



中外钢管桩内力验算方法对比

邹建强, 赵 凯

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 钢管桩作为一种多轴对称的钢结构, 性能稳定, 受力机理相对明确, 在国内外港口工程中主要用于高桩码头的基礎结构和板桩码头的主体结构。通过对比研究国标、欧标、美标 API 和美标 AISC 共 4 种国内外规范对于钢管桩内力验算方法, 探究 4 种规范验算方法的差异性, 为海外港口工程钢管桩内力验算方法选取提供参考建议。以某港口高桩墩台结构为例对比 4 种规范钢管桩内力验算方法, 结果表明: 1) AISC 规范计算结果最小, 即其充分考虑发挥结构的性能, 偏安全。2) 欧标计算的结果最大, 相对保守。3) 国标和 API 规范计算结果介于 AISC 规范和欧标之间。

关键词: 多轴对称; 钢管桩内力; 高桩墩台结构; 4 种规范

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0056-07

Comparison of internal force calculation methods for steel pipe piles with Chinese and foreign codes

ZOU Jian-qiang, ZHAO Kai

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

Abstract: As a multi-axially symmetrical steel structure, steel pipe piles have stable performance and a relatively clear stress mechanisms. They are widely used in port engineering in China and foreign countries and are mainly used for the foundation structure of high-pile wharf and the main structure of sheet pile wharf. This article compares the calculation methods of the internal force of steel pipe piles in four domestic and foreign codes (Chinese standards, European standards, API, and AISC), to explores the differences among the four standard calculation methods, which provides a reference for the selection of internal force calculation methods of steel pipe piles in overseas projects. Finally, taking the high pile pier and abutment structure of a port as an example, the internal force of the steel pipe piles calculated by the four codes is compared. The results show that: 1) The AISC code calculation result is the smallest, that is, it fully considers the performance of the structure. The result is safe. 2) The European standard calculation result is the largest and relatively conservative. 3) The calculation results of Chinese code and API standard are between AISC standard and European standard.

Keywords: multi-axis symmetry; internal force of steel pipe pile; pier structure; four specifications

随着“一带一路”倡议的不断推进, 港口作为重要基础设施在海外特别是非洲区域发展迅速。为提高国内设计院在海外竞争优势, 需要设计人员熟悉国外规范体系以适应海外业主咨工需求。钢管桩在国内外港口工程中应用越来越广泛, 国内钢管桩研究目前主要是大直径钢管桩水平承载

力分析^[1-2]和国内外规范下桩基承载力对比分析^[3-4], 尚未分析对比国内外钢管桩内力验算体系。因此, 本文通过对比分析国内外 4 种规范下钢管桩内力验算体系, 得出 4 种规范钢管桩内力验算特点, 为港口工程设计人员提供参考。

钢管桩通常采用的内力验算方法有 4 种: 国

标 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》^[5]、美国钢结构协会 (AISC) 制定的规范 (ANSI/AISC 360-10)^[6]、美国石油协会 (API) 制定的设计规范 (API RP 2A-WSD 14)^[7] 和欧共体委员会制定的 BS EN 1990, 1993 等一系列规范^[8]。4 种规范的主要验算思路差异不大, 都是基于力学知识和试验修正系数的理论公式或半理论半经验公式进行计算, 其中的国标和欧标计算体系采用分项系数法, 美标 API 的计算体系采用容许应力法, 美标 AISC 的计算体系可适用于上述两种方法。针对钢管桩的验算, 主要分为强度验算、整体稳定验算和局部验算, 其中相关参数如截面惯性矩、截面模量、长细比等意义一致。

