

# 多年冻土区未回冻钻孔灌注桩承载性质试验研究

## Experimental study on bearing features of bored pile under non-refreezing condition in permafrost region

王旭<sup>1</sup>, 蒋代军<sup>1</sup>, 赵新宇<sup>2</sup>, 刘德仁<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 青藏铁路建设总指挥部, 青海 格尔木 816000)

**摘要:** 为研究青藏高原多年冻土区钻孔灌注桩在未回冻状态下基桩承载力和变形性质, 解决后续承台、桥墩(台)的施工、上部结构的铺架以及对工期的影响等问题, 本文结合青藏铁路以桥代路特大桥工程进行高温细颗粒多年冻土钻孔灌注桩的现场静载试验, 根据现场地温测试及静载荷试验资料, 分析了桩-土体系回冻过程及其回冻过程中桩侧摩阻(或冻结力)的分布, 获得钻孔灌注桩灌注后不同地温条件下的竖向承载力及变形性质, 为后续工程的施工提供技术依据。

**关键词:** 多年冻土; 高温细颗粒冻土; 钻孔灌注桩; 地温; 竖向承载特性

中图分类号: TU 473.1<sup>4</sup>; TU 475.7<sup>2</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)01-0081-04

作者简介: 王旭(1965-), 男, 河南郑州人, 工学博士, 教授, 主要从事桩基础与土工设计理论方面的研究工作。

WANG Xu<sup>1</sup>, JIANG Dai-jun<sup>1</sup>, ZHAO Xin-yu<sup>2</sup>, LIU De-ren<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. General Department of Qinghai-tibet Railway Construction, Geermu 816000, China)

**Abstract:** Facing the problems such as pile cap and bridge pier construction, super structure construction, time limit for construction etc, a key problem is to solve the bearing capacity and deformation of large diameter bored pile under non-refreezing condition. In-situ experiment was carried out at high-temperature in fine-granular frozen soil region of Qinghai-Tibet plateau. On the basis of ground temperature data and in-situ experimental data, the authors analyzed the shaft resistance and tip resistance of the pile under different ground temperature conditions. In the meantime, the authors also analyzed the deformation features of non-refreezing large diameter bored pile in permafrost. The experimental results can be used as some guides and references in the process of pile foundation construction.

**Key words:** permafrost; high temperature fine-granular frozen soil; cast-in-place bored pile; ground temperature; axial bearing features

## 0 前言

基桩试验场地位于青藏高原楚玛尔河高平原上, 清水河一级阶地, 海拔 4530 m。天然冻土上限为 2.0~2.5 m, 无冻结层上水, 年平均地温在-1.0~-0.5 °C 间, 属高温不稳定多年冻土区, 设计地温分区为 T<sub>cp</sub>-II 区。工程地质柱状图见图 1 所示。为解决该地区桥梁基桩灌注后桩周冻土层地温的变化及灌注桩承载力形成规律, 把握后续工程施工的进程, 如桥墩(台)的施工、上部结构的铺架及对工期的影响等工程实际问题, 需确定钻孔灌注桩灌注后未回冻状态下基桩承载力和变形性质。所以研究桩土体系的回冻过程及其回冻过程中在不同地温条件下的竖向承载力及变形性质, 可为施工进度提供可靠依据, 具有重要的工程实用价值。

## 1 试桩的施工及元件布设

### 1.1 试桩的施工

试桩长度 14.5 m, 设计桩径 1.25 m。于 2002 年 7 月 21 日灌注完毕。混凝土入模温度为 11.5~11.9 °C 之

间。基桩的施工采用了 HC60 型 R-618 旋挖钻机, 此方法具有成孔速度快、质量好、孔壁规则、对周围冻土环境扰动少、融化圈亦小, 对保持冻土地基的天然状态有益等优点。桩身混凝土采用低温早强混凝土。

### 1.2 试桩及测温元件布置

为确定试桩的竖向承载力以及各层土的侧摩阻值(或冻结力)和桩端阻力值, 依据试桩处的工程地质资料、土层分布情况, 在桩身不同断面处对称埋设 2 只钢筋计或混凝土应变计, 测点位置如图 1 所示。为把握钻孔施工及灌注混凝土后对桩周冻土的热扰动, 在试桩中心、桩壁、桩周土体中埋设了地温测试孔, 分别称为桩中心测温孔(SZ)、桩壁测温孔(SB)、桩侧测温孔(SC)。测温元件的布设如图 1 所示。为进行比较, 同时布设了未受施工扰动的基准测温孔(JZ)。

