

# GFRP 套管钢筋混凝土柱恢复力模型的试验研究\*

关宏波<sup>1</sup>, 刘士润<sup>2</sup>, 魏晓刚<sup>1</sup>, 刘书贤<sup>1</sup>, 麻凤海<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连理工现代工程检测有限公司, 辽宁 大连 116024;  
3. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 套管钢筋混凝土柱是一种新型的组合结构形式, 为研究其抗震性能, 对 8 根 GFRP 套管钢筋混凝土柱进行低周反复荷载作用下的试验研究。主要研究了轴压力大小、混凝土强度及 FRP 管与基础的连接方式对 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱的变形能力和滞回特征的影响, 根据 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱在低周反复荷载作用下滞回曲线的特点, 采用截面纤维模型法对试件截面进行全过程分析获得骨架曲线。通过试验数据回归分析确定加卸载规则, 提出了适合于 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱的恢复力模型, 并与试验结果进行了比较, 计算模型与试验结果吻合良好。

**关键词:** GFRP 套管; 钢筋混凝土柱; 抗震性能; 恢复力模型

**中图分类号:** TV352.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)01-0173-08

## 0 引言

国内外学者在过去的 40 多年中对各种建筑结构的恢复力模型开展了大量的理论分析和试验研究, 提出了多种恢复力模型 (郭子雄, 杨勇, 2004), 比较典型的恢复力模型有 Clough 模型 (Clough, Johnston, 1996)、Takeda 模型 (Takeda *et al.*, 1970) 等。结构构件的恢复力模型能够反映结构或构件的主要力学特征及结构真实动力特性, 是结构分析和设计不可缺少的工具 (郭子雄, 吕西林, 2004; 郭子雄等, 2009)。GFRP 套管钢筋混凝土柱是一种新型的组合结构形式, 目前国内外关于 GFRP 套管钢筋混凝土柱方面的研究主要集中在静力方面, 而关于 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱抗震性能方面的研究非常少 (关宏波, 王清湘, 2012), 因此开展 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱恢复力模型研究具有非常重要的作用, 将影响 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱在结构中的推广和应用。

本文主要根据 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱在低周反复荷载下滞回曲线的特点, 在试验研究结果的基础上, 对试验数据加以分析、综合、归纳,

提出了适合于 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱的恢复力模型, 并与试验骨架曲线进行了比较。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验具体考虑了混凝土强度、GFRP 管与基础的连接方式及轴压力系数 (试验轴压力与极限承载力的比值) 等影响因素, 具体详见表 1。

表 1 试件设计方案  
Tab. 1 Specimens design scheme

试件编号	立方体抗压 强度/MPa	极限轴压力 $N_0/\text{kN}$	试验轴压力 $N/\text{kN}$	轴压系数 $n = N/N_0$
JC-L-L-B	31.4	2 012	402	0.2
JC-L-L-C	31.4	2 012	402	0.2
JC-L-H-B	31.4	2 012	1 207	0.6
JC-L-H-C	31.4	2 012	1 207	0.6
JC-H-L-B	60.3	2 540	508	0.2
JC-H-L-C	60.3	2 540	508	0.2
JC-H-H-B	60.3	2 540	1 524	0.6
JC-H-H-C	60.3	2 540	1 524	0.6

注: B 为 GFRP 管不深入基础内试件; C 为 GFRP 管深入基础内试件。

\* 收稿日期: 2013-11-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045, 51174038), 辽宁省教育厅科研项目(L2012111), 中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2012-319)及辽宁工程技术大学市场调研信息立项基金(SCDY2012010)联系资助。

试件几何尺寸及配筋情况见图 1, 受力钢筋为 HRB335, 纵向配筋率为 2.16%; 箍筋采用 HPB235, 体积配箍率为 1.2%; GFRP 套管混凝土组合柱中 GFRP 管壁厚 5 mm, 内径为 200 mm, 外径为 210 mm, GFRP 管长分别为 1.2 m 和 1.4 m。

