

doi: 10. 3969 /j issn 1672-6073. 2010. 01. 020

盾构隧道下穿机场停机坪的变形规律

高爱林 马雪梅 金 淮 张建全

(北京城建勘测设计研究院有限责任公司 北京 100101)

摘 要 在机场线盾构区间下穿期间,对停机坪沉降、停机坪平曲度变化以及板块差异沉降进行精密监测,分析停机坪的变形规律,说明停机坪的平整性对飞机安全滑行的重要意义;在监测过程中将结果及时反馈给业主、停机坪管理单位、监理和施工单位,从而做到信息化施工,保证施工安全和停机坪运营安全。

关键词 盾构隧道 首都机场线 停机坪 监测 变形规律 信息化 施工

中图分类号 U455. 43;U452. 1⁺3 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)01-0074-04

北京市轨道交通首都机场线根据建设需要需下穿首都机场停机坪。鉴于停机坪正常运营的重要性,机场管理单位提出不停航施工的要求。根据飞机正常滑行对停机坪平整性的严格要求,本监测工程的监测项目包括停机坪沉降、板块差异沉降以及停机坪平曲度变化 3 个方面。另外,在进行现场监测的过程中,需对停机坪板块是否有明显的开裂、塌陷、隆起,板块间是否有明显错台及是否出现冒浆等现象,进行现场巡视。

本文总结了由于隧道施工所引起的停机坪变形规律,结合第三方监测的特点总结了信息化施工经验,并对监控量测工作的保障作用进行了探讨。

1 停机坪监控量测方案

1.1 工程及地质概况

穿越段长 376 m,隧道覆土 8.6~10.2 m,左右线线间距为 12 m,需穿越 2 条飞机滑行线、4 个停机位。停机坪坪面由水泥板块拼接而成,板块大小不一,一般为 5 m 见方,板块厚约 40 cm,强度较高(在 C60 以上)。板块下方有厚约 30 cm 的路基填料层,填料层比较密实,主要由砾石组成。

收稿日期: 2009-08-24 修回日期: 2009-09-15

作者简介: 高爱林,男,工程师,从事新建地铁监测工作,

gaoailin@sina.com

隧道穿越地层主要为粉质黏土④层,局部穿越粉土④₁和黏土④₂层;覆土主要为粉质黏土④、粉土④₁、细砂③、粉质黏土③₁和粉质黏土填土①层。易于盾构掘进控制,但对地表地层沉降控制不利。

上层滞水位埋深 5.3~5.8 m,潜水水位埋深 10.6~12.7 m,承压水水位埋深 15.4~18.4 m,容易造成管片上浮。

1.2 施工概况

穿越停机坪段采用盾构法施工,盾构隧道外径为 6 000 mm,错缝拼装,选用铰接式土压平衡盾构机,配备同步注浆和二次注浆系统。

两条隧道先后下穿停机坪,右线先进行下穿施工,由南向北施工,历时 17 d 右线穿越完成 40 d 后,左线隧道开始下穿停机坪,由南向北施工,历时 28 d 完成。

1.3 监测点布设

一般情况下,道路上的测点最好是沿左、右线的中心线分别布设,能直接反映单洞掘进的沉降值^[1]。借鉴道路监测布点的基本原则,考虑到停机坪平整性的要求,在布设停机坪沉降监测点时,沿着机场线隧道左右中线前进方向每隔 10 m 布置 1 个监测点,沿盾构隧道方向每隔 20 m 布置 1 条监测断面,每个断面设 7 个监测点。断面点由左向右依次为:左线中线左侧 11 m 点、左侧 5 m 点、左线中线点、左右线中间点、右线中线点、右线右侧 5 m 点、右线右侧 11 m 点。停机坪平曲度变化监测点,采用相邻的停机坪沉降监测点代替。板块差异沉降监测点在盾构下穿 15 m 范围的板缝两侧进行布设,测点布设于板块四角,测点埋设方法分两类。

1) 钻穿停机坪结构板布设至土体,以监测土层变形。在盾构刚进入停机坪的前 40 m 范围内,测点沿隧道中线布置,每 10 m 设置 1 个,共布设 8 个测点。布点形式如图 1 所示。

