

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0045-05

基于改进 Bouc-Wen 模型的 RC 梁-柱节点抗震性能研究

吕大刚¹, 于晓辉¹, 杜文晨²

(1. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 中国汽车工业工程公司, 天津 300113)

摘 要: 在传统的 Bouc-Wen 材料模型中引入捏缩函数, 提出了一种可以考虑材料捏缩行为的改进 Bouc-Wen 材料模型。将该模型引入到 OpenSees 软件平台中, 基于 Joint2D 节点单元, 对钢筋混凝土(RC)梁-柱节点的抗震性能进行了研究。通过对两个钢筋混凝土梁-柱中节点的往复加载试验结果进行数值模拟, 验证了该文提出的改进 Bouc-Wen 模型的合理性。进一步对 RC 框架梁-柱节点抗震性能的影响因素进行了研究, 结果表明: 截面高宽比和剪跨比对节点的剪切强度和延性影响显著。

关键词: Bouc-Wen 模型; RC 梁-柱节点; 捏缩效应; OpenSees; 抗震性能

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S015

STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF RC BEAM-COLUMN JOINTS WITH A MODIFIED BOUC-WEN MODEL

LÜ Da-gang¹, YU Xiao-hui¹, DU Wen-chen²

(1. Harbin Institute of Technology, Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin, 150090, China;

2. China Automobile Industry Engineering Corporation, Tianjin 300113, China)

Abstract: A pinching function is introduced into the conventional Bouc-Wen material model, and an improved Bouc-Wen material model is proposed considering the pinching behavior of materials. Such a model is incorporated into the OpenSees software platform, and is then combined with the Joint2D element to study the seismic performance of the RC beam-column joints. Two hysteretic experiments of middle beam-column joints are simulated and the improved Bouc-Wen model is verified. Finally the influence factors of RC beam-column joints are examined. The results show that the aspect ratio and the shear span ratio have significant effects on the shear strength and the ductility of joints.

Key words: Bouc-Wen model; RC beam-column joint; pinching effect; OpenSees; seismic performance

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架的梁-柱节点是框架结构传力的枢纽, 它的刚度和延性直接影响到框架结构的变形和耗能能力。梁-柱节点作为 RC 框架结构在地震作用下的薄弱环节, 它通常要求具有比节点区所联系的梁、柱单元更高的承载力, 从而满足“强节点”的要求。从结构分析的角

度, 准确地了解梁-柱节点的抗震性能, 对正确评估 RC 框架结构在地震作用下的损伤意义重大。因此, 国内外学者对 RC 框架梁-柱节点的抗震性能开展了一系列理论和试验研究。

早在 1976 年唐山地震后, 中国建筑科学研究院、东南大学等科研单位就特别组成了框架节点专

收稿日期: 2014-05-08; 修改日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(91315301, 51378162, 51408155); 国家科技支撑计划课题项目(2013BAJ08B01); 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金项目(SLDRCE12-MB-04); 中国高校基本科研业务费专项资金项目(HIT. NSRIF. 2015099); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551251)

通讯作者: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 副院长, 从事抗震可靠性、易损性和鲁棒性研究(E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

作者简介: 于晓辉(1982—), 男, 辽宁丹东人, 助理研究员, 博士, 主要从事地震易损性理论及应用研究(E-mail: yxhhit@126.com);

杜文晨(1989—), 男, 山东济宁人, 助理工程师, 硕士, 主要从事 RC 梁-柱节点抗震性能研究(E-mail: doo_hit13@163.com).

题研究组,并由胡庆昌等^[1]于1982年设计了多组节点试验,针对其抗震性能及剪切强度等影响因素进行了分析,最终给出了剪切强度计算公式及提高节点抗剪强度的方法。近年来,基于OpenSees对RC框架梁柱节点开展精细化有限元数值模拟得到了广泛关注。吴健秋^[2]基于OpenSees软件研究了节点核心区有箍筋配置的中节点试验,对修正斜压场理论的定参方法进行了探索分析。朱庆华等^[3]基于OpenSees数值模拟对RC框架梁、柱节点的抗震性能影响因素进行了研究。李爽等^[4]利用OpenSees模拟通过对比考虑节点影响和不考虑节点影响两种情况下的分析结果,研究了节点对钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌能力的影响。

