

文章编号:1673-2049(2009)02-0087-05

# 预制混凝土桩体抗扭设计及试验

梁力,李鑫,李明,王伟

(东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110004)

**摘要:**为了解决预制混凝土螺旋桩的抗扭问题,对预制混凝土桩体的抗扭性能进行了加强设计及试验研究。采用提高混凝土强度等级、配置螺旋箍筋、施加一定预应力等措施来提高预制混凝土桩体的特征扭矩;对试件的破坏特征、开裂扭矩、极限扭矩及扭矩-扭率关系等抗扭性能进行了研究。结果表明:按估算公式计算的预制桩体开裂扭矩与试验结果基本吻合,但存在一定误差;应选用预应力混凝土结构作为预制混凝土螺旋桩的桩型,而不选用增加配置螺旋箍筋的普通钢筋混凝土结构。

**关键词:**钢筋混凝土;预制混凝土桩体;螺旋箍筋;开裂扭矩;极限扭矩;变形;裂缝

中图分类号:TU473.1 文献标志码:A

## Design and Experiment on Torsional Behaviors of Precast Concrete Pile Body

LIANG Li, LI Xin, LI Ming, WANG Wei

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to solve the torsional problem of precast concrete screw pile in construction, the torsional behaviors of precast concrete pile body were designed strongly and studied by experimental method. The methods of improvement of concrete strength level, distribution of spiral hoop and application of some prestresses were used to improve the characteristic torsion of precast concrete pile body. Meanwhile, the torsional behaviors, such as destructive characteristic, cracking torsion, ultimate torsion and the relationships between torsion and angle of twist per unit length were studied. Results show that the calculated values of formulas of precast concrete pile body are in reasonable agreement with experimental values, and prestressed concrete structure should be selected to make precast concrete screw pile instead of common reinforced concrete structure with high ratio of spiral hoop.

**Key words:** reinforced concrete; precast concrete pile body; spiral hoop; cracking torsion; ultimate torsion; deformation; crack

## 0 引言

预制混凝土螺旋桩是由中国冶金建设集团沈阳勘察研究总院和东北大学土木工程研究所提出的一种新型桩基础,它是通过扭矩将其旋入土中,有着施工方便、成桩质量稳定、低噪声等优点<sup>[1-4]</sup>。前期的

试验与理论研究表明,由于预制混凝土螺旋桩在施工过程中要承受很大的扭矩作用,按普通受扭构件来设计,在旋入过程中很容易发生受扭破坏,故解决预制混凝土螺旋桩的桩体抗扭问题非常重要。由于没有成熟的配有螺旋箍筋的钢筋混凝土与预应力混凝土圆形构件的抗扭机理及特征扭矩计算公式,首

收稿日期:2009-04-03

基金项目:沈阳市科技攻关项目(20040528)

作者简介:梁力(1955-),男,辽宁丹东人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:ll-neu@163.com。

先,在前期的桩型设计基础上,根据现有规范和混凝土理论对预制混凝土桩体进行抗扭加强设计,并估算其开裂扭矩;然后,进行钢筋混凝土和预应力混凝土桩体受扭试验,测定其抗扭性能参数,为其理论分析和后期的数值计算提供检验手段,并为预制混凝土螺旋桩的设计和施工提供数据。

## 1 开裂扭矩计算理论及抗扭设计

### 1.1 桩体开裂扭矩计算理论

#### 1.1.1 素混凝土构件

钢筋混凝土纯扭构件在裂缝出现前,钢筋应力很小,且钢筋对开裂扭矩的影响也不大,可以忽略钢筋的作用,故首先考虑素混凝土构件的抗裂强度,即

$$T_{cr}^p = \tau_t W_{tp} = \gamma_t f_t W_{tp} \quad (1)$$

式中: $T_{cr}^p$ 为素混凝土构件的纯扭抗裂强度; $\tau_t$ 为剪应力; $W_{tp}$ 为截面抗扭塑性抵抗矩; $f_t$ 为混凝土极限抗拉强度; $\gamma_t$ 为混凝土轴心抗拉强度降低系数。相关试验表明,对高强度混凝土,其降低系数约为0.7,对低强度混凝土,降低系数接近0.8<sup>[5]</sup>。根据北京建筑工程学院的试验,环形截面梁的降低系数也可取用0.8<sup>[6]</sup>。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[7]</sup>中取混凝土抗拉强度降低系数为0.7。

