

DOI:10.19701/j.jzjg.2021.21.024

洛阳隋唐城应天门遗址保护建筑基础拉杆设计

徐珂¹, 姬浩杰², 梁岩³

(1 清华大学建筑设计研究院有限公司, 北京 100084; 2 河南六建建筑集团有限公司, 洛阳 471001;
3 郑州大学土木工程学院, 郑州 450001)

[摘要] 隋唐城应天门遗址保护建筑采用桩基础, 桩顶设置承台支撑上部斜柱框架。在不能开挖遗址的情况下, 采用暗挖顶管工艺施工基础预应力拉杆, 平衡基础间水平推力。先后介绍了预应力拉杆的组成、预应力张拉次数、预应力张拉比例和顺序、桩顶水平位移控制目标等设计原则, 以及预应力拉杆的施工方法及施工控制方法, 并根据施工监测结果及施工模拟结果对施工方案进行了调整。结果表明: 施工过程中桩顶水平位移均满足既定目标, 且变化趋势与施工模拟结果吻合。

[关键词] 洛阳隋唐城应天门遗址; 遗址保护; 暗挖顶管; 预应力拉杆; 施工监测

中图分类号: TU318 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2021)21-0129-07

[引用本文] 徐珂, 姬浩杰, 梁岩. 洛阳隋唐城应天门遗址保护建筑基础拉杆设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(20): 129-135. XU Ke, JI Haojie, LIANG Yan. Foundation tie rod design of the conservation building of YingTianMen archaeological site of Luoyang City of Sui and Tang Dynasties[J]. Building Structure, 2021, 51(20): 129-135.

Foundation tie rod design of the conservation building of YingTianMen archaeological site of Luoyang City of Sui and Tang Dynasties

XU Ke¹, JI Haojie², LIANG Yan³

(1 Architectural Design & Research Institute of Tsinghua University Co., Ltd., Beijing 100084, China;

2 Henan Six Construction Group, Luoyang 471001, China; 3 School of Civil Engineering, Zhengzhou University,
Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Pile foundation was used in the conservation building of YingTianMen archaeological site of Luoyang City of Sui and Tang Dynasties. The pile cap was set to support the upper inclined column frame. As the site could not be excavated, the prestressed tie rod between foundations was constructed by underground excavation and pipe jacking technology to balance the horizontal thrust between foundations. The composition of the prestressed tie rod were introduced, the number of prestressed tension, the proportion and sequence of prestressed tension, the horizontal displacement control target of pile top and other design principles were introduced successively, as well as the construction scheme and construction control method of the prestressed tie rod were introduced. According to the comparison of construction monitoring and construction simulation results, the construction scheme was adjusted. The results show that the horizontal displacement of pile top meets the established target during construction, and the variation trend is consistent with the construction simulation results.

Keywords: YingTianMen archaeological site of Luoyang City of Sui and Tang Dynasty; archaeological site protection; underground excavation and pipe jacking; prestressed tie rod; construction monitoring

0 概况

应天门是隋唐两京考古发掘出的第一座宫城门阙遗址, 其遗存为夯土墩台, 顶部比现有地面高 1~6m, 地面下夯土深度约 1m。本工程建筑设计在平面上分中部城楼、东西连廊、东西朵楼、东西飞廊、东西阙楼共 9 个建筑物, 因建筑造型和空间限制, 结构设计采用斜柱支撑框架跨越遗址^[1-2], 基础布置在遗址外侧, 支撑斜柱与地面呈 45°~65°, 柱下水平分力大。

以城楼为例(文献[1]中图 8), 初步分析时预

估柱下最大竖向荷载效应为 21 000~24 000kN, 水平荷载效应为 10 000~12 000kN, 即竖向与水平荷载效应约为 2:1 的关系。如果不能约束或平衡该水平分力, 会造成两方面破坏: 1) 基础采用现浇混凝土桩基础, 桩顶出现水平位移大变形时会引起柱身剪切或弯曲破坏, 结构丧失基础支撑效应; 2) 柱脚持续外推过程中, 柱与地面夹角减小, 柱轴力和水平推力持续增大, 增加斜柱弯曲效应, 逐步超过构件

作者简介: 徐珂, 硕士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, Email: 15601060166@126.com。

承载能力,该过程不可逆,直至最终改变结构体系特性。因此平衡柱下水平分力是本工程重点问题,在排除压重摩擦提供反力、斜桩支撑提供反力等外部方案后,设计采用在基础间设置拉梁的方案,其力学关系属于结构内部自平衡,受外部环境影响小,整体安全性高。采用自平衡方案的问题是,按常规施工方法需要开挖遗址,这是遗址保护工程不允许实施的方案,故需要考虑非常规工艺。

