

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.06.024

# 考虑渗流作用的深基坑桩锚支护结构 内力和变形研究

赵喆, 马亮, 张繁祥

(甘肃省建筑科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以天水市某深基坑为研究背景,对预应力锚索内力、支护桩侧向位移及基坑周边地表沉降进行了监测;采用MIDAS/GTS有限元分析软件,分别建立考虑渗流和不考虑渗流两种深基坑开挖支护分析模型,对深基坑开挖过程中桩锚内力和变形过程进行了模拟计算,进一步探讨了在渗流作用下深基坑位移、内力随基坑开挖深度的变化规律。结果表明:在桩锚支护结构体系下,有限元分析结果与实际监测结果的预应力锚索内力、支护桩侧向位移及基坑周边地表沉降变化趋势基本一致,均随着基坑开挖深度的增加呈现增大趋势,直到基坑开挖完成后逐渐趋于稳定;对比分析表明考虑渗流作用分析结果较不考虑渗流作用更为不利。

**关键词:**深基坑;桩锚支护结构;渗流;锚索轴力

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2020)06—0140—06

## Internal Force and Deformation of Pile Anchor Retaining Structure in Deep Foundation Pit Considering Seepage

ZHAO Zhe, MA Liang, ZHANG Fanxiang

(Gansu Academy of Building Research Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** By taking a deep foundation pit in Tianshui City as an example, the internal force of prestressed anchor cable, lateral displacement of supporting pile and surface settlement around the foundation pit are monitored first. Then, the finite element analysis software MIDAS/GTS is adopted to establish two kinds of deep foundation pit excavation and support analysis models with and without seepage respectively, the internal force and deformation of pile anchor in the excavation process of deep foundation pit are simulated and calculated, and the variation laws of displacement and internal force of deep foundation pit with excavation depth under seepage is further discussed. The results are as follows. The change trend of internal force of prestressed anchor cable, lateral displacement of supporting pile and surface settlement around the foundation pit are basically consistent with the actual monitoring results under the pile anchor supporting structure system, which all show an increasing trend with the increase of excavation depth, and gradually tend to be stable after the completion of foundation pit excavation. The comparative analysis shows that the analysis results considering the seepage effect are more unfavorable than those without considering the seepage effect.

**Keywords:** deep foundation pit; pile anchor retaining structure; seepage; anchor cable axial force

随着城市发展和建设的需要,基坑朝着更大更深的方向发展,全国范围许多地区开始研究、编制深基坑支护设计和施工有关技术规范和规程,涌现出

许多实用的基坑支护方法,对基坑过程设计理论和计算方法也有所改进<sup>[1-3]</sup>。

在城市繁华地带施工的深基坑,场地狭小,且在

收稿日期:2020-08-21

修稿日期:2020-09-17

基金项目:甘肃省住房和城乡建设厅2019年建设科技项目计划“BIM技术在兰州市区复杂环境深大基坑中的研究与应用”(JK2019-06)

