Hans汉斯

桐梓河特大悬索桥地震响应分析

范玉亮1*,李国栋1,朱 赫2,申成庆2

¹中铁开发投资集团有限公司,云南 昆明 ²中南大学土木工程学院,湖南 长沙

收稿日期: 2023年5月1日; 录用日期: 2023年5月21日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

大跨度桥梁是山区交通运输的枢纽和抗震救灾的生命线,一旦在地震灾害中被破坏,后果十分严重。桐 梓河特大悬索桥是一座主跨965 m的大跨度双塔钢桁架加劲梁悬索桥,位于贵州省桐梓县,其跨度大、 主塔高、结构受力复杂。为评估该桥在地震荷载作用下的安全性,建立空间有限元模型,使用反应谱法 对桐梓河特大悬索桥E1、E2级地震下的响应进行计算分析。结果表明:该桥在自重 + 二恒和横向(或纵 向) + 竖向E1、E2地震作用下,钢桁梁最大拉应力分别为119.81 MPa、129.12 MPa、153.70 MPa和 173.53 MPa,最大压应力分别为87.12 MPa、87.24 MPa、79.09 MPa和79.43 MPa,均处于弹性工作 阶段。同样工况下,相应E1、E2作用下混凝土主塔的最大拉应力分别为1.79 MPa、2.09 MPa、2.10 MPa 和2.39 MPa,最大压应力分别为9.15 MPa、8.72 MPa、8.26 MPa和7.84 MPa,均满足设计要求。

关键词

悬索桥, 地震响应, 反应谱分析

Seismic Response Analysis of Tongzi River Super Large Suspension Bridge

Yuliang Fan^{1*}, Guodong Li¹, He Zhu², Chengqing Shen²

¹China Railway Investments Group Limited, Kunming Yunnan ²School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Received: May 1st, 2023; accepted: May 21st, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

Long-span bridges are the hub of transportation and the lifeline of earthquake relief in moun-

*通讯作者。

tainous areas. Once damaged in earthquake disasters, the consequences are very serious. Tongzi River Super Large Suspension Bridge is a long-span double-tower steel truss stiffened girder suspension bridge with a main span of 965 m, located in Tongzi County, Guizhou Province, with a large span, high main tower and complex structural stress. In order to evaluate the safety of the bridge under earthquake load, a space finite element model is established, and the response spectrum method is used to calculate and analyze the response of the Tongzi River Super Large Suspension Bridge under earthquakes of magnitude E1 and E2. The results show that under the action of dead weight + secondary dead load and transverse (or longitudinal) + vertical E1 and E2 earthquakes, the maximum tensile stress of the steel truss beam are 119.81 MPa, 129.12 MPa, 153.70 MPa and 173.53 MPa, respectively, and the maximum compressive stress are 87.12 MPa, 87.24 MPa, 79.09 MPa and 79.43 MPa, respectively, which are in the elastic working stage. Under the same working condition, the maximum tensile stress of the main tower under the action of corresponding E1 and E2 are 1.79 MPa, 2.09 MPa, 2.10 MPa and 2.39 MPa respectively, and the maximum compressive stress is 9.15 MPa, 8.72 MPa, 8.26 MPa and 7.84 MPa respectively, which meet the design requirements.

Keywords

Suspension Bridge, Seismic Response, Response Spectrum Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

近年来,随着我国经济发展的速度越来越快,大量基础设施与交通设施迅速发展完善。特别是响应 国家西部大开发战略的进一步号召,我国西南、西北地区建设了大量的高速公路,这给西部地区的发展 带来了便捷。大跨度桥梁是跨越高山峡谷必需的交通枢纽工程,尤其对于西部地区,其地质复杂多样, 高山峡谷更是随处可见。如果大跨度桥梁在地震灾害中遭到严重破坏,不仅导致交通线本身损失巨大, 还会切断震区交通生命线,给救灾工作带来巨大困难,进一步导致巨大的生命与经济损失[1]。大跨度桥 梁的抗震分析研究也成为众多学者研究的热点[2] [3] [4] [5] [6]。

