

嵌岩桩分布式检测及承载机理研究

朴春德^{1,2}

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 南京大学光电传感工程监测中心, 江苏 南京 210093)

摘 要: 基于 BOTDR 分布式光纤传感技术, 研究了具有一定厚度上覆土层的嵌岩桩在桩顶荷载作用下承载特性, 分析了嵌岩部分桩身轴力和侧摩阻力的发挥情况。结果表明: 基于 BOTDR 的分布式光纤检测技术, 具有分布式的特点, 从而有效掌握嵌岩桩的荷载传递机理和承载特性; 具有一定厚度上覆土层的嵌岩桩, 荷载主要由上部土层的侧摩阻力承担, 桩端承担荷载很少, 嵌岩桩的设计中应当按摩擦桩或端承摩擦桩考虑; 由于嵌岩部分岩石裂隙发育, 在灌注混凝土的过程中一部分浆液进入嵌岩部分岩石的裂隙里面, 提高了嵌岩部分的承载能力, 从而在嵌岩段上部其侧摩阻力具有强化现象。

关键词: 嵌岩桩; BOTDR; 分布式检测; 传感光纤

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0345-04

作者简介: 朴春德 (1979-), 男, 博士, 从事岩土工程分布式监测与诊断研究。E-mail: piaochunde@126.com。

Distributed detection and bearing mechanism of rock-socketed piles

PIAO Chun-de^{1,2}

(1. Resources and Geosciences College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Center for Engineering Monitoring with Opto-Electronic Sensing, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: On the basis of BOTDR-based distributed optical fiber sensing technology, the bearing characteristics of rock-socketed piles, with working load on pile top, in the overlaying soil at a certain depth are studied, and the development of the pile lateral friction and the socket axial force is also analyzed. The results show that owing to the distributed features of BOTDR-based distributed optical fiber detection technology, an effective grasp is achieved of the bearing capacity and load transfer mechanism of rock-socketed piles. Moreover, the pile lateral friction of the upper soil layer bears most of the load of rock-socketed piles in the overlaying soil at a certain depth, while the pile bottom takes only a small proportion of the load. Therefore, the design of rock-socketed piles should be considered as that of friction piles or end-bearing friction piles. It is also found in the study that due to the growing number of socket rock cracks, part of concrete slurry is poured into socket rock cracks during the process of concrete filling, which accordingly improves socket bearing capacity. Thus, the pile lateral friction of the upper part of socket is intensified.

Key words: rock-socketed pile; BOTDR; distributed detection; sensing optical fiber

0 引 言

嵌岩桩是桩身嵌入岩层一定深度的桩。由于岩层具有强度大、压缩性小、承载力高等特性, 以基岩作为持力层的嵌岩桩在大型土木工程建设中其独特的优势得到了广泛应用^[1-2]。但另一方面, 由于嵌岩桩承载力大、试验耗费高且很难进行破坏性试验, 因而系统完整的实测资料并不多, 从而制约了人们对其承载特性和荷载传递机制的全面认识, 特别是具有一定厚度上覆土层的嵌岩桩桩身压缩特性和桩-岩界面侧摩阻力特性方面需要进一步研究^[3-5]。

桩的静载荷试验是了解基桩承载性状和确定桩承载力的最直接最可靠的方法。本文针对嵌岩桩荷载传递研究方面存在的问题, 基于 BOTDR (布里渊光时域反射计) 分布式光纤传感技术, 通过试桩施工过程中预埋在桩身中的传感光纤, 检测静载荷试验过程中嵌岩桩的桩身变形, 分析具有一定上覆土层嵌岩桩的荷载传递机理和桩身压缩变形特性, 研究其上覆土层

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (20100481175); 中国矿业大学青年科学基金项目 (2009A030)

收稿日期: 2011-08-08

和基岩的侧摩阻力发挥状况，为今后的嵌岩桩设计提供有益的参考。

1 嵌岩桩 BOTDR 检测原理

1.1 BOTDR 原理

由于布里渊散射光受应变和温度的影响，当光纤沿线发生轴向应变或周围环境温度变化时，光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移，频率的漂移量与光纤所受的轴向应变 ε 和温度变化量 T 呈良好的线性关系，因此通过测量光纤中的背向布里渊散射光频率的漂移量就可以获得光纤的应变值和温度变化量。它们之间比例关系为^[6-8]

$$\nu_B(\varepsilon, T) = \nu_B(0, T_0) + \frac{\partial \nu_B}{\partial \varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial \nu_B}{\partial T} (T - T_0) \quad (1)$$

