

# 考虑剪切变形的 RC 薄壁空心墩滞回分析模型

司炳君<sup>\*1</sup>, 孙治国<sup>2</sup>, 王东升<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 振动与强度测试中心, 辽宁 大连 116024;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 建立了考虑弹塑性剪切变形的钢筋混凝土薄壁空心墩抗震滞回分析模型, 模型中以修正的压力场理论(modified compression field theory, MCFT)计算空心墩的剪切变形, 并通过 Ozcebe 建议的滞回规则描述剪切滞回关系, 以纤维单元模型模拟空心墩的弯曲变形, 两者通过串联模型共同模拟试件在地震条件下的弯剪作用. 利用建立的数值模型对 1 个矩形和 3 个圆形薄壁空心墩试件的滞回曲线进行了模拟分析. 结果表明, 不考虑剪切变形的纤维单元模型模拟的滞回曲线与试验结果有较大的误差, 难以准确模拟滞回曲线的捏拢效应和耗能能力, 并可能高估薄壁墩的刚度和残余位移, 而建议的模型很好地模拟了薄壁墩的滞回性能.

**关键词:** 薄壁空心墩; 滞回性能; 模拟; 纤维有限单元模型; 修正的压力场理论

**中图分类号:** U443.22 **文献标志码:** A

## 0 引言

我国山区众多大型桥梁工程中, 薄壁空心桥墩占有相当大的比重. 铁路上, 南昆铁路板其二号大桥、遂渝铁路草街嘉陵江特大桥分别采用了矩形和圆端型的薄壁空心桥墩. 公路方面, 仅沪蓉西高速中, 龙潭河特大桥、野三河特大桥、双河口特大桥、马水河特大桥等均采用了矩形薄壁空心桥墩. 开展薄壁空心桥墩抗震问题的研究, 对保证这类重大桥梁工程的抗震安全, 具有十分重要的意义. 而目前国内外对此类问题的研究工作则相对薄弱, 2008 年汶川大地震中, 庙子坪大桥深水桥墩(薄壁空心形式)发生开裂破坏, 震后由于水下修复施工十分困难且花费巨大而引起了广泛关注, 这也从一个侧面说明了开展薄壁空心墩抗震问题研究的必要性<sup>[1]</sup>.

由于特殊的截面形式严重削弱了抗剪能力, 地震作用下薄壁墩成为典型的“强弯弱剪”构件, 具体表现为抗剪强度低, 剪切变形成分显著. Pinto 等<sup>[2]</sup>以空心桥墩作为试验子结构, 通过子结

构拟动力试验研究了欧洲典型桥梁的抗震能力. 在对试验结果进行的数值分析中, 提出了基于纤维模型进行空心墩抗震数值模拟的几个缺陷, 如纵筋拔出、桥墩非线性剪切变形无法考虑等. 在其后进行的数值模拟工作中, 他们基于 STM 模型(strut-and-tie model)考虑结构的非线性剪切效应, 并与基于 Timoshenko 梁单元的纤维模型组合, 发展了空心墩的数值分析技术, 与试验结果的对比较验证了模型的准确性<sup>[3]</sup>. Takahashi 等<sup>[4]</sup>通过矩形空心墩的抗震拟静力和伪动力试验, 强调了空心墩的抗剪薄弱性和合理估计其剪切变形的重要性. Ranzo 等<sup>[5]</sup>在美国加州大学圣地亚哥分校进行的 3 个剪跨比为 2.5 的圆形截面薄壁空心墩抗震拟静力试验中, 有 2 个试件发生了弯剪破坏, 且试件的位移延性较差. 而 Delgado 等<sup>[6]</sup>、Calvi 等<sup>[7]</sup>的试验结果则表明, 大量剪跨比超过 3.0 的矩形空心墩仍发生弯剪破坏, 凸显薄壁空心墩抗震问题的特殊性.

传统的纤维单元模型在模拟弯曲为主的钢筋

收稿日期: 2013-07-05; 修回日期: 2013-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008041, 51178071); “九七三”国家高技术研究发展计划资助项目(2011CB013605); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1212); 辽宁省百千万人才工程资助项目.

