

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231129001

文章编号: 1672-9331(2024)04-0149-11

引用格式: 盖永斌, 李欢, 龙绿军, 等. 独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥抗震性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 149-159.

Citation: GAI Yongbin, LI Huan, LONG Lyujun, et al. Seismic performance of single-tower cable-stayed bridge with asymmetric steel-concrete hybrid girder[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 149-159.

独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥抗震性能研究

盖永斌¹, 李欢², 龙绿军¹, 张晋瑞¹

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410219; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:【目的】研究独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的抗震性能, 并探明非对称结构地震响应的差异。【方法】以长沙香炉洲大桥西汉航道桥为依托, 采用 Midas Civil 软件建立非对称钢-混混合梁斜拉桥全桥有限元模型, 分别采用反应谱法和非线性时程分析法对其进行地震响应分析, 并重点研究了结构非对称性对斜拉桥辅助墩、过渡墩及其桩基抗震性能的影响。【结果】独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的动力特性和地震响应规律呈现出明显的非对称性, 非对称布置的两过渡墩和两辅助墩在地震作用下的内力响应存在较大差异, 结构的非对称性对横向地震更加敏感, 在抗震设计时应予以重视; 除两过渡墩桩基外, 长沙香炉洲大桥按照静力计算设计的结构尺寸及配筋形式均能满足各工况地震作用下的抗震性能目标; 塔身、墩身在横向+竖向地震作用下的安全储备均大于纵向+竖向地震的, 桩基在横向+竖向地震作用下的安全储备几乎都小于纵向+竖向地震的; 受结构非对称性的影响, 边跨的 27# 过渡墩桩基总是先于主跨的 31# 过渡墩桩基发生破坏; 在横向地震作用下, 受群桩承台影响横向各排桩基地震轴力有较大差异。【结论】从经济性和抗震合理性角度出发, 应对独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥进行差异化的抗震设计, 研究成果可为非对称斜拉桥及其他非对称桥梁结构的抗震设计提供有益参考。

关键词: 独塔斜拉桥; 非对称结构; 钢-混混合梁; 抗震性能; 反应谱法; 非线性时程分析法; 弯矩-曲率分析
中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A

Seismic performance of single-tower cable-stayed bridge with asymmetric steel-concrete hybrid girder

GAI Yongbin¹, LI Huan², LONG Lyujun¹, ZHANG Jinrui¹

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410219, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to study the seismic performance of single-tower cable-stayed bridges with asymmetric steel-concrete hybrid girders and explore the differences in seismic response of asymmetric structures. [Methods] Midas Civil software was used to establish a finite element model of the entire cable-stayed bridge with asymmetric steel-concrete hybrid girders based on the West Branch Channel Bridge of Changsha Xiangluzhou Bridge. The seismic response analysis was conducted using the response spectrum method and the nonlinear time history analysis

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-01-15; 接受日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278547); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ10079)

通信作者: 盖永斌(1993—)(ORCID: 0009-0006-0696-4486), 男, 工程师, 主要从事桥梁抗震研究。

E-mail: 442838581@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

method, respectively. The impact of structural asymmetry on the seismic performance of auxiliary piers, transition piers, and pile foundations of the cable-stayed bridge was mainly studied. [Findings] The dynamic characteristics and seismic response of the single-tower cable-stayed bridge with asymmetric steel-concrete hybrid girders exhibit significant asymmetry. There are significant differences in the internal force response of the two transition piers and two auxiliary piers arranged asymmetrically under seismic action. The structural asymmetry is more sensitive to lateral earthquakes and should be taken seriously in seismic design. Except for the pile foundations of the two transition piers, the structural dimensions and reinforcement forms of Changsha Xiangluzhou Bridge designed according to static calculation can meet the seismic performance goals under various earthquake conditions. The safety reserves of tower and pier bodies under lateral and vertical seismic actions are greater than those under longitudinal and vertical seismic actions, while the safety reserves of pile foundations under lateral and vertical seismic actions are almost all smaller than those under longitudinal and vertical seismic actions. Due to the influence of structural asymmetry, the pile foundation of the 27[#] transition pier of the side span always fails before that of the 31[#] transition pier of the main span. Under lateral seismic action, there are significant differences in the seismic axial force of each row of pile foundations affected by the bearing platform. [Conclusions] From the perspective of economy and seismic rationality, differentiated seismic design should be carried out for single-tower cable-stayed bridges with asymmetric steel-concrete hybrid girders. The research results can provide a useful reference for the seismic design of asymmetric cable-stayed bridges and other asymmetric bridge structures.

Key words: single-tower cable-stayed bridge; asymmetric structure; steel-concrete hybrid girder; seismic performance; response spectrum method; nonlinear time history analysis method; moment-curvature analysis

Foundation items: Project (52278547) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022JJ10079) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province

Corresponding author: GAI Yongbin (1993—) (ORCID: 0009-0006-0696-4486), male, engineer, research interest: seismic design of bridges. E-mail: 442838581@qq.com

0 引言

随着城市跨江桥梁对景观的要求越来越高^[1],独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥作为一种新颖的结构形式得到了越来越多的应用。独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥主跨及边跨采用不同的材料,导致其在地震作用下会产生不同于常规斜拉桥的地震响应规律,故有必要对独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的抗震性能进行专项研究。

国内外学者对于常规双塔斜拉桥及多塔斜拉桥的抗震性能进行了大量研究,如屈爱平等^[2]对沪通长江大桥主航道桥的抗震性能进行了研究,得到了沪通长江大桥主航道桥在地震作用下的响

应规律,并选取了抗震效果最优的塔梁纵向约束体系;何旭辉等^[3-6]对平塘特大桥的抗震性能进行了系统研究,得到了山区非等高三塔斜拉桥在地震作用下的响应规律,并对平塘特大桥的弹性约束体系和阻尼约束体系进行了参数敏感性分析;徐凯燕等^[7]以武汉军山长江大桥为例,对比分析了双塔斜拉桥在一致激励和非一致激励作用下的地震响应;潘思璇等^[8]通过对某非对称矮塔斜拉桥在行波激励下抗震性能的研究,发现非对称结构在不同方向的行波激励下具有不同的地震响应,因此在抗震设计中应重视非对称结构的抗震设计;XIE等^[9]通过振动台试验研究了一座主跨1400 m的双塔斜拉桥在横向地震作用下的响应规律和潜在破坏模式,揭示了超大跨度斜拉桥

