

· 地基与基础 ·



基桩沉桩过程桩身应力控制标准分析与应用

冯光华¹, 张华章², 谭德银¹, 陈章宇¹, 何伟峰³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510230; 3. 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

摘要:通过对上千根基桩沉桩过程桩身应力的统计,找出桩身应力的极值分布,总结出一套适合于预应力混凝土桩和钢管桩的沉桩过程桩身应力控制标准。根据该标准,监控沉桩过程桩身应力值,调整沉桩指令,有利于提高沉桩效率,保证桩身质量。研究成果是对现有规范和的丰富并对工程应用有指导作用。

关键词:桩身应力;预应力混凝土桩;钢管桩;应力监控

中图分类号:U 655.54⁺4.1

文献标志码:A

文章编号:1002-4972(2014)09-0140-06

Analysis and application of control standard of pile stress under pile-sinking construction

FENG Guang-hua¹, ZHANG Hua-zhang², TAN De-yin¹, CHEN Zhang-yu¹, HE Wei-feng³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

Abstract: The extreme value distribution of pile body stress was found and the control standard of pile body stress suitable for prestressed concrete pile and steel pipe pile under pile-sinking construction was summarized by the statistics of more than one thousand pile body stress. The efficiency was improved and the integrity of pile was satisfied by monitoring of pile body stress according to the control standard. Research achievements can give instruction to existing norms engineering practice.

Keywords: pile stress; prestressed concrete pile; steel pipe pile; stress monitor

随着预应力混凝土桩和钢管桩的普遍应用,沉桩过程中常出现基桩破坏现象,例如混凝土桩的桩头破坏和桩身裂缝、钢管桩的卷边等。沉桩过程中也常见超过现有规范^[1-2]而桩身未见破坏的情况,特别是预应力混凝土空心方桩,JTS 167-4-2012《港口工程桩基规范》给出的拉应力标准值分为:5.0、5.5、6.0、6.5 MPa四级,实际沉桩中常常出现桩身最大拉应力达到7~8 MPa,甚至是9 MPa的情况,而桩身并未出现裂缝。因此预应力混凝土桩和钢管桩沉桩过程桩身应力的控制标准是一个亟待研究的课题。笔者对上千根基桩沉桩过程桩身最大应

力值进行统计,找出桩身最大应力极值的分布规律,提出沉桩过程桩身应力控制标准。

1 基桩沉桩过程桩身应力控制值

1.1 预应力混凝土桩桩身压应力控制标准

预应力混凝土桩桩身材料为混凝土和钢筋,在沉桩动态应力作用下,往往是混凝土先于钢筋破坏,这是由于混凝土保护层的存在使混凝土直接受到锤击能量的作用,并且钢材本身的力学性能比混凝土要好。

20世纪50年代,日本野正等人发现,混凝土材料在冲击荷载作用下,极限抗压强度和弹性模

收稿日期:2014-01-06

作者简介:冯光华(1984—),男,硕士,工程师,主要从事桩基检测与科研工作。

量均随着加荷时间的缩短而增大: 当荷载作用时间从 100 s 减至 0.03 s 时, 强度和弹性模量分别提高 30% ~ 56% 和 20% ~ 25%^[3]。

1984 年美国垦务局 Rapheal^[4] 对 5 座混凝土坝钻孔取样获得的试件进行混凝土动力试验, 在 0.05 s 内试件加载到极限强度 (相当于大坝 5 Hz 的振动频率), 得到混凝土的单轴动力抗压强度比静力强度平均提高 31%, 直接拉伸强度平均提高 66%, 劈拉强度平均提高 45%。

中国在 DL 5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[5] 4.6.1 中规定: “除水工钢筋混凝土结构外的混凝土水工建筑物的抗震强度计算中, 混凝土动态强度和动态弹性模量的标准值可较其静态强度提高 30%; 混凝土动态抗拉强度的标准值可取为动态抗压强度标准值的 10%”。

对超过 500 根预应力混凝土桩桩身最大应力进行统计, 统计的总锤击数超过 32 000 锤。记录每一根桩的最大压应力值 CSX , 动力放大系数定义为 CSX/f_c 。根据图 1 可以得到, 相对于混凝土的抗压强度设计值, 最大的动力放大系数为 1.514, 超过 1.393 的占统计数量的 2%, 达 1.294 以上的占统计数量的 5%。

统计的预应力混凝土桩桩身混凝土强度有 C50、C60、C80 共 3 种, 其对应的强度设计值见表 1。

表 1 混凝土强度设计值^[6]

