DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.014

武穴长江公路大桥总体设计

彭晓彬[1]，詹建辉[1]，常英[1]，冯云成[2]

（1.湖北省交通规划设计院股份有限公司，湖北 武汉 430051；2.中交第一公路勘察设计研究院有限公司）

摘要：武穴长江公路大桥全长30.993 km，跨江主桥采用主跨808 m单侧混合梁斜拉桥，跨堤孔桥采用主跨100 mPC连续箱梁，引桥采用30 m预制T梁。跨江主桥桥跨布置为(80＋290＋808＋75＋75＋75) m，主梁采用分离式双边箱钢箱梁和同外形预应力混凝土箱梁，钢箱梁U肋与顶板焊接设计要求全熔透，斜拉索采用抗拉强度1 770 MPa高强锌铝合金镀层钢丝，索塔采用无下横梁钻石形混凝土塔，桩基采用3 m直径钻孔灌注桩。

关键词：公路桥；斜拉桥；混合梁；锌铝合金镀层钢丝；全熔透焊接；无下横梁索塔

1 工程概况

武穴长江公路大桥是湖北省“953”高速公路网纵一线(麻城至阳新高速公路)和国道220线(东营至深圳公路)跨越长江的关键性控制工程，桥位上距棋盘洲长江公路大桥约40 km，下距九江长江公路二桥约45 km。

路线全长30 993 m，其中跨江主桥全长1 403 m，两岸接线长29 590 m；设互通式立交5处(武穴西枢纽互通、四望互通、武穴互通、富池互通、枫林东枢纽互通)，分离式立交6处；设匝道收费站3处、服务区1处、监控管理分中心1处、养护工区1处、超限超载检测站3处，改移杭瑞高速公路鄂东南省界收费站1处。

全线采用设计速度100 km/h的高速公路标准建设，其中武穴互通至富池互通段3 722 m(含跨长江主桥)采用双向六车道标准，桥梁宽度(不含布索区)采用33.5 m，其余路段27 271 m采用双向四车道标准，路基宽度26 m。

大桥位于长江中下游田家镇河段，其下游为龙坪河段。桥位河道狭窄，江中靠右岸有鲤鱼洲，河床纵向下切很深；由于大地构造断裂和基岩节点等控制，总体河势较为稳定。河段航道技术等级为Ⅰ级，代表船队船型分别为Ⅰ－(1)级航道四排四列船队(406.0 m×64.8 m×3.5 m)和5 000 t级船舶。主通航孔桥墩按代表船型、船队船撞力进行设计，同时按5 000 t级海轮、10 000 t级内河船舶进行防撞校核；其余水中桥墩按3 000 t级船舶考虑防撞标准。

大桥设计基本风速为30.1 m/s。桥址区长江左岸地势平缓，右岸为丘陵地貌。场地构造较稳定，发生滑坡、泥石流、崩塌、塌陷等地质灾害的可能性较小，可不考虑断裂错动对地面建筑的影响。大桥抗震设计采用两水平设防、两阶段设计的设计思想，E1作用下(50年超越概率5%)地震动峰值加速度为72.0 cm/s^2，E2

[8] JTG D60－2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[9] 梁鹏.超大跨度斜拉桥几何非线性及随机模拟分析[D].同济大学博士学位论文，2004.

[10] 董道福，陈常松，颜东煌，等.单元解体法精确求解梁元无应力构形[J].湖南大学学报：自然科学版，2016(11).

[11] 王晟.钢桁梁斜拉桥节段纵移悬拼足尺模型试验及状态偏差预测与控制技术研究[D].长沙理工大学博士学位论文，2017.

[12] Madenci E，Guven I.The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS (2nd Edition)[M]. USA：Springer，2015.

[13] 陈常松.超大跨度斜拉桥施工全过程几何非线性精细分析理论及应用研究[D].中南大学博士学位论文，2007.

[14] 颜东煌，王晟，母进伟，等.节段纵移悬拼法足尺模型试验动载效应研究[J].中国公路学报，2016(11).

