

文章编号: 0451-0712(2006)03-0045-06

中图分类号: U448.27

文献标识码: B

东海大桥Ⅶ标主桥斜拉桥主塔施工

杨国平, 闫 朔, 党权交

(路桥华东工程有限公司 上海市 200135)

摘 要: 东海大桥Ⅶ标主桥——颗珠山大桥为斜拉桥, 主塔为Ⅱ形钢筋混凝土结构, 采用塔吊配翻模施工, 文中对模板、劲性骨架、主塔施工进行了总结, 可供海上斜拉桥施工参考。

关键词: 东海大桥; 颗珠山大桥; 主塔; 塔吊; 翻模; 施工技术

1 东海大桥Ⅶ标主桥主塔设计概况

近年来, 斜拉桥的施工在我国发展迅速, 施工工艺日趋成熟, 设计与施工都已跨进了世界先进行列, 但海上斜拉桥的施工在我国并不多见。东海大桥作为我国第一座真正意义上的海上桥梁, 在我国桥梁史上具有划时代的意义。

东海大桥Ⅶ标为颗珠山大桥, 颗珠山大桥主桥为斜拉桥, 主塔为Ⅱ形钢筋混凝土结构, 塔柱在承台顶面以上塔高为 100.7 m。下、中塔柱外形有斜率变化, 塔根部尺寸横桥向宽为 5.5 m, 纵桥向宽为 8.5 m; 上塔柱为拉索锚固区, 外形不变, 横桥向宽 4.5 m, 纵桥向宽 6.0 m, 塔内设混凝土牛腿和锚固钢横梁; 塔壁厚为 0.6~1.2 m。左右幅塔柱设三道

横梁, 桥面以下设钢筋混凝土下横梁, 截面为薄壁箱形; 桥面以上设上横梁, 由 3 根 $\phi 1\ 800 \times 30$ 钢管构成。主桥主塔见图 1 所示。

2 垂直运输设备及布置方案的选择

塔吊和电梯是斜拉桥索塔施工垂直运输必不可少的设备, 每个主墩可选择的配置方案有: (1) 一台塔吊一部电梯方案, 布置在两塔之间或是依附于塔柱; (2) 一台塔吊两部电梯方案, 塔吊布置在两塔之间或是依附于塔柱, 两部电梯分别依附于左右幅塔柱; (3) 两台塔吊两部电梯方案, 塔吊和电梯分别依附于左右幅塔柱。

由于每个主墩的Ⅱ形主塔的两个塔柱间距为

收稿日期: 2006-01-18

参考文献:

[1] JTJ214-98, 港口工程荷载规范[S].

[2] JTJ213-98, 海港水文规范[S].

[3] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 高级分析指南[M]. 1998.

[4] JTJ267-98, 港口工程混凝土设计规范[S].

[5] GBJ146-90, 粉煤灰混凝土应用技术规范[S].

[6] 杭州湾大桥工程指挥部. 杭州湾跨海大桥专用施工技术规范[S]. 2005.

