

# Numerical Simulation of Soil Nailing Wall Support and Foundation Pit Deformation

## —Taking the Foundation Pit Support of Meixi Lake Project of Changsha Zhongjian as an Example

Qingnian Li

Guangxi Coal Geology Bureau, China Coal Geology Bureau, Liuzhou Guangxi  
Email: liqingnian@126.com

Received: Jun. 14<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 20<sup>th</sup>, 2020

### Abstract

In this paper, taking the foundation pit project of No. 1 Meixi (block 3b) of Changsha Zhongjian as an example, through the preliminary geological investigation and multi scheme argumentation, the preliminary soil nailing wall supporting structure and the foundation pit supporting scheme of sloping hanging net and plain spraying are determined. The FLAC3D is used to simulate the supporting scheme, and the deformation and displacement of the foundation pit soil during the excavation under the condition of adopting soil nailing wall are analyzed. The field monitoring data are compared. The numerical simulation results show that when the excavation reaches the bottom of the foundation pit, the horizontal displacement value of the middle and upper part of the foundation pit reaches the maximum, Section 1 is 27.01 mm, Section 2 is 26.46mm and Section 3 is 28.16 mm. They are 3.4‰, 4.4‰, 3.5‰ of the excavation depth of the foundation pit respectively, which meet the requirements of the specification. When excavating a uniform depth, the horizontal displacement decreases gradually with the increase of distance from the edge of the foundation pit; when looking from the top to the bottom along the vertical direction of the foundation pit, the horizontal displacement line increases to the maximum and then decreases. The maximum horizontal displacement of the three sections did not exceed 8 cm of the design value. Therefore, the shape of foundation pit and supporting parameters designed by theory are reasonable and reliable. After the first several steps of excavation of each section, the shape of the settlement curve of the monitoring point is similar, and after the last step of excavation, the shape changes obviously. Section 2 and Section 3 did not settle in the three or four steps before the excavation of the foundation pit edge, but increased. However, after the excavation of the foundation pit, there was a trend of settlement near the edge of the foundation pit. The first four steps of excavation decrease gradually with the increase of distance from the foundation pit. After the fifth step of excavation is stable, the settlement near the edge of the foundation pit becomes slow, and the settlement around 2 m from the edge of the foundation pit reaches the maximum. The final settlement curve of the three sections is basically the same shape, similar to the "spoon" shape. The quantities of the maximum settlement of the three sections are 10.64 mm, 3.4 mm and 11.25 mm respectively, which are 1.33‰, 0.56‰, 1.4‰ of the excavation depth, meeting the specification requirements. The maximum settlement of the foundation pit is about 2 m away from the edge of the foundation pit. Small settlement has little impact on surrounding buildings and highways.

## Keywords

Foundation Pit Support, Soil Nailing Wall Support, Deformation, Displacement

# 土钉墙支护及基坑变形数值模拟

## ——以长沙中建梅溪湖项目为例

李庆年

中国煤炭地质总局广西煤炭地质局, 广西 柳州

Email: liqingnian@126.com

收稿日期: 2020年6月14日; 录用日期: 2020年7月13日; 发布日期: 2020年7月20日

## 摘要

本文以长沙中建梅溪一号(3B地块)基坑工程为例,通过前期的地质调查、多方案论证,确定了初步的土钉墙支护结构和放坡挂网素喷的基坑支护方案,应用FLAC3D对支护方案模拟,模拟分析了采用土钉墙支护条件下,基坑开挖过程中基坑土体的变形及位移情况,并与现场监测数据做了对比。数值模拟结果显示当开挖到基坑底部时,基坑中上部水平位移值达到最大,剖面一为27.01 mm、剖面二26.46 mm、剖面三为28.16 mm。分别为基坑开挖深度的3.4‰、4.4‰、3.5‰,符合规范要求。开挖统一深度时,随着距离基坑边缘距离的增加,水平位移逐渐减小;沿着基坑垂直方向由上向下看,水平位移线增大达到最大之后再减小。三个剖面的最大水平位移都没有超过设计值的8 cm。所以说明理论设计的基坑形状、支护参数合理可靠。每个剖面前几步开挖后,监测点的沉降曲线形状相似,最后一步开挖后形状变化明显。剖面2和剖面3在基坑边缘基坑开挖前三、四步没有沉降,反而出现了上升的现象,但是在基坑开挖结束后,基坑边缘附近还是表现出沉降的趋势。剖面1基坑表面各测点表现出一一直沉降,开挖的前四步随着距离基坑的距离增加沉降量逐渐减小,第五步开挖稳定后基坑边缘附近沉降变缓慢,而在距基坑边缘2 m左右沉降量达到最大;三个剖面最终的沉降曲线形状基本相同,类似于“勺子”状;三个剖面的最大沉降量分别为10.64 mm、3.4 mm、11.25 mm,为开挖深度的1.33‰、0.56‰、1.4‰,符合规范要求。基坑最大沉降值距离基坑边缘2 m左右。沉降量较小对周围建筑物和公路影响较小。

## 关键词

基坑支护, 土钉墙支护, 变形, 位移

Copyright © 2020 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

随着我国经济的不断增长和城市化进程的不断加快,我国的城市建设得到了飞速发展,高层及超高层建筑的大量涌现,市政广场、地铁车站、地下通道、高速铁路、大型水利设施、桥梁、地下民防工事



