

· 施 工 ·



# 基于欧标体系的 打入桩停锤标准的确定方法\*

苏世定<sup>1</sup>, 徐 雄<sup>2</sup>, 杨 黎<sup>2</sup>, 张佳文<sup>2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 针对复杂地质条件下如何确定合理可靠的打入桩停锤标准问题, 研究基于欧标体系的打入桩停锤标准的确定方法。依托某码头工程, 采用高应变打桩监控和静载试验相结合的方法, 建立极限承载力与贯入度的对应关系, 并最终确定用于指导该工程打入桩施工的停锤标准。结果表明: 基于欧标体系确定的打入桩停锤标准以承载力是否满足设计要求为准则, 标准可靠性高。

**关键词:** 欧标; 打入桩; 停锤标准; 打桩监控; 极限承载力

**中图分类号:** TU 473; U 656

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)11-0203-05

## Determination method of driving stop criterion for driven piles based on Euro codes

SU Shi-ding<sup>1</sup>, XU Xiong<sup>2</sup>, YANG Li<sup>2</sup>, ZHANG Jia-wen<sup>2</sup>

(1. CCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. The Second Engineering Company of CCC Fourth Harbor Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of how to determine a reasonable and reliable driving stop criterion for driven piles under complex geological conditions, the determination method of driving stop criterion for driven piles based on Euro codes is studied. Relying on a certain wharf project, using a combination of high-strain dynamic pile monitoring and static load testing, the corresponding relationship between the ultimate bearing capacity and penetration/pile tip elevation is established, and finally the driving stop criterion is determined to guide the construction of the project's pile driving. The results show that the driving stop criterion for driven piles determined based on Euro codes is based on whether the bearing capacity meets the design requirements, and the reliability of the criterion is high.

**Keywords:** Euro codes; driven pile; driving stop criterion; dynamic pile monitoring; ultimate bearing capacity

欧标作为世界上最成熟的技术标准体系之一, 广泛应用于亚非拉等国家地区, 因此了解掌握欧标体系的各个方面都具有极其重要的意义。目前已有不少学者在桩基设计<sup>[1]</sup>、地质勘察<sup>[2-3]</sup>和地基承载力计算<sup>[4]</sup>等方面开展了相关研究工作, 但具体细化到高桩码头结构中的打入桩施工停锤标准确定还相对较少。下部结构打入桩施工作为高桩码头水工结构

施工的“生命线”, 它的顺利与否直接关系到整个项目的实施进度。因此, 参照欧标体系确定各方认可的停锤标准具有十分重要的意义。本文针对某高桩码头工程, 详解欧标体系指导下的停锤标准确定方法。

### 1 基于欧标体系的停锤标准确定方法

欧标体系中, 码头工程中的打入桩施工主要

收稿日期: 2021-01-28

\*基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)河口海岸与岛礁工程创新团队建设项目(311020009)

作者简介: 苏世定(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桩基工程的科研, 设计及检测评估工作。

参考规范 EN 12699<sup>[5]</sup> 和 EN 1997-1: 2004<sup>[6]</sup>。欧标 EN 12699 以打入桩是否满足设计承载力要求作为准则来确定停锤标准。对于评估承载力的现场试验, 欧标 EN 1997-1:2004 统称其为打桩试验。欧标 EN 1997-1:2004 指出在无相关经验前提下, 经静载试验验证的高应变动测可用于评估承载力, 确定极限承载力与贯入度/桩端高程的对应关系。但为了避免盲目开始现场试验, EN 12699 提出应先进行可打性分析研究, 对打桩试验进行评估, 以确定合适的打桩设备和工作流程。

综合以上几点, 在欧标体系的相关指导下, 本工程实际采用的停锤标准确定方法如下: 1) 根据地质勘察资料, 通过可打性分析进行设备选型或者评估已有打桩设备; 2) 选择具有代表性的区域进行打桩试验, 开展高应变打桩过程监控, 并进行初复打测试, 以获得施工参数验证沉桩可行

性, 并初定停锤标准用于指导沉桩施工; 3) 利用初定的停锤标准进行第二次试打试验, 进行高应变打桩过程监控、初复打测试, 评估承载力值, 最后通过竖向抗压静载试验验证高应变结果, 以确定最终的停锤标准。

