

基于欧标的板桩码头钢构件承载能力计算方法

符 成, 张志鹏

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要:介绍了基于欧标的板桩码头钢构件承载能力的计算理论、方法和过程，并结合算例，与国标进行了对比。结果表明：1) 国标对钢板桩承载能力计算采用弹性模型，欧标根据截面类型可采用塑性模型计算；2) 对于 Class 2 截面钢板桩承载能力的计算，国标相对欧标保守；3) 欧标中钢构件的内力设计值可参照国标采用综合分项系数确定。

关键词:板桩码头；钢板桩；拉杆；导梁；承载能力

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0051-05

Calculation method of bearing capacity of steel members of sheet pile wharf based on European code

FU Cheng, ZHANG Zhipeng

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: This paper introduces the calculation theory, method and process of the bearing capacity of steel members of sheet pile wharf based on European code, and compares them with Chinese code through an example. The results show that: 1) Elastic model is used to calculate the bearing capacity of steel sheet piles in Chinese code, while plastic model can be used for calculation according to the section type in European code; 2) The calculation of the bearing capacity of steel sheet piles with Class 2 section as per Chinese code is relative conservative compared to European code; 3) The design value of internal force of steel members in European code can be determined by using comprehensive partial coefficient in accordance with Chinese code.

Keywords: sheet pile wharf; steel sheet pile; steel rod; wailing beam; bearing capacity

板桩码头是传统三大码头结构形式之一，其受力特点是依靠板桩入土部分的横向土抗力和安设在其上部的锚碇结构来维持结构的稳定性。早期的板桩码头受限于板桩强度，一般只适用于水深不大的中小型码头。近 30 年来，板桩码头逐步向着大型深水化方向发展。目前 10 万吨级板桩码头已日渐成熟，并进一步向 20 万吨级的深水码头迈进^[1]。在此过程中，钢板桩、大型组合钢板桩和高强度拉杆等钢构件的广泛应用起到了关键作用。

典型板桩码头结构主要由板桩墙(前墙)、拉杆、锚碇结构、胸墙、导梁等构件组合而成。构

件承载能力计算是依据构件的计算内力值(弯矩、剪力、轴力)来复核截面的承载能力能否满足规范要求的过程。对钢板桩、拉杆、导梁等钢构件的承载能力计算，中欧规范在计算理论和方法上存在较大的差异。国标计算基于弹性模型，简单易用，但未能考虑钢材在塑性发展阶段承载能力的进一步增强，理论上偏于保守；欧标计算基于钢结构的塑性设计理论，计算过程较为繁琐^[2]。

本文详细介绍了基于欧标的板桩码头钢板桩、拉杆和导梁的计算理论、方法和过程，并结合算例，与国标进行对比，可为海外工程板桩码头设计提供一定的参考。

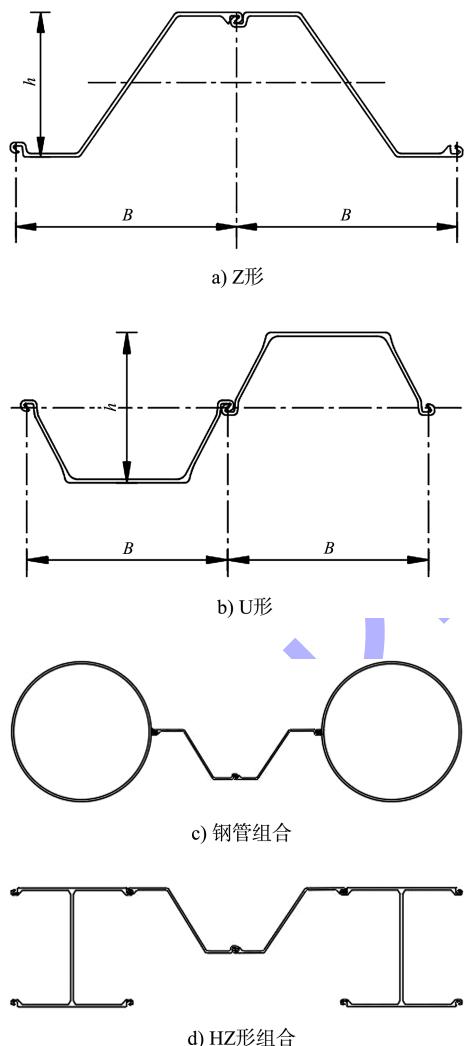
收稿日期: 2022-07-27

作者简介: 符成 (1984—)，男，高级工程师，从事港口及航道工程设计工作。

1 钢板桩承载能力计算

1.1 概述

常见的钢板桩截面有 Z 形、U 形、H 形(工字形)及组合形式(如钢管组合板桩、HZ 形组合桩等), 见图 1。以钢管组合板桩为例, 组合桩的计算一般将钢板桩作为辅桩, 仅考虑其挡土和传力作用, 不考虑受力作用; 钢管桩作为主桩承受全部水平力。



