

文章编号: 1674—8247(2017)06—0005—05

## 基于 FENAP 平台的 RC 桥墩非线性滞回性能分析

嵇 一

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

**摘 要:**为精细化模拟钢筋混凝土桥墩的非线性滞回性能,利用自主研发的纤维梁柱单元模拟分析平台 FENAP,建立了桥墩试件的精细化计算模型,并对其进行了低周反复荷载试验条件下的非线性滞回分析。模拟过程中考虑了桥墩构件刚度和强度退化等损伤效应、轴力和弯矩的多维耦合效应,以及箍筋对混凝土的约束效应等非线性行为。对比结果显示:利用 FENAP 平台得到的桥墩滞回特性与试验结果吻合较好,说明 FENAP 平台可有效模拟钢筋混凝土桥墩构件的复杂非线性行为,且计算效率和求解精度较高。文章进一步比较选用不同钢筋本构模型对分析结果的影响并得出结论, Menegotto-Pinto 模型较双线性等向强化模型更好地模拟了试件的刚度退化、强度退化和“捏拢”效应,双线性钢筋本构模型严重高估了构件的刚度和耗能能力。

**关键词:**钢筋混凝土; 桥墩; 精细化模型; 纤维梁柱单元; 非线性滞回分析; 模拟平台; Bauschinger 效应

中图分类号: TU352

文献标志码: A

## Non-linear Hysteretic Behavior Analysis of RC Bridge Piers Based on FENAP Platform

ZHUO Yi

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** In order to simulate the nonlinear hysteretic behavior of RC bridge piers elaborately, based on the independently developed simulation analysis platform FENAP of fiber beam-column element, the refined analysis model of the bridge pier specimen is constructed and its nonlinear hysteretic behavior under low cyclic loading and simulated. In the simulation process, the damage effect of stiffness and strength degradation of members, multi-dimensional coupling effect of axial force and bending moment, and binding effect of stirrups on concrete are considered. The comparison results show that the hysteretic behavior based on FENAP platform and test match well, the complex nonlinear behavior of RC bridge pier components may be simulated refinedly with high computational efficiency and solution accuracy by using the platform FENAP. Furtherly, the effect of choosing different reinforcement constitutive model to the analysis results is compared, it shows that Menegotto-Pinto model can simulated the rigidity degradation, strength degradation of members and ‘pinching’ effect better than bilinear isotropic hardening model. The stiffness and energy dissipation capacity shall be overestimated if bilinear reinforcement constitutive model is used.

**Key words:** reinforced concrete (RC); bridge pier; refined model; fiber beam-column element; non-linear hysteretic analysis; simulation platform; Bauschinger effect

随着地震作用下桥梁结构精细化模拟分析方法的深入,钢筋混凝土桥墩等重要构件的滞回性能模拟问题已越来越多地受到人们的重视。目前,桥梁构件在

反复荷载作用下的模拟分析模型主要有三维实体有限元模型和离散杆系单元模型。三维实体有限元模型可相当精细地模拟构件的一些重要非线性特征,但较高

收稿日期: 2017-07-05

作者简介: 嵇一(1983-),男,高级工程师。

引文格式: 嵇一. 基于 FENAP 平台的 RC 桥墩非线性滞回性能分析[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(6): 5-9.

ZHUO Yi. Non-linear Hysteretic Behavior Analysis of RC Bridge Piers Based on FENAP Platform [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 5-9.

的计算成本及和计算的收敛问题在很大程度上限制了这种模型的发展,使之难以用于复杂桥梁结构的模拟。相比而言,离散杆系单元模型既可从宏观上模拟构件的性能,又能深入分析构件的局部非线性特性,且模型简单、无需耗费大量机时,因而受到大多数研究人员的青睐<sup>[1]</sup>。根据单元塑性铰分布方式和截面滞回特性模拟方法的不同,离散杆系单元分析模型又分为集中塑性模型<sup>[2-3]</sup>、分布塑性模型<sup>[4]</sup>和梁柱纤维单元模型<sup>[5-7]</sup>。由于纤维模型直接从截面内纤维的本构关系出发,得到单元乃至整个构件的非线性性能,可有效地模拟构件的刚度退化、强度退化等损伤效应及轴力和弯矩(单向、双向)的多维耦合效应等复杂非线性行为,因而已成为结构精细化模拟的必要手段,并得到了广泛应用。

