

# 双柱墩地震反应的轴力-刚度耦合作用

魏斌<sup>1,2</sup>, 李建中<sup>1</sup>

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 广东交通集团检测中心, 广州 510550)

**摘要:**地震作用下钢筋混凝土双柱桥墩产生的动轴力不仅会改变桥墩的屈服强度,而且也会相应地改变桥墩的刚度,但目前广泛使用的集中塑性模型一般并未考虑这种轴力-刚度的耦合作用。以自动计入轴力-强度及轴力-刚度耦合作用的纤维模型分析结果为基准,研究了轴力-刚度耦合作用对钢筋混凝土双柱桥墩地震反应的影响。结果表明,轴力-刚度耦合作用对双柱墩弹性阶段的反应有较大影响,但不改变结构的极限承载力;由于拉压桥墩的刚度互为消长,等高双柱墩的地震位移响应在不计轴力-刚度的耦合作用时与实际情况只略有差异,但墩柱弹性内力响应则会被较大地低估;不等高双柱墩的刚度受较矮侧桥墩控制,因此轴力-刚度的耦合作用对结构的地震位移响应和弹性内力响应都有明显影响,桥梁不规则性越大影响越显著,在进行结构分析时不能忽视这一因素的影响。

**关键词:**钢筋混凝土;双柱墩;地震反应;集中塑性模型;纤维模型;轴力-刚度耦合作用

**中图分类号:**TU 375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)04-0066-06

## Axial Force-Stiffness Interaction in Seismic Analysis of RC Double-Column Bridges

WEI Bin<sup>1,2</sup>, LI Jianzhong<sup>1</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Guangdong Communication Group Testing Center, Guangdong 510550, P. R. China)

**Abstract:** Earthquake induced dynamic axial force in reinforced concrete (RC) bridge bent columns will not only change the yield strength of the columns but also change their stiffness, which is seldom considered by the common lumped-plasticity line model. Based on the fiber element model results that taking into account the influence of dynamic axial force on strength and stiffness simultaneously, the axial force-stiffness interaction effect on the seismic responses of RC double-column bridges was analyzed. The results show that, axial force-stiffness interaction has a large effect on the seismic responses of the double-column bridge in the elastic range, and it does not alter the ultimate capacity of the columns. Since the stiffness of the columns under compression and tension dynamic axial forces offset each other, the global displacement of bridge bent with equal columns is relatively unaffected by the axial force-stiffness interaction, however, the differences of the column member forces are manifest. For the short column controls the global stiffness, the axial force-stiffness interaction has significant influences on both the global displacement and member force responses. The influences become larger as the irregularity of the bridge bent increases, so the interaction between axial force and member stiffness should be sufficiently considered in seismic analyses.

**Key words:** reinforced concrete; double-column bridge; seismic response; lumped-plasticity model; fiber element model; axial force-stiffness interaction

收稿日期:2012-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(90815007);西部交通建设科技项目(2009318000102)

作者简介:魏斌(1985-),男,博士生,主要从事桥梁与隧道工程研究,(E-mail)07weibin@mail.tongji.edu.cn。

双柱桥墩及框架结构立柱地震时会产生动轴力的作用,其中轴力的变化对构件屈服强度的影响已为人所熟知<sup>[1]</sup>。近年来的研究表明,钢筋混凝土构件的截面屈服曲率对动轴力及配筋率等的变化不敏感,其强度和刚度间大致存在一种正比关系<sup>[2]</sup>。因此轴力变化时,钢筋混凝土构件的刚度也会发生与轴力-强度( $P$ - $M$ )类似的耦合作用,即存在轴力-刚度的耦合作用。

在实际的地震反应分析与设计中,考虑到模型建立、计算时间及结果解读等的复杂性,一般尽量采用集中塑性的杆单元进行非线性分析。对集中塑性单元,轴力-强度的耦合作用可以通过设置塑性铰的屈服包络球来方便地表示,这在商业有限元程序(如SAP2000<sup>[3]</sup>)中已有成熟的考虑方法。但对于绝大多数的有限元程序,集中塑性杆单元的刚度独立于所受的外荷载,即不能考虑轴力-刚度的耦合作用。更为精细的纤维模型将钢筋混凝土截面离散为大量具有实际非线性应力-应变关系的单元,可以自动计入轴力-强度及轴力-刚度耦合作用<sup>[2,4]</sup>,但对计算机时和结果处理的要求也大大增加<sup>[5]</sup>。