注: B 为板桩半幅宽度; h 为截面高度。

图 1 常见钢板桩及组合形式

1.2 国标钢板桩承载能力计算

JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[3]中规定, 钢板桩的单宽强度需满足:

$$\frac{\gamma_{GQ}}{1000} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_z} \right) \leq f_t \quad (1)$$

式中: γ_{GQ} 为综合分项系数, 取 1.35; N 为作用标

准值产生的每米轴向力; A 为钢板桩的截面面积; M_{\max} 为作用标准值产生的每米板桩墙的最大弯矩; W_z 为钢板桩的弹性抵抗矩; f_t 为钢材的强度设计值。

由式(1)可知, 国标计算公式基于材料的弹性模型, 采用容许应力法, 且不考虑剪力影响。考虑到桩-土相互作用的高度非线性, 应力计算不采用分项系数法, 而是考虑 1.35 的综合分项系数。

1.3 欧标钢板桩承载能力计算

1.3.1 钢板桩分类

欧标允许钢截面设计采用塑性模型, 但截面的抗力和转动能力不应超过抵抗局部屈曲的能力。欧标 3 以钢构件的宽厚比和压应力分布将钢截面分为 4 类^[4-5], 其中常用的有 3 类(表 1), 分别为: 1) Class 1, 截面形成塑性铰, 并拥有塑性设计要求的转动能力; 2) Class 2, 截面可以承受一定的塑性弯矩, 但转动能力有限; 3) Class 3, 截面受压边缘应力符合弹性分布并可达到屈服, 由于出现局部屈服, 塑性弯矩承载能力无法进一步增长。一般情况下, 采用 Class 1 的厚实截面对钢板桩并不经济, 目前生产的钢板桩绝大部分为 Class 2 和 Class 3 等级。

表 1 钢板桩截面等级分类

截面形状	Class 1	Class 2	Class 3
Z 形	边界条件与 Class 2 一致, 需对转动能力进行复核	$\frac{b_f/t_f}{\varepsilon} \leq 45$	$\frac{b_f/t_f}{\varepsilon} \leq 66$
U 形		$\frac{b_f/t_f}{\varepsilon} \leq 37$	$\frac{b_f/t_f}{\varepsilon} \leq 49$

注: b_f 为翼板宽度; t_w 为腹板厚度; t_f 为翼板厚度; ε 为无因次量, $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$, f_y 为材料屈曲强度。

1.3.2 弯矩复核

在无剪力和轴向压力的情况下, 复核各截面的弯矩设计值 M_{Ed} 不超过相应的弯矩抗力设计值 $M_{c,Rd}$, 即 $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$ 。

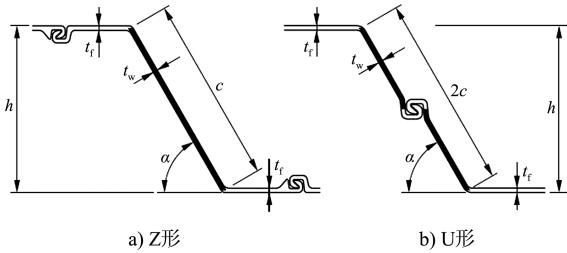
$$M_{c,Rd} = \begin{cases} \beta_B W_p f_y / \gamma_{M_0} & (\text{Class1 或 Class2 截面}) \\ \beta_B W_e f_y / \gamma_{M_0} & (\text{Class3 截面}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: β_B 为考虑锁口处剪力传递能力的折减系数;

W_{pl} 为塑性截面模量; W_{el} 为弹性截面模量; γ_{M_0} 为分项系数, 取 1.0; 对于 Z 形板桩, 中欧规范均为 $\beta_B = 1.0$; 对于 U 形板桩(无焊接), 国标对截面惯性矩折减 0.9, 即 $\beta_B = 0.9$; 欧标则综合考虑钢板桩拼装形式(单幅、两幅或三幅拼装)、结构支撑的数量、地基条件及锁口处理措施(密封、润滑)等因素, 其取值可参见欧标 3-Part 5 的英国附录^[6]。

