

天津富民桥整体结构计算分析与设计

井润胜 汤洪雁 孙建勋 张滔

(天津城建设计院 天津 300073)

摘要:天津富民桥主桥为单塔空间索面自锚式悬索桥,造型独特,结构受力及构造处理复杂。主要介绍该桥的结构设计特点,并简述了整体结构空间分析计算结果。

关键词:自锚式悬索桥 空间缆索结构 桥梁设计

1 工程概况

天津富民桥作为海河综合开发基础设施建设的重要工程,位于天津市中心城区,海河两岸综合开发规划智慧城范围内。主桥的设计采用了新颖的独塔空间索面自锚式悬索桥方案——“沾水船影”,似一艘海河上启锚的帆船。

天津富民桥规划为机非混行双向8车道,桥面宽度为38.6m,横向布置为:1.3m(吊索锚固区及防撞护栏)+15m(行车道)+6m(塔区及防撞护栏)+15m(行车道)+1.3m(吊索锚固区及防撞护栏)。主桥主跨钢箱梁下挂5.0m人行通道,直接连接海河两岸的亲水平台。

本桥2005年底开工,于2008年6月建成通车。

2 桥梁整体布置

天津富民桥主桥为独塔空间索面自锚式悬索桥,桥塔为独柱,主跨主缆锚于主梁的两侧,边跨主缆锚于地锚,形成一个稳定的结构体系,见图1。主跨主缆采用三维空间线形,在立面及平面皆为抛物线,边跨主缆采用一组(2根并排)缆索不加竖向吊索形式。主跨157m,一跨跨越海河。边跨86.4m,一跨跨越城市主干道。主梁自主跨向边跨方向依次为16m的预应力混凝土段、6m的钢混过渡段、199m的钢箱梁段、6m的钢混过渡段和16.4m的预应力混凝土段。钢箱梁为双主梁结构,中间用钢横撑连接,全宽38.6m。5m宽人行道位于钢横撑的正下方,并悬挂于钢箱梁之下。主缆和吊杆采用高强度平行钢丝。主跨主缆直接锚固于主跨预应力混凝土箱梁内,边跨主

缆锚固在边跨锚碇,边跨锚碇与边跨预应力混凝土箱梁固接。主塔、边跨锚碇、承台和桩基础采用钢筋混凝土结构。全桥变形由主跨端320型伸缩缝完成。

3 空间分析

由于本桥采用特殊桥型,设计需要克服整体结构及局部构件计算等诸多难点:在一期恒载作用下主缆及其他构件的线形及内力的非线性计算;在二期恒载及活载作用下,全桥结构的受力及变形的线性计算;屈曲稳定分析;塔顶鞍座、散索套的局部受力计算。

3.1 整体分析

采用MIDAS空间有限元软件进行非线性分析计算。主缆和吊杆采用索单元,主缆和吊杆共用1个节点,主缆在塔顶用刚性连接与主塔相连,主梁采用梁格单元,其间用刚性连接联结主梁、横撑和吊杆。横撑和主塔采用梁单元。边跨端和塔底采用固接,其余支座只约束横桥向和竖向位移。全桥模拟8个车道。空间计算模型见图2。

根据桥梁结构的实际情况建模,输入主缆初始坐标(假定),设定迭代次数为10次,收敛精度为 10^{-5} ,索鞍和锚固端IP点固定,其余各点可以移动,进行非线性迭代分析计算,求出恒载作用下主缆的平衡内力以及主缆空缆线形和成桥线形。

