文章编号: 1007 - 6069(2011)01 - 0110 - 05

基于 OpenSees 的钢筋混凝土桥墩拟静力试验数值分析

李贵乾[1,2],郑 罡[2],高 波[1,2]

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院,重庆 400074; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁结构动力学国家重点实验室,重庆 400067)

摘 要: 以 4 个呈弯曲破坏形态的圆形钢筋混凝土桥墩的拟静力试验结果为依据,基于 OpenSees 中的 BeamwithHingesElement 单元,建立了相应的桥墩滞回分析纤维单元模型。由模拟结果与试验结果对比可知,所建立的纤维单元模型对桥墩的骨架曲线及滞回曲线都有良好的模拟效果,且能体现桥墩在反复加载过程中刚度、强度退化现象,表明了模型的有效性。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; 拟静力试验; OpenSees; 纤维单元模型; 数值分析

中图分类号: TU202; P315.97 **文献标志码**: A

Numerical analysis for pseudo-static tests of reinforced concrete bridge columns based on OpenSees

LI Guiqian[1,2], ZHENG Gang[2], GAO Bo[1,2]

(1. Department of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. State Key Laboratory of Bridge Structural Dynamics, Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Based on the pseudo-static test of 4 R/C bridge columns, which are circular-section and flexural failure, the BeamwithHingesElement in OpenSees is applied to model the hysteretic behavior of R/C bridge columns subjected to cyclic loading. The comparison between computed results and experiment results shows that the fiber element model in OpenSees can accurately stimulate the skeleton curves, hysteretic curves of the columns, and also describe their stiffness, strength degradation in the cyclic loading process.

Key words: R/C bridge columns; pseudo-static test; OpenSees; fiber element model; numerical analysis

引言

地震荷载作用下,钢筋混凝土桥墩通常是最易破坏的桥梁构件,其滞回耗能性能在一定程度上决定了桥梁的整体抗震能力。因此,如何较可靠地模拟钢筋混凝土桥墩在循环荷载作用下的非线性滞回反应是桥梁结构抗震研究的重要内容。

纤维单元模型因其简洁性和有效性而被广泛地运用于桥墩的非线性滞回分析,Cofer 等人[1] 基于 NEABS 和 ABAQUS 软件分别建立了反复荷载下桥墩的纤维单元模型; Lee 和 Elnashai[2] 基于纤维单元程序 ADAPTIC,对弯剪作用下钢筋混凝土柱的滞回性能进行了模拟分析; Esmaeily 和 Xiao[3] 基于纤维单元模型编

收稿日期: 2009 - 12 - 24; **修订日期**: 2010 - 01 - 04

基金项目: 重庆市杰出青年科技基金项目(CSTC, 2008BA6039); 交通部西部交通建设科技项目(200731882233)

作者简介: 李贵乾(1984 -),男,硕士研究生,主要从事桥梁抗震研究. E-mail: lgqmancan@163.com

通讯作者: 郑 罡(1972 -),男,研究员,博士,主要从事桥梁抗震,振动控制与结构健康监测方面的研究. E-mail: zhenggang@cmhk.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制了桥墩的滞回分析程序。而以美国 Bekerley 大学为主研发的 OpenSees 程序,因其较好的非线性地震响应模拟能力,引起了世界各国地震工程领域众多研究人员的关注和重视。OpenSees 具备较丰富的材料模型、单元模型、分析选项和强大的求解功能,集中反映了当今结构工程前沿领域许多崭新的研究成果,所提供的纤维单元模型适合于钢筋混凝土桥墩在地震作用下的响应分析。

文中以 4 个呈弯曲破坏形态的圆形钢筋混凝土桥墩的拟静力试验结果为依据,基于 OpenSees 程序,建立了桥墩滞回分析的纤维单元模型,获得了良好的模拟效果。

1　钢筋混凝土桥墩拟静力试验

在上世纪 90 年代的几次破坏性地震 1994 年美国 NorthRidge 地震、1995 年日本 Kobe 地震、1999 年中国台湾 Chi-Chi 地震),以及本世纪初的中国汶川地震(2008 年),桥梁墩柱受到了较为严重的破坏。为研究桥墩在地震作用下的抗震性能,国内外学者进行了大量的钢筋混凝土桥墩拟静力试验研究,积累了丰富的试验数据。文中的试验数据取自美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center,简称 PEER),试验由 Lehman 等[4,5]在美国 Bekerley 大学结构实验室完成,试验桥墩具有一定的代表性与典型性。该组试验的目的是为了得到良好约束的圆形截面钢筋混凝土桥墩的抗震及地震损伤性能,试验桥墩的设计参数和侧向位移加载历程分别见表 1 和图 1(图中 Δ_y 为屈服位移)。

