

文章编号: 1001-8360(2012)01-0091-06

# 钢筋混凝土空心墩延性变形能力分析

孙治国<sup>1</sup>, 郭 迅<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 梁永朵<sup>1</sup>

(1. 中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 基于纤维梁柱单元建立钢筋混凝土空心墩滞回分析模型, 与试验结果对比验证模型准确性。在此基础上讨论纵筋配筋、壁厚、混凝土强度、剪跨比等因素对空心墩延性变形能力影响。研究表明: 对剪跨比大于 7.0 的高墩, 提高纵筋配筋率可有效增强其延性变形能力; 而对于剪跨比小于 5.0 的中低墩, 提高纵筋配筋率对其延性变形能力不利; 在轴压比和纵筋配筋率一定情况下, 空心墩壁厚对其延性变形能力影响不大, 而保持轴力和纵筋配筋量不变时, 增大壁厚可有效增加中低墩延性变形能力; 且在固定轴力下, 增大混凝土强度对提高中低墩延性变形能力效果显著。

**关键词:** 空心墩; 高墩; 延性变形能力; 纤维梁柱单元; 模拟分析

中图分类号: U443.22 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2012.01.016

## Analysis on Ductile Deformability of Hollow Reinforced Concrete Bridge Piers

SUN Zhi-guo<sup>1</sup>, GUO Xun<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>, LIANG Yong-duo<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The hysteretic analysis model of hollow reinforced concrete bridge piers was established on the basis of fiber beam-column elements and the accuracy of the model was verified by comparison with reliable experimental results. The influences of the longitudinal reinforcement, wall thickness, concrete compression strength and aspect ratio on the ductile deformability of hollow bridge piers were studied. It is found as follows: With high piers with the aspect ratio larger than 7.0, the ductile deformability can be effectively increased by raising the longitudinal reinforcement ratio; with low-height and medium-height piers with the aspect ratio less than 5.0, raising the longitudinal reinforcement ratio is unfavorable for the ductile deformability; the wall thickness has little influence on the ductile deformability of hollow piers with constant axial load ratios and longitudinal reinforcement ratios, however, when keeping the axial load and longitudinal reinforcement unchanged, pier wall thickening will better the ductile deformability of low-height and medium-height piers effectively; also, it is effective to increase the ductile deformability of low-height and medium-height hollow bridge piers by using high-strength concrete under constant axial loads.

**Key words:** hollow bridge piers; high piers; ductile deformability; fiber beam-column element; simulation

5.12 汶川大地震中庙子坪大桥深水空心桥墩开裂破坏, 由于水下修复难以施工、花费代价巨大而引起广泛关注<sup>[1]</sup>。进一步联系空心墩在我国西部高地震风

险区广泛应用与对其抗震性能认识缺乏, 开展空心桥墩抗震性能研究显得尤为迫切<sup>[2]</sup>。

钢筋混凝土空心墩抗震性能研究的开创性工作由结构抗震专家 Priestley 与 Park<sup>[3]</sup> 完成, 他们进行了一系列空心墩抗震拟静力试验研究及分析, 强调抗弯中性轴位置对保证空心墩延性抗震能力的重要性: 即空心墩内侧混凝土由于难以被有效约束, 中性轴位置距内侧混凝土越近, 混凝土越不易压碎破坏, 保证桥墩延

收稿日期: 2010-06-23; 修回日期: 2010-10-26  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008041); 地震行业科技专项经费(200808021); 地震工程与工程振动开放实验室开放基金(2009A07)  
作者简介: 孙治国(1980—), 男, 山东德州人, 博士研究生。  
E-mail: szg\_1999\_1999@163.com

