基于结构响应参数的机场滑行道桥损伤量化分析

张宇辉[1],高一驰[1],赵媛媛[2]
(1. 中国民航大学交通科学与工程学院,天津　300300; 2. 中国中元国际工程有限公司,北京　100086)

摘　要: 为高效分析滑行道桥在损伤情况下的安全通行能力,探究不同损伤情况下的滑行道桥响应参数,本文采用数值模拟的方法,建立飞机-滑行道桥耦合振动损伤模型,进行滑行道桥安全承载力学性能评估实验分析。根据相关规范,针对滑行道桥不同损伤类型(整体损伤、支座损伤、局部裂缝),以 5%、10%、15%、20%、25%量化滑行道桥整体刚度损伤程度和 20%、40%、60%、80%、100%量化支座刚度损伤程度;根据预应力筋的位置,设置 20、40、60、80、100 mm 5 种裂缝深度来量化裂缝损伤。结合不同机型的荷载作用,探究分析不同工况下滑行道桥的 2 个响应参数(频率和跨中挠度),验证损伤分级可行性并进行相关滑行道桥安全承载能力分析。结果表明,不同损伤类型(整体损伤、支座损伤、局部裂缝)滑行道桥的频率和跨中挠度变化均与损伤程度呈现明显的相关性,且不同损伤类型对滑行道桥的结构响应有显著影响。

关键词: 滑行道桥;损伤量化;振动频率;挠度;安全承载力
中图分类号: V351　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1674-5590(2026)01-0040-07

Quantitative analysis of damage to airport taxiway bridges based on structural response parameters

ZHANG Yuhui[1], *GAO Yichi*[1], *ZHAO Yuanyuan*[2]
(1. *College of Transportation Science and Engineering, CAUC, Tianjin* 300300, *China*; 2. *China IPPR International Engineering Co., Ltd., Beijing* 100086, *China)*

Abstract: To efficiently analyze the safe passage capacity of taxiway bridges under damage conditions and investigate their response parameters under different damage scenarios, this paper adopts a numerical simulation method to establish an aircraft-taxiway bridge coupled vibration damage model and conducts experimental analysis for evaluating the safety load-bearing mechanical performance of taxiway bridges. According to relevant specifications, for different damage types of taxiway bridges (overall damage, bearing damage and local cracks), the overall stiffness damage degree is quantified as 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, and the bearing stiffness damage degree is quantified as 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. Based on the position of prestressed tendons, five crack depths of 20, 40, 60, 80 and 100 mm are set to quantify crack damage. Combining the loading effects of different aircraft types, this study investigates two response parameters of taxiway bridges (frequency and mid-span deflection) under various working conditions to verify the feasibility of damage grading, and perform related safety load-bearing capacity analysis of taxiway bridges. The results show that the variations of frequency and mid-span deflection of taxiway bridges under different damage types (overall damage, bearing damage and local cracks) are all clearly correlated with the damage degree, and different damage types significantly affect the structural response of taxiway bridges.

Key words: taxiway bridge; damage quantification; vibration frequency; deflection; safety load-bearing capacity

机场滑行道桥是指机场滑行道为跨越障碍物而修建的构筑物,简称滑行道桥[1]。滑行道桥可以解决部分吞吐量已经饱和的大型枢纽机场与现有或规划的公路铁路网、河流、管线等相交问题,也可以满足部分受地形地貌限制的机场新建和改扩建等需求,已经成为机场飞行区场道系统的重要组成部分[2]。目前关于

收稿日期: 2024-11-18; **修回日期:** 2025-03-19　　**基金项目:** 天津市教委科研计划项目(2018KJ245)
作者简介: 张宇辉(1984—　),男,山西吕梁人,副教授,博士,研究方向为机场滑行道桥研究.

滑行道桥的研究主要集中于仿真建模的建立与优化、性能测试分析等。黄信等[3]通过建立机场滑行道桥桥面三维精细化分析模型,探究了滑行道桥桥面板的横向有效分布宽度的合理取值。戚春香等[4]优化了滑行道桥的受力性能,对比分析了简支梁桥截面形式、跨度以及连续梁桥跨数、边跨比对机–桥耦合模型振动的影响。张宇辉等[5]通过研究飞机荷载对冲击系数的影响,建立了滑行道桥动–静荷载力学计算模型。

如何快速有效分析滑行道桥损伤状态下的安全承载能力,为飞行区场道管理与维护提供理论与技术支持,已成为滑行道桥损伤技术研究的核心问题之一。为优化桥梁损伤检测方法,学者们提出采用桥梁振动参数实现桥梁测试的方法,桥梁结构的固有特性如刚度、质量等,决定了桥梁结构的响应,反之,桥梁结构的响应也可以反映出桥梁结构的固有特性;通过测试桥梁结构响应反推桥梁结构特性,推测桥梁结构物理参数,进行桥梁结构内力的分析和承载力计算。关于桥梁损伤与结构响应参数之间的关系研究,在公路桥梁和铁路桥梁方面,文献[6]从振动响应中识别桥梁的固有频率、模态阻尼比和振型,实现桥梁结构损伤状态的识别;文献[7]采用数值分析与实际测量的方法,共同模拟桥梁的局部损伤,探究局部裂纹对桥梁结构性能的敏感性影响;文献[8]通过将桥梁损伤状态变化转换为结构刚度节点损伤矩阵的变化,提出了基于桥梁响应参数识别桥梁结构节点损伤的检测方法。在滑行道桥损伤研究方面,文献[9]通过理论分析、数值计算和现场实验的方法,验证了基于振动参数的滑行道桥损伤识别方法的可行性;文献[10]提出了基于动态试验的滑行道桥快速诊断技术,并模拟了不同形式滑行道桥结构损伤对动力模态试验和动力荷载试验结果的影响。

