DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250599

飞机荷载下盾构隧道下穿机场管片及跑道内力响应分析

王　琳[1],李志坚[1],徐文田[2],曹铁志[1]
(1.民航机场规划设计研究总院有限公司,广东 广州 510000; 2.广州地铁设计研究院股份有限公司,广东 广州 510000)

摘　要: 依托广州白云机场下穿隧道工程,分析了下穿隧道施工对飞机跑道的影响以及上方飞机荷载对下穿隧道运行的影响。通过三维有限元数值模拟,分析了最不利情况下即飞机在隧道正上方降落滑行过程中的地层、管片最大位移和管片最大应力结果。研究发现:上覆土层厚度较小的情况下,隧道管片所受拉应力和跑道沉降受飞机荷载影响较大;飞机降落地点越接近隧道正上方,飞机荷载对下穿通道的影响越大,随着降落位置与通道轴线距离的增大,管片拉应力、地层和跑道沉降先增大后减小,降落位置位于左线隧道正上方时达到最大值。

关键词: 机场跑道;隧道;盾构开挖;下穿机场;数值分析;地表沉降
中图分类号: U45　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0248-05

Analysis on Internal Force Response of Shield Tunneling through Airport Segment and Runway under Aircraft Loading

WANG Lin[1], LI Zhijian[1], XU Wentian[2], CAO Tiezhi[1]
(1. Civil Aviation Airport Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Relying on the Guangzhou Baiyun Airport Underpass Tunnel Project, the impact of the underpass tunnel construction on the aircraft runway and the impact of aircraft loading above on the operation of the underpass tunnel are analyzed. Three-dimensional finite element simulation is used to analyze the results of the strata, the maximum displacement of the segments and the maximum stress of the segments during the most unfavorable situation, namely the landing and taxiing process of the aircraft directly above the tunnel. The results show that when the thickness of the overburden soil layer is relatively small, the tensile stress on the tunnel segments and the runway settlement are greatly affected by the aircraft load. The closer the landing site of the aircraft is to directly above the tunnel, the greater the impact of the aircraft load on the underpass. With the increase of the distance between the landing position and the channel axis, the tensile stress of the segment, the settlement of the stratum and the runway first increase and then decrease, reaching the maximum value when the landing position is directly above the left line tunnel.

Keywords: airport runway; tunnel; shield excavation; underpass airport; numerical analysis; surface settlement

0　引　言

随着城市化进程的推进,机场作为城市交通运输的主要承担者之一,运输需求不断增加。近年来,机场规模不断扩大,人流量与日俱增,为了提高机场客流量疏散能力和改善机场周边交通状况,地铁被越来越多地用于机场运输,下穿机场的隧道工程也越来越多[1]。

飞机起飞对机场跑道变形有特殊要求,下穿隧道施工对飞机跑道存在影响,且飞机起落荷载对地铁运行存在影响[2]。这两个问题如果处理不当,容易造成机场跑道变形,影响飞机正常起飞,飞机荷载引起隧道拱顶、拱底位移过大,影响地铁运行[3]。为解决这些问题,许多专家学者进行了相关研究。张恒新等[2]依托上海地铁10号线下穿虹桥机场工程,运用三维有限元数值模拟的方法,对盾构隧道下穿引起的跑道沉降进行了分析。公孙铭等[4]对无飞机冲击荷载影响下的隧道开挖过程进行计算分析,总结出了开挖过程中跑道及下部土层的沉降变化规

收稿日期:2025-06-11
作者简介:王琳(1982—),男,学士,工程师,从事机场桥梁与地下工程设计研究工作。

律。谭忠盛等[5]提出了超长大管幕施工技术，以低阻、高精、微沉的管幕顶进解决了机场下穿大断面施工的地表控制问题。张晋彰等[6]为分析隧道结构变形，基于随机场理论，以土体弹性模量的空间变异性为切入点，采用蒙特卡罗方法与有限差分模拟计算相结合的方法，开展隧道水平收敛的随机分析。李健斌等[7]为准确预测隧道开挖引起的地层变形，以土性参数的空间变异性为切入点，针对多层土双线盾构隧道施工地层变形问题，基于随机场理论，采用蒙特卡罗策略与有限差分模拟计算相结合的方法，开展地层变形随机分析。一些学者结合现场试验及现场监测对下穿隧道影响进行了研究分析[8-15]。以上学者大多是对其中一个问题进行具体分析，鲜有同时考虑机场运行和隧道运行的相互影响。

