

文章编号:1671-1637(2026)08-0073-15

高铁与飞机动载作用下隧道-道基结构动力响应特性

李飞龙^{1,2}, 姜昌山^{1,2}, 杨 山^{1,2}, 孟宪锋^{*1,2,3}

(1. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100101; 2. 机场工程安全与长期性能交通运输行业野外科学观测研究基地, 北京 101312; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:为研究高铁隧道下穿机场飞行区时飞机与列车耦合动载下的响应特性,以渝昆高铁下穿昆明长水机场为背景,采用ABAQUS建立“隧道-道面-围岩-道基”三维精细化有限元模型,通过ABAQUS表格函数施加CRH380列车交会振动荷载,并采用Fortran编写DLOAD子程序模拟A380-800飞机滑行荷载,基于Newmark- β 法求解动力方程,系统对比了飞机滑行、列车振动及两者耦合3种工况下结构与道基的响应特性;通过在道基不同深度与隧道衬砌特征部位布置监测点,获取了动峰值位移、竖向动应力、动加速度及衬砌内力等响应规律。研究表明:耦合动荷载作用下隧道拱顶上方道基竖向位移呈“倒锅底形”分布,瞬态峰值达48.33 mm,并随深度呈线性衰减;耦合效应显著扩大动力影响范围,按动应力为自重应力10%的标准,影响深度增至31.53 m,是飞机滑行荷载时的2.93倍;按加速度 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 阈值的隧底围岩影响深度为22.2 m,为列车振动荷载时的1.28倍;道基加速度响应具有空间异质性,上部道基近似线性衰减,影响深度小于24.2 m,隧底围岩则呈指数衰减;衬砌位移主要由列车振动控制,飞机滑行荷载的附加影响可忽略;耦合工况下拱脚动拉应力为530 kPa,远低于材料强度,衬砌全断面最小安全系数达720.62,安全储备充足。研究提出了峰值加速度为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 与动应力为10%自重应力的双重阈值控制标准,建立的耦合分析方法可为空铁联运枢纽下穿工程的振动安全评估与设计优化提供理论依据。

关键词:机场道基;隧道衬砌结构;有限元仿真;动力响应特性;动力影响深度;动应力;动加速度;安全性

中图分类号:U25 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.326

Dynamic response characteristics of tunnel-subgrade structure under high-speed rail and aircraft dynamic loads

LI Fei-long^{1,2}, JIANG Chang-shan^{1,2}, YANG Shan^{1,2}, MENG Xian-feng^{*1,2,3}

(1. China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 2. Observation and Research Base of Transport Industry of Airport Engineering Safety and Long-term Performance, Beijing 101312, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the dynamic response characteristics under coupled dynamic loads of aircraft and trains during the underpassing of a high-speed rail tunnel through an airport airfield, with the Chongqing-Kunming High-Speed Railway underpassing Kunming Changshui Airport as the

出版历程:2025-12-16 收稿,2026-03-11 修回,2026-05-27 录用

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52532011);云南省科技厅重点研发计划(202303AA080011)

作者简介:李飞龙(1988-),男,河南济源人,民航机场规划设计研究总院有限公司助理研究员,工学博士,博士后,E-mail:18115026@bjtu.edu.cn。

*通信作者:孟宪锋(1979-),男,河北南宫人,民航机场规划设计研究总院有限公司正高级工程师,E-mail:879904131@qq.com。

引用格式:李飞龙,姜昌山,杨 山,等. 高铁与飞机动载作用下隧道-道基结构动力响应特性[J]. 交通运输工程学报,2026,26(8):73-87.

Citation: LI Fei-long, JIANG Chang-shan, YANG Shan, et al. Dynamic response characteristics of tunnel-subgrade structure under high-speed rail and aircraft dynamic loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 73-87.

background, a “tunnel, pavement, surrounding rock, and subgrade” three-dimensional refined finite element model was established using ABAQUS. Vibration loads from CRH380 trains were implemented using Abaqus’s tabular function, while aircraft taxi loads of the A380-800 were modelled with a Fortran-based DLOAD user subroutine. The dynamic equations were solved based on the Newmark- β method. Response characteristics of structure and subgrade were systematically compared under three working conditions: aircraft taxiing, train vibration, and their coupling. By arranging monitoring points at different depths of the subgrade and characteristic locations of the tunnel lining, response laws such as peak dynamic displacement, vertical dynamic stress, dynamic acceleration, and lining internal forces were obtained. Research results indicate that under coupled dynamic loads, the vertical displacement of the subgrade above the tunnel crown presents an “inverted trough-shaped” distribution. The transient peak reaches 48.33 mm, and it decays approximately linearly with depth. The coupling effect significantly expands the dynamic influence range. Based on the criterion of dynamic stress being 10% of the self-weight stress, the influence depth increases to 31.53 m, which is 2.93 times that under the aircraft taxiing load. Based on the acceleration threshold of $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, the influence depth of the surrounding rock at the tunnel bottom is 22.2 m, which is 1.28 times that under the train vibration load. The acceleration response of the subgrade exhibits spatial heterogeneity; the acceleration in the upper subgrade shows an approximate linear attenuation with an influence depth of less than 24.2 m, whereas that in the surrounding rock at the tunnel bottom exhibits an exponential attenuation. The lining displacement is primarily controlled by the train vibration, and the additional influence of the aircraft taxiing load is negligible. Under coupled conditions, the dynamic tensile stress at the arch foot is 530 kPa, which is far below the material strength. The minimum safety factor of the full lining cross-section reaches 720.62, indicating a sufficient safety reserve. A dual threshold control criterion of a peak acceleration of $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and a dynamic stress of 10% self-weight stress is proposed, and the established coupled analysis method provides a theoretical basis for the vibration safety assessment and design optimization of underpass projects beneath air-rail intermodal hubs.

Keywords: airport subgrade; tunnel lining structure; finite element simulation; dynamic response characteristic; dynamic influence depth; dynamic stress; dynamic acceleration; safety

Publication history: Received 2025-12-16; Received in revised form 2026-03-11; Accepted 2026-05-27

Funding: Key Program of National Natural Science Foundation of China (52532011); Key R&D Program of Yunnan Provincial Department of Science and Technology (202303AA080011)

* **Corresponding author:** MENG Xian-feng, professor of engineering, E-mail: 879904131@qq.com.

0 引 言

机场飞行区道面结构是保障民航安全运行的核心基础设施,广泛分布于中国各类枢纽与区域干线机场。随着《“十四五”民用航空发展规划》落地实施,空铁(轨)联运模式快速普及。该规划明确提出,至2025年末,中国千万级机场轨道交通接入率需达到80%,预计约40座机场完成指标建设。为实现轨道交通接入,铁路隧道下穿机场飞行区的工程项目也随之不断增多,其交互运行所带来的振动与变形

会对上方飞行区道面结构及下方隧道衬砌结构产生动力作用,容易诱发道面板开裂、板底脱空、衬砌损伤等结构性病害,严重威胁机场运行与轨道交通运营安全。因此,深入研究高速列车与飞机运行时机场道基与隧道结构的动力响应特征及变形传递机制,对保障机场与高铁隧道的安全稳定运营具有重要的理论价值与工程意义。

针对铁路隧道下穿机场飞行区这一复杂工况下的动力响应问题,国内外学者围绕飞机荷载特性、道面结构行为及隧道稳定性开展了系统研究。接下来

从以下3个维度对现有成果进行梳理。

首先是飞机荷载特性与道基动力响应。在飞机荷载对道基的作用机理方面,研究者通过多种数值方法揭示了荷载类型与道基条件的影响规律。周正峰等^[1]基于ABAQUS优化了刚性道面模型,验证了其响应分析的可靠性。张甲峰等^[2]基于层状弹性体系理论发现,飞机荷载越大,地基附加动应力的横向扩散范围越广,竖向影响深度越深。王志新等^[3]结合布辛奈斯克解指出,A380机型产生的附加应力显著高于B747、B777,且覆土越浅应力越大。在动静荷载对比方面,Li等^[4]借助FLAC3D模型表明,动态荷载引发的附加应力深度超过静荷载。凌道盛等^[5]发现飞机滑行速度 $60\sim 80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,荷载影响深度为静力分析的1.5~1.7倍,道基浅层竖向正应力呈“倒锅底型”分布。Tang等^[6]指出A380飞机起降时,路基饱和度增加会显著降低跑道临界速度并加剧竖向位移振动,而提高路面模量对临界速度影响有限。在道面平整度影响方面,Loprencipe等^[7]对比了多种平整度评价模型,重点分析了粗糙度波长与国际平整度指数(IRI)阈值的影响。Tian等^[8]通过优化IRI模型参数提升了与飞机振动的相关性。Liu等^[9]建立飞机-跑道耦合模型,揭示了滑行速度对平整度激励下振动响应的影响。Bazi等^[10]发现薄结构柔性道面的滚动阻力更为显著,并建立了基于落锤弯沉仪的预测方法。

