



# 复杂地质条件下 PHC 桩可打性与 实际沉桩全程动测对比分析\*

查文洋<sup>1</sup>, 赵耀璞<sup>2</sup>

(1 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

**摘要:** 针对复杂地质条件下经常出现基桩难以入土至设计高程等异常情况影响施工的问题, 研究了基桩可打性和沉桩过程质量控制方法。基于坦桑尼亚达累斯萨拉姆港改扩建工程, 采用对典型地质钻孔处桩基进行 GRLWEAP 可打性和沉桩过程高应变全程动测对比分析的方法, 得出结论: 利用全程动测结果可以对可打性分析中的土层参数进行更符合实际的修正。研究结果表明: 参考类似土层参数修正值进行调整后的 GRLWEAP 可打性分析和高应变全程动测不仅能为 PHC 桩沉桩施工提供理论支持, 还能实时监控沉桩过程以进行质量控制。

**关键词:** 预应力高强度混凝土管桩; 可打性分析; 全程动测; 质量控制

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0174-08

## Comparative analysis of drivability of PHC piles and whole-process PDA during pile sinking under complex geological conditions

ZHA Wen-yang<sup>1</sup>, ZHAO Yao-pu<sup>2</sup>

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

2. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that abnormal conditions such as the difficulty for foundation piles to be penetrated into the designed height and affect the construction under complex geological conditions, the drivability of foundation piles and the quality control methods of the pile sinking process are studied. Based on the reconstruction and expansion project of Dares Salaam Port in Tanzania, the method of conducting a comparative analysis of the GRLWEAP driveability and the whole-process PDA during the pile-sinking process of the pile foundation at the typical geological boreholes is adopted. And the conclusion is that the whole-process PDA results can be used to make more realistic corrections to the soil parameters in the driveability analysis. The research results show that the GRLWEAP driveability analysis after adjustment concerning similar soil layer parameter correction values and the whole-process PDA can not only provide theoretical support for PHC piles sinking construction but also monitor the piles sinking process in real time for quality control.

**Keywords:** PHC pile (prestressed high-strength concrete pipe pile); drivability analysis; whole-process PDA; quality control

基桩锤击沉桩质量事故的发生主要源于两个方面: 一是打桩设备和沉桩工艺选择不当,

选择了不相匹配的桩锤设备或采用了较为严格的终锤标准; 二是沉桩过程中锤击拉、压应力

收稿日期: 2020-05-08

\*基金项目: 广州市珠江科技新星专项(201906010023)

作者简介: 查文洋(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与海洋工程的桩基施工、检测及科研工作。

超过桩身拉、压应力容许限值, 使桩身产生顺桩轴向的纵向或垂直于桩轴向的横向裂缝直至桩身损坏<sup>[1]</sup>。

由于基桩锤击沉桩质量事故会造成很大的工程结构安全隐患和经济损失, 故引入基桩可打性分析对桩基安全施工具有十分重要的意义。准确可靠的基桩可打性分析有助于优化沉桩工艺、提高沉桩效率、指导桩基的顺利施工。通过 GRLWEAP 打桩分析软件, 建立桩-锤-土分析模型, 进行桩-锤-土动力可打性分析, 研究桩-锤-土三者间的动态作用特性, 可预估基桩沉桩过程中的工艺参数, 分析沉桩难易程度, 优化沉桩工艺; 在沉桩过程中通过动测方法掌握沉桩过程中的锤击

能力、拉压应力和承载力, 从而有依据地顺利将基桩打入设计高程。

1 工程概况

本项目为坦桑尼亚达累斯萨拉姆港改扩建工程, 其中 1 号改扩建泊位和新建滚装泊位桩基础均采用 PHC 管桩, 桩径分别为 1.0 m 和 0.8 m, 1 号泊位 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>工程桩和滚装泊位 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>工程桩设计参数见表 1。其中, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>桩参考 SGB01 地质钻孔, 主要地层有中粗砂、黏质粉土、黏质中粗砂以及砂质黏土等; 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>桩参考 SGR02 地质钻孔, 主要地层有中粗砂、黏质粉土、黏质中粗砂以及砂质黏土等。

表 1 PHC 桩设计参数

桩号	位置	桩长/m	桩径/m	壁厚/mm	参考钻孔	泥面高程/m	桩尖高程/m	入土深度/m	桩的形式
1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup>	1 号泊位	37(含 7 m 钢桩靴)	1.0	130	SGB01	-11.50	-31.61	20.11	仰桩(6:1 斜率)
3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup>	滚装泊位	42(含 5 m 钢桩靴)	0.8	130	SGR02	-10.30	-34.36	24.06	仰桩(3:1 斜率)

