



国内外标准桩基础沉降控制指标及 计算方法对比

杨志远¹, 刘宁², 蔡伟²

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 桩基础作为承载能力高、适用范围广的深基础结构形式, 广泛应用于国内外港口水运工程中, 而桩基础沉降将引起上部结构的损坏或影响流动机械的正常使用, 因此需在桩基设计过程中开展沉降计算, 以保证桩基变形在结构安全和使用允许的限值以内。国内外标准及相关工程设计手册针对桩基础沉降控制指标及计算方法给出较多建议。在沉降控制指标方面, 中国标准规定较为详细; 在单桩沉降量计算方法方面, 国外标准对于桩身压缩性、土体弹性模量、泊松比等基础参数研究较多, 其线性理论公式具有较强的实用性。通过对比国内规范、欧洲 BS EN 规范及美国常用桩基设计手册等研究成果, 以中东某引桥工程为例开展桩基沉降计算, 总结提炼各类标准差异, 旨在为国内外水运项目桩基础设计过程中的沉降控制及计算方法确定提供参考。

关键词: 桩基础; 沉降控制指标; 沉降计算; 国内外标准

中图分类号: U655.54+4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0073-06

Comparison of criteria and calculation method for pile foundation settlement by domestic and international standards

YANG Zhiyuan¹, LIU Ning², CAI Wei²

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: As a deep foundation structure with high bearing capacity and wide application range, pile foundation is widely used in domestic and foreign port and water transportation projects. However, settlement of pile foundation will cause damage to the superstructure or affect the normal use of mobile machinery, so settlement calculation should be carried out during design for pile foundation to ensure that the deformation of pile foundation is within the allowable limit of structural safety and normal serviceability. Domestic and foreign standards and related engineering design manuals provide many suggestions on the settlement criteria and calculation method for pile foundation. In terms of settlement criteria, Chinese standards have more detailed provisions. In terms of calculation method of single pile settlement, foreign standards have more research on basic parameters such as pile compressibility, soil elastic modulus and Poisson's ratio, etc. Their linear theoretical formulas have more practicability. By comparing the results of the domestic pile foundation code, European BS EN code and the common pile foundation design manual in the United States, a pile foundation settlement calculation is carried out using a certain approach bridge project in the Middle East as an example. Various standard differences were summarized and extracted, aiming to provide reference for the settlement criteria and calculation method in the process of pile foundation design in domestic and foreign water transportation projects.

Keywords: pile foundation; settlement criteria; settlement calculation; domestic and foreign standard

收稿日期: 2023-12-16

作者简介: 杨志远 (1974—), 男, 高级工程师, 从事国内外港口、航道等工程项目管理工作。

桩基础的沉降受多种复杂因素的影响，涉及桩和地基所受的应力和弹/塑性变形，地基土的固结沉降，桩的形式和布置，施工或地基条件的变化等因素。除单桩的弹、塑性变形可用桩的静载荷方法准确求得之外，其他因素都需要根据建筑经验和部分研究成果综合确定^[1]。

港口工程中的桩基础一般应用于高桩承台，桩基沉降将引起上部结构的损坏或影响流动机械的正常使用等，如轨道梁下桩基沉降对梁的内力产生较大影响^[2]，需在设计时予以关注。国内 JTS 147-7—2022《水运工程桩基设计规范》^[3]针对桩基础沉降变形允许值及减少不均匀沉降对上部结构不利影响给出了定性建议，参照行业标准 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[4]给出不同类型桩基最终沉降量计算方法。国外标准针对桩基础沉降也开展了大量研究，提出基于理论分析和对比现场原位测试后的沉降控制指标和计算方法。

随着中国企业参与海外综合基础设施建设的深入，水运行业对于桩基结构横向及竖向变形的控制要求越来越高，因此桩基础沉降设计问题也逐渐增多，工程设计人员掌握国内外桩基础沉降计算方法的必要性逐步显现。本文通过整理、对比国内外行业标准及相关文献的桩基础沉降控制

指标及计算方法，旨在为国内外水运工程桩基础设计提供参考。

1 沉降控制指标

1.1 国内标准

根据国内标准《水运工程桩基设计规范》，桩基沉降变形允许值应根据上部结构对桩基沉降变形的适应能力和使用要求确定，包括结构使用允许的变形值和结构安全所允许的变形值。由于码头结构的容许变形统计资料较少，规范尚未给出定量标准，但针对减小桩基结构不均匀沉降对结构的不利影响已有相关规定。同一桩台基桩的桩端宜处于同一土层，且桩端高程宜接近。同一承台的基桩不宜以软硬程度相差过大的土层作为持力层。相同结构同时采用嵌岩桩和非嵌岩桩时，应进行论证并采取必要的结构措施。

