



高桩码头结构基桩常见问题分析及 处理技术*

蒋腊梅, 王 军

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对港口工程高桩码头基桩施工过程中出现超高、打低、偏位、桩头开裂、桩身裂缝, 以及灌注桩、嵌岩桩在施工过程中出现的完整性异常、承载力不足等问题进行分析, 提出割桩、局部减低上部结构高程、局部加大上部结构截面、增加桩帽、接桩、补桩、包裹补强、后注浆等处理技术。通过工程实例分析后注浆加固补强措施对承载力提高的效果, 为灌注桩、嵌岩桩常见问题处理技术提供数据支撑。研究成果可为高桩码头结构基桩处理提供参考。

关键词: 高桩码头; 桩基承载力; 后注浆; 桩基检测

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0121-07

Analysis and treatment technologies for common problems in foundation piles of high-pile wharf

JIANG Lamei, WANG Jun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To solve the problems of over-height, under-height, deviation, cracking of pile head, and pile body cracks, as well as the integrity anomalies and insufficient bearing capacity of cast-in-place piles and embedded piles during the construction of foundation piles of high-pile wharves in port engineering, this paper proposes cutting piles, partially lowering the elevation of the upper structure, partially increasing the cross-sectional area of the upper structure, adding pile caps, splicing piles, filling piles, reinforcing with wrapping, and post-grouting treatment technologies. Through the analysis of the effect of post-grouting reinforcement measures on bearing capacity improvement in engineering examples, it provides data support for the common problem treatment technologies of cast-in-place piles and embedded piles. The research results can provide reference for the treatment of foundation piles for high-pile wharves.

Keywords: high-pile wharf; bearing capacity of pile foundation; post-grouting; pile foundation detection

码头结构作为港口工程的重要组成部分, 随着优质口岸线的大量利用, 港口建设条件越来越恶劣。高桩码头结构适应性强, 在日益恶劣的建港条件下应用最为广泛。高桩码头采用系列长桩作为地基形成桩基础, 承受上部结构传来的荷载, 适用于软土层较厚的区域。高

桩码头水上桩基施工过程中, 由于水流、波浪、地质土层等方面影响, 基桩实施过程中可能会产生一些问题^[1-3]。本文对基桩可能出现的异常或缺陷进行分析, 分类提出处理措施, 以期为保证工程质量、控制工程投资、确保工期提供参考。

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 蒋腊梅 (1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计工作。

1 高桩码头结构

1.1 桩基分类

高桩码头既适用于沿海地区和江河两岸的软土地基,也可用于硬质黏土、粉土、砂土和风化岩等地基,特别是在外海水深浪大的大型港口建设时,桩基结构已成为码头结构的最佳形式之一。

高桩码头基桩根据所用材料和结构形式不同可分为钢筋混凝土方桩、预应力混凝土管桩、钢管桩、组合桩(上节为钢筋混凝土桩,下节为钢管桩);根据施工工艺不同可分为打入桩、钻孔灌注桩(包括挖孔桩)、嵌岩桩^[4]。

1.2 桩基施工特点

1.2.1 打入桩

根据水流、水深、波浪条件,沉桩方式可分为水上和陆上两类。在水流、水深、波浪条件较好时,一般采用打桩船将桩打入地基;水深、波浪条件较差时,为了使沉桩成为可能,也可采用升降式平台船的陆上沉桩方式,或者利用已建结构或临时水上平台采用悬锤吊打沉桩方式。

1.2.2 钻孔灌注桩

钻孔灌注桩早期主要用于桥梁和陆上土建工程,港口码头工程使用较晚。目前港口码头工程中对于不适宜采用打入桩和重力式结构,或基岩面以上覆盖层较厚的地方,已普遍采用钻孔灌注桩。码头工程使用的钻孔灌注桩一般在水上使用,为满足成桩施工要求,其钢护筒较长且壁厚较厚。

