

# AM扩底桩在静载试验中的应变测试分析

覃卫民<sup>1</sup>, 赵刚<sup>2</sup>, 周伟江<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司  
市政工程设计院, 湖北 武汉 430052; 3. 无锡市康达建筑安装工程有限公司, 江苏 无锡 214181)

**摘要:** 在武汉天兴洲长江大桥工程中引进先进的 AM 全液压扩底灌注桩施工技术, 在国内铁路工程中属首次应用。根据线法测量原理, 采用高精度滑动测微计对 AT 扩底桩在静载试验的桩身应变进行测试, 其测试精度高, 具有较高的工程应用价值。通过对 35 号墩 3 处试桩的应变测试结果可知, 从施加第五级荷载起, 桩端阻力才开始出现, 最终端阻力占总荷载的 47.3%。AM 扩底桩试桩属于摩擦端承桩, 桩端阻力在试验后期的承载潜力巨大, 这为工程推广应用提供设计依据。

**关键词:** AM 扩底桩; 滑动测微计; 摩阻力; 端阻力

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0101-04

**作者简介:** 覃卫民(1973-), 男, 广西环江人, 副研究员, 从事岩土工程安全监测和技术开发等工作。E-mail:  
qwm1973@sohu.com。

## Strain of AM bottom-expanded piles in static loading tests

QIN Wei-min<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>, ZHOU Wei-jiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430052, China; 3. Wuxi City Kangda Build Install Engineering Co., Ltd, Wuxi 214181, China)

**Abstract:** By introducing the full hydraulic construction, the technique of AM bottom-expanded piles is used for the bridge piles in Wuhan Tianxinzhou Yangtze River Bridge, which is applied for the first time in the railroad engineering in China. Based on the linear measuring principle, a high-precision sliding micrometer is applied to strain testing of AM piles under static loading condition. Because of its high measuring accuracy, the sliding micrometer has a great application value in tip resistance and side friction of pile tests. According to the strain results of three test piles, the tip resistance of AM piles begin to work since the 5th stage of loading applied, and the ratio of the tip resistance to the whole load is about 47.3%. The AM piles belong to friction piles and they have obvious characteristics of end-bearing piles, and the AM piles have a huge potential tip resistance at later stage. The strain of AM pile tests provides a good reference for their design.

**Key words:** AM bottom-expanded pile; sliding micrometer; friction force; tip resistance

## 1 工程概况

AM 全液压扩底灌注桩工法是引进日本的先进桩基施工技术, 具有以下优点: ①采用一套管理严格的稳定液护壁, 避免桩周泥皮过厚和孔底沉碴导致单桩承载力的降低。②采用扩底桩桩周边摩擦加端部扩大措施, 提高了单桩承载力, 从而节约投资成本。

武汉天兴洲公铁两用长江大桥工程铁路引桥工程包括江北联络线上的滠口右线桥、滠口右线引桥、谌家矶右线桥及客车上行联络线引桥, 合计桥长 6782.7 m。桥梁采用钻孔桩基础, 大部分桥基础按扩底桩设计, 这是扩底桩技术首次在国内铁路工程中应用。

扩底桩设计参照日本规范—Reference For Highway Bridge Design, Specificationcation For Highway Bridges, PART IV:Substructures 进行设计。

为了获取 AM 扩底桩的沿桩身的侧摩阻力、桩端阻力参数, 为工程桩的设计提供依据, 需要对桥梁桩基工程试桩进行桩身应变测试<sup>[1]</sup>。

选取客车上行联络线引桥 35 号墩的扩底桩进行桩身应变测试。35 号墩身高 16 m, 基础设计 5φ 1.0 m, 按摩擦桩设计, 桩长 24.5 m, 桩身配钢筋 16φ 16。地

