

文章编号:1007-2993(2020)05-0254-06

预应力鱼腹梁钢支撑在深基坑围护中的应用

杜常春 杜治国 郭安

(浙江省工程勘察设计院集团有限公司,浙江宁波 315012)

【摘要】 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术是基于预应力原理的一种新型的、先进的、绿色环保的深基坑的内支撑结构体系。结合2个装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑体系在软土深基坑中应用的工程实例,介绍了基坑围护方案及基坑开挖效果,体现了装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术具有绿色环保、经济性好、施工周期短等优点,具有较好的综合效益,同时重点探讨了该支撑技术在深厚软土中存在的问题,可供本地区同类工程设计与施工参考。

【关键词】 深基坑;软土地基;装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑;绿色环保

【中图分类号】 TU 472.3

【文献标识码】 B

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2020.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Prestressed Fish-bellied Beam Steel Support in Deep Foundation Pit Enclosure

Du Changchun Du Zhiguo Guo An

(Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315012, Zhejiang, China)

【Abstract】 Support of prefabricated prestressed fish-bellied beam based on the prestressing principle is a new advanced environmental friendly internal support structure system of deep foundation pit. Two application examples of this steel structure support system in deep foundation pit in soft soil are introduced, including pit enclosure schemes and excavation results. The advantages of this support technology are summarized, including environmental friendliness, economical efficiency, short construction period, with comprehensive benefits. The problems of this support structure in deep soft soil are also discussed. Reference for the similar engineering design and construction in the local area are provided.

【Key words】 deep foundation pit; soft-clay foundation; steel support of prefabricated prestressed fish-bellied beam; green and environmental protection

0 引言

随着经济的发展与城市化的不断推进,在用地日益紧张的情况下,为满足人民日益增长的生活需要,开发地下空间已成为一种必然趋势。高层建筑物下多层地下室、地下铁道与地下车站、地下车库、地下商城等大量的深基坑工程的深度与规模越来越大。深大基坑项目主要位于我国沿海、沿江等经济发达的城市中,场地浅部分布有厚度不一、含水量高、性质差、灵敏度高的软土。根据深基坑工程特点,选择一种安全可靠、技术可行、绿色环保、经济合理、施工方便的支护体系,符合当今节约资源、提高经济效益、可持续发展的科学发展观。由于地质条件、周

边环境的差异,深基坑支护技术不尽相同,对基坑围护设计与施工的要求也越来越高,这促进了基坑支护和施工技术的更新、进步与发展,各种深基坑的支护技术也日渐成熟与完善^[1-3]。

钢支撑体系^[4]是由水平钢构件(钢管、型钢或组合型钢)、立柱以及腰梁利用螺栓或焊接的连接方式组成的内支撑体系。钢支撑体系应用较为成熟,目前其设计计算方法与技术构造要求都有明确的标准^[4-6]。

为克服钢支撑刚度小、变形大等缺点,钢支撑与液压千斤顶配合使用,对钢支撑施加可调节的轴压力,提高支撑的刚度。在对钢支撑施加预加力的基

作者简介:杜常春,男,1974年生,汉族,四川广安人,高级工程师,注册土木工程师(岩土),主要从事岩土工程勘察、设计及咨询工作。E-mail:180839732@qq.com

基础上,利用基坑位移监测与钢支撑技术相结合,形成了钢支撑轴力自动伺服系统,实现了液压千斤顶对钢支撑施加轴力的实时监测与调整。2010年从韩国引进并在上述技术基础上改进了一种新型的预应力张弦式鱼腹梁组合型钢支撑技术——装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术^[7]。

