

# 软土地地上双座串联大跨度斜拉桥地震响应及碰撞分析

王德光<sup>1</sup>, 王 恒<sup>2</sup>, 沈文爱<sup>2</sup>, 何友娣<sup>3</sup>, 张 强<sup>3</sup>

(1. 杭州江东建设工程项目管理有限公司, 浙江 杭州 310004; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

**摘 要:** 本文分析了软土地地上双座串联大跨度斜拉桥——洪鹤大桥的地震响应及相邻斜拉桥的碰撞问题。首先,建立其空间有限元模型进行了动力特性分析;随后,考虑桥梁特点及场地效应,选取合适的地震波,采取纵桥向+0.3 横桥向+0.3 竖桥向的激励组合方式输入,对桥梁关键部位动力响应进行了非线性时程分析,并将结果与反应谱法进行对比验证;最后,对两座斜拉桥交接墩处主梁的碰撞问题展开了研究。结果表明:三向地震作用下,结构主梁及主塔均以纵桥向位移为主,且主梁横桥向位移不可忽略;结构在主塔处的剪力、弯矩远大于桥墩处,各方向内力最大值集中在 4 号塔及 8 号塔塔底右边,这在抗震设计中应引起重视;在 E2 地震作用下交接墩处两主梁不会发生碰撞,但建议在塔梁处布置纵向液体粘滞阻尼器以提高其减震性能。

**关键词:** 斜拉桥; 串联; 地震响应; 交接墩; 碰撞; 减震措施

**中图分类号:** U448.27    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0052-07

## Seismic Response and Collision Analysis of Two Series-connected Long-span Cable-stayed Bridges at Soft Soil Site

WANG De-guang<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>2</sup>, SHEN Wen-ai<sup>2</sup>, HE You-di<sup>3</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup>

(1. Hangzhou Jiangdong Construction Engineering Project Management Co Ltd, Hangzhou 310004, China; 2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co Ltd, Wuhan 430050, China)

**Abstract:** This paper analyzes the seismic response of Honghe Bridge, which consists of two series-connected long-span cable-stayed bridges, and the collision of adjacent cable-stayed bridges. Firstly, the spatial finite element model is established to analyze the dynamic characteristics of the bridge. Secondly, considering the characteristics of the bridge and the site effect, the appropriate seismic wave is selected, and the longitudinal + 0.3 transverse + 0.3 vertical excitation combination mode is adopted to input. The nonlinear time-history analysis of the dynamic response of the key parts of the bridge is carried out, and the results are compared with the response spectrum method. Finally, the collision of the main girder at the joint pier of two cable-stayed bridges is studied. The results show that under the action of three-way earthquake, the displacement of the main beam and the main tower of the structure are mainly longitudinal, and the transverse displacement of the main beam cannot be ignored; the shear force and bending moment of the structure at the main tower are much greater than those of the piers, and the maximum internal force in each direction is concentrated on the right side of the bottom of tower 4 and tower 8, which should be paid attention to in the seismic design. The two main girders at the transfer pier under the E2 earthquake action will not collide. It is suggested that

收稿日期: 2019-08-23    修回日期: 2019-10-24  
作者简介: 王德光(1966-),男,浙江杭州人,高级工程师,研究方向为土木工程建设与管理(Email: zd91210@126.com)  
通讯作者: 沈文爱(1983-),男,广西北流人,博士,副教授,研究方向为结构振动控制(Email: wshen@hust.edu.cn)  
基金项目: 中铁大桥勘测设计院集团有限公司科技项目;国家自然科学基金(51838006)

the longitudinal liquid viscous damper should be placed at the tower girder to improve its damping performance.

**Key words:** cable-stayed bridge; series-connected; seismic response; transfer pier; collision; damping measures

在近几年国内外桥梁建设中,由于斜拉桥具有造型美观、结构受力合理、跨越能力大、施工方便等优点<sup>[1]</sup>,其应用日益广泛。而随着全球地震活动频繁发生,作为交通运输枢纽的斜拉桥一旦破坏,将造成巨大的经济损失及安全问题,因此,斜拉桥的地震响应研究得到了人们的重视。