作者简介:赵喆(1989—),男,甘肃通渭人,工程师,主要从事地基处理与基坑支护结构稳定分析等研究工作。

E-mail:754201770@qq.com

深基坑在施工过程中的安全事故也时有发生,这些深基坑在开挖过程中对周边复杂环境的影响控制也更为严格<sup>[4-5]</sup>。Clough等<sup>[6]</sup>以硬黏土和砂土基坑作为研究对象,研究了基坑侧向位移和基坑开挖深度之间的关系;徐中华等<sup>[7]</sup>以上海软土地区的钻孔灌注桩围护的深基坑为研究对象,从统计角度系统分析了基坑开挖过程灌注桩的变形性状,并研究了相关因素对基坑变形的影响;张学亚等<sup>[8]</sup>以实际工程案例为研究背景,对基坑进行了动态分析,研究了深厚软土地基围护结构的变形规律,并提出了基坑变形控制方法;周勇等<sup>[9]</sup>以兰州地铁湿陷性黄土深基坑为研究对象,对基坑支护结构和位移进行了实时监测,并对车站深基坑的渗流稳定性进行了分析;文建鹏等<sup>[10]</sup>和董桂红等<sup>[11]</sup>以实际深基坑工程案例为背景,对深基坑支护结构和基坑周边环境进行了监测分析;胡志超<sup>[12]</sup>以马銮湾灌新路近海隧道工程为背景,采用理论与现场监测相结合的方法,对比和分析了在渗流作用下基坑沉降、坑底隆起、水平位移及工程桩轴力等,验证了相关设计和监测结果的合理性;朱志鹏<sup>[13]</sup>以实际工程案例为背景,采用有限元分析方法,并结合现场实际监测结果,对开挖过程中基坑在渗流作用下的变形规律进行了系统性的研究,最后采用控制变量法,探讨了土体参数、围护结构参数以及施工因素对基坑变形的影响。虽然国内外对考虑渗流和不考虑渗流深基坑内力和变形方面研究诸多,但是基坑工程具有很强的区域性,而且基坑工程支护结构形式多样,基坑周边环境复杂多变,其他地区的研究成果很难直接对某一环境的基坑施工过程进行预测判断,尤其在一些含水丰富的地区,渗流的影响更是不容忽视。

为了研究考虑渗流作用深基坑桩锚支护结构内力和变形规律,对天水市某深基坑桩锚支护结构在渗流作用下的内力和变形进行了跟踪监测,以便对深基坑实际受力情况进行准确定量描述和对同地区同类型的基坑工程设计和施工做出预测。本文监测结果是在渗流场和土体开挖应力共同作用的结果,很难反映不考虑渗流作用基坑支护内力与变形的结果,因此采用有限元分析方法分别建立了考虑渗流与不考虑渗流两种情况的深基坑开挖支护对比模型,并结合实际监测结果对比分析,进一步研究渗流作用对深基坑桩锚支护结构内力和变形的影响,可供本地区深基坑设计计算和施工参考。

## 1 工程概况

该工程位于天水市秦州区,北至成纪大道,南侧

紧邻籍河,东侧为籍河北路,东西长约 100 m ~ 160 m,南北宽约 60 m ~ 100 m,占地面积为 18 495.0 m<sup>2</sup>,总建筑面积为 85 123.22 m<sup>2</sup>。基坑拟采用明挖顺做法施工,基坑安全等级为一级,基坑±0.000 m,高程为 1 181.300 m,开挖深度为 13.75 m ~ 15.25 m,基坑普遍底标高为 1 165.75 m ~ 1 164.95 m。

### 1.1 工程地质概况

该工程场地根据地层的岩性特征及物理力学性质的差异,地层自上而下划分为 6 层,各土层的基本参数如表 1 所示。各土层状况描述依次如下:

(1) 杂填土层,厚 1.0 m ~ 3.3 m,成分复杂,土质均匀性很差,稍密,稍湿。

(2) 黄土状粉质黏土层,厚 0.5 m ~ 7.0 m,土质均匀性较好,稍湿—湿,硬塑—可塑状。

(3) 圆砾层,厚 1.0 m ~ 5.2 m,层面埋深 3.2 m ~ 8.0 m,层面标高 1 172.75 m ~ 1 176.20 m,骨架颗粒粒径以 2 mm ~ 10 mm 为主,约占总重量的 50% ~ 80%,稍密。

(4) 卵石层,埋深 5.3 m ~ 11.5 m,厚度 2.5 m ~ 6.1 m,骨架颗粒粒径以 20 mm ~ 50 mm 为主,大于 20 mm 的颗粒约占总重量的 50% ~ 60%,稍密。

(5) 强风化泥岩,埋深 8.8 m ~ 12.0 m,厚度 3.3 m ~ 8.2 m,原岩成分以黏土矿物为主,泥质胶结,胶结程度一般,成岩度差,属半成极软岩,遇水易软化。

