

邳州京杭运河提篮式钢管混凝土系杆拱桥的设计

梁智涛

(中交第一公路勘察设计研究院 710068)

摘要: 本文以江苏连徐高速公路跨越邳州市城南的京杭运河特大桥主桥设计为背景, 简要介绍了该桥的设计过程、构造处理特点及其独特的创新之处。该桥的顺利建成对设计所采用的理论及方法进行了有效的验证, 也为以后修建同类型自平衡体系钢管混凝土系杆拱桥的设计积累了可靠的资料。其优美的桥梁造型及复杂的高技术含量居国内乃至亚洲同类型桥梁的领先水平。

关键词: 自平衡体系 系杆拱桥 设计 钢管混凝土 京杭运河

1. 概述

京杭运河特大桥是连云港—徐州高速公路中的一座特大型桥梁, 位于连云港—徐州高速公路K154+498m处(桥梁中心桩号), 桥梁北邻邳州市, 向西跨越古老的京杭大运河及彭河, 穿过朝阳村, 继而与路线相接, 桥梁全长为2577m。该桥由主、引桥组成。其中, 主桥结构体系为三跨自平衡体系提篮式钢管混凝土系杆拱桥, 平面上位于直线段内, 主跨跨径为235m。两边跨为钢筋混凝土肋拱构成的上承式拱桥, 边孔跨径为57.5m, 主桥全长为350m。主桥位于纵坡为1.6447%及-0.66%, 半径为25000m的竖曲线内, 由于竖曲线的影响和为满足桥梁纵坡与路线纵坡的搭配问题, 导致了主桥在纵断面上为一坡拱。为了增加桥梁的整体稳定性, 有利于结构的抗震和美观, 主拱肋按1:5.71的斜率在横断面上向桥轴中心线倾斜, 从而形成提篮式结构。

引桥全长为2227m, 结构体系为部分预应力混凝土组合连续箱梁, 跨径组成为: 连云港侧由两联5×30m, 一联7×30m和一联3×30m(变宽度段)连续箱梁组成, 长度为600m; 徐州侧由一联3×30m(变宽度段)、三联7×30m, 两联8×30m和两联7×30m连续箱梁组成, 长度为1620m。引桥两端设有平曲线, 其中, 连云港侧位于半径R=5500m, 偏角为46° 01' 30"(左偏)的圆曲线内; 徐州侧位于半径R=7000m, 偏角为35° 31' 08"(右偏)的圆曲线内。平曲线的设置加

之雄伟的拱肋使整个桥梁显示出优美的三维曲线美, 建成后的大桥雄姿见图1。

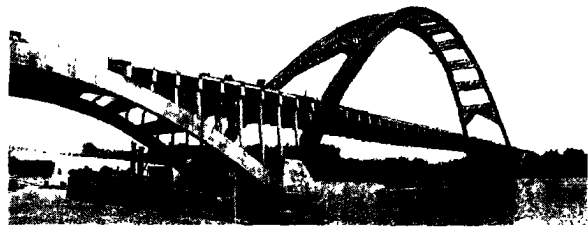


图1 大桥雄姿

2. 技术指标

2.1、设计荷载: 汽车—超20级, 挂车—120

2.2、桥面宽度组成:

主桥桥面宽度为: 2.75m(系杆及吊杆空间)+0.5m(防撞护栏)+12.0m(行车道)+1.0m(波形梁护栏)+1.0m(中央分隔带)+1.0m(波形梁护栏)+12.0m(行车道)+0.5m(防撞护栏)+2.75m(系杆及吊杆空间)=33.5m。

2.3、设计水位: 26.81m。

2.4、设计洪水频率: 1/300。

2.5、地震烈度: 地震基本烈度为Ⅷ度

2.6、通航水位: 24.80m。

2.7、通航等级: 2级。

2.8、航运通航净空: 65×7m。

3. 桥型及构造特点

京杭运河特大桥为大跨径自平衡体系提篮式钢管混凝土系杆拱桥, 这一桥型在国内系杆拱桥设计领域尚属首创, 在此之前所做的三跨系杆拱桥均为平行拱肋。该桥在纵断面上呈飞雁式造型, 两侧翼边跨为上承式钢筋混凝土拱桥, 主跨为中承式钢管混凝土系杆拱桥。弯曲

