

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.003



CFRP 筋转换梁框支剪力墙抗震性能试验的 数值模拟仿真方法

吴世娟^a, 江世永^b, 陶帅^a, 李雪阳^a

(中国人民解放军后勤工程学院 a. 军事土木工程系; b. 训练部, 重庆 401311)

摘要:对 3 根 CFRP 筋转换梁框支剪力墙进行了低周往复荷载试验, 并与 1 根全钢筋转换梁框支剪力墙对比, 分析了其破坏模式、受力特征和滞回特征等抗震性能。通过 OpenSees 分析平台, 选取基于刚度法理论的非线性梁柱单元, 并结合零长度转动弹簧单元, 建立了合理考虑纵筋粘结滑移的 CFRP 筋转换梁框支剪力墙数值分析模型。结果表明: 考虑了纵筋粘结滑移的数值模型能较好地模拟 CFRP 筋转换梁框支剪力墙在低周往复荷载作用下滞回曲线的捏缩特性, 对试件屈服荷载和极限承载力也有较好的模拟精度。

关键词:CFRP 筋; 框支剪力墙; 抗震性能; 粘结滑移

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0016-07

Numerical simulation method for the seismic performance test of frame supported shear wall with CFRP bars in transfer beam

Wu Shijuan^a, Jiang Shiyong^b, Tao Shuai^a, Li Xueyang^a

(a. Dept. of Civil Engineering; b. Dept. of Training, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: Three specimens of frame supported shear wall with CFRP bars in transfer beam were tested under low cyclic loading, comparing to one with steel bars. And the failure modes, stress characteristics and hysteretic characteristics were analyzed. The nonlinear beam column elements based on stiffness method and zero length rotational spring element were selected through the OpenSees analysis platform. A numerical analysis model was established to analyze the frame supported shear wall, reasonably considering bond slip of longitudinal reinforcement, and the simulation results were compared with the experimental. The results showed that the numerical model considering the bond slip of longitudinal reinforcement, can well simulate pinch characteristics of hysteresis curve of frame supported shear wall under cyclic loads. Besides, the yield load and ultimate load also had preferable simulation accuracy.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic(CFRP) bar; frame-supported shear wall; seismic performance; bond-slip

收稿日期:2017-01-02

基金项目:重庆市高校优秀成果转化类项目(KJZH14220)

作者简介:吴世娟(1992-), 男, 主要从事军事建筑工程检测与加固研究, (E-mail)13220354826@163.com.

江世永(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)jiangshiy@163.com.

Received:2016-01-02

Foundation item: the Key Projects of Chongqing Colleges Outstanding Achievements Transformation (No. KJZH14220)

Author brief: Wu Shijuan(1992-), main research interests: inspection and reinforcement of military building engineering, (E-mail)13220354826@163.com.

Jiang Shiyong(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)jiangshiy@163.com.

