

硬粘土层含局部胶结地质条件下不同桩型沉桩实施效果分析

周鑫强, 徐明磊, 王馨

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 当基桩打入硬粘土层含局部胶结层时, 往往沉桩困难。本文结合多个工程案例, 分析硬粘土层含局部胶结层地质特点及沉桩实施效果, 通过 GRLWEAP 软件打桩动力分析, 模拟中硬粘土层含局部胶结地质下不同桩型、不同桩靴形式、不同桩靴长度的沉桩过程, 在相同锤能和打入深度条件下进行对比, 研究分析各种模型桩基穿透性能和对应的初打承载力, 提出了桩型选择和沉桩控制标准的设计建议, 可供类似项目参考。

关键词: 硬粘土层含局部胶结层; GRLWEAP 软件; 沉桩实施效果; 沉桩控制标准; 桩型选择

中图分类号: U655.55

文献标识码: A

文章编号: 2097-3519 (2025) 05-0101-05

DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20250522

Analysis of Piling Effects subject to Different Pile Types under Condition of Hard Clay Layer Containing Local Cementation

Zhou Xinqiang, Xu Minglei, Wang Xin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510230, China)

Abstract: It is difficult to drive a foundation pile into hard clay layer containing local cementation. By referring to several engineering cases, an analysis was carried out for the geological characteristics of hard clay layer with local cementation as well as piling effect. GRLWEAP-based piling dynamic analysis included the simulation of piling processes corresponding to different types of piles, pile boots and lengths of pile boots under the geological conditions of hard clay layer with local cementation, which were compared subject to same blow energy and piling depth. The penetration performances of pile foundations and the corresponding initial bearing capacities were also analyzed in order to make a proposal for the selection of pile type and piling control standard in the design, which could be used as a reference for similar projects.

Key words: hard clay layer containing local cementation; GRLWEAP software; piling effect; piling control standards; selection of pile types

引言

根据湛江奥里油电厂、印尼华宝园区等国内外码头、连云港港徐圩港区 30 万吨级原油码头工程项目设计经验, 当基桩打入硬粘土层含局部胶结时, 往往沉桩困难。

硬粘土局部胶结硬化是由于老粘土中的土颗粒孔隙被细黏粒、二氧化硅、碳酸盐、氧化铁、氧化锰等物质填充, 并经过长年固结, 使粘土剖面或

粘土层胶结密实, 形成形式多样的坚硬夹层。这种现象在地质环境中普遍存在, 但由于其多处于软土、粘土地基中, 为不稳定夹层, 在勘察报告中地层分类一般作为地层亚层, 往往在设计中容易忽视, 从而对工程建设造成不利影响。

在硬粘土层含局部胶结地质条件下, 打桩施工往往出现基桩无法下沉或达不到设计标高、贯入度小、桩锤回弹大、总锤击数多等情况, 造成桩头破损、桩身开裂^[1-2]等等质量事故, 影响施工进度, 同

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 周鑫强 (1981-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事港口工程咨询与设计工作。

时也增加工程费用。研究此类地质下不同桩型沉桩实施效果及控制标准十分必要。

1 工程案例

1.1 湛江奥里油电厂油改煤项目码头工程

该工程位于湛江市湛江湾调顺岛北面，建设 1 个 5 万 t 级煤炭码头。湛江湾地表出露大片中更新统北海组和早更新统湛江组地层，北海组地层为滨海相沉积，其下的湛江组地层是砂与粘土互层的河流三角洲相沉积物，有杂色粘土、红砂层和铁质胶结层。