国内标准《建筑桩基技术规范》对桩基沉降变形允许值做出相关规定，可作为港口工程相关结构设计的参考，见表 1。桩基沉降变形可用沉降量、整体倾斜、局部倾斜等指标表示。计算桩基沉降变形时，应根据不同情况选取不同指标控制。如由于土层厚度与性质不均匀、荷载差异等因素引起的地基沉降变形，给出了排架结构桩基沉降的允许值。

表 1 桩基沉降变形允许值

砌体承重结构基础的局部倾斜率	单层排架结构(桩距为 6 m)桩基的沉降量/mm	桥式吊车轨面的倾斜率(按不调整轨道考虑)		体型简单的剪力墙结构桩基最大沉降量/mm
		纵向	横向	
0.002	120	0.004	0.003	200

1.2 国外标准

欧洲规范 *Eurocode 7-Geotechnical design- Part 1: General Rules*^[5] 中指出，通常按照 ULS (ultimate limit state, 承载能力极限状态) 设计方法 1 设计的单桩沉降量较小，为桩径的 0.5%~1.0%。另外考虑一些因桩身及持力层土体压缩等带来的沉降。虽然该沉降不会对单桩结构设计产生较大影响，但对于群桩结构需要进行复核。表 2 给出了单桩沉降的控制值。

表 2 BS EN 规范单桩沉降指标

单桩类型	荷载作用下沉降量	地质破坏情况下沉降量
仅靠侧阻承压	-	0.5%~1.0%桩径
仅靠端阻承压	-	10%~15%桩径
仅靠侧阻承压(桩身可压缩)	0.5%桩径+桩身变形	-
侧阻端阻同时考虑(桩身可压缩)	1.0%桩径+桩身变形	-
抗拉桩	0.5%桩径+结构应变	-

美国地质工程设计手册 *Geotechnical Engineering Handbook*^[6]中提到,大部分情况下桩基础的沉降应控制在 1/2 英寸(12.7 mm)。有些因素可能导致桩基沉降超过 1/2 英寸,包括 1) 主要依靠端阻承担上部荷载的群桩结构; 2) 桩端处土体为高压缩性; 3) 桩基础受到较大的下拉力。因此需要在桩基设计时充分考虑沉降等因素。

2 桩基础沉降计算方法

2.1 国内标准

根据国内标准《水运工程桩基设计规范》,桩基的最终沉降量由桩的泥面以上桩身压缩变形量和桩的入土部分最终沉降量组成,其中桩的泥面以上桩身压缩变形量按受压构件的弹性形变计算。规范针对桩间距符合单桩条件的桩基入土部分最终沉降量计算给出了建议方法,对于承台底地基土不分担荷载的桩基础,将沉降计算点水平影响范围内各基桩对应力计算点产生的附加应力叠加,采用单向压缩分层总和法计算土层的沉降,并计入桩身压缩量,按下式计算:

$$s = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + \xi_e \frac{Q_j l_j}{E_p A_{ps}} \quad (1)$$

式中: s 为桩基入土部分最终沉降量,mm; ψ 为桩基沉降计算经验系数,无当地经验时,可取 1.0; σ_{zi} 为应力计算点桩端平面以下第 i 层土 1/2 厚度处产生的附加竖向应力之和,kPa; Δz_i 为第 i 土层厚度; E_{si} 为计算土层的压缩模量,MPa; ξ_e 为桩身压缩系数。对端承桩取 1.0,对摩擦桩,当 $l/d \leq 30$ 时,取 2/3,当 $l/d \geq 50$ 时取 0.5,介于两者之间可线性插值(l/d 为桩入土部分长度与桩径之比); Q_j 为荷载效应准永久组合作用下的桩顶附加荷载,kN; l_j 为入土部分桩长,m; A_{ps} 为桩身截面面积,m²; E_p 为桩身弹性模量,MPa。

对于桩中心距不大于 6 倍桩径的群桩结构,桩基最终沉降量取桩端以下沉降量,可采用按等效作用面计算的分层总和法,按照等效作用面位于桩端平面,等效作用面积为桩台投影面积,等

效作用附加应力近似取桩台底平均附加应力的假定进行桩基础沉降计算。

《工程地质手册》针对墩式结构下群桩的沉降计算推荐了几种实用方法,其中假设群桩桩基为等效深基础,深基础荷载面在桩端处,不考虑桩侧摩阻力的应力扩散作用,并假设荷载面积为由桩群外侧边线所围成的面积,进而采用计算天然浅基础的方法计算群桩的沉降,压缩层的下边界在附加应力与土自重应力之比的 0.2 倍处。考虑桩长对沉降计算的折减,取一定的折减系数 m ,见表 3。

