

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.10.046

英标钻孔桩单桩承载力及沉降计算方法研究

刘 钊

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092)

摘要: 不同于国标的桩基承载力计算, 英国标准计算单桩承载力是一种半经验-半算法, 目前应用较多的为有效应力法和标准贯入度值(SPT)法, 而这2种计算方法需要结合土工试验参数或者原位试验结果, 并按照规范给出的经验系数进行计算。分析表明: 英国标准中的有效应力法对土工试验参数较为敏感, 计算得到的极限承载力变异性较大; SPT法计算得到的极限承载力值较为稳定, 且与试桩结果较为符合, 在工程设计中建议结合SPT算法, 对有效应力法结果进行修正。

关键词: 英国标准; 单桩承载力; 有效应力; 沉降

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0166-05

1 概述

随着“一带一路”战略的推进, 国内设计院和咨询机构承担着越来越多的海外工程项目。由于历史的原因, 很多前殖民地国家至今都沿用英国标准(英标)或法国标准(法标), 特别在东非地区, 很多国家仍然在沿用英标进行工程设计。

英标针对桩基计算方法与国标计算方法差别较大, 是一种半经验-半计算的方法^[1], 需要设计者直接用到大量的土体参数试验结果。目前已发表的针对英标体系的文章, 主要是对英国标准桥梁荷载、混凝土梁体设计和钢结构梁体设计进行介绍或者对比分析, 而对基于英标的桩基设计和计算方法介绍较少。因此本文针对英标的单桩承载力和沉降计算方法进行了研究。

2 桩基竖向承载力设计计算方法

英国标准关于桥梁桩基设计遵循的规范为BS 8004: 2015《基础设计规范》^[2]。该规范于2015年发布, 以取代1986版本, 同时该规范与欧洲标准BS EN 1997协同使用。

中国规范中针对竖向承载力的设计参数主要通过单桩静载试验和静力触探等原位试验, 并结合经验参数综合确定^[3]; 而BS 8004: 2015关于桩基竖向承载力提供的设计方法主要有根据土工试验结果的有效应力法和基于标准贯入度值(SPT)的计算方法。

英标中关于单桩竖向极限承载力 $R_{c,k}$ 的计算公式为:

$$R_{c,k} = R_{s,k} + R_{b,k} \quad (1)$$

式中: $R_{c,k}$ 为单桩竖向极限承载力标准值; $R_{s,k}$ 为单桩竖向极限侧摩擦承载力标准值; $R_{b,k}$ 为单桩竖向极限端摩擦承载力标准值。

英标中关于单桩荷载计算采用的为标准组合, 竖向设计承载力 $R_{c,d}$ 需在极限承载力的基础上考虑安全系数 γ_s 和 γ_b , 其表达式为:

$$R_{c,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} + \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} \quad (2)$$

对于式(2)中 γ_s 和 γ_b 的取值, 在1986版BS 8004中, 建议取值2.0~3.0, 但BS 8004: 2015提出, 该安全系数的取值应该与BS EN 1997保持协同, 而BS EN 1997中对于单桩荷载计算采用的为承载能力组合。综合恒活载分项系数和安全系数后, 可统一采用2.0这一数值。

2.1 基于土工试验结果的计算方法

BS 8004: 2015中, 基于土层特性参数的计算方法沿用了经典理论——有效应力计算方法。

BS 8004: 2015将各土层分类为粗颗粒土(非黏性土)和细颗粒土(黏性土), 粗颗粒土主要指的是砂质土, 细颗粒土为黏质土和粉质土, 相应的侧摩擦力和端摩擦力计算方法也有区别。

2.1.1 单桩竖向极限侧摩擦力

单桩竖向极限侧摩擦力 $R_{s,k}$ 计算公式为:

$$R_{s,k} = \frac{\sum_{j=1}^n (A_{s,j} \times q_{s,j})}{\gamma_{Rd}} \quad (3)$$

式中: $A_{s,j}$ 为各层土与桩周的接触面积, m^2 ; $q_{s,j}$ 为各土层的平均单位极限侧摩擦力, kPa ; γ_{Rd} 为模型系数。

各粗颗粒土层的平均单位极限侧摩擦力 $q_{s,j}$ 计算公式为:

$$q_{s,j} = K_{s,j} \times \tan \delta_j \times \sigma'_{v,j} \quad (4)$$

收稿日期: 2020-03-17

作者简介: 刘钊(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事国内及海外道路桥梁工程设计工作。

式中： $K_{s,j}$ 为土层的土压力系数，该土压力系数实际上是土体在受压状态下产生的侧向应力和竖向有效应力的比值，对钻孔桩可取值0.7； $\sigma'_{v,j}$ 为各土层的竖向平均有效应力，可依据各土层的深度、土体重度、地下水位深度等计算得到， $K_{s,j} \times \sigma'_{v,j}$ 即为该土层土体对桩的侧向应力。

