

引用本文:霍知亮,孙立强,郎瑞卿,等.基于美国标准的桩基竖向承载力计算分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):25-32.

HUO Zhi-liang, SUN Li-qiang, LANG Rui-qing, et al. Analysis of Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation Based on American Standard [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 25-32.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08046

基于美国标准的桩基竖向承载力计算分析

霍知亮^{1,2}, 孙立强¹, 郎瑞卿³, 于长一⁴, 牛增祥⁵

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津市市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300051;
3. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 4. 中交天津港湾工程
研究院有限公司, 天津 300222; 5. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100071)

摘要:为了进一步提高中国海外项目质量,阐述了美国国家公路与运输协会桥梁设计规范 AASHTO LRFD 方法和基于静力触探试验的 LCPC 桩基础承载力计算方法,对比分析了中国标准与美国标准桩基承载力设计方法的异同。根据海外某工程的计算示例和对比分析,得到了不同桩基竖向承载力计算方法的结果及其规律。结果表明:AASHTO LRFD 法和基于静力触探试验的 LCPC 法计算的桩基承载力较为接近;《公路桥涵地基与基础设计规范》由于其桩摩阻力标准值较小,桩端在砂性土中承载力容许值存在限制等因素的影响,其计算得出的桩侧摩阻力和桩端阻力均较小;采用 AASHTO LRFD 方法时,地下水位埋深和标准贯入试验等原位测试结果对计算结果影响较大;基于美国标准的海外项目勘察侧重原位测试结果,在勘察外业工作中应重视其操作的标准性。

关键词:美国标准;桩基;静力触探试验;极限承载力

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)06-0025-08

Analysis of Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation Based on American Standard

HUO Zhi-liang^{1,2}, SUN Li-qiang¹, LANG Rui-qing³, YU Chang-yi⁴, NIU Zeng-xiang⁵

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300051, China; 3. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 5. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100071, China)

Abstract: In order to further improve the quality of China's overseas projects, the bearing capacity calculation methods of AASHTO LRFD method and LCPC method based on static cone penetration test were expounded. The similarities and differences of pile foundation bearing capacity design methods between Chinese standards and American standards were compared and analyzed. According to the calculation example and comparative analysis of an overseas project, the results of different pile foundation vertical bearing capacity calculation methods were obtained. The results show that the pile foundation bearing capacity calculated by AASHTO

收稿日期:2021-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52078336;52008286);天津市自然科学基金项目(19JCYBJC22100;19JCQNJC06900)

作者简介:霍知亮(1987-),男,天津市人,高级工程师,工学博士,E-mail:hzl_tmedi@126.com。

LRFD method and LCPC method based on static cone penetration test are close. Due to the small standard value of pile friction and the limitation of allowable value of pile end bearing capacity in sandy soil, the calculated pile side friction and end resistance are small based on *Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts*. Through the analysis, it is also obtained that the in-situ test results such as groundwater buried depth and standard penetration test have great influences on the calculation results by using AASHTO LRFD method. The overseas project geotechnical investigation based on American standard focuses on the in-situ test results, and attention should be paid to the standardization of its operation in the field work.

Key words: American standard; pile foundation; static cone penetration test; ultimate bearing capacity

0 引言

随着“一带一路”发展倡议的实施,中国企业凭借自身的优势承担着越来越多的海外项目。许多国家由于缺少本国规范,通常采用欧美规范进行勘察设计,美国标准体系在国际范围内广泛使用。在实际工作中,中国的工程设计人员对本国规范体系及技术要求比较了解,由于中美规范的体系构架和设计思路不同,在海外项目中应用美国标准常存在认识欠深刻、应用困难的情况。

对于桩的计算与设计而言,美国标准与中国标准差异较大。中国相关学者和技术人员针对此类问题已进行探讨并取得了相应的成果。缪林昌等^[1]针对中国、美国和欧盟规范进行了不同桩基设计计算方法的比较,分析得到了不同规范桩基静载试验结果的区别。孔友南等^[2]分析中、美(API规范)、欧、日规范对于桩基计算和设计的不同,提出设计工作中的要点。陈峰等^[3]结合某桥梁项目,基于美国桥梁设计手册进行了桩基承载力计算分析,并根据桩基静载试验进行结果验证。赵胤儒等^[4]以巴基斯坦某工程为例,阐述了中、美、巴在桥梁建设标准、建筑材料、桩基础承载力及设计原则、抗震和运营方面的设计要点并进行了对比分析。兰千钰等^[5]结合实际工程,对中欧规范中应用CPT法计算桩基承载力进行计算对比,得出在某些情况下,中国规范相对保守的结论。由上可知,现有的研究成果以工程案例为主,较少系统性总结美国标准、中国标准在桩基竖向承载力设计方法方面的差异。

