

# 海河大桥下塔柱平衡架施工工艺

闫学成,董景强,张伟

(天津第三市政公路工程有限公司,天津市 300074)

**摘要:**该文介绍了海河大桥下塔柱施工的总体思路、施工工艺、施工难点及解决办法。

**关键词:**下塔柱;外倾角度;平衡架;水平拉杆;模板系统;预应力钢绞线

**中图分类号:**U443.38 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0122-04

## 1 下塔柱概况及施工工艺

海河大桥主桥为双塔双索面斜拉桥,主塔塔高为 140.12 m,其包括下塔柱、中塔柱、上塔柱。下塔柱呈“V”型,全高 31.62 m,至下横梁顶。塔肢两个方向:横桥向、纵桥向均为变截面,其中横桥向外侧斜度为 1:3.180,内侧为 1:2.602;纵桥向为 1:96.62。其根部断面尺寸为 6.29 m × 7.94 m,顶部尺寸为 4.50 m × 7.076 m,两塔肢满外最大距离为 43 m,每个塔上端 11 m 高、下端 5 m 高为实心体,中间 15.62 m 高部分为空心体(图 1 所示)。塔柱混凝土强度等级为 C50。下横梁为长 43.0 m,高 6.0 m,宽 6.0 m 的预应力混凝土箱梁,两端各 8.0 m 为实心段,中间 27.0 m 为空心段,壁厚 80 cm,共布置 64 束 19 孔,21 孔预应力,两个单肢塔柱与下横梁共同组成一个封闭的框架结构。

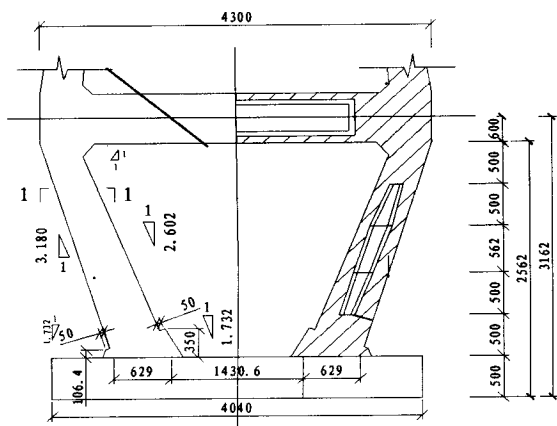


图 1 下塔柱立面图

每个肢体内部设 8 组劲性骨架(图 2 所示)。骨架 1、2、3 各两组,骨架 4 各一组,每组骨架断面尺寸为 400 mm × 400 mm,主肋为 L100 × 100 × 10 角钢,连接杆件为 L40 × 40 × 5 角钢,单组骨架刚度为 30 816 cm<sup>4</sup>,所有角钢材质均为 II 级

钢。

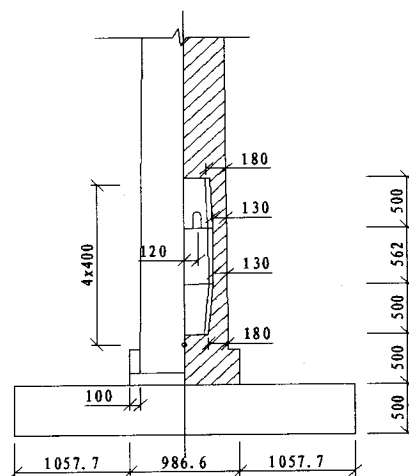


图 2 下塔柱侧面图

下塔柱高度在 32 m 左右时,三面位于承台范围内,一面位于地面上,所以采用在每个塔肢四周搭设满堂红脚手架、利用手拉葫芦结合塔吊进行翻模施工的工艺。翻模施工工艺原理是:3 块 2.25 m 的模板交替使用,以最底块模板为基准模(此块模板与已浇筑混凝土采用 H 型螺母附墙固定,模板上口与混凝土表面齐平),在此块基准模板上支设两块模板,绑筋浇筑混凝土,然后最上块模板不动,拆除下面两块模板倒放到上面,形成周转,依此类推,进行施工。考虑到脚手架要支撑在承台和陆地上,为避免陆地部分在施工荷载作用下基础下沉,对该处的地面进行混凝土固化,并加设部分钢筋对混凝土进行加强。

