

侧向预应力约束高轴压比混凝土圆柱滞回性能

周长东^{1,2}, 田 腾³, 吕西林², 白晓彬¹, 李 慧¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 100044 北京; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 200092 上海;
3. 中广电广播电影电视设计研究院, 100045 北京)

摘 要: 为了研究侧向预应力约束高轴压比混凝土圆柱的滞回性能,进行了7根混凝土圆柱的低周反复荷载试验;采用理论分析与回归分析相结合的方法,得出了预应力碳纤维条带约束高轴压比混凝土圆柱的正截面抗弯承载力计算公式;提出了能够考虑轴压比与预应力大小两因素的预应力碳纤维条带约束高轴压比混凝土圆柱三折线型恢复力模型及其特征点的计算方法.试验结果表明采用预应力碳纤维条带约束高轴压比混凝土圆柱后,柱的滞回性能有显著改善;预应力碳纤维条带提供的环向主动约束力能够有效抑制斜向剪切裂缝的开展,加固后高轴压比圆柱的破坏形态由脆性剪切破坏转变为延性更好的弯曲破坏.采用推荐模型所得计算结果与试验结果吻合较好.

关键词: 钢筋混凝土圆柱;滞回性能;恢复力模型;预应力碳纤维条带;高轴压比;主动约束

中图分类号: TU375.3, TU317+.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0105-07

Hysteretic behavior of circular RC columns confined by lateral pre-stress under high axial compression

ZHOU Chang-dong^{1,2}, TIAN Teng³, LÜ Xi-lin², BAI Xiao-bin¹, LI Hui¹

(1 School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 3. Radio, Film and Television Design and Research Institute, 100045 Beijing, China)

Abstract: By lateral cyclic loading test, hysteretic behavior of seven circular RC columns confined by lateral pre-stress under high axial compression was studied. Using theoretical analysis and statistic regression analysis, the formula of calculated flexural capacity for columns is proposed. The three line restoring force model of circular RC columns under high axial compression confined by pre-stressed CFRP belts which is capable of considering the pre-stress of CFRP belts and axial load ratio is set up. Test results show that the hysteretic behavior of the columns with high axial load ratio is improved significantly after confined by pre-stressed CFRP belts. The diagonal shear cracks of columns can be effectively confined with the active lateral stress provided by pre-stressed CFRP belts, and the failure mechanism of the columns with high axial load ratio may be changed from shear to flexure with satisfactory ductility. The result of the recommended model shows good agreement with the test result.

Key words: circular RC column; hysteretic behavior; restoring force model; pre-stressed CFRP belt; high axial load ratio; active confinement

收稿日期: 2012-02-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978021);同济大学土木工程防灾国家重点实验室开放基金项目(SLDRCE08-MB-01);中央高校基本科研业务费项目(2011JBM080).

作者简介: 周长东(1971—),男,博士,副教授;

吕西林(1955—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

通信作者: 周长东, zhouchangdong@163.com.

高轴压比的底层框架柱在较小位移延性比下即会出现明显的强度退化,易在地震作用中发生破坏.国外一些专家进行了多个环向预应力加固柱的试验,结果表明,环向预应力能够对柱体提供初始横向主动约束力,进而获得比外贴纤维布加

固法更好的抗震加固效果^[1-3]。

滞回性能是反映柱的抗震能力的主要指标,而滞回性能分析的恢复力模型主要由骨架曲线和滞回规则两部分组成。目前多采用反复静荷载试验法来确定压弯构件的滞回性能和恢复力曲线^[4-8],但对环向预应力加固压弯构件滞回性能的研究还鲜有报道。本文基于预应力碳纤维条带加固高轴压比钢筋混凝土圆柱低周反复荷载的试验结果,通过分析加固圆柱的滞回性能,提出了预应力碳纤维条带加固高轴压比混凝土圆柱的三折线恢复力模型。

1 试验概况

试验共有 7 根钢筋混凝土圆柱,截面直径 300 mm,柱身高 525 mm,柱头高 450 mm,底座高 450 mm,截面配置纵筋 8 ϕ 22(其中试件 Z2 和 Z3 配置 6 ϕ 25),并伸入到底座底部,箍筋 ϕ 6@150,保护层厚度为 25mm,设计轴压比 n 为 0.55,0.70 和 0.82。试件的设计尺寸和柱体配筋、预应力碳纤维条带加固方案见图 1。