性。Pinto 等<sup>[4]</sup>以欧洲典型未经抗震设计桥梁为原型,分别进行 1 个矩形空心矮墩和高墩大比例尺模型抗震拟静力试验,研究既有桥梁抗震薄弱环节并探讨抗震加固策略。Faira 等<sup>[5]</sup>采用考虑混凝土受拉和受压退化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 JRC (Joint Research Center, in Ispra, Italy) 4 个矩形空心墩进行详细建模,对弯曲变形起控制作用的高墩和剪切影响较大的矮墩滞回性能进行模拟分析。我国台湾学者结合岛内高速铁路计划,对空心墩抗震性能进行一系列研究,内容涉及空心墩中混凝土本构模型,小比例尺及足尺空心桥墩抗弯、抗剪能力,延性和耗能特征,空心墩抗震加固及震后修复技术,以及空心桥墩抗震分析模型等<sup>[6-10]</sup>。弓俊青和朱晞<sup>[11]</sup>通过对钢筋混凝土空心圆端墩柱截面弯矩-曲率分析,讨论轴压比、配箍率、直边长度和壁厚等因素对截面弯曲承载力与延性影响。郝文秀等<sup>[12]</sup>则通过拟静力试验研究活性粉末混凝土空心矩形桥墩抗震性能。鉴于空心墩由于混凝土截面削弱而带来的抗剪薄弱性,Calvi 等<sup>[13]</sup>、Isskovic 等<sup>[14]</sup>通过模型试验并与现有墩柱抗剪分析模型进行对比分析,研究空心墩地震抗剪能力。

国内外对空心墩延性抗震研究表明:空心墩延性抗震能力随轴压比提高而降低,随配箍率增加而增加,这与实心截面桥墩认识并无特殊之处。根据 Priestley 和 Park<sup>[3]</sup>研究,壁厚、纵筋配置、轴力、混凝土强度、截面形式等因素均会对空心墩抗弯中性轴位置产生显著影响,这增加了空心墩抗震分析难度。而纤维模型发展与应用则为弯曲变形控制钢筋混凝土结构模拟分析提供了有效解决途径<sup>[15-17]</sup>。本文基于纤维梁柱单元建立钢筋混凝土空心墩滞回分析模型,通过与试验结果对比验证模型准确性。在此基础上,基于滞回性能模拟进行空心墩延性变形能力影响因素参数分析,重点讨论纵筋配筋、壁厚、混凝土强度、剪跨比等因素对空心墩延性变形能力影响。

## 1 空心墩滞回性能分析的纤维模型及验证

### 1.1 空心墩拟静力试验概况

Zahn<sup>[18]</sup>进行了 6 个圆形截面空心墩抗震拟静力试验。本文以其中 Unit11 号试件为例进行验证。模型截面见图 1(a)。桥墩高 1 600 mm,对应剪跨比为 4.0,混凝土圆柱体抗压强度为 29.6 MPa,轴压比为 0.08,纵筋配筋率为 3.56%,体积配箍率约为 1.13%。

Pinto 等<sup>[4]</sup>进行 2 个大比例尺矩形空心截面桥墩抗震拟静力试验,分别为矮墩和高墩模型,由于高墩模

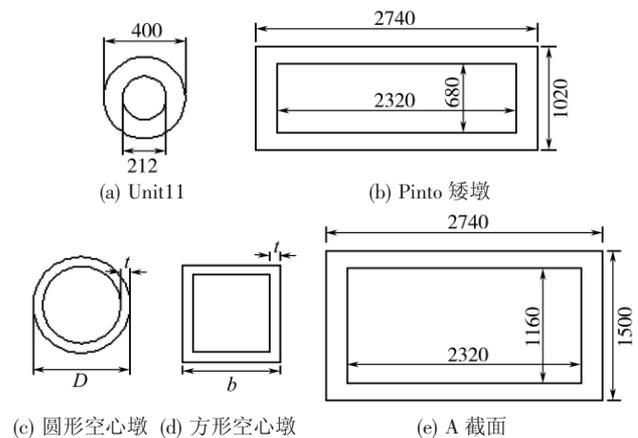


图 1 空心墩截面(单位:mm)