## 2 地温测试及桩-土回冻过程分析

对于试桩的回冻过程, 由图 3 试桩桩壁孔(SB)地

基金项目: 兰州交通大学青蓝工程资助项目; 青藏铁路建设总指挥部项目资助

收稿日期: 2004-01-07

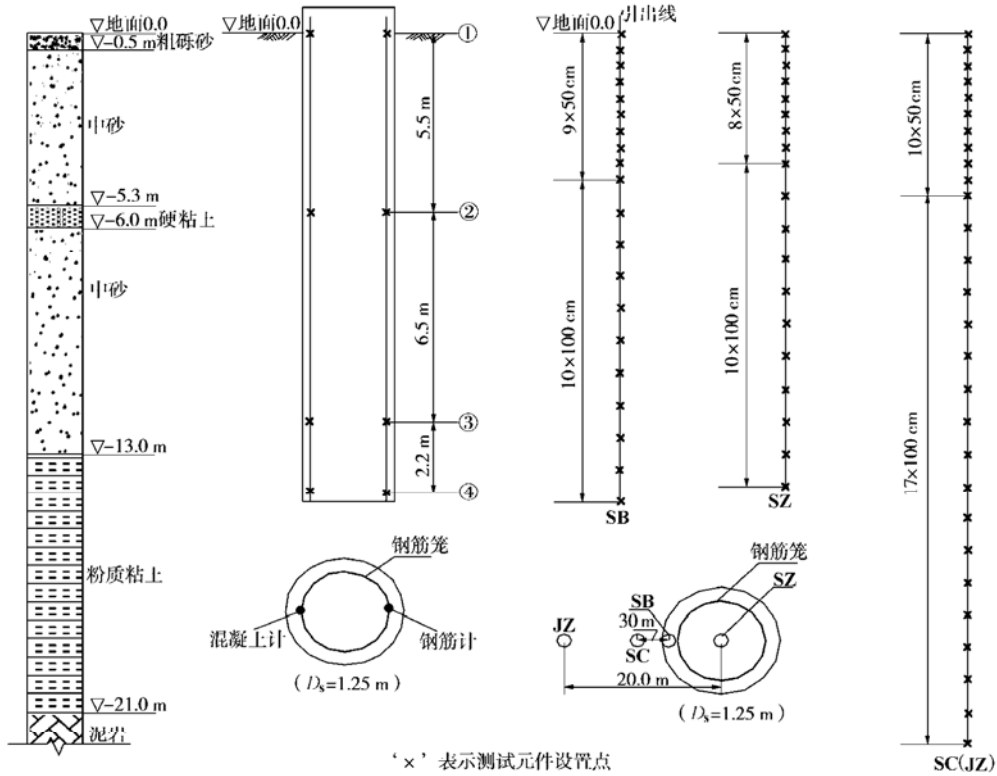


图 1 工程地质柱状图、试桩测点布置、测试元件布设图

Fig. 1 Geological column, arrangement of monitoring point and ground temperature cell

温测试曲线可知，桩身混凝土灌注后桩周冻土的地温急剧升高。试桩在灌注第 3 天后桩壁孔在天然冻土上限附近(2.5 m 处)的地温达到 6.51 °C，桩底处地温也在升高，达到 0.47 °C。随后沿桩身各点地温逐渐降低。18 d 后首先在桩底处出现负温(-0.18 °C)；至第一次加载时，从地面以下 8.5 m(-0.10 °C)至桩底范围内均出现负温(-0.57 °C)，即桩身混凝土浇筑后经过 34 d 桩底断面的地温恢复到设计地温范围。至第 2 次加载时，从地面以下 4.5 m(-0.026 °C)至桩底范围内均出现负温(-0.57 °C)，即桩身混凝土浇筑后经过 57 d 沿桩身出现负温的范围在扩大。但负温并未达到该地区的设计地温范围。

