

大跨度双塔空间缆索面自锚式悬索桥合理抗震体系研究

曲 慧

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 以某大跨度双塔空间缆索面自锚式悬索桥为背景,系统阐述了典型减隔震装置对不同设防烈度下桥梁减隔震设计的适用性;同时基于有限元数值模拟方法,构建7种约束体系的有限元模型,进行模态分析和地震反应谱分析,以揭示不同约束体系对结构动力特性和地震响应的影响。研究表明:对于双塔空间缆索面自锚式悬索桥,采用纵桥向塔梁之间弹性约束、墩梁之间完全释放约束,横桥向塔梁之间完全约束、墩梁之间弹性约束是合理的抗震约束体系;塔、梁是否设置竖向支撑,对桥梁地震响应影响不大。所提出的“纵-横-竖”合理抗震约束体系可为同类桥梁抗震设计提供一定的借鉴作用。

关键词: 自锚式悬索桥;双塔空间缆索面;抗震体系

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0203-05

Research on Reasonable Seismic Resistant System of Long-span Double-pylon Spatial Cable Plane Self-anchored Suspension Bridge

QU Hui

[Tongji University Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking a long-span double-ylon spatial cable plane self-anchored suspension bridge as the background, the applicability of typical seismic isolation and energy dissipation devices to bridge seismic isolation and energy dissipation under different seismic fortification intensities is systematically expounded. At the same time, based on the finite element numerical simulation method, 7 finite element models with distinct constraint systems are constructed to carry out the modal analysis and seismic response spectrum analysis in order to reveal the influence of various constraint systems on the structural dynamic characteristics and seismic responses. The research results show that for a double-ylon spatial cable plane self-anchored suspension bridge, it is a reasonable seismic restraint system to adopt elastic constraints between pylon and girder, and fully release constraints between piers and girder in the longitudinal direction of the bridge, and complete constraints between pylon and girder, and have elastic constraints between piers and girder in the transverse direction of the bridge. Whether vertical supports are set up for pylons and girder has little impact on the seismic response of bridges. The proposed “longitudinal - transverse - vertical” rational seismic constraint system can provide some references for seismic design of similar bridges.

Keywords: self-anchored suspension bridge; double-ylon spatial cable plane; seismic resistant system

0 引 言

随着经济的发展,人们对城市桥梁建设寄予了更多的期望,桥梁不仅要满足跨越河流的基础交通功能,还被赋予了更高的美学期望。人们渴望通过一座具有代表性的跨河桥梁的建设,来展现更多的城市文化,成为城市中地标性建筑,成为展示城市的一张名片。自锚式悬索桥以其新颖美观的造型、对

地形和地质情况适应性强等优点,在城市跨越内河的桥梁建设方案中,越来越多地被创作和建设^[1-2],其造型也从最初的双塔平行缆索面自锚固式悬索桥发展到了目前的双塔空间缆索面自锚式悬索桥。空间缆索面自锚式悬索桥在造型上更加灵活多变,其动力结构体系和地震响应也存在特点。但是,过去的研究主要针对大跨度双塔空间平行缆索面自锚式悬索桥的抗震体系^[3-6],而对于城市大跨度双塔空间缆索面自锚式悬索桥的纵横向和竖向合理抗震体系的研究较少。因此,本文以江西省吉安市泰和县澄江大桥为例,通过分析双塔空间缆索面自锚式悬索

收稿日期: 2025-03-14

作者简介: 曲慧(1984—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计和动力分析工作。

桥抗震动力体系的一般特点,提出了不同设防烈度下空间缆索面自锚式悬索桥的合理纵横向和竖向抗震体系,以为将来同类桥梁的设计提供一定的借鉴作用。

1 工程概况

江西省吉安市泰和县澄江大桥横跨赣江,总长1 280 m,在桥位段航道等级为内河Ⅱ级,桥位处水面宽度约0.9 km。按双向4车道城市主干路标准设计,设计速度为50 km/h,桥梁断面对称设置非机动车道和人行道。主桥采用双塔自锚式悬索桥,跨径布置为:48 m+85 m+210 m+85 m+45 m=473 m;主跨210 m,边跨85 m,配跨分别为48、45 m,边、中跨比值为0.405。主跨和边跨均采用空间缆索面布置。主桥效果图见图1;主桥立面总体布置见图2。