综上所述,大部分的研究都从滑行道桥的建模和损伤检测优化角度出发,并未基于实际应用规范。从不同响应参数下滑行道桥检测和损伤识别的角度出发,探讨适用于滑行道桥实际检测的不同损伤类型下的损伤分级,并针对不同损伤分级下飞机荷载对滑行道桥结构特性参数影响的研究较少。

本文结合桥梁振动的基本理论,建立不同损伤类型下(整体损伤、支座损伤、局部裂缝)的滑行道桥损伤量化模型,研究在不同损伤状态下滑行道桥结构响应参数的变化情况,对滑行道桥进行安全承载性能分析,可为准确识别、判断滑行道桥损伤状态提供有力支持。

1　飞机–滑行道桥耦合振动建模可行性分析

1.1　飞机–滑行道桥耦合振动理论

当飞机在滑行道桥上运动时,二者之间会相互作用、相互影响,产生共同振动。在有限元模型中,可将飞机与滑行道桥 2 个结构体系视为一个整体振动的结构体系。滑行道桥的固有频率 f 可表示为

$$f=\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{1}$$

式中:n 代表振动阶数;m 代表结构的质量;E 代表滑行道桥材料的弹性模量;I 代表滑行道桥截面的惯性矩;L 代表滑行道桥的跨径。

在考虑滑行道桥刚度和质量变化的情况下,根据增量原理,计算得到滑行道桥结构固有频率的增量 Δf,可表示为

$$\Delta f=\frac{1}{\pi}\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{m}}\left(\frac{\Delta I}{I}-\frac{\Delta m}{m}\right) \tag{2}$$

式中:Δm 表示滑行道桥质量的变化;ΔI 表示滑行道桥截面惯性矩的变化。

通过施加不同的机型荷载可以反映出滑行道桥结构在耦合荷载作用下的实际振动状态。

1.2　建立健康滑行道桥有限元模型

本文以南方某机场的小跨径预应力混凝土简支梁滑行道桥为分析对象。该滑行道桥为双跨混凝土简支梁结构,计算跨径为 16 m,桥面滑行通道为 44 m,全宽为 65.5 m,按 B747 翼展设计。滑行道桥实体如图 1 所示。

图 1　滑行道桥实体图

Fig.1　Actual photograph of the taxiway bridge

建模时,将滑行道桥简化为上部结构的约束,滑行道桥整体刚度为 345 000 MPa;采用降温法实现预应力的施加[11],使用“embedded”功能放置钢筋,实现钢筋混凝土的耦合。滑行道桥支座为板式橡胶支座,共 128 个支座,支座规格为 400 mm × 700 mm × 78 mm,计算其抗压弹性模量为 503 MPa[12–13]。滑行道桥局部支座图如图 2 所示,将滑行道桥上部与支座接触处进

行切分，共切分出 128 个尺寸为 400 mm × 700 mm 的矩形，在支座底面施加相应约束。

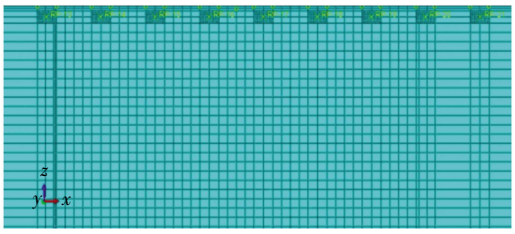


图 2　滑行道桥局部支座图

Fig.2　Local bearing diagram of the taxiway bridge

滑行道桥与支座的网格单元采用 C3D8R 单元，滑行道桥网格划分如图 3 所示。

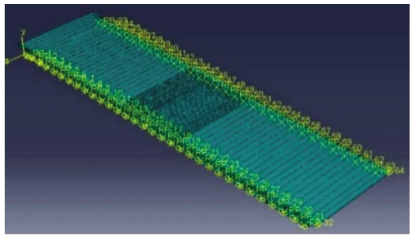


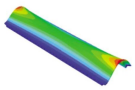
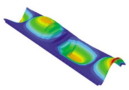
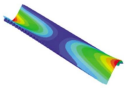
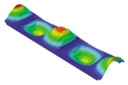
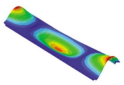
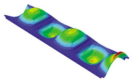
图 3　滑行道桥上部结构网格划分图

Fig.3　Mesh division diagram of the taxiway bridge superstructure

根据该滑行道桥的检测报告[14]，无损伤状态下滑行道桥的振动频率理论值为 10.700 Hz。健康滑行道桥实体模型模态计算结果如表 1 所示，滑行道桥实体模型具有良好的振动状态，在预应力场和重力场的作用下，仿真计算得到的一阶频率为 10.050 Hz，与滑行道桥检测报告中滑行道桥理论频率相差 6.075%。