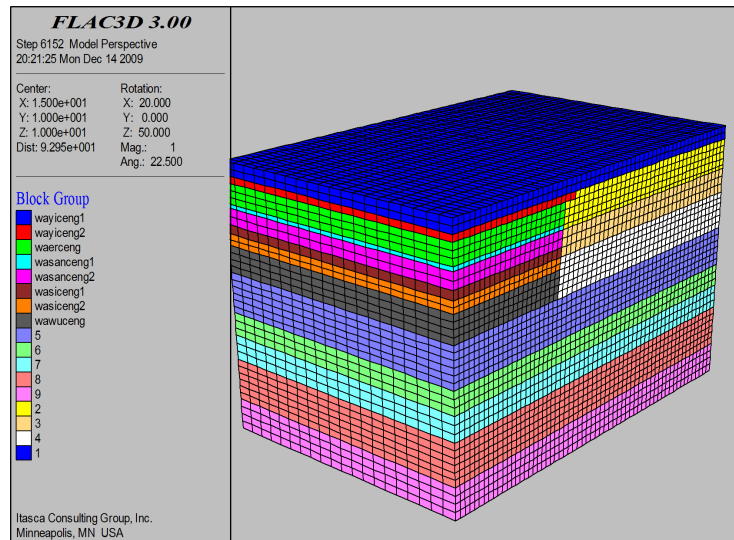


Figure 2. Section 1 model diagram

图 2. 剖面一模型图

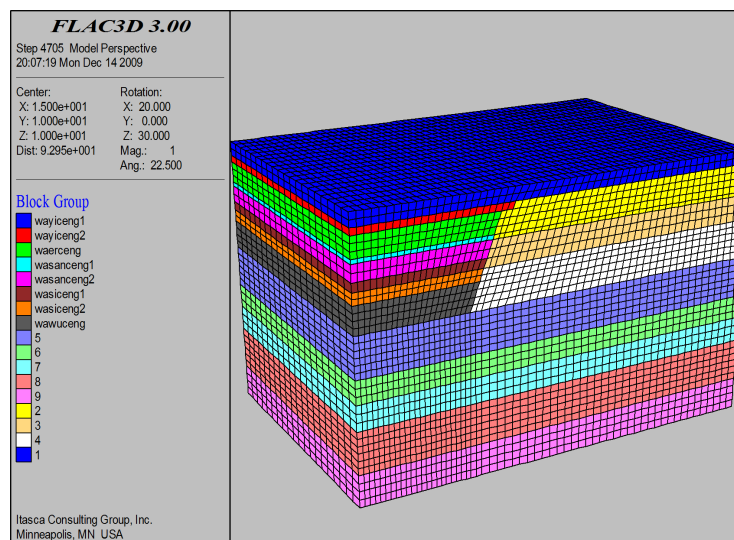


Figure 3. Section 3 model diagram

图 3. 剖面三模型图

### 2.3. 模拟边界设置

本基坑位于长沙市岳麓区梅溪湖片区境内，南邻梅溪湖路，东邻 E2 路，场地交通便利，地理位置优越。实际基坑为长方形，基坑外轴线面积约  $102 \times 371.9 \text{ m}^2$ ，南北侧开挖深度为地表下 6 m，中部为 8 m。根据场地工程地质条件，基坑支护方案拟采用土钉墙支护和放坡挂网素喷支护两种形式。据工程经验与现场实际情况，本次数值模拟模型尺寸设置为  $30 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 。

### 2.4. 参数设置

模型中岩土物理力学参数按表 1 中所列参数取值。土钉采用 FLAC3D 中的锚索结构(cable)，喷射混凝土用壳结构(shell-type)。土钉及混凝土层面的参数如表 2 和表 3 所示。

**Table 1.** Physical and mechanical indicators of major soil layers  
**表 1.** 主要土层物理力学指标

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
土层名称	杂填土	沉积粉土	粉质粘土	沉积粉质粘土	粉土	粉质粘土	粉土	粉质粘土	粉土
厚度(m)	0.3~2.35	2.43	1.84	2.46	3.39	1.69	1.83	3.12	1.44
体积模量(MPa)	4.3	4.04	5.59	6.44	8.05	8.33	6.35	9.32	5.59
剪切模量(MPa)	1	1.1	2.29	2.63	3.29	3.20	2.44	4.3	2.29
质量密度( $\times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ )	1.7	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	1.9
粘聚力(KPa)	15	20	30	27	15	32	12	31	30
内摩擦角( $^\circ$ )	15	20	20	21	21	20	20	20	20
剪胀角	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Table 2.** Soil nail material parameters  
**表 2.** 土钉材料参数

弹性模量/GP	截面积/ $\text{m}^2$	屈服强度/KPa	水泥黏结刚度/N/M	水泥黏结强度/KPa
20	$2.54 \times 10^{-4}$	800	$4 \times 10^9$	89

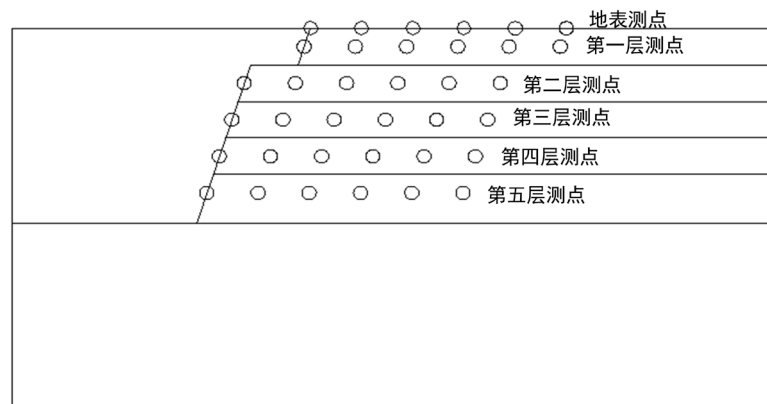
**Table 3.** Concrete parameters  
**表 3.** 混凝土参数

弹性模量/GP	泊松比
2.1	0.28

### 3. 数值模拟结果及分析

#### 3.1. 水平位移分析

在模拟中为了更加详细的掌握土体的位移情况，本次模拟过程中在软件中设置了多个测点监测不同开挖深度土体地表沉降和土层水平位移。每层测点按照从基坑边缘坡面开始依次间距 2 m 设置，每层设置 6 个点。具体见图 4 所示。



**Figure 4.** Location of each monitoring point  
**图 4.** 各监测点位置

1) 剖面 1 水平位移模拟曲线(图 5~10)

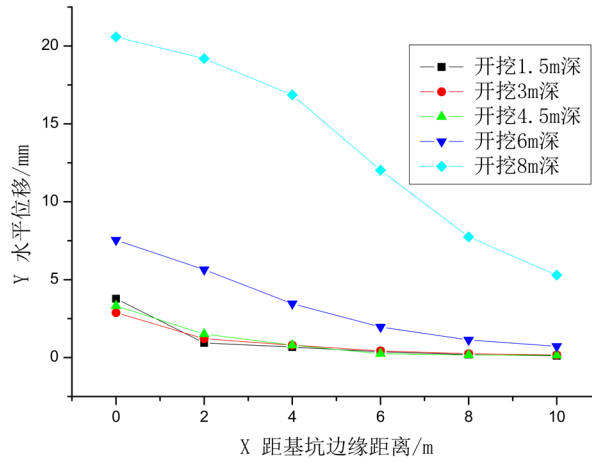


Figure 5. Horizontal displacement of the first layer monitoring point  
图 5. 第一层监测点水平位移

