

文章编号:1671-6833(2013)06-0080-05

混合配筋预应力混凝土管桩抗弯刚度模型研究

王新玲¹, 杜琳², 黄伟东³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001; 3. 郑州市市政工程管理处, 河南 郑州 450002)

摘要: 混合配筋预应力混凝土管桩(PRC)是在先张法预应力混凝土管桩(PC)基础上,采用预应力钢筋与非预应力普通钢筋间隔对称布置而形成的一种新型预应力管桩. 本文在受弯刚度模型试验的基础上,采用通用有限元软件对混合配筋预应力混凝土管桩的抗弯刚度进行了计算分析,通过比较开裂前刚度和开裂后刚度的有限元计算值、试验值和按现行混凝土规范公式的计算值,提出了适应于混合配筋管桩的开裂前和开裂后抗弯刚度的理论计算公式.

关键词: 混合配筋预应力混凝土管桩(PRC); 抗弯刚度; 有限元分析; 理论计算

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.020

0 引言

预应力混凝土管桩发明于国外,在国内的生产及应用无论是管桩规格型号,还是产量及使用寿命在全球都是第一,但在新产品开发及应用方面创新较慢,生产模式落后,基本上引用的还是日本 80 年代的技术,远不能满足社会发展的需要^[1]. 查阅相关文献表明^[2-6],普通的预应力混凝土管桩在实际工程中存在着诸多不足和缺点,尤其是在高地震烈度地区,当基础埋深较浅时,管桩的抗水平荷载能力较差而被限制使用;基础工程中管桩用作抗拔桩,被普遍认为耐久性不足;管桩仅在极少数的基坑工程中得到使用,主要原因是管桩抗弯能力不足、延性较差. 故在我国现有的经济发展水平和桩技术基础上发展新型混合配筋预应力管桩,具有较好的可操作性和较大的应用空间. 为了解决普通预应力混凝土管桩抗弯能力及延性差等问题,由本课题组^[7]设计了在混凝土中采用预应力钢筋配合非预应力钢筋形成水平承载混凝土复合截面,试验研究表明,新型管桩,混合配筋预应力管桩(PRC 桩)较普通的预应力具有更好的抗弯承载力、延性及耐久性. 目前,普通预应力混凝土管桩抗弯刚度计算公式,仍采用《混凝土结构设计规范》中刚度公式,对混合配筋预

应力管桩是否适用,是有待解决的重要问题. 笔者基于前期试验结果^[5-6],采用有限元软件,对混合配筋预应力管桩受弯试验全过程进行模拟分析,同试验结果进行对比,研究适应于 PRC 桩开裂前、后抗弯刚度理论计算公式.

1 混合配筋预应力混凝土管桩模型

1.1 混合配筋预应力混凝土管桩试验概况

文献[7]试验采用 $D = 500, 600$ mm 两种直径、长度为 8 m(原型长度)管桩,图 1 和图 2 分别为混合配筋试验管桩(PRC)配筋图和试验加载示意图;试验桩的详细参数见表 1. 笔者基于试验结果,对 PRC 型桩进行数值模拟分析.

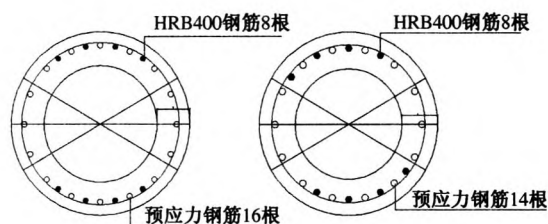


图 1 PRC 试验管桩配筋图

Fig. 1 The reinforcement figure of PRC pipe piles

1.2 混合配筋预应力管桩几何和结构模型

针对混合配筋预应力管桩采用分离式进行建

收稿日期:2013-05-12;修订日期:2013-07-06

基金项目:河南省重点科技攻关计划项目(132102310277)

作者简介:王新玲(1963-),女,河南新乡人,郑州大学教授,博士,主要从事结构工程方面的研究,E-mail:xinling-wang@zhu.edu.cn.

