

刚性道面模态分析的有限元模型及其验证

彭科迪^{1,2}, 赵鸿铎^{1,2}, 曾孟源^{1,2}, 边泽英^{1,2}, 郭牧^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804)

摘要:为解决模型理论模态与实测模态对应难的问题, 在上海龙华机场 8 块板开展足尺度试验, 板中施加冲击荷载并反演结构参数, 首先由分布式光纤实测振动识别各板模态频率; 然后以模型理论频率与实测频率的平均相对误差为指标, 确定了 ABAQUS 道面模型的最优板块数目、侧面边界、单元类型及尺寸; 最后采用 15 组试验的实测频率验证了模型的准确性。结果表明: 以接地弹簧模拟板间接缝、侧面自由、采用 1/3 板厚 C3D8R 单元的道面结构单板模型, 其理论模态结果更接近实测模态; 前两阶频率模型计算值与实测值的 R^2 分别为 0.922, 0.967, 各阶频率平均误差均 $< 5\%$, 总平均误差 $< 3\%$ 。与目前常用的多板道面结构有限元模型相比, 本模型的理论结果与试验模态相统一, 可为道面结构的模态分析提供参考。

关键词:道路与铁道工程; 刚性道面; 有限元模型优化; 模态分析; 结构振动; 模态频率

中图分类号: U416.222 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2298-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231070

Finite element model for modal analysis of rigid pavement and its validation

PENG Ke-di^{1,2}, ZHAO Hong-duo^{1,2}, ZENG Meng-yuan^{1,2}, BIAN Ze-ying^{1,2}, GUO Mu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve the problem of difficult correspondence between the theoretical and the measured mode, the full-scale tests were conducted at Shanghai Longhua Airport. Impact loads were applied to the eight slabs and structural parameters were inverted. The modal frequencies of each slab were identified based on pavement vibration measured by distributed optical fiber. By minimizing the average relative error between theoretical and measured frequency, the optimal number of slabs, boundary conditions of sides, element types, and sized for the ABAQUS pavement model were determined. The accuracy of the finite element model was verified by the modal frequencies of 15 groups of experiments. The results show that the modal frequencies calculated by the proposed model are closer to the measured results. It is a one-slab pavement structure model with ground springs simulating inter-slab joints. The boundary conditions on

收稿日期: 2023-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52278457, 51978520).

作者简介: 彭科迪 (1999-), 男, 博士研究生. 研究方向: 铺面结构损伤监测. E-mail: pengkedi2016@tongji.edu.cn

通信作者: 赵鸿铎 (1975-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 铺面智能化技术. E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

each side are free, while the elements are C3D8R and 1/3 slab thick. The R^2 values of the model results and measured values of the first two-order frequencies are 0.922 and 0.967 respectively. The average error of each order frequency is less than 5%, and the total average error is within 3%. Compared with the currently used multi-slab pavement structural finite element model, the model unifies the theoretical and experimental modes of pavement structure. It provides a reference for pavement structure modal analysis.

Key words: highway and railway engineering; rigid pavement; finite element model optimization; modal analysis; structural vibration; modal frequency

0 引言

刚性道面常由于板底脱空、局部开裂等损伤而发生断板等结构性病害。为及时发现道面损伤、保障结构性能,已开展了大量针对弯沉^[1]、应力应变^[2]、模态^[3]等的检测工作。其中模态分析可反映结构动力学特性,结构模态参数只与质量、刚度、阻尼等相关^[4],不受荷载影响,可有效识别板底脱空、模量衰减等结构损伤,指导养护维修^[5]。为明确模态参数与结构损伤的关系,需要计算理论模态,主要采用有限元方法^[6],其基础是建立一个与结构实际振动吻合、有效反映实际振动特性的模型。

目前已有较多道面结构动力学分析有限元模型^[7-8],但主要面向应力应变或挠度,属于时域分析;而模态属于频域分析。模态对结构整体状况更敏感;如模型尺寸、边界、单元等都可能影响模型整体,进而影响理论模态。在模型尺寸上,为模拟接缝传荷,江斌臣等^[9]针对静载建立了4块板模型;凌建明等^[10]为满足飞机动载的尺寸要求建立了9块板道面模型。板数增加有利于模型收敛,但会降低求解效率,且对模态计算精度的影响尚不明确。在边界模拟上,远离受荷位置的侧面边界对应力应变结果影响不大^[11];而对于模态分析,边界约束效应会显著影响各阶频率,4边固定更符合实测^[12]。但该结论基于楼板(底部自由)得出,不能直接用作道面板(底部有基层支撑)模态分析的边界条件。在单元选择上,刚性道面一般采用实体单元模拟,其中缩减积分单元在道面弯沉和应力计算中更容易收敛。为避免缩减积分的沙漏问题、提高计算效率,非协调单元亦有使用^[13]。而道面模态相关研究中对计算精度和效率的共同考虑还较少。综上,既有道面结构有限元模型不完全适用于模态分析,道面结构实测模态缺乏可靠的理论模型进行对照;因此有必要建立适用于模态分析的刚性道面模型,并进行验证。

针对刚性道面模态分析中模型形式不确定的问题,本文采用落锤式弯沉仪(Falling weight deflectometer, FWD)激振下的实测振动,以前期研究建立的振动频域-空间场分析方法^[14]为基础,识别结构模态频率;依据实测与理论频率的平均相对误差,确定了最优模型尺度、边界条件、单元类型与尺寸;建立了刚性道面模态分析有限元模型,并用实测频率验证了模型准确性。该模型可为基于模态分析的结构损伤识别提供理论支持。