[15] Alberto M. B. Martins，Luís M. C. Simões，João H. J. O. Negrão.Cable Stretching Force Optimization of Concrete Cable－Stayed Bridges Including Construction Stages and Time－Dependent Effects[J].Structural and Multidisciplinary Optimization，2015，51(3)：757－772.

收稿日期：2018－10－11

作者简介：彭晓彬，男，硕士，教授级高工.E－mail：67393541@qq.com

作用下（50 年超越概率 2%）地震动峰值加速度为 109.4 cm/s^2。

2　桥位选择

桥位所处河道由一个单一微弯河段和一个微弯分汊河段组成，上段江中靠右岸有鲤鱼洲，下段为鹅头形分汊河道。该河段具有江窄、河道弯道多、港口作业区和锚地多、水流复杂等特点。河段南北两岸均为低山地貌，山体分布优质石灰石较多，沿山脚和江边分布有大量企事业单位和相关配套码头设施。结合桥位通道选取原则在长江田镇至码头镇约 28 km 江段内，自上而下提出了田镇－半壁山、余祥－上巢湖、郭祥－码头镇 3 个桥位方案，3 个桥位相距各约 10 km（工程河段河势及工程位置见图 1）。考虑到余祥－上巢湖桥位虽南岸接线地形条件较复杂、压覆矿产资源较多，但符合麻阳高速公路总体走向，主流交通顺捷，建设规模较小，湖北、江西两省均赞成该桥位，最终推荐采用余祥－上巢湖桥位。

选定的余祥－上巢湖桥位位于长江下游航道里程

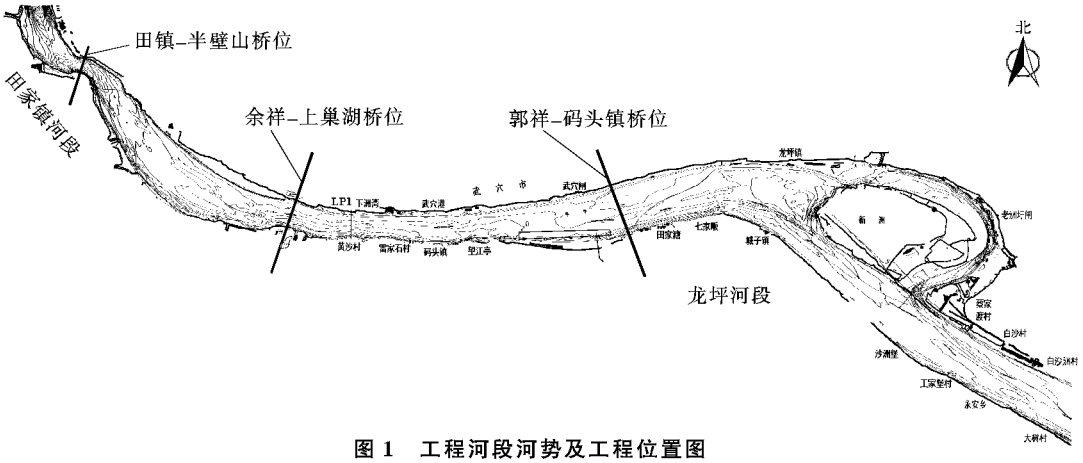

图 1　工程河段河势及工程位置图

约 844.7 km。北岸位于武穴市余祥村上游，下距武穴市市区约 4.5 km；南岸位于阳新县富池镇下游，上距富池镇约 6.0 km，满足桥位选择“近城不进城”原则。

3　桥梁跨径布置

武穴长江大桥桥型方案根据桥梁建设条件、功能要求合理确定。桥墩位置、跨径布置需满足地形地质、水利防洪、港口航道和地面道路等要求，同时在结构受力合理的基础上，以桥梁跨径布置方案的经济合理性作为基本目标。

