

界首市裕民桥总体计算与关键构件分析

刘胜光

(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海市 201206)

摘 要: 界首市裕民桥主桥为主跨 142 m 的自锚式悬索桥,设计步骤主要包括桥梁总体布置的确定、静力有限元建模、整体稳定性分析、缆索线形确定、运营阶段内力分析以及构件强度验算等;同时,还需建立动力模型,以了解桥梁自振模态,并对结构在地震作用下的响应进行分析,进而验算桥梁的抗震性能。所总结的内容可为类似桥梁设计提供较有价值的参考。

关键词: 裕民桥;自锚式悬索桥;悬索桥建模;缆索系统;主塔计算长度

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)03-0102-04

1 概 述

1.1 工程概况

裕民桥位于安徽省界首市,跨越沙颍河,通航净空要求为 110 m×10 m。主桥采用双塔 3 跨自锚式悬索桥,跨径布置为 58 m+142 m+58 m=258 m。主缆垂跨比为 1/6.94,为平行索面,吊索间距 6.1 m。主桥标准段桥面布置为 1.5 m(吊索区)+12 m(人非车道)+1.5 m(吊索区)=15 m;梁端桥面因主缆锚固要求加宽到 18 m,即上述吊索区各自增加 1.5 m。标准段主梁采用双边箱钢梁结构,梁高 2 m,梁端主缆锚固段采用钢筋混凝土箱梁结构,与标准段之间设置钢-混过渡段。主塔采用双圆柱形,上塔柱直径 2 m,下塔柱直径从 2 m 渐变到 4.5 m;因放置主索鞍需求,塔顶局部加粗到 2.5 m,且分别在塔顶和梁顶设置横梁。主桥基础采用承台桩基础,桩径 1.5 m,每墩 20 根;根据地质报告建议桩端持力层选为第 6 层粉质黏土层,桩长 45 m;承台厚 3 m,为长圆形。主桥立面布置及主塔处断面见图 1。

除主桥外,本桥还布置有供非机动车上下桥的坡道桥和供行人通行的梯道桥。限于篇幅,本文仅讨论主桥的设计,且重点在于自锚式悬索桥特有内容,即悬索桥建模、稳定性分析、缆索系统设计、主塔计算长度确定、抗震性能研究等,而对于较为常规的钢箱梁、混凝土构件以及下部结构的计算,本文不予涉及。

1.2 设计标准及荷载

1.2.1 活载标准

汽车荷载:施工和维护期间按城-B 级车辆荷载验算。

人群荷载:按《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)第 3.1.3 条计算得人群荷载 $W=2.4 \text{ kN/m}^2$,考虑到桥址两岸为商业和文化区,人群密集,提高至 $W=3.5 \text{ kN/m}^2$;局部分析时,取 $W=5.0 \text{ kN/m}^2$ 。

1.2.2 恒载标准

一期恒载:钢材 78.5 kN/m^3 ;主缆 90 kN/m^3 (计入防护系统重量);混凝土 26 kN/m^3 。

二期恒载:考虑铺装(混凝土+沥青),栏杆及过桥管线等重量。

1.2.3 抗震标准

基本烈度为 6 度;地震动峰值加速度 $0.05g$;场地类型为 III 类;场地特征周期 0.45 s ;桥梁结构阻尼比取 0.02 ;本桥为悬索桥,根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011),抗震设防分类为甲类,地震作用计算时参考《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)中的 A 类桥梁。

1.2.4 风荷载标准

按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)取值,地表类别 B 类;风作用水平 $W_1(1/10)$ 和 $W_2(1/100)$ 所对应的基本风速 U_{10} 分别为 24.5 m/s 和 32.4 m/s ;纵横向风分别考虑。

1.2.5 温度荷载

整体升降温按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取值;缆索升降温取 $15 \text{ }^\circ\text{C}$;钢梁截面梯度温度按 BS5400 取用。

