

# 新管幕工法隧道开挖过程风险管理研究

韩子安

沈阳地铁集团有限公司, 辽宁 沈阳  
Email: 824612818@qq.com

收稿日期: 2021年6月10日; 录用日期: 2021年6月24日; 发布日期: 2021年7月9日

## 摘要

本文依托下穿铁路站场的NTR新管幕工法隧道工程, 对不同的隧道横断面形势及施工方案进行了对比分析, 探究顶管阶段和开挖阶段的地表沉降规律及结构体系受力特征。研究表明: 矩形结构形式下地表最大沉降量达到10.66 mm, 拱形结构形式下的最大沉降量则为13.84 mm, 相比前者地表沉降量增大了29.8%。矩形结构形式下顶管阶段产生的地表沉降量达到总沉降量的69.5%, 而开挖阶段产生的沉降量仅占到30.5%; 拱形结构形式下由于钢管数量较少, 在顶管阶段产生的地表沉降量达到总沉降量的54.9%, 而开挖阶段产生的沉降量仅占到45.1%。通过分析可见, 从地层沉降控制方面考虑, 应优先考虑矩形结构形式。

## 关键词

NTR (New Tubular Roof)新管幕法, 变形特性

# Study on Risk Management during Tunnel Excavation with NTR Construction Method

Zian Han

Shenyang Metro Corporation, Shenyang Liaoning  
Email: 824612818@qq.com

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 9<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, based on the NTR new pipe curtain construction method of tunnel engineering under the railway yard, the cross-section situation and construction scheme of different tunnels are

compared and analyzed, and the ground settlement law and the stress characteristics of the structural system in the pipe-jacking stage and the excavation stage are explored. The results show that the maximum surface settlement of the rectangular structure is 10.66 mm, while that of the arch structure is 13.84 mm, which increases by 29.8% compared with the former. Under the rectangular structure, the surface settlement in the pipe jacking stage reaches 69.5% of the total settlement, while the settlement in the excavation stage only accounts for 30.5%. Due to the small number of steel tubes in the arch structure, the surface settlement generated in the pipe jacking stage reaches 54.9% of the total settlement, while the settlement generated in the excavation stage only accounts for 45.1%. It can be seen from the analysis that the rectangular structure should be given priority in the ground settlement control.

## Keywords

New Tubular Roof, Tunnel Construction, Subsidence Settlement

Copyright © 2021 by author(s) 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

城市隧道的建设位于城市的繁华区域, 为避免中断地面交通, 多数地铁车站都结合地质情况采用浅层埋设的地下线路。隧道开挖过程将不可避免地扰动地下土体应力状态, 使其失去原有的平衡状态, 从而表现为地层的移动与变形, 通常把因开挖形成的应力调整涉及有明显位移的地层范围称为施工影响范围。对于浅埋隧道, 施工开挖引起的影响范围往往延伸至地表, 形成施工沉降槽, 同时还对周边的路面、地下管线、既有建(构)筑物等基础设施造成影响, 严重者会影响到建(构)筑物的正常使用, 甚至出现倒塌等事故。

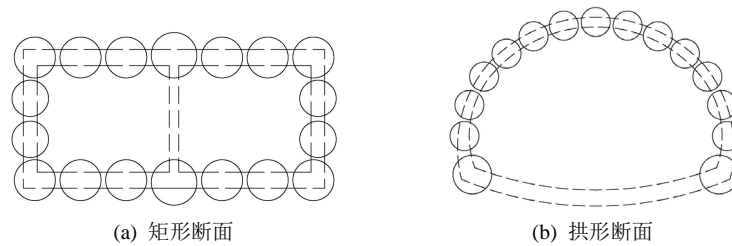
新型管幕法(New Tubular Roof Method)是我国从韩国引进的新型地下结构暗挖技术。新管幕工法是对传统管幕的改进, 所顶钢管均为大直径钢管(直径一般在 1800 mm 以上)。采用大直径钢管的目的, 就是可以在施工后期直接将拟建结构物外轮廓(结构底板、顶板、墙体)施做于所顶钢管形成的管排内, 从而完成地下结构的构筑[1]。

阎石等[2]人对新管幕工法大直径钢管顶进施工力学特性进行了数值模拟分析。结果表明, 新管幕工法顶管过程是地层应力及钢管受力不断变化最终达到平衡的动态过程, 施工顺序对钢管受力及地层影响较大。孙智勇[3]对新管幕工法施工技术要点进行了分析研究。

