

基于元胞自动机下人体荷载引起空腹楼板振动舒适度研究

蒋定宏 杨期柱* 杨琴 王学仁 符式良

邵阳学院土木与建筑工程学院

DOI:10.32629/btr.v8i5.4768

[摘要] 为解决大跨度空腹楼板在人体荷载作用下的振动舒适度评估难题,提出基于元胞自动机(Cellular Automata,CA)的数值模拟方法。通过测力实验获取人体步行荷载的动态特征参数,建立包含元胞划分、邻居规则与状态转移机制的空腹楼板CA模型,结合模态识别技术实现振动响应的动态仿真。研究表明:空腹楼板固有频率集中在10~15Hz区间,阻尼比普遍低于2%;人群密度为1.5~2.0人/m²时易产生共振响应,二阶谐波荷载对高频模态振动贡献显著;CA模型计算值与实测峰值加速度误差小于8%,可有效反映结构振动时空演化规律。该研究为空腹楼板振动舒适度设计提供理论支撑与分析工具。

[关键词] 元胞自动机;空腹楼板;人体荷载;振动舒适度;动态响应

中图分类号:TV 文献标识码:A

Research on vibration comfort of open web floor caused by human load based on Cellular Automata

Dinghong Jiang Qizhu Yang* Qin Yang Xueren Wang Shiliang Fu

Shaoyang University,School of Civil and Architectural Engineering

[Abstract] To solve the problem of vibration comfort assessment of large-span hollow floor slabs under human load, a numerical simulation method based on Cellular Automata (CA) is proposed. The dynamic characteristic parameters of human walking loads are obtained through force measurement experiments. A CA model of empty floor slabs including cell division, neighbor rules and state transition mechanisms is established. Combined with modal recognition technology, the dynamic simulation of vibration response is realized. Research shows that the natural frequency of empty floor slabs is concentrated in the range of 10 to 15Hz, and the damping ratio is generally less than 2%. When the crowd density is 1.5–2.0 people /m², resonance responses are prone to occur, and the second-order harmonic load contributes significantly to the high-frequency modal vibration. The error between the calculated value of the CA model and the measured peak acceleration is less than 8%, which can effectively reflect the spatio-temporal evolution law of structural vibration. This study provides theoretical support and analytical tools for the design of vibration comfort of empty floor slabs.

[Key words] cellular automaton; bare floor; human load; vibration comfort; dynamic response

1 引言

1.1 研究背景

随着居民生活品质提升与城市化加速,建筑结构向大跨度、轻量化方向不断发展。钢-混凝土组合空腹楼板作为创新型水平受力结构,因自重轻、跨度大、受力合理等优势,广泛应用于商场、展馆等公共建筑。此类结构刚度较低且阻尼特性弱,人体步行、跳跃等活动产生的动态荷载易引发振动响应。当振动幅值超过舒适度阈值时,会导致使用者产生不适感,甚至影响结构耐久性。因此,准确模拟人体荷载作用下空腹楼板的振动行为,成为结构设计阶段亟待解决的关键问题。

1.2 研究现状

当前学界对空腹楼板振动问题的研究呈现“两多两少”特征:

(1)静力性能研究多,动力响应研究少:80%以上文献聚焦空腹楼板承载力、挠度等静力指标,仅20%涉及动力特性,且多集中于单一荷载下的响应分析;

(2)单一因素分析多,耦合机制研究少:现有研究多单独分析板厚、跨度对振动频率的影响,缺乏“人群荷载(密度、步频)-结构振动(频率、加速度)-人体舒适度(生理、心理)”耦合系统作用机制探索;

(3)确定性模拟多,随机性模拟少:采用有限元法(FEM)的研究占比75%,但该方法难以模拟人群随机运动(如突发变向、拥挤推搡)引发的非线性振动。而元胞自动机(CA)作为离散化、分布

式动态模拟工具,可通过元胞状态定义、空间网格划分与演化规则设定,精准刻画人群微观运动特征与结构振动时空分布规律。现有研究已将CA模型应用于桥梁人致振动分析,证实其在模拟人群荷载时空特性方面的优势,但针对空腹楼板的CA振动模型尚未见系统研究。

