

文章编号: 1000-7598 (2014) 05-1406-08

基于分布式光纤测试技术的大直径嵌岩桩承载性能研究

罗 勇¹, 李春峰¹, 邢皓枫²

(1. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵阳 550001; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 采用分布式光纤传感技术对赫章特大桥 195 m 主墩下的大直径嵌岩桩承载特性进行了系统的研究分析。首先采用室内模型试验验证了光纤技术在桩基测试中应用的可行性; 然后通过现场埋设和施工过程中的数据采集、整理与分析, 系统研究了大直径嵌岩桩的承载特性及其荷载传递机制; 依托工程的实测变形量进一步证明了光纤测试技术的可行性和正确性。基于全分布式光纤传感技术的研究结果对大直径嵌岩桩理论及其工程应用具有参考价值, 同时对光纤测试技术在桩基测试中的应用具有借鉴作用。

关 键 词: 嵌岩桩; 分布式光纤测试技术; 轴力; 承载特性; 沉降

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Research on bearing behaviors of large-diameter rock-socketed piles through distributed optical fiber sensing technology

LUO Yong¹, LI Chun-feng¹, XING Hao-feng²

(1. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academe Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Large-diameter rock-socketed piles are used to support the pier with the height of 195 m at Hezhang bridge, to acquire its bearing behaviors, distributed fiber optic sensing technology is implemented to monitor the continuous distributed strains of the large-diameter rock-socketed piles. At first, indoor model tests are performed to verify that the fiber optic technology is available to monitor the compressive strain when the pile is loaded. And then, the design and in-situ installation of fiber optic sensors is carried out on the basis of Hezhang bridge; and the testing data during construction are collected as well. Through the data treatment and analysis, the bearing behaviors and load transfer mechanism of the large-diameter rock-socketed piles are researched. Comparing with the actual settlement of the support engineering, fiber optic sensing technology is further testified to be feasible. The research results have reference value for pile theory and the application of fiber optic sensing technology to similar projects.

Key words: rock-socketed piles; distributed optical fiber sensing technology; axial force; bearing behavior; settlement

1 引 言

嵌岩桩单桩具有承载力高、沉降量小且速度快、群桩效应小等优点, 是大型桥梁, 高层建筑及重型厂房等建(构)筑物的主要基础型式。然而, 由于大直径嵌岩桩具有承载力大, 试验耗费极高且开展破坏性试验难度大, 因此, 对工程设计人员确定嵌岩桩的合理嵌入深度是非常困难的^[1-3]。

近年来, 随着我国交通基础设施建设规模的逐步扩大, 高速公路建设迅猛发展, 尤其是随着西部

大开发战略的实施, 西部高原山区迎来了高速公路的建设高峰期。由于贵州地区地形地貌及地质条件的限制, 高速公路建设不可避免地要采用大量跨大江、大河及深沟陡谷的高架桥梁, 而其基础多采用大直径嵌岩桩。据贵州已建、在建高速公路的数据显示, 桥梁占总公路里程的比例高达 25%~40%, 据此估算, 近期在建、待建高速公路桥梁的嵌岩基桩工程数量可达近 20 万根, 嵌岩基桩建设规模空前巨大, 因此, 系统研究嵌岩桩承载机制有较大的现实意义和经济意义。

收稿日期: 2013-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41272292); 贵州省科学技术基金项目 (No. 20132168); 贵州省交通运输厅科技项目 (No. 2010-122-022)。

第一作者简介: 罗勇, 男, 1977 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 40830720@qq.com

然而目前对于大直径嵌岩桩的承载特性、设计理论、设计方法等均未有的系统研究,且各行业相关设计规范存在较大差异。在实际工程应用中,设计人员普遍的做法是凭经验尽可能地加大嵌岩桩直径和增加嵌岩深度来避免设计风险。显然,这将对嵌岩桩的设计带来不确定性和造成不必要的浪费。