1 4 种规范验算体系

1.1 中国规范

国内钢管桩内力验算方法基于 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》, 从强度和稳定性两个方面对构件进行了内力校核, 其中强度验算时使用净截面参数、稳定性验算时使用毛截面参数, 强度校核使用的内力值和钢材的强度指标均为设计值。规范中规定除通用的截面几何参数外, 进行验算时还需要确定如下主要参数: 轴心受压构件的稳定系数 ϕ (根据规范附录 B 中的表格或者公式确定), 长细比 λ , 钢材的屈服强度 f_y (和截面类型有关), 截面塑性发展系数 γ_x 和 γ_y (规范中表 4.3.6), 等效弯矩系数 β_{mx} 和 β_{tx} (规范中条文 4.3.9.1)。这些参数的选取见图 1。

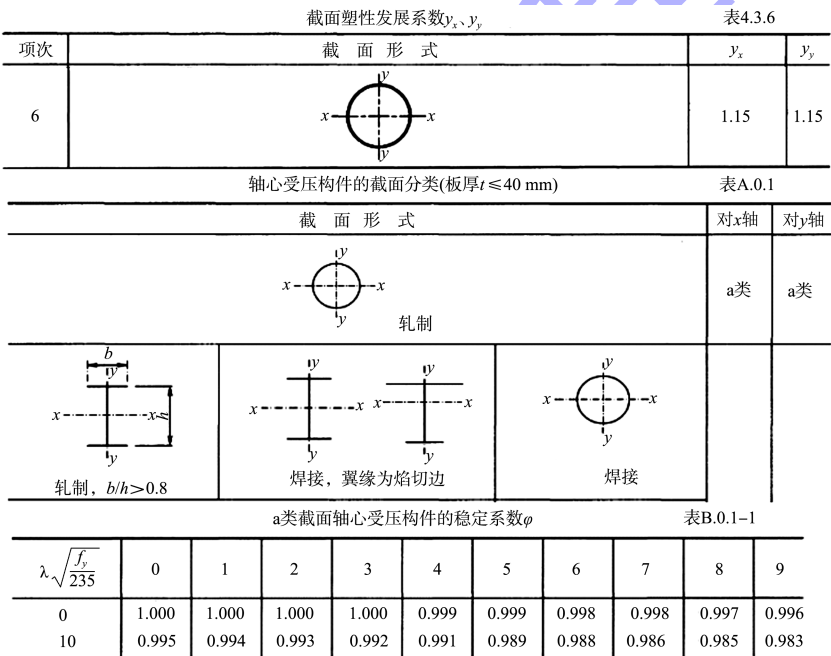


图 1 国标中相关参数的选取

钢管桩强度验算包含 4 部分内容, 一般的验算思路是将计算得到绕 x 轴的弯矩设计值 M_x 和绕 y 轴的弯矩设计值 M_y 进行合成, 用不合成的弯矩进行验算时得到的结果是偏危险, 见表 1。

表 1 国标钢管桩强度验算及公式

验算内容	计算公式
轴心受拉构件和轴心受压构件的强度	$\sigma = N/A_n \leq f$
主平面受弯构件的抗弯强度	$M_x/(\gamma_x W_{nx}) + M_y/(\gamma_y W_{ny}) \leq f$
主平面受弯构件的抗剪强度	$\tau = VS/(I t_w) \leq f_v$
拉弯和压弯组合构件的强度	$N/A_n + M_x/(\gamma_x W_{nx}) + M_y/(\gamma_y W_{ny}) \leq f$

注: σ 是正应力设计值, N 是轴向拉力或压力设计值, A_n 是净截面面积, f 是钢材抗拉或抗压设计值, W_{nx} 和 W_{ny} 是对 x 轴和 y 轴的净截面模量, τ 是剪应力设计值, V 是截面剪力设计值, S 是剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩, I 是毛截面惯性矩, t_w 是截面与中和轴相交厚度, f_v 是钢材截面抗剪设计强度, φ_b 是整体稳定性系数, β_{mx} 是弯矩作用面内的等效弯矩系数, W_{lx} 是弯矩作用面内对较大受压纤维毛截面模量, N'_{Ex} 是参数, η 是截面影响系数, β_{tx} 是弯矩作用面外的等效弯矩系数。