本工程勘察所揭露的粉质粘土~粘土，粘性土混砂，砂层（粉细砂，中粗砂，砾砂）等中下部地层就属于湛江组地层。其中⑥粉质粘土~粘土：棕红色，灰白色，灰黄色，稍湿，坚硬，局部硬塑，粘性一般，含少量粉细砂，切面较光滑，局部间夹坚硬状铁质胶结薄层，偶夹细砂或中粗砂。该层于探区分布连续，平均层顶标高-23.12 m（-17.95 ~ -30.42 m），平均土层厚度 5.74 m（1.50 ~ 15.20 m）。该层平均标贯击数 N = 32.7 击（17 ~ 55 击），具中等压缩性，并具较高强度，属中硬土。⑧粉质粘土~粘土：棕红色，灰白色，灰黄色，湿，坚硬，粘性一般，含少量粉细砂，切面较光滑，局部间夹坚硬状铁质胶结薄层。该层于探区分布连续，平均层顶标高-30.54 m（-24.53 ~ -38.75 m），平均揭示厚度 10.93 m（1.25 ~ 21.00 m）。该层平均标贯击数 N = 37.0 击（25 ~ 55 击）具中等压缩性，并具较高强度，属中硬土。

⑥粉质粘土~粘土和⑧粉质粘土~粘土处于工程区中下地层，分布连续，标贯击数较大且局部间夹坚硬状铁质胶结薄层，对桩基设计和沉桩施工有较大影响。

该工程原设计桩基采用 650 mm × 650 mm 预应力钢筋混凝土方桩，桩基持力层为⑧粉质粘土~粘土层。预应力钢筋混凝土方桩采用锥形混凝土桩靴。该工程采用 D100 柴油锤沉桩，当桩靴进入⑥粉质粘土~粘土层时，沉桩开始出现困难，贯入度减小至 10 mm/击以下；甚至碰到间夹坚硬状铁质胶结薄层基桩无法下沉。总锤击数普遍较高，并出现桩头破损情况，桩靴均未达到设计高程，且与设计高程相差较大。码头典型断面如图 1 所示。

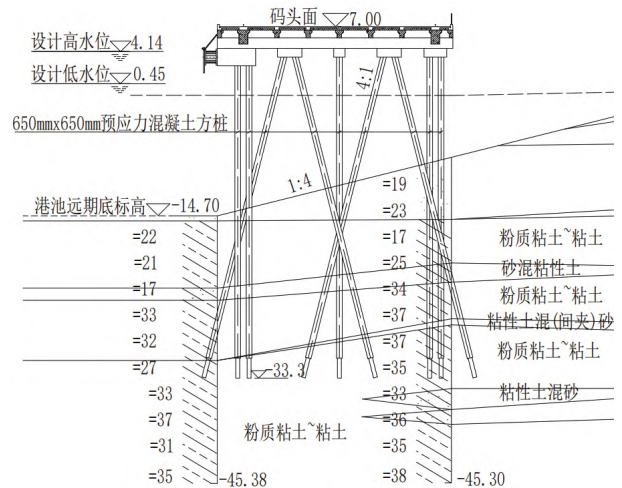


图 1 湛江奥里油电厂油改煤项目码头工程断面示意图
Fig.1 Section diagram of Zhanjiang Aoli Oil Power Plant oil to coal project wharf

经过分析，本工程粉质粘土~粘土层标贯击数较大，局部间夹坚硬状铁质胶结薄层厚度有的 0.22 ~ 0.3 m，最厚近 1.0 m，胶结强度大，是施工困难的主要原因；因此，为了提高预应力混凝土方桩可打性，并增加打入深度，设计于桩端增设了 3 m 长 H 型钢桩靴。改进后预应力混凝土方桩穿透能力明显增强，基本达到了设计高程，总锤击数 1 000~2 000 击，终锤平均贯入度 5 mm/击左右，改进措施效果显著。

