

塔梁固接独塔斜拉桥抗震设计方法研究

方 圆, 席 进

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:以某独塔单索面斜拉桥为工程实例,通过对比不同约束体系下结构地震反应的特点,阐述了延性抗震及减隔震设计方法的原理。通过对比两种抗震设计思路下结构的性能目标,对合理抗震体系的特征和各组成部分进行了系统剖析,并阐明桥梁合理抗震体系设计的关键性,以期为桥梁工程师的抗震设计提供参考。

关键词:独塔斜拉桥;延性抗震设计方法;减隔震设计方法;抗震体系;拉索支座

中图分类号:U488.25 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0029-05

0 引言

独塔斜拉桥由主塔、斜拉索、主梁和桥面系及连接装置等组成。独塔斜拉桥的大部分质量集中在主梁和桥面系上,因此地震荷载作用下的惯性力也主要集中在主梁和桥面系上^[1-2]。对于塔梁固接体系的独塔斜拉桥而言,纵向刚度较大,结构周期较短,可以有效地控制地震荷载作用下联端纵向位移,因此,一般情况下过渡墩、辅助墩均设置活动支座,可以达到纵向位移控制与纵向地震力之间的平衡。对于塔梁固接独塔斜拉桥横向结构体系,过渡墩和辅助墩与主梁连接的组合直接影响地震时传到各墩的惯性力。因此确定该类型斜拉桥合理的结构横向约束体系至关重要^[3-5]。另一方面,针对塔梁固接独塔斜拉桥各种连接装置的减振机理及抗震设计方法进行的系统分析较少,张文学等^[6]针对低重心矮塔斜拉桥的地震反应特点进行了研究;黄小国等^[7]对地震作用下独塔斜拉桥的合理约束布置体系进行了探讨;袁万城^[8]对拉索减震支座的减震机理以及在梁桥上的应用进行了研究。

以环巢湖旅游大道上一座典型的独塔斜拉桥白石天河大桥为算例,对三种横向支座布置体系情况下的地震反应进行了分析;在一种横向约束布置体系的基础上,分别对采用延性抗震设计方法、减隔震设计的抗震设计方法进行了比较研究。

1 工程概况

1.1 结构概况

白石天河桥主桥采用的跨径布置:75+135+40=250 m,为单索面独塔斜拉桥,纵向为塔梁固结体系,如图1所示。主梁采用混合梁形式,主跨采用钢箱梁,梁高2.80 m,宽27.5 m,如图2所示;边跨采用单箱5室混凝土梁,梁高2.80 m,宽27.5 m,如图3所示。

混凝土箱梁桥面铺装按5 cm 混凝土+8 cm 沥青混凝土计算质量,钢箱梁桥面铺装按6 cm 沥青混凝土计算质量。

过渡墩采用桩柱式桥墩,每个墩处有一排桥墩,一排共4个,桥墩采用圆形截面,直径1.8 m,桥墩下桩基为直径2.0 m的钻孔灌注桩。辅助墩采用分离式独柱式桥墩,桥墩采用方形截面,顺桥向2.2 m,横桥向4.0 m,承台厚度3.0 m,顺桥向宽8.0 m,横桥向宽19.7 m,每个桥墩下采用4根2.0 m直径的钻孔灌注桩基础。

收稿日期:2014-08-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.04.06

作者简介:方圆(1982-),男,博士,工程师,主要从事桥梁抗震的研究。E-mail:fangyuand1@163.com

方圆,席进.塔梁固接独塔斜拉桥抗震设计方法研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):29-33.

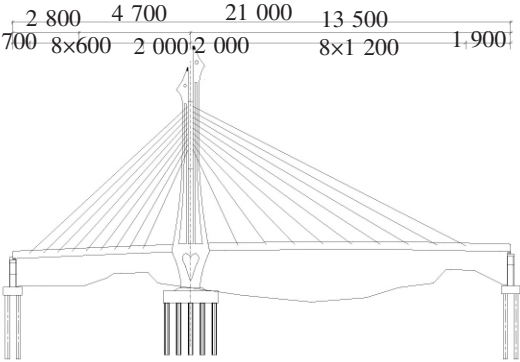


图 1 桥跨布置示意图(单位:cm)

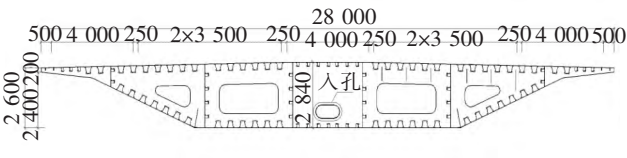


图 2 钢箱梁标准断面(单位:mm)

