

# 应县木塔倾斜及扭转分析

薛建阳, 浩飞虎

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 应县木塔是辽代建筑的典型代表, 距今已约 960 年. 为了解应县木塔当前的变形状况, 为其修缮和保护提供科学依据, 对应县木塔进行了原位变形测试. 进一步分析了木塔明层及平坐层的整体倾斜和扭转, 其中对木塔的二层、三层进行重点分析. 实测及分析结果表明: 应县木塔的二层明层及平坐层内外槽变形不协调, 外槽变形较严重; 木塔二层明层外槽变形较大的柱子主要分布在西南、正南和东南方向, 二层明层整体向东北方向倾斜. 平坐层外槽变形较大的柱子主要分布在正西、西北和东北方向; 三层明层与二层明层变形趋势基本一致, 三层平坐层变形大于相应的二层, 变形趋势和二层相反; 二层、三层明层方柱与圆柱连接不紧密, 两者变形不统一, 方柱倾斜量普遍大于圆柱; 相对于二层、三层, 四层五层变形较小, 整体向正北和东北方向倾斜; 二层、三层内槽扭转方向不一致, 且两层内槽扭转趋势相反, 而外槽扭转趋势基本一致, 方向均沿逆时针.

**关键词:** 应县木塔; 倾斜; 扭转; 圆柱; 方柱

**中图分类号:** TU366.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)02-0212-07

## Analysis of tilt and twist of the Yingxian Wooden Pagoda

XUE Jianyang, HAO Feihu

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The Yingxian Wooden Pagoda is a typical representative of the architectural style of Liao Dynasty, which is about 960 years ago. In order to solve the current deformation situation of the Yingxian Wooden Pagoda to better repair and protection of wooden pagoda, spot deformation measurement test was made for this county pagoda. Further analysis is made on the overall tilt and twist of the pagoda and the dark floor, and the second floor and the third floor of the wooden tower are also analyzed emphatically. Conclusions are drawn as follows: the deformation of the inner and outer grooves of the second floors and the dark floors of the Yingxian Wooden Pagoda is not coordinated, and the deformation of the outer groove is serious. The columns of the second floor of the timber pagoda mainly distribute in the southwest, the south and the southeast, and the second floor are inclined to the northeast. The large deformation columns in the outer groove of the dark floor are mainly distribute in the west, northwest and northeast. The deformation trend of the third floor and the second floor is basically the same, the deformation of the third floor is more than the corresponding two, the deformation trend is opposite to the second floor; the second and third floor square column is not tightly connected with the circular column, and their deformation is not uniform and the square column is more tilted. Compared with the second and the third floors, the deformation of the fourth floor and the fifth floor is smaller and the whole is tilted to the north and the northeast. The torsional trend of the two or three inner grooves is polarized, and the torsional trend of the second inner grooves is opposite, but the torsional trend of the outer groove is basically the same, and presents the counter clockwise.

**Key words:** The Yingxian Wooden Pagoda; tilt; twist; circular column; square column

应县木塔始建于公元 1056 年, 初名宝宫寺, 亦称佛宫寺释迦塔, 位于应县城内北部偏西. 至今已有九百多年历史, 历经沧桑, 仍巍峨矗立. 木塔外形呈六檐五层, 平面为八角形, 内部有四个平坐层合为九层, 高度达 65.878 m. 是世界上现存的一个仅用木构件相互拉结建造的最高最古老的建筑(如图 1 所示). 应县木塔历史上, 共

经过六次大的维修. 除了金明昌历经四年修理外, 其他各次修理都是修补或妆奁性质, 基本未改动原结构. 木塔分明层和平坐层两大部分, 每层又分内槽和外槽, 二层及以上各明层内外槽除了原有的 32 根圆柱以外, 均有方柱加固, 位于转角、柱头铺作第一跳华拱头下方(五层明层外槽除外). 二层至五层的平坐层均有斜撑枝檠, 和各铺作柱

头枋或后加承重枋, 共同组成三排类似现代“桁架”的结构<sup>[1-4]</sup>.

