

文章编号: 1007-2993(2026)02-0213-08

张弦梁钢桁架支撑在某箱体基坑工程中的应用研究

黄祖腾¹ 杨静² 高鹏瑜¹

(1. 深圳市巨鲲科技有限公司, 广东深圳 518000; 2. 上海巨鲲科技有限公司, 上海 200433)

【摘要】 随着城市地下空间开发向深大化发展, 绿色可回收支护技术成为基坑工程的重要发展方向。以粤港澳大湾区某污水处理厂箱体式深基坑工程为研究对象, 论证了预应力装配式张弦梁钢桁架支撑技术的工程适用性及环境效益。通过构建混凝土支撑与张弦梁钢支撑多方案对比模型, 结合有限元数值模拟与施工全过程监测, 揭示了该技术的力学特性与变形控制机理。研究表明: (1) 预应力调控系统可实现基坑变形主动控制, 部分桩顶位移监测点出现最大值为-8.4 mm 的反向变形; (2) 模块化装配技术使支撑间距由 18 m 扩展至 30 m, 释放 30% 作业空间, 施工效率提升; (3) 构建钢-混凝土组合支护体系, 解决异形基坑平面适配难题; (4) 量化环境效益显示, 钢构件回收率达 95% 以上, 减少建筑垃圾及碳排放。本案例为深基坑绿色支护技术提供了量化设计范式, 对推动可持续岩土工程发展具有实践价值。

【关键词】 张弦梁; 钢桁架; 基坑支护; 装配式; 预应力

【中图分类号】 TU399

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0566

Application of beam string steel truss support in a box foundation pit project

HUANG Zuteng¹ YANG Jing² GAO Pengyu¹

(1. Shenzhen Blue Whale Tech Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China; 2. Shanghai Blue Whale Tech Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

【Abstract】 With the development of urban underground space to deep and large, green recyclable support technology has become an important development direction of foundation pit engineering. In this paper, the engineering applicability and environmental benefits of the prestressed prefabricated beam string steel truss support technology of a sewage treatment plant in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area are systematically demonstrated. By constructing a multi-scheme comparison model of concrete support and beam string steel truss support, combined with finite element numerical simulation and monitoring of the whole construction process, the mechanical properties and deformation control mechanism of the technology are revealed: (1) The prestress control system can realize the active control of foundation pit deformation, and the maximum reverse deformation of some pile top displacement monitoring points is -8.4 mm; (2) The modular assembly technology expands the support spacing from 18 m to 30 m, frees up 30% of the working space, and improves the construction efficiency; (3) A steel-concrete composite support system could effectively solve the problem of plane adaptation of special-shaped foundation pits; (4) The quantitative environmental benefits show that the recycling rate of steel components is more than 95%, reducing construction waste and carbon emissions. This case provides a quantitative design paradigm for green support technology for deep foundation pits, and has practical value for promoting the development of sustainable geotechnical engineering.

【Key words】 beam string; steel truss; green support; assembled; prestressed

0 引言

地下空间作为城市战略性发展资源和新型国土资源, 其开发利用是实现人车立体分流、降低环境污染和优化城市生态的重要途径。随着城市地下空间的不断开发, 基坑开挖的深度越来越深, 开挖的面积

也越来越大, 工程实践面临着诸多挑战性问题, 基坑工程技术在原有基础上, 有了很大发展和突破。绿色可回收装配式支护技术成为基坑工程技术发展趋势之一^[1]。其中钢支撑是绿色可回收装配式支护技术的重要组成部分。现阶段的钢支撑体系, 主要包括钢

管(组合)支撑、预应力型钢组合支撑等。每种支撑体系各有特点和适用性,本文将介绍一种综合适用性较强,能替代传统混凝土支撑的技术——张弦梁钢支撑技术。张弦梁钢支撑加力大小可根据变形精细控制,且多点施加预应力比较简便,对减小张弦梁跨度内的局部变形具有直接作用,在工程实例中使用效果良好^[2]。

