

复杂环境条件下高水位深基坑变形控制设计探讨

王荣彦

(河南省地勘局第二水文地质工程地质队,河南 郑州 450053)

摘要:到目前为止,国家、行业和地方规范尚没有从理论高度对基坑工程的变形控制设计加以明示。在查阅国内大量文献基础上,结合多年的工程实践对复杂环境条件下高水位深基坑变形控制设计的概念、含义及基坑变形控制设计的设计内容进行了初步的探讨,对今后开展基坑工程的变形控制设计有一定的参考价值。

关键词:基坑工程;复杂环境条件;高水位;深基坑;变形控制设计

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)04-0039-05

Study on Deformation Control Design of Deep Foundation Pit in High Water Level District under Complex Environment Conditions/WANG Rong-yan (No.2 Team of Hydrology and Engineering Geology, Henan Bureau of Investigation and Development of Geology and Mineral Resources, Zhengzhou Henan 450053, China)

Abstract: Based on the reviewing of large amount of literature data of China and according to the engineering practice for years, study was made on the concept and the meaning as well as the content of deformation control design of foundation pit.

Key words: foundation pit engineering; complex environment condition; high water level; deep foundation pit; deformation control design

1 概述

本文所说的复杂环境条件是指在小于 $0.5H$ (H 为基坑深度)内有建(构)筑物、道路、管线等需要采取工程措施加以保护。所说的高水位地区是指地下水位在基坑深度以上,需要采取降水或止水措施以确保基坑挖土、基础施工的安全和正常进行。龚晓楠教授^[1]认为,目前对基坑工程的设计方法有2种:(1)基坑工程稳定控制设计:当基坑周围空旷允许基坑周围土体产生较大变形时,基坑围护体系满足稳定性要求即可;(2)基坑工程变形控制设计:当基坑紧邻市政道路、管线、周围建构筑物,不允许基坑周围地基土体产生较大的变形时,基坑围护设计应按变形控制设计。它不仅要求基坑围护体系满足稳定性要求,还要求基坑围护体系的变形小于某一控制值。按变形控制设计不是愈小愈好,也不易统一规定。龚晓楠教授^[1]又提出,现有规范、规程、手册及设计软件均未能从理论高度加以区分。我国已有条件推广根据基坑周边环境条件采用按稳定控制设计还是按变形控制设计的设计理念。

就笔者目前查阅到的文献资料,最早提出基坑工程按变形控制设计的设计理念见于1996年8月侯学渊、刘国彬撰写的《软土基坑支护结构的变形控制设

计》一文^[2]。此后,1996年孙家乐^[3],1999年熊巨华^[4],1999年俞建霖^[5],2002年刘兴旺^[6],2003年吕三和^[7],2008年王文东^[8]分别从不同方面就自己的研究领域针对“基坑变形控制设计”这一设计理念进行论述。笔者受益匪浅,也深受启发,并就该问题发表自己的一点看法,与同行们共同探讨。

2 基坑工程变形控制设计的概念和内涵

何为基坑工程变形控制设计?各相关文献解释不同,笔者试做如下解释:所谓变形控制设计是指在充分了解周边环境的前提下,综合考虑基坑深度、地质条件(含地下水条件)和环境条件、气象条件、场地红线条件的基础上,对基坑支护结构及可能影响的周边环境进行变形验(估)算,在支护结构体满足强度及稳定的前提下,控制位移在环境允许的范围,合理确定其变形控制量,并进行支护方案的选择和优化,并选择合理的变形控制技术(措施)。在方案实施过程中实行动态设计,以确保基坑变形对周围道路、地下管线、建(构)筑物不会产生不良影响,不会影响其正常使用为目的。这一设计理念就叫基坑工程变形控制设计。

基于此,要做好基坑工程的变形控制设计应包

收稿日期:2011-09-07

作者简介:王荣彦(1965-),男(汉族),河南濮阳人,河南省地勘局第二水文地质工程地质队副总工程师、注册岩土工程师、高级工程师,工程地质与水文地质专业,从事岩土工程的勘察、设计与治理工作,河南省郑州市南阳路56号,wangrongyan168@126.com。

