



各国打入桩承载力估算方法及对比

吴志良, 程泽坤

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 介绍美国石油平台规范、英国地基规范、新加坡地基规范、日本港口标准以及中国港口工程桩基规范打入桩桩基承载力计算方法及安全系数, 并加以对比, 供设计人员计算参考。

关键词: 打入桩; 桩基承载力; 安全系数

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0218-06

Calculation of soil resistance to driven piles and comparison of some standards

WU Zhi-liang, CHENG Ze-kun

(CCCC Third Harbour Consultants Co., Ltd, Shanghai 200032, China)

Abstract: Calculation methods for soil resistance and the safety factor of driven piles are listed per to Chinese port standard, BS foundation standard, API recommended practice, foundation standard of Singapore, as well as Japanese harbour facility standard. A comparison is carried out among the standards. The result may serve as reference for designers.

Key words: driven pile; pile's bearing capacity; safety factor

打入桩是桩基工程中最重要的重要组成部分, 因其施工速度快、造价低而得到广泛应用。打入桩承载力是桩基工程设计的关键内容, 一般可通过现场试桩获取, 条件不许可或设计前期采用一些经验估算方法。因此分析比较一些打入桩承载力估算方法十分必要。本文主要介绍和比较美标、英国地基规范、新加坡地基规范、日本港口标准及中国港口桩基规范中打入桩承载力估算方法, 供设计人员参考。

1 基桩承载力估算方法

为方便理解, 将打入桩承载力估算公式统一为:

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

式中: Q_d 为基桩承载力极限值; Q_f 为桩侧阻力极限值; Q_p 为桩端阻力极限值; f 为单位面积桩侧阻力; A_s 为桩侧面积; Q 为桩端阻力极限值; A_p 为桩

端面积。

1.1 中国港口工程桩基规范^[1]

在中国港口工程的桩基规范中, 可以根据土样试验结果及现场原位测试的标贯值 N , 桩基埋深、黏性土的液性指数及砂土的密实程度等, 通过查阅规范中所附表格得到桩侧单位面积端阻力和桩端单位面积阻力, 然后按式(1)计算桩基承载力。在国内港口工程几十年的应用实践中证明是非常成功的。

1.2 美国海洋石油平台设计和建造推荐标准(RP-2A-WSD)^[2]

在黏性土中桩侧阻力和桩端阻力为:

$$F = \alpha S_u \quad (2)$$

$$q = 9S_u \quad (3)$$

式中: α 为系数, $\alpha \leq 1.0$ 。

$$\begin{cases} \alpha = 0.5\psi^{-0.5} & \psi \leq 1.0 \\ \alpha = 0.5\psi^{-0.25} & \psi > 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 吴志良(1963—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口设计工作。

$$\psi=c/p_0' \quad (5)$$

式中: p_0' 为计算点上覆土的有效压力; S_u 为土的不排水抗剪强度。

在非黏性土中, 桩的侧阻力和端阻力为

$$F=Kp_0'\tan\delta \quad (6)$$

$$q=p_0'N_q \quad (7)$$

式中: K 为土的侧压力系数, 对开口桩及不形成土塞情况为 0.8, 对闭口桩或形成土塞的桩为 1.0; δ 为砂土与桩壁的摩擦角; N_q 为桩端阻力系数。

在该标准中, 根据砂的密实程度和砂的种类列出了桩与土的摩擦角和桩端阻力系数, 此表系数仅作参考, 可以根据试验资料调整 (表 1)。

表 1 桩与土的摩擦角和桩端阻力系数

密实程度	砂土种类	桩土摩擦 $\delta/(\circ)$	桩侧阻力限/kPa	N_q	桩端阻力限值/MPa
非常松散	砂	15	47.8	8	1.9
松散	砂-粉砂				
中密	粉砂				
松散	砂	20	67.0	12	2.9
中密	砂-粉砂				
密实	粉砂				
中密	砂	25	81.3	20	4.8
密实	砂-粉砂				
密实	砂				
非常密实	砂-粉砂	30	95.7	40	9.6
密实	砾砂				
非常密实	砂				
		35	114.8	50	12.0

1.3 英国基础规范 BS 8004^[3]

在 BS 8004 中, 仅列出了黏性土的桩侧阻力和桩端阻力推荐的经验公式, 与美标中黏性土的桩侧阻力与桩端阻力类似, 与黏性土的不排水抗剪强度有关, 只是侧阻力、端阻力系数不一样。

$$f=\alpha S_u \quad (8)$$

$$q=N_c S_u \quad (9)$$

式中: α 值为 0.3 ~ 0.6, 一般取 0.5; N_c 值一般取 9, 当入土深度与桩径之比小于 4 时, N_c 值一般取 6。

1.4 日本港口设施标准^[4]