Joint2D模型是OpenSees软件中较为常用的一种节点单元。它是基于Altoontash提出的一种梁-柱节点模型^[5],该模型是对Lowes和Altoontash提出的宏观分析节点模型^[6]的一种简化。由图1(a)可见,Lowes-Altoontash模型通过1个剪切块分量、8个钢筋滑移分量和4个交界面剪切分量来共同模拟梁-柱节点的抗震性能。由图1(b)可见,Altoontash节点模型包含4个位于梁柱单元与节点交界面的转动弹簧,用以模拟钢筋滑移和拔出引起的梁柱单元端部转动。综上,选择合适的材料模型来模拟节点区的弹簧特性对Joint2D的优化建模十分重要。根据已有的试验结果,RC框架梁-柱节点的变形曲线一般为光滑曲线,因此采用光滑的材料模型来定义节点区弹簧成为了一种合理的选择。在已有的材料模型中,Bouc-Wen材料模型是一种较为常用的光滑模型。但OpenSees中已有的Bouc-Wen模型无法考虑捏缩效应,为此本文通过引入捏缩函数对OpenSees已有的Bouc-Wen模型进行改进,并进一步将其与Joint2D模型相结合,对RC框架梁-柱节点的抗震性能进行了研究。

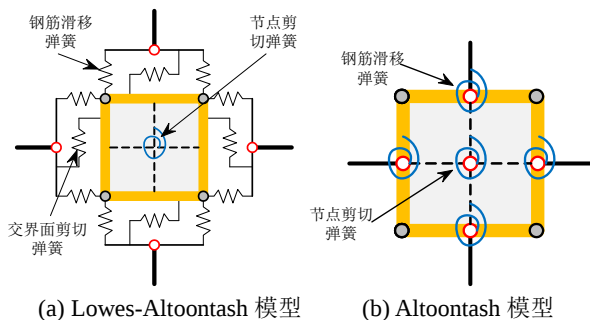


图1 梁-柱节点模型

Fig.1 Beam-column joint model

1 改进的 Bouc-Wen 材料模型

改进的 Bouc-Wen 材料模型是在 OpenSees 原有的 Bouc-Wen 材料模型基础上,通过添加捏缩控制函数 $h(z)$ 来使其能够模拟材料的捏缩滑移。改进的 Bouc-Wen 材料模型为:

$$\dot{z} = h(z) \frac{A\dot{u} - \nu(\beta|\dot{u}|z|^{n-1} + \gamma\dot{u}|z|^n)}{\eta} \quad (1)$$

其中: z 为恢复力; u 为位移; β 、 γ 和 n 为滞回形状参数; A 为影响切线刚度; ν 和 η 为强度和刚度退化参数; 捏缩函数 $h(z)$ 为:

$$h(z) = 1 - \zeta_1 \exp\left(\frac{[-z \times \text{sign}(\dot{u}) - qz_{\max}]^2}{\zeta_2^2}\right) \quad (2)$$

$$\zeta_1(\varepsilon) = \zeta_s \{1 - e^{(-p\varepsilon)}\} \quad (3)$$

$$\zeta_2(\varepsilon) = (\psi + \delta_\psi \varepsilon)(\lambda + \zeta_1) \quad (4)$$

式中: ζ_1 、 ζ_2 、 ψ 、 δ_ψ 和 λ 是捏缩函数的控制参数,通过调整这些参数可以定义材料的捏缩滑移特性;滞回能 ε 是描述强度和刚度退化的关键术语。构件吸收的能量是恢复力 z 和位移 u 的连续积分。