预应力装配式张弦梁钢桁架支撑具有受力简单、支撑刚度大、安装精度高、高预应力、大跨度空间的优势,是一种安全、经济、绿色的新型装配式钢结构支撑技术^[3]。该技术近几年迅速发展,在全国多个地区均有应用。周 虔^[4]研究表明,预应力张弦梁钢支撑系统具有节能环保与高效可靠的特性,在复杂城市深基坑工程中展现出显著技术优势。陈家冬等^[5]研究了张弦梁支撑技术特点、受力特性及需要注意的问题。谢卫兵等^[6]通过对某科技大厦项目支护技术的应用研究,指出张弦梁钢桁架支撑系统解决了传统钢管撑在大跨度时的稳定性问题及支撑间距过密的问题,裴 杰^[7]则对此项目的支撑施工技术进行了探讨。陈加顺^[8]通过对某张弦梁与砼角撑相结合的支护设计项目研究,分析了张弦梁对开挖空间及工期的影响。刘建鹏等介绍了张弦梁钢桁架支撑系统预应力的控制机理,并通过对实际应用项目的分析介绍了此技术的适用范围^[3,9]。邓诗尧等^[10]对比研究表明,相较于传统混凝土内支撑,钢桁架支撑技术具有显著优势:其材料加工要求较低,所需堆场面积更小,可有效缓解施工场地受限导致的材料加工及周转困难,从而优化施工平面布置。康积源等^[11]通过对钢桁架支撑在某加固工程中的应用研究,验证了此技术在加固工程中的应用效果。张小芳等^[12]指出张弦梁钢桁架支撑技术具备大跨度、大刚度的优势,解决了传统内支撑系统一旦发生较大变形便难以控制的难题。

张弦梁钢桁架支撑支护技术已经成熟,但工程应用还不充分,本文通过对某污水处理工程基坑支护项目的设计方案比选与监测结果分析,进一步研究张弦梁钢桁架支撑的应用效果。

1 张弦梁钢桁架支撑系统

1.1 系统组成

张弦梁钢桁架支撑系统由张弦梁系统、钢桁架支撑、预应力施加装置及立柱及钢支架组成的竖向支承系统组成。主要受力构件为张弦梁及钢桁架支撑,竖向支承构件钢支架置于张弦梁系统与钢桁架支撑的底部,与立柱连接,预应力施加装置设置于张弦梁撑杆的端部以及钢桁架支撑的端部。张弦梁钢桁

架组成示意如图 1 所示。

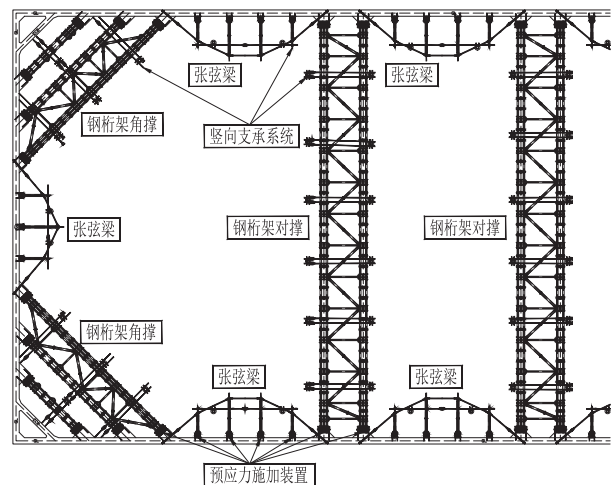


图 1 张弦梁钢桁架支撑系统组成示意

Fig. 1 Schematic diagram of the composition of the beam string steel truss support system

1.2 受力分析

基坑外侧水平土压力经冠梁/腰梁传递至张弦梁钢桁架支撑系统后呈现双重传递路径:部分力直接作用于钢桁架,其余通过张弦梁撑杆受压传递至高强钢拉杆形成拉力,最终由两端高强钢拉杆将拉力传递至连接构件(砼梁及钢桁架)。其中,高强钢拉杆的拉力可分解为水平与竖向分量,其水平分量由砼梁承担,竖向分量则由对撑/角撑承担。张弦梁钢桁架受力示意图如图 2 所示。

