

地震作用下 RC 薄壁空心墩抗剪强度比较研究

孙治国^{1,2} 王东升^{1,2} 郭迅³ 王涛³

(1. 大连海事大学, 辽宁大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁大连 116026;

3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 开展钢筋混凝土薄壁空心桥墩抗震问题的研究, 对保证大型桥梁结构抗震安全具有重要意义。首先设计 2 个矩形薄壁空心墩试件, 分别进行定轴力和变轴力下的拟静力试验, 发现试件前期破坏以弯曲和剪切断裂为主, 其后发生混凝土压碎脱落、纵筋屈曲等现象; 最终试件薄壁发生突然的失稳破坏, 引起桥墩倒塌。基于薄壁空心墩试验结果对国内外主要桥梁抗震设计规范和学者们提出的抗剪分析模型进行对比分析, 认为我国《公路桥梁抗震设计细则》和欧洲 Eurocode 8 规范较为准确的计算了各试件抗剪强度或得到偏于保守的结果, 可用于薄壁空心墩的抗剪设计; UCSD 模型和 Aschhiem 模型高估了试件的抗剪能力, 不适合于对薄壁空心桥墩的抗剪强度分析, 而提出的改进的 UCSD 模型很好的预测了薄壁空心墩的抗剪强度。修正的压力场理论 (Modified Compression Field Theory, MCFT) 计算的薄壁空心墩抗剪强度最为准确。

关键词: 薄壁空心墩; 拟静力试验; 抗剪强度; 弯剪破坏; 倒塌

中图分类号: U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2013)12-0081-09

Comparative study on shear strength of RC thin-walled hollow bridge piers under seismic effect

Sun Zhiguo^{1,2} Wang Dongsheng^{1,2} Guo Xun³ Wang Tao³

(1. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering, Liaoning Province, Dalian 116026, China;

3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Research on seismic behavior of RC thin-walled hollow bridge piers is of great significance to the seismic safety of large bridges. Two rectangular RC thin-walled hollow pier specimens were designed and tested. One specimen was subjected to constant axial load and cyclic lateral displacements, and the other was subjected to varying axial load and cyclic lateral displacements. The test results indicate that flexural and shear concrete cracks developed firstly and then concrete spalling and longitudinal bar buckling were observed in regions close to the bottom of specimens. The ultimate performance of specimens is dominated by local compression flange buckling failure of pier walls and specimens may collapse suddenly. The shear strength analysis models from bridge seismic design codes and literatures were evaluated and compared based on available test results for RC thin-walled hollow bridge piers. It is found that both Chinese bridge seismic design code and Eurocode 8 code give good or conservative predictions for shear strength of specimens, and hence they are applicable to the seismic design of thin-walled hollow bridge piers. However, the UCSD and Aschhiem models may overestimate the shear strength of specimens so that they could be inappropriate to the shear strength analysis of piers. Comparatively, the proposed modified UCSD model may predict the shear strength of thin-walled piers very well, while the Modified Compression Field Theory (MCFT) gives the most accurate predictions of shear strength for the piers with thin walls.

Keywords: thin-walled hollow bridge pier; quasi-static tests; shear strength; flexural-shear failure; collapse

E-mail: dswang@dlmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51008041, 51178071), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013605), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0751)和中央高校基本科研业务费(3132013068, 3132013315)

作者简介: 孙治国, 博士, 讲师

收稿日期: 2012-07-30

引 言

定义空心墩壁厚与一半截面宽度的比值为壁厚比。壁厚比小于 0.20 的薄壁空心墩在我国大型铁路、公路桥梁工程中占有相当大的比重。如南昆铁路板

其二号大桥矩形主墩纵桥向壁厚比约为 0.18^[1]，遂渝铁路草街嘉陵江大桥、温福铁路白马河大桥中，大量圆端型空心墩横桥向壁厚比均在 0.20 以下，最小达 0.125。大型公路桥梁方面，壁厚比在 0.20 以内的薄壁空心墩应用则更为广泛，沪蓉西高速双河口特大桥、沪蓉西高速龙潭河特大桥、昭待高速牛栏江特大桥、都汶高速庙子坪特大桥、元磨高速红河大桥等特大型桥梁中，大量空心桥墩壁厚比低于 0.15，最小甚至接近 0.10^[2]。

尽管国内外针对空心桥墩抗震问题进行了众多的理论和试验研究工作，但针对薄壁空心墩进行的研究则严重不足。孙治国^[2]统计分析了国内外学者完成的 74 个矩形空心墩试验数据分布情况，发现仅 Pinto 完成了 1 个壁厚比小于 0.20 的薄壁墩拟静力试验^[3]，其余试件从本质上讲均属于厚壁墩范畴，其地震破坏机理也接近于实心桥墩，掩盖了薄壁空心墩抗震问题的特殊性，对薄壁墩抗震能力的把握需要结合更多有效的试验数据进行说明。

自 1994 年美国 Northridge 地震中大量桥梁结构由于桥墩剪切破坏引起倒塌后^[4-5]，桥墩抗剪问题的研究一直是桥梁抗震中的热点课题^[6-8]。由于截面严重削弱造成空心墩成为典型的“强弯弱剪”构件，薄壁空心墩的地震抗剪问题尤为值得关注。孙治国^[2]对国内外完成的空心墩试验进行的总结表明，不少轴压比在 0.3 以下，剪跨比在 3.0 以上的空心墩仍发生了剪切或弯剪破坏，且发生剪切破坏的空心墩试件剪跨比最大可达 4.27。而目前国内外针对空心墩抗剪问题进行的少量研究仅针对厚壁墩试件，对薄壁空心墩