的拱肋、柔性的桥面系和纤细的吊杆，组合出一个直与曲、刚与柔的优美造型。横桥向拱肋采用由横撑连接的提篮式结构，不但增加了桥梁的整体刚度和稳定性，有利于结构的抗震，而且还增加了桥梁的美观性。提篮式结构的创新采用使整个桥梁完全呈现出三维空间受力和几何特性，加之两拱肋在纵断面上的高程不在同一高度上，致使该桥为完全几何非对称结构，即桥梁在纵桥向为一坡拱桥。因此说该桥是拱桥设计领域内技术含量最高，设计难度最大的桥梁结构也不为过。

该桥所采用的拱肋截面、带牛腿的横梁、承台系梁构造及系杆构造处理措施都具有独到之处。自平衡体系的形成是靠强大的系杆张力来抵消主跨拱肋产生的水平推力来实现的。水平力的施加是通过在两边跨端横梁上施加强大的预应力，然后通过边跨拱肋传递到拱脚来平衡主拱圈产生的反向推力，从而形成自平衡体系。

京杭运河特大桥主孔跨越京杭运河主河槽。主拱肋和边拱肋均向桥轴中心线倾斜，倾角分别为 $80^{\circ} 3' 57.6''$ 和 $79^{\circ} 52' 39.9''$ ，主拱肋为主钢管、缀板、混凝土和腹杆钢管组成的桁架式组合截面，边拱肋为钢筋混凝土实体矩形断面，系杆均在拱肋端部实腹段平弯或竖弯。主拱圈和边跨拱圈的矢跨比分别为 $1/4$ 及 $1/8$ 。拱轴系数经过优化，其合理拱轴系数边、中跨分别确定为 1.3 及 1.33 。桥面系恒载及活载由中跨主拱肋吊杆下的横梁或边跨拱肋上的立柱横梁传递给主、边跨拱肋，横梁有混凝土和钢箱梁两大类，横梁在纵桥向用槽型板连接。桥面横向包括主拱肋和中央分隔带在内全宽为 33.5m 。为了保证全桥整体造型风格一致，连接两拱肋的横撑均采用不灌混凝土的钢管桁架。主桥总体布置及横断面见图2、3。

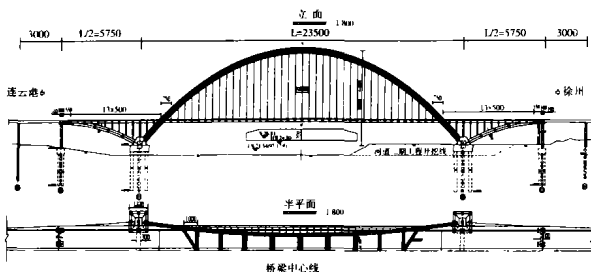


图2 桥梁总体布置图

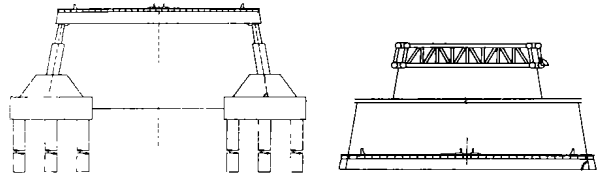


图3 桥梁横断面

4. 结构设计

大跨径自平衡体系提篮式空间曲线钢管混凝土系杆拱桥的设计，在桥跨布置上一方面要满足通航净空和防洪的要求，另一方面还要满足结构受力、整体刚度及行车舒适性的要求，以及满足施工便利性，并与其周围的环境相协调，做到不破坏自然环境，且与城市景观协调一致的要求。

4.1 主拱肋：每肋由 $4-\phi 850\text{mm}$ 直径的钢管组成平行四边形断面，这一端面形式为本桥所独创，其中钢管壁厚 14mm ，主钢管之间用缀板（每弦间），缀条（两弦间）连接，从而形成钢管混凝土格构柱。在第一根吊杆至拱脚段，全截面均填充50号混凝土，并参入UEA微膨胀剂，使其成为实心截面。主拱肋采用等高度（ $h=3.7\text{m}$ ）等宽度（ $B=2.0\text{m}$ ）的平行四边形截面，两主肋在主桥中心处净距为 16.0m ，拱脚处中心距离为 36.579m 。在横撑的设计上充分根据结构的受力和稳定性要求，设置了两种类型的横撑，拱肋间共设9道横撑，其中两边横撑为K型，中间横撑为四边形，每道横撑为空钢管构成的格构式桁架梁。横撑外形尺寸为 $3\text{m}\times 2.85\text{m}$ ，横桥向主钢管直径为 $\phi 55\text{cm}$ ，腹杆钢管直径为 $\phi 35\text{cm}$ ，管壁厚均为 10mm 。横撑最大吊装重量为 28t 。