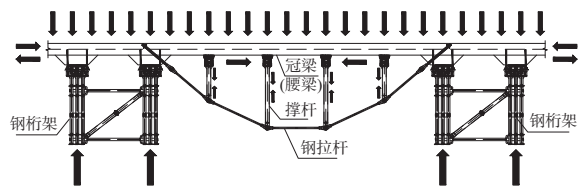


图 2 张弦梁钢桁架受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the stress of the beam string steel truss

2 应用实例

2.1 工程概况

拟建项目位于东莞市黄江镇,场地为珠江三角洲冲积平原,场地现状为空地、耕地、鱼塘。拟建场地北侧为厂房,距用地红线约 20 m,距基坑边 25 m,厂房区地坪标高 20.3 ~ 21.36 m。场地南侧为已征收的远期规划用地。场地西侧为规划生态路,道路标高约 19.00 m,距基坑边 50 m。场地东侧为大凹渠,东侧地块标高约 17.5 ~ 21.21 m,大凹渠距基坑边约 40 m。

拟建基坑开挖面积约 16405 m²,周长约 580 m,基坑内尺寸 206 m×84 m,基坑深度 10.1 ~ 14.1 m。

基坑周边环境如图3所示。



图3 基坑周边环境图

Fig. 3 The surrounding environment of the foundation pit

2.2 方案设计

2.2.1 剖面设计

基坑设计涉及的主要土层为耕植土、杂填土、素填土、黏土、细砂、强风化泥质粉砂岩、中等风化泥质粉砂岩、强风化凝灰岩、中等风化凝灰岩(较破碎)、中等风化凝灰岩(较完整)。上述各岩土层参数如表1所示。

表1 岩土一般物理力学指标设计参数
Tab. 1 Design parameters of general physical and mechanical indicators of rock and soil

地层编号	岩土层名称	天然密度 ρ ($g \cdot cm^{-3}$)	直接快剪	
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
①	耕植土	1.86	21.6	13.5
① ₁	杂填土	1.85	10.0	15.0
① ₂	素填土	1.84	23.4	13.8
② ₁	黏土	1.86	25.0	14.0
② ₂	细砂	1.90	2.0	28.0
② ₃	黏土	1.88	25.0	14.4
③ ₁	黏土	1.92	15.0	10.0
④ ₁	强风化泥质粉砂岩	1.95	35.0	25.0
④ ₂	中等风化泥质粉砂岩	2.05	100.0	40.0
⑤ ₁	强风化凝灰岩	1.95	35.0	25.0
⑤ _{2.1}	中等风化凝灰岩(较破碎)	2.10	100.0	42.0
⑤ _{2.2}	中等风化凝灰岩(较完整)	2.15	120.0	45.0

本工程基坑支护安全等级:一体化箱体基坑深度大于14m的等级为一级,其余为二级。基坑支护采用灌注桩+内支撑体系,共设置一道支撑梁。灌注桩采用 $\phi 1200@1600$ mm钻孔灌注桩,立柱桩采用 $\phi 1000$ mm钻孔灌注桩+上部格构柱。典型剖面如图4所示。

2.2.2 平面设计

基坑平面尺寸为206m \times 81m,呈较为规整的长

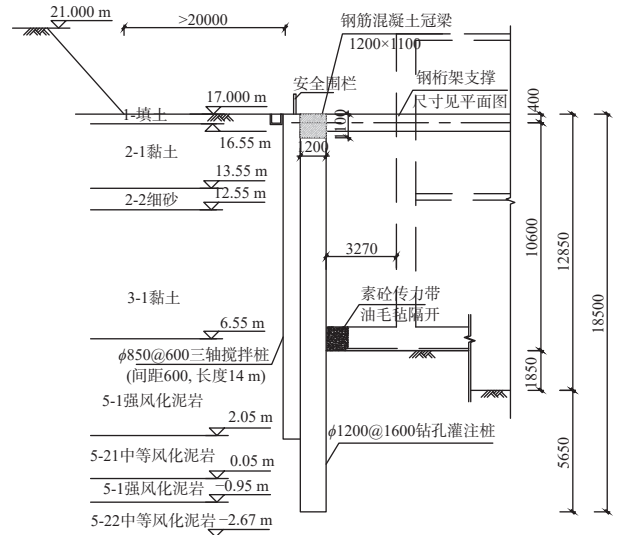


图4 典型剖面图(单位:mm)