塔身地震破坏的一个新特点;SUN等^[10-13]还通过振动台试验研究了这座主跨1 400 m双塔斜拉桥各种纵向抗震体系的抗震性能,并评估了桩-土-结构相互作用对超大跨度斜拉桥地震响应的影响;MARTINS等^[14]通过模态/谱的方法对一座混凝土斜拉桥在地震作用下的抗震性能进行设计优化,考虑斜拉索、索力、主梁和索塔结构尺寸等设计变量,基于造价、结构位移、固有频率和应力等设计目标,提出了一种经济有效的结构设计方案。在独塔斜拉桥抗震性能研究方面,研究成果大多是针对独塔对称斜拉桥的。姜冲虎等^[15]以石河子独塔斜拉桥为工程背景,通过非线性时程分析法研究了该桥在横向地震作用下的合理抗震约束体系;燕斌^[16]以某(155+155) m独塔对称斜拉桥为工程背景,重点研究了采用基础隔震设计后桥梁纵向抗震性能的变化情况;曾聪等^[17]以某跨断层深水独塔斜拉桥为工程背景,通过非线性分析研究了三向地震作用下跨断层独塔斜拉桥的地震响应规律,并针对减震措施提出了建议。

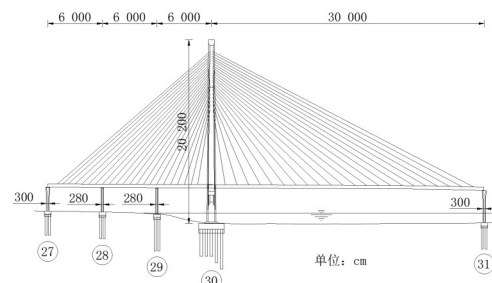
上述对于斜拉桥抗震性能的研究大多关注的是索塔内力和梁端位移等控制指标,很少关注斜拉桥辅助墩和过渡墩的抗震性能。而斜拉桥辅助墩和过渡墩的损伤常常先于索塔出现,且同样会导致灾难性的后果^[18]。本文以长沙香炉洲大桥为工程背景,对独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的抗震性能进行研究,重点研究了非对称斜拉桥辅助墩和过渡墩抗震性能的差异,从而针对地震响应的差异性提出设计优化的建议。

1 工程背景及计算模型

1.1 工程概况

长沙香炉洲大桥西汉航道桥为(3×60+300) m独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥,全长480 m,桥面宽37.5 m(含拉索区),边跨设置两个辅助墩和一个过渡墩,主跨设置一个过渡墩。全桥结构整体为塔梁固结体系,辅助墩和过渡墩处均设置竖向支座。长沙香炉洲大桥西汉航道桥的总体布置图和效果图如图1所示。

索塔为钻石型钢筋混凝土索塔,塔高202.0 m,为长沙桥梁最高塔;索塔承台采用矩形承台,横桥



(a) 总体布置图



(b) 效果图

图1 长沙香炉洲大桥总体布置图和效果图

Fig. 1 General layout and renderings of Changsha Xiangluzhou Bridge

向45.0 m,顺桥向28.2 m,厚6.0 m;承台下设40根直径2.8 m的钻孔灌注桩,按嵌岩桩进行设计。27#、31#过渡墩和28#、29#辅助墩均采用花瓶墩。27#、31#过渡墩顺桥向墩底宽3.0 m,横桥向墩底宽14.0 m;28#、29#辅助墩顺桥向宽2.8 m,横桥向墩底宽16.0 m;27#、31#过渡墩矩形承台横桥向16.0 m,顺桥向7.4 m,厚3.5 m,承台下设8根直径2.0 m的钻孔灌注桩,按嵌岩桩进行设计;28#、29#辅助墩矩形承台横桥向17.4 m,顺桥向7.4 m,厚3.5 m,承台下设8根直径2.0 m的钻孔灌注桩,按嵌岩桩进行设计。香炉洲大桥主跨采用钢箱梁,边跨采用混凝土箱梁。斜拉索采用标准抗拉强度为1 860 Mpa的平行钢丝斜拉索,全桥共88根斜拉索。

1.2 计算模型

采用有限元软件Midas Civil建立长沙香炉洲大桥西汉航道桥全桥有限元模型。主梁、索塔、桥

墩及桩基础等均采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟^[19],并考虑索力的 $P-\Delta$ 效应,所有支座均采用连接单元模拟。将桥面铺装、护栏及拉索绿化带等均作为二期恒载考虑,并将其转化为质量。在建立有限元模型时考虑了桩-土-结构的相互作用,采用m法^[20]计算桩侧土弹簧刚度,以节点弹性支撑来模拟桩土效应^[21]。通过在过渡墩位置考虑相邻孔的质量来体现引桥的影响^[2]。全桥共划分为3 075个节点,2 869个单元,长沙香炉洲大桥全桥有限元模型如图2所示。

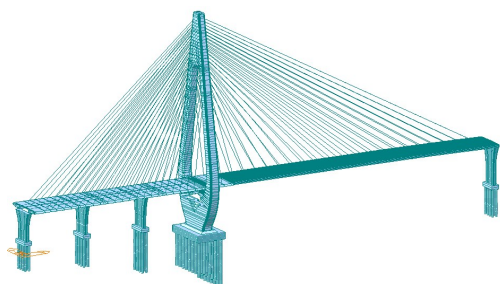


图2 长沙香炉洲大桥全桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of Changsha Xiangluzhou Bridge

