



防灾减灾工程学报

Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering

ISSN 1672-2132, CN 32-1695/P

《防灾减灾工程学报》网络首发论文

题目： 吊顶地震时程反应分析的二维简化模型
作者： 冯云幸，曲哲，李威齐
DOI： 10.13409/j.cnki.jdpme.20211111020
网络首发日期： 2022-10-08
引用格式： 冯云幸，曲哲，李威齐. 吊顶地震时程反应分析的二维简化模型[J/OL]. 防灾减灾工程学报. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20211111020>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20211111020

吊顶地震时程反应分析的二维简化模型

冯云幸^{1,2}, 曲哲^{1,2}, 李戚齐³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 河北 三河 燕郊 065201; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国建筑标准设计研究院有限公司 北京 100048)

摘要: 吊顶是由各种轻钢龙骨、吊顶板、吊杆等构件拼装组成的松散的非连续体系, 其地震反应的数值模拟尚缺乏研究。本文介绍一种用于吊顶地震反应分析的二维简化模型, 能够模拟吊顶在沿主龙骨方向的水平地震作用和竖向地震作用下的动力反应, 且能够考虑吊顶板与龙骨之间的摩擦、滑移、碰撞等因素的影响。利用该模型在 OpenSees 中模拟了由 4 块吊顶板组成的基本吊顶单元的双向加载振动台试验。通过对比试验和数值模拟得到的吊顶加速度反应的时程和傅里叶谱以及坠板率, 验证了该二维简化模型的合理性。进一步, 利用该模型考察了吊顶坠板率的频率相关性。结果表明, 吊顶的坠板率不仅仅取决于楼面峰值加速度的大小, 而是表现出显著的频率相关性。

关键词: 吊顶; 振动台试验; 数值模拟; 坠板率; 频率相关性

中图分类号: TU352.11

文献标识码: A

A Simplified Two-dimensional Model for the Seismic Response History Analysis of Suspended Ceilings

FENG Yunxing^{1,2}, QU Zhe^{1,2}, LI Qiqi³

(1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Yanjiao, Sanhe, Hebei 065201, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. China Institute of Building Standard Design and Research Institute Co., Beijing 100048, China)

Abstract: The suspended ceiling is a flexible system of loosely connected light-gauge-steel runners, panels, hanger rods and other components. There is still a lack of research on the numerical simulation of its seismic response. This paper introduces a two-dimensional simplified model for the response history analysis of suspended ceilings under combined uniaxial horizontal and vertical earthquake excitation, which considers the friction, sliding and pounding between the ceiling panels and the runners. The model is implemented in OpenSees and is calibrated against a shake table test of minimum units of suspended ceiling composed of four panels and a single hanger rod. The comparison of the time history and Fourier spectra of the acceleration responses and the rate of fallen panels between the test and numerical simulation results verifies the efficacy of the simplified model. The model is further used to identify the engineering demand parameters that correlates with the extents of seismic damage to suspended ceiling. The results show that the rate of the fallen panels depends on not only the peak floor acceleration, but also shows significant frequency-dependency.

Keywords: suspended ceiling; shake table test; numerical simulation; rate of fallen panels; frequency-dependency

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项工程 (2019EEVL0304)、黑龙江省自然科学基金杰出青年项目 (JQ2019E005) 资助

作者简介: 冯云幸 (1993—), 女, 硕士研究生。主要从事吊顶的数值模拟与地震易损性研究。Email: fyxokk@163.com

通讯作者: 曲哲 (1983—), 男, 研究员, 工学博士。主要从事建筑抗震、减震与隔震技术研究。Email: quz@iem.ac.cn

引言

建筑中除主体结构以外的所有构件均属于非结构构件的范畴。它主要包括支撑或附着于主体结构的建筑构件、机电和管线系统，同时也包括家具和设备等内部物品^[1]。吊顶是我国各类公共建筑中最常见的一种非结构构件，在地震中往往先于主体结构发生破坏^[2]，不但会造成严重的经济损失，而且影响建筑震后使用功能的快速恢复。吊顶主要包括由主龙骨和次龙骨拼接形成的轻钢龙骨网格、浮放在网格上的吊顶板和将网格悬挂在楼板下的吊杆或吊线（图 1）^[1-3]。为增强吊顶的抗震能力，可在主、次龙骨以及次龙骨和边龙骨之间设置抗震夹，也可在吊线或吊杆周边设置斜拉索，但这些构造在我国普通公共建筑中并未普及。

