

无黏结预应力 RC 桥墩抗震性能的数值分析

司炳君¹ 陈 灿¹ 孙治国¹ 王东升²

(1. 大连理工大学 建设工程学部 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: 配置竖向无黏结预应力筋, 利用其弹性恢复力减小钢筋混凝土桥墩在大震下的残余位移和裂缝宽度, 是实现桥墩地震损伤控制的有效手段。本文在完成的拟静力试验基础上, 基于 OpenSees 分析平台建立了无黏结预应力钢筋混凝土桥墩抗震数值分析模型, 采用非线性纤维梁柱单元模拟桥墩的弯曲变形, 采用修正的压力场理论计算试件剪切变形并通过剪切弹簧模拟, 通过零长度转动弹簧模拟纵筋拔出变形, 三者共同考虑试件在地震下的弯-剪-轴力耦合作用。将模拟得到的试件滞回曲线、残余位移、预应力筋应力等与试验结果进行了对比, 同时将模拟得到的墩顶弯曲变形、纵筋拔出变形和剪切变形进行了分离。结果表明: 模拟得到的试件滞回曲线、残余位移、预应力筋应力等与试验结果吻合良好, 该模型可对竖向配置无黏结预应力筋钢筋混凝土桥墩的抗震性能进行准确的模拟分析。纵筋拔出变形可占墩顶总变形的 30%~50%, 在数值模型中不可忽略。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; 无黏结预应力筋; 数值分析; OpenSees; 纵筋拔出变形; 剪切变形

中图分类号: TU378.3; U443.22

文献标志码: A

Numerical analysis of the seismic performance of unbonded prestressed RC bridge piers

SI Bingjun¹, CHEN Can¹, SUN Zhiguo¹, WANG Dongsheng²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

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

Abstract: For seismic damage prevention design of reinforced concrete (RC) bridge piers, longitudinal unbonded prestressed tendons were used to minimize residual displacement and concrete cracking width of the piers under seismic action. Based on quasi-static test results, a numerical model for seismic analysis of the unbonded prestressed RC bridge piers was built on the basis of OpenSees analysis platform. In this model the nonlinear fiber beam column element was used to simulate the flexural deformation of the piers. The shear deformation was calculated by the Modified Compression Field Theory (MCFT) and simulated by the shear spring element. While the longitudinal bar slip deformation was modeled by the zero length rotation spring. Thus, flexure-shear-axial interaction of the piers under seismic action was simulated by combining the three deformation components. The simulated hysteretic curves, the residual displacement, and the unbonded prestressing tendon stress were compared with experimental results. Also, the flexural, shear and longitudinal bar slip deformations of the piers obtained by the numerical model were obtained. The results indicate that simulated hysteretic curve, residual displacement and unbonded prestressed tendon stress agreed well with test data. And the model could be used to simulate the seismic behavior of

收稿日期: 2014-01-14; 修订日期: 2014-03-13

基金项目: 国家 973 计划项目(2011CB013605); 国家自然科学基金项目(50978042, 51008041); 中国博士后基金项目(2013M540226); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1212)

作者简介: 司炳君(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为桥梁与结构工程抗震. E-mail: sibingjun@aliyun.com

通讯作者: 孙治国(1980-), 男, 博士, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: szg_1999_1999@163.com

the longitudinal unbonded prestressed RC bridge piers. The longitudinal bar slip deformation would account for 30% ~ 50% of the total lateral displacement, and should not be neglected in the analysis model.

Key words: RC bridge piers; unbonded prestressing tendon; numerical analysis; OpenSees; bar slip deformation; shear deformation

引言

近年来,我国跨海桥梁工程建设迅速发展,对跨海桥梁水下桥墩的抗震问题而言,传统的“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设计理念已无法保证其抗震安全。由于所发挥社会功能的特殊性,跨海桥梁墩柱对震后可修复性、耐久性等提出了更为严格的要求。限制桥墩的震后残余位移并延缓混凝土的开裂破坏过程是实现跨海桥梁地震损伤控制设计,保证跨海桥梁全寿命抗震安全的关键。

1995年日本Kobe地震中,大量钢筋混凝土桥墩尽管仅遭受中度或轻度破坏,但由于残余位移过大而不得不拆除重建,并由此引发了人们对桥墩震后残余位移控制问题的关注^[1]。在此背景下,在桥梁墩柱中配置竖向预应力筋,利用其弹性恢复力减小桥墩震后残余位移并延缓混凝土的开裂破坏过程,成为控制桥墩地震损伤破坏,保证其震后可修复性及耐久性的有效手段,而建立合理有效的预应力混凝土桥墩抗震数值分析模型成为桥梁抗震研究的重要课题^[2-5]。Kwan和Billington基于DIANA软件,建立了配置无黏结预应力筋双柱式预制桥梁排架的非线性有限元模型,通过拟静力和时程分析研究了这种结构的抗震能力^[6,7]。Wang、Ou等则通过ABAQUS软件建立了节段拼装预应力混凝土桥墩的有限元抗震分析模型,并通过与试验结果的对比验证了模型的准确性^[8,9]。Sakai和Mahin建立了竖向配预应力筋钢筋混凝土桥墩的纤维单元模型,探讨了预应力筋对桥墩残余位移控制的有效性^[10]。Lee等则基于OpenSees的纤维梁柱单元发展了预应力混凝土桥墩的抗震分析模型^[11]。我国葛继平和王志强等^[12,13]针对节段拼装桥墩,也发展了预应力混凝土桥墩抗震的集中塑性铰模型和纤维单元模型。