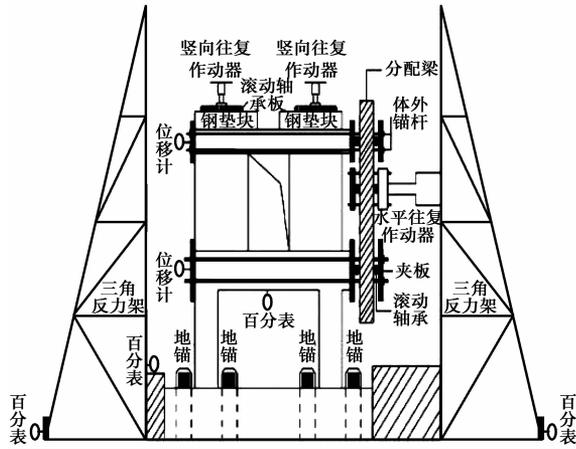


图 2 加载设备示意

Fig. 2 the setup of test equipment

虑了往复循环荷载作用过程中钢筋的包辛格效应和等向应变硬化。

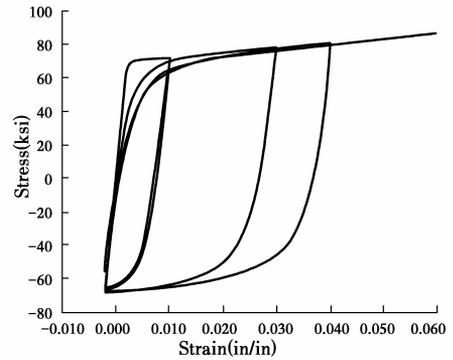


图 4 钢筋本构滞回模型

Fig. 4 Constitutive model of steel bar

2 模型建立

2.1 混凝土本构

混凝土材料本构采用 OpenSees 中的 Concrete01 模型^[13]，该模型不考虑混凝土的受拉应力和刚度，其受压骨架曲线主要由上升段抛物线和下降直线段两部分组成，如图 3 所示。其中， k 表示混凝土由于箍筋约束作用产生的强度增大系数，具体计算参照文献^[14]； ϵ_0 表示无约束混凝土峰值应力对应的应变，一般取为 0.0022 ； ϵ_u 为约束混凝土极限应变变值； f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。Concrete01 模型能考虑箍筋对混凝土的约束作用，通过参数 k 可反应核心区混凝土随箍筋配置而引起的强度提高以及峰值应变增大，对混凝土结构的分析具有良好的精度。

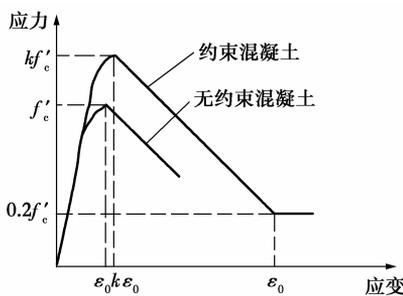


图 3 混凝土应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of concrete

2.2 钢筋本构

钢筋材料选取 OpenSees 中的 Steel02 钢筋模型，它是由 Filippou 修正的 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型^[15]，其滞回本构如图 4 所示。该模型考

2.3 CFRP 筋本构

CFRP 筋本构选取 OpenSees 中的 Elastic 材料模型，单元类型采用 truss 单元进行模拟。由于 CFRP 筋为线弹性材料，无明显屈服点，因此，其应力-应变曲线关系可取为弹性。

2.4 粘结滑移本构

考虑到纵筋在节点中滑移产生的变形会对构件的刚度、强度和变形能力产生显著影响^[16-18]，采用零长度单元模拟试件节点处的变形，并赋予这种零长度单元截面 Pinching4 Material^[19-20]，其本构模型如图 5 所示。

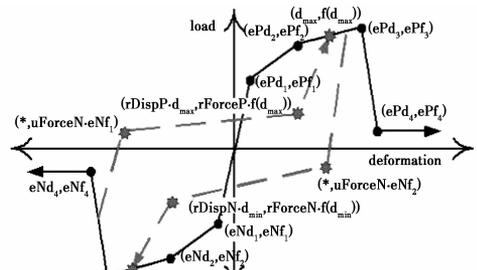


图 5 Pinching4 Material 模型应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of pinching4 material model

该模型主要从多线性加载路径、三线性加卸载路径和控制加载路径的三损伤准则体现正反交替荷载作用下试件的刚度和强度退化^[21]。卸载路径主要由 3 个参数决定，即再加载达到最大或最小变形历史的变形率 $rDisp$ 、再加载最大或最小的历史荷载率 $rForce$ 和卸载时从正向（负向）荷载到荷载包络线的荷载率 $uForce$ 。而 3 个损伤准则分别用来定义再卸载时的刚度退化、再加载时的强度退化及以前

变形未达到时的强度退化。三损伤准则中的损伤指数定义为

$$\delta_i = \alpha_1 (\tilde{d}_{\max,i})^{\alpha_3} + \alpha_2 (\kappa_i)^{\alpha_4} \leq \delta_{\text{lim}} \quad (1)$$

当

$$\tilde{d}_{\max,i} = \max \left[\frac{d_{\max,i}}{D_{\max}}, \frac{d_{\min,i}}{D_{\min}} \right] \quad (2)$$

式中: α_i ($i=1,2,3,4$)根据试验取值; δ_{lim} 为损伤指数的最大值; d_{\max} 和 d_{\min} 为历史变形时的最大和最小值; D_{\max} 和 D_{\min} 为强度初始损伤时的正向和反向变形; κ 为单调加载下达到正向变形时的能量损失率; i 为荷载步。本文中, $[\text{rDisp rForce uForce}] = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0 \ 0]$ 。

