



## 高地震烈度深山区某钢管混凝土 格构超高桥墩的施工控制

舒昌信

(和天(湖南)国际工程管理有限公司,湖南 长沙 410205)

**摘要:**为了阐述自爬式多功能提升系统施工方法在超高桥墩的应用,本文以某特大桥钢管混凝土格构空心墩施工工程为例,从C80自密实补偿收缩混凝土制备、高抛试验、钢管格构柱施工、自爬式多功能提升系统施工、管内C80混凝土施工及长悬臂爬模施工等关键环节论述控制要点。最终实践证明:自爬式多功能提升系统的施工方法在超高桥墩应用是成功的。本文结果可为类似钢管混凝土格构空心墩施工提供一定的借鉴及参考。

**关键词:**钢管混凝土格构墩;自爬式提升系统;高抛混凝土;长悬臂液压爬模;高地震烈度深山区

中图分类号:TU398+.9

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)01-0040-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.01.008

## Construction control on a concrete-filled steel tubular lattice ultra-high bridge pier in a deep mountainous area with high seismic intensity

SHU Changxin

(Hetian (Hunan) International Engineering Management Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

**Abstract:** In order to illustrate the application of the construction method of self-climbing multi-functional lifting system in ultra-high bridge piers, the construction project on a hollow pier of concrete-filled steel tubular lattice for a super-large bridge is taken as an example, and the key points of control are discussed from such key links as the preparation of C80 self-compacting expansive concrete, the high-throw test, the construction of steel pipe lattice columns, the construction of self-climbing multi-functional lifting system, the construction of C80 concrete in the pipe and the construction of long cantilever climbing formwork. Finally, it is proved that the construction method of self-climbing multi-functional lifting system is successful in the application of ultra-high bridge piers. The results can provide a certain reference for the construction of similar hollow piers of concrete-filled steel tubular lattice structure.

**Key words:** concrete-filled steel tubular lattice piers; self-climbing lifting system; high-toss concrete; long cantilever hydraulic climbing formwork; deep mountain areas with high seismic intensity

随着高速公路从山岭重丘区向高地震烈度深山区发展,对桥梁下部结构及基础的设计选型、施工建造、新材料应用等方面提出了更高要求。钢管混凝土结构在拱肋、超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)π型梁、超高层建筑等工程中应用广泛,但在桥梁下部结构中的应用起步较晚。一般来说,超过40 m以上的高墩结构形

式常采用单肢空心薄壁墩或双肢实心薄壁墩,但因高地震烈度区特殊工程地质、气候环境及环境保护等因素,这一常规结构不宜作为高地震烈度区高墩或超高墩的最优选型。根据大量研究及成功应用工程案例表明,钢管混凝土格构空心墩在高地震高烈度深山区具有结构刚度大、延性好、变形能力强、造价低、抗风及抗震性能好等优越性能<sup>[1-3]</sup>。通常

收稿日期:2023-08-31

作者简介:舒昌信(1975—),男,高级工程师,从事工程项目管理工作。

来说,与钢筋混凝土桥墩相比较,钢管混凝土桥墩具有增加3%的有效使用面积、节约50%的混凝土用量及自重减少50%等优势,可称为“环保节约型桥墩”。根据研究资料表明,钢管混凝土格构结构的应用最早起源于1879年英国塞文铁路桥,而我国首次应用是2000年广东深圳北站彩虹大桥桥墩<sup>[4]</sup>。目前,在我国地震高烈度深山区大量应用钢管混凝土格构式超高墩,如四川雅西高速干海子特大桥、四川黑石沟特大桥、四川腊八斤特大桥、四川金阳河特大桥等桥梁工程。不少学者对钢管混凝土格构超高墩装配式法兰连接、抗震性能、桥梁高墩施工技术进行了系统性研究与论证。如:欧智菁等<sup>[1]</sup>通过对四川干海子特大桥的抗震性能研究,发现柱肢倾斜度越大,其抗震性能越好,并且轴压比越大,构件的延性越差;刘婉玥等<sup>[2]</sup>采用有限元软件对墩柱承载能力、抗震性能分析进行了分析,得出墩柱结构可靠性与优越性;季学凯<sup>[4]</sup>以安徽省某山区高速公路项目为例,对新型法兰连接方式与力学性能、格构墩抗震性能、关键设计参数优化等重要问题开展系统性研究。本文以某特大桥钢管混凝土格构空心墩施工工程为例,从施工工法选择、C80自密实补偿收缩混凝土制备、高抛试验等关键工序控制进行阐述,以期类似钢管混凝土格构超高墩的施工提供一定参考。