#### 1.1.2 钢筋混凝土构件

对于配有纵筋及箍筋的构件,福州大学的试验<sup>[8]</sup>表明:纵筋及箍筋可以提高混凝土构件的纯扭抗裂强度 $T_{cr}$

$$T_{cr} = [1 + \alpha(\rho_{st}^v + \rho_{vt}^v)] T_{cr}^p \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为系数, $\alpha = 10.5 \sim 13.1$ ,平均值为11.8; $\rho_{st}^v$ 为抗扭纵筋的体积配筋率; $\rho_{vt}^v$ 为抗扭箍筋的体积配筋率。但是当 $\rho_{st}^v + \rho_{vt}^v$ 值超过0.014时, $T_{cr}$ 值不再继续增大。从实用观点看,忽略钢筋的作用是偏于安全的。

#### 1.1.3 预应力混凝土构件

预应力混凝土纯扭构件的抗裂强度 $T_{crp}$ 为

$$T_{crp} = \omega T_{cr} \quad (3)$$

式中: $\omega$ 为预应力对受扭构件抗裂强度的影响系数,即预应力混凝土纯扭构件抗裂强度与混凝土构件抗裂强度的比。根据不同理论,各个研究单位推导的预应力对受扭构件抗裂强度的影响系数的计算公式有所不同,如按 $(\sigma_t/f_t)^2 + (\sigma_c/f_c)^2 = 1$ ( $\sigma_t$ 为构件拉应力; $\sigma_c$ 为构件压应力; $f_c$ 为混凝土极限抗压强度)破坏理论,按混凝土的主拉破坏理论,按 Drucker-Prager 破坏准则等。本文中笔者按 Drucker-Prager 破坏准则推导的预应力对受扭构件抗裂强度的影响

系数的计算公式为

$$\omega = \sqrt{\frac{10}{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma/f_c - 0.45}{0.55}\right)^2} \quad (4)$$

式中: $\sigma$ 为构件所受预压应力。

### 1.2 桩体抗扭设计

前期试验研究表明,按原来的普通构件进行抗扭设计,预制混凝土桩体在施工过程中不能承受较大的扭矩作用,很容易发生受扭破坏。经分析可以从2个方面来提高桩体的抗扭强度:①提高混凝土强度等级(或使用纤维混凝土);②优化预制混凝土桩的桩型,包括施加合理预应力、加强螺旋箍筋配筋率及选择合理螺距等。

本文中设计4组试件,分别为I-1(螺旋箍筋螺距为50 mm的预应力混凝土试件)、I-2(螺旋箍筋螺距为50 mm的钢筋混凝土试件)、II-1(螺旋箍筋螺距为100 mm的预应力混凝土试件)和II-2(螺旋箍筋螺距为100 mm的钢筋混凝土试件),其中每组又有4个试件,共16个试件。混凝土强度等级为C60,纵向筋为10 $\Phi^{HT}$ 9 热处理钢筋,抗扭加强筋也为10 $\Phi^{HT}$ 9 热处理钢筋,螺旋箍筋为 $\Phi^{HT}$ 5 热处理钢筋,预应力混凝土试件的有效预应力为4.9 MPa。试件长为1.6 m,内、外径分别为210、400 mm,混凝土保护层厚度为35 mm,其桩型和配筋如图1所示。

## 2 试验概况

该试验在东北大学的211工程岩石失稳与控制实验室进行,共做了4个试件<sup>[9-10]</sup>。试件1和试件2均为螺旋箍筋螺距为50 mm的钢筋混凝土试件,试件3、4分别为螺旋箍筋螺距为50、100 mm的预应力混凝土试件。

### 2.1 试验加载装置

该试验采用自行设计的扭转加载装置,如图2所示。试件的就位形式为卧位,为减少试件变形及支承面间的摩擦阻力和自重弯矩的影响,在试件两端各垫一滑动支座。在试件的一端利用地锚通过扭座将试件进行固定,在另一端利用螺旋千斤顶通过加载力臂(扭杆)进行加载。试件与扭座、扭杆分别通过10个高强螺栓人工连接,从而使所加扭矩均匀传到试件上。