从工程实用的角度,集中塑性单元仍将是非线性地震反应分析的主要选择<sup>[6]</sup>,然而针对集中塑性单元不能考虑轴力-刚度耦合作用的研究却十分缺乏。笔者以纤维模型分析结果为基准,研究了轴力-刚度耦合作用对钢筋混凝土双柱桥墩地震反应的影响,并对集中塑性单元的取用和轴力-刚度耦合作用的简化处理方法做出了建议。

## 1 模型及参数选择

选择双柱桥墩横向地震反应进行分析,为简化起见,忽略基础和横梁的变形,按墩底固结和横梁无限刚性考虑,只讨论墩柱在横桥向的配筋。在西部山区桥梁中,常因地形限制而出现同一排架左右墩高不同的情况,笔者以左右墩高比 $\alpha$ 来考虑这一因素的影响。分析采用的结构尺寸如图1所示,通过更改轴压比 $\nu$ 和墩高比 $\alpha$ 来研究不同结构特性下轴力-刚度耦合作用的大小,参数取值范围见表1。

表1 结构参数变化

轴压比 $\nu$	墩高比 $\alpha$	地震动强度 PGA
0.05~0.35	0.25~1.00	0.05~1.00

计算分析在 Opensees 平台上进行<sup>[7]</sup>。为更好追踪结构的非线性地震反应,“精确”模型采用基于力形函数的非线性梁柱单元<sup>[8]</sup>,截面离散为纤维单元,其中混凝土采用修正的 Kent-Park 模型<sup>[9]</sup>,钢筋

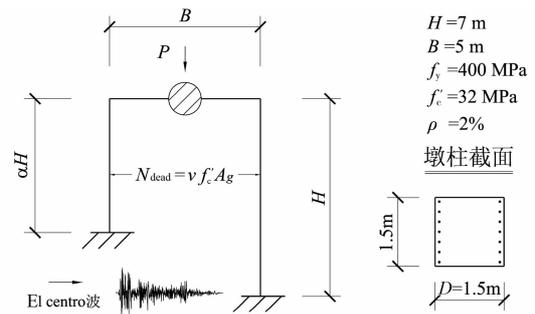


图1 分析采用的结构示意图

使用理想弹塑性模型。“精确”模型可以自动计入轴力-强度及轴力-刚度的双耦合作用<sup>[2]</sup>。为尽量减少其它因素的影响,基于集中塑性单元的对比模型使用相同的纤维截面来定塑性铰,塑性铰长度按 Scott 的建议取值<sup>[10-11]</sup>,塑性铰以外弹性部分的刚度取截面的等效刚度<sup>[12]</sup>。由于对比模型弹性部分的刚度是不随单元轴力而改变的,因此理论上研究对比模型与“精确”模型的差异即可以得到轴力-刚度耦合作用的影响。

为验证对比方案的可行性,进行单墩模型的分析。恒定轴力下,对比模型与“精确”模型的差异仅来源于塑性铰长度和弹性部分等效刚度等参数的取值。地震动输入采用 El-centro 地震波<sup>[13]</sup>,通过调整幅值代表不同的地震动水平。分析结果如图2所示。

从图2可以看出,轴力恒定时,在不同的轴压比和地震动水平下,对比模型与“精确”模型的分析结果均十分接近。这说明对比模型所采用的简化参数是合理的;当轴力变化时,对比模型与“精确”模型的额外差异即为轴力-刚度耦合作用的结果。

## 2 等高双柱墩地震反应

图1所示的等高双柱墩模型(即 $\alpha=1$ )可视为普通规则桥梁横桥向的简化情形。模型计算参数的确定过程同单墩模型,分析结果如图3所示。

总体来说,等高双柱墩的地震位移响应在不计轴力-刚度的耦合作用时与实际情况只略有差异,而墩柱弹性内力响应则差异明显,尤其在轴压力水平较低时会被较大地低估。图4给出了墩柱截面  $P$ - $M$  相互作用曲线上不同恒载轴压比下动轴力的变化范围。从图中可以看出,随着轴压比的增大,结构动轴力变化范围相对恒载轴力的比值逐渐降低,动轴力引起的墩柱截面屈服弯矩的变化相对恒载弯矩的比值也不断降低。在恒载轴力达到  $P$ - $M$  相互作用曲线弯矩最大点  $A$  时,动轴力反而会降低截面的屈服