型在 3.5 m 高度处纵筋大量截断,本文以矮墩模型为例进行验证,矮墩模型截面见图 1(b)。模型墩高为 6.5 m,沿加载方向截面宽度为 2.74 m,对应剪跨比  $\lambda$  为 2.37;混凝土立方体抗压强度为 38.9 MPa,轴压比约为 0.1,纵筋配筋率约为 0.35%;模型箍筋配置非常少,体积配箍率均约为 0.09%。

需要说明的是:Unit11 号试件与 Pinto 矮墩模型均为弯曲破坏控制。

### 1.2 模型的验证

纤维梁柱单元基本概念及假定详见文献<sup>[15-17]</sup>。采用基于柔度法的纤维梁柱单元,混凝土本构关系采用改进的 Park 模型<sup>[19]</sup>。模型中,假定钢筋与混凝土之间完全黏结,不考虑剪切变形。分别建立 Unit11 号圆形空心墩与 Pinto 矩形空心矮墩滞回分析模型。进行滞回性能模拟参数敏感性分析,研究发现基于纤维梁柱单元对空心墩滞回性能进行模拟分析时,沿墩高仅在塑性铰区建立 1 个纤维梁柱单元计算精度可能不够,有必要沿墩高建立 3 个以上纤维梁柱单元,且在塑性铰区域至少建立 2 个梁柱单元。同时,纵筋采用双折线模型和 Menegotto-Pinto 模型<sup>[5]</sup>对模拟结果影响不大,考虑到 Menegotto-Pinto 模型会大大增加收敛难度,统一采用双折线模型。

Unit11 试件沿墩高划分为 5 个纤维梁柱单元,矮墩沿墩高划分为 4 个纤维梁柱单元,模拟墩顶荷载墩顶位移滞回曲线与试验结果对比见图 2。可以看出:模型能较好模拟空心墩滞回性能。

## 2 空心墩的延性变形能力分析

### 2.1 空心墩延性变形能力的定义

采用滞回性能数值分析结果进行分析,以桥墩极限位移角  $R$  表示延性变形能力,定义空心墩极限位移

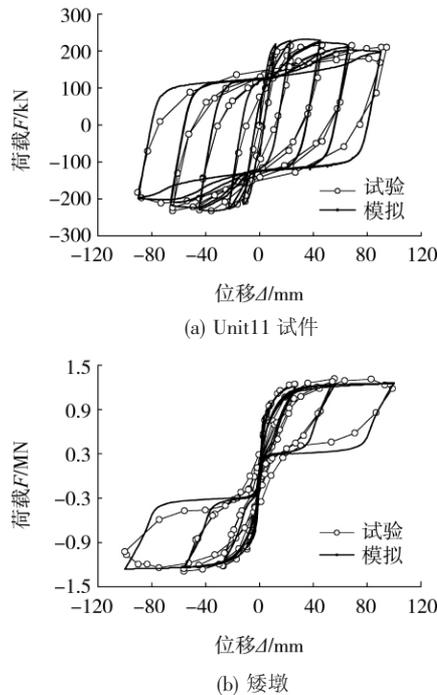


图 2 空心墩模拟滞回曲线与试验结果对比

$\Delta_u$  为极限承载力下降 85% 时对应位移。极限位移  $\Delta_u$  与墩高  $H$  之比为极限位移角  $R$ 。

### 2.2 纵筋配筋率的影响

对于圆形截面空心墩(图 1(c)所示),不同轴压比  $\eta_k$ 、不同剪跨比  $\lambda$ 、不同壁厚(空心墩壁厚  $t$  与空心墩外径长  $D$  之比)情况下,空心墩极限位移角随纵筋配筋率变化情况见图 3。可以发现:空心墩延性变形能力随轴压比提高而显著降低。对剪跨比较低( $\lambda=4$ )的中低墩,随纵筋配筋率提高,空心墩延性变形能力略有降低或保持不变;而对于剪跨比较大( $\lambda=7$  或  $10$ )的高墩,随纵筋配筋率提高,空心墩延性变形能力增大,且剪跨比越大,趋势越明显。

