

深基坑支护的工程设计与监测

高 玲

(华东电力设计院,上海 200063)

摘要 从深基坑支护结构形式、支护结构设计以及围护墙体入土深度的确定三方面内容对深基坑支护工程进行介绍,并介绍了深基坑施工工程的监测内容、监测设备和监测报警的有关内容.以某电厂 3×600 MW 机组工程的循环水泵房深基坑支护工程为例,说明深基坑工程中,设计、施工及监测是保证工程质量的三大基本要素.

关键词 深基坑;支护工程;工程设计;工程监测

中图分类号: TU47

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2005)S2-0030-03

20 世纪 80 年代以来,伴随着我国高楼及超高大楼的建设,实施了许多规模大、难度高、技术新的地下工程,其基坑深度已逐渐由 6 m、8 m 发展至 10 m、20 m 以上.当深基坑邻近密集的既有建(构)筑物时,基坑工程的成败不仅涉及基坑本身的安全,而且必将殃及邻近建(构)筑物的安全.根据上海市标准 DBJ08-61-97《基坑工程设计规程》,基坑工程由其重要性、规模、所处环境及失效后可能产生的严重性分为 3 级.上海市建委沪建建(94)第 0293 号文《确保新建建设工程地基基础质量的若干补充规定》第六条:当深基坑开挖深度超过 7 m(含 7 m)时,基坑支护开挖方案应委托具有岩土工程设计资格的单位进行支护设计,并委托市建委科技委员会或建设单位主管部门组织专家评审,经论证在技术经济上切实可行后方可实施.在近 20 多年中,深基坑工程的设计、施工和科研等方面均创造了许多新成果,技术上取得了长足的进步.

1 深基坑支护工程

支护结构的设计是保证基坑安全的首要条件,它与基坑的平面尺寸、开挖深度、围护墙体的强度刚度、基坑内外土体的物理力学性能、地下水位、施工方式等多种因素有关.基坑支护是由围护墙体、支撑(或地锚)系统及基坑内外土体组成的共同受力体系.目前,当基坑开挖深度大于或等于 7 m 时,习惯上称之为深基坑.

1.1 支护结构形式

根据场地布置、地质条件、水文资料、基坑深度

及经济合理性,形成了不同的支护结构体系.水泥搅拌桩一般用于基坑开挖深度不超过 7 m、环境条件宽松、保护要求不严的浅基坑.其平面布置的形式多样,主要有实体式、空腹式、格构式、拱形或拱形加钻孔灌注桩,均为连续搭接的墙体,满足既挡土又挡水的要求.土钉墙在支护结构中应用也比较广泛,是 8 m 以内较合适的支护形式;土层条件好时,15 m 左右的基坑也有使用,一般较多地应用于地下水位较低或者地下水位能够被降低的区域.土钉墙可以单独使用,也可以与其他支护形式联合使用.对于 5 ~ 10 m 深软土基坑,常采用钻(冲、挖)孔桩、沉管灌注桩或钢筋混凝土预制桩等,并可作各种布置,并用水泥搅拌桩、化学灌浆或高压注浆形成防渗止水帷幕.也有采用钢板桩或 H 形钢桩的结构形式.当基坑深度大于 10 m 时,可采用地下连续墙、排列式钻孔灌注桩或 SMW 工法连续墙等,并设置支撑或锚杆.

