

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.04.066

盾构隧道下穿机场的结构设计与施工沉降控制研究

陈刚

[深圳市机场(集团)有限公司, 广东 深圳 518128]

摘要: 随着机场为核心的城市综合交通枢纽、机场捷运系统的发展,地下结构下穿机场的工程逐渐增多。现以某机场捷运工程盾构下穿运营飞机滑行道为背景,对盾构隧道下穿机场的重点问题进行研究。通过对飞机荷载的合理等效计算,确定盾构埋深与飞机荷载取值的关系。结合工程实例,对下穿滑行道盾构管片进行受力分析并提出构造措施。研究盾构埋深及地层损失率对机场道面沉降的影响,总结控制盾构沉降的相关措施。

关键词: 机场捷运;盾构隧道;飞机荷载;滑行道;沉降

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)04-0246-04

0 引言

随着我国经济发展和城市化进程的加快,以机场为核心,连接高铁、地铁、市域铁等综合交通枢纽迅速发展。同时,城市机场不断扩建,机场内捷运系统也应运而生,地下隧道等结构下穿的机场跑道或滑行道的工程逐渐增多^[1-2]。国内外实施隧道穿越运营机场的工程案例见表1所列。对于隧道下穿机场采用的施工方法主要有盾构法、箱涵顶进法、明挖法等。其中,绝大多数采用的是盾构法。

表1 国内外隧道下穿机场实例一览表

工程名称	开挖类型	地质情况
英国伦敦希斯罗机场航站楼间地下通道	盾构法	砂砾土
德国斯图加特机场跑道下穿隧道	暗挖法	—
美国圣保罗机场起飞区下穿隧道	—	—
上海虹桥机场飞行区三条下穿隧道	盾构法	黏土层、粉砂与粉质黏土层
首都国际机场货运车道下穿P4停机坪和机场滑行道	箱涵顶进法	黏土、亚黏土、粉砂层
首都国际机场T2与T3航站楼汽车联络通道垂直下穿滑行道	浅埋暗挖法	黏土、亚黏土、粉砂层
台北松山机场跑道下方隧道	箱涵顶进法、盖挖逆筑法	粉质砂土、粉质黏土层

盾构隧道在下穿机场滑行道或跑道的过程中,可能会产生下列不利影响。

(1)隧道推进过程中产生的沉降对飞机的安全运行产生影响。由于跑道结构的刚度一般比下部的土体大,抵抗变形的能力也比较强,沉降量就会比下

部土体小,因此可能会导致跑道与下部土体接触脱离,造成严重的安全隐患;沉降导致的道面开裂容易使细小的混凝土块吸入飞机引擎,影响飞机安全。因此,需严格控制机场滑行道及跑道的沉降与倾斜。

(2)飞机降落及滑行的冲击荷载会对隧道结构产生不利影响。在大型喷气式客机行驶跑道下穿越,其动荷载反复地加载造成隧道管片接缝频繁地张缩,对管片混凝土的抗裂及抗疲劳能力也提出较高的要求。

现结合工程实例,针对飞机起降荷载对盾构隧道管片的影响,以及盾构推进施工期间的沉降控制进行分析研究。

1 飞机荷载分析

地下结构设计计算中需合理地考虑飞机荷载的影响,目前尚无统一的计算方法。荷载取值与地下结构的尺寸、埋深等有较大的关系。在实践中一般采用有限元分法、应力扩散角叠加、附加应力系数叠加等方法^[3-5]。

对于盾构隧道,其埋深较深,且截面尺寸较大,现以荷载最大的A380-600F型大型客机为例,采用简化的等效均布矩形荷载的附加应力系数法进行计算^[6],并取等效矩形荷载下的中心点处的附加应力作为盾构管片的均布超载进行计算分析。