1.3 地震动输入

根据《香炉洲大桥项目工程场地地震安全性评价报告》^[22],桥址处场地基本烈度为Ⅵ度,设计基本地震加速度为 $0.05g$,场地类别为Ⅱ类。E1、E2地震作用分别取50年超越概率10%、50年超越概率2%的地震,相应加速度反应谱曲线如图3所示。文献[22]共提供了3条E1地震作用和3条E2地震作用的加速度时程曲线,3条E2地震作用的加速度时程曲线如图4所示。地震响应分析时考虑竖向地震力的作用,计算工况分为①纵向地震+0.67竖向地震、②横向地震+0.67竖向地震。

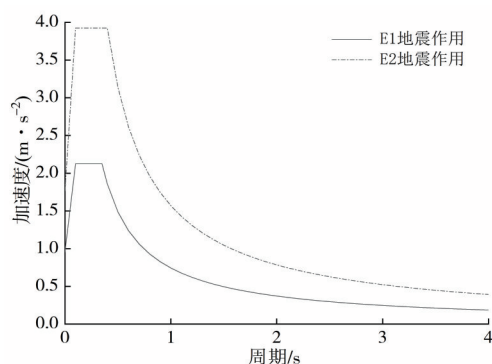
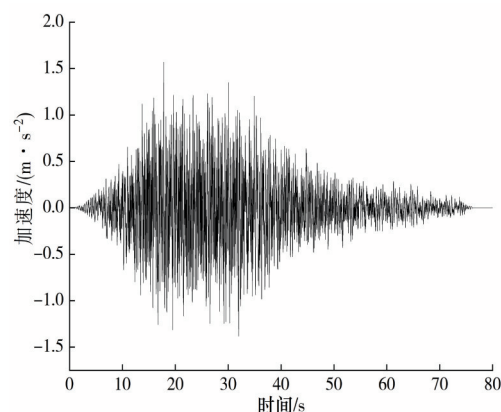
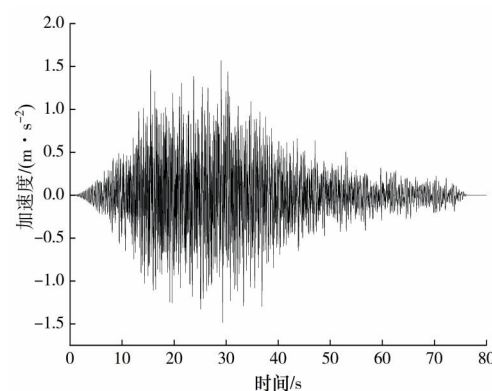


图3 加速度反应谱曲线

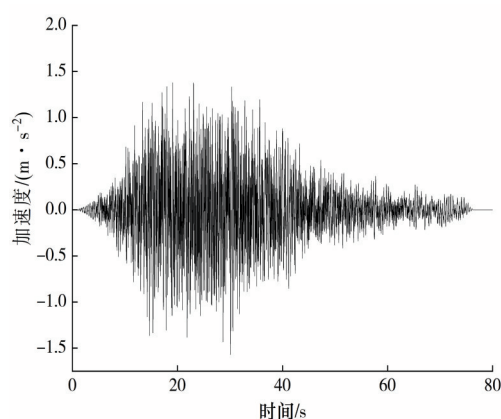
Fig. 3 Response spectrum curves of acceleration



(a) 时程曲线1



(b) 时程曲线2



(c) 时程曲线3

图4 加速度时程曲线

Fig. 4 Time history curves of acceleration

2 动力特性分析

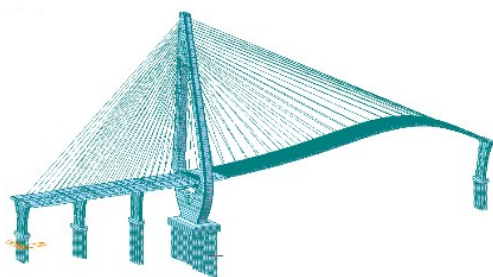
采用多重 Ritz 向量法对长沙香炉洲大桥进行动力特性分析^[23],共计算了前300阶振型,经核查各方向累计振型参与质量均大于98%。前5阶的自振周期、自振频率及振型特征如表1所示,前3

阶振型图如图5所示。

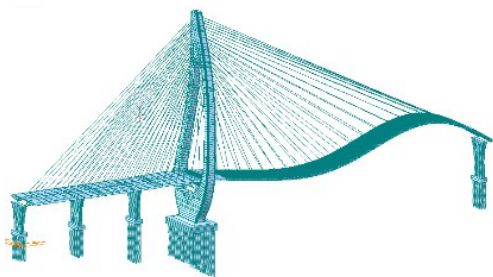
表1 长沙香炉洲大桥自振周期、自振频率及振型特征

Table 1 Natural vibration period, frequency, and mode characteristics of Changsha Xiangluzhou Bridge

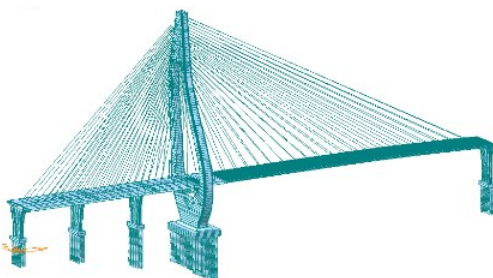
振型阶数	周期/s	频率/Hz	振型特征
1	2.584	0.387	主梁一阶竖弯
2	1.590	0.629	主梁二阶竖弯
3	1.499	0.667	索塔一阶横弯
4	1.300	0.769	主梁三阶竖弯
5	1.292	0.774	主梁一阶横弯



(a) 1阶振型图



(b) 2阶振型图



(c) 3阶振型图

图5 长沙香炉洲大桥振型图

Fig. 5 Vibration mode of Changsha Xiangluzhou Bridge

由表1和图5可知:由于采用了塔梁固结的结构体系,大大增加了主梁的纵向刚度,故1阶振型并不是大跨度斜拉桥常见的主梁纵飘,而是主梁一阶竖弯;桥梁结构的不对称性也体现在自身动力特性上,由于主跨采用钢箱梁、边跨采用混凝土箱梁,且边跨有两个辅助墩,故主跨的结构刚度远小于边跨,主跨振型也远早于边跨出现;由于索塔