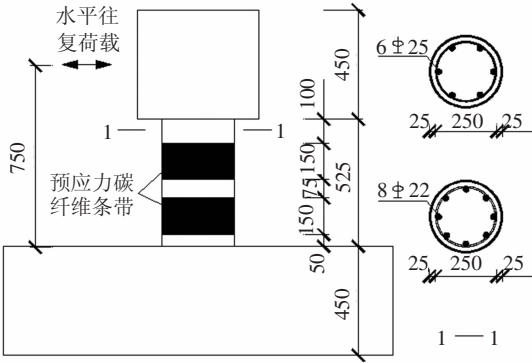


图 1 试件详图

试件所用的材料及其性能详见表 1,其中 E 为材料的弹性模量, f_{cu} 为混凝土立方体强度, f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为材料的极限抗拉强度, ϵ_u 为材料的极限应变, t_f 为每层碳纤维条带的厚度;具体试验分组方案见表 2,其中 n 为试件的设计轴压比, α 为碳纤维条带中的预应力, $\alpha = 0.20$ 表示碳纤维条带的预应力为其极限抗拉强度的 0.20 倍。

表 1 材料性能

材料类型	E /GPa	f_{cu} /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa	ϵ_u	t_f /mm
C35	31.8	34.2	—	2.60	0.003	—
C40	32.6	40.6	—	2.90	0.003	—
ϕ 6	200	—	382	530	0.010	—
ϕ 22	200	—	350	532	0.010	—
ϕ 25	200	—	362	542	0.010	—
CFRP	241	—	—	3 710	0.017	0.167

表 2 试件分组

试件	混凝土	n	α	备注
Z1	C35	0.82	—	对比试件
Z2	C40	0.55	0.20	碳纤维条带
Z3	C40	0.55	0.25	碳纤维条带
Z4	C35	0.70	0.10	碳纤维条带
Z5	C35	0.70	0.20	碳纤维条带
Z6	C35	0.82	0.10	碳纤维条带
Z7	C35	0.82	0.20	碳纤维条带

在柱顶通过两个 50 t 千斤顶施加竖向恒定荷载;通过 100 t 的伺服作动器沿水平方向施加低周反复荷载,水平往复荷载的加载位置见图 1;通过电阻应变片量测钢筋应变和纤维布应变;通过电测位移计量测位移;在对比柱根部受弯两侧各布置一对沿纵向和横向的混凝土应变片,用来测量底部混凝土应变。

加载试验时首先施加轴向力至预定值,然后循环施加水平力。试件屈服前采用水平荷载控制,每级荷载循环一次,加载初期,荷载主要级差为 30 kN,后期级差递减,接近试件屈服时级差为 5 kN;试件屈服后采用位移控制,以屈服位移 Δ_y 为级差进行位移控制加载(考虑到安全因素,试件接近破坏时,取 0.5 Δ_y 递增),每级循环 3 次,不断加大试件位移,直至水平荷载下降到峰值荷载的 85% 时为止。

2 结果与分析

2.1 破坏形态

试件的缠布破坏形态和柱体破坏形态见图 2。

Z1 在纵筋屈服之前,首先在柱身中部出现细微交叉斜向裂缝,随之在试件的底部一侧出现底部水平裂缝,之后新的裂缝不断出现,旧的斜向裂缝逐渐贯通;当最外侧纵向钢筋即将达到屈服时,斜向裂缝突然贯通,试件严重开裂,基本丧失承受竖向荷载的能力,加载停止,属于典型的剪切破坏。

Z2 纵筋屈服前,首先在柱身底部出现一条水平弯曲裂缝;当最外侧纵向钢筋受拉屈服后,加载至 2 Δ_y 位移时,柱身中部未包裹纤维布处出现细微交叉斜裂缝,底部混凝土开裂较为严重,下部纤维布发出啪啪的拉展声音;加载至 3 Δ_y 时,试件承载力达到最大值,之后承载力均逐级下降,此时底部水平裂缝加速开展;在以控制位移为 4 Δ_y 加载循环时,底部混凝土破坏严重,循环至第三圈时,柱底部混凝土破坏很严重,加载停止,此时柱身中部未包裹纤维布的部分出现细微斜裂缝但未

开展;截止到试件破坏,裂缝的发展,混凝土的压碎以及纤维布的高程度拉展都发生在柱底塑性铰区域,试件呈现出弯曲破坏特征.

虽然 Z3、Z4、Z5、Z6、Z7 的设计轴压比有所不同,但是其试验过程均与试件 Z2 类似,也经历了柱身底部出现水平弯曲裂缝、最外侧纵向钢筋受拉屈服、柱身中部未包裹纤维布处出现细微交叉斜裂缝,下部纤维布发出啪啪的拉展声音、底部混凝土严重开裂和剥落等逐渐破坏的过程,裂缝发展、纤维布的高程度拉展以及混凝土压碎都发生在柱底塑性铰区域,试件均呈现出典型的弯曲破

坏的特征,其滞回性能大幅度提高.