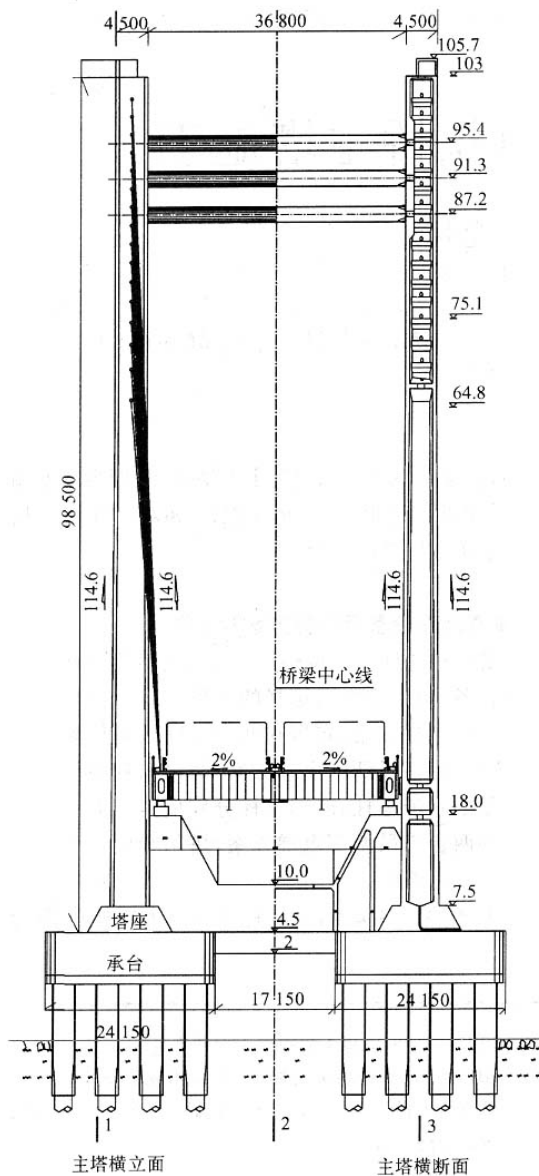
Cast-in-situ Construction of High-rise Pier Body for IV Contract Section of Hangzhou Gulf Crossing Project

HUANG Zeng-cai, WU Jian, DING Ya-jun

(Road & Bridge Southern China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528403, China)

Abstract: Some crucial techniques and technology innovation about cast-in-situ formwork, steel reinforcement and concrete for high-rise pier body are presented on the basis of cast-in-situ work in maritime space of high-rise pier body in IV Contract Section of Hangzhou Gulf Crossing Project.

Key words: maritime bridge; high-rise pier; construction; crucial techniques; technology innovation



单位:mm

图1 主桥主塔

45.8 m,在101.2 m 塔高范围内只有3道横梁连接,基本上是相互独立的,所以为解决施工人员的上下问题,施工过程中必须设置两部电梯。

而如果只在两塔之间设一台塔吊,那么塔吊附墙方案很难解决,而且由于上横梁为钢管结构,主墩的承台成哑铃形布置,左右幅承台中间为系梁连接,穿过或让开上横梁和立足系梁的方案都不好解决,所以此方案不可行。如果塔吊布置在单幅塔柱的一

侧,由于单幅塔柱施工过程中,最大吊重在 7 t 左右,要满足两个塔柱施工的需要,该塔吊必须达到起重半径为 50 m 时起重重量在 7 t 以上的性能,也就是说该塔吊起吊能力必须在 350 t·m 以上,显然很不经济。

因此,我们选择第三种方案。由两台塔吊和两部电梯分别依附左右幅塔柱,并服务于各自的塔柱。根据已有设备,综合施工条件,我们选用了起吊能力为 $150\text{ t} \cdot \text{m}$ 的塔吊和单笼施工电梯作为垂直运输设备。

考虑到本海域的气候特征,最大风力有可能达到12级以上,因此要增强塔吊附墙体系的侧向抗风稳定性。为此我们改变了传统上一个节点只用一根压杆的方式,在内侧的节点上增加了一根拉杆,还在节点之间设铰接点,以释放变形产生的应力,缩小塔吊附墙间距,限制塔吊工作自由悬高,以满足塔吊抗风的需要。

3 模板施工方案的选择

本桥H形主塔的塔柱斜率较小,塔柱结构上下变化不大。塔柱的外形尺寸只在下、中塔柱范围内按照一定的倾斜度(横向斜度1:114.6,纵向1:45.84)逐渐变化,上塔柱外形不变。因此,适合采用爬模法施工。重点比较了液压爬升法和塔吊提升法。

液压爬升法的优点有:

- (1)可以有效地解决高空模板安装就位难题,提高高空作业的安全性;
- (2)摒弃了其他方法中模板施工的拆装繁琐工艺,大大简化了工序,从而可以加快施工进度;
- (3)可以利用爬模自身携带的小型液压油缸作为爬架、模板提升的自身动力,可实现整套爬模同步爬升,抗风性能好、安全,并能大大缓解垂直运输的压力。

