

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.023

王家河特大桥高墩多跨矮塔斜拉桥施工关键技术研究

于 峥

(中铁建大桥工程局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:高墩多跨矮塔斜拉桥是一种组合结构体系,它具有力学性能优良、造价经济且兼具美学效果的优点,近年来在中国工程项目中得到了广泛应用。陕西合铜高速公路王家河特大桥为五塔六跨连续刚构预应力混凝土高墩多跨矮塔斜拉桥,采用塔墩梁固结刚构体系。该文详细介绍了王家河特大桥在异形渐变薄壁空心墩、大体量 $0^\#$ 块以及变截面索塔施工过程中所遇到的问题及其解决方案,可为相关工程的施工提供参考。

关键词:高墩多跨矮塔斜拉桥;塔墩梁;固结

随着桥梁技术的发展,对不同基本桥型相互组合成为组合桥梁体系,已经成为桥梁设计和施工的一个主要趋势。组合体系桥梁极大地丰富了桥梁造型。其中,高墩多跨矮塔斜拉桥是一种较为常用的组合结构体系,它具有力学性能优良、造价经济且兼具美学效果的优点,近年来在中国工程项目中得到了广泛应用。然而,由于高墩多跨矮塔斜拉桥设计一般较为复杂,造成了施工过程困难重重,需要解决的施工问题也较多。这就需要施工方开展施工技术公关,及时解决高墩多跨矮塔斜拉桥施工过程中的难题,确保施工过程的安全有序进行。该文以陕西省合(阳县)铜(川市)高速公路王家河特大桥的施工过程为背景,对其在异形渐变薄壁空心墩、大体量 $0^\#$ 块以及变截面索塔施工过程中

所遇到的施工问题及其解决方案进行介绍。

1 工程概况

王家河特大桥为合铜高速公路控制性工程,位于陕西省铜川市王益区王家河乡王家河新村北。王家河大桥起止里程为K150+440.456~K152+455.285,桥梁全长2015 m,桥面全宽29.5 m,左右线宽度均为13 m。全桥共有桩基319 m、承台37个、墩柱46个、盖梁32个、预制梁192片,主桥桥梁中心线处桥跨布置为(125+4×230+125) m,全长1170 m,采用五塔六跨预应力混凝土高墩多跨矮塔斜拉桥,塔墩梁固结刚构体系,大桥的主桥立面图如图1所示。

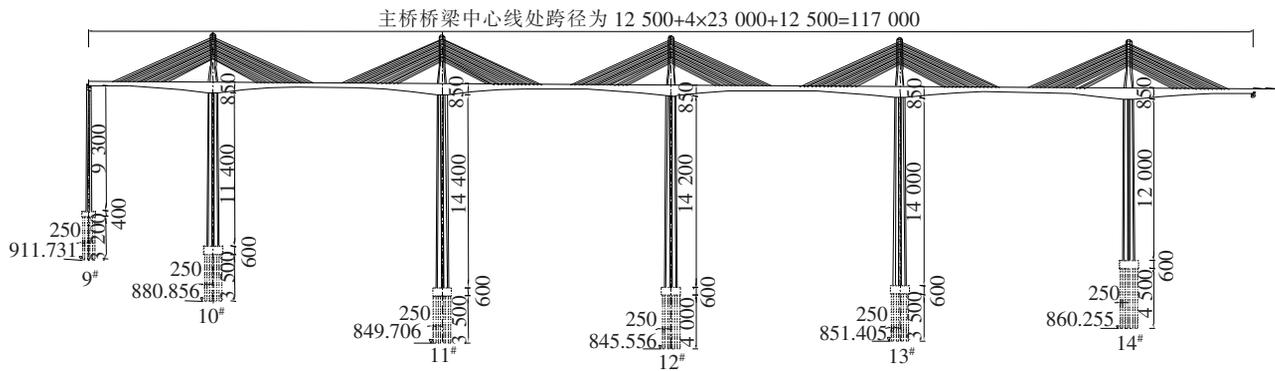


图1 王家河特大桥主桥立面图(单位:cm)

桥梁主墩采用双薄壁空心墩,整体成八边形,双肢间距为2 m,主墩墩高分别为114、144、142、140、120 m。单肢桥墩采用单箱双室变宽截面,横桥向墩顶宽

15.5 m,坡率为2:100,纵桥向墩顶宽4 m,坡率为1:100;双薄壁截面四周设置275 cm×150 cm大倒角,形成八边形形状。空心墩横桥向壁厚0.7 m,纵桥

