

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.08.014

# 高塔大跨 PC 斜拉桥抗震性能研究

杨相展

(创辉达设计股份有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 兰海高速贵遵复线乌江特大桥主跨布置为(40+110+320+110+40) m 双塔双索面 PC 斜拉桥,最大塔高 197.1 m。为研究该类桥梁的抗震性能,利用 Midas/Civil 软件建立了全桥有限元三维模型,分析了该桥的动力特性,同时利用反应谱法,对高塔的承载力和位移进行了计算。结果表明,该桥的各项指标均满足规范要求,可为此类桥梁的设计提供参考。

**关键词:** 高塔;斜拉桥;抗震性能;反应谱法

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)08-0049-03

## 0 引言

随着高速公路向山区,特别是向西部地区深沟大河这样的自然地形不断发展,横跨其间的桥梁规模也逐渐增大。斜拉桥作为千米级以下最具竞争力的大跨桥梁,在近年得到的应用越来越多,桥梁跨度、高度不断刷新世界纪录<sup>[1]</sup>。作为重要的生命线工程,对于斜拉桥抗震性能的研究尤为重要。

朱曾辉<sup>[2]</sup>通过对巴东长江大桥(塔高 212 m,双塔双索面 PC 斜拉桥)有限元模型的分析,发现高塔大跨漂浮体系斜拉桥的第 1 阶纵飘频率基本上由塔高决定,并基于分析结果,提出对高塔大跨斜拉桥纵向施加约束的建议,以便有效降低塔高对桥梁抗震的不利效应。李成等<sup>[3]</sup>以润扬大桥北汊斜拉桥(塔高 146.88 m,双塔双索面钢箱梁斜拉桥)的实际工程为背景,采用 Midas/Civil 有限元软件建立三维计算模型,进行动力特性分析,分别采用规范反应谱法和时程分析法对该桥进行地震反应分析,得出了主体结构重要截面在地震作用下的内力和位移。戴小冬等<sup>[4]</sup>应用 SAP2000 软件对常德沅江西大桥(塔高 110 m,双塔双索面 PC 斜拉桥)建立有限元模型,采用非线性时程分析方法对该桥进行了研究。

当前国内外学者就斜拉桥抗震性能进行了大量研究,但是对高塔大跨 PC 斜拉桥抗震研究还较少。本文以前人研究结论为基础,以兰海高速贵遵复线乌江特大桥为例,利用 Midas/Civil 有限元软件建立

三维计算模型,对高塔大跨 PC 斜拉桥进行抗震性能研究。

## 1 工程概况

乌江特大桥位于贵州省遵义市播州区尚稽镇县道 002 楠木渡大桥下游约 450 m 处,由北向南横跨乌江。乌江特大桥主桥中心桩号为 K38+920.00。该桥为双塔双索面 PC 斜拉桥,跨径布置为(40+110+320+110+40) m,主桥长 620 m,塔墩处设支座,纵向按半漂浮体系设计。

乌江特大桥桥型布置图见图 1。该桥已于 2018 年 1 月正式通车,建成后的实景图见图 2。

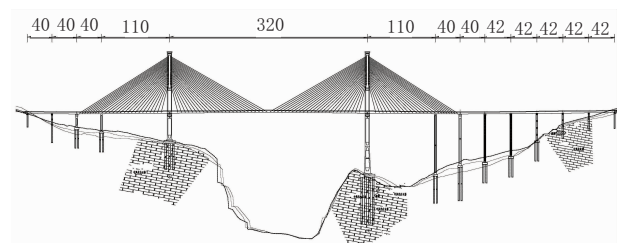


图 1 乌江特大桥桥型布置图(单位:m)