图1 主桥效果图

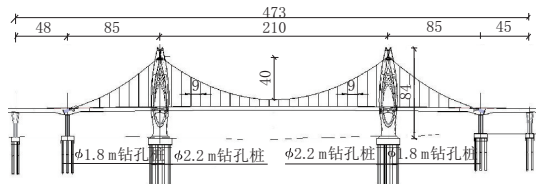


图2 主桥立面布置图(单位:m)

主塔采用镂空稻谷造型的C50混凝土结构,全高83.9 m,桥面以上塔高约58 m,中间镂空的稻谷造型采用钢结构装饰构件,主跨缆索矢跨比为1/5.25。主跨采用分离式双钢主梁截面形式,2幅之间设置横系梁,桥面全宽43 m。主梁采用Q345qD钢材,梁高3.5 m。配跨采用C50预应力混凝土箱梁形式,钢混结合段设置在边跨靠近P14、P17号墩的20 m范围内,主缆锚固在P14、P17号墩位置的锚固横梁上。主桥采用全漂浮体系,在塔梁结合处不设置竖向支撑支座,仅设置横向抗风支座。塔梁横断面布置见图3。在边墩位置设置分离式的花瓶墩,墩高18 m,墩底截面尺寸为4 m×6.5 m;过渡墩位置设置分离式的花瓶墩,墩高20 m,墩底截面尺寸为4 m×8.1 m,刚度较大。主塔下采用单桩直径2.2 m的钻孔灌注桩群桩基础,桩长40 m,边墩和过渡墩下采用单桩直径为1.8 m的钻孔灌注桩群桩基础,桩长30 m。选用中

风化泥质粉砂岩作为嵌岩桩的持力层。

2 计算模型

依据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011),江西省吉安市抗震设防烈度为6度,0.05g。该项目主桥的抗震设防分类为甲类,因此需要进行专门的地震安全评价,从而得到桥址的场地设计反应谱。江西省防震减灾工程研究所对桥址场地进行了地震危险性分析,确定了场地地震动特性,并对50 a超越概率10%(重现期为475 a)和50 a超越概率2%(重现期为2 000 a)这2种超越概率各提供了场地地表设计反应谱,如图4所示。该反应谱相当于设防烈度为7度0.1g《公路桥梁抗震设计》(JTG/T 2231-01—2020)水平方向设计反应谱。

该项目使用空间三维商业有限元软件MIDAS Civil 2022进行结构有限元计算,考虑相邻联引桥边界联对主桥的影响,建立动力分析模型,主桥和相邻引桥总体模型如图5所示。在动力分析模型中,采用空间三维梁单元模拟主梁、主塔、墩台;使用只受拉桁架单元模拟主缆和吊杆;通过在承台重心位置建立梁单元来模拟承台刚度和质量;在承台下采用6×6耦合弹簧单元来模拟桩土相互作用。

由于模态分析和反应谱分析能直接和快速地反映结构的动力特性和地震下的结构响应,因此本文在后续对比和分析中,将基于模态分析和反应谱分析,采用弹性连接来模拟支座的线性属性,线性刚度则根据实际约束情况拟定。

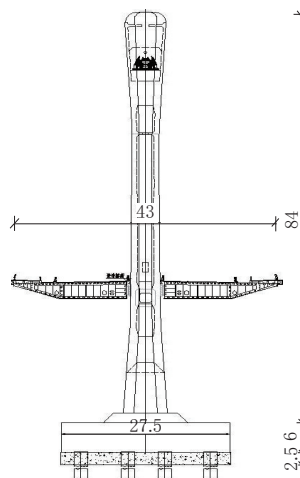


图3 主桥塔梁横断面布置图(单位:m)

3 常用的减隔震弹性约束装置^[7-9]

3.1 纵向减隔震弹性约束装置

对于抗震设防烈度较低的地区,塔梁之间的地

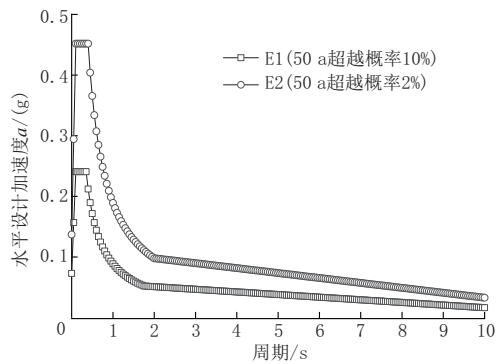


图4 场地地表设计反应谱(阻尼比0.02)