1 刚性道面足尺振动试验

1.1 足尺试验搭建

理论模型的建立和比较需要以试验模态为依据,为此于2018年1月在上海龙华机场新建了15块装配式水泥混凝土道面板。

道面结构形式如图1(a)所示,为了感知道面结构振动,在1~8号板面层顶部7 cm深度处埋设了分布式振动光纤。所采用分布式光纤振动传感技术的采样精度为2 m,相邻采样点间距为1 m。为增加监测区域的采样点数量、减小测量误差,并缩短采样点的空间距离,使感知单元内的测点仅受该处振动影响,将光纤按30 cm直径缠绕4圈形成振动感知单元。前期研究已通过与传统加速度传感器的对比,证明了该方法可实现铺面板振动的分布式采集及模态频率的有效识别^[15-17]。光纤的平面布置主要考虑采集道面多个区域的振动特性,涵盖各板角和板边。其平面布置如图1(b)所示,每块板为4.00 m×2.20 m×0.24 m,包含6个感知单元,位于4个板角和2条长边中点,单板内光纤长度约35 m,包含35个采样点。

分别于2018年1月和5月在8块板的板中位置施加FWD荷载。根据《民用机场道面现场测试规程》(MH/T 5110—2015)设定荷载幅值为85~120 kN,承载板直径为30 cm。光纤振动数据由解调仪进行采集和解调,采集频率为2 500 Hz。

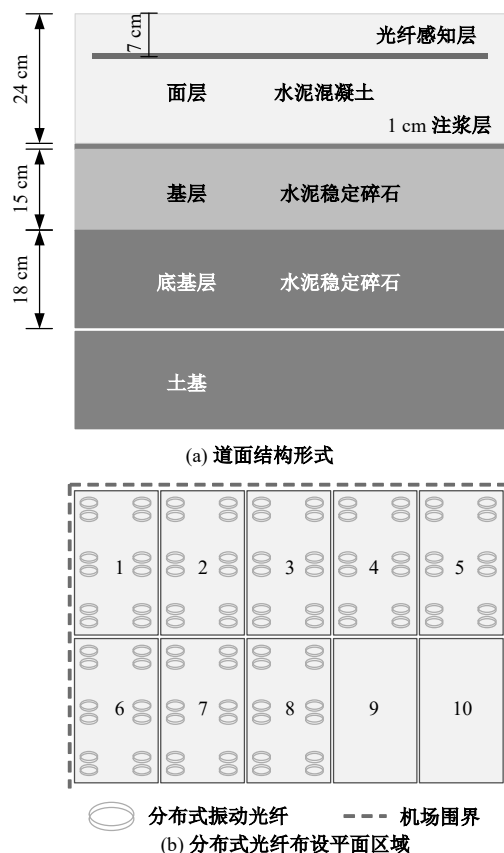


Fig. 1 Optical fiber layout for full-scale vibration tests

1.2 结构与材料参数

根据 FWD 实测道面弯沉盆曲线及相应的荷载幅值,采用《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2019)附录 C. 1 的弯沉盆面积指数法^[18],反算基层顶面反应模量 K 及面层弹性模量 E 。该方法准确性优于传统的弯沉盆面积指数法和弯沉盆面积指数改进法^[19]。反算结果见表 1。

1.3 实测模态频率

对道面板实测振动进行频域分析,根据文献[14]提出的水泥混凝土路面振动变维度分析方法,基于多测点功率谱密度场计算各阶固有频率。首先根据道面实测振动,排列组合地计算每 2 个测点的自/互功率谱密度函数 $G_{ij}(f)$,如下所示:

$$G_{ij}(f) = \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t, f) x_j(t, f) dt \quad (1)$$

式中: f 为频率, Hz; Δf 为单位带宽; t 为时间; T 为总时长, s; $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 分别为测点 i 、 j 的实测振动响应; $i, j \in [1, n_s]$, n_s 为测点总数; 当 $i=j$ 时, $G_{ij}(f)$ 为自功率谱, 否则为互功率谱。

表 1 基于弯沉的结构、材料参数反算结果

Table 1 The back-calculation results of structural and material parameters based on surface deflection

板号	基顶反应模量/(MN·m ⁻³)		面层模量/GPa	
	1月	5月	1月	5月
1	139.6	78.44	86.10	62.02
2	137.6	68.18	119.8	61.80
3	102.9	49.62	90.73	44.81
4	118.5	—	91.75	—
5	101.3	44.50	126.2	70.38
6	56.64	37.51	203.7	122.9
7	93.46	58.21	133.8	53.09
8	62.85	30.67	102.2	52.97

注: 5月测试时板 4 光纤盒内光纤发生不可修复损坏, 因此未激振板 4。

以测点 i 为基准, 对测点 i 与其他测点的互功率谱密度函数进行归一化, 得到测点 i 的归一化功率谱密度函数 $P_{SDi}(f_i)$, 如下所示:

$$P_{SDi}(f_i) = \frac{1}{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} \frac{G_{ij}(f_i)}{\sum_{l=1}^k G_{ij}(f_l)} \quad (2)$$