收稿日期:2020-05-12

作者简介:于峥,男,高级工程师。

向壁厚为0.9 m,中间壁厚为0.6 m,墩顶、墩底均设2.0 m厚实心段,再分别设置5 m变厚段过渡。

主梁0[#]块为预应力混凝土结构,采用大悬臂变高度单箱三室斜腹板截面。箱梁顶板宽29.5 m,两侧悬臂板长4.5 m,悬臂板端部厚0.2 m,根部厚0.8 m,腹板斜率为1:2.998。桥面设2%的双向横坡,0[#]块梁高8.5 m。0[#]块中室、边室顶板厚度分别为93、65 cm;底板厚度为150 cm。0[#]块边腹板1.2 m厚,中腹板1.1 m厚。中室横隔梁由于塔墩梁传力需要,厚10 m,两边室设置4道厚0.9 m横隔板,斜拉索主梁锚固点横隔板中室厚0.5 m,边室厚0.3 m。

主塔与主梁为固结,桥面以上塔高36 m。塔柱采用实体截面,纵桥向塔柱桥面以上12 m范围为渐变段,宽度由6 m直线变化至9 m,斜率为1:8,上塔柱为等截面,宽度为6 m。横桥向尺寸为3.5 m。从美观上考虑,主塔4个角设置120 cm×40 cm倒角,横桥向设20 cm深凹槽。

2 工程施工过程中的重难点分析

王家河特大桥由于设计复杂,施工环境较为恶劣,施工条件较差,造成了施工过程中需要解决的问题较多,总结王家河特大桥施工过程中的重难点如下:

(1) 大桥结构总体布置极为复杂,高墩多塔多跨矮塔斜拉桥规模较大。

(2) 大桥合龙段施工难度大且为多跨合龙。

(3) 主墩为异形渐变空心薄壁高墩,与常规薄壁空心墩相比施工难度大。

(4) 桥梁位于平面圆曲线上,对于连续刚构以及斜拉索施工难度大。

(5) 梁部施工平均作业高度离地面130 m,从包茂高速公路、王家河村上方跨越,高空作业无论对施工人员还是下方人员都存在较大风险,并且人员及机械降效明显,安全生产为该项目施工重点。

3 施工技术

3.1 主墩爬模施工

主墩采用液压爬模施工,标准段每段施工高度6 m。主墩的爬模施工分为6个阶段:(A)浇筑混凝土;(B)模板后移,安装固定导轨的预埋件挂座;(C)通过液压装置提升导轨,拆除下部预埋件挂座;(D)通过液压装置提升架体,进行钢筋绑扎及板面裁切调整;(E)

合模,连接对拉螺杆及阳角斜拉杆;(F)浇筑混凝土,进入下一循环。原设计爬模采用每节段4.5 m高度进行施工,以11[#]主墩为例按此施工墩柱节段划分为2 m+5 m+28×4.5 m+4 m+5 m+2 m,共计33个节段。经方案优化调整为爬模每节段6 m高,同样以11[#]主墩为例按此施工墩柱节段划分为2 m+5 m+21×6 m+4 m+5 m+2 m,共计26个节段,可减少7个标准节段施工。按照每节段5 d共计节省工期35 d,爬模主要增加模板面板以及背楞,同时6 m钢筋安装需搭设劲性骨架,通过沟通同意将此部分劲性骨架工程量入图。

在主墩的爬模施工过程中,模板截面将随着主墩施工高度的增加而进行裁剪。模板面板根据需要缩小的尺寸在现场标识放样,直接利用切割机现场切除,切割时要确保线形平直。为确保面板裁切后拼缝平顺、棱角分明,拼缝需始终位于木工字梁竖肋范围内,模板后的竖肋需根据拼缝的变化适当调整,当拼缝裁切至相邻竖肋时,多余的竖肋直接撤出。随着截面的缩小,为避免横肋彼此间相互影响,需根据模板的裁切位置及尺寸相应对双I20钢横肋进行切除。

3.2 主墩墩柱封顶段及墩梁结合部施工

在变截面混凝土内预埋I20工字钢做实心段底模支撑,横桥向间距1.53 m布置4道,拆除墩柱内模并筒平台及模板,然后在I20工字钢上面铺设10 cm×10 cm方木,间距按20 cm布置,顶部满铺竹胶板作为底模。外模仍采用爬升作为墩顶实心段侧模板。