1.2.3 嵌岩桩

随着港口航运业的发展,深水泊位的需求日益增加。在持力层岩面埋深较浅且起伏变化较大、上部覆盖层有一定厚度但厚薄不一、甚至岩面裸露的区域建设高桩码头结构,桩基大多采用嵌岩桩。水上嵌岩桩需采用钢护筒,且钢护筒需入岩一定深度,作为永久结构不周转使用。

2 高桩码头结构桩基施工常见问题

2.1 桩基偏位

港口高桩码头桩基施工过程中,如遇一定风

力打桩船会发生左右摇摆或晃动,桩基水平偏位超过 JTS 206-2—2023《水运工程桩基施工规范》^[5]中的水上沉桩允许偏差的要求(表 1),则需采取工程措施进行处理。

表 1 不同桩型水上沉桩允许偏差
Tab. 1 Allowable deviations for pile driving of different pile types above water

序号	桩位	允许偏差/mm	
		直桩	斜桩
1	设计高程处桩	100	150
	内河和有掩护近岸水域沉桩	150	200
	无掩护近岸水域沉桩	250	300
	顶平面位置	100	100
2	每米桩身垂直度	10	-
		滑道桩,包括送入水下 10m 以内	100
3	桩顶高程	0	0
		100	100

注: 1) 序号 1、2 项偏差按夹桩铺底后所测数据为准,禁止拉桩矫偏; 2) 近岸指距岸 500 m 及以下,离岸指距岸超过 500 m; 3) 墩台中间桩的桩顶允许偏差可按表中规定值增加 50 mm。

2.2 桩基超高、打低

打入桩根据桩-土相互作用特性分为摩擦桩、端承桩、抗拔桩等。摩擦桩在竖向荷载作用下,侧阻力占桩基承载力的 80%~90%;端承桩在竖向荷载作用下,端承力占桩基承载力 60%以上^[6]。高桩码头桩基的停锤标准:摩擦桩一般以高程控制、贯入度校核;端承桩一般以贯入度控制、高程校核。实际工程中,由于地质起伏变化,沉桩过程中可能出现少量超高、打低的情况。

2.3 基桩缺陷

基桩施工过程中如遇风或涌浪,打桩船会发生左右摇摆或晃动,导致打桩过程中桩、替打和桩锤不在一条轴线上,发生偏心锤击,造成混凝土桩顶劈裂或者桩身断裂。

灌注桩、嵌岩桩需现场浇筑混凝土,完工后应判定其桩身完整性。桩身完整性分类^[7]: I 类桩,桩身完整,为合格桩; II 类桩,桩身有轻微缺陷,不会影响桩身结构承载力的正常发挥,为

合格桩; III类桩: 有明显缺陷, 对桩身结构承载力有影响, 为不合格桩。IV类桩, 桩身存在严重缺陷, 为不合格桩。

3 基桩常见问题补救技术

3.1 基桩偏位补救技术

预应力混凝土管桩与桩帽或横梁的连接处抗弯要求较高, 连接处按刚性设计时, 可采用图1的形式1, 横梁或桩帽外包基桩宜大于0.4倍桩径, 且考虑打桩偏位的影响, 码头下横梁宽度一般不小于1.8倍桩径。桩与桩帽或横梁的连接处无抗弯要求或桩顶弯矩较小, 桩与桩帽或横梁的连接可采用图1的形式2, 桩帽外包宽度不小于0.25倍桩径, 且考虑打桩偏位的影响, 码头下横梁宽度一般不小于1.5倍桩径。一般高桩码头打入桩段单个分段的桩位见图2。