设计值/MPa	f_c
C50	23.5
C60	28.0
C80	37.5

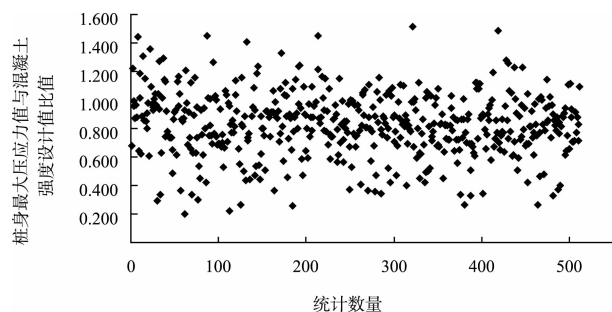


图 1 预应力混凝土桩的动力放大系数统计

通过桩身最大压应力值与混凝土强度设计值的比值统计, 得到混凝土桩的动力放大系数见图 1。其概率分布图见图 2, 动力放大系数在 0.8 ~ 1.0 的概率分布最大。

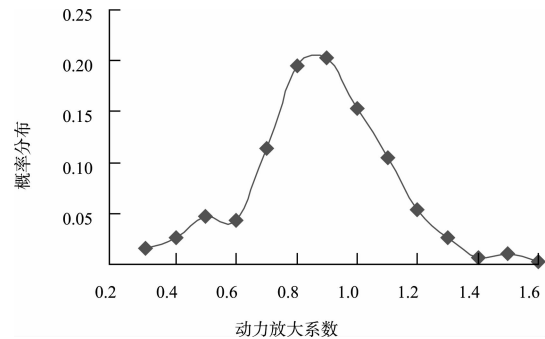


图 2 动力放大系数的概率分布

基于上述统计结果, 对于 PHC 桩、大直径管桩和预应力混凝土空心方桩在内的带预应力混凝土桩沉桩过程桩身极限压应力验算公式建议取为:

$$\sigma_p \leq b_c f_c \quad (1)$$

式中: b_c 为动态混凝土抗压强度增强系数, b_c 取 1.3; σ_p 为锤击压应力控制值 (MPa); f_c 为管桩混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)。

1.2 预应力混凝土桩桩身拉应力控制标准

考虑混凝土材料在动态应力作用下其强度提高以及预应力钢筋配筋率对沉桩过程桩身拉应力控制值的影响, 对于 PHC 桩、大直径管桩和预应力混凝土空心方桩在内的带预应力混凝土桩锤击过程极限拉应力验算公式建议取为:

$$\sigma_s (1 - \rho_p) \leq \gamma_{pc} \sigma_{pc} + b_t f_t \quad (2)$$

式中: σ_s 为锤击沉桩拉应力控制值 (MPa); ρ_p 为预应力钢筋配筋率; γ_{pc} 为混凝土预应力分项系数, 取为 1.0; σ_{pc} 为混凝土有效预压应力值 (MPa); b_t 为动态混凝土抗拉强度增强系数, 取为 1.3; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值 (MPa)。

当预应力钢筋配筋率、混凝土有效预压应力等参数缺乏时, 根据公式 (1) 和公式 (2) 以及规范^[7] 对于不同基桩型号有效预压应力值的规定, 计算出常见带预应力混凝土桩沉桩过程桩身应力控制标准见表 2。

表 2 锤击沉桩拉应力极限值

桩型	型号	混凝土 强度等级	拉应力控制值/ MPa
预应力混凝土管桩	A	C60	6.86
		C80	7.32
	AB	C60	8.86
		C80	9.32
	B	C60	10.86
		C80	11.32
	C	C60	12.86
		C80	13.32
C50 方桩		C50	10.11

1.3 钢管桩桩身应力控制标准

钢管桩沉桩过程桩身钢材直接承受锤击动应力，而对于工程中常用的 Q345 钢，李国强、屈立军等人对于其在静态力学性能上的常温和高温条件下的应力-应变关系曲线、屈服强度、极限强度、弹性模量和延伸率等都已经作出了较全面的研究。对于 Q345 钢材在冲击荷载作用下的动态力学性能，上海交通大学的于文静^[8]等人利用 SHPB 装置在应变率为 $10^2 \sim 10^3$ 下得到了其动态力学性能参数。根据其研究结果不同应变率作用下 Q345 钢的屈服强度见表 3。

