

民航机发〔2022〕15号

民航局机场司关于印发《铁路、城市轨道交通 下穿机场飞行区影响分析研究》的通知

民航各地区管理局，各运输机场公司，各运输航空公司，质监总站：

为贯彻落实“四型机场”建设发展理念，便利旅客出行、提升旅客出行体验，进一步拓展规划设计思路，分析总结国内外机场下穿工程的相关经验，机场司组织编制了《铁路、城市轨道交通下穿机场飞行区影响分析研究》（IB—CA—2022—04），现予以发布，供各单位参考。

该信息通告的电子版可在民航局网站“机场司——政策发布”一栏下载。

民航局机场司

2022年9月30日



信息通告

中国民用航空局机场司

编 号：IB-CA-2022-04

下发日期：2022年9月30日

铁路、城市轨道交通下穿 机场飞行区影响分析研究

前 言

为贯彻落实“平安、绿色、智慧、人文”四型机场建设发展理念，进一步拓展规划设计思路，便利旅客出行、提升旅客出行体验，借鉴国内外铁路穿越机场的相关工程经验，机场司组织成立编写组，依托2020年度民航安全能力建设资金项目“空铁联运模式下铁路穿越对机场的影响及安全保障技术研究”，对国内外轨道交通、城际、高铁、通道等穿越机场飞行区的工程建设案例进行研究分析，并梳理国内外下穿机场飞行区的隧道工程相关技术参数，供相关单位在机场规划、设计和施工时参考。

在相关工程案例资料收集整理和技术评审过程中，感谢首都机场集团、上海机场集团、广东机场集团、四川机场集团、重庆机场集团、民航规划设计总院等单位的大力支持和帮助。

主编单位：湖南机场股份有限公司

中铁二院工程集团有限公司

参编单位：民航中南机场设计研究院（广州）有限公司

湖南交通规划勘察设计院轨道院

中国民航局第二研究所

主 编：洪 鑫 金旭炜

参编人员：徐爱民 王兆有 杨吉忠 邱团结 肖飞知

陈志贤 蒋 尧 王 甦 曾志强 戴小罡

吕勇刚 屠潇宇 陈钦文 张海涛 李 军

邓红娟 张 震 邓 昆 梁 飞

主 审：姜昌山 王晓鸿

审查人员：郑 斐 朱亚杰 钟选明 蔡 琪 张 楠

肖军华 赵东平 赵旭伟 张雅丽 李 岳

周 全 张 昆 侯振宇 任守贵 段学科

目 录

1. 概述	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外空铁联运布局形式.....	2
1.3 铁路、城市轨道交通下穿机场工程存在的主要问题.....	4
1.4 研究内容.....	6
2. 城市轨道交通下穿机场飞行区	7
2.1 地铁下穿上海虹桥机场飞行区.....	7
2.1.1 工程概况.....	7
2.1.2 控制措施.....	9
2.1.3 监测结果.....	11
2.2 地铁下穿重庆江北机场飞行区.....	12
2.2.1 工程概况.....	12
2.2.2 控制措施.....	14
2.2.3 监测结果.....	15
2.3 地铁下穿成都双流机场飞行区.....	15
2.3.1 工程概况.....	15
2.3.2 控制措施.....	18
2.3.3 监测结果.....	20
2.4 地铁下穿南京禄口机场飞行区.....	20
2.4.1 工程概况.....	20
2.4.2 控制措施.....	23
2.4.3 监测结果.....	26
2.5 国外城市轨道交通下穿机场飞行区.....	27
2.5.1 单轨隧道穿越德国斯图加特机场飞行区.....	27
2.5.2 PTS 地铁隧道穿越瑞士苏黎世机场飞行区.....	28

2.5.3 轻轨隧道穿越美国圣保罗机场飞行区	29
3. 城际铁路下穿机场飞行区	30
3.1 穗莞深城际下穿深圳宝安机场飞行区	30
3.1.1 工程概况	30
3.1.2 控制措施	31
3.1.3 监测结果	32
3.2 城际轨道交通下穿广州白云机场北飞行区	33
3.2.1 工程概况	33
3.2.2 控制措施	36
3.2.3 监测结果	39
3.3 深湛铁路下穿湛江吴川机场飞行区	39
3.3.1 工程概况	39
3.3.2 控制措施	40
3.3.3 监测结果	43
4. 高速铁路下穿机场飞行区	44
4.1 广湛高铁下穿湛江吴川机场飞行区方案研究	44
4.1.1 项目概况	44
4.1.2 仿真模拟	45
4.1.3 影响分析	48
4.2 成自高铁下穿天府国际机场飞行区	53
4.2.1 项目概况	53
4.2.2 仿真模拟	54
4.2.3 影响分析	56
5. 施工工法特点和适用条件分析	64
5.1 施工工法适应性分析	64
5.2 常用施工工法概述	65
5.3 施工工法比选	65

6. 总结与建议	68
6.1 规划阶段.....	68
6.2 设计阶段.....	68
6.3 施工阶段.....	69
6.4 运营阶段.....	70
6.5 技术分析.....	70
附录 A 其他系统下穿机场飞行区	71
A-1 首都机场 T2~T3 捷运联络线隧道下穿机场跑道.....	71
A-2 地下通道下穿首都机场停机坪.....	74
A-3 地下行李转运系统穿越希思罗机场.....	78
附录 B 参考文献	80

1. 概述

1.1 研究背景

2018年5月，中国民航局与铁路总公司签署推进空铁联运战略合作协议，明确加快推动铁路与民航基础设施规划建设统筹，提升资源使用效率，充分发挥航空、铁路运输各自优势，促进综合运输服务一体化发展，更好地满足人民群众对更高品质交通出行需求，推进交通强国建设的工作目标。

2020年4月，国家发改委发布《关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见》，提出以问题导向、需求引领，突出重点、统筹规划，科学分类、有序建设，以及全面联通、一体发展为基本原则，通过强化规划引导、加强建设协作、提升运营水平等措施，进一步促进枢纽机场联通轨道交通，扩大机场辐射范围，提升航空服务水平和枢纽运营效率，加快构建现代化综合交通运输体系，推动基础设施高质量发展。

2021年2月，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》，提出加快建设20个左右国际性综合交通枢纽城市以及80个左右全国性综合交通枢纽城市。

2021年11月，交通运输部办公厅、公安部办公厅、中国民用航空局综合司、中国国家铁路集团有限公司办公厅联合发布《关于开展空铁（轨）联运旅客换乘流程优化工作的通知》，联合推进民航到达旅客换乘铁路和城市轨道交通流程优化工作，力争“十四五”期间在部分具备条件的综合客运枢纽实现空铁（轨）联运旅客换乘流程优化，更好满足人民群众日益增长的美好出行

需求。

“十四五”期间，旅客吞吐量前 50 名的机场超过 40 个需实施改扩建。据统计，全国旅客吞吐量排名前 20 的民用运输机场，19 个已经或正在实现与轨道交通、铁路的一体化布局，空铁联运正逐步从理念转变为现实，而空轨联运在各枢纽机场建设运行中已相当普遍。已建成的空铁联运机场包括北京大兴机场、上海虹桥机场、广州白云机场、深圳宝安机场、海口美兰机场、三亚凤凰机场、青岛胶东机场、兰州中川机场、郑州新郑机场、武汉天河机场等，在建和规划建设的空铁联运机场包括重庆江北机场、长沙黄花机场、昆明长水机场、杭州萧山机场、鄂州机场等。

铁路、轨道的接入势必会造成与机场的竖向交叉，铁路、轨道下穿机场是否会对机场的安全运行造成影响，如何解决可能会出现的问题，成为大型综合交通枢纽建设的重要任务。编写组梳理分析国内外铁路、轨道交通下穿机场的相关工程案例，为民航机场改扩建中铁路、轨道下穿机场飞行区、航站区的规划设计和建设实施提供参考和借鉴。

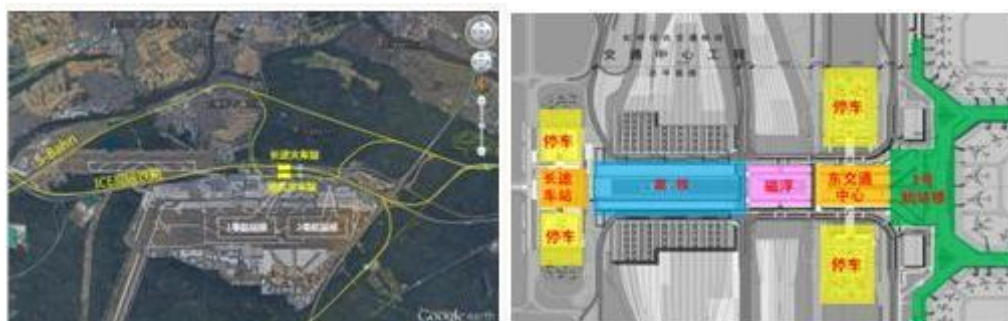
1.2 国内外空铁联运布局形式

综合世界大型机场案例来看，航站楼与铁路站台的衔接布局大致有“平行式”和“下穿式”两种模式。

（1）平行式布局

典型代表为德国法兰克福机场，国内采用平行式布局的有上海虹桥枢纽、成都双流机场、贵阳龙洞堡机场等。对于这种布局模式，跑道、航站楼、铁路站台呈平行条块式布局。航站楼与铁路站台相对独立，旅客通过自动步道等辅助设施进行平面联系。

平行式布局避免了铁路穿越航站楼和跑道产生的额外造价和相关影响，工程复杂度较小，适用于后期改建、扩建枢纽，但换乘效率不高，并且限制了机场在铁路侧的发展方向。



a) 法兰克福机场布局

b) 虹桥综合交通枢纽布局

图 1.2-1 平行式布局案例

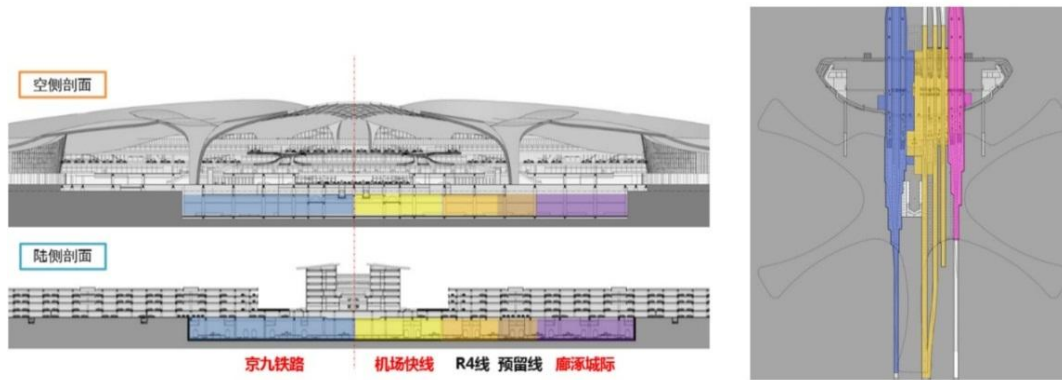
(2) 下穿式布局

典型代表是法国戴高乐机场，荷兰阿姆斯特丹史基浦机场，国内有北京大兴机场、成都天府机场、青岛胶东机场，郑州新郑国际机场、重庆机场等。铁路从航站楼下穿越，站台与航站楼成竖向布局，旅客可以通过站厅内的大容量扶梯直接提升至航站楼大厅，实现“零距离换乘”。下穿式布局工程难度大、建设成本高，但更适用于新建枢纽，有利于机场横向扩张，且换乘效率高，乘客体验好。

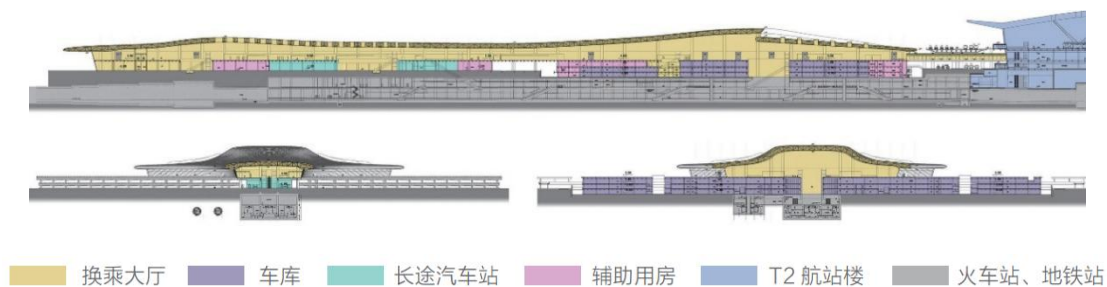


a) 戴高乐机场下穿式布局

b) 成都新机场下穿式布局



c) 北京大兴机场下穿式布局



d) 郑州新郑国际机场下穿式布局



e) 重庆机场穿越工程

图 1.2-2 下穿式布局案例

1.3 铁路、城市轨道交通下穿机场工程存在的主要问题

综合国内外大型机场案例来看，尽管铁路穿越工程实现了

“零距离换乘”，但高速铁路具有运行速度高、复线隧道断面大、净空高、振动强烈等特点，空铁联运模式下高速铁路下穿机场飞行区引起的长期沉降、飞机与列车动力相互作用影响等，对民航安全能力保障提出了新的技术要求。

(1) 铁路穿越工程不可避免地会对穿越区土体产生扰动，带来地层损失和飞行区道面沉降，且在运营期长期循环动力荷载作用下，某些地层会产生显著的累积塑性变形，对飞机正常运行造成安全隐患。高速铁路对于基底差异沉降要求非常严格，民航飞行区工后沉降控制标准相对较为宽松，由此产生不同沉降控制标准的协调问题。针对不同穿越条件如埋深、土性、建设时机、穿越工法、穿越位置等，需研究铁路穿越带来的沉降影响和相应的控制措施。

(2) 航空导航设备对服役环境的振动要求极为苛刻，部分设备的微振动控制量级可达 $< 5\mu\text{g}$ (10^{-5}m/s^2)。下穿高速列车轮轨低频振动波长长、传播距离远，是否会引航航空导航精密设备信噪比降低、准确度下降、重复性变差，甚至不能正常工作等问题，目前尚无工程案例和研究资料可供参考。

(3) 根据《运输机场运行安全管理规定》(CCAR-140)，“在机场飞行区电磁环境保护区内设置工业、科技、医疗设施，修建电气化铁路、高压输电线路等设施不得干扰机场飞行区电磁环境”。当高速铁路引入机场后，高速运行的动车组会向四周随机辐射电磁杂波，动车所辐射的电磁杂波对机场导航构成的影响不可忽视。

1.4 研究内容

为满足铁路、城市轨道交通引入机场设计方案的可行性以及可实施性，保证机场安全、正常运行，针对空铁（轨）联运模式下铁路、城市轨道交通对民航安全运行影响开展专题研究非常必要。

本文主要针对铁路、城市轨道交通下穿机场跑道、滑行道、停机坪，从隧道埋深、地质条件、施工工法、穿越情况、沉降控制标准及控制措施、监测结果等方面，对上海地铁 10 号线下穿虹桥机场跑道、穗莞深城际下穿深圳宝安机场飞行区等相关案例进行介绍；基于数值仿真方法，对广湛高铁下穿新建湛江机场飞行区及成自高铁下穿成都天府机场飞行区情况下飞机载荷对隧道结构、疲劳、列车运行安全性以及列车运行引起的跑道变形问题，进行了深入的研究和模拟评估。从地层适应性、环境要求适应性、线路适应性、适用长度、造价工期适应性、安全控制适应性等方面，对不同案例的施工工法特点及适用条件进行调研和分析总结，并对铁路、城市轨道交通下穿机场飞行区的规划设计、施工、监测控制等方面提出相应建议。

2. 城市轨道交通下穿机场飞行区

2.1 地铁下穿上海虹桥机场飞行区

2.1.1 工程概况

本案例是国内首例不停航条件下采用盾构法在黏土地层下穿越跑道工程，在穿越工程中采取了规划、设计、施工、线路优化、结构优化、注浆浆液优化等一系列措施。

(1) 工程简介

上海轨道交通 10 号线区间隧道从虹桥机场既有跑道以及规划建设跑道下方穿越，具有连接东、西航站楼的客运功能；轨道交通 2 号线区间隧道从机场跑道北侧绕行，局部区域从机场机坪下方穿越。轨道交通 2、10 号线行车设计最高速度 80 km/h。下穿机场南北两侧的迎宾三路隧道和仙霞西路隧道将承担旅客行李的传输，并作为虹桥枢纽及其周边地区和中心城区之间的客运通道，以构建虹桥枢纽内部环路系统。



图 2.1-1 下穿虹桥机场飞行区工程规划布置图

除迎宾三路隧道外，另 3 条盾构隧道同时在机场跑道下施工，在国内乃至世界机场建设史上都极为罕见。如何在施工时间和空间受限制的情况下，在众多敏感建（构）筑物下方完成隧道的施工与监测，并保障机场运行不受影响，这对工程各相关方都提出了挑战。区间隧道埋深及穿越建构筑物情况见表 2.1-1 所列。

表 2.1-1 盾构隧道下穿虹桥机场工程概况

隧道名称	穿越段埋深/m	穿越	地质条件	施工工法
10 号线	11.3 ~ 24.5 (跑道 ≥ 20)	跑道、滑行道、停机坪、西航站楼	人工填土层、黏土层、淤泥质粉质黏土层、淤泥质黏土层、黏土层和粉砂与粉质黏土互层	盾构法
2 号线	11.3 ~ 17.9	滑行道、草坪区、西航站楼		
仙霞西路隧道	6.5~13.0	绕滑道、防吹坪、导航灯		
迎宾三路隧道	-	绕滑道、防吹坪、导航灯		

(2) 控制标准

地铁 10 号线穿越飞行区的工程沉降控制标准为：跑道与周边区域土体沉降差异小于 10 mm，道面倾斜度不大于 0.1%。

(3) 工程特点

①不停航施工穿越。机场道面区允许沉降量的取值直接影响工程造价和跑道的安全使用，须考虑飞机起降及滑行安全要求、机场道面结构对差异沉降的适应性及抗裂要求等因素。

②穿越距离长。10 号线有长达 1826 m 的区间隧道位于机场飞行区下方，除 140 m 长的土面区对沉降不敏感之外，其他区段均对沉降控制提出了较高要求。

③监测难度大。常规监测方法受机场运行条件限制不能实

施，而施工监测必须确保监测的覆盖面、监测频率和精度等。

2.1.2 控制措施

不停航条件下，为减少隧道下穿对运营机场飞行区产生的不利影响，采取了以下安全控制措施：

(1) 线路设计

10 号线穿越跑道段线路均采用直线；尽量采用小坡度的下坡施工；空港一路站设计为地下两层半车站，同时线路出空港一路站后即以大坡度下坡，以增加线路埋深，减小盾构施工对道面的影响。2 号线 1 号工作井位置移至土面区内，避免了与滑行道施工的相互影响。

(2) 结构选型及优化

轨道交通 2、10 号线区间隧道设计均采用 350 mm 厚、1.2 m 环宽、外径 6.2 m 的预制混凝土管片，通缝拼装；10 号线区间隧道管片混凝土中添加钢纤维—聚丙烯纤维，以增加防火及耐久性；为保护地面机场设施，在穿越跑道段衬砌的每块管片上增加 2 个注浆孔，有利于实施二次注浆，用于控制后期沉降；在管片内侧增设 1 道以遇水膨胀弹性体为主的密封垫，以加强止水，形成 3 道防水。

(3) 施工管理

2、10 号线的施工工期与机场新建跑道的工期重叠，机场对两个工程的施工顺序、工期从三个方面进行统筹规划与协调。其一，在水泥稳定碎石层施工之后，安排 2 号线在滑行道与停机坪下方盾构穿越；其二，待隧道穿越一个月、沉降基本稳定后，再进行道面层施工；其三，铺设混凝土面层 1 月~1.5 月后，混凝土

已达到设计强度，再进行 10 号线下穿越施工，减少了隧道施工对新建跑道的不利影响，有助于确保新建道面的质量。

工程实施过程中，采用了快速均衡推进的施工方式，防止施工停滞给周边环境带来影响。据迎宾三路施工过程中测算，盾构推进和管片拼装的最短时间都是 1 h，考虑各种因素单个管片的施工时间是 2.7 h，经过技术创新和精细化管理，沉降控制在毫米级，施工速度达到 18 m/d，远超计划的 6 m/d。

采用同步注浆和二次注浆控制的措施，同步注浆量、注浆位置和注浆压力均根据盾构穿越过程中地面沉降的变化进行动态调整。仙霞路隧道在离盾尾 8 环~10 环（2 号线 5 环~8 环）的位置进行了二次注浆，二次注浆遵循“少量多次”原则。

（4）施工监测

根据机场飞行区各穿越段特点，划分为不同监测区段，并采用针对性的监测技术和监测方法。机场跑道监测为整个飞行区监测的重中之重，采用以自动监测为主、人工监测为辅的方式，主要采用全站仪自动监测（无棱镜）、电子水平尺相对沉降监测、人工地表沉降监测等方式。人工监测数据可与自动监测数据进行对比分析，以确保监测数据的准确性和可靠性。同时，纵向和横向监测断面交叉布置，以便于收集多方面数据进行分析。跑道段人工监测点布置如图 2.1-2 所示。