式中， $\nu_B(\varepsilon, T)$ 为光纤在 T 温度下受到 ε 应变时的布里渊频率漂移量， $\nu_B(0, T_0)$ 为 T_0 温度下自由光纤（不发生应变）的布里渊频率量， $\partial \nu_B / \partial T$ 为温度系数， $\partial \nu_B / \partial \varepsilon$ 为应变系数， T_0 为参考温度， ε 为光纤所受应变。

当脉冲光由光纤的一端注入时，入射的脉冲光与光纤中的声学声子发生作用后产生布里渊散射，其中背向布里渊散射光沿着光纤返回到脉冲光的入射端。因此，由光纤沿线某一点返回的布里渊散射光到 BOTDR 的距离为

$$Z = \frac{cT}{2n} \quad (2)$$

式中， c 为真空中的光速， n 为光纤的折射系数， T 为发出脉冲光至接收到散射光的时间间隔。

本课题采用的 BOTDR 是由日本 NTT 公司研制的 AQ8603 光纤应变分析仪，主要技术性能指标：测量范围为 1，2，5，10，20，40，80 km；空间采样间隔为 1.00，0.50，0.20，0.10，0.05；空间定位精度为 $\pm (2.0 \times 10^{-5} \times \text{测量范围 (m)} + 0.2 \text{ m} + 2 \times \text{距离采样间隔 (m)})$ ；应变测量范围为 $-1.5\% \sim 1.5\%$ ($15000 \mu\varepsilon$)；脉冲宽度为 10，20，50，100，200 ns 时，空间分解度为 1，2，5，11，22 m；应变测量精度为 $\pm 0.004\%$ ($40 \mu\varepsilon$)， $\pm 0.003\%$ ($30 \mu\varepsilon$) 时重复性为 $<0.04\%$ ， $<0.02\%$ 。

1.2 嵌岩桩分布式检测

将传感光纤铺设在钢筋笼的主筋上，之后随着灌注混凝土将传感光纤植入桩体内，使传感光纤与周围钢筋混凝土协调变形。在静载荷试验过程中，通过

BOTDR 检测嵌岩桩桩身传感光纤长度上的应变信息。由于桩基检测过程中温度的变化量很小，因此忽略温度变化量对布里渊频率漂移量的影响^[9]。

1.3 桩身压缩变形的计算方法

嵌岩桩 BOTDR 检测中，设置 BOTDR 仪器的采样间距为 0.05 m，传感光纤沿着钢筋笼的主筋布设，因此假设单桩相邻测试截面之间的轴力按线性变化也不至于产生较大误差。设桩长为 L ，第 i 截面和第 $i+1$ 截面的测试轴力分别为 $p(i)$ 和 $p(i+1)$ ，该两截面到桩顶的距离分别为 l_i 和 l_{i+1} ，则桩身第 i 截面和第 $i+1$ 截面之间的压缩量为

$$S_{si} = \int_{l_i}^{l_{i+1}} \frac{p(i)}{E_c A} dh \quad (3)$$

式中， E_c 为桩身混凝土弹性模量， A 为桩身截面面积。

桩身轴力可以推导为

$$p(i) = \sigma A = \varepsilon_i E_c A \quad (4)$$

把式 (4) 代入式 (3) 得

$$S_{si} = \int_{l_i}^{l_{i+1}} \frac{p(i)}{E_c A} dh = \int_{l_i}^{l_{i+1}} \varepsilon_m dh \quad (5)$$

则桩身总压缩量为

$$S_s = \sum_{i=1}^n S_{si} = \sum_{i=1}^n \int_{l_i}^{l_{i+1}} \varepsilon_m dh \quad (6)$$

