

· 施 工 ·



改进型大管桩分批张拉预应力损失的试验研究

吴捷安¹, 胡若邻^{2,3}, 陈学国¹

(1. 宁波海港工程有限公司, 浙江 宁波 315200; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510288;
3. 广州港湾工程质量检测有限公司, 广东 广州 510288)

摘要: 为一次性完成后张法预应力混凝土大管桩多股钢束张拉, 使各钢束应力达到设计控制应力且分布均匀、实现精细化施工, 对分批张拉过程的预应力损失量进行了理论分析, 并通过某型号的改进型大管桩分批次张拉过程进行了试验测试。研究结果表明分批次张拉效果良好, 各预应力损失率与理论结果基本相符。

关键词: 后张法; 预应力混凝土大管桩; 分批张拉; 预应力损失

中图分类号: TU 378

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0164-05

Experimental study on batch prestress loss of modified large-diameter prestress concrete post-tensioned cylinder pile

WU Jie-an¹, HU Ruo-lin^{2,3}, CHEN Xue-guo¹

(1. Ningbo Harbour Engineering Co., Ltd., Ningbo, 315200, China; 2. CCCC Forth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510288, China; 3. Guangzhou Harbor Engineering Quality Examination Co., Ltd., Guangzhou 510288, China)

Abstract: For tensioning several prestressing tendons of tubular piles uniformly at one time, we carry out a theoretical analysis of and test on the prestress loss in the process of the batch prestressing. The result reveals that the batch prestressing bears satisfactory effect and the real loss rate of the prestress accord basically with the theoretical result.

Key words: post-tensioned; prestressed concrete large-diameter cylinder pile; batch prestress; prestress loss

后张法预应力混凝土大管桩(雷蒙特桩), 由于抗弯承载力高和成本低等诸多优点, 在港口工程中得到了广泛的使用^[1-2]。随着海工工程的发展, 对预应力混凝土大直径管桩的要求也越来越高。海上用PHC管桩的抗弯、抗拉性能不好, 桩身混凝土有效预压应力值偏小($\leq 10\text{MPa}$); 大管桩制造工艺相对复杂, 还有诸多欠完善之处; 而4 m长标准管节偏短、接头较多、耐久性较差等。为此, 宁波海港工程有限公司在传统大管桩基础上, 发明了管节双层端模工艺、管桩法兰式接头及联接工具等, 生产了强度更高、管节长度更长的预应力混凝土大管桩^[3-5]。

为保证这种改进型大管桩混凝土有效预压

应力满足规范要求, 并使各预应力钢束应力水平相当, 有必要对张拉过程进行分析研究和监测控制。在后张法构件中, 所配置的预应力筋, 可全部1次同时张拉, 混凝土弹性压缩紧随张拉结束而终止, 这表明本批(次)张拉在本批(次)预应力筋中没有弹性压缩损失。但由于大管桩预应力钢束均匀分布于管桩圆周, 受张拉设备的限制, 常采用分批张拉的工艺, 这样后批张拉的预应力筋引起混凝土弹性压缩而产生次应力, 造成预应力损失^[6]。

对于采用1860型钢绞线的后张法预应力混凝土大管桩, 混凝土有效预压应力将达10~15 MPa, 而总张拉力将达12 000 kN及以上, 由于工艺需

收稿日期: 2013-03-17

作者简介: 吴捷安(1968—), 男, 从事港口与航道工程技术工作。

要, 同时也为防止张拉过程中产生裂缝, 需要对钢绞线进行分批、分次张拉^[7]。虽然有关规范^[8-9]提出可将先批张拉的预应力钢束控制应力提高一定数值, 但并未给出精确计算预应力筋分批张拉损失量的计算公式, 同时部分理论方法较为繁琐, 且缺乏实测数据支撑^[10-11], 因此本文推导了采用直线钢束的大管桩分批张拉预应力损失的计算公式, 列表得到了常用大管桩的分批张拉损失率, 并根据Excel表格计算结果获得一次张拉到位的各次张拉控制应力值, 通过在试验管桩中分批次张拉试验测试, 验证本文的计算方法, 从而防止管桩因预应力不足、受力不均而影响结构性能。