对于方形截面空心墩(图 1(d)所示),不同轴压比、不同剪跨比、不同壁厚(空心墩壁厚  $t$  与空心墩外截面边长  $b$  之比)时,空心墩极限位移角随纵筋配筋率变化情况见图 4。可以看出:随纵筋配筋率提高,中低空心墩延性变形能力仍基本呈降低趋势;而高空心墩延性变形能力则呈增大趋势。

对截面边长不相等矩形空心墩,考虑 2 种截面形式:Pinto 试验截面(图 1(b)所示)以及将 Pinto 试验模型短边尺寸增至 1 500 mm,其余尺寸与 Pinto 试验模型相同,定义为 A 截面(图 1(e)所示)。Pinto 截面与 A 截面墩极限位移角随纵筋配筋率变化情况见图 5。可以看出:空心墩延性变形能力随轴压比提高而降低仍为普遍规律;当剪跨比较大时( $\lambda \geq 7$ ),随配筋率提高空心墩延性变形能力增大;对剪跨比小于 5 的矮墩,除

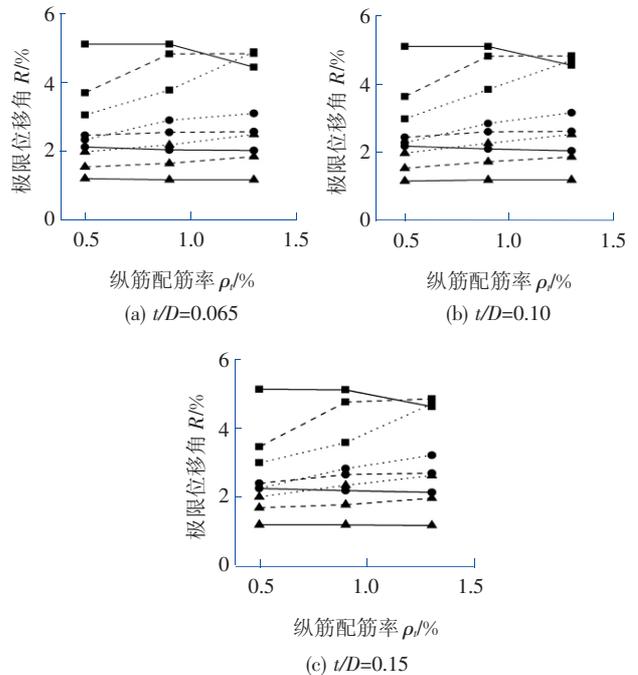


图 3 纵筋配筋率与轴压比对圆形空心墩延性变形能力影响

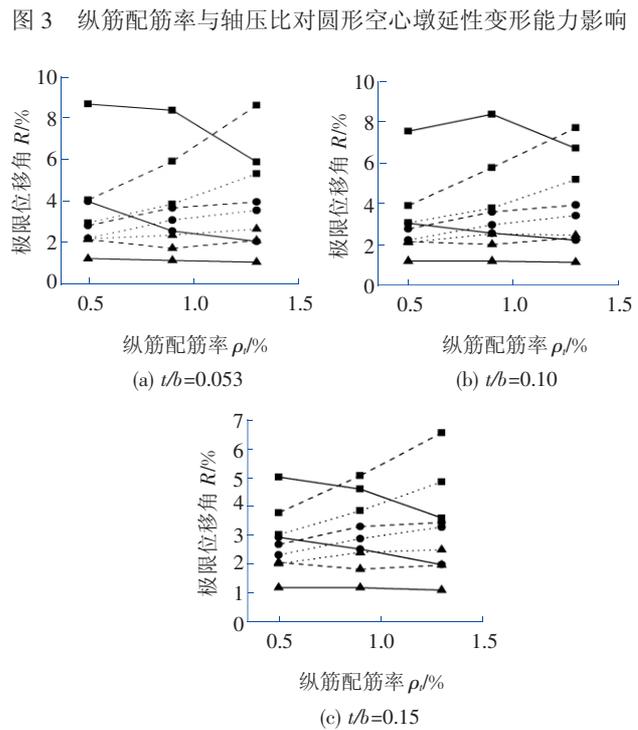


图 4 纵筋配筋率与轴压比对方形空心墩延性变形能力影响

