

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0038-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.009

## 西安地铁车站深基坑工程变形特性研究

谢冬洲, 李新生, 刘汉露, 谢勇

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安710000)

**摘要:** 为确定西安地铁车站深基坑的变形特性, 收集了18个地铁车站深基坑变形的实测数据, 根据实测数据, 对深基坑开挖引起的支护结构侧向位移和地表沉降的变形规律进行了统计研究, 并将研究结果与其他地区的基坑工程进行比较。结果表明: 基坑支护结构侧移曲线形状为“鼓胀形”, 最大侧移点深度均位于开挖面以上; 最大侧移值在 $0.03\%H \sim 0.12\%H$  ( $H$ 为开挖深度)之间, 其值随插入比的增大而减小; 地表沉降曲线呈“凹槽形”, 最大地表沉降位置出现在 $0.51H$ 处; 最大地表沉降约为 $0.06\%H$ , 增大插入比对其值的影响并不显著; 最大地表沉降随着最大侧移的增大而增大, 且其比值约等于1.10。该研究成果可为西安市类似深基坑工程的变形预测、设计和施工提供参考。

**关键词:** 深基坑; 变形特性; 统计分析; 最大侧移; 地表沉降

**中图分类号:** TU475

**文献标识码:** A

## Research on Deformational Characteristics of Deep Excavations Engineering in Xi'an Subway Station

XIE Dongzhou, LI Xinsheng, LIU Hanlu, XIE Yong

(College of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** In order to determine characteristics of deformation of the deep excavations in Xi'an subway station, the measured data of the deformation of the deep excavations of 18 subway stations were collected. According to the measured data, the characteristics of lateral displacement of the retaining structure and ground surface settlement caused by deep excavations are statistically studied, and the research results are compared with the deep excavations in other areas. The research shows that: The shape of the lateral displacement curve of the deep excavations' retaining structure is "bulging shape", and the maximum lateral displacement point depth is above the excavation surface; the maximum lateral displacement value ranges from  $0.03\%H$  to  $0.12\%H$  ( $H$  is excavation depth), and decreases with the increase of insertion ratio; the ground surface settlement curve is "groove shape", and the maximum surface settlement position appears at  $0.51H$ ; the maximum surface settlement is about  $0.06\%H$ , and increase of insertion ratio has no significant effect on the surface settlement; the maximum surface settlement increases with the increase of maximum lateral displacement, and its ratio is approximately equal to 1.10. The research results can provide reference for the deformation prediction, design and construction of similar deep excavations in Xi'an.

**Key words:** deep excavations; characteristics of deformation; statistical analysis; deep excavations; lateral displacement; ground surface settlement

近年来, 西安市地铁建设正方兴未艾, 深基坑结构变形和地表沉降, 进而对周边建筑物产生不利影响。Ou等<sup>[1]</sup>收集了台北市10个深基坑变形的实

收稿日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(211026130199)

作者简介: 谢冬洲(1993-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 从事深基坑设计方面的研究。

测数据，分析了支护结构变形与开挖深度的关系。丁智等<sup>[2]</sup>、廖少明等<sup>[3]</sup>采用经验法分别对浙江、苏州等地区深基坑的变形性质及影响因素做了统计研究。这些研究成果在预测基坑变形等方面发挥了积极的作用。本文针对湿陷性黄土广泛分布的西安市，收集了 18 个地铁车站深基坑实测变形数据，研究了西安地铁车站深基坑的工程变形特性，并提出了深基坑变形控制的相应措施。研究成果可为西安市类似深基坑工程的变形预测、施工、设计等方面提供借鉴与参考。

## 1 基坑工程实例

### 1.1 工程实例

收集了 18 个西安市地铁车站深基坑现场监测资料，具体如表 1 所示。18 个深基坑主要采用钻孔灌注桩加内支撑的支护方式，开挖方式均为明挖。收集的数据主要包括开挖深度 ( $H$ )、桩长 ( $H_w$ )、支护结构最大侧移 ( $\delta_{hm}$ )、最大侧移深度 ( $H_{hm}$ )、地表最大沉降 ( $\delta_{vm}$ )、最大沉降位置 ( $X_{vm}$ )。为方便叙述，本文中出现的符号意义如图 1 所示。深基坑的变形控制允许值为：基坑支护结构最大侧移不大于  $0.1\%H$  并