钢管桩稳定性验算包括轴心受压构件的稳定 性、受弯构件和压弯构件稳定性，具体见表 2。

表 2 国标钢管桩稳定性验算及公式

构件	验算内容	计算公式
轴心受压构件	稳定性	$N/(\varphi A) \leq f$
受弯构件	最大刚度主平面内受弯构件的稳定性	$M_x/(\varphi_b W_x) \leq f$
	两个主平面内受弯的构件的稳定性	$M_x/(\varphi_b W_x) + M_y/(\gamma_y W_y) \leq f$
压弯构件	弯矩作用平面内的稳定性	$N/(\varphi_x A) + \beta_{mx} M_x / \left[\gamma_x W_{1x} \left(1 - \frac{0.8N}{N'_{Ex}} \right) \right] \leq f$
	弯矩作用平面外的稳定性	$N/(\varphi_y A) + \eta \frac{\beta_{mx} M_x}{\varphi_b W_{1x}} \leq f$

进行平面内外压弯稳定验算时，理论上不应该用合成弯矩，而是用某一方向上的弯矩。对于 x 和 y 方向刚度差别较大的结构，弯矩作用在 x 向的平面时，结构可能会在 y 向的平面内发生受压失稳，所以要进行弯矩平面外的稳定性验算。经验表明钢管桩设计不宜采用 Q235A、Q345A，外径与有效厚度之比不宜大于 100，宜打入良好持力层，且沉桩困难时，其外径与厚度之比不宜大于 70。钢管桩同时要验算其使用期和施工期的强度和稳定性。

1.2 美国 AISC 规范

美国钢结构协会 (AISC) 针对钢结构建筑制定了详细的设计和施工规范 (ANSI/AISC 360-10)。规范中规定可采用两种方法校核结构内力，分别是荷载和抗力分项系数法 (LRFD) 及容许应力法 (ASD)。两种方法采用的验算公式基本上一致，主要区别在荷载分项系数和安全系数。AISC 规范针对某种受力形式，给出结构不同限制条件下的验算准则，即通过给定限定准则，限定结构只发生特定形式的破坏，并校核结构在这种破坏形式下的内力。AISC 规范从单独受拉、受压、受弯、受剪、受扭这 5 个方面以及这几种组合对结构的内力进行校核，规范还给出了复合截面的内力校核公式。

对于受拉杆件的设计和验算，规范规定的长细比限值为 300，须验算毛截面屈服和净截面拉伸断裂。U 为剪切滞后系数，对于受拉杆件，当张力是通过紧固件或者焊接直接传输到截面上时，U=1。规范中规定设计张力强度为 $P_n \phi_t$ ，容许张力强度为 P_n / Ω_t 。对于总截面上张力屈服情形， $P_n = F_y A_g$ ，LRFD 法 $\phi_t = 0.9$ ，ASD 法 $\Omega_t = 1.67$ ；对

于净截面的张力断裂情形， $P_n = F_u A_e$ ， $\phi_t = 0.75$ (LRFD 法)， $\Omega_t = 2.0$ (ASD 法)；其中 ϕ_t 和 Ω_t 为两种方法的安全系数。 A_g 是毛截面积， A_e 是有效面积， F_y 是钢材最小屈服应力， F_u 是钢材最小的拉应力。

对于受压杆件主要从 3 个方面验算：1) 非细长杆件，弯曲拉紧时受压强度验算；2) 非细长杆件，扭曲及弯扭拉紧时的受压强度验算；3) 细长杆件的受压强度验算。LRFD 法的设计受压强度为 $\varphi_c P_n$ ，ASD 法的允许受压强度为 P_n / Ω_c ， $\varphi_c = 0.90$ ， $\Omega_c = 1.67$ 。对于受压构件，构件的长细比 Kl/r 建议不超过 200，其中 φ_c 和 Ω_c 是两种方法的安全系数。验算公式这里不再赘述，具体参见规范 E 章。

