



内河高桩码头大直径 PHC 管桩沉桩现场试验 及参数优化*

林福裕, 李夫仲, 杨 梅

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 依托安徽淮北港区孙疃作业区综合码头工程, 开展内河高桩码头大直径预应力高强混凝土 (PHC) 管桩沉桩现场试验及参数优化研究。通过初始地勘报告获得沉桩参数后, 进行沉桩可打性分析并优化施工工艺, 进行试沉桩、高低应变和静载试验, 并根据试验结果进行桩基设计参数优化。结果表明: 结合沉桩现场试验中的桩端进入持力层深度和最后贯入度结果, 验证了内河高桩码头大直径 PHC 管桩施工工艺、沉桩设备、沉桩控制参数和停锤标准的可行性; 明确了内河高桩码头大直径 PHC 管桩单位面积极限侧摩阻力标准值和极限桩端阻力标准值的调整系数范围为 5%~10%; 采用⑦层粉细砂作为桩基持力层, 同步优化桩基参数。

关键词: 高桩码头; 大直径 PHC 管桩; 沉桩现场试验; 可行性分析; 参数优化

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0074-08

Field test and parameter optimization of large diameter PHC pipe pile sinking for high-pile wharf in inland rivers

LIN Fuyu, LI Fuzhong, YANG Mei

(Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Based on the comprehensive wharf project of Suntuan operation area in Huaibei Port area, Anhui Province, we carry out the on-site test and parameter optimization research on large diameter prestressed high-intensity concrete (PHC) pipe pile sinking for high-pile wharf in inland rivers. After obtaining the parameters of pile sinking through the initial geological survey report, we carry out the feasibility analysis of pile sinking and the improvement of construction planning, conduct trial pile sinking, high and low strain and static load tests, and optimize pile foundation design parameters based on the test results. The results indicate that the feasibility of the construction process, pile sinking equipment, pile sinking control parameters, and stopping hammer standards for large-diameter PHC pipe piles of high-pile wharf in inland rivers are verified by the depth of the pile tip entering the bearing layer and the final penetration results in the comprehensive pile sinking on-site test. The adjustment coefficient range for the ultimate lateral friction resistance standard value and ultimate pile end resistance standard value for unit area of large-diameter PHC pipe piles of high-pile wharf in inland rivers is determined by 5% to 10%. The ⑦ layer of fine sand as the bearing layer of the pile foundation is proposed, and the pile foundation parameters are synchronously optimized.

Keywords: high-pile wharf; large diameter PHC pipe pile; pile sinking on-site test; feasibility analysis; parameter optimization

收稿日期: 2023-07-24

*基金项目: 安徽省交通运输行业重点科技项目 (2022-KJQD-016)

作者简介: 林福裕 (1986—), 男, 高级工程师, 从事水运工程咨询设计及项目管理。

内河港口新建码头大多采用高桩结构形式。当既有河道不具备通航能力、水上打桩船无法作业时,通常采用陆地沉桩工艺^[1-2]。此外,传统钻孔灌注桩也存在工程造价高^[3]、成桩质量和施工速度受到制约^[4]、泥浆外溢影响周边环境^[5]等问题。

预应力高强混凝土管桩(简称PHC管桩),是预应力技术与离心制管技术相结合的产物^[6-8],通过在预制厂内采用先张法预应力和混凝土离心成型工艺,经过蒸压养护而制成,通常采用锤击或静压的方法进行沉桩,当管桩直径达到800 mm或更大时可视为大直径管桩。相比于灌注桩等其他地基处理方式,PHC管桩具有质量稳定可靠^[9-10]、应用范围广^[11-12]、承载力高^[13-14]等优点,被广泛应用于水利、交通、工民建等领域^[15-16]。但目前关于水运工程陆上大直径管桩的应用研究相对较少,特别是在地基条件的适应性、沉桩方式及设计计算理论方法与参数选择等一系列关键技术问题尚需解决。

为此,本文依托安徽淮北港韩村港区孙疃作业区综合码头工程,通过现场沉桩试验明确大直径PHC管桩在相应地质条件下的适应性,揭示桩基设计参数对内河码头桩基承载力的影响,明确适合内河码头陆上施工的大直径管桩形式,旨在为类似内河高桩码头工程提供参考。