地下连续墙作为深基坑开挖的挡土和防渗结构,具有刚度大、整体性、防渗性和耐久性好,适合于大深度的基坑,对邻近建(构)筑物的影响小,可节省土方工程量的特点,因此能适应各种复杂的施工环境与各种复杂的地质条件.地下连续墙广泛应用于建筑物的地下室、地铁、地下停车场、盾构和顶管工作井、大型泵房、船坞、船闸、护岸、堤坝等.在上海已建的高层建筑和地铁车站等数十项工程中应用了地下连续墙支护技术,国内很多城市,如广州、北京、深圳、天津等地都在应用中取得了良好效果.为了提高经济效益,地下连续墙可作为永久性结构的一部分,

支承竖向荷载和水平向荷载,如可以兼作地下室的外墙、兼作主体结构的承重墙。上海的金茂大厦(地上88层,地下3层)、天津的金皇大厦(地上47层,地下3层)等都是按地下连续墙兼作主体结构承重墙设计的。在国外也有很多成功的应用实例,由于篇幅的关系,这里不再一一阐述。可见地下连续墙有其明显的优越性,但也存在其不足之处,就是工程造价较高,所以在实际应用中应综合分析、论证,以求得工程的安全性、经济性及合理性。

SMW工法连续墙在近年应用以来,普遍认为其性能良好,造价适宜,如将加劲钢材拔出后重复利用,更可以降低造价。

1.2 支护结构设计

1.2.1 围护墙体的设计

围护墙体主要承受基坑开挖卸荷所产生的水土压力,并将此压力传递到支撑上,以确保基坑及周围建(构)筑物的安全。围护墙体结构内力分析的古典方法有:平衡法(亦称自由端法)、弹性曲线法、假想铰法(亦称等值梁法)、Terzaghi法(亦称塑性铰法)、等弯矩及等轴力法;解析方法有山肩帮男法、弹性法、弹塑性法;还有地基杆系有限单元法及有限元分析法。其中弹性法考虑了墙体的刚度和土的抗力,并考虑了墙体、支撑的变形;线弹性平面有限元在一定程度上能模拟深基坑的开挖过程,把开挖掉的土体作为“空气单元”,并能考虑土体和围护墙体的相互作用,把土体和围护墙体均假定为线弹性本构关系,土体单元采用精度较高的平面四边形八节点等参单元,围护墙体采用梁单元来模拟,支撑杆件采用弹簧单元来拟合后,计算出围护墙体的内力、变形、地面沉降、基坑隆起等。但基坑开挖涉及因素往往非常复杂,如开挖的时空效应、基坑内外土体的加固效应、支撑系统的选择及实际发生的土体蠕变、弹塑性地基土体的本构关系模拟效果等等,所以在基坑开挖过程中常采用非线性弹性或弹塑性平面有限元反馈分析是比较可靠的。

1.2.2 支撑系统的设计

基坑工程中,支撑结构是承受围护墙体所传递的水土压力的结构体系,它包括围圈、支撑、立柱及其他附属构件。支撑系统按材料通常分为钢支撑、现浇钢筋混凝土支撑体系或地锚。支撑杆件按其受力和形状大致可分为单跨压杆式、多跨压杆式、双向多跨压杆式、水平桁架式、水平框架式、竖向斜撑、平面斜角撑、井字撑与斜角撑结合、大直径环梁与辐射状支撑相结合,或与周边桁架相结合等。同时可充分发挥圆形、椭圆形、抛物线形和拱杆的力学性能,

采用其中一种或多种形状相结合的形式。可见,支撑系统出现了多种形式,以满足不同的基坑形状、平面尺寸、开挖深度、施工方法的需要。

钢支撑安装方便、施工速度快,并可施加一定的预顶力;现浇钢筋混凝土支撑的最大优点是整体性好、刚度大。

钢筋混凝土支撑杆系可采用平面杆系有限元分析计算,由于水平框架是个不静定结构,一般在沿围圈各角点的长边方向加刚杆,认为该方向的水平位移为零,或在各角点加柔性杆,柔性杆的 EA/L 和支撑杆的 EA/L 之比约 10^{-3} 时,认为是较合理的。而基坑边角一般采用等腰三角形的斜撑,使得受力比较均匀,从而使围圈的弯矩也比较合理。