本项目工程桩施打前, 在 1 号泊位和滚装泊位的其他典型地质钻孔位置进行了试打桩, 包括试桩前可打性分析、试桩过程中全程动测和试桩后相关参数理论值与实测值的对比分析, 确定了永安 YC-30 液压打桩锤(锤芯质量 30 t, 额定冲程 0.2~1.5 m, 额定能量 450 kJ)及沉桩工艺, 验证了桩基设计承载力, 并根据桩通过各个土层时的承

载力和贯入度实测值与理论值的对比分析结果, 对可打性分析中各个土层的计算参数进行了修正, 得到各个土层较为准确的桩侧及桩端阻力取值。因此, 以此修正值为基础, 参考规范及设计取值, 得到地质钻孔 SGB01 和 SGR02 的土层计算参数取值, 见表 2~3。

表 2 地质钻孔 SGB01 主要计算参数资料

岩土名称	层顶高程/m	分层厚度/m	标贯击数/击	单位桩侧阻力/kPa	单位桩端阻力/kPa
坚硬, 灰褐色, 轻微砂质黏土, 砂较好	-11.50	2.19	7	0~6	400
密实, 灰色, 级配差, 轻微黏质中粗砂	-13.69	2.10	36	9	400
密实, 淡绿色带斑点状棕色, 级配差, 中粗砂	-15.79	8.40	34~39	25~47	1 100~3 300
密实-非常密实, 灰白色, 级配差, 黏质粗砂, 含少量砂砾尺寸的碳酸岩块	-24.19	2.80	50(280 mm)	52	3 950
密实-非常密实, 灰白色, 级配差, 黏质粗砂, 含少量砂砾尺寸的碳酸岩块	-26.99	1.20	32	60	6 500
坚硬, 灰色, 轻微砂质黏土	-28.19	1.90	33	75	3 100
非常密实, 灰白色, 级配好, 中粗砂, 黏性, 富含砂砾尺寸的坚硬的白色石灰岩结块	-30.09	4.10	50(120 mm)~50(110 mm)	165	2 900~5 700

注: 标贯击数表示 63.5 kg 的穿心锤自 0.76 m 高处自由下落, 撞击锤座, 通过探杆将标准贯入器竖直打入土层 15 cm 后开始记录的累计打入 30 cm 的锤击数。当锤击数已达 50 击, 而贯入深度未达 300 mm 时, 可记录实际贯入深度并终止试验。

表 3 地质钻孔 SGR02 主要计算参数资料

岩土名称	层顶高程/m	分层厚度/m	标贯击数/击	单位桩侧阻力/kPa	单位桩端阻力/kPa
中等密实,浅灰色,级配差,轻微黏质粗砂	-10.30	2.64	24~26	0~9.575	400
非常密实,灰黄色带斑点状浅灰色,级配好,轻微黏质中粗砂	-12.94	3.10	50(190 mm)~50(180 mm)	12~78	1 290~3 550
中等密实,灰绿色,非常粉质细砂	-16.04	1.10	22	79~113.96	3 550~9 200
非常坚硬,浅灰色,轻微黏质粉土	-17.14	1.40	36	130	6 914
非常坚硬,灰黄色,轻微粉质砂质黏土,粗砂	-18.54	12.10	26~42	165~95~111	7 500~8 200~1 350
密实-非常密实,灰色,级配差,轻微黏质粗砂	-30.64	5.70	42~50(210 mm)	111~161	1 450~5 600

注：单位桩侧阻力、单位桩端阻力根据土层类别、厚度和标贯击数，结合前期试桩经验取值。

2 基桩可打性分析及全程动测基本原理

基桩可打性分析是在对桩锤、锤垫、替打、桩垫、桩身、岩土及锤-桩-土间动力作用关系进行简化的基础上，利用传统基桩一维波动理论进行预沉桩分析。美国 Goble Rauche Likins and Associate, Inc. 公司推出的 GRLWEAP 程序 (GRL’s Wave Equation Analysis of Pile Driving)，可全面模拟桩锤、打桩系统、桩和土的性能，具有打桩分析功能。GRLWEAP 打桩分析软件主要依据波动理论，工作原理是基于 Smith 模型，程序分桩模型、桩锤模型、土体模型以及打桩系统模型等几大模块。

