

江苏灌河大桥设计

韩大章 李正华 新

(江苏省交通规划设计院 南京 210005)

摘要: 灌河大桥是连云港至盐城高速公路上的一座特大桥梁,大桥位于盐城境内,跨越灌河。主桥为双索面半漂浮五跨连续钢与混凝土组合梁斜拉桥,主跨340m,主梁采用双边肋,索塔为H形,采用平行钢绞线拉索,拉索在主梁和塔上的锚固分别采用锚拉板和钢锚梁。本桥为国内目前最宽的组合梁斜拉桥。

关键词: 组合梁 斜拉桥 双主梁 锚拉板 钢锚梁

1 工程概况

灌河大桥是连盐高速公路上的一座特大型桥梁,桥梁全长1818.96m,桥梁跨越的灌河河宽水深,在响水镇以上水面宽100~300m,水深5~6m,响水镇以下水面宽300~1000m,河底标高-6.0~-9.0m,最大排洪水位4.09m,低潮位时水

深达5~7m,是江苏省沿海地区唯一没有闸坝控制的内河天然河流。该桥于2004年8月开工建设,于2006年10月建成通车。

灌河大桥主桥采用双塔双索面半漂浮五跨连续组合梁斜拉桥,跨径组成为:32.9m+115.4m+340m+115.4m+32.9m。主桥布置图见图1。

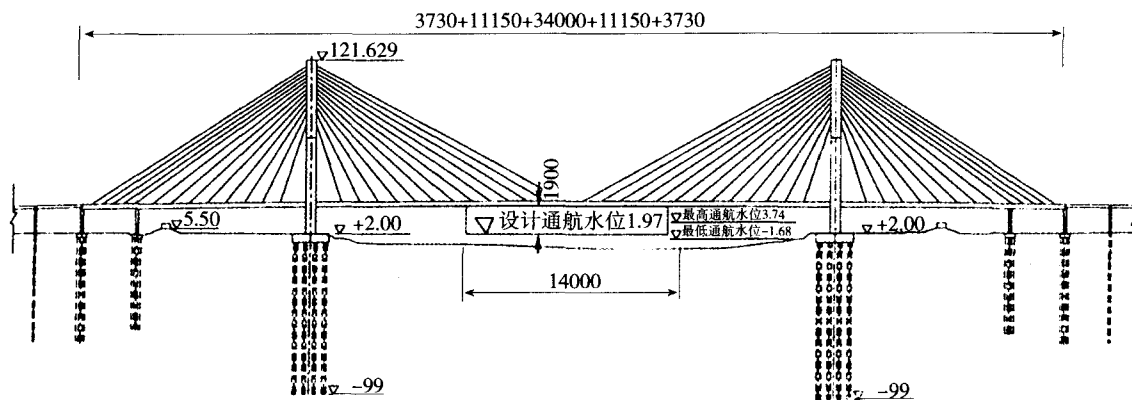


图1 灌河大桥桥跨布置图(尺寸单位:cm)

2 主要技术标准

公路等级:双向六车道高速公路

设计荷载:公路—I级

设计车速:100km/h

通航要求:满足通航净宽140m,通航净高19m要求

桥面宽度:桥梁总宽36.6m,主桥桥面宽33m(不含拉索锚固区宽度和检修道宽度)

设计风速:桥位10m高处100年一遇基本风速为26m/s

地震烈度:区域地震动加速度峰值为0.05g(相当于地震基本烈度VI度)

主梁梁高:3.08~3.41m,为钢—混凝土组合梁结构

3 桥梁设计

3.1 总体设计

本桥属中等跨度斜拉桥,适合采用组合梁斜拉桥。组合梁斜拉桥采用钢主梁+混凝土桥面板的主梁方案,避免了钢箱梁主梁造价高,加工、运输、吊装难度大,桥面铺装很难处理完善这一缺点;也避免了混凝土主梁自重过大导致基础庞大、施工周期长、施工工艺复杂、施工风险大等缺陷。组合梁主梁这一特点使得其非常适合于用在最大悬臂长度在150~250m且基础条件较差

