

文章编号: 0451-0712(2006)05-0067-06

中图分类号: U442.5

文献标识码: B

武汉阳逻长江公路大桥主塔设计

张 铭

(湖北省交通规划设计院 武汉市 430051)

摘 要: 结合武汉阳逻长江公路大桥设计及施工过程, 对主塔的结构构造、受力计算及施工方案做重点介绍

关键词: 武汉阳逻长江大桥; 主塔设计; 钢剪刀撑; 施工方案

1 武汉阳逻长江大桥概况

武汉阳逻长江公路大桥是京珠、沪蓉国道主干线武汉绕城公路东北段上跨越长江的特大型悬索桥, 桥面南、北纵坡分别为 1.9%、2.591%, 双向六车道, 桥面净宽 33 m, 设计行车速度为 120 km/h, 设计荷载为汽车—超 20 级、挂车—120。

主桥跨径布置为 250 m+1 280 m+440 m, 主跨跨径为世界第 8。该桥主塔采用大直径群桩基础, 主塔采用混凝土结构, 其型式在横桥向为 H 形塔, 顺桥向为一字型, 整个桥塔由塔座、塔柱、塔冠、上下横梁及两道钢剪刀撑组成。

桥址区历年最大风速为 29.7 m/s, 风向为北东向。桥位处长江河道顺直微弯, 主航道偏于北岸阳逻深槽。桥位北岸为自然岸坡, 南岸为人工堤防, 一般水位时江面宽约 1 000~1 100 m, 大堤之间距离约为 1 500 m。大桥 300 年一遇的设计水位为 28.92 m, 相应流量为 92 000 m³/s。

北塔处第四系覆盖层厚 4.4~5.4 m, 主要为粘性土、亚砂土, 局部含少量砾石。岩石风化层较薄, 弱风化岩层顶板高程在 15.8~19.8 m, 微风化顶板高程在 -4.4~-8.2 m。基岩完整性较好, 强度较高, 为细砂岩, 岩石允许承载力为 11 MPa。北岸为岩石岸坡, 稳定。

南塔处地面高程为 23.3 m, 覆盖层为厚 68.3~69 m 的粘土、亚粘土、粉砂、细砂、中砂及卵石。下伏砾岩、泥质砂岩, 其强、弱风化交替出露呈互层状, 岩石软硬相间, 强度较低。

2 结构设计

2.1 方案构思

主塔设计中对构造和计算并重考虑, 本着先构思后计算的原则进行。

武汉阳逻长江公路大桥是武汉的东大门, 建成以后将成为武汉市的标志性建筑, 它既是一座科技桥, 也是一座景观桥。主塔的造型高大、突出, 是大桥景观设计的重中之重。主塔的造型特色受到水文、地质、桥宽、桥梁结构型式及结构受力的制约, 为满足主塔的功能性要求和景观需求, 在设计中对主塔的造型进行了多方案的比选, 最终采用了分离式 H 形空间主塔配合钢剪刀撑的方案。塔柱的外侧采用大倒角, 简洁明快, 上下横梁采用弧线造型, 两道钢剪刀撑与几者完美地结合在一起, 极大地增强了大桥的视觉效果。该主塔气势恢弘、雄伟挺拔、富于变化, 非常具有现代气息, 与周围的景观融为一体, 也体现出大桥的大气和宏伟。其造型很好地处理了工学与美学的关系, 是力与美结合的典范。

主塔的造型确定之后, 就是对主塔各细部构造进行优化, 除从施工阶段到运营阶段对主塔结构的刚度、强度、稳定性进行计算外, 还详尽地考虑了混凝土塔柱与钢剪刀撑的连接部位的细部构造, 并对塔柱大悬臂施工(没有中横梁)和剪刀撑吊装的施工的可实施性、可操作性做了细致的分析, 确保主塔安全顺利地施工。