现阶段采用纤维梁柱单元数值模拟构件的滞回行为,大多利用国外已有软件,如 OpenSEES<sup>[8]</sup>, DRAIN<sup>[9]</sup>等。大型通用有限元软件 ABAQUS 具备强大的非线性求解能力和友好的前后处理界面,已为大多数研究人员所采用,但国内外基于 ABAQUS 纤维梁柱单元的实用开发却不多见。本文基于 ABAQUS 开发了一种实用的钢筋混凝土纤维梁柱单元模拟分析平台 FENAP<sup>[10]</sup>,编制了相应的材料库,开发了多种混凝土和钢材的本构模型,并利用 FENAP 平台模拟了钢筋混凝土梁、墩柱构件的滞回性能,取得了较好的模拟结果。

虽然利用 FENAP 平台可较高计算精度地模拟简单算例的结果,但并未对桥墩试件反复加载试验的数值模拟进行验证,因此,本文利用 FENAP 平台建立了

桥墩试件的精细化模型,对其进行了低周反复荷载条件下的非线性滞回特性分析,并与试验的滞回结果进行对比,以验证 FENAP 平台的有效性和实用性。此外,本文比较了不同钢筋本构模型对分析结果的影响。

## 1 精细化纤维单元模拟平台 FENAP

### 1.1 FENAP 平台的基本原理

基于纤维梁柱单元模型的基本原理,利用大型通用有限元软件 ABAQUS 的强大非线性求解功能和子程序二次开发接口,建立了精细化纤维梁柱单元模拟平台 FENAP,该平台可进行结构或构件的复杂非线性静力及动力响应分析,能有效考虑构件的刚度退化、强度退化等损伤效应,模拟轴力和弯矩(单、双向)的多维耦合效应等复杂非线性行为,并可以很好地模拟箍筋对混凝土的约束作用等。

FENAP 平台主要包含 3 个模块,即前处理模块、求解器模块和后处理模块,如图 1 所示。分析时,首先进入 FENAP 前处理器,对模型的截面纤维划分方式和材料本构参数进行设置,形成用于计算的 \*.inp 文件。然后,平台自动调用 ABAQUS/Standard 求解器进行求解,求解完成后,进入 FENAP 后处理器。由于 ABAQUS 软件只能对其内置单元库进行计算结果的后处理,而无法查看用户自定义单元中内部截面和纤维的计算结果,因此在 FENAP 平台中,单元的杆端力和变形结果可通过 ABAQUS/Viewer 模块进行查看,而单元内部截面力(轴力和弯矩)、截面变形(轴向应变和曲率)及纤维应力和应变结果则须通过二次开发的 FENAP/Post 模块进行查看。

