



柔性靠船桩在码头升级中的应用及优化设计

刘涌国^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
2. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 对于柔性靠船桩与码头之间是否需要设置护舷, 前沿有护舷的柔性靠船桩计算方法等问题仍需要进行研究。采用 Abaqus 有限元软件对两侧均有护舷的钢管靠船桩进行分析, 认为靠船桩宜采用 p - y 曲线法, 内侧护舷按非线性弹簧进行分析计算, 并结合工程实例对靠船桩进行优化设计。结果表明, 内侧护舷的设置有助于降低靠船桩内力; 钢管桩采用高强度钢材, 采取局部加强能显著提高靠船桩性能。

关键词: 柔性靠船桩; 码头升级; 优化设计

中图分类号: U 653.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0089-09

Application and optimal design of flexible fender pile in wharf upgrading

LIU Yong-guo^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2.Ningbo Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: It is still necessary to study whether fender should be installed between fender pile and wharf and the calculation method of fender pile with fender in front of berth pile. In this paper, Abaqus finite element analysis software is used to analyze the steel fender pile with fender on both sides. It is believed that the fender pile can be analyzed by p - y curve method, and the inner fender is analyzed by nonlinear spring. The optimal design of the fender pile is carried out by engineering examples combined with an engineering example. The results show that the inner fender is helpful to reduce the internal force of fender pile. The steel tube pile is made of high strength steel, and the local strengthening of steel tube pile can significantly improve the performance of fender pile.

Keywords: flexible fender pile; wharf upgrading; optimal design

码头升级改造是提高靠泊能力的重要途径, 高桩码头升级改造常用方法主要有: 码头前沿新增平台; 码头平台前增加新结构, 新旧结构连成整体; 新建嵌入式墩台, 新旧结构相互独立; 在码头排架中增加桩基, 并与原结构连成整体; 在码头前沿增设靠船桩等^[1]。其中新增平台方案造价较高; 采用新旧结构连成整体, 施工难度大,

且受原结构影响较大; 新建嵌入式墩, 拆除工作量大, 造价高, 适用范围有限; 采用新增靠船桩提升码头结构等级, 不需要对原码头结构进行大的改造, 工程造价相对较低, 施工速度快, 该方案主要缺点是码头前沿线前移, 减少了吊机的有效外伸距。显然, 采用新增靠船桩方案加固高桩码头具有较明显的优势。当前靠船桩计算方法还

收稿日期: 2021-10-14

作者简介: 刘涌国(1973—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

有待于进一步完善,本文针对前沿增设靠船桩加固码头的方法,并结合工程实例做进一步研究。

1 靠船桩研究现状

张铁峰^[2]提出靠船桩和码头之间有护舷的钢管靠船桩计算方法,该方法利用 m 法确定嵌固点深度,将护舷假定为线性弹簧,利用材料力学原理,建立变形协调方程和能量守恒方程,求出撞击力和护舷反力,从而求解出靠船桩的内力和泥面位移等。胡立万等^[3]提出柔性防冲桩内力计算方法,靠船桩与码头之间的橡胶护舷可根据刚度不同分别假定为铰接、线性弹簧支座或非线性弹簧。已知撞击力,假定护舷反力求出桩顶位移,再验证是否符合边界条件,不符合则调整反力,迭代计算至符合边界条件;已知撞击能,根据能量守恒原理用迭代法求船舶的撞击力及护舷反力,进而用 m 法计算防冲桩的内力和位移。项雯等^[4]提出柔性靠船桩高桩码头在承受撞击力的情况下,通过分析桩、护舷及桩台的受力和变形的的方法。靠船桩与码头前沿护舷之间存在间隙 Δ ,根据靠船桩 $p-y$ (水平反力-位移) 曲线,利用有限差分法求解桩顶位移,采用迭代法计算护舷压缩量和水平力。冯建国等^[5]提出码头平台与靠船桩共同受力的结构模型,在靠船桩与码头之间设置护舷,通过把护舷压缩过程简化为理想弹塑性变形、将靠泊过程分阶段分别分析其受力状态;将靠船桩简化成一端固定一端弹性支撑的梁,利用能量守恒原理,建立系统受力、位移和吸能的方程组,从而求得护舷变形、吸能量和桩内力等。上述计算方法均未考虑外护舷作用,不具有普遍适用性,且模型进行了一定的简化,可能存在误差,且计算方法较复杂。