1 计算方法

对于采用分批张拉的后张法预应力混凝土大管桩, 分批张拉损失与后批张拉应力有关, 因此在计算每批需要提高的张拉应力时应从最后一批开始计算, 依次反推出各批张拉应力。对于总共分*n*批次的张拉过程, 则第*n-1*批张拉的钢绞线, 仅有第*n*批张拉对其产生影响, 设由第*n*批张拉造成的混凝土弹性压缩为 ϵ_n , 则由桩身截面平衡条件有^[9]

$$E_c \epsilon_n = \frac{\sigma_{con,n} A_s}{A_c + A_s E_s / E_c} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{con,n}$ 为第*n*批钢绞线张拉后的有效预应力(考虑放张端锚具变形和钢筋内缩的等引起的预应力损失); A_c 为混凝土净截面面积; A_s 为第*n*批钢绞线截面面积(每批张拉时的钢绞线截面面积

相等); E_s 为钢绞线弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量。

则由混凝土弹性压缩造成的第*n-1*批钢绞线预应力损失为

$$\Delta \sigma_{n-1,n} = \frac{\sigma_{con,n} A_s}{A_c + A_s E_s / E_c} E_s \quad (2)$$

故第*n-1*批钢绞线张拉控制应力应为

$$\sigma_{con,n-1} = \sigma_{con,n} + \Delta \sigma_{n-1,n} \quad (3)$$

根据上述计算原理, 可推导出第*i*批钢绞线张拉时的张拉控制应力:

$$\sigma_{con,i} = \sigma_{con} + \sum_{k=1}^{n-i} \frac{E_s A_s}{E_c A_c + k E_s A_s} \sigma_{con,n-k+1} \quad (4)$$

当 $\sigma_{con,i} \geq 0.8 f_{ptk}$ (钢绞线抗拉强度标准值)时, 应取 $\sigma_{con,i} = 0.8 f_{ptk}$ ^[9]。最后一批钢绞线张拉后无分批张拉预应力损失, 故可列表由最后一批钢绞线张拉控制应力依次求得各批钢绞线张拉控制应力。

2 工程实例与计算分析

以1根长60 m, 改进生产后的 $\phi 1\ 200$ mm HG1200-48-B型大直径管桩为例, 对其分批次张拉过程进行预应力试验测试, 并与计算结果相对比。该管桩混凝土壁厚15 cm, 共由7个管节拼接而成, 管节组合为(10+10+8+8+8+8+8) m, 48根低松弛钢绞线($\phi 15.24$ mm)通过16束预留孔道张拉形成管桩的后张预应力, 设计混凝土有效预压应力达14.58 MPa。每次沿圆周对称张拉2束, 共分8批次张拉到位。

表1 第一批钢筋张拉以后应力损失

批次	每次张拉后钢筋的总面积/m ²	每次张拉后换算混凝土面积/m ²	每次张拉拉力/MN	当次张拉截面压缩应变	当次张拉造成的钢筋预应力损失/MPa	累计预应力损失/MPa
2	0.002 177	0.493 296	1.544 9	0.107 1	21.41	21.41
3	0.003 266	0.499 652	1.522 3	0.104 2	20.83	42.25
4	0.004 355	0.506 007	1.500 2	0.101 4	20.27	62.52
5	0.005 443	0.512 363	1.478 7	0.098 7	19.73	82.25
6	0.006 532	0.518 719	1.457 8	0.096 1	19.22	101.47
7	0.007 621	0.525 075	1.437 4	0.093 6	18.72	120.19
8	0.008 710	0.531 430	1.417 6	0.091 2	18.24	138.43