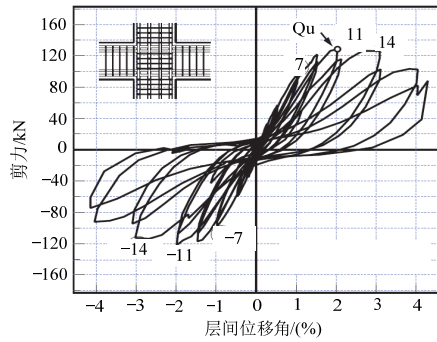
2 RC 梁-柱节点试验的数值模拟

将改进的 Bouc-Wen 材料模型添加至 OpenSees 软件平台中,利用 OpenSees 平台中的 Joint2D 模型,对两组 RC 梁-柱中节点试验进行模拟验证。在 OpenSees 模型中,混凝土选用 Concrete02 材料模型,包括:线性抗拉段和线性受拉软化段;钢筋选用 Steel02 材料模型,能够考虑等向应变硬化的影响;梁柱单元采用非线性梁柱单元(Nonlinear BeamColumn Element);梁柱截面采用纤维截面模型(Fiber Section)。本文采用刚节点及基于 Pinching4 材料(以下简称 P4)和改进 Bouc-Wen 材料(以下简称 BW)的 Joint2D 节点建模方式,并对数值模拟结果进行了对比分析。本文不考虑钢筋滑移的影响,Pinching4 材料和改进 Bouc-Wen 材料均用来定义节点剪切弹簧的恢复力关系。

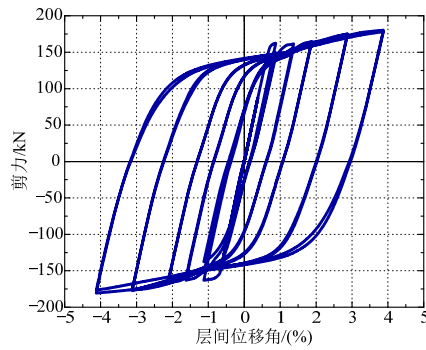
本文模拟的第一组节点试验选用 Zaid 与 Shiohara 等^[9]于1999年所做的新型节点试验中的普通中节点组合体试验(S3),具体试验方案见文献[9]。本文采用的第二组节点试验是 Kusahara 和 Azukawa 等^[10]所做的钢筋混凝土框架中间层中节点试验中的普通无偏心中节点组合体试验(JE0),具体试验方案见文献[10]。图2和图3分别给出了试件 S3 和 JE0 的试验结果以及数值模拟结果的对比。由图可见:

不考虑节点核心区的性能退化与试验数据差别较大,并且峰值剪力过高。基于 Pinching4 材料和改进 Bouc-Wen 材料的 Joint2D 节点模型具有基本一致的模拟精度。由于 Pinching4 材料是一种可以较好模拟材料的捏缩滑移特性的材料模型,因此,这证

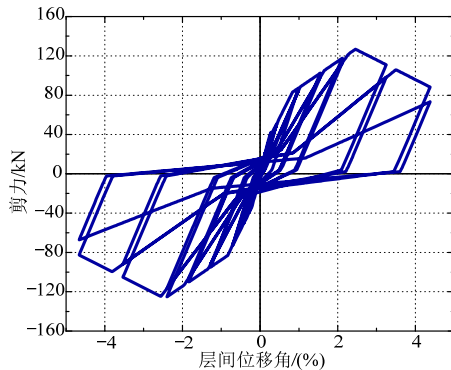
明了改进 Bouc-Wen 模型具有了模拟材料捏缩滑移的特性。



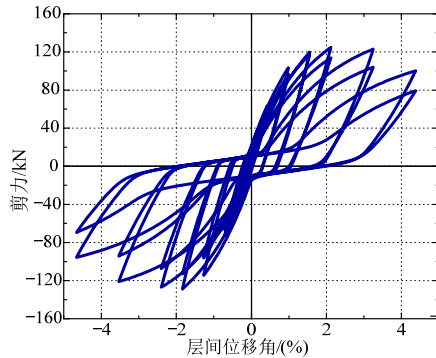
(a) 实验数据^[9]



