

中欧（新加坡）规范桩基竖向抗压承载力计算方法对比

张培印

（中国水电基础局有限公司，天津 301700）

摘要：欧洲岩土设计规范已正式在新加坡推广并取代英国规范，其核心是3种设计路径，根据各国家情况自行选择其一或多种使用；新加坡规范指明采用设计路径一。介绍了新加坡桩基设计时分项系数的选择，对比分析中国、新加坡桩基竖向抗压承载力计算方法；以某工程试验桩为例，说明新加坡桩基设计方法与国内规范设计方法的差异，为海外项目桩基设计与施工提供借鉴和参考。

关键词：欧洲规范；设计路径；对比分析；国内规范；桩基；抗压承载力。

中图分类号：TU91

文献标识码：A

文章编号：2096-7195(2021)03-0211-04

Calculation methods comparison of pile vertical compressive bearing capacity in China and Singapore design codes

ZHANG Pei-yin

(Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: The European geotechnical design code has been officially promoted in Singapore and replaced the British code. Its core is three design approaches, one or two can be selected according to the situation of each country. The Singapore Code specifies the use of Design Approach 1. The selection of division coefficient for pile foundation design in Singapore is introduced, and the calculation methods of vertical compressive bearing capacity of pile foundation in China and Singapore are compared and analyzed. Taking a project test piles as an example, the difference between Singapore pile foundation design method and the one in domestic specification is illustrated, which can provide reference for overseas project in pile foundation design and construction.

Key words: Euro-code; design approach; compared; domestic specification; pile foundation; compressive capacity

0 引言

随着中国企业“走出去”战略的逐步实施，中国建筑企业在全中国范围内的业务量逐步提升；不同地区都有各自适用的规范条文，在亚洲，尤其是新加坡自2015年以来建筑设计规范逐步由英国标准转为欧洲规范，即由BS EN1997-1:2004、BS EN1997-2:2007分别转为EN1997-1、EN1997-2。其中，EN1997-1为欧洲规范第7卷岩土工程设计部分，其设计原理秉承欧洲规范的主要设计思想，即强调极限状态设计，指定在设计中要区分出承载力极限状态与正常使用极限状态^[1]。基于岩土设计本身的复杂性，并考虑各个国家地质、气候、经济条

件等具体情况，发行各国家附录（NA），具体到桩基承载力设计上，又有不同的设计方法、设计路径、设计组合以及调整系数、模型系数可供选取^[2]。

EN1997-1通过采用不同设计作用效应、设计抗力表达式组合及引进不同分项系数的方式，提出了3种设计路径（Design Approach），分别被称为DA-1、DA-2和DA-3。DA-1对荷载作用或抗力作用分项系数，DA-2对荷载作用和抗力作用分项系数，DA-3对结构作用和材料参数作用分项系数。选择何种设计途径是由相关国家自行决定的^[3]，并在各国家附录中明确规定。新加坡桩基规范指明采用路径一进行设计。中方工程设计与施工人员往往对国标《建筑桩基技术规范》（下文简称“桩规”）

较为熟悉,开展海外桩基工程不可避免地要理解并接受欧洲标准与国标的差异,需要分析国内外桩基设计中存在差异的原因。

1 新加坡桩基设计

1.1 设计路径及分项系数

与我国标准不同的是,欧洲规范采用以概率理论为基础、按分项系数表达的极限状态设计方法。根据规定,新加坡选取设计路径一进行桩基设计^[4],作用(A)、抗力(R)与材料(M)通过不同的分项系数组合,在路径一中形成两种组合方式:组合一 DA1-C1 (Design approach 1, combination 1) 与组合二 DA1-C2 (Design approach 1, combination 2),见表 1。

表 1 设计路径一两种组合方式
Table 1 Combinations under DA-1

类型	作用组合
组合一	A1 '+' M1 '+' R1
组合二	A2 '+' M1 或 M2 '+' R4

表中, A1 为作用分项系数,取 A1 组值; M1 为材料分项系数,取 M1 组值; R1 为抗力,取 R1 组值,依此类推。

作用分项系数见表 2。

表 2 作用分项系数
Table 2 Partial load factor

类型	类别	组合一		组合二	
		作用系数	抗力系数	作用系数	抗力系数
作用	永久	1.35	—	1.00	—
	可变	1.50	—	1.30	—
抗力	侧阻力	—	1.00	—	1.40
	端阻力	—	1.00	—	1.70

欧洲规范鼓励通过静载荷试桩得到特征值,对利用数值求解桩基承载力特征值,没有具体规定;若通过数值求解承载力,应当考虑计算模型的系统性错误或呈现一定范围的不确定性,引入一个大于 1 的模型系数(model factor)来调整抗力系数^[5],对计算结果进行修正,以保证计算结果的精度或安全性。模型系数在国家附录中有规定,该系数既可施加到作用效应上,也可施加到抗力项上;欧洲规范推荐值为 1.4,新加坡通常采用 1.35。