抗剪问题的研究尚未涉及。我国目前桥梁抗震设计的主要依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[9]和《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[10]均未对空心墩的抗剪问题给予特别研究。《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)直接取美国 Caltrans 规范^[11]的下限值，给出了桥墩抗剪设计的保守估计；而《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)则根本就没有针对桥墩抗剪计算问题的说明。

针对这一背景，本文首先设计 2 个矩形薄壁空心墩试件，分别通过定轴力和变轴力拟静力试验研究其抗震能力，揭示薄壁空心墩的地震破坏机理，并结合 Pinto 等^[3]完成的 1 个矩形薄壁空心墩，Ranzo 与 Priestley^[12]完成的 3 个圆形薄壁空心墩试验结果，对国内外主要规范和学者们建议的桥墩抗剪分析模型进行对比验证。

1 矩形薄壁空心墩抗震拟静力试验

1.1 试件设计及加载历程

以云南省牛栏江特大桥主桥桥墩为工程背景，设计 2 个完全相同的薄壁空心墩试件，分别进行定轴力和变轴力拟静力加载试验，试件设计如图 1 所示。试件自侧向加载点至墩底高度为 4000mm，墩身截面尺寸为 1000mm × 890mm，空心部分尺寸为 860mm × 750mm，模型壁厚为 70mm，试件加载方向壁厚比仅为 0.14。

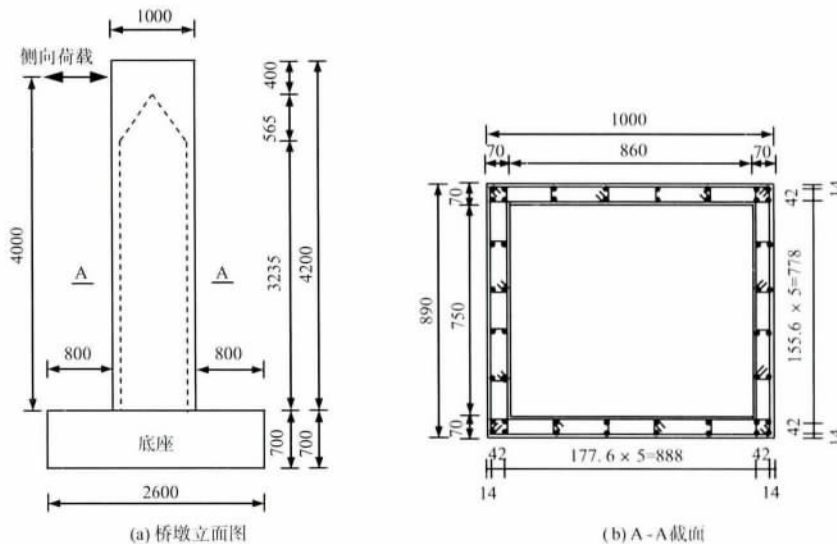
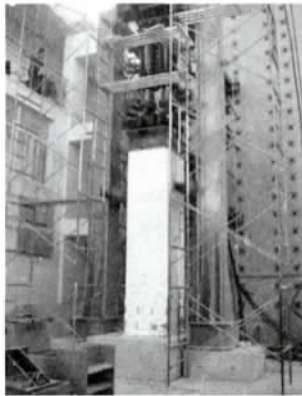


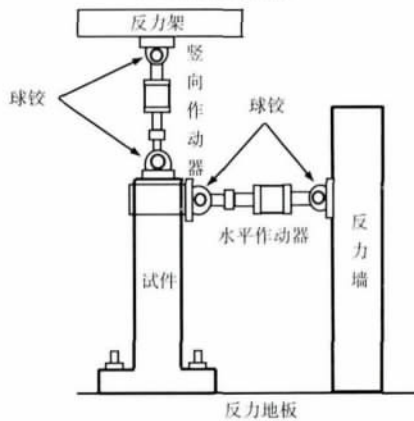
图 1 薄壁墩设计详图

Fig. 1 Design details of thin-walled hollow bridge piers

墩身配筋情况为:纵筋为 48 根直径 8mm 的三级钢筋,箍筋为直径 2.4mm 的镀锌铁丝,沿截面薄壁均呈封闭状配置,沿墩高方向箍筋间距为 50mm。箍筋设置 135°弯钩,深入核心混凝土长度大于 20mm。自纵筋外缘计算,混凝土保护层厚度为 10mm。试验前进行了材料力学性能的测试工作,实测墩身混凝土 150mm 立方体试块抗压强度为 26.3MPa,纵筋及箍筋屈服强度分别为 437MPa 与 374MPa。



(a) 加载装置照片



(b) 加载装置示意图

图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup

试验加载装置如图 2 所示,采用拟静力加载方式,定轴力试件加载历程为:试件轴压比固定为 0.2,试件侧向加载按位移控制,分别按 5mm,10mm,20mm,30mm,···施加位移,每个位移下循环 3 次,直至试件破坏。对变轴力加载试件,侧向位移加载历程与定轴力试件相同,且侧向位移为 5mm 时,试件轴压比保持固定在 0.2,其后,开始变轴力加载,加载规则为:在正向位移最大处,轴压比为 0.3,在负向位移最大处,轴压比为 0.1,在位移为 0 处,轴压比为 0.2,各点之间按线性变化。