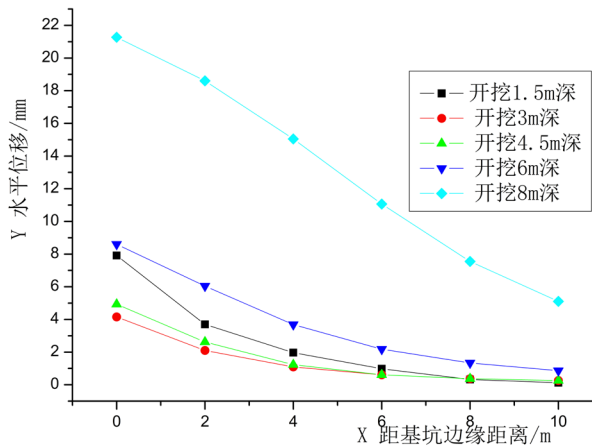


Figure 6. Horizontal displacement of the second level monitoring point  
图 6. 第二层监测点水平位移

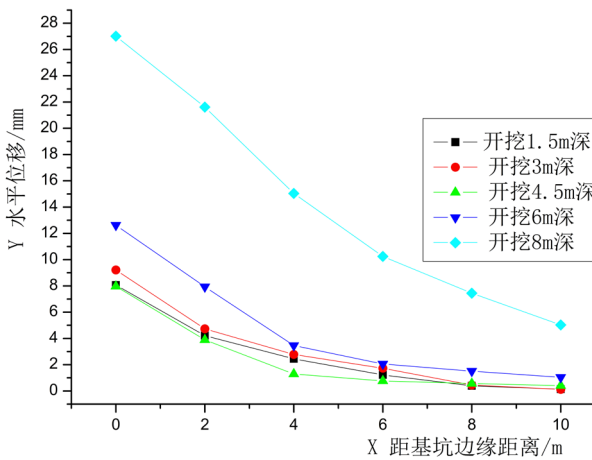


Figure 7. Horizontal displacement of the third level monitoring point  
图 7. 第三层监测点水平位移

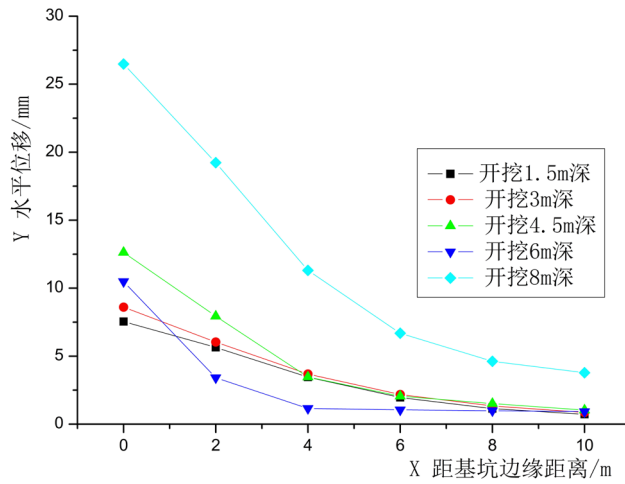


Figure 8. H Horizontal displacement of the fourth level monitoring point  
图 8. 第四层监测点水平位移

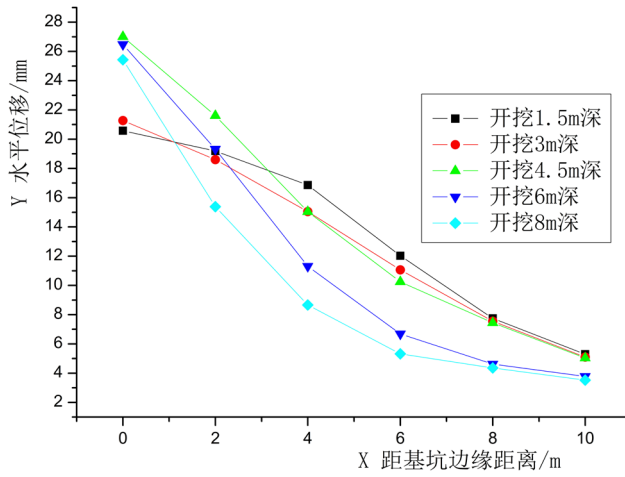


Figure 9. Horizontal displacement of the fifth level monitoring point  
图 9. 第五层监测点水平位移

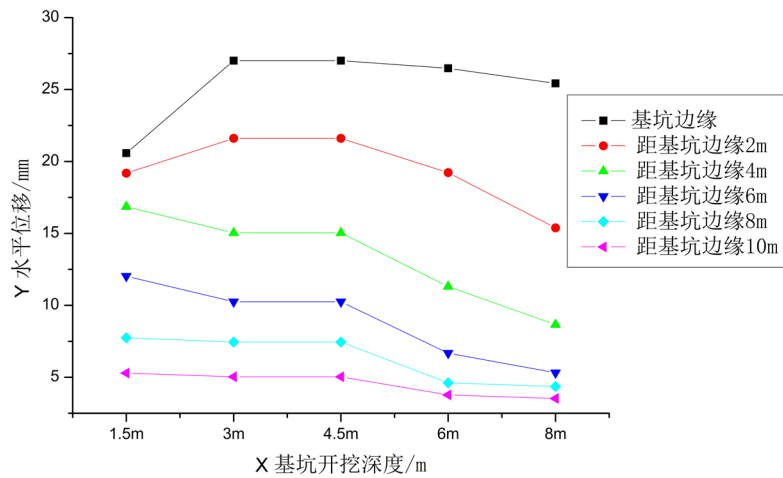


Figure 10. Horizontal displacement of each monitoring point  
图 10. 各监测点水平位移综合图

## 2) 剖面 2 水平位移模拟曲线(图 11~15)

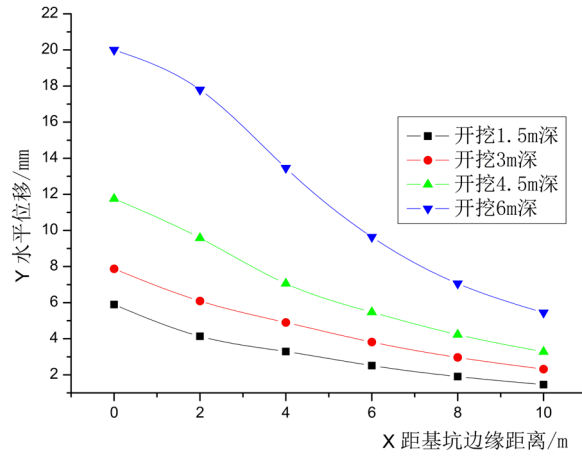


Figure 11. Horizontal displacement of the first layer monitoring point  
图 11. 第一层监测点水平位移