### 2.2 量测内容与量测方案

#### 2.2.1 量测内容

量测内容:①混凝土表面应变;②距扭转中心距离分别为40.7、68.5 cm 扭杆上2点的位移,以得到

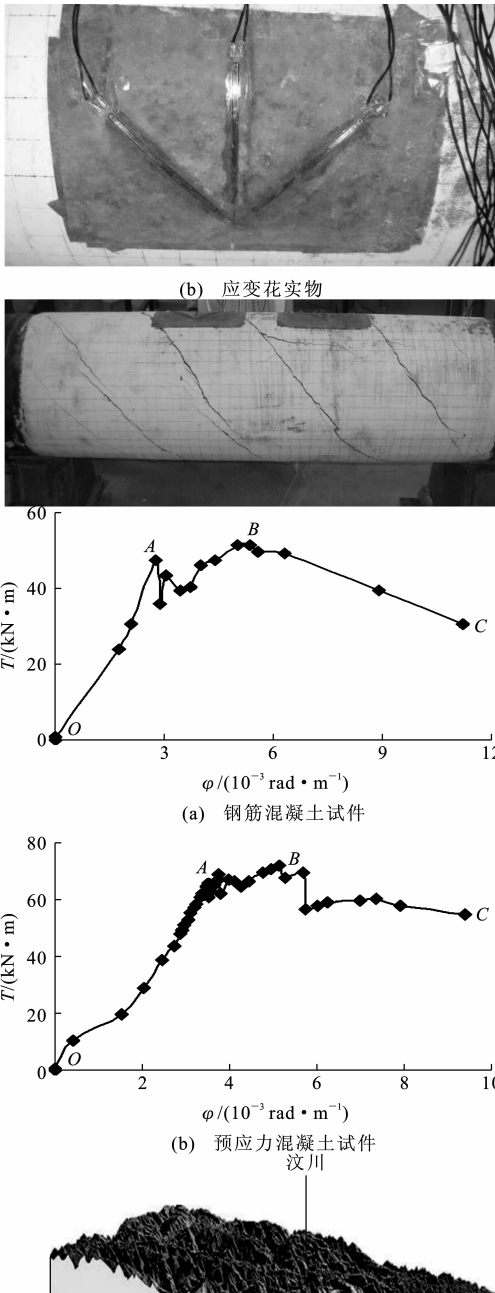


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimension and Reinforcement of Specimens (Unit:mm)

试件的扭转角;③裂缝宽度及扩展情况。

2.2.2 量测方案

量测方案如图 3 所示。量测步骤为:①试件试验前,均匀地用石灰浆刷白,等晒干后在其上画出尺寸 30 mm×30 mm 的方格,以便确定加载过程中的各条裂缝的位置、走向和标注相应的扭矩值,试验时设置专人描绘和记录裂缝的走向以及对应荷载的大小;②混凝土应变采用型号为 BX120-100AA 的电阻应变计进行量测,编号为 1~6[图 3(a)],第 1 组

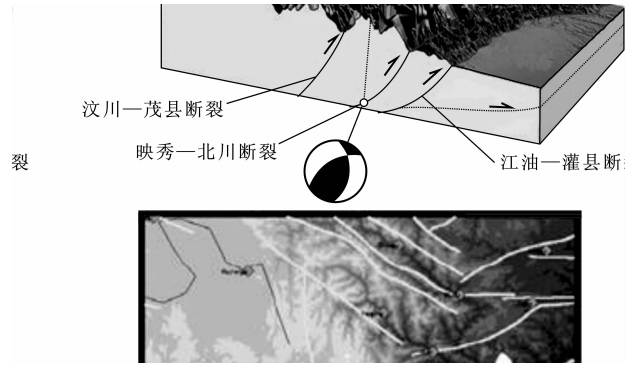


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Loading Device in Experiment

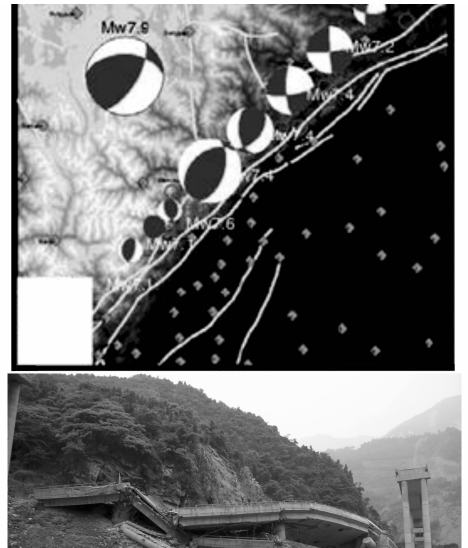


图 3 应变量测方案(单位:mm)

Fig. 3 Measuring Scheme of Strain (Unit:mm)

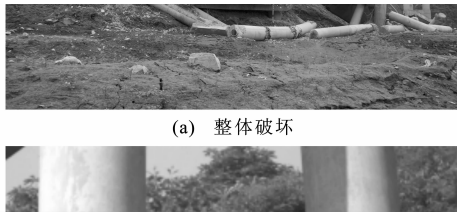
应变花编号为 1~3,第 2 组应变花编号为 4~6,并采用 YJ-31 型静态电阻应变仪进行数据采集;③扭转杆 2 点位移采用应变式位移传感器量测;④裂缝宽度用 30 倍的读数显微镜测读。

