

三向位移计在桩基测试中的应用

颜 钟^{1,2}, 李 端 有^{1,2}, 李 强^{1,2}

(1. 长江科学院 工程安全与灾害防治研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要:三向位移计是线法监测仪器中的一个代表仪器,能够测定整条测线的应变。通过工程实例展示了三向位移计在桩基摩阻力及端阻力测试中的应用情况。采用四次多项式拟合法对实测应变曲线进行处理,继而得到摩阻力与端阻力。测试结果显示,桩在荷载较小的时候,反力大部分由桩侧摩阻力提供,当荷载增加到一定数值时,端阻力开始出现,此时侧摩阻力增量较小或不再随荷载的增加而增加,端阻力增量却表现得十分明显。桩侧摩阻力峰值位置会随荷载的增加而向桩底方向移动。

关键词:桩基测试; 摩阻力; 端阻力; 线法监测; 三向位移计

中图法分类号: P631.13 文献标志码: A

桩基摩阻力及端阻力的测定对桩基设计有很大的影响,传统的测定方法是埋设钢筋应力计、混凝土应变计等,此等方法是基于点法监测原理,只能测定仪器埋设处的应变信息。20 世纪 80 年代初,瑞士联邦苏黎世科技大学岩石及隧道工程系 Kovari K. 教授等提出了线法监测原理^[1],基于该原理可以测定整条测线的应变。三向位移计是一种基于线法监测原理的代表性仪器,具有携带方便、测值稳定、数据可靠等优点,在桩基检测中应用较广。

1 三向位移计介绍

三向位移计 (TRIVEC) 可用于岩石、混凝土等介质中垂直测线轴向和径向位移的测量,能同时测定 X、Y、Z 三个方向的应变。三向位移计沿垂直测线的位移矢量分辨率为 0.001 mm,径向 Δx 和 Δy 测量精度为 0.04 mm/m、测量范围 ± 180 mm/m ($\pm 10^\circ$); 轴向 Δz 的测量精度为 0.002 mm/m、测量范围 ± 10 mm。三向位移计由数字读数仪、精密探头、导向链、校正装置、电缆以及若干操作杆组成。

三向位移计和传统仪器相比有以下主要优点。

(1) 精准、可靠性高。传统仪器只能测出仪器埋设点处的应变,计算结果只能靠这几个点的数据进行

推算,而三向位移计是在得到整条测线数据的基础上,计算出桩基的摩阻力及端阻力^[2],所以相对传统仪器,其计算结果更加精确可靠。

(2) 抗损坏性好。传统方法埋设的传感器有可能会因桩身破坏而导致传感器损坏,使整个测量工作毁于一旦,三向位移计测量应变前是不需要埋设传感器的,只需在桩基中埋设金属测环及套管,从施加荷载至整桩破坏的过程中,预埋的测环及套管不会被损坏以至影响测量。

(3) 稳定性及重复性好。三向位移计采用球锥定位原理:锥形测标是环形的,并被切成 4 瓣,探头两端的球头也切成 4 瓣,这样探头就可在用套管连接的锥形测标中自由地滑动和测量。球心定位精度可达到 0.001 mm,通过采用高硬度的不锈钢或铜及精密机械加工,能达到较高的稳定性和重复性。

2 三向位移计测试原理

每次使用三向位移计前都应在标定筒中进行系数标定,标定后方能用于测量。事先在测孔中牢固地埋设间距为 1 m 的高精度金属测环,测环间可用 HPVC 管连接。试验开始前可将三向位移计探头放入孔底一段时间,以适应环境温度,通过操纵操作杆(2 m 长的

轻质铝杆)从下往上测量,每米测量 1 次数据并记录。测量时拉紧电缆或操作杆即可进行读数,读数结束后旋转 45°到滑动位置,使探头通过测环,通过测环后,再回转 45°(即原来角度)并提升探头到下一测量位置进行测量。如此循环测量直至完成测量工作。测量位置和滑动位置角度相差 45°,见图 1。

