

文章编号:1671-1637(2026)08-0202-15

基于BIM+智能压实的道基薄弱区分布 对道面力学性能影响评价方法

戴 轩^{1,2,3}, 王呈智¹, 蔡 靖^{*1,2}, 乔 洋¹, 刘 磊³

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 民航机场智能建造与工业化工程技术研究中心,
天津 300456; 3. 民航数字化创新山东省工程研究中心, 山东 泰安 271000)

摘 要:为了量化道基压实度空间分布特征及其对道面力学性能的影响,本文对机场智能压实工程进行分析,建立了建筑信息模型(BIM)与智能压实信息融合应用框架,提出了评价道基压实空间分布的压实薄弱综合指数;通过道基土体加州承载比试验,分析压实计值与道基反应模量的关系;建立三维有限元数值分析模型,探究压实度空间分布对机场道面力学性能的影响;最后形成基于BIM模型的智能压实-道面结构力学性能一体化分析方法。研究表明:相同压实薄弱区面积比下的薄弱区毗邻度指标可相差2.5倍,压实薄弱综合指数可反映压实通过率、压实薄弱程度、薄弱区空间分布的综合影响,压实薄弱综合指数随压实薄弱区面积比的增加而增大,离散程度也逐步增加;道基反应模量与压实计值呈幂指数增长关系;道面弯拉应力最大值随压实薄弱综合指数的增加而增大,且可用三次多项式进行描述;通过参数化BIM建模、属性信息扩展、可视化编程、智能压实数据与BIM数据融合、BIM-力学模型一体化分析,实现依据智能压实数据、道面结构几何数据及机荷载数据对运行期道面结构应力与服役寿命进行动态分析,从而提升道基压实水平。研究成果对扩展智能压实数据的价值、实现场道工程智能建造-运维一体化分析具有参考意义。

关键词:机场工程;智能压实;动态分析模型;道面力学性能;建筑信息模型;薄弱区分布

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.323

Evaluation method for effect of subgrade weak zone distribution on mechanical performance of pavement based on BIM and intelligent compaction

DAI Xuan^{1,2,3}, WANG Cheng-zhi¹, CAI Jing^{*1,2}, QIAO Yang¹, LIU Lei³

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300,
China; 2. Engineering Research Center of Airport Intelligent Construction and Industrialization, CAAC,
Tianjin 300456, China; 3. Shandong Engineering Research Center of Civil Aviation
Digital Innovation, Taian 271000, Shandong, China)

Abstract: To quantify the spatial distribution characteristics of compactness and their effects on

出版日期:2025-12-30 收稿,2026-03-27 修回,2026-05-27 录用

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(3122026054);天津市企业科技特派员项目(25YDTPJC00370);天津市交通运输科技项目(2025-70)

作者简介:戴 轩(1988-),男,天津人,副教授,工学博士,E-mail:xdai@cauc.edu.cn。

* 通信作者:蔡 靖(1975-),女,河北唐山人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:caijing75@163.com。

引用格式:戴 轩,王呈智,蔡 靖,等.基于BIM+智能压实的道基薄弱区分布对道面力学性能影响评价方法[J].交通运输工程学报,2026,26(8):202-216.

Citation: DAI Xuan, WANG Cheng-zhi, CAI Jing, et al. Evaluation method for effect of subgrade weak zone distribution on mechanical performance of pavement based on BIM and intelligent compaction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 202-216.

pavement mechanical performance, an airport intelligent compaction project was analyzed, an application framework for the information fusion between building information model (BIM) and intelligent compaction was established, and a compaction weakness composite index for evaluating the spatial distribution of subgrade compaction was proposed. Through California bearing ratio tests on subgrade soil, the relationship between the compaction meter value and the subgrade reaction modulus was analyzed. A three-dimensional finite element numerical analysis model was established to investigate the effect of the spatial distribution of compactness on the mechanical performance of airport pavement. Finally, an integrated analysis method for intelligent compaction and pavement structure mechanical performance based on the BIM model was developed. The results indicate that under the same area ratio of compaction weak zones, the adjacency index of weak zones can differ by 2.5 times; the compaction weakness composite index can reflect the comprehensive effect of compaction pass rate, compaction weakness degree, and spatial distribution of weak zones; the compaction weakness composite index increases with the increase of the area ratio of compaction weak zones, and the degree of dispersion also gradually increases. Furthermore, the subgrade reaction modulus exhibits a power exponential growth relationship with the compaction meter value. The maximum flexural-tensile stress of the pavement increases with the increase of the compaction weakness composite index, and this relationship can be described by a cubic polynomial. Through parametric BIM modeling, attribute information extension, visual programming, fusion of intelligent compaction data and BIM data, and integrated analysis of BIM and mechanical model, the dynamic analysis of pavement structure stress and service life during the operation period can be realized based on intelligent compaction data, pavement structure geometric data, and aircraft load data, thereby improving the subgrade compaction level. The research results provide a reference for expanding the value of intelligent compaction data and realizing the integrated analysis of intelligent construction and operation-maintenance of airport pavement engineering.

Keywords: airport engineering; intelligent compaction; dynamic analysis model; pavement mechanical performance; building information modeling; weak zone distribution

Publication history: Received 2025-12-30; Received in revised form 2026-03-27; Accepted 2026-05-27

Funding: Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122026054); Tianjin Enterprise Science and Technology Special Commissioner Project (25YDTPJC00370); Tianjin Transportation Science and Technology Project (2025-70)

* **Corresponding author:** CAI Jing, professor, PhD, E-mail: caijing75@163.com.

0 引言

机场跑道长期承受复杂飞机动载与高频冲击,道基压实质量直接决定道面结构服役性能与安全^[1]。中国《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)对道基压实度进行了严格规定(如中等及以上航空交通等级填方道床不低于96%),压实度不足会导致道面产生沉降、开裂等病害,威胁飞机起降安全。

传统道基压实质量控制仍采用点式抽检(如灌砂法、环刀法),无法获取压实度的空间分布差异,尤

其难以识别隐蔽性压实薄弱区^[2]。刘东海等^[3]研究表明传统压实检测方法效率低下,同时会对路面结构造成损害;Yuan等^[4]指出传统检测方法仅能反映路基局部压实情况,难以对路基总体压实状态进行全面分析。在压实质量检测方面,学者提出了各类评价方法,如钱劲松等^[5-6]提出基于半方差函数的路基压实均匀性评价方法,可量化评价局部薄弱区,但其并未对薄弱区分布造成的影响进行深入探讨;Wang等^[7]采用人工神经网络对公路路基压实质量进行检测与评价,其评价方法对数据依赖性较高,所建立神经网络泛化能力有限;Wang等^[8]对水稳碎

石基层压实度分布进行研究,发现压实度空间分布十分复杂,压实薄弱区在路基边缘成片状分布,在路基中部成点状零星分布。上述研究均对压实薄弱情况进行了分析,然而并没有将道基压实状态与道面结构联系起来,不同压实薄弱区分布对道面结构的影响尚待揭示。

近年来,智能压实技术广泛应用于道路与机场工程,其在振动碾压过程中可实时获取位置信息与振动传感器数据,通过对激振力、振动频率分析来获取压实质量空间分布状态^[5,9]。针对智能压实技术,Wang 等^[10]通过传感器开展压实度实时监测,基于压实度反馈动态调整振动频率;Anjan 等^[11]基于智能压实数据建立压实质量控制标准,从而估算目标压实值;Meehan 等^[12]分析碾压遍数、含水率对压实计值 E_{CMV} 的影响,并根据 E_{CMV} 值来优化施工工艺。尽管学者开展了相关研究,然而在实际工程中,智能压实数据大多仅作为压实遍数、压实度的管控监测手段,不同压实均匀性分布对道面结构的影响并没有应用于压实程度评价中,难以对现场施工进行有效指导。

目前机场道面结构设计仍采用静态设计方法,假定道基土体均匀密实,分析不同机型荷载下引发的道面结构应力,结合疲劳方程评估道面结构损伤,从而确定道面结构厚度^[13-14]。然而实际工程中道基压实程度动态发展且分布不均匀,传统静态设计无法分析复杂道基条件对道面结构的影响,因此需从现场工程出发,基于建设-运维一体化理念^[15],提出一种基于现场压实施工状态的动态分析方法。在道基-道面相互作用方面,Wei 等^[16]运用马尔可夫链,结合飞机交通载荷、机龄、路面表层厚度等因素对道面服役性能进行预估;王观虎等^[17]以道面破损度为控制指标,建立灰色预测模型对道面结构进行评价;Wang 等^[18]基于结构方程-系统动力学模型,提出了路面服役性能评价指标;蔡良才等^[19]基于疲劳破坏模型提出道面病害程度计算预测方法。上述研究并没有考虑道基压实度分布对道面结构的动态作用^[20]。智能压实技术给全面掌握施工后的道基压实分布提供了大量信息,为动态评价不同压实度分布影响下的道面结构性能提供了基础技术手段,将实际压实度分布引入道面结构评价分析中,便可挖掘压实度数据的价值,为建设-运维一体化智能建造提供支撑。