其次是道面结构动力响应影响。针对道面结构力学行为,学者们开展了从理论推导到现场实测的系统研究。凌建明等^[11]建立了飞机动载系数预估模型,发现滑跑动载系数随速度提高和平整度劣化而增大。郑飞等^[12]基于弹性地基板理论推导出道面板应力计算公式,与有限元结果误差小于2%。穆一凡等^[13]发现B737-800冲击荷载下临界荷位位于板纵缝中部,面层厚度与模量影响显著。魏保立等^[14]揭示飞机中高频荷载易引发道面弯沉振动,而弯拉应力呈低频特性。王兴涛等^[15-16]基于丹佛机场5年实测数据发现,大型飞机作用下板底受拉应变大于板顶受压应变,板角与板边为敏感部位。刘诗福等^[17]建立三维飞机-跑道模型,发现三维不平整激励下动载系数为二维的1.20~1.52倍,平整度恶化时振动响应指数级增长。黄博等^[18]指出高速紧急制动会显著增大道面纵向拉应力,使跑道疲劳寿命从82.3年降至17.8年。国外研究方面,Nam^[19]通过加速加载试验预测沃斯堡米查国际机场刚性道面20年内无明显劣化。Wang等^[20]发现六轮起落架构型更易诱

发柔性道面破坏。Park等^[21]量化了环境因素对混凝土道面板的影响。Dong等^[22]提出利用道面振动反算土基模量的新方法。Hu等^[23]通过足尺试验建立了考虑多因素的疲劳方程。Robinson等^[24]发现仅不足半数土工合成材料能显著提升道面抗车辙性能。

最后是下穿隧道结构稳定性与动力响应。在隧道结构受飞机荷载影响方面,魏晓刚等^[25-26]建立道面-土层-隧道模型,发现A380荷载下圆形截面隧道稳定性最优,埋深超64 m时飞机荷载扰动可忽略。李飞龙等^[27]对比发现B777-9引发的道面竖向位移为B737-10的3.52倍,下穿通道顶板安全系数偏低。针对相对位置影响,孙晓静等^[28]指出飞机位于隧道正上方3倍洞径范围内时影响最显著,拱顶中心围岩压力与位移最大。在地铁高铁振动影响方面,巴振宁等^[29]发现线路与建筑长轴夹角为 0° 时振动最强,车速 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 较 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 振动幅值增加19.67%。陈娟等^[30]发现高架桥段高铁地铁共同作用下出现振动放大,振级增量最高达18.2 dB。吴雪等^[31]表明高速列车引发的跑道振动随车速增大而增强,减振垫可使垂向Z振级减小10.0~10.5 dB。高盟等^[32]指出双线列车交会时振动叠加效应使位移与孔压增大约一倍。工程应用层面,中国民用航空局机场司^[33]系统梳理了国内外下穿工程案例,明确了沉降控制与监测要求。Golov等^[34]建立了IRI与交通事故风险的定量关系。Yang等^[35]验证了埋深超64 m时飞机荷载可忽略的结论。现有研究在飞机滑行荷载、道面结构响应及隧道稳定性等单一领域已形成较为系统的认知:普遍采用数值模拟、理论解析与现场实测相结合的方法,深入分析了荷载特性(如机型、速度)、道面条件(平整度、结构形式)及地质环境等因素对结构动力响应与长期性能的影响规律,并明确了关键影响参数与安全阈值。然而,现有研究仍存在明显不足,绝大多数工作聚焦于飞机或列车单一动荷载作用,对于空铁联运枢纽中“飞机滑行-下穿高铁”耦合动荷载这一实际复杂工况,仍缺乏系统研究,尤其未能定量揭示耦合振动在道基与隧道衬砌中的传播机理、叠加或放大效应影响,导致难以为此类复杂交互作用下的工程安全评估与精细化设计提供充分的理论依据。因此,针对飞机-高铁耦合动荷载作用下的动力响应规律开展深入研究,具有重要的理论意义与工程价值。

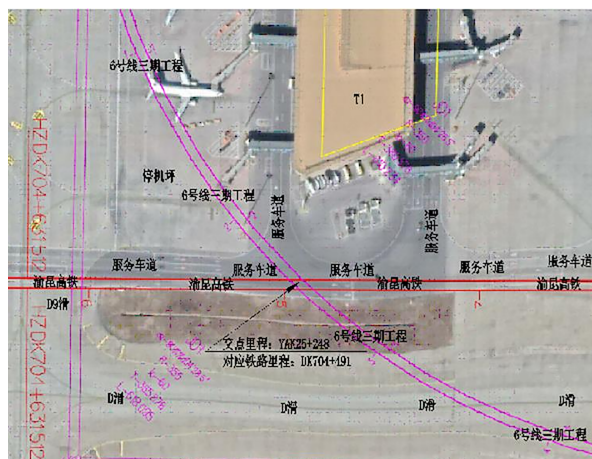
本文聚焦于空铁联运枢纽中高铁隧道下穿飞行区的新场景,采用ABAQUS软件,创新性地建立了“隧道-道面-围岩-道基”全耦合三维精细化有限元

模型,系统模拟多种交互运行工况,从而定量揭示单一动荷载及耦合动荷载作用下道基竖向动位移、动应力及加速度的空间衰减规律与影响深度,明确了衬砌结构内力的关键分布特征与薄弱部位,从而突破以往研究集中于单一动荷载和定性分析的局限;为类似工程的耦合振动分析与安全评估提供了重要数据支撑。

1 工程概况与分析模型

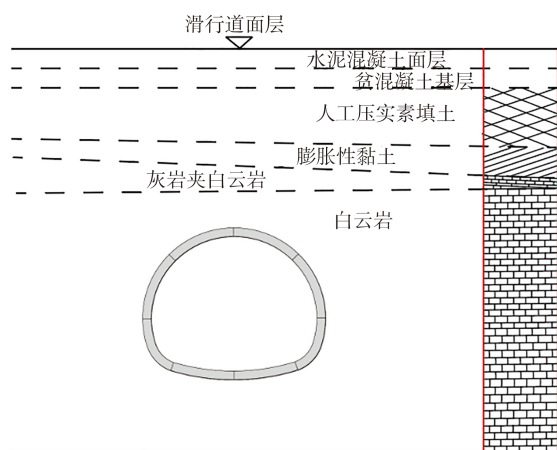
1.1 工程概况

渝昆高铁设计最高行车速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,采



(a) 渝昆高铁隧道与长水机场飞行区交互平面

用单洞双线隧道布置,隧道埋深为 $41 \sim 59 \text{ m}$,岩板厚度为 $21 \sim 59 \text{ m}$ 。隧道区间采用钻爆掘进法施工,盾构隧道上部穿越昆明长水机场既有滑行道及停机坪范围。渝昆高铁穿越的地层主要包括断层角砾岩、灰岩、灰岩夹白云岩、泥灰岩、泥质灰岩(白云岩)夹砂岩及泥页岩等,部分区域存在无填充或半填充溶洞。洞身围岩岩质较弱、强度低,易发生围岩变形及洞壁失稳。计算工况中,隧道埋深为 41 m ,其与飞行区的平面交互关系及典型横断面如图1所示。



(b) 渝昆高铁隧道与既有滑行道交互断面

图1 下穿隧道与飞行区滑行道交互

Fig. 1 Interaction between underpass tunnel and flight airfield taxiway

1.2 分析模型

为研究高铁列车与飞机运行动荷载对机场道基与隧道衬砌结构的振动影响,因此需建立涵盖车辆、轨道、隧道、围岩及机场道面道基的一体化分析模型。

1.2.1 轨道-隧道-道面结构模型

轨道模型采用双块式无砟轨道。双块式无砟轨道结构组成自上而下分别为钢轨、轨道板、隧道回填层、仰拱、初期支护和围岩等,隧道模型结构如图2所示。

机场飞行区道面简化成水平无限延伸、竖向有限厚度的多层弹性体系,面层为水泥混凝土板,忽略

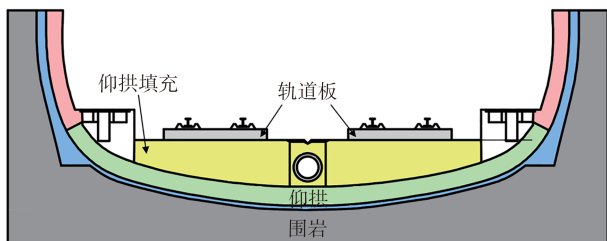


图2 隧道中无砟轨道模型

Fig. 2 Ballastless track model in tunnel

道面板间接缝与传力杆的影响;各结构层间接触面满足位移与应力连续条件。以上假设在保证计算精度的前提下,对实际道面结构进行了合理简化,为后续力学分析提供了明确的边界条件。

1.2.2 耦合振动理论与求解方法

由于整个“飞机/列车-机场飞行区-下伏隧道”系统是一个时变耦合的非线性动力体系。为高效求解,首先将其解耦为飞机-道面子系统与列车-隧道结构子系统。其次将飞机移动荷载的激振力与列车振动荷载的激振力作为外荷载,施加于隧道-道面结构有限元模型上进行动力响应分析。

