

东江大桥嵌岩桩承载性能试验研究

聂如松, 冷伍明, 李 箫, 杨 奇

(中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 报道了东莞东江大桥两根大直径嵌岩桩桩基承载力试验, 探讨了嵌岩桩荷载传递规律, 分析了桩端阻力和桩侧摩阻力随荷载的变化规律和桩底注浆对桩端附近侧阻力和端阻力的影响, 得到了桩端附近侧摩阻力与相对位移的关系。结果表明, 两桩桩底存在沉渣, $Q-s$ 曲线呈双折线型; 桩端压浆对提高嵌岩桩的极限承载力效果显著, 对减小桩基沉降有作用, 不是明显; 桩端附近侧摩阻力与相对位移的关系为加工软化型或抛物线型, 桩底注浆对侧摩阻力与相对位移的关系有影响。

关键词: 嵌岩桩; 自平衡法; 压浆; 侧摩阻力; 端阻力; 沉降

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1410-06

作者简介: 聂如松(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事路基支挡结构和桥梁基础方面的研究。E-mail: niersong97@163.com。

Load transfer mechanism of rock-socketed piles of Dongjiang Rive Bridge

NIE Ru-song, LENG Wu-ming, LI Qing, YANG Qi

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The bearing capacity tests on two single large-diameter rock-socketed piles were carried out on Dongjiang River Bridge in Dongguan City. The load transfer behaviors of the piles implanted into soft rock layers were analyzed, the effect on the shaft resistance and the tip resistance of pile were analyzed after grouting into the tip of piles, and the relationship between the shaft resistance and the relative displacement was obtained. It was indicated that there were dregs in the tip of two piles and the curve of $Q-s$ was a double broken line, the ultimate bearing capacity of the piles increased and the relevant settlement decreased remarkably after grouting, and the relationship between the shaft resistance near the tip and the relative displacement might be the type of working softening or parabola which was also influenced by grouting.

Key words: rock-socketed pile; self-balanced method; grouting; shaft resistance; tip resistance; settlement

0 引 言

近年来,我国在大江大河上兴建了结构型式多样的特大型桥梁。这些桥梁基础需要承受上部结构传递下来的巨大荷载,同时要满足比较小的沉降需求。这就往往需要把桩基嵌入深层的岩石中。超长直径桩和大直径嵌岩桩得到了广泛的应用。程晔等^[1]、张帆等^[2]、戴国亮等^[3]报道了几座特大桥梁的桩基现场试验情况。本文基于对东莞东江大桥两根试桩进行自平衡法测试得到的结果,探讨了嵌岩桩荷载传递规律,分析了桩端阻力和桩侧摩阻力随荷载的变化规律;分析了桩底注浆对桩端附近侧阻力和端阻力的影响,得到了桩端附近侧摩阻力与相对位移的关系,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

东莞东江大桥是莞-深高速公路北端的石碣段跨

越东江南支流处的一座大桥,采用首创的刚性悬索加劲连续钢桁梁结构形式,主跨为113+208+113 m,是国内首座双层公路大桥。大桥上层的莞-深高速公路为双向六车道,下层北五环路为双向八车道,全桥共14车道,桥宽36 m。

大桥基础采用钻孔灌注桩,几乎全部嵌固在岩石中。为了客观正确地评价成桩的承载能力和沉降性质,验证设计和理论计算、检验施工工艺效果和质量,确保大桥基础工程的绝对安全,在N2号墩和S6号墩附近进行了2根非工程桩静载荷试验。

2 试桩概况

N2AT号试桩位于北岸N2墩位附近,S6AT号试

基金项目:国家自然科学基金项目(50678175)

收稿日期:2007-09-28

表 3 试桩加载及位移总结表
Table 3 The load and settlement of test piles

试桩	压浆情况	荷载/kN	总位移/mm			回弹量占总位移		
			向下	向上	桩顶	向下	向上	桩顶
N2AT	压浆前	17600	18.23	1.90	1.13	2.00%	31.31%	2.22%
	压浆后	24200	14.70	5.96	1.39	27.89%	25.17%	33.81%
S6AT		15400	14.96	0.92	0.27	14.37%	29.89%	24.53%