塔吊提升法的优点是,可充分利用现有起重设备,并且施工方便、灵活。

针对本桥主塔不是很高,爬模施工只分 21 节,中间又因为需调整模板宽度,特别是上塔柱,因为有混凝土牛腿需每节改动内模系统,液压爬升法显得不是很适用,而且也不太经济。而塔吊提升法的方便和灵活可以得到充分发挥。主塔每节爬模的拆装一般只需 20 h 左右,可以选择在风力不大时进行,塔吊的起重能力也满足模板分块提升的需要。所以,最后选择了塔吊提升法施工。

爬模系统由模板及爬架两部分组成。爬架通过

锥形螺母与已浇塔柱连接固定,包括2个上部平台,1个主工作平台和1个下部清理、修复平台。同层平台间连成一条贯穿的通道,上下层平台间采用固定

扶梯相连。内、外模板系统由竹胶面板、木工字梁、钢围檩组成,其中外模分8块,内模分9块。爬模系统结构见图2所示。

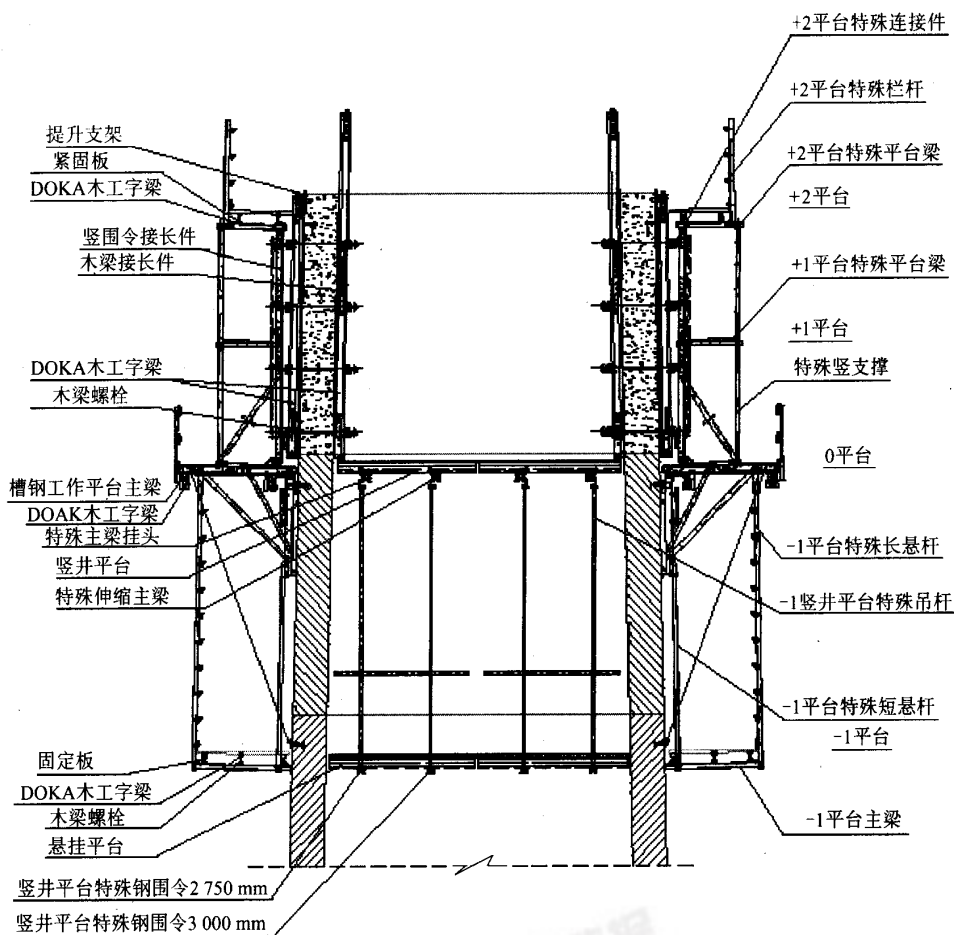


图2 爬模系统结构

模板的竖向倾斜度变化通过专门加工的造型木调节,截面尺寸通过可调宽度模板调整,钢围檩上根据横断面在浇注高度上改变的尺寸设置孔道,用以调整模板的横断面尺寸。内模通过对拉螺栓与外模固定,模板高度设计为5.5 m,每次浇注高度最高为5.0 m。

