

吊顶龙骨节点和拼接点荷载-位移恢复力模型

王 勇^{1,2}, 蒋欢军^{1,2}, 黄有露^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 开展了吊顶主龙骨拼接点、主次龙骨节点和边节点的低周往复加载试验, 总结了龙骨节点和拼接点的破坏模式, 分析了龙骨节点和拼接点的承载力与变形性能, 采用有限元软件 OpenSEES 中的 Pinching4 模型建立了龙骨节点和拼接点的荷载-位移恢复力模型。该恢复力模型与试验得到的荷载-位移滞回曲线比较一致, 且随着循环加载圈数的增加, 两者的累积耗能变化规律也比较一致。在此基础上, 进一步建立了各类龙骨节点和拼接点的通用恢复力模型, 并给出龙骨节点和拼接点通用恢复力模型参数的建议值。

关键词: 吊顶; 龙骨节点和拼接点; 抗震性能; 试验研究; 荷载-位移恢复力模型

中图分类号: TU8; P315.9

文献标志码: A

Force-Displacement Hysteretic Model for Grid Joints and Splices of Suspended Ceiling

WANG Yong^{1,2}, JIANG Huanjun^{1,2}, HUANG Youlu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Low cycle tests on the main tee splices, main-cross tee joints and peripheral joints of suspended ceiling were conducted. The failure modes of grid joints and splices were summarized. The load-bearing ability and deformation capacity of grid joints and splices were analyzed. The Pinching4 model in OpenSEES software was used to establish the force-displacement hysteretic model for grid joints and splices. The force-displacement hysteresis curve based on the hysteretic model is consistent with that obtained from the experiments, and as the number of cyclic loading increases, the change rule of the accumulated energy dissipation based on the

hysteretic model agrees well with the corresponding experimental results. On this basis, the generic hysteretic model for various grid joints and splices was further established, and the recommended values of generic hysteretic model parameters for grid joints and splices were given.

Key words: suspended ceiling; grid joints and splices; seismic performance; experimental study; force-displacement hysteretic model

吊顶是建筑中一类重要的非结构构件, 通常由竖向承力构件、龙骨系统和面板构成。大量的震后调研发现, 矿棉板吊顶(以下吊顶专指矿棉板吊顶)因自身抗震能力不足在地震中的破坏十分严重, 如 2010 年智利地震中一所医院的吊顶发生大面积倒塌^[1]; 2011 年基督城地震中吊顶与通风设备发生碰撞导致部分面板坠落^[2]; 2013 年芦山地震中芦山县人民医院的吊顶完全倒塌^[3]。吊顶的破坏主要受加速度控制, 常见的破坏模式表现为: 矿棉板的错位与坠落、龙骨及龙骨节点的屈曲与破坏、与周围的结构构件及非结构构件发生相互作用而导致的破坏等。吊顶的震害往往集中在吊顶边角部, 这与吊顶边界无可靠的连接和边界碰撞等因素有关。吊顶的破坏不仅造成了直接的经济损失, 也影响了建筑震后功能的快速恢复。震害调查表明, 吊顶龙骨节点和拼接点的失效是造成吊顶破坏的主要原因之一。

与吊顶龙骨构件相比, 龙骨节点和拼接点的强度低, 是吊顶中的抗震薄弱部位。国内外学者针对龙骨节点和拼接点的抗震性能进行了相关研究。Paganotti 等^[4]和 Dhakal 等^[5]对应用于新西兰的吊顶中的主龙骨拼接点、主次龙骨节点和带铆钉的边节

收稿日期: 2021-07-05

基金项目: 上海市优秀学术带头人计划(18XD1403900); 同济大学地震工程国际合作联合实验室项目(0200121005/058)

第一作者: 王 勇(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为非结构构件抗震。E-mail: yongwang0305@163.com

通信作者: 蒋欢军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程结构抗震与防灾研究。

E-mail: jhj73@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

点进行了单调加载试验,研究了节点和拼接点的破坏模式和极限承载力,并基于试验结果对其开展了易损性分析。Takhirov等^[6]通过单调加载和低周往复加载试验研究了美国式吊顶中的边节点的构造类型对边节点抗震性能的影响,分析了不同构造类型的边节点的破坏模式和荷载-位移响应。Soroushian等^[7-10]对美国式吊顶中的主次龙骨节点和边节点施加了单调荷载和低周往复荷载,探讨了节点的破坏机理和滞回特性,建立了节点的易损性曲线和荷载-位移恢复力模型。宋喜庆^[11]通过单调加载试验研究了中国式吊顶中的主次龙骨节点和主龙骨-吊件节点的破坏荷载和失效原因。Fiorin等^[12]对应用于欧洲的吊顶中的龙骨节点进行了单调加载和低周往复加载试验,考察了节点类型、龙骨截面形状和龙骨截面尺寸对节点抗震性能的影响,分析了节点的破坏机理、力-位移响应和等效黏滞阻尼,采用与Soroushian等^[8]相同的方法建立了节点的荷载-位移恢复力模型。

总体而言,国内外学者对吊顶龙骨节点和拼接点恢复力模型的研究相对不足,缺乏公认的恢复力模型。不同研究者采用的试件类型和构造形式存在差异,因此研究结论的通用性较差。我国在吊顶龙骨节点和拼接点恢复力模型的研究方面尚处于空白。因此,国内外研究者对吊顶进行数值分析时,大多将龙骨节点和拼接点进行简化处理,如将主次龙骨节点假定为铰接,并未考虑龙骨节点和拼接点的非线性对吊顶抗震性能的影响^[13-15]。

本文通过低周往复加载试验研究了矿棉板吊顶中的主龙骨拼接点、主次龙骨节点和边节点的抗震

性能,总结了龙骨节点和拼接点的破坏模式,分析了龙骨节点和拼接点的承载力和变形性能,基于试验数据,采用有限元软件OpenSEES中的Pinching4模型^[16]建立了龙骨节点和拼接点的通用荷载-位移恢复力模型。

1 试验概况

1.1 试件设计

以吊顶中的主龙骨拼接点、主次龙骨节点和边节点为试验对象,设计4类共29个试件,加载方式为低周往复加载,试验类型包括轴向加载试验、受剪试验和受弯试验,试件信息见表1。试件的组成详见表2。龙骨节点和拼接点受力性能试验的详细内容参见文献[17-18]。试件编号由试验类型-加载类型-试件号3部分组成,试验类型中JA、CJS、CJB和WJ分别代表吊顶内部节点(主龙骨拼接点和主次龙骨节点)的轴向加载试验、主次龙骨节点的受剪试验、主次龙骨节点的受弯试验和边节点的轴向加载试验,加载类型中A、B、D和E分别代表主轴、次轴、固定和自由,数字3指低周往复加载,主龙骨拼接点试件和主次龙骨节点试件编号中的M和C分别代表主龙骨拼接点和主次龙骨节点,边节点试件编号中的M和C表示端部龙骨分别为主龙骨和次龙骨,M和C后接数字为试件序号,如JA-3-M1代表主龙骨拼接点的轴向低周往复加载试件1,JA-3-C1代表主次龙骨节点的轴向低周往复加载试件1,WJ-E3-M1代表端部龙骨为主龙骨的固定型边节点的轴向低周往复加载试件1。