本文阐述了美国国家公路与运输协会(AASHTO)桥梁设计规范《Bridge Design Specifications》^[6](简称AASHTO LRFD)和基于静力触探试验的桩基础承载力计算方法,并根据算例分析了不同方法得出的单桩承载力及其规律,研究成果可为相关人

员提供借鉴。

1 AASHTO LRFD 桩承载力计算

1.1 设计方法

AASHTO LRFD采用荷载-抗力系数法设计,结构应该满足以下4种极限状态。

(1)使用极限状态(Service Limit State)。使用极限状态为正常使用条件下规定变形、裂缝等数值的要求。

(2)疲劳与脆裂极限状态(Fatigue and Fracture Limit State)。疲劳极限状态为假定的单辆设计货车在一定作用次数所引起应力幅的要求。脆裂极限状态为AASHTO LRFD相关材料的韧性要求。

(3)强度极限状态(Strength Limit State)。强度极限状态为设计使用年限内,规定桥梁结构可以抵抗具有统计意义的荷载,从而确保相应结构构件的强度和稳定性。

(4)极端事件状态(Extreme Event Limit State)。确保在冲刷条件下桥梁受到强烈地震、洪水冲击或船舶、车辆或浮冰撞击时仍能保持完好。

对于每种极限状态都应满足

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \varphi R_n = R_r \quad (1)$$

式中: R_r 为桩承载力; γ_i 为荷载系数; φ 为抗力系数; η_i 为荷载修正系数, $\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0.95$; η_D 为延性系数,对于非延性构件取1.05,常规设计取1.0,延性构件取0.95; η_R 为超静定系数,对于静定结构取1.05,常规超静定取1.0,特殊超静定结构取0.95; η_I 为运营重要性系数,对于重要桥梁取1.05,一般桥梁取1.0,不重要桥梁取0.95; Q_i 为作用的效应值; R_n 为抗力标准值; R_r 为抗力。

1.2 单桩承载力计算

根据AASHTO LRFD, R_r 可按式(2)计算。

$$R_r = \varphi R_n = \varphi_{qp} R_p + \varphi_{qs} R_s \quad (2)$$

$$R_p=q_pA_p$$

(3)

$$R_s=q_sA_s$$

(4)

式中: R_p 为桩端承载力极限值; R_s 为桩侧承载力极限值; φ_{qp} 为桩端抗力系数,依据 AASHTO LRFD,黏性土取 0.4,砂性土取 0.5; φ_{qs} 为桩侧抗力系数,依据 AASHTO LRFD,黏性土取 0.45,砂性土取 0.55; q_p 为桩端的单位极限承载力; q_s 为桩侧极限摩阻力; A_p 为桩端截面面积; A_s 为桩侧面积。

(1)黏性土

黏性土中不排水荷载条件下,采用 α 法确定钻孔灌注桩单位面积极限侧摩阻力 q_s ,如式(5)所示。

$$q_s=\alpha S_u$$

(5)

式中: S_u 为黏性土的不排水抗剪强度; p_a 为大气压力; α 为黏聚系数,当 $S_u/p_a<1.5$ 时, $\alpha=0.55$;当 $1.5\leq S_u/p_a\leq 2.5$ 时, $\alpha=0.55-0.1(S_u/p_a-1.5)$ 。

对于黏性土中轴向受压的钻孔灌注桩,桩端的单位极限承载力计算公式为

$$q_p=N_cS_u\leq 3\,828\text{ kPa}$$

(6)

$$N_c=6(1+0.2Z/D)\leq 9$$

(7)

式中: N_c 为承载力系数; Z 为钻孔灌注桩桩端深度; D 为桩基础直径。

(2)无黏性土

无黏性土中,采用 β 法确定桩单位面积极限侧摩阻力 q_s ,即

$$q_s=\beta\sigma'_v$$

(8)

$$\beta=[1-\sin(\varphi'_f)](\sigma'_p/\sigma'_v)\tan(\varphi'_f)$$

(9)

$$\varphi'_f=27.5+9.2\lg[(N_1)_{60}]$$

(10)

$$\sigma'_p=0.47(N_{60})^mp_a$$

(11)