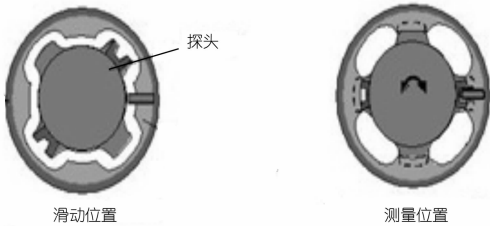


图 1 滑动位置与测量位置

在施加荷载前需测读初始读数,初始读数测 3 次取平均值,其他各级荷载下的读数需等变形稳定后才能测读数值。每级荷载下的实测应变为当前读数减去初始读数,即:

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon'_{ij} - \varepsilon'_{0j} \quad (1)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_{ij}$ 为第 i 级荷载下桩身第 j 米处实测应变值; ε'_{ij} 为第 i 级荷载下桩身第 j 米处读数仪所记录读数值,当 $i = 0$ 时为初始读数,即加荷前读数。实测数据不可避免地存在一定误差,不能直接用实测值进行计算,否则将使误差恶性放大,甚至出现负摩阻力等不合理现象,必须进行回归处理,处理后的应变称为回归应变,用符号 ε_{ij} 表示。

根据回归后各测点的回归应变,能很容易计算出轴向力。

$$p_{ij} = E_i \varepsilon_{ij} A \quad (2)$$

式中, p_{ij} 为第 i 级荷载下桩身第 j 米处的轴向力; E_i 为第 i 级荷载下的弹性模量,取式(3)线性回归后的值; ε_{ij} 为第 i 级荷载下桩身第 j 米处回归应变值; A 为桩身净面积。

$$\bar{E}_i = \frac{F_i}{\varepsilon_{i0}} \quad (3)$$

式中, \bar{E}_i 为桩头处第 i 级荷载桩头部分弹性模量值; F_i 为第 i 级荷载值; ε_{i0} 为第 i 级荷载下桩头应变。

以往计算中也有采用平均静弹模的方法,但从理论上来说此方法是比较粗糙的,本文取桩头部分线性回归后的弹性模量来代替以往计算中采用平均值方法的弹性模量,此结果更加接近实际情况。

根据式(2)得到的轴向力,可用(4)式计算各级荷载下的单位摩阻力。

$$q_{ij} = \frac{p_{ij} - p_{ij+1}}{U} \quad (4)$$

式中, q_{ij} 为第 i 级荷载下第 j 米处单位摩阻力; U 为桩基侧面积,因所取长度为 1 m,数值上等于桩身周长。

在式(2)中,当 j 取桩身长度值时,即桩身底部的轴向力就是端阻力,除以桩面积(面积按与土接触面积计算)便可得单位端阻力。

3 工程实例

3.1 工程概况

某试桩工程位于武汉地区,为检测试桩在各级荷载下的各地层单位摩阻力及单位端阻力,对其中 3 号和 4 号区的 6 根桩进行单桩竖向抗压静载试验。仪器采用瑞士 Solexperts AG 公司生产的三向位移计,加压方式为堆载法,通过千斤顶进行液压分级施加反力,共分 9 级加压,第一次施加荷载 1 000 kN,最大值为 5 000 kN,每级加压后荷载持续 2 h。

本文仅列 3 号区 S2-8 桩。该桩采用预制钢筋混凝土桩,桩长 33 m,地质条件及桩身截面尺寸见图 2。

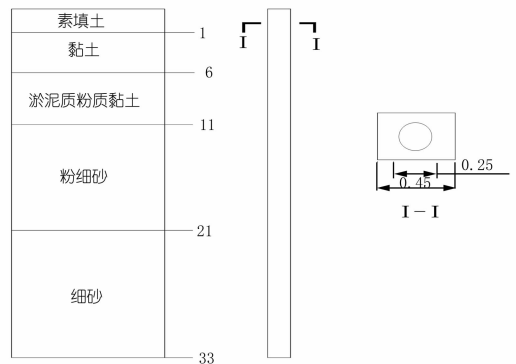


图 2 地质条件及桩身截面(尺寸单位:m)