1 方案讨论

在与建筑师、考古单位仔细协商、研究土遗址分布情况的前提下,经考古单位详细测量,得出墩台遗址在地面下遗存范围不超过 1.0m 深度的结论后,选择在遗址下合适深度采用暗挖顶管工艺实现遗址两侧基础间杆件连通,平衡上部结构在柱脚处产生的水平推力(图 1)。

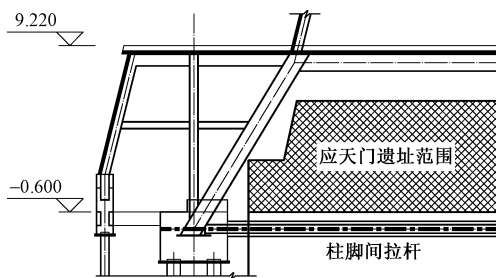


图 1 遗址层结构体系与遗址关系

通过整体分析可知,柱脚间拉杆在各种工况组合下一直处于受拉状态,不会出现受压状态,理论上在基础间的拉杆采用预应力筋或钢构件可以满足轴向受拉使用要求^[3]。以城楼柱脚最大水平分力 11 000kN 计算,采用 72 根 $\phi 15.2$ ($f_{pk} = 1\ 860\text{MPa}$) 钢绞线可满足设计要求,合成一捆直径小于 0.2m,在土中所需顶管直径小、施工容易实现,这样做会带来诸多问题。在方案深化中又提出以下改进意见:

(1) 单独使用预应力筋作为拉杆构件,进行预应力张拉或上部荷载变化时,基础间水平位移变化明显,按上述钢绞线规格计算,在城楼荷载作用下,一侧桩顶位移会达到 40~50mm,日常荷载变化对桩顶推拉频繁。需要增加拉杆截面刚度,控制轴向变形,减少桩顶位移量。

(2) 单独使用钢构件时,在柱脚发生水平位移后被动参与工作,不具有主动控制位移能力。调节预应力张拉值可以控制柱脚水平位移量,这点优于单独使用钢构件。

(3) 拉杆构件在地下长期使用,如果受到环境腐蚀,最终会影响结构安全。作为整个结构体系最重要的构件,应该有足够的保护层厚度,避免腐蚀及

意外破坏导致拉杆构件退出结构体系。

(4) 考古资料显示局部夯土内存在空洞,推测为 20 世纪 50~70 年代开挖的防空洞,方向和尺寸难以量化,未来可能出现塌方情况,如压迫拉杆会改变结构体系设计状态,发展趋势无法预估,应增加拉杆抗弯性能,减少结构体系发生变化的可能性。

(5) 拉杆在有限尺寸下,一次性张拉预应力至控制值,拉杆压缩变形量会超过桩顶位移允许值,应结合施工进度进行分次张拉,每次张拉引起的桩顶位移量应控制在合理而微小的范围。

(6) 理论计算与实际情况存在差异,施工中需进行应力、位移监测。通过理论计算预判结构变化趋势,对比施工监测结果,判断预应力分次张拉控制值的合理性和结构体系生成过程的安全性,控制施工进度。

综合上述意见,拉杆方案采用钢管混凝土组合构件,中心布置无粘结预应力筋(图 2)。混凝土材料可以约束钢管,避免钢管在预应力最大张拉值时发生屈曲破坏,同时增加拉杆轴向刚度,设计控制目标是拉杆在结构恒、活荷载及重力作用下处于受压状态,如果出现受拉状态,混凝土材料会退出工作,拉杆轴向刚度会发生突变,不利于上部结构工作稳定性^[4]。

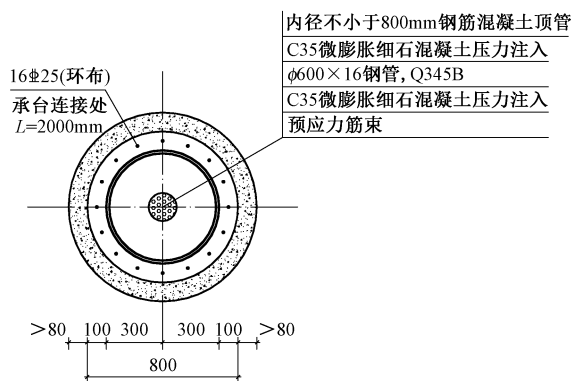


图 2 暗挖顶管预应力拉杆剖面图

结合施工可操作性以及对遗址的影响,采用内径不小于 800mm、壁厚不小于 80mm 钢筋混凝土顶管进行暗挖施工,该直径可供施工人员进入内部处理顶管推进过程中遇到的问题。施工完成后顶管上部距离遗址夯土底部还有 0.5~0.6m。

