

# 轴力对预应力高强混凝土管桩抗震性能的影响

杨志坚,盖常宏

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究轴力和往复荷载作用下预应力高强混凝土管桩的抗震性能,为预应力高强混凝土管桩的设计和实际工程应用提供参考依据。方法 应用 ABAQUS 有限元软件对预应力高强混凝土管桩进行有限元模拟,并与已有试验结果对比,两者吻合良好,验证了模型的准确性。在此基础上,研究轴压比和有无普通钢筋及普通钢筋直径对预应力高强混凝土管桩滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、延性及耗能能力的影响。结果 配置普通钢筋可以提高预应力高强混凝土管桩的承载能力和延性,对刚度影响不大;随着轴压比的增加,预应力高强混凝土管桩的承载能力逐渐提高,但延性变差,轴压比为 0.45 时,预应力高强混凝土管桩发生脆性破坏。结论 配置普通钢筋可以有效改善预应力高强混凝土管桩的抗震性能,预应力高强混凝土管桩的轴压比不宜超过 0.3。

**关键词** 预应力高强混凝土管桩;轴压比;抗震性能;滞回曲线

中图分类号 TU378

文献标志码 A

**引用格式:**杨志坚,盖常宏.轴力对预应力高强混凝土管桩抗震性能的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):423-431.(YANG Zhijian, GAI Changhong. Effect of axial force on seismic performance of prestressed high-strength concrete piles[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 423-431.)

## Effect of Axial Force on Seismic Performance of Prestressed High-strength Concrete Piles

YANG Zhijian, GAI Changhong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To study the seismic performance of prestressed high-strength concrete pipe piles under axial force and reciprocating load, the finite element software ABAQUS is used to simulate the prestressed high-strength concrete pipe piles, and compared with existing experimental results. On the basis of verifying the accuracy of the model, the effects of axial compression ratio, the presence or absence of ordinary steel bars, and the diameter of ordinary steel bars on the hysteresis curve,

收稿日期:2023-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52178148, 51808353);辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10);“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2203109)

作者简介:杨志坚(1984—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

skeleton curve, stiffness degradation, ductility, and energy dissipation capacity of prestressed high-strength concrete pipe piles are studied. The research results show that the configuration of ordinary steel bars can improve the bearing capacity and ductility of prestressed high-strength concrete pipe piles, with little impact on stiffness; as the axial compression ratio increases, the bearing capacity of prestressed high-strength concrete pipe piles gradually increases, but the ductility worsens. When the axial compression ratio is 0.45, the prestressed high-strength concrete pipe piles undergo brittle failure, and the axial compression ratio of the prestressed high-strength concrete pipe piles should not exceed 0.3.

**Key words:** prestressed high-strength concrete pipe pile; axial compression ratio; seismic performance; hysteresis curve

预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)是一种经过布料脱模、预应力张拉、离心成型、蒸汽养护形成的空心筒体混凝土预制构件<sup>[1]</sup>。PHC管桩因其竖向承载力高、建造速度快、质量安全可靠、施工绿色环保等优点,在工民建、港口码头、桥梁等工程中得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

目前,国内外的学者已对PHC管桩的性能进行了大量的研究。M. Yamazoe等<sup>[3]</sup>在2011年日本东北地区太平洋沿岸地震的桩基震害调查中发现,PHC管桩在地震荷载作用下的主要破坏形式包括:在靠近承台的桩头部位发生弯剪破坏以及桩头以下的桩身发生受弯破坏。A. Larosche等<sup>[4]</sup>对简单嵌入式的桩与承台连接节点进行了拟静力试验,研究了不同连接形式、嵌入长度和承台配筋等参数的影响,试验结果表明,通过延长悬臂传递力矩更加经济,增加桩嵌入的深度可以提高抗弯承载力,桩端配置约束钢筋可以增加桩端的传力。Y. P. Oktiovan等<sup>[5]</sup>通过对PHC管桩在轴力作用下的剪切试验与有限元模拟结果对比,观察轴向载荷比和剪切跨度对PHC桩的剪切能力和破坏模式的影响,发现随着轴压比的增加,PHC管桩的抗剪承载力增大。徐金等<sup>[6]</sup>对PHC桩进行了拟静力试验研究,在试验中使用弹簧模拟桩周土作用,通过分析试验各参数下的滞回曲线、骨架曲线以及耗能能力,发现非预应力筋可以改善PHC管桩的延性,但非预应力钢筋和预应力钢筋的配筋强度比应保持在0.4~0.8。

