

文章编号:1671-8879(2011)02-0052-05

季冻区摩擦单桩承载力计算分析

王海鹏¹, 单 炜¹, 王 平¹, 毕树琦²

(1. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 黑龙江省富锦至绥滨松花江大桥工程建设指挥部, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:为了验证季冻区摩擦单桩的初步设计桩长和检验初步设计参数的准确可靠性, 计算了超长桩轴向容许承载力及桩的沉降量, 观测了某桥梁桩的顶位移与荷载、基桩极限摩阻力和极限承载力, 与理论计算结果进行了对比分析。研究表明: 理论计算沉降量与实测的误差是 6.31%, 两组数据基本吻合, 说明试桩过程和试桩加载数据合理; 试桩受力比较充分, 但承载力小于预期极限荷载, 说明其实际承载能力对于设计要求来说略显不足; 桩侧摩阻力和桩底阻力的发挥程度与桩土之间的变形有关, 试桩的桩顶荷载起初由桩侧土承担, 在达到一定荷载值时, 桩端阻力开始发挥作用, 在极限状态时, 桩侧摩阻力、桩端阻力发挥都比较充分。

关键词:桥梁工程; 寒区桥梁; 超长桩; 桩基承载力

中图分类号: U445.551

文献标志码: A

Calculation and analysis of friction pile bearing capacity in season frozen area

WANG Hai-peng¹, SHAN Wei¹, WANG Ping¹, BI Shu-qi²

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang,

China; 2. Engineering Headquarters of Heilongjiang from Fujin to Suibin Songhua Jiang

River Bridge, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To verify the accuracy and reliability of the pile length and parameter adopted by primary design, the axial bearing capacity and settlement of super-long pile were calculated. The displacement of pile cap and load or time, resistance of pile bottom and ultimate bearing capacity of pile were measured, the results were compared to the calculating results. The research results show that: the error of the settlement between the theoretical calculation and practice is 6.31%, two sets of data are consistent with the bored piles process and load data reasonable; bearing capacity of test pile is full, but it is less than that expected, which shows the ultimate load bearing capacity for actual design requirements is insufficient; the friction of pile side is resistance with the deform between pile and soil, the load of the bored pile top is loaded by the soil at beginning when it reaches a certain load value, the pile endpoint resistance come into action, the pile side friction, bottom resistance are fully in operation at limit state. 4 tabs, 3 figs, 11 refs.

Key words: bridge engineering; cold area bridge; ultra-long pile; pile bearing capacity

0 引言

由于桩土之间作用的复杂性和各地区地质条件的多样化和多变性,在实际工程中,桩的竖向承载力受到的影响是很大的,加之桩的类型、成桩材料、成桩施工工艺等的不同,其承载力也会受到影响。国内外学者针对桩基的轴向受压承载力已经进行了深入的研究,在桩基承载力的评定与试验方法等方面有了很大的突破。美国陆军部冷区研究与工程实验室在费尔班克斯多年冻土区,通过研究冻土的流变性能,以便理解和改善桩基承载力的工作机理^[1-2]。土的类型、地温已给定,可调整桩的材料及其尺寸和回填材料来优化桩的承载力。对于以沿桩表面摩擦发挥其支承作用的摩擦桩,在多年冻土区一年中最危险的时期通常是晚夏至初冬,此时荷载主要支承深度处的多年冻土的温度正处在最暖期。由于受拉桩发生横向收缩,因此,高拉伸荷载下的表面摩擦比压缩荷载下的表面摩擦小。