表 1　滑行道桥模型频率与振型云图

Tab.1　Frequency and mode shape contour plots of the taxiway bridge model

频率阶数	频率/Hz	振型云图	频率阶数	频率/Hz	振型云图
一阶	10.050		四阶	14.369	
二阶	10.577		五阶	14.830	
三阶	12.238		六阶	16.139	

1.3　不同机型对机–桥耦合振动模型的影响

选取国内常用机型作为加载机型，包括：单轴双轮 B737–800，双轴双轮 B747–400，三轴双轮 B777–300，加载区域为跨中部位。各机型的主起落架构型如图 4 所示。根据荷载面积等效原则[15]，计算过程中将飞机轮印简化为矩形轮印。

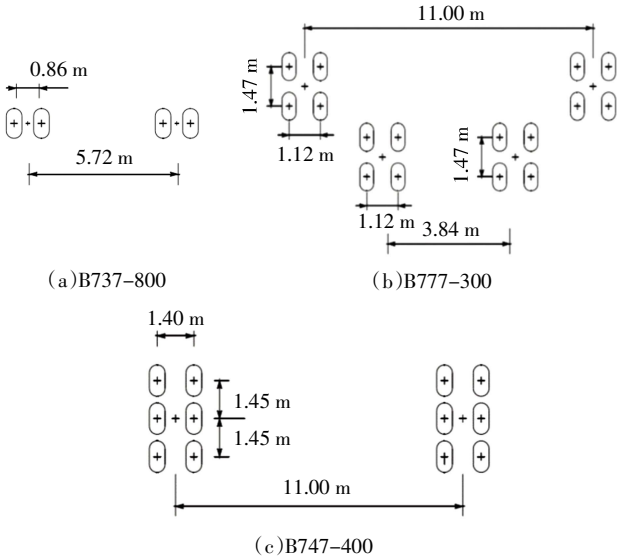


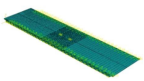
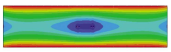
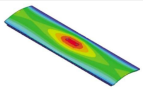
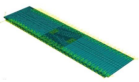
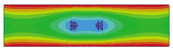
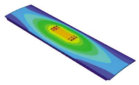
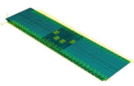
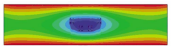
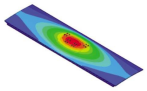
图 4　主起落架构型图

Fig.4　Configuration diagram of the main landing gear

不同机型加载结果如表 2 所示，对比不同机型在同一位置的频率变化，滑行道桥的振动频率因飞机荷载的施加而降低，挠度也随之增大，验证了该模型的有效性与可行性，可用于后续的损伤分级研究。

表 2　跨中部位不同机型加载结果示意图

Tab.2　Loading result diagram at mid–span for different aircraft types

机型	模型	挠度云图及挠度值	一阶振型图(频率/Hz)
B737–800			
	单轴双轮	1.874 mm	9.610 3
B777–300			
	三轴双轮	2.162 mm	8.356 2
B747–400			
	双轴双轮	2.165 mm	8.101 3

2　滑行道桥损伤量化机理分析

本文考虑 3 种滑行道桥损伤：①整体损伤，因动力作用和静力作用导致的滑行道桥刚度下降；②支座损伤，滑行道桥的支座容易出现松弛的现象，导致支座刚度下降；③局部裂缝，在飞机荷载和温度等因素的作用下，滑行道桥跨中部位产生裂缝。

2.1　基于损伤量化的滑行道桥频率变化原理

滑行道桥的自由振动方程可表示为

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{x}}\} + [\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{x}}\} + [\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\} = \{0\} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为滑行道桥的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;$\ddot{\boldsymbol{x}}$、$\dot{\boldsymbol{x}}$、$\boldsymbol{x}$ 分别为滑行道桥振动的加速度向量、速度向量、位移向量。

滑行道桥结构的特征值方程可表示为

$$([\boldsymbol{K}]-\omega^2[\boldsymbol{M}])\{\boldsymbol{\phi}\}=\{0\} \tag{4}$$

式中:ω^2 是滑行道桥结构的特征值,反映滑行道桥结构固有频率的变化;$\boldsymbol{\phi}$ 是滑行道桥的特征向量,反映滑行道桥振型的变化。

当滑行道桥出现损伤时,滑行道桥的刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 会发生变化,因此,滑行道桥的特征值和特征向量也会随之变化,可表示为

$$([\boldsymbol{K}]+[\Delta\boldsymbol{K}]-(\omega^2-\Delta\omega^2)([\boldsymbol{M}]+[\Delta\boldsymbol{M}]))\times(\{\boldsymbol{\phi}\}+\{\Delta\boldsymbol{\phi}\})=\{0\} \tag{5}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{\phi}$ 表示滑行道桥特征向量的变化;$\Delta\omega^2$ 表示滑行道桥特征值的变化;$[\Delta\boldsymbol{K}]$表示滑行道桥刚度矩阵的变化;$[\Delta\boldsymbol{M}]$表示滑行道桥质量矩阵的变化。

忽略二次项,$\Delta\omega^2$ 可展开为

$$\Delta\omega^2=\frac{\{\boldsymbol{\phi}\}^{\mathrm{T}}[\Delta\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{\phi}\}}{\{\boldsymbol{\phi}\}^{\mathrm{T}}([\boldsymbol{M}]+[\Delta\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{\phi}\})} \tag{6}$$

