



# 某集装箱码头桩基承载力理论计算与 静载试验对比分析

陈洁, 余神光, 张晓晨, 覃杰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 依托某集装箱码头工程的后轨道梁桩基, 针对开口钢管桩和半闭口钢管桩两种形式, 详细对比国内外常用桩基承载力经验公式计算结果的差异, 并与现场静载试验结果进行对比。结果显示: 对于砂性土与黏性土成层交替分布的地基, 国内外桩基承载力经验公式在侧摩阻力、端阻力、桩端闭塞效应、总承载力计算结果上均存在一定的差异, 与静载试验结果相比也有所偏差。按国内规范计算的总承载力与静载试桩结果基本接近, 国外经验公式的偏差较大。半闭口桩尖可显著提高砂质地基的桩端承载力, 桩端闭塞系数可达 0.8 以上。相关结论可供类似工程借鉴。

**关键词:** 桩基承载力; 静载试验; 开口桩; 半闭口桩

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0085-07

## Calculation of pile bearing capacity and static loading test of a container terminal

CHEN Jie, YU Shenguang, ZHANG Xiaochen, QIN Jie

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Relying on one rear crane pile static load test of a container terminal project, for open-end and semi-open end steel tubular piles, the analysis on the results of the common calculation methods on the pile bearing resistance used at home and abroad, as well as the comparisons between the calculation results and the pile test results have been carried out. It is found that there are certain differences on the calculated results on the friction, end and total bearing resistance with different common calculation methods as well as the results of pile load test for the soil conditions with sand and clay distributed alternately. The total resistance calculated by the method stated in the domestic code is close to the results of pile load test while the methods stated in foreign codes have relatively large derivation with the load test. The semi-open pile shoes can significantly improve the pile end bearing resistance and the pile plug coefficient can reach more than 0.8. The conclusions may be reference for similar projects.

**Keywords:** pile bearing capacity; static load test; open end pile; semi-open end pile

桩基是水运工程中常见的基础形式, 目前国内外规范、手册中推荐了各类桩基的承载力经验计算公式, 各公式计算出的侧摩阻力、桩端阻力、总承载力存在差异<sup>[1-3]</sup>, 工程实践中需通过现场试桩对承载力进行验证。此外, 不同的桩端形式对钢管桩的承载力有着显著的影响, 对于半闭口桩端形式, 国内外规范中未给出明确的方法, 如中

国现行水运行业规范《码头结构设计规范》中针对半敞口钢管桩仅给出“参照同条件的敞口钢管桩酌情增大”的规定, 王新等<sup>[4]</sup>针对半闭口和闭口钢管桩在硬黏土中的承载力进行了研究。依据中国现行水运行业规范 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[5]</sup>(国内规范)、欧洲工程手册 Pile Design and Construction Practice(Tomlinson 手册)<sup>[6]</sup>、美国

收稿日期: 2022-08-30

作者简介: 陈洁 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口海工结构设计工作。

石油协会规范 American Petroleum Institute. Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms (API 标准)<sup>[7]</sup>, 采用其中推荐的桩基承载力经验公式进行理论计算的对比分析, 依托某集装箱码头的后轨道梁桩基, 针对开口钢管桩和半闭口钢管桩两种形式, 与现场静载试验结果进行对比分析。相关结论可为类似项目的桩基设计提供参考。

## 1 桩基承载力理论计算方法

### 1.1 侧摩阻力

1) 国内规范。桩侧摩阻力未区分桩身外壁与内壁; 桩侧摩阻力值按规范查表取值, 其中黏性土的侧摩阻力与土层深度、液性指数  $I_L$  有关, 砂性土的侧摩阻力与土层深度、密实度有关。

2) Tomlinson 手册。桩侧摩阻力包含桩身外壁、内壁两部分, 一般默认桩身外壁、内壁的侧摩阻力一致, 桩侧摩阻力  $q_{sk}$  按下式计算:

$$\text{砂性土: } q_{sk} = K_s \sigma'_{v0} \tan \delta_f \quad (1)$$

$$\text{黏性土: } q_{sk} = F \alpha_p c_u \quad (2)$$

式中:  $K_s$  为水平土压力系数;  $\sigma'_{v0}$  为上覆土体自重应力, kPa;  $\delta_f$  为桩土之间的摩擦角, ( $^\circ$ );  $F$  为与桩长与桩径的比值  $L/B$  相关的长度系数;  $\alpha_p$  为与不排水剪切强度与上覆土体自重应力的比值  $c_u/\sigma'_{v0}$  相关的峰值黏滞系数;  $c_u$  为黏性土的不排水剪切强度, kPa。