3 试验结果及其分析

3.1 破坏特征

3.1.1 钢筋混凝土试件

试验表明,2 根钢筋混凝土桩的桩体受力破坏过程相似。钢筋混凝土桩的桩体裂缝形态如图 4 所示。在弹性阶段,扭转变形相对较小,当达到开裂时,试件的混凝土表面首先形成与试件轴线呈接近 45°的斜裂缝,并随扭矩的增大,斜裂缝逐渐延伸、变宽;同时,斜裂缝的数量不断增加,基本上在表面均匀分布,最终每条裂缝在不同时期开展贯通,形成环绕整个试件截面的螺旋形裂缝。超过开裂扭矩后,扭转角明显增大,抗扭刚度急剧降低。



(a) 整体破坏



图 4 钢筋混凝土试件裂缝分布

Fig. 4 Crack Distribution of Reinforced Concrete Specimen

### 3.1.2 预应力混凝土试件

2 根预应力混凝土试件的受力破坏过程与钢筋混凝土试件的破坏过程相似。所不同的是,预应力混凝土试件混凝土表面首先形成与试件轴线呈小于  $45^\circ$  的斜裂缝,即裂缝角度要小于钢筋混凝土试件,且预应力混凝土试件的开裂扭矩和极限扭矩明显高于钢筋混凝土试件的开裂扭矩和极限扭矩,而且裂缝宽度小于钢筋混凝土试件。

### 3.2 特征扭矩及相应扭率

钢筋混凝土和预应力混凝土试件在扭矩作用下的特征扭矩及相应单位长度扭转角(扭率)的实测值见表 1。其中,  $T_c$  为试件开裂扭矩,以混凝土表面出现斜裂缝为特征;  $T_u$  为试件的极限扭矩,以在加载过程中的最大扭矩为标准;  $\varphi_{cr}$ 、 $\varphi_u$  分别为开裂扭矩和极限扭矩所对应的扭率。

理论计算与实测的开裂扭矩值见表 2。

表 1 试件的特征扭矩及相应扭率的实测值

Tab. 1 Measured Values of Characteristic Torsions and Corresponding Torsional Curvatures

试件编号	$T_c / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$T_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$T_c \cdot \varphi_{cr} / (10^{-3} \times T_u^{-1} \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1})$	$\varphi_{cr} / (10^{-3} \times \varphi_u / (10^{-3} \times \text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	$\varphi_{cr} \cdot \varphi_u^{-1}$	
1	47.35	51.50	0.919	2.74	5.38	0.509
2	43.51	43.51	1.000	1.52	4.14	0.367
3	65.95	72.16	0.914	3.50	5.14	0.681
4	63.46	65.64	0.967	2.55	3.48	0.733

表 2 开裂扭矩的理论值与实测值比较

Tab. 2 Comparisons of Theoretical Values and Measured Values of Cracking Torsion

试件编号	1	2	3	4
理论值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	40.08	40.08	62.27	62.27
实测值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	47.35	43.51	65.95	63.46
相对误差/ $\%$	15.35	7.88	5.58	1.87

### 3.3 扭转变形

钢筋混凝土和预应力混凝土试件纯扭的典型扭矩-扭率( $T-\varphi$ )曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,无论是钢筋混凝土试件还是预应力混凝土试件,在扭矩作用下的  $T-\varphi$  曲线表现



(b) 桥墩底压溃



(c) 梁柱效应

图 5  $T-\varphi$  曲线Fig. 5 Relations of  $T$  and  $\varphi$ 

出 3 个阶段:①弹性阶段  $OA$ ;②弹塑性阶段  $AB$ ;③软化阶段  $BC$ 。

## 4 结 语

(1)钢筋混凝土和预应力混凝土桩的破坏形态为:在弹性阶段,扭转角相对较小,当达到开裂时,钢筋混凝土试件的表面形成与试件轴线呈接近  $45^\circ$  的斜裂缝;而预应力混凝土试件的表面形成的斜裂缝与试件轴线夹角小于  $45^\circ$ ,最终每条裂缝在不同时期开展贯通,形成环绕整个试件截面的螺旋形裂缝。超过开裂扭矩后,扭转角明显增大,抗扭刚度急剧降低。预应力混凝土试件在开裂至破坏的裂缝宽度要小于钢筋混凝土试件的裂缝宽度,且裂缝数量要比钢筋混凝土试件少。

(2)可以按式(1)~(4)计算配有螺旋箍筋的圆形截面的桩体开裂扭矩,但存在一定的误差,4 个试件的理论与实测值的相对误差分别为 15.35%、7.88%、5.58%和 1.87%。