大吨位柱下设置两道预应力拉杆,位于钢柱两侧对称位置,保持桩基础承台受力平衡。这样拉杆的预应力最大控制值为 5 600kN,假如出现预应力筋失效情况下,基础间水平力全部由钢管承担。 $\phi 600 \times 16$ 钢管的拉应力低于 200MPa,拉杆不会出现拉断破坏,这种情况下模拟计算,以城楼为例,桩顶位移会达到 8~12mm,对桩身可能会产生剪切破坏,承台

变成支撑在桩身上的结构,可保证上部结构不会立即失稳。拉杆的外侧混凝土顶管和钢管外注浆混凝土则成为钢管混凝土组合构件的保护层,合计厚度不小于 180mm,核心预应力筋处于拉杆中心,理论上不会受到环境腐蚀和外力破坏。

2 深化设计

考虑现场条件和施工工艺等因素,深化设计由设计单位和施工单位合作完成,主要解决以下问题。

2.1 锚固节点设计

为减少拉杆预应力筋张拉端及锚固端的锚固节点空间尺寸,将锚固点直接与钢柱脚连接,拉杆与斜柱间传力明确,能够提高传递效率。具体做法是预应力筋通过内钢管穿过柱脚节点,采用一块锚板锚固所有预应力筋连接于柱脚外伸法兰盘,锚板有圆形和矩形两种形式(图 3)。

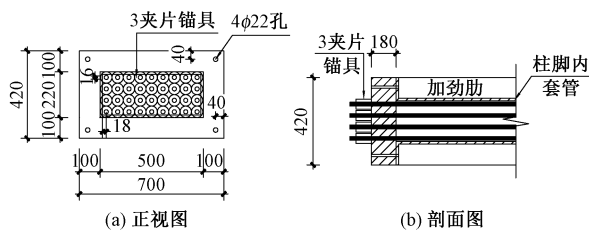


图 3 预应力筋锚板构造

中心预应力筋束密集,锚板按最小施工间距设计总体尺寸小,内部填充混凝土承压能力有限。以城楼拉杆预应力最大控制值为 5 600kN 的锚板为例,锚板支撑截面为 500mm×220mm,扣除钢绞线所占面积后,混凝土所占面积理论值为 0.1m²,承压能力有限,同时考虑此处混凝土填充质量难以保证,按锚板承担全部预应力张拉力进行设计。锚板材料选用《优质碳素结构钢》(GB/T 699—2015)中 45#调质钢,钢材弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,剪切模量 $G = 7.9 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

采用 ANSYS 软件的实体单元模拟锚板进行有限元分析,锚板与柱脚法兰盘接触面用单向受压单元作为锚板的边界条件,预应力筋拉力按锚具尺寸等效为面荷载,施加在锚板承压面上,在基本组合作用下,按照 von Mises 应力不大于材料折减后屈服强度和剪应力不大于材料折减后抗剪强度双控原则确定各锚板厚度,实际选用板厚在 50~180mm^[5]。典型锚板位移云图见图 4,最大位移约为 0.124mm,位于锚板中心位置,且有限元分析结果与试验结果吻合。

为验证锚板有限元分析结果,在正式加工锚板前,施工单位和监控单位根据设计图纸要求进行城楼 36m 拉杆全尺寸锚板预应力张拉和混凝土灌注模拟试验(图 5、图 6),张拉结束后对锚板变形和应

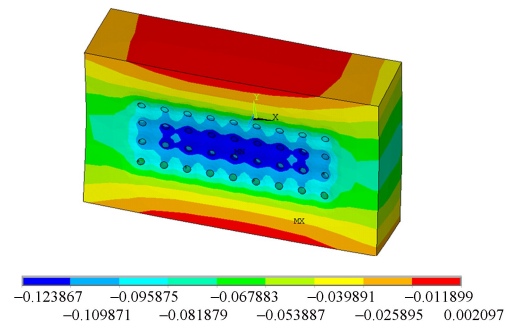


图 4 锚板有限元分析位移云图/mm



图 5 预应力试验



图 6 预应力试验数据采集

力变化、钢管轴力、预应力筋伸长量和实际拉力进行测量记录,与模拟分析数据进行对比分析,用于指导施工。

2.2 预应力分次张拉比例

根据施工阶段分次张拉,可以避免一次性张拉引起的桩顶水平位移过大,造成桩身破坏。理想的张拉比例是与上部结构刚度和荷载变化相对应,控制桩顶在节点附近有限度位移。模拟分析需要了解桩基础水平承载能力、桩基础抗侧力刚度和上部建筑施工过程。桩基础水平承载力及抗侧力刚度可以通过试桩试验确定。