作为现代桥梁体系中跨越能力最大的桥型,悬索桥不仅造型优美,在大跨度情况下,面对斜拉桥也 具有一定的经济优势[7]。悬索桥的力学特点使其可以充分发挥材料的强度,具有用料省、自重轻的特点, 在西南山区中经常被使用,因此研究大跨度悬索桥的抗震性能意义重大[8][9]。邓育林等[10]采用反应谱 法不同的大跨度悬索桥实例进行了地震响应分析,发现高阶振型对大跨度悬索桥地震响应影响显著。通 过改变不同构件的阻尼比,罗俊杰[11]等对大跨度悬索桥实例进行3向地震反应谱分析,探究其对悬索桥 地震响应的影响。本文依托的桐梓河特大悬索桥是目前贵州地区在建的峡谷地带第二大跨度高塔悬索桥。 桐梓河特大桥桐梓岸锚碇所处地质环境复杂,岩溶极发育,两侧锚碇类型不对称,仁怀侧为隧道锚,桐 梓侧重力锚,主塔基础不同:仁怀岸为桩基础,桐梓岸为扩大基础,两侧均为超高墩且高度不同,故对 该桥进行抗震性能的研究十分必要。

2. 工程概况

桐梓河特大悬索桥是贵州省金沙经仁怀至桐梓高速公路的控制性工程,位于遵义市仁怀市与桐梓县

交界位置。大桥全长 1422 m,其中主桥为主跨 965 m 简支钢桁加劲梁悬索桥。各项技术指标如表 1 所示。 跨径布置为(205 + 965 + 225) m, 矢跨比为 1/10, 矢高 96.5 m。主塔高度仁怀岸 208 m,桐梓岸 146 m。 工程总立面图如图 1 所示。根据地质勘查报告,项目主要技术标准如表 1 所示。



Figure 1. General elevation of the project (m) 图 1. 工程总立面图(m)

参数
公路-I级
一级
双向 2%
7度
100 年

Table	e 1. Main technical standards of the	project
表1.	项目主要技术标准	

3. 建立有限元模型

首先定义材料及截面属性,通过 Midas/Civil 分别对大桥不同结构进行材料定义,所涉及到的混凝土、钢材的材料特性值,如表 2 所示。

结构	材料	弹性模量(kN/mm ²)	容重(kN/m ³)	泊松比	阻尼比
钢桁梁	Q345	206	97.4	0.3	0.02
主塔	混凝土	34.5	26.5	0.2	0.05
主缆钢丝	钢材	195	78.5	0.3	0.02
主塔预应力钢绞线	钢材	205	78.5	0.3	0.02
吊索	钢材	205	78.5	0.3	0.02

Table 2. Characteristic value of main materials 表 2. 主要材料特性值

其中桥面板采用板单元模拟,吊杆与主缆钢丝采用只受拉单元模拟,其余结构均采用梁单元模拟。 对于边界条件,桥塔和主缆与地面接触均施加一般支承,限制其所有方向的位移;桥塔与钢桁梁之间使 用弹性连接中的刚性连接;桥面板与钢桁梁之间使用弹性连接。最后建成桐梓河特大桥有限元模型如图 2 所示,全桥模型共有 12,892 个节点和 14,723 个单元,钢桁架与桥面板的局部轴视图如图 3 所示。



Figure 3. Partial axial view of truss and deck of bridge finite element model 图 3. 桥梁有限元模型桁架及桥面局部轴视图

4. 定义地震荷载组合

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020),公路桥梁抗震应考虑永久作用(自重荷载、预应力钢束荷载和二期恒载等)与地震作用(本文主要考虑 E1 和 E2 级地震荷载)的最不利组合,作用效应组合系数为 1.0,不考虑与活载的组合[12]。