8:00 开始进行, 加卸载分级、位移观察间隔时间及位移相对稳定标准, 严格按照《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041—2000) 的规定执行, 逐级加载到 2×17600 kN 后, 荷载箱向下位移了 18.23 mm, 停止加载, 然后逐级卸载到 0。

(2) 压浆情况

N2AT 试桩共设 2 个压浆回路, 即沿桩的钢筋笼对称布置四根镀锌管作为压浆管, 并形成 2 个压浆回路。在钢筋笼底部用弯头将 2 根相对的镀锌管连接成回路, 其中 1 根为进浆管, 1 根为溢浆管; 镀锌管、弯头和底部压浆管安装前清除钢管内锈渣等杂物, 防止堵塞出浆孔。在压浆管上端安装高压止浆阀, 在溢浆管上安装溢浆安全阀。位于上面的底部压浆管上设置 2 个直径为 6 mm (间距为 80 cm)、被橡胶套筒紧密包裹的出浆孔 (压浆小孔), 孔口朝下; 位于下面的底部压浆管上设置 3 个直径为 6 mm (间距为 40 cm)、被橡胶套筒紧密包裹的出浆孔 (压浆小孔), 孔口朝下。压浆管与钢筋笼牢靠连接, 压浆回路底部紧贴桩底沉渣, 尽量减小被水下混凝土包裹的厚度, 使压浆孔无法用高压水开裂。压浆管接头处密封使其不透水, 防止泥浆或水泥浆漏入, 避免堵塞压浆管路。橡胶套管采用自行车内胎, 外缠防水胶布。包裹前进行空压试验, 确定破坏压力。施工中注意压浆管必须与钢筋笼连接牢固。

第一阶段试验完成后, 对其进行了压浆, 压浆稳定压力为 4 MPa, 桩底压入水泥浆液共 0.18 m^3 , 为孔底沉渣预估体积的 2 倍, 说明孔底具有一定的可灌性。

对桩底进行后压浆, 压浆的技术控制指标采用 3 个指标: ①浆液配合比, 水泥: 水: 外加剂: $1: 0.45: 0.01$; ②最小压力 2~3 MPa, 最大压力 8.0 MPa 左右。③桩上抬量 $< 3 \text{ mm}$ 。

3.2 S6AT 试桩

S6AT 号试桩于 2006 年 11 月 28 日上午 10 点开始进行加载试验测试, 按要求逐级加载到 2×15400 kN 后逐级卸载到 0。

4 试验结果分析

4.1 $Q-s$ 曲线分析

N2AT 试桩压浆前后及 S6AT 试桩实测 $Q-s$ 曲线

如图 2 所示。N2AT 试桩压浆前后的自平衡试验和 S6AT 试桩的自平衡试验向下、向上位移以及桩顶位移及卸载后回弹量所占总位移的百分比如表 3 所示。

从图 2 中可以看出, 桩几乎全部嵌入岩层中, 荷载箱施加的荷载较小时, 荷载箱上下桩段几乎不发生位移, 桩侧存在静止摩阻力。当荷载继续增大, 桩-土之间才产生相对位移, 桩侧摩阻力进一步发挥。桩端存有沉渣, 桩端阻力的发挥需要一定量的沉降, 从图 2 可以看出, N2AT 试桩在桩底压浆前, 下段桩需向下位移约 16.5 mm, 桩端阻力才开始起作用; 桩底压浆后, 约需要 12.0 mm; S6AT 试桩端阻力的发挥需要约 12 mm 的沉降。由于荷载箱在桩中的埋设位置偏下, N2AT 试桩和 S6AT 试桩荷载箱以上桩段基本上处于弹性阶段, 其承载能力有很大的富余。