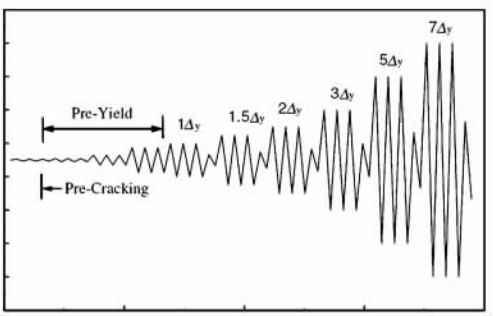

图 1　侧向位移加载历程

Fig. 1　Lateral displacement loading history for the tests

试验所得部分桥墩的最终破坏形态如图 2 所示。试验最终阶段,桥墩塑性铰区保护层混凝土压碎剥落,核心混凝土压溃,裂缝发展明显;纵筋屈曲,且部分纵筋发生拉断现象;箍筋拉断,桥墩均呈明显的弯曲破坏形态。

表 1　桥墩主要设计参数

Table 1　Main design parameters of bridge columns

桥墩编号	混凝土强度/MPa	纵筋屈服强度/MPa	纵筋极限强度/MPa	纵筋率/%	配箍率/%	截面直径/mm	测试墩高/mm	轴压比
No. 415	31	462	630	1.49	0.7	610	2 438	0.072
No. 430	31	462	630	2.98	0.7	610	2 438	0.072
No. 815	31	462	630	1.49	0.7	610	4 877	0.072
No. 1015	31	462	630	1.49	0.7	610	6 096	0.072

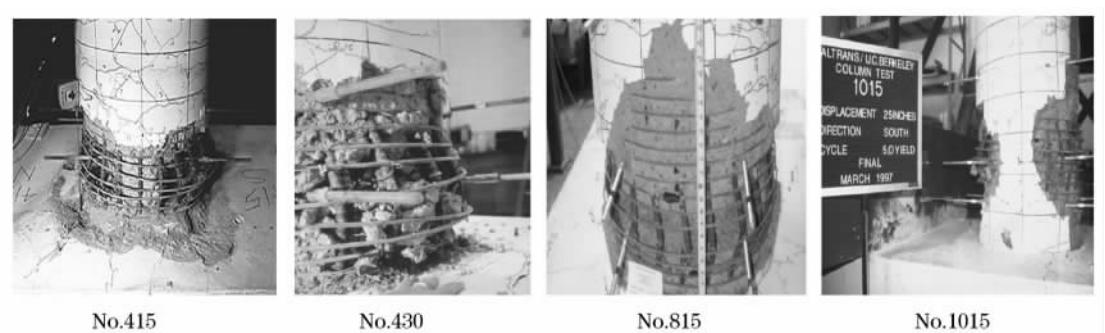

图 2　桥墩最终破坏形态

Fig. 2　Failure modes of the bridge columns

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 桥墩滞回分析的纤维单元模型

2.1 纤维单元模型

利用 OpenSees 中基于柔度法的 Beam-withHingesElement[6] (以下简称为 BHE) 纤维单元模型对钢筋混凝土桥墩的非线性滞回性能进行分析。模型由端部的塑性铰单元和上部的线弹性杆单元构成。其中,塑性铰单元模拟桥墩的非线性性态(包括剪切效应、钢筋混凝土粘结 - 滑移效应) ,线弹性杆单元模拟桥墩的弹性反应; 而混凝土和钢筋的应力-应变关系则反映在各纤维束中,纤维单元模型如图 3 所示。BHE 纤维单元的主要参数为塑性铰单元长度 L_p 和线弹性杆单元的等效刚度 EI_{eff},分别按文献[7]相关规定计算,结果如表 2 所示。