1.2 印尼华宝园区配套码头工程

印尼华宝园区位于印度尼西亚中苏拉威西省莫罗瓦利县，配套码头工程建设 1 个 5 万 t 级煤炭码头和 1 个 2 万 t 级件杂货码头。

该场地地貌类型属于海相沉积地貌，土层分布相对较有规律，主要地层依次为：海相沉积层（Q4m）：①₁ 淤泥、①₂ 淤泥质黏土；海陆交互相沉积层（Q4mc）：粗砾砂（夹层）、圆砾（夹层）、②₁ 黏土、②₂ 黏土、胶结黏土、③₁ 圆砾、②₅ 粗砾砂、③₁ 黏土、圆砾（夹层）及③₂ 粗砾砂。其中②₁ 黏土：灰色，灰黄色，青灰色，可塑~硬塑状，高塑性，偶见贝壳碎屑、圆砾及结核，夹砂斑、粉土团，局部夹珊瑚质角砾，土质不均。该层分布较连续，层厚 1.0 ~ 16.4 m，平均标贯击数 N=13.0 击。②₂ 黏土：灰色，浅灰色，青灰色，硬塑状，高塑性，夹砂斑，多呈胶结状，土质不均。该层分布较连续，层厚 3.1 ~ 21.3 m，平均标贯击数 N=22.6 击。

在②₁ 黏土和②₂ 黏土层存在胶结黏土夹层，该

层呈灰色, 青灰色, 坚硬状, 高塑性, 夹结核, 呈胶结状, 土质不均。该层分布不连续, 仅在部分钻孔中揭露, 层厚较大, 平均标贯击数 $N=48.0$ 击, 为特殊性岩土。

该工程桩基采用 1 200 mm PHC 桩, 桩靴采用 9m 长钢管, 桩基持力层为②₂黏土层。桩靴高程与设计基本吻合, 总锤击数在 800~1 000 击左右, 遇到胶结黏土夹层锤击数达到 1 500 击左右, 终锤平均贯入度 3 mm/击左右, 实施效果良好。码头典型断面如图 2 所示。

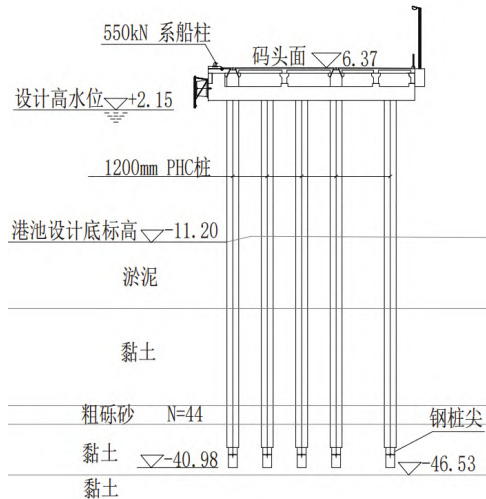


图 2 印尼华宝园区配套码头工程断面示意图
Fig.2 Section diagram of supporting wharf project of Huabao Park in Indonesia

1.3 连云港港徐圩港区 30 万 t 级原油码头工程

该项目位于徐圩港区防波堤内侧六港池北侧水域, 近口门处, 建设 1 个 30 万 t 级原油码头。

该场地地貌类型属于海相沉积地貌, 为大陆架海洋边缘地貌。场区地层均为第四系松散堆积物。从上至下粉土、粘土、砂层交错。中硬粘土胶结层在浅、中、深层土层中广泛分布。

其中, 浅层地质中, ②₁黏土中, 含大量铁锰质, 局部含大量钙质结核, 钙核最大粒径 20~80 mm, 高程在-11.48~-14.95 m 之间; ②_t粉质黏土: 含少量铁锰质浸染, 局部含少量钙质结核。高程-13.95~-23.18 m; 两层标贯击数平均值约 9~11 击, 具中等压缩性。

中层地质中, ⑤₁粉质黏土为可塑~硬塑状, 含少量铁锰质浸染, 夹少量粉土薄层, 高程-44.88~-51.76 m, 标贯击数平均值 11.3~22.8 击, 具中等偏低压缩性。⑥粉质黏土层局部硬塑, 含大量铁锰质

浸染及结核, 局部混中细砂, 夹单层厚 0.10~0.40 m 细砂薄层; 该层分布稳定连续, 高程-51.96~-55.85 m, 具中等压缩性。

深层地质中, ⑦_t粉质黏土夹砂为硬~可塑状, 具有水平层理, 夹粉土及粉砂薄层, 局部呈互层状, 含大量铁锰质浸染, 该层分布零散, 揭示层厚 1.10~5.40 m, 标贯击数平均值 28.5 击, 具中等压缩性。⑧₁黏土为硬塑状, 含大量铁锰质浸染及结核, 粒径 2~5 mm, 局部为粉质黏土; 该层分布稳定连续, 高程-55.86~-65.45 m, 标贯击数平均值 24.8 击, 具中偏低压缩性。

