

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201901166

承压状态下网状箍筋约束 PC 管桩抗震性能试验

马 华¹, 张泽伟¹, 李振宝¹, 颜成华², 王寿彬², 谭学立²

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 江苏东浦管桩有限公司, 江苏 连云港 222002)

摘要:与普通混凝土管桩相比,预应力混凝土管桩(PC管桩)抗震性能差,为改善其性能提出一种新型网状箍筋约束的PC管桩.通过对2组共4根PC管桩试件在不同轴压比下的拟静力试验,研究配筋形式、轴压比对其抗震性能的影响,其中一组为新型网状箍筋约束另一组为普通螺旋配箍,各组轴压比分别为0.3、0.5.详细记录试验破坏过程,得到试件的滞回曲线、骨架曲线、承载力、变形能力、刚度退化曲线和耗能能力等.试验结果表明:各试件均产生受弯破坏,延性系数在2.99~3.96之间;网状箍筋约束试件耗能能力强,其滞回环较螺旋配箍试件饱满;试件承载力、延性以及耗能能力受轴压比影响较大,轴压比越大,承载力越大,延性及耗能能力越差.给出了网状箍筋约束PC管桩正截面承载力计算公式,同时,对高轴压比作用下预应力混凝土管桩正截面抗弯承载力公式提出了修改建议.

关键词: 预应力混凝土管桩;网状约束;轴压比;抗震性能;正截面抗弯承载力

中图分类号: TU378

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0160-07

Seismic performance of prestressed concrete pipe piles with meshed stirrup subjected to axial compression force

MA Hua¹, ZHANG Zewei¹, LI Zhenbao¹, YAN Chenghua², WANG Shoubin², TAN Xueli²

(1. The Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China; 2. Jiangsu Dongpu Pipe Pile Co. Ltd., Lianyungang 222002, Jiangsu, China)

Abstract: Prestressed concrete (PC) pipe pile has poor seismic performance compared with ordinary concrete piles. To improve the performance, a new type of mesh-constrained PC pipe pile is proposed. Through the quasi-static test of four PC pipe pile specimens, which are divided into two groups under different axial compression ratios, effects of reinforcement form and axial compression ratio on their seismic performance were investigated. One group had a new type of meshed constraint and the other had common spiral constraint. The axial compression ratios of each group were 0.3 and 0.5 respectively. The failure process was recorded in detail, and the hysteresis curve, skeleton curve, load-bearing capacity, deformation ability, stiffness degradation curve and energy consumption capacity of the test specimens were obtained. Results show that all test specimens were subjected to flexural failure, and the ductility factor was between 2.99 and 3.96. The meshed constrained test specimens had large energy consumption, and its hysteresis loop was fuller than the spiral constrained specimens. The load-bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of the specimens were greatly affected by the axial compression ratio. The larger the axial compression ratio, the greater the load-bearing capacity and the worse the ductility and energy dissipation capacity. A formula of flexural capacity of the PC pipe piles with meshed constrain stirrups is proposed and the formula of the PC pipe piles subjected to the high axial compressive ratio is modified.

Keywords: PC pipe pile; mesh constraint; axial compression ratio; seismic performance; flexural capacity

预应力混凝土PC管桩与其他桩基础相比,具有单桩承载力大,施工周期短,设计选用范围广等一系列优点^[1].PC管桩是在构件加工厂通过张拉预应力、离心成型、高温高压蒸养工艺生产而成的空心管桩.由于其采用高强材料,与普通混凝土桩相比延性

较差.目前,国内外学者针对PC管桩的抗震性能开展了一系列的研究工作. Budek等^[2]对高强预应力混凝土管桩(PHC管桩)进行了低周往复加载试验,研究了不同配箍率、是否配置非预应力筋对管桩抗震性能的影响;戎贤等^[3-5]通过填芯、掺入钢纤维、改变配箍率等措施对PHC管桩进行改善,进行抗震性能试验研究;王铁成等^[6]通过试验研究了不同桩型的抗震性能,同时分析了箍筋直径以及间距、填芯和非预应力筋对其抗震性能的影响;Kokusho等^[7]通过试验研究了轴力作用下PC管桩的抗弯性能;

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 2016年江苏省“双创人才”计划

作者简介: 马 华(1962—),女,副研究员,硕士生导师;

李振宝(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李振宝, lizb@bjut.edu.cn

杉村義広等^[8]通过现场试验表明,轴力会对桩端的转动能力产生影响。

为提高 PC 管桩抗震性能,本文提出一种新型网状箍筋约束的预应力混凝土管桩,与普通 PC 管桩不同的是,以数根冷拔钢丝在预应力钢筋所在圆周长的数个等分点上以较大螺距正反向绑扎,形成箍筋网,并保持网状箍筋约束 PC 管桩与普通螺旋配箍 PC 管桩体积配箍率一致. 箍筋网与预应力钢筋共同形成的钢筋骨架对桩身混凝土的侧向约束作用更强. 同时,箍筋网沿桩身的纵向分量与横向分量可分别承受弯曲荷载与剪切荷载. 基于管桩正常使用状态下压弯组合受力的情况,设计制作了 4 根足尺 PC 管桩试件,通过拟静力试验研究其在不同轴压力情况下的破坏形态以及抗震性能。