作者简介: 司炳君\*(1971-), 男, 博士, 副教授, E-mail: sbbingjun@yahoo.com.cn.

混凝土结构中具有足够精度并获得了广泛应用<sup>[8-9]</sup>,但针对薄壁空心墩这一特殊结构形式,建立能够考虑剪切变形的数值分析模型显得尤为重要.本文提出考虑弹塑性剪切变形成分的薄壁空心墩抗震滞回性能数值分析模型,模型中以修正的压力场理论(modified compression field theory, MCFT)计算薄壁空心墩的剪切变形<sup>[10-12]</sup>,通过纤维单元模型模拟其弯曲变形成分,两者通过串联模型共同模拟试件的弯剪变形.

## 1 模型介绍

### 1.1 MCFT 理论介绍

MCFT 理论由 Bentz 和 Vecchio 等提出,其核心思路是在考虑混凝土拉应力的基础上,假定混凝土的主应力和主应变同向,并忽略钢筋与混凝土之间的滑移,根据平衡方程、变形协调关系、钢筋的应力-应变关系和受压、受拉开裂混凝土的应力-应变关系建立模型,式(1)~(15)给出了 MCFT 理论的 15 个基本方程<sup>[10-12]</sup>,图 1 给出了 MCFT 理论的图示.

#### (1) 平衡条件

平均应力:

$$f_x = \rho_x f_{sx} + f_1 - v \cot \theta \quad (1)$$

$$f_z = \rho_z f_{sz} + f_1 - v \tan \theta \quad (2)$$

$$v = (f_1 + f_2) / (\tan \theta + \cot \theta) \quad (3)$$

裂缝处的应力:

$$f_{sxcr} = (f_x + v \cot \theta + v_{ci} \cot \theta) / \rho_x \quad (4)$$

$$f_{szcr} = (f_z + v \tan \theta - v_{ci} \tan \theta) / \rho_z \quad (5)$$

#### (2) 协调条件

平均应变:

$$\tan^2 \theta = (\epsilon_x + \epsilon_2) / (\epsilon_z + \epsilon_2) \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_z + \epsilon_2 \quad (7)$$

$$\gamma_{xz} = 2(\epsilon_x + \epsilon_2) \cot \theta \quad (8)$$

裂缝宽度:

$$\omega = s_\theta \epsilon_1 \quad (9)$$

$$s_\theta = 1 / ((\sin \theta) / s_x + (\cos \theta) / s_z) \quad (10)$$

#### (3) 应力-应变关系

钢筋:

$$f_{sx} = E_s \epsilon_x \leq f_{yx} \quad (11)$$

$$f_{sz} = E_s \epsilon_z \leq f_{yz} \quad (12)$$

混凝土:

$$f_2 = \frac{f'_c}{0.8 + 170\epsilon_1} \left[ 2 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_c} - \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_c} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$f_1 = 0.33 \sqrt{f'_c} / (1 + \sqrt{500\epsilon_1}) \quad (14)$$

裂缝处剪应力为

$$v_{ci} \leq \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.31 + 24\omega / (a_g + 16)} \quad (15)$$

式中:  $f_x$ 、 $f_z$  分别为单元体上  $x$  与  $z$  方向的平均应力;  $\rho_x$ 、 $\rho_z$  分别为纵向和横向钢筋配筋率;  $f_{sx}$ 、 $f_{sz}$  分别为纵向和横向钢筋的应力;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为混凝土的主拉和主压应力;  $\theta$  为混凝土主压应力与  $x$  轴的夹角;  $v$  为单元体上混凝土的剪应力;  $f_{sxcr}$  与  $f_{szcr}$  分别为裂缝处纵向和横向的钢筋应力;  $v_{ci}$  为沿裂缝面传递的剪应力;  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_z$  分别为纵向和横向平均应变;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为主拉应变与主压应变;  $\gamma_{xz}$  为剪应变;  $\omega$  为裂缝宽度;  $s_\theta$  为平均裂缝间距;  $s_x$ 、 $s_z$  分别为垂直于  $x$  和  $z$  方向的平均裂缝间距;  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $f_{yx}$ 、 $f_{yz}$  分别为纵向和横向钢筋的屈服强度;  $f'_c$ 、 $\epsilon'_c$  分别为混凝土圆柱体峰值应力和峰值应变;  $a_g$  为混凝土最大骨料粒径.