1 工程概况

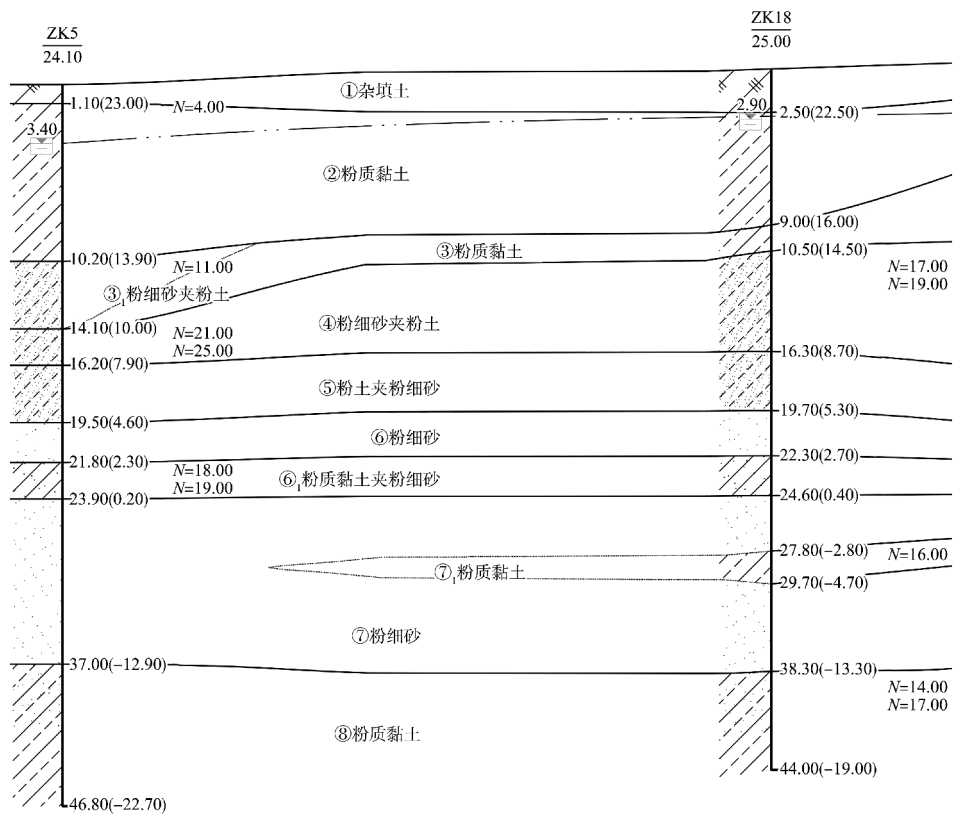
工程位于淮北市濉溪县孙疃镇孙疃煤矿东北侧、浍河航道右岸,上距临涣船闸约16 km、下距南坪船闸约13.5 km。受上下船闸水位控制,本工程设计高水位24.90 m(1985国家高程,下同),设计低水位18.50 m。工程建设5个500吨级(水工兼顾1 000吨级)通用泊位,岸线长度380 m。

码头平台采用高桩框架结构,码头面高程为26.5 m,码头平台尺寸380 m×25 m(长×宽),共分成6个结构段,长度分别为66.0、65.5、65.5、58.5、58.5、66.0 m,悬臂分缝,排架间距7 m,每个结构段设9~10榀排架,单榀排架基础由1根φ1 000 mm PHC(AB型)和3根φ800 mm PHC(AB型)管桩组成。上部结构由横梁、纵梁、轨道梁、前边梁、后边梁、靠船立柱、系靠船梁、纵横撑、立柱和叠合板等组成,其中横梁尺寸800 mm×2 000 mm(宽×高),纵梁尺寸500 mm×1 650 mm(宽×高),轨道梁尺寸800 mm×1 650 mm(宽×高),前边梁尺寸800 mm×1 200 mm(宽×高),后边梁尺寸500 mm×1 650 mm(宽×高),靠船立柱截面边长为800 mm,系靠船梁截面边长为700 mm,纵横撑截面边长为600 mm,立柱截面边长为800 mm,叠合板中预制板部分厚200 mm、现浇板部分厚300~350 mm(含磨耗层)。