本文依托广州白云机场下穿通道项目，对已有机场下穿隧道开挖过程进行有限元分析，模拟隧道开挖过程，计算其对机场跑道沉降的影响，同时考虑隧道正常运营后管片刚度折减时飞机荷载对隧道的影响。

1　工程概况

以广州白云机场下穿通道盾构施工为依托，分析盾构施工对不停航机场跑道的影响。白云机场下穿通道采用分离式双线盾构施工，下穿机场东二跑道盾构段长 1 078.0 m，盾构结构间距 12.00 m，盾构始发井端头距离东二跑道中心线约 304 m，隧道管片外径 11.3 m，管片厚度 0.5 m。

根据地质勘查报告内容，隧道下穿东二跑道下方地层自上而下主要为耕植土、粉质黏土①、中粗砾砂、粉质黏土②、粗砾砂、微风化石灰岩。相关地层物理力学参数见表 1，隧道结构及跑道的物理力学参数见表 2。

表 1　主要地层物理力学参数

土层	容重/(kN·m^{-3})	泊松比	压缩模量/MPa
耕植土	18.5	0.32	5.3
粉质黏土①	18.7	0.35	5.1
中粗砾砂	20.2	0.37	20
粉质黏土②	18.8	0.32	5.19
粗砾砂	20.3	0.34	30
微风化石灰岩	26.7	0.20	150

2　下穿隧道施工对既有机场的影响分析

2.1　计算模型建立

为分析双线盾构隧道下穿施工对机场跑道的影响，重点研究跑道正下方隧道及周围土体在盾构开挖过程中产生的应力与位移。采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立三维模型，模型沿 X、Y、Z 轴方向的尺寸为 100 m×120 m×50 m，X 表示与隧道垂直的横方向，Y 表示与隧道轴线相同的纵方向，Z 表示与隧道垂直的竖直方向。数值模型采用位移边界条件，模型上表面为地表，采用自由边界，模型侧面分别限制其法向位移，模型底部采用固定边界。地层和管片采用三维实体单元模拟，盾壳通过板单元进行模拟。地层材料采用摩尔-库伦本构模型，管片、盾壳和机场跑道采用弹性本构模型[16]。2#通道有限元模型如图 1 所示。

表 2　主要结构物理力学参数

结构名称	容重/(kN·m^{-3})	泊松比	弹性模量/MPa
管片(C50)	25	0.2	34 500
管片(C60)	25	0.2	36 000
盾壳	120	0.3	21 000
跑道	23.8	0.2	1 800

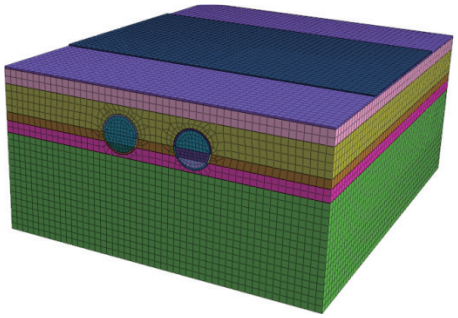

图 1　2#通道有限元模型

左右两线盾构管片外径均为 11.3 m，内径为 10.3 m，管片厚度为 0.5 m。盾构掘进过程中土仓压力 150 kPa，注浆压力 100 kPa。模型中土层分布形式简化为东二跑道和西一跑道，正下方勘探数据按水平地层取用。主要岩土地层和结构的力学参数见表 1 和表 2。