(6) 中风化泥岩,层面埋深 14.5 m ~ 19.0 m,原岩成分以黏土矿物为主,含有大量的白色钙质成分,泥质胶结,胶结程度一般,成岩度差,属半成极软岩,遇水易软化。

### 1.2 水文地质概况

该工程场地地下水埋深 8.9 m ~ 9.6 m,主要赋存于黄土状粉质黏土层底部及卵石层中,主要受地下径流和籍河侧向渗流补给。根据区域水文资料及周边调查,场地地下水位一般年变化幅度 1.0 m ~ 2.0 m。

表 1 土层基本参数

土层名称	厚度 /m	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	压缩模量 /MPa
杂填土	3.3	17.0	0.35	10.0	12.0	3.9
粉质黏土	0.1	16.8	0.30	23.0	23.0	5.7
圆砾层	4.0	20.0	0.23	0.0	30.0	25.0
卵石层	3.0	21.5	0.23	2.0	40.0	35.0
强风化泥岩层	5.0	22.0	0.26	35.0	31.5	40.0
中风化泥岩层	6.0	22.0	0.26	45.0	32.0	45.0

### 1.3 支护结构设计方案

该基坑采用“咬合桩 + 预应力锚索”的方式进行支护,支护桩为机械钻孔灌注桩,桩长为 18.25 m,桩径为 1.0 m,桩间距为 2.6 m,桩身混凝土强度为 C30,止水桩桩径为 0.8 m,桩间均咬合 0.2 m 以上,桩顶设置钢筋混凝土冠梁,截面尺寸为 1.0 m × 0.5 m。基坑竖直方向采用 3 道预应力锚索,第 1 道与冠梁顶面的间距为 2.0 m,第 1 道与第 2 道、第 2 道与第 3 道预应力锚索的间距均为 2.5 m,预应力锚索采用 3s15.2 的钢绞线,锚固在卵石或泥岩层中,其端部垫采用 2 根 20b 型槽钢背靠背立起作为腰梁。支护结构布置剖面图见图 1。

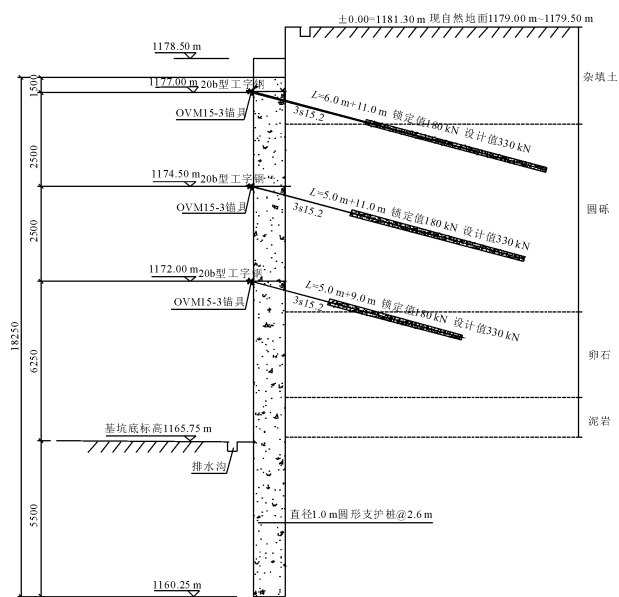


图 1 支护体系剖面图(单位:mm)

## 2 深基坑监测方法及结果分析

基坑拟采用明挖顺做法施工,开挖过程中对基坑支护结构变形和内力进行监测,基坑开挖过程为:第一次基坑开挖到 3.0 m 处,设置第一道预应力锚索;第二次基坑开挖到 5.5 m 处,设置第二道预应力锚索;第三次基坑开挖到 8.0 m 处,设置第三道预应力锚索;第四次基坑开挖到设计标高处。基坑开挖深度较大,且基坑周边环境复杂,所以从基坑边缘起至基坑外周围 1.5 倍基坑深度范围内为需要保护的环境。对该范围内的预应力锚索、围护桩和周边环境进行监测,基坑现场监测点布置如图 2 所示。

