

文章编号:1671-1637(2013)03-0022-11

钢筋混凝土空心桥墩应用及抗震性能研究综述

孙治国^{1,2}, 王东升^{1,2}, 李宏男³, 杜修力⁴

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 大连海事大学 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026; 3. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 4. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 分析了我国6座大型铁路桥梁和26座大型公路桥梁中空桥墩的设计情况, 从墩高、壁厚比、薄壁宽厚比和剪跨比等方面对空心桥墩在中国的应用情况进行了评述。总结了新西兰、美国、欧洲、日本以及中国对空心桥墩抗震问题开展的试验研究和理论分析成果, 指出了空心桥墩抗震研究存在的问题和进一步研究方向。分析结果表明: 剪跨比大于10.0的高墩、壁厚比小于0.2或薄壁宽厚比大于10.0的薄壁墩在中国大型桥梁工程中获得了广泛应用; 目前对空心桥墩抗震问题开展的研究集中于剪跨比在8.0以下的中低墩, 对壁厚比小于0.2或薄壁宽厚比大于5.0的薄壁墩开展的研究非常少; 合理的空心桥墩抗剪强度及抗震变形能力分析模型仍未建立; 分析水下空心桥墩抗开裂措施, 控制空心桥墩残余位移, 采用新型结构和新材料提高空心桥墩抗震能力, 应用现代试验技术研究空心桥墩抗震问题是未来重要的研究方向。

关键词: 桥梁工程; 高墩大跨桥梁; 钢筋混凝土空心桥墩; 抗震性能

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A

Application of RC hollow bridge pier and review of seismic behavior research

SUN Zhi-guo^{1,2}, WANG Dong-sheng^{1,2}, LI Hong-nan³, DU Xiu-li⁴

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 4. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Design details of RC hollow bridge piers for 6 major railway bridges and 26 major highway bridges in China were analyzed. Pier height, web thickness to section width ratio, web width to thickness ratio and aspect ratio of pier used in China were reviewed. The experimental researches and theoretical analyses of seismic behaviors for RC hollow piers in New Zealand, America, Europe, Japan and China were summarized, and the existing problems and future research directions were pointed out. Analysis result shows that high piers with aspect ratio larger than 10.0, thin walled piers with web thickness to section width ratio less than 0.2 or web width to thickness ratio larger than 10.0 are commonly used in large bridges in China. Most of the researches have focused on the seismic behaviors of low and medium height piers with aspect ratio less than 8.0, and few researches have been conducted for

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家 973 计划项目 (2011CB013605); 国家自然科学基金项目 (51008041); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (3132013068, 3132013315); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目 (LP1212)

作者简介: 孙治国 (1980-), 男, 山东德州人, 大连海事大学讲师, 工学博士, 从事桥梁与结构工程抗震研究。

piers with web thickness to section width ratio less than 0.2 or web width to thickness ratio larger than 5.0. There is still not any reasonable shear strength and seismic deformation analysis model for hollow bridge piers. Some important research directions in the future include anti-cracking measures of hollow bridge pier under the water, residual displacement control of hollow bridge pier, improving the seismic behavior of hollow bridge pier by new structures and materials, and researching the seismic behavior of hollow bridge pier by modern experimental techniques. 1 tab, 10 figs, 60 refs.

Key words: bridge engineering; high-pier long-span bridge; RC hollow bridge pier; seismic behavior

Author resume: SUN Zhi-guo(1980-), male, lecturer, PhD, +86-411-84725098, szg_1999_1999@163.com.

0 引言

大型桥梁工程中,空心截面桥墩占有相当大的比重,且较多位于高地震烈度区^[1]。由于国内外尚缺乏空心桥墩震害经验,且试验、理论研究储备相对不足,空心桥墩抗震问题远未解决。目前,中国空心桥墩抗震设计依据的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)和《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)均未对空心桥墩的抗震设计给予特别关注,仅套用实心桥墩抗震的一般性原则。由于截面形式的特殊性,空心桥墩抗震问题尤为突出,首先,空心桥墩截面形式是对结构传统的“强剪弱弯”抗震设计原则的挑战;其次,空心截面形式不利塑性铰的形成和发展;第三,薄壁空心桥墩在地震下易发生失稳破坏,抗震稳定性问题突出^[2-4];第四,受墩高和复杂桥梁结构形式的影响,空心桥墩地震反应振型复杂,地震下空心桥墩(高墩)将受到复杂的弯-剪-扭耦合作用,对其抗震能力十分不利。

目前,国内外对实心桥墩抗震问题进行了大量研究并取得了若干进展^[5-9],对空心桥墩抗震问题,尽管国内外学者针对高墩大跨桥梁结构抗震能力进行了不少探索,但重点在于高墩(空心桥墩)动力特性和地震反应,对空心桥墩实际的延性变形能力和抗剪强度缺乏合理认识,远未实现延性抗震设计目标^[10-11],这与空心桥墩在桥梁工程中的广泛应用很不相称。为引起广大科技和工程技术人员对空心桥墩抗震问题的了解和重视,本文首先对中国部分铁路和公路桥梁空心桥墩的应用情况进行分析,总结了国内外关于空心桥墩抗震问题的研究进展,并在此基础上指出了空心桥墩抗震需要进一步研究的方向和问题。

1 中国空心桥墩应用情况总结

1.1 影响空心桥墩抗震性能的参数及定义

壁厚比、剪跨比和薄壁的宽厚比是影响空心桥

墩抗震能力的主要因素。Taylor等定义了薄壁无约束部分的长度与壁厚的比值为宽厚比,用以研究薄壁墩的局部稳定性问题^[12];本文定义空心桥墩壁厚与截面一半宽度的比值为壁厚比,用以进一步体现空心桥墩截面形式的特殊性。空心桥墩横桥向截面宽度 b 、纵桥向截面宽度 h 、横桥向包括倒角在内的壁厚 z 与无约束段壁厚 t_1 、纵桥向包括倒角在内的壁厚 y 与无约束段壁厚 t_2 等参数的定义见图1。横桥向壁厚比 c_1 、纵桥向壁厚比 c_2 、横桥向宽厚比 ξ_1 、纵桥向宽厚比 ξ_2 分别定义为

$$c_1 = \frac{2t_1}{b} \quad (1)$$

$$c_2 = \frac{2t_2}{h} \quad (2)$$

$$\xi_1 = \frac{h - 2y}{t_1} \quad (3)$$

$$\xi_2 = \frac{b - 2z}{t_2} \quad (4)$$

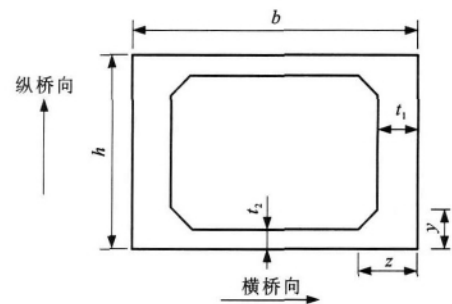


图1 参数定义

Fig. 1 Definitions of parameters

由于桥墩纵桥向剪跨比的确定较为复杂,本文仅以横桥向剪跨比进行统计分析,直接将桥墩高度与横桥向墩底截面宽度的比值定义为横桥向(参考)剪跨比。

1.2 中国空心桥墩应用情况及国内外相关研究

为了解空心桥墩在中国桥梁工程中的应用背景,收集了国内6座大型铁路桥梁和26座大型公路桥梁中35个铁路桥梁空心桥墩及97个公路桥梁空心桥墩设计情况。收集的铁路和公路空心桥墩的墩

