

# 预应力高强混凝土管桩-承台组合体 受力性能

李艳艳<sup>1,2</sup>, 李泽高<sup>1</sup>, 李和庆<sup>3</sup>, 赵雄<sup>3</sup>

1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401
2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401
3. 中国石油天然气管道工程公司, 廊坊 065000

**摘要** 对5个预制桩身与承台组合体试件进行低周反复试验,分析构件的破坏形态、承载力及延性、锚固钢筋的受力,研究预制桩身与承台锚固钢筋的不同锚固形式对试件受力性能的影响。结果表明:通过连接板焊接锚固钢筋的试件,倾角锚固钢筋能延缓试件裂缝的发展,提高试件的承载能力;在桩身内安放钢筋笼并深入承台的锚固钢筋可明显改善管桩-承台组合体试件的整体性,提高组合体试件的承载能力、延性,改善组合体试件的变形能力,且斜角锚固钢筋试件的承载能力优于直角试件。

**关键词** PHC管桩;低周往复荷载;承载力;延性

**中图分类号** TU473.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.007

## Mechanical properties of prestressed high-intensity concrete pile and pile caps combined

LI Yanyan<sup>1,2</sup>, LI Zegao<sup>1</sup>, LI Heqing<sup>3</sup>, ZHAO Xiong<sup>3</sup>

1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China
3. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China

**Abstract** 5 specimens of prefabricated pile combined with pile caps are tested under low cycle reciprocating loading. The failure patterns, the bearing capacity and the ductility, the forces in anchoring reinforcing bars, as well as the influence of different forms of the precast pile and pile cap anchoring reinforcing bars on the mechanical properties of the specimen are studied. It is shown that by anchoring reinforced connecting plate welded specimens, the inclined anchoring reinforcing bars can play a role in delaying the growth of cracks, increasing the bearing capacity of the specimen. The specimens with the pile body and the anchoring reinforcing bars can significantly improve the integrity of the pile cap assembly of the specimen and increase the bearing capacity, the ductility, and the deformation ability, and the bearing capacity of the anchoring reinforcing bars of oblique angle is better than that of the rectangular specimens.

**Keywords** PHC pipe pile; low cyclic loading; bearing capacity; ductility

近年来,预应力高强混凝土管桩以其承载能力高、质量可靠、施工快捷方便、整体稳定性好等优点逐渐引起土木工程行业的关注<sup>[1,2]</sup>。随着经济的发展,预应力混凝土管桩基础被越来越多地应用到工程实践中。近年来关于 PHC

收稿日期:2015-01-12;修回日期:2015-03-26

基金项目:河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2011052, Y-2012041);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2010123, QN2014119)

作者简介:李艳艳,副教授,研究方向为结构工程,电子信箱: nicole\_820@163.com

引用格式:李艳艳,李泽高,李和庆,等. 预应力高强混凝土管桩-承台组合体受力性能[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 44-49.

(prestressed high-intensity concrete)管桩单桩的承载力方面的研究已取得一定的进展<sup>[3-6]</sup>,但对PHC管桩与承台组合体试件受力性能方面的研究较少。本研究采用低周往复荷载试验<sup>[7]</sup>,研究锚固钢筋的不同连接方式及承台与桩身的不同连接方式对试件受力性能的影响;进一步研究桩基的受力破坏形态,分析和验证预应力高强混凝土管桩的安全性、可行性。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验设计5个承台与管桩组合体试件CT-1、CT-2、CT-3、CT-4、CT-5。预制管桩桩身长1800 mm,承台长1800 mm,宽1100 mm,高850 mm,桩身采用预应力高强混凝土预制管桩,混凝土强度C80,承台为现场浇筑。管桩类型为A类,试