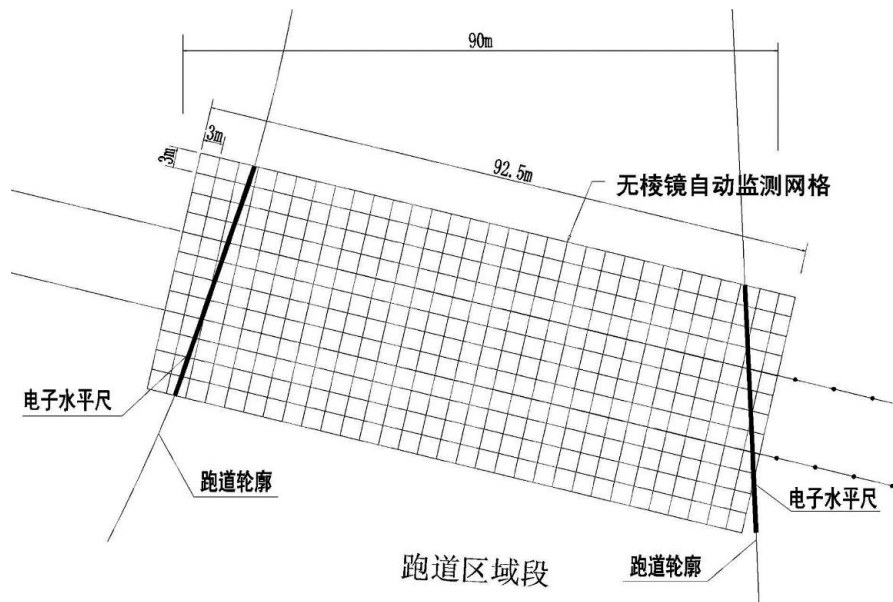


图 2.1-2 既有跑道区测点布置图

2.1.3 监测结果

下穿机场跑道的 10 号线区间隧道，其在规划、设计、施工及监测等各阶段均得到高度重视，并取得了令人满意的成果。该线已于 2010 年 11 月开通运营，服役状态良好。各项目沉降数据如表 2.1-2 所示。

表 2.1-2 各穿越项目沉降实测统计表

穿越项目	最大值		平均值	
	沉降值/mm	地层损失率/‰	沉降值/mm	地层损失率/‰
2 号线隧道	10	7.2	6	4.3
10 号线隧道	7	6.5	4	3.7
仙霞西路隧道	15	2.3	10	1.5
迎宾三路隧道	7	-	-	-

监测结果显示，10 号线穿越跑道段最大沉降值仅为 7 mm，平均沉降值仅为 4 mm，实现了微扰动的控制要求，未对跑道产生不利影响。2 号线、仙霞西路和迎宾三路隧道的沉降也基本满足了沉降控制要求。

在 2 号线穿越新建滑行道区域时，出现滑行道区域地表沉降过大导致水稳层开裂的情况，后采取技术补救措施解决。

2.2 地铁下穿重庆江北机场飞行区

2.2.1 工程概况

重庆机场是国内首例同时正穿两条机场跑道并同时进行两线轨道交通隧道 TBM 施工的机场，面对飞行区地面沉降控制精度高、控制距离长，以及不停航施工环境约束条件的情况，通过建立有效的施工协调制度，采用自动化监测、信息化施工管理等手段，不断优化施工技术措施，把地面沉降最大值控制在 6 mm 之内，保证了区间隧道的施工质量和机场运营安全。

(1) 工程简介

10 号线区间线路由 T3A 航站楼站后配线区出发穿越机场第二跑道、第一跑道、滑行道、联络道、机坪、机场场区内部多管线、B 指廊北侧端部、T2B 航站楼南侧端部、机场交通换乘中心及航站楼高架桥，最后到达地铁 T2 航站楼站，均为双洞单线隧道，设有联络通道三座，设计最高速度 100 km/h。轨面埋深约 16 m ~ 40 m，隧道中段位于半径分别为 650 m 和 1200 m 的曲线上，隧道纵坡最大为 16.797‰，最小为 2‰。

重庆轨道交通 10 号线 T3 ~ T2 站区间沿线主要位于第四系构造剥蚀丘陵地段，下伏基岩主要为侏罗系中统沙溪庙组砂以及泥岩不等厚互层，以砂质泥岩为主。围岩级别为 IV 级，跑道下方有经夯实的回填区，回填土层最大厚度为 17.8 m，隧道上部基岩厚度最小为 7 m。



图 2.2-1 下穿江北机场跑道平面

地下水的富水性受地形地貌、岩性及裂隙发育程度控制，主要为大气降水、地面沟、塘水体渗漏补给，水文地质条件较复杂，主要为第四系嵩山层孔隙水和基岩裂隙水，正常涌水量 1.37/10 (m · min)，状态为 I 级，不发育。

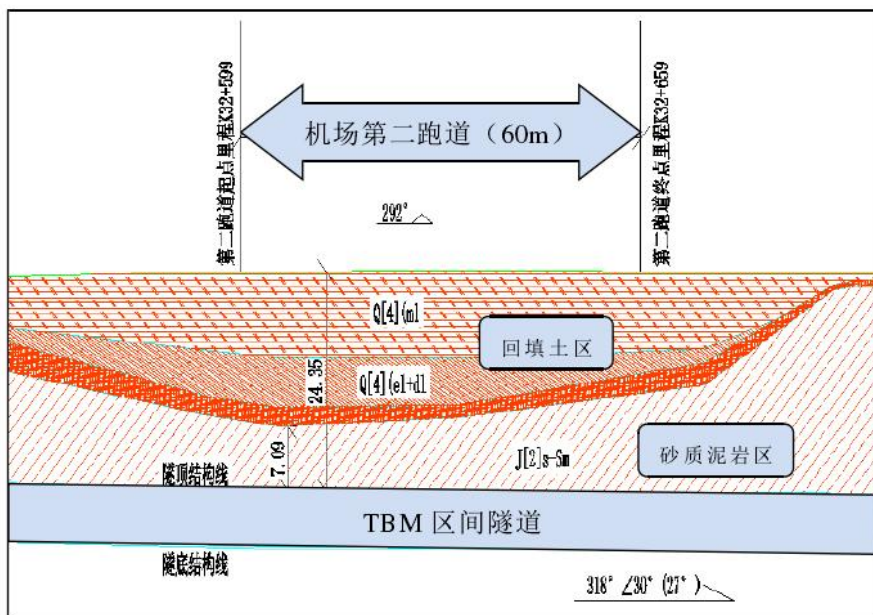


图 2.2-2 下穿隧道地质纵剖图

(2) 控制标准

根据设计及机场相关要求，隧道施工监测范围内累计沉降量 $\leq 10\text{ mm}$ ，穿越跑道（滑行道）道面高程与周边区域产生的差异沉降 $\leq 10\text{ mm}$ ，道面倾斜控制值 $\leq 10\text{ mm}$ 。

(3) 工程特点

①同时穿越两条跑道。隧道施工穿越跑道及滑行道范围约 648 m，停机坪范围约 305 m，长距离下穿施工易造成地面沉陷，对机场正常运营和设施设备保护的潜在安全风险较大。

②地质条件复杂。由于飞行区内隧道线路区域的原始地貌多为水塘沟壑地带，在修建跑道的地基高填方处理中可能存在较大孤石，或因砂岩、泥岩交错或互层，造成软硬不均和岩性突变，对 TBM 的刀具异常磨损影响较大。

经过多种方案的技术对比分析、专项评估论证，采用复合 TBM 工法进行施工，以最大限度降低施工对机场正常运营的干扰，有效减少施工粉尘，确保隧道施工过程中的安全、优质、环保、快捷。技术方案中，区间隧道设计管片外径为 6.6 m，内径为 5.9 m，管片采用错缝拼装，厚度为 35 cm。盾构设备采用复合式土压平衡 TBM 掘进机施工，设备全长 90 m。

2.2.2 控制措施

(1) 隧道轴线偏差的控制

为加强隧道轴线偏差控制、防止 TBM 掘进过程姿态难以控制导致的超挖现象，通过对土仓压力、千斤顶推力、土量等施工参数进行纠偏，避免盾构机“蛇”形走位。

(2) 穿越 T2 航站楼的技术措施

为重点保护航站楼的底边差异沉降，在距离进洞 37 m 范围内的底板或立柱上沿隧道轴线上下线方向，每隔 12 m 布设静力水准仪对其轴线进行自动沉降监测。若 TBM 下穿隧道施工引起拱顶及拱底部位出现明显应力集中，可能造成地面建筑物倾斜、开裂现象时，应及时进行补充注浆，采取增大支护安全系数，在洞内增设套拱、管棚及小导管等超前支护措施，以提高路段地层强度，兼顾封堵裂隙止水。

(3) TBM 管片上浮控制

为防止 TBM 管片上浮，主要措施采取调整同步注浆浆液配合比，尽量降低用水量，同时在成型隧道内每隔 10 环采用双液浆进行二次注浆加固，使整环注浆形成止水环。

(4) 施工监测

采用自动化监测为主，人工监测为辅的监测方法，并根据隧道线路走向，监测作业能力及机场不停航施工等要求，将隧道 TBM 施工对机场的影响区域划分为 4 个监测区域：飞行区外的 T2 航站楼及高架桥、停车场、道路等设施采用人工监测；飞行区内建（构）筑物沉降采用自动化监测技术。

2.2.3 监测结果

下穿段右线 4 个拱顶沉降点的监测结果显示：最大拱顶沉降 2.9 mm，沉降控制限值为 3.2 mm，满足拱顶位移控制标准，施工过程中未出现跑道破损情况。

2.3 地铁下穿成都双流机场飞行区

2.3.1 工程概况

目前，国内外下穿机场的隧道工程，多数在均匀的土质或岩质地层中修建，隧道长距离穿越富水砂卵石及中风化泥岩的上软下硬复杂地层的工程经验较少。本案例总结了上软下硬复杂地层条件下，盾构隧道下穿机场停机坪及滑行道所采取的设计方案和风险对策。

(1) 工程简介

成都地铁 10 号线工程连接中心城区、双流机场、新津区，线路呈东北—西南走向，最高运行速度 100km/h。在双流机场 2 号航站楼—双流西站区间，线路先后下穿机场 T2 航站楼、G 指廊、停机坪（含输油管线，埋深 2.5 m~3 m）及滑行道。该项目是成都地铁建设以来首次穿越机场停机坪与滑行道，也是首次在富水砂卵石地层中长距离穿越机场停机坪与滑行道工程。区间下穿停机坪段埋深为 8.1 m~25 m，下穿滑行道段埋深约 41 m，线路平面如图 2.3-1。

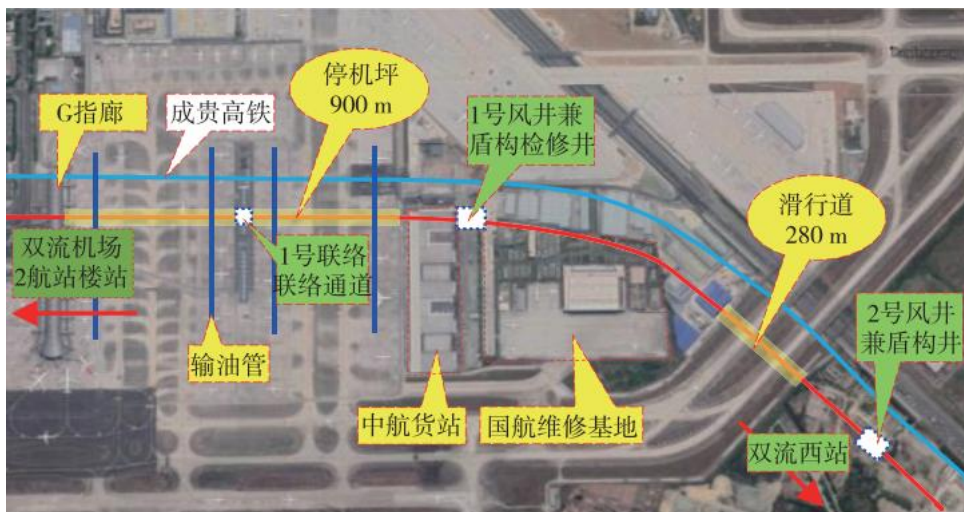


图 2.3-1 地铁 10 号线穿越工程线路平面示意

根据地勘钻孔揭露，地层自上而下依次为素填土、黏土、粉质黏土、中砂、卵石土、强风化及中等风化泥岩。隧道主要穿越

卵石土及泥岩层，场地内地下水位埋深为 4 m~6 m，主要为孔隙水和基岩裂隙水，地下水不具有承压性。下穿机场飞行区段地质纵剖面如图 2.3-2 所示。

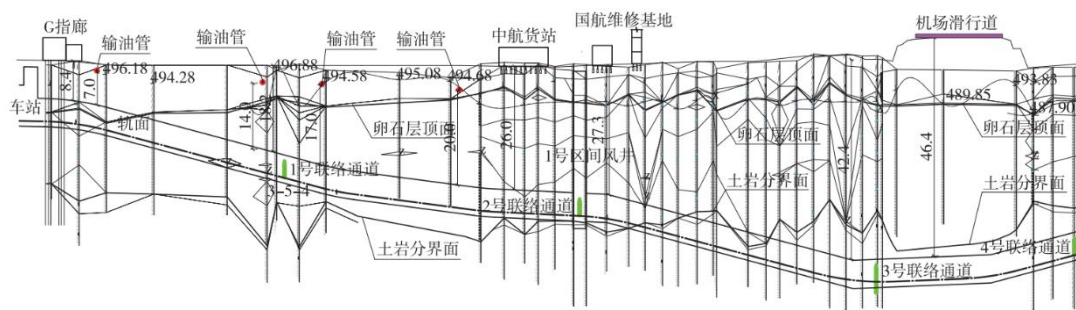


图 2.3-2 地质纵剖面示意图 (单位:m)

(2) 控制标准

依据相关规范标准及文献，参考以往国内已实施案例，停机坪及滑行道变形控制值取 10 mm。机场飞行区相关监测控制值见表 2.3-1。

表 2.3-1 机场飞行区监测控制值

序号	监测项目	变化速率报警值	累计沉降报警值	累积控制变化量
		(mm/d)	(mm)	(mm)
1	道面沉降	±2	±7	±10
2	输油管线沉降	±2	±7	±10
3	建筑物沉降 (倾斜)	±3	±14	±20
4	道面相对差异 沉降	-	±1‰	±1.5‰
5	相邻道面板差 异沉降	±1	±3	±5

(3) 工程特点

本工程具备以下特点：①隧道在机场不停航条件下施工，地表变形控制要求严格；②隧道处于富水砂卵石及中风化泥岩层，

地层上软下硬，施工风险较高；③线路穿越区影响范围较长，全长 1.18 km；④下穿滑行道处局部埋深 41 m，水压较高。

针对工程特点，综合考虑机场安全、工期、造价等方面的影响，对各工法进行对比分析，如表 2.3-2 所示，最终区间采用盾构法施工。

表 2.3-2 施工工法对比分析

	矿山法	明挖法	顶进法	盾构法
安全控制性分析	施工控制沉降较难、施工风险较高，对沉降要求严格区域不宜采用	需对地面交通进行疏解，甚至停航方可施工	对地层条件有一定要求，施工需设置工作井，穿越长度有所限制	施工技术较成熟、沉降控制能力较强，在一定埋深情况下可适用于下穿机场等复杂环境
线路适应性分析	适应各种线路条件，但埋置深度不宜过大	对线路的适应性较强，出于造价等考虑，通常应用于浅埋工程	—	对线路曲线半径、纵坡、线间距等均有要求，其线路适应性相对较差，但其在线路埋深较大时具有一定优势
工期和造价适应性分析	需采用辅助措施控制变形，其费用高、工期长，经济性较差	—	—	设备较复杂、初期投入高，但线路较长时工期和造价较优

2.3.2 控制措施

(1) 线路平纵断面优化

线路平面设计时，在穿越机场停机坪及滑行道段采用了直线或大半径曲线，减少曲线施工纠偏引起的土体损失，同时缩短下穿机场施工的时间，优化了线路与机场的平面关系。

线路纵断面设计时，在满足线路技术条件的基础上，加大了飞行区线路埋深，减小盾构施工时地层损失对道面的影响。

(2) 盾构机优化改造

选用复合式土压平衡盾构机，并对盾构机做了优化设计，如增大刀盘开口率至 33%，充分考虑破碎大卵石、漂石的要求；盾尾密封采用 2 道盾尾刷+1 道钢板束，为大埋深、泥岩地层及泥岩与砂卵石交界地层的安全掘进提供保障，以及配置超挖刀、进行渣土改良等等。

(3) 下穿停机坪段安全处理措施

施工前，对线路影响范围内停机坪进行陆地声纳法地质探测，及时发现空洞并填充注浆；在掘进过程中，利用注浆孔向地层注入克泥效浆液，填充刀盘开挖面与盾体之间的空隙，缓解同步注浆前地层损失造成的沉降；施工完成后，按期进行空洞探测，如发现空洞则及时填充。

(4) 下穿停机坪输油管道保护措施

本工程穿越 4 条输油管线，埋深为 1.6 m~3.0 m。施工过程中，采取保护措施如盾构管片增设注浆孔，从洞内对隧道周围进行二次注浆，注浆厚度为 3 m；考虑杂散电流可能对航油管道造成腐蚀，通过增大道床杂散电流收集网截面、增设回流电缆、上下行轨道间增设均流电缆等措施对杂散电流进行防护；对输油管道前后一定范围内的管片采用高渗透性环氧树脂加强防水，以防可能泄漏的油气进入区间隧道。

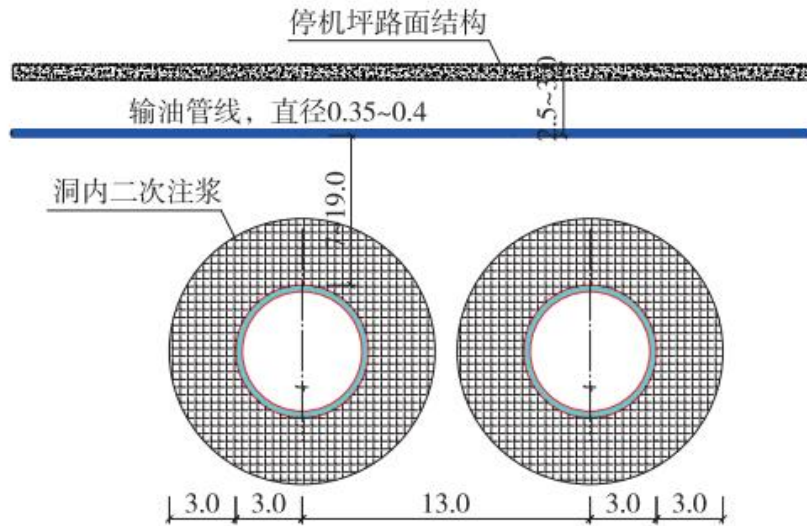


图 2.3-3 输油管道加固示意 (单位: m)

(5) 施工监测

采用远程自动监测系统对运营跑道道面、停机坪及其下部土体变形进行 24 h 实时监控量测, 监测内容见表 2.3-3。

表 2.3-3 监测项目及仪器

	监测项目	监测方法和仪器
机场飞行区	G 指廊沉降及倾斜	自动全站仪、静力水准仪
	停机坪沉降	自动全站仪 (免棱镜)
	机场内道路沉降	自动全站仪 (免棱镜)
	滑行道沉降	自动全站仪 (免棱镜)
	地下输油管沉降	自动全站仪 (免棱镜)

2.3.3 监测结果

下穿机场段监控量测结果表明, 停机坪最大沉降量为 6.97 mm, 滑行道最大沉降量仅 1.98 mm, 最终沉降量均控制在标准以内, 各项指标满足预期。该盾构隧道已于 2018 年 10 月安全穿越双流机场飞行区段。

2.4 地铁下穿南京禄口机场飞行区

2.4.1 工程概况

(1) 工程简介

南京地铁机场线（即 S1 线）为南京至高淳城际轨道一期工程，设计最高速度 100 km/h。下穿机场段线路走向如图 2.4-1 所示，穿越区间全长 370.9 m，机场穿越段覆土厚度为 5.60 m~11.0 m，左右线间距约 10 m。



图 2.4-1 南京 S1 线穿越禄口机场滑行道平面布置

机场滑行道穿越地层主要为全断面中风化安山岩；机坪穿越地层主要为上软下硬复合地层，穿越岩层为全~微风化安山岩，土层为粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉土等（部分区段穿越回填抛石层），如图 2.4-2 所示。

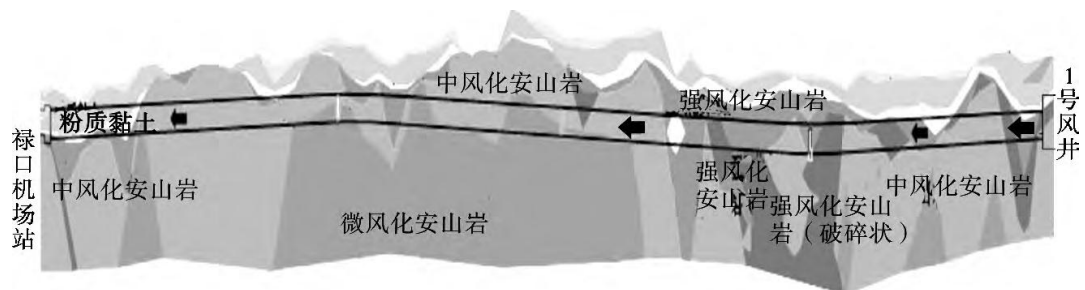


图 2.4-2 禄口机场区间地质纵剖面布置

该工程采用土压平衡盾构工法施工，穿越前采取了增加注浆孔、刀盘改制、盾构机同步注浆设备优化等技术措施；试验段穿

越施工时采取地质补勘、试验段模拟推进等措施。

场址区地下水主要为孔隙潜水及基岩裂隙水，其中孔隙潜水主要赋存于素填土、3层粉质黏土中。填土层结构松散，厚度不均，富水性一般，透水性较弱；3层粘性土富水性差、透水性差；基岩裂隙水按含水岩组岩性主要为碎屑岩类裂隙水。含水层主要由侏罗系大王山组 J3LW、侏罗系西横山组 J3x 组成。