为了减少位移,一般必须遵循“及时支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”的原则。

1.2.3 基坑开挖时围护墙体前后的土体

基坑开挖时由于土体内应力场变化,如果支护结构没有足够的强度刚度,则软土将发生蠕变和基坑外水土流失而导致周围土体及围护墙体向开挖区方向移动、地面沉降及坑底土隆起,从而引起邻近建(构)筑物下沉、位移或倾斜。为确保邻近建(构)筑物不受损害,可以采用基坑内外一定范围土体进行加固。土体加固除利用常规的地基处理技术外,还常利用降水技术,提高土体不排水抗剪强度,效果非常明显。在一般情况下加固基坑内被动区的效果比加固基坑外主动区的效果更好。

对于基坑周围土体的移动,一般常用时空效应法、经验估算法(Perk法)、稳定安全系数法及反分析法进行预测,在基坑开挖过程中一般需要现场监测。

1.3 围护墙体入土深度的确定

围护结构的入土深度直接影响其强度、弯矩和稳定。过小的入土深度会导致围护墙体的强度不足、变形过大及稳定性不足,过大的入土深度则使得工程造价提高。为确定合理的入土深度,必须对围护墙体的抗滑移、抗倾覆、抗隆起和抗管涌进行验算。入土深度主要取决于地质条件、基坑开挖深度、形状、尺寸、周围环境、地面超载等,计算方法一般采用以下几种:①土压力平衡的验算;②基坑底面隆起验算,验算方法主要分为太沙基(Terzaghi)及沛克(Peck)公式、卡柯(Caguot)公式,同时考虑凝聚力 c 和内摩擦角 φ 的计算公式,考虑墙体、土体的极限承载力的抗隆起计算方法;③控制隆起位移量的模拟试验经验公式;④渗透稳定验算。

一般情况下,可以按表1控制地面沉降量及围护墙体的水平位移,表中 H 为基坑深度。

表1 地面最大沉降量及围护墙体水平位移控制参考值

保护等级	地面最大沉降量	围护墙体水平位移
特级	$\leq 0.1\% H$	$\leq 0.14\% H$
一级	$\leq 0.2\% H$	$\leq 0.3\% H$
二级	$\leq 0.5\% H$	$\leq 0.7\% H$
三级	$\leq 1\% H$	$\leq 1.4\% H$

注:表中数据系按上海软土层深基坑工程经验资料提出。

2 基坑支护工程的监测

由于地下土体性质、荷载条件、施工环境的复杂性,仅凭地质勘察资料和室内土工试验参数来确定设计和施工方案,往往含有许多不确定因素,尤其是对于复杂的大中型工程或环境要求严格的项目,对在施工过程中引发的土体性状、环境、邻近建(构)筑物、地下设施变化的监测已成了基坑工程建设必不可少的重要环节。

对开挖过程实施跟踪监测,并将信息及时反馈,是为了掌握支护结构和基坑内外土体移动,随时调整施工参数,优化设计,并及时了解施工环境——地下土层、地下管线、地下设施、地面建筑等在施工过程中所受的影响及影响程度后,采取相应的措施,以确保施工安全,使工程顺利进行。施工监测的作用还在于检验设计的正确性,并有利于积累资料,为今后改进设计理论和施工技术提供依据。

2.1 监测内容

对深大基坑的监测内容通常包括:支护结构的位移和内力(弯矩);支撑轴力变化;立柱的水平位移、沉降或隆起;坑周土体位移及土压力变化;坑底土体隆起;地下水位及孔隙水压力变化;相邻建(构)筑物、地下管线、地下工程等保护对象的沉降、水平位移与异常现象。

2.2 监测设备

监测手段常采用水准仪、经纬仪、测斜仪、分层沉降仪、土压力盒、孔隙水压力仪、水位观测仪、钢筋应力计等。目前在实际工作中,以水准仪量测墙顶和地面位移以及以测斜仪量测墙体和土体深层位移较为可靠而且特别重要,其他监测手段常被用来进行综合分析。用钢筋应力计测支撑轴力时,尚应配以温度计埋设在支撑中,以便计算温度变化引起的应力。实测表明,由于温度变化,支撑往往产生较大的附加轴力,对钢筋混凝土支撑,附加轴力可达15%~20%,这在设计中是不能忽视的。钢支撑的温度变化应力则更大。