1 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑结构形式及工作原理

在基坑工程中,竖向围护结构确定后,为确保基坑壁稳定性及不产生过大变形而对周边环境产生不良影响,围护体应有足够的强度与刚度并与支撑体系相结合。支撑体系是承受围护结构所传递的土压力和水压力的结构体系,与竖向围护结构共同为基坑施工提供一个可靠的结构空间。装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑作为基坑工程的一种支撑形式,基于预应力原理采用标准化构件形成的装配式张弦结构的钢支撑体系,综合了传统钢筋混凝土支撑与钢支撑的优点,是目前较为先进的内支撑技术。该体系由鱼腹梁、腰梁、钢绞线、三角形连接件、预压顶紧装置、角撑、对撑、立柱和牛腿等部件组成^[8-10],通过对鱼腹梁下弦钢绞线施加和复加预应力控制支挡结构的变形,组合成大跨度的鱼腹腰梁结构,经与角撑、对撑和三角形连接件组合,形成一个具有高冗余度平面预应力支撑系统(见图1)。大跨度的上弦钢梁连接至围护桩的围檩梁上,通过对鱼腹梁下弦钢绞线施加预应力,调动了围护结构外侧的被动土压力,挖土后被动土压力逐渐减少至消失、主动土压力逐渐增加,再通过复加预应力可控制与调节基坑变形。作用在上弦钢梁上的土压力通过腹杆传递至下弦钢绞线上,钢绞线通过两侧的三角形连接件再把荷载传递至组合型钢对撑或角撑梁上,结合远程实时监测系统,从而可以有效并精确地掌控基坑位移及支撑钢构件的受力情况。

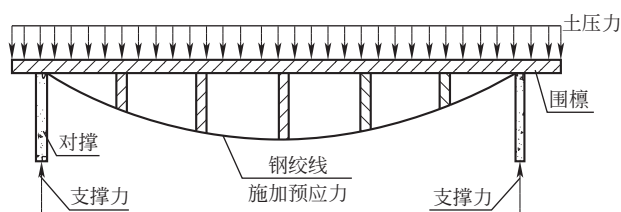


图1 鱼腹梁构造示意图

2 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术的优越性

在深基坑的内支撑方案比选过程中,需要综合环境条件、地质条件、技术及经济等诸方面因素确定,深基坑内支撑体系主要有钢筋混凝土支撑与钢

支撑。

钢筋混凝土支撑整体性好,能适用于各种复杂形状和深度的基坑,荷载水平高,既能受压,又能受拉,亦经得起施工设备的碰撞。但钢筋混凝土支撑材料不可重复性利用,养护周期长,拆除工作量大、困难,形成大量建筑垃圾与粉尘等,不符合目前绿色环保、可持续发展的要求。

综合了传统钢筋混凝土支撑与钢支撑的优点的装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术已在长三角、珠三角等地区基坑工程中得到了一定程度的应用,取得了深基坑支护应用经验。与传统钢筋混凝土及钢支撑支护技术相比,装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术的优越性体现在以下四方面。

(1)信息化:该技术配置了先进的基坑工程安全智能监测预警与控制系统,包括集数据采集、处理、图文显示与预警为一体的应用系统软件,能准确、迅速地反映生产现场的安全状态等信息。通过数据综合分析和处理,可实现24h实时监测与隐患预警,了解基坑的安全状态,指挥隐患的排除。这不仅进一步确保了基坑本身的安全,而且更有效地保护基坑周边的建(构)筑物、市政道路和管线等的安全。

(2)安全冗余度较高:该技术通过增设许多用于增加系统稳定性、提高超静定冗余度的附加构件(例如立柱托架、横梁、剪刀撑、纵横构件间的U型卡件等)形成较好的超静定结构,大幅提高了支撑系统的整体性,增强了系统抵御偶发性冲击荷载的能力。相对于传统支撑系统的破坏模式——脆性破坏,预应力鱼腹梁工具式组合内支撑的破坏模式为延性破坏,从而提高了基坑支护结构的安全度。

(3)节能减排、绿色环保:预应力鱼腹梁装配式钢结构支撑系统技术采用低合金材料、标准化部件,在工程现场装配。当地下结构部分施工完成后,所有钢构件可全部回收、循环使用。

(4)经济效益好、施工便利性好:该技术不仅大幅减少了支护结构安装、拆除的工期和造价,而且提供了开阔的施工空间,显著改善了地下工程的施工作业条件,挖土、运土及地下结构施工更便捷,减少了土方开挖及主体结构施工的工期和造价。

3 工程实例一

3.1 工程概况

某商业广场位于浙江省海宁市中心区域,整体3层地下室,地下建筑面积约 $11.67 \times 10^4 \text{ m}^2$,平面面积约 $3.89 \times 10^4 \text{ m}^2$,周长701.4m。基坑深度