将 $\Delta\omega^2$ 定义为 s 级损伤状态下的滑行道桥结构损伤程度,则可得

$$\Delta\omega_s^2(\mu_s)=\frac{\{\boldsymbol{\phi}_s\}^{\mathrm{T}}[\Delta\boldsymbol{K}_s(\mu_s)]\{\boldsymbol{\phi}_s\}}{\{\boldsymbol{\phi}_s\}^{\mathrm{T}}([\boldsymbol{M}]+[\Delta\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{\phi}_s\})} \tag{7}$$

式中,μ_s 为损伤等级。

滑行道桥损伤程度会影响滑行道桥的特征值,即会影响滑行道桥的固有频率。

2.2　基于损伤量化的滑行道桥跨中挠度变化原理

滑行道桥的挠度与刚度有直接联系,损伤会导致刚度下降,从而使滑行道桥在相同荷载下的挠度增大。根据平截面假定[16],均质纯弯完好梁跨中挠度理论计算公式可表示为

$$\delta=\frac{PL^3}{48EI} \tag{8}$$

式中:δ 为荷载作用下跨中截面的挠度值;P 为荷载作用下纯弯截面的弯矩值。

在 s 级损伤状态下,定义滑行道桥刚度损伤等级因子 D_s,则其他条件不变的情况下,损伤状态下的滑行道桥截面惯性矩为 I_s,可表示为

$$I_s=I(1-D_s) \tag{9}$$

此时 s 级损伤状态下的滑行道桥跨中挠度 δ_s 可表示为

$$\delta_s=\frac{PL^3}{48EI_s}=\frac{PL^3}{48EI(1-D_s)} \tag{10}$$

$$\frac{\Delta\delta}{\delta}=\frac{\delta_s-\delta}{\delta}=\frac{EI}{EI_s}-1=\frac{1}{1-D_s}-1 \tag{11}$$

式(11)中,$\Delta\delta$ 表示滑行道桥的跨中挠度变化,该式表示 D_s 增大时,挠度增加,刚度下降,当 D_s 增加到一定程度时,滑行道桥失去承载能力。

3　滑行道桥损伤量化模型分析

3.1　整体损伤

3.1.1　整体损伤分级设置

根据《民用机场飞机荷载桥梁技术状况评定规程》(简称《评定规程》)中飞机荷载桥梁的总体技术评定等级[2](如表 3 所示),设置 5 种滑行道桥整体损伤类型。

表 3　飞机荷载桥梁总体技术状况评定等级

Tab.3　Overall technical condition evaluation level of the bridge under aircraft loading

技术状况评定等级	技术状况描述
1 类	良好状态、功能完好
2 类	有轻微缺损,对桥梁使用功能无影响
3 类	有中等缺陷,尚能维持正常使用功能
4 类	主要构件有大的缺陷,严重影响桥梁使用功能或影响承载能力,不能保证正常使用
5 类	主要构件有严重缺陷,主要构件不能正常使用,危及桥梁安全,桥梁处于危险状态

在健康无损伤情况下,滑行道桥的整体刚度为 345 000 MPa,参考《公路桥涵养护规范》中对桥梁损伤承载能力的规定[17],将整体刚度损伤程度定为 5%、10%、15%、20%、25% 5 个级别,实现滑行道桥整体刚度损伤的量化模拟。

3.1.2　整体损伤程度分级模型仿真结果分析

设置 4 种不同荷载分别为:无荷载、B737-800 最大滑行质量、B777-300 最大滑行质量、B747-400 最大滑行质量,结合健康无损伤情况,共分析 6 个损伤程度级别,24 种工况。

整体损伤不同损伤程度下的滑行道桥频率如表 4 所示,滑行道桥结构频率变化如图 5(a)所示。从图 5(a)可以看出,滑行道桥的频率呈线性下降的趋势,与整体损伤程度相匹配。当整体刚度损伤程度为 25% 时,即滑行道桥处于完全损伤的情况下,B737-800加载时,滑行道桥频率降低 12.74%;B777-300 和B747-400 加载时,滑行道桥频率分别降低 12.95%和 12.93%;滑行道桥的频率降低幅度介于 12.74%~12.95%之间。相关研究表明[18],当滑行道桥频率下降至完好状态下的15%~25%时,滑行道桥无法使用,根据仿真计算数据可知,当整体刚度损伤程度为 25%时,滑行道桥频率已接近极限,承载性能无法保证,滑行道桥已无法安全通行。整体损伤不同损伤程度下的滑行道桥跨中