1.3.3 剪力复核

钢板桩截面的受剪区域如图 2 所示。



注: c 为腹板倾斜段长度; α 为腹板倾角。

图 2 钢板桩不同截面的受剪区域

复核各截面的剪力设计值 V_{Ed} 不超过相应的塑性剪抗力设计值 $V_{pl,Rd}$, 即 $V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$ 。

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M_0}} \quad (3)$$

式中: A_v 为腹板的投影剪切面积, $A_v = t_w(h - t_f)$; $V_{pl,Rd}$ 对应每半幅板桩计算时应换算为每延米塑性剪抗力设计值 $V'_{pl,Rd}$ 。

1.3.4 弯矩和剪力组合复核

复核弯矩和剪力组合作用下, 截面的弯矩设计值 M_{Ed} 不超过折减后的塑性弯矩抗力设计值 $M_{V,Rd}$, 满足 $M_{Ed} \leq M_{V,Rd}$ 且 $M_{V,Rd} \leq M_{c,Rd}$ 。当 $V_{Ed} \leq 0.5 V_{pl,Rd}$ 时, 剪力对钢板桩塑性弯矩抗力的影响可忽略不计。欧标 3-Part 5 给出了 Class 1 和 Class 2 截面塑性弯矩抗力设计值 $M_{V,Rd}$ 的计算公式:

$$M_{V,Rd} = \left(\beta_B W_{pl} - \frac{\rho A_v^2}{4 t_w \sin \alpha} \right) \frac{f_y}{\gamma_{M_0}} \quad (4)$$

其中:

$$\rho = (2V_{Ed}/V_{pl,Rd} - 1)^2 \quad (5)$$

式中: ρ 为折减系数, 对于非 Class 1 和 Class 2 截面弯矩抗力设计值的折减, 考虑板桩受剪作用, 应

采用折减后的材料屈服强度 $(1-\rho)f_y$ 计算。截面全部塑性弯矩抗力设计值与折减后的塑性弯矩抗力设计值的比值:

$$\frac{M_{V,Rd}}{M_{c,Rd}} = 1 - \left(\frac{A_v^2}{4 t_w \beta_B W_{pl} \sin \alpha} \right) \rho \leq 1 \quad (6)$$

1.3.5 轴力复核

复核各截面的轴向压力设计值 N_{Ed} 不超过相应的塑性轴压抗力设计值 $N_{pl,Rd}$, 满足 $N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$ 。

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M_0}} \quad (7)$$

式中: A 为截面面积。

1.3.6 弯矩和轴向压力组合复核

复核弯矩和轴向压力组合作用下(在没有剪力的情况下), 截面的弯矩设计值 M_{Ed} 不超过折减后的塑性弯矩抗力设计值 $M_{N,Rd}$, 满足 $M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$ 且 $M_{N,Rd} \leq M_{c,Rd}$ 。

轴向压力设计值 N_{Ed} 与塑性轴压抗力设计值 $N_{pl,Rd}$ 的比值 \leq 限制值时, 轴向压力对钢板桩的塑性弯矩抗力设计值的影响可忽略不计。根据欧标 3-Part 5, 限制值取值如下: 对 Z 形截面钢板桩 Class 1~3, 取 0.10; 对 U 形截面钢板桩 Class 1~2, 取 0.25; 对 U 形截面钢板桩 Class 3, 取 0.10。

欧标 3-Part 5 给出了考虑轴向压力作用, 折减后的截面塑性弯矩抗力设计值的计算公式:

$$M_{N,Rd} \leq k M_{c,Rd} \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right) \text{ 且 } M_{N,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad (8)$$

