

黄土地区深大基坑桩锚支护结构监测与数值分析

许 健¹, 杨少飞¹, 吴海洋², 张 磊¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国电建集团 青海省电力设计院有限公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 基于黄土地区深大基坑桩锚支护结构变形、位移, 锚索轴力及建筑物沉降等监测数据与数值计算结果的对比分析, 得出以下结论: 基坑支护结构桩顶水平位移、桩顶沉降、桩身水平位移, 临近建筑物沉降等监测值均远小于规范规定的预警值, 表明该基坑支护结构设计合理; 基坑降水, 尤其降水速率的变化, 对地表及临近建筑物沉降有显著影响; 桩身底部向基坑内的最大水平位移为 8.9 mm; 基坑开挖过程中支护结构的监测值与数值计算结果吻合较好。

关键词: 黄土地区; 深大基坑; 桩锚支护; 监测数据; 数值模拟

中图分类号: TU 470⁺. 3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0517-08

Monitoring and numerical analysis of pile-anchor supporting structure for deep and large foundation pit in loess area

XU Jian¹, YANG Shao-fei¹, WU Hai-yang², ZHANG Lei¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Qinghai Electric Power Design Institute of Co. Ltd. of China Electric Power Construction Group, Xining 810008, China)

Abstract: Based on the comparative analysis of monitoring data and numerical calculation results of deformation, displacement, axial force of anchor cable and settlement of building in deep and large foundation pit in Loess area, conclusions are drawn as follows: the monitoring values of pile top horizontal displacement, pile top settlement, pile body horizontal displacement and adjacent building settlement of foundation pit supporting structure are far less than the warning value stipulated in the code, which indicates that the design of foundation pit supporting structure is reasonable. The dewatering of foundation pit, especially the change of precipitation rate, has a significant effect on the settlement of the earth's surface and adjacent buildings. The maximum horizontal displacement of the bottom of the pile into the foundation pit is 8.9mm. The monitoring value of supporting structure is in good agreement with numerical calculation during excavation.

Key words: loess area; deep and large foundation pit; pile-anchor supporting; monitoring data; numerical simulation

随着城市的快速扩容, 高层建筑的大量兴建, 其对地下空间的开发在规模与功能上都提出了更高的要求, 出现了大量技术复杂、规模庞大的深基坑^[1]。这些基坑往往具有开挖深度大、体积大, 工程地质水文条件、周围环境复杂等特点, 对支护结构设计及施工质量要求苛刻。对于开挖深度达 20 m 以上的深大基坑, 目前, 在软弱土地区常用地下连续墙和内支撑复合支护结构^[2], 而在黄土地区, 由于土层含水量较低, 土体强度高, 且其施工快、造价低、便于基础施作, 故在周边环境允许的情况下, 深大基坑支护结构形式以桩锚式支护结构为主。

对于软土地区以地下连续墙和内支撑复合支

护结构为主的深大基坑, 张尚根、杨敏、成峰、丁智等^[3-6]通过对软土地区的大量深基坑支护结构变形监测数据进行统计, 分析总结了基坑开挖过程中支护结构变形及建筑物沉降等特征, 为软土地区深基坑支护理论的发展做出重要贡献。王林、杨骏、李彦东、张如林等^[7-11]对软土地区基坑开挖与支护过程中支护结构变形、内力, 地表沉降, 基底隆起, 基坑土体的稳定性等进行了数值模拟分析, 并首次提出坑外土体位移临界面、传导路径及传导曲线斜率的概念。而对黄土地区桩锚支护结构深大基坑, 周勇、官少龙、刘科等^[12-14]通过对深基坑支护结构变形、锚索轴力、建筑物沉降等监测数据进行深入分析, 提出了一些有意义

收稿日期: 2018-08-28

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(515084455)

第一作者: 许 健(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土与环境岩土工程研究。E-mail: xujian@xauat.edu.cn

的结论,但黄土地区深大基坑桩锚支护结构理论的发展与软土地区相比,还有一定的差距,需进一步完善与补充。

基于此,本文以西安医学院第一附属医院医疗科技综合楼基坑支护工程为背景,对基坑支护结构变形及锚索轴力等监测数据进行了分析,并运用有限元对部分监测项目进行了数值模拟,将计算结果同监测结果进行对比分析,验证了计算方法和计算参数选取的可靠程度,探讨了差异产生的原因,以期复杂地质条件下黄土深大基坑工程的设计与施工提供参考^[15]。

1 工程实例

1.1 工程概况

拟建基坑位于西安市西二环路西侧,丰镐西南侧。基坑长约88 m,宽约37 m,平均开挖深度约20.3 m。基坑北侧与既有六层门诊楼相距约3~5 m,基坑东、西及南侧均与道路相邻,道路下埋有地下管线,管顶标高约为-2.0 m左右。