表 3 沉降计算经验系数

桩尖入土深度/m	<20	30	40	50
沉降计算经验系数 m	1.10	0.90	0.70	0.60

2.2 国外标准

国际工程中应用广泛的 *Foundation Analysis and Design*^[7]针对桩基沉降给出了估算方法。桩基础总沉降量 ΔH_p 包含轴向沉降 ΔH_a 及桩端沉降 ΔH_{pt} 两部分:

$$\Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt} \quad (2)$$

轴向沉降计算时,可计算每段长度为 Δl 的桩的平均轴向作用力 P_{av} ,平均横断面积 A_{av} 和从桩端面到桩尖的桩身弹性模量 E_p ,得到每段沉降量 $\Delta H_{s,s}$ 为:

$$\Delta H_{s,s} = \frac{P_{av} \Delta L}{A_{av} E_p} \quad (3)$$

并将几个值求和得到轴向总沉降量:

$$\Delta H_a = \sum \Delta H_{s,s} \quad (4)$$

桩端沉降可按照下式计算:

$$\Delta H_{pt} = \Delta q D \frac{1-\mu^2}{E_s} m I_s I_F F_1 \quad (5)$$

式中: $m I_s$ 为形状系数,取 1.0; I_F 为埋入系数,当 $L/D \leq 5$ 时, $I_F = 0.55$,当 $L/D > 5$ 时, $I_F = 0.5$; D 为桩端直径; μ 为泊松比,取 0.35; Δq 为桩端承载力,取桩荷载与桩端面积之比; E_s 为桩以下土体应力-应变模量。 F_1 为折减系数,若轴向侧阻力减去桩端荷载 $P_p \leq 0$,取 0.25,若仅靠桩端承载,则取 0.75(但通常有部分桩侧阻力),其他取 0.50。

美国标准 *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*^[8] 针对群桩结构下的沉降计算, 推荐采用桩端面为等效基底的实体基础沉降计算方法, 与国内规范相似。

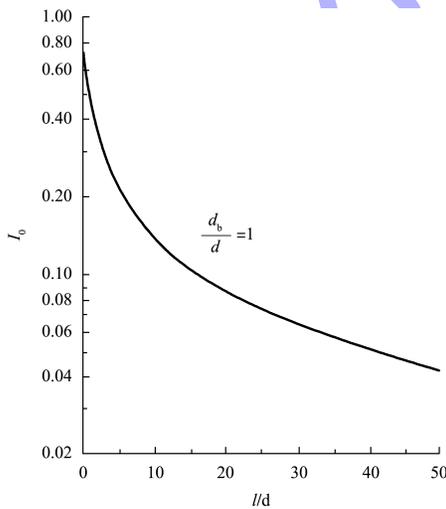
Pile Foundations Analysis and Design^[9] 介绍了 Poulos 计算单桩或群桩沉降的方法。该方法认为在桩基沉降计算中, 地基土的弹性模量 E 和泊松比 μ 是两个重要的土体变形参数, 结合弹性理论以及对比原位测试结果进行修正, 可以得到接近实际情况的单桩或群桩的荷载-沉降曲线^[10]。本文介绍该方法中当外加荷载 R_s 未达到桩极限侧摩阻力时的线性沉降 s 计算公式为:

$$s = \frac{IR_s}{dE_s} \quad (6)$$

$$I = I_0 R_k R_b R_v \quad (7)$$

式中: I 为沉降影响系数; E_s 为桩周土的割线模量, MPa; d 为桩径, m; R_s 为桩基础上部荷载, N; I_0 为主沉降影响系数; R_k 为桩身压缩性修正系数; R_b 为桩端土刚度修正系数; R_v 为土体泊松比修正系数。主沉降影响系数 I_0 与桩长 l 和桩径 d 相关, 其函数关系见图 1。