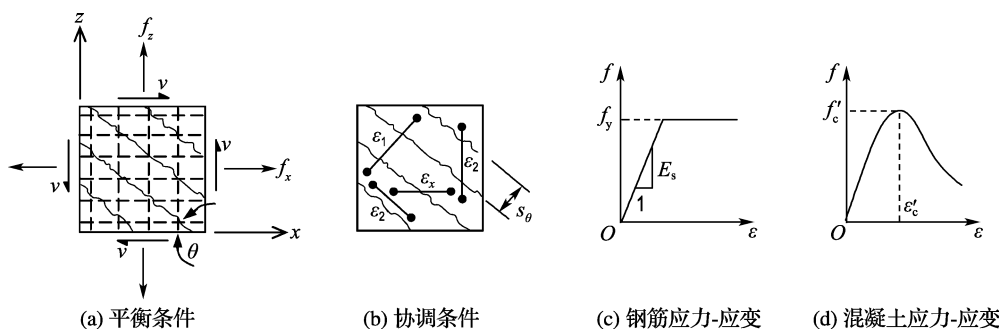


图 1 MCFT 理论图示

Fig. 1 Illustration of the modified compression field theory

Bentz 等<sup>[10]</sup>对 MCFT 理论进行了进一步的发展,他们基于 MCFT 基本理论和平截面假定,将混凝土截面划分为若干层,每层作为一个双轴应力单元按 MCFT 理论分析,并由此可完成钢筋混凝土构件在弯、剪、轴力共同作用下的受力全过程分析.根据各个受力阶段混凝土截面上的剪应变分布情况,可方便地计算钢筋混凝土构件直至极限承载力阶段的剪切力-剪切位移关系.剪切位移

$$\Delta_v = \int_0^L \gamma(x) dx \quad (16)$$

式中: $\Delta_v$ 为墩柱剪切变形, $\gamma$ 为沿桥墩  $x$  高度处柱截面的平均剪切应变, $L$ 为桥墩高度.通过计算桥墩各个荷载下的剪切变形,便可获得构件受力全过程的剪切力-剪切位移关系.

### 1.2 分析模型的建立

建立了如图 2 所示的薄壁墩抗震滞回分析模型,模型中以纤维单元模拟桥墩的弯曲变形成分,试件的剪切变形通过模型底部的弹簧单元模拟,两者串联共同考虑薄壁墩的弯剪耦合作用.弹簧单元的剪切力-剪切位移骨架曲线通过 MCFT 理论分析得到,经简单修正简化为如图 3 所示的三折线形式.

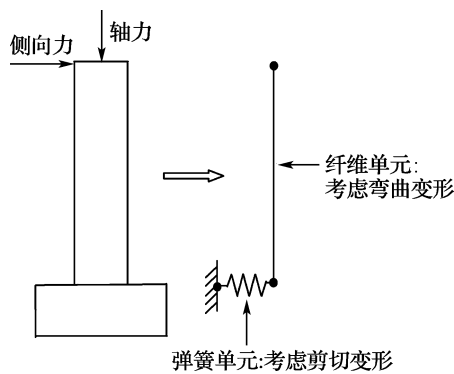


图 2 考虑剪切变形的薄壁墩数值分析模型

Fig. 2 The analysis model including shear deformation for the thin-walled hollow bridge piers

需要说明,图 3 中, $V_{cr}$ 、 $\Delta_{cr}$  原分别代表桥墩开裂对应的剪切荷载和剪切位移, $V_y$ 、 $\Delta_y$  分别为桥墩屈服对应的剪切荷载和剪切位移, $\Delta_m$  为桥墩达到极限荷载  $V_m$  时对应的剪切位移,但作者的研究表明,MCFT 计算的钢筋混凝土墩柱剪切力-

剪切位移关系至极限荷载前基本呈双折线形式,且剪切开裂是引起剪切力-剪切位移关系刚度突变的原因,而弯曲开裂和纵筋屈服对其刚度影响不大,如图 4 所示,因此,本文虽借用了图 3 的三折线形式,但其含义已发生了变化<sup>[13]</sup>.

