



考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析

李荣庆, 侯永为

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 泥沙淤积将影响高桩码头的正常使用。为掌握泥沙淤积对高桩码头基桩的影响规律, 借助有限元分析方法, 结构与土均按三维实体单元建模, 桩土间设置接触单元考虑桩土相互作用, 采用单元生死近似考虑泥沙淤积过程, 岩土参数采用实测位移资料进行校准。分析结果表明, 泥沙淤积引起的附加土压力将使最大弯矩出现在基桩顶部, 且大部分为陆侧受拉, 最危险截面出现在桩头向海的桩顶附近; 对泥沙进行清淤处理后, 将明显改善基桩受力状态, 极大降低淤积对基桩造成的不利影响。

关键词: 淤积; 高桩码头; 有限元

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0095-05

Three-dimensional finite element analysis of pile-supported wharf considering sediment deposition

LI Rong-qing, HOU Yong-wei

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The service of pile-supported wharf will be influenced by sediment deposition. In order to study the influence law of sediment deposition on piles, the following works are finished: the structures and soils are modeled by three-dimensional solid elements, contact elements are set up to consider interaction of piles and soils, the birth and death of elements are used to model the sediment deposition, and geotechnical parameters are calibrated by measured displacements. The result shows that the maximum bending moment will appear at the top of pile under additional earth pressure by sediment deposition, and the most of piles are in tension at the landside section while the worst section is at the top of piles which towards the sea. The stress condition of piles will be obviously improved and the influence of deposition will be reduced after excavating sediment.

Keywords: sediment deposition; pile-supported wharf; finite element

对某些高桩码头的现场监测表明, 建成后的码头前沿、下方和后方会发生泥沙淤积现象。泥沙淤积将产生较大的土压力, 改变高桩码头的受力特性, 对基桩受力造成不利影响。因此, 泥沙淤积下高桩码头基桩受力分析是掌握高桩码头使用状态的重要参考, 并可为下一步的码头疏浚工作提供指导。由于桩土相互作用的复杂性, 国内

外有关设计规范均没有明确规定泥沙淤积下高桩码头的分析方法。目前基桩内力分析的研究成果可概括为3类: 弹性理论法^[1]、地基反力法^[2]和数值分析方法^[3]。弹性分析法将桩分成若干微段, 同时根据半无限体中受水平力并发生位移的Mindlin方程估算微段中心处桩周土位移, 根据桩的挠曲方程求桩的位移和内力。地基反力法将桩

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 李荣庆(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事工程结构设计和抗震研究。

侧土的抗力以函数 $p(x,y)$ 表示, 进而求得桩身位移和内力。按 $p(x,y)$ 的计算方法, 又可以分为极限地基反力法、弹性地基反力法和弹塑性地基反力法 3 种类型。我国《港口工程桩基规范》^[4] 规定的 m 法、 NL 法和 $p-y$ 曲线法都属于地基反力法。数值分析方法则将土视为连续体, 考虑桩土之间的接触特性, 通过有限元法、边界元法或有限差分法等进行求解, 具有计算能力强、能适用于复杂的地质条件和受力形式等优点, 考虑影响桩基工作性能的众多因素, 逐渐成为解决岩土问题的一种重要方法。本文结合工程实例, 采用有限元分析方法对泥沙淤积下的高桩码头基桩受力进行分析, 总结了泥沙淤积对基桩的影响规律, 最后对泥沙清淤效果进行分析, 可为类似工程案例提供参考。

1 工程概况

1.1 地质与码头结构

某工程可靠泊 10 万吨级集装箱船, 全长 360 m, 宽 55.5 m。码头有 4 个分段, 每个分段长度为 90 m。码头面高程为 5.20 m, 码头前沿靠泊水域泥面高程为 -17.5 m。码头岸桥轨距为 35 m, 码头宽 55.5 m, 现浇桩帽节点, 预制横梁和纵向梁系, 预制现浇叠合面板, 预制梁板均采用先张法预应力混凝土结构。排架间距 10.5 m, 每榀排架布置 12 根基桩, 即轨道梁下面每个节点各 3 根桩, 纵梁下面每个节点各 1~2 根桩。基桩采用 $\phi 1\ 200$ mm B2 型预应力混凝土组合管桩。预应力混凝土组合管桩上部 50 m 采用 $\phi 1\ 200$ mm B2 型预应力混凝土管桩, 下部约 26 m 采用 $\phi 1\ 200$ mm 钢管桩。码头结构断面见图 1, 选取某排架进行分析。

