

“古建筑木材科研基地”专栏 (10) DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025112

编者按: 2023年5月, 国家文物局公布第八批重点科研基地名单, 依托中国林业科学研究院木材工业研究所的古建筑木材科学研究与保护国家文物局重点科研基地(简称古建筑木材科研基地)位列其中。古建筑木材科研基地围绕国家文物保护重大需求, 以古建筑木材保护为目标, 全力解决古建筑木材劣化病害机理等科学问题, 攻克病害诊断识别、材料服役评价、绿色多效防护等技术难题, 创制绿色防护产品, 着力构建古建筑木材病理学理论体系, 强化古建筑的系统性保护, 提高古建筑预防性保护能力。本刊于2024年系列报道古建筑木材科研基地相关研究成果, 为古建筑文物科技创新和保护提供支撑, 助力文物保护事业高质量发展。

应县木塔木构件连接界面类型及其分布特征分析

张佳凝¹, 王品博¹, 周海宾^{1,2}, 邓昊¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091;

2. 古建筑木材科学研究与保护国家文物局重点科研基地, 北京 100091)



摘要: 应县木塔作为中国木结构的杰出代表, 其独特的结构性能源于木构件接触面间的摩擦机制, 可有效耗散地震等动态载荷能量, 造就其卓越的结构稳定性。然而, 在长期环境荷载与材料老化等作用下, 该建筑目前呈现明显的整体倾斜与局部变形问题。研究以应县木塔明间1~5层为统计范围, 分析连接界面类型及其分布特征, 并测量柱头铺作嵌压、滑移情况。实际勘察发现, 木塔连接界面类型有横-横、横-弦和弦-弦三种, 其中弦-弦连接界面类型占比最高, 为61.29%。统计数据显示, 内槽连接界面数量为22 424个, 外槽连接界面数量为65 320个; 而且, 随着层数升高, 连接界面总数呈递减趋势, 其中弦-弦连接界面占比降低, 而横-弦连接界面占比增加。1~5层铺作连接界面数量存在明显差异, 外槽转角铺作的连接界面数量最多, 补间铺作的连接界面数量最少。构件间嵌压值整体呈现自2~5层逐渐减小趋势, 枋斗与普拍枋间的嵌压情况最严重, 且嵌压值受连接界面材种影响。构件间滑移现象主要集中于平盘斗, 滑移值随着层数增加而逐渐减小。研究为应县木塔的力学性能分析与结构安全评估提供参考依据。

关键词: 应县木塔; 连接界面; 摩擦机制; 嵌压; 滑移

中图分类号: S781; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2025) 06-0001-09

Types and Distribution Characteristics of Contact Interface between Timber Components in the Yingxian Wooden Pagoda

ZHANG Jianing¹, WANG Pinbo¹, ZHOU Haibin^{1,2}, DENG Hao¹

(1. Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Scientific Research Base of Wood Science and Conservation of Historical Building, State Administration of Cultural Heritage, Beijing 100091, China)

Abstract: The unique friction mechanism of the contact interface between the wooden components of the Yingxian Wooden Pagoda can dissipate energy, resulting in its outstanding structural stability.

收稿日期: 2025-10-16; 修改日期: 2025-11-15

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“应县木塔本体信息采集、挖掘与数据模型构建”(2023YFF0906301)。

作者简介: 张佳凝(2001—), 女, 硕士研究生。Email: 15836742953@163.com

通讯作者: 邓昊, 男, 高级工程师。Email: denghao64@126.com

However, significant overall and local tilting exists at present. Current research is mainly concentrated on the mechanical analysis by establishing numerical models, ignoring the types of wood contact interfaces and the friction mechanism. This study focused on the statistical summary of the first to fifth floors of the clear chamber of the Yingxian Wooden Pagoda, analyzing the distribution characteristics of contact interface types and the embedded pressure and slip phenomenon of the column heads. Field investigations revealed that the contact interface of the Yingxian Wooden Pagoda include transverse-to-transverse, transverse-to-tangential, and tangential-to-tangential types. The tangential-to-tangential contact interface is the most prevalent type, accounting for 61.29%. There are 22 424 inner groove contact interfaces and 65 320 outer groove contact interfaces. The number of contact interfaces decreases as the number of floors increases, with the tangential-to-tangential and transverse-to-tangential contact interface types accounting for less and more, respectively. The quantity of contact interfaces for the first to fifth floors paving is the largest for a single outer groove corner paving, and the smallest for a single interlocking paving. The embedded pressures between components generally decrease from the second floor to the fifth floor. The embedded pressure between the dou and the pu-pai beam is the most severe, and the embedded pressures are affected by the material types of the contact interfaces. The slip phenomenon is mainly concentrated in the flat plate dou, and the slip value gradually decreases as the number of floors increases. This study would provide a reference database for the mechanical analysis and structural safety assessment of the Yingxian Wooden Pagoda.