1.3 研究内容与技术路线

本文首先通过实验获取人体步行荷载参数,建立空腹楼板动力学参数数据库;其次构建融合结构特性与荷载特征的CA模型,明确元胞状态与振动传递规则;最后通过仿真与实测对比,验证模型有效性并分析结构参数对舒适度的影响规律。技术路线涵盖“参数获取-模型构建-仿真验证-规律分析”四个阶段。

2 理论基础与实验方法

2.1 人体步行荷载特性

人体步行荷载表现为周期性脉动特征,单步荷载时间历程可通过傅里叶级数描述:

$$F(t) = G \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sin(2\pi n f_t + \varphi_n) \right]$$

其中,G为人体重量, β_n 为第n阶谐波动态荷载系数, f_t 为步行频率, φ_n 为相位角。通过25名测试者的150组测力实验数据统计表明:峰值步行力与体重比均值为1.2267,标准差0.1027;单步接触时间 T_p 平均为0.6236s,对应步行频率约1.6Hz。

2.2 元胞自动机理论框架

CA模型核心构成包括元胞、网格、邻居规则、边界条件与状态转移函数五大要素。在空腹楼板振动模拟中,采用二维方形网格划分结构区域,每个元胞对应边长100mm的楼板单元,状态变量包括竖向位移 u 、速度 v 及加速度 a 。邻居规则采用Moore型,即中心元胞状态受8个相邻元胞影响,边界条件设为固定边界以匹配实际支座约束。

2.3 实验方案设计

(1) 荷载参数测试:采用1kN量程测力板采集步行荷载时程,采样频率500Hz,测试者体重范围500~750N,每人完成6组正常步行实验。

(2) 结构模态识别:对3块尺寸为6m×4m×0.2m的空腹楼板试件,采用脉动法测试固有频率、阻尼比与振型,激励设备选用力锤与加速度传感器。

(3) 振动响应实测:在试件表面布置12个监测点,分别测试单人行走、多人并行等5种工况下的加速度响应,与CA模型计算结果对比验证。

3 空腹楼板元胞自动机振动模型构建

3.1 模型初始化

(1) 元胞属性定义:每个元胞包含结构参数与动力参数两类属性,结构参数包括楼板厚度 h 、钢梁高度 h_{beam} 等,动力参数涵盖固有频率 f_n 、阻尼比 ξ 等,基于模态识别结果赋值。

(2) 初始状态设置:初始时刻元胞位移与速度均设为0,通过随机数生成器模拟人群初始分布,荷载施加位置对应元胞状态

初始激励值。

3.2 荷载加载机制

结合CA模型离散特性,将步行荷载转化为元胞激励信号。单人行走时,荷载沿预设路线逐行作用于对应元胞,作用时间与单步接触时间 T_p 匹配;多人荷载考虑跟随、排斥等行为规则,通过状态转移函数实现荷载叠加:

$$F_{cell}(t) = \sum_{i=1}^N G_i [1 + \beta_1 \sin(2\pi f_{t,i} t + \varphi_i)]$$

其中,N为作用于目标元胞的人数, $f_{t,i}$ 为第i人的步行频率,取值范围1.4~2.0Hz。

3.3 振动传递规则

基于结构动力学基本原理,建立元胞状态更新方程:

$$a(t + \Delta t) = \frac{F_{cell}(t) - ku(t) - cv(t)}{m}$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t + \Delta t)\Delta t$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + v(t + \Delta t)\Delta t$$

其中,k、c、m分别为元胞的等效刚度、阻尼与质量,通过空腹楼板截面特性计算获得。相邻元胞间的振动传递通过刚度耦合实现,传递系数依据材料弹性模量与单元间距确定。

3.4 舒适度评价标准

采用国际标准化组织(ISO)制定的ISO2631-1标准,以竖向加权加速度均方根值(a_{RMS})作为舒适度评价指标,结合我国《混凝土结构设计规范》要求,划分三个舒适度等级: $a_{RMS} \leq 0.05m/s^2$ 为优, $0.05 < a_{RMS} \leq 0.15m/s^2$ 为可接受, $a_{RMS} > 0.15m/s^2$ 为不舒适。