表1 试件的综合信息

Tab.1 General information of test specimens

试件类型	试验类型	加载方向	试件数量	试件编号
主龙骨拼接点	轴向		3	JA-3-M1; JA-3-M2; JA-3-M3
	轴向		3	JA-3-C1; JA-3-C2; JA-3-C3
主次龙骨节点	受剪	主轴	3	CJS-A3-C1; CJS-A3-C2; CJS-A3-C3
		次轴	3	CJS-B3-C1; CJS-B3-C2; CJS-B3-C3
	受弯	主轴	3	CJB-A3-C1; CJB-A3-C2; CJB-A3-C3
		次轴	4	CJB-B3-C1; CJB-B3-C2; CJB-B3-C3; CJB-B3-C4
固定型边节点	轴向		6	WJ-E3-M1; WJ-E3-M2; WJ-E3-M3; WJ-E3-C1; WJ-E3-C2; WJ-E3-C3
自由型边节点	轴向		4	WJ-D3-M1; WJ-D3-M2; WJ-D3-C1; WJ-D3-C2

1.2 加载装置及加载制度

试验加载装置如图1所示,加载装置由钢框架和电子万能试验机组成。设计钢框架用以安装试件,试件加载过程中钢框架保持为弹性,钢框架由下部的钢底座和上部的框架组成,所有构件均采用Q235钢材,下部的钢底座由9块钢板组成,除钢底座

厚度为20 mm,其余竖向钢板厚度均为10 mm,上部的框架由钢柱(钢柱内焊接钢连接板)、钢梁和方钢管组成,钢柱与钢底座焊接,钢梁与钢柱通过钢柱内钢连接板的螺栓连接,方钢管与钢柱焊接。采用电子万能试验机对试件加载,采用加载端内置的力传感器和试验机外置的位移计分别测量节点的受力和

表2 试件组成的综合信息

Tab.2 General information of the constitution of test specimens

试件类型	试验类型	加载方向	试件的组成					
			主龙骨段		次龙骨段		边龙骨段	
			数量	长度/mm	数量	长度/mm	数量	长度/mm
主龙骨拼接点	轴向		2	300				
	轴向		1	430	2	300		
主次龙骨节点	受剪	主轴	1	60	2	200		
		次轴	1	200	2	200		
	受弯	主轴	1	60	2	170		
		次轴	1	200	2	170		
固定型边节点	轴向		1	300			1	300
自由型边节点	轴向		1	300			1	300

注:表中边节点的组成以端部龙骨为主龙骨为例进行说明,端部龙骨为次龙骨的边节点的组成与端部龙骨为主龙骨的边节点的组成除端部龙骨不同外,其余部分相同。

位移。在加载过程中,电子万能试验机的固定端保持不动,仅加载端上下移动施加竖向荷载。试验中正向和负向分别指加载端向上和向下加载。

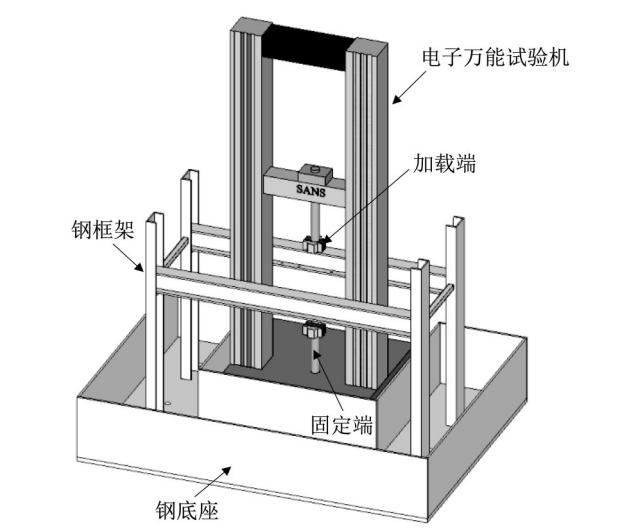


图1 加载装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test setup

试件的受力图如图2所示,主次龙骨节点受剪和受弯试验仅给出了主轴加载方向的试件,次轴加载方向的试件与其类似不再详述。参照 Retamales 等^[19]建议的加载方案,试验中采用位移控制加载方式,加载制度如图3所示,每次加载2圈。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 龙骨节点和拼接点的破坏模式

主龙骨拼接点在轴向加载试验中,破坏模式表现为拼接点拉出破坏。主次龙骨节点在轴向加载试验中,破坏模式表现为节点受压屈曲。主次龙骨节点在主轴受剪试验中,破坏模式表现为节点剪切破坏。主次龙骨节点在次轴受剪试验中,破坏模式表现为节点面外弯曲并脱出破坏。主次龙骨节点在主

轴和次轴受弯试验中,破坏模式皆表现为节点脱出破坏。固定型边节点和自由型边节点在轴向加载试验中,破坏模式皆表现为节点拉出破坏。

1.3.2 龙骨节点和拼接点的承载力与变形性能

各试件的承载力与变形性能试验结果见表3,表中 F_p^+ 和 F_p^- 分别指正向和负向峰值荷载或弯矩, D_p^+ 和 D_p^- 分别指正向和负向峰值荷载或弯矩对应的位移或转角。对于主次龙骨节点受弯试验,弯矩 F 和转角 D 的单位分别为 $\text{kN}\cdot\text{mm}$ 和 rad ;对于其余试验,荷载 F 和位移 D 的单位分别为 kN 和 mm 。表3中数据取每组试件结果的平均值,其中边节点的试验结果取端部龙骨为主龙骨的情况,主次龙骨节点次轴受弯试件因具有两种滞回模式(参见下文图5f和5g),表中列举的正向和负向结果分别为模式2和1的结果。

由表3可知:①主龙骨拼接点轴向受力时正负向承载力和变形能力比较一致。②主次龙骨节点轴向受力时受拉强度是受压强度的2倍左右,说明主次龙骨节点受压时的易损性更高,这是由于在轴向压力作用下节点极其容易压屈。与主龙骨拼接点对比,主次龙骨节点轴向受力时更容易破坏。③主次龙骨节点次轴受剪时的节点强度远低于主轴受剪时的节点强度,但次轴受剪时的变形能力更强,这是因为节点插片在次轴受剪时容易发生面外变形,降低了节点的强度,提高了节点的变形能力。④主次龙骨节点次轴受弯时比主轴受弯时的节点强度更大,这与节点次轴受弯时节点插片中锁扣产生较大塑性变形甚至进入强化阶段从而提高了节点承载力有关。⑤固定型边节点和自由型边节点轴向受力时两者的极限承载能力比较一致,两者的抗拉极限承载力比较接近是因为两者都表现为节点拉出破

