

· 地基与基础 ·



欧标及 API 规范桩基承载力设计

吴哲丰, 郝风光

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 欧洲标准作为当前较新的设计标准应用逐渐广泛, 其在桩基设计上采用分项系数法取代了传统标准中采用的安全系数法。分项系数可选择多个路径, 并且可根据试桩情况, 调整分析系数的数值, 对于缺乏试桩的情况需对数值计算进行校正, 设计方法先进。API-RP2A 方法在桩基极限承载能力的计算上应用最为广泛。总结了几内亚力拓铁矿码头项目和几内亚阿联酋铝业码头项目中的设计经验, 介绍了将欧标与 API 规范相结合进行桩基承载力设计的方法, 并与国内 2012 版港口工程桩基规范进行了比较。

关键词: 桩基极限承载能力; 欧洲标准; API-RP2A 方法

中图分类号: U 656.1⁺34; TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)S1-0133-05

Evaluation of ultimate pile bearing capacity using Eurocode 7 and API-RP2A

WU Zhe-feng, HAO Feng-guang

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

Abstract: Eurocode, as a new standard, is more and more widely applied in international engineering projects. By introducing a partial factor methodology against the traditional safety factor methodology, it provides multiple design approaches with adjustment of partial factors based on pile test availability, and is considered an advanced code. API-RP2A provides a most widely used method for evaluating the ultimate pile bearing capacity. This paper presented an evaluation method for pile bearing capacity by utilizing a combination of Eurocode 7 and API-RP2A based on experiences from the Simandou Project and the Kamsar Bauxite Jetty Project in Guinea, and gives a comparison to the Chinese Code for *Pile Foundation of Harbor Engineering* (2012).

Keywords: ultimate pile bearing capacity; Eurocode; API-RP2A

1 欧标和 API 规范概况

欧标是由欧洲标准化委员会制定的一系列关于建筑设计、土木工程和建筑产品的欧洲规范, 已经逐步形成包括 10 卷 60 分册的完整配套的工程技术标准体系, 成为在工程建设领域中具有较大影响力的一套区域性国际标准。2010 年 3 月已经全面实施欧洲建筑和土木工程技术和相应的国家附件。欧标体系基本涵盖了所有土建工程领域(包括工民建、公路、铁路、水利水电、港口码头等), 与国内标准不同, 欧标偏重于大土木

工程的通用性和系统性知识, 偏重于理论、原理和设计概念的更新。

美国石油协会基于美国 AISC 钢结构设计规范, 综合考虑了大量工程设计原理和海洋石油开发经验发布了 API, 是国际上应用较为广泛的海上钢结构规范之一, 是海洋工程结构设计的必备规范。

具体到桩基承载力设计上, 欧标规定了设计体系、设计路径、设计组合、调整系数的选取, 而对于桩基承载力特征值的确定, 尤其是利用数

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 吴哲丰(1978—), 男, 高级工程师, 从事港口水工结构设计。

值求解桩基承载力特征值的方法则没有具体的规定，往往是采用国际上公认的方法来获取，并没有详细的规定。而 API 体系内的 API-RP2A 规范则详细规定了数值求解桩基承载力特征值的多种方法，其计算参数取值可以从多项土力学试验结果中获取，根据不同的土力学试验结果，可以选择不同的数值计算方法，实用性强。由于 API 具有强大的科研能力和海洋工程开发经验，其数值计算方法在海洋工程的领域具有权威性。

海外项目往往选址都在不发达地区，在项目的初期往往不具备对桩基进行静载荷试桩或者动载试桩的条件，根据土力学试验得到的土力学参数对桩基承载力特征值进行数值计算是不可避免的。同时，项目又要求设计必须满足欧标体系，因此将欧标的设计体系与 API-RP2A 的数值计算方法相结合则是一种较好的方法。

本文以几内亚力拓铁矿码头项目和几内亚铝业码头项目中的开口钢管桩直桩设计为例，介绍欧标和 API-RP2A 相结合进行桩基承载力计算的方法。

2 欧标基桩承载力设计路径

欧标中的 EC7^[1] 规定了桩基承载力的计算原则，根据规定，进行桩基承载力的计算可以有 3 个不同的设计路径进行，不同的欧洲国家可以按照各自国家附录的推荐选用不同的路径进行分析，不同路径可以选用不同的分项系数，通过这些分项系数，将作用(A)、抗力(R)、材料(M)的特征值转化为设计值。不同设计路径下的分项系数见表 1。

表 1 不同设计路径分项系数

桩类型	承受轴力的桩
设计路径 1	组合 1: $A_1^+ M_1^+ R_1$
	组合 2: $A_2^+ (M_1 \text{ 或 } M_2)^+ R_4$
设计路径 2	组合: $A_1^+ M_1^+ R_2$
设计路径 3	组合: $(A_1^* \text{ 或 } A_2^*)^+ M_2^+ R_3$