桩端压缩性修正系数 R_k 和桩刚度系数 K 成一定的函数关系。不同的桩长桩径比 (l/d) 对应不同的函数关系, 见图 2。



注: d_b 为桩尖直径。

图 1 I_0 与 l/d 函数关系

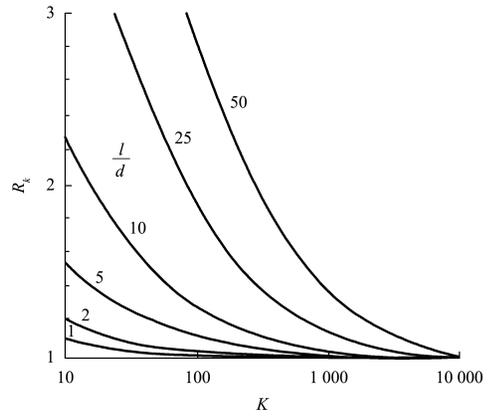


图 2 不同桩长桩径比时 R_k 与 K 函数关系

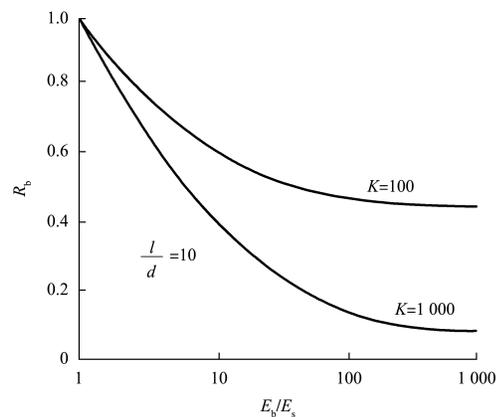
桩刚度系数 K 由下式定义:

$$K = \frac{E_p R_a}{E_s} \quad (8)$$

式中: E_p 为桩身材料弹性模量, MPa; E_s 为桩周土割线模量平均值, MPa; R_a 为桩截面面积和桩侧表面积之比。

桩端土刚度修正系数 R_b 和桩身弹性模量与桩端土割线模量之比 (E_p/E_s) 成一定的函数关系。不同的 K 和不同的 l/d 对应不同的函数关系, 见图 3。

R_v 用于考虑桩周土泊松比对桩身沉降的影响。假设桩周土的弹性模量为恒定值, 则桩周土泊松比 ν_s 越小, R_v 越小, 对沉降的折减越大。 R_v 和 ν_s 成一定的函数关系, 不同的 K 对应不同的函数关系, 见图 4。



a) $l/d=10$

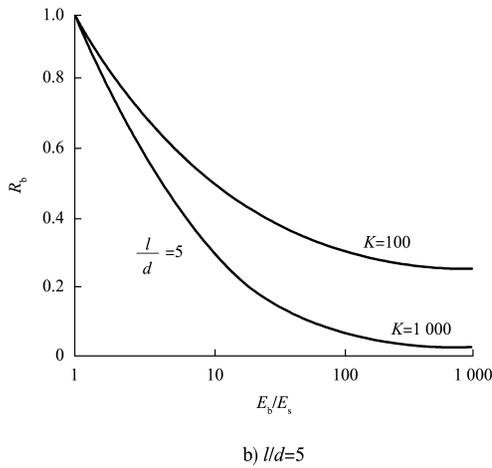


图3 R_b 与 E_b/E_s 函数关系

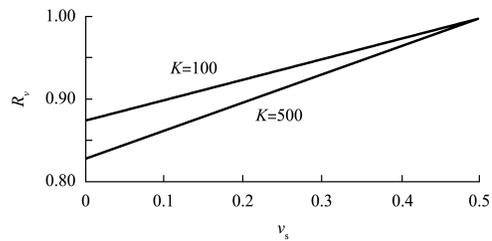


图4 R_b 与 ν_s 函数关系

3 国内外桩基沉降相关规定对比

针对桩基沉降计算,以中东某人工岛工程引桥桩基为例,对比不同方法的计算结果。该引桥结构(图5)为已有陆堤和新建人工岛的连接通道,引桥总长330 m、宽14 m,共12个排架,每排3根桩。桩基采用打入钢管桩,桩径1.2 m、壁厚25 mm、桩长为24 m、轴向荷载4 978 kN。