Key words: Yingxian Wooden Pagoda; contact interface; friction mechanism; embedded pressure; slip

应县木塔（佛宫寺释迦塔），始建于辽清宁二年（1056年），是世界上现存最高、最古老的木构楼阁式建筑，其卓越的结构稳定性主要得益于独特的榫卯与斗拱层叠结构体系。在荷载作用下，木构件节点主要通过材料接触面，即连接界面的摩擦机制实现能量耗散^[1-4]。已有研究表明，摩擦系数与节点承载力^[5-7]、刚度^[6,8]、抗震性能^[9-11]及耗能能力^[11-12]等关键力学性能正相关，基于摩擦-剪切耗能的有限元模型能有效反映斗拱在荷载作用下的力学特性^[12]。

虽然已有研究证实古建筑木构件间摩擦性能对其结构稳定性具有重要影响^[13]，但现有研究主要局限于通过建立节点力学模型模拟其滞回特性，缺乏以木材连接界面和摩擦机理为出发点的系统研究。具体表现在：其一，忽略木材的各向异性及界面类型的多样性，将不同类型连接界面的摩擦系数设定为固定值；其二，摩擦系数的取值方法存在明显缺陷，如直接采用木材在固定较小配

重下的测试值作为连接界面的统一参数^[12,14]，或根据木材性能规范中的范围取固定值^[7,12]，甚至未说明取值依据^[6,8]等。

木材为各向异性材料，其力学性能随纹理方向呈现显著差异^[15-17]。在应县木塔复杂的结构中，不同位置的连接界面因接触面材质、构造方式及受力状态的不同，实际摩擦系数存在明显变化。同时，因构件破坏引起的构件间嵌压与滑移行为进一步加剧界面摩擦性能的复杂性。嵌压指在长期荷载作用下，木材接触表面因应力超过其弹性极限而产生的不可逆的塑性变形^[17]，通常表现为压溃、凹陷或局部纤维塌陷^[18]。滑移往往是柔性节点在长期荷载作用下，通过界面间的摩擦滑动进行适应调整的结果^[19]。嵌压表现为连接界面因压力产生的材料形变压缩，滑移表现为连接界面因构件相对位移产生的滑动，两者均与木构件间摩擦性能有重要关系。当前应县木塔面临整体倾斜与局部变形（尤以2层、3层为甚）问题，此类结构性

损伤已引发其内部力学状态的显著改变,严重削弱结构稳定性。因此,开展实际工况下木塔构件节点间界面摩擦研究迫在眉睫。本研究以应县木塔连接界面为研究对象,系统统计其类型、数量及空间占比,并实测主要承重构件间的嵌压、滑移情况,旨在建立应县木塔摩擦界面基础数据库,为后续精细化力学分析与结构安全评估提供数据支撑。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

应县木塔层间剖面如图1所示。不同于其他的建筑材料,木材由于其独特的各向异性,具有横切面、径切面、弦切面三种切面类型。不同木构件接触即产生横-横、横-径、横-弦、径-径、径-弦和弦-弦6类连接界面(图2)。以应县木塔木构件间连接界面为研究对象,范围覆盖明间1~5层的内外槽所有构件,按层间、铺作间、内外槽间和材种间4种维度分别统计界面类型及数量,并同步实测主要承重构件间的嵌压、滑移情况。

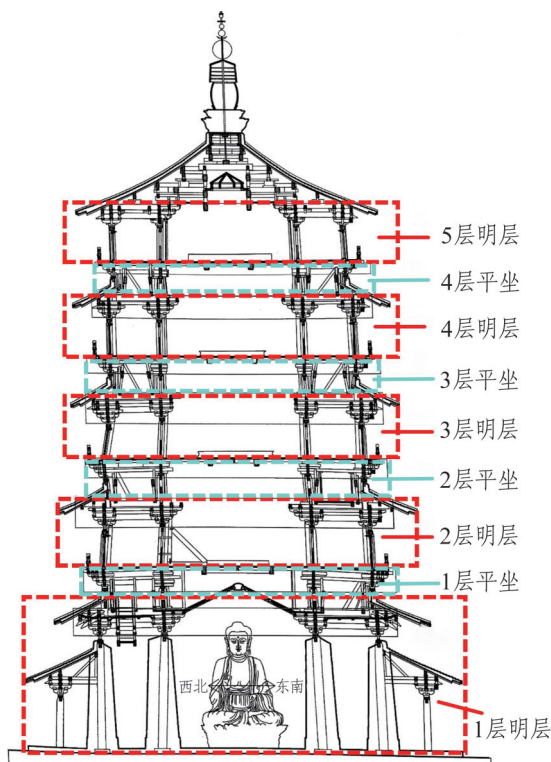


图1 应县木塔层间剖面示意图^[20]

Fig.1 Schematic of the interfloor section of the Yingxian Wooden Pagoda^[20]