的斜拉桥之中。

主桥采用五跨连续半飘浮体系，边中跨比为0.436，为增加结构刚度并在施工中尽快形成单悬臂体系，在边跨设一个辅助墩。每个索塔上各布置13对拉索，拉索在主梁和塔上的标准索距分别为11.7m和2.0m。主梁在各墩顶及索塔横梁处均设置纵向滑动支座，并在索塔内侧设横向限位支座，在各边墩顶设横向限位挡块。主桥两侧过渡孔采用1孔31.5m装配式部分预应力混凝土简支箱梁，为克服边跨负反力，将过渡孔引桥作为压重支承在主桥过渡墩横梁上，并在主桥过渡墩和辅助墩间采用混凝土预制块作为压重。

3.2 主梁

主梁采用“工”字形钢，纵梁、横梁、小纵梁通过节点板及高强螺栓连接形成钢构架，构架上架设预制桥面板，现浇膨胀混凝土湿接缝，与钢梁上的抗剪栓钉形成整体，组成组合梁体系。主梁全宽36.6m，梁高3.08~3.41m，两“工”字钢纵梁梁肋间距34m。主梁断面见图2。

“工”字钢纵梁除端部外梁高2.8m，工字钢主梁顶、底板宽1000mm，厚度根据受力区域不同，分别为36mm和60mm，腹板厚28mm。为提高其整体和局部稳定性，设置一定数量的水平、竖向加劲肋。钢纵梁标准节段长11.7m，在工厂分段制造。横梁间距3.9m，每节标准梁段设三道横梁，除引桥挂孔处的横梁采用箱型截面外，其余的横梁均采用工字型断面，桥面双向横坡2%由横梁高度调整形成。为减小预制桥面板的体积、减轻每块桥面板的吊装重量并方便架设预制桥面板，在两边钢主梁间设三道小纵梁，小纵梁与横梁断面亦均为“工”字型，主梁与横梁、小纵梁与横梁间的连接均采用摩擦型高强螺栓连

接。钢梁顺桥向处于竖曲线上，故顶板与底板由于竖曲线半径不同而发生长度的差异，在梁段制造时不予考虑，而在拼接缝上下缘处调整，以适应弧长的差异，拼接板螺栓孔考虑这一差异。根据计算，在边跨主梁和小纵梁间填入混凝土块进行压重。

预制桥面板架在由主梁、小纵梁和横梁构成的钢格构架上，桥面板通过布置在钢主梁、钢横梁及小纵梁顶的剪力钉与钢梁结合。剪力钉采用 $\phi 22$ 圆头焊钉，长220mm，剪力钉在钢主梁上的排列以不与桥面板普通钢筋和横向预应力冲突为准。剪力钉在横梁上的排列考虑中孔与边孔桥面纵向预应力管道的位置。

拉索在主梁上的锚固采用锚拉板的形式。拉索与主梁腹板在同一个平面内。在钢梁上翼缘设置锚拉板，锚拉板以焊接形式与钢梁上翼缘相连接。为加强锚拉板区域板与混凝土的横向连接，在锚拉板两侧布置剪力钉，其布置原则是不与钢梁顶面剪力钉干扰。图3为索梁锚固构造。

桥面板厚0.28m，全宽35m，由于在主梁间设了三道小纵梁，预制桥面板宽为7.4m和8.75m，采用原50号混凝土预制，根据其所在位置和预应力束通过情况及齿板设置情况共分32种类型，桥面板的存放期要求不小于3个月。