(2) 控制标准

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》，控制标准为：地表最大隆沉量范围+10 mm~-30 mm，速率 ≤ 3 mm/d；隧道拱顶沉降 ≤ 20 mm，速率 ≤ 3 mm/d；板块差异沉降不得超过 1.5 cm。

(3) 工程特点

①复合地层长距离土压平衡模式（带压掘进）穿越停机坪

本次穿越机场停机坪滑行道的施工控制核心在于控制地面和地层沉降，确保机场滑行道和停机坪使用安全。

②监测方法及监测时间等受限制较多

施工监测须满足飞机起降限制要求，还需确保监测覆盖面、频率和精度，开展监测作业的难点包括：选取的监测方案可能受机场运行限制而无法实施；机场滑行道、停机坪结构坚固，常规监测方法不能反映地层和地表沉降情况，无法为盾构机掘进提供真实、可靠的施工参数等。

③土压平衡模式下掘进参数确定较困难

1、2号盾构区间过机场前均为全风化、强风化、中风化、微风化安山岩地层，无可供试验的软土地层，相关土压平衡经验需借鉴3、4号盾构软土段相关数据，因盾构机型号不同，地质条

件不同，3、4号盾构软土段掘进参数只能作为参考。

2.4.2 控制措施

(1) 穿越前技术措施

①增加注浆孔

所有在机场道面下的管片，每块增加两个注浆孔（共15个注浆孔），通过不同注浆孔的选择使二次注浆更具针对性，也避免多次壁后注浆引起注浆孔堵塞，进而影响后期沉降控制。

②刀盘改制

针对复杂的地层情况，对盾构机刀盘增设3个定向钻孔，选择性地正面取芯和超前注浆，刀盘转速由原最大2.3 rpm调整为最大3.0 rpm，增大对正面土体的切削能力。

③优化盾构机同步注浆设备

采用2套SCHWING双出料口注浆系统用于同步注浆。一是增加同步注浆孔：原通向盾尾为2套注浆管路和4个注浆孔改为2套管路和5个注浆孔，以便降低堵管现象，有效控制地面沉降。二是盾构机开孔：在盾构机开口环和盾尾环环向增加5个定向钻孔，用于盾构减摩、盾构背土、盾构进出洞止水加固时向盾构机外部压注浆液以及必要时多角度定向超前注浆。三是浆液优化：同步注浆浆液采用相适应的单液浆，此浆液能在压注初期就具有较高的屈服值，同时压缩性和泌水性小，可有效控制隧道上浮。

(2) 使用多种沉降监测技术

施工采取自动化监测、人工监测、地质雷达扫描等多种监测及扫描手段对盾构通过区域进行沉降监测及地质空洞扫描。

①自动化监测、人工监测

监测区纵向长 370 m (约 308 环), 监测区域内沿中心线向两侧 6、12、18 m 布置监测点, 每排按 5 环 (6 m) 间距布置呈方格网状监测点, 如图 2.4-3 所示。

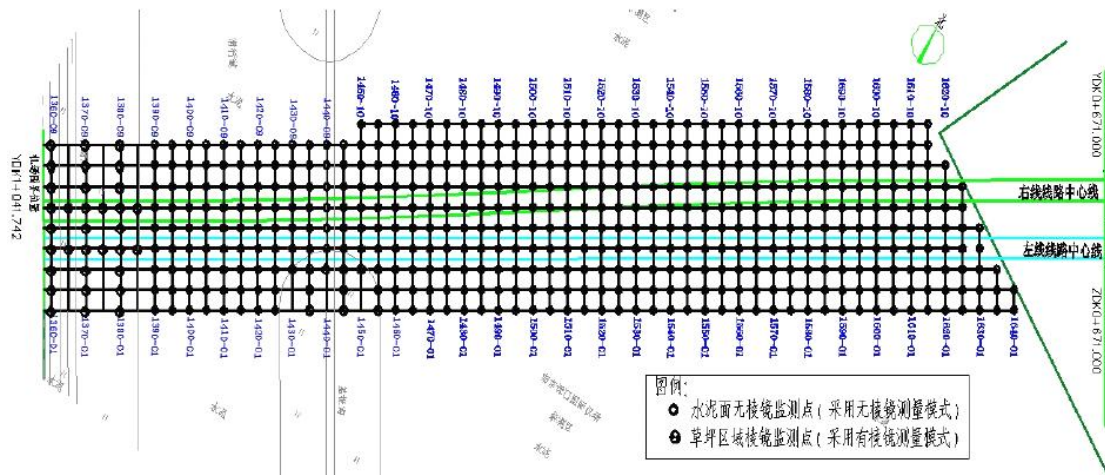


图 2.4-3 监测测点布置示意

由于道面上不能安装棱镜或钻孔埋设监测设施, 最终确定在道面上布设监测标记 (反光油漆点), 并采用全站仪三维红外扫描技术进行道面全天候沉降监测, 同步定期采用人工几何水准方式进行对比的监测方案。

②采用地质雷达扫描技术

由于机场停机坪及滑行道不允许布设打穿硬壳层的深孔监测点, 自动化监测及人工监测取得的沉降数据将无法真实反映地层沉降情况。在此情况下, 采用地质雷达对已施工区域进行地质扫描, 探测是否存在空洞, 频率一日一次。

采用全站仪三维红外扫描技术进行道面全天候沉降监测, 同步定期采用人工几何水准方式进行对比监测。根据监测结果统计, 盾构隧道下穿机场左右线沉降均已超过控制值, 由于报警及时, 及时调整盾构机工作参数, 避免了安全生产事故发生。左线最大沉降量为 12.3 mm, 由于右线先行施工, 受左线二次施工的

影响，右线地表最大沉降量为 13.8 mm。

(3) 盾构穿越段施工技术措施

① 严格控制推进、出土量

地面监控室按千斤顶行程 25 cm~30 cm/斗作为主要监控手段，隧道内出渣统计人员采用激光测距仪按 10 cm/次统计出渣量。出土量不符合标准时，双方人员将对本环出渣量进行对比复核，并以隧道内统计人员统计数据为准。若渣土含泥量明显增加，土仓压力波动过大等特殊情况发生时，立即组织召开现场会议，分析出渣量变化原因并采取相应措施。

② 土体改良

泡沫原液注入量为(15~30)L/min，压缩空气注入量为(150~200)L/min，发泡率在(10~15)倍之间效果较明显，气泡较稳定，不易破裂，既能改良渣土，又能保证土仓内土体的稳定性。

③ 刀盘转速及推进速度

穿越地层处于上软、下硬地层中，既要考虑降低刀盘转动对土体造成的扰动，又要考虑对盾构机刀具的保护，根据前期施工经验，刀盘转速选取(1.9~2.2)r/min；推进速度的设定主要根据试验段及经验值来控制，穿越段盾构机掘进速度以匀速推进为宜，推进时速度控制在(2~3)cm/min之间。

④ 同步注浆

盾构推进施工中的同步注浆浆液采用商品厚浆，主要含粉煤灰、砂、膨润土、水、添加剂。此浆液能在压注初期就具有较高的屈服值，同时压缩性、泌水性小，固结时间短，可有效控制地面沉降和管片上浮。

2.4.3 监测结果

选取 3 处典型断面监测数据进行分析，3 个断面管片编号及对应地质情况分别为 1460（停机坪区域中风化安山岩段）、1515（软硬交接面段）、1570（停机坪区域粉质黏土段）。各断面最终横向沉降槽，分别见图 2.4-4~图 2.4-7。

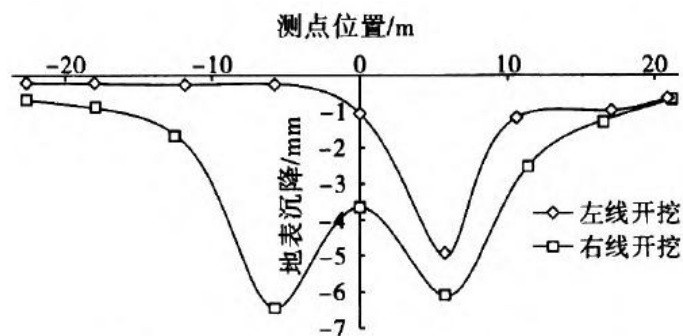


图 2.4-4 中风化安山岩断面横向沉降槽

由上图可知，在盾构穿越中风化安山岩地层时，因地层条件较好，最大沉降仅 6.4 mm，且右线开挖对左线影响较小。

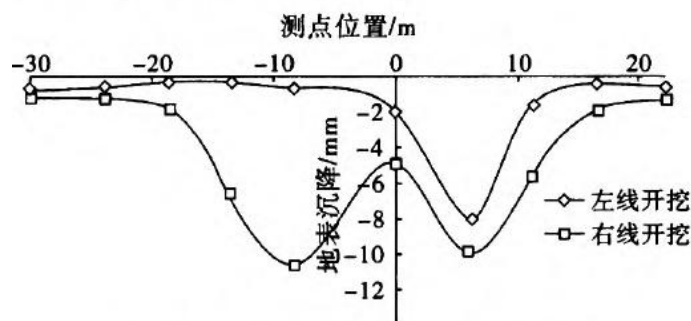


图 2.4-5 软硬交接段断面横向沉降槽

由上图可知，当盾构穿越软硬交接段时，地表沉降控制较好，最大地表沉降为 10.7 mm。

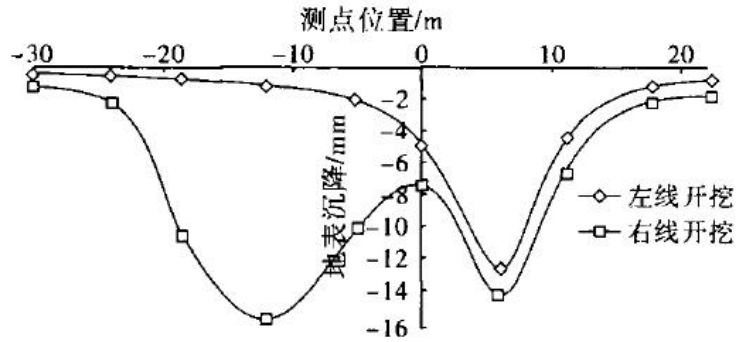


图 2.4-6 粉质黏土段断面横向沉降槽

由上图可知，在粉质黏土段，最大地表沉降为 15.8 mm，且横向影响距离也相应增大，但是隧道距离逐渐变远，右线开挖对左线的影响也相对变小。

由沉降槽可知，在粉质黏土段地表沉降较大，故选取 1570（停机坪区域粉质黏土段）右线拱顶测点绘制地表沉降随时间变化曲线，如图 2.4-7。

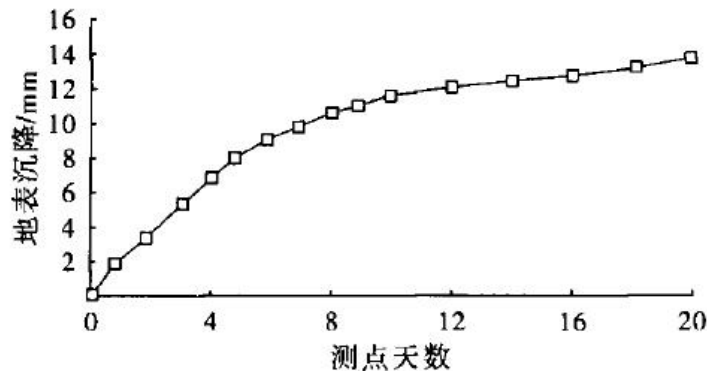


图 2.4-7 1570 右线拱地表沉降随时间变化曲线

由上图可知，右线拱顶处地表沉降在开挖后 12 天左右趋于平缓，最大沉降为 15.7 mm，日平均最大沉降速率为 2 mm/(24 h)。根据前述设定的监测报警值要求，在施工过程中各项指标均能够满足工程监测设计要求。

2.5 国外城市轨道交通下穿机场飞行区

2.5.1 单轨隧道穿越德国斯图加特机场飞行区

2001 年，德国斯图加特机场在跑道下修建圆形单轨隧道（设计速度 80 km/h）。工程处于泥岩地层中，地形和地质条件较差，采用浅埋暗挖法施工，初期支护为喷射混凝土，施工过程中严格控制隧道变形和监控量测措施，地面沉降被有效地控制。



图 2.5-1 斯图加特 S2 线下穿机场飞行区

2.5.2 PTS 地铁隧道穿越瑞士苏黎世机场飞行区

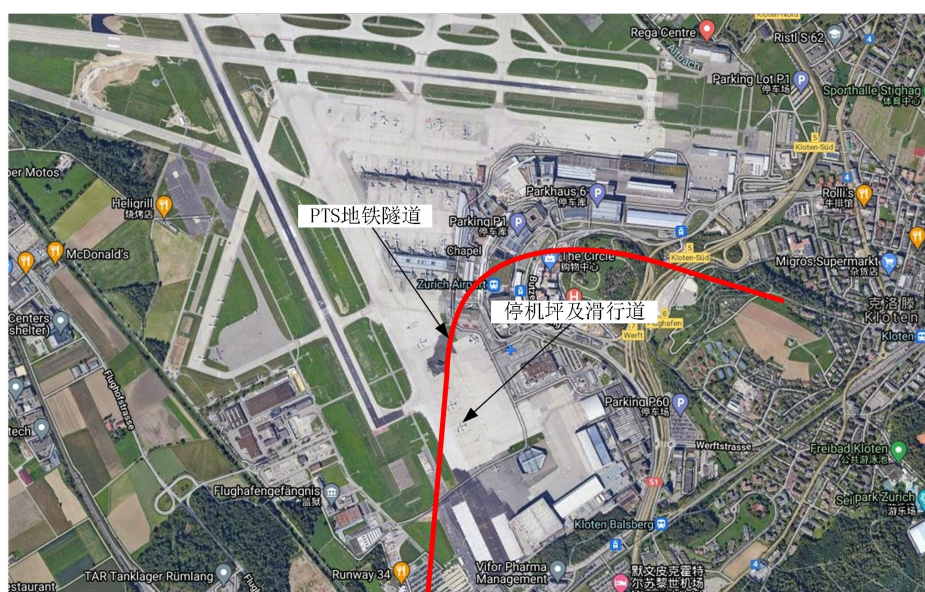


图 2.5-2 苏黎世 PTS 地铁隧道下穿机场飞行区

2000 年，瑞士在苏黎世机场运营区下方修建了两条地铁隧道。隧道在停机坪、滑行道和登机口区域下通过，距离超过 300 m。地质岩性为以地下水为主的冰川期湖层沉积物，跑道和停机

坪覆盖层最大为 13 m。两条客运系统 (PTS) 隧道位于含泥砂粘土及细砂冰川湖居沉积层中, 石块和岩块靠近冰碛层, PTS 沿线的地下水位低于地面约 1.5 m ~ 2.5 m。隧道施工采用泥水平衡盾构机, 直径 6.28 m。隧道施工后地面下沉最大不超过 5 mm。

2.5.3 轻轨隧道穿越美国圣保罗机场飞行区

美国圣保罗国际机场在飞行区地下修建了两条长 2250 m 的轻轨交通隧道。考虑到地表沉降、水渗流、飞行区相关限制条件等, 采用预制混凝土衬砌结构, 每环隧道由七块预制螺栓连接而成, 通过注浆确保结构防水和结构对地面的有效支撑。



图 2.5-3 美国圣保罗国际机场轻轨交通

3. 城际铁路下穿机场飞行区

3.1 穗莞深城际下穿深圳宝安机场飞行区

3.1.1 工程概况

(1) 工程简介

穗莞深城际轨道交通线最高行车速度为 140 km/h，采用双洞单线布置，隧道埋深 11 m ~ 22 m，线路最大纵坡 30‰，隧道区间采用盾构隧道穿越深圳机场一、二跑道间的垂直联络道、T3 航站楼西侧滑行道以及停机坪，如图 3.1-1 所示。

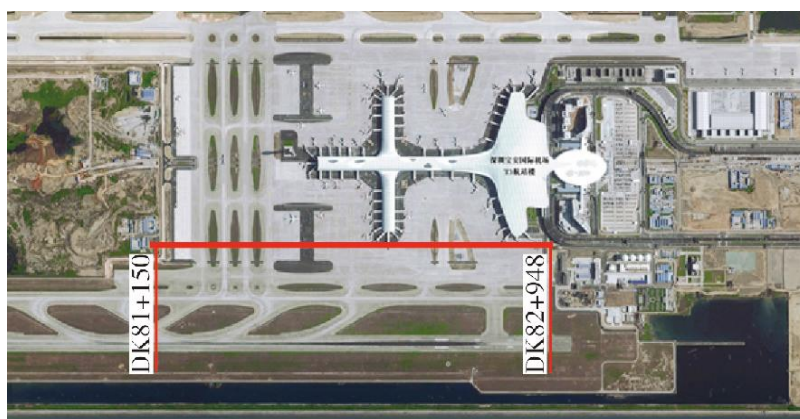


图 3.1-1 穗莞深城际下穿深圳宝安机场平面示意

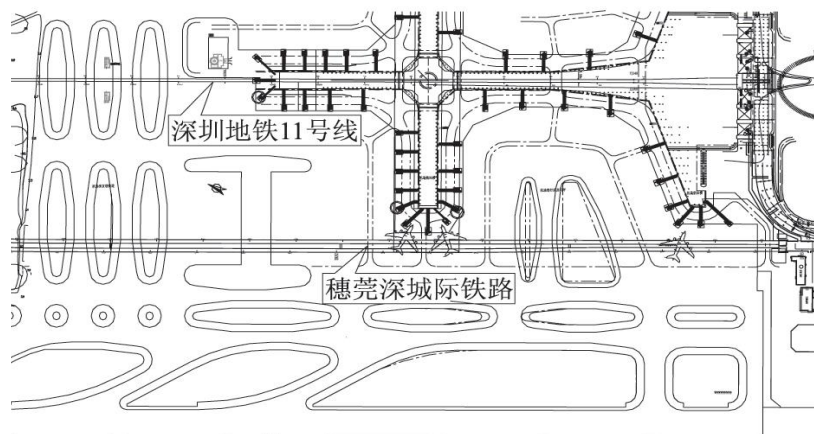


图 3.1-2 两条轨道交通线下穿深圳宝安机场平面布置

穿越段上覆层主要为填土、填砂、淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土等，多为松土，部分地段呈振动液化状；下卧层为全风化花岗岩（硬土）和强风化花岗岩（软岩）。

（2）控制标准

由于覆土较浅、穿越段土层条件较差、施工环境复杂及测量过程困难等因素，盾构下穿机场道面时，为了避免因沉降过大导致影响飞行区正常运营，滑行道及机坪地表沉降控制标准为：工后一年内，沉降不大于 2 cm，差异沉降不大于 0.15%，且施工阶段按 80%控制。

3.1.2 控制措施

（1）盾构机专项设计

投入两台土压平衡盾构机进行施工，盾构机针对穿越机场飞行区段，依据地质特性、水文条件、隧道埋深等实际情况进行专项设计。

（2）注浆加固

为填补掘进超挖施工过程中其他因素造成的地层损失，有效控制地基变位，采用超前注浆、同步注浆为主，径向注浆、二次注浆、系统补浆、跟踪注浆为辅的六种注浆形式，加固和稳定地层、填补管片壁后的空隙，必要时采取双液注浆。具体注浆参数和数量设定，参考试验段的成果，并在穿越期间根据沉降进行微调。

（3）泡沫剂与膨润土混合使用的渣土改良

工程掘进时选择以泡沫剂为主、膨润土为辅的改良剂进行施工。向土仓注入膨润土有利于改良土体并减小刀盘磨损，膨润土选用优质纳溪膨润土。由于膨润土用量较大，且需要进行发酵后

使用，配备有专用的膨润土膨化池。另外，在膨润土注入管上增设单向阀，避免土仓内水压过大形成回流。泡沫剂和膨润土的最佳配合比在下穿机场飞行区段过程中，根据开挖土体情况和盾构机掘进的速度、推力、扭矩等参数进行调整。

3.1.3 监测结果

在机场地面沉降的监测中，每个断面共计布设 13 个监测点，断面间距 25 m，各监测点断面布置见图 3.1-3。

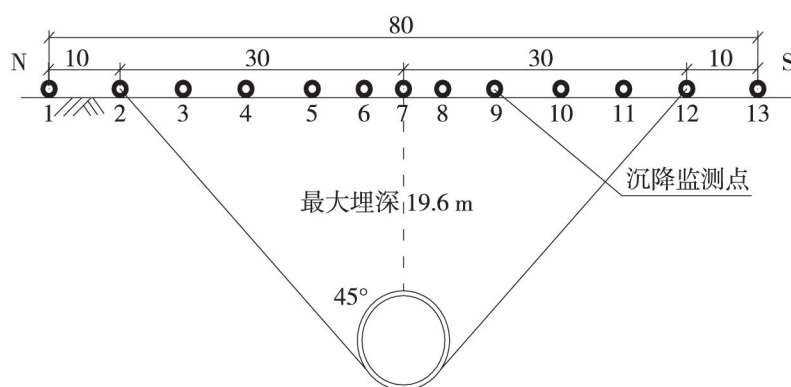


图 3.1-3 地表沉降监测点断面布置 (单位: m)

左线 ZDK81+255 断面中沉降量最大为 9 号和 11 号测点，两测点的变形时程曲线见图 3.1-4。右线 ZDK81+255 断面中沉降量最大为 5 号和 7 号测点，两测点的变形时程曲线见图 3.1-5。盾构通过机场飞行区段后，对滑行道累计沉降进行的监测表明，累计沉降在 (-10 mm, +5 mm) 之内。