在隧道-飞行区道面结构的动力响应分析中,基于静力学有限元^[36]的核心思想,首先将弹性体离散为有限单元并建立整体刚度平衡方程,表示为

式中： $R(t)$ 为 t 时刻的动力荷载项，包含动荷载 $F(t)$ 、惯性力以及阻尼力； $\delta(t)$ 为位移向量。

惯性力 $F_T(t)$ 与阻尼力 $F_c(t)$ 分别表示为

$$F_T(t)=-M\delta''(t)$$

$$F_c(t)=-C\delta'(t)$$

式中： M 和 C 分别为质量矩阵与阻尼矩阵； $\delta''(t)$ 和 $\delta'(t)$ 分别为加速度向量和速度向量。

据此，隧道-道面结构体系的振动控制方程可通过 Hamilton 原理表示

$$M\delta''(t)+C\delta'(t)+K\delta(t)=F(t) \quad (3)$$

对于阻尼项，采用瑞利阻尼模型表示

$$C=\alpha M+\beta K$$

$$\alpha=2\xi\omega_1\omega_2/(\omega_1+\omega_2)$$

$$\beta=2\xi/(\omega_1+\omega_2)$$

式中： ξ 为阻尼比； ω_1 为一阶自振圆频率； ω_2 为二阶自振圆频率； α 、 β 均为阻尼系数。

实际计算中可通过 ABAQUS 对结构进行模态分析，结合阻尼比（通常取 0.05）来确定阻尼系数 α 和 β 的数值。

1.2.3 动力方程求解

动力方程的求解采用适用于非线性问题的直接积分法——Newmark- β 法。该方法通过对时间域进

行离散，逐步迭代求解各时间步的结构动力响应，从而获得隧道衬砌与飞行区道基在动荷载作用下的振动位移、加速度及动应力等关键指标。

2 数值计算模型与参数设置

为准确分析列车与飞机动荷载作用下“隧道-道面-围岩-道基”耦合体系的动力响应，本文建立了三维有限元模型，详细阐述了模型参数、边界条件、计算流程及分析工况。

2.1 模型构建与材料参数

为更准确模拟列车和飞机动荷载对衬砌结构及道基的动力效应，同时兼顾计算效率，建立了数值模型尺寸为 180 m×100 m×100 m 的三维有限元模型，模型中隧道衬砌结构、道面结构及道基均采用八节点减缩积分实体单元(C3D8R)进行离散。围岩采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，水泥混凝土面层板与隧道衬砌结构采用线弹性模型。各结构层之间假定完全连续接触，满足位移协调与应力连续条件，并忽略道面板接缝与传力杆的局部影响。滑行道与隧道空间斜交成 76°，模型的主要物理力学参数列于表 1，其三维几何及隧道断面结构见图 3。模型阻尼系数由结构前两阶自振频率及阻尼比计算确定。

表 1 地层与结构材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of strata and structural materials

结构层	弹性模量/MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	α/s^{-1}	β/s	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	厚度/m
水泥混凝土面层	36 000	0.15	2 450	0.1	0.001 0			0.38
贫混凝土基层	15 000	0.20	2 100	0.1	0.002 0			0.40
人工压实素填土	18	0.35	1 950	1.0	0.001 0	45	16.0	16.60
膨胀性黏土	10	0.32	1 850	1.0	0.001 0	34	14.5	4.45
灰岩夹白云岩	14 450	0.28	2 150	1.0	0.002 0	42	18.0	3.95
白云岩	18 740	0.28	2 200	1.0	0.002 0	50	25.0	
衬砌结构	30 000	0.18	2 450	0.1	0.001 0			0.70
仰拱	30 000	0.18	2 450	0.1	0.001 0			2.24
道面板	32 500	0.18	2 450	0.1	0.001 0			0.35
钢轨	210 000	0.2						

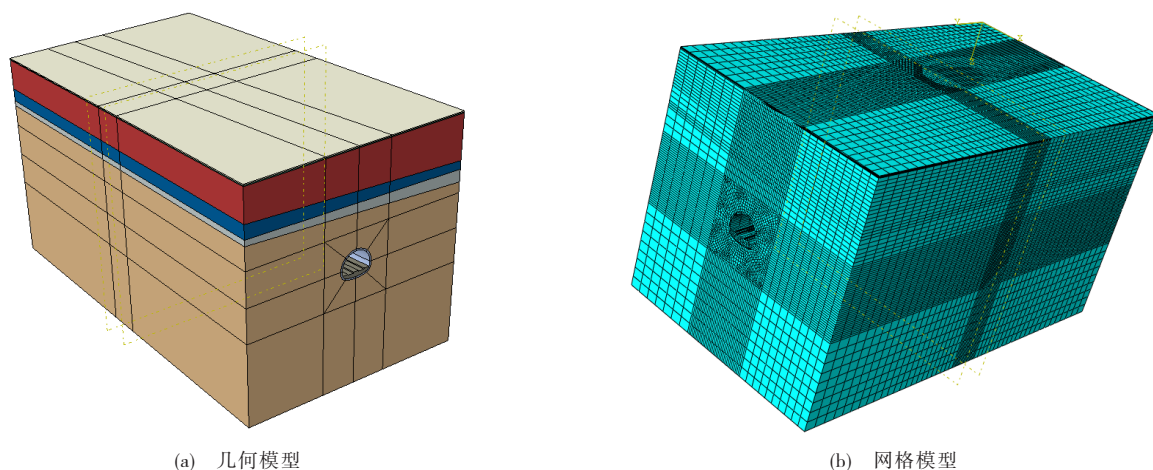


图3 三维有限元几何模型与网格模型

Fig. 3 3D finite element geometric model and mesh model

$M_0 a_i \omega_i'^2, i=1, 2, 3$, 对应3种控制条件, 分别为行车平稳性、作用到线路上的动力与波形磨耗, M_0 为簧下质量, 取750 kg, a_i 为矢高, ω_i' 为不平顺控制条件下的振动圆频率, $\omega_i' = 2\pi v/L_i$, L_i 为不平顺曲线典型波长, v 为列车运行速度。

上述3种控制条件中的波长与矢高分别取 $L_1 = 10$ m, $a_1 = 3.5$ mm; $L_2 = 2$ m, $a_2 = 0.4$ mm; $L_3 = 0.5$ m, $a_3 = 0.08$ mm。通过计算, 得出 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下的列车振动荷载时程曲线, 见图4。

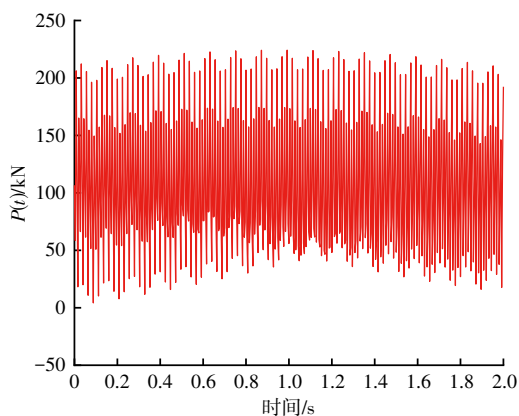


图4 列车振动荷载时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of train vibration load

空客 A380-800 型飞机的滑行荷载的施加通过用户自定义子程序实现。利用 Fortran 语言编写 DLOAD 子程序, 并通过 ABAQUS 用户子程序接口嵌入, 以此精确模拟飞机滑行荷载。其中空客 A380-800 型飞机的主起落架构型见图5, 并根据《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025) 确定该机型的关键参数, 得到滑行荷载值, 结果列于表2, 将表2确定的荷载以移动面荷载的形式施加于道面顶面, 其时程曲线如图6所示, 图中: p 为

A380-800 飞机滑行荷载时的正弦简谐荷载, 表达式为

$$p = \frac{G\rho}{n_w} + \frac{G\rho}{n_w} (k' - 1) \sin(\omega t)$$

式中: k' 为动荷载的滑行系数, 取 1.141; ω 为飞机机轮转动的圆周率; G 为飞机重力, 一般取为机场道面设计规范中的最大滑行重力; ρ 为主起落架荷载分配系数; n_w 为一个主起落架的轮总数。

表2 A380-800飞机滑行荷载计算参数

Table 2 Calculation parameters of A380-800 aircraft taxiing load

飞机机型	A380-800
轮载/kN	272.57
机轮滑行荷载计算公式	$P(t) = 272.57 + 38.43 \sin(17.3t)$
机轮滑行荷载压强计算公式	$p = 1473.35 + 207.7 \sin(17.3t)$

该方法在保证荷载模拟精度的同时, 有效提升了计算效率。

在有限元分析中, 为准确模拟波动传播并避免人工边界反射干扰, 常采用黏性边界、透射边界与黏弹性边界等方法^[38-40]。针对本文所建立的大尺寸模型, 各结构层间已设置为完全连续接触, 可有效衰减内部应力波反射。在此基础上, 静力分析采用顶面自由、其余侧面施加法向位移约束的边界条件; 动力分析中, 为彻底消除边界反射, 采用静态边界条件: 4个侧面仅约束法向位移, 底部完全固定 ($U_1 = U_2 = U_3 = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3} = 0$), 顶面仍为自由边界, U_1, U_2, U_3 为 x, y, z 三个方向的线位移; U_{R1}, U_{R2}, U_{R3} 为绕 x, y, z 三个轴的转角。

