

千年古塔整体平移施工技术

赵善敏

山东水总有限公司, 山东 济南 250014

[摘要] 近几年来, 随着科学技术的发展, 社会的文明程度有了大幅度的提高, 环境保护和文物保护的实例层出不穷。古建筑的平移施工技术也得到了进一步的发展与提高。这里就安徽省宣城市境内狸桥镇的千年古塔—龙溪塔的整体平移施工技术就是一个很好的实例。

[关键词] 千年古塔; 平移; 施工技术

Construction Technology of Integral Translational Construction of Millennium Ancient Pagoda

ZHAO Shanmin

Shandong Water General Co., Ltd., Shandong, Jinan, China, 250014

Abstract: In recent years, with the development of science and technology, the civilization of society has been greatly improved. Environmental protection and cultural relics protection cases emerge in endlessly. The translation construction technology of ancient buildings has also been further developed and improved. Here is a good example of the translation construction technology of the Millennium Ancient Pagoda-Longxi Pagoda in liqiao Town, Xuancheng City, Anhui Province.

Keywords: Millennium ancient pagoda; Translation; Construction technology

前言

龙溪塔位于安徽省宣城市境内的狸桥镇, 塔高 7 层, 高 20 余米, 其结构基础为砌石、塔体为砖木结构, 重为 1200 多吨。据在其地宫中挖出的石刻记载, 该塔建于宋代, 距今已有 1000 多年的历史。但由于水阳江开卡工程的建设, 为保护千年文化遗产, 该塔必须平移至距原位置以东 124 米的新建大堤上。由于该塔经历了数个朝代的更迭变换、千余年的风霜雪雨, 又历经了多次战乱, 致使该塔塔身向西南方向倾斜 20 多厘米, 且结构比较松散, 原砖石的胶结材料强度不高, 经多年风化已基本剥落, 整体性较弱。平移时既要确保该塔原有的倾斜角度又要确保其整体性、完整性, 做到万无一失。这给该古塔的成功顺利平移带来了很大的困难, 又加上平移这么高、这么重的古塔在全国目前尚属首例, 在世界上也是屈指可数的, 可见平移该塔的施工技术要求之高可想而知, 此工程曾受到中央、省市等电视台多次报道。

1 工程特点

(1) 该塔高度大, 整体性差, 重量大, 在平移时首先要保证其基础完整, 塔身整体受力均匀且不破坏其自身原来的受力平衡。平移时的顶推力受力均衡且其合力平行作用在前进的方向上。

(2) 由于该塔坐落于江边, 原塔基未经加固处理造成不均匀沉陷, 导致塔身倾斜 20 多厘米。这在平移过程中必须始终保持塔身的倾斜角和倾斜方向不变, 保持塔身各点的原有应力不变。

(3) 平移该塔所经过的路线基础为河道淤积的淤泥—软基, 在平移前必须加固地基, 使地基承载力达到承担塔重的要求, 且其变形要控制在 2-3mm 以内。

(4) 该塔平移的目的地的新基础比原塔基基础高 1.60 米, 平移该塔需在上坡的坡面上移动, 这给平移塔的施工技术提出了更高的要求, 为保证塔的平衡和稳定, 就必须建造钢筋砼轨道, 并在轨道上设置平衡滚轴。

2 主要施工流程

宝塔内部型钢加固及外部型钢桁架制作→宝塔基础内保护筒钢筋混凝土施工→宝塔内部青石地面拆除及土方开挖→宝塔内扩基础钢筋混凝土及塔基内环托换施工→宝塔基础外保护筒钢筋混凝土施工→宝塔线路搅拌桩施工→钢筋砼轨道浇筑→宝塔外扩基础钢筋混凝土施工及塔基外环托换施工→宝塔外部型钢桁架焊接拼装→钢箱梁顶进、

掏土→钢箱梁预应力钢筋混凝土施工→宝塔原址土方开挖至下轨道底标高→下轨道钢筋混凝土施工→钢板及轴承组安设→上托梁钢筋混凝土施工→预应力筋张拉→宝塔平移→就位连接→恢复原始面貌。

3 主要施工工艺

3.1 基础托换

3.1.1 施工步骤为

测量放线→钢箱梁制作→开挖工作坑→箱梁运输及吊装→调试顶推装置→顶箱梁→箱梁内土方开挖→钢筋制作安装→封头模板支设→浇筑免振混凝土→养护。

3.1.2 施工方法

(1) 测量放线: 准确测量塔体基础下土体厚度, 确定顶进箱梁上顶标高。塔基周围和平移长度范围内的土体一次开挖到位(若有地下水需进行降水、开挖), 直至满足顶推箱梁施工要求。

