

某半漂浮体系多塔斜拉桥抗震性能研究

钱逸卿

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要: 为开展半漂浮体系多塔斜拉桥的抗震性能研究,基于某全长 1 272 m 的三塔斜拉桥,建立有限元数值模型,对其进行非线性时程分析,从桥梁基本动力特性、地震响应和结构强度验证等方面进行分析比较。结果表明应用纵向黏滞阻尼器和横向耗能阻尼器,能够使得桥梁纵、横向主振型周期均避开地震峰值区间。纵桥向设置黏滞阻尼器能够有效降低结构地震响应和主梁纵向位移,降低梁端发生与相邻联碰撞的风险。横桥向采用摩擦摆支座与横向耗能阻尼器能够大幅降低桥塔、桩基的地震响应,提高桥塔在地震作用下的冗余度,并且能够有效降低桩基配筋率。半漂浮体系多塔斜拉桥采用纵向黏滞阻尼器+横向耗能阻尼器的形式,能够较好地满足桥梁抗震性能目标,为中高烈度区同类型的桥梁抗震设计提供设计参考。

关键词: 半漂浮体系;多塔斜拉桥;抗震性能;黏滞阻尼器;横向耗能阻尼器

中图分类号: U448.27TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0151-05

Research on Seismic Performance of a Semi-floating Multi-pylon Cable-stayed Bridge

QIAN Yiqing

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, Shanghai 200125, China]

Abstract: To explore the seismic performance of a semi-floating multi-pylon cable-stayed bridge, based on a three-pylon cable-stayed bridge with a total length of 1 272 m, a finite element numerical model is established to conduct the nonlinear time-history analysis on it, which is analyzed and compared from the aspects of basic dynamic characteristics, seismic response and structural strength verification of the bridge. The results indicate that the application of longitudinal viscous dampers and transverse energy dissipation dampers can make both the longitudinal and transverse main vibration modes away from the peak seismic range. The setup of viscous dampers in the longitudinal direction can effectively reduce the seismic response of the structure and the longitudinal displacement of the girder, and the risk of collision between the girder end and adjacent beams. The use of friction pendulum bearings and lateral energy dissipation dampers in the transverse direction of the bridge can significantly reduce the seismic response of the bridge pylon and pile foundation, which improves the redundancy of the bridge pylon under the seismic action. And the reinforcement ratio of the pile foundation can be effectively reduced. The use of longitudinal viscous dampers and transverse energy dissipation dampers for the semi-floating multi-pylon cable-stayed bridges can meet the seismic performance of the bridge, which provides a reference for the seismic design of the similar bridges in medium and high intensity areas.

Keywords: semi-floating system; multi-pylon cable-stayed bridge; seismic performance; viscous dampers; transverse energy dissipation dampers

0 引言

斜拉桥凭借出色的大跨跨越能力与良好的景观造型优势,在现代桥梁工程领域的应用愈发广泛^[1-2]。随着斜拉桥主跨跨径的不断增大,传统单塔、双塔斜拉桥已难以同时满足工程经济指标与结

构力学性能的要求^[3],而通过增加桥塔数量与跨数优化结构形式,成为解决该问题的有效途径,多塔斜拉桥也由此应运而生^[4]。

现阶段,学者多认为应从纵向、横向分别考虑斜拉桥的抗震结构体系^[5]。斜拉桥纵向抗震体系大多采用漂浮体系、半漂浮体系、塔梁固结体系和塔墩梁固结体系,其中各类固结体系虽能对结构变形实现有效约束与控制,但结构产生的地震内力较大;而漂浮、半漂浮体系有纵向无约束,结构体系较柔的特

收稿日期: 2026-01-19

作者简介: 钱逸卿(1996—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

点,能够借助主梁的纵向摆动来耗散地震能量,但会带来较为显著的纵向位移问题。有研究表明,对于多塔斜拉桥,若采用固结体系,将不可避免的产生更大的温度效应^[6-8],相比之下半漂浮体系和漂浮体系表现较好。