日本港口设施标准中, 桩侧阻力值

$$Q_f=\sum r_{fi}A_{si} \quad (10)$$

式中: r_{fi} 为每一土层的平均摩阻力值; A_{si} 为每一土层的桩侧面积; 在砂性土中, $r_{fi}=2 N$; N 为第 i 层土的平均标贯击数; 对于黏性土 $r_{fi}=C_{ai}$, C_{ai} 为第 i 层土的凝聚力, 当土层 $c<100$ kPa 时, $c_{ai}=c$, 当 $c\geq 100$ kPa 时, 取 $c_{ai}=100$ kPa。

桩端阻力在砂性土中

$$R_{pk}=300NA_p \quad (11)$$

$$N=\frac{N_1+N_2}{2} \quad (12)$$

式中: N_1 值为桩端所在位置的标贯击数; N_2 为桩尖以上 4 倍桩径范围内标贯击数平均值。

桩端阻力在黏性土中

$$Q_p=6S_u \quad (13)$$

式中: S_u 为桩端土层的不排水抗剪强度。

此外, 日本港口设施标准中对于砂土的桩端阻力还可采用根据浅基础承载力公式推导的桩端阻力计算公式, 类似按 API 计算的砂土的桩端阻力。

1.5 新加坡基础规范 (Code of Practice for Foundation)^[5]

在该规范中, 分别列出了按实验室试验结果和原位测试结果进行桩基极限承载力估算, 由于非黏性土难以取得不扰动和近似于现场条件的土样, 故试验往往在黏性土中进行。

根据试验室试验结果, 桩侧阻力计算公式, 同英标计算公式类似 ($f=\alpha S_u$, α 值为黏性系数), α 值随不排水抗剪强度增加而减小, 0.25 为非常坚硬的黏性土, 1.0 为非常软的黏性土。

桩端阻力也同英标公式, N_c 值一般取 9, 当入土深度与桩径之比小于 4 时, N_c 值取 5。

根据现场原位测试的标准贯入击数, 采用修正的 Myerhof 公式, 桩侧阻力

$$f=K_s N \quad (14)$$

式中: $K=2 \sim 5$, f 值不超过 200 kPa。

桩端阻力

$$q_b = K_b(40N) \quad (15)$$

式中: N 值对于密实的或坚硬的土可取到50~70, 对于开口钢管桩或 H 桩, 可打入岩石最大可取到80, K_b 可取6~9, q_b 限值为18 MPa。

对于圆锥贯入试验(CPT), 桩侧阻力 f 可取1/100圆锥尖阻力 q_c , 桩端阻力可取圆锥尖阻力 q_c 。

2 桩侧阻力、端阻力计算值比较

2.1 黏性土中

1) 桩侧阻力。

在黏性土中, 桩侧阻力估算皆建立了土的不排水抗剪强度的相关性, 并且全部小于等于不排水抗剪强度 S_u , 即为不排水抗剪强度乘以无量纲系数, API规范为 α 值 ≤ 1.0 , 美标需要公式计算, 与不排水抗剪强度及上部有效应力有关,

$$\psi = S_u/p_0' \quad (16)$$

一般而言, ψ 值不大于2.5, 表层土的上覆压力小, 其不排水抗剪强度也小, 例如, 表层黏性土的不排水抗剪强度为20 kPa, 上覆土重力为9 kN/m², 其值为2.22; 根据计算API公式计算, 结果一般为0.4~1.0, 见图1。

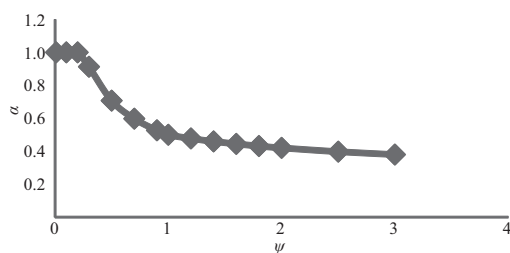


图1 α - ψ 关系

BS规范 α 值为0.3~0.6, 一般取0.5, 对比美标, 取的较小, 特别是对于埋深较深的硬黏土; 日本规范按土层的凝聚力计算, 但最大不超过100 kPa, 表层黏性土取的侧摩阻力较大; 新加坡规范 α 值为0.25~1.0, 与美标较接近。