Fig. 4 Typical profile(Unit: mm)

方形。桩撑支护初始设计了两种支护方案,即:灌注桩+混凝土支撑支护方案和灌注桩+张弦梁钢桁架支撑支护方案。

混凝土支撑支护方案采用混凝土角撑+中部4个对撑的布置方式,对撑间距为18m。混凝土支撑支护方案平面布置如图5所示。

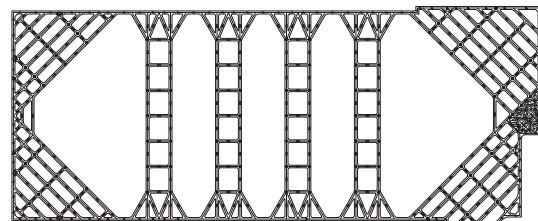


图5 混凝土支撑方案

Fig. 5 Concrete support scheme

张弦梁钢桁架支撑支护方案则采用角撑+张弦梁+中部3对撑的布置方式。其平面设计选择了较大跨度的30m张弦梁系统,对撑间距为30m,极大地满足施工场地大开挖空间的要求。基坑右上角不太规整,无法很好地放置张弦梁,因此在右上角局部设置了少量混凝土支撑,以便于张弦梁及钢桁架支撑的布置。张弦梁钢桁架支撑支护方案平面布置如图6所示。

平面方案对比显示,张弦梁钢桁架支撑支护方案较混凝土支撑支护方案开挖空间增加约30%。混凝土支撑施工时需要支模、绑扎钢筋,浇筑后养护时间长。张弦梁钢桁架支撑方案张弦梁跨度大,开挖空间大,方便土方施工,且钢支撑可场外分段预拼装再运输至现场进行模块化安装,全螺栓连接,施工便捷,安装完成后即可使用,可有效缩短施工工期。在环境

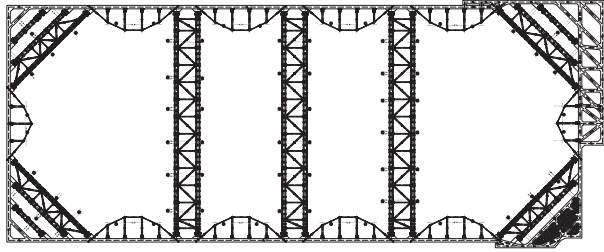


图6 张弦梁钢桁架支撑方案
Fig. 6 Beam string steel truss bracing scheme

保护方面,张弦梁钢桁架支撑支护方案构件可利用率达95%以上,建筑垃圾少,相比混凝土支撑支护方案减少建筑垃圾约6800 t,减少碳排放约1400 t。钢支撑构件全螺栓连接,安拆噪声小,有效降低对周边环境的影响。钢支撑与砼支撑特点对比如表2所示。

表2 钢支撑与砼支撑特点对比表
Tab. 2 Comparison table of the characteristics of steel support and concrete support

对比项目	钢支撑	砼支撑
开挖面积	大	小
施工工期	短	长
建筑垃圾	少	多
构件回收	可	不可
施工噪音	小	大
扬尘	无	有

综合考虑施工工期、基坑开挖空间及环境保护要求等因素,选择灌注桩+张弦梁钢桁架支撑支护方案。

2.2.3 截面设计

混凝土冠梁截面为1200 mm(宽)×1100 mm(高),支撑梁截面为1200 mm(宽)×1100 mm(高)和1000 mm(宽)×1000 mm(高)。支撑立柱为4个角钢焊制的格构柱,角钢型号为L160×16 mm。