式中: β 为侧阻力系数; σ'_v 为土层中间深度处的竖向有效应力; σ'_p 为土层中间深度处的先期固结压力; φ'_f 为无黏性土有效内摩擦角; $(N_1)_{60}$ 为标准化的贯入击数; N_{60} 为锤击效率修正的贯入击数; m 为指数,对于纯净石英砂取 0.6,对于粉砂至砂质粉土取 0.8。

采用 Brown 等^[7]推荐的方法计算无黏性土桩端的单位极限承载力,即

$$q_p=1.2N_{60}\leq 2\,871\text{ kPa}\quad N_{60}\leq 50$$

(12)

1.3 修正标贯击数的计算

AASHTO LRFD 计算桩基承载力的过程中不采用标准贯入实测值,需对实测值进行修正。在进行标准贯入试验时,通过比较动能 E_K 和势能 E_P 可以获得标贯系统的效率,此时能效比 E_R 定义为 E_K/E_P 。在美国常规的工程实践中, E_R 通常基于标贯系统效率的 60%统计整理而得出,即 $E_R=60\%$ 。相对于能效比为 60%的标贯击数为 N_{60} 。由于标贯

系统能量效率低下,加上操作者在操作过程中的差异,因此需要对测量的 N 值进行修正,修正公式为

$$N_{60}=C_EC_BC_SC_RN$$

(13)

式中: C_E 为能量影响系数; C_B 为孔径影响系数; C_S 为取样影响系数; C_R 为杆长影响系数。

各影响系数的取值在不同设计手册中略有不同(如文献[8],[9]),表 1 所示为文献[8]中各系数的取值。

表 1 影响系数的取值

Table 1 Values of Influence Coefficients

系数	因素	设备或取值	修正值
C_E	能量影响	穿心锤	0.50~1.00
		安全锤	0.70~1.20
		自动锤	0.80~1.50
C_B	钻孔直径/mm	65~115	1.00
		150	1.05
		200	1.15
C_S	取样方法	标准取样器	1.00
		非标准取样器	1.10~1.30
C_R	钻杆长度/m	1.03~4.00	0.75
		4.00~6.00	0.95
		6.00~10.00	0.85
		>10.00	1.00

从表 1 可以看出,能量影响系数 C_E 变化幅值较大,相对于其他修正系数,准确确定 C_E 值可以更准确确定 N_{60} 。准确估计 C_E 可依据 ASTM D4633-16^[10]里的技术要求,通过能效测量设备测定标贯系统的 E_R 值。

由于随着土体有效上覆应力 σ'_{v0} 的增加,标贯击数 N 也随之增加,故锤击效率修正的贯入击数 N_{60} 需通过 1 个大气压(约 100 kPa)和有效上覆应力 σ'_{v0} 进行标准化,标准化的贯入击数表示为 $(N_1)_{60}$,其计算公式为

$$(N_1)_{60}=C_NN_{60}$$

(14)

式中: C_N 为标准化系数。

不同的技术规范提供了不同的 C_N 计算方法,其中 FHWA-IF-02-034^[9]和 ASTM D6066-11^[11]中给出的表达式为

$$C_N=(p_a/\sigma'_{v0})^n$$

(15)

式中: n 为应力指数,黏土通常取 1,砂土取 0.5~0.6(如文献[12],[13]),在文献[8]中取 $n=0.5$,且规定 $C_N\leq 2$ 。

在 AASHTO LRFD 中, C_N 的表达式为

$$C_N=0.77\lg(40/\sigma'_{v0})<2$$

(16)

1.4 群桩效应的影响

当桩间距较小时,桩侧土和桩端土的塑性区会产生叠加效应,势必减小群桩的承载力,群桩效应折减系数见表 2。

表 2 砂性土群桩效应折减系数

Table 2 Reduction Coefficients of Pile Group Effect in Sandy Soil			
群桩类型	桩中心距	特殊情况	折减系数
单排桩	2.0 <i>D</i>		0.90
	≥3.0 <i>D</i>		1.00
多排桩	2.5 <i>D</i>		0.67
	3.0 <i>D</i>		0.80
	≥4.0 <i>D</i>		1.00
单排桩和多排桩	≥2.0 <i>D</i>	承台位于中密或密实土层,并且承台底无冲刷	1.00
	≥2.0 <i>D</i>	桩底及桩侧采用压力注浆	1.00