件桩身外径500 mm,桩身壁厚100 mm,桩身预应力钢筋配置11 $\Phi$ 9.0,螺旋筋规格为 $\Phi$ 5,桩身配筋率均为0.56%,管桩预应力主筋所在位置直径为406 mm;试件几何尺寸及配筋情况见图1,各试件桩身与承台的钢筋锚固形式见表1<sup>[8-10]</sup>。承台及填芯混凝土强度等级设计为C35,填芯沿桩身长度全填满,预留3个边长为150 mm的立方体标准试块,实测抗压强度平均值为62.63 MPa;承台钢筋及锚固钢筋均采用HRB335,直径是18 mm。钢筋屈服强度实测值为345 MPa,极限强度实测值为524 MPa。以节点桩身根部为直线坐标原点,直线沿桩身方向,锚固钢筋若向下深入承台为正值,向上深入桩身为负值,组合体试件CT-1、CT-2、CT-3节点处锚固钢筋贴应变片位置分别为100及400 mm,CT-4、CT-5节点处锚固钢筋贴应变片位置分别为100、400、-100、-400及-700 mm。

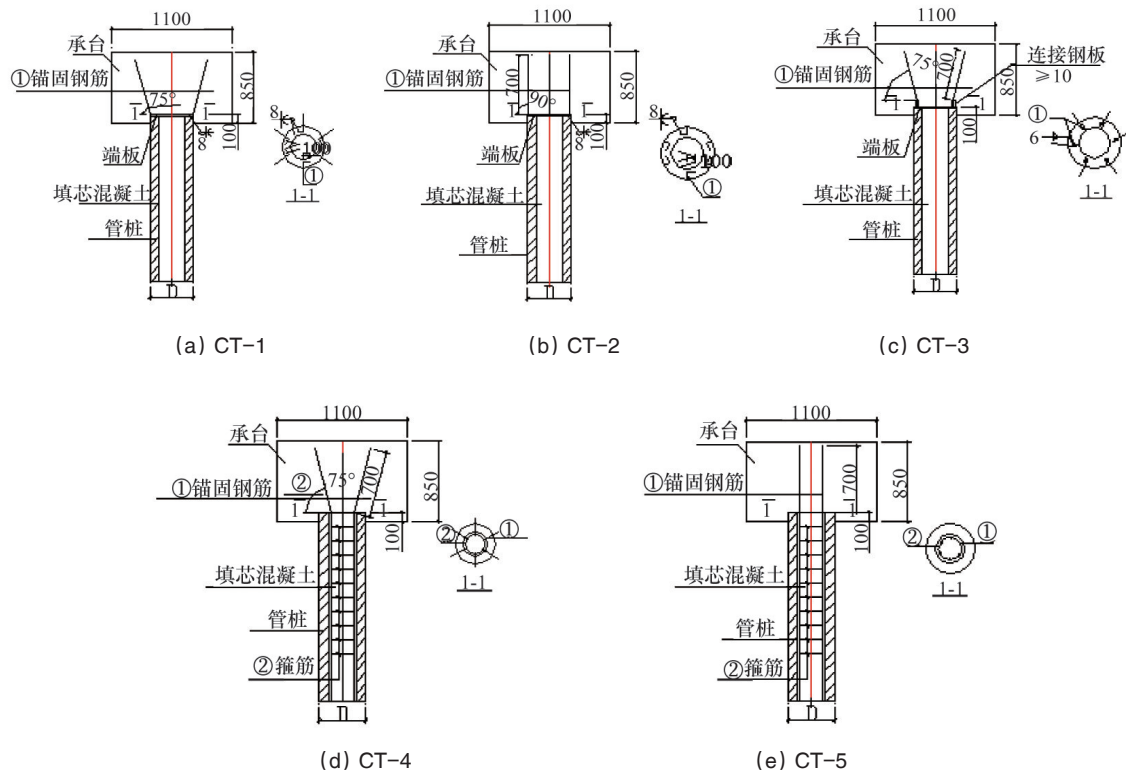


图1 试件尺寸及配筋(mm)

Fig. 1 Specimen size and reinforcement (mm)

表1 桩身与承台连接(锚固钢筋6B18)