在求出成桥状态线形,内力和应力后,添加移动荷载工况,并进行荷载组合,移动荷载分析,查看在各种荷载工况组合下全桥的内力、应力、位移结果。

注:《天津市海河桥梁项目—富民桥工程》项目获第三届欧维姆预应力技术奖二等奖

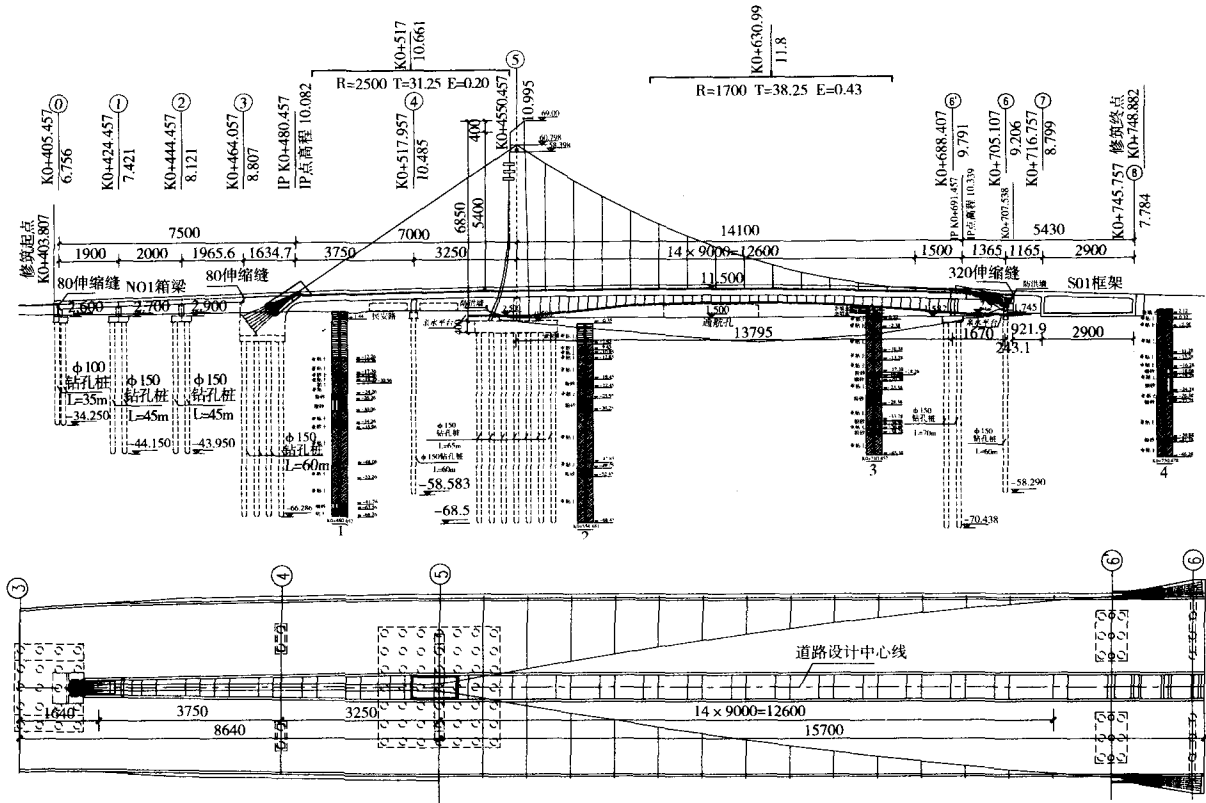


图1 独塔空间索面自锚式悬索桥总体布置



图2 空间计算模型

主缆由37股预制平行钢丝索组成，主鞍处主缆拉力最大为27900kN，满足规范规定安全系数不得小于2.5的规定

主缆为空间三维线形，体系转化过程中，主缆吊点位移变化较大，最大位移出现在主跨跨中，横桥向位移3.723m，顺桥向位移0.582m，竖向位移-0.605m，总位移3.817m。

吊杆为空间纵向双吊杆，采用91φ5平行钢丝。主跨跨中吊杆拉力最大1030.7kN，满足规范

规定销接式吊索安全系数不得小于3的规定。根据各吊杆内力计算结果进行索夹计算和索夹分类，并配置相应的螺杆。

主跨跨中和主塔处钢箱梁的应力较大，见表1，其应力值满足规范要求。

表1 钢箱梁应力

截面位置	上缘应力	下缘应力
主跨跨中钢箱	-102.3	52.2
主塔处钢箱梁	106.3	-153.4

预应力混凝土箱梁段,按全预应力构件采用梁格法进行设计计算,混凝土无拉应力出现,最大压应力 $\sigma_{\max}=13\text{MPa}$,满足规范要求。

主梁在活载作用下,向下最大位移值 $\Delta_{\max}=-100.0\text{mm}$,向上最大位移值 $\Delta_{\max}=+5.0\text{mm}$,位移幅值 $\Sigma\pm\Delta=105\text{mm}$ 小于规范要求。