为了更好地了解和保护应县木塔, 近年来, 专家学者对木塔的研究越来越多. 中国文化遗产研究院侯卫东等<sup>[5]</sup>围绕应县木塔结构试验、结构计算及结构监测等几个方面的工作, 梳理和归纳了应县木塔结构监测与试验分析的研究现状, 发现木塔二层明层倾斜严重, 控制二层明层倾斜变形的进一步发展, 是当前应县木塔修缮加固的关键和重点. 太原理工大学李铁英等<sup>[6]</sup>对应县木塔实体结构进行现场环境振动测试试验, 分析得到木塔各层的不同自振频率下的扭转振型, 指出木塔各层扭转与平动耦合振动导致现在其扭转和平动残损变形显著; 陈志勇等<sup>[7-8]</sup>通过水平低周往复和竖向单调加载试验, 研究了应县木塔柱脚节点原型、梁柱节点和典型斗拱节点模型受力性能. 利用有限元软件 ABAQUS 建立了应县木塔整体结构残损变形现状和完整无残损变形两种精细化有限元模型, 通过模态分析, 得到了应县木塔损伤和无损伤模型的模态参数以及地震响应, 并对木塔的抗震安全进行了评估. 而对于应县木塔目前具体的变形量和扭转数值, 以及变形和扭转趋势, 尚未



图 1 应县木塔  
Fig. 1 Ying County Wooden Pagoda

有学者做详细的研究. 除此之外, 木塔内部方柱与圆柱紧挨, 大多数学者仅对圆柱做了调查研究, 而方柱的情况没有明确的调查资料. 因此, 有必要通过现场勘查和测量, 对木塔现阶段的圆柱和方柱的倾斜和扭转变形做出全面的分析<sup>[9-12]</sup>, 以此来弥补这一研究领域的空缺.

## 1 应县木塔倾斜特征

### 1.1 二层倾斜特征

通过调研, 木塔一层内外槽柱周围有土墙夯筑, 由于其刚度较大, 对柱有明显的支撑作用, 故木柱倾斜较小. 二层平坐层层高较小且有大量的斜撑, 刚度远大于二层明层, 根据实测结果, 木塔二层明层倾斜变形较大.

为准确描述柱子的倾斜情况, 圆柱以柱头和柱根横截面形心的水平投影距离表示圆柱倾斜值, 方柱以柱头和柱根内表面中心的水平投影距离表示方柱倾斜值. 则二层明层外槽方柱最大倾斜值为 578 mm, 明层外槽圆柱最大倾斜值为 583 mm, 平坐层外槽圆柱最大倾斜值为 137 mm, 是明层圆柱最大倾斜值的 23.5%. 与木塔二层明层及平坐层外槽柱倾斜相比, 相应的内槽柱整体倾斜变形较小. 其中, 二层明层内槽方柱最大倾斜值为 338 mm, 圆柱最大倾斜值为 381 mm, 二层平坐层圆柱最大倾斜值为 171 mm, 是相应明层圆柱最大倾斜值的 44.9%. 具体实测数据见表 1、表 2. 通过对比分析二层明层及平坐层的柱子, 可以看出:

(1)外槽柱倾斜值普遍高于内槽柱, 明层中, 内、外槽柱最大差值为 581 mm, 平坐层两者最大差值为 134 mm. 同时, 内槽 N8、N1 和 N2 倾斜值较大, 最大可达到 381 mm. 平坐层相对于明层, 倾斜量较小, 最大为 137 mm, 表明二层明层及平坐层内槽外槽变形不协调, 明层外槽倾斜最严重.