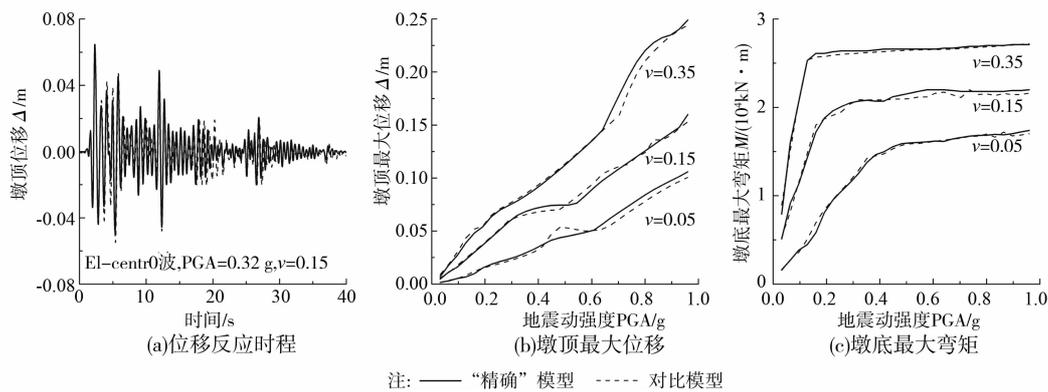


图 2 单墩时程分析结果

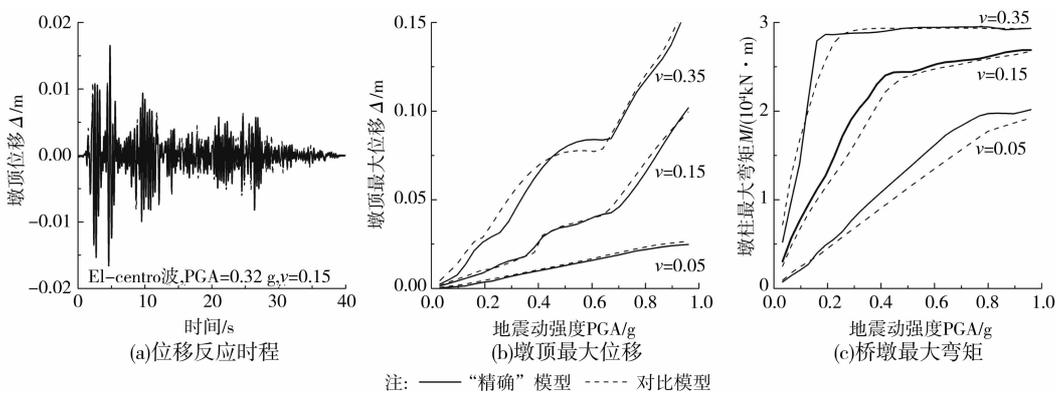


图 3 等高双墩时程分析结果

弯矩。这解释了图 3(c)中恒载轴压比增大时“精确”模型与对比模型墩柱最大弯矩差异变小的原因。取  $\nu=0.05$ , 对等高双柱墩模型进行 pushover 分析可以发现(图 5):在动轴力作用下,受拉侧桥墩的刚度会减小,受压侧桥墩的刚度会增大,两者共同作用下“精确”模型的侧向荷载-位移曲线与恒定刚度的集中塑性铰模型十分接近。因此,如图 3(b)所示,忽略轴力-刚度的耦合作用并不会对等高双柱桥墩的整体地震位移响应带来明显的误差。但从局部上看,动轴力对受压侧桥墩弹性反应阶段的刚度耦合效应会相应增大桥墩的地震弯矩响应(图 3(c)),这在常遇地震作用下验算结构强度时需要特别注意。

### 3 不等高双柱墩地震反应

山区桥梁受地形限制常会出现不等高双柱墩的情形,不同双侧墩高比  $\alpha$  下的地震反应分析结果如图 6 所示,模型分析参数的确定过程同单墩模型。受篇幅限制,只给出  $\nu=0.15$  的结果。

与等高双墩的情形不同,由于结构的总体刚度受较矮侧桥墩控制,不等高双墩侧向变形时动轴力对拉压墩的刚度影响并不能相互抵消,因此从整体上动轴力对结构的荷载-位移关系会产生明显影响。

