [1] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 何川. 盾构/TBM 施工煤矿长距离斜井的技术挑战与展望[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 287-297.
- [3] 雷升祥. 斜井 TBM 法施工技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.

-
- [4] 邹春华. 煤矿斜井盾构拆解区域管片力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2016, 45(23): 53-57.
- [5] 李铁成. 盾构斜井管片接缝防水设计及防水性能试验研究[J]. 施工技术, 2016, 45(21): 124-126.
- [6] Working Group No.2, International Tunnelling Association (2000) Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. Tunnelling and Underground Space Technology, 15, 303-331. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00058-4)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org