Pinto 截面沿短边方向加载时规律不同外,其余仍基本为随纵筋配筋率增大而减小。

### 2.3 壁厚对空心墩延性变形能力的影响

桥墩极限位移角随圆形空心墩壁厚  $t$  与空心墩外径长  $D$  之比变化规律,见图 6。可以看出:轴压比,纵

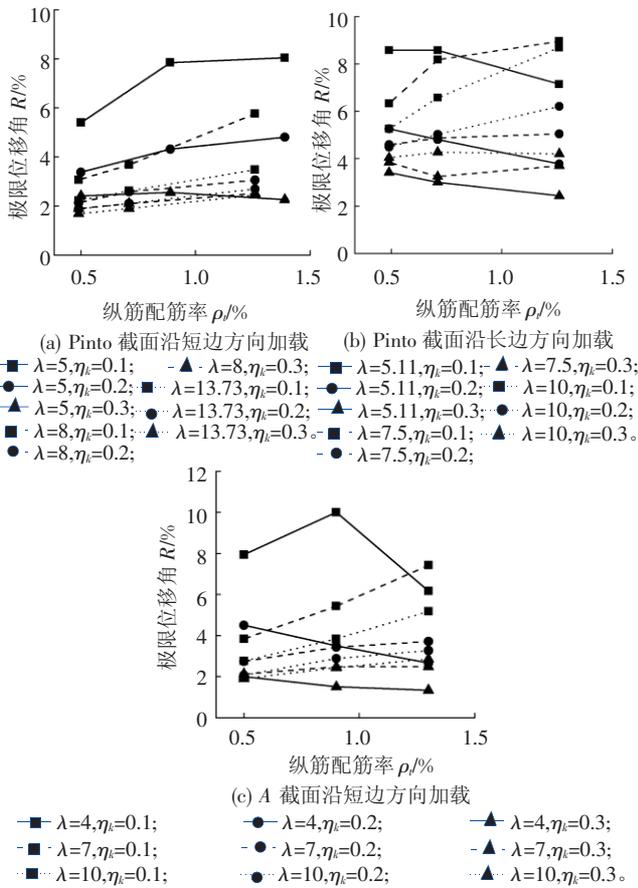


图 5 纵筋配筋率与轴压比对矩形空心墩延性变形能力影响

筋配筋率一定情况下,圆形空心墩壁厚  $t$  与外径  $D$  之比小于 0.05 时,空心墩表现出较差延性变形能力,大于 0.05 后,壁厚变化对空心墩延性变形能力影响不大。

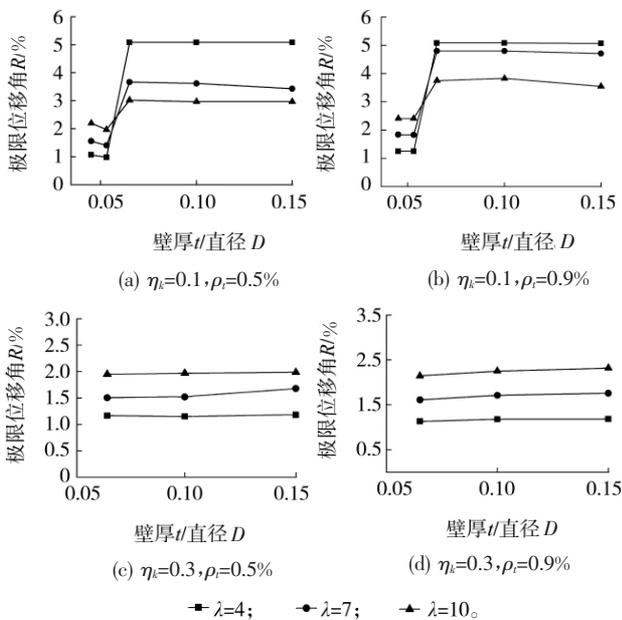


图 6 壁厚对圆形空心墩延性变形能力的影响

方形截面墩极限位移角随空心墩壁厚  $t$  与空心墩

外截面边长  $b$  之比变化规律见图 7。可以看出:轴压比、纵筋配筋率一定情况下,壁厚变化对空心墩极限变形能力影响不大,除剪跨比  $\lambda=4$  部分桥墩随壁厚增加延性变形能力明显减少外,其余空心墩延性变形能力基本保持稳定。