为控制斜拉桥主梁纵向地震位移响应,目前一般采用弹性约束和附加耗能装置^[9-12]。有大量实验表明采用塔梁弹性约束能够将一部分惯性力直接通过塔梁连接装置传递到塔身,从而有效降低主梁纵向位移^[13-14]。附加耗能装置能够提高对地震输入能力的耗散能力,其中非线性黏滞阻尼器由于不改变结构静力特性的同时能够有效改善结构在地震作用下的位移和内力^[15-16],被广泛应用。

斜拉桥横向抗震体系大多采用抗风支座的固定约束方式^[17],然而这种横向固定约束体系会使得桥塔的地震内力响应较大,在中高烈度地区往往需要提高截面配筋和尺寸来满足抗震需求,因此有较多学者提出使用减隔震措施改善结构的受力性能。Guan等人^[18]将E型钢阻尼支座应用于南京夹江桥,针对桥梁辅助墩与边墩设置横向减震构造,有效削减了结构的地震响应。汪磊^[19]等通过对比摩擦摆支座、黏滞阻尼器与钢阻尼器的横向减震效能,发现钢阻尼器的抗震表现优于另外两种装置。Zhou^[20]等则结合振动台试验与数值模拟方法,开展了横向钢阻尼器体系的可靠性研究。

现阶段,有部分学者对多塔斜拉桥的抗震性能进行了探究,李冲^[21]等在塔梁间设置摩擦摆支座和新型减震耗能抗风支座,发现该体系下桥梁横向地震响应明显降低,季阳^[22]等以某四塔斜拉桥为研究对象,研究其纵向约束体系的地震响应,发现中塔固结易在约束处的塔底产生较大内力,自由体系易产生较大纵向位移。总的来说,关于采用弹性约束的多塔斜拉桥抗震性能的研究仍较少且不具有一般性,因此本文以某半漂浮体系多塔斜拉桥为例,应用纵向黏滞阻尼器和横向耗能阻尼器,从桥梁基本动力特性、地震响应和结构强度验证等方面,评价其抗震性能,以期

为同类型桥梁的抗震设计提供实用的技术参考与设计思路。

1 桥梁概况及结构建模

某三塔双索面半漂浮体系钢箱梁斜拉桥跨径布置为100 m+120 m+416 m+416 m+120 m+100 m,桥长

1 272 m,桥面宽度42 m,边跨设置一座辅助墩。主梁采用钢箱梁,斜拉索采用扇性密索布置,主塔采用A形主塔,边塔高度90 m,中塔高度80 m,塔柱采用箱形截面,塔底局部横桥向尺寸适当加大。桥梁立面布置见图1。

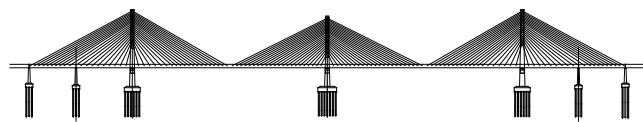


图1 桥梁立面布置图

主桥纵向为半漂浮体系,塔梁之间设置摩擦摆支座,每个主塔的两侧设置4个纵向黏滞阻尼器,共计12个;每个桥塔处横向设置2个钢阻尼器,用以调整桥梁横向抗震性能。结构支撑体系见图2。