近几年,国内外一些学者对嵌岩桩提出了一些较为新颖的设计思路或研究成果,如 Horvath^[5]和 Rowe^[6]等提出了计算桩侧壁摩阻力的方法, Leong 等^[7]对桩岩模量比、相对嵌入深度等影响侧壁摩阻力发挥的几个因素进行了研究,指出随嵌岩深度增大,桩侧壁摩阻力略有减小;桩径增大,单位侧壁摩阻力略有减小,岩性越好,桩侧极限阻力越大; Dykeman 等^[8]通过模型试验验证了其合理性; Carrubba^[9]则通过现场试验得到了桩侧壁摩阻力与岩石单轴抗压强度的关系; Serrano 等^[10]运用 Hock-Brown 强度准则推导出计算桩侧壁摩阻力的理论公式,并与经验公式进行对比验证了其合理性。

如何获取大直径嵌岩桩在施工加载过程中,嵌岩桩的侧壁、端部阻力的变化规律,到目前为止,还没有相关的文献报道,主要问题在于传统的测试技术无法实现采集数据的连续性和完整性。常规传感器只能在一维受力条件下标定,这与实际受力环境(三维)完全不一样,因而存在不匹配的标定系数和不一致受力环境;施工环境复杂,开展长期测试困难重重,传统的测试技术难以克服。

因此,本文以赫章特大桥工程为依托,开展基于 BOTDA (Brillouin optic time-domain analysis) 分布式光纤传感技术的大直径嵌岩桩工作机制研究,跟踪整个大直径嵌岩桩在不同受力荷载情况下桩基应变曲线,旨在对大直径嵌岩桩的工作性状进行研究,掌握嵌岩桩的荷载传递机制和承载特性,最终目的以优化嵌岩桩设计,确保桩基经济、合理、安全。

2 原理及其模型试验

2.1 分布式光纤传感技术原理

基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术采用两个光源作为泵浦光和探测光,两束光分别从传感光纤(应变传感和温度传感)的两端注入,调节两束光的频差,直到布里渊散射增益最高,通过检测传感光纤(应变传感和温度传感)中受激布里渊散射光频移,实现沿传感光纤(应变传感和温度传感)上的应变和温度的分布式测量^[11-14],原理如图 1 所示。通过这一基本原理,分析光纤变形测量精度、拉伸变形、压缩变形(光纤用于监测混凝土试件在

加载过程中的变形特性进行剖析),从而为 BOTDA 在结构物变形测试中的可行性提供试验依据。

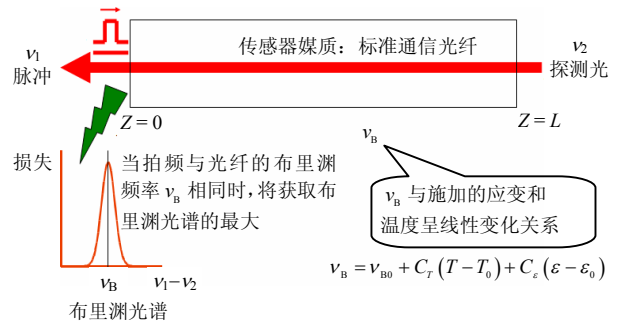


图 1 光纤传感基本原理
Fig.1 Basic principle of optical fiber sensing

作为传感器的光纤与需要测试对象融为一体,其最大的优点就是光纤体积小、柔软,不改变被测对象的物理力学性能,只跟随测试物体一起变形。在工作过程中光纤是否能够适应特定的变形、温度等条件,其性能是否保持一致和稳定,因此,在光纤传感应用前,必须对其进行相应的试验,以验证其可行性。

布里渊频移的变化量理论解为

$$\Delta v_B(\varepsilon) = v_B(\varepsilon, T_0) - v_B(0, T_0) = 4.48 v_B(0, T_0) \varepsilon \quad (1)$$

式中: ε 为应变变量; v_B 为布里渊频率; T_0 为温度。

文献[15-20]在 1998 年通过试验建立了应变、温度的变化与布里渊频移和功率变化的对应关系。试验建立的应变、温度变化与布里渊频移和功率变化的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_B &= C_{v\varepsilon} \Delta \varepsilon + C_{vT} \Delta T \\ \frac{\Delta P_B}{P_B(\varepsilon, T)} &= C_{P\varepsilon} \Delta \varepsilon + C_{PT} \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Δv_B 为布里渊频移的变化值; $\Delta P_B / P_B(\varepsilon, T)$ 为归一化了的功率的变化率; $\Delta \varepsilon$ 为应变的变化值; ΔT 为温度的变化值; $C_{v\varepsilon}$ 为应变系数; C_{vT} 为温度系数; $C_{P\varepsilon}$ 为布里渊散射光功率的应变系数; C_{PT} 为射光功率的温度系数。在入射光波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,试验得到的各个系数分别为

$$\left. \begin{aligned} C_{v\varepsilon} &= 0.0493 \text{ MHz}/\mu\varepsilon \\ C_{vT} &= 1.2 \text{ MHz}/(^{\circ}\text{C}) \\ C_{P\varepsilon} &= -7.8 \times 10^{-4} /(^{\circ}\text{C}) \\ C_{PT} &= 0.27\% /(^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

