

# Discussion on Design Technology of Small Curvature Radius Oil and Gas Pipeline Shield Tunnel

Lei Zhang<sup>1\*</sup>, Chunling Yang<sup>1</sup>, Simeng Liu<sup>1</sup>, Dapeng Ding<sup>2</sup>, Hongtao Yuan<sup>1</sup>, Moupeng Hu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang Hebei

<sup>2</sup>Sinopec Gas Company, Beijing

Email: \*zhanglei1@cnpc.com.cn

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In the oil and gas pipeline shield tunnel crossing engineering, the plane view of the tunnel center line is usually a straight line, and the turning curvature radius of the longitudinal section is not less than 1000 m. With the high-speed process of pipeline construction and the increasingly limited construction land, the shield tunnel center line has to adopt curve line. Through the finite element simulation of a curved shield tunneling process, it provides the basis of small curvature shield for reasonable value of ring jacking force, ground settlement and waterproof design of joints. By solving the key problems of the small the curvature radius shield tunnel, the curvature radius exceeds 1000 m, and the arrangement of tunnel center line becomes more flexible, which provides a new idea for the planar linear design of the shield tunnel in the future.

## Keywords

Small Curvature Radius Shield, Thrust Forces of Segment, Land Subsidence, Waterproof Design

---

---

\*通信作者。

# 小曲率半径油气管道盾构隧道设计技术探讨

张 磊<sup>1\*</sup>, 杨春玲<sup>1</sup>, 刘思萌<sup>1</sup>, 丁大鹏<sup>2</sup>, 苑红涛<sup>1</sup>, 胡谋鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

<sup>2</sup>中国石油化工股份有限公司天然气分公司, 北京

Email: \*zhanglei1@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年10月19日; 录用日期: 2020年11月26日; 发布日期: 2020年12月15日

## 摘 要

油气管道盾构隧道穿越工程中, 穿越平面线形通常为直线, 且纵断面转角曲率半径均不小于1000 m。随着管道建设的高速发展和建设用地日益紧张, 盾构隧道线形不得不采用曲线。通过对某曲线盾构掘进过程进行有限元模拟, 为小曲率盾构在环片顶力合理取值、地面沉降量、以及接缝的防水设计上提供了依据; 通过对小曲率盾构几个关键问题的解决, 使盾构隧道曲率半径突破1000 m的限制, 使平面线形布置更为灵活, 为今后盾构隧道平面线形设计提供了新的思路。

## 关键词

小曲率盾构, 环片顶力, 地面沉降, 防水设计

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

盾构隧道具有地层适应性强、地层扰动小、穿越距离长等特点, 已成为油气管道非开挖穿越的一种重要方式。油气管道盾构穿越平面线形通常为直线, 且纵断面转角曲率半径均不小于 1000 m [1]。某油气盾构隧道穿越市区, 由于城市用地日益紧张, 穿越平面路由在平面上进行了多次转角, 且最小曲率半径为 300 m [2]。为确保工程的顺利实施, 特针对该小曲线半径盾构隧道进行分析。

## 2. 工程概述

某油气管道盾构隧道位于市区, 盾构隧道的平面路由政府指定, 穿越轴线建构筑物密集, 超高层建筑比比皆是。盾构隧道长 2745 m, 内径 3.08 m, 平面上共有 4 次水平转角, 依次为: 35.75°、32.8°、23.57°、42.28°, 各处转角的曲率半径分别为 400 m、350 m、500 m、300 m, 如图 1。

隧道穿越地层主要为细砂层和强风化粉砂质泥岩。通过穿越场区地质调查及钻探揭露, 细砂层地质描述为: 黄褐色, 饱和, 中密, 矿物成分以石英、长石、云母等组成, 颗粒均匀, 级配良好, 含黏性土约占 5%~10%左右, 有轻微缩孔现象, 其中含零星砾石, 粒径 10 mm, 含量约 10%, 该层为强透水层, 渗透系数取 30 m/d。粉砂质泥岩地质描述为: 强风化, 棕、棕红色, 矿物成分主要为粘土矿物, 次为长石、石英、云母等。泥质结构, 泥质胶结, 中厚层状, 局部层理较发育, 岩质软, 手扳易断, 失水干裂,