2 柔性靠船桩形式

柔性靠船单桩是一种较常用的靠船桩结构形式,适用于靠船撞击能不大的中小型码头,通常

采用无护舷钢管靠船桩、外侧有护舷的钢管靠船桩、内侧有护舷的钢管靠船桩或两侧均有护舷的钢管靠船桩等形式。本文主要研究两侧均设有橡胶护舷的柔性靠船桩,其中外护舷抵御船舶撞击力,并吸收一部分船舶撞击能,一般可选择吸能量较大的拱形或鼓形护舷等,内护舷主要用于保护码头结构,并可限制靠船桩产生过大的位移,以保证码头安全,一般可选用吸能量和反力均较小的圆筒形护舷或 D 形护舷等。柔性靠船桩加固的原理是利用靠船桩和外护舷吸收大部分撞击能,从而极大降低内护舷反力,使码头内力不变或降低。

3 靠船桩设计流程

3.1 计算假定

- 1) 假定外护舷达到最大设计吸能量,可充分发挥外护舷和靠船桩的作用,并便于简化计算;
- 2) 假定钢桩的弹性系数 K 为常数,便于简化计算靠船桩的吸能量;
- 3) 由于码头刚度远大于靠船桩刚度,故可不考虑码头平台的吸能量。

3.2 设计流程

- 1) 计算船舶撞击能,并可根据实际进行相应调整;
- 2) 初步确定外护舷吸能量,一般可按总吸能量的 30%~45% 考虑,根据不同的设计条件会有一些的差异;
- 3) 确定内、外护舷规格型号,外护舷可采用拱形护舷或鼓形护舷等,吸能量和反力均较大,而内护舷宜选用吸能量和反力均较小的 D 形护舷、筒形护舷等;
- 4) 建立靠船桩模型,本文采用 m 法或 $p-y$ 法确定桩的地基弹簧系数;
- 5) 建立桩顶自由的单桩计算模型,并计算桩的弹性系数 K ;
- 6) 施工桩顶约束,内护舷根据护舷反力-变形曲线,采用非线性弹簧模拟,符合护舷实际受力情况;
- 7) 求解模型,得到靠船桩的内力、位移及内护舷变形值;
- 8) 根据各单元的变形量,求出总的吸能量。内护舷吸能量及反力根据护舷曲线确定;
- 9) 调整参数,优化构件设计。靠船桩设计流程见图 1。

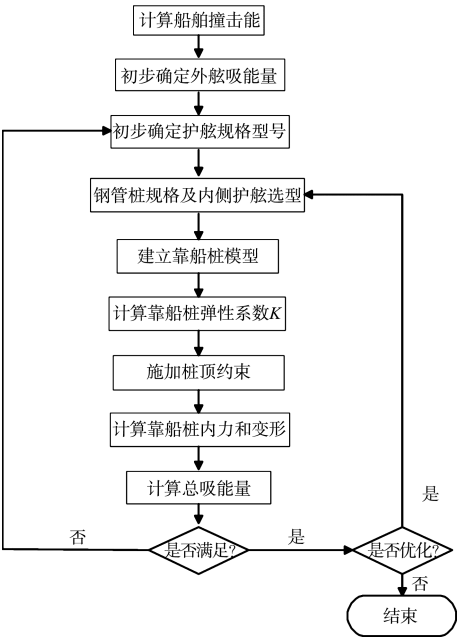


图 1 靠船桩设计流程

4 工程实例

4.1 工程概况

某码头工程已建 1 座 1 万吨级泊位，码头结构升级改造按停靠 3.5 万吨级散货船设计。码头平台长 190 m、宽 18 m，码头面高程 5.5 m，码头前沿设计水深-10.9 m。码头采用高桩梁板结构，排架间距 9 m，每个排架设 6 根直径 1 000 mm 预应力高强度混凝土(PHC)桩。

码头结构改造方案采用新增钢管靠船桩结构方案。码头前沿每隔一个排架设置 1 根直径 1 500 mm 钢管靠船桩，钢管桩前侧设拱形橡胶护舷，靠船桩与码头之间设圆筒形橡胶护舷。码头加固改造断面见图 2。

