

# 强震作用下采用BRB的联塔斜拉桥力学响应分析

王树明<sup>1,2</sup>, 王朝<sup>3</sup>

(1. 甘肃五环公路工程有限公司, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省桥梁工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;  
3. 中铁桥研科技有限公司, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 以位于抗震设防烈度为8度的高烈度地震区中的(151+328+151)m联塔斜拉桥为研究对象, 拟在联塔间设置大吨位屈曲约束支撑(Buckling-Restrained Brace, BRB), 以提高联塔结构的连接刚度与地震耗能能力。分析在强震作用下联塔结构的内力变化, 量化BRB的弹性刚度、屈服力及屈服后刚度等关键力学参数的敏感性大小, 对BRB关键参数的取值提出合理化建议。研究表明: 结构内力对BRB初始刚度变化敏感性较大, 故BRB初始刚度应维持在设计值; 结构内力对BRB屈服力有一定的敏感性, 故BRB屈服力宜维持在设计值或适当提高; 联塔结构内力对BRB屈服后刚度敏感性较小, 故BRB屈服后刚度宜维持在设计值或较低水平。

**关键词:** 联塔斜拉桥; 抗震; BRB; 弹性刚度; 敏感性

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0098-05

## Analysis on Mechanical Response of Double-pylon Cable-stayed Bridge with BRB under Strong Earthquake

WANG Shuming<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>

(1. Gansu Ring V Highway Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Bridge Engineering Research Center, Lanzhou 730050, China; 3. China Railway Bridge Research Technology Co., Ltd., Wuhan 430030, China)

**Abstract:** Taking a (151+328+151) m double-pylon cable-stayed bridge located in a high-intensity earthquake area with seismic fortification intensity of 8 degrees as the research object, it is proposed to install the large-tonnage buckling-restrained braces (BRB) between the pylons to improve the connection stiffness and seismic energy dissipation capacity of the double-pylon structure. The internal force changes of double-pylon structures under strong earthquake action are analyzed. The sensitivity of key mechanical parameters such as elastic stiffness, yield force, and post yield stiffness of BRB is quantified. And the rational suggestions for the values of key parameters of BRB are put forward. The research results indicate that the internal forces of the structure are highly sensitive to changes in the initial stiffness of the BRB, and the initial stiffness of the BRB should be maintained at the design value. The internal forces of the structure have a certain sensitivity to the yield force of BRB, and the yield force of BRB should be maintained at the design value or appropriately increased. The internal forces of the double-pylon structure are less sensitive to the stiffness of the BRB after yielding, and the stiffness of the BRB after yielding should be maintained at the design value or a lower level.

**Keywords:** double-pylon cable-stayed bridge; seismic; BRB; elastic stiffness; sensitivity

## 0 引言

随着经济社会的快速发展, 我国的道路交通量日益激增, 斜拉桥作为跨越大江大河及超大峡谷的重要桥型, 发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。斜拉桥具有主塔高、主梁跨度大、结构柔度大的特点, 然而受限于材料与结构的力学性能, 主梁的宽度不可能达到无限宽, 因而若要满足更大的交通量需求, 则必须

增加车道数量<sup>[2]</sup>。在这种背景条件下, 分幅联塔桥梁成为斜拉桥的一种优选方案, 展现出良好的应用前景。近年来, 双幅联塔斜拉桥已在实际工程中得到了广泛应用。

双幅联塔斜拉桥的双幅一般共用承台基础, 但由于主塔高度大、质量大, 且双塔横向距离近, 一旦发生地震, 不仅双塔会相互影响造成损伤, 且双塔的不规则运动也会对承台基础造成严重损坏<sup>[3]</sup>。因此, 增强联塔的横向联系与地震耗能能力, 成为该类型桥梁亟待解决的问题。针对双幅联塔斜拉桥的抗震问题, 已有众多学者展开了研究。高宝<sup>[3]</sup>等采用