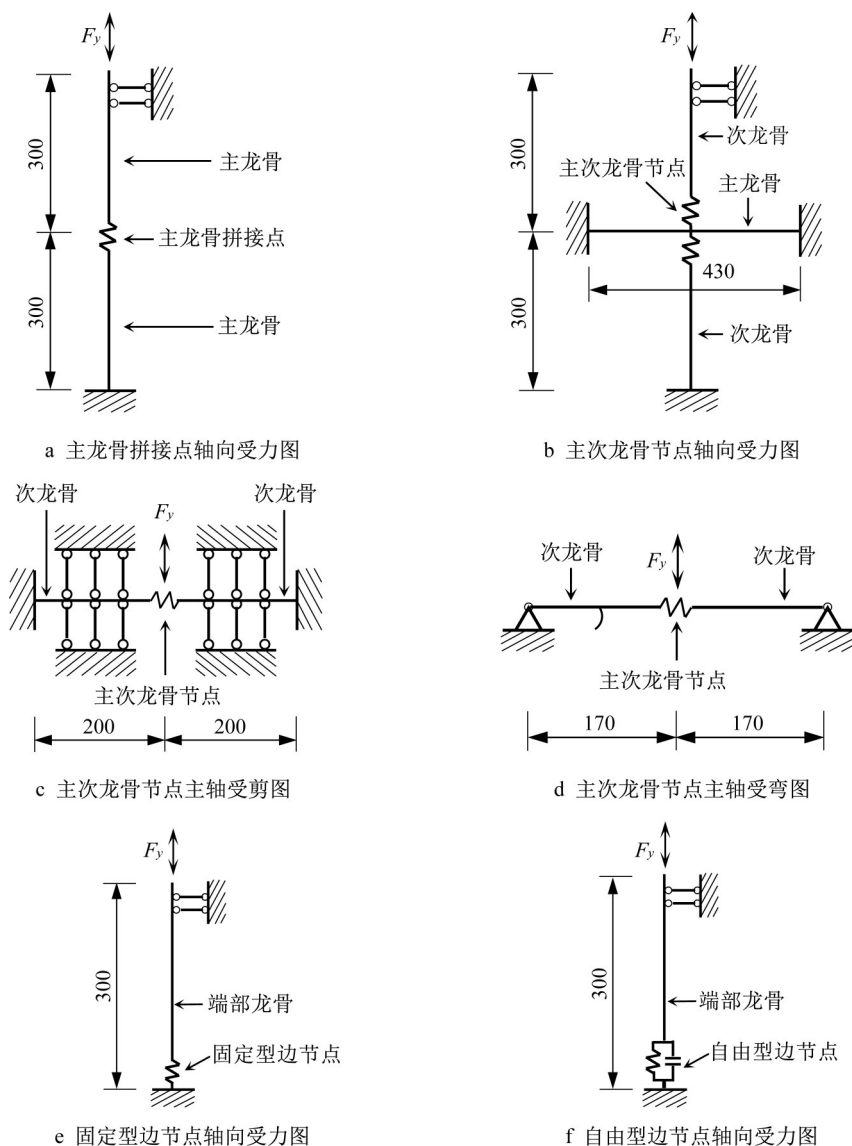


图2 试件受力图(单位:mm)

Fig.2 Mechanical diagrams of specimens (unit: mm)

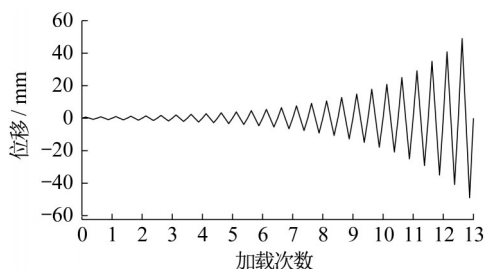


图3 低周往复加载试验的加载制度

Fig.3 Loading protocol of cyclic test

坏,该破坏模式主要与抗震夹的卡舌与边龙骨的约束大小有关,而两者在该方面的约束情况表现一致;两者的抗压极限承载力比较接近是因为两者的破坏形式中都存在端部龙骨的压屈,该破坏形式受边节点形式的影响较小。两者的受拉强度远小于受压强

度,这与抗震夹未用螺钉与边界木板固定边节点容易发生拉出破坏有关,自由型边节点因为存在间隙使得其极限变形能力更强。

2 吊顶龙骨节点和拼接点荷载-位移恢复力模型

2.1 Pinching4模型

吊顶龙骨节点和拼接点的构造复杂,在地震作用中表现出高度的非线性行为。有限元软件OpenSEES中的Pinching4模型^[16]可考虑往复荷载加载下节点的强度退化、刚度退化和捏拢效应,能准确模拟出各类复杂节点的滞回特性,具有良好的普适性。基于龙骨节点和拼接点的受力和变形特点,选

表3 吊顶龙骨节点和拼接点试件的试验结果

Tab.3 Test results of ceiling grid joints and splices

试件类型	加载类型	加载方向	F_p^+	D_p^+	F_p^-	D_p^-
主龙骨拼接点	轴向		1.220	3.8	0.957	3.1
			1.151	3.0	0.475	0.5
主次龙骨节点	受剪	主轴	1.012	11.2	1.222	11.9
		次轴	0.359	15.0	0.367	16.1
	受弯	主轴	9.605	0.237	6.035	0.254
		次轴	23.035	0.216	22.988	0.181
固定型边节点	轴向		0.094	13.7	1.990	12.4
自由型边节点	轴向		0.071	27.7	2.336	27.9

用Pinching4模型建立其荷载-位移(f - d)恢复力模型。如图4所示,该模型由单调加载下的多线型骨架曲线(16个参数定义,分别为 (ePd_1, ePf_1) 、 (ePd_2, ePf_2) 、 (ePd_3, ePf_3) 、 (ePd_4, ePf_4) 、 (eNd_1, eNf_1) 、 (eNd_2, eNf_2) 、 (eNd_3, eNf_3) 、 (eNd_4, eNf_4)),往复加载下的三线型卸载-重加载路径(6个参数定义,分别为