高 H 、横桥向和纵桥向壁厚比 c_1 、 c_2 及横桥向(参考)剪跨比 λ 等参数的设计情况见表 1, 各参数的具体分布情况见图 2、3。本文统计的铁路桥梁空心桥墩为矩形单箱和圆端型单箱, 而公路桥梁空心桥墩

均为矩形截面, 包括矩形单箱、双箱和三箱等形式。同时, 为突出薄壁空心桥墩的应用情况, 整理了部分公路桥梁空心桥墩壁厚比 c 和薄壁宽厚比 ξ 的对应关系, 见图 4。

表 1 空心桥墩设计情况

Tab. 1 Design details of hollow bridge piers

参数	H/m		c_1		c_2		λ	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
铁路桥梁	16~110	47.8	0.125~0.780	0.28	0.18~0.42	0.30	2.0~7.2	4.0
公路桥梁	15~178	73.9	0.060~0.550	0.20	0.13~0.67	0.35	1.3~21.2	8.6

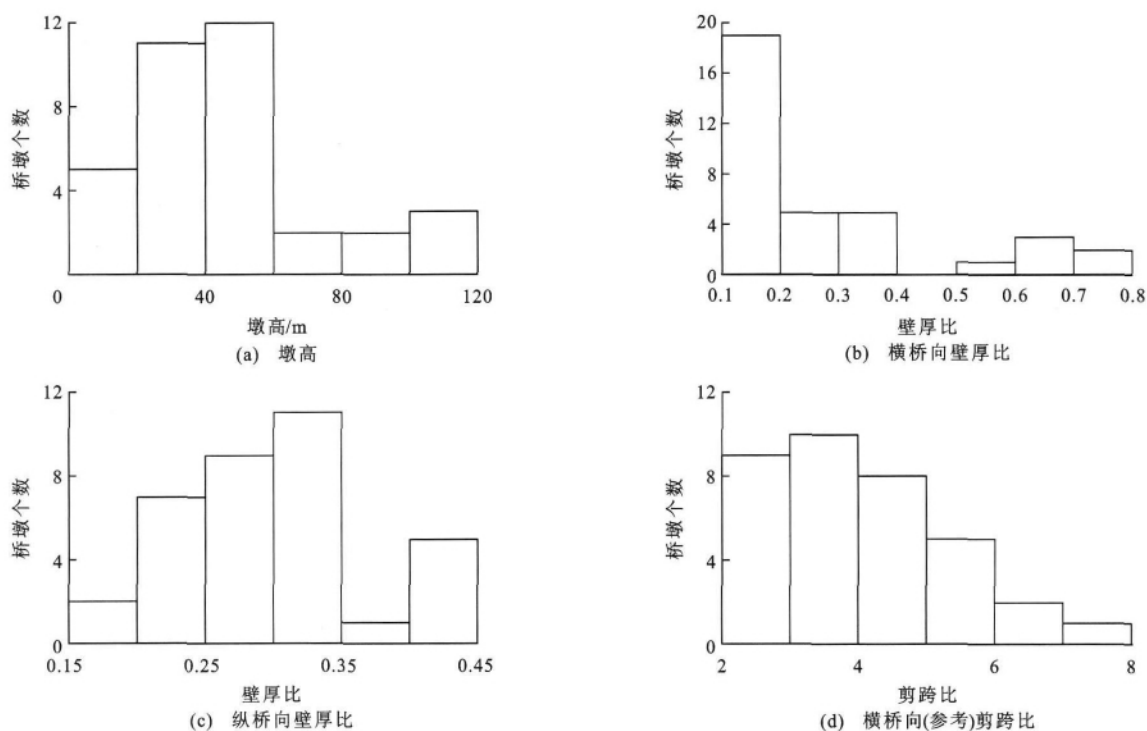


图 2 铁路桥梁空心桥墩数据分布

Fig. 2 Data distributions of hollow bridge piers for railway bridges

图 5 为国内外文献收集到的 74 个矩形空心桥墩抗震试验数据分布, 包括剪跨比、壁厚比和薄壁宽厚比等^[13-31]。对比目前国内外对矩形空心桥墩开展的试验研究情况和矩形空心桥墩在中国桥梁工程中的应用情况(图 2~5)可以看出, 目前国内外对空心桥墩抗震问题开展的研究集中于中低墩, 剪跨比普遍在 8.0 以下, 而中国公路桥梁空心桥墩横桥向(参考)剪跨比大于 10.0 的高墩普遍应用; 同时, 国内外针对薄壁墩开展的研究明显不足, 图 2~4 表明, 壁厚比小于 0.20 的薄壁墩在中国桥梁工程中应用广泛, 而目前文献中仅 Pinto 等完成了 1 个壁厚比小于 0.20 的薄壁墩试验^[14]。Taylor 等针对矩形薄壁空心桥墩进行的静力压弯试验表明, 空心桥墩薄壁宽厚比大于 15.0 时, 可能会因局部失稳破坏而

影响桥墩的极限承载力^[12]; 薄壁宽厚比大于 10.0 的空心桥墩在中国桥梁工程中广泛应用, 而文献所见的空心桥墩抗震试验薄壁宽厚比最大仅为 10.0, 且试验数据集中在 5.0 以下, 这都充分表明空心桥墩抗震问题研究的滞后性。

2 空心桥墩抗震性能研究进展

2.1 Park 与 Priestley 领导的空心桥墩试验

空心桥墩抗震研究的开创性工作是由 Park 领导完成的, Mander 和 Zahn 分别完成了 4 个矩形和 6 个圆形空心桥墩抗震拟静力试验, 截面形式见图 6。主要结论为: 对矩形空心桥墩, 强调了箍筋的约束效应对空心桥墩延性、耗能能力及抗弯承载力的有利作用; 对圆形截面空心桥墩, 则强调了抗弯中