Table 1 Connection of pile body and pile caps

编号	连接形式	连接方式
CT-1	不截桩+填芯	按照天津市图集设计,锚筋弯折75°,直接焊在桩端的锚板上
CT-2	不截桩+填芯	锚筋弯折90°,直接焊在桩端的锚板上
CT-3	不截桩+填芯	按国家图集设计,锚筋弯折75°,焊在连接板上,再将连接板焊在桩端的锚板上
CT-4	截桩+填芯	在桩内放置钢筋笼,锚固钢筋弯折75°
CT-5	截桩+填芯	在桩内放置钢筋笼,锚固钢筋不弯折

### 1.2 加载方案

本次试验采用液压加载装置,竖向力采用竖向千斤顶在柱顶施加恒定压力,水平力通过反力墙上的水平液压伺服作动器作用在柱端加载头,加载装置如图2所示。试验加载采用荷载-位移混合控制加载制度,中间以试件的钢筋屈服为界限,加载制度如图3所示,加载直至荷载下降至极限荷载的85%,或达到不适合继续承载的变形限制,或试件发生脆断,认为试件达到破坏即停止试验。

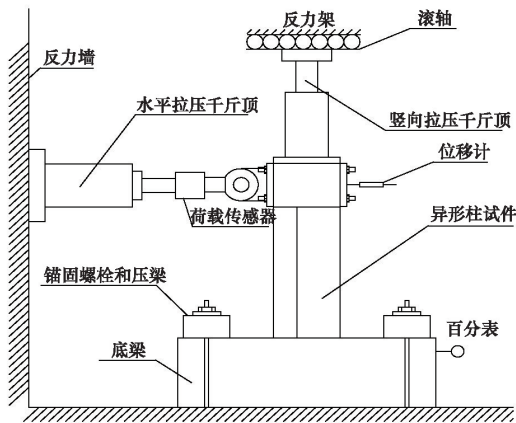


图2 试验加载装置

Fig. 2 The loading device

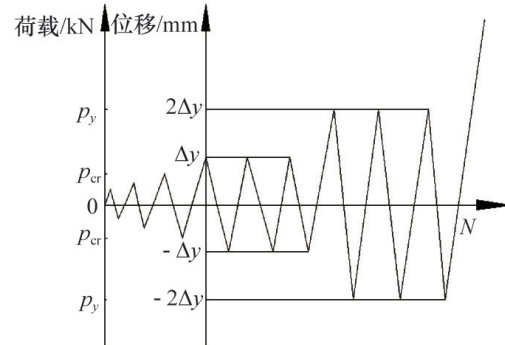


图3 加载制度

Fig. 3 Loading system

## 2 破坏形态分析

各试件都经历了完整的加载过程。图4反映了PHC管桩与承台组合体在低周往复荷载作用下的破坏形态。

1) 各个组合体试件在加载初期,首先在桩身与承台的交接处出现裂缝。随着荷载级数的增加,CT-1、CT-3、CT-4、CT-5裂缝在桩身出现,继而在承台出现;CT-2裂缝在承台出现,继而在桩身出现;在这个过程中,桩身与承台的裂缝越来越大,发展为缝隙。在加载后期,CT-1、CT-2、CT-3都听到了断裂声,组合体试件发生脆性断裂,CT-4、CT-5桩身被拔出,

表现一定的延性。

2) 组合体试件破坏时,CT-1桩身发生破坏,一侧是受压破坏,混凝土被压碎,一侧是受弯破坏;CT-2承台混凝土有隆起现象,且裂缝宽度较大,桩身几乎没有破坏;CT-3桩身破坏,以受弯破坏为主;CT-4承台混凝土大块隆起,破坏严重,桩身受压破坏;CT-5桩身与承台均发生破坏,桩身混凝土有剥落,承台混凝土有隆起现象。说明在桩身内安放钢筋笼的组合体试件节点处桩身与承台破坏较均匀,试件表现较好的延性,且承载力比其他试件好。