1.1 地质条件

该区域地质条件为黄泛冲积平原,为冲积成因的堆积地形。场地区域稳定性良好,不存在不良工程地质,场地及地基稳定性高。建设场地土层自上而下可划分为11个岩土层,见图1。地基土物理力学性质,见表1。

表1 孙疃港地基土物理力学性质					
土层	名称	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
②	粉质黏土	1 910	10.5	13.7	4.18
③	粉质黏土	1 960	19.6	8.6	8.21
③ ₁	粉细砂夹粉土	1 970	20.7	8.6	9.52
④	粉细砂夹粉土	1 980	20.5	11.9	9.20
⑤	粉土夹粉细砂	1 920	11.3	27.8	6.52
⑥	粉细砂	1 960	21.3	17.3	8.50
⑥ ₁	粉质黏土夹粉细砂	1 980	22.5	15.1	9.03
⑦	粉细砂	1 960	21.8	18.5	9.15
⑦ ₁	粉质黏土	1 975	22.0	27.9	9.30
⑧	粉质黏土	1 985	23.1	28.1	9.36



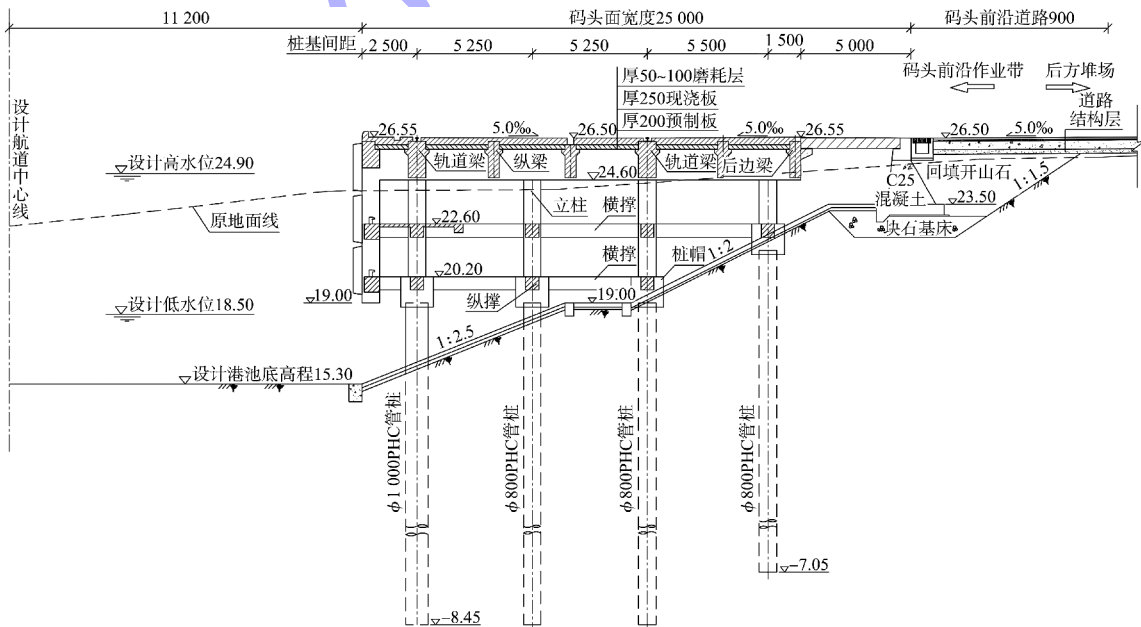
注：N 为标贯击数。

图 1 工程地质土层剖面 (单位: m)