主拱肋内灌注混凝土，腹杆（第一吊点至拱脚腹杆除外）和横撑钢管内不灌注混凝土。除 $\phi 850$ 钢管采用Q345-C外，其余全用Q235-C钢板。

4.2 边拱肋：为钢筋混凝土结构，半波外形，为适应其平面内的宽度变化，将边拱肋作成等宽等高平行四边形实体截面，其截面尺寸为 $2\text{m}\times 2.5\text{m}$ 。边拱两片肋之间设有三道钢管桁架

横撑,在拱肋端部变截面段设三道预应力混凝土箱式截面横梁和一个预应力混凝土带牛腿的实体端横梁。钢管桁架横撑的截面尺寸为1.6m×1.2m,预应力混凝土箱式横梁截面尺寸为1.97m×1.0m,预应力混凝土实体端横梁截面尺寸为2.62m×2.0m(不包括牛腿尺寸)。边拱肋立柱均采用钢管混凝土柱,其直径为85cm。

4.3系杆:作为连接主跨、边跨的纽带,在桥面与拱肋相交处,分别与各片拱肋纵轴线相平行,并置于横梁之上的系杆箱内。在边跨拱肋端部将系杆拉索分别进行平弯及竖弯后,锚固在边跨端横梁外侧。本桥系杆为了避免与主拱肋、边拱肋相交使其结构受力复杂化,采用热挤PE平行钢绞线拉索,以适应平面内的弯曲变化。其锚固顺序与拱肋吊装施工加载顺序相对应,系杆拉索需按编号进行张拉锚固。成桥后,系杆连同其保护箱一同隐藏于桥面板的实心板之内,成为永久保护。全桥系杆拉索共由32孔25- ϕ 15.24mm的预应力钢绞线组成。柔性系杆还有利于解除因其与拱肋刚接而产生的受力复杂化,使桥面及拱圈受力明确,构造处理简单化。

4.4横梁:全桥横梁根据所采用的材料分为预应力混凝土横梁和钢横梁两大类,预应力混凝土横梁设在两边跨的拱肋变截面段,全桥共有6道。预应力混凝土箱型横梁,其外形尺寸为100cm×209cm,腹板厚为18cm,顶、底板厚度分别为13cm和15cm。横梁内设置的预应力筋按不同的受力分阶段进行张拉。钢横梁为闭合箱式断面且在箱底设有抵抗横向推力的钢牛腿,并在钢箱梁内设置体外预应力钢筋,从而形成预应力钢箱梁结构。由于钢箱内设有预应力钢筋,有效地降低了横梁高度,节省了钢材。箱顶设有抗剪锚钉,并与桥面槽型板浇为一体,增加了桥面板的整体性,同时又增加了钢箱横梁的抗弯能力。钢横梁的平均高度为1.62m,顶底板厚均为30mm,腹板厚16mm。钢横梁两腹板

之间的宽度根据结构受力、施工及构造要求,箱梁宽度共划分为80cm(A类)、83cm(B类)、75cm(C类)80cm(D、E类)五个类别,钢箱内的横隔板间距有2m及2.5m两种。

4.5吊杆:为PE包镀锌高强平行钢丝束组成,工厂化制作。锚具采用与其配套的可调试锚具,分别将平行钢丝束锚固于主拱肋的上缘板及横梁的下缘,并以横梁的下端作为标高调整端。吊杆直径为9cm,全桥采用同一型号。

4.6桥面系:由槽型板、空心板、现浇层及桥面铺装构成,预制钢筋混凝土槽形板共有4种类型,预制槽型板高45cm,宽98cm;空心板有5种类型,预制板之上的现浇层厚6cm;桥面铺装采用沥青混凝土,厚度为9cm,并在现浇层与铺装层之间涂抹一层防水材料。伸缩缝除主桥的两端设置伸缩缝外,在与主拱肋相交处也设置伸缩缝。桥面外侧设防撞护栏,内侧设波形梁护栏,而吊杆外侧边缘设不锈钢轻型护栏。桥梁侧面设波型装饰钢板,板厚为3mm,以增加桥梁的整体美感。

4.7下部构造

每个拱座设置左、右两个承台,承台厚度为4m,平面尺寸为13.7m×13.7m。承台顶面设四棱台拱座,高度为5.5m。左右两个承台由断面为3m×4.5m的箱型系梁相连,箱型断面腹板厚度为50cm,顶底板厚度为60cm。为了克服拱脚产生的横向推力,采用梁内设置预应力钢束,并且锚于拱座及承台外侧面。