(2) 钢箱梁制作: 钢箱梁所用材料为 36 号工字钢, 箱梁在现场统一制作, 尺寸误差不大于 5mm, 其焊接要求符合钢结构设计规范及焊接技术规程要求。箱梁的边刃脚前端与地坪呈 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 角倾斜。

(3) 开挖工作坑: 开挖人工工作坑时严格控制开挖量, 并要求工作坑底面高出地下水面 1000mm 以上, 人工工作坑的大小要根据使用千斤顶的行程加上千斤顶本身的长度, 再加上施工的工作面, 宽度为导轨外边宽度加 1 米。待工作坑底开挖至设计标高后, 采用 C15 素混凝土浇灌工作坑底板厚 25cm, 要求工作坑底板光滑平整, 同时为防止箱梁顶进过程中出现向前扎头现象, 将底板做成前高后低的仰坡, 坡度为 1% 左右。箱梁就位后在其两侧安装限位角钢, 防止顶进时出现侧移。

(4)、安装布置顶进设备: 采用起重设备将箱梁吊至顶顶位置, 同时将顶推千斤顶和反力架就位。本工程以现场制作的顶推系统作为顶推靠背, 千斤顶与顶推系统之间增设承压钢板和枕木, 以确保顶推系统不受破坏。配备 500T 的千斤顶及其相应的配套设备作为顶进设备, 并要求: a 液压系统动力系统及其辅助工作装置, 尽可能安装在箱梁中部, 使油压基本一致。b 根据箱梁与土体的摩擦系数仔细计算顶推力, 控制好油压, 在确保箱梁安全顶进的前提下, 尽量不增大顶推力, 避免对后背及其它部位施加的反力过大, 因而造成损伤。c 液压系统的各部件安装前要进行单体试验和联动试验, 合格后才可进行安装; 每个箱梁按设计要求配备 1 台千斤顶, 每台油泵连动 4 台千斤顶, 依照设计位置同时顶推。配备、布置千斤顶时以箱梁的中心线为轴, 分组对称均匀布置。

(5) 箱梁底板立面安装钢套并内衬软木胶垫, 以保护箱梁侧面; 箱梁外安装横铁, 在横铁的底面焊接一钢托, 置千斤顶于钢托上; 箱梁内布置观测点, 并安装照明设备。

(6) 箱梁顶推施工: 在顶推箱梁前, 安排专业人员负责观测记录, 检查仪器装置。在预留基础土坡处开始顶进, 箱梁内安排 1 名工人进行开挖作业。顶进施工过程中保持刃脚有足够的吃土量, 严禁超挖, 工人在箱梁内进行挖土操作, 边顶进, 边挖土。顶进箱梁过程中, 千斤顶顶进速度由刃脚切土及操作人员从角刃刮土速度确定, 严禁使箱体正面直接推土, 以避免对建筑基础有较大扰动。当千斤顶顶满 1 个行程回油后, 填充垫块, 再行顶推; 前一节箱梁顶进 1400mm 后, 吊装后序箱梁, 顶进施工的要求不变; 在两个箱梁相接时, 确定对接位置准确, 并连接好传力型钢。箱梁顶进全过程中, 箱梁每前进 250mm, 进行一次观测, 发现偏差及时采取纠正措施。

箱梁偏差调整方法如下:

——左、右偏差: 用增减一侧顶力调整或挖土调整; 挖土调整, 即在刃脚前一侧稍微多挖, 而另一侧少挖或不挖。

——偏上调整: 如底刃脚向上翘起, 边刃脚向里翘的过大, 可适当调整刃脚高度; 底刃脚前端超挖略低于底板, 使其逐渐调整; 如果因挖土不够宽、吃土量过大而抬高箱梁时, 可在箱梁两侧适当的超挖。