王家河特大桥主桥为墩梁固结设计,其中,0[#]块内设计有竖向预应力。为此,钢筋需提前预埋进墩身,伸入墩身长度10~11 m,总长度为15.98~19.73 m,共计104根。墩柱标准段高度为6 m,实心段高度为2 m,过渡段高度为5 m。混凝土分段位置不宜离精轧螺纹钢下部端头过远,控制在2 m以内,在精轧螺纹钢直接和混凝土接触部位,为了保证钢筋长度,在允许范围内可以适当降低本层混凝土浇筑标高。精轧螺纹钢底部悬空处用 $\phi 80$ mm的钢管固定,并与下锚垫板焊接,保证精轧螺纹钢在波纹管中心,防止精轧螺纹钢移动,钢管下部用钢筋做支撑,上部用定位钢筋固定在钢波纹管上,定位钢筋与主筋焊接,沿高度方向每1 m设置一处。压浆孔在钢波纹管底端,为方便后期压浆施工,使用PVC细管将压浆孔引至梁顶,待张拉结束后进行压浆。

3.3 主梁0[#]块施工

0[#]块采用托架法施工,箱内采用脚手架支撑。0[#]

块的腹板和翼缘板在横桥向伸出墩顶 7 m, 搭设牛腿支架作为侧模支撑和工作平台。三角支架的立柱、纵梁及斜撑均采用双 HM588 型钢, 纵梁一侧长 4.22 m, 另一侧长 9.72 m, 较长的一侧用于布置上人马道, 两端的纵梁通过 4 根 $\phi 32$ mm 精轧螺纹钢对拉, 每一榀三角支架在地面加工好之后整体吊至作业面进行固定。牛腿使用 20 mm 钢板焊接而成, 每一对牛腿通过 4 道精轧螺纹钢对拉。根据原设计要求, 主墩 0[#] 块及 1[#] 块均在托架上施工, 而 1[#] 块混凝土数量为 202 m³, 重量达 525 t, 因此托架承重极大。为了避免施工中可能存在的风险, 施工方将挂篮全部设置于 0[#] 块上, 1[#] 块调整为挂篮施工。这一方法大大降低了施工安全风险, 同时较大地节约了托架用量。

托架施工完成后进行预压, 采用贝雷梁作为反力梁的形式进行预压。首先采用预埋的地脚螺栓将反力梁底座的 H 型钢固定, 在反力梁所在位置对 H 型钢焊接肋板加强; 之后吊装单排双层贝雷梁作为反力梁, 在反力梁上方用 2 根 I36 工字钢(中间钻孔)与预埋的精轧螺纹钢连接对反力梁进行锚固, 在反力梁下方用 I36 工字钢并排焊接作为反力梁的分配梁, 最后在反力梁与托架之间利用千斤顶进行加载预压。

托架预压完成后安装底模、侧模, 之后进行钢筋及混凝土施工。墩梁固结段钢筋密布, 主墩伸入 0[#] 块的主筋分别与 0[#] 块钢筋有多处干扰。为避免这一问题, 施工方通过开展细致的图纸复核, 对配筋冲突处与设计方进行深入的沟通并进行相应调整。由于 0[#] 块高度为 8.5 m, 因此混凝土分为两次浇筑, 腹板第一次浇筑至 3.9 m 高度, 浇筑分界线位于横隔板人孔顶部与第 4 层横向预应力筋之间。同时为防止混凝土开裂, 在混凝土中掺入聚丙烯纤维, 掺入量为 0.9 kg/m³。

3.4 主塔液压爬模施工

主塔在挂篮施工至 4[#] 块后进行施工, 采用液压爬模施工, 主塔内设劲性骨架, 用于钢筋和索鞍定位。主塔高度为 36 m, 原方案采用翻模进行施工, 后经方案优化为采用改装后主墩上的爬模作为主塔模板体系, 减少主塔模板工程量。主塔的施工工艺包括劲性骨架的设计与安装、索鞍定位和索鞍安装 3 个主要步骤, 具体过程如下:

(1) 劲性骨架的设计与安装。劲性骨架作为钢筋和斜拉索索鞍的承载结构, 其安装过程可以分有索区安装和无索区安装两部分。其中, 无索区安装是将整个劲性骨架进行整体的吊装和安装。在将有索区劲性骨架转运至桥上后, 将索鞍临时定位在已加工好的框