图5 桥梁总体有限元模型

震位移差一般都在 1 m 以内,塔梁之间的纵向弹性约束装置可以采用铅芯橡胶支座,布置在主塔和主梁的侧面交接面上。这样铅芯橡胶支座可以提供较高的剪切刚度,来实现弹性约束塔梁的目的,同时铅芯变形可以提供阻尼力来耗散地震能力。

对于抗震设防烈度较高的地区,塔梁之间的地震位移差都超过 1 m,塔梁之间的纵向弹性约束装置可以采用液体黏滞阻尼器。在强震过程中,通过阻尼器来提供较大的约束刚度,并通过活塞在黏滞流体中的运动来耗散地震能量,限制纵向的主梁变位。

3.2 横向减隔震弹性约束装置

对于抗震设防烈度较低的地区,墩梁之间的横向弹性约束装置可以采用摩擦摆减隔震支座。在地震中该支座可转化为弱连接体系,利用摩擦摆动的重力势能做功来耗散地震能量。

对于抗震设防烈度较高的地区,墩梁之间的横向弹性约束装置可以采用弹塑性钢阻尼器,在强震中利用钢阻尼器来提供较大的横向约束刚度,同时通过金属的变形来耗散地震能量,约束地震后的墩梁位移,达到减隔震目的。

4 动力特性和地震响应一般特点

4.1 分析工况设置

对于大跨度的双塔空间缆索面自锚式悬索桥,其动力特性和地震响应,除了受主塔、主梁、主缆吊杆和基础等主要构件质量和构件刚度的影响外,还主要与塔梁之间和墩梁之间的边界约束刚度有关,其中最重要的边界约束关系就是塔梁之间的约束关系。

一般塔梁之间的竖向约束方式有竖向支撑(半漂浮)和无竖向支撑(全漂浮)2种。从静力的角度来

讲,竖向无支撑体系,主梁在塔梁位置没有支点,因此没有负弯矩问题,但这将给相邻端长吊索带来很大负担,甚至影响其疲劳性能,因此对于超大跨度桥梁,可以在竖向位置设置一个合适的竖向弹性支撑。为比较竖向约束方式的影响,设置了 2 种模型(Model 3、Model 4)。

一般塔梁之间的横向约束方式为横向完全约束,这是为了提高主梁抗风稳定性。若缆索体系对主梁的横向约束能力不足,则主梁会在风荷载下产生严重的横向变形,并可能产生横向飘移,造成对塔柱的撞击。因此在塔、梁横向约束方面不设置对比模型,仅采用完全约束方式。

一般塔梁之间的纵向约束方式分为塔梁固结、纵向完全约束、纵向弹性约束和纵向约束完全释放的全漂浮体系。塔梁固结体系一般受力复杂,构造关系难以处理而较少使用,因此设置 Model 1 至 Model 3 这 3 种模型来对应后面 3 种纵向体系的对比。

墩梁之间在纵桥向上一般考虑正常使用温度作用下的需求,因此均为完全释放。横桥向上可以采用完全约束、弹性约束和完全释放,因此设置 Model 5 至 Model 7 这 3 种模型进行对比。

Model 1 至 Model 7 这 7 个模型的边界约束情况见表 1。

表 1 纵横向动力特性和地震响应中约束条件说明

模型	方向	体系	塔(墩)梁连接					
			Δx	Δy	Δz	θ_x	θ_y	θ_z
Model 1	纵向	塔梁完全约束	1	1	0	1	1	0
Model 2	纵向	塔梁弹性约束	k	1	0	1	1	0
Model 3	纵向	塔梁全漂浮	0	1	0	1	1	0
Model 4	纵向	塔梁半漂浮	0	1	1	1	1	0
Model 5	横向	墩梁完全约束	0	1	0	1	1	0
Model 6	横向	墩梁弹性约束	0	k	0	1	1	0
Model 7	横向	墩梁完全释放	0	0	0	1	1	0