杨志坚等<sup>[7-8]</sup>对PHC管桩进行了往复荷载试验和有限元分析,研究结果表明,AB型桩的延性优于A型桩的延性,但均不满足大震时的延性要求,需要改善其延性。为改善PHC桩的抗震性能,国内外学者提出一系列措施并进行了相应的试验研究和有限元模拟分析。M. Akiyama等<sup>[9]</sup>提出对PHC管桩进行填芯和沿桩身粘贴环向的碳纤维布来增加混凝土受压区的面积,试验结果表明,两种方法均能改善管桩的抗弯性能和延性。J. W. Bagn等<sup>[10]</sup>分别采用填充混凝土和横向钢筋对大直径PHC管桩进行加固,试验结果表明,两种措施都能显著提高PHC管桩的抗弯强度和抗剪强度。陈刚等<sup>[11]</sup>以钢绞线替代PHC管桩中的钢棒作为主筋对6个构件进行足尺试验研究,试验结果表明,配置钢绞线的PHC管桩均发生受压区混凝土压碎破坏,换置钢绞线可有效提高管桩在受弯状态下的变形能力和承载力。王铁成等<sup>[12-14]</sup>研究了填芯、增加钢纤维和普通钢筋等因素对PHC管桩抗震性能的影响,试验结果表明,填芯后的管桩延性、承载力以及耗能能力均得到了提高,普通钢筋可以提高PHC管桩的抗震性能。赵长春等<sup>[15]</sup>提出在混凝土中加入碳纤维来改善PHC管桩的抗震性能,并进行了低周往复荷载试验,研究表明,这种方法可以有效提高PHC管桩的抗拉强度、开裂强度、刚度以及耗能能力。张锡治等<sup>[16]</sup>对PHC管桩进行轴力和桩端往复荷载作用下的拟静力试

验,结果表明,轴压比越大,极限抗弯强度和初始刚度越高,增加预应力钢筋的应力比可以提高 PHC 管桩的开裂荷载和承载能力。

然而在地震作用下,PHC 管桩不但要抵抗地震作用引起的水平荷载,还需承担上部结构传来的竖向荷载。国内外学者对于 PHC 管桩在水平荷载作用下的受力性能以及改善 PHC 管桩抗震性能措施方面进行了大量研究,而对轴力和往复荷载共同作用下 PHC 管桩的受力性能研究较少。现有研究成果表明,轴力对 PHC 管桩的抗震性能影响较大,有必要研究轴力作用下 PHC 管桩的抗震性能。基于此,笔者采用 ABAQUS 有限元软件对不同轴压比及配筋形式的 PHC 管桩的抗震性能进行了非线性有限元模拟分析,通过研究其滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力以及延性,分析其抗震性能,为 PHC 管桩的设计和实际工程应用提供参考。

1 有限元模型的建立

1.1 模型参数设计

应用 ABAQUS 有限元分析软件建立了 8 个 PHC 管桩在轴力和往复荷载共同作用下的有限元模型,构件截面形式如图 1 所示。8 个有限元模型柱长×直径×内径均为 5 000 mm×400 mm×160 mm,混凝土抗压强度为 80 MPa,预应力钢筋均采用 7A10.7 钢筋,屈服强度均为 1 448 MPa,螺旋箍筋均采用ΦA4@80,屈服强度均为 840 MPa,普通钢筋均采用 HRB400 级的热轧带肋钢筋,预应力筋与普通钢筋采用并筋布置。

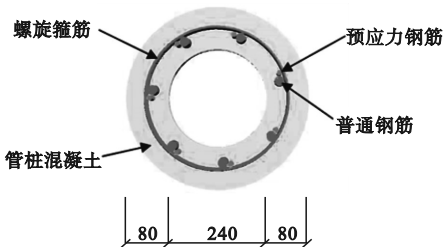


图 1 截面形式

Fig. 1 Sectional form

1.2 材料本构

钢筋本构模型采用双折线理想弹塑性模型,满足 Von Mises 屈服准则。初始弹性模量  $E_s = 200\ 000\ \text{MPa}$ ,强化阶段弹性模量为  $0.01E_s$ ,泊松比为 0.3。