1.2 工程地质水文条件

拟建场地地形平坦,地面相对高程介于99.38~99.52 m之间,地貌单元属皂河一级阶地。据钻探揭露,所见土层自上而下依次为人工填土,第四系全新统冲洪积(Q_{4al+pl})、上更新统残积(Q_{3el})古土壤,冲洪积(Q_{3al+pl})粉质粘土和砂类土,中更新统冲洪积(Q_{2al+pl})粉质粘土和砂类土,冲湖

积(Q_{2AL+L})粉质粘土和砂类土,设计过程中各土层参数选取见表3。

勘察期间,各勘探点均遇到地下水,场地稳定水位深度介于12.90~13.04 m之间,相对高程在86.46~86.51 m之间,属潜水。据水文资料记录,地下水位年变化幅度大于2.0 m,勘察期间处于较高水位期。

1.3 支护结构设计与监测方案

1.3.1 支护结构设计方案

按JGJ120-2012,该基坑侧壁安全等级为一级,重要性系数取1.1。综合考虑场地工程及水文地质条件、周边环境及基坑开挖深度等因素,本基坑在坡顶-0.5~-4.0 m范围内采取放坡开挖,喷锚支护,-4.0 m以下采用锚拉式钢筋混凝土护坡桩方案,各区域均采用钻孔灌注桩配合锚索进行支护。根据工程实际情况,将该基坑分为五个不同的区域,以北侧支护结构为例,各排锚索部分设计参数及地层水文参数见图1。

1.3.2 监测方案及变形控制要求

基坑开挖及使用期间,建设单位委托具有相应资质的第三方实施监测,监测内容包括:桩顶水平位移、桩顶沉降、桩身变形、临近既有建筑物沉降、预应力锚索轴力等,监测点平面分布见图2。

按《建筑基坑工程监测技术规范》GB50497-2009,该基坑变形监测部分控制值及报警值取值见表1。

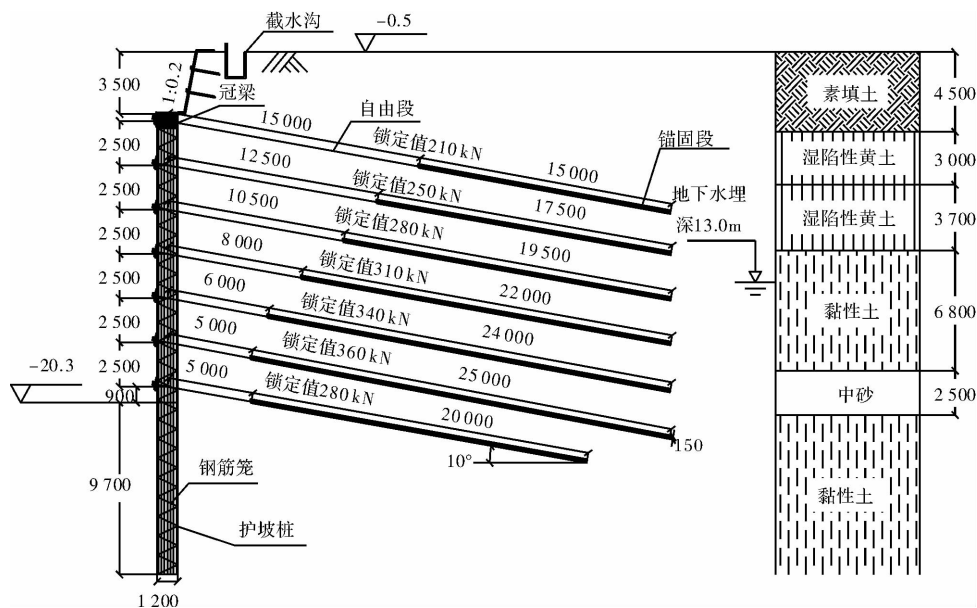


图1 基坑北侧桩锚支护结构及地层剖面图(单位:mm)

Fig. 1 Section of pile-anchor supporting structure and stratum on the north side of foundation pit (Unit: mm)