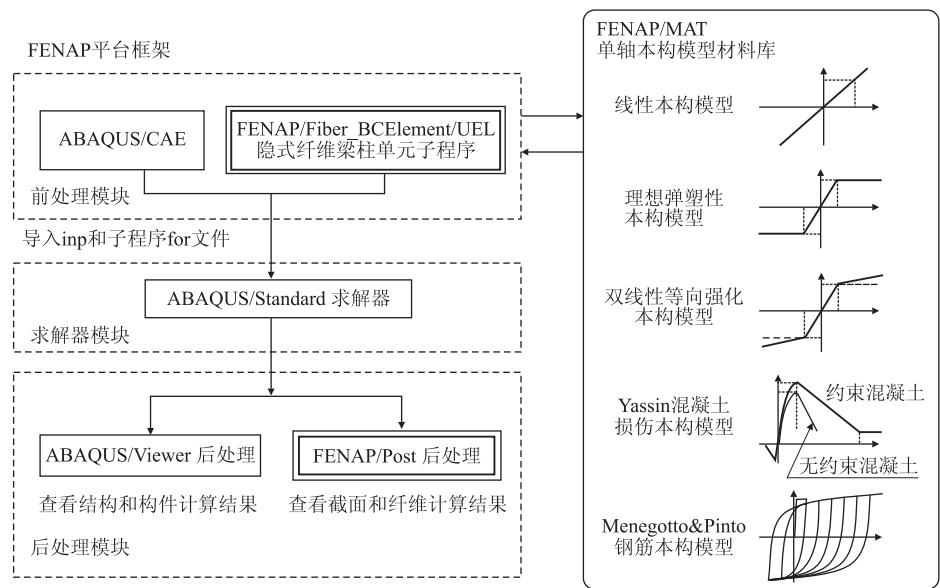


图1 纤维梁柱单元模拟平台 FENAP 框图

FENAP 平台的核心模块是 FENAP/Fiber \_ BCElement单元子程序,它将实现纤维梁柱单元模型的主要功能。在该子程序中,嵌套着若干其它子程序,这些子程序分 3 个层次,即单元层次、截面层次和纤维层次,由高到低逐级调用。其中单元层次和截面层次各包含 1 个子程序,纤维层次包含 12 个子程序。模拟过程中,可通过多种截面离散子程序和单轴材料本构子程序选择不同的截面形式及纤维材料本构模型,进而实现对任意截面形状及复杂结构非线性行为的模拟。

1.2 FENAP/MAT 材料库本构模型

对于纤维模型而言,计算结果的精度和效率很大程度上取决于纤维材料本构模型的选取,因此,进一步开发了与 FENAP 平台相适应的材料本构模型库 FENAP/MAT,涵盖多种常用的钢材和混凝土材料的单轴本构模型。钢材的本构模型包括理想弹塑性、双线性等向强化和 Filippou 等人<sup>[11]</sup>修正的 Menegotto-Pinto<sup>[12]</sup>本构模型等。其中,修正的 Menegotto-Pinto 本构模型可考虑钢筋反复加载过程中的 Bauschinger 效应和等向强化效应,且在计算过程中,采用应变的显函数表达形式来求解应力和切线模量,因而具有较高的计算精度,与钢筋反复加载试验结果吻合较好,其循环加载应力应变滞回曲线如图 2 所示。

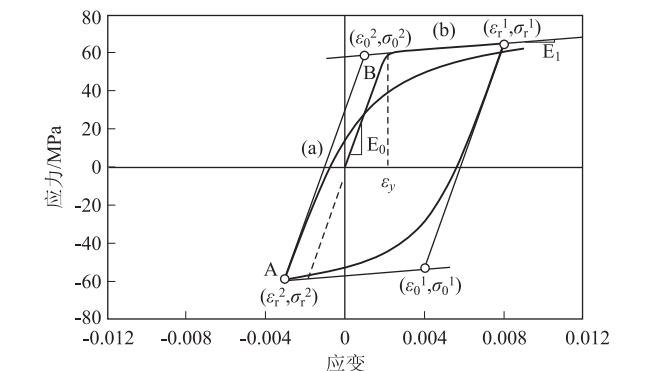


图 2 Menegotto-Pinto 钢筋本构模型循环加载滞回曲线

混凝土材料的本构模型采用了 Mohd-Yassin<sup>[13]</sup>提出的混凝土损伤本构模型。该模型能够很好地考虑混凝土在加、卸载过程中的受压连续刚度和强度退化效应、受拉刚化效应以及混凝土开裂后的刚度、强度退化效应。并可通过修改混凝土的材料特性参数,有效地考虑箍筋对混凝土的约束作用。其受压骨架曲线采用 Scott 等人<sup>[14]</sup>修正的 Kent-Park<sup>[15]</sup>模型,受压卸载和再加载滞回规则采用焦点模型以及 Blakeley<sup>[16]</sup>模型的两折线滞回规则。受拉过程中,采用直线型模型模拟加载和受拉刚化效应,并通过直线卸载函数来描述开裂后混凝土从受拉向受压加载的刚度恢复过程,混凝土