表 1 二层外槽柱子倾斜值  
Tab. 1 Column tilt outer grooves of the second floor /mm

		编号											
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
		298	314	194	147	238	188	197	286	115	220	181	131
方柱	明层	298	314	194	147	238	188	197	286	115	220	181	131
	明层	302	304	239	185	182	253	197	189	54	119	83	15
圆柱	平坐层	25	83	33	22	51	2	10	75	99	19	16	130
		编号											
		W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
		137	94	195	119	139	343	241	212	446	473	578	385
方柱	明层	137	94	195	119	139	343	241	212	446	473	578	385
	明层	22	12	143	44	95	189	170	235	438	529	583	406
圆柱	平坐层	37	57	11	78	73	137	137	77	114	14	41	55

注: 平坐层内外槽柱子均无方柱加固.

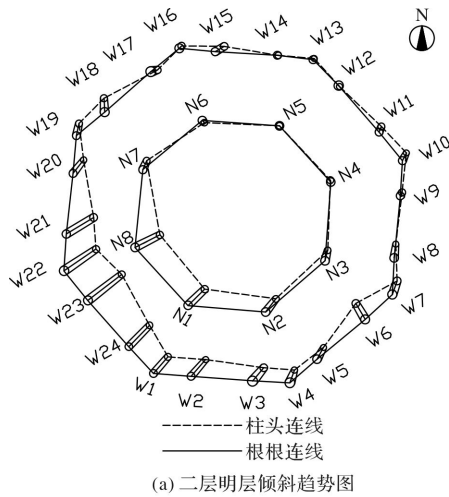
表 2 二层内槽柱子倾斜值

Tab. 2 Column tilt of the second floor inner grooves

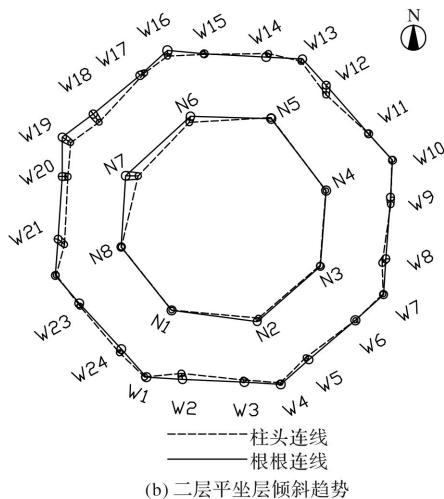
		编号							
		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
方柱	明层	320	204	160	137	92	12	172	338
圆柱	明层	315	227	148	27	2	40	134	381
	平坐层	4	50	12	3	17	86	171	3

(2)明层方柱最大倾斜值为 578 mm, 圆柱最大倾斜值为 583 mm, 二者倾斜量最大差值为 154 mm, 最小差值为 56 mm, 表明二层明层内外槽方柱和圆柱变形基本一致, 方柱倾斜量普遍大于圆柱。

(3)明层外槽倾斜变形较大的柱子主要分布在西南、正南和东南方向, 整体向东偏北方向倾斜。明层变形较大, 而平坐层变形较小, 基本没有倾斜变形。这主要是因为二层平坐层自身刚度很大, 并且处于稳固的一层之上, 因此柱头、柱根基本没有发生侧移, 如图 2 所示。



(a) 二层明层倾斜趋势图



(b) 二层平坐层倾斜趋势

图 2 二层倾斜趋势图

Fig. 2 The tilt trend of the second floor

### 1.2 三层倾斜特征

三层的整体倾斜量仅次于二层, 其中明层外

槽西北角柱及相邻的平柱倾斜量较大, 大于该位置二层柱子的倾斜值。由于平坐层层高较小且内外槽均有大量的径向和环向斜撑, 刚度远远大于明层, 因此, 明层的倾斜远大于平坐层。三层明层外槽方柱最大倾斜值 603 mm, 明层外槽圆柱最大倾斜值 803 mm, 三层平坐层外槽圆柱倾斜量最大值 490 mm, 是明层外槽圆柱最大倾斜值的 61%。具体实测数据见表 3~表 4。