因场地有限,共进行两组以水平破坏为目标的试验,每组试桩由两根桩组成,一根为检测桩,另一根为辅助用锚桩。检测桩按直径 0.7m、桩长 20.5m 工程桩标准施工,成桩后先进行竖向承载力检测,达到竖向荷载控制值 48h 后再进行水平承载力检测。水平加载标高为承台底部标高,以单向多循环模式加载至破坏标准。试验结果判定:当桩身不允许开裂时,单桩水平承载力特征值为 210kN,推定水平临界荷载为 280kN,对应水平位移为 8.85mm;当桩顶水平位移 6mm 时,对应荷载为 240kN;当桩顶水平位移 10mm 时,对应荷载为 300kN。

根据试桩数据,桩顶边界条件按水平弹簧刚度为 30kN/mm 约束桩顶进行模拟分析。在此假定下,设计文件确定桩顶位移控制目标为:施工阶段上部荷载和预应力过程中位移限值为 ± 2.0 mm,即最大摆动位移值 ≤ 4 mm;使用阶段位移限值为 ± 1.5 mm,即最大摆动位移值 ≤ 1.5 mm。

施工单位结合场地和安装特点与设计单位共同编制详细的施工方案,并进行施工模拟分析。在施工前确定预应力分次张拉节点,以城楼为例:1)下部遗址层钢结构安装完毕后进行第一次张拉,总体张拉比例为 30%。2)与常规钢结构工程施工区别是,中部城墙层安装完钢结构暂停后续安装,等待中下部混凝土结构全部浇筑完成后,进行预应力第二次张拉,监控合格后再开始上部建筑层钢结构安装,张拉比例为 40%。这样施工的原因为:一是等待结构自重荷载和刚度增加;二是减少上部建筑层钢框架结构安装变形。3)结构主体完成后进行建筑初步装修,包括建筑墙体、地面做法、立面装修等,然后进行第三次张拉,张拉比例为剩余的 30%,并进行预应力有效拉力调整。4)进行建筑精装修施工,完成后正式使用。具体施工阶段见文献[1]的表 4。

2.3 预应力拉杆布置

城楼属于对称性结构,预应力拉杆受力和柱脚位移方向明确。朵楼下部遗址层四根斜柱在柱脚处与其它斜柱共用基础,其中东南角的柱脚斜柱水平夹角为 53.9° ,与连廊、飞廊支撑斜柱脚交汇于一点,组合后的基础竖向力、水平推力值是本工程最大值,竖向力标准组合值约为 22 630kN,水平推力约为 12 930kN。斜柱下四座基础承台通过基础间暗挖双层预应力拉杆相互连接(图 7),平衡 X, Y 双向水平分力。

阙楼是非对称性结构,平面呈 L 形,下部遗址层斜柱布置在阴角区数量少、阳角区数量多,遗址两侧没有明显的受力对称关系(图 8),按照各承台双向水平位移接近 0 的原则,确定各拉杆预应力控制值^[1,6]。施工模拟所得联合承台柱角相对原点的 X 向、 Y 向水平位移均不大于 $\pm 1.5\text{mm}$ (图 9)。

阙楼下共布置八根拉杆,三个组合承台不是对称关系,每根拉杆长度不同,考虑施工时每根预应力筋做不到绝对同步张拉,为验证不同张拉顺序对结构整体刚度的形成、桩顶位移的影响,按照从左至

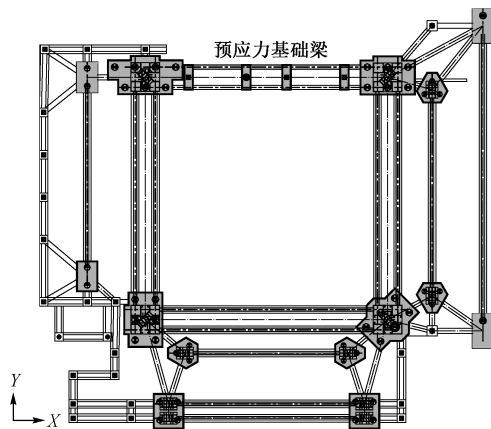


图 7 朵楼基础承台间暗挖顶管拉杆

右、从中到边、从边到中三种张拉顺序进行模拟分析,结果显示三种张拉顺序在中间过程位移有区别,最后停止点是一致的(图 10),钢管内力和预应力拉力变化趋势也与之相同。朵楼区段主要基础间拉杆为矩形布置,也进行了相关分析得到相同结论,因此在理论上可以降低每次张拉过程同步施工的要求^[7]。

2.4 预应力拉杆构件截面设计

在设计阶段,结构模型中预应力拉杆是钢管混凝土组合构件,设计预期在施工结束后的使用阶段,预应力筋为受拉体,混凝土和钢管为组合受压体。

预应力拉杆在施工过程中是由钢管→预应力+钢管→预应力+混凝土+钢管演变的过程,并且伴随着上部刚度、荷载不断增加和分次张拉施工,组合受压体的受力也存在受拉和受压不断转换的过程。