## 1 工程概况

某特大桥主桥(双幅)采用(85+160+85)m预应力混凝土连续刚构,引桥采用4×40m预应力混凝土简支T梁,大桥全长为495m,共7跨,有7个桥墩、1个桥台,其中6#为最高墩,墩高为135.2m,具体如图1所示。

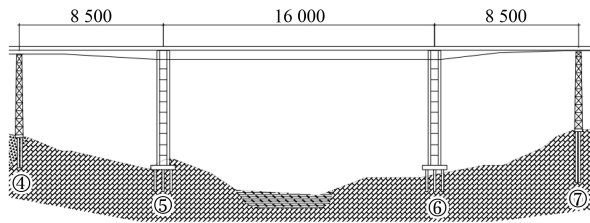


图1 大桥立面布置

大桥主桥墩采用钢管混凝土格构空心墩,横桥向按100:1放坡,顺桥向坡度不变。钢管混凝土格构空心墩由四肢格构柱及柱间混凝土肋板形成单箱

单室截面,格构柱由4根圆钢管柱组成。单根圆钢管外径为1.4m、厚度为28mm、长度为16m,钢管柱外包厚度为20cm的C30钢纤维混凝土。格构柱间混凝土肋板壁厚为50cm,钢管格构柱钢管直径为1.4m,材质为Q345C,墩内竖向每隔16m设置一道1m厚横隔板,墩顶横隔板厚度为1.5m。管内为C80自密实补偿收缩混凝土,钢管外包及横隔板为C30自密实补偿收缩混凝土。钢管格构柱之间用平联、斜联及缀板连接成整体,其中顺桥向只有平联,横桥向有平联、斜撑及缀板。横桥向连接采用焊接,顺桥向连接采用螺栓连接,钢管接头采用螺栓与焊接相结合方式;同时,在钢管顶部与底部连接处设置导向板与定位板,便于钢管节段预拼装对位,具体如图2、3所示。

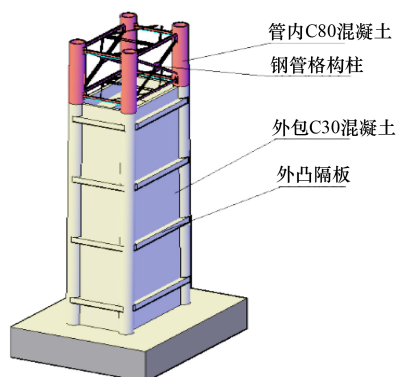
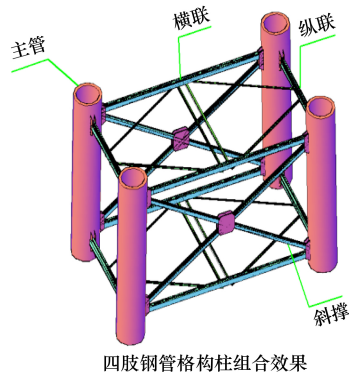