收稿日期:2022-07-24

作者简介:刘胜光(1987—),男,学士,工程师,从事桥梁设计工作。

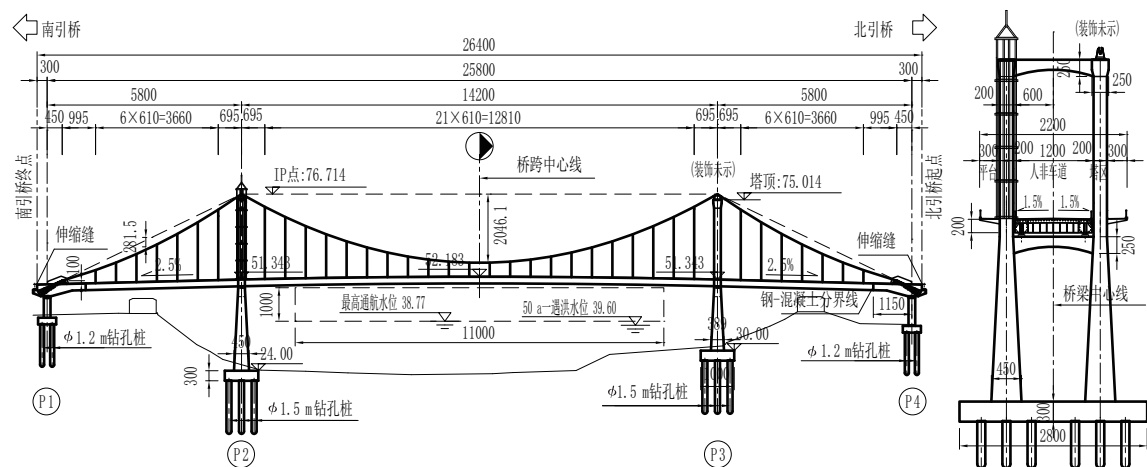


图1 裕民桥主桥立面布置及主塔处断面(单位:高程 m,其他 cm)

1.2.6 不均匀沉降

主墩 3 cm,边墩 1 cm。

1.2.7 通航标准

沙颍河按Ⅲ级航道,通航净空 110 m×10 m,设计航道底宽 60 m,最高通航水位 38.77 m,设计洪水水位 39.60 m(1/50)。

2 总体计算

2.1 静力模型建模步骤

采用 Midas/Civil 有限元分析软件对本桥进行有限元分析。加劲梁、桥塔采用梁单元模拟,主缆、吊索采用索单元(种类 Lu)模拟;主塔承台底用完全固结;主塔横梁顶及边墩处设置纵向滑动支座;主缆与塔顶的主鞍采用刚性连接模拟,并释放纵桥向约束(运营分析时再固结);主缆与加劲梁之间的散索鞍采用只受压弹性链接模拟;主缆与加劲梁之间的锚固、吊索和加劲梁的连接通过刚性连接来处理。

全桥静力模型的建立按如下步骤进行:

(1)定义材料、截面等特性值。

(2)运行“悬索桥建模助手”,建立桥梁大致轮廓。对于本桥,由于边跨锚固段采用较重的混凝土梁,端部吊索受力较大,故“桥面系”定义时应按“点荷载”施加。

(3)按实际情况修改模型。主要包括修改边跨锚固段;“地锚”改“自锚”;添加“弹性链接”以模拟支座;添加除自重外的其他恒载工况等。

(4)运行悬索桥分析。“悬索桥分析控制”中的“更新节点组”为所有吊索与主缆相交的点(即索夹位置);“垂点组”为主缆跨中垂点,可以为空;“考虑的荷载工况”即为所有恒载。

(5)成桥验证。添加 1 个“一次成桥”的施工阶

段,运行之后查看本阶段的位移,若接近于零,则表示悬索桥分析成功。

(6)运营分析模型。在通过验证的模型上,继续添加运营阶段的各项荷载,如温度、风、沉降以及人群荷载等,即可进行运营状态分析。

主桥有限元静力计算模型见图 2。

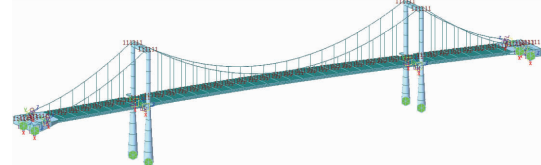


图2 主桥有限元静力计算模型

2.2 稳定计算

成桥阶段的整体稳定安全系数,可在 Midas/Civil 有限元分析软件中进行“屈曲”分析获得。在屈曲分析控制中,荷载组合选项中添加各恒载及“活载”工况。其中“活载”应为使考察构件(本桥的 P2 主塔)产生最大轴力的活载等效的静力荷载工况,该工况可以通过软件中“移动荷载追踪器-将移动荷载工况转换为静荷载工况”来加载。