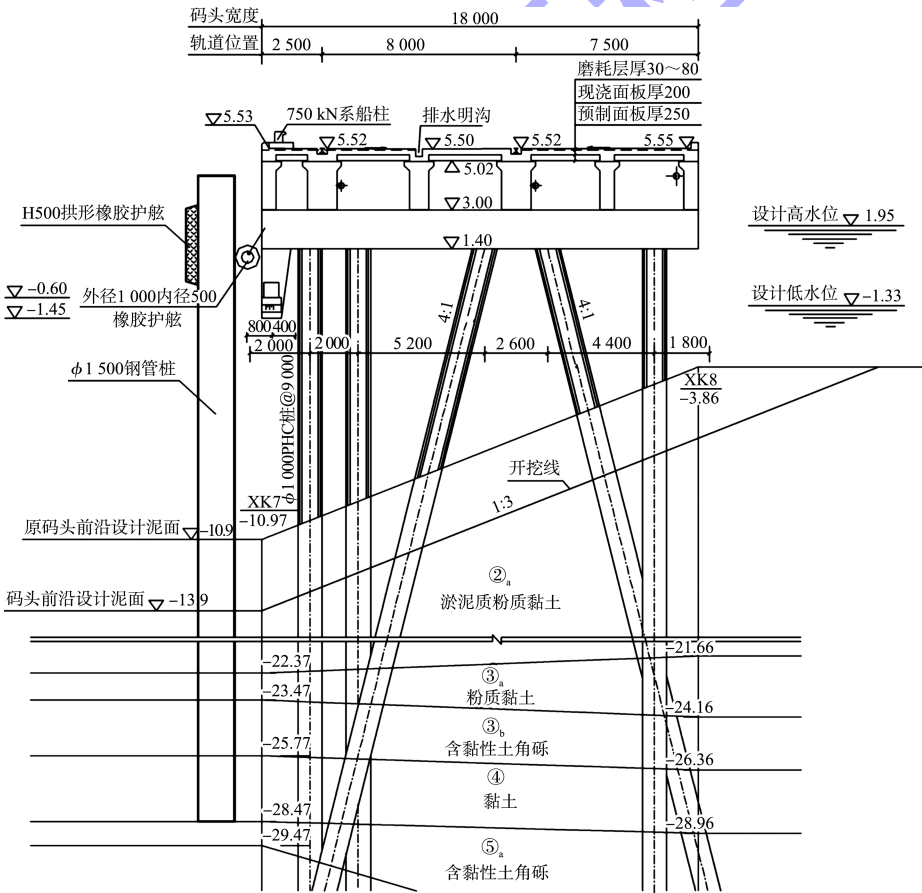


图 2 码头加固改造结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

4.2 自然条件

4.2.1 气象

该地区多年平均气温为 16.6℃。多年平均风速为 4.8 m/s，各月的平均风速变化范围在 3.7~

5.5 m/s，6 月最小，12 和 1 月最大。

4.2.2 水文

本海区潮汐类型为不规则半日浅海潮，基准面采用 1985 国家高程系统。

设计高水位为 1.95 m(高潮累积频率 10%),设计低水位为-1.33 m(低潮累积频率 90%),50 a 一遇极端高水位 3.16 m,50 a 一遇极端低水位-2.41 m。

设计流速:涨潮流速 1.51 m/s,流向 222°;落潮流速 1.14 m/s,流向 39°。

4.2.3 工程地质

地基土划分为 8 个工程地质层,分别为:①素填土;②_a淤泥质粉质黏土;②_b粉质黏土;③_a粉质黏土;③_b含黏性土角砾;③_c粉质黏土;④黏土;⑤_a含黏性土角砾。各土层参数见表 1。

表 1 各土层物理力学性质指标

层号	土层名称	含水量 w/%	天然密度 ρ/(t·m ⁻³)	土粒相对 密度 G	饱和度 S _r /%	固结快剪		快剪		十字板剪切试验	
						c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	原状土 C _u /kPa	重塑土 C _u /kPa
② _a	淤泥质粉质黏土	38.3	1.80	2.72	94.9	16.5	9.0	6.1	3.2	22.7	8.10
③ _a	粉质黏土	25.5	1.98	2.73	94.3	36.0	14.9	15.5	8.7	30.0	-
③ _b	含黏性土角砾	28.9	1.93	2.67	94.6	28.5	14.2	27.0	10.7	43.0	-
④	黏土	34.7	1.85	2.74	94.8	-	-	18.7	10.2	28.0	-