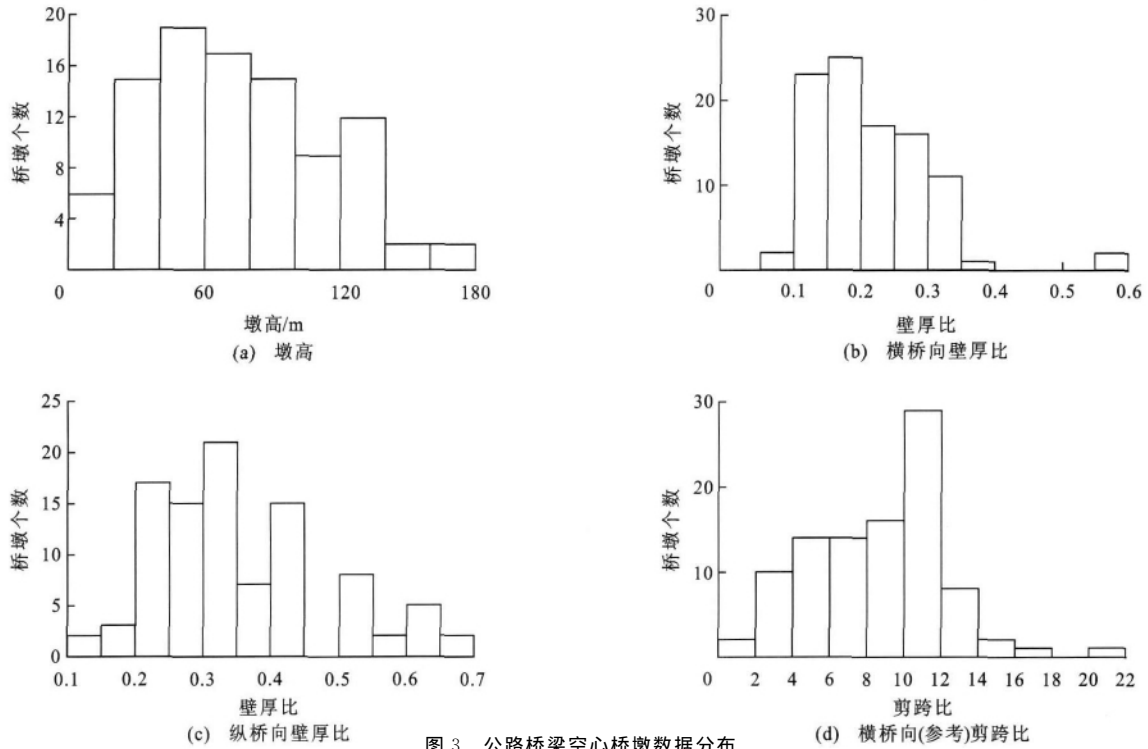


图 3 公路桥梁空心桥墩数据分布

Fig. 3 Data distributions of hollow bridge piers for highway bridges

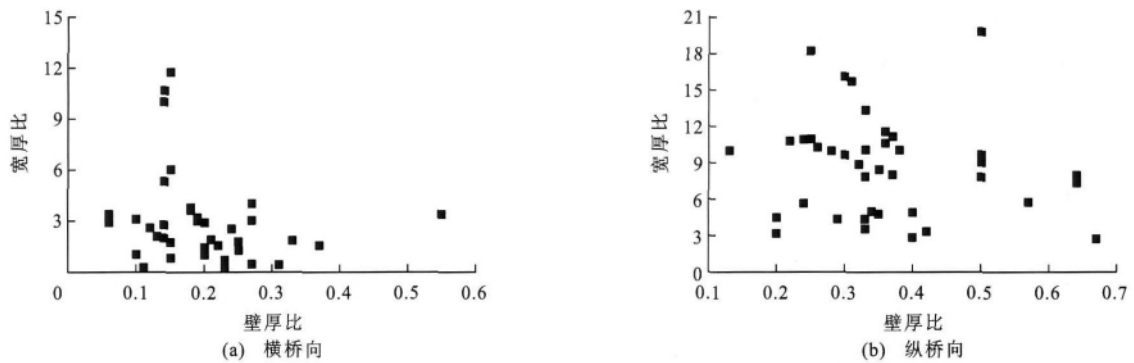


图 4 公路桥梁中 c 与 ξ 的关系

Fig. 4 Relationships between c and ξ for highway bridges

性轴位置对保证其延性抗震能力的重要性,由于空心桥墩内侧混凝土难以被有效约束,中性轴位置距内侧混凝土越近,混凝土则不易压碎破坏,从而保证了桥墩的延性^[13,32]。但值得关注的是,他们研究的圆形截面试件仅沿截面外侧配置了纵筋和约束箍筋,过多的纵筋配筋率(配筋率最高达 5.4%)易造成截面抗弯中性轴远离空心桥墩内壁,而内侧混凝土的脆性压碎破坏又使得外侧的箍筋难以有效发挥约束作用,这些都是造成 Zahn 的试件延性较差的重要原因。

在 Priestley 领导下, Hoshikuma 在美国加州大学圣地亚哥分校(UCSD)进行了 5 个圆形薄壁空心桥墩的拟静力试验,试件截面形式同图 6(b)。试验结果同样表明,内侧混凝土的压碎破坏仍是控制圆形空心

桥墩抗震能力的主要因素,强调了过高的纵筋配筋率对空心桥墩抗震的不利作用。同时,剪跨比为 2.5 的 2 个试件发生了剪切破坏,分析表明,轴力对空心桥墩抗剪承载力的有益作用要远小于实心墩试件,并建议忽略轴力对空心桥墩抗剪强度的贡献^[33]。

2.2 日本学者进行的空心桥墩抗震试验

日本学者 Ogata 等以 1995 年 Kobe 地震后日本进行的桥梁抗震加固为工程背景,设计了 5 个圆形截面空心桥墩,试件壁厚沿墩高逐渐变小并在变截面处截断纵筋,通过拟静力试验验证了 FRP 加固空心桥墩的有效性,并在此基础上提出了空心桥墩抗震加固的设计建议^[34]。