目前,国内外针对斜拉桥地震响应的研究主要集中于桥梁结构体系<sup>[2,3]</sup>、地震动分析方法<sup>[4~6]</sup>及减隔振装置<sup>[3,7,8]</sup>等方面。文献[9]以某塔梁固结的独塔斜拉桥为研究对象,通过模型试验和数值模拟,研究了其受力状态、极限承载力及传力机理。文献[10]以某半漂浮体系双塔斜拉桥为背景,探讨了 E 型钢阻尼器和液体粘滞阻尼器的布置方案及减震限位效果。文献[11]基于非线性有限元理论,对刚构体系斜拉桥的地震响应特点进行了研究。文献[12]针对桥梁的塔梁固结体系、漂浮体系、半漂浮体系,以泰州长江公路大桥为对象,对跨中最大挠度和主缆抗滑移系数影响因素进行分析。可以看出,多数文献重点在于不同桥型、塔梁连接方式对斜拉桥地震响应的影响研究<sup>[13~16]</sup>。双座串联斜拉桥是大跨度斜拉桥设计实践中的一种创新,目前针对这一类型斜拉桥的地震响应及其减震措施的研究还未见报道。为丰富斜拉桥地震响应研究内容并为类似待建桥梁提供一定的理论基础及指导意义,本文以软土地地上串联大跨度斜拉桥——洪鹤大桥为背景展开研究。

全文组织结构如下:首先,基于 Midas 模型,对桥梁进行动力特性分析;随后,选取合适的地震波,以纵桥向+0.3 横桥向+0.3 竖桥向的激励组合方式输入,采用非线性时程分析法,对结构关键部位的位移、内力进行计算和分析,并将结果与反应谱法进行对比;最后,针对桥梁的串联特性,对交接墩处主梁的碰撞问题进行研究,并对其提出合理的减震限位措施。

# 1 工程概况及动力分析模型

## 1.1 工程概况

洪鹤大桥桥长 9.654 km,起点位于珠海市香洲区南屏镇洪湾,衔接洪湾互通,与广珠西线及横琴二桥、港珠澳大桥连通,终点与正在建设的鹤港高速公路、规划的金海大桥连接。两座主航道桥均为桥跨布置为 73+162+500+162+73 m 的双塔双索面叠合梁斜拉桥,全长 970 m,半漂浮体系,总体布置如图 1 所示。主塔采用钻石型钢筋混凝土桥塔,辅助墩和边墩采用独柱墩。主梁采用开口叠合梁形式,总长 970 m,钢梁部分包括纵梁、横梁、小纵梁、压重箱及过渡梁、锚拉板、钢锚梁、钢牛腿及预埋件等组成。斜拉索采用镀锌钢绞线拉索,两桥均有 160 根索。钢主梁采用 Q370QB,桥面板采用 26 cm 厚 C60 混凝土,主塔采用 C50 混凝土。

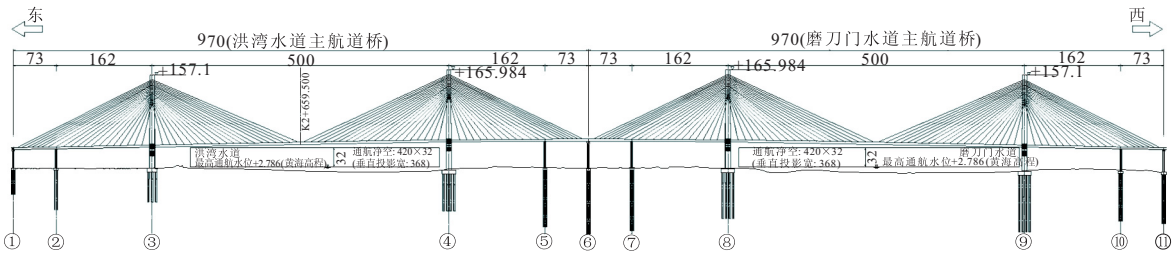


图 1 洪鹤大桥总体布置/m

## 1.2 Midas 模型

本文采用 Midas Civil 软件建立洪鹤大桥有限元模型,如图 2 所示。斜拉索采用桁架单元模拟,桥塔、钢主梁、桥墩、承台以及桩均采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟。考虑桩-土-结构相互作用的影响,桩土互相作用采用等效土弹簧

模拟,弹簧刚度系数由 m 法计算得到,土质情况参考《洪鹤大桥详勘工程地质勘察报告》。通过约束桥塔与主梁、桥墩与主梁之间的竖向自由度模拟球形支座。用一般连接中的滞后系统模型模拟桥墩与主梁间的横向 C 型钢阻尼器,其系统如图 3 所示(方框内为恢复力模型, $d$  为  $N_1$ 、 $N_2$  两节

点的相对变形,  $f$  为出力)。C 型钢阻尼器参数见表 1, 示意图如图 4。两座主梁之间设置 20 cm 间距的抗震缝。



图 2 洪鹤大桥 Midas 模型

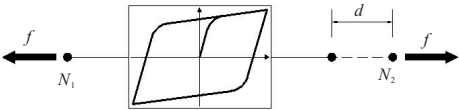
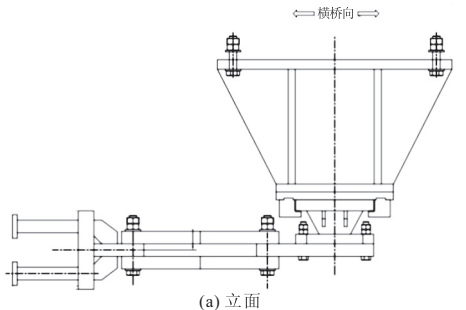


