

· 地基与基础 ·



卸荷式板桩 + 高桩梁板结构 在软土地区码头建设中的应用

吴丙贵

(中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 510115)

摘要: 以某电厂码头扩建工程为例, 通过结构方案设计、计算分析、经济及优缺点对比, 分析卸荷式板桩 + 高桩梁板结构的特点及优势, 为此结构形式的推广奠定理论与实践基础。

关键词: 卸荷; 板桩; 有限元; 软基

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0132-06

Application of relieving sheet pile & high piled slab structure in wharf construction in soft soil area

WU Bing-gui

(CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510115, China)

Abstract: Based on the example of wharf-expanding project of a power plant, this paper analyzes the structural characteristics and advantages of the relieving sheet pile & high piled slab structure to lay a theoretical and practical basis for marketing promotion of this wharf type through structural scheme design, economy comparison and the comparison of advantages and disadvantages.

Key words: load-relieving; sheet pile; finite element; soft soil

板桩结构是水工3种主要结构形式之一, 在港口建设中具有重要的作用。普通板桩结构在国内、外应用十分广泛, 卸荷式板桩结构在国外应用非常普遍, 但我国对于该结构的应用起步较晚, 卸荷式板桩结构应用很少, 这与国外发达的钢铁工业及先进的钢板桩生产、设计、施工技术密不可分^[2], 同时也与我国JTS 167-3—2009《板桩码头设计与施工规范》未明确提出卸荷式板桩结构的计算方法有关。

卸荷式板桩 + 高桩梁板结构断面由2部分组成: 前面为普通高桩梁板码头结构, 在码头后布置带卸载平台的卸荷式板桩结构。此结构结合了板桩、高桩承台及卸荷板等结构的优点, 其在淤泥层较厚的河口地区及施工场地范围受限制地区优势明显: 传统的高桩码头为了保证边坡稳定需

要大规模开挖和换填, 造价较高; 而卸荷式板桩或卸荷式板桩接岸 + 高桩梁板结构则较好地解决了边坡稳定及支护问题, 节省工程造价。

卸荷式板桩挡土结构的桩基不仅要承受上部荷载, 还起着限制岸坡向外滑移的作用, 涉及被动桩桩土相互作用的问题, 其受力相当复杂。目前我国在这种码头结构方面可供借鉴的资料不多, 计算理论尚未成熟。本文以某电厂配套码头扩建工程为例, 通过结构方案设计、计算模型介绍、经济及优缺点对比, 分析卸荷式板桩 + 高桩梁板结构的特点及优势, 为此结构形式的推广提供理论及实践基础。

1 工程概况

电厂现有一个5 000吨级配套码头, 扩建工程位于现有码头下游端, 相距30 m左右, 前沿线相

收稿日期: 2013-09-30

作者简介: 吴丙贵(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计及研究。

比现有码头后退 25 m 左右。建设规模为 1 个 5 000 吨级散货泊位及 1 个 5 000 吨级多用途泊位（结构按 5 万吨级设计），码头岸线长 256 m，远期为一个 5 万吨级泊位（图 1）。

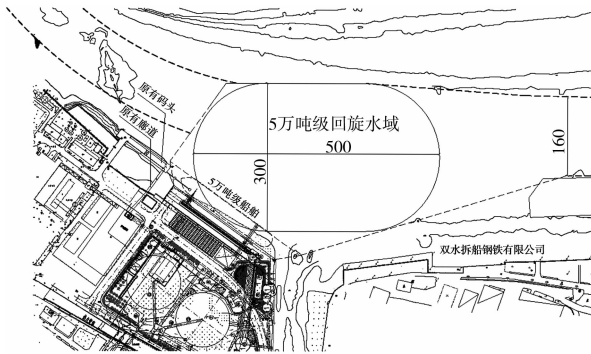


图 1 总平面布置

扩建工程上游为电厂现有 5 000 吨级码头，下游为拆船厂场地，陆域有皮带输送廊道及电厂现有建筑设施。本工程地处两河交界处。复杂的周边环境及独特的地质条件决定了本工程设计的复杂性。