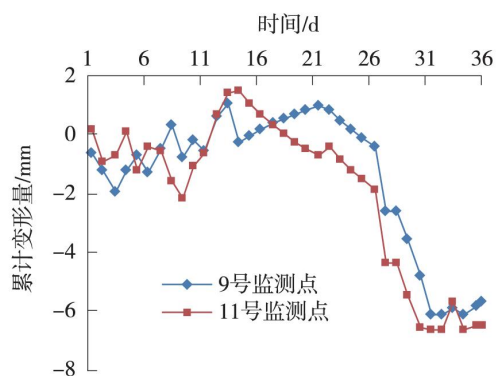


图 3.1-4 左线 9 号和 11 号测点沉降曲线

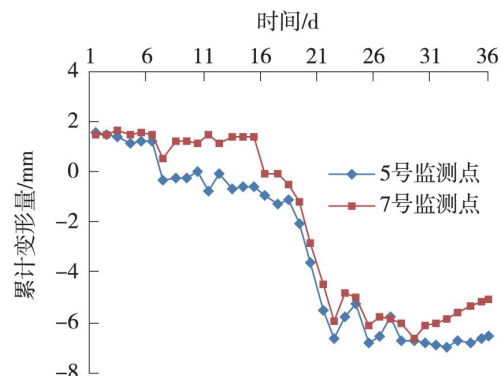


图 3.1-5 左线 5 号和 7 号测点沉降曲线

3.2 城际轨道交通下穿广州白云机场北飞行区

3.2.1 工程概况

(1) 工程简介

新塘经白云机场至广州北的城际轨道交通设计速度为 200 km/h，其中白云机场 T3 站~T1 站区间隧道工程穿越白云机场航站区及飞行区。区间隧道采用盾构法施工，衬砌采用环宽为 1600 mm 管片，内径为 8000 mm，外径为 8800 mm，强度等级 C50，抗渗等级不小于 P12。管片连接采用 14 根 M30 环向螺栓和 19 根 M30 纵向螺栓，接缝之间采用高弹性橡胶密封止水条防水。管片与围岩之间的环缝采用同步注浆及二次补浆充填，防止地面沉降。

下穿段隧道根据先期 T2 站预留线路条件采用线间距 18.6 m 的双洞单线隧道型式，隧道埋深达 14.0 ~ 16.5 m，隧道穿越白云机场北滑行道区域线路位置如图 3.2-1 所示。

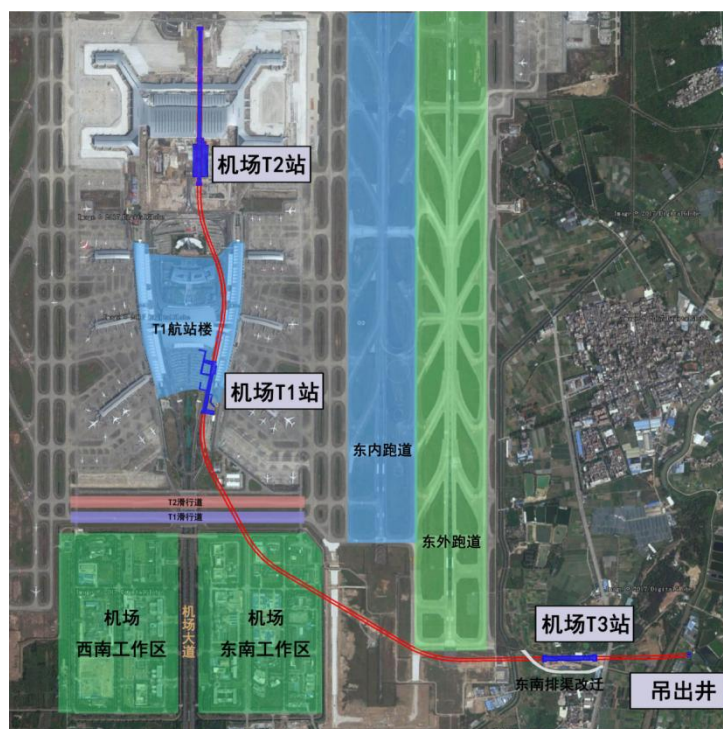


图 3.2-1 隧道穿越白云机场 T1~T3 区间滑行道区域线路位置

隧道穿越白云机场北滑行道段地质纵断面如图 3.2-2 所示，地质统计见图 3.2-3 及表 3.2-1。

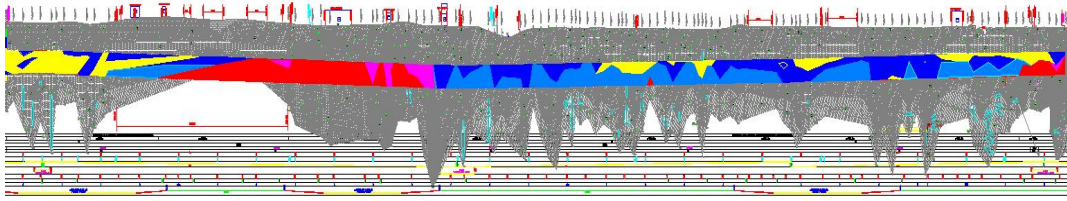


图 3.2-2 隧道穿越白云机场 T1~T3 区间滑行道地质纵断面布置

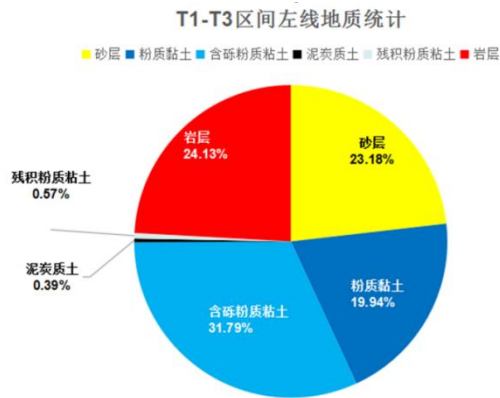


图 3.2-3 隧道穿越白云机场 T1~T3 区间滑行道地质统计

表 3.2-1 隧道穿越白云机场 T1~T3 区间滑行道地质统计

类别	类别	透水性	占比
细砂	<3-2>	饱和、密实为主，透水性中等	0.25%
中砂	<3-3>	饱和、稍密~中密状，透水性中等	0.32%
粗砂	<3-4>	饱和、稍密~中密状，透水性中等	15.45%
砾砂	<3-5>	饱和、中密状，透水性强	7.16%
粉质黏土	<4N-3>	硬塑，土层透水性弱	19.94%
含砾粉质黏土	<4-4>	硬塑，透水性弱	31.79%
泥炭质土	<4-2C>	流塑~软塑，土层透水性微	0.39%
残积粉质黏土	<5C-2>	硬塑，透水性弱	0.57%
强风化炭质灰岩	<7C-1>	呈半岩半土状，碎块状，风化裂极发育，透水性弱	0.05%
弱风化炭质灰岩	<8C-1>	岩体较完整，透水性中等	0.02%
强风化炭质页岩	<7-2>	呈半岩半土状，风化裂隙发育，透水性弱	5.13%

强风化粉砂岩、砂岩	<7-3>	呈半岩半土状,碎块状,风化裂隙发育,透水性弱	12.81%
弱风化炭质页岩	<8-2>	弱风化炭质页岩	0.24%
弱风化石灰岩	<8C-2>	岩体较完整,透水性中等	5.76%
强风化粉砂岩、砂岩	<8-3>	岩体较破碎,裂隙发育,透水性弱	0.12%

由于隧道处于冲洪积平原,灰岩广泛分布,地下水丰富,岩溶发育较为强烈,为探明隧道穿越沿线地质情况、减少盾构穿越沿线溶土洞等不良地质因素对盾构施工及后续运营的影响,在盾构施工前已对缺乏地质资料区域进行地质勘查,同时对盾构沿线影响范围内进行岩溶预处理。

场地地下水类型以及赋存方式有以下两种:①第四系孔隙水。主要赋存于冲洪积砂层中。本场地第四系孔隙水含水层主要有粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂、卵石层。场地孔隙水一般为潜水,区段上覆黏性土层,地下水略具承压性。②岩溶水。分布于碳酸盐类岩层裂隙及溶洞中,为中等透水性地层,属于承压水。

第四系孔隙水受大气降水补给和影响,地下水径流为主要排泄方式;岩溶水的补给来源主要是相邻含水层如第四系含水层的侧向、垂直补给,运动方式以水平径流为主,沿当地岩溶侵蚀基准面排泄,水量较丰富。

(2) 控制标准

根据机场方面对滑行道道面沉降控制的要求,穿越工程施工区域道面高程与周边区域产生的沉降差异不大于 10 mm,道面差异沉降不大于 1%。

(3) 工程特点

①地面条件受限

穿越滑行道实施过程中必须保证 T3、T4 及滑行道正常运营，同时不允许人员、机具进入。

②地质条件复杂

灰岩面起伏较大，洞身地层上软下硬，隧道拱部以上覆盖有 3 m~9 m 厚富水砂层。

③岩溶探查及处理困难

受地面管控限制，地表基本无条件进行滑行道下岩溶的详细探查及相应处理。

针对下穿段隧道位于竖曲线、地层上软下硬、岩面起伏等特点，需考虑地下水、富水砂层对施工安全影响以及开挖过程中如何严格控制好地表沉降。在不停航的情况下，采用刀盘直径 9.13 m 泥水土压双模式盾构掘进。

3.2.2 控制措施

为了保障施工安全性及满足沉降标准要求，从施工岩溶处理、沉降控制措施等方面对施工技术进行控制。

(1) 盾构施工前不停航岩溶处理

由于区间线路大部分位于机场围网范围内，给隧道线路沿线地质勘测和岩溶处理带来了极大的困难。为减少施工对机场运行的影响，降低施工安全管控风险，对滑行道区域进行二期分段实施，并对各期施工区域进行独立围蔽，施工前利用夜间停航时间对滑行道区域进行管线探查，并完成飞行区外施工便道施工。

完成道面砼破除后按照 $10\text{ m} \times 10\text{ m}=100\text{ m}^2$ 范围布置 1 台

钻机全面铺开进行溶（土）洞探查，对发现的溶（土）洞遵循以下原则注浆处理：①所有发现的土洞必须处理。隧道顶部溶洞必须处理。②当隧道底部位于弱风化灰岩时，隧道结构轮廓线外放 3 m，隧道底板以下 4 m 以内溶洞必须处理。③当隧道底为较稳定隔水层（例如粘土、粉质粘土）时：若隧道底板以下隔水层厚度 ≥ 5 m，隧道底的溶洞一般不处理；若隧道底板以下隔水层厚度 < 5 m，且最上层溶洞顶板厚度 < 4 m 或厚跨比 < 1 ，则隧道结构轮廓线外放 5 m，岩面以下 4 m 范围内的溶洞必须处理。④当隧道底至岩面范围内为砂层或无较稳定隔水层时：若最上层溶洞顶板厚度 ≥ 5 m，隧道底的溶洞一般不处理；若最上层溶洞顶板厚度 < 5 m 或厚跨比 < 1 ，则隧道结构轮廓线外放 5 m，岩面以下 5 m 范围内的溶洞必须处理。

（2）盾构机优化选型

针对灰岩地层盾构掘进问题，由原设计的泥水盾构调整为土压泥水双模式盾构机，以提升地层适应性。

（3）复合式盾尾注浆

在现有盾尾同步注浆系统的基础上，在盾尾顶部增设特制的同步双液注浆模块及配套的复合注浆系统，在盾构掘进过程中，盾尾同步进行双液浆及砂浆注浆，相当于在同步注浆阶段同时进行一定的二次补浆，以解决盾构同步注浆顶部及周边填充不密实的问题。复合注浆系统在盾构下穿机场滑行道内沉降控制重点区域时发挥巨大作用，如图 3.2-4 所示。

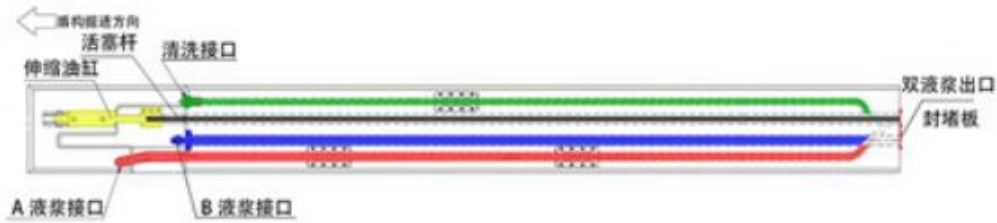


图 3.2-4 复合注浆系统示意

(4) 冷冻刀盘系统

为避免二次地面作业（不停航施工），增加冷冻刀盘系统，为极端不利条件下的盾构开仓作业增加一道保障。

(5) 浓泥浆取石

岩溶地区掘进面普遍存在灰岩，由于岩层风化程度不一，通常存在裂隙发育，刀具进尺会使得开挖面的岩体沿着裂隙整块剥离，导致剥离下来的较大直径块石无法顺利由排浆管带出，造成堵管频繁，且会堆积在土仓内造成切口水压波动，进而造成地表沉降超限。在泥水、土压两种模式同时启动的状态下，采用浓泥浆进行防喷涌，利用螺旋机快速排除土仓积压的块石，快速恢复泥水掘进模式的仓内积石排出方法，减少了因块石堵管引起仓内压力波动过大而造成地表沉降异常的发生。

(6) 注浆加固

下穿 T1 滑行道前，因地质勘探揭露地质条件差（岩溶见洞率 100%，地层上部深厚沙层且土洞发育），针对地质特点对该区域掘进范围上部进行注浆加固，并在恢复道面前，于道面板下部预埋补浆管道。

(7) 施工监测

在建筑物或临时支架处设置全站仪，通过扫描技术对道面区进行全天候自动化监测，而对土面区则安装或改装后棱镜满足飞

行区布置高度为地面 ± 0 标高要求。同时，在夜间停航时间人工采用电子水准仪复核，将全站仪采集的数据与水准仪测得的数据进行比较。

3.2.3 监测结果

通过自动监测实时数据，及时反馈数据调整盾构掘进参数，盾构下穿滑行道监测沉降最大为-7.6 mm，隆起为 4.5 mm，变化大的监测点均位于土面区且实现了道面区零沉降。

3.3 深湛铁路下穿湛江吴川机场飞行区

3.3.1 工程概况

湛江吴川机场是国内首例铁路隧道正穿机场跑道并同步施工的机场，飞行区地面沉降控制精度高、控制距离长，需通过有效的过渡回填设计，优化施工技术措施和设置长期监控量测措施，把地面不均匀沉降控制在 1.5‰之内，以保证区间隧道的施工质量和机场运营安全。

(1) 工程简介

深湛铁路吴川机场支线按照城际铁路标准 200 km/h 建设，由西向东垂直跑道引入湛江机场，在 T1 和规划的 T2 航站楼中间设置机场站，通过地面二层的换乘/安检厅接入航站楼二层连廊候机区。区间隧道下穿跑道和滑行道，下穿段隧道顶板埋深 7.5 m~10.5 m。隧道所处地层为粉质粘土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩。平面图及隧道横断面图如下所示。

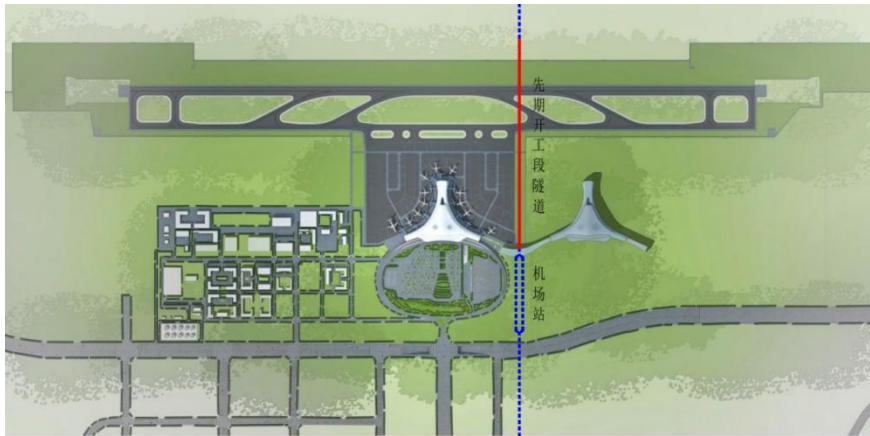


图 3.3-1 铁路与机场平面关系图

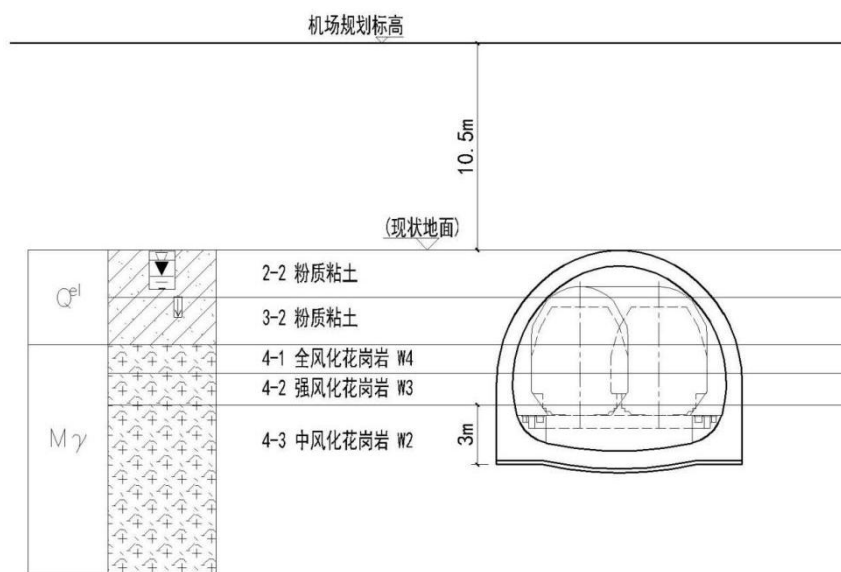


图 3.3-2 铁路隧道与机场跑道剖面关系图

(2) 工程特点

①不均匀沉降要求高。铁路隧道位于跑道填方区，隧道与周边其他区域回填刚度有差异，长期运行过程中易产生不均匀沉降，对机场正常运营造成影响。

②建设工期紧张。铁路隧道采用明挖法施工，隧道开挖范围回填完成后，方可进行跑道施工。为保证机场如期完工，跑道范围的隧道工期压力较大。

3.3.2 控制措施

经过多种方案的技术对比分析和专项评估论证，采用明挖工

法进行施工，加强回填过渡措施，对填方体设置一定的沉降期，以有效控制隧道上方跑道的不均匀沉降。

(1) 实施工法

隧道基坑平均埋深约 14.6 m，采用两级 1:1 台阶放坡开挖，每级台阶坡高不大于 8 m，边坡设置砂浆锚杆支护。坑外两侧各设置一排 $\Phi 600$ 降水井，间距 6 m；坑内设置两排 $\Phi 600$ 疏干井，间距 10 m。隧道回填至现状地面后，机场进行地面以上至设计标高的回填。

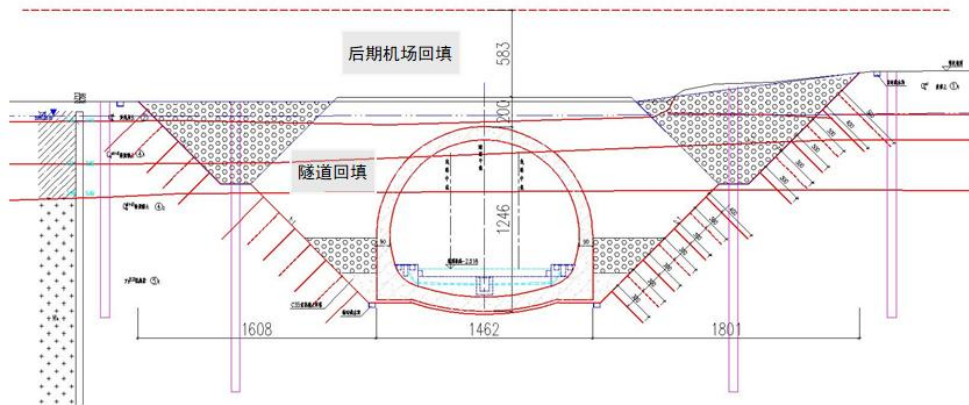


图 3.3-3 开挖工法断面图

(2) 回填方案

①根据《民用机场岩土工程设计规范》(MH/T 5027) 要求，飞行区道面影响范围内回填压实度 0 m~4 m 不小于 96%，大于 4m 不小于 95%；航站区范围回填压实度不小于 93%。