有学者对冻土中桩基破坏模式进行了模型试验研究,认为均质冻土中等截面竖直桩的荷载-沉降曲线呈陡降型,正常情况下存在着明显的“台阶”,其承载力主要受冻结强度所控制;并对冻土中模型桩在动荷作用下进行了沉降试验研究,认为冻土中桩的沉降过程主要是冻土在剪应力荷载作用下的流变过程^[3-5]。桩的沉降速度随冻土温度的升高而增大,随桩表面粗糙度的增大而减小,随地基刚度的增大而增大,与普通土中桩承载特性相似的冻土中含水量达到饱和时,桩的沉降速度最小;当荷载水平较高时,对应于动载下的沉降速度小于静载,随着荷载水平的降低,动载与静载对沉降速度的影响效果逐渐接近^[6]。通过冻土地区的单桩室内抗拔模型试验,认为冻土单桩承载力和冻结力均随冻结温度的下降,呈抛物线趋势增大,温度越低,强度越大^[7-8]。从以上分析可以看出,针对寒区的桩基承载力研究没有统一的结论。由于在高寒区,地区温差比较大,其中最大冻深达2 m以上,常有冻害现象,对桩的轴向承载力和沉降量有很大影响。为此,本文通过4根锚桩对试验桩逐级加载,参照规范对试验桩分级加载的方法,研究试验桩轴向承载力、桩侧摩阻力、桩端阻力等敏感性特征,对寒区的桥梁超长桩的承载力进行了分析研究^[9]。

1 摩擦桩单桩轴向受压承载力

摩擦桩单桩轴向受压承载力容许值公式为

$$R_a = \frac{1}{2} u \sum_{i=1}^n q_i l_i + A_p q_r$$

$$q_r = m_0 \lambda [f_{a0} + k_2 \gamma_2 (h - 3)]$$

式中: R_a 为单桩轴向受压承载力容许值(kN),桩身自重标准与置换土重标准值(当桩重计入浮力时,置换土重也计入浮力)的差值作为荷载考虑; u 为桩身周长(m); A_p 为桩端截面面积(m²),对于扩底桩,取扩底截面面积; n 为土的层数; l_i 为承台底面或局部冲刷线以下第*i*土层的厚度(m),扩孔部分不计; q_i 为与 l_i 对应的土层与桩侧的摩阻力标准值(kPa),宜采用单桩摩阻力试验确定; q_r 为桩端处土的承载力容许值(kPa); f_{a0} 为桩端处土的承载力基本容许值(kPa); h 为桩端的埋置深度(m),对于冲刷的桩基,埋深由一般冲刷线算起,对于无冲刷的桩基,埋深由天然地面线或实际开挖后的地面线算起, h 的计算值不大于40 m,当大于40 m时,按40 m算; k_2 为容许承载力随深度的修正系数; γ_2 为桩端以上各土层的加权平均重度,若持力层在水位线以下且不透水时,无论桩端以上土层的透水性如何,一律取饱和重度,当持力层透水时,则水中部分土层取浮重度; λ 为修正系数; m_0 为清底系数。

该摩擦桩的最终沉降量的计算公式为

$$s = \phi_s s_0 = \phi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_i} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$$

$$p_0 = p - \gamma h_d$$

式中: s 为地基最终沉降量(mm); s_0 为按分层总和法计算的地基沉降量(mm); ϕ_s 为沉降量经验系数,根据地区沉降量观测资料及经验确定; n 为地基沉降计算深度范围内所划分的土层数; p_0 为对应于荷载长期效应组合时的基础底面处附加压应力(kPa); E_i 为基础底面下第*i*层的压缩模量(MPa),应取土的“自重压应力”至“土的自重压应力和附加压应力之和”的压应力段计算; z_i, z_{i-1} 分别为基础底面至第*i*层土、第*i*-1层土的距离(m); $\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ 分别为基础底面计算点至第*i*层土、第*i*-1层土底面范围内平均附加压应力系数; p 为基底压应力(kPa); h_d 为基底埋置深度(m),当基础受水流冲刷时,从一般冲刷线算起,当不受水流冲刷时,从天然地面算起,如位于挖方内,则由开挖后的地面算起; γ 为 h_d 内土的重度(kN/m³),当基底为透水地基时,水位以下取浮重度。