智能压实普遍采用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)数据^[9],然而 GIS 技术无

法集成道面空间结构的多维度信息,也难以与物理模型进行有效数据连接。利用建筑信息模型(Building Information Model, BIM)进行道面结构全生命周期管控,可实现工程全生命周期信息的结构化存储与传递。扩展模型信息的传递格式与标准是 BIM 技术跨系统应用的关键^[21-22]。针对交通基础设施,蔡靖等^[23]提出了基于工业基础类(Industry Foundation Classes, IFC)的机场道面结构信息模型存储与传递方法;罗丹等^[24]对比分析 BIM 技术在交通基础设施智能建造中的适用性与局限性;戴轩等^[25]应用 BIM 技术结合人工神经网络,建立了机场道面裂缝发展数字孪生模型;Yan 等^[26]分析了 BIM 与数字孪生技术在道路工程规划设计、施工建造、运维管理及拆除重建全生命周期各阶段的应用现状。总体上,BIM 技术已在基础设施数智化发展中得到应用,但与建造过程深入结合的相关研究较少。将 BIM 与智能压实结合,可突破二维 GIS 数据的局限,实现场道工程设计-施工-运维一体化分析。

本文以广州白云国际机场扩建工程为依托,对实际智能压实数据进行分析,提出 BIM-智能压实融合应用框架与评价指标;在此基础上,开展室内模型试验、建立压实计值与土基回弹模量的量化关系,实现智能压实数据与道基力学参数的映射;然后,建立三维有限元分析模型,研究不同压实度空间分布模式对道面结构力学性能的影响;最后,以 BIM 技术为载体,实现动态施工数据与道面结构力学分析模型的传递,形成基于 BIM 模型的智能压实-道面结构力学性能一体化分析方法。

1 智能压实分析与技术框架

1.1 智能压实技术分析

目前大型机场工程普遍采用智能压实进行道基施工。以广州白云国际机场飞行区土石方工程为例,其占地面积为 34.67 km²,场地最大高差为 12.3 m,道基土体以粉质黏土为主,物理力学参数如表 1 所示。采用智能压实技术进行飞行区道基压实,核心系统由振动压路机(工作质量为 22 t、激振力为 360 kN、振动频率为 30 Hz、振幅为 1.8 mm、碾压速度为 4 km·h⁻¹)、加速度传感器、实时动态定位

表 1 道基土体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of subgrade soil

土性	含水量/ %	天然重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙 比	塑限 指数	压缩 系数	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
粉质黏土	45	18.9	1.52	13.0	1.2	2.5×10^{-5}

(Real Time Kinematic, RTK)-GPS 定位系统、红外温度计及车载显示系统组成,如图 1 所示。



图1 智能压实系统组成

Fig. 1 Composition of intelligent compaction system

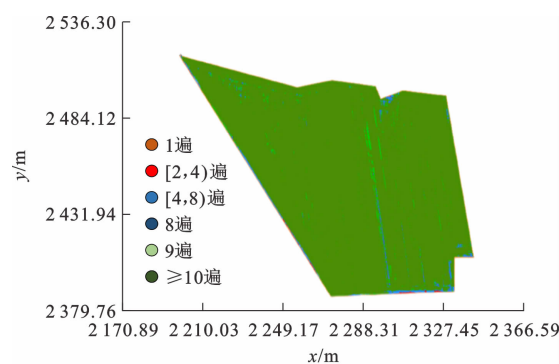
智能压实采用 3 阶段作业流程:首先,利用振动压路机中振轮内置的加速度传感器实时采集碾压参数,结合北斗定位系统形成三维数字碾压轨迹;然后,按设计厚度分层填筑碾压,根据实时采集数据确保压实度;最后,进行数据分析处理,车载终端接收云端反馈,生成包含时间、经纬度、压实遍数、压实度的时空图形数据。图 2 为本工程某标段实测的可视化图形报告(x 、 y 分别为压实区域在工程平面坐标系中的横向和纵向位置),对比传统压实,智能压实记录了道基的压实遍数[图 2(a)],实时管控压实过程,避免事后抽检的不可逆性,同时在施工过程中获得压实薄弱区空间分布状态[图 2(b)],输出全场压实度分布情况。

可以看出,上述智能压实应用基本以现场压实数据的可视化分析与施工管控为主,压实度空间数据以孤立图表存在,评价指标以静态指标为主(压实薄弱区面积),无法为设计合理性、运行可靠性提供指导。

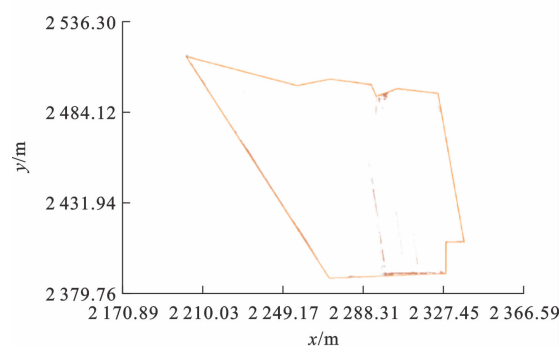
1.2 BIM+智能压实应用框架

BIM 是基于全生命期的信息化管理技术,通过模型数据库处理工程信息,并利用通用数据环境(Common Data Environment, CDE)实现数据的传递、共享、协同^[27-30]。目前 BIM 技术与机场工程智能建造过程的信息融合度不足,BIM 模型仍主要用于可视化展示、碰撞检查与 4D 进度模拟,并没有汇集智能建造信息。将 BIM 与智能压实数据融合的优势在于实现数据共享,其形成数据源可以为各方、各阶段所用,且可以根据结构参数的变化动态调整分析结果^[22,31-32]。因此,本文提出基于 BIM 实现智能获取道基压实度信息,并直接用于道面结构性能评价,技术框架如图 3 所示。主要步骤如下:

(1) 采用可视化编程,通过结构化参数建立



(a) 压实遍数数据



(b) 压实薄弱区分布

图2 智能压实获取的压实数据空间分布

Fig. 2 Space distribution of compaction data based on intelligent compaction

BIM 模型,并将设计阶段几何信息(道面结构层厚度、平面定位、尺寸等)、属性信息(材料强度、道基参数等)赋值到 BIM 模型中,根据压实度评价单元对模型进行切分。

(2) 通过数据字典扩展模型属性,形成包含智能压实与结构评价的信息容器,扩展属性包括压实度、道基反应模量、道基压实评价指标、道面结构内力、机型荷载参数、荷载作用次数等。

(3) 根据 BIM 模型中压实度数据规划路线,进行智能压实作业,将智能压实获得的全场压实度数据,通过 .csv 表格写入 BIM 模型属性信息(采用 Orchid 节点包),并将压实度数据转化为基顶反应模量等力学分析数据。

(4) 将道基反应模量分布、BIM 模型几何信息、属性信息传递至有限元分析模型,根据设计荷载,计算道面结构内力及变形。

(5) 利用解析扩展平台,将力学分析信息、评价信息存储至 BIM 模型,根据压实度信息、力学计算信息分析是否满足设计要求,通过道面结构内力分析道面服役年限。当不满足要求时,对压实薄弱区进行复压,直至符合评价指标。当完成 1 遍压实作业后,根据压实数据更新评价单元信息。

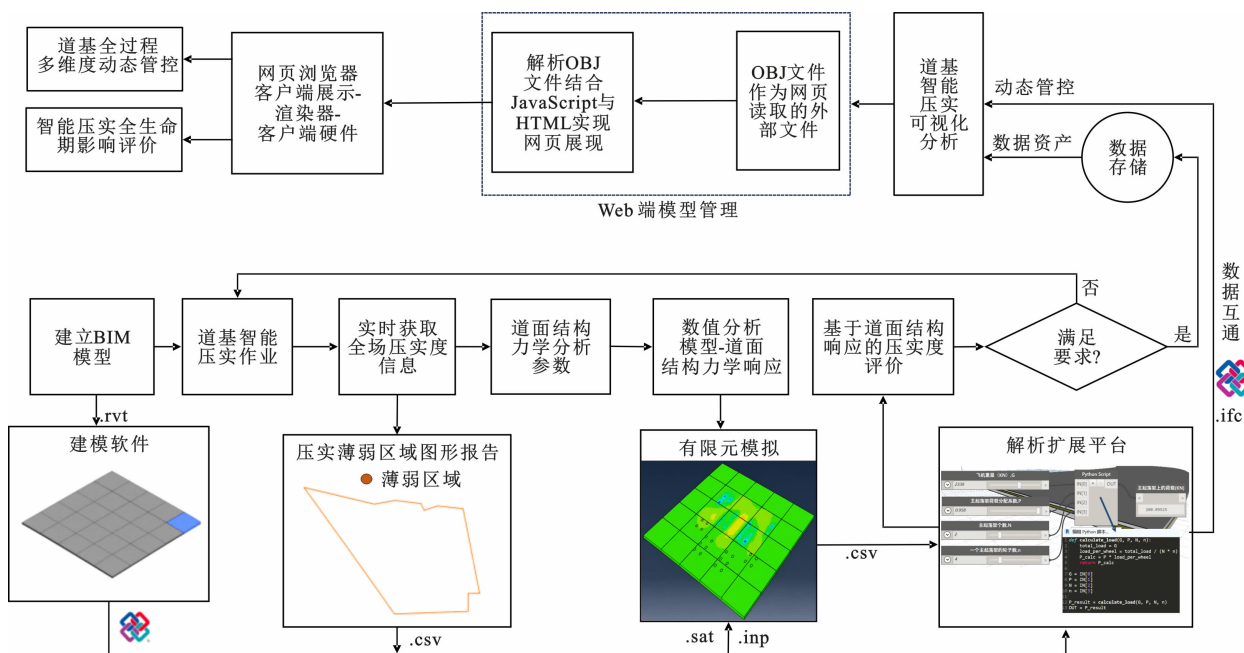


图3 BIM与智能压实融合应用框架

Fig. 3 Integrated application framework of BIM and intelligent compaction

(6)将包含属性信息的 BIM 模型转换为 IFC 数据格式文件,采用“族模型 IFC 解析扩展法”^[23]扩展 IFC 文件属性信息,数据传递采用 IFC2×3 版本进行,通过 Dynamo 平台中的 Python 脚本与 IFC 解析平台,完成属性的批量添加,形成符合 IFC 标准的结构化数据库,对模型动态信息进行更新。