注：“+”表示组合使用，A 表示作用系数，M 表示材料系数，R 表示抗力系数；上标*表示作用由结构施加，上标+表示作用由土体施加，路径 1 需要同时验算 2 个组合。

欧标采用 3 种设计路径是对欧洲不同国家设计习惯的妥协，这样不同的国家可以采用不同的表达式与本国的国家附录相对应，不同设计路径的区别见表 2。

表 2 不同设计路径主要区别

桩类型	承受轴力的桩
设计路径 1	组合 1: 作用×系数
	组合 2: 抗力×系数
设计路径 2	组合: 作用×系数 抗力×系数
设计路径 3	组合: 作用(施加在结构)×系数材料特性×系数

注：路径 1 考虑将系数分别单独施加在作用上(组合 1)和抗力上(组合 2)独立验算；路径 2 考虑将系数同时施加在作用上和抗力上进行验算；路径 3 考虑将系数同时施加在结构作用上和材料特性上进行验算。

英国国家附录(UK National Annex to Eurocode 7)^[2] 推荐桩基承载力采用设计路径 1 进行计算，也就是说要分别对作用和抗力进行验算。而我国 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[3] 中的桩基承载力的验算采用分项系数法，同时在作用和抗力上施加分项系数，从计算理论上来说与设计路径 2 相同。

3 欧标分项系数选择

以几内亚力拓铁矿码头项目和几内亚铝业码头项目中的开口钢管桩直桩设计为例，在进行分项系数选择时，按照英国国家附录，推荐采用设计路径 1 进行计算，其具体表达式如下：路径 1：桩基承载力验算内容；组合 1: $A_1^+ M_1^+ R_1$ ；组合 2: $A_2^+ (M_1 \text{ 或 } M_2)^+ R_4$ 。其中，欧标和英国国家附录中对于作用分项系数 A_1 、 A_2 的规定见表 3。

表 3 作用分项系数 A_1 、 A_2

作用类型	类别	分项系数	欧标推荐值		英国国家附录值	
			A_1	A_2	A_1	A_2
永久作用	不利	$\gamma_{G,dst}$	1.35	1.00	1.35	1.00
	有利	$\gamma_{G,stb}$	1.0	1.0	1.0	1.0
可变作用	不利	$\gamma_{Q,dst}$	1.5	1.30	1.5	1.30
	有利	$\gamma_{Q,stb}$	0	0	0	0

土体、岩石等的特征值需要除以材料分项系数得到设计值，欧标和英国国家附录中对于材料分项系数 M_1 、 M_2 的规定见表 4。

表 4 材料分项系数 M_1 、 M_2

土体参数	分项系数	欧标推荐值		英国国家附录值	
		M_1	M_2	M_1	M_2
有效内摩擦角 $\tan\phi'$	γ'_ϕ	1.00	1.25	1.00	1.25
有效内聚力 c'	γ'_c	1.00	1.25	1.00	1.25
不排水抗剪强度 c_u	γ_{cu}	1.00	1.40	1.00	1.40
无侧限抗压强度 q_u	γ_{qu}	1.00	1.40	1.00	1.40
密度 ρ	Y_ρ	1.00	1.00	1.00	1.00

注: M_1 用于计算桩的抗力, M_2 用于计算土体产生的不利作用(负摩擦等)。

表 5 桩抗力系数 R_1 、 R_4

抗力(对打入桩)	分项系数	欧标推荐值		英国国家附录值		
		R_1	R_4	R_1	R_4 (无极限状态验证)	R_4 (有极限状态验证)
桩端阻力	γ_b	1.00	1.3	1.00	1.7	1.5
桩侧摩阻力	γ_s	1.00	1.3	1.00	1.5	1.3
桩总抗力(抗压)	γ_r	1.00	1.3	1.00	1.7	1.5
桩总抗力(抗拔)	$\gamma_{s,t}$ (拉)	1.25	1.6	1.00	2.0	1.7

注: R_4 经过验证后可取小值, 验证是指不少于总桩数 1% 的工程桩可达到 150% 的荷载或者 150% 变位未破坏, 或者在正常工作极限状态时不考虑变位的情况。

值得注意的是, 欧标的 R_4 对应的推荐值, 比英国国家附录的 R_4 推荐值明显偏低较多, 这是由于欧标中的 R_4 所对应的桩力特征值来源于桩的静载试验或者是桩试验所得到的特征值, 而不是来源于土的参数所进行的数值计算值, 欧标中的 R_4 对于计算值是不使用的, 这是采用欧标进行桩基承载力计算非常容易犯的错误。