面以下地层分别为黏土、粉质黏土、粗砂，相应的层厚为 12.6, 11.7, 2.6 m。桩底位于粗砂层。AM 桩采用的主要技术参数见图 1。

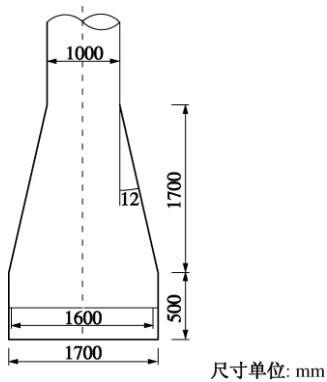


图 1 AM 扩底桩扩头参数

Fig. 1 Design parameters of AM bottom-expanded pile

## 2 测试方法

灌注桩的应变测试方法主要有以下 3 种：

(1) 点式传感器方法。在桩内不同截面埋入钢筋计等传感器件，通过电测法来获取沿桩身不同截面处的应变<sup>[2]</sup>。

(2) 滑动测微计方法。在沿桩身埋设 PVC 测管，在每一米间通过测标连接起来，通过活动式探头在测管内的操作来获取桩身每一米间的平均应变<sup>[2-4]</sup>。

(3) 光纤应变传感方法。根据分布式光纤技术原理，通过在沿桩身埋设光纤可以连续测定理论上任意标距的桩身应变<sup>[5-6]</sup>。

本工程试桩的桩身应变测试采用滑动测微计方法，该方法具有测试方法先进、测试精度高（0.003 mm/m）的优点，在国内的桩基应变测试中逐渐得到推广并写入国家技术规范中<sup>[2]</sup>。

滑动测微计方法是基于线法测量原理，其用于轴向变形测量的原理大致可申述如下：PVC 套管上每米有一个金属测标，将测线划分成若干段，通过灌浆，测标被浇筑试桩中，当被桩身发生变形时，将带动测标与之同步变形。用滑动测微计逐段测出各标距长度随时间的变化，从而得到反映被测介质沿测线的变形分布规律的数据（图 2）。

在试验加载前对 PVC 套管内测标进行初读数，然后开始加载，每级荷载稳定后分别测定观测管每米间测标在该级荷载下的变化量即可得出桩身应变随荷载

桩身轴向力由公式（1）给出

$$N_i = E_g \varepsilon_i \cdot A_{gi} + E_h \varepsilon_i \cdot A_{hi} \quad (1)$$

式中  $N_i$  为桩身  $i$  截面轴向力； $E_h$  为桩身砼弹模； $E_g$  为桩身钢筋弹模； $A_{gi}$  为桩身  $i$  截面的纵向钢筋总面积；

$A_{hi}$  为桩身  $i$  截面砼截面积， $\varepsilon_i$  为桩身  $i$  截面的应变值。

桩身单位摩阻力由公式（2）计算

$$f_i = (N_i - N_{i+1}) / \pi + D_i \cdot h, \quad (2)$$

式中， $N_i$  为轴向力， $D_i$  为桩身  $i$  截面直径， $h$  为两截面的间距。

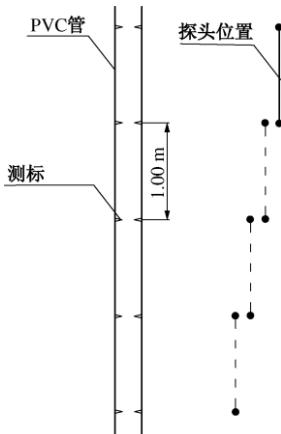


图 2 滑动测微计测试原理

Fig. 2 Measuring principle of sliding micrometer

对试桩实测应变曲线进行回归分析，经处理后得到一条光滑平顺曲线，进而由此推算试桩的轴向力及摩阻力。若将各试桩桩底截面的轴力作为端阻力，桩顶轴力减端阻力即为该桩的总摩阻力。