当用户输入各模型所需参数时，就能进行打桩分析，其桩土体系见图 1。GRLWEAP 打桩波动分析程序的主要功能有：

- 1)对于给定的桩锤系统，GRLWEAP 可依据实测的锤击数计算打桩阻力、桩身动力应力变化及预估承载力。
- 2)GRLWEAP 可用贯入度替代锤击数进行振动打入桩分析。
- 3)对于已知的打桩过程、土质情况及承载力要求，GRLWEAP 可以帮助选择合适的锤和打桩系统。
- 4)GRLWEAP 可打性分析可确定打桩过程中桩身应力是否超限或拒锤(不能打入预期的深度)。
- 5)通过 GRLWEAP 估计总打入时间。

高应变全程动测是通过安装在桩顶以下桩身两侧的力和加速度传感器实时接收桩的应力波信号，并应用应力波理论分析处理力和速度时程曲线，从而判定整个沉桩过程中桩的承载力和评价桩身完整性。全动测数据分析方法采用 Case 法和实测曲线拟合法。

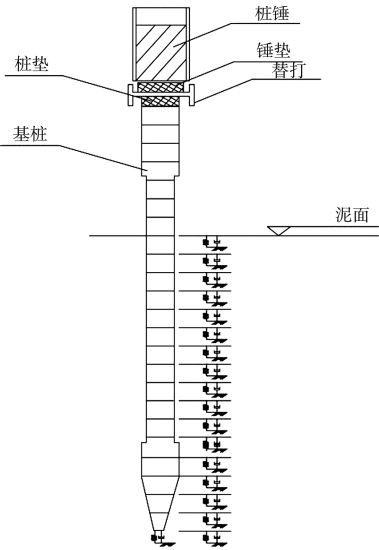


图 1 桩土体系计算原理

桩的一维波动方程如下<sup>[2]</sup>：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial^2 t} + R \tag{1}$$

式中： $x$  为桩截面的位置； $u$  为截面  $x$  处的位移； $t$  为时间； $c$  为应力波在桩内的传播速度， $c = \sqrt{E/\rho}$ ， $E$  为桩材弹性模量， $\rho$  为桩材质量密度； $R$  为土阻力。

3 基桩可打性分析结果

可打性分析主要根据拟选桩锤和地质勘察资料，计算沉桩拉、压应力分布及贯入度变化情况，估算总锤击数和打桩时间。根据前期试打桩结果，秉持重锤低击的原则，PHC 沉桩施工主要采用 0.30 m 或 0.35 m 跳高。因此，对沉桩模型进行初步分析可得<sup>[3-5]</sup>：1)1<sup>#</sup>桩采用纸垫和 0.30 m 跳高施打，

停锤贯入度为 2.26 mm(桩尖高程为-31.61 m), 最大压应力为 16.2 MPa, 最大拉应力为 5.6 MPa, 初打承载力为 6 189.4 kN, 总锤击数为 1 440 锤。

2)2#桩采用麻绳垫和 0.35 m 跳高施打, 停锤贯入度为 2.57 mm(桩尖高程为-31.61 m), 最大压应力为 17.6 MPa, 最大拉应力为 5.8 MPa, 初打承载力为 6 326.4 kN, 总锤击数为 1 260 锤。