架上, 再将其整体吊装到塔上安装。待劲性骨架安装完毕后, 要进行索鞍的精准定位。在劲性骨架的钢筋安装施工过程中, 为了确保钢筋和索鞍安装位置准确, 要采用劲性骨架对钢筋骨架和索鞍进行纠偏并固定。劲性骨架还用于模板的安装施工过程中, 即利用劲性骨架对模板位置进行调整和固定。此外, 劲性骨架对塔身整体偏位也能起到控制作用。

(2) 索鞍的定位。索鞍位于斜拉索两端锚固于箱梁和主塔上, 其主要由锚垫板和预埋管组成, 因此索鞍定位时可以通过定位索鞍两端中心以及箱梁(塔壁)外侧索鞍出口底点、顶点的空间位置来确定。

(3) 索鞍的安装。为了在加快索鞍施工进度时同时确保施工精度, 该项目采用将索鞍与劲性骨架一起整体安装定位的施工方法。施工过程如下: ① 先将索鞍粗定位在已加工好的劲性骨架框架上; ② 将粗定位的索鞍和劲性骨架整体吊装到主塔上并进行安装; ③ 将劲性骨架安装定位后进行索鞍微调, 以保证索鞍与劲性骨架的位置坐标满足规范和设计要求。

3.5 主梁悬浇施工

0[#]、1[#] 块梁段浇筑完成后, 穿束张拉 1[#] 块的纵向预应力束, 然后放松前后吊杆, 并拆除后锚杆; 铺设轨道和安放主桁行走平滚; 拆除主桁前、后钢垫块, 同时调节反压装置, 然后通过滑道前移挂篮进入 2[#] 块。

挂篮前移后, 按上述工序和方法, 使挂篮平稳就位, 同时, 根据主桥轴线调整挂篮主桁的平面位置, 并进行抄平垫实。然后根据箱梁顶面设计标高及施工预拱度, 加上挂篮挠度推算出相应的立模标高, 并以此通过挂篮前、后吊杆调整其底模前端的立模标高。挂篮移动过程中, 两端挂篮不同步差不得大于半个该施工阶段梁段长度。以后各块件重复以上工序进行施工。

外模是随挂篮前移一起进入下一块件就位的, 外模就位后应根据设计断面尺寸和标高进行调整。外模前端标高通过水准测量进行调整, 同时, 用吊线检查其垂直度及横断面尺寸, 并及时调整、紧固模板底脚螺丝和横向拉条螺丝, 外模的后端用水平千斤顶紧固, 使其已浇箱梁密贴、固定, 防止漏浆影响工程的外观质量。

挂篮底模、外侧模调整到位后, 即可进行底、腹板钢筋绑扎及预应力管道安装, 钢筋及预应力管道在加工场加工, 运至现场绑扎安装。施工方法和工艺同 0[#] 块。

为便于梁块连接钢筋和波纹管的定位与固定, 同时为便于模板的拆、立以及梁体断面尺寸变化后的改

制,梁块端模采用分块木模组拼而成,制作时应根据箱梁端面钢筋与波纹管的布置位置和直径进行精确放样、打孔,以便于端模的现场安装与定位。

内模是在底板与腹板钢筋绑扎、焊接完成后,利用滑行轨道拉出就位,然后根据顶板底模的立模标高,通过滑行轨道的前、后吊杆进行调整。内模定位与调整是通过内支撑及模板拉杆螺栓实现。

内模施工完毕后,绑扎梁块的顶板钢筋,同时穿插安装横向预应力束。纵向束的定位架间距按曲线段40 cm,直线段80 cm进行布设,此时应注意,竖向预应力筋与波纹管在下端的密封(用胶布缠绕),上端间距位置要准确。其工艺及要求同0#块。

梁块混凝土浇筑顺序按底板→腹板→顶板及翼缘板的次序浇筑,并由挂篮的前端向后依次浇筑,腹板混凝土浇筑时应保持两侧平衡,混凝土高差不得大于50 cm。严格控制浇筑方量,梁段浇筑重量与理论重量偏差控制在±1%。在整个浇筑过程中两悬臂端的不平衡重不得大于该梁段自重的30%,且应注意天气情况,浇筑期间桥面10 min最大平均风速不大于15 m/s。

梁体混凝土强度及弹性模量达到设计值的90%进行预应力的张拉施工,张拉程序及压浆工艺同0#块。纵向束随着块件的接长延伸,穿束难度也随之加大,因此,穿束方法采用钢丝绳和卷扬机牵引穿束,其张拉工艺同0#块。对较长束的压浆可适当增加注浆压力,最大压力可控制在1 MPa,并在曲线孔道的最高点设排气孔,以确保孔道压浆饱满、密实。