施工需要先进行预应力张紧再浇筑混凝土形成组合构件,这样才能保证预应力筋在构件中的线型。张紧预应力即第一次张拉,为减少预应力筋在自重作用下的变形,钢管内每隔 2.0m 设置定位支架。施工监测数据符合预期后,进行管内混凝土压力注入。

第一次张拉前,拉杆为钢管构件,在上部结构作用下处于受拉状态;张拉后,在预应力作用下钢管处

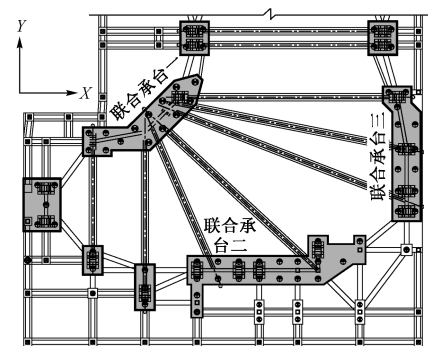


图 8 阙楼暗挖顶管预应力拉杆平面布置图

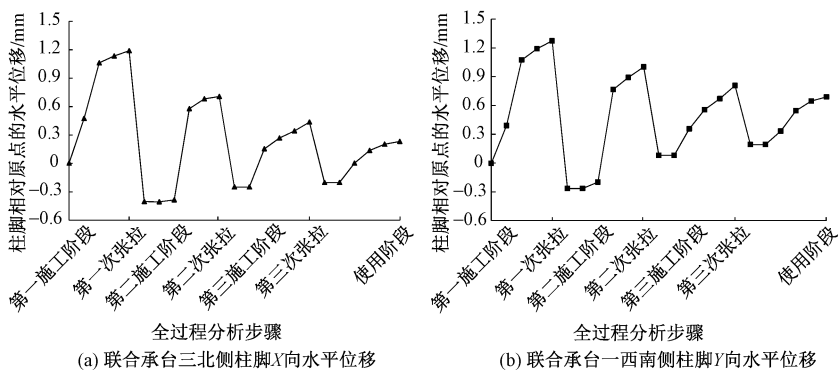


图 9 模拟阙楼施工阶段桩顶位移图

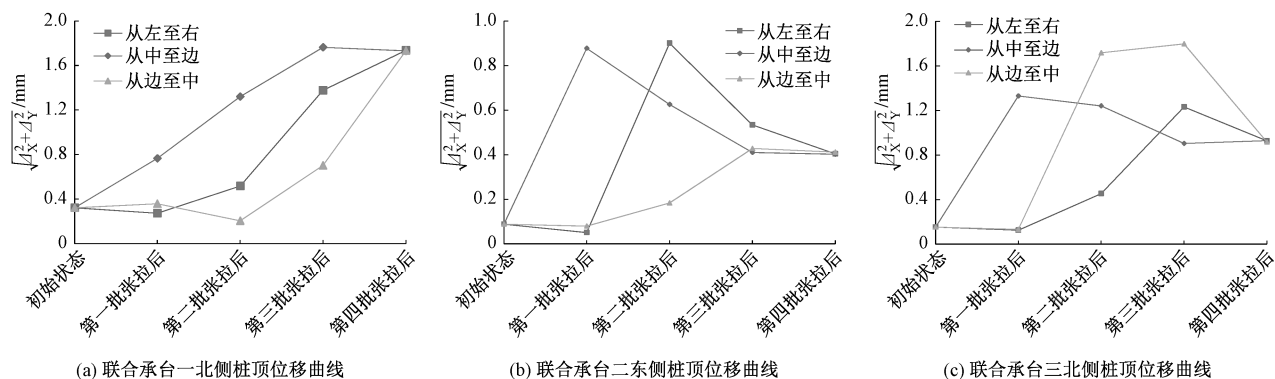


图 10 阙楼第一次张拉按不同张拉顺序分析结果

于受压状态。实际情况是暗挖顶管与土体之间没有明显变形空隙,土体约束顶管,顶管与钢管间为压力注入混凝土,可认为是全长外包混凝土约束钢管,不会出现失稳状态。为稳妥起见,模拟分析时验算钢管稳定性,其中钢管按两端连接于承台,跨中无竖向支撑的构件模拟,计算弯矩按整体模型分析结果加上重力偏心引起附加弯矩计算。以城楼为例,拉杆计算长度为 36m,按压弯构件计算钢管稳定性强度设计值小于 120MPa。

3 拉杆内力变化

根据设计阶段施工模拟分析预计拉杆内力变化趋势是:拉杆第一次张拉前,在上部荷载作用下,拉杆为受拉状态,杆体为钢管,拉力由钢管承担;张拉后变为受压状态,压力由钢管承担。第二次张拉前,杆体已完成混凝土灌注,杆体为钢管混凝土,随着上部荷载增加,拉杆由受压状态逐步转变为受拉状态,拉力主要由预应力筋和钢管承担;张拉后变为受压状态,压力由钢管和混凝土承担。第三次张拉后,在全部恒、活荷载及重力作用下,拉杆为受压状态(图 11)。