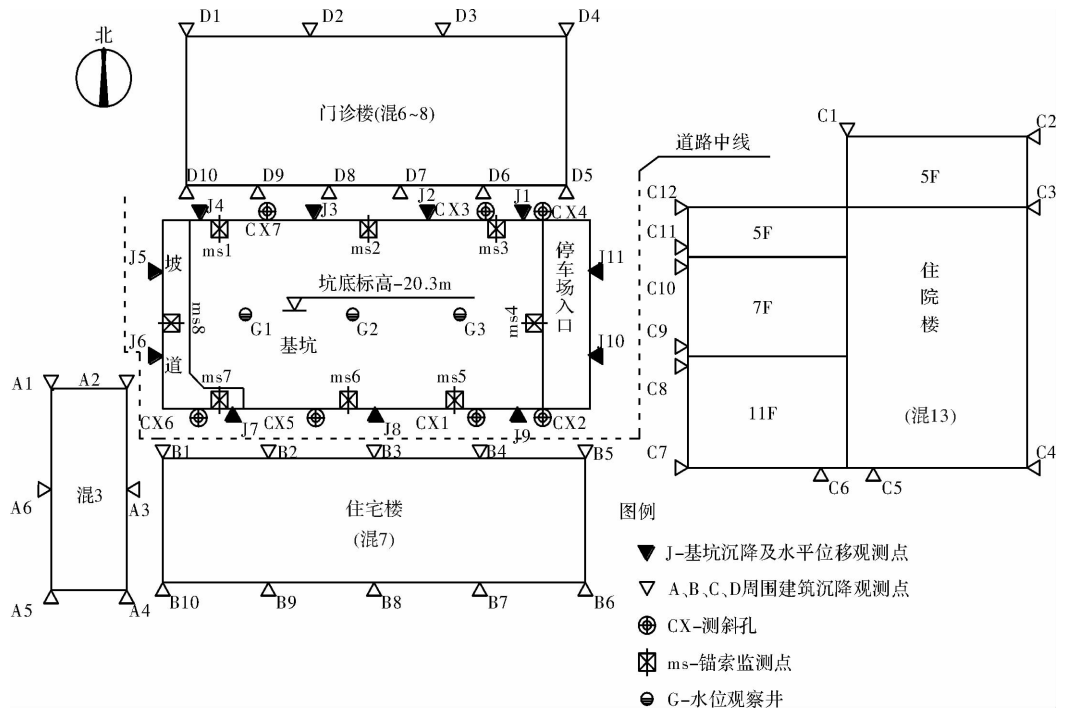


图 2 基坑周边环境及监测点平面布置图

Fig. 2 Layout of monitoring project of pit-retaining structure

表 1 基坑监测变形监控指标

Tab. 1 Deformation monitoring index of foundation pit monitoring

地表沉降		桩顶水平位移		桩身深层水平位移		周围建(构)筑物倾斜	
控制值/mm	报警值/mm	控制值/mm	报警值/mm	控制值/mm	报警值/mm	控制值/mm	报警值/mm
0.15H%	0.12H%	40	32	45	36	2‰	1.6‰

注: H 为基坑开挖深度; 报警值取控制值的 80%。

1.4 基坑开挖工况

由于基坑深度较大, 为确保基坑安全, 基坑开挖期间采用分层开挖, 基坑开挖各工况如表 2 所示。

表 2 基坑开挖及支护进度

Tab. 2 Progress of foundation pit excavation and support

工况	开挖支护进度	对应日期
工况一	开挖至 5.0 m	2015/9/29
工况二	第一道锚索张拉完毕	2015/10/18
工况三	开挖至 7.5 m	2015/10/23
工况四	第二道锚索张拉完毕	2015/11/2
工况五	开挖至 10.0 m	2015/11/9
工况六	第三道锚索张拉完毕	2015/11/20
工况七	开挖至 12.5 m	2015/12/21
工况八	第四道锚索张拉完毕	2016/1/4
工况九	开挖至 15.0 m	2016/1/17
工况十	第五道锚索张拉完毕	2016/2/1
工况十一	开挖至 17.5 m	2016/3/2
工况十二	第六道锚索张拉完毕	2016/3/14
工况十三	开挖至 20.0 m	2016/3/22
工况十四	第七道锚索张拉完毕	2016/4/1

2 数值计算模型的建立

2.1 模型假定

在模拟过程中, 考虑到该基坑实际情况, 作如下假设: (1)土体为均质弹塑性体且各向同性; (2)不考虑地下水的渗流; (3)假定锚索、桩身等支护结构均处于弹性阶段, 不考虑桩身内钢筋的影响; (4)将桩身按等刚度的原则等效为地下连续墙, 不考虑桩间土土拱作用的影响; (5)不考虑冠梁的影响, 用等高度连续墙代替; (6)不考虑腰梁作用; (7)不考虑桩土表面喷射混凝土对支护效果的影响。