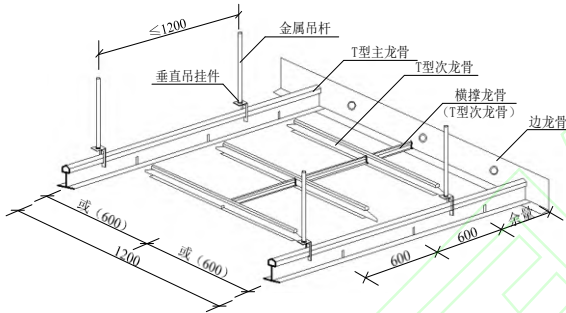


图 1 吊顶的基本组成

Fig.1 Basic configuration of suspended ceiling

在吊顶体系中，各种龙骨之间连接薄弱，吊顶板浮放于龙骨网格之上，主、次龙骨浮放在边龙骨之上，形成松散的非连续体系。国内外振动台试验表明^[4-11]，组成吊顶的各构件之间在地震作用下会发生复杂的摩擦、滑移和碰撞，为吊顶地震反应的数值模拟带来挑战。Zaghi 等^[12]在 OpenSees 中建立了吊顶的三维数值模型，并开发了

zeroLengthImpact3D 模拟吊顶板与龙骨之间的初始间距、摩擦、碰撞以及由碰撞引起的能量损失等复杂的相互作用；Soroushian 等人^[13]在介绍吊顶-管线耦联系统的数值模拟中使用 zeroLengthImpact3D 模拟吊顶板与龙骨之间的连接。此外，Soroushian 等人^[14-15]开展了主次龙骨节点、边龙骨节点等的静力试验，利用试验数据标定了 OpenSees 中的 Pinching4 单轴本构模型的材料参数。Brandolese 等人^[9,16]在使用 Pinching4 本构模型模拟吊顶的主次龙骨节点时也给出了一套模型参数的取值。可见，吊顶板与龙骨之间的相互作用和龙骨之间的连接是当前吊顶地震反应数值模拟方面研究较多的两个问题。但是在上述研究中，zeroLengthImpact3D 使用复杂、容易造成计算难以收敛且只能在三维模型中使用，而 Pinching4 本构模型参数较多，不同学者根据各自试验结果标定的参数取值差异很大，尚未形成共识。

为了便于通过大量数值分析把握吊顶的基本动力特性和地震破坏特征，本文介绍一种模拟吊顶地震反应的二维简化模型。该模型可以模拟吊顶在沿主龙骨轴线方向和竖向地震作用下的动力反应，且能够考虑吊顶中各个构件之间的摩擦、滑移碰撞等对吊顶地震反应影响有较大影响的因素。通过与一组基本吊顶子结构的振动台试验结果进行对比，检验该模型的有效性，并进一步利用该模型考察了影响吊顶坠板率的主要工程需求参数。

1 模型构成

模型由主龙骨、次龙骨、吊顶板、吊线及其连接节点构成，可用于模拟吊顶在竖向和与主龙骨平行的水平方向上的动力反应。模型的构成如图 2(a) 所示。模型中各个部分的模拟方法详述如下。