2.1 分批张拉控制应力的确定

为达到桩身设计预应力水平 $0.7 f_{pk}$ 即1 302 MPa, 减少后批张拉对前批张拉预应力的影响, 应考虑

后批次预应力张拉对本批次张拉造成的应力损失。根据前文所述方法可采用EXCEL列表求得各批次对第一批和第七批张拉影响计算结果, 如表1和

2所示，其余批次预应力损失计算表格类似，本文不一一罗列。表中混凝土弹性模量取设计弹模

(39 GPa)的75%，即29.3 GPa；钢绞线弹性模量取200 GPa。

表2 第7批钢筋张拉以后应力损失

批次	每次张拉钢筋后钢筋的总面积/m ²	每次张拉后换算混凝土面积/m ²	每次张拉力/MN	当次张拉截面压缩应变	当次预应力释放后损失/MPa	累计预应力损失/MPa
8批次	0.008 710 00	0.531 430 71	1.417 6	0.091 2	18.24	18.24

根据第8批次预应力张拉控制应力1 302 MPa，可逐步确定各批次张拉控制应力值。由于一次张拉荷载较大，为防止张拉出现偏心和管桩开裂，采用两次张拉到位，即第1批分8次张拉到各控制应力的40%，第2批再分8次张拉到各控制应力的103%（为克服锚具变形和钢筋内缩等引起的预应力损失）。表3为各批次张拉控制应力和张拉力，从表中可见，首次张拉的钢绞线在整个张拉过程中预应力损失理论值超过10%，因此施工中必须考虑分批次张拉对预应力损失的影响。

表3 各次张拉控制力应力计算结果

张拉批次	张拉控制应力/MPa	理论损失率/%
1	1 440.4	10.6
2	1 419.0	9.0
3	1 398.2	7.4
4	1 377.9	5.8
5	1 358.2	4.3
6	1 339.0	2.8
7	1 320.2	1.4
8	1 302.0	0.0

2.2 试验测试及结果分析

通过在张拉端工作锚头下安装16个预应力传感器，如图1所示，测试每批次张拉时各钢束的荷载值。设计张拉工序为：第1批张拉8对钢束至各钢束控制应力的40%，共分8次张拉到位；第2批张拉与第1批张拉类似，共分8次将各钢束张拉到设计控制应力的100%。预应力传感器采用长沙金码生产的锚索计，通过测试锚索计内各钢弦频率获得各预应力束的张拉力，如采用合适措施使锚头下各钢弦受力均匀，可保证传感器具有较好可靠性，精度达0.1 kN。

2.2.1 分批次张拉有效预应力变化

有效预应力变化数据见表4，由表4可以得出



图1 大管桩分批次张拉预应力试验测试

后批张拉对前批张拉预应力的影响量。从表中可见，前次张拉的预应力在紧邻的后次张拉预应力影响下，预应力损失最大，之后损失变化量趋于平缓，说明后次张拉的预应力对紧邻的前次张拉的预应力影响最大，对其余预应力的影响较小。后次张拉的预应力对相邻前次张拉的预应力的影响，不仅包含桩身压缩及桩身接缝压缩引起的预应力损失，还包含二次应力引起的预应力损失。首批张拉至40%控制应力，第2批张拉至103%。

本次试验测试采用锚索计测试有效预应力，钢弦式锚索计各钢弦之间应变由于偏压等原因存在较大差异，导致所测荷载值与千斤顶油压数据有一定偏差。根据表4，可得张拉力损失变化量与理论计算结果(表5)。从表5可见，实测结果与理论结果基本吻合，说明锚索计所测预应力损失基本可靠；实测损失率略大于理论损失率，主要原因是理论计算没有考虑或对管节接缝压缩、夹片回缩及管道摩阻等因素的影响考虑不足，而C80混凝土弹性模量取值偏高，仅仅考虑了理论压缩导致的预应力损失。