应当注意到,合理的桥墩地震损伤控制分析模型不仅要求对桥墩极限承载力和极限变形能力的模拟,而且包括对桥墩震后残余位移、预应力筋应力水平的准确估计,这大大增加了桥墩数值分析模型的建模难度。由于反复荷载作用下钢筋混凝土桥墩的变形主要由弯曲、剪切以及纵筋在底座中的拔出组成。对弯曲破坏控制的桥墩,纵筋拔出变形可达总变形的50%,并对结构的初始刚度产生明显影响;而对于剪切破坏控制的桥墩,剪切变形可达总变形的30%以上,并严重影响滞回曲线的捏拢效应。因此,合理考虑桥墩的各变形成分及各成分间的有效耦合是建立桥墩抗震数值分析模型的关键^[11,14-16]。本文在完成的竖向配预应力筋钢筋混凝土桥墩抗震拟静力试验的基础上,建立了考虑桥墩弯曲、剪切及纵筋拔出成分的预应力桥墩抗震数值分析模型,采用纤维梁柱单元模拟桥墩弯曲变形,采用修正的压力场理论计算试件的非线性剪切变形并通过剪切弹簧模拟^[17,18],采用零长度转动弹簧模拟纵筋拔出变形,共同考虑试件的弯-剪-轴力耦合作用,并结合实验结果对模型的准确性进行了验证。

1 实验情况介绍

共完成了7个桥墩试件的抗震拟静力试验,其中1个试件为普通钢筋混凝土桥墩(RC-1),其它6个试件均配有竖向无黏结预应力钢筋(PRC-1 ~ PRC-3、PRC-0.05、PRC-0.15、PRC-M)。试件设计详见图1所示,所有试件外加轴力的轴压比均为0.1; PRC-1、PRC-2和PRC-M试件预应力筋预应力轴压比均为0.1,其余预应力桥墩试件为0.05。实测混凝土立方体抗压强度为55.9 MPa,Φ8和Φ12钢筋的屈服强度分别为517 MPa和453 MPa,φ^S12.7预应力筋的极限抗拉强度为1 939.2 MPa。

所有试件均发生弯曲破坏,试件最终破坏以混凝土压碎脱落和纵筋屈曲为主,除PRC-2试件1根预应力筋锚具失效外,其余预应力筋均未发生拉断或其它失效破坏,典型破坏形态如图2所示。试验结果表明,配有预应力筋的试件滞回曲线捏拢效应明显,其裂缝宽度和残余位移均较普通钢筋混凝土桥墩试件明显降低。试验详细情况见文献[19]所示,本文不再赘述。