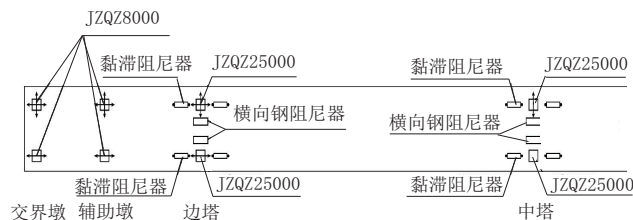


图2 结构支撑体系示意图

利用MIDAS Civil 2021 v2.1建立了桥梁的空间有限元分析模型(见图3)。其中桥塔、桥墩、主梁、承台均采用空间梁柱单元进行模拟,拉索采用空间桁架单元模拟,二期恒载模拟为附加分布质量,并考虑初应力以及拉索垂度的影响,桩基础土弹簧刚度根据m法进行确定,摩擦摆支座采用双折线模型模拟,黏滞阻尼器采用黏滞耗能器单元模拟,横向耗能阻尼器采用钢阻尼器^[23],用双折线模型模拟。

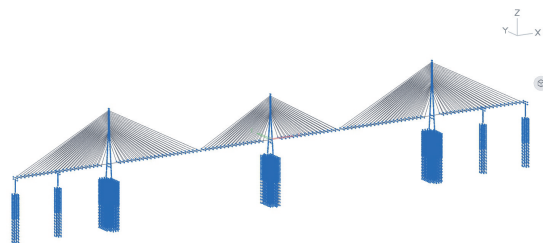


图3 结构有限元模型

桥位处抗震设防烈度为7度,水平向设计基本地震加速度峰值为0.15g,特征周期为0.40 s,工程所在场地类别为Ⅲ类。图4为依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG T 2231-01—2020)^[24]对应E2地震的目标反应谱和与和与之相协调的7条人工地震波的反应谱。采用非线性时程分析方法,结果取七条波的平均值^[24]。

2 动力特性分析

采用Ritz向量法对有限元模型进行主桥动力特

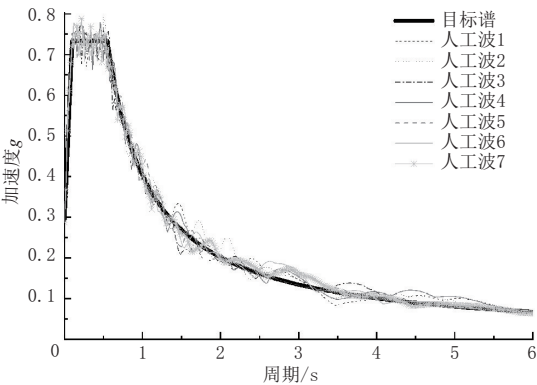


图4 输入地震波

性分析,共运行 150 阶模态,累计振型参与质量达到 100%。本文列出前 6 阶主要自振频率(见表 1)与振型特征(见图 5)。

表 1 结构主要自振周期及振型描述

振型	周期/s	振型描述
1	6.115	纵向振动
2	4.925	一阶横向扭转
3	4.897	一阶横弯
4	4.827	二阶横弯
5	4.141	纵向竖弯
6	3.327	二阶横向扭转

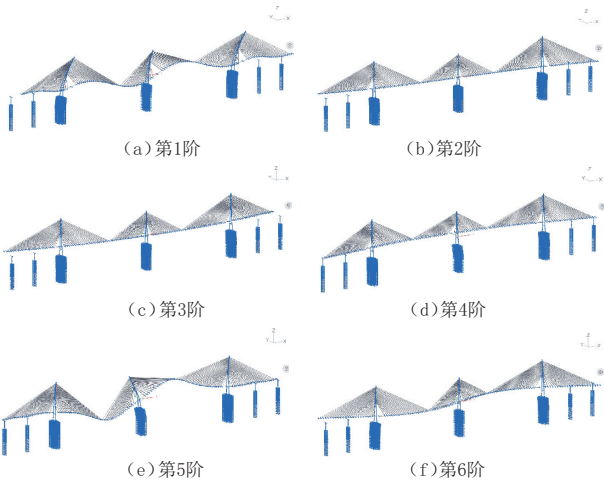


图5 桥梁主要振型

由图表可知,结构纵横向主振型周期较长,能够避开地震峰值区间,有效起到隔震的作用,究其原因,这主要是因为桥梁纵向具有半漂浮体系斜拉桥的结构特性,结构跨径较长,结构柔性好,桥梁横向使用了减隔震支座与钢阻尼器,与常规采用抗风支座固定的情况相比,结构横向刚度大大降低。