该工程工作平台桩基采用直径 1 200 mm 钢管桩, 桩基持力层为⑥粉质黏土层。沉桩较为顺利, 钢管桩桩端基本达到设计高程, 总锤击数受砂层的影响较大, 普遍在 1 600~1 800 击左右, 终锤平均贯入度 3 mm/击左右, 单桩抗压承载力达到 10 000 kN。码头典型断面如图 3 所示。

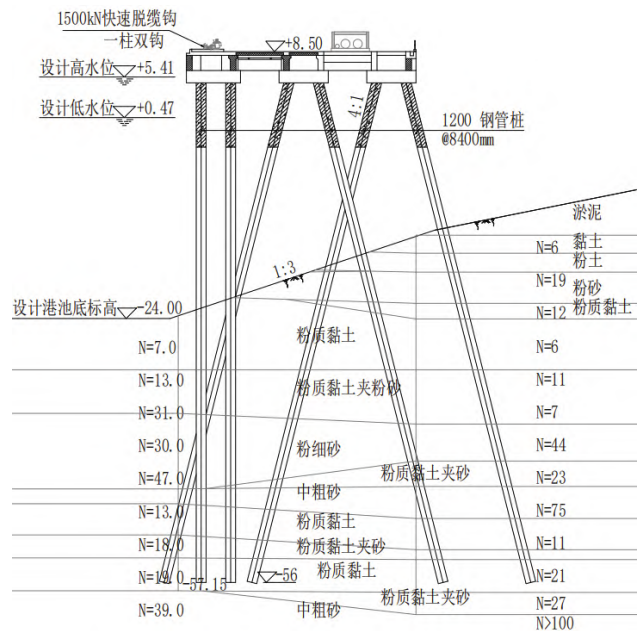


图 3 连云港港徐圩港区 30 万 t 级原油码头工程断面示意图
Fig.3 Section diagram of 300 000 t crude oil terminal project in Xuwei Port Area of Lianyungang Port

2 沉桩模拟分析

采用 GRLWEAP 软件进行打桩动力分析, 模拟中硬粘土层含局部胶结地质下不同桩型、不同桩靴形式、不同桩靴长度的沉桩过程, 在相同锤能和打入深度条件下进行对比分析, 研究各种模型的桩基穿透性能和承载能力。

GRLWEAP 软件可打性分析, 基于波动方程,

运用一维弹性应力波传播原理分析打桩应力, 软件可考虑土层分层特性和桩锤变化影响, 以及桩基刚度造成的能量损失, 可以反映锤能、贯入度与承载力的关系^[3]。

2.1 模型建立

选择湛江奥里油电厂油改煤项目的典型地质进行沉桩模拟分析, 地质剖面见图 1, 地质参数见表 1, 建立以下四种模型:

模型 1: 650 mm×650 mm 预应力砼方桩, 分别采用四棱锥混凝土桩靴和 H 型钢桩靴;

模型 2: 直径 800 mm PHC 桩, 分别为不带桩靴和带钢管桩靴;

模型 3: 直径 800 mm 钢管桩, 材质 Q345, 壁厚 18 mm;

模型 4: 650 mm×650 mm 预应力砼方桩, 不同 H 型钢桩靴长度。

表 1 主要地质参数取值

Tab.1 Values of major geological parameters

岩土层 编号	岩土层名称	打入式挤土桩 (或钢管桩)				桩侧极 限摩阻 力标准
		桩端极限阻力标准值 q_R /kPa				
		20 m~	25 m~	30 m~	大于 35 m	
④	粉质粘土~					75
④ ₁	粘性土混砂					70
④ ₂	砂混粘性土					90
⑤	砂混粘性土					95
⑤ ₂	中粗砂					110
⑥	粉质粘土~	2 600	3 000	3 200	3 300	90
⑥ ₁	粘性土混 (间					95
⑥ ₂	砂混粘性土					110
⑦	砂混粘性土	6 500	7 500	8 000	8 500	130
⑦ ₁	粉细砂					115
⑧	粉质粘土~	2 600	3 000	3 200	3 300	100
⑧ ₁	粘性土混砂				3 300	100
⑧ ₂	砂混粘性土					130