3) API 标准。桩侧摩阻力的计算思路与 Tomlinson 手册基本类似, 桩侧摩阻力  $q_{si}$  计算公式为:

$$\text{砂性土: } q_{sk} = K_s \sigma'_{v0} \tan \delta_f \quad (3)$$

$$\text{黏性土: } q_{sk} = \alpha c_u \quad (4)$$

式中:  $K$  为水平土压力系数;  $\alpha$  为与不排水剪切强度和上覆土体自重应力的比值  $\psi = c_u/\sigma'_{v0}$  相关的系数。

Tomlinson 手册和 API 标准中均规定了砂性土的侧摩阻力上限, 若按公式计算出的侧摩阻力超过规定限值, 则应取限值。

### 1.2 端阻力

1) 国内规范桩端阻力按规范查表取值, 黏性土的桩端阻力与土层深度、液性指数  $I_L$  有关, 砂性土的桩端阻力与土层深度、密实度有关。

2) Tomlinson 手册和 API 标准关于桩基端阻力  $q_R$  的计算方法基本一致, 砂性土的桩端阻力与土体上覆自重应力相关, 黏性土的桩端阻力与土体的不排水剪切强度相关:

$$\text{砂性土: } q_R = N_q \sigma'_{v0} \quad (5)$$

$$\text{黏性土: } q_R = 9c_u \quad (6)$$

式中:  $N_q$  为地基承载力系数, Tomlinson 手册中给出  $N_q$  与土体内摩擦角的关系曲线, API 标准给出了不同密实度的砂土对应的  $N_q$  值。

与侧摩阻力的规定类似, Tomlinson 手册和 API 标准中规定了砂性土的端阻力上限值。

### 1.3 桩端闭塞效应

在国内规范中, 无论桩端是否开闭口, 桩端承载力均按桩基外轮廓计算桩端面积, 通过桩端折减系数考虑桩端闭塞效应。对于开口管桩, 依据桩径和桩基入土深度确定相应的桩端折减系数; 对于半闭口桩端, 国内规范持力层为黏性土时, 桩端折减系数的增大值不宜大于敞口的 20%, 较密实砂性土桩端折减系数的增大值可适当增加。

Tomlinson 手册与 API 标准中, 除桩端设置完全封闭钢板, 则均应计算判断桩端闭塞效应, 对于半闭口桩端应按开口桩进行计算。当桩内侧的侧摩阻力大于桩内部土体端阻力时, 认为桩端闭塞, 桩基承载力考虑为桩身外侧摩阻力与桩端(含内部土体)的端阻力之和; 当桩内侧的侧摩阻力小于桩内部土体端阻力时, 桩端不闭塞, 桩基承载力考虑为桩身外、内侧壁侧摩阻力与桩端(钢管桩净截面)的端阻力之和。

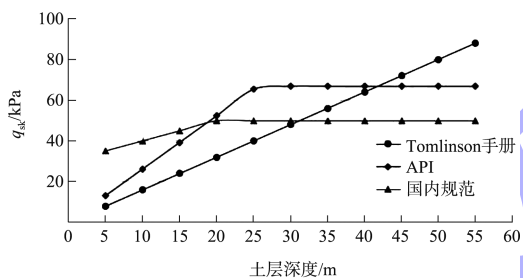
## 2 桩基承载力理论计算对比

### 2.1 砂性土侧摩阻力

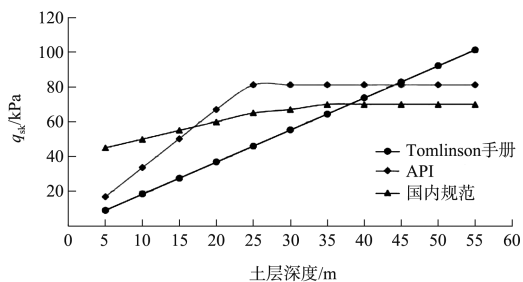
Tomlinson 手册、API 标准和国内规范中, 砂性土的侧摩阻力均与土体自重应力密切相关。此外, Tomlinson 手册和 API 标准考虑水平土压力系