1.2 抗压承载力设计值计算公式

根据 1.1 节描述,新加坡规范桩基抗压承载力

设计值计算公式为:

$$R_{c;d} = R_{s;d} + R_{b;d} \quad (1)$$

$$R_{s;d} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_{R;d}\gamma_s} \quad (2)$$

$$R_{b;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_{R;d}\gamma_b} \quad (3)$$

$$R_{s;k} = \sum A_{s;i} \times q_{s;i,k} \quad (4)$$

$$R_{b;k} = A_b \times q_{b,k} \quad (5)$$

式中: $R_{c;d}$ 为桩基竖向承载力设计值; $R_{s;d}$ 为桩侧抗力设计值,可视为桩侧抗力; $R_{b;d}$ 为桩端抗力设计值,可视为桩端抗力; $R_{s;k}$ 为桩侧阻力特征值; $R_{b;k}$ 为桩端阻力特征值; $\gamma_{R;d}$ 为模型系数; γ_s 为桩侧阻力分项系数; γ_b 为桩端阻力分项系数; $q_{s;i,k}$ 为第 i 层土单位面积桩侧阻力标准值; $q_{b,k}$ 为桩端阻力标准值; $A_{s;i}$ 为第 i 层土桩身面积; A_b 为桩端面积。值得注意的是,欧标中的承载力设计值,是极限状态承载力的概念。从数值上讲, $R_{s;k}$ 与 $R_{b;k}$ 本身分别是桩侧与桩端阻力的极限值,除以一个接近 2 的组合系数后即变为设计值;国标“桩规”中承载力特征值也可看作由桩侧承载力特征值与桩端承载力特征值之和,见公式(9),只是这里的特征值是由桩侧、桩端极限值除以安全系数 2 所得,从数值上看,两个规范里的特征值约相差 1 倍,即欧标中的特征值大于“桩规”特征值。换言之,“桩规”中的承载力特征值 R_a 可认为是欧标中的承载力设计值 $R_{c;d}$ 。

2 欧标、国标桩基设计的联系与对比

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[6],单桩竖向抗压承载力的设计方法为综合安全系数法,估算桩基竖向极限承载力标准值如下式:

$$Q_{u;k} = Q_{s;k} + Q_{b;k} \quad (6)$$

$$Q_{s;k} = \sum A_{s;i} \times q_{s;i,k} \quad (7)$$

$$Q_{b;k} = A_p \times q_{b,k} \quad (8)$$

$$R_a = \frac{Q_{u;k}}{K} = \frac{Q_{s;k}}{K} + \frac{Q_{b;k}}{K} \quad (9)$$

可以认为:

$$R_{s;d} = \frac{Q_{s;k}}{K} \quad (10)$$

$$R_{b;d} = \frac{Q_{b;k}}{K} \quad (11)$$

式中: $Q_{u;k}$ 为竖向极限承载力标准值; $Q_{s;k}$ 为桩侧极限承载力标准值; $Q_{p;k}$ 为桩端极限承载力标准值; $q_{si;k}$ 为第 i 层土单位面积桩侧阻力标准值; q_{bk} 为桩端阻力标准值; A_{si} 为第 i 层土桩身面积; A_b 为桩端面积; K 为综合安全系数; R_a 为竖向承载力特征值, 内涵同欧标中的桩基承载力设计值 $R_{c;d}$ 。

安全系数综合涵盖了诸多不确定因素, 如地质条件、土体性能、施工因素等, 极限承载力标准值除以安全系数 K 得到承载力特征值; 该方法没有考虑确定桩极限承载力方法的可靠性, 不区分桩侧、桩端达到极限状态的先后顺序, 这显然是值得商榷的。

3 计算实例

以新加坡大士污水处理厂 C3C 桩基项目某试验桩设计为例, 项目地质勘察结果表明, 自上而下土层划分为: ①砂质填土、②海相沉积黏土、③全风化砂岩、④强风化砂岩、⑤中风化砂岩。试桩时在护筒外侧涂抹沥青层以消除填土与海相黏土的桩侧摩阻力。勘察报告给出的各土层标贯值见表 3。

表 3 各土层标贯值 (SPT)

Table 3 Standard penetration value of each soil layer

土层类别	埋深/m	标贯值	侧阻力	端阻力
			标准值/ kPa	标准值/ kPa
填土	0~17	22	涂层	—
海相沉积黏土	17~20.5	1	涂层	—
砂岩残积土	20.5~29.5	35	70	—
全风化砂岩	29.5~36.5	100	200	—
强风化砂岩	36.5~38.5	100	200	—
中风化砂岩	38.5~39.5	—	350	6 000