如果不考虑温度的影响, Toshio kurashima^[21]通过试验数据拟合得到的频移与应变的关系可表示为

$$\Delta\nu_B(\varepsilon, T_0) = 0.049 \, 3\nu_B(0, T_0)\varepsilon \quad (4)$$

式(4)与理论推导的解析式(1)是吻合的。

通过理论分析和试验研究,均验证了布里渊频移与温度和应变之间呈良好的线性关系。布里渊分布式光纤应变测量机制正是基于应变与频率的线性的关系模型:

$$\Delta\nu_B = C_{v\varepsilon}\Delta\varepsilon + C_{vT}\Delta T \quad (5)$$

用光纤作为分布式传感器,通过对光纤的标定以及对试验数据进行拟合就可以确定 $C_{v\varepsilon}$ 和 C_{vT} 的值,从而建立精确的布里渊散射频移与温度和应变的定量关系。

从式(5)可以看出,除了光纤中的应变对布里渊散射光频移有影响之外,光纤温度的变化同样对布里渊频移有影响。大量室内试验证明,环境温度变化不超过 5°C 时,温度对布里渊频移的影响可忽略不计,但若获得更精确的应变,还是要考虑温度的影响,进行温度校正。

2.2 可行性的室内模型试验

为了验证光纤传感技术能用于大直径嵌岩桩的测试工作,必须对其进行相关的室内试验和标定研究。进行了多组拉伸和压缩试验,试验设备及光纤结构如图2所示,其测试结果如图3所示。



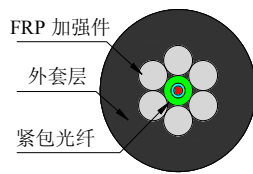
(a) 高精度自动拉伸平台测试
光纤拉伸试验



(b) 万能试验机测试光纤
压缩试验



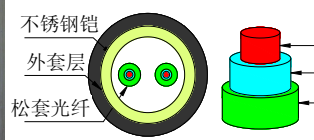
(c) FRP 加强型应变光缆及聚氨酯
加强紧包光缆



(d) FRP 加强型应变
光缆结构

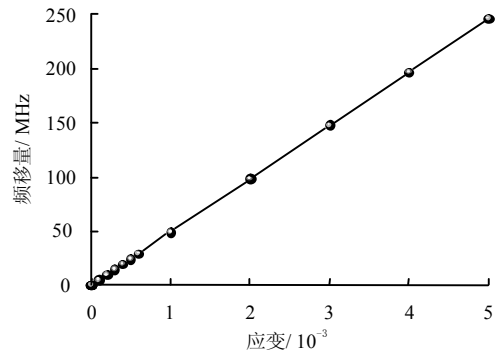


(e) 测温光缆

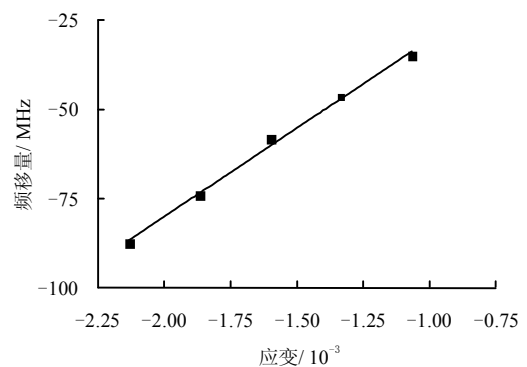


(f) 测温光缆结构

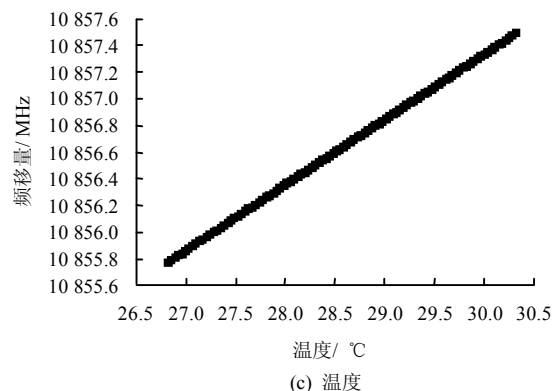
图2 光纤测试设备及其内部结构
Fig.2 Testing optical fiber equipment
and its internal structure