②隧道顶部回填从隧道仰拱开始自下而上依次采用素混凝土、级配碎石和水泥改良土，最终与机场上部回填材料及回填要求统一，减小机场跑道因地基刚度不统一引起的差异沉降。

③根据数值模拟分析，计算出隧道两侧沉降槽主要影响区域，在沉降槽主要影响区域设置级配碎石隔离带，进一步减小隧

道与跑道路基间的差异沉降。

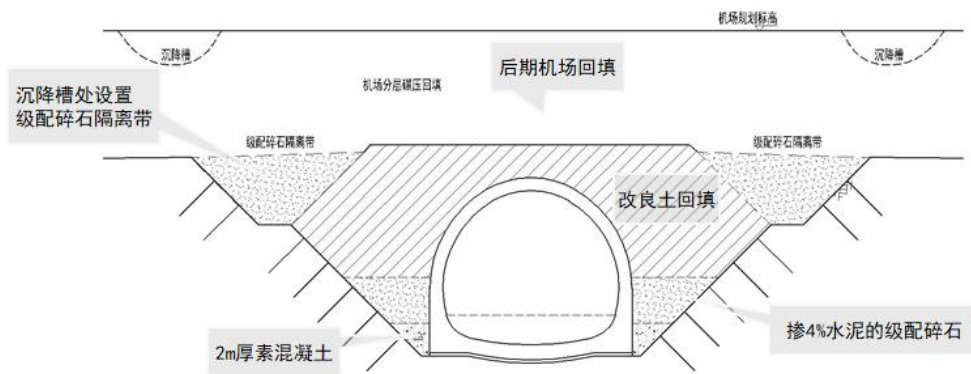


图 3.3-4 过渡回填方案

由于该工程位于机场跑道及飞行区影响范围内，回填土压实度需同时满足《民用机场岩土工程设计规范》(MH/T 5027)和《铁路隧道工程施工质量验收标准》(TB 10416)。结构两侧 1 m 及顶部 2 m 范围采用人工或小型机械夯填，分层厚度不大于 200 mm，夯实次数 (3~4) 次；其余范围采用机械平碾，分层厚度 250 mm~300 mm，压实次数 (6~8) 次。

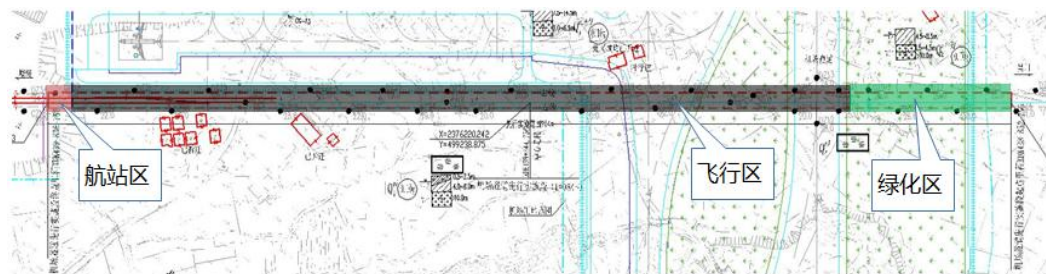


图 3.3-5 回填范围区段示意图

(3) 运营期监测设计

为避免长期运营情况下机场和铁路产生相互影响，机场建设方要求铁路隧道建成后对隧道变形和隧顶土压力长期监测。建设过程中在隧道拱顶、边墙及仰拱分别埋设监测点，每组布置 4 个测点，组间距 150 m，隧道建成后开始监测，委派专人收集、分析数据，直至数据收敛。

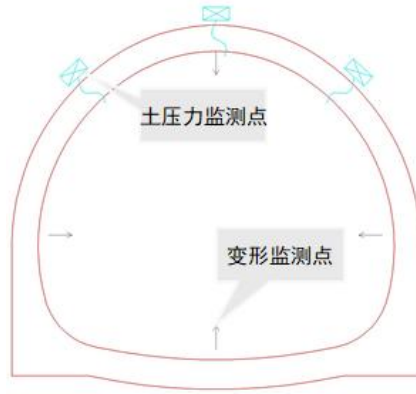


图 3.3-6 隧道监测设计

3.3.3 监测结果

隧道主体结构的监测数据显示，隧道拱顶、底板最大沉降为 0.8 mm，净空收敛为 0.5 mm，主体结构本身的变形较小，满足规范要求。

4. 高速铁路下穿机场飞行区

4.1 广湛高铁下穿湛江吴川机场飞行区方案研究

湛江吴川机场在扩建工程前期设计时，曾研究将 350 km/h 的广湛高铁引入湛江机场，并设置湛江机场站的方案。尽管广湛高铁最终放弃在湛江机场设站，后来深湛铁路吴川机场支线引入湛江机场，但前期对广湛高铁下穿湛江机场跑道方案的部分研究成果，依然可供参考借鉴。

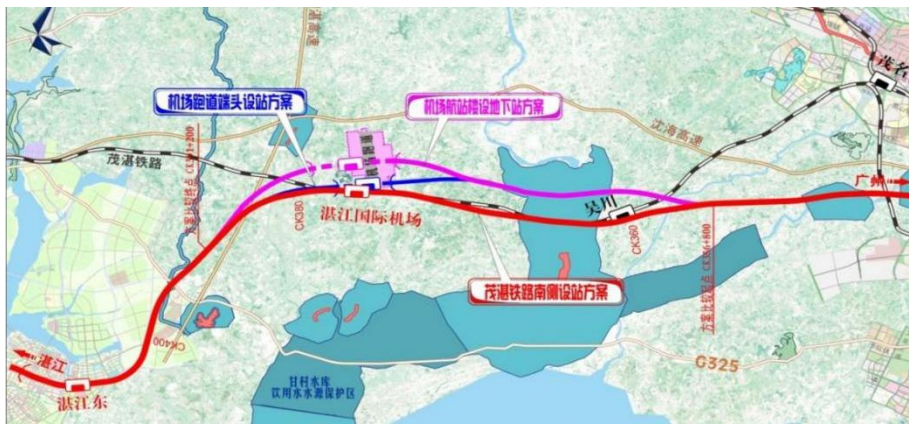


图 4.1-1 广湛高铁引入湛江机场研究示意

4.1.1 项目概况

广湛高铁自西向东与跑道垂直引入湛江吴川机场的规划方案，是在 T1 和规划中的 T2 航站楼之间设置湛江机场站。车站埋深 22 m，通过 150 m 长的换乘通道连接航站楼前地下换乘大厅。区间隧道段 600 m 下穿机场跑道及滑行道，隧道埋深约 10 m。隧道下穿地层岩性为粉质粘土和全风化花岗岩，平面图及区间隧道横断面见图 4.1-2 与图 4.1-3。

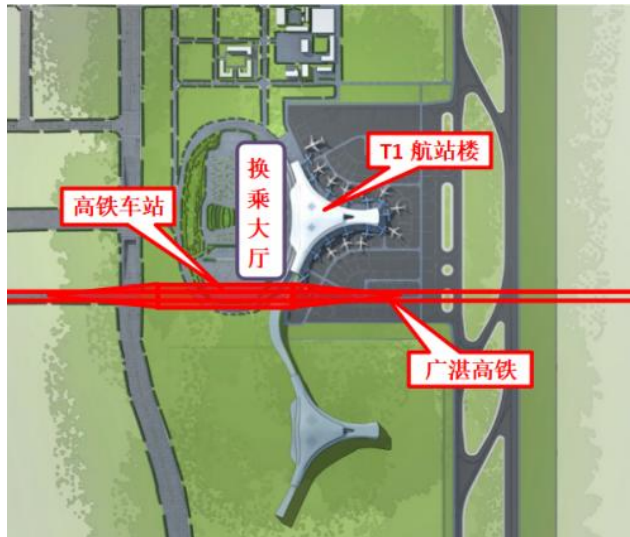


图 4.1-2 铁路与机场平面关系示意

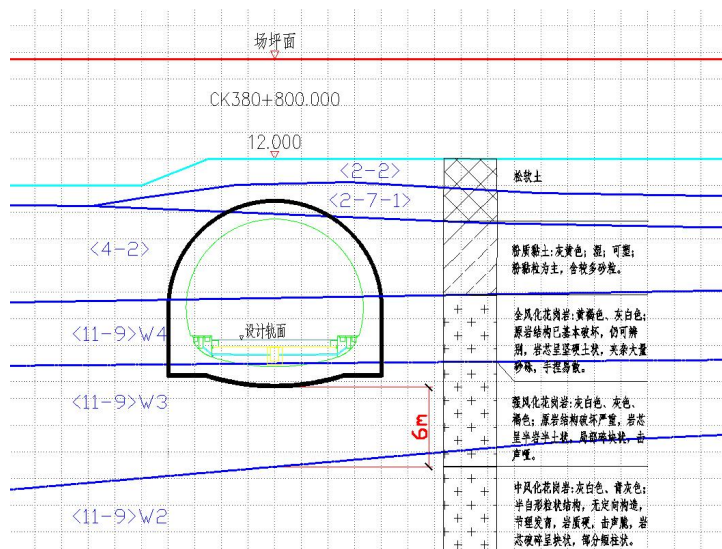


图 4.1-3 广湛高铁下穿湛江机场横断面示意

由于高铁隧道沉降微小，而隧道两侧跑道沉降相比较较大，可能会引起较大的差异沉降；同时高铁隧道埋深较浅，飞机起降可能会对高铁结构安全和高速行车安全造成影响。因此，前期论证过程中，采用数值仿真模拟的方法，开展了高速列车重复高频动荷载引起隧道周边土体的累积塑性变形，以及飞机起降和高速滑行振动扰动对隧道结构及行车安全性研究。

4.1.2 仿真模拟

(1) 车辆系统模型

列车荷载采用 CRH380 系列动车组，运行速度 350km/h。将列车简化为 10 自由度车辆系统模型。对于轮轨接触关系，应用 Hertz 非线性弹性接触理论，以确定轮轨之间的垂向作用力。

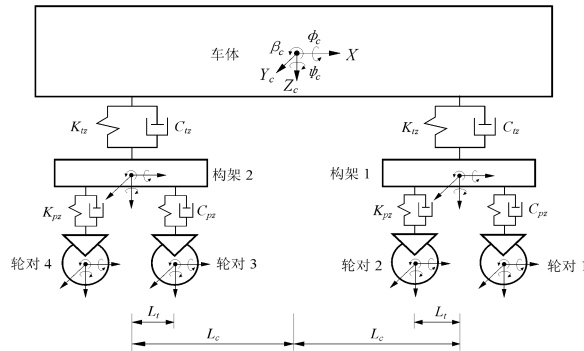


图 4.1-4 列车动力学模型

(2) 轨道模型

轨道模型采用 CRTS I 型双块式无砟轨道，结构组成自上而下分别为钢轨、扣件、双块式轨枕、道床板、土工布隔离层、隧道回填层等，结构如图 4.1-5 所示。

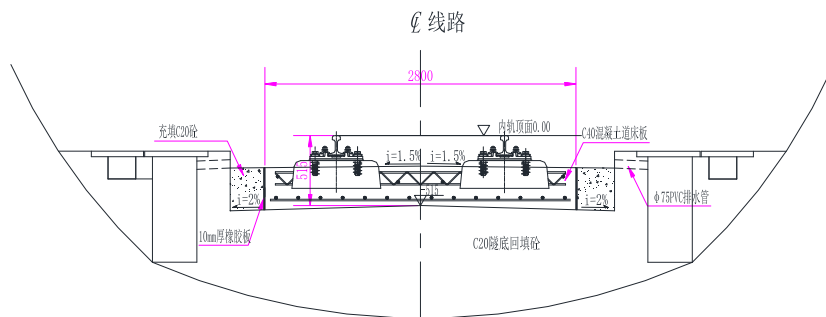


图 4.1-5 隧道地段 CRTS I 型双块式无砟轨道

模型考虑轨道不平顺对轮轨间动力相互作用带来的影响，在行车安全性和舒适性评估中采用了德国低干扰轨道谱。典型车轮轮轨力仿真时程曲线如图 4.1-6 所示。

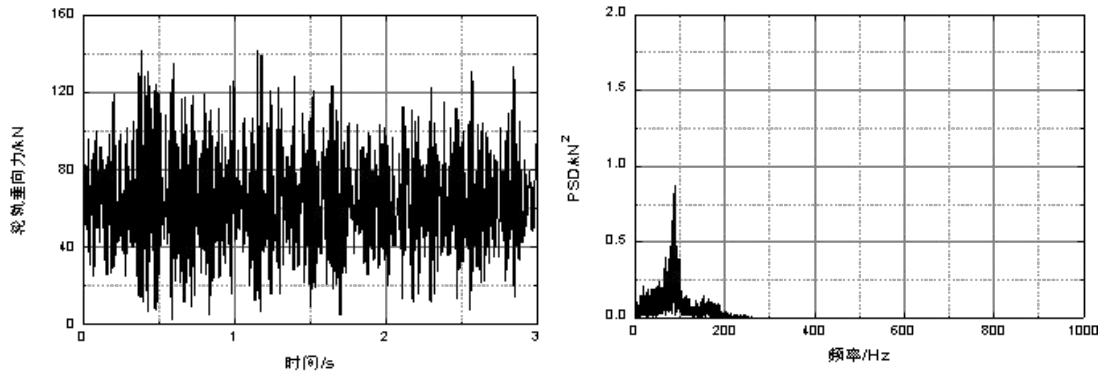


图 4.1-6 CRH380 动车组速度 350km/h 时的轮轨力及功率谱

隧道周边土体的动力附加沉降主要受轮轨垂向力的影响，从图中可以看出，最大轮轨垂向力为 130 kN，轮轨垂向力主要振动频率分布在 (80~100) Hz 之间。

(3) 隧道-土体-跑道模型

基于 Midas GTS 软件建立隧道-土体-跑道有限元模型，土体模型尺寸沿铁路运行方向为 120 m，沿跑道方向为 200 m，深度为 52 m，跑道宽度 60 m，跑道面结构按水泥混凝土和水泥稳定碎石基层分层，隧道拱顶至飞机跑道面为 10 m，隧道底部坐落于 W-3 强风化花岗岩层，隧道上方沿跑道方向开挖范围 82.9 m，隧道-土体-跑道有限元模型如图 4.1-7 所示。

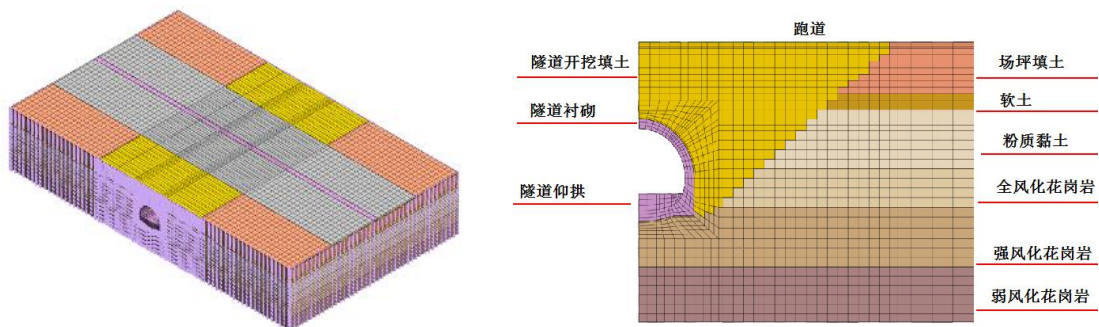
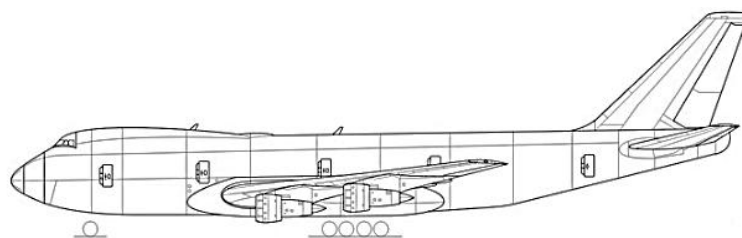


图 4.1-7 隧道-土体-跑道有限元模型

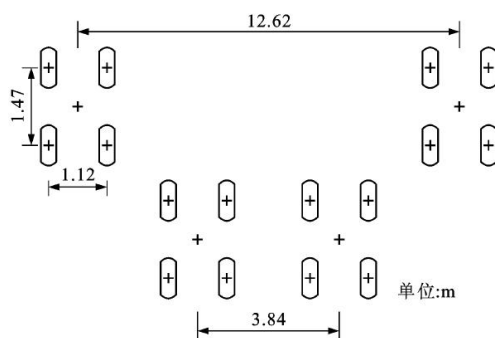
(4) 飞机滑行荷载垂向模型

考虑湛江机场为 4E 级机场，仿真采用波音 B747-400 飞机。

飞机在跑道上滑行、起飞、着陆等运行工况，根据多体动力学理论将飞机运行过程其简化等效为由刚体、力元、铰接及惯性坐标系等要素组合而成的飞机动力学仿真模型。飞机结构简图及机轮分布如图 4.1-8 所示。



(a) 外形结构



(b) 机轮分布

图 4.1-8 B747-400 外形结构

4.1.3 影响分析

通过建立上述模型，研究了设计速度 350 km/h 高速铁路以浅埋深隧道结构在机场跑道下通过，动态列车荷载引起的跑道长期沉降，以及飞机荷载对隧道和高速铁路行车安全影响。

(1) 铁路对跑道的的影响分析

为模拟列车通过隧道的过程，将车轨耦合模型计算得到的轮轨力荷载应用于隧道-土体-跑道模型中。按每天 50 列列车通过隧道，其中低速（80 km/h）列车占列车总数 2/3，高速（350 km/h）列车占 1/3 分析，依次计算两种列车速度下土体的动偏应力。隧

道偏应力随深度的变化曲线见图 4.1-9 和图 4.1-10。

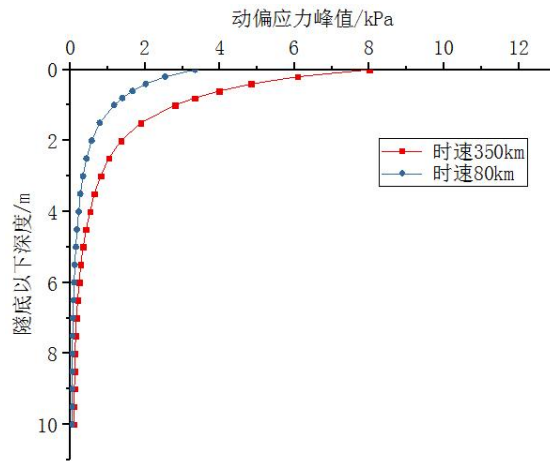


图 4.1-9 隧道中线处动偏应力曲线

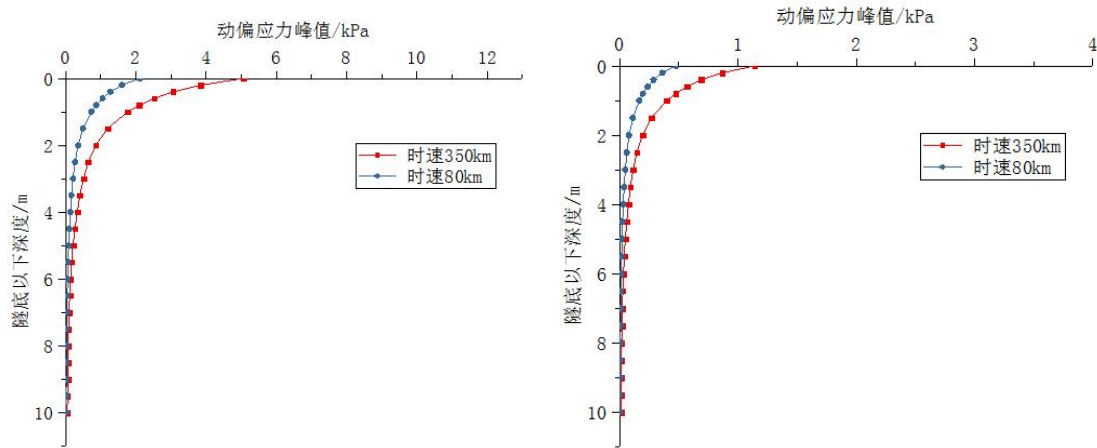


图 4.1-10 距隧道中线 10 m 处和 20 m 处动偏应力曲线

偏应力用来计算一定数量的列车荷载引起的土体累积塑性应变，然后通过积分土体应变来计算跑道的不均匀沉降，得到隧道穿越段横断面基底沉降曲线，如图 4.1-11 所示。

计算结果表明，在高速列车的长期荷载作用下，跑道上存在沉降槽。跑道方向 50 m 以内的最大沉降量分别为 23.31 mm（运营半年）、26.93 mm（一年）、32.20 mm（三年）、35.29 mm（五年）和 37.98 mm（十年）。总沉降量和 50 m 尺度范围内差异沉降均满足《民用机场岩土工程设计规范》（MH/T 5027—2013）

中对道槽区工后运行期沉降量和差异沉降要求，但局部范围内最大差异沉降接近 1.5‰的限值。

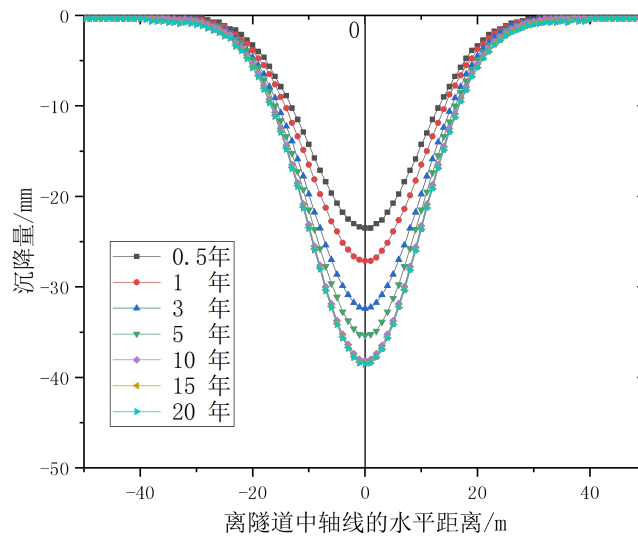


图 4.1-11 基底沉降曲线

(2) 飞机荷载对隧道和高速铁路运营的影响

飞机荷载带来的影响主要体现在两方面：一是飞机的起降荷载可能会引起隧道结构的大变形，影响其耐久性；二是飞机起降带来的轨道动力响应，可能会提高列车的车轮减载率。

① 飞机荷载引起的隧道变形

剔除高铁荷载，将飞机荷载施加在有限元模型上，分析飞机荷载引起的结构变形。隧道埋深 10 m，隧道上方回填土密实度按 $K=96\%$ 计算。有限元模型如图 4.1-12 所示。