混凝土本构模型采用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型,混凝土应力-应变采用《混凝土结构设计规范》(50010—2010)<sup>[17]</sup>中提出的重复荷载作用下混凝土应力-应变关系曲线,弹性模量为 38 000 MPa,泊松比为 0.2,混凝土损伤塑性模型中膨胀角为  $30^\circ$ , $\varepsilon = 0.1$ , $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1.16$ , $\gamma = 0.666\ 7$ , $\mu = 0.005$ 。

1.3 单元类型的选取和网格划分

有限元模型网格划分及边界条件如图 2 所示。模型由管桩混凝土、螺旋箍筋、预应力钢筋、夹具、套箍以及端板 6 个部分组成。其中,预应力钢筋和螺旋箍筋采用 T3D2 桁架单元,管桩混凝土、夹具、套箍和端板采用 C3D8R 实体单元。混凝土网格尺寸为 100 mm,管桩混凝土跨中塑性区和接触面加密网格,网格尺寸为 50 mm,钢筋网格尺寸为 50 mm。

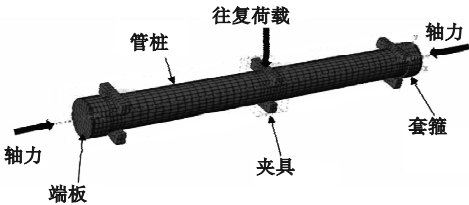


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.4 相互作用和边界条件

套箍、端板和夹具设置为刚体;管桩混凝土与夹具、管桩混凝土与套箍之间采用面与面接触,其中法向接触定义为硬接触,切向接触定义为罚,摩擦系数为 0.3;管桩混凝土端面和端板采用绑定约束;预应力钢筋和螺旋箍筋内置到管桩混凝土中;夹具完全固定。加载过程共分为三个分析步:分析步 1 采用降温法对预应力筋施加预应力,定义预应力筋的膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5}$ ;分析步 2 为在

两侧端板参考点上施加大小相等但方向相反的轴力;分析步3为在跨中夹具上施加位移,并定义幅值来模拟往复荷载。

2 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性,对文献[8]中配置普通钢筋的 P12 构件和文献[18]中 P401 构件进行了非线性有限元模拟,图3为有限元分析得到的构件滞回曲线、骨架曲线与试验曲线对比。模拟与试验的峰值荷载比值见表1。

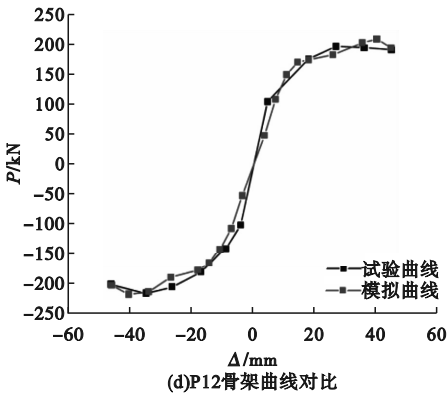
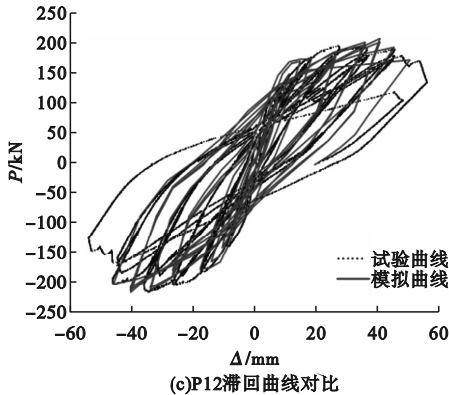
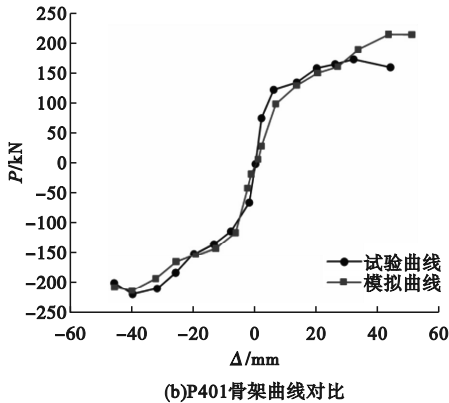
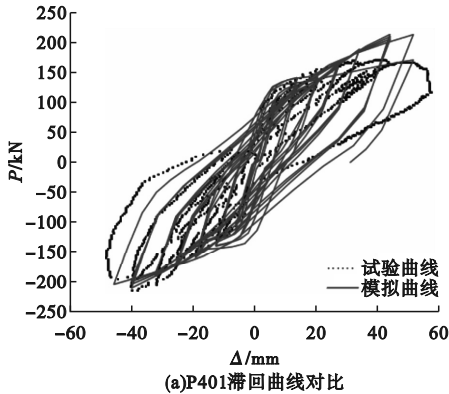