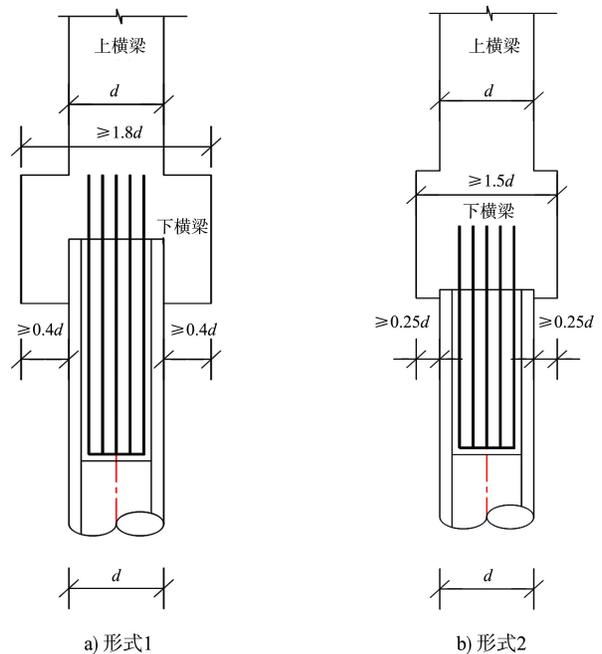


图1 管桩与桩帽的连接形式

Fig.1 Connection forms between pipe piles and pile caps

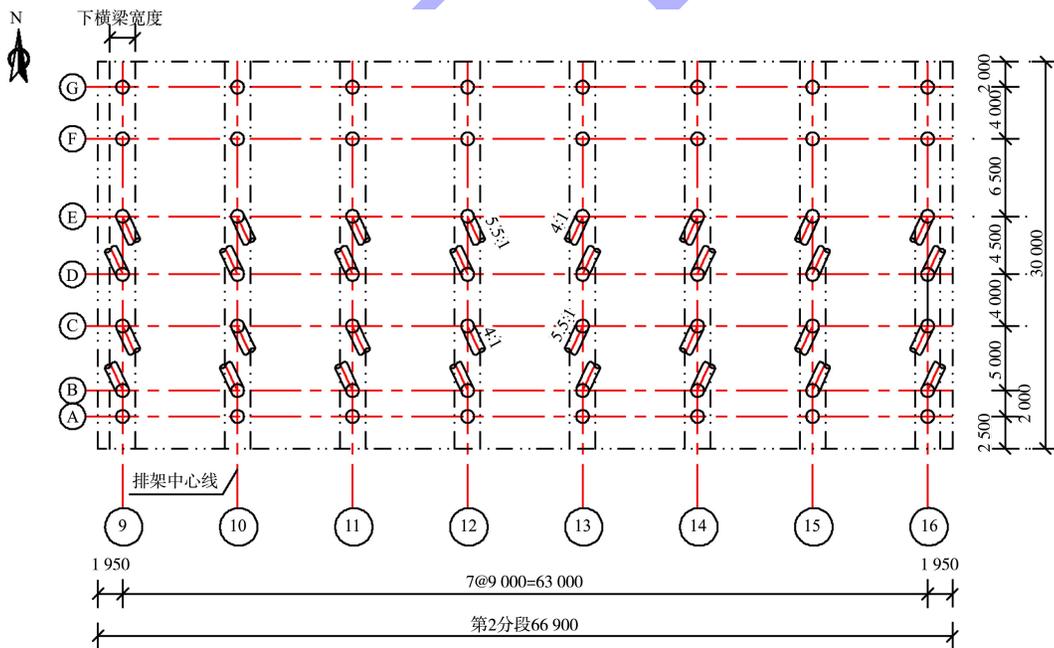


图2 高桩码头分段桩位 (单位: mm)

Fig.2 Segmented pile positions of high-pile wharf (unit: mm)

如图3所示, 实际施工过程中, 基桩偏位方式包括:

1) 沿着排架中心线方向偏移原设计桩位(9E桩往北偏移)。该情况下基桩的外包宽度仍满足规范, 但是由于同一排架的基桩间距发生变化,

9E与9D桩的距离大于原设计值, 需复核原横梁跨中配筋是否满足规范要求。

2) 基桩偏离排架中心线(22E、31E)。该情况下基桩的外包宽度不能满足规范要求。

①基桩偏位小于0.15桩径, 如22E桩的基桩

往东偏离原中心线，基桩仍在下横梁范围内，可通过局部加大下横梁宽度(图 4)，将基桩包裹横梁范围，另外需注意调整桩芯钢筋布置或上横梁宽度。

②基桩偏位大于 0.15 桩径，如 31E 桩的基桩

往东偏离原中心线较大，基桩已经超出原下横梁范围内，宜先在横梁西侧对称补 1 根基桩，再将下横梁东、西侧均局部加宽(图 4)；或者在下横梁下方新增桩帽节点，将偏位桩及补桩一起做成一个整体，再在桩帽上方进行下横梁施工，如图 5 所示。