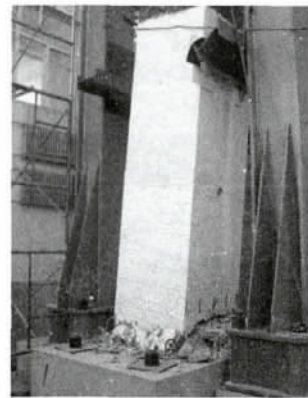
1.2 薄壁墩破坏现象与破坏过程

定轴力加载试件的破坏过程可概括为:当侧向位移为 10mm 时,与侧向力垂直的 2 个平面下部混凝土

首先产生水平弯曲裂缝并迅速向两侧截面延伸为剪切斜裂缝,随侧向位移增大,混凝土开裂高度上升,裂缝宽度增加。其后,桥墩底部混凝土掉渣并压碎脱落,纵筋屈曲。试件在进行第 2 次负向 90mm 的加载过程中发生了突然的倒塌,破坏现象表现为:受压侧混凝土突然压溃,并伴随着明显的破坏声,桥墩侧向承载力突然下降,试验结束。图 3(a) 为定轴力试件倒塌后的破坏情况。



(a) 定轴力试件



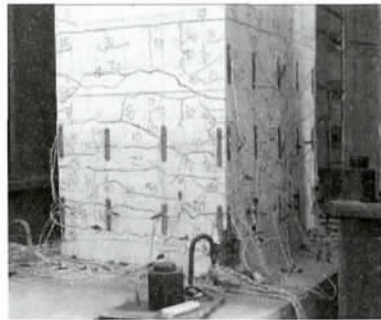
(b) 变轴力试件

图 3 试件倒塌后的破坏情况

Fig. 3 Damage states of specimens after collapse

变轴力加载试件的破坏过程可概括为:当侧向位移增大到 10mm 时,与侧向力垂直的 2 个平面下部混凝土首先产生水平弯曲裂缝,并向与侧向力平行的平面延伸为剪切斜裂缝。随侧向位移增大,裂缝开裂高度增加、宽度增大。其后,桥墩底部混凝土压碎脱落,纵筋屈曲。与定轴力加载试件不同的是,由于轴压比不同(分别为 0.3 和 0.1),试件在 2 个方向上的破坏明显不同,试件达到负向最大位移时(对应轴压比为 0.1),此时受拉侧最大裂缝宽度、卸载后的残余裂缝宽度,以及混凝土开裂的高度,均比试件在正向最大位移时(对应轴压比为 0.3)混凝土受拉侧的开裂破坏现象更为显著,这主要是由于正向位移时的轴压比较大,对混凝土裂缝的开展起到了抑制作用。另外,试

件在正向最大位移时受压侧混凝土的压碎破坏和纵筋屈曲破坏要比负向最大位移时受压侧的破坏更为明显。试件在第 2 次正向加载至 80mm 时发生了突然的倒塌,破坏现象表现为:混凝土突然压溃,并引起整个试件发生薄壁的失稳破坏,桥墩侧向承载力突然下降,试验结束。整个倒塌破坏过程约持续了 13s,倒塌结束后试件底部 600mm 范围内成为废墟,整个试件高度约下降了 500mm。图 3(b) 为变轴力试件倒塌后的破坏情况,图 4 为摄像机记录到的变轴力试件倒塌破坏过程。



(a) $t=0s$



(b) $t=3s$



(c) $t=6s$



(d) $t=9s$



(e) $t=13s$

图 4 变轴力试件的破坏过程

Fig. 4 Collapse process of specimen undervarying axial load

分析薄壁墩的倒塌破坏机理,认为主要是由于薄壁本身的稳定性问题突出,在地震反复荷载下,由于混凝土的拉断、压碎和纵筋的屈曲等造成薄壁损伤的逐步累积,最终由于薄壁失稳而造成了整个桥墩的倒塌。当然,与定轴力加载试验结果相比,变轴力加载试件的倒塌破坏更为剧烈,这可能与倒塌时的轴压比较高有关。

1.3 薄壁墩混凝土开裂情况

汶川大地震中,庙子坪大桥深水薄壁空心桥墩发生开裂破坏,并由此引起了人们对水下混凝土开裂破坏规律和裂缝控制问题的重视^[13]。试验过程中采用读数显微镜测量了桥墩试件混凝土裂缝的发展情况,包括最大位移时水平弯曲裂缝和剪切斜裂缝宽度,以及卸载后的残余裂缝开展情况,图 5 为桥墩试件裂缝宽度随墩顶侧向位移的变化关系。可以发现,随侧向位移增大和桥墩破坏的加剧,裂缝宽度与残余裂缝宽度均明显增大,但值得关注的现象为,尽管桥墩剪跨比已经达到 4.0,对于实心桥墩而言,一般发生弯曲破坏,而本文的空心墩试件,剪切斜裂缝的出现和发展程度与水平弯曲裂缝几乎一致,这也证实了薄壁空心墩的抗剪薄弱性。

另外关注试件的残余裂缝宽度,当墩顶位移小于 20mm 时(对应桥墩高度的 0.5%),卸载后试件的残余裂缝宽度均肉眼不可见,而试件倒塌破坏前的残余裂缝宽度最大为 0.4mm,远小于汶川地震后庙子坪大桥水下薄壁空心墩的裂缝宽度^[14]。造成这种差异的原因有待于进一步研究。

