

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.115



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 江南地区宋元时期传统木构铺作 对结构整体抗连续倒塌性能的影响

华一唯, 淳庆

(东南大学 建筑学院, 南京 210096)

**摘要:**为了研究江南地区宋元时期传统木构建筑的抗连续倒塌性能,选择典型实例,通过三维扫描测绘建立实例及对应无铺作大殿的有限元模型,并进行抽柱后结构的推覆分析,研究铺作在空间木构架连续倒塌时对结构传力路径及极限承载力的影响。结果表明:对于江南地区宋元传统木构建筑,当某根柱突然失效时,周围的梁、枋、檩、阑额等横向构件可以提供多个方向的拉结,防止结构进一步倒塌;铺作的存在对结构整体抗连续倒塌性能有明显提升,铺作之间的横向构件在倒塌时联合周围构件形成“组合桁架”共同受力,提供了有效传力路径和整体性拉结,使得局部柱失效后结构的极限承载力相对于无铺作结构提升约30%~50%;檐柱和角柱的失效更容易引起木构的连续性倒塌。

**关键词:**江南地区;传统木构;连续倒塌;受力机制;铺作

**中图分类号:**TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0060-12

## Effect of Pu-zuo on progressive collapse of Chinese ancient timber buildings of Jiangnan area in the Song & Yuan Dynasties

HUA Yiwei, CHUN Qing

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** To study performance of the Chinese ancient timber buildings of Jiangnan area in the Song & Yuan Dynasties in the progressive collapse resistance, the finite element models of a typical Chinese ancient timber building and a corresponding building without Pu-zuo were established by the three-dimensional scanning survey for further pushdown analysis, through which their main collapse mechanism and the effect of the Pu-zuo against the progressive collapse were studied. The results show that: For Chinese traditional timber buildings of the Jiangnan area in the Song and Yuan Dynasties, when a column suddenly fails, the lateral components around it can provide multi-directional linkages to delay or prevent the progressive

**收稿日期:**2021-01-11

**基金项目:**国家自然科学基金(51778122)

**作者简介:**华一唯(1995-),男,主要从事历史建筑保护研究, E-mail: bill\_huayw@163.com.

淳庆(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: cqnj1979@163.com.

**Received:**2021-01-11

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51778122)

**Author brief:** HUA Yiwei (1995-), main research interest: conservation of historical construction, E-mail: bill\_huayw@163.com.

CHUN Qing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cqnj1979@163.com.

collapse. The existence of Pu-zuo improves the progressive collapse resistance of the whole structure. A "truss-like" structure is formed among the Pu-zuo to transfer the extra load when the progressive collapse happens, which effectively enhance the linkage and strengthen the alternative load path in the structure. Thus, compared with the timber building without Pu-zuo, the bearing capacity of the typical Chinese ancient timber building with Pu-zuo significantly rises, with increasing by 30%~50%; Compared with the failure of the middle columns, the failure of the side columns tends to result in the progressive collapse of the building.

**Keywords:** Jiangnan area; traditional timber building; progressive collapse, mechanical mechanism; Pu-zuo

江南地区的传统木构建筑不仅在研究本地区的木构谱系中有着重要价值,对研究中国传统木构的发展脉络也具有重要意义。然而,由于水系发达,气候湿润,仅有少量的古建筑木结构能完整保存至今。仅存的遗构往往年久失修,其梁、柱等关键构件存在腐朽问题。当腐朽累积到一定程度后,整体结构就极有可能因为这些关键构件的局部失效而发生连续性坍塌。在近几年发生的建筑结构倒塌事故中,传统木结构的倒塌也不少。钢筋混凝土结构和钢结构的连续倒塌问题已成为近些年来研究热点,但针对传统木构建筑的相关研究才刚刚起步。中国江南地区宋元时期的传统木构建筑文物价值巨大,但同样面临着连续倒塌的风险,因此,亟须对其抗连续倒塌机制进行研究。

铺作在中国传统木构建筑中扮演着重要角色。宋元时期的斗拱用材较大(图 1(a)),普遍用昂,后尾挑斡至下平枋,柱头铺作后尾与梁枋相连。因此,与明清时期的斗拱相比(图 1(b)),宋元时期的斗拱不仅尺度较大,其后尾更是与梁枋、平枋、柱等有着充分的联系,这些特点对结构的抗连续倒塌性能十分有利。



(a) 保国寺大殿铺作 (b) 无锡文庙铺作

图 1 宋元时期和明清时期的铺作实例

Fig. 1 Sample of the Pu-zuo in Song & Yuan dynasties and Ming & Qing dynasties

目前,针对中国传统木构建筑的抗连续倒塌研究很少,Zhou 等<sup>[1]</sup>通过有限元方法对典型木构的平面框架进行了倒塌仿真;张锡成等<sup>[2]</sup>采用增量动力分析(IDA)方法对不同的倒塌机制进行了研究;杨娜等<sup>[3]</sup>考虑了残损,建立了传统木构的残损现状模型,并研究了其在地震作用下发生倒塌的概率。针

对现代木结构的抗连续倒塌性能,学者们有过部分研究,主要集中在木材的损伤模型<sup>[4]</sup>、结构的鲁棒性<sup>[5-7]</sup>以及木框架结构<sup>[8]</sup>和桁架<sup>[9-10]</sup>的连续倒塌问题中。而针对铺作的研究主要集中在其抗震性能上,主要研究了不同形制<sup>[11]</sup>、不同残损<sup>[12]</sup>以及不同布置方式<sup>[13-15]</sup>对其抗震性能的影响,并进行了大量试验研究<sup>[16-21]</sup>。综上所述,目前尚无针对江南传统木构建筑中铺作对整体结构抗连续倒塌性能影响研究的相关报道。

笔者选取江南地区宋元时期传统木构建筑的典型案例——金华天宁寺大殿,通过三维扫描精细测绘建立其有限元模型,抽除其主要的铺作,建立对应的无铺作大殿模型进行对比研究;基于抽柱法,对两者进行非线性静力推覆分析,研究两者倒塌时的主要受力机制及其塑性铰的发展情况;对比两者的倒塌结果,对铺作在木构建筑连续倒塌中起到的作用进行分析研究。

## 1 典型案例——金华天宁寺大殿

选取的案例金华天宁寺大殿,现为全国重点文物保护单位。其大雄宝殿具有区别于北方的建筑特色,建筑形制和结构做法具有明显的地域性特点,是江南地区典型的宋元厅堂式木构建筑(八架椽屋前槽内槽三椽枋对后乳枋用四柱),也是浙江省仅存的 3 座元代木构建筑之一。天宁寺大殿面阔三间,进深三间八架椽,单檐歇山顶,厅堂造。平面基本为正方形,面阔方向当心间为 6.16 m,与两个次间的比例接近 2:1,前架进深略大于后架。因此,其无论平面布置、整体尺度还是间架样式均是江南地区宋元时期木构的典型样式。

为了建立准确的天宁寺大殿有限元模型,对该建筑进行了现场三维激光扫描(图 2),基于精细扫描云图获得该建筑结构和构件的准确几何尺寸,其进深和面阔方向的剖面图如图 3 所示。天宁寺大殿的主要榫卯节点样式分别为半榫、透榫和直榫。其中:梁、顺枋串与柱之间的连接均为透榫;柱与阑额、