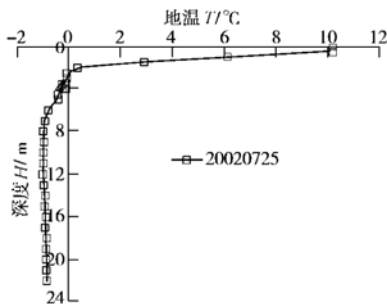


图 2 试验场地基准测温孔地温曲线

Fig. 2 Ground temperature curve of JZ in test site

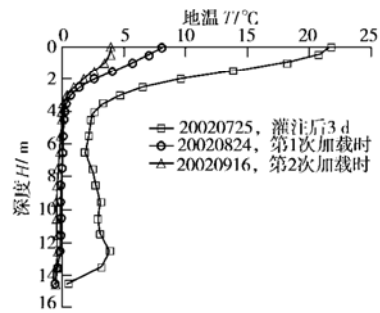


图 3 试验场地试桩桩壁测温孔地温曲线

Fig. 3 Ground temperature curve of SB in test site

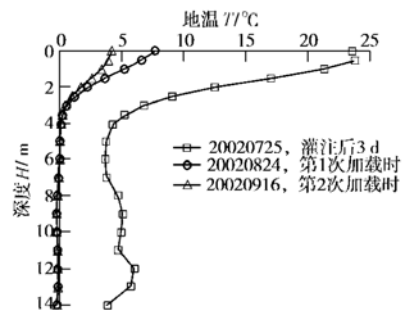


图 4 试验场地试桩中心测温孔地温曲线

Fig. 4 Ground temperature curve of SZ in test site

从试桩中心孔地温曲线可知，试桩在灌注后第 3 天后中心孔在天然冻土上限附近(2.5 m 处)的地温达到 9.1 °C，桩底处地温达到 3.8 °C。至第 1 次加载

时(34 d 后), 首先在桩底处出现负温(为 $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 说明此时桩底土即将开始冻结。至第二次加载时, 从地面以下  $7.0\text{ m}$ ( $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ )至桩底范围内均出现负温( $-0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 即桩身混凝土灌注后经过  $57\text{ d}$  试桩中心负温的范围在扩大。从试桩桩侧孔地温曲线可知, 试桩灌注后在同一深度处桩侧孔地温与桩壁孔地温存在地温梯度, 即桩侧孔地温比桩壁孔地温回冻得更快, 随着时间的推移同一深度处桩侧孔与桩壁孔地温的地温梯度在逐渐变小。

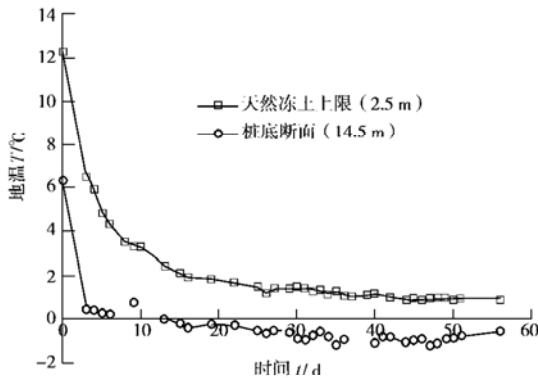


图 5 试验场地试桩桩壁测温孔地温曲线

Fig. 5 Ground temperature curve of SB in test site

基准测温孔因未受施工的扰动, 地温随时间基本不变化。从桩壁孔、试桩中心孔、基准测温孔地温曲线及该地区的设计地温范围相比较可知, 回冻过程是缓慢的。

### 3 现场试验及结果分析

#### 3.1 试验加载方法

多年冻土区桩基试验加载方法应依据桩周土的性质确定。本次试验第 1 次加载考虑到试桩桩周土大部分处于正温, 尚未冻结, 依据文献[1]采用一般地区桩基试验的慢速加载方法进行。第 2 次加载时桩周土地温降低, 范围增大, 考虑到冻土的流变性质以及其它因素<sup>[2-8]</sup>, 采用多年冻土区基桩快速加载的加载方式。试验采用锚桩 - 反力梁 - 千斤顶加载系统。

#### 3.2 试验曲线

图 6, 7 为两次不同地温条件下竖向静载试验的  $P-S$  曲线、 $S-\log T$  曲线。第 1 次试验加载至  $2400\text{ kN}$ , 最大沉降量为  $5.85\text{ mm}$ , 残余沉降量为  $3.99\text{ mm}$ , 回弹率为  $31.8\%$ , 大部分为塑性沉降。第 2 次试验加载至  $4800\text{ kN}$ , 最大沉降量为  $13.92\text{ mm}$ , 残余沉降量为  $9.90\text{ mm}$ , 回弹率为  $28.9\%$ , 产生了较大的塑性沉降。从两次试验的  $S-\log T$  曲线可知, 桩顶沉降速率都逐渐增大。试验的加载量是根据具体工程的需要确定的, 即以高度为  $22\text{ m}$  重力式桥墩所需单桩极限承载力的 2