(a) 拉应变



(b) 压应变 (混凝土柱中心采样点拟合直线图)



(c) 温度

图3 拉应变、压应变及温度与布里渊频移的线性关系
Fig.3 Linear relations of tensile strain, compressive strain, temperature and Brillouin frequency shift

图3(a)为高精度全自动拉伸平台测试光纤拉伸试验,由测试结果可知,FRP加强型应变光缆的拉伸应变系数在 $19.81 \sim 20.19 \, \mu\varepsilon/\text{MHz}$ 之间。同时可以得出,当应变超过 $5 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ 时,光缆的应变不再符合 $19.81 \sim 20.19 \, \mu\varepsilon/\text{MHz}$ 之间的应变系数。究其原因,主要是光缆纤芯与外部加强、包层结构在超过 5×10^{-3} 以后不能同步变形所致。但作为钢筋混凝土小应变材料而言,已经远远满足极限变形范围的要求。

图3(b)表示混凝土柱内受压FRP加强型应变光缆在 $37.3 \sim 37.9 \, \text{m}$ 段中 $37.6 \, \text{m}$ 处的点受到不同压缩变形时,与其对应的中心频漂之间的拟合直线,拟

合直线能得出截距和斜率,其斜率就是FRP加强型应变光缆在该点处的压缩应变系数,表示测试光缆每发生1 MHz的频漂时37.6 m处对应发生 20.12×10^{-6} 的应变。

图3(c)表示测温光缆(松套光缆)的点在不同温度环境下,与其对应的中心频漂之间的拟合直线,拟合直线能得出截距和斜率,其斜率就是温度光缆在该点处的温度系数,表示测试光缆每发生1 MHz的频漂,对应发生0.875 °C的温度变化。

通过应变光缆的拉、压和温度光缆的测温试验,说明布里渊频移量与其对应的物理量具有良好的线性关系。

3 赫章特大桥工程概况及其现场测试

3.1 工程概况

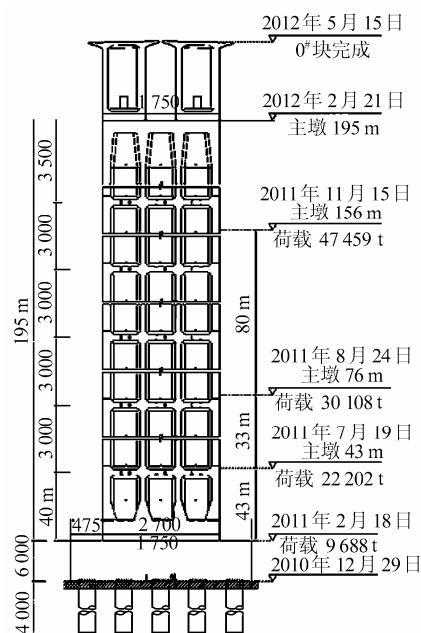
拥有亚洲第一高桥墩的贵州省赫章特大桥,该桥11号主墩高达195 m,不仅在中国同类桥型中排在首位,在亚洲也名列榜首。赫章特大桥位于在建的毕节至威宁高速公路,场区位于云贵高原乌蒙山脉北段,地势西高东低,桥位区附近的海拔最高处可达1 835 m。赫章特大桥2010年6月开工建设,于2013年3月29日18时20分合龙,历时33个月。

如图4(a)所示,桥梁11#墩为双肢薄壁墩,高195 m,设计轴力为1 000 MN,坐落在长×宽×高为27.0 m×23.0 m×6.0 m的承台上,承台由20根长40 m、直径2.5 m的嵌岩桩群桩基础支撑,实际嵌岩深度为12.12~37.48 m。考虑承台自重,群桩基础承受总荷载约为700 MN,因此,每根基桩平均分担荷载约为35 MN。桩基采用泥浆护壁正循环冲孔工艺成孔。

