



欧标体系下码头打入桩施工前期策划及工作流程*

胡兴昊，娄学谦，苏世定

(中交四航工程研究院有限公司，广东 广州 510230)

摘要：码头打入桩施工前期的策划主要包括选择打桩设备、制定沉桩控制标准和现场试验等，是打入桩设计施工能否顺利实施的关键。而中、欧标准的差异会让熟悉国内标准的中国工程师对欧标体系下打入桩施工前的策划工作感到困扰。从规范条文出发，介绍欧标体系下码头打入桩施工前期的主要策划工作，并通过与中国规范相关内容的对比，总结中、欧标准的异同以加深对欧洲标准的理解。以此提出欧标体系下打入桩施工前期的主要工作流程，并在东非某码头工程中进行应用。工程实践表明，该流程有理有据、内容全面，能满足采用欧洲标准项目的要求。

关键词：欧洲标准；打入桩；施工前期策划；工作流程

中图分类号：U 655.54⁴

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0199-06

Preliminary planning and work process of pier's driven pile construction under European standard system

HU Xing-hao, LOU Xue-qian, SU Shi-ding

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The planning work in the early stage of the wharf's driven pile construction includes the selection of driving equipment, establishing pile driving control standards and pile test, etc., which is the key to the success of driven pile design and construction. The differences between Chinese and European standards will make Chinese engineers who are familiar with the domestic standards perplexed by the preparation work before the construction of driven piles under the European standard system. Starting from the standard, this article introduces the main planning work in the early stage of the pier's driven pile construction under the European standard system, and through comparison with the relevant content of the Chinese standard, summarizes the similarities and differences between the Chinese and European standards to deepen the understanding of the European standard. In this way, the main work process in the early stage of driving pile construction under the European standard system is proposed and applied to a terminal project in East Africa. The engineering practice shows that the process is well-founded and comprehensive, and can meet the requirements of adopting European standard projects.

Keywords: European code; driven pile; preliminary planning; work process

欧标(Eurocodes)是世界上先进的技术标准体系，其应用范围不仅限于欧洲本土，在亚非拉美很多国家也有很大影响力。随着国家海上丝绸之路战略的推进，中国基建企业承建的国外码头工

程也越来越多地采用欧洲标准。因此，对欧标体系进行全面的研究和了解极其重要。在码头工程中，目前已有不少学者在勘察^[1-2]、桩基设计^[3-4]、地基承载力^[5]等方面对欧洲标准进行了介绍。但

收稿日期：2020-05-20

*基金项目：广州市珠江科技新星专项资助项目(201806010164)；广州市珠江科技新星专项资助项目(201906010023)

作者简介：胡兴昊(1988—)，男，硕士，工程师，从事桩基工程的科研、设计及检测评估工作。

关于欧标中与码头工程打入桩施工前期策划内容相关的介绍鲜有报道。良好的施工准备工作是项目得以顺利实施的保证，因此有必要针对欧标体系下打入桩施工前期的策划工作进行研究。

本文所述打入桩，依据中国标准包括预制混凝土桩、钢管桩、钢板桩等，与欧洲标准中采用冲击法或振动法施工的预制挤土桩对应。打入桩施工前期的策划工作主要包括选择打桩设备、沉桩时桩身内力计算及控制、制定打桩控制标准和现场试验等，这些都是打入桩设计施工乃至整个项目能否顺利实施的关键。但目前国内对打入桩施工前期工作的研究主要集中在现场试验^[6-7]方面，对其他工作关注很少，更是未见有在欧标体系下与之相关的研究。

本文主要通过对欧洲标准中打入桩施工前期选择打桩设备等工作内容的全面解读，介绍欧标体系下码头打入桩施工前期的主要策划工作，并通过与中国规范相关内容的对比，总结中、欧标准的主要异同以加深对欧洲标准的理解。以此提出欧标体系下打入桩施工前期的主要工作流程，并将该流程应用于东非某码头工程中。介绍该码头工程在欧标体系下施工准备过程及成果。