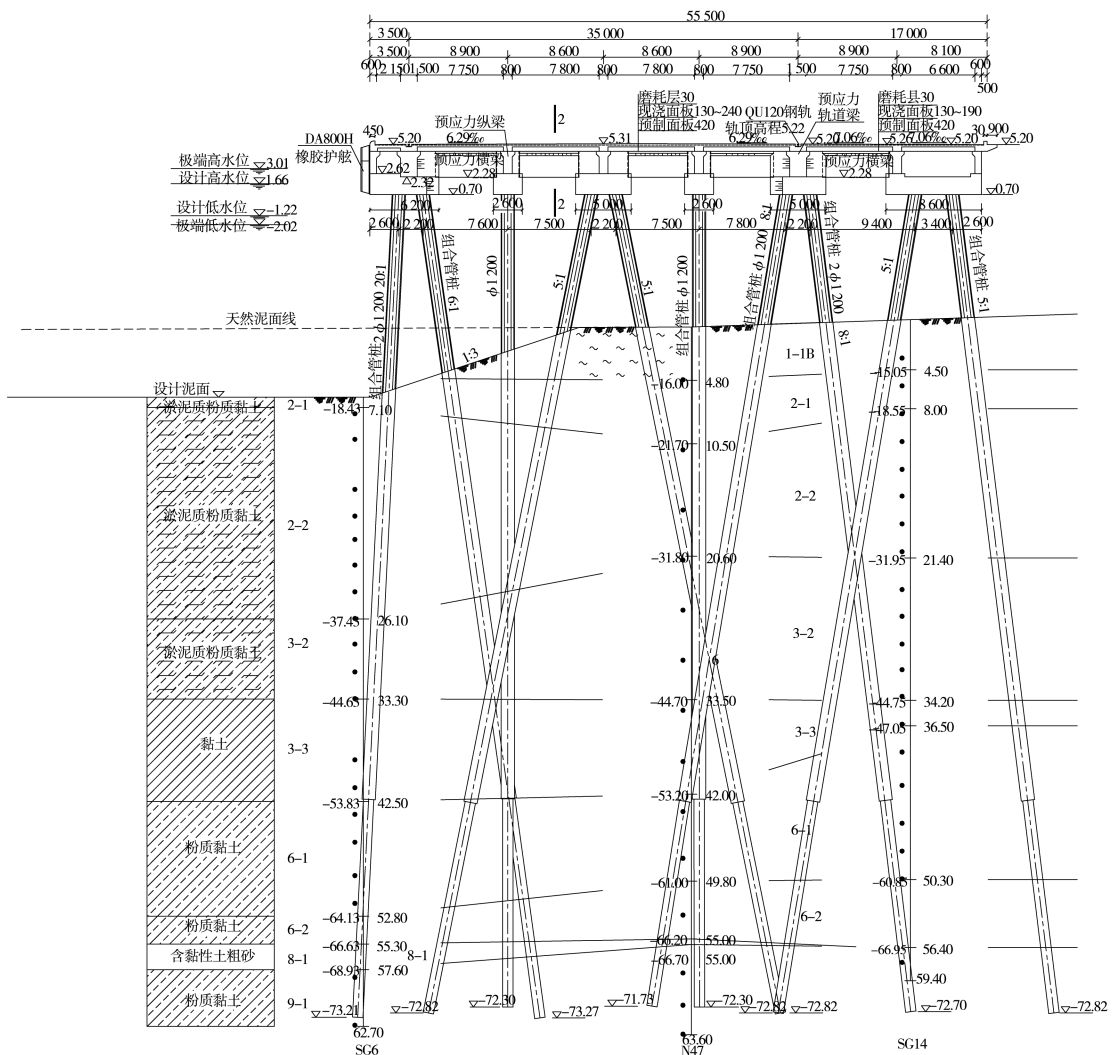


图 1 码头地质和结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 泥沙淤积情况

本工程水工结构于 2005 年 4 月 1 日开工, 2007 年 8 月底水工主体工程完工。所选取排架位置的回淤情况如下: 根据 2003 年 8 月地勘报告, 码头排架的钻孔高程为 -11.48、-11.37、-10.49 m, 泥面较为平坦; 根据沉桩记录, 本排架各基桩沉桩时的泥面高程在 -11 m 左右; 2015 年测图 (图 2) 显示, 码头前沿由沉桩时的 -11.0 m, 疏浚至现在的 -16.51 m, 竣深了 4.51 m, 码头后沿由沉桩时的 -11.0 m 淤积至 -2.58 m, 淤积了 8.42 m。

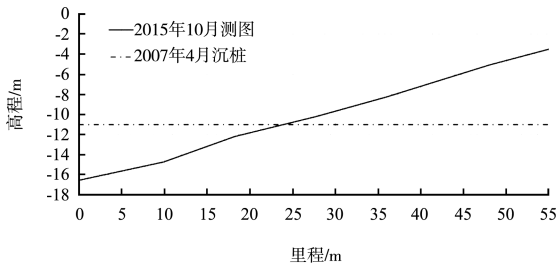


图 2 码头下方泥沙淤积情况

2 有限元模型及参数校准

2.1 有限元模型

高桩码头具有明显的三维受力特点, 受计算机性能限制, 不可能选取整个结构段进行分析。考虑到本工程沿码头纵向地质分布基本均匀, 因此选取典型横向排架进行分析。结构和岩层采用

弹性材料模拟; 各土层采用理想弹塑性材料模拟, 材料本构服从摩尔库仑屈服准则; 桩土之间的接触特性采用接触单元进行模拟。桩土均采用 10 节点四面体单元模拟, 泥沙淤积和清淤过程采用单元生死模拟。

根据地勘资料, 土的参数见表 1, 结构参数见表 2。