当通过试验的方式得到桩基承载力特征值时, 桩力的试验值还需要除以协调系数 (correlation factors) ξ , 对于不同的试验类型, 对应不同的协调系数(表 6、7)。

对于不具备对桩基进行静载荷试桩或者动力检测试桩条件的的项目, 利用土力学参数对桩基承载力特征值进行数值计算是不可避免的。而在欧标中没有专门的规定, 这种情况下, 则应该参照国家附录对数值计算得到的基桩进行修正。如在表 5 中, 英国国家附录就针对该种情况对抗力分项系数进行了放大矫正, 使得修正后的桩基承载力能够对应原先的综合安全系数 (2.0 ~ 3.0) 的水准。

由于参考的项目没有来自于土体的不利参数, 因此 M_2 不参与计算。土体参数均选择 $M_1 = 1.0$, 即可以采用标准值。

根据计算或者试验得到的桩基承载力特征值(标准值)需要除以承载力分项系数才能得到设计值, 欧标和英国国家附录中对于抗力分项系数 R_1 、 R_4 的规定见表 5。

表 6 静载试验特征值矫正系数

ξ 对应试验数 n	ξ_1	ξ_2
1	1.40	1.40
2	1.30	1.20
3	1.20	1.05
4	1.10	1.00
≥ 5	1.00	1.00

注: ξ_1 对应试验测量的平均值, ξ_2 对应试验测量的最小值。

表 7 动力检测试验特征值矫正系数

ξ 对应试验数 n	ξ_5	ξ_6
≥ 2	1.60	1.50
≥ 5	1.50	1.35
≥ 10	1.45	1.30
≥ 15	1.42	1.25
≥ 20	1.40	1.25

注: 对于不同的动测试验, 根据是否做了信号矫正, 打桩公式是否输入桩顶测量边界等条件, 表中的矫正系数还要再乘以从 0.85 ~ 1.2 不等的模型系数(model factor)。 ξ_5 对应试验测量的平均值, ξ_6 对应试验测量的最小值。

以几内亚力拓铁矿码头项目和几内亚铝业码头项目中的开口钢管桩直桩设计为例, 由于工程区域缺乏试桩资料, 可认为无极限状态验证, 因此最终 R_4 的取值取为表 5 中的大值。

4 API-RP2A 数值计算方法

由于欧标和对应的国家附录中,并未规定桩基极限承载力的数值计算的方法,因此设计人员在选择计算公式时往往无所适从,国内的一整套桩基极限承载力的计算方法是基于国内的土工试验的基础上得到的,由于国内外的土工试验标准不尽相同,因此国内的方法在海外项目中往往得不到承认,给设计工作带来很大的困难。而 API-RP2A^[4]的计算方法,适用于海外绝大多数的土工试验,且得到广泛应用和承认,在海外项目中使用最为广泛。

开口钢管桩的总承载力计算分为桩侧摩阻力和桩端阻力两部分:

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p \quad (1)$$

式中: Q_f 为桩侧摩阻力(kN); Q_p 为桩端阻力(kN); f 为单位桩侧摩阻力(kPa); A_s 为桩侧面积(m^2); q 为单位桩端阻力(kPa); A_p 为桩端面积(m^2)。

4.1 砂性土的桩侧摩阻力计算

对于砂性土中的管桩,其桩侧任意一点的侧摩阻 f (kPa) 可按下式计算:

$$f = ac \quad (2)$$

式中: c 为该点处土体的不排水抗剪强度; a 为无量纲系数,可由下式决定:

$$\begin{cases} a = 0.5\psi^{-0.5} & \psi \leq 1.0 \\ a = 0.5\psi^{-0.25} & \psi > 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\psi = c/\rho'_0$, 为对应点处的摩擦角; ρ'_0 为该点处的有效土压力(kPa)。

4.2 砂性土的桩端阻力计算

$$Q = 9c \quad (4)$$

式中: c 为该点处土体的不排水抗剪强度。

4.3 黏性土的桩侧摩阻力计算

对于黏性土中的管桩,其桩侧任意一点的侧摩阻 f (kPa) 可按下式计算:

$$F = Kp_0 \tan \delta \quad (5)$$

式中: K 为横向土压力系数,不闭塞桩取 0.8,闭塞可取 1.0; p_0 为该点处有效土压力(kPa); δ 为桩土摩擦角,可查表 8 根据土体分类、疏密度取值。