桥址处北岸地势平缓，地面高程 16～18 m；南岸为山岭地貌，地形地貌受当地采石开挖影响较大。江面宽约 1 220 m，河道较顺直，岸线稳定，主桥桥型及桥墩布设考虑因素包括：① 河床断面呈不对称“V”形，深槽靠近南岸，深槽部位江底狭窄，水流湍急，冲刷较大。从维护南岸坡稳定、满足船舶航行需要、保证桥梁安全及节省工程投资等考虑，主墩基础宜设置于最高通航水位以上的岸坡处；② 通航条件：目前工程河段航道最小维护水深为航行基面下 4.0 m，桥位处常年保持基面下 4.0 m 水深，此处水域宽度为 547 m，该范围内不能设置桥墩；4.0 m 水深水域摆动范围为 935 m，该范围内宜少设桥墩（桥位河床纵断面变化见图 2）；③ 桥位北岸侧有两道防洪堤（黄广大堤和利丰民垸堤），两堤间距达 320 m，南岸无防洪堤。桥跨布置应考虑泄洪影响及堤防安全。

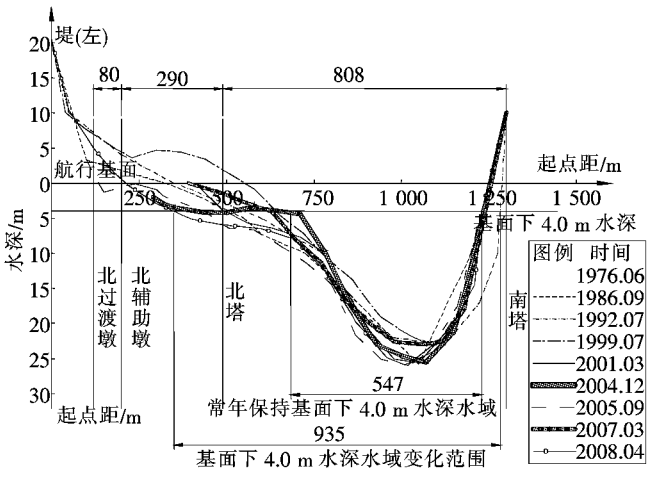

图 2　余祥－上巢湖桥位河床纵断面变化图（单位：m）

目前中国钢桁拱桥和钢箱拱桥最大主跨达 550 m 左右，但多跨钢桁或钢箱拱桥设计施工技术难度大，经济性相对较差。如采用悬索桥方案，可采用主跨 1 310

m 或 2×730 m 方案，但武穴岸侧堤外设锚碇对防洪有不利影响，且大桥工程和投资规模相对较高。斜拉桥方案考虑了主跨 2×490 m、主跨 2×570 m 三塔斜拉桥方案和主跨 808 m 双塔斜拉桥方案。航道部门认为三塔斜拉桥方案在深水区设墩较多，且中墩对船舶航行有一定影响；双塔斜拉桥方案 808 m 主通航孔可满足双向通航要求，290 m 辅助通航孔可满足单向通航要求，同时 808 m＋290 m 可覆盖桥位 4.0 m 深槽水域变化范围，并满足设计代表船队三线通航要求，能够较好地适应航道变化及航运发展规划要求。因此最终推荐采用主跨 808 m 双塔斜拉桥方案。

根据防洪基本要求，跨利丰民垸堤孔桥跨径不小于 60 m，跨黄广大堤孔桥跨径不小于 80 m，且桥梁下构基础与堤脚距离不小于 10 m。基于上述要求，跨堤孔桥采用主跨 100 m 预应力混凝土变截面连续箱梁。一般陆地段引桥按墩高与跨度协调的原则采用 30 m 基本跨度梁桥，互通匝道桥采用支架现浇预应力箱梁，一般高架桥采用施工快捷及经济性较好的装配式预应力混凝土 T 梁。

4 大桥纵断面设计

武穴长江大桥及两岸接线临江段的纵断面设计主要受武穴城市规划远期通道、长江主副通航孔净空、南岸山体挖方、富池互通、丰山隧道以及隧道出口标高等因素控制。

结合通航净空要求，考虑运营期间桥面排水及结构整体受力需要，长江大桥范围宜采用双向坡，并将竖曲线最高点设置主跨中心合龙点。长江大桥江面开阔，空气湿度较大，冰雪天气钢桥面易出现结冰现象，为减小运营期间车辆侧滑风险，长江大桥主桥最大纵坡推荐采用 2%，凸曲线半径推荐采用 30 000 m，主桥平面均位于直线段上。