1 试件概况

1.1 试件设计与制作

按照 GB 13476—2009《先张法预应力混凝土管桩》^[9]及江苏省工程建设标准图集《预应力混凝土管桩》(苏 G 03—2012)^[10]的设计要求,采用 C60 混凝土,设计制作长 10 m,桩径 500 mm,壁厚为 110 mm 的 A 型管桩,其中混凝土有效预压应力为 4.4 MPa. 预应力主筋采用 9 mm 低松弛型的预应力混凝土用钢棒,张拉控制应力为 994 N/mm²,箍筋采用 5 mm 的低碳冷拔钢丝. 其中,网状箍筋见图 1,采用人工绑扎的方式制作完成. 在保证不影响试验段性能的前提下,从工厂制作完成的长 10 m 管桩中截取 3 m 长度作为试验对象。



图 1 新型网状箍筋

Fig. 1 New mesh stirrup

为保证管桩内钢筋处于正常使用状态,同时实现试件与地面的刚性连接,参照钢筋锚固长度及管桩的极限承载力,设计尺寸为 1 800 mm × 1 100 mm × 750 mm 的底座,管桩埋入底座 650 mm,并在其中配制 HRB400 纵筋,在其上表面配制 850 mm × 850 mm × 10 mm 的 Q345 钢板进行局部加强. 试件几何尺寸见图 2,试件中,底座顶部至加载点净高 2 000 mm. 试验中,2 组试件分别为新型网状箍筋约束 (WZYS) 和普通螺旋箍筋约束 (LXYS),其横纵截

面见图 3. 各组试件,分别设置轴压比为 0.3 与 0.5. 试件主要参数见表 1,表 2 列出试验材料相关力学性能的实测值。

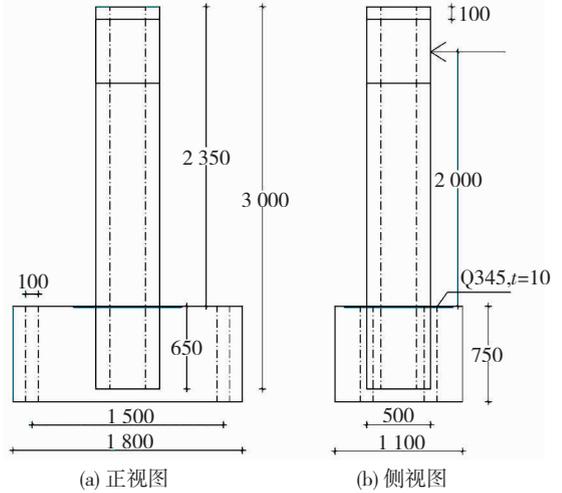
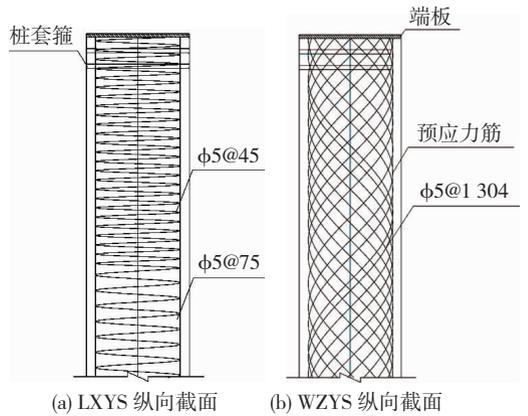
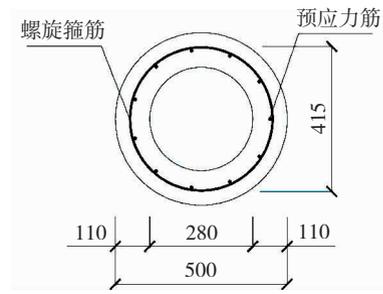


图 2 试件几何尺寸 (mm)

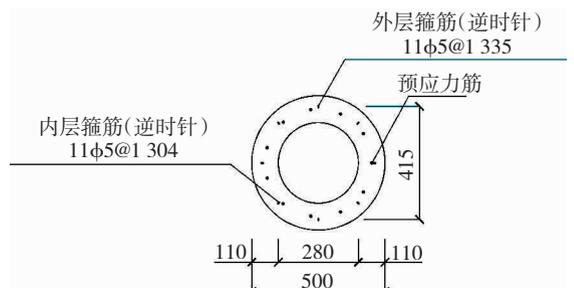
Fig. 2 Specimen geometry (mm)