另外，式(4)中的 δ_j 为桩-土间的摩擦角，对于各土层， $\delta_j = \min(k_\delta \times \varphi'_{pk}, \varphi'_{cv})$ ，其中的 k_δ 为深度系数，对钻孔桩可取值1.0； φ'_{pk} 为土层的内摩擦角； φ'_{cv} 为土壤的恒定体积抗剪角，可通过三轴试验结果得到。在无有效的恒定体积抗剪角试验结果下，混凝土桩的 δ_j 可取值为土层内摩擦角的0.75倍。在极限状态下竖向所能提供的最大单位面积摩擦力(摩擦应力)即为侧向应力产生的竖向应力通过乘以 $\tan \delta_j$ 得到。

各细颗粒土层的平均单位极限侧摩擦力 $q_{s,j}$ 计算公式为：

$$q_{s,j} = \beta_j \times \sigma'_{v,j} \quad (5)$$

式中： β_j 为土层经验系数，对常规固结细颗粒土，可由土层内摩擦角 φ 按 $\beta = K_0 \tan \varphi$ 计算得到，其中 $K_0 = 1 - \sin \varphi$ ，为黏性土静止土压力系数，即为土体在无侧向变形条件下土体水平向应力与竖向应力之比，乘以 $\tan \varphi$ 即为极限状态细颗粒土体水平向应力下对桩体竖向所能提供的最大单位面积摩擦力(摩擦应力)的比值； $\sigma'_{v,j}$ 为各土层的竖向平均有效应力，可依据各土层的深度、土体重度、地下水位深度等计算得到。

BS 8004 : 2015同时允许细颗粒土层平均单位极限侧摩擦力 $q_{s,j}$ 采用如下计算公式：

$$q_{s,j} = \alpha_j \times c_{u,j} \quad (6)$$

式中： $c_{u,j}$ 为土层不排水抗剪强度； α_j 为黏性土的摩擦系数，对常规钻孔桩，其 α_j 可通过下式得到：

$$0.4 \leq \alpha_j = 0.45 \times (1 - \ln \frac{c_{u,j}}{100}) \leq 1.0 \quad (7)$$

粗、细颗粒土各土层的平均单位极限侧摩擦力计算图示见图1。图中： L 为桩竖向总长； P 为桩顶竖向荷载； d 为桩直径。

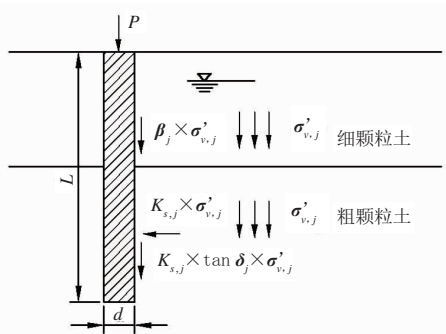


图1 侧摩擦力计算图示

2.1.2 单桩竖向极限端摩擦力

单桩竖向极限端摩擦力 $R_{b,k}$ 计算公式为：

$$R_{b,k} = \frac{A_b \times q_b}{\gamma_{Rd}} \quad (8)$$

式中： q_b 为单桩极限端摩擦力，kPa； γ_{Rd} 为模型系数。

各粗颗粒土层的平均单位极限端摩擦力 q_b 计算公式为：

$$q_b = N_q \times \sigma'_{v,b} \quad (9)$$

式中： $\sigma'_{v,b}$ 为桩尖土层竖向有效应力，可依据桩尖深度、土体重度、地下水位深度等计算得到； N_q 为粗颗粒土承载压力系数，根据常用的经典理论算法，钻孔桩的 N_q 取值可参考表1，其中的 φ 为该粗颗粒土层的内摩擦角。