该系统爬升预埋件用锥形套筒取代了常规的直套筒,用直径为16 mm的精轧螺纹钢加PVC套管取代了以前常用的对拉拉杆。用完后容易取出,不易形成腐蚀通道,满足海上施工对质量的要求,而且能反复利用,节约成本。

4 劲性骨架的应用

为了使钢筋、模板及斜拉索管的空间位置定位

稳定方便、准确可靠,在上塔柱和中塔柱中设置了劲性骨架。

劲性骨架的杆件采用L10角钢和[8槽钢组成。一般情况下,劲性骨架可采取分片加工、现场组拼的办法。但在海上施工时,采取分片组拼有以下缺点:(1)分片劲性骨架在海上风力作用下,空间位置很难准确定位;(2)分片组拼现场安装时间较长;(3)海上风力较大,又是高空作业,分片组拼时作业人员的安全较难保证。

因此,劲性骨架采取分节整体加工、整体吊装的方法,分节高度同塔柱施工节段一致。只要在工厂预制时控制好骨架的外形尺寸,每个节段的劲性骨架现场安装时间一般只需1~2 h。

在上塔柱施工时,需预埋斜拉索管。索管可在加工厂直接初安装在劲性骨架上,周围设置微调螺栓,在劲性骨架定位焊接好后,再利用微调螺栓对索管进行精确定位。通过施工证明,利用劲性骨架经过初装和精调两次控制定位安装索管,可以简化索管安装工序,减少索管定位时间,确保索管位置准确。

劲性骨架对钢筋和模板具有定位、调整作用,对控制主塔的线形非常有利,对海上施工安全可起到保证作用。

5 主塔施工

5.1 主塔施工工艺流程

主塔施工工艺流程见图 3 所示。

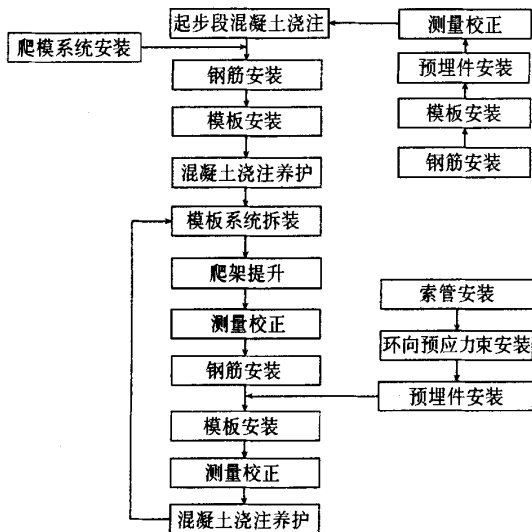


图 3 塔柱施工工艺流程

5.2 塔柱混凝土的施工

海上拌和船是海上混凝土施工必不可少的生产设备。但在承台施工完成之后,塔柱施工中每次混凝土的方量都不大,施工周期又短,使用海上拌和船生产,来回拖船很不经济,还受海上风浪的制约。因此,我们结合前期的钻孔施工,在主墩处设置了一个 $18\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的墩侧加宽水上施工平台,在平台上设置了混凝土搅拌站以及施工人员生活区。

泵送混凝土施工是决定塔柱施工成败的关键。根据塔高和施工需要,我们选择了混凝土输出压力为 15.7 MPa ,最高垂直输送高度可达 250 m ,输送能力为 $43\text{ m}^3/\text{h}$ 的混凝土输送泵。输送泵管沿塔吊塔身布置。泵送混凝土采用高性能海工混凝土,坍落度要求为 $18\sim 22\text{ cm}$,坍落度损失约为 2 cm 。