吸水易软化, 岩芯多呈短柱状(<10 cm)、块状及饼状,  $RQD = 0\% \sim 30\%$ , 岩石质量为极差的~差的, 岩体破碎, 该层为中等透水层, 渗透系数取  $0.2 \text{ m/d}$ 。



Figure 1. Plan of shield tunnel

图 1. 盾构隧道平面图

### 3. 问题的提出

由于已建油气管道盾构隧道平面线形均为直线, 且纵断面转角曲率半径不小于  $1000 \text{ m}$ 。而本盾构隧道平面线形为曲线, 且最小曲率半径为  $300 \text{ m}$ , 在设计上会带来三个方面的新问题。

问题一: 直线盾构前进过程中, 盾构环片横断面上会受到盾构机内部(图 2)千斤顶的均匀顶力, 如图 3。而在曲线盾构前进过程中, 为满足盾构转弯的要求, 背离盾构前进侧的环片受到的千斤顶顶力大于转弯侧环片所受的顶力, 且顶力的方向不垂直于环片横断面, 顶力在横断面方向有一侧向分力, 如图 4。故环片将向产生一错台, 错台量是否满足规范的要求, 从而决定了我们对千斤顶顶力的控制[3]。



Figure 2. Inside of shield machine

图 2. 盾构机内部

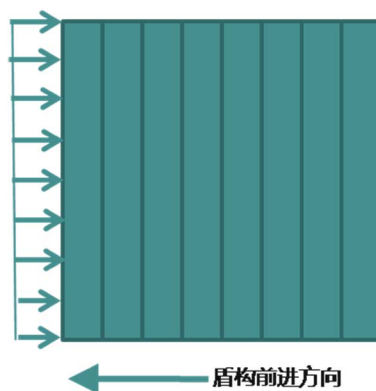


Figure 3. Stress condition of segment of linear shield

图 3. 直线盾构环片受力情况

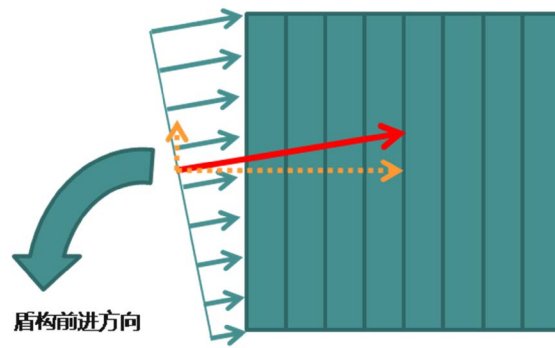


Figure 4. Stress condition of segment of curved shield  
图 4. 曲线盾构环片受力情况

问题二：直线盾构前进过程中，一般情况下盾构开挖断面为圆形，如图 5。而在曲线盾构前进过程汇总，为满足盾构机转弯的要求，通常在左右两侧会使用超挖刀，最终盾构开挖断面为椭圆型，如图 6。曲线盾构的超挖将导致地层损失的加剧。在本工程中，隧道轴线距离一处高层建筑距离仅 9 m，如图 7。而曲线盾构的超挖将导致地层损失的加剧，故应考察施工中地面的沉降对地面的建筑造成的影响[4]。