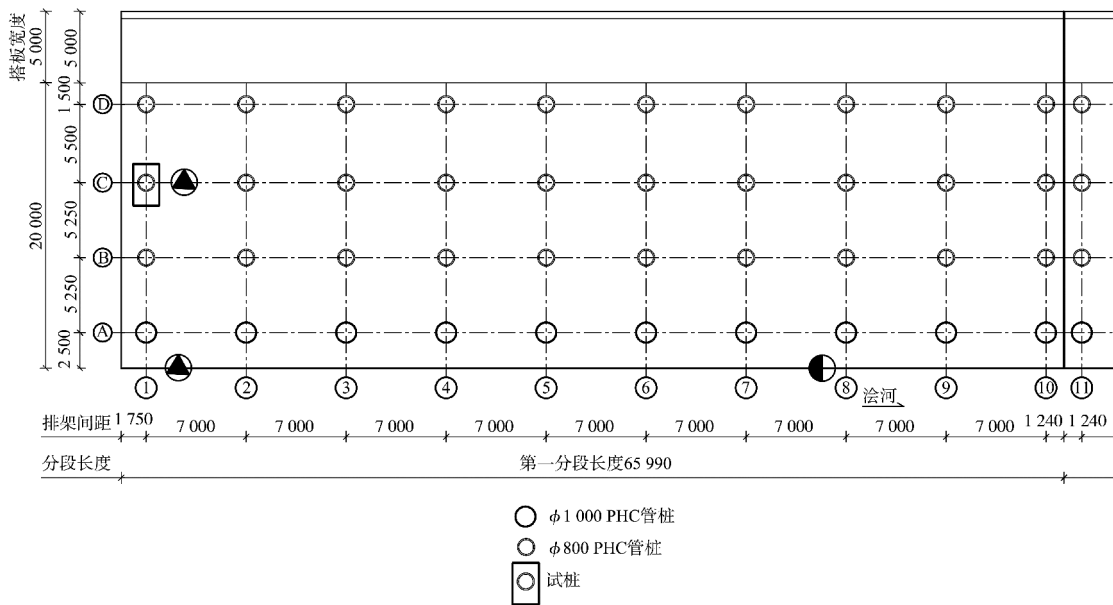
1.2 码头桩基形式

码头拟建泊位处采用预应力混凝土管桩基础，自码头前沿设计 4 排全直桩，其中最前沿设计为 $\phi 1\,000$ mm AB(130) 型 PHC 管桩，其余 3 排均为

$\phi 800$ mm AB(110) 型 PHC 管桩。码头结构断面及码头局部桩位平面布置见图 2。管桩长均为 35 m，分为上、下两节桩，其中上桩 17 m、下桩 18 m，接桩采用焊接形式，PHC 管桩焊接头大样见图 3。



a) 码头结构断面(高程 m; 尺寸: mm)



b) 码头局部桩基平面布置 (单位: mm)

图 2 码头结构断面及桩基布置

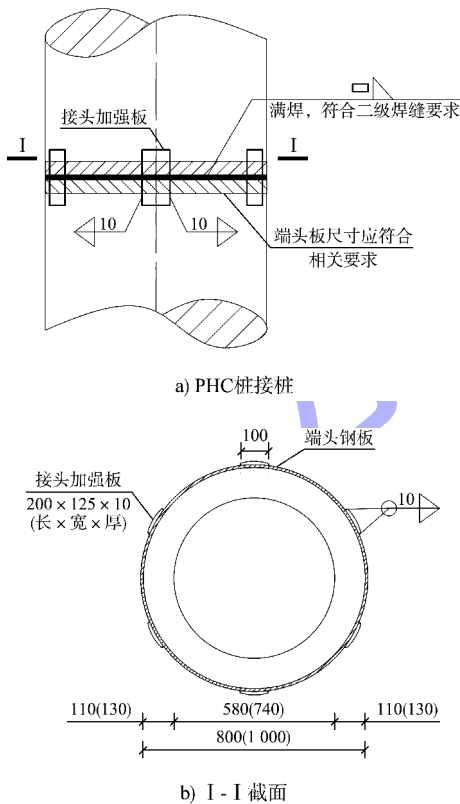


图 3 接桩焊接接头大样 (单位: mm)

同一排管桩的桩间距为 7 m，相邻两排管桩的桩间距为 5.25 m。 $\phi 1\,000$ mm AB(130) 型 PHC 管桩的混凝土强度等级为 C80，桩身抗裂弯矩设计值、抗弯强度设计值分别不小于 901、1 110 kN·m，有效预压应力不小于 6 MPa。 $\phi 800$ mm AB(110) 型 PHC 管桩，管桩的混凝土强度等级为 C80，桩身抗裂弯矩设计值、抗弯强度设计值分别不小于 469、575 kN·m，混凝土的有效预压应力不小于 6 MPa。