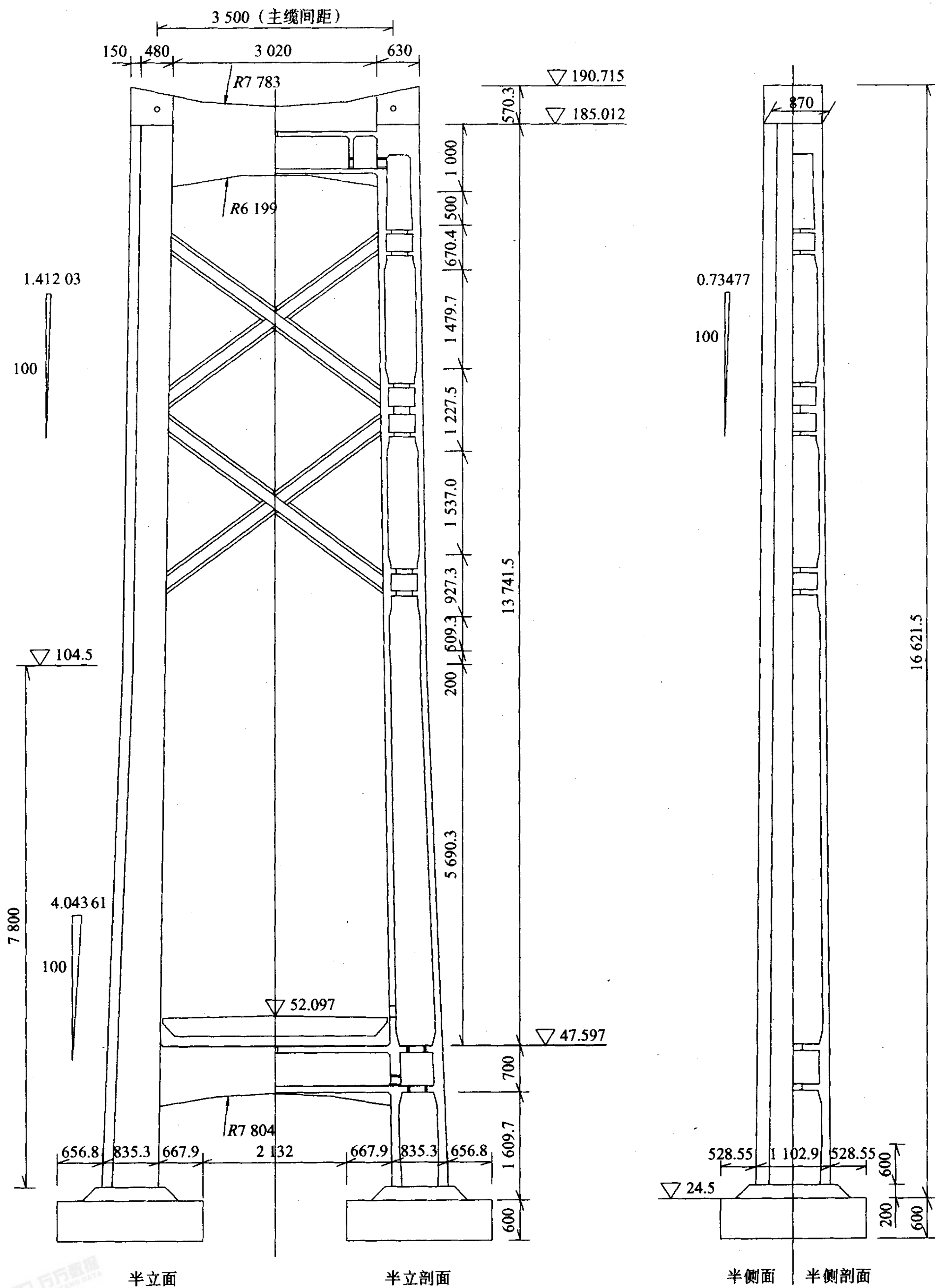
2.2 结构设计

北塔一般构造见图 1 所示。

其结构设计主要包括基础、塔柱、横梁、钢剪刀撑几个部分。

(1) 基础。

基础一般构造见图 2、图 3 所示。



单位:cm

图1 北塔一般构造

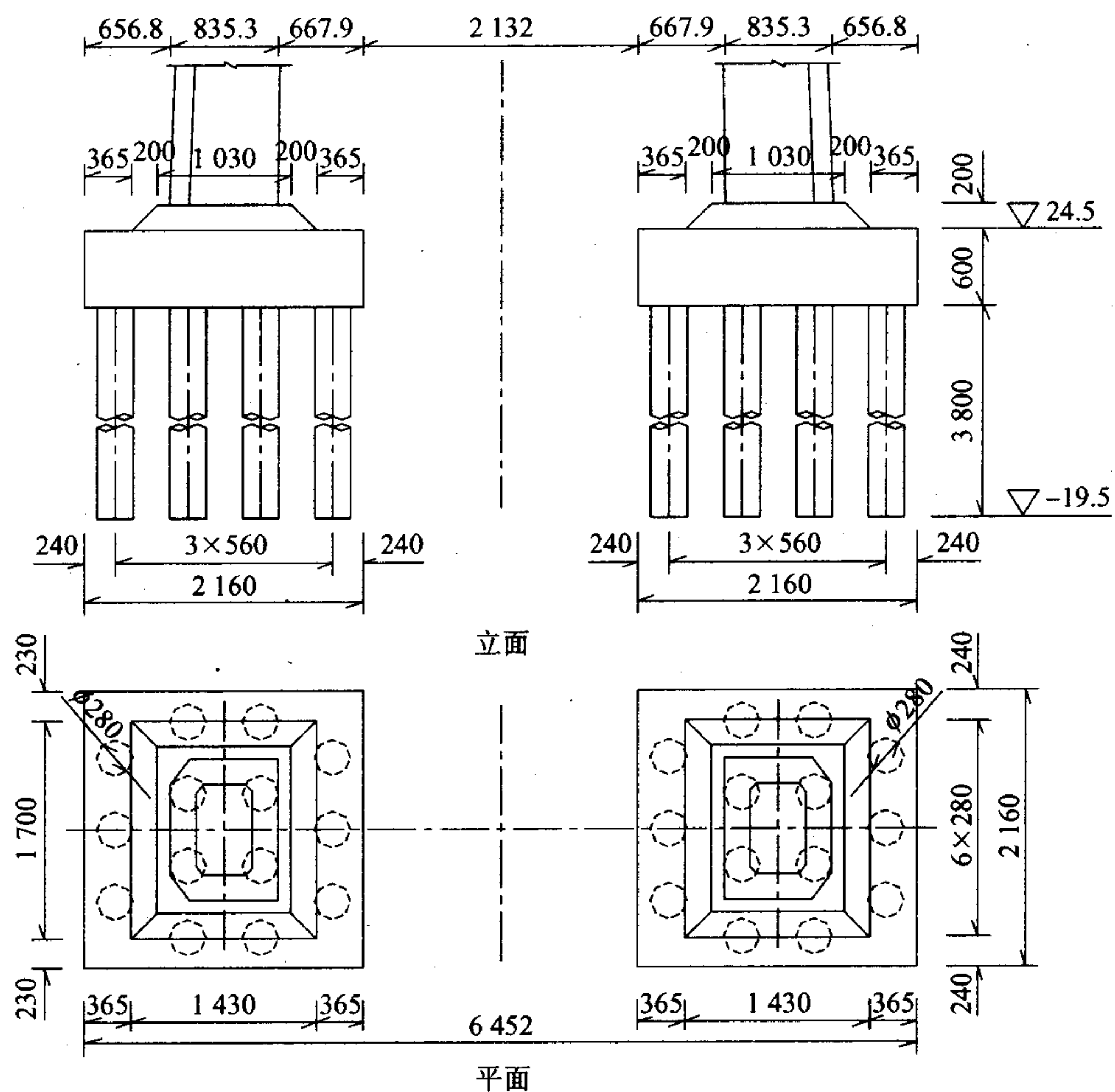