2) 布置于结构板块

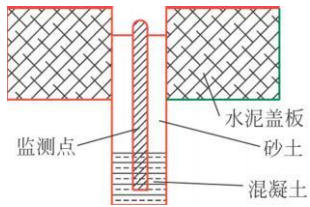


图 1 停机坪监测点埋设

上,以监测停机坪沉降、平曲度变化及板块差异沉降。监测点的制作方法是:将长约 5 cm 的照准点钉入停机坪,露出 1 mm 左右作为监测标志,然后在周围缝隙浇注锚固剂,布点形式如图 2 所示。

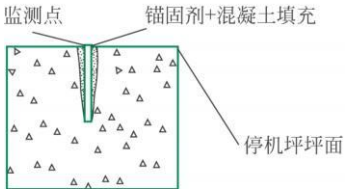


图 2 停机坪监测点布设

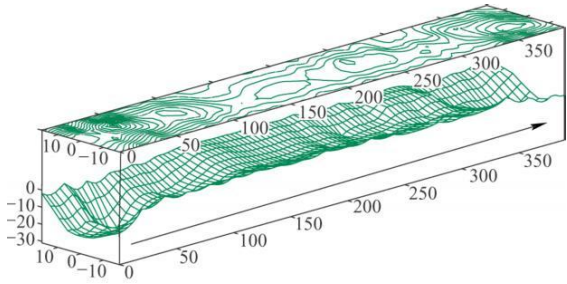


图 3 停机坪沉降等值线

1.4 监测方法、频率、周期

采用高精密性的 DNi2 型数字化水准仪进行监测。隧道开挖面前后 20 m 的测点,按每天 2 次的频率监测 (过滑行线时按每天 3 次的频率监测);开挖面前后 50 m 的测点,按每天 1 次的频率监测;其余部位下穿通过后的监测点,按每周 1 至 2 次的频率监测。

监测工作始于土建施工开挖之前,止于沉降稳定之后。沉降稳定以 100 d 的平均速率小于 0.01~0.04 mm/d 进行判断^[2]。

1.5 控制标准

根据专家意见,停机坪沉降、板块差异沉降以及停机坪平曲度 3 个监测项目,对应控制值分别为 10、5 和 1/1000 mm,报警值、预警值分别取控制值的 80%、70%。

2 监测成果及沉降规律

根据停机坪坪面的运营情况,将监测范围划分进入停机坪区域、飞机滑行区域、飞机停靠区域、出停机坪区域共 4 个区域。进入停机坪区域为隧道进入停机坪的前 80 m 范围,主要进行机动车行走;飞机滑行区域为停机坪 80~120 m 的范围,该范围有一条滑行线,是往来飞机频繁滑行的区域;飞机停靠区域为进入停机坪 120~350 m 的范围,共 4 个停机位,为飞机进行停靠的区域;出停机坪区域为监测范围后 50 m,主要进行机动车行走。

2.1 监测成果

将测点空间位置关系与测点累计沉降量绘制沉降等值线图 (见图 3)。根据具体监测数据及沉降等值线图可知,停机坪变形呈现两端变形大中间变形小的规律,进入停机坪区域的变形最为明显,最大沉降量为 31.9 mm,横向平曲度最大变形为 1/314,纵向平曲度最大变形为 1/833,板块的差异沉降最大为 4.0 mm。

结合施工情况分析可知,引起进入停机坪区域变形较大的原因主要为:左线隧道进入该区域后,盾构机液压泵出两次故障,迫使施工常处于停工状态;该区域为盾构下穿停机坪首先到达的区域,在该地质条件下盾构机各项参数仍在进一步调整,故对停机坪变形控制不