整体稳定计算时,屈曲荷载=稳定安全系数 K×[恒载+活载(等效为静力荷载加载)]。对于稳定安全系数 K,可参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)第 7.4.2 条,取为 4。通过计算,P2 主塔前 5 阶稳定安全系数见表 1。由表 1 可见,P2 主塔的 1 阶稳定安全系数为 17.6>4,满足要求。

表 1 P2 主塔前 5 阶失稳安全系数

失稳模态阶数	失稳特征	稳定安全系数
1	正对称竖弯失稳	17.6
2	反对称竖弯失稳	18.1
3	塔面内正对称弯曲失稳	27.1
4	塔面外正对称侧弯失稳	37.6
5	塔面外反对称侧弯失稳	45.4

2.3 动力计算

2.3.1 动力模型

本桥采用桩基,动力模型中桩基础采用“m法”模拟,其他结构的模拟则与静力模型相同。据此建立的主桥动力分析模型见图3。

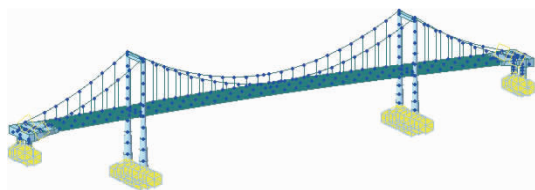


图3 主桥动力分析模型

2.3.2 自振模态

根据建立的主桥动力计算模型,对该桥进行结构动力特性的分析研究,以了解其结构的动力响应特性。该桥的结构动力特性见表2。

表2 结构动力特性表

振型阶数	周期 /s	频率 /Hz
1	1.978	0.506
2	1.600	0.625
3	1.316	0.760
4	1.259	0.794
5	1.181	0.846
6	1.059	0.945

2.3.3 抗震分析

2.3.3.1 地震动输入

根据前面建立的主桥结构动力特性分析模型,按照对应的边界约束条件以及所计算的结构动力特性,采用反应谱法对E1及E2概率水准地震作用下的结构响应进行计算分析。其中,地震输入分别为纵桥向和横桥向,由《公路桥梁抗震设计规范》第5.2.2条算得。E1地震作用下反应谱最大值 $S_{\max}=0.21g$,E2地震作用下 $S_{\max}=0.35g$ 。

2.3.3.2 桥梁结构地震响应及验算

运行程序,可以得到各支座位置及塔底截面对应不同地震作用的地震响应,再将其与静力计算结果进行比较。经过对比,对于塔底截面及桩基,地震作用均不控制设计。

对于支座,其在E2地震作用下的响应见表3。根据《公路桥梁抗震设计规范》第7.5.2条,所采用的滑动支座主位移方向的位移量应大于146 mm,固定支座水平承载力应大于1 842 kN。另外,根据E2地震作用下梁端位移144 mm,并结合静力下梁端位移,本桥可采用200型伸缩缝。

表3 各支座在E2地震作用下的响应

支座位置	纵向		横向	
	F_x /kN	U_x /mm	F_y /kN	U_y /mm
P1	190	144	1 608	59
P2	1 842	143	1 475	90
P3		145	1 652	95
P4	273	146	1 167	51
梁端		144		60

2.3.4 抗风验算

根据《公路桥梁抗风设计规范》,本桥需要验算 W_2 风作用水平下的颤振稳定性。根据《公路桥梁抗风设计规范》第7.5.1条,算得颤振稳定系数 $I_f=3.8$,其中主梁扭转基频 f_t 可由有限元模型得出,本桥为0.94;再根据《公路桥梁抗风设计规范》第7.5.3条, $I_f<4$ 的桥梁,可由《公路桥梁抗风设计规范》第7.5.4条算得颤振临界风速 U_f ;最后代入《公路桥梁抗风设计规范》第7.5.8条,检验桥梁颤振稳定性。本桥检验结果为:

$U_f = 70.2 \text{ m/s} > \gamma_f \gamma_t \gamma_a U_d = 66.2 \text{ m/s}$, 本桥不会发生颤振失稳。