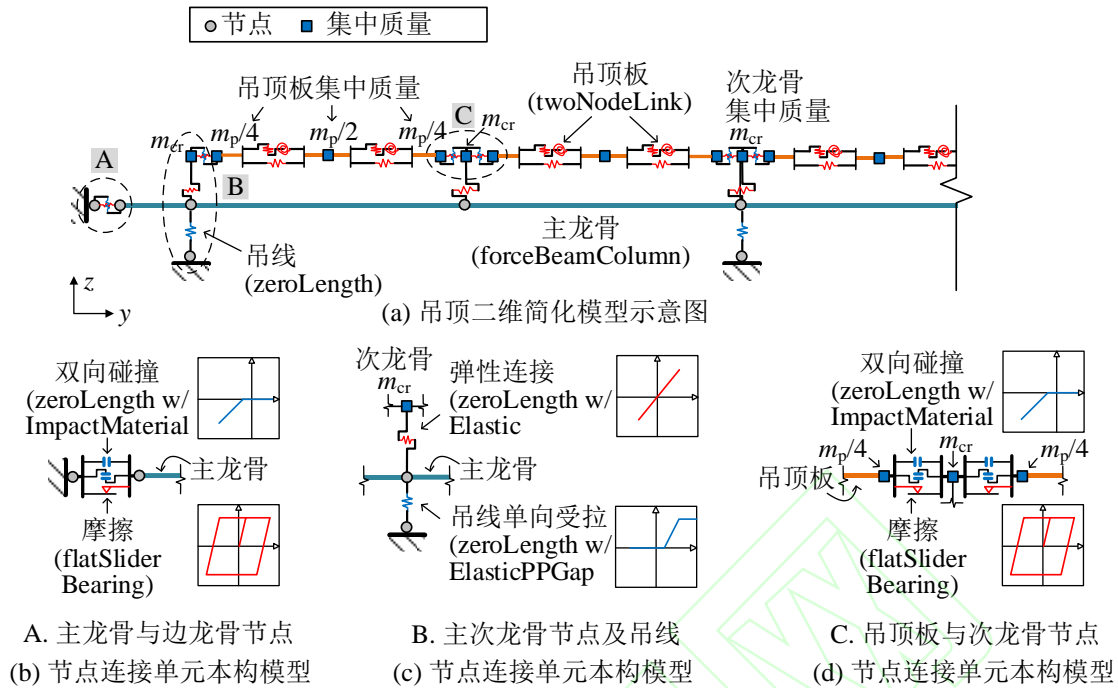


Fig.2 Two-dimensional simplified numerical model for suspended ceilings

(1) 主龙骨：采用基于力的梁柱单元（forceBeamColumn）模拟沿吊顶跨度方向连续的主龙骨，主龙骨质量均匀分布，在地震作用下保持线弹性，且不考虑主龙骨的搭接；在主龙骨两端，采用 flatSlider Bearing 单元模拟主龙骨与边龙骨之间在水平方向的摩擦，采用水平和竖向的两个 zeroLength 单元模拟二者在两个方向上的碰撞，在碰撞方向上采用 ImpactMaterial 本构模型（图 2b）。

(2) 次龙骨：在二维模型中，与主龙骨正交的次龙骨缩减为质点，质量为 m_{cr} ，并通过 zeroLength 单元与主龙骨相应位置的结点连接，以模拟主、次龙骨节点沿主龙骨轴线方向的受剪行为（图 2c）。在本文简化模型中，用线弹性材料 Elastic 模拟该方向上主、次龙骨的相对位移。当有更详细且可靠的连接节点力学参数时，也可采用更复杂的 Pinching4 材料本构。

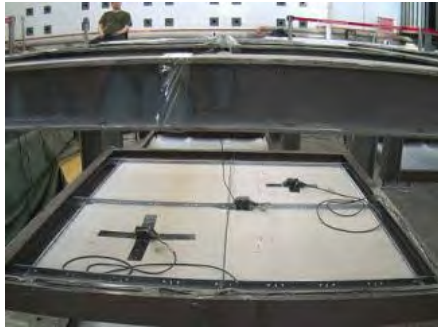
(3) 吊顶板：根据 Zaghi 等人^[12]的建议，采用以 twoNodeLink 单元连接的三个质点模拟吊顶板，三个质点的总质量为 m_p （图 2a），假设吊顶板始终保持线弹性，板端与表示次龙骨的质点之间通过一个水平方向的 flatSliderBearing 单元模拟二者之间的摩擦，通过水平和竖向的 zeroLength 单元模拟二