图3 有限元和试验结果对比

Fig. 3 Comparison of finite element and test results

表1 峰值荷载比较

Table 1 Comparison of peak loads

构件编号	峰值荷载 试验值/kN		峰值荷载 模拟值/kN		模拟值/ 试验值	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向
P401	173	-216	214	-211	1.24	0.97
P12	398	-427	422	-429	1.06	1.00

由图3和表1可知,模拟与试验滞回曲线吻合良好,峰值荷载误差在5%以内,骨架曲线在刚度和强度上与试验结果吻合较好。此模型可用来进一步分析PHC管桩在轴力和往复荷载共同作用下的抗震性能。

3 参数分析

在模型验证的基础上,对8个PHC管桩在轴力和往复荷载共同作用下的抗震性能进行分析,变量主要包括轴压比(0、0.15、0.30、0.45)、是否配置普通钢筋及普通钢筋直径。模型参数见表2。

表2 模型参数

Table 2 Model parameters

构件编号	轴压比	配筋形式
P1	0	—
P1 - 0.15	0.15	—
P1 - 0.3	0.30	—
P1 - 0.45	0.45	—
P2 - 12	0	7 $\Phi$ 12
P2 - 0.3 - 12	0.30	7 $\Phi$ 12
P2 - 0.3 - 14	0.30	7 $\Phi$ 14
P2 - 0.3 - 16	0.30	7 $\Phi$ 16