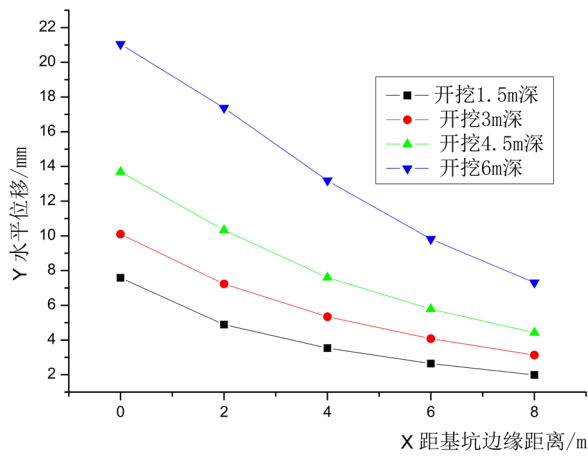


Figure 12. Horizontal displacement of the second level monitoring point  
图 12. 第二层监测点水平位移

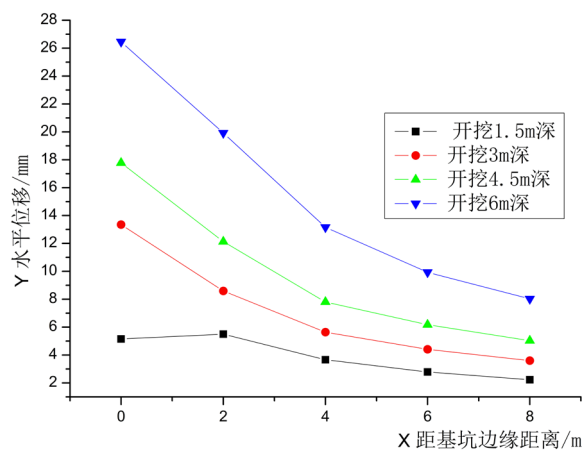


Figure 13. Horizontal displacement of the third level monitoring point  
图 13. 第三层监测点水平位移



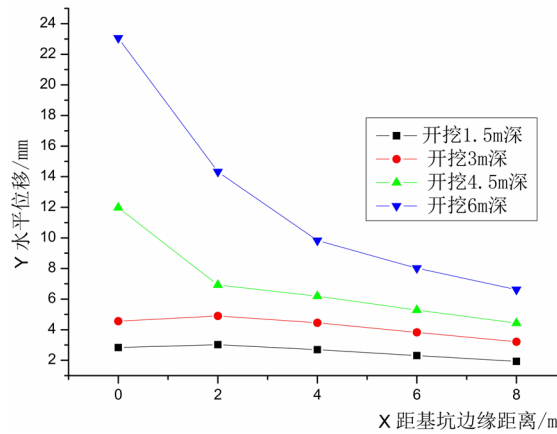


Figure 14. Horizontal displacement of the fourth level monitoring point  
图 14. 第四层监测点水平位移

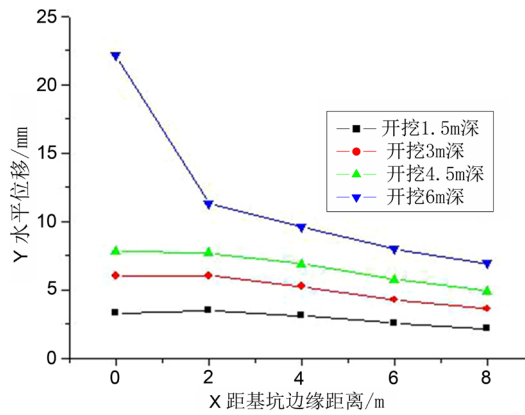


Figure 15. Horizontal displacement of the fifth level monitoring point  
图 15. 第五层监测点水平位移

3) 剖面 3 水平位移模拟曲线

图 16~23 为基坑剖面 1、2、3 分步开挖各个监测点水平位移曲线图。由上面各图可以得出基坑开挖过程中，水平位移的变化规律：

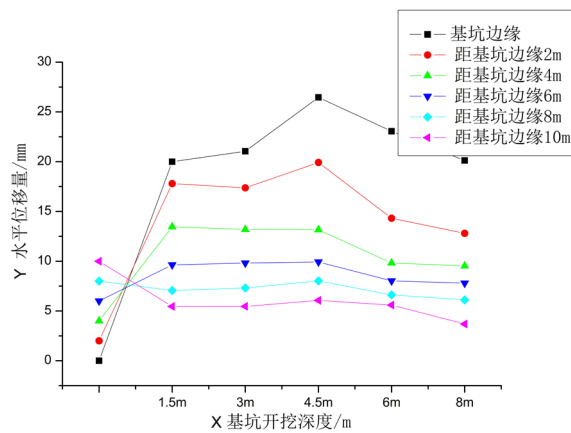


Figure 16. Horizontal displacement of each monitoring point  
图 16. 各监测点水平位移综合图

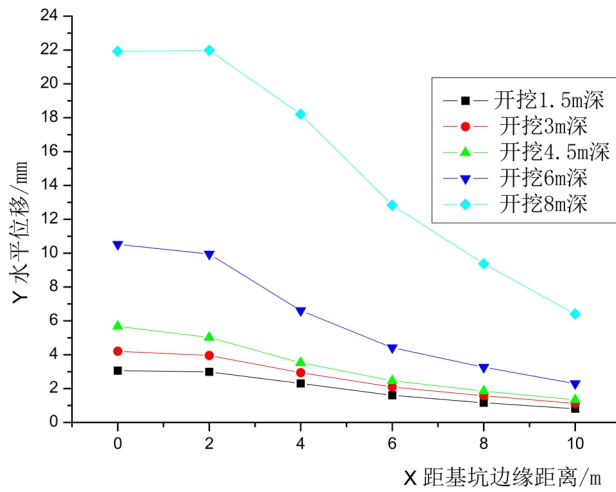


Figure 17. Horizontal displacement of the surface monitoring point  
图 17. 表层监测点水平位移

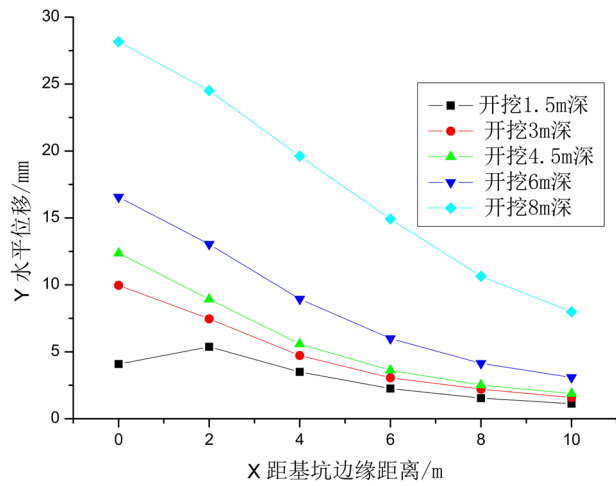


Figure 18. Horizontal displacement of the first level monitoring point  
图 18. 第一层监测点水平位移