——偏下调整: 使边刃脚增加向里翘的角度, 底刃脚增加向上翘的角度; 如因土质松软造成扎头时, 可在箱梁底部换铺钢板, 边铺边顶进。

(7) 开挖土方: 开挖箱梁内土方和顶推箱梁需交替进行, 施工时严格控制开挖量, 不得扰动非开挖区域土体, 并且自土方开挖直至浇筑混凝土的间隔时间要尽量缩短。

(8) 钢筋制作与安装: 钢筋加工、绑扎及焊接必须严格按照施工组织设计要求及满足钢筋混凝土有关规范要求。严格依照图纸要求布置钢筋, 控制好每根钢筋的长度和位置。

(9) 封头模板支设: 钢箱梁封头模板支设严密, 预留钢筋位置用木工钻打孔, 模板支设需超出箱梁顶标高约 1.5 米, 以便为箱梁内部浇筑的混凝土增加浇筑压力。

(10) 浇筑免振混凝土: 免振混凝土是由高效减水剂、早强剂、一级超细粉煤灰等外加剂材料与水泥、砂石料

配制而成的流动性大的自密实混凝土。采用免振混凝土，可有效解决箱梁内部混凝土无法振捣的问题，同时避免了混凝土浇筑振捣时振捣力对宝塔的震动和冲击。

3.2 塔身加固

为加固塔体的整体性、增强塔身的强度，宝塔的内、外部均采用了整体式 36a 槽钢进行了封闭式加固方案，首先按设计要求并结合古塔的实际形状、尺寸进行现场加工、制作、焊接，使型钢加固体与塔身、塔基组成一个有机紧密的整体。塔基础内、外保护筒的钢筋均采用直径 12 的二级钢筋，砼采用 C35。内保护筒标高为 $\pm 0.000 \sim 1.50\text{m}$ ，浇筑混凝土截面尺寸及浇筑质量均符合设计及验收规范要求。

3.3 搅拌桩地基加固

由于该塔平移所经过的路线为淤泥软基，且深度为 8 米多，需进行地基加固。依据工程现状及地质条件，该地基处理采用了深层搅拌桩复合地基加固技术，选用 CZG-600 型单轴叶片喷浆的水泥搅拌专用配套设备，深层搅拌机专用配套设备包括：起重机架及作业平台、导向架、电气控制柜、灰浆拌制机、灰浆泵等。经处理后的复合地基承载力特征值 $\geq 160\text{kPa}$ ，深层搅拌桩桩径 600mm。新建宝塔基础处有效桩长 18.5m，且桩端进入持力层第 6 层粉质粘土层不小于 1.0m。平移轨道处深层搅拌有效桩长约 8m，保护桩长 0.5m，施工桩顶标高为 -2.20m ，且桩端进入持力层第 3 层粉质粘土层 1.5m。原址内水泥土搅拌桩（垂直轨道方向）有效桩顶标高为 -3.60m ，有效桩长约 9m，打桩前将表层腐殖土、杂物清理干净到位，经相关单位验收后再进行打桩施工操作。平移轨道在遇水道、水沟位置时需先将水导流并将淤泥清除，用素土换填夯实。

3.4 土方开挖施工

3.4.1 土方开挖流程

测量放线→技术复核→机械开挖平移范围内土体→托换梁顶进、配合人工挖土→塔内部人工挖土→清理外运。

3.4.2 开挖施工准备及注意事项

- (1) 挑选有丰富施工经验的施工开挖队伍，做好各方面的技术交底、安全技术交底和物资准备及技术准备。
- (2) 挖土时，塔周围土体用人工铲平，严禁使用挖掘机开挖，以免扰动、损坏塔体。
- (3) 基础施工期间，基坑四周堆载不得超过 1.5 米，以减少对基坑边坡土体的压力，保证边坡安全稳定。基坑边堆放钢筋不得超过 2 吨每平方米；基坑边不得堆放水泥罐，严禁停放施工机械。
- (4) 基础施工期间，加强对周围环境的监察、检测，发现异常情况及时采取措施。
- (5) 挖土前，对自然地面进行仔细标高测量，如发现自然地面标高超高，就要及时查明原因并做出处理。
- (6) 挖土必须保证进度，保证垫层的施工，并采取防止雨雪积水对基坑造成的不利影响。

3.4.3 开挖方法

结合工程特点及施工图，开挖前根据施工图的轴线控制点测量放线，并撒出灰线，经监理工程师核查无误后方可进行土方开挖。开挖时随时作好标志，控制好挖土量，挖土量以平移范围内的截面尺寸进行核对计算，并考虑整体受力均衡，严禁超挖。开挖过程中若遇明暗浜，则立即通知设计并采取加固措施。