其中混凝土桥塔结构中有 144 根预应力钢绞线,且均采取两端张拉的方式施加预应力,在钢束特征 值中设置钢束总面积为 431.86 mm²,预应力抗拉强度标准值为 1,860,000 kN/m²。二期恒载设为顺桥向 2434.75 kN/m² 的压力面荷载。

由于地震具有时间上与空间上的随机性,难以找到结构在不同方向上地震作用的最不利情况,分析 地震作用时一般采用三个正交方向(对于桥梁则为横桥向、纵桥向和竖桥向),本文采用横桥向 + 竖桥向 和纵桥向 + 竖桥向两种地震动作用组合方式。计算工况如表 3 所示。

表 3. 计算工况		
工况	名称	地震荷载组合
工况 1	E1 横向 + 竖向	自重 + 土压力 + E1 地震横桥向 + E1 地震竖桥向
工况 2	E1 纵向 + 竖向	自重 + 土压力 + E1 地震纵桥向 + E1 地震竖桥向
工况 3	E2 横向 + 竖向	自重 + 土压力 + E2 地震横桥向 + E2 地震竖桥向
工况 4	E2 纵向 + 竖向	自重 + 土压力 + E2 地震纵桥向 + E2 地震竖桥向

Table 3. Calculation condition 表 3. 计算工况

5. 输入反应谱数据

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)得该项目地震荷载相关系数如表 4 所示,桐梓河特 大桥设防烈度应提高一度进行设计[13]。根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020),采用两 水准设防二阶段设计的抗震设计方法,通过判断结构强度是否满足要求来判断结构的抗震安全性,因此 本文仅计算结构应力。规范规定悬索桥在 E1 地震作用下结构应基本不发生损伤,在 E2 地震作用下仅主 塔可发生轻微损伤。桐梓河特大悬索桥采用 E1 和 E2 两种水平的地震作为设防标准。具体参数如下表 4 所示。

Table 4. Seismic load related parameters 表 4. 地震荷载相关参数

项目	数值
地震基本烈度划分区间	6
抗震设防标准	7
反应谱特征周期	0.35 s
地震动峰值加速度	0.05 g

5.1. 反应谱函数定义

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020),加速度反应谱 S(T)如式(1)所示。

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max} \left(0.6T/T_0 + 0.4 \right) & T \le T_0 \\ S_{\max} & T_0 < T \le T_g \\ S_{\max} \left(T_g/T \right) & T_g < T \le 10 \end{cases}$$
(1)

式中: *T* 为周期; *T*₀ 为反应谱直线上升段最大周期,取 0.1s; *T*_g 为特征周期(s); *S*_{max} 为设计加速度反应谱 最大值(g)如式(2)所示。

$$S_{\max} = 2.5 C_i C_s C_d A \tag{2}$$

式中: *C_i*为抗震重要性系数; *C_s*为场地系数; *C_d*为阻尼调整系数; *A* 为水平向基本地震动峰值加速度。 由此得本文所施加的 E1 和 E2 地震水平加速度谱曲线,分别如图 4 和图 5 所示。







Figure 5. E2 seismic response spectrum curve 图 5. E2 地震反应谱曲线

5.2. 特征值定义

桐梓河特大悬索桥有限元模型庞大,结构复杂,为了更为快速地使得参与质量系数超过 90%选择运 算效率较高的多重 Ritz 向量法。通过在 X、Y、Z 方向各定义 23 组初始 Ritz 向量,可以自由叠加得到 69 组不同的反应谱荷载工况。

5.3. 反应谱荷载工况

反应谱地震荷载分析一般有四种组合振型的方法可供选择,包括有完整二次项组合法(CQC 法)、平 方和开平方法(SRSS)、ABS 法和线性法。其中 ABS 法与线性法相对保守,一般不采用,CQC 法适用于 振型分布较密集的结构体系,SRSS 法则适用于振型分布较稀疏的结构体系[14]。因此本文最终选用 CQC 法进行桐梓河特大悬索桥的抗震分析。