括但不限于以下内容:

(1)明确周边环境(建、构筑物、道路、地下管线)的位移变形量(包括变形速率);

(2)做好基坑工程的概念设计,对支护方案进行比选,在正确选型的基础上对支护结构进行优化设计(如对支护桩嵌固深度、刚度的调整,拉锚采用扩大头锚杆调整位置,调整预应力以控制变形等);

(3)对支护结构和保护对象进行变形预测分析和估算,必要时调整、补充或优化设计;

(4)选择合理的止水帷幕,并控制施工质量,防止基坑发生大的涌砂事故,以控制基坑变形;

(5)设计合理的土方开挖方案以控制基坑的不正常变形;

(6)科学、全面监测、分析,随施工过程及反馈信息及时调整设计方案,实行动态设计,当变形过大时及时采取工程措施;

(7)有效的变形控制技术应急措施。

3 深基坑变形控制设计的主要内容

3.1 明确基坑工程及周边环境的位移变形量(包括变形速率)

2009年3月,随着《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497-2009)^[9]的发布,我国第一次以国标的形式对基坑支护结构及周边环境的保护对象就监测项目、监测点布置、监测方法及精度要求、检测频率、监测报警、数据处理及反馈等进行了系统的要求和规定。按照支护结构类型和基坑等级的不同,对支护结构的报警值分别从累计值、变化速率和相对基坑深度控制值三方面取其小值确定;对基坑周边保护对象从累计值和变化速率两方面控制。

3.2 进行基坑工程概念设计,做好支护方案比选

(1)根据文献[8],将主体工程与支护结构相结合的设计方法,已在上海地区几十项深大基坑中得到广泛应用,该方法可以有效控制基坑变形,有效保护周边环境,效果较好。

(2)根据文献[10],在复杂环境条件下高水位地区深基坑支护方案选型中,郑州地区多采用刚度较好的单一的桩锚支护体系或联合支护体系(即上部土钉下部桩锚支护体系),当然也有别的支护体系,这里不一一列举。在此基础上再进行细部的优化设计。即所谓先进行概念设计,进行方案比选,再进行优化设计,如:增大排桩断面,增大支撑刚度或增大排桩的嵌固深度;改变支撑锚杆的位置及刚度、预应力设置;采用新工艺,如桩锚支护结构中的锚杆

由普通的预应力锚杆(索)调整为扩大头锚杆,以增加抗拔力,有效控制基坑变形。

以下试以郑州东区某深基坑采用桩锚支护形式,其中的锚杆采用扩大头锚杆为例,说明优化设计的重要性及效果。

该基坑挖深11.5 m,基坑的西侧、南侧紧邻城市主干道,距离仅7~8 m。基坑影响范围内的土层为:0~7.0 m黄色稍密粉土;7.0~19.0 m为灰色可塑粉质粘土夹灰色稍密粉土;19.0~29.0 m为中密~密实细砂。地下水位5.5 m。

方案比选及确定:在方案比选专家论证的基础上,确定在基坑南侧、西侧采用双排水泥土搅拌桩截水方案,支护方案采用联合支护法,即上部5.0 m采用土钉墙支护形式,下部采用桩锚支护。

对方案进行优化:在对郑州东区类似基坑类似支护形式对比分析并经专家论证对方案进行优化,最终确定:其中的桩为CFG后插筋钻孔灌注桩,非普通的钻孔灌注桩,采用不均匀配筋;其中的锚杆为非常规的、普通的预应力锚杆,采用LXK工法提倡的扩大头锚杆。具体参数见表1~4。计算的支护结构安全系数见表5。支护结构如图1。

表1 上部土钉墙坡度信息

坡号	台宽/m	坡高/m	坡度系数
1	1.65	5.0	80.0

表2 止水帷幕(水泥土搅拌桩)设计有关参数

桩型	桩径/mm	有效桩长/m	桩间距/m	桩顶标高/m	喷灰量/(kg·m ⁻¹)	排数
水泥土搅拌	500	11.50	0.35	-5.5	65.0	2

表3 下部护坡桩设计有关参数

桩径/mm	桩长/m	主筋		加强筋		箍筋		桩顶标高/m	桩间距/m	
		直径/mm	根数	长度/m	直径/mm	间距/mm	直径/mm			间距/mm
800	12.0	22	12	12.0	12	2.0	8	0.20	-5.5	1.2