(a) LXYS 纵向截面 (b) WZYS 纵向截面



(c) LXYS 横向截面



(d) WZYS 横向截面

图 3 桩身截面

Fig. 3 Pile section

表 1 试件主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of the test specimens

| 试件编号 | 预应力 钢筋 | 箍筋直 径/mm | 网格 角度 | 螺距/ mm | 轴压比 |
|----------|-----------------|-------------|----------|-----------|-----|
| LXYS-0.3 | 11 ϕ^D 9.0 | 5 | | 45/75 | 0.3 |
| WZYS-0.3 | 11 ϕ^D 9.0 | 5 | 90 | 1304 | 0.3 |
| LXYS-0.5 | 11 ϕ^D 9.0 | 5 | | 45/75 | 0.5 |
| WZYS-0.5 | 11 ϕ^D 9.0 | 5 | 90 | 1304 | 0.5 |

注: D 代表钢筋直径.

表 2 试验材料力学性能实测值

Tab. 2 Mechanical properties of test materials MPa

| f_{y1} | f_{u1} | f_{y2} | f_{u2} | f_c |
|----------|----------|----------|----------|-------|
| 1 412.67 | 1 460.43 | 525.62 | 612.50 | 51.31 |

注: f_{y1} 为预应力钢筋的屈服强度实测值; f_{u1} 为预应力钢筋的极限强度实测值; f_{y2} 为箍筋的屈服强度实测值; f_{u2} 为箍筋的极限强度实测值; f_c 为混凝土的轴心抗压强度实测值; 箍筋屈服强度为名义屈服强度.

1.2 试件加载装置及制度

本试验使用反力架加载试验系统进行加载, 加载装置见图 4. 试验前将承台固定, 使用 3 000 kN 液压千斤顶在管桩桩顶施加恒定的轴力, 模拟管桩工作时所承受的竖向荷载, 然后使用 1 000 kN 拉压千斤顶在管桩侧面距离底部 2 000 mm 处施加低周反复荷载, 模拟地震发生时作用在管桩桩身的水平力. 在桩顶加载点对称布置位移计, 用以观测试验过程中的位移变化.

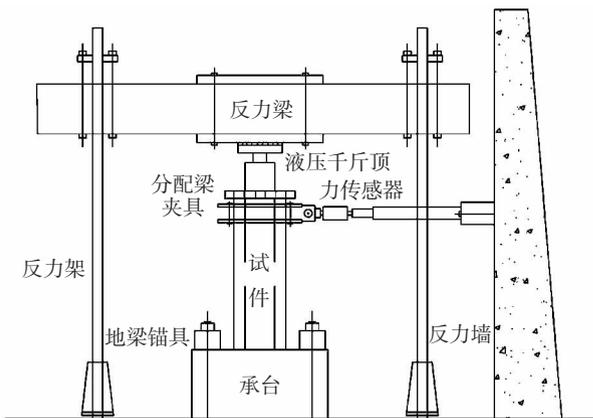


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Diagram of test loading device

根据中国 JGJ 101—2015《建筑抗震试验方法规程》^[11] 规定, 试验采用荷载 - 位移混合控制加载方法. 在管桩试件屈服前采用荷载控制加载, 控制荷载以 20 kN 等差递增, 每级荷载循环 1 次; 由于没有确定屈服点的统一标准, 同时试验过程中难以精确确定试件屈服位移, 基于经验及现场加载情况, 判断选取 10 ~ 12 mm 为加载控制屈服位移, 屈服后采用位移控制, 分别以 1 Δ 、1.5 Δ 、2 Δ 、2.5 Δ 、3 Δ 作为控制位移进行加载, 每级位移加载循环 2 次. 试验加载制度

见图 5. 当加载至水平荷载下降到极限荷载的 85 % 或者试件严重破坏导致试验无法继续时, 认为试件已经破坏, 试验结束.

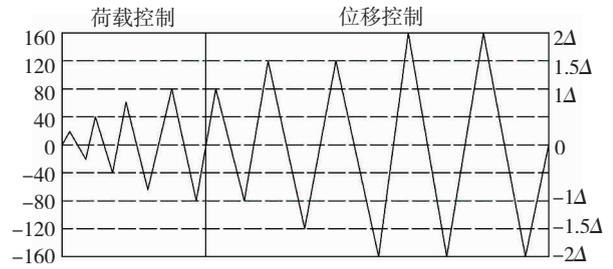


图 5 试验加载制度

Fig. 5 Test loading system

2 结果与分析

2.1 试件破坏过程

4 个试件的最终破坏情况见图 6, 试件混凝土脱落及裂缝情况见图 7. 试件 LXYS-0.3 加载过程中, 当水平力达到 180 kN 时, 管桩受拉侧距离根部 280 mm 处, 首次出现横裂缝. 随着加载的不断进行, 管桩 500 mm 范围内出现两条主裂缝, 并不断加宽、延伸, 至桩身两侧发展为斜裂缝. 力控制阶段, 未出现混凝土脱落现象. 加载到 -24 mm 时, 管桩受压侧混凝土出现较大面积开裂, 加载过程中听到“嘭”一声巨响, 此时, 判断管桩试件受拉侧钢筋断裂, 最终, 试件根部混凝土大面积脱落, 裂缝宽度较大.