数和土体外摩擦角,国内规范则根据砂性土的密实度进行统计分析。

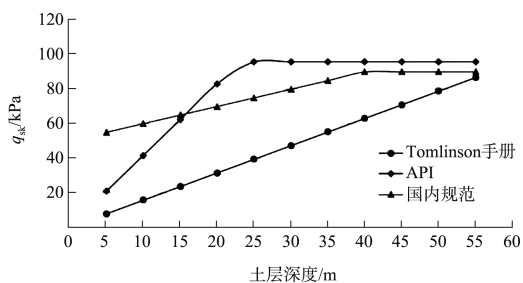
分别按照3个标准计算不同密实度砂性土侧摩阻力随深度的变化曲线,见图1。Tomlinson手册计算的砂性土侧摩阻力小于API标准,这是由于水平土压力系数 $K$ 的差异,API标准规定开口桩 $K=0.8$ ,不考虑土体密实度的影响,Tomlinson手册中,水平土压力系数 $K_s$ 与砂性土的密实度相关,对于开口桩,松散砂取0.50、中密砂取0.45、密实砂取0.35,均小于API标准。随着土层深度增加,Tomlinson手册计算值将逐渐超过API标准,因API标准对不同密实度的砂性土给出对应的侧摩阻力上限值(47.8~114.8 kPa),Tomlinson手册只规定120 kPa上限。国内规范的推荐值介于API标准和Tomlinson手册之间,砂性土越密实,国内规范的推荐值越接近API标准。



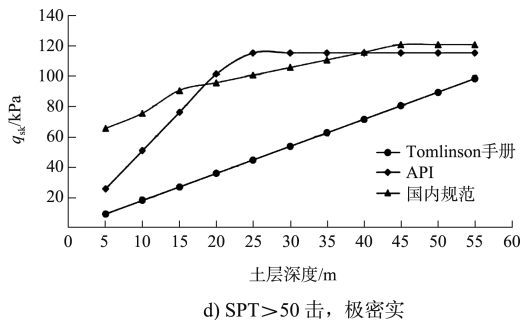
a) SPT=10 击, 稍密



b) SPT=20 击, 中密



c) SPT=35 击, 密实



d) SPT&gt;50 击, 极密实

图1 砂性土侧摩阻力的理论计算值对比

## 2.2 黏性土侧摩阻力

对于黏性土, Tomlinson手册和API标准中侧摩阻力与黏性土的不排水剪切强度 $c_u$ 线性相关,考虑与不排水剪切强度和上覆土体自重应力的比值 $\psi=c_u/\sigma'_{v0}$ 相关的峰值折减系数 $\alpha$ 或 $\alpha_p$ ,由图2可知,API和Tomlinson手册中峰值折减系数的曲线基本接近。

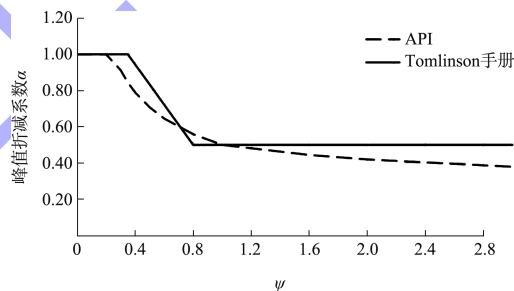
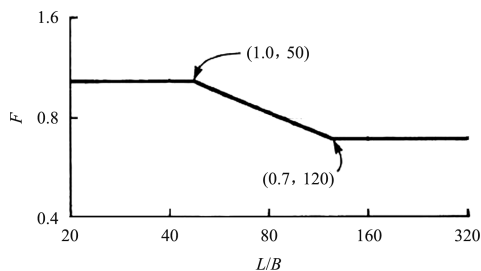


图2 Tomlinson手册和API标准中峰值折减系数对比曲线

Tomlinson手册中额外考虑了与桩长与桩径比值( $L/B$ )相关的折减系数 $F$ ,见图3,当 $L/B\leq 50$ , $F$ 取值1.0,当桩径1.0~1.2 m,桩长入土深度为50~60 m时可不考虑该系数的影响,API和Tomlinson手册计算出的黏性土的侧摩阻力基本一致。

图3 折减系数 $F$ 与 $L/B$ 关系

国内规范的黏性土侧摩阻力,与土层深度和液性指数  $I_L$  相关,与 Tomlinson 手册、API 的计算方法相差较大,且与土层深度直接相关,随土层深度增加而增大,但当土层深度为 20~35 m 时,侧摩阻力达到上限值,不再随深度增长。