1.3 码头桩基设计参数

码头桩基采用打入桩，其单位面积极限侧摩阻力标准值 q_f 和极限端阻力标准值 q_r 见表 2。

码头结构采用高桩框架式结构，根据前述各个结构尺寸参数在易工软件中建模，选择荷载组合，充分考虑承载能力极限状态持久组合、正常使用极限状态持久状况的准永久组合等工况进行荷载组合计算，得到的计算结果见表 3。

表 2 打入桩单位面积积极限侧摩阻力标准值 q_{li} 和极限端阻力标准值 q_{lr} kPa

设计 参数	层号	土层名称	土层深度/m							
			0~<5	5~<10	10~<15	15~<20	20~<25	25~<30	30~<35	35~<50
q_{li}	①	杂填土	30	—	—	—	—	—	—	—
	②	粉质黏土	25	30	—	—	—	—	—	—
	③	粉质黏土	40	45	50	—	—	—	—	—
	③ ₁	粉细砂夹粉土	—	40	45	—	—	—	—	—
	④	粉细砂夹粉土	—	—	50	55	—	—	—	—
	⑤	粉土夹粉细砂	—	—	—	45	—	—	—	—
	⑥	粉细砂	—	—	—	55	60	—	—	—
	⑥ ₁	粉质黏土夹粉细砂	—	—	—	65	70	—	—	—
	⑦	粉细砂	—	—	—	—	—	65	70	75
	⑦ ₁	粉质黏土	—	—	—	—	—	70	—	—
	⑧	粉质黏土	—	—	—	—	—	—	—	90
q_{lr}	③ ₁	粉细砂夹粉土	—	900	1 500	—	—	—	—	—
	④	粉细砂夹粉土	—	—	2 100	2 700	—	—	—	—
	⑤	粉土夹粉细砂	—	—	—	1 700	—	—	—	—
	⑥	粉细砂	—	—	—	2 700	3 100	—	—	—
	⑥ ₁	粉质黏土夹粉细砂	—	—	—	1 200	1 500	—	—	—
	⑦	粉细砂	—	—	—	—	—	3 300	3 500	3 700
	⑦ ₁	粉质黏土	—	—	—	—	—	1 900	—	—
	⑧	粉质黏土	—	—	—	—	—	—	—	2 800

表 3 码头平台主要构件设计计算结果

φ1 000 mm 桩基		φ800 mm 桩基		横梁		
最大桩力 设计值/kN	最大桩身弯矩 设计值/(kN·m)	最大桩力 设计值/kN	最大桩身弯矩 设计值/(kN·m)	最大弯矩/(kN·m)		最大 剪力/kN
				正弯矩	负弯矩	
4 433.6	620.4	3 227.4	620.4	1 835.7	-2 285.8	1 467.2
普通纵梁		轨道梁		平台最大水平 位移/mm		
最大弯矩/(kN·m)		最大弯矩/(kN·m)		最大剪力/kN		
正弯矩	负弯矩	正弯矩	负弯矩			
1 011.1	-629.5	736.3	3 587.7	2 264.3		
				2.9		

根据地质按照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》进行码头桩基受力计算，打入桩单桩轴向抗压承载力设计值公式为：

$$Q_d = (U \cdot \sum_{i=1}^n q_{li} l_i + q_{lr} A) / \gamma_r \tag{1}$$

式中： Q_d 为单桩轴向承载力设计值，kN； γ_r 为单桩轴向承载力分项系数，取 1.50； U 为桩身截面周长，m； q_{li} 为单桩第 i 层土的单位面积积极限侧阻

力标准值，kPa； l_i 为桩身穿过第 i 层土的长度，m； q_{lr} 为单桩单位面积积极限桩端阻力标准值，kPa； A 为桩端截面面积，m²。

根据岩土层桩基参数计算，35 m 桩长单桩轴向抗压承载力设计值满足最大桩力要求，码头平台桩基参数见表 4。本工程桩基沉桩采用干地施工，即陆上打桩施工工艺，见图 4。

表 4 码头平台桩基参数

行号	排架号	桩型	长度/m	数量/根	顶高程/m	底高程/m
A	1~58	φ1 000 mm AB(130)型 PHC 管桩(直桩)	35	58	19.55	-15.45
B	1~58	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩(直桩)	35	58	19.55	-15.45
C	1~58	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩(直桩)	35	58	19.55	-15.45
D	1~58	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩(直桩)	35	58	21.95	-13.05