式中 k 为系数, 取值见表 2。

表 2 系数 k 取值

截面类型	U 形	Z 形
Class 1	1.33	1.11
Class 2	1.33	1.11
Class 3	1.00	1.00

1.3.7 弯矩、剪力和轴向压力组合复核

在剪力作用下, 当 $N_{Ed}/N_{pl,Rd} >$ 限制值且 $V_{Ed} > V_{pl,Rd}/2$ 时, 截面的弯矩、轴压的组合抗力设计值应予以折减。此时, 截面的弯矩抗力设计值 $f_{r,red}$ 应采用折减的钢材屈服强度计算:

$$f_{r,red} = (1-\rho)f_y \quad (9)$$

2 拉杆承载能力计算

2.1 承载能力极限状态

根据欧标 3-Part 5, 墩粗螺纹段轴拉抗力设计值 $F_{t,Rd}$ 为:

$$F_{t,Rd} = k_t \frac{f_{ua} A_s}{\gamma_{M_2}} \quad (10)$$

杆体光圆段轴拉抗力设计值 $F_{tg,Rd}$ 为:

$$F_{tg,Rd} = \frac{f_y A_g}{\gamma_{M_0}} \quad (11)$$

式中: A_s 为墩粗螺纹段的受拉截面面积; f_{ua} 为材料的抗拉强度; k_t 为缺口系数, 考虑螺纹处弯矩和拉力作用的折减; γ_{M_2} 为分项系数; A_g 为杆体段截面面积。轴拉抗力设计值 $F_{t,Rd}$ 为 $F_{t,Rd}$ 和 $F_{tg,Rd}$ 的较小值。

欧标 3-Part 5 推荐 k_t 取值: 当拉杆连接铰处须考虑弯曲作用时, $k_t = 0.6$; 当拉杆连接铰处不受弯曲或组合应力作用时, $k_t = 0.9$ 。根据欧标 3-Part 5 的英国附录, $\gamma_{M_0} = 1.0$, $\gamma_{M_2} = 1.25$ 。

典型拉杆的杆体光圆段和墩粗螺纹段见图 3。

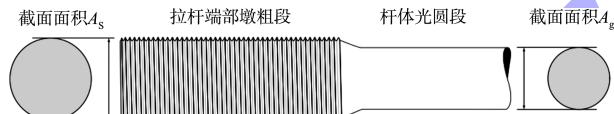


图 3 拉杆光圆段和螺纹段

2.2 正常使用状态

根据欧标 3-Part 5 中 7.2.4 条, 锚固拉杆应设计有足够的抗力以防止因屈服而产生的变形。考虑正常使用状态特征组合, 拉杆轴向拉力特征值 $F_{t,Ser}$:

$$F_{t,Ser} \leq F_{t,Sd} = \frac{f_y A_s}{\gamma_{Mt,Ser}} \quad (12)$$

表 3 板桩墙设计参数

$M_{Ed}/$ (kN·m)	$V_{Ed}/$ kN	$N_{Ed}/$ kN	$B/$ mm	$b_f/$ mm	$h/$ mm	$t_w/$ mm	$t_f/$ mm	$A/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	$W_{el}/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	$W_{pl}/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	$f_y/$ MPa
750	1 150	1 000	700	361	461	13.2	13.2	200.2	2 760	3 273	355

1) 判断板桩截面类型。计算得 $b_f / (t_f \varepsilon) = 33.8 < 45$, 根据欧标截面等级分类, AZ 28-700 型钢板桩截面为 Class 2 等级, 采用塑性截面模量 $W_{pl} = 3 273 \text{ cm}^3/\text{m}$ 计算。

2) 考虑剪力作用的截面弯矩抗力设计值

式中: A_s 为拉杆最小的毛截面面积, 对螺纹部分为拉应力分布面积; $\gamma_{Mt,Ser}$ 为分项系数, 欧标 3-Part 5 中推荐 $\gamma_{Mt,Ser} = 1.10$ 。

3 导梁承载能力计算

导梁通常由两片背靠背布置的槽钢组成, 拉杆从两片槽钢间穿过, 见图 4。

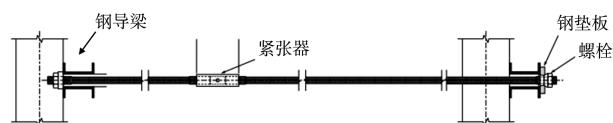


图 4 典型拉杆及导梁安装

从受力模式来看, 假定导梁为点支撑, 受拉杆施加的集中力作用, 可简化为刚性支撑连续梁计算。导梁最大弯矩设计值 M_{max} 为:

$$M_{max} = \frac{1}{10} T_h S^2 \quad (13)$$

式中: T_h 为拉杆拉力每延米设计值(等效为均布荷载); S 为拉杆间距。 M_{max} 可参考国标采用标准值计算, 考虑综合分项系数 1.35。钢导梁的强度应满足: $M_{max}/W \leq f_t$, 其中 W 为导梁材料的弹性截面抵抗矩; f_t 为导梁材料的屈服强度。