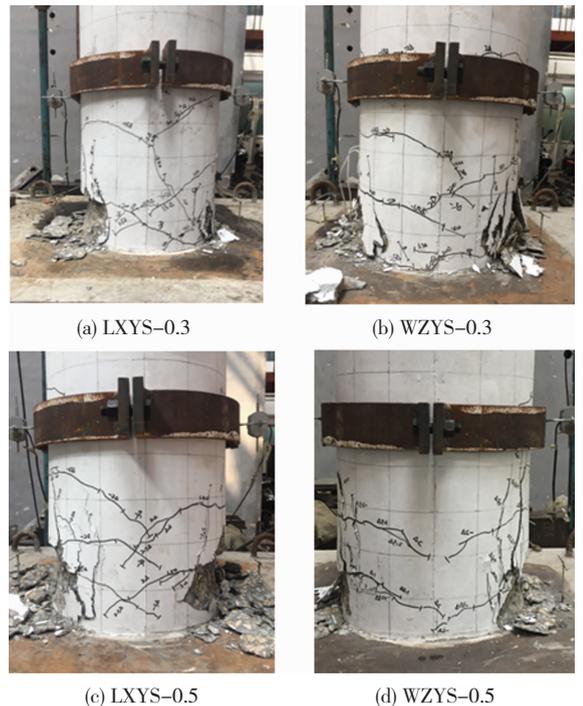


图 6 试件最终破坏情况

Fig. 6 Final damage of the test specimen

试件 WZYS-0.3 加载过程中, 当水平力达到 160 kN 时, 管桩受拉侧距离根部 90 mm 处, 出现多条不连贯横裂缝, 长度较短. 随着加载的不断进行,

管桩 500 mm 范围内出现多条横裂缝并延伸至桩身两侧,当加载至 30 mm 时,管桩受压侧距离根部 100 mm,长 200 mm 范围内混凝土压碎并出现轻微脱落,最终,试件根部混凝土大面积压酥脱落,3 条主裂缝宽度较小且延伸出较多细小裂缝。

试件 LXYS-0.5 加载过程中,当水平力达到 240 kN 时,管桩受拉侧距离根部 150 mm 处,首次出现横裂缝,其裂缝开展情况与试件 LXYS-0.3 类似,加载至 25 mm 时,管桩受压侧混凝土脱落严重,

最终,形成 2 条主裂缝,宽度达 6 mm。

试件 WZYS-0.5,当水平力达到 240 kN 时,管桩受拉侧距离根部 150 mm 处,首次出现横裂缝,其裂缝开展情况与试件 WZYS-0.3 类似,细小裂缝较多,加载至 25 mm 时,管桩受压侧混凝土压酥现象严重,但未出现脱落现象。最终,试件根部混凝土大面积压酥脱落,桩身裂缝集中在距离根部 500 mm 范围内,形成 2 条主裂缝,宽度较小且延伸出较多细小裂缝。