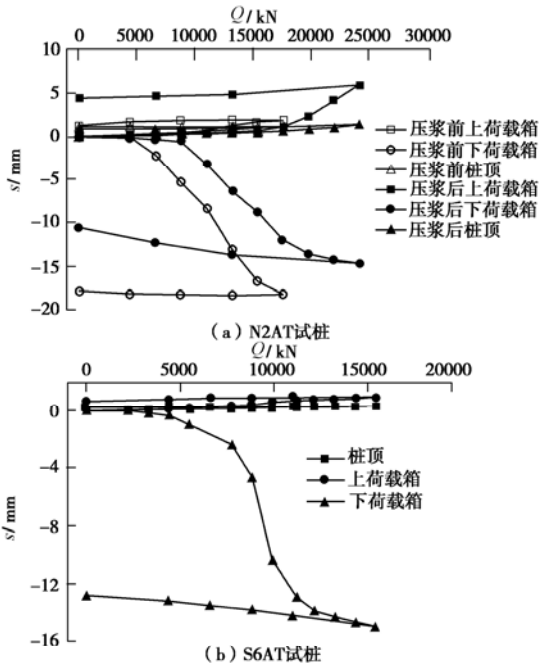


图 2 $Q-s$ 曲线图

Fig. 2 The curves of $Q-s$ of the test piles

4.2 等效转换结果

将 N2AT 试桩、S6AT 试桩上段桩和下段桩的 $Q-s$ 曲线按照经验转换法^[4]转变为传统的 $Q-s$ 曲线, 如图 3 所示。从图中可以看出, $Q-s$ 曲线不同于植入土中的荷载沉降曲线, 为缓降型, 而是接近为双折线。张建新等^[5]在室内进行两组嵌岩桩模型试验, 结果发

现,软岩中的嵌岩桩 $Q-s$ 曲线呈折线形。对于这两根试验桩,桩底存在沉渣,在荷载箱施加压力情况下,桩基础沿混凝土与围岩之间的壁面由浅及深破坏,桩底沉渣为侧摩阻力的充分发挥提供了条件。

根据建筑桩基技术规范(JGJ94—94)规定,对于大直径桩可取 $s=0.03\sim0.06D$ (D 为桩端直径,大桩径取低值,小桩径取高值)所对应的荷载值或者取桩顶沉降 $s=40\text{ mm}$ 所对应的荷载为桩的极限承载力,从图3可知按上述原则确定 N2AT 和 S6AT 试桩的承载能力完全满足设计荷载的要求,并且有很大的富余。

桩底压浆前后,桩顶转换荷载为 34000 kN 时,对应的桩顶沉降分别为 20.42 mm 和 14.21 mm 。桩底压浆使桩顶沉降减少 6.21 mm ,是压浆前桩顶总沉降的 43.70% ,这说明桩底压浆对减小桩顶沉降有效果,但不显著。

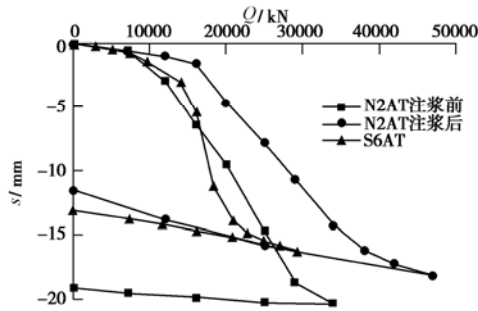


图3 等效 $Q-s$ 曲线

Fig. 3 Equivalent $Q-s$ curves of the test piles

4.3 桩身轴力分布

每加载一步,可以获得混凝土应变计应变值,根据混凝土和钢筋协调变形的原理按式(1)得到每个截面的轴力, N2AT 试桩压浆前后和 S6AT 试桩在测试过程中桩身轴力分布图如图4~6所示。

$$N_i = \frac{\varepsilon_{li} + \varepsilon_{2i}}{2} (E_g A_{gi} + E_h A_{hi}) \quad (1)$$

式中 N_i 为第 i 截面轴力 (kN); ε_{li} , ε_{2i} 为第 i 截面对称的混凝土应变计应变值; E_g , E_h 为钢筋和混凝土的弹性模量 (kPa); A_{gi} , A_{hi} 为第 i 截面钢筋与混凝土截面积 (m^2)。

从图4~6可以看出,自平衡法测桩与常规静载荷载测桩得到的桩身轴力图是不同的。自平衡法测桩得到的桩身轴力曲线以荷载箱为界,向桩段两头递减;而常规静载荷载测桩得到的桩身轴力曲线沿桩身近似梯形分布,桩头最大,然后向下递减。轴力图中还显示,上段桩侧阻力还没有完全发挥,试桩承载能力有较大的富余。