2.2 模型建立及参数选取

为了模拟基坑最不利位置支护结构的受力及变形大小, 取基坑北侧 I 区东西长度方向中间位置单个桩间距进行计算分析, 模型长、宽、高分别为 98.4 m、1.6 m、60 m。为便于计算, 在模拟过程中, 将护坡桩按照抗弯刚度相等的原则等效为厚度 $h=0.91$ m 的地下连续墙^[16], 其换算关系如下式(1)。该基坑北侧门诊楼荷载大小取单层 15

kPa, 六层共计 90 kPa, 作用范围取门诊楼宽度约 16 m, 作用位置取地表. 固定沿模型长度方向的位移, 模型底部约束其三个方向的位移. 桩土之间采用面一面接触的形式, 其切向行为通过摩擦系数来确定, 法向行为设置为硬接触, 桩底与土体之间采用绑定约束; 锚索锚固段采用嵌入土体的方式进行约束, 自由段与桩体之间采用绑定约束. 模型装配及网格划分结果见图 3.

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16d_0}} \quad (1)$$

式中: D 为支护桩直径, m; d_0 为支护桩中心距, m.

该模型土体采用摩尔—库伦模型, 所用土体

参数见表 3. 由于假设桩身、锚索等支护构件均处于弹性阶段, 故在模拟过程中设它们均为弹性材料, 所需参数见表 4.

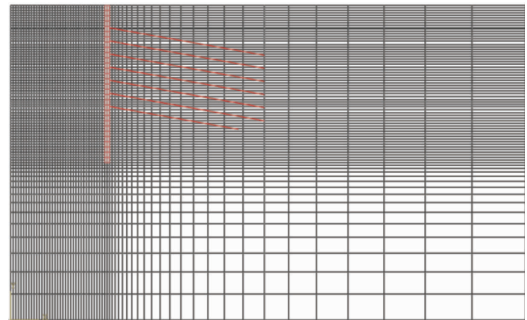


图 3 模型装配及网格划分示意图

Fig. 3 Model assembly and meshing schematic diagram

表 3 摩尔—库伦模型中岩土体物理力学参数

Tab. 3 Physico-mechanical parameters of geomaterials in the Mohr-Coulomb model

层号	土类名称	层厚/m	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$	泊松比	弹性模量/MPa
1	素填土	4.5	18.0	10.0	15	0.33	12.0
2	湿陷性黄土	3.0	17.1	35.0	21	0.30	17.0
3	湿陷性黄土	3.7	18.6	34.0	20	0.28	21.0
4	黏性土	6.8	19.3	35.0	18	0.25	33.0
5	中砂	2.5	20.0	0.0	37	0.23	45.0
6	黏性土	39.5	19.5	40.0	25	0.22	60.0

表 4 护坡桩材料参数

Tab. 4 Material parameters of slope protection pile

区域	桩径/m	桩顶标高/m	桩长/m	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模/MPa	泊松比
I 区	1.2	-0.5	29.5	2 400	30 000	0.2

3 结果分析

以下分析中, 水平位移以向基坑内为负, 反之为正; 竖向位移以竖直向下为负.

3.1 桩顶水平位移分析

图 4 为各开挖工况下监测点 J1-J4 的桩顶水平位移变化曲线, 图 5 为选取的 J3 监测点现场监测值与计算值对比图. 图 4~5 表明:

(1)随着基坑的开挖, 桩顶水平位移发展趋势呈先期慢, 中期快, 后期缓慢并总体趋于稳定的变化规律. 至基坑支护开挖结束时, 桩顶水平位移最大值位于 J2、J3 处, 为 -20 mm, 最小值位于 J4 处, 为 -15 mm, 基坑中部水平位移较边角处大, 表明基坑端部受约束较大, 基坑开挖空间效应显著.

(2)基坑开挖后, 工况六至工况九桩顶水平位移发展最快, 变化曲线呈近似线性关系, 位移变

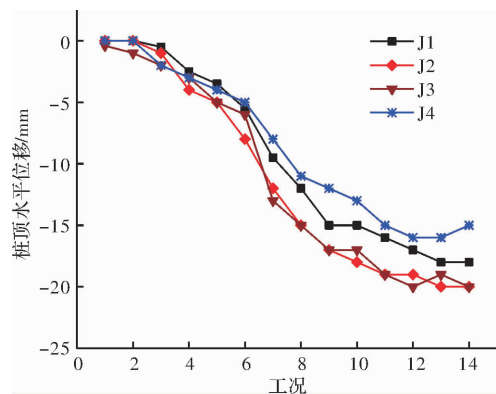


图 4 J1-J4 桩顶水平位移监测曲线

Fig. 4 Horizontal displacement monitoring curves of pile top from J1 to J4

化速率约为 0.16 mm/d, 远小于规范规定的报警值, 表明整个基坑开挖支护过程中, 未出现超挖、快挖等不良现象.