本文依托下穿铁路站场的 NTR 新管幕法地下通道工程, 通过 Flac<sup>3D</sup> 数值软件对两种不同的隧道断面方案进行变形、受力分析, 为工程实际施工方案比选参考依据。

## 2. 工程概况及比选方案

某城市拟采用 NTR 新管幕工法建设下穿铁路站场的地下通道。地下通道标准段跨度越为 13 m, 底板埋深则 12 m。结构形式采用 NTR 新管幕板系结构, 横断面结构形式分别选用矩形断面和拱形断面进行对比分析; 其中矩形断面的顶板及底板厚度为 0.7 m, 边墙厚度为 0.6 m, 由于跨度较大, 中间布设立柱, 纵向间距为 0.5 m, 见图 1(a)。拱形断面的厚度则 0.6 m, 仰拱厚度为 1 m, 为防止出现开挖过程中两侧拱脚发生整体沉降或者地基承载力不足, 将拱脚处钢管直径选取为 2.2 m, 其他均为 1.8 m, 见图 1(b)。



**Figure 1.** Structural section form of NTR construction method  
**图 1.** NTR 工法结构断面形式

主要施工工序:

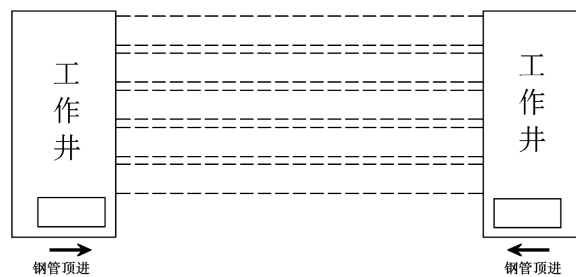
第 1 步: 由两端工作井分节顶入钢管(每节长度约为 6 m), 见图 2。顶管顺序为由上至下, 由中间向两侧进行顶进, 钢管顶管过程中每顶进 1 m 测量一次钢管的顶进方向, 如有偏差应及时进行纠偏, 见图 3(a)。

第 2 步: 钢管顶进结束后, 进行壁后注浆, 加固管间土体, 图 3(b)。

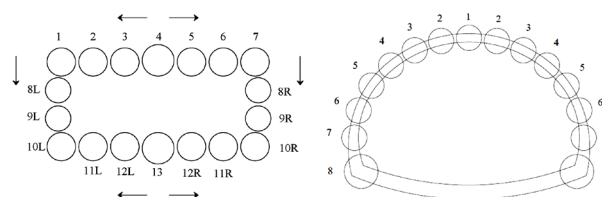
第 3 步: 注浆结束后, 进行钢管切割支护施工, 为保证施工安全性, 钢管切割需进行跳段施工, 切割后立即焊接止水钢板和固定钢板, 形成支护体系; 第二次切割其余部分, 图 3(c)。

第 4 步: 钢管切割结束后, 分段安装结构内模板、排气管、补偿注浆管及混凝土浇筑管, 按分段进行钢筋绑扎施工。底部钢管钢管切割支护及模板、配筋施工完毕后, 按照从下到上、由里到外的施工原则进行混凝土浇筑施工, 图 3(d)。

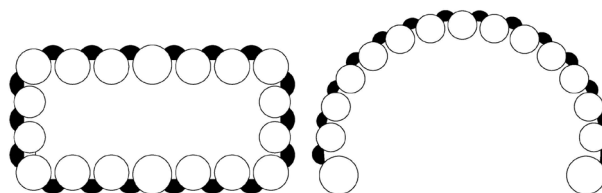
第 5 步: 混凝土结构经过养护达到设计强度后, 进行内部土方开挖。



**Figure 2.** Schematic diagram of steel pipe jacking plan  
**图 2.** 钢管顶进平面示意图



(a) 钢管顶进



(b) 管间注浆

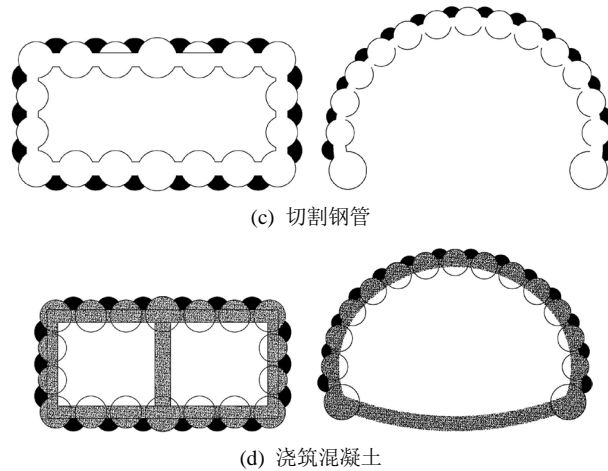


Figure 3. Schematic diagram of main construction steps of NTR tunnel  
图 3. NTR 隧道主要施工步序示意图