因下塔柱为外倾斜腿形状,要求下塔柱在每施工 4.5 m 时就需要设置若干道拉杆,并对抗拉措施进行验算。安装拉杆顺序为:浇注块件并养护、绑扎钢筋、拆模倒模、焊接拉杆并浇注下一段塔柱混凝土,在施工过程中减少由附加荷载引起的对根部附加应力。

## 2 注意解决的问题

在普通的斜拉桥施工过程中下塔柱塔肢通常采用搭设满堂红脚手架进行翻模施工的方法。并

收稿日期:2006-05-29

作者简介:闫学成(1962-),男,天津人,高级工程师,从事道路、桥梁施工工作。

将满堂红脚手架作为承载平台,此方法操作简便,施工速度快,通常应用于斜度不大、高度不高的塔柱施工,但海河大桥塔柱斜度大(1:3.180),高度大(31.62 m),如完全照搬此工艺进行施工会存在以下问题:

(1)下塔肢倾角大,高度高。

下塔肢底口宽 26.88 m, 外倾角为 1:3.180, 当下塔肢高度上升至 25.62 m 时, 上口扩宽至 43.0 m, 在施工过程中, 倾覆力大。

(2)模板加固困难。

塔柱模板加固形式通常为: 下口与已浇筑完段混凝土固定, 上口与劲性骨架固定。在大斜率悬臂状态下浇筑混凝土时, 混凝土的侧压力由模板承担, 由于劲性骨架为悬臂状态且单根骨架刚度有限, 在大斜率自由悬臂状态下会产生较大的变形, 需要在模板(骨架)上口设立支点, 以变悬臂为简支, 即在塔柱外侧设置刚度足够大的斜撑顶住模板上口, 在塔柱另一侧设刚度足够大的拉杆拉住模板上口, 以保证模板系统在混凝土浇筑过程中不变形。但随着塔柱高度的增加, 在外侧设置斜顶撑不仅不经济, 施工周期长, 同时也不安全。

(3)下横梁跨度大。

下横梁长 43.0 m, 宽 6.0 m, 高 6.0 m, 混凝土总方量约 800 m<sup>3</sup>, 对于一次性浇筑难度较大, 由于下塔肢底口宽度较小, 无处立钢支撑, 对于一次性浇筑如此大体积混凝土, 要求支架变形小, 更不能引起下横梁混凝土开裂, 难度较大。

(4)设计、规范要求高。

规范要求斜拉桥塔柱在施工过程中, 采用“0 应力法施工”, 即下塔柱在施工过程中塔肢根部不能产生拉应力和压应力, 更不能开裂, 下塔柱在通车使用阶段不能有应力产生, 根脚底部的应力为“0”。

### 3 平衡架支撑模板施工工艺

两个下塔柱顶端由下横梁连接成整体, 形成一封闭的框架, 下横梁为预应力现浇箱梁。由于跨度大, 自重大, 距承台表面高度达 32 m, 所以下横梁的现浇施工需在两个塔柱之间搭设高度为 23 m 的钢支撑系统, 此钢支撑系统由 13 组立柱组成, 其中 9 组采用单组立柱由 4 根 600 mm × 600 mm 格构式钢支撑组成及 8 根直径 600 mm 的钢管支撑, 每组立柱承载力为 600 t, 每根钢支撑采用法兰连接, 根、组钢支撑之间用钢板和 20# 槽钢连成整体, 下端与承台上的扩大基础的预埋钢板焊成固定端, 经计算, 其整体刚度巨大。

塔柱模板与劲性骨架固定后, 下端虽与已浇筑混凝土段固定形成固定端, 但上部仍为 4.5 m 悬臂端, 再加上倾斜角度大, 在混凝土的侧压力和其它施工荷载作用下, 模板(劲性骨架)系统的刚度和强度不能满足要求, 所以必须在单肢内外两侧模板(劲性骨架)上口各设 4 根 10# 槽钢与下横梁钢支撑系统焊牢, 左右塔柱对称连接, 通过钢支撑系统平衡水平侧压力, 形成整体平衡架, 使 4.5 m 模板系统由一端固定一端悬臂改为一端固定一端简支, 极大地改善了受力形式。