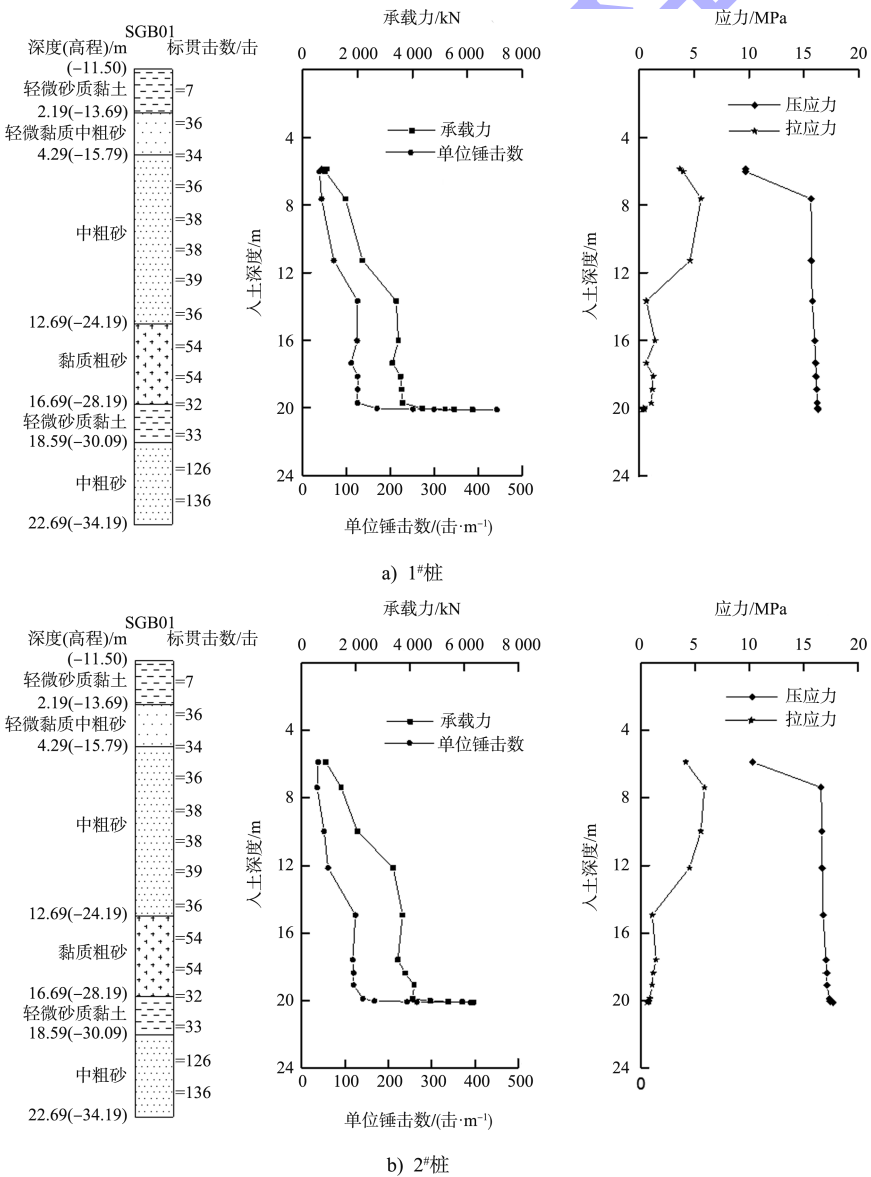
3)3#桩采用纸垫和 0.30 m 跳高施打, 停锤贯入度为

1.68 mm(桩尖高程为-34.36 m), 最大压应力为 21.0 MPa, 最大拉应力为 5.5 MPa, 初打承载力为 6 513.0 kN, 总锤击数为 3 890 锤。

4)4#桩采用麻绳垫和 0.35 m 跳高施打, 停锤贯入度为 2.39 mm(桩尖高程为-34.36 m), 最大压应力为 22.2 MPa, 最大拉应力为 5.8 MPa, 初打承载力为 6 712.2 kN, 总锤击数为 3 550 锤。具体可打性分析结果见表 4 和图 2。

表 4 可打性分析结果

桩号	跳高/ m	停锤贯入度/ (mm·击 <sup>-1</sup> )	总锤 击数/击	最大压 应力/MPa	最大拉 应力/MPa	终锤计算 有效能量/kJ	锤击 效率/%	初打承 载力/kN
1#	0.30	2.26	1 440	16.2	5.6	54.9	61	6 189.4
2#	0.35	2.57	1 260	17.6	5.8	60.9	58	6 326.4
3#	0.30	1.68	3 890	21.0	5.5	57.5	64	6 513.0
4#	0.35	2.39	3 550	22.2	5.8	65.1	62	6 712.2



