

文章编号:1673-2049(2019)01-0032-09

应县木塔结构变形现状与分析

薛建阳,张雨森

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:为了解应县木塔的构件变形和整体变形现状,对其圆柱的柱头和柱脚坐标、阑额和乳栿的挠度、楼板的相对高程进行了现场测量和分析,得到了圆柱倾斜水平投影值和柱脚高程、内外槽高差、阑额和乳栿的挠曲程度和整体变形等几何参数和力学特征。结果表明:在构件变形层面,应县木塔二层明层和三层的圆柱倾斜最严重,四层平坐层和五层平坐层外槽南侧、西南侧和北侧的圆柱倾斜水平投影值较大,木塔向东北向的倾斜仍在加剧;柱脚呈现出南高北低的规律,内、外槽高差从二层明层往上依次减小;除四层明层和五层明层外,其他各层均有25%~35%的阑额挠度过大,需要进行替换或加固,乳栿挠度相对较小;木塔的整体变形在东西向和南北向存在显著差异,从二层平坐层至五层明层,东西向各层中心偏移值先增大后减小,南北向各层中心偏移值逐层递增;二层明层到三层明层外槽柱向东的中心偏移量占木塔在该方向整体倾斜偏移量的75%,二层明层外槽柱向北的层位移占木塔在该方向整体倾斜偏移量的42%,各层中心偏移方向也存在差异。

关键词:应县木塔;圆柱变形;阑额挠度;乳栿挠度;整体变形

中图分类号:TU366.2

文献标志码:A

Present Structural Deformations and Analysis of Yingxian Wooden Pagoda

XUE Jian-yang, ZHANG Yu-sen

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to acquire the present deformations of components and overall Yingxian Wooden Pagoda, the coordinate values of heads and bases of columns, deflections of architraves and beam ties and relative elevations of floors were measured, and the geometric parameters and mechanical characteristics including horizontal projection values of the oblique columns, elevations of column bases, altitude difference between the inside and outside, distributions of architraves' and beam ties' deflections and overall deformation were obtained. The results show that as for component deformations, the timber columns' inclinations in the second bright floor and the third floor are the most severe in the Yingxian Wooden Pagoda, and the external columns' inclinations on the south, southwest, and north sides in the fourth dark floor and the fifth dark floor are more serious than other corresponding columns in all dark floors. The tower's inclination to the northeast is still aggravating. Column bases are higher in the south and lower in the north. Altitude difference between the inside and outside becomes larger from the second bright floor. Except for the fourth bright floor and fifth bright floor, 25%-35% of architraves in each floor have large deflections, which need reinforcement, while beam ties' deflections are

收稿日期:2018-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51678478);“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAK01B03-02);

陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW23-01)

作者简介:薛建阳(1970-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:jianyang_xue@163.com。

small. There is a significant discrepancy in the overall deformation of the wooden pagoda between the east-west and the north-south directions. From the second dark floor to the fifth bright floor, the center deviation values in the east-west direction firstly increase and then decrease, while those in the north-south direction rise floor by floor. The eastward center deviation value of the external columns from the second bright floor to the third bright floor accounts for 75% of the overall deviation value of the tower in this direction, and the northward value of the second bright floor is 42% in the direction. There are also different center azimuth angles of each floor.

Key words: Yingxian Wooden Pagoda; columns' deformation; architraves' deflection; beam ties' deflection; overall deformation

0 引 言

应县木塔建于辽代清宁二年(公元 1056 年),是世界上现存最古老的、最高的木结构佛塔,木塔高 65.878 m(自木塔南侧地面),共 5 层 6 檐,相邻明层之间为平坐层,实际结构层数为 9 层,如图 1 所示。每层共 32 根圆柱,其中内槽柱 8 根,外槽柱 24 根。内槽柱或外槽柱通过阑额和普拍枋相连,内、外槽柱之间由乳栌相连,平坐层布置环向和径向的斜撑形成空间结构^[1],与明层相比具有较大刚度。19 世纪 30 年代,木塔二层明层及以上的夹泥墙被拆除换成格子木门和窗,仅剩一层及二层平坐层墙体,木塔刚度受到影响^[2],塔身的倾斜不断加剧。