图2 北塔基础构造

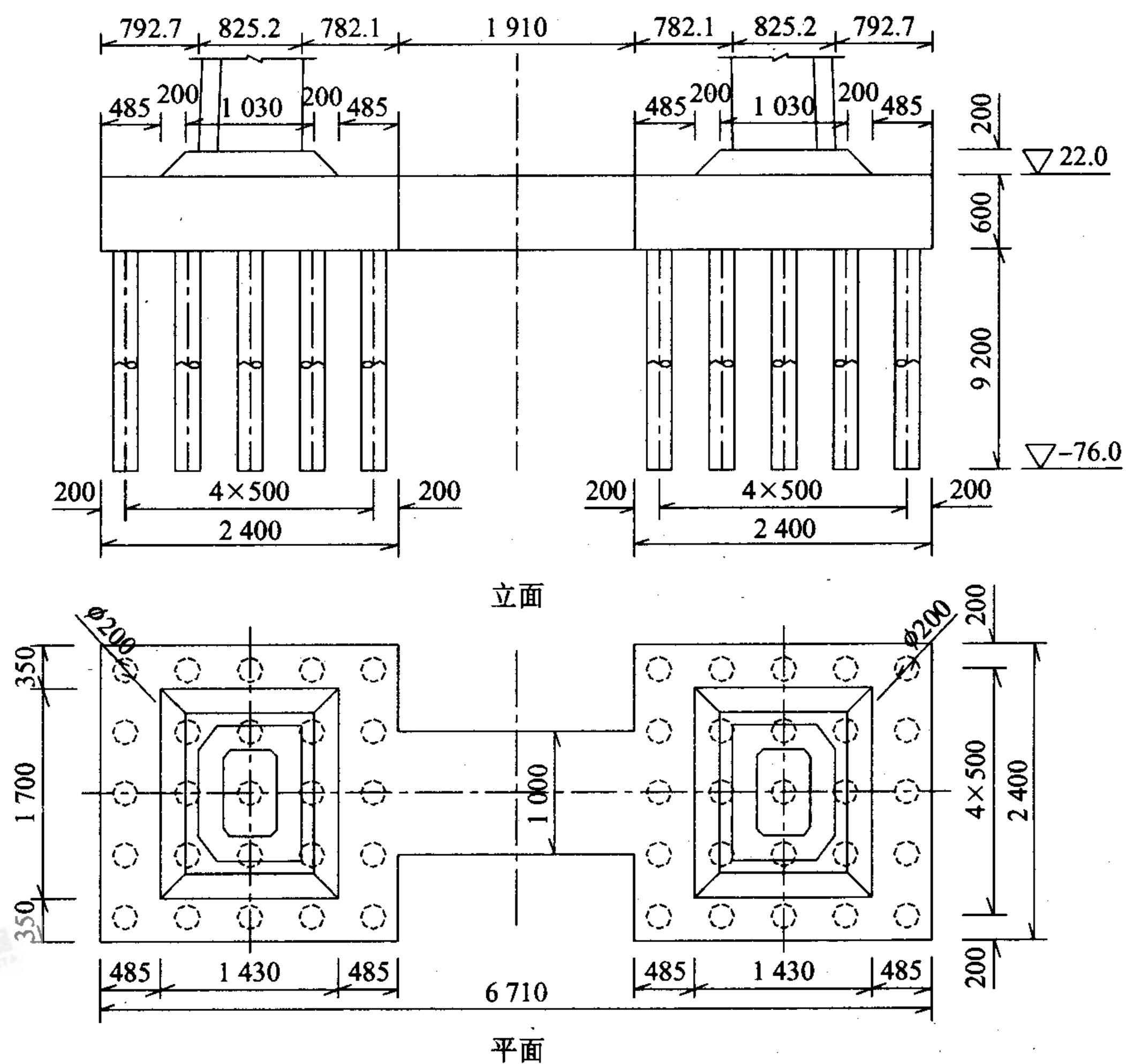


图3 南塔基础构造

南塔采用桩基础。由于覆盖层较厚,下伏砾岩强、弱风化层交替出露,岩石软硬相间,桩基按摩擦桩设计。每个塔柱下设25根直径为2.0 m的钻孔灌注桩,桩长92 m,桩底标高为-76.0 m。为加强两侧基础的整体刚度,减少基础间的不均匀沉降,在两个塔柱下的承台间设置一道系梁,厚6.0 m。承台平面尺寸为24.0 m×24.0 m,厚为6 m。为了将塔柱承受的荷载更均匀地传递到基础上,在承台顶部设置了2 m高的塔座。整个南塔基础在江滩上,考虑在枯水期内进行施工,承台采用大开挖方案施工,由于地基的允许承载力较低,系梁施工时留出后浇段。