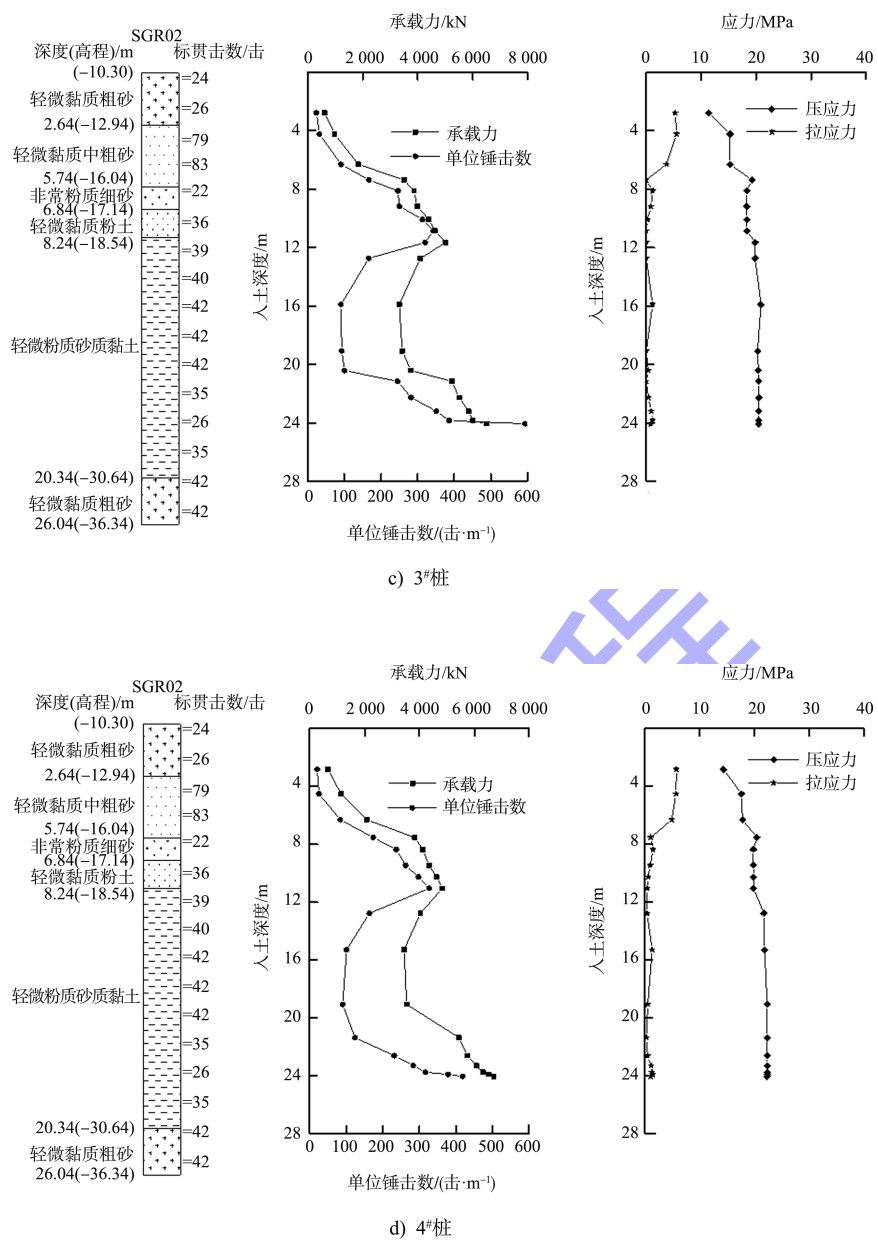


图 2 沉桩模拟结果

4 实际沉桩全程动测结果对比分析

自稳桩后开始全程动测，采用 PDA 公司 PAX 型最新传感器进行测试，1# 桩和 3# 桩锤击跳高主要采用 0.30 m，2# 桩和 4# 桩锤击跳高主要采用 0.35 m，基桩高应变初打拟合曲线见图 3，动测结

果见表 5。其中，桩阻抗  $Z=EA/c=\rho cA$ ，是由桩身材料特性和桩身截面确定的量， $A$  为桩截面积， $E$ 、 $\rho$ 、 $c$  同式(1)。基桩沉桩过程中的贯入度、全程动测所得承载力与 GRLWEAP 计算分析贯入度、承载力对比见图 4。