注:c、φ、C_u分别为黏聚力、内摩擦角、抗剪强度。

4.3 船舶撞击能计算

根据《港口工程荷载规范》^[6]第 10.4.2 条公式计算船舶撞击能:

$$E_0 = \frac{\rho}{2} m v_n^2 \tag{1}$$

式中: E₀ 为船舶靠岸时的有效撞击能量(kJ); ρ 为有效动能系数,取 0.8; v_n 为船舶靠岸时的法向速度(m/s),按 0.15 m/s 考虑; m 为船舶质量(t),采用式(2)^[7]计算得 4.355 8 万 t。

$$\lg m = 0.404 + 0.932 \lg DWT \tag{2}$$

式中: DWT 为船舶总载质量(t)。

经计算, E₀ = 392 kJ。

4.4 靠船桩设计方案

由于设计靠泊船型的升级,原码头承载能力难以满足新增船型靠泊需要,拟采用码头前沿增加靠船桩设计方案:在码头前沿设直径 1 500 mm 钢管靠船桩,靠船桩前方设 H500 拱形橡胶护舷,靠船钢桩与码头之间设外径 1 000 mm、内径 500 mm 的筒形橡胶护舷。

4.4.1 软黏土的 p-y 曲线

单位桩长的极限阻力 p_u,按式(3)(4)计算并取小值:

$$p_u = (3 + \frac{\rho g z}{C_u} + \frac{Jz}{b}) C_u b \tag{3}$$

$$p_u = 9 C_u b \tag{4}$$

式中: ρ 为由泥面到深度 z 处土的平均有效密度(t/m³); C_u 为土的不排水抗剪强度(kPa); z 为深度(m); b 为桩径或边长(m); J 为试验系数,一般取 0.5,较硬黏土取 0.25。

土阻力达到极限阻力一半时的相应变形为:

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} b \tag{5}$$

式中: y₅₀ 为桩周土达极限水平土抗力一半时,相应桩的侧向水平变形(mm); ε₅₀ 为三轴仪试验中达主应力差一半时的应变值,对饱和度较大的软黏土,可取无侧限抗压强度 q_u 一半时的应变值,当无试验资料时可按表 2 采用。

表 2 ε₅₀ 取值

C _u /kPa	12~24	24~48	48~96
ε ₅₀	0.020	0.010	0.007

对于 C_u > 96 kPa 的黏土,宜按试桩资料绘制 p-y 曲线。参照图 3,按式(6)确定 p-y 曲线的坐标值:

$$p/p_u = 0.5 (y/y_{50})^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

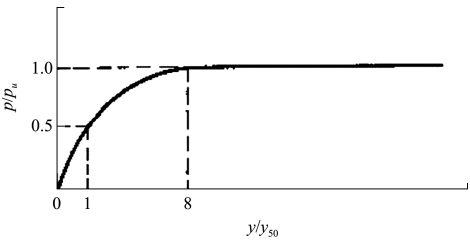


图 3 软黏土用短期静荷载 p-y 曲线坐标值

4.4.2 计算参数

关于桩的入土深度，可先根据式(7)计算桩的相对刚度系数 T ：

$$T=\sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{mb_0}} \tag{7}$$

式中： E_p 为桩材料的弹性模量(kN/m^2)； I_p 为桩截面的惯性矩(m^4)； b_0 为桩的换算宽度(m)； m 为桩侧土的水平抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m^4)。

根据《码头结构设计规范》^[8]，承受水平力的单桩，入土深度宜满足弹性桩长条件。

根据表 3，②_a土层的 m 值取 2.500 MN/m^4 ，桩径 1.5 m ，壁厚 25 mm 。经计算得出 $T=4 \text{ m}$ ，小于②_a土层厚度，故按②_a单层土计算合理。入土深度 $L_1 \geq 4T (=16 \text{ m})$ ，因此入土深度取 16 m 。

表 3 各土层 m 值		
土层	土层名称	m 值/ $(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
② _a	淤泥质粉质黏土	2.5
③ _a	粉质黏土	4.5
③ _b	含黏性土角砾	10.0
④	黏土	6.0
⑤ _a	含黏性土角砾	10.0

按土层 m 值，每隔 1 m 取一个计算点，计算各点水平抗力系数 K 。

各土层计算参数取值见表 4，各计算点 p - y 曲线见图 4。

表 4 各土层计算参数						
土层	有效密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	C_u/kPa	试验 系数 J	b/m	ε_{50}	临界深度 z_i/m
② _a	0.90	22.7	0.5	1.5	0.02	8.22
③ _a	0.92	30.0	0.5	1.5	0.01	9.38
③ _b	0.94	43.0	0.5	1.5	0.01	10.87
④	0.97	28.0	0.5	1.5	0.01	8.83
⑤ _a	0.94	43.0	0.5	1.5	0.01	10.87