施工要求:主筋预留500 mm伸入冠梁,浇注砼标号C25,自然地面标高为±0.000 m。

表4 预应力锚桩设计有关参数

排数	锚桩钻孔		锚索长度/m		钢绞线长度/m	标高/m 自然地面为±0.000 m	间距/m
	孔深/m	孔径/mm	自由段	锚固段			
第一排	24.2	200	6	18	24.5	-5.3	2.4
第二排	21.2	200	6	15	21.5	-8.0	

注:第一、二排锚索施加预应力为250 kN;扩大头段长3.0 m,直径400 mm;采用普通42.5纯水泥浆,水灰比0.75,泵压力值为1.2~2.4 MPa,注浆总量<80 kg/m;钢绞线规格为3根7Φ5 1860级钢绞线。

桩顶冠梁设计参数:截面积500 mm×800 mm,浇注砼C25,配筋6Φ18、箍筋Φ8@200、加强筋Φ12

表5 计算的支护结构安全系数

基坑 深/m	预估桩顶最 大变形/mm	抗倾覆 验算	整体稳 定验算	抗管涌 验算	抗隆起 验算	承压水 验算
11.5	21.5	1.180	1.345	3.473	4.682	1.28

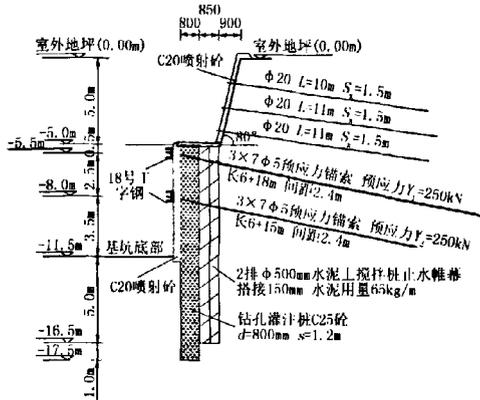


图1 郑州东区某深基坑支护结构

@2000。锚杆连梁:2×22 槽钢。楔型垫板:250 mm×250 mm 钢板厚 25 mm。锚具、夹片:OVM15 系列。

位移监测:在基坑桩顶共布置 6 个水平位移监测点,路面共布置 6 个沉降监测点,实测结果表明,桩顶水平位移在 5.6~12.0 mm(而预估的桩顶水平位移为 21.5 mm),桩顶最大水平位移相当于基坑深度 0.11%*H*;对应的路面沉降在 2.9~6.8 mm。根据对郑州东区类似地层类似深度类似支护类型的基坑变形调查结果,其桩顶最大水平位移多在 18.5~39.0 mm,相当于基坑深度的(0.22%~0.38%)*H*。

根据文献[11],福州市 24 项基坑工程 111 根桩身变形测试成果统计资料,桩身位移量:桩撑方案 2.2~70 mm,平均 30.0 mm;钢管支撑方案 27.8~88.7 mm,平均 60.2 mm;竖向斜支撑方案 31.3~118.8 mm,平均 76.0 mm;土锚支护方案 45~110.2 mm,平均 79.0 mm。上述工程土质接近,基本反映了支护结构本身对位移的控制作用。也反映了排桩位移主要受支护结构本身刚度控制。只是论文没有给出基坑深度与桩身位移的关系。当然其中也反映了施工质量不同对桩身位移的影响。

根据徐中华^[12]对上海地区 80 个采用钻孔灌注桩围护结构的实测数据,所有基坑的最大侧移随基坑深度的增加而增大,基本介于 0.1%*H*~1.0%*H*,平均 0.44%*H*。当然郑州东区的土质与上海、福州相比要好的多,三地采用的支护方案也有不同程度的差异,且也有施工质量的因素影响等等。但从上