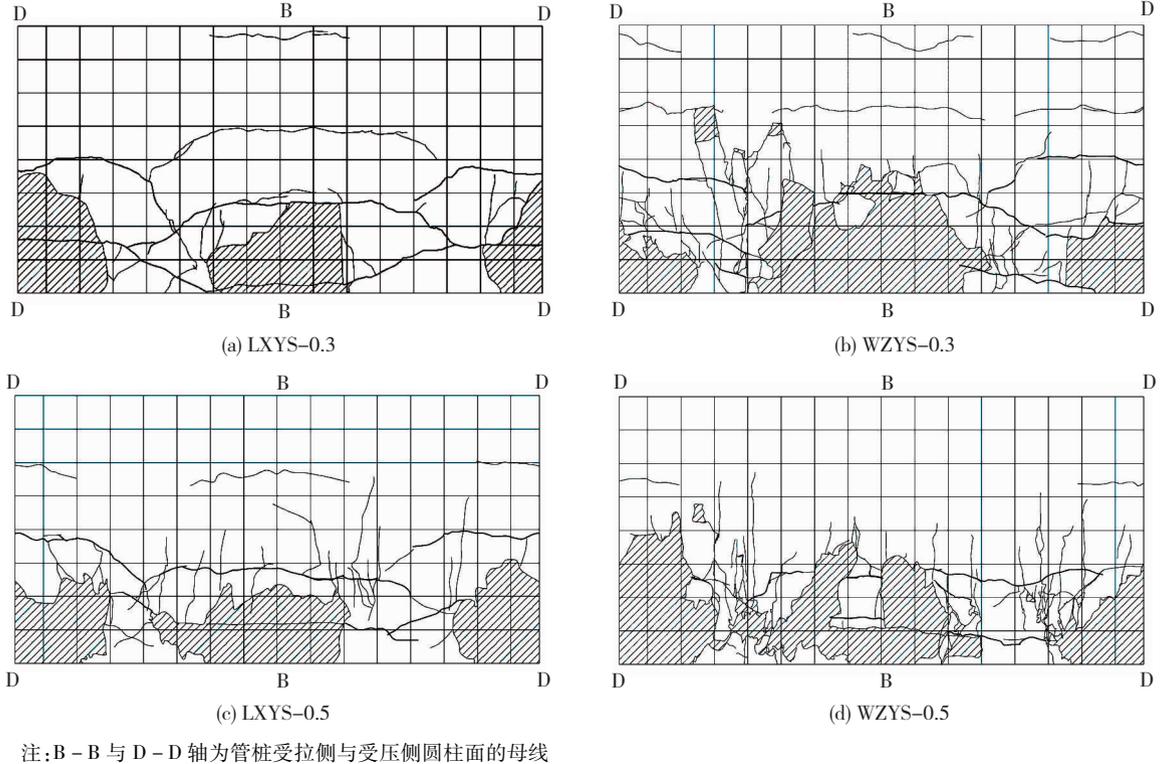


图 7 试件混凝土脱落及裂缝示意

Fig. 7 Schematic of concrete peeling and crack of the test specimen

从 4 个试件的最终破坏形态来看,试件的剪切斜裂缝较少,主要发生弯曲破坏.破坏模式分为两种,分别是:受拉侧钢筋断裂以及受压区混凝土压碎.不同的是,普通螺旋配箍的 2 个试件,混凝土脱落程度更深,主裂缝较少且宽度较大;网状箍筋约束的两个试件,裂缝开展更为丰富,其在试验加载至荷载下降段变形较大时,伴随有轻微响声.通过混凝土剥落后钢筋情况,判断为少数箍筋断裂。

2.2 滞回曲线

4 个管桩试件加载点的滞回曲线($P-\Delta$)见图 8,均呈现出“弓形”.加载初期,桩端荷载及其位移呈现出很强的线性关系,卸载后的残余变形较小,试件的整体刚度较大,4 个试件整体恢复性能较好;加载中后期,各试件刚度逐渐减小,耗能能力明显增强,同时,随着往复加载与卸载次数的增加,各试件的残余变形不断累积,出现不同程度的“捏缩效应”。

从图 8 看出,2 个新型网状箍筋约束试件,在保

证原有承载力的基础上,捏拢程度较低,滞回曲线相对比较饱满,整体耗能能力较好.由于轴压力能够有效延缓裂缝的出现,在配箍方式相同的情况下,随着轴压比的增加,试件的承载力显著提升,刚度有一定程度提升.同时,试件破坏位移减小,变形能力减弱。

2.3 骨架曲线及特征点参数

管桩试件荷载-位移骨架曲线见图 9,4 条曲线大体发展趋势相同呈现“S”形,均分别经历了弹性阶段、弹塑性阶段与破坏阶段.从图 9 看出,2 个新型网状箍筋约束试件,初始刚度较大。

结合试验过程及图 9,确定管桩试件荷载-位移骨架曲线的特征点参数:屈服荷载、极限荷载、破坏荷载及其相应的位移.确定方法如下:屈服荷载 P_y 采用“能量等值法”确定,极限荷载 P_{max} 为骨架曲线的峰值荷载,破坏荷载 $P_u^{[11]}$ 是荷载下降至峰值荷载的 85% 时的荷载.相应的屈服位移 Δ_y 、极限位移 Δ_{max} 以及破坏位移 Δ_u ,均为试验相应荷载对应的

位移实测值. 根据试件的破坏位移与屈服位移, 得到其位移延性系数. 特征点参数见表 3.

试件屈服后, 在轴压比相同的情况下, 2 个新型网状箍筋约束试件与普通螺旋配筋试件相比, 在各阶段承载力均有一定程度的提高, 同时, 延性系数较大, 表明使用新型网状箍筋约束在保持管桩原有承载力的基础上, 能够提高其延性性能. 配箍条件相同的情况下, 试件的延性系数随着轴压比的提高而减小, 表明管桩的延性性能受轴压比的影响较大, 因而, 在设计使用过程中, 应严格控制其轴压比.

2.4 刚度退化

随着外荷载循环次数的增加, 试件刚度不断减小, 这种刚度退化现象, 采用割线刚度来表示, 4 个试件的刚度退化趋势见图 10. 可看出, 由于混凝土的开裂, 初期试件刚度退化较快; 屈服后趋于平缓, 在相同轴压比的情况下, 采用新型网状箍筋约束的试件相比于普通螺旋配箍, 其刚度退化较慢, 表明新型网状箍筋约束能够有效延缓试件屈服后承载力的退化速度.

