

# 固定式测斜仪对洞桩法施工车站边桩 深层水平位移的监测

张子真<sup>1,2</sup> 陈昌彦<sup>1,2</sup> 王金明<sup>1,2</sup> 孙玉辉<sup>1,2</sup>

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司, 100038, 北京;

2. 北京市道路与市政管线地下病害工程技术研究中心, 100038, 北京//第一作者, 工程师)

**摘要** 利用固定式测斜仪对洞桩法暗挖施工车站的边桩深层水平位移展开实地监测工作。实际监测数据分析结果表明:测斜仪电缆保护对试验的进行非常重要;温度修正对试验结果的影响不大,应剔除受电磁干扰而异常的测试数据;选定冠梁施工后的电压值作为初始状态;桩体水平位移主要受小导洞内初期支护扣拱回填、初期支护凿除和站厅层土方开挖的影响;扣拱开挖、二次衬砌扣拱期间位移变化不大。

**关键词** 洞桩法暗挖地铁车站;固定式测斜仪;边桩深层水平位移

**中图分类号** U456.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.05.031

## Application of In-place Inclinator in Deep Stratum Side Pile Horizontal Displacement Monitoring of PBA Metro Station

ZHANG Zizhen, CHEN Changyan, WANG Jinming, SUN Yuhui

**Abstract** The in-place inclinometers are applied in the monitoring of deep stratum side pile horizontal displacement for metro station built with pile-beam-arch (PBA) method. The results of monitoring data analysis show that the protection of the inclinometer cable is very important for the experiment. Since the temperature changes have less impact on the test result, the abnormal test data disrupted by electromagnetic interference should be eliminated, the voltage value of crown beam after construction should be selected as the initial state. The horizontal displacement of slide pile is mainly influenced by the back-filling of the arch, the cutting of the sprayed concrete support and the earth excavation inside the small guide hole at the initial stages, therefore the horizontal displacement during the second buckle arch excavation and lining is not obvious.

**Key words** PBA metro station; in-place inclinometer; horizontal displacement of side pile in deep stratum

**First-author's address** BGI Engineering Consultants Ltd., 100038, Beijing, China

地铁车站采用洞桩法施工时,对交通和周围居民生活的影响较小。洞桩法施工过程为:先挖导洞,并在洞内打桩;梁柱完成后,施作顶部结构;最后,在其保护下施工。可见,洞桩法施工实际上就是将着盖挖法施工的挖孔桩梁柱等转入地下进行。

目前,文献[1-4]等对洞桩法车站桩体水平位移的研究,均通过数值模拟的方法,来总结车站结构或地层的变形规律。相比之下,基于桩体水平位移实测数据的研究鲜有报道。

北京地铁某洞桩法施工车站(以下简为“监测车站”),利用固定式测斜仪,开展桩体水平位移监测研究。既得到了丰富的监测数据,也积累了宝贵的经验,能为后续研究提供参考。

## 1 监测前期工作

### 1.1 方案设计和监测原理

监测车站埋深为9~11 m,为双跨连拱墙结构。研究选择标准断面作为监测断面,在断面A轴和C轴边桩分别布置了8台BGK6150-1型单轴测斜仪(如图1所示)。

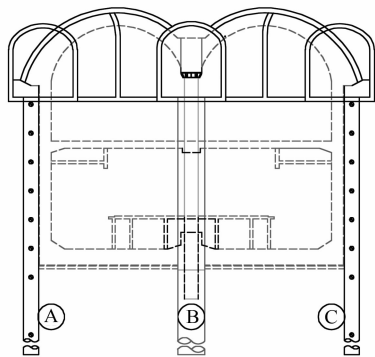


图1 标准断面单轴测斜仪的布置位置

测斜仪内置的高精度传感器,可将倾角 $\theta$ 转换

为电压信号  $U$  输出。故测量  $U$  值,即可算得相应测斜仪的  $\theta$  值。

如图 2,设  $I$  (传感器处) 与其下方相邻的传感器或底部滑轮处 ( $O$  点) 的距离为  $L$ ,则第  $i$  台传感器的水平位移为  $D_i = L_i \sin \theta_i$ 。

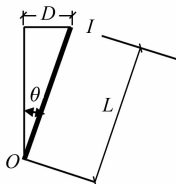


图2 测斜仪水平位移计算原理示意图

将  $D_i$  累加,可以得到  $n$  支测斜仪串联的累积水平位移:

$$D_n = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + \cdots + L_n \sin \theta_n \quad (1)$$

本次  $D_n$  测量值和上次  $D_n$  测量值的差值,即为本次位移值;本次位移值与上次累积位移之和,即为本次累积位移值。这样就可求得不同工况下的桩体水平位移值。