钢桁架支撑采用Q355级钢材,张弦梁下弦采用GLG650高强钢拉杆。张弦梁选用双杆30 m跨度张弦梁及单杆24 m跨度张弦梁,与张弦梁相连的主撑采用3H800×300×14×26 mm型钢(加劲),其余位置桁架主撑采用2H800×300×14×26 mm型钢(加劲)。

2.2.4 设计结果

采用有限元软件进行建模分析。计算得出基坑支护结构水平位移最大的10个点位置示意图,如图7所示,其节点位移值如表3所示。

计算结果显示,平面计算冠梁处最大水平位移为15.8 mm,小于限值30 mm,满足设计要求。

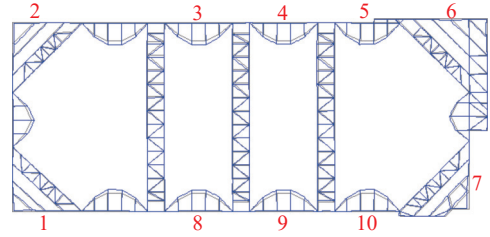


图7 位移最大节点位置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the position of the node with the largest displacement

表3 节点位移表
Tab. 3 Nodal displacement table

序号	节点号	垂直基坑位移/mm
1	40	10.5
2	292	10.9
3	394	8.2
4	444	6.2
5	494	7.0
6	629	15.8
7	646	15.8
8	848	6.3
9	898	7.7
10	950	7.7

2.3 施工技术

施工平面结合施工区域划分及施工工艺流程安排进行布置。钢支撑系统施工流程为:预埋件安装→钢支架安装→钢支撑安装→张弦梁安装→二次灌浆→钢支撑验收→施加预应力→投入使用^[10]。

2.3.1 场地准备

钢桁架支撑(包括张弦梁)结构外廓线外扩1.0 m作业区,土方开挖深度应控制于冠(腰)梁底标高下0.5 m,形成标准安装基面。吊装现场及进场道路要求场地平整,经15 t级压路机分层碾压后,密铺钢板,且车道需满足40 t级重载车辆通行条件^[13]。

2.3.2 堆场预拼装




钢支撑运输至项目现场之前应在堆场实施模块化预拼装,按安装分段逆向分解运输单元(单元长度≤12 m),确保构件进场后直接吊装。预拼装时根据项目安装分段情况,采用现有机械将转运至预拼装场地的构件,按进场顺序拼装成段。完成预拼装的构件进行编号后,采用长拖车有序装运至项目现场。预拼装段数表如表4所示。

2.3.3 预埋件安装

预埋件主要有支架端部的预埋连接件及张弦梁

表 4 预拼装段数表

Tab. 4 Table of the number of pre-assembled segments

序号	分段构件	分段长度/m	分段质量/t
1		7	5.6
2		11	6.8
3		6	4.5

边拉杆处的预埋圆管。混凝土梁施工时,根据安装图上预埋件及牛腿角点坐标放出点位。预埋件定位准确后,与混凝土梁钢筋点焊固定,以免预埋件在混凝土振捣过程中位置偏移^[10]。预埋圆管安装时,尽量避开已绑扎完成的钢筋,定位准确后,与钢筋进行多点焊,避免移位。预埋圆管两头管口需套袋绑紧,防止混凝土倒灌,堵塞圆管。现场安装见图 8、图 9。



图 8 预埋件安装

Fig. 8 Installation of embedded parts



图 9 预埋管安装

Fig. 9 Installation of embedded pipes

2.3.4 钢支架安装

场地开挖具备条件后,首先根据图纸放线定位连接件及支架平台梁的位置,然后焊接牛腿及加劲板。钢牛腿完成后,定位并焊接预埋件与支架梁之间的连接件,然后安装钢支架。钢支架梁与立柱及连接件之间采用高强螺栓连接^[10]。牛腿及加劲板焊接如图 10 所示,支架梁安装如图 11 所示。