需要说明的是新加坡规范, 黏性土也可以按标贯击数来确定, 为 $(2 \sim 5)N$, 对于黏性土, 例如: $N=15$ 击的黏土, $C_u=75$ kPa, 土层的埋深为8 m, 上层土的平均浮密度为0.9 t/m³, 按API计算, $p_0=72$ kN/m², $\psi=c/p_0=1.04>1.0$, $\alpha=0.5\psi^{-0.25}=0.495$, $f=37.1$ kN/m², 按新加坡规范 f

$= (2 \sim 5)N=30 \sim 75$ kPa, 故若用标贯击数来估算桩侧摩阻力, 以 $f=2N$ 为宜。

中国港口工程桩基规范, 侧阻力与端阻力按查表法, 这些参数是统计很多试桩资料而来, 黏性土的最大桩侧阻力取100 kPa, 与日本规范的限值相同。

2) 桩端阻力。

黏性土桩端阻力也与不排水抗剪强度相关, 在 $(5 \sim 9)S_u$, 其中美标为 $9S_u$; BS规范一般为 $9S_u$, 桩入持力层土深度小于4倍桩径时为 $6S_u$; 日本规范取 $6S_u$; 新加坡规范法规一般为 $9S_u$, 桩入持力层土深度小于4倍桩径时为 $5S_u$, 见表2。

表2 各规范黏性土桩侧阻力、桩端阻力

规范	桩侧阻力	桩端阻力
美国API	αS_u	$9S_u$
英国BS 8004	$(0.3 \sim 0.6)S_u$ 一般取 $0.5S_u$	$9S_u$, 当桩端进入持力层小于4D时 $6S_u$
日本	c 且 $c \leq 100$ kPa	$6S_u$
新加坡	$(0.25 \sim 1.0)S_u$ $(2 \sim 5)N$; $1/100q_c$	$9S_u$, 当桩端进入持力层小于4倍桩径时 $5S_u$; q_c
中国	10~100 kPa	50~3 100 kPa

2.2 非黏性土中

在非黏性土中, 桩的侧阻力与端阻力, BS规范没有列经验公式, 日本规范与新加坡规范列出与标贯击数有关的经验公式, 美国API规范桩侧阻力与桩与非黏性土的摩擦角有关, 桩端阻力采用类似太沙基地基承载力公式。对于非黏性土的密实程度划分, 可以这样考虑, $N<5$ 极松散, N 在10~15松散, N 在15~30中密, N 在30~50密实, $N>50$ 极密实。

表3 非黏性土桩侧阻力、桩端阻力

规范	桩侧阻力	桩端阻力
美国API	$Kp_0' \tan \delta$	$p_0' N_q$
英国BS 8004		
日本	$2N$	$300N$
新加坡	$(2 \sim 5)N$; $1/100q_c$	$(240 \sim 360)N$; q_c
中国	21~128 kPa	600~8 550 kPa

对于桩侧阻力及桩端阻力, 以单层砂土进行举例说明, 按开口钢管桩考虑, 上部覆盖土层平均浮密度为0.9 t/m³; 见表4和5。

表4 土层桩侧阻力计算算例

kPa

规范	上覆土层厚8 m时位置桩侧阻力				上覆土层厚20 m时位置桩侧阻力		
	N=8	N=18	N=28	N=35	N=18	N=28	N=35
美国API	20.9	26.9	26.9	33.3	67.1	67.1	83.1
日本	16.0	36.0	56.0	70.0	36.0	56.0	70.0
新加坡	16 ~ 40	36 ~ 90	56 ~ 140	70 ~ 175	36 ~ 90	56 ~ 140	70 ~ 175
中国	25 ~ 35*	36 ~ 42*	46 ~ 52*	72 ~ 78	46 ~ 54*	57 ~ 65*	92 ~ 102

注: 按API计算时按开口钢管桩, $K=0.8$; *参考规范内细砂桩侧阻力。

表5 土层桩端阻力算例

kPa

规范	上覆土层厚20 m			上覆土层厚35 m		
	N=18	N=28	N=35	N=18	N=28	N=35
美国API	3 600	3 600	7 200	6 300	6 300	9 600***
日本	5 400	8 400	10 500	5 400	8 400	10 500
新加坡	4 320 ~ 6 480	6 720 ~ 10 080	8 400 ~ 12 600	4 320 ~ 6 480	6 720 ~ 10 080	8 400 ~ 12 600
中国	3 060 ~ 3 420*	3 960 ~ 4 320**	5 625 ~ 6 480	3 690*	6 480 ~ 7 200***	7 200 ~ 7 785