由于高度与下塔柱差不多, 所以下塔柱模板(劲性骨架)加固系统可与下横梁钢支撑体系连接起来, 两个塔柱模板加固系统对称与钢支撑架连接, 此钢支撑架起到平衡架的作用, 它平衡两个塔柱混凝土浇注时的侧压力。

### 4 水平拉杆的设置

为了减少水平分力的影响, 设置拉杆的方法通常采用拉杆, 既然为拉杆, 基本上不存在拉杆稳定的问题, 所以在以往斜拉桥施工经验的基础上, 采用预应力钢绞线作为拉杆, 即利用悬臂翻模施工浇筑至一定高度加设一道主动拉杆, 克服悬臂状态下的附加应力, 再继续悬臂浇筑一定高度加第二道拉杆, 如此类推完成下塔柱的施工, 下横梁完成后拆除所有拉杆。

### 5 主动拉杆位置确定的原则

由于下塔柱根部混凝土截面应力控制是整个下塔柱施工方案设计中的控制关键, 确定拉杆位置是根据下塔柱根部在悬臂浇筑过程中自重及施工荷载作用下不产生裂缝(还应留有足够的安全储备)的最大悬臂高度扣除一定高度(主要考虑模板附墙高度)。

经过计算, 仅在混凝土自重作用下, 在 14 m 高斜悬臂的情况下, 其根部混凝土拉应力即达到 1.8 MPa, 濒临开裂, 所以在此之前必须设置拉杆。

(1)第一道拉杆位置

C50 混凝土极限拉应力为 1.95 MPa, 考虑到此时混凝土龄期为 20 d, 它的实际抗拉强度达不到 1.95 MPa, 再考虑足够的安全储备, 所以浇筑第四步混凝土前应安装第一道拉杆并施加拉力, 第一道拉杆位置距塔柱根部 7.5 m, 位于第二步混凝土段(第四步混凝土施工时第三步混凝土部分模板还不能拆除)。

(2)其它拉杆位置

安装好第一道拉杆后, 其上部新浇筑塔柱的

自重对第一道拉杆位置混凝土截面的影响明显,而对下塔拉根部截面应力影响就很小,因此确定第二道拉杆位置的方法为对第一道拉杆位置的塔柱混凝土表面进行应力控制以确定第二道拉杆的位置,依次类推,确定其它拉杆的位置,直至下塔柱(含下横梁)浇筑完毕。

根据这一原则,共需布置三道拉杆,第二道拉杆位置在 15.5 m(第四步混凝土段),第三道拉杆位置在 22.5 m(第六步混凝土段)(图 3 所示)。

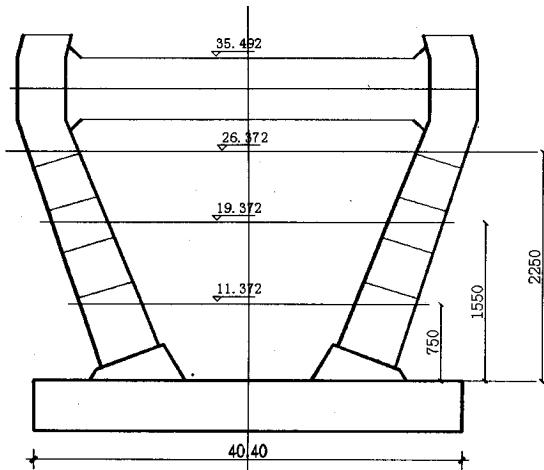


图3 下塔柱主动拉杆位置图

## 6 拉杆主动力施加的原则

拉杆位置确定后,主动施力的大小成为控制施工过程的关键。力小达不到预期效果,力大过犹不及,甚至会影响塔柱的整体线形。对此我们对变形和内力进行双控,在满足下塔柱各截面内力的同时确保线形。我们以设计单位提供的理想状态下成塔(在施工过程中不产生任何施工附加应力)的内力为参照,保证塔柱完成后下塔柱内力与其尽可能接近。