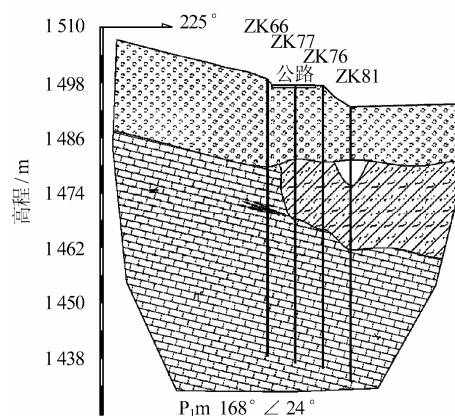
如图4(b)所示桥梁11#墩下主要地层分布如下:

(1) 覆盖层(Q^{al+pl}):以卵石为主,褐黄色、黑色,中密状态,卵石成分为灰岩,粒径为20~40 mm,含量约为70%,余为砂土,厚为0~35.5 m,局部有淤泥或淤泥质黏土夹层。

(2) 中风化灰岩(P_1m):深灰色,中厚层状,岩体较完整,局部溶蚀,裂隙较发育,岩质较硬,岩芯呈柱状和长柱状,少量块状,岩石饱和单轴抗压强度标准值为40 MPa,基岩面朝威宁方向倾斜约44°。可见桥区工程地质条件主要表现为基岩面倾角大、覆盖层深厚且厚度不均,故采用先进的分布式光纤技术开展此复杂地质条件下大直径嵌岩桩承载特性研究很有必要。



(a) 主墩修筑过程中数据采集进度图



(b) 工程地质断面图

图4 195 m主墩工程地质图

Fig.4 Engineering geology map of 195 meters main pier

3.2 现场测试

根据目前的实际情况,不可能对如此大直径的嵌岩桩进行原位测试试验,主要有以下几个原因:

(1) 大直径嵌岩桩极限承载力可达上万吨,完全存在混凝土被压碎,而桩基侧壁摩阻力和端阻力均未达到极限状态的情况,同时,目前较难提供如此大的反力装置。

(2) 试验费用极高、周期长。因此,利用上部结构物自重进行分步、分阶段测试的构想应运而生,上部结构自身荷载占其总荷载的比例较高,可根据施工过程模拟静载荷试验的分步加载过程,完全可以测试典型嵌岩桩在不同荷载情况下的侧壁摩阻力、桩端阻力的变化规律。

根据现场桩基成孔的工艺,采用在第1节钢筋笼绑扎传感光纤,然后将钢筋笼放入泥浆护壁的桩

孔内,在缓慢下放的过程中整理光纤,如图 5(a)所示,当第 1 节钢筋笼放到相应位置后,开始接入第 2 节钢筋笼。当钢筋笼全部到位后,采用柔性钢丝软管对光纤进行保护,这一过程历时 3 d,如图 5(b)所示,根据工程施工进度,现场数据采集共 11 次,其中 8 次与主墩高度对应的测试时间见表 1。



(a) 测试传感光缆绑扎

(b) 现场采集应变数据

图 5 桩基光缆铺设与测试

Fig.5 Layout and test of fiber optic cable in pile

表 1 应变光缆测试成果表

Table 1 Test results of strain optical cable

测试日期	施工进度	测试桩顶	计算桩顶	计算桩顶
		应变值 / 10^{-6}	应力 /MPa	竖向力 /MN
2011-02-19	承台浇筑	35	1.05	5.152
2011-04-12	主墩 3 m	40	1.20	5.888
2011-07-19	主墩 43 m	80	2.40	11.775
2011-08-24	主墩 76 m	110	3.30	16.191
2011-11-15	主墩 156 m	170	5.10	25.022
2012-02-21	主墩完成	200	6.00	29.438