在试验范围内 (0.1 ~ 0.25), 纤维布中所施加的预应力越大,试件中斜裂缝出现的更迟,开展程度更小,承载力下降也更缓慢;而轴压比越大,承载力的下降越快,破坏越突然;对比柱试验末段基本丧失了承载力,采用预应力碳纤维条带加固的试件在整个试验过程中均能保持柱身的完整,试验末段仍具备稳定的承受竖向荷载的能力,且碳纤维布未出现全部断裂的情况,说明预应力碳纤维条带加固高轴压比作用下的圆柱能够满足实际的工程要求.

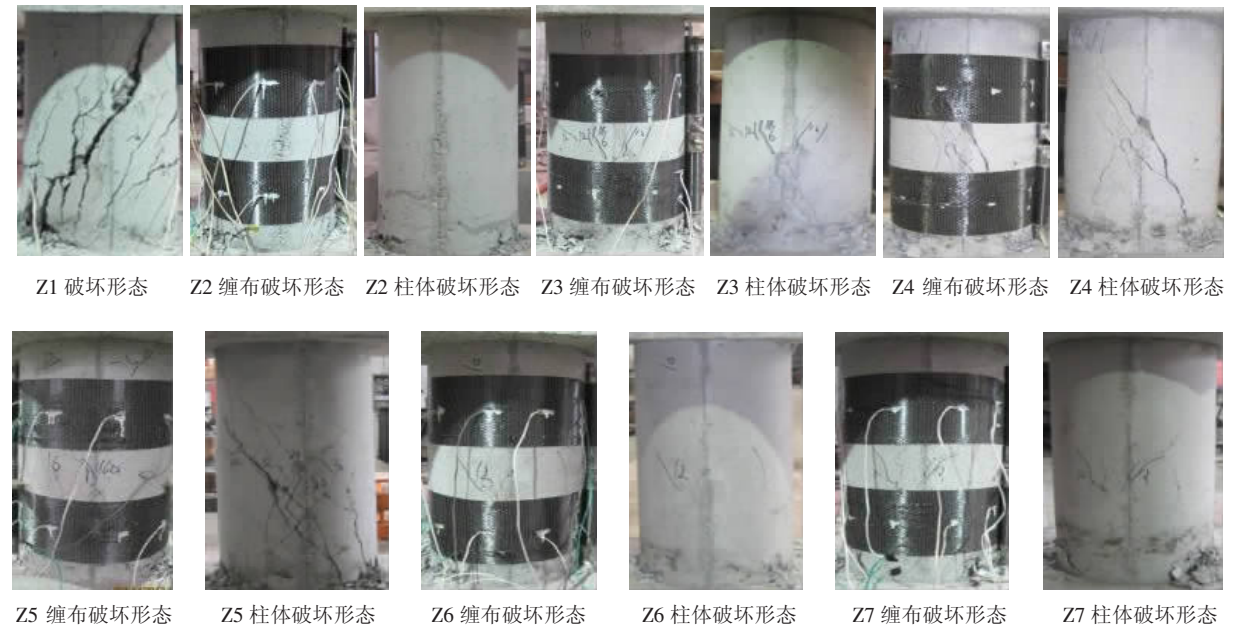


图 2 试件破坏形态

2.2 滞回性能分析

各试件的荷载 - 位移滞回曲线见图 3, 试验结果见表 3. 可以看出对比柱破坏时纵筋尚未达到屈服, 滞回环包络的面积很小, 极限承载力很

低, 耗能能力和滞回性能极差. 采用预应力碳纤维条带加固后, 试件的滞回性能均得到很大程度的改善, 其滞回环变得饱满, 耗能能力显著提高, 塑性变形能力大幅度增长.

表 3 试验结果

试件	屈服位移 Δ_y / mm	极限位移 Δ_u / mm	延性系数 Δ_u / Δ_y	Δ_w / Δ_{u1}	峰值荷载 P_m / kN	P_{m1} / P_{m1}	耗能总量 E	平均耗能 系数 μ_e
Z1	—	5.12	—	1.00	145.2	1.00	—	—
Z2	6.6	24.25	3.67	4.74	247.1	1.70	43 409.27	5.93
Z3	6.3	24.21	3.84	4.73	235.2	1.62	59 643.96	7.43
Z4	6.2	21.34	3.44	4.17	207.1	1.43	41 346.17	6.18
Z5	5.9	23.11	3.92	4.58	210.8	1.45	39 004.04	6.24
Z6	6.1	17.41	2.85	3.40	218.2	1.50	19 599.46	4.70
Z7	6.0	19.22	3.20	3.75	213.1	1.47	27 215.81	5.61

在高轴力的作用下, 加固柱的滞回曲线有明显的上下两个交汇点; 对碳纤维条带施加较大的预应力, 可以减缓加、卸载刚度随着位移幅度增加而降低的幅度; 轴压比越大, 试件的延性越差, 达到极限承载力后的强度退化越快.