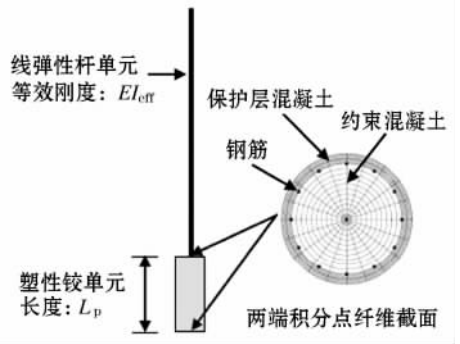

图 3 桥墩滞回分析纤维单元模型

Fig. 3 Fiber element model for bridge columns

表 2 桥墩塑性铰长度及弹性区等效刚度

Table 2 Plastic-hinge length and effective stiffness of bridge columns

桥墩编号	L_p/m	EI_{eff}/(kN · m^2)
No. 415	0. 35	6.98×10^4
No. 430	0. 35	1.05×10^5
No. 815	0. 41	6.98×10^4
No. 1015	0. 41	6.98×10^4

2.2 混凝土本构模型

在纤维单元模型中,混凝土采用 Scott 等人修正后的 Kent-Park 模型[8] (即 OpenSees 中的 Concrete02 材料) ,其应力-应变滞回关系如图 4 所示。该模型通过改变混凝土受压骨架曲线的峰值应力、峰值应变以及软化段斜率来考虑横向箍筋的约束影响,且可以考虑混凝土的剩余强度; 而混凝土受拉时的上升段和下降段均为直线,可考虑混凝土的初始开裂。Concrete02 混凝土模型是在简化与精确之间的一种较好的平衡,对钢筋混凝土桥墩非线性分析有良好的精度。其受压骨架曲线分以下 3 段加以描述:

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf'_c[2\varepsilon_c/\varepsilon_0 - (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2] & (\varepsilon_c < \varepsilon_0) \\ Kf'_c[1 - Z_m(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] & (\varepsilon_0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{20}) \\ 0.2Kf'_c & (\varepsilon_c > \varepsilon_{20}) \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\varepsilon_0 = 0.002K \quad (2)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (3)$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s\sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K} \quad (4)$$

上述式中: K 为考虑约束所引起的混凝土强度增加系数,0. 002K 是相应的峰值应变; Z_m 为应变软化段斜率; f'_c为混凝土圆柱体抗压强度(MPa) ; f_{yh}为是箍筋的屈服强度(MPa) ; ρ_s为体积配箍率; h'为从箍筋外边缘算起的核心混凝土宽度; S_h为箍筋间距。

2.3 钢筋本构模型

钢筋在反复荷载作用下的本构关系对桥墩滞回曲线的模拟有重要影响,选择合理、恰当的钢筋应力-应变滞回模型是较可靠地模拟钢筋混凝土桥墩非线性滞回反应的关键。由于在试验过程中有纵筋屈曲或拉断的现象,且加载后期桥墩有明显的强度和刚度退化现象。因此,在纤维单元模型中,钢筋采用 Mohle-Kunnath 钢筋模型[6] 。该模型建立在 Chang 和 Mander[9] 所提出的等向强化钢筋模型基础上,可以考虑钢筋的 Baus-

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

chinger 效应、低周疲劳效应(循环加载过程中的强度、刚度退化) 以及准确预测钢筋的断裂,其应力-应变滞回关系如图 5 所示。反应钢筋低周疲劳效应和控制钢筋断裂现象的是以下 3 个参数:

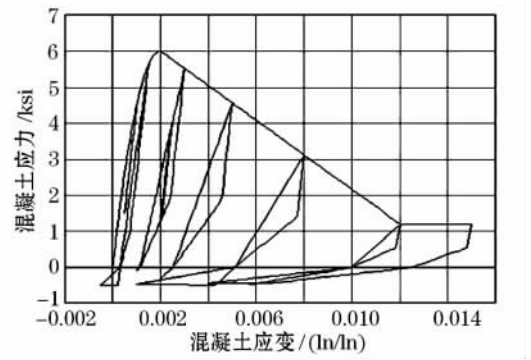

图 4　Concrete02 应力-应变滞回关系

Fig. 4　Hysteretic stress-strain relation of concrete02 model

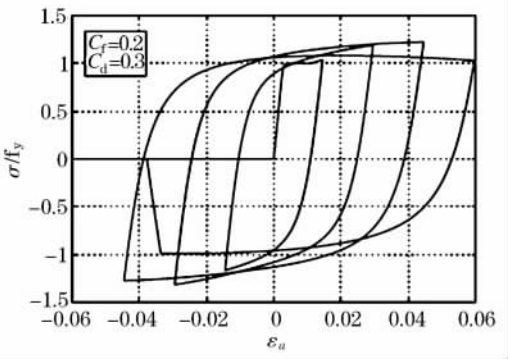

图 5　Mohle-Kunnath 模型应力-应变滞回关系

Fig. 5　Hysteretic stress-strain relation of Mohle-Kunnath steel model

(1) 损伤累积系数 α: 控制钢筋在循环加载过程中的损伤累积效应,α 值越大,则每周循环加载后的钢筋强度折减量越多,其应力-应变滞回曲线捏得越拢。

(2) 疲劳延性系数 C_f: 控制钢筋断裂的循环加载次数,C_f 值越大,则钢筋能承受的循环加载次数越多; 对钢筋断裂前的滞回曲线形状无影响。

(3) 疲劳强度退化系数 C_d: 控制每周循环加载后的钢筋强度折减量,C_d 值越大,则每周循环加载后的钢筋强度折减量越少。

Kunnath 和 Brown[10] 的钢筋低周疲劳材料试验研究得出上述 3 个参数的推荐值分别为: α = 0.506, C_f = 0.26, C_d = 0.389。

3　桥墩滞回曲线数值模拟

采用 OpenSees 中 BHE 单元建立桥墩滞回分析的纤维单元模型,对所选取的 Lehman 试验墩柱进行数值模拟(以位移控制进行滞回加载) ,模拟得到的桥墩骨架曲线、滞回曲线及其与试验结果的对比,如图 6 和图 7 所示。

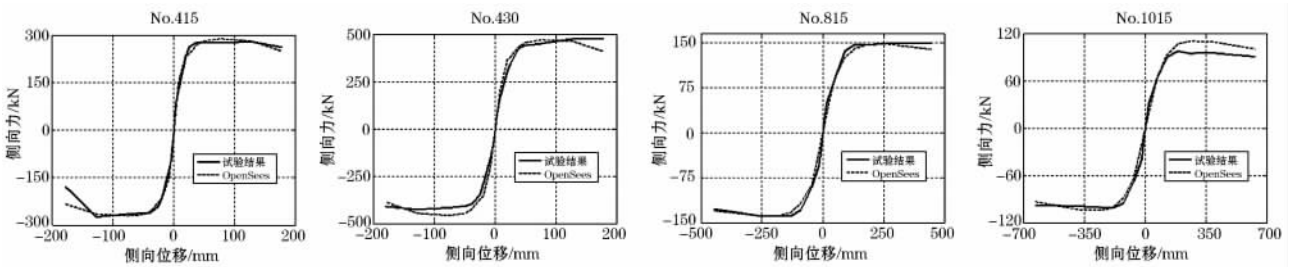

图 6　桥墩骨架曲线的对比

Fig. 6　Comparisons of the experimental and simulated skeleton curves

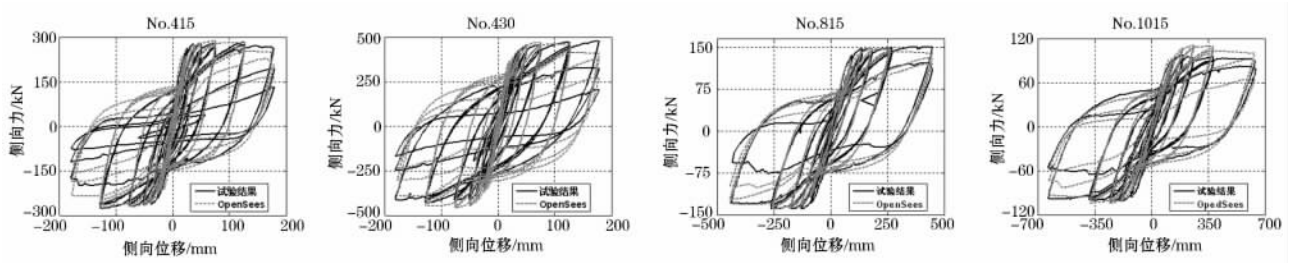

图 7　桥墩模拟滞回曲线与试验结果的对比

Fig. 7　Comparisons of the experimental and simulated hysteretic curves

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图6可以看出,各桥墩骨架曲线的计算值与试验值较为吻合,对比桥墩的极限承载力可以发现,除No.815号桥墩外,计算值比试验值偏高,但误差在8%以内(见表3)。