A380-600F型飞机主起落架荷载示意图1所示。该型号飞机主起落架轮20只,单只轮荷载 $1102/4=275.5(\text{kN})$ 。

考虑主起落架轮区的影响范围为:

$$B \times L = 6.5 \text{ m} \times 14.2 \text{ m}$$

根据相关经验,取荷载冲击系数为1.3,则跑道上等效均布的矩形超载为:

收稿日期: 2022-11-01

作者简介: 陈刚(1978—),男,本科,注册岩土工程师,主要从事非连续变形分析研究及重大项目管理工作。

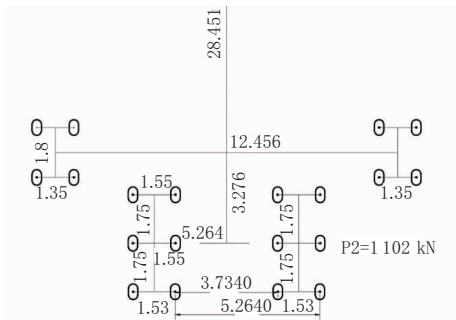


图1 A380-600F型飞机主起落架轮子荷载示意图(单位:m)

$$275.5 \times 20 \times 1.3 / (6.5 \times 14.2) = 77 \text{ (kPa)}$$

跑道地基不同埋深的竖向附加应力见表2所列,其中 $L/B=2.18$ 。

表2 不同埋深处竖向附加应力一览表

埋深/m	2Z/B	中心附加应力系数	附加应力/kPa
5	1.49	0.632	48.7
10	2.99	0.304	23.4
11	3.28	0.268	20.6
12	3.58	0.235	18.1
15	4.48	0.168	12.9
20	5.97	0.104	8.0
25	7.46	0.069	5.3
30	8.96	0.048	3.7

由表2分析可知,随着埋深的增大,飞机主起落轮区域的超载逐渐减小。当隧道埋深大于11m时,附加应力小于20kPa,飞机超载不起控制作用,可按盾构设计的常规地面超值取值为20kPa。当盾构隧道浅埋时,等效的附加应力显著大于常规设计时的地面超载值,且相应的冲击振动效应也会明显加强,在设计时需要给予重点考虑。

除竖向荷载外,飞机制动产生的水平力对道面结构的影响较大,影响道面结构耐久性。根据相关研究文献^[7],飞机制动力作用下面层最大拉应力出现在道面表面,对面层内部的最大剪应力和面层底部的拉应力影响不显著。对于盾构隧道工程,结构覆土一般大于4m,因此水平制动力对隧道结构的影响可不考虑。

2 下穿机场滑行道的盾构管片设计

某机场旅客捷运系统工程,连接航站楼与新建卫星厅。区间线路纵断面大体呈“V”字坡。隧道下穿既有F类滑行道2根,新建E类滑行道1根,滑行道道面采用40(20+20)cm厚水泥稳定碎石+36~42cm厚现浇水泥混凝土。隧道与既有滑行道最小竖向距离为13.21m,与新建滑行道最小竖向距离为12.47m。