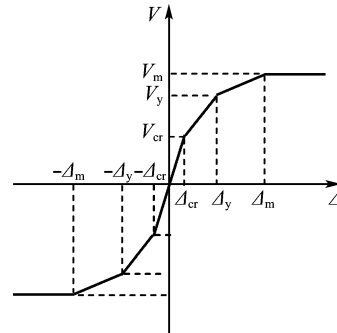


图 3 桥墩剪切力-剪切位移关系骨架曲线

Fig. 3 The skeleton curve for shear force-shear displacement relationship of RC bridge piers

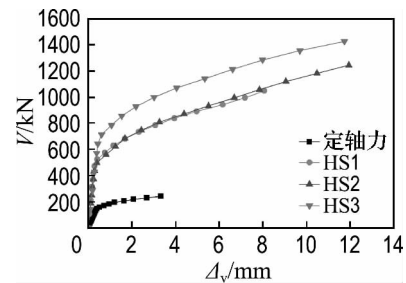


图 4 薄壁空心墩试件剪切力-剪切位移关系

Fig. 4 Shear force-shear displacement relationship of the thin-walled hollow bridge piers

剪切力-剪切位移滞回关系采用 Ozcebe 等建议的剪切滞回模型<sup>[14]</sup>.如图 5 所示,其中  $V'_p$  与  $V'_m$  为对应再加载刚度的剪切强度值,分别用来确定小于或大于开裂剪切荷载  $V_{cr}$  时的刚度,且

$$V'_p = V_p e^{\alpha(\Delta_p/\Delta_y)} \quad (17)$$

$$\alpha = 0.82(N/N_0) - 0.14 \leq 0 \quad (18)$$

$$V'_m = V_m e^{(\beta + \chi \Delta_m/\Delta_y)} \quad (19)$$

$$\beta = -0.014 \sqrt{\Delta_m/\Delta_y} \quad (20)$$

$$\chi = -0.010 \sqrt{n} \quad (21)$$

式中: $n$ 为描述滞回次数引入的参数, $V_p$ 、 $\Delta_p$  分别为上次加载达到的极限荷载和对应的位移值, $N$ 为轴力, $N_0$ 为试件名义轴心抗压强度,按 ACI 318—11 规范计算.

对考虑弯曲变形成分的纤维单元模型,采用了基于柔度法的纤维梁柱单元,混凝土受压应力-应变关系采用 Mzrtinez-Rudea 等<sup>[15]</sup>建议的公式,鉴于薄壁墩的特殊结构形式,模型中未考虑箍筋约束效应影响.采用 Menegotto-Pinto 模型<sup>[16]</sup>描述纵筋的本构关系,可考虑反复荷载下的包辛格效应,关于纤维梁柱单元的基本概念详见文献<sup>[17]</sup>.