(3)监测与计算结果显示的桩顶水平位移总变

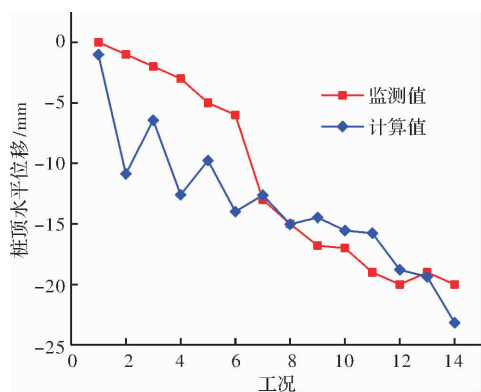


图5 桩顶水平位移对比图

Fig. 5 Comparison diagram of horizontal displacement of pile top

化趋势基本一致,但也有一定差异,基坑开挖后期监测值呈收敛趋势,而计算值未有收敛迹象,这表明施工现场实际工况更为复杂,应将计算结果作为补充。

(4)计算结果中锚索对桩顶水平位移的约束作用更明显,每施加一道锚索,桩顶变形随之减小,尤其是前几道锚索,其对桩顶水平位移的约束作用更为突出,这主要是在锚索的实际张拉过程中,预应力损失过大,远小于模拟时的锚索张拉锁定值。

3.2 桩顶沉降分析

由图6可知,桩顶沉降随基坑开挖逐渐增大,各监测点沉降量与时间呈三段不同斜率的近似线性关系:工况一至工况六,桩顶沉降量很小,仅有 -2.4 mm ;工况六至工况七期间,沉降速率最大,达到 0.1 mm/d ;之后,沉降速率变小,并趋于平稳,平均速率约为 0.04 mm/d 。分析原因,桩顶沉降的这一变化特征可能与基坑降水有关,该基坑在开挖地下水位以上部分时(实际按 -10 m 控制),降水井只开启了设计数量的一半,之后才全部启用,故自工况五开始基坑降水量突然加大,而由于沉降的滞后效应,导致支护结构附近地层沉降速率自工况六开始明显加大,滞后时间约为 10 d ,所以在基坑降水的影响下桩顶沉降速率呈现“慢→快→慢”的这一特性。另外,受基坑开挖空间效应的影响,可以明显看出基坑开挖后期,靠近基坑中部的J2、J3监测点桩顶沉降速率及沉降量总体上较靠近基坑边角的J1、J4监测点的大。

图7为桩顶沉降计算值与J3点监测值的对比,可看出:桩顶沉降计算值与监测值随着工况的变化趋势基本一致,沉降均不断增大,但开挖支护结束时计算结果趋于收敛,且计算结果较监测结果曲线平缓,沉降速率未出现明显的突变现象,

开挖支护结束时计算的沉降量也较监测值小,究其原因,这可能是由于计算分析过程中未考虑基坑降水的影响。

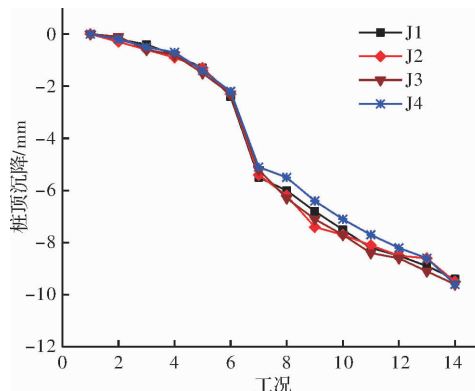


图6 J1-J4 桩顶沉降监测曲线

Fig. 6 Settlement monitoring curves of pile top from J1 to J4

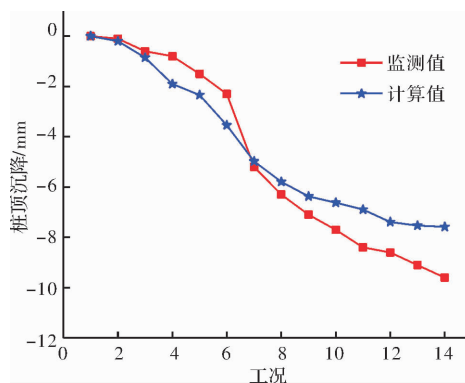


图7 桩顶沉降对比图

Fig. 7 Comparison diagram of pile top settlement

3.3 桩身水平位移分析

图8为测斜孔CX03桩身水平位移监测值,提取桩身水平位移计算数据得到图9,对比图8~图9可知:

(1)桩身水平位移变形曲线形态介于直线和抛物线形之间,空间上呈近似悬臂支护的变形特征,这主要是由于桩身中部锚索相对密集且设计锁定值较大,对桩身约束作用较好,提高了桩身的整体抗弯曲能力,说明在较密集的多层锚索作用下,支护结构整体刚性有所加强。

(2)桩身底部向基坑内的水平位移随着基坑的开挖不断增大,最大水平位移为 -8.9 mm ,说明在黄土地区深基坑设计时,若将嵌固段作为固定端,应严格验算基坑底部土体的抗隆起稳定性。

(3)计算结果与实测结果显示的桩身变形曲线形态大体一致,但计算的桩身中部弯矩总体上大于监测结果,表明实际工况下的支护结构刚性较计算环境下大。

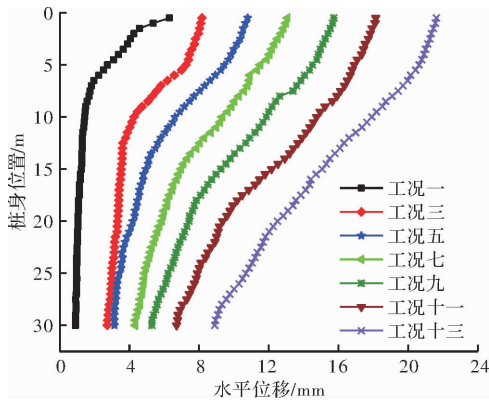


图8 CX03 桩身水平位移监测曲线

Fig. 8 Horizontal displacement monitoring curves of pile body CX03

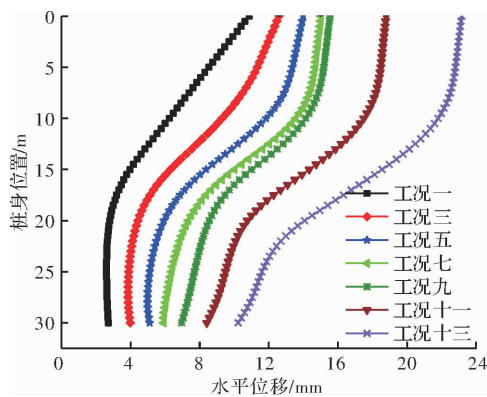


图9 桩身水平位移计算值

Fig. 9 Calculated value of horizontal displacement of pile body

(4)基坑开挖完成后,计算结果显示,桩身最大位移位于桩顶处,为 -23.2 mm ,最小位移处于桩底,为 -10.2 mm ,而监测结果显示,开挖完成时,桩身最大变形为 -21.6 mm ,也位于桩顶,最小变形在桩底,为 -8.9 mm ,计算值较监测值大,说明该基坑支护设计合理,桩身变形控制较好。

3.4 锚索轴向应力分析

图10为监测点ms2轴力随基坑开挖与支护的变化曲线,从中可以看出:(1)随着基坑的开挖,锚索轴力越来越大,这是因为随着基坑的开挖,桩身变形越来越大,锚索的约束作用越来越强,锚索轴力越来越大;(2)监测结果显示,下层锚索对上层锚索的影响较小,这是因为施工过程中,锚索存在较大的预应力损失,使其对桩体的约束作用减弱;(3)由于开挖机械对锚索产生了干扰,锚索2-5轴力大量减小,同时,其余锚索轴力增加,体现了各层锚索相互协调共同工作的空间作用效应。