根据该工程试验方案,金属测环及套管随钢筋笼一起浇筑,浇筑过程中应该有保证测环及套管垂直度的措施,且必须用盖盖住孔口,防止杂物掉入套管内影响测量。相对试桩成型后才埋设金属测环及套管来说,在浇筑混凝土时就直接埋设金属测环及套管,能有效防止在试验过程中金属测环及套管与试桩发生相对位移,保证金属测环及套管与试桩的牢固连接,使测量数据的有效性得到保障。由于初始数据是在压桩完成后才开始测读,故不必考虑压桩过程中对金属测环及套管所产生的影响。

3.2 试验成果与分析

实测应变曲线如图 3 所示,从图中可以看出数据比较离散,这也是为什么要首先用拟合法对实测应变曲线进行处理的原因之一。处理后的回归应变曲线如图 4 所示。得到回归处理的数据后,可根据公式(2)得到试桩的轴向力,如图 5 所示。可进一步计算出试桩的单位摩阻力及单位端阻力。单位摩阻力见图 6,

单位端阻力见图 7。

约 11 m 厚的覆盖层所挤密,所以能提供较大的摩阻力。文献[3]提到了摩擦桩的单位摩阻力峰值随荷载增大而增大并逐步下移的规律,从图 6 中可以看出实测结果和前人的理论分析基本符合,较好地验证了这一理论分析。

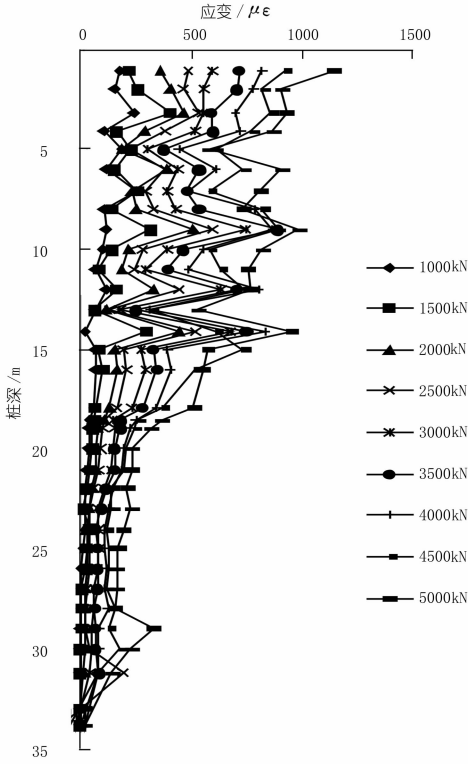


图 3 3 号区 S2-8 试桩实测应变

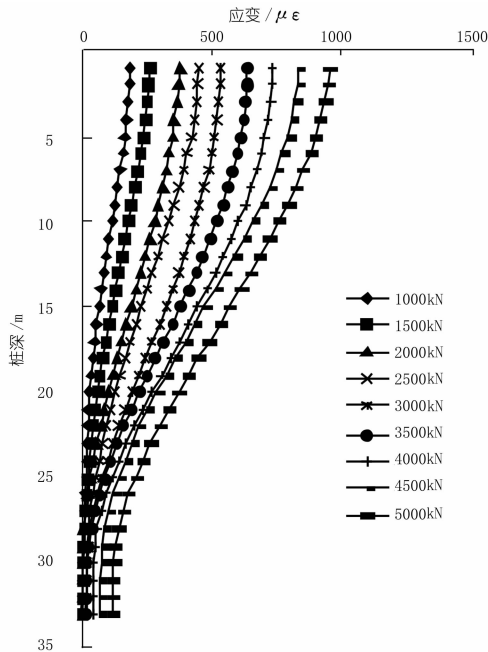


图 4 3 号区 S2-8 试桩回归应变

从图 6 可以看出,上部素填土覆盖层所能提供的单位摩阻力较小,这是由于上部覆土土质疏松所致。层厚 5 m 的黏土与同层厚的淤泥质粉质黏土相比而言,位于下部的淤泥质粉质黏土能提供更大的摩阻力,在荷载较低时,是主要的持力层。单位摩阻力最大值位于粉细砂层及细砂层,粉细砂具有容易受自重或上面的覆盖层挤密的物理性质,该工程中粉细砂被上部