CQC 法的表达式如式(3)所示。

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} r_{ij} S_i S_j}$$
(3)

式中, r_{ij}为模态组合系数, 一般当 r_{ij}近似为0时, 可采用 SRSS 方法; S_j为结构第 j 阶振型地震作用效应。 SRSS 法的表达式如式(4)所示。

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} S_i^2} \tag{4}$$

式中, F为结构的地震作用效应; S_i为结构第 i 阶振型地震作用效应。

6. E1、E2 地震作用下弹性反应谱计算结果及分析

6.1. 振型及频率

通过多重 Ritz 向量法分析后,得到桐梓河特大悬索桥的前 10 阶自振频率与周期如表 5 所示,其中三 个方向(X、Y、Z)的参与质量分别为 94.25%、93.89%和 91.49%,均超过 90%,满足我国规范要求。提取 大桥的前六阶振型图(限于篇幅,取前六阶)如图 6 所示,分析振型分解结果可以看出:前六阶振型分别为 第一阶横桥向平动、第二阶顺桥向竖弯、第三阶顺桥向竖弯、第四阶顺桥向竖弯、第五阶横桥向平动、 第六阶顺桥向竖弯。

模态阶次	自振频率(Hz)	周期(s)	振型特征
1	0.066	15.059	主梁一阶对称侧弯
2	0.120	8.364	主梁一阶反对称竖弯
3	0.128	7.782	主塔(左)顺桥向弯曲
4	0.173	5.787	主梁一阶对称竖弯
5	0.190	5.262	主梁一阶反对称侧弯
6	0.233	4.297	主梁二阶对称竖弯
7	0.268	3.736	主塔(右)顺桥向弯曲
8	0.290	3.449	主梁二阶反对称竖弯
9	0.293	3.417	主缆异向对称侧弯
10	0.301	3.319	主缆同向对称侧弯

 Table 5. Calculation results of partial vibration mode period

 表 5. 部分振型周期计算结果





Figure 6. Shape diagram of the first six vibration modes of the bridge 图 6. 大桥前六阶振型形状图

6.2. 结构应力

经过有限元分析,在 E1 横向 + 竖向工况下,桐梓河特大桥的整桥应力云图如图 7(a)所示,其中最 大拉应力为 119.81 MPa,最大压应力为 87.12 MPa。最大拉应力位于桥梁跨中钢桁加劲梁的下弦杆部分, 跨中云图如图 7(b)所示。最大压应力位于桥梁桥塔的横梁部分,混凝土桥塔的应力云图如图 7(c)所示。



同理,在 E1 纵向 + 竖向工况下,提取桐梓河特大桥的整桥应力云图如图 8(a)所示,其中最大拉应

力为 129.12 MPa,最大压应力为 87.24 MPa。最大拉应力仍位于桥梁跨中钢桁加劲梁的下弦杆部分,跨 中应力分布云图如图 8(b)所示。最大压应力仍位于桥梁桥塔的横梁部分,混凝土桥塔的应力云图如图 8(c) 所示。



Figure 8. Stress cloud diagram under working condition 2 (MPa) 图 8. 工况 2 下应力云图(MPa)

在 E2 横向 + 竖向组合的激励下,经有限元分析得桐梓河特大桥的整桥应力云图如图 9(a)所示,其中最大拉应力为 153.70 MPa,最大压应力为 79.09 MPa。最大拉应力位于桥梁跨中钢桁加劲梁的下弦杆部分,跨中应力分布云图如图 9(b)所示。最大压应力位于桥梁桥塔的横梁部分,混凝土桥塔的应力云图 如图 9(c)所示。





图 10. 工况 4 下应力云图(MPa)