注:*D*为桩径。

1.5 与中国标准的异同

中国标准采用桩基承载能力概率极限状态分项系数的设计方法,与美国标准 AASHTO LRFD 在桩基竖向承载力计算公式上基本一致,其承载力由侧摩阻力和端阻力组成,然而在设计方法和思路、参数选取、群桩效应等方面存在差异,中国标准与美国标准的桩基承载力设计方法对比如表 3 所示。

2 静力触探桩承载力计算

桩基竖向承载力的确定一般有静荷载试验、规范计算、波动方程、原位测试等方法。静力触探的测试过程可看作一种试验桩的连续贯入,国内外已积累了很多经验,静力触探成果可以进行土质分层、参数反演^[15-16],采用其测试数据可较好预测单桩承载力。单桩极限承载力 Q_{ult} 可表示为

$$Q_{ult}=Q_s+Q_p=f_pA_s+q_pA_p$$
 (17)

式中: Q_s 为桩侧承载力极限值; Q_p 为桩端承载力极限值; f_p 为桩侧壁单位摩阻力。

目前,在欧美规范体系及相关设计手册中,采用静力触探测试计算单桩承载力的方法有 LCPC 法、De Ruiter 和 Beringen 法(欧洲法)、Meyerhof 法、Schmertmann 和 Nottingham 法、Tumay 和 Fakhroo 法等^[5,17]。根据国外学者的比较研究,LCPC 法提供了较为准确的桩承载力计算结果。采用 LCPC 法^[18-19]的单桩承载力计算公式为

$$f_p=q_c/\alpha_{LCPC}$$
 (18)

$$q_p=k_cq_{ca}$$
 (19)

式中: q_c 为锥尖阻力; k_c 为承载力系数,如表 4 所

表 3 中美桩基承载力设计对比

Table 3 Comparison in Pile Foundation Bearing Capacity Calculation Between Chinese and American Standards		
项目	中国标准	美国标准
设计方法	概率极限状态分项系数的设计方法	荷载-抗力系数法
极限状态	承载能力极限状态、正常使用极限状态	使用极限状态、疲劳与脆裂极限状态、强度极限状态、极端事件状态
侧摩阻力	根据地区经验或由土体类型和状态查表确定	根据土体类型和土体强度指标计算确定
桩端阻力	根据地区经验或由土体类型和状态查表确定(或计算确定)	黏性土根据强度指标、砂性土根据标准化的贯入击数计算确定
桩端阻力限值	当持力层为砂土、碎石土时,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019) ^[14] 存在限制	当持力层为黏性土和砂土时,均存在限制
标贯击数	不修正,根据实测标贯击数确定砂性土状态,查表得到桩侧摩阻力值	进行能量修正,根据修正后的标贯击数,计算得到砂性土土体有效内摩擦角和桩端阻力值
群桩效应	一般不考虑	根据群桩类型、桩中心距对群桩承载力进行折减

表 4 承载力系数 k_c

Table 4 Bearing Capacity Coefficient k_c			
土质分类	q_c /MPa	k_c	
		I 组	II 组
软黏土和淤泥	<1	0.40	0.50
中等压实黏土	1~5	0.35	0.45
粉土和松散砂土	≤5	0.40	0.50
中等到坚硬黏土、密实粉土	>5	0.45	0.55
软的白垩地层	≤5	0.20	0.30
中等密实的砂土和砾	5~12	0.40	0.50
风化或破碎的白垩地层	>5	0.20	0.40
密实到非常密实的砂土和砾	>12	0.20	0.40

注:I 组表示普通钻孔桩、泥浆钻孔桩、微型桩(低压灌浆)、套管螺旋桩、空心螺旋钻钻孔桩、墩;II 组表示套管螺旋桩、打入预制桩、预应力管桩、打入套管桩、静压金属桩、微型桩(直径小于 250 mm)、打入灌注桩(低压灌注)、打入金属桩、打入夯扩桩、导管架混凝土桩、大直径高压灌注桩。

示; α_{LCPC} 为摩阻力系数,如表 5 所示; q_{ca} 为桩端平均锥尖阻力。

桩端平均锥尖阻力 q_{ca} 需要根据桩端上下的距离 a ($a=1.5D$) 确定,具体方法为:首先确定桩端上下距离 $-a$ 和 a 范围内的锥尖阻力平均值 q'_{ca} ,然后剔除 $-a$ 和 a 范围内大于 $1.3q'_{ca}$ 和小于 $0.7q'_{ca}$ 的值,