内额之间的连接均为半榫;蜀柱和梁枋之间的连接均为直榫。天宁寺大殿的铺作样式为六铺作单抄双下昂,出三跳。外檐第二跳计心用重栱,第三跳计心用单栱,柱头铺作里转出华栱一跳偷心承梁枋,补间铺作里转出华栱一跳偷心上昂,扶壁栱均叠用三层单栱,后尾均挑斡至下平栱。榫卯节点样式的具体位置及铺作构造见图 3。

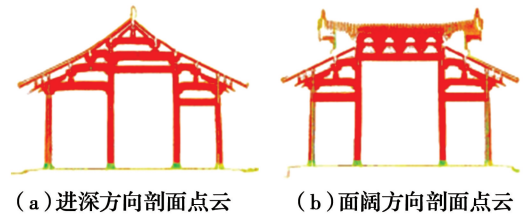


图 2 天宁寺大殿三维扫描点云

Fig. 2 3D cloud point of the main hall of Tian-ning temple

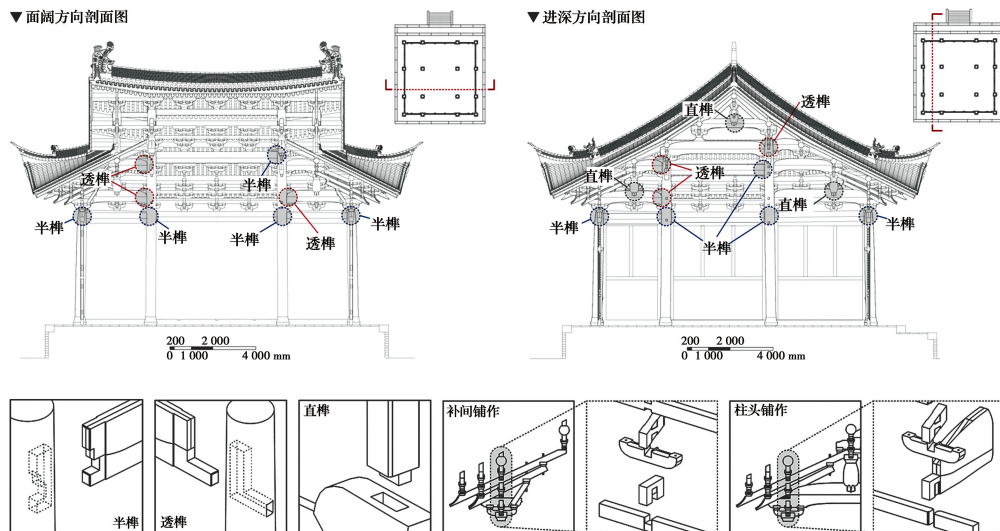
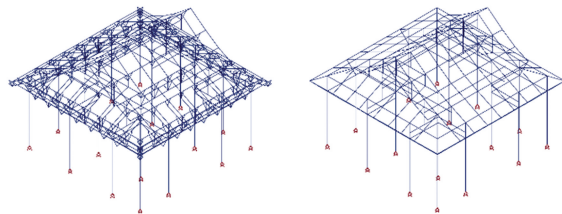


图 3 天宁寺大殿主要榫卯节点类型及其铺作构造

Fig. 3 Types of the joints and Pu-zuos in the main hall of the Tian-ning Temple

## 2 有限元模型的建立

基于金华天宁寺大殿结构和节点连接的调研和研究,利用有限元软件 SAP2000,建立天宁寺大殿的结构模型,同时,建立相应的无铺作大殿的结构模型,并采用 Pushdown 方法对两者抽柱后的整体结构进行空间推覆分析。天宁寺大殿结构模型和相应的无铺作大殿结构模型如图 4 所示。



(a) 天宁寺大殿 (b) 无铺作大殿

图 4 用于 Pushdown 分析的两个有限元模型

Fig. 4 Two finite element models for Pushdown analysis

有限元分析时所用木材的弹性模量、泊松比及破坏应力等参数均通过材性试验获得,列于表 1。天宁寺大殿结构模型依据现场三维扫描所得的准确几何尺寸而建立,斗栱按梁杆式简化方法进行建模

(图 4(a)): 枋、昂用梁单元模拟,栱则按斗的连线简化为杆单元。其中,斜向杆件(栱)与其余构件铰接;素枋、柱头枋、檐枋、撩檐枋及平栱在柱头处也按铰接考虑,其余位置刚接。柱底边界条件为铰接。梁与柱以及阑额与柱之间按不同榫头种类考虑半刚性连接,其中,梁柱之间节点为透榫,参考文献[22]的试验结果,面内转动刚度取  $500 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,面外转动刚度取  $217 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,扭转刚度取  $208 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ;阑额与柱之间节点为半榫,参考文献[23]的试验结果,面内转动刚度取  $313 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,面外转动刚度取  $209 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,扭转刚度取  $239 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ;其余截面较小的枋(如顺脊串)与柱之间的连接保守按铰接考虑。蜀柱与梁之间的直榫也保守按铰接考虑。为了研究铺作在结构倒塌中起到的作用,还建立了对应的无铺作大殿有限元模型进行对比分析。相应的无铺作大殿结构模型的梁柱布置方式均按天宁寺大殿结构模型建立,梁、柱、檩条等构件尺寸均与天宁寺大殿模型一致。两者区别在于去除了天宁寺大殿结构模型中的所有斗栱,檐口处三椽栿(乳栿)向外挑出承接撩檐枋,柱头伸至檐栱并与之铰接,柱与梁枋的连接按榫卯半刚性考虑,其余构件



之间的连接及边界条件均与天宁寺大殿相同(图 4(b))。

Pushdown 分析需要在杆件内力较大的截面处插入塑性铰,SAP2000 采用内力-位移曲线描述塑

性铰的行为,同时还可引入 *IO*(立即使用)、*LS*(生命安全)、*CP*(防止倒塌)3 个关键点以更细致地显示塑性铰的能力水平。使用的 3 种内力-位移曲线如图 5 所示。

表 1 木材力学性能参数表

Table 1 Mechanical parameters of the wood

弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比			破坏应力/MPa	
顺纹	弦向	径向	顺纹	弦向	径向	顺纹	弦向	径向	受压	受拉
7 784.86	778.49	778.49	3 110.12	311.01	311.01	0.3	0.3	0.3	33.85	64.22