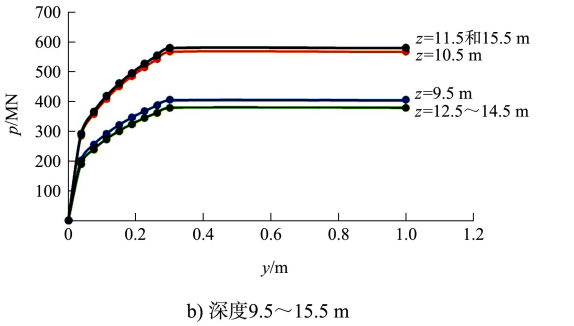
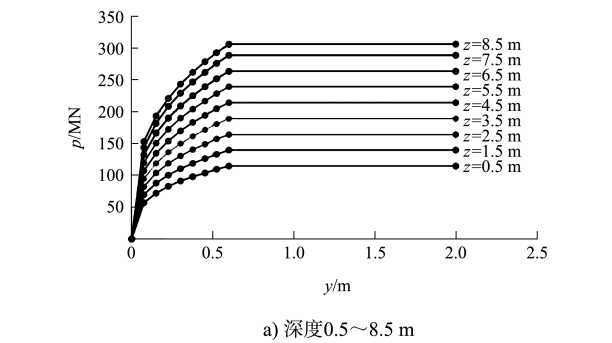
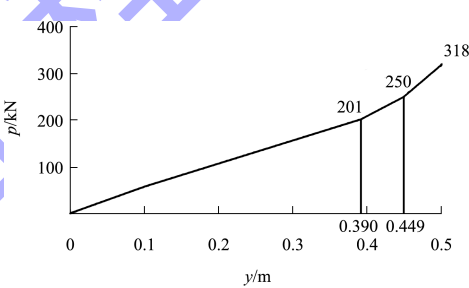
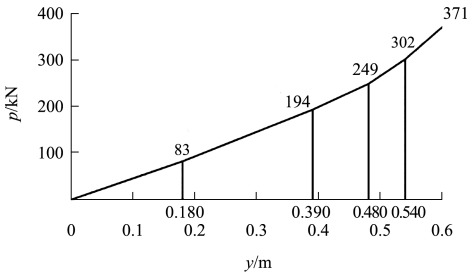


图 4 短期荷载的 p - y 曲线

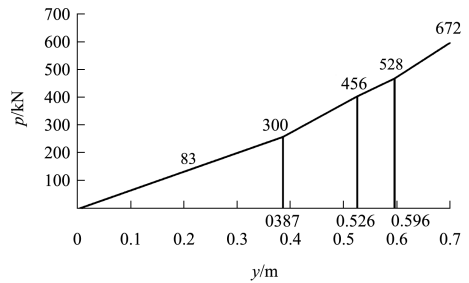
关于橡胶护舷反力-位移曲线，因橡胶护舷具有高度非线性，不宜简化成线性弹簧单元。因此根据厂家提供的护舷 p - y 曲线，按非线性弹簧支座进行计算。3 种筒形护舷的反力-位移曲线见图 5^[9]。



a) 外径1 000 mm、内径500 mm(标准型长1 m)



b) 外径1 200 mm、内径600 mm(标准型长1 m)



c) 外径1 400 mm、内径700 mm(标准型长1 m)

图 5 3 种筒形护舷的 p - y 曲线

4.4.3 计算模型与结构基本参数

采用 Abaqus 有限元分析软件计算，模型中的靠船桩采用二维梁单元 B21 模拟，按薄壁钢管计算。当采用 m 法计算时，土体按线性弹簧考虑；当采用短期荷载 p - y 法计算时，土体按非线性弹簧考虑。内护舷按非线性弹簧单元考虑。靠船桩基本不承受竖向荷载，底部按铰接考虑。

计算基本参数为：钢管桩直径 1 500 mm、壁厚

25 mm，外护舷采用长 $L=3$ m 的 H500 标准反力拱形护舷，内护舷采用长 $L=1$ m 的外径 1 200 mm/内径 600 mm 标准反力筒形护舷。船舶撞击能 $E_0=392$ kJ。