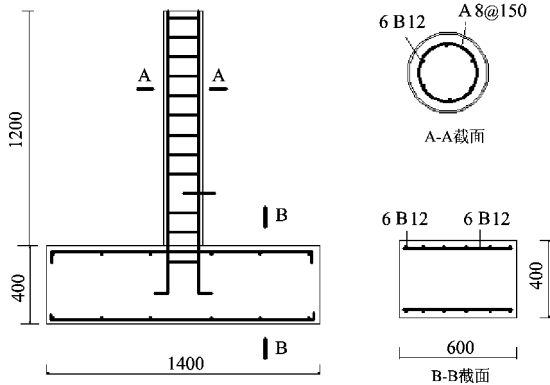


图 1 试件几何尺寸及钢筋布置

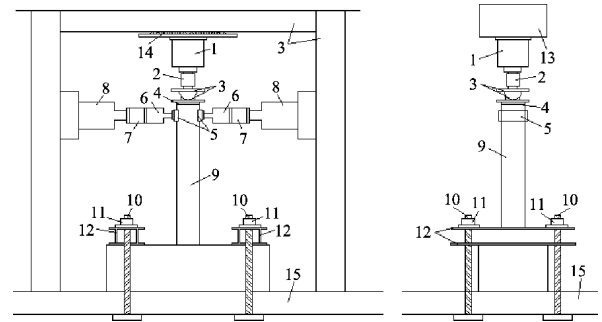
Fig. 1 Geometric size and details of reinforcement of specimen

## 1.2 试验装置和加载制度

利用反力架加载, 图 2 为试验加载装置的示意图。水平荷载由两个行程为  $\pm 100$  mm, 25 t 液压千斤顶在柱上端施加; 轴向荷载由一个放置在柱顶的 200 t 千斤顶施加, 同时将一个球铰放在柱顶与千斤顶之间传递轴向压力。

低周反复荷载试验的具体加载方法是: 首先施加轴向荷载, 并始终保持其值不变, 然后由水平千

斤顶施加水平荷载, 采用力与位移联合控制的方法, 在试件屈服以前荷载由力控制, 每次循环一次直到试件屈服, 当试件到达屈服点以后, 改由位移控制, 每级位移处循环两次, 直至试件破坏 (秦鹏等, 2013), 当水平承载力下降到最大值的 85% 时, 即认为试件已经破坏 (张国军等, 2007)。



1: 200 t 液压千斤顶; 2: 荷载传感器; 3: 球铰; 4: 钢板;  
5: 加载装置; 6: 加载头; 7: 荷载传感器; 8: 25 t 液压千斤顶; 9: 试件; 10: 螺栓; 11: 螺帽; 12: 工字型钢; 13: 反力架; 14: 滚轴; 15: 钢筋混凝土梁

图 2 试验加载装置的正面(a)及侧面(b)示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the front (a) and the side (b) of the test loading device

## 1.3 主要试验结果分析

### 1.3.1 试件破坏特征

试件在低轴压下, 在最初的几次往复荷载循环中, 试件没有明显的破坏迹象, 残余位移非常的少; 但试件到达屈服点以后, 采用位移控制

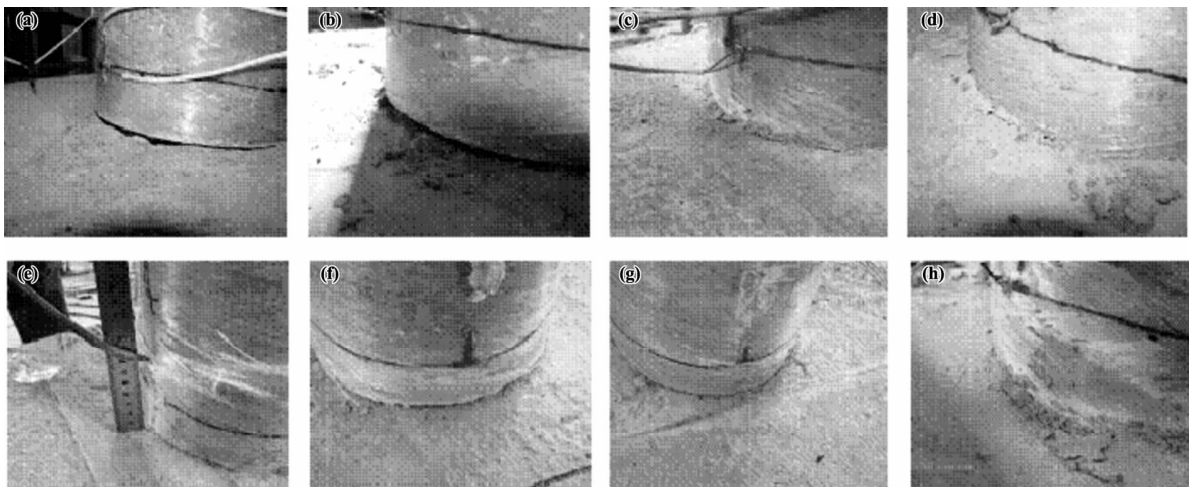


图 3 失效试件图片

(a) 试件 JC-L-L-B; (b) 试件 JC-H-L-B; (c) 试件 JC-L-L-C; (d) 试件 JC-H-L-C; (e) 试件 JC-L-H-B; (f) 试件 JC-H-H-B; (g) 试件 JC-L-H-C; (h) 试件 JC-H-H-C