收稿日期: 2024-09-02

作者简介: 王树明(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事桥梁施工技术研究工作。

SAP2000软件建立了(54+166+468+166+54)m联塔分幅四索面钢混组合梁斜拉桥的有限元分析模型,结合非线性时程分析方法,研究了在不同超越概率下该桥的地震响应。陈德伟<sup>[4]</sup>等选择主跨为300m的双幅联体塔斜拉桥开展了对阻尼器布置方案和参数分析的研究,结果表明采用黏滞阻尼器能够对主梁、主塔的内力和变形产生显著的降低效果。目前,在大跨度桥梁抗震措施方面,采用屈曲约束支撑(Buckling-Restrained Brace, BRB)的方案受到了众多学者们的关注<sup>[5]</sup>。BRB是一种性能优越的轴向位移型金属阻尼器,具备连接刚度大、吨位耗能大的优点<sup>[6]</sup>,弹性刚度、屈服力及屈服后刚度三个关键参数是其主要的性能指标<sup>[7]</sup>。

对于双幅联塔斜拉桥而言,要提高联塔结构的抗震与协同工作能力,需要在联塔结构间设置耗能连接装置。本文针对某强震区双幅联塔斜拉桥的减震需求,提出了在横梁外侧的联塔之间设置BRB体系的方案,并分析了其性能参数对桥梁抗震性能的影响,以期提升双幅联塔斜拉桥在强震下的抗震能力与安全性。

## 1 工程概况

本文所研究的分幅联塔斜拉桥的跨径组合为(151+328+151)m,全长360m。桥塔采用菱形“双子塔”设计,南塔塔高152m,北塔塔高133m,根据其形态和位置,分为上塔柱和下塔柱。南、北塔的上塔柱高97m,南塔下塔柱高55m,北塔下塔柱高36m。桥塔横断面如图1所示。

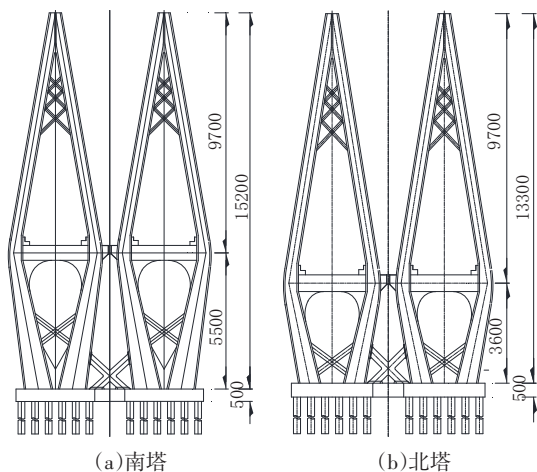


图1 联塔斜拉桥北主塔横断面图(单位:cm)

斜拉桥联塔结构共用基础与承台,其共同工作需要较大的连接刚度相匹配。此外,本文所研究联

塔结构桥梁处于抗震设防烈度为8度的高烈度地震区,地震峰值加速度为0.216g,主桥按A类设防。为提高联塔结构的地震耗能能力,拟在联塔结构横梁外侧的牛腿间设置BRB,以提升双幅斜拉桥的连接刚度,同时使联塔结构能兼具地震耗能能力,以耗散地震动输入的能量,保护桥梁不致受到强震严重损坏<sup>[2]</sup>。

## 2 有限元仿真模型

### 2.1 基本模型

采用MIDAS Civil软件建立联塔斜拉桥的三维有限元模型。该桥为半漂浮结构体系,塔梁间纵向自由,故竖向设置双向活动钢支座,横向设置单向活动钢支座以约束主梁横向变形;辅助墩处墩梁间竖向设置双向活动球形支座,梁体可沿纵横向自由变形;过渡墩处墩梁间纵向自由,故竖向设置双向活动钢支座,横向设置单向活动钢支座以约束主梁的横向变形。主梁、主塔、主墩、承台和横梁均采用空间梁单元模拟,斜拉索采用空间桁架单元模拟,考虑垂度效应的影响,各处支座及索梁的连接处根据其约束特性采用弹性连接来模拟,承台底及各墩底采用固结的方法近似模拟,构建模型单元共计957个,节点共计1140个,模型如图2所示。