表1 粗颗粒土承载压力系数取值表

$\varphi / (^\circ)$	26	28	30	32	34	36	38	40
N_q	5	8	10	14	21	30	43	72

各细颗粒土层的平均单位极限端摩擦力 q_b 计算公式为：

$$q_b = N_c \times c_{u,b} \quad (10)$$

式中： N_c 为细颗粒土承载压力系数，与桩尖深度有关，钻孔桩满足进入2~3倍持力层深度情况下可以近似取值为9； $c_{u,b}$ 为持力层不排水抗剪强度。

2.2 基于标准贯入度值(SPT)的计算方法

BS 8004 : 2015提供了一种基于标准贯入度值的计算方法，主要通过土层类别和标准贯入度 N 值计算。

2.2.1 单桩竖向极限侧摩擦力

各土层的单桩竖向极限侧摩擦力 p_s 计算公式为：

$$p_s = n_s \times p_{ref} \times N_j \quad (11)$$

式中： n_s 为与土层类别和桩类型有关的经验系数； N_j 为该土层位置的平均标准贯入度； p_{ref} 为承载力计算时的常数值，取值100 kPa。

2.2.2 单桩竖向极限端摩擦力

各土层的单桩竖向极限端摩擦力 $p_{b,0.1}$ 为：

$$p_{b,0.1} = n_{b,0.1} \times p_{ref} \times N_b \quad (12)$$

式中： $n_{b,0.1}$ 为与土层类别和桩类型有关的经验系数； N_b 为桩端位置的标准贯入度值； p_{ref} 取值100 kPa。

n_s 和 $n_{b,0.1}$ 可从表2取值。

3 桩基沉降设计计算方法

BS 8004 : 2015提供了若干种桩基沉降计算

表2 基于SPT法的承载力计算经验系数表

土层类别	n_s		$n_{b,0.1}$	
	打入桩	钻孔桩	打入桩	钻孔桩
砂土	0.033~0.043	0.014~0.026	2.900~4.800	0.72~0.82
粉土	0.018~0.030	0.016~0.023	1.100~2.600	0.41~0.66
黏土	0.020~0.029	0.024~0.031	0.095~1.600	0.34~0.66

方法,其中工程设计上比较常用的是线弹性理论计算方法(Poulos 线弹性理论)^[4]。

Poulos 线弹性理论基于单桩竖向极限端承载力 R_{bu} 、单桩竖向极限侧向承载力 R_{su} 、土体的弹性模量 E 和泊松比 ν 所建立的桩基竖向变形曲线见图2。按照 Poulos 线弹性理论,在竖向荷载作用下,桩侧土首先变形,在达到弹性极限 R_{sy} 时,达到初始弹性变形 S_y ,此时桩侧土不再限制桩体的变形,而新增的荷载由桩端土变形承担,直到达到 $P_u=R_{bu}+R_{su}$ 时,达到最终变形 S_{lim} 。

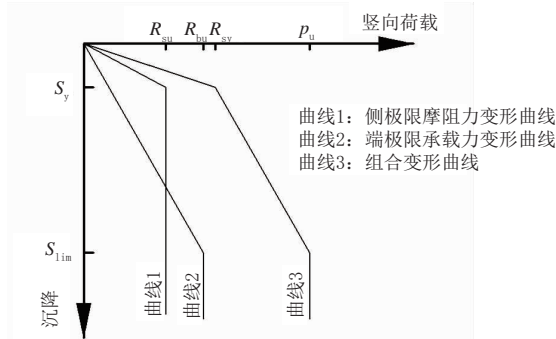


图2 Poulos 线弹性理论单桩变形曲线

3.1 单桩沉降计算方法

弹性极限 R_{sy} 计算公式为:

$$R_{sy} = \frac{R_{su}}{1-\beta} \quad (13)$$

式中: R_{su} 为单桩竖向极限侧向承载力; β 为荷载达到 R_{sy} 时传递到桩端土的比例。

对摩擦桩, β 计算公式为: $\beta = \beta_0 \times C_k \times C_v$ 。

对端承桩, β 计算公式为: $\beta = \beta_0 \times C_k \times C_b \times C_v$ 。

式中: β_0 为绝对刚性不可压缩桩基的比例系数,而实际上桩基的可压缩性减小了传递到桩端的荷载比例,该系数主要与桩长和桩身直径比例 (L/d) 及桩端直径和桩身直径的比例 d_b/d 有关^[5]; C_k 为桩基压缩性的修正系数,该系数主要与桩基压缩性系数 K 、桩长与桩身直径比例 (L/d) 有关,其中的桩基压缩性系数 K 可通过 $K = E_p/E_s$ 计算得到 (E_p 为桩身材料的弹性模量, E_s 为沿着桩身各层土的变形模量平均值); C_v 为泊松效应修正系数,它取决于土的泊松比 ν_s 及桩基压缩性系数 K ,按照 Poulos 线弹性理论,土体平均泊松比可近似取为 $\nu_s = 0.3$ 。