利;该区域位于花坛附近,土层含水量较高,土质较疏松。

飞机滑行区域、飞机停靠区域变形控制较好,主要与盾构机参数调整合理、该地层条件下施工经验的逐渐丰富及盾构机已经达到了比较合理的工作状态有关。

出停机坪区域变形较大原因主要为:右线盾构机在该区域出现了故障;左线隧道开挖至此,二次注浆系统经常被调到滑行线附近进行补浆,从而减小了对本区域的控制。

2.2 沉降规律

2.2.1 隧道开挖施工引起的停机坪纵向沉降规律

为了分析隧道开挖对停机坪纵向沉降的影响,选择典型断面 (K4+960 断面) 进行分析。将典型断面各监测点随时间的变形规律绘制成沉降时程曲线,见图 4。

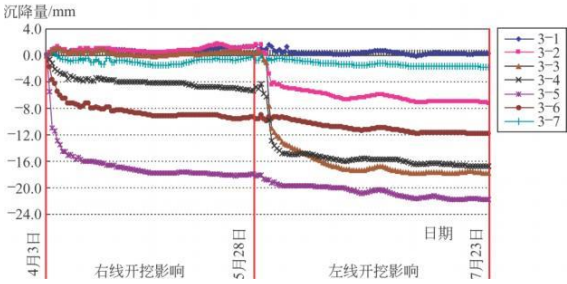


图 4 典型断面沉降时程曲线图

由图 4 可以看出,停机坪经历了轻微影响—快速下沉—缓慢下沉—趋于稳定—稳定的变形过程。将中线各测点在各阶段后变形情况占稳定时沉降量的比例进行了统计,见表 1。

表 1 变形后沉降量占稳定时沉降量的比例 %

区域	快速下沉阶段		缓慢下沉阶段		逐渐稳定阶段	
	右线 中线	左线 中线	右线 中线	左线 中线	右线 中线	左线 中线
进入停机坪区域	72	54	84	70	97	94
飞机滑行区域	69	42	82	63	98	92
飞机停靠区域	69	—	89	—	99	—
出停机坪区域	76	31	84	71	96	105
平均值	70	46	87	68	98	96

注:左线隧道下穿停机坪区域时,由于反复注浆使沉降规律略有不同,未进行统计

1) 轻微影响阶段:在盾构机机头距测点断面 50 m 时发生,对测点影响的程度主要与盾构机距测点的距离、盾构机的土压力以及工作状态有关。本工程影响范围在 -4.8~5.7 mm 之间。

2) 快速下沉阶段:该阶段发生于盾尾穿越监测断面 3 d 内。本阶段测点沉降速率急剧增大,尤其在盾尾通过断面的 1 d 内,均发生了测点的最大下沉速率(该工程速率最大为 -12.5 mm/d)。在一般情况下,经过 3 d 的急速下沉,测点沉降量将达到稳定时沉降量的 50% 以上。本阶段测点下沉量占稳定时沉降量的比例,主要与施工参数、盾构机状态及穿越顺序有关。

3) 缓慢下沉阶段:该阶段发生于盾尾穿越监测断面 4~7 d 内,测点下沉速率逐渐减小。在一般情况下,经过此阶段 4 d 的下沉,测点沉降量将达到稳定时沉降量的 70% 以上。

4) 趋于稳定阶段:该阶段发生于盾构机盾尾穿越监测断面 7~35 d 内,沉降速率逐渐放缓,并最终趋于稳定。在一般情况下,测点沉降量将达到稳定时沉降量的 92% 以上。

5) 稳定阶段:该阶段发生于盾构机盾尾穿越监测断面 35 d 后。经过 35 d 的下沉,停机坪已经基本处于稳定阶段。

由以上统计分析可知,在该地质条件下,测点达到稳定所需要的时间以及累计下沉量大小,受施工情况影响明显。

当同步注浆、二次补浆、土压力、盾构机掘进速度、盾构机稳定性等参数设置得当时,测点稳定所需时间相对较短,累计变形量较小。因盾构机进入停机坪时对施工参数的调整不是很合理,故进入停机坪区域时沉降量较大,最终沉降量均超过控制值。随着施工参数逐渐趋于合理,飞机滑行区域和停机位区域的沉降量逐渐变小,最终控制在控制值范围之内。