表 3 不同应变率作用下 Q345 钢材的屈服强度

应变率/s	σ_0 /MPa
10^{-4}	374
10^{-3}	374
5×10^{-2}	536
10^3	586
2×10^3	657
4×10^3	691

于文静等人认为：Q345 钢材具有明显的应变率强化效应，但是在不同的分区内对应变率不敏感。在准静态和动态冲击各自的分区内，不同应变率下，发生相同变形时应力水平相差不大。

钢管桩锤击沉桩应变速率约为 0.1 等级水平，根据表 3，Q345 钢材在沉桩动应力作用下的材料屈服强度将大于其静态屈服强度 374 MPa。

对高应变检测的超过 500 根钢管桩桩身最大压应力值和最大拉应力值进行统计，统计的总锤击数超过 37 000 锤，记录每根桩的最大压应力值 CSX、最大拉应力值 TSX，纵坐标为 CSX 和 TSX 与钢材屈服强度的比值。由图 3 可知，最大的比值为 0.887 9，小于 1，也就是统计的所有锤击产生的钢管桩桩身最大应力均小于钢材的屈服强度。

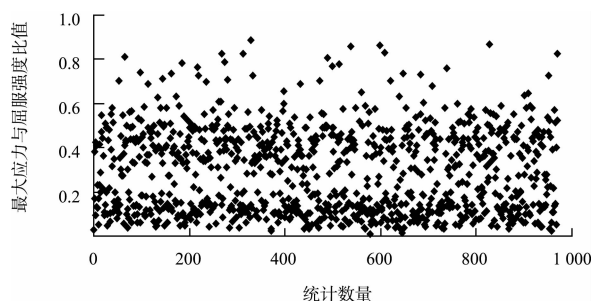


图 3 钢管桩桩身最大应力与钢材屈服强度的比值

通过桩身最大应力值与屈服强度的比值统计，得到钢管桩的动力放大系数见图 2。本文建议基于动态效应的钢管桩应力验算公式为：

$$\sigma_s \leq \mu_s \quad (3)$$

式中： σ_s 为锤击沉桩应力控制值（MPa）； μ_s 为钢材静态屈服应力值（MPa）。

相对于规范^[1-2]，本文中的沉桩过程桩身应力控制标准是考虑了基于动态效应的增强系数，同时考虑预应力钢筋配筋率对于沉桩过程桩身应力的影响。公式 1~3 适用于带预应力混凝土桩和钢管桩的沉桩过程桩身应力控制标准。

2 工程应用

2.1 工程概况

湛江地区码头工程中广泛使用的预应力混凝土空心方桩截面形式为 650 mm × 650 mm，其距离桩头前 2.6 m 和距离桩尖 2.8 m 部分实心，中间部分为直径 0.3 m 空心圆。混凝土强度等级为 C50，采用高性能混凝土。张拉控制应力是 450 MPa，预应力损失不超过 100 MPa，预应力钢筋的配筋率为 2.15%。其结构见图 4。

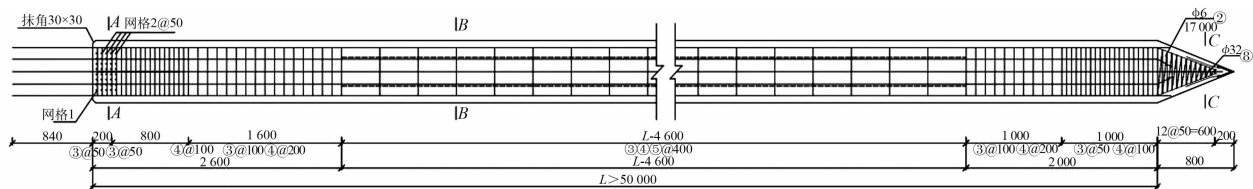


图 4 预应力混凝土空心方桩结构

某码头工程中，预应力混凝土空心方桩的混凝土强度等级为 C50，沉桩采用 D100 桩锤，采用桩尖高程和贯入度双控标准，二档能量终锤贯入度最后 3 阵，每阵 10 击，平均贯入度不大于 5 mm/击。在方桩沉桩过程中发现有较多的基桩在贯入度达到设计要求的收锤标准时，桩尖距设计高程仍大于 1 m，甚至超出 4~5 m（表 4），不满足原停锤标准要求的现象，而此类桩根据高应变的结果显示单桩承载力已经满足设计要求（表 5）。