(3)配有纵筋和螺旋箍筋可以提高对素混凝土试件的开裂扭矩,但是提高的不多,对极限扭矩有一定提高,而施加适当预应力对试件的开裂扭矩和极限扭矩均有较大提高。由于预制混凝土螺旋桩在旋入过程中是不允许开裂的,且钢筋在桩体开裂前受力比较小,故建议预制混凝土螺旋桩的设计应选用预应力混凝土结构,而不是采用增加配筋的方法来提高开裂扭矩。

## 参考文献:

## References:

- [1] 贾志杰. 新型预制螺旋桩受力特性数值分析研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.  
JIA Zhi-jie. Numerical Analysis Research of the Mechanics Character for New Type Precast Screw Pile[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.
- [2] 董天文,梁力,张成金. 旋入式螺旋桩[J]. 世界桥梁,2004(4):73-75.  
DONG Tian-wen, LIANG Li, ZHANG Cheng-jin. Screw Piles Constructed by Rotary Method[J]. World Bridges, 2004(4):73-75.
- [3] 孙犁,钱大行. 桩基础与其对环境污染问题的探讨[J]. 建筑科学,2005,21(3):92-94.  
SUN Li, QIAN Da-xing. Discussion on Pile Foundation and Its Problems of Environmental Pollution[J]. Building Science, 2005, 21(3):92-94.
- [4] 孙鸣. 钢筋混凝土螺旋桩可行性分析[J]. 天津城市建设学院学报,2001,7(3):187-190.  
SUN Ming. Analysis of the Feasibility of Reinforced Concrete Screw Pile[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2001, 7(3):187-190.
- [5] 东南大学,天津大学,同济大学. 混凝土结构——混凝土结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:184-195.  
Southeast University, Tianjin University, Tongji University. Concrete Structures—Design and Principle of Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002:184-195.
- [6] 殷芝霖,张誉,王振东. 抗扭[M]. 北京:中国铁道出版社,1990:29-179.  
YIN Zhi-lin, ZHANG Yu, WANG Zhen-dong. Torsion Resistance[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990:29-179.
- [7] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [8] 洪敦枢. 在纯扭作用下矩形截面钢筋混凝土构件的试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,1981(2):1-28.  
HONG Dun-shu. Experimental Study on Reinforced Concrete Member with Rectangular Section Under Torsion Action[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 1981(2):1-28.
- [9] 刘绍舜,罗贤武,房铁柱,等. 振动沉管法CFG桩的施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(10):51-53.  
LIU Shao-shun, LUO Xian-wu, FANG Tie-zhu, et al. Construction of CFG Pile for Vibratory Immersed Tunneling Method[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(10):51-53.
- [10] 熊君放,罗银燕,胡新民. 长螺旋钻孔压灌混凝土桩施工技术及应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(4):35-37.  
XIONG Jun-fang, LUO Yin-yan, HU Xin-min. Guncreting Pile Construction Technology Using Long Auger and Application[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(4):35-37.

## “2009 中国上海国际建筑科技大会”会讯

“2009 中国上海国际建筑科技大会”暨“中国工程院土木水利与建筑学部学术年会”将于 2009 年 10 月 15~17 日在同济大学召开。本次大会以“大型公共建筑与基础设施建设理论与实践”为主题,旨在交流各国大型公共建筑与基础设施建设经验,展示大型公共建筑与基础设施规划、设计、施工、质量管理等科技成就,同时为与会者提供探讨如何提高城市建设与发展质量水平、推动城市可持续发展进程的学术平台。

大会论文集将收录大会主题报告及所有被学术委员会录用的论文,全文语言为英文,并将由同济大学出版社正式出版,拟送 Ei 等相关机构检索。全文提交截止日期为 2009 年 6 月 30 日;通知论文全文录用截止日期为 2009 年 7 月 30 日;提前注册截止日期为 2009 年 8 月 30 日。注册费用:国内代表 1 600 元;提前注册 1 400 元;学生代表 800 元。论文撰写格式见 [http://journal.hep.com.cn/webarticle/hep/009\\_b.html](http://journal.hep.com.cn/webarticle/hep/009_b.html)。获取更多会议信息及提交论文请访问 <http://www.icat2009.cn>。

**中国土木工程学会** 联系人:张凌、李丹、文捷、李应斌;电话:(010)58934710,58934591,58933071;传真:(010)58933953;E-mail:cceslidan@yahoo.com.cn 或 cces.china@263.net。

**同济大学** 联系人:张其林、李元齐、宋晓光、周祎;电话:(021)65980586;传真:(021)65986345;E-mail:liyq@tongji.edu.cn。