试算确定对结构内力无明显影响时的土体计算范围, 左侧自码头平台前沿向左取 50 m, 右侧码头平台后沿取 55 m, 下侧取至岩层下 15 m。边界条件采用左右边界水平约束, 底边界固定约束, 有限元模型见图 3。

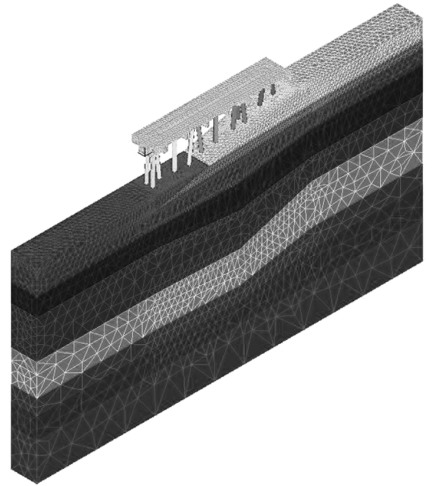


图 3 高桩码头三维有限元模型

表 1 土参数

土层名称	压缩模量/(N/mm ²)	弹性模量/(N/mm ²)	泊松比	天然密度/(t/m ³)	粘聚力/(kN/m ²)	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
淤泥	2.33	14	0.42	1.68	15.1	7.8	0
淤泥	2.33	14	0.42	1.66	13.0	7.3	0
淤泥质粉质黏土	2.67	16	0.42	1.75	16.0	9.0	0
淤泥质粉质黏土	2.93	17	0.40	1.78	17.0	9.3	0
淤泥质粉质黏土	3.12	18	0.42	1.79	20.0	9.6	0
黏土	3.16	18	0.40	1.78	22.0	10.8	0
粉质黏土	4.24	25	0.40	1.88	25.0	12.1	0
粉质黏土	4.85	29	0.40	1.91	27.0	13.1	0
粉质黏土	7.61	46	0.25	2.02	44.0	17.6	0
岩石		2.0×10 ⁴	0.25	2.00			

表 2 结构参数

构件类型	弹性模量/(10 ⁴ N/mm ²)	泊松比	密度/(t/m ³)	面积/m ²	惯性矩/m ⁴
桩	3.60	0.2	2.5	0.481	0.068 1
梁、板	3.25	0.2	2.5		