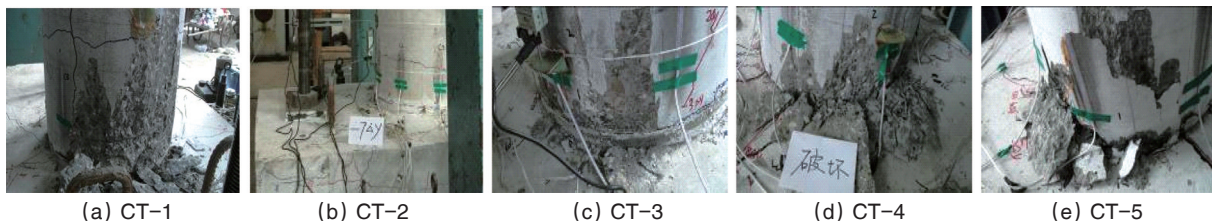


图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of specimens

## 3 骨架曲线分析

各试件的骨架曲线及对比见图5。将滞回环正负向加载的峰值点连接成的包络线即为骨架曲线,荷载控制时取本级循环的正负向峰值点,位移控制时取第一次循环时的正负向峰值点。

1) 对比组合体试件节点CT-1、CT-2、CT-3,如图5(a)所示,按国家图集设计的试件CT-3随着荷载的施加,位移较小,其次是CT-1、CT-2,可以看出倾角锚固钢筋试件的承载能力较好,且通过连接板焊接锚固钢筋的试件优于锚固钢筋直接焊在桩身端板上的试件节点。对比组合体试件节点CT-4、CT-5,如图5(b)所示,可以看出,在加载初期,试件CT-4的变形能力较好;在加载中期,正向加载,随着荷载的施加,CT-5的变形能力较好;反向加载,随着荷载的施加,CT-4的变形

能力较好;加载后期,正向加载的过程中:CT-4的骨架曲线有一段处于荷载不变,而位移发生较大的变化,这一阶段是因为锚固钢筋发生屈服产生塑性变形,因而桩身发生较大的位移;CT-5的承载能力较大一些,荷载上升到最大值突然下降,锚固钢筋被拉断,表现一定的脆性。总的看来,对于在桩身内安放钢筋笼的试件节点,倾角的组合体试件延性较好一些,但表现的优势不明显。

2) 对比5根组合体试件节点正负向均值的骨架曲线,如图5(c)所示,可以看出在加载初期前3根各根试件的骨架曲线差别不大,随着荷载的施加,逐渐出现分化。加载中期,CT-4、CT-5的骨架曲线也几乎重合,并与其他试件出现差别。加载后期,可以看出,在桩身内安放钢筋笼锚固钢筋的试件比其他3根试件承载力、位移都要好,且表现的较明显,

其次是CT-3、CT-1、CT-2。说明按国家图集设计的通过连接板焊接的倾角试件及通过钢筋笼锚固的试件可以改善试件的延性,增加试件的变形能力;对于在桩身内安放钢筋笼的