者之间的碰撞，在碰撞方向上采用 ImpactMaterial 本构模型（图 2d）。

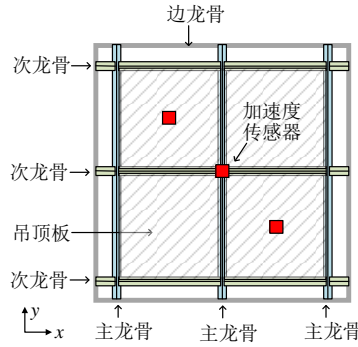
(4) 吊线：采用 zeroLength 单元模拟吊线对主龙骨在竖向的支撑作用，而忽略吊线摆运时在水平方向引入的几何非线性刚度。在 zeroLength 单元的竖向采用 ElasticPPGap&Elastic 本构模型模拟吊线的只拉不压行为（图 2c）。

2 试验验证

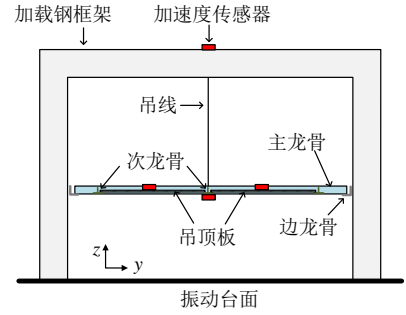
利用上述简化模型模拟一个吊顶基本单元的振动台试验，以检验模型的合理性。试验中的吊顶基本单元包含 2×2 排列四块吊顶板以及相应的龙骨网格和位于模型中央的吊线（图 3）。吊顶的边龙骨和吊线均固定在刚度足够大的钢框架上，以保证钢框架对振动台台面输入无明显的放大作用。模型的具体参数详见文献[1]。在吊顶的主龙骨中部、两块吊顶板的中央以及加载钢框架的顶部中央分别布置加速度传感器（图 3bc）。试验中，振动台在沿主龙骨水平方向 y 向和沿重力竖直方向 z 向输入具有相同峰值加速度和不同频率的正弦波。



(a) 试验体照片



(b) 试验体平面布置



(c) 试验体立面布置

图 3 吊顶试验体及加速度传感器布置

Fig.3 Configuration of suspended ceiling unit and layout of acceleration sensors

利用第 1 节所述方法在 OpenSees 中建立该试验中吊顶基本单元的试验体的二维简化模型如图 4 所示。该模型由一根主龙骨、三个表示不同位置的次龙骨的集中质量、两块吊顶板以及模拟其相互作用的连接单元组成。数值模型中的主龙骨代表了试验体的中央主龙骨，其截面的面积为 41.711mm^2 ，惯性矩为 525.718mm^4 ，线密度为 0.327kg/m ，弹性模量为 $8.2 \times 10^4\text{MPa}$ 。如上文所述，采用以 twoNodeLink 单元连接的三个质点模拟吊顶板。考虑试验体的对称性，假设该主龙骨两侧吊顶板在沿主龙骨轴线方向同步运动，因此在数值模型可采用两块吊顶板代表试验体中的四块吊顶板，即图 4 中的 m_p 代表了试验体中主龙骨所承受的吊顶板的质量， $m_p=1.04\text{kg}$ ；吊顶板的轴向刚度为 19.5kN/mm ，剪切刚度为 8.125kN/mm ，截面受弯刚度为 0.297kNm 。同样地，数值模型中的三个次龙骨质点分别代表了试验体中中央主龙骨所承受两侧两根次龙骨的部分，其质量 $m_{cr}=0.0954\text{kg}$ 。