本构模型骨架曲线及滞回规则如图 3 所示。

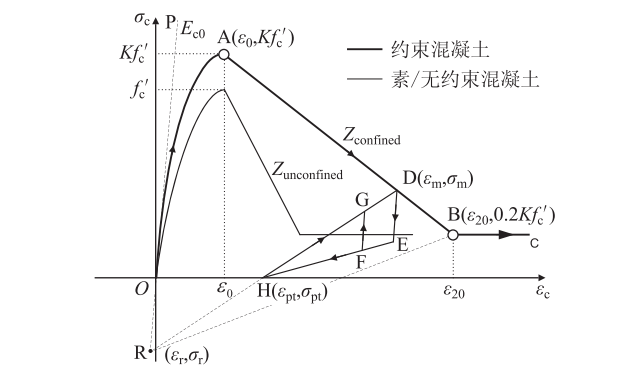


图 3 混凝土本构模型骨架曲线及滞回规则

2 钢筋混凝土桥墩试件循环加载试验模拟

本文采用 FENAP 平台对 Kawashima 等人<sup>[17]</sup>所做的钢筋混凝土 T029 号桥墩试件循环加载试验进行数值模拟。桥墩试件墩高 1.75 m, 方形截面 400 mm × 400 mm。试件几何尺寸及配筋如图 4(a) 所示, 材料参数如表 1 所示。

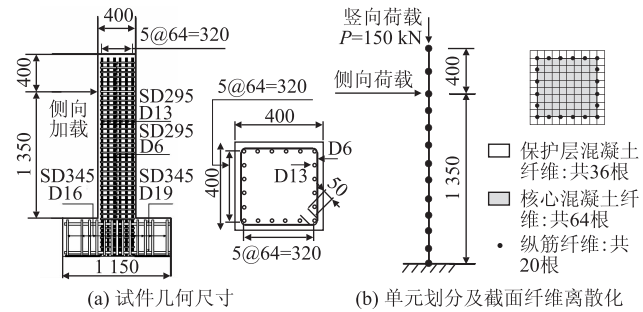


图 4 钢筋混凝土桥墩试件几何尺寸及分析模型 (mm)

表 1 钢筋混凝土桥墩试件材料参数

材料	规格	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
混凝土	保护层厚 40 mm	29.6	29.4	2.94
纵筋	φ13	179	372	372
箍筋	φ6@50	179	363	363

建模过程中,将桥墩划分为 11 个纤维梁柱单元,共计 12 个节点,每个单元采用 2 个 Gauss 积分截面,截面内由 36 根保护层混凝土纤维、64 根核心混凝土纤维及 20 根钢筋纤维组成,分析模型的单元划分及截面离散化方式如图 4(b) 所示。钢筋纤维采用 FENAP/MAT 材料库中的修正 Menegotto-Pinto 本构模型,其材料特性参数包括初始弹性模量  $E_s$ , 屈服强度  $f_y$ , 屈服后刚度系数  $b$  及控制钢筋本构曲线平滑性过渡参数  $R_0$ 、 $cR_1$  和  $cR_2$ 。混凝土纤维采用 FENAP/MAT

材料库中的 Yassin 混凝土损伤本构模型,其材料参数包括混凝土的峰值压应力 $f'_c$ 、相应的压应变 $\varepsilon_0$ 、极限压应力 $f'_{cu}$ 、极限压应变 $\varepsilon_{cu}$ 、峰值拉应力 $f'_t$ 和抗拉刚度模量 $E_{is}$ 。箍筋对核心混凝土的约束作用通过提高核心混凝土的强度和压应变参数来实现,核心混凝土的抗压强度 $f'_c$ 和相应压应变 $\varepsilon_0^c$ 的计算公式为

$$f'_c = K \times f'_c \tag{1}$$

$$\varepsilon_0^c = 0.002 \times K \tag{2}$$

式中: $K$ ——核心混凝土抗压强度提高系数。

核心混凝土抗压强度提高系数采用修正 Kent-Park 模型<sup>[15]</sup>建议公式进行计算:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} = 1.0975 \tag{3}$$