3.6 斜拉索施工

王家河特大桥斜拉索为中央双索面,双排布置在主梁的中央分隔带处。塔根两侧无索区长度为90 m,中跨无索区长度为28 m,边跨无索区长23.68 m,梁上索距4.0 m,塔上索距1.2 m。塔上采用分丝管式索鞍结构,斜拉索在塔上连续通过,在索鞍一侧设置单根可换式单侧双向抗滑装置,实现拉索在索塔位置处的锚固,为与斜拉索通过鞍座相适应,分丝管中段采用圆弧形。斜拉索两侧对称锚于主梁,采用主梁侧单端张拉。每个索塔设有2×15对30根斜拉索,全桥共150根斜拉索。

斜拉索施工方法及工艺:先安装PE外套管,然后逐根从PE管内穿入PE钢绞线,斜拉索穿过主塔索鞍内管,两端分别锚固于箱梁中腹板处。采用逐根张拉、单根调索的施工方法。施工工艺见图2。

斜拉索是斜拉桥的生命线,索体、锚头防腐需高度重视,按国家有关标准和OVM250平行钢绞线拉索体

系技术标准进行。采用密封浆体材料加强索体的锚固性,同时将索体与外界进行隔离,防止雨水、水气对索体侵蚀,有效防止索体锈蚀,延长索体使用寿命。

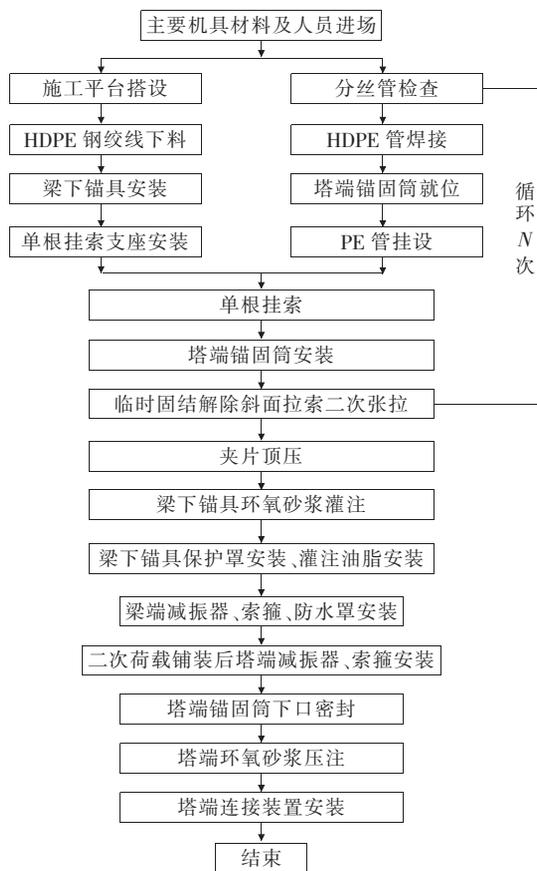


图2 斜拉索施工流程图

4 合龙总体方案

合龙顺序由边向中间进行,即先合龙边跨,再合龙次中跨,最后合龙中跨。

该桥连续刚构中跨及次中跨合龙段采用两侧挂篮合并连接施工。施工时利用挂篮为主体结构承担合龙段的荷载。边跨合龙段施工时挂篮底部放置于边跨托架上,由托架承受部分荷载。

为保证合龙时两端梁体不发生相对位移,保护合龙段混凝土在凝固过程中不因此而产生裂缝,在浇注合龙段混凝土前应将两端悬臂临时予以锁定。梁体锁定通过在上一节段预埋型钢支撑,在合龙时进行焊接,预埋件位置必须左右对称。合龙段混凝土浇筑时间应在当日夜间气温最低时段开始浇筑。

合龙段施工前清除箱梁顶部的临时荷载,对于不需要使用的临时荷载全部清理至桥下,必须使用的材

料设备应堆放至 0# 块横隔板顶部,尽量减少对悬臂端标高的影响。

主要流程:最后一跨悬臂现浇段施工完成(包括钢板、孔道预埋)→两侧挂篮对接、固定→绑扎底板、腹板钢筋、安装预应力管道→焊接底板钢支撑→安装内模→绑扎顶板钢筋、安装预应力孔道→梁体顶推→焊接锁定支撑型钢→浇筑混凝土及养生→拆除体外支撑型钢→预应力张拉并压浆。