各试件的无量纲化骨架曲线见图 4. 可以看出, 在高轴压的作用下, 随着纤维布中预应力的增加, 试件的延性逐渐提高; 当对碳纤维条带施加相同的预应力时, 轴压力的增大对试件的极限变形能力将会产生不利影响.

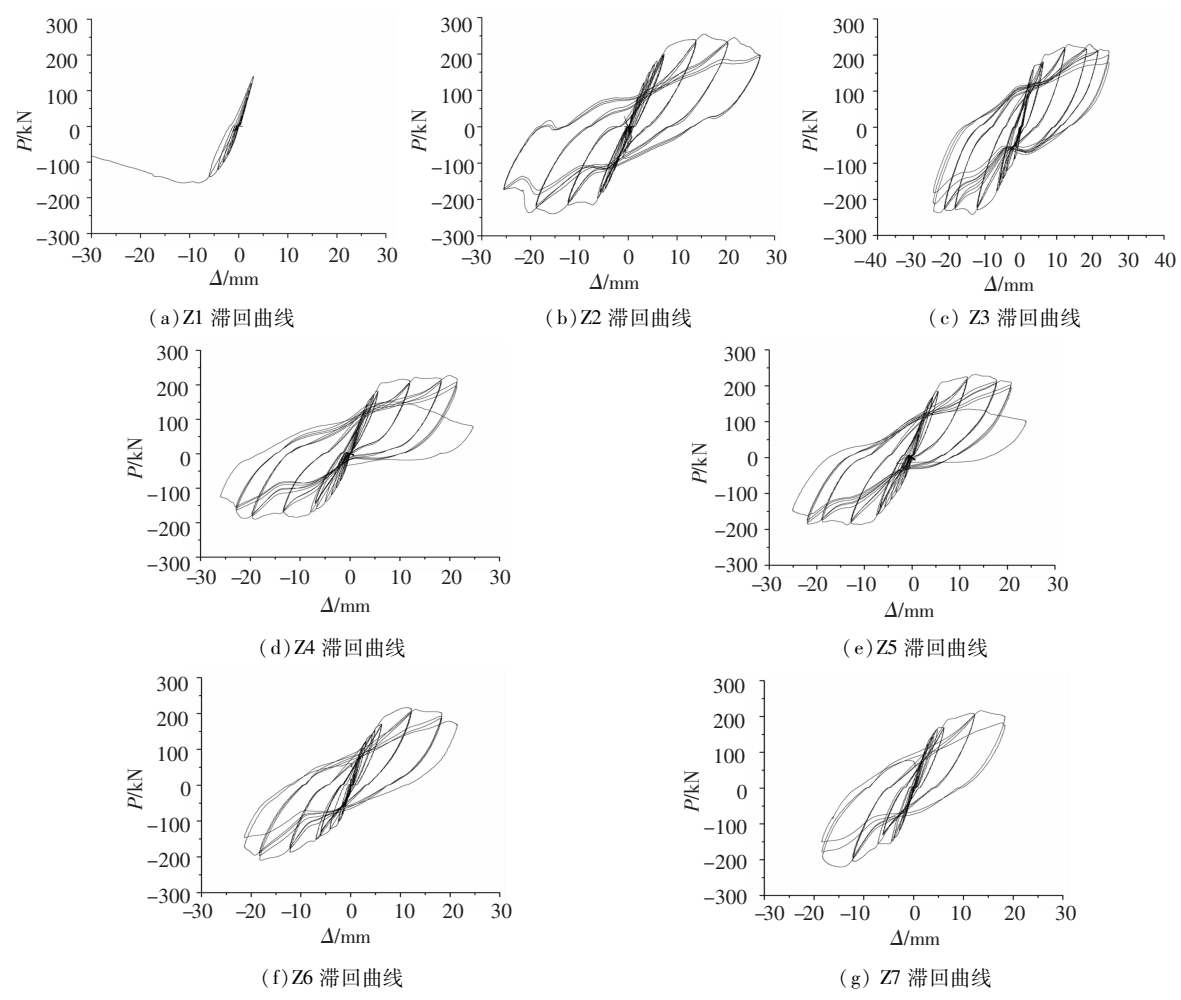


图 3 试件滞回曲线

3 建议的恢复力模型

恢复力特性模型一般由骨架曲线和滞回环组成,骨架曲线确定了模型的各特征点,它是 1/4 滞回循环内各特征点的连线;滞回环指明了模型在正负向加、卸载过程中的行走路线及刚度和退化性质^[9-10]. 由图 4 可知,经无量纲化后的骨架曲线基本关于原点对称,并且可把骨架曲线划分为弹性段、强化段和强度退化段 3 部分,故采用图 5 所示的退化三线型曲线与试验结果符合较好.