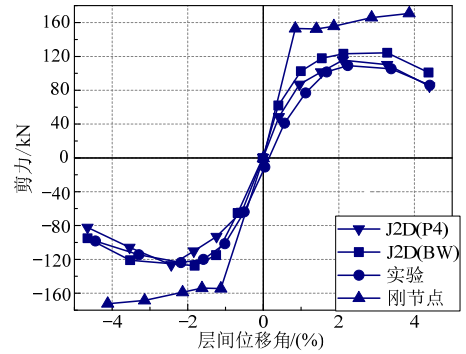
(b) 刚节点模拟



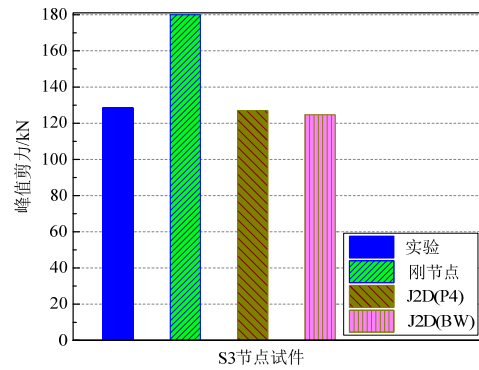
(c) 基于 P4 材料的 Joint2D 模拟



(d) 基于 BW 材料的 Joint2D 模拟



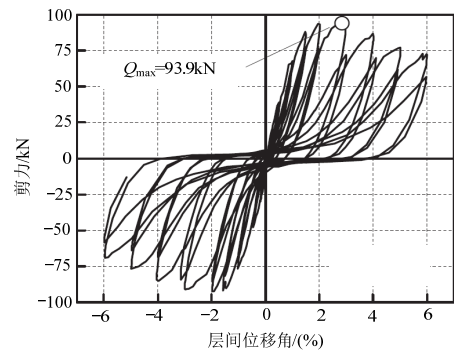
(e) 骨架曲线对比



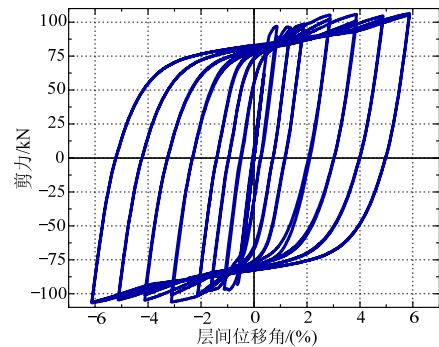
(f) 峰值剪力对比

图 2 S3 节点试验结果及数值模拟结果

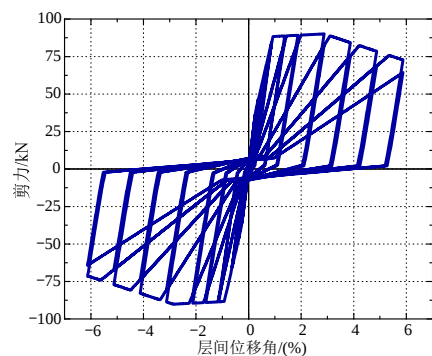
Fig.2 Test results and numerical simulation results of the S3 joint



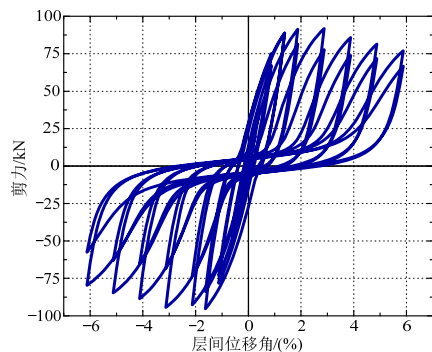
(a) 实验数据^[10]