表 5 摩阻力系数 α_{LCPC}

Table 5 Friction Coefficient α_{LCPC}

土质名称	q_c/MPa	α_{LCPC}				f_p 限制值/MPa					
		I 组		II 组		I 组		II 组		III 组	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
软黏土和淤泥	<1	30	90	90	30	0.015	0.015	0.015	0.015	0.035	
中等压实黏土	1~5	40	80	40	80	0.035 (0.080)	0.035 (0.080)	0.035 (0.080)	0.035	0.080	≥0.12
粉土和松散砂土	≤5	60	150	60	150	0.035	0.035	0.035	0.035	0.080	
中等到坚硬黏土、密实粉土	>5	60	120	60	120	0.035 (0.080)	0.035 (0.080)	0.035 (0.080)	0.035	0.080	≥0.20
软的白垩地层	≤5	100	120	100	120	0.035	0.035	0.035	0.035	0.080	
中等密实的砂土和砾	5~12	100	200	100	200	0.080 (0.120)	0.035 (0.080)	0.080 (0.120)	0.080	0.120	≥0.20
风化或破碎的白垩地层	>5	60	80	60	80	0.120 (0.150)	0.080 (0.120)	0.120 (0.150)	0.120	0.150	≥0.20
密实到非常密实的砂土和砾	>12	150	300	150	200	0.120 (0.150)	0.080 (0.120)	0.120 (0.150)	0.120	0.150	≥0.20

注：I 组 A 类表示普通钻孔桩、泥浆钻孔桩、空心螺旋钻钻孔桩、微型桩（低压灌浆）、套管螺纹桩、墩；I 组 B 类表示套管钻孔桩；II 组 A 类表示打入预制桩、预应力管桩、导管架混凝土桩；II 组 B 类表示打入金属桩、静压金属桩；III 组 A 类表示打入灌注桩、打入夯扩桩；III 组 B 类表示直径大于 250 mm 的高压灌注桩、微型桩（高压灌注）；桩侧壁单位摩阻力 f_p 括号内取值适用于施工过程对土体产生的扰动最小时。

最后再次计算此计算区间内桩端平均锥尖阻力 q_{ca} 。

3 工程案例

3.1 工程概况

国外某桥梁项目工程所在区域地形比较平坦，属于河流冲积平原。场地地震效应系数为 0.20，属中等活动区域。采用美国标准进行岩土工程勘察，根据揭露的地层、沉积原因、密实程度及状态、工程地质等特征，可把场地地层分为 6 个主层和若干亚层，具体层位和原位测试指标如表 6 所示。选取典型钻孔和钻孔旁 2.5 m 进行静力触探试验，其地层划分及原位测试成果如图 1,2 所示。

勘探孔 1 水位埋深为 2.4 m，采用静力触探试验(CPT)与钻探进行对比。勘探孔 2 水位埋深为 20.2 m，采用孔压静力触探试验(CPTU)与钻探进行对比。

3.2 桩基承载力计算步骤及条件

根据工程地质分层、土工试验及标准贯入试验结果，计算得出不同深度处土层锤击效率修正的贯入击数 N_{60} 和标准化的贯入击数 $(N_1)_{60}$ ，进而得到单桩承载力计算结果。

通过静力触探结果及中国标准《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[14]（简称《公路桥规》）进行桩基承载力计算并进行对比。在后文的

表 6 场地地层及参数

Table 6 Site Stratum and Parameters

岩土名称	层厚/m	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	标贯击 数 N	q_c/MPa	f_s/kPa
层 1 FS	1.60~5.50	18.5	6.6		
层 2 CL	0.00~6.30	17.6	6.3	0.68	15.73
层 3 CL	12.50~14.30	19.8	12.9	1.92	85.73
层 4-1 ML	1.00~10.10	20.1	16.4	3.63	101.37
层 4-2 SC	0.80~3.00	20.1	15.8	2.56	49.13
层 4-3 SM	2.90~10.80	20.2	19.1	5.93	95.08
层 5 CL	2.80~11.90	19.7	12.0	3.76	94.06
层 6-1 SM	19.20~33.60	20.2	35.4	14.08	250.49
层 6-2 SM	20.30~35.30	20.3	65.4	19.16	258.05

分析过程中，上述几种方法的计算前提及假设包括：

(1)中国规范和美国标准在土层划分、现场测试、室内试验方面均有所差异，根据美国标准进行的工程勘察严格意义上并不能转化成中国标准所规定的成果。本文计算中假设贫黏土(CL)近似为黏性土，粉土质砂(SM)近似为粉砂，并根据土体物理指标查表得到《公路桥规》不同土层的计算指标。