2 工程概况

工程位于南太平洋, 为高桩码头结构, 基桩设计与施工参照欧标 EN 12699 和 EN 1997-1:2004。基桩采用大直径钢管桩, 桩径有 1 800、1 500 mm 两种, 其中 1 800 mm 桩径钢管桩为轨道梁下承重桩。施工前期评估, 项目实施主要难点在码头浅岩面区的钢管桩施打。根据地质勘察结果, 浅岩面区的地质分布主要为珊瑚砂、强风化千枚岩层和中风化千枚岩层, 其物理力学性质指标见表 1。

表 1 岩土层物理力学性质指标

岩土名称及状态	层顶高程/m		土体密度/(t·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/kPa	单轴抗压强度/MPa	标贯击数/击
	SGT1	SGT2				
松散珊瑚砂	-20.30	-	1.65	35	-	3~12
中密碎石土	-	-20.58	1.0	37	-	23~29
强风化千枚岩	-31.21	-25.87	2.00	-	6.0	188~300
中风化千枚岩	-33.61	-35.07	2.20	-	10.3	-

根据设计规定的试打要求, SGT1 区域试验桩 T1 的设计桩底高程为-42.50 m, 最小桩底高程为-35.00 m; SGT2 区域试验桩 T2 的设计桩底高程为-42.50 m, 最小桩底高程-29.00 m。2 根桩的工作荷载为 9.230 MN, 最终承载力应至少满足 2 倍工作荷载, 即 18.460 MN。首先通过 SGT1 区域 T1 试打, 确定所选打桩设备的可行性, 并进行高应变打桩过程监控及初复打测试, 若无法入土至规定的最小桩底高程, 将变更原设计方案中的打入桩为嵌岩桩, 对后续的施工造成严重影响。因此在设备选型前进行可打性分析, 避免盲目开始试验。在完成第一根试验桩的基础上, 对 SGT2 钻孔区域的试验桩开展打桩试验, 同时进行高应变测试校核初定的停锤标准, 最后通过竖向抗压

静载试验对高应变初复打测试结果进行验证, 以最终确定可靠的停锤标准。

3 沉桩可打性分析

根据施工资源和地勘结果, 拟选液压锤 YC40 作为施工桩锤, 其锤芯质量 40 t, 额定最大冲程 1.50 m、最大冲击能量 600 kJ。在沉桩试打前, 通过 GRLWEAP 软件对 SGT1 钻孔区域的试验桩 T1 进行可打性分析, 初步判定该桩锤的施工能力, 其结果为: 锤型 YC40, 锤质量 40 t, 锤芯跳高 1.40 m, 桩底高程-41.31 m, 停锤贯入度 1.76 mm/击, 总锤击数 3791 击, 最大压应力 241.9 MPa, 初打承载力 25.068 MN。采用 YC40 钢管桩基本可将试验桩 T1 施打到位。极限承载力与沉桩贯入度相关性见图 1。

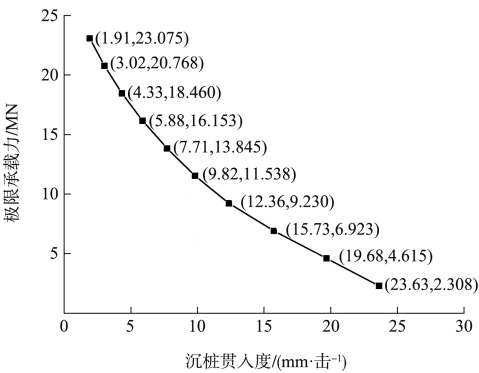


图 1 极限承载力与沉桩贯入度相关性

4 打桩试验与停锤标准

4.1 测试桩 T1 试验结果分析

钢管桩 T1 稳桩阶段, 发生压桩自沉 12.25 m, 桩底高程到达-32.55 m, 钢管桩直接进入强风化千枚岩层, 考虑到安全因素, 在用小跳高正常施打至-37.65 m后开始高应变打桩过程监控, 总共锤击 1 460 锤, 从桩底高程-37.65 m至-42.48 m, 整个过程中的跳高、测试承载力 RMX、打桩压应力 CSX、桩端应力 CSB、锤击能量 EMX 和沉桩贯入度见图 2。

由图 2 的试打桩监控结果可知, 采用现有打桩设备可将试验桩 T1 施打至高程-42.48 m。在最终停锤阶段, 进行最终测试, 采用跳高 1.45 m, 停锤贯入度达到 2.30 mm/击, 测试承载力为 19.614 MN。隔 7 d 后, 对该钢管桩进行复测, 测试跳高 1.50 m, 测试贯入度为 1.00 mm/击, 测试承载力达到 24.077 MN, 恢复系数 1.23。