4.5 靠船桩结构计算与优化

4.5.1 基本模型计算结果

m 法及短暂荷载 p - y 法的计算结果比较见表 5。

表 5 m 法及短暂荷载 p - y 法计算结果比较

方法	撞击点位移/m	内护舷压缩量/m	最大应力/MPa	最大弯矩/(MN·m)	泥面位移/mm	总吸能量/kJ
m 法	0.46	0.444	309.3	13.21	62.2	456.3
短暂荷载 p - y 法	0.31	0.298	316.0	13.52	3.0	369.5

m 法计算的桩体变形均位于结构一侧，桩顶变形较大，而 p - y 法计算的桩体存在反向弯曲，故桩顶位移较小； m 法计算的桩身弹性系数为 1 742 kN/m，而 p - y 法计算的桩身弹性系数达 2 833 kN/m，两者相差较大，因而 p - y 法计算的钢桩变形和吸能量均

较小，内侧护舷压缩量也相应较小； m 法和 p - y 法计算的弯矩相近，两者仅相差 2.35%， p - y 法的结果稍大； p - y 法计算的总吸能量约为 m 法的 81%。桩身应力及变形比较见图 6。



图 6 桩身应力及形态

通过计算结果比较可知， m 法和 p - y 法桩身弯矩相近；而采用 m 法计算，总吸能量偏大。 p - y 曲线考虑桩土的非线性能较好地反映静载作用下桩土之间的应力-应变关系，因此建议采用 p - y 法进行计算。下文仅采用 p - y 法进行研究。

4.5.2 靠船桩特性与优化设计

通过调整外护舷长度、内护舷型号、靠船桩与

内护舷间隙进行计算，并对靠船桩结构进行优化。

1) 外护舷长度变化的影响。由表 5 可知， p - y 法计算的靠船桩总吸能量为 369.5 kJ，而船舶撞击能为 392.0 kJ，不能满足要求。

钢管桩与护舷的计算参数与 4.4.3 节一致。为方便比较，撞击力作用点均保持不变。计算结果见表 6 和图 7。

表 6 外护舷长度变化比较

外护舷长度/m	撞击点位移/m	内护舷压缩量/m	最大应力/MPa	最大弯矩/(MN·m)	泥面位移/mm	总吸能量/kJ
3.0	0.310	0.298	316.0	13.52	3.0	369.5
3.5	0.362	0.347	368.0	15.75	3.3	474.6
4.0	0.413	0.396	420.5	17.97	3.8	575.6

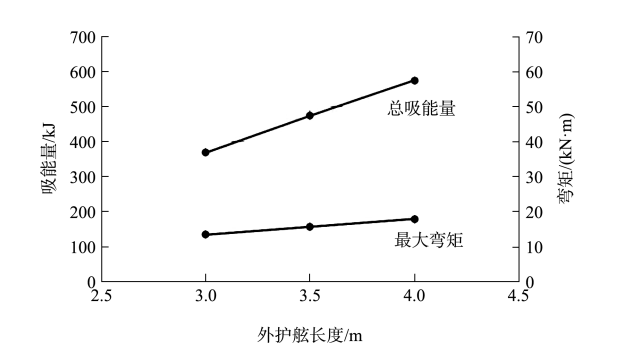


图 7 桩身弯矩、吸能量与护舷长度关系

由图 7 可知，桩身弯矩和靠船桩总吸能量与护舷长度基本呈线性变化趋势，总吸能量增长快于

桩身弯矩增长。护舷长度由 3.0 m 增加到 3.5 m，吸能量增加了 28%，而桩身弯矩增加了 16.5%，桩身在泥面处位移变化较小。护舷长度为 3.5 m 时，总吸能量为 474.6 kJ，超过船舶撞击能的 392.0 kJ。

2)内护舷型号变化影响。钢管桩的计算参数与 4.4.3 节一致，外护舷采用 $L=3.5$ m 的 H500 标准反力拱形护舷，内护舷分别采用 $L=1$ m 的外径 1 000 mm/内径 500 mm、外径 1 200 mm/内径 600 mm、外径 1 400 mm/内径 700 mm 标准反力筒形护舷。计算结果见表 7。

表 7 内护舷型号变化比较

内护舷型号	撞击点位移/m	内护舷压缩量/m	最大应力/MPa	最大弯矩/(MN·m)	泥面位移/mm	总吸能量/kJ
外径 1 000 mm/内径 500 mm	0.360	0.345	366	15.65	3.3	474.0
外径 1 200 mm/内径 600 mm	0.362	0.347	368	15.75	3.3	474.6
外径 1 400 mm/内径 700 mm	0.335	0.322	341	14.58	3.0	448.0