高202.0 m(桥面以上约160.0 m),在达到较好景观效果的同时也降低了索塔的横向刚度,故在前3阶振型中出现了索塔横弯振型。

塔梁固结的结构体系可以显著减小主梁的梁端位移,但在地震作用下会显著增大索塔的结构内力,故应重视索塔在地震作用下的内力响应,确保大桥的抗震安全性。由于桥梁结构具有非对称性,在地震作用下27#、31#过渡墩和28#、29#辅助墩必然会产生不同的内力响应,而两过渡墩和两辅助墩均采用了相同的结构尺寸,故有必要进一步研究在地震作用下不同过渡墩和辅助墩之间的内力分布规律,从而指导结构设计。

3 地震响应分析

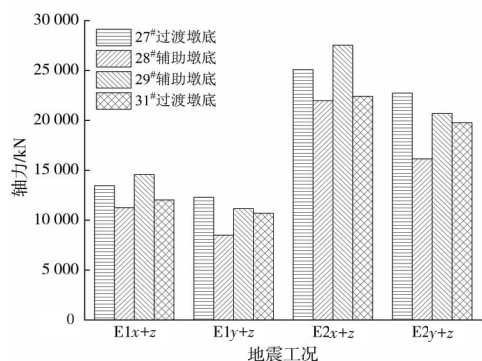
分别采用反应谱法和非线性时程分析法对长沙香炉洲大桥进行地震响应分析,重点分析索塔、辅助墩和过渡墩在地震作用下的内力响应,并对其抗震性能进行验算与评估。

3.1 反应谱分析

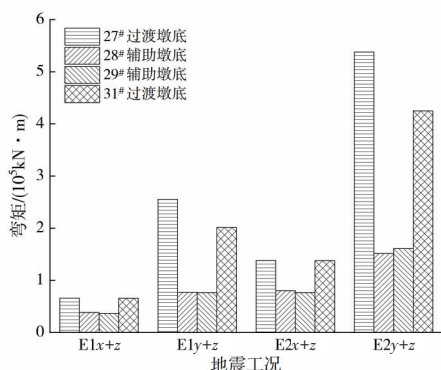
在反应谱分析中,振型组合采用CQC法,方向组合采用SRSS法。辅助墩、过渡墩及其桩基在各工况地震作用下轴力和弯矩的对比如图6~图7所示。图中 $E1x+z$ 表示E1纵向地震+0.67竖向地震作用, $E1y+z$ 表示E1横向地震+0.67竖向地震作用, $E2x+z$ 表示E2纵向地震+0.67竖向地震作用, $E2y+z$ 表示E2横向地震+0.67竖向地震作用,下同。

由图6可以看出,不论在何种工况地震作用下,27#过渡墩的墩底轴力均大于31#过渡墩的;在纵向+竖向地震作用下,27#过渡墩的墩底弯矩与31#过渡墩的相当,但在横向+竖向地震作用下,27#过渡墩的墩底弯矩要远大于31#过渡墩的,表明结构的非对称性对横向地震更加敏感;不论在何种工况地震作用下,28#辅助墩的墩底轴力均小于29#辅助墩的,但墩底弯矩的差异很小,推测此种现象也与结构的非对称性有关。

由图7可以看出,不论在何种工况地震作用下,27#过渡墩的最不利桩基轴力均大于31#过渡墩的,这与墩底轴力的趋势是一致的;在纵向+竖向地震作用下,27#过渡墩的最不利桩基弯矩略小于



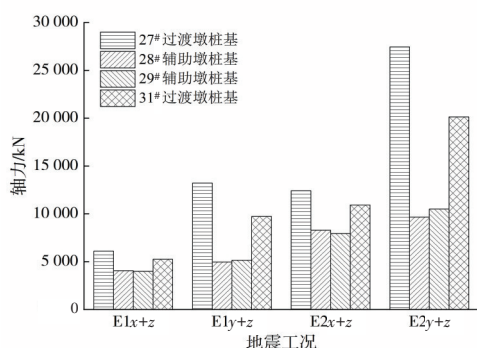
(a) 轴力



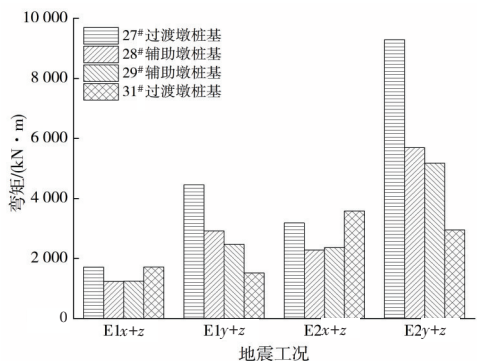
(b) 弯矩

图6 辅助墩和过渡墩内力对比(反应谱分析)

Fig. 6 Comparison of internal forces between auxiliary piers and transition piers (response spectrum analysis)



(a) 轴力



(b) 弯矩

图7 辅助墩桩基和过渡墩桩基内力对比(反应谱分析)

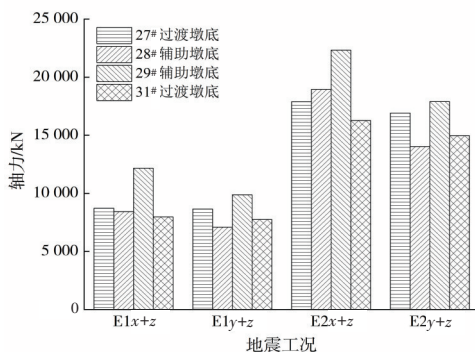
Fig. 7 Comparison of internal forces of pile foundations of auxiliary piers and transition piers (response spectrum analysis)