3.1 滞回曲线

有限元分析得出的各模型构件滞回曲线

如图4所示。

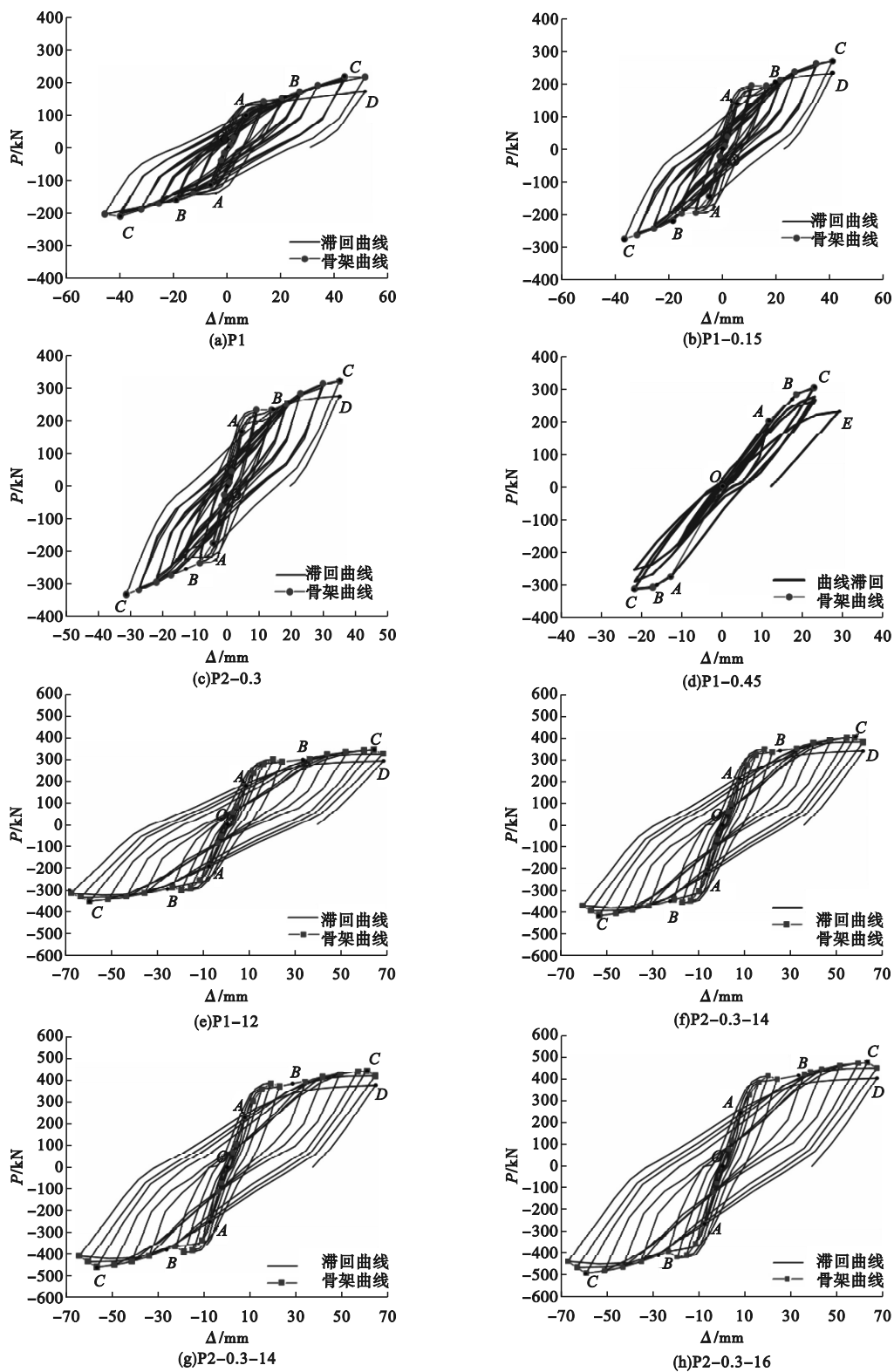


图4 滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves

由图4可知,在轴力和往复荷载共同作用下,PHC管桩的受力全过程可分为四个阶段。

弹性阶段(OA段):加载初期,各构件均处于弹性状态,滞回曲线基本为直线;卸载后,滞回环面积很小,构件无残余变形,在此阶段,PHC管桩具有良好的变形恢复能力,在A点,PHC管桩出现裂缝。

屈服阶段(AB段):混凝土开裂后,滞回曲线的斜率逐渐减小,且减小幅度越来越大;滞回环基本呈弓形,中部出现不同程度的捏缩现象;构件卸载完成后,仍存在较大的残余变形并不断增加;开始卸载时曲线下降较快,荷载减小后,曲线下降速度减慢,呈现恢复变形滞后现象;随着加载位移的增加,混凝土裂缝增加,混凝土破坏导致承载力稍有下降,预应力筋受拉后,承载力逐步提高;在B点,预应力筋达到屈服强度。

强化阶段(BC段):此阶段,滞回曲线斜率逐渐减小,承载力不断提高,在C点,预应力筋达到极限强度,滞回曲线达到峰值;对比相同加载位移的三次滞回曲线,曲线的斜率逐渐减小,承载力稍有降低,呈现刚度退化现象,但随着加载位移的增加,承载力再次提高;卸载后,构件残余变形随循环次数增加不断增大。

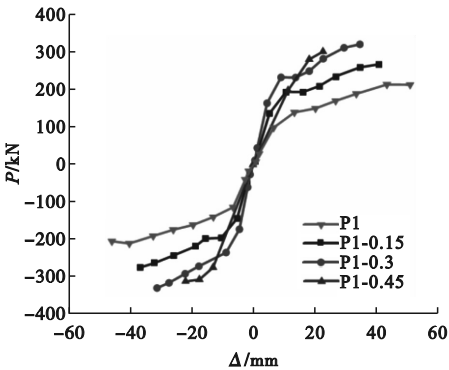
破坏阶段(CD段):此阶段,滞回曲线的斜率和构件的承载力迅速下降,除构件P1-0.45外,其余构件均在曲线达到D点时,预应力筋拉伸断裂导致破坏;构件P1-0.45在曲线达到E点处,PHC管桩因混凝土压碎而导致破坏。P1系列管桩在达到极限荷载后,突然发生破坏,承载力骤然下降到峰值荷载的85%,呈脆性破坏特征;P2系列管桩滞回曲线存在荷载下降段,在达到极限荷载后,有一个较为平缓的下降过程,呈延性破坏特征,表明配置普通钢筋可以很好地改善PHC管桩在地震荷载作用下的延性。