北塔也采用桩基础。由于地质条件较好,岩石风化层较薄,桩基按柱桩设计。每个塔柱下设14根直径为2.8 m的钻孔灌注桩,平均桩长38 m,桩尖嵌入微风化细砂岩中。承台采用分离式结构,厚6.0 m,承台平面尺寸为21.6 m×21.6 m。塔座高为2 m。

(2)塔柱。

设计采用分离式H形空间主塔。南、北塔塔高由承台顶面计算到塔冠顶分别为163.512 m、160.512 m。

塔柱为普通钢筋混凝土结构,采用空心薄壁断面。以北塔为例,塔柱设计尺寸为:鞍座底尺寸为8.7 m(顺桥向)×6.3 m(横桥向),塔根处尺寸为11.029 m(顺桥向)×8.353 m(横桥向)。由于北塔顶索鞍尺寸较大,因此北塔鞍座底顺桥向尺寸比南塔长0.4 m,并且为保持主塔的景观效果,塔冠部分没有采用牛腿的结构型式。为了适应塔柱的受力变化,塔柱断面尺寸在顺桥向沿塔高均匀变化,北塔柱外侧面斜率(由塔顶鞍座底高程至塔根处)为100:0.734 77;塔柱横桥向宽度从塔顶鞍座底高程至转折点高程104.5 m处均为6.3 m,北塔柱外侧面斜率为100:1.412 03,从转折点高程104.5 m处至塔根,塔柱横桥向宽度由6.3 m渐变至8.353 m,北塔柱外侧面斜率为100:4.043 61,北塔柱内侧面斜率统一为100:1.412 03。

从塔顶至高程104.5 m处,塔柱壁厚0.85 m,从高程104.5 m处至下横梁,塔柱壁厚为0.95 m,从下横梁至塔根,塔柱壁厚1.20 m(不包括塔壁局部加厚段)。

剪刀撑处塔柱壁厚由0.85 m增加到1.20 m。在各横梁处、塔根部等受力较大的区段设置了加厚段。为了改善剪刀撑处塔壁的受力状态,在各节点处塔柱内侧设置0.6~1.2 m厚的横向隔板以抵抗剪刀

撑产生的水平力。塔冠设置4.5 m厚的实体段以传递塔顶主索鞍巨大的垂直压力。为增加主塔的景观效果,在塔柱的外侧设有宽1.5 m、长2.0 m的倒角,在塔柱内侧设有半径为20 cm的圆弧。

塔柱竖向配置直径为32 mm的主筋,主筋间距为15 cm,水平配置直径为16 mm的箍筋。在塔柱及横梁的外表面,设置一层直径为5 mm,间距为10 cm的钢筋焊网以增强混凝土表面的抗裂性能。

(3)横梁。

根据受力需要以及整个方案的景观考虑,主塔设置上、下两道箱形断面混凝土横梁,并以钢箱剪刀撑结构代替了传统的混凝土中横梁,造型比较新颖。主塔下横梁断面尺寸为9.73 m(宽度)×7.0 m(高度),顶板、底板、腹板厚度均为1 m,横梁下缘圆弧形装饰块半径为78.04 m,装饰块厚0.5 m;北塔上横梁断面尺寸为7.76 m(宽度)×6.2 m(高度),顶板、底板厚度均为0.7 m,腹板厚度为0.8 m,横梁下缘圆弧形装饰块半径为61.99 m,横梁上缘圆弧形装饰块半径为77.83 m,装饰块厚0.5 m,横梁采用预应力混凝土结构。

上横梁内部均设有2道0.7 m厚的隔板,横梁上缘圆弧形装饰块与塔顶钢鞍罩间留有一道变形缝,其间填塞橡胶止水带。在上、下横梁的腹板上每隔5 m设置一个 $\phi 100$ mm的PVC管作为通风管。

南、北塔上横梁设置36束 $16\phi 15.24$ 钢绞线,南塔下横梁设置64束 $16\phi 15.24$ 钢绞线,北塔下横梁设置52束 $16\phi 15.24$ 钢绞线,均为直线束,钢束锚固于塔柱内。由于受通航净空的影响,主塔的下横梁至承台的距离较短,特别是在岸上的北主塔。为了在初始阶段减小张拉横梁预应力束对下塔柱产生的不利影响,南、北塔下横梁预应力束分两次张拉;在下横梁混凝土浇注完毕后,第一次分别拉40束、36束预应力钢束,在上横梁混凝土浇注前,第二次张拉剩余预应力钢束。上横梁预应力钢束一次张拉到位。