图 6 为定轴力试件试验结束时和变轴力试件倒塌破坏前的剪切斜裂缝开展情况,可发现剪切裂缝与桥墩轴线的夹角约在 60°左右。另外需要注意,Pinto 完成的 A70 薄壁矩形空心墩剪切裂缝与桥墩轴线的夹角也基本在 60°左右^[3]。

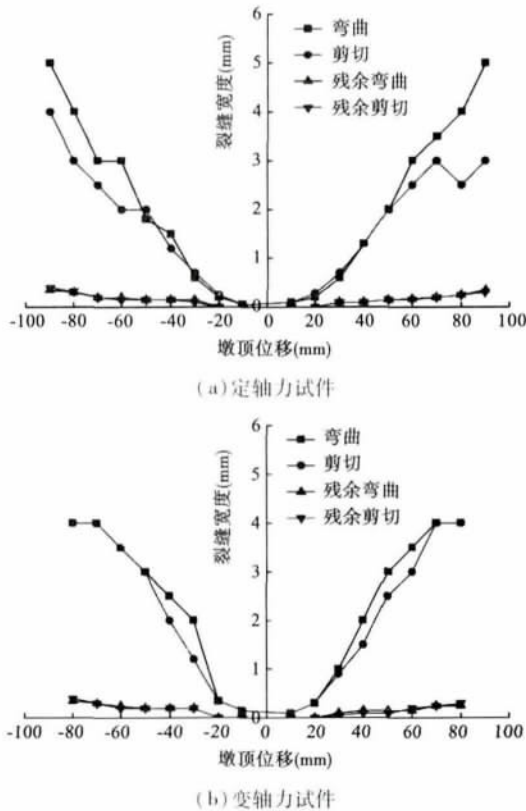
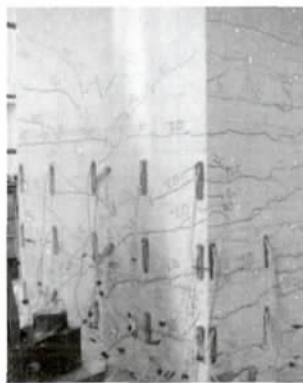


图 5 裂缝宽度随侧向位移的变化关系
 Fig. 5 Relationship between crack width and lateral displacement of pier specimens



(a) 定轴力试件



(b) 变轴力试件

图 6 试件的剪切裂缝

Fig. 6 Shear cracks of specimens

1.4 试件滞回曲线

图 7 为定轴力与变轴力试件的侧向力 F -侧向位移 Δ 滞回曲线。需要说明,对本试验的加载装置而言(图 2)加载过程中轴力会产生一个水平分量,从而使得水平力传感器直接采集到的侧向荷载降低,本文试验结果已消除了这种误差。图 7 表明,无论是定轴力试件还是变轴力加载试件,滞回曲线均表现出一定的“捏拢效应”,这可能是由于试件剪切变形所占比例较大造成的。另外,试件倒塌前侧向承载力几乎未表现出下降的趋势,表现为脆性突然的倒塌。

表 1 为试件达到的极限变形能力,可以看出,定轴力与变轴力试件倒塌前所达到的最大变形分别为 90mm 和 80mm,对应的位移延性系数分别为 7.6 和 9.2,极限位移角分别为 2.25% 和 2.0%。尽管从这些指标来看,薄壁空心墩已经达到了较为理想的变形能力,但由于薄壁失稳而引起的脆性倒塌破坏形态仍值得关注。

综上,薄壁空心墩的地震破坏过程可概括为 2 个阶段:倒塌前以弯剪破坏为主的阶段和由于薄壁失稳引起的倒塌破坏阶段。对倒塌前而言,仍应强调薄壁空心墩的抗剪薄弱性,而薄壁墩倒塌阶段表现出的脆性破坏模式也应引起足够重视。