1 欧洲标准相关内容解读

1.1 参考规范

在欧标中，码头工程打入桩施工前期策划工作主要参考欧标挤土桩执行规范 EN 12699^[8]及通用混凝土通用准则 EN 13369^[9]等，国内主要参考 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[10]和 JTS 215—2018《码头结构施工规范》^[11]。对欧洲标准中打入桩施工前期主要策划工作中打桩设备选择、桩身内力计算及控制、沉桩控制标准制定、现场试验等内容的解读及与中国标准进行对比。

1.2 打桩设备选择

欧标 EN 12699 对选择打桩设备的规定主要为原则性规定。如第 8.5.1 条规定打桩设备应符合欧标钻孔及挤土设备规范 EN 16228，并在第 8.5.2、8.5.3 和 8.5.6 条分别对冲击锤、振动锤、打桩辅助设备做了原则性的规定（未提供定量指标）。同时在第 7.1.4 条中指出，利用波动方程可打性分析或类似方法，有助于确定合适的打桩设备。另外，欧标第 8.5.3.4 条建议可使用多种设备配合沉桩，可结合振动打桩和锤击打桩，振动锤通常用于初沉桩，冲击锤用于将桩打入所需的阻力或深度。这给打入桩选锤提供了新的思路。

与之对应的中国标准 JTS 215—2018 在第 4.3.11~4.3.13 条和附录 H 分别对可打性分析、替打、锤垫和锤型等进行了规定，包括量化要求。表明中国标准对于打桩设备的选择，既有原则要求又有定量指标，欧标则较为开放，偏于原则性指导，具体根据现场确定。

1.3 桩身内力计算及控制

在欧标中关于桩身内力计算及控制主要在 2 个阶段。1) 预制桩的起吊运输过程：须根据 EN 13369 中 4.3.3 的规定，依照各种起吊及运输工况，对打入桩桩身强度进行验算，防止起吊过程中吊点选择不当或运输时桩位摆放失误所引起的桩身开裂变形；2) 打桩过程：欧标 EN 12699 第 7.6.1.2 条规定，存在桩身应力过大风险时，应提前利用波动方程进行可打性分析，且应在打桩时进行桩身应力监测，以验证预测的正确性。同时第 7.6.2~7.6.4 条分别对混凝土桩、钢桩和木桩沉桩时的最大拉应力控制值和应力控制值可提高的幅度做了规定，见表 1。另外，特别提示混凝土桩在先硬后软场地及基岩场地打桩分别会产生较大的拉应力和压应力，须引起注意。

表 1 打入桩沉桩过程桩身应力控制值

桩型	最大压应力(包括预应力)	最大拉应力	监测打桩应力时，允许值可提高的幅度/%
混凝土桩	不超过 0.8 倍混凝土特征强度	不超过 $0.9f_{yk}A$ -预应力	10
钢管桩	不超过 $0.9f_{yk}$	不超过 $0.9f_{yk}$	20

注： f_{yk} 是钢筋的特征屈服强度，A 是钢筋面积。

中国标准应力控制公式与欧标类似, 也认为混凝土或钢在冲击力作用下的强度将比静态时提高, 但中国标准根据统计分析方法推荐桩身应力, 欧标则主张利用可打性分析进行计算。

1.4 沉桩控制标准制定

欧标 EN 12699 首先在第 7.6.1.1 条提出在确定沉桩标准时应评估和考虑的因素, 包括打桩程序、桩锤、桩和桩垫、桩径和桩长等。随后在第 8.6.1.2 条规定应在指定的时间后对 1 根或多根桩复打, 以确定时间对桩的承载力的影响; 第 8.6.1.3 条规定如果在复打时未达到沉桩标准, 则应重新评估桩的承载力。表明在欧标判断是否完成沉桩施工的标准为打入桩承载力是否满足设计要求。另外, 第 7.7.1 条规定, 在施工前应通过动测初、复打试验考察时间对承载力的影响, 得到承载力恢复系数。