两条隧道中线测点达到稳定的所需时间不同,右线上方监测点沉降稳定较快,左线上方监测点稳定较慢,这一现象主要是由于右线先施工、左线后施工引起。右线隧道下穿停机坪时,未受过扰动的停机坪土体自稳点能力较强,故沉降经过快速下沉后达到稳定的时间较

短。而左线隧道下穿时,停机坪的土体已经受到右线隧道施工的扰动,故沉降需要稳定的时间相对较长。

2.2.2 左线开挖对右线隧道中线点沉降的叠加效应

为了分析左线隧道开挖对右线隧道中线点沉降的叠加效应,统计了飞机滑行区域以及飞机停机位区域的部分断面的沉降情况,见表 2。

表 2 部分监测断面沉降的叠加效应

断 面 号	7	8	9	10	11	21	22	23	24	25	26	27	28
右线中线累计沉降量 /mm	-13.7	-9.7	-10.4	-11.3	-8.0	-3.7	-6.3	-5.3	-7.0	-6.9	-6.5	-8.1	-5.4
左线开挖引起右线中线的沉降量 /mm	-3.0	-1.5	-1.4	-1.7	-1.3	-1.2	-1.5	-1.5	-2.4	-2.7	-1.9	-1.4	-1.4
左线开挖引起右线中线沉降量占总沉降量的比例 /%	23	16	13	15	16	32	24	29	35	39	29	17	26

由表 2 可以看出,左线隧道的施工,对已经基本稳定的右线隧道上方土体会产生一定的扰动,使得右线隧道中线点产生了一定的沉降叠加效应,后期的阶段沉降量占最终沉降量的比例在 13%~39% 之间,平均约为 24%。

因沉降叠加效应,滑行线附近的测点由右线通过后分别沉降 9.0、9.6 mm,又分别继续下沉 1.4、1.7 mm,最终沉降量超过控制值。正是由于加强了对停机位区域的控制,使叠加后的累计变形量均在控制范围之内。因此,建议在今后类似工程中,采用分步控制的原则,可使先下穿隧道以总控制值的 70% 作为分控制值,从而使得总沉降量在可控范围之内。

2.2.3 飞机滑行对停机坪的沉降影响

根据工程需要,盾构隧道垂直下穿 1 条飞机滑行线,由于每天上百架数百吨重的飞机往来滑行增加了停机坪的动荷载,必将加剧停机坪的变形。为了分析飞机滑行对停机坪沉降的影响程度,将右线中线上方 2 个典型测点(1 个测点为滑行线外 30 m,不受飞机滑行影响,1 个测点为滑行线附近测点),沉降量随时间变化规律的沉降时程曲线图,见图 5。

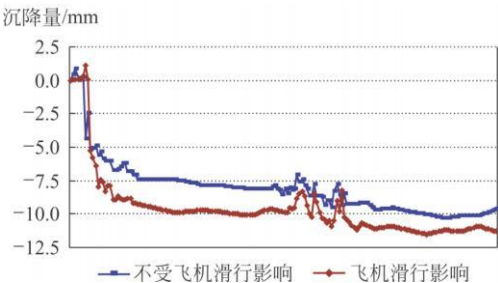


图 5 右线中线典型测点沉降时程曲线

根据施工情况可知,右线在通过上述 2 个测点时,盾构机行进速度、土压力、二次注浆、膨润土添加量等

参数基本一致。分析可知,在其他因素相同的条件下,飞机滑行加剧了停机坪 2 mm 左右的沉降。

3 信息化施工效果

工程中的第三方监测以信息化施工为要求,力争起到信息的采集、检验、处理、分析、发布的桥梁与纽带作用,保证了信息的畅通。监测报告分日报、周报、预警快报 3 种,报送手段有传真、电子邮件、短信、电话通知等形式。另外,采用北京城建勘测设计研究院自主研发的“监测信息化平台”,汇总与发布的监测资料,便于相关各方进行统计分析。

在相关各方密切配合并不断努力下,停机坪变形得到有效控制,实现了穿越停机坪的不停航施工。施工过程中曾出现停机坪冒浆、沉降速率过大等现象,经分析上述异常情况发现,分别由注浆压力过大和注浆泵性能不稳定引起。经反馈至各方并通过专题会讨论后,异常情况均得到及时处理。