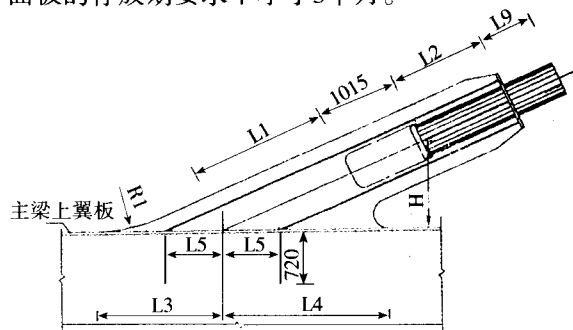


图3 索梁锚固构造

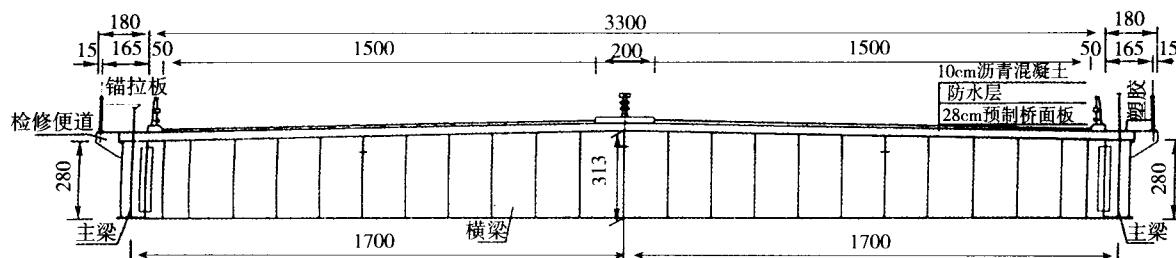


图2 主桥主梁标准横断面(尺寸单位: cm)

3.3 拉索

拉索采用OVM250系列环氧涂层钢绞线拉索,采用四层防护体系,分别为钢绞线间外喷环氧涂层、钢绞线间无粘结筋专用油脂、钢绞线索股的HDPE护套和整体索外包HDPE护套。钢绞线标准强度为1860MPa,弹性模量为 1.95×10^5 MPa。

拉索在主梁上的标准索距与标准梁段长度相同,为11.7m,在塔上的索距为2m。根据计算,本桥采用五种类型的拉索,即OVM250-37、OVM250-43、OVM250-55、OVM250-61和OVM250-73,在恒+汽车及降温工况时最大索力为7370kN。拉索均在塔上单端张拉。

3.4 索塔及基础

3.4.1 索塔

由于本桥为中等跨度斜拉桥,塔高121m,因通航要求不高,下塔柱较短,而桥面较宽(六车道),若采用A型塔、倒Y型塔则会由于塔高相对较矮景观效果较差,同时对行车会产生一定的压抑感。根据计算,本桥风荷载并不控制设计,主梁不必靠空间索面提供抗扭刚度,因此可以采用开畅的索面,故索塔采用H形,采用平行索面,拉索平面与主梁腹板在同一平面内,简化了锚拉板的构造和拉索在主梁、索塔上的锚固。

索塔包括上、中、下塔柱和上、下横梁,采用50号混凝土。其中上塔柱高42.0m,中塔柱高61.8m,下塔柱高15.829m;中塔柱横桥向内外侧面的斜率为1/17.540,下塔柱外侧面的斜率为1/12.939,内侧面斜率为1/3.748。索塔在桥面以上高度为96.548m,高跨比为0.284,塔底左右塔柱中心间距35.6m。

塔柱采用空心箱形断面,单箱单室,塔柱顺桥向尺寸为7.0m,上、中塔柱横桥向尺寸为4.0m,下塔柱横桥向尺寸由4.0m变化到7.0m。上、中、下塔壁厚分别为0.60m、0.80m和1.0m。上塔柱内设牛腿,中间设钢锚梁。下塔柱底部设2.0m实心段。