塔柱混凝土施工要点如下。

(1) 钢筋加工及安装:塔柱钢筋在加工场内下料,钢筋下料长度约为 5 m ,并按规范要求设置钢筋错头。竖向主筋对接采用直螺纹钢套筒连接工艺,在竖向主筋上每 $1.5\sim 2\text{ m}$ 安设钢筋定位框,塔柱钢筋依靠定位框与模板顶部定位。施工时严格控制塔柱钢筋的内、外侧净保护层。

(2) 内、外模板安拆:外模、内模均利用塔吊提升安装,在内外模之间设置内支撑及对拉螺杆紧固模板。利用爬架上的可调撑杆脱模。

(3) 模板测调:塔柱钢筋安装完成后,先利用爬架上的可调撑杆粗调模板,然后采用全站仪极坐标法准确测量模板定位控制角点,根据测量结果调整撑杆使模板准确就位。

(4) 浇注混凝土:塔柱采用泵送混凝土入模,分层布料(布料层厚度 30 cm),插入式振捣器振捣混凝土。

(5) 混凝土养护:塔柱外表面采用喷洒养护剂的办法进行养护,顶部接缝处采用淡水养护。

海上桥梁,对钢筋混凝土的防腐蚀要求很高。所以严禁钢材外露,严禁在混凝土外表面预埋钢结构件,避免形成腐蚀通道。对钢筋的净保护层厚度要求也较高,外侧面厚度一般要求至少 7.5 cm ,内侧面一般要求至少 4 cm 。钢筋保护层垫块一般要求采用高强塑料制品。

5.3 上塔柱施工

上塔柱为拉索锚固区,塔壁内需预埋斜拉索索管,塔内设有混凝土牛腿和锚固钢横梁。并且在 1 号索锚固区和上横梁支撑区布置有预应力索,塔壁厚度还有变化,所以施工较为复杂,也是塔柱施工的关键部位。

5.3.1 斜拉索索管安装施工要点

斜拉索索管安装是主塔施工的关键工序,索管的安装精度直接影响到斜拉索的施工质量。

(1) 斜拉索索管为无缝钢管,其长度根据斜拉索仰角和水平偏角及塔壁厚度计算确定;

(2) 斜拉索索管的安装必须选择阴天或温差相对稳定的低温段进行精确定位;

(3) 索管利用相对坐标在加工厂的劲性骨架上进行初定位安装;

(4) 索管随劲性骨架一起安装,施工测量主要控制劲性骨架的平面位置、倾斜度、标高,同时复核索管的三维位置;

(5) 索管的精确定位安装:采用全站仪极坐标法

测定索管上、下口的三维位置,采用逼近法使索管上、下口在三维空间中逐步靠近设计部位,利用微调螺栓调节,反复测量校核,至误差在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内时,焊接固定。

5.3.2 混凝土牛腿施工要点

牛腿是塔柱的重要受力部位,由于牛腿这种突出构造物的影响,牛腿标高又随斜拉索锚固端的空间位置变化且形状也不规则,所以上塔柱的内模系统需每次改制,每次的浇注高度也要根据情况划分。为缩短施工周期,我们采用提前将每个牛腿处的异形模板整体加工好,现场的改制量就可大大减少。

牛腿处钢筋布置较密,弯起钢筋多,钢筋又多为大直径钢筋,所以施工时应注意细分层、密摊铺、加强振捣,以保证混凝土密实,避免出现蜂窝。

牛腿施工时应预留螺栓预留孔,牛腿顶面设有高标号砂浆调平层,调平层表面平整度要求控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内。调平层达到强度后,按设计位置埋设螺栓,并在预留孔内填注环氧砂浆,安装承重钢板,拧紧螺栓。然后安装锚固钢横梁。