### 2.1 锚索轴力

预应力锚索应力变化对基坑开挖过程的安全性有着至关重要的影响,锚索轴力监测是通过接在锚索上的钢筋应力计来进行的,采用频率仪进行预应

力锚索应力监测<sup>[13]</sup>。按照设计要求该试验段预应力锚索锁定值取 180 kN,锁定时的锚索拉力考虑锁定过程的预应力损失,可采用超张拉方法减少预应力损失,锚索拉力取锁定值的 1.1 倍。锚索轴力监测点布置在 Z112 支护桩第一道锚索 M1、第二道锚索 M2 和第三道锚索 M3(编号:112-2-1、112-2-2、112-2-3),通过对同一断面的 3 根锚索轴向应力进行监测,锚索轴向拉力变化曲线如图 3 所示。

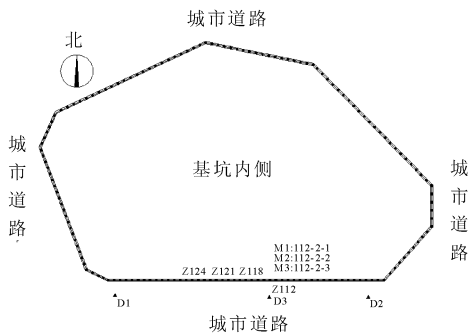


图 2 基坑现场试验监测点布置图

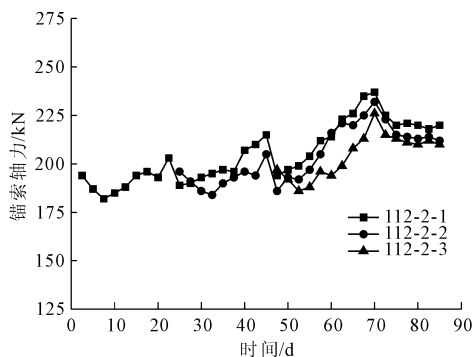


图 3 锚索轴力-时间曲线

由图 3 可看到在预应力锚索锁定后由于预应力损失锚索拉力值有所降低,随后基本处于稳定状态,随着基坑深度的增加,锚索拉力值也会随之增加,一般增长率在 25% 左右。从曲线还可看出,下一道锚索施工后,会使得上部已施工完成的锚索轴向拉力值有所降低,但随着基坑的开挖,锚索轴向拉力值又会逐渐增大,整体呈增大趋势,后期逐渐趋于稳定。

### 2.2 支护桩桩体位移

通过采用测斜装置对 3 根支护桩 Z118、Z121 和 Z124 的桩身水平位移进行监测,测斜仪沿着测斜管定向放入管中,直至滑入管底,量测时每隔 500 mm 读一次数,通过测定测斜仪与垂直线间的倾角变化,进而得到支护桩不同深度处的水平位移变化<sup>[14-15]</sup>。对 Z118、Z121 和 Z124 支护桩的桩身水平位移进行监测,支护桩桩身水平位移变化曲线,如图 4 所示。