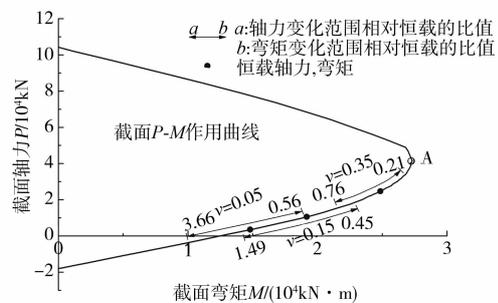


图 4 截面轴力-弯矩作用曲线

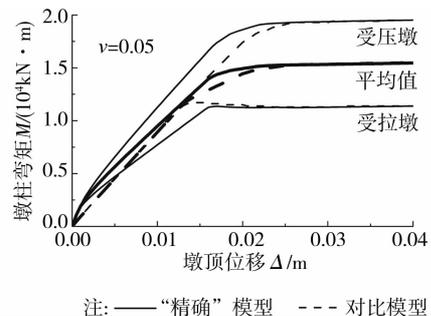


图 5 等高双墩 pushover 分析

从图 6 可以看出,考虑与不考虑轴力-刚度耦合效应时结构的位移时程反应差异较大,反应出动轴力对

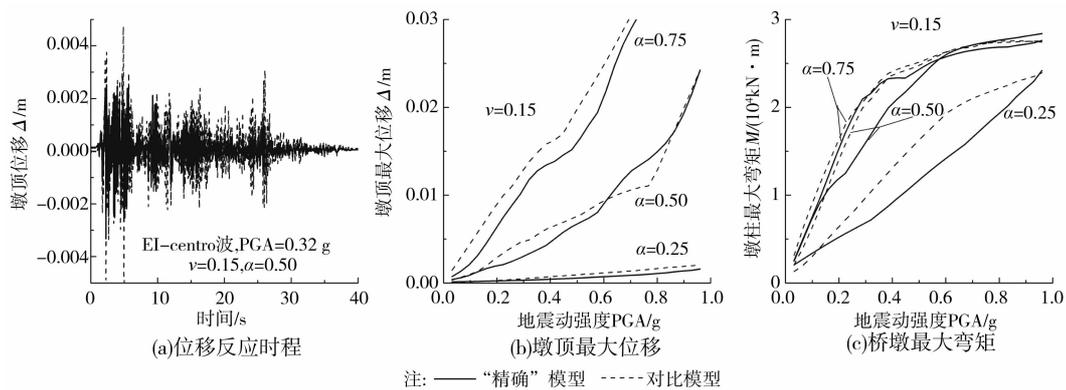


图 6 不等高双墩时程分析结果

结构动力特性的改变作用;墩顶最大位移和桥墩最大弯矩反应均有较大差异,而且相对更无规律。值得注意的是,El-centro 波输入下不等高双墩的大部分工况都是忽略轴力-刚度耦合效应会得到比“精确”模型更大的地震反应分析结果,这与等高双墩的情形正好相反。这可能是由于当桥墩朝使矮墩受压一侧移动时忽略轴力-刚度的耦合效应会减小结构的侧向抗力,从而增大结构反应的结果。

更一般地,如图 7 所示,考虑另 10 组地震波下轴力-刚度耦合效应对不等高双墩最大地震反应的影响,地震波均从 PEER 地震数据库中选取,PGA 统一调整为 0.3 g。可见,不等高双墩中轴力-刚度的耦合效应随地震波特性的改变而改变,相同地震波下对最大位移和桥墩最大弯矩的影响又存在差异。不等高双墩的整体侧向荷载-位移关系受动轴力影响显著,动轴力水平与结构的地震反应直接相关,而地震反应又由结构的侧向荷载-位移关系和具体的地震输入所决定,几个因素相互作用形成了十分复杂的耦合效应,难以准确判断忽略轴力-刚度耦合效应的后果,因此在不规则的桥墩地震反应分析中应避免采用不计入轴力-刚度的耦合效应的分析方法。

#### 4 简化分析方法

集中塑性铰法由于较为简便,在众多商业有限元程序中均提供了相应的单元,是一种工程实践中得到广泛应用的非线性地震反应分析方法,因此研究如何在保持集中塑性铰法简洁性的基础上克服其不能考虑轴力-刚度耦合效应的缺点具有较大的实用价值。通过前述讨论可以看出,对规则的等高双墩简化模型,轴力-刚度耦合效应具有较好的规律性,具备简化分析的条件,而不规则的非等高双墩则