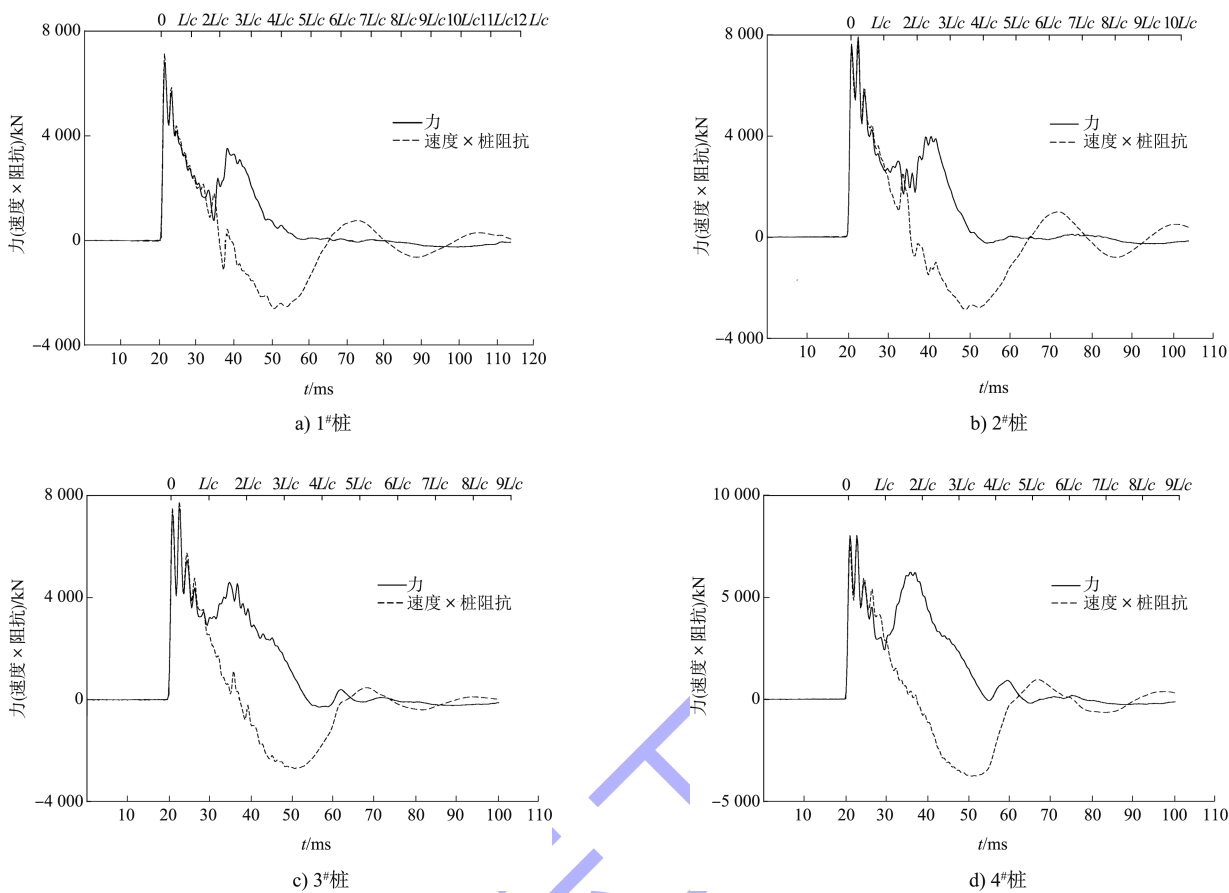
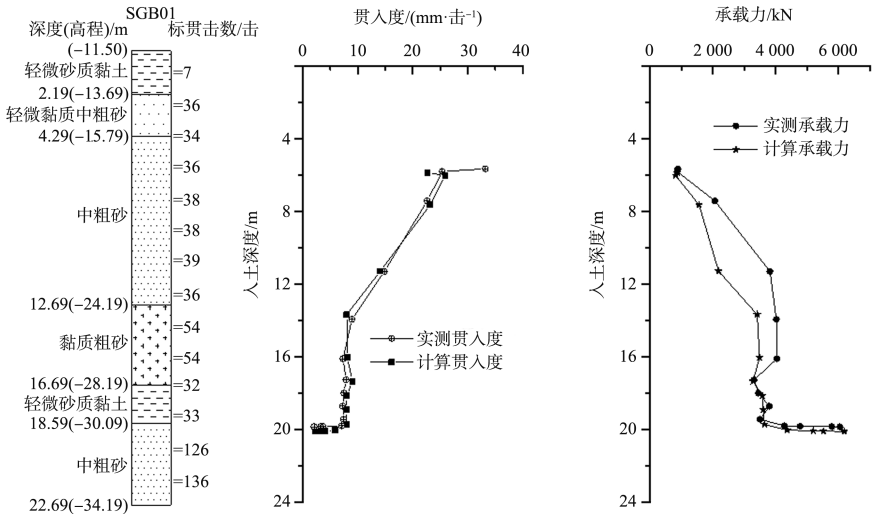