式中: k 为 $G_{ij}(f)$ 所包含的离散频率的个数; f_l 为第 l 个离散频率, $l \in [1, k]$ 。将各测点各频率处的功率谱密度组合为矩阵, 得到多测点的功率谱密度场 P_{SD} , 如下所示:

$$P_{SD} = \begin{bmatrix} P_{SD1}(f_1) & \cdots & P_{SD1}(f_k) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{SDn_s}(f_1) & \cdots & P_{SDn_s}(f_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于各测点的功率谱密度场在频域的分布情况, 采用峰值拾取法可简单快速地求出各阶模态频率。以板 1 为例, 其在 1 月和 5 月的 2 次试验中所测得的前 7 阶模态频率分布如图 2 所示。

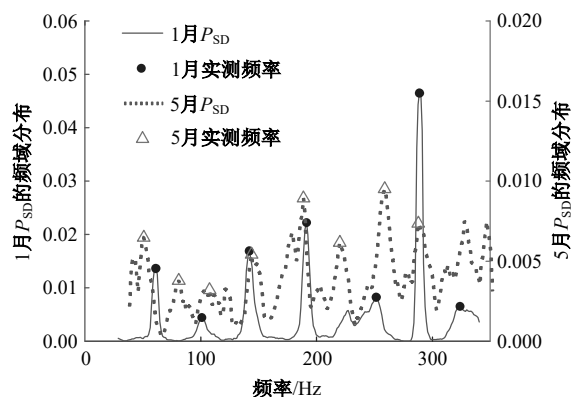


图 2 板 1 实测模态频率

Fig. 2 Measured modal frequencies of Slab 1

2 面向道面结构模态分析的建模方法

刚性道面结构分析普遍采用 Winkler 地基单层板模型,采用 ABAQUS 建立刚性道面三维有限元模型。为保证理论模型与试验结果的可比性,分别以道面弯沉盆反算得到的 E 和 K 作为模型面层材料的弯拉弹性模量和 Winkler 地基的刚度。由于 E 和 K 未做温度修正,即模型中采用的材料与结构参数已隐含了温度影响,故模型中未设置温度场。其他模型参数根据文献[20]确定:水泥混凝土泊松比为 0.15,密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$ 。

面向道面结构模态分析,重点从结构板块数目、侧面边界条件、结构单元 3 方面研究并建立与实测模态相符的有限元模型。

2.1 板块数目

模态分析研究结构自身的振动特性,常以单块板为研究对象,计算固有频率和振型^[21]。考虑到以 9 块板模型为代表的多板模型在动应力、动应变、挠度等动态分析中已得到了普遍应用,本文将对不同板块数目模型的模态计算结果进行对比分析。

道面模型的板块数目需根据荷载作用区域、分析要求等选择。例如 B787—800 主起落架间距为 5.72 m,而道面单板的宽度一般为 4~5 m,故在垂直于荷载前进方向上至少需包含 2 块板。但由于模态属于结构固有属性,模态计算无需施加飞机荷载,因此尺寸小于起落架间距的 2 块板、4 块板模型也可开展模态分析。

另一方面,板块数目需考虑模型准确性,一般模型板块数目越少、包含的接缝数越少,边界模拟也越简化,计算误差也越大;而多板模型可以有效考虑接缝状态。

本文将对多板模型在模态分析中的适用性做进一步检验。为了对比不同模型的模态结果,采用模态置信准则(Modal assurance criteria, MAC)表征不同模型求解的模态的相互关系。MAC 计算方法为:

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \cdot \phi_j)}{(\phi_i^T \cdot \phi_i)(\phi_j^T \cdot \phi_j)} \quad (4)$$

式中: ϕ_i 、 ϕ_j 分别为第 i 、 j 个模型的振型; MAC_{ij} 表示第 i 、 j 个模型的模态置信准则, $MAC_{ij}=1$ 表示两模型对应同一模态, $MAC_{ij}=0$ 表示两模型的模态不相关。

2.2 侧面边界

板的侧面既要考虑板间接缝,又要考虑模型最外侧的边界(即图 3 所示立面)。传力杆类、集料嵌锁类接缝都以传递竖向剪力为主,可采用竖向弹簧模拟接缝传荷作用^[22]。如图 3(a)所示,多板模型采用 2 点间竖向弹簧模拟接缝,最外侧的侧面边界不建立弹簧,该方法可以较好地模拟接缝力学行为^[11]。图 3(b)中,单板模型可在侧面用接地竖向弹簧替代 2 点间弹簧,模拟接缝的剪力传递作用。

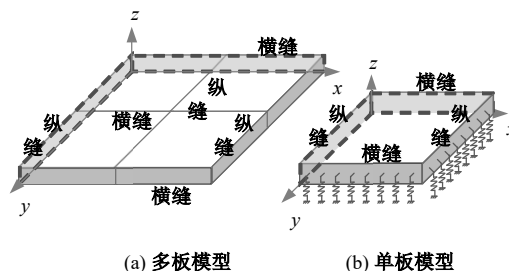


图 3 侧面边界位置示意

Fig. 3 Side boundary locations

弹簧刚度按照式(5)计算。先采用 Friberg 理论方法或实测接缝传荷能力计算接缝刚度 q ; 再根据节点数按照“贡献面积”刚度分配原则确定单个弹簧的刚度^[11]。

$$k_a = \frac{q\lambda}{4(N_R - 1)(N_C - 1)} \quad (5)$$

式中: k_a 为单个弹簧的刚度, MN/m ; q 为单位长度的接缝刚度, MN/m^2 ; λ 为接缝长度, m ; N_R 和 N_C 分别为接缝所在侧面的节点行数和列数。