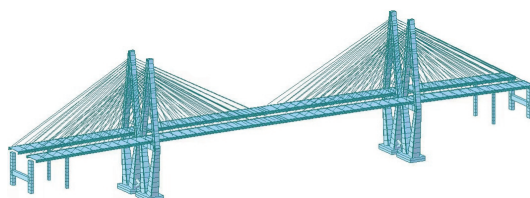


图2 联塔斜拉桥有限元模型

### 2.2 BRB本构及模拟

利用MIDAS Civil滞后系统中的Park-Wen模型来模拟BRB的力学行为<sup>[8]</sup>,滞后系统设置于联塔塔间横梁处,南塔、北塔各一个。Park-Wen模型能有效模拟金属阻尼器力学行为,由相互独立的具有单轴塑性(Uniaxial Plasticity)特性的六个弹簧构成,一般用于模拟耗能装置(Energy Dissipation Device)。力学模型如图3所示。

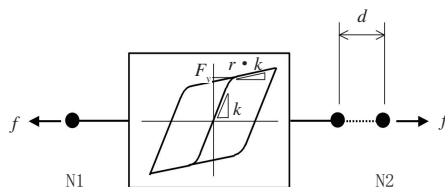


图3 Park-Wen模型

### 2.3 地震动参数选取

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)<sup>[9]</sup>中的有关规定:对于A类桥梁,公路桥梁的地震作用应同时考虑水平和竖向地震作用;当采用时程分析法时,应同时输入两个或三个方向分量的一组地震动时程计算地震作用效应。本文的分析主要针对横向地震动作用,故同时输入横向和竖向地震动时程,E2地震作用下的横向地震动时程如图4所示,竖向地震动时程拟按横向时程×0.67折减。

### 2.4 BRB减震效果分析

在E2地震动输入下,分析设置BRB阻尼系统前后联塔结构的内力变化情况,探讨BRB对结构抗震能力的贡献。联塔结构中不同部位的内力分量时程曲线峰值对比如表1所示。

由表1可知,增设BRB后,承台底的横向剪力和弯矩有一定程度的增加,原因是BRB增强了联塔结构的整体横向刚度,但增加值不大,且使得南北两塔的内力分配更均衡,利于结构受力。对于主塔各肢,

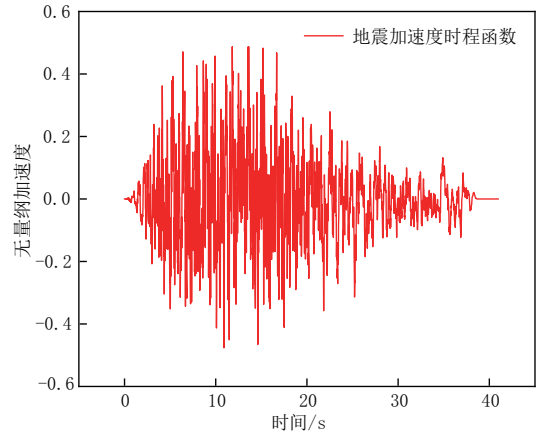


图4 E2地震加速度时程(单位:g)

增设BRB显著降低了塔底的横向剪力与弯矩,对横向剪力的最大降低率为67.3%,横向弯矩的最大降低率为44.9%。对于轴力,可见增设BRB后有效降低了主塔轴力的最大值,使得原本在各肢间分布不均的轴力变得更为均衡。因此可认为增设BRB有效提升了联塔斜拉桥结构的抗震能力,使得结构受力趋于合理。

表1 设置BRB前后实桥主要内力峰值对比

位置 承台底/塔底	内力分量	南(高)塔			北(矮)塔		
		无控	设置BRB	变化率/%	无控	设置BRB	变化率/%
承台底	轴力/kN	47 207	47 298	0.2	28 994	28 782	-0.7
	横向剪力/kN	80 550	82 230	2.1	70 482	83 055	17.8
	横向弯矩/(kN·m)	6 321 200	6 792 680	7.5	5 490 970	7 298 230	32.9
左幅左肢	轴力/kN	92 474	63 690	-31.1	65 370	71 129	8.8
	横向剪力/kN	26 406	8 639	-67.3	8 427	5 431	-3.56
	横向弯矩/(kN·m)	430 182	315 233	-26.7	337 269	256 987	-23.8
左幅右肢	轴力/kN	30 023	80 893	169.4	22 114	86 434	290.9
	横向剪力/kN	17 305	8 055	-53.5	14 472	8 825	-39.0
	横向弯矩/(kN·m)	427 615	245 215	-42.7	105 534	85 317	-19.2
右幅左肢	轴力/kN	39 719	93 491	135.4	29 981	88 638	195.6
	横向剪力/kN	17 905	8 479	-52.6	15 320	9 387	-38.7
	横向弯矩/(kN·m)	442 487	243 667	-44.9	111 400	89 095	-20.0
右幅右肢	轴力/kN	84 437	68 609	-18.7	70 831	70 504	-0.5
	横向剪力/kN	25 232	8 687	-65.6	9 028	4 955	-45.1
	横向弯矩/(kN·m)	437 711	306 252	-30.0	352 654	265 475	-24.7