### 3. 施工过程数值模拟分析

#### 3.1. 计算模型及边界条件

为研究 NTR 隧道施工过程中产生的地层变形规律及对周边环境的影响，基于 Flac<sup>3D</sup> 软件建立三维数值计算模型，矩形断面模型见图 4，拱形断面模型见图 5。其中，顶管阶段产生的力学效应参照已有文献的研究成果，采用等效应力释放方法进行模拟[4]。模型中上部覆土厚度为 6 m。模型长度(z 轴) 50 m，宽度(x 轴) 100 m，高度(y 轴) 50 m。土体用摩尔库伦模型模拟，钢管和钢筋混凝土采用线弹性模型模拟，混凝土强度等级为 C30。土体弹性模量取勘察报告提供的压缩模量的 3 倍。模型的边界条件为，除地表为自由边界外，其他面均为法向约束。

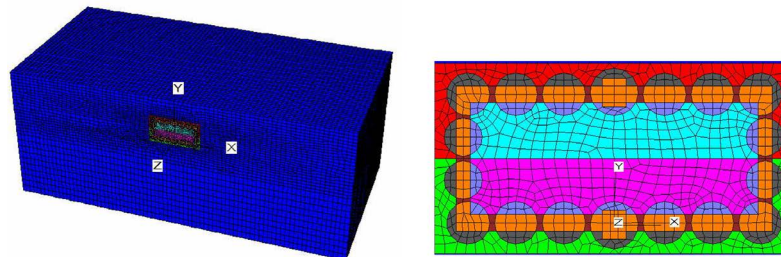


Figure 4. Schematic diagram of rectangular section model  
图 4. 矩形断面模型示意图

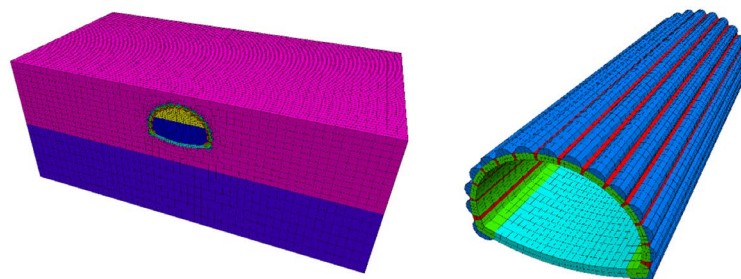


Figure 5. Schematic diagram of arch section model  
图 5. 拱形断面模型示意图

土体及结构等材料的力学参数根据地质勘查报告、相关工程经验及规范选取，具体取值见表 1。

Table 1. Values of soil layer and structural parameters

表 1. 土层及结构参数取值

材料种类	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\nu$	弹性模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi$ (°)	本构关系
粉质粘土	18.8	0.30	20	20	11	摩尔库伦
中粗砂	19.5	0.29	77	3	30.6	
砾砂	19.3	0.26	90	2	34	
圆砾	20.5	0.25	97	2	34.2	
砾砂	20	0.26	90	2	34	
圆砾	20.5	0.23	97	2	35	
钢管	78	0.3	206,000	/	/	弹性模型
二衬结构	25	0.2	30,000	/	/	

### 3.2. 计算过程分析

整个计算过程主要分为两个阶段，钢管顶进阶段和开挖阶段。钢管顶进过程的计算云图见图 6。矩形横通道顶排钢管顶进施工过程中地表沉降发展迅速，其地层变形速率较大。与此相比，两侧边墙钢管顶进施工引起的地面沉降的发展相对缓慢，但是该阶段的地表沉降槽宽度加大。当顶板管幕顶进结束时，地表最大沉降为 2.87 mm，两侧边墙管幕顶进结束时地表最大沉降增大至 3.77 mm，表明，该阶段所产生的沉降较小；当底板管幕顶进结束时，地表最大沉降量为 7.41 mm。顶板、边墙和底板管幕施工阶段所产生的地表沉降分别占到 38.7%、12.14%和 49.12%，表明顶板和底板的管幕施工阶段对周边环境影响较大。矩形断面横通道钢管顶进过程引起的地表沉降见图 7。