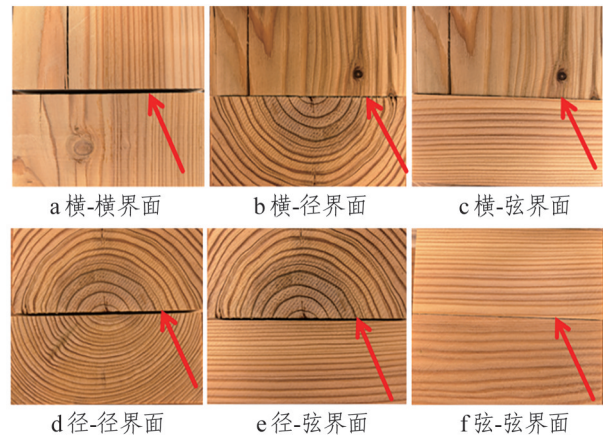


图2 木构件的6类连接界面

Fig.2 Six types of contact interfaces between timber components

1.2 研究方法

1.2.1 界面类型、数量统计 依据图纸报告和实地勘察,发现明层与暗层交接处的构件组合复杂,隐蔽部分较多,暂无法明确界面连接方式。因此,明、暗层交接处形成的连接界面未纳入统计范围;暗销不承担结构稳定功能,因其形成的构件间连接界面亦未被纳入统计范围。

根据传力方向不同,将横-横、横-径、横-弦、径-径、径-弦和弦-弦6类连接界面进一步划分为垂直摩擦界面和水平摩擦界面,不同传力方向连接界面类型如图3所示。分别按照层数、铺作类型、内外槽、材种4种维度,统计不同类型连接界面的数量和占比,计算式见式(1)。

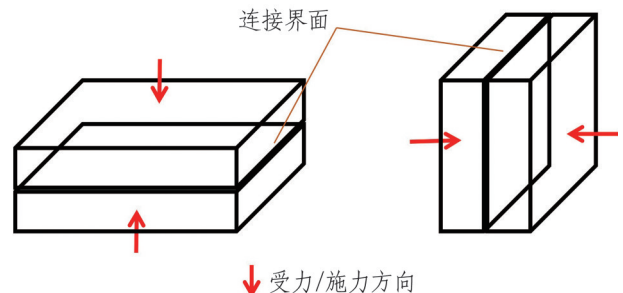


图3 不同传力方向连接界面类型示意

Fig.3 Schematic of contact interface types with different force transmission directions

$$R = \frac{N_0}{N_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_0 为一种维度内一种界面类型的数量; N_1 为一个计算范围内所有连接界面数量; R 为比率,表示一种界面类型在一个计算范围内的占比。

如图4所示,以柱头枋与散斗为例,共有3组连接界面:①、②为柱头枋侧面与散斗斗口侧面,记为2组弦-弦界面;③为柱头枋底部与散斗斗口底面,记为1组弦-弦界面。

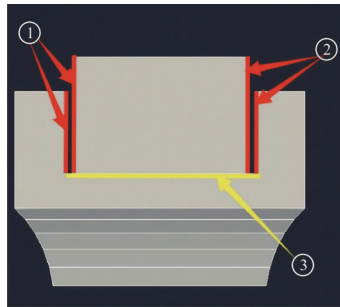


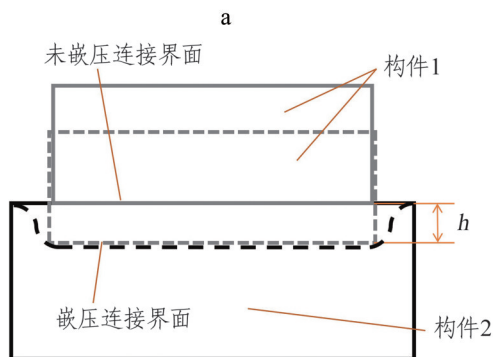
图4 木构件连接界面统计(以柱头枋与散斗为例)

Fig.4 Enumeration of contact interfaces of a timber component(column-top purlin and intermediate block as example)

1.2.2 嵌压、滑移程度测量 已有研究表明,内槽柱头铺作各构件连接界面嵌压情况明显^[21]。由于明间一层柱头铺作各铺作间互相遮盖严重,因此研究测量明间2~5层内槽柱头铺作主要承重构件连接界面的嵌压程度,构件范围涵盖普拍枋、枂斗、左/右柱头枋、角华拱和柱头枋上平盘斗,并比较不同层间同类构件的嵌压程度。

使用精度为0.1 mm的钢尺测量构件连接界面间的嵌压深度,对枂斗、散斗等承压构件,在其受压面选取多个测量点,记录最大嵌压值;采用塞尺测量构件间因压溃产生的间隙,通过高清摄影记录压溃区域的形态特征,包括木材组织的压缩、断裂等损伤模式。嵌压示意简图和严重嵌压现场图例分别如图5a和图5b所示,以嵌压与未嵌压时的连接界面相对位移差 h 作为嵌压程度取值(精度1 mm)。