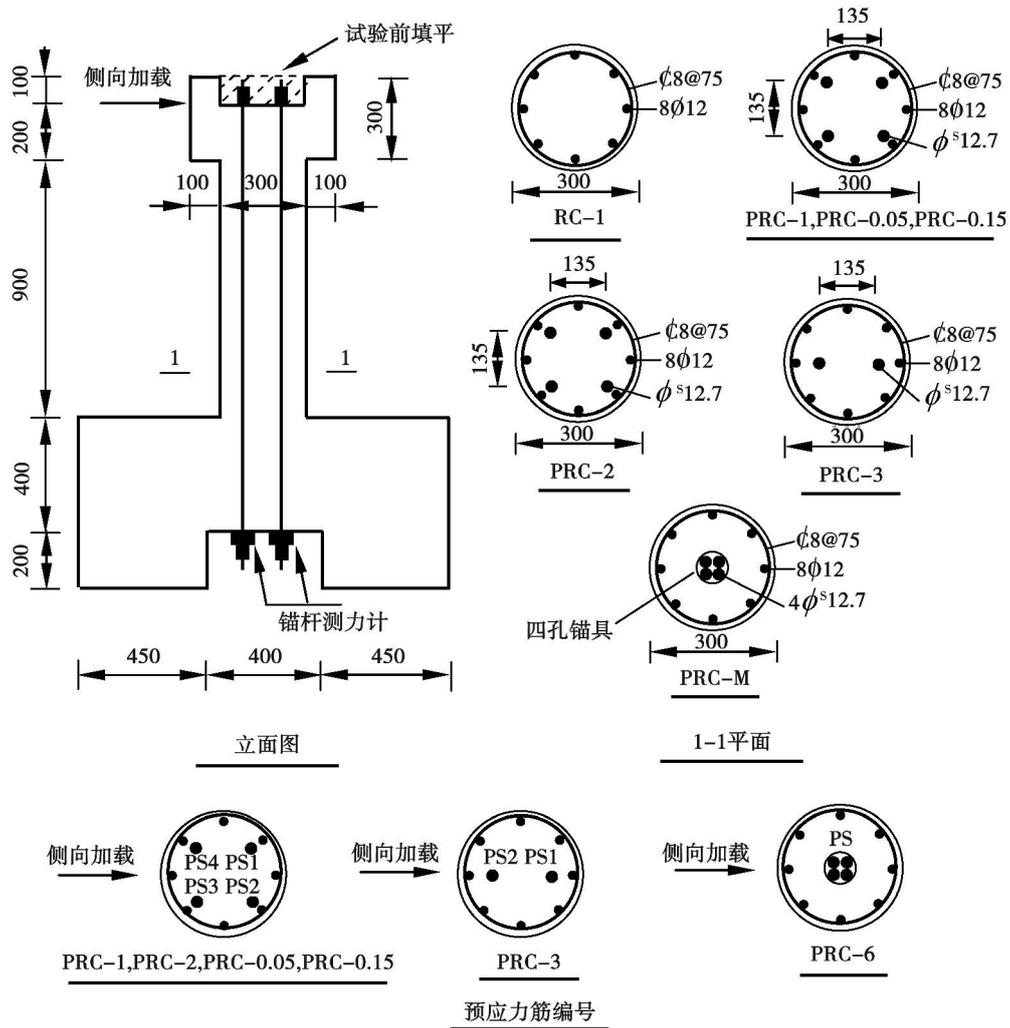


图1 桥墩试件设计情况

Fig. 1 Design details of the pier specimens

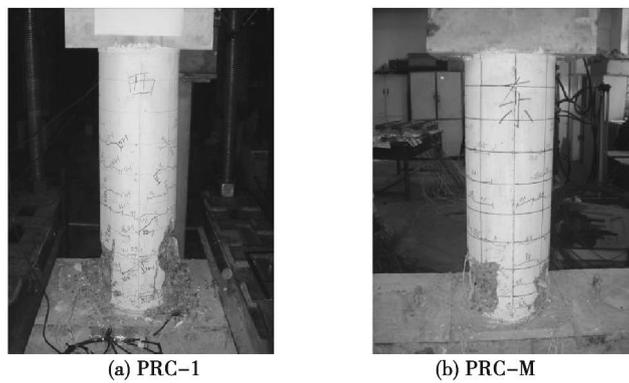


图2 试件破坏形态

Fig. 2 Damage states of the specimens

2 模型建立

2.1 混凝土材料模型

数值模型采用 OpenSees 数值平台建立^[20]，混凝土材料模型采用 Concrete01，该材料是基于 Kent-Scott-Park^[21]混凝土单轴受压应力-应变关系，不考虑混凝土的受拉应力和刚度。Concrete01 模型对混凝土结构的

分析具有良好的精度,其应力-应变骨架曲线分为两段,上升段为抛物线,下降段为直线,达到残余强度后作水平处理,强度不再降低。模型中考虑了箍筋对混凝土的约束效应。根据 Zhao 等^[22]的研究,由于底座的约束作用,桥墩底部混凝土在达到峰值强度之后,强度下降很慢且具有很大的极限抗压应变,为了协调零长度转动弹簧单元内核心混凝土的最大变形,满足平截面假定,建议 Concrete01 模型中的混凝土强度仅下降到极限抗压强度的 80% 就不再降低。

2.2 钢筋材料模型

钢筋材料采用 OpenSees 中的 Steel02,其应力应变模型是基于 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型,该模型考虑了钢筋在加载卸载循环过程中包辛格效应的影响,能很好地模拟钢筋的受拉断裂以及应变软化等力学特性。

2.3 预应力筋材料模型

预应力筋采用 OpenSees 中的 Elastic 材料模型,可以通过施加初应变的方式来施加预应力,采用 truss 单元模拟。在试验加卸载过程中,预应力筋一直处于弹性阶段,并未屈服,因此其应力-应变关系取为弹性。

2.4 滑移材料模型

纵筋在底座中的拔出而产生的变形会对试件的初始刚度、卸载刚度以及变形能力产生显著影响^[14,15,22]。拔出的影响可以在桥墩底部采用零长度转动弹簧并加入滑移材料模型考虑。

钢筋滑移材料模型采用 Bond_SP01,Viathanatepa 等^[23]完成的拉拔实验表明,当锚固长度较大时,钢筋应力-滑移量的骨架曲线关系表现为:在钢筋屈服前为一直线段,屈服后为曲线段,达到极限强度之后,其强度保持不变,骨架曲线如图 3 所示,图中 K 为黏结材料的弹性刚度。钢筋滑移材料模型由 S_y 、 S_u 、 b 、 R 四个参数控制。其中 S_y 为具有足够锚固长度的钢筋屈服滑移量,参考文献 [22],其计算如式 (1) 所示; S_u 为极限滑移量; b 为钢筋的硬化率; R 为钢筋在循环荷载下的捏缩系数。