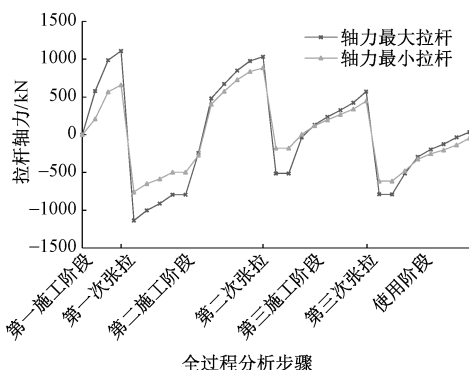


图 11 城楼施工模拟分析拉杆中钢管内力变化曲线

预应力筋有效拉力在三次张拉阶段成台阶式上升;张拉阶段期间,随着结构荷载增加,预应力筋有效拉力呈小幅上升趋势;第三次张拉后至使用后施

加全部活荷载,预应力筋有效拉力达到峰值。

4 预应力拉杆施工方案

预应力拉杆位于场地黄土状粉质黏土层,是洛阳地区顶管施工常遇土层,在无水状态下较为稳定。针对本工程特点,要求不能采用可能导致遗址破坏或受到污染的施工方式。如采用机械掘进方式施工,施工过程中存在产生地面隆起,破坏遗址的风险,且施工现场设置的泥浆池,也会污染遗址。因此,本工程不宜采用机械掘进方式施工顶管。人工掘进式施工方法在洛阳地区是常见施工方法,虽然可能存在安全隐患,但是其具有对土体挤密效应小,不会引起地面隆起,施工为干作业,不会污染遗址等适合本工程的特点。而且,人工掘进式施工方法更容易控制和修正轴线偏差。在施工前制定详细安全施工方案,采取有效保障措施,实时动态监控顶管内状态,能够有效保证施工人员安全和土遗址稳定。因此,综合比较,采用人工掘进式施工方法是适合本工程要求的。

拉杆全过程施工方案如下:先人工暗挖成孔,将混凝土顶管推进,顶管间采用密封材料封堵,完成后在管内推进 $\phi 600 \times 16$ 钢管,边推进边设置钢管与混凝土顶管间定位装置,同时在钢管内设置预应力筋定位支架,后续钢管间采用现场等强对接焊缝拼接。钢管安装完毕后,先用 C35 膨胀性混凝土压力注入混凝土顶管与钢管间缝隙,达到混凝土强度后进行预应力第一次张拉,监控数据符合要求后,再用 C35 膨胀性混凝土压力注入钢管内部,要求连续施工并记录注入量与预算量差异。后期根据上部结构施工阶段和荷载增加情况,进行预应力分次张拉。

设计要求每根钢绞线穿入前,施工人员对钢绞线进行统一编码标示,防止钢绞线在钢管内产生缠绕交叉错位的情况,所有钢绞线依编码次序穿入,钢绞线到达另一端时穿入锚板,需对号入

孔,保证每根钢绞线位置在两端一致。张拉时由上至下分层依次张拉,避免未张拉钢绞线对已张拉钢绞线施加外部荷载。由于钢绞线在浇筑完成后不能更换、增加,东、西阙楼每根顶管内增加1~2束钢绞线备用。

在每个张拉端设置至少一个穿心式压力传感器,布置在先期张拉的预应力筋上,监测张拉过程中预应力筋的实际拉力变化情况。对重要拉杆的钢管外侧设置振弦式应变计,可以监测钢管内力变化,两者监测数据与承台位移监测共同组成预应力张拉过程监控体系的基础数据。

5 监控工作情况

监控工作由郑州大学承担,结合其教学及实践经验确定四种模型模拟地基情况。模型1:原设计方案。模型2:同原设计方案,建立实体承台单元,在承台单元侧面根据现场遗址土层高度施加侧向土压力荷载。模型3:建立实体承台单元和外部土体单元,土体弹性模量取其压缩模量10倍;土体模型在水平向尺寸取承台外边缘向外延伸1倍桩长,竖向尺寸取桩底向下延伸1倍桩长;在地基外表面约束其法向自由度,底部约束三向平动自由度。模型4:同模型3,区别是土体模型在水平向尺寸取承台外边缘向外延伸2倍桩长,竖向尺寸取桩底向下延伸2倍桩长^[8-11]。