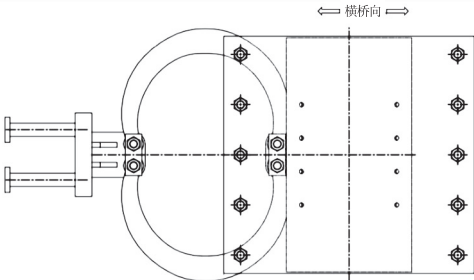
图 3 C 型钢阻尼器的力 - 位移滞回模型

表 1 C 型钢阻尼器参数

项目	参数大小
水平承载力/kN	1150
屈服力/kN	1000
纵向位移量/mm	500
屈服位移量/mm	20
横向极限位移量/mm	305



(a) 立面



(b) 平面

图 4 C 型钢阻尼器

1.3 动力特性分析

利用 Midas Civil 程序中的多重 Ritz 向量法计算模型的动力特性, 结果如表 2 所示。可以看出, 结构的基频为 0.099 Hz, 基本周期为 10.10, 属于长周期结构。主桥的 1, 2 阶振型为两主梁的顺桥向纵漂, 符合半漂浮体系的特征。3~6 阶出现主梁的侧弯, 说明主梁横向刚度小于竖向刚度。前 10 阶自振频率分布在 0.099~0.306 Hz 之间, 因此在外荷载作用下, 易激发多个低阶振型, 应引起重视。图 5 为结构在平动方向的振型有效质量占总质量的百分比随振型模态阶数变化的情况。可以

看出, 用振型反应谱法计算结构响应时, 考虑前 300 阶振型可满足 JTG/T B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[17]</sup> 的规定。

表 2 洪鹤大桥动力特性

阶次	频率/Hz	振型特征
1	0.099	东桥 1 阶纵飘
2	0.101	西桥 1 阶纵飘
3	0.188	主梁 1 阶正对称侧弯, 2 主梁正对称分布
4	0.204	主梁 2 阶正对称侧弯, 2 主梁反对称分布
5	0.244	主梁 1 阶反对称侧弯, 2 主梁正对称分布
6	0.257	主梁 2 阶反对称侧弯, 2 主梁反对称分布
7	0.288	东桥主梁 1 阶正对称竖弯
8	0.289	西桥主梁 1 阶正对称竖弯
9	0.299	主梁 3 阶正对称侧弯+1 阶扭转
10	0.306	主梁 4 阶正对称侧弯+1 阶扭转

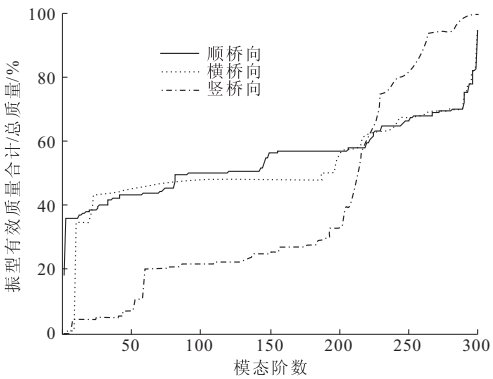


图 5 振型有效质量统计

2 地震响应分析

2.1 地震动输入

地震动输入是影响地震响应时程分析的重要因素之一。选取地震波必须满足地震动三要素: 持时、峰值、频谱特性, 否则结构的地震响应分析可能就不具有参考意义。本文采用《洪鹤大桥工程场地地震安全性评估报告》提供的满足桥址场地条件要求及抗震设计的 3 条人工波进行地震响应分析, 取响应的最大值作为桥梁地震反应的结果。人工波由该斜拉桥场地 50 年超越概率为 2.5% 的地表水平向设计地震动加速度反应谱生成(E2 地震作用, 峰值为 0.503g)。人工波的持时为 40.94 s, 采样频率为 50 Hz, 时间间隔为 0.02 s, 小于结构基本周期的 1/50, 满足计算精度要求。图 6~8 为 3 条地震波的加速度时程曲线, 为方便后文时程分析方法中瑞雷阻尼的参数选取, 同时给出了 3 条时程曲线的频谱图。此外, 3 条人工地震波的加速度反应谱与设计反应谱的对比如图 9 所示, 由图可以看出, 人工地震波反应谱与地震设计反应谱拟合很好, 能准确反映出地震动的特性。