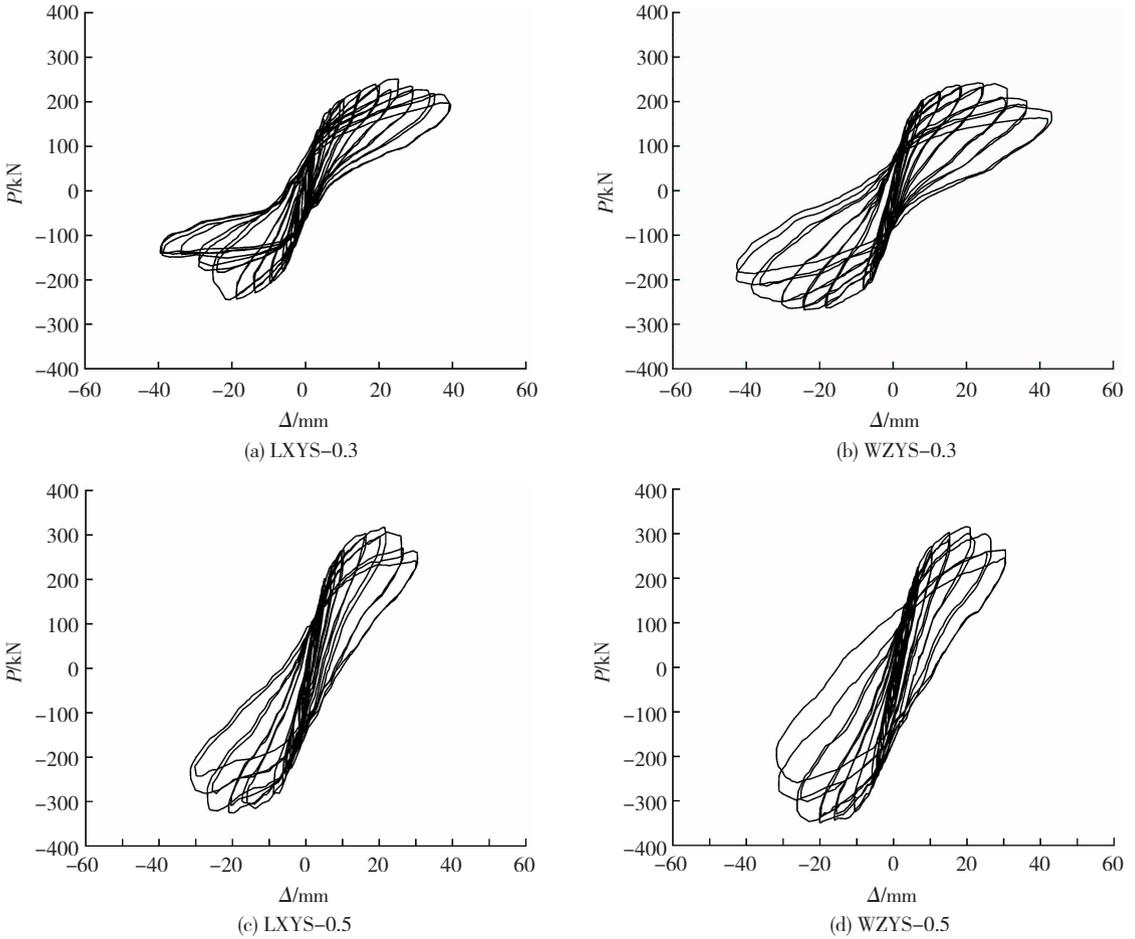


图 8 滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curve of the test specimen

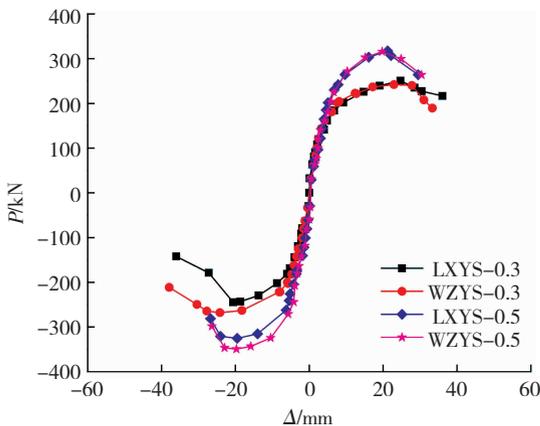


图 9 骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curve of the test specimen

