

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.005

填芯对PHC管桩抗弯性能影响研究

王威, 刘杰, 王宁, 仵永杰, 王勤富

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为研究填芯对PHC管桩抗弯性能的影响, 基于弹性理论及叠加原理, 推导出填芯PHC管桩抗弯承载力计算公式; 同时对填芯与不填芯PHC管桩进行对比研究。研究表明, 素混凝土填芯对PHC管桩抗弯承载力约能提高16%, 钢筋混凝土填芯对PHC管桩抗弯承载力约能提高35%。该结果可作为水平荷载作用下填芯PHC管桩设计的参考依据。

关键词: 填芯PHC管桩; 抗裂弯矩; 极限弯矩; 抗弯承载力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)05-0019-04

Study on Bending Performance of PHC Pipe Piles with Concrete Core

Wang Wei, Liu Jie, Wang Ning, Wu Yongjie, Wang Qinfu

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For the study of the effect of filled core on the performance of PHC pipe pile bending, deduced the formula of flexural bearing capacity of filled core PHC pipe pile via elastic theory and superposition principle, and comparatively studied the PHC pipe piles with filled core and without filled core. The results showed that the plain concrete filled core improved the flexural bearing capacity of PHC pipe pile by about 16%, and the reinforced concrete filling core improved the capacity about 35%. It can be used as a reference for core filled PHC pipe pile design under the horizontal loading.

Keywords: core filled PHC pipe pile; cracking moment; limit moment; bending bearing capacity

0 引言

预应力高强度混凝土 (prestress high concrete, PHC) 管桩, 是采用先张法预应力离心成型, 并在 10 个大气压 (1.0 MPa)、180 °C 蒸汽养护下制成的空芯圆筒型混凝土构件, 混凝土强度不小于 C80。其桩身混凝土强度较高, 承载性能良好, 能适用于一般性土层, 也可用于砂层和强风化岩层。其具有施工速度快, 检测方便, 施工现场文明整洁; 能以工厂化、专业化、标准化生产, 桩身质量可靠; 运输吊装方便, 接桩快捷; 机械化施工程度高, 操作简单, 易控制等优点, 被各类工程建设广泛采用^[1]。随着工程应用的

不断深入, 逐渐发现各类桩型的承载性能存在较大差异, 于是学者们对 PHC 管桩的承载性状等方面进行了研究。目前对管桩的研究主要集中在空芯管桩的竖向承载力性能、抗剪性能、抗弯性能等方面。GB 13476—2009《先张法预应力混凝土管桩》^[2]对 PHC 管桩的竖向承载力及抗弯、抗剪承载力值给出了明确的规定。然而对填芯管桩的相关研究却还不够完善。宋寅^[3]对钢筋混凝土填芯管桩的抗拔、抗剪、抗弯进行了较详细的研究, 得出了在管桩中填筑钢筋混凝土可以提高其承载力。曾文^[4]对缺陷的管桩填芯补强进行了研究, 得出对管桩缺陷部位进行钢筋混凝土填芯的具体方案和措施以弥补管桩的

收稿日期: 2015-08-17

基金项目: 湖南省自然科学基金-株洲联合基金资助项目 (2015JJ5017)

作者简介: 王威 (1989-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为土与结构的相互作用,

E-mail: 1013183931@qq.com

缺陷。刘永超等^[5]通过对管桩接头处填芯钢筋混凝土的研究,提出了通过填芯来提高管桩的受拉性能。B. Suprenant等^[6-7]对钢筋混凝土填芯大直径管桩承载性状进行了研究,获得了一些有益的结论。但对填芯管桩的研究还不够完善,理论公式的探讨不够全面。

本文基于弹性理论及叠加原理,推导填芯PHC管桩抗弯承载力计算公式,探讨填芯对PHC管桩抗弯性能的影响。对填芯与不填芯PHC管桩进行对比试验,以验证填芯PHC管桩抗弯承载力计算公式的可靠性。