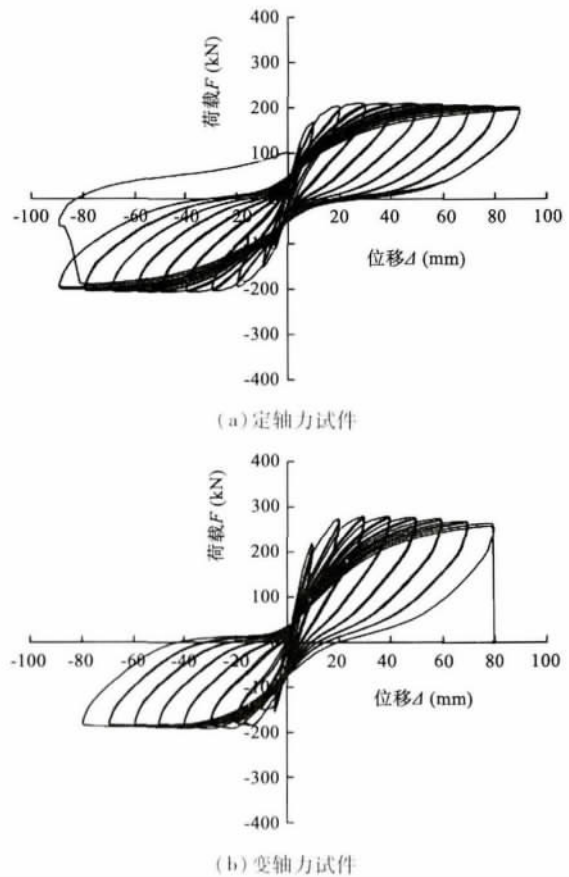


图 7 试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of pier specimens

表 1 试件的变形能力
Table 1 Deformation capacity of specimens

试件	屈服位移 (mm)	极限位移 (mm)	位移延性 系数	极限位移角 (%)
定轴力	11.8	90	7.6	2.25
变轴力	8.7	80	9.2	2.0

2 薄壁空心墩抗剪强度对比分析

2.1 主要抗剪分析模型介绍

目前国内外规范和学者们提出的桥墩抗剪计算模型主要结合实心桥墩试验和分析得出,为验证各模型对薄壁空心墩的适用性,结合美国 Caltrans 规范^[11]、欧洲 Eurocode 8 规范^[15]、我国《公路桥梁抗震设计细则》^[9]、UCSD 模型^[16]、Aschhiem 模型^[17]和修正的压力场理论(Modified Compression Field Theory, MCFT),对本文进行的 2 个矩形空心墩试验数据和 Pinto 的 A70 矩型空心墩试件^[3]、以及 Ranzo 与 Priestley^[12]完成的 3 个圆形薄壁空心墩试件的抗剪承载力进行对比分析,分别如图 8、图 9 所示。各抗剪模型如下文所述,关于 MCFT 理论的详细论述见文献[18]限于篇幅,本文不再赘述。

Pinto 的 A70 试件为矩形薄壁墩,壁厚比为 0.153,轴压比为 0.09,剪跨比为 2.37,试件呈弯剪破坏形态。Ranzo 与 Priestley 完成的 3 个圆形薄壁空心墩分别为 HS1、HS2 和 HS3 试件,壁厚比分别为 0.195 和 0.182 两种,轴压比分别为 0.05 和 0.15 两种,剪跨比均为 2.5。除 HS1 试件为弯曲破坏外,其余均为弯剪破坏。

美国 Caltrans 规范规定的桥墩塑性铰区抗剪强度为^[11]:

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = v_c \times (0.8A_g) \quad (2)$$

$$v_c = Factor1 \times Factor2 \times \sqrt{f_c'} \leq 0.33\sqrt{f_c'} \quad (3)$$

$$Factor1 = 0.025 \leq \frac{\rho_v f_{yt}}{12.5} + 0.305 - 0.083\mu_\Delta < 0.25 \quad (4)$$

$$Factor2 = 1 + \frac{P}{13.8A_g} < 1.5 \quad (5)$$

对圆形截面墩:

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yt} D'}{s} \quad (6)$$

对矩形截面墩:

$$V_s = \frac{A_{sh} f_{yt} b'}{s} \quad (7)$$

式中: f_c' 为混凝土抗压强度; ρ_v 为体积配箍率; f_{yt} 为箍

筋屈服强度; μ_Δ 为位移延性系数; P 为轴力; A_g 为桥墩截面面积; A_{sh} 为单根箍筋面积; D' 为自箍筋中心计算的截面核心直径尺寸; s 为箍筋竖向间距; A_{sh} 为计算方向上的箍筋面积; b' 为加载方向上的截面有效宽度。

欧洲 Eurocode 8 规范的桥墩塑性铰区抗剪模型为^[15]:

$$V_n = V_c + V_s \quad (8)$$

$$V_c = 0, \eta_k \leq 0.1 \quad (9)$$

$$V_c = 2.5 \times (0.035f_c') A_c, \eta_k > 0.1 \quad (10)$$

式中: η_k 为轴压比; A_c 为截面核心面积; V_s 的计算可按照 Caltrans 规范进行。

我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008) 对桥墩塑性铰区抗剪强度的规定基本取美国 Caltrans 规范的下限值,可表示为^[9]:

$$V_n = V_c + V_s \quad (11)$$

$$V_c = 0.023\sqrt{f_c'} A_c \quad (12)$$

对圆形截面墩:

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yt} D}{s} \leq 0.67\sqrt{f_c'} A_c \quad (13)$$

对矩形截面墩:

$$V_s = \frac{A_{sh} f_{yt} b}{s} \leq 0.67\sqrt{f_c'} A_c \quad (14)$$

式中: D 为圆形墩柱截面直径; b 为沿加载方向上的截面宽度。

Priestley 等提出的桥墩抗剪计算模型(UCSD 模型) 可表述为^[16]:

$$V_n = V_c + V_p + V_s \quad (15)$$

$$V_c = k\sqrt{f_c'} (0.8A_g) \quad (16)$$

$$V_p = \frac{D - c}{2L} P \quad (17)$$

对圆形截面墩柱:

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yt} D'}{s} \cot\theta \quad (18)$$