(2)根据 FHWA NHI-10-016，考虑到施工工艺和施工质量的影响，在无黏性土中采用 β 法确定单位面积极限桩侧摩阻力可减少至 $2/3$ ^[7]。

(3)基于式(17)的方法计算结果为单桩承载力极限值。根据文献[20]的研究，推荐桩侧承载力的

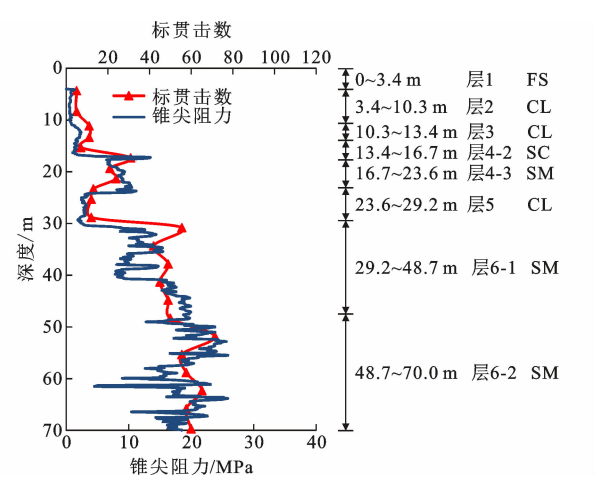


图 1 勘探孔 1 地层划分及原位测试结果

Fig. 1 Stratum and In-situ Test Results of No. 1 Point

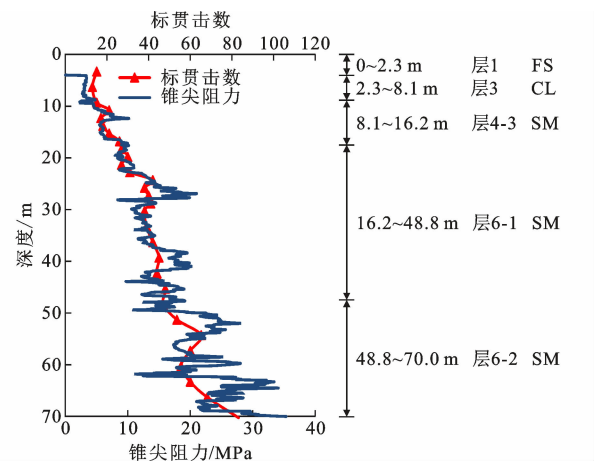


图 2 勘探孔 2 地层划分及原位测试结果

Fig. 2 Stratum and In-situ Test Results of No. 2 Point

安全系数取 2.0, 桩端承载力的安全系数取 3.0。

(4) 在地震液化分析中,美国标准通常采用 FHWA SA-97-076^[21] 中的 Simplified Procedure 方法,其计算方法与中国规范存在较大差异,故分析中不考虑地震液化的影响。

3.3 单桩承载力计算分析

依据《公路桥规》、AASHTO LRFD 及 LCPC 法分别计算钻孔灌注桩桩径 $D=1\text{ m}$ 时的单桩承载力,其计算结果如图 3~5 所示。

从图 3 可以看出,不同计算方法得到的桩侧摩阻力在 0~30 m 范围内差异不大。在深度大于 30 m 时,AASHTO LRFD 计算得到的桩侧摩阻力最大,LCPC 法计算得到的结果次之,《公路桥规》的计算结果最小。原因在于对于层 6-2 SM,《公路桥规》中粉细砂地层的桩侧摩阻力标准值规定为 55~70 kPa(公式中折减系数为 0.5,其容许值为 27.5~35 kPa);AASHTO LRFD 计算得到的桩侧摩阻力标