试件,在承台内锚固钢筋是倾角的试件的变形能力、延性优于在承台内锚固钢筋是直角的试件的变形能力,但优势表现的不明显。

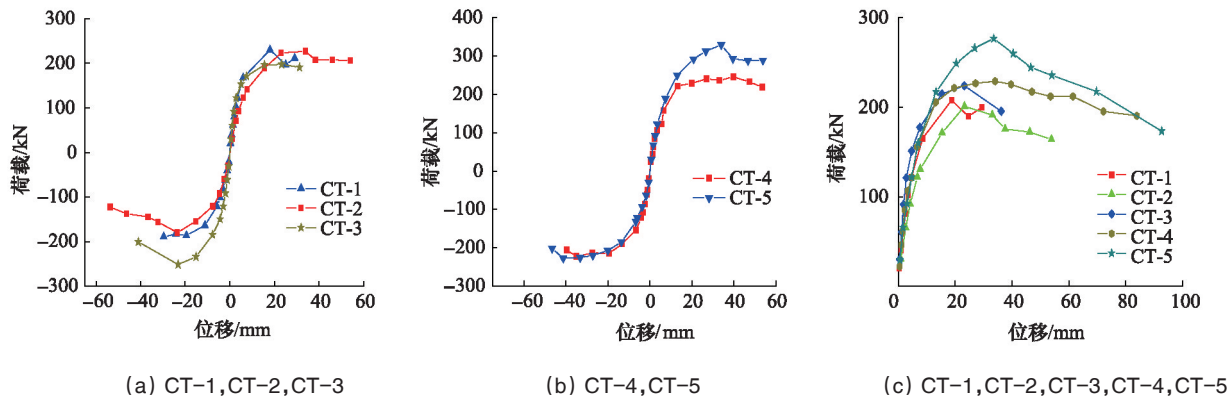


图5 各试件的骨架曲线及对比

Fig. 5 Skeleton curve and comparisons of the specimens

#### 4 混凝土应力分析

各试件节点处的混凝土的应力-弯矩见图6,其中混凝土受压时应力为负,受拉时应力为正,荷载推正拉负,正荷载对应正弯矩,负荷载对应负弯矩。

1) 对比试件CT-1、CT-2、CT-3,在加载初期,混凝土受压时和受拉时,承受相同弯矩下,桩身混凝土应力从大到小依次是CT-1、CT-3、CT-2;可见对于在桩身根部连接锚固钢筋的试件,锚固钢筋在承台内是倾角的组合体试件节点整体性较好,桩身混凝土能较早承担部分承载力。试件破坏时,所测混凝土受压时组合体试件节点承受的弯矩从大到小依次是CT-3、CT-1、CT-2,进一步验证了倾角锚固钢筋的组合体试件节点连接性较好,能较好发挥节点处桩身混凝土和承台锚固钢筋的力学性能,即锚固钢筋是倾角的组合体试件节点的承载能力较好,且按国家规程设计的组合体试件承载力更好,整体性更优。对比试件CT-4、CT-5,加载初期,桩身混

凝土受压时和受拉时,安放钢筋笼的组合体试件节点处桩身混凝土弯矩-应力曲线几乎重合,桩身混凝土受力性能差别不大。试件破坏时,混凝土受压时,在承受相同弯矩时,试件CT-4桩身混凝土应力较小,即承台内锚固钢筋承担了大部分承载力,说明安放钢筋笼锚固钢筋倾角的试件节点比直角的试件节点处连接性能好,承载力较高。

2) 对比5个组合体试件节点,在加载初期,各个试件桩身混凝土弯矩-应力曲线几乎重合,随着加载的进行,逐渐出现分化。在组合体试件破坏时,同一弯矩下,在桩身内安放钢筋笼的组合体试件节点和按国家图集设计的组合体试件节点桩身混凝土受压时应力较小,且按国家图集设计的组合体试件节点混凝土受压时的压应力小于在桩身内安放钢筋笼锚固钢筋在承台内是直角的组合体试件节点桩身混凝土受压时的压应力,这时锚固钢筋承担大部分承载力,说明在承台内锚固钢筋是倾角的组合体试件整体性较好。

