

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.001

钢管混凝土柱-软钢消能元件组合高墩桥梁试设计*

卓卫东¹, 王志坚^{1,2}, 廖丽云¹, 蔡哲罕¹, 王宏达¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350043)

摘要: 为显著提高强震区高墩桥梁结构的抗震性能, 基于可恢复功能抗震设计原理, 提出钢管混凝土柱-软钢消能元件组合箱形截面高墩桥梁的设计概念。以山区某常规RC箱形截面高墩连续刚构桥为工程背景, 进行新型组合截面高墩桥梁试设计; 分析了新型组合截面高墩桥梁在作用基本组合下的静力性能和地震组合下的抗震性能, 并对比分析了其与常规RC箱形截面高墩桥梁在E2地震作用下的抗震性能。结果表明: ①作用基本组合下, 新型组合截面高墩桥梁能够很好地满足结构承载力和稳定性要求; ②在E2地震作用下, 常规RC箱形截面高墩桥梁出现中等程度的破坏, 而新型组合截面高墩桥梁仅有可更换的软钢消能元件发生塑性变形, 表明其具有地震可恢复性; ③在E2地震作用下, 新型组合截面高墩桥梁的地震位移反应明显小于常规RC箱形截面高墩桥梁的地震位移反应。

关键词: 高墩; 消能减震; 可恢复功能抗震结构; 组合截面

中图分类号: U442.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0483-07

Trial Design of Bridge with Concrete-filled Steel Tubular Column and Energy Dissipating Mild Steel Plate Composite Tall Piers

ZHUO Weidong¹, WANG Zhijian^{1,2}, LIAO Liyun¹, CAI Zhehan¹, WANG Hongda¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350043, China)

Abstract: To improve the seismic performances of bridges with very tall piers in high seismicity area, design concept of the bridge with very tall piers, which is composed mainly of concrete-filled steel tubular (CFST) columns and energy dissipating mild steel plates (EDMSP), is proposed based on the principle of earthquake restorable structures. Trial design of a bridge with the proposed innovative composite box section tall piers is carried out based on a typical continuous rigid frame highway bridge with tall RC box section piers. The static and seismic performances of the bridge according to fundamental loading combination and E2 level seismic action are analyzed respectively. The seismic performance of the designed bridge under E2 level seismic action is compared with the bridge with conventional RC box section piers. The results show that: (a) under fundamental loading combination, the bridge with innovative composite box section piers can well meet the requirements of structural strength and stability; (b) under E2 level seismic action, the conventional designed bridge experiences medium damage in the piers, while only the replaceable EDMSP elements of the innovative de-

* 收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878180)、福建省交通运输科技发展计划项目(201803)资助

作者简介: 卓卫东(1966-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事桥梁与结构工程抗震研究。Email: zhuowd@fzu.edu.cn

signed bridge undergo plastic deformation, indicating the innovative designed bridge is earthquake restorable; (c) the seismic displacement responses of the innovative designed bridge is significantly smaller than that of the conventional designed bridge under E2 level seismic action.

Keywords: tall pier; energy dissipation device; earthquake resilient structure; composite section

引言

在山高谷深的艰险山区修建高等级公路和铁路桥梁,桥墩每增高 1 m,线路可缩短 200~400 m^[1],因此,高墩桥梁往往成为唯一的设计选项。据统计,在我国西部地区已建成或在建的公路、铁路桥梁中,墩高超过 40 m 的高墩桥梁占桥梁总数 40% 以上^[2]。随着我国西部大开发的加速发展和全面推进,可以预见,公路和铁路高墩桥梁的建设将越来越多。由于我国西部的大部分地区为高烈度地震区,且强震频发,所以,大量高墩桥梁将面临大震甚至巨震的严峻考验。

高墩桥梁的抗震设计远比中低墩桥梁复杂,高墩质量分布、高阶振型及二阶效应等都会对结构地震反应产生显著影响。然而,一方面国内外对高墩桥梁抗震设计尚无规范可循,另一方面高墩桥梁的震害经验少,使得其抗震设计具有较大的盲目性和随意性。2008 年汶川地震中,都汶高速公路紫坪铺特大桥遭受完全损毁的严重震害^[3],暴露出传统的 RC 高墩桥梁抗震设计尚存在诸多问题。为提高 RC 高墩桥梁的抗震性能,国内外学者从新结构型式和新材料入手,研发了不少新型高墩,如箱形桥墩^[2]、双壁钢箱混凝土组合墩^[4]、混凝土柱-板式墩^[5]、格构式钢管混凝土墩和钢管混凝土叠合柱桥墩^[6]等。尽管这些新型高墩均具有较好的抗震性能,并已运用于实际工程,然而,其抗震设计理念和设计方法并没有更新。