C_k 和 C_v 修正系数图见图3。

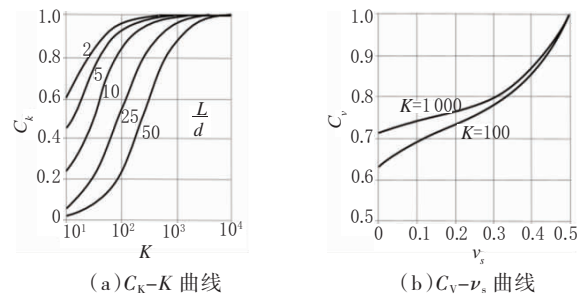


图3 C_k 和 C_v 修正系数图

C_b 为持力层刚度效应修正系数,它取决于桩长和桩身直径比例 (L/d) 以及持力层的变形模量与沿桩身各层土的变形模量平均值之比 E_p/E_s 。

C_b 修正系数图见图4。

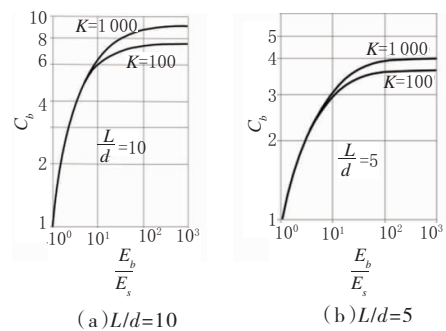


图4 C_b 修正系数图

根据各参数确定 β 值后,可根据单桩竖向极限侧向承载力计算出弹性极限荷载 R_{sy} ,而在此荷载下的初始弹性竖向变形值 S_y 为:

$$S_y = \frac{I \times R_{sy}}{d \times E_s} \quad (14)$$

在极限承载力 P_u 作用下,达到的最终竖向变形值 S_{lim} 可通过下式计算:

$$S_{lim} = \frac{I \times P_u}{d \times E_s} \quad (15)$$

式中: E_s 为沿着桩身各层土的变形模量平均值; d 为桩身直径; I 为沉降影响系数。

对摩擦桩, I 计算公式为: $I = I_0 \times R_k \times R_b \times R_v$ 。

对端承桩, I 计算公式为: $I = I_0 \times R_k \times R_b \times R_v$ 。

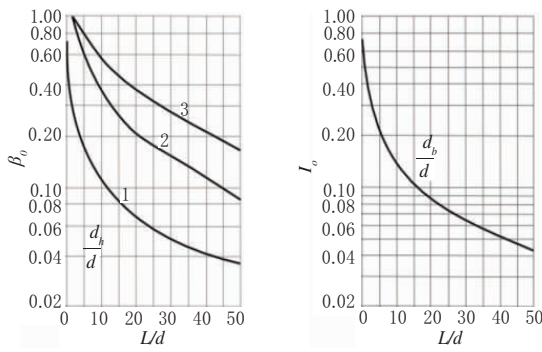
式中: I_0 为基本沉降影响系数,该系数主要与桩长和桩身直径比例 (L/d) 及桩端直径和桩身直径的比例 d_b/d 有关。

β_0 和 I_0 系数图见图5。

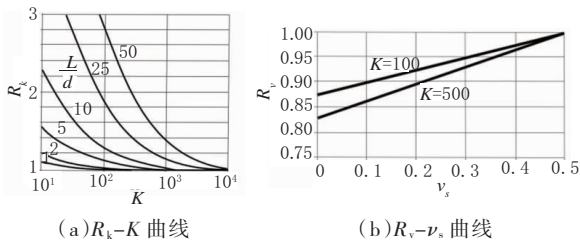
R_k 为桩基压缩性的修正系数,该系数主要与桩基压缩性系数 K 和桩长与桩身直径比例 (L/d) 有关。 R_v 为泊松效应修正系数,它取决于土的泊松比 ν_s 及桩基压缩性系数 K 。