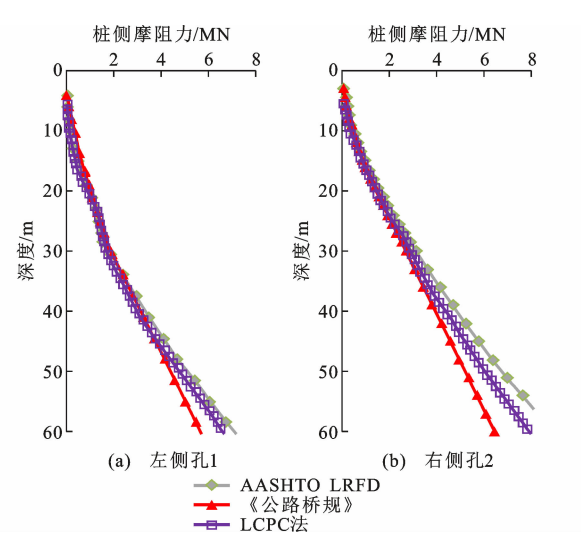


图 3 桩侧摩阻力计算结果对比

Fig. 3 Comparison of Side Friction Calculation Results

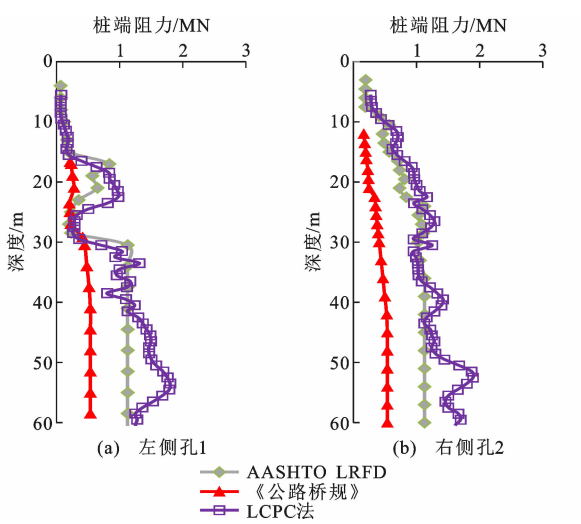


图 4 桩端阻力计算结果对比

Fig. 4 Comparison of Pile End Resistance Calculation Results

准值可达到 90~120 kPa(砂土中桩侧承载力折减系数为 0.55,其值为 49.5~66 kPa);LCPC 法对于密实到非常密实的砂土其限制为 120 kPa(安全系数为 2,其值为 60 kPa)。

从图 4 可知,不同计算方法得到的桩端阻力容许值差异较大。LCPC 法计算得到的桩端阻力最大,AASHTO LRFD 计算得到的结果次之,《公路桥规》的计算结果最小。原因在于 LCPC 法未规定桩端阻力的限制;AASHTO LRFD 规定桩端位于砂土时,桩端阻力标准值最大为 2 871 kPa(砂土中桩端承载力折减系数为 0.5 时,其容许值为 1 435.5 kPa);《公路桥规》对于桩端承载力容许值粉砂限制为 1 000 kPa,细砂限制为 1 150 kPa,考虑清底系数

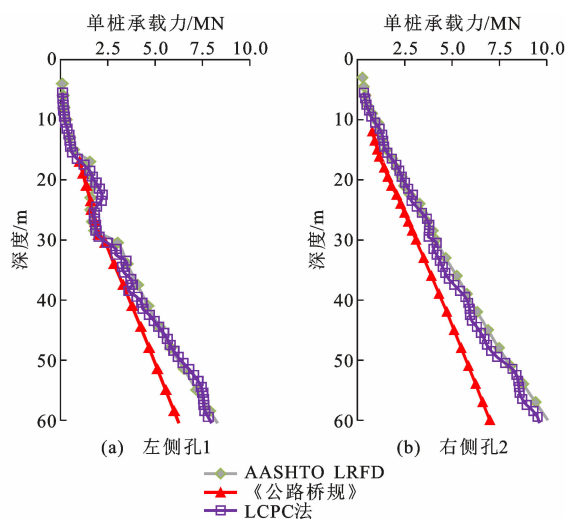


图5 单桩承载力计算结果对比

Fig. 5 Comparison of Single Pile Bearing Capacity Calculation Results

及桩端土透水性的修正系数后,其桩端阻力将进一步减小。

从图5可以看出,虽然AASHTO LRFD和LCPC法在桩侧摩阻力、桩端阻力结果上略有差异,但单桩承载力结果相差不大,而《公路桥规》单桩承载力计算方法得到的结果略小。

4 结语

(1)AASHTO LRFD采用荷载-抗力系数法设计,对于单桩承载力需结合地基土体的性质,黏性土地基和砂性土地基应采用不同的计算公式和相应的承载力折减系数。通过对比分析,《公路桥规》计算得出的桩侧摩阻力和桩端阻力均较小。

(2)AASHTO LRFD所述的单桩承载力计算方法中地下水位埋深影响了有效自重应力的大小,对承载力的计算有较大的影响。此外,基于美国标准的海外项目勘察侧重原位测试结果,在勘察外业工作中应重视原位测试操作的标准性。