可以看出，采用外径 1 000 mm/内径 500 mm 与外径 1 200 mm/内径 600 mm 的内护舷时的计算结果基本接近，从护舷反力和变形关系可以看出，两者前段曲线基本接近；采用外径 1 400 mm/内径 700 mm 护舷，由于护舷刚度变大，护舷压缩量较小，桩身弯矩减小，总吸能量有所降低。总吸能量均超过船舶撞击能 392.0 kJ。

3)靠船桩与内护舷间隙变化影响。由于桩位误差或设计要求，内护舷和靠船桩之间均可能有间隙，本文对内护舷与靠船桩之间存在间隙的情

况进行对比。

钢管桩的计算参数与 4.4.3 节一致，外护舷采用 $L=3.5$ m 的 H500 标准反力拱形护舷，内护舷采用 $L=1$ m 的外径 1 000 mm/内径 500 mm 标准反力筒形护舷。护舷和桩的间距分别为 0、0.2、0.4 m，对这 3 种情况分别进行计算。本文采用在护舷变形反力曲线中增加一段零刚度弹簧的方法，可以准确模拟该间隙，计算方法简便，概念清晰，计算精度较高。计算结果见表 8 和图 8。

表 8 靠船桩与内护舷间距变化比较

间距/m	撞击点位移/m	内护舷压缩量/m	最大应力/MPa	最大弯矩/(MN·m)	泥面位移/mm	总吸能量/kJ
0	0.36	0.345	366.0	15.65	3.3	474.0
0.2	0.39	0.174	397.0	16.96	3.5	483.0
0.4	0.42	0.020	427.8	18.27	3.8	509.0

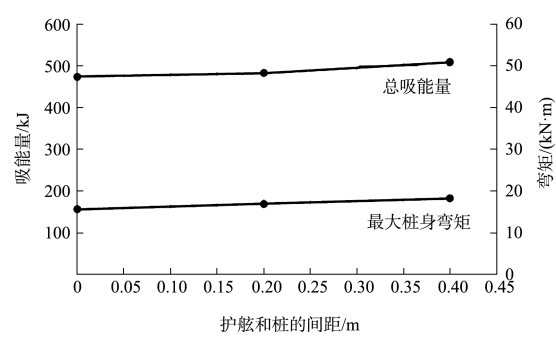


图 8 桩身弯矩、吸能量与护舷间距关系

可以看出，随着护舷与钢管桩间距的增加，桩身弯矩呈线性增加趋势，间距达到 0.40 m 以上时，钢管桩变形达到 0.42 m 时，这时内护舷几乎不受力，总吸能量有所增加。间距为 0.20 m 时桩身内力增加 8.37%，吸能量基本不增加；间距为 0.40 m 时桩身内力增加 16.7%，吸能量仅增加 7.38%。内护舷反力较大时产生的反向弯矩，可使钢管桩内力大幅减少，有利于减少钢管桩壁厚或降低钢材强度等级。

根据上述比较可知，采用钢管桩为直径 1 500 mm、壁厚 25 mm、外护舷为 $L=3.5$ m 的 H500 标准反力拱型护舷、内护舷为 $L=1$ m 的外径 1 000 mm/内径 500 mm 标准反力筒形护舷、内护舷和靠船桩之间间距为 0 时为较优设计方案。由图 6 可知，泥面上下钢管桩应力较大。对受力较大的部位，钢管桩壁厚增加至 40 mm，以优化钢管桩设计，由于靠船桩局部壁厚增加，导致靠船桩刚度增加，总吸能量有所降低，因此外护舷调整长度至 $L=4$ m。

经计算，此时的桩顶位移为 0.309 m，撞击点位移为 0.296 m，桩身应力标准值为 278 MPa，靠船桩总吸能量为 456 kJ，大于船舶撞击能 392 kJ。桩身 Mises 应力值为 334 MPa(经验系数取 1.2)，计算结果见图 9。

根据《钢结构设计标准》^[10]，靠船桩选用 Q420 钢，可满足要求。

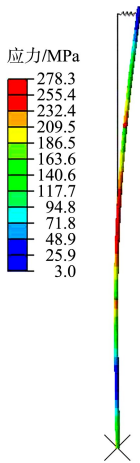


图 9 优化后的桩身应力及形态

5 钢管靠船桩结构加强措施

5.1 钢管桩加强措施

5.1.1 灌桩芯混凝土

为避免由于局部屈曲而大幅降低吸能量，可在桩内灌注低强度现浇混凝土，与其他方法相比，相对价廉。由于内部混凝土的支撑作用，可以避免钢管桩局部屈曲，在较大荷载作用下可以延迟塑性铰出现。由于混凝土与钢管桩无法完全结合，在计算时可以忽略混凝土断面的抗弯能力。采用混凝土加强的措施须清理桩内泥面，再浇筑混凝土，施工难度较大，工期较长。