$rDispP$ 、 $rForceP$ 、 $uForceP$ 、 $rDispN$ 、 $rForceN$ 、 $uForceN$)和3个破坏准则(15个参数定义,考虑了卸载刚度退化(gK_1 、 gK_2 、 gK_3 、 gK_4 、 gK_{Lim}),重加载刚度退化(gD_1 、 gD_2 、 gD_3 、 gD_4 、 gD_{Lim})和强度退化(gF_1 、 gF_2 、 gF_3 、 gF_4 、 gF_{Lim}))组成,另外可考虑能量退化(gE)和损伤类型($dmgType$)。

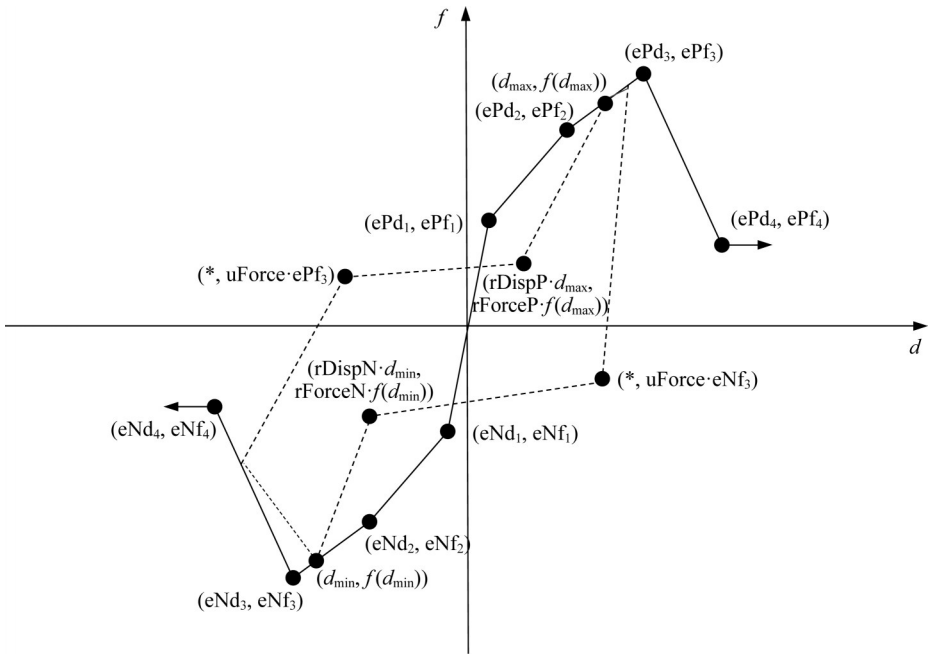


图4 Pinching4模型

Fig.4 Pinching4 model

2.2 Pinching4模型的适用性探讨

本节依据龙骨节点和拼接点低周往复加载的试验结果对Pinching4模型参数进行标定,采用标定好的Pinching4模型建立了典型试件的荷载-位移恢复力模型并与试验结果进行对比,探讨了Pinching4模型对龙骨节点和拼接点的适用性。

2.2.1 滞回曲线对比

基于本文作者经验和Soroushian等^[8-10]已发表的类似论文中采用的标定方法,当确定龙骨节点和拼接点Pinching4模型参数时,可从以下三方面入手

寻找其规律性:① Pinching4模型的骨架曲线参数依据试件骨架曲线的特征点确定。② Pinching4模型的卸载-重加载参数依据试件滞回曲线的形状特征确定。③ Pinching4模型的破坏准则参数依据试件滞回曲线的卸载刚度退化、重加载刚度退化、强度退化和能量退化确定。

图5为典型试件根据Pinching4模型得到的荷载-位移滞回曲线与试验曲线的对比,试件的恢复力模型反映出的滞回规律与试验曲线的滞回规律基本一致,两者的滞回曲线形状吻合良好。主龙骨拼接

点轴向受力时的滞回曲线比较饱满,有明显的滑移行为和一定的耗能能力,正负向承载力变形能力比较一致。主次龙骨节点轴向受力时的滞回曲线的捏拢效应显著,由于节点屈曲受压承载力远小于受拉承载力。主次龙骨节点受剪时的滞回曲线呈反 S 形,捏拢效应和滑移行为明显,正向承载力与变形能力与负向结果基本一致,与节点主轴受剪相比,次轴受剪时承载力较小,但变形能力更强,原因在于次轴受剪时节点插片产生了较大的面外弯曲从而降低了节点承载力但提高了节点变形能力。主次龙骨节点主轴受弯时的滞回规律同主次龙骨节点受剪时的滞回规律比较一致。主次龙骨节点次轴受弯时的滞回

曲线表现出两种模式(图 5f 的模式 1 和图 5g 的模式 2), 因为节点破坏的时刻不同导致最大峰值点出现的位置不同,如果节点破坏时加载端正处于负向状态,则表现为模式 1, 否则为模式 2, 但两者的承载力和变形能力比较一致。边节点轴向受力时的滞回曲线表现出很小的刚度退化和耗能能力,抗拉承载力远小于抗压承载力,原因是边节点中的抗震夹未用螺钉与边界固定,极易发生拉出破坏,造成抗拉承载力极低。自由型边节点的滞回曲线除了因间隙的设置出现正负向各 19 mm 左右的滑移段外,其余性能与固定型边节点基本一致。