Fig. 3 Photo of the failure specimen

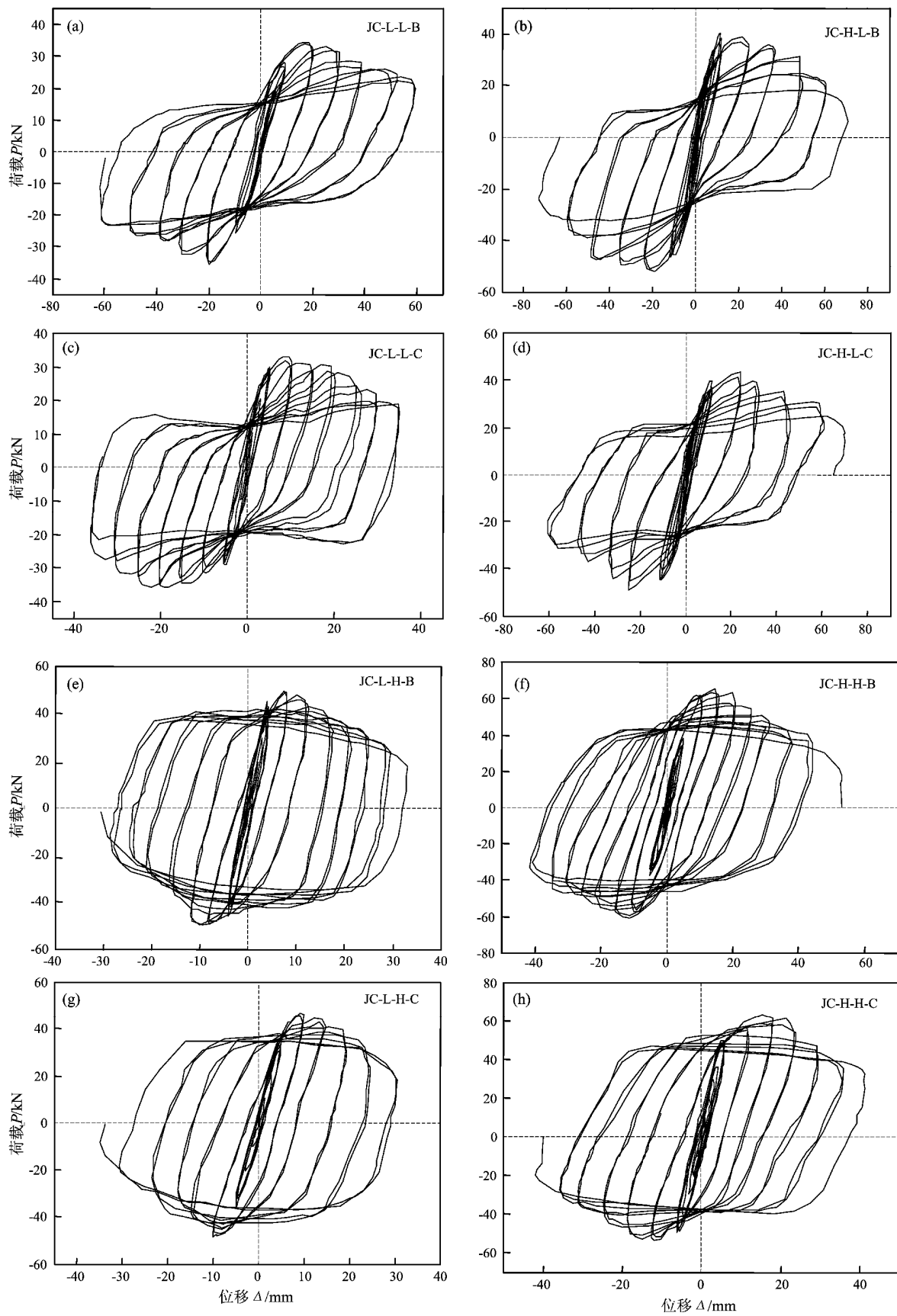


图4 试件的荷载—位移滞回曲线

Fig. 4 Load-displacement hysteresis loops for test specimens

时,出现破坏的迹象,FRP管表面尤其在根部开始泛白,并且白色区域随着试验的深入而不断扩大,试件破坏时没有发现被拉断的纤维,属于弯曲破坏,图3c、d显示在低轴压下各试件的破坏形态。

与低轴压试件不同,高轴压试件在荷载控制阶段,FRP管表面就出现白色区域,随加载次数的增多及加载位移的增大,白色条带迅速向外发展,并有纤维被拉断的“啪啪”响声出现,属压缩破坏,各试件的最终破坏形态见图3e~h。