5.1.2 局部增加钢管桩壁厚

增加钢管桩局部壁厚施工简单，钢管桩刚度可增加约 50%，工厂制作能够保证施工质量。

5.1.3 焊接加强环

采用焊接加强环也是一种可行的加强方式，在钢管桩本身的钢板较厚时，不宜再采用钢板加厚措施，可采用焊接加强环的方式。该方法可使钢管桩刚度增加约 50%，且能保证钢管桩质量，施工难度不大。

5.2 钢管桩侧向加强措施

5.2.1 采用钢管加强

在钢管靠船桩之间用钢管连成整体，使钢管靠船桩之间形成一个排架，达到靠船桩之间发挥

作用，较适用于小型码头。当钢管桩间距较大时，需要加大连接钢管，而且容易被船碰撞，反而成为不安全的因素。钢管桩一般段与加强段截面见图 10。

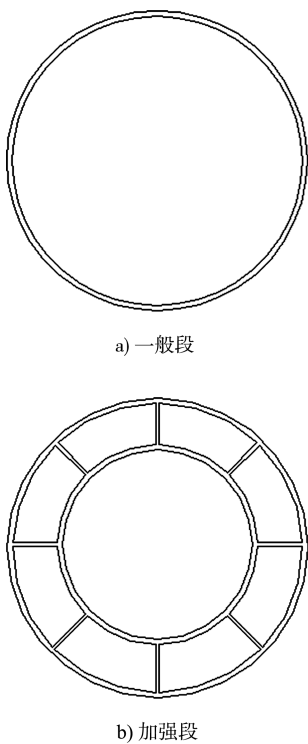


图 10 钢管桩一般段与加强段截面

5.2.2 采用锚链加强

锚链加强的措施构造简单、受力明确，且能节省材料。在码头和靠船桩上设置锚环，通过锚链固定，见图 11。该措施可有效控制靠船桩的侧向变形，靠船桩与码头之间有效空间大，可保证船舶靠泊安全。

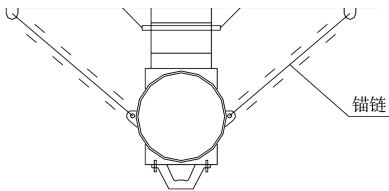


图 11 钢管桩侧向连接

6 结论

1)采用非线性弹簧模拟内护舷，桩土作用采用 p - y 值法计算，可以对两侧均有橡胶护舷的靠船

- 桩进行较精确的分析。
- 2)靠船桩外侧护舷能吸收部分能量，减少靠船桩外力。
- 3)靠船桩内侧设有护舷，可减小靠船桩内力，且对靠船桩总吸能量影响不大。
- 4)靠船桩与内侧护舷的间隙增加，使靠船桩内力显著增加，对靠船桩吸能量变化不显著。
- 5)本文提出的靠船桩加强措施，可使靠船桩受力更合理且节省造价。
- 6)采用钢管靠船桩升级改造码头时应应对地基适应性进行论证。

参考文献：

[1] 孟晓宁,边树涛.高桩码头结构加固改造常用方案[J].水运工程,2015(4):120-125.

[2] 张铁峰.钢管靠船桩计算方法探讨[J].水运工程,1999(11):21-25.

[3] 胡立万,刘贤志.柔性防冲桩内力计算的迭代法[J].水运工程,1998(7):18-22.

[4] 项雯,鲁子爱,翟秋,等.撞击力下柔性靠船桩高桩码头横向变形分析[J].水道港口,2013,34(2):169-173.

[5] 冯建国,李存兴,王君辉.定机移船码头的靠船桩系统计算方法[J].水运工程,2020(1):35-39.

[6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第二航务工程勘察设计院有限公司.港口工程荷载规范:JTS 144-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.

[7] 洪承礼.港口规划与布置[M].2版.北京:人民交通出版社,1999.

[8] 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.

[9] 中橡集团青岛天盾橡胶有限公司.橡胶护舷设计选型手册[R].青岛:中橡集团青岛天盾橡胶有限公司,1999.

[10] 中冶京诚工程技术有限公司.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.