且小于 30 mm、最大地表沉降不大于  $0.1\%H$ 。

### 1.2 地层条件

西安市位于关中平原中部，表层为第四纪冲洪积物，主要地层是素填土、新黄土、古土壤、老黄土、中砂等，主要土层物理力学参数如表 2 所示。

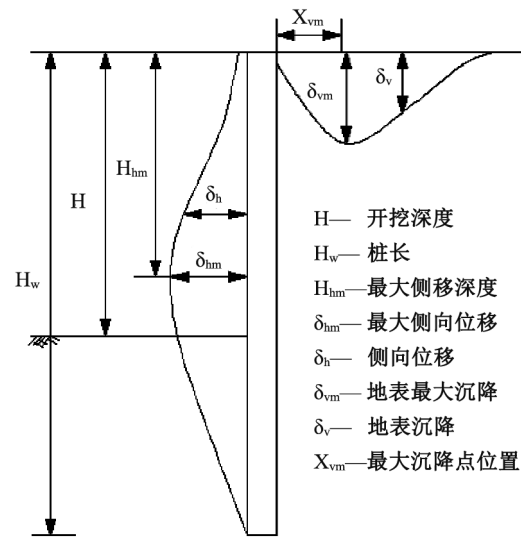


图 1 有关参数的含义示意图

Fig.1 Schematic diagram of definition of excavation parameter

表 1 西安地铁车站深基坑数据汇总

Tab.1 Excavation project summary in Xi'an subway station

编号	工程名称	$H/m$	$H_w/m$	$R$	$\delta_{hm}/mm$	$H_{hm}/m$	$\delta_{vm}/mm$	$X_{vm}/m$
1	地铁某车站 <sup>[4]</sup>	27.1	36.1	0.33	12.50	19.00	5.80	11.00
2	南门车站 <sup>[5]</sup>	17.0	24.0	0.41	6.65	13.50	10.50	8.00
3	北大街车站 <sup>[6]</sup>	18.2	22.2	0.22	7.04	13.00	—	—
4	韦曲南车站 <sup>[7]</sup>	17.8	23.8	0.34	10.70	12.00	9.99	8.00
5	大雁塔车站 <sup>[8]</sup>	20.6	38.0	0.70	13.95	20.50	—	—
6	通化门车站 <sup>[9]</sup>	24.5	35.0	0.43	10.70	16.00	28.50	14.00
7	小寨车站(2号线) <sup>[10]</sup>	17.1	25.1	0.47	5.00	12.50	—	—
8	小寨车站(3号线) <sup>[10]</sup>	23.1	34.2	0.47	6.40	12.50	—	—
9	尤家庄车站 <sup>[11]</sup>	16.1	22.1	0.37	17.00	—	—	—
10	运动公园车站 <sup>[12]</sup>	17.0	24.0	0.41	11.45	12.50	—	—
11	五路口站 <sup>[13]</sup>	16.1	20.1	0.19	7.80	5.00	8.20	8.00
12	大明宫车站 <sup>[14]</sup>	18.5	24.5	0.32	10.23	15.00	10.32	8.00
13	地铁某车站 <sup>[15]</sup>	18.0	25.0	0.39	9.00	12.00	—	—
14	地铁某车站 <sup>[16]</sup>	17.8	21.9	0.23	14.46	11.00	10.83	11.00
15	保税区车站 <sup>[17]</sup>	18.0	24.0	0.33	22.30	—	18.00	—
16	地铁某车站 <sup>[18]</sup>	18.7	24.0	0.28	7.30	16.00	8.50	12.50
17	大差市站 <sup>[19]</sup>	16.0	22.0	0.38	8.39	9.00	8.21	8.00
18	地铁某车站 <sup>[20]</sup>	15.6	19.0	0.26	16.02	9.00	11.38	8.00

注：1. 表中“—”表示数据缺失。

表2 主要土层物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of main soils

岩土名称	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°
素填土	15.6	3	8	10
新黄土	17.2	18	35	21
古土壤	17.6	18	33	21
老黄土	17.8	22	37	22
中砂	19.5	24	2	30