## 1.2 仪器安装和监测

BGK-6150-1 测斜仪采用  $\phi 70$  mm 的测斜管,随钢筋笼下放,逐节安装。桩孔应有足够的深度,并应避免沉渣影响钢筋笼的下放。测斜管应安装在迎土一侧,既方便电缆的保护,也避免后期凿桩侵限时破坏测斜管。测斜管安装完成后,管顶应低于桩顶约 20 cm,以预留孔口悬挂固定组件的空间。安装后的孔口现场实况照片如图 3 所示。

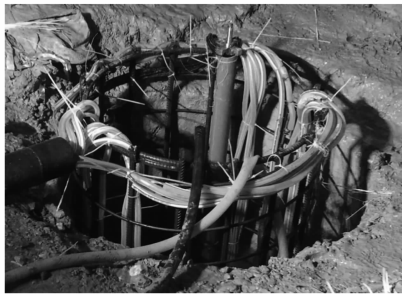


图3 固定式测斜仪的安装孔口实景图

电缆应就近沿导洞侧壁向上延伸,并悬挂在人手可触及的高处(如图 4 所示)。桩顶下 1 m 至桩顶上 2 m 范围内的电缆,应严密包裹软材料作为缓冲层。电缆正下方的导洞底板应凿出一个沟槽,并将电缆放入,以避免机械行走时将电缆压坏。冠梁施工前,应及时接长电缆,以延伸至方便人工采集数据的地方。

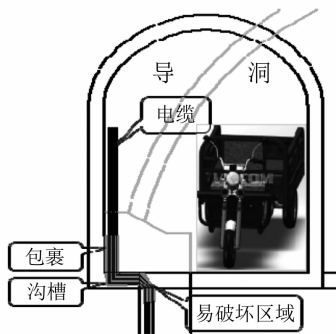


图4 桩顶电缆的保护

因为施工场地狭小,无法为自动化数据采集仪提供可靠的、稳定的平台,故本工程仍需采用人工监测。

## 2 监测数据处理

冠梁施工之前,施工机械距离传感器电缆较近,但此时边桩尚未受力,理论上不应发生明显变形。如果初始值采集过早,数据中可能会包含更多的施工电磁干扰。

冠梁施工之后,边桩开始受力,而此时施工机械也距离电缆较远,电磁干扰减弱。初始监测值的采集,应结合工况,尽可能避开电磁干扰,但又不能晚于边桩受力,从而抓住主要因素,忽略次要因素。

### 2.1 温度修正

以桩身混凝土浇筑后一个月、桩间旋喷桩施工前的测量值为初始值,得到监测车站 C 轴边桩各阶段的桩体水平位移如图 5 所示。

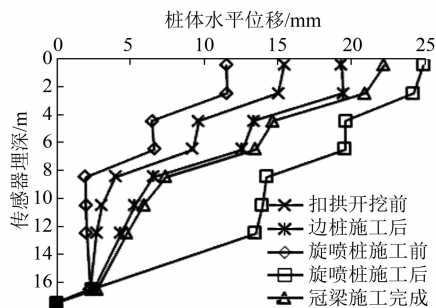


图5 桩体水平位移

从图 5 中可以看出:桩间旋喷桩施工前,最大水平位移已超过 10 mm;旋喷桩施工后,最大水平位移接近 25 mm;冠梁混凝土浇筑后,最大水平位移达到 22 mm;扣拱开挖前,最大水平位移约 15 mm。图 5 中,边桩施工后,未进行土方开挖作业,桩体水平位移就达到了 1~2 cm,且前后剧烈变化。这显然是不合理的。

分析试验数据发现,在冠梁浇筑之前,部分传感器输出电压值异常波动,呈现出不稳定状态(如图 6 所示)。

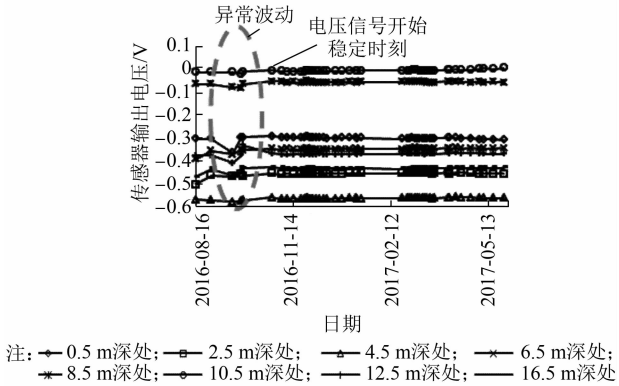


图 6 温度修正前的电压时程曲线

经分析,波动可能是由温度引起的。C 轴边桩传感器的温度时程曲线如图 7 所示。由图 7 可见,在电压波动比较大时,传感器温度也刚好发生了突变。这可能是受旋喷桩施工影响。