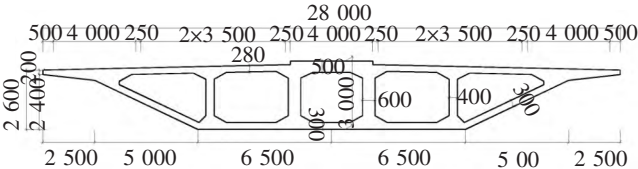


图 3 混凝土梁标准断面(单位:mm)

1.2 横向约束布置体系

桥墩、主梁之间的两种约束布置体系如表 1 所示。

表 1 主要构件计算结果汇总

约束体系	位置	约束方式		
		Δx	Δy	Δz
体系 1	9# 过渡墩	0	1	1
	11# 辅助墩	0	1	1
	12# 过渡墩	0	1	1
体系 2	9# 过渡墩	0	1	1
	11# 辅助墩	0	0	1
	12# 过渡墩	0	1	1
体系 3	9# 过渡墩	0	s	1
	11# 辅助墩	0	0	1
	12# 过渡墩	0	s	1

注:表中“0”表示放开,“1”表示限位,“s”表示弹性限位。

由表 1 所示,体系 1、体系 2 均为常用的约束布置方式,两种约束布置体系区别在于辅助墩支座是否具有横向限位功能。体系 2、体系 3 的区别在于采用完全限位或弹性限位。

2 地震动输入及动力分析模型

2.1 地震动输入

采用“地震动安全性评价报告”提供的反应谱及相应匹配的地震波进行地震反应分析。对于体系 1、体系 2 两个常规横向约束布置结构体系,采用反应谱分析方法;对于体系 3 结构体系,考虑减隔震拉索支座的非线性力学行为,采用非线性时程方法进行地震反应分析。设计反应谱如图 4 所示,两个概率水准地震波的加速度反应谱如图 5 所示。

2.2 动力分析模型

通过 Sap2000 有限元分析软件,采用空间有限单元法建立主桥结构计算模型,其中主塔、主梁、桥墩均采用空间梁单元模拟;主梁采用单梁式力学模型;斜拉索采用空间桁架单元;对于主塔、拉索、过渡墩及辅助墩考虑了由于恒载作用而引起的轴力,对几何刚度进行了修正;在承台质心采用集中质量模拟承台的作用。在承台底部采用 6 个方向弹簧(6×6 刚度矩阵)模拟桩基和土层的共同作用。动力计算模型如

图 6 所示。

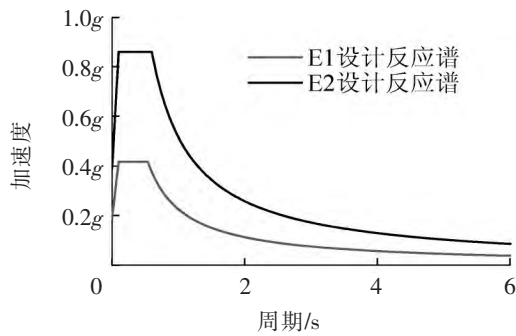


图 4 两个概率水准设计加速度反应谱

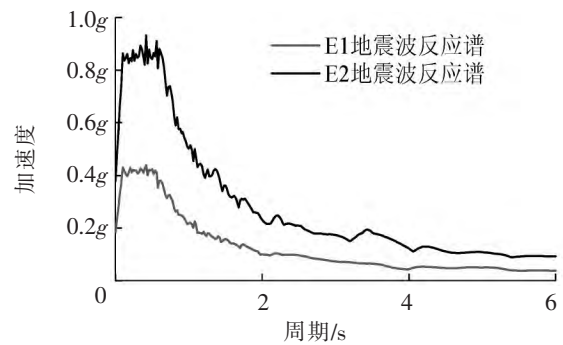


图 5 两个概率水准地震波加速度反应谱

非线性动力模型主要用于体系 3、E2 地震工况的时程分析,非线性因素主要考虑了过渡墩上拉索减震支座横向剪力键剪断后的非线性(如图 7)以及辅助墩上球钢支座的滑动摩擦效应(如图 8)。