图 2 乌江特大桥实景图<sup>[5]</sup>

乌江特大桥主桥宽度:0.5 m(风嘴)+0.2 m(检修道栏杆)+1.457 m(拉索锚固区)+0.393 m(防撞墙)+

收稿日期: 2021-10-04

作者简介: 杨相展(1981—),男,硕士,高级工程师,从事大跨桥梁设计与技术管理工作。

15.5 m(行车道)+1.5 m(防撞墙)+ 15.5 m(行车道)+ 0.393 m(防撞墙)+1.457 m(拉索锚固区)+ 0.2 m(检修道栏杆)+ 0.5 m(风嘴)=37.6 m。

乌江特大桥桥梁横断面图见图 3。

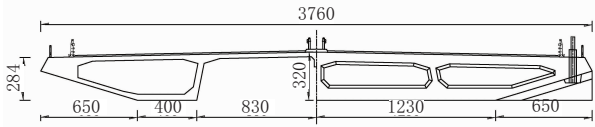


图 3 乌江特大桥桥梁横断面图(单位:m)

乌江特大桥索塔采用“H”型索塔,由上塔柱、中塔柱、下塔柱、上横梁及下横梁组成。遵义侧承台以上高度为 143.1 m,贵阳侧承台以上高度为 197.1 m。索塔锚固区采用混凝土齿板锚固形式,塔柱截面中采用环向预应力体系。

## 2 计算模型

本文利用 Midas/Civil 有限元软件建立三维计算模型,全桥共分为 1 198 个节点、974 个单元,其中梁单元 774 个,桁架单元 200 个。结构有限元模型见图 4。

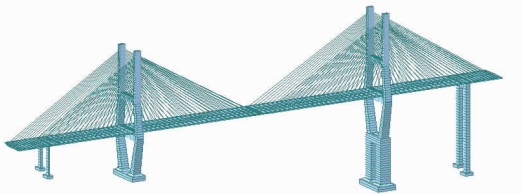


图 4 结构有限元模型示意

乌江特大桥主桥支座采用球型钢支座,索塔处采用竖向 QZ15000SX 双向滑动支座,横桥向采用 KFQZ 8000SX 双向滑动支座作为侧向限位支座;辅助墩顶设置 QZ15000SX 双向滑动支座;过渡墩顶设置竖向 QZ10000SX 双向滑动支座,横桥向采用 KFQZ 2000SX 双向滑动支座作为侧向限位支座。主梁在不同位置的约束条件(计算模型边界条件)见表 1。表中 DX、DY、DZ 分别表示顺桥向、横桥向和竖向的平动自由度;RX、RY、RZ 分别表示绕顺桥向、横桥向和竖向的转动自由度;数字 1 表示约束,0 表示自由。

## 3 动力特性分析

梁自振特性分析是研究桥梁振动问题的基础,为了计算地震作用下的结构动力响应,必须首先计算桥梁结构的自振特性。根据建立的动力计算模型,进行了结构自振特性分析。

成桥状态结构自振频率及振型见表 2。

将表 2 结果与文献[2~4]中的结果相比,可以发现两者差异不大:对于半漂浮体系斜拉桥,其 1 阶振

表 1 计算模型边界条件

位置	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
左侧过渡墩	0	1	1	1	0	0
左侧辅助墩	0	0	1	0	0	0
左侧索塔	0	1	1	1	0	0
右侧索塔	0	1	1	1	0	0
右侧辅助墩	0	0	1	0	0	0
右侧过渡墩	0	1	1	1	0	0

表 2 成桥状态结构自振频率及振型

阶次	频率 $f$ /Hz	振型特点	阶次	频率 $f$ /Hz	振型特点
1	0.108	主梁纵飘	7	0.562	右侧辅助墩纵弯
2	0.326	右侧辅助墩纵弯	8	0.756	左右桥塔同向横弯
3	0.393	主梁 1 阶对称竖弯	9	0.767	主梁 2 阶对称竖弯
4	0.416	左右桥塔同向横弯	10	0.771	上塔柱反向横弯
5	0.505	左右桥塔反向横弯	16	1.207	主梁 1 阶对称横弯
6	0.532	主梁 1 阶反对称竖弯	20	1.401	左侧桥塔纵弯