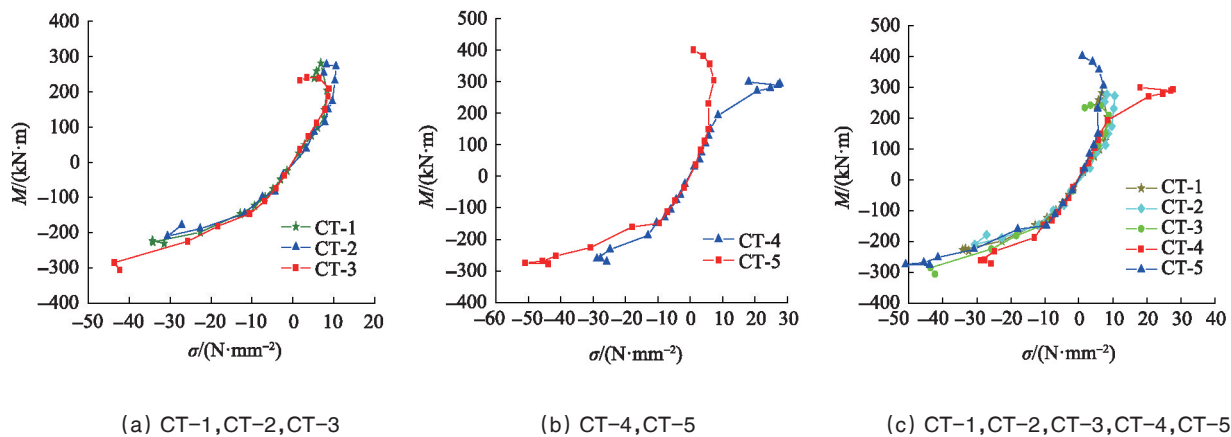


图6 各试件节点处桩身混凝土的弯矩M-应力σ对比

Fig. 6 Comparison of moment - stress curves of pile concrete at the nodes of the specimens

## 5 锚固钢筋受力性能分析

锚固钢筋所测点钢筋受拉时微应变为正,受压时微应变为负,荷载推正拉负;组合体试件节点承台部分锚固钢筋的微应变对比分布如图7所示。

1) 由图7(a)、(b)可以看出,试件CT-1、CT-2、CT-3在加载初期,试件锚固钢筋各点处于弹性阶段,荷载-微应变曲线为一条直线,随着加载的进行,锚固钢筋出现塑性变形。如果节点整体性较好,在相同荷载下承台直角锚固钢筋先达到屈服,倾角锚固钢筋后达到屈服。即锚固钢筋是倾角的组合体试件节点承台混凝土与锚固钢筋协同效果好,承载力较直角锚固钢筋组合体试件高。最终破坏时,组合体试件节点CT-1、CT-2、CT-3的锚固钢筋都没有达到屈服,还处于弹性

阶段,材料性能没有充分利用,因为这3个组合体试件表现一定的脆性,锚固钢筋没有发挥其材料性能,试件就发生破坏,破坏时3个节点试件都发生脆响,桩身预应力筋被拉断。在相同荷载作用下,承台处锚固钢筋在距桩身端板处100 mm处,微应变较大,其次是距承台400 mm处,这说明在承台内锚固钢筋的受力沿着锚固钢筋向下逐渐变小,距承台节点越近处,受力越大。

2) 由图7(c)、(d)可知在加载过程中,在相同荷载作用下,试件CT-4锚固钢筋的微应变较小,试件CT-5锚固钢筋的微应变较大,且组合体试件在推拉过程中,CT-4锚固钢筋拉压应变比较对称,即锚入承台的锚固钢筋倾角比直角好,倾角组合体试件的承载力较好,整体性较好。