而中国标准一般以贯入度、高程之一或组合为停锤标准, 并就不同持力层分别提出定量规定。对比可见, 欧标的要求较为直接, 以承载力满足设计要求为准, 使沉桩施工不拘泥于具体贯入度或高程。但又认可在经静载验证或已有经验的前提下^[12] 动测得到的极限承载力与贯入度(高程)的对应关系, 将承载力与贯入度(高程)再次结合, 这有利于提高现场施工效率。

1.5 现场试验

欧标体系下的现场试验包括打桩试验和荷载试验。EN 12699 第 7.1.4 条规定: 如果在可打性方面没有类似经验, 则应在主要工作开始前在选定地点进行 1 次或多次打桩试验。并在该条文下的注释 1 中说明打桩试验提供了调查打桩程序、设备、技术的可能性, 可帮助沉桩和评估桩的建造对土层特性及环境的影响。此外, 可以通过打桩试验来确定打桩标准, 并给出桩长和承载力的关系。注释 2 提出利用波动方程或类似方法进行可打性研究, 有助于确定合适的打桩程序、打桩设备和打桩应力。

可见, 在欧标中现场试验除了进行试打桩, 还须进行荷载试验验证承载力与高程(贯入度)关系,

荷载试验一般采用动测或静载试验。动测试验在沉桩时进行, 静载试验用于进一步验证承载力和动测结果。另外, 欧标建议提前进行可打性分析, 以对打桩工作进行预估, 避免试验盲目开始。

1.6 工作流程推荐

综上, 对欧标体系下施工前期主要工作流程建议如下: 1) 根据施工资源、现场条件以及可打性分析结果确定打桩设备; 2) 利用可打性分析计算桩身最大应力、不同深度的贯入度和极限承载力等参数, 预估打桩过程以合理选择打桩程序并初定停锤标准; 3) 进行试桩或工程桩试打试验, 开展高应变初、复打检测(有条件应全程动测), 得到施工参数以验证可打性分析并指导施工; 4) 进行竖向抗压静载试验验证动测承载力。

2 工程案例

东非坦桑尼亚某港口项目参考欧洲标准。海上桩基采用 $\phi 800$ 、 $1\ 000\text{ mm}$ 的 PHC 桩, 包括直桩和斜桩, 工程桩总数超 1 000 根, 均由国内采购, 吊运过程已经计算复核。

项目典型位置地质钻孔 ZK01、ZK06 结果如表 2 所示, 打桩施工时海底泥面高程为 -14.0 m 左右。分析勘察结果可知, 该项目土层较硬, 普遍为密实-极密实状态, 可能造成 PHC 桩难以沉桩到位导致承载力不足, 若持续高能量施打又易引起桩身断裂、桩尖破损等问题。

表 2 岩土层物理力学性质指标

岩土名称及状态	底层高程/m		密度 $\rho/\text{(g}\cdot\text{cm}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	标贯 N/击
	ZK01	ZK06			
极密实细中砂	-	-16.47	2.05	41.2	45~240
密实中粗砂	-24.19	-21.47	2.05	42.0	34~39
极密实珊瑚礁砂砾	-	-23.47	2.07	49.5	210
密实-极密实粗砂	-30.09	-	2.00	42.0	36~280
极密实中粗砂	-34.19	-31.07	2.00	42.0	33~120
极密实珊瑚礁砂砾	-	-40.07	2.07	49.5	190~270
硬塑砂质黏土	-40.89	-	1.89	-	140~245

3 施工前期工作流程

3.1 确定打桩设备

首先应选择打桩设备。根据施工资源及现场

要求,有以下2种备选液压锤可供选择(表3)。

表3 打桩锤性能参数

型号	锤质量/t	额定冲程/m	最大冲击能量/(kN·m)
YC 30	30.0	0.2~1.5	450
BSP CGL370	25.0	0.2~1.5	375

依规范要求采用打桩分析软件 GRLWEAP 对2种备选液压锤进行计算,计算桩型为 $\phi 800\text{ mm}$ 、壁厚130 mm的PHC直桩和钢桩靴的组合形式,