31#过渡墩的,但在横向+竖向地震作用下,27#过渡墩的最不利桩基弯矩要远大于31#过渡墩的,在E2y+z地震工况下大了205.4%,表明受结构非对称性的影响,过渡墩桩基在横向地震作用下体现出更大的差异性,在抗震设计时应予以重视;在纵向+竖向地震作用下,28#辅助墩的最不利桩基弯矩均略小于29#辅助墩的,但在横向+竖向地震作用下,28#辅助墩的最不利桩基弯矩均略大于29#辅助墩的,表明不对称的两个辅助墩在纵、横向地震作用下呈现相反的规律。

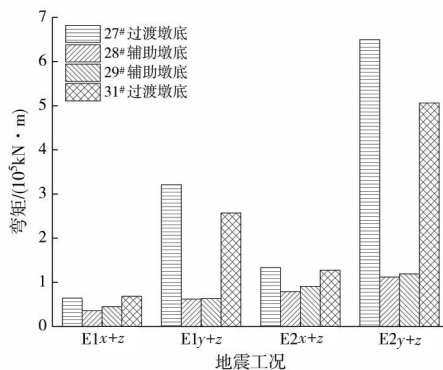
通过反应谱分析的结果可以看出,桥梁结构具有非对称性,从而导致两辅助墩和两过渡墩在不同工况的地震作用下呈现出不同的地震响应规律,故在抗震设计时应予以重视。

3.2 非线性时程分析

对辅助墩和过渡墩处的支座连接单元进行重新定义,采用非线性恢复力模型模拟滑动支座的摩擦耗能作用^[3]。采用非线性直接积分法进行时程分析,各地震工况计算结果取相应3条地震波计算结果的最大值作为最终地震响应。采用非线性时程分析法的辅助墩、过渡墩及其桩基在各工况地震作用下轴力和弯矩的对比如图8~图9所示。



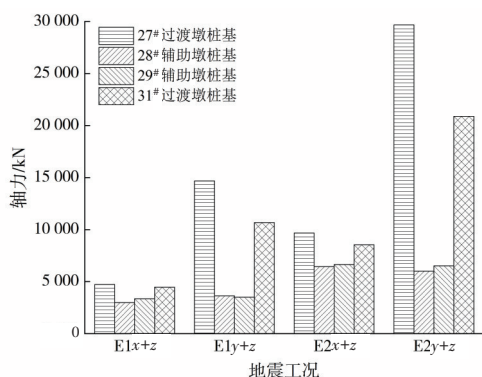
(a) 轴力



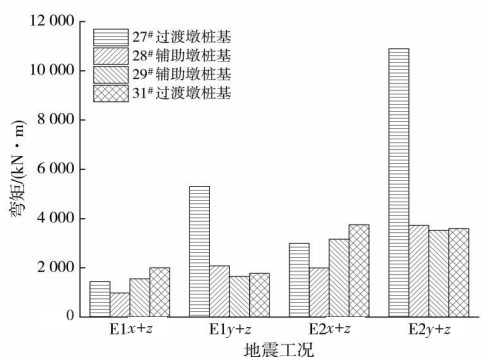
(b) 弯矩

图8 辅助墩和过渡墩内力对比(非线性时程分析)

Fig. 8 Comparison of internal forces between auxiliary piers and transition piers (nonlinear time history analysis)



(a) 轴力



(b) 弯矩

图9 辅助墩桩基和过渡墩桩基内力对比(非线性时程分析)

Fig. 9 Comparison of internal forces of pile foundations of auxiliary piers and transition piers (nonlinear time history analysis)

对比非线性时程分析和反应谱分析的计算结果可知,非线性时程分析得到的辅助墩、过渡墩及其桩基的内力响应呈现出与反应谱分析相似的规律,表明非线性时程分析的计算结果可以反映实际地震作用下的内力响应。与反应谱分析法相比,非线性时程分析法得到的墩底轴力均小于反应谱分析的,减小幅度为11.5%~35.3%;而墩底弯矩相对于反应谱分析的有增大亦有减小,变化幅度为-26.2%~27.6%。与反应谱分析相比,最不利桩基轴力响应的变化幅度为-37.9%~11.1%,最不利桩基弯矩响应的变化幅度为-34.7%~33.9%。

对比两种分析方法的地震响应结果可知,两辅助墩、两过渡墩及其桩基内力响应的差异性在两种计算方法下呈现出完全相同的规律,表明辅助墩和过渡墩地震响应的差异主要是由桥梁结构的非对称性导致的,而与计算方法无关。

3.3 抗震性能验算与评估

索塔、辅助墩、过渡墩及其桩基均为桥梁重要

受力构件,根据相关规范^[24-25]规定:在E1地震作用下,结构应处于弹性状态、基本无损伤;在E2地震作用下,结构可发生局部轻微损伤、无须修复或经简单修复即可正常使用。利用UCFyber软件将索塔、辅助墩、过渡墩及其桩基截面划分为纤维单元,采用实际的钢筋、混凝土应力-应变关系分别模拟钢筋和混凝土单元,再通过数值积分法进行截面弯矩-曲率分析(考虑相应轴力),从而得到截面的弯矩-曲率曲线。索塔采用C55混凝土,辅助墩和过渡墩采用C40混凝土,桩基均采用C30混凝土,纵向受力主筋均为HRB400,混凝土本构关系均采用Mander本构模型。验算用组合轴力是恒载轴力与地震轴力的差,验算用组合弯矩是恒载弯矩与地震弯矩的和,取上述两种计算方法的最不利情况进行抗震验算。相应性能验算目标为:在E1地震作用下,组合弯矩应小于截面初始屈服弯矩;在E2地震作用下,组合弯矩应小于截面等效屈服弯矩。长沙香炉洲大桥索塔、辅助墩、过渡墩及其桩基的验算结果如表2~表3所示。