## 3 BRB关键力学参数敏感性分析

### 3.1 参数选取

选取弹性刚度、屈服力及屈服后刚度三个关键参数进行敏感性分析<sup>[7]</sup>。根据联塔斜拉桥结构的地震响应特点,给出了南塔、北塔的金属阻尼器性能的参数初步设计值。针对初始刚度 $k$ 与屈服力 $F_y$ ,以设计值-30%~30%为变化区间,以10%的变化量分级;针对屈服后刚度,以屈服后刚度比 $r$ (屈服后刚度与

初始弹性刚度的比值)为目标值,以1%~5%为变化区间分为6级(不含设计值2%)取值。据此,含设计值在内,各参数变量的分级均为7级,如表2所示。

### 3.2 BRB弹性刚度敏感性分析

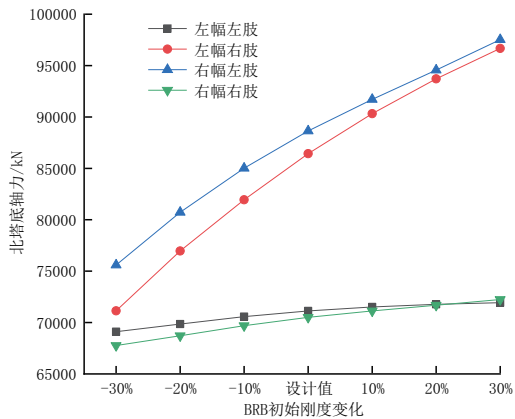
对于BRB初始刚度变化引起的结构内力变化,考虑到其对主塔、承台的纵桥向剪力和弯矩影响较小,故仅分析其对主塔塔底及承台底的轴力、横向剪力及横桥向弯矩的影响;此外,由于联塔效应,也考察纵向弯矩的变化规律。由于BRB弹性刚度对塔底



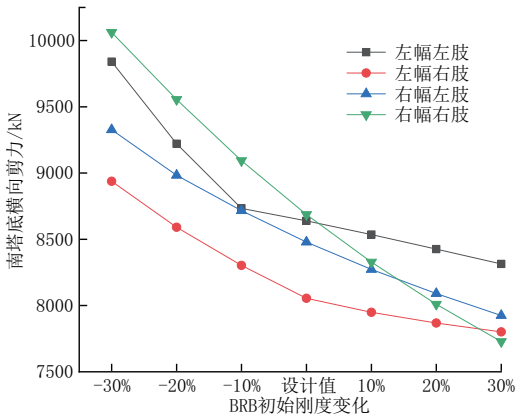
表2 阻尼器设计参数及分级取值

参数等级/ $\%$	南(高)塔			北(矮)塔		
	弹性刚度 $k/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	屈服力 $F_y/$ kN	屈服后 刚度比/ $r$	弹性刚度 $k/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	屈服力 $F_y/$ kN	屈服后 刚度比/ $r$
第一级(-30)	11 060 000	37 800	0.001	16 590 000	56 980	0.001
第二级(-20)	12 640 000	43 200	0.002	18 960 000	65 120	0.002
第三级(-10)	14 220 000	48 600	0.005	21 330 000	73 260	0.005
第四级(设计值)	15 800 000	54 000	0.010	23 700 000	81 400	0.010
第五级(10)	17 380 000	59 400	0.020	26 070 000	89 540	0.020
第六级(20)	18 960 000	64 800	0.030	28 440 000	97 680	0.030
第七级(30)	20 540 000	70 200	0.050	30 810 000	105 820	0.050