2 场地工程地质条件及试桩概况

拟建项目为山东省烟台市某滨海广场试桩工程。根据场地的《工程地质勘察报告》，试桩深度范围内岩土层的分布如图 1 所示，其中片麻状花岗岩的主要矿物成分为长石、石英、云母，原岩结构已大部分破坏，裂隙发育。岩土层的物理力学性质指标，如表 2 所示。

试桩采用钻孔灌注桩，桩长为 27 m，桩径为 1.2 m，混凝土标号为 C45。由于混凝土的弹性模量受到骨料的性能、混凝土的级配、制作方法、硬化时的环境条件及混凝土龄期等影响，其弹性模量 E 参考值并不十分可靠。因此，本次测试中弹性模量 E 值是根据各级荷载作用下桩头处所测的应变反演得到，随着桩顶荷载大小的不同，弹性模量范围选取为 $3.30 \times 10^4 \sim 3.37 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，此值较参考值更为可靠。

为了解嵌岩桩在桩顶荷载作用下的承载机理，在试桩施工过程中，沿着钢筋笼主筋布设了传感光纤，随着灌注混凝土埋设在试桩中，并在距离桩头 1 m 处

表 1 岩土层物理力学性质指标

Tablet 1 Physical and mechanical indexes of rock-soil layers

| 土层名称 | 含水率 $w/\%$ | 重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$ | 孔隙比 e | 塑性指数 I_p | 液性指数 I_L | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ |
|------------|---------------|-----------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 粉质黏土（混角砾）③ | 21.3 | 20.0 | 0.63 | 12.3 | 0.34 | 50.0 | 16.1 |

| | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 粉质黏土③ ₁ | 21.6 | 20.0 | 0.66 | 12.3 | 0.37 | 55.0 | 13.8 |
| 粉质黏土④ | 21.5 | 20.0 | 0.65 | 12.3 | 0.37 | 49.3 | 20.4 |
| 全风化片麻状花岗岩⑥ | 24.8 | 20.3 | 0.68 | 14.6 | 0.45 | 52.0 | 10.8 |