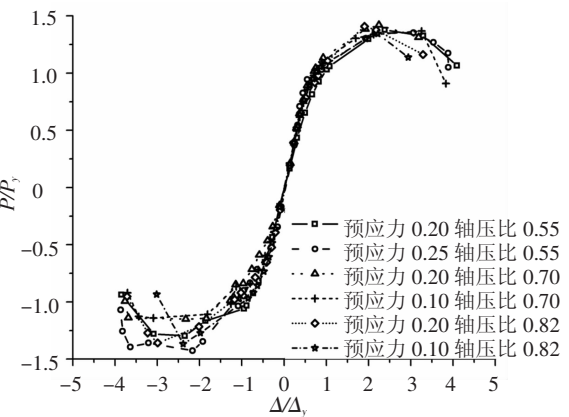


图 4 无量纲化骨架曲线

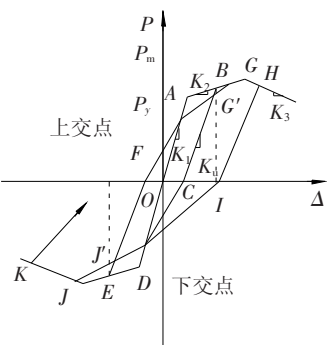


图 5 建议的恢复力模型

采用非线性曲线拟合软件 1stOpt 对试验数据进行多元非线性回归分析,得到建立三折线恢复力模型的关键参数:屈服荷载 P_y 、屈服位移 Δ_y 、峰值荷载 P_m 、荷载峰值点位移 Δ_m 和退化刚度 K_3 .

3.1 峰值荷载 P_m

预应力碳纤维布约束的混凝土强度^[11]为

$$\left\{\begin{aligned} \frac{f'_{cc}}{f_{cc}} &= 1 + 3.7 \left(\frac{f_{el} + f_{il} + f_r}{f_{cc}} \right)^{0.8268}, \\ f_{el} &= \alpha_h \left(1 - \frac{s_f}{2D} \right)^2 \frac{2t_f f_f}{D}, \\ f_{il} &= 2t_f E_f \varepsilon_{if} / D, \\ f_r &= f_{ys} A_{ssl} / s d_{cor}. \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中, f'_{cc} 为约束混凝土抗压强度, f_{cc} 为素混凝土抗压强度, 取 $f_{cc} = 0.77f_{cu}$; f_{il} 和 f_{el} 分别为预应力 CFRP 的初始约束应力和有效约束应力; f_r 为箍筋的约束应力; α_h 为 CFRP 的有效拉应变系数, 对于 300 mm 直径的圆柱, 当 α 为 0.10、0.20 和 0.25, α_h 分别为 0.46、0.60 和 0.65; s_f 为 CFRP 条带间距; D 为圆柱直径; E_f 和 f_f 分别为 CFRP 弹性模量和极限抗拉强度; ε_{if} 为环向预应力 CFRP 的初始应变; A_{ss1} 为单根箍筋的截面面积; s 为箍筋间距; d_{cor} 为核心混凝土的直径。

碳纤维条带加固圆柱在低周反复荷载作用下柱底截面破坏时, 其纵筋强度已接近极限强度^[12]。因此, 基于既有研究成果^[13], 综合考虑了试件轴压比 n 和碳纤维条带的预应力 α 对纵筋利用程度的影响, 对纵筋配筋特征值 λ_l 进行了增强。

$$\left\{ \begin{aligned} P_m &= M_u/0.75, \\ M_u &= f'_{cc}\pi R^3 \left\{ \lambda'_l \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) \left[\left(\frac{r_s}{R} \frac{\sin(\pi - \theta)}{\pi - \theta} \right) + \frac{4\sin^3\theta}{6\theta - 3\sin 2\theta} \right] + n' \frac{4\sin^3\theta}{6\theta - 3\sin^3 2\theta} \right\}, \\ \lambda'_l &= (6.16 - 14.35n + 9.66n^2 + 3.22\alpha - 12.50\alpha^2)\lambda_l, \\ \theta &= \frac{n' + 1.56\lambda'_l + 0.11\lambda_f + 0.20}{1.08\lambda'_l + 0.34\lambda_f + 0.38}. \end{aligned} \right.$$

式中: P_m 为水平峰值荷载; M_u 为加固圆柱截面抗弯承载力; 2θ 为对应于受压区混凝土截面面积的圆心角; r_s 为柱截面中心至纵筋截面中心的距离; 纵筋配筋特征值 $\lambda_l = \frac{A_{sf}f_{yl}}{A_gf_c}$; λ'_l 为考虑预应力纤维布作用后的纵筋配筋特征值; λ_f 为碳纤维布特征值, $\lambda_f = \frac{2E_ft_f\varepsilon_f}{Df'_c}$; $n' = \frac{N}{f'_{cc}A_g}$, A_g 为圆柱截面面积; 在本文分析中, $0.55 \leq n \leq 0.82$, $0 \leq \alpha \leq 0.25$ 。