### 1.3.2 滞回曲线的特征

各试件的滞回曲线见图4,由图4可见:(1)GFRP管与基础的连接方式的不同并未在水平极限位移、水平极限承载力方面产生多大影响,仅仅在能量耗散方面略显差异;(2)从滞回曲线上可以看出轴压的不同对试件的滞回性能影响较大,主要是因为轴压的不同改变了试件的受力状态及破坏类型。

### 1.3.3 骨架曲线分析

各试件的骨架曲线如图5所示,由图5a可以

看出:GFRP管与基础的连接方式对试件的骨架影响甚少。不同轴压下的试件骨架曲线如图5b所示,从图中可以看出:虽然低轴压试件承载力小于高轴压试件,但承载力下降缓慢,骨架曲线平缓。把骨架曲线上各特征点的计算结果列于表2,从表2中可以看出:低轴压的延性要高一些,GFRP管插入基础内部的试验的延性略好些。

表2 骨架曲线特征点试验结果

Tab. 2 Test result of characteristic points of skeleton curves

试件编号	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\Delta_u/\Delta_y$
JC-L-L-B	25.7	9.6	32.6	27.7	35.2	3.7
JC-L-L-C	30.0	12.1	33.6	28.6	52.7	4.4
JC-L-H-B	43.9	6.6	49.4	42.0	15.5	2.3
JC-L-H-C	39.1	6.8	47.4	40.3	17.8	2.6
JC-H-L-B	39.3	9.6	46.0	39.1	41.1	4.3
JC-H-L-C	37.1	8.8	43.9	37.3	41.5	4.7
JC-H-H-B	51.2	9.0	59.4	50.5	26.5	2.9
JC-H-H-C	51.1	7.8	56.8	48.3	24.1	3.1

注:  $P_y$ 、 $P_m$  和  $P_u$  分别为屈服、峰值和极限变形对应荷载。

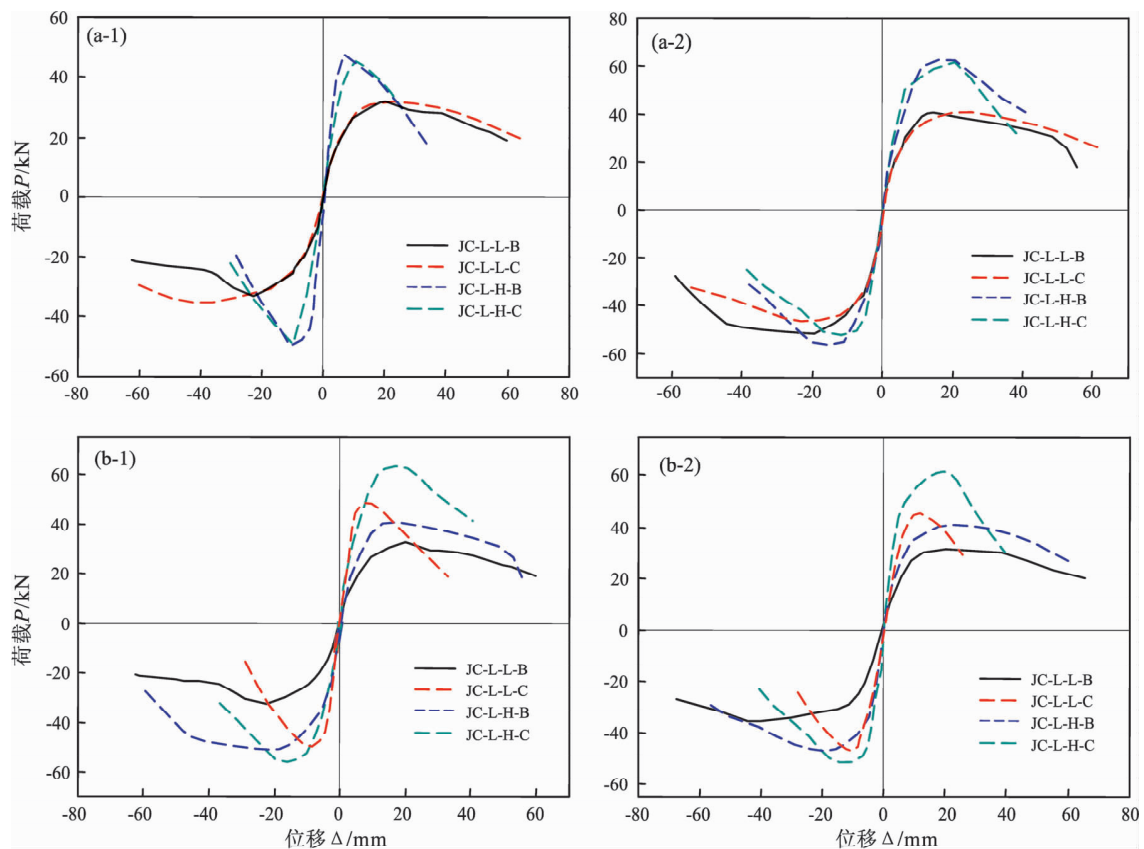


图5 试件骨架曲线

(a) GFRP管与基础连接方式的影响;(b) 轴压及混凝土强度影响

Fig. 5 Skeleton curves of the specimens

(a) the influence of GFRP tube and basic connection mode; (b) the influence of axial compression and the strength of concrete