(7)对上述动态数据,通过道基智能压实可视化分析平台,在网页端进行实时管控,实现道基压实-道面结构动态分析,将最终压实数据存储至道面模型中,形成数据资产;可视化展示采用徐照等^[32]提出的网页端三维渲染与 IFC 结合路径,即将所存储数据转换为 OBJ 格式文件,通过 JavaScript 与超文本标记语言完成模型的网页端解析与轻量化渲染;最终实现道基全过程多维度动态管控与智能压实全生命周期影响评价 2 类功能。

全生命周期通常指规划-设计-施工-运维-拆除全过程^[33]。智能压实全生命周期是指道基智能压实数据能为道面结构全生命周期管理服务,如动态设计、智能施工、运维阶段结构评估等。通过 BIM 技术在跑道全生命期中传递道基压实数据,使得道基土体工程信息得到最大程度利用。

1.3 考虑空间分布的智能压实评价指标

1.3.1 现有评价指标分析

压实计值 E_{CMV} ^[34]是智能压实的核心监测指标,通过加速度传感器采集压路机振动时域信号经快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)

后,转化为频域信号计算得出

$$E_{CMV} = \frac{\beta A_{2\omega}}{A_{\omega}} \quad (1)$$

式中: β 为放大系数,一般取 300; $A_{2\omega}$ 为加速度频谱图中 2 次谐波分量幅值; A_{ω} 为加速度频谱图中基频分量幅值。

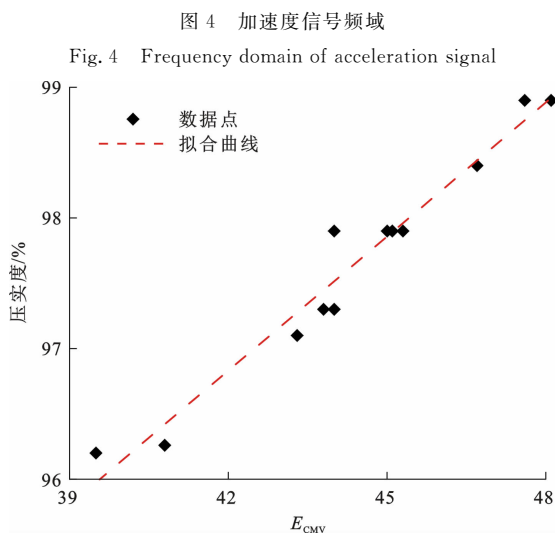
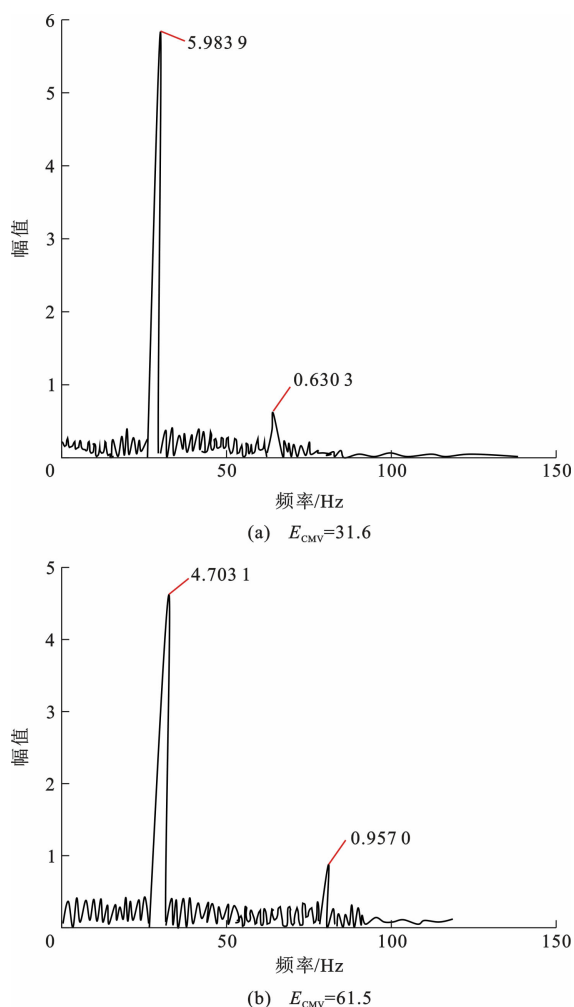
现场采集 30 000 组时域数据,按 2 s 时间间隔划分并滤波去噪。通过 MATLAB 进行 FFT 处理,消除基线漂移后得到频域曲线,提取波峰幅值计算 E_{CMV} ,如图 4 所示。可以看出:计算结果表明在不同压实工况下,86.7%的 E_{CMV} 位于 40~50 内,此时道基总体上处于压实良好状态;当采用低频高振(频率为 30 Hz、振幅为 1.8 mm)时, E_{CMV} 分布更集中,压实均匀性更优。

为确定 E_{CMV} 与压实度的关系,需要进行反分析。采用灌砂法检测现场压实度,结果显示总体压实度为 96.8%~97.5%,且 E_{CMV} 与压实度存在正相关关系,如图 5 所示。

拟合得到的压实度 K 与 E_{CMV} 关系式如下

$$K = \frac{0.34E_{CMV} + 82.46}{100} \quad (2)$$

式(2)的拟合优度 R^2 为 0.958,拟合效果较好,利用式(2)便可根据不同 E_{CMV} 来获取场地压实度。根据中国《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025),以 96.0% 的压实度作为控制指标,可以得到 E_{CMV} 下限值为 39.8,在智能压实工程中,可使用该值作为控制指标。



1.3.2 压实薄弱区空间分布评价指标

目前对于采用智能压实施工的路基,一般以压实程度通过率作为控制指标,中国《公路路基与基层智能压实控制技术规程》(DB23/T 2940—2021)规定压实度通过率不低于90.0%,即压实薄弱区面积

比 η 小于 0.1。 η 计算如下

$$\eta = \frac{A_0}{A} \quad (3)$$

式中: A_0 为压实薄弱区面积(图 6 中阴影部分); A 为压实区总面积。

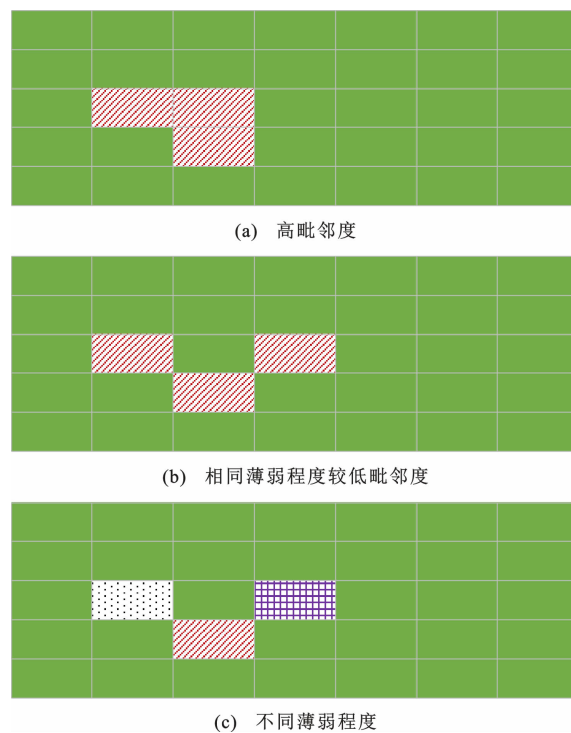


图 6 压实薄弱区分布

Fig. 6 Distribution of compaction weak zone

不难发现,该指标仅针对压实度未达标面积占比进行评价,没有考虑压实薄弱程度。同时,该指标也没有考虑不同薄弱区的空间关系。实际上,不同薄弱区空间位置带来的影响是不同的,仅用压实程度通过率指标无法进行针对性评价。图 6 中给出了相同压实通过率下的几种压实薄弱区分布情况。中国《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)规定填方上道床压实度不低于 96%,图 6 中绿色区域表示压实度为[96%,100%],方格填充表示压实度区间为[94%,96%),点状填充表示压实度区间为[92%,94%),斜线填充表示压实度低于 92%。对比图 6(a)与(b),尽管压实通过率相同,但其薄弱区域的毗邻情况并不相同,因此对道面结构影响不同;对比图 6(b)与(c),尽管压实薄弱区分布一致,然而其薄弱程度不同,也将带来不同影响。