基础采用群桩,每个承台底由9根 ϕ 200cm的钻孔灌注桩组成,一个拱座下共有18根桩,每根基桩预埋3根检测管,基桩桩长为70m。

过渡墩采用矩形柱式墩,断面尺寸为140cm×140cm。基础采用双排桩,桩径为1.2m。过渡墩承台为一哑铃形,厚度为2.0m。

4.8钢构件的防腐及涂装

对于钢构件来说,其防腐措施及材料的好

坏直接影响到结构的使用寿命,所以本桥从保证质量方面考虑优先选择技术先进使用寿命长的电弧热喷涂锌铝复合涂层技术,重点对该桥钢拱肋、钢横梁等钢结构进行有效的防腐处理。

在对钢结构进行防腐处理前,应对其进行喷砂除锈及表面粗糙化,并进行防锈涂装。钢构件除锈等级应达到GB8923-88标准Sa3.0级,清洁后钢构件表面的粗糙度应达到GB9793-88标准中规定的Rz40-80 μm 。钢构件的外表防锈涂装采用电弧热喷涂锌铝复合涂层工艺,锌涂层厚度80-120 μm ,铝涂层100-150 μm ,使用年限要求小于60年。喷涂机采用DPT-302电弧喷涂机。钢构件内的表面防锈涂装采用两道无机富锌底漆(2X75 μm)。

电弧热喷涂锌铝复合涂层所使用的材料应符合GB3190中L2的要求,含锌量99.95%,含铝量 $\geq 99.5\%$ 。电弧热喷涂锌铝复合涂层的外观应均匀一致,无松散粒子,不允许有破裂、剥落、漏喷、分层、鼓泡等缺陷。

5. 施工特点

邳州京杭运河特大桥的拱肋施工方法为主跨钢管拱肋采用竖转方案,边跨混凝土拱肋采用支架现浇方案,该桥主跨拱肋因呈提篮形状,其竖转过程不同于平行拱肋,竖转技术含量远比一般竖转方法复杂,在进行了系列施工技术创新后使其竖转方法得以成功实现。支架拼接及竖转施工方法的采用解决了高空拱肋接头施焊的难度,提高了接头的施工质量,克服了缆索吊装的不稳定性,方便了施工,保证了安全。施工过程中的照片见图4。



图4 支架拼装主拱肋

5.1 该桥施工工艺复杂,首先是主拱肋的放样和焊接,需分段在工厂放样施焊,而且分段放样长度需根据焊接时温度和吊装温度差予以调整。主拱肋采用液压提升竖向转体施工,转体施工示意如图5。

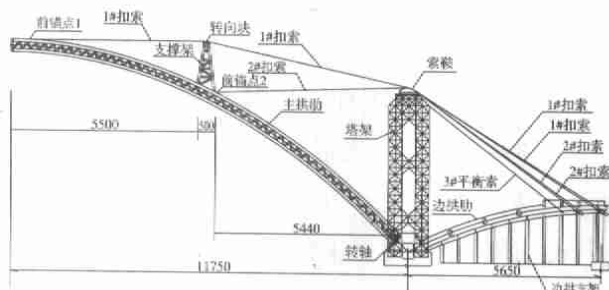


图5 竖转施工方案示意图

5.2 搭设支架现浇边跨拱肋混凝土及制作上部结构构件,张拉主墩系梁预应力束及边跨各中、端横梁预应力筋。

5.3 按对称原则施工灌注拱肋及缀板内混凝土,吊装横梁及槽形板,最后现浇桥面及铺设沥青混凝土。系杆预应力应根据施工阶段分批张拉,张拉系杆预应力时,应不断观测主拱肋位移及拱脚水平位移,使得拱脚水平位移控制在5mm以内,而拱肋控制点位移应符合设计提供的位移和标高,在全桥施工中,根据施工阶段进行监测监控,及时记录主拱肋及边拱肋的内力及挠度,并对其观测结果进行分析整理,以此指导下一阶段工作。

6. 结语

邳州京杭运河特大跨径自平衡体系提篮式空间曲线钢管混凝土系杆拱桥的设计是一种全新的结构,这一结构在亚洲范围内处于领先水平;拱肋截面形式为本桥所独有;钢横梁的设计也进行了一系列的创新;结构所呈现的空间非对称几何形状,使其成为目前最复杂的桥梁结构;提篮式结构的采用,不但增加了桥梁的整体刚度,而且对结构的抗震非常有利;在该桥的设计中采用了大量新技术、新方法及新材料,保证了结构的安全性;该桥的检测数据与设计理论计算吻合良好。运营状况优良。

在此对参与本桥设计的全体成员和关心本桥设计、施工的各方专家及领导表示衷心的感谢!