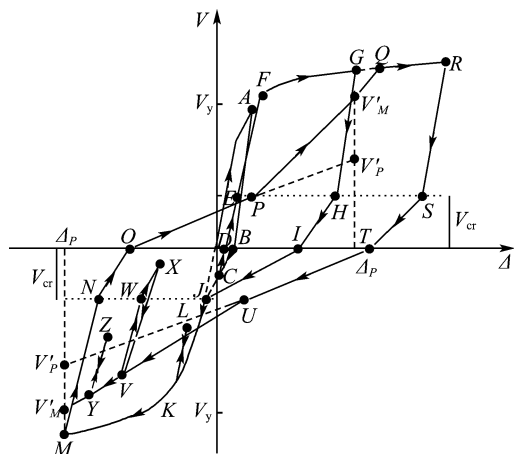


图 5 Ozcebe 建议的剪切滞回模型

Fig. 5 The hysteretic shear model proposed by Ozcebe

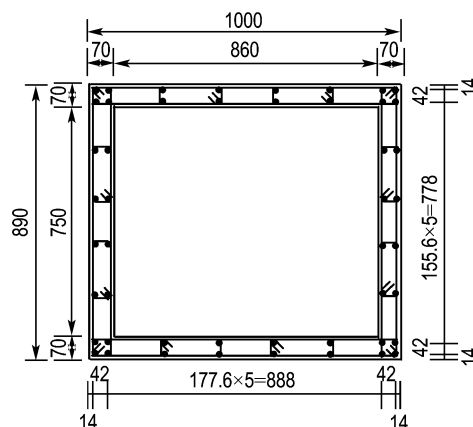
## 2 模型对比验证

### 2.1 薄壁空心墩试验

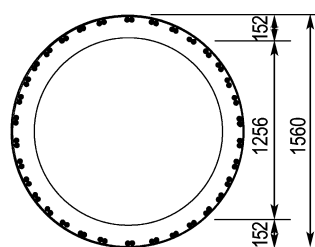
以孙治国<sup>[13]</sup>完成的 1 个矩形薄壁空心墩试件和 Ranzo 等<sup>[5]</sup>完成的 3 个圆形薄壁空心墩试件拟静力试验结果为依据,对本文建立的数值分析模型进行对比验证.孙治国完成的定轴力试件墩身截面尺寸为 1 000 mm×890 mm,剪跨比为 4.0,空心部分尺寸为 860 mm×750 mm,壁厚为 70 mm,试件轴压比为 0.2.

Ranzo 的 3 个圆形薄壁空心墩编号分别为 HS1、HS2 和 HS3,剪跨比均为 2.5,HS1 与 HS2 试件轴压比为 0.05,HS3 试件轴压比为 0.15.所有试件仅沿截面外壁设 1 层箍筋和纵筋,HS1 试件纵筋为 68 根直径 13 mm 钢筋,配筋率为 1.4%;其余两试件纵筋均为 68 根直径 16 mm 钢筋,配筋率为 2.3%.试件配箍均为直径 6 mm,间距 70 mm.从试件的破坏形式看,HS1 试件为弯曲破坏,HS2 与 HS3 基本为弯剪破坏,即达到抗弯能力后塑性铰区发生的剪切破坏.

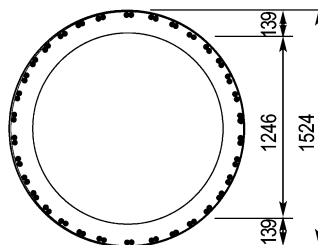
各试件的截面形式及配筋情况如图 6 所示.



(a) 定轴力试件



(b) HS1



(c) HS2 和 HS3

图 6 薄壁空心墩详图

Fig. 6 Design details of the thin walled hollow bridge piers

### 2.2 模拟结果的对比分析

分别采用纤维单元模型、本文建议的考虑剪切变形的数值分析模型(弯剪模型)对 4 个薄壁空心墩试件的滞回性能进行了模拟分析,模拟得到的试件墩顶荷载  $V$ -墩顶位移  $\Delta$  滞回曲线及与试验结果的对比见图 7.

可以发现,相对于仅考虑弯曲变形的纤维单元模型,本文建立的数值分析模型更好地模拟了各空心墩试件的滞回性能,特别是对 Ranzo 的圆形截面试件的模拟效果更为突出,这主要是由于孙治国完成的定轴力试件剪跨比较大,剪切成分相对于 Ranzo 试件要小.