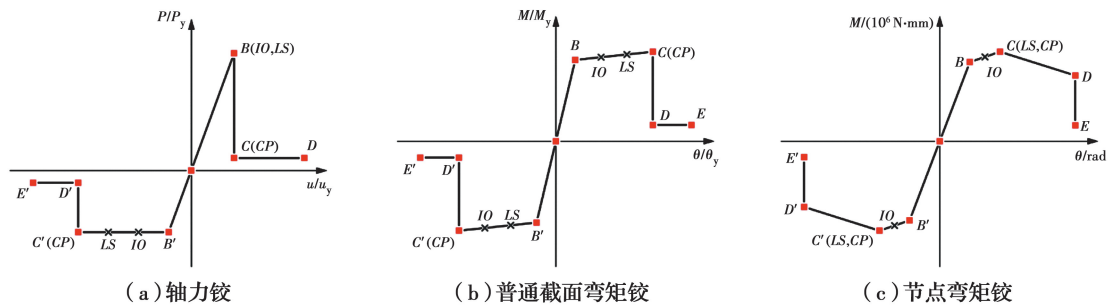


图 5 塑性铰的内力-位移曲线

Fig. 5 Internal force-displacement curves of the plastic hinges

采用的轴力铰考虑木材拉压极限承载力和延性不同的特点(图 5(a)),受拉时 *IO* 点和 *LS* 点与 *B* 点重合,*CP* 点与 *C* 点重合,受压时 *IO*、*LS* 分别取 *B'*、*C'* 段的三等分点,*CP* 点与 *C'* 点重合,关键点归一化后的内力位移值见表 2;弯矩铰的曲线如图 5(b)所示,关键点归一化后的内力位移值按表 2 取值,其中 *B* 点的弯矩为截面受压区表面纤维屈服时的弯矩,*C* 点的弯矩为受拉区表面纤维达到极限应力时的弯矩,均依据截面内力分析推算得到。*IO*、*LS* 点为 *BC* 段的三等分点,*CP* 点与 *C* 点重合;除了普通截面塑性铰,分析涉及透榫和半榫两种连接节点,其弯矩铰曲线依据参考文献[22-23]中对透榫和半榫的

节点试验结果,直接将关键点的值输入 SAP2000 (见表 2),其骨架曲线如图 5(c)。其中 *IO* 点为 *BC* 段中点,*LS* 点和 *CP* 点与 *C* 点重合。经过初步试算,两个结构模型中插入塑性铰的主要位置如下:梁枋的端部和中部;柱的端部和跨中;阑额、梁枋、串与柱的连接处;枋、榑的连接处;枋的两端及其与斜向杆件交点处;斜向杆件的中点。

分析采用结构抗连续倒塌分析中常用的抽柱法进行。依次抽除结构中的柱子以模拟某根柱子突然失效后结构的抗倒塌性能。考虑对称性,依次抽除一侧的 8 根柱子(A~E),并加上对应的屋面竖向推覆荷载进行 Pushdown 推覆分析,得到对应抽柱后结构

表 2 塑性铰曲线控制点对应值

Table 2 Values at the key points on the curves of the plastic hinges

控制点	轴力铰		普通截面弯矩铰		半榫节点弯矩铰		透榫节点弯矩铰	
	$P/P_y$	$u/u_y$	$M/M_y$	$\theta/\theta_y$	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$\theta/\text{rad}$	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$\theta/\text{rad}$
<i>E'</i>	-0.200	-8.000	-0.200	-2.000	-0.946	-0.200	-1.950	-0.140
<i>D'</i>	-0.200	-6.000	-0.200	-1.399	-4.120	-0.200	-9.263	-0.140
<i>C'</i>	-1.000	-6.000	-1.079	-1.399	-5.189	-0.150	-11.213	-0.080
<i>B'</i>	-1.000	-1.000	-0.667	-0.667	-4.730	-0.060	-9.750	-0.060
<i>A</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<i>B</i>	1.897	1.897	0.667	0.667	4.730	0.060	9.750	0.060
<i>C</i>	0.200	1.897	1.079	1.399	5.189	0.150	11.213	0.080
<i>D</i>	0.200	6.000	0.200	1.399	4.120	0.200	9.263	0.140



的荷载-位移曲线,并与未抽柱结构屋面荷载的 Pushdown 推覆分析结果进行对比。竖向推覆荷载的施加方法采用 Khandelwal 等<sup>[24]</sup>的建议:在初始失稳区域施加不断增加的竖向荷载  $q$ ,而在其他区域施加 1 倍设计竖向荷载  $g$ ,  $g$  的值参考文献<sup>[25]</sup>取恒荷载(DL)加 1/4 活荷载(LL),分析采用非线性静力法。初始失稳区域定义为抽除柱的周围相邻柱所形成的区域(抽除柱 F 后的初始失稳区域如图 6 所示)。

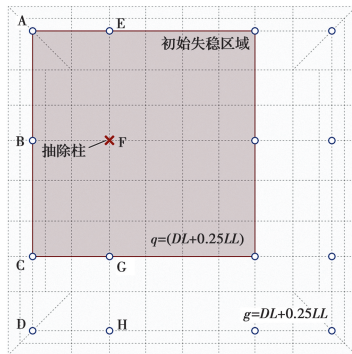


图 6 抽柱结构的加载区域示意图

Fig. 6 Diagram of the loading area in Pushdown analysis

对于每一个抽柱后的工况,加载分为两步:第 1 步,在所有屋面增加  $g = 2.575 \text{ kN/m}^2$  的恒载<sup>[26]</sup>;第 2 步,在初始失稳区域持续增加竖向荷载  $q$ ,直至结

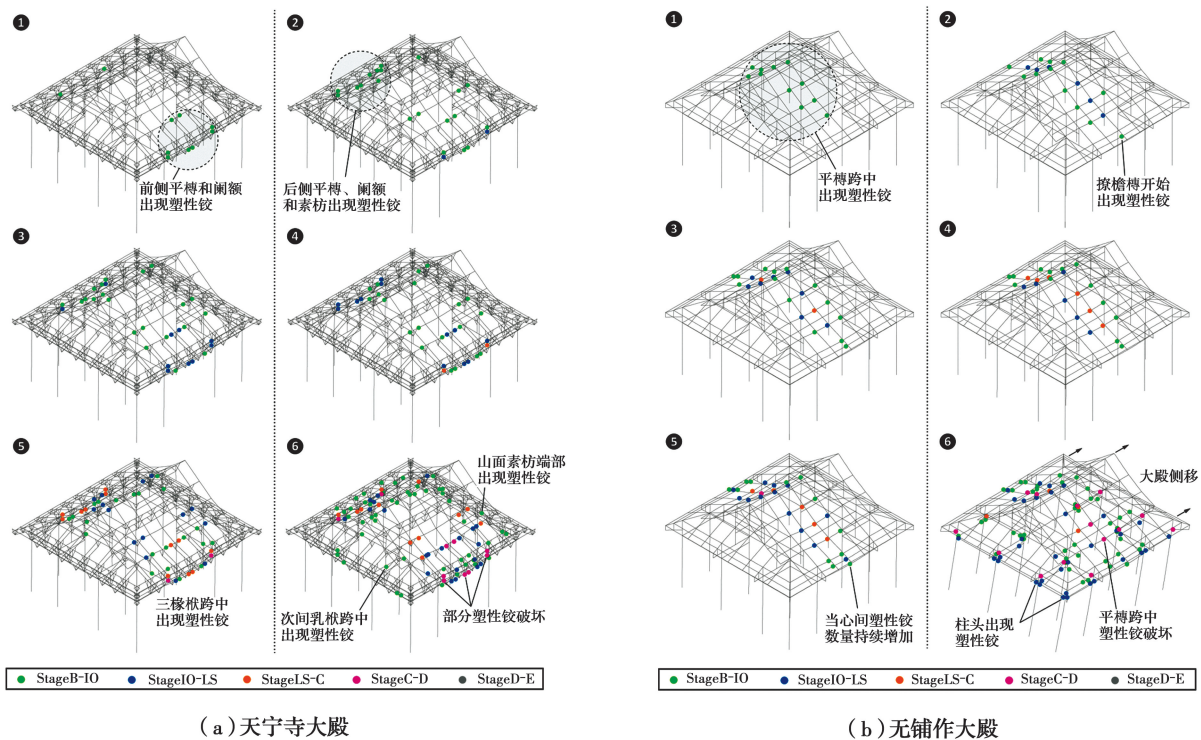
构倒塌。认为在推覆过程中某一步加载无法找到收敛解时结构倒塌,因为此时结构已出现足够多的塑性铰转变为机构。