## 2 深基坑侧向位移特点研究

为方便叙述,规定支护结构的侧向位移以向开挖侧变形为正,地表变形以向下沉降为正。

### 2.1 深基坑侧移曲线特征

深基坑的侧向位移曲线一般有“鼓胀形”和“倒三角形”两种,本文选取了西安市3个典型的地铁站深基坑支护桩侧移数据展开分析。图2为3个深基坑支护结构的侧移曲线。从图中可以看出,深基坑的侧移曲线呈“鼓胀形”,表现为中间大、两头小。设有内支撑的深基坑侧移曲线多表现为这种形式,坑顶和坑底位移较小,最大侧移位置出现在支护结构中部。

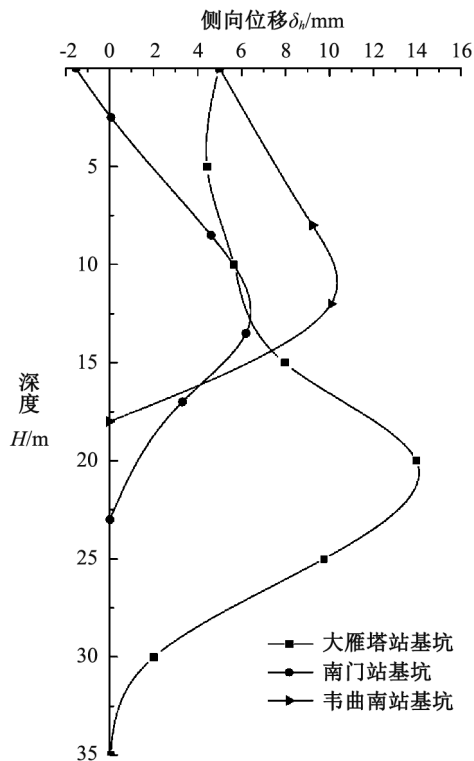


图2 深基坑侧移曲线

Fig.2 Lateral displacement curves of deep excavations

### 2.2 深基坑最大侧移深度特点

深基坑最大侧移深度具有很强的规律性,参考文献[1]统计了台北地区10个基坑的实测资料,认为最大侧移深度约等于开挖深度,即 $H_{hm}=H$ 。参考文献[2]分析的杭州地铁车站支护结构的 $H_{hm}$ 位于 $(H-4 \sim H+7)$ 范围内。本文根据收集的实测数据,得到了最大侧移深度与开挖深度的关系如图3所示。从图中可以看出,支护结构最大侧移深度出现在开挖面以上2.7 m ~ 11.1 m之间,平均值位于开挖面以上6.35 m。最大侧移均位于开挖面以上,与杭州等软土地区的研究结果不一致。这是因为黄土地层的物理力学性质较好,在开挖面以下支护结构侧向位移较小,而软土地区开挖面以下易出现较大的变形所致。

### 2.3 开挖深度对最大侧移的影响

图4为深基坑开挖深度( $H$ )与最大侧向位移( $\delta_{hm}$ )之间的关系。如图所示,侧向位移最大值为17.0 mm,最小值为5.0 mm,平均值为10.9 mm,支护桩的变形量在变形控制范围之内。支护桩的最大侧移 $\delta_{hm}$ 在 $(0.03\% \sim 0.12\%)H$ 之内,平均值为 $0.06\%H$ ,上限值与下限值差异较小,这说明基坑支护方式对变形控制的效果好。文献[3]统计的苏州地区地铁车站地下连续墙的 $\delta_{hm}$ 值介于 $(0.05\% \sim 0.40\%)H$ 之间,均值为 $0.2\%H$ 。这与本文研究的结果具有很大的差异。这是由于与苏州地区的软弱土相比,西安市的黄土强度大、压缩性小、稳定性好。