经过有限元分析,在 E2 纵向 + 竖向组合激励下,桐梓河特大桥的整桥应力云图如图 10(a)所示,其中最大拉应力为 173.53 MPa,最大压应力为 79.43 MPa。最大拉应力位于桥梁跨中钢桁加劲梁的下弦杆

部分,跨中应力分布云图如图 10(b)所示。最大压应力位于桥梁桥塔的横梁部分,混凝土桥塔的应力云图 如图 10(c)所示。

综上所述,在4种组合作用下,模型最大拉应力均出现在跨中钢桁梁的下弦杆上,最大压应力均出现在桥塔的横梁处。四种工况下最大拉应力对比如图 11 所示,对比发现相同地震等级下,桥梁在纵向+竖向组合激励下会产生更大的拉应力,工况2比工况1下最大拉应力大7.8%,工况4比工况3下最大拉应力大12.9%,均小于规范规定容许值345 MPa;在E2地震荷载作用下,工况3和工况4的最大拉应力分别比工况1和工况2增大28.3%和34.4%,其中工况4下最大拉应力173.53 MPa最大,仍小于容许值。



Figure 11. Comparison diagram of maximum tensile stress (MPa) 图 11. 最大拉应力对比图(MPa)

分别对比 4 种计算工况下,结构应力水平与其所使用材料的应力容许值,以验算桥梁在 E1、E2 地震作用下是否满足设计要求。对比结果如下表 6~9 所示。

Table	e 6. Th	e maximum	tensile ar	nd compressive	stress of the	component u	under worl	king condition	on 1 (M	Pa)
表 6.	工况	1 下构件的	最大拉、	压应力(MPa)						

验算结果	位置	计算结果	容许值	备注
钢桁梁最大拉应力(MPa)	跨中下弦杆	119.81	[345]	满足设计要求
钢桁梁最大压应力(MPa)	跨中下弦杆	87.12	[345]	满足设计要求
桥塔最大拉应力(MPa)	横梁	1.79	[2.64]	满足设计要求
桥塔最大压应力(MPa)	横梁	9.15	[50]	满足设计要求

Table 7. The maximum tensile and compressive stress of the component under working condition 2 (MPa) 表 7. 工况 2 下构件的最大拉、压应力(MPa)

验算结果	位置	计算结果	容许值	备注
钢桁梁最大拉应力(MPa)	跨中下弦杆	129.12	[345]	满足设计要求
钢桁梁最大压应力(MPa)	跨中下弦杆	87.24	[345]	满足设计要求
桥塔最大拉应力(MPa)	横梁	2.09	[2.64]	满足设计要求
桥塔最大压应力(MPa)	横梁	8.72	[50]	满足设计要求

Table 8. The maximum tensile and compressive stress of the component under working condition 3 (MPa) 表 8. 工况 3 下构件的最大拉、压应力(MPa)

验算结果	位置	计算结果	容许值	备注
钢桁梁最大拉应力(MPa)	跨中下弦杆	153.70	[345]	满足设计要求
钢桁梁最大压应力(MPa)	跨中下弦杆	79.09	[345]	满足设计要求
桥塔最大拉应力(MPa)	横梁	2.10	[2.64]	满足设计要求
桥塔最大压应力(MPa)	横梁	8.26	[50]	满足设计要求

Table 9. The maximum tensile and compressive stress of the component under working condition 4 (MPa) 表 9. 工况 4 下构件的最大拉、压应力(MPa)

验算结果	位置	计算结果	容许值	备注
钢桁梁最大拉应力(MPa)	跨中下弦杆	173.53	[345]	满足设计要求
钢桁梁最大压应力(MPa)	跨中下弦杆	79.43	[345]	满足设计要求
桥塔最大拉应力(MPa)	横梁	2.39	[2.64]	满足设计要求
桥塔最大压应力(MPa)	横梁	7.84	[50]	满足设计要求