2.2　有限元计算结果

由于盾构推进的距离较长，穿越土层情况较复杂，因此采取交替钝化隧道土体单元和激活盾壳单元、管片单元、注浆层来模拟隧道开挖及注浆加固过程。开挖过程模拟主要包括盾构开挖、土仓压力施加以及注浆加固等过程，考虑从注浆加固到形成强度承载需要一个过程，故通过注浆压力和注浆层的施加来模拟，管片随着盾构机的推进不断施作。以 2#通道为例，首先进行右线隧道盾构开挖，右线全部开挖结束后再开挖左线隧道，施工分析主要考虑隧道施工过程对地表沉降的影响。

2#通道右线开挖施工后的地层、跑道位移和管片应力情况如图 2 至图 4 所示。

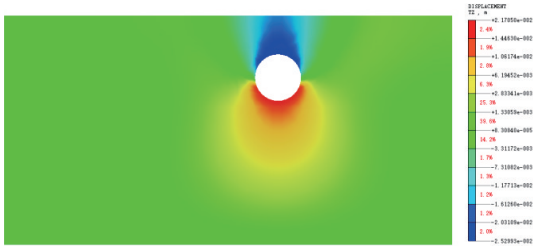

图 2　右线隧道开挖完成后位移云图

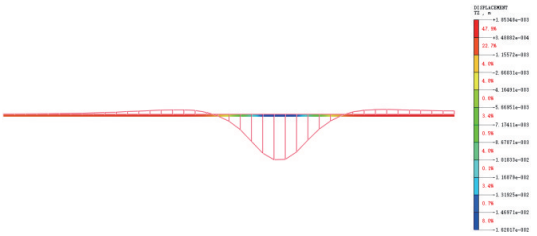

图 3　右线隧道开挖完成后跑道位移云图

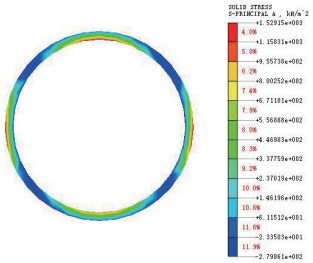

图 4　右线隧道开挖完成后管片应力云图

右线隧道开挖完成后，隧道下方土体最大隆起 21.7 mm，位于隧道正下方；最大沉降 25.2 mm，位于隧道正上方；跑道最大沉降 16.2 mm，位于隧道正上方。右线隧道开挖完成后，隧道管片最大拉应力 1.53 MPa，最大压应力 2.79 MPa，位于管片斜对角位置。

2#通道左线开挖施工后的地层、跑道位移和管片应力情况如图 5 至图 7 所示。

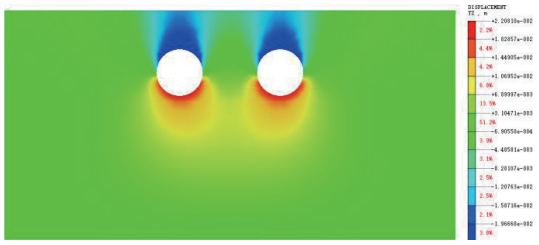

图 5　左线隧道开挖完成后地层位移云图

左线隧道开挖完成后，隧道下方土体最大隆起 22.1 mm，位于隧道正下方；最大沉降 23.4 mm，位于隧道正上方；跑道最大沉降 17.5 mm，位于隧道正上方。左线隧道开挖完成后，隧道管片最大拉应力 1.39 MPa，最大压应力 2.62 MPa，位于管片斜对角位置。