近年来,桥梁抗震设计理念已从抗震减震发展到震后可恢复性设计^[7],并成为第 16 届世界地震工程(16WCEE, 2017)的主题^[8]。按照可恢复功能抗震结构的设计理念,目前有多种途径可实现结构震后可恢复性,包括摇摆结构、自复位结构、可更换构件/部件结构等;其中,可更换构件结构概念最早来自 C.Roeder 等^[9]在研究偏心支撑钢框架时所提出的延性“结构保险丝”设计概念。M.C.Tang 等^[10]在设计旧金山—奥克兰海湾大桥东侧主桥时,首次提出由钢柱—钢连梁组成的“可更换部件钢主塔”的设计概念;C.C.McDaniel 等^[11]研究发现,充当“结构

保险丝”的钢连梁在中震和大震时屈服,使塔柱在大震时都能保持为弹性状态。之后,研究者不断发展可应用于桥梁工程中的可更换部件结构体系,其中最具代表性的为双柱墩-屈曲约束支撑(BRB)和双柱墩-剪切耗能型钢连梁^[12-14]。谢文等^[15]将双柱墩-BRB 和双柱墩-剪切耗能型钢连梁结构体系应用于高墩桥梁,通过有限元分析对高墩地震损伤控制的有效性进行了验证。徐秀丽等^[16]提出了一种以混凝土薄壁板为牺牲部件、四肢混凝土柱-钢连梁组合而成的自耗能高墩结构体系,并通过拟静力模型试验及数值模拟分析进行了验证。

本文基于可恢复功能抗震设计原理,创新性地提出采用钢管混凝土柱与软钢消能元件组合、从而形成一种新型的箱形组合截面高墩结构体系。以山区高速公路某常规 RC 箱形截面高墩连续刚构桥为背景,进行新型组合截面高墩桥梁试设计;通过有限元分析,探讨新型组合截面高墩桥梁的静力性能和抗震性能,并与常规 RC 箱形截面高墩桥梁进行 E2 地震作用下抗震性能的对比分析。

1 新型组合截面高墩桥梁设计概念

国内外目前对高墩的界定尚没有统一标准,本文将墩高不低于 35 m 或桥墩长细比超过 60~70 作为高墩的判定依据^[17]。本文提出的新型组合截面高墩主要由四肢钢管混凝土柱和软钢消能元件组成,其中,软钢消能元件既是消能部件,又是“牺牲部件”;同时,沿墩高方向每隔一定间距设置一道钢横梁。图 1 为其构造示意。

新型组合截面高墩桥梁的结构设计概念如下:

(1) 在正常使用阶段,四肢钢管混凝土柱与软钢消能元件组合形成箱形截面,保证结构具有较大的弯曲刚度和扭转刚度;同时,沿墩高方向设置钢横梁,以保证结构的整体稳定性;

(2) 在 E1 地震作用下,结构整体处于弹性状态;

(3) 在 E2 地震作用下,仅组合截面高墩中软钢消能元件接近塑性变形极限状态,通过其弹塑性滞回变形,耗散大量地震能量,同时使高墩刚度大幅度减小,降低结构地震力;钢横梁可允许轻微损

坏或保持在弹性状态,其它结构构件包括钢管混凝土柱则均保持在弹性状态。

在承载力设计方面,新型组合截面高墩在作用基本组合下,主要由四肢钢管混凝土柱承受上部结构传递的竖向和水平荷载,软钢消能元件和钢横系梁均不承担上部结构传递的竖向荷载;在地震组合下,仍主要由四肢钢管混凝土柱承受上部结构传递的竖向和水平荷载,软钢消能元件和钢横系梁参与承受部分水平荷载。