桩锤拟选用 D100 柴油锤, 锤的主要性能参数见表 2。

表 2 柴油锤的主要参数

Tab.2 Main parameters of diesel hammer

锤型	规格	锤芯重量/kN
柴油锤	D100	100

2.2 打桩分析结果

1) 不同桩型、不同桩靴对比

在相同地质、相同锤能和打入深度条件下, 模型 1、2、3 的打桩动力分析结果见表 3 所示, 可以得出以下结论:

①从沉桩应力 (拉应力) 控制来看, 钢管桩优于预应力混凝土方桩, 采用钢管桩靴有利于预应力混凝土沉桩应力控制;

②从初打承载力比较来看, 带 H 型钢桩靴的混凝土桩, 桩侧阻力略有减小, 桩端阻力降低较多;

③从沉桩效果来看, PHC 桩桩端采用钢管桩靴后, 沉桩阻力减小, 贯入度有所增大、穿透能力增强;

④钢管桩沉桩效果良好, 终锤贯入度、总锤击数与采用钢管桩靴的混凝土桩接近, 但桩基承载力相对更高。

2) 不同 H 型钢桩靴长度对比

模型 4 采用 650 mm×650 mm 预应力砼方桩, 对不同 H 型钢桩靴长度进行对比分析, 打桩动力分析结果见下表 4 所示, 可以得出以下结论:

①H 型钢桩靴长度增加, 桩基终锤贯入度增大, 总锤击数减少, 而桩身应力不变。这表明桩靴加长, 桩基穿透硬粘土能力增强;

②H 型钢桩靴长度增加, 桩端阻力不变, 而桩侧阻力有所减小。这可能是由于 H 型钢桩靴对局部土体的破坏和扰动增大, 从而降低了部分桩侧阻力。

3 设计建议

3.1 桩型选择的建议

在硬粘土层含局部胶结地质中, 码头桩基建议采用带钢管靴的混凝土桩或钢管桩, 以增强桩基穿透能力, 有利于混凝土桩桩身应力控制。混凝土桩采用 H 型钢桩靴或钢管桩靴的长度不宜过长, 以免影响桩基承载能力。

3.2 停锤标准建议

停锤标准应结合桩型、桩锤能量及承载力要求等确定, 在硬粘土层含局部胶结地质中, 建议带钢管靴的混凝土桩终锤平均贯入度为 5 mm/击, 钢管桩终锤平均贯入度为 3~5 mm/击。

表 3 不同桩型打桩动力分析结果汇总表

Tab.3 Summary of dynamic analysis results of different pile driving types

模型	分析桩型	直径或边长/mm	桩靴形式	停锤贯入度/(mm/击)	总锤击数/击	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	终锤有效能量/kJ	初打承载力/kN	初打侧阻力/kN	初打端阻力/kN	打入深度/m	桩端高程/m
模型 1	方桩	650	四棱锥 混凝土 桩靴	5.92	1 712	40.5	-10.0	110.4	5 004.2	4 556.2	448.0	25.7	-34.3
	方桩	650	H 型钢 桩靴	5.02	2 018	21.3	-4.9	62.1	4 746.4	4 544.8	201.6	25.7	-34.3
模型 2	PHC 桩	800	无桩靴	2.89	2 753	30.3	-1.3	78.8	5 521.8	4 558.6	963.2	25.7	-34.3
	PHC 桩	800	带钢管 桩靴	4.89	1 986	30.2	-0.7	78.2	4 705.7	4 504.1	201.6	25.7	-34.3
模型 3	钢管桩	800	/	4.50	2 046	247.2	-5.8	117.2	5 096.2	4 558.6	537.6	25.7	-34.3