为综合反映上述不同薄弱区分布与压实薄弱程度对道面力学性能的影响,提出压实薄弱综合指数 P_{CWCI} ,计算如下

$$P_{CWCI} = \frac{A_0(1+C)}{2An} \sum_{i=1}^n (K_0 - K_i) \quad (4)$$

式中: C 为薄弱单元毗邻度; n 为压实薄弱区单元总个数; K_i 为薄弱区压实度, 向下取整计入, i 为压实薄弱区单元的编号; K_0 为压实度控制值, 按照《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025) 相关规定选取。

当 η 越大、毗邻度越大、压实薄弱程度越高时, P_{CWCI} 越大, 即道基压实情况越差。

毗邻度 C 为拓扑几何学概念^[35], 可用下式计算

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{jk}}{n(n-1)} \quad j \neq k \quad (5)$$

$$c_{jk} = \begin{cases} 1 & d_{jk} \leq a \\ 0.5 & a < d_{jk} \leq \sqrt{a^2 + b^2} \\ 0 & d_{jk} > \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: c_{jk} 为压实薄弱区单元间毗邻值, j, k 为 2 个不同压实薄弱区单元的编号; d_{jk} 为相邻两压实薄弱区中心点距离; a, b 分别为压实薄弱区单元长与宽。

图 6(a) 分布下的毗邻度 C 计算如下

$$C = \frac{1.5 + 2 + 1.5}{3 \times (3-1)} = \frac{5}{6} \quad (7)$$

图 6(b) 分布下的毗邻度 C 计算如下

$$C = \frac{0.5 + 1 + 0.5}{3 \times (3-1)} = \frac{1}{3} \quad (8)$$

显然图 6(a) 的薄弱区更为集中, 其毗邻度值也更大, 是图 6(b) 的 2.5 倍。

为分析 P_{CWCI} 变化规律, 采用蒙特卡洛方法大量随机计算(压实度为 90%~100%), 得到不同 P_{CWCI} 随 η 的变化如图 7 所示。可以看出, 随 η 增加, P_{CWCI} 也逐渐增大, 然而由于毗邻度与薄弱程度的不同, 相同的 η 将得到不同的 P_{CWCI} , 从而对道面结构也产生不同的影响。总体上, η 越大, P_{CWCI} 计算结果的离散性也越大, 这将加剧不同压实薄弱程度的影响; 当相邻薄弱区毗邻度较大时, 将形成成片薄弱带, 并产生叠加效应, 将对道面结构产生更为不利的影响; 当局部薄弱区超限且集中时, 将形成较大 P_{CWCI} , 加剧断板等结构破坏风险。

2 道基压实度空间分布力学模型

2.1 CMV 值与道基反应模量关系试验

道基反应模量是数值分析模型的关键性参数, 智能压实仅能获得压实度与 E_{CMV} 的关系, 无法直接用于力学计算, 因此需通过室内试验探究 E_{CMV} 与道基反应模量的关系。试验土样取自白云机场扩建工程现场, 基本参数见表 1。依据《公路土工试验规

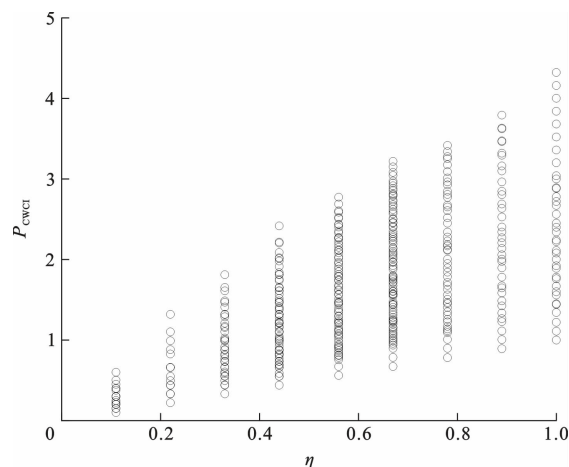


图 7 P_{CWCI} 随 η 的变化

Fig. 7 Variation of P_{CWCI} with η

程》(JTG E40—2007) 开展基础物理性质试验与道基性质试验, 如图 8 所示。稠度试验测得土样塑性指数为 12.7, 击实试验获得土样最佳含水率为 14.25%~15.20%, 对应最大干密度为 1.81~1.97 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

为获取压实度与道基反应模量的关系, 进行加州承载比 (CBR) 试验, 如图 8(d) 所示。CBR 值 T_{CBR} 与压实度 K 的关系如图 9 所示, T_{CBR} 与压实度 K 呈幂指数增加关系, 这与 Li 等^[36] 的研究相一致。

根据试验结果, T_{CBR} 与压实度的拟合关系式如下

$$T_{\text{CBR}} = 7.12K^{8.63} \quad (9)$$

式(9)的拟合优度 R^2 为 0.98。

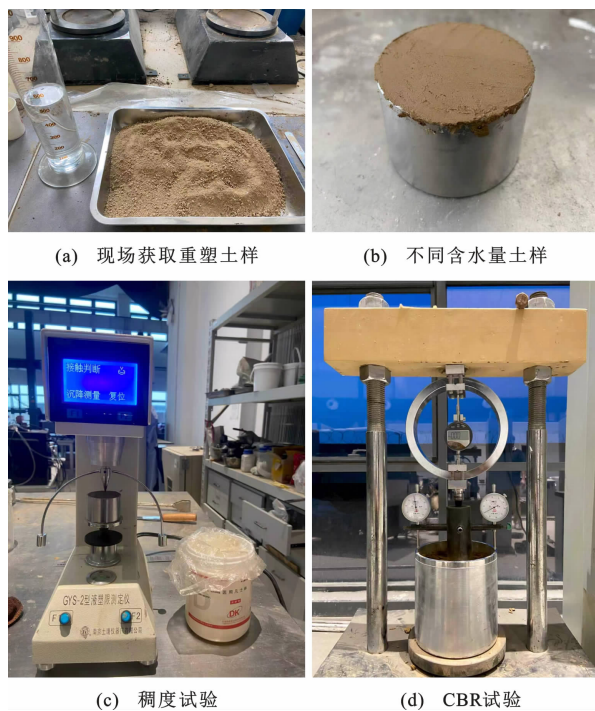
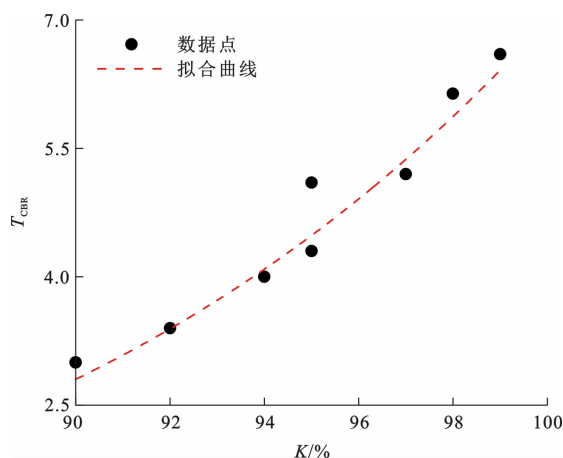


图 8 土体物理力学性质试验

Fig. 8 Physical and mechanical properties test of soil

图 9 T_{CBR} 与 K 的关系Fig. 9 Relationship of T_{CBR} and K

根据 Powell 等^[37]的研究成果, T_{CBR} 与道基动态回弹模量 M_R 关系式如下

$$M_R = 17.6 T_{\text{CBR}}^{0.64} \quad 2 < T_{\text{CBR}} \leq 12 \quad (10)$$

同时考虑动态回弹模量 M_R 与道基回弹模量 E_0 的换算公式为

$$E_0 = K_s K_\gamma M_R \quad (11)$$

式中: K_s 为湿度调整系数, 取 0.75; K_γ 为模量折减系数, 取 0.70。

得到 E_0 与 K 的关系如下

$$E_0 = 32.4 K^{5.52} \quad (12)$$

根据现场试验获得 E_{CMV} 与 K 的关系, 则可结合式(12)得出 E_{CMV} 与 E_0 的关系如下

$$E_0 = 32.4 \left(\frac{0.34 E_{\text{CMV}} + 82.46}{100} \right)^{5.52} \quad (13)$$

由《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)给出的道基反应模量 K_{0D} 与 E_0 关系, 可得到利用 E_{CMV} 计算的 K_{0D} 如下

$$\begin{aligned} K_{0D} &= 1.271 E_0^{0.779} \\ &= 19.09 \left(\frac{0.34 E_{\text{CMV}} + 82.46}{100} \right)^{4.30} \end{aligned} \quad (14)$$

利用式(14), 可以建立现场智能压实参数与数值模拟道基反应模量的关系, 从而进一步分析道面结构受力情况。式(14)适用于表 1 中 $2 < T_{\text{CBR}} \leq 12$ 的粉质黏土, 对其他土体需通过试验确定具体参数。