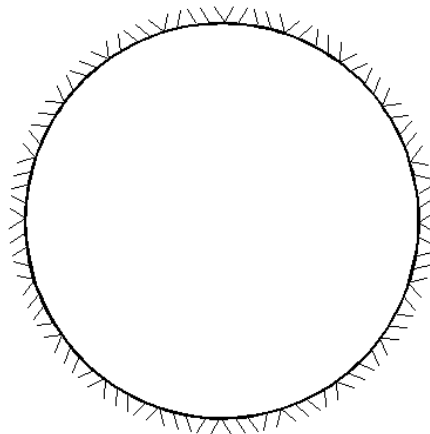


Figure 5. Excavation section of linear shield  
图 5. 直线盾构开挖断面

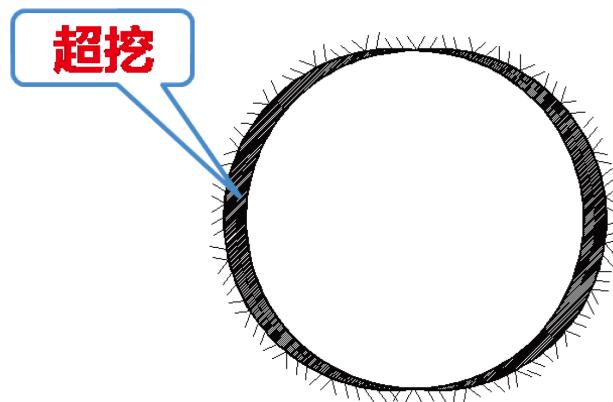


Figure 6. Curved shield excavation section  
图 6. 曲线盾构开挖断面

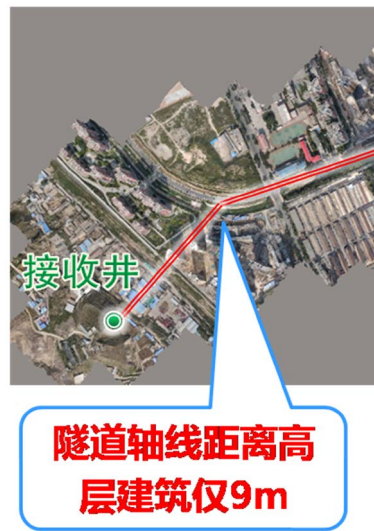


Figure 7. Curved shield excavation section  
图 7. 曲线盾构开挖断面

问题三：根据《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423-2013)规定，盾构隧道防水等级为二级。直线盾构环片与环片之间缝隙较小且均匀，如图 8，通常环片间采用常规的防水方案(弹性橡胶密封垫单道防水方案)即可满足二级防水的要求，如图 9。而曲线盾构环片与环片之间缝隙并不均匀，曲线凸出侧的缝隙将大于凹陷侧，且远远大于直线盾构环片之间的缝隙，如图 10，故曲线隧道防水方案的选择也是盾构隧道设计的一个关键[5]。

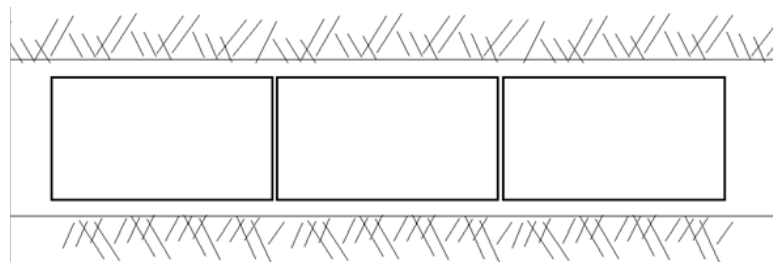


Figure 8. Schematic diagram of gap between segment of linear shield  
图 8. 直线盾构环片与环片之间缝隙示意图