(4)剪刀撑。

剪刀撑采用焊接箱形截面,截面一般构造见图4所示,材质为Q345-D。每道剪刀撑由1个长节段、2个短节段、4个嵌补段及塔柱内预埋件组成,长节段最长达39.6 m。上下两道剪刀撑重量分别为110.7 t、113.3 t,待上横梁施工完毕后,从上横梁上整体吊装。

剪刀撑外侧钢板壁厚10 mm,纵肋高180 mm,厚度为12 mm,间距400~600 mm,加劲肋厚度为

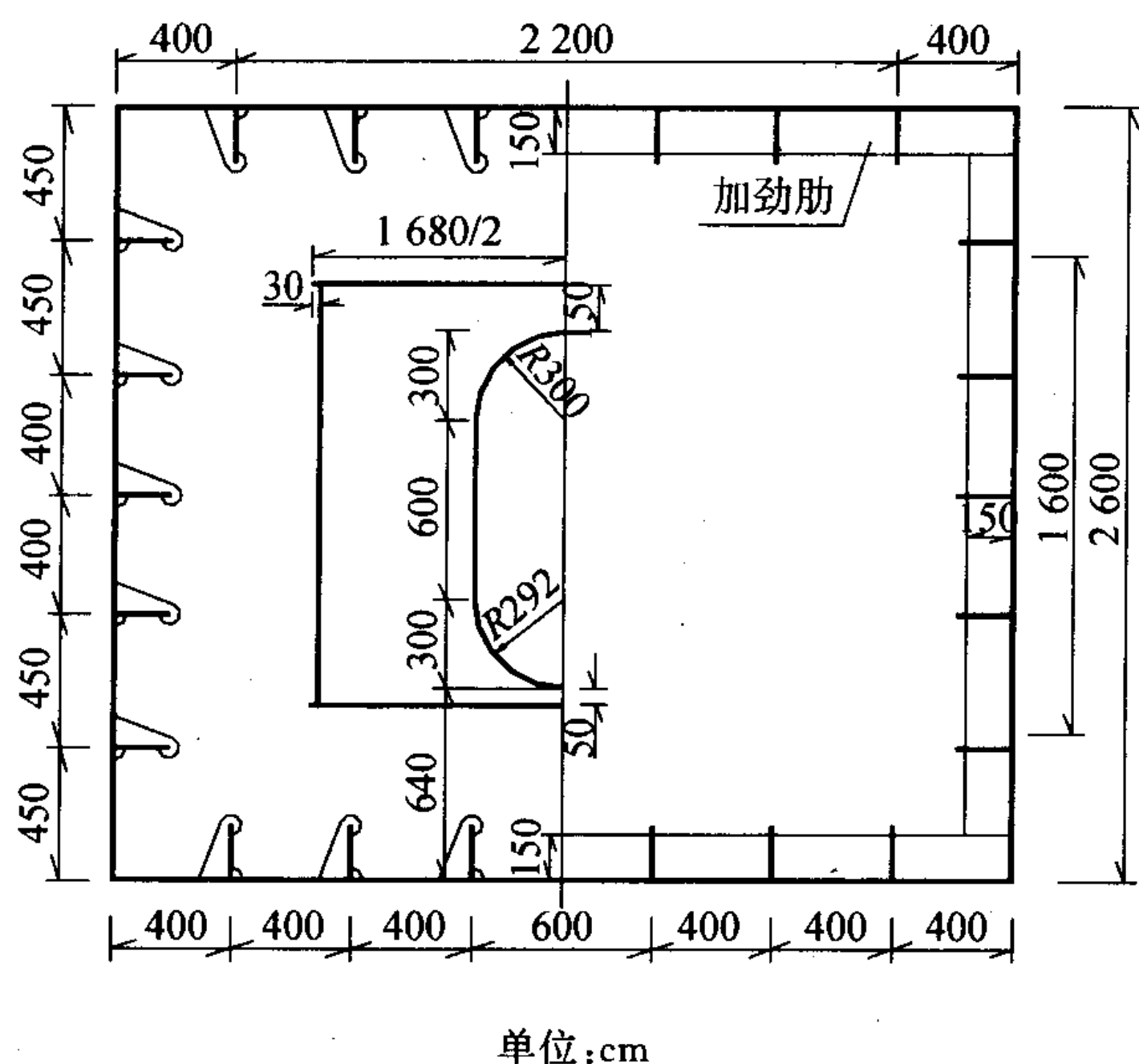


图4 剪刀撑截面一般构造

8 mm。横隔板每 3.3 m 或 3.4 m 设置一道,板厚 8 mm,在临时吊点处的横隔板板厚增加到 14 mm。剪刀撑断面尺寸为 3.0 m(宽度)×2.6 m(高度)。剪刀撑各单元件在工厂的组拼顺序为:底板单元件→横隔板单元件→腹板单元件→顶板单元件→起吊吊耳。

考虑到剪刀撑整体吊装时的机械控制精度与混凝土塔柱的施工精度很难达到钢构件的加工要求,在剪刀撑的各端部设置了嵌补段,嵌补段长 500 mm,板厚由 10 mm 渐变至 14 mm,嵌补段与剪刀撑在塔柱侧壁临时搭设的施工平台上完成对接焊。

为防止剪刀撑在吊装过程中产生弯曲变形,在剪刀撑四周设置临时型钢支撑对其进行约束。

剪刀撑各节段在工厂加工制造,在工地拼焊成整体。剪刀撑通过焊接方式与预埋在塔柱侧壁的预埋件相焊接,剪刀撑整体起吊到位后,先对其进行临时锁定,以保证嵌补段的焊接质量。由于嵌补段在最后焊接时处于受约束状态,为避免钢结构出现过大的焊接残余应力,在焊接完成后,对嵌补段与塔柱预埋件之间的焊缝采用高频冲击的方法消除焊接残余应力。

剪刀撑的涂装采用电弧喷铝的涂装体系。

3 结构计算

针对阳逻长江公路大桥索塔结构形式,计算内容及方法如下。

索塔结构计算分为顺桥向和横桥向两部分,分别采用 QJX 桥梁综合程序和桥梁博士 V2.8 程序,