3 抗震性能分析

3.1 纵桥向阻尼约束体系

本桥纵桥向设置摩擦摆支座与黏滞阻尼器,对其进行非线性时程分析,将其地震响应与不设置阻

尼约束的情况进行比较。

图 6 为桥墩关键截面在纵向地震作用下的弯矩响应和剪力响应图,从图中可以看出,桥梁设置纵向黏滞阻尼器后,桥梁纵向地震弯矩响应明显下降,其中边塔处桥塔弯矩下降达 41%,中塔处桥塔弯矩下降 21%,与此同时,剪力的下降并不明显,平均在 5% 左右,这主要是因为黏滞阻尼器的加入使得桥梁在地震下的传力路径发生改变,上部结构部分惯性力由黏滞阻尼器直接传递至桥塔,而这部分惯性力在不使用黏滞阻尼器时是由拉索传递至桥塔的,桥塔底部受到的弯矩由于力矩变短,而有了明显的降低,与此同时,惯性力的总量是不变的,因此剪力响应在设置黏滞阻尼器后变化不大。

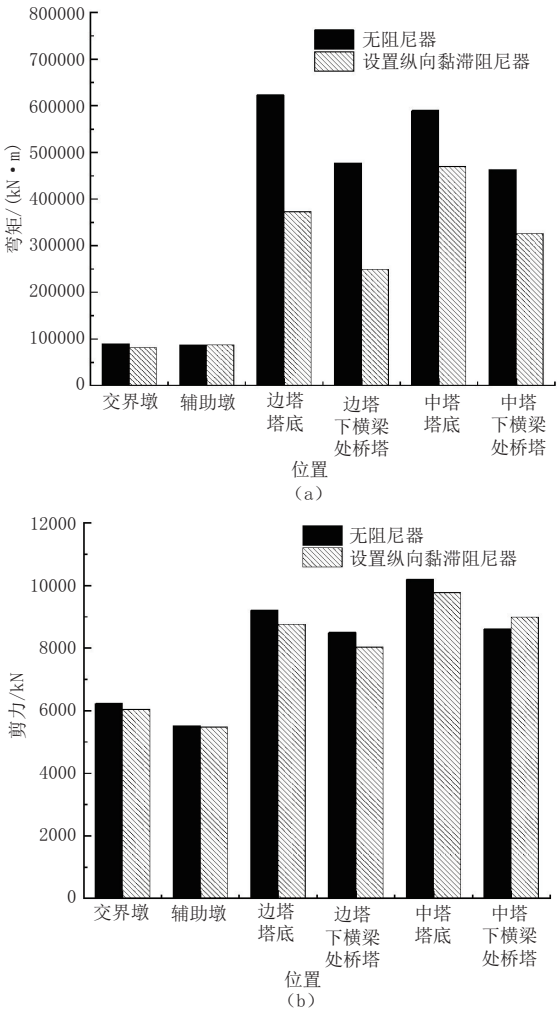


图6 桥墩关键截面地震响应图

图 7 为桥梁桩基在纵向地震作用下的弯矩响应图,从图 7 中可以看出,设置黏滞阻尼器后,交界墩与辅助墩处桩基弯矩响应相近,边塔和中塔处明显降低,最大可达 34%,这主要是桥塔传递至承台的弯矩减小导致的。