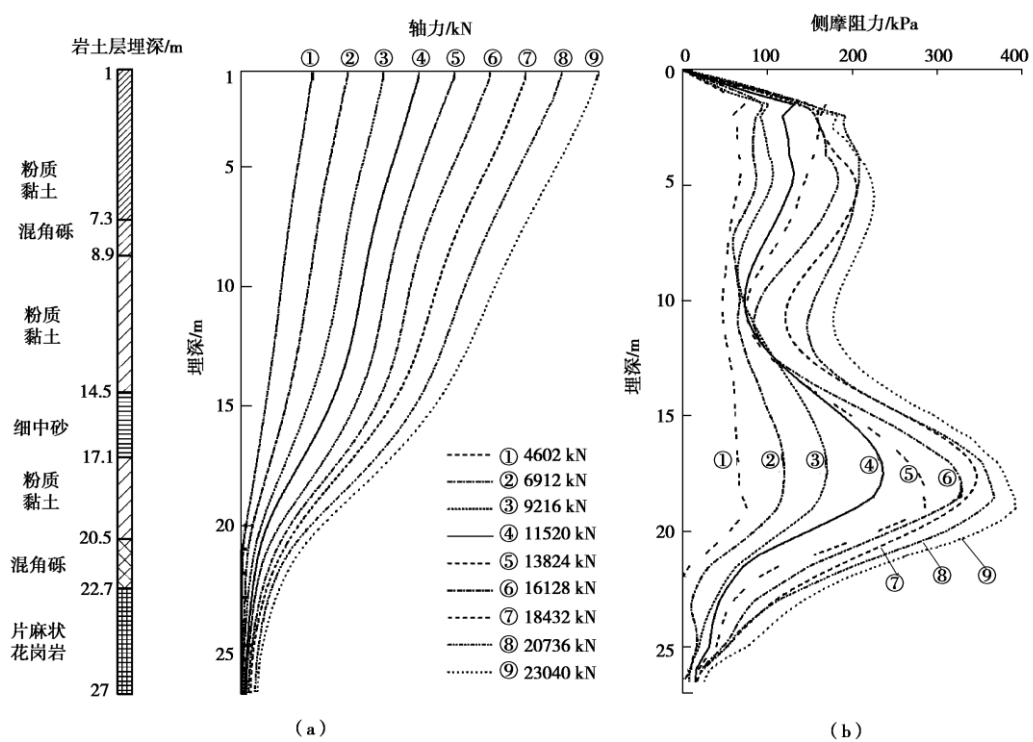


图 1 桩身轴力和侧摩阻力分布图

Fig. 1 Distribution of axial force and lateral friction along pile shaft

把传感光纤引出桩身外面，为后期静载荷试验过程中检测桩身变形所用。

3 试验结果分析

根据布设在桩身中的传感光纤，检测静载荷试验过程中桩身应变分布，从而计算桩身轴力和桩侧摩阻力分布，如图 1 所示。

由图 1 (a) 中的桩身轴力分布图可知，在桩顶荷载作用下，试桩桩身轴力随着桩顶荷载的增加而增加，随桩深的增加而从上向下传递并随之减少。本次静载荷试验中，荷载施加到第三级时桩端才开始受力，但及时施加最大荷载，其所占荷载比例很小。由图 1 (b) 中的桩身侧摩阻力分布图可知，在桩头附近的侧摩阻力值随着桩顶荷载的增大而增大，但当侧摩阻力达到一定程度后，其侧摩阻力不再增大，反而相对减小，说明此段桩侧摩阻力已发挥完毕，并随着荷载的增加，其侧摩阻力值逐渐由上到下发挥传递。沿桩深方向其侧摩阻力分布形态在不断改变，在接近嵌岩段上部的侧摩阻力较大，而在嵌岩段下部则相对较小，嵌岩桩侧摩阻力随桩深的发挥情况为呈“M 型”。

本次试桩中嵌岩段上部侧摩阻力增大的主要原因为：试桩嵌岩深度为 4.3 m，岩石风化严重，裂隙发育，在试桩施工中灌注混凝土时嵌岩段水泥沿着岩石

裂隙流入，从而把岩石和灌注桩成为一体，在静载荷试验过程中，其相对位移为零。另一方面，其上部的土层有强化效应。

岩土界面处轴力和桩端荷载占总荷载的比例值，如图 2 所示。

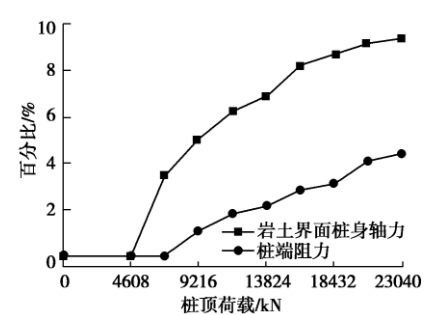


图 2 岩土界面桩身轴力和桩端荷载占总荷载比值

Fig. 2 Ratio of axial force at rock-soil interface and pile-tip load to total load

由图 2 可知，桩端承担的荷载很小，其端阻力占总荷载比例为 1.1%~4.4%，桩顶荷载主要由桩侧摩阻力来承担，其侧摩阻力占总荷载比例为 95.6%~98.9%。嵌岩部分桩侧摩阻力占总荷载的比例为 0~9.4%，即荷载主要由土层来承担，嵌岩部分岩层所承担的荷载很小。由于混凝土强度高，桩端荷载很小，桩端岩石强度大，所以桩端沉降很小。从本次试桩中

可知,具有一定厚度上覆土层的嵌岩桩来说,由于嵌岩段上部的侧摩阻力发挥较大,嵌岩桩的设计中应当把嵌岩桩按摩擦桩或端承摩擦桩考虑。

试桩中各岩土层的桩身压缩量与侧摩阻力之间关系,如图3所示。由图3可知,各岩土层的侧摩阻力随着桩身混凝土压缩量的增加而呈非线性增长。试桩中侧摩阻力的发挥状况主要与桩周岩土层物理力学性质和厚度有关,即下部④细中砂和⑤粉质黏土层的侧摩阻力数值最大,由于嵌岩段试桩与桩周岩层之间相对位移较小,其侧摩阻力还没有充分发挥。