为增加索塔景观效果,塔柱外侧设有宽1.2m,深0.08m的装饰性凹槽;塔柱外侧均设2.0m \times 0.5m的倒角。塔柱横桥向内、外侧竖向每隔5m

设置 $\phi 100\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的PVC管作为通风管。

为使结构传力明确并简化设计,本桥索塔设计的一个特点是将所有塔柱与横梁相连接的部位按节点进行设计,即横梁与塔柱相连处用混凝土实心段处理,只留下便于进出索塔通行和维护的入孔,而不再像以往斜拉桥塔柱与横梁连接处设多道横隔板,即使结构传力明确,又简化了设计和方便了施工。

3.4.2 横梁

上、中塔柱连接处设上横梁,梁高由端部的5m直线变化至中部的4m,横梁中部设有横隔板;中、下塔柱连接处设下横梁,梁高为5.0m。横梁采用箱形断面,上下横梁宽度均为6.6m,顶底板和腹板壁厚均为0.7m。横梁为预应力混凝土结构,上横梁内布置16束 $19\phi j15.24$ 钢绞线,下横梁内布置32束 $19\phi j15.24$ 钢绞线,每束张拉力为3710.7kN,所有预应力锚固点均设在塔柱外侧,采用深埋锚头工艺。

上横梁中部由于部分预应力钢束曲线布置,为防止混凝土崩裂,钢束弯曲部分沿径向设置防崩钢筋,并在上横梁跨中设置一道横隔板。下横梁顶面设置主梁支座垫石及主梁安装所需的临时锚固装置。因主梁支座位于下横梁两端,下横梁中段并无主梁支座,为避免横隔板产生的附加约束应力导致横梁开裂,故下横梁不设中隔板。

3.4.3 钢锚梁

索塔的拉索锚固段,是将斜拉索的局部集中力,安全、均匀地传递到塔柱的重要受力构造。传统的环向预应力锚固方式,是将拉索直接锚固在空心塔壁上,拉索集中力传递至塔壁,为防止塔壁混凝土开裂,平衡塔壁上的拉应力,在其周边施加环向平面预应力。环向预应力的锚固系统全部在现场完成,由于在高空作业,锚垫板的角度及预应力管道定位控制较难,且需要多次张拉预应力,高空浇筑混凝土锚固构造也有一定难度,且施工完成后不可检查和更换。

钢锚梁是独立的拉索锚固构件,支撑于塔柱内侧牛腿上,由钢锚梁自身平衡两侧拉索的水平分力,部分不平衡水平分力通过钢锚梁支座摩阻力

和水平限位装置传递至塔壁。拉索的竖向分力由塔柱内侧牛腿传至塔柱。由于钢锚梁平衡了拉索水平分力,使得塔壁混凝土没有拉应力,混凝土塔壁不会开裂,因而塔柱受力比环向预应力好。钢锚梁在工厂加工制作并试拼,可以精确确定锚垫板位置和角度,且钢锚梁自重较轻,起吊安装均很方便,并可定期检查、维修、养护和更换。

本桥拉索在塔上的锚固采用钢锚梁的锚固方式。除第1对斜拉索直接锚固在混凝土底座上外,第2~13对斜拉索锚固在钢锚梁上。钢锚梁共12对,每对钢锚梁长5.6m,宽1.02m,锚梁除

锚头外梁高0.62m。为便于安装,每根钢锚梁分为两个节段,节段之间采用高强螺栓连接;钢锚梁端部支撑于塔壁牛腿顶面的钢底座上。

钢锚梁为箱形结构,有锚垫板、承压板、主板、横隔板、连接板、加劲肋等构件组成。其中侧面拉板主要承担斜拉索水平拉力,板厚30mm。为增加钢锚梁钢板的竖向稳定性,侧面拉板外侧焊有竖向加劲肋;两块主板之间设置横隔板,厚度20mm;锚垫板厚50mm,锚垫板上另有与钢绞线拉索配套的锚垫板。图4为钢锚梁构造。