由上可知,黏滞阻尼器可以使得桥塔、桩基在地震作用下弯矩效应减小,有利于桥梁下部结构的配

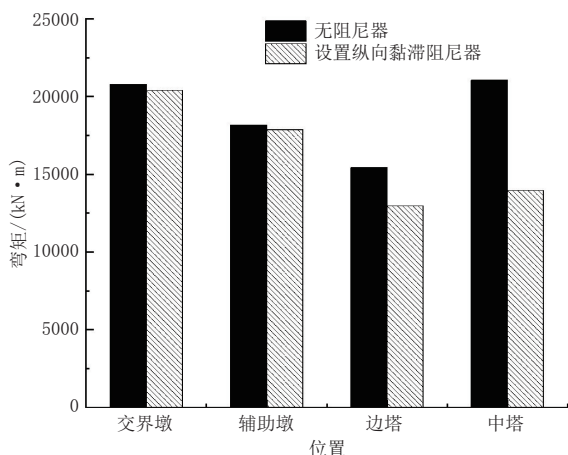


图7 桥梁桩基地震弯矩响应图

筋趋向于更经济的形式,从而整体降低工程造价。

图8为主梁在纵桥向地震作用下关键节点处的位移响应比较图,从图8中可以看出,设置黏滞阻尼器后,主梁纵向位移响应显著降低,降低幅度最高可达43%,究其原因,黏滞阻尼器在地震作用下能够有效耗散地震能量,从而降低了整体位移响应。主梁地震位移的降低有利于避免梁端产生梁-梁之间的相对碰撞,同时可以减小伸缩缝及摩擦摆支座的规格,降低工程成本。

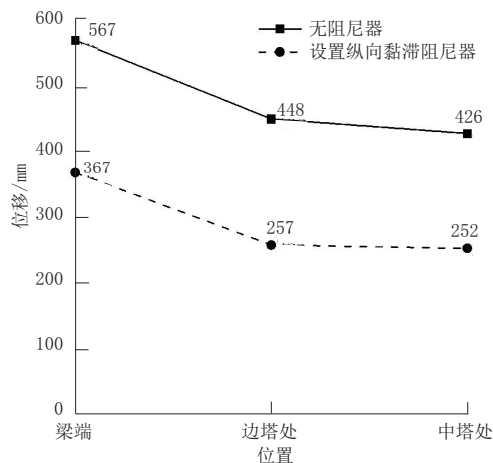


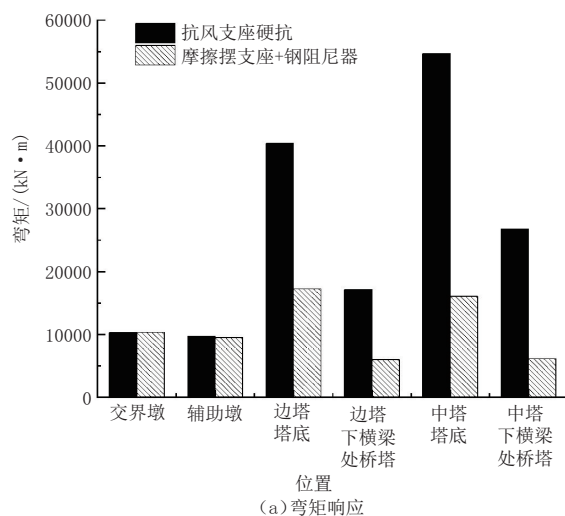
图8 主梁关键节点位移响应图

3.2 横桥向钢阻尼器约束体系

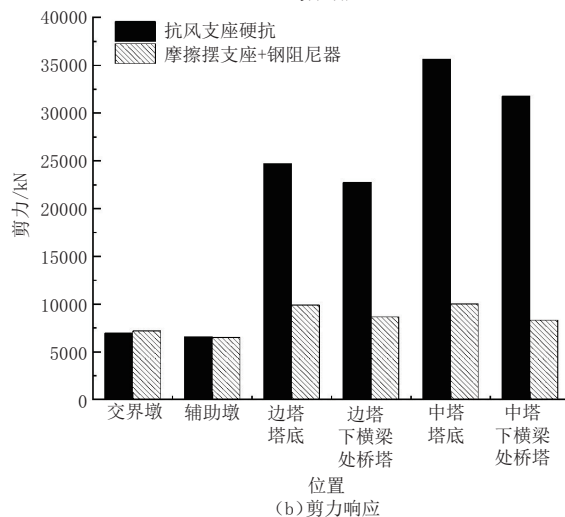
本桥横桥向设置摩擦摆支座与钢阻尼器组合,对其进行非线性时程分析,将其地震响应与通过抗风支座硬抗的情况进行比较。