5.3.3 锚固钢横梁的施工

锚固钢横梁是斜拉索主要受力及传力构件,主要承受拉索水平分力,并将拉索的竖向分力传递到主塔牛腿上。

由于主塔塔柱空心断面有限,混凝土牛腿还占据一定的空间;塔柱施工时上面是爬模的内模系统,下面在下、中塔柱还有几道横隔板,锚固钢横梁不好吊装进入塔柱;还存在上下交叉施工的安全风险;所以我们的总体施工思路是:

(1)塔柱施工结束后暂不封顶,先拆除内模系统,安装锚固钢横梁;

(2)锚固钢横梁采用塔吊提升,从塔顶进入塔柱,用葫芦及千斤顶配合精确调整钢横梁定位,安装顺序由下至上;

(3)每根锚固钢横梁分成两节安装,节段间以高强螺栓连接;

(4)锚固钢横梁委托加工厂加工制作,并按照设计要求进行防腐处理,在工厂必须对每根梁进行预拼装,验收合格后方可出厂;

(5)锚固钢横梁在塔柱上的横向支撑在现场组拼焊接。

还应注意,在上塔柱混凝土施工时,应按设计位置预埋锚固钢横梁纵向及横向支撑预埋件。锚固钢横梁吊装时,吊点布置应对称,保证锚固钢横梁水平

下放。为不损坏锚固钢横梁,吊装时采用软吊带。吊装时禁止发生碰撞,以免锚固钢横梁发生变形和损坏防锈涂层。

5.4 塔柱节段施工周期

主塔施工平均每节浇注高度为 4.5 m ,一节的周期平均有效作业时间为 $4\sim 5\text{ d}$,在海上施工时,实际天数约 $6\sim 7\text{ d}$ 。

5.5 上横梁的安装

主塔上横梁由3根 $\phi 1\ 800\times 30$ 钢管横撑组成,是主塔主要受力构件,主要承受拉索产生的水平压力。上横梁每根自重约 50 t ,由设置在塔柱顶部的提升架起吊安装。

塔顶提升架在完成3根钢横撑的起吊安装之后,可作为斜拉索挂索安装的辅助设施。提升架由桁架与卷扬机组成,桁架由 $L\ 100\times 6$ 与 $L\ 75\times 6$ 角钢焊接而成,通过桁片与预埋件焊接固定于塔顶。提升架顺桥向及横桥向靠塔内侧设悬臂,以利于上横梁提升吊装。提升系统采用每塔顶2台 10 t 卷扬机、4轮滑车绕两轮4线。在两侧悬臂部分布置2台 5 t 卷扬机,负责钢横梁的横移。

钢横撑由驳船运输至施工现场,用 100 t 浮吊吊至桥面存放。钢横撑存放在桥面时底部设滑移装置,以滑移至塔柱根部起吊位置。从桥面至安装位置最大提升高度约为 72 m ,卷扬机的容绳量至少应保证 350 m 。 10 t 卷扬机的最大绳速为 9.8 m/min ,滑车组共4线,起吊速度为 2.45 m/min ,钢横撑吊至安装位置耗时约为 30 min 。

由于两主塔间距上宽下窄,钢横撑无法整根从塔柱根部垂直提升,而且在安装钢横撑前,左右主塔的自由度都较大,是一个细长杆件,随气温、日照、风荷载的影响产生差异变形,所以整根安装存在困难。因此,每根钢横撑分成3节安装,在靠塔柱处设 $1\sim 1.5\text{ m}$ 的斜短节,两个短节与中间长节间留 $1.5\sim 2\text{ cm}$ 的间隙进行焊接,对接焊缝处设内外套管。短节用塔吊起吊安装。钢横撑的准确长度由监控单位和设计单位提供。

主塔钢横撑安装施工注意事项:

(1)上塔柱施工时应按设计位置预埋钢横撑预埋钢板,预埋钢板位置的测量放样及预埋要精确;