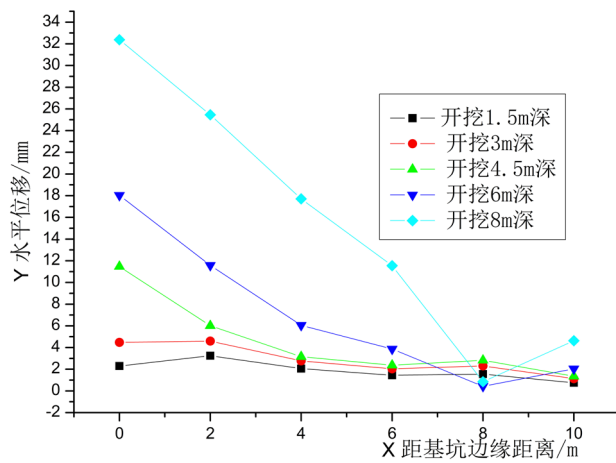


Figure 19. Horizontal displacement of the second level monitoring point  
图 19. 第二层监测点水平位移

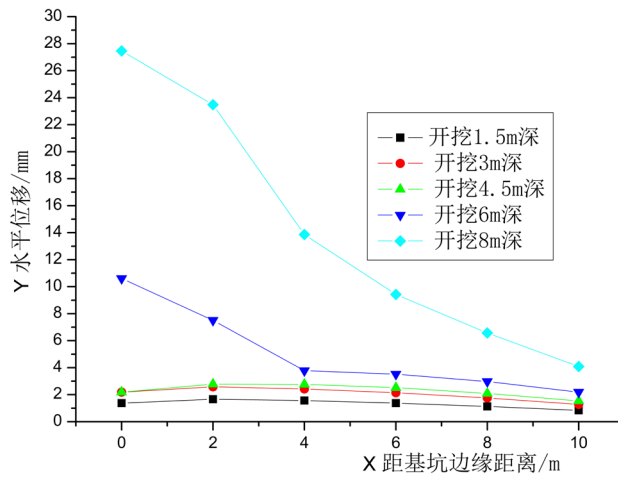


Figure 20. Horizontal displacement of the third level monitoring point  
图 20. 第三层监测点水平位移

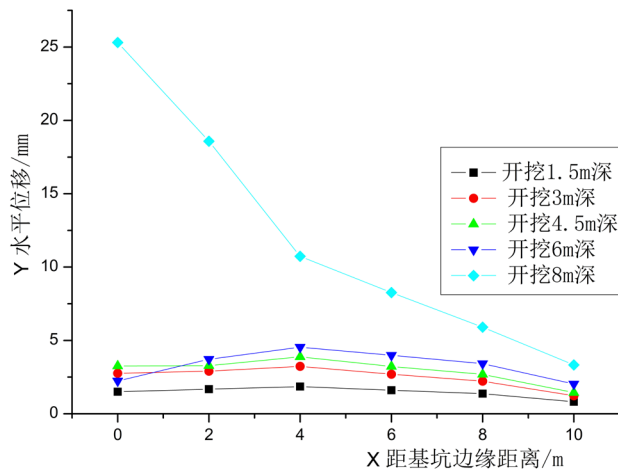


Figure 21. Horizontal displacement of the fourth level monitoring point  
图 21. 第四层监测点水平位移

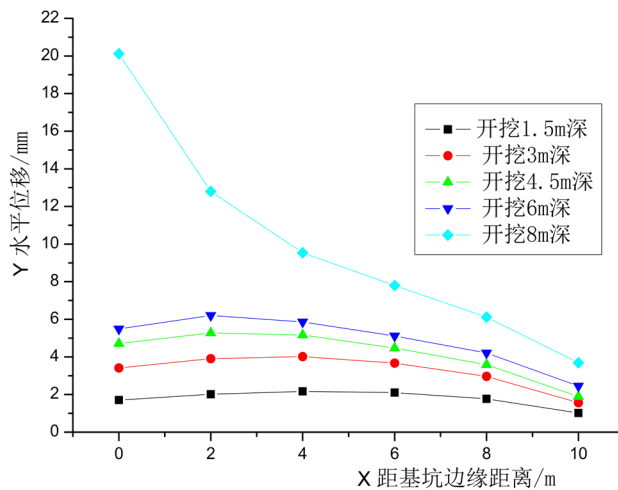


Figure 22. Horizontal displacement of the fifth level monitoring point  
图 22. 第五层监测点水平位移

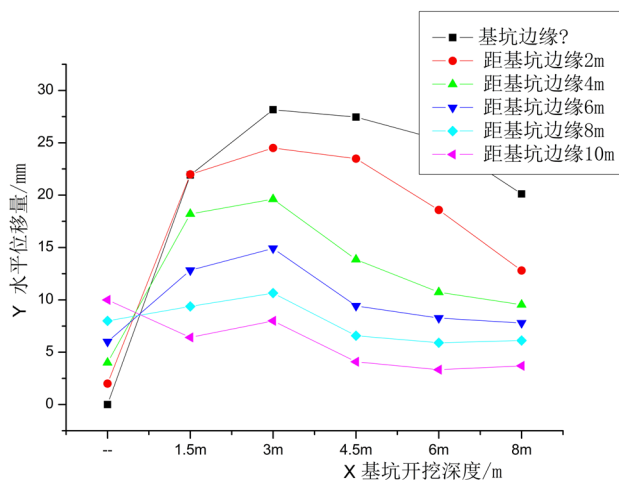


Figure 23. Horizontal displacement of each monitoring point  
图 23. 各监测点水平位移综合图

a) 3 个剖面基本反映了类似的水平变形特征，各层的监测点在开挖前几步水平位移趋势和开挖最后一步位移趋势相同，不同是最后一步开挖对监测点位移的扰动更加剧烈，出现了较大的位移。

b) 基坑水平变形量与开挖深度存在较好的相关性。随着开挖深度的增加，基坑水平变形量也呈现逐渐增大的趋势。基坑开挖工作结束后，基坑中上部土体的水平位移值出现最大值，剖面一为 27.01 mm、剖面二为 26.46 mm、剖面三为 28.16 mm。分别为基坑开挖深度的 3.4‰、4.4‰、3.5‰，符合规范要求。

c) 开挖同一深度时，土体的水平位移与土体与基坑边缘的距离存在一定的负相关性，随着距离基坑边缘距离的增加，水平位移呈现逐渐减小的变化趋势。从模拟的结果来看，距离基坑边缘约 4 m 范围内，土体水平变形量较大，这与现场监测的结果也是相一致的。

d) 沿着基坑垂直方向由上向下看，水平变形量曲线呈抛物线型，具有“先增大，后减小”的趋势。由数值模拟数据可以看出，三个剖面的最大水平变形量都没有超过设计值的 8 cm。说明本方案理论设计的基坑形状、支护参数合理可靠[11]。