核心混凝土的极限应变 $\varepsilon_{cu}^c$ 采用 Scott 等人<sup>[14]</sup>建议的公式计算:

$$\varepsilon_{cu}^c = 0.004 + 0.9\rho_s (f_{yh}/300) \tag{4}$$

式中: $\rho_s$ ——试件的配箍率;

$f_{yh}$ ——箍筋抗拉屈服强度;

$f'_c$ ——无约束混凝土抗压强度。

表 2 和表 3 分别给出了 FENAP 平台模拟过程中所采用的混凝土和钢筋纤维的材料特性参数。

表 2 混凝土材料特性表

位置	$f'_c$ /MPa	$\varepsilon_0$	$f'_{cu}$ /MPa	$\varepsilon_u$	$f'_t$ /MPa	$E_{is}$ /MPa
保护层	-29.40	-0.002 0	-5.88	-0.006 0	2.94	1 470
核心	-32.27	-0.002 2	-6.41	-0.012 6	2.94	1 470

表 3 钢筋材料特性表

参数	$E_s$ /MPa	$f_y$ /MPa	$b$	$R_0$	$cR_1$	$cR_2$
数值	210 000	372	0.01	15	0.925	0.15

计算过程中,在墩顶施加 150 kN 竖向压力,在距墩顶 400 mm 处施加侧向水平荷载,采用位移控制,逐级加载,试验位移加载时程曲线如图 5 所示。

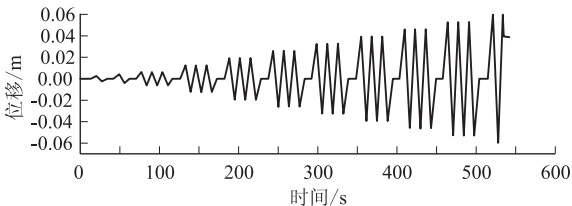


图 5 位移加载时程曲线

FENAP 平台数值模拟与试验得到的桥墩试件墩底水平反力—加载位置处水平位移滞回关系曲线和骨架关系曲线的对比分别如图 6、图 7 所示。

从图中可看出,在发生严重破坏(即滞回曲线未

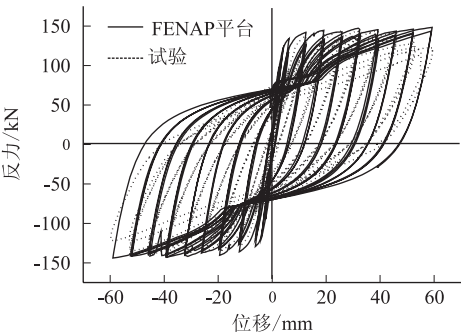


图 6 桥墩反力—位移滞回关系曲线对比

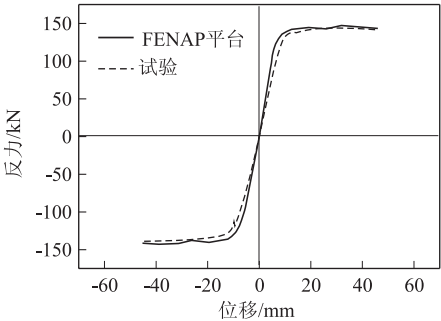


图 7 桥墩反力—位移关系骨架曲线对比

进入到下降段)前,FENAP 平台数值模拟与试验结果曲线形状十分吻合,FENAP 平台能够有效地模拟试件的刚度和强度退化效应。在最终破坏阶段,试验曲线发生了强烈的强度退化和“捏拢”效应,而模拟结果较试验结果有所偏差。其主要原因在于进入破坏阶段后,钢筋和混凝土间发生的粘结滑移会降低试件的刚度,而 FENAP 平台中所采用的纤维模型,其基本原理是在平截面假定基础上建立的,并未考虑粘结滑移的影响。此外,模型中所采用的钢筋本构关系并不能考虑纵筋屈曲效应的影响。但综合对比强度、刚度和滞回耗能的模拟结果,FENAP 平台可有效模拟钢筋混凝土桥墩试件的滞回性能,具有较高的求解精度和计算效率。