刚度和强度退化定义为

$$k_i = k_0 (1 - \delta_i^k) \quad (3)$$

$$f_{\max,i} = f_{\max,0} (1 - \delta_i^f) \quad (4)$$

$$d_{\max,i} = d_{\max,0} (1 - \delta_i^d) \quad (5)$$

式中: k_i 为卸载刚度; δ_i^k 为卸载刚度损伤指数; f_{\max} 为骨架包络线的强度最大值; δ_i^f 为强度损伤指数; d_{\max} 为再加载时的最大历史变形; δ_i^d 为变形损伤指数; 0 和 i 为荷载步。本文中, $[\text{gammaK}] = [0.3 \ 0.0 \ 0.1 \ 0.0 \ 0.3]$; $[\text{gammaD}] = [0.7 \ 0.0 \ 0.3 \ 0.0 \ 0.25]$; $[\text{gammaF}] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

另外,Pinching4 Material 还可用于模拟节点处钢筋的应变渗透作用,能有效考虑钢筋整体滑移前引起试件刚度和强度的变化。

2.5 数值分析模型

OpenSees 程序中主要提供了 3 种梁柱宏观单元^[21]: Displacement Beamcolumn 单元、Nonlinear beam Column 单元和 Beam With Hinges 单元。主要选取基于有限元单元刚度法理论的非线性梁柱单元(Displacement Beamcolumn),对 CFRP 筋转换梁框支剪力墙进行模拟。通过有限元形函数,并按照平截面假定,可求得相应截面的抗力向量和切线刚度矩阵,最后根据 Gauss-Lobatto 四边形积分法则沿杆长得到整个单元的刚度矩阵和抗力向量。

纤维截面的划分直接影响到模拟结果的精确度,纤维截面划分越细,结果越精确,但同时又增加了计算量。试件保护层混凝土和核心区混凝土的划分均采用 OpenSees 用户手册中的“Quadrilateral Patch Command”,如转换梁核心区混凝土横向划分为 20 段纤维,纵向划分为 2 段纤维。钢筋的划分采用 OpenSees 用户手册中的“Straight Layer Command”。

为了解决模型计算速度慢,并减少插值函数迭代误差,在建模过程中对转换梁和柱构件适当细分单元。塑性铰长度取为截面高度,由于刚度法的纤维单元要求单元长度小于塑性铰长度,因此,将转换梁和柱构件都划分 5 段单元,端部两段单元长度取为构件截面高度,中间单元均等划分。

考虑到纵筋粘结滑移的影响,在柱底添加一个零长度转动弹簧,并赋予零长度单元 Pinching4 Material。该单元也是基于纤维截面模型,并且与非线性梁柱单元具有相同的截面尺寸和截面划分方式,唯一区别在于前者截面内的钢筋本构采取 Pinching4 Material,而后者采用的是 Steel02。零长度转动弹簧单元通过截面的弯矩与曲率关系代替单元的力-变形关系。在 OpenSees 建模中,零长度弹簧单元由两个坐标相同的节点组成,虽然其实际长度为零,但在计算构件的变形时却将其长度取为 1。由于单元内部只有一个高斯积分点,故截面的变形(曲率)等于单元变形(转角)。因此,通过柱高和零长度转动弹簧单元的曲率可得到构件的粘结滑移变形。

3 试验结果及有限元分析

试验中,CFRP 筋端部未发生滑移,转换梁的端部首先出现塑性铰,之后,柱脚也开始产生塑性铰。随着位移加载的增大,节点处的混凝土被压碎,标志着梁柱节点处塑性铰的产生,所有试件最终的破坏形态如图 6 所示。试验结果表明,配 CFRP 筋混凝土转换梁框支剪力墙具有明显的捏缩效应,且与普通钢筋混凝土转换梁框支剪力墙具有相当的承载能力。