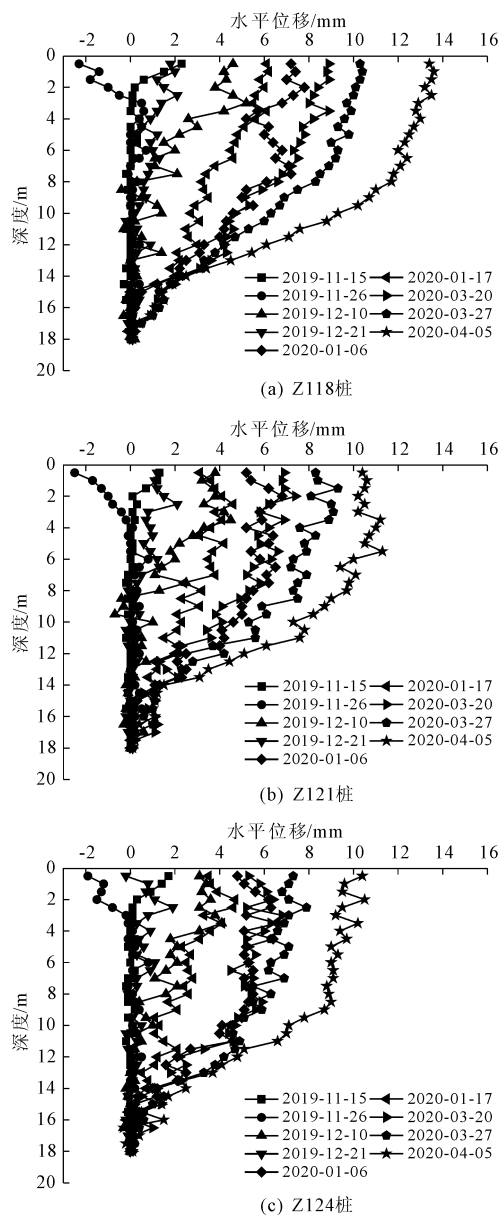


图4 桩身位移曲线

由图4可看出支护桩桩身位移越靠近桩顶位移越大,桩底基本没有发生过大位移,沿着桩身呈现“上部大,下部小”的规律,说明支护桩桩底5.5 m的嵌固深度满足要求。随着基坑开挖深度的增大,桩身变形逐渐增大,当基坑开挖至设计标高后桩身位移达到最大值,后期逐渐趋于稳定。锚索的施加使得位移部分回弹,可以减少桩身位移,随着基坑的开挖以及锚索的施工,桩身后土体合力点下移,在开挖至设计标高后,桩身位移自上而下整体呈阶梯状分布,桩身上部位移增长平缓,下部位移增长较为明显。从桩身位移曲线可看到,Z118、Z121和Z124支护桩的桩身位移最大值分别为13.6 mm、11.3 mm和10.4 mm,说明空间效应对基坑开挖过程支护桩

的桩身位移有显著影响,支护桩中间位置的桩身最大位移值明显大于其他支护桩位置。

### 2.3 坑周地表沉降分析

受现场场地条件限制,只在基坑周边布设3个地表沉降监测点D1—D3,对其在开挖过程中周围地表沉降进行监测,地表沉降随时间的变化曲线如图5所示。

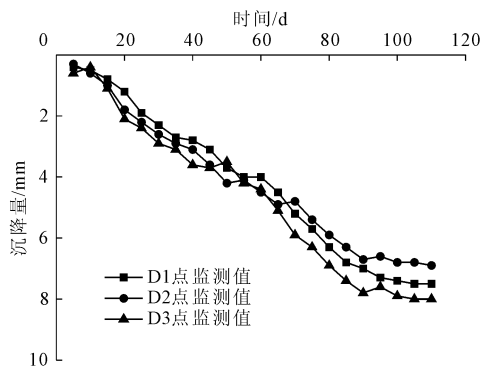


图5 地表沉降变化曲线

由图5可以看到,随着基坑的开挖基坑周边地表沉降整体呈增大趋势;在基坑开挖初期,地表逐渐出现沉降,最大沉降为0.6 mm,到第100天基坑已开挖至基地标高,周边地表沉降出现在D3监测点,沉降值增至为8.0 mm,后期逐渐稳定。在基坑第三道锚索施工完毕前,地表沉降变化速率较小,在第三道锚索施工完毕后到开挖至基坑底,地表沉降变化速率较大,在基坑完全开挖至基底后,沉降基本达到最大,并逐渐趋于稳定。