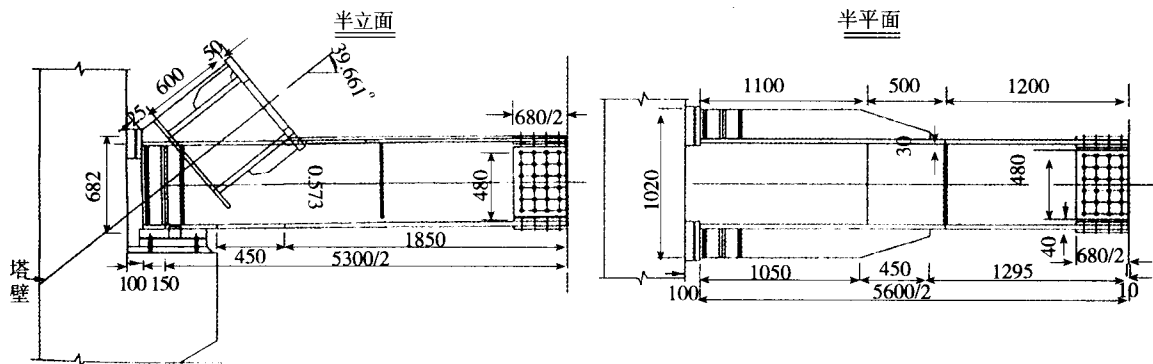


图4 钢锚梁构造

3.3.4 基础

索塔承台采用哑铃形,厚度为6.0m,上下游承台间以系梁连接,平面尺寸为 $(24 \times 24 + 12 \times 11.6 + 24 \times 24)$ m。每个索塔下基桩采用32根 $\phi 2.5$ m的钻孔灌注桩,按照摩擦桩设计,桩长为95m。辅助墩与过渡墩均采用分离的双柱式实体墩,柱距34m,单柱平面尺寸为 $3\text{m} \times 2\text{m}$,承台厚度为3.0m,单个承台平面尺寸为 $7.2\text{m} \times 7.2\text{m}$,单个承台基础采用4根 $\phi 1.7$ m的钻孔灌注桩,按照摩擦桩设计,桩长为50m。

4 主要技术特点

(1) 主梁全宽36.6m,为目前已知的国内最宽的钢与混凝土组合梁斜拉桥。由于剪力滞后效应的存在,在组合梁斜拉桥采用平面分析计算时应考虑到桥面板纵向应力沿横向的不均匀分布情况。设计中通过剪力滞后系数和桥面板有效宽度数据来为平面分析计算中准确把握关键部位的真实受力情况提供依据,以保障结

构有合理的安全储备。

(2) 在主梁间设置小纵梁,在架设桥面板之前减小横梁跨度,增强了横梁间的联系,既增加了施工过程中的稳定,同时又减小了桥面板预制块单元大小,方便预制、运输和吊装施工。

(3) 采用锚拉板和钢锚梁的拉索锚固方式,特别适合平行索面拉索的锚固,由于拉索完全位于同一平面内,无横向分力,使得锚拉板和钢锚梁的结构大为简化,传力亦简洁明确。

(4) 拉索在塔上的锚固没有采用传统的环向预应力。本桥塔柱宽度较小,若采用钢绞线环向预应力则钢束弯曲半径太小,若用井字形预应力粗钢筋,则因钢筋长度太小而预应力损失过大,且环向预应力在塔壁上应力分布不均匀,部分转角处常有拉应力存在。采用钢锚梁拉索强大的集中力不直接作用在塔壁混凝土上,亦无需施加环向预应力,塔壁受力合理,混凝土塔壁不会产生裂缝。

(5) 由于下塔柱较短, 为景观要求, 取消了塔底塔座。下塔柱较短较刚, 施工完下横梁即张拉下横梁预应力则会在塔底外侧产生较大的拉应力, 为此设计中下横梁的预应力张拉次序进行了专门设计: 下横梁分两次浇筑, 施工完下横梁后只张拉一半的预应力钢束, 待塔柱施工到接近上横梁时再张拉剩余的预应力钢束, 此时塔底已有足够的压力, 张拉横梁预应力时塔底无拉应力。