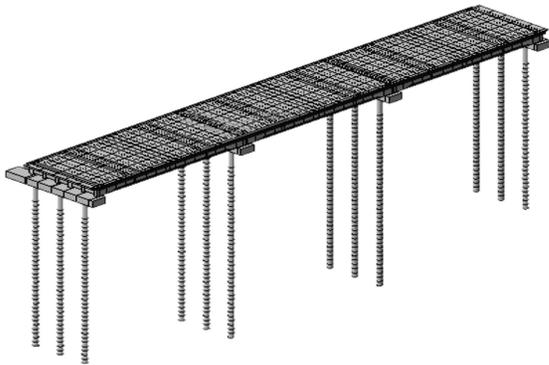


图5 引桥结构

根据岩土勘察报告,该区域表层存在强风化的砂岩,表层以下主要为中密及密实的砂性土,是主要可压缩层。基岩层为由砂岩、钙质岩和泥

岩等。土层划分和土体参数见表4,沉降计算结果见表5。

表4 土体物理力学参数

土层	深度/m	天然密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	桩土摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	锥尖阻力 q_c/MPa
强风化砂岩	0~<1.5	2.0	33	25.0
中密/密实砂土	1.5~<5.0	1.8	31	7.2
中等密实砂土	5.0~<17.8	1.8	27	7.0
密实砂	17.8~<24.9	1.8	31	10.0
中密/密实砂土	24.9~<33.0	1.8	30	10.0
强风化砂岩	33.0~40.0	2.0	33	25.0

表5 桩基沉降计算对比

计算方法	沉降控制指标/mm	单桩沉降量/mm
国内规范	120	2.76
Bowles 方法	12.7	0.57
Poulos 方法		5.60

对比上述国内外标准中桩基沉降相关规定以及工程实例计算结果可以看出:

1) 在桩基础沉降控制指标方面,中国标准规定较详细,且针对沉降控制指标的表述更加具体。水运工程针对控制桩基结构不均匀沉降给出相关规定,但由于码头的容许变形统计资料较少,相关控制指标尚未量化,需参考其他行业标准。

2) 在桩基础沉降计算方法方面,国内外标准对于群桩结构多以等效实体深基础等开展应力计算,计算方法为分层总加法;针对单桩沉降计算,国外标准对桩身压缩性、土体弹性模量、泊松比等基础参数研究较多,考虑桩身和桩端的沉降变形,其线性理论公式具有较强的实用性。计算结果显示在相同条件下国外标准 Poulos 方法较为保守。

4 结论

1) 基于大量工程实践经验,国内外对于桩基结构使用期的沉降控制要求逐渐严格,因此在水运工程桩基础设计过程中,开展沉降计算以及采取必要的沉降控制措施是必要的。

2) 国内外标准规范针对桩基础沉降控制指标均给出一定的建议,需要在设计期结合地质和桩基类型识别并选用适合的方法,施工后及时开展

现场试验等进行验证,单桩结构可通过静载荷试验等原位测试方法开展沉降变形允许值研究。

3) 对于桩基础沉降计算方法的研究,国外标准是在理论分析和现场原位试验等验证的基础上,综合考虑桩及土体特性,公式相对简便,在国际工程设计中具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

[2] 黄向平, 莫若瑜. 软土地基上桩基轨道梁的沉降控制[J]. 水运工程, 2018(6): 274-278.

[3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[5] European Committee for Standardization. Eurocode 7- Geotechnical design- Part 1: General Rules[S]. London: UK. Standards Policy and Strategy Committee, 2004.

[6] DAS B M. Geotechnical Engineering Handbook [S]. Florida: J. Ross Publishing, 2011.

[7] BOWLES J E. Foundation Analysis and Design [S]. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1997.

[8] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 8th ed. Washington, DC: HIS Markit, 2017.

[9] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundations Analysis and Design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.

[10] POULOS H G. Settlement of single piles in non-homogeneous soils [J]. Journal of geotechnical engineering division(ASCE), 1979, 105(5): 627-641.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 60 页)

2) 隔震技术能够通过增加结构自振周期及阻尼降低地震荷载,提高结构安全性,减少对于地震起控制作用的结构工程量,符合绿色环保要求。

3) 隔震装置与装配式码头相结合的结构方案具有快速施工及损坏后可及时更换的优点,保证码头在大震后尽快恢复功能。

参考文献:

[1] 广州大学, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.

[2] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2020.

[3] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 14—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[4] American Society of Civil Engineers. Seismic design of

piers and wharves: ASCE 61-14-2014 [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2014.

[5] 宋波, 李悦. 新型高桩码头的减震措施[J]. 中国港湾建设, 2006(6): 25-28.

[6] JEFFRY F, JOSIA I R, WIDJOJO A P, et al. Study of dimension variation effect on a batter piled wharf structure with seismic isolation systems [J]. Materials science forum, 2020, 987: 10-14.

[7] 李俊威, 马玉宏, 赵桂峰, 等. 隔震与非隔震高桩码头结构的 Pushover 对比分析[J]. 水运工程, 2022 (8): 45-51.

[8] 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展Ⅲ: 斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 16-28.

[9] 林学良, 王磊, 曹凯平, 等. 一体式预制桩帽构件在装配式高桩码头中的应用[J]. 水运工程, 2023 (5): 17-21, 54.

(本文编辑 王传瑜)