表 1 试验桩参数表
Tab. 1 The parameter table of test piles

规格型号	混凝土	预应力 钢筋	非预应力 钢筋	箍筋
PRC500 * 12φ10.7	C60	12φ10.7	8φ12	φ ^b 5@80
PRC500 * 14φ10.7	C60	14φ10.7	8φ12	φ ^b 5@80
PRC500 * 16φ10.7	C60	16φ10.7	8φ12	φ ^b 5@80
PRC600 * 16φ10.7	C60	16φ10.7	8φ12	φ ^b 5@80
PC 600 * 16φ10.7	C60	16φ10.7	—	φ ^b 5@80
PC 500 * 16φ10.7	C60	16φ10.7	—	φ ^b 5@80

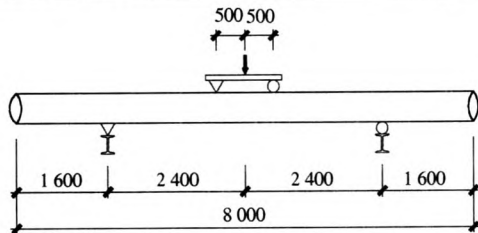


图 2 管桩抗弯试验加载示意图
Fig. 2 The bending test load figure of pipe piles

模,混凝土采用 Solid65 单元及 Concrete 材料,钢筋(包括预应力筋、非预应力筋和箍筋)采用 link8 单元,垫块采用 Solid45 单元;对预应力筋和非预应力采用实体筋法进行建模,在选取预应力的施加方法时采用初始应变法.因笔者研究的混合配筋预应力管桩考虑螺旋箍筋的作用,采用节点耦合的方法建模工作量较大,故采用约束方程法来进行建模处理^[8].结构模型如图 3 所示.



图 3 混合配筋管桩和垫块的单元网格模型
Fig. 3 The grid model of PRC Pipe Piles and pad

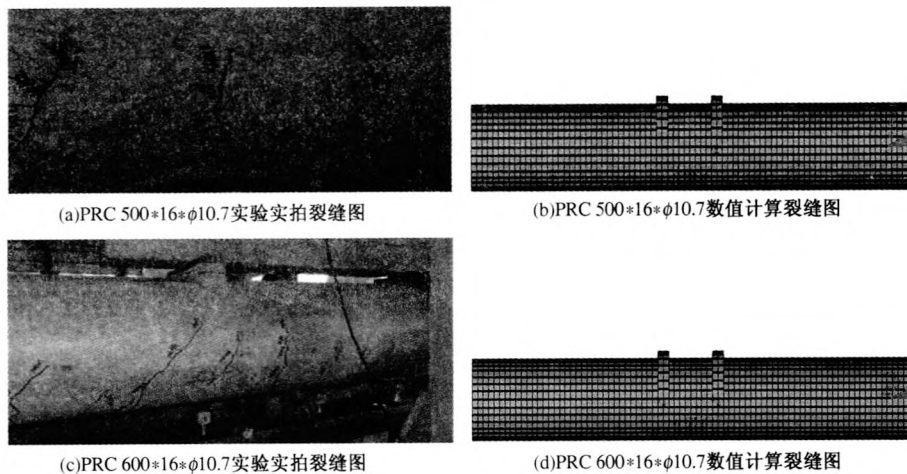


图 4 PRC 管桩试验和数值计算裂缝图
Fig. 4 The crack of PRC based on tests and finite element analysis

1.3 材料模型的选取

混凝土采用多线性随动强化(MISO)模型,通过输入 11 个点来定义如下的混凝土非线性本构关系.对混凝土单轴受压的应力-应变关系曲线,笔者在上升段采用 GB 50010—2010 规定的公式,下降段则采用 Hongnestad 的处理方法.钢筋(HRB400 钢筋和预应力钢筋)采用双线性随动强化模型(BKIN),其中 HRB400 钢筋弹性模量 2×10^5 MPa,预应力钢筋弹性模量 1.95×10^5 MPa.

1.4 结构模型加载、约束与求解

选取垫块上一定数量的节点施加集中荷载,约束时采用简支梁的位移约束形态,求解时采用位移收敛准则.

2 混合配筋预应力管桩计算与试验比较

2.1 裂缝图的比较

图 4 为 2 根管桩试验和有限元计算的裂缝图,从图中可以看出,有限元计算的裂缝位置和试验结果一致.其它管桩计算裂缝位置和试验结果均一致,限于篇幅,省略.

2.2 数值计算挠度和试验挠度比较

图 5 给出了试验桩型荷载挠度的有限元计算值和试验结果比较.结果表明,梁跨中的荷载-挠度曲线有限元计算值与试验值符合程度较好,说明,可以用有限元数值模拟方法分析混合配筋预应力管桩抗弯刚度,以弥补试验数量及类型的不足.