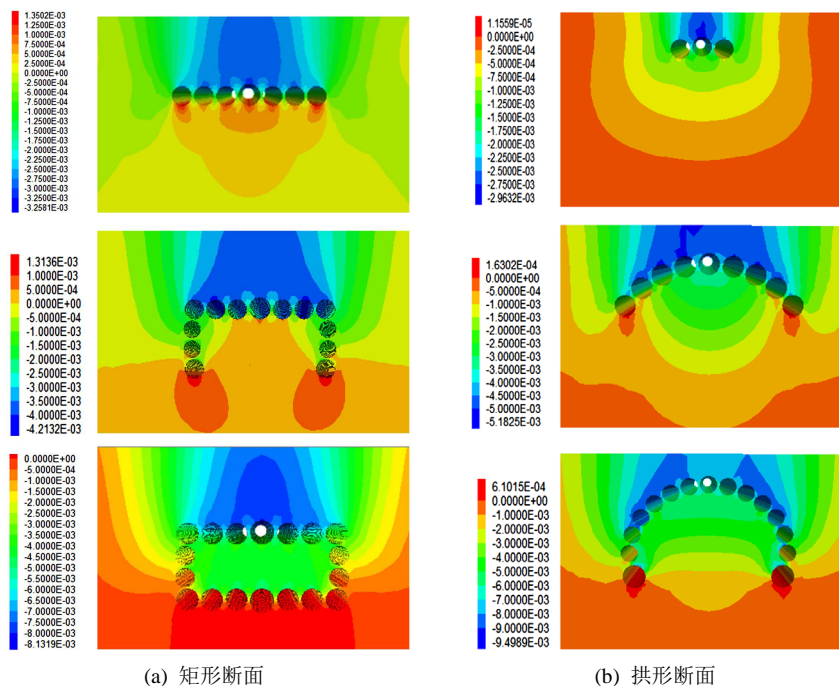
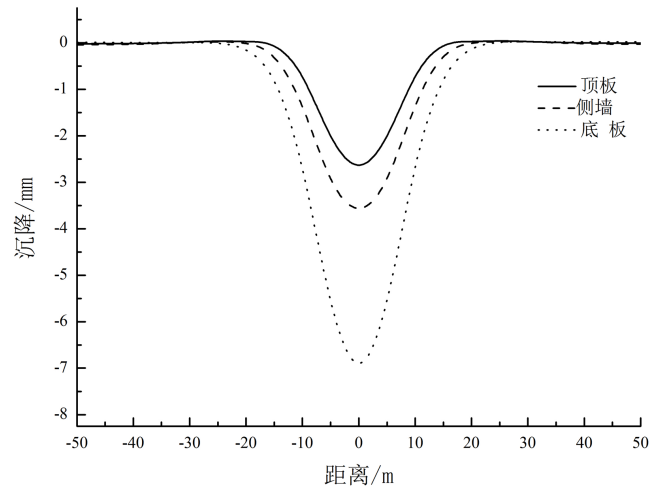
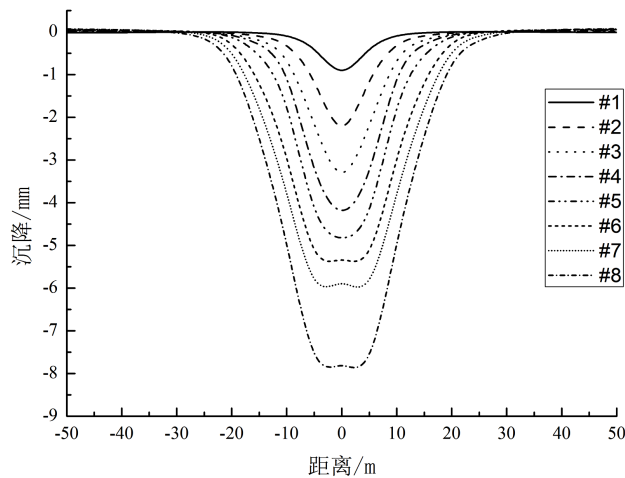