为了能更有效地控制塔柱的稳定、变形及消除根部混凝土的附加应力,根据工艺要求,每道拉杆的张拉根据各段塔柱混凝土的施工情况分级施加上去,即每一段混凝土施工时相应施加该部分拉力,直至下一道拉杆安装前将全部拉力施加完毕。

为便于操作,拉杆采用预应力钢绞线,第一道拉杆由两组9孔钢绞线组成,第二、三道拉杆各由4组9孔钢绞线组成,单肢塔柱的每道拉杆张拉必须对称进行。

考虑到下塔柱施工周期长(约50d左右)及风吹日晒雨淋的影响,为避免拉杆钢绞线滑丝,其张拉控制应力为 $0.4 R_y$ 。

三道拉杆具体张拉情况为:

第一道拉杆:总张拉力 300 t,共分两次张拉,浇注第三步混凝土时张拉 130 t,浇注第四步混凝土时张拉到 300 t;

第二道拉杆:总张拉力 400 t,共分两次张拉,浇注第五步混凝土时张拉 260 t,浇注第六步混凝土时张拉到 400 t;

第三道拉杆:总张拉力 480 t,共分四次张拉,第七、八步混凝土浇注前,张拉 120 t,第七、八步混凝土浇注 1/4 时,张拉到 240 t,第七、八步混凝土浇注 2/4 时,张拉到 360 t,第七、八步混凝土浇注 3/4 时,张拉到 480 t。应说明,第七、八步混凝土与下横梁一次浇注完成。

## 7 混凝土节段的划分

混凝土浇筑时的侧压力由劲性骨架和模板承担,所以每段混凝土的浇筑高度要适当,太高则压力大,引起模板变形大,要求劲性骨架和模板刚度大,需投入较多的模板,不经济;高度太低,则分段多,又影响工期。考虑到模板设计、周转次数、模板加固措施和全国其它斜拉桥塔柱混凝土的施工,每段混凝土划分高度为 4.5m(图 4 所示)。

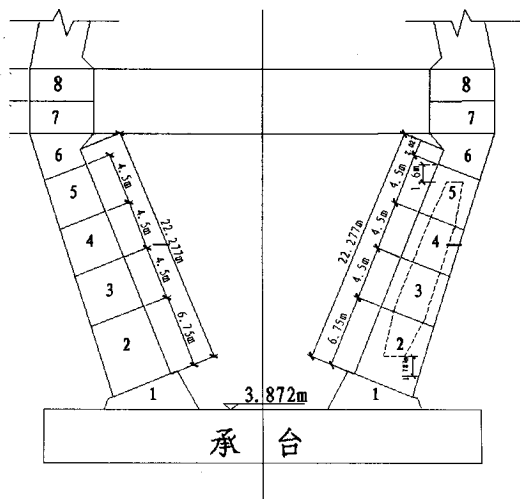


图4 下塔柱混凝土浇筑分段图

为加速施工进度,混凝土应具有缓凝、早强、高强特点,1 d 强度应达到 20 MPa,塌落度控制在  $140 \pm 20$  mm,考虑到输送泵管直径尺寸为 125 mm,粗骨料粒径不应大于 25 mm。每节段混凝土浇筑量约为  $100 \text{ m}^3$ ,在全部混凝土浇筑完成前混凝土不应初凝。为减少水泥用量,改善混凝土可泵性能,混凝土中掺加了 15% 的超细矿粉。

## 8 模板系统应用

下塔柱施工采用翻模施工工艺,根据下塔柱的截面形式,设计两套收分模板,塔柱正面内外侧



倾斜度不一样,所以设计为单面收分模板,模板划分与外边线垂直,这样倾斜角度小些,便于混凝土的浇筑;塔柱纵向侧面两边线倾斜度相同,所以设计为双面收分模板。每块模板高度为 2.25 m,模板除保证强度、刚度外,还要便于安装拆除,施工中不变形、不漏浆。模板固定在骨架上,内外模板用 H 型螺栓连接,经计算,螺栓横向间距 1.25 m,纵向 0.825 m,螺栓直径 25 mm。