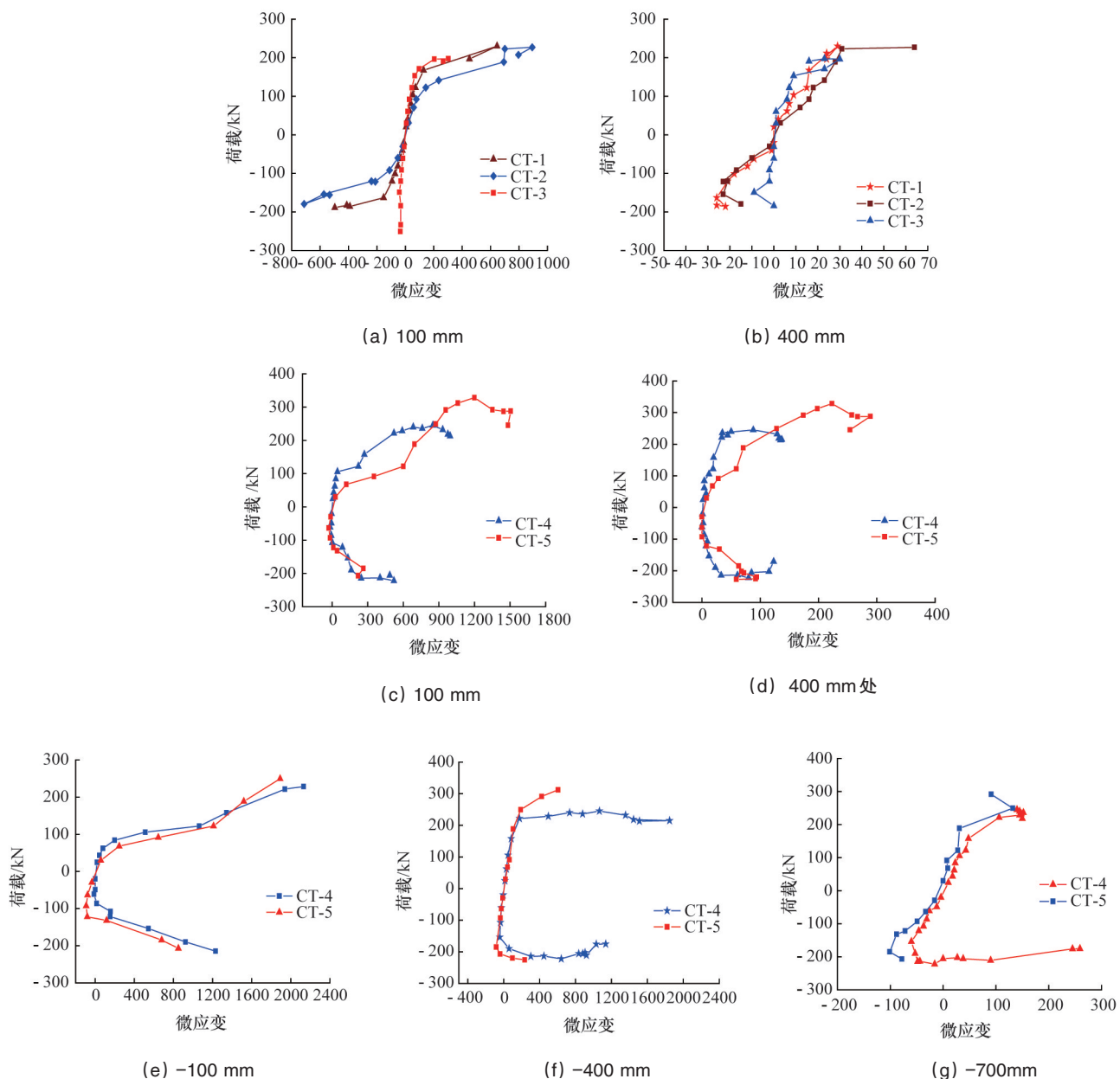


图7 锚固钢筋应变对比

Fig. 7 Comparison of strains in anchorage reinforcing bars

由图7(e)、(f)、(g)知,在加载初期和中期,桩身部分的锚固钢筋受力差不多,CT-4、CT-5的荷载-微应变曲线几乎重合,即安放钢筋笼的试件,钢筋在桩身部分的受力性能一样,不会因锚固方式的不同而受力不同;在节点破坏时,组合体试件节点CT-4桩身中性轴发生移动,使所测锚固钢筋始终处于受拉状态,即产生拉应力。相同荷载作用下,承台处锚固钢筋在距桩身端板100 mm处,微应变较大,随着距承台的距离增大应变逐渐缩小,这说明在承台内锚固钢筋的受力沿着锚固钢筋向下受力逐渐变小,距承台节点越近处,受力越大。