4 测试数据处理及其成果分析

4.1 桩顶应变及竖向力

根据赫章特大桥 11 号墩 1#桩测试桩深-应变曲线、拟合桩深-应变曲线,计算在不同施工进度时桩顶应变及竖向力,成果分别见图 6 和表 2。

4.2 桩底荷载分担比

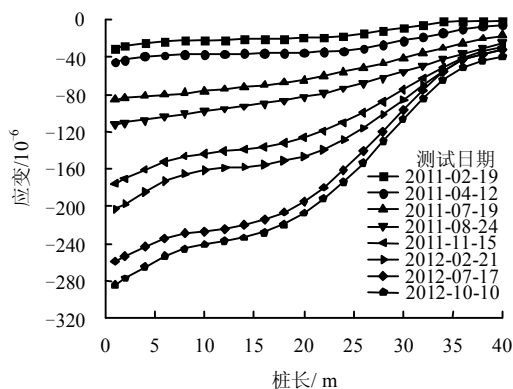
根据拟合桩深-应变曲线、桩深-轴力曲线,分析在不同施工进度时桩底荷载分担比,成果见表 2。

4.3 桩身压缩量

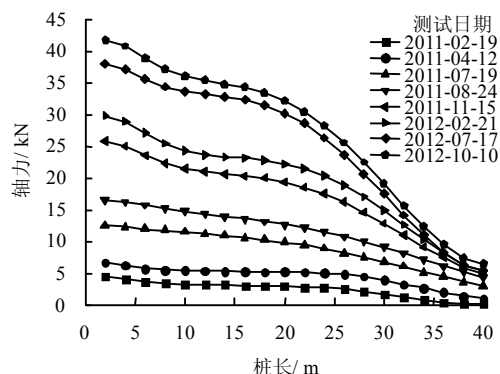
(1) 根据应变光缆测试桩身各处应变值 ε , 计算不同施工进度时桩身压缩量 z , 计算公式为

$$z = \int_0^{40} \varepsilon dz \quad (6)$$

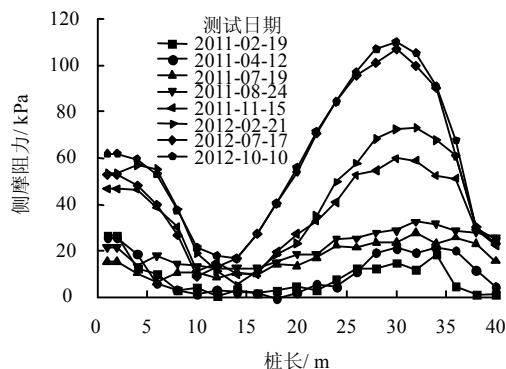
(2) 施工过程中在承台布置了沉降标,进行沉降量测量,见图 7,施工测试结果与全分布式光纤测试应变积分结果对比如表 3 所示。



(a) 桩身应变曲线图



(b) 桩身轴力分布图



(c) 桩侧摩阻力分布图

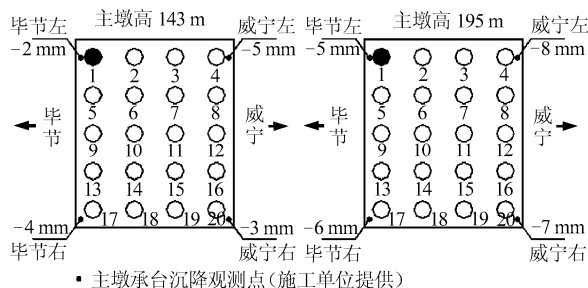
图 6 1 号桩基测试曲线图

Fig.6 Monitoring diagrams of No. 1 pile foundation monitoring

表 2 不同施工进度时桩底荷载分担比

Table 2 Load sharing ratio of pile bottom in different construction progresses

测试日期	施工进度	测试桩顶竖向力	测试桩底轴力	分担比
		/MN	/MN	/%
2011-02-19	承台浇筑	5.152	0.125	3
2011-04-12	主墩 3 m	5.888	0.924	16
2011-07-19	主墩 43 m	11.775	3.680	31
2011-08-24	主墩 76 m	16.191	5.152	32
2011-11-15	主墩 156 m	25.022	6.623	26
2012-02-21	主墩 195 m	29.438	6.623	22



主墩承台沉降观测点(施工单位提供)