普遍区域 13.1 m。该基坑工程场地呈不规则梯形,规模较大,深度较大,环境条件复杂。场地南北分布有市政道路,车流量较大、地下管线密布(地下室边线距离道路边线 5.0 m 左右);西侧分布 6 层筏板浅基础住宅楼(基础埋深 1.5 m 左右,其中西侧地下室边线距离住宅楼 40.0 m 左右,西北角最近处距离在 9.0~10.0 m 左右);东侧场地较为空旷(作为材料堆场及临时设施场地)。

根据本工程勘察结果,基坑开挖深度及影响范围内,地基土层分布较稳定,自上而下为:①层杂填土(松散,厚度 1.5~2.0 m 左右);②层粉质黏土(可塑—软塑,厚度 2.0 m 左右);③层淤泥质粉质黏土(流塑,厚度 3.0 m 左右);④₁层黏土(可塑,厚度 4.0 m 左右);④₂层粉质黏土(可塑为主、底部软塑,厚度 5.0 m 左右);④_{2a}层砂质粉土(中密,厚度 0.0~3.0 m 左右,透镜体分布于④₂层粉质黏土中);⑤层淤泥质粉质黏土(流塑,厚度 14.0~15.0 m 左右);⑥层粉土(中密,层厚 4.0~5.0 m)。场地地下潜水位稳定埋深在 0.5~1.0 m 左右,主要分布于浅层土中;承压水位埋深在 3.5 m 左右,赋存于⑥层粉土中,渗透系数 $k=3.0 \times 10^{-4}$ cm/s 左右。基坑底部位于可塑的④₂层粉质黏土中。

3.2 基坑围护方案

根据本基坑工程环境、水文及工程地质条件、基坑深度等要素,为控制基坑四周的变形、确保周边环境的安全,本着技术可行、经济合理、绿色环保、施工便利的原则,对基坑围护方案进行了比选,最终采用 $\phi 850@600$ 三轴水泥搅拌桩隔水帷幕, $\phi 1000@1200$ 钻孔灌注桩作为围护受力结构(钻孔桩桩底进入性质较好的⑥层粉土中);支撑体系采用 2 道钢筋混凝土十字对撑桁架作为主支撑,再加装配式预应力鱼腹梁钢结构的组合支撑体系(局部设置预应力高压旋喷锚索^[11]),坑内采用集水明排结合降压管井的地下水控制方案。

3.3 基坑开挖及效果

本基坑工程于 2014 年 9 月 20 日进行围护桩施工,同年 11 月初进行第一层土方开挖,至 2015 年 5 月 21 日土方回填完毕。基坑施工历时 8 个月,期间经历了暴雨天气、春节长假等时期的考验。局部土压力受力集中的阳角部位、支撑刚度相对较弱的预应力鱼腹梁跨中位置等部位存在变形稍大的情况,施工期间虽然出现多次位移报警,但总体上本基坑工程是安全的、稳定的,对周边环境的影响是可控的。

根据本基坑工程的深层土体位移监测数据,基坑围护桩及边坡土体变形总体在可控范围内,局部边坡段及深度段出现报警,特别是在东北角部位深层土体位移监测孔 CX5、CX6,顶部位移 33.0 mm 左右,深度段 9.00~11.00 m 处位移最大至 79.0 mm(见图 2)。根据地质资料结合现场实际情况,该部位深度段 9.00~11.00 m 分布有④_{2a}层砂质粉土,三轴水泥搅拌桩隔水帷幕存在轻微质量缺陷,基坑开挖施工期间,有轻微的渗漏现象,并产生了一定的水土流失,导致该深度段土体位移过大。