在飞机荷载作用下,刚性道面结构主要产生竖向位移,因此在有限元中常通过约束结构层 4 个侧面的法向位移来模拟边界条件,也有一些模型将侧面设置为自由状态^[23]。一般情况下,板块越多、荷载和计算点离边界越远,侧面边界对结果产生的影响就越小。

周正峰^[11]研究发现,模型的几何尺寸足够大时,边界条件对分析结果的影响较小,不同约束条件相差约 5%,并根据机场道面板的实际受力状况,将远离荷载作用位置的板边假设为自由边。朱立国^[13]采用 9 块板模型并施加动荷载,计算结果表明简支和自由边界条件下板底弯拉应力最大值几乎一致,即侧面边界对力学响应结果影响不大。但相关结论多基于静荷载分析,对模态分析的指导有限。如表 2 所示,本研究将对 5 种不同边界条件对道面结构模态的影响展开研究。

表 2 不同侧面边界条件(以右侧面为例)

Table 2 Different boundary conditions for right side

边界	固定	平面反对称	法向位移
图示			
表达式	$x=y=z=0; \theta_x=\theta_y=\theta_z=0$	$y=z=0; \theta_x=0$	$x=0$
边界	中线位移	自由	
图示			
表达式	$x=0(\text{当 } z=h/2)$	—	

注: x, y, z 分别为侧面上各点沿3个轴方向的位移; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为绕3个轴的转角; h 为板厚。

2.3 单元类型和尺寸

单元类型和尺寸决定了单元的复杂度和数量,从而影响模型的计算效率。机场道面板主要为素混凝土矩形板,几何形状简单,一般选用三维六面体实体单元即可满足要求。对于道面结构的弯拉应力和挠度,C3D8I(板厚方向含4个单元)和C3D20R(板厚方向含2个单元)能够实现较高的计算精度^[13];而C3D8R作为通用的一阶单元,能满足一般精度要求且运算效率较高^[24]。因此选择这3类单元,综合其计算效率及精度进行比较,各单元示意图如图4所示。

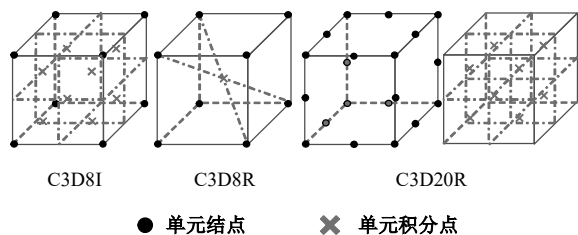


图 4 3类单元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three types of elements

经试算发现,C3D8R和C3D8I的模态分析耗时较为相近(分别为20.72和20.90 s),且频率计算结果完全相同,前3阶均为140.84、196.43、274.24 Hz。这是因为在网格质量高、形式简单的条件下,这2种一阶单元会给出非常接近的力、位移、刚度。模态计算依赖质量矩阵和刚度矩阵,对于密度均匀、尺寸固定的道面模型,其质量矩阵是确定的,在刚度矩阵相近的条件下,模态结果也会比较接近。因此后续分析中只需选用其中一种单元(本文选用C3D8R)与C3D20R二阶单元进行比较。

由于模型在板厚方向上最短,需要一定的单

元数量保证结果的准确性和收敛性;而单元尺寸在一定程度上会影响模型的刚度,尺寸过大会降低模型的变形能力,尺寸过小将显著增加计算量,参照相关模型的单元大小,分别研究了4、6、8、12 cm这4种单元尺寸对道面模态频率的影响。

3 理论模态与实测结果的对比方法

振动试验中,受激振力、传感器布设位置等的影响,实测结果可能遗漏某些模态,因此理论模态与实测结果可能无法一一对应^[25]。为了对比理论与实测的模态结果,本文以模态频率的各阶平均相对误差为指标,对有限元模型与实际道面结构在模态上的相似性进行量化和比较。

设前 m 阶理论模态频率与前 n 阶实测频率为:

$$F_t = [f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tm}]^T \quad (6)$$

$$F_r = [f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rn}]^T \quad (7)$$

式中: $n < m$ 。对 F_r 中的每个元素,寻找 F_t 中与之最接近的元素,例如与实测一阶频率 f_{r1} 相对应的理论模态为:

$$f_{rt1} = \underset{(1 \leq i \leq m)}{\operatorname{argmin}} (f_{r1} - f_{ti}) \quad (8)$$

同理可得:

$$F_{rt} = \begin{bmatrix} f_{rt1} \\ f_{rt2} \\ \vdots \\ f_{rtn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underset{(1 \leq i \leq m)}{\operatorname{argmin}} (f_{r1} - f_{ti}) \\ \underset{(1 \leq i \leq m)}{\operatorname{argmin}} (f_{r2} - f_{ti}) \\ \vdots \\ \underset{(1 \leq i \leq m)}{\operatorname{argmin}} (f_{rn} - f_{ti}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

理论模态与实测结果的吻合程度可以用二者的平均相对误差表示:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n \frac{f_{ri} - f_{ti}}{f_{ti}} \quad (10)$$