图 3 桩初打拟合曲线

表 5 基桩高应变初打 CAPWAP 法分析结果

桩号	初打承载力/kN	侧摩阻力/kN	端承力/kN	拟合分析桩顶最大位移/mm	总锤击数/击	停锤贯入度/(mm·击 <sup>-1</sup> )	最终入土深度/m
1 <sup>#</sup>	6 047.3	2 861.2	3 186.1	17.5	1 480	2.03	19.86
2 <sup>#</sup>	6 449.9	2 954.7	3 495.2	17.6	1 330	2.43	19.97
3 <sup>#</sup>	6 634.1	3 744.6	2 889.5	24.5	3 895	2.35	23.74
4 <sup>#</sup>	6 961.7	3 814.8	3 146.9	24.8	3 510	2.09	23.92



a) 1<sup>#</sup>桩



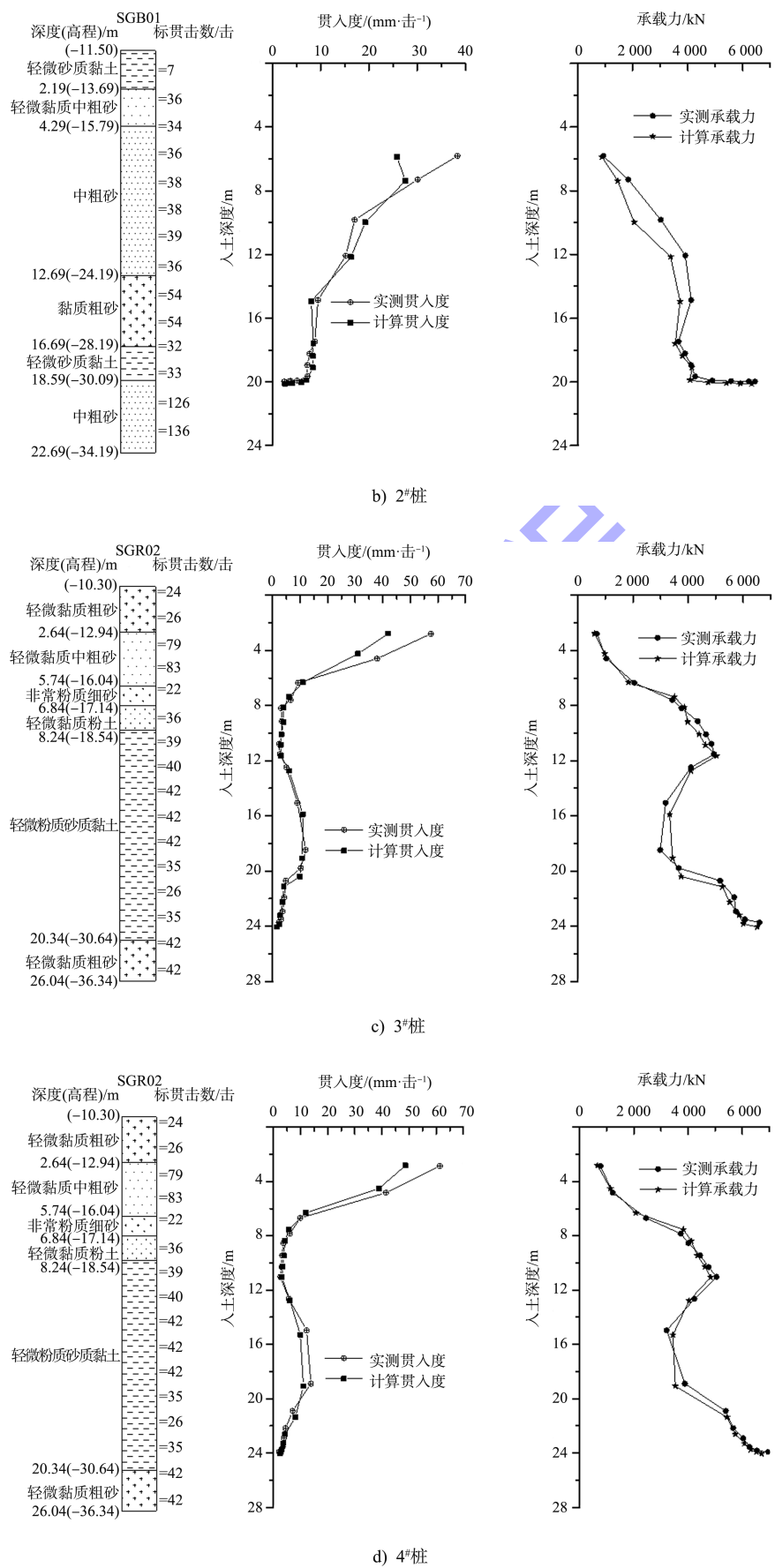


图 4 实测与计算承载力(贯入度)对比

根据沉桩过程全程动测结果可知：

1) 1#桩顶有效接收锤击能量范围为 47~57 kJ，锤击效率为 52%~63%；2#桩顶有效接收锤击能量范围为 57~63 kJ，锤击效率为 54%~60%；3#桩顶有效接收锤击能量范围为 50~65 kJ，锤击效率为 55%~72%；4#桩顶有效接收锤击能量范围为 61~70 kJ，锤击效率为 58%~67%。1#和 3#桩采用 4 层纸垫作为桩垫，每层 15 cm，沉桩开始时厚度大，桩顶有效接收锤击能量偏低，随着纸垫很快被击实，锤击效率逐渐变大；而 2#和 4#桩采用 3 层麻绳垫，击实后厚度变化不大，锤击效率较为稳定。总体来说 4 根桩的锤击效率与计算锤击效率较为吻合。

2) 1#和 2#桩实际沉桩总锤击数分别为 1 480 锤和 1 330 锤，3#和 4#桩实际沉桩总锤击数分别为 3 895 锤和 3 510 锤，与计算锤击数基本一致。3#桩和 4#桩穿过密实黏质中粗砂硬层时消耗锤击数较多，约为 1 500 锤，沉桩较为困难，该过程中采用全程动测实时监控桩身拉压应力，在应力超限的情况下立即停锤检查桩垫或降低锤击跳高施打，从而使 PHC 桩安全穿过硬夹层。此外，相对于 0.30 m 跳高，硬质地层处沉桩采用 0.35 m 跳高并不能明显减少锤击数。