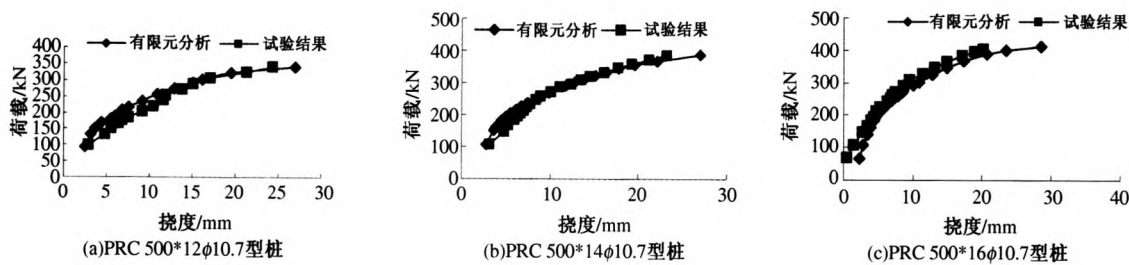


图 5 管桩荷载—挠度曲线图
Fig. 5 The load-deflection curve of PRC

3 混合配筋预应力管桩抗弯刚度理论分析

采用 3 种方法研究混合配筋管桩抗弯刚度:

(1) 规范法计算: 根据《混凝土结构设计规范》规定的不允许出现裂缝的预应力混凝土受弯构件和允许出现裂缝的预应力混凝土受弯构件的抗弯刚度计算公式来进行计算.

(2) 试验值计算: 由于短期刚度 B_s 相当于 EI , 参照试验加载方案, 根据结构力学公式 (静定结构位移计算) 得出的刚度公式来进行计算.

$$B_s = \frac{2.278\ 333 \times 10^{12} M}{f} \tag{1}$$

(3) 有限元计算: 利用有限元分析所得挠度计算值, 同样根据上述公式 (1) 来进行计算.

3.1 开裂前刚度理论计算值与试验计算值、解析值的对比

表 2 列出了各试验桩开裂前刚度的试验值、有限元计算值及规范公式计算值, 比较结果可以看出, 对于 PRC 500 直径的桩和 PRC 600 直径的桩来说, 用有限元分析结果算出来的刚度值和试验结果算出来的刚度值符合良好, 比值平均为 1.17, 标准差为 0.07, 变异系数为 0.06. 而运用混凝土结构设计规范算出来的理论刚度值与试验结

果算出来的刚度值相比偏大, 对于 500 mm 直径的桩来说比值平均为 1.36; 对于 600 mm 直径的桩来说比值平均为 1.93; 均偏于不安全. 故针对混合配筋预应力管桩, 需要对混凝土设计规范中的开裂前理论刚度公式进行修正.

3.2 开裂后刚度规范计算值与试验计算值、有限元值的对比

表 3 列出了各试验桩开裂后刚度的试验值、有限元计算值及规范公式计算值, 表中数据同样表明, 用有限元分析结果算出来的刚度值和试验结果算出来的刚度值符合良好, 比值平均值为 1.03, 标准差为 0.1, 变异系数为 0.1. 而运用混凝土结构设计规范算出来的理论刚度值与试验结果算出来的刚度值相比偏小. 故针对混合配筋预应力管桩来说需要对混凝土设计规范中的开裂后理论刚度公式进行修正.

4 混合配筋预应力管桩抗弯刚度公式

4.1 开裂前抗弯刚度公式

分析 PRC 桩的抗弯刚度, 应和其外径、内径以及壁厚相关, 基于混凝土结构设计规范的刚度计算公式进行修正, 提出开裂前抗弯刚度 B_s 计算公式 (2).