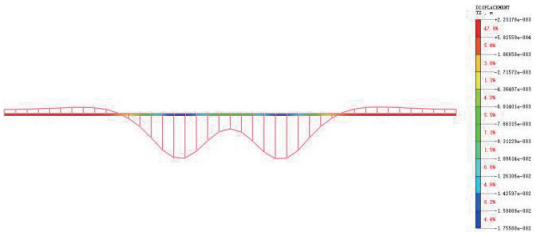

图 6　左线隧道开挖完成后跑道位移云图

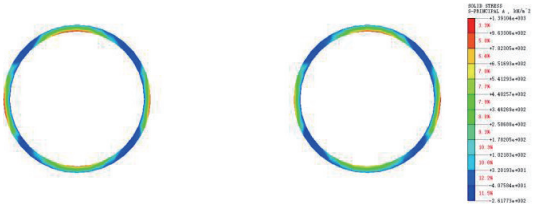

图 7　左线隧道开挖完成后管片应力云图

2.3　计算结果分析

表 3、表 4 为 2#、3#通道开挖过程计算结果汇总。

表 3　地下通道左、右线施工阶段位移统计

通道号	施工阶段	地层隆起/mm	地层沉降/mm	跑道沉降/mm	差异沉降率/‰
2#	右线开挖	21.7	25.2	16.2	0.96
	左线开挖	22.1	23.4	17.5	
3#	右线开挖	21.6	24.3	15.6	0.92
	左线开挖	22.9	23.2	16.2	

表 4　地下通道左、右线施工阶段管片应力统计　单位：MPa

通道号	施工阶段	最大拉应力	最大压应力
2#	右线开挖	1.53	2.79
	左线开挖	1.39	2.62
3#	右线开挖	1.52	2.97
	左线开挖	1.40	2.80

计算结果表明，在严格按照施工工序进行施工的前提下，隧道管片所受拉应力和跑道沉降符合施工标准，机场跑道差异沉降率能满足控制标准。由于上覆土层较薄，隧道开挖过程中，隧道拱顶及地层出现较大位移，施工时应当加强相应监控量测措施。

3　飞机荷载对下穿隧道影响分析

3.1　计算模型

根据相关研究[16]，采用刚度折减系数 0.8 来体现管片接头的影响。假设飞机荷载作用位置与模型中轴线的相对距离为降落位置（见图 8）。

结合现有的线路纵断面图，考虑飞机最大起降荷载和滑行荷载作用下的最不利情况，针对不同飞机降落位置下的隧道变形和应力分布进行建模分析，有限元建模参数同本文第 2.1 节。其中，地表荷载计算依据《民用航空行业标准》（MH/T 5004—2010）中的相关规定。

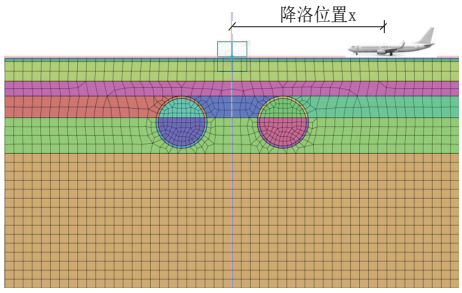

图 8　飞机荷载作用位置示意图

飞机荷载采用式(1)计算：

$$P_s = \frac{G \cdot p}{n_c \cdot n_w} \tag{1}$$

式中：G 为设计飞机最大滑行重量，kN；P_s 为设计飞机主起落架上的轮载，kN；p 为主起落架荷载分配系数；n_c 为主起落架个数；n_w 为一个主起落架的轮子数。

飞机荷载根据波音 747-8 的相关参数进行计算(见表 5)。

表 5　机型参数取值表

机型	G/kN	p	n_c	n_w
B747-8	4 423	0.954	4	4

单个轮子传递的竖向飞机轮载采用式(2)计算：

$$P_{cz} = \frac{\mu_D P_s}{(a + 2z\tan\theta)(b + 2z\tan\theta)} \tag{2}$$

式中：P_{cz} 为地面飞机、车辆荷载传递到计算深度 z 处的竖向压力，kN/m^2；μ_D 为飞机、车辆荷载的动力系数，取 1.3；P_s 为飞机、车辆单个轮子的压力，kN；a 为飞机、车辆单个轮子的轮印长度，m；飞机荷载的轮印长度按机轮荷载和轮胎压力计算确定，其中 a=1.5b；b 为飞机、车辆单个轮子的轮印宽度，m；θ 为荷载扩散角，根据扩散层材料取 θ=45°。