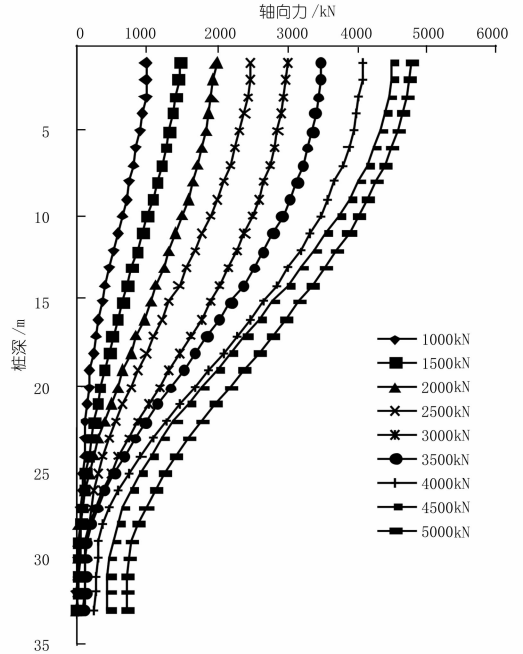


图 5 3 号区 S2-8 试桩轴向力

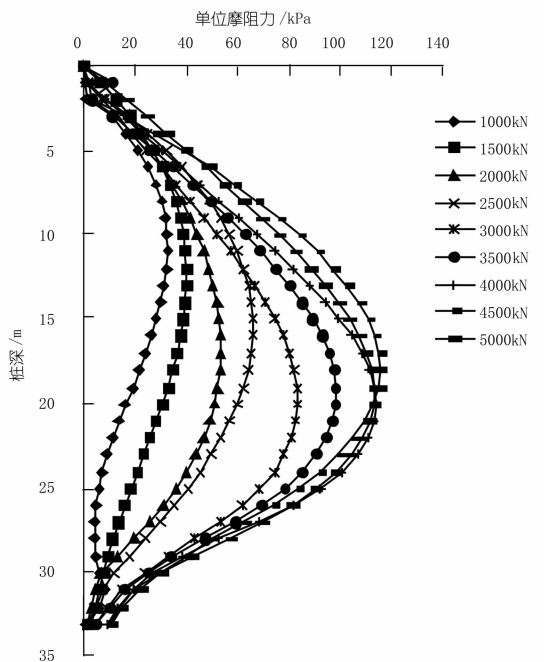


图 6 3 号区 S2-8 试桩单位摩阻力

从图 7 的端阻力分布图可以看出,端阻力在荷载 2 000 kN 以下时都是非常小;当荷载增加到 2 500 kN 时,端阻力开始出现,到 4 000 kN 时,其增长速度明显加快。这是因为桩的侧阻力已不能提供足够多的抗力,所以在该工程中可以认为,当荷载在 4000kN

时,侧摩阻力已达到最大值。

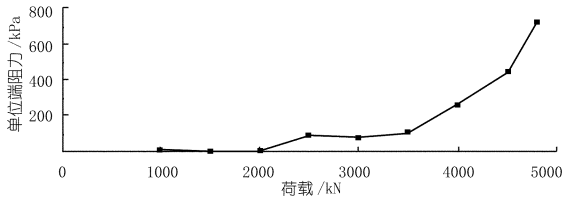


图 7 3 号区 S2-8 试桩单位端阻力

总体而言,桩基顶部受到荷载后,荷载较小时抗力主要由侧摩阻力提供,随着荷载的增大,端阻力开始出现,与摩阻力共同提供与荷载相平衡的反力,并且有可能超过摩阻力成为受力的主要承担者。