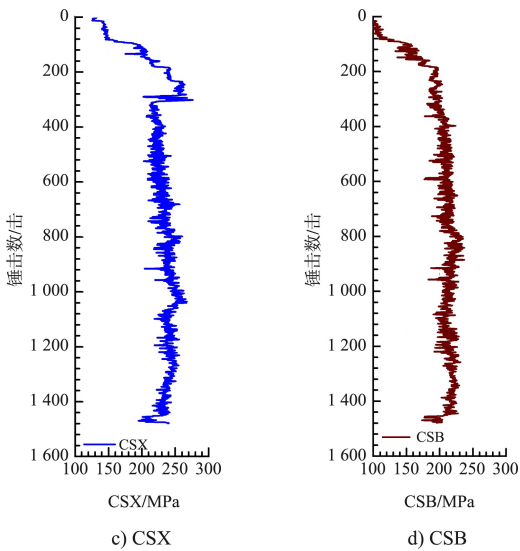
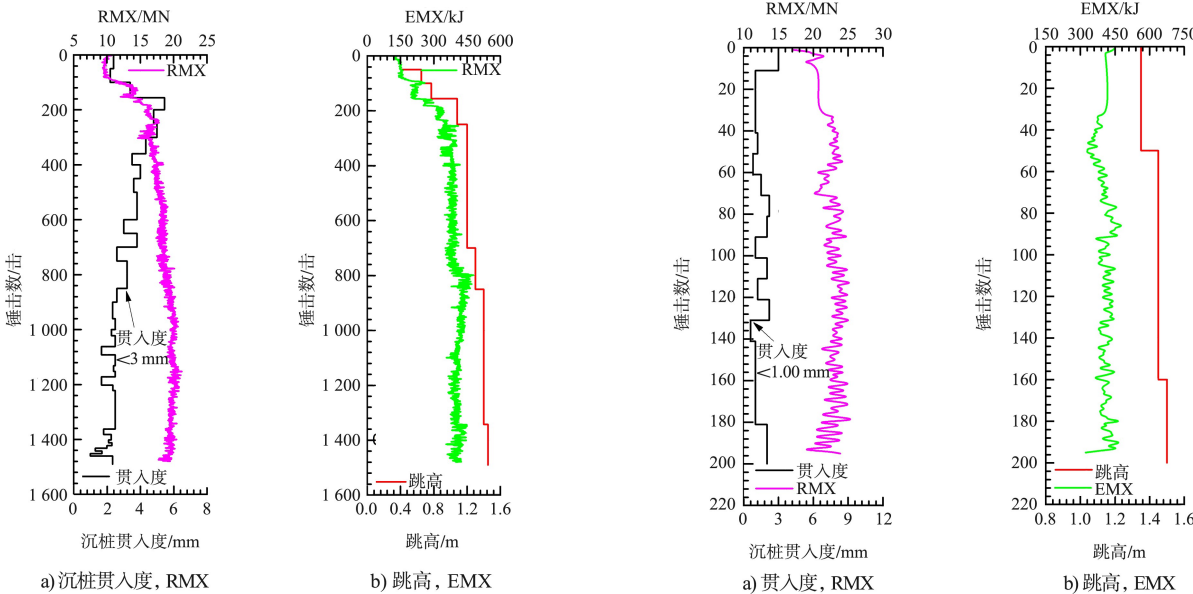


图 2 试验桩 T1 打桩过程监控曲线

其中在打桩监控过程中发现, 跳高为 1.40 m、沉桩贯入度小于 3 mm/击时, 测试承载力均大于 19.000 MN, 该位置桩底高程为-40.56 m, 与设计高程-42.5 m 的距离为 1.94 m。根据试验桩 T1 的试验结果, 可初步确定停锤标准: 当桩端距设计高程小于 2 m 时, 跳高 1.40 m, 三阵平均贯入度小于 3.00 mm/击。

此外, 为了研究钢管桩在大跳高、小贯入度的情况下连续锤击是否会发生卷边破坏, 将试验桩 T1 从桩底高程-42.48 m 硬打到桩底高程-42.76 m, 整个打桩过程监控见图 3。