表 4 设计桩尖高程与实际桩尖高程对比

桩号	设计桩尖高程	实际桩尖高程	超出长度
1 [#]	-39	-35.8	3.2
2 [#]	-41	-36.9	4.1
3 [#]	-44	-40.3	3.7
4 [#]	-44	-40.3	3.7
5 [#]	-44	-40.7	3.3
6 [#]	-43	-40.7	2.3
7 [#]	-42	39.4	2.6
8 [#]	-43	-41.2	1.8

表 5 曲线拟合法分析结果

桩号	动测 承载力/kN	摩阻力/ kN	端承力/ kN	拟合分析 桩顶最大 位移/mm	贯入度/ (mm·击 ⁻¹)
1 [#] 初打	5 561.5	3 267.2	2 294.3	25.0	5
1 [#] 复打	6 921.4	4 318.6	2 602.8	16.9	5
2 [#] 初打	5 974.4	3 381.2	2 593.2	27.4	5
2 [#] 复打	7 222.3	4 494.3	2 728.0	16.7	5

注：承载力要求为 5 200 kN。

表 5 为高应变测试的基桩曲线拟合法分析结果。分析数据可知：当贯入度为 5 mm/击时，桩的承载力为 5 500~6 000 kN；贯入度小于 4 mm/击时，桩的承载力达到 6 000 kN 以上。乘以恢复系数约为 1.2，桩的承载力远大于设计承载力要求。结合地质情况综合分析，方桩桩尖进入黏土层后，用 D100 柴油锤锤击施工，贯入度约为 5 mm/击时，承载力已能满足设计要求，因地质局部差异性，当黏

土夹砂层层厚较大（如大于 4 m 时，桩基要穿过该土层进入下卧的粗砂层作为桩基持力层时，锤击数大（1 000 击以上），贯入度小（2~5 mm/击），对桩身损伤大，不利于码头整体质量的控制。

2.2 沉桩过程桩身应力的控制

根据本文公式(1)计算得到本工程中空心方桩的锤击沉桩压应力标准值： $\sigma_p = 30.55 \text{ MPa}$ 。

根据公式(2)计算得到其锤击沉桩拉应力标准值为： $\sigma_s = 10.33 \text{ MPa}$ 。

本项目中对 9[#]方桩进行了现场施工监控，该桩桩长 49 m，设计桩尖高程 -41 m，地质勘察资料见表 6。

表 6 地质钻孔资料

岩土名称	分层厚度/m	层底高程/m	标贯/(击·30 cm ⁻¹)
淤泥	4.92	-7.68	0
黏土	6.66	-14.34	4~8
黏土	12.52	-26.86	9~14
黏土	7.43	-34.29	16~18
中砂	2.63	-36.92	27
砾砂	6.21	-43.13	32~49

图 5~9 给出了沉桩过程中桩身相关参数随着入土深度变化曲线。沉桩初期采用 D100 锤Ⅲ档施打，由图 5 可知拉应力比较大，最大拉应力达到 10.01 MPa，而计算的拉应力标准值为 10.33 MPa，实际沉桩桩身最大拉应力值接近计算标准值，有开裂危险。鉴于此，桩尖处于上层较软淤泥层时，降低锤高，采用Ⅱ档打入，防止桩身拉应力超限，发生桩身破坏，当桩尖高程低于 -27.5 m 时，桩尖进入硬土层，采用Ⅲ档施打。桩锤由Ⅱ档提高到Ⅲ档，桩身最大能量提高，由图 6 可知，Ⅲ档能量达到 120 kN·m 以上，而桩身的最大压应力值显著提高，而此时最大锤击压应力成为沉桩的控制阀门^[9]，根据计算，压应力控制值

为 30.55 MPa,随着桩尖入土深度的增大,最大锤击压应力有所增加,由图 9 可知,当入土深度为 34.2 m 时,压应力最大值为 26.852 MPa,小于控制阈值,而此时贯入度已经达到了收锤标准的 5 mm/击,距离桩尖设计高程还有 4 m。其动测结果显示其承载力已经大大超过设计要求的 5 200 kN,而桩身完整性系数均为 100%。