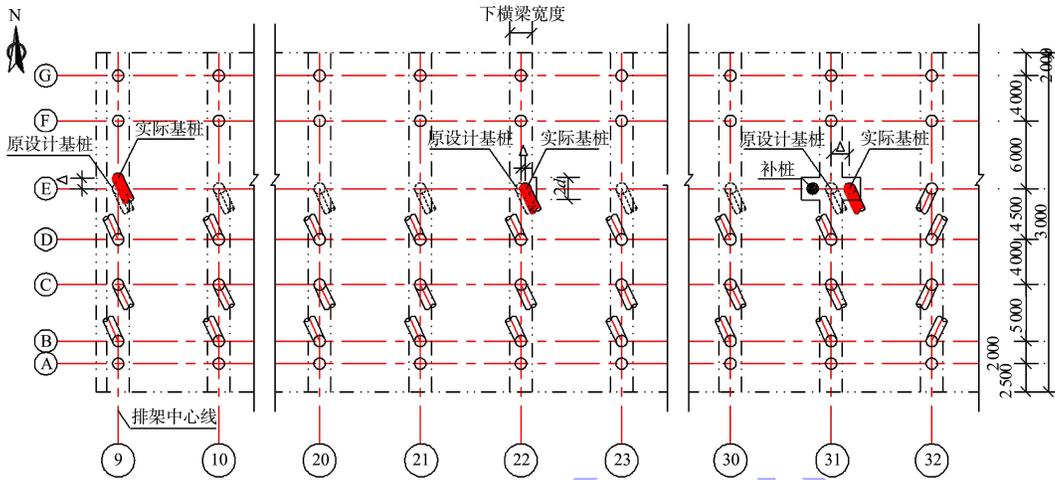
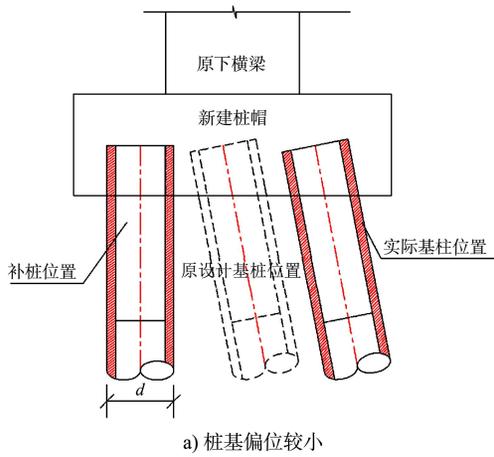
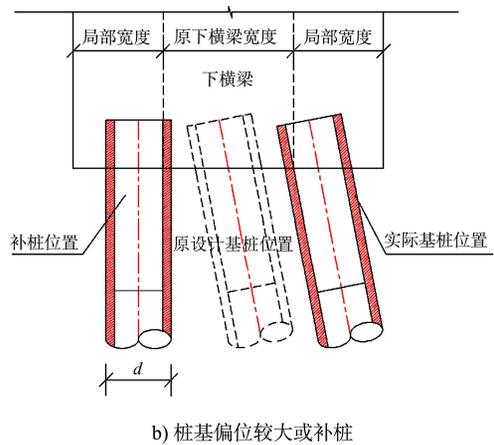


图 3 桩基偏位 (单位: mm)