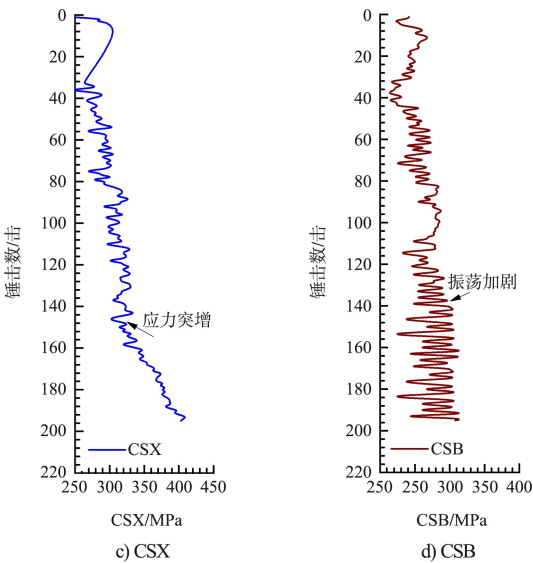


图 3 试验桩 T1 施打至破坏监控曲线

由图 3 曲线可知，在跳高 1.45~1.50 m 持续施打过程中，沉桩贯入度  $\leq 1$  mm/击，桩身压应力突然增大，最后远远超过钢材屈服极限 345 MPa，并且桩端应力振荡明显，沉桩贯入度出现从 1 mm/击增大为 2 mm/击的异常现象。该现象可能是钢管桩发生卷边变形导致贯入度增加。针对该现象，确定了拒锤标准：当桩端与设计高程的距离大于 2 m、1.50 m 跳高下、连续三阵贯入度  $\leq 1$  mm/击时，视为拒锤并处理，必要时采用高应变动测复核承载力。

4.2 测试桩 T2 试验结果分析

在测试桩 T1 的试验结果基础上将测试桩 T2 从桩底高程-33.39 m 沉桩至-40.88 m，并开展打桩过程监控和高应变初复打测试。最终桩底高程-40.88 m，与设计桩底高程-42.50 m 的距离为 1.62 m，停锤跳高 1.50 m，停锤贯入度 1.50 mm/击，测试承载力为 21.031 MN。隔 7d 后进行复打测试，测试贯入度 0.15 mm/击，测试承载力达到 24.050 MN，恢复系数 1.14。试验桩 T2 打桩过程监控曲线见图 4。根据测试桩 T2 的施工情况，T2 最终停锤时已适用依据 T1 试验结果所得的停锤条件。根据欧标 EN 1997-1: 2004，经静载试验验证

的高应变动测可用于评估承载力，确定极限承载力与贯入度/桩端高程的对应关系。因此，下一步将对 T2 试验桩进行静载试验验证以评估现有施工参数的合理性。

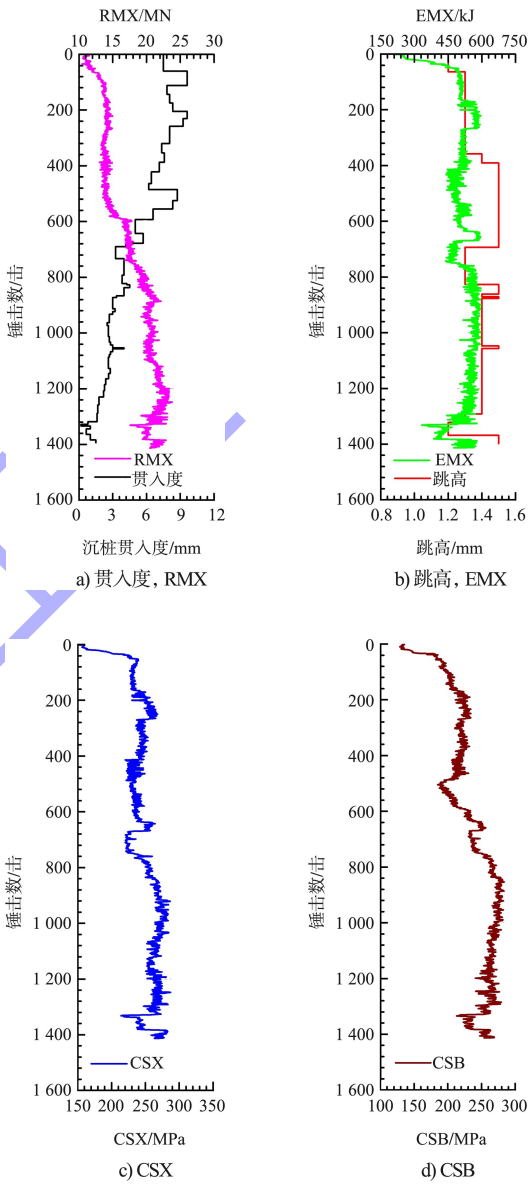


图 4 试验桩 T2 打桩过程监控曲线

4.3 静载试验验证

静载试验采用锚桩法，试验加卸载流程参照 ASTM 标准的维持荷载法<sup>[7]</sup>，分 2 个循环，设计要求最大加载量应不小于 2 倍工作荷载 18.460 MN，实际最大加载到 22.149 MN，试验结果见图 5。