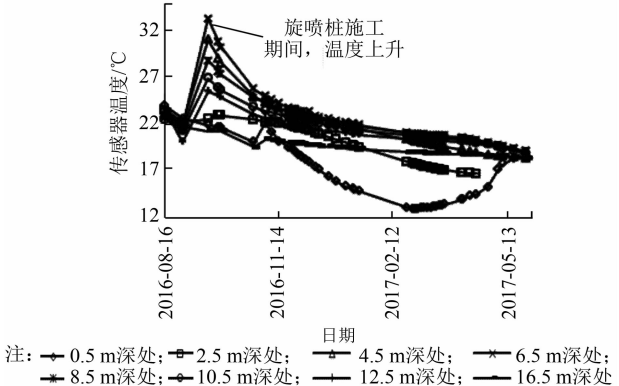


图 7 传感器温度时程曲线

温度的突变会引起结构变形及测斜仪输出电压值的突变。BGK-RB500 读数仪上的电压温度变化比  $\varepsilon=0.000\ 25\ \text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。据此,可对测斜仪输出电压值进行修正。

$$U_T = U + \varepsilon(T - T_0) \tag{2}$$

式中:

- $U_T$ ——温度修正后的电压值;
- $U$ ——温度修正前测斜仪输出电压值;
- $T$ ——一般测试时的传感器温度;
- $T_0$ ——首次数据采集时的传感器温度。

利用  $U_T$ 可计算扣拱开挖前的桩体水平位移温度修正值。修正前后的监测结果如图 8 所示。由图 8 可见,修正前后的变形量差距不大。这说明传

感器输出电压值异常波动并非由温度波动引起。故温度修正不能解决数据波动的问题。

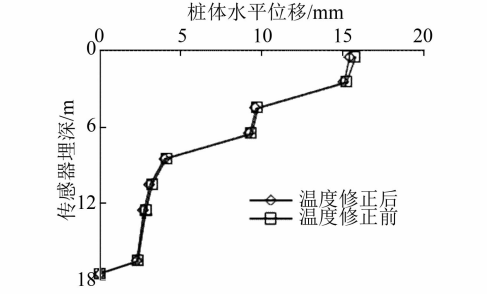


图 8 温度修正对监测结果的影响

2.2 合理选择初始状态

在传感器输出电压值波动时期,传感器周边正在进行边桩、旋喷桩及冠梁等的施工。故传感器容易受到各种施工机械的电磁干扰,而电缆所配备的屏蔽线,只能适量减轻这些施工影响,而无法完全抵销。

桩体水平位移监测主要监测土方开挖和结构施工对桩体变形的影响。由于冠梁施工之前,扣拱土方尚未开挖,因此,冠梁施工之前的异常数据,应予以剔除,不计入桩体水平位移的计算中。

监测车站 A 轴传感器安装后第 84 天,即 C 轴传感器安装后第 113 天,冠梁浇筑完成,以此为初始状态。

3 变形分析

将冠梁浇筑完成时的监测数据作为初始数据,得到桩体水平位移如图 9 和图 10 所示。

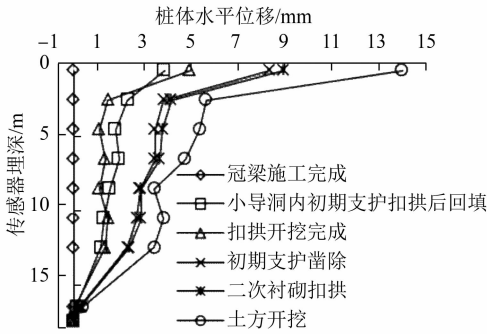


图 9 A 轴桩体水平位移曲线

各施工阶段的桩体最大水平位移如表 1 所示。A 轴和 C 轴边桩桩体水平位移值虽有差异,但随工况的变化趋势基本一致:位移增量主要发生小导洞内初支扣拱后回填、初支凿除和站厅层土方开挖阶段。这说明这些施工对桩体水平位移影