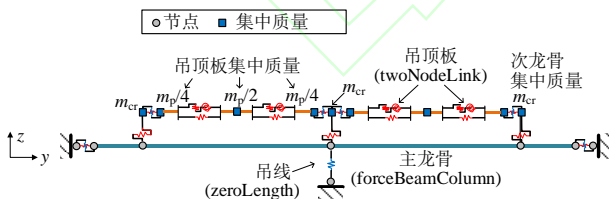


图 4 试验中吊顶基本单元的二维简化数值模型

Fig.4 Simplified 2D numerical model for suspended ceiling unit in experiment

用于模拟碰撞行为的 ImpactMaterial 材料的力-位移曲线如图 5(a)所示，主龙骨与固定在钢框架上的边龙骨之间在 y 和 z 两个方向上的碰撞刚度均取 $k_p=109\text{N/mm}$ ；吊顶板与次龙骨之间在 y 和 z 两个方

向上的碰撞刚度均取 $k_p=10.9\text{N/mm}$ 。根据现场实测尺寸，吊顶板长度与次龙骨间距之间存在约 7mm 的差值，因此为吊顶板与次龙骨之间在 y 方向（水平方向）上的 ImpactMaterial 材料设置一定的初始间隙 δ_{gap} 。 δ_{gap} 在 1.5mm 至 5.5mm 之间随机取值，且保证吊顶板两端的 δ_{gap} 之和为 7mm 。

用于模拟摩擦行为的 flatSliderBearing 单元在水平方向的摩擦力-位移曲线如图 5(b)所示，其中起滑前刚度取 $k_0=200\text{N/mm}$ ，摩擦系数 $\mu=0.3$ 。采用只压不拉的 ENT 材料模拟 flatSliderBearing 单元在 z 向（竖直方向）的行为，ENT 材料的受压刚度也取为 200N/mm 。

试验中采用直径约为 2.8mm 的镀锌钢丝作为吊线，悬吊长度为 500mm 。在数值模型中，采用 zeroLength 单元模拟吊线，采用 ElasticPPGap 材料模型模拟其轴向力-位移关系，如图 5(c)所示。其中，吊线的轴向刚度 $k_w=1010\text{N/mm}$ ，轴向屈服承载力 $F_y=2525\text{N}$ ；为模拟试验体中吊线的初始松弛，设置 $\delta_{\text{loose}}=5\text{mm}$ 的初始间隙。

用 remove 模拟吊顶板坠板行为，次龙骨可搭接长度为 10.9mm ，当吊顶板与次龙骨相对位移大于 $(10.9-\delta_{\text{gap}})$ 时发生坠板。

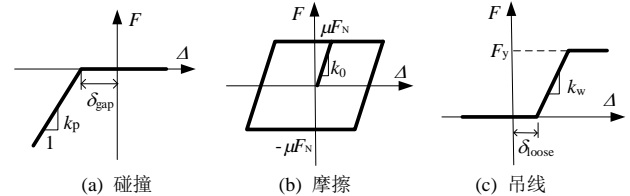


图 5 滞回曲线

Fig.5 Hysteresis curve

以台面水平 (y 向) 和竖向 (z 向) 加载频率分

别为 $f_y=2.1\text{Hz}$ 和 $f_z=4.2\text{Hz}$ 、峰值加速度 $PTA_y=PTA_z=1.0g$ 的加载工况为例，图 6 和图 7 分别对比了试验和计算得到的主龙骨与吊顶板的水平和竖向加速度时程和相应的傅里叶谱。可见，计算