(6) 塔柱与横梁交接处除预留入孔外采用实心节点, 突破了传统的设多道横隔板的作法, 既使传力明确, 又方便了施工。

5 科研试验与专题研究

为验证灌河大桥设计的可靠性, 确保工程施工和营运期间安全可靠, 结合设计和施工进行了相关科研试验与专题研究工作。

5.1 组合梁受力机理研究

由于钢-混凝土组合梁斜拉桥特有的受力特性, 以及宽翼缘构件的剪力滞效应, 使得其应力分布复杂, 故有必要对组合梁斜拉桥的受力特性, 特别是剪力滞问题以及关键部位的局部受力情况进行研究, 为进一步完善组合梁斜拉桥的设计提供参考。

5.2 锚拉板足尺模型试验研究

对组合梁斜拉桥锚拉板进行了疲劳试验, 在充分调研国内外同类或类似桥梁的基础上, 经过细致分析计算及相应的试验; 力求解决过去组合梁斜拉桥施工及运营过程中影响结构安全的问题, 将该类桥梁的受力机理了解清楚以指导设计优化、进行设计验证。该试验研究是国内首次进行的斜拉桥做锚拉板足尺模型试验。

5.3 索力优化及桥面板抗裂研究

针对组合梁斜拉桥成桥状态可以通过斜拉索的张拉索力进行调整这一受力特点, 进行了斜拉桥索力优化方法研究, 并结合灌河桥设计施工实际情况, 对该桥进行了索力优化的计算分析。同时针对灌河桥采用钢绞线斜拉桥的情况, 对钢绞线斜拉索张拉施工中的夹片锚固性能进行反顶工艺措施研究试验。

针对组合梁斜拉桥桥面板的开裂情况的结构性和非结构性因素的分析研究, 结合灌河桥设计施工实际情况, 对该桥进行桥面板结构受力分析和实际混凝土收缩测定, 通过对其桥面板的一、二、三体系受力情况和收缩应力的计算, 对灌河桥桥面板的抗裂性能做出评定, 并据此研究提出提高桥面板抗裂性能的措施。

5.4 试桩工程试验报告

通过试桩验证了灌注桩施工工艺的可行性, 为桩基施工设备的选择、泥浆配比方案和施工工艺的改进提供重要依据; 试桩报告提供压浆前后单桩极限承载力、桩身轴向应力、桩身完整性、分层岩土摩擦力、极限端阻力、桩弹性压缩、岩土塑性变形, 并对钻孔桩施工工艺和桩端后压浆工艺提出了建议。

5.5 抗震性能研究

针对灌河特大桥的结构特点, 结合震害资料以及工程抗震实际经验, 采用理论分析的方法进行灌河特大桥的抗震性能研究。在对施工图方案进行详细的地震反应分析的基础上, 对主桥结构进行了全面的抗震性能评价, 在不影响桥梁在运营荷载下的使用性能的前提下, 保证灌河特大桥的抗震安全性。该研究采用反应谱方法和时程分析法进行空间非线性地震反应分析, 对主桥结构进行了抗震安全性验算, 并提出抗震研究的结论和建议。

5.6 抗风性能研究

采用数值风洞技术, 对本桥成桥状态的结构动力特性、主梁成桥状态的静三分力系数与气动导数、索塔阻力系数、颤振临界风速及成桥状态主梁的涡振振幅、成桥状态的静风荷载及风载响应进行了计算分析, 结果表明, 本桥在成桥状态满足颤振稳定性要求, 且具有很大富余度。涡振分析显示本桥在成桥状态涡激振幅很小, 可不予考虑。

参考文献

- [1] 林元培. 斜拉桥. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 严国敏. 现代斜拉桥. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.