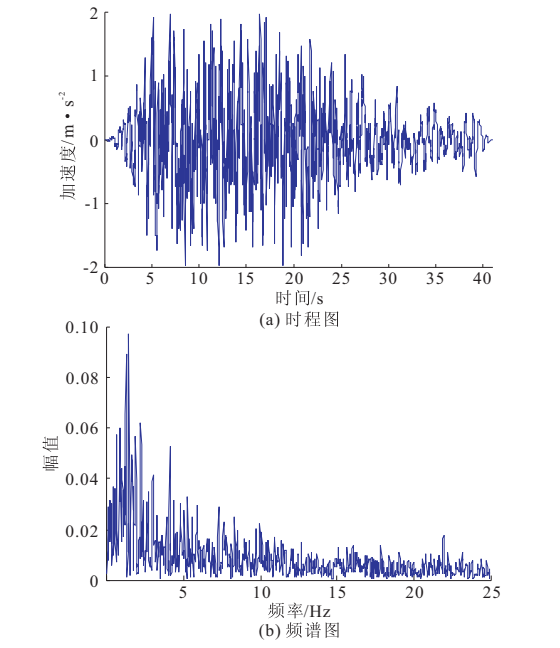


图6 E2地震作用人工地震波1的加速度时程图和频谱

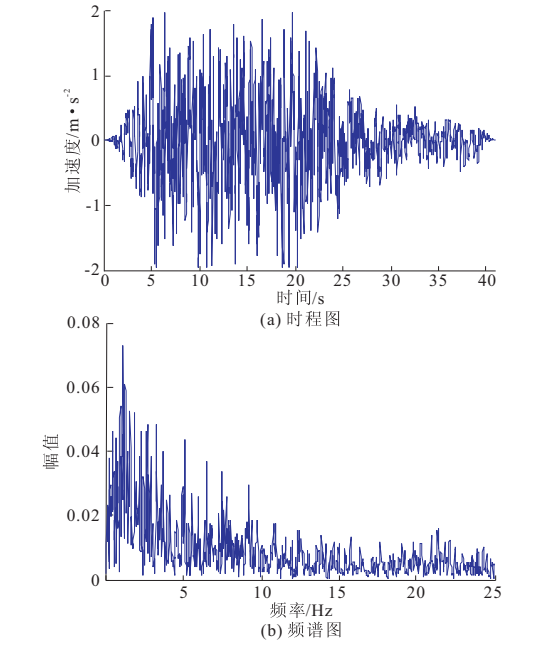


图7 E2地震作用人工地震波2的加速度时程图和频谱

2.2 关键部位的位移与内力分析

由于大跨度斜拉桥具有明显的空间特征,因此进行地震响应分析时应当同时考虑纵桥向 $x$ 、横桥向 $y$ 和竖桥向 $z$ 的地震作用,本文采用非线性时程分析法研究了3个方向地震作用下桥梁的动力响应,即顺桥向( $x$ 向)+0.3横桥向( $y$ 向)+0.3竖桥向( $z$ 向)地震作用( $E_x+0.3E_y+0.3E_z$ )。时程分析采用瑞雷阻尼,阻尼频率点的选取根据地震作用的频率成分和结构本身的动力特性综合考虑。位移响应方面,以主塔塔顶位移和1号梁(东桥主梁)梁端位移、2号梁(西桥主梁)梁端位移为研究重点。内力响应方面,以各墩底、塔底的剪力和弯矩为研究重点。同时,将结果与反应谱