对比8个构件的滞回曲线发现,轴压比

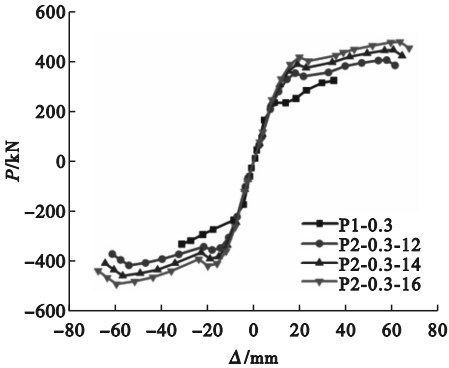
越大,构件滞回曲线越扁平,捏缩越严重,卸载后残余变形越小,复位能力越强。与P1系列构件相比,P2系列构件承载力显著提高,滞回曲线更加饱满,滞回环包围面积大幅增加,构件极限位移明显增加,表明普通钢筋能极大改善构件的耗能能力。

3.2 骨架曲线

将滞回曲线各阶段第一次加载的峰值点连接起来形成的包络线作为骨架曲线,各构件的骨架曲线如图5所示。由图可知,各构件在开裂之前均处于弹性阶段,骨架曲线基本为直线;混凝土开裂后,构件刚度快速退化,骨架曲线斜率明显减小,最后曲线趋于平缓。P1系列构件加载到极限荷载时,突然破坏,骨架曲线未出现下降;P2系列构件加载到极限荷载时,承载力缓慢下降至极限承载力85%,构件破坏。



(a)不同轴压比下构件的骨架曲线



(b)配置不同普通钢筋下构件的骨架曲线

图5 骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves

由图5(a)可知,P1系列构件轴压比从

0 逐渐增加至0.3,构件初始刚度逐渐提高,极限位移减小,承载力提高;但由0.3 增加至0.45 时,承载力降低,初始刚度减小,极限位移大幅缩小。因此,在实际工程设计中,应保证 PHC 管桩的轴压比小于0.45。由图 5(b) 可知,加载初期,各构件处于弹性阶段,骨架曲线斜率几乎相同,初始刚度相差不大;P2 系列构件与 P1 - 0.3 构件相比,在相同轴压比下,承载力和极限位移均有显著提高,开裂荷载增大;随着普通钢筋配筋率的增加,承载力逐渐提升,极限位移也有一定程度地增大。

3.3 刚度退化曲线

将坐标原点与滞回曲线各级加载的峰值点连线的斜率作为等效刚度  $K$ ,各构件的刚度退化曲线以及特征点刚度对比如图 6 所示。

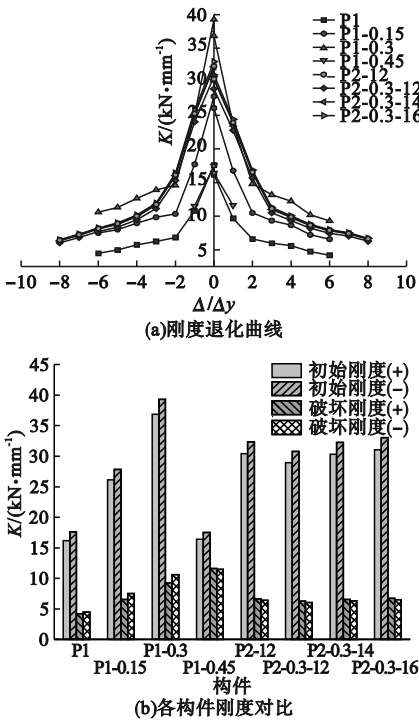


图6 刚度退化曲线

Fig. 6 Stiffness degradation curves

由图 6 可知,构件的负向初始刚度比正向初始刚度稍大,主要是由于构件受拉区钢筋的数量和位置不对称造成的;随着加载的进行,结构损伤逐渐累积,破坏时两个方向的

刚度值基本相同。在加载初期,由于裂缝的大量产生,导致各构件的刚度迅速下降到初始刚度的 50% 左右,随着加载位移的增加,构件刚度缓慢下降。

对比轴压比不同的 P1 系列构件,轴压比越大,构件的初始刚度越大,刚度退化越快,破坏时的刚度也会更大;构件 P1 - 0.45,初始刚度与构件 P1 接近,为 8 个构件中最小,构件表现为在屈服后迅速破坏,破坏刚度为 8 个构件中最大,刚度退化效果不明显。

将 P2 系列构件与 P1 - 0.3 进行对比发现,配置普通钢筋虽然会使构件的初始刚度有所降低,但会使刚度退化变缓;增加普通钢筋配筋率对刚度稍有提高,但影响并不大。

3.4 能量耗散能力

采用《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015)<sup>[19]</sup>中提出的能量耗散系数公式计算所得的各构件的能量耗散系数曲线如图 7 所示。