述三地的致对比,可以看出,在总体方案确定后进一步优化设计方案对控制基坑位移影响显著。

3.3 对支护结构和保护对象进行变形预测分析和估算

基坑工程是支护、降水、基坑开挖的系统工程,因此,基坑施工对周围环境的影响可分为如下 3 个方面。

3.3.1 支护结构施工及结构本身变形对周围环境的影响

对支护桩的施工对周围环境的影响应从采取合适的工程措施上解决。如郑州东区护坡桩采用钻孔灌注桩时,多采取套打、优质泥浆护壁、提高成孔质量,防止孔壁坍塌,尽量减少对基坑周边土体的影响。

目前的国家规范及有关基坑支护软件可近似计算或估算出支护体本身的变形,这里不再赘述。但对于支护结构的变形引起基坑边缘地面沉降和是否引起坑底隆起,在不同的文献中往往仁者见仁^[13]。有的学者主张将支护结构变形与地面沉降和坑底隆起结合起来综合考虑,认为支护结构变形对坑底隆起有明显影响;有的学者主张应该将坑底隆起与支护结构变形分开考虑。一般认为,将坑底隆起单独考虑,而把支护结构变形与地面沉降结合起来考虑,至少可以简化计算模式,更便于计算(估算)。现在一般认为,典型的地表沉降曲线有三角形曲线和正态分布曲线。在工程实践中,地面沉降以正态分布曲线出现较多,具体计算可参考文献[13]或其它文献。

3.3.2 长时间大幅度基坑敞开降水对周围环境的影响

长时间大幅度基坑敞开降水形成以基坑为中心辐射一定范围的漏斗状的弯曲水面,即所谓降水漏斗曲线。理论、经验和监测结果反分析历来是岩土工程得以发展的必经之路。要准确评估降水引起的地面沉降难度很大。从理论上说,对基坑敞开降水对周围环境的影响通常按照分层总和法对欠固结的粉土层、粘土层进行沉降量估算,公式为:

$$S = \alpha / (1 + e_0) \cdot \Delta P h$$

式中:*S*——计算的粉土层、粘土层沉降量,mm;
 α ——压缩系数; e_0 ——土层原始孔隙比;*h*——计算土层厚度,m; ΔP ——由于地下水水位下降施加于土层上的平均荷载,kPa。

根据多年设计经验,要准确分析敞开降水对基坑周围地面及建构筑物影响,一般应注意以下问

题。

(1)地面沉降与场地及附近地段的降水历史有关,如该地段的降水幅度不超过场地及其附近历史降水的幅度,引起的地面沉降会很小。

(2)考虑受影响地段的地质条件,若该地段软土很厚,则其沉降一般会很大。

(3)受影响范围内建构筑物的基础选型不同,抗变形的能力不同,在同一场地,受降水影响也不同,如同样采用天然地基,筏板基础就比独立基础和条形基础的刚度大。

(4)宋榜慈等^[14]认为,降水引起的地面沉降主要与降水幅度有关,建议将降水幅度分为:微小影响带,指水位降幅3~4 m,一般属于水位常年变动带,位于该地段的建筑物,其受降水影响就比较小;敏感影响带,指水位降幅6~10 m;剧烈影响带:指水位降幅>10 m的范围。笔者认为如此区分可以定性的分析降水对环境的影响,不失为一种参考方法。

(5)采用理论计算与实测结果综合分析,往往可互相印证。

笔者曾经在郑州东区某深基坑降水方案选择中采用理论公式计算与现场监测结果对比分析^[15],得到初步印证。在郑州东区深基坑敞开降水时,当基坑周围地下水位下降1 m,会使上部软土产生固结沉降1.5~2.5 mm(因每个地段所经历的降水历史不同,所在场地的地质条件的差异,因此即使实测,所观测到的地面沉降数据也有很大差别)。