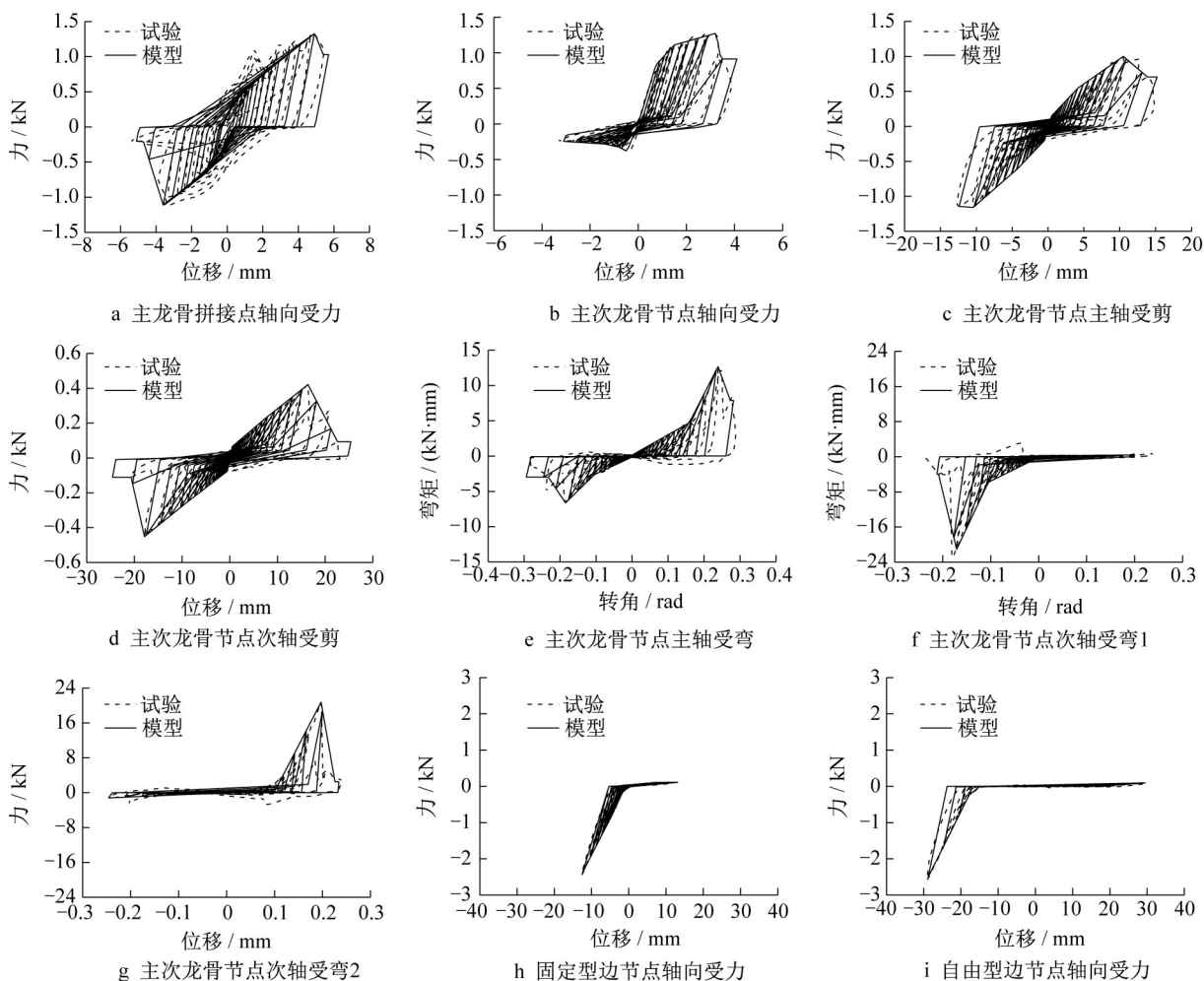


图 5 典型试件基于 Pinching4 模型得到的滞回曲线与试验结果对比

Fig.5 Comparison of hysteresis curves based on Pinching4 model and test results of representative specimens

2.2.2 累积耗能对比

表 4 为典型试件根据 Pinching4 模型得到的最大累积耗能与试验结果的对比情况,表中的试件同图 5 中的试件一致。由表 4 可知,恢复力模型结果与试验结果的最大差异为 19.5%,两者差异均在 20.0%

以内,总体吻合较好。主龙骨拼接点较主次龙骨节点轴向受力时耗能能力更强,主次龙骨节点受剪或受弯时主轴方向上的耗能比次轴方向上的耗能更多,固定型边节点与自由型边节点的最大累积耗能基本一致。

图 6 给出了典型试件根据恢复力模型得到的累积耗能与试验的累积耗能随加载圈数的对比情况, 两者的累积耗能都随着加载圈数增加而增加,且在 同一加载圈数下的结果接近,说明了 Pinching4 模型能较好模拟出龙骨节点和拼接点的累积耗能,具有较高的可靠度和精确度。

表 4 典型试件基于 Pinching4 模型得到的最大累积耗能与试验结果对比

Tab.4 Comparison of maximum accumulated dissipated energy based on Pinching4 model and test results of representative specimens

试件类型	试验类型	加载方向	最大累积耗能/(kN·mm)		差异/%
			试验	模型	
主龙骨拼接点	轴向		37.0	37.1	0.3
	轴向		8.4	8.0	4.8
主次龙骨节点	受剪	主轴	28.4	33.3	17.3
		次轴	14.9	17.8	19.5
	受弯	主轴	4.6	3.9	15.2
		次轴	2.7	3.2	18.5
		次轴	2.6	2.7	3.8
固定型边节点	轴向		10.0	11.3	13.0
自由型边节点	轴向		11.9	11.2	5.9

注:差异=|模拟值-试验值|/试验值。

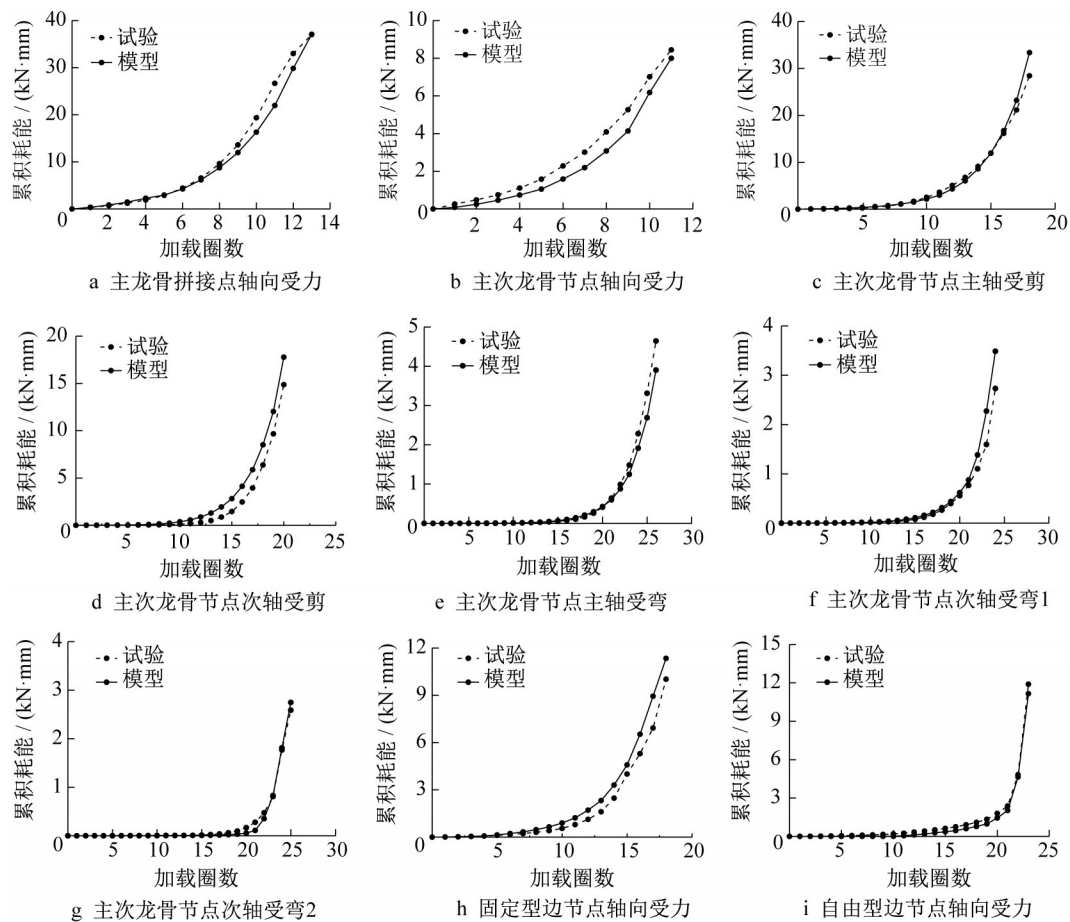


图 6 典型试件基于 Pinching4 模型得到的累积耗能与试验结果对比

Fig.6 Comparison of accumulated dissipated energy based on Pinching4 model and test results of representative specimens