大桥北岸地势较低，地面标高约 17 m，北岸接线根据地方意见预留城市规划远期穿越通道，路段纵坡按路线规范要求控制。南岸接线纵断面设计思路如下：① 富池互通主线及匝道的挖方边坡按 8 级控制，由此大桥南岸桥台处设计高程取 65 m；② 鉴于挖方段山高坡陡，且富池互通主线范围存在超高缓和段，考虑设置 1%纵坡对排水更为有利；③ 丰山隧道洞口临近丰山铜矿尾砂库，应确保洞口设计高程大于尾砂库设计标高＋100 m，同时丰山隧道出口接线位于富池互通主线范围，故设置 1.8%的单坡将隧道出口设计高程降至 61 m。长江大桥临江段纵断面示意见图 3。

5 主桥总体设计

主桥实施方案为(80＋290＋808＋75＋75＋75)

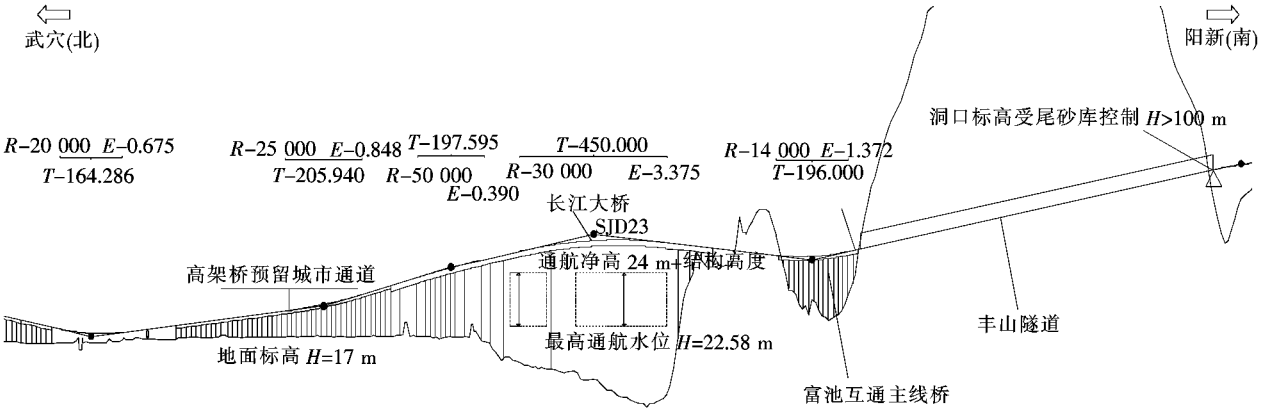

图 3 临江段纵断面示意图(单位：m)

mPK 钢箱混合梁斜拉桥(主桥桥型布置见图 4)，大桥主跨和北边跨位于长江河段深水区，采用钢箱梁结构以减少深水区主梁架设风险；南边跨位于山岭边坡区，采用预应力混凝土结构以节约造价。由于该桥跨径较大，结构体系的非对称性对结构内力分配、构造设计及施工方法等都有较大影响，总体设计时需兼顾主梁高跨比、边中跨比、塔高比、辅助墩及斜拉索的合理布设，以改善大跨度非对称体系斜拉桥的结构响应及其非线性影响。

5.1 主梁设计

主梁设计中研究了双边矩形箱组合梁和 PK 钢箱混合梁 2 种主梁形式。经综合比较认为，虽然 800 m

左右组合梁斜拉桥在理论计算上具备可实施性，但大跨度钢箱梁斜拉桥方案技术成熟，施工方便，结构重量轻，经估算可节约工程建安费 7.3%，故推荐采用 PK 钢箱混合梁方案。

5.1.1 钢箱梁

北边跨和中跨钢箱梁全长 1 166.6 m，标准段采用分离式双边箱断面，两边箱之间以横梁连接；北边跨尾索区考虑压重需要采用封闭截面，为单箱三室断面。主桥钢箱梁全宽 38.5 m，至索塔区缩窄为 36.0 m，钢箱梁顶板外表面至底板内表面高 3.8 m（钢箱梁标准横断面见图 5）。标准梁段长 15 m，全桥梁段最大吊装重量 332.1 t，最小吊装重量 93.9 t，钢箱梁主体结构材质采用 Q345qD。