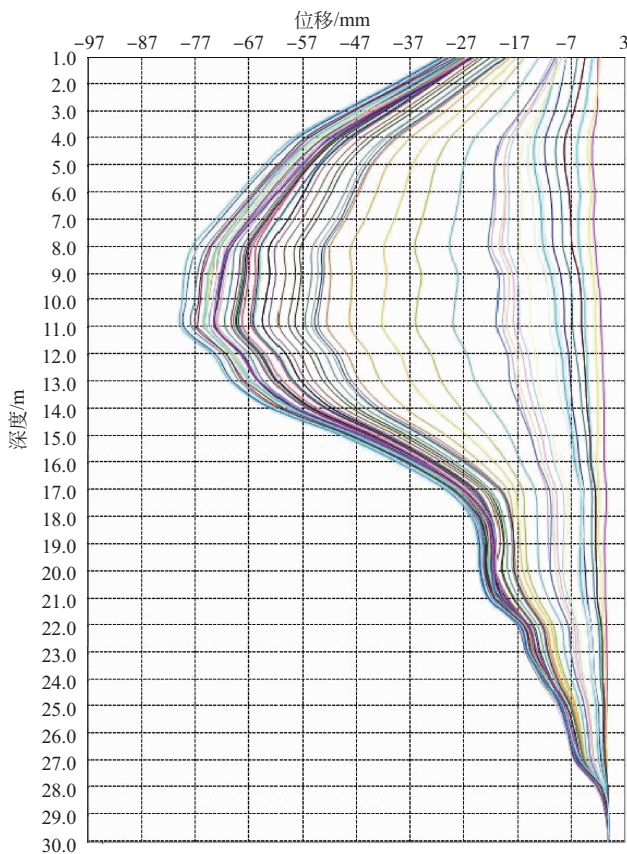


图 2 CX6 深层土体位移监测成果图

根据管道位移监测数据成果,南北两侧市政道路有轻微裂缝、地下管线沉降位移最大为 43.0 mm,地下管线变形基本在合理范围之内。施工期间所有地下市政管线使用正常,未出现异常情况。

西北角最近的已有建筑沉降监测数据表明最大沉降量 22.5 mm(见图 3),基坑开挖期间虽有报警,但通过优化挖土流程、控制挖土进度后,已有建筑沉降位移有所收敛,已有建筑使用功能正常,基坑开挖期间至基坑回填完成未发现基坑变形引发已有建筑的裂缝发生,也未发现基坑变形加剧已有建筑原有裂缝的发展。

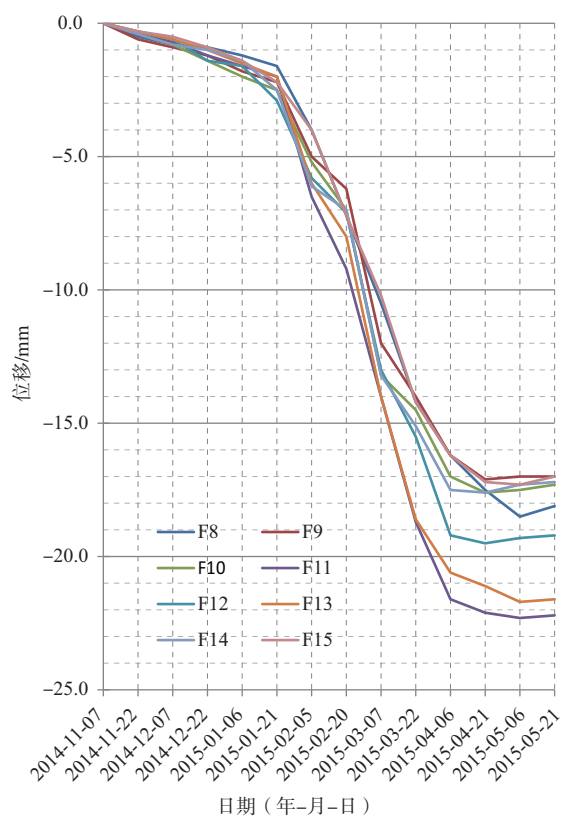


图3 西北角已有建筑竖向位移监测成果图

由于本基坑工程规模较大、形状复杂、支撑长度大,在基坑的中心部位采用整体性较好、质量稳定可靠的钢筋混凝土十字支撑桁架,再组合装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑体系(局部预应力锚索)。相对于全部采用钢筋混凝土支撑节约造价20%左右、工期缩短1个月左右,该基坑围护方案体现了安全、经济、绿色、环保、低碳的理念,获得了较好的支护效果及较好的社会与经济效益。