2.3 通用荷载-位移恢复力模型的建立

2.2 节验证了基于 Pinching 模型建立的龙骨节 点和拼接点荷载-位移恢复力模型的可行性,但对于 同一类型龙骨节点或拼接点试件,试件在制作连接

和加载安装过程中会不可避免地产生初始缺陷,该初始缺陷会造成一定的试验误差,且由于本文的试件尺寸较小、承载力较弱,对制作和安装精度的敏感性较强,导致同组试件的试验结果存在一定的离散性,因此有必要建立龙骨节点和拼接点的通用荷载-位移恢复力模型。

2.3.1 通用恢复力模型参数取值

同组试件受样本空间较小等影响,试验结果具有一定的离散性,当同组试件的恢复力模型参数的分布较为离散时,均值受极端值的影响很大,而中位值不受极端值的影响,表现比较稳定,具有较好的代表性,因此本文选取同组试件恢复力模型参数对应的中位值作为其通用恢复力模型参数的代表值。

表 5 总结了各类龙骨节点和拼接点通用荷载-

位移恢复力模型的参数取值。需要说明的是,主次龙骨节点次轴受剪试件关于其次轴对称,理论上其荷载-位移恢复力模型关于原点对称,因此表 5 给出的主次龙骨节点次轴受剪试件的通用恢复力模型参数的建议值为进一步优化的结果。同理,主次龙骨节点次轴受弯试件关于其次轴对称,由于其破坏的随机性存在两种滞回模式,这两种滞回模式的理论恢复力模型的正负向参数应对应,因此表 5 给出的主次龙骨节点次轴受弯试件的通用恢复力模型参数的建议值亦为进一步优化的结果。另外,由于受试验条件和试件数量等因素的影响,龙骨节点和拼接点通用荷载-位移恢复力模型参数的建议值可能存在一定的偏差,后期可通过一定数量的试验对其进行进一步修正。

表 5 吊顶龙骨节点和拼接点通用荷载-位移恢复力模型的参数取值

Tab.5 Parameters of generic force-displacement hysteretic models of ceiling grid joints and splices

Pinching4 模型	参数	主龙骨 拼接点轴向 模型	主次龙骨 节点轴向 模型	主次龙骨 节点主轴 受剪模型	主次龙骨 节点次轴 受剪模型	主次龙骨 节点主轴 受弯模型	主次龙骨 节点次轴 受弯模型 1	主次龙骨 节点次轴 受弯模型 2	固定型边 节点轴向 模型	自由型边 节点轴向 模型
正向骨架曲线	ePf ₁ /N	450	472	150	75	0.15*	0.15*	0.15*	0.1	0.1
	ePf ₂ /N	756	889	651	230	4.44*	0.20*	3.20*	30	1
	ePf ₃ /N	1 206	1 216	1 001	350	7.97*	0.30*	19.62*	109	25
	ePf ₄ /N	507	378	458	100	7.90*	0.60*	4.50*	111	50
	ePd ₁ /mm	0.3	0.6	0.5	0.5	0.000 4*	0.000 2*	0.000 2*	0.01	0.01
	ePd ₂ /mm	1.7	1.7	5.5	8.5	0.139*	0.033*	0.13*	1.9	18.0
	ePd ₃ /mm	3.6	3.1	10.5	17.0	0.24*	0.1*	0.2*	8.2	20.7
	ePd ₄ /mm	4.7	3.6	13.8	21.5	0.268*	0.21*	0.23*	12.6	23.8
负向骨架曲线	eNf ₁ /N	-450	-472	-150	-75	-0.15*	-0.15*	-0.15*	-4	-4
	eNf ₂ /N	-650	-361	-620	-230	-2.43*	-3.20*	-0.20*	-173	-9
	eNf ₃ /N	-979	-290	-1248	-350	-2.93*	-19.62*	-0.30*	-566	-587
	eNf ₄ /N	-196	-261	-556	-100	-5.432*	-4.50*	-0.60*	-2 385	-2 336
	eNd ₁ /mm	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5	-0.0007*	-0.0002*	-0.0002*	-0.01	-0.01
	eNd ₂ /mm	-1.4	-0.8	-5.0	-8.5	-0.105*	-0.133*	-0.033*	-1.7	-15.0
	eNd ₃ /mm	-3.3	-3.3	-12.7	-17.0	-0.204*	-0.2*	-0.1*	-4.4	-19.3
	eNd ₄ /mm	-4.7	-5.4	-16.0	-21.5	-0.287*	-0.23*	-0.21*	-12.7	-27.9
卸载-重加载路径	rDispP	-0.55	0.45	0.6	0.5	0.6	0.8	0.8	0.5	0.5
	rForceP	0.01	0.1	0.2	0.2	0.0001	0.13	0.13	0.5	0.01
	uForceP	-0.01	-0.3	-0.01	-0.1	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.13
	rDispN	-0.55	-0.8	0.6	0.5	0.6	0.8	0.8	0.45	0.95
	rForceN	0.01	0.2	0.2	0.2	0.0001	0.13	0.13	0.03	0.01
	uForceN	-0.01	-0.01	-0.01	-0.1	-0.01	-0.01	-0.01	-0.1	-0.1
卸载刚度退化	gK _i	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	gK _{Lim}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
重加载刚度退化	gD _i	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	gD _{Lim}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
强度退化	gF _i	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	gF _{Lim}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
能量退化	gE	1	1	1	1	1	1	1	1	1
损伤类型	dmgType	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle

注:表中*i*=1~4;主次龙骨节点受弯模型中带“*”参数对应的荷载和位移单位分别为kN·mm和rad;主次龙骨节点次轴受弯的恢复力模型有1、2两种类型,分别对应图7f和图7g。