飞机主起落架一个轮印的长度 a 和宽带 b 按式(3)确定：

$$a = \sqrt{\frac{P_s \times 10^4}{5.227q}} \tag{3}$$

式中：a 为飞机荷载的轮印长度，m；q 为飞机主起落架轮胎压力，取 1.38 MPa；P_s 为飞机主起落架上的轮载，kN。

3.2　计算模型

以 2#通道最不利情况为例，对 2#下穿通道在机场跑道正常运营条件下，飞机在与 2#下穿通道轴线距离 x=0、4、8、12、16 m 处降落时的隧道开挖施工过程进行数值模拟。飞机在左线隧道正上方降落滑行过程中的地层、管片最大位移和管片最大应力结果如图 9 至图 11 所示。

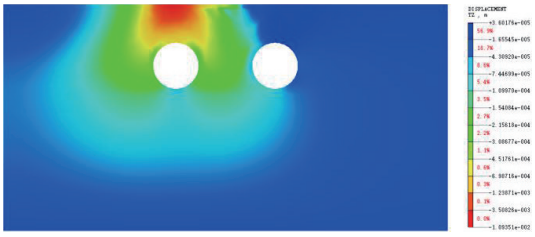

图 9　地层位移云图

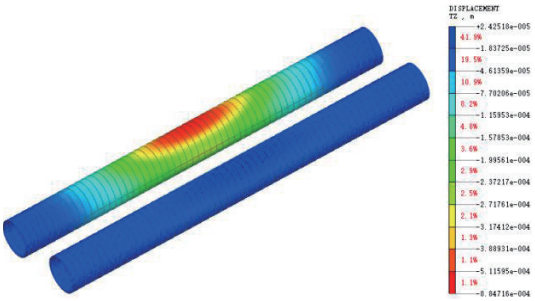

图 10　左右两线管片位移云图

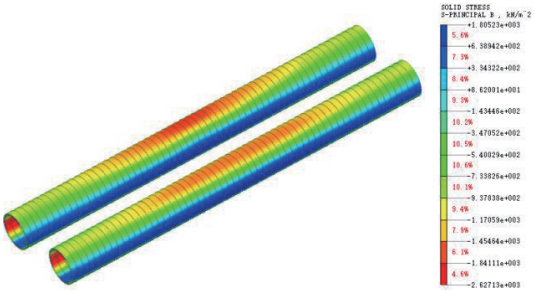

图 11　左右两线管片应力分布云图

当飞机在 x =12 m 处降落时，土层最大沉降 10.9 mm，位于左线隧道上方；左线管片沉降最大达到 0.8 mm，位于管片上部；管片最大拉应力 1.81 MPa，位于管片两侧，最大压应力 2.63 MPa，位于左线管片上方。

3.3　计算结果分析

飞机在不同位置降落工况下地层及隧道管片位移计算结果汇总见表 6、表 7。

表 6　2#通道不同位置降落工况计算结果

降落位置/m	地层位移/mm	管片位移/mm	管片拉应力/MPa	差异沉降率/‰
x=0	10.6	0.3	1.75	
x=4	10.6	0.5	1.79	
x=8	10.8	0.7	1.80	0.64
x=12	10.9	0.8	1.81	
x=16	10.8	0.7	1.80	

表 7　3#通道不同位置降落工况计算结果

降落位置/m	地层位移/mm	管片位移/mm	管片拉应力/MPa	差异沉降率/‰
x=0	11.2	0.3	1.71	
x=4	11.2	0.4	1.72	
x=8	11.3	0.6	1.75	0.67
x=12	11.4	0.7	1.76	
x=16	11.3	0.6	1.75	

（1）飞机降落地点越接近隧道正上方，飞机荷载对下穿通道的影响越大。飞机降落地点从2#、3#下穿通道轴线处向左线隧道正上方移动时，2#通道地层位移从10.6 mm增大到10.9 mm，管片最大拉应力从1.75 MPa增大到1.81 MPa，管片位移从0.3 mm增大到0.8 mm，差异沉降率维持在0.64‰。