Fig. 3 Pile foundation deviation (unit: mm)



a) 桩基偏位较小



b) 桩基偏位较大或补桩

图 4 横梁局部加宽

Fig. 4 Partial widening of crossbeam

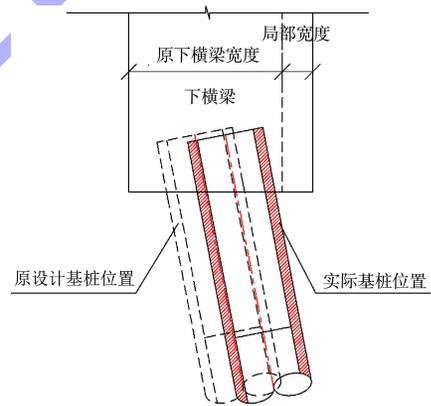


图 5 新建桩帽

Fig. 5 Newly-built pile cap

3.2 基桩超高、打低补救技术

3.2.1 基桩超高

桩端距设计高程相差较大，沉桩贯入度较控制贯入度明显偏小，需根据地质情况分析基桩超高的原因。若施工过程和地质情况正常，应通过高应变动测定基桩承载力及桩身完整性，若桩身完整且基桩承载力可满足抗压承载力设计要求，需根据基桩入土深度复核基桩抗拔承载力，如基桩抗拔承载力可满足设计要求，可不作处理。

对不能满足设计要求的桩基可通过以下方式补救: 1) 桩身完整性缺陷的补救措施见 3.3 节。2) 基桩抗压承载力满足设计要求而抗拔承载力稍小于设计要求时, 可增加桩芯混凝土长度。3) 基桩抗压承载力满足设计要求而抗拔承载力远小于设计要求时, 桩尖位于土基的打入桩可通过后注浆提高桩基侧阻力; 持力层为岩基, 可通过桩内设置锚杆以满足设计要求。4) 基桩抗压承载力不满足设计要求或无法通过以上方式对抗拔承载力进行加强, 需在原基桩附近补桩(可根据打桩顺序补原设计桩型或灌注桩), 再局部加宽下横梁或设置桩帽。

3.2.2 基桩打低

基桩施工开始时锤击正常, 后续突然贯入度变大, 继续锤击后, 桩顶低于原设计桩顶高程, 应根据地质情况分析原因, 测定基桩承载力及桩身完整性, 若桩身完整且基桩承载力满足设计要求, 只需对横梁或桩帽进行局部处理: 1) 若基桩伸入下横梁(桩帽)长度小于原设计, 但大于 100 mm, 可加强桩芯混凝土及加大基桩与横梁(桩帽)连接处的桩基截面(图 6); 2) 若桩基顶高程低于下横梁或者桩帽底高程, 需局部降低横梁或另外设置桩帽(图 7); 3) 若基桩打低太多, 预应力高强度混凝土管桩或者钢管桩可进行水上接桩。若基桩承载力不能满足设计要求, 需补桩。