对矩形截面墩柱:

$$V_s = \frac{A_{sh} f_{yt} b'}{s} \cot\theta \quad (19)$$

式中: θ 为剪切裂缝与墩柱轴线的夹角,取为 30°; c 为截面受压区高度; L 为桥墩高度; k 为考虑混凝土抗剪强度退化系数,可取为:

$$k = 0.29 \quad \mu_\Delta < 2.0 \quad (20)$$

$$k = 0.29 - 0.095(\mu_\Delta - 2) \quad 2.0 \leq \mu_\Delta \leq 4.0 \quad (21)$$

$$k = 0.1 \quad \mu_\Delta > 4.0 \quad (22)$$

Aschhiem 等提出的抗剪模型为^[17]:

$$V_n = V_c + V_s \quad (23)$$

$$V_c = 0.29 \left(k + \frac{P}{14A_g} \right) \sqrt{f_c} (0.8A_g) \quad (24)$$

$$1.0 \geq k = \frac{4 - \mu_\Delta}{3} \geq 0 \quad (25)$$

V_s 计算同 UCSD 模型。

2.2 薄壁空心墩抗剪强度对比分析

首先观察各试件试验结果与国内外主要桥梁抗震设计规范的对比情况,如图 8 所示。可以发现与定轴力试件、变轴力试件和 HS1 试件的试验结果相比, Caltrans 规范计算的初始抗剪强度明显偏高,但随位移延性系数增大, Caltrans 规范计算的抗剪强度迅速减小并与试验结果相交,在大位移下表现出较好的预测效果。对 HS2 和 HS3 试件, Caltrans 规范计算的初始抗剪强度与试验结果较为吻合。对 A70 试件, Caltrans 规范计算的抗剪强度始终位于滞回曲线上方,高估了试件的抗剪强度。我国《公路桥梁抗震设计细则》规定的抗剪强度实质为 Caltrans 规范的下限值,从图 8 也可以看出除 A70 试件计算值与试验结果基本吻合外,对其余试件的抗剪强度得到了偏于保守的估计。对 Eurocode 8 规范,计算的变轴力试件和 A70 试件的抗剪强度与试验结果吻合很好,但略高估了定轴力试件的抗剪强度,低估了 3 个圆形薄壁墩的抗剪能力。

考虑到钢筋混凝土结构抗剪强度分析的复杂性和分析模型的离散性,可认为我国《公路桥梁抗震设计细则》和欧洲 Eurocode 8 规范仍可用于薄壁空心墩的抗剪设计。

观察各试件试验结果与各学者们提出的抗剪分析模型的对比情况,如图 9 所示,可发现 UCSD 模型严重高估了各试件的抗剪强度,Aschheim 模型虽然较 UCSD 模型有所改进,但总体来看,计算的抗剪强度仍偏高。即 UCSD 模型和 Aschheim 模型不适合于对薄壁空心墩试件抗剪能力的分析。

相对于各规范和学者们提出的抗剪模型,MCFT 理论计算的空心墩抗剪强度最为准确。需要说明的是,无论是各国抗震设计规范或 UCSD 模型、Aschheim 模型,其抗剪强度计算公式仍主要基于试验结果的统计分析获得。而 MCFT 理论基于开裂混凝土的受拉和受压本构关系,根据平衡方程、变形协调条件以及钢筋、混凝土的本构关系经复杂计算过程获得,有其严格的物理意义和推导过程,因此其计算的抗剪强度最为准确。

补充一点,根据 Priestley 等的研究,对发生弯剪或剪切破坏的桥墩试件对比其抗剪强度才有意义,本文的 HS1 试件尽管发生了弯曲破坏,但对于薄壁墩这一特殊结构形式,其剪切变形成分可达总变形的 30%,因此对其进行抗剪分析仍是合适的^[12]。

2.3 薄壁空心墩抗剪强度分析的改进模型

UCSD 模型在实心钢筋混凝土墩柱的抗剪分析中具有非常好的精度并获得了广泛应用^[16],本文根据试验结果对 UCSD 模型进行改进,使之适用于薄壁空心墩的抗剪分析。