3) 1#和 2#桩沉桩开始时，贯入度大幅减小的同时承载力大幅增加，当进入硬层后，贯入度基本介于 7~10 mm，承载力变化较小，在穿过硬层中的软夹层后，贯入度迅速减小至 2~4 mm，承载力则分别增加至初打最终承载力 6 047.3 和 6 449.9 kN；3#和 4#桩沉桩初期，承载力同样随着贯入度的减小而增加，当 PHC 桩底进入硬夹层后，贯入度急剧减小至 2~4 mm，锤击数和承载力则显著增大，在穿过硬夹层后贯入度增大至 9~14 mm，直至最终进入密实黏质粗砂层，贯入度随即减小至 2~4 mm，此过程中承载力则先减小后增大至初打最终承载力 6 634.1 和 6 961.7 kN。4 根桩在整个沉桩过程中的贯入度和承载力数值及变化规律与模拟计算值较为一致，进一步验证了 GRLWEAP 可打性分析的准确性。

5 结论

1) 通过对比分析 PHC 桩可打性分析及实际沉桩高应变全程动测结果，说明土层及沉桩过程计算参数的取值较为合适，实际沉桩过程中 4 根桩的计算结果与实测数据较为接近，更是验证了这两种方法的有效性。

2) 实践证明，本工程选择 YC-30 锤打桩是合适的，可以穿透较厚的硬夹层。但是穿透硬夹层需要较大的锤击能量及较高的锤击数，而盲目采用增加锤击跳高的方式增大锤击能量会使得桩身应力超限导致开裂，锤击数过高亦会引起桩身疲劳破坏，因此应根据高应变全程动测数据动态调整锤击跳高及锤击数，必要时更换新桩垫，尽可能避免上述问题的发生。

3) 在地层差异大、地质条件复杂的地区，应选择典型钻孔进行 GRLWEAP 可打性分析和实际沉桩高应变全程动测，并将桩通过各个地层时的实测贯入度与承载力和理论值进行对比分析，以实测贯入度为主、实测承载力为辅对可打性分析中的各土层桩侧及桩端阻力进行修正以缩小贯入度和承载力理论值与实测值之间的差异。而该修正值可作为该地区其他类似土层计算参数取值的理论依据，从而提高后续可打性分析的准确性。

参考文献：

[1] 吕黄, 谭德银, 陈立鹏. 基桩可打性分析与全程动测监控理论在码头工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(3): 159-163.

[2] 周莉莉. 复杂地质条件下海上风电场工程桩基础施工工艺及沉桩可打性分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 277-280.

[3] 郭全生, 王向平, 付永刚, 等. 大直径桩波动方程可打性分析及应用[J]. 地震工程学报, 2017, 39(S1): 232-235.

[4] 孙亚哲, 高倚山, 张建龙, 等. PHC 桩穿越深厚密实砂层可打性分析及现场试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1079-1084.

[5] 韩亮, 姚爱军, 郭萍, 等. 深海水下导管架钢管桩可打性实例分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1872-1875, 1898.