δ 可作为考虑模态丢失的有限元模型比选指标。

4 结果与分析

4.1 板块数目

在模态分析中,模型中所包含的所有板块会被视为整体,但实际上受荷板的结构振动远大于相邻板,接缝主要传递竖向剪力。多板共同振动的模型在一定程度上夸大了接缝的连接作用。

对于单板尺寸为 $4.00 \text{ m} \times 2.20 \text{ m} \times 0.24 \text{ m}$ 的刚性道面,分别建立不同板块数目的模型,进行模态分析。所有模型的板侧均为自由边界,且其他结构、材料参数均保持一致。

首先选择振型相近的某阶模态,分别为单板/2板/4板/6板/9板模型的第11/24/46/64/93阶模态,并计算各模型振型的MAC值,结果如图5(a)所示。除2板模型与6板模型的MAC值较小(0.9462),其他各模型的MAC值均 > 0.95 ,可判定为同一理论振型。如图5(b)所示,该振型为一侧面受压、一侧面受拉,且在不同模型中对应的模态频率均为 547.96 Hz 。

图6展示了不同模型在 550 Hz 以内的各阶固有频率。单板模型的前3阶频率分别为 138.87 、 192.25 、 272.18 Hz ,与实测频率具有相似的离散性;而多板模型各阶固有频率分布较为密集,与足尺道面结构的实测固有频率差异较大,与实测振动难以对应。出现密集模态是由于随着模型板数增加、单元和弹簧数目激增,模型自由度也成倍增加,动力学方程将产生大量相近的特征值,即模态频率。

由上述分析可知,板块数量的变化将导致振动模式变化,而不单是模型不精确引起误差。多板模型均需做进一步模态筛选才能获得所关注板块的各阶频率。因此,在模态分析中,建立单板道面模型更有理论意义,也更有利于各阶模态特征的提取。

4.2 侧面边界

单板模型不包含相邻板,侧面约束条件对其模态有显著影响。任选一次测试(此处选择了8号板1月的测试结果)为基础建立有限元模型,基顶反应模量为 62.85 MN/m^3 ,面层材料模量 102.2 GPa ,纵缝与横缝刚度参考文献[11]的理

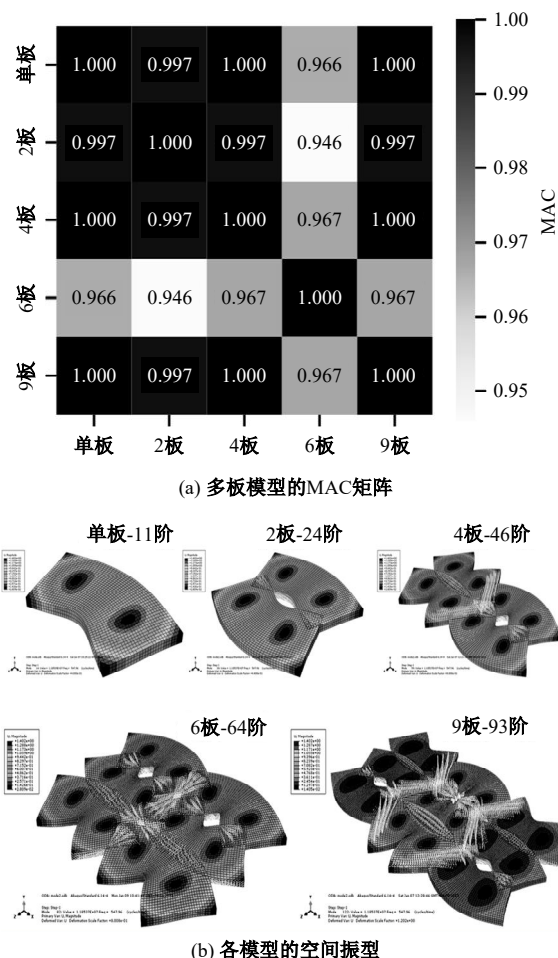


图5 不同板数模型的同一振动形态

Fig. 5 A certain vibration pattern for models with different slab numbers

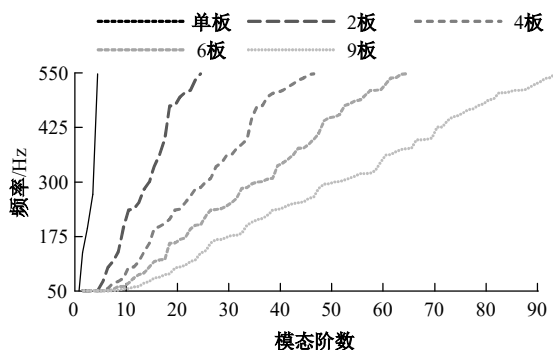


图6 单板与多板模型计算的模态频率

Fig. 6 Modal frequencies calculated with different models

论值分别设为 500 和 1000 MN/m^2 , 实测前2阶频率分别为 $f_{r1}=141.87 \text{ Hz}$, $f_{r2}=191.28 \text{ Hz}$ 。

对于不同侧面边界模型,与 f_{r1} , f_{r2} 最接近的理论频率分布于第1~6阶,因此表3列出了5种不同侧面约束条件下单板模型的前6阶模态频率。

表 3 不同侧面边界单板模型的前 6 阶理论模态频率

Table 3 The first six-order theoretical frequencies of single-slab models with different side boundaries