## 2 GFRP 套管钢筋混凝土柱恢复力模型

### 2.1 骨架曲线

对 GFRP 套管钢筋混凝土柱截面的受力情况进行全过程分析, 采用层纤维模型计算, 将 GFRP 套管钢筋混凝土柱截面的混凝土分为不同的层状单元, 每根钢筋作为独立单元看待。约束混凝土的应力—应变模型采用 Samaan 的 GFRP 约束混凝土应力—应变模型 (Samaan, Mirmiran, 1998), 如图 6 所示, 其轴向应力—应变关系式如下:

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{\left[ 1 + \left( \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{f_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}}} + E_2 \varepsilon_c. \quad (1)$$

式中,  $E_1$  为第一直线段斜率, 由混凝土强度决定;  $E_2$  为第二直线段斜率, 由 GFRP 管对混凝土的约束刚度决定;  $n$  为渡段曲线控制参数, 对于低强混凝土  $n = 1.3$ , 高强混凝土  $n = 1.8$ ;  $f_c$  为轴向应力;  $\varepsilon_c$  为轴向应变。

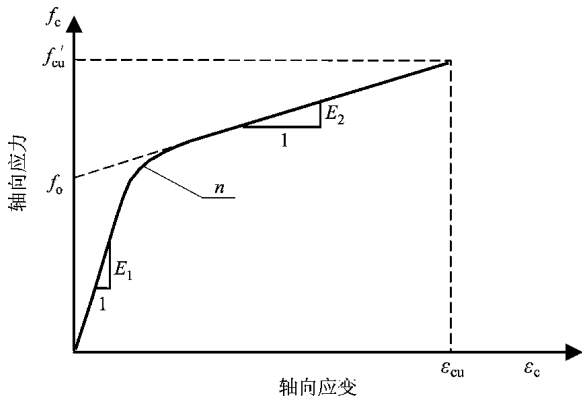


图6 双线性模型

Fig. 6 Bilinear confinement model

钢筋的应力—应变模型采用理想弹塑性模型, 如图 7 所示, 其关系为

$$f_s = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_y; \\ f_y, & \varepsilon > \varepsilon_y. \end{cases} \quad (2)$$

图 8 为试件截面应变—应力分布图, 图中

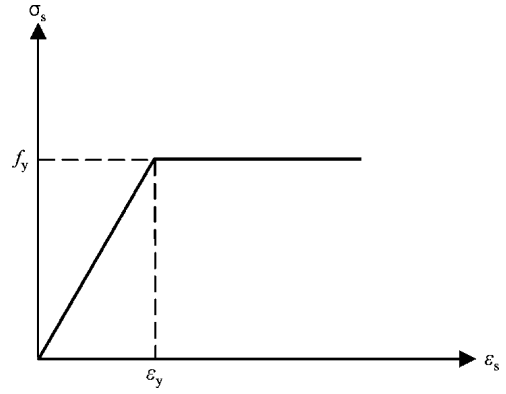


图7 钢筋的理想弹塑性应力应变曲线

Fig. 7 Ideal elastic-plasticity stress-strain curve of steel

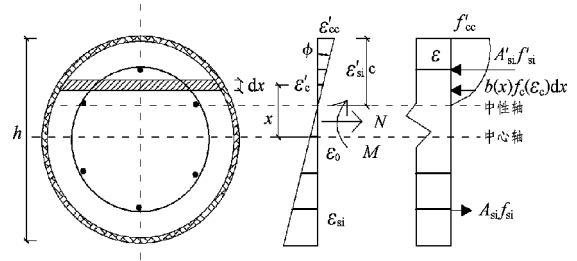


图8 试件截面应变—应力分布图

Fig. 8 Strain and stress distribution of cross-section of specimens

$h$  为截面高度;  $dx$  为截面划分的带宽;  $x$  为截面任意点距中心轴的距离;  $c$  为中性轴到受压边缘的距离;  $\varepsilon_c'$  为约束混凝土的压应变;  $\varepsilon_{si}$ 、 $\varepsilon_{si}'$  分别为钢筋的拉、压应变;  $\varepsilon_0$  为中心轴处的应变;  $\phi$  为截面曲率;  $b(x)$  为所取带元处的带宽, 为  $x$  的函数;  $f_c'(\varepsilon_c)$  为约束混凝土的压应力;  $f_{si}$ 、 $f_{si}'$  为钢筋的拉、压应力;  $A_{si}$ 、 $A_{si}'$  为拉、压钢筋面积;  $N$ 、 $M$  分别为截面轴力和弯矩。