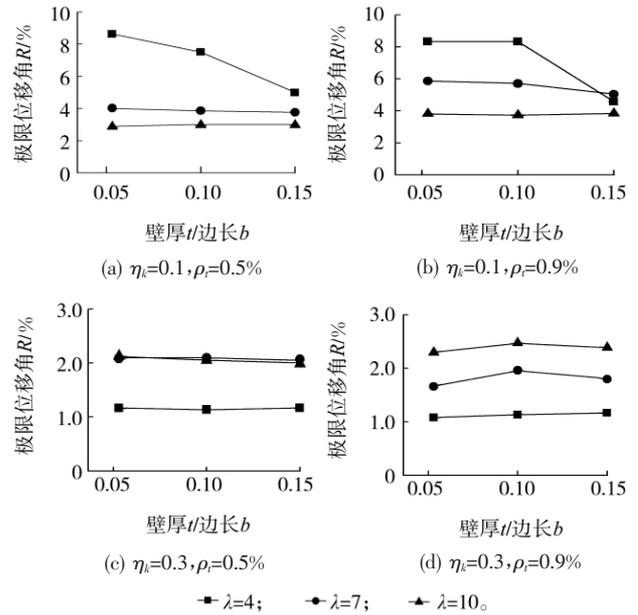


图 7 壁厚对方形空心墩延性变形能力影响

若保持空心墩轴力、纵筋配筋数量不变,随空心墩壁厚增加,桥墩轴压比与纵筋配筋率均降低。图 8 为轴力和纵筋配筋数量一定时,不同剪跨比桥墩极限位移角随壁厚变化规律。可以看出:对剪跨比较小( $\lambda=4$ )空心墩,增加壁厚可有效增大桥墩延性变形能力;而随剪跨比增加,增加壁厚对提高空心墩变形能力影响已不明显;当剪跨比增大到 10 时,增加壁厚对空心墩延性变形能力基本没有影响。

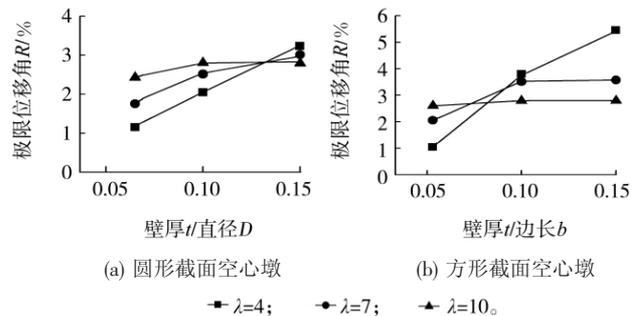


图 8 在固定的轴力和纵筋配筋量下壁厚对空心墩延性变形能力的影响

### 2.4 混凝土强度对空心墩延性变形能力的影响

保持纵筋配筋率、轴力大小不变,改变混凝土抗压强度  $f_c$ ,不同剪跨比  $\lambda$  下圆形空心墩极限位移角随混凝土强度变化规律见图 9。可以看出:轴力不变情况下,空心墩延性变形能力随混凝土强度提高而增加,这

可能与混凝土强度提高后轴压比减小有关。但从增加幅度看,提高混凝土强度对增强剪跨比较低( $\lambda=4$ )的中低墩延性变形能力更明显,对剪跨比较高( $\lambda=10$ )的高墩则不明显。