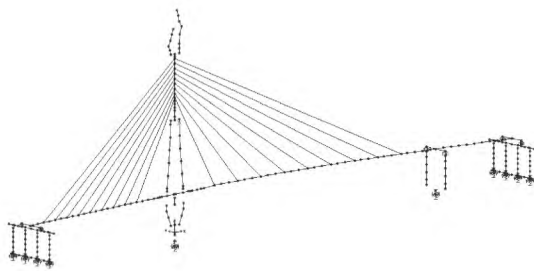


图 6 动力有限元分析模型

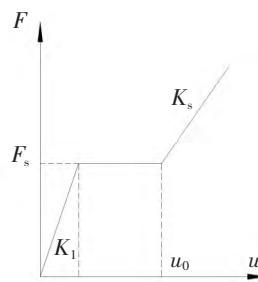


图 7 拉索支座非线性力-位移关系

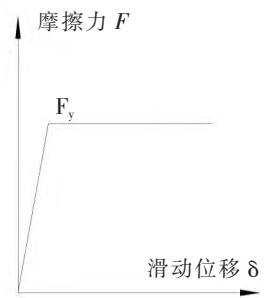


图 8 理想弹塑性模型

3 地震反应分析

3.1 横向约束体系地震反应比较

通过反应谱方法对 E2 地震(横向+竖向)输入下,体系 1、体系 2 各桥墩的地震反应进行了比较,如表 2 所示。

表 2 不同横向约束体系下地震反应比较

工况	位置	墩、塔底弯矩/(kN·m)	
		体系 1	体系 2
E2(横向+竖向)	9# 墩	2.685E+04	1.949E+04
	10# 桥塔	7.292E+05	6.915E+05
	11# 墩	8.055E+04	2.146E+04
	12# 墩	8.221E+03	1.844E+04

通过表 2 计算结果可知:

(1)横向约束体系布置对结构地震反应影响很大;10# 辅助墩横向约束释放后,明显减小了辅助墩墩底弯矩,9# 过渡墩及桥塔底部地震反应也有一定的降低。

(2)通过调整约束体系布置,起到合理分配地震力的作用;体系 2 释放 10# 辅助墩支座的横向约束后,采用相同构造设计的 9#、12# 过渡墩地震反应基本相同,并较体系 1 中 9# 过渡墩的地震弯矩减小了 30%。

3.2 延性抗震设计

体系 1、体系 2 墩、梁之间采用球型支座,结构按照延性体系进行抗震设计。以体系 2 为例,E1、E2 地震横向作用下桥墩强度验算如表 3 所示。

表 3 桥墩抗弯强度验算

工况	位置	能力/需求	状态
E1 横向+竖向	9# 墩墩底	1.446	弹性
	10# 桥塔塔底	2.176	弹性
	11# 墩墩底	5.002	弹性
	12# 墩墩顶	1.259	弹性
E2 横向+竖向	9# 墩墩底	0.795	塑性
	10# 桥塔塔底	1.250	局部损伤
	11# 墩墩底	3.431	局部损伤
	12# 墩墩顶	0.740	塑性

由表 3 所示的计算可以看出, E1 地震作用下, 各桥墩及桥塔均处于弹性工作状态; E2 地震作用下, 9#、12# 过渡墩处于塑性工作状态; 通过延性设计使桥墩具有足够的塑性变形能力, 从而确保结构不倒塌。桥墩变形能力验算如表 4 所示。

表 4 不同横向约束体系下地震反应比较

位置	φ_u/cm^{-1}	φ_y/cm^{-1}	θ_u/cm^{-1}	$\Delta u/\Delta d$
9# 墩	1.601E-04	2.364E-05	6.593E-03	2.043
12# 墩	1.949E-04	2.294E-05	8.653E-03	2.567

表 4 的计算结果表明: E2 横向地震作用下, 9#、12# 过渡墩进入塑性工作状态, 但塑性变形能力大于地震位移需求, 位移延性满足要求。

由于 E2 地震作用下, 9#、12# 过渡墩已进入塑性工作状态, 相应桩基的地震反应需要按照能力保护的计算方法确定。表 5 所示为按照能力保护方法进行的桩基强度验算。

由表 5 的计算可知, E2 横向地震作用下, 桩基配筋率达到 2.0% 的情况下抗弯强度满足设计要求。

通过上述延性抗震设计的方法, E1、E2 横向地震作用下, 结构可以达到的性能目标如表 6 所示。

表 5 能力保护桩基抗弯强度验算

位置	地震弯矩/ (kN·m)	抗弯能力/ (kN·m)	能力/ 需求	配筋率/%
9# 桩基	2.026E+04	2.496E+04	1.131	2.00
12# 桩基	1.943E+03	2.217E+04	1.141	2.00