图11为ms2监测点锚索轴力计算值,基坑开挖支护结束后,为了便于锚索轴力监测值与计算

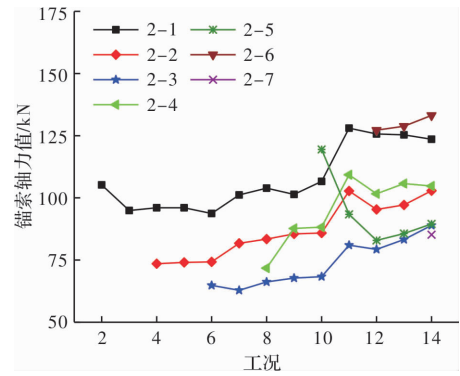


图10 ms2 轴力监测曲线

Fig. 10 Axis force monitoring curves of ms2

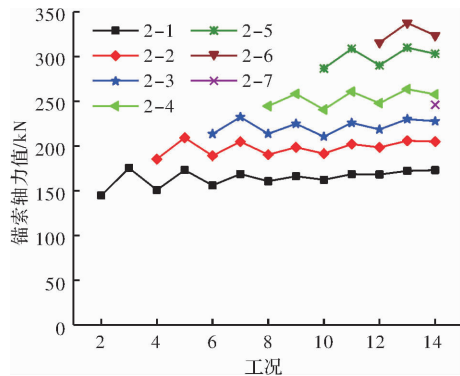


图11 锚索轴力计算值

Fig. 11 Axis force calculated value of anchor cable

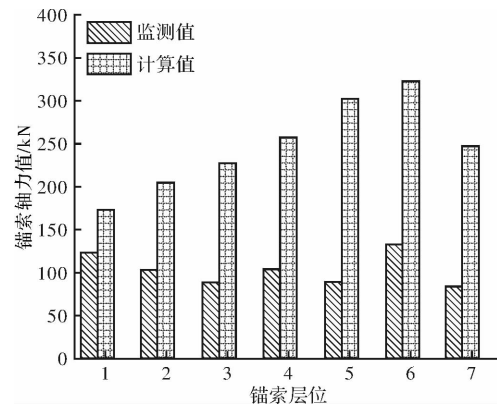


图12 各层锚索轴力对比直方图

Fig. 12 Histogram of axial stress contrast in each layer of anchor cable

值的比较,作锚索轴力计算值与监测值对比直方图,如图12所示。从图中可知:开挖支护结束时,各层锚索轴向应力监测值占计算值比例分别为 71.4% , 50.2% , 39.0% , 40.6% , 29.5% , 41.1% , 34.6% ,地下水位以上部分比值较高,而地下水位以下的黏土层中比值则相对较低,平均比值不足计算值的一半,其表明:地下水位以下锚索的蠕变效应较显著;基坑开挖过程中,支护结构背侧土体向基坑内的实际位移较计算值小,导致锚索约束作用较小,故锚索轴力较小;第六

层锚索轴力监测值较大,主要由于其锚固段大部分位于中砂层中,锚固体与地层之间摩阻力较大,锚索蠕变效应较湿陷性黄土层及黏土层中小。

3.5 基坑临近建筑物沉降分析

由于基坑北侧门诊楼距离基坑最近,现以其作为基坑临近建筑物沉降分析对象,取具有代表性的D1、D4、D5及D9监测点进行数据分析,绘制的门诊楼沉降变化曲线如图13所示,从中可以看出:

(1)随着基坑的开挖,门诊楼沉降逐渐增大,沉降速率整体上呈近似线性关系,平均沉降速率约为0.04 mm/d,而工况六至工况七期间沉降速率有明显的增大现象,这同样与3.2中所述的基坑降水有关。

(2)基坑开挖与支护结束时,门诊楼最大沉降量为D4的-8.7 mm,最小沉降量为D5的-7.2 mm,分别位于门诊楼南北两侧,差异沉降量仅为1.5 mm,整体倾斜率0.09‰,远小于规范规定的倾斜2‰的监测报警值,表明门诊楼整体稳定性良好,受临近基坑开挖影响不大。

(3)基坑开挖支护结束时,门诊楼沉降未见收敛趋势,仍以较缓慢稳定的速度不断增大,故基坑开挖结束后应及时进行地下室的施工,以尽早完成±0以下的回填工作,以及早结束基坑降水工作。