表 2 开裂前刚度规范计算值与试验值、有限元值的对比

Tab. 2 The stiffness Comparisons of coda and experimental and analytical value before cracking

桩型	刚度规范计算值		刚度试验计算值		刚度有限元计算值		规范值/	有限元值/
	荷载/kN	刚度值/ 10^{13}	荷载/kN	刚度值/ 10^{13}	荷载/kN	刚度值/ 10^{13}	试验值	试验值
PRC 500 * 12φ10.7	176.82	8.17	176.82	5.63	179.55	7.07	1.45	1.24
	185.56	8.17	185.56	5.28	189.00	6.82	1.55	1.29
PRC 500 * 14φ10.7	223.45	8.17	223.45	6.54	226.01	7.19	1.25	1.10
	233.14	8.17	233.14	6.47	236.78	6.83	1.26	1.06
PRC 500 * 16φ10.7	230.71	8.17	230.71	6.16	248.40	7.57	1.33	1.23
	241.14	8.17	241.14	6.14	259.20	7.19	1.33	1.17
PRC 600 * 16φ10.7	307.79	16.30	307.79	8.54	298.35	10.00	1.91	1.17
	322.92	16.30	322.92	8.34	309.83	9.55	1.95	1.15

表 3 开裂后刚度规范计算值与试验计算值、有限元值的对比

Tab.3 the stiffness Comparisons of the coda and experimental and the analytical value after cracking

桩型	规范计算刚度值		试验计算刚度值		规范值/ 试验值	有限元计算刚度值		有限元值/ 试验值
	荷载/kN	刚度值/10 ¹³	荷载/kN	刚度值/10 ¹³		荷载/kN	刚度值/10 ¹³	
PRC 500 * 12φ10.7	254.54	3.66	254.54	4.63	0.79	255.15	5.07	1.10
	289.03	3.29	289.03	4.14	0.79	292.95	4.20	1.01
	306.28	3.16	306.28	3.88	0.81	302.40	4.04	1.04
PRC 500 * 14φ10.7	345.97	3.1	345.97	4.23	0.73	344.40	4.19	0.99
	371.04	2.97	371.04	3.79	0.78	365.93	3.58	0.94
	383.58	2.92	383.58	3.58	0.82	387.45	3.09	0.86
PRC500 * 16φ10.7	257.16	4.36	257.16	5.98	0.73	259.20	7.19	1.20
	279.35	3.95	279.35	5.65	0.70	270.00	6.88	1.22
	496.14	2.66	496.14	3.67	0.72	—	—	—
PRC 600 * 16φ10.7	344.73	8.74	344.73	9.22	1.05	344.25	8.97	1.02
	374.11	7.78	374.11	8.58	0.91	378.68	8.12	0.95
	432.87	5.44	432.87	6.84	0.80	—	—	—

$$B_s = 0.85 \frac{r - r_1}{r_1} E_c I_0. \tag{2}$$

式中: r, r_1 为管桩环形截面的外环、内环半径; E_c 为混凝土弹性模量; I_0 为管桩换算截面惯性矩.

4.2 开裂后抗弯刚度公式

同理,提出开裂后抗弯刚度计算公式(3).

$$B_s = \frac{0.75r}{r_1} \cdot \frac{0.85E_c I_0}{\kappa_{cr} + (1 - \kappa_{cr}) \omega}. \tag{3}$$

式中: κ_{cr} 和 ω 的取值分别见《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010).

表 4 和表 5 列出了笔者提出的开裂前和开裂后 PRC 管桩抗弯刚度的理论计算公式和试验结果的比较. 其中,开裂前比值的平均为 0.96,变异系数为 0.11;开裂后比值的平均值为 0.97,变异系数为 0.05,和试验结果吻合良好,可以用于计算新型混合配筋管桩抗弯刚度计算.

表 4 开裂前刚度理论公式计算值与试验值的对比

Tab.4 Comparisons of calculated values with stiffness formula proposed and test

桩型	开裂前刚度计算值/10 ¹³ 及比较			
	荷载/kN	B_{s1}	B_{s1}^t	B_{s1}/B_{s1}^t
PRC 500 * 12φ10.7	176.82	5.45	5.63	0.97
	185.56	5.45	5.28	1.03
PRC 500 * 14φ10.7	223.45	5.45	6.54	0.83
	233.14	5.45	6.47	0.84
PRC 500 * 16φ10.7	230.71	5.45	6.16	0.88
	241.14	5.45	6.14	0.89
PRC 600 * 16φ10.7	307.79	9.44	8.54	1.11
	322.92	9.44	8.54	1.13

注: B_{s1} 为公式(2)计算值; B_{s1}^t 为开裂前刚度试验值.