Figure 6. Cloud picture of surface settlement during steel pipe jacking  
图 6. 钢管顶进过程中的地表沉降云图



**Figure 7.** Surface settlement curve of rectangular cross-section pipe jacking  
**图 7.** 矩形断面顶管的地表沉降曲线

拱形断面一共由 15 根钢管组成，与矩形断面相比减少了 3 根钢管；但是由于埋深较浅，拱形断面在顶管阶段产生的地表沉降较大，地表最大沉降量达到 7.6 mm，而矩形断面结构形式下最大地表沉降量为 7.41 mm。在钢管顶进阶段，顶部#1、#2、#3 钢管和拱脚位置的#8 钢管在顶进过程中引起的地表沉降较大，主要原因为#1、#2、#3 钢管的埋深较浅，地层移动易延伸至地表，而#8 钢管的直径较大，顶进过程中对地层扰动较大，引起既有钢管在拱脚位置发生整体沉降，地表沉降曲线也逐渐发展为类似于双线隧道施工引起的地表沉降模式。拱形断面的顶管施工阶段产生的地表沉降，见图 8。由图可以看出，随着钢管的顶进，地表沉降槽宽度不断增大，并且两侧边墙和拱脚处钢管顶进时地表沉降量最大值由隧道中心线位置逐渐向两侧发生移动，最终发展为双线隧道的地表沉降模式。



**Figure 8.** Surface settlement curve of arch section pipe jacking  
**图 8.** 拱形断面顶管的地表沉降曲线

开挖阶段首先对钢管进行切割，然后在管内安装模板，浇注永久支护结构。矩形断面数值模型中，当永久支护结构浇注至 5 m (即永久支护结构超前开挖面 5 m) 时，按上、下台阶法进行开挖土方，上台阶长度为 2 m。NTR 隧道纵向， $z = -25$  m 为监测断面。NTR 隧道施工过程中地面沉降主要发生在顶管阶段，顶管结束时地表最大沉降量达到 7.41 mm，而开挖结束时最终沉降量达到 10.66 mm。顶管阶段所产生的地表

沉降占到总沉降的 69.5%，尤其在顶板和底板钢管顶进阶段所产生的沉降较为显著，而开挖阶段仅占到 30.5%。开挖阶段的地表沉降云图，见图 9。不同施工阶段的地表沉降曲线见图 10。施工结束后，顶板在最大拉应力达到 1.99 MPa，位于跨中受拉区，而底板最大拉应力则为 1.51 MPa，同样位于跨中位置，见图 11。

拱形断面钢管顶进结束时，沉降量达到 7.6 mm，当上台阶开挖面通过断面(Z = -25 m)时沉降量达到 9.8 mm，而下台阶通过该断面时沉降量达到 10.6 mm，隧道贯通时最终沉降量达到 13.84 mm。开挖阶段的地表沉降云图，见图 9。不同施工阶段的地表沉降曲线，见图 12。开挖结束后，衬砌最压拉应力位于拱腰位置，达到 5.3 MPa，而最大拉应力在拱顶位置，大小为 2.8 MPa。由于拱形断面跨度较大，没有设中柱，导致支护结构受力较大，拱部最大拉应力超出混凝土抗拉强度，有可能出现开裂现象；可以适当加大支护结构的厚度。隧道支护结构的受力状态，见图 13。