桩基础于2016年11月~2017年3月施工,2017年10月完成桩基承台周边土回填及遗址层钢结构安装,开始第一次预应力张拉,首先在西阙楼按原设计张拉比例进行张拉,数据显示基础沉降、承台扭转、预应力拉力、顶管应力、节点应力变化趋势与模拟分析一致,变化比例小于四种模拟分析结果,其中桩顶位移数据小于模拟数据平均值50%,说明场地土对地下构件约束能力超过模拟预期。各方讨论后决定由三次张拉改为两次张拉,减少张拉次数可以降低多次张拉带来断丝、锚具滑脱风险,各楼根据自身特点第一次张拉分别按40%或50%比例张拉。因两次张拉模拟数据超出设计预警值,施工监控要求调整为以桩顶位移数据是否达到模拟数据值平均值50%预警。工程于2018年12月结构封顶,完成第二次预应力张拉。钢绞线合计1398根,最终城楼有2根钢绞线断丝,通过增加其它钢绞线控制张拉力解决。因两次张拉时间间隔较长,第二次张拉时对出现锈蚀的锚具予以更换,监测数据符合预期后,对锚点进行封锚。

工程于2019年10月完成建筑装修工作并正式开放使用,监测工作按建设期间的施工阶段和建成

后第一次使用阶段共21个节点测量数据。为防止使用阶段出现问题,设计要求在建筑投入使用后继续对结构进行一段时间的监测,监测工作要求监测时间不少于1年、监测节点不少于6个。

图12为城楼北侧水平位移最大承台顶位移变化曲线。桩顶位移可以通过承台位移测量数据判断,图中正值代表桩顶向外侧偏移,实测数据显示城楼承台顶位移与模拟分析趋势相符,最大位移发生在第二次张拉完成后,该承台最大位移为-0.82mm,方向是向城楼内侧移动,在装修过程中向原点回归,在最后使用阶段最大位移为-0.16mm,说明基础拉杆长度在预应力作用下缩短,处于受压状态,符合设计预期。

图13为施工过程中阙楼典型顶管内钢管应力变化曲线。由图13可知,实测应力变化趋势与四种模型变化相符,实测应力变化幅度小于四种模型应力变化幅度。在第一次张拉后,三种模拟分析预估钢管为受拉状态,实测应力值接近零,可以认为内侧土体对基础约束能力大于模型假定,是承台将上部产生的水平荷载传递至土体承担造成的结果。第二次张拉后,实测应力值与模型2,3,4数据接近,可以理解为承台在第一次张拉后,在重力外推过程中,内侧土体由受压变为不受压状态,约束能力下降,同时基础间拉杆受压截面由钢管转变为钢管混凝土,轴向刚度增加。从全部钢管应力监测数据可知,主要基础拉杆在全部装修完成后并投入使用时为受压状态,达到设计要求状态。

图14为施工阶段朵楼遗址层斜钢柱典型应力变化曲线,尽管实测承台水平位移绝对值小,上部钢结构测点应力变化曲线显示,预应力张拉过程对上部结构刚度还是有明显影响,无论实测数据还是模拟数据,均引起数据跳跃。与下部构件数据相比,上部构件应力数据变化与模拟数据拟合吻合度高。

通过对承台顶部水平位移、上部结构和基础拉杆内力、上部结构位移等数据的监测,在建成使用阶段有以下结论:1)桩顶水平位移处于可控状态,桩身未出现剪切破坏的迹象和趋势;2)各楼所有基础拉杆基本处于受压状态,且承台水平位移与顶管变形方向基本一致;3)上部结构的斜柱、柱脚和梁应力处于可控状态,整体应力实测值与模拟值相差较小且趋势一致,无应力突变情况发生;4)上部结构位移满足各阶段要求,处于稳定状态;5)基础拉杆内钢绞线有效预应力实测值与设计控制值最大相差约6.0%(东阙楼),整体平均有效预应力实测值与设计控制值相差在4%以内^[12]。