理论研究方面,为有效模拟空心桥墩的倒塌破坏过程,日本学者对空心桥墩中混凝土的压碎和纵

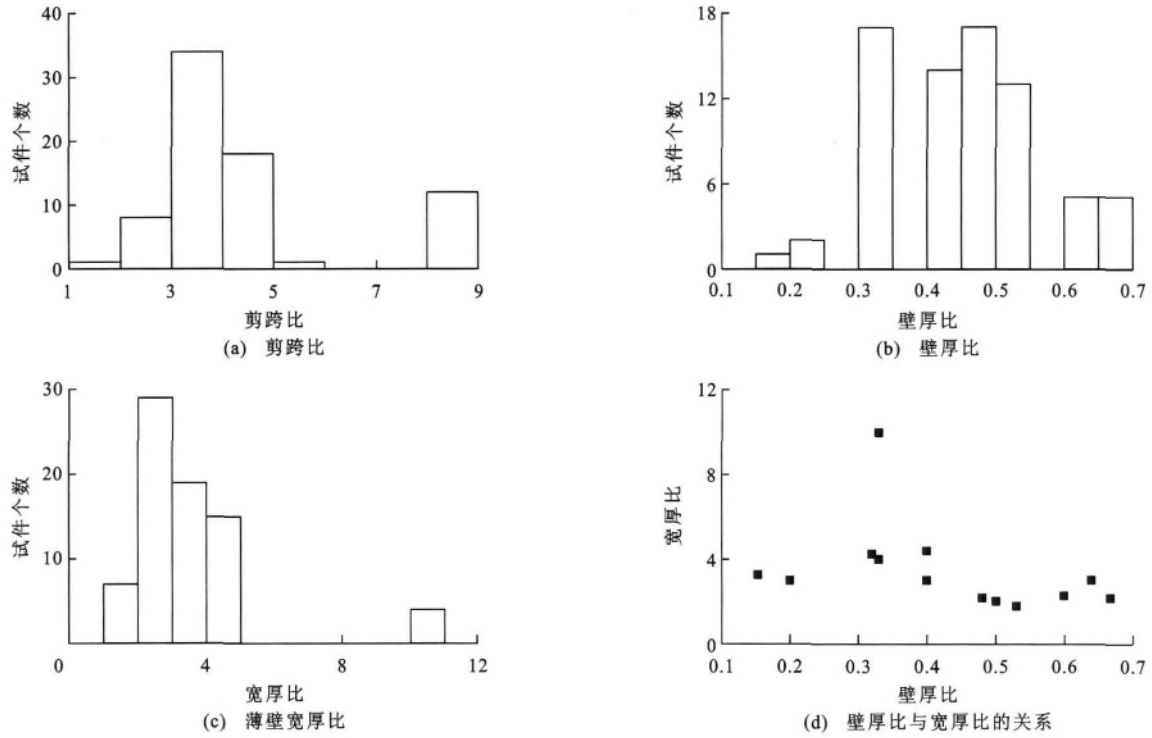
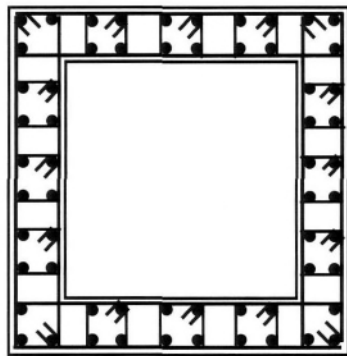
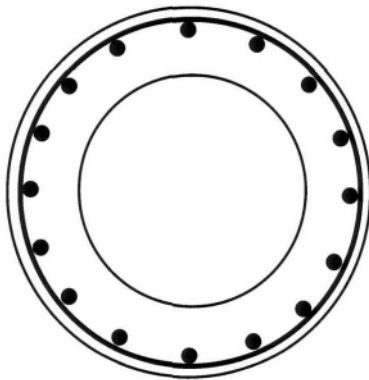


图 5 矩形空心桥墩试验数据分布

Fig. 5 Experimental data distributions of rectangular hollow bridge piers



(a) Mander研究的截面形式



(b) Zahn研究的截面形式

图 6 Mander 与 Zahn 研究的空心桥墩

Fig. 6 Hollow bridge piers studied by

Mander and Zahn

筋的屈曲破坏过程建立了精细化的分析模型,将混凝土保护层、箍筋和拉结筋均用弹塑性弹簧模拟,纵

筋则用带有固定端的梁模拟。模型中考虑了箍筋的约束效应、纵筋塑性弯曲刚度、试件初始变形以及混凝土保护层的受拉和约束效应等。通过与试验结果的对比表明,模型很好地模拟了空心桥墩的弯矩-曲率反应以及混凝土压碎和纵筋的屈曲破坏过程。

2.3 欧洲进行的空心桥墩抗震研究

2.3.1 Pinto 领导的空心桥墩抗震研究

欧洲关于空心桥墩抗震最著名的研究是在 Pinto 领导下完成的。在 Pinto 领导下,欧洲委员会 JRC (Joint Research Center) 首先以奥地利一座 1975 年设计的具有代表意义的未考虑抗震要求的空心桥墩为研究对象,在欧洲 ELSA (European Laboratory for Structural Assessment) 实验室完成了 2 个大比例(1:2.5)矩形空心桥墩模型的拟静力试验,截面形式见图 7(a)。试件包含按旧规范设计桥墩的典型抗震缺陷,如塑性铰区纵筋截断且搭接长度不足,纵筋和箍筋配筋率偏低以及明显不合理的配箍构造措施等,试验结果表明,欧洲未考虑抗震要求的空心桥墩延性及耗能能力较差。他们还设计了 2 个符合欧洲新规范要求设计的矩形空心桥墩拟静力试验,截面形式见图 7(b),试验结果表明,按新规范设计的空心桥墩抗震能力明显增强^[14]。

在 Pinto 领导下,欧洲 ELSA 实验室以空心桥墩作为试验子结构,针对某多跨连续梁桥在世界上

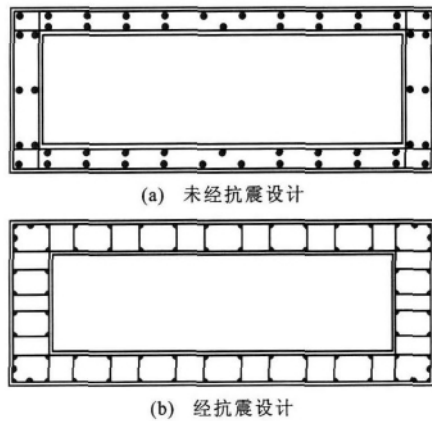


图 7 欧洲的典型矩形空心桥墩

Fig. 7 Typical rectangular hollow bridge piers in Europe

首次成功实现了大比例模型的子结构拟动力试验。研究成果除有效验证了按欧洲新规范设计的桥梁结构的抗震能力外,更主要的贡献在于对子结构拟动力试验这一试验手段的探索。在对伪动力试验结果进行的数值模拟中,他们也认识到纤维模型进行空心桥墩抗震数值模拟的几个不足,如纵筋拔出的考虑,桥墩非线性剪切对总体变形能力的影响等。其后,他们基于 STM 模型考虑空心桥墩的非线性剪切变形,并与基于 Timoshenko 梁单元的纤维模型耦合,发展了空心桥墩抗震的数值分析技术,与试验结果的对比验证了模型的准确性^[35]。