2.2 有限元数值分析模型的建立

基于实际工程条件, 建立如图 10 所示的考虑压实刚度分布的三维有限元数值分析模型, 模型考虑移动飞机荷载-道面结构-道基相互作用, 并将智能压实获取的压实度数据转化为道基模量输入模型中, 模型尺寸为 $40.0 \text{ m} \times 100.0 \text{ m} \times 20.8 \text{ m}$, 道面结构采用弹性本构模型, 道基采用摩尔-库仑本构模

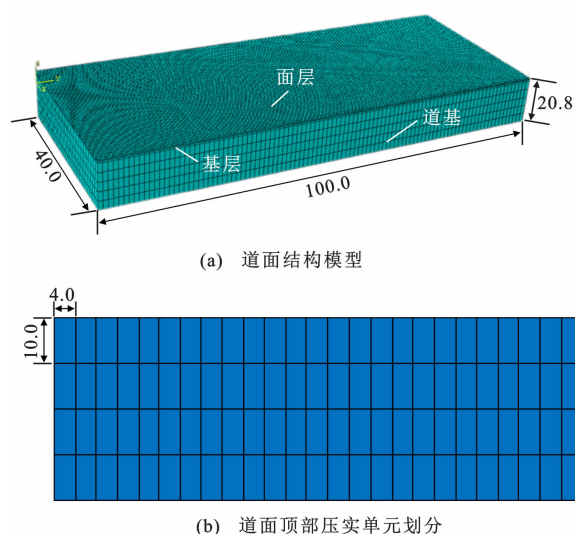


图 10 刚性道面有限元模型(单位: m)

Fig. 10 Finite element model of rigid pavement (unit: m)

型, 基本参数如表 2 所示, 其弹性模量根据式(14)进行调整。由于模型尺寸较大, 将接缝简化为具有一定宽度且与道面板长度和厚度相同的各向同性均值的薄层, 通过改变虚拟材料的弹性模量来表达不同接缝所具有的传荷能力。通过试算, 当板块间平均传荷能力为 0.7 时, 虚拟材料的弹性模量设为 900 MPa。

表 2 数值分析模型参数

Table 2 Parameters of numerical analysis model

位置	层厚/ m	弹性模量/ MPa	泊松 比	土体黏聚 力/kPa	土体内摩 擦角/(°)
面层	0.4	37 000	0.15		
基层	0.4	500	0.25		
道基	20.0	式(14)换算	0.30	30.4	18.8

模型底面约束法向和切向位移, 模型侧面仅约束法向位移。定义荷载和面板之间的相互作用类型为绑定, 离散化方法为表面和表面接触, 选择道面板为主表面, 机轮轨迹为从表面。滑移公式为有限滑移, 接触跟踪为双配置路径, 相互作用类型为内置区域, 网格单元类型为 C3D20R。

模拟机型为 B737-800, 起落架构型见图 11, 胎压为 1.47 MPa , 荷载移动速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据有限元坐标数值划定荷载的移动范围与轨迹, 将其编入 DLOAD 子程序中以实现主起落架中心点坐标的移动, 通过 ABAQUS-oneAPI 子程序关联的方式模拟飞机荷载移动, 改变文件中心起始坐标, 实现荷载的快速布置。

2.3 数值分析模型的验证

采用温克尔地基上的弹性薄板小挠度理论对数值分析模型进行验证, 其控制方程如下

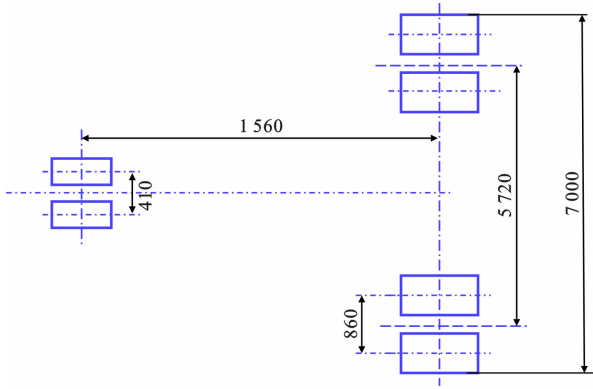


图 11 B737-800 起落架构型(单位:mm)

Fig. 11 Landing gear configuration of B737-800 (unit: mm)

$$D \nabla^2 \nabla^2 \omega(r) = q(r) - K_{OD} \omega(r) \quad (15)$$

式中: D 为道面板的弯曲刚度; ∇^2 为拉普拉斯算子, 上角标表示 2 阶空间微分; $q(r)$ 为距荷载作用中心 r 处的荷载分布函数; $\omega(r)$ 为距荷载作用中心 r 处的道面板挠度。

板挠度与弯矩关系如下

$$\begin{cases} M_x = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_x dz = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ M_y = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_y dz = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} z \tau_{xy} dz = -D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (16)$$

$$D = \frac{E_c h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (17)$$

式中: M_x 、 M_y 分别为垂直 x 、 y 轴截面上单位宽度弯矩; z 为以板中点为原点、沿板厚方向的坐标, $z \in [-h/2, h/2]$; ω 为道面板挠度; M_{xy} 为平面内扭矩; σ_x 、 σ_y 分别为 x 、 y 方向的正应力; τ_{xy} 为 xy 平面内剪应力; h 为道面板厚度; E_c 为道面板的弹性模量; ν 为道面板的泊松比。

应用 Hankel 积分变换求解道面板挠度理论计算公式如下

$$\omega(r) = \frac{qR}{\kappa l} \int_0^\infty \frac{J_0(rt/l) J_1(Rt/l)}{1+l^4} dt \quad (18)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K_{OD}}} \quad (19)$$

式中: q 为圆形均布荷载的压力, 本研究中为机轮胎压; R 为圆形均布荷载的半径; κ 为温克尔地基反力系数; l 为道面板的相对刚度半径; J_0 、 J_1 分别为第 1 类 0 阶、1 阶贝塞尔函数; t 为积分参数; E 为道面板材料弹性模量。

基于上述理论模型, 建立刚性道面板有限元模型, 提取距荷载中心不同距离截面处的弯沉值, 与上

述求得的理论解对比差异。参考姚炳卿等^[38]的研究成果, 采用荷载等效原则, 将多轮荷载等效为同等胎压作用下的等效单轮荷载。针对 B737-800 机型荷载水平, 在道面板模型中心处施加半径为 0.15 m 的 1.47 MPa 的均布荷载。对于道面弯沉的数值分析模型与理论解对比如图 12 所示, 可以看出: 二者规律较为一致, 均在荷载作用处取得最大挠度值, 模拟值与理论解的最大相对误差为 7.52%, 表明所建立的数值分析模型可反映道面板在外荷载下的作用规律。

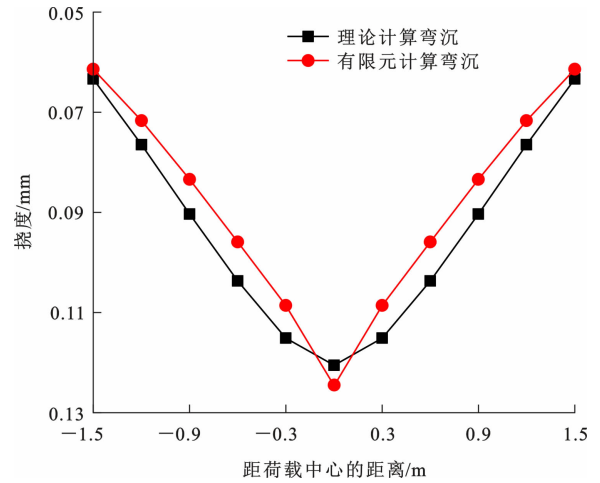


图 12 数值分析模型解与理论解对比

Fig. 12 Comparison between numerical analysis model and theoretical solution

2.4 压实薄弱综合指数对道面结构的影响

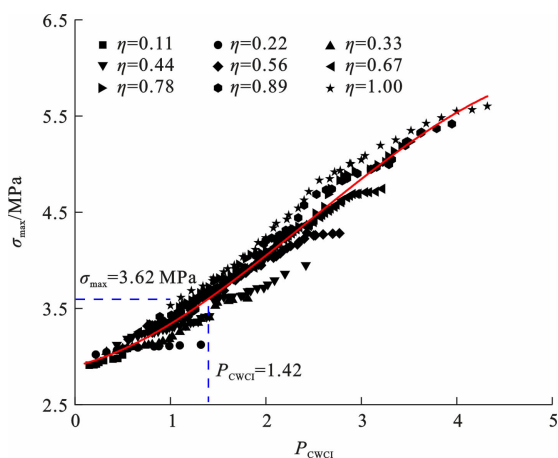
基于智能压实数据与有限元分析模型, 根据不同压实度分布与薄弱区面积比, 生成了 339 组工况进行计算, 得到 P_{CWC1} 对道面结构弯拉应力 σ_{max} 的影响。根据图 7 分析, P_{CWC1} 的取值范围在 0~4.32, 计算结果如图 13 所示。