R_k 和 R_v 修正系数图见图6。

R_b 为持力层刚度效应修正系数,它取决于桩



(a) β_0 - L/d 曲线 (b) I_0 - L/d 曲线
图5 β_0 和 I_0 系数图

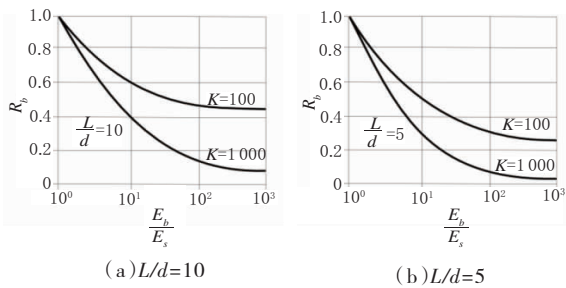


(a) R_k - K 曲线 (b) R_v - ν_s 曲线

图6 R_k 和 R_v 修正系数图

长和桩身直径比例(L/d)以及持力层的变形模量与沿着桩身各层土的变形模量平均值之比 E_p/E_s 。

R_b 修正系数图见图7。



(a) $L/d=10$ (b) $L/d=5$

图7 R_b 修正系数图

R_b 为持力层深度效应修正系数,反映的主要是土层顶端至不可压缩层的土层总厚度 h 的影响,在钻孔深度有限的情况下,可近似按 $h/L=2$ 考虑 R_b 。

R_h 修正系数图见图8。

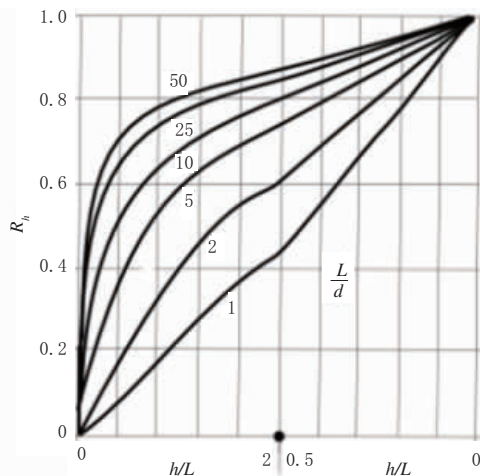


图8 R_h 修正系数图

3.2 群桩沉降计算方法简述

群桩沉降与单桩沉降的结果有着较大差异。对于群桩沉降的计算方法,英国标准中并未指定计算方法,但引用的经典理论中主要提供了以下几种计算方法:

(1)群桩影响系数法,群桩下某根桩基的沉降应考虑周边所有桩基影响系数的叠加。

(2)单桩沉降曲线修正法,认为群桩的沉降曲线与单桩类似,需考虑相关的影响系数。

(3)群桩沉降系数法,整个群桩的沉降在考虑群桩的桩基分布后乘以一个增大系数。

(4)等代实体法,将群桩在一定深度范围等同于实体基础,考虑基地土层参数后进行计算分析,该方法与国标范围常规考虑类似。

目前在国际上主流的英标岩土计算软件中,采用的计算方法为:对于基底为无黏性土(排水条件下),群桩沉降分析基于线性沉降理论,即在单桩沉降基础上考虑群桩几何分布后计算群桩影响系数;对于基底为黏性土(不排水条件),群桩沉降分析一般考虑等代实体基础的埋深,根据相应计算方法进行变形计算^[6]。

4 工程实例

某非洲国家首座立交桥项目设计采用钻孔灌注桩,桩基直径 900 mm,根据当地地质勘察单位提供的资料,该桩基长度建议为 20 m 左右,持力层建议选择密实砂层。为满足英标设计要求,采用英国规范 BS8004:2015 的有效应力法和 SPT 法对桩基承载力进行计算,最后与试桩结果进行了对比。选取具有代表性的钻孔 BH02 进行了计算,计算结果见表 3。

通过计算结果可以发现:

(1)采用有效应力法和 SPT 法计算得到的粗颗粒土层承载力结果较为接近,但细颗粒土层计算得到的差异性较大。

(2)采用有效应力法计算时,若桩端持力层为砂土,桩端承载力计算参数承载压力系数 N_q 受到砂土层内摩擦角试验准确性影响较大,内摩擦角差异在 2° 左右时,引起的桩端极限承载力差异接近 2 倍,且内摩擦角值越大,引起的偏差越大。

5 结语

不同于国内规范对单桩承载力估算采用的桩端和桩侧承载力特征值通过原位试验或工程经验能够直接给出,英国标准的有效应力法承载力计算需要用到大量的土工试验参数,但有效应力法