图7 施工测量承台沉降量

Fig.7 Settlement of bearing platform by construction surveying

表3 光缆测试与施工测量结果对比

Table 3 Results contrast between cable test and construction surveying

桩号	测点	施工进度	光缆测试桩身压缩量 / mm	测量承台沉降量 / mm
1号桩	毕节左	承台浇筑	0.7	
		主墩 3 m	1.2	
		主墩 43 m	2.5	
		主墩 52 m		
		主墩 76 m	2.9	
		主墩 101 m		
		主墩 143 m		2.0
		主墩 156 m	4.4	
		主墩完成	4.9	5.0

4.3 根据规范计算承载力

根据1#桩基的地质情况,采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)^[22]对嵌岩桩的计算:

$$[Ra] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + 1/2 \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (7)$$

式中: c_1 为根据清孔情况、岩石破碎程度等因素而定的端阻发挥系数; A_p 为桩端截面面积 (m^2); f_{rk} 为桩端岩石饱和单轴抗压强度标准值 (kPa); c_{2i} 为根据清孔情况、岩石破碎程度等因素而定的第 i 层岩层的侧壁摩阻力发挥系数; u 为各土层或岩层部

分的桩身周长 (m); h_i 为桩嵌入各岩层部分的厚度 (m), 不包括强风化层和全风化层; m 为岩层的层数, 不包括强风化层和全风化层; ζ_s 为覆盖层土的侧壁摩阻力发挥系数; l_i 为各土层的厚度 (m); q_{ik} 为桩侧第 i 层土的侧壁摩阻力标准值 (kPa); n 为土层的层数, 强风化和全风化岩层按土层考虑。

采用《建筑桩基技术规范》计算1#桩基的竖向极限承载力标准值:

$$Q_{rk} = \zeta_r A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^n l_i q_{sik} \quad (8)$$

式中: ζ_r 为桩嵌岩段侧壁摩阻力和端阻综合系数, 与嵌岩桩深径比 h_t/d 、岩石软硬程度和成桩工艺有关。

按规范计算结果如表4所示, 可知1#桩基长度为40 m, 覆盖层为17 m, 嵌入完整基岩为23 m, 两本规范计算的思路基本一致, 只是折减系数不同, 但不同规范计算的单桩承载力的计算结果相差将近一倍。

根据《建筑桩基技术规范》5.8.2节中的钢筋混凝土轴心受压桩正截面受压承载力计算公式:

$$N \leq \psi_c f_c A_{ps} + 0.9 f_y' A_s' \quad (9)$$

式中: N 为荷载效应基本组合下桩顶轴向压力设计值; ψ_c 为基桩成桩工艺系数, 取0.75; f_c 为混凝土轴向抗压强度设计值; f_y' 为纵向主筋抗压强度设计值; A_{ps} 为桩身截面面积; A_s' 为纵向主筋截面面积。

根据式(9), 计算得到桩身强度控制的单桩承载力约为70 MN, 约为每根桩基实际分担荷载的2倍。由表4可知, 规范中通过岩土体提供的承载力计算结果明显大于桩身强度控制的承载力, 说明单桩极限承载状态由桩身强度控制, 桩的破坏模式为一般桩身破坏。因此, 为获得更高的承载力, 应严格控制嵌岩桩的施工质量, 特别是桩头施工质量, 而不应该盲目增加嵌岩深度和增大桩径。

表4 采用规范计算1号桩基的容许承载力

Table 4 Allowable bearing capacity of No.1 pile foundation calculated by specification

桥涵地基规范承载力/MN				桥涵地基规范承载力占百分比/%				桩基规范承载力/MN				桩基规范各承载力占承载力百分比/%			
桩端	嵌岩	覆盖层	总计	桩端	嵌岩	覆盖层	总计	桩端和嵌岩	覆盖层	总计	桩端和嵌岩	覆盖层	总计	桩端和嵌岩	覆盖层
78.5	288.88	1.07	368.45	21.31	78.40	0.29	100.00	196.25	10.68	206.93	95	5	100		

5 结 论

(1) 整个测试过程的数据显示, 大直径嵌岩桩桩底分担荷载小于32%, 65%以上的荷载由嵌岩部分提供的侧壁摩阻力承担, 是非常典型的端承摩擦桩。

(2) 在桥梁上部墩台的各级荷载作用下, 桩身轴力沿桩身呈非线性递减分布, 上部荷载越大, 桩身轴力非线性越明显, 从桩顶到3/4桩长附近处轴力值已减小了70%左右, 而且随着荷载的增加, 递减幅度更大, 表现明显的端承摩擦桩特性。