在空心桥墩抗震加固方面,Tsionis 等总结了钢筋混凝土空心桥墩的抗震试验结果,指出按旧规范设计的空心桥墩的变形能力远不能满足抗震要求,他们基于有限元模型和纤维模型研究了 FRP 加固矩形空心桥墩的变形能力,并提出了 FRP 加固空心桥墩的抗震设计公式^[36]。

2.3.2 葡萄牙学者的研究

葡萄牙学者首先完成了 4 个矩形空心矮墩(剪跨比均为 3.3)的抗震拟静力试验,试件截面形式类似于图 7(a)中的未经抗震设计试件,用以研究空心矮墩的抗剪薄弱性及震后修复技术。试验结果表明,空心桥墩均发生弯剪或剪切破坏。震后修复试验表明,采用内置箍筋和外包 CFRP 材料,经仔细设计和修复的空心桥墩试件均发生弯曲破坏,表现出良好的抗震能力,且强度和延性大大提高。Faria 等采用考虑混凝土受拉和受压退化的双标量损伤变量模型和描述纵筋低周反复效应的 Menegotto-Pinto 模型,对欧洲委员会 JRC 完成的 4 个矩形空心桥墩进行了详细的建模,对高墩(弯曲变形起控制作用)和矮墩(剪切影响较大)试件的滞回性能进行了成功的模拟^[17]。

2.3.3 意大利学者的研究

意大利学者 Calvi 等基于拟静力试验并与现有桥墩抗剪计算公式进行对比,研究了按旧规范设计的空心桥墩的抗震能力。桥墩截面形式见图 8,桥墩包括按旧规范设计的典型抗震缺陷,如箍筋用量严重不足,抗剪强度不足,纵筋的不合理截断等,试验结果再次验证了空心桥墩的抗剪薄弱性^[15]。与桥墩抗剪分析计算公式的对比表明,UCSD 模型和 UCB 模型较好地预测了空心桥墩的抗剪能力^[37]。同时,针对空心桥墩的抗震薄弱性,Pavese 等进行了 FRP 加固空心桥墩的抗震性能试验和理论分析,结果表明,横向包裹的 FRP 材料大大提高了空心矮墩的抗剪承载力、延性和耗能能力,对于弯剪破坏试件,加固方式仍较好地提高了空心桥墩的抗震能力,而对于含有纵筋搭接的空心桥墩试件,由于纵向 FRP 材料在柱底的破坏,加固效果并不理想^[38]。

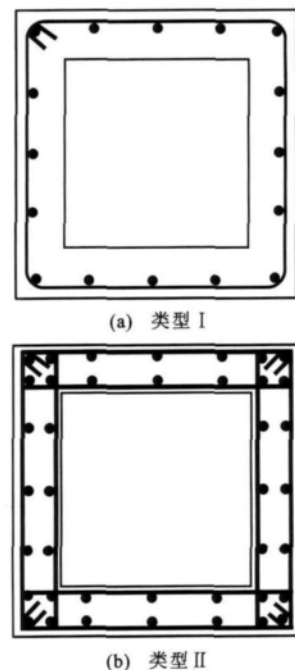


图 8 意大利的矩形空心桥墩

Fig. 8 Rectangular hollow bridge piers in Italy

为进一步研究外包 CFRP 对方形截面空心桥墩抗震能力的影响,意大利学者 Lignola 等完成了 7 个方形截面空心桥墩的压弯试验,试件截面形式类似于图 8(a),并在试验基础上发展了 CFRP 约束方形截面空心桥墩的弯矩-曲率、荷载-位移分析模型。研究表明,CFRP 有效延缓了混凝土的压碎和纵筋的屈曲破坏过程,并由此提高了空心桥墩的强度和变形能力^[39-40]。

2.3.4 斯洛文尼亚学者的研究

斯洛文尼亚学者 Isakovic 等以中欧 20 世纪 70

年代建造的空心桥墩为原型,完成 1 个矮墩模型和 1 个高墩模型的拟静力试验,截面形式见图 9。试件的抗震缺陷包括纵筋在塑性铰区截断且配置于箍筋外侧,配箍量明显不足,纵筋及箍筋均采用光圆钢筋等。试验结果表明,尽管桥墩的抗震设计缺陷明显,但由于试验轴压比较低,试件仍表现出不错的抗震能力,矮墩发生了弯剪破坏,高墩发生了弯曲破坏。研究者还进行了空心桥墩滞回性能的数值模拟和抗剪强度分析工作,他们首先以 Drain 3DX 程序的梁柱单元进行了空心桥墩抗弯能力的数值模拟,并以此作为抗剪需求,与欧洲 Eurocode 8 规范和 UCSD 模型中规定的桥墩抗剪能力进行对比,预测空心桥墩的破坏模式和破坏位置,并与试验结果进行了对比分析。研究表明,各模型计算的桥墩抗剪能力差异非常大,且准确度不高,空心桥墩抗剪问题仍未得到很好解决^[41]。

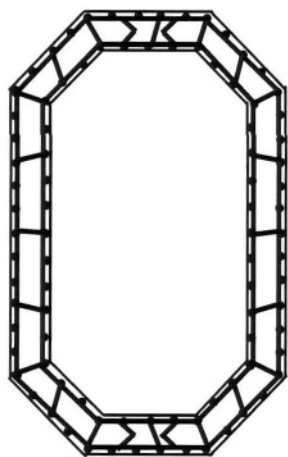


图 9 斯洛文尼亚的空心桥墩

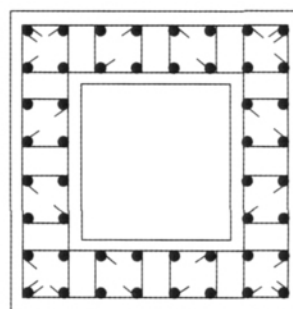
Fig. 9 Hollow bridge pier in Slovenia

2.4 中国学者的研究

2.4.1 台湾高速铁路计划

为进一步提高台湾的交通运输能力,20 世纪末台湾启动了高速铁路计划,由于高速铁路中使用的空心桥墩截面、配筋形式不同于以往研究的空心桥墩,台湾学者对其抗震性能进行了一系列的研究,空心桥墩截面形式见图 10,研究内容涉及空心桥墩中混凝土的本构模型、空心桥墩的抗弯和抗剪能力、延性和耗能特征、空心桥墩抗震数值分析模型、空心桥墩的抗震加固和震后修复技术等。研究主要得出以下结论^[18-27]:随轴力增大,桥墩抗剪强度增加,但延性降低;随配箍的增多,桥墩抗剪强度和变形能力均增加,箍筋配置不足且在塑性铰区含有纵筋搭接的桥墩易发生搭接纵筋的粘结破坏,延性较差;外包 CFRP 可有效增加空心桥墩的延性和耗能能力,且