4 算例及对比分析

某海外项目板桩码头板桩墙选用 S355GP 钢材、AZ 28-700 型钢板桩, 设计参数见表 3, 在不考虑腐蚀影响下, 复核钢板桩承载能力是否满足受力要求。

$V_{Ed} = 1 150 \text{ kN}$, 剪力设计值大于塑性剪抗力设计值的一半, 弯矩抗力设计值须进行折减。计算得 $\rho = 0.108$ 。因此, 钢材的屈服强度降低为 $f_{y,red} = 316.66 \text{ MPa}$, 计算得折减后的截面弯矩抗力设计值 $M_{e,Rd} = 1 036.43 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 。

3) 考虑轴压力作用的截面弯矩抗力设计值 $N_{pl,Rd} = 7107.1 \text{ kN}$, $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 0.141 > 0.10$ 。

考虑轴压力作用对截面弯矩抗力设计值的折减, 采用折减的钢材屈服强度计算得: $M_{N,Rd} = 968.97(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$, $M_{Ed} = 750(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$ 。

经过复核, 截面承载能力满足规范要求。承载比为 77%, 表明钢板桩受力尚有一定富余。该算例如采用国标复核, 应采用弹性截面模量 W_{el} , 而非欧标采用的塑性截面模量 W_{pl} , $W_{pl}/W_{el} = 1.856$ 。

国标不考虑剪力影响, 考虑钢板厚度, 钢材采用设计强度而非屈服强度。本例中 S355GP 钢材设计强度取 320 MPa, 代入式(1)计算, 可得钢材的设计应力值 $321.7 \text{ MPa} > 320 \text{ MPa}$, 截面承载能力不满足要求。

从计算结果对比可知, 对于 Class 2 截面钢板桩, 采用国标计算相对欧标保守。主要区别在于国标采用弹性截面模量, 而欧标采用塑性截面模量。根据统计, 钢板桩塑性截面模量值一般为弹性截面模量值的 1.15~1.20 倍。对 Class 3 截面钢板桩, 中欧标准均采用弹性截面模量计算, 在以受弯为主的情况下, 两者的计算结果接近。

5 结论

1) 对于钢板桩承载能力计算, 中欧规范在计算理论和方法上存在较大差异。国标采用材料弹性模型, 计算公式简单, 但对欧标中 Class 2 截面未能考虑塑性弯矩的作用, 计算理论上稍保守; 欧标可采用塑性设计, 考虑剪力和轴压力对弯矩抗力的折减, 设计理念先进, 但计算较为繁琐。

2) 国标对钢板桩承载能力的计算未能考虑剪力对弯矩抗力的影响, 建议对剪力较大的钢板桩适当考虑一定安全富余。

3) 板桩结构受力为复杂的桩-土相互作用, 荷载和荷载作用效应(弯矩、剪力和轴力)之间呈现高度的非线性关系, 不能直接对荷载施加分项系数。为解决该问题, 国标采用荷载标准值进行计算, 并引入综合分项系数; 欧标针对一般性问

题, 荷载作用效应仍采用设计值。欧标 7-Part 1^[7]规定, 当荷载和荷载作用效应呈非线性变化时, 应对荷载作用效应施加分项系数。为便于计算, 建议基于欧标设计的板桩码头参照国标方法进行设计, 即采用荷载标准值计算, 并考虑综合分项系数。

4) 中欧规范对拉杆承载能力的计算方法基本一致, 但考虑的侧重点不同。国标仅要求对承载能力极限状态进行复核, 并考虑 1.35 的受力不均匀系数; 欧标则要求考虑承载能力极限状态和正常使用极限状态, 对墩粗螺纹段和杆体光圆段分别复核。

5) 对于导梁的承载能力计算, 中欧规范均可按照刚性支撑连续梁模型计算, 计算方法基本一致。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册(中册)[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 邹建强, 赵凯. 中外钢管桩内力验算方法对比[J], 水运工程, 2021(4): 56-62, 146.
- [3] 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.
- [4] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings: BS EN 1993-1-1: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [5] European committee for standardization. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 5: Piling: BS EN 1993-5: 2007[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [6] UK National Annex to Eurocode 3: Design of steel structures-Part 5: Piling: NA+A1: 2012 to BS EN 1993-5: 2007[S]. London: British Standards Institution, 2007.
- [7] European committee for standardization. Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules: BS EN 1997-1: 2004[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

(本文编辑 王传瑜)