(3) 根据规范计算的承载力允许值远大于桩基实际的轴力, 光纤测试的数据与施工方监测的结果对比表明, 不应由承载力控制嵌岩深度, 应同时采用沉降和混凝土强度来控制较为经济合理。

(4) 光纤监测的嵌岩部分的侧壁摩阻力发挥很小, 最大不到 120 kPa; 同样, 端阻力发挥不到 100 kPa。也就是说, 实际桩基的承载力发挥非常有限。

(5) 现场测试表明, 具有一定嵌岩深度的嵌岩桩在上部荷载作用下, 侧壁摩阻力由上至下依次发挥, 且侧壁摩阻力先于端阻发挥, 在各级荷载作用下桩顶荷载主要由侧壁摩阻力承担, 其承载特性属于摩擦桩范畴; 随着上部荷载增加并达到某一定值后, 桩端以上 3/4 范围内产生明显的侧壁摩阻力强化现象。

(6) 施工方的测试沉降数据表明, 光纤测试技术可靠度极高, 是目前复杂施工环境下大直径嵌岩桩可靠的应变测试技术手段之一。

参考文献

- [1] 刘数亚, 刘祖德. 嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 86—92.
LIU SHU-ya, LIU ZU-de. Some problem on the research and design of rock-socketed piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4): 86—92.
- [2] 张建新, 叶红东, 杜海金, 等. 嵌岩桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(7): 1222—1225.
ZHANG Jian-xin, YE Hong-dong, DU Hai-jin, et al. Some problems in design of rock-socketed pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1222—1225.
- [3] 刘兴远, 郑颖人, 林文修. 关于嵌岩桩理论眼镜架的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1998, 19(5): 118—119.
LIU Xing-yuan, ZHENG Ying-ren, LIN Wen-xiu. Some cognition on the theoretical research of rock-socketed piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 19(5): 118—119.
- [4] PELLIS P J N, TURNER R M. End bearing on rock with particular reference of sandstones[C]//International Conference on Structural Foundations on Rock. Sydney: A. A. Balkema, 1980, 1: 181—190
- [5] HORVATH R G, KENNEY T C, TROW W A. Results of tests to determine shaft resistance of rock-socketed drilled piers[C]//International Conference on Structural Foundations on Rock. Sydney: A. A. Balkema, 1980, 1: 349—361
- [6] ROWE R K, ARMITAGE H H. Theoretical solutions for axial deformation of drilled shafts in rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1987, 24(1): 114—125
- [7] LEONG E C, RANDOLPH M F. Finite element modeling of rock-socketed piles[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1994, 18(1): 25—47
- [8] DYKEMAN P, VALSANGKAR A J. Model studies of socketed caissons in soft rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(5): 747—759
- [9] CARRUBBA PAOLO. Skin friction of large-diameter piles socketed into rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(2): 230—240
- [10] SERRANO A, OLALLA C. Shaft resistance of a pile embedded in rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(1): 21—35.
- [11] RAVET F, BAO X, ZOU L, et al. Accurate strain detection and localization with the distributed Brillouin sensor based on a phenomenological signal processing approach[C]//Proceedings of SPIE. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [12] BILLINGTON R. Measurement methods for stimulated Raman and Brillouin scattering in optical fibres, USA[R]//NPL Report COEM 31. June. [S. l.]: [s. n.], 1999.
- [13] THEVENAZ L, NIKLE M, FELLAY A, et al. Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers[C]//Proceedings of SPIE. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [14] WAIT P C, NEWSON T P. Measurement of Brillouin scattering coherence length as a function of pump power to determine Brillouin linewidth[J]. **Optics Communications**, 1995, 117(1—2): 142—146.
- [15] HEIMAN D, HAMILTON D S, HELLWARTH R. Brillouin scattering measurements on optical glasses[J]. **Physical Review B**, 1979, 19: 6583.
- [16] COTTER D. Observation of stimulated Brillouin scattering in low loss silica fibre at 1.33 μm [J]. **Electronics Letters**, 1982, 18(12): 495—496.
- [17] HORIGUCHI T, TATEDA M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory[J]. **Journal of Lightwave Technology**, 1989, 7(8): 1170—1176.