### 2.4 插入比对最大侧移的影响

图5为本文统计的最大侧移 $\delta_{hm}$ 与插入比 $R$ 的

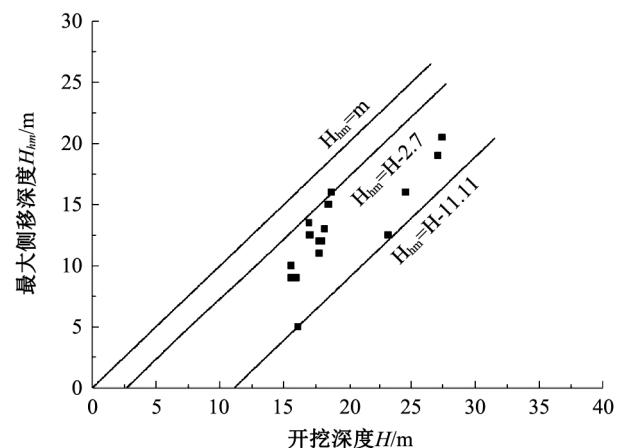


图3 最大侧移深度与开挖深度关系

Fig.3 Relationship between excavation depth and depth of maximum lateral displacement points

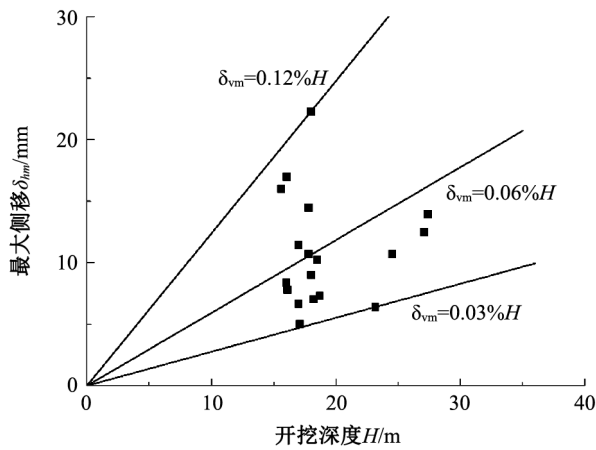


图 4 最大侧移与开挖深度的关系

Fig.4 Relationship between maximum lateral displacement and excavation depth

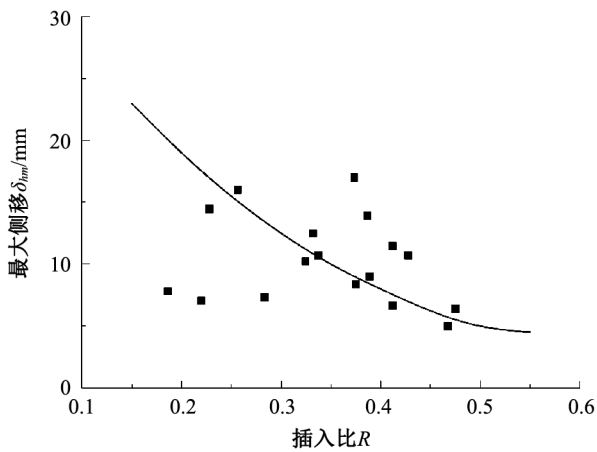


图 5 最大侧移与插入比的关系

Fig.5 Relationship between maximum lateral displacement and insertion ratio

关系图，插入比大部分位于 (0.19, 0.47) 之间，平均值为 0.35。从图中可以观察到，随着插入比的增大，最大侧移有明显的降低的趋势，这表明适当增大插入比对最大侧移变形控制是有效的。当插入比较小，增大插入比可有效的减小支护结构的侧向位移。但当插入比达到一定值后，增大插入比并不能有效的减小变形，但这会使工程造价提高，所以在保证基坑稳定的前提下，通过盲目的增大插入比来控制支护结构的侧向变形是不经济的。

### 3 深基坑地表沉降特点分析

#### 3.1 深基坑地表沉降曲线特征

本文选取了 3 个西安地铁车站深基坑地表沉降的监测数据，得到了距基坑水平距离 (X) 与地表

沉降 ( $\delta_v$ ) 的关系如图 6 所示。从图可以看出，深基坑沉降曲线均为“凹槽形”，地表最大沉降量为 9.80 mm ~ 11.38 mm，最大沉降量均远小于变形允许值。“凹槽形”沉降曲线的地表沉降随着距基坑的水平距离先增大后减小，最大地表沉降出现在距坑壁一定距离。