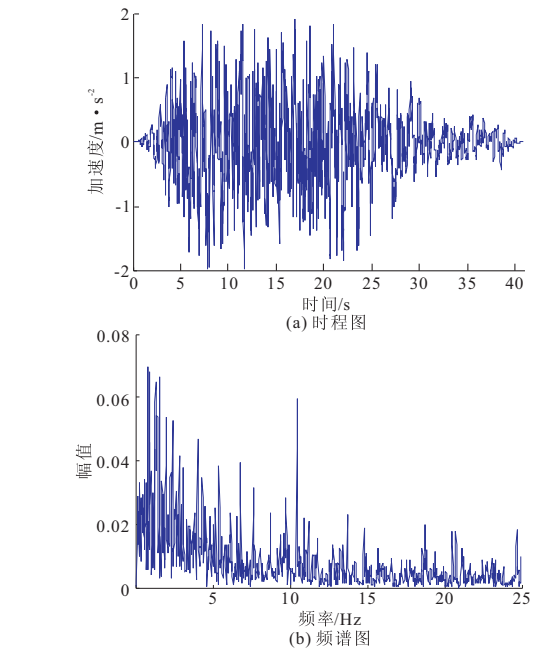


图8 E2地震作用人工地震波3的加速度时程图和频谱

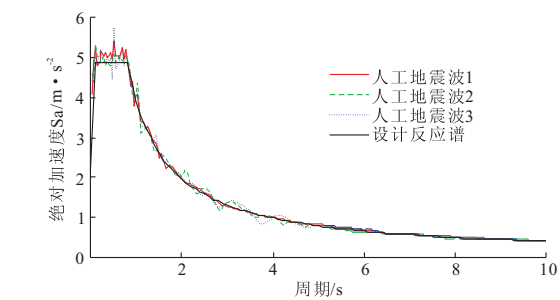


图9 人工地震波反应谱与设计反应谱对比

法进行对比,获得更全面的分析。反应谱法计算考虑前300阶模态的贡献。图10与表3中的时程分析结果为3条地震波作用下响应的最大值。

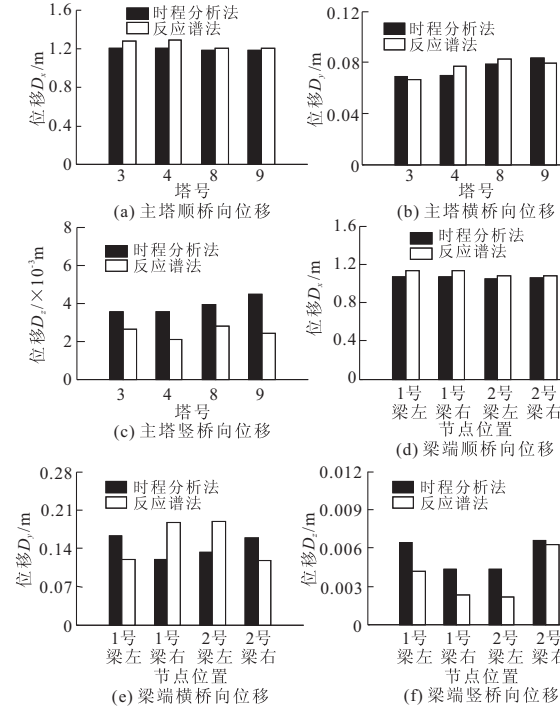


图10 时程分析法和反应谱法位移响应结果对比



图 10 为两种方法在主塔和梁端的位移响应计算结果,可以看出,二者吻合较好。由图 10a~10c 可知,各主塔塔顶的位移主要以纵桥向为主,均在 1.2~1.3 m 之间,横桥向、竖桥向位移很小,尤其竖桥向位移,均不足 1 cm。由图 10d~10f 可得,两个主梁纵桥向位移较大,均在 1.1 m 左右,而横桥向也发生不可忽略的位移,最大达 20 cm,应引起重视。此外,主塔、主梁的位移响应不仅与地震激励有关,还与约束条件及桥梁动力特性有关。

两种计算方法下各截面内力响应绝对值如表 3 所示,括号内为反应谱法计算结果。二者存在较大的区别,有少量截面处误差达到 50% 以上。原因在于:地震加速度反应谱是通过统计平均所

得,反应谱所求的响应具有“统计意义”;而时程分析法是利用某条地震波进行计算,所得响应受样本地震波特性和控制,因此二者可能存在较大的内力误差。但为安全评估结构的内力情况并作出合理的抗震设计,应将二者结合,综合考虑以得到合理的结果。

限于篇幅,以  $y$  表示截面横桥向, $z$  表示截面竖桥向。由表 3 可看出, $y$  剪力最大值、 $z$  弯矩最大值发生在 4 号塔底右边,分别为 22953 kN, 516251 kN·m, $z$  剪力最大值和  $y$  弯矩的最大值发生在 8 号塔底右边,分别为 19763 kN, 1739229 kN·m。同时,主塔塔底的内力均远大于各个墩底的内力。因此,在抗震设计中,应注意这些截面的抗剪及抗弯性能。