由表2、表3可知:不论在何种工况地震作用下,索塔、辅助墩和过渡墩均满足抗震性能目标,且在横向+竖向地震作用下的安全储备均大于纵向+竖向地震;在E1横向+竖向地震作用下,27#过渡墩桩基不满足抗震性能目标,在E2横向+竖向地震作用下,两个过渡墩桩基均不满足抗震性能目标,说明按照静力计算设计的桩基尺寸及配筋形式无法满足抗震设计的需要;在纵向+竖向地震作用下,各桩基的安全储备几乎都大于横向+竖向地震的,说明桩基在横向地震作用下更易发生破坏,这与塔身、墩身的抗震验算结论相反;由于桥梁结构具有非对称性,两过渡墩在横向+竖向地震作用下的抗震性能存在较大差异,边跨的27#过渡墩桩基总是先于主跨的31#过渡墩桩基发生破坏,因此应重视结构非对称性导致的抗震性能差异,对两过渡墩进行差异化设计。

为了使两个过渡墩桩基满足抗震性能目标,需要在原设计的基础上对桩基尺寸及配筋形式进行优化。原设计两个过渡墩均采用8根直径为2.0 m的钻孔灌注桩,纵向受力主筋为38根 $\Phi 28$ 。优化设计首先考虑将纵向受力主筋加强,将 $\Phi 28$ 主筋改为 $\Phi 28$ 并筋,再次进行抗震性能验算,验算结果如表4所示。

表2 索塔、辅助墩和过渡墩抗震验算结果

Table 2 Seismic checking results of towers, auxiliary piers, and transition piers

地震工况	验算位置	地震轴力/kN	组合轴力/kN	地震弯矩/(kN·m)	组合弯矩/(kN·m)	初始屈服弯矩(等效屈服弯矩)/(kN·m)	能力需求比
E1(纵向+竖向)	27#过渡墩底	13 463	74 230	65 786	82 006	181 800	2.22
	28#辅助墩底	11 268	42 072	38 278	38 278	147 100	3.84
	29#辅助墩底	14 581	44 648	36 492	36 492	149 300	4.09
	30#索塔底	61 321	728 520	1 041 403	1 115 561	5 153 000	4.62
	31#过渡墩底	12 035	67 721	65 485	84 818	175 900	2.07
E1(横向+竖向)	27#过渡墩底	12 289	75 404	255 270	255 270	802 600	3.14
	28#辅助墩底	8 499	44 842	77 122	77 122	792 200	10.27
	29#辅助墩底	11 157	48 072	76 484	76 484	810 500	10.60
	30#索塔底	54 092	735 749	2 037 174	2 037 174	15 500 000	7.61
	31#过渡墩底	10 699	69 057	201 486	201 486	479 800	2.38
E2(纵向+竖向)	27#过渡墩底	25 091	62 602	138 104	154 325	246 800	1.60
	28#辅助墩底	21 969	31 372	80 327	80 327	210 600	2.62
	29#辅助墩底	27 535	31 693	76 566	76 566	210 900	2.75
	30#索塔底	114 652	675 189	2 192 194	2 266 352	6 590 000	2.91
	31#过渡墩底	22 429	57 327	137 711	157 043	241 900	1.54
E2(横向+竖向)	27#过渡墩底	22 743	64 950	537 801	537 801	1 194 000	2.22
	28#辅助墩底	16 148	37 192	151 674	151 674	1 296 000	8.54
	29#辅助墩底	20 687	38 542	160 752	160 752	1 304 000	8.11
	30#索塔底	99 952	689 889	4 269 036	4 269 036	21 400 000	5.01
	31#过渡墩底	19 767	59 989	424 703	424 703	1 168 000	2.75

表3 索塔桩基、辅助墩桩基和过渡墩桩基抗震验算结果

Table 3 Seismic checking results of pile foundations of tower, auxiliary piers, and transition piers

地震工况	验算位置	地震轴力/kN	组合轴力/kN	地震弯矩/(kN·m)	组合弯矩/(kN·m)	初始屈服弯矩(等效屈服弯矩)/(kN·m)	能力需求比
E1(纵向+竖向)	27#过渡墩桩基	6 105	5 379	1 711	2 038	8 486	4.16
	28#辅助墩桩基	4 055	4 105	1 234	1 234	7 749	6.28
	29#辅助墩桩基	3 987	4 909	1 248	1 248	8 215	6.58
	30#索塔桩基	7 744	15 616	3 292	4 721	29 440	6.24
	31#过渡墩桩基	5 433	4 963	1 964	2 488	8 246	3.31
E1(横向+竖向)	27#过渡墩桩基	13 218	-1 734	4 454	4 454	3 971	0.89
	28#辅助墩桩基	4 966	3 194	2 918	2 918	7 216	2.47
	29#辅助墩桩基	5 153	3 744	2 472	2 472	7 542	3.05
	30#索塔桩基	9 804	13 556	4 507	4 507	27 950	6.20
	31#过渡墩桩基	9 737	659	1 515	1 515	5 608	3.70
E2(纵向+竖向)	27#过渡墩桩基	12 424	-940	3 185	3 512	8 277	2.36
	28#辅助墩桩基	8 287	-127	2 281	2 281	8 809	3.86
	29#辅助墩桩基	7 950	947	2 360	2 360	9 401	3.98
	30#索塔桩基	15 857	7 503	6 202	7 630	30 230	3.96
	31#过渡墩桩基	10 975	-579	4 091	4 616	8 518	1.85
E2(横向+竖向)	27#过渡墩桩基	27 452	-15 968	9 285	9 285	0	0.00
	28#辅助墩桩基	9 676	-1 516	5 696	5 696	7 896	1.39
	29#辅助墩桩基	10 498	-1 602	5 174	5 174	7 838	1.51
	30#索塔桩基	19 985	3 375	8 599	8 599	31 770	3.69
	31#过渡墩桩基	20 204	-9 808	3 040	3 040	0	0.00

表4 优化后的过渡墩桩基抗震验算结果

Table 4 Optimized seismic checking results of pile foundations of transition piers

地震工况	验算位置	地震轴力/ kN	组合轴力/ kN	地震弯矩/ (kN·m)	组合弯矩/ (kN·m)	初始屈服弯矩(等效 屈服弯矩)/(kN·m)	能力需 求比
E1(横向+竖向)	27#过渡墩桩基	13 218	-1 734	4 454	4 454	8 917	2.00
E2(横向+竖向)	27#过渡墩桩基	27 452	-15 968	9 285	9 285	6 706	0.72
	31#过渡墩桩基	20 204	-9 808	3 040	3 040	11 260	3.70