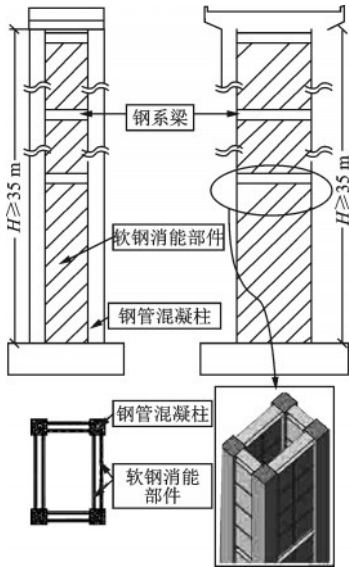


图1 新型组合截面高墩构造示意

Fig.1 Concept of innovative pier with composite section

与传统的RC高墩桥梁相比,新型组合截面高墩桥梁具有以下优点:

(1)从静力性能上看,兼具RC/钢箱形截面高墩桥梁的优点,同时,由于竖向轴力主要由四肢钢管混凝土柱承受,不会出现箱形截面钢桥墩的局部稳定问题;

(2)从抗震性能上看,具有消能减震结构的优点,同时可充分发挥软钢消能元件可快速更换的优点;通过合理设计,可实现高墩桥梁结构功能的震后可恢复性;

(3)从施工性能上看,具有类似于钢结构可便捷施工的优点。

2 新型组合截面高墩桥梁试设计

2.1 工程背景

本文以图2所示的山区高速公路某高墩桥梁为

工程背景;其主桥桥跨布置为57.5 m+105 m+57.5 m,上部结构为预应力混凝土连续刚构。主梁采用变截面单箱单室直腹板箱形截面,C50混凝土;支点处梁高为6.0 m,边跨直线段及跨中处为2.6 m,梁体下缘按2次抛物线变化。2#、3#主墩为RC箱形截面墩,C40混凝土;墩高 $H=48$ m,墩身横桥向宽 $a=6$ m,顺桥向宽 $b=4.2$ m,壁厚 $t=0.8$ m。1#、4#两个过渡墩上分别设置GPZ(II)3DX和GPZ(II)3SX支座。

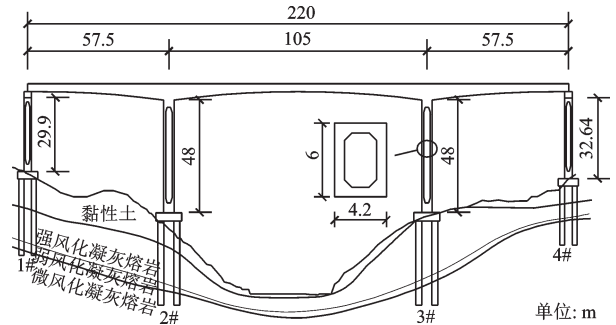


图2 桥梁布置

Fig.2 Bridge layout

2.2 新型组合截面高墩桥梁试设计

基于背景工程,采用本文所提出的新型组合截面高墩替换原RC箱形截面主墩,桥梁其他部分均保持不变,从而得到新型组合截面高墩桥梁。为了与原桥结构进行对比,在设计新型组合截面高墩时,采用以下的等效高墩原则:

- (1)两者的正截面受压承载力相同;
- (2)墩高相同,而且顺桥向的截面抗弯刚度也相同。

根据上述等效高墩原则,拟定新型组合截面高墩的结构和构造细节:四肢钢管混凝土柱采用Q345方钢管,外围截面尺寸为 1.2×1.2 m,壁厚为25 mm,含钢率为8.16%,内填C50混凝土。四肢钢管混凝土柱之间的软钢消能元件采用LYP100低屈服点钢板,总厚度为35 mm,其基本力学性能参数见表1,符合《建筑用低屈服强度钢板》^[18]的要求。此外,沿墩高方向每隔12 m设置一道型号为 $400 \times 146 \times 14.5$ mm的Q345工字钢横系梁。

经计算,原RC箱形截面高墩的轴压比为

表1 LYP100钢材的基本力学性能参数

Table 1 Basic mechanical properties of LYP100 steel

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击性能/J
81	239	55	193

0.192, 新型组合截面高墩的轴压比为 0.199, 两者基本相同; 此外, 原 RC 箱形截面高墩顺桥向的截面抗弯刚度为 $1.07 \times 10^9 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$, 新型组合截面高墩顺桥向的截面抗弯刚度为 $1.02 \times 10^9 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$, 两者也基本相同。由此可见, 试设计的新型组合截面高墩桥梁与原桥具有可对比性。