模型能够反映试验体的基本动力反应特性。受摩擦和碰撞行为影响，主龙骨和吊顶板的最大加速度反应均远大于台面峰值加速度；且主龙骨的加速度反应明显大于吊顶板。

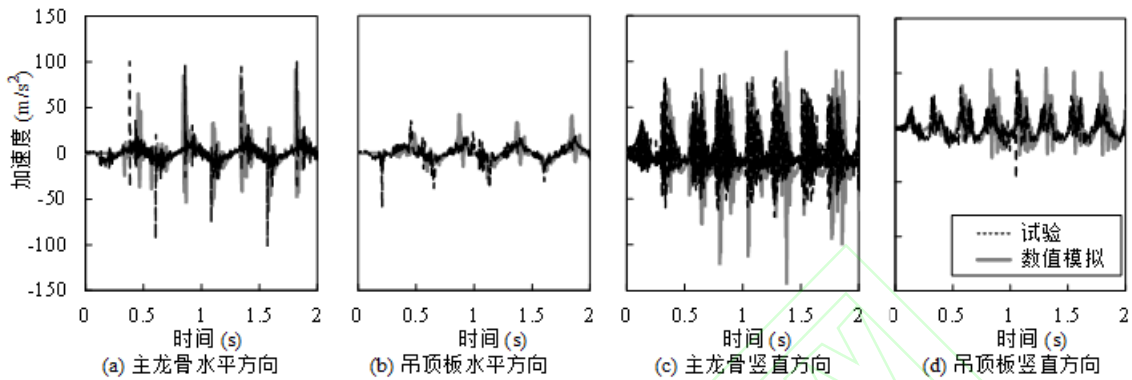


图 6 主龙骨和吊顶板的加速度时程反应

Fig.6 Acceleration history response of main runner and ceiling panel

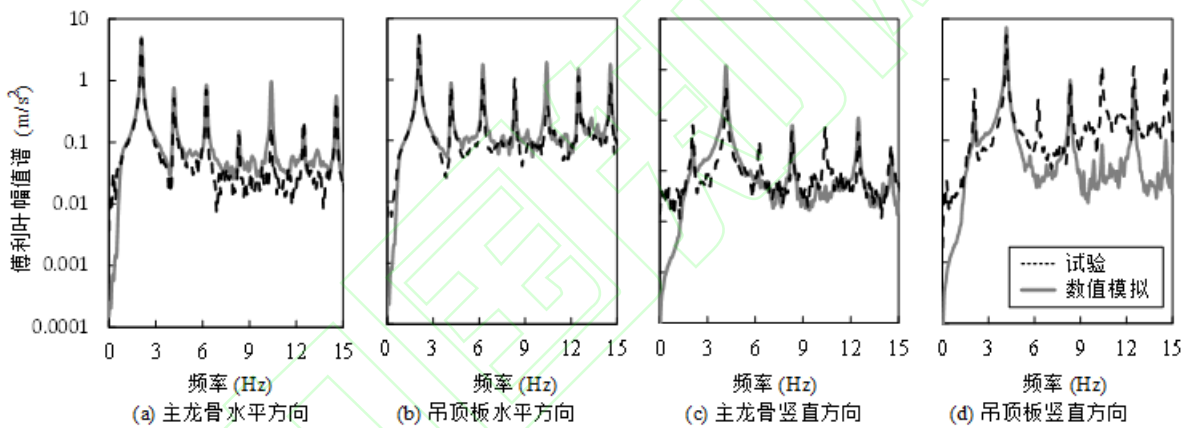


图 7 主龙骨和吊顶板的加速度反应的傅里叶谱

Fig.7 Fourier spectra of acceleration response of main runner and ceiling panel

在描述吊顶的地震破坏时，往往以坠板率，即坠落的吊顶板数量与吊顶板总数之比，作为衡量吊顶损伤程度的重要指标^[2,17]。采用图 4 所示的简化数值模型计算文献[1]中具有不同台面峰值加速度 ($PTA=0.5\sim 2.0g$)和加载频率组合 ($f_y=1.0\sim 12.5\text{Hz}$, $f_z=2.1\sim 25\text{Hz}$ 且 $f_z=2f_y$) 的 16 个工况下吊顶试验体的坠板率。在模拟中，为了考虑吊顶板与次龙骨之间初始空隙 δ_{gap} 的不确定性，对于每一个工况的每一个试验体重复计算 50 次，在每次计算中吊顶板两端的 δ_{gap} 在 1.5mm 至 5.5mm 之间随机取值且保证吊顶板两端的 δ_{gap} 之和为 7mm，取 200 次计算得到的平均坠板率作为该工况下的坠板率，并与试验结果进行对比，如图 8 所示。可见，本文简化模型可