倍。从试验曲线不易判断两次试验的极限承载力。

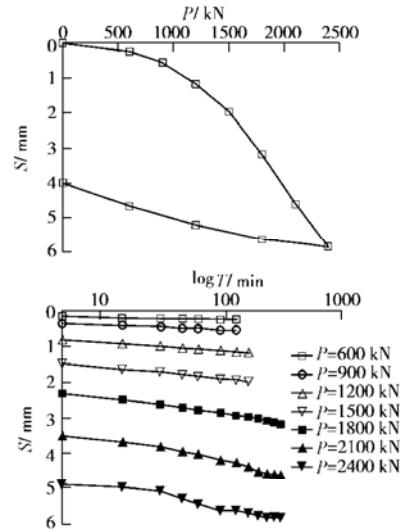


图 6 第一次加载的  $P-S$ 、 $S-\log T$  曲线

Fig. 6 Curves of  $P-S$ 、 $S-\log T$  in first test

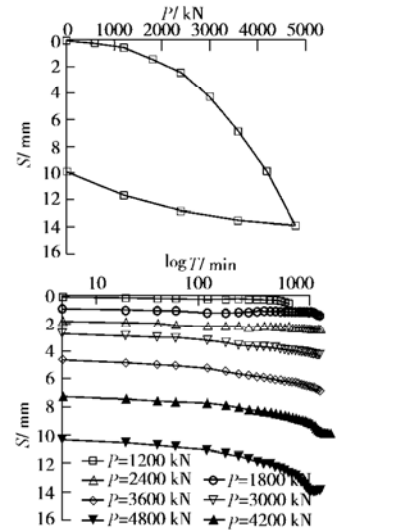


图 7 第二次加载的  $P-S$ 、 $S-\log T$  曲线

Fig. 7 Curves of  $P-S$ 、 $S-\log T$  in second test

#### 3.3 试验结果分析

图 8, 9 为两次桩身轴力图、桩侧摩阻 (冻结力) 分布曲线。第 1 次加载至  $2400\text{ kN}$  时的分段平均侧摩阻值分别为:  $0\sim 5.5\text{ m}$ ,  $59.8\text{ kPa}$ ;  $5.5\sim 11.5\text{ m}$ ,  $25.8\text{ kPa}$ ;  $11.5\sim 14.4\text{ m}$ ,  $15.8\text{ kPa}$ 。沿全桩长平均值为  $36.9\text{ kPa}$ , 桩端阻为  $255.8\text{ kPa}$ , 说明桩土体系在未回冻时承载力是较小的。第 2 次加载至  $2400\text{ kN}$  时的分段平均侧摩阻值分别为:  $0\sim 5.5\text{ m}$ ,  $54.0\text{ kPa}$ ;  $5.5\sim 11.5\text{ m}$  的冻结力为  $27.01\text{ kPa}$ ;  $11.5\sim 14.4\text{ m}$  冻结力为  $21.5\text{ kPa}$ 。沿全桩长平均值为  $36.1\text{ kPa}$ , 桩端阻为  $292.0\text{ kPa}$ , 相应的位移为  $2.43\text{ mm}$ , 比第 1 次加载相同载荷下位移小。第 2 次加载至  $4800\text{ kN}$  时的分段平均侧摩阻值分别为:  $0\sim 5.5\text{ m}$ ,  $110.8\text{ kPa}$ ;  $5.5\sim 11.5\text{ m}$  的冻结力为  $44.5\text{ kPa}$ ;  $11.5\sim 14.4\text{ m}$  的冻结力为  $42.7\text{ kPa}$ , 沿桩身平均值为

68.9 kPa, 桩端阻为 735.3 kPa。说明随着桩周土及桩底土温的降低桩侧阻及桩端阻有较大的发挥。但此时相应的沉降量较大, 为 13.92 mm, 残余沉降量为 9.90 mm, 沉降量较大。