### 3 大殿倒塌模式及其塑性铰发展

对两个大殿的倒塌模式进行研究,考虑完整结构、角柱失效、檐柱失效及金柱失效 4 种情况,分析抽柱后结构在加载过程中塑性铰的发展情况。

#### 3.1 完整结构

两个大殿完整结构推覆过程中的塑性铰发展情况见图 7。对于天宁寺大殿(图 7(a)),当心间前侧的平枋和阑额两端首先出现塑性铰。接着,大殿后侧当心间的平枋和阑额两端及前侧当心间斗拱素枋两端出现塑性铰,前侧阑额、下平枋跨中的塑性铰继续发展。然后,下平枋和中平枋两端、前乳栱后三椽栱跨中均出现了塑性铰。斗拱素枋两端及阑额、下平枋跨中的塑性铰进一步发展。最后,次间的梁枋和山面的素枋出现了塑性铰,当心间的阑额、素枋和平枋处部分塑性铰破坏,局部形成机构最终引起倒塌。对于无铺作大殿(图 7(b)),当心间的平枋和梁枋跨中首先出现塑性铰,前后侧均有分布。接着,撩檐枋跨中也开始出现塑性铰,而其余平枋跨中的塑性铰逐渐发展。然后,当心间横向构件出现的塑性铰数量进一步增加,此时大殿当心间跨中的塑性铰已经接近承载力极限。最后,次间梁枋和山面阑额



(a) 天宁寺大殿

(b) 无铺作大殿

图 7 完整结构 Pushdown 分析塑性铰发展情况

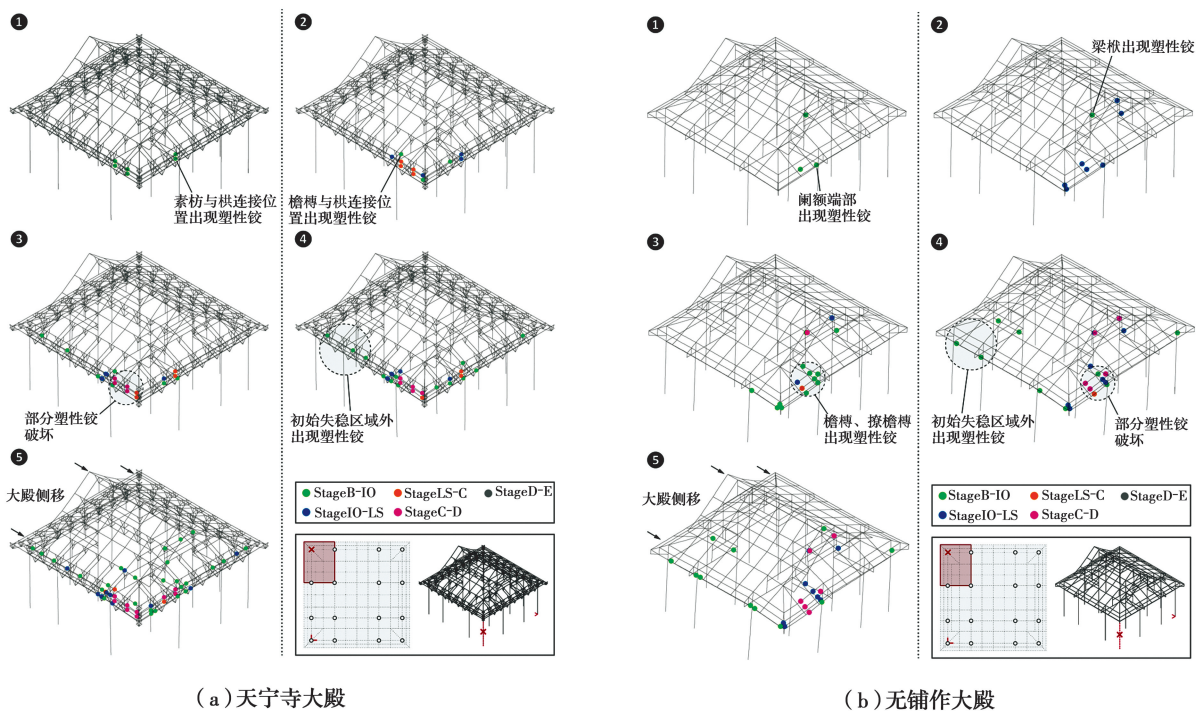
Fig. 7 Development of the plastic hinges in the two main halls during the pushdown analysis

两端出现了塑性铰,当心间的阑额和平枋处部分塑性铰破坏。结构整体由于过多的塑性铰而产生了侧移,最终导致整体性侧向倒塌。

### 3.2 角柱失效工况

两个大殿在抽除角柱时竖向推覆过程中塑性铰发展结果如图 8 所示。对于天宁寺大殿(图 8(a)),角柱附近的檐枋和斗拱素枋在与斜向杆件相交的位置首先出现塑性铰,且面阔向的塑性铰数量更多。接着,撩檐枋与斗拱相交处也出现塑性铰,素枋处的塑性铰则进一步发展,此时的塑性铰位置均主要集中在初始失稳区域内。到加载后期,整个大殿发生侧向偏移,部分远离加载区域的阑额、梁枋和素枋由于侧移

在端部也形成一些塑性铰。但这些塑性铰大部分并未达到承载能力极限。最终,初始失稳区域内的塑性铰部分失效,结构局部转变为机构而倒塌。对于无铺作大殿(图 8(b)),角柱附近的檐枋和阑额远端出现塑性铰。同时,初始失稳区域之外的一些梁枋两端因侧移也产生了一些塑性铰。接着,在初始失稳区域的撩檐枋、檐枋和阑额端部、跨中均出现了塑性铰,并快速发展,此时初始失稳区域外的塑性铰数量也因大殿的侧移而逐渐增加,但内力均不大。到加载后期,初始失稳区域之外的塑性铰数量进一步增多,初始失稳区域内的塑性铰则继续发展,直至失效,结构局部转变为机构而坍塌。



(a) 天宁寺大殿 (b) 无铺作大殿

图 8 抽除角柱后结构竖向 Pushdown 分析塑性铰发展情况

Fig. 8 Development of the plastic hinges in the case of the failure of corner column