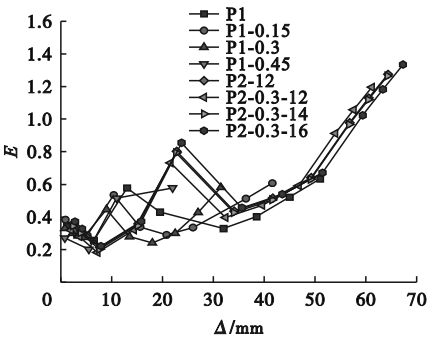


图7 能量耗散系数曲线

Fig. 7 Energy dissipation factor curves

从图 7 可以看出,加载前期,各构件的初始能量耗散系数相差不大,构件均处于弹性阶段,滞回环面积很小,随着加载位移的增加,能量耗散系数逐渐减小,在弹性阶段结束时,能量耗散系数达到最低值;混凝土开裂后,裂缝的数量和宽度不断增加,能量耗散系数不断增大;混凝土破坏后,钢筋和混凝土协同工作能力下降,能量耗散系数减小;构件屈服后,承载力增长缓慢,残余变形不断增加,能量耗散系数又不断增大。

对比 P1 系列构件发现,轴压比越大,构件的能量耗散系数峰值越小,达到峰值点越早,耗能能力越差;与 P1- 0.3 构件相比,P2 系列构件在开裂后,能量耗散系数增长缓慢,但峰值更大,表明配置普通钢筋可以有效地提升构件的耗能能力。

3.5 延 性

取构件破坏时的极限位移与屈服位移的比值为位移延性系数,各构件的承载力及位移延性系数结果见表 3。由表可知,对于 P1 系列构件,轴压比由 0 增大到 0.3,承载力逐

渐增大,延性逐渐减小,这主要是因为增大构件的轴压比,使得构件的相对受压区高度增加、塑性转动能力变差。与轴压比为 0 的 P1 构件相比,轴压比为 0.15、0.3、0.45 的 P1 系列构件,承载力分别提高了 29.6%、55.5%、46.7%,位移延性系数分别减小了 15.0%、19.6%、43.9%,P1- 0.45 构件表现出明显的脆性破坏特征。综合考虑,在工程设计与实际应用过程中,应该把 PHC 管桩的轴压比控制在 0.3 以内。

表 3 计算结果

Table 3 Calculation results

构件编号	承载力/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性系数	承载力提高幅度/%	延性系数提高幅度/%
P1	210.02	19.70	48.46	2.46	—	—
P1- 0.15	272.17	18.55	38.76	2.09	29.6	- 15.0
P1- 0.3	326.60	16.64	32.95	1.98	55.5	- 19.6
P1- 0.45	308.06	16.18	22.33	1.38	46.7	- 43.9
P2- 12	348.43	19.21	61.86	3.22	65.9	30.9
P2- 0.3 - 12	409.92	19.49	61.2	3.14	95.2	27.6
P2- 0.3 - 14	450.91	20.08	64.26	3.20	114.7	30.1
P2- 0.3 - 16	483.70	20.71	67.32	3.25	130.3	32.1

注:数据均为正向和反向的平均值。

与 P1 系列构件相比,P2 系列构件加入普通钢筋承载力提高了 65.9%,位移延性系数提高了 30.9%,普通钢筋直径从 12 mm 增加到 16 mm,构件承载力分别提高了 95.2%、114.7%、130.3%,位移延性系数分别提高了 27.6%、30.1%、32.1%。结果表明,配置普通钢筋可以有效地改善构件的延性、提高构件的承载力;增大普通钢筋配筋率,构件的延性和承载力都有一定程度的提高。

4 结 论

(1)采用 ABAQUS 有限元分析软件对往复荷载作用下的 PHC 管桩进行非线性有限元模拟,计算得到的滞回曲线、骨架曲线等

与试验结果吻合良好,验证了模型的准确性。

(2)随着轴压比的增加,PHC 管桩的刚度和承载力得到了提高,但延性和耗能能力随之减弱。当轴压比为 0.45 时,PHC 管桩在屈服后很快因混凝土压碎而发生破坏,呈明显的脆性破坏特征。建议在工程设计和应用过程中,轴压比限制在 0.3 以内。

(3)配置普通钢筋可以明显改善 PHC 管桩的承载力、耗能能力和延性,但刚度稍有降低;增大普通钢筋配筋率对于 PHC 管桩的承载力、刚度、耗能能力和延性均有一定程度的提高。