4 仿真分析与结果验证

4.1 模型参数校准

空腹楼板试件采用钢-混凝土组合截面,等效厚度205mm,钢梁型号HN400×200×8×13,经模态测试得基频12.3Hz,二阶频率24.1Hz,阻尼比0.85%。CA模型网格规模设为60×40,时间步长0.002s,通过灵敏度分析确定最优参数:邻居影响系数0.3,荷载传递衰减系数0.95。

4.2 单人行荷载响应分析

单人行走作用下,楼板振型以一阶竖向弯曲为主,振型中心位于跨中区域。CA模型计算的跨中峰值加速度为0.082m/s²,实测值为0.077m/s²,相对误差6.5%。振动响应在步行开始后3~5步达到稳定状态,卸载后振动衰减符合指数规律,与结构阻尼特性一致。

4.3 人群荷载响应规律

(1) 密度影响分析:人群密度从0.5人/m²增至2.5人/m²时,跨中 a_{RMS} 先增大后减小,在1.8人/m²时达到峰值0.143m/s²,接近舒适度临界值。高密度下行人步频降低至1.3~1.4Hz,荷载频率偏离结构基频,共振效应减弱。

(2) 谐波贡献分析:一阶谐波荷载主要激发基频振动,二阶谐波对二阶模态的贡献度达42%,当步行频率为6.1Hz(基频1/2)

时,二阶模态振动幅值显著增大,需重点关注高频共振风险。

4.4 结构参数影响研究

(1) 楼板厚度效应: 厚度从150mm增至205mm时,结构基频从9.8Hz提升至12.3Hz,但开孔比增大导致局部振动增强,205mm厚楼板峰值加速度较180mm厚试件提高12%。

(2) 钢梁类型影响: 采用HN450×200×9×14钢梁时,结构刚度提升18%,跨中 a_{rms} 降低23%,钢梁高度对振动抑制效果优于腹板厚度。

5 结论与展望

5.1 研究结论

(1) 建立的空腹楼板CA振动模型可有效模拟人体荷载作用下的振动响应,计算值与实测数据吻合良好,峰值加速度误差小于8%,为舒适度评估提供高效工具。

(2) 空腹楼板振动特性呈现“高频低阻尼”特征,人群密度 $1.5\sim 2.0$ 人/ m^2 为共振敏感区间,二阶谐波荷载是高频模态振动的主要诱因。

(3) 楼板厚度与钢梁高度对振动响应影响显著,设计中需平衡结构刚度提升与局部振动控制的矛盾,建议采用“厚板+高钢梁”组合方案优化舒适度性能。

5.2 研究局限与展望

本研究未考虑人体-结构耦合效应,后续可引入多体动力学理论完善荷载模型;CA模型当前采用固定步行频率,未来可结合机器学习算法实现随机步行行为的动态预测。此外,可拓展CA模型的三维化与并行计算功能,提升大尺度结构振动仿真的效率与精度。

[项目]

教育部国家级大学生创新训练计划项目(S202310547020),湖南省自然科学基金区域联合项目(2024JJ7491)。

[参考文献]

[1]刘界鹏,黄鈺,李江,等.步行激励下大跨度钢-混凝土空心板组合梁振动舒适度研究(英文)[J].Engineering,2022,19(12):93-104+6.

[2]徐龙河,杨冬玲,李忠献.桁架结构动力仿真自动元胞机模型的参数研究[J].振动与冲击,2011,30(7):218-222.

[3]杨期柱,马克俭,姜岚,等.钢-混凝土组合空腹楼板振动舒适度分析与实测研究[J].空间结构,2020,26(03):66-74.

[4]蔡卫强,刘爱荣,黄友钦,等.基于元胞自动机的桥梁人致振动响应研究[J].广州大学学报(自然科学版),2025,24(3):42-51.

[5]姜岚,张华刚,袁波,等.行走激励下大跨度空腹夹层板结构振动舒适度分析[J].四川建筑科学研究,2012,38(01):9-13.

[6]杨涛.自动元胞机理论在交错桁架结构动力仿真试验中的应用研究[D].天津大学,2010.

[7]平萍.元胞自动机原理及其在密码学的应用研究[D].南京理工大学,2009.

作者简介:

蒋定宏(2004--),男,汉族,湖南耒阳人,本科、新型结构。

*通讯作者:

杨期柱(1985--),男,汉族,湖南洞口人,博士、副教授、空间网格结构与新材料应用研究。