石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 24 No. 4 第24卷 第4期

2011 年 12 月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Dec. 2011

钢筋粘结滑移对钢筋混凝土墩柱抗震性能影响

罗 征 , 李建中

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室 ,上海 200092)

摘要:为了研究钢筋粘结滑移对钢筋混凝土墩柱在地震荷载下的弹塑性滞回性能的影响, 采用有限元 OpenSEES 对试验墩柱进行了有限元数值模拟 同时参数分析了在改变墩柱延性、钢 筋屈服强度、混凝土的约束以及加载历程对粘结滑移曲率的影响。分析结果表明:考虑钢筋粘 结滑移的模型能较好地反映滞回曲线的 "捏拢" 效应以及墩柱强度与刚度的退化作用 ,与实际结 果模拟较好,可供钢筋混凝土墩柱数值模拟和地震反应分析参考。

关键词: OpenSEES; 滞回环; 粘结滑移; 强度退化; 纤维截面; 参数分析 中图分类号:U448 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373 (2011) 04-0007-06

通过试验发现钢筋混凝土墩柱根部附近的纵筋滑移是墩柱总变形的重要组成部分。通过钢筋混凝 土柱的低周反复加载试验表明[14] 基础底部柱纵筋粘结滑移引起的附加变形可占总变形的 30% 以上 在 文献 [2] 中,作者研究了钢筋混凝土节点考虑粘结退化的滞回曲线,发现粘结退化将使得滞回曲线发生捏 拢效应 刚度退化。

通过 OpenSEES 有限元软件^[5],对 PEER 的钢筋混凝土柱抗震性能试验数据库(PEER Column Performance Data Base) 里面的 Saatcioglu^[6]试验构件进行数值模拟,建立了考虑墩底钢筋粘结滑移的墩柱有 限元模型 结果表明考虑粘结滑移因素后 数值结果与试验结果拟合较好 同时能较好的模拟出滞回曲线 的"捏拢"现象以及刚度退化现象。

考虑粘结滑移钢筋混凝土墩的数值模型 1

1.1 混凝土本构及钢筋材料模型

根据 PEER 数据库里面 Saatcioglu and Ozcebe^[6]试件在定轴力的低周反复加载试验进行模拟分析和 对比验证。试件材料混凝土强度 37 MPa、轴力 600 kN、纵筋屈服强度 437 MPa,横向钢筋屈服强度 425 MPa 箍筋间距 65 mm。墩柱试件高度 1 m 截面边长 350 mm、配箍率 0.019 5% 配筋率 0.032 1%、最终 破坏形态为弯曲破坏。数值模拟采用混凝土模型为 concrete 01 material ,它是基于 scott-kent-park^[7]的单轴 混凝土模型,见图1。应力-应变的骨架曲线由两部分组成,上升段采用抛物线,下降段采用直线,混凝土 达到剩余强度后作为水平线处理 强度不再降低。加载和卸载采用 Karsan-Jirsa^[8]线性加卸准则。钢筋模 型 reinforce material,它是基于 Chang-Mander^[9]的钢筋模型,见图 2。钢筋本构由四部分组成:一部分为线 弹性段,二为屈服平台段,三为应变硬化段,四为应变软化段。Chang-Mander^[9]钢筋模型能够描述钢筋在 塑性变形时的包辛格效应、循环应变强化、反向记忆特性、低周疲劳等力学性能,较好地模拟了钢筋在反 复应变下的滞回曲线。模型由 10 条规则描述钢筋在反复荷载下的应力-应变加卸载路径 ,其中 ,规则 1、 规则2表示骨架曲线 其它为滞回规则。

1.2 钢筋粘结滑移单元

在钢筋混凝土纤维模型基础上 通过在墩底附加一个零长度单元^[4]来模拟墩柱底部的纵筋滑移,把

收稿日期:2011-09-22 作者简介: 罗征 男 1980 年出生 博士研究生 项目基金:国家自然科学基金(90815007)