对该试验桩计算时,不考虑浮重度的影响;在分层时按规范和经验 2 种方法取层厚;在取基础截面时,按照实际情况及锚桩的间距取正方形基础,其中,基础长度为 10 m;各土层的压缩模量和重度严格按照规范取值^[10-11]。

2 实例分析

2.1 工程背景

富锦松花江公路大桥地处北温带季风气候区,该桥所处地区大陆性气候特点十分明显,冬季严寒漫长,夏、秋降雨集中,春季干燥多风,秋季降温急剧,常有冻害发生。年平均气温为 2.5℃,年内温差较大,7 月份平均气温为 21.9℃,极端最高气温为 37.1℃,1 月份平均气温为-20.1℃,极端最低温度为-37.8℃,无霜期为 132~140 d,土壤最大冻深为 2.08 m。

该桥主墩采用整体式基础,每墩上下行共设桩基础 14 根,桩直径 2.0 m,长度 68 m,全桥共有 98 根。过渡墩采用分离式基础,每个承台下为 4 根直径 2.0 m 钻孔桩基础,桩长 50 m,全桥共有 16 根。

试桩长度为 45 m,位于 26#、27#墩之间的桥轴线上,距离 26#墩 25 m,采用传统试桩方法,即采用千斤顶、锚桩、反力梁加载法测试。

2.2 加载与沉降观测

在试桩四周,以试桩为中心对称布置 4 根锚桩,试桩与锚桩的中心距为 4 m,锚桩间中心距为 5.66 m,两侧设有 2 根基准桩,用以测量试桩的变形,基准桩与试桩的中心距为 4 m,与锚桩的中心距为 3.06 m。试验荷载 $P=20\,282\text{ kN}$ 。

采用慢速维持荷载法,用单循环方式进行加载。加载时采用等量分级进行,每级加载量为试验荷载的 1/10~1/15。在某级荷载作用下,1 h 内对应的沉降值小于 0.1 mm 时,可定为该级沉降达到稳定,可进行下一荷载等级的加载,且保证加荷平稳、连续、无冲击及无超载。根据现场实际情况,荷载加载分成 10 级分别进行(表 1)。每级荷载下沉降测读时间依 0、5、10、15、30 min 分别进行,以后每隔 30 min 测读一次,直至达到荷载维持时间的标准。

沉降观测:每级加载完毕后,第 5、10、15 min 各测读一次,以后每隔 15 min 观测一次,累计 1 h 后,每隔 30 min 观测一次。

沉降相对稳定的标准:每 1 h 的沉降不超过 0.1 mm,并连续出现 2 次(由 1.5 h 内连续 3 次观测计算),认为已达到相对稳定,可加下一级荷载。

表 1 试桩荷载分级及累计荷载

加载级别	每级荷载/ kN	累计荷载/ kN	加载级别	每级荷载/ kN	累计荷载/ kN
1	2 000	2 000	6	2 000	12 000
2	2 000	4 000	7	2 000	14 000
3	2 000	6 000	8	2 000	16 000
4	2 000	8 000	9	2 000	18 000
5	2 000	10 000	10	2 000	20 000

根据规范及参考上述资料,取桩长 $L=45\text{ m}$,埋深 $h=42\text{ m}$,桩径 $d=2\text{ m}$, $f_{a0}=200\text{ kPa}$;桩侧各土层厚度及摩阻力可由施工现场土层的力学指标查知,则桩端处土的承载力容许值 $q_r=657\text{ kPa}$ 。

该试验桩的轴向受压承载力容许值为

$$R_a = \frac{1}{2}u \sum_{i=1}^n q_i l_i + A_p q_r = 8\,837.53\text{ kN}$$

由反力梁加载法测得桩极限荷载为 18 000 kN,由经验取系数为 2,则容许承载力为 $18\,000/2=9\,000\text{ kN}$ 。由于 $8\,837.53\text{ kN}<9\,000\text{ kN}$,桩所承受的轴向压力小于桩容许承载力,故所加荷载合理