荷载产生的应变为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \phi \cdot x. \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为中心轴的应变;  $\phi$  为截面曲率;  $x$  为截面任意点距中心轴的距离。

钢筋的应力为

$$\sigma_{si}(\varepsilon_{si}) = \sigma_{si}(\varepsilon_0 + \phi \cdot x). \quad (4)$$

混凝土的应变为

$$f'_c(\varepsilon'_c) = f'_c(\varepsilon_0 + \phi x). \quad (5)$$

对中心轴取矩, 根据试件截面轴力  $N$  和弯矩  $M$  的平衡条件得:

$$N = \int_{h/2-c}^{h/2} b(x) f'_c(\varepsilon'_c) dx + \sum_1^n A_{si} \sigma_{si}(\varepsilon_{si}). \quad (6)$$

$$M = \int_{h/2-c}^{h/2} b(x) f'_c(\varepsilon'_c) x dx + \sum_1^n A_{si} \sigma_{si}(\varepsilon_{si}) d_{si}. \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{si}(\varepsilon_{si})$  为截面内第  $i$  根钢筋应力;  $A_{si}$  为截面内第  $i$  根钢筋的面积;  $d_{si}$  为截面内第  $i$  根钢筋到中性轴的距离。

试件顶点位移  $\Delta$  与塑性铰区域曲率  $\phi$  的关系如下:

$$\Delta = \begin{cases} \frac{\phi H^2}{3}, & \phi \leq \phi_y; \\ \frac{\phi H^2}{3} - (\phi - \phi_y) l_p (H - 0.5 l_p), & \phi > \phi_y. \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\phi_y$  为试件的屈服曲率, 与屈服荷载相对应;  $l_p$  为试件塑性铰区域高度, 可表示为

$$l_p = 0.5h + 0.05H. \quad (9)$$

其中,  $h$  为试件截面高度;  $H$  为塑性铰区域最大弯矩截面到加载点之间的距离。

水平荷载  $P$  与水平位移间的关系为

$$P = \frac{M - N \cdot \Delta}{H}. \quad (10)$$

## 2.2 GFRP 套管钢筋混凝土柱的滞回规则

对于屈服点前的加卸载刚度恒取为弹性加载刚度  $K_e$  (管品武, 2000), 对于屈服点后的卸载刚度则根据上面的试验数据, 采用回归的方法 (张国军等, 2006), 得出卸载刚度与混凝土强度、轴压比及位移幅值的关系, 卸载刚度为

$$K_u = b \cdot K_e \left( \frac{\Delta_i}{\Delta_y} \right)^a. \quad (11)$$

式中,  $K_u$  恢复力模型中的卸载刚度;  $\Delta_y$  恢复力模型中的屈服位移;  $K_e$  恢复力模型中的弹性刚度;

$\Delta_i$  恢复力模型中的卸载点位移幅值;  $a$ 、 $b$  为通过试验数据回归得到的参数。

本文试验中各试件的卸载刚度见表 3,  $a$  与  $b$  的值通过多元线性来拟合:

$$a = 1.227n - 0.01f_{cu} - 0.056; \quad (12)$$

$$b = -1.3n + 0.015f_{cu} + 0.843. \quad (13)$$

其中,  $n$  为轴压系数,  $f_{cu}$  为混凝土抗压强度。

表 3 不同位移幅值下各试件的卸载刚度

Tab. 3 The unloading stiffness of the specimens under the different displacement amplitudes