盾构管片外径6.6m,内径5.9m,管片厚度350mm,

管片环宽1.2m,通缝拼装。盾构穿越滑行道区段对上半环二次注浆。

2.1 计算模型

单圆隧道衬砌环的内力计算按弹性均质圆环进行。计算模型见图2所示。

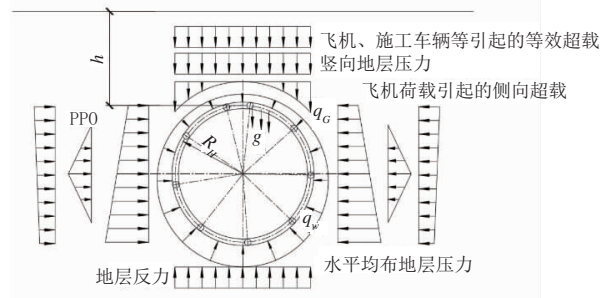


图2 计算模型

2.2 管片内力计算

根据所在位置区域的地层分布看,盾构推进面全部位于第④层淤泥质黏土内,静止侧压力系数为0.57。

根据表2计算分析,因该段盾构埋深大于12m,飞机引起的附加荷载小于施工超载20kPa;故地面超载荷载取20kPa。

抗力系数取5000kN/m³。衬砌环内力计算结果见图3所示。

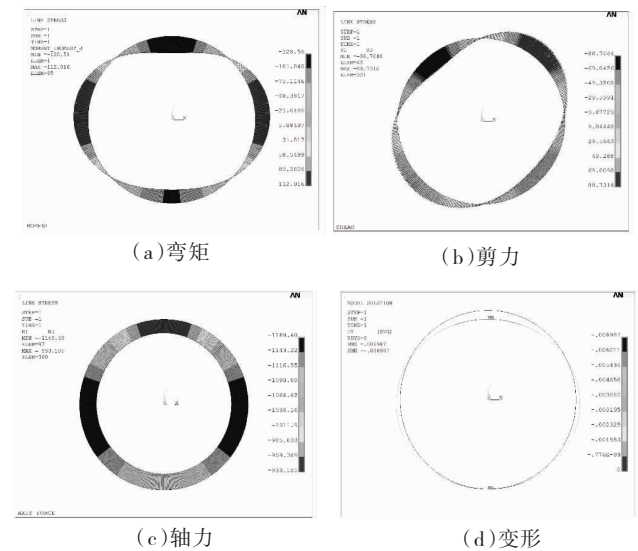


图3 滑行道下方盾构计算结果图示

根据计算结果可知,隧道最大径向变形6.99mm < 3% $cD=19.8$ mm,满足要求。

2.3 管片构造措施

由于飞机滑行道对于沉降的控制极为严格,一般下穿机场的隧道工程都采取了相应的措施来保证两个工程的安全,如管片采用钢纤维加强衬砌、隧道施工中及时注浆及采用化学添加剂的浆液、加强动态监控量测。为避免飞机荷载反复的加载造成隧

道管片接缝频繁地张缩,接缝密封垫的防水与耐久性应保证良好的性能。

在提高防水要求方面,考虑充分利用密封垫弹性压密止水与膨胀止水的双重止水功效,选用的三元乙丙胶弹性密封垫+聚醚聚氨酯弹性体的材料复合体,其性能、断面构造形式应进行水密性性能与耐久性指标的检测;尤其是模拟实际反复加载、接缝反复张缩条件下的水密性性能与耐久性指标的检测。

3 隧道穿越跑道的沉降控制研究

3.1 跑道及滑行道的沉降控制要求

目前,世界上各主要国家对于机场场道地基允许沉降量均没有明确的统一规定,而且国际民航组织也尚未制定出详细控制标准。近年来,我国修建的部分机场对地基的差异沉降、残余沉降的控制给出了较高的要求,即差异沉降不大于1‰、残余沉降不大于2~10 cm。

根据场道工程设施技术要求及机场管理部门相关专项咨询评估意见,该工程制定以下盾构施工控制标准:

一年质保期内,滑行道及跑道面高程施工区域与周边产生的沉降差异≤10 mm,差异沉降≤1‰;施工后,滑行道道面高程施工区域与周边产生的沉降差异≤50 mm,跑道道面施工区域与周边产生的沉降差异≤25 mm,差异沉降≤1‰。

3.2 盾构推进引起的土体扰动机理分析

在地层中进行盾构掘进,改变了原地层的边界,必然会引起或多或少的地层位移和地表沉降,它将影响到邻近建筑物及地下管线的安全,影响周围的环境。经验法是考虑地层沉降的方法之一,根据施工中的观察结果,提出一些较为简便的计算公式,如Peck法。Peck认为,施工中引起的地面沉降是在不排水情况下发生的,所以沉降槽的体积应等于地层损失的体积,据此提出了盾构隧道施工阶段的地面沉降的估算公式:

$$S_{(x)} = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (1)$$

$$S_{\max} = V_s / i\sqrt{2\pi} \quad (2)$$

式中: $S_{(x)}$ 为距离隧道中心线 x 处地表沉降, m; S_{\max} 为隧道中心线处最大地面沉降, m; x 为距隧道中心线的距离, m; i 为沉降宽度系数; V_s 为盾构隧道单位长度地层损失, m^3/m 。