1 素混凝土填心PHC管桩抗裂弯矩

假设填芯部分与管桩内表面紧密接触且无相对滑移。因填芯管桩的应力分布较复杂,难以对其弯矩进行精确计算,为此本文在推导抗裂弯矩计算公式时,采用管桩与填芯部分二者弯矩简化叠加组合的方法。

由GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[8]可知,按正截面应变保持平面的假定,根据弹性理论应力和弯矩的关系,管桩开裂时受拉区混凝土的拉力为主要承载力,并考虑其塑性性能对抗裂承载力的影响,可得非填芯管桩的抗裂弯矩计算式为

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + f_{tk})W_o, \quad (1)$$

式中: σ_{pc} 为管桩混凝土有效预压应力;

f_{tk} 为管桩混凝土轴心抗拉强度标准值;

W_o 为管桩换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

填芯管桩在荷载作用下,先经过弹性阶段,然后进入开裂阶段。在管桩开始出现裂缝时,受拉区边缘的混凝土达到极限拉应变 ε_1 。由弹性理论可得其极限拉应变为

$$\varepsilon_1 = \frac{f_{t桩} + \sigma_{pc}}{E_{c1}}, \quad (2)$$

式中: $f_{t桩}$ 为管桩开裂时边缘混凝土拉应力;

E_{c1} 为管桩混凝土弹性模量。

管桩中填充的混凝土与管桩有较好的接触和摩擦,两者之间几乎没有相对位移。根据平面假定,可以得出填芯受拉区边缘应变 ε_2 为

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{r_2}{r_1}, \quad (3)$$

式中: r_1 为管桩的外环半径;

r_2 为管桩的内环半径。

联立式(2)和式(3),并由弹性理论可得

$$f_{t芯} = \frac{(f_{t桩} + \sigma_{pc})r_2 E_{c2}}{E_{c1}r_1}, \quad (4)$$

式中: E_{c2} 为填芯混凝土弹性模量;

$f_{t芯}$ 为管桩开裂时桩芯边缘处的拉应力。

由材料力学理论可得管桩混凝土截面惯性矩

$$I_{桩} = A_{桩} i_{桩}^2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \left(\frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4} \right)^2 = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}, \quad (5)$$

式中: $A_{桩}$ 为管桩截面面积;

$i_{桩}$ 为管桩截面惯性半径;

d, D 分别为管桩的内、外直径。

在管桩中,由于钢筋的主筋均分布在直径为 D_s 的圆上,其直径较小且存在一定的间距,管桩中钢筋的截面惯性矩可简化为

$$I_{筋} = A_{筋} i_{筋}^2 = n \frac{\pi D_{筋}^2}{4} \cdot \left(\frac{D_s}{2\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{n\pi D_{筋}^2 D_s^2}{32}, \quad (6)$$

式中: $A_{筋}$ 为管桩钢筋截面面积;

$i_{筋}$ 为管桩中钢筋截面惯性半径;

D_s 为纵向预应力钢筋重心所在圆周直径;

n 为管桩纵向主筋的数量。

根据截面抵抗矩公式 $W = \frac{I}{R}$,可得管桩换算截面抵抗矩^[9]

$$W_o = \frac{2I_{桩}}{D} + \frac{2(E_s/E_c - 1)I_{筋}}{D} = \frac{\pi(D^4 - d^4) + 2n\pi(E_s/E_c - 1)D_{筋}^2 D_s^2}{32D}, \quad (7)$$

$$W_{o芯} = \frac{2I}{d} = \frac{\pi d^3}{32}. \quad (8)$$

式(7)~(8)中: E_s/E_c 为管桩钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;

$D_{筋}$ 为纵向钢筋的直径;