表 3 时程分析法和反应谱法内力计算结果

位置序号	截面位置	剪力 $y$ /kN	剪力 $z$ /kN	弯矩 $y$ /kN·m	弯矩 $z$ /kN·m
1	1 号墩左	1849( 1673)	3363( 3964)	71829( 82401)	47666( 35632)
2	1 号墩右	2053( 1904)	3556( 4312)	77757( 89793)	51015( 40319)
3	2 号墩左	980( 806)	2249( 2815)	35811( 45750)	22764( 13865)
4	2 号墩右	972( 806)	2249( 2815)	35811( 45750)	22204( 13865)
5	3 号塔左	18025( 10003)	18147( 16211)	1664467( 947283)	408804( 307988)
6	3 号塔右	19644( 10003)	18154( 16211)	1665170( 947280)	474268( 307988)
7	4 号塔左	21441( 9318)	17597( 19746)	1661725( 1097325)	460535( 269253)
8	4 号塔右	22953( 9319)	17716( 19734)	1658473( 1097171)	516251( 269275)
9	5 号墩左	807( 634)	2255( 2427)	50995( 53177)	25485( 13324)
10	5 号墩右	821( 634)	2255( 2427)	50995( 53177)	25971( 13324)
11	6 号墩左	2068( 1111)	2959( 3160)	71202( 70488)	70332( 28733)
12	6 号墩右	1778( 975)	2755( 2924)	62690( 65229)	57508( 25446)
13	7 号墩左	865( 692)	2278( 2525)	53701( 55065)	28328( 14928)
14	7 号墩右	821( 647)	2251( 2426)	50763( 52928)	26191( 13957)
15	8 号塔左	21302( 9551)	19700( 19130)	1739181( 1054315)	457186( 276465)
16	8 号塔右	22225( 9553)	19763( 19117)	1739229( 1054103)	497217( 276489)
17	9 号塔左	19226( 9109)	17793( 17852)	1653734( 1032339)	446219( 278115)
18	9 号塔右	17822( 9111)	17758( 17843)	1652598( 1032260)	416448( 278140)
19	10 号墩左	1155( 935)	2441( 3098)	48538( 59677)	30464( 18581)
20	10 号墩右	1142( 935)	2441( 3098)	48538( 59677)	29971( 18581)
21	11 号墩左	2112( 1645)	4122( 4771)	103706( 116677)	64943( 41438)
22	11 号墩右	2169( 1645)	4122( 4771)	103706( 116677)	65180( 41438)

注:括号内为反应谱法计算结果

3 交接墩处主梁碰撞分析

3.1 交接墩处梁端位移响应分析

双座串联斜拉桥在交接墩处的碰撞问题是抗震分析的重点之一。图 11 为交接墩处局部详图。图 12 为在人工波 1 的激励下,梁端的位移响应和加速度响应。可以看出,一致激励下,1、2 号梁的运动并不会出现明显的滞后现象,为更直观地观察,图 13a 对比了二者的位移响应时程。由于 2 主梁的间距仅为 20 cm,因此需要加以计算分析才能判定是否发生碰撞。1、2 号梁的运动情况分为 3 种:(1)二者同时同向运动;(2)二者同时朝

向交接墩中心运动;(3)二者同时背向交接墩中心运动。前两种情况均有碰撞的可能,利用 Matlab 软件将二者梁端间距变化计算得出。由图 13b 可知,整个激励过程中,梁端间距最大为 38.53 cm,最小为 3.79 cm。三条地震波下梁端间距最小值是在 1 号地震波作用时出现,此次研究中交接墩处不会发生主梁碰撞的情况。但是仅 3 条样本地震激励无法完全准确反映实际地震反应,且图中梁端间距有出现小于 3.79 cm 的趋势,因此有必要进行适当的减震限位措施。图 13c,13d 为两个主梁梁端的位移响应频谱,其卓越频率均为 0.0976 Hz,与结构的基频基本相等,说明二者纵向位移基本是由纵漂振型控制的。