图4为地面沉降横向分布图。

Peck公式有两个参数(地层损失)和 i (沉降槽

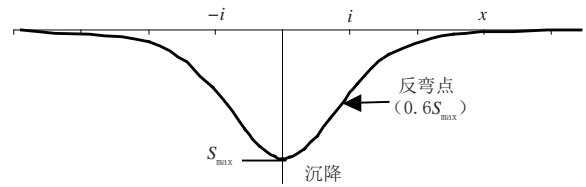


图4 地面沉降横向分布图

半宽度),这两个参数确定后横断面沉降便可以直接得到。其中沉降槽宽度系数按下列经验公式取值:

$$i = (Z/2R)0.8 \times R$$

假定地层损失率 0.003,得出不同埋深下推测最大地表沉降见表3所列。

表3 不同顶覆土情况的地面沉降一览表

覆土厚度 /m	隧道中心与计算点距离 /m	沉降槽宽度系数 i	沉降槽宽度 W /m	最大沉降 /m	沉降斜率 ‰
6	9.3	4.3	21.7	0.010 1	0.91
10	13.3	5.8	28.9	0.007 4	0.51
11	14.3	6.1	30.6	0.007 0	0.46
12	15.3	6.5	32.3	0.006 6	0.41
15	18.3	7.5	37.3	0.005 7	0.31
20	23.3	9.1	45.3	0.004 7	0.21
25	28.3	10.6	52.9	0.004 0	0.15
30	33.3	12.0	60.2	0.003 6	0.12

当盾构覆土小于6 m时,地面最大沉降量不满足要求。随着盾构的埋深增大,最大沉降量明显减少。该工程中隧道埋深约13 m,预测单线最大沉降约6.8 mm。

该工程盾构穿越段埋深约12.3 m,盾构中心距12 m,根据前述Peck经验公式并考虑双线盾构的叠加影响,计算得出右线推进时的附加沉降约为1.2 mm,则左线盾构中心地表最大沉降 S_{\max} 约为 $6.5+1.2=7.7$ (mm)。

3.3 现场实测分析

该工程盾构为双线盾构,盾构中心距12 m,左线先行始发,左线推进约174环后右线开始始发,其中下穿滑行道长度约300 m,管片范围为第268~518环。

为确保盾构下穿施工期间机场滑行道地面沉降可控,在盾构推进过程中加强地面的沉降监测,施工监控等级为特级。沿盾构轴线设置的沉降观测点间距约6 m,根据现场监测数据,盾构推进期间沿左线隧道轴线布置的部分监测点地表沉降数据见图5所示。

当盾构推进时会引起前方地面隆起,最大隆起量小于10 mm,基本满足要求。在盾构推进6个月后,

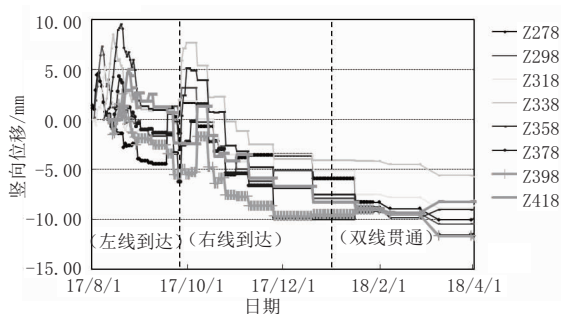


图5 左线盾构轴线处地面变形曲线图

地表沉降趋于稳定,最终沉降范围在 6.5~11.68 mm,最大沉降 -11.68 mm,与根据 PECK 公式计算出的双线沉降数值 7.7 mm 比较接近。绝大部分测点沉降均小于 10 mm,满足设计要求。