3 关键构件计算要点

3.1 缆索系统计算分析

3.1.1 主缆及吊索

3.1.1.1 缆索制造长度及线形

本文前述所建立的静力模型中,主缆及吊索为索单元,种类Lu。Lu即为无应力索长,可以作为施工下料长度。主缆中心索股下料长度即为模型中所有主缆单元的Lu相加,吊索则为各单元的Lu。

要保证成桥状态下的主缆线形,除了确定主缆及吊索长度以外,还需要有专业人员在施工过程中进行严格的施工监控。施工监控需要根据施工过程中的实际情况进行详细计算,本文不涉及。但是设计时应给出理论上的空缆状态的线形,供施工时参考。

空缆线形需要通过“倒拆”的方法得出:在本文2.1节第(5)步得出的成桥模型上,添加2个施工阶段,按实际施工的倒序先后将二期恒载、吊索(含索夹)等荷载“拆除”。运行之后读出主缆在塔顶、跨中以及散索鞍等处的位移,即为理论上的空缆线形。

3.1.1.2 缆索强度计算

运营状态下基本组合缆索最大内力可由静力计算模型直接读出,再根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015)第9.4.2条、第10.4.2条分

别验算主缆及吊索的应力。

3.1.2 索鞍计算

鞍槽尺寸可由《公路悬索桥设计规范》第12.4.1条确定,其中鞍槽设计宽度 b 计算时,单排钢丝数量 n_{wt} 可取与单股钢丝数的平方根接近的数,例如本桥单股主缆钢丝91根, n_{wt} 取为9,这样算得的 b 和 h_{ss} 分别为46 mm和49 mm,最接近正方形。

鞍槽内主缆抗滑移安全系数按《公路悬索桥设计规范》第12.4.2条计算,其中主缆松紧边拉力由有限元模型直接读出,取标准组合。

3.1.3 索夹计算

索夹计算按《公路悬索桥设计规范》第11.4条进行,包括根据主缆尺寸确定索夹内径;根据吊索内力及与主缆夹角验算抗滑移稳定,进而确定螺栓型号及个数;根据螺栓夹紧力验算索夹材料强度等。

3.2 主塔计算

悬索桥主塔承受主缆和主梁带来的偏心压力,是典型的偏心受压构件,可按照一般的混凝土构件验算。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第5.3节和第6.4节给出了具体计算方法,不再赘述。

由于本桥主塔的特殊约束形式,需要按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中式E.0.3和式E.0.2-3来确定其计算长度换算系数 k ,而其中的关键便是水平约束刚度 K_F 的确定。

本工程的水平约束即成桥阶段主缆对塔顶的约束,其水平约束刚度 K_F 可通过以下方法计算:

(1)成桥模型中,在塔顶施加1个单位力 P_1 ;(2)

运行计算,读出塔顶位移 Δ_1 ;(3)算出塔缆组合刚度 $K_{F1}=P_1/\Delta_1$;(4)删去主缆,在只有主塔的模型中,重复(1)~(3)步,算出主塔独立刚度 $K_{F2}=P_2/\Delta_2$;(5)主缆的水平约束刚度 $K_F=K_{F1}-K_{F2}$ 。

另外,对于本桥主塔这种变截面构件,式E.0.2-3中的截面抗弯刚度 EI 可取为平均刚度。根据上述方法算得的计算长度换算系数 k 分别为:P2塔0.89,P3塔0.77。

4 结 语

(1)自锚式悬索桥的Midas/Civil有限元计算模型需要借助建模助手,并通过“悬索桥分析”功能得到最终模型。

(2)桥梁稳定计算时,要把活载转换为静力荷载加载,需要用到“移动荷载追踪器-将移动荷载工况转换为静荷载工况”功能。

(3)动力模型需要将静力模型中的桩基础改为“m法”模拟,可用以研究结构自振模态、地震响应等,后者是选取桥梁支座、伸缩缝等构件的重要依据。

(4)对于本桥这种规模较小的悬索桥,抗风稳定性可按规范给出的公式进行验算。

(5)缆索系统是悬索桥的特有结构,本文给出了缆索长度、空缆及成桥线形的确定方法;而缆索强度、索鞍和索夹的计算可根据静力模型的结果和规范要求进行计算。

(6)主塔与其他偏压构件不同的地方在于计算长度的确定,本文结合规范给出了确定主塔计算长度换算系数的方法。

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com