图2 钢格构墩效果



四肢钢管格构柱组合效果

图3 四肢钢管格构柱组合效果

## 2 施工工法简介

### 2.1 施工方法

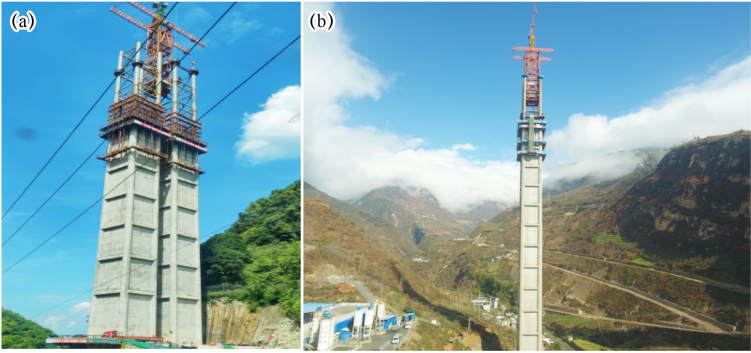
桥梁高墩施工工法:当墩高不超过40m时,采用翻模法施工<sup>[7]</sup>;当超过40m时,采用液压爬模或滑模施工,严禁使用翻模法施工<sup>[8]</sup>。钢管混凝土格构超高墩施工方法一般有“自爬式多功能

提升系统+长悬臂液压爬模”和“塔吊+液压爬模施工”两种，两种施工方法的选择从优缺点、场地条件、技术管理及施工建造成本等因素进行综合考虑。大桥 6<sup>#</sup>墩采用“自爬式多功能提升系统+长悬臂液压爬模”施工方法，施工亮点：1) 创造性地将塔吊与自爬式体系融为一体，既解决了高空作业的难度，也解决了施工交叉作业的安全风险；2) 使用自带漏斗浇筑混凝土；3) 可为后续上部构造施工使用，在桥上拆除塔吊；4) 多个作业吊点，且施工建造成本低。

2.2 施工工艺流程

大桥 6<sup>#</sup>墩的钢管格构柱、管内混凝土浇筑、格构柱之间连系构件及钢筋模板小型构件施工采用自爬式多功能提升系统；外包混凝土、横隔板及格构墩间肋板施工采用带有升降式平台的长悬

臂液压爬模；横隔板外凸部分采用无底支撑自带卸载功能的装配式三角托架；墩顶封顶段横隔板施工采用支架现浇，其中首节、第二节钢管格构柱的施工及自爬式提升系统安装采用 75 t 履带吊，人员上下通道采用施工电梯。钢管混凝土格构墩施工流程：现场准备→首节钢管格构柱施工(含埋入与伸出承台部分管柱，承台分两次浇筑)→首节肋板、外包混凝土及横隔板施工→自爬式提升系统安装→液压爬模体系安装→第二节钢管格构柱施工→自爬式提升系统爬升至第二节钢管格构柱→自爬式提升系统荷载试验→液压爬模爬升→第一节外凸部分施工→施工电梯安装→循环至墩顶→封顶段支架施工→自爬式提升系统支承体系转换→自爬式提升系统拆除。自爬式提升系统在双幅或单幅桥梁施工示意如图 4 所示。



(a) 双幅；(b) 单幅

图 4 自爬式提升系统在桥梁施工示意

3 关键工序控制

钢管混凝土格构墩关键控制工序包括 C80 自密实补偿收缩混凝土制备、高抛试验、钢管格构柱施工、自爬式提升系统施工、长悬臂液压爬模施工、管内混凝土施工、横隔板外凸部分施工、封顶段施工、自爬式提升系统体系转换及自爬式

提升系统拆除等关键环节控制内容。

3.1 混凝土制备

根据《自密实混凝土应用技术规程》(T/CECS 203—2021)<sup>[9]</sup>可知，C80 自密实补偿收缩混凝土具有超高流动性、充填性、黏稠性、抗离析性和保塑性能，其主要工作性能指标选择标准如表 1 所示。

表 1 自密实补偿收缩混凝土工作性能

| 泵送灌注时间/h | 坍落度/cm         | 扩展度/cm         | U 型箱填充高度/cm | V 型漏斗通过时间/s | 扩展度达 50 cm 的时间/s | 时间/h  |       |
|----------|----------------|----------------|-------------|-------------|------------------|-------|-------|
|          |                |                |             |             |                  | 初凝    | 终凝    |
| ≤6       | ≥18(灌注时间为 3 h) | ≥40(灌注时间为 3 h) | ≥30 无障碍     | 10~25       | 5~20             | 12~18 | 14~20 |
| ≤10      | ≥18(灌注时间为 5 h) | ≥40(灌注时间为 5 h) |             |             |                  | 16~22 | 18~24 |