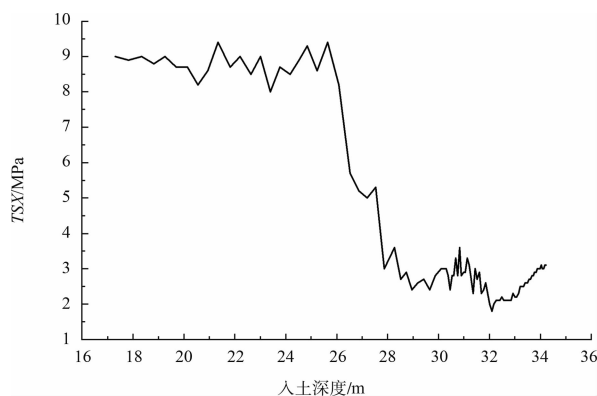


图 5 最大拉应力随着入土深度的变化

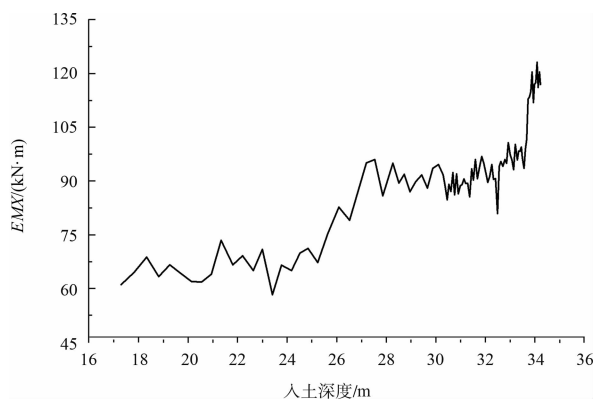


图 6 桩身最大能量随着入土深度的变化

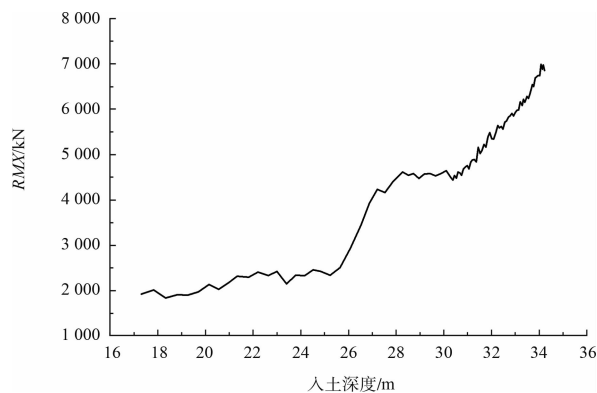


图 7 RMX 承载力随着入土深度的变化

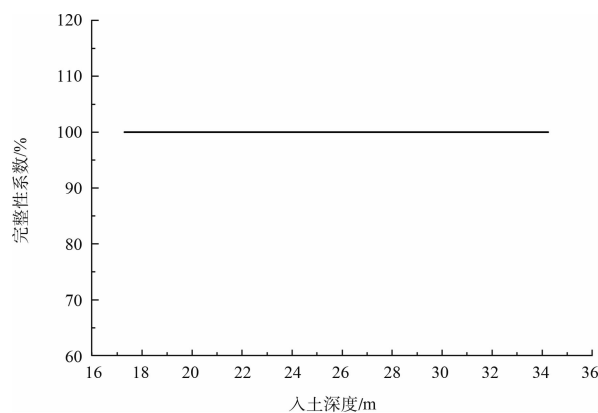


图 8 完整性系数随着入土深度的变化

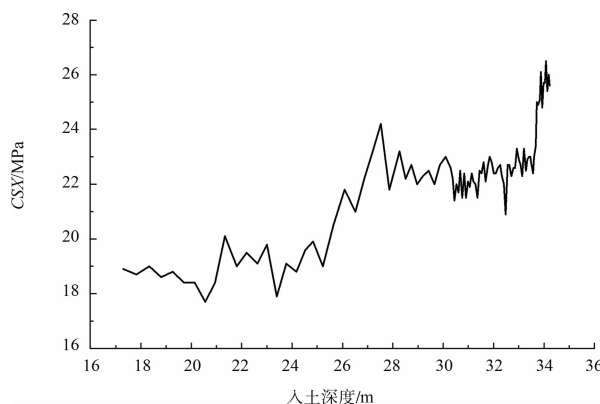


图 9 最大压应力随着入土深度的变化

表 7 9# 桩曲线拟合法分析结果

状态	终锤动测 承载力/kN	摩阻力/ kN	端承力/ kN	拟合分析 桩顶最大 位移/mm	贯入度/ (mm·击 ⁻¹)
初打	6 128.3	3 634.3	2 494.0	27.0	5
复打	7 360.1	4 786.3	2 573.8	19.5	5