用分层总和法计算桩的沉降量。取桩尖平面处的平均压力进行计算,承台尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,根据规范,可取基础、桩和土的平均重度为 20 kN/m^3 。其中,桩端阻力 $G=42\,000\text{ kN}$,则

$$p_0 = \sum_{i=1}^n r_i h_i = 375.57\text{ kPa}$$

桩尖处土的附加压力 $\sigma_0=247.25\text{ kPa}$

其中,桩尖深入持力层 6.5 m,则计算厚度为 $16.3-6.5=9.8\text{ m}$ 。沉降量经验系数 $\psi_s=0.5$,另据规范附表,可查知系数 $\alpha_i=0.537\,0$, $E_i=12\text{ MPa}$,则由基础沉降量公式可得

$$s = \psi_s s_0 = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) = 0.5 \times \frac{247.25}{12} \times 526.26 = 54.22\text{ mm}$$

经计算,试验桩的最终沉降量为 54.22 mm。

3 试验结果分析

3.1 试桩变形测试结果

根据各级荷载下的荷载 Q 与沉降 s 对应关系,得到 $Q\sim s$ 及 $s\sim \lg(t)$ 曲线,如下页图 1、图 2 所示。

由图 1 可以看出,在最大荷载时,总沉降量 $s=63.643\text{ mm}$,卸载后残余沉降量为 57.876 mm ,与前面采用分层总和法计算的沉降量 54.22 mm ,误差为 6.31%,两组数据基本吻合,说明试桩过程和试桩加载数据合理,符合要求。另外,回弹量为 5.767

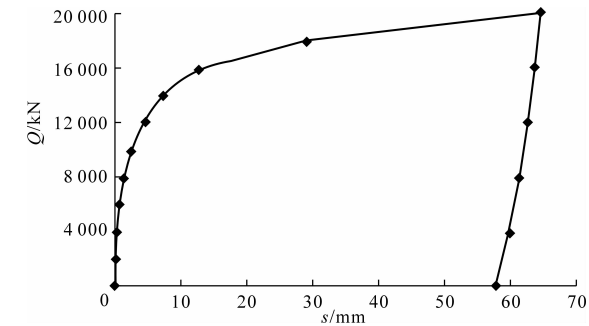


图 1 试桩的 $Q \sim s$ 曲线

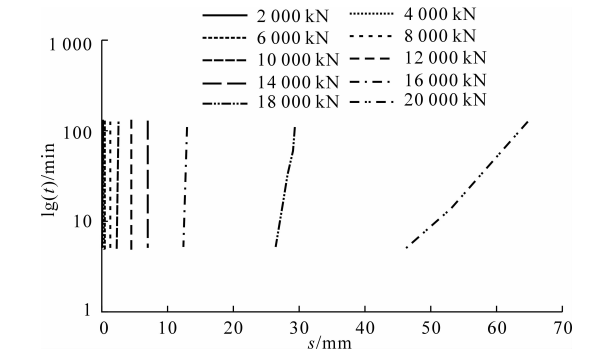


图 2 试桩的 $s \sim \lg(t)$ 曲线

mm,回弹率为 9.06%,桩身压缩所占比例较小,沉降主要为桩底沉降。

从图 2 可看出,前几级加载,每一级荷载内的沉降与时间关系曲线呈平缓排列,在 18 000 kN 级荷载时,曲线略显倾斜;在 20 000 kN 级荷载时,曲线开始突然变陡,认为试桩已被破坏。