3.3.3 基坑开挖或超挖对周围环境的影响

基坑开挖或超挖对周围环境的影响无法进行理论计算,可从采取工程措施上尽量避免因基坑开挖或超挖可能对周围环境造成的影响。

3.4 选择合理的止水帷幕,防止基坑发生大的涌砂事故,以控制基坑变形

对基坑工程中可能遇到的各类水包括地表水、地下水、管线回水、上层滞水的控制(止水和降水),如采用帷幕桩止水,除应选择合理的止水帷幕外,还应注意施工工艺的选择,防止基坑涌砂。因基坑一旦涌砂,将造成基坑支护体及邻近建(构)筑物发生大的变形。据对郑州东区深基坑统计资料,在复杂环境条件下高水位地区深基坑有60%~70%发生基坑管涌或涌砂事故,从某种程度上说,基坑发生管涌或涌砂几乎是不可避免的,因此造成的对基坑支护体及邻近建(构)筑物大的变形也无法预测。根据文献[16],基坑发生涌砂对支护体变形影响较大。采用单排水泥土搅拌桩作止水帷幕,一旦止水

帷幕搭接不好或搅拌质量不均匀,极易出现涌砂事故,即使时间较短,支护体位移将有较大突变,一般数小时内可增加10~20 mm。在本工程中,涌砂部位的支护体变形量比没有发生涌砂部位的支护体变形量多20 mm,占支护体正常位移量(约30 mm)的70%。因此,在软土地区设置单排水泥土搅拌桩应慎重分析后确定,特别是离建筑物较近时。否则,若基坑发生涌砂极易导致建筑物发生过大的不均匀沉降甚至拉裂。

3.5 设计合理的土方开挖方案并认真实施,避免基坑的不正常变形

国家、行业的有关规范对土方开挖的要求许多以强制性条文出现^[17-20]。大量的工程经验也表明,设计不当、施工质量低下及超挖、水的因素造成基坑事故的比例占到70%~80%。可见,设计合理的土方开挖方案的必要性,尤其对土钉墙结构及高水位软土地区,显得特别重要。

3.6 科学、全面监测,随施工过程及反馈信息及时调整设计方案,实行动态设计

在监测过程中,发现临近建筑物发生过大的不均匀沉降时,需适时调整设计,实行动态设计。

以郑州东区某深基坑的北侧壁为例。基坑深度为自然地坪向下约5.70 m。拟建工程基坑周边环境较差,北侧已建5层办公楼距基坑开挖线为3.20 m筏板基础。西北侧食堂距基坑开挖线为3.20 m。

基坑影响范围内的土层为:0~6.5 m为黄色稍密粉土;6.5~18.0 m为灰色可塑粉质粘土夹灰色稍密粉土;18.0~29.0 m为中密、密实细砂。拟建场地潜水地下水埋深1.30 m。

支护降水方案选择:采用桩锚支护+水泥土搅拌桩止水帷幕。

(1)单排水泥土搅拌桩端止水帷幕直径500 mm,咬合150 mm,桩长13 m;

(2)北侧5层办公楼地段设置预应力管桩一排,桩顶标高-1.0 m,桩径0.50 m,桩间距1.60 m,长度20.0 m,管桩型号PHC-AB500(100);

(3)设置预应力锚杆一排,桩顶标高-2.60 m,水平间距为1.60 m,自由段长度为5.00 m,锚固段长度为13.00 m,施加80.0 kN的预应力;

(4)采用12号槽钢梁将锚头联接;桩顶做700 mm×500 mm的钢筋砼压顶梁一道。

基坑项目开始于2005年9月20日,至10月9日,基坑开挖到地面下4.5 m,此时,北侧办公楼内侧角点沉降仅10 mm,10月12日基坑发生涌砂,此

后办公楼内侧角点沉降发生巨变,到10月20日,已达33 mm。为此,需要变更设计。自10月21日开始采用双液注浆,持续7天,慢慢遏制了办公楼内侧角点的快速沉降,到10月28日办公楼内侧角点的沉降达40.2 mm,但已基本稳定。随后不再沉降而是缓慢逐步抬升,到12月10日,抬升至24.6 mm后保持稳定。详见图2。