2.3.5 钢支撑安装

钢支撑梁的连接,采用大六角高强度螺栓。在构件自由端下方放置枕木用于支撑构件,用汽车吊依次吊装已拼装段,对孔穿入高强螺栓并拧紧。钢桁架



图 10 牛腿及加劲板焊接

Fig. 10 Welding of corbel and stiffener plate



图 11 支架梁安装

Fig. 11 Bracket beam installation

支撑安装顺序为:弦杆→斜腹杆→弦杆→横腹杆。按照此方法进行下一段钢支撑的安装。钢桁架安装完成后进行张弦梁的安装。张弦梁安装顺序为:撑杆→高强拉杆。钢桁架安装如图 12 所示,张弦梁安装如图 13 所示。



图 12 钢桁架安装

Fig. 12 Steel truss installation



图 13 张弦梁安装

Fig. 13 Beam string installation

2.3.6 二次灌浆

钢支撑结构端部与混凝土梁连接间隙根据梁平整度及拆撑需求进行二次灌浆处理,材料采用高强度无收缩灌浆料(3 d 抗压强度需达到 C20 标准),钢支撑梁要确保至少一端灌浆^[10]。现场灌浆如图 14 所示。



图 14 二次灌浆
Fig. 14 Secondary grouting

2.3.7 预应力施加

预应力施加分为两部分:第一部分为桁架主撑预应力的施加;第二部分为张弦梁预应力施加。预应力施加时应按均匀、对称、分级的原则执行。预应力可分次施加,首次施加在钢支撑安装完成时,根据设计预应力值施加初始预应力,然后根据现场监测情况,当冠梁或腰梁变形增加一定数值时,进行再次施加。由于钢楔块打入锁定后不可避免会出现预应力的损失,故在允许的情况下,实际施加的预应力可在设计预应力的基础上增加 10%~20%。

2.4 应用效果

2.4.1 工程实况

从预埋件进场至一体化箱体基坑底板全部浇筑完成历时约 10 个月,项目基坑开挖完成后的实况如图 15 所示。



图 15 现场实况图
Fig. 15 View of the site

2.4.2 监测结果

基坑设置了立柱桩沉降监测点共 18 个;基坑顶

部竖向位移监测点共 31 个;支护桩顶水平位移监测点共 31 个;支撑轴力监测 24 组;基坑支护桩深层水平位移监测孔共 18 孔。基坑监测点平面布置如图 16 所示。监测结果汇总情况如表 5 所示。基坑支护桩深层水平位移曲线如图 17 所示。

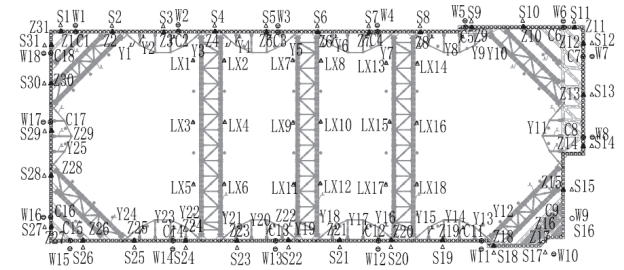


图 16 基坑监测点布置
Fig. 16 Layout of foundation pit monitoring points

表 5 监测结果汇总表
Tab. 5 Summary table of monitoring results

监测项目	累计变化		报警指标	
	点号	最大值	报警值	控制值
支护桩顶水平位移/mm	Z06	21.88	±36	±45
支护桩顶竖向位移/mm	S19	-27.8	±36	±45
深层水平位移/mm	C11	26.34	±40	±50
立柱桩沉降/mm	LX14	16.35	±20	±25