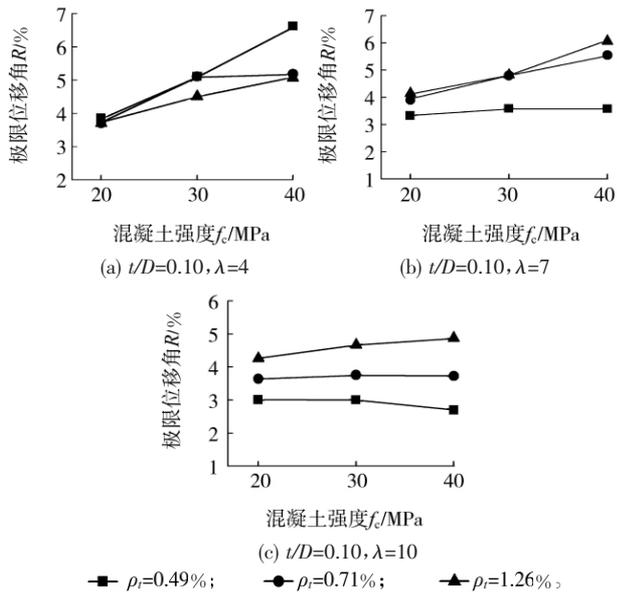


图 9 混凝土强度对圆形空心墩延性变形能力的影响

对于 Pinto 试验空心墩截面,保持纵筋配筋率、轴力大小不变,改变混凝土抗压强度  $f_c$ ,不同剪跨比下空心墩极限位移角随混凝土强度变化规律见图 10。可以看出:固定轴力下,矩形空心墩延性变形能力随混

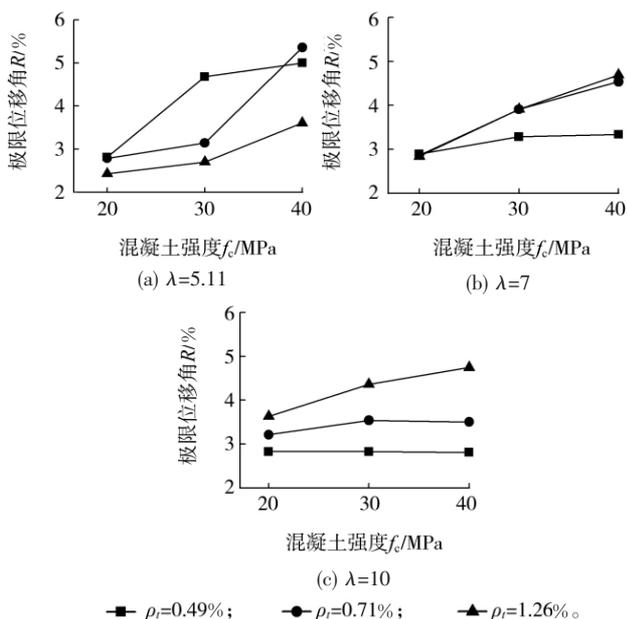


图 10 混凝土强度对矩形空心墩延性变形能力的影响

凝土强度提高而增强。且从增加幅度看,提高混凝土强度对增强剪跨比较低( $\lambda=5.11$ )的中低墩延性变形能力更为明显,对剪跨比较高( $\lambda=10$ )的高墩仍不明显。

另外,从图 9~图 10 中也可以看出:对剪跨比较低的中低墩,空心墩延性变形能力随纵筋配筋率增加基本为降低趋势,而在剪跨比为 7 和 10 时,极限位移角则随纵筋配筋率提高而提高,且剪跨比越大,趋势越明显,这与本文 2.2 节结论一致。

### 3 结论

本文基于纤维梁柱单元建立钢筋混凝土空心墩滞回分析模型,通过与试验结果对比验证了模型准确性。在此基础上,基于滞回性能数值分析结果进行空心墩延性变形能力参数分析,重点讨论纵筋配筋率、壁厚、混凝土强度、剪跨比等因素对空心墩延性影响。结论如下:

- (1) 纵筋采用双折线模型,沿墩高建立 3 个以上梁柱单元,基于纤维模型可对弯曲破坏控制钢筋混凝土空心墩滞回性能进行较为准确模拟分析。
- (2) 剪跨比大于 7 的高墩,延性变形能力随纵筋配筋率提高而增大;剪跨比小于 5 的中低墩,则表现出减小的趋势。
- (3) 轴压比、纵筋配筋率一定时,圆形空心墩壁厚  $t$  与外径  $D$  之比小于 0.05 时,空心墩呈较差延性变形能力;大于 0.05 后,壁厚变化对圆形空心墩延性变形能力影响不大。矩形空心墩延性变形能力随壁厚变化也基本保持稳定。
- (4) 固定轴力大小和纵筋配筋数量时,对剪跨比约为 4 的中低墩,增加壁厚可有效增大桥墩延性变形能力;而对剪跨比约为 10 的高墩,增加壁厚对空心墩延性变形能力影响不大。
- (5) 固定轴力情况下,提高混凝土强度对增强中低墩延性变形能力效果显著,而对于高墩效果则不明显。

综上所述,对于高墩,提高纵筋配筋率是增强其延性抗震能力的有效途径;而对于中低墩,增加壁厚、提高混凝土强度则是提高其延性的重要途径。进一步考虑到空心中低墩抗剪强度可能成为其抗震薄弱环节,而增加壁厚、提高混凝土强度又是提高桥墩抗剪能力的主要因素,可收到提高延性并增加抗剪承载力的双重有利效果。

#### 参考文献:

[1] 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 Wei-lin, LIU Zhen-yu, JIANG Jin-song. 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.
- [2] 梁智堯, 李建中. 桥梁高墩合理计算模型探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 91-98.  
LIANG Zhi-yao, LI Jian-zhong. Investigation on Rational Analytical Model of Tall Bridge Pier[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2): 91-98.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] FARIA R, POUCA N V, DELGADO R. Simulation of the Cyclic Behavior of R/C Rectangular Hollow Section Bridge Piers via a Detailed Numerical Model[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(5): 725-748.
- [6] 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.
- [7] YEH Y K, MO Y L, YANG C Y. Seismic Performance of Rectangular Hollow Bridge Columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 60-68.
- [8] MO Y L, WONG D C, MAEKAWA K. Seismic Performance of Hollow Bridge Columns[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 337-348.
- [9] MO Y L, YEH Y K, HSIEH D M. Seismic Retrofit of Hollow Rectangular Bridge Columns[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2004, 8(1): 43-51.
- [10] 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, ASCE, 2005, 10(5): 520-529.
- [11] 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.
- [12] 郝文秀, 阎贵平, 钟铁毅, 等. 反复荷载作用下活性粉末混凝土空心桥墩力学性能的试验研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 60-64.  
HAO Wen-xiu, YAN Gui-ping, ZHONG Tie-yi, et al. Experimental Study on the Mechanical Behaviour of Reactive Powder Concrete Piers with Hollow Cross-sections Subjected to Cyclic Loading[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(5): 60-64.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] SPACONE E, FILIPPOU F, TAUCER F F. Fiber Beam-column Model for Non-linear Analysis of R/C Frames: Part I. Formulation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711-725.
- [16] SPACONE E, FILIPPOU F, TAUCER F F. Fiber Beam-column Model for Non-linear Analysis of R/C Frames: Part II. Applications[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 727-742.
- [17] 聂利英, 李建中, 范立础. 弹塑性纤维梁柱单元及其单元参数分析[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 15-20.  
NIE Li-ying, LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Elastic-plastic Fiber Beam-column Element and its Parametric Analysis [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 15-20.
- [18] ZAHN F A. Design of Reinforced Concrete Bridge Columns for Strength and Ductility[D]. Christchurch: University of Canterbury, 1985.
- [19] MZRTINEZ-RUEDA J E, ELNASHAI A S. Confined Concrete Model under Cyclic Load [J]. Materials and Structures, 1997, 30(3): 139-147.

(责任编辑 崔立秋)