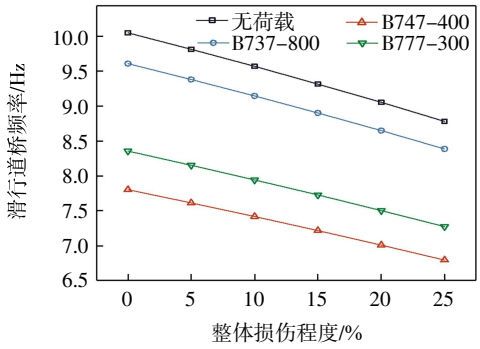
挠度如表 5 所示，滑行道桥跨中挠度变化如图 5(b)所示。从图 5(b)可以看出，当整体刚度损伤程度为 25%时，B737–800 加载时，滑行道桥跨中挠度上升 32.28%；B777–300 和 B747–400 加载时，滑行道桥跨中挠度分别上升 32.52%和 33.33%。根据《评定规程》[2]，当跨中挠度大于计算跨径的 1/600 时，滑行道桥承载性能受到严重影响。该滑行道桥的计算跨径为 16 m，跨中挠度计算结果为 2.67 cm，当滑行道桥整体刚度损伤程度为 25%时，B777–300 和 B747–400 加载情况下，滑行道桥跨中挠度大于 2.67 cm，说明滑行道桥超过承载极限，已无法安全通行。

表 4　整体损伤不同刚度损伤程度下的滑行道桥频率

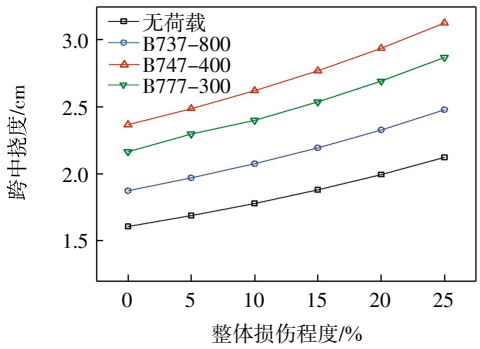
Tab.4　Frequency of the taxiway bridge under different stiffness damage degrees of overall damage

Hz

加载情况	刚度损伤程度/%					
	0	5	10	15	20	25
无荷载	10.050	9.814	9.570	9.317	9.055	8.782
B737–800	9.610	9.382	9.146	8.902	8.649	8.386
B777–300	8.356	8.153	7.944	7.728	7.504	7.274
B747–400	7.803	7.614	7.418	7.217	7.009	6.794



(a)频率变化



(b)跨中挠度变化

图 5　整体损伤不同刚度损伤程度下滑行道桥结构响应

Fig.5　Structural response of the taxiway bridge under different stiffness damage degrees of overall damage

表 5　整体损伤不同刚度损伤程度下滑行道桥跨中挠度

Tab.5　Mid–span deflection of the taxiway bridge under different stiffness damage degrees of overall damage

cm

加载情况	刚度损伤程度/%					
	0	5	10	15	20	25
无荷载	1.607	1.689	1.779	1.881	1.995	2.124
B737–800	1.874	1.970	2.076	2.194	2.328	2.479
B777–300	2.165	2.298	2.400	2.538	2.693	2.869
B747–400	2.367	2.487	2.628	2.784	2.948	3.156

3.2　支座损伤

3.2.1　支座损伤分级设置

根据《评定规程》中主要部件技术状况评定等级[2]（如表 6 所示），设置 5 种支座损伤程度。

表 6　飞机荷载桥梁主要部件技术状况评定等级

Tab.6　Technical condition evaluation level of major components of the bridge under aircraft loading

技术状况评定等级	技术状况描述
1 类	良好状态、功能完好
2 类	功能良好，材料有局部的轻度缺损或污染
3 类	材料有中等缺陷，或出现轻度功能性病害，但发展缓慢，尚能维持正常使用功能
4 类	材料有严重缺陷，或出现中度功能性病害，但发展较快；结构变形接近规范值，功能明显降低
5 类	材料有明显缺陷，出现严重的功能性病害，且有继续扩展现象；关键部位的部分材料强度达到极限，变形大于规范值，结构的强度、刚度、稳定性不能达到安全通行的要求

支座损伤区域如图 6 所示。健康状态下支座刚度为 503 MPa，支座刚度损伤程度定为 20%、40%、60%、80%、100% 5 个级别来实现支座损伤量化的模拟。

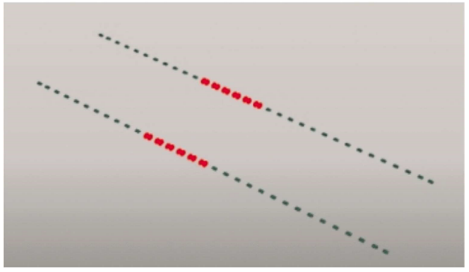


图 6　跨中支座损伤区域

Fig.6　Damage area of mid–span bearing

3.2.2　支座损伤程度分级模型仿真结果分析

设置 4 种不同耦合荷载，分别为：无荷载、B737–800 最大滑行质量、B777–300 最大滑行质量、B747–400 最大滑行质量，结合健康无损伤情况，共分析 6 个损伤程度级别，24 种工况。

支座损伤不同损伤程度下的滑行道桥频率如表 7所示，滑行道桥结构频率变化如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看出，在支座完全损伤之前，滑行道桥的频率呈线性下降趋势。当支座刚度损伤程度达到100%完

全损伤时,滑行道桥频率出现骤降现象,各机型加载情况下滑行道桥频率分别降低 8.68%、9.02%、45.75%,远低于滑行道桥健康频率,此时滑行道桥已无法安全通行[18]。