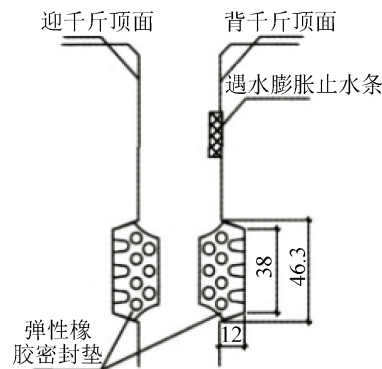


Figure 9. Single waterproof scheme of elastic rubber gasket  
图 9. 弹性橡胶密封垫单道防水方案

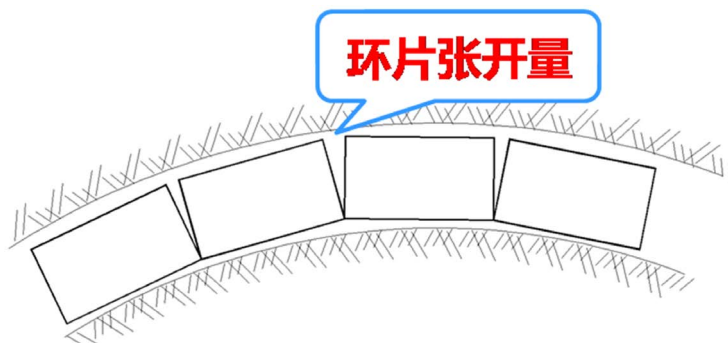


Figure 10. Schematic diagram of gap between segments of curved shield machine

图 10. 曲线盾构环片与环片之间缝隙示意图

## 4. 盾构掘进过程有限元模拟

### 4.1. 模型的建立[6]

对曲线盾构掘进及环片安装的施工过程进行有限元实体建模,开挖长度取 50 环管片长度,土体尺寸取隧道外径外 5 倍隧道开挖直径,曲线曲率半径为 300 m。对环片分别施加顶力为  $250 \text{ t/m}^2$ 、 $350 \text{ t/m}^2$ 、 $450 \text{ t/m}^2$ 、 $550 \text{ t/m}^2$ ,通过对模拟结果进行分析,找出顶力的合理取值,找出小曲率盾构设计针对性措施。

### 4.2. 计算结果

#### 4.2.1. 环片顶力取值

环片错台量计算[7]结果分别见图 11~14。环片顶力  $550 \text{ t/m}^2$ 、 $450 \text{ t/m}^2$ 、 $350 \text{ t/m}^2$ 、 $250 \text{ t/m}^2$  时,环片错台量分别为: 22.7 mm、14.4 mm、6.4 mm、4.7 mm [7] [8]。GB 50446-2008 根据《盾构法隧道施工与验收规范》(GB 50446-2008)规定,错台量限值为 8 mm [9],故顶力取值  $450 \text{ t/m}^2$  和  $550 \text{ t/m}^2$  不满足规范要求。考虑到施工速度,环片顶力取值为  $350 \text{ t/m}^2$  较为合理。

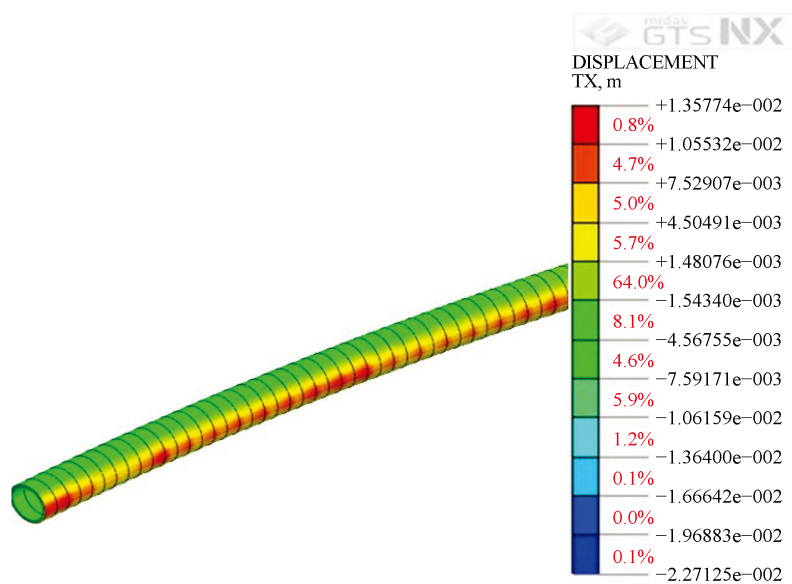


Figure 11. Dislocation of segments (Jacking Force  $F = 550 \text{ t/m}^2$ )

图 11. 环片错台量(顶力  $F = 550 \text{ t/m}^2$ )