## 3 基坑开挖渗流分析

### 3.1 分析模型

结合本工程实例,在有限元分析过程中分不考虑渗流深基坑开挖支护和考虑渗流深基坑支护的渗流稳定性分析两个阶段,开挖支护分析按照深基坑开挖施工顺序进行,渗流稳定性分析采用阶段性降水与施工开挖支护交替进行。

在分析模型中,通过激活、钝化网格组的方法来实现深基坑支护结构设置与开挖的过程,本构模型选用摩尔-库仑弹塑性模型,土体采用二维平面应变单元,混凝土灌注桩采用二维梁单元,锚杆采用桁架单元,土层参数按表1取用。模型水平方向计算长度取开挖宽度的3.5倍,竖直方向取开挖深度的6.0倍,整个基坑模型尺寸为210.0 m×82.5 m,模型底部设为固定边界,两边设定为法相约束边界,分析模型如图6所示。

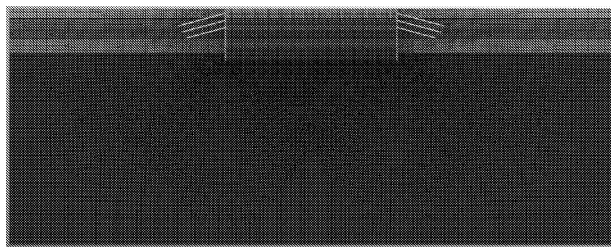


图 6 分析模型

### 3.2 渗流作用对基坑开挖的影响

由图 7 可看到土体初始孔隙水压力呈水平分布,保持着相对平衡的状态,随着基坑开挖和降水会逐渐打破土体原有的孔隙水压力平衡,在基坑内外侧产生水头差,从而导致渗流的产生。在基坑开挖过程中,从基坑内侧向基坑外,渗流场等势线越来越稀疏,在靠近支护桩附近渗流场等势线最为密集,表明在支护桩附近水力梯度最大,从流速来看此处也是流速最大区域,因而该区域地下水的渗流作用较大。

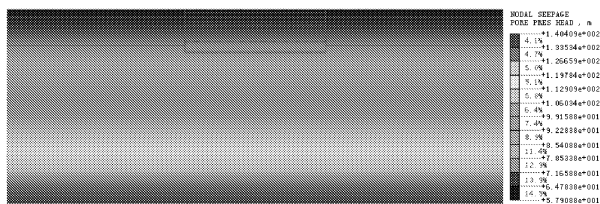


图 7 初始孔隙水压力

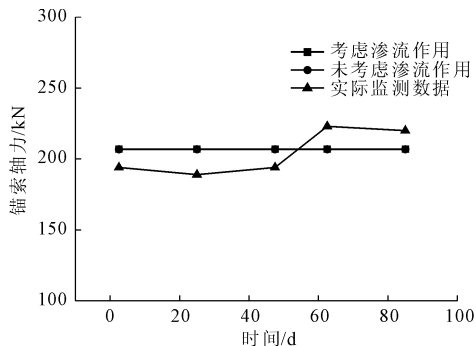
### 3.3 锚索轴力对比分析

从图 8 可看到在基坑开挖过程中,随着土体应力释放和渗流力的作用,锚索轴向拉力整体呈现逐渐增大的趋势;在基坑周围土体应力场和渗流力共同作用下,预应力锚索轴向拉力相对于不考虑渗流作用时增大幅度值约为 0.1%,两者相差较小,表明渗流力对预应力锚索轴向拉力影响不明显。另外,还可看到考虑渗流作用后的锚索轴向拉力较不考虑渗流作用和实际监测结果偏大,这是由于在考虑渗流力作用后,会使得基坑周边土体有效应力有所增大,产生向基坑内侧的水平位移,锚索轴向拉力也会随之增大,因此,基坑支护结构设计应考虑渗流场作用,提高基坑支护结构的安全系数。