根据前述分析可知,右线通过时必将引起左线中线上方测点发生叠加效应,且飞机滑行必将加剧滑行范围的测点沉降,在左线穿越飞机滑行区域时,需第三方与施工单位密切配合,经过合理调整施工参数,采取反复的注浆措施,使停机坪滑行区域变形得到有效控制。将 2007 年 5 月 28 日至 8 月 27 日期间,对应图 5 中相同断面的左线中线上方典型测点沉降量随时间的变化规律,做出沉降时程曲线图,见图 6。

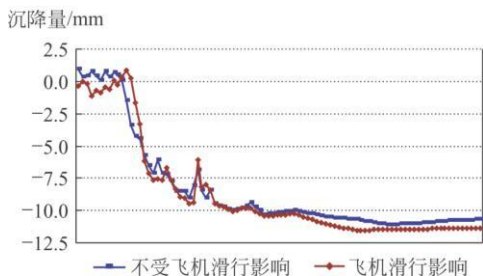


图 6 左线中线典型测点沉降时程曲线

根据图 6 可以看出,通过吸取右线的经验,在左线下穿停机坪滑行区域的过程中,施工单位不断调整注浆措施,消除了飞机滑行对停机坪变形带来的影响。根据表 2 可知,采取积极注浆措施后,飞机滑行区域沉降叠加在 13%~16% 之间,均小于沉降叠加平均值。

4 结语

1) 在该地层条件,盾构通过后需经过约 7 d 后方可进入逐渐稳定阶段,此时累计沉降量可达稳定时沉降量的 70%。

2) 两条隧道中线上方监测点达到稳定的时间略有不同,先通过的隧道,沉降稳定较快,后通过的隧道,沉降稳定较慢,这主要与后期通过时土体已经过一次扰动及稳定性差有关。

3) 后期施工的隧道会引起前期施工的隧道中线上方监测点发生约 24% 的沉降叠加,因此,建议在今后类似的工程中,采取分步控制的原则,可使先下穿隧道以总控制值的 70% 作为分控制值,从而使得总沉降量在可控范围之内。

4) 在其他因素相同的条件下,飞机滑行加剧了停机坪 2 mm 左右 (约占最终沉降量的 20%) 的沉降。

5) 信息化施工对于控制停机坪变形及异常情况起到了积极作用,在监测数据的科学指导下,经过施工单位的反复注浆,消除了飞机滑行时对飞机滑行区域造成的影响,并且在一定程度上抑制了沉降叠加的发生,从而避免了停机坪变形过大或注浆压力过大等不合理措施对停机坪造成的破坏,实现了下穿停机坪的不停航施工,保证了施工安全和停机坪运营安全。

参考文献

- [1] 于来法. 地下铁道建设的第三方环境变形监测 [J]. 测绘通报, 2004(11): 48—51, 57.
- [2] GB 50207—2007 建筑变形测量规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 金淮, 张健全, 吴锋波, 等. 盾构下穿首都机场施工监测变形特性分析 [J]. 都市快轨交通, 2008, 21(5): 53—57.
- [4] 张飞进. 盾构施工穿越既有有线地表沉降规律与施工参数优化 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- [5] 梁睿. 北京地铁隧道施工引起的地表沉降统计分析与预测 [D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

(编辑: 郝京红)

Deformation of Airport Apron Caused by Shield Tunnel Under passing

Gao Ailin Ma Xuemei Jin Huai Zhang Jianquan
(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101)

Abstract In the period of the transit tunnel shield under-passing the airport apron, settlements, flat-curvatures and different pavement plate settlements were monitored; the settlement regularity of the apron was analyzed. The information was fed back in time to the construction unit, supervision unit, owner's representative and first party representative units so as to realize the information-guided construction and assure the safety of construction and airport apron operation.

Key words shield tunnel; Capital Airport Express; airport apron; monitoring; regulation of deformation; information-guided construction