### 3.2. 地表沉降分析

图 24~26 为三个剖面沉降图，由图可知：

1) 每个剖面前几步开挖后，监测点的沉降曲线形状相似，最后一步开挖后形状变化明显。

2) 剖面 2 和剖面 3 在基坑边缘基坑开挖前三、四步没有沉降，反而出现了上升的现象，但是在基坑开挖结束后，基坑边缘附近还是表现出沉降的趋势。

3) 剖面 1 基坑表面各测点呈现一直沉降的趋势，直至开挖的前四步随着距离基坑的距离增加，沉降量出现减少的现象，第五步开挖稳定后基坑边缘附近沉降变缓慢，而在距基坑边缘 2 m 左右沉降量达到最大。

5) 三个剖面最终的沉降曲线形状基本相同，呈先增大后减少的趋势，曲线形状类似于“勺子”状。主要原因是土钉墙和混凝土层共同作用，限制了表面土体的自由变形，从而使表面土体的强度得到一定程度的提高。

6) 三个剖面的最大沉降量分别为 10.64 mm、3.4 mm、11.25 mm，为开挖深度的 1.33‰、0.56‰、1.4‰，符合规范要求。基坑最大沉降值距离基坑边缘 2 m 左右。沉降量较小对周围建筑物和公路影响较小。

根据基坑水平位移和沉降结果综合分析，基坑坡面最大水平位移处位于基坑边坡中上部，最大沉降值出现在在距离基坑边缘 2 m 的位置。计算结果满足设计要求。此结果与多数基坑模拟结果趋势一致。

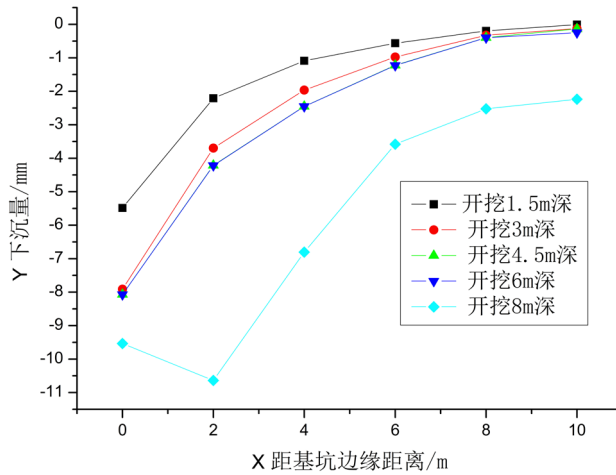


Figure 24. Section 1 measurements settlement chart

图 24. 剖面 1 测点沉降图

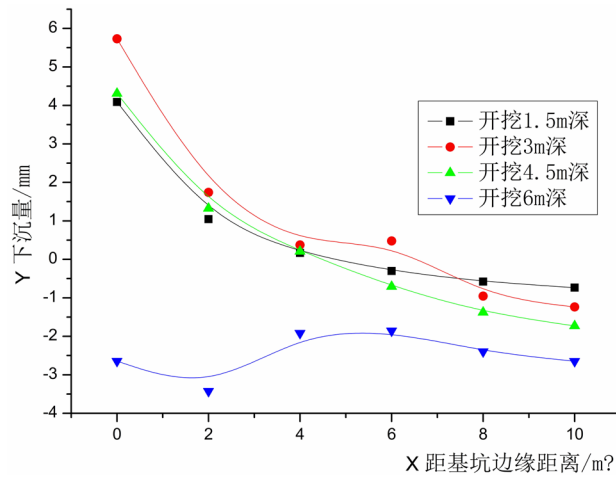


Figure 25. Section 2 measurements settlement chart

图 25. 剖面 2 测点沉降图

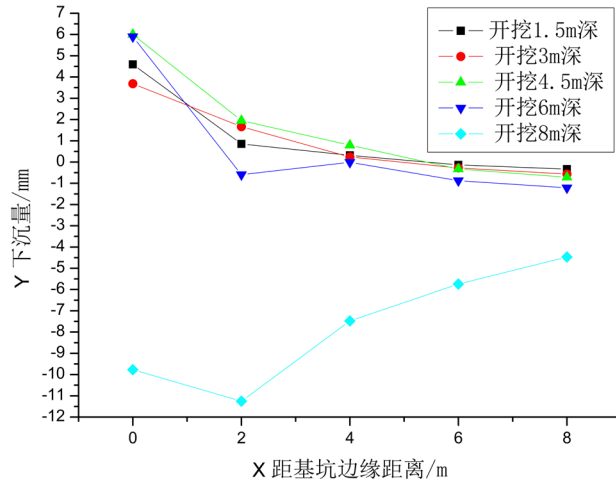


Figure 26. Section 3 measurements settlement chart

图 26. 剖面 3 测点沉降图

## 4. 基坑变形模拟结果与实测结果对比分析

### 4.1. 沉降对比

图 27~29 为数值模拟沉降结果与现场实测沉降结果对比图。通过分析图中对应点的变化情况可以得出:

1) 从对比结果中可以看出, 基坑各个剖面模拟结果与现场实测结果曲线的形状基本相同, 发展趋势基本相同, 由此可以看出, 模拟结果存在较大的可信度。

2) 现场实测三个剖面的曲线显示, 下沉量最大的位置位于距基坑坡面边缘大约 2 m 的范围内, 曲线整体呈先增大后减小的趋势, 距离基坑坡面的距离越大, 其下沉量越小。模拟结果与现场实际情况基本吻合。

3) 现场实测数值基本偏大于模拟结果, 这可能是由于模拟过程中进行了一些条件的简化造成的。

4) 现场监测结果显示距离基坑边缘 20 m 以外, 土体基本不发生任何变化, 没有受基坑开挖的扰动, 这说明本项目开展过程中所设计的基坑支护方案, 在保证基坑本身稳定的同时, 对周围的建筑物和公路影响较小, 满足规范与现场施工的要求。