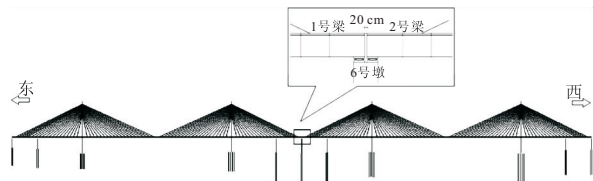


图 11 交接墩处局部详图

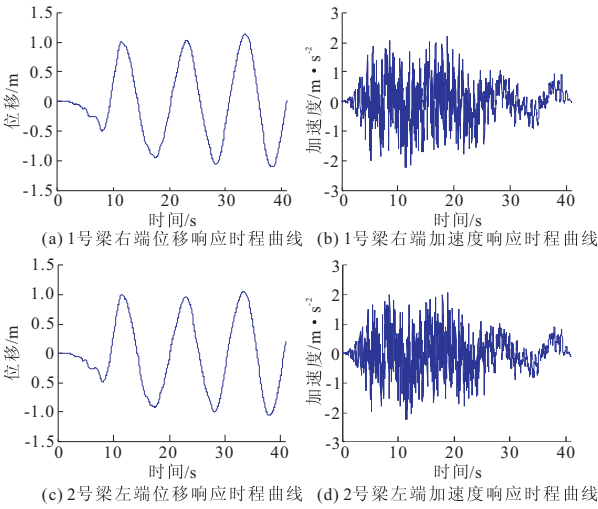


图 12 1号人工地震波下梁端位移响应时程曲线

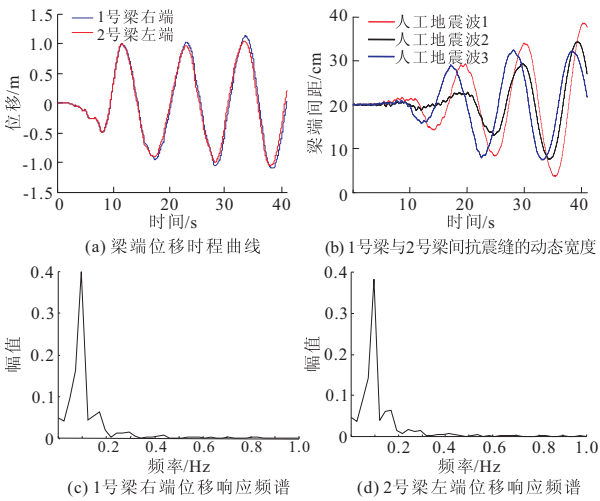


图 13 交接墩处梁端位移响应分析

3.2 减震措施

前一小节中得出交接墩处主梁梁端发生碰撞的风险较高,为确保桥梁在强震作用下的安全,现在各个塔梁处布置纵向液体粘滞阻尼器,共 8 对 16 个。东侧桥阻尼器平面布置如图 14 所示,西侧桥与其一致。

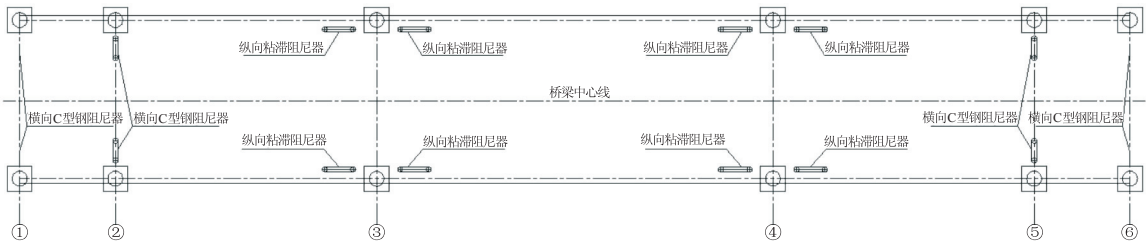


图 14 阻尼器布置

纵向液体粘滞阻尼器的阻尼力表达式为：  
$$F=CV^\alpha \tag{1}$$
  
式中： $F$  为阻尼力； $C$  为阻尼系数； $V$  为相对速度； $\alpha$  为速度指数。从粘滞阻尼器应用于桥梁抗震的角度来讲<sup>[18]</sup>， $C$  的范围一般为 1000 ~ 10000 kN/(m/s) $^\alpha$ ， $\alpha$  的范围一般为 0.2 ~ 1。本文在 Midas 软件中用 Maxwell 模型来模拟液体粘滞阻尼器，力学模型如图 15 所示( $C_d$  为阻尼系数， $K_b$  为弹簧刚度系数， $d_d$ 、 $d_b$  分别为阻尼器和弹簧的变形量， $f$  为出力)。其中，弹簧单元取值  $1\times 10^7$  kN/m，以模拟刚性连接。阻尼单元取值见表 4。

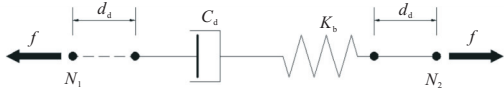


图 15 液体粘滞阻尼器 Maxwell 力学模型

表 4 纵向液体粘滞阻尼器参数

项目	参数值
阻尼系数 $C/(kN/(m/s)^\alpha)$	1500
阻尼指数 $\alpha$	0.3
最大阻尼力 $F/kN$	2400
最大冲程/mm	$\pm 450$

从图 16 中可以看出,布置纵向液体粘滞阻尼器后,1号梁右端、2号梁左端的纵向位移响应峰

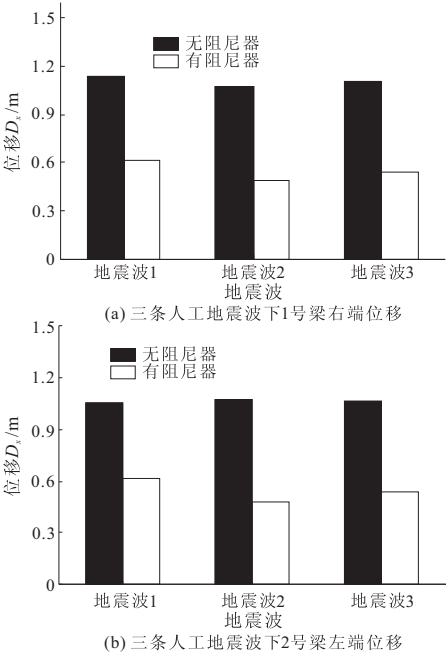


图 16 有无阻尼器位移响应峰值对比

值均减小超过 40%。在梁端间距方面,图 17 为 1 号梁与 2 号梁间抗震缝的动态宽度变化情况,其最小值为 17.08 cm,远大于不安装液体粘滞阻尼器时对应的间距。因此,在该桥梁塔梁处设置液体粘滞阻尼器减震限位效果明显。