对于弯曲杆件的验算，该规范主要用于核算围绕一个主要轴线进行简单弯曲的构件，构件在其相关平面内所承受的载荷平行于主要轴线，该轴线通过剪切中心或在载荷作用点及支撑位置上阻止扭曲。LRFD 法的设计弯曲强度为 $\varphi_b M_n$ ，ASD 法的容许弯曲强度为 M_n / Ω_b ， $\varphi_b = 0.90$ ， $\Omega_b = 1.67$ ，其中 φ_b 和 Ω_b 是两种方法的安全系数。对于部分非均匀薄膜杆件，考虑到杆件会进行处理防止侧向扭转屈曲，规范用修正参数 C_b 来表示这一因素，对于钢管桩构件并没有这一规定。具体验算公式参见规范 F 章。

对于剪切杆件的验算，规范适用于在腹板平面上受到剪切作用的单轴或双轴对称的杆件，单角钢、HSS 截面、单轴或双轴对称的构件在较弱的方向上受到剪切应力作用的构件。对于剪切杆件的设计，LRFD 法的设计弯曲强度为 $\varphi_v V_n$ ，ASD 法的容许弯曲强度为 V_n / Ω_v ， $\varphi_v = 0.90$ ， $\Omega_v = 1.67$ ，

其中 φ_v 和 Ω_v 是两种方法的安全系数。具体验算公式参见规范 G 章。

对于受扭及复合受力的钢管桩(双轴对称构件)验算见表 3, 其中 $(KL)_z$ 和 $(KL)_y$ 为两个方向

上的构件长度系数乘以构件有效长度, M_r 是荷载组合条件下要求的弯曲强度, M_e 是有效弯曲强度, P_e 是受拉时有效强度, C_b 是扭转压曲时修正系数, φ_b 是弯曲时阻力系数, M_p 是塑性弯曲力矩。

表 3 受扭及复合受力的钢管桩验算内容及注意要点

验算内容	验算注意要点
双轴或单轴对称构件受到弯矩及压力作用	采用规范公式 H1-1a 和 H1-1b 验算,计算方法适用于 $0.1 \leq I_{yc}/I_y \leq 0.9$ 的单轴或双轴对称的杆件在受到弯矩和轴压力共同作用时的内力的校核,其中 I_{yc} 为受压翼缘关于 y 轴的惯性矩, I_y 为平面外惯性力矩。
双轴或单轴对称构件受到弯矩及拉力作用	仍然采用规范公式 H1-1a 和 H1-1b 验算,但是部分参数需调整
双轴对称的构件受到弯矩及压力作用时绕单轴破坏校核	$(KL)_z \leq (KL)_y$ 的双轴对称的构件,受弯矩和拉力共同作用且弯矩作用在主轴方向时,可以分别考虑平面内和平面外的屈曲或者横向扭转屈曲以取代 H1.1 中的验算方法。当 $M_r/M_{cy} \geq 0.05$ 以及平面内失稳时,仍然需要采用规范 H1.1 中的方法, P_e 、 M_r 和 M_e 由弯曲平面内的参数确定。对于平面外失稳或者横向扭转失稳,应用公式 H1-2。对于钢管桩, C_b 为 1, 当 $C_b M_{ex}$ 大于 $\varphi_b M_{px}$ (LRFD 法) 或者大于 M_{px}/Ω_b (ASD 法) 时,应用公式 H1-1 替代公式 H1-2
圆形及矩形管截面的扭转强度	LRFD 法的设计扭转强度为 $\varphi_c T_n$, ASD 法的允许受扭强度为 T_n/Ω_T , $\varphi_c = 0.90$, $\Omega_c = 1.67$
管截面承受组合扭转、剪切、弯曲及轴向应力作用的构件	当计算的 T_r (扭转强度) 小于或等于 20% 的 T_c (容许扭转强度) 时,承受组合扭转、剪切、弯曲及轴向应力作用的管截面的内力校核须由章节 H1 确定,扭转效应可忽略。当 T_r 大于 T_c 的 20% 时,管截面的内力校核用公式 H3-6