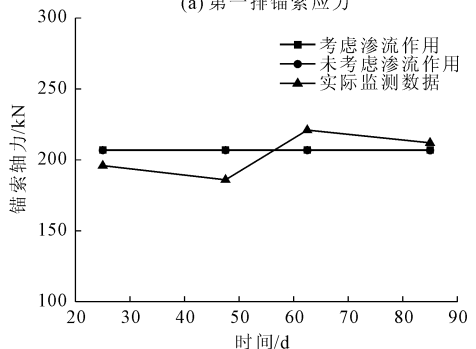
### 3.4 支护桩水平位移对比分析

从图 9 可看到,在基坑周围土体应力和渗流作用下,有限元分析曲线与实际监测结果曲线变化趋势基本一致,随着开挖深度的增加支护桩水平位移呈增大趋势。在考虑渗流作用支护桩桩顶水平位移

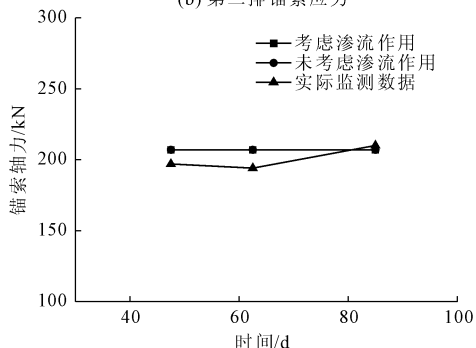
可达 11.4 mm,未考虑渗流作用支护桩顶水平位移为 7.5 mm,整体来看支护桩水平位移考虑渗流作用相对于不考虑渗流作用增大幅度值约在 0.0% ~ 78.0%,具体桩身水平位移的变化与桩体本身部位有关,随桩深的变化而变化,这是由于渗流力的作用和开挖后土体应力释放造成的,渗流作用使得基坑外侧有效应力增大,从而作用在支护结构上的水平力增大,因此,考虑渗流场分析结果能够更好的反映深基坑在降水开挖过程中周边土体位移变化情况。



(a) 第一排锚索应力



(b) 第二排锚索应力



(c) 第三排锚索应力

图 8 锚索轴向拉力对比分析

### 3.5 坑周地表沉降对比分析

随着基坑的开挖,基坑周围土体存在一定的地表沉降,从图 10 可看到,有限元分析计算结果与现场实际监测结果变化趋势相一致,两者吻合较好,整体随着基坑开挖深度的增加,基坑外地表沉降呈现逐渐增大的趋势。另外,从曲线图可知,在基坑开挖

至第90天时,考虑渗流作用基坑地表沉降值可达8.1 mm,相反未考虑渗流作用基坑地表沉降值为7.4 mm,在整个基坑开挖过程中,考虑渗流作用基坑地表沉降相比于未考虑渗流结果有所增加,增加幅值约为8.0%~20.0%,这是由于渗流场作用的影响基坑外侧土体竖向有效应力增大的结果。