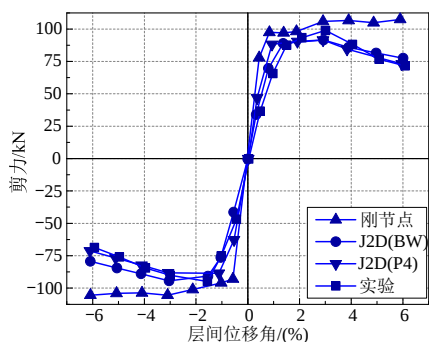
(b) 刚节点模拟



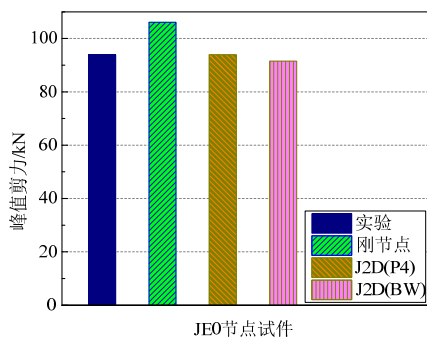
(c) 基于 P4 材料的 Joint2D 模拟



(d) 基于 BW 材料的 Joint2D 模拟



(e) 骨架曲线对比



(f) 峰值剪力对比

图3 JE0 节点试验结果及数值模拟结果

Fig.3 Test results and numerical simulation results of the JE0 joint

3 RC 框架梁-柱节点的影响因素分析

RC 框架梁-柱节点的抗震性能受众多因素影响, 包括: 节点截面比、梁柱配筋率、柱竖向荷载、

柱轴压比和剪跨比、失效模式、楼板作用、加载时程、体积配箍率、纵筋的横向加固等。本文选取节点截面高宽比、柱轴压比和剪跨比三个参数进行分析, 并用延性折减系数和峰值剪力骨架曲线对结果进行评价。其中, 延性折减系数是构件破坏时的变形与屈服时的变形的比值。本文基于节点核心区失效模式确定节点的破坏, 因为这种失效模式主要是节点区的纯剪切变形引起的, 此时梁、柱还没有屈服, 能最大限度的反应节点的剪切强度^[11]。

节点截面高宽比 α 是梁高 H_b 和柱宽 H_c 之比。这种定义将整个节点视为一个剪切板, 它通过剪切应力传递荷载^[11]。本文总共选取了节点截面高宽比为 $\alpha=0.6$ 、 0.8 、 1.0 、 1.2 和 1.5 五种情况进行分析。图4和图5是节点在不同截面高宽比情况下的骨架曲线和延性折减系数的对比结果。由图可见: 在节点区面积一定的情况下, 节点截面高宽比越大, 梁-柱节点的剪切强度和屈服强度越小, 而且截面高宽比的增大会使节点提前进入屈服状态。但是较大或者较小的截面高宽比都会减小节点构件的延性, 因此合适的截面高宽比才能最好的发挥节点的延性和剪切强度。

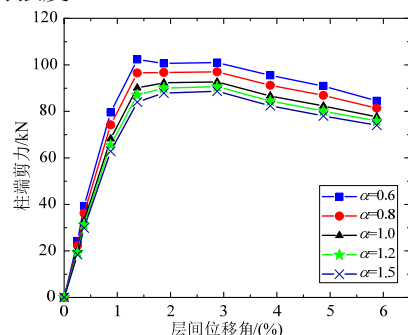


图4 RC 框架梁-柱节点在不同截面高宽比情况下的骨架曲线

Fig.4 The envelop curves for the RC frame beam-column joints with different aspect ratios

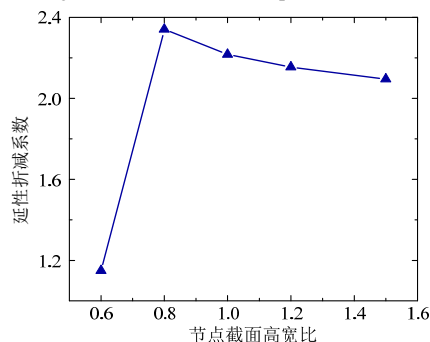


图5 RC 框架梁-柱节点在不同截面高宽比情况下的延性折减系数

Fig.5 The ductility reduction factors for the RC frame beam-column joints with different aspect ratios

图 6 和图 7 给出了节点在不同柱剪跨比 λ 条件下的骨架曲线和延性折减系数的对比结果。柱子的剪跨比为 $\lambda=L_c/h_c$ 。其中, L_c 为柱净高和节点一半高度之和, h_c 为柱变形平面内的截面宽度。本文取 $\lambda=3.0$ 、 3.5 、 4.0 和 4.5 四种情况进行分析对比。由图可见, 剪跨比增大会减小节点的剪切强度。但是, 同节点截面高宽比的影响一样, 剪跨比过大或者过小都不利于 RC 框架节点的延性设计。因为剪跨比 $\lambda>4$ 时, 柱子是容易发生弯曲破坏的长柱, 可以使节点先于柱子破坏, 发挥出节点的延性。但是, 剪跨比过大会使柱子发生失稳, 可能导致轴向失效 (Axial Failure)^[11]。由图可见, 剪跨比过大会使节点延性迅速下降。