$W_{o芯}$ 为管桩填芯混凝土换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

通过叠加可得填芯管桩的抗裂弯矩计算式为

$$M_{cr}' = (\sigma_{pc} + f_{t桩})W_o + f_{t芯}W_{o芯}. \quad (9)$$

填芯管桩抗裂弯矩计算步骤为:将管桩开裂时边缘混凝土拉应力 $f_{t桩}$ 代入式(4),得出 $f_{t芯}$,再根据式(7)和式(8)得出 W_o 和 $W_{o芯}$,最后将其代入式(9),得到素混凝土填芯管桩抗裂弯矩。

2 管桩的极限弯矩

非填芯管桩的极限弯矩^[10]为

$$M_u = \alpha_1 f_{ck} A_{桩} (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi} + f'_{py} A_{筋} D_s \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi} + (f_{ptk} - \sigma_{pc}) A_{筋} D_s \frac{\sin \pi \alpha}{2\pi}, \quad (10)$$

式中： α_1 为混凝土矩形应力图的应力值与轴心抗压强度设计值之比，对C60取 $\alpha_1=0.98$ ，C80取 $\alpha_1=0.94$ ，在C60，C80之间的按线性内插法确定；

f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值；
 f'_{py} 为预应力钢筋的抗压强度设计值；
 f_{ptk} 为预应力钢筋强度标准值；
 α 为受压区混凝土面积与截面全面积之比，

$$\alpha = \frac{0.55\sigma_{pc}A_{筋} + 0.45f_{ptk}A_{筋}}{\alpha_1f_{ck}A_{桩} + f'_{py}A_{筋} + 0.45(f_{ptk} - \sigma_{pc})A_{筋}}; \quad (11)$$

α_1 为受拉区纵向预应力钢筋面积与全部纵向预应力钢筋面积之比，

$$\alpha_1 = 0.45(1 - \alpha). \quad (12)$$

根据混凝土结构设计原理中正截面受弯构件的假设^[8]，受拉区混凝土的拉应力忽略不计，因而管桩在填筑素混凝土后，计算其极限抗弯承载力时只考虑混凝土的受压承载力。

当中和轴在管桩壁上时，填芯部分的混凝土全部受拉，此时填筑的混凝土无承载力，因而无需考虑。

当中和轴在管桩的填芯部分时，受压区混凝土面积与全截面面积之比 α 应大于中和轴在管桩内径边缘时的临界值 $\alpha_0 = \arccos \frac{2r_2}{\pi(r_1 + r_2)}$ ，如图1所示。其中

①和②分别为管桩、填芯混凝土受压区应力，③为管桩钢筋受拉、受压应力。在极限荷载的作用下填芯混凝土部分受压，其受压部分面积为

$$A_{芯} = r_2^2(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha). \quad (13)$$

填芯混凝土的合压力为

$$F_{芯} = A_{芯}f_{ck芯} = r_2^2(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha)f_{ck芯}, \quad (14)$$

式中 $f_{ck芯}$ 为填芯混凝土轴心抗压强度。

填芯混凝土受压区到截面中心的距离为

$$z = \frac{2r_2 \sin^3 \pi\alpha}{3(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha)}. \quad (15)$$

填芯受压区混凝土的合压力对截面中心的内力矩

$$M_{芯} = F_{芯}z = r_2^2(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha)f_{ck芯} \frac{2r_2 \sin^3 \pi\alpha}{3(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha)} = \frac{2}{3}f_{ck芯}r_2^3 \sin^3 \pi\alpha. \quad (16)$$

通过叠加，可得素混凝土填芯管桩的极限弯矩公式为

$$M'_u = M_u + M_{芯}$$

$$\alpha_1 f_{ck} A_{桩} (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi\alpha}{2\pi} + f'_{py} A_{筋} D_s \frac{\sin \pi\alpha}{2\pi} + (f_{ptk} - \sigma_{pc}) A_{筋} D_s \frac{\sin \pi\alpha_1}{2\pi} + \frac{2}{3} f_{ck芯} r_2^3 \sin^3 \pi\alpha. \quad (17)$$