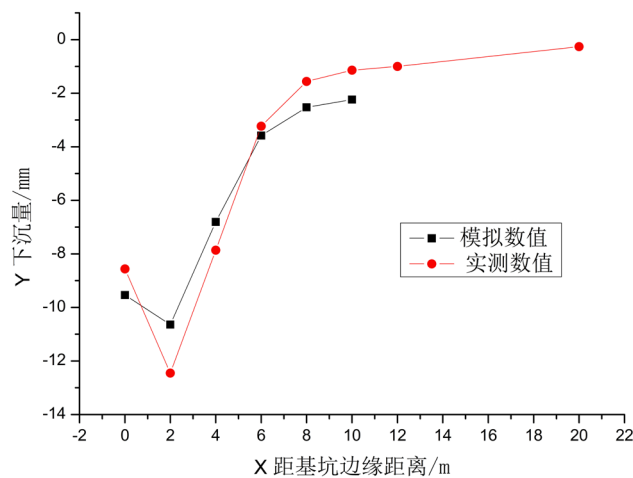


Figure 27. Section 1 survey point settlement comparison chart

图 27. 剖面 1 测点沉降对比图

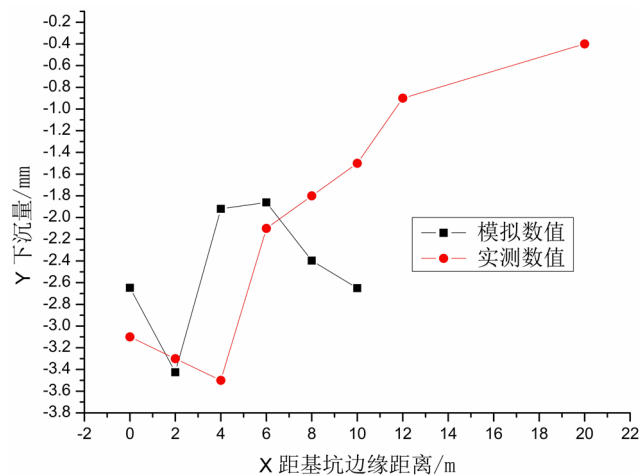


Figure 28. Section 2 survey point settlement comparison chart

图 28. 剖面 2 测点沉降对比图

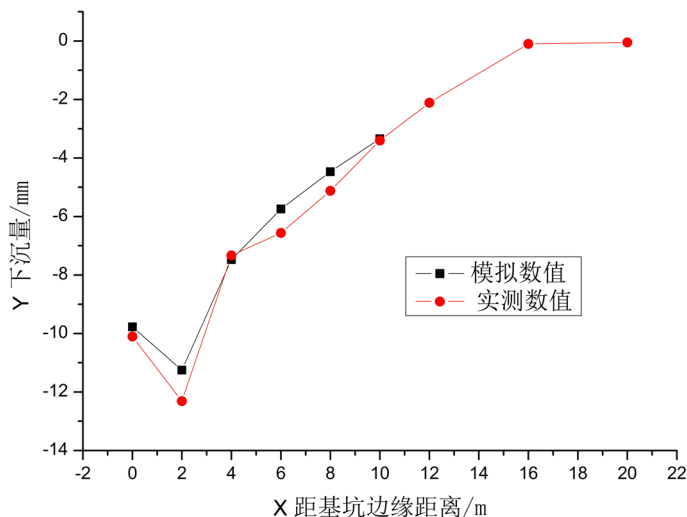


Figure 29. Section 3 survey point settlement comparison chart  
图 29. 剖面 3 测点沉降对比图

#### 4.2. 坡面不同深度水平位移对比

图 30~32 为数值模拟坡面各个测点模拟结果与现场实测结果对比图。通过分析图中对应点的变化情况可以得出:

- 1) 模拟结果与实测结果曲线形状基本类似，大致呈现为抛物线状。
- 2) 剖面 1 和剖面三为深 8 m 的基坑，两个剖面的坡面水平变形最大位置基本上都是在基坑坡面的中上部；二剖面 2 为深 6 m 的基坑，坡面最大水平位移主要出现在基坑的中下部。
- 3) 现场实测数值基本偏大于模拟结果，这可能是由于模拟过程中进行了一些条件的简化造成的和现场施工质量两方面相关。
- 4) 基坑坡面的水平位移数据显示本次施工所采用的支护方案具有一定的合理性。方案的设计以及数值模拟的过程对具有类似条件的基坑施工设计方案具有一定的指导性。

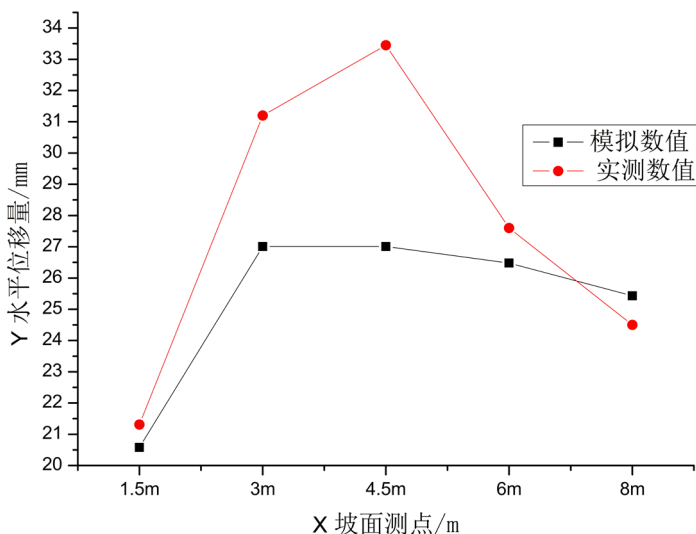


Figure 30. Comparison of horizontal displacement of slope at Section 1  
图 30. 剖面 1 测点坡面水平位移对比图

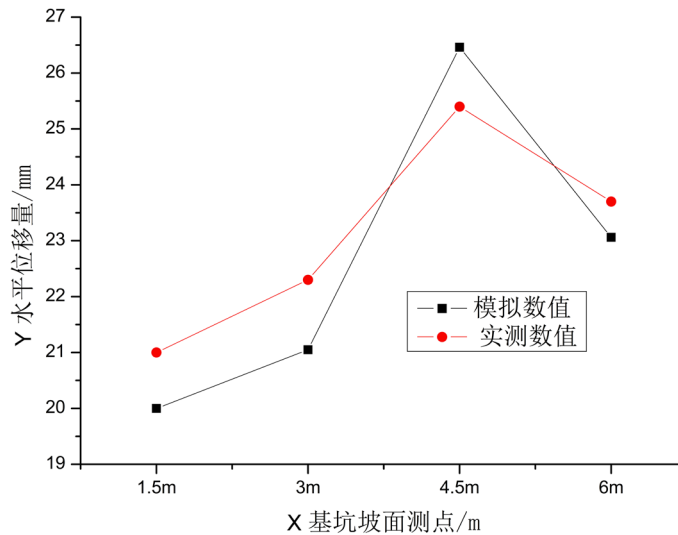


Figure 31. Comparison of horizontal displacement of slope 2  
图 31. 剖面 2 测点坡面水平位移对比图