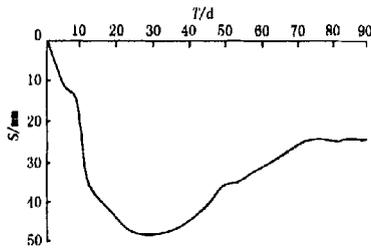


图2 郑州东区某深基坑沉降监测曲线

3.7 有效的变形控制技术及其措施

(1)在选定的支护方案基础上对方案进行优化设计。

(2)采用钢管注浆、深层搅拌桩、旋喷等工艺加固基坑内被动区。

(3)制定合理的土方开挖方案,如:尽量缩短基坑无支撑的暴露时间,削掉基坑阳角等;间隔抽条开挖,预留土墩等;采用土钉墙支护时分层分段开挖,如在砂层或软土层中尽量减少竖向开挖深度,在支护前及时打入木桩或钢管防止土体局部坍塌。

(4)超前注浆及跟踪注浆。超前注浆是指在支护设计方案实施时提前对周边建筑物可能发生过的不均匀沉降提前预防,实施超前注浆。跟踪注浆是指在施工过程中如发现基坑涌砂或基坑及周边建筑物发生过大变形可采用跟踪注浆措施,以控制变形。

(5)限制堆载,控制动载。设计文件中应明确在基坑周边多宽范围内严禁堆载或明确堆载限制。动载如不可避免,应有加强措施。

4 建议

到目前为止,国家、行业和地方规范尚没有从理

论高度对基坑工程的变形控制设计加以明示。经过近20年的工程实践和理论探索,笔者认为,条件已基本具备。正如龚晓楠教授指出,我国已有条件推广根据基坑周边环境条件采用按稳定控制设计还是按变形控制设计的设计理念。建议行内专家给予关注。

参考文献:

- [1] 龚晓楠. 基坑工程实例(2)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 4-11.
- [2] 侯学渊, 杨敏. 软土地基变形控制设计理论和工程实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [3] 孙家乐, 等. 深基坑支护结构体系变形控制设计[A]. 见: 侯学渊, 杨敏. 软土地基变形控制设计理论和工程实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 138-145.
- [4] 熊巨华. 软土地区围护结构变形控制设计[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [5] 俞建霖, 龚晓楠. 基坑工程变形形状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, (4).
- [6] 刘兴旺, 吴世明. 软土地区基坑开挖变形形状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4).
- [7] 吕三和. 深基坑支护变形控制设计与研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [8] 王文东, 李进军, 徐中华. 敏感环境条件下深基坑工程的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2008, (S1): 349-354.
- [9] GB 50497-2009, 建筑基坑工程监测技术规范[S].
- [10] 王荣彦. 郑州东区基坑支护型式探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(12).
- [11] 吴铭炳. 软土基坑排桩支护研究[J]. 工程勘察, 2001, (4): 15-17.
- [12] 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形状研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5).
- [13] 马秉务, 姚爱国. 基坑边缘地面沉降计算方法分析[J]. 西部探矿工程, 2004, (1).
- [14] 宋榜慈, 李受社. 武汉地区工程中的地下水问题及其处理对策[J]. 工程勘察, 2004, (5).
- [15] 王荣彦. 郑州东区某软土基坑降水排水方案的比较与选择[A]. 第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [16] 王荣彦, 孙芳. 某复合土钉墙支护体变形原因分析[J]. 土基基础, 2007, (8).
- [17] GB 50202-2002. 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
- [18] GB 50007-2001. 建筑地基基础设计规范[S].
- [19] YB 9258-97. 建筑基坑工程技术规范[S].
- [20] CECS 96:97. 土钉支护技术规范[S].

《岩心钻探孔内事故处理工具手册》一书出版发行

本刊讯 中国地质科学院勘探技术研究所教授级高级工程师王年友任主编, 谢文卫、苏长寿任副主编的《岩心钻探孔内事故处理工具手册》一书, 已由中南大学出版社出版发行。该书系统介绍了石油钻井中常用的打捞、套取、震击等处理事故的工具体种、结构原理及其使用维护; 介绍了地质

岩心钻探常见事故处理工具及特殊事故处理工具等。该书内容全面, 共收集有70多种打捞、套取、切割、磨削、震击等事故处理工具, 并附有相关事故处理工具生产厂家, 可供广大生产一线的技术人员、采购人员及机台工人参考, 也可供生产一线人员根据原理图进行现场加工制作。