3.2 应变测试结果

3.2.1 桩身轴力分布

试桩在逐级加载过程中,对埋入桩身不同深度测试元件实测结果进行整理,得到短试桩的桩身轴力分布,如图 3 所示。

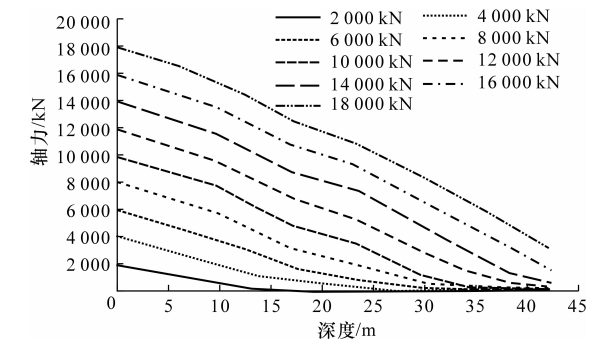


图 3 桩身轴力变化与分布

由图 3 可看出,桩身轴力随深度的增加逐渐减小,但在不同的地层条件和不同的加荷阶段有不同的递减速率。最初加载时荷载与桩侧摩擦力相平衡,桩底不受力;随着上部荷载的加大,力逐渐传至桩底并逐步加大,由于桩土间相对位移的产生,使得桩侧摩阻力也进一步增大。

3.2.2 桩侧摩阻力

基于加载过程中的桩顶变形、各桩身截面的实测应变及计算的桩身压缩变形所得出的各土层的桩侧摩阻力见表 2。

表 2 试桩各级荷载作用下桩侧摩阻力 f 的变化分布

土 层	各级荷载(kN)作用下桩侧摩阻力/kPa										桩侧摩阻力设计值/kPa
	0	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000	12 000	14 000	16 000	18 000	
中砂	0	22.6	31.9	34.9	36.7	38.4	38.9	40.0	39.6	39.3	40
砾砂	0	14.2	28.6	45.8	54.5	58.6	60.4	61.0	61.3	64.1	65
中砂	0	0.0	12.4	23.3	33.6	38.8	39.0	38.8	39.3	44.0	40
砾砂	0	0.0	4.9	14.7	31.8	56.3	56.8	61.2	62.2	63.7	65
粗砂	0	0.0	1.3	3.8	8.9	15.3	36.5	53.5	64.4	64.9	65

由表 2 可以看出,桩侧摩阻力随着桩顶荷载值的增加而增加,且部分土层在某一荷载级别下的桩侧摩阻力基本达到或超过设计采用值。荷载从上向下传递,亦即上部土层的摩阻力先于下部发挥作用,随着荷载增加,下部土层的侧摩阻力才逐渐发挥出来,其发挥是一个异步的过程,极限摩阻力小的土层其摩阻力容易发挥到极限。在接近极限荷载时,上部土层的摩阻力已经趋于稳定,而下部土层的摩阻力逐渐明显发挥,这是摩擦桩受力变形特性的反映。在极限状态下,各土层桩侧摩阻力的实测值基本小于设计值,与勘察结果略有差异,这与桩位的实际地

质条件有关,也与泥浆护壁等因素有关。

3.2.3 桩端阻力

桩端阻力与土的性质、持力层上覆荷载、桩径、桩底作用力、时间以及桩底端进持力层深度等有关。根据桩底压力盒的读数分析,在不同桩顶荷载作用下,试桩的桩端阻力及其与加载值的比值见下页表 3。

由表 3 可以看出,试桩在最大加载情况下的最大桩端阻力为 3 312 kN,占桩顶荷载值的 18.4%。

总体来说,桩侧摩阻力和桩底阻力的发挥程度与桩土之间的变形有关,并且各自达到极限时所需的位移量是不同的。根据以往试验资料及经验可知,

表 3 桩端阻力与加载值比较

加载值 Q/ kN	桩端阻力 G/kN	$\frac{G}{Q}/\%$	加载值 Q/ kN	桩端阻力 G/kN	$\frac{G}{Q}/\%$
2 000	0	0	12 000	201	1.675
4 000	0	0	14 000	605	4.321
6 000	0	0	16 000	1 698	10.612
8 000	0	0	18 000	3 312	18.400
10 000	0	0			