从上述高应变全程动测监测数据图表以及监控过程来看,案例中的预应力混凝土空心方桩混凝土强度较低、桩长较大,上部软土层较厚,在施打初期拉应力较大,容易造成桩身因受拉破裂。而设计要求的桩尖持力层为较硬土层,沉桩后期容易出现锤击能量过高、桩身压应力超标而桩身受损的现象。因此通过对于桩身拉压应力阈值的计算,找出其沉桩过程的应力控制值,通过调整桩锤跳高控制因锤击造成桩身应力值,从而避免了桩身在沉桩施工时发生桩身破坏。虽然重锤低击能减少质量事故的发生,但是若一直采用较小的跳高沉桩施工会造成施工效率较低,因此在桩

基有一定承载力后并能控制贯入度在一定范围内则可采用较大锤芯跳高进行施打。最终根据实测的极限承载力来判断是否收锤。本次施工较好的控制沉桩过程中桩身应力值,桩身无发生明显损坏,完整性较好,最终桩基极限承载力达到预计要求,施工质量高。

根据前述测试和分析情况,该码头工程方桩沉桩仍采用 D100 桩锤二档能量停锤,但停锤标准做了以下修正:

- 1) 最后三阵锤击平均贯入度达到 5 mm 以下,桩尖高程高出设计高程 2.5 m 范围内可停锤;
- 2) 最后三阵锤击平均贯入度达到 5 mm 以下,桩尖高程高出设计高程 4 m 范围内,继续锤击 50 ~ 80 击后可停锤;
- 3) 最后三阵锤击平均贯入度达到 5 mm 以下,桩尖高程高出设计高程且超高 4 m 范围内,及时报监理工程师并与设计院联系;
- 4) 当桩尖已达设计高程,且最后 10 击平均贯入度 > 5 mm/击,及时报监理工程师并与设计院联系。沉桩均采用 D100 桩锤二档能量停锤。

3 结论

1) 预应力混凝土桩沉桩过程桩身最大压应力值控制值公式为: $\sigma_p \leq b_c f_c$, b_c 为动态混凝土强度抗拉强度增强系数, b_c 取 1.3; σ_p 为锤击压应力控制值; f_c 为管桩混凝土轴心抗压强度设计值。

2) 预应力混凝土桩沉桩过程桩身最大拉应力值控制值公式为: $\sigma_s (1 - \rho_p) \leq \gamma_{pc} \sigma_{pc} + b_t f_t$, 其中 σ_s 为锤击沉桩拉应力控制值, ρ_p 为预应力钢筋的配筋率; γ_{pc} 为混凝土预应力分项系数, 取为 1.0, σ_{pc} 为混凝土有效预压应力值, b_t 为动态混凝土强度抗拉强度增强系数, 取为 1.3, f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值。

3) 钢管桩沉桩过程桩身最大应力值控制值公式为: $\sigma_s \leq \mu_s$, σ_s 为锤击沉桩应力控制值, μ_s 为钢材静态屈服应力值。

参考文献:

- [1] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [2] JTJ 261—1997 港口工程预应力混凝土大直径管桩设计与施工规程[S].
- [3] Hatano T. Dynamical compression deformation and failure of concrete under earthquake load [S]//Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, 1960.
- [4] Raphael J M. Tensile strength of concrete[J]. ACI Mater J, 1984, 81(2): 158-165.
- [5] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [6] JTJ 267—1998 港口工程混凝土结构设计规范[S].
- [7] GB 13476—2009 先张法预应力混凝土管桩[S].
- [8] 于文静, 史健勇, 赵金城. Q345 钢材动态力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 28-30.
- [9] 戴宇文, 吕黄, 谭德银. 考虑桩波动特性的 PHC 管桩半闭环施工监控[J]. 水运工程, 2010(10): 130-134.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

世界最大起重船进入起重机总装阶段

8月25日, 振华重工自主设计建造的世界最大起重船进入起重机总装阶段。

该起重船是国家产业技术创新研发项目, 其船体长 290 m, 宽 58 m, 最大起重质量达到 1.2 万 t, 相当于吊起 2 座钻井平台, 项目于 2011 年启动。这是振华重工继建造“蓝鲸号”7 500 t 起重船和韩国三星 8 000 t 起重船之后, 再次刷新世界最大起重船纪录。该船具备自航、锚泊、动力定位以及 360° 全回转等功能, 适用于无限航区航行, 可在 300 m 深海执行各种起重、勘探、打捞任务, 可广泛运用于架桥、救助、水上施工等多个领域。

该船预计 2015 年建成, 届时将为深海海上作业和打捞救助等相关领域提供重要的装备支持, 同时也巩固了振华重工在大型海上起重装备建造领域的国际领军地位。 (摘编自《中国交通建设网》)