$$S_y = 0.1 \left(\frac{d_b f_y}{4 \sqrt{f'_c}} (2\alpha + 1) \right)^{\frac{1}{\alpha}} + 0.013 \quad (1)$$

式中 d_b 为钢筋直径(in); f_y 为钢筋屈服强度(ksi); f'_c 为混凝土抗压强度(ksi); α 是局部黏结滑移参数,根据欧洲混凝土规范 CEB-FIP Model Code 90^[24]取为 0.4。另根据经验计算可得, $S_u = (30 \sim 40) S_y$, b 取(0.3 ~ 0.5), R 取(0.5 ~ 1.0)。

2.5 单元选取和模型建立

基于欧拉-伯努利理论的非线性梁柱单元^[25]模拟普通钢筋混凝土部分,非线性梁柱单元采用的是 Gauss-Lobato 四边形积分规则,模型的两个固定积分点设置在单元两端,可以结合单元的实际变形情况,保证模拟的精确性。此外非线性梁柱单元采用的是有限元柔度法理论推导出来的,其首先利用柔度法公式计算出弯矩-轴力沿单元长度分布情况,然后通过迭代计算各个积分点的曲率和轴向变形,这种柔度矩阵的方法比目前其他的线性插值法的分析结果要精确。

无黏结预应力筋采用 truss 单元模拟,底部固结,并且桥墩和预应力筋在顶端采用刚臂(rigid link beam)连结,保证预应力筋与混凝土之间的位移耦合。需要说明,数值模型中桥墩底座部分并未建模,但深入底座的预应力筋在模型中进行了模拟。

纵筋拔出的影响通过在墩底添加一个零长度转动弹簧。该单元截面也是基于纤维模型,和非线性梁柱单元具有相同的截面划分,区别在于前者的钢筋纤维的本构关系采用 Bond_SP01 材料(应力-滑移关系),而后者采用的是 Steel02 应力-应变关系。零长度转动弹簧是一个基于弯曲-曲率分析的纤维截面,在分析过程中,对于给定曲率下钢筋和混凝土的应变是通过平截面假定来计算,截面弯矩通过积分得到。在 OpenSees 程序内,零长度单元由两个相同坐标的节点连接而成,单元内的力-变形关系由截面的各种单轴材料变形关系组合而成。虽然其实际长度为零,但是在程序内定义其截面各个方向的长度为 1 且只有一个高斯积分点,因此单元的变形(转角)与截面的变形(曲率)相等。此外对于零长度转动弹簧单元,应不考虑零长度单元内的剪切作用,所以需要约束单元的横向剪切变形。