表 6 可以达到的性能目标

地震水平	性能目标		
	桥墩	桥塔	桩基
E1	弹性	弹性	弹性
E2	不倒塌	可修复损伤	可修复损伤

3.3 减隔震设计

从抗震原理上看, 减隔震技术与延性抗震设计是类似的。两者都是通过延长周期以避开地震能量集中的周期范围, 并且增大阻尼以耗散能量来达到减小地震反应的目的。体系 3 采用的减隔震措施为: 在体系 2 的基础上, 释放 9#、12# 支座的横向约束, 采用具有一定自由行程的拉索支座。

拉索支座的工作原理为: 在设定的自由行程内, 通过球型活动支座的摩擦起到隔震效果, 当滑动位移达到设定值后, 通过弹性拉索进行限位。这种通过可控状态下的约束释放便是减隔震设计思想的体现, 并且可以达到非常理想的减隔震效果。表 7 所示为 E2 地震作用下体系 2 与体系 3 结构地震反应的比较, 表 8 为联端主梁横向位移的计算。

表 7 延性、减隔震体系地震反应比较

工况	位置	墩、塔底弯矩/(kN·m)	
		延性设计 体系 2	减隔震设计 体系 2'
(E2 横向+竖向)	9# 墩	1.949E+04	5.990E+03
	10# 桥塔	6.915E+05	7.578E+05
	11# 墩	2.146E+04	2.279E+04
	12# 墩	1.844E+04	6.661E+03

表 8 联端主梁横向位移的比较

位置	联端主梁横向位移	
	最大位移/m	残余位移/cm
9# 过渡墩	0.206	0.7
12# 过渡墩	0.258	1.3

通过表7、表8的计算可以看出,采用拉索支座的减隔震设计,有效减小了过渡墩的地震反应,墩底弯矩仅为相应延性抗震体系中地震弯矩的1/3。同时,由于E2横向地震作用下桥塔基本处于弹性工作状态,主梁残余位移很小。因此,从地震力及地震位移两个方面可以看出,采用拉索支座的减隔震体系对于结构的抗震性能有明显的提高^[8-9]。

4 结论

以环巢湖旅游大道白石天河大桥为工程实例,分别采用延性抗震设计方法、减隔震设计方法对不同约束体系下塔梁固接独塔斜拉桥的地震反应进行了分析,通过对比两种抗震设计思路下结构的地震反应特点,对合理抗震体系的特征和各组成部分进行系统剖析,阐明桥梁合理抗震体系设计的关键性,得出以下结论:

(1)横向约束体系布置对结构地震反应影响很大,不同约束体系下的地震力分配有很大差别。抗震设计时,应根据实际情况对约束布置体系进行比较优化,通过调整约束体系布置,达到合理分配地震力的目的。

(2)减小结构地震受力的同时,控制地震位移是减隔震设计的关键。拉索支座的应用是减隔震设计思想的完美体现,正常运行情况下拉索支座横向通过支座自带的剪力键保证横向约束,地震达到一定程度后,剪力键剪断,拉索起限位作用。

参 考 文 献

- [1]范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2]范立础编著.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [3]叶爱君,范立础.超大跨度斜拉桥的横向约束体系[J].中国公路学报,2007,20(2):63-67.
- [4]庄鑫,李建中,王瑞龙.横向抗震挡块对桥梁抗震性能的影响分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(1):14-18.
- [5]李自林,马嘉蓬,刘治德.非对称矮塔斜拉桥桥塔抗震性能分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013,26(4):15-19.
- [6]张文学,李建中,李怀峰.低重心斜拉桥地震响应特性研究[J].桥梁建设,2007(5):21-23.
- [7]黄小国,李建中,郭磊.地震作用下独塔斜拉桥合理约束体系[J].结构工程师,2008(6):29-35.
- [8]袁万城,韦正华,曹新建,等.拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J].工程力学,2011(S2):204-209.
- [9]管仲国,李建中.城市快速路高架桥抗震体系选择与经济对比[C]//第十九届全国桥梁会议论文集(下册).北京:人民交通出版社,2010:617-626.

Study on Seismic Design Method of Single Tower Cable-stayed Bridge with Tower Beam Consolidation

Fang Yuan, Xi Jin

(Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: By taking a typical single tower cable-stayed bridge as studying object, the seismic responses of single tower cable-stayed bridge with different longitudinal constraint systems and lateral constraint systems are calculated. Principles of two seismic design methods, seismic design for ductility and seismic isolation, are expatiated. The reasonable design of bridge earthquake resistance system is clarified by systemically analyzing the characteristics and components of reasonable earthquake resistance system, which may provide reference for bridge engineers in the bridge seismic design.

Key words: single tower cable-stayed bridge; seismic design for ductility; seismic isolation design; earthquake resistance system; cable-sliding friction seismic bearing