2.3.2 骨架曲线建立

基于 2.3.1 节提出的试件通用恢复力模型参数

的标定方法,图 7 给出了试件通用恢复力模型的骨架曲线结果。需要注意,主次龙骨节点次轴受剪试

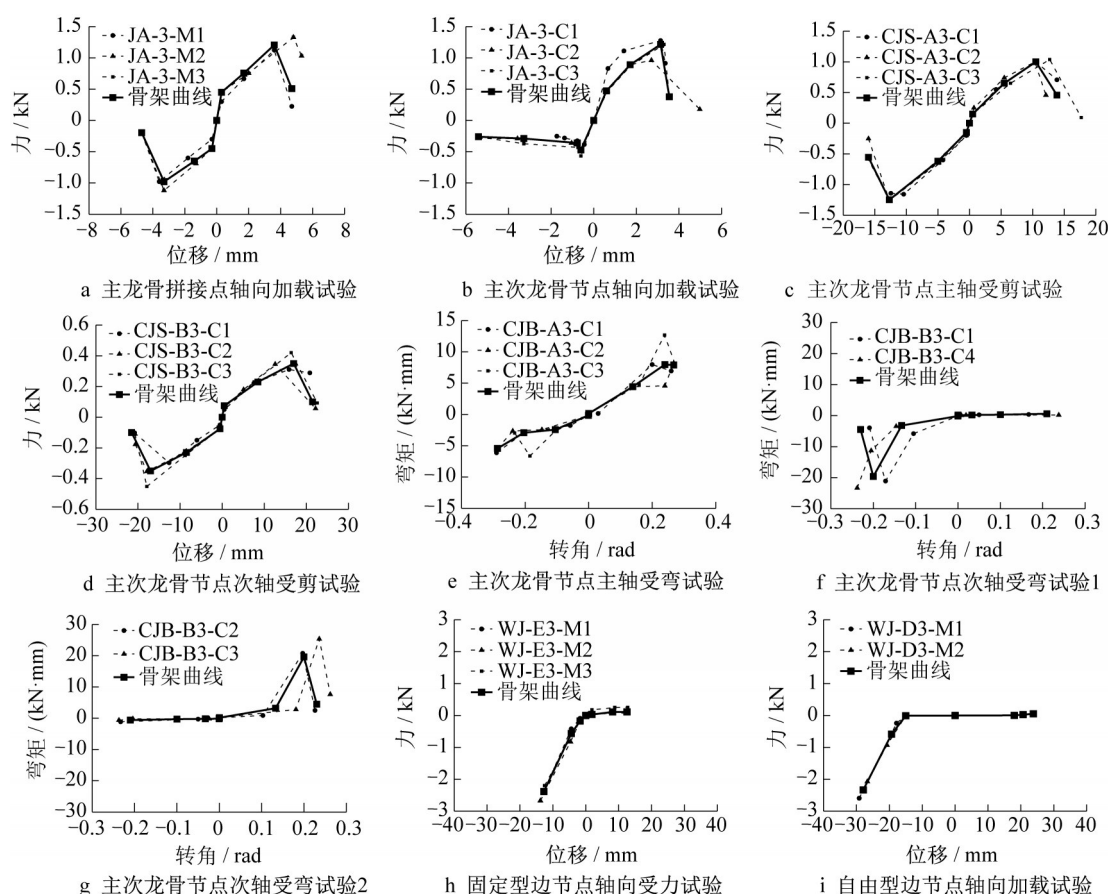


图7 吊顶龙骨节点和拼接点通用恢复力模型的骨架曲线

Fig.7 Skeleton curves of generic hysteretic models of ceiling grid joints and splices

件的骨架曲线关于原点对称,主次龙骨节点次轴受弯试件在两种滞回模式下的骨架曲线相互对称,其他试件的骨架曲线关于原点对称。

2.3.3 通用恢复力模型验证

图8给出了各类龙骨节点和拼接点采用通用恢复力模型得到的滞回曲线与试验滞回曲线的对比结果,由图8可知两者吻合程度较好,说明可以采用通用恢复力模型模拟龙骨节点和拼接点的滞回特性。需要指出,本文建立的龙骨节点和拼接点的通用恢复力模型只适合与本文采取相同产品的应用,对于其他产品的适用性需进一步研究。

3 结论

本文对吊顶龙骨节点和拼接点进行了低周往复加载试验,基于有限元软件OpenSEES的Pinching4模型建立了节点和拼接点的通用荷载-位移恢复力模型,得到的主要结论如下:

(1) 主龙骨拼接点轴向受力的破坏模式为拼接点拉出破坏,主次龙骨节点轴向受力的破坏模式为

节点受压屈曲,边节点轴向受力的破坏模式为节点拉出破坏。主次龙骨节点主轴受剪的破坏模式为节点剪切破坏,次轴受剪的破坏模式为节点面外弯曲并脱出破坏。主次龙骨节点受弯的破坏模式为节点脱出破坏。

(2) 与主龙骨拼接点对比,主次龙骨节点轴向受力时更容易破坏;与主次龙骨节点主轴受剪对比,主次龙骨节点次轴受剪时节点强度更低,变形能力更强;与主次龙骨节点主轴受弯对比,主次龙骨节点次轴受弯时节点强度更大,变形能力稍低;不同形式边节点的轴向承载能力基本一致,边节点的受拉强度远小于受压强度。鉴于边节点抗震能力较弱的问题,本文建议带抗震夹的边节点宜采用螺钉将抗震夹与吊顶边界固定以提高边节点的抗震能力。

(3) 本文采用Pinching4模型建立的龙骨节点和拼接点的恢复力模型与试验得到的滞回曲线比较一致,且两者的累积耗能随循环加载次数增加的变化规律也比较一致,说明Pinching4模型能较准确地反映龙骨节点和拼接点的滞回特性。在验证了选用的Pinching4模型的可行性后,进一步建立了龙骨节点