为模拟试件的剪切变形,在模型顶部加入零长度剪切弹簧,并与非线性梁柱单元串联。剪切弹簧的荷载-位移骨架曲线通过 MCFT 理论计算并简化得出,关于 MCFT 理论的详细计算情况见文献 [17,18],本文不再赘述。图 4 为剪切弹簧的荷载-位移骨架曲线, $A(\Delta_{cr}, F_{cr})$ 点为对应的桥墩剪切开裂时的剪切位移及剪力, $B(\Delta_u, F_u)$ 点为桥墩达到极限抗剪承载力时剪切位移及剪力。 A 、 B 两点数值均有 MCFT 理论计算得出。本文是通过 shear limit curve 来监测指定试件两点的相对位移是否达到剪切破坏时所需位移,并实时的对剪

切弹簧的刚度进行调整。剪切弹簧的骨架曲采用 limit state material^[26] 来模拟,由于本文的试件主要以弯曲破坏为主,因此试件并未进入剪切强度退化阶段。 C 点是为了防止剪切弹簧失效,使得剪切弹簧具有足够的承载力,其承载力大小定义为 B 点的两倍,且 AB 段和 BC 段具有相同的刚度。

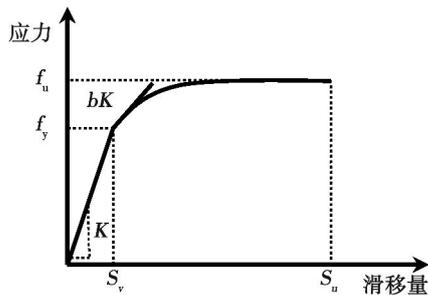


图3 Bond_SP01 中应力-钢筋滑移骨架曲线
Fig.3 Skeleton curve of bar stress-slip in Bond_SP01

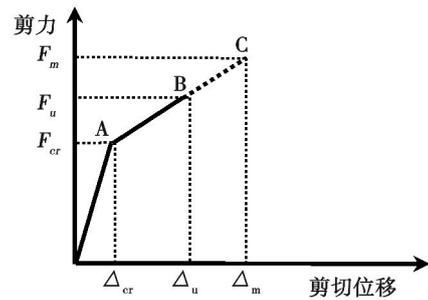


图4 剪切变形骨架曲线
Fig.4 Skeleton curve of shear deformation

整个桥墩建模如图5所示,节点1、2间为转动弹簧单元,节点2、3间为纤维梁柱单元,节点3、4间为剪切弹簧单元。由于转动弹簧和剪切弹簧单元为零长度,因此节点1与2的坐标位置相同,3与4的坐标位置也相同。节点1底部固结,同时限制住节点2的水平方向位移,节点3和4在轴向和弯曲方向上具有相同的位移。模型中转动弹簧模拟纵筋的拔出变形,非线性梁柱单元模拟试件的弯曲响应,剪切弹簧模拟试件的剪切响应,以此来考虑试件的弯-剪-轴力耦合作用。

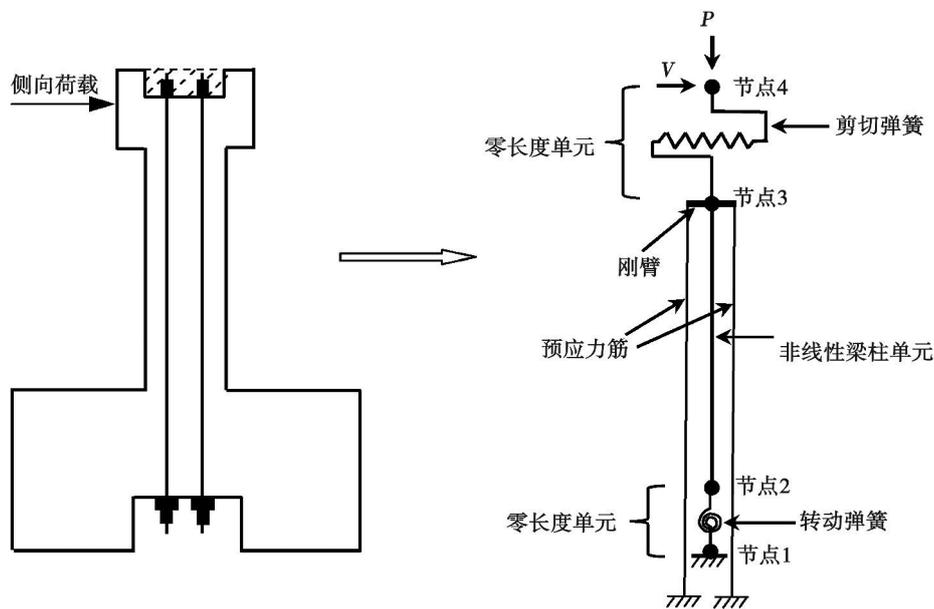


图5 桥墩数值分析模型
Fig.5 Numerical analysis model of piers

3 模型分析结果及对比

3.1 滞回曲线

图6为模拟得到的试件侧向荷载 F -墩顶位移 Δ 滞回曲线以及与试验结果的对比情况。总体来看,实验值和模拟结果基本相近。考虑了试件剪切及纵筋拔出的数值模型能够很好地模拟整个滞回曲线的捏缩效应以及刚度退化等特性。

试件在加载的初期处于弹性阶段,整个恢复力曲线在开始时处于直线状态。随着加载过程的进行,试件进入弹塑性阶段,加载和卸载刚度随着侧向位移的增加而明显降低,模拟结果也很好地反映了这一过程。