注: x 为纵桥向、 y 为横桥向、 z 为竖向;“0”表示自由、“1”表示示从约束、“k”表示弹性约束;Model 1 至 Model 4 墩梁之间为纵向完全释放;Model 5 至 Model 7 塔梁之间纵向为弹性约束、横向为完全约束。

4.2 纵向动力特性和纵向地震响应分析

表 2 为塔梁纵向不同约束体系的动力特性比较。

由表 2 可知,采用塔梁纵向完全约束的 Model 1,其结构基本周期是 2.43 s,比塔梁纵向完全释放约束的 Model 3 结构基本周期 4.98 s 小很多,结构更柔,主要振动形态以主梁纵向漂浮为主。塔梁弹性约束的

表2 不同塔梁纵向约束体系动力特性比较

模型	振型	周期/s	振型描述
Model 1	1	2.43	主梁1阶反对称竖弯
	2	1.95	塔横向正对称侧弯+主梁横向侧弯
	3	1.93	主塔纵向侧弯+主梁对称竖弯
	4	1.62	塔横向反对称侧弯+主梁横向侧弯
Model 2	1	3.79	塔纵向侧弯+主梁纵向振动
	2	2.48	主梁1阶反对称竖弯
	3	2.05	主梁1阶正对称竖弯
	4	1.92	塔横向正对称侧弯+主梁横向侧弯
Model 3	1	4.98	塔纵向侧弯+主梁纵漂
	2	2.48	主梁1阶反对称竖弯
	3	2.06	主梁1阶正对称竖弯
	4	1.92	塔横向正对称侧弯+主梁横向侧弯
Model 4	1	4.50	塔纵向侧弯+主梁纵漂
	2	1.87	塔横向正对称侧弯+主梁横向侧弯
	3	1.84	主塔纵向侧弯+主梁对称竖弯
	4	1.63	塔横向反对称侧弯+主梁横向侧弯

注:主桥范围内,墩梁支座纵向约束为完全释放。

Model 2 结构基本周期为 3.79 s,处于 Model 1 和 Model 3 之间。这表明 Model 1 的纵向刚度最大。Mode 2、Mode 3 的第 2~4 阶结构周期和振型基本一致。Model 4 的第 2~4 阶结构周期为 1.63~1.87 s,比 Model 1 至 Model 3 的周期都小,表明竖向支撑也提高了其他主要振动形态的周期。对于设置了竖向支撑的半漂浮体系 Model 4,结构的基本周期为 4.50 s,这表明半漂浮体系的纵向结构刚度要略大于全漂浮体系。设置了竖向约束的 Model 4 的主梁纵向漂浮振型更独立,不像 Model 1 至 Model 3 中主梁的漂浮振型中还混入了主梁的竖弯振动,其整体主梁的振动表现得更为纵向平动。