CFRP 加固圆形截面桥墩的效果优于方形桥墩;使用 CFRP 和“狗骨式杆”对震后破坏的桥墩进行修复可使震后破坏桥墩的抗震性能得到有效恢复。



(a) 矩形墩



(b) 圆形墩

图 10 台湾的空心桥墩

Fig. 10 Hollow bridge piers in Taiwan

2.4.2 中国其他学者的研究

理论研究方面,弓俊青等针对铁路常用空心圆端截面桥墩的形状和特征,通过对钢筋混凝土空心圆端墩柱截面的弯矩-曲率分析,讨论了轴压比、配箍率、直边长度和壁厚对截面弯曲承载力与延性的影响。结果表明,由于直边的存在,使得空心圆端截面的弯曲承载力大于相同直径的空心圆形截面桥墩,而其延性却减小;增大桥墩配箍可有效提高其弯曲承载力和延性,且空心桥墩内径的变化对其延性有较大影响^[42]。为精细模拟钢筋混凝土空心桥墩在静力推覆荷载作用下的破坏过程,褚一等在 ABAQUS 软件基础上开发了一种精细化的纤维梁柱单元分析平台 FENAP,对中国西部山区一空心高墩进行了 Pushover 分析,模拟了桥墩从混凝土开裂、纵筋屈服到混凝土压碎破坏的完整过程,并通过与 OpenSees 计算结果的对比,验证了模型的精度^[43]。孙治国等基于纤维单元模型建立了钢筋混凝土空心桥墩的滞回分析模型,在验证模型准确性的基础上讨论了纵筋、壁厚、混凝土强度、剪跨比等因素对空心桥墩变形能力的影响,获得了弯曲破坏空心桥墩变形能力影响因素的初步认识^[44]。并基

于收集到的71个矩形空心桥墩拟静力试验数据,讨论了影响空心桥墩变形能力的主要因素,给出了矩形空心桥墩塑性铰约束箍筋用量的计算公式^[45]。

在试验研究方面,宋晓东和刘林同期开展了空心桥墩抗震的试验研究工作,研究重点则分别针对山区公路桥梁高墩和铁路圆端型空心桥墩。宋晓东完成的山区矩形空心高墩模型(剪跨比为8.0)的拟静力试验表明,增大壁厚和配箍率可有效提高空心桥墩的变形和耗能能力^[28]。刘林完成的铁路圆端型空心桥墩的拟静力试验发现,配筋率为0.23%的空心桥墩表现出明显的脆性,而减小壁厚会降低空心桥墩的变形和耗能能力^[46]。郝文秀等通过拟静力试验研究了活性粉末混凝土空心矩形桥墩的抗震性能,发现活性粉末混凝土桥墩具有较好的抗震能力,且桥墩的抗震能力随轴压比和混凝土强度增大而减小,随配箍的增多而增大^[47]。崔海琴等设计了9个矩形空心桥墩的抗震拟静力试验,包括4个普通空心桥墩和5个CFRP加固的空心桥墩,研究表明,4个普通空心桥墩均发生弯曲破坏,表现出良好的延性和耗能能力,而横向包裹CFRP的加固方式可有效提高空心桥墩的变形能力和抗剪强度^[29-30]。宗周红等完成了6个矩形薄壁空心桥墩的双向拟静力试验,研究表明,薄壁高墩在多维荷载作用下主要以弯曲破坏为主,但剪切作用不可忽视,不同方向荷载的耦合作用对空心桥墩的破坏过程有显著影响,空心桥墩的变形能力随剪跨比的增大或轴压比的减小而增大^[48]。李志兴以云南牛栏江大桥为例,设计了1:12的缩尺模型,通过伪动力试验研究了含空心高墩的大跨连续刚构桥的抗震能力^[49]。杜修力等完成了5个矩形空心桥墩的拟静力试验,重点关注了配筋率、轴压比、箍筋间距等对桥墩抗震能力的影响^[31]。

3 存在的问题和发展方向

3.1 主要结论及存在的问题

空心桥墩在大型桥梁工程中获得了广泛应用,而目前国内外对空心桥墩抗震问题进行的研究仍较为薄弱,本文总结了空心桥墩在中国桥梁工程中的应用情况,并对国内外完成的空心桥墩抗震研究成果进行较为全面的介绍,主要结论及存在的问题如下。

(1)总结国内外对空心桥墩延性抗震的研究进展,一个基本共识为:空心桥墩延性抗震能力随轴压比提高而降低,随配箍率的增加而增加,这与实心桥墩认识并无特殊之处。而体现空心桥墩截面特殊性

的壁厚比、薄壁宽厚比等参数对桥墩延性变形能力的影响尚无系统性研究,另外在空心桥墩这种截面尺寸可达10 m以上的大型结构中,箍筋能否发挥对核心混凝土的约束效应值得怀疑。

(2)更值得关注的是对高墩、薄壁空心桥墩抗震能力认识薄弱。目前剪跨比大于10.0、壁厚比小于0.2、薄壁宽厚比大于10.0的空心桥墩在中国大型桥梁工程中获得了广泛应用,限于试验设备、试验条件的限制,目前国内外几乎没有对此开展的研究。

(3)对空心桥墩的地震抗剪强度缺乏有效性研究。目前国内外对此进行的研究仅限于“个案”,主要的研究手段在于基于试验结果与现有抗剪分析模型进行对比,由此获得的认识难免偏颇。目前中国桥梁抗震设计的主要依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/T B02-01—2008)和《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)均未对空心桥墩的抗剪问题给予特别研究。

(4)在空心桥墩抗震的数值分析技术上,由于剪切变形的影响较大,仅考虑弯曲变形的纤维模型表现出不足,近年来发展起来的STM模型和修正的压力场理论(MCFT)为考虑结构的非线性剪切变形提供了有效途径^[50-51]。

3.2 进一步研究的方向

(1)深水高墩(空心桥墩)在地震下抗裂措施值得关注。在汶川大地震中,庙子坪大桥水下空心桥墩混凝土开裂破坏,尽管桥墩设计充分实现了“大震不倒”的抗震设计理念,但出于耐久性要求必须对水下裂缝进行加固。重大土木工程结构的抗震设计甚至要求达到“大震不裂”的目标,这也为深水桥墩的抗震设计提出了新的课题。美国密歇根大学研制了高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC),由于其优越的抗拉伸性能而受到关注,可能为解决深水空心桥墩的地震开裂问题提供新的途径^[52-53]。

(2)桥墩震后残余位移的大小是决定其使用性与可修复性的关键,1995年Kobe地震后,大量钢筋混凝土桥墩由于残余位移过大而无法修复,并由此引起了人们对桥墩残余位移估计及控制问题的重视。目前国内外对减少桥墩残余位移开展的研究,一种是采用竖向预应力桥墩,另一种是使用形状记忆合金^[54-55],但均处于个别学者开展的试验研究阶段。