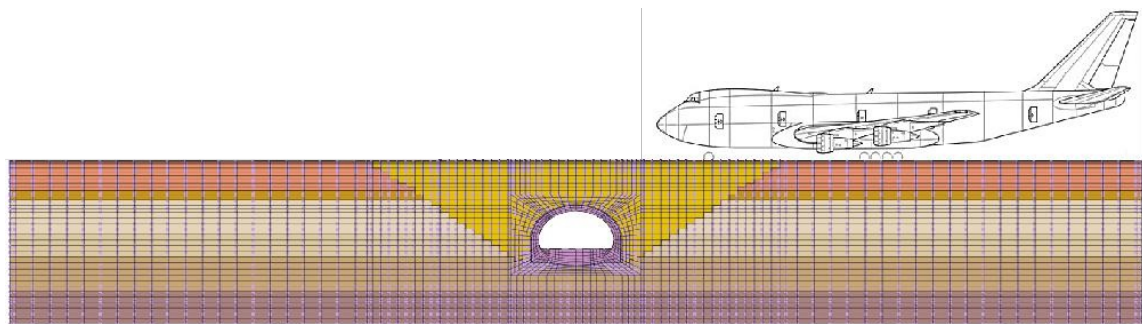


图 4.1-12 跑道-土体-隧道有限元分析模型

从飞机荷载作用下隧道最不利位置断面变形云图（图 4.1-13）和隧道整体变形图（图 4.1-14）可以看出，隧道底部位移较小，最大变形出现在顶部。

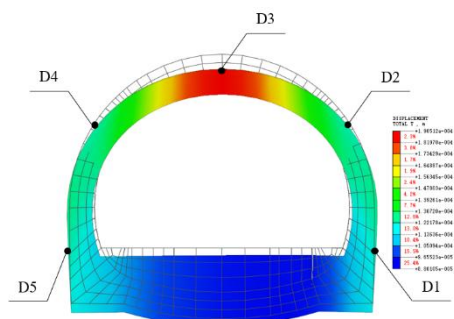


图 4.1-13 最不利位置断面变形

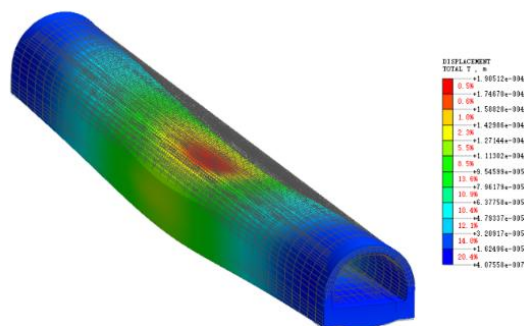


图 4.1-14 隧道整体变形

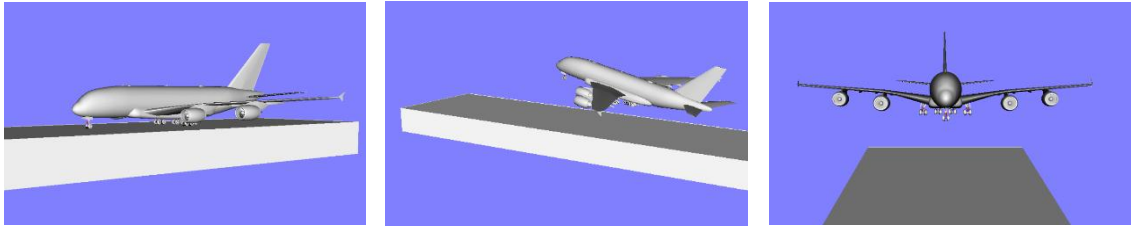
各测点竖向和侧向变形峰值见表 4.1-1。隧道最大竖向变形 0.192mm，最大水平变形 0.099mm。可见在飞机运行过程中，隧道变形较小，对跑道表面平整度和隧道结构耐久性的影响可以忽略不计。

表 4.1-1 隧道衬砌变形值统计

测点	D1	D2	D3	D4	D5
最大垂向变形/mm	0.154	0.156	0.192	0.178	0.179
最大水平向变形/mm	0.066	0.081	0.076	0.099	0.071

②飞机荷载引起的轨道动力响应

考虑飞机起降引起的隧道结构附加变形，以及对跑道面平顺性产生的影响，在保持模型参数不变的情况下，分别应用高速铁路荷载和飞机荷载，对钢轨在飞机动荷载作用下的动力响应进行分析，并对运行安全性进行评价。



a) 起飞滑行

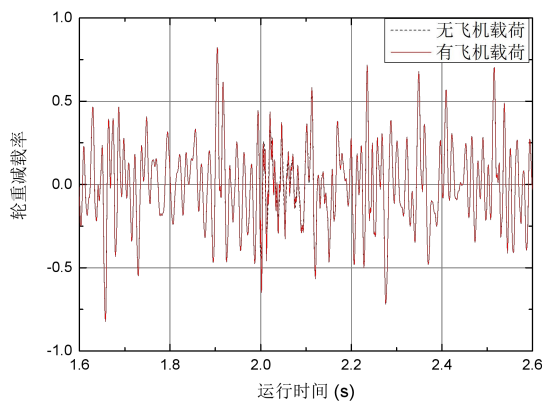
b) 开始起飞

c) 起飞完成

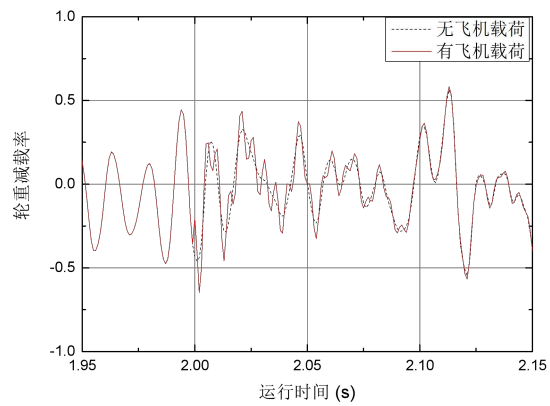
图 4.1-15 飞机在跑道上滑行、起飞、着陆

飞机荷载对列车运行的影响主要体现在轨道表面的动态不平顺。为满足安全要求，在轨道动力响应计算中选取最不利工况，即 B747 飞机荷载作用于隧道的同时，列车以 350km/h 速度到达，通过分析轮重减载率来评价列车运行的安全性。

CRH380 动车组首节车厢以 350km/h 速度通过隧道时，轮重减载率的时程曲线如图 4.1-16 所示。图中黑色虚线表示列车通过隧道时没有飞机滑行，红色实线表示有飞机通过。虽然飞机通过隧道时轨道的振动位移和速度发生了变化，但列车的垂向力变化不大。从图 4.1-16 (b) 可以看出，飞机荷载对轮重减载率的影响很小。



(a) 飞机通过全时段



(b) 局部时段

图 4.1-16 轮重减载率

通过对列车动载引起的跑道长期沉降、飞机荷载引起的隧道

变形、飞机运行对轮重减载率影响等方面的数值模拟分析，形成结论如下：

1) 在高速列车长期循环荷载作用下，跑道内存在沉降槽。设计年限内跑道总沉降和不均匀沉降均满足《民用机场岩土工程设计规范》的要求。2) 隧道埋深 10 m 时飞机起降滑行荷载作用下隧道结构安全可以保证。3) 隧道埋深 10 m 时飞机滑行振动对 350 km/h 高速列车运行安全性的影响微弱。

4.2 成自高铁下穿天府国际机场飞行区

成自高铁设计速度 350 km/h，斜向下穿越同步建设的天府机场飞行区及航站区，并在航站楼负二层设天府机场站，是国际上首条 350 km/h 不停站下穿机场的高速铁路，建设时尚无可供借鉴的工程案例。

4.2.1 项目概况

成自高铁天府机场段线路长度 7.84 km，航站楼下的天府机场站隧道约 1.6 km，其它区间隧道约 6.2 km。航站楼下隧道埋深约 25 m，隧道顶部为拱形混凝土结构；飞行区内以明挖隧道方式穿越远期规划的东二跑道，隧道埋深为 14 m，与跑道交叉角度约 55°。平面和横断面见图 4.2-1 和图 4.2-2。

机场建设施工中，为保证下穿隧道的安全性，对机场远期东二跑道段回填、夯填等施工提出要求：回填土石粒径不大于 200 mm，回填应分层回填（每层厚度不大于 30 cm）、两侧对称进行（两侧高差不大于 50 cm）。下穿东二跑道段压实度应达到机场要求的道基顶面以下 0 m~4 m 范围压实度不小于 96%，道基顶面 4 m 以下压实度不小于 95%的要求。回填时机械或机具不得碰撞

隧道结构及防水保护层，隧道拱顶外缘 4 m 以下范围内应采用人工或小型机具夯填，回填严禁强夯。

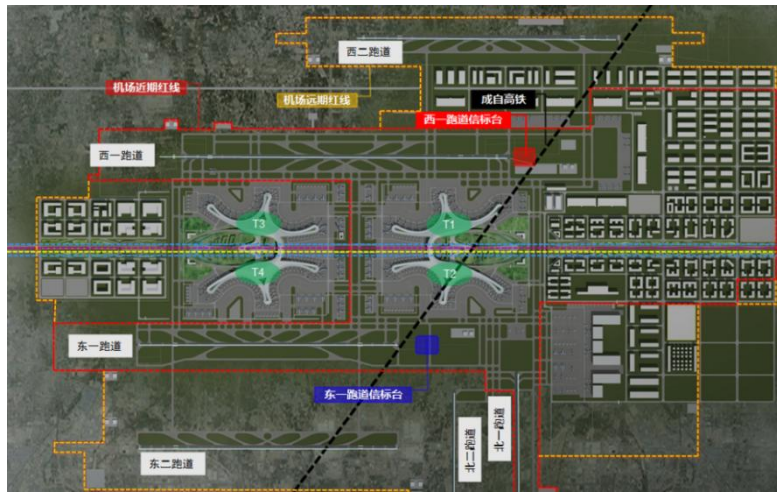


图 4.2-1 成自高铁天府机场段平面布置示意

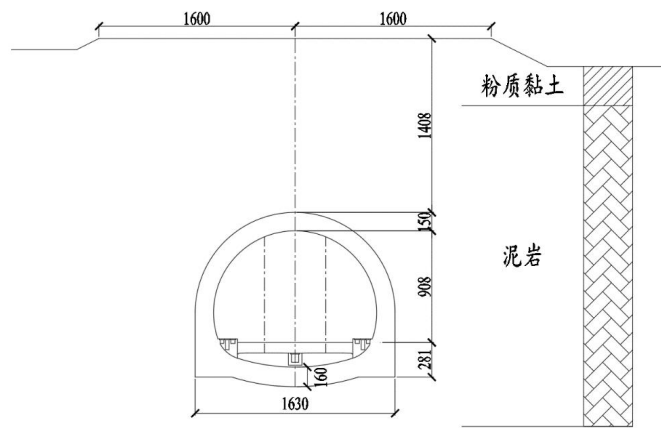


图 4.2-2 成自高铁天府机场段某横断面布置示意

4.2.2 仿真模拟

(1) 隧道-地层-跑道动力学模型

为更好模拟飞机荷载对隧道结构的影响，兼顾计算机性能，选取模型几何尺寸为 $120\text{m} \times 50\text{m} \times 284\text{m}$ ，衬砌、围岩、跑道均采用 C3D8R 单元类型模拟；材料参数上，围岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型，高铁隧道衬砌结构采用混凝土塑性损伤模型，衬砌结构采用 C30 混凝土，如图 4.2-3 所示。

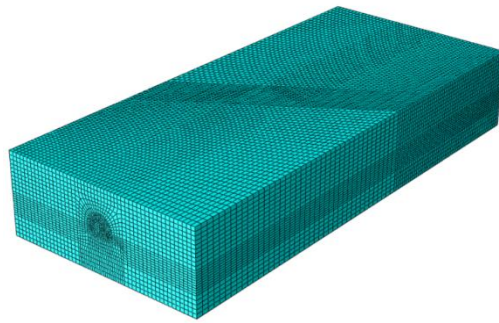


图 4.2-3 三维有限元动力模型

通过模态分析求解结构的振动特性，了解结构固有频率及各振型参与情况，为动力分析提供条件。根据振型分析结果，选择 $\omega_i = \omega_1 = 0.6753$ 和 $\omega_j = \omega_2 = 3.0336$ 为计算固有频率，阻尼比选用 $\xi_i = \xi_j = 0.05$ 。

表 4.2-1 模态计算结果

振型阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
圆频率 (rad/s)	4.243	5.104	6.127	7.951	9.315	11.009	13.354	15.193	17.056	19.061
周期(Hz)	0.675	0.812	0.975	1.265	1.483	1.752	2.125	2.418	2.715	3.034

(2) 飞机荷载作用机制

模拟过程中，为与有限元网格保持协调，将规范中飞机与道面接触采用的类椭圆形轮印等效转化为矩形轮印，并通过在模型的荷载移动方向上设置荷载移动带的方式，实现飞机荷载的移动以及飞机荷载自身随时间的变化，从而确定加载方式。



图 4.2-4 矩形轮印和组合型轮印

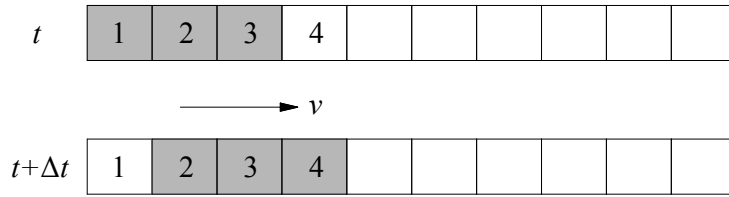


图 4.2-5 飞机荷载移动带

同时归纳了 B737-800、B747-400 飞机在满载情况下主起落架单轮动力载荷随时间的变化规律。在有限元分析软件中截取 0.75s 飞机荷载曲线作为输入荷载数据进行计算分析。B737-800 型飞机降落过程与 B747-400 型基本一致，但由于两者主起落架形式不同，故单轮动力荷载峰值有所差异。

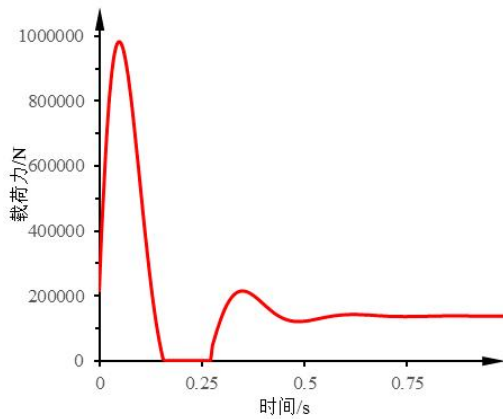


图 4.2-6 B737-800 主起落架单个轮胎
动力载荷

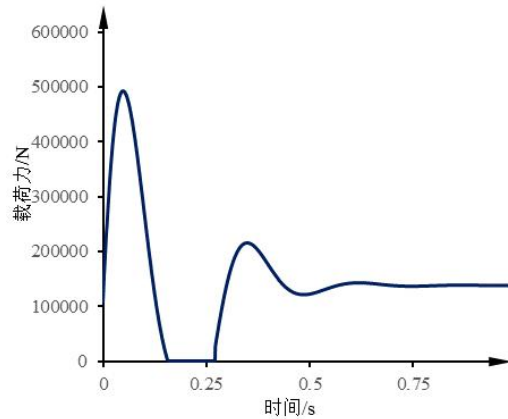


图 4.2-7 B747-400 主起落架单个轮胎
动力载荷

4.2.3 影响分析

(1) 飞机荷载作用下高铁隧道动力响应规律研究

基于飞机动力荷载作用下隧道-地层-跑道有限元模型，分析了 B737-800 以及 B747-400 两种机型不同因素对隧道动力响应特征的影响，包括飞机类型、着陆方式、着陆位置、载客数量等因素，选取衬砌的位移、动拉应力和动压应力作为动力响应分析指标。研究

设置多个工况，并选取五组衬砌断面进行监测，如图 4.2-8。

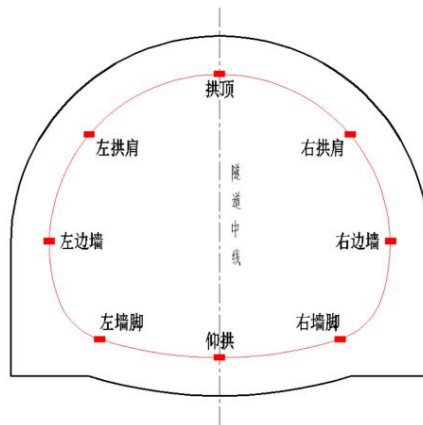


图 4.2-8 横断面监测点布置图

计算工况见表 4.2-2。仅列举 B737-800 飞机在距离交叉点 0m 处着陆时某断面特征点竖向位移时程，如图 4.2-9。

表 4.2-2 计算工况

分析工况	计算条件	备注
着陆位置	距离交叉点 0m、10m、20m	正常着陆、满载
着陆方式	正常着陆、重着陆、粗暴着陆	距离交叉点 0m，满载
载客数量	空载、半载、满载	距离交叉点 0m，正常着陆

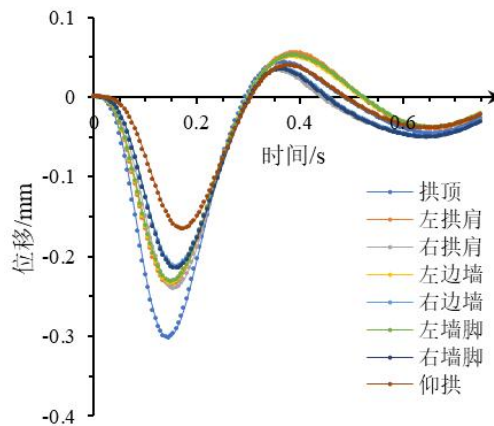


图 4.2-9 B737-800 距交叉点 0m 着陆某断面特征点竖向位移时程

此外，还设计了正交试验对各个因素的影响敏感度进行排序，得到各因素方差分析结果，见表 4.2-3 与表 4.2-4。

表 4.2-3 B737-800 型飞机荷载作用下各因素方差分析结果

指标 因素	位移		动拉应力		动压应力	
	F	显著性	F	显著性	F	显著性
着陆位置	0.952	-	1.302	-	1.934	-
着陆方式	5.074	显著	4.010	一般	4.228	一般
载客数量	1.904	-	2.632	-	1.760	-

表 4.2-4 B747-400 型飞机荷载作用下各因素方差分析结果

指标 因素	位移		动拉应力		动压应力	
	F	显著性	F	显著性	F	显著性
着陆位置	1.056	-	1.972	-	2.156	-
着陆方式	5.500	显著	4.624	显著	4.440	一般
载客数量	1.368	-	1.288	-	1.294	-

数值分析结果表明:

1) 在 14 m 埋深条件下, 各工况中, 动拉应力最大值为 437.79kPa, 动压应力最大值为 556.24 kPa, 均小于《铁路隧道设计规范》(TB10003-2016) 的限值, 即 C30 混凝土极限抗压强度 22.5MPa, 极限抗拉强度 2.2 MPa。通过数值模拟分析, 隧道可以在接地带区域下穿。但考虑到实际建设和运营中的不确定因素, 在下穿隧道规划选线时, 依然建议尽量避免直接下穿接地带。

2) 在 14 m 埋深条件下, 对于 B747-400 飞机, 着陆位置距交叉点距离 0 m、10 m、20 m 时, 位移幅值分别为 0.79 mm、0.69 mm、0.62 mm, 动拉应力幅值分别为 218.90 kPa、175.76 kPa、146.58 kPa, 动压应力幅值分别为 278.12 kPa、230.54 kPa、178.30 kPa。因此, 铁路隧道穿越跑道位置应尽量避免接地带, 确因实际情况无法避开时, 则应尽量加大埋深。

3) 由正交试验极差分析可知, 两种飞机荷载作用下各影响因素对位移及动拉应力的影响敏感度排序为: 着陆方式>载客数

量>着陆位置，对动压应力的影响敏感度排序为：着陆方式>着陆位置>载客数量。正交试验方差分析显示，着陆方式对于各个指标的影响较为显著。

(2) 循环飞机荷载作用下高铁隧道衬砌结构疲劳损伤分析

基于上述衬砌动力响应研究，通过 Fe-Safe 耐久性分析软件，计算分析长期循环飞机荷载作用下高铁隧道衬砌结构疲劳损伤效应，并对衬砌结构疲劳寿命进行预测，工况设置与表 4.2-2 一致。以下仅给出 B737-800 型飞机距交叉点距离 0 m 着陆的隧道结构疲劳寿命分布云图，见 4.2-10。

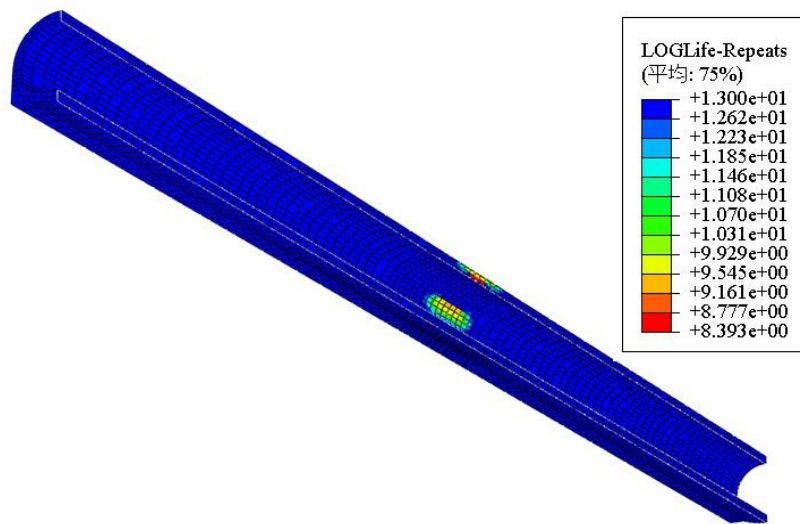


图 4.2-10 B737-800 距交叉点距离 0m 着陆的隧道结构疲劳寿命

表 4.2-5 不同着陆位置下隧道结构使用寿命年限

着陆位置（距交叉点距离）	B737-800			B747-400		
	0	10	20	0	10	20
疲劳寿命/ $\lg N$	8.393	8.418	8.446	7.814	8.034	8.182
使用寿命/年	1208	1278	1365	318	528	743