### 3.3 檐柱失效工况

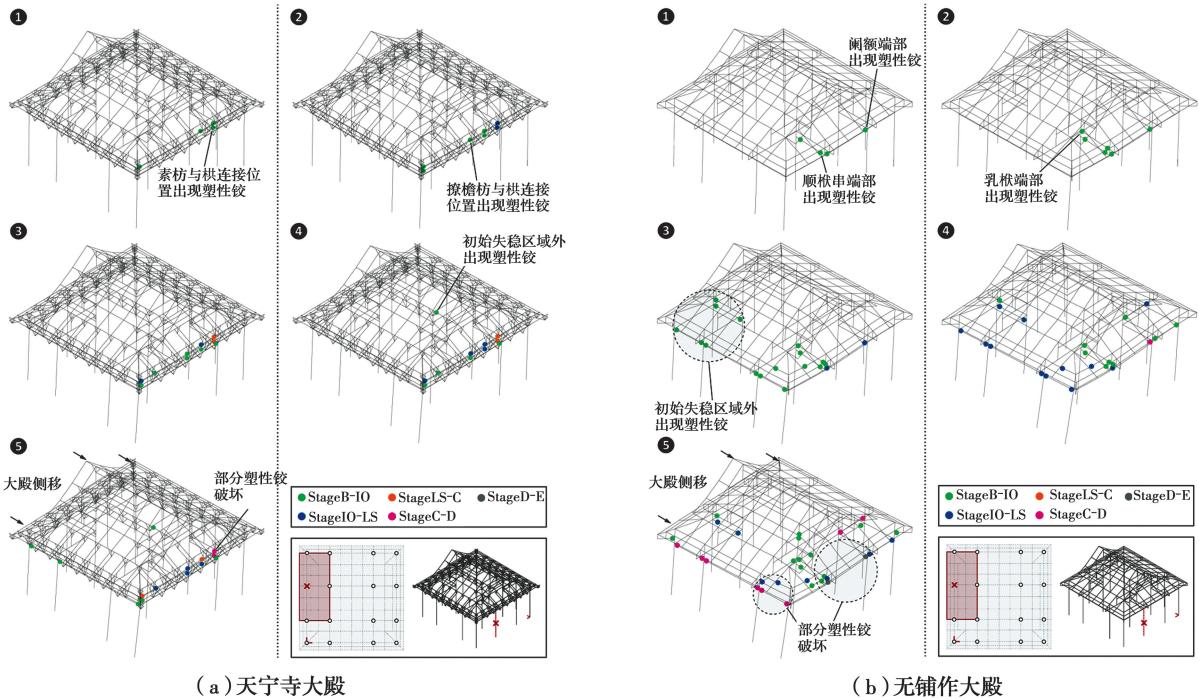
两个大殿在抽除檐柱时竖向推覆过程中的塑性铰发展结果如图 9 所示。对于天宁寺大殿(图 9(a)),檐柱附近素枋和拱头接触处首先出现塑性铰,数量逐渐增多。接着,部分撩檐枋与拱相交处也出现塑性铰,素枋处的塑性铰则进一步发展,此时的塑性铰均主要集中在初始失稳区域内。到加载后期,整个大殿发生侧向偏移,加载区域外的阑额和梁枋的端部也形成一些塑性铰,但数量较少且内力总体较小。最终,初始失稳区域素枋端部的塑性铰达到承载能力极限,结构失去有效的传力路径而发生倒塌。对于无铺作大殿(图 9(b)),与檐柱相连的阑额及顺枋串两端首先出现塑性铰。接着,顺枋串上

方的乳枋两端也产生了塑性铰。然后,初始失稳区域内的塑性铰进一步发展。同时,由于大殿的侧移,初始失稳区域之外的部分梁枋、阑额和顺枋串两端出现塑性铰,但其内力均不大。到加载后期,整个大殿发生进一步侧移,加载区域外的塑性铰数量开始增多,内力逐渐增大,最终,初始失稳区域内与柱相连的阑额两端的塑性铰达到承载能力极限,结构失去有效的传力路径而发生倒塌。

### 3.4 金柱失效工况

两个大殿在抽除金柱时竖向推覆过程中的塑性铰发展结果如图 10 所示。对于天宁寺大殿(图 10(a)),面阔方向金柱之间的斗拱素枋与拱头接触的位置及进深方向的梁枋和枋端部首先出现塑性铰。



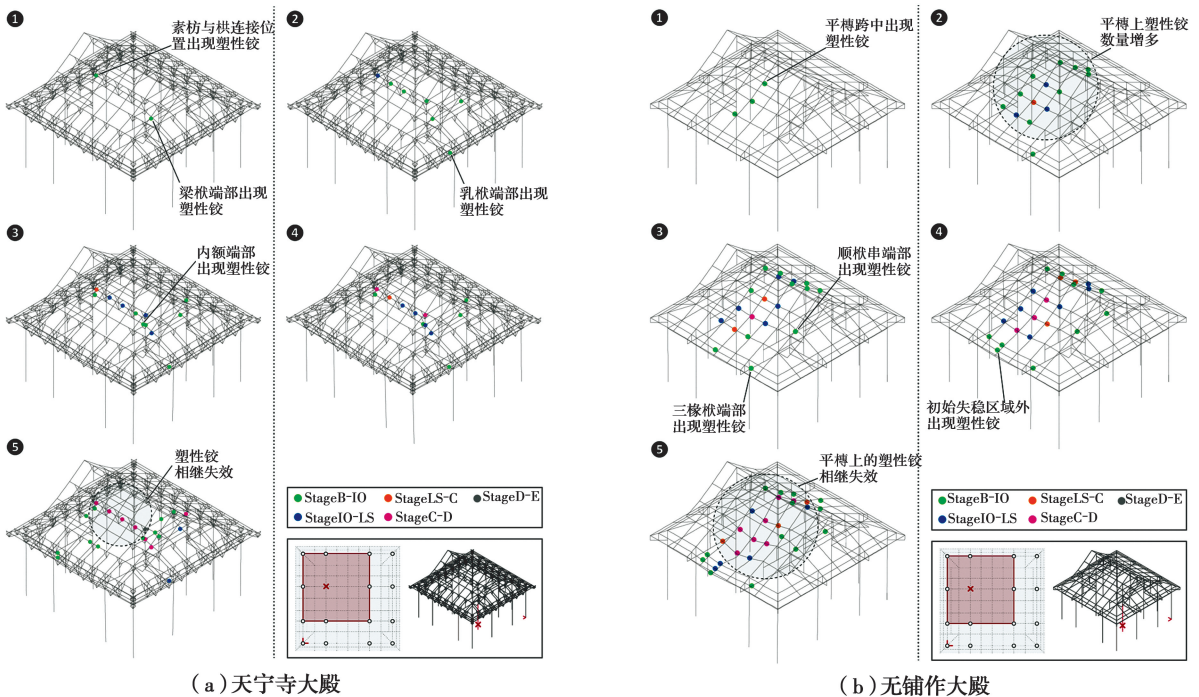


(a) 天宁寺大殿

(b) 无铺作大殿

图 9 抽除檐柱后结构竖向 Pushdown 分析塑性铰发展情况

Fig. 9 Development of the plastic hinges in the case of the failure of eave column



(a) 天宁寺大殿

(b) 无铺作大殿

图 10 抽除金柱后结构竖向 Pushdown 分析塑性铰发展情况

Fig. 10 Development of the plastic hinges in the case of the failure of middle column

接着, 面阔向柱头之间的内额端部也出现塑性铰。其上斗拱素枋的塑性铰则进一步发展。进深方向第 2 进间的梁枋和枋两端塑性铰数量增多, 且内力逐渐上升。此外, 与金柱相连的次间乳枋远端也出现了塑性铰, 但是内力稍小一些。最终, 斗拱间素枋、

第 2 进间梁枋和顺枋串端部的塑性铰内力继续增加直至失效, 结构失去有效的传力路径而发生倒塌。在此过程中, 下平枋和檐口附近的枋也出现一些塑性铰, 但是内力总体并不大。对于无铺作大殿(图 10(b)), 当心间面阔方向平枋跨中首先出现塑性铰,