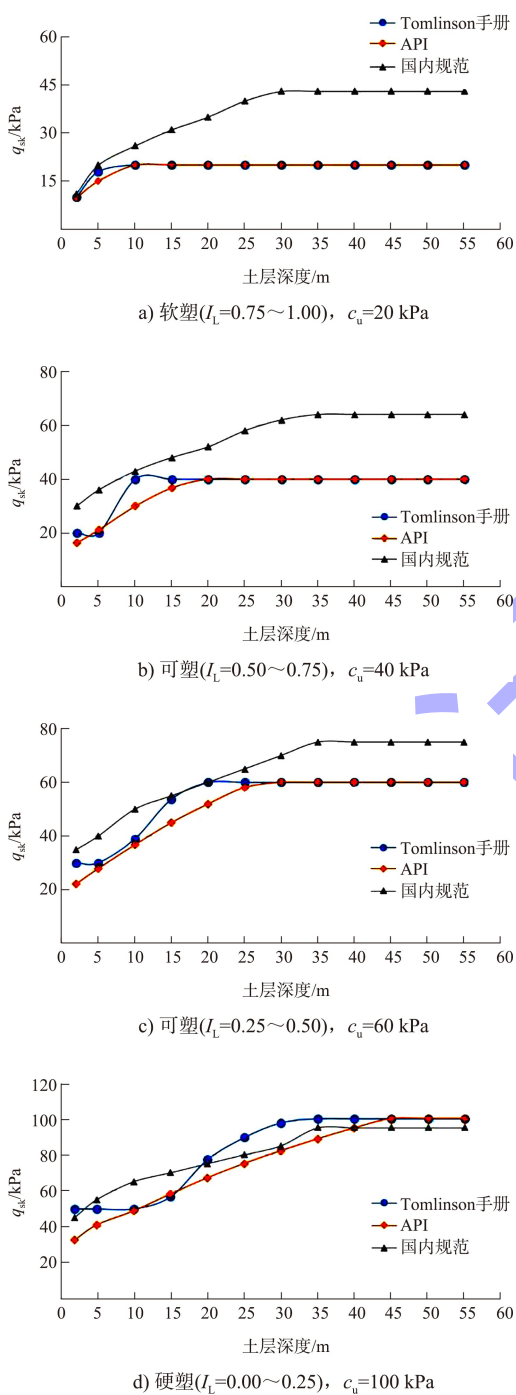


图4 黏土 ( $I_p > 17$ ) 侧摩阻力的理论计算值对比

分别按照 3 个标准计算出的不同强度的黏土 ( $I_p > 17$ ) 随深度的变化曲线,见图 4。可知, Tomlinson 手册和 API 标准计算的黏性土侧摩阻力

上限值完全相同;未达到上限时 Tomlinson 手册的计算值略大于 API 标准;随着土体强度的增加,上限值出现的深度逐渐从软黏土的  $<10$  m 加大至硬黏土的 35 m 左右;对于大部分黏土,国内规范给出侧摩阻力远大于 API 标准和 Tomlinson 计算值,上限值高 25%~100%;对于硬黏土,三者计算结果差别相对较小,国内规范的上限值甚至略小于 API 标准和 Tomlinson 计算值。

## 2.3 端阻力

Tomlinson 手册和 API 标准在端阻力计算上基本相同,对于黏性土,端阻力均为 9 倍的不排水剪切强度  $c_u$ ;对于砂性土,两者承载力性能系数  $N_q$  取值规定有所区别。

以密实-极密实砂为例,API 的  $N_q$  推荐值分别为 40 和 50,而 Tomlinson 手册中则是给出了  $N_q$  和内摩擦角、 $L/B$  的关系曲线,见图 5。Tomlinson 手册中密实砂内摩擦角推荐值为  $35^\circ \sim 40^\circ$ ,  $N_q$  取 50~120;极密实砂内摩擦角推荐值大于  $40^\circ$ ,  $N_q$  取 120~150,数值均大于 API 标准。