高铁隧道服役期间飞机着陆位置会以不同的比例发生。假设期间距交叉点 10 m 着陆次数占总降落次数比值为 a ，距交叉点 20 m 着陆次数占总降落次数比值为 b ，则交叉点处着陆比例为

(1-a-b)。按照相同的方法计算 B747-400 飞机荷载作用下隧道衬砌疲劳使用年限，汇总于表 4.2-6 和图 4.2-11 中。

表 4.2-6 B747-400 飞机不同着陆位置占比下隧道结构使用寿命年限

$a \backslash b$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	319	335	352	371	390	410	431	454	477	502	528
0.1	347	365	384	404	424	446	470	494	520	546	
0.2	377	397	418	439	462	486	511	538	565		
0.3	411	432	454	478	503	529	556	585			
0.4	447	470	495	520	547	576	606				
0.5	487	512	538	566	596	627					
0.6	530	557	586	616	648						
0.7	577	606	638	671							
0.8	628	660	694								
0.9	683	718									
1	743										

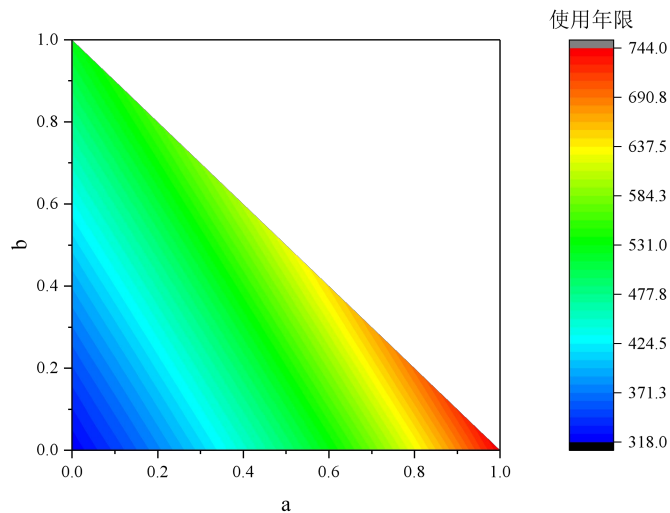


图 4.2-11 B747-400 飞机不同着陆位置占比下隧道衬砌使用年限云图

表 4.2-7 不同着陆方式下隧道结构使用寿命年限

着陆方式	B737-800			B747-400		
	正常着陆	重着陆	粗暴着陆	正常着陆	重着陆	粗暴着陆
疲劳寿命/ $\lg N$	8.393	8.126	7.858	7.814	7.257	6.700
使用寿命/年	1208	652	352	318	88	24

高铁隧道服役期间内，飞机着陆方式同样为一个随机过程，正常着陆、重着陆和粗暴着陆会以不同的比例发生。假设期间重

着陆次数占总降落次数比值为 a ，粗暴着陆次数占比为 b ，则正常着陆比例为 $(1-a-b)$ 。按照相同的方法计算 B747-400 荷载作用下隧道衬砌疲劳使用年限，汇总于表 4.2-8 和图 4.2-12 中。根据 2021 年民航统计公报，飞机重着陆比例约百万分之 8.8，粗暴着陆比例约百万分之 3.3，具体到省会机场或干线机场，比例最大的约万分之一以下，最小的约二十万分之一。根据统计比例，均能满足隧道结构使用寿命年限的要求。

表 4.2-8 B747-400 型飞机不同着陆方式占比下隧道结构使用寿命年限

$a \backslash b$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	318	280	246	217	191	168	148	130	114	101	88
0.1	246	217	191	168	148	130	114	100	88	78	
0.2	191	168	148	130	114	100	88	78	68		
0.3	148	130	114	100	88	78	68	60			
0.4	114	100	88	78	68	60	53				
0.5	88	78	68	60	53	47					
0.6	68	60	53	47	41						
0.7	53	47	41	36							
0.8	41	36	32								
0.9	32	28									
1	25										

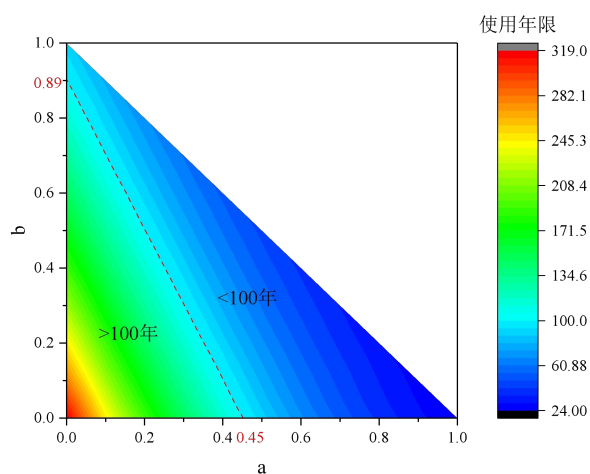


图 4.2-12 B747-400 型飞机不同着陆方式占比下隧道衬砌使用年限云图

表 4.2-9 不同载客数量下隧道结构使用寿命年限

载客数量	B737-800			B747-400		
	空载	半载	满载	空载	半载	满载
疲劳寿命/ $\lg N$	8.565	8.480	8.393	8.101	7.958	7.814
使用寿命/年	1794	1474	1208	616	443	318

飞机载客数量同样为一个随机过程，载客量会以不同的比例发生。假设空载次数占总降落次数比值为 a ，半载次数占总降落次数比值为 b ，则满载比例为 $(1-a-b)$ 。按相同方法计算 B747-400 荷载作用下隧道衬砌疲劳使用年限，汇总于表 4.2-10 和图 4.2-13 中。

表 4.2-10 B747-400 飞机不同载客数量占比下隧道结构使用寿命年限

$a \backslash b$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	319	329	340	352	364	376	388	401	415	429	443
0.1	340	352	364	376	388	401	415	429	443	458	
0.2	364	376	388	401	415	429	443	458	473		
0.3	388	401	415	429	443	458	473	489			
0.4	415	429	443	458	473	489	506				
0.5	443	458	473	489	506	523					
0.6	473	489	506	523	540						
0.7	506	523	540	558							
0.8	540	558	577								
0.9	577	597									
1	617										

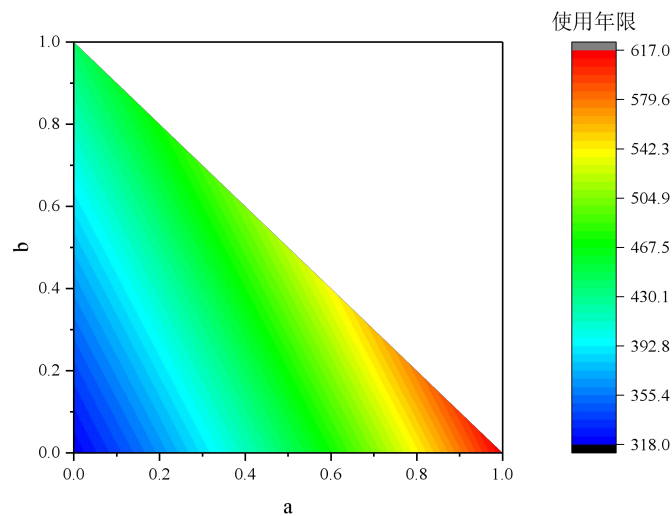


图 4.2-13 B747-400 飞机不同着陆方式占比下隧道衬砌使用年限云图

从以上图表分析可知：

1) 按 2021 年统计比例计算，B747-400 型飞机荷载作用下高铁隧道衬砌结构均能达到隧道设计使用年限，且衬砌最小疲劳寿命均出现在拱顶位置处；

2) 建议在后期运营中对隧道结构应力、裂缝等进行在线监测，及时发现并对衬砌裂缝进行补强和修复工作，防止裂缝贯通出现掉块进而威胁高铁运营安全；

3) 在实际施工中可以设置泡沫混凝土减振层，以减小隧道衬砌结构在飞机荷载作用下的动力响应，达到提高衬砌使用寿命的目的。

5. 施工工法特点和适用条件分析

基于前文案例分析，从地层适应性、环境要求适应性、线路适应性、适用长度、造价工期适应性、安全控制适应性等方面对不同施工工法的特点及适用性进行总结和分析。

5.1 施工工法适应性分析

机场飞行区环境条件的特殊性对地下穿越工程的施工提出了很多挑战，主要包括以下施工难点和限制因素：

（1）机场飞行区环境复杂，允许的施工扰动程度小。为保证机场正常运营，必须严格控制跑道（滑行道）的整体沉降和差异沉降。飞行区内布置有大量管线，穿越工程施工应避免对既有管线造成影响。同时，施工对航站楼等建（构）筑物的扰动程度应控制在不影响其正常运营范围。

（2）机场正常运营给施工空间和时间提出了一系列要求。当采用不停航施工时，应服从相应管理规定并接受对不停航施工的监督管理。

（3）在实施飞行区地下穿越工程时，必须在规划、设计和施工全过程中实施严格的风险辨识、评估和管控，确保施工安全和机场运行安全。

（4）常规监测手段的范围和频率受到限制。飞行区地下穿越工程的监测方案应按照不损伤、不占用跑道及滑行道，不产生电磁干扰、不影响机场安全运行等原则选择。

5.2 常用施工工法概述

地下穿越施工工法有明挖法、管幕箱涵法、盾构法和矿山法等。国内外部分飞行区地下穿越工程工法汇总整理如表 5.2-1 所示。

表 5.2-1 部分机场飞行区穿越工程工法汇总表

施工工法	工程名称
明挖法	成都双流机场大件路隧道下穿第二跑道
	浦东机场二、三号地下通道穿越东西向垂直联络道
	浦东机场 T1-S1、T2-S2 下穿越工程
	城际铁路下穿郑州机场二期扩建工程
顶管法	成自高铁下穿新建天府机场滑行道及跑道
	美国 BWI 机场暴雨管排水工程地下穿越运营跑道
管幕箱涵法	厦门高崎机场飞行区主跑道下顶管
	北京首都机场地下服务车道穿越 L 形滑行道
	英国希斯罗机场空侧服务车道地下穿越机位滑行道
	昆明地铁隧道下穿巫家坝机场跑道
	重庆交通 10 号线穿越江北机场跑道
	天津地铁 2 号线机场延伸线地下区间盾构隧道
	穗莞深城际轨道交通 9 号线下穿深圳宝安机场
	南京至高淳城际下穿禄口机场
	南京地铁机场线 S1 下穿南京禄口机场滑行道及机坪
	成都轨道交通 10 号线下穿双流机场停机坪及滑行道
盾构法	新塘至广州北城际铁路隧道下穿白云机场滑行道
	上海轨道交通 10 号线下穿虹桥机场
	上海轨道交通 2 号线下穿虹桥机场
	上海仙霞西路隧道下穿虹桥机场
	上海迎宾三路隧道下穿虹桥机场
浅埋暗挖法	德国斯图加特机场
矿山法	美国华盛顿杜勒斯国际机场航站楼间地下行人通道
	美国埃迪森机场收费公路隧道下穿机场跑道
	贵阳枢纽龙洞堡机场隧道
钻爆暗挖	湖北恩施下穿许家坪机场隧道
	重庆轨道交通轻轨三号线下穿江北机场
新奥法	美国杜勒斯国际机场旅客捷运系统

5.3 施工工法比选

在飞行区地下穿越时，施工方案必须首先保证安全性和适应性，再综合考虑其对施工工期、造价等方面的影响，对施工工法

进行比选分析如下：

(1) 对地层的适应性方面，明挖法能适应软土地区各类地层，管幕法、盾构法能够适应土质地层，矿山法等软土地区虽然已有应用，但是对于自立性差的淤泥质土层并不适应。

(2) 飞行区环境控制方面，盾构法施工技术成熟，沉降控制能力最强，在合适埋深下，可适用于各种软岩环境条件施工；矿山法等尚很难应用于沉降要求严格的区域；明挖法施工后期存在结构处道面与周边道面产生不均匀沉降的问题，因此需采取相应的地基过渡处理措施。

(3) 线路的适应性方面，盾构对线路断面、长度、平面曲率、纵向坡度都有要求，其线路适应范围窄，适合埋深一般 10 m~30 m；明挖法对线路的适应性强，通常应用于浅埋地道工程；管幕法断面适应能力强，但适应线路长度较短，且以直线或大曲率半径线路为宜；矿山法等可适应于各类线路条件，但埋深不宜过深。

(4) 工期和造价适应性方面，盾构法设备复杂，费用高，但在线路较长时工期和造价较优；管幕法在 4 种工法中工期、造价均最高；矿山法等软土地区施工其辅助措施费用高，也并不经济。

(5) 安全控制方面，明挖法工程本身施工安全性较高，但不停航施工情况下施工管理复杂；盾构法与其它工法相比，施工技术成熟，安全性高；管幕法有较强的安全控制措施，但是其沉降控制能力差，可能造成较大沉降；矿山法等很难应用于机场跑道区域等安全控制要求高的环境。各种工法适用性及在机场特定

环境下的比较分析汇总见表 5.3-1。

表 5.3-1 施工工法比选

工法	地层适应性	环境要求适应性	线路适应性	适用长度	造价、工期适应性	安全控制适应性
明挖法	各种地质条件	不均匀沉降影响	线路适应性强	各种长度	埋深较浅时较适宜	地面安全施工管理要求严格
管幕法	土质地层	有一定环境影响	对线路坡度、曲率有要求	短	造价高、工期长	需采取严格管理措施
盾构法	土质地层	环境影响小	对线路断面、坡度、曲率均有要求	长	线路长时较适宜	技术成熟安全可靠
矿山法	主要为硬土地层	环境影响较大	线路适应性强	各种长度	造价较高、工期长	安全风险较大

6. 总结与建议

通过从施工方法、沉降控制、飞机列车动力相互影响等方面对相关案例的介绍和综合分析，对铁路、轨道交通下穿机场飞行区的规划、设计、施工、运营等方面提出相关建议。

6.1 规划阶段

有关部门和单位应当从方便旅客交通的角度，推进空铁联运的顶层设计，满足空铁联运的发展需求。

6.2 设计阶段

需要对空铁联运设计方案如机场方案、线路方案等统筹考虑，降低下穿对机场和铁路系统的影响。同时，考虑机场运行与铁路运行的相互影响，验证方案的可行性，建议开展以下几个方面的工作：

（1）下穿隧道两侧产生的累积差异沉降分析

通过仿真计算、试验等方式，对铁路下穿隧道两侧跑道产生的累积差异沉降进行分析研究，依据相关规范和标准，对沉降指标做出评价。

（2）飞机荷载作用下结构安全性及列车安全性

通过仿真计算、试验测试等方式，基于有限元、动力学等方法，对飞机荷载作用下下穿隧道结构安全性及列车安全性展开分析研究，验证结构安全性及列车动力学性能。

（3）飞机循环荷载作用下隧道衬砌结构疲劳损伤分析

通过仿真计算，模拟飞机循环荷载下隧道衬砌结构的疲劳损伤并进行分析评价，保证长期运营的安全性。

(4) 下穿隧道车致振动对飞机运行的影响分析。

6.3 施工阶段

(1) 施工方案

需要根据线路和机场设计方案，选用合适的施工方案，如明挖法、盾构法、管幕法等。对于停航施工项目，可以考虑明挖法；不停航施工项目，可以选择管幕法或盾构法；距离与埋深满足要求的，优先选择盾构穿越。

(2) 施工组织及管理

机场飞行区、航站区与铁路、轨道交通交叉区域属于交叉系统的薄弱区域，施工中如果处理不当，容易在运行中出现安全质量问题，在施工中要重点关注。要充分考虑安全质量隐患，并采取必要的防治措施。

施工前，应统筹规划与协调施工顺序、工期，快速均衡推进，防止施工停滞给周边环境带来影响。

施工中，应确保必要的投入。明挖施工中，隧道基坑回填要严格按照设计施工标准组织实施，预留充分的土体沉降周期，并在土体和道面中采取必要的补强措施，避免后期土体沉降引起道面病害；当隧道穿越既有跑道、滑行道和站坪时，穿越前要分析穿越土质情况，可在穿越前采用注浆等方式对穿越土体进行补强，同时还需考虑预留后期注浆管，为运行中可能出现的病害预留后期处理条件。

施工管理方面，飞行区地下穿越工程的实施涉及地下工程施

工并可能影响机场运行，应制定明确的安全管理体系，确保机场运行安全和工程实施安全。同时应实施安全风险管理体系，包括安全风险的辨识、评估和控制，严格管控风险。

(3) 施工监测

施工过程中，需要对地表沉降、结构应力等进行监测，根据监测反馈的情况对施工方案及时调整和纠正，对局部结构进行加强，沉降监测优先采用全站仪无棱镜等远程自动化监测技术，呈网格状进行纵向和横向监测断面测点布置。

6.4 运营阶段

铁路、城市轨道交通投入运营后，需要对隧道、土体、机场道面等进行持续监测（建议不少于2年），监测运行阶段的结构变化，监测重点内容需包括道面沉降、结构安全性、地下水位、隧道周边土体变化等方面，及时发现和排查问题，并提出相应解决措施，确保机场和铁路运行安全。

6.5 技术分析

如果跑道、滑行道或站坪出现不同形式的基础沉降，导致道面板损坏，可能存在以下几方面原因：一是施工质量问题，施工过程中未严格按照相关规范要求进行。二是地下水位下降，轨道交通穿越既有跑道、滑行道或站坪区域时，破坏了原有地下水位平衡，在隧道壁形成了新的排水通路，导致地下水位下降。三是振动破坏了土体结构，轨道交通运营会导致隧道结构与土地之间产生一定的振动，随着时间的推移对隧道周边的土体结构造成破坏，逐渐反射至路床，导致基础沉降，进而造成道面损坏。关于相关的沉降问题可以重点从以上几方面考虑并进一步深入研究。

附录 A 其他系统下穿机场飞行区

A-1 首都机场 T2~T3 捷运联络线隧道下穿机场跑道

首都机场旅客捷运系统工程 T3-T2 捷运联络线及汽车通道工程，在不停航施工条件下，采用管幕法施工。一般来说，大断面平顶直墙浅埋暗挖法在隧道开挖过程中沉降均较大，可能达到 10 cm ~ 30 cm，很难满足机场跑道运行条件。该工程实现了超浅埋大断面隧道暗挖过程中跑道沉降始终控制在容许范围内，确保了工程施工安全和机场运行安全，取得了巨大的经济和社会效益。

(1) 工程概况

首都机场 T2 与 T3 航站楼的联络线隧道工程平面如图 A-1-1 所示，隧道施工总长 754 m，与主跑道垂直。

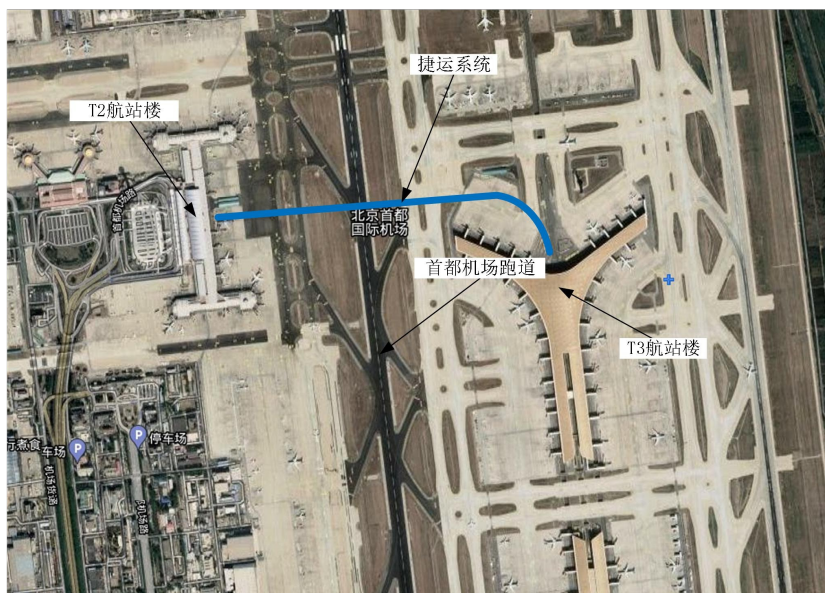


图 A-1-1 汽车（捷运）隧道平面位置图

其中，明挖段施工 522 m，暗挖段施工 232 m。明挖段包括

中跑道西侧 373 m 箱涵、123 m 的 U 形槽和主跑道东侧 26 m 箱涵；暗挖段 232 m 位于中跑道下。

暗挖段结构形式为单层双跨矩形框架结构，断面宽度 23.9 m，高度 9.1 m，埋深仅 5.6 m。隧道主体部分垂直下穿使用中的跑道，隧道四周采用 60 根 $\phi 970$ mm 钢管幕形成强有力的超前支护，管幕设计长度 232 m，新建隧道与既有机场跑道的平面及剖面位置关系见图 A-1-2。