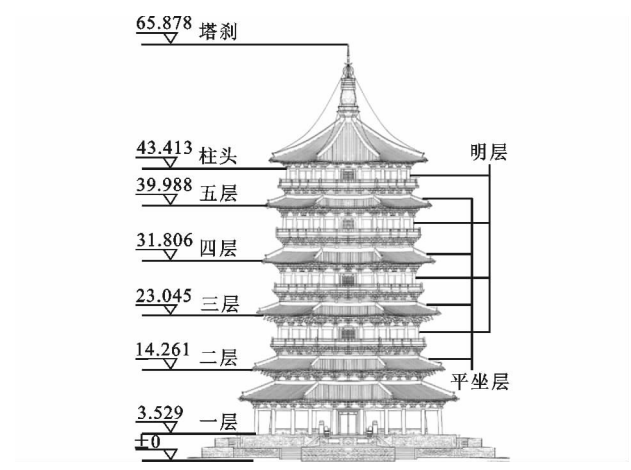


图 1 楼层分布与高度(单位:m)

Fig. 1 Floor Distributions and Heights (Unit: m)

陈明达^[3]综合整理了 1933 年梁思成和刘敦桢等学者残余的图稿和 1962 年木塔测量结果,对应县木塔的修建历史、原状、建筑设计及构图、结构 4 项内容做了初步研究。魏德敏等^[4]根据应县木塔残损实测和变形监测数据,分析了残损发展的主要原因和特征,提出了抗震设防水平的确定原则和耐久年代的判定准则。李铁英等^[5-10]通过模型试验、现场

环境振动测试试验、木塔场地勘测等方法分析了木塔在地震作用下的位移,评估了其抗震能力。中国文化遗产研究院于 2011 年对应县木塔底部 3 层的构件变形进行了测绘,对比了 1933 年和 2011 年的测绘结果,对其残损状态进行了勘察评估,发现二、三层的圆柱倾斜较上部严重,且变形仍在不断发展。除上述试验和现场监测外,有限元分析大量应用于应县木塔的研究中^[11-17]。在木塔为维护研究方面,袁建力等^[18-21]基于试验提出了一种木塔纠偏方法;建筑信息模型(BIM)^[22]也被用于记录木塔的全构件信息。以上研究中的现场勘测和分析或年代较远,不能反映木塔现状,或主要集中在二、三层圆柱的倾斜,对四、五层圆柱倾斜和其他变形分析较少。为了更全面地了解应县木塔的最新变形,对圆柱、阑额、乳栌和木塔整体的变形进行了实地测量和分析。

本次主要测量的构件如图 2 所示,包括内外槽圆柱[图 2(a)]、阑额[图 2(b)]和乳栌[图 2(c)]。在现场测量的基础上,分析了圆柱的倾斜水平投影值和柱脚高程、内外槽高差、阑额和乳栌的挠度和木塔整体变形现状,进而为木塔加固维护提供参考。

1 圆柱变形及分析

圆柱是应县木塔的竖向主要承重构件,其倾斜和沉降对木塔的抗震性能有重要影响。自 1933 年以来,已经有多家科研院所对应县木塔圆柱的变形进行测量,将本次测量的圆柱变形与文献[1]的相关数据进行对比,分析圆柱变形的发展。

1.1 圆柱的倾斜水平投影值

圆柱的倾斜水平投影值为柱头圆心相对于柱脚圆心的水平偏移。柱头为圆柱顶端,明层圆柱柱脚位于圆柱与楼板相交处,平坐层圆柱柱脚为圆柱底端,如图 3 所示。通过现场测量柱头和柱脚表面点坐标,计算其圆心坐标后得到木塔各层柱的倾斜水平投影值,如图 4 所示。

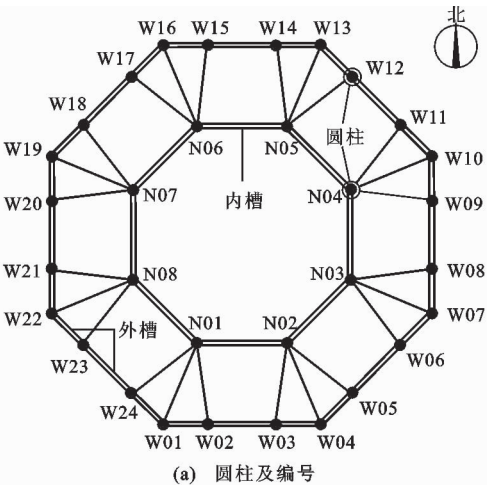


图 2 木塔构件示意图

Fig. 2 Diagrams of Components of Wooden Pagoda

测量结果表明:

(1)平坐层[图 4(a),(b)]:大部分平坐层圆柱的倾斜水平投影值在 250 mm 之内。二层圆柱的倾斜水平投影值相对其他层小,主要是由于木塔一层外槽和内槽分别有 1 圈夹泥墙,夹泥墙对该层的圆柱有嵌固作用,增大了该层刚度;三层外槽东侧和东北侧圆柱的倾斜值较大,达到其他圆柱的 2 倍,个别圆柱倾斜水平投影值已经超过圆柱半径;四层和五层外槽南侧、西南侧和北侧圆柱的倾斜水平投影值相对二层和三层较大,其中五层圆柱的倾斜最为显著,可能是因为在木塔的整体倾斜方向上,重力二阶效应的影响逐层累积,对高层圆柱的影响更大。四、五层内槽圆柱的倾斜值较三层小。

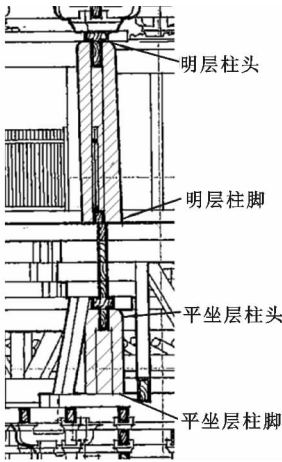


图 3 圆柱测点示意图

Fig. 3 Diagram of Timber Columns' Measuring Points

(2)明层[图 4(c),(d)]:二、三层圆柱的倾斜比相应平坐层严重。二层的西、西南、南侧和三层西、西南侧圆柱的倾斜值较大,这 2 层各有 5 根或 6 根圆柱倾斜水平投影值超过圆柱半径,贺俊筱等^[23]根据试验和模拟的分析结果认为当柱头位移超过 1/2 柱径时,木柱不再具有抗侧能力,所以认为这几根柱子需要纠偏;四层和五层的圆柱倾斜值相对其他层较小,五层外槽南侧、东侧和四层外槽东北侧圆柱倾斜值虽然不及半径,但是其数值仅次于二层,个别超过二层,除上文提到的重力二阶效应影响外,在水平风荷载或地震作用下,一定范围内较小的上部荷载使五层圆柱的抗侧能力较弱。

将本文测量数据与文献[1]的二层和三层数据进行比较,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出:

(1)平坐层[图 5(a),(b)]:二层的测量结果相差不大,部分圆柱倾斜值略有增加;外槽 W12 圆柱的倾斜水平投影值有较大发展,达到 130 mm;内槽圆柱的倾斜水平投影值稍小于文献[1]的数据;三层圆柱的倾斜水平投影值增加幅值较大,特别是外槽 W09~W11 圆柱,平均增加幅值超过圆柱半径。

(2)明层[图 5(c),(d)]:二层的测量结果差异较小;二层外槽西南侧(W21~W24)圆柱的倾斜水平投影值有所增加,东北侧(W12~W14)圆柱的倾斜值略减小;内槽的圆柱倾斜投影值稍小于文献[1]的数据,减小幅度不大;三层外槽西侧(W19,W20)和西南侧(W22,W23)圆柱、内槽南侧(N02)圆柱的倾斜水平投影值增加幅度大于其他圆柱。