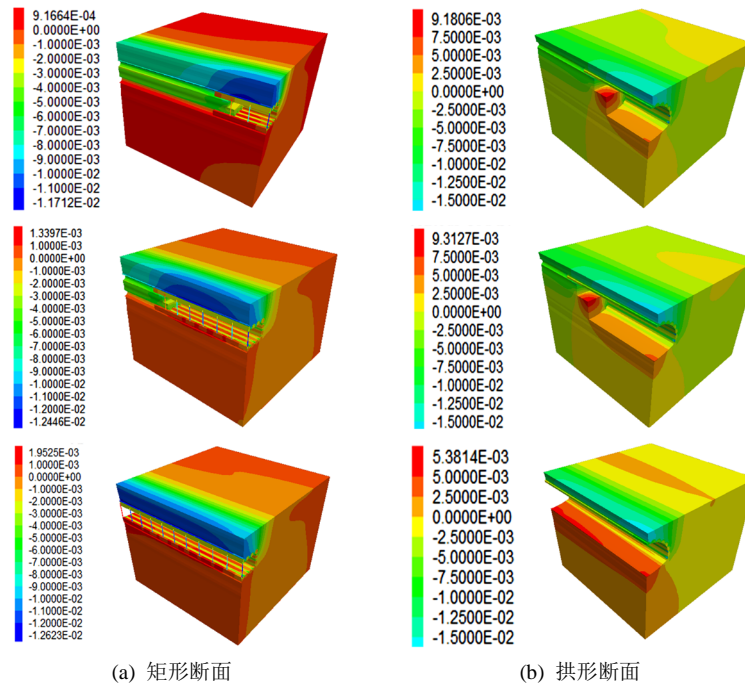


Figure 9. Cloud picture of surface subsidence in excavation stage  
图 9. 开挖阶段的地表沉降云图

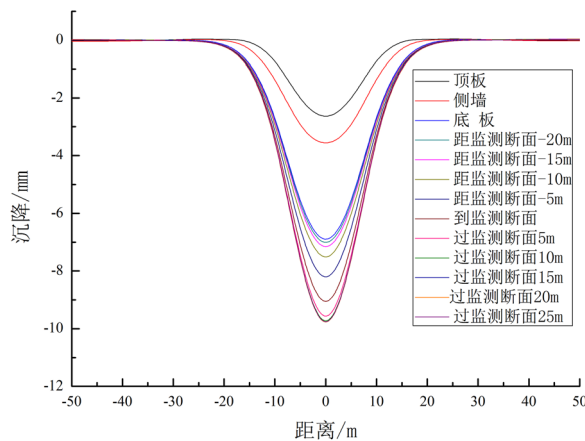


Figure 10. Surface settlement curves of rectangular section at different construction stages  
图 10. 矩形断面不同施工阶段的地表沉降曲线

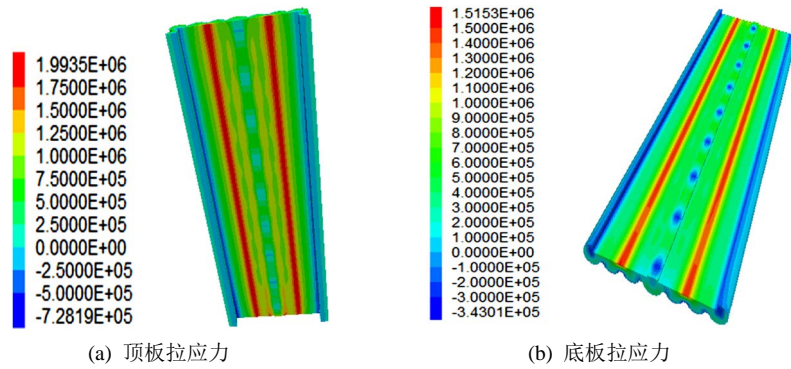


Figure 11. Stress state of rectangular cross-section structure  
图 11. 矩形断面结构受力状态

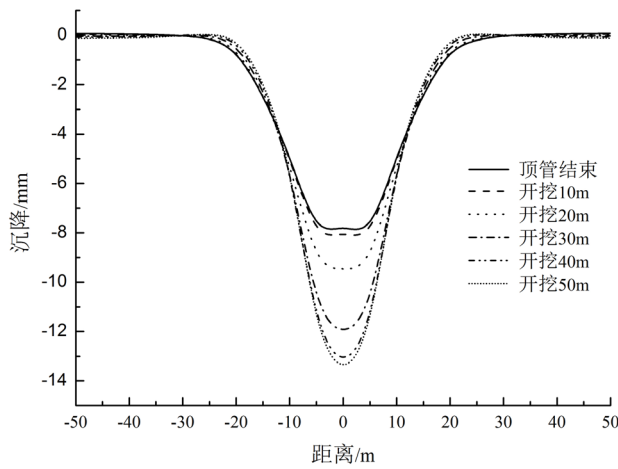


Figure 12. Surface settlement curves of arch section in different excavation stages  
图 12. 拱形断面不同开挖阶段的地表沉降曲线