为节约模板,下塔柱的模板可利用部分中、上塔柱模板,因中塔柱正面为等截面,四面垂直,所以为便于中、下塔柱外观统一,下塔柱每段模板支设原则为斜向留茬,与外边线垂直。

## 9 下横梁施工

由于下塔肢第七步、第八步混凝土随着下横梁同时浇注,造成混凝土方量较大,达到  $800\text{m}^3$ ,由于混凝土重力向下,对下塔肢根部混凝土产生一个向外的弯矩,对其产生拉应力,为尽量减少下横梁的混凝土重量直接传到下塔肢,在 9 组钢支撑的外侧增加 8 根 600 mm 的钢管,通过横向军用梁,形成支点,起到了很好的施工效果,外侧模板采用了较新的竹板。(见图 5 所示)

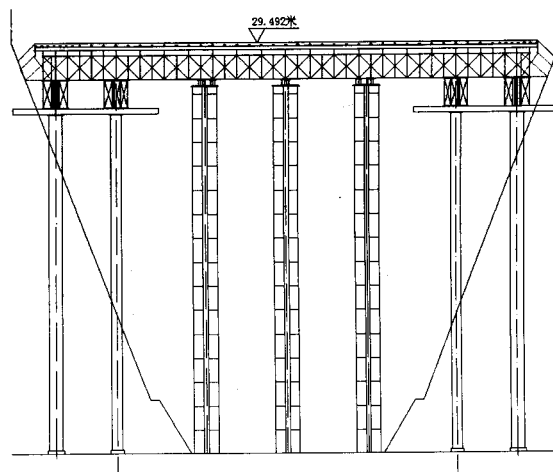


图 5 下横梁支撑体系示意图

## 10 施工效果

下塔肢施工过程中塔肢根部没有产生开裂现象及混凝土浇注过程中的倾覆现象,在最后的实测实量中,所有断面的坐标及混凝土外观均取得很好的施工效果,尤其对于“V”形外倾结构物的施工,如何有效抵抗混凝土及其它外加荷载对根部混凝土产生拉力,探索出了一套行之有效的施工手段,为以后的施工积累了丰富的手段。

(上接 121 页)取局部倒虹的方案进行处理。虽然局部倒虹容易淤塞,不利于用户排水。在综合各方利弊后,方案二体现总体技术合理,技术合理往往与经济原则是并行的。方案二采用局部倒虹加大了用户排水投资;但从全局看却是最经济的办法。

### 3.2 设计留有余量,突破规范时要有保护措施

市政管线会随着新增用户需求有不断扩容、延伸、增加接点的工程特点,每种管线都是一个不断发展的系统。管线综合设计对地下空间的使用应留有余量,做到布置紧凑,节约每一寸空间的使用。此外,在设计过程中,很难完全满足设计规范的要求。此时应采取相应技术措施做好管线的保护。大学城某校区 D300 生活污水管接入大市政污水干管。污水支管与路上 DN600 供水主干管垂直相遇。由于受污水主干管下游标高所限,综合后污水管在高压水管之下通过,外壁间距几乎为零。不能满足规范净距 50cm 的要求。使用一年后,供水主干管敷设的人行道发生沉降,供水主干管下移,把 UPVC 污水管压裂。设计过程中如果能注意

保护,事故是可以避免的。如局部加强交叉点周边范围管基的处理,把该段污水管换成钢管,通过相应工程措施降低事故发生机率。

## 4 结语

目前,我国设计体系中并无管线综合专业,管线综合设计工作的内涵与外延还在不断完善与发展中,管线综合施工图成果文件只是综合工作的一部分,更大量的工作发生在设计机构各专业的联系与协调过程中。随着社会分工的不断细化,大型工程不同专业内容有可能由不同的设计机构完成,此时管线综合工作的作用尤为重要,工程建设的需求对管线综合设计人员提出越来越高的要求。管线综合是一门综合性很强的学科,并无完善的理论体系指导具体设计。本文就大学城建设中的一些经验分析了管线综合与各专业之间的联系,希望能给正在进行管线综合设计与管理的工程技术人员带来一些启发。