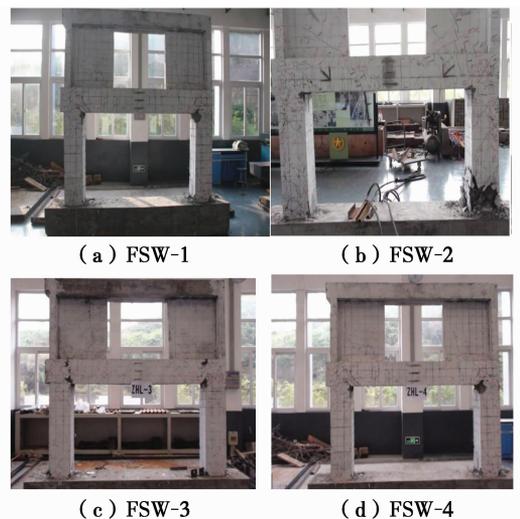


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure mode of specimens

3.1 滞回曲线

4 榀混凝土转换梁框支剪力墙的滞回曲线及模拟结果的对比如图 7 所示(FSW-2 由于设备发生故障,未画出其滞回曲线,FSW-4 只保存了试验的滞回图像,故将模拟值与试验值分别画在两张图中)。总体来看,数值模拟结果与试验结果基本吻合,这主要是因为所选试件破坏主要为弯曲型破坏。而考虑了柱底纵筋粘结滑移的数值模型能较好地模拟正交替荷载下整个试件滞回曲线的捏拢现象及刚度退化等特性。在 OpenSees 程序建模中,由于未考虑剪力墙端部钢筋拔出的影响,因此,各个试件模拟得到的滞回曲线有一定的捏缩效应,但不如试验明显。

压,下部只有钢筋受压,所以截面刚度很小,曲线较为平缓。随着负向加载的进一步增大,下部钢筋受压屈服后,使裂缝逐渐闭合,混凝土重新参与受压,因此,截面的刚度重新大起来。而反向卸载过程中,上部受拉钢筋先恢复弹性变形,但塑性变形未恢复;同时,下部钢筋与混凝土同时恢复其弹性变形,但因混凝土压应变小,所以,先恢复到零应变状态,接着钢筋继续恢复其压应变。因此,使卸载曲线呈现出先大后小。数值模拟结果也较好地反应了这一变化规律。

3.2 骨架曲线

根据水平荷载-位移的恢复力曲线得到试件的骨架曲线如图 8 所示。从图中可以看出,试件主要经历了弹性、屈服、强化、极限荷载、荷载下降等 5 个阶段,骨架曲线的走势与试件单调加载类似。随着加载位移的增大,试件超过其弹性极限进入屈服状态,此时变形增加较快,应力基本维持不变。位移继续增大,试件的承载能力进一步增加。但相比于试验,数值模拟得到的强化段更显著,主要原因是 OpenSees 程序不能合理考虑弯曲作用和粘结滑移的耦合影响,使试件屈服后的强化段明显。但极限荷载后两者都呈现了相同的下降趋势。

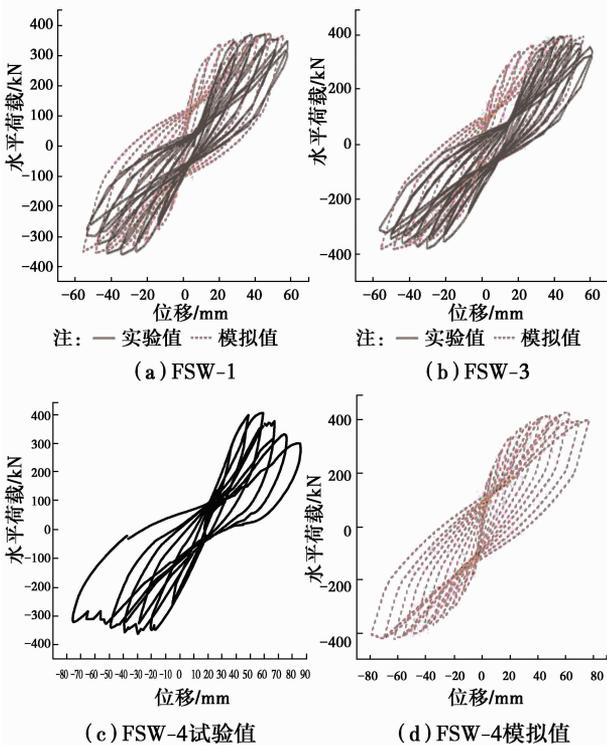


图 7 试验和模拟的滞回线对比

Fig. 7 Comparisons between the tested and simulated hysteretic curves

加载初期,由于试件处于弹性阶段,水平荷载与位移呈线性变化。随着荷载的增大,试件的加载和卸载刚度都开始逐渐下降,各滞回环出现拐点。从恢复力曲线的斜率变化可以看出:正、反向加载曲线均表现出刚度先小后大的趋势,而卸载曲线表现出刚度先大后小的趋势。以反向加载为例,在前一个正向位移加载过程中,转换梁下部纵筋已进入受拉屈服阶段,当卸去正向位移后,下部纵筋可立即恢复其弹性部分,但塑性伸长却不能恢复。因此,反向加载时,由于混凝土原有裂缝尚未闭合,不能参与受