按泥沙淤积过程, 分打桩完成、前方挖泥、泥沙淤积和后方清淤 4 个阶段进行分析。各阶段的泥面高程和有限元模型见图 4。

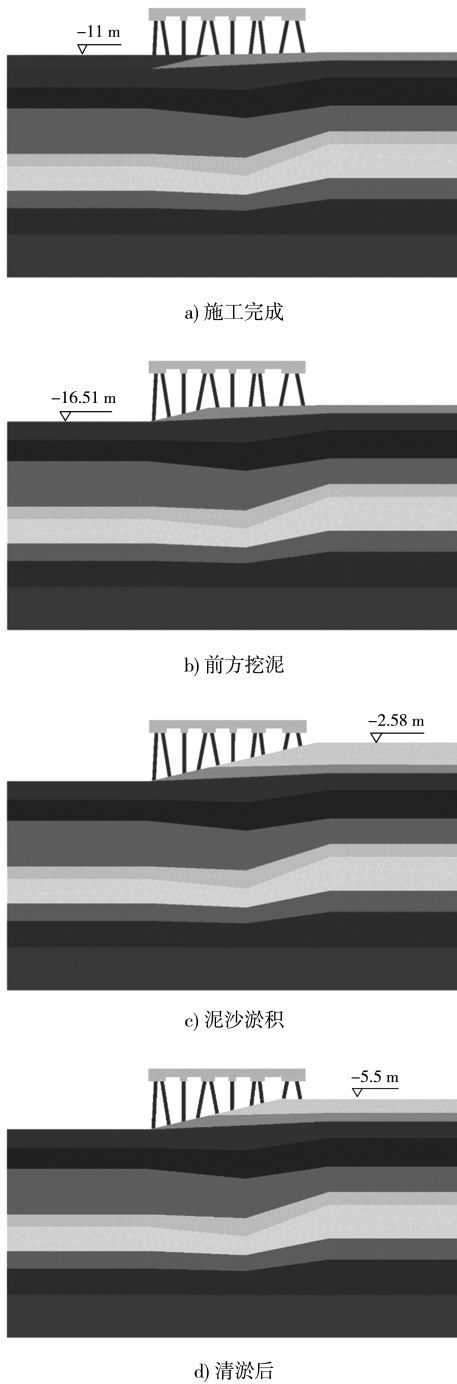


图4 有限元分析阶段

2.2 参数校准

有限元分析中，选取合理的计算参数是保证有限元分析正确性的首要问题。本文选取的岩土参数主要指标为土的弹性模量、泊松比、内摩擦角和粘聚力。其中内摩擦角和粘聚力可根据岩土勘察结果确定，而弹性模量和泊松比在岩土勘察报告中一般无法直接获取，需要根据经验或位移实测结果反分析得到。已有文献^[5]指出，弹性模

量可能是压缩模量的几倍，需要结合经验和实测资料多次试算才能大体确定所需要的弹性模量。结合本工程码头面的位移沉降观测结果，码头平台水平位移约为 1.5 cm，码头后沿竖向位移约为 1.4 cm，经多次计算分析，确定弹性模量取 6 倍压缩模量时，计算所得位移与实测位移相当。根据实测位移校准后确定的土的弹性模量和泊松比见表 1。

3 结果分析

泥沙淤积后的码头结构变形见图 5，泥沙淤积和清淤后的基桩内力见表 3。预应力混凝土大管桩的开裂弯矩与轴力具有相关性^[6]，首先根据计算所得各桩轴力，计算轴力对应的开裂弯矩，然后将计算弯矩与开裂弯矩进行对比，从而分析基桩受力状态。

从计算结果看，在泥沙淤积作用下，码头平台向前位移约 1.6 cm，桩头向海侧桩顶部受力较大。排架各桩中，*K* 轴桩弯矩最大，其次为 *H* 轴桩，均为陆侧受拉。*K* 轴桩受力最不利，计算弯矩与开裂弯矩比值达到 91%，说明泥沙淤积对桩造成较大影响，若进一步淤积，将达到开裂弯矩，使基桩开裂，加快海水中氯离子对预应力筋的腐蚀，引起预应力筋的应力损失，对构件的承载力造成影响。