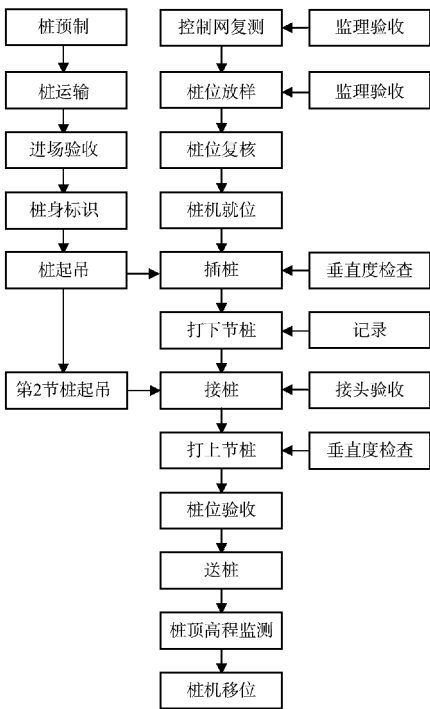


图 4 陆上打桩施工工艺

2 现场试桩试验与分析

根据工程总体布置，结合地质钻孔邻近参照，同时考虑该地区首次陆上大直径管桩试桩的顺利可行，均采用桩径为 800 mm 的 PHC 桩进行试桩，即确定 C-1、B-14、D-45 工程桩作为试验桩，依次进行低应变动力检测、高应变动力检测（初打）、轴向抗压静荷载试验，确定码头区域各土层的桩侧极限摩阻力标准值、桩端极限阻力标准值。高应变动力检测打桩全过程中桩身应力及沿桩身变化情况；初打最后 5 m 每隔 1 m 提供初打静土阻力值。试打桩进行初、复打。初打与复打及静载压载之间的时间间隔应满足 JTJ 249—2001《港口工程桩基动力检测规程》^[17] 的要求。在沉桩后进行加载的间歇时间不应少于 14 d。轴向抗压静荷载试验采用压载法。

试沉桩停锤标准：应优先按照高程控制；当基桩桩尖未达到设计高程，贯入度已小于 3 mm/击，应继续锤击 50 次，若平均贯入度仍小于 3 mm/击，且桩顶高程距设计高程相差 1 m 以内时，可停锤。

2.1 试沉桩施工及高应变结果分析

试沉桩采用 TWDD180 型多导杆柴油打桩锤型打桩机。TWDD180 型锤总质量为 34.8 t，替打高度 0.7 m，桩垫采用纸垫，厚 100 mm。桩锤每分钟击打 35~50 次，锤击部分最大行程 3 m，全机总质量 130 t。根据停锤标准等要求进行试沉桩控制，3 根桩试沉桩结果见表 5。

表 5 试验桩沉桩结果

桩号	设计桩长/m	设计桩底高程/m	实际桩底高程/m	总锤击数/击	最终贯入度/(mm·击 ⁻¹)	偏差
C-1	35	-14.05	-12.40	2 529	1.10	小
B-14	35	-16.45	-9.20	3 271	1.06	大
D-45	35	-14.05	-8.20	3 229	1.30	大

按照 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》^[18] 采用 RSM-PDT(B) 基桩高应变检测仪及 RS-1616K(S) 基桩动测仪分别对上述 3 根试验桩的高、低应变进行检测，其中高应变检测结果见表 6，低应变检测结果见表 7。

表 6 试验桩高应变检测结果

桩号	极限承载力设计值/kN	极限承载力检测值/kN	桩侧摩阻力检测值/kN	桩端摩阻力检测值/kN	分项系数
C-1	4 680	4 896	3 630	1 266	
B-14	4 680	4 799	3 523	1 226	1.45
D-45	4 680	5 053	3 769	1 284	

表 7 试验桩低应变检测结果

桩号	设计混凝土强度等级	波速/(m·s ⁻¹)	桩身质量	综合质量评定
C-1	C80	3 464	桩身完整	I
B-14	C80	3 370	桩身完整	I
D-45	C80	3 381	桩身完整	I