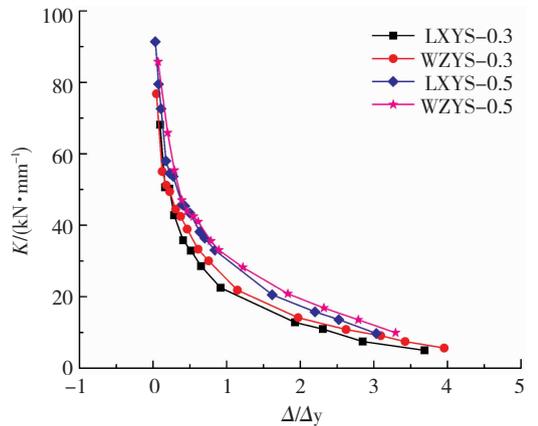


图 10 刚度退化曲线

Fig. 10 Deterioration curve of stiffness

表 3 试件各阶段特征点参数

Tab.3 Characteristic point parameters of each stage of the test specimen

| 试件编号 | P_y/kN | Δ_y/mm | P_{\max}/kN | Δ_{\max}/mm | P_u/kN | Δ_u/mm | Δ_u/Δ_y |
|----------|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| LXYS-0.3 | 205.66 | 9.80 | 247.64 | 22.65 | 179.43 | 36.04 | 3.68 |
| WZYS-0.3 | 216.90 | 9.00 | 254.82 | 23.57 | 200.53 | 35.63 | 3.96 |
| LXYS-0.5 | 272.78 | 9.40 | 321.31 | 20.38 | 272.70 | 28.12 | 2.99 |
| WZYS-0.5 | 279.48 | 8.80 | 332.35 | 19.74 | 280.98 | 28.39 | 3.22 |

2.5 耗能能力

采用规格化累计耗能系数 $E_N^{[12-14]}$, 来比较 4 个不同试件的耗能能力, 见表 4. 其定义为结构在某一阶段变形过程中所消耗的能量与其屈服位移和峰值荷载乘积的比值, 能够较好地评价构件的耗能能力. 表达式为

$$E_N = \frac{1}{P_m \Delta_y} \sum_{i=1}^{i=m} w_i, \quad (1)$$

式中: P_m 为试件水平峰值承载力, w_i 为滞回环面积, Δ_y 为试件的屈服位移.

由表 4 可知, 相同轴压比情况下, 采用新型网状箍筋约束的试件相比于普通螺旋配箍, 其耗能能力明显增加. 表明采用新型网状箍筋约束能够显著提高管桩试件的耗能能力. 同时, 相同配箍情况下, 随着轴压比的增加, 试件耗能能力有一定程度的下降.

表 4 各试件规格化累计耗能系数

Tab.4 Cumulative energy consumption of each test specimen

| 试件编号 | E_N |
|----------|-------|
| LXYS-0.3 | 7.10 |
| WZYS-0.3 | 8.36 |
| LXYS-0.5 | 5.95 |
| WZYS-0.5 | 6.49 |

3 正截面抗弯承载力计算

针对预应力混凝土构件, 现行《混凝土结构设计规范》^[15] 规定了沿周边均匀配置纵向钢筋的环形截面偏心受压构件正截面受弯承载力计算公式:

$$M_{lx} = \alpha_l f_c A (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi} + f'_{py} A_p r_p \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} + (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p \frac{\sin \pi \alpha_l}{\pi}, \quad (2)$$

其中:

$$\alpha = \frac{N + f_{py} A_p}{\alpha_l f_c A + f'_{py} A_p + 1.5 (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p}, \quad (3)$$

$$\alpha_l = 1 - 1.5 \alpha. \quad (4)$$

考虑新型网状箍筋约束中钢筋网的作用, 将钢筋网格沿管桩轴向分量进行合成, 提出适用于轴力作用下新型网状箍筋约束的 PC 管桩的正截面受弯承载力计算公式:

$$M_{wz} = M_{lx} + f_y A'_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_l}{\pi}, \quad (5)$$

式中: A 为环形截面面积; A_p, A'_s 分别为全部纵向预应力筋及箍筋等效截面面积沿管桩轴向分量; r_1, r_2 为管桩的内、外半径; r_p, r_s 为预应力筋与箍筋重心所在圆周的半径; α 为受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值; α_l 为纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值; N 为管桩所承受的轴力; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; f_y 为箍筋抗拉强度设计值; f'_{py} 为预应力筋抗压强度设计值; f_{py} 为预应力筋抗拉强度设计值.

规范^[15] 公式是针对低轴力作用下管桩的计算方法. 由于 \sin 函数的非单调性, 当作用在桩端的轴力较大时, 上述公式需进行讨论, 本文根据规范进行修正后建议如下:

当 $\alpha \leq 1/2$ 时, 使用式(2)、(5)进行承载力计算;

当 $\alpha > 1/2$ 时, 将上述式(2)、(5)中 $\sin \pi \alpha$ 替换为 $1 + \sin(\pi \alpha - \pi/2)$, 进行承载力计算.

按照公式计算所得 4 个试件的正截面承载力及试验结果见表 5. 试验结果大于计算结果, 因此, 管桩在轴力作用下的正截面承载力的计算是偏安全的.