注: *按细砂查表取值; **按中粗砂查表取值, 取埋深为25 ~ 30 m的值; ***按限值。

从表4可以得出, 按新加坡规范计算桩侧阻力时, 若按5N计算, 侧阻力值明显比其他标准大, 所以建议按2N计算, 同日本标准。按美标计算标贯击数比较小的表层砂土, 其侧阻力值与所列其他标准接近, 但表层土标贯击数较高时与其他规范对比, 明显小很多, 对照中国港口工程规范与日本标准接近, 所以表层砂土按中国标准与日本标准估算较合适; 对于埋深较大, 标贯击数较大 ($N>30$ 击) 的土层, 美标、日本标准比起中国标准, 其侧阻力偏小。

从上例可以看出, 日本标准、新加坡标准的桩端阻力比中国标准、美国标准大, 当桩埋深为35 m时, 而且标贯击数 >30 击时, 中国港口工程标准的桩端阻力最小, 而且该标准中对于中粗砂仅列出了 $N>30$ 情况, 对于中密的中粗砂及 $N>50$ 击的粗砂或砾砂可能缺乏试验数据没有列出推荐值。

3 桩基承载力的安全系数

桩基承载力验算, 以前按允许应力的方法采用的是安全系数, 按以概率论为基础的极限状态设计法后, 荷载有分项系数, 抗力也有分项系数, 两者组合相当于安全系数。由于土层特性十分复杂, 土工试验离散性也大, 目前很多设计者仍然喜欢采用以前的安全系数来验算基桩的承载力。

1) BS规范及新加坡规范安全系数为2 ~ 3;

当有足够静载试验及有当地经验时取低值, 对极限承载力不肯定时取高值。

2) API RP-2A-WSD为1.5 ~ 2.0, 在钻进及生产过程组合的环境荷载工况为2.0, 在设计的环境荷载情况下为1.5。

3) 日本规范桩的设计值为极限承载力乘以小于1.0的系数, 荷载组合为标准组合, 其倒数值相当于安全系数, 由笔者计算, 见表6。

表6 日本港口设施规范安全系数

设计情况	分项系数 (安全系数)	
	端承桩	摩擦桩
可变荷载为船舶靠泊	0.4(2.5)	0.4(2.5)
可变荷载为船舶作用	0.4(2.5)	0.4(2.5)
可变情况为level 1 地震	0.66(1.51)	0.5(2.0)
可变情况为门机运转	0.4(2.5)	0.4(2.5)
可变情况为波浪作用	0.66(1.51)	0.5(2.0)

注: level 1 地震为50 a基准期内重现期为75 a一遇的地震。

4) 中国港口工程桩基规范, 因为验算桩基承载力时, 设计桩力值组合不是按标准组合得出, 桩力设计值小于桩基承载力按极限承载力除以一个单桩轴向承载力分项系数 γ_R , 按静载试验时, 1.3 ~ 1.4; 按经验参数法时, γ_R 取1.45 ~ 1.55, 考虑荷载分项系数后, 其折算的安全系数接近2.0。

5) 欧洲标准, Eurocode 7: Geotechnical design^[6]内没有列出具体的按土工试验或现场测试计算桩基承载力的具体方法, 但对承载力验算非常具体,

按规定的荷载分项系数计算桩的设计值 $F_{c;d}$ ，然后验算 $F_{c;d} \leq R_{c;d}$ ， $R_{c;d}$ 为桩基承载力的设计值，由端阻力设计值 $R_{b;d}$ 及侧阻力设计值 $R_{s;d}$ 组成，端阻力及侧阻力的设计值分别由桩基桩端阻力、桩侧阻力特征值 $R_{b;k}$ 和 $R_{s;k}$ 除以分项系数 γ_b 和 γ_s ，这两系数与荷载组合分项系数，土壤参数分项系数及打入桩的抗力系数有关；而特征值为单桩试验或计算的极限值除以相关系数 ξ ，下面所列为根据土工试验或现场测试计算的桩基承载力表达式：

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d} \quad (17)$$

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b \quad (18)$$

$$R_{s;d} = R_{s;k} / \gamma_s \quad (19)$$

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = (R_{b;cal} + R_{s;cal}) / \xi =$$

$$R_{c;cal} / \xi = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{\text{mean}}}{\xi_3}, \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\} \right\} \quad (20)$$

式中：mean为平均值；min为最小值；对于静载试桩其相关系数分别为 (ξ_1, ξ_2) ，对PDA得出的极限承载力，其相关系数为 (ξ_5, ξ_6) ，其相关系数列于表7~9， n 为试验数量。