在连接界面嵌压程度测量中,内槽柱头-普拍枋-枂斗节点处的木构件嵌压情况严重且表现特殊,该节点严重嵌压情况示例如图5c所示。勘察范围内,内槽柱与普拍枋均采用华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)制作,而枂斗则选用榆木(*Ulmus rubra*)^[15]。在该节点中,各构件所承受的压力基本均等,因而形成了两种不同材质的连接界面组合,即华北落叶松-华北落叶松和华北落叶松-榆木,这为不同材种的嵌压程度对比提供现实依据。研究还统计明间2~5层各内槽柱头铺作的柱头-普拍枋和普拍枋-枂斗构件组合连接界面嵌压值,以分析不同材种组合在相同压力情况下的嵌压情况差异。



a 嵌压示意简图;b 严重嵌压示例;c 内槽柱头-普拍枋-枂斗节点严重嵌压示例。

图5 木构件连接界面嵌压示意图和现场实例

Fig.5 Schematic and in-situ structure for embedded pressure of the contact interface between timber components

木构件连接界面的滑移常导致无表面劣化的新鲜木材暴露,形成明显的新旧表面区分痕迹。明显滑移情况示例如图6a所示,实地勘察发现滑移现象主要集中于散斗与平盘斗。本研究对木塔1~5层明间所有带有明显滑移痕迹的木构件进行滑

移程度测量,使用钢尺测量构件相对于初始位置的滑移距离,并记录滑移方向与结构整体倾斜方向的相关性。以滑移构件和非滑移构件在滑移界面上产生的痕迹 S 作为滑移程度取值(精度1 mm),滑移示意简图如图6b所示。

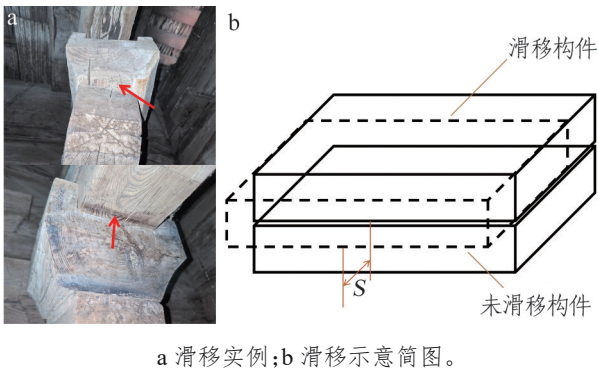


图6 木构件连接界面滑移实例和示意图
Fig.6 Schematic and in-situ structure for slip of the contact interface between timber components

2 结果与分析

2.1 连接界面类型及构件组合分布分析

经实地勘察，未发现符合标准径切面要求的木构件，实际连接界面类型仅有横-横、横-弦和弦-弦三种。表1为应县木塔典型构件连接界面的构件组合。多数构件组合为横纹受压，弦-弦连接界面类型的构件组合在木塔整体连接界面类型中占比最高，典型弦-弦连接界面构件组合示例见图7；

表1 不同构件组合的连接界面类型

Tab.1 Contact interface types of different timber component combinations

连接界面	典型构件连接界面构件组合
弦-弦	主柱柱脚-棋、主柱柱头-阑额、六椽栿-垫木、六椽栿-枋、主柱柱脚-乳栿、散斗-枋、栌斗-普拍枋、华棋-交互斗、普拍枋-普拍枋、普拍枋-阑额、交互斗-乳栿、梁-枋、斜棋-散斗、辅柱-华棋垂直面、华棋-栌斗水平面、乳栿-垫木、普拍枋-驼峰、柱头枋-柱头枋、驼峰-普拍枋、普拍枋-柱头枋、柱头枋-抹角栿
横-弦	主柱柱脚-垫木、主柱柱脚-乳栿、主柱柱脚-栌斗、辅柱-阑额、辅柱-地枋、主柱柱头-阑额、辅柱-乳栿、普拍枋-柱头水平面、斜撑-枋水平面、斗-棋垂直面、辅柱-华棋水平面、外槽短柱-枋、栌斗-华棋垂直面、铺板枋-柱头枋(榫卯连接处)
横-横	壁枋-壁枋、普拍枋-普拍枋(两段拼接成一根时)、六椽栿-华拱转里枋(天花梁与平座外槽华拱转里枋接触)

横-弦连接界面类型主要集中在柱头与柱脚位置的顺纹受压和横纹受压构件组合连接处，数量较少，典型横-弦连接界面构件组合示例见图8；横-横连接界面类型构件组合极少，典型横-横连接界面构件组合示例见图9。



图7 典型弦-弦连接界面木构件组合
Fig.7 Typical timber component combinations with the tangential-tangential contact interface