图9为桥梁关键截面在横向地震作用下的弯矩响应和剪力响应图,从图9中可以看出,相较于横向抗风支座硬抗,采用摩擦摆支座和钢阻尼器后桥梁横向地震响应明显下降,其中弯矩响应下降最大达71%,剪力响应下降最大达74%,这主要是因为采用横向抗风支座硬抗导致结构横向刚度过大,摩擦摆

支座与横向钢阻尼器组合的刚度远低于前者,同时钢阻尼器和摩擦摆支座耗散了一部分地震能量,使得下部结构的响应降低。



(a) 弯矩响应



(b) 剪力响应

图9 桥墩关键截面地震响应图

通过对桥塔的抗震性能验算发现,即使横向抗风支座硬抗下地震响应较大,桥塔仍然可以满足性能目标(见表2),这主要是由于斜拉桥桥塔的配筋一般受静力控制,地震响应相对静力工况较小,但相比之下,使用摩擦摆支座和钢阻尼器能够很好的提高结构冗余度^[25],尤其当地震烈度提高后,能够为配筋优化提供条件。

从图10桥梁桩基在横向地震作用下的弯矩响应图中可以看出,横向抗风支座硬抗的情况下,桩基弯矩响应远大于使用摩擦摆支座和钢阻尼器的情况,增大幅度可达3倍,这主要是由于横向抗风支座硬抗下结构横向刚度过大,使得承台传递至桩基的力远大于采用支座支撑和钢阻尼器组合的情况。在此情况下,对桩基强度进行验算,发现原配筋条件已无法满足桩基性能目标,桩基将发生破损,需要加强桩

表 2 主塔塔底截面强度验算

抗震体系	截面位置	验算轴力/kN	弯矩响应/(kN·m)	抗弯能力/(kN·m)	能力需求比
抗风支座硬抗	边塔塔底	81 954	403 816	773 300	1.91
	中塔塔底	76 976	546 931	1 254 000	2.29
摩擦摆支座+钢阻尼器	边塔塔底	102 456	172 461	827 300	4.80
	中塔塔底	144 317	160 588	14 73 000	9.17

基配筋或增加桩基根数,而设计中若增加桩基根数将使得工程量变化较大,故而一般提高桩基配筋率。图 11 为在不变桩基个数的情况下,满足桩基强度要求的桩基配筋率比较图(能力需求比 1.05),从图 11 中可以看出,采用摩擦摆支座和钢阻尼器,能够有效降低桩基配筋率,维持在一个较为经济的水平(1.27%),这能够大大降低桥梁下部结构的工程花费。