4 工程实例二

4.1 工程概况

某商业广场项目位于绍兴市镜湖区,整体设置两层地下室,基坑开挖深度10.00~11.55 m,拟建场地呈近似南北矩形分布,地下室长约215.0 m,宽约110.0 m,建筑面积47356.0 m²。场地四周相对较空旷,其中东侧距离用地红线10.0 m左右,红线以东为宽度较大的市政绿化带与快速路;南侧为在建前期住宅项目(两层地下室,基坑深度8.5 m左右);西侧为本工程前期已建住宅楼及小区内道路(设置一层地下室,拟建地下室距离已有建筑20.0~25.0 m);北侧20.0 m左右分布有道路。东侧绿化带及北侧道路下分布有市政管线。环境平面图见图4。

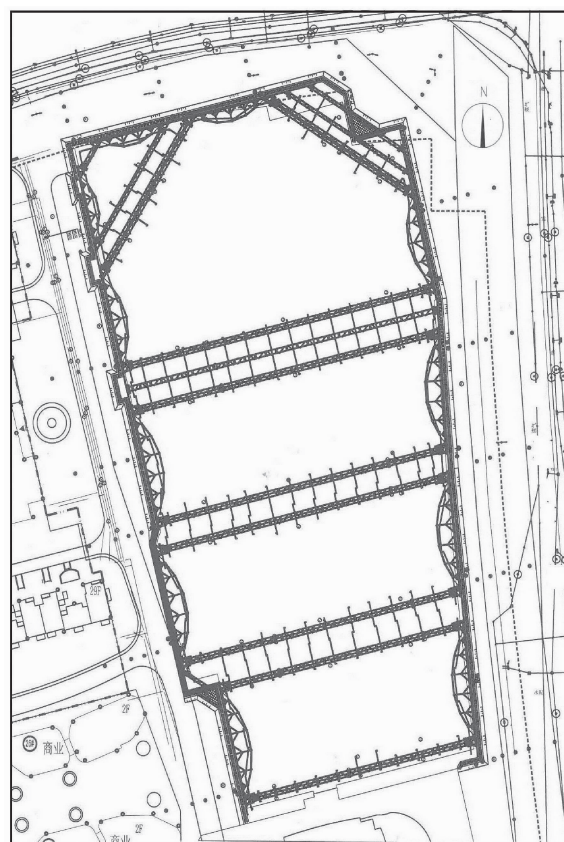


图4 绍兴市某基坑环境及支撑平面图

根据本工程的勘察资料,拟建场地软土分布厚度很大,地基土层性质差。基坑开挖深度及影响范围内,主要地基土的组成自上而下为:

①₁层素填土(松散,层厚2.0 m左右);①₂层粉质黏土(软塑,层厚1.5 m左右);②₂层黏质粉土(松散,层厚1.5 m左右);③层淤泥质黏土(流塑,含水量高,层厚15.0~21.0 m);④层粉质黏土(可塑—硬塑,层厚4.0~6.0 m左右)。场地地下潜水位稳定埋深在1.0 m左右,②₂层黏质粉土渗透性相对较高,其它地基土层渗透性均较低,为不透水层。坑底位于深厚的③层淤泥质黏土中。

4.2 基坑围护方案

通过方案比选,最终确定基坑围护方案SMW工法桩^[12]+两道装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑的围护方案,坑内裙边间隔设置水泥搅拌桩^[13]支墩加固。支撑布置形式为装配式组合型钢对撑与角撑,两榀支撑桁架之间净间距30.0~44.0 m不等,中间设置预应力鱼腹梁(见图3)。典型围护剖面为:上部2.0 m左右按1:1.0坡率放坡,坡底设置宽1.5 m平台,平台上设置直径 $\phi 850@600$ 的三轴水泥搅拌桩,内插H700×300/13×24型钢(西侧及出土口处插二跳一,其它各侧插一跳一布置),深度

进入④层粉质黏土 1.0~2.0 m 不等,设置两道装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑。典型围护剖面见图 5。