型均为纵飘,且均为长周期,本桥周期为 9.25 s;同时主梁 1 阶对称竖弯出现得较早(振型图见图 5),而 1 阶对称横弯出现得较晚,在第 16 阶(振型图见图 6),原因主要是本桥采用了 PC 箱梁,桥梁横向刚度较大,使得横桥型自振频率较高。

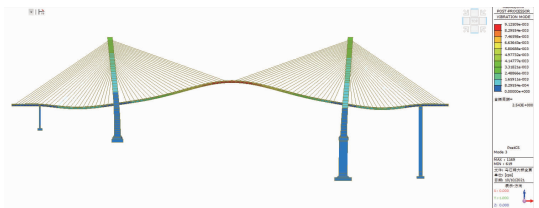


图 5 主梁 1 阶对称竖弯,  $f=0.393$  Hz

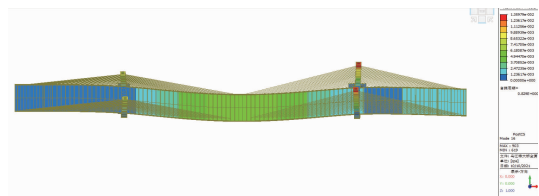


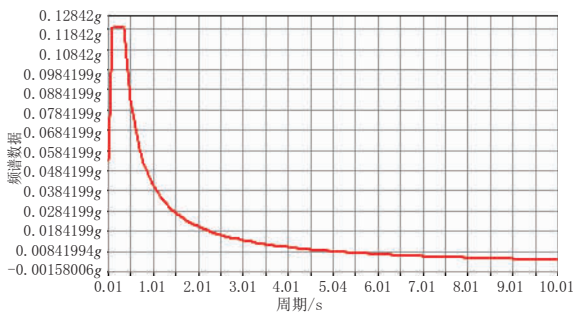
图 6 主梁 1 阶对称横弯,  $f=1.207$  Hz

## 4 地震反应分析

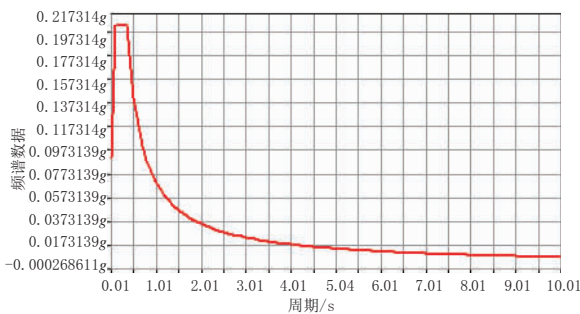
### 4.1 反应谱参数

根据《兰海高速贵遵复线乌江特大桥工程场地地震安全性评价报告》,E1 地震动峰值加速度值为 0.053g, E2 地震动峰值加速度为 0.107g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,对应地震基本烈度为 VI 度。水平设计加速度反应谱  $S^6$ 见图 7。

单独考虑顺桥向 X 或横桥向 Y 与竖向 Z 的地震作用,取下述各分量的地震最不利组合作为设计地震作用:顺桥向 +0.5 竖向(工况一)或横桥向 +0.5 竖



(a) E1地震作用下水平设计加速度反应谱



(b) E2地震作用下水平设计加速度反应谱

图7 水平设计加速度反应谱

向(工况二)。竖向设计加速度反应谱可以由水平设计加速度反应谱乘以谱比函数 0.65 确定。地震荷载组合采用 SRSS 法。

## 4.2 计算结果

在顺桥向 +0.5 竖向(工况一)和横桥向 +0.5 竖向(工况二)地震动组合作用下,反应谱分析的桥塔塔顶最大水平位移、恒载和地震荷载组合下的桥塔塔底弯矩值、恒载和地震荷载组合下的桥塔塔顶和塔底应力值见表 3、表 4、表 5。