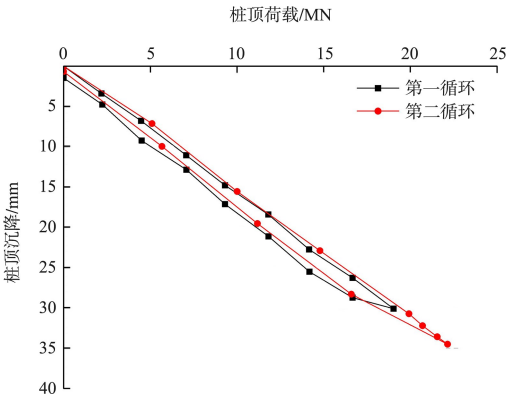


图 5 试验桩 T2 静载试验曲线

根据图 5 曲线, 荷载-沉降曲线变化平缓, 无明显陡降段出现, 当试验荷载达到 22.149 MN, 累计沉降为 34.51 mm, 远小于欧标规定的破坏准则中的 10% 桩径 (180 mm), 也小于国内规范<sup>[8-9]</sup> 的规定值 40 mm。全部卸载后残余沉降为 0.68 mm, 桩顶沉降基本由弹性压缩引起, 试验桩承载力远大于 2 倍工作荷载, 满足设计要求。

4.4 停锤标准确定

由静载试验结果可知, 最终停锤情况为: 距桩底设计高程 1.62 m, 停锤跳高 1.50 m, 三阵平均贯入度为 1.50 mm/击的试验桩 T2, 实际承载力远大于 2 倍设计荷载 18.460 MN, 与高应变测试结果基本相符, 因此根据打桩试验推导而来的停锤标准可应用于后续沉桩施工。考虑到实际工程应用的统一性, 将停锤跳高统一调整为 1.40 m, 并针对贯入度 3.00 mm/击调整桩端距设计高程为不小于 1 m, 而对于贯入度 2.00 mm/击则调整桩端距设计高程为不小于 2 m。最终确定的停锤标准如下: 1) 桩端距桩底设计高程小于 2.0 m, 跳高 1.40 m, 三阵平均贯入度小于 2.00 mm/击; 2) 桩端距桩底设计高程小于 1.0 m, 跳高 1.40 m, 三阵平均贯入度小于 3.00 mm/击。

5 结语

1) 对于停锤标准, 欧标体系中的对应规范是以打入桩承载力是否满足要求为准则, 因此采用 GRLWEAP 可打性分析进行桩锤的合理选择, 并建立承载力与对应贯入度的关系, 可用于指导打

桩过程监控。

2) 依托高应变的打桩过程监控, 可通过监控过程中的实时承载力以及桩底高程, 初步确定停锤标准, 但采用该标准停锤的钢管桩应进行高应变测试, 同时应通过静载试验验证高应变结果的可靠性, 以最终确定合理的停锤标准。

3) 通过高应变的打桩过程监控所得的桩身应力变化, 可确定钢管桩沉桩的拒锤标准, 以避免后续施工出现桩身损伤, 保障基桩施工质量。

4) 本文在无相关经验前提下, 基于欧标体系对应规范的指导, 采用经静载试验验证的高应变动测结果, 确定了极限承载力与贯入度/桩端高程的对应关系, 确定出对应的停锤标准, 整个执行过程和经验可为高桩码头结构中打入桩的停锤标准确定提供指导与参考。

参考文献:

[1] 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): 231-236.

[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.

[3] 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.

[4] 方波, 符成. 中欧规范关于重力式码头地基承载力计算方法的对比[J]. 水运工程, 2018(10): 117-121.

[5] European Committee for Standardization. Execution of special geotechnical work-displacement piles: BS EN12699: 2015[S]. London: BSI, 2015.

[6] European Committee for Standardization. Eurocode7: Geotechnical design-part1: general rules: BS EN1997-1: 2004 [S]. London: BSI, 2004.

[7] ASTM. Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load: D1143M-07[S]. West Conshohocken: ASTM, 2007.

[8] 中交四航工程研究院有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

[9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.