2.3 新型组合截面高墩桥梁结构静力分析

利用 Midas Civil 2019 软件, 对新型组合截面高墩连续刚构桥进行结构静力分析, 分析时同时考虑 $P-\Delta$ 效应和 $P-\delta$ 效应对高墩的影响。

根据《矩形钢管混凝土结构技术规程》^[19] 规定, 弯矩作用在一个主平面内的矩形钢管混凝土压弯构件, 其承载力应同时满足式(1)和式(2)要求:

$$\frac{N}{N_{\text{m}}} + (1 - \alpha_c) \frac{M}{M_{\text{m}}} \leq \frac{1}{\gamma} \quad (1)$$

$$\frac{M}{M_{\text{m}}} \leq \frac{1}{\gamma} \quad (2)$$

式中, N 为轴心压力设计值; M 为弯矩设计值; α_c 为混凝土工作承担系数; N_{m} 为轴心受压时截面受压承载能力设计值; M_{m} 为只有弯矩作用时截面的受弯承载能力设计值; γ 为结构重要性系数, 取为 1.1。

同时, 弯矩作用平面外的稳定性应满足式(3)要求:

$$\frac{N}{\phi N_{\text{m}}} + \frac{\beta M}{1.4 M_{\text{m}}} \leq \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

式中, ϕ 为受压稳定系数; β 为等效弯矩系数。

表 2 列出了新型组合截面高墩在作用基本组合下的内力组合设计值及验算结果; 由表 2 可见, 四肢钢管混凝土柱的承载能力和稳定性均能够满足要求。

根据计算结果, 软钢消能元件在作用基本组合下的最大 Mises 应力为 76.2 MPa, 小于屈服设计值 81 MPa, 故软钢消能元件处于弹性状态。

3 结构地震反应对比分析

3.1 结构动力有限元模型

本文利用 ABAQUS 软件, 建立背景桥梁和新型组合截面高墩桥梁的动力有限元模型。对原桥结构, 采用 B31 单元(2 节点三维 1 阶的 Timoshenko 梁单元)模拟上部主梁, 并将其定义为弹性梁单元; 高墩也采用 B31 单元模拟, 通过 *rebar 关键字在梁单元截面上定义钢筋, 混凝土和钢筋的本构模型分

表 2 钢管混凝土柱内力组合设计值及验算结果

Table 2 Design forces and checking results of CFST Columns

控制截面	最不利内力	内力组合设计值		验算结果	
		轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	式(1) 左式	式(3) 左式
左肢墩顶	轴力最大	15 461	-3 468	0.342	0.689
	轴力最小	4 368	-1 753	0.120	0.226
	弯矩最大	4 626	-1 324	0.111	0.218
	弯矩最小	15 202	-3 897	0.351	0.697
左肢墩底	轴力最大	13 064	924	0.228	0.501
	轴力最小	1 967	2 373	0.102	0.166
	弯矩最大	6 419	3 392	0.201	0.365
	弯矩最小	8 612	-95	0.135	0.309
右肢墩顶	轴力最大	13 265	-2 820	0.289	0.585
	轴力最小	3 181	2 731	0.131	0.224
	弯矩最大	5 521	2 853	0.171	0.312
	弯矩最小	10 163	-3 047	0.248	0.484
右肢墩底	轴力最大	20 660	-635	0.336	0.759
	轴力最小	8 613	2 788	0.216	0.419
	弯矩最大	12 887	3 588	0.306	0.603
	弯矩最小	15 376	-1 317	0.276	0.599

别选用清华大学土木工程系开发的 PQ-Fiber 子程序中的 Concrete02 模型和 USteel01 模型(随动硬化弹塑性单轴本构模型); 盆式支座采用 cartesian 连接单元模拟, 固定方向力学模型采用线性模型, 刚度取为无穷大, 活动方向采用双线性理想弹塑性模型。对新型组合截面高墩桥梁, 主梁与盆式支座的模拟与原桥结构的模拟相同; 高墩也采用 B31 单元模拟, 通过 *rebar 关键字在梁单元截面上定义钢管, 其本构模型采用 PQ-Fiber 子程序中的 USteel01 模型, 钢管约束核心混凝土的本构模型采用韩林海模型^[20]; 钢横梁采用 B31 梁单元模拟; 软钢消能元件采用 S4R 壳单元模拟, 并沿单元厚度方向设置了 9 个 Simpson 积分点; 钢横梁和软钢消能元件的本构模型均选用 ABAQUS 中的双线性塑性模型, 在多轴应力下满足 Von Mises 屈服准则; 软钢消能元件与钢管混凝土柱、钢横梁之间采用 tie 连接。