对于较长的桩,考虑到侧摩阻的非线性增长,

对于某一种类的土,规定了其侧摩阻的限值,可查表 8 校核。

4.4 黏性土的桩端阻力值计算

$$q = p_0 N_q \quad (6)$$

式中: p_0 为桩端处有效土压力; N_q 为无量纲承载力系数,可查表 8 根据土体分类、疏密度取值。

表 8 API-RP2A 土体设计参数

土体疏密度	土体描述	桩土摩擦角/(°)	桩侧摩阻限值/kPa	N_q	桩端阻限值/MPa
非常松散	砂				
松散	砂-粉土	15	47.8	8	1.9
中密	粉土				
松散	砂				
中密	砂-粉土	20	67	12	2.9
密实	粉土				
中密	砂				
密实	砂-粉土	25	81.3	20	4.8
密实	砂				
非常密实	砂-粉土	30	95.7	40	9.6
密实	砾石				
非常密实	砂	35	114.8	50	12

4.5 闭塞效应系数的考虑

API-RP2A 可以考虑桩的闭塞效应,考虑了闭塞效应的桩,在计算竖向抗压承载力时,桩端面积可以按照整个桩的截面来考虑;对于没有闭塞的桩,在计算竖向抗压承载力时,桩端面积则按环形来考虑。而桩端是否形成闭塞,闭塞效应是多少,在 API-2A 中可以静力计算来确定。若桩内的土重力加上桩内侧的摩阻力,大于桩塞土体所受的桩端阻力,则认为桩端形成了闭塞,反之则未完全形成闭塞。

5 与我国 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》的比较

我国的《港口工程桩基规范》是在 1998 版规范的基础上经过修订完成的,设计采用以概率论为基础的极限状态设计,以可靠度指标度量桩基的可靠度,采用分项系数表达的极限状态设计表达式,其设计理念与欧标中的设计路径 2 基本相同。

《港口工程桩基规范》采用试桩和数值计算的桩抗力特征值也分别给出了抗力分项系数,有试

桩的抗力分项系数小, 这点也和欧标理念相同, 但是试桩情况下的抗力分项系数没有针对试验类型、试验组数、试验边界条件进行细致划分, 与欧标还存在一定的差距。

《港口工程桩基规范》对桩基承载力设计值的数值计算与 API-RP2A 的数值解法相比, 简单易用、操作性强、不需要对土的特性做细致的分析, 这点与国内岩土专业和结构专业的划分有关。而 API 规范则更多地依赖工程师对土的各种物理力学指标的掌握和理解, 对工程师的岩土方面的要求更高。

6 结语

1) 欧标进行桩基承载力计算有多个设计路径, 在进行设计时必须找到相对应的国家附录, 采用国家附录中推荐的计算路径进行承载力计算。

2) 欧标中桩基承载力的抗力系数均针对试桩得到的桩基承载力特征值, 其系数较小, 若桩基承载力特征值是由计算获得, 则不能采用欧标中

的抗力系数。必须要采用国家附录中的修正后的抗力系数, 才能保证安全。

3) 欧标中没有规定桩基承载力的数值计算方法, 设计时可以采用国际上权威的 API 方法进行数值计算。

4) 我国港工规范的桩基承载力设计路径与欧标的体系基本相同, 其表达形式与欧标中的设计路径 2 一致。

参考文献:

- [1] Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules (BS EN 1997-1: 2004) [S].
- [2] UK National Annex to Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules (NA to BS EN 1997-1: 2004) [S].
- [3] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [4] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design(API RP 2A-WSD), 21st Edition[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 119 页)

对推动行业逐步消除数据描述的混乱现象, 保证数据的准确性、一致性和有效性, 提高交通运输行业信息数据的生产、管理、使用和服务的效率和质量将发挥重要作用。

标准实施为交通运输行业在信息化建设与管理中全面实现信息共享和数据交换提供了必要的技术保障, 保证交通信息资源的高质量开发利用和多元信息的集成整合与数据标准一致, 实现在同一业务领域不同数据集、不同业务领域相关数据集之间的数据资源共享, 从而更好地实现转变管理方式, 提高管理效能、服务经济社会的目标, 达到“统一标准”和“一数一源”的信息共享目标, 并由此获取行业最佳数据利用的经济效益和社会效益。

4 结语

交通信息基础数据元系列标准经过“十二五”期间的制修订, 基本覆盖交通运输公路水路行业的主要业务领域, 将为“十三五”期交通运输行业部省两级开展信息化建设以及数据共享交换发挥基础标准支撑作用。

参考文献:

- [1] 方欣, 刘丽华, 金水高. 公共卫生数据元标准化研究进展[J]. 河南预防医学杂志, 2006, 17(3): 1.
- [2] 唐菁.《交通信息基础数据元 第 1 部分: 总则》编制说明[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2014.

(本文编辑 郭雪珍)