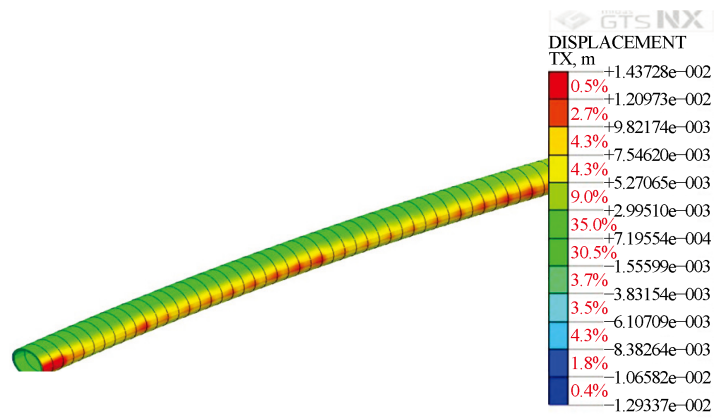


Figure 12. Dislocation of segments (Jacking Force  $F = 450 \text{ t/m}^2$ )  
 图 12. 环片错台量(顶力  $F = 450 \text{ t/m}^2$ )

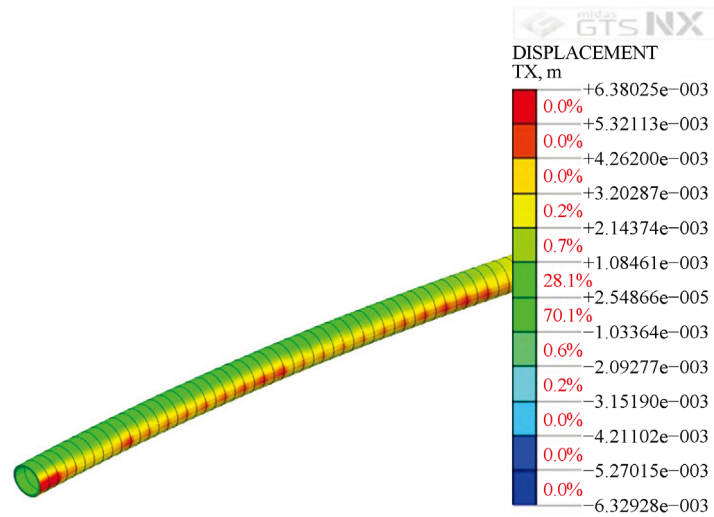


Figure 13. Dislocation of segments (Jacking Force  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )  
 图 13. 环片错台量(顶力  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )

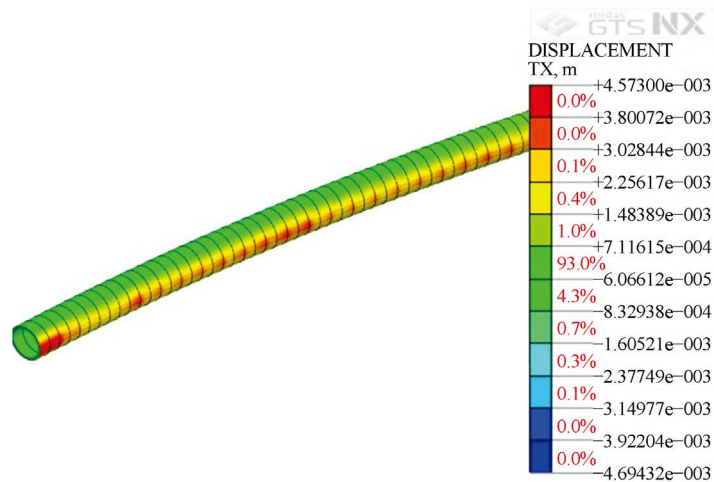


Figure 14. Dislocation of segments (Jacking Force  $F = 250 \text{ t/m}^2$ )  
 图 14. 环片错台量(顶力  $F = 250 \text{ t/m}^2$ )