(3)新型桥墩结构形式和土木工程新材料的应用为空心桥墩抗震问题研究带来了新的课题。如美国新修建的旧金山—奥克兰海湾大桥中使用了由4个圆形墩组成的空心桥墩,为了解此类桥墩的抗

震能力, Hines 等专门进行了相关研究^[56]。鉴于圆形截面空心桥墩由于内壁混凝土的压碎对其抗震能力的不利作用, 韩国学者 Han 等提出利用内置管件约束混凝土的概念, 并进行了试验和理论验证^[57]。另外, 近年来对预应力节段拼装空心桥墩抗震问题的研究也进入了高潮^[58-59], 在新材料方面, 一方面是土木工程材料高强化的发展趋势^[60], 另外, 纤维混凝土、自密实混凝土等新型建筑材料也逐步在桥梁工程获得了应用。

(4) 现代试验条件和研究手段的进步使得研究高墩这种大型复杂结构成为可能, 特别值得关注的是子结构试验技术的发展, 这需要解决两方面的问题, 一方面是数值分析技术的精确性和计算效率, 能够对子结构试验中的数值分析部分实现准确、快速的模拟分析, 另一方面是试验加载设备的大型化、复杂化, 确保大尺寸模型及复杂边界加载条件的实现。

4 结 语

(1) 剪跨比大于 10.0 的高墩、壁厚比小于 0.2 或薄壁宽厚比大于 10.0 的薄壁墩在中国大型桥梁工程中获得了广泛应用。

(2) 高墩和薄壁空心桥墩的抗震问题尚未引起重视, 目前对空心桥墩抗震问题开展的研究集中于剪跨比在 8.0 以下的中低墩, 且对壁厚比小于 0.2 或薄壁宽厚比大于 5.0 的薄壁墩开展的研究非常少。

(3) 建立有效的空心桥墩抗剪分析模型并在数值分析中合理考虑其非线性剪切变形是空心桥墩抗震设计面临的主要困难。

(4) 分析水下空心桥墩抗开裂措施, 控制空心桥墩残余位移, 采用新型结构和新材料提高空心桥墩抗震能力, 应用现代试验技术研究空心桥墩抗震问题是未来重要的研究方向。

参 考 文 献 :

References :

[1] 周军生, 楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 31-37.
ZHOU Jun-sheng, LOU Zhuang-hong. The status quo and developing trends of large-span prestressed concrete bridges with continuous rigid frame structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 31-37. (in Chinese)

[2] 王钧利, 贺拴海. 高墩大跨径弯桥在悬臂施工阶段刚构的非线性稳定分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 30-34.
WANG Jun-li, HE Shuan-hai. Nonlinear stability analysis of long-span curve bridge with high piers during cantilever construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineer-

ing, 2006, 6(2): 30-34. (in Chinese)

- [3] 王钧利, 贺拴海. 大跨径弯桥圆心角对其内力、位移及稳定性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 86-90.
WANG Jun-li, HE Shuan-hai. Central angle influence of long-span curve bridge on its inner forces, displacements and stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 86-90. (in Chinese)
- [4] MARIA H S, WOOD S L, BREEN J E. Behavior of hollow, rectangular reinforced concrete piers subjected to biaxial loading[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(3): 390-398.
- [5] PRIESTLEY M J N, PARK R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading[J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(1): 61-76.
- [6] 孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 48-57.
SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, DU Xiu-li, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 48-57. (in Chinese)
- [7] 王东升, 司炳君, 孙治国, 等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 34-41.
WANG Dong-sheng, SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, et al. Experiment on shear strength of reinforced concrete bridge column in plastic hinge zone under seismic effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 34-41. (in Chinese)
- [8] 孙治国, 王东升, 郭 迅, 等. 钢筋混凝土墩柱等效塑性铰长度研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 56-64.
SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, GUO Xun, et al. Research on equivalent plastic hinge length of reinforced concrete bridge column[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 56-64. (in Chinese)
- [9] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 钢筋混凝土桥墩震后修复技术研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 128-132.
SUN Zhi-guo, SI Bing-jun, WANG Dong-sheng, et al. Review on the repair techniques for earthquake damaged RC bridge piers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 128-132. (in Chinese)
- [10] 刘建新, 张 伟, 张 茜. 洛河特大桥抗震性能计算[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 57-62.
LIU Jian-xin, ZHANG Wei, ZHANG Qian. Anti-seismic performance calculation of Luohe bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 57-62. (in Chinese)
- [11] 李建中, 宋晓东, 范立础. 桥梁高墩位移延性能力的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 43-48.
LI Jian-zhong, SONG Xiao-dong, FAN Li-chu. Investigation for displacement ductility capacity of tall piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 43-48. (in Chinese)
- [12] TAYLOR A W, ROWELL R B, BREEN J E. Behavior of thin-walled concrete box piers[J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(3): 319-333.