2.3 计算流程

动力响应分析在初始地应力场平衡的基础上进行, 具体流程如图7所示。首先进行隧道施工开挖

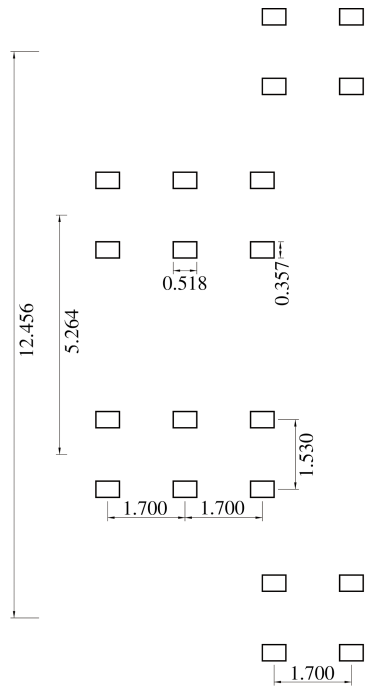


图5 主起落架构型(单位:m)

Fig. 5 Main landing gear configuration (unit: m)

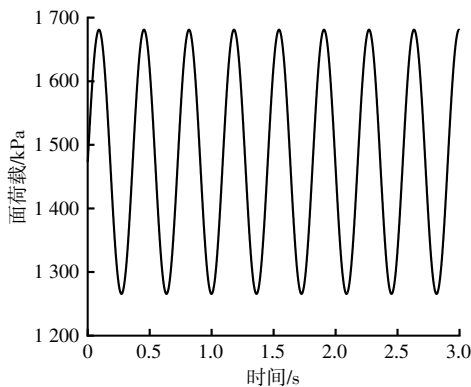


图6 A380-800飞机滑行荷载时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of A380-800 aircraft taxiing load

及道面结构施工时的静力学模拟,获得稳定的初始应力场;随后,在此初始状态下,施加列车振动荷载与飞机滑行荷载,进行系统的瞬态动力分析,获取结构体系的动力响应数据。需要说明的是,本文所用数值计算方法与有限元软件同文献[27]一致,其可靠性与合理性已在文献[27]中得到验证,故本研究不再重复赘述。

2.4 分析工况与监测方案

基于前述模型参数,建立了“隧道-道面-围岩-道基”一体化三维耦合分析模型。分析中,飞机滑行速度取 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,列车运行速度取 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

为精确捕捉结构的动力响应,在飞行区道基及隧道衬砌结构关键部位布置了监测点:道基区域监测点主要布置于飞机主起落架荷载作用的横向投影范围及

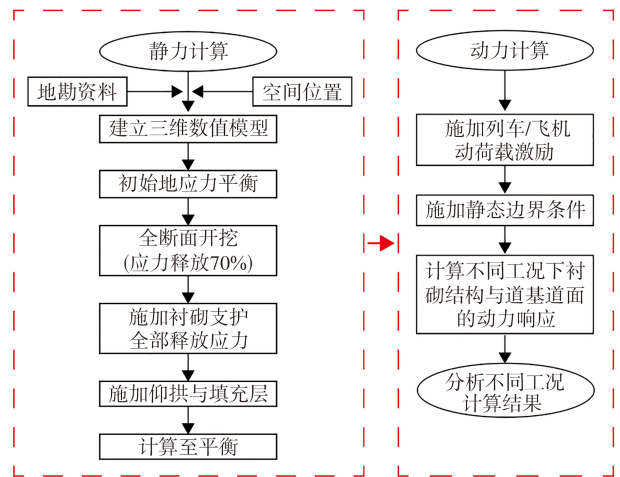
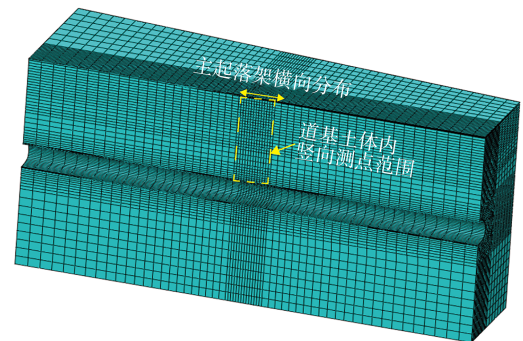


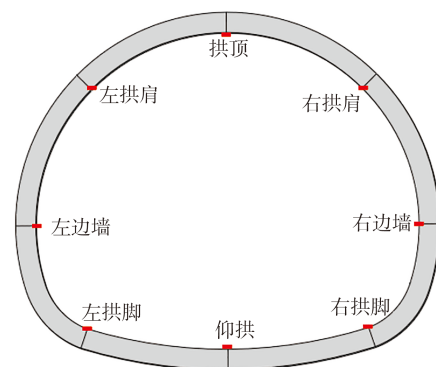
图7 数值分析计算流程

Fig. 7 Flow of numerical analysis calculation

下方道基深度范围内[图8(a)];测点沿竖向分布,具体位置由有限元网格节点确定,用以分析动应力及振动加速度在道基中的传递与衰减规律。隧道衬砌结构监测:在高铁隧道典型横断面上共布置8个监测点[图8(b)],涵盖拱顶、拱肩、拱脚及仰拱等关键部位。这些测点用于同步监测衬砌结构的动拉/压应力、动应变及特征点的竖向位移时程,以综合评估隧道结构在耦合动荷载作用下的力学状态与安全性。



(a) 道基内监测点布置



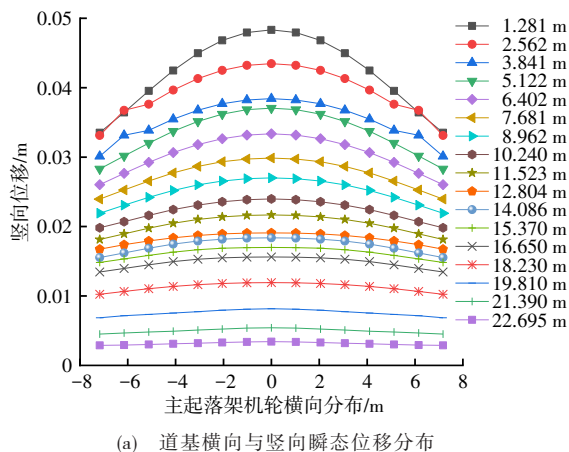
(b) 高铁隧道横断面监测布置

图8 道基与隧道衬砌结构监测点布置

Fig. 8 Layout of monitoring points in subgrade and tunnel lining structure

3 结果与分析

为系统揭示飞机与列车耦合动荷载作用下“隧道衬砌结构-围岩-机场道面结构”体系的动力响应规律与耦合效应,本节基于统一的最不利耦合工况(A380-800飞机以 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 滑行至隧道上方道面,同时2列列车以 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 在隧道中央交会),围绕



道基动力响应与隧道衬砌结构力学行为展开分析,并与单一飞机滑行荷载、单一列车振动荷载工况进行对比,以明晰不同动荷载模式下的响应特性。

3.1 耦合动荷载作用下道基竖向位移响应

为揭示列车交会振动与飞机滑行动荷载耦合下道基的位移响应规律,图9给出了该工况下道基不同深度处瞬态位移的变化曲线。

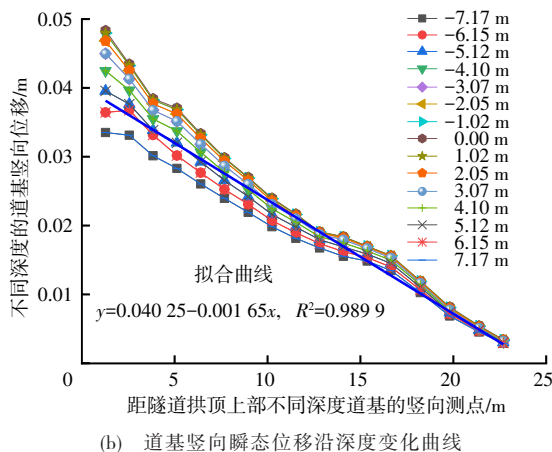


图9 耦合动荷载下拱顶上方道基位移分布

Fig. 9 Displacement distribution in subgrade above tunnel crown under coupled dynamic loads

由图9(a)可知,在飞机与列车耦合振动荷载作用下,隧道拱顶上方道基的竖向位移呈明显的“倒锅底形”分布,即中心区域位移最大,并向两侧逐渐减小。这一分布特征主要源于两方面荷载的叠加效应:其一,A380-800飞机主起落架滑行时,其动荷载在双轮印中心区域产生应力叠加;其二,下伏隧道内两列高铁在此处(隧道中央)交会,其交会振动效应与上部飞机滑行荷载引起的峰值区域在空间上重合,从而显著放大了动力响应,致使该处道基竖向瞬态位移达到最大值 48.33 mm 。上述耦合动力作用主要通过以下两方面的力学机制影响道基变形形态。

(1)应力叠加效应。耦合动荷载经由刚性道面传递与扩散,在道基浅层形成“中间强、两侧弱”的叠加应力场。依据有效应力原理,叠加应力越大,土体孔隙压缩与剪切变形越显著,从而导致轮组与隧道正上方即中央区域竖向位移最大,并向两侧逐渐衰减。