由表 6~9 可知,钢桁梁的最大拉应力水平在 110 MPa~180 MPa 的范围内,最大压应力在 70 MPa~90 MPa 的范围内,均远小于 Q345 材料的屈服强度 345 MPa;桥塔所用 C50 混凝土的抗拉容许值为 2.64 MPa,抗 压允许值为 50 MPa,对比得四种荷载组合下桥塔横梁的应力水平均低于其对应容许值,因此说明桐梓河特 大悬索桥在自重、二恒和横向(或纵向)+ 竖向地震作用下均满足设计要求,其中钢桁梁均处于弹性阶段。

7. 结论

本文以桐梓河特大悬索桥为工程背景,利用 Midas/Civil 有限元软件建立桐梓河特大桥的三维有限元 模型,计算得到了结构的动力特性,采用反应谱法计算了桥梁在 E1 和 E2 作用下的地震响应。

桐梓河特大悬索桥在自重 + 二恒 + E1 横向 + 竖向、E1 纵向 + 竖向、E2 横向 + 竖向和 E2 纵向 + 竖向 4 种工况组合下的最大拉应力分别为 119.81 MPa、129.12 MPa、153.70 MPa 和 173.53 MPa,最大 压应力分别为 87.12 MPa、87.24 MPa、79.09 MPa 和 79.43 MPa,均小于所用材料 Q345 的屈服强度,处 于弹性工作阶段。混凝土部分在 4 种工况组合下的最大拉应力分别为 1.79 MPa、2.09 MPa、2.10 MPa 和 2.39 MPa,最大压应力分别为 9.15 MPa、8.72 MPa、8.26 MPa 和 7.84 MPa,同样均小于所用 C50 混凝土 的容许应力值。

因此,在 E1、E2 地震作用下,桐梓河特大悬索桥应力水平在容许范围内,不会出现倒塌、破坏现 象,满足抗震性能设计要求。

基金项目

中铁开投科技研究开发计划(2021-B 类-04)。

参考文献

[1] 任远航. 大跨度混合梁斜拉桥抗震分析研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.

- [2] 李帅, 张凡, 颜晓伟, 等. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 86-97+106.
- [3] 王晓伟, 叶爱君, 沈星, 等. 大跨度边墩横向减震体系的地震易损性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 333-340.
- [4] Sgambi, L., Garavaglia, E., Basso, N., et al. (2014) Monte Carlo Simulation for Seismic Analysis of a Long Span Suspension Bridge. Engineering Structures, 78, 100-111. <u>https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.051</u>
- [5] Apaydin, N.M., Bas, S. and Harmandar, E. (2016) Response of the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge under Spatially Varying Multi-Point Earthquake Excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 44-54. <u>https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.018</u>
- [6] Adanur, S., Altunisik, A.C., Soyluk, K., et al. (2016) Multiple-Support Seismic Response of Bosporus Suspension Bridge for Various Random Vibration Methods. Case Studies in Structural Engineering, 5, 54-67. https://doi.org/10.1016/j.csse.2016.04.001
- [7] Gimsing, N.J. and Georgakis, C.T. (2012) Cable-Supported Bridges: Concept and Design. Wiley, Chichester. https://doi.org/10.1002/9781119978237
- [8] 权新蕊, 宋松科, 刘伟. 近活动断裂带大跨悬索桥抗震性能研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(6): 57-63.
- [9] 张新军, 张超. 大跨度悬索桥合理抗震结构体系研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(1): 39-44.
- [10] 邓育林, 贾贤盛. 大跨度悬索桥地震反应中高阶振型的影响分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2008(2): 24-28+81.
- [11] 罗俊杰, 温留汉·黑沙. 结构构件阻尼比对大跨度悬索桥地震响应的影响[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2016, 15(2): 16-20.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [13] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB18306-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 姚德隆. 基于 Midas/civil 的公路桥梁抗震安全性分析[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2019.