综上, AISC 规范提供的验算方法主要适用于建筑钢结构,在建模计算结构强度时,该规范提供多种计算方法并给出了各种方法的使用条件和注意点,使得建模求解的过程更加灵活。在计算各个构件的强度时,针对构件的形式和受力特点,规范也给出了详细计算公式。但港工结构和建筑结构的特点以及工作环境存在一定的差异性,针对建筑结构的验算方法能否直接应用于港工结构有待商榷,如高桩码头和板桩码头在现有的受力模式下能否认为是单层框架从而采用规范推荐的模型计算方法。

1.3 美国 API 规范

美国石油协会 (API) 采用工作应力设计法 (WSD) 针对海上石油平台进行结构设计。API 制定了详细的设计规范 (API RP 2A-WSD 14)。API 规定采用该规范方法计算结构的应力需要与 AISC 335-89 中的相关内容保持一致,但同时不建议采用 AISC 规范来设计海洋平台。API 规定地震时的容许应力可以增大 70%, 凡是结构的应力产生于因为设计环境条件引起的侧向力和垂直力,容许应力可以增大 1/3。API 规范中的校核内容基本上

与 AISC 规范一致,主要针对局部屈曲和整体屈曲,从轴向拉伸、轴向压缩、弯曲、剪切、扭转这 5 个方面以及这几种受力形式的某几种组合对结构的内力进行验算,考虑到工作环境的特殊性,API 规范还引入了由内外压力差引起的膜应力。规范验算内容见图 2。

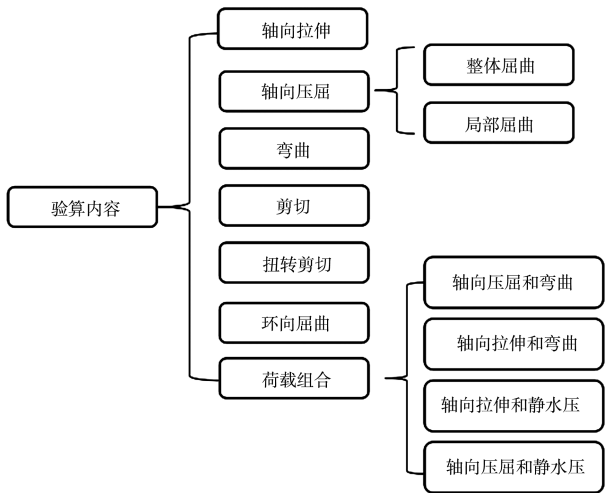


图 2 美国 API 规范钢管桩内力验算内容

验算公式这里不再赘述,可参见规范第 6 章。其中验算无加强的圆柱形构件的局部屈曲时,当 D/t 大于 60 时,轴向压力可能会引起结构的局部

屈曲。当 $60 < D/t < 300$ 并且厚度 $t > 6 \text{ mm}$ 时, 容许的局部弹性屈曲应力 F_{xe} 和非弹性局部屈曲应力 F_{xc} 的计算公式如下:

$$\begin{cases} F_{xe} = 2CEt/D \\ F_{xc} = F_y \left[1.64 - 0.23 \left(\frac{D}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \leq F_{xe} \\ F_{xc} = F_y \end{cases} \quad (1) \quad (D/t \leq 60)$$

式中: C 是临界弹性屈曲系数, 其理论值是 0.6, 但是考虑到结构初始几何缺陷的影响, 推荐 C 值采用 0.3; D 和 t 分别是外径和壁厚; E 为弹性模量。