目前基坑工程的综合监测水平尚不够理想,尽管有了计算机和遥控等先进设备,而测试元件的质量及其标定、埋设、保护和施工配合等方面存在不少问题,有待改进。

2.3 监测报警

警戒值是判断位移或受力状况是否超过允许范围、工程施工是否安全可靠、施工步骤或优化原设计方案是否需要调整的依据。警戒值一般由总允许变化值和单位时间内允许变化量两部分组成。超过警戒值后的监测报警是一个极其严肃的问题,处理得当可化险为夷,避免损失,否则会留下隐患,酿成事故。有的工程虽作了报警,而有关当事人员并不警觉,结果仍会酿成“大祸”,实践中不乏这样的教训,需引以为戒。

3 基坑支护工程实例

宁波北仑电厂二期3×600MW机组工程的循环水泵房位于一期泵房、一期排水隧道和海堤所形成的狭小区域内,泵房北侧紧贴海堤,东南侧距一期泵房沉井结构约17m,西侧距一期 $\varnothing 5500$ 排水盾构隧道约5m(见图1)。

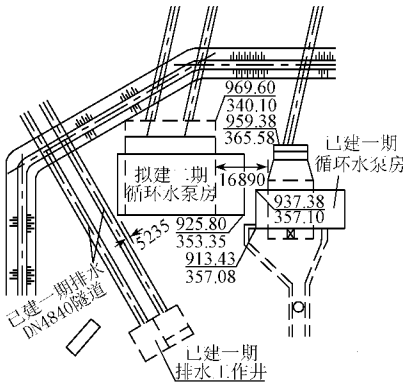


图1 循环水泵房区域布置示意图

循环水泵房地处70m厚的第四纪海相地层上,其中约30~40m厚为②号和③号深厚的淤泥质粉质黏土,呈流塑状,其中②号土约20m厚,属欠固结土,天然含水量 $\omega = 44.6\% \sim 60.4\%$,孔隙比 $e = 1.26 \sim 1.65$,液性指数 $I_L = 1.10 \sim 2.48$,渗透系数小于 10^{-8} cm/s,三轴快剪 $C_u = 22$ kPa,属高压缩性、高灵敏度、渗透性差、抗剪强度低的土体。

循环水泵房地下结构平面尺寸为44m×42.5m,基坑开挖深度为14.3m,采用地连墙形成内格浮阀式基础,地连墙作为主体结构的一部分,并作为地下结构的支承基础结构。外墙采用800mm厚地连墙,内衬厚700mm,地连墙深度根据地层分布分别为32.5m、35.5m和38.5m,内隔墙采用600mm厚地连墙,两侧均为厚200mm的衬砌。

根据平面布置要求,内隔墙将整个地下结构划分为30个仓,形成一个类似网格形的结构,基坑开挖过程中内隔墙兼作支撑,减少了外墙的侧向位移,增加了基坑的稳定性。而其中外围的(下转第49页)

晋电厂一期工程的玻璃钢虹吸引水管和循环水管自1997年投产以来,一直运行良好。

为防止腐蚀,小管径埋地管道还可以布置在地沟内或安装在地面上的管架上,也可以直接安装在地面上。古晋电厂所有室外消防管道(钢管)直接安装在地面的支墩上,在跨马路段则放入地沟内。这样既达到防腐的目的,又便于运行管理和节省投资。

各海边电厂由于投资金额大小和对设备、管道选用的材质不同,采用的防腐方式也略有差别。另外,采用牺牲阳极的防腐保护,设计时牺牲阳极的选取应考虑到下列因素:被保护体周围介质的成分和含量以及被保护体周围土壤的电阻率或水的电导率等等。