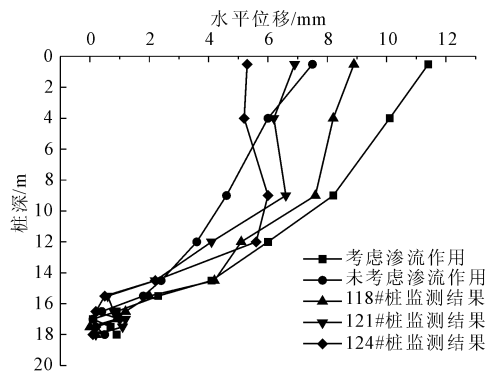


图9 桩体水平位移对比分析

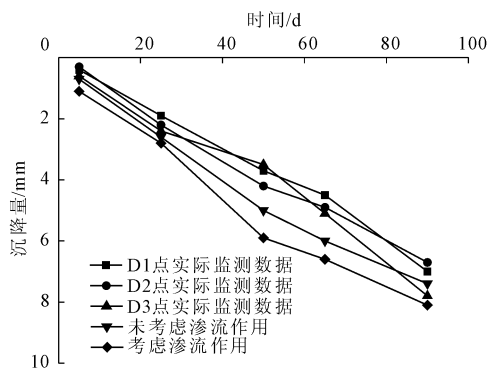


图10 地表沉降对比分析

## 4 结论

通过对渗流作用下深基坑桩锚支护结构内力和变形进行分析,可总结以下几点结论:

(1) 考虑渗流作用深基坑开挖,随着基坑开挖深度的增加,基坑外围土体有效应力逐渐增大,使得预应力锚索轴向拉力、支护桩桩身水平位移和基坑周地表沉降均会有所增加,直到基坑开挖完毕最终趋于稳定。

(2) 考虑渗流作用,在基坑开挖过程中,支护桩附近区域水力梯度、流速最大,受到地下水的渗流作用较大。

(3) 有限元分析结果与现场监测结果较为接近,有、无考虑渗流作用的预应力锚索轴向拉力、支护桩水平位移和基坑周边地表沉降曲线大致相同,但考虑渗流作用下的结果较大,对深基坑开挖稳定性极为不利,说明深基坑考虑渗流作用使计算结果

偏于安全。

(4) 采用“咬合桩+预应力锚索”支护方案可有效地控制桩体水平位移和坑周地表沉降,实测的最大桩体水平位移在10.4 mm~13.6 mm之间,小于25.0 mm的允许值,此支护类型适用于天水市的类似深基坑工程的施工。

## 参考文献:

- [1] 郑磊,王培涛,周丰峻.大跨度地下洞室工程技术发展[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(3):321-328.
- [2] 周小秋,黄庆.某工程地下基坑支护结构位移过大原因分析[J].西部探矿工程,2001,13(4):20-21.
- [3] 侯学渊,刘国彬,黄院雄.城市基坑工程发展的几点看法[J].施工技术,2000,29(1):7-9.
- [4] 严薇,曾友谊,王维说.深基坑桩锚支护结构变形和内力分析方法探讨[J].重庆大学学报,2008,31(3):344-348.
- [5] 史立新,李忠.预应力锚索咬合桩深基坑支护三维数值模拟分析[J].甘肃科学学报,2018,30(1):48-54.
- [6] Clough G W, O'Rourke T D. Construction induced movements of in situ wall[J]. Geotechnical Special Publication, 1990(25):439-470.
- [7] 徐中华,王建华,王卫东.软土地区采用灌注桩围护的深基坑变形性状研究[J].岩土力学,2009,30(50):1362-1366.
- [8] 张学亚,钱德玲,魏雪云.软土地基上深基坑开挖变形控制及风险性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015(2):208-212.
- [9] 周勇,王晓莉,朱彦鹏,等.兰州地铁湿陷性黄土深基坑在降低水位条件下的渗流稳定性分析[J].中国铁道科学,2017,38(1):86-94.
- [10] 文建鹏,赵笑鹏,姜晓迪.珠海某混凝土内撑式支护结构深基坑监测与分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):99-103.
- [11] 董桂红,刘有军,郭海力.昆明市某深基坑变形监测实例分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):76-81.
- [12] 胡志超.基于现场监测和数值模拟的近海隧道深基坑研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [13] 朱志鹏.基于渗流-应力耦合分析的基坑开挖数值计算及变形的研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [14] 肖武权,冷伍明,律文田.某深基坑支护结构内力与变形研究[J].岩土力学,2004,25(8):1271-1274.
- [15] 夏才初.地下建筑测试理论与监测技术[M].上海:同济大学出版社,1993.
- [16] 时伟,刘继明,章伟.深基坑桩锚支护体系水平位移试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S1):2355-2358.