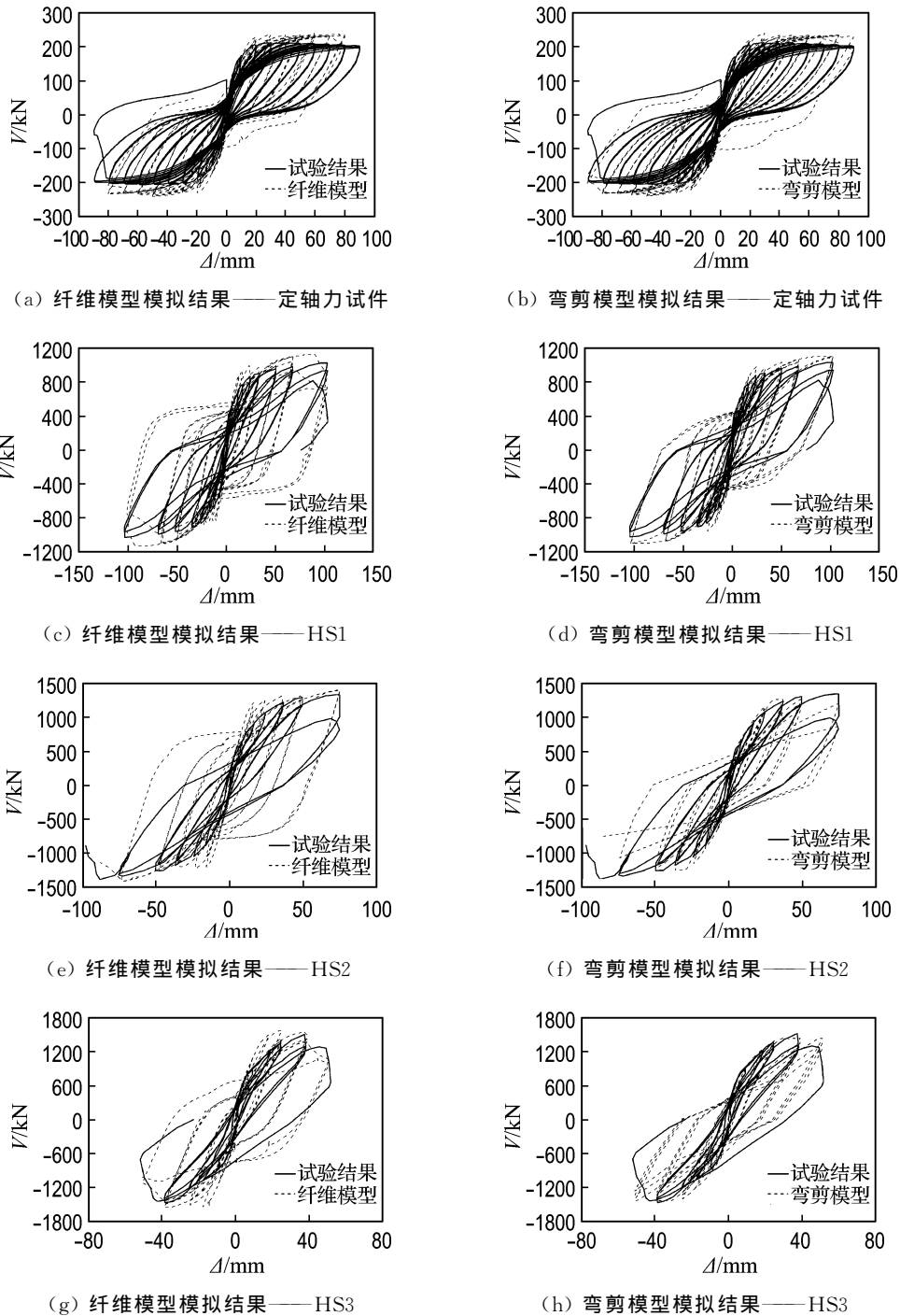


图 7 薄壁空心墩试件滞回曲线的对比

Fig. 7 Comparison of the hysteretic curves of the thin-walled hollow pier specimens

首先对比各滞回曲线捏拢效应的模拟,由于剪切变形是引起滞回曲线捏拢的主要因素,相对于纤维单元模型(纤维模型),本文建立的模型(弯剪模型)很好地模拟了各滞回曲线的捏拢效应,并且从各试件的耗能能力(各滞回曲线包围的面积)分析,本文建议模型与试验结果更为吻合.这一规

律在圆形薄壁墩试件的模拟结果中更为明显,如图 7(c)与 7(d)、图 7(e)与 7(f)、图 7(g)与 7(h)的对比所示.