5 施工监控

5.1 结构应力、线形监测

桥梁结构几何尺寸的控制是施工控制的基本要求,任何一个结构不可能达到与设计尺寸完全吻合无误,但要尽量减少结构尺寸与设计尺寸的偏差,并将其降低到 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》规定的容许范围内。

应力监测是施工控制的一个重要监测内容,通过对箱梁控制截面混凝土应力监测,可以了解在节段悬臂浇筑、预应力张拉、斜拉索张拉、移动挂篮以及体系

转换前后控制截面混凝土应力变化情况,及时判定主跨应力是否超限,了解主跨安全状况,确定施工过程中截面应力是否在设计范围内。

在悬臂施工中,T 构两侧悬臂梁体的几何尺寸、比重、施工荷载、浇筑混凝土的偏差等施工过程的随机差异不可避免地出现,T 构悬臂重量不平衡并导致影响结构安全性的倾覆力矩,这种倾覆力矩在施工合龙前的几个施工段时尤其令人担心。施工规范对此进行了明确规定。倾覆力矩监测是保证结构体系安全的需要。悬臂根部控制截面应力也可以反映出倾覆力矩。在合龙前的 3 个悬臂施工节段,测定每个施工节段悬浇后的倾覆力矩,在倾覆力矩达到报警线时予以报警。

测点布置。主跨应力控制截面为墩顶部 0# 块中心截面、悬臂根部截面、最大悬臂的 1/2 截面以及悬臂合龙处。根据结构形式,选定全桥作为箱梁应力观测对象。

桥梁上部结构及索塔共布置应力测点 158 个(图 3)。根据施工过程中的实际情况,可以适当调整应力测点位置并以满足结构安全为标准。

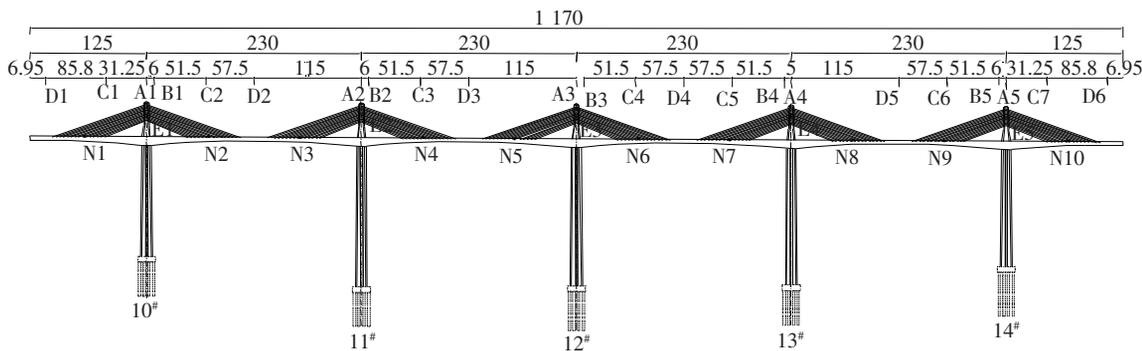


图 3 主梁应力测点布置示意图(单位:m)

挠度观测资料是控制成桥线形最主要的依据。在悬臂施工过程中,每一梁段的立模、浇筑混凝土、张拉预应力前后需要监测箱梁挠度变化和相应的应力变化。在箱梁合龙过程中,需要监测箱梁挠度变化和相应的应力变化;在桥梁合龙后,张拉底板预应力时,需要监测箱梁的应力变化,为控制分析提供实测数据。同时,通过对各阶段实测变形与预测变形值比较,进行预测变形的验证,为后续梁段误差分析提供依据。同时对箱梁平面位置进行监测,保证其满足规范要求。

根据以往的经验,在每个施工块件上布置 3 个对称的高程观测点,这样不仅可以测量主梁的挠度,同时可以观察主梁是否发生扭转变形。高程控制点布置在

离块件前端 10 cm 处,采用直径 16 mm 的钢筋在垂直方向与顶板的上下层钢筋点焊牢固,并要求竖直。测点(钢筋)露出主梁混凝土表面 5 cm,测头磨平并用红油漆标记。

主梁位移监测应分为竖直面内的线形及变位监测和绕桥梁中心线的扭转两个部分,有效地控制主跨的施工质量。为减少温度的影响,观测均安排在早晨太阳出来之前进行。

挠度观测资料是施工控制中控制成桥线形最主要的依据。根据以往的经验,在每个施工块件上布置两个对称的高程观察点,这样不仅可以测量箱梁的挠度,同时可以观察箱梁是否发生扭转变形。在施工过程