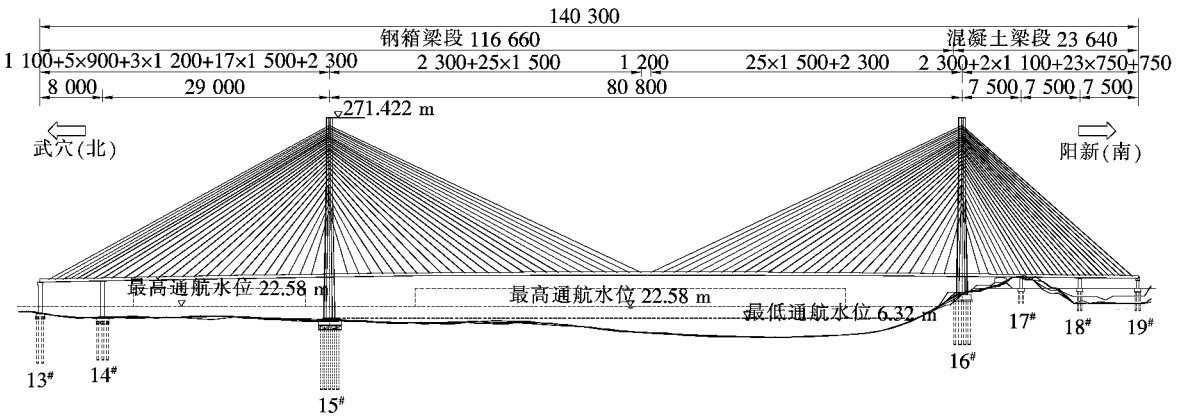

图 4　主桥桥型布置图（单位：cm）

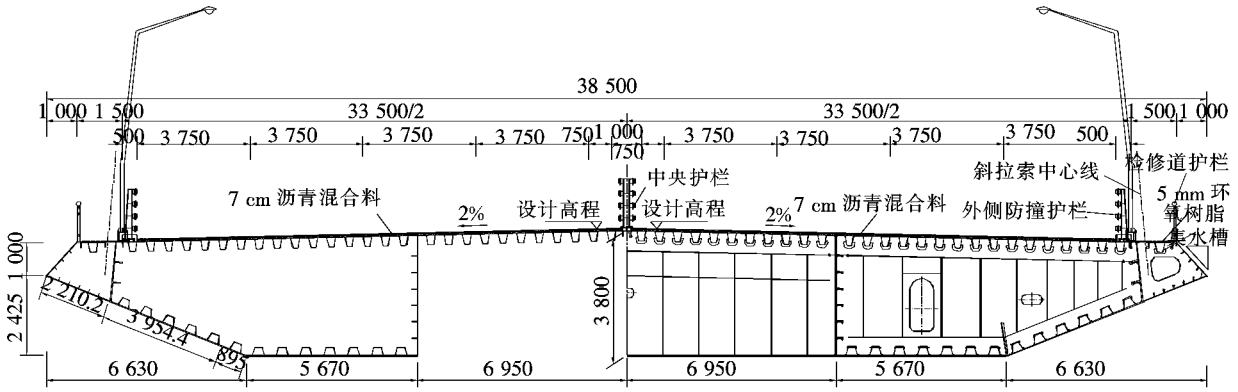

图 5　钢箱梁标准横断面（单位：mm）

为提高桥面系抗疲劳性能，U 肋与顶板焊接设计要求全熔透，采用多头门式焊机＋双向反变形胎架。U 肋焊接方式应根据单面自动焊、双面自动焊或单面焊双面成型等工艺研究进展、工程实施经验及成熟情况择优采用，设计推荐采用全自动内焊系统、机器人双面施焊的焊接工艺。U 肋与底板连接设计采用单面坡口焊，制造时也可采用全自动 U 肋内焊系统，形成 U 肋与底板双面贴角焊。