自锚式悬索桥加劲梁部分要承受由主缆传来的较大轴向压力,钢结构受压有可能导致局部屈曲失稳,有必要对加劲梁进行屈曲稳定分析。应用空间结构分析软件MIDAS进行屈曲特征值分析计算,最小临界系数为36,见图3。满足结构稳定性的要求。

通过整体分析,该桥的强度、刚度均满足规范要求。

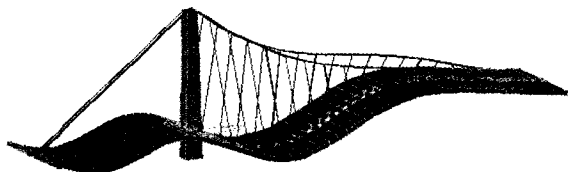


图3 屈曲稳定分析

3.2 主鞍、散索套局部分析

主缆过塔顶主鞍,以往悬索桥主缆平面投影为一条直线,主缆过主鞍的鞍槽为直线,主缆对主鞍作用以竖向力为主,而本桥主缆需由边跨的直线变化到主跨的斜线,需要考虑主缆对鞍槽的横桥向水平力作用,并且要设计出双向组合转向构造。鞍座采用空间分析软件ANSYS进行验算。最大等效应力值最大值为 143MPa ,见图4,经计算满足有关规范的要求。主、边跨散索套同样存在使主缆转向的构造要求,尤其是水平向的转向与主缆的特性是一致的,需要以类似的方式处理。

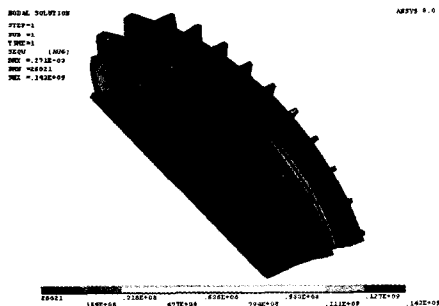


图4 主索鞍局部分析

4 结构设计

主跨主缆的空间三维线形设计,需要一系列特殊构造设计的支持。主缆在主索鞍位置需要改变水平及竖直角度,主缆在主跨锚固位置需要满足角度变化要求,主缆的安装过程由平面线形到空间线形的过渡,尤其是吊杆的设计要满足施工阶段安装及使用阶段的正常运营的转角要求。

4.1 锚碇

在主桥边跨端部,为克服主缆产生的上拔力,采用预应力钢筋混凝土重力式锚碇,并将主缆和主梁均锚固于重力锚之上,将主缆产生的竖直上拔力,主缆水平力与自锚主梁轴力的差,传给重力锚承受。重力式锚碇通过钢-混凝土过渡段与主桥钢箱梁连接。重力式锚碇锚体分为锚块和后锚块两部分,后锚块主要用于压重和封闭锚固预应力锚具。

主跨端部为自锚端,自锚结构分为锚室和锚块两部分,锚室采用变截面形式,并于IP点下方设置支承墩保证锚碇的抗倾覆稳定性。

4.2 锚固系统

边跨锚固端锚固系统由索股锚固拉杆和预应力锚固钢束构成,拉杆与锚固预应力采用与索股相同的安全系数2.5控制,保证在各种使用荷载作用下,锚固预应力锚板和锚块之间始终处于受压状态。预应力管道采用不锈钢管真空灌浆对索股平行钢丝进行防护,并定期检查、更换前锚面处油脂。

主跨锚固端由于空间受限,锚固系统采用平行钢丝冷铸锚形式进行索股锚固,管道采用不锈钢管灌油对索股平行钢丝进行防护,并定期检查、更换油脂。

4.3 主塔

主塔采用钢筋混凝土结构、矩形截面,桥面以上塔高58m,塔横桥向宽4.6m,顺桥向塔底宽13.0m,塔顶宽4.5m。在主塔底部两侧设置门型墩。

4.4 钢箱梁

主、边跨均为分离式双钢箱加劲梁,钢箱梁之间用钢箱横撑连接。采用正交异性钢板,采用

桥面钢板下设置纵向U形加劲肋,箱梁底板与斜腹板纵向也分别设置U形和扁钢加劲肋。在主跨顺桥向每3m设置1道横隔板,每6m设置1道钢箱横撑。

4.5 缆索系统

4.5.1 主缆

主缆由2跨组成,跨径组成为(86.4 + 157.081)m。主跨主缆理论跨径为141m,在设计成桥状态下,理论垂度为52.46m,垂跨比约为1:5.376。主缆共2根。主缆施工采用预制平行钢丝索股逐根架设的施工方法(PPWS)。边跨地锚端索股锚头采用套筒式热铸锚,在铸钢制成的锚杯内,浇铸锌铜合金。主跨自锚端索股锚头采用冷铸锚。