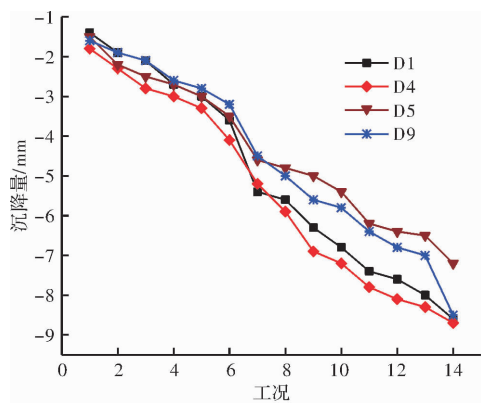


图13 基坑临近建筑物沉降监测曲线

Fig. 13 Building settlement monitoring curves near the foundation pit

4 结论

通过建立有限元模型,对基坑北侧中部支护结构变形、位移,锚索轴力,临近建筑物沉降等监测对象进行计算结果与监测数据的对比分析,得出以下结论。

(1)该基坑支护结构桩顶水平位移、桩顶沉

降、桩身水平位移,临近建筑物沉降等监测值均远小于规范规定的预警值,表明该基坑支护结构设计合理。

(2)基坑降水,尤其降水速率的变化,对地表及临近建筑物沉降有显著影响,基坑开挖过程中应严格控制降水速率。

(3)桩身底部向基坑内的最大水平位移为8.9 mm,说明在黄土地区桩锚支结构的深大基坑设计时,若将嵌固段作为固定端,应严格验算基坑底部土体的抗隆起稳定性。

(4)整个基坑开挖过程中支护结构的变形特征,计算结果与监测值总体上能够较好的吻合,但锚索应力的计算结果与实际监测值偏差较大,锚索应力分析时应以监测值作为参考。

参考文献 References

- [1] 帅红岩,陈少平,曾执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 376-380.
SHUAI Hongyan, CHEN Shaoping, ZENG Zhi. Numerical simulation of deformation characteristics of supporting structure of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 376-380.
- [2] 喻军,龚晓南,李元海. 基于海量数据的深基坑本体变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 319-324.
YU Jun, GONG Xiaonan, LI Yuanhai. Deformation characteristics of deep excavations based on mass data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 319-324.
- [3] 张尚根,袁正如. 软土深基坑开挖地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S1): 1753-1757.
ZHANG Shanggen, YUAN Zhengru. Analysis of ground settlement induced by excavation of deep foundation pit in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S1): 1753-1757.
- [4] 杨敏,卢俊义. 上海地区深基坑周围地面沉降特点及其预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 194-199.
YANG Min, LU Junyi. Characteristics and prediction of ground settlement around deep excavation in Shanghai[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(2): 194-199.
- [5] 成峰,张远芳,万永祥. 苏南软土地区地铁车站深基坑变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 387-391.

- CHENG Feng, ZHANG Yuanfang, WAN Yongxiang. Deformation characteristics of deep foundation pits of subway stations in south Jiangsu province soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 387-391.
- [6] 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(S1): 506-512.
- DING Zhi, WANG Da, WANG Jinyan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.
- [7] 王林,谢亮,杨文琦,等. 软土地区深基坑圆筒支护结构三维数值分析模拟[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 88-109.
- WANG Lin, XIE Liang, YANG Wenqi, et al. Three-dimensional numerical analysis and simulation of circular deep excavation in soft ground region[J]. Building Structure, 2011, 41(3): 88-109.
- [8] 杨骏,李夫杰,杨育僧. 软土地区地铁车站深基坑施工坑外土体位移规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(5): 542-547.
- YANG Jun, LI Fujie, YANG Yusen. Research on the soil displacement outside the construction pit of deep foundation pit in subway station in soft soil area[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(5): 542-547.
- [9] 李彦东,梁发云,褚峰. 软土地区深基坑变形特性三维数值模拟与验证[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1072-1120.
- LI Yandong, LIANG Fayun, CHU Feng. 3D numerical simulation on the deformation behavior of deep excavation in soft soils and its verification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1072-1120.
- [10] 张如林,徐奴文. 基于 PLAXIS 的深基坑支护设计的数值模拟[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 131-136.
- ZHANG Rulin, XU Nuwen. Numerical simulation of timbering design of deep foundation pits based on PLAXIS[J]. Structural Engineers, 2010, 26(2): 131-136.
- [11] 万志辉,刘红艳,步艳洁. 深基坑围护结构变形监测与数值模拟分析[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 83-86.
- WAN Zhihui, LIU Hongyan, BU Yanjie. Analysis of deformation monitoring and numerical simulation on retaining structure of deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2015, 44(7): 83-86.
- [12] 周勇,郭楠,朱彦鹏. 兰州地铁世纪大道站基坑支护监测与数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2014(1): 82-88.
- ZHOU Yong, GUO Nan, ZHU Yanpeng. Construction monitoring and numerical simulation of deep excavation of century avenue metro station in Lanzhou[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(1): 82-88.
- [13] 官少龙,杜艳艳,蔡新森,等. 深基坑桩锚支护体系变形特性研究[J]. 路基工程, 2015(4): 139-143.
- GUAN Shaolong, DU Yanyan, CAI Xinsen, et al. Study on deformation characteristics of pile-anchor supporting system for deep foundation pit[J]. Subgrade Engineering, 2015, (4): 139-143.
- [14] 刘科,赵浩. 黄土深基坑桩锚联合支护结构变形与稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 513-517.
- LIU Ke, ZHAO Hao. Numerical analysis and stability analysis of a commercial plaza excavation engineering foundation in loess area [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 513-517.
- [15] 吴意谦,朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 404-411.
- WU Yiqian, ZHU Yanpeng. Monitoring and numerical simulation of deformation law of deep foundation pit of subway station in Lanzhou collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 404-411.
- [16] 吕凤梧. 复杂条件下深基坑嵌岩支护开挖施工过程数值模拟与分析[D]. 上海:同济大学, 2002.
- LÜ Fengwu. Numerical simulation and analysis of excavation process of rock-socketed support for deep foundation pit under complex conditions[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.

(编辑 桂智刚)