分析可知:

(1)与外槽柱相比, 内槽柱倾斜比较小, 大多在 120~180 mm 之间, 内槽柱 N7 倾斜最大。外槽柱倾斜主要集中在西北, 正西和西南方向, 其中外槽 W20 倾斜量最大。方柱与圆柱倾斜量差异较大, 方柱的倾斜量普遍大于圆柱。

(2)明层和平坐层外槽倾斜变形差别较大, 二者整体倾斜方向不同。明层外槽变形较大的柱子主要分布在西北、正西和西南方向, 整体向东南方向倾斜。平坐层外槽变形较大的柱子主要分布在正东, 东北和东南方向。与此同时, 和二层平坐层相比, 三层平坐层变形较大。这主要是因为三层平坐层柱根与二层柱头连接处刚度较大, 而二层柱头侧移较大, 故增大了三层柱根和柱头的相对位移, 如图 3 所示。

### 1.3 其他层倾斜特征

木塔四层和五层的倾斜量较小, 同二层、三层相比, 内外槽圆柱和方柱的倾斜方向基本一致, 方柱倾斜量较圆柱大。相对于明层, 平坐层变形较小, 实测结果表明:

(1)四层明层外槽最大倾斜值为 292 mm, 五层明层外槽最大倾斜值为 241 mm, 均小于二、三层的最大倾斜值, 方柱的倾斜普遍大于圆柱。

(2)四层和五层倾斜变形无明显差异, 二者整体向东北, 正北方向有轻微倾斜。

## 2 应县木塔整体变形分析

通过实测分析, 发现应县木塔变形较大部位主要集中在二层明层、三层的明层和平坐层, 且二层和三层变形的方位有所不同。二层明层变形主要集中在正西、西南和正南方向, 整体呈现出

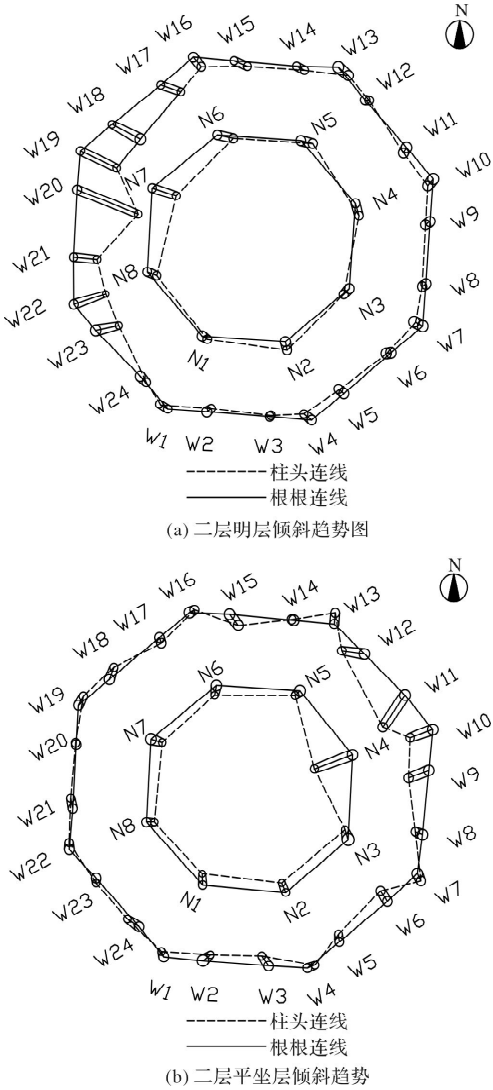


图 3 三层倾斜趋势图

Fig. 3 The tilt trend of the third floor

向东北方向倾倒的趋势, 而三层明层的变形主要集中在正西、西北方向, 整体呈现出向西南方向倾倒的趋势. 三层平坐层介于三层明层和二层明层之间, 变形主要集中在正东、东南和东北方向,

分析其原因:

(1)应县木塔台基处于倾斜状态, 南侧高程略大于北侧高程, 整体向西北和东北方向倾斜. 另外, 从应县木塔地基的地质剖面图<sup>[13]</sup>分析, 应县木塔 24 m 以下整体处在一个水泊环境当中, 东北侧积水时间最长, 地质最松软. 因此, 木塔东北部不均匀沉降是导致木塔整体向东北方向倾斜的一个主要原因.