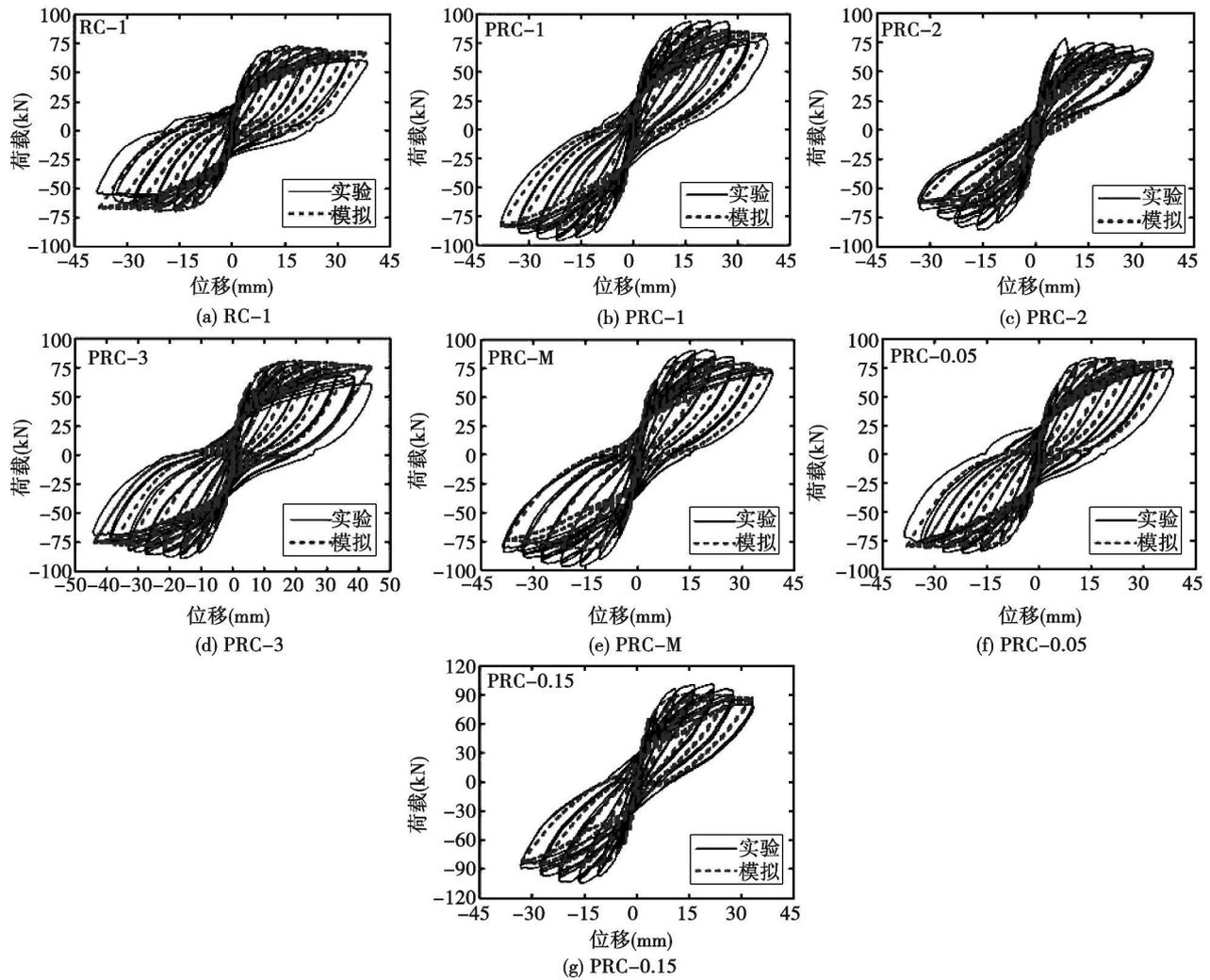


图 6 模拟与试验滞回曲线对比

Fig. 6 Comparisons between the simulated and tested hysteretic curves

3.2 残余位移

图 7 为各位移延性情况下 模拟与试验的残余位移值的对比。可以看出, 尽管部分试件模拟结果与试验结果存在一定差异, 如 PRC-3 与 PRC-0.05 试件在正加载方向模拟的残余位移值小于试验结果, PRC-M 试件在负加载方向模拟的残余位移值偏大等, 但与试验结果本身的不对称性有关。总体上看, 模拟结果与试验结果吻合良好。即所建立的数值分析模型可以对预应力桥墩试件的残余位移进行较为准确的模拟分析。

3.3 预应力筋应力

图 8 为模拟得到的部分试件预应力筋应力及与试验结果的对比情况, 需要说明, 由于 PRC-M 试件试验过程中采用集中锚固, 未能分别测得各个预应力筋的应力值, 在此不与模拟结果对比。其余各预应力桥墩试件各选择一根预应力筋进行对比。且强调一点, 本文用于对比的各预应力筋均在正向位移时, 预应力筋张紧, 拉应力增大; 负向位移时, 预应力筋松弛, 拉应力减小。

可以看出, 模拟计算的预应力筋应力大小的发展趋势与实验结果基本一致。且负向位移时(此时预应力筋松弛) 模拟得到的预应力筋应力值与试验结果吻合很好, 而正向位移时(此时预应力筋张紧) 模拟结果与实验结果有一定的差异, 但总体来看模拟结果大于试验结果。主要原因可能有两点, 其一是数值模型中没有考虑预应力筋与孔道间摩擦以及锚具在反复荷载下松弛引起的预应力损失; 其二, 试件严重破坏阶段时, 试件高度减小并引起预应力筋应力减小, 这些在数值模型中均难以有效考虑^[27]。