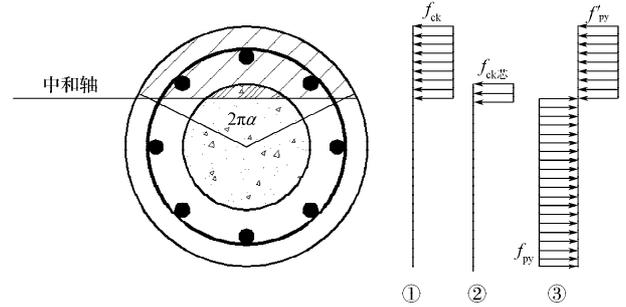


图1 受弯填芯管桩正截面承载力计算简图
 Fig. 1 Normal section bearing capacity calculation diagram of filled core pipe pile

3 素混凝土填芯与非填芯管桩抗弯性能对比

先根据GB 13476—2009《先张法预应力混凝土管桩》^[2]制作2根A型PHC原型试验桩，一根为填芯管桩，另一根为非填芯管桩。其外径均为300 mm，内径160 mm，长5 m；预应力钢筋为6Φ7.1，分布圆直径 D_s 为230 mm；管桩采用C80混凝土，填芯采用C30混凝土。

试验梁采用简支梁，用助动器在梁上对称施加集中荷载。按照GB 13476—2009《先张法预应力混凝土管桩》^[2]的逐级方式进行加载。先按其抗裂弯矩的20%加载至抗裂弯矩的80%；然后按其抗裂弯矩的10%加载至抗裂弯矩；再按其抗裂弯矩的5%加载至开裂；最后按其极限弯矩的5%，逐级加载至出现裂缝宽度达到1.5 mm，或者受拉钢筋断裂，或者受压区混凝土破坏，只要出现其中一种情况，管桩破坏便停止加载。试验加载装置如图2所示。

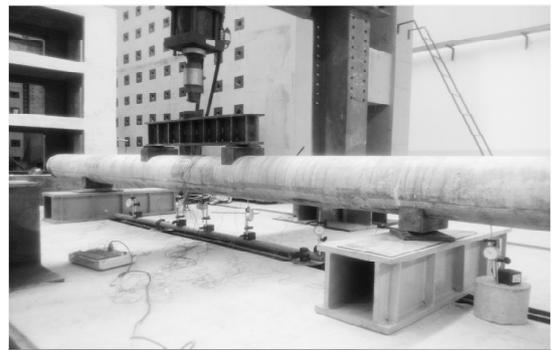


图2 管桩抗弯性能加载装置图
 Fig. 2 Loading device diagram for bending resistance of filled core pipe pile

4 试验结果与计算结果对比分析

表1为管桩抗裂弯矩与极限弯矩的试验结果与计算结果。

表1 管桩弯矩试验与计算结果
Table 1 Pipe pile bending test and calculation results

桩型	抗裂弯矩/(kN·m)		极限弯矩/(kN·m)	
	试验值	计算值	试验值	计算值
空芯桩	28.62	27.83	39.09	40.38
填芯桩	35.59	29.06	51.66	46.92

由表可以算出：填芯管桩抗裂弯矩计算值与试验值相比约相差18%，极限弯矩约相差9%。这可能是因为在建立理论公式时，未考虑受拉区混凝土的有利作用，特别是填芯混凝土在高强度管桩管壁的约束下，处于复杂应力状态，其抗拉抗压性能有一定提高所致。同时还可算出：填芯管桩与不填芯管桩相比，抗裂弯矩试验值约提高24%，极限弯矩试验值约提高32%。由此可知，填芯能有效提高管桩的抗弯承载力，改善水平荷载作用下的承载性能。

素混凝土填芯管桩、钢筋混凝土填芯管桩、空芯管桩有关参数与抗弯承载力理论计算结果如表2所示。

表2 3种管桩有关参数与抗弯承载力理论计算结果
Table 2 The related parameters and bending bearing capacity calculation results of 3 pipe piles