由表4可知,将 $\Phi 28$ 主筋改为 $\Phi 28$ 并筋后,31#过渡墩在E2横向+竖向地震作用下的能力需求比提高为3.70,而27#过渡墩在E2横向+竖向地震作用下仍不能满足抗震性能目标。将27#过渡墩桩基的配筋进一步加强,由 $\Phi 28$ 并筋改为 $\Phi 32$ 并筋后,再次进行抗震性能验算,此时桩基的等效屈服弯矩为13 020 kN·m,能力需求比提高为1.40,满足抗震性能目标。综上,从抗震安全性及合理性的角度,应对非对称结构进行差异化的抗震设计。

3.4 抗震设计优化

由于3.3中桩基抗震性能验算针对的是群桩基础中的最不利桩基,而最不利桩基的抗震性能不满足要求并不代表所有桩基均不满足抗震性能的目标。为了使抗震设计更加精细,也为了在确保结构抗震安全性的同时也能做到较好的经济性,故有必要对群桩基础的地震响应规律进行更为细致的研究。两过渡墩承台均下设8根直径

2.0 m 钻孔灌注桩,具体分布情况为横桥向4排、顺桥向2排。在E2纵向+竖向地震和E2横向+竖向地震作用下,两过渡墩最不利桩基的内力分布规律如表5所示。

由表5可知,在纵向+竖向地震作用下,过渡墩顺桥向两排桩基的轴力相近、弯矩完全相同,表明群桩基础最不利桩基的验算结果可以代表每根桩基的验算情况;在横向+竖向地震作用下,过渡墩横桥向外排桩基的地震轴力远大于内排桩基的,各排桩基的地震弯矩完全相同,群桩基础中最不利桩基的验算结果对应最外排桩基验算情况,但并不能反映内排桩基的验算情况。利用UCFyber软件对横向+竖向地震作用下的过渡墩横桥向内排桩基进行抗震性能验算,结果表明:采用原设计配筋的27#过渡墩横桥向内排桩基能力需求比为0.97,31#过渡墩横桥向内排桩基能力需求比为3.24;采用 $\Phi 28$ 并筋的27#过渡墩内排桩基能力需求比为1.83,31#过渡墩内排桩基能力需求比为5.72。

表5 过渡墩桩基地震内力分布

Table 5 Seismic internal force distribution of pile foundations of transition piers

地震工况	桩基编号	27#过渡墩桩基地 震轴力/kN	31#过渡墩桩基地 震轴力/kN	27#过渡墩桩基地 震弯矩/(kN·m)	31#过渡墩桩基地 震弯矩/(kN·m)
E2(纵向+ 竖向)	顺桥向第1排桩基	12 424	10 640	3 185	4 091
	顺桥向第2排桩基	12 377	10 975	3 185	4 091
E2(横向+ 竖向)	横桥向第1排桩基	27 452	20 204	9 285	3 044
	横桥向第2排桩基	11 227	8 667	9 285	3 044
	横桥向第3排桩基	11 227	8 667	9 285	3 044
	横桥向第4排桩基	27 452	20 204	9 285	3 044

4 结论

本文以长沙香炉洲大桥西汉航道桥为工程背景,建立有限元模型对独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的地震响应规律及抗震性能进行研究,主要得到以下结论:

1) 独塔非对称钢-混混合梁斜拉桥的动力特性和地震响应规律呈现出明显的非对称性,非对称布置的两过渡墩和两辅助墩在地震作用下的内力响应存在较大差异,且结构的非对称性对横向地震更加敏感,在抗震设计时应予以重视。

2) 除两过渡墩桩基外,长沙香炉洲大桥按照静力计算设计的结构尺寸及配筋形式均能满足各

工况地震作用下的抗震性能目标;塔身、墩身在横向+竖向地震作用下的安全储备均大于纵向+竖向地震的,而桩基在横向+竖向地震作用下的安全储备几乎都小于纵向+竖向地震的。

3) 按照静力计算设计的两过渡墩桩基在横向+竖向地震作用下不满足抗震性能目标,应对两过渡墩桩基采取加强配筋或减震等抗震设计措施;受结构非对称性的影响,边跨的27#过渡墩桩基总是先于主跨的31#过渡墩桩基发生破坏,因此应对两过渡墩桩基进行差异化抗震设计。

4) 在横向地震作用下,受群桩承台影响横桥向各排桩基地震轴力有较大差异,导致各排桩基的能力需求比存在较大差异。从经济性和抗震合理性角度出发,建议对横桥向各排桩基进行差异化抗震设计。

5) 随着新型城镇化战略的推进,为满足日益增长的交通量需求和城市景观的需要,越来越多的非对称异形结构宽桥开始建设,今后应针对非对称结构和群桩基础的抗震性能差异进行更加精细化的抗震设计。

[参考文献]