2 工程建设条件

2.1 设计水位（珠江基面起算）

设计高水位：1.18 m；设计低水位：-1.02 m；
极端高水位：2.55 m；极端低水位：-2.06 m。

2.2 设计代表船型（表 1）

表 1 设计代表船型尺度

船舶吨级/DWT	种类	船型尺度/(m×m×m) (长×宽×设计吃水)
5 000	散货船	105.5×16.5×7.0
50 000	散货船	200×36×11.5

2.3 地质地貌

根据扩建项目岩土工程勘察报告码头场地自上而下依次为第①层填土、第②层淤泥、第③层黏土、第④层粉细砂、第④₁层粗砂、第⑤层黏性土、第⑥层砂质黏性土、第⑦层全风化花岗岩、第⑧层强风化花岗岩、第⑨层中风化花岗岩（物理力学指标见表 2、地质剖面见图 2）。

表 2 各岩土层物理力学参数

层序	土层名称	含水率 w/%	密度/ (g·m ⁻³)	孔隙比 e ₀	压缩模量 E _s /MPa	直接快剪		固结快剪	
						粘聚力 c/(kPa)	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
②	淤泥	67.5	1.60	1.762	1.76	4.52	1.86	10.75	5.82
⑤	黏土	26.0	2.00	0.701	5.66	19.32	8.51	11.53	8.70
⑥	砂质黏性土	23.6	2.03	0.642	5.00	25.07	18.59	40.00	11.00
⑦	全风化花岗岩	23.4	2.01	0.660	4.73	28.30	17.04	33.73	6.24

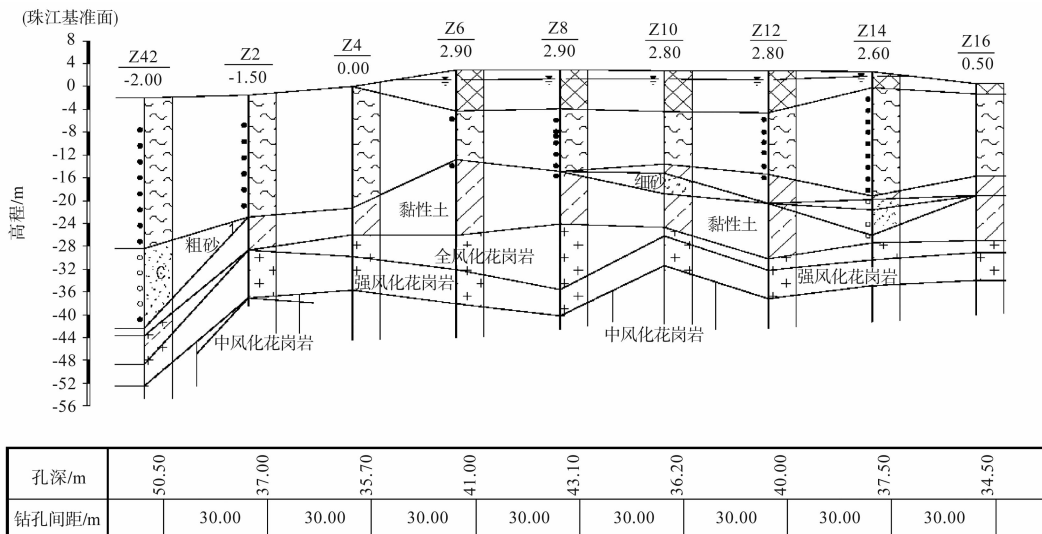


图 2 码头区地质纵剖面

前面高桩平台面高程为 3.90 m，平台宽 35 m，长 256 m，排架间距为 8 m。桩基采用 $\phi 1\ 200\text{B}$ 型 PHC 管桩，每个排架布置 8 根，其中包括 1 对半叉桩（斜桩斜度为 4.5:1），1 对叉桩和 4 根直桩，桩基持力层为强风化花岗岩，桩底要求进强风化层不小于 3 m。

卸荷式板桩结构设置 L 型卸荷板，采用 2.0 厚钢筋混凝土结构，卸荷板底高程为 -0.1 m。桩基采用 2 排 $\phi 1\ 000$ 直径灌注桩，前排为密排灌注桩，后排灌注桩间距为 2 m。板桩挡土墙长 276 m，分段长度为 18 和 20 m。

码头防撞设施采用 SUC1250 标准型鼓型橡胶护舷，两鼓一板，间隔一个排架布置，间隔中间布置 DA-A500H 护舷。码头系缆设施采用 1 000 kN 系船柱，系船柱间距 20 ~ 24 m。