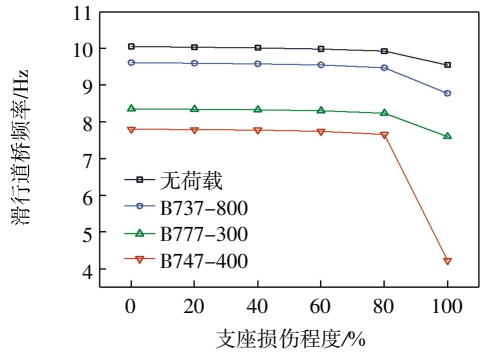
支座损伤不同损伤程度下的滑行道桥跨中挠度如表 8 所示,滑行道桥结构跨中挠度变化如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出,当支座严重损伤之前,滑行道桥的跨中挠度呈线性上升的趋势,当滑行道桥支座损伤程度在 60%以内时,滑行道桥仍能正常维持使用功能;当支座损伤程度至 80%严重损伤时,滑行道桥跨中挠度上升幅度增大;当支座损伤程度至 100%完全损伤时,在各机型加载情况下滑行道桥跨中挠度分别上升 56.99%,44.06%,41.78%。此时,在各机型加载时,滑行道桥跨中挠度均大于 2.67 cm,已无法保证安全通行。

表 7　支座损伤不同损伤程度下滑行道桥频率

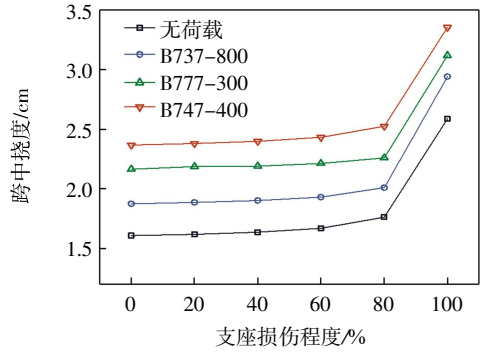
Tab.7　Frequency of the taxiway bridge under different damage degrees of bearing damage

Hz

加载情况	损伤程度/%					
	0	20	40	60	80	100
无荷载	10.050	10.034	10.012	9.981	9.925	9.544
B737–800	9.610	9.597	9.578	9.547	9.474	8.776
B777–300	8.356	8.342	8.329	8.304	8.235	7.602
B747–400	7.803	7.793	7.777	7.746	7.659	4.233



(a)频率变化



(b)跨中挠度变化

图 7　支座损伤不同损伤程度下滑行道桥结构响应

Fig.7　Structural response of the taxiway bridge under different damage degrees of bearing damage

表 8　支座损伤不同损伤程度下滑行道桥跨中挠度

Tab.8　Mid–span deflection of the taxiway bridge under different damage degrees of bearing damage

cm

加载情况	损伤程度/%					
	0	20	40	60	80	100
无荷载	1.607	1.618	1.636	1.668	1.762	2.588
B737–800	1.874	1.886	1.901	1.930	2.01	2.942
B777–300	2.165	2.186	2.191	2.213	2.260	3.119
B747–400	2.367	2.380	2.399	2.433	2.525	3.356

3.3　局部裂缝

3.3.1　裂缝深度设置

结合滑行道桥实际使用情况,对于单跨桥来说,荷载作用下最不利的位置是滑行道桥跨中位置,跨中下表面的开裂概率最高,1/4 跨位置出现的裂缝较少,因此,研究区域为跨中裂缝。根据滑行道桥设计图纸,当裂缝深度达到 10 cm 时,底面裂缝扩展至预应力筋的位置,因此设置 20、40、60、80、100 mm 共 5 种深度。裂缝仿真图如图 8 所示,裂缝宽度设置为 2 mm,长度设置为 12 m,方向与飞机运行方向垂直。

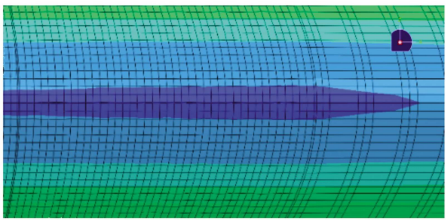


图 8　跨中 2 mm 裂缝仿真图

Fig.8　Simulation diagram of 2 mm crack at mid–span

3.3.2　不同深度裂缝模型仿真结果分析

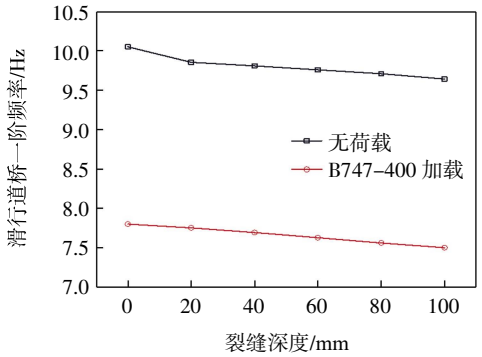
以 B747–400 飞机荷载为例,模拟无荷载和B747–400 荷载时共计 12 种工况。对于滑行道桥来说,裂缝对滑行道桥局部区域的变形影响更为复杂,一阶频率可反映裂缝对滑行道桥整体刚度的影响,而二阶频率更能反映局部结构状态。不同裂缝深度下滑行道桥频率变化如表 9 和图 9所示。