验算环向屈曲时, 内外水头差会导致结构产生环向应力, 环向最大应力 f_h 和临界环向屈曲应力 F_{hc} 的计算公式以及两者需满足的控制方程如下:

$$f_h \leq F_{hc} / S_{F_h} \quad (2)$$

$$f_h = pD / (2t) \quad (3)$$

式中: f_h 是环向应力; F_{hc} 是临界环向屈曲应力; p 是静水压力; S_{F_h} 是抵抗水压破坏系数。

对于轴向压缩和弯曲组合, 一般钢管桩设计中不考虑整体失稳, 但是当桩承受有轴向力并且侧向荷载较大时, 应该考虑 $P-\Delta$ 效应 (P 为结构竖向荷载, Δ 为侧向刚度较柔的建筑物在风荷载或水平地震作用下产生的较大水平位移)。并且容许应力可以在适当的时候增加 1/3, 验算公式如下:

$$\frac{f_a}{0.6 F_{xc}} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (4)$$

式中: F_{xc} 是局部弹性屈曲应力; F_b 是容许的弯曲应力; f_a 是轴向应力的绝对值, f_{bx} 和 f_{by} 是 x 和 y 向的弯曲应力。

综上, API 规范是专门针对海上石油平台制定的规范, 港口工程钢管桩的工作环境与之有较大的相似性, 相对于其他针对建筑钢结构的规范, API 规范结合结构的特点, 给出了圆形截面最大剪应力的简化计算公式、内外水头差引起的环向压力的计算公式以及涉及这些特殊荷载的内力校

核公式, 验算公式较具体, 计算方法易于掌握。

1.4 欧标规范

欧共体委员会为了消除欧共体各成员国在工程建设领域的技术障碍编制统一的技术规范, 其中规范 EN1993 主要是针对钢结构设计的指导规范。在进行结构设计时, 设计荷载所取的分项系数以及抗力的分项系数都需要符合欧标相应的规范, 对于截面模量等参数计算方法与其他规范一致。

欧标对于薄壁圆形钢管桩, 外径壁厚比在不同的区间范围内时, 采用的强度验算公式是不同的, 具体分类见图 3。通常情况下港口工程钢管桩 $d/t > 90e^2$, 需参考 EN 1993-1-6 规范。对于所有的钢结构构件, 欧标从轴向拉伸、轴向压缩、弯曲、剪切、扭转以及上述几种作用方式的组合受力情况对结构进行了内力验算, 并针对构件的不同形态规定了相应的整体稳定的验算标准。针对钢管桩这种薄壁壳体结构, 规范另外规定相应的附加的验算准则: 极限塑性状态和极限屈曲状态。具体公式见规范 EN 1993-1-1 的第 6 章。

当验算弯矩和剪力共同作用时, 要考虑剪力对抗弯能力的影响, 当剪力值小于塑性抗剪承载力的一半时, 剪力的影响可以忽略, 但是由剪切屈曲引起的截面承载力减少的情况除外。受弯验算时, 采用折减的屈服强度 $(1-\rho)f_y$ 代替原有的屈服强度 f_y 。当弯矩、剪力和轴力共同作用时, 应考虑这剪力和轴力对弯矩抗力的影响。在受剪区域, 当剪力设计值 V_{Ed} 不大于塑性抗剪承载力的一半, 即 $< \frac{1}{2}V_{pl,Rd}$ 时, 弯矩抗力和轴向抗力不折减, 但是由剪切屈曲引起的截面承载力减少的情况除外。当剪力设计值 V_{Ed} 大于塑性抗剪承载力 $V_{pl,Rd}$ 的一半时, 在计算截面针对弯矩和轴力组合时的抗力时需要采用折减后的屈服强度 $(1-\rho)f_y$, 也可以不折减屈服强度而折减板厚, 其中 $\rho = (2V_{Ed}/V_{pl,Rd} - 1)^2$, $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ 。欧标对于薄壁圆形钢管桩的分类见图 3。

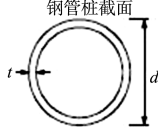
<div>钢管桩截面</div> 						
类别	受压、受弯或受压弯截面					
1	$d/t \leq 50e^2$					
2	$d/t \leq 70e^2$					
3	$d/t \leq 90e^2$					
注, 对于: $d/t > 90e^2$ 见 EN1993-1-6						
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71
	e^2	1.00	0.85	0.66	0.56	0.51