试件编号	试件刚度变化情况						
JC-L-L-B	$\Delta_i/\Delta_y$	2.1	3.1	4.1	5.3	6.3	
	$K_u/K_e$	1.2	0.9	0.9	0.8	1.1	
JC-L-L-C	$\Delta_i/\Delta_y$	1.4	1.8	2.2	2.7	3.2	3.9
	$K_u/K_e$	1.1	1.0	1.1	0.9	1.0	1.3
JC-H-L-B	$\Delta_i/\Delta_y$	2.5	3.7	4.5	5.5	6.6	
	$K_u/K_e$	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	
JC-H-L-C	$\Delta_i/\Delta_y$	2.4	3.2	4.5	6.0		
	$K_u/K_e$	1.1	1.2	1.0	0.5		
JC-L-H-B	$\Delta_i/\Delta_y$	2.1	3.0	4.1	5.3	6.1	7.3 8.2
	$K_u/K_e$	0.9	1.1	1.3	0.9	1.4	1.3 1.2
JC-L-H-C	$\Delta_i/\Delta_y$	1.1	0.8	1.2	2.2	1.1	
	$K_u/K_e$	1.0	0.8	1.4	1.8	1.0	
JC-H-H-B	$\Delta_i/\Delta_y$	1.1	1.6	2.2	2.7	3.2	3.8 4.5
	$K_u/K_e$	1.3	1.1	1.0	1.0	0.9	2.4 1.4
JC-H-H-C	$\Delta_i/\Delta_y$	1.4	2.1	2.8	3.5	4.2	4.8
	$K_u/K_e$	1.2	1.1	0.9	0.9	1.0	1.0

注: 表中数据皆为正向与反向加载时的平均值。

## 2.3 建议的骨架曲线与试验结果的比较

图 9 为根据本文建议的恢复力计算公式绘制与试验得到的骨架曲线的比较情况, 表 4 为建议的计算公式计算与试验得到的骨架曲线特征点的比较。从图 9 及表 4 的对比中可以看出按本文建议的恢复力模型的骨架曲线与试验结果较为符合, 能反映试件的恢复力特性, 因此本文提出的计算骨架曲线的方法是合理可行的。

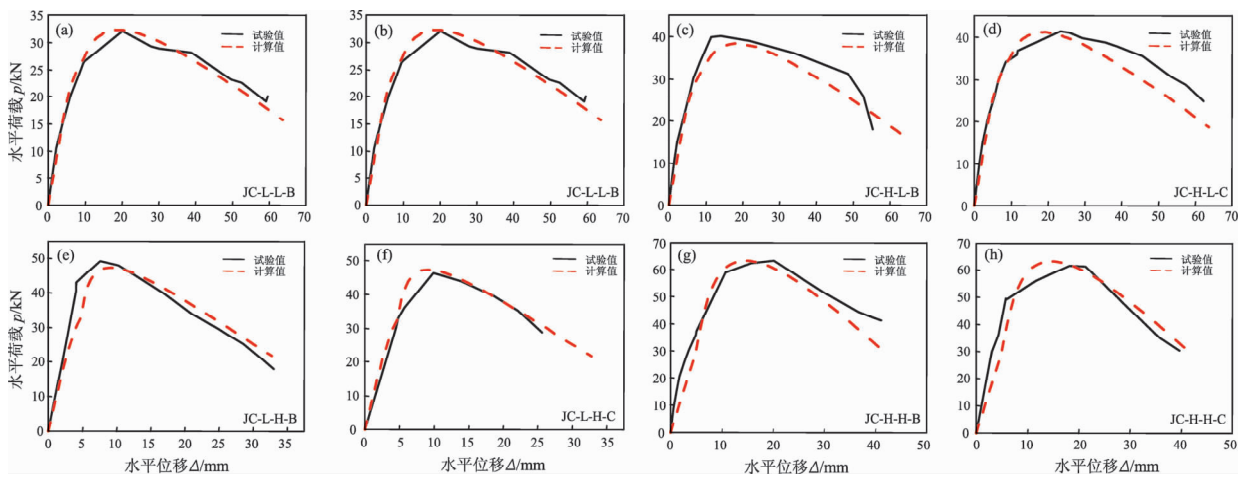


图 9 计算与试验得到的骨架曲线的比较

Fig. 9 Comparison between analytical and experimental results of skeleton curve of specimens

表 4 试件的骨架曲线特征点计算值与试验值比较

Tab. 4 Comparison between the calculated and experimental results of the feature points of the skeleton curve of the specimens

试件编号	屈服				峰值				极限破坏			
	$P_{yt}$	$P_{yc}$	$\Delta_{yt}$	$\Delta_{yc}$	$P_{mt}$	$P_{mc}$	$\Delta_{mt}$	$\Delta_{mc}$	$P_{ut}$	$P_{uc}$	$\Delta_{ut}$	$\Delta_{uc}$
JC-L-L-B	25.8	26.9	9.3	9.6	32.1	32.3	20.1	19.2	27.3	27.5	38.9	37.5
JC-L-L-C	29.7	29.4	11.2	11.4	31.6	32.3	20.5	19.2	26.9	27.5	47.2	38.5
JC-L-H-B	41.4	42.9	6.1	6.0	49.1	47.2	7.6	9.2	41.8	40.1	15.3	17.5
JC-L-H-C	38.0	43.8	6.5	6.3	46.3	47.2	9.9	9.2	39.3	40.1	18.6	17.5
JC-H-L-B	34.8	31.5	8.9	8.6	40.1	38.7	14.1	18.0	34.0	32.9	40.0	35.5
JC-H-L-C	35.1	34.9	10.2	9.6	41.3	41.1	23.5	19.2	35.1	34.9	45.8	37.8
JC-H-H-B	54.5	58.2	9.6	9.6	63.2	63.2	20.2	14.5	53.7	53.7	28.0	25.9
JC-H-H-C	52.4	54.5	8.6	8.4	61.5	63.2	18.2	14.3	52.2	53.7	26.3	26.5