图 13 中给出了不同薄弱区面积比 η 的计算结果, 可以看出各条曲线发展较为一致, 即所提指标 P_{CWC1} 涵盖了不同薄弱区面积比的影响。总体上 σ_{max} 随 P_{CWC1} 的增加而增大, 二者基本呈三次多项式函数关系, 拟合公式如下

$$\sigma_{max} = -0.036 P_{CWC1}^3 + 0.253 P_{CWC1}^2 + 0.207 P_{CWC1} + 2.92 \quad (20)$$

上式拟合优度 R^2 为 0.962, 拟合效果较好。

利用图 13 可以根据道面运行时不同机型荷载, 反推道基压实所需的 P_{CWC1} 指标。对本文工程, 机场道面结构按照 30 年服役使用年限与交通量, 计算出 σ_{max} 为 3.62 MPa, 在图 13 中反推该值对应的 P_{CWC1} 为 1.42, 采用智能压实施工时, 便可以以此动态控制压实后道基压实薄弱程度、薄弱区空间分布、薄弱

图 13 $\sigma_{\max}$ 与 P_{CWCI} 的关系Fig. 13 Relationship of $\sigma_{\max}$ and P_{CWCI}

区面积比,直至 P_{CWCI} 满足要求。

传统机场道面结构设计为静态设计,当 $\sigma_{\max}$ 确定后,道面结构控制指标包括道面结构层厚度、结构层强度、道基反应模量。中国《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)规定对重型航空交通量,道床顶面最小反应模量不低于 50 MPa。由于该值与道基压实度直接相关,当采用智能压实技术时,能够通过实时获取全场道基压实度时空分布,同步调整薄弱区分布模型,计算 $\sigma_{\max}$,从而定量评价道基压实是否满足要求。

当 $\sigma_{\max}$ 确定后,可根据其与道面机轮荷载允许覆盖次数 C 的关系,分析压实薄弱区影响下的跑道结构寿命,表达式如下^[39]

$$\frac{f_{\text{cm}}}{\sigma_{\max} F_{\text{cal}}} = \frac{\lg(C) F_s' b d}{(1 - I_{\text{SCI}}/100)(d - b) + F_s' b} + \frac{(1 - I_{\text{SCI}}/100)(ad - bc) + F_s' bc}{(1 - I_{\text{SCI}}/100)(d - b) + F_s' b} \quad (21)$$

式中: f_{cm} 为混凝土弯拉强度设计值; F_{cal} 为应力标定系数,可取 1.0; F_s' 为基层补偿系数; I_{SCI} 为道面结构状态指数; a 、 b 、 c 、 d 均为与基层模量相关的补偿系数,其取值来源于道面足尺加速加载试验,当考虑 50% 的破坏点时, $a = 0.760$, $b = d = 0.160$, $c = 0.857$ ^[40]。

根据式(21),对起降架次为 5 000 架次的小型机场,当存在道基压实薄弱区导致道面结构应力比从 0.42 增至 0.45 时,机场跑道使用寿命将从 27.11 年降低为 21.69 年,降幅达 20.0%。

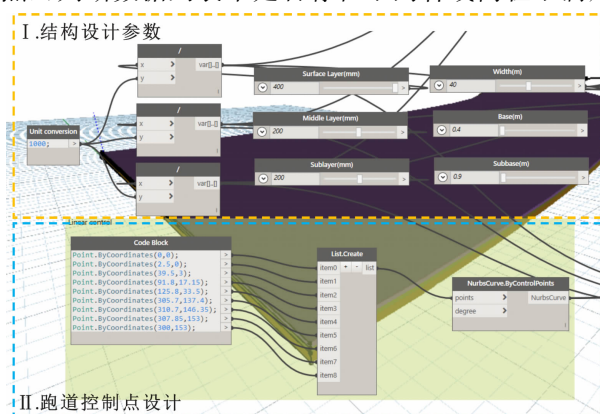
3 基于 BIM 的智能压实全生命期影响评价方法

3.1 道基压实信息 BIM 建模与 IFC 属性扩展

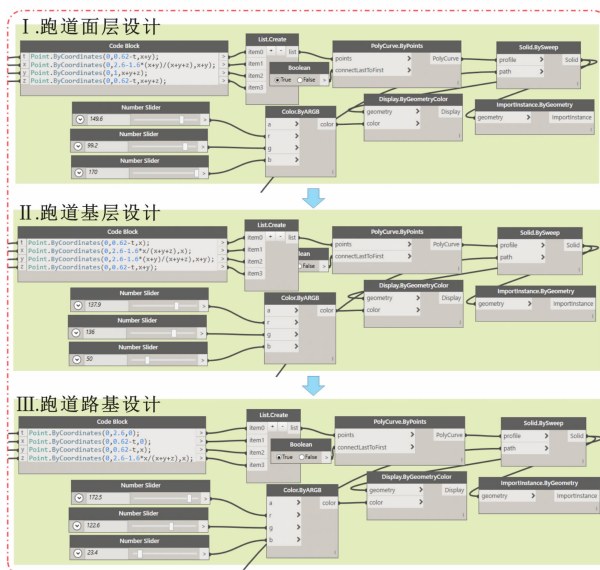
传统智能压实采用 GIS 数据汇集压实信息,无

法反映道面结构,也难以与物理模型进行联动。在图 3 框架下,建立道基-道面结构一体化 BIM 模型,并通过 IFC 标准扩展道基压实属性信息。采用参数化方式建立 BIM 模型,跑道道基-道面结构建模采用可视化编程 Dynamo 进行,如图 14 所示。自动读取道面结构控制点坐标,通过“Point.ByCoordinates”和“Line.ByStarPoint-EndPoint”节点生成跑道中心线,并通过“NurbsCurve.ByControlPoints”形成跑道平面控制点。

图 14(b)中为分析道面 3D 数据,引入“Point.ByCoordinates”节点根据输入的 x 、 y 、 z 坐标值生成三维空间中的点对象,其中 z 坐标用来控制高程。将各结构层厚度参数化,从而形成横断面上结构层各点坐标;将生成的点对象数据通过“List.Create”节点合并为数据列表,通过布尔运算(“Boolean”节点),判断数据列表中是否存在不闭合或高程不满足



(a) 跑道平面设计建模



(b) 跑道竖向结构设计建模

图 14 道基-道面结构参数化 BIM 建模

Fig. 14 Parametric BIM modeling of subgrade-pavement structure

设计要求的地形点;根据跑道横断面设计参数使用“PolyCurve.ByPoints”节点生成横断面轮廓线;之后将横断面轮廓按照路径曲线通过“Solid.BySweep”节点扫掠生成三维实体模型。使用“ImportInstance.ByGeometry”节点将三维模型导入到 Revit 中,形成可编辑的.rvt 文件。

通过提出的“族模型 IFC 解析扩展法”^[23]扩展 BIM 模型的属性,并赋予 IFC 参数,典型属性集列表如表 3 所示。除基础属性外,扩展道基压实度评价属性与服役参数数据如表 4 所示。扩展属性存储在道面单元属性集中,用于评价道基压实度相关参数,包括压实度、道基反应模量、压实薄弱面积比、压实薄弱综合指数 P_{CWCI} 、道面结构弯拉应力、允许作用次数等。在解析平台中完成 IFC 属性的批量赋值。

表 3 机场跑道 BIM 模型基础属性定义

Table 3 Definition of basic attributes of airport runway BIM model

属性名称	数据类型	说明
PavementArea	IfcAreaMeasure	道面板面积
PavementVolume	IfcVolumeMeasure	道面板体积
VerticalSlope	IfcPlaneAngleMeasure	纵坡坡度
RunwayLayer	IfcCountMeasure	跑道层数
SurfaceCourseSlope	IfcPlaneAngleMeasure	面层坡度
SurfaceCourseThickness	IfcPositiveLengthMeasure	面层厚度
SurfaceCourseMaterial-Type	IfcMaterialSelect	面层材料
BaseCourseThickness	IfcPositiveLengthMeasure	基层厚度
BaseCourseMaterial Type	IfcMaterialSelect	基层材料
CushionThickness	IfcPositiveLengthMeasure	垫层厚度
CushionMaterial Type	IfcMaterialSelect	垫层材料
SubgradeThickness	IfcPositiveLengthMeasure	道基厚度
SubgradeMaterial Type	IfcMaterialSelect	道基材料
ConstructionDate	IfcDateTime	铺设时间

3.2 智能压实数据与 BIM 模型的融合

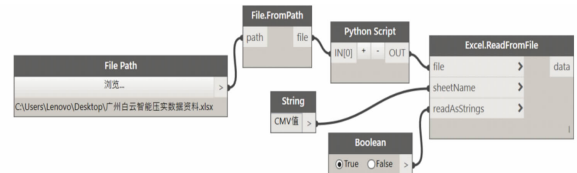
首先,将智能压实系统获取的 RTK 定位数据转换为模型局部坐标系。对压实单元进行编码,将压实度信息与编码对应并写入.csv 格式文件。在 BIM 可视化编程平台 Dynamo 环境中使用“python.script”加载 python 脚本,同时利用 Orchid 节点包将压实信息表格数据批量存储至 BIM 模型中。对加速度传感器获取的时域数据进行 FFT 处理,输出在施工阶段包含坐标位置的 E_{CMV} 数据列表,并转化为道面压实度分布数值,如图 15(a)所示。