图 3 欧标对于薄壁圆形钢管桩的分类

当验算钢管桩塑性极限状态校核时, 考虑到材料充分发挥结构性能, 由平面外产生的弯矩应该与结构塑性抗弯刚度相对应。具体参考 EN 1993-1-6 规范第 6 章, 公式如下:

$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \leq f_{eq,Rd}$ (5)

式中: $\sigma_{eq,Ed}$ 、 $\sigma_{x,Ed}$ 、 $\sigma_{\theta,Ed}$ 、 $\tau_{x\theta,Ed}$ 、 $\tau_{xn,Ed}$ 、 $\tau_{\theta n,Ed}$ 、 $f_{eq,Rd}$ 分别为应力设计值、桩径向应力、环向应力、平面内切应力设计值, 与径向弯矩相关的横向切应力、与环向弯矩相关的横向切应力、钢材抗力设计值。

对于屈曲极限状态校核是验算壳体结构在膜应力的作用下是否会突然发生局部或者整体的较大位移。这种极限状态下的承载力很大程度上取决于施工质量, 针对该极限状态的校核应该考虑到施工误差的影响。采用线弹性法(LA)进行结构内力分析时, 对于单向应力作用的结构需满足式(6), 对于多向应力作用的结构需满足式(7)。

$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}, \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}, \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd}$ (6)

$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1$ (7)

式中: $\sigma_{x,Rd}$ 、 $\sigma_{\theta,Rd}$ 、 $\tau_{x\theta,Rd}$ 分别为径向、环向和切向的屈曲应力的设计值。 $\sigma_{x,Ed}$ 、 $\sigma_{\theta,Ed}$ 为拉应力时, 在式(7)中应取 0; k_x 、 k_i 、 k_θ 、 k_τ 为屈曲相互作用参数, 取值见 EN 1993-1-6 规范附录 D。

综上, EN 1993 是欧标关于土木工程中所有钢结构的验算规范, 这一系列的验算规范相对于其他类型的规范包含的验算内容更详细。如结合结

构的特点, 针对钢管桩结构提出壳体结构的验算准则, 针对管板组合中的钢管桩提出相应的验算准则。欧标相对于其他规范更加全面, 对于不同验算内容, 分项规范都有详细的规定, 这也导致要在不同的规范之间相互调用不同的验算内容, 相较于其他规范验算体系掌握更难。

2 工程算例

某港口高桩墩台的几何参数如下: 墩台长宽均为 12 m, 厚 1.5 m, 顶高程 13 m, 泥面高程-13.4 m, 墩台桩基础为 9 根直径 1.2 m 的钢管桩, 壁厚 20 mm。用于计算的荷载组合的标准值: 系缆力 1 000 kN(主导), 均载 100 kPa。本文基于有限元软件建模, 通过对比分析计算结果总结各种计算方法之间的差异, 三维有限元模型见图 4。4 种规范的荷载分项系数以及根据各个规范计算钢管桩内力和简化方法计算得到二阶弯矩见表 4 和表 5。

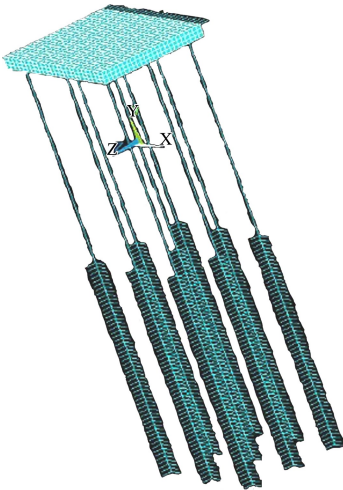


图 4 高桩墩台三维有限元模型

表 4 4 种规范荷载分项系数

规范	自重	系缆力	均载(非主导)
国标	1.2	1.4	1.5×0.7
美标 AISC	1.2	1.6	1.6×0.5
美标 API	1.0	1.0	1×1
欧标	1.35	1.5	1.5×0.7