根据上表要求, 6<sup>#</sup>墩钢管内 C80 自密实补偿收缩混凝土工作性能指标: 坍落度为 245 mm、扩展度为 610 mm、U 型箱填充高度为 310 mm、经过 3 h 后的坍落度为 240 mm、扩展度为 590 mm。经过试配与验证, C80 自密实补偿收缩混凝土配合比: 水泥为 466 kg、微珠为 48 kg、微硅粉为 50 kg、膨胀剂为 36 kg、细集料为 783 kg、粗集料为 156 kg、水为 138 kg, 外加剂为 6.9 kg, 水胶比为 0.23, 7 d 抗压强度为 90.2 MPa, 28 d 抗压强度为 101.7 MPa。

### 3.2 高抛试验

现场采用 18 mm 厚胶合板加工成两个圆柱分别进行对比。胶合模板内侧内包铁皮, 两个圆柱的尺寸分别为 160 mm(直径)×1 600 mm(高)、800 mm(直径)×1 600 mm(高), 混凝土从 16 m 高度高抛, 依靠混凝土自重而密实, 免振一次性成型。经过 24 h 后混凝土拆模, 检查其外观并养护 7~28 d 后钻芯取样, 检查柱顶至柱底混凝土的密实度、均匀性和混凝土强度。经过高抛试验结果验证, 管内 C80 自密实补偿收缩混凝土配合比

满足现场使用要求。

### 3.3 钢管格构柱施工

6<sup>#</sup>墩格构柱钢管共分为 9 节, 其中首节与末节为非标准节, 中间段为 7 节标准节, 标准节长为 16 m, 单根最大重量约为 15 t。

#### 3.3.1 首节钢管格构柱

首节钢管格构柱安装流程: 带底钢板支撑架安装→承台第一次混凝土浇筑→上钢板及连接钢板安装→首节格构钢管安装及自爬式提升系统塔基预埋件预埋→承台第二次混凝土浇筑→首节钢管格构柱顺横桥向联接件安装→钢管顶口工作操作平台安装→管内 C80 混凝土浇筑。

#### 3.3.2 第二节钢管格构柱

第二节钢管格构柱安装流程: 测量放样及划线定点→第二节单片钢管起吊→初步定位、纠偏→先安装横桥向平联及斜撑, 后安装顺桥向平联→测量复核→管接头焊接与最终固定→清理焊渣→管内 C80 自密实补偿收缩混凝土浇筑。具体如图 5 所示。



(a) 第二节; (b) 其他节 (除首节、第二节)

图 5 各节段施工实景

(1) 钢管格构柱拼装。在场地条件允许的情况下, 在地面上将单根钢管组装成单片钢管格构柱, 既减少高空作业的频率, 降低施工安全风险, 同时加快了施工进度; 当场地条件不允许, 则选择单根钢管柱起吊安装。

(2) 钢管格构柱定位与纠偏。第二节钢管柱安装定位采用风缆绳方式纠偏, 使用垂球中心定位法检查定位情况。

(3) 钢管接头及斜撑焊接。钢管接头采用焊接为主, 螺栓连接为辅助。在管节用螺栓初步固定后, 按照跳焊方法完成接头焊接, 并采取措施预防钢管格构柱的变形。所有焊缝采用超声波进行检

测, 待符合焊缝等级要求, 方可进行下一道工序。

(4) 管内混凝土检查。在管内混凝土浇筑 4 d 后, 安排专人对管内混凝土进行 100% 敲击法检测。当采用超声波法进行 100% 自检和不少于 20% 抽检时, 超声波检查间距不能超过 80 cm, 且检测最不利的径向截面。当用敲击法检测凝脱空或不密实时, 超声波检测间距不能超过 10 cm。当敲击法和超声波检测管内混凝土脱空时, 可适当钻孔验证, 并根据脱空缺陷大小补充灌注。