其次,对比试件初始加载阶段的刚度,纤维单元模型忽略了剪切变形成分,使得模拟得到的初始阶段刚度比试验结果偏大,而本文建立的模型

与试验结果吻合很好,这一点在 HS2 与 HS3 试件中表现得尤为突出,如图 7(e)与 7(f)、图 7(g)与 7(h)的对比所示。

最后,对比试件卸载时的刚度和残余位移,纤维单元模型模拟的桥墩卸载刚度和残余位移均与试验结果有较大误差,纤维单元模型明显高估了桥墩的卸载刚度和残余位移,而本文提出的滞回分析模型的模拟结果要明显优于纤维单元模型模拟结果。

补充一点,本文建立的模型与试验结果仍存在一定误差,除钢筋混凝土结构试验本身的离散性外,模型中并未考虑纵筋在底座中拔出变形成分的影响,这可能是造成模拟与试验结果存在差异的最主要原因。

### 3 结 论

(1) 对薄壁空心墩试件,由于剪切变形所占比重较大,仅以纤维单元模型难以对其滞回性能进行准确的模拟分析,纤维单元模型模拟滞回曲线的捏拢效应和耗能能力与试验结果相比有较大误差,并可能高估试件初始加载刚度、卸载刚度和残余位移。

(2) 与试验结果的对比表明,本文建立的考虑弹塑性剪切变形的薄壁空心墩滞回分析模型很好地模拟了试件的滞回曲线,为此类构件的抗震能力分析提供了有效工具。

### 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. (in Chinese)
- [2] Pinto A V, Verzeletti G, Magonette G, et al. Pseudo-dynamic testing of large-scale R/C bridges in ELSA [C] // *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco:

Elsevier Science Ltd., 1996:1-8.

- [3] Guedes J, Pinto A V, Pegon P. Non-linear shear model for R/C piers [R]. Ispra: Joint Research Center, ELSA Unit, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2010:1-114.
- [4] Takahashi Y, Iemura H. Inelastic seismic performance of RC tall piers with hollow section [C] // *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland: 12WCEE Publications, 2000.
- [5] Ranzo G, Priestley M J N. Seismic performance of large RC circular hollow columns [C] // *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland: 12WCEE Publications, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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.
- [11] Lee D H, Elnashai A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction [J].

- Journal of Structural Engineering**, ASCE, 2001, **127**(5):546-553.
- [12] Lee D H, Elnashai A S. Inelastic seismic analysis of RC bridge piers including flexure-shear-axial interaction [J]. **Structural Engineering and Mechanics**, 2002, **13**(3):241-260.
- [13] 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 Zhi-guo. Research on the seismic deformation capacity of RC bridge columns [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [14] Ozcebe G, Saatcioglu M. Hysteretic shear model for reinforced concrete members [J]. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 1989, **115**(1):132-148.
- [15] Mzrtinez-Rudea J E, Elnashai A S. Confined concrete model under cyclic load [J]. **Materials and Structures**, 1997, **30**(3):139-147.
- [16] 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.
- [17] 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.

## Hysteretic analysis model considering shear deformation for RC thin-walled hollow bridge piers

SI Bing-jun<sup>\*1</sup>, SUN Zhi-guo<sup>2</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>

( 1. Vibration & Strength Test Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China )

**Abstract:** A new numerical model considering elasto-plastic shear deformation for RC thin-walled hollow bridge piers was proposed. In this model, the shear force-shear displacement relationship of the pier was obtained by the modified compression field theory (MCFT) and implemented in the hysteretic shear model proposed by Ozcebe, while the flexural deformation was simulated by fiber element model. And then, the MCFT and fiber element model were incorporated into a series model to account for the flexure-shear interaction of the piers under seismic effect. The hysteretic curves for one rectangular and three circular thin-walled hollow pier specimens were simulated and compared with experimental results. It is found that the fiber element model without considering shear deformation gives inadequate results and is incapable of predicting the pinching effect and energy dissipation capacity of the piers. Moreover, the fiber element model would overestimate the lateral stiffness and residual displacement of the pier specimens. Comparisons between test and simulation results reveal the adequacy of the proposed numerical model.

**Key words:** thin walled hollow bridge piers; hysteretic behavior; simulation; fiber element model; modified compression field theory (MCFT)