注：荷载  $P$  的单位为 kN；位移  $\Delta$  的单位为 mm；下标 t 为试验值；下标 c 为计算值。

3 结论

(1) 从 GFRP 套管钢筋混凝土柱低周反复水平荷载试验中可以看出，此组合柱的滞回曲线不同于传统的钢筋混凝土柱，因此传统的钢筋混凝土柱恢复力模型不再适用此类组合柱。

(2) 轴压力对 GFRP 套管钢筋混凝土柱的滞回性能和刚度退化影响较大，因此恢复力模型中应该考虑轴压力系数对滞回规则的影响，而 GFRP 管与基础的连接方式对其滞回性能的影响不大。

(3) 通过对 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱受力全过程分析，同时结合试验数据的统计回归，得到组合柱的加卸载的滞回规则，建立了考虑轴

压系数对滞回特性影响的恢复力模型。

(4) 通过计算得到的骨架曲线及骨架曲线上特征点与试验获得的骨架曲线及骨架曲线上特征点的比较可以看出，本文提出的 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱的恢复力模型能较好地反映 GFRP 套管钢筋混凝土组合柱的滞回特性。

参考文献：

关宏波,王清湘. 2012. 玻璃纤维增强材料套管钢筋混凝土组合柱偏压承载力计算[J]. 工业建筑,42(10):42-47

管品武. 2000. 钢筋混凝土框架柱塑性铰区抗剪承载力试验研究及机理分析[D]. 长沙:湖南大学.

郭子雄,吕西林. 2004. 高轴压比下 RC 框架柱恢复力模型试验研究[J]. 土木工程学报,37(5):32-38.

郭子雄,杨勇. 2004. 恢复力模型研究现状及存在的问题[J]. 世界地

- 震工程,20(4):47-51.
- 郭子雄,张志伟,黄群贤,等.2009.高轴压比下RC框架柱恢复力模型试验研究[J].土木工程学报,29(5):79-85.
- 秦鹏,肖岩,周云,等.2013.约束钢管混凝土圆柱的低周反复荷载试验研究[J].地震工程与工程振动,33(5):190-196.
- 张国军,吕西林,刘伯权.2006.轴压比超限时框架柱的恢复力模型研究[J].建筑结构学报,27(1):90-98.
- 张国军,吕西林,刘伯权.2007.高强混凝土框架柱的恢复力模型研究[J].工程力学,24(3):83-90.
- Clough R. W., Johnston S. B. . 1966. Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements [ A ]//Proc. 2th Japann Earth. Engng. Symp. [ C ]. Tokyo Japan.
- Samaan M. , Mirmiran. A. . 1998. Model of Concrete Confined Fiber Composite [ J ]. Journal of Structural Engineering, 124(9) :1025 - 1031.
- Takeda T. , Sozen M. A. , Nielson N. N. . 1970. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes [ J ]. Journal of Structural Division, ASCE, 96( ST12 ) :2557 - 2572.

## Research on Experiment of Hysteretic Model of Reinforced Concrete Columns Confined by GFRP Tube

GUAN Hong-bo<sup>1</sup>, LIU Shi-run<sup>2</sup>, WEI Xiao-gang<sup>1</sup>, LIU Shu-xian<sup>1</sup>, MA Feng-hai<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. Modern Engineering Test Co. , Ltd. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

(3. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

### Abstract

The RC (reinforced concrete) column confined by GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) tube is a new kind of composite structure, in order to study the seismic performance of it, we conducted the low cyclic loading test on 8 RC columns confined by GFRP tube, and especially investigated the effect of axial compression ratio, concrete strength and connection mode between FRP pipe and foundation on the seismic performance and hysteretic characteristics of it. According to the characteristics of hysteresis curve of the RC column confined by GFRP tube under low cyclic loading, we did the whole process analysis of the cross section of the specimen and obtained its skeleton curve by using the fiber cross section layer model method. Then the unloading rule was determined through the test data regression analysis and the restoring force model of RC composite column confined by GFRP tube was proposed. Compared with the experimental results, the calculation model is in good agreement with the test results.

**Key words:** GFRP tube; reinforced concrete column; seismic performance; restoring force model