表3 桥墩极限承载力对比

Table 3 Comparisons of ultimate loads of bridge columns

桥墩编号	OpenSees/kN	试验/kN	(OpenSees-试验)/试验/%
No.415	279.8	277	1
No.430	465.6	452	3
No.815	143.3	144	-0.5
No.1015	107.5	99.5	8

注:表中数字为正负方向绝对值的平均值。

从图7可以看出,除No.430号桥墩外,其余桥墩滞回曲线的捏拢现象和卸载段都得到了较好的模拟。而模拟的No.430号桥墩滞回曲线未能准确地反映试验的捏拢现象,且初始刚度和卸载段的刚度偏大,这有可能是单纯的钢筋低周疲劳材料试验研究所得的疲劳参数与真实的钢筋混凝土存在差异以及给定的No.430号桥墩等效刚度偏大的缘故,具体原因有待进一步研究。

在桥墩加载后期阶段,试验结果显示,随着侧向位移的增大、荷载循环次数的增多,塑性铰区混凝土压碎脱落,纵筋屈曲、断裂,桥墩侧向承载力及刚度不断降低,数值模拟的结果有效地体现了这一过程。与考虑低周疲劳效应的Mohle-Kunnath钢筋模型相比,采用一般常用的双线性钢筋模型或Giuffer-Menegotto-Pinto钢筋模型并不能体现这一现象[11];同时,在计算过程中发现,桥墩侧向承载力迅速降低时,通常对应着钢筋的突然断裂。可见,钢筋的滞回特性对钢筋混凝土桥墩的退化特性是重要的,而钢筋的断裂将导致桥墩承载力及其耗能能力的突然下降。因此,可靠的钢筋模型对桥墩在反复加载过程中刚度、强度退化现象的模拟亦较为重要。

由模拟结果与试验结果对比可以看出,所建立的纤维单元模型对桥墩的骨架曲线及其滞回曲线都有良好的模拟效果。

4 结论

采用OpenSees中的BHE纤维单元模型进行了4个呈弯曲破坏形态的钢筋混凝土桥墩滞回曲线的模拟,并将模拟结果与试验结果进行比较,得到如下主要结论:

(1)要较好地模拟桥墩在反复加载过程中刚度、强度退化现象,则应有效地体现钢筋的低周疲劳效应和断裂破坏。

(2)采用Concrete02混凝土模型和Mohle-Kunnath钢筋模型建立的纤维单元模型,对桥墩的骨架曲线及滞回曲线都有良好的模拟效果。

(3)从文中4个桥墩的模拟结果来看,文献[7]所规定的塑性铰长度和等效刚度的计算方法是匹配的,已能满足桥墩强物理非线性计算的需求。

参考文献

[1] Cofer W F, Zhang Y, Mclean D I. A comparison of current computer analysis methods for seismic performance of reinforced concrete Members [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38(9): 835-861.

[2] 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.

[3] Asadollah E G, Xiao Yan. Seismic behavior of bridge columns subjected to various loading patterns [R]. PEER 2002/15, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.

[4] Berry M, Parish M, Eberhard M. PEER Structural Performance Database User's Manual [Z]. Berkeley: PEER, University of California, 2004.

[5] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns [R]. PEER 1998/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.

[6] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. OpenSees Command Language Manual [Z]. Berkeley: PEER, University of California, 2007.

[7] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则 [S].
JTG/T B02-01-2008 Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges [S].

[8] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.

[9] Chang G, Mander J. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I evaluation of seismic capacity [R]. NCEER Technical Report, 1994-0006.

[10] Brown J, Kunnath S K. Low cycle fatigue behavior of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge columns [R]. NCEER Technical Report, 2000-0007.

[11] Berry M P. Performance modeling strategies for modern reinforced concrete bridge columns [D]. University of Washington, 2006.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net