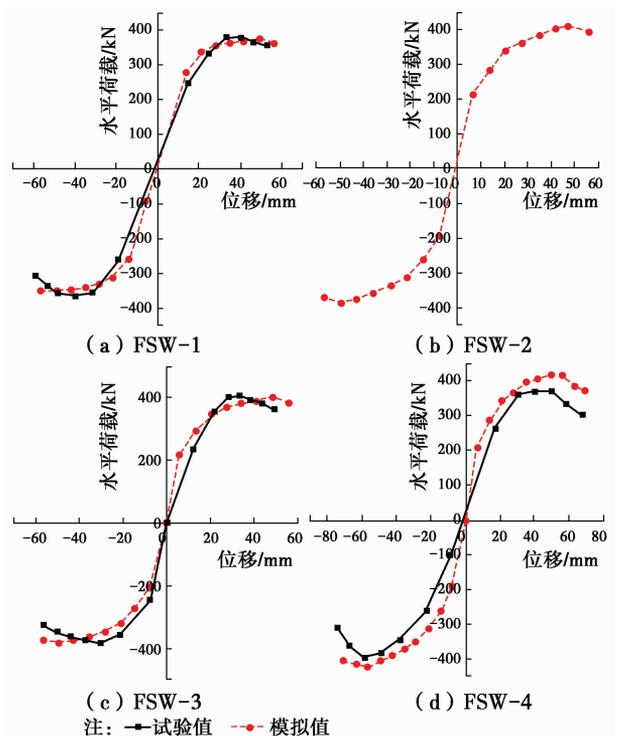


图 8 骨架曲线对比

Fig. 8 Comparisons of Skeleton curve

3.3 承载能力分析

试件的屈服荷载及极限荷载试验值与模拟值见

表2。从表2可以得出,普通钢筋转换梁框支剪力墙具有与配CFRP筋混凝土转换梁框支剪力墙相当的承载能力。各试件模拟得到的屈服荷载整体都比试验值偏大,误差均在10%左右,这主要是该模型无法有效考虑混凝土开裂后构件截面刚度的退化。

对于FSW-1和FSW-3,试件的极限承载力模拟值与试验值吻合较好;对于试件FSW-4,其极限承载力模拟值与试验值相差较大一些,但总体误差都在12%以内,说明该模型可较准确地反应试件在正反交替荷载作用下的受力特征。

表2 试件屈服荷载和极限荷载的对比

Table 2 Comparison of yield load and ultimate load of specimen

构件	屈服荷载			极限荷载		
	试验值/ kN	模拟值/ kN	误差/%	试验值/ kN	模拟值/ kN	误差/%
FSW-1	265	296.07	11.70	381	373.11	2.07
FSW-3	260	288.74	11.05	394	391.16	0.72
FSW-4	290	319.28	10.10	366.5	410.36	11.97

注:FSW-2由于设备故障未给出数据。

4 结论

基于CFRP筋转换梁框支剪力墙拟静力试验,通过OpenSees平台建立了3榀CFRP筋转换梁框支剪力墙和1榀普通钢筋转换梁框支剪力墙的数值分析模型,并将模拟结果与试验结果对比分析,主要结论为:

1) 配CFRP筋转换梁框支剪力墙的破坏模式均为弯曲型破坏,且与普通钢筋框支剪力墙具有相当的承载力。

2) 采用非线性梁柱单元并考虑了纵筋粘结滑移的数值模型能较好地模拟CFRP筋转换梁框支剪力墙在低周往复循环荷载作用下滞回曲线的捏缩特性和受力特征,验证了数值模型的可靠性。

3) 纵筋粘结滑移变形会对试件捏缩效应和刚度退化等产生显著影响,进行有限元分析时,需考虑纵筋拔出的影响。

参考文献:

[1] 混凝土结构耐久性设计规范:GB/T 50476—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
Code for durability design of concrete structures: GB/T 50476-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[2] 杜修力,王作虎,詹界东. 预应力FRP筋混凝土梁的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2012(2):43-50.