(2)边界约束效应。道面-道基界面的黏结作用限制了侧向位移,使变形以竖向为主。其中,中间区域因约束较弱、变形释放较为充分,而两侧受道面边缘约束较强,竖向位移受到抑制。在上述2种机制的共同作用下,道基竖向位移最终呈现出中央凸起、两侧平缓的“倒锅底形”分布形态。

为深入探究竖向瞬态位移沿深度的衰减规律,图9(b)展示了拱顶上方道基不同深度测点的竖向峰值位移。从图9(b)可以看出,在主起落架横向作用范围内,各测点的峰值位移随深度增加呈线性衰减趋势,其拟合曲线系数 R^2 高达0.989 9,表明该拟合直线能精确描述隧道拱顶上方道基在耦合动荷载作用下竖向位移衰减规律,为相关工程控制提供了定量依据。

3.2 动荷载作用下道基竖向动应力响应

为研究最不利工况下飞行区道基及隧底围岩竖向动应力的响应规律,图10给出了列车振动与飞机滑行耦合动荷载作用下隧底与拱顶上方道基竖向动应力沿深度的变化规律。

从图10可知,在飞机与列车耦合动荷载作用下,拱顶上方道基与隧底围岩的竖向动应力呈现不同规律:对于隧底围岩来说,其竖向动应力自仰拱底部起,随距离振源深度增加呈指数衰减,拟合曲线系数 R^2 达0.998 08,此工况下动应力峰值为 65.04 kPa 。对于拱顶上方道基来说,应力变化较为复杂;靠近衬砌拱顶处,因结构刚度大且围岩强度较高,此时列车振动的影响较小;随着距拱顶距离增加,飞机滑行荷载的影响显著增强并成为主导,导致动应力峰值在一定深度内呈现先降低后上升波动的趋势。

图11为不同动荷载作用下道基中竖向动应力

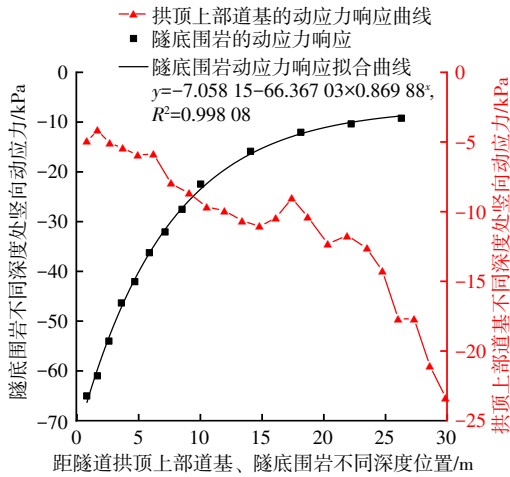
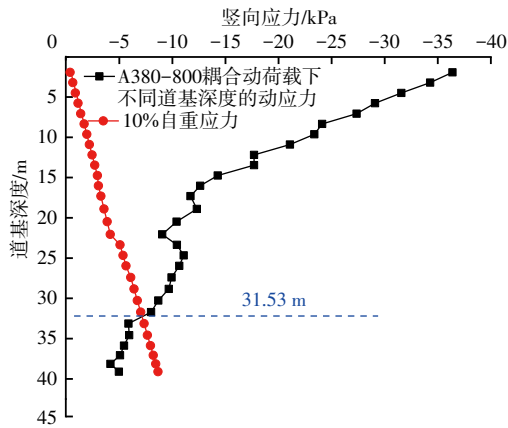
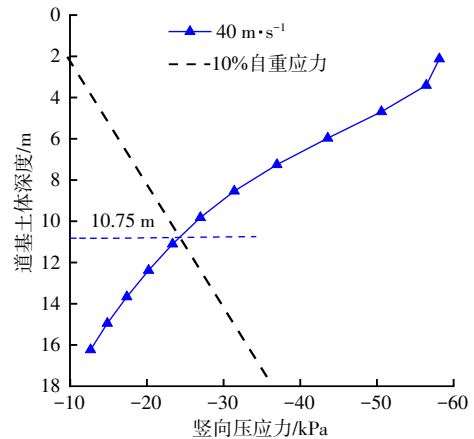


图10 耦合动荷载作用下隧底与拱顶上部道基竖向动应力沿深度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of vertical dynamic stress with depth at tunnel floor and in subgrade above tunnel crown under coupled dynamic loads



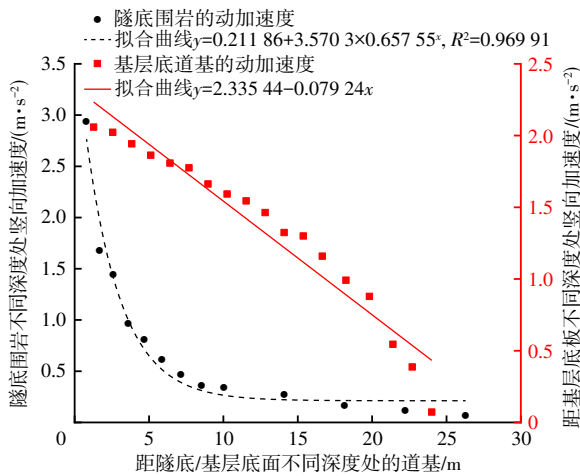
(a) 耦合动荷载下道基竖向动应力与10%自重应力对比



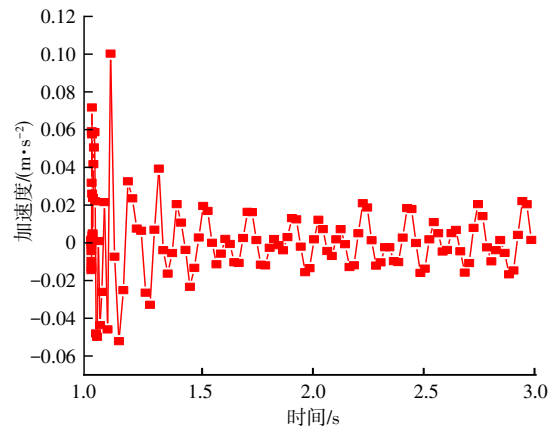
(b) 飞机动荷载下道基竖向动应力沿深度变化

图11 不同动荷载作用下道基中竖向动应力对比

Fig. 11 Comparison of vertical dynamic stress in subgrade under different dynamic loads



(a) 道基竖向加速度沿深度衰减曲线



(b) 拱顶附近道基动加速度时程曲线

图12 耦合动荷载下道基中竖向加速度响应曲线

Fig. 12 Vertical acceleration response curves in subgrade under coupled dynamic loads

对比结果。依据竖向动应力达到10%自重应力的道基深度影响评价标准,由图11(a)可得,在飞机滑行荷载与列车振动荷载耦合作用下,拱顶上部道基的动应力影响深度为31.53 m;对比图11(b)中仅考虑飞机滑行荷载的工况(影响深度10.75 m)可知,两者耦合作用下的影响深度明显高于单一飞机滑行荷载的作用,表明下伏隧道中列车振动会显著增大飞机滑行荷载对下部道基的影响范围。

3.3 动荷载作用下道基竖向加速度响应

为系统揭示并对比飞机滑行、列车振动及其耦合动荷载作用下道基加速度的响应差异,本节综合分析了道基中竖向加速度的衰减规律与影响深度。

3.3.1 耦合荷载作用下的加速度响应特征

在飞机与列车动荷载耦合作用下,飞行区道基与隧底围岩的加速度响应呈现不同的衰减规律,如图12所示。

根据工程中普遍采用的加速度峰值 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 为动力影响可忽略的临界标准;对于飞行区上部道基,峰值加速度随深度增加整体呈近似线性衰减,当测点距基层底面 24.2 m 时,其值已衰减至 $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,故影响深度小于 24.2 m ;对于隧底围岩,峰值加速度随距振源距离的增加则呈明显的指数衰减,拟合曲线 R^2 高达 $0.969\,91$,当测点距隧底 22.2 m 时,加速度衰减至前述 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的临界值,因此影响深度为 22.2 m 。此外,拱顶附近道基的动加速度最大值仅为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [图12(b)],其数值微小,影响可忽略。

3.3.2 单一荷载下加速度响应与对比

为明晰耦合效应的实质,需将耦合工况与单一荷载作用下的规律进行对比。如图13所示,在单一飞机滑行荷载作用下[图13(a)],道基加速度随距离呈指数衰减,例如A380-800以 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 滑行时拟合曲线 R^2 达 $0.983\,03$;依据 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的加速度阈值,其影响深度为 23.5 m 。在单一列车振动荷载作用下[图13(b)],因道面结构、隧道衬砌及道基本身的阻尼耗能作用,加速度随距离显著衰减,其中仰拱底围岩衰减呈指数规律且拟合精度极高($R^2=0.999\,74$),影响深度为 17.34 m ;同时,隧道拱顶上部道基加速度均小于 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,其影响可忽略。

对比耦合工况与2种单一工况的结果,可得到以下结论。

(1)影响深度差异:耦合动荷载对隧底围岩的影响深度(22.2 m)显著大于单一列车振动荷载(17.34 m);对于飞行区上部道基,耦合荷载的影响深度(小于 24.2 m)与单一飞机荷载(23.5 m)非常接