其次,运用前文提出的式(4)分区域计算压实道基的 P_{CWCI} ,将该属性值存储在预先扩展的模型属性

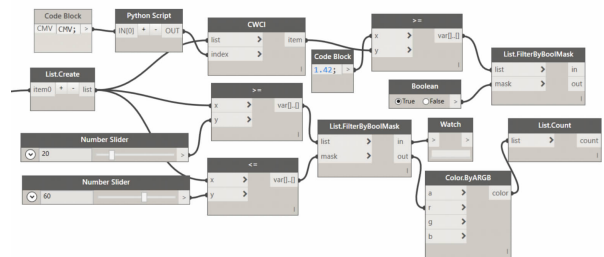
表 4 跑道智能压实评价扩展属性定义

Table 4 Definition of extended attributes for runway intelligent compaction evaluation

属性名称	属性类型	数据类型	说明
CompactionDegree	IfcProperty-TableValue	IfcCount-Measure	压实度
CompactionMeterValue			E_{CMV}
SubgradeResilient-Modulus			道基反应模量
CompactionWeakness-AreaRatio			压实薄弱面积比
CompactionWeakness-CompositeIndex			P_{CWCI}
FlexuralTensileStress			弯拉应力
ServiceLoadingTimes			允许作用次数



(a) 智能压实 E_{CMV} 导入



(b) 计算 P_{CWCI} 并写入模型属性信息

图 15 智能压实数据与 BIM 模型的融合

Fig. 15 Integration of intelligent compaction data and BIM model 中,在 Dynamo 中建立判别指标,根据不同的 P_{CWCI} 对道基压实进行管理。突出压实度过程管控概念,除监测压实次数、遍数、压实薄弱区面积外,还将对 P_{CWCI} 限值进行控制(考虑薄弱区毗邻度与薄弱程度),同时对道面结构预期服役寿命进行预估(需大于 30 年),当上述指标均满足要求后,方可存储最终数据,完成该单元道基压实施工,否则,需要对薄弱区域再次压实。最后通过抽检复核过程管控效果。

3.3 压实薄弱区分布对道面结构力学影响的一体化分析

以 BIM 模型为通用数据源,建立智能压实数据与有限元力学分析的连接,基本流程如图 16 所示。首先需要将压实度信息传递至有限元分析模型,基于式(14)将智能压实数据转换为道基反应模量;然后,将第 3.1 节建立的模型转换为 IFC 格式文件,通过可读取 IFC 格式文件的中间平台对 IFC 文件

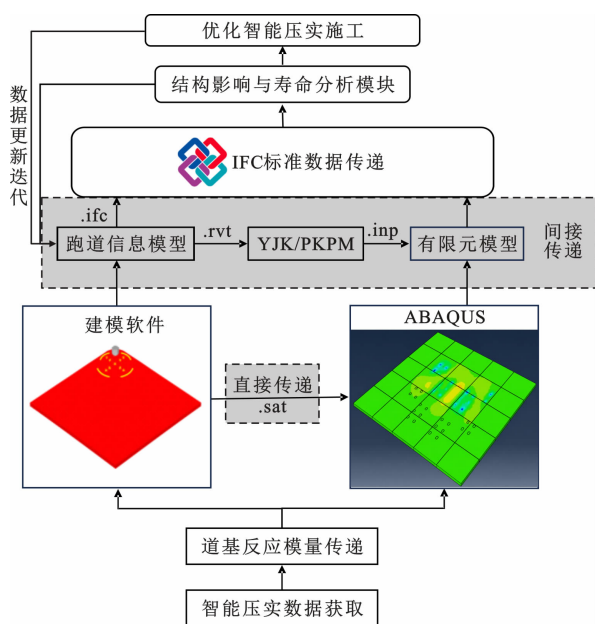


图 16 BIM 信息与 ABAQUS 模型转换流程

Fig. 16 Conversion process between BIM information and ABAQUS model

进行解析,生成可被有限元软件读取的文件;最后,利用有限元进行结构的计算,从而完整建立起有限元模型与道面系统建筑信息模型之间的数据传递方法。

IFC 格式数据与有限元模型的连接通过 PKPM 或 YJK 中的数据接口进行,在 PKPM 或 YJK 设计软件中导出 .inp 格式的文件,后由 ABAQUS 直接读取(间接传递)。除间接传递外,还可通过在建模平台中进行模型的搭建并整合为项目文件,随后将其导出为 .sat 格式模型,直接输入 ABAQUS 软件进行计算(直接传递)。结构计算后输出道面结构最大应力,写入 IFC 文件属性后,通过式(21)疲劳方程结合运维阶段允许作用次数分析压实薄弱区对道面结构的影响,完成智能压实数据对全生命期影响的智能评估。

3.4 应用实例

利用上述方法,可搭建基于 Web-BIM^[32] 的智能压实管理平台,通过智能压实中的加速度传感器、定位系统、自动测量系统形成感知层。利用智能压实数据、BIM 数据、评价分析数据、成果资料数据形成数据层,建立以 IFC 数据和文档信息组成的 CDE。在网页端利用 IFC 数据与实时压实数据展示模型信息,实现道基压实的可视化动态管控,并对道基-道面结构力学信息、道基压实信息进行全生命期管理。采用网页端无需安装专业软件,远程便可以完成模型的可视化呈现与管理,便于数据共享

协同。

以某机场扩建工程为实例,根据已有交通量获取主要起降机型与年交通量,结果见表 5。参数化调整评价机型信息,并通过可视化编程输入至 BIM 模型属性信息。在完成智能压实数据、道面结构几何数据、机型荷载数据输入后(图 14),调用有限元分析模块得到道面结构最大弯拉应力,在 Dynamo 中利用 Python 节点,可以实时输出某压实薄弱条件下,道面结构最大弯拉应力与某交通量下的预期服役寿命。

表 5 某机场各类机型起降架次

Table 5 Various types of aircraft take-off and landing sorties at an airport

飞机机型	最大起飞质量/t	年总起降架次	占比/%
B737-300	62.8	8 245	23.0
B737-800	79.0	17 490	48.8
A320-200	78.0	6 700	18.7
A380-800	575.0	3 410	9.5

分析表明,在 $P_{\text{CWC1}}=2.00$ 、 $\eta=56\%$,在代表机型荷载作用下,道面结构预期服役寿命为 26.5 年,低于 30 年设计使用年限,此时应立即进行复压,通过模型对压实薄弱区快速定位并施工。由于采用可视化编程,已建立了基于 BIM 的结构化数据,分析完荷载机型、压实薄弱区分布、道面结构信息变化后,评价数据将会实时更新(图 3),从而为智能压实过程的动态调整提供可靠依据。采用本项目评价方法管控后,对现场道基每 1 000 m² 检查 1 处,均满足压实度要求,且 90% 道基评价单元的 $P_{\text{CWC1}} < 0.5$ (限值为 1.42),体现出较好的压实度控制效果。

4 结 语

(1)智能压实获取的压实度空间分布信息具有全生命期工程价值,单一压实度通过率指标无法反映薄弱程度、压实薄弱区毗邻度的影响,相同压实薄弱区面积比下的薄弱区毗邻度指标可相差至 2.5 倍。智能压实施工时应同时对薄弱区面积比与薄弱区毗邻度进行控制。

(2)提出了压实薄弱区综合指数 P_{CWC1} ,该指标随着压实薄弱区面积比、薄弱程度、薄弱区毗邻度的增加而增大,随着压实薄弱区面积比的增加,压实薄弱区分布影响下的 P_{CWC1} 离散程度不断增大。

(3)基于室内试验获取了 E_{CMV} 与道基反应模量的关系方程,道基反应模量与 E_{CMV} 呈正相关关系,且可用幂函数表达。通过建立 339 组工况有限元数

值分析模型,发现道面结构最大弯拉应力随 P_{CWC1} 的增大而增加,且可用三次多项式函数进行描述。对智能压实工程,除控制压实薄弱区面积比小于 10% 外,宜控制 P_{CWC1} 上限值,本文条件下该值为 1.42。

(4) 基于 BIM 技术提出了智能压实全生命期影响评价方法,将智能压实数据与道面结构力学数据建立连接,通过参数化 BIM 建模、属性信息扩展、可视化编程、数据融合、BIM-力学模型一体化分析,形成了根据智能压实数据、道面结构数据及机型荷载数据评估道面结构弯拉应力与寿命的动态分析方法。本文方法可以在施工阶段对道基-道面结构响应进行动态设计,同时对运维期道面结构受力进行预测,还可对服役阶段道基软化等特殊工况进行实时评估,为场道工程建设-运行一体化分析提供了技术路径。