## 6 结论

1) 通过连接板焊接锚固钢筋的试件,试件破坏时,节点表现一定的脆性,试件发生脆断;倾角锚固钢筋能延缓试件裂缝的发展,提高承载能力。

2) 在桩身内安放钢筋笼的组合体试件节点处桩身与承台破坏较均匀,试验加载过程中,试件表现出较好的延性,且承载力比其他试件好。

3) 对于所有组合体试件,裂缝首先在桩身与承台交接处即节点处出现,节点最终破坏时锚固钢筋是直角的试件锚固钢筋被拔出,锚固钢筋是倾角的试件锚固钢筋没有被拔出,钢筋笼在试件受力过程中充分发挥了作用,有效缓解了预制桩身与承台的刚度差异,且倾角锚固的试件比直角锚固的试件效果更好。

### 参考文献(References)

- [1] 施峰. PHC管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 95-99.  
Shi Feng. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 95-99.
- [2] Phoon K K, Quek S T, Chow Y K, et al. Reliability analysis of pile settlement[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1990, 116(11): 1717-1734.

- [3] 吴江斌, 楼志军, 宋青军. PHC管桩桩身抗剪承载力试验与计算方法研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 164-167.  
Wu Jiangbin, Lou Zhijun, Song Qingjun. Test and calculation method research on the shear capacity of PHC pipe piles[J]. Building Structure, 2012, 42(5): 164-167.
- [4] 曾庆响, 梁焕华, 李法尧, 等. 预应力高强混凝土管桩正截面受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 114-116.  
Zeng Qingxiang, Liang Huanhua, Li Fayao, et al. Experimental research on the flexural behavior of prestressed high strength concrete pipe piles [J]. Building Structure, 2010, 40(4): 114-116.
- [5] 涂涛. 预应力混凝土管桩承载性能的研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
Tu Tao. Study on the vertical bearing behavior of prestressed concrete pipe pile[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [6] 刘宁. 预应力混凝土管桩水平承载力现场试验及数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.  
Liu Ning. In-situ test and numerical simulation of horizontal bearing capacity on prestressed concrete pipe pile[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [7] 秦鹏, 肖岩, 周云, 等. 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, 2013, 33(5): 190-196.  
Qin Peng, Xiao Yan, Zhou Yun, et al. Research on CFRP confined circular concrete-filled steel tubular columns subjected to cyclic lateral forces[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 190-196.
- [8] 天津市勘察院. DB 29-110-2010 预应力混凝土管桩技术规程[S]. 天津: 天津市城乡建设和交通委员会, 2010.  
Tianjin Exploration Institute. DB29-110-2010 Technical code of prestressed concrete piles[S]. Tianjin: Tianjin Urban and Rural Construction and Transportation Commission, 2010.
- [9] 全国水泥制品标准化技术委员会. GB 13476—2009 先张法预应力混凝土管桩[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
National Cement Products Standardization Technical Committee. GB 13476—2009 Pre-tensioned prestressed concrete piles[S]. Beijing: Standard Press of China, 2009.
- [10] 中国建筑标准设计研究院. 10G409 国家标准设计图集《预应力混凝土管桩》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
China Institute of Building Standard Design. 10G409 National standard design atlas "Prestressed concrete piles"[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

(责任编辑 赵业玲)

### ·学术动态·



中国科学技术协会

## 中国科协2014年度事业发展统计:科技开放与交流

截止2014年底,各级科协及两级学会加入国际民间科技组织677个。其中,所属全国学会加入的组织405个,占59.8%,省级学会加入的组织252个,占37.2%;在国际民间科技组织中任职专家899人。其中,所属全国学会任职专家527人,占58.6%,省级学会任职专家351人,占39%。

各级科协和两级学会参加国际科学计划335项,比上年增加116项。其中,两级学会参加的国际科学计划314项,占94%;促成科技合作项目993项,比上年增加195项。引进优质科技资源434项,占合作项目的44%。其中,两级学会促成科技合作项目669项,占67%;参加国外、港澳台地区科技活动3.2万人次;接待国外、港澳台地区专家学者3.1万人次。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16431676.html>。