3.3 结构方案经济性及优缺点对比

施工改进方案很好地解决了初设推荐方案中难以解决的已有建构筑物的保护问题，无需大开挖，解决了疏浚土处理的难题，通过软基处理有效利用现有淤泥及黏土资源。在节省造价的同时满足绿色环保的要求，改进方案相比初设推荐方案具有较大的优势（表 3）。

表 3 经济及优缺点对比

方案	开挖深度	开挖影响范围	已有建构筑物保护	环境影响	工程造价
卸荷式板桩 + 高桩梁板结构方案	-14.00 m (远期设计底高程处)	码头范围(做好卸荷式板桩结构后开挖)	无需进行特殊保护(开挖影响范围之外)	减少挖抛土方量,降低对环境的影响	8 000 万元左右
大沉箱方案	-23.40 m (岩面高程处)	码头前沿线后 150 m	有重要建构筑物在开挖范围之内,需采取特殊保护措施,保护成本占投资成本的 20% 以上	大范围的挖、运、抛,并另采砂回填,对环境的影响较大	12 000 万元左右

4 计算分析

4.1 计算模型

对淤泥层和黏土层其土体本构模型采用修正剑桥模型，混凝土灌注桩采用线弹性模型，其它土体采用 Mohr-Coulomb 模型。

修正剑桥模型亦称为剑桥椭圆屈服面模型，采用下列屈服函数：

$$p_a e^{\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} e_0^{\kappa}\right)} = p \left(1 + \frac{\eta^2}{M^2}\right) \quad (1)$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

式中： $\eta = q/p$ ； λ 为体积压缩参数； k 为卸荷条件下的回弹指数； e_0 为初始孔隙比；参数 M 由下式计算：

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (2)$$

共包含 4 个计算参数。

Mohr-Coulomb 模型采用如下屈服准则：

$$f(\sigma) = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \left(\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi \right) \sqrt{J_2} - c \cdot \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

式中： I_1 为应力张量的第一不变量； J_2 为应力偏量的第二不变量； θ_σ 为罗德角； c 为粘聚力； φ 为内摩擦角。

流动准则采用主应力的表达形式为：

$$g(\sigma) = \sigma_3 - \sigma_1 N_\psi \quad (4)$$

式中： $N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$ ， ψ 为剪胀角。

4.2 计算参数

本工程软件处理完成后，取土作三轴排水剪切试验指标作为数值模拟计算指标。模拟计算土体参数见表 4。

表 4 数值模拟参数

土体	$\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	e_0	凝聚力 c / kPa	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	弹模 E / MPa	泊松比 μ	λ	κ	M	说明
②层淤泥	1.65	1.495	20.7	19.9		0.35	0.275	0.030	1.20	剑桥模型
⑤层黏土	1.85	0.701	25.0	25.0		0.30	0.120	0.015	1.30	剑桥模型
全风化花岗岩	1.96	0.670	10.6	32.7	18	0.30				M-C 模型
强风化花岗岩	2.20		40.0	26.0	35	0.25				M-C 模型
混凝土搅拌桩	2.00		290.0	32.0	300	0.25				M-C 模型
C30 混凝土	2.40				30 000	0.17				线弹性