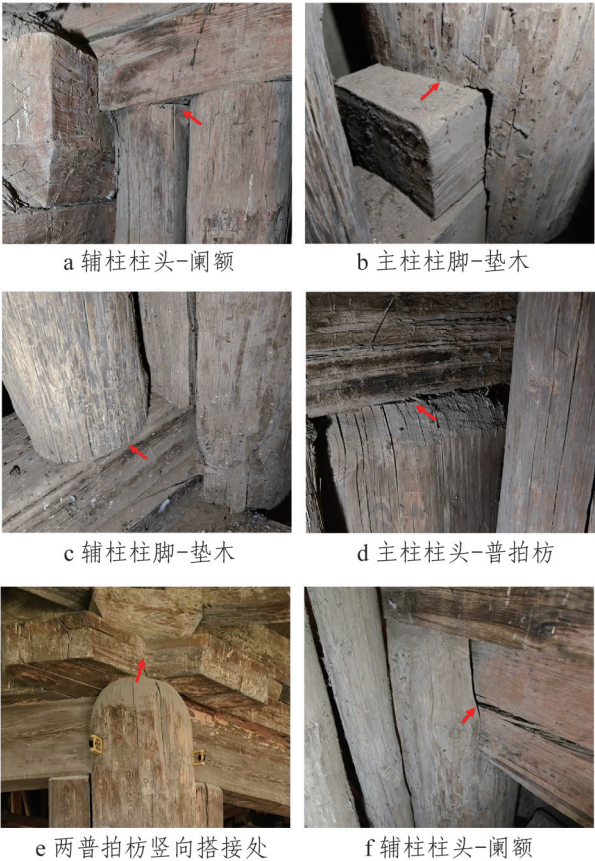


图8 典型横-弦连接界面构件组合
Fig.8 Typical timber component combinations with the transverse-tangential contact interface

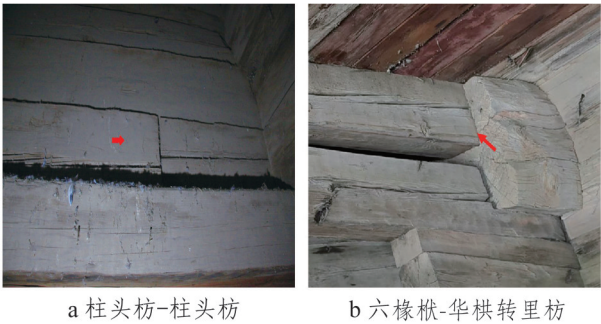


图9 典型横-横连接界面构件组合
Fig.9 Typical timber component combinations with the transverse-transverse contact interface

2.2 层间、铺作间连接界面数量分析

表2为层间内外槽连接界面数量及单柱(主柱)平均连接界面数量差异。全塔明间内槽连接界面数量为22 424个,外槽连接界面数量为65 320个,外槽连接界面数量约为内槽连接界面数量的3倍。单层明间外槽包括转角8个、柱头16个、补间24个共48个铺作,明间内槽包括转角8个、补间8个

共16个铺作,外槽铺作数量约为内槽铺作数量的3倍,与内外槽连接界面数量比值相对应。内外槽的连接界面数量均随着层数的增加呈逐减趋势,至第5层时达到最少。这是由于木塔采用自下而上逐层收分的构造形式,与其结构功能高度适配:底层承担较大自重与上部荷载,因而节点复杂,连接界面多;随着高度上升,荷载逐步减小,结构逐渐简化,对缓冲、分散能量的摩擦需求减弱,连接界面数量相应逐层减少。1、4、5层内槽单柱(主柱)平均连接界面数量明显大于外槽,2、3层相反。2、3层外槽因处于较大高宽比位置,需通过增加单位柱头连接界面增强整体抗侧移能力,以抵抗水平荷载。

表2 层间内外槽连接界面数量及单柱(主柱)平均连接界面数量差异

Tab.2 Difference in the number of interlayer inner-outer groove connection interfaces and the average number of connection interfaces per single column (main column)

层数	连接界面总数		单柱(主柱)平均连接界面数	
	内槽	外槽	内槽	外槽
1	5 472	15 632	684	651
2	4 200	15 312	525	638
3	4 056	14 448	507	602
4	4 392	11 112	549	463
5	4 304	8 816	538	367
N_1	22 424	65 320		

表3列出应县木塔层间连接界面类型的数量及占比。1~5层弦-弦连接界面数量均占主体,且随着层数的增加,弦-弦连接界面的占比呈现降低的趋势。横-弦连接界面的占比则呈现出稳定且连续的上升趋势,从1层的28.17%逐步增长至5层的

表3 层间连接界面类型数量及占比差异

Tab.3 Difference in the quantity and proportion of contact interface types among layers

层数	弦-弦界面		横-弦界面		横-横界面		界面总数 N_1
	数量 N_0	占比 R	数量 N_0	占比 R	数量 N_0	占比 R	
1	14 160	67.10%	5 944	28.17%	1 000	4.74%	21 104
2	11 880	60.89%	6 536	33.50%	1 096	5.62%	19 512
3	11 168	60.35%	6 312	34.11%	1 024	5.53%	18 504
4	8 936	57.64%	5 600	36.12%	968	6.24%	15 504
5	7 632	58.17%	4 792	36.52%	696	5.30%	13 120
共计	53 776	61.29%	29 184	33.26%	4 784	5.45%	87 744

36.52%。随着层数的增加，结构体系中横向构件与纵向构件之间的相互作用不断增强。木塔结构体系从底层依靠大量横向延展的弦-弦连接以保障整体抗震稳定性，向高层优化为纵横交织的抗风稳定性。