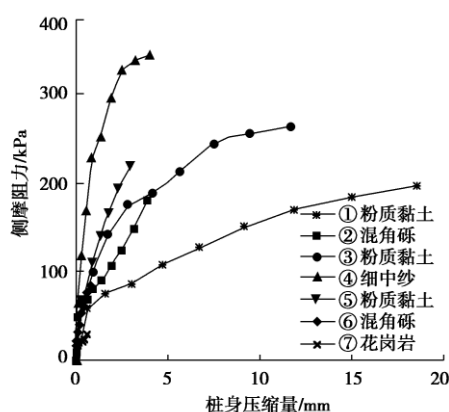


图3 各岩土层的桩身压缩量与桩侧摩阻力关系

Fig. 3 Relation between pile lateral friction and pile compression on each rock-soil layer

4 结 论

(1) 基于BOTDR的分布式光纤检测技术,具有分布式的特点,可以准确了解桩身各深度范围内的轴力传递大小、侧摩阻力发挥状况及桩身压缩变形量,从而掌握嵌岩桩的荷载传递机理和承载特性。

(2) 对于具有基岩裂隙发育的嵌岩桩,在灌注混凝土过程中部分浆液灌入到岩石裂隙之中,从而提高了嵌岩桩的强度,因此在嵌岩部分的桩身压缩很小,其侧摩阻力发挥较小,另一方面,在嵌岩段的上部其侧摩阻力具有强化现象。

(3) 具有一定厚度上覆土层的嵌岩桩来说,由于其上部的侧摩阻力发挥较大,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力来承担,桩端承担荷载较少,特别是嵌岩段的桩身压缩量很小,其侧摩阻力不能有效发挥,因此不能盲目的增加嵌岩段的长度提高桩的承载能力。在嵌岩桩的设计中应当按摩擦桩或端承摩擦桩考虑。

参考文献:

[1] 徐新跃, 徐 策. 软土地基嵌岩桩的受力性状[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊1): 497 - 500. (XU Xin-yu, XU Ce. Forced behavior of rock socketed piles in soft soil[J]. Industrial Construction, 2005, 35(S1): 497 - 500. (in Chinese))

[2] 何思明, 卢国胜. 嵌岩桩荷载传递特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2598 - 2602. (HE Si-ming, LU Guo-sheng. Study on load transfer characteristic of rock-socketed pole[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2598 - 2602. (in Chinese))

[3] 熊智彪, 王启云, 谷淡平. 红砂岩嵌岩桩模型试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 92 - 94. (XIONG Zhi-biao, WANG Qi-yun, GU Dan-ping. Model test study on resistance of rock-socketed piles in red-sandstone rock[J]. Building Structure, 2010, 40(4): 92 - 94. (in Chinese))

[4] 赵明华, 雷 勇, 刘晓明. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 103 - 110. (ZHAO Ming-hua, LEI Yong, LIU Xiao-ming. Analysis of load transfer of rock-socketed piles based on characteristics of pile-rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 103 - 110. (in Chinese))

[5] 王启云, 熊智彪, 张家生, 等. 红砂岩嵌岩桩桩-岩界面摩阻特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 661 - 666. (WANG Qi-yun, XIONG Zhi-biao, ZHANG Jia-sheng, et al. Model tests on resistance behaviors of rock-concrete interface of rock-socketed piles in red-sandstone rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 661 - 666. (in Chinese))

[6] 施 斌, 徐洪钟, 张 丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(3): 493 - 499. (SHI Bin, XU Hong-zhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of botdr to healthy monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(3): 493 - 499. (in Chinese))

[7] 索文斌, 施 斌, 张 巍, 等. 基于 BOTDR 的分布式光纤传感器标定实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 985 - 989. (SUO Wen-bin, SHI Bin, ZHANG Wei, et al. Study on calibration of distributed optical fiber sensors based on BOTDR[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9): 985 - 989. (in Chinese))

[8] 朴春德, 施 斌, 魏广庆, 等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976 - 981. (PIAO Chun-de, SHI Bin, WEI Guang-qing, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 976 - 981. (in Chinese))

[9] 朴春德, 施 斌, 朱友群, 等. 灌注桩检测中 BOTDR 温度补偿试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(2): 161 - 164. (PIAO Chun-de, SHI Bin, ZHU You-qun, et al. Experimental study on BOTDR temperature compensation in

bored pile detection[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(2): 161 - 164. (in Chinese))
(本文责编 胡海霞)