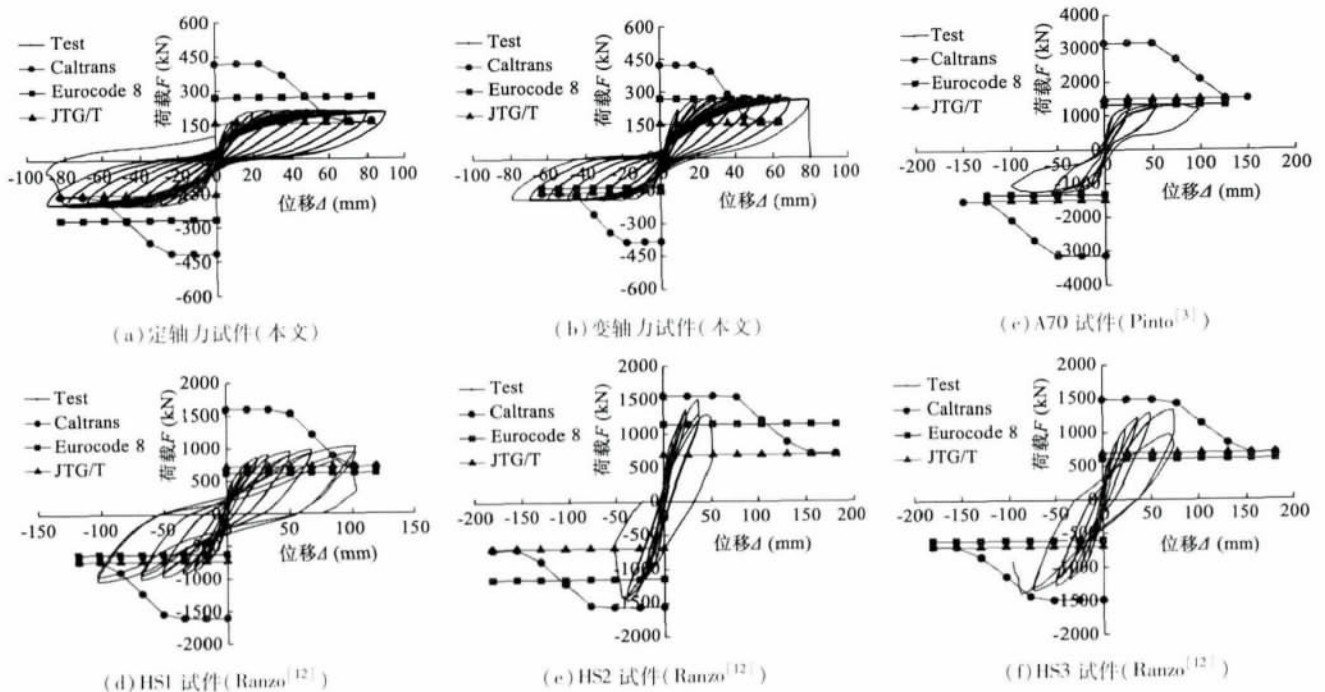


图 8 薄壁墩抗剪强度分析—与国内外桥梁抗震规范的对比

Fig. 8 Analysis of shear strength of hollow bridge piers—compared with bridge seismic design codes

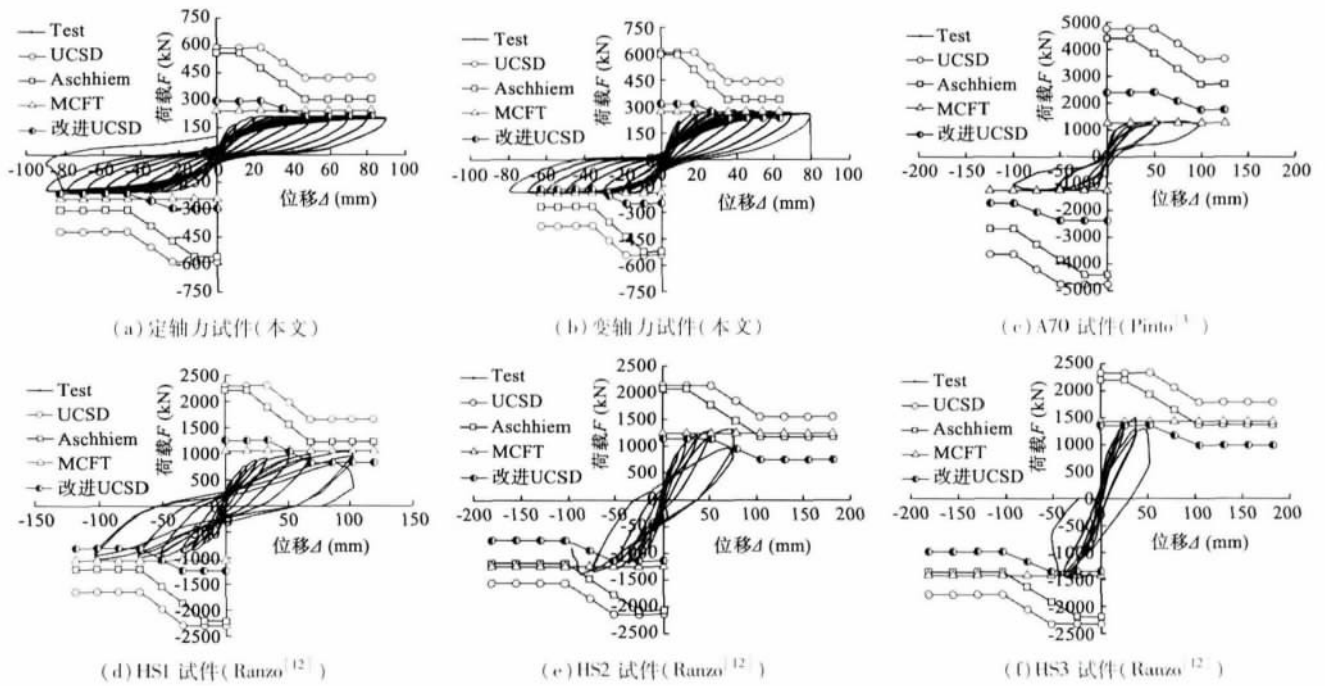


图 9 薄壁墩抗剪强度分析与各抗剪分析模型的对比

Fig. 9 Analysis of shear strength of hollow bridge piers—compared with shear analysis model

UCSD 模型的抗剪强度主要由 3 部分组成: 混凝土的贡献 V_c 、轴力的贡献 V_p 和箍筋的贡献 V_s 。本文仍借鉴 UCSD 模型的公式形式而仅对个别参数进行改进。首先考虑 V_c 。对矩形空心墩试件, 可认为腹板承受剪力而翼缘主要承受拉压应力, 因此抗剪分析时截面面积 A_g 应取为腹板部分的面积; 对圆形空心墩试件暂取为总面积的 2/3。

对箍筋的贡献 V_s , 由于本文试验及 Pinto 的 A70 试件试验结果均表明, 剪切裂缝与空心墩轴线的夹角约为 60° , 而 UCSD 模型取为 30° , 严重高估了箍筋的抗剪贡献, 因此建议对空心墩试件按 60° 进行计算。