4.3 三维有限元网格剖分

模型的选取范围为：模型垂直水流方向的2个断面分别以桩号18和20的位置截断，模型顺水流方向考虑了11根灌注桩，模型深度方向为40m（图5，6）。

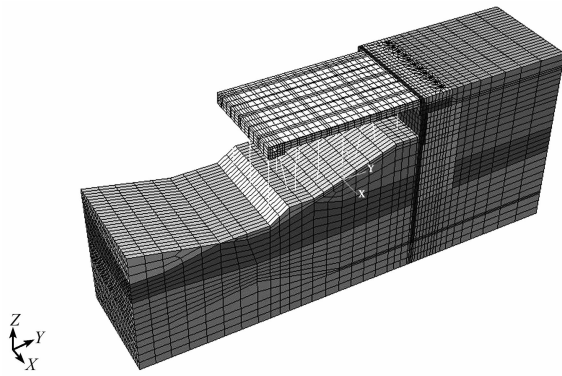


图5 码头整体有限元网格剖分图

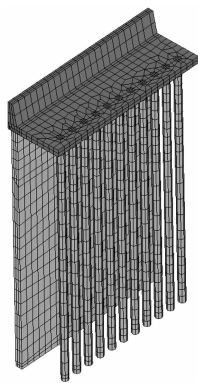


图6 卸荷式板桩结构有限元网格剖分图

4.4 施工顺序模拟

本次模拟的施工工序为：板桩（前排密排灌注桩、下同）和灌注桩（后排间隔灌注桩，下同）施工→土体开挖→卸荷板施工→高桩码头施工→堆载和龙门吊作用。

4.5 卸荷式板桩结构计算结果分析

此结构形式，受力较复杂的主要是卸荷式板桩结构，前面的高桩梁板码头按一般结构计算。本文主要研究卸荷式板桩结构受力。

从计算结果来看码头竣工后若在码头面进行30 kPa堆载，板桩的最大水平位移为5 cm，最大弯矩为1 000 kN·m，灌注桩的最大水平位移为5 cm，最大弯矩为800 kN·m（图7~10）。计算结果满足

设计要求，其结构设计安全可靠。

从分布规律看，开挖和卸荷板施工对板桩和灌注桩的水平位移及弯矩影响不大，后期堆载是结构变形和结构应力增加的主要因素。设缝情况比不设缝时的板桩和灌注桩的水平位移略大，这是因为码头结构和卸荷板连接后，对卸荷板的水平位移起到一定的限制作用。