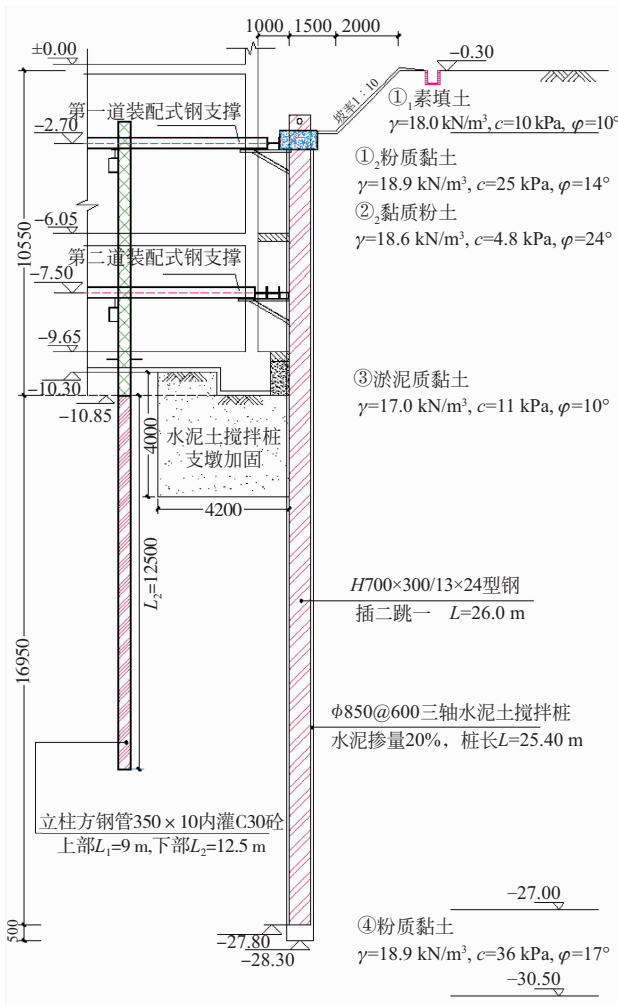


图 5 绍兴市某基坑围护典型剖面图(单位:m、mm)

4.3 基坑开挖与处理

(1)本基坑工程于 2017 年 7 月围护桩施工,后续按设计工况及要求进行预应力鱼腹梁钢结构支撑安装与土方分区、分块、分层开挖。按照土方开挖流程,对南侧区块土方先行开挖,2018 年 1 月 13 日下午南区东侧开挖至坑底时,累计变形报警,当天下午出现 30.0 mm 的位移变形,并未有稳定迹象,冠梁出现明显裂缝,鱼腹梁钢结构焊接处出现拉裂现象,立即暂停土方开挖并进行坑内回填反压。2018 年 1 月 13 日晚 8:00 南侧第二榀钢支撑出现起拱现象,晚 12:30 左右东侧边坡突然发生坍塌,东侧绿化带土体下沉 1.0 m 左右,宽度 25.0 m 左右(至绿化带中污水主管道边缘)、长度 80.0 m 左右,中间两榀组合型钢对撑桁架与鱼腹梁崩裂、冠梁断裂,西侧小区道路出现 30.0~50.0 mm 的裂缝。

(2)该基坑南区围护体系已失效,南区东侧围护 SMW 工法桩偏移断裂,事发后对南区块东侧、西侧坑内再次进行了回填反压至第一道钢支撑下,该基坑围护须重新加固设计,方可再实施。

(3)后续加固方案本着安全、快捷、就地取材等原则进行,尽可能对坡顶卸土卸载。根据现场实际情况,对东侧围护桩失效的边坡段采用多排门架式 H 型钢桩加固,并设置钢筋混凝土冠梁与连系梁。对于支撑体系,采用修复、加固失效钢支撑、结合盆式开挖设置竖向型钢斜抛撑、预应力高压旋喷锚索相结合的加固方案。在实施过程中,结合现场实际加固设计方案及施工专项方案经多次论证与修正,该基坑工程最后才得以完成。

5 分析

(1)实例一基坑工程虽然深度较大、形状较不规则,但支撑体系采用了整体性较好的钢筋混凝土主支撑桁架结合装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑组合方案,有效控制了基坑边坡的位移,避免了钢支撑节点由于变形过大而破坏。该基坑工程虽然周边环境条件较复杂,但开挖范围内及坑底土层性质总体较好,稳定性相对较好,对基坑的变形控制起到良好的作用。该方案保证了基坑的整体稳定性并有效控制了变形,取得了良好的技术与经济效果。