(2)为掌握准确的吊装时间和吊装温度,需要对主塔变形规律进行 $3\sim 5\text{ d}$ 的观测,以选择在塔柱变形稳定的时段进行安装;

(3)提升架的加工制作要保证焊缝质量,在拼接

安装时对节点的焊缝质量更应该严格把关;

(4)在安装钢横撑端头短节钢管时,必须对预埋板上的对接点位置进行复测,若发生了偏移应该重新布置;

(5)吊装过程中4台卷扬机要保持同步,以防横撑钢管发生大的倾斜;

(6)长、短节横撑钢管之间的熔缝是主要受力部位,而且厚度较深,并需要仰焊和竖焊,焊缝质量不好控制,应该特别注意,要保证焊透,焊缝要平滑,不能有焊瘤;

(7)内衬管作为横撑连接处的加强构件,也应该保证焊缝质量;

(8)施工过程中若要搭设爬梯,与钢横撑的接触面均应垫橡胶垫以免破坏横撑表面的防腐涂层。

5.6 主塔的质量控制

我们对主塔施工的质量高度重视,在施工中也采取了切实可行的办法,确保主塔的内在和外观质量。

(1)控制原材料的差异性,加强混凝土生产过程的检查控制,减少混凝土的色泽差异。

(2)模板使用前将表面杂物清除干净,均匀涂抹脱模剂;模板接缝用玻璃胶密封,防止漏浆。模板的拼缝误差和接缝高差控制在 ± 2 mm。

(3)钢筋保护层垫块采用圆形高强塑料成品垫块,钢筋保护层控制误差为 ± 5 mm。

(4)塔身施工放样采用天顶法和三维坐标法两种方法相互校核,观测时实行两人复核制度,确保塔身放样准确。

(5)塔柱倾斜率控制不大于 $H/2\ 500$,且不大于

30 mm;轴线允许偏位为 ± 10 mm;断面尺寸允许偏差为 ± 20 mm;塔顶高程允许偏差为 ± 10 mm。

(6)分节浇注时,节段之间不得有错台,新旧混凝土接缝表面应凿毛,以保证新旧混凝土结合良好。

(7)塔身混凝土拆除模板后,喷洒养护剂养护,养护剂喷洒应均匀,并在混凝土表面用土工布围护,作为防风保温措施。

(8)确保索管及锚固钢横梁位置的准确,保证锚垫板与索管孔道垂直,符合设计要求。

(9)确保全部预应力束布置准确,轴线偏位不大于10 mm,张拉要求双控,以伸长量为主,伸长量误差控制在 $-5\%\sim+10\%$ 以内,同一截面的断丝数量不得大于1%。

(10)外观要求:混凝土表面平整、线形顺直;混凝土蜂窝麻面不得超过该面面积的0.5%,深度不得超过10 mm;斜拉索锚固区不得有蜂窝。

6 结语

在主塔施工中,重点是要保证模板系统在风力作用下的稳定,所以劲性骨架的应用和模板系统的选择尤其重要。对于裸塔在施工期间出于抵抗台风和季节性强风的需要,在塔柱之间还应采用临时抗风支撑。

在桥梁的施工过程中,我们不断摸索,吸取教训,总结经验,使海上施工工艺日益成熟。由于海上施工条件复杂,人员和机械配置还有待进一步完善,施工工艺流程也有待进一步优化。

Main Pylon Construction of Cable-stayed Bridge in VII Contract Section for Donghai Sea Crossing Project

YANG Guo-ping, YAN Shuo, DANG Quan-jiao

(Road & Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Kezhushan Bridge, the main structure of the VII Contract Section of Donghai Sea Crossing Project, is a cable-stayed structure whose main pylon is a Π -shaped reinforcement concrete structure and is built by pumping concrete into the somersaulting formwork. The formwork, stiff frame work, and building of the main pylon are summarized as reference to other maritime cable-stayed structure construction.

Key words: Donghai Sea Crossing Project; Kezhushan Bridge; main pylon; tower crane; somersaulting formwork; construction techniques