计算索塔结构各工况及不同荷载组合下的内力、应力及变形。桩基计算时塔身的内力作用于承台中心底面,按顺桥向、横桥向分别计算。

对塔身按 4.0 m 一段作为一个施工节段,全塔共划分 46 个施工阶段,145 个单元,全面检算主塔在施工及运营期间的受力情况。

3.1 主要计算荷载

索塔及上部结构的静载、混凝土收缩徐变、活载、温度、风荷载、地震荷载、船舶撞击荷载、施工荷载等。

(1)上部结构恒载和活载通过主缆传至塔顶主索鞍的竖向力和水平力,以及通过支座传至下横梁的支反力,横梁的预加力,混凝土收缩徐变按 1 200 d 考虑。

(2)风力:设计风速为桥址区离地面 20 m 高度处百年一遇 10 min 平均最大风速 33.4 m/s,运营阶段与活载组合的风荷载,取桥面处可行车的设计风速 30 m/s,施工阶段的风荷载,取 10 年重现期 20 m 高度的设计风速 28.06 m/s。

(3)地震荷载:本桥地震基本烈度为 6 度,设计时按 7 度设防。

(4)温度荷载。

南塔:体系升温 20 ℃,体系降温 20 ℃;

北塔:体系升温 20 ℃,体系降温 10 ℃。

(5)施工过程中的施工荷载。

3.2 主要计算工况及荷载组合

(1)施工阶段。

裸塔:恒载+施工荷载+风载+温度。

(2)运营阶段。

①恒载+活载;

②恒载+活载+温度;

③恒载+活载+风载+温度;

④恒载+最大风载+温度;

⑤恒载+地震力。

3.3 主要计算结果及分析

(1)承载力计算。

根据计算分析,外荷载引起北主塔基础的单桩最大轴力 $N_{\max} = 54\ 816\ \text{kN}$,单桩地基允许承载力 $[N] = 67\ 725\ \text{kN}$,外荷载引起南主塔基础的单桩最大轴力 $N_{\max} = 30\ 320\ \text{kN}$,单桩地基允许承载力 $[N] = 31\ 797\ \text{kN}$,很显然,主塔基础的单桩承载力均能满足设计要求。