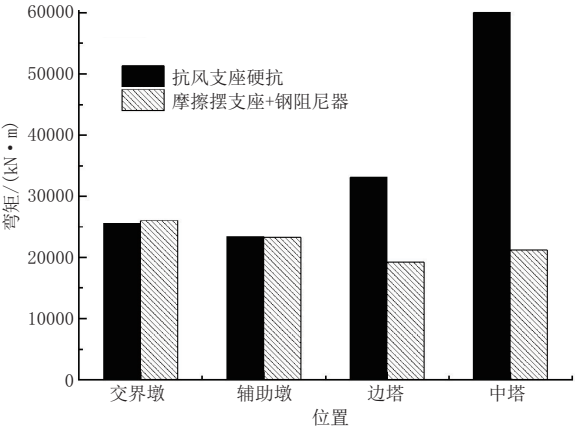


图 10 桥梁桩基地震弯矩响应图

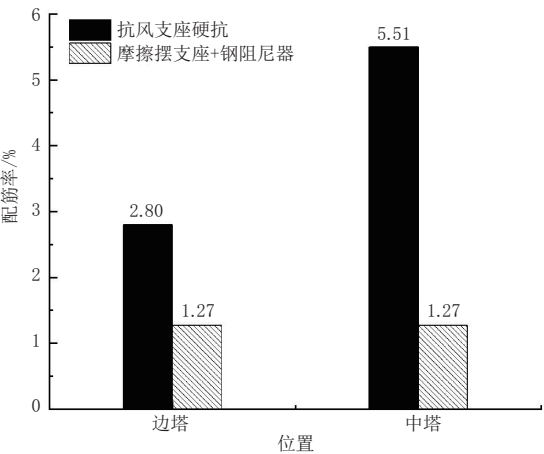


图 11 满足桩基强度要求的桩基配筋率比较图

4 结 论

本文以某半漂浮体系多塔斜拉桥为例,对两种地震输入方向下采用不同的抗震方案进行了非线性时程分析,从桥梁基本动力特性、地震响应和结构强度验证等方面,评价其抗震性能。主要结论如下:

(1)应用纵向黏滞阻尼器和横向耗能阻尼器后,

能够使得桥梁在纵向具有半漂浮体系斜拉桥的结构特性,结构柔度较高,同时结构横向刚度大大降低,使得桥梁纵、横向主振型周期均能够避开地震峰值区间。

(2)纵桥向设置一定数量的黏滞阻尼器,能够有效降低桥塔、桩基地震响应,同时能够大幅降低主梁纵向位移,降低梁端发生与相邻联碰撞的风险。

(3)横桥向采用摩擦摆支座与横向耗能阻尼器,能够大幅降低桥塔、桩基的地震响应,提高桥塔在地震作用下的冗余度,并能够有效降低桩基配筋,使其在经济范围内。

(4)半漂浮体系多塔斜拉桥采用纵向黏滞阻尼器+横向耗能阻尼器的形式能够较好的满足桥梁抗震性能目标,为中高烈度区同类型的桥梁抗震设计提供设计参考。

参考文献:

[1] 严国敏.现代斜拉桥[M].成都:西南交通大学出版社,1996.

[2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.

[3] 刘喆.多塔斜拉桥合理结构体系研究[D].成都:西南交通大学2021.

[4] 王伯惠.斜拉桥结构发展和中国经验[M].北京:人民交通出版社,2000.

[5] 尹会娜.大跨径斜拉桥合理抗震体系研究[D].长沙:湖南大学,2021.

[6] 吴国光.赤石大桥关键技术研究及对策[J].公路工程,2013,38(6):1-5.

[7] 龙海滨,胡建华.汝郴高速公路赤石特大桥设计与关键技术研究[J].中外公路,2013,33(1):181-185.

[8] 张欣,卢立志,刘勇.赤石大桥主桥超高墩桥塔结构优化及试验研究[J].桥梁建设,2019,49(4):23-28.

[9] Takahashi M.Earthquake resistance design of the Meiko Nishi Bridge, In: Proceedings of 1st US-Japan Bridge Engineering Workshop[R]. Tsukuba Public Works Research Institute, 1984.

[10] 焦驰宇,李建中,彭天波.塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响[J].振动与冲击,2009(10):179-1847.

[11] Soneji B B, Jangid R S. Passive hybrid systems for earthquake protection of cable-stayed bridge[J]. Engineering Structure, 2007(29): 57-70.

[12] Calvi G M, Sullivan T, Villani A. Conceptual seismic design of cable-stayed bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010 (14): 1139-1171.

[13] 李立峰,刘本永,张晨熙,等.中等跨径斜拉桥塔梁弹性约束装