4 应用中有关问题的讨论

对于回归应变处理时应采用什么样的拟合方程,既能达到工程所要求的精度同时又具有一定的简化性,是值得讨论的问题。对此,前人提出了二次或三次样条曲线拟合的方法,但在实际的工程中很难得到确定样条曲线需要的边界条件,所以在该工程中使用了四次多项式拟合方法。经过实际测试,该方法在工程

中拟合相关系数达 0.98 以上,完全能满足工程所要求的精度。该方法在其他工程中可以推广借鉴,但其理论上的依据还需要更进一步的研究。

5 结语

本文通过工程实例展示了三向位移计在桩基摩阻力及端阻力测试中的应用。与传统的测试手段相比,该仪器有较大的优势:能连续快速地测出整条测线上的数据。总的来说三向位移计在岩土工程的测试中将会有较大的应用发展前景。文中提出的数据处理方法既能满足精度要求又能极大简化计算,可为其他类似工程参考。

参考文献:

- [1] Kovari K, Amstad Ch, Grob H. Displacement measurements of high accuracy in Underground openings[A]. In , Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech [C]//Denver:NAS Washington DC,1974.
- [2] 朱国甫,李光煜. 确定桩侧摩阻力曲线的约束样条拟合方法[J]. 岩土力学,1994,15(3):1-8.
- [3] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学,1990,11(4):1-12.

(编辑:郑毅)

Application of TRIVEC in pile testing

YAN Zhong^{1,2}, LI Duanyou^{1,2}, LI Qiang^{1,2}

(1. Engineering Safety and Disaster Prevention Scientific Institute, Changjiang River Scientific Institute, Wuhan, 430010, China;
2. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: TRIVEC is a representative of linear observation equipment that can measure strain in a whole line range. We present the application of TRIVEC in detection of frictional resistance and end resistance in a pile testing projects. Quartic polynomial fitting is applied to process the measured strain data, and then the frictional resistance and end resistance of a pile can be obtained. The result show that, frictional resistance provides a larger part of counter force when load is small, but when the load increases to a higher level, the end resistance begins to appear, and the frictional resistance shows a little increment or even no increment with the increment of load, while the end resistance increases significantly. Moreover, the test verifies a law that the position of peak frictional resistance will move towards the end of the pile with load increases.

Key words: pile testing; frictional resistance; end resistance; linear monitoring; TRIVEC

· 简 讯 ·

世界最大 U 形输水渡槽湍河渡槽工程建设取得突破性进展

2011 年 12 月 6 日至 8 日,国务院南水北调工程建设委员会专家委员会在河南南阳组织召开了南水北调中线一期工程湍河渡槽 1:1 仿真试验中间成果和首跨槽身施工技术咨询会,标志着湍河渡槽的工程建设取得突破性进展。湍河渡槽是三线三槽双向预应力 U 型结构,工程建设难度很大。为验证并优化设计,完善渡槽施工工艺,2011 年 5 月湍河渡槽现场开始 1:1 仿真模型试验。经过一系列的准备性试验,9 月 8 日湍河渡槽 1:1 仿真模型浇筑成功,10 月 10 日完成仿真试验槽的预应力张拉施工,11 月 28 日完成 1:1 仿真充水试验,经过试验数据的采

集分析,湍河渡槽结构安全,槽体受力状态较好,符合设计预期。与此同时,在总结仿真工艺试验成果后,渡槽施工工艺基本成熟。目前,工程槽首樨渡槽浇筑完成,按照设计的走行方案,造槽机于 11 月 30 日安全过孔。

专家们经过现场调研和会议讨论,初步认定湍河渡槽模型试验达到了预期的目的,试验数据可靠,成果丰富。渡槽结构设计合理,具有一定的超载能力,槽体工作性状满足要求。同时对试验报告和工程建设提出了意见和建议。

(长江)