表 9　不同裂缝深度下滑行道桥频率

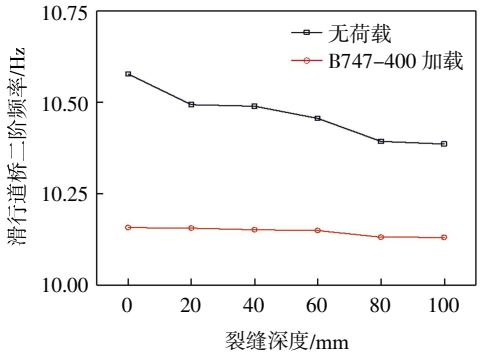
Tab.9　Frequency of the taxiway bridge under different crack depths

Hz

加载情况	裂缝深度/mm					
	0	20	40	60	80	100
无荷载时的一阶频率	10.050	9.855	9.809	9.760	9.709	9.642
B747–400 加载时的一阶频率	7.803	7.754	7.696	7.629	7.562	7.504
无荷载时的二阶频率	10.577	10.493	10.489	10.456	10.393	10.386
B747–400 加载时的二阶频率	10.158	10.156	10.152	10.150	10.314	10.131



(a)一阶频率



(b)二阶频率

图 9　不同裂缝深度下滑行道桥频率变化

Fig.9　Frequency variation of the taxiway bridge under different crack depths

从表 9、图 9 中可以看出，随着裂缝深度增加，滑行道桥的一阶频率和二阶频率均呈下降趋势。但 B747-400 加载时，二阶频率变化的幅度远小于一阶频率，表明裂缝对滑行道桥的整体刚度影响显著；二阶频率由于其复杂性，受单一区域刚度变化的影响较小，导致其频率下降缓慢，当裂缝深度超过 60 mm 时，滑行道桥二阶频率才出现较为敏感的波动。

不同裂缝深度下滑行道桥跨中挠度变化如表 10 和图 10 所示。从表 10 和图 10 中可以看出，当裂缝达到 100 mm 时，B747-400 加载情况下，滑行道桥跨中挠度上升 4.65%，变化情况较于整体损伤和支座损伤，波动较小。当滑行道桥裂缝达到 100 mm 时，B747-400 加载情况下，滑行道桥跨中挠度小于 2.67 cm，说明滑行道桥还处于承载极限内，仍可通行。

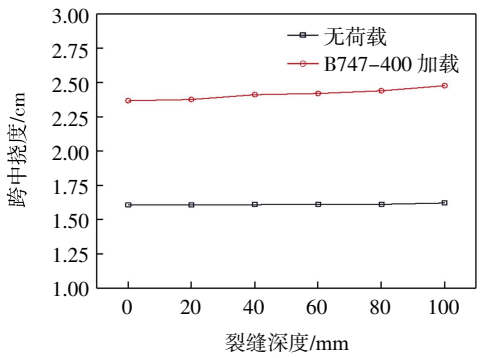


图 10　不同裂缝深度下的跨中挠度变化

Fig.10　Mid-span deflection variation under different crack depths

表 10　不同裂缝深度下滑行道桥跨中挠度

Tab.10　Mid-span deflection of the taxiway bridge under different crack depths

cm

加载情况	裂缝深度/mm					
	0	20	40	60	80	100
无荷载作用	1.607	1.608	1.609	1.611	1.611	1.621
B747-400 加载	2.367	2.376	2.411	2.420	2.440	2.477

4　结语

本文通过设置损伤分级，建立了滑行道桥损伤量化模型，以 B737-800、B747-400、B777-300 这 3 种机型为主，探究了不同损伤类型和损伤分级对滑行道桥振动响应的影响规律和机理，总结分析了滑行道桥不同结构损伤与滑行道桥结构振动响应的联系规律，得到以下结论。

(1)通过简化滑行道桥上部结构模型，对滑行道桥上部结构与支座上表面接触处进行切分绑定，设置参考点并与支座耦合，更贴近滑行道桥真实受力情况。

(2)建立了 3 种机型作用下的飞机-滑行道桥耦合模型，分析了同一机型在不同位置和不同机型在同一位置的滑行道桥结构响应参数。结果表明，飞机荷载越重，振动频率越低，跨中挠度越大，跨中位置的频率波动越大。

(3)通过设置损伤分级，从结构角度进一步量化了滑行道桥整体损伤和支座损伤状况。对于整体损伤，当滑行道桥刚度损伤程度为 25% 时，滑行道桥频率降低 12.74%~12.95%，跨中挠度增加 32.28%~33.33%，滑行道桥已无法安全通行。对于支座损伤，当支座损伤程度在 80% 以内时，滑行道桥处于轻微损伤状态，各机型在滑行道桥上可正常通行。当支座损伤程度超过 80%时，出现滑行道桥频率骤降、跨中挠度骤增的现象，滑行道桥不能正常运行。

(4)依据滑行道桥预应力筋的位置，在滑行道桥跨中设置 5 种不同深度的裂缝。结果表明，在各裂缝深度下，滑行道桥结构响应波动情况均低于整体损伤和支座损伤。当裂缝深度为 100 mm 时，滑行道桥安全承载性能仍为良好。

（下转第 59 页）

区机场建设中需重点关注地温场时空变异对地基稳定性的影响。未来建议构建数字化、智能化的地温监测体系,深化多因素作用下地温长期演化规律研究,为全球高纬度冻土区重大基础设施的冻土风险防控与生态协同发展提供科学借鉴。

参考文献:

[1] GUO M, LU Y, YU W B, et al. Permafrost change and its engineering effects under climate change and airport construction scenarios in NorthEast China[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 43: 101117.