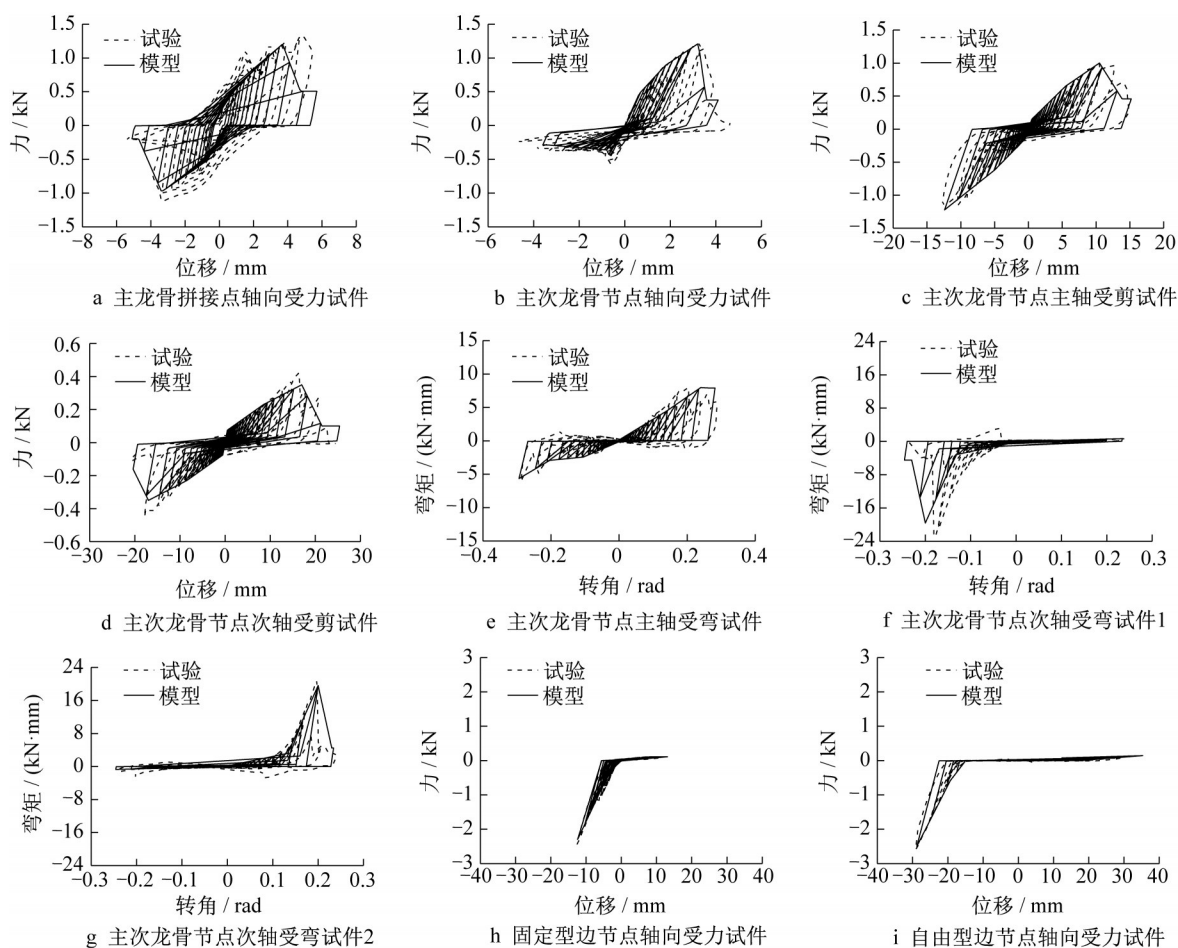


图8 吊顶龙骨节点和拼接点基于通用恢复力模型得到的滞回曲线与试验结果对比

Fig.8 Comparison of hysteresis curves based on generic hysteresis models and test results of ceiling grid joints and splices

和拼接点的通用荷载-位移恢复力模型,并给出确定通用模型所需参数的建议值,以期为该通用模型在同类吊顶非线性数值分析中的应用提供一定参考。

作者贡献声明:

王 勇:试验工作的开展和论文的撰写。

蒋欢军:指导论文写作,提出建设性意见和建议。

黄有露:整理数据。

参考文献:

- [1] MIRANDA E, MOSQUEDA G, RETAMALES R, *et al.* Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(S1): S453.
- [2] DHAKAL R P, MACRAE G A, HOGG K. Performance of ceilings in the February 2011 Christchurch earthquake [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2011, 44(4): 377.
- [3] 李威齐, 曲哲, 解全才, 等. 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.

LI Qiqi, QU Zhe, XIE Quancai, *et al.* Seismic damage characteristics and fragility of suspended ceilings in Chinese public buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 207.

- [4] PAGANOTTI G, DHAKAL R, MACRAE G. Development of typical NZ ceiling system seismic fragilities [C/CD]// *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Auckland: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011.
- [5] DHAKAL R P, MACRAE G A, POURALI A, *et al.* Seismic fragility of suspended ceiling systems used in NZ based on component tests [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2016, 49(1): 45.
- [6] TAKHIROV S M, GILANI A S J, STRAIGHT Y. Seismic evaluation of lay-in panel suspended ceilings using static and dynamic and an assessment of the U. S. building code requirements [C]// *Second ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2015: 483-496.

- [7] SOROUSHIAN S, MARAGAKIS E M, JENKINS C. Capacity evaluation of suspended ceiling components, part 1: experimental studies [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19(5/6): 784.
- [8] SOROUSHIAN S, MARAGAKIS E M, JENKINS C. Capacity evaluation of suspended ceiling components, part 2: analytical studies [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19(5/6): 805.
- [9] SOROUSHIAN S, MARAGAKIS M, JENKINS C. Capacity evaluation of suspended ceiling-perimeter attachments [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2): 04015124.
- [10] SOROUSHIAN S, MARAGAKIS M, JENKINS C. Axial capacity evaluation for typical suspended ceiling joints [J]. *Earthquake Spectra*, 2016, 32(1): 547.
- [11] 宋喜庆. 矿棉板吊顶关键节点抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- SONG Xiqing. Seismic performance of key joint in mineral wool board suspended ceiling [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [12] FIORIN L, BRANDOLESE S, SCOTTA R. Experimental and numerical assessment of suspended ceiling joints [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2021, 19: 919.
- [13] YAO G C. Seismic performance of direct hung suspended ceiling systems [J]. *Journal of Architectural Engineering*, 2000, 6(1): 6.
- [14] ECHEVARRIA A, ZAGHI A E, SOROUSHIAN S, *et al.* Seismic fragility of suspended ceiling systems [C/CD]// *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon: Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica, 2012.
- [15] 李戚齐. 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 Qiqi. Study on the seismic damage characteristics of suspended ceilings of exposed runners and mineral wool boards [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.
- [16] LOWES L N, MITRA N. A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2004.
- [17] 蒋欢军, 王勇, 吴宸. 吊顶龙骨节点和拼接点轴向受力性能试验研究[J/OL]. [2021-07-05]. *工程力学*. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0264>.
- JIANG Huanjun, WANG Yong, WU Chen. Experimental study on the axial behavior of grid joints and splices of suspended ceilings [J/OL]. [2021-07-05]. *Engineering Mechanics*. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0264>.
- [18] 王勇, 蒋欢军, 吴宸. 吊顶主次龙骨节点受剪和受弯性能试验研究[J/OL]. [2021-07-05]. *工程力学*. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0266>.
- WANG Yong, JIANG Huanjun, WU Chen. Experimental study on shear and bending behavior of main-cross tee joints of suspended ceiling [J/OL]. [2021-07-05]. *Engineering Mechanics*. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.04.0266>.
- [19] RETAMALES R, MOSQUEDA G, FILIATRAULT A, *et al.* New experimental capabilities and loading protocols for seismic qualification and fragility assessment of nonstructural components: MCEER technical report 08-0026 [R]. Buffalo: Multidisciplinary Center for Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 2008.