图1 Concrete01 材料模型



图 2 Reinforce 材料模型

弯曲变形和滑移变形分开考虑。即用一个杆件单元来模拟构件长度内弯曲效应引起的变形,在杆件单元 的端部再附加一个单独考虑滑移变形的零截面长度单元。如图 3 所示,这是根据零长度截面单元,定义 单元长度为1并且只有一个积分点,这样,单元的变形就等于截面的变形,弯曲-曲率的关系等于弯矩-转 角的关系,由此得到的是滑移产生的截面曲率。即 *i* 节点截面的曲率为粘结滑移产生的截面曲率,而 *j* 节 点截面的曲率为截面弯曲变形产生的曲率。

OpenSEES 里面 Bond-slip^[10] 采用的钢筋应力-加载端滑移 关系的骨架曲线如图 4 所示 SOROUSHIAN^[11]等所完成的拉拔 试验表明,当锚固长度较长时,钢筋应力-加载端滑移量关系的 骨架曲线表现为:在钢筋屈服前的一个近似直线段和钢筋屈服 后的曲线段。

直线段斜率采用 K 来表示 曲线段部分用下式

$$\widetilde{\sigma} = \frac{\frac{s}{\mu - \widetilde{s}}}{\left[\left(\frac{1}{\mu b}\right)^{R_e} + \left(\frac{\widetilde{s}}{\mu - \widetilde{s}}\right)^{R_e}\right]^{\frac{1}{R_e}}}$$

图 3 钢筋混凝土墩柱模型

这里将钢筋的应力规范化 $\tilde{\sigma} = (\sigma - f_y) / (f_u - f_y)$ 将钢筋滑移

量同样的规范化 $\tilde{s} = (s_u - s_y)/s_y \mu = (s - s_y)/s_y$ 代表延性因子, b 为刚度折减系数用来表示弹性刚度 K 的折减, f_u 与 f_y 用以代表纵筋的极限强度与屈服强度, s_y 与 s_u 代表钢筋相应强度时墩底钢筋的滑移量。 方程里面可以看出,当钢筋应力接近于屈服强度时, $\tilde{s}/(\mu - \tilde{s})$ 接近于 0,曲线斜率接近于 bK 。而当钢筋 的应力接近极限应力时, $\tilde{s}/(\mu - \tilde{s})$ 变得无限大,曲线斜率接近与 0,为了保证极限状态下曲线斜率为 0, R_e 采用 1.01。Bond-slip 模型的滞回曲线如图 5 所示。

(1)



此模型主要有 *s_y*, *s_u*, *α*, *R* 四个参数 其中 *s_y* 为具有足够锚固长度(锚固长度大于钢筋屈服时对应的锚 固长度) 的钢筋的拉拔试验数据拟合而得到

$$s_y = 2.54 \left[\frac{d_b}{8\,437} \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} (2\alpha + 1) \right]^{\frac{1}{\alpha}} + 0.34$$
 (2)

式中, d_b 为钢筋直径; α 为描述局部粘结滑移的系数, \mathbb{R} 0.4; R为描述"捏拢"效应的因子, R 取值范围 0~1。根据 OpenSEES 里面采用 Bond_SP01, 根据建议值^[3], $s_u = 35s_y R = 0.35$ 。图 5 可以看出 Bond_SP01 材料的滞回曲线 R = 0.35 时出现了明显的捏拢效应。

2 试验结果与是否考虑粘结滑移单元数值结果对比

对 Saatcioglu and Ozcebe^[6]试件 U6 考虑与不考虑钢筋粘结滑移效应分别进行建模并进行滞回曲线的分析。如图 6(a) 所示, WH 代表考虑粘结滑移的数值模拟结果, WH/O 代表不考虑粘结滑移的数值模拟结果。

从图 6(a) 三条滞回曲线显示,考虑粘结滑移的曲线与实际模型的曲线更加的贴近吻合,试验结果与 考虑粘结滑移的数值模型的滞回曲线有着明显的捏拢效应,同时由图看出不考虑粘结滑移效应时会高估 构件的弹性刚度、屈服强度、以及卸载刚度。说明考虑粘结钢筋粘结滑移时的数值模型能较为贴切的表 达墩柱的滞回曲线,反映出墩柱的滞回耗能能力。图 6(b)、(c) 显示在构件延性 μ = 1 μ = 4,构件的位 移变形,考虑粘结滑移与不考虑粘结滑移构件墩顶位移两者相差较大,进一步说明忽略考虑墩柱粘结滑 移会低估墩柱的变形。