表 4 为层间不同铺作连接界面数量差异。将某一铺作类型连接界面数量与该铺作在统计范围内的数量相比，得到单个铺作连接界面均值数量。随着层数增加，所有铺作的三类连接界面数量均呈逐渐下降趋势，与表 2 数据相对应。单个外槽转

角铺作的连接界面数量均值最大，为 420 个/铺作。从结构上看，相较于其他铺作类型，外槽转角铺作具有最复杂的挑檐形式，满足木塔引流雨水的实际需求和逐层收分的设计需求。转角铺作较补间铺作和柱头铺作的连接界面均值数量多，其具有连接内外槽的重要支撑功能。内槽补间铺作连接界面均值数量最少，为 217 个/铺作，其结构简单，出跳数量最少，结构功能性弱于转角和柱头铺作。

表 4 层间不同铺作连接界面数量差异

Tab.4 Difference in the quantity of contact interfaces among layer intersections

层数	转角铺作连接界面						补间铺作连接界面						柱头铺作(外槽)连接界面		
	内槽			外槽			内槽			外槽			横-横	横-弦	弦-弦
	横-横	横-弦	弦-弦	横-横	横-弦	弦-弦	横-横	横-弦	弦-弦	横-横	横-弦	弦-弦			
1	312	1 264	2 112	240	1 712	2 568	64	416	1 304	96	1 272	4 080	288	1 280	4 096
2	160	1 088	1 160	232	1 768	1 880	32	552	1 208	384	1 512	4 896	288	1 616	2 736
3	160	1 088	1 192	192	1 384	1 592	16	352	1 248	336	2 016	4 368	320	1 472	2 768
4	200	1 136	1 256	128	1 224	1 680	96	592	1 112	288	1 512	2 616	256	1 136	2 272
5	184	1 152	1 272	96	928	1 168	64	576	1 056	192	1 080	2 520	160	1 056	1 616
单个铺作均值	343			420			217			226			267		

2.3 连接界面嵌压、滑移程度分析

表 5 列出应县木塔各层明间内槽柱头铺作嵌压值，整体呈现自 2~5 层逐渐减小趋势，多数构件间 2 层的嵌压值最大。这是由于自 2~5 层各柱头铺作承受的载荷逐渐减小，2 层承担的载荷最大。栌斗与普拍枋间的嵌压情况最严重，其中 2 层栌斗与普拍枋间平均嵌压值达到 33.8 mm，约为 5 层 7.4 mm 的 5 倍。栌斗与角华栱、柱头枋间的嵌压情况相对较弱，在部分构件中仍有较明显的嵌压现象。栌斗承接单个铺作的大部分载荷，下表面全部置于普

拍枋上，形成极大的局部压力。栌斗为上表面接触面较大、下表面接触面较小的形式，下表面接触面较小，致使其与普拍枋间的压强增大，嵌压值最大。栌斗与角华栱、柱头枋的搭接形式，导致这两种构件悬空位置处出现剪切破坏，从而出现较大嵌压的情况。柱头枋上平盘斗也是嵌压较明显的位置之一，塔身倾斜与水平风荷载的共同作用导致内外槽之间的连接构件乳袱发生扭转，致使下方的平盘斗承压更大，产生塑性变形，从而出现平盘斗与下方柱头枋间的嵌压情况。

表 5 各层明间内槽柱头铺作连接界面嵌压值

Tab.5 Embedded pressures of the contact interface between column and crown within open space of different layers

构件 1-构件 2	构件 1-构件 2 连接界面嵌压值 h/mm							
	2 层		3 层		4 层		5 层	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
栌斗-普拍枋	60	33.8	40	19.4	20	12.0	15	7.4
栌斗-角华栱	50	25.9	22	14.9	12	6.5	0	0
栌斗-左柱头枋	50	20.8	14	8.5	18	8.2	20	6.9
栌斗-右柱头枋	23	10.8	23	9.8	15	7.3	5	2.1
左枋-上平盘斗	0	0	12	1.5	5	0.6	12	2.2
右枋-上平盘斗	15	1.9	8	1.6	0	0	3	0.7

表 6 为内槽柱头-普拍枋-栌斗节点不同材种组合连接界面嵌压值。两种材种组合的连接界面最大和平均嵌压值均随层数增加呈现明显递减趋势。随层数增高，铺作的荷载变小，致使嵌压值逐渐减小，至 5 层达到最小。分材种组合看，在相同的层数下，华北落叶松-华北落叶松连接界面的最大和平均嵌压值均大于华北落叶松-榆木连接

表 6 内槽柱头-普拍枋-枋斗节点不同材种组合连接界面嵌压值

Tab.6 Embedded pressures of the contact interface at node of inner groove column head-piled beam-gable beam with different wood species combinations

构件 1-构件 2	材种组合	构件 1-构件 2 连接界面嵌压值 h/mm							
		2 层		3 层		4 层		5 层	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
普拍枋-枋斗	华北落叶松-榆木	60.0	33.8	40.0	19.4	20.0	12.0	15.0	7.4
普拍枋-柱头	华北落叶松-华北落叶松	60.5	45.9	57.5	33.8	38.5	23.0	22.0	14.0