3.2 屈服位移 Δ_y

FRP 加固圆柱的屈服位移受纵筋屈服应变和截面直径的影响较大, 其他因素影响很小^[14]。结合本文试验数据, 可得 Δ_y 的经验公式为

$$\Delta_y = 5.6f_y l^2 / (3E_s D).$$

式中: E_s 为纵筋弹性模量, l 为圆柱计算高度。

3.3 屈服荷载 P_y

对试验数据进行回归分析, 考虑了 n 、 α 两因素的影响, P_y 计算如下:

$$P_y = (3.25n - 2.45n^2 + 0.38\alpha - 2\alpha^2 - 0.3)P_m.$$

3.4 峰值位移 Δ_m

荷载峰值点位移 Δ_m 一般用经验方法确定^[15]。通过对试验数据进行多元非线性回归分析, n 、 α 和 Δ_m 的关系如下:

$$\frac{\Delta_m - \Delta_y}{\Delta_y} = 4.97 - 12.23n + 9.26n^2 - 0.90\alpha + 12.67\alpha^2.$$

3.5 骨架曲线刚度计算

骨架曲线分为弹性段、强化段和强度退化段 3 部分, 定义其各段相应刚度分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 。

3.5.1 弹性段

由图 4 可知, 由于预应力碳纤维条带提供了环向主动约束力, 加固柱的骨架曲线在开裂时并无明显拐点, 即试件的开裂对其刚度的影响不大。弹塑性地震反应分析主要研究构件进入塑性阶段后的性能^[14], 故把预应力碳纤维条带约束混凝土圆柱屈服前的骨架曲线简化为原点和屈服点直接相连的直线(图 5 中 OA 段), 弹性段的刚度为

$$K_1 = P_y / \Delta_y.$$

3.5.2 强化段

计算出 P_m 、 P_y 、 Δ_m 和 Δ_y 4 个参数, 即可得强化段(图 5 中 AG 段)的刚度为

$$K_2 = (P_m - P_y) / (\Delta_m - \Delta_y).$$

3.5.3 强度退化段

将强度退化段简化为峰值荷载点与极限位移点的连线(图 5 中 GH 段)。令该段的退化刚度 $K_3 = \beta K_1$, 对试验数据进行多元非线性拟合, 得:

$$K_3 = (-3.34 + 9.67n - 7.55n^2 + 1.61\alpha - 4.29\alpha^2)K_1.$$

计算过程和结果见表 4, K_{1i} 、 K_{3i} 和 β_i 由试验数据计算所得, β 由拟合公式计算所得。可以看出, 拟合公式具有较高精度。

表 4 计算结果

试件	K_{1i}	K_{3i}	β_i	β	β/β_i	卸载刚度				强度退化率			
						$2\Delta_y$	$3\Delta_y$	$3.5\Delta_y$	$4\Delta_y$	$2\Delta_y$	$3\Delta_y$	$3.5\Delta_y$	$4\Delta_y$
Z2	28.03	-4.12	-0.153	-0.154	1.004	0.928	0.853	—	0.646	0.952	0.898	0.747	0.952
Z3	26.98	-2.63	-0.169	-0.169	0.999	0.937	0.915	0.862	0.782	0.969	0.926	0.901	0.797
Z4	—	—	—	—	—	0.900	0.832	0.822	0.747	0.933	0.920	0.816	—
Z5	27.63	-1.97	-0.119	-0.119	0.999	0.885	0.845	0.803	0.724	0.945	0.916	0.903	—
Z6	26.39	-4.29	-0.369	-0.369	1.001	0.943	0.837	—	—	0.946	0.677	—	—
Z7	25.67	-4.56	-0.336	-0.336	0.998	0.951	0.871	0.842	—	0.931	0.913	—	—

3.6 卸载刚度计算

试件各级循环下的卸载刚度退化率见表 4. 对试验数据进行多元非线性回归分析, n 、 α 、位移幅值 Δ 与刚度退化率 K_u/K_l 的关系:

$$\begin{cases} K_u = aK_l\left(\frac{\Delta}{\Delta_y}\right)^b, \\ a = 5.36 - 13.3n + 9.1n^2 + 8.8\alpha - 30\alpha^2, \\ b = -3.5 + 10.4n - 6.85n^2 - 10.1\alpha + 34.5\alpha^2. \end{cases}$$

(1)

3.7 反复加载路径及强度退化率计算

由图 3 可知, 预应力碳纤维条带约束高轴压比圆柱的滞回曲线有明显的上下两个交汇点, 根据试验数据分析, 取直线 $P = 0.70P_y$ 与 $P = K_l\Delta$ 的交点作为上交点, 取其关于原点的对称点为下交点. 约束圆柱在达到屈服荷载之后再循环加载时, 卸载以后的反向加载或再加载路径首先指向下交点(上交点), 然后再指向历史最小(大)位移点对应的强度退化点^[15-16].