## 3 测试成果及分析

35 号墩的扩底桩试桩数量为 3 根，试验最大荷载为 14400 kN，分 17 级施加，35 号墩 2 号桩的桩身应变测试及处理成果见图 3 至图 6。

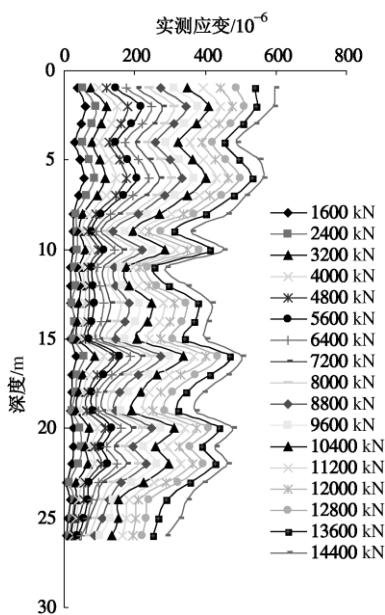


图 3 应变测试曲线

Fig. 3 Measuring strain curves

从图 6 可以看出, 同一土层不同深度处摩阻力不同, 随着荷载的增大, 桩体上部出现摩阻力有不同程度降低的现象。在各土层分界区域, 测试的摩阻力结果出现波动现象, 这是因为分界区域土层位移趋势出现波动, 影响该区域极限摩阻力的充分发挥。

对于 35 号墩试桩而言, 桩侧单位极限摩阻力试验值范围为: 对黏土为 85~100 kPa, 对粉质黏土为 70~80 kPa, 对于粗砂为 135~150 kPa。