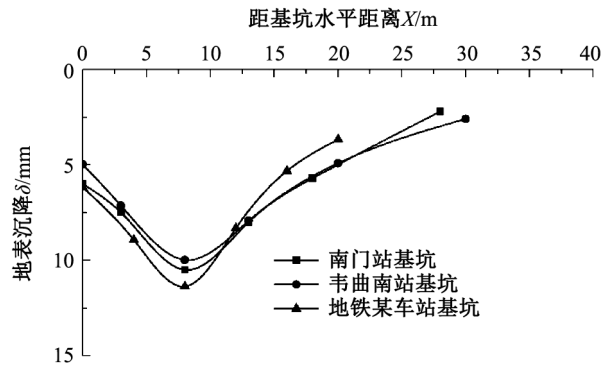


图 6 深基坑地表沉降曲线图

Fig.6 Surface settlement curves of deep excavations

#### 3.2 最大地表沉降点位置特征

地表沉降曲线为“凹槽形”的深基坑，其最大沉降位置与基坑的开挖深度有关。参考文献 [2] 研究的浙江地区深基坑最大地表沉降点位于坑外 0.5H 处。本文统计的西安地铁车站深基坑最大沉降点位置 ( $X_{vm}$ ) 与基坑开挖深度 (H) 的关系如图 7 所示。由图可知，最大地表沉降点位置  $X_{vm}$  位于 (0.41 ~ 0.67)H 之间，平均为 0.51H，说明深基坑的周边地表沉降最大值一般出现在距坑壁 0.5H 位置处。

#### 3.3 开挖深度对最大地表沉降的影响

图 8 为基坑开挖深度 (H) 与最大地表沉降 ( $\delta_{vm}$ ) 关系曲线。地表沉降最大值为 28.5 mm，最小值为 5.8 mm，平均值为 11.9 mm。最大地表沉降  $\delta_{vm}$  在 (0.02% ~ 0.12%)H 之间，平均值为 0.06%H。小于参考文献 [3] 统计的苏州软土地区地铁车站地下连续墙后最大地表沉降， $\delta_{vm}$  介于 (0.04% ~ 0.27%)H 之间，平均值为 0.13%H。这表明，地层条件对地表沉降的影响很大，深基坑支护结构能很好的控制地表沉降。

#### 3.4 插入比对最大地表沉降的影响

图 9 为本文依据实测数据所得出的最大地表沉降 ( $\delta_{vm}$ ) 与插入比 (R) 的关系图，由图可以知，插入比由 0.19 增大至 0.43 时，最大地表沉降并没有显著降低，反而表现为趋于平稳的趋势，这说明插入比

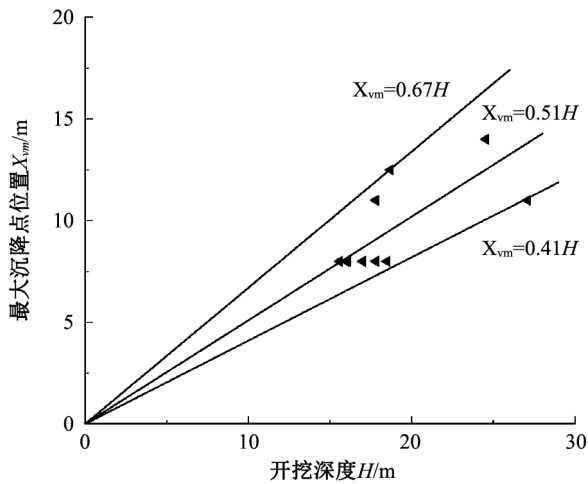


图7 最大沉降点位置与开挖深度的关系

Fig.7 Relationship between the location of the maximum settlement point of deep excavations and the excavation depth