4.5.2 吊索

吊索采用平行钢丝成品吊索,吊索布置为顺桥向间距9m,共14排,侧向投影为竖直索,横桥向每截面两组,均为斜索。吊索的下吊点均在桥梁横向最外侧,上吊点随主缆的空间位置变化,每根吊索的横桥向倾斜角度均不相同。吊索采用预制平行钢丝束股(PWS),外包双层PE防护。吊索上下锚头均采用叉耳式热铸锚,锚头由锚杯与叉形耳板构成,锚杯内浇铸锌铜合金,叉形耳板与锚杯用螺纹连接,吊索锚头锚杯采用ZG35SiMn铸钢铸造。考虑安全和换索需要,吊索采用单吊索设计,纵向双吊索设置。

4.5.3 索夹

除主跨安装吊索的索夹外,还有夹紧边跨主缆的索夹和安装缆套的索夹。由于主缆倾角不同,所需夹紧力不同,索夹长度和螺杆数量均不相同。

4.5.4 主鞍

塔顶索鞍采用全铸的整体式索鞍,为肋传力结构形式。索鞍重约85.56t。鞍座下设置聚四氟乙烯板,便于主鞍在施工过程中通过塔顶预埋反力架进行顶推,调整施工中恒载产生的塔顶不平衡的水平力。成桥后,再将索鞍的地脚螺帽固定,并将鞍座与底下钢板焊接。

4.5.5 散索套

本桥采用散索套构造,将主缆索股分散锚固于锚体。主跨散索套采用全铸的肋传力结构,2个散索套重约14.5t。边跨主缆自中间向两边散索,偏角较大,散索套采用2个分离式全铸的肋传力结构分别散索,再用铸钢件加劲板将2个散索套横向连接,克服主缆散索产生的横向分力,2个散索套重约16.6t。

4.6 桥下人行道

主桥上不设置人行道,在主跨钢梁下方设置专门的人行通道。人行通道通过吊索吊在主梁下方,吊索间距3.0m。吊索下为顺桥向间距3.0m的工字形钢横梁,横梁间通过纵向加劲板连接,横梁、纵板上焊接桥面板,桥面板上铺设2cm厚灰色蓝色塑胶铺装层。

4.7 下部基础

主跨自锚端,每个锚碇处采用单排4根直径1.5米的圆形柱式钢筋混凝土钻孔灌注桩,桩长45米,采用C25混凝土,支撑主跨钢箱梁锚碇结构。并于IP点下方设置支承墩保证锚碇的抗倾覆稳定性。支承墩处采用钢筋混凝土承台,平面尺寸为10.5米×6.5米,承台厚2.0米,采用C30混凝土。每个承台下设置6根直径1.5米钢筋混凝土灌注桩,桩长50米,采用C25混凝土。

索塔下部基础处采用钢筋混凝土承台,平面尺寸为25米×25米,承台厚4米,承台采用C30混凝土。承台下设置49根 ϕ 1.5钢筋混凝土灌注桩,桩长65米。

边跨重力锚锚体下部基础处采用钢筋混凝土承台,平面尺寸14.3米×18.2米,高度2米,采用C30混凝土;锚碇基础采用钢筋混凝土钻孔灌注桩,一个锚碇下设置20根 ϕ 1.5钢筋混凝土灌注桩,桩长55米,采用C25混凝土。

5 结语

天津富民桥造型独特新颖、结构受力及构造复杂,结构形式为国内首创,设计需要克服整体结构及局部构件计算等诸多难点。国内外目前建成或在建的该类桥型很少。它的建成将为同类型桥梁的建设提供一定参考和借鉴。