2.2 静载试验结果分析

当采用工程桩进行轴向抗压静荷载试验时，针对打入桩，加载量不小于设计要求的基桩轴向抗压承载力设计值的 1.4 倍，即 $\phi 800$ mm 的 PHC 管桩加载量应大于 4 518 kN，实际试验加载至 5 400 kN。单桩轴向抗压静荷载试验 $Q-s$ （荷载-沉降）曲线，见图 5。

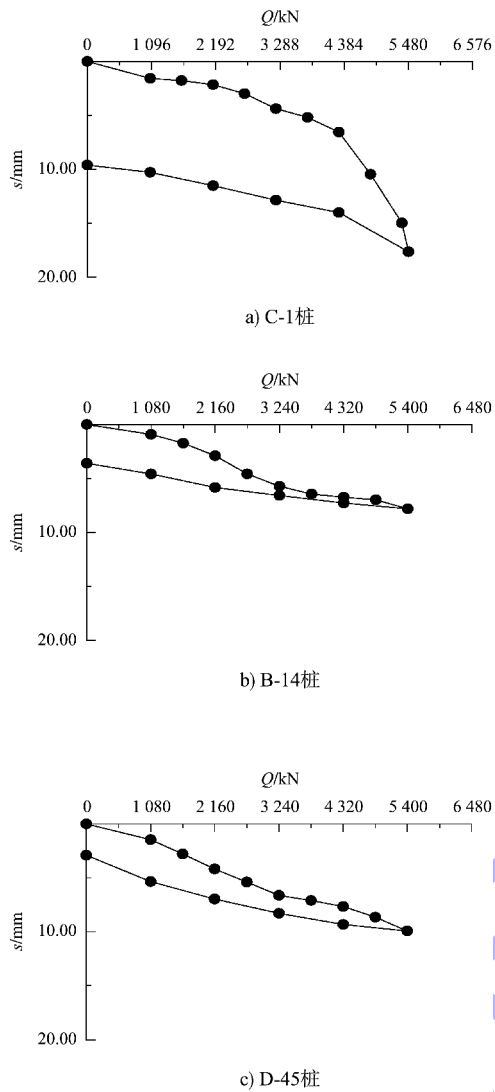


图 5 现场静载试验 $Q-s$ 曲线

总体上看, 试验桩的轴向抗压静荷载试验 $Q-s$ 曲线均为缓变形曲线, 加载至 5 400 kN 时, 3 根桩顶沉降量分别为 17.65、7.81 及 9.92 mm。根据 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》, $Q-s$ 曲线没有陡降时, 在 $Q-s$ 曲线上取桩顶总沉降量 s 达到 40 mm 相对应的荷载作为极限承载力, 综合确定试验桩的轴向抗压极限承载力不小于 5 400 kN。

3 桩基参数修正及优化

目前大部分内河高桩码头工程地质岩土层桩基参数主要根据现场勘察、土工试验等并参照规范进行确定, 若未开展试沉桩及轴向静载荷试验, 岩土层桩基参数取值势必偏于保守。本工程根据试沉桩过程沉桩记录、高应变检测以及轴向抗压静载荷试验结果, 对各岩土层桩基参数标准值进行修正, 打入桩单位面积极限侧摩阻力修正标准值 q_{f-m} 和极限端阻力修正标准值 q_{r-m} 见表 8。

总体上看, 试验桩单位面积极限侧摩阻力标准值和极限端阻力标准值调整系数范围为 5%~10%, 属于正常调整范围, 同时未超出 JTS 167—2018《码头结构设计规范》推荐范围。结合各土层桩基参数标准值的修正, 设计进一步研究并采用⑦层粉细砂作为桩基持力层, 同步优化桩基参数, 见表 9。

表 8 打入桩单位面积极限侧摩阻力修正标准值 q_{f-m} 和极限端阻力修正标准值 q_{r-m} kPa

参数修正	层号	土层名称	土层深度/m							
			0~<5	5~<10	10~<15	15~<20	20~<25	25~<30	30~<35	35~<50
q_{f-m}	①	杂填土	30	—	—	—	—	—	—	—
	②	粉质黏土	30	35	—	—	—	—	—	—
	③	粉质黏土	45	48	52	—	—	—	—	—
	③ ₁	粉细砂夹粉土	—	41	45	—	—	—	—	—
	④	粉细砂夹粉土	—	—	53	57	—	—	—	—
	⑤	粉土夹粉细砂	—	—	—	47	50	—	—	—
	⑥	粉细砂	—	—	—	58	62	—	—	—
	⑥ ₁	粉质黏土夹粉细砂	—	—	—	65	70	73	—	—
	⑦	粉细砂	—	—	—	—	—	66	70	74
	⑦ ₁	粉质黏土	—	—	—	—	—	73	78	83
	⑧	粉质黏土	—	—	—	—	—	85	90	95