(2)应县木塔明层和平坐层交替布置, 明层高度大于平坐层. 从构造上讲, 明层内外槽圆柱均有方柱加固, 外槽平柱和角柱的柱头均有乳栌和草乳栌与相应位置的内槽柱柱头连接, 所有柱根均与平坐层叠梁以叉造式连接. 平坐层内外槽均有斜撑交叉布置, 类似现代结构的“桁架”体系, 内槽和外槽柱与柱之间均有叠梁布置, 叠梁高度约 2 m. 除此之外, 平坐层内槽角柱和外槽角柱与相邻的平柱柱底有梁连接, 梁上布置径向斜撑. 因此, 平坐层刚度远大于明层. 三层平坐层位于两个刚度薄弱层之间, 由于受二层柱头变位较大的影响, 其整体变形大于二层平坐层. 由此可见, 木塔平坐层与明层刚度的巨大差异导致木塔应力集中和变形加剧.

(3)木塔动力特性的实测结果也表明, 木塔二阶、三阶弯曲振动会引起木塔二、三层产生较大幅度的振动. 从木塔目前的变形趋势看, 很接近二阶、三阶弯曲振型. 应县木塔自建成以来, 遭受过多次地震的影响, 除此之外, 从应县木塔脉动风的分布特征和风向来看, 很可能风荷载和地震作用的频率与木塔自身频率相一致, 导致木塔出现共振, 由此出现二、三层变形较大的趋势. 如果施加必要的阻尼装置, 改变木塔在弯曲振动下的二、三层的模态, 则可以抑制二、三层变形的加剧.

表 3 三层外槽柱子倾斜值/mm  
Tab. 3 Column tilt of the third floor outer grooves /mm

		编号											
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
方柱	明层	245	35	33	82	52	58	114	42	70	69	81	50
	明层	100	68	17	120	72	49	99	55	68	107	76	50
圆柱	平坐层	71	118	160	100	99	167	101	96	268	308	490	282
		编号											
		W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
方柱	明层	181	104	160	108	303	350	572	603	351	440	267	98
	明层	161	108	174	150	260	390	489	803	288	412	288	105
圆柱	平坐层	137	29	173	71	73	161	128	125	130	85	59	173

注: 平坐层内外槽柱子均无方柱加固

表 4 三层内槽柱子倾斜值  
Tab. 4 Column tilt of the third floor inner grooves

		编号							
		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
方柱	明层	104	164	122	109	181	195	362	158
	明层	75	108	99	155	150	200	309	125
圆柱	平坐层	137	128	130	194	82	121	145	98

3 应县木塔扭转分析

应县木塔平面为不规则八边形,其质量中心和刚度中心无法实际测量,由于二、三层明层变形扭转较大,故以二、三层明层圆柱柱头和其平坐层圆柱柱底切向的相对位移描述其扭转状况,主要分析内外槽角柱的相对扭转.以二层为例,以二层平坐层内外槽柱根连线为其径向方向,水平面内与径向垂直的方向为切向方向,则相对扭转值为二层明层柱头形心和二层平坐层柱根形心的水平投影连线在其切线方向的投影值,规定柱头和柱根相对扭转值沿切向顺时针方向为正,逆时针方向为负.具体表示方法如图 4 所示.