(5) 道面结构 BIM-力学一体化分析模型的计算效率与精度是本文所提评价方法的关键。在 BIM-力学一体化分析框架下,采用机器学习方法训练形成可靠代理模型,是提升道面结构分析效率的有效途径。此外,开展不同压实均匀度下的足尺加速加载试验,对模型精度与评价方法可靠性进行验证,是进一步的研究方向。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 游庆龙,凌建明,袁捷,等. 适应大型飞机的沥青道面结构有限元模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 18-23.
YOU Qing-long, LING Jian-ming, YUAN Jie, et al. Finite element model of flexible airport pavement structure for large aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 18-23.
- [2] 白桃,安奕铭,金光来,等. 道路隐性病害三维探地雷达图谱轻量化识别改进算法[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(4): 42-57.
BAI Tao, AN Yi-ming, JIN Guang-lai, et al. Improved algorithm for lightweight identification of 3D GPR images of hidden road defects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(4): 42-57.
- [3] 刘东海,李欣,刘强,等. 基于压实实时监测的高填方基础薄弱区快速识别研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 38-47.
LIU Dong-hai, LI Xin, LIU Qiang, et al. Fast detection method for low-bearing-capacity area of high-filled subgrade based on real-time compaction monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4): 38-47.
- [4] YUAN D L, LI S Y, REN L W. Evaluation study on the application effect of intelligent construction technology in the construction process[J]. Sustainability, 2024, 16(3): 1071.
- [5] 钱劲松,庞劲松,费伦林,等. 路基智能压实评价指标研究进展综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 388-397.
QIAN Jin-song, PANG Jin-song, FEI Lun-lin, et al. A review of research progress on intelligent compaction measurement values for subgrade [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(3): 388-397.
- [6] 钱劲松,杨以诚,凌建明. 路基智能压实的地统计分析与空间均匀性评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(10): 2859-2869.
QIAN Jin-song, YANG Yi-cheng, LING Jian-ming. Geostatistical analysis and evaluation of subgrade spatial uniformity based on intelligent compaction technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10): 2859-2869.
- [7] WANG X F, CHENG C, LI J L, et al. Automated monitoring and evaluation of highway subgrade compaction quality using artificial neural networks[J]. Automation in Construction, 2023, 145: 104663.
- [8] WANG N, MA T, CHEN F, et al. Compaction quality assessment of cement stabilized gravel using intelligent compaction technology: A case study[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128100.
- [9] 张军辉,刘科,杨豪,等. 公路路基智能压实研究综述[J/OL]. 中国公路学报, 2026-02-09. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20260206.1611.004>.
ZHANG Jun-hui, LIU Ke, YANG Hao et al. A review of the intelligent compaction for highway subgrade [J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2026-02-09. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20260206.1611.004>.
- [10] WANG X, DONG Q, ZHAO X K, et al. Prediction of remaining service life of cement concrete pavement in airfield runway[J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(1): 150-167.
- [11] ANJAN KUMAR S, ALDOURI R, NAZARIAN S, et al. Accelerated assessment of quality of compacted geomaterials with intelligent compaction technology[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 824-834.
- [12] MEEHAN C L, CACCIOLA D V, TEHRANI F S, et al. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests[J]. Automation in Construction, 2017, 73: 31-44.
- [13] TANG F L, MA T, GUAN Y S, et al. Parametric modeling and structure verification of asphalt pavement based on BIM-ABAQUS[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103066.
- [14] 游庆龙,黄之懿,马靖莲,等. 不均匀飞机轮载作用下沥青道面结构力学响应[J]. 振动与冲击, 2023, 42(1): 292-300.
YOU Qing-long, HUANG Zhi-yi, MA Jing-lian, et al. Mechanical response of asphalt pavement structure under non-uniform aircraft wheel load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 292-300.
- [15] TANG F L, MA T, ZHANG J H, et al. Integrating three-

- dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM[J]. Automation in Construction, 2020, 113: 103152.
- [16] WEI B L, GUO C C, DENG M Y. An innovation of the Markov probability model for predicting the remaining service life of civil airport rigid pavements[J]. Materials, 2022, 15(17): 6082.
- [17] 王观虎,蔡良才,邵 斌,等. 机场水泥混凝土道面使用寿命的改进灰色预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 45-48.
- WANG Guan-hu, CAI Liang-cai, SHAO Bin, et al. Modified gray prediction model of service life for airport cement concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 45-48.
- [18] WANG Y D, ZHAO J, GAO N, et al. A dynamic evaluation method for the development of intelligent construction technology in the construction field based on structural equation model-system dynamics model[J]. Buildings, 2024, 14(2): 417.
- [19] 蔡良才,王海服,张罗利,等. 基于累积损伤的机场道面剩余寿命预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 1-6.
- CAI Liang-cai, WANG Hai-fu, ZHANG Luo-li, et al. Prediction model of remaining life for airport pavement based on cumulative damage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 1-6.
- [20] 王 萌,于群丁,肖源杰,等. 透水性基层级配碎石填料宏观抗压特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1701-1716.
- WANG Meng, YU Qun-ding, XIAO Yuan-jie, et al. Experimental investigation of macro-and meso-scale compaction characteristics of unbound permeable base materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1701-1716.
- [21] 徐 照,占鑫奎,张 星. BIM 技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用[J]. 图学学报, 2018, 39(6): 1148-1155.
- XU Zhao, ZHAN Xin-kui, ZHANG Xing. Application of BIM technology in the manufacturing stage of precast elements of prefabricated construction[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(6): 1148-1155.
- [22] 徐 照,康 蕊,孙 宁. 基于 IFC 标准的建筑构件点云信息处理方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 1068-1075.
- XU Zhao, KANG Rui, SUN Ning. IFC-based point-cloud information processing method for structural elements[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(6): 1068-1075.
- [23] 蔡 靖,王瀚雪,戴 轩,等. 基于 IFC 标准的机场道面结构信息模型存储与传递方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(10): 3042-3053.
- CAI Jing, WANG Han-xue, DAI Xuan, et al. Storage and transfer method of airport pavement structure information model based on IFC standard[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(10): 3042-3053.
- [24] 罗 丹,黄晓琴,冷费贤,等. 数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 33-64.
- LUO Dan, HUANG Xiao-qin, LENG Fei-xian, et al. Applications and challenges of digital twin in intelligent construction of transportation infrastructure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 33-64.
- [25] 戴 轩,冯 蒙,蔡 靖,等. 机场刚性道面裂缝发展数字孪生模型及其应用[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2026-01-05. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0704>.
- DAI Xuan, FENG Meng, CAI Jing, et al. Digital twin model of cracks development on airport rigid pavement and its application [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026-01-05. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0704>.
- [26] YAN Y, NI L, SUN L J, et al. Digital twin enabling technologies for advancing road engineering and lifecycle applications[J]. Engineering, 2025, 44(1): 184-206.
- [27] MENG W, ZHANG H, AI Q S, et al. CBR-RBR fusion based parametric rapid construction method of bridge BIM model[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57: 102086.
- [28] BARAZZETTI L, BANFI F, BRUMANA R, et al. Creation of parametric BIM objects from point clouds using nurbs[J]. The Photogrammetric Record, 2015, 30(152): 339-362.
- [29] SONG H H, YANG G, LI H J, et al. Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering[J]. Automation in Construction, 2023, 147: 104736.
- [30] LIU P. Mountain rainfall estimation and BIM technology site safety management based on internet of things[J]. Mobile Information Systems, 2021, 2021(1): 1017200.
- [31] XU Z, ZHANG L, LI H, et al. Combining IFC and 3D tiles to create 3D visualization for building information modeling [J]. Automation in Construction, 2020, 109: 102995.
- [32] 徐 照,徐夏炎,李启明,等. 基于 WebGL 与 IFC 的建筑信息模型可视化分析方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 444-449.
- XU Zhao, XU Xia-yan, LI Qi-ming, et al. Combining WebGL and IFC to create 3D visualization for building information models[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 444-449.
- [33] 张建平,余芳强,李 丁. 面向建筑全生命期的集成 BIM 建模技术研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, 4(1): 6-14.
- ZHANG Jian-ping, YU Fang-qiang, LI Ding. A modeling technology of integrated BIM for building lifecycle [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2012, 4(1): 6-14.
- [34] LIU D H, LIN M, LI S. Real-time quality monitoring and control of highway compaction[J]. Automation in Construc-

- tion, 2016, 62: 114-123.
- [35] 陈利满, 钟立楠. 毗邻连通和及环面作用[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2017, 50(5): 50-55.
- CHEN Li-man, ZHONG Li-nan. Adjacent connected sums and toms actions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition), 2017, 50(5): 50-55.
- [36] LI T G, KONG L W, LIU B H. The California bearing ratio and pore structure characteristics of weakly expansive soil in frozen areas[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7576.
- [37] POWELL W D, POTTER J F, MAYHEW H C, et al. The structural design of bituminous roads: 1132 [R]. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1984.
- [38] 姚炳卿, 王威龙. 机场刚性道面当量单轮荷载的计算原理及其图表[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 43-53.
- YAO Bing-qing, WANG Wei-long. The calculating principles and charts of equivalent single wheel load for airport rigid pavements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(2): 43-53.
- [39] 戴 轩, 蔡 靖, 李香香, 等. 脱空尺寸对机场刚性道面的影响及其使用寿命分析[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 47-52.
- DAI Xuan, CAI Jing, LI Xiang-xiang, et al. Influence of void size beneath airport concrete pavement and pavement life analysis[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 47-52.
- [40] WANG Q, DAVIS J. Airport pavement groove identification and analysis at NAPTF[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 1003-1010.