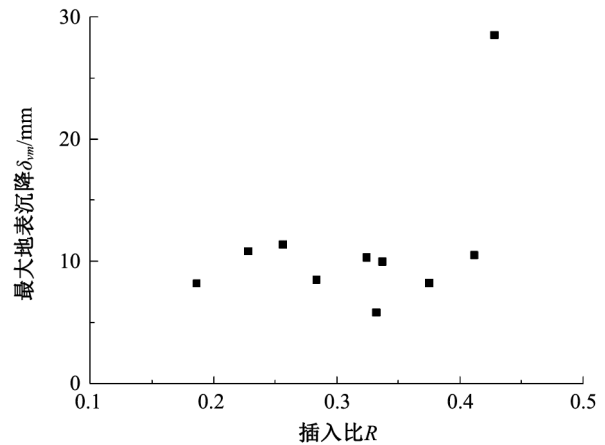


图9 最大地表沉降与插入比关系

Fig.9 Relationship between maximum ground surface settlement and insertion ratio

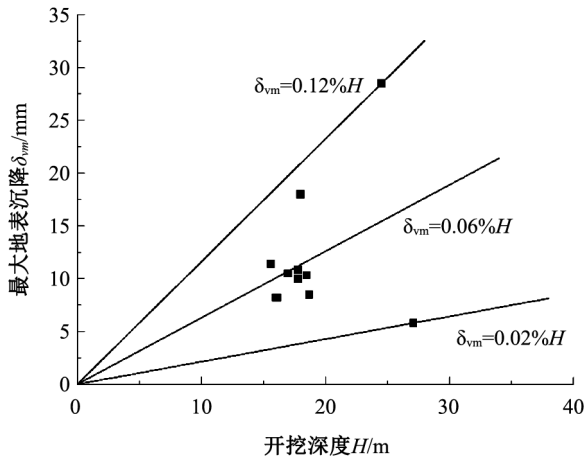


图8 最大地表沉降与开挖深度之间的关系

Fig.8 Relationship between maximum ground surface settlement and excavation depth

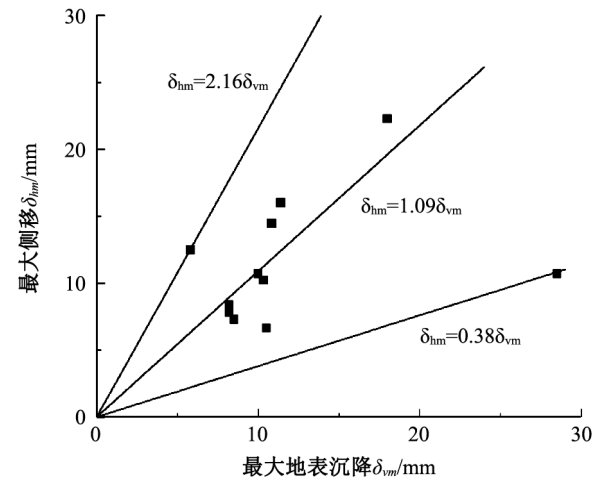


图10 最大地表沉降与最大侧移的关系

Fig.10 Relationship between maximum ground surface settlement and maximum lateral displacement

对地表沉降的影响较小。这是可能是由于插入比直接影响坑底隆起量,进而间接的影响地表沉降。因此,通过增大插入比来减小地表沉降是不合理的。

### 3.5 最大侧移与最大沉降的关系

基坑支护结构的侧向位移与地表沉降密切相关,通过建立地表沉降与支护结构侧向位移的关系可以预测最大地表沉降。参考文献[1]统计的台北地区基坑最大地表沉降  $\delta_{vm}$  位于  $(0.5 \sim 0.7)\delta_{hm}$  之间。图10为西安地铁车站深基坑最大地表沉降与最大侧移之间的关系。由图可知,最大地表沉降随着最大侧移的增大而增大,  $\delta_{vm}$  在  $(0.46 \sim 2.66)\delta_{hm}$  之间,平均值为  $1.1\delta_{hm}$ 。

## 4 结论

1) 深基坑侧移曲线为“鼓胀形”,最大侧移点深度  $H_{hm}$  出现在开挖面以上 2.7 m ~ 11.1 m 之间,平均值位于开挖面以上 6.35 m。

2) 支护结构最大侧移值  $\delta_{hm}$  在  $(0.03\% \sim 0.12\%)H$  之间,平均值为  $0.06\%H$ ;最大侧移值随插入比的增大而具有减小的趋势,适当提高插入比能有效控制支护结构的变形。