定义强度退化率 γ 为某一级位移幅值下的第三次循环与第一次循环时的最大水平荷载之比^[15], 试件各级循环下的强度退化率见表 4.

对试验数据进行多元非线性回归分析, 可以

建立 n 、 α 、 $\mu = \Delta/\Delta_y$ 和 γ 的关系:

$$\gamma(n, \mu, \alpha) = 1.08e^{-0.19\eta\mu} + 0.014e^{14.4n\alpha}. \quad (2)$$

3.8 滞回规则

通过对各参数分析, 预应力碳纤维条带约束高轴压比混凝土圆柱恢复力模型的滞回环规则:

- 1) 约束圆柱未达到屈服强度之前, 加载和卸载均沿着骨架曲线的弹性段(图 5 中 OA 段).
- 2) 约束圆柱屈服之后, 加载路径沿着骨架曲线进行(图 5 中 AB 段和 DE 段); 从正骨架曲线上卸载时(图 5 中 BC 段), 卸载刚度按式(1)确定.
- 3) 反向加载和再加载时, 先指向下(上)交点, 再指向历史最小(大)位移处对应的强度退化点(图 5 中 J' 和 G'), 强度退化率按式(2)确定.
- 4) 反向加载时, 首先指向下交点, 然后再指向历史最小位移处(图 5 中的 E) 对应的强度退化点(图 5 中的 J'); 到达骨架曲线后, 再沿着骨架曲线前进(图 5 中的 JK 段).

3.9 骨架曲线的对比

建议的骨架曲线特征点计算结果与试验结果的对比见表 5. 表中带 .t 下标的为试验数据. 图 6 为根据建议的恢复力模型绘制的退化三线型骨架曲线与试验所得骨架曲线的对比图.

表 5 骨架曲线特征点计算值对比

试件	$P_{y.t}$	P_y	$P_{y.t}/P_y$	$\Delta_{y.t}$	Δ_y	$\Delta_{y.t}/\Delta_y$	$P_{m.t}$	P_m	$P_{m.t}/P_m$	$\Delta_{m.t}$	Δ_m	$\Delta_{m.t}/\Delta_m$
Z2	185	177.4	1.043	6.60	6.30	1.048	247.1	239.69	1.031	15.61	15.65	0.998
Z3	170	162.9	1.044	6.30	6.30	1.000	235.2	228.13	1.031	16.47	16.45	1.001
Z4	166	161.6	1.027	6.20	6.13	1.011	207.1	202.31	1.024	19.68	—	—
Z5	163	156.1	1.044	5.90	6.13	0.962	210.8	205.69	1.025	13.49	13.52	0.998
Z6	161	155.0	1.038	6.10	6.13	0.995	218.2	213.83	1.020	14.05	14.04	1.001
Z7	154	149.9	1.027	6.00	6.13	0.979	213.1	208.53	1.022	15.52	15.55	0.998