2.2.2 与时间相关的预应力损失

预应力张拉完毕后，次日对8组（16束）预应力束进行预应力管道灌浆，养护20 d后，切割多余

表4 预应力变化数据

批次	分次张拉预应力编号	预应力/kN								最大损失量/kN	最大损失率/%	
		1	2	3	4	5	6	7	8			
首批张拉至40%	1	167.5	159.5	157.9	156.6	155.1	153.6	152.3	151.4	16.1	10.6	
	2		221.5	211.7	210.3	207.9	206.5	205.3	203.9	17.6	8.6	
	3			214.3	202.9	201.2	199.3	198.1	196.8	17.6	8.9	
	4				187.4	179.2	177.9	175.6	174.5	12.9	7.4	
	5					216.7	206.4	205.2	204.1	12.6	6.2	
	6						201.9	191.6	190.2	11.7	6.1	
	7							181.9	171.9	10.0	5.8	
	8								172.8	0.0	0.0	
第二批张拉至103%	1	151.4	586.9	541.0	536.5	534.0	531.5	530.0	527.5	525.0	61.9	11.8
	2		203.9	592.5	557.4	553.0	552.0	548.0	546.0	545.0	47.5	8.7
	3			196.8	659.0	621.0	617.5	615.0	613.0	611.0	48.0	7.9
	4				174.5	541.5	508.5	505.0	502.5	500.0	41.5	8.3
	5					204.1	563.5	515.5	523.0	520.9	42.6	8.2
	6						190.2	525.0	493.4	490.5	34.5	7.0
	7							171.9	548.5	518.0	30.5	5.9
	8								172.8	610.0	0.0	0.0

注：表中黑体字为初张拉至控制力时的有效预应力（锚索计读数）。

表5 实测预应力损失率与理论损失率对比

张拉批次	实测损失率/%		实测平均损失率/%	理论损失率/%	(实测-理论)差值/%
	1	2			
1	10.6	11.8	11.2	9.9	1.3
2	8.6	8.7	8.7	8.4	0.2
3	8.9	7.9	8.4	7.0	1.4
4	7.4	8.3	7.8	5.6	2.3
5	6.2	8.2	7.2	4.1	3.0
6	6.1	7.0	6.6	2.7	3.8
7	5.8	5.9	5.9	1.4	4.5
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表6 张拉完毕与切割前预应力对比

传感器编号	预应力/kN		损失值/kN	损失百分比/%
	切割前	张拉完毕		
1	567.9	600.0	32.1	5.4
2	572.4	594.0	21.6	3.6
3	446.3	467.0	20.7	4.4
4	473.4	489.0	15.6	3.2
5	558.3	585.0	26.7	4.6
6	477.4	496.0	18.6	3.8
7	462.6	484.0	21.4	4.4
8	546.5	569.0	22.5	4.0
9	448.3	466.0	17.7	3.8
10	526.6	552.8	26.2	4.7
11	617.2	637.0	19.8	3.1
12	431.8	450.0	18.2	4.0
13	500.2	554.0	53.8	9.7
14	510.5	534.0	23.5	4.4
15	484.0	497.0	13.0	2.6
16	620.3	660.0	39.7	6.0
平均预应力损失			24.4	4.5

钢绞线、拆除锚具。为研究预应力沿时间发展的变化规律，对放张预应力钢绞线前后钢绞线预应力进行了测试，两次测试结果及对比见表6。

从表6可知，养护20 d后，切割锚具前，8组（16束）钢绞线平均预应力损失值为24.4 kN，平均损失率为4.5%，预应力损失主要是由钢绞线应力松弛、混凝土收缩和徐变及管节接缝压缩等引起的。