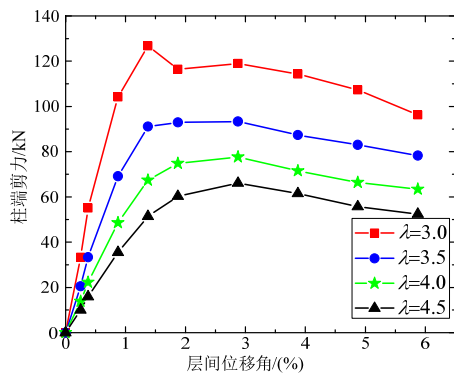


图 6 RC 框架梁-柱节点在不同截面剪跨比情况下的骨架曲线

Fig.6 The envelop curves for the RC frame beam-column joints with different shear span ratios

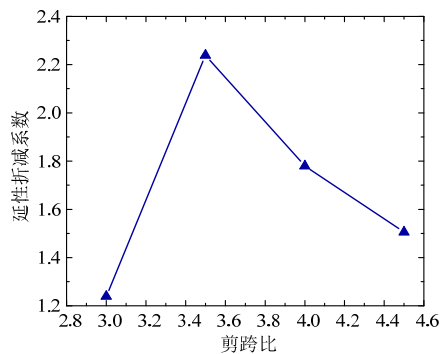


图 7 RC 框架梁-柱节点在不同截面剪跨比情况下的延性折减系数

Fig.7 The ductility reduction factors for the RC frame beam-column joints with different shear span ratios

图 8 和图 9 是柱轴压比对节点剪切强度和延性折减系数的影响。由图可见, 轴压比对节点的剪切强度和延性几乎没有影响。但是, 这一结论还需更多的数值模拟分析结合理论研究做进一步的讨论。

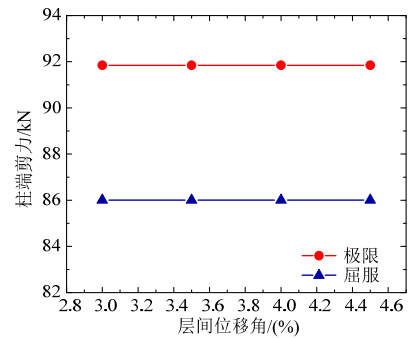


图 8 RC 框架梁-柱节点在不同轴压比情况下的极限剪力和屈服剪力

Fig.8 The limit shear and yield shear for the RC frame beam-column joints with different axial compression ratios

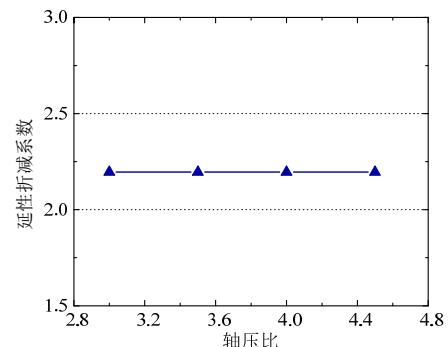


图 9 RC 框架梁-柱节点在不同轴压比情况下的延性折减系数

Fig.9 The ductility reduction factors for the RC frame beam-column joints with different axial compression ratios

4 结论

(1) 改进的 Bouc-Wen 材料模型可以较好地模拟 RC 框架梁-柱节点在往复荷载作用下的强度和刚度退化现象。

(2) RC 框架梁-柱节点的截面高宽比和剪跨比对节点的剪切强度和延性影响显著。轴压比的影响并不明显, 但这一结论尚需做进一步的深入讨论。

参考文献:

- [1] 胡庆昌, 徐云扉, 陈玉峰. 低周反复荷载下钢筋混凝土框架梁柱节点核心区的受力性能[J]. 建筑结构, 1982, 4: 14—19.
Hu Qingchang, Xu Yunfei, Chen Yufeng. Performance of beam-column joints of reinforced concrete frames under low-cycle loading [J]. Building Structures, 1982, 4: 14—19. (in Chinese)
- [2] 吴健秋. 基于 OpenSees 的梁-节点单元的适用性和定参方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
Wu Jianqiu. A study on the applicability and parameter defining method of the beam-column model in OpenSees [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)