5.1.2 预应力混凝土箱梁

南边跨采用与钢箱梁同外形的预应力混凝土箱梁，全长 236.4 m；箱梁全宽 38.5 m，至索塔区缩窄为 35.5 m，预应力混凝土箱梁外轮廓梁高 3.822 m。标准段顶板厚 35 cm，底板厚 40 cm，斜底板厚 35 cm，内腹板厚 55 cm（混凝土箱梁标准横断面见图 6）。索塔处设置厚 2.5 m 横隔板，辅助墩及过渡墩顶各设置厚 3.0 m 横隔板，与钢混结合段相连接横隔板厚 1.40 m，其余横隔板箱内厚 45 cm，箱外厚 35 cm，顺桥向横隔板标准间距为 7.5 m（塔区由 5.5 m 减小至 4.0 m）。

混凝土箱梁要求采用长节段跳仓支架现浇施工，自梁端开始分成 3 个施工段和 2 个湿接缝，每个施工段分若干节浇筑。考虑箱梁构造、拉索间距、混凝土泵送能力及人员工作强度等要求，每次浇筑方量控制在

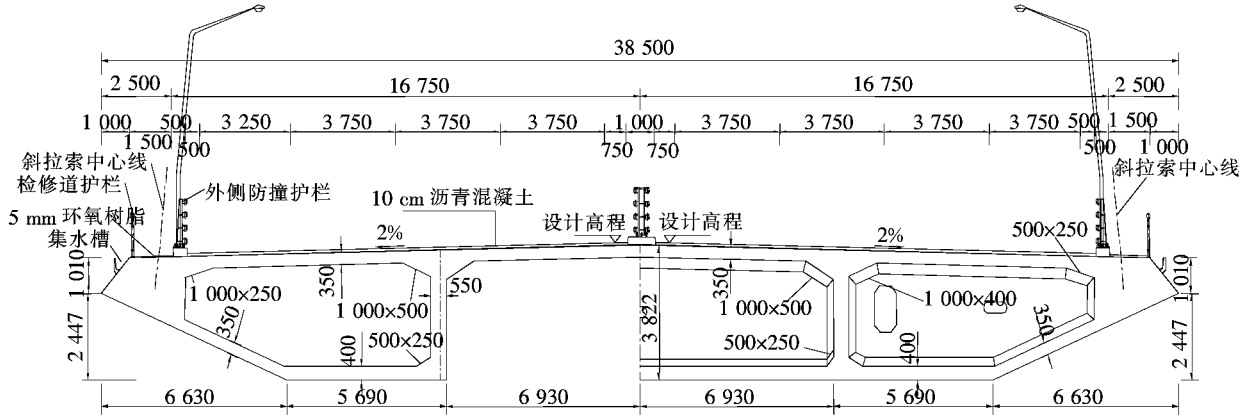

图 6 混凝土箱梁标准横断面(单位:mm)

1 200 m^3,每节长度控制在 15 m 内。考虑后浇湿接缝与先浇节段混凝土之间存在收缩变形差和界面黏结,接缝过长会出现收缩变形差过大,过短则施工质量难以保证,确定湿接缝长 2.1 m。

为保证大节段宽幅混凝土箱梁始终处于三向受压状态,降低混合梁斜拉桥宽幅混凝土箱梁早期开裂风险,南边跨预应力混凝土箱梁采用三向预应力混凝土结构,纵、横、竖向预应力均采用体内钢束,并根据箱梁节段浇筑时序和运营期受力特性进行预应力钢束无齿块布置设计。为减少短预应力钢束的应力损失,长度小于 10 m 的预应力钢绞线采用低回缩量锚具。

5.1.3 钢—混凝土结合段

设计选取结合面伸入主跨 5、11.4 和 42.75 m 共 3 种钢—混凝土结合面方案进行对比研究。经综合比较认为,虽然方案 2 存在弯矩幅值偏大问题,但该方案施工工艺简便经济、桥梁施工安全风险较小,后期可通过设置预应力、优化索力等措施对主梁弯矩进行适当优化,因此最终确定钢—混凝土结合面设于主跨距南塔中心线 11.4 m 处。