#### 4.2.2. 地面沉降校核

在  $350 \text{ t/m}^2$  顶力作用下, 地面沉降量计算结果见图 15。在盾构隧道顶约 20 m 位置地面沉降量最大为 16 mm, 满足行业内对于地面沉降量限值 30 mm 的要求[10], 故可以判定, 本工程盾构施工对地面建筑物不会造成影响。

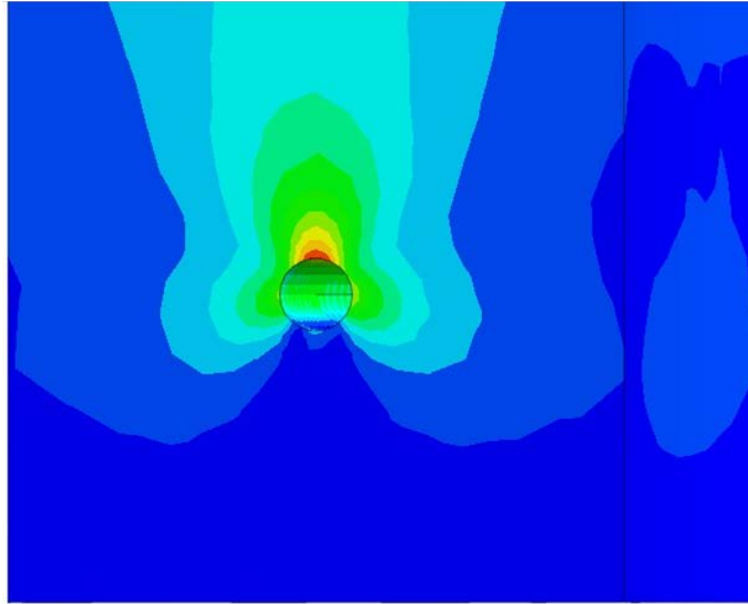


Figure 15. Nephogram of soil settlement (Jacking Force  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )  
图 15. 土体沉降云图(顶力  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )

#### 4.2.3. 环片防水设计

常用的环片防水形式有单道防水、双道防水和三道防水[11], 如图 16~18。在  $350 \text{ t/m}^2$  顶力作用下, 环片的张开量计算结果见图 19, 最大张开量为 7 mm。通过三种接缝防水方案试验性能对比, 张开量小于 10 mm 时, 双道防水和三道防水均能满足盾构隧道二级防水等级的要求。考虑到三道防水对截面受力的削弱太大, 故选用双道防水。