3 结论

1) 后批次张拉会造成前批次张拉的预应力钢束产生应力损失，且前次张拉的预应力在紧邻的

后次张拉影响下，预应力损失最大，之后损失变化量趋于平缓，分批次张拉预应力损失率与理论结果基本相符。

2) 分批次张拉预应力损失量随张拉批次数量

的增多而增大，8批次以上分步张拉应力损失最大超10%，应在施工中对前批次张拉钢束进行超张拉，补偿其预应力损失。

3) 对改进型后张法预应力混凝土大管桩，分批张拉完成养护20 d后，各钢绞线平均预应力损失率约为4.5%，这主要是由于钢绞线应力松弛、混凝土收缩和徐变及管节接缝压缩等引起。

为减小分批次张拉大管桩的预应力损失，建议采用适当的超张拉以克服理论较实测结果偏低而造成的预应力偏差；钢弦式锚索计可用于测试有效预应力，但需保证各钢弦受压均衡，建议在预应力张拉时采用智能自动张拉设备，并通过锚索计校核，从而更精密完成分批次张拉工序。

参考文献：

[1] 陈益飞, 马欢欢. 超长大直径管桩在高桩码头中的应用[J]. 水运工程, 2009(9): 132-136.

[2] 汪冬冬, 许礼雍, 王成启. 大管桩和PHC管桩在北方港口码头工程中的应用前景[J]. 水运工程, 2013(1): 155-

160.

[3] 史美鹏, 李军, 方中军, 等. 长管节混凝土管桩双层端模: 中国, 201120459100. 2[P]. 2012-08-01.

[4] 张勇. 预应力混凝土管桩抗弯接头: 中国, 2006 2010 5748. 9[P]. 2007-07-11.

[5] 史美鹏, 李军, 方中军, 等. 长管节混凝土管桩: 中国, 201120459110.6[P]. 2012-07-11.

[6] 李献忠, 姜稚清. 后张预应力分批张拉法[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16(3): 24-26.

[7] 桑登峰, 胡若邻. 某改进型大管桩抗弯试验研究[J]. 中国港湾建设, 2013 (1): 45-49.

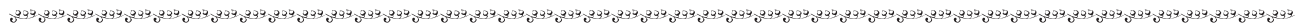
[8] JTS 167-6—2011 港口工程后张法预应力混凝土大管桩设计与施工规程[S].

[9] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

[10] 李森平, 吴锋. 后张预应力混凝土管桩分批张拉预应力损失[J]. 中国港湾建设, 2009(5): 32-34.

[11] 丁南宏, 钱永久, 林丽霞. 分批张拉预应力损失的空间简化计算方法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(6): 66-69.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

二航局一项科技成果获国家发明专利

近日，二航局“一种实施大吨位物体拖拉上岸的方法及其装置”获国家发明专利。

该方法及其装置可用于对任意形状的大吨位物体的拖拉上岸作业，有效解决了大节段混凝土箱梁段和大吨位钢构件的吊装运输难题，具有安全可靠、经济性高等特点。

该项专利已成功应用于合宁高速公路改扩建南淝河大桥拆除工程，极大地节省了施工过程中吊车台班费及混凝土拆卸、切割分解费，提高了生产效率。

摘编自《中国交通建设网》

港珠澳大桥“巨无霸”钢套箱成功吊装

8月20日，二公局承建的港珠澳大桥青州航道桥双壁哑铃型防撞钢套箱成功吊装，刷新了国内大型钢套箱在外海整体吊装的记录。

青州航道桥索塔承台防撞套箱包括防撞箱体结构和底板结构，防撞设施以套箱防撞结构为主，外部设置缓冲护弦，起辅助防撞作用。防撞箱体为钢板组装格构构件，底板为型钢组装格构和桁架构件组合体。套箱平面呈哑铃型，平面长90.39 m，宽43.14 m，高8.5 m，厚3.3 m，质量1 750 t，号称“巨无霸”，为施工及维护方便，套箱共分26个分段，分段质量为25~36 t。

“巨无霸”的成功吊装为青州航道桥顺利实现工序转换奠定了基础，同时也为我国桥梁超大型钢套箱在外海环境施工积累了宝贵经验。

摘编自《中国交通建设网》