续表8

参数修正	层号	土层名称	土层深度/m							
			0~<5	5~<10	10~<15	15~<20	20~<25	25~<30	30~<35	35~<50
q_{r-m}	③ ₁	粉细砂夹粉土	-	1 200	1 800	-	-	-	-	-
	④	粉细砂夹粉土	-	-	2 400	3 000	-	-	-	-
	⑤	粉土夹粉细砂	-	-	-	2 100	-	-	-	-
	⑥	粉细砂	-	-	-	3 000	3 500	-	-	-
	⑥ ₁	粉质黏土夹粉细砂	-	-	-	1 500	1 900	-	-	-
	⑦	粉细砂	-	-	-	-	-	3 300	3 500	3 700
	⑦ ₁	粉质黏土	-	-	-	-	-	2 600	2 800	3 000
	⑧	粉质黏土	-	-	-	-	-	3 000	3 200	3 400

表 9 码头平台桩基优化参数

行号	排架号	桩型	长度/m	数量/根	顶高程/m	底高程/m
A	1~58	φ1 000 mm AB(130)型 PHC 管桩	28	58	19.55	-8.45
B	1~58(不含 14)	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩	28	57	19.55	-8.45
C	1~58(不含 1)	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩	28	58	19.55	-8.45
D	1~58(不含 45)	φ800 mm AB(110)型 PHC 管桩	29	57	21.95	-7.05

4 内河码头沉桩设备选型

试沉桩采用 TWDD180 型多导杆柴油打桩锤型打桩机，由于试沉桩停锤时总锤击数较大、最终贯入度较小，相对⑦层密实粉细砂层($N=30$ 击)的摩阻力，打桩锤的锤击能偏小，另外考虑 φ1 000 mm 大直径预制型管桩陆上沉桩的顺利实施，全面沉桩时将打桩锤调整为 TWDD200 型多导杆柴油打桩锤型打桩机。最终，该工程全部工程桩均顺利完成沉桩，标志着在皖北地区首次采用陆上大直径预制型管桩设计、实施是成功的。

5 结论

- 1) 以安徽淮北港韩村港区孙疃作业区综合码头工程为例，对内河高桩码头大直径 PHC 管桩沉桩现场试验中的桩端进入持力层深度和最后贯入度进行分析，验证了沉桩设备性能、桩身结构强度与地质条件三者的适应性，也验证了施工工艺、沉桩设备、沉桩控制参数和停锤标准的可行性。
- 2) 基于现场试验及土层桩基参数反演参数结果，明确了内河高桩码头大直径 PHC 管桩单位面积极限侧摩阻力标准值和极限桩端阻力标准值的调整系数范围；同时结合各岩土层桩基参数标准值的修正，提出采用⑦层粉细砂作为桩基持力层，同步优化桩基参数。

3) 通过本工程码头平台桩基设计、试沉桩等工作的系统性梳理，根据试验检测数据，合理调整地勘参数，优化桩基设计，保证码头结构安全稳定，一方面促进陆上大直径预制型管桩施工的顺利高效实施；另一方面直接降低工程造价，估算直接节省工程成本，凸显内河高桩码头桩基试验工作及其对设计优化的重要性，可为类似工程的设计及实施提供借鉴。

参考文献：

[1] 洪鑫. 单桩静载荷试验的理论模拟及影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 176-183.

[2] 王遇国, 梅志荣, 张季超. 单桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 7-11.

[3] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[4] 施峰. PHC 管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004(1): 95-99.

[5] 律文田, 王永和, 冷伍明. PHC 管桩荷载传递的试验研究和数值分析[J]. 岩土力学, 2006(3): 466-470.

[6] 桑登峰, 谭德银, 赵冉. 大直径 PHC 桩竖向承载特性数值模拟研究[J]. 水运工程, 2014(1): 168-172, 196.