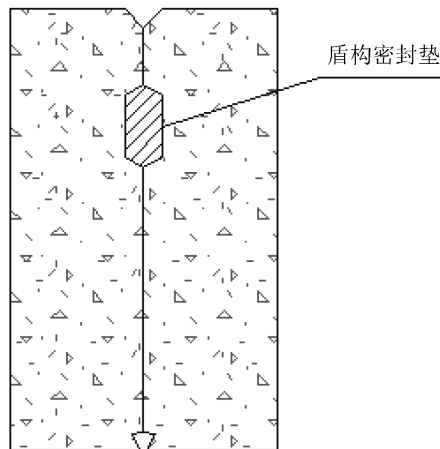


Figure 16. Single waterproof  
图 16. 单道防水



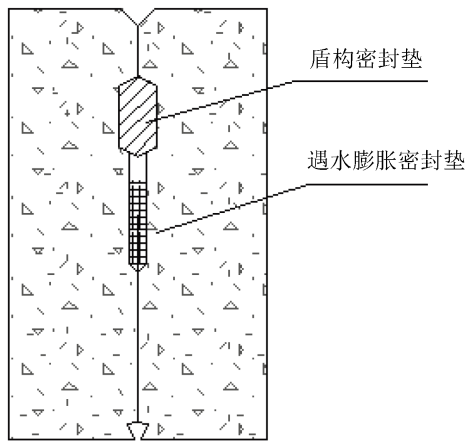


Figure 17. Double waterproof  
图 17. 双道防水

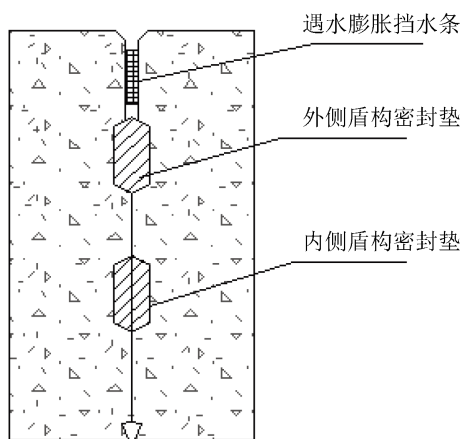


Figure 18. Three waterproof  
图 18. 三道防水

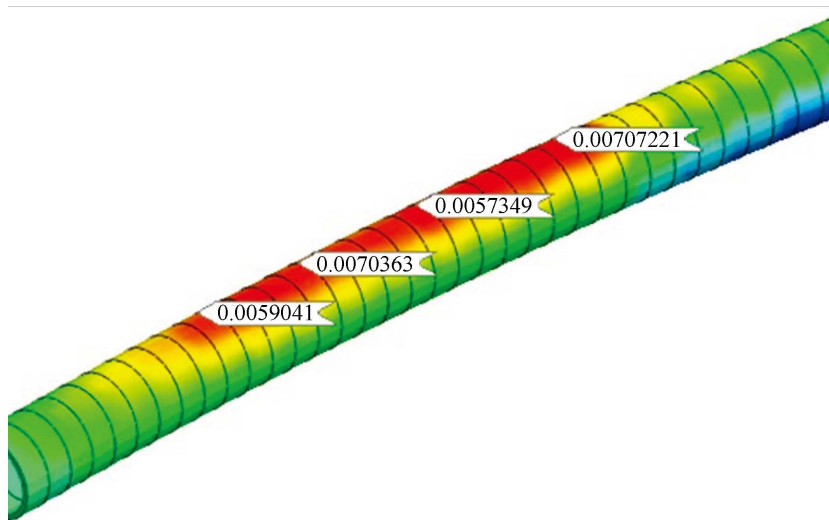


Figure 19. Segment opening (Jacking Force  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )  
图 19. 环片张开量(顶力  $F = 350 \text{ t/m}^2$ )

## 5. 结论

本文通过对曲线盾构掘进过程有限元模拟, 为小曲率盾构在环片顶力合理取值、地面沉降量、以及环片接缝的防水设计上提供了依据; 对小曲率盾构几个关键问题的解决, 使盾构隧道曲率半径突破 1000 m 的限制, 使平面线形布置更为灵活, 为今后盾构隧道平面线形设计提供了新的思路。

## 参考文献

- [1] 史航, 程梦鹏, 张文伟, 等. GB 50423-2013 油气输送管道穿越工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 12-19.
- [2] 吴海彬, 何川, 晏启祥, 等. 通用楔形管片盾构隧道曲线段线路拟合算法及应用[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 90-98.
- [3] 小泉 淳, 管林星, 朱合华, 等. 盾构隧道管片设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 周诗俊, 王金安. 曲线隧道盾构引起地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 909-913, 971.
- [5] 赵运臣, 肖龙鸽, 刘招伟, 等. 武汉长江隧道管片接缝防水密封垫设计与试验研究[J]. 隧道建设, 2008, 28(5): 570-575.
- [6] 张宏洲, 张金伟, 翟建华. 盾构法隧道等代层参数反演的 ANSYS 方法[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 8-10, 27.
- [7] Working Group No.2, International Tunnelling Association (2000) Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. Official Report of the International Tunneling Association.
- [8] [日]土木学会, 主编, 隧道标准规范[盾构篇]及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] 张庆风, 王甦, 万姜林, 等. GB 50446-2008 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [10] 葛春辉, 王承德, 余彬泉, 等. CECS 246-2008 给水排水工程顶管技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 10-1.
- [11] 何太洪, 周冠南, 刘训华. 杭州地铁 1 号线越江隧道管片防水密封垫优化研究[J]. 地下工程与隧道, 2009(S1): 41-45.