钢混结合段的设计应连接可靠,传力明确,能较顺畅地传递截面各项内力并且刚度过渡平稳。通过对 4 类钢混结合段形式分析,该项目采用有格室的后承压板构造。钢混结合段长 5.8 m,钢格室腹板上设置 PBL 剪力键,格室内填充自密实混凝土,并通过剪力键及钢板与混凝土的摩擦力传递轴力、剪力和弯矩。钢格室通过钢箱梁加强段与钢箱梁连接,钢箱梁加强段长 3.0 m,采用在 U 肋中间加设 T 形加劲的方式(钢混结合段主要构造见图 7)。考虑到 T 肋尾端与 U 肋相接处截面发生突变,U 肋顺桥向压缩变形受到 T 肋约束,U 肋局部承压容易出现应力集中。综合考虑日本多多罗大桥、生口大桥和中国鄂东、荆岳等长江大桥建设经验,将 T 肋加长至 3 m,并延伸至横隔板处密贴,以通过横隔板约束 T 肋轴向变形,减小应力变化。

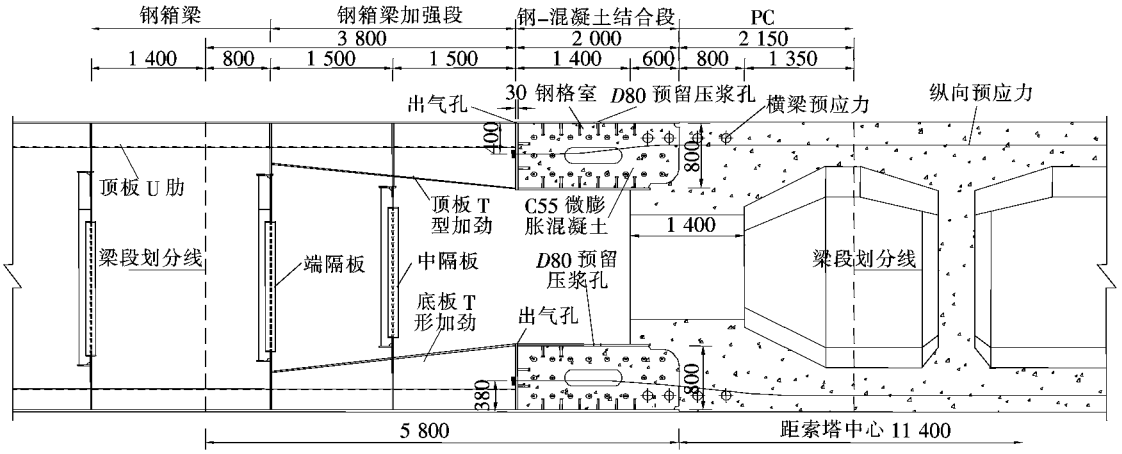

图 7 钢混结合段主要构造(单位:mm)

5.2 主塔设计

根据主梁断面、索面布置以及景观需求，主塔采用钻石形混凝土塔。北塔高 269 m，南塔高 233 m，索塔桥面以上高度均为 206 m。北塔设置下横梁，横梁以下内收整体呈钻石形；为抵抗船撞，下塔柱设防区域设置十字形隔板，主塔一般构造见图 8。南塔下塔柱高 21.6 m，为减小下塔柱在温度和风荷载作用下的开裂风险，将下塔柱沿中塔柱外侧轮廓张开，并取消下横梁构造，设置 7.3 m 高牛腿作为主梁竖向支撑和施工期临时固结平台。