表3 桥塔塔顶最大水平位移表 单位:cm

位置	E1 工况一	E1 工况二	E2 工况一	E2 工况二
4号桥塔	22.0	6.6	36.9	12.7
5号桥塔	5.5	9.6	20.4	18.9

表4 恒载和地震荷载组合下桥塔塔底弯矩值 单位:kN·m

位置	E1 工况一	E1 工况二	E2 工况一	E2 工况二
4号桥塔	$2.53 \times 10^5$	$1.07 \times 10^5$	$4.31 \times 10^5$	$2.74 \times 10^5$
5号桥塔	$2.18 \times 10^5$	$6.57 \times 10^5$	$4.29 \times 10^5$	$1.33 \times 10^5$

表5 恒载和地震荷载组合下桥塔塔顶、塔底应力值 单位:MPa

工况	4号塔塔顶	4号塔塔底	5号塔塔顶	5号塔塔底
E1 工况一	-1.43	-10.68	-1.29	-12.23
E1 工况二	1.01	-11.71	1.10	-11.32

由表 3 可知,在纵横向地震作用下,塔顶位移均较小,满足《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T

2231-01-2020)要求。

由表 4 可知,由于 5 号桥墩底部 50 m 范围内为双肢矩形薄壁结构,刚度较大,在横向地震力的作用下,横梁与塔柱交界处产生了较大的弯矩,从桥塔应力图中也可得到同样的结果。对 E2(工况一)作用下的 4、5 号桥塔底缘进行了强度验算,见表 6。由表 6 可知,E2 作用下桥塔承载力储备较大,满足要求。

表6 E2(工况一)作用下塔底强度验算

位置	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	抗弯能力/(kN·m)	安全系数
4号桥塔	$2.9 \times 10^5$	$4.31 \times 10^5$	$8.59 \times 10^5$	1.99
5号桥塔	$3.03 \times 10^5$	$4.29 \times 10^5$	$1.08 \times 10^6$	2.52

由表 5 可知,在恒载和纵向地震组合作用下,桥塔顶缘最小压应力为 -1.43 MPa,未出现拉应力;桥塔底缘最大压应力为 -12.23 MPa,未出现拉应力,桥塔顶底缘应力均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362-2018)要求。在恒载和横向地震组合作用下,桥塔顶缘最大压应力为 -11.71 MPa,拉应力最大值为 1.10 MPa,出现在下横梁与塔柱交界处,此处刚性较大,设计时进行了精心配筋以有效抵抗拉应力;桥塔底缘最大压应力为 -11.32 MPa,未出现拉应力,桥塔顶底缘应力均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362-2018)要求。

## 5 结语

利用 Midas/Civil 有限元软件建立了乌江特大桥的三维模型,按照规范要求采用反应谱法分析了顺桥向 +0.5 竖向和横桥向 +0.5 竖向地震动组合作用下桥塔的内力和位移,计算结果表明该桥各项指标均满足规范要求。目前本桥已经于 2018 年 1 月正式通车,运行良好,可为同类桥梁的抗震设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 刘波,彭运动,候满.贵州都格北盘江大桥主桥设计及关键技术[J].桥梁建设,2018,48(6):81-86.
- [2] 朱增辉.高塔大跨斜拉桥抗震稳定性分析[D].重庆:重庆交通学院,2005.
- [3] 李成,刘向荣,施飞.某大跨度斜拉桥抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2013(5):74-76.
- [4] 戴小冬,卢江波,苏振宇,等.常德沅江西大桥主桥抗震性能研究[J].公路工程,2018,43(5):252-255.
- [5] 刘建.楠木渡乌江特大桥主桥设计[J].价值工程,2019,38(26):274-275.
- [6] JTJ/T 2231-01-2020,公路桥梁抗震设计规范[S].