本文采用在墩底设置等效边界弹簧单元的方法来近似模拟两座桥梁的基础和地基的影响。此外, 在分析步中考虑结构几何非线性的影响。

利用所建立的结构动力有限元模型, 首先进行结构动力特性分析。表 3 对比了新型组合截面高墩

桥梁与RC箱形截面高墩桥梁前3阶的结构自振特性;由表3可知,两者的自振特性较为接近。

表3 结构自振特性比较

模态 序号	自振周期/s		振型特征
	RC高墩桥梁	组合高墩桥梁	
1	2.072	2.158	主梁横向对称弯曲
2	1.635	1.676	主梁纵向弯曲
3	1.243	1.248	主梁横向反对称弯曲

3.2 结构地震反应分析

3.2.1 地震动输入

根据背景工程的桥址场地类别,选取3条I类场地的地震动时程,其中2条为天然地震动记录,另1条为模拟I类场地的人工地震动时程。按设防基本烈度为8度区、对输入地震动时程进行相应调幅,并同时输入三个方向分量的一组地震动时程,分别进行E1和E2地震作用下的地震反应分析;结构反应取为3组地震动时程输入下结构地震反应的最大值。

3.2.2 E1地震动作用下结构地震反应对比

对RC箱形截面高墩桥梁,在E1地震作用下,其主墩墩顶截面顺桥向最大曲率为 $1.275e-4$,横桥向最大曲率为 $1.392e-6$,均小于屈服曲率(根据截面弯矩-曲率分析结果,主墩墩顶截面顺桥向和横桥向的屈服曲率分别为 $5.606e-4$ 和 $3.910e-4$);墩底截面顺桥向最大曲率为 $1.144e-4$,横桥向最大曲率为 $3.801e-5$,也均小于屈服曲率(分别为 $5.821e-4$ 和 $4.4047e-4$)。因此,E1地震动作用下,RC箱形截面高墩处于弹性状态。

对新型组合截面高墩桥梁,在E1地震作用下,其主墩中的四肢钢管混凝土柱的柱顶和柱底截面最大曲率分别为 $5.296e-4$ 和 $2.390e-4$,均小于屈服曲率(分别为 $2.703e-3$ 和 $2.775e-3$);钢横梁最大Mises应力为75 MPa,小于其屈服应力(345 MPa);软钢消能元件的最大Mises应力也小于其屈服应力(81 MPa)。因此,E1地震动作用下,新型组合截面高墩也处于弹性状态。

由表4可知,E1地震作用下,与RC箱形截面高墩桥梁相比,新型组合截面高墩桥梁具有更小的侧向位移。

表4 E1地震作用下结构最大位移反应比较

Table 4 Comparison of maximum lateral displacements under E1 level seismic action

位置及方向	最大位移反应/cm		相对 差/%
	RC高 墩桥梁	组合高 墩桥梁	
主墩墩顶顺桥向	6.31	4.71	-25
主墩墩顶横桥向	5.58	2.73	-51
主梁-过渡墩顺桥向相对位移	8.73	6.99	-20

3.2.3 E2地震作用下结构地震反应对比

对RC箱形截面高墩桥梁,本文采用修正Park-Ang损伤指标定义其主墩的损伤状态^[21]。表5列出了E2地震作用下RC箱形截面主墩控制截面的损伤指标及对应的损伤等级;由表5可知,在E2地震作用下,2#、3#主墩均发生中等程度的损伤。

表5 RC主墩损伤指标及损伤等级

Table 5 Damage indices and corresponding damage states of RC main piers

主墩	控制 截面	顺桥向		横桥向	
		损伤 指标	损伤等级	损伤 指标	损伤等级
2#	墩底	0.28	中等损伤	0.36	中等损伤
	墩顶	0.13	轻微损伤	0.00	无损伤
3#	墩底	0.29	中等损伤	0.39	中等损伤
	墩顶	0.14	轻微损伤	0.00	无损伤