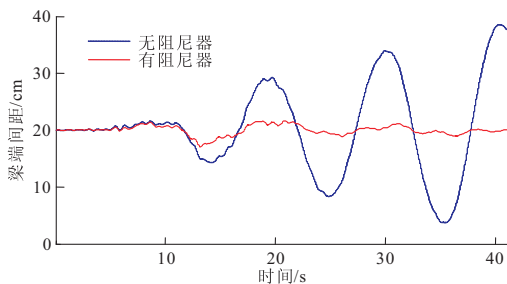


图 17 1 号梁与 2 号梁间抗震缝的动态宽度

## 4 结论与展望

本文以广东珠海市洪鹤大桥为对象,研究了 E2 地震作用下双座串联大跨度斜拉桥的内力和位移响应。研究结论如下:

(1) 本桥梁为半漂浮体系,第一阶振型为纵漂。桥梁的基本周期为 10.11 s,属于长周期结构,对减小地震作用是有利的。但主梁纵漂会使得塔顶、梁端产生较大位移,应引起重视。桥梁的横向刚度较弱,此方向的抗弯刚度设计也应考虑。

(2) 在纵桥向+0.3 横桥向+0.3 竖桥向地震激励组合下,主塔塔顶、主梁以纵向位移为主,且位移均大于 1 m,应考虑设置纵向阻尼器进行减震限位。同时,主梁横向位移不容忽视。内力方面,各主塔底处的剪力、弯矩均大于各墩底,其中,4 号塔塔底右边、8 号塔塔底右边尤为突出,因此对该截面抗剪、抗弯应重点关注。

(3) 在交接墩处,3 条人工地震波激励下,1 号梁右端和 2 号梁左端具有发生碰撞的风险。因此,需在塔梁处布置纵向阻尼器加以控制。当采用液体粘滞阻尼器进行纵向减震控制时,结果表明其位移响应峰值减震率达 40% 以上,可十分有效地防止两座串联的斜拉桥在 E2 地震作用下发生碰撞。

## 参 考 文 献

[1] Virlogeux M. Recent evolution of cable-stayed bridges [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 737-755.

[2] Gimsing N J, Georgakis C T. Cable Supported Bridges: Concept and Design (3rd Edition) [M]. John Wiley and Sons, 2012.

[3] 马如进, 葛纯熙, 胡晓红. 大跨度斜拉桥纵向塔梁阻尼器阻尼性能识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 73-79.

[4] 刘章军, 雷耀龙, 方 兴. 大跨桥梁结构随机地震反应的概率密度演化分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(s1): 226-232.

[5] Soyuk K, Dumanoglu A A, Tuna M E. Random vibration and deterministic analyses of cable-stayed bridges to asynchronous ground motion[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 18(2): 231-246.

[6] 易 江, 刘 闯, 李建中. 地震频谱特性对独塔斜拉桥纵向地震响应影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1114-1122.

[7] 沈 星, 倪晓博, 叶爱君. 大跨度斜拉桥边墩新型横向钢阻尼器减震体系及设计方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 110-119.

[8] Park K S, Jung H J, Lee I W. Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 405-417.

[9] 戴公连, 栗 森. 高铁槽形梁斜拉桥塔梁固接结构试验研究及数值分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 85-92.

[10] 张常勇, 王文斌, 姚宗健. 大跨度斜拉桥顺桥向阻尼约束体系研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 75-80.

[11] 赵 超, 王德胜. 独塔刚构体系斜拉桥地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 157-161.

[12] 李万恒, 王元丰, 李鹏飞, 等. 三塔悬索桥桥塔适宜刚度体系研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 75-81.

[13] 徐 艳, 嵇冬冰, 王瑞龙. H 型斜拉桥桥塔横桥向结构抗震设计与分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 1-7.

[14] 易 江, 孙平宽, 李建中. 斜拉桥横向减震振动台试验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 47-53.

[15] 焦常科, 李爱群, 伍小平. 弹性连接失效对大跨斜拉桥地震响应影响[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 723-728.

[16] Okamoto Y, Nakamura S. Static and seismic studies on steel/concrete hybrid towers for multi-span cable-stayed bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67: 203-210.

[17] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].

[18] 陈永祁. 桥梁工程液体粘滞阻尼器设计与施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.