数量逐渐增多,平枋两侧 1/4 处也出现了塑性铰。然后,平枋上的塑性铰进一步发展,跨中的塑性铰发展尤其快。同时,与金柱相连的进深方向三椽栿和顺栿串端部产生塑性铰。到加载后期,部分撩檐枋和檐枋跨中也出现一些塑性铰。最终,平枋跨中附近的塑性铰失效,初始失稳区域产生较大挠曲,结构转变成机构而发生倒塌。

## 4 对比与讨论

### 4.1 倒塌模式及其传力机制

对比倒塌过程可以发现,抽柱后结构的倒塌模式均具有一致性。在柱子失效后,初始失稳区域的荷载会通过横向构件向周围的柱子传力。最后结构的倒塌均是由于部分传力路径上一定数量的塑性铰失效,从而导致结构缺乏有效的传力路径。

对于抽除角柱后的结构,其倒塌时通过檐口附近的横向构件传向相邻的檐柱。对于无铺作大殿,主要有沿面阔和进深两个方向的拉结(图 11(a))。每个方向的拉结主要通过两种构件传力:一是通过柱头阑额,由于其截面往往较大,具有较大的竖向刚度,是较为主要的传力构件;二是通过檐枋和撩檐枋等檐口横向构件传递,这些构件截面较小,内力也稍小一些。因此,倒塌过程中出现的塑性铰也主要分布于这些构件上。对于有铺作的天宁寺大殿,类似的也有两个方向的拉结,主要区别在于传力不再是由柱间阑额单独完成。外檐铺作的存在使得阑额、檐枋和斗拱中的素枋、泥道拱一同在面内形成一榀“组合桁架”共同受力(图 11(b))。这种组合桁架形成一条有效的传力路径,分摊了大部分的荷载,因而倒塌过程中出现的塑性铰也主要分布于此。这榀“组合桁架”将荷载快速直接地传递到相邻檐柱,而其余横向构件承担的力相对就更小。

抽除檐柱后的结构倒塌与抽除角柱工况类似,也通过檐口附近的横向构件进行传力。对于无铺作大殿,主要与相邻的檐柱、金柱和角柱形成三向拉结(图 11(c))。向金柱的传力主要依靠三椽栿或乳栿及其下方顺栿串进行;向檐柱和角柱的传力则通过柱头阑额等横向构件进行。其中由于阑额、顺栿串和梁栿截面较大,具有较大的竖向刚度,是主要的传力构件,倒塌过程中出现的塑性铰也主要分布在这些构件上。其余如檐枋、撩檐枋等檐口横向构件内力则稍小。对于有铺作的天宁寺大殿,类似的有 3 个方向的拉结。主要区别在于,向檐柱和角柱的传

力不仅仅由柱间阑额单独完成,柱头的阑额、檐枋和斗拱中的素枋、泥道拱也一同在面内形成一榀“组合桁架”共同受力(图 11(d))。这种组合桁架在檐口处建立了一条刚度较大的主要传力路径,倒塌时塑性铰也主要分布于此。同时,铺作下昂尾部的瓜子拱、令拱也和下平枋组合形成类似桁架的结构,提升了下平枋的刚度,辅助了面阔向的荷载传递。

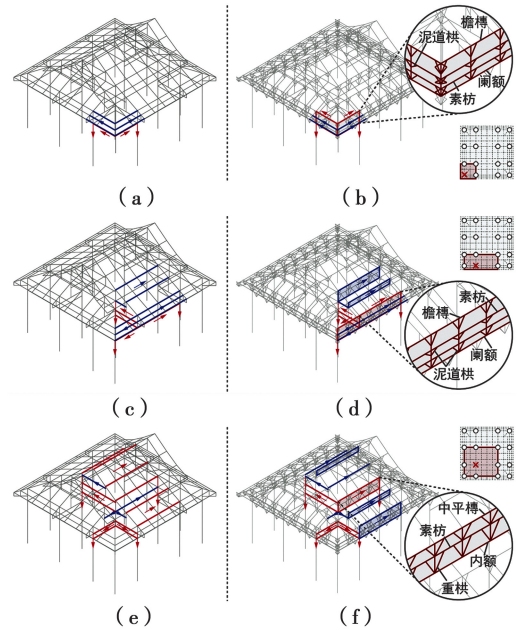


图 11 天宁寺大殿与无铺作大殿倒塌时的主要传力路径  
Fig. 11 Main load transferring path of the the two main halls during the progressive collapse

抽除金柱后,结构倒塌时通过金柱附近的横向构件传向相邻的檐柱和金柱。对于无铺作大殿,主要与相邻的檐柱、金柱和角柱形成四向拉结(图 11(e))。进深方向主要通过梁栿和下方顺栿串传递至两侧檐柱和金柱;面阔方向则通过乳栿和下方顺栿串传至檐柱,传至另一侧金柱则主要通过平枋等横向构件。其中,由于顺栿串和梁栿截面较大,具有较大的竖向刚度,是主要的传力构件,但面阔方向与另一侧金柱的联系基本只通过平枋,由于平枋的截面尺寸较小,承载能力有限,倒塌过程中出现的塑性铰多出现在平枋上。对于有铺作的天宁寺大殿,类似的有 4 个方向的拉结,主要区别在于,面阔方向金柱之间的传力不再仅仅由柱间平枋单独完成。由于金柱间铺作的存在,中平枋、内额和斗拱中的素枋、泥道拱一同在面内形成一榀“组合桁架”共同受力(图 11(f))。这种组合桁架形成了一条有效的传力路径,将荷载快速直接地传递到相邻金柱,倒塌时塑性铰也主要分布于这条路径上。同时,铺作下昂尾

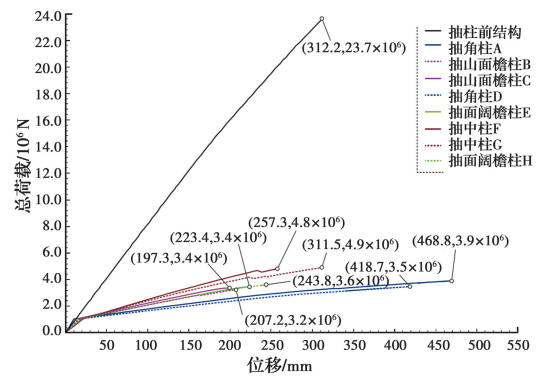
部的瓜子拱、令拱也和下平枋组合形成桁架的结构,提升了下平枋的刚度,而脊枋和下方顺脊串之间也通过单拱形成了类似桁架的结构,这两者均辅助了面阔向的荷载传递。

综上所述,倒塌时的主要传力构件有梁枋、素枋、平枋、阑额、顺枋串、顺脊串等。对于有铺作的大殿,梁枋、阑额和顺枋串截面较大,主要受弯。倒塌时,梁枋和顺枋串主要负责金柱和檐柱及金柱之间的传力,阑额则主要负责檐枋之间的传力,塑性较多出现在这些构件端部的榫卯节点处。平枋、素枋及顺脊串等截面较小的构件则由于铺作的存在形成“桁架”组合受力,负责檐柱之间和金柱之间的传力,枋、枋和串受弯,而拱(斜杆)受压,倒塌时塑性较多出现在这些构件与拱(斜杆)的连接处。最终的倒塌是由于部分素枋上塑性失效所致。而对于无铺作的大殿,倒塌时主要通过平枋、梁枋、顺枋串和阑额传力,其传力机理与有铺作的大殿类似,区别在于构件之间无明显的共同受力现象。相较于梁枋、顺枋串和阑额,平枋截面较小,倒塌过程中塑性较大多出现在平枋上。