此外,根据监测数据,盾构通过一般区段时,盾构轴线处地面沉降稳定值约 10~20 mm,表明盾构二次注浆等措施对控制沉降起到了显著的作用。

3.4 沉降控制措施

根据对一些实际工程的观测资料以及盾构推进过程的分析可知,在盾构推进过程中,引起土体位移和地面沉降的主要因素有开挖面土体的三维移动、盾构壳与土体之间的摩擦、盾构超挖、土体挤入盾尾空隙、土体次固结、孔隙水的流动、开挖面压力变化量、注浆率等。为此,针对盾构掘进下穿滑行道区域时,应采取严格、有效的施工措施:

(1)盾构施工前,应核对隧道沿线地质资料、物探资料。同时,详细排摸沿线地下管线、构筑物及临近建筑物基础类型、埋深。对此,在施工中采取相应的保护措施。

(2)应建立完整的测量和监控量测系统,控制隧道轴线偏差,对地层及结构进行监测,并及时反馈信息,实行信息化施工。

(3)盾构掘进速度,应与地表控制的隆陷值、进出土量、正面土压平衡调整值及同步注浆等相协调。一旦停歇时间较长时,必须及时封闭正面土体。

(4)盾构推进时,须对盾构外径及衬砌外径间的环形空隙进行同步压注单液浆。

(5)不断完善施工工艺,严格控制盾构推进地层损失率。

4 结论

以某机场捷运工程为背景,通过对地面超载的合理确定,确定合适的隧道埋深,并采取针对的结构构造及施工措施,有效降低了工程风险,保证机场运营安全。

(1)应针对地下隧道形式的不同合理确定滑行道下的飞机荷载。对于浅埋工程,飞机荷载产生的荷载效应较大。对于该工程盾构隧道,当埋深大于 11 m 时,地面超载以一般超载控制。

(2)盾构隧道穿越滑行道等风险点时,隧道埋深宜尽量深埋,以降低飞机荷载的影响,保证管片结构的耐久性。同时也可显著减小道面沉降,保证机场运营安全。

(3)盾构推进中应严格控制地层损失率,建立完善实时沉降监测体系,不断完善施工工艺措施,控制地表沉降。

参考文献:

- [1] 孙璋,廖少明,米思兴.下穿上海虹桥机场飞行区的三项隧道工程简介[J].地下工程与隧道,2010(3):10-14.
- [2] 马栋,黄立新.首都机场下穿跑道隧道施工道面沉降修复技术[J].铁道建筑技术,2016(8):31-35+54.
- [3] 田小芳.地下结构下穿机场设计中飞机荷载计算研究[J].现代隧道技术(增刊2),2019(12):532-537.
- [4] 童建军,桂登斌,王力,等.下穿飞机跑道地铁区间隧道附加荷载计算方法[J].隧道建设(中英文),2020,40(9):1292.
- [5] 刘子钰,赵鸿铎.A380-800 飞机荷载作用下复合道面的结构响应分析[J].西部交通科技,2014(2):69-74.
- [6] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [7] 游庆龙,凌建明,赵鸿铎,等.考虑飞机制动力的机场沥青道面力学响应分析[J].同济大学学报(自然科学版),2012(4):223-227.

(上接第 241 页)

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M].北京:建筑工业出版社,2015.
- [2] 关军,储成龙,张智慧.基于投入产出生命周期模型的建筑业能耗及敏感性分析[J].环境科学研究,2015,28(2):297-303.
- [3] GB/T 51366—2019,建筑碳排放计算标准[S].

- [4] 俞海勇,王琼,张贺,等.基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J].粉煤灰,2011,23(6):5.
- [5] 崔鹏.建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D].南京:东南大学,2015.
- [6] 江苏省住房和城乡建设厅.江苏省建筑与装饰工程计价定额[M].南京:江苏科学技术出版社,2014.