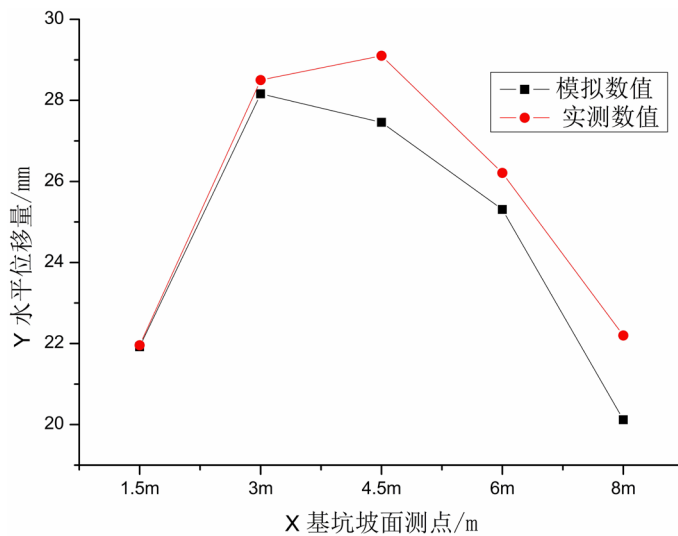


Figure 32. Contrast map of the horizontal displacement of the profile 3  
图 32. 剖面 3 测点坡面水平位移对比图

### 4.3. 基坑支护结构合理性评价

通过分析支护体结构受力和基坑土体水平变形量和地表沉降, 基坑水平变形量最大基本在基坑坡面的中上部, 三个剖面最大变形量为 28.16 mm; 地表沉降极值在距离基坑边缘 2 m 的位置, 最大沉降量为 11.25 mm; 根据设计方案中要求该基坑为二级基坑, 基坑的变形量不超过 8 cm 即满足要求, 上述数据表明支护设计方案完全能够满足要求。同时通过现场设置测站观测基坑变形得出的结果基本与数值模拟结果相符, 也说明设计方案和数值模拟计算的模型选取及开挖施工顺序合理可靠, 能够保证基坑的稳定性[1]。

## 5. 结论

1) 数值模拟结果显示: 当开挖到基坑底部时, 基坑中上部水平位移值达到最大, 剖面一为 27.01 mm、剖面二为 26.46 mm、剖面三为 28.16 mm。分别为基坑开挖深度的 3.4‰、4.4‰、3.5‰, 符合规范要求。



开挖统一深度时,随着距离基坑边缘距离的增加,水平位移逐渐减小;沿着基坑垂直方向由上向下看,水平位移线增大达到最大之后再减小。三个剖面的最大水平位移都没有超过设计值的 8 cm。所以说明理论设计的基坑形状、支护参数合理可靠。

2) 每个剖面前几步开挖后,监测点的沉降曲线形状相似,最后一步开挖后形状变化明显。剖面 2 和剖面 3 在基坑边缘基坑开挖前三、四步没有沉降,反而出现了上升的现象,但是在基坑开挖结束后,基坑边缘附近还是表现出沉降的趋势。剖面 1 基坑表面各测点表现出一直沉降,开挖的前四步随着距离基坑的距离增加沉降量逐渐减小,第五步开挖稳定后基坑边缘附近沉降变缓慢,而在距基坑边缘 2 m 左右沉降量达到最大;三个剖面最终的沉降曲线形状基本相同,类似于“勺子”状;三个剖面的最大沉降量分别为 10.64 mm、3.4 mm、11.25 mm,为开挖深度的 1.33%、0.56%、1.4%,符合规范要求。基坑最大沉降值距离基坑边缘 2 m 左右。沉降量较小对周围建筑物和公路影响较小。

3) 数值模拟沉降结果与现场实测数据对比结果表明数值模拟与实际情况较为吻合,只有局部略有偏差。

## 参考文献

- [1] 薛丽影, 杨文生, 李荣年. 深基坑工程事故原因的分析与探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 468-473.
- [2] 梁潇文, 张福龙. 兰州地区土钉墙支护受力研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(3): 190-192.
- [3] 杨学林. 基坑工程设计、施工和监测中应关注的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(11): 2327-2333.
- [4] 黄曙光. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J]. 岩土工程学报, 2013(S1): 474-477.
- [5] 李进军, 王卫东, 邸国恩, 等. 基坑工程对临近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 623-629.
- [6] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 619-626.
- [7] 张大祥, 傅长军. 土钉墙技术在深基坑边坡支护中的应用研究——以南京某商业用楼基坑为例[J]. 江苏科技信息, 2019, 36(33): 49-51.
- [8] 杨继红, 丁鹏, 杨兴隆. 深基坑开挖过程中土钉支护结构的变形与受力特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 133-136.
- [9] 程良奎, 陈肇元. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [10] Bruce, D.A. and Jewell, R.A. (1986) Soil Nailing: Application and Practice I. *Ground Engineering*, **19**, 356-365.
- [11] 李校兵, 王军, 郑国栋. 土钉支护基坑的变形监测与数值模拟[J]. 铁道建筑, 2008(11): 60-62.
- [12] 何德海. 某基坑支护方案设计及施工数值模拟研究[J]. 城市住宅, 2019, 26(5): 148-151.
- [13] 连芸, 鲁玉芬, 吴立坤. 复合土钉墙在某基坑工程中的应用研究[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2018, 18(4): 25-27+35.
- [14] Sherif, A., Ibrahim, W.W., et al. (2006) Fatigue of Corrugated-Web Plate Girders: Analytical Study. *Journal of Structural Engineering*, **132**, 1381-1392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:9\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:9(1381))
- [15] Sause, R., et al. (2006) Fatigue Life of Girders with Trapezoidal Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering*, **132**, 1070-1078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:7\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:7(1070))
- [16] 季玉海. 复合土钉支护的面层设计方法与应用[J]. 铁道建筑技术, 2009(3): 57-62.
- [17] 孙玉琢, 刘福臣, 成英昌, 等. 基坑土钉支护设计计算问题探讨[J]. 港工技术, 2009, 46(3): 49-51.
- [18] 孙林娜, 徐福宾. 水泥土墙复合土钉墙的协同作用机理数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 314-322.
- [19] 刘波, 韩彦辉. *FLAC 原理、实例与应用指南*[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [20] 李晶晶, 程祖锋, 耿立立, 等. 基于 FLAC3D 的复合土钉支护数值模拟分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(3): 5-8.