(2)塔柱内力计算。

阳逻大桥北边跨较短,仅 250 m,而南边跨较长,为 440 m,主桥的布跨特点决定了北塔柱的轴力较大,而南塔柱顺桥向的弯矩较大。另外,由于北塔在岸坡上,通航净空相对较低,使得下横梁至承台的距离较短。横桥向下横梁的抗压刚度与下塔柱抗推刚度比值较小,当恒载(预应力)、混凝土收缩徐变与温降相组合的时候,下塔柱将分担相当一部分下横梁产生的水平力。为改善下塔柱的受力情况,减小下塔柱的横桥向弯矩及剪力,设计采用控制下横梁在低温合拢的方式(下横梁施工时在横梁两侧各留出 1 m 的后浇段,合拢温度控制在 8 ℃)来降低温降对下塔柱产生的不利影响。

经过计算分析,施工阶段不控制塔柱设计。运营阶段塔柱最小压应力控制截面在塔根部,控制工况为:恒载+最大风载+温降,塔柱最大压应力控制截面在塔中部的塔柱斜率拐点处,控制工况为:恒载+活载+桥面风载+温升。按照顺桥向与横桥向可能同时出现的荷载情况进行角点的应力叠加,其计算结果如下。

北塔在附加组合情况下: $\sigma_{hmax}=18.8\text{ MPa}$, $\sigma_{hmin}=-0.36\text{ MPa}$;南塔在附加组合情况下: $\sigma_{hmax}=17.8\text{ MPa}$, $\sigma_{hmin}=-0.38\text{ MPa}$;钢剪刀撑的内力主要受横桥向最大风载控制,最大压应力为 122 MPa,最小压应力为 -86.6 MPa。按承载能力极限状态计算,根据计算求得的塔柱内力,塔柱各关键控制截面的尺寸及配筋均能满足规范要求。

4 主要设计施工特点

(1)用钢剪刀撑替代传统的混凝土中横梁,主塔造型新颖,富于现代感。

(2)混凝土主塔采用钢剪刀撑的结构形式,为国内首创;国外一些大跨径悬索桥的主塔有的采用钢剪刀撑的结构形式,但这些主塔均为钢塔,而像阳逻大桥主塔这样采用钢剪刀撑——混凝土塔柱相结合的方式,还没有成功运用的先例。

(3)下横梁采用设置后浇段在低温合拢的方式,解决下塔柱较短带来的下塔柱内力较大的问题。

(4)塔柱施工中成功地引进并使用德国先进的 DOKA 自动爬升模板系统。不仅加快了施工的进度,有利于提高混凝土浇注的内在质量,而且能确保混凝土外观质量达到国际一流水平。

(5)由于剪刀撑在上横梁施工完毕后才开始吊装,塔柱在施工过程中悬臂较长,难度较大。主塔施工采用相应的施工控制技术来确保主塔的线形。

(6)钢剪刀撑单件吊装重量为 120 t,其吊装高度之高,吊装重量之重,吊装难度之大,创造了国内桥梁施工之最。

(7)钢剪刀撑采用整体吊装。北塔钢剪刀撑吊装方案为在主塔靠岸侧的支架上立拼各节段,垂直起吊钢剪刀撑;南塔钢剪刀撑吊装方案为在主塔靠岸侧的平台上平拼各节段,平台上设有滑道,斜拉起吊钢剪刀撑。

5 结语

武汉阳逻长江公路大桥主塔设计经过全体设计人员的不懈努力,专家、同行的精心指导和帮助,建设、施工单位的全力配合,取得了一定的设计经验。大桥主塔于 2003 年 11 月开始施工,于 2005 年 6 月已经施工完毕,实现了设计预期目标。

Design of Main Tower of Yangluo Highway Bridge over Yangtze River in Wuhan City

ZHANG Ming

(Traffic Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: On the basis of the design and construction course of Yangluo Highway Bridge over Yangtze River in Wuhan City, the structure of main tower, calculation of force accepting and construction schemes are mainly introduced.

Key word: Yangluo Highway Bridge over Yangtze River in Wuhan City; design of main tower; steel scissors bracing; construction scheme