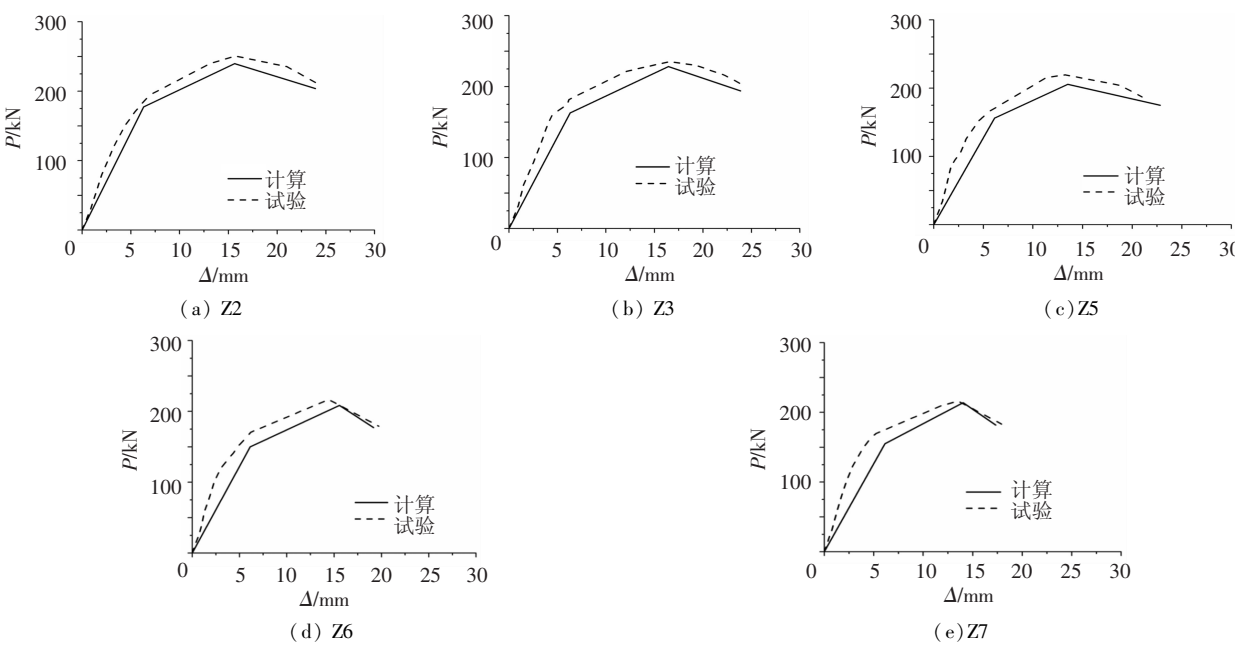


图 6 骨架曲线对比

考虑到恢复力模型关于原点对称,故本文只取正向骨架曲线进行对比。通过计算模型和试验数据对比可以看出,建议的骨架曲线与试验结果吻合度较好。说明本文提出的退化三线型恢复力模型能够较好地模拟预应力碳纤维条带约束高轴压比混凝土圆柱的滞回性能。

4 结 论

1) 预应力碳纤维条带能够对高轴压比钢筋混凝土圆柱提供有效的环向主动约束,延缓了斜裂缝的产生和发展,约束后高轴压钢筋混凝土圆柱破坏形态由脆性剪切破坏转变为延性更好的弯曲破坏,大幅度提高了高轴压比钢筋混凝土圆柱的承载力、位移延性和耗能能力。

2) 在高轴压力作用下,被约束钢筋混凝土圆柱的变形能力随着碳纤维条带的预应力水平增大而增大,随轴压比的增大而减小。

3) 通过分析各工况下约束钢筋混凝土圆柱的滞回性能,得出了恢复力模型的滞回规则;采用非线性曲线拟合软件 1stOpt 对试验数据进行多元非线性回归分析,得出了骨架曲线各特征参数的计算公式,确定了卸载刚度和再加载、反复加载下的强度退化率,建立了能够考虑轴压比与预应力大小两因素的预应力碳纤维条带约束高轴压比钢筋混凝土圆柱三折线型恢复力模型。

4) 本文提出的计算模型能够较好地反映轴压比和预应力两因素对高轴压作用下钢筋混凝土圆柱滞回性能的影响,为采用体外预应力约束钢筋混凝土柱的进一步动力分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] TETSUO Y W, KOOROUGH N N, HAJIME S. Seismic or emergency retrofit of RC short columns by use of prestressed aramid fiber belts as external hoops [R]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2001, 135 – 141.
- [2] NESHELI K. MEGURO K. Seismic retrofitting of earthquake-damaged concrete columns by lateral pretensioning of FRP belts [C]//San Francisco: National Conference on Earthquake Engineering, USA, 2006.
- [3] SHAHAB M T, HASAN M. Experimental and analytical investigation of square RC columns retrofitted with prestressed FRP strips [C]//8th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Greece, Patras: [s. n.], 2007.
- [4] 姚谦峰, 苏三庆. 地震工程 [M]. 陕西: 陕西科技出版社, 2001.
- [5] 周小真. 压弯剪作用下钢筋混凝土剪切破坏柱恢复力特性研究 [J]. 西安冶金建筑学院学报, 1992, 24 (3): 235 – 242.
- [6] 张国军, 吕西林, 刘伯权. 轴压比超限时框架柱的恢复力模型研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27 (1): 90 – 98.
- [7] 张国军. 大型火力发电厂高强混凝土框架柱的抗震性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [8] 陶忠, 高献, 于清. FRP 约束圆钢筋混凝土柱滞回性能的理论分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (9): 15 – 19.
- [9] 石晶, 白国良. 空腹式型钢混凝土框架柱的恢复力特性 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20 (4): 94 – 97.
- [10] 徐伟栋. 配置高强钢筋的混凝土柱抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] 白晓彬. 环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱轴心受压性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [12] WU Yufei, LIU Tao, DERIC J O. Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing [J]. Advanced Structural Engineering, 2006, 9 (4): 507 – 533.
- [13] GU Dongsheng, WU Gang, WU Zhishen. Ultimate flexural strength of normal section of FRP-confined RC circular columns [J]. Journal of Southeast University, 2010, 26 (1): 107 – 111.
- [14] BARIS B. Design of FRPs in circular bridge column retrofits for ductility enhancement [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (3): 766 – 776.
- [15] 郭子雄, 张志伟, 黄群贤, 等. 型钢混凝土柱恢复力模型试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (5): 79 – 85.
- [16] 苏小卒. 预应力混凝土框架抗震性能研究 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.

(编辑 赵丽莹)