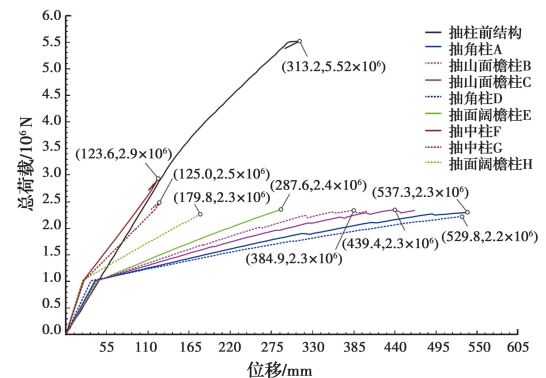
#### 4.2 承载力及其刚度

天宁寺大殿和无铺作大殿在竖向推覆过程中的荷载-位移曲线结果如图 12 所示,各工况极限承载力及其差异列于表 3。无铺作大殿完整结构的极限承载力相比于有铺作的天宁寺大殿下降十分明显,约下降 76.7%,而无铺作大殿 8 个抽柱后结构的极限承载力相比于有铺作的天宁寺大殿也有所下降,其下降幅度约在 30%~50%。说明铺作的存在可以明显提升完整结构和局部柱失效后结构的极限承载力,从而提升整体结构的抗连续倒塌能力。另外值得注意的是,相比于抽除金柱的工况,抽除角柱和檐柱的工况极限承载力下降幅度稍小一些,说明

铺作的存在对金柱传力路径的影响更大一些。这是由于天宁寺大殿的当心间跨度较大,但金柱之间在面阔方向实质上缺乏有效的横向传力构件,而铺作的存在使得平枋与内额、顺脊串之间形成组合桁架共同工作,为当心间的横向传力提供了有效的传力路径。另外,铺作的存在使得檐口柱缝一圈形成组合桁架,让檐枋、素枋和阑额共同受力,从而形成了有效的传力路径和拉结,这也是局部柱失效后,天宁寺大殿结构极限承载力高于相应无铺作大殿的重要原因。



(a) 天宁寺大殿



(b) 无铺作大殿

图 12 竖向推覆荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves in pushdown analysis

表 3 天宁寺大殿与无铺作大殿各抽柱工况结构极限承载力

Table 3 Load bearing capacity of two halls after the failure of different coulmns

结构模型	结构极限承载力 $F_u/10^6 \text{ N}$								
	完整结构	抽柱 A	抽柱 B	抽柱 C	抽柱 D	抽柱 E	抽柱 F	抽柱 G	抽柱 H
天宁寺大殿	23.70	3.467	3.226	3.358	3.890	3.430	4.811	4.898	3.604
无铺作大殿	5.520	2.297	2.334	2.346	2.281	2.350	2.923	2.481	2.256
差异/%	-76.71	-33.75	-27.65	-30.14	-41.36	-31.49	-39.24	-49.35	-37.40

为研究两者在抽柱后结构的整体刚度,提取了恒载加载后抽柱位置的竖向位移用于对比分析,列于表 4。

表 4 中恒载加载后的位移结果显示,相比于无铺作大殿,有铺作的天宁寺大殿 8 个抽柱工况的恒载工况位移均有所下降,这说明铺作的存在还对柱

附近结构竖向刚度有明显的提升。其中,铺作对山面的柱附近的刚度提升更为明显,与无铺作大殿相

比,其位移下降幅度约为60%~70%。

表4 天宁寺大殿与无铺作大殿恒载工况下抽柱处的竖向位移

Table 4 Deflection at the failed column in the two main halls under the dead-load case

结构模型	恒载工况下抽柱处的竖向位移 $u_1$ /mm							
	抽柱 A	抽柱 B	抽柱 C	抽柱 D	抽柱 E	抽柱 F	抽柱 G	抽柱 H
天宁寺大殿	15.42	16.42	12.73	9.946	19.37	21.09	18.67	14.52
无铺作大殿	39.10	40.89	40.16	33.53	43.13	23.86	24.48	22.26
差异/%	60.56	59.84	68.30	70.34	55.09	11.61	23.73	34.77

### 4.3 构件的敏感性系数

为评估各个柱的敏感性,引入构件的敏感性系数  $C. I.$  的概念<sup>[27]</sup>。

$$C. I. = \frac{p_u - p_{u,d}}{p_u} \quad (1)$$

式中: $p_u$ 为结构初始状态下的极限荷载; $p_{u,d}$ 为某根构件突然失效后剩余结构的极限荷载。计算8根柱的构件敏感性系数见表5。

表5 天宁寺大殿和无铺作大殿柱的构件敏感性系数

Table 5 Component sensitive factor of the columns in the two main halls

柱号	类型	位置	C. I.	
			天宁寺大殿	无铺作大殿
A	角柱	前侧面	0.853 7	0.583 9
B	檐柱	前侧面	0.863 9	0.577 2
C	檐柱	后侧面	0.858 3	0.575 0
D	角柱	后侧面	0.835 9	0.586 8
E	檐柱	前侧面	0.855 2	0.574 3
F	金柱	前侧	0.797 0	0.470 5
G	金柱	后侧	0.793 3	0.550 5
H	檐柱	后侧面	0.847 9	0.591 3

从表5可以发现,对于天宁寺大殿,8根柱的构件敏感性系数的排序是:柱B>柱C>柱E>柱A>柱H>柱D>柱F>柱G;对于无铺作大殿,8根柱的构件敏感性系数的排序是:柱H>柱D>柱A>柱B>柱C>柱E>柱G>柱F。两者的柱构件敏感性排序具有较强的一致性,均为金柱的敏感性较小,檐柱和角柱的敏感性基本相同。说明对于江南地区宋元时期传统木构来说,檐柱和角柱失效更容易引起木构的连续性倒塌。

## 5 结论

对江南地区宋元时期传统木构的铺作在结构整

体连续倒塌中的作用进行了详细研究。选取天宁寺大殿作为典型研究对象,通过三维扫描精细测绘建立相应的有限元模型;去除铺作,建立相应的无铺作大殿结构模型以作对比研究;对天宁寺大殿和对应的无铺作大殿结构模型进行抽柱后的空间Pushdown分析;对比研究了两者塑性铰发展的区别以及极限承载力的差异,并研究了铺作在倒塌时起到的作用。得到以下主要结论:

1)有铺作大殿和无铺作大殿在抽除角柱、檐柱和金柱后,结构的大体传力路径类似,均通过横向构件向周围的柱子进行传力;倒塌时结构的主要传力构件包括梁枋、平枋、顺枋串、阑额、素枋、顺脊串等。另外,檐柱和角柱的失效更容易造成建筑的连续性倒塌。

2)梁枋、阑额和顺枋串在倒塌时主要受弯。其中,梁枋和顺枋串主要负责金柱和檐柱及金柱之间的传力,阑额则主要负责檐枋之间的传力。倒塌时塑性铰多出现在这些构件端部的榫卯节点处。