表 5 基于 4 种规范计算的钢管桩内力 and 位移

规范	轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	剪力/ kN	扭矩/ (kN·m)	位移/ mm	二阶弯矩/ (kN·m)
国标	3 479	2 370	262	0	156.20	2 913
美标 AISC	3 175	2 690	298	0	178.25	3 256
美标 API	3 017	1 705	188	0	111.47	2 041
欧标	3 660	2 537	280	0	167.15	3 149

尽管 4 种规范主要都是从强度和稳定性两个方面进行校核，但是针对各个分项的验算仍然有较大差异，不同规范的验算内容也不同。为了方便对比分析，分别列出了各个规范的验算项，没有验算的项均不列出(如受拉验算和考虑拉力的复合验算)，列举内容为各项达到承载力的百分比，具体计算结果见表 6~8。

表 6 基于国标的钢管桩内力验算结果

验算内容	抗压强度验算	抗弯强度验算	抗剪强度验算	抗压弯强度验算	平面内稳定验算	平面外稳定验算
达到承载力的比例/%	15.9	39.8	4.2	55.9	60.7	49.9

表 7 基于美标 AISC 和 API 的钢管桩内力验算结果

规范	达到承载力的比例/%				
	受压稳定验算	受弯稳定验算	受剪稳定验算	压弯稳定验算	轴压环压组合验算
美标 AISC	16.8	40.5	8.9	48.9	-
美标 API	27.3	41.8	4.3	69.7	69.5

表 8 基于欧标的钢管桩内力验算结果

验算内容	达到承载力的比例/%	验算内容	达到承载力的比例/%
抗压强度验算	14.3	压弯稳定验算	75.0
抗弯强度验算	42.4	塑性强度验算	56.9
抗剪强度验算	7.6	径向屈曲验算	70.4
抗压弯强度验算	56.7	环向屈曲验算	0
受压稳定验算	24.8	切向屈曲验算	5.6
受弯稳定验算	46.7	复合屈曲验算	51.6

3 结论

1) 本文通过对比国标、美标 AISC、美标 API 和欧标 4 种规范对钢管桩内力验算的计算方法，得出美标 AISC 验算方法充分考虑结构性能，偏安

从表 6 和表 8 可以看出，对于抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗压弯强度的验算，国标和欧标计算结果差异较小；从表 7 可以看出，美标 AISC 和 API 验算结果有一定差异，除受弯稳定验算外，其余验算内容计算结果差异较大，且 API 规范计算更偏危险；对比表 7 和表 8，欧标和美标 API 的受压稳定、受弯稳定、压弯稳定计算结果差异较小，从验算结果上看，欧标更偏危险。相较于其他规范，BS EN 规范中的壳体验算是最危险的，这是因为薄壁壳体结构本身承受壳体曲面外的外力的能力很弱，而且承载力还受制造工艺的影响，因此针对适用于薄壁壳体结构的钢管桩内力验算需重点关注。此外不同规范对于有效长度系数的规定是有区别的，如 API 规定的有效长度系数为 1，这对受压验算和与压力有关的复合验算都有影响，但是相较于受弯承载力，受压承载力往往会小很多，这也就降低了压缩长度对整体计算结果的影响。

全；欧标验算方法考虑壳体结构本身承受壳体曲面外的外力，偏危险；国标和美标 API 验算结果差异较小。

2) 通过对比 4 种规范可以看出，从实用上看国标和美标 API 验算方法较简单直接，容易掌握，规范条例有针对性，更加适用于港口工程钢管桩内力验算。美标 AISC 主要针对建筑结构钢结构，部分规范条例术语不适用于港口工程钢结构。欧标钢管桩内力验算内容较详尽但是也更复杂，不易掌握，非特殊情况可不采用该验算体系。