近,但在飞行区基层附近,耦合作用下的竖向加速度响应较单一飞机荷载有明显放大(差值为 $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),这揭示了飞机滑行荷载与下伏隧道列车振动在飞行区上部道基的动力响应上存在不可忽视的耦合放大效应。

(2)衰减规律与响应机制:无论在何种工况下,隧底区域的加速度衰减均严格遵循指数规律,揭示出动力响应机制的一致性;耦合工况下影响范围的显著扩展,验证了不可忽视的耦合放大效应。

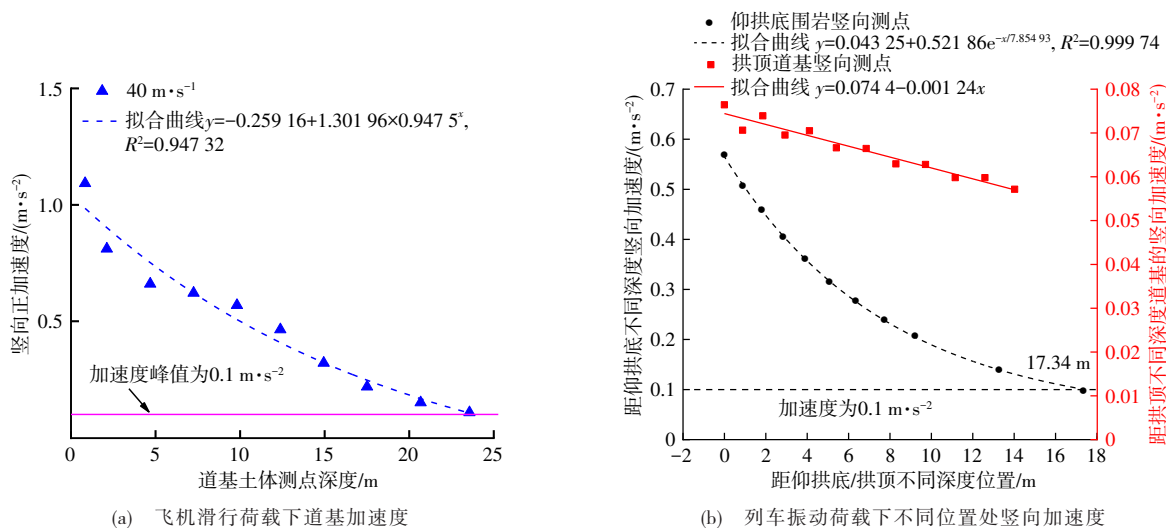
(3)工程建议:出于最不利设计原则,建议采用加速度峰值 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 和动应力为 10% 自重应力作为控制道基动力影响范围的双重阈值。

3.4 隧道衬砌结构动力响应与安全性分析

本节系统评估了隧道衬砌结构在最不利耦合荷载(飞机滑行与隧道内列车交会)作用下的动力响应与安全性,并与单一荷载工况进行对比,主要从竖向位移、应力分布及截面内力3个方面展开。

3.4.1 衬砌结构竖向位移响应

图14呈现了耦合动荷载作用下衬砌结构的竖向位移云图,图15展示了不同工况下衬砌关键点的位移时程曲线。对图15分析可知,衬砌结构竖向位移呈振荡波动特征,其中隧底(仰拱)位移响应最为显著,但位移最大值极小(耦合工况下为 0.048 mm ,单一列车振动荷载下为 0.044 mm)且两者的衬砌峰值位移量值接近;这说明在当前隧道埋深条件下,上部飞机滑行荷载对衬砌结构产生的附加竖向位移影响非常有限,其衬砌结构的位移响应主要由下伏隧道列车振动控制。



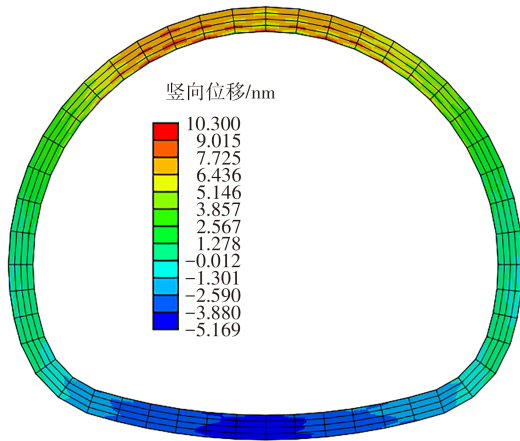
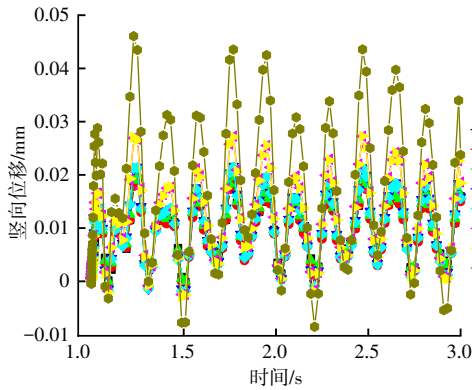
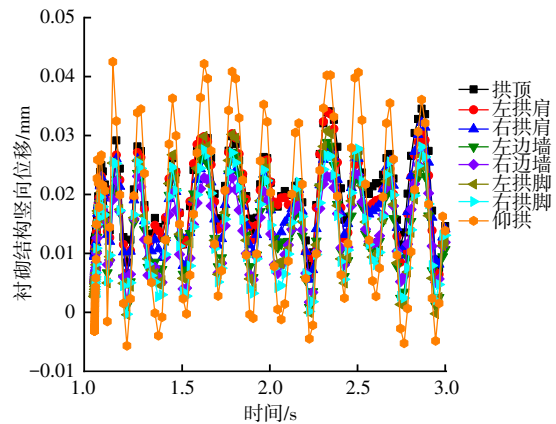


图 14 耦合动荷载下衬砌竖向位移

Fig. 14 Vertical displacement of lining under coupled dynamic loads



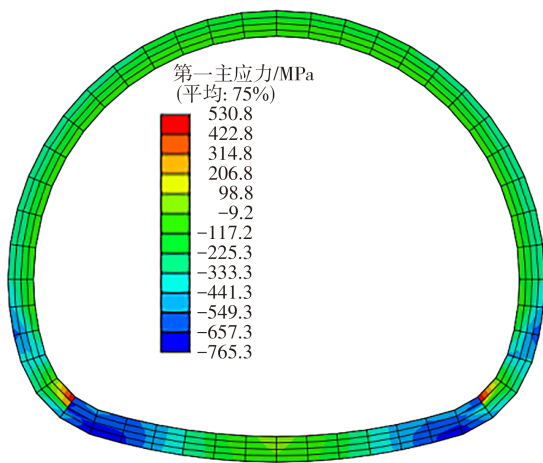
(a) 耦合动荷载



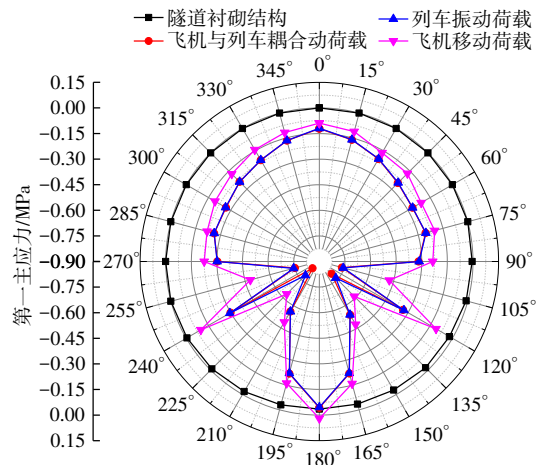
(b) 列车振动荷载

图 15 不同动荷载下衬砌结构中关键点竖向位移时程曲线对比

Fig. 15 Comparison of vertical displacement time-history curves at key points of lining structure under different dynamic loads



(a) 耦合动荷载下第一主应力



(b) 不同工况下第一主应力分布

图 16 动荷载下衬砌结构第一主应力及分布

Fig. 16 First principal stress and distribution of lining structure under dynamic loads

3.4.2 衬砌结构第一主应力分析

通过对比柱坐标系(CSYS-1)下飞机滑行荷载、列车振动荷载及两者耦合工况下的衬砌第一主应力,如图 16 揭示了如下规律:①3 种工况下,衬砌结构的应力分布形态相似,拱脚处均出现拉应力集中,其余部位主要为压应力;②耦合工况在拱脚处产生的动拉应力(530 kPa)略高于列车振动工况,而飞机滑行荷载产生的应力最小,这表明耦合作用带来了轻微的衬砌结构应力放大效应,但未改变基本的应力分布模式;③耦合工况下的最大动拉应力(530 kPa)与最大动压应力(770 kPa),均远低于 C30 混凝土的材料强度标准(抗拉强度为 2 200 kPa,抗压强度为 22 500 kPa)。从应力角度看,衬砌结构在耦合动荷载下是安全的。