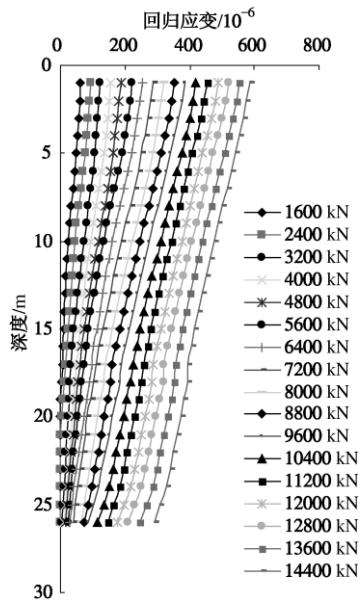


图 4 应变回归曲线

Fig. 4 Strain curves by regression analysis

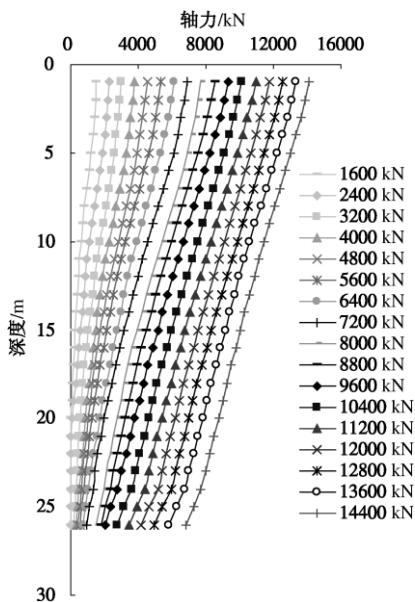


图 5 桩身轴力分布曲线

Fig. 5 Distribution of axial force along shaft

由于桩端阻力承受外荷载的比例为 47.3%, 该试桩属于摩擦端承桩, 桩端阻力在试验后期的增长速率

处于加速状态, 具有较高的承载潜力, 这为 AM 扩底桩的工程推广应用提供较好的设计依据。

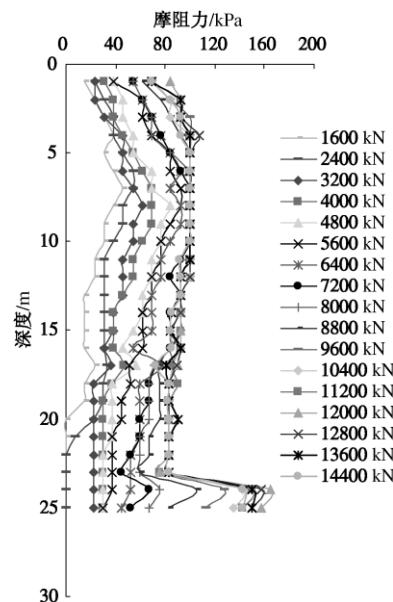


图 6 桩身摩阻力分布曲线

Fig. 6 Distribution of frictional resistance along shaft

桩端阻力如此之大的原因在于: ①桩底位于粗砂层, 粗砂层具有很高的承载力。②桩底扩大的设计, 进一步增大 AM 桩的承载力。

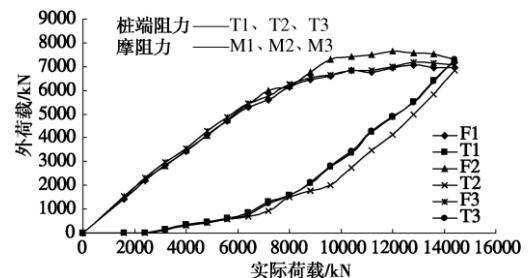


图 7 各级荷载下 3 处试桩桩端阻力及摩阻力变化曲线图

Fig. 7 Curves of tip resistance and friction force of three AM piles under external loads

#### 4 测试方法探讨

尽管采用滑动测微计方法测试桩身应变具有测试方法先进、测试精度高的优点, 但从现场测试过程来看, 该方法也有以下不足之处: ①在桩内埋设测管和测环, 其连接密封技术要求较高, 要防止混凝土浇筑时砂浆和粉尘进入套管内, 这些杂质依附在测标上会对测试成果影响很大; ②由于载荷试验的加卸载级数多, 在探头进入测管后的操作中, 依靠人工拉、扣测试手把的操作多达数百次, 耗时较长, 对操作人员的体能要求较高; ③测试设备来自进口, 整套设备价格约为人民币 40 万元人民币, 昂贵的设备价格限制其在

工程中的进一步推广应用。

近十年来兴起的光纤传感技术具有抗电磁干扰、防水防潮、抗腐蚀和耐久性好等优点，具备线法测量和连续测量的条件。但是传感光纤既是传感元件又是传输媒介，它的铺设好坏直接影响到测试结果，细小的光纤在现场恶劣的基桩施工环境下显得娇嫩，使得对光纤的铺设要求很高，同时还要防止后期桩头处理和养护过程中对传感光纤的破坏。因此在国内鲜见采用光纤传感技术进行桩身应变测试的工程。

传统的点式传感器方法具有价格低廉、埋设简便等优点，在我国得到普遍应用，被国家技术规范《建筑基桩检测技术规范》JGJ106—2003 推荐为“宜采用”的基桩内力测试方法<sup>[2]</sup>。但该方法的不足之处在于：①点式传感器法属于点法测试的范畴，获得测试信息相对较少，而埋设过多时，由于引线过多又会影响桩身结构及承载力的发挥；②传感器主要靠焊接依附于桩身与桩底，在信号线的埋设以及成桩等过程都会直接影响传感器的成活率。

由此可见，如果能综合以上 3 种测试方法的优点，研制出一种测试精度高、安装埋设简便、价格低廉的基桩应变测试产品和方法，且能实现线法测试的目标，必有较好的推广应用前景。

## 5 结 论

采用高精度滑动测微计对 AT 扩底桩在静载试验的桩身应变进行测试，测试精度高，具有较高的工程应用价值。AM 扩底桩的应变测试结果表明：

(1) AM 扩底桩技术采用扩底桩桩周边摩擦加端部扩大措施，能极大地提高单桩承载力，其在国内铁路工程的应用是成功的。

(2) AM 扩底桩属于摩擦端承桩，桩端阻力在试验后期的承载潜力巨大，为其在工程中的推广应用提供较好的设计依据。

## 参考文献：

- [1] TB 10002.5—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京：铁道出版社，2005. (TB 10002.5—2005 Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert[S]. Beijing: China Railway Press, 2005. (in Chinese))
- [2] JGJ106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2003. (JGJ106—2003 Technical code for testing of building foundation pile[S]. Beijing: China Architecture and Building Press , 2003. (in Chinese))
- [3] ERGUN M U, SONMEZ D. Negative skin friction from surface settlement measurements in model group tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(6): 1075 – 1079.
- [4] 李光煜, 黄 粹. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 99 – 109. (LI Guang-yu, HUANG Yue. Linear principles and portable equipment series for strain monitoring in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 99 – 109. (in Chinese))
- [5] 隋海波, 施 斌, 张 丹, 等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 135 – 143. (SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Review on fiber optic sensor-based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 135 – 143. (in Chinese))
- [6] 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))

(本文责编 黄贤沙)