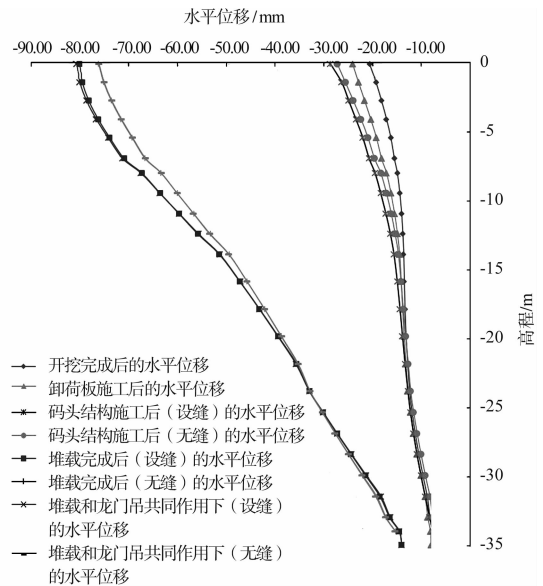


图7 板桩水平位移随高程变化曲线

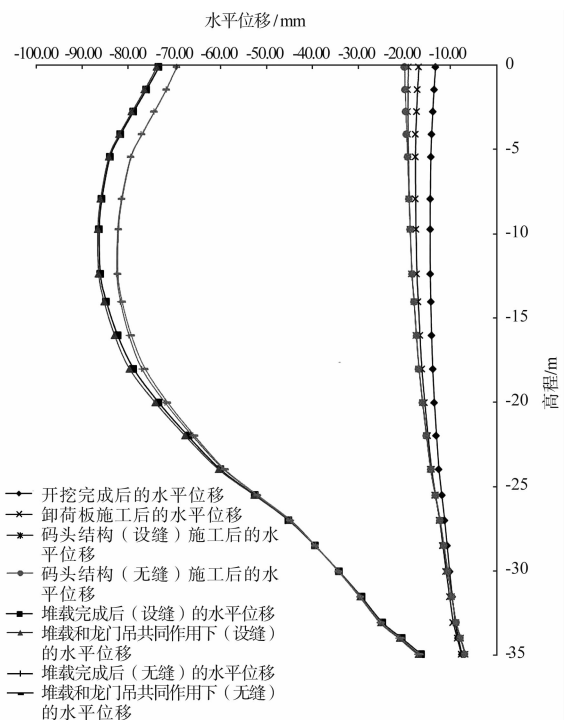


图8 灌注桩水平位移随高程变化曲线

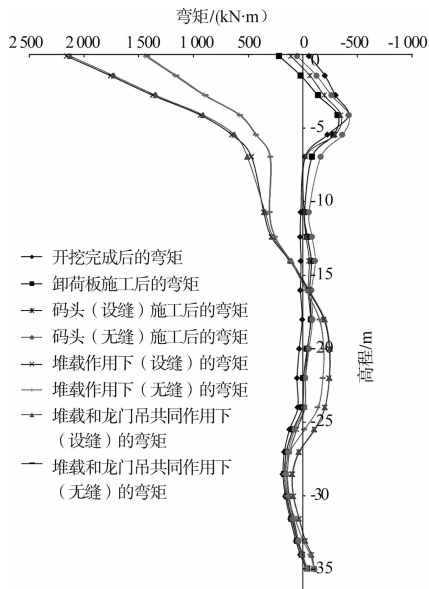


图9 板桩弯矩随高程变化曲线

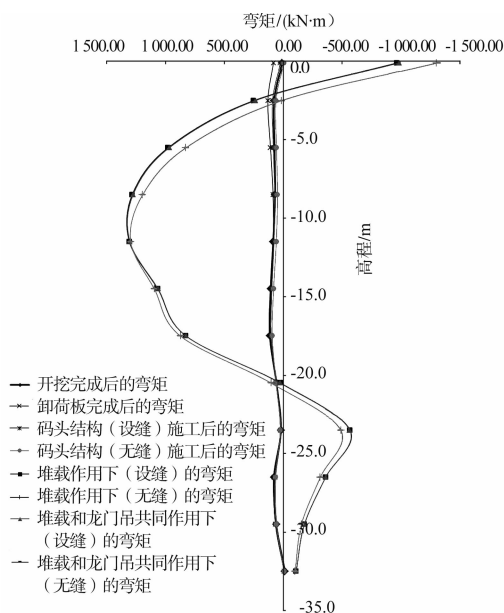


图10 灌注桩弯矩随高程变化曲线

5 码头结构设计特点

1) 码头结构由前方高桩码头+卸荷式板桩挡土墙接岸结构组成,发挥各结构形式的优势,克服了深软土地基高桩结构接岸困难、板桩结构不适应大型深水码头的特点。

2) 卸荷式板桩结构前排桩用于挡土,承受土体产生的土压力以及外侧作用的其它外部荷载等,以承受水平力为主。

3) 卸荷式板桩结构承台用于承受上部荷载及承台面上的土重,以承受竖向力为主。因承台面

的降低,类似重力式码头卸荷板作用分担了部分前墙的土压力,起到了卸荷作用。

4) 卸荷式板桩结构承台后排桩较密,起到了遮帘作用,分担了部分前墙的土压力。

5) 板桩后土体采用软基处理方式使其达到设计指标,避免采用国外置换的方式,节省造价,保护了周边建筑。

6) 卸荷式板桩结构板桩采用连排钻孔灌注桩,发挥了抗弯性能好、相对地连墙宜成孔的优点。

6 结语

卸荷式板桩+高桩梁板结构方案由前方高桩平台+卸荷式板桩接岸结构组成,发挥各结构形式的优势,克服了深软土地基高桩结构接岸困难、板桩结构不适应大型深水码头的特点;卸荷式板桩接岸结构集中了板桩、高桩承台及卸荷板等结构的优点,上部承台将前排排桩和后排灌注桩连接成整体,可以使前后排桩变形和受力分配合理。此结构在淤泥层较厚的河口地区及施工场地范围受限地区优势明显。

板桩后土体采用软基处理方式使其达到设计指标,避免采用国外置换的方式,保护了周边建筑,减少了土石方开挖回填量,缩短工期并节省工程造价。

板桩及后排灌注桩最大正负弯矩出现在桩头较短范围内,桩与卸荷板的接头部位存在较大的应力,接头部位宜加强配筋。

参考文献:

- [1] 周世良,关英俊,古西召,等.整体卸荷式板桩挡土结构三维有限元数值模拟分析[J].水运工程,2012(6):28-32.
- [2] 刘永绣.板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [3] JTJ 292—1998 板桩码头设计与施工规范[S].
- [4] 刘文平,郑颖人,雷用,等.遮帘式板桩码头结构有限元数值分析[J].岩土工程学报,2010,32(S1):135-141.
- [5] 崔冠辰,蔡正银,李小梅,等.遮帘式板桩码头工作机理初探[J].岩土工程学报,2012,4(S1):762-766.