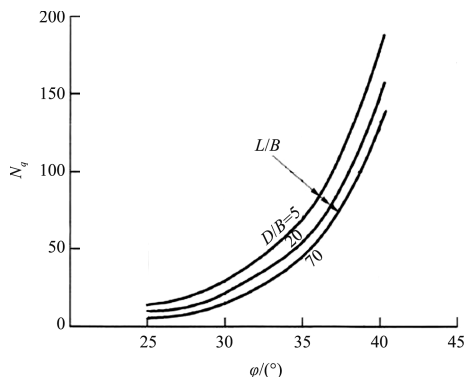


图5 Tomlinson 手册中  $N_q$  曲线

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

项目位于非洲西海岸,泊位长 680 m,设计船型为 18.5 万 DWT 集装箱船,码头结构采用单锚钢管板桩组合结构,码头面高程为 5.45 m。后轨道梁基础采用直径 1.15 m、壁厚 16 mm 的钢管桩,钢管桩设计压桩力为 4 577 kN,根据地质分布情况采用两种桩尖形式:1)硬砂层较深区域采用常规的开口钢管桩,设计桩底高程为 -36 m;

2) 硬砂层较浅区域采用半闭口桩尖形式的钢管桩,即在钢管桩桩端内套一段长 2.6 m、桩径 0.5 m 的

小钢管芯,管芯与钢管桩通过焊接 8 片肋板连接,桩底高程为-26 m,见图 6。

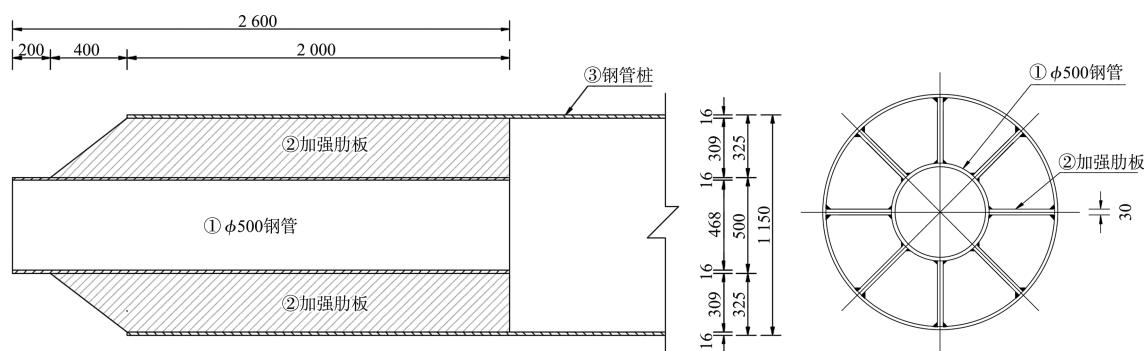


图 6 半闭口桩尖结构 (单位: mm)

项目地质以细砂、中砂、黏土、中粗砂交替分布为主,成层特性显著,钢管桩设计持力层均

在密实中粗砂层, 2 根试桩处的参考钻孔资料, 见表 1。

表 1 各公式计算和静载试桩的侧摩阻力

土层名称	土层高程/m	标贯击数/击	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	$c_u/\text{kPa}$	$I_L$	砂土密实度	$\delta_t/(^{\circ})$	侧摩阻力 $q_{sk}/\text{kPa}$	
② <sub>2</sub> 中粗砂	-1.4~-3.0	10~23	30	-	-	稍密	-	25	国内规范
							20.0	7	API
							21.0	4	Tomlinson
							-	13	试桩
② <sub>3</sub> 细砂	-6.0~-1.4	52~75	42	-	-	密实	-	55	国内规范
							30.0	35	API
							29.4	15	Tomlinson
							-	64	试桩
② <sub>4</sub> 细砂-中砂	-9.0~-6.0	21~35	35	-	-	中密	-	50	国内规范
							20.0	35	API
							24.5	25	Tomlinson
							-	47	试桩
③ <sub>2</sub> 细砂-中砂	-11.1~-9.0	7	28	-	-	松散	-	40	国内规范
							15.0	31	API
							19.6	26	Tomlinson
							-	25	试桩
③ <sub>3</sub> 黏土	-14.0~-11.1	4	-	20	0.96	-	-	30	国内规范
							-	20	API
							-	20	Tomlinson
							-	23	试桩
④ <sub>1</sub> 黏土	-17.0~-14.0	3~5	-	20	0.92	-	-	33	国内规范
							-	20	API
							-	20	Tomlinson
							-	24	试桩
⑥ <sub>1</sub> 黏土	-19.7~-17.0	9	-	50	0.33	-	-	45	国内规范
							-	50	API
							-	50	Tomlinson
							-	49	试桩