以较好地模拟吊顶在动力加载下的坠板行为。其中一个显著的特性是，坠板率与加载频率表现出明显的相关性，而不仅仅取决于峰值加速度的大小。

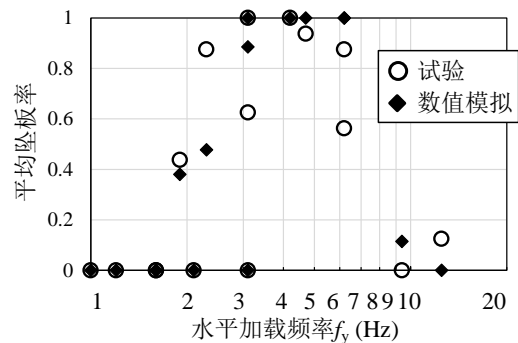


图 8 加载频率与坠板率的相关关系

Fig.8 Relationship between rate of fallen panel and loading frequency

3 吊顶坠板率的频率相关性

本文简化数值模型为考察吊顶的地震破坏特性提供了高效的工具。以坠板率的频率相关性为例，利用该数值模型可以高效地考察更多加载工况下吊顶试验体的坠板率。此处取楼面峰值加速度 $PFA=1.5g$ 、 $1.1g$ 、 $0.8g$ 、 $0.7g$ 、 $0.6g$ 、 $0.5g$ ，水平加载频率 $f_y=0.25\text{Hz}\sim 12\text{Hz}$ ，竖向加载频率 $f_z=2f_y$ ，按上文方法计算得到的吊顶平均坠板率如图 9 所示。可见，当加载频率不变时，坠板率随 PFA 的增大而增大；对于相同的 PFA ，坠板率随着水平加载频率的增大先增后减，并在 $f_y=6\text{Hz}$ 附近坠板率最大。此处，当 PFA 不超过 $0.5g$ 时，坠板率为零。

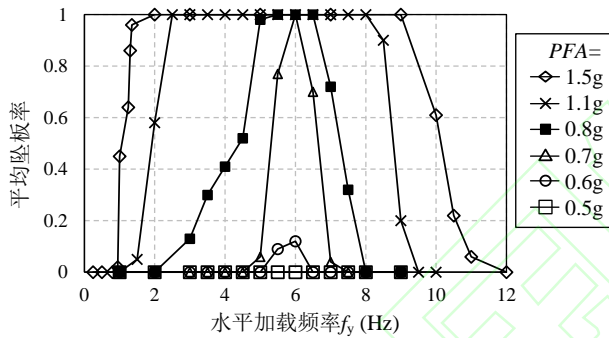


图9 不同 PFA 下坠板率与加载频率的相关关系

Fig.9 Relationship between rate of fallen panel and loading frequency under different PFA s

4 结论

本文介绍一种模拟吊顶地震反应的二维简化模型。与三维模型相比，该模型虽然不能在三个水平方向同时施加地震作用且忽略了一些构件间相互作用，却能够把握吊顶地震反应的主要特性，为定量地研究吊顶的地震破坏特性提供了简单高效的分析工具。通过对比试验和数值模拟得到的吊顶加速度反应的时程和傅里叶谱以及坠板率，验证了该二维简化模型的合理性。进一步，利用该模型考察了吊顶坠板率的频率相关性。结果表明，吊顶的坠板率不仅仅取决于楼面峰值加速度的大小，而是表现出显著的频率相关性。