### 3 不同钢筋本构模型对构件滞回性能的影响

为进一步研究不同钢筋本构模型对构件滞回性能的影响,从而为模拟过程中钢筋本构模型的选择提供依据,分别采用两种常用的钢筋本构模型,即 FENAP/MAT 库中的修正 Menegotto-Pinto 和双线性等向强化本构模型进行对比分析。分析过程中,两种本构模型的材料特性均采用表 3 中的参数。

计算得到的桥墩试件墩底水平反力—加载位置处水平位移滞回曲线、墩底截面弯矩—曲率关系曲线、纵



筋纤维应力—应变关系曲线及保护层混凝土纤维应

力—应变关系曲线的对比分别如图 8 所示。

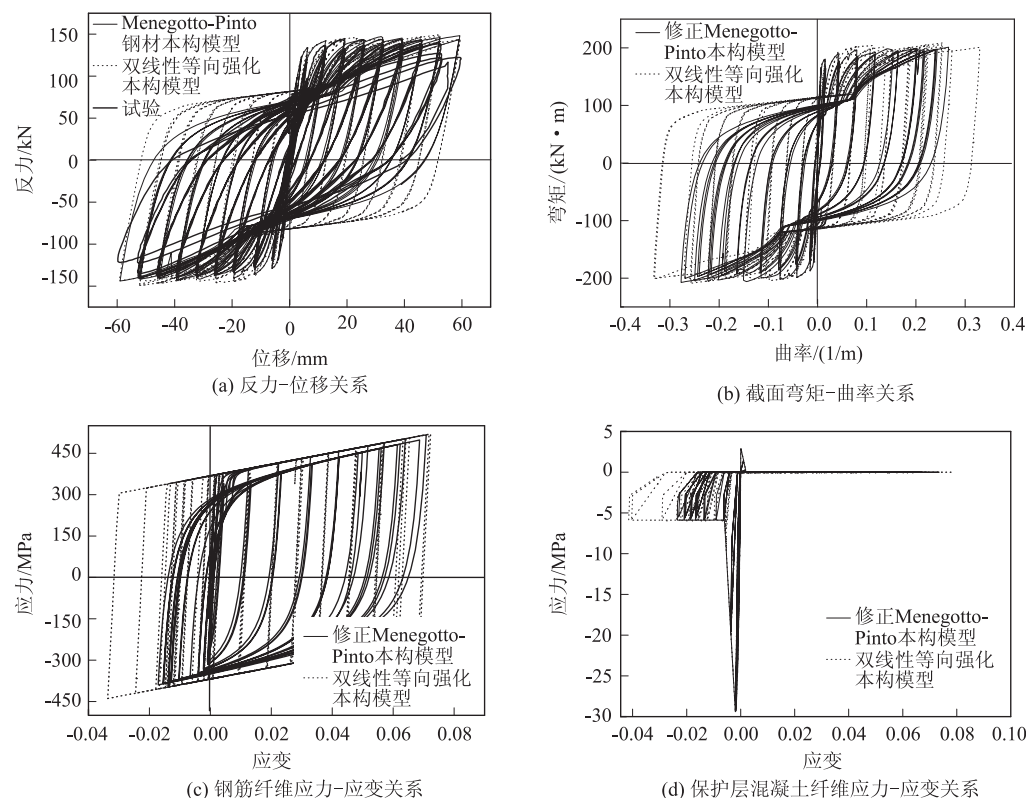


图 8 不同钢筋本构模型计算结果曲线对比

由图 8(a)可以看出,两种钢筋本构模型均能够得到与试验曲线较为接近的结果,但修正 Menegotto-Pinto 模型得到的反力—位移曲线较双线性模型更好地模拟了试件的“捏拢”效应。因此,双线性模型得到的试件耗能能力偏高。另外,对于刚度退化效应的模拟,双线性本构也相对较差。由图 8(b)可看出,在截面层次上,两种模型得到的墩底截面弯矩结果相差不大,但双线性模型得到的极限曲率较大。由图 8(c)、(d)可看出,由于 Menegotto-Pinto 模型能够有效考虑 Bauschinger 效应,且直线的转折点采用平滑的曲线进行过渡,因此, Menegotto-Pinto 模型较双线性等向强化模型更好地模拟了试件的刚度退化、强度退化和“捏拢”效应。在模拟过程中,双线性钢筋本构模型严重高估了构件的刚度和耗能能力。