参考文献

[1] 翟莲,杨莹莹,张竹军,等. 预应力混凝土管桩研究现状及前景[J]. 混凝土世界,2020(3):

- 46-48.  
(ZHA Lian, YANG Yingying, ZHANG Zhujun, et al. Research status and prospect of prestressed concrete pile [J]. World of concrete, 2020(3):46-48)
- [2] 杨志坚,雷岳强. 预应力高强混凝土管桩的抗剪性能有限元分析[J]. 工程力学, 2020, 37(增刊1):200-207.  
(YANG Zhijian, LEI Yueqiang. Finite element analysis of the shear behavior of prestressed high-strength concrete piles [J]. Engineering mechanics, 2020, 37(S1):200-207.)
- [3] YAMAZOE M, SAKUTA J, MITSUJI K, et al. Field investigation and dynamic analysis of damaged structure on pile foundation during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake [C]. Portugal: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012.
- [4] LAROSCHE A, ZIEHL P, ELBATANOUNY M K, et al. Plain pile embedment for exterior bent cap connections in seismic regions [J]. Journal of bridge engineering, 2014, 19(4):111-122.
- [5] OKTIOVAN Y P, OTAKI T, OBARA T, et al. Shear performance evaluation of PHC piles under different levels of axial load ratio [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2022, 51(9):2091-2112.
- [6] 徐金, 窦远明. 混合配筋管桩拟静力试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(14):113-116.  
(XU Jin, DOU Yuanming. Pseudo static test study on hybrid reinforced concrete pipe pile [J]. Building structure, 2019, 49(14):113-116.)
- [7] 杨志坚, 王文进, 康谷贻. 往复荷载作用下预应力高强混凝土管桩延性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊1):107-112.  
(YANG Zhijian, WANG Wenjin, KANG Guyi. Analysis on the ductility of prestressed high strength concrete pile under cyclic loading [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(S1):107-112)
- [8] YANG Z J, LI G C, WANG W J. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on seismic performance of PHC piles [J]. Structural engineering international, 2018, 28(4):475-488.
- [9] AKIYAMA M, ABE S, AOKI N, et al. Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section [J]. Engineering structures, 2012, 34:259-270.
- [10] BAGN J W, LEE B Y, KIM Y Y. Flexural and shear behavior of large diameter PHC pile reinforced by rebar and infilled concrete [J]. Computers & concrete, 2020, 25(1):75-81.
- [11] 陈刚, 周清晖, 徐铨彪, 等. 预应力钢绞线超高强混凝土管桩受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7):173-182.  
(CHEN Gang, ZHOU Qinghui, XU Quanbiao, et al. Study on flexural performance of prestressed steel strand reinforced ultra-high strength concrete pipe piles [J]. Journal of building structures, 2019, 40(7):173-182.)
- [12] 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):84-89.  
(WANG Tiecheng, WANG Wenjin, ZHAO Hailong, et al. Seismic performance of different prestressed high strength concrete pipe piles [J]. Industrial buildings, 2014, 44(7):84-89)
- [13] WANG T C, WANG W J, ZHAO H L, et al. Seismic performance of pre-stressed high-strength concrete pile reinforced with steel fibre [J]. Material research innovations, 2015, 19(S8):125-131.
- [14] WANG T C, YANG Z J, ZHAO H L, et al. Seismic performance of prestressed high strength concrete piles [J]. Materials research innovations, 2014, 18(S2):515-521.
- [15] 赵长春, 张留军, 龚维明, 等. 预应力高强混凝土管桩抗震能力改善措施的试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(1):131-134.  
(ZHAO Changchun, ZHANG Liujun, GONG Weiming, et al. Experimental study on improvement measures of seismic resistance for tubular piles of PHC [J]. Industrial buildings, 2021, 51(1):131-134)
- [16] ZHANG X Z, NIU S X, YAN J B, et al. Seismic behaviour of prestressed high strength concrete piles under combined axial compression and cyclic horizontal loads [J]. Advances in structural engineering, 2019, 22(5):1089-1105.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Concrete structure design specification:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [18] YANG Z J, LI G C, WANG W J, et al. Study on the flexural performance of prestressed high strength concrete pile [J]. KSCE journal of civil engineering, 2018, 22:4073-4082.
- [19] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程:JGJ/T101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
(China Academy of Building Science. Building seismic test procedures: JGJ/T101—2015 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.)  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)