- [1] 丘桑,蔡小杨,李俊诺,等.厝角头索塔下塔柱施工及温度应力分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):146-156. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221117001.
QIU Shen, CAI Xiaoyang, LI Junnuo, et al. Construction and thermal stress analysis of the lower pylon of Cuojiatou cable tower [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 146-156. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221117001.
- [2] 屈爱平,李龙安.沪通长江大桥主航道桥抗震设计[J].桥梁建设,2015,45(6):69-73.
QU Aiping, LI Long'an. Seismic design of main ship channel bridge of Hutong Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 69-73.
- [3] 何旭辉,盖永斌,魏标,等.平塘特大桥主桥抗震性能研究[J].桥梁建设,2017,47(1):76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.01.014.
HE Xuhui, GAI Yongbin, WEI Biao, et al. Study of seismic performance of main bridge of Pingtang Bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.01.014.
- [4] 陈应高,盖永斌,何旭辉,等.山区非等高三塔斜拉桥纵向抗震约束体系研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1457-1464. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.07.016.
CHEN Yinggao, GAI Yongbin, HE Xuhui, et al. Research on the longitudinal seismic constraint systems of mountain cable-stayed bridge with three different-height pylons [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1457-1464. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.07.016.
- [5] 徐向东,盖永斌,杜镔,等.基于弹性拉索的超高墩三塔斜拉桥减震效果研究[J].世界地震工程,2020,36(2):138-145. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2020.02.015.
XU Xiangdong, GAI Yongbin, DU Bin, et al. Study on seismic reduction effect of three-pylon cable-stayed bridge with super-high pier using elastic cables [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 138-145. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2020.02.015.
- [6] WEI B, HU Z L, HE X H, et al. System-based probabilistic evaluation of longitudinal seismic control for a cable-stayed bridge with three super-tall towers [J]. Engineering Structures, 2021, 229(3): 111586. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111586.
- [7] 徐凯燕,魏德敏.武汉军山长江大桥非线性地震反应时程分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2010,37(5):19-23.
XU Kaiyan, WEI Demin. Nonlinear earthquake-response time-history analysis of Wuhan Junshan Yangtze River Bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(5): 19-23.
- [8] 潘思璇,唐冕,宋旭明.行波激励对非对称矮塔斜拉桥抗震性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(7):1862-1872. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.07.012.
PAN Sixuan, TANG Mian, SONG Xuming. Seismic behavior of asymmetric extradosed bridge with action of traveling wave effect [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(7): 1862-1872. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.07.012.
- [9] XIE W, SUN L M. Transverse seismic response and failure mode of towers of a cable-stayed bridge full-model: tests and simulations [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 122(11): 105224. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105224.
- [10] SUN L M, XIE W. Full-model shaking table tests of seismic behavior of a super-long-span cable-stayed bridge with pile foundations [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11): 04019102. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001478.
- [11] LIANG F Y, JIA Y J, SUN L M, et al. Seismic response of pile groups supporting long-span cable-stayed bridge subjected to multi-support excitations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 101: 182-203. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.07.019.
- [12] SUN L M, XIE W. Evaluation of pile-soil-structure

- interaction effects on the seismic responses of a super long-span cable-stayed bridge in the transverse direction: a shaking table investigation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125 (6): 105755. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105755.
- [13] SUN L M, XIE W. Experimental assessment of soil-structure interaction effects on a super long-span cable-stayed-bridge with pile group foundations [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 17(6): 3169-3196. DOI: 10.1007/s10518-019-00574-8.
- [14] MARTINS A M B, SIMÕES L M C, NEGRÃO J H J O. Optimization of concrete cable-stayed bridges under seismic action [J]. *Computers and Structures*, 2019, 222 (C): 36-47. DOI: 10.1016/j.compstruc. 2019. 06.008.
- [15] 姜冲虎,李德建.石河子独塔斜拉桥横向抗震合理约束体系研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(3): 570-576. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2015. 03.019.
- JIANG Chonghu, LI Dejian. Lateral seismic analysis and its restraint system feasibility of Shihezi single pylon cable-stayed bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12 (3): 570-576. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2015.03.019.
- [16] 燕斌.基础隔震独塔斜拉桥抗震性能研究[J]. *桥梁建设*, 2018, 48(2): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.02.005.
- YAN Bin. Study of seismic performance of single pylon cable-stayed bridges with base isolation design [J]. *Bridge Construction*, 2018, 48 (2): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.02.005.
- [17] 曾聪,江辉,黄磊,等.跨断层独塔斜拉桥的非线性地震响应特性研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 230-245. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2021. 02.012.
- ZENG Cong, JIANG Hui, HUANG Lei, et al. Nonlinear seismic response characteristics of fault-crossing single-tower cable-stayed bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 230-245. DOI: 10. 19721/j. cnki. 1001-7372.2021.02.012.
- [18] HAO H, TANG E K C. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, part II: damage prediction and FRP strengthening [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (10): 3193-3205. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.06.006.
- [19] 董俊,曾永平,张金,等.超250 m级高塔铁路斜拉桥减隔震设计参数影响分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(7): 1963-1976. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. T20210902.
- DONG Jun, ZENG Yongping, ZHANG Jin, et al. Influence analysis of vibration isolation design parameters of over 250 m high tower railway cable-stayed bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19 (7): 1963-1976. DOI: 10. 19713/j. cnki. 43-1423/u. T20210902.
- [20] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [21] 樊冰,李永庆,宋松林,等.高烈度区深水斜拉桥动水效应及抗震体系研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44 (5): 1024-1033. DOI: 10.20000/j. 1000-0844. 20211206001.
- FAN Bing, LI Yongqing, SONG Songlin, et al. Hydrodynamic effect and seismic system of a deep-water cable-stayed bridge in high-seismic-intensity areas [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44 (5): 1024-1033. DOI: 10.20000/j. 1000-0844.20211206001.
- [22] 湖南湘测科技工程有限公司.香炉洲大桥项目工程场地地震安全性评价报告[R]. 长沙:湖南湘测科技工程有限公司,2020.
- Hunan Xiangce Technology Engineering Co., Ltd.. Report on seismic safety assessment of the Xiangluzhou Bridge project site [R]. Changsha: Hunan Xiangce Technology Engineering Co., Ltd., 2020.
- [23] 陈志强,郑史雄,陈志伟,等.近断层脉冲方向性对大跨斜拉桥地震响应的影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15 (12): 3127-3134. DOI: 10.19713/j. cnki.43-1423/u. 2018.12.015.
- CHEN Zhiqiang, ZHENG Shixiong, CHEN Zhiwei, et al. Influence of directivity of near-fault impulse effect on seismic response of long span cable stayed bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15 (12): 3127-3134. DOI: 10.19713/j. cnki.43-1423/u.2018.12.015.
- [24] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [25] 同济大学.城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Tongji University. Code for seismic design of urban bridges: CJJ 166—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

(责任编辑:毛娜;校对:彭三军)