续表1

土层名称	土层高程/m	标贯击数/击	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	$c_u/\text{kPa}$	$I_L$	砂土密实度	$\delta_t/(^{\circ})$	侧摩阻力 $q_{sk}/\text{kPa}$	
⑥ <sub>1</sub> 黏土	-29.7~-19.7	12~14	-	60	0.33	-	-	65~75	国内规范
								58	API
								60	Tomlinson
								55~57	试桩
⑦ <sub>0</sub> 中砂	-31.1~-29.7	13	29	-	-	稍密	-	55	国内规范
							20.0	67	API
							20.3	54	Tomlinson
							-	50	试桩
⑧ <sub>1</sub> 中粗砂	-36.0~-31.1	30~35	35	-	-	密实	-	110	国内规范
							30.0	96	API
							25.2	59	Tomlinson
							-	73	试桩

3.2 桩基静载试验

桩基静载试验采用堆载法，分别对 1 根开口钢管桩 TP<sub>1</sub>、1 根半闭口钢管桩 TP<sub>2</sub> 进行竖向抗压静载试验，按美国标准 ASTM D1143 执行。静载荷试验进行 2 次加载循环，首次加载循环最大加载力为设计压桩力的 2 倍即 9.154 MN，每级荷载维持时间 1 h；第二次加载最大加载力为设计压桩力的 2.5 倍即 11.443 MN，每级荷载维持时间 15 min；两次循环之间停歇 12 h。TP<sub>1</sub>、TP<sub>2</sub> 沿桩长每 2 m 埋设 1 组传感器用于检测桩身侧摩阻力，确定各土层桩侧摩阻力。试验结果表明：

1) 开口桩 TP<sub>1</sub>：第 2 次加载循环中，荷载超过 9.154 MN 后开始出现较大沉降，荷载 9.726 MN 时桩底沉降已达到 173.38 mm，遂终止加载，进行卸载。可判定 TP<sub>1</sub> 桩的极限承载力不小于 9.154 MN，但小于 9.726 MN。

2) 半闭口桩 TP<sub>2</sub>：第 2 次加载循环中，荷载达到 2.5 倍设计压桩力 11.443 MN 后，沉降变化仍在可控范围内，现场随后进行卸载，完成 2 次加载循环。TP<sub>2</sub> 桩基 Q-S 曲线未出现明显沉降骤降，且桩身最大沉降不到 26 mm，该桩在加载中未达到破坏状态，可判定 TP<sub>2</sub> 桩的实际桩基承载力应大于 11.443 MN，即大于 2.5 倍设计压桩力。

3.3 承载力计算结果与试验结果分析

鉴于 TP<sub>2</sub> 桩在试桩加载中未破坏，无法获得 TP<sub>2</sub> 钢管桩的极限侧摩阻力，因此根据 TP<sub>1</sub> 桩的试

验结果，对比各规范经验计算公式与静载试验的差异，TP<sub>1</sub> 的侧摩阻力见表 1。

1) 黏性土侧摩阻力：静载试验结果与按 API 标准、Tomlinson 手册计算得出的桩身外侧壁侧摩阻力较为接近，国内规范直接查表得出黏性土侧摩阻力相对偏大。

2) 砂性土侧摩阻力：各经验公式计算的侧摩阻力均与静载试验结果差异较大，对于深度 35~40 m 的密实中粗砂⑧<sub>1</sub>，试桩结果与 Tomlinson 手册计算值较为接近，API 标准和国内规范推荐值均偏大；深度 30~35 m 的稍密中砂⑦<sub>0</sub>，试桩结果与按 Tomlinson 手册和国内规范计算值较为接近，API 标准偏大；对于浅层 0~15 m 中密-密实砂性土，试桩结果与按国内规范查表结果更为接近，API 计算值偏小，Tomlinson 手册中水平土压力系数取值过小导致计算出的密实砂侧摩阻力值远小于试桩结果。

3.4 桩端闭塞效应

3 个标准计算的桩端阻力与试验结果比较，见表 2。

1) API 标准、Tomlinson 手册计算的桩端阻力为钢管桩的净截面上的端阻力，相比试桩结果明显偏小，国内规范按桩底全截面考虑闭塞系数后的桩端阻力与试桩结果更为接近。