表 5 承载力试验值与计算值对比

Tab.5 Comparison between bearing capacity test value and calculated value

| 试件编号 | 试验值/ (kN · m) | 计算值/ (kN · m) | 试验值/ 计算值 |
|----------|------------------|------------------|-------------|
| LXYS-0.3 | 398.93 | 318.00 | 1.25 |
| WZYS-0.3 | 440.66 | 326.52 | 1.34 |
| LXYS-0.5 | 597.49 | 400.19 | 1.49 |
| WZYS-0.5 | 614.56 | 410.02 | 1.50 |

注: 计算值考虑二阶效应, 采用表 2 中实测数据计算.

4 结 论

通过对 4 个足尺 PC 管桩进行低周往复加载试验研究, 得出以下结论:

1) 从试件的破坏过程及破坏特征判断, 4 个试件均为受弯破坏, 表现为混凝土的压碎脱落, 其抗弯承载力试验值与计算值比值均大于 1.0, 计算值具

有一定的安全储备。

2) 新型网状箍筋约束 PC 管桩由于其特殊的箍筋网, 相比于普通螺旋配箍的 PC 管桩, 能够有效提高管桩试件的延性约 8%; 提高耗能能力约 10%~20%。

3) 轴压比是影响 PC 管桩延性、承载力以及耗能能力的重要指标。轴压比越大, 其承载力越高, 延性越差, 耗能能力越差。

4) 提出了新型网状箍筋约束 PC 管桩正截面抗弯承载力计算公式, 以及管桩承受较高轴压比时承载力计算修正公式。

参考文献

- [1] 完平平. 预应力混凝土管桩抗震分析及思考[J]. 广东科技, 2009(3): 79
WAN Pingping. Seismic analysis and thinking of prestressed concrete pipe piles[J]. Guangdong Science and Technology, 2009(3): 79. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5423.2009.06.046
- [2] BUDEK A M, PRIESTLEY M J N. Experimental analysis of flexural hinging in hollow marine prestressed pile shafts[J]. Coastal Engineering Journal, 2005, 47(1): 1. DOI: 10.1142/S0578563405001161
- [3] 戎贤, 齐晓光, 李艳艳. 预应力高强混凝土管桩滞回性能的试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2013(2): 88
RONG Xian, QI Xiaoguang, LI Yanyan. Experimental research on hysteretic behavior of prestressed high strength concrete pipe piles[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013(2): 88. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdx.2013.02.024
- [4] 戎贤, 王旭月, 李艳艳. 反复荷载作用下改善的 PHC 管桩的抗震性能试验研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(7): 59
RONG Xian, WANG Xuyue, LI Yanyan. Test study on seismic behavior of the improved PHC pipe piles under low cyclic loading[J]. Building Science, 2013, 29(7): 59. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2013.07.007
- [5] 戎贤, 王旭月, 李艳艳. 掺入钢纤维的 PHC 管桩抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014(8): 10
RONG Xian, WANG Xuyue, LI Yanyan. Experimental study on seismic behavior of PHC pipe piles with steel fibers[J]. Building Structure, 2014(8): 10. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.08.003
- [6] 王铁成, 王文进, 赵海龙, 等. 不同高强预应力管桩抗震性能的试验对比[J]. 工业建筑, 2014, 44(7): 84
WANG Tiecheng, WANG Wenjin, ZHAO Hailong, et al. Seismic performance of different prestressed high strength concrete pipe piles[J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 84. DOI: 10.13204/j.gyjz201407018
- [7] KOKUSHO S, WADA A, KOBAYASHI K, et al. Experimental study on plastic deformability of high strength prestressed concrete piles under axial and lateral forces[J]. Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, 1984, 8(3): 609
- [8] 杉村義広, 佐々木建一, 佐藤宏, 等. 耐震継手を持つ PHC 杭の軸力変動下における水平交番載荷試験[J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 1998, 63(513): 105
SUGIMURA Y, SASAKI K, SATOU H, et al. Cyclic horizontal load test of PHC piles with earthquake resistant joint under axial force changing condition[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1998, 63(513): 105. DOI: 10.3130/aajs.63.105_3
- [9] 先张法预应力混凝土管桩: GB 13476—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
Prestensioned spun concrete piles: GB 13476—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009
- [10] 预应力混凝土管桩: 苏 G 03—2012[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2012
Prestressed concrete pipe pile: Su G 03—2012[S]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2012
- [11] 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015
- [12] BAYRAK O, SHEIKH S A. High-strength concrete columns under simulated earthquake loading[J]. ACI Structural Journal, 1997(6): 714
- [13] BAYRAK O, SHEIKH S A. Confinement reinforcement design considerations for ductile HSC columns[J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 1998, 124(9): 1002. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(999)
- [14] 司炳君, 李宏男, 王东升, 等. 基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究(I): 拟静力试验[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 127
SI Bingjun, LI Hongnan, WANG Dongsheng, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge piers designed on the basis of displacement(I): Quasi-static test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 127. DOI: 10.13197/j.eeev.2008.01.008
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

(编辑 赵丽莹)