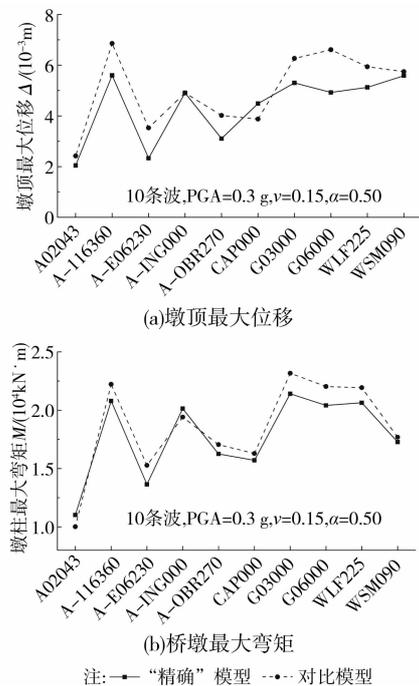


图 7 不同地震波下的轴力-刚度耦合效应

建议采用直接考虑轴力-刚度耦合效应的纤维单元进行分析。

前文提到,动轴力对拉压墩刚度的相互“抵消”作用使等高双柱墩的地震位移响应在不计轴力-刚度的耦合作用时与实际情况只略有差异,这一特性可作为简化分析的基础。结构形成塑性机构时的最大侧向承载力不受轴力-刚度的耦合效应的影响,前者属于极限承载力的范畴,由结构布置和截面强度特性唯一确定,这在图 3 和图 6 中可明确看到;轴力-刚度的耦合效应改变的是构件达到极限承载力的路径。因此问题的关键在于如何简化确定考虑轴力-刚度耦合效应的“精确”荷载-位移曲线。推荐步骤如下。

1) 采用集中塑性铰单元建立非线性分析模型, 进行时程分析, 得到未考虑轴力-刚度耦合效应的最大墩顶位移  $\Delta_0$  和最大墩柱内力  $F_0$ 。

2) 对集中塑性铰单元模型进行 pushover 分析, 得到结构的荷载-位移曲线, 如图 8 中的虚线所示。如不进行 pushover 分析, 也可通过联立求解形成塑性机构时桥墩截面的轴力-强度方程和结构平衡方程组成的方程组得到极限承载力  $F_u$ , 再按截面折减刚度确定曲线的上升段。非线性方程组一般从恒载内力出发迭代 2~3 次即可收敛。

3) 根据截面形状和材料类别, 估算结构的屈服位移。钢筋混凝土截面的等效屈服曲率对截面的轴力水平和配筋率不敏感, 近似为以常数<sup>[14]</sup>。矩形截面的等效屈服曲率  $\phi_y$  约为

$$\phi_y = 2.10 f_y / (ED) \quad (1)$$

式中  $E$  为钢筋的弹性模量, 其余符号的含义如图 1 所示。更多不同截面形式的等效屈服曲率可参考其他文献<sup>[2, 15]</sup>。双柱墩的等效屈服位移  $\Delta_y$  通过曲率积分可得式(2)。

$$\Delta_y = \phi_y H^2 / 6 \quad (2)$$

给定屈服位移  $\Delta_y$  和极限承载力  $F_u$ , 即可以理想弹塑性曲线近似确定“精确”的荷载-位移曲线, 如图 8 中的实线所示。

4) 将结构考虑轴力-刚度耦合效应的“精确”位移  $\Delta_p$  近似取为  $\Delta_0$ 。如果  $\Delta_p > \Delta_y$ , 则结构的最大内力反应不需修正,  $F_p = F_0$ ; 如果  $\Delta_p < \Delta_y$ , 则如图 8 所示, 过  $\Delta_p$  作垂线得到考虑/不考虑轴力-刚度耦合效应的地震内力反应差值  $\Delta F$ , 结构“精确”最大内力反应  $F_p = F_0 + \Delta F$ 。为消除  $\Delta_p = \Delta_y$  处产生的内力突变, 可在  $\Delta_p = \Delta_y$  邻域内取  $F_p = \max(F_0, F_u)$ 。

应当指出的是, 结构恒载在如图 4 所示 P-M 相互作用曲线弯矩最大点 A 附近时, 由于曲线的强非线性, 按上述步骤(2)、(3)得到的两组荷载-位移曲线在均值上会有较大差异。此时  $\Delta_p = \Delta_0$  的近似假设不再成立, 建议采用直接考虑轴力-刚度耦合效应的单元进行分析。

应用上述简化分析方法对第 3 章中的等高双柱墩模型进行了分析, 与“精确”结果的对比见图 9。可见, 所提的简化分析方法在适用范围内具有较好的效果, 恒载轴力接近 P-M 相互作用曲线弯矩最大点 A 时精度降低, 但偏保守。在今后的研究中可对上述简化分析方法做进一步的综合性验证, 但可以预见, 只要研究工况符合整体荷载-位移曲线基本不受轴力-刚度耦合效应影响的条件, 笔者所提的简化