界面。与华北落叶松相比，榆木的力学性能更优良。前期勘察结果表明，普拍枋发生极严重的嵌压变形^[21]，而枋斗未见明显变形或变形极其轻微。对于内槽柱头-普拍枋节点，该连接界面类型属于横-弦，即一个构件为顺纹承压，另一个构件为横纹承压。由于顺纹承压强度远高于横纹承压强度，在相同荷载下，顺纹方向的压缩变形显著小于横纹方向。在该节点不同材种组合连接界面相同压力情况下，柱头的顺纹压缩量小于枋斗的横纹压缩量，枋斗的压缩为普拍枋-枋斗连接界面的嵌压提供缓冲，从而表现出华北落叶松-华北落叶松连接界面嵌压值大于华北落叶松-榆木连接界面的情况。

实地勘察发现滑移现象主要集中在平盘斗，相较于其他构件，斗一般仅与两个构件的界面产生接触，受摩擦力约束较小；相较于其他斗类型，平盘斗无斗耳，进一步减小了构件间的摩擦约束。表 7 为内外槽平盘斗连接界面的滑移值统计。各层内外槽均有 10 个以上的平盘斗发生明显滑移，最严重的滑移值出现在 2 层外槽与 3 层内槽的平盘斗，均为 20 mm。内外槽平盘斗滑移平均值，随着层数增加呈现逐渐减小趋势，外槽平盘斗滑移平均值普遍大于内槽滑移平均值或与之相当。外槽受风荷载作用较直接，对水平作用力响应显著，

连接界面间需要通过更大的滑移量耗能。随层数增加，累积倾斜变形量及水平荷载作用相对减弱，导致滑移现象逐步减少；然而，由于倾斜变形中行程量更大，外槽平盘斗滑移值增大。

3 结论与展望

1) 通过实地勘察，系统统计应县木塔连接界面的类型、数量及其分布特征，并实测关键节点的嵌压与滑移程度。应县木塔连接界面明间内槽连接界面数量为 22 424 个，外槽连接界面数量为 65 320 个，实际连接界面类型仅有横-横、横-弦和弦-弦三种，暂未发现标准径切面连接界面。在统计的木塔整体连接界面类型中，弦-弦连接界面类型占比 61.29%；横-弦类型占比 33.26%；横-横类型占比 5.45%。

2) 木塔层数越高，铺作形式越简单，连接界面数量越少。1~5 层中各层内、外槽及不同铺作类型中的连接界面数量均随层数增加呈明显下降趋势；2、3 层内槽单柱（主柱）平均连接界面数量小于外槽；弦-弦连接界面数量最大，随层数增加，弦-弦连接界面类型占比逐渐降低，而横-弦连接界面类型占比逐渐上升。铺作类型中，各层外槽转角铺作连接界面数量最多，补间铺作连接界面数量最少。1~5 层中各层内、外槽及不同铺作类型的连接界面数量均随层数增加出现明显下降趋势。

3) 构件间嵌压值随层数增高整体呈现逐渐减小趋势，2 层嵌压值最大，普拍枋、角华棋、左右柱头枋、枋上平盘斗均存在嵌压，枋斗与普拍枋间的嵌压情况最严重，嵌压值最高达到 60 mm；华北落叶松（顺纹）-华北落叶松（横纹）连接界面嵌压值大于华北落叶松（横纹）-榆木（横纹）连接界面。滑移现象主要集中于平盘斗，随层数增加，累积倾斜变形量减小，平盘斗滑移平均值随

表 7 内外槽平盘斗连接界面滑移值

Tab.7 Slip values of the interface between the inner and outer sockets of the flat plate bucket

层数	外槽平盘斗			内槽平盘斗		
	滑移数量	滑移平均值/mm	滑移最大值/mm	滑移数量	滑移平均值/mm	滑移最大值/mm
2 层	16	10.69	20	11	5.82	8
3 层	12	9.17	15	19	8.89	20
4 层	15	6.13	10	18	6.44	16
5 层	12	5.94	15	16	6.25	15

之逐渐减小, 外槽平盘斗滑移平均值呈现大于内槽滑移平均值的趋势。这些嵌压严重、滑移明显的部位需进行结构检测及针对性维护。

4) 本研究受限于现场条件与检测手段, 未能对连接界面的有效接触面积进行精确测量, 也未考虑界面因长期荷载导致的表面状态变化(如磨损、老化等), 在一定程度上影响了摩擦性能的定量分析与力学模型的精确构建。未来可结合三维激光扫描等无损检测技术, 对木塔关键节点进行高精度三维数字化重建, 实现接触面积、微观形变的精细化表征。同时, 可进一步开展木材在不同纹理组合、含水率与荷载下的摩擦试验, 建立包括摩擦系数的木材连接界面基础数据库, 为木结构古建筑的损伤评估与保护加固提供更为可靠的理论与数据支撑。

参考文献:

- [1] CHRISTOVASILIS I P, RIPARBELLI L, FIORAVANTI M. The role of friction in the response of tranverse-laminated timber buildings under low-amplitude seismic loads[J]. *Engineering Structures*, 2025, 327: 119622.
- [2] CHRISTOVASILIS I P, RIPARBELLI L, RINALDIN G, et al. Methods for practice-oriented linear analysis in seismic design of tranverse laminated timber buildings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 105869.
- [3] ZHANG B Z, XIE Q F, LI S Y, et al. Effects of gaps on the rotational performance of traditional straight mortise-tenon joints[J]. *Engineering Structures*, 2022, 260: 114231.
- [4] 武国芳. 应县木塔柱架节点受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 王娟, 许刃文, 张熙铭, 等. 唐代殿堂型木构架抗侧力性能影响参数分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(2): 48-59.
WANG J, XU R W, ZHANG X M, et al. Parameter analysis on lateral force resistance of the Palace-style timber building in Tang Dynasty [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(2): 48-59.
- [6] 方士东, 王志涛, 郭小东, 等. 抬梁式空间木结构古建筑有限元建模方法[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 56(5): 751-761.
FANG S D, WANG Z T, GUO X D, et al. Research on finite element modeling method for ancient wooden buildings in post-and-lintel construction[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 56(5): 751-761.
- [7] 褚云朋, 谭森龙, 古松, 等. 带普拍枋的松尾燕尾榫节点抗震性能研究 [J/OL]. *工程力学*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250517.1641.008>.
- [8] 薛建阳, 宋德军, 吴晨伟. 古建筑木结构斗棋力学性能研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2025, 46(6): 17-33.
XUE J Y, SONG D J, WU C W. Research progress on mechanical performance of Dou-Gong brackets in ancient timber structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2025, 46(6): 17-33.
- [9] 高潮, 杨庆山, 王娟, 等. 受水平地震作用的古建筑木结构柱非线性响应研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(S2): 207-214.
GAO C, YANG Q S, WANG J, et al. Nonlinear response study on columns in traditional timber structure under horizontal earthquake action[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(S2): 207-214.
- [10] WANG Z R, MENG X J, ZHANG C Y, et al. Experimental and numerical investigation on seismic performance enhancement of ancient timber structure with friction energy dissipation brace[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 111: 113591.
- [11] 洪阳洲. 干架叠磊结构三维离散单元地震动力反应分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [12] 袁建力, 施颖, 陈韦, 等. 基于摩擦-剪切耗能的斗棋有限元模型研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(6): 151-157.
YUAN J L, SHI Y, CHEN W, et al. Finite element model of Dou-Gong based on energy dissipation by friction-shear[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(6): 151-157.
- [13] 周海滨, 黄磊, 张纪平, 等. 木材连接界面摩擦及其对古建筑抗震性能影响研究进展[J]. *木材科学与技术*, 2024, 38(5): 1-10, 49.
ZHOU H B, HUANG L, ZHANG J P, et al. Research review on interfacial friction of wood components and its effect on seismic resistance in timber structures of ancient buildings[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2024, 38(5): 1-10, 49.
- [14] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统木结构典型榫卯节点基于摩擦机理特性的低周反复加载试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(10): 139-145.
GAO Y L, TAO Z, YE L Y, et al. Low-cycle reversed loading tests study on typical mortise-tenon joints of traditional timber building based on friction mechanism[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(10): 139-145.
- [15] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [16] 赵鸿铁. 中国古建筑结构及其抗震: 实验、理论及加固方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] ZHANG L P, HAN Y G, XIE Q F, et al. Mechanical performance of wood subjected to the interaction of transversal tension/compression and longitudinal shear stresses[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 420: 135637.
- [18] 孙玉婷, 李军, 魏志鹏, 等. 考虑木材嵌压的燕尾榫节点弯矩-转角模型研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2025, 46(2): 58-68.
SUN Y T, LI J, WEI Z P, et al. Study on the moment-rotation model of dovetail mortise-tenon joints considering the embedded compression of timber[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2025, 46(2): 58-68.
- [19] 郭宇, 刘睿静, 宋怡, 等. 木结构榫卯节点抗震性能及震后加固修复研究进展[J]. *林产工业*, 2020, 57(4): 25-28.
GUO Y, LIU R J, SONG Y, et al. Research progress on anti-seismic performance of mortise-tenon joints for timber buildings and their reinforcement and repairing after earthquake[J]. *China Forest Products Industry*, 2020, 57(4): 25-28.
- [20] 侯卫东. 应县木塔保护研究[M]. 北京: 文物出版社, 2016: 199.
- [21] 黄磊, 王雨晨, 韩旭, 等. 应县木塔普拍枋用材方法与残损状况分析 [J]. *木材科学与技术*, 2024, 38(4): 8-19.
HUANG L, WANG Y C, HAN X, et al. Material application method and component damage analysis of the Pu-Pai Fang in Yingxian wooden pagoda[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2024, 38(4): 8-19.

(本文编校 向琴、曹惠敏)