管桩类型	桩径/mm	壁厚/mm	型号	桩身混凝土等级
空芯管桩	300	70	A	C80
素混凝土填芯管桩	300	70	A	C80
钢筋混凝土填芯管桩	300	70	A	C80

管桩类型	填芯混凝土等级	填芯配筋	抗裂弯矩/(kN·m)	极限弯矩/(kN·m)
空芯管桩			27.83	40.38
素混凝土填芯管桩	C30		29.06	46.92
钢筋混凝土填芯管桩	C30	6Φ12	30.12	54.68

由表可以算出：素混凝土填芯管桩、钢筋混凝土填芯管桩与不填芯管桩相比，抗裂弯矩约分别提高4.4%和8.2%，极限弯矩约分别提高16%和35%。由此可知，填芯能有效提高管桩的承载能力。从抗弯角度看，采用钢筋混凝土填芯比采用素混凝土填芯效果更好。

5 结语

基于弹性理论及叠加原理推出了填芯管桩抗弯承载力计算公式，为管桩在水平荷载作用下的设计计算提供了理论参考依据。填芯能有效提高管桩的抗弯承载力，采用钢筋混凝土填芯比采用素混凝土

填芯效果更好。填芯对管桩的抗剪承载力的影响有待进一步研究。

参考文献：

- [1] 邓友生,孙宝俊,郭忠强. 预应力混凝土管桩的应用研究及发展前景[J]. 建筑技术, 2003, 34(4): 263-266.
Deng Yousheng, Sun Baojun, Wu Zhongqiang. Research on the Use of Prestressed Concrete Tubular Pile and Prospects Thereof [J]. Architecture Technology, 2003, 34(4): 263-266.
- [2] 匡红杰, 蒋元海, 严志隆, 等. 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: 9-21.
Kuang Hongjie, Jiang Yuanhai, Yan Zhilong, et al. GB 13476—2009 Prestressed Concrete Pipe Piles[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 9-21.
- [3] 宋寅. 预应力混凝土管桩填芯混凝土抗弯试验研究及理论分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
Song Yin. Experimental Research & Theoretical Analysis on Resistance to Bending of Core Concrete of Prestressed Concrete Pipe Pile[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [4] 曾文. PHC管桩桩身缺陷的填芯补强[J]. 建筑技术, 2010, 41(10): 907-909.
Zeng Wen. Filing-Core Strengthening to Disfigurement PHC Pile[J]. Architecture Technology, 2010, 41(10): 907-909.
- [5] 刘永超, 郑刚, 顾晓鲁. 抗拔管桩及其填芯混凝土受拉结构性能试验[J]. 天津大学学报, 2012, 45(6): 487-492.
Liu Yongchao, Zheng Gang, Gu Xiaolu. Tensile Performance Tests of Uplift Pile and Core Concrete[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(6): 487-492.
- [6] Suprenant B, Tampa F. Bonding New Concrete to Old[J]. Concrete Construction, 1988, 33(7): 676-680.
- [7] Paik K, Salgado R, Lee J, et al. Behavior of Open-and Closed-Ended Pipes Driven into Sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 296-309.
- [8] 赵基达, 徐有为, 黄小坤, 等. GB 50010—2010混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 34-80.
Zhao Jida, Xu Youwei, Huang Xiaokun, et al. GB 50010—2010 Code for Concrete Structure Design[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 34-80.
- [9] 宋子康, 蔡文安. 材料力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001: 167-189.
Song Zikang, Cai Wen'an. Mechanics of Materials[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001: 167-189.
- [10] 汤关祚, 匡红杰, 蒋元海, 等. 03SG409—预应力混凝土管桩[S]. 北京: 中国建筑标准设计研究院出版社, 2008: 4-10.
Tang Guanzuo, Kuang Hongjie, Jiang Yuanhai, et al. 03SG409—2003 Prestressed Concrete Pipe Pile[S]. Beijing: China Institute of Building Standard Design & Research Press, 2008: 4-10.

(责任编辑: 邓光辉)