表7 从静载试桩结果计算特征值的相关系数

ξ	n				
	1	2	3	4	5
ξ_1	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
ξ_2	1.40	1.20	1.05	1.00	1.00

表10 某钻孔土层分布

土层编号	名称	土层顶底高程/m	天然密度/(t·m ⁻³)	液性指数	平均标贯击数	平均固结快剪指标	
						内摩擦角/(°)	凝聚力C/kPa
①	淤泥质粉质黏土	-18.0~-40.0	18.1	1.23	3	24	11
②	粉细砂	-40.0~-50.0	18.9		20		
③	粉细砂	-50.0~-60.0	19.4		35		
④	黏性土混砂砾	-60.0~-72.0	20.5	0.21	36	24	54

根据此钻孔资料，对直径1 200 mm开口钢管桩进行承载力计算，桩底高程按-65 m考虑。见表11。

表11中，对于端阻力为方便比较，统一按闭塞系数考虑，国外经常按桩端全面积乘以桩端阻力，或桩端环面积乘以桩端阻力加0.5~0.6倍桩内壁摩擦力，取两者之中小值；按BS规范计算时，砂土桩侧阻力按2N（标贯击数考虑）；按新加坡规范计算时桩侧阻力按其平均值考虑；按日本规范计算时，黏性土桩侧阻力按土凝聚力取值并根

表8 按土工试验或现场测试计算结果计算特征值时的相关系数

ξ	n						
	1	2	3	4	5	6	7
ξ_3	1.40	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25
ξ_4	1.40	1.27	1.23	1.20	1.15	1.12	1.08

表9 从桩基动测结果计算特征值的相关系数

ξ	n				
	2	5	10	15	20
ξ_5	1.60	1.50	1.45	1.42	1.40
ξ_6	1.50	1.35	1.30	1.25	1.25

如果换算成安全系数法，从上面表格可以得出，按静载试验时其需要的安全系数最小，用土工指标计算次之，按桩基动测结果所需的安全系数最大。

此外，结构沉降也是在桩基工程中需要考虑的，由于通过土工指标进行沉降计算本身偏离实际值较大，对于沉降量要求较小的结构，通过桩基承载力控制，要求安全系数大一些；根据对桩基直径最大到600 mm的桩无论在黏土中还是砂土中一系列静载试验压至破坏，当试验荷载的安全系数取2.5时，桩顶的沉降量一般不超过10 mm^[7]。

4 算例

以某工程钻孔按各种标准进行计算，土层分布及参数见表10。

据规范内说明根据场地条件调整，本例对深层黏土桩侧阻力值进行了调整。

从表11量值上看，所列各种方法估算极限承载力存在一定差异，最大达145%。

5 结语

对于按经验公式估算桩基极限承载力，可以参考多种规范或手册，对于不得不竞标的工程，需要参阅多种规范，做到既能满足要求而又不过

表11 桩基极限承载力估算

规范	土层编号	桩侧平均阻力/kPa	桩端阻力/kPa	桩基承载力/kN
中国港口工程标准	①	12		
	②	65		9 643
	③	86		
	④	97	2 500	
BS 8004	①	25		
	②	40		9 797
	③	70		
	④	130	2 440	
API标准	①	19		
	②	80		11 157
	③	96		
	④	98	2 440	
日本港口设施	①	11		
	②	40		7 677
	③	70		
	④	100	1 627	
新加坡规范	①	12~50		
	②	40~100		12 641
	③	70~105		
	④	65~260	2 440	

分保守。桩基承载力安全系数取值根据设计者的经验，对于组合设计环境荷载如波浪等情况，安全系数可以取得小一些，而正常作业情况，安全系数需要取得大一些，对于对沉降敏感或沉降要求严的结构，如码头上有门机荷载或经常需要堆货的，安全系数应该大一些，应注意方法不同、岩土资料不同，采用安全系数不同。

参考文献：

[1] JTS 167-4-2012 港口工程桩基规范[S].
[2] API RP-2A-WSD. Recommended practice for planning,

designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design[S].
[3] BS 8004:1986 British standard code of practice for foundations[S].
[4] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S].
[5] CP4: 2003 Code of practice for foundations[S].
[6] NF EN 1997-1 Geotechnical design[S].
[7] Tomlinson M, Woodward J. Pile Design and Construction Practice[M]. 5th edition. Boca Raton: CRC Press, 2007.

(本文编辑 武亚庆)