3)对于有铺作的大殿,倒塌时平枋、素枋及顺脊串等截面较小的构件由于铺作的存在形成“桁架”组合受力,负责檐柱之间和金柱之间的传力。其中枋、枋和串受弯,而拱(斜杆)受压。塑性铰多出现在这些构件与拱(斜杆)的连接处。对于无铺作大殿,倒塌时构件之间则无明显的共同受力现象,塑性铰多出现于平枋上。

4)铺作的存在对天宁寺大殿的抗连续倒塌性能有明显的提升。在局部柱失效的情况下,天宁寺大殿的结构极限承载力相较无铺作大殿约提升了30%~50%。

### 参考文献:

- [1] ZHOU Q, YANG K. Progressive collapse of a Chinese ancient building by simulation [C]//2010 Third



- International Conference on Information and Computing, June 4-6, 2010, Wuxi, China. IEEE, 2010: 192-194.
- [2] 张锡成, 胡成明, 吴晨伟, 等. 水平地震作用下大式带斗拱木结构古建筑的抗倒塌性能分析[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(1): 10-18.  
ZHANG X C, HU C M, WU C W, et al. Analysis of anti-collapse performance of ancient timber frame buildings of grand style with Dou-Gong under horizontal earthquake [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2020, 32(1): 10-18. (in Chinese)
- [3] 杨娜, 谭圣, 秦术杰. 考虑残损的古建木结构地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(4): 95-104.  
YANG N, TAN S, QIN S J. Seismic fragility analysis of timber structure considering initial damage [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 95-104. (in Chinese)
- [4] SCHMIDT J, KALISKE M. Models for numerical failure analysis of wooden structures [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 571-579.
- [5] KIRKEGAARD P H, SØRENSEN J D, ČIZMAR D, et al. System reliability of timber structures with ductile behaviour [J]. Engineering Structures, 2011, 33(11): 3093-3098.
- [6] BRANCO J M, NEVES L A C. Robustness of timber structures in seismic areas [J]. Engineering Structures, 2011, 33(11): 3099-3105.
- [7] DIETSCH P. Robustness of large-span timber roof structures: Structural aspects [J]. Engineering Structures, 2011, 33(11): 3106-3112.
- [8] 李晓铎. 梁柱式木框架结构抗连续倒塌性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.  
LI X D. Study on progressive collapse-resisting performance of post-beam timber frame [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [9] 郑艺杰. 胶合木平面桁架鲁棒性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
ZHENG Y J. The robust analysis of glued laminated timber plane truss [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [10] 张晋, 章东昊, 蔡建国, 等. 木结构连续倒塌研究现状[J]. 工业建筑, 2016, 46(12): 116-122.  
ZHANG J, ZHANG D H, CAI J G, et al. A review on progressive collapse study of timber structures [J]. Industrial Construction, 2016, 46(12): 116-122. (in Chinese)
- [11] 潘毅, 袁双, 王慧琴, 等. 古建筑木结构偷心造和计心造斗拱力学性能数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 9-15.  
PAN Y, YUAN S, WANG H Q, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of Tou-Xin-Zao and Ji-Xin-Zao Tou-Kung in Chinese ancient timber structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 9-15. (in Chinese)
- [12] 陈九璋, 陈雪瑶, 戴璐. 残损斗拱节点受力性能试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 149-158.  
CHEN J Z, CHEN X Y, DAI L. Experimental research on mechanical performance of damaged bracket set joints [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2): 149-158. (in Chinese)
- [13] 李海娜. 古建筑木结构铺作层抗震机理分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
LI H N. Seismic analysis of Tou-Kung in ancient wooden building [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 潘毅, 袁双, 郭瑞, 等. 铺作层布置对古建筑木结构抗震性能的影响[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 29-40.  
PAN Y, YUAN S, GUO R, et al. Effects of Tou-Kung layer layout on seismic performance of ancient timber structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 29-40. (in Chinese)
- [15] 王娟, 崔志涵, 杨庆山, 等. 唐代殿堂型木构架柱架摇摆抗侧机理研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 104-114.  
WANG J, CUI Z H, YANG Q S, et al. A study on horizontal resistance mechanism of palace-style wooden frame in Tang dynasty [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 104-114. (in Chinese)
- [16] 程小武, 沈博, 刘伟庆, 等. 宋式带“昂”斗拱节点力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 133-142.  
CHENG X W, SHEN B, LIU W Q, et al. Experimental study on mechanical properties of Song-style Dougong joints with Ang [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 133-142. (in Chinese)
- [17] 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 木结构古建筑中斗拱与榫卯节点的抗震性能: 试验研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 58-64.  
GAO D F, ZHAO H T, XUE J Y. Aseismic characteristics of bucket arch and mortise-tenon joint of ancient Chinese timber buildings: Experimental research [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 58-64. (in Chinese)

- [18] 燕兆, 李爱群, 曾德民, 等. 典型宋式斗拱试验骨架曲线特征和滞回性能分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊1): 513-518.  
YAN Z, LI A Q, ZENG D M, et al. Analysis of the skeleton curves characteristics and hysteretic performance of typical song style brackets sets [J]. Building Structure, 2019, 49 (Sup1): 513-518. (in Chinese)
- [19] 邵云, 邱洪兴, 乐志, 等. 宋、清式斗拱低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(9): 79-82, 38.  
SHAO Y, QIU H X, YUE Z, et al. Experimental study of low-cycle loading test on Song-style and Qing-style Dougong [J]. Building Structure, 2014, 44(9): 79-82, 38. (in Chinese)
- [20] 吴磊. 古建筑木结构铺作层试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
WU L. Seismic analysis of Pu-Zuo in ancient wooden building [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [21] 隋葵, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古代殿堂式木结构建筑模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 35-40.  
ZHAO H T, XUE J Y, et al. A study on Chinese ancient timber structures by shaking table test [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 35-40. (in Chinese)
- [22] 淳庆, 潘建伍, 董运宏. 江南地区传统木构建筑透榫节点受力性能研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 862-869.  
CHUN Q, PAN J W, DONG Y H. Mechanical properties of Tou mortise-tenon joints of the traditional timber buildings in the south Yangtze River regions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 862-869. (in Chinese)
- [23] 淳庆, 潘建伍, 韩宜丹. 江南地区传统木构建筑半榫节点受力性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 124-131.  
CHUN Q, PAN J W, HAN Y D. Research on mechanical properties of ban mortise-tenon joint of the traditional timber buildings in the south Yangtze River regions [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 124-131. (in Chinese)
- [24] KHANDELWAL K, EL-TAWIL S. Assessment of progressive collapse residual capacity using pushdown analysis [C]//Structures Congress 2008, April 24-26, 2008, Vancouver, British Columbia, Canada. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-8.
- [25] 吕大刚, 崔双双, 李雁军, 等. 基于备用荷载路径 Pushover 方法的结构连续倒塌鲁棒性分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(Sup2): 112-118.  
LV D G, CUI S S, LI Y J, et al. Robustness analysis for progressive collapse of structures using ALP-based pushover analysis approach [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup2): 112-118. (in Chinese)
- [26] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Load code for the design of building structures: GB 50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [27] 秦楠. 基于关键构件失效的结构竖向防连续倒塌性能评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
QIN N. Key component infailure based performance evaluation of vertical continuous collapse of structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)