对轴力的贡献 V_p , 仍按照 UCSD 模型计算。改进模型计算的空心墩抗剪强度及与试验结果的对比如图 9 所示。可以看出, 改进模型除计算的 A70 试件抗剪强度略偏高外, 其余薄壁空心墩试件的抗剪强度与试验结果非常吻合, 在低位移延性下, 试件尚未达到极限抗剪能力, 因此改进模型计算的抗剪强度在滞回曲线上方, 在高位移延性下, 改进模型计算的抗剪强度逐渐降低并与试验滞回曲线相交, 证实了改进模型的准确性。

3 结论

为研究薄壁空心桥墩的抗震能力并评价其抗剪分析模型, 本文首先设计了 2 个矩形薄壁空心墩试件, 分别通过定轴力和变轴力下的拟静力试验, 揭示了薄

壁空心桥墩的地震破坏机理。然后利用本文试验和其他学者完成的薄壁空心墩试验结果, 结合国内外主要桥梁抗震规范和学者们提出的抗剪分析模型, 对薄壁空心墩试件的抗剪强度进行了对比分析, 主要结论为:

(1) 矩形薄壁空心墩试件的破坏过程基本表现为 2 个阶段, 倒塌破坏前以弯-剪破坏为主的阶段和倒塌破坏阶段。在弯-剪破坏阶段, 试件的破坏主要包括加载早期的水平弯曲开裂和剪切开裂, 以及其后发生的混凝土掉渣、压碎脱落, 纵筋屈曲等现象; 在试件前期损伤的基础上造成薄壁发生突然的失稳破坏, 从而导致了试件最终的倒塌; 薄壁空心墩的抗剪薄弱性和脆性倒塌破坏模式宜引起足够重视。

(2) 我国《公路桥梁抗震设计细则》和欧洲 Eurocode 8 规范较为准确的计算了各试件抗剪强度或得到了偏于保守的结果, 可用于薄壁空心墩的抗剪设计。

(3) 美国 Caltrans 规范可能会高估薄壁空心墩在低位移延性下的抗剪强度, UCSD 模型和 Aschhiem 模型均高估了试件的抗剪能力, 不适合于对薄壁空心桥墩的抗剪强度分析; 改进 UCSD 模型对薄壁空心墩的抗剪强度进行了非常准确的预测。

(4) 相对于各规范公式和其他学者们提出的抗剪分析模型, 修正的压力场理论 (MCFT) 计算的薄壁空心墩抗剪强度最为准确。

强调一点, 目前国内外对薄壁空心墩抗震问题的

研究,总体上看属于起步阶段。本文基于试验结果对其地震破坏过程、抗剪强度计算模型等进行了初步的对比分析。但限于可供参考的试验数据总体偏少,关于薄壁空心墩抗震更普遍的结论宜结合更多的试验数据进行进一步的对比分析。

参考文献

- [1] 陈俊真,曾昭强,许智焰. 一座铁路预应力混凝土平弯桥——南昆铁路板其二号大桥[J]. 桥梁建设,1997(3):34-37,40(Chen Junzhen, Zeng Zhaoqiang, Xu Zhiyan. A horizontally curved beam bridge—Banqi No. 2 bridge on Naning Kunming railway line [J]. Bridge Construction, 1997(3):34-37,40(in Chinese))
- [2] 孙治国. 钢筋混凝土桥墩抗震变形能力研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012(Sun Zhiguo. Research on the seismic deformation capacity of RC bridge columns[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012(in Chinese))
- [3] 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 & Structural Dynamics, 2003, 32(13):1995-2012
- [4] Moehle J, Fennes G, Mayes R, et al. Highway bridges and traffic management [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(S2):287-372
- [5] Housner G W, Thiel C C. The continuing challenge: report on the performance of state bridges in the Northridge earthquake [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4):607-636
- [6] Jaradat O A, Mclean D I, Marsh M L. Performance of existing bridge columns under cyclic loading—Part 1: experimental results and observed behavior [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6):695-704
- [7] Jarad O A, Mclean D I, Marsh M L. Performance of Existing Bridge Columns under Cyclic Loading—Part 2: analysis and comparison with theory [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1):57-67
- [8] 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 Dongsheng, Si Bingjun, Sun Zhiguo, 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))
- [9] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008(JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communication Press, 2008(in Chinese))
- [10] GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006(GB 50111—2006 Code for seismic design of railway engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2006(in Chinese))
- [11] Caltrans seismic design criteria [S]. Version 1.2. Sacramento, California: California Department of Transportation, 2001
- [12] Ranzo G, Priestley M J N. Seismic performance of large RC circular hollow columns [C]//Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, 2000
- [13] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377-1387(Zhuang Weilin, Liu Zhenyu, Jiang Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7):1377-1387(in Chinese))
- [14] 姚红兵,蒋劲松,黄麟. 庙子坪岷江大桥震害与修复加固[J]. 西南公路,2008(4):36-40
- [15] Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures—Part 2: bridges [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1994
- [16] Priestley M N, Verma R, Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8):2310-2329
- [17] Aschheim M, Moehle J P, Werner S D. Deformability of concrete columns [R]. Sacramento, California: California Department of Transportation, Division of Structures, 1993
- [18] Bentz E C, Vecchio F J, Collins M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(4):614-623

孙治国(1980-)男,博士,讲师。主要从事桥梁与结构工程抗震研究。

王东升(1974-)男,博士,教授。主要从事桥梁抗震研究。

郭迅(1967-)男,博士,研究员。主要从事结构抗震与健康监测研究。

王涛(1977-)男,博士,研究员。主要从事结构抗震研究。