3.4 弯曲、剪切和纵筋拔出变形分量

在地震反复荷载作用下, 钢筋混凝土桥墩的总侧向位移由墩身的弯曲变形、剪切变形和纵筋在底座拔出变形组成。Lehman 等^[28-29]完成的桥墩拟静力实验表明: 对弯曲破坏性桥墩, 弯曲变形占墩顶总位移的 50%

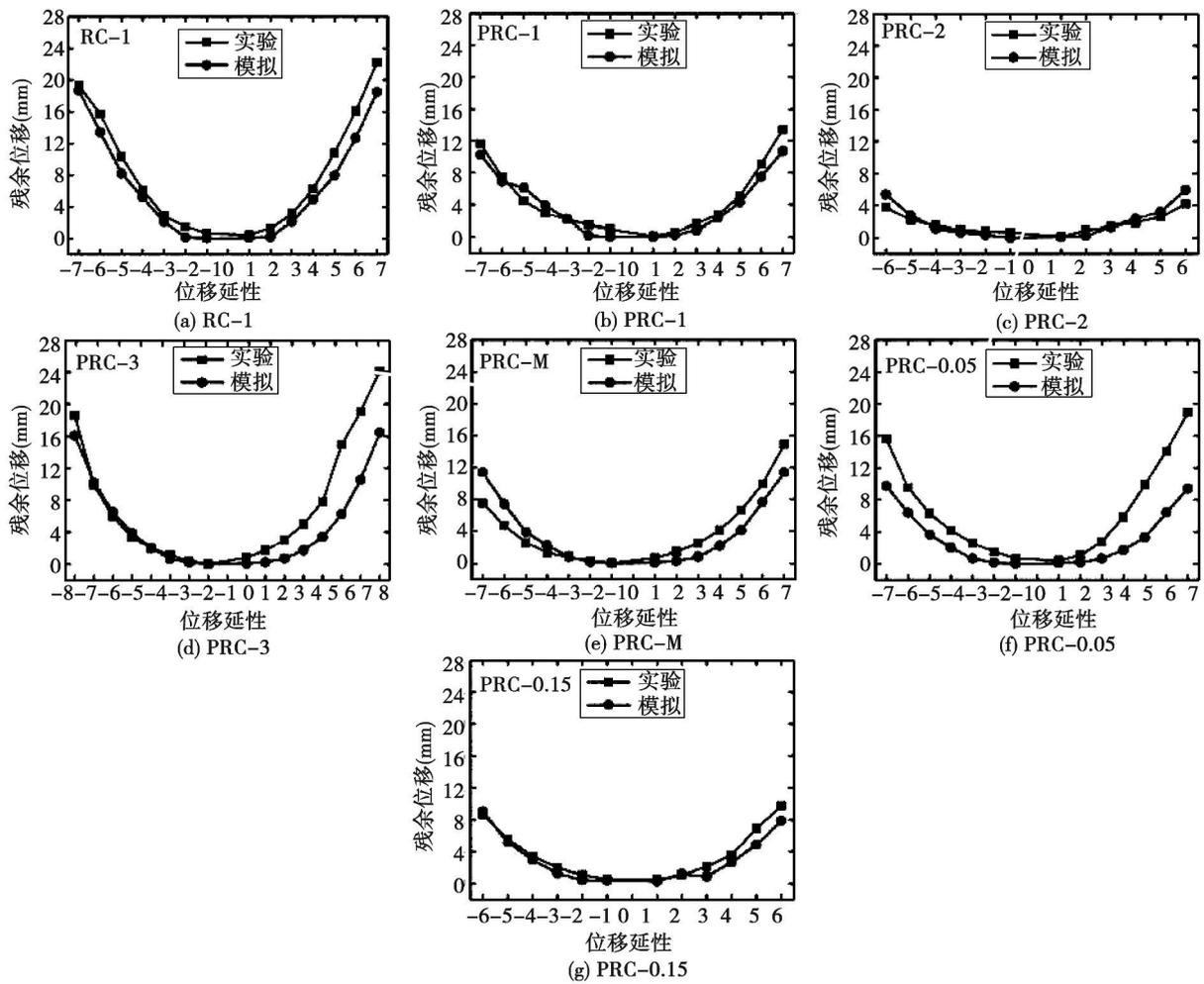


图7 模拟与试验残余位移对比

Fig. 7 Comparisons between the simulated and tested residual displacement

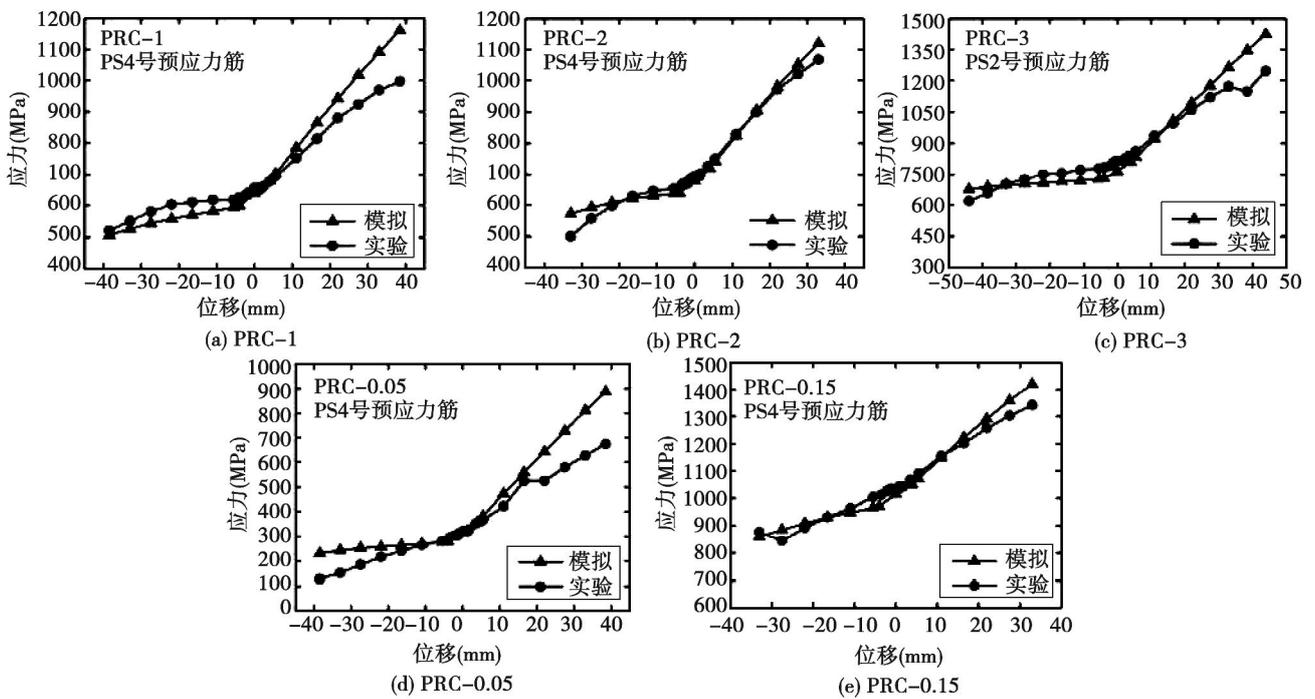


图8 模拟与试验预应力筋应力的对比

Fig. 8 Comparisons between the simulated and tested prestressed tendon stresses

左右, 纵筋拔出变形占 20% ~ 50%, 剪切变形不足 5%。图 9 为模拟得到的三种变形分量随着位移的增加所占比例的变化情况。对比可知, 对于本文发生弯曲破坏的桥墩试件, 剪切变形只占总变形的 1% ~ 3%, 几乎可以忽略不计。弯曲变形所占比例为 50% ~ 70%; 纵筋拔出变形所占比例为 30% ~ 50%, 不可忽略。