地质资料参考ZK01,入土深度22 m。计算结果如表4所示。从表4可知:1)用以上2桩锤均能将PHC桩沉桩至设计深度,且打桩过程贯入度均正常,但桩身拉、压应力偏大,须引起重视;2)桩锤质量减小对桩身拉压应力影响不大,但会减小贯入度,令总锤击数明显增加。锤击数的增加,将加大施工风险。因此,决定选用YC30锤,采用重锤低击方法沉桩,以降低桩身损坏风险。

表4 不同桩锤可打性分析结果

锤型	锤质量/t	锤芯跳高/m	停锤贯入度/mm	总锤击数/击	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	初打承载力/kN
YC30	30.0	0.8	5.47	2 532	38.6	10.8	7 824
BSP CGL370	25.0	0.8	2.97	3 893	35.9	9.6	7 824

3.2 可打性分析

为模拟打桩过程,观察在低跳高时PHC桩,特别是斜桩的穿透能力和桩身应力情况,在选定桩锤后,将锤芯跳高定为0.3 m,采用GRLWEAP软件,对不同桩径的直桩、斜桩进行可打性分析。结果表明:1)斜桩可沉桩至设计高程,但锤击数较直桩多;2)所有PHC桩沉桩桩身应力虽然偏

高,但都在设计允许范围内,其中最大拉应力出现在沉桩初期,可相应降低开锤跳高;3)出现未到设计高程而贯入度<3 mm时承载力满足设计要求的情况;4)鉴于沉桩总锤击数较多且桩身应力较大,建议现场沉桩试验时进行全程应力监控以指导调整锤芯跳高。计算结果见表5。

表5 可打性分析结果

位置	计算桩底高程/m	停锤贯入度/mm	总锤击数/击	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	最大桩身能量/kJ	初打极限承载力/kN	桩型
ZK01	-32.0	4.8	2 166	28.3	9.6	68.6	6 788.2	$\phi 800\text{ mm}$ 直桩
	-32.0	4.6	2 365	28.0	9.1	70.5	6 959.1	$\phi 1 000\text{ mm}$ 直桩
	-32.0	1.8	3 140	30.6	8.6	62.6	8 125.3	$\phi 1 000\text{ mm}$ 倾桩
ZK06	-35.0	4.2	1 316	29.6	9.9	70.6	6 987.6	$\phi 800\text{ mm}$ 直桩
	-35.0	2.9	1 598	28.2	8.8	69.4	7 938.6	$\phi 1 000\text{ mm}$ 直桩
	-35.0	2.3	2 263	31.9	8.9	61.2	7 868.2	$\phi 800\text{ mm}$ 仰桩

参考可打性分析结果,在施工前初步提出的停锤控制方法如下:

1)以0.3 m跳高,连续3阵平均贯入度≤5 mm,且达到设计高程,可以停锤;如贯入度大于5 mm,应继续锤击至贯入度≤5 mm方可停锤。

2)未达到设计高程,在0.3 m跳高下连续3阵平均贯入度≤5 mm,且桩尖距设计高程≤1.0 m,可以停锤。

3)桩尖距设计高程≥1 m,平均贯入度≤3 mm,可停锤。

3.3 现场高应变动测

为验证以上分析结果和提供沉桩施工参考,大规模施工前在ZK01和ZK06附近开展5根PHC桩的打桩试验,其中T1~T4为工程桩,T5为试验桩。同时进行高应变全程动测和至少7 d后的复打试验。各PHC桩试打桩及动测结果分别见表6、7。

表 6 试打桩设计及施工参数

桩号	地质钻孔	桩长/m	桩底高程/m	沉桩跳高/m	停锤贯入度/mm	总锤击数/击	桩型
T1		45	-32.95	0.2~0.4	5.0	1 995	φ800 mm 直桩
T2	ZK01	45	-32.79	0.2~0.4	4.6	1 940	φ1 000 mm 直桩
T3		45	-32.96	0.2~0.4	1.0	3 325	φ1 000 mm 仰桩
T4	ZK06	45	-36.10	0.2~0.4	4.3	910	φ800 mm 直桩
T5		45	-35.10	0.2~0.4	3.0	890	φ800 mm 直桩