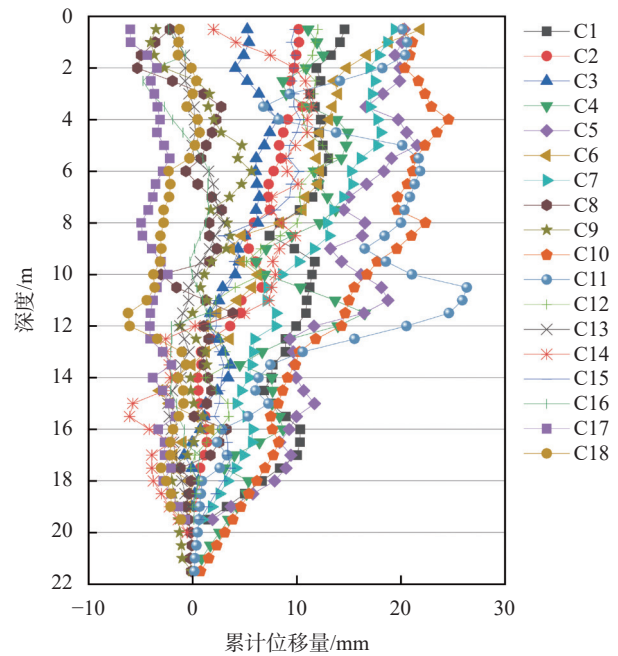


图 17 基坑支护桩深层水平位移曲线图
Fig. 17 Horizontal displacement curve of deep foundation pit support pile

监测数据显示,支撑系统预应力施加后,约 33% 的监测点出现-8.44~-4.71 mm 反向位移。此现象

源于预应力施加导致土体向坑外变形。

底板浇筑完成后,基坑坑外位移监测点主要分布在基坑东西两侧短边位置,主要是两边土压力不平衡导致的一侧位移反向。部分监测点数据出现振荡,是由于测斜孔周边堆积了建筑材料以及施工车辆频繁通过,造成在测试过程中读数失真,从而出现数据的波动。

至基础底板浇筑完成,桩顶水平位移最大值为15.15 mm,围护桩最大深层水平位移值为24.29 mm,均未超过报警值。支撑拆除后桩顶位移跳动,桩顶水平最大累计位移值为21.88 mm,围护桩最大深层水平位移值为26.34 mm,亦未超过报警值。支护结构的整体稳定性及安全性均可满足要求。

3 结论

通过对粤港澳大湾区某大型污水处理厂深基坑工程实践进行研究,系统验证了预应力装配式张弦梁钢桁架支撑技术的工程适用性、力学性能及环境效益,主要结论如下:

(1)变形主动控制机理:通过预应力动态调控技术实现了基坑位移全周期管理,最大水平位移15.8 mm,仅为限值的52.7%;部分测点出现-8.4 mm反向变形,证实了其对土体变形的主动抑制能力。

(2)绿色施工效能:模块化装配技术使支撑间距由18 m扩展至30 m,释放30%作业空间,施工效率提升;钢构件回收率达95%以上,减少建筑垃圾及碳排放,全生命周期环境效益显著。

(3)复合支护优化策略:针对异形基坑平面适应性不足的问题,提出“钢-混凝土组合支护”模式,局部混凝土支撑(占比14.7%)可优化力系分布,最终桩顶位移21.88 mm,为限值的48.6%,验证了复杂形态基坑的稳定控制可行性。

(4)技术创新体系:建立预应力损失补偿模型与模块化分段设计准则(7~11 m预拼装单元),形成标准化施工流程,为深大基坑绿色支护提供可复制技术范式。

当前研究聚焦单道支撑体系,后续需开展多道支撑协同作用机理研究。本成果为城市地下空间可持续发展提供了理论支撑与工程实践参考。

参 考 文 献

[1] 徐杨青,江强强.城市地下空间基坑工程技术发展综述[J].建井技术,2020,41(6):1-9,23. (XU Y Q, JIANG Q Q. Review on engineering and technology development of foundation pit for urban underground

space[J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(6): 1-9,23. (in Chinese))