2) 对于开口桩，按照国内规范计算的桩端阻力与试桩结果基本接近，对于桩径 1.15 m，入土深度近 40 m 的钢管桩，桩端闭塞系数 0.35 取值

基本合理。

3)对于半闭口桩, 桩底增加桩靴后, 桩端闭塞效应显著提高, 闭塞系数取值 0.8 以上。

4)对于开口桩, 静载试验的总侧摩阻力小于各经验公式的理论计算结果, 总摩阻力与国内规范较为接近, API 标准和 Tomlinson 手册考虑桩身内外侧摩阻力总和的数值明显偏大; 静载试验的总承载力小于各经验公式的理论计算结果。

表 2 桩基承载力比较

项目	开口桩 TP <sub>1</sub>			半闭口桩 TP <sub>2</sub>		
	侧摩阻力/MN	端阻力/kN	桩基承载力标准值/MN	侧摩阻力/MN	端阻力/kN	桩基承载力标准值/MN
API	12.506 <sup>①</sup>	570 <sup>②</sup>	13.076	10.530 <sup>①</sup>	827 <sup>②</sup>	11.357
Tomlinson 手册	10.255 <sup>①</sup>	627 <sup>②</sup>	10.792	7.384 <sup>①</sup>	910 <sup>②</sup>	8.294
国内规范	8.130	2 799 <sup>③</sup>	10.929	6.522	5 983 <sup>③</sup>	12.505
试桩	6.194	2 950	9.154	>5.193	>6 250	>11.443

注: ①为桩外壁、内壁侧摩阻力之和; ②为无论开口桩、半闭口桩经判别均未达到闭塞, 桩底面积仅考虑 16 mm 厚的钢管桩截面面积, 半闭口桩多考虑肋板与内部 500 mm 桩径的钢管桩净截面面积; ③开口桩闭塞系数取 0.35, 半闭口桩取 0.80。

5 结论

1)黏性土的侧摩阻力, API 标准、Tomlinson 手册计算值与静载试桩结果更为接近, 国内规范查表推荐值偏大, 黏性土侧摩阻力建议用 API 和 Tomlinson 手册推荐公式进行校核。

2)砂性土的侧摩阻力, 各计算方法与试桩结果偏差较大。浅层 0~15 m 密实砂, Tomlinson 手册计算值明显偏小, 设计中建议采用 API 和国内规范推荐值比较分析; 深层 30 m~35 m 密实砂, Tomlinson 手册计算值与试桩结果较接近, API 和国内规范推荐值相对偏大, 建议采用 Tomlinson 手册推荐公式进行校核; 深度超过 55 m, Tomlinson 手册的侧摩阻力上限值偏大, 计算值将大于国内规范和 API 标准。

3)国内采用基于试桩数据统计分析的经验参数法, 侧摩阻力考虑桩身外侧, 桩端阻力考虑闭塞效应, 其总承载力、侧摩阻力、端阻力与静载试桩结果均较为接近; 而 API 标准、Tomlinson 手册通过计算判别桩端闭塞来确定总承载力, 与试桩结果相差偏大, 建议国外项目桩基设计考虑采用国内规范计算方法进行校核。

4)对于砂质持力层的开口桩经静载试桩验证, 开口桩闭塞系数取 0.35, 与国内规范推荐值接近; 对于砂质持力层的开口桩和半闭口桩, 经静载试桩验证, 当钢管桩桩底增加半闭口桩靴后, 桩端闭塞效应显著提高, 闭塞系数可取值 0.8 以上,

大于国内水运规范的推荐值。

5)实际工程中, 对于持力层较浅的区域可选用半闭口桩来提高钢管桩的抗压承载力; 砂性土与黏性土成层交替分布的地质条件下, 钢管桩通过增加半闭口桩靴, 桩基承载力提高 25% 以上, 且施工中沉桩顺利, 可为类似地质条件下的工程项目提供参考。

参考文献:

[1] 吴志良, 程泽坤. 各国打入桩承载力估算方法及对比[J]. 水运工程, 2013(10): 218-223.

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

[3] 陈凯, 曹虎麒, 胡振明. 中外规范桩基承载力计算对比[J]. 水运工程, 2020(5): 229-234.

[4] 王新, 邱青长, 尹培林. 克里比深水港工程钢管桩桩端结构选型[J]. 水运工程, 2015(3): 178-182.

[5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JST167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[6] TOMLINSON M J, WOODWARD J. Pile design and construction practice[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.

[7] American Petroleum Institute. Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API recommended practice 2A-WSD [S]. Washington D. C.: API Publishing Services, 2014.

(本文编辑 赵娟)