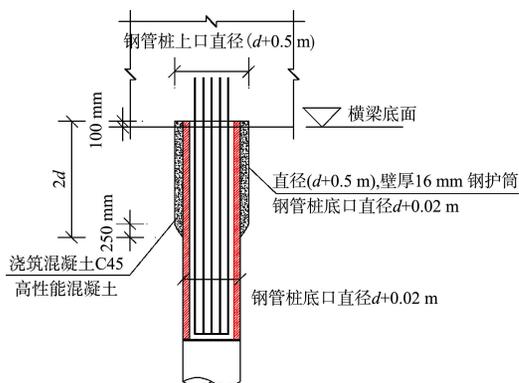


图 6 桩顶加强

Fig. 6 Reinforcement at pile top

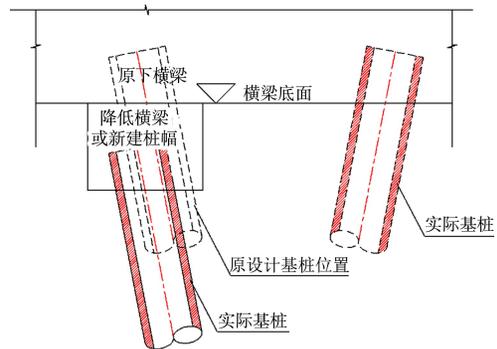


图 7 局部降低横梁或设置桩帽

Fig. 7 Partially lowering crossbeam or setting pile caps

3.3 基桩缺陷补救技术

3.3.1 打入桩缺陷

混凝土桩打桩完毕后采用高应变或低应变动测法检测桩身质量, 如发现断桩、裂缝等情况需补桩或进行修补。1) 对于桩身裂缝发生在施工水位以上的部分, 一般可在桩身外壁凿成 V 形槽后用环氧嵌补, 再用 2~3 层环氧玻璃布封贴, 并在桩芯灌注混凝土 C40 至裂缝以下 500 mm^[8]。2) 如桩顶开裂范围较小, 可以采取割除裂缝段、局部降低横梁(桩帽)的处理措施。3) 如裂缝纵向延伸至水下、不易查明其长度时, 对桩芯及外包均应浇筑混凝土至硬土表面, 桩芯配钢筋笼, 外壁配钢筋网; 或者另外设置钢套筒包裹原纵向裂缝区域, 钢套筒长度超过裂缝长度的 1 倍桩径。4) 若发生断桩, 需进行补桩, 对断桩水上段进行割除。补桩可采用 1:10~1:12 的斜桩, 使其桩顶保持原桩位, 并对横梁配筋进行复核。

3.3.2 灌注桩、嵌岩桩缺陷

桩身完整性分类为 III 类桩的基桩有明显缺陷, 需进行工程处理, 可根据缺陷所在区域进行针对性补救。桩身完整性分类为 IV 类桩的基桩建议补桩, 根据补桩桩位复核其他基桩的承载力、横梁配筋, 如由于补桩桩位变化, 整个排架桩基受力分布变化, 其他基桩的承载力若不能满足极限抗压承载力的要求, 需对其他基桩进行后注浆补强^[9-11]。基桩缺陷在桩尖时, 通过基桩内预埋的超声波检测管进行后注浆, 以提高基桩承载力; 基桩缺陷在桩顶时, 宜对基桩桩顶凿除后重新浇筑。

4 后注浆补强措施承载力计算及效果分析

钻孔灌注桩由于采用泥浆护壁，沉渣难以彻底清除，在初灌水下混凝土的冲击作用下，沉渣挤向四周形成锥形空隙，可能造成桩底混凝土不密实，同时沉渣沿着桩壁向上泛起而减小桩在持力层中的侧摩阻力。灌注桩成孔过程中采用泥浆护壁，存在厚度不一的泥皮，难以控制和检测。大直径桩的灌注速度较慢，桩体混凝土上升过程中难以挤落泥皮，桩体混凝土与周围的土层不能很好地集合在一起，使侧摩擦力难以充分发挥。钻孔桩施工技术及工艺本身无法解决桩底混凝土密实问题，往往降低钻孔桩的承载力。灌注桩成桩后，采用高压注浆泵由注浆通道将水泥浆压入桩端和桩侧土层，浆液的注浆压力对桩端沉渣和桩端持力层及桩周泥皮起到渗透、压密、劈裂作用，充填的水泥浆可固化桩端沉渣和桩侧泥皮，增大桩端阻力和桩侧摩阻力。打入桩也可在清除桩内土体后埋设注浆管，再采用后注浆进行基桩承载力的补强。

某项目有 5 根 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 灌注桩(桩尖持力层为粉细砂)，超声波检测结果表明，因桩端底部残留较厚的软弱沉渣，造成桩端部 2 倍桩径范围内有局部缺陷，判定为 III 类桩。通过对灌注桩桩身完整性检测结果分析，采取桩端后注浆法对 5 根灌注桩桩端缺陷部位和沉渣区进行加固补强。灌注桩桩端注浆以渗透和压密的方式注入浆液，在桩底劈裂渗透，使沉渣及桩端缺陷范围加固密实，对桩底缺陷进行加固。另通过桩底注浆产生的“扩底”效应使得桩端承载力大幅提高，通过压密注浆法处理，37 d 后检测结果表明，5 根桩均满足基桩完整性和可靠性的要求。灌注桩注浆前后高应变检测结果对比见表 2。由表可知， $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 灌注桩基桩极限承载力增幅 20.6%~34.6%，其中桩侧摩阻力增幅 10.4%~23.5%，桩端阻力增幅 40.8%~90.6%，通过后注浆工艺处理缺陷桩的效果比较理想。