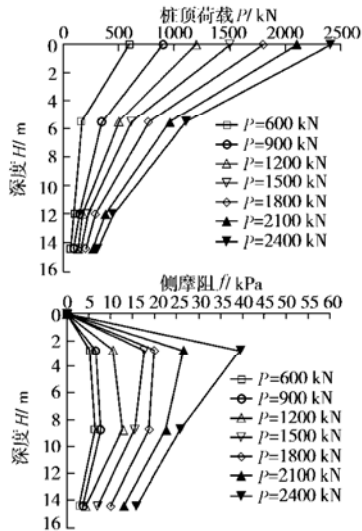


图 8 第 1 次加载时桩身轴力图、桩侧摩阻(冻结力)分布曲线  
Fig. 8 Curves of axial force and friction (or adfreezing force) of piles in first test

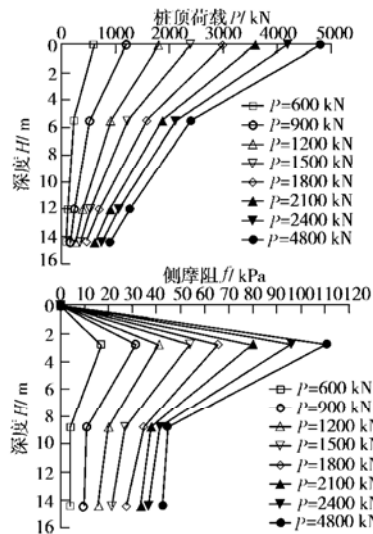


图 9 第 2 次加载时桩身轴力图、桩侧摩阻(冻结力)分布曲线  
Fig. 9 Curves of axial force and friction (or adfreezing force) of piles in second test

## 4 结 论

(1) 高温细颗粒多年冻土区(Tcp-II区), 夏季进

行钻孔灌注桩施工, 桩身混凝土入模温度为 11.5 ℃ 的情形下, 34 d 后, 桩壁孔在地表以下 8.5 m 范围内为正温, 8.5 m 以下范围内出现负温(-0.10~ -0.57 ℃)。而试桩中心孔此时刚出现负温, 与基准孔地温相比较可知, 钻孔灌注桩处于回冻初期。

(2) 现场试验表明, 第 1 次试验加载至 2400 kN, 最大沉降量为 5.85 mm, 残余沉降量为 3.99 mm, 回弹率为 31.8%, 大部分为塑性沉降。第 2 次试验加载至 4800 kN, 最大沉降量为 13.92 mm, 残余沉降量为 9.90 mm, 回弹率为 28.9%, 也产生了较大的塑性沉降。说明在基桩未回冻状态下会产生较大的塑性变形, 桩土体系在未回冻状态竖向承载力是较低的。

(3) 基桩第 1 次加载至 2400 kN 时平均侧摩阻值为 36.9 kPa, 桩端阻为 255.8 kPa。第 2 次加载至 2400 kN 时的平均冻结力为 36.1 kPa, 桩端阻为 292.0 kPa。第 3 次加载至 4800 kN 时平均冻结力为 68.9 kPa, 桩端阻为 735.3 kPa。说明随着桩周土及桩底土温度与桩侧阻及桩端阻的强烈相关性。

(4) 现场静载试验表明, 夏季施工中, 在混凝土入模温度较高的情况下, 在基桩回冻之前不宜修筑重力式桥墩, 以避免产生塑性沉降。

## 参考文献:

- [1] JGJ 94-94. 建筑桩基技术规范 [S].
- [2] JGJ 118-98. 多年冻土地区建筑地基基础设计规范[S].
- [3] 陈卓怀, 励国良. 多年冻土地区桥涵工程研究[R]. 兰州: 铁道部科学研究院西北研究所, 1982.
- [4] 王家澄, 王绍令, 邱国庆. 青藏公路沿线的多年冻土[J]. 地理学报, 1979, 34(1): 18-32.
- [5] 铁道部科学研究院西北研究所, 铁道第一勘察设计院. 多年冻土地区桩基试验研究[R]. 1978.
- [6] Rowley R K, Watson G H, Ladand B. Vertical and lateral pile load tests in permafrost[A]. Permafrost Second International Conference[C]. North American Contribution, 1976.
- [7] 陈卓怀, 等. 多年冻土地区桩基试验研究[R]. 兰州: 铁道部科学研究院西北研究所, 1978.
- [8] 朱炳泉, 励国良. 昆仑山桩基场静载试验研究报告[R]. 1982.