## 4 结论

本文利用自主研发的精细化纤维梁柱单元模拟分析 FENAP 平台,对钢筋混凝土桥墩试件进行了滞回性能模拟和分析,比较了两种钢筋本构模型对分析结果的影响,得到以下结论:

(1) FENAP 平台可有效地模拟低周反复荷载条件下,钢筋混凝土构件的非线性滞回性能,与试验得到

的滞回关系曲线吻合较好。能够较好地考虑构件的刚度和强度退化等损伤效应、轴力和弯矩的多维耦合效应,以及箍筋对混凝土的约束效应等非线性行为,且计算效率和求解精度较高。

(2) Menegotto-Pinto 本构模型较双线性等向强化本构模型更好地模拟了试件的刚度退化、强度退化和“捏拢”效应。在模拟过程中,双线性钢筋本构模型严重高估了构件的刚度和耗能能力。

## 参考文献:

- [1] Taucer F F, Spacone E, Filippou F C. A fiber beam - column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures [R]. EERC Report 91/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Bekerley, CA, 1991.
- [2] Powell G H, Chen P F. 3D beam-column element with generalized plastic hinges [J]. Journal of Mechanical Engineering, ASCE, 1986, 112(7): 627 - 641.
- [3] Sfakianakis M, Fardis M N. Bounding surface model for cyclic biaxial bending of RC sections [J]. Journal of Mechanical Engineering, ASCE, 1991, 117(12): 2748 - 2769.
- [4] Roufaiel M S L, Meyer C. Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1987, 113(3): 429-444.

(下转第 32 页)

(上接第9页)

- [5] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part I. Formulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25 (7): 711 - 725.
- [6] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part II. Applications [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25 (7): 727 - 742.
- [7] 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.
- [8] McKenna F, Fenves G L. The OpenSEES command language manual [EB/OL]. [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Main\\_Page](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Main_Page), 2010 - 3 - 31.
- [9] Prakash V, Powell G H and Campbell S D. DRAIN-2DX: Static and Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures [R]. NISEE, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1993.
- [10] 嵯一, 李忠献. 钢筋混凝土纤维梁柱单元实用模拟平台[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 102-108.  
ZHUO Yi, LI Zhongxian. A practical Simulation Platform of Reinforced Concrete Fiber Beam-column Element [J]. Engineering Mechanics 2011; 28(4): 102 - 108.
- [11] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints [R]. EERC Report 83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1983.
- [12] Menegotto M, Pinto P E. Slender RC Compressed Members in Biaxial Bending [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1977, 103(3): 587 - 605.
- [13] Mohd-Yassin M H. Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cyclic Loads [D]. University of California, Berkeley, 1994.
- [14] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain rates [J]. ACI Structural Journal, 1982, 84(4): 13 - 27.
- [15] Kent D C, Park R. Flexural members with Confined Concrete [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [16] Blakely R W G, Park R. Prestressed Concrete Sections with Cyclic Flexure [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1973, 99(8): 1717 - 1742.
- [17] Nagaya K, Kawashima K. Effect of Aspect ratio and Longitudinal Reinforcement Diameter on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns [R]. Report No. TIT/EERG, 2001, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- [18] 嵯一, 王菲. 罕遇地震下城际铁路连续梁桥延性抗震设计[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(4): 66 - 71.  
ZHUO Yi, WANG Fei. Seismic Ductility Design for Intercity Railway Continuous Bridge Under Rare Earthquake [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 66 - 71.

(编辑:刘会娟 苏玲梅)