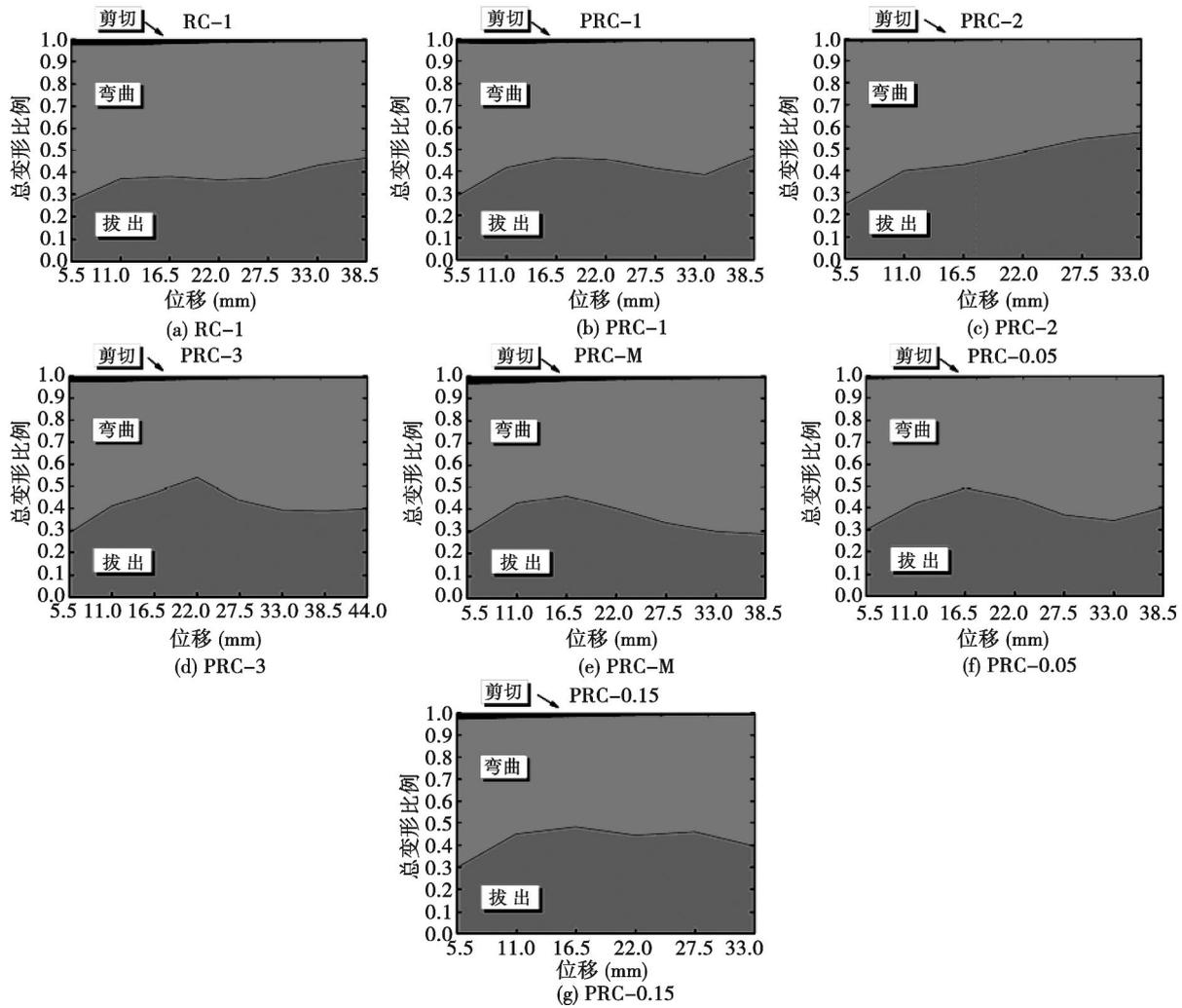


图 9 试件变形分量

Fig. 9 Deformation components of the specimens

4 结语

在完成的拟静力试验基础上, 对竖向配置无黏结预应力钢筋混凝土桥墩的抗震性能进行模拟分析, 建立了基于 OpenSees 分析平台的数值模型, 其中采用非线性梁柱单元模拟弯曲变形, 零长度转动弹簧模拟纵筋的拔出变形, 剪切弹簧模拟试件的剪切变形。并将模拟得到的滞回曲线、残余位移和预应力筋应力等与实验结果进行了对比。同时分离了墩顶弯曲变形、剪切变形和纵筋在底座中的拔出变形所占比例情况。分析结果表明:

(1) 考虑了纵筋拔出和剪切效应后, 模型很好地模拟了试件的滞回曲线、残余位移等。

(2) 模拟得到的预应力筋应力变化规律与试验结果基本一致, 且数值模型很好模拟了预应力筋松弛情况下的应力大小; 对预应力筋张紧阶段, 模拟得到的预应力筋应力较试验结果偏大。

(3) 模型计算得到的试件弯曲变形所占比例为 50% ~ 70% 左右, 纵筋在底座中的拔出变形所占比例为 30% ~ 50% 左右, 而剪切变形只占 1% ~ 3% 左右。

参考文献:

[1] Fujino Y F, Hashimoto S, Abe M. Damage analysis of Hanshin expressway viaducts during 1995 Kobe earthquake. I: Residual inclination of rein-

- forced concrete piers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2005, 10(1): 45–53.
- [2] Zatar W A, Mutsuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 740–749.
- [3] 王志强, 葛继平, 魏红一. 东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(11): 1462–1466, 1500.
WANG Zhiqiang, GE Jiping, WEI Hongyi. Seismic performance of prestressed concrete bridge column of East sea bridge [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(11): 1462–1466, 1500. (in Chinese)
- [4] 司炳君, 张明生, 孙治国, 等. 竖向配预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能研究综述 [J]. *世界地震工程*, 2012, 28(3): 120–125.
SI Bingjun, ZHANG Mingsheng, SUN Zhiguo, et al. Review of studies on seismic behavior of prestressed reinforced concrete bridge piers [J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 28(3): 120–125. (in Chinese)
- [5] Palermo A, Pampanin S, Marriott D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2007, 133(11): 1648–1661.
- [6] Kwan W P, Billington S L. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. I: Monotonic and cyclic analyses [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2003, 8(2): 92–101.
- [7] Kwan W P, Billington L B. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. II: Seismic analyses [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2003, 8(2): 102–111.
- [8] Wang J C, Ou Y C, Chang K C, et al. Large-scale seismic tests of tall concrete bridge columns with precast segmental construction [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(12): 1449–1465.
- [9] Ou Y C, Chiewanichakorn M, Aref A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2007, 133(11): 1636–1647.
- [10] Sakai J, Mahin S A. Analytical investigations of new methods for reducing residual displacements of reinforced concrete bridge columns [R]. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley*, 2004.
- [11] Lee W K, Billington S L. Modeling residual displacements of concrete bridge columns under earthquake loads using fiber elements [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2010, 15(3): 240–249.
- [12] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩集中塑性铰模型的地震响应分析 [J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 185–190.
GE Jiping, WANG Zhiqiang. Seismic performance studies of segmental bridge columns with match-cast dry joints using concentrated plastic hinge method [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 185–190. (in Chinese)
- [13] 葛继平, 王志强, 魏红一. 干接缝节段拼装桥墩抗震分析的纤维模型模拟方法 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(3): 52–57, 203–204.
GE Jiping, WANG Zhiqiang, WEI Hongyi. Seismic performance analysis of segmental bridge columns with match-cast dry joints using fiber beam-column element method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(3): 52–57, 203–204. (in Chinese)
- [14] Setzler E J, Sezen H. Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformation [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(2): 493–511.
- [15] Xu S Y, Zhang J. Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 40(3): 315–337.
- [16] 孙治国, 王东升, 李宏男, 等. 钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析模型 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(2): 249–254.
SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, LI Hongnan, et al. Flexural-shear analysis model for reinforced concrete bridge piers [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(2): 249–254. (in Chinese)
- [17] 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): 614–624.
- [18] Bentz E C. Sectional analysis of reinforced concrete members [D]. Toronto: University of Toronto, 2000.
- [19] 张明生. 无黏结部分预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究与模拟分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
ZHANG Mingsheng. Study on seismic performance of unbonded partly prestressed reinforced concrete piers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [20] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees): OpenSees command language manual [R]. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, 2007.
- [21] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. *Journal of the Structural Division*, 1971, 97(7): 1969–1990.
- [22] 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.
- [23] Viwathanatepa S, Popov E P, Bertero V V. Effects of generalized loadings on bond of reinforcing bars embedded in confined concrete blocks [R]. *Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 1979.
- [24] CEB-FIP-Model-Code 1990. Design of concrete structures [S]. London: British Standard Institution, London, UK, 1993.
- [25] Taucer F, Spacone E, Filippou F C. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures [R]. *Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 1991.
- [26] Elwood K J. Shake table tests and analytical studies on the gravity load collapse of reinforced concrete frames [D]. *University of California*, 2002.
- [27] Elwood K J. Modelling failures in existing reinforced concrete columns [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, 31(5): 846–859.
- [28] Calderone A, Lehman D E, Moehle J P. Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement [R]. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 2001.
- [29] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns [R]. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 2000.