其他内力影响略小,限于篇幅,仅列出影响较为显著的对北塔底轴力与南塔底横向剪力的影响曲线,其变化曲线如图5所示。



(a)北塔底轴力



(b)南塔横向剪力

图5 BRB弹性刚度对塔底内力影响

由图5可知,随着BRB初始刚度在设计值 $\pm 30\%$ 区间内的逐渐提升,对承台底内力影响较小,北塔底横向弯矩最大增幅为设计参数的7.2%;而对塔底轴力与横向剪力的影响较为明显(见图5),随着BRB初始刚度增大,北塔各肢轴力逐渐增大,最大增幅为35.9%,南塔各肢横向剪力则逐渐降低,最大降幅为23.2%;南塔各肢横向弯矩夜均逐渐降低,最大降幅为16.0%,北塔左幅左肢与右幅右肢的横向弯矩均是

减小后增大,在设计值附近达到最小;塔底纵向弯矩有一定增加,最大增幅为5.8%。上述结果表明,联塔结构内力对BRB初始刚度的变化具有较大的敏感性,因此BRB初始刚度维持在设计值是最适宜的,增大或降低BRB初始刚度将加剧联塔结构内力的不均衡性。

### 3.3 BRB屈服力敏感性分析

对于BRB屈服力变化引起的结构内力变化,主要分析其对主塔塔底及承台底的轴力、横向剪力及横桥向弯矩的影响;此外,由于联塔效应,也需考察纵向弯矩的变化规律。由于BRB屈服力对塔底其他内力影响略小,限于篇幅,仅列出影响较为显著的对南塔底横向弯矩与北塔底轴力的影响曲线,其变化曲线如图6所示。

由图6可知,随着BRB屈服力在设计值 $\pm 30\%$ 区间内的逐渐提升,南北塔承台底内力有小幅变化,其中南塔承台底横向剪力的最大降幅为5.4%,北塔承台底弯矩的最大降幅为3.0%;对于南塔塔底轴力,左幅右肢与右幅左肢的轴力均逐步降低,最大降幅为4.5%,左幅左肢与右幅右肢的轴力均是先降低后升高;对于北塔塔底轴力,各肢轴力的最大增幅为1.38%;塔底横向剪力总体变化较小,其中南塔左幅左肢与左幅右肢的横向剪力均先减小后增大,右幅塔底的横向剪力逐渐降低,最大降幅为3.51%;对于塔底横向弯矩,南塔塔底各肢横向弯矩的最大降幅为6.97%,北塔塔底各肢横向弯矩的最大增幅为0.88%;塔底纵向弯矩无显著变化。上述结果表明,联塔结构内力对BRB屈服力有一定的敏感性,因此BRB屈服力应维持在设计值或适当提高,可使得联塔结构受力趋于合理。