表 7 试打桩动测结果

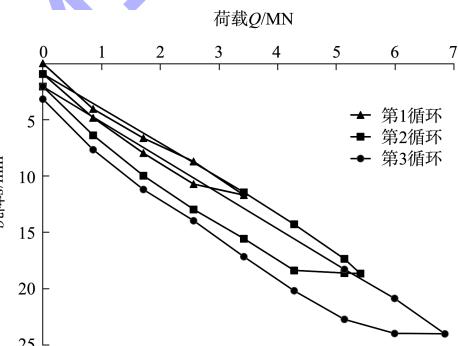
桩号	最大锤击能量/kJ	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	设计极限承载力/kN	初打承载力/kN	复打承载力/kN	承载力恢复系数
T1	99.3	30.3	9.9	6 846	6 159.0	7 698.8	1.25
T2	98.1	28.4	10.1	7 088	6 759.0	8 860.0	1.31
T3	96.3	33.0	9.6	7 978	8 125.0	10 393.0	1.28
T4	100.8	29.8	10.3	6 846	6 424.5	8 351.9	1.30
T5	103.7	30.8	9.9	6 846	6 705.6	8 382.0	1.25

由表 6、7 可知, 各试打桩在满足停锤标准后, 其承载力均满足设计要求。且桩身拉、压应力等与可打性分析差距不大。证明可打性分析不仅有助于选择桩锤, 在模拟打桩过程选择安全的沉桩方式和合理的沉桩标准等也能发挥重要作用, 可避免施工盲目开始。可见, 欧洲标准将可打性分析纳入试桩工作, 扩大可打性分析作用范围能对项目起到切实有效的作用。

同时, 在现场试验时还通过初复打试验明确了时间对该项目 PHC 桩承载力的影响, 将承载力恢复系数定为 1.25。依据规范向项目各方提出在无高应变复打条件时, 可据此预测最终承载力, 并取得同意, 为提高施工效率创造了条件。

3.4 抗压静载试验

为验证动测结果, 进一步复核桩基承载力, 对 T5 桩进行竖向抗压静载试验。采用慢速维持荷载法, 分 2 个循环, 最大加载量为设计极限承载力 6.846 MN。试验结果如图 1 所示。由图 1 可知, Q - s 曲线较为平缓, 最大加载时沉降为 23.99 mm, 残余沉降为 3.17 mm, 均未超过规范限值, 表明该试验桩未发生破坏, 承载力满足设计要求。

图 1 T5 桩各加载循环下的 Q - s 曲线

4 结语

1) 欧标中定量规定较少, 在选择打桩设备、确定沉桩标准等方面主要提出原则性要求, 留给项目各方的空间较大。

2) 欧标以承载力是否达标为沉桩控制标准, 接受动测结果及由初复打试验得到时间对承载力的影响。

3) 欧标中可打性分析应用范围较广, 可用于选择打桩设备、判断桩身应力、以及预估打桩工作等, 以避免打桩盲目开始。

4) 提出欧标体系下打入桩施工前期主要工作流程, 并应用于坦桑尼亚某码头工程中。采用 GRLWEAP 软件进行可打性分析预估现场打桩情

况,有助于合理选择桩锤、打桩程序及确定停锤标准;通过试打桩、高应变全程动测和静载试验验证并修正参数的工作流程,有理有据,内容全面,可为打入桩施工准备工作乃至整个项目提供切实有益的帮助。

参考文献:

- [1] 万中喜,任世锋,祁丽华.中、欧、美岩土勘察布置的比较[J].水运工程,2019(6):158-162,179.
- [2] 程新生,刘星,代卫强.中外水运工程岩土勘察标准对比[J].水运工程,2018(8):150-153,170.
- [3] 沈超,吴立柱,向军,等.基于欧标的软弱岩地质条件下灌注桩承载能力设计分析[J].中国港湾建设,2019,39(1):31-34.
- [4] 孔友南,陈谦,曹凯平,等.中美欧日桩基承载力设计规范比较[J].水运工程,2018(6):241-246.
- [5] 方波,符成.中欧规范关于重力式码头地基承载力计算

(上接第 173 页)

- [2] LIU Z, MIEDEMA S A , VLASBLOM W J, et al. Modeling and simulation of the dynamic behavior of TSHD's suction pipe system by using ADAMS[C]// China Dredging Association. Proceedings of CHIDA Dredging Days. Beijing: CHIDA, 2003: 1-17.
- [3] KEIZER C D, VERDOODT L L J. Training simulator for trailing suction hopper dredgers with a dynamic and realistic dredging process[C]//China Dredging Association. Proceedings of China International Dredging Congress & Exhibition. Beijing: CHIDA, 2003: 81-92.
- [4] 刘厚恕.国外挖泥船发展新态势[J].船舶,2009,20(6):1-7.
- [5] 刘厚恕.耙吸挖泥船在我国的发展及大型化展望[J].上海造船,2003(1):45-49,3.
- [6] 赖灼森.广航局:新型耙头应用效果佳[N].中国交通报,2010-06-29(2).

(上接第 194 页)

- [9] 吴燕开.排水粉喷桩(2D 工法)加固软土地基原理与应用研究[博士学位论文][D].南京:东南大学,2005.
- [10] 沈水龙,蔡丰锡,顾伟华.有明黏土中搅拌桩施工时的孔隙水压力[J].岩土力学,2006,27(4):648-652.
- [11] VESIC A S. Expansion of cavity in infinite soil mass [J]. Journal of mechanics and foundation engineering, 1972 ,

方法的对比[J].水运工程,2018(10):117-121,131.

- [6] 时闽生,孙言茂,黎双邵,等.海上风电大型钢管嵌岩桩基础施工和试验研究[J].中国港湾建设,2016,36(1):32-36.
- [7] 胡兴昊,黄邦,王幸.大直径钢管桩承载力恢复过程试验研究[J].水运工程,2018(12):193-197,219.
- [8] European Committee for Standardization. BS EN 12699: 2015. Execution of special geotechnical work-Displacement piles[S]. London: BSI, 2015.
- [9] European Committee for Standardization. Common rules for precast concrete products: BS EN 13369: 2018 [S]. London: BSI, 2018.
- [10] 中交第一航务工程设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [11] 中交第四航务工程局有限公司.码头结构施工规范: JTS 215—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode 7: Geotechnical Design—Part 1: General rules: BS EN 1997-1: 2004 [S]. London: BSI, 2004. (本文编辑 郭雪珍)
- [7] 尹纪富,洪国军,江帅,等.耙吸挖泥船耙头固定体喷嘴流场特性数值分析[J].中国港湾建设,2016,36(5):9-12,20.
- [8] 刘昊阳,伍骏,孟治金,等.耙吸式挖泥船耙头冲水系统喷嘴布局的优化研究[J].船舶工程,2019,41(3):76-81,86.
- [9] 聂敏.耙吸挖泥船航道疏浚工程分析[J].建材与装饰,2018(32):266-267.
- [10] 高伟.国内外疏浚挖泥设备的对比与分析[J].中国港湾建设,2009(2):63-67.
- [11] 左用中.1000 方耙吸式挖泥船备用耙头模型试验[J].武汉水运工程学院学报,1981(2):109-124.
- [12] 刘东征,李春潮,郭飞燕,等.耙吸挖泥船格栅适用工况应用分析[J].水运工程,2014(9):181-184.

(本文编辑 王璁)

98(3):265-289.

- [12] CHAI J C, MIURA N, KOGA H. Lateral displacement of ground caused by soil-cement column installation [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005, 131(5): 623-632.

(本文编辑 郭雪珍)