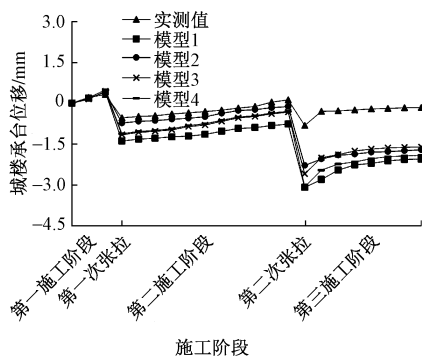


图12 城楼承台顶位移变化曲线

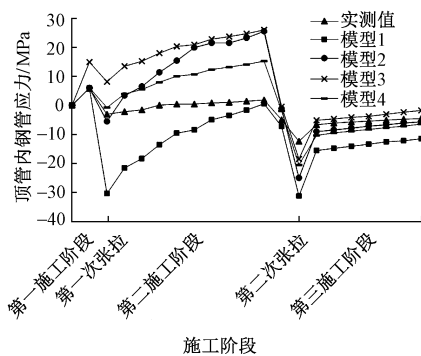


图13 阙楼顶管内钢管应力变化曲线

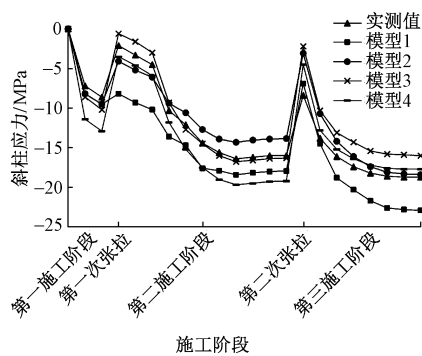


图14 朵楼斜钢柱应力变化曲线

6 结语

洛阳隋唐城应天门遗址保护建筑采用斜柱支撑框架跨越遗址,基础间设置暗挖顶管拉杆平衡斜柱柱脚水平反力,拉杆选用具有抗拉、抗压刚度的预应力钢管混凝土组合构件控制柱脚水平位移。通过考虑现场条件及施工工艺等因素的施工模拟计算、预应力拉杆的足尺试验的结果,对设计进行优化,并改进施工方案。在施工阶段监测重点数据变化,并与施工模拟结果进行相互验证,在符合设计要求的前提下控制施工进度,保证了桩基础和上部结构在施工阶段和使用阶段的安全,未对遗址产生扰动,实现了土遗址保护及展示的设计目标。

参 考 文 献

- [1] 徐珂,田立强,马志平.洛阳隋唐城应天门遗址保护建筑总体结构设计[J].建筑结构,2021,51(21):111-118.
- [2] 徐珂,田立强,马志平.洛阳隋唐城应天门遗址保护建筑单体结构设计[J].建筑结构,2021,51(21):119-128.
- [3] 冯海宁,温晓贵,魏纲,等.顶管施工对土体影响的现场试验研究[J].岩土力学,2003,24(5):781-785.

- [4] 齐志刚,张希黔,赵源畴.地下预应力拉杆施工技术在双曲混凝土组合扭壳屋盖结构中的应用[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2010,12(5):131-134.
- [5] 管品武,杨晓鑫,梁岩.大跨复杂斜撑钢结构铸钢节点力学性能分析[J].结构工程师,2019,35(5):32-38.
- [6] 胡昕,黄宏伟.相邻平行顶管推进引起附加荷载的力学分析[J].岩土力学,2001,(1):75-77.
- [7] 吴穷,王乾坤,任志刚,等.大跨度钢结构施工过程仿真分析[J].工业建筑,2018,48(3):127-131.
- [8] 管品武,卢奥奇,梁岩,等.桩顶水平支撑刚度对斜柱支撑系统施工影响分析[J].结构工程师,2019,35(4):231-236.
- [9] 陈祥,孙进忠,蔡新滨.基桩水平静载试验及内力和变形分析[J].岩土力学,2010,31(3):753-759.
- [10] 王增春,南建林.桩水平刚度对预应力基础的影响[C]//全国混凝土及预应力混凝土学术交流会.北京,2005.
- [11] 赵明华,陈耀浩,杨超伟,等.基于有限杆单元法的陡坡基桩非线性分析[J].岩土力学,2018,39(8):311-319.
- [12] 管品武,杨光煜,张东亮,等.复杂钢结构温度效应影响分析[J].结构工程师,2020,36(2):80-87.

《建筑结构》稿件录制视(音)频倡议书

广大作者朋友们:

为了突破传统纸质刊的局限性,帮助读者快速、清晰、多维度地了解论文成果,丰富论文的呈现形态,《建筑结构》编辑部特推出文章幕后的故事征集倡议,以更好地宣传推广您或您的团队,展示您的论文、您的技术、您的成果等,也为读者提供更高质量服务。征集的内容将在结构云学堂、微信、微博及抖音等新媒体平台展示。具体如下:

一、项目设计类文章,可以将设计过程、遇到的难点等通过音视频并加以文字进行阐述,也可以录制部分现场施工的视频,或者竣工时现场讲解,也可以是已经投入运营多年的项目。

二、试验类文章,可以将前期设计、试验过程等

环节录制为视频,也可以通过音视频介绍下论文的写作背景、动机、趣事以及研究灵感等内容。

三、理论分析类文章,可以将有关此主题的理论体系和发展沿革等通过音视频、动画等形式进行介绍。

四、有限元分析类文章,可以通过音视频的形式介绍下建模的过程及参数选取等相关注意事项,配合动画演示更佳。

五、其他方面您觉着比较好的展示形式也可以主动告知我们。

有这方面意向的作者可以联系稿件的责任编辑,沟通具体主题和内容,音视频一经采纳,稿件可以提前予以刊发。

《建筑结构》编辑部