参考文献：

- [1] 李威齐.明架矿棉板吊顶的地震损伤特征研究[D].哈尔滨.中国地震局工程力学研究所.2019
Li Q Q. Study on the seismic damage characteristics of suspended ceilings of exposed runners and mineral wool boards[D]. Harbin. Institute of Engineering Mechanics. 2019 (in Chinese)
- [2] 李威齐, 曲哲, 解全才, 王多智.我国公共建筑中吊顶的震害特征及其易损性分析[J].工程力学, 2019, 36(7):207-215
Li Q Q, Qu Z, Xie Q C, Wang D Z. Seismic damage characteristics and fragility of suspended ceilings in Chinese public buildings[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7):207-215 (in Chinese)
- [3] 12J502-2, 国家建筑标准设计图集《内装修-室内吊顶》[S] 北京: 中国计划出版社, 2013.
12J502-2, The national building standard design atlas “interior decoration – the ceiling of the room” [S]. Beijing: China Planning Press,2013 (in Chinese)
- [4] Soroushian S, Rahmanishamsi E, Ryu KP, et al. Experimental Fragility Analysis of Suspension Ceiling Systems[J]. Earthquake Spectra,2016,32(2):881-908
- [5] Soroushian S, Rahmanishamsi E, Jenkins C, et al. Fragility Analysis of Suspended Ceiling Systems in a Full-Scale Experiment[J]. Journal of Structural Engineering,2019,145(4)
- [6] Ryan KL, Soroushian S, Maragakis M, et al. Seismic Simulation of an Integrated Ceiling-Partition Wall-Piping System at E-Defense.I: Three-Dimensional Structural Response and Base Isolation[J]. Journal of Structural Engineering,2016,142(2)
- [7] Soroushian S, Maragakis M, Ryan KL, et al. Seismic Simulation of an Integrated Ceiling-Partition Wall-Piping System at E-Defense.II: Evaluation of Nonstructural Damage and Fragilities[J]. Journal of Structural Engineering,2016,142(2)
- [8] Lu Y, Mosqueda G, Han Q H, Zhao Y F. Shaking Table Tests Examining Seismic Response of Suspended Ceilings Attached to Large-Span Spatial Structures[J]. Journal of Structural Engineering,2018,144(9)
- [9] Brandolese S, Fiorin L, Scotta R. Seismic demand and capacity assessment of suspended ceiling systems[J]. Engineering Structures,2019,193:219-237
- [10] Ryu KP, Reinhorn A.M. Experimental Study of Large

- Area Suspended Ceilings[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019,23(6)
- [11] 韩庆华, 赵一峰, 卢燕. 吊顶系统自振特性分析及试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39 (7): 95-103
Han Q H, Zhao Y F, Lu Y. Natural vibration characteristic analysis and experimental research of suspended ceiling systems[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(7):95-103 (in Chinese)
- [12] Zaghi AE., Soroushian S, Heiser AE, et al. Development and validation of a numerical model for suspended-ceiling systems with acoustic tiles[J]. *Journal of Architectural Engineering*,2016,22(3)
- [13] Soroushian S, Maragakis M, Zaghi AE, Echevarria A. Numerical Simulation of Integrated Suspended Ceiling-Sprinkler Systems[Z]. *Structures Congress 2015*
- [14] Soroushian S, Maragakis M, Jenkins C. Axial Capacity Evaluation for Typical Suspended Ceiling Joints[J]. *Earthquake Spectra*, 2016,32(1):547-565
- [15] Soroushian S, Maragakis M, Jenkins C. Capacity Evaluation of Suspended Ceiling-Perimeter Attachments[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2)
- [16] Fiorin L, Brandolese S, Scotta, R. Experimental and numerical assessment of suspended ceiling joints[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2021, 19, 919–962
- [17] ASCE/SEI 41-06. *Seismic rehabilitation of existing buildings*[S]. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2006.