- [2] 李连祥,赵仕磊,张菊连,等.全回收基坑支护技术发展及思考展望[J].工业建筑,2025,55(3):211-222. (LI L X, ZHAO S L, ZHANG J L, et al. Thinking and prospects of the development of fully-recycled retaining and protection of foundation excavation engineering[J]. Industrial Construction, 2025, 55(3): 211-222. (in Chinese))
- [3] 刘建鹏,王震,黄炜.装配式张弦梁钢支撑技术适用性研究[J].中国建筑金属结构,2023,22(2):45-48. (LIU J P, WANG Z, HUANG W. Research on the applicability of prefabricated tension beam steel support technology[J]. China Construction Metal Structure, 2023, 22(2): 45-48. (in Chinese))
- [4] 周度.装配式预应力张弦梁钢支撑体系在深基坑支护设计及施工中的应用研究[J].江西建材,2022(1):200-202. (ZHOU Q. Design and construction of prefabricated pre-stressed tension string beam steel support system in deep foundation pit support applied research[J]. Jiangxi Building Materials, 2022(1): 200-202. (in Chinese))
- [5] 陈家冬,陈卫刚,吴亮,等.装配式预应力张弦梁钢支撑在深基坑工程中的应用与实践[C]//第十二届深基础工程发展论坛论文集.昆明:中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会,中国工程机械工业协会桩工机械分会,中国工程机械学会桩工机械分会,等.2022:87-93. (CHEN J D, CHEN W G, WU L, et al. Application and practice of prefabricated prestressed tension beam steel support in deep foundation pit engineering[C]// Proceedings of the 12th Forum on the Development of Deep Foundation Engineering. Kunming: Pile Machinery Branch of China Construction Machinery Society, et al. 2022: 87-93. (in Chinese))
- [6] 谢卫兵,郭海轮,郑钊泽.装配式张弦梁钢支撑在某深基坑工程中的应用[J].广东土木与建筑,2022,29(1):22-25. (XIE W B, GUO H L, ZHENG Z Z. Application of assembled prestressed beam string steel bracing system in a deep excavation project[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2022, 29(1): 22-25. (in Chinese))
- [7] 裴杰.装配式张弦梁钢支撑在深基坑中施工工艺探讨[J].建设科技,2023(19):82-84. (PEI J. Discussion on construction technology of prefabricated tension string beam steel bracing in deep excavation[J]. Construction Science and Technology, 2023(19): 82-84. (in Chinese))
- [8] 陈加顺.张弦梁钢支撑系统在基坑支护中的运用[J].建筑监督检测与造价,2022,15(6):47-50. (CHEN J S.

- Application of Zhangxian beam steel support system in foundation pit support[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2022, 15(6): 47-50. (in Chinese))
- [9] 刘建鹏. 装配式张弦梁钢支撑基坑支护主动控制原理分析 [J]. 工程与建设, 2023, 37(6): 1727-1731. (LIU J P. Displacement control principle of foundation pit supported by prestressed beam string steel bracing system[J]. Engineering and Construction, 2023, 37(6): 1727-1731. (in Chinese))
- [10] 邓诗尧, 蔡博文, 裴子敬, 等. 预应力装配式张弦梁钢支撑施工技术研究 [J]. 住宅与房地产, 2024(11): 21-25. (DENG S Y, CAI B W, PEI Z J, et al. Research on construction technology of prestressed prefabricated tension beam steel support[J]. Housing and Real Estate, 2024(11): 21-25. (in Chinese))
- [11] 康积源, 郑旭锐, 陈天成, 等. 深基坑钢支撑加固措施的研究与应用 [J]. 建筑机械化, 2024, 45(8): 78-82. (KANG J Y, ZHENG X R, CHEN T C, et al. Research and application of steel support and reinforcement measures in deep foundation pit[J]. Construction Mechanization, 2024, 45(8): 78-82. (in Chinese))
- [12] 张小芳, 程 磊, 王贤能, 等. 预应力张弦梁钢支撑在某基坑工程中的应用 [J]. 广东建材, 2024, 40(2): 103-108. (ZHANG X F, CHENG L, WANG X N, et al. The application of prestressed string beam steel support in a foundation pit engineering[J]. Guangdong Building Materials, 2024, 40(2): 103-108. (in Chinese))
- [13] 王义军. 张悬梁钢支撑在某深基坑支护工程中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024(2): 35-37. (WANG Y J. Application of steel bracing of suspension beam in a deep foundation pit[J]. Construction & Design for Engineering, 2024(2): 35-37. (in Chinese))

收稿日期: 2024-12-02