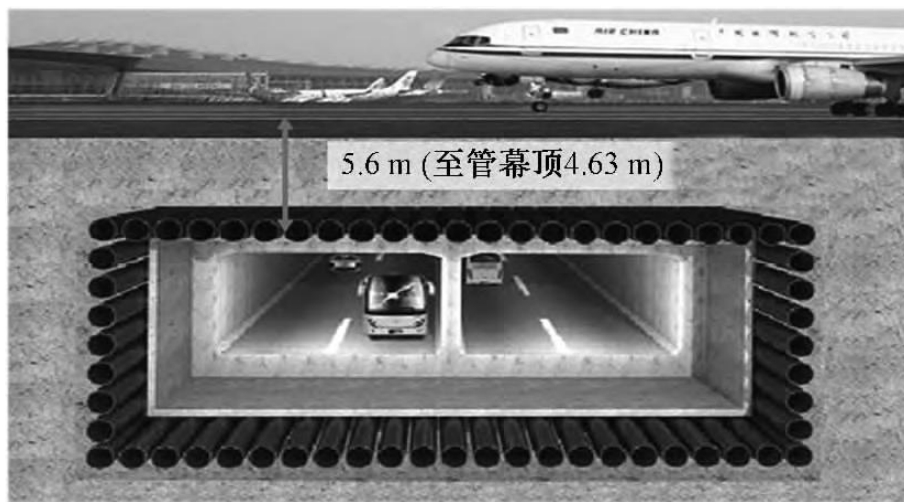


图 A-1-2 汽车（捷运）隧道与跑道的剖面位置关系

地层表层为人工填土，其下为一般第四纪冲洪积成因的黏性土、粉土和砂类土。该项目存在以下工程特点：

1) 不停航施工。该工程位于 T2 航站楼与 T3 航站楼之间，地处敏感的机场管控区域，为 24 h 不停航施工，且要从处于运行状态的跑道下方穿过。

2) 管幕顶进施工精度要求高。管幕顶进长度达 232 m，创造了国内外管幕顶管最长纪录，在微型盾构机出洞端的精度要求为：中心偏差为垂直方向 10 mm，水平方向 15 mm。

3) 超浅埋暗挖法施工风险极高。多导洞开挖主要风险为多

次受力转换，开挖工况多，步序复杂，洞周围岩的受力特性不断变化，应力场不断重分布，松弛区随工况变化而变化，位移多次重复叠加且具有不确定性，难以准确用数值模拟预控。施工实测及监测反馈变得极其重要，施工控制难度大、风险高。

(2) 技术方案

项目结合“浅埋暗挖法”和“管幕”的优点，即采用“管幕保护下的浅埋暗挖”施工方案。



图 A-1-3 首都机场 T3E-T2 汽车（捷运）隧道下穿中跑道施工

1) 管幕超前支护

管幕顶进技术是利用微型盾构机（泥水平衡掘进机），通过掘进机刀盘按预先设定的压力紧贴在被切削的土体断面，在后方顶力作用下一边旋转切削土体，一边向前推进维持土体平衡。掘进时带动管幕钢管埋入土体形成预先设计的“口”形管幕形状，起到整体加固土体和土体超前支护作用。

2) 土体超前预加固注浆

采用土体超前注浆加固，每个循环为 20 m 进行深孔注浆加

固。开挖时，保留 2 m 不开挖，作为下步注浆的止浆墙；施工配料为 WSS 浆液，采用隔孔跳注方式注浆，压力控制在 (0.3~0.5) MPa，根据土体情况现场设定，适合黏性土、砂质土以及地下水丰富的砂砾层等多种土层。

3) 多导洞开挖支护

采用多导洞浅埋暗挖开挖施工，严格控制施工步骤，以减少群洞效应的影响，并在过程中进行初支和二衬受力体系转换，逐步形成稳定结构，实现隧道主体建造。

(3) 监测结果

工程暗挖段 2011 年 5 月开工，由于不停航施工且沉降控制严格，施工过程中施工方案经专家多次论证、调整，克服重重困难，于 2013 年 4 月主体结构箱涵 232 m 贯通。

对跑道沉降进行远程监测，开挖支护期间跑道累计最大沉降 18 mm；在衬砌结构施工期间跑道累计最大沉降 24 mm；叠加衬砌施工后的结构变形和土体固结，累计沉降不超过 30 mm，平整度小于 1‰，满足了跑道的沉降控制要求。

A-2 地下通道下穿首都机场停机坪

(1) 工程概况

为解决机场货运与飞机滑行平交横穿的相互影响，借鉴管幕法顶进箱涵的施工经验和技術，首都机场下穿西区 L 滑行道工程采用管棚-箱涵顶进工法施工，是当前首例在机场滑行道下不停航箱涵顶进施工规模最大的顶进隧道。

顶进箱涵与 L 滑行道轴线的平面夹角约 45°，其平面布置

情况如图 A-2-1 所示。顶进箱涵和超前管棚长度均为 148.3 m，管棚采用 $\phi 325 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 螺旋钢管，大管棚下顶进箱涵断面尺寸如图 A-2-2 所示。顶涵过程中，箱涵顶部覆盖土层厚度沿箱涵纵向为 3.5 m ~ 6.2 m，穿越 L 滑行道时覆土厚为 4.5 m ~ 5.5 m。该区土层主要有黄褐色人工填土、亚黏土、黏土、粉砂及细砂等。

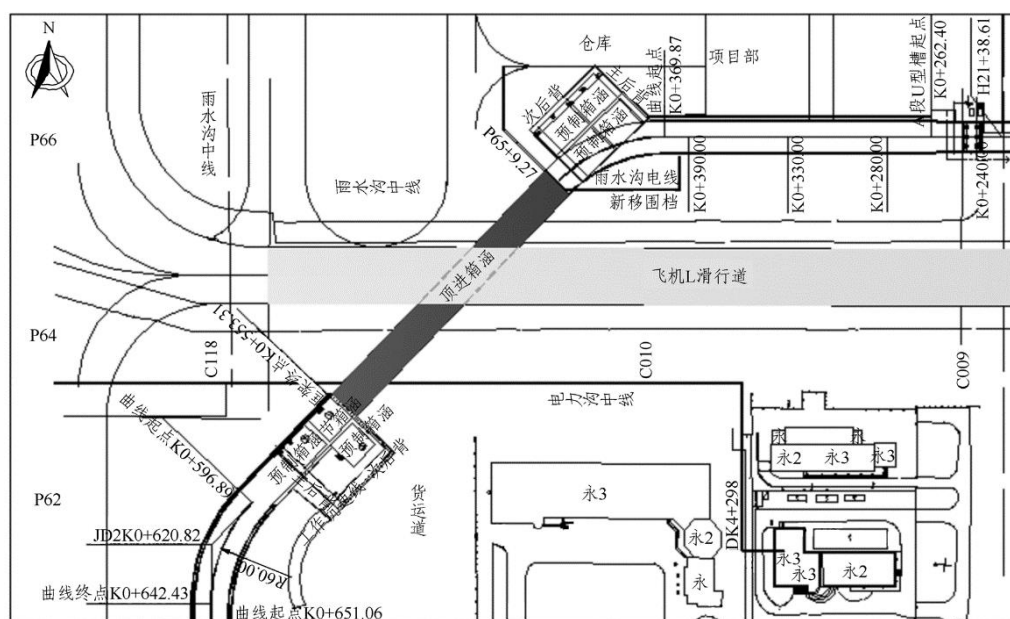


图 A-2-1 箱涵顶进穿越滑行道平面布置示意图

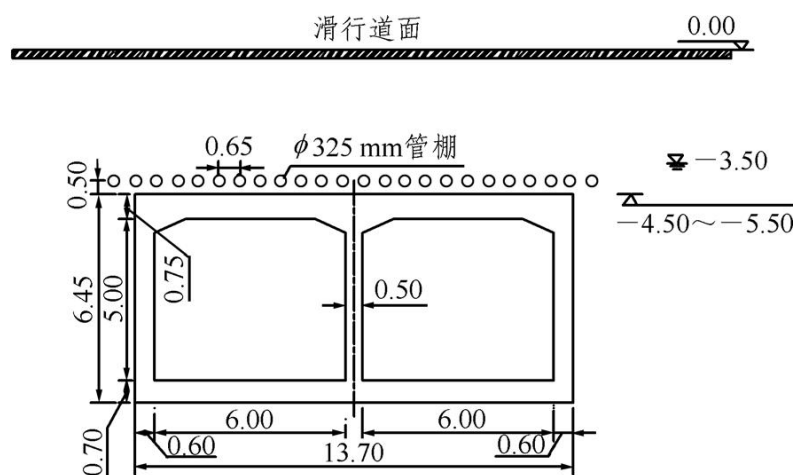


图 A-2-2 大管棚下顶进箱涵断面尺寸 (单位: m)

(2) 技术方案

工程采用长管棚支护“吃土顶进”施工工法顶进箱涵。工程超前管棚一次钻进长度和箱涵总顶进长度达 148.3 m，属超长管棚 - 箱涵顶进施工。箱涵顶进穿越滑行道纵剖面布置见图 A-2-3。工程采用南北工作坑双向分节顶进合龙施工方案。

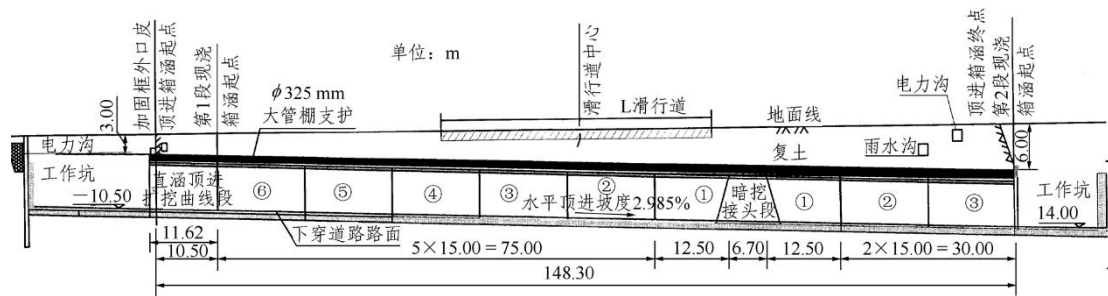


图 A-2-3 箱涵顶进穿越滑行道纵剖面布置图

1) 超长管棚施工

管棚施工采用水平导向钻孔并回拖棚管的方法以保证施工精度。在回拖拉管的同时进行管外环状注浆，以充填管皮与孔壁之间的间隙，为提高管棚的承载能力，在搭设成的棚管中高压注入 C30 强度等级混凝土以提高其刚度。

2) 箱涵顶进降阻

工程特别选用了一种黏性保持时间长、遇水不分解、不向土中渗透且不干缩结硬的化学泥浆，采取有压注浆法，通过纵横布设连通的压浆管、阀系统注入涵周箱土界面作为润滑剂，使箱涵与土体之间摩阻力显著减小，同时亦通过调节注浆量及保持压力来稳定土体，控制滑行道道面沉降。实践证明，该方法降阻效率达 60%~80%，为箱涵顺利顶进提供了重要条件。

3) 小导洞施工及下滑道技术

为避免箱涵顶进扎头问题，箱涵顶进前，在涵底通长开挖三个平行小导洞，在洞底修筑滑道基础，铺设工字钢滑轨，如图 A-2-4 所示。顶涵时使箱涵顺滑道面前进，边顶边拆除小导洞拱架及支护。

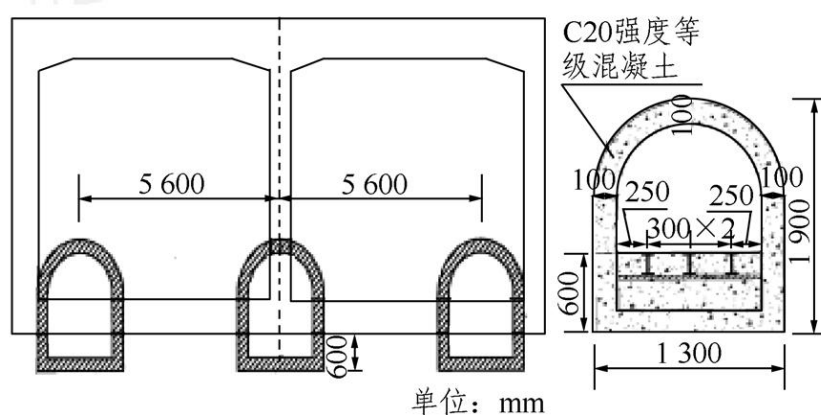


图 A-2-4 箱涵底部超前小导洞开挖布置图

4) 施工监测

为确保滑行道在施工期和工后安全正常使用，在施工过程中开展变形监测工作。监测点的布置沿箱涵顶进方向，在箱涵宽度及两侧各 5 m 范围内布置相关地面沉降监测点。

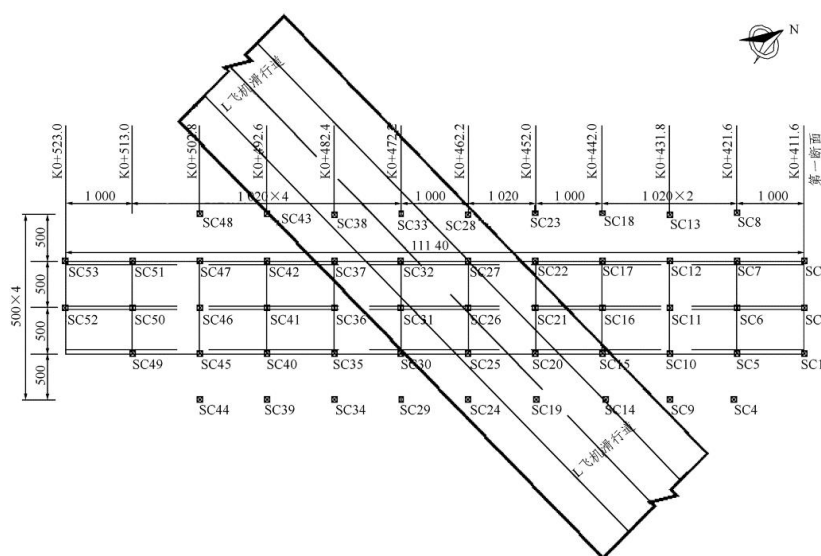


图 A-2-5 沉降监测点布置及测点编号 (单位: cm)

(3) 监测结果

选取位于滑行道下的典型监测断面 K0+462.2，该断面各测点沉降变化时程曲线如图 A-2-6 所示。

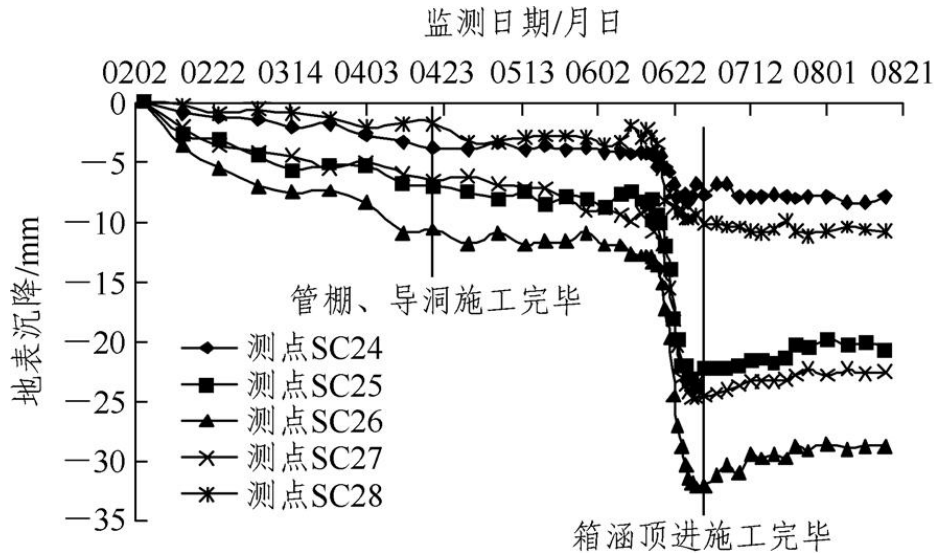


图 A-2-6 K0+462.2 断面各测点沉降变化时程曲线 (2006 年)

最大沉降发生在测点 SC26，即位于箱涵中心处，最大稳定沉降约为 28.0 mm。

A-3 地下行李转运系统穿越希思罗机场

伦敦希思罗机场航站楼地下行李转运系统通过一个长 1500 m 的隧道及竖井系统，在机场 1 号进出站口和 4 号进出站口间长距离转运旅客行李。希思罗地质条件稳定，土层主要是由下部的伦敦粘土和其上的 5 m 厚度左右的 Taplow Terrace 砂砾层组成。地下水位于地面以下 2.5 m。隧道采用英国 Dosco 隧道全断面掘进机来进行推进，该系统配备了公路隧道掘进机和传统的分段支护及材料传送设备。隧道直径 4.5 m，衬砌管片采用 30 kg/m^3 钢纤维混凝土，宽度 1 m、厚 150 mm。在隧道施工中，通过对地面和地下标志的精确测量和对凿孔延展及倾斜角的观测来监测

沉陷。穿越机场段施工沉降控制情况为：转弯处最大沉降 16 mm；
直线掘进的沉降量不超过 10 mm。



图 A-3-1 希思罗机场行李转运隧道

附录 B 参考文献

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见[EB/OL]. (2020-04-21) [2021-12-23]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/21/content_5504605.htm.

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24) [2021-12-23]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.

[3] 中华人民共和国交通运输部 交通运输部办公厅 公安部办公厅 中国民用航空局综合司 中国国家铁路集团有限公司办公厅关于开展空铁(轨)联运旅客换乘流程优化工作的通知[EB/OL]. (2021-1-16) [2021-12-23]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202111/t20211116_3626407.html?ivk_sa=1024320u.

[4] 张恒新, 张孟喜, 王晓鸿, 李磊. 双线盾构隧道下穿机场跑道沉降特征分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(12):114-119. DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.201912230008.

[5] 孙璟, 廖少明, 米思兴, 邵伟. 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(03):10-14+60. DOI:10.13547/j.cnki.dxgcysd.2010.03.005.

[6] 周松, 荣建, 陈立生, 王洪新. 大直径泥水盾构下穿机场的施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(04):806-813.

[7] 李志成. TBM 下穿江北机场区间隧道施工的技术分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2020, 31(02):15-19.

[8] 郑鹏飞, 郭治岳, 陈文字, 陈行, 于超, 徐海南. 泥岩和砂卵石交互地层盾构施工参数优化研究[J]. 四川建筑, 2021, 41(01):119-122.

- [9] 阮松.地铁隧道下穿不停航机场方案研究[J].铁道勘察, 2020, 46(5):62-67.
- [10] 陈强.盾构软硬不均地层下穿机场滑行道施工技术研究[J].路基工程, 2019(02):175-178.DOI:10.13379/j.issn.1003-8825.2019.02.36.
- [11] 陈铁.盾构穿越机场停机坪控制技术[J].城市建设理论研究, 2014(10). DOI:10.3969/j.issn.2095-2104.2014.10.1395.
- [12] 宋博.盾构隧道下穿机场飞行区施工控制技术[J].四川建材, 2017, 43(03):148-150.
- [13] 袁新朋.城际铁路隧道下穿机场飞行区沉降控制研究[J].高速铁路技术, 2015, 6(04):26-30+61.
- [14] 周玉标,黄武军.盾构在岩溶地区下穿运营中的机场飞行区施工技术[J].建筑机械化, 2021, 42(06):16-18.DOI:10.13311/j.cnki.comme.2021.06.003.
- [15] 蒋小锐.城际铁路隧道下穿机场滑行道方案探讨[J].铁道标准设计, 2017, 61(01):71-75.DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.2017.01.015.
- [16] 李兴高,袁大军,周江天,于娇,孙国著.超长管幕在浅埋暗挖隧道下穿机场跑道施工中的应用[J].铁道建筑, 2014(02):67-69.
- [17] 逯兴邦,王元东,乔亚飞,丁文其,斯碧峰,凌昌荣.不停航条件下机场飞行区地下穿越施工工法研究[J].现代隧道技术, 2018, 55(S2):375-385.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2018.S2.050.
- [18] 谭信荣,朱亦墨,张恒.飞机滑行荷载对下穿高铁的动力影响[J].地下空间与工程学报, 2020, 16(S2):957-963.
- [19] 杨程.天府机场超大型明挖深基坑隧道群施工组织技术[J].智慧城市, 2021, 7(07):17-18.DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2021.07.009
- [20] 王宇航,宋子洋,姚光磊,赵才友,卢俊.飞机起降滑行对下穿高速铁路轨道结构的影响[J].铁道建筑, 2021, 61(07):117-121+134.

- [21] 陈以庭, 机场综合交通枢纽塔台的车致振动响应研究[D].2020, 成都: 西南交通大学.
- [22] 何杰. 综合交通枢纽航站楼结构车致振动[D].西南交通大学, 2019.DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2019.002591.
- [23] 杨波. 地表动力荷载作用下超浅埋隧道响应分析[D].石家庄铁道大学, 2018.
- [24] JGJ/T 170-2009, 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S].
- [25] GB 10070-1988, 城市区域环境振动标准[S].
- [26] GB 50868-2013, 建筑工程容许振动标准[S].
- [27] GB/T 13441.1-2007, 机械振动与冲击《人体暴露于全身振动的的评价》第1部分: 一般要求[S].
- [28] GB/T 13441.2-2008, 机械振动与冲击《人体暴露于全身振动的的评价》第2部分: 建筑物内的振动(1 Hz~80 Hz) [S].

抄送：各监管局，各机场建设指挥部，各地区质监站，各设计、监理、
施工、咨询、检测单位。

民航局机场司

2022年10月8日印发