应县木塔二层平坐层内、外槽设径向斜撑,同时,内槽柱间和外槽柱间各设环向斜撑一道,径向和环向斜撑提高了其抵抗变形的能力.明层由于没有径向和环向支撑,且层高较大,刚度较小,相对于平坐层有较大的扭转变形.具体情况如下:

(1)木塔二层内槽扭转变形较大,以内槽柱 N8 和 N4 连线为分界线,两边扭转方向相反,南侧主要沿着顺时针方向旋转,北侧主要沿着逆时针方向旋转.且北侧总体扭转变形较大.三层内槽扭转变形大于外槽,方向与二层基本相反.这主要是因为二、三层整体沿着一个方向倾斜较严重,使得柱子的扭转在切向上的分量方向正好相反.

(2)木塔二层外槽扭转变形较为一致,总体沿逆时针方向旋转,扭转量小于内槽.二层倾斜数据表明,外槽主要是平面内倾斜较严重.三层外槽与二层外槽相比,扭转量较小,总体沿逆时针方向.具体数据见表 5.

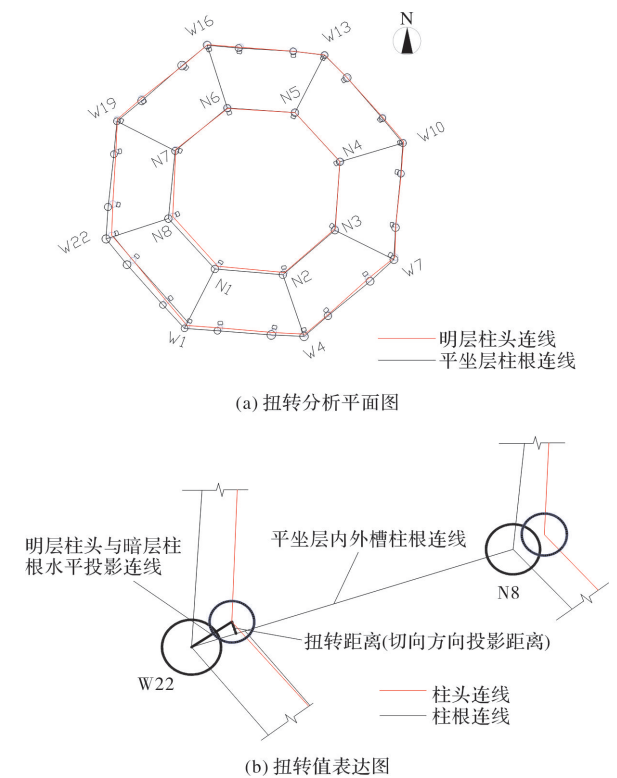


图 4 扭转值分析示意图  
Fig. 4 Torsional analysis

表 5 明层平坐层相对扭转  
Tab. 5 relative rotation of bright floor and dark floor

内槽角柱	二层相对位移	三层相对位移	外槽角柱	二层相对位移	三层相对位移
N1	449	-97	W1	-105	-208
N2	258	-322	W4	52	-186
N3	168	-46	W7	3	-78
N4	515	79	W10	-117	163
N5	-207	174	W13	-164	182
N6	-24	70	W16	-185	-37
N7	-581	-66	W19	-235	-208
N8	230	-132	W22	-300	158

备注: 相对位移指明层柱头与平坐层柱底的连线在切线方向的相对位移,顺时针为正,逆时针为负.

## 4 应县木塔信息化建模及变形状况分析

为了更好地反映应县木塔各层柱子的真实变形,通过建筑信息化模型 BIM (Building Information Modeling) 建立应县木塔三维空间状态下的柱列分布. 应县木塔柱列的三维空间位置均是建立在实测柱子倾斜和变形基础上,反映的是柱子真实的变形状态和空间相对位置. 以二层、三层为例来分析其变形状况,如图 5 所示. 从应县木塔柱列 BIM 模型中可以看出:

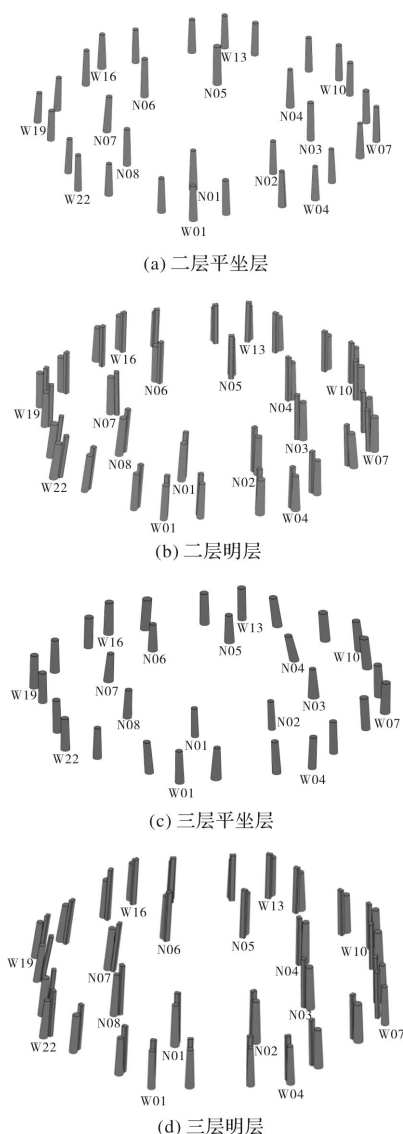


图 5 二、三层柱 BIM 空间分布图

Fig. 5 BIM space distribution of the second and third floor column

明层方柱和圆柱倾斜变形基本一致,由于方柱高于圆柱,故方柱的倾斜量普遍大于圆柱;方柱与圆柱有分离的趋势,两者挤压不紧密,急需加固;平坐层层高较小,刚度较大,变形较大,

主要是因为相邻明层刚度较薄弱,明层与平坐层连接处刚度较大,上层平坐层柱根随下层明层柱头变形增加而侧移增大,从而导致平坐层柱头和柱根相对位移增大,倾斜变形增加;四层、五层的变形较二、三层小,主要是由于二、三层变形导致木塔整体结构向东北和正北方向偏移,四层、五层上部荷载较小,刚度较大,受二层、三层的影响,二者向东北和正北方向略微倾斜.

用 BIM 构建应县木塔模型是以“族”为基础,将应县木塔各层柱划分为方柱、圆柱和明层、平坐层,建立完整、清晰、系统的信息化模型,通过数据库管理,对其倾斜变形做进一步的统计和分析. 一方面可以准确地还原应县木塔本身的形态,这对应县木塔性能的评估起着重要的作用. 另一方面 BIM 本身具有结构分析功能,可以实现结构和建筑的共同设计与分析,真正做到建筑、结构一体化. 因此,建立应县木塔 BIM 模型对其修缮和保护有重要的实用价值.

## 5 结论

通过对应县木塔的变形实测,得到其倾斜和扭转情况:

(1)木塔二层明层及平坐层内外槽变形不协调,其中,二层明层内外槽变形差异较大,最大差值为 581 mm,外槽变形较严重. 三层明层变形与二层明层倾斜变形方向基本相反. 与二层平坐层相比,三层平坐层变形较大. 木塔二、三层明层方柱与圆柱变形差异较大,表明二者连接不紧密,急需加固. 方柱倾斜普遍高于圆柱.

(2)木塔二层明层和平坐层外槽柱的倾斜变形差异较大,其明层外槽变形较大柱主要分布在西南、正南和东南方向,整体向东偏北方向倾斜. 平坐层外槽变形较大柱主要分布在正西,西北和东北方向. 三层明层外槽变形较大柱主要分布在西北、正西和西南方向,整体向东南方向倾斜. 平坐层外槽变形较大柱主要分布在正东,东北和东南方向. 这与木塔二层、三层在二阶频率下的振动形态比较接近.