3.5 平移轨道铺设

根据本工程的特点，该塔平移采用了钢筋混凝土梁（上轨）和加钢板（上轨）的形式，即在托换梁底面铺设钢板的形式。

3.5.1 上、下轨道梁施工

对平移范围内的下轨道进行立模、浇筑混凝土下轨道。其施工流程为：测量→浇筑垫层→下轨道基础扎筋→下轨道支模→下轨道基础浇筑混凝土→下轨道顶面找平。

- (1) 根据现场情况和整体平移要求按国家规范要求进行平面位置和高程测量，准确标定平移位置和方向。
- (2) 凿除搅拌桩桩头、整平压实基础：将加固后的地基按照设计高程凿除桩头，并整平压实地面，以满足平移施工要求。拆除时采用人工静力拆除，以减少对地基的扰动。
- (3) 土方开挖：开挖区放线，指定开挖区域。在开挖区内将建筑物四周及内部的土体采用人工分段开挖，并严格控制开挖量，严禁对非开挖区域扰动过大。
- (4) 轨道铺设：本工程采用钢筋砼轨道，每隔 5 米设一道联系梁。轨道横断面尺寸为顶宽 0.5 米，底宽 1.2 米，高 1.2 米，其底部为矩形基础，宽 1.2 米，高 0.9 米，类似火车道轨。连系梁断面为 0.4×0.9 米。钢筋采用受力筋为直径 25 的二级钢筋，分布筋为直径 12 的一级钢筋，模板采用固定钢模板，砼的强度为 C35。施工时要严格控制工程质量，其轨道的高程误差为不大于 3mm。

(5) 注意施工过程中严格对建筑物进行监测。

3.6 平移、就位

本工程设计的新塔基为钢筋砼筏板基础。

3.6.1 整体平移施工工艺程序：整体平移准备→连接油压千斤顶油泵装置→试平移调试→整体平移→偏位调整→就位

3.6.2 整体平移准备包括：检查轨道砼及托换梁砼的强度是否达到设计要求，整体检测建筑物现状及加固体系现状；检查各观察点现状及观测装置，检查机械设备，掌握天气气温、风力等气象信息，连接油压机械千斤顶油泵装置，并进行千斤顶试顶调试。

3.6.3 整体平移：本工程在轨道上采用直径 20CM 的柱状滚轴，轴承两侧安装限位装置，以防止移位时出现偏位过大，且方便调整和更换。顶推采用 4 个同步千斤顶，并由专人统一指挥，千斤顶的后座采用附着式自锚装置，随千斤顶前移。当千斤顶顶满一行程后进行回油收缸，如此反复进行直至建筑物达到设计平移位置为止。

平移过程中要加强监测，及时矫正偏差。

3.7 监测与控制

在主体基础托换、整体平移施工中，要随时注意主体是否发生沉降、倾斜、滑移。因此，施工观测要自始至终贯穿整个施工过程。

利用人工、专用仪器、微机相结合的方法进行监测。用直尺、经纬仪、全站仪对平移过程中的建筑物偏位进行监测；用水准仪观测监控基础沉降、整体塔体平移，并将监测数据输入计算机，通过计算机汇总、分析，综合人工观测结果，及时发现问题，迅速加以解决，以确保塔体安全和工程的顺利进行。

平移过程中的误差测量内容包括：被顶进箱梁空间误差；反力系统、顶进系统的变形与位移；开挖土体尺度；纠偏控制误差；顶进设备的安装误差；平移观测点的误差等。

塔体就位后，每半个月观测 1 次，连续观测 4 次；之后一年内每 2 个月观测 1 次；第二年，每 4 个月观测 1 次；第三年，每 6 个月观测 1 次；之后每年观测一次。

为保证观测数据可靠性，观测按照“五定”原则即沉降观测所依据的基点、工作基点和沉降观测点，点位稳定；仪器、设备稳定；观测人员固定；观测条件基本一致；观测路线、镜位、程序和方法固定。以尽量减少误差，确保沉降观测的可靠性。

4 结语

随着科技的发展和施工技术的不断提高，我国在古建筑保护和整体平移方面也取得了优良的成绩，该古塔的安全、顺利成功地平移到位，目前依然完好，创造了我国古建筑整体平移施工史上的又一创举。在此，将此施工技术提供给各位，期待能为各位带来一些施工技术、经验的借鉴与参考。

[参考文献]

- [1] 陈开利, 王邦楣, 林亚超. 四层办公楼纵向整体平移. 桥梁工程检定与加固手册, 2015 (2): 125.
[2] 余天庆. 工程材料与桥梁结构的力学性能测试, 工业建筑, 2018 (06): 23-65.