#### 3.3.3 其他节钢管格构柱

其他节段管柱施工同前述, 但在安装及定位纠偏时, 其他节段管柱起吊使用自爬式提升系统,

用千斤顶法纠偏。

### 3.4 自爬式多功能爬升提升系统施工

自爬式提升系统施工主要包括自爬式提升系统的安装、爬升、荷载试验、支承体系转换及拆除等施工内容。自爬式提升系统由架体系统、支撑系统、塔吊系统、爬升系统、起重系统 5 部分组成,其中架体系统由立杆、水平杆、斜杆、支撑臂及起重臂组成,支撑系统由上下两层转柱构成,塔吊系统由塔吊、附着及底座组成,爬升系统由连续式千斤顶、钢丝绳、下顶点、提升承重梁组成,起重系统由两台卷扬机及两个行走小车组成。自爬式提升系统设计应根据桥墩尺寸、节段钢管最大质量、现场条件等因素,对架体、支撑、支撑臂与起重臂、塔吊、起重系统的卷扬机等组成杆件的尺寸与选型进行专项设计。一般来说,自爬式提升系统最大起重量为单根(片)钢管格构柱最大重量的 1.5 倍以上,其限位、抗倾覆、锚固的安全系数不应小于 2,待荷载试验合格后方可投入使用。自爬式提升系统安装实景如图 6 所示。



图 6 自爬式多功能提升系统安装实景

#### 3.4.1 系统安装及爬升

(1) 自爬式提升系统安装前,进行杆件编号和安全技术交底工作。采用 75 t 履带吊安装,安装流程:完成安装前的准备工作→在承台上安装塔机基座→安装塔机与 1<sup>#</sup>移动架的连接梁→安装 1<sup>#</sup>移动架立杆、水平支撑、斜撑→安装 1<sup>#</sup>移动架旋转支腿→安装起重卷扬机底座斜撑、卷扬机→安装 1<sup>#</sup>移动架平台栏杆、爬梯→按照前述方法安装 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>移动架及旋转支腿→安装操作平台及围栏→在移动架顶部两侧安装臂架支撑臂→在支撑臂上安装起重臂→在起重臂上安装小车、起重钢丝绳及吊钩→安装完成。

(2) 自爬提升系统在本节管内混凝土强度达

到 70%,方可进行爬升。爬升流程:完成爬升前的检查工作→起重臂行走小车行走到大臂中间→吊钩钩住挂座上的提升承重桁架→将提升承重桁架安装在钢管柱水平杆上→安装提升拉杆及千斤顶,在千斤顶顶紧后拆除塔机基座及第一节移动模架的预埋螺栓→4 台千斤顶同步对称匀速顶升,顶升一个行程临时固定一次,反复顶升使移动架底层旋转支腿高于钢管柱水平杆 5~10 cm→将上下两层旋转支腿向外旋转至钢管柱水平杆上,调整旋转支腿上的调节螺杆,再使用千斤顶缓慢下放移动架使旋转支腿与钢管柱水平杆紧密接触并用螺栓连接固定→采用起重机将提升承重桁架起吊至挂座上→完成爬升工作。

#### 3.4.2 系统荷载试验

为保证自爬式提升系统在使用过程中的安全性及稳定性,须对自爬式提升系统进行荷载试验。待提升系统移至第二节钢管柱后再进行荷载试验。试验荷载按最大质量的 1.2 倍配重试吊检验。试验实施前,在起重臂杆件、支承臂杆件、架体杆件、转柱杆件、格构墩平联斜撑杆件等 5 处布置应力应变监测点。测试时,第一次选择最重单根(片)管柱,用起重臂起吊,上下、左右行走各重复 3 次;第二次选择最重单根(片)管柱的 1.2 倍,配重用混凝土试块,用起重臂起吊,上下、左右行走各重复 6 次,收集观测数据进行分析,结论合格后方可使用。

#### 3.4.3 系统体系转换

在墩顶横隔板施工前,将自爬式提升系统提升至墩顶横隔板顶面以上支承在管柱水平杆上,待墩顶横隔板现浇完成、混凝土强度达到 100%后,再次将自爬式提升系统受力点转至墩顶横隔板上,完成体系转换。

#### 3.4.4 系统拆除

自爬式提升系统拆除按从上至下原则,但不能先拆除限位限速装置。具体拆除流程:起重臂行走系统→起重臂桁架→支承臂桁架→移动架→限位限速装置→塔吊。利用固定在墩顶横隔板上的塔吊拆除,在 0 号块及连续箱梁各段完成后在主桥上拆除。