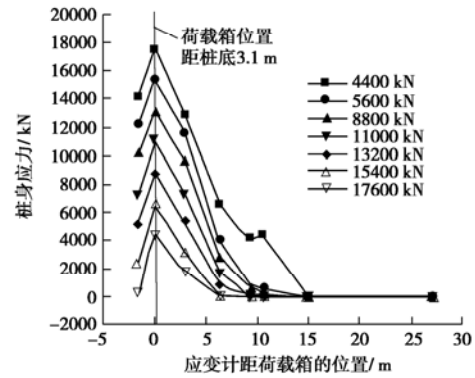


图4 N2AT 压浆前桩身轴力曲线图

Fig. 4 Distribution of axial force of pile N2AT before grouting

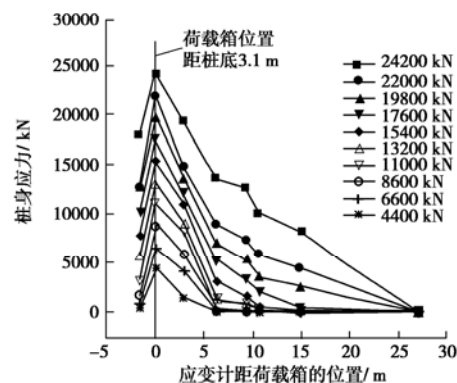


图5 N2AT 压浆后桩身轴力曲线图

Fig. 5 Distribution of axial force of pile N2AT after grouting

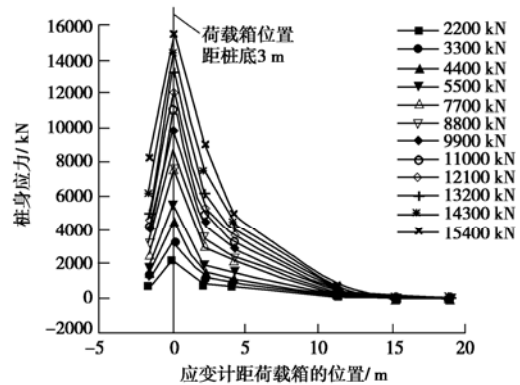


图6 S6AT 桩身轴力曲线图

Fig. 6 Distribution of axial force of pile S6AT before grouting

4.4 平均侧摩阻力

按式(2)可以求得桩侧平均摩阻力, N2AT 试桩桩端压浆前后桩侧摩阻力如图7和图8所示, S6AT 试桩桩侧摩阻力如图9所示。

$$f_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi d L_i} \quad (2)$$

式中, d 为桩的直径 (m), L_i 为相邻断面应变计间的距离 (m)。

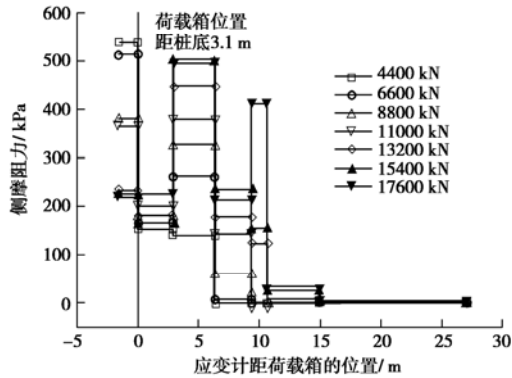


图 7 N2AT 试桩压浆前侧摩阻力图

Fig. 7 Distribution of shaft resistance of pile N2AT before grouting

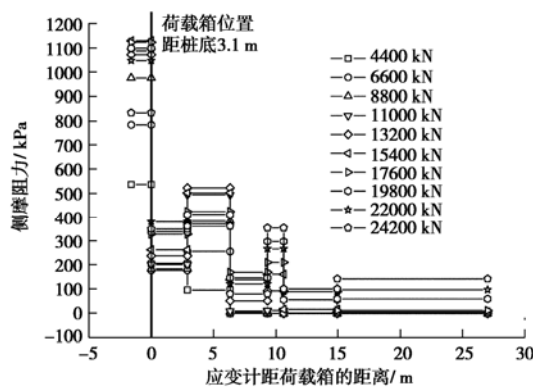


图 8 N2AT 试桩压浆后侧摩阻力图

Fig. 8 Distribution of shaft resistance of pile N2AT after grouting

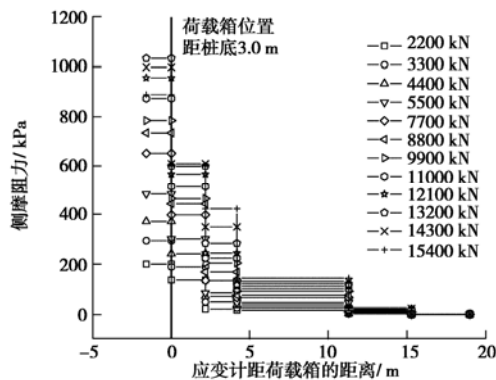


图 9 S6AT 试桩侧摩阻力图

Fig. 9 Distribution of shaft resistance of pile S6AT before grouting