牺牲阳极块都是靠自身的溶解提供阴极保护电流,所以所选用的牺牲阳极必须有足够的负电压,保证阳极与被保护金属能产生足够的驱动电压和有效电压,具有较大的理论容量,较高的电流效率,牺牲阳极表面较均匀地溶解,腐蚀产物自动脱落。

古晋电厂二期工程海水循环设备防腐系统的成功设计实施,特别是令业主担心的主厂房内的凝汽器进出口循环水管道的腐蚀问题得到根本解决,使

(上接第32页)

18个仓内进行了劈裂注浆加固,以提高土体的弹性抗力(见图2)。

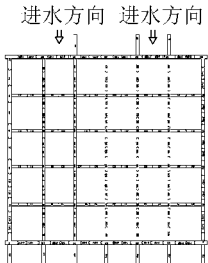


图2 地下连续墙分隔示意图

在地连墙施工中发现大幅地连墙槽段在欠固结淤泥质土中施工非常困难,成槽常常不稳定而坍孔,经现场研究后改为小幅地连墙,并优化泥浆配比。实践证明,这些措施的效果是非常明显的。该基坑工程采用了盆式开挖,逆作法施工,严格遵循了“分层、分步、对称、平衡、限时”的原则,做到边开挖边内衬。整个基坑开挖过程中实施了工程监测,内容包括地连墙测斜、沉降、地连墙应力、侧向土压力及周围环境的监测,监测数据及时指导了施工。

循环水泵房地下结构早已施工完毕,根据当时记录,地连墙的侧向位移为30mm,施工过程中影响邻近的一期循环水泵房的沉降量约2mm。所有实测资料表明,本工程的设计施工是成功的,达到了预期的效果。

得电厂自2003年底投运以来运行良好。

4 结 论

海边电厂供水系统的防腐设计是一项新的研究课题,设计中考虑防腐措施,可以保证系统的安全运行,节省维修开支,具有极其重要的意义。文中针对此类问题进行研究,给出了防腐设计方法和经验,在马来西亚古晋电厂二期工程中,设计施工顺利以及系统的成功运行表明,文中的海水循环设备的防腐措施是有效的,该设计方法与经验对于解决海边电厂设备防腐设计,具有参考价值。

参考文献:

[1] 张明慧,杨兴全.化工腐蚀与防护技术[M].成都:成都科技大学出版社,1988.
[2] 侯保荣.海洋腐蚀环境研究及保护对策:海洋腐蚀与防护技术[M].北京:海洋出版社,1998.
[3] 王庆璋,杜敏.海洋腐蚀与防护技术[M].青岛:青岛海洋大学出版社,2000:33-35.
[4] 韦冰.马来西亚古晋电厂二期工程施工设计图[R].武汉:中南电力设计院,2002.

(收稿日期 2005-09-17 编辑 熊水斌)

4 结 语

深基坑工程质量保证的三大基本要素即设计、施工及监测,三者的关系密不可分。为确保深基坑支护工程的安全、经济、合理,必须从这三方面抓起。基坑工程的设计应根据不同的地质条件、不同的周围环境来确定不同的支护结构形式;基坑的开挖施工(包括支撑设置过程)同支护结构、基坑周围土体位移之间存在着一定的相关性,科学地安排土方开挖施工顺序及控制施工进度,将有助于控制围护墙体和基坑周围土体的位移,即所谓的“时空效应”。施工监测提供了动态的信息反馈和信息化管理依据。

参考文献:

[1] DBJ08-61-97,基坑工程设计规程(上海市标准)[S].
[2] JGJ120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
[3] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
[4] 刘建航,侯学渊.软土市政地下工程施工技术手册[R].上海:上海市工程局,1990.
[5] 刘建航.地下墙深基坑周围地层移动的预测与治理[J].地下工程与隧道,1991.
[6] 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.

(收稿日期 2005-09-10 编辑 高建群)