对新型组合截面高墩桥梁,在E2地震作用下,其主墩中的四肢钢管混凝土柱的柱顶和柱底截面的最大曲率分别为 $1.243e-3$ 和 $1.096e-3$,均小于屈服曲率(分别为 $2.703e-3$ 和 $2.775e-3$),故四肢钢管混凝土柱仍处于弹性状态;钢横梁最大Mises应力为220 MPa,小于其屈服应力(345 MPa),故钢横梁也处于弹性状态。在E2地震作用下,软钢消能元件的典型Mises应力分布如图3所示;由图3可见,软钢消能元件出现大面积屈服,并在地震动作用下发生弹塑性滞回变形,耗散大量的地震能量。

表6对比了E2地震作用下两者的最大位移反应;由表6可知,与RC箱形截面高墩桥梁相比,新型组合截面高墩桥梁在E2地震作用下的最大位移反应明显较小;其中,主墩墩顶顺桥向和横桥向的最大位移反应分别减小了35%和58%,主梁与过渡墩之间顺桥向的最大相对位移反应减小了25%。

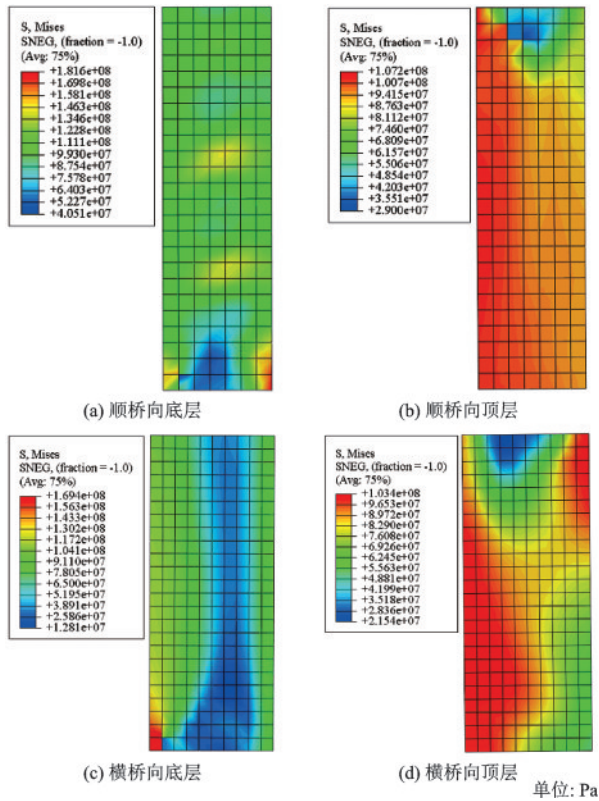


图3 软钢消能元件 Mises 应力分布

Fig.3 Stress distributions of the mild steel plates

表6 E2地震动下结构最大位移反应比较

Table 6 Comparison of maximum lateral displacements under E2 level seismic action

位置及方向	最大位移反应/cm		相对差/%
	RC高墩桥梁	组合高墩桥梁	
主墩墩顶顺桥向	33.96	22.06	35
主墩墩顶横桥向	45.21	18.98	58
主梁—过渡墩顺桥向相对位移	39.20	29.58	25

4 结论

本文基于可恢复功能抗震结构设计原理,提出了钢管混凝土柱-软钢消能元件组合箱形截面高墩的结构设计概念及其构造设计,通过新型组合截面高墩桥梁的试设计研究,得到以下结论:

(1)作用基本组合下,新型组合高墩桥梁能够满足结构承载力和稳定性的要求。

(2)E1地震作用下,新型组合截面高墩桥梁处于弹性状态,且比常规RC箱形截面高墩桥墩具有更小的侧向位移反应。

(3)在E2地震作用下,常规RC箱形截面高墩桥梁主墩出现中等程度的破坏,而新型组合截面高墩桥梁仅有可更换的软钢消能元件发生大范围的塑性变形,表明其具有地震可恢复性。

(4)在E2地震作用下,新型组合截面高墩桥梁由于软钢消能元件的附加阻尼效应,其最大位移反应比常规RC箱形截面高墩桥梁的最大位移反应有较大幅度的减小。

参考文献:

[1] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社,2014.
Wang K H. Seismic research on bridges [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Press, 2014. (in Chinese)

[2] 宗周红,夏 坚,徐绰然. 桥梁高墩抗震研究现状及展望[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013,43(2): 445-452.
Zong Zh H, Xia J, Xu Ch R. Seismic study of high piers of large-span bridges: an overview and research development[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(2): 445-452. (in Chinese)

[3] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等. 汶川地震公路震害调查[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
Chen L Sh, Zhuang W L, Zhao H Q, et al. Reconnaissance of highway seismic damage in Wenchuan earthquake [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)

[4] Xia J, Zong Z, Xu C, et al. Seismic performance of double-skin steel-concrete composite box piers: Part I-Bidirectional quasi-static testing [J]. Journal of Southeast University, 2016, 32(1): 58-66.