- [13] MANDER J B. Seismic design of bridge piers[D]. Christchurch: University of Canterbury, 1983.
- [14] PINTO A V, MOLINA J, TSIONIS G. Cyclic tests on large-scale models of existing bridge piers with rectangular hollow cross-section [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32(13): 1995-2012.
- [15] CALVI G M, PAVESE A, RASULO A, et al. Experimental and numerical studies on the seismic response of R. C. hollow bridge piers[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2005, 3(3): 267-297.
- [16] DELGADO R, DELGADO P, POUCA N V, et al. Shear effects on hollow section piers under seismic actions: experimental and numerical analysis [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2009, 7(2): 377-389.
- [17] FARIA R, POUCA N V, DELGADO R. Simulation of the cyclic behaviour of R/C rectangular hollow section bridge piers via a detailed numerical model [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8(5): 725-748.
- [18] MO Y L, YEH Y K, CHENG C T, et al. Seismic performance and retrofit of hollow bridge columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2001, 3(1): 59-66.
- [19] YEH Y K, MO Y L, YANG C Y. Seismic performance of hollow circular bridge piers [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(6): 862-871.
- [20] YEH Y K, MO Y L, YANG C Y. Seismic performance of rectangular hollow bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(1): 60-68.
- [21] YEH Y K, MO Y L, YANG C Y. Full-scale tests on rectangular hollow bridge piers [J]. *Materials and Structures*, 2002, 35(2): 117-125.
- [22] MO Y L, NIEN I C. Seismic performance of hollow high-strength concrete bridge columns [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2002, 7(6): 338-349.
- [23] MO Y L, WONG D C, MAEKAW A K. Seismic performance of hollow bridge columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(3): 337-348.
- [24] CHENG C T, YANG J C, YEH Y K, et al. Seismic performance of repaired hollow-bridge piers [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(5): 339-351.
- [25] MO Y L, YEH Y K, HSIEH D M. Seismic retrofit of hollow rectangular bridge columns [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(1): 43-51.
- [26] CHENG C T, MO Y L, YEH Y K. Evaluation of as-built, retrofitted, and repaired shear-critical hollow bridge columns under earthquake-type loading [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(5): 520-529.
- [27] MO Y L, JENG C H, PERNG S F. Seismic shear behavior of rectangular hollow bridge columns [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2001, 12(4): 429-448.
- [28] 宋晓东. 桥梁高墩延性抗震性能的理论及试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- SONG Xiao-dong. Theory and experimental research on the seismic ductility of tall piers [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [29] 崔海琴, 贺拴海, 宋一凡. 空心矩形薄壁墩延性抗震性能试验 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27(6): 58-63
- CUI Hai-qin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Experimental study on antiseismic ductility of hollow rectangular thin-walled pier [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(6): 58-63. (in Chinese)
- [30] 崔海琴, 贺拴海, 赵小星, 等. CFRP 约束空心薄壁墩抗震性能试验 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(3): 53-59
- CUI Hai-qin, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing, et al. Experimental research on seismic behavior of hollow rectangular thin-walled pier confined with CFRP [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2010, 30(3): 53-59. (in Chinese)
- [31] 杜修力, 陈明琦, 韩强. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 254-259.
- DU Xiu-li, CHEN Ming-qi, HAN Qiang. Experimental evaluation of seismic performance of reinforced concrete hollow bridge columns [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 254-259. (in Chinese)
- [32] ZAHN F A, PARK R, PRIESTLEY M J N. Flexural strength and ductility of circular hollow reinforced concrete columns without confinement on inside face [J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(2): 156-166.
- [33] HOSHIKUMA J I, PRIESTLEY M J N. Flexural behavior of circular hollow columns with a single layer of reinforcement under seismic loading [R]. San Diego: University of California, 2000.
- [34] OGATA T, OSADA K. Seismic retrofitting of expressway bridges in Japan [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(1): 17-27.
- [35] GUEDES J, PINTO A V, PEGON P. Non-linear shear model for R/C piers [R]. Ispra: Joint Research Center, 2010.
- [36] TSIONIS G, PINTO A. Numerical analysis of RC bridge piers with rectangular hollow cross-section retrofitted with FRP jackets [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, 11(4): 607-630.
- [37] KOWALSKY M J, PRIESTLEY M J N. Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(3): 388-396.
- [38] PAVESE A, BOLOGNINI D, PELOSO S. FRP seismic retrofit of RC square hollow section bridge piers [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8(S1): 225-250.
- [39] LIGNOLA G P, PROTA A, MANFREDI G, et al. Experimental performance of RC hollow columns confined with CFRP [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(1): 42-49.
- [40] LIGNOLA G P, PROTA A, MANFREDI G, et al. Deformability of reinforced concrete hollow columns confined with CFRP [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(5): 629-637.

- [41] ISAKOVIC T, BEVC L, FISCHINGER M. Modeling the cyclic flexural and shear response of the R. C. hollow box columns of an existing viaduct[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(7): 1120-1138.
- [42] 弓俊青,朱 晞. 钢筋混凝土空心圆端墩柱截面弯曲承载力和延性的分析研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(2): 11-16.
GONG Jun-qing, ZHU Xi. Study on flexural capacity and ductility of reinforced concrete piers with hollow round-nose section[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(2): 11-16. (in Chinese)
- [43] 褚 一,李忠献. 基于 FENAP 平台的 RC 高桥墩破坏过程模拟及分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2010, 30(4): 90-96.
ZHUO Yi, LI Zhong-xian. Simulation and analysis of damage process of RC high bridge piers based on FENAP platform[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2010, 30(4): 90-96. (in Chinese)
- [44] 孙治国,郭 迅,王东升,等. 钢筋混凝土空心墩延性变形能力分析[J]. *铁道学报*, 2012, 34(1): 91-96.
SUN Zhi-guo, GUO Xun, WANG Dong-sheng, et al. Analysis on ductile deformability of hollow reinforced concrete bridge piers[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(1): 91-96. (in Chinese)
- [45] 孙治国,王东升,郭 迅,等. 矩形空心墩变形能力及塑性铰区约束箍筋用量[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(3): 95-102.
SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, GUO Xun, et al. Deformation capacity and amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of rectangular hollow bridge piers[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2012, 34(3): 95-102. (in Chinese)
- [46] 刘 林. 高墩大跨铁路桥梁抗震设计与减震控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2004.
LIU Lin. Investigation of seismic design and seismic response control of high-pier-and-long-span railway bridges[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [47] 郝文秀,钟铁毅. 活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(6): 82-86.
HAO Wen-xiu, ZHONG Tie-yi. Experimental study and numerical analysis of the ductility of reactive powder concrete piers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(6): 82-86. (in Chinese)
- [48] 宗周红,陈树辉,夏樟华. 钢筋混凝土箱型高墩双向拟静力试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(4): 369-374.
ZONG Zhou-hong, CHEN Shu-hui, XIA Zhang-hua. Bi-axial quasi-static testing research of high hollow reinforced concrete piers[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(4): 369-374. (in Chinese)
- [49] 李志兴. 高墩大跨混凝土刚构桥抗震性能研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2010.
LI Zhi-xing. Study on seismic performance of concrete rigid frame bridge with long spans and high piers[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)
- [50] LEE D H, ELNASHAI A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(5): 546-553.
- [51] XU Shi-yu, ZHANG Jian. Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011, 40(3): 315-337.
- [52] FISCHER G, LI V C. Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions[J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(1): 25-35.
- [53] 徐世焯,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 45-60.
XU Shi-lang, LI He-dong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [54] SAHIDI M S, O'BRIEN M, SADROSSADAT-ZADEH M. Cyclic response of concrete bridge columns using superelastic nitinol and bendable concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(1): 69-77.
- [55] 崔 迪,李宏男,宋钢兵. 形状记忆合金混凝土柱动力特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 150-154.
CUI Di, LI Hong-nan, SONG Gang-bing. Experimental study on dynamic properties of SMA reinforced concrete columns[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 150-154. (in Chinese)
- [56] HINES E M, DAZIO A, SEIBLE F. Structural testing of new East Bay Skyway piers[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(1): 103-112.
- [57] HAN T H, STALLINGS J M, CHO S K, et al. Behaviour of a hollow RC column with an internal tube[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(1): 25-38.
- [58] WANG J C, OU Y C, CHANG K C, et al. Large-scale seismic tests of tall concrete bridge columns with precast segmental construction[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(12): 1449-1465.
- [59] OU Y C, WANG P H, TSAI M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(3): 255-264.
- [60] 司炳君,孙治国,王东升,等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(4): 1-9.
SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(4): 1-9. (in Chinese)