(2)实例二基坑开挖及影响范围内软土厚度很大,性质差,土体抗剪强度低,坑外土压力很大。其中预应力鱼腹梁的跨度达 44.0 m,支撑刚度小、稳定性差,组合型钢对撑桁架支撑刚度虽然相对较大,但与大跨度鱼腹梁组合后整体支撑刚度偏小,稳定性也较差。在变形较大的情况下钢结构节点破坏导致支撑体系失稳、失效。

6 结论

(1)钢支撑体系在我国的研究与应用虽然较早,并拥有配套的设计规范与图集,但装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑技术引进与开发时间相对较短,对其认识与施工过程的管控经验还是存在不足。然而,由于钢筋混凝土支撑刚度大、施工简单、质量稳定,钢筋混凝土支撑仍然是地基土性质差、基坑深度大、环境条件复杂、位移控制严格的基坑工程最主要的支撑形式,同类基坑工程第一道支撑宜采用钢筋混凝土支撑。

(2)装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑的围护方案,在环境恶劣的现场钢支撑安装存在较大的误差,也容易造成预应力施加不及时或不到位、土方开挖与钢支撑安装施工脱节,在支撑体系尚未形成有效

的整体时进行土方开挖会大大增加基坑失稳的风险。对于软土厚度大的基坑工程,基坑暴露时间过长,也会增大基坑的变形,导致钢支撑失稳、失效。

(3)基坑工程作为地下工程,所处的地质条件复杂,影响因素众多,我们至今对岩土力学性质的了解还不够深入,很多设计计算的理论还不够完善,是建立在半理论、半经验的基础上的。基坑围护施工过程中,应加强安全监测、做到信息化施工,加强应急处理措施,做好动态设计工作,确保基坑及周边环境的安全。

参 考 文 献

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 高大钊,陈忠汉,黄书秩,等. 深基坑工程[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 刘合寨,周元,尤波. 软土地区大面积不规则深基坑支护设计实践与分析[J]. 岩土工程技术,2019,32(4):212-217.
- [4] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 浙江省工程建设标准. DB33T1096—2014 建筑基坑工程技术规程[S].
- [6] 11SG814 建筑基坑支护结构构造[S].
- [7] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [8] T/CCES3—2017 预应力鱼腹式基坑钢支撑技术规程[S].
- [9] 张衡. 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑对深基坑变形的控制技术与方法研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2014.
- [10] 刘发前,卢永成. 装配式预应力鱼腹梁内支撑系统的利与弊[J]. 城市道桥与防洪,2013(7):12,117-118,125.
- [11] JGJT 199—2010 型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].
- [12] CECS147—2016 加筋水泥土桩锚技术规程[S].
- [13] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S].

收稿日期:2019-09-23

(上接第 253 页)

参 考 文 献

- [1] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [2] Coupe S, Martin C D. Single fluid jet-grouting strength and deformation properties[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 690-695.
- [3] 杨立中,王建秀. 国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报,1997(S1):14-18.
- [4] Lee F H, Gu Q. Method for estimating dynamic compaction effect on sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 139-152.
- [5] Waltham T, Bell F, Culshaw M. Sinkholes and Subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction[M]. Berlin: Praxis Publishing Ltd., 2005.
- [6] van Paassen L A, Ghose R, Linden T J M V D, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [7] Waele J D, Gutiérrez F, Parise M, et al. Geomorphology and natal hazards in karst areas: a review[J]. Geomorphology, 2011, 134(1-2): 1-8.
- [8] 何长明,邹金锋,李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(4):628-632.
- [9] 黄涛,刘辉. 强夯结合碾压控制高填方沉降的机理研究[J]. 西南交通大学学报,2007,42(2):158-163.
- [10] 张洁琦. 浅谈强夯处理在机场、公路岩溶地基中的应用[J]. 科学之友,2009(12):36-37.
- [11] 何春保,姜志全. 垫层强夯法在岩溶地貌地基处理中的试验研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(8):60-65.
- [12] 夏天. 岩溶地基不同能级强夯处理效果分析[J]. 城市住宅. 2016,23(9),101-103.
- [13] 黄赫,李凤岭,马永峰,等. 岩溶地质条件下双层强夯地基处理效果分析[J]. 石油工程建设,2017,43(1):6-12.
- [14] 朱彦鹏. 强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J]. 兰州理工大学学报,2018,44(5):120-125.

收稿日期:2019-10-17