桩侧摩阻力受到众多因素的影响。侧摩阻力的大小与成桩工艺、岩土的种类、桩的贯入深度、制桩材料、桩土间的相对位移以及成桩后的时间等有关。本试验所做的两根工程桩均为钻孔灌注桩，钻孔施工对周围岩土体有一定的影响，使桩侧岩土体应力释放，在一定程度上降低了侧摩阻力；水下施工容易使桩侧岩土体软化和在桩侧产生泥皮，也会降低侧摩阻力。试验桩为嵌岩桩，不同岩层对桩产生的侧阻力也不相

同，如图 7 和图 8 所示，距荷载箱 9.33~10.33 m 的弱风化泥质粉砂岩对桩产生的摩阻力比与荷载箱更近的强风化岩对桩产生的摩阻力更大。桩侧摩阻力的发挥程度与桩土间的相对位移有很大的关系，一般来讲，距荷载箱越近，桩土间相对位移越大，桩侧摩阻力也越大。从图 7~9 可以看出，荷载箱加载到最大值时，荷载箱上段仍有摩阻力没有调动，说明上段桩实际极限侧摩阻力比试验得到的侧摩阻力还要大。

4.5 侧摩阻力与桩土间相对位移的关系

N2AT 试桩和 S6AT 试桩荷载箱以上桩段侧摩阻力没有充分发挥，故以两试桩荷载箱以下桩段来说明嵌入岩层中平均侧摩阻力与相对位移的关系，如图 10 所示。从图中可以看出，N2AT 试桩在桩底压浆前，桩侧摩阻力与相对位移的关系呈加工软化型；桩侧摩阻力只需要极小的相对位移（0.022 mm）便到达了极限值，然后随着相对位移的增加，侧摩阻力逐渐减小，当相对位移达到 15 mm 左右时，桩侧摩阻力基本上不再变化。桩底压浆后，侧摩阻力有了很大的提高，本次试验中，压浆后桩端附近极限侧摩阻力值比压浆前的极限侧摩阻力值约提高了一倍。张帆等^[2]通过现场试验得到桩端压浆对接近底部的侧摩阻力产生一定有利的影响，戴国亮等^[3]得到压浆后靠近桩端的砾砂层中侧摩阻力提高了 63.4%、细砂/粗砂中提高了 116.24%~186.24%，本次试验在岩石中的测试结果与他们得到的结果类似。

压浆后桩侧摩阻力与相对位移的关系由加工软化型变为近似的刚塑性型（达到极限侧摩阻力值的相对位移仅为 0.152 mm）。当位移超过 13 mm 时，桩侧摩阻力有一定程度的降低。

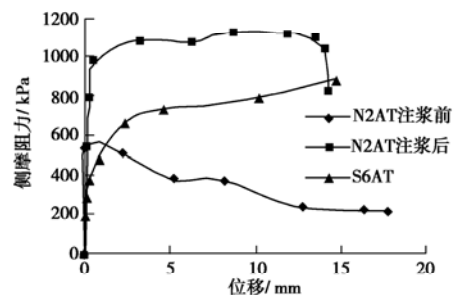


图 10 平均侧摩阻力与相对位移的关系图

Fig. 10 Relationship between the average shaft resistance and the relative displacement of test piles