（2）飞机降落地点从2#、3#下穿通道轴线处向左线隧道正上方移动时，3#通道地层位移从11.2 mm增大到11.4 mm，管片最大拉应力从1.71 MPa增大到1.75 MPa，管片位移从0.3 mm增大到0.7 mm，差异沉降率维持在0.67‰。

（3）机场下穿通道修建完成后，机场跑道正常运营条件下飞机起降荷载所引起的管片应力符合相关标准限制，跑道沉降值、差异沉降率也满足相关标准的要求。

4　结　语

本文针对广州白云机场下穿通道项目建立有限元数值模型，分析下穿隧道修建对已有机场跑道及飞机荷载对下穿隧道安全运营的影响，分析了左右线隧道开挖完成后的地层及跑道沉降规律，并对管片拉应力和跑道沉降率的变化规律进行分析，得到以下结论：

（1）上覆土层厚度足够的情况下，隧道管片所受拉应力和跑道沉降符合施工标准即可满足机场跑道差异沉降率控制标准。若上覆土层较薄，隧道开挖过程中，隧道拱顶及地层出现较大位移，进行相应施工时做好施工监测。

（2）飞机降落地点越接近隧道正上方，飞机荷载对下穿通道的影响越大。随着降落位置与通道轴线距离的增大，管片拉应力、地层和跑道沉降先增大后减小，降落位置位于左线隧道正上方时达到最大值。

（3）飞机荷载最不利位置对下穿隧道管片应力影响相对较小，但对管片位移影响较大，从地铁运营安全角度考虑，飞机降落点应尽可能远离隧道正上方。

（4）本研究采用的飞机荷载计算模型可根据不同机型进行调整，对于其他考虑飞机荷载作用的下穿机场盾构隧道工程均有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 杜浩，张宏，凌建明，等. 基于机场跑道道面结构完整性的盾构施工控制[J]. 同济大学学报（自然科学版），2013，41（11）：1702-1705.
[2] 张恒新，张孟喜，王晓鸿，等. 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.
[3] 王锦华. 盾构隧道下穿对机场跑道影响的随机有限元数值模拟分析[J]. 施工技术（中英文），2022，51（21）：23-29.
[4] 公孙铭，张智梅，杨超，等. 盾构下穿机场跑道的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报，2011，7（3）：464-468.
[5] 谭忠盛，马栋，孙晓静，等. 不停航机场跑道下大断面隧道施工技术[J]. 土木工程学报，2015，48（S1）：378-382.
[6] 张晋彰，黄宏伟，张东明，等. 考虑参数空间变异性的隧道结构变形分析简化方法[J]. 岩土工程学报，2022，44（1）：134-143.
[7] 李健斌，陈健，罗红星，等. 基于随机场理论的双线盾构隧道地层变形分析[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37（7）：1748-1765.
[8] 李志军，张建国. 地铁盾构区间下穿机场跑道的影响控制[J]. 水利与建筑工程学报，2017，15（4）：153-156.
[9] 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（2）：175-178.
[10] 王广德，韩黎明，柴震林，等. 飞机动荷载作用下场道地基沉降[J]. 地下空间与工程学报，2013，9（4）：939-945.
[11] 冯建霖. 下穿机场跑道大断面隧道施工对策及地层变形规律研究[J]. 隧道建设，2015，35（5）：473-477.
[12] 王乐明. 高铁大直径盾构隧道下穿快轨路基结构的影响分析及控制技术研究[J]. 铁道标准设计，2018，62（9）：109-114.
[13] 伍毅敏，刘延安，王恒，等. 北京市隧道下穿施工引起城市路面沉降的影响规律回归分析[J]. 交通运输工程学报，2022，22（2）：176-186.
[14] 卢鑫月，许成顺，侯本伟，等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报，2022，44（3）：492-501.
[15] 谭信荣，朱亦墨，张恒，等. 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.
[16] 焦忺玥，董秀竹，林森斌. 软土地区双线盾构下穿机场跑道沉降规律研究[J]. 铁道工程学报，2024，41（2）：68-73.