DU X L, WANG Z H, ZHAN J D. Experimental study on seismic behavior of prestressed concrete beams with FRP tendons [J]. China Civil Engineering Journal, 2002 (2): 43-50. (in Chinese)

- [3] 董振华,贾俊峰,韩强. 低周荷载下FRP约束RC矩形空心墩的抗震性能试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(Sup1):827-831.
DONG Z H, JIA J F, HAN Q. Experimental study on seismic behavior of FRP confined rectangular hollow pier under low cyclic loading [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2013, 32 (Sup1): 827-831. (in Chinese)
- [4] 祁勇,朱慈勉,钟树生,等. 不同肢厚比框支短肢剪力墙斜柱式转换层结构抗震试验研究[J]. 振动与冲击, 2012,31(12):155-159.
QI Y, ZHU C M, ZHONG S S. Experimental study on seismic performance of inclined column-shaped transfer floor structure of frame-supported short-leg shear wall based with various ratio leg-thickness [J]. Vibration and Shock, 2012, 31(12): 155-159. (in Chinese)
- [5] 祁勇,钟树生. 框支短肢剪力墙转换结构抗震性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2013,39(4):223-226.
QI Y, ZHONG S S. Experimental study on seismic behavior of frame supported short leg shear wall transfer structure [J]. Building Science Research of Sichuan, 2013, 39(4): 223-226. (in Chinese)
- [6] 吴进进. 加腋式框支短肢剪力墙结构设计研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
WU J J. Study on design of frame supported short-leg shear wall structure with haunched transfer beam [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [7] LIANG W S, CAI J. Nonlinear static analysis of seismic response for transfer structure with haunching braces [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 493-498.
- [8] LIANG W S, CAI J. Displacement-based assessment of seismic resistance for transfer structure with haunching braces [J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 557-562.
- [9] 杨淑斌,程晓杰. 某带高位转换框支剪力墙结构抗震性能分析[J]. 安徽建筑大学学报,2015(6):11-15.
YANG S B, CHEN X J. Seismic behavior of shear wall structure with high transfer frame [J]. Journal of Anhui University of Architecture, 2015 (6): 11-15. (in Chinese)
- [10] 李德顺. 采用加腋梁式转换的框支短肢剪力墙结构抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
LI D S. Study on seismic behavior of frame supported short leg shear wall structure with haunch beam

- conversion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [11] 李炳宏. 配置 BFRP 纵筋及 BFRP 连续螺旋箍筋的混凝土梁的受力性能研究[D]. 重庆: 中国人民解放军后勤工程学院, 2011.
- LI B H. Study on flexural and shear behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars and continuous BFRP rectangular spirals[D]. Chongqing: Logistics Engineering University of PLA, 2011. (in Chinese)
- [12] 曾德光. FRP 筋混凝土梁的受弯性能试验研究和理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- Zeng D G. Experimental study and theoretical analysis on flexural performance of FRP reinforced concrete beams [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [13] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1990, 97:1969-1990.
- [14] 解琳琳, 叶献国, 种迅, 等. 钢筋混凝土柱低周反复试验数值分析的参数研究[J]. 土木工程学报, 2012(Sup1): 273-277.
- XIE L L, YE X G, ZHONG X, et al. Study on parameters of numerical analysis of reinforced concrete columns under cyclic reversed loading [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2012(Sup1): 273-277. (in Chinese)
- [15] MENEGOTTO M. Method of analysis for cyclically loaded R. C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [J]. The Earthquake Engineering Online Archive Lisbon, 1973: 15-22.
- [16] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. Structural Journal, 2007, 104(2):133-141.
- [17] SETZLER E J, SEZEN H. Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformations [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(2): 493-511.
- [18] XU S Y, ZHANG J. Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(3): 315-337.
- [19] MITRA N, LOWES L N. Evaluation, calibration, and verification of a reinforced concrete beam-column joint model [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(1):145-163.
- [20] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2):133-141.
- [21] MAZZONI S, MCKENNA F, FENVES G L. OpenSees command language manual [R]. 2006.

(编辑 王秀玲)