(参考文献[3]—[11]转第 54 页)

向相关系数最小。升力和扭矩的展向相关系数在 0° 风攻角时最大, 且随着风攻角的增大而减小。

参考文献:

- [1] Larsen A. Advances in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74/75/76: 73—90.
- [2] 刘志文, 陈政清. 串列双幅典型断面三分力系数气动干扰效应[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(5): 6—13.
Liu Zhiwen, Chen Zhengqing. Aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of typical sections in tandem arrangement [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(5): 6—13. (in Chinese)
- [3] Bartoli G, Bruno L, Buresti G, et al. BARC: A benchmark on the aerodynamics of a rectangular 5:1 cylinder [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25: 586.
- [4] Bruno L, Coste N, Fransos D. Simulated flow around a rectangular 5:1 cylinder: Spanwise discretization effects and emerging flow features [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104/105/106: 203—215.
- [5] Bruno L, Fransos D, Coste N, Bosco A. 3D flow around a rectangular cylinder: A computational study [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 263—276.
- [6] Bruno L, Salvetti M, Ricciardelli F. Benchmark on the aerodynamics of a rectangular 5:1 cylinder: An overview after the first four years of activity [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 126: 87—106.
- [7] 李明水, 孙研国, 廖海黎. 基于涡激力偏相关的大跨度桥梁涡激振动线性分析方法[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(5): 675—679.
Li Mingshui, Sun Yanguo, Liao Haili. A linear approach of vortex induced vibration for long span bridge based on partial correlation of aerodynamic force [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(5): 675 — 679. (in Chinese)
- [8] Ricciardelli F. Effects of the vibration regime on the spanwise correlation of the aerodynamic forces on a 5:1 rectangular cylinder [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 215—225.
- [9] 李加武, 林志兴, 金挺. 压力积分法在桥梁断面雷诺数效应研究中的应用[J]. *振动工程学报*, 2006, 19(4): 505—508.
Li jiawu, Lin Zhixin, Jin Ting. Application of pressures integration in effects of bridge decks [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(4): 505 — 508. (in Chinese)
- [10] Schewe G. Reynolds-number-effects in flow around a rectangular cylinder with aspect ratio 1:5 [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 39: 15—26.

(上接第49页)

- [3] 朱庆华, 梁书亭, 王杰, 等. 基于OpenSees的钢筋混凝土框架节点抗震性能影响因素分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2007, 29(5): 30—34.
Zhu Qinghua, Liang Shuting, Wang Jie, et al. Analysis of influence factors for seismic capacity of joints in reinforced concrete frame based on OpenSees [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2007, 29(5): 30—34. (in Chinese)
- [4] 李爽, 赵颖, 翟长海, 谢礼立. 节点对 RC 框架结构抗连续倒塌能力影响研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 80—88.
Li Shuang, Zhao Ying, Zhai Changhai, Xie Lili. The influences of Joint on the progressive collapse-resisting performance of RC frames [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 80—88. (in Chinese)
- [5] Lowes L N, Mitra N, Altoontash A. A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames [R]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2003.
- [6] Altoontash A. Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints [D]. California: Stanford University, 2004.
- [7] Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C]// *Proceedings of the 4th Conference on Non-linear Oscillations*, Prague, Czechoslovakia, 1967: 315.
- [8] Baber T T, Wen Y K. Random vibrations of hysteretic degrading systems [J]. *ASCE: Journal of Engineering Mechanics Division*, 1981, 107(6): 1069—1087.
- [9] Zaid S, Shiohara H, Otani S. Test of a joint reinforcing detail improving joint capacity of R/C interior beam-column joint [C]// *The 1st Japan-Korea Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures*, Seoul: Seoul National University, 1999: 1—11.
- [10] Kusahara F, Azukawa K, Shiohara H, et al. Tests of reinforced concrete interior beam-column joint subassembly with eccentric beams [C]// *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 2004: Paper No.185.
- [11] Wael M H. Analytical and experimental assessment of seismic vulnerability of beam-column joints without transverse reinforcement in concrete buildings [D]. Berkeley, California: University of California, 2011.