3) 地表沉降曲线为“凹槽形”,最大沉降位置介于  $(0.41 \sim 0.67)H$  之间,平均值为  $0.51H$ ;最大地表沉降  $\delta_{vm}$  分布于  $(0.02\% \sim 0.12\%)H$  之间,平均值为  $0.06\%H$ ;增大插入比并不能有效的减小地表沉降。

4) 最大地表沉降随着最大侧移的 (下转第 59 页)

弯梁间距, 确定导向卡数量, 并将总载荷进行分解。最后, 查表 4 确定导向卡规格。

## 4 结论

1) 导向卡承受载荷, 应根据不同情况进行组合, 载荷组合存在上、下限, 最终可通过技术经济比较后确定。

2) 导向卡类型虽多, 工程上均可采用滑动摩擦的力学模型, 通过螺栓预紧力计算推导其所能承受的载荷大小。

### 参考文献:

[1] 姚贵英, 李纯良, 张晓四. 提高立井井筒排水管路

安装设计质量的几点尝试 [J]. 煤炭工程, 2004(7): 40-41.

[2] 马海君. 超深井筒排水管路及其梁系的安全性能分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.

[3] GB/T 50451-2017, 煤矿井下排水泵站及排水管路设计规范 [S].

[4] 张晓四, 姚贵英. 基于系统工程的立井井筒排水管路优化设计 [J]. 煤, 2009(9): 15-17.

[5] 成大先. 机械设计手册: 第 1 卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[6] MT/T 5017-2011, 煤矿井筒装备防腐蚀技术规范 [S].

[7] 赖勇平, 胡芳. 论油漆对摩擦系数的影响 [J]. 沪东中华技术情报, 2001(4): 28-29.

(责任编辑 李新)

(上接第 42 页) 增大而增大, 最大地表沉降与最大侧移的比值  $\delta_{vm}/\delta_{hm}$  位于 (0.46, 2.66) 之间, 平均值 1.1。

### 参考文献:

[1] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.

[2] 丁智, 王达, 王金艳, 等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 506-512.

[3] 廖少明, 魏仕锋, 谭勇, 等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469.

[4] 杨罗沙. 基于现场监测反馈分析的黄土地区超深基坑位移控制及工程应对措施研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[5] 刘均红. 西安地铁车站深基坑变形规律现场监测与 FLAC 模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.

[6] 任建喜, 张引合, 张琨, 等. 西安地铁车站深基坑变形规律 FLAC 模拟研究 [J]. 铁道工程学报, 2011, 28(3): 90-93.

[7] 张婷. 西安地铁韦曲南站深基坑变形规律现场监测研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.

[8] 丰友山. 西安大雁塔车站基坑开挖稳定性的研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.

[9] 林源. 黄土超深基坑施工对周边环境的影响及对策研

究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[10] 周国华. 黄土地区地铁 T 形换乘站深基坑围护结构稳定性研究 [D]. 长沙: 湖南科技大学, 2009.

[11] 李永辉. 黄土深基坑施工监测分析与数值模拟 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[12] 杨睿, 李冬生. 西安地铁运动公园站深基坑变形规律现场监测研究 [J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(6): 450-454.

[13] 成娟. 西安地铁车站深基坑施工风险管理研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[14] 张慧文. 西安地铁深基坑支护结构设计及稳定性研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

[15] 郭颖. 西安某地铁车站深基坑围护结构设计及变形规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.

[16] 侯小杰. 西安地铁深基坑支护方案优选 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.

[17] 徐甜, 薛丽媛, 邓祥辉. 西安地铁 3 号线某深基坑施工的控制技术 [J]. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2017, 17(1): 96-99.

[18] 王大军. 某地铁车站深基坑有限元模拟及现场监测分析 [D]. 西安: 长安大学, 2017.

[19] 傅震. 黄土地区地铁车站深基坑变形规律的分析 [D]. 西安: 长安大学, 2014.

[20] 刘杰. 黄土地区地铁车站基坑围护结构变形规律监测与数值模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

(责任编辑 李新)