表 5 开裂后刚度理论公式计算值与试验值对比

Tab.5 Comparisons of calculated values with stiffness formula proposed and test after cracks

桩型	开裂后刚度计算值/10 ¹³			刚度比较
	荷载/kN	B_{s2}	B_{s2}^t	B_{s2}/B_{s2}^t
PRC 500 * 12φ10.7	254.54	4.58	4.63	0.99
	289.03	4.11	4.14	0.99
PRC 500 * 14φ10.7	345.97	3.88	4.23	0.92
	371.04	3.71	3.79	0.98
PRC 500 * 16φ10.7	257.16	5.45	5.98	0.91
	279.35	4.94	5.65	0.87
PRC 600 * 16φ10.7	344.73	9.21	8.58	1.07
	374.11	6.44	6.84	0.94

注: B_{s2} 为公式(3)计算值; B_{s2}^t 为开裂后刚度试验值.

4.3 PRC 700 型管桩有限元分析

笔者提出的刚度计算公式是否适应于 PRC 700 直径的桩刚度计算,需通过有限元分析验证.

图 6 所示绘出了刚度公式(2)和(3)计算的 PRC 700 型桩挠度与有限元分析所得的挠度计算值. 由对比分析可知,笔者提出的抗弯刚度公式计算值与有限元计算值符合良好.

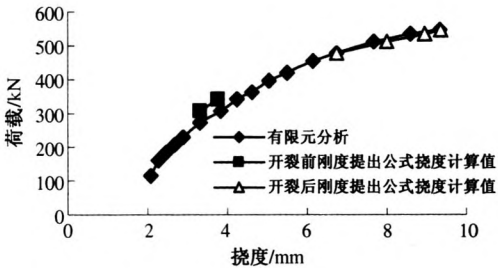


图 6 PRC 700 * 18φ10.7 型桩的荷载 - 挠度曲线图
Fig.6 The load-deflection curve of PRC 700 * 18φ10.7

5 结论

基于试验结果和有限元分析,对混凝土结构设计规范中管桩的抗弯刚度进行修正,提出了适合混合配筋预应力管桩(PRC)的开裂前刚度公式(2)和开裂后刚度公式(3),均和试验结果吻合良好;并通过 $\phi 700$ 直径的桩型进行了验算.该公式可用于计算 PRC 型桩抗弯刚度,为以后混凝土规范修订提供依据.

参考文献:

- [1] REESE L C. COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff [C]// 7th Annual Offshore Tech Conf. Houston, Paper OTC 2312, 1975, 2: 671 - 690.
- [2] CHANDLER R J. The shaft friction of piles in cohesive soils in terms of effective stress [J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1968, 12(1): 48 ~ 51.
- [3] 蒋元海,魏从九.关于我国管桩行业现状及发展的建议[J].混凝土与水泥制品,2007,(4): 31 ~ 32.
- [4] 王学军,王玉茜.浅谈预应力管桩存在的问题及解决方案[J].山西建筑,2010,36(18): 78 ~ 79.
- [5] 徐醒华.我国管桩的生产、应用和发展[J].建筑技术,2006,37(3): 181 ~ 83.
- [6] 龚爱群.预应力混凝土管桩的应用与实践[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学土木工程学院,2007.
- [7] 王新玲,高会宗,周同和,等.新型混合配筋预应力混凝土管桩抗弯性能试验研究[J].工业建筑,2012,42(8): 64 - 69.
- [8] 王新敏. Ansys 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

Stiffness Study of Prestressed and Reinforced Concrete Compounded Pipe Pile

WANG Xin-ling¹, DU Lin², HUANG Wei-dong³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. SIPPR Engineering Group Co., Ltd, Zhengzhou 450002, China; 3. Zhengzhou City Municipal Engineering Administration, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The prestressed and reinforced concrete compounded pipe pile (PRC) is a new type of prestressing pipe pile, formed by the symmetrical arrangement of prestressing steel bars and non-prestressed reinforcement, on the basis of pre-tensioned prestressed concrete pipe piles (PHC) and high strength prestressed concrete tubular pile. Finally, a computational analysis of the stiffness of the prestressed and reinforced concrete compounded pipe pile using finite element software are introduced, by comparing the before-cracking stiffness and after-cracking stiffness of the finite element calculated values, experimental values and calculated values according to the existing concrete specification formula, a theoretical formula is proposed to calculate the before-cracking and after cracking flexural rigidity.

Key words: prestressed and reinforced concrete compounded pipe pile; bending stiffness; finite element analysis; theoretical study