桩底阻力的充分发挥需要有较大的位移值,而桩侧摩阻力只要桩土间产生不太大的相对位移就能得到充分发挥。由于试桩沉降较大,因此桩底阻力发挥较为充分。

3.3 锚桩变形试验结果

试桩过程中对锚桩的上拔量进行了跟踪检测,锚桩的累计上拔量见表 4。试桩处加载到 20 000 kN 时终止加载,此时锚桩总上拔量均值为 1.095 mm。由此可知,试验桩的锚桩上拔量均远小于规范允许值(累计上拔量 100 mm)。现场观察,锚桩没有发生任何形式的破坏,反力加载装置完好。

表 4 锚桩最终上拔量 mm

锚桩编号		3 #			
锚桩上 拔量	位移	1.22	1.13	0.95	1.08
	平均值	1.095			

4 结 语

(1)卸载后残余变形较大,可以确定桩顶沉降主要是由桩底沉降引起,试桩受力比较充分,但承载力小于预期极限荷载,说明其实际承载能力对于设计要求来说略显不足;试验过程中锚桩上拔量远小于规范允许值,锚桩没有发生任何破坏。

(2)桩侧摩阻力和桩底阻力的发挥程度与桩土之间的变形有关,根据对桩身轴力以及桩侧摩阻力、桩端阻力的分析可知,试桩的桩顶荷载起初由桩侧土承担,在达到一定荷载值时,桩端阻力开始发挥作用,在极限状态时,桩侧摩阻力、桩端阻力发挥都比较充分。

参考文献:

References:

[1] Comini G,Guidice S,Lewis R W,et al. Finite element solution of nonlinear heat conduction problems with special reference to phasechang[J]. Internet Journal for Numerical Methods in Engineering,1974,16(8): 613-624.

[2] Combarieu O. Prossimeter test and the end-bearing

load of pile[J]. Bulletin de Liaison des Loratoires des Ponts et Chaussees,1996,203:61-73.

[3] 王 建,任文峰. 苏拉马都大桥钻孔桩泥浆性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(2):44-46.

WANG Jian,REN Wen-feng. Study on slurry character of suramadu bridge bored pile[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2007,24(2):44-46.

[4] 樊恒辉,高明霞,李 鹏,等. 粘土分散性的判别试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):76-80.

FAN Heng-hui,GAO Ming-xia,LI Peng,et al. Experimental study on clay dispensibility [J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2007,27(2):76-80.

[5] 胡琦忠,金伟良,史方华,等. 大型跨海桥梁基础结构正常使用极限状态的可靠度分析[J]. 中国公路学报,2008,21(1):53-58.

HU Qi-zhong,JIN Wei-liang,SHI Fang-hua,et al. Reliability analysis of foundation structures of off-shore long-span-bridges on serviceability limit states [J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(1):53-58.

[6] 高亚成,郑建青. 水泥土的室内试验研究[J]. 河海大学学报,1999,27(5):103-106.

GAO Ya-cheng,ZHENG Jian-qing. Test of Cement-soil in Laboratory[J]. Journal of Hehai University,1999,27(5):103-106.

[7] 胡庆立,张克绪. 大直径桩的竖向承载力性能研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(4):491-495.

HU Qing-li,ZHANG Ke-xu. Research on axial bearing behavior of large diamenter piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(4):491-495.

[8] 李素华,周 健,殷建华,等. 摩擦型单桩承载性能设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15): 2659-2664.

LI Su-hua,ZHOU Jian,YIN Jian-hua,et al. Study on bearing performane of friction pile foundation in complicatied soil-layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(15):2659-2664.

[9] 冯忠居,谢永利,李 哲,等. 大直径超长钻孔灌注桩承载力性状[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):24-27.

FENG Zhong-ju,XIE Yong-li,LI Zhe,et al. Bearing property of large-diameter over-length nonplacement pile[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(1):24-27.

[10] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[11] JTJ 24—85,公路桥涵地基与基础设计规范[S].