侧面边界	一阶/Hz	二阶/Hz	三阶/Hz	四阶/Hz	五阶/Hz	六阶/Hz	相对误差/%
固定	331.9	442.7	632.8	787.0	880.4	889.5	-102
平面反对称	182.1	296.4	483.4	526.9	554.3	660.4	-11.0
法向位移	191.3	226.1	289.7	313.4	348.6	424.0	-16.7
中线位移	51.10	51.39	51.51	107.2	120.8	242.5	-4.97
自由	0.000	0.000	0.000	138.9	194.3	272.2	1.06

总体而言,随着侧面约束增强,各阶模态频率呈上升趋势。对于不同侧面边界的模型,最接近实测值的理论模态频率(f_{n1} 和 f_{n2})已在表 3 中加粗,其与实测值的平均相对误差 δ 位于表 3 最后一列。

比较发现,在侧面布设接缝弹簧、4 边自由条件下,理论模态频率与实测频率的结果最相近,故采用 4 边自由的侧面边界。此时单板模型只有 4 条接缝弹簧传递邻板的剪力,没有其他侧面约束,这与 9 块板模型的中央板在形式上具有一致性。

4.3 单元选择

针对模态分析,对比了 2 种单元类型(C3D8R、C3D20R)及 4 种单元尺寸(立方体边长 $a=h/6$ 、 $h/4$ 、 $h/3$ 、 $h/2$, h 为板厚 24 cm)。计算并比较单板的前 4 阶频率,结果如图 7 所示。

由图 7 发现:2 类单元的频率计算结果差异较

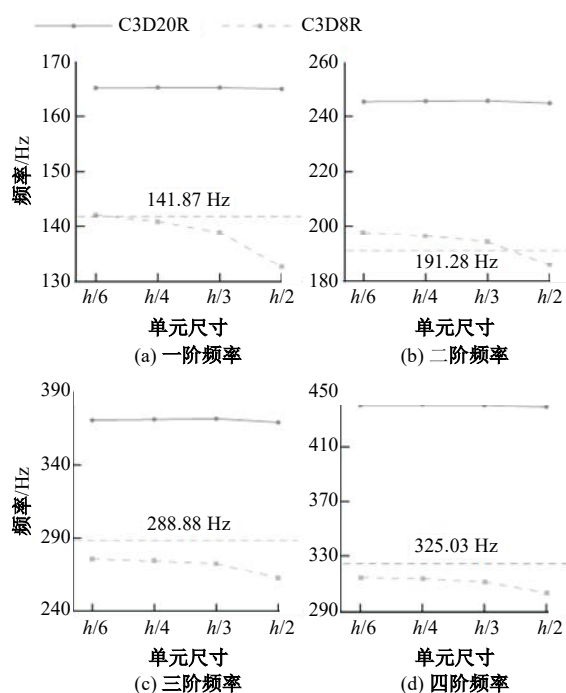


图 7 单元类型及尺寸对模态频率的影响

Fig. 7 Impact of element type and size on modal frequencies

大,一阶频率平均差异约 19.3%,高阶频率差异更大。而 C3D8R 的频率计算结果与实测更接近,其误差小于 C3D20R,甚至 12 cm C3D8R 单元的平均误差(-6.6%)也低于 4 cm 的 C3D20R(16.4%),因此单元类型对计算结果的影响比单元尺寸更显著。

进一步选用 C3D8R 单元,分析单元尺寸对频率误差及计算耗时的影响,结果如图 8 所示。随着单元减小、网格加密,误差减小较为有限,而计算耗时却显著增加;在 $a=h/3$ 时,频率误差已降至 3.4%,且计算耗时仅为 $h/6$ 单元的 1/3。综上,模态分析应优先采用 C3D8R 单元,而可以选择相对较大的单元尺寸,后续验证分析中采用 $a=h/3$ 单元。

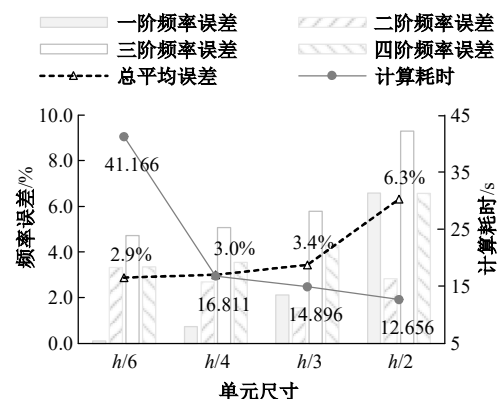


图 8 不同尺寸 C3D8R 单元的频率计算误差及耗时

Fig. 8 Influence of C3D8R element size on modal frequencies

4.4 模型验证

基于前 3 部分的结果分析,本文提出了用于模态分析的单板模型,其 4 个侧面为接地弹簧,无其他约束,并采用边长为 8 cm 的 C3D8R 单元。本小节仅对前 2 阶频率进行对比验证,一方面是由于激励能量有限,高阶模态可能无法被激发;另一方面测试过程受噪声干扰,高阶模态在实际测试中难以准确识别。

结构实测频率的分布情况如图 9(a)~(b)顶

部小提琴图所示,1月的道面结构频率总体上高于5月。将前2阶频率的模型计算值与实测值进行回归分析,如图9所示。结果表明,本文模型计算的理论模态频率与实测频率具有较强的线性关系,线性决定系数 $R^2>0.9$ 。