3.4.3 耦合动荷载下衬砌截面内力与安全系数分析

为评估衬砌结构在耦合荷载作用下的力学状态,图17展示了隧道衬砌截面在柱坐标系下的径向应变分布。图18进一步给出了耦合动荷载与围岩压力共同作用下,衬砌截面的轴力与弯矩分布(轴力以拉力为正,压力为负;弯矩以向内弯曲为正,向外弯曲为负)。

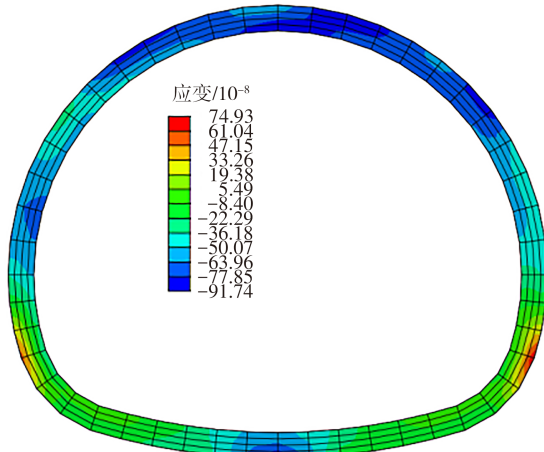


图17 耦合动荷载与围岩压力作用下衬砌截面径向应变

Fig. 17 Radial strain of lining cross-section under coupled dynamic loads and surrounding rock pressure

衬砌结构横截面的轴力 N_1 和弯矩 M_1 分别为^[41-42]

$$N_1 = E(\epsilon_1 + \epsilon_2)bh/2 \quad (5)$$

$$M_1 = E(\epsilon_1 - \epsilon_2)bh^2/12 \quad (6)$$

式中: E 为衬砌结构弹性模量; ϵ_1 、 ϵ_2 分别为衬砌结构内外侧应变; b 为单位长度; h 为衬砌厚度。

衬砌的安全性依据规范进行判定:当截面偏心距 $e \leq 0.2h$ 时,其承载力由抗压强度控制,据此计算

结构安全系数

$$kN_1 \leq \varphi\eta R_a bh \quad (7)$$

$$k = N_u/N_1 \geq k' \quad (8)$$

式中: N_u 为衬砌抗压强度极限承载力; φ 为结构纵向弯曲系数(取1.0); R_a 为混凝土极限抗压强度; η 为轴力偏心影响系数, $\eta = 1 - 1.5e/h$; k 为结构安全系数; k' 为规范安全系数。

由图18可见,在围岩压力与飞机-列车耦合动荷载的共同作用下,加之道基分布的不均匀性,衬砌截面的轴力呈明显的局部非对称性;除右拱脚区域承受拉应力外,截面其他部分均处于受压状态,与应力分布结果吻合。弯矩分布规律显示,拱肩与边墙处的弯矩由负(外弯)转正(内弯),且拱脚处弯矩值最大,拱脚是潜在的抗拉薄弱区,需在设计中予以重点关注。

为定量评估隧道衬砌结构的安全性,表3给出了最不利耦合工况下各特征截面的内力及安全系数。测点沿隧道环向从拱顶起按顺时针方向每隔15°布置,共24个。通过分析表3可知,全断面各特征截面的安全系数均远超规范要求的2.0,最小安全系数高达720.62。这一结果从截面内力与承载力的角度定量证实:在飞机-列车耦合动荷载与围岩压力的共同作用下,隧道衬砌结构具有极高的安全储备,完全满足工程安全要求。

4 结 语

(1)耦合动荷载作用下,隧道拱顶上方道基竖向位移呈“倒锅底形”空间分布,瞬态峰值达48.33 mm,并随深度呈线性规律衰减,说明位移响应主要由飞

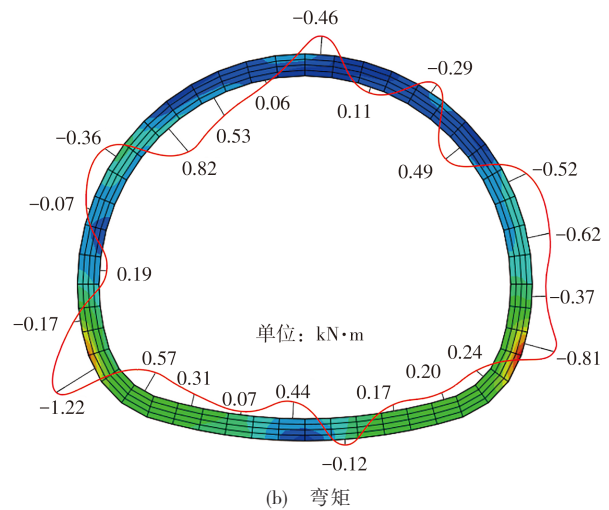
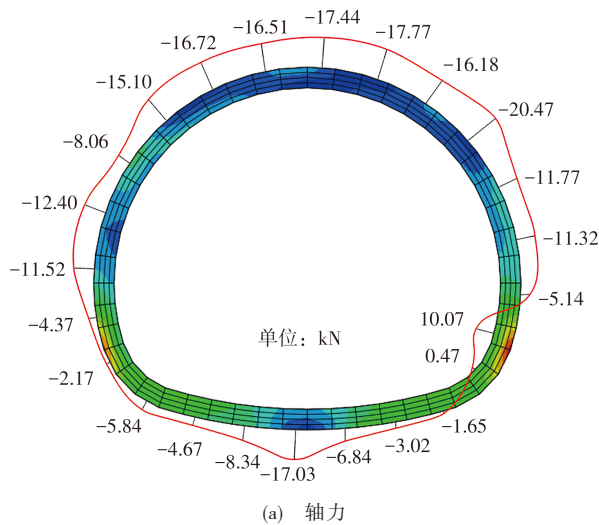


图18 耦合动荷载与围岩压力作用下衬砌截面内力分布

Fig. 18 Internal force distributions of lining cross-section under coupled dynamic loads and surrounding rock pressure

表 3 隧道衬砌截面内力与安全系数
Table 3 Internal forces and safety factors of tunnel lining

cross-section			
截面位置/(°)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
0	-17.44	-0.46	845.91
15	-17.77	0.11	829.97
30	-16.18	-0.29	911.63
45	-20.47	0.49	720.62
60	-11.77	-0.52	1 253.37
75	-11.32	-0.62	1 302.88
90	-5.14	-0.37	2 867.35
105	10.07	-0.81	1 464.13
120	0.47	0.24	31 128.92
135	-1.65	0.20	8 966.05
150	-3.02	0.17	4 887.97
165	-6.84	-0.12	2 156.40
180	-17.03	0.44	866.26
195	-8.34	0.07	1 768.78
210	-4.67	0.31	3 156.44
225	-5.84	0.57	2 526.89
240	-2.17	-1.22	6 802.41
255	-4.37	-0.17	3 373.32
270	-11.52	0.19	1 280.21
285	-12.40	-0.07	1 189.56
300	-8.06	-0.36	1 829.33
315	-15.10	0.82	976.61
330	-16.72	0.53	882.32
345	-16.51	0.06	893.29

机荷载与列车交会振动的空间叠加效应控制。

(2)耦合荷载对道基的动力影响呈现空间异质性并具有显著放大效应一下伏隧道中的列车振动放大了上部飞机滑行荷载的影响:基于动应力达到自重应力 10% 的标准,道基影响深度从飞机单独滑行荷载作用时的 10.75 m 增大至耦合动荷载工况的 31.53 m;基于加速度峰值 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的标准,隧底围岩的影响深度则从列车单独振动作用时的 17.34 m 增至耦合动荷载工况的 22.2 m。

(3)道基加速度响应规律也呈现出显著的空间异质性:在耦合动荷载作用下,上部道基加速度近似呈线性衰减,影响深度小于 24.2 m;而隧底围岩加速度则呈指数衰减。值得注意的是,耦合作用显著扩大了动力影响范围(基于动应力达到自重应力 10% 的标准),其影响深度可达 31.53 m。因此,为确保工程安全,建议采用以加速度峰值 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 和动应力为 10% 自重应力构成的双重阈值进行综合控制。

(4)隧道衬砌结构在耦合荷载作用下表现出充

足的安全储备。首先,耦合动荷载仅在拱脚处引起轻微的拉应力放大(530 kPa),该值远低于 C30 混凝土的材料强度。其次,衬砌结构的整体位移响应($\leq 0.048\text{ mm}$)主要由下伏隧道的列车振动控制,上部飞机滑行荷载的影响可忽略不计。此外,在耦合动荷载工况下,衬砌全断面最小安全系数高达 720.62,完全满足规范要求。

(5)本文针对特定工况开展耦合系统动力响应分析,研究成果能够为相关工程评价提供理论与数据参考。结合工程实际,未来可围绕两大方向开展拓展研究:一是结合复杂地质条件,揭示长期循环荷载引发的道面结构累积疲劳损伤机制;二是研制耦合模型试验系统,通过室内试验探明道基与隧道衬砌的动力响应特性,进而为复杂耦合交通荷载下结构安全防控体系的构建奠定试验基础。

参考文献:

References:

[1] 周正峰,凌建明.基于 ABAQUS 的机场刚性道面结构有限元模型[J].交通运输工程学报,2009,9(3):39-44.
ZHOU Zheng-feng, LING Jian-ming. Finite element model of airport rigid pavement structure based

- 2021, 21(5): 2150065.
- [7] LOPRENCIPE G, ZOCCALI P. Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(7): 782-791.
- [8] TIAN Y, LIU S F, LIU L, et al. Optimization of international roughness index model parameters for sustainable runway[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2184.
- [9] LIU S F, LING J M, TIAN Y, et al. Random vibration analysis of a coupled aircraft/runway modeled system for runway evaluation[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2815.
- [10] BAZI G, HAJJ E, ULLOA-CALDERON A, et al. Finite element modelling of the rolling resistance due to pavement deformation[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(3): 365-375.
- [11] 凌建明,王增逸,刘诗福,等.飞机滑跑激振和着陆冲击的动载预估模型[J].交通运输工程学报,2026,26(8):1-19.
- LING Jian-ming, WANG Zeng-yi, LIU Shi-fu, et al. Dynamic load predictive model for aircraft taxiing excitation and landing impact[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 1-19.
- [12] 郑飞,翁兴中.飞机荷载下水泥混凝土道面板应力计算方法[J].交通运输工程学报,2010,10(4):8-15.
- ZHENG Fei, WENG Xing-zhong. Calculating methods of stress for cement concrete pavement slab under plane loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 8-15.
- [13] 穆一凡,夏海廷,胡桂章,等.冲击荷载作用下机场刚性道面动力响应与影响因素分析[J].科学技术与工程,2023,23(7): 3029-3037.
- MU Yi-fan, XIA Hai-ting, HU Gui-zhang, et al. Analysis of dynamic response and influencing factors of airport rigid pavement under impact load[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 3029-3037.
- [14] 魏保立,郭成超,崔璨.飞机滑行荷载对机场道面的随机振动效应分析[J].科学技术与工程,2018,18(16):101-106.
- WEI Bao-li, GUO Cheng-chao, CUI Can. Random vibration analysis of airport pavement in condition of aircraft taxiing[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(16): 101-106.
- [15] 王兴涛,陈建峰,叶观宝,等.波音747型飞机跑道滑力学响应[J].交通运输工程学报,2016,16(2):1-9.
- WANG Xing-tao, CHEN Jian-feng, YE Guan-bao, et al. Mechanical responses of Boeing 747 running on runways[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2): 1-9.
- [16] 蔡靖,张鑫,李岳.多机型影响下跑道结构层动态响应分析[J].南京航空航天大学学报,2020,52(6):930-936.
- CAI Jing, ZHANG Xin, LI Yue. Analysis on dynamic response of runway structure layers under multiple aircraft types' impact[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 930-936.
- [17] 刘诗福,赵家福,侯天新,等.不平整激励对飞机-跑道系统动力响应的作用机制[J].振动与冲击,2025,44(10):198-207.
- LIU Shi-fu, ZHAO Jia-fu, HOU Tian-xin, et al. Mechanism of uneven excitation on the dynamic response of aircraft-runway system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(10): 198-207.
- [18] 黄博,王宇,盛文军,等.飞机制动滑行作用下跑道的动力响应[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(8):3052-3061.
- HUANG Bo, WANG Yu, SHENG Wen-jun, et al. Dynamic response of runway during aircraft braking taxiing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3052-3061.
- [19] NAM B H. In-situ super accelerated pavement test for the fatigue evaluation of in-service airfield rigid pavement—A case study at Meacham Airport[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129115.
- [20] WANG H, LI M Y, GARG N, et al. Multi-wheel gear loading effect on load-induced failure potential of airfield flexible pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(6): 805-816.
- [21] PARK H W, KIM D H, SHIM C S, et al. Behavior of airport concrete pavement slabs exposed to environmental loadings[J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2618.
- [22] DONG Q, WANG J H, ZHANG X M, et al. Dynamic response analysis of airport pavements during aircraft taxiing for evaluating pavement bearing capacity[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2021, 22(9): 736-750.
- [23] HU C, WENG X Z, ZHANG J, et al. Experimental study on fatigue strength of airport concrete pavement slab[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121493.
- [24] ROBINSON W J, HOWARD I L, TINGLE J S, et al. Analysis of full-scale geosynthetic reinforced airfield pavement subjected to accelerated aircraft loading[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(3): 04020052.
- [25] 魏晓刚,杨柳川,刘会丽,等.机场跑道下穿隧道结构稳定性影响因素研究[J].工业建筑,2022,52(1):165-173.
- WEI Xiao-gang, YANG Liu-chuan, LIU Hui-li, et al. Research on influencing factors of structural stability of airport runway underpass tunnel[J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 165-173.
- [26] 魏晓刚,秦志帆,王世翱,等.飞机滑跑作用下隧道结构的稳定性分析[J].科学技术与工程,2025,25(8):3425-3437.
- WEI Xiao-gang, QIN Zhi-fan, WANG Shi-ao, et al. Stability analysis of tunnel structure under the action of aircraft running[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3425-3437.
- [27] 李飞龙,姜昌山,蔡国庆,等.飞机滑行荷载对水泥混凝土道面及下穿通道的动力响应影响[J].土木工程学报,2024,57(增2):80-87.
- LI Fei-long, JIANG Chang-shan, CAI Guo-qing, et al. Effect of aircraft taxiing load on dynamic response

- 2024, 57(S2): 80-87.
- [28] 孙晓静, 谭忠盛, 周思震, 等. 飞机荷载对隧道结构的动力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 156-163.
SUN Xiao-jing, TAN Zhong-sheng, ZHOU Si-zhen, et al. Analysis of the dynamic influence of aircraft load on a tunnel structure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 156-163.
- [29] 巴振宁, 符瞻远, 付继赛, 等. 地铁列车振动对颐和园北宫门古建筑木结构影响的实测与分析[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1602-1612.
BA Zhen-ning, FU Zhan-yuan, FU Ji-sai, et al. Measurement and analysis of the influence of metro train vibration on the ancient wooden structures of north palace gate of the Summer Palace [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6): 1602-1612.
- [30] 陈娟, 宋耀, 高广运, 等. 高架桥段高铁与地铁列车荷载共同作用下地面振动特性实测研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(13): 97-105.
CHEN Juan, SONG Yao, GAO Guang-yun, et al. Actual testing study on ground vibration characteristics under combined load actions of high-speed trains passing through viaduct and subway trains [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(13): 97-105.
- [31] 吴雪, 周兴龙, 钟瑞, 等. 时速350 km高速列车下穿机场对跑道区道面的影响[J]. 铁道建筑, 2021, 61(8): 154-158.
WU Xue, ZHOU Xing-long, ZHONG Rui, et al. Influence of 350 km/h high speed train under-crossing airport on runway area pavement[J]. Railway Engineering, 2021, 61(8): 154-158.
- [32] 高盟, 李佳文, 李丹阳. 双线列车移动荷载作用下饱和地基振动响应特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(3): 228-235.
GAO Meng, LI Jia-wen, LI Dan-yang. Analysis of vibration response characteristics of saturated foundation under moving load of double-track trains [J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(3): 228-235.
- [33] 中国民用航空局机场司. 铁路、城市轨道交通下穿机场飞行区影响分析研究[R]. 北京: 中国民用航空局机场司, 2022: 7-43.
Airports Department of Civil Aviation Administration of China. Impact analysis of railway and urban rail transit under-crossing airport flight area [R]. Beijing: Airports Department of Civil Aviation Administration of China, 2022: 7-43.
- [34] GOLOV E, EVTYUKOV S, PROTSUTO M, et al. Influence of the road surface roughness (according to the international roughness index) on road safety [J]. Transportation Research Procedia, 2022, 63: 999-1006.
- [35] YANG L C, WEI X G, FA J Y, et al. Numerical study of influencing factors of safety and stability of tunnel structure under airport runway [J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10432.
- [36] 高峰, 付钢, 胡文亮. 移动飞机荷载对机场下部隧道的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 218-222.
GAO Feng, FU Gang, HU Wen-liang. Influence of moving aircraft loads on airport tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2012, 31(2): 218-222.
- [37] 潘昌实, PANDE G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984, 17(4): 19-28, 18.
PAN Chang-shi, PANDE G N. Preliminary deterministic finite element study on a tunnel driven in loess subjected to train loading [J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(4): 19-28, 18.
- [38] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51.
- [39] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
MA Sheng-jie, CHI Ming-jie, CHEN Hong-juan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [40] 陆飞云. 地下结构动力计算中地层弹簧参数和地层边界研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 44-48.
LU Fei-yun. Research on stratum spring parameters and stratum boundary in dynamic calculation of underground structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 44-48.
- [41] 闵博. 非对称连拱隧道衬砌开裂特征及其对结构承载能力的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 24-26.
MIN Bo. Study on the cracking characteristic of asymmetric double-arch tunnel linings and its influence on structural bearing capacity [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 24-26.
- [42] LI F L, JIANG C S, CAI G Q, et al. Study on force characteristics and safety of segment structure and bolts with and without cavity behind lining with multi-field coupling [J]. Buildings, 2023, 13(8): 2108.