S6AT 试桩荷载箱以下桩段的侧摩阻力与相对位移的关系不同于 N2AT 桩，它们之间接近于抛物线分布。但比较一致的是，达到极限侧阻力需要的相对位移很小。在很小的相对位移，S6AT 试桩的下部桩段侧摩阻力很快就达到了 400 kPa，随着相对位移的增

加,侧摩阻力呈非线性增长,相对位移超过 5 mm 时,侧摩阻力增长就很小了。

4.6 端阻力与沉降的关系

将底截面的应变计测得值转换为轴力当作桩端阻力。图 11 为桩端阻力与位移的关系曲线。N2AT 在压浆前,桩端阻力随沉降近似线形增长;压浆后,端阻力随沉降先呈线形增长,当沉降达到 12 mm 左右时,桩端阻力开始迅速增长。这说明,桩端存有沉渣,即使压浆以后,桩端阻力的充分发挥,仍需要一定的位移,同时还反映了压浆不充分。从图 11 中可以看出,S6AT 试桩桩底沉渣对端阻力的影响更加明显,在桩端下沉约 12 mm 过程中,端阻力增加的很少,当桩端沉降超过 12 mm 以后,端阻力随沉降的增加迅速增加。

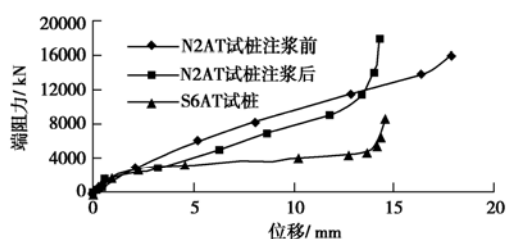


图 11 端阻力与沉降的关系

Fig. 11 Relationship between the tip resistance and the settlement of test piles

5 结 论

通过对东江大桥 N2 号墩和 S6 号墩附近两根试桩进行的自平衡荷载试验,得到以下几点认识:

(1) 自平衡测试结果表明,两桩的极限承载能力满足设计荷载的要求,并且有很大的富余。

(2) 试验结果表明,两试桩桩端存有沉渣。桩端后压浆技术可以显著提高桩基的极限承载能力,对减小桩顶沉降有效果,但不显著;桩端压浆对接近于桩端的侧摩阻力有益,本次试验结果表明,压浆后桩端附近极限侧摩阻力值比压浆前的极限侧摩阻力值约提高了一倍。

(3) 试验结果表明,桩侧摩阻力与相对位移的关系可能呈加工软化型,也可能接近于抛物线型。两者共同点是,达到极限侧摩阻力的相对位移比较小,在 0~5 mm 之间。压浆后,N2AT 试桩桩端附近侧摩阻力与

相对位移的关系由加工软化型变为近似的刚塑性型。

致 谢: 本文得到了东莞公路桥梁开发建设总公司汪爱兵高级工程师的支持和帮助,在此,表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 程 晔, 龚维明, 薛国亚. 南京长江第三大桥软岩桩基承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 94 - 98, 114. (CHENG Ye, GONG Wei-ming, XUE Guo-ya. The bearing characteristics of piles embedded in weak rocks for the third bridge over the Yangtze River at Nanjing[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12):94 - 98, 114. (in Chinese))
- [2] 张 帆, 龚维明, 戴国亮. 大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 464 - 469. (ZHANG Fan, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Experimental research on the load transfer mechanism of super-long large diameter bored pile with the self-balanced load test method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 464 - 469. (in Chinese))
- [3] 戴国亮, 龚维明, 程 晔, 薛国亚. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 690 - 694. (DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, CHENG Ye, XUE Guo-ya. Application of self-balanced testing and post grouting to larger diameter and super-long piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 690 - 694. (in Chinese))
- [4] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 薛国亚. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82 - 88. (GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, XUE Guo-ya. Theory and practice of self-balance loading test for pile bearing capacity[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 82 - 88. (in Chinese))
- [5] 张建新, 吴东云, 杜海金. 嵌岩桩承载性状和破坏模式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 320 - 323. (ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, DU Hai-jin. Testing study on bearing behaviors and failure mode of rock-socked pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 320 - 323. (in Chinese))