根据国内规范及欧洲规范计算结果见表 4。

从表 4 计算结果可以看出, EN1997-1 两种组合下计算出的桩总承载力相差较大, 这是因为两种组合对应的抗力分项系数不同, 且由 DA1-C2 控制设计。欧洲规范考虑了桩侧与桩端位移的不同步性,

也就是桩侧、桩端承载力发挥的不同步性, 分别赋予不同的抗力分项系数。国标计算的桩承载力与 DA1-C2 计算结果相差不多, 主要是因为欧洲规范中引入了模型系数, 使得修正后的桩侧承载力抗力系数达到 1.89, 桩端抗力系数达到 2.295, 综合平均系数为 2.01, 这与国标中的安全系数 K 十分接近。

表 4 承载力设计值

Table 4 Design value of bearing capacity

规范	桩侧抗力 $R_{s;d}/kN$	桩端抗力 $R_{b;d}/kN$	总承载力 $R_{c;d}/kN$
JGJ 94—2008	4 367	2 356	6 723
EN1997-1 (DA1-C1)	6 469	3 491	9 960
EN1997-1 (DA1-C2)	4 621	2 053	6 674

4 结 论

《建筑桩基技术规范》与 EN1997-1 关于极限承载力计算值的计算方法是相同的, 均由侧阻力与端阻力极限计算值组成; 尽管中、欧(新加坡)规范从设计理论及思路上存在差异, 但是由于抗力分项系数的组合作用, 其国标承载力特征值与欧标(新加坡)承载力设计值计算结果相差不多; 欧洲规范考虑了桩侧、桩端阻力发挥的不同步性, 国标没有考虑这一过程。

参考文献

[1] Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules. BS EN 1997-1. 2004.

[2] 吴哲丰. 欧标及 API 规范桩基承载力设计[J]. 水运工程, 2016(S1): 133-137.

WU Zhe-feng. Evaluation of ultimate pile bearing capacity using Eurocode 7 and API-RP2A[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(S1): 133-137.

[3] 陈立宏. 欧洲岩土工程设计规范 Eurocode7 简介[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 135-138.

CHEN Li-hong. Introduction to geotechnical design code: Eurocode 7[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 135-138.

[4] Singapore National Annex to Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules. NA to SS EN 1997-1: 2010.

[5] 蔡伟, 王鹏飞. 欧标及常用美标打入桩桩基承载力计

算对比[J]. 水运工程, 2018, 547(10): 227-232.

CAI Wei, WANG Peng-fei. Calculation comparison for driven pile bearing capacity between Europe code and the US codes[J]. Port & Waterway Engineering, 2018, 547(10):

227-232.

[6] 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.

【简 讯】

中国土木工程学会 2021 年学术年会会议通知（一号通知）

中国土木工程学会学术年会是紧密围绕国家发展战略，聚焦我国土木工程行业发展热点的前瞻性、基础性、应用性的高端学术交流活动，具有很强的科技引领与示范作用，是我国土木工程行业最具品牌影响力的学术活动。

学会 2021 年学术年会将在湖南长沙召开，欢迎中国土木工程学会会员、业内专家学者、以及广大科技工作者踊跃参加，共同探讨城市更新与土木工程高质量发展事宜，现将有关事项通知如下：

会议主题与内容：

今年学术年会主题为“城市更新与土木工程高质量发展”，顺应了时代发展要求，会议内容涵盖城市更新、工业化、数字化、智能化等新理论与新实践，具体内容包括：绿色低碳建设、“后疫情时代”城市更新、“碳达峰、碳中和”健康建筑、绿色建造、数字建造、韧性城市、智慧城市、智能交通、数字市政、现代桥隧、地下空间高效开发与利用、城市防灾减灾、土木工程高质量发展等。

会议时间与地点：

会议时间：2021 年 9 月（暂定）

会议地点：湖南长沙

论文征集与出版：

本届学术年会将广泛征集近年来未在国内外刊物或论文集上发表过的与会议主题相关的论文，

投稿以电子邮件方式发送至会务组指定邮箱，所投稿件经专家审核后收录到《年会论文集》，并由中国建筑工业出版社出版，优秀论文将推荐至《土木工程学报》（增刊），经学报审稿通过后发表。

欢迎广大作者踊跃投稿，来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail 邮箱及联系方式。论文投稿格式与《土木工程学报》要求一致。

论文投稿指定邮箱：cces2021@163.com。

重要日期：

2021 年 5 月 1 日，开始接受论文投稿

2021 年 7 月 10 日，论文全文投稿截止

2021 年 8 月 1 日前，通知论文是否录用，并发出论文修改通知

2021 年 9 月（暂定），会议召开

参会报名：

参会注册报名，详见学术年会二号通知

会务组联系方式：

中国建筑第五工程局有限公司

联系人：蒋婧、邹友清

联系电话：0731-85699928

学会联系人：李丹、包雪松、孙志勇、张洁

联系电话：010-58934710、58933071

学会网址：www.cces.net.cn