[5] 周雁群,张晔芝,叶梅新,等. 铁路桥梁新型柱板式高墩双柱模型的抗震性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2 506-2 514.
Zhou Y Q, Zhang Y Zh, Ye M X, et al. Seismic performance of neotype column-slab high piers in double-column model of railway bridge [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2 506-2 514. (in Chinese)

[6] 杨有福,刘 敏. 格构式钢管混凝土构件抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报,2017,30(12):10-20.
Yang Y F, Liu M. Progress of research on seismic behavior of concrete-filled steel tube latticed members[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2017, 30(12): 10-20. (in Chinese)

- [7] 李建中,管仲国. 桥梁抗震设计理论发展:从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报,2017,30(12):1-9.
Li J Zh, Guan Zh G. Research progress on bridge seismic design: target from seismic alleviation to post-earthquake structural resilience [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2017, 30(12): 1-9. (in Chinese)
- [8] 吕西林,全柳萌,蒋欢军. 从16届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(3):1-9.
Lyu X L, Quan L M, Jiang H J. Research trend of earthquake resilient structures seen from 16WCEE[J]. Earthquake Engineering and Engineering, 2017, 37(3): 1-9. (in Chinese)
- [9] Roeder C, Popov E. Inelastic behavior of eccentric braced steel frames under cyclic loadings [R]. Report No. 77, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1977.
- [10] Tang M C, Manzanarez R, Nader M, et al. Replacing the East Bay Bridge [J]. Civil Engineering, 2000, 70(9): 38-43.
- [11] McDaniel C C, Seible F. Influence of inelastic tower links on cable-supported bridge response[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 272-280.
- [12] El-Bahey S, Bruneau M. Buckling restrained braces as structural fuses for the seismic retrofit of reinforced concrete bridge bents[J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 1 052-1 061.
- [13] El-Bahey S, Bruneau M. Bridge piers with structural fuses and bi-steel columns. II: Analytical investigation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(1): 36-46.
- [14] 孙治国,华承俊,石岩,等. 利用BRB实现桥梁排架基于保险丝理念的抗震设计[J]. 振动与冲击,2015,34(22):199-205.
Sun Zh G, Hua Ch J, Shi Y, et al. Seismic design of bridge bents with BRB as structural fuse[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 199-205. (in Chinese)
- [15] 谢文,孙利民. 采用附加耗能构件的双柱式高墩地震损伤控制研究[J]. 振动与冲击,2015,34(20):98-103.
Xie W, Sun L M. Investigation on seismic damage control for twin-column tall piers by supplemental energy dissipation elements [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(20): 98-103. (in Chinese)
- [16] 徐秀丽,唐雨生,周叮,等. 新型自耗能高墩抗震性能研究[J]. 中国公路学报,2017,30(12):81-88.
Xu X L, Tang Y Sh, Zhou D, et al. Research on seismic performance of new self-dissipation energy high pier [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2017, 30(12): 81-88. (in Chinese)
- [17] 廖朝华. 墩台与基础[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
Liao Zh H. Piers and foundations[M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [18] 建筑用低屈服强度钢板:GB/T 28905—2012 [S]. 北京:中国标准出版社,2013.
Low yield strength plates for construction: GB/T 28905-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [19] 矩形钢管混凝土结构技术规程:CECS 159:2004[S]. 北京:中国计划出版社,2004.
Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members:CECS 159:2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [20] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 2版. 北京:科学出版社,2007.
Han L H. Concrete-filled steel tube structure: theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [21] Kunnath S K, Reunhorn A M, Lobo R F. IDARC version 3.0: A program for inelastic damage analysis of reinforced concrete structures [R]. State University of New York: Technical Report NCEER-92-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, 1992.

(本文责编:周小潭)