### 3.5 C80 自密实补偿收缩混凝土施工

### 3.5.1 拌制与运输

利用灌车将管内C80自密实补偿收缩混凝土运至墩位处。将混凝土放入自爬式提升系统的 $5\text{ m}^3$ 储料漏斗中,通过漏斗进入钢管。首节及第二节钢管内混凝土、首节及第二节外包混凝土、首节及第二节横隔板混凝土使用75 t履带吊进行混凝土浇筑,其他部位使用自爬式提升系统的储料漏斗进行混凝土浇筑。混凝土上下运输不使用泵车,以防止超高、长距离所产生的堵管现象。

### 3.5.2 浇筑

混凝土浇筑时,在距离管口位置4~16 m处采用高抛,当浇筑离上管口4 m时,应采用振捣棒振捣,以确保此段混凝土密实。振捣过程应严格按照振捣施工工艺要求,同时振捣棒在振动过程中应避免碰撞钢管壁。

### 3.5.3 养护

管内混凝土用蓄水法进行养护,即在管顶口处预留20 cm厚混凝土(无需浇筑),用以储存养护用水。

## 3.6 液压爬模施工

### 3.6.1 液压爬模施工工艺

钢管格构墩外包混凝土采用长悬臂液压爬模施工。

### 3.6.2 外凸隔板施工

由于横隔板外凸部分悬臂长度范围(60~90 cm)较宽,影响爬模向上爬升跨越外凸部分的横梁,需要在爬模设计方面做特殊设计(如挂座、轨道等)。处理方式有悬挑牛腿挂座、无底支撑自带卸载功能的装配式三角托架两种方式,施工中常采用后一种。

## 4 实际施工效果

大桥从2017年12月17日开工建设,至2022年3月1日桥梁主体完工,期间经历51个月完成桥梁贯通,贯通实景如图7所示。通过施工实践表明,钢管格构超高墩应用可大幅减少模板用量,提高机械化施工水平,缩短施工工期,降低高墩施工的综合经济成本及地震对桥梁的影响,也大大减少桥梁圯工工程数量,有利于节能环保。自

爬式多功能爬升提升系统的应用,真正实现了“标准化设计、工厂化预制、装配化施工”的施工智能建造理念。



图7 桥梁贯通实景

## 5 结语

本文以某特大桥主墩6#桥墩的施工为例,详细介绍了自密实混凝土制作、C80混凝土高抛试验及浇筑、自爬式提升系统组成及提升、爬升体系转换、钢管格构柱安装与定位、长悬臂液压爬模施工等方面的控制要点,对类似钢管混凝土格构墩的施工具有借鉴及推广意义。

## 参考文献:

- [1] 陈盛富,欧智菁. 钢管混凝土格构柱抗震性能研究综述[J]. 福建建筑,2016(2):48-53.
- [2] 杨凯,刘婉玥. 装配式钢管混凝土格构墩设计研究[J]. 工程与建设,2021(5):931-934.
- [3] 陈宝春,欧智菁. 钢管混凝土格构柱极限承载力计算方法研究[J]. 土木工程学报,2008,41(1):55-63.
- [4] 季学凯. 装配式法兰连接钢管混凝土格构墩设计关键问题研究[D]. 安徽:合肥工业大学,2021.
- [5] 陈盛富. 四肢变截面钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 福建:福建工程学院,2017.
- [6] 袁广学. 高速公路桥梁高墩柱施工技术分析[J]. 工程建设与设计,2017(24):142-144.
- [7] 舒昌信. 山区高空心薄壁墩的无支架翻模施工法简介[J]. 湖南交通科技,2009(1):105-107.
- [8] 四川省公路水运建设项目禁止、限制使用落后工艺、设备、材料目录(试行)[EB]. (2018-10-08)[2023-08-31] <http://jtt.sc.gov.cn/jtt/c101520/2018/10/8/b10d65fc848c4843936935f7e37798ec.shtml>.
- [9] 自密实混凝土应用技术规程:T/CECS 203—2021[S]. 北京:中国计划出版社,2021.