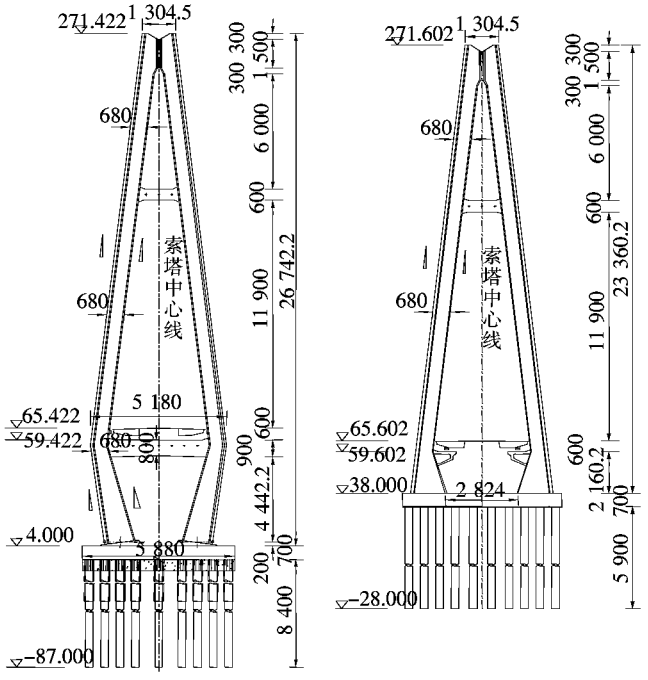

图 8　主塔一般构造图（除标高单位为 m 外，其余单位：cm）

北塔基础采用群桩基础，承台采用哑铃形承台，承台厚度 7 m。承台上设 2 m 高塔座，承台下梅花状布置 38 根直径 3 m 钻孔灌注桩，桩长 84 m。南塔基础采用群桩基础，承台采用矩形承台，承台厚度 7 m。承台下行列式布置 36 根直径 3 m 的钻孔灌注桩，桩长 59 m。针对主塔大直径钻孔桩、中风化砂岩夹页岩强度高（平均抗压强度 28 MPa，最大抗压强度 56 MPa）和强风化斜坡岩漏水严重的施工特点，开发了大直径斜坡岩钻孔系统，确保了施工效率和成孔质量。

5.3 斜拉索及锚固

主桥钢箱梁段顺桥向标准索距为 15 m，南边跨混凝土箱梁段标准索距为7.5 m，北边跨钢箱梁尾索区标准索距为 9 m 和 12 m；斜拉索按扇形布置，每个索面由 26 对高强度平行钢丝斜拉索组成，全桥共 4×26 对（208 根）斜拉索，钢丝标准抗拉强度≥1 770 MPa。斜拉索防护采用“镀锌－5%铝钢丝＋双层 HDPE＋双层 PVF 氟化膜胶带”多层防腐系统。

斜拉索张拉方式为塔端张拉，其在梁端锚固形式采用钢锚箱方式，塔端锚固形式采用钢锚梁方式。为使斜拉索的风、雨激振和涡激振动得到抑制，该桥斜拉索采用阻尼器、气动措施并用的综合减振方案。气动措施通过在斜拉索表面现场缠绕固定螺旋线实现；减振阻尼器包括内置式阻尼器（减振橡胶圈）和外置式阻尼器，外置式阻尼器拟采用杠杆质量减振器 LMD（荆岳长江公路大桥采用了此方案）。

6 结语

武穴长江公路大桥处于两省、三地毗邻地带，协调难度较大；道路沿线分布有众多采矿权和探矿权企事业单位，建设环境复杂。总体设计兼顾了桥位处通航、水利、矿产资源与交通各方面的需求，较好地实现了区域经济社会与长江过江通道布局的整合发展。结合建设条件，跨江主桥采用主跨 808 m 单侧混合梁斜拉桥，该桥采用的预应力混凝土梁长节段跳仓支架现浇施工、钢箱梁 U 肋全熔透焊接技术、钢－混凝土结合段 U 肋加劲设计、无下横梁主塔构造设计、大直径斜坡岩钻孔系统等关键技术可为类似大桥建设提供借鉴。该桥已于 2016 年 12 月开工建设，预计 2020 年建成通车。

参考文献：

[1] 彭晓彬，詹建辉.超大跨度混合梁斜拉桥非线性受力分析研究[J].桥梁建设，2011(4).

[2] 彭晓彬，詹建辉.大跨度组合梁斜拉桥结构设计方案研究[J].桥梁建设，2016(4).

[3] 詹建辉，廖原，王成启.嘉鱼长江大桥总体设计[J].中外公路，2017(3).

[4] 王帆，赖亚平，乔云强，等.合川渠江景观大桥三角拱形桥塔设计研究[J].中外公路，2018(2).

[5] 陈虎成，张家元，刘明虎，等.石首长江公路大桥主桥总体设计[J].桥梁建设，2017(5).