[2] 姜来库. 地表水对某多年冻土地基温度影响的数值研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

[3] 李　瑶. 多年冻土区跑道地基水热力耦合效应研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.

[4] 戚春香, 韩　卓, 马　琳, 等. 多年冻土区跑道水热力耦合地基温度应力分析[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(5): 34–41.

[5] 戚春香, 李　瑶, 马　琳, 等. 漠河地区多年冻土地基温度场附面层参数研究[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(1): 49–53.

[6] 王肖江. 飞机动荷载作用下跑道冻土地基长期变形特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.

[7] 韩　卓. 保温隔热技术在多年冻土区场道地基中的应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.

[8] 刘伟博, 喻文兵, 陈　琳, 等. 多年冻土地区机场跑道修筑技术现状[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1599–1610.

[9] 王娇娇, 张　虎, 金晓颖, 等. 变暖背景下砾石换填对多年冻土区机场跑道下地温场的影响[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(3): 291–303.

[10] 张　开. 青藏高原机场跑道多年冻土地基温度控制方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.

[11] 张润峰, 戚春香, 张献民, 等. 道面宽度对机场跑道多年冻土地基温度场的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 568–576.

[12] MAO Y C, LI G Y, MA W, et al. Field observation of permafrost degradation under Mo′he airport, Northeastern China from 2007 to 2016[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 43–50.

[13] 戴竞波. 大兴安岭北部多年冻土地区地温特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 53–63.

[14] 李述训, 吴通华. 冻土温度状况研究方法和应用分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 377–383.

[15] MOHAMMED I, ZHOU Z F, AI C F. Evaluating the impact of temperature variations and subgrade reactions under traffic–load on airport concrete pavement performance[J]. Structures, 2024, 70: 107704.

[16] 李红霞, 张洪泽, 王文杰, 等. 人类活动与全球变暖对冻土环境的双重影响[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(1): 1–4, 23.

[17] LIU X L, FU C W, LV C. Study on applicability of parallel perforated ventilation subgrade to the runway in frozen soil regions[J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 110: 168–185.

[18] 郝加前, 吉延峻, 何乃武, 等. 高温多年冻土区冻土地基预先融化技术研究现状及展望[J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 645–652.

[19] 刘国光, 杨跃敏, 牛富俊, 等. 春融作用对寒区机场土面区工作性能的影响[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(6): 621–627.

[20] 张程程. 中国东北多年冻土时空演化及线性工程响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.

[21] 吴树森, 周学军, 王　振, 等. 漠河极寒天气特征分析[J]. 黑龙江气象, 2022, 39(3): 37–39, 46.

[22] TAI B W, WU Q B, XU X M. Thermal and hydrological processes in permafrost slope wetlands affect thermosyphon embankment stability[J]. Advances in Climate Change Research, 2024, 15(4): 680–694.

(责任编辑:明　月)

(上接第 46 页)

参考文献:

[1] 中国民用航空局机场司. 飞机荷载桥梁在机场工程中的应用: IBCA–2019–02 [Z]. 北京: 中国民用航空局机场司, 2019.

[2] 中国民用航空局. 民用机场飞机荷载桥梁技术状况评定规程: MH/T 5074—2023[S]. 北京: 中国民航出版社, 2023.

[3] 黄　信, 谭成松, 陈　宇, 等. 机场滑行道桥桥面板横向有效分布宽度分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8475–8480.

[4] 戚春香, 丁丛丛, 李佳坤. 基于机桥耦合振动的滑行道桥优化设计研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6744–6751.

[5] 张宇辉, 丁硕旋. 地震波影响下的滑行道桥仿真建模[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2518–2524.

[6] MAZZEO M, DE DOMENICO D, QUARANTA G, et al. Automatic modal identification of bridges based on free vibration response and variational mode decomposition technique[J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115665.

[7] TAROZZI M, PIGNAGNOLI G, BENEDETTI A. Identification of damage–induced frequency decay on a large–scale model bridge[J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111039.

[8] ABEDIN M, DE CASO Y BASALO F J, KIANI N, et al. Bridge load testing and damage evaluation using model updating method[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113648.

[9] 王婷婷. 基于振动的飞机滑行道桥损伤识别方法的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.

[10] 张献民, 金喜莎, 李少波, 等. 基于动静参数联合反演技术快速评定桥梁承载能力[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 74–80.

[11] 何　琳, 王家林. 模拟有效预应力的等效荷载–实体力筋降温法[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 75–80.

[12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁板式橡胶支座技术标准: JT/T 4—2019[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2019.

[13] 樊友景. 弹性力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[14] 广州白云国际机场. 广州白云国际机场桥梁检测报告[R]. 广州: 广州白云国际机场, 2020.

[15] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T 5004—2010[S]: 北京: 中国民用航空局, 2010.

[16] 汪越胜, 梁小燕. 材料力学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范: JTG 5120—2021 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2019.

[18] 张献民, 孙维丰, 曹中杰, 等. 动态测试钢筋混凝土梁承载力的新方法[J]. 工程力学, 2002(S1): 616–619.

(责任编辑:刘雅婷)