表 4 不同 H 型钢桩靴长度的方桩打桩动力分析结果汇总表

Tab.4 Summary of dynamic analysis results of square piles with different H-shaped steel pile shoe lengths

分析桩型	桩靴形式	桩靴长度/m	停锤贯入度/(mm/击)	总锤击数/击	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	终锤有效能量/kJ	初打承载力/kN	初打侧阻力/kN	初打端阻力/kN	打入深度/m	桩端高程/m
方桩	H 型钢桩靴	1.5	4.89	1 986	30.2	-0.74	78.2	4 705.7	4 504.1	201.8	25.7	-34.3
	钢桩靴	3	5.14	1 867	30.3	-1	78.9	4 554.1	4 352.5	201.6	25.7	-34.3
	靴	5	5.2	1 711	30.3	-1.8	78.6	4 378.2	4 176.6	201.6	25.7	-34.3

4 结 语

结合多个工程案例, 分析硬粘土局部胶结层地质的特点及沉桩情况。通过 GRLWEAP 软件打桩动力分析, 模拟中硬粘土层含局部胶结地质下不同桩型、不同桩靴形式、不同桩靴长度的沉桩过程, 在相同锤能和打入深度条件下进行对比分析, 研究分析各种模型桩基穿透性能和对应的初打承载力, 提出了桩型选择和沉桩控制标准的设计建议, 可供类似项目参考。

参考文献:

[1] 蔡小红, 黄松涛. 大直径 PHC 桩沉桩过程中常见工程质量问题及对策[J]. 水运工程, 2015, (10): 177-181, 187.
Cai Xiaohong, Huang Songtao. Common engineering quality problems and Countermeasures in the process of large diameter PHC pile sinking[J]. Water Transport Engineering, 2015, (10): 177-181, 187.

[2] 胡东, 黄松涛. PHC 桩在沉桩过程中出现纵向裂缝的原因分析及相应对策[J]. 水运工程, 2011(5): 141-146.
Hu Dong, Huang Songtao. Causes of longitudinal cracks in PHC pile during pile sinking and corresponding countermeasures[J]. Water Transport Engineering, 2011, (5): 141-146.

[3] 王馨, 窦峰, 唐明刚. 尼日利亚拉各斯莱基地区钢管桩停锤标准研究[J]. 港工技术, 2020, (1): 104-107.
Wang Xin, Dou Feng, Tang Minggang. Research on Stopping Hammer Standard of Steel pipe piles in Laki

Area, Lagos, Nigeria[J]. Port Engineering Technology, 2020, (1): 104-107.

[4] 方育平, 何文钦. 大中型高桩码头不同类型桩基结构的应用与分析[J]. 水运工程, 2009, (7): 87-92.
Fang Yuping, He Wenqin. Application and analysis of different types of pile foundation structures in large and medium-sized high pile piers[J]. Water Transport Engineering, 2009, (7): 87-92.

[5] 周伟. φ1 400 大管桩、钢管桩在连云港 25 万吨级矿石码头工程中的应用[J]. 水运工程, 2013, (6): 60-65.
Zhou Wei. Application of φ1 400 large pipe piles and steel pipe piles in Lianyungang 250,000-ton ore terminal project [J]. Water Transport Engineering, 2013, (6): 60-65.

[6] 赵娟, 池海. 预制预应力混凝土空心方桩在大吨位码头应用分析[J]. 港工技术, 2016, (5): 35-37.
Zhao Juan, Chi Hai. Application analysis of precast Prestressed concrete hollow square pile in large tonnage wharf [J]. Port Engineering Technology, 2016, (5): 35-37.

[7] 张世佺. 钢筋混凝土大管桩钢管组合桩沉桩施工效果分析[J]. 中国新技术新产品, 2020, (24): 103-105.
Zhang Shiquan. Analysis of pile sinking effect of Reinforced concrete Large pipe pile and steel pipe composite pile[J]. New Technologies and New Products of China, 2020, (24): 103-105.

[8] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167-2018, 码头结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTS 167-2018, Design code for Wharf structure[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.