图6为采用E2反应谱分析得到的不同塔梁纵向约束体系关键构件地震响应比较。

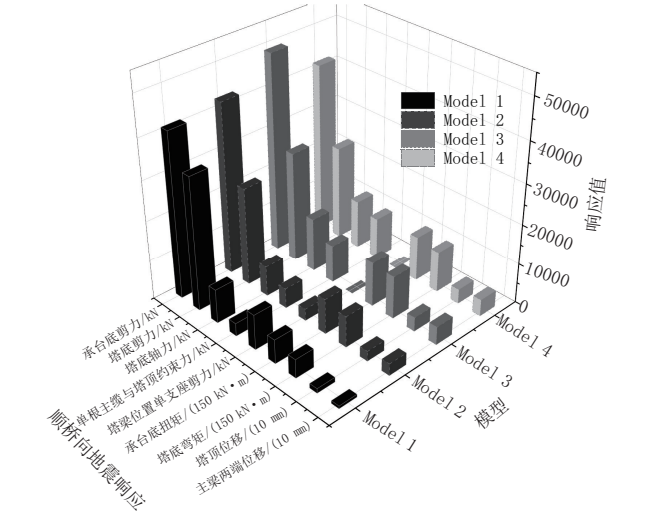


图6 不同塔梁纵向约束体系关键构件地震响应比较

由图6可见,在不同纵向约束体系下,Model 1 中塔梁之间的约束装置需要承担极大的水平力,对于设防烈度为7度的地区,其抗剪约束的水平力需求都已达到8 791 kN。相比之下,在全漂浮体系 Model 3 和半漂浮体系 Model 4 中,塔梁之间的抗剪力需求为 0 kN。虽然比 Model 1 减小很多,但其需要面临更大的问题,就是 0.457 m 的梁端纵向位移和 0.356 m 的纵向塔顶位移会给高烈度区的伸缩缝设计带来一定的挑战。在 Model 3、Model 4 中,主缆与塔顶的约束力需求值接近 Model 1 的 3 倍;塔身和承台底的弯矩响应也比 Model 1 大 1.7 倍。相比之下,塔梁弹性约束的 Model 2 无论是力和位移都处于完全约束和漂浮体系之间,很好地平衡了地震下的力和位移需求,是一种抗震优选体系。Model 3、Model 4 的纵向结构响应基本一致,可见增加竖向支撑对桥梁纵向地震响应影响不大。

4.3 横向动力特性和横向地震响应分析

表3为墩梁横向不同约束体系动力特性比较。

表3 不同墩梁横向约束体系动力特性比较

模型	振型	周期/s	振型描述
Model 5	1	3.78	塔纵向侧弯+主梁纵向振动
	2	2.43	主梁1阶反对称竖弯
	3	2.04	主梁1阶正对称竖弯
	4	1.81	主塔横桥向侧弯
Model 6	1	3.79	塔纵向侧弯+主梁纵向振动
	2	3.69	主梁正对称横向侧弯
	3	3.49	主梁反对称横向侧弯
	4	2.48	主梁1阶反对称竖弯
Model 7	1	7.13	主梁正对称横向侧弯
	2	5.97	主梁反对称横向侧弯
	3	3.79	塔纵向侧弯+主梁纵向振动
	4	2.48	主梁1阶反对称竖弯

注:主桥范围内,塔梁支座横向完全约束。

由表3可知,采用墩梁横向完全释放的 Model 7,其结构基本周期是 7.13 s,第 2 阶周期为 5.97 s,比墩梁横向完全约束的 Model 5 和墩梁弹性约束的 Model 6 都大得多,表明由于释放了墩梁之间的横向约束,结构横向表现更柔,主要振动形态以主梁横向侧弯为主。在 Model 6 结构中,墩梁之间设置了弹性刚度后,增加了结构整体横向刚度,让主梁横向侧弯振动形态发生在主梁纵向漂浮振动之后,横向主振型周期分别为 3.69、3.49 s,与纵向主振型周期 3.79 s 接近。说明结构的纵横向振动刚度基本一致,基本振动形态均以平动为主。

图7为采用E2反应谱分析得到的在塔梁横向完

全固结的条件下,不同墩梁横向约束体系的关键构件横桥向地震响应比较柱状图。

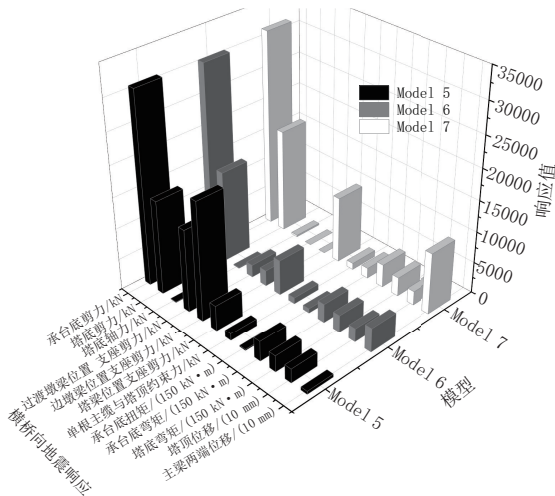


图7 不同墩梁横向约束体系关键构件地震响应比较

由图7可见,对于设防烈度为7度的地区,横向墩梁完全约束体系 Model 5 在墩梁固定支座位置产生了很大的横向剪力,边墩位置横向支座水平剪力为 19 116 kN,已达到支座竖向吨位的 32%,是 Model 6 中剪力的 7.45 倍。过渡墩位置支座横向水平剪力为 13 322 kN,已达到支座竖向吨位的 65%,是 Model 6 中剪力的 6.65 倍。这表明在 Model 5 这种结构体系下,墩梁支座的横向剪力会随着设防烈度的增加而逐渐增大到难以控制的程度,使支座的抗剪设计成为一个难题。