响较大,而扣拱开挖及二衬扣拱等阶段,位移变化并不明显。

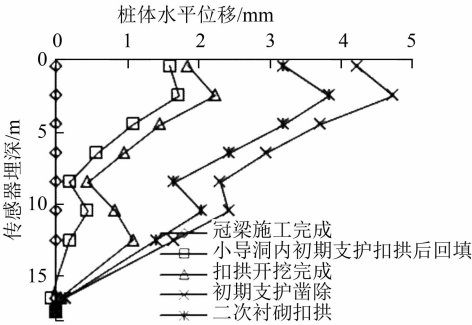


图 10 C 轴桩体水平位移曲线

表 1 各施工阶段的桩体最大水平位移

施工阶段	位移最大点 深度/m		各阶段最大 水平位移/ mm		累积最 大水平 位移/mm	
	A 轴	C 轴	A 轴	C 轴	A 轴	C 轴
小导洞内初期支护扣拱后回填阶段	2.5	0.5	1.72	3.84	1.72	3.84
扣拱开挖阶段	2.5	0.5	0.51	1.10	2.23	4.94
小导洞初支凿除阶段	2.5	0.5	2.49	3.40	4.72	8.34
初期支护扣拱阶段	2.5	0.5	-0.89	0.57	3.83	8.91
站厅层土方开挖阶段		0.5		5.08		13.99

1) 小导洞内初期支护扣拱后回填阶段:产生了较大的水平推力。该推力指向车站内侧作用于桩顶,使边桩向车站内侧偏移。A 轴边桩最大位移为 3.84 mm,出现在桩顶;C 轴边桩最大位移为 1.72 mm,出现在 2.50 m 深处。

2) 扣拱开挖阶段:桩体水平位移略有增大。A 轴边桩最大位移达到 4.94 mm,发生在桩顶,增量为 1.10 mm;C 轴边桩最大位移达到 2.23 mm,出现在 2.5 m 深度处,增量为 0.51 mm。扣拱开挖使车站内侧的应力得到释放,边桩在外部土压力作用下,逐渐向车站内侧挤压。虽然初支扣拱拱脚会产生一定水平推力,但这不足以使桩体向外偏移。

3) 小导洞初期支护凿除阶段:初期支护结构受体系发生转换,小导洞退出工作,扣拱开始承担更大荷载。A 轴边桩最大位移达到 8.34 mm,出现在桩顶,增量为 3.4 mm;C 轴边桩最大位移达到 4.72 mm,发生在 2.5 m 深度处,增量为 2.49 mm。小导洞初期支护凿除后,扣拱跨度突然增大,支护体系的刚度明显减弱,是风险最大的阶段。初期支护凿除应严格分段完成,尤其在地下水丰富的地区更要严控分段长度,及时浇筑二次衬砌扣拱,减少

暴露时间。

4) 二次衬砌扣拱阶段:A 轴桩顶位移由 8.34 mm 增加至 8.91 mm,增量是 0.57 mm;C 轴边桩最大位移达到 3.83 mm,仍在 2.50 m 深度处,增量为 -0.89 mm。此阶段,桩体水平位移变形暂时稳定。

5) 站厅层土方开挖阶段:A 轴边桩水平位移随开挖进行明显增大,最大值仍出现在桩顶,达到 13.99 mm,增量为 5.08 mm。由于 C 轴边桩传感器电缆被破坏,因此未能观测到土方开挖到底后的 C 轴边桩位移值。其根据 A 轴边桩监测结果推测,在侧面土压力作用下,桩体会发生明显的水平位移。

4 结论

1) 采用固定式测斜仪监测边桩深层水平位移时,现场实施的关键在于保护电缆不被破坏。其中桩头易受到破坏,需加强保护。由于监测车站环境特殊,只能进行人工监测。电缆应在冠梁施工前及时接长,并延伸至便于人工采集数据的地方。

2) 温度修正对监测数据影响不大。监测数据异常波动可能是受施工机械的电磁干扰。应选择冠梁施工后的稳定电压值作为初始监测数据,并剔除掉冠梁施工前的异常监测数据。

3) A 轴和 C 轴边桩的监测数据均表明,深层水平位移主要受小导洞内初支扣拱后回填和小导洞初期支护凿除等施工的影响。A 轴边桩的监测数据表明:站厅层土方开挖也是引起桩体变形的主要因素;相比之下,扣拱开挖和二衬扣拱施工阶段的桩体位移增量较小。

4) 今后的测试,应尽可能在干燥、可以接地的环境下采集数据,从而屏蔽干扰,保证监测数据的稳定性。

参考文献

[1] 刘军,荀桂富,章良兵,等.PBA 工法中边桩参数对结构稳定性的影响研究[J].铁道标准设计,2016,60(9): 118.

[2] 房旭.地铁车站 PBA 洞桩法及车站交叉结构施工力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2013.

[3] 李晓霖.地铁车站 PBA 工法的数值模拟研究[J].地下空间与工程学报.2007,3(5): 928.

[4] 杨公标.洞桩法地铁车站施工引起的地层变形与结构受力特性分析[D].北京:北京交通大学,2016.

(收稿日期:2018-05-23)