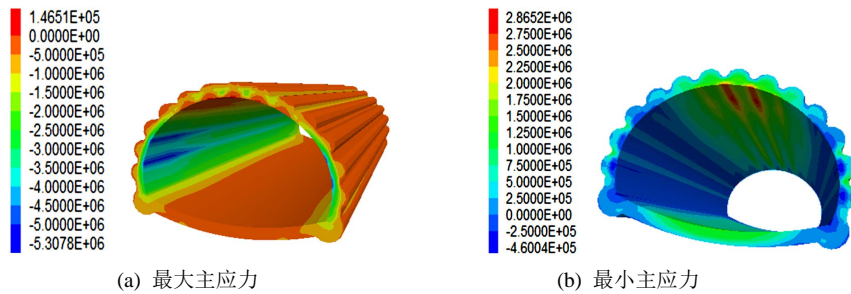


Figure 13. Stress state of arched section structure  
图 13. 拱形断面结构受力状态

### 3.3. 对比分析

两种结构形式下的地表沉降对比曲线，见图 14。隧道贯通时，矩形结构形式下地表最大沉降量达到 10.66 mm，拱形结构形式下的最大沉降量则为 13.84 mm，相比前者地表沉降量增大了 29.8%。矩形结构形式下顶管阶段产生的地表沉降量达到总沉降量的 69.5%，而开挖阶段产生的沉降量仅占到 30.5%；拱形结构形式下由于钢管数量较少，在顶管阶段产生的地表沉降量达到总沉降量的 54.9%，而开挖阶段产生的沉降量仅占到 45.1%，见图 15。从沉降角度来看，拱形断面的沉降量较大，其原因主要有两方面：1) 拱



形结构形式下的埋深较小,地层移动易延伸至地表;2)拱形结构形式下无需设置中柱,所以导致开挖阶段的沉降量相对较大。

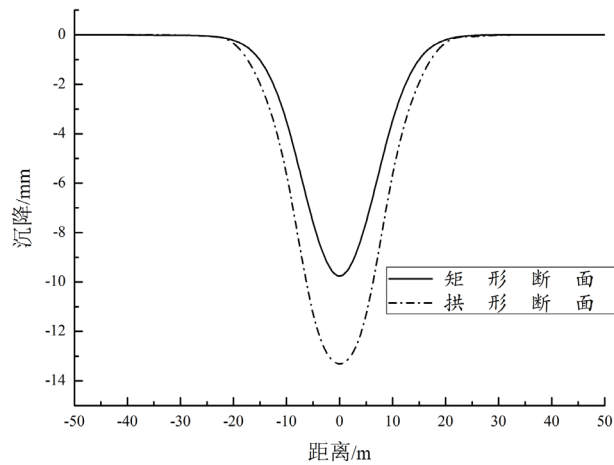


Figure 14. Comparison of surface settlement curve at the end of construction

图 14. 施工结束时地表沉降曲线对比图

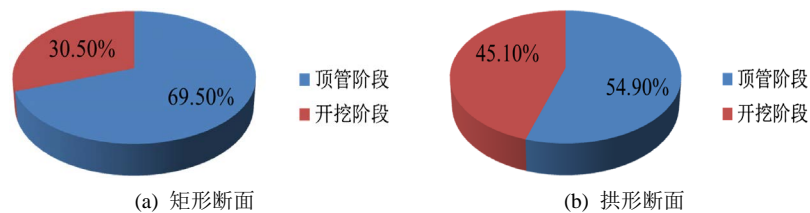


Figure 15. Settlement proportion of different construction stages

图 15. 不同施工阶段所占的沉降比例

#### 4. 结论

1) 矩形结构形式在顶管阶段产生的地表沉降量为总沉降量的 69.5%，而开挖阶段产生的沉降量仅占到 30.5%；

2) 拱形结构形式下顶管阶段产生的地表沉降量达到总沉降量的 54.9%，而开挖阶段产生的沉降量仅占到 45.1%；

3) 矩形结构形式下地表最大沉降量达到 10.66 mm，拱形结构形式下的最大沉降量则为 13.84 mm，相比前者地表沉降量增大了 29.8%。基于控制地层沉降方面考虑，应优先考虑矩形断面结构形式方案，降低结构埋深。

#### 参考文献

- [1] 邢凯, 陈涛, 黄常波. 新管幕工法概述[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(8): 63-67.
- [2] 阎石, 金春福, 钮鹏. 新管幕工法大直径钢顶管施工力学特性数值模拟分析[J]. 施工技术, 2009(S2): 376-380.
- [3] 孙智勇. 新管幕法的工程应用与技术要点分析[J]. 现代城市轨道交通, 2013(4): 48-51.
- [4] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 黄书岭. 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1174-1180.