横向墩梁约束完全释放体系 Model 7 中支座水平力主要集中在塔梁约束位置,塔梁位置的横向水平力为 10 634 kN,是横向 3 种体系中最大的。该力是 Model 6 中塔梁之间横向剪力 5 700 kN 的 1.86 倍,Model 5 中塔梁上水平剪力 4 131 kN 的 2.57 倍。而墩梁弹性约束体系 Model 6 能较好地协调横向剪力在塔梁和墩梁之间的分配,它在塔梁之间的水平剪力与在墩梁之间的水平剪力基本持平,各占横向总剪力的 50%;同时塔梁弹性约束体系对主梁两端的横向位移具有较强的控制能力,可将塔梁完全释放 Model 7 中的梁端横向位移 0.99 m 控制到 0.394 m。

再比较 3 种模型的塔底内力,可以看出 3 种结构响应相差不大,只是塔梁弹性约束体系的承台扭矩减少很多。因此横向墩梁弹性约束 Model 6 是横向的优选体系。

综合纵向和横向结构振动形态和地震影响可以看出,结合结构的整体刚度,在纵向塔梁之间采用弹性约束、在横向墩梁之间采用弹性约束是较为优越

的抗震结构体系,如图 8 所示。

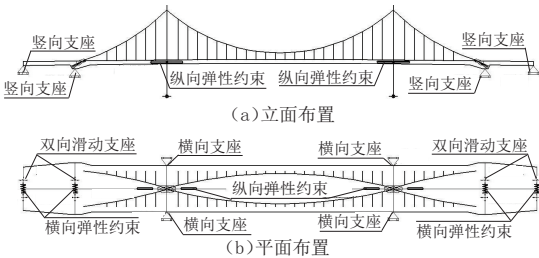


图8 合理“纵-横-竖”抗震约束体系示意图

5 结 语

(1)在纵向动力特性表现上,塔梁纵向弹性支撑体系的结构刚度处于塔梁完全约束和全漂浮体系之间,竖向支撑提高了半漂浮体系的整体刚度,且由于设置了竖向支撑,使得主梁纵向漂浮振型的独立性显著增强。

(2)在纵向地震响应上,塔梁完全固结约束体系中的约束装置需要承担极大的水平力,塔梁全漂浮体系面临较大的梁端位移,而塔梁采用弹性约束体系,可以较好地平衡结构地震下力的响应和位移的响应。因此塔梁纵向弹性约束体系是一种抗震优选体系。

(3)在横向地震响应上,墩梁弹性约束体系较好地协调了横向剪力在塔梁和墩梁之间的分配;同时墩梁弹性约束体系对主梁两端的横向位移有一个强有力的控制。因此横向墩梁弹性约束是横向的优选体系。

(4)纵桥向塔梁位置推荐的弹性约束装置有铅芯橡胶支座和液体黏滞阻尼器等;横桥向墩梁位置推荐的弹性约束装置为摩擦摆减隔震支座和金属钢阻尼器等。

参考文献:

[1] 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司.澄江大道(含澄江大桥)建设工程勘察设计的施工图[Z].上海:同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,2022.

[2] 肖汝诚.桥梁结构体系[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2013.

[3] 张哲,窦鹏,石磊,等.自锚式悬索桥的发展综述[J].世界桥梁,2003(1):5-9.

[4] 张宏斌,孔宪京,张哲.自锚式悬索桥动力特性分析[J].公路交通科技,2004,21(7):66-69.

[5] 魏标.自锚式悬索桥体系的分析比较[D].上海:同济大学,2007.

[6] 曲慧.大跨自锚式悬索桥的结构动力体系研究[D].上海:同济大学,2010.

[7] 黄炜然.高烈度区自锚式悬索桥抗震及对策研究[D].成都:西南交通大学,2022.

[8] 管仲国,李建中,朱宇.弹塑性阻尼支座用于自锚式悬索桥减震设计[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(1):6-12.

[9] 王靖程,张德明,叶爱君.横向抗震体系对大跨度自锚式悬索桥地震反应的影响[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):181-186.