### 3.4 BRB屈服后刚度敏感性分析

对于BRB屈服后刚度变化引起的结构内力变化,考虑到其对主塔、承台的纵桥向剪力和弯矩影响较小,故主要分析其对主塔塔底及承台底的轴力、横

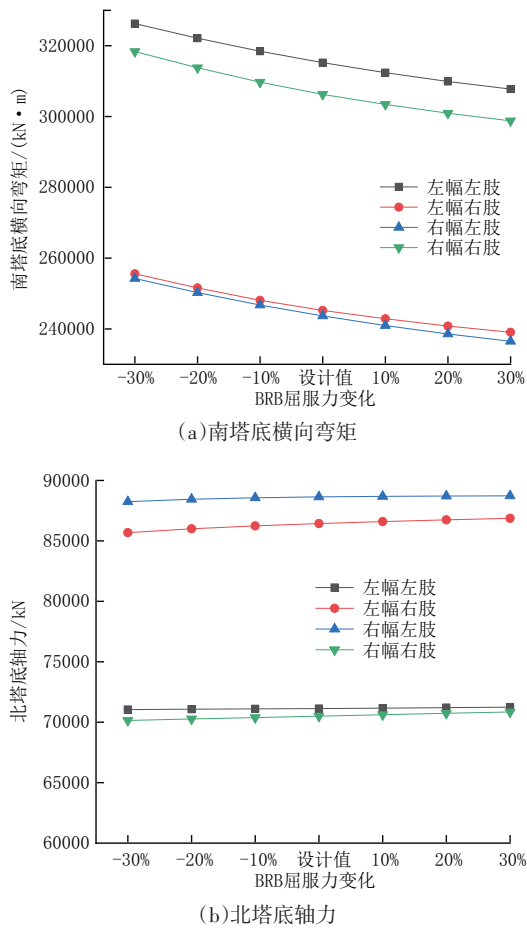


图6 BRB屈服力对塔底内力影响

向剪力及横桥向弯矩的影响,如图7所示。

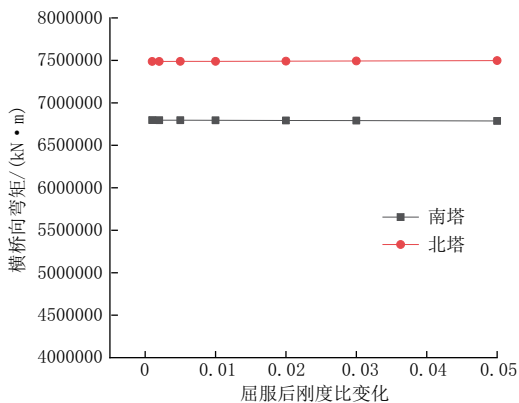


图7 BRB屈服后刚度对承台底横向影响

由图7可知,随着BRB屈服后刚度比在1‰至5‰区间内逐渐提升时,承台底及塔底各项内力变化幅度均较小。当BRB屈服后刚度比逐渐提升时,承台底内力值进行了重分配,使得内力不平衡性进一步加剧;主塔各肢轴力的最大增幅为0.36%,最大降幅为0.09%;主塔各肢横向剪力的最大增幅为0.22%,最大降幅为0.16%;南塔各肢横向弯矩的最大降幅为0.29%,北塔各肢横向弯矩的最大增幅为0.11%。上述结果表明,结构内力对BRB屈服后刚度

的敏感性不高,因此BRB屈服后刚度维持在设计值或较低的水平,可降低联塔结构内力的不平衡性。

## 4 结 语

本文采用MIDAS Civil软件分析了E2地震作用下某高烈度地震区中的(151+328+151)m联塔斜拉桥在安装BRB前后的受力变化情况,主要得出结论如下所列。

(1)在E2强震作用下,增设BRB后的联塔结构内力有显著降低,且使得原本在各肢间分配不均的轴力变得更为均衡;其中,主塔各肢横向剪力的最大降低率为67.3%,横向弯矩的最大降低率为44.9%。

(2)当BRB初始刚度在设计值±30%区间内逐渐提升时,主塔结构内力有增有减,其中主塔各肢轴力的最大增幅为35.9%,主塔各肢横向剪力的最大降幅为23.2%。这一结果表明联塔结构内力对BRB初始刚度的变化具有较大的敏感性,因此BRB初始刚度维持在设计值是适宜的,增大或降低BRB初始刚度将加剧联塔结构内力的不平衡性。

(3)当BRB屈服力在设计值±30%区间内逐渐增大时,主塔结构内力有增有减,但变化幅度不大。塔底轴力的最大增幅为1.38%,塔底横向弯矩的最大降幅为6.97%。这一结果表明联塔结构内力对BRB屈服力有一定的敏感性,因此BRB屈服力维持在设计值或适当提高,可使得联塔结构的受力趋于合理。

(4)当BRB屈服后刚度比在1‰到5‰区间内逐渐增大时,主塔结构内力变化较小,但不平衡性增大。这一结果表明联塔结构内力对BRB屈服后刚度敏感性不高,因此BRB屈服后刚度维持在设计值或较低的水平,可降低联塔结构内力的不平衡性。

### 参考文献:

- [1] 郑洲,谢旭,王天佳,等.斜拉桥钢塔地震损伤特性及输入地震动参数的影响[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(4):817-827.
- [2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 高宝.联塔分幅组合梁斜拉桥抗震性能研究[J].城市道桥与防洪,2018(10):87-90,104.
- [4] 陈德伟,丁祥文,于祥敏.双幅联塔斜拉桥阻尼器布置方案和参数分析[J].公路,2019,64(5):67-72.
- [5] 李幅昌,闫鹤丹,邱增美.装配式双铝合金内芯屈曲约束支撑滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(5):209-220.
- [6] 李宏男,李忠献.结构振动与控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [7] 高承勇,安东亚.耗能型屈曲约束支撑在结构设计中的合理应用与参数控制[J].建筑结构学报,2016,37(6):69-77.
- [8] 朱锋,姜蕊,李铎.Midas Civil桥梁工程抗震设计实例详解[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2023.
- [9] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].