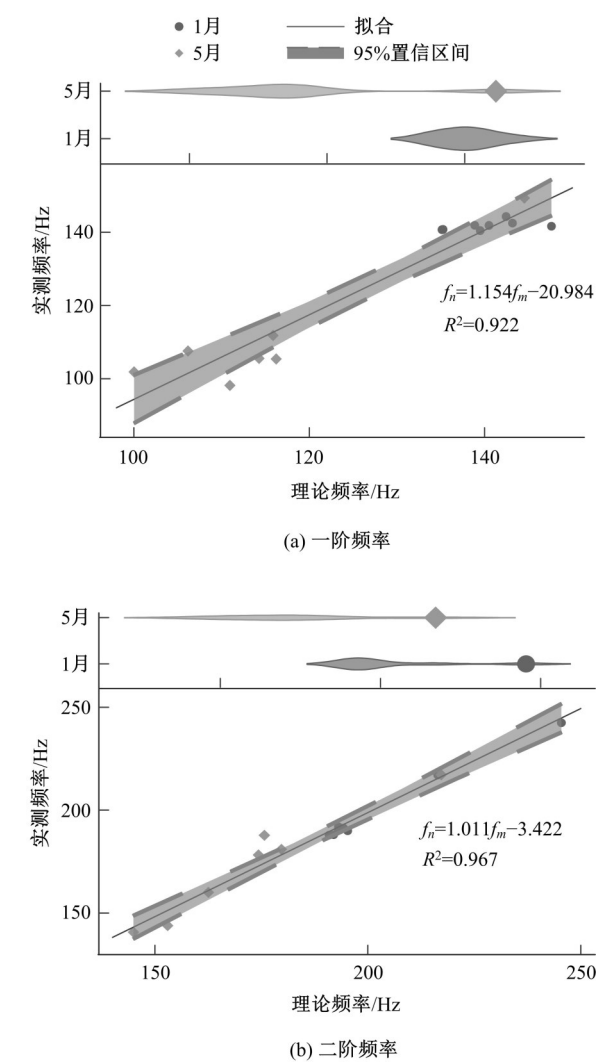


图9 模型计算的理论模态频率与实测值的回归曲线
Fig. 9 Regression of theoretical modal frequencies and the measured values

在15组试验中,最大误差出现在5月的5号板测试,其一阶模态频率计算值与实测相差11.5%。对2个测试月份和前2阶频率的平均误差进行汇总,结果如表4所示。根据试验与模型的对比结果,1月测试的平均绝对误差小于5月结果,一阶频率的平均误差略大于二阶频率,但都在5%以内。

出现误差的可能原因包括:①理论模型中的接缝刚度是参考理论值设定,但实际值可能随时间发生变化,5月的接缝刚度可能已与刚竣工时

表4 误差汇总分析			
Table 4	Summary analysis of errors		
	一阶	二阶	月平均误差/%
1月	2.25	1.44	1.84
5月	5.49	2.87	4.18
各阶平均误差	3.76	2.11	2.93

不同,因而5月误差大于1月;②FWD实测弯沉盆存在误差,进而导致反演所得的基顶反应模量及材料模量与实际的材料结构参数存在差异。因此,如在模型中采用实测接缝刚度,并通过高精度测量或其他反算方法提高模量反算准确度,将有望进一步降低模型误差,提高理论模态的准确性。

总体上,振动试验所得的实测模态频率与模型计算的理论频率吻合较好,全部测试结果的平均绝对误差为2.93%。本文建立的机场刚性道面三维有限元模型在理论模态求解方面与实际情况一致性较高,可以较真实地反映实际道面模态特征。

5 结 论

(1)针对实测模态频率可能出现模态丢失的问题,基于实测结果提出的“各阶频率平均相对误差”指标,可有效利用实测模态,作为模型比选依据。

(2)单板模型的频率计算结果与实测结果更相近,多板模型得到的密集模态难以在实测结果中区分;以弹簧单元模拟板边接缝、4边自由的边界条件与实测结果误差最小;单元类型对模态计算结果的影响程度大于单元尺寸,一阶单元比二阶单元的适用性更高。

(3)建立了考虑接缝、侧面自由的刚性道面模态分析单板模型,模型计算的前2阶频率与实测结果的 $R^2>0.9$,总平均误差 $<3\%$,且各阶频率、各测试月份的平均误差均 $<5\%$,验证了模型的有效性和准确性。

本文建立的道面结构模态分析模型,可以为刚性道面乃至路面结构的理论模态分析提供参考。面向道面结构损伤识别,未来将基于此模型进一步研究不同结构状况下(特别是道面发生局部损伤后)模态特征的变化,为基于模态的结构状态反演和损伤识别提供理论支持。

参考文献:

[1] Fu G, Wang H, Zhao Y, et al. Non-destructive eval-

- uation of longitudinal cracking in semi-rigid asphalt pavements using FWD deflection data[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(10).
- [2] Wang H P, Xiang P, Jiang L Z. Optical fiber sensing technology for full-scale condition monitoring of pavement layers[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(5): 1258-1273.
- [3] Azenha M, Ramos L F, Aguilar R, et al. Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7): 881-890.
- [4] 胡俊亮, 叶仲韬, 吴杰. 基于动态测试数据的旧桥系统参数识别[J]. 市政技术, 2022, 40(4): 1-5, 35.
Hu Jun-liang, Ye Zhong-tao, Wu Jie. System parameter identification of old bridges based on dynamic testing data[J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(4): 1-5, 35.
- [5] Shi Z, Hong Y, Yang S. Updating boundary conditions for bridge structures using modal parameters[J]. Engineering Structures, 2019, 196: No. 109346.
- [6] Filippoupolitis M, Hopkins C. Experimental validation of finite element models for reinforced concrete beams with discontinuities that form dowel-type joints[J]. Vibration, 2021, 4(3): 537-550.
- [7] 游庆龙, 李京洲, 罗志刚, 等. 飞机轮载作用下机场复合式道面结构力学分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2020, 41(1): 111-117.
You Qing-long, Li Jing-zhou, Luo Zhi-gang, et al. Mechanical analysis of airport composite pavement structure under aircraft wheel load[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2020, 41(1): 111-117.
- [8] Byrum C R, Ye D. Evaluating the effect of concrete slab curling on joint load transfer responses[J]. Transportation Research Record, 2012(2305): 43-53.
- [9] 江斌臣, 袁捷, 杨戈. 机场水泥混凝土道面有限元模型建立方法研究[J]. 城市道桥与防洪, 2013(5): 208-210, 5.
Jiang Bin-chen, Yuan Jie, Yang Ge. Study on setting-up method of finite element model for airport cement concrete pavement[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2013(5): 208-210, 5.
- [10] 凌建明, 刘文, 赵鸿铎. 大型军用飞机多轮荷载作用下水泥混凝土道面的结构响应[J]. 土木工程学报, 2007(4): 60-65.
Ling Jian-ming, Liu Wen, Zhao Hong-duo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple-gear military aircraft loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(4): 60-65.
- [11] 周正峰. 机场水泥混凝土道面接缝传荷能力研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
Zhou Zheng-feng. Research on load transfer efficiency at joints in airport rigid pavement systems[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2008.
- [12] Lu Y, Shang H, Li Z, et al. Dynamic behavior and serviceability analysis of a new type of u-shaped steel-concrete composite floor slab[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, No. 8321836.
- [13] 朱立国. 基于大型飞机虚拟样机的刚性道面动力行为模拟与表达[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2017.
Zhu Li-guo. Simulation and expression of dynamic behavior of rigid pavement based on virtual prototype of large aircrafts[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2017.
- [14] 曾孟源, 赵鸿铎, 边泽英, 等. 基于分布式光纤的混凝土路面振动场感知与解析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 78-90.
Zeng Meng-yuan, Zhao Hong-duo, Bian Ze-ying, et al. Sensing and analysis of concrete pavement vibration field based on distributed optical fiber[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 78-90.
- [15] Zeng M, Zhao H, Gao D, et al. Reconstruction of vehicle-induced vibration on concrete pavement using distributed fiber optic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24305-24317.
- [16] 曾孟源, 赵鸿铎, 吴荻非, 等. 基于振动感知的混凝土铺面板底脱空识别方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 42-52.
Zeng Meng-yuan, Zhao Hong-duo, Wu Di-fei, et al. Identification of cavities underneath concrete pavement based on pavement vibration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 42-52.
- [17] 曾孟源. 装配式水泥混凝土路面振动感知与解析[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2022.
Zeng Meng-yuan. Vibration sensing and analysis of precast concrete pavement[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2022.
- [18] 民用机场道面评价技术管理规范: MH/T 5024—2019[S]. 2019.

- [19] 刘诗福, 凌建明, 杨文臣, 等. 刚性路面弯沉盆平均距离反演方法及综合分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 74-81.
Liu Shi-fu, Ling Jian-ming, Yang Wen-chen, et al. Back-calculation of rigid pavement parameters using average distance of deflection basin and its comprehensive analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 74-81.
- [20] Wu D, Zeng M, Zhao H, et al. Detection and localization of debonding beneath concrete pavement using transmissibility function analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159: No. 107802.
- [21] 柴玉阳, 杜绍君, 李凤明. 弹性边界约束矩形板的振动特性分析:理论、有限元和实验[J]. 振动工程学报, 2022, 35(3): 577-584.
Chai Yu-yang, Du Shao-jun, Li Feng-ming. Vibration properties of rectangular plates with elastic boundary constraints: theory, finite element and experiments [J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(3): 577-584.
- [22] 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 on ABAQUS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 39-44.
- [23] 吕昊文, 王威娜, 秦煜, 等. 考虑轮载冲刷的水泥混凝土路面模型尺寸确定[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2021, 46(3): 724-736.
Lv Hao-wen, Wang Wei-na, Qin Yu, et al. Size determination of cement concrete pavement structure model with mobile load erosion[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2021, 46(3): 724-736.
- [24] Ling J, Wei F, Chen H, et al. Accelerated pavement testing for rutting evaluation of hot-mix asphalt overlay under high tire pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(2): No. 04020009.
- [25] 张云龙, 张家源, 钱雪松, 等. 环境激励下桥梁模态参数识别的频谱方法综述[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(6): 1580-1591.
Zhang Yun-long, Zhang Jia-yuan, Qian Xue song, et al. Spectrum-driven methods for modal parameter identification of bridge under environmental excitation [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1580-1591.