分析方法即可期望达到较好的效果。

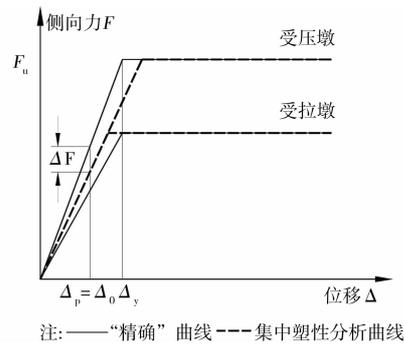


图 8 轴力-刚度耦合效应简化分析方法

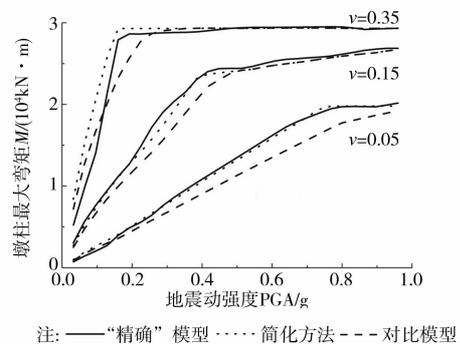


图 9 简化分析方法的验证

## 5 结论

通过对基于纤维单元和集中塑性铰单元的地震反应分析结果, 研究了轴力-刚度耦合作用对钢筋混凝土双柱桥墩地震反应的影响。主要结论如下。

1) 由于拉压桥墩的刚度互为消长, 等高双柱墩的地震位移响应在不计轴力-刚度的耦合作用时与实际情况只略有差异, 但墩柱弹性内力响应则会被较大地低估。

2) 不等高双柱墩的刚度受较矮侧桥墩控制, 因此轴力-刚度的耦合作用对结构的地震位移响应和弹性内力响应都有明显影响, 桥梁不规则性越大影响越显著。

3) 等高双柱墩考虑轴力-刚度耦合作用的“精确”地震反应可在易于实现的集中塑性单元法分析的基础上采用推荐的简化分析方法得到; 非等高双柱墩采用集中塑性单元难于确定轴力-刚度的耦合作用, 建议采用直接考虑轴力-刚度耦合效应的单元(如纤维单元)进行地震反应分析。

### 参考文献:

- [1] Powell G, Chen P. 3D beam-column element with

- generalized plastic hinges [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1986, 112(7): 627-641.
- [2] Priestley M, Calvi G, Kowalsky M. *Displacement-based seismic design of structures* [M]. Pavia: IUSS Press, 2007.
- [3] Computers and Structures Inc. *SAP2000 v10 integrated finite element analysis and design of structures* [M]. Berkeley: CSI, 2005.
- [4] Gregori J, Sosa P, Prada M, et al. A 3D numerical model for reinforced and prestressed concrete elements subjected to combined axial, bending, shear and torsion loading [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(12): 3404-3419.
- [5] Ceresa P, Petrini L, Pinho R. Flexure-shear fiber beam-column elements for modeling frame structures under seismic loading-state of the art [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, 11(Sup1): 46-88.
- [6] Berry M, Lehman D, Lowes L. Lumped-plasticity models for performance simulation of bridge columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(3): 270-279.
- [7] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. *OpenSees command language manual* [R]. Berkeley: University of California, Pacific Earthquake Engineering Center, 2006.
- [8] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fiber beam-column model for non-linear analysis of R/C frames; part I formulation [J]. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 1996, 25(7): 711-725.
- [9] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. *Journal of Structural Division ASCE*, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [10] Scott M, Hamutcuoglu O. Numerically consistent regularization of force-based frame elements [J]. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 2008, 76:1612-1631.
- [11] Scott M, Fenves G. Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(2): 244-252.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. *JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震细则* [S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [13] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER ground motion database [DB/OL], [http://Peer.Berkeley.Edu/Peer\\_Ground\\_Motion\\_Database](http://Peer.Berkeley.Edu/Peer_Ground_Motion_Database), 2010.
- [14] Adhikari G, Petrini L, Calvi G M. Application of direct displacement based design to long span bridges [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(4): 897-919.
- [15] Xiao J, Zhang C. Seismic behavior of RC columns with circular, square and diamond sections [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 801-810.

(编辑 胡玲)