表 2 注浆前后高应变检测结果对比

Tab. 2 Comparison of high-strain test results before and after grouting

阶段	桩号	测试桩长/m	测试桩尖高程/m	CAPWAPC 法极限承载力/kN		
				极限承载力/MN	桩侧摩阻力/MN	桩端阻力/MN
注浆前	1	52	-45.84	7.307	6.099	1.208
	2	52	-45.94	7.252	5.983	1.269
	3	52	-45.81	7.212	6.019	1.193
	4	52	-45.84	7.324	6.128	1.193
	5	52	-45.92	7.333	5.737	1.596
注浆后	1	52	-45.84	9.835	7.533	2.302
	2	52	-45.94	8.746	6.817	1.909
	3	52	-45.81	8.718	6.643	2.075
	4	52	-45.84	9.090	6.928	2.163
	5	52	-45.92	9.061	6.814	2.247

5 结论

- 1) 打入桩基桩偏位，可通过增加上部结构外包尺寸进行处理。
- 2) 打入桩基桩超高，根据桩身完整性及承载力是否满足要求，可通过割桩、增加桩芯混凝土长度、桩尖设置锚杆、补桩等进行处理。
- 3) 打入桩基桩打低，根据桩身完整性及承载力是否满足要求，通过减低上部结构底高程、水上接桩或补桩等方式进行处理。
- 4) 缺陷基桩可根据桩身缺陷区域及范围采用包裹环氧玻璃布、桩顶局部割桩、设置外钢套筒、后注浆、补桩等方式进行处理。

参考文献:

[1] 张强. 高桩码头结构修复加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
ZHANG Q. Technology of repairment and reinforcement for pile-supported wharf [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

[2] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 长江大水位差集装箱码头建设技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. Techniques for container wharf construction of the Yangtze River with huge water fluctuation[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

- [3] 中交第一航务工程局有限公司. 港口工程施工手册(下册)[M]. 2版. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Handbook for harbour engineering construction (volume two) [M]. 2nd edition. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [4] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
GONG X N. Pile and pile foundation handbook [M]. 2nd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [5] 中交第三航务工程局有限公司. 水运工程桩基施工规范: JTS 206-2—2023[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2023.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Code for construction for pile foundation in port and waterway engineering: JTS 206-2-2023 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2023.
- [6] 刘兴禄. 桩基工程与动测技术 500 问[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
LIU X L. 500 questions for pile foundation engineering and dynamic testing technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [7] 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2020.
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd. Technical code for testing and inspection of waterway engineering foundation piles: JTS 240-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [8] 史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册)[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
SHI P D. Pile and pile foundation handbook [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [9] 刘旭. 桥梁桩基的施工缺陷及桩基加固方案对比分析[J]. 山西水泥, 2024(10): 175-177.
LIU X. Comparative analysis of construction defects and pile foundation reinforcement schemes for bridge pile foundations [J]. Shanxi cement, 2024(10): 175-177.
- [10] 蔺威威, 谷坤鹏, 刘思楠, 等. 码头桩基钢套筒灌浆加固修复技术[J]. 水运工程, 2024(5): 231-236.
LIN W W, GU K P, LIU S N, et al. Reinforcement and repair technology of steel sleeve and grouting in wharf pile foundation [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 231-236.
- [11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.
CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 62 页)

- [7] J·麦克卢斯基. 道路型式与城市景观[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
MCCLUSKY J. Road form and urban landscape [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- [8] 芦原义信. 外部空间设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1985.
ASHIHARA Y. Exterior design in architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [9] 芦原义信. 街道的美学[M]. 北京:百花文艺出版社, 2006.
ASHIHARA Y. The aesthetics townscape [M]. Beijing: Baihua Literature and Art Publishing House, 2006.
- [10] 凯文·林奇. 城市意象[M]. 华夏出版社, 2001.
LYNCH K. The image of the city [M]. Huaxia Publishing House, 2001.
- [11] 卡米诺·西特. 城市建设艺术[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2017.
SITTE C. The art of building cities [M]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Science and Technology Press, 2017.

(本文编辑 赵娟)