码头后方清淤后，码头平台位移减小至 0.9 cm，受力较大部位仍出现在桩头向海侧桩顶。但清淤后各桩弯矩有较大的减少：*K* 轴桩最大弯矩由 1 204 kN·m 减小至 738 kN·m；*H* 轴两根桩最大弯矩由 922 kN·m 减小至 540 kN·m 左右。*K* 轴桩仍为受力最不利，但计算弯矩与开裂弯矩比值降低至 47%，受力状态得到改善。

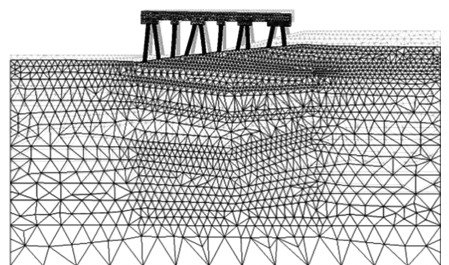


图5 码头结构变形

表 3 典型排架基桩内力

桩基编号	N_1/kN	$M_1/(kN \cdot m)$	$M_{cr1}/(kN \cdot m)$	$ M_1/M_{cr1} /\%$	N_2/kN	$M_2/(kN \cdot m)$	$M_{cr2}/(kN \cdot m)$	$ M_2/M_{cr2} /\%$
1a-A	1 994	246	1 638	15	1 996	215	1 639	13
1b-A	2 344	272	1 722	16	2 242	236	1 698	14
1-B	1 161	39	1 439	3	1 394	-14	1 494	1
1-C	2 209	493	1 690	29	2 197	369	1 687	22
1-D	4 122	833	2 149	39	3 716	665	2 052	32
1-E	909	561	1 378	41	1 271	398	1 465	27
1-F	2 022	765	1 645	46	2 093	536	1 662	32
1-G	2 711	521	1 811	29	2 292	263	1 710	15
1a-H	939	922	1 385	67	1 349	544	1 484	37
1b-H	1 062	923	1 415	65	1 380	542	1 491	36
1-J	3 295	-310	1 951	16	2 429	-559	1 743	32
1-K	703	1 204	1 329	91	1 705	738	1 569	47

注: N_1 和 N_2 分别为泥沙淤积和清淤后的基桩桩顶轴力, 受压为正; M_1 和 M_2 分别为泥沙淤积和清淤后的基桩桩顶弯矩, 陆侧受拉为正; M_{cr1} 和 M_{cr2} 分别为与 N_1 和 N_2 对应的抗裂弯矩。

4 结论

1) 有限元法可较好地考虑结构与土的相互作用, 通过单元生死近似模拟各阶段泥沙淤积过程。分析中所用的岩土参数可通过实测位移资料进行校准, 作为下一步分析基桩内力的前提条件。

2) 泥沙淤积引起的附加土压力将使最大弯矩出现在基桩顶部, 且大部分为陆侧受拉, 最危险截面出现在桩头向海的桩顶附近; 淤积较高时, 将使基桩最大弯矩接近开裂弯矩, 降低结构安全性和耐久性。

3) 对码头下方和后方进行泥沙清淤处理后, 将明显改善基桩受力状态, 降低泥沙淤积对基桩造成的不利影响。

另外, 由于泥沙运动和桩土相互作用的复杂性, 本文未考虑泥沙回淤、落淤和土体蠕变对基

桩性能的影响, 尚需结合现场监测和理论研究, 不断总结经验, 逐渐完善泥沙淤积下高桩码头分析方法。

参考文献:

- [1] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design[M]. United States: John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [2] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法——NL法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 97-101.
- [3] 崔新壮, 丁桦, 金青, 等. 刚性桩横向承载力的三维极限分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 641-646.
- [4] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [5] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] JTJ/T 261—1997 港口工程预应力混凝土大直径管桩设计与施工规程[S].

(本文编辑 武亚庆)

征订通知

2017年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 订阅方式请登录《水运工程》杂志社官方网站: www.sygcc.com.cn, 首页下载中心下载2017年《水运工程》征订通知单, 有关要求和反馈信息一应俱全。