3 参数分析

3.1 位移延性

墩底截面的钢筋屈服时的墩顶位移为屈服位移,延性为1,表1列出了墩顶位移延性与墩底曲率表, 其中 φ_{sp} 为墩底粘结曲率,墩底粘结曲率随着位移延性的增加而增加与粘结滑移产生的曲率占总曲率的 比例较大,并且墩底粘结曲率占总墩底曲率的比例随着墩顶位移延性的增加而减小。

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~				
墩顶位移	延性	$oldsymbol{arphi}_{sp}$	$arphi_{\dot{arepsilon}}$	$(arphi_{sp} / arphi_{ik}) / \%$
17	1	0.009 6	0.018 2	53
34	2	0.012 5	0.025 3	49
51	3	0.016 9	0.039 3	43
68	4	0.020 6	0.0590	35
85	5	0.028 3	0.093 8	30

おうます

图 7 为墩底粘结曲率--墩顶延性曲线。由图 7 可以看出,钢筋滑移产生的曲率随着位移延性的增加而 增加并且增加的趋势是加大的,说明墩柱的延性的增加会加快墩柱粘结滑移变形的速度。

### 3.2 钢筋屈服强度

减小钢筋的屈服强度,钢筋屈服强度的减小相当于钢筋粘结条件的退化,在相同位移延性时不同钢 筋屈服强度时的墩底曲率进行对比。将钢筋的屈服强度由原来的 437 MPa 变为 335 MPa,模型的其他条 件不变 结果如图 8。纵筋的屈服强度增加相当于混凝土的混凝土粘结滑移条件得到改善 粘结滑移的曲 率变小 说明增加纵筋的屈服强度能有效的减小墩底的粘结滑移产生的变形。







图 8 不同钢筋屈服强度墩底粘结曲率-延性

#### 3.3 混凝土约束

减小混凝土的配箍率将减小混凝土的约束 这里通过增大横向箍筋配箍率来改变混凝土的约束。将 原有的横向配箍率由 1.95% 增加到 3.9%。不同混凝土约束墩底

粘结曲率-延性曲线如图9所示。增加混凝土的配箍率相当于混 凝土的混凝土粘结滑移条件得到改善 粘结滑移的曲率变小并且 褂 敦底粘结曲 曲率变化的速率也相对低配箍率的小,说明增加混凝土的约束能 有效的减小墩底的粘结滑移产生的变形。

3.4 加载时程

加载时程对墩柱滞回性能的影响较大,如大的位移反向滞回 将会引起在随后的滞回变形曲线刚度变小。为了研究加载时程 对墩底粘结曲率的影响,这里采用两种不同的加载时程如图10, 图 11 纵轴采用墩顶位移与墩顶屈服位移之比(无量纲)。墩顶位



移与墩底剪力关系如图 12 所示。不同加载时程墩底粘结曲率-延 图 9 不同混凝土约束墩底粘结曲率-延性 性曲线如图 13 所示。可以看出加载路径的不同对卸载刚度以及墩底粘结曲率影响较大。对于加载值从 小值突然加载到大值的加载工况,由于墩底的钢筋粘结条件没有退化完全,墩底粘结曲率值会相比逐级 加载的工况的粘结曲率值小。

#### 结论 4

钢筋的粘结滑移效应对墩柱的滞回性能影响较大 从实际的试验结果与是否考虑墩底钢筋的粘结滑 移的滞回曲线可以看出 ,考虑钢筋的粘结滑移效应后与真实的结果较为接近 ,能模拟出墩柱的捏拢效应





图 11 加载时程-工况 2



图 12 墩顶位移与墩底剪力

图 13 不同加载时程墩底粘结曲率-延性

以及滞回曲线的刚度退化 同时对墩柱的数值模型进行参数分析得到以下结果:

(1)钢筋滑移产生的曲率随着位移延性的增加而增加并且增加的斜率(即增加的趋势)是加大的,说 明墩柱的延性的增加会加快粘结滑移变形的速度。

(2) 纵筋的屈服强度增加相当于混凝土粘结滑移条件得到改善粘结滑移的曲率变小,说明增加纵筋的屈服强度能有效的减小墩底的粘结滑移产生的变形。

(3) 增加混凝土的配箍率相当于混凝土的混凝土粘结滑移条件得到改善,粘结滑移的曲率变小并且 曲率变化的速率也相对低配箍率的小,说明增加混凝土的约束能有效减小墩底的粘结滑移产生的变形。

(4)加载路径不同对卸载刚度以及墩底粘结曲率影响较大。对于加载值从小值突然加载到大值的工况,由于墩底的钢筋粘结条件没有退化完全,墩底粘结曲率值会相比逐级加载的工况的粘结曲率值小。

参考文献

- [1] Eligehausen, Popov P ,Bertero. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations [R]. Berkeley: University of California ,1983.
- [2] Filippou F C , Popov E P. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforce concrete Joints [R]. Berkeley: University of California ,1983.
- [3]朱雁茹 ,郭子雄. 基于 OpenSEES 的 SRC 柱低周往复加载数值模拟 [J]. 广西大学学报 2010 35(4) 555-559.

[4]徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究 [D]. 北京:清华大学土木工程系, 1990.

- [5]Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H Scott, et al. OpenSees example manual [R]. Berkeley: University of California, 1983.
- [6]Saatcioglu, Ozcebe, Guney. Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading [J]. ACI Structural Journal, 1989 89(7): 3-12.
- [7] Mander J B , Priestley M J N , Park R. Theoretical stress strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering ,1988 ,114(8): 1804–1825.

(下转第44页)

- [4]Znidaric A, Baumgärtner W. Bridge weigh-in-motion systems-an overview [C]// Pre-Proceedings of 2nd European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998: 139– 152.
- [5]González A, Brien O. Influence of dynamics on accuracy of a bridge weigh in motion system [C]// Proceedings of the 3rd Conference on Weigh-In-Motion. Florida: Iowa State University, 2002:13-15.

## Algorithm Analysis of Bridge Weigh-in-Motion System Based on Bridge Response

#### Geng Shaobo, Shi Xuefei, Ruan Xin

( Department of Bridge Engineering ,Tongji University Shanghai 200092 ,China)

Abstract: The bridge weigh-in-motion system, based on the bridge structure influence line calculation, attracts many researchers' attention extensively abroad. Portability and recyclability are advantages of B-WIM system. Some foreign products are also applied for existing bridge evaluation while few research papers can be found in China. As its application can provide the existing bridge with real vehicle load data for bridge condition evaluation, the operation principles of the whole system are introduced in detail. With an example of a 3-axle truck, the influence line ordinate generation is elaborated. The general form of matrix method is listed for vehicle axles load calculation. The content discussed in this paper can be used as the basis for software generation of B-WIM system.

 Key words: bridge structure; weigh-in-motion; vehicle load
 (责任编辑 车轩玉)

#### (上接第11页)

- [8]Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loading [J]. Journal of Structural Division ,1969 95(12): 2543-2563.
- [9] Chang G A, Mander J B. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part 1 [R]. New York : University of Buffalo , 1994.
- [10]Zhao Sritharan S. Modeling of strain penetration effects in fiber based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI Structural Journal 2007, 104(2):133-141.
- [11]Sorushian P , Choi K. Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete [J]. ACI Structural Journal, 1989 86(2):217-222.

## Reinforce Bond-Slip Effect for Reinforce Concrete Columns Seismic Performance

#### Luo Zheng, Li Jianzhong

(Tongji University, State Key Laboratory Of Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: For the study of bond-slip effect on reinforced concrete column elastoplastic hysteretic behavior under seismic loading , the OpenSEES finite element is used in numerical simulation. The curvature of bond-slip parameter analysis is made by changing pier ductility , steel yield strength , confined concrete and the loading process. The results show that the fiber model based OpenSEES can simulate the characteristics of hysteresis loop , and the model considering bond – slip can better reflect the hysteresis curve of the "pinch" effect and the degradation of strength and stiffness columns , which can provide reference for numerical simulation of reinforced concrete columns and seismic response.

Key words: OpenSEES; hysteretic loop; bond-slip; degradation of strength; fiber section

(责任编辑 刘宪福)