(3)采用静力触探测试,LCPC法提供了较为准确的单桩承载力计算结果,经过对比计算和分析,可作为一种有效的单桩承载力计算方法。

(4)本文工程案例得到的单桩承载力计算结果尚未进行试桩验证。在实际工程中,通过不同计算方法得到的承载力结果需通过试桩结果进行修正,验证施工工艺和成桩质量,必要时进行极限桩侧摩阻力的修正和静力触探法桩侧、桩端安全系数的评估。

参考文献:

References:

- [1] 缪林昌,周贻鑫,李植淮,等.中美欧规范桩基承载力计算设计对比[J].中外公路,2016,36(1):77-81.
MIAO Lin-chang, ZHOU Yi-xin, LI Zhi-huai, et al. Comparison of Pile Foundation Bearing Capacity Calculation and Design in China, the United States and Europe[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(1): 77-81.
- [2] 孔友南,陈谦,曹凯平,等.中美欧日桩基承载力设计规范比较[J].水运工程,2018(6):231-236.
KONG You-nan, CHEN Qian, CAO Kai-ping, et al. Design Code Comparison of Pile Foundation Bearing Capacity in China, the United States, Europe and Japan[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(6): 231-236.
- [3] 陈峰,游亿财,李翔.巴基斯坦冲积平原区PKM高速公路桥梁桩基承载力的计算分析[J].路基工程,2018(增1):44-47.
CHEN Feng, YOU Yi-cai, LI Xiang. Calculation and Analysis on Bearing Capacity of Bridge Pile Foundation of PKM Motorway in Pakistan Alluvial Plain[J]. Subgrade Engineering, 2018(S1): 44-47.
- [4] 赵胤儒,尤岭,周涛.中国美国巴基斯坦桥梁设计标准规范对比分析——以巴基斯坦卡洛特水电站工程为例[J].水利水电快报,2020,41(3):62-68.
ZHAO Yin-ru, YOU Ling, ZHOU Tao. Comparative Analysis of Chinese, American and Pakistani Standard and Regulations in Bridge Design: Case of Karot Hydropower Station in Pakistan[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, 41(3): 62-68.
- [5] 兰千钰,王彪.基于中欧规范桩基承载力的CPT法探讨[J].港工技术,2019,56(增1):72-74.
LAN Qian-yu, WANG Biao. Research on CPT Method for Bearing Capacity of Pile Foundation Based on Chinese & European Standard[J]. Port Engineering Technology, 2019, 56(S1): 72-74.
- [6] LRFD-9-2020, The AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th Edition)[S].
- [7] BROWN D A, TURNER J P, CASTELLI R J. Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods[M]. Washington DC: FHWA, 2010.
- [8] RIX G J, WAINAINA N, EBRAHIMI A, et al. Manual on Subsurface Investigations[R]. Washington DC: FHWA, 2018.
- [9] SABATINI P, BACHUS R, MAYNE P, et al. Geotechnical Engineering Circular No. 5: Evaluation

- of Soil and Rock Properties[R]. Washington DC: FHWA, 2002.
- [10] ASTM D4633-16, Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers[S].
- [11] ASTM D6066-11, Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potentia Standard[S].
- [12] LIAO S S C, WHITMAN R V. Overburden Correction Factors for SPT in Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 373-377.
- [13] MAYNE P W, KEMPER J B. Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT [J]. Geotechnical Testing Journal, 1988, 11(2): 139-147.
- [14] JTG 3363—2019, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
JTG 3363—2019, Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].
- [15] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459.
- [16] ROBERTSON P K. Soil Behaviour Type from the CPT: An Update[C]//ALBUQUERQUE P, FONTAINE E, CARVALHO D D. Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Huntington Beach: Taylor & Francis, 2010: 575-583.
- [17] 蔡国军, 刘松玉, PUPPALA A J, 等. 基于 CPTU 测试的桩基承载力可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 404-412.
CAI Guo-jun, LIU Song-yu, PUPPALA A J, et al. Reliability Assessment of Bearing Capacity of Pile Foundation Based on CPTU Data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 404-412.
- [18] LUNNE T, POWELL J, ROBERTSON P K. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Los Angeles: CRC Press, 2002.
- [19] MAYNE P W. Cone Penetration Testing[M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2007.
- [20] ESLAMI A, FELLENIUS B H. Pile Capacity by Direct CPT and CPTU Methods Applied to 102 Case Histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 886-904.
- [21] KAVAZANJIAN J E, MATASOVIC N, HADJ-HAMOU T, et al. Geotechnical Engineering Circular No. 3. Design Guidance: Geotechnical Earthquake Engineering for Highways [M]. Washington DC: FHWA, 1997.