(3)木塔二层内槽扭转变形较大,以内槽柱 N8 和 N4 连线为分界线,两边扭转变形方向相反,南侧主要沿着顺时针方向扭转,北侧主要沿着逆时针方向扭转,北侧整体扭转变形较大. 木塔二层外槽扭转方向较为一致,其整体沿逆时针方向扭转,扭转值普遍小于内槽. 三层内槽扭转变形大于外槽,扭转变形方向与二层基本相反. 三层外

槽与二层外槽相比,扭转量较小,其整体沿逆时针方向。

## 参考文献 References

- [1] 梁思成. 中国古建筑调查报告 [M]. (下)北京: 生活·读书·新知三联书店, 2012.  
LIANG Sicheng. China ancient building survey report [M]. (Bottom), Beijing: Life, Reading, and New Knowledge Sanlian Bookstore, 2012.
- [2] 李世温, 李庆玲. 应县木塔 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
LI Shiwen, LI Qingling. YING County wooden pagoda [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.
- [3] 侯卫东, 王林安, 永昕群. 应县木塔保护研究 [M]. 北京: 文物出版社, 2016.  
HOU Weidong, WANG Linan, YONG Yiqun. Research on the protection of Yingxian wooden tower [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2016.
- [4] 陈明达. 应县木塔 [M]. 北京: 文物出版社, 2001.  
CHEN Mingda. Ying County Muta [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2001.
- [5] 王林安, 侯卫东, 永昕群. 应县木塔结构监测与试验分析研究综述 [J]. 中国文物科学研究, 2012(3): 62-67.  
WANG Lin'an, HOU Weidong, YONG Yiqun. Summary of monitoring and test analysis of wooden tower structure in Yingxian county [J]. Chinese Cultural Research, 2012(3): 62-67.
- [6] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 应县木塔实体结构的动态特性试验与分析 [J]. 工程力学, 2005, 22(1): 141-146.  
LI T Y, WEI J W, ZHANG S Y, et al. Experiment and analysis of vibration characteristics of Yingxian wooden tower [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 141-146.
- [7] 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.  
CHEN Zhiyong. Study on the mechanical behavior of typical nodes and structures of Yingxian wooden tower [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [8] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 应县木塔精细化结构建模及水平受力性能分析 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 150-158.  
CHEN Zhiyong, ZHU Enchun, PAN Jinglong. Modeling and horizontal stress analysis of fine structure of Ying County Wooden Pagoda [J]. Journal of Building-Structures, 2013, 34(9): 150-158.
- [9] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 高层古建筑木结构——应县木塔现状结构评价 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 51-58.  
LI Tieying, WEI Jianwei, ZHANG Shanyuan, et al. Wood structure of high-rise ancient building—evaluation of present status of wooden tower in Yingxian County [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 51-58.
- [10] 李铁英. 应县木塔现状结构残损要点及机理分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2004.  
Li Tieying. Analysis of the present structural damages and mechanisms of the wooden towers in Yingxian county [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [11] 刘国梁. 佛宫寺释迦塔现状测绘的控制测量 [J]. 北京建筑工程学院学报, 1995, 11(1): 65-70.  
LIU Guoliang. The control survey of the present mapping of Buddha's Monastery in Buddha Temple [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 1995, 11(1): 65-70.
- [12] 金良生. 山西应县佛宫寺释迦塔实测记 [J]. 北京建筑工程学院学报, 1995, 11(1): 60-64.  
JIN Liangsheng. Scientific record of the Shijiata at the Buddha Palace in Yingxian County, Shanxi province [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 1995, 11(1): 60-64.
- [13] 魏剑伟, 李铁英, 张善元, 等. 应县木塔地基工程地质勘测与分析 [J]. 工程地质学报, 2003, 11(1): 70-78.  
WEI Jianwei, LI Tieying, ZHANG Shanyuan, et al. Geological survey and analysis of the foundation of wooden pagoda in yingxian county [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(1): 70-78.

(编辑 沈 波)