结合二层明层、三层平坐层和三层明层圆柱的倾斜水平投影值的变化趋势,可以看出木塔向东北向的倾斜仍在加剧。

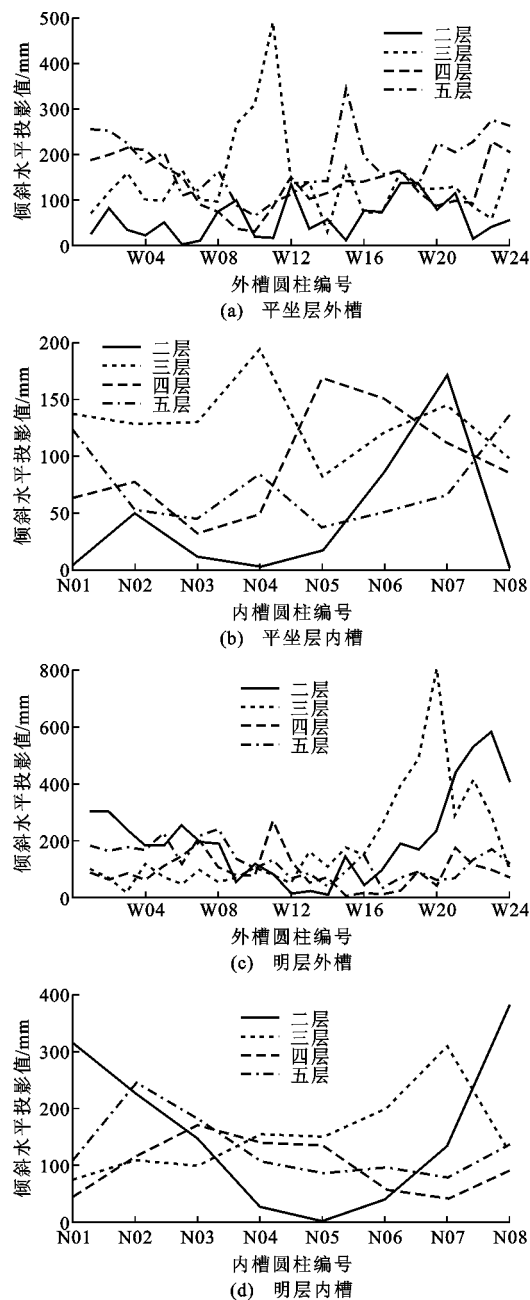


图 4 圆柱倾斜水平投影值

Fig. 4 Horizontal Projection Values of Oblique Columns

1.2 圆柱的柱脚高程

圆柱的柱脚高程主要受 3 个因素影响:地基的不均匀沉降、圆柱自身的倾斜和水平构件横纹受压变形^[24],柱脚高程的差异是三者综合作用的结果,可以反映木塔的竖向变形。

以木塔周围埋设的测量控制点所在平面为假定零水准面,测量高程均为相对于该点的高程,以二、三、五层明层为代表,依据各层柱脚的空间坐标绘制其相对高程图,见图 6,其中 X, Y 为圆柱柱脚圆心相对于测量控制点在水平面内的相对横、纵坐标, X, Y 轴分别对应东西向和南北向。圆柱柱脚圆心

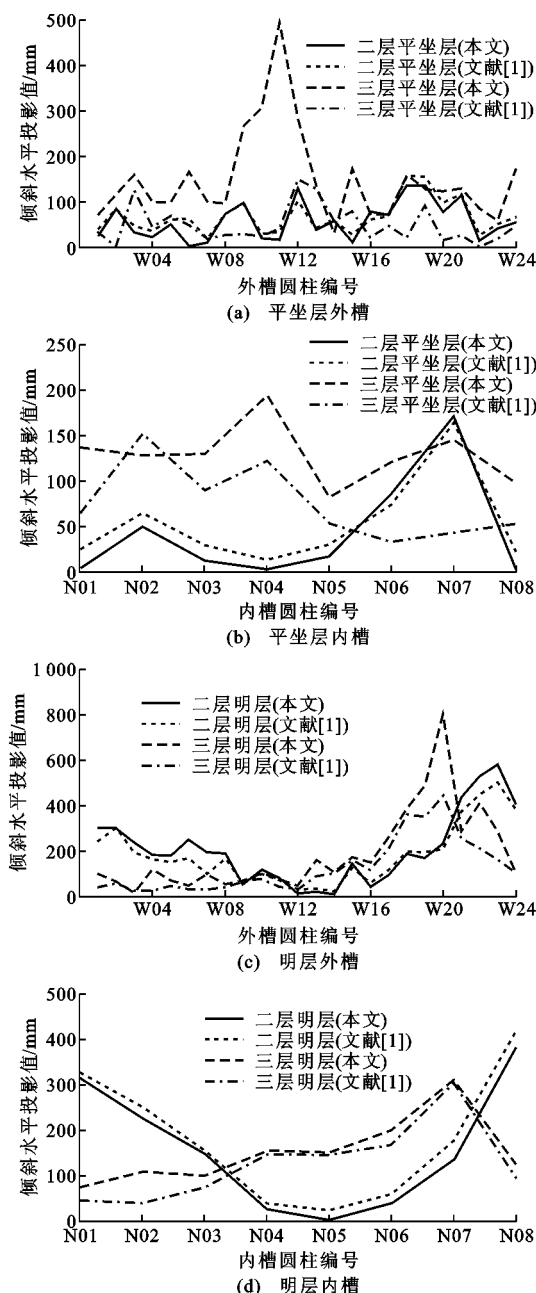


图 5 测量结果对比

Fig. 5 Comparisons of Measurement Results

在 OYZ 平面内的投影为各层柱脚的相对高程。

二层明层外槽[图 6(a)]西北和东北侧圆柱的柱脚下沉严重,可能是由于二层平坐层外槽西北侧圆柱和东北侧 W12 圆柱的倾斜水平投影值较大,平坐层相应位置圆柱的倾斜会引起上部明层圆柱的竖向沉降。外槽圆柱的柱脚高程呈现南高北低的变化规律,与木塔地基的沉降趋势一致。二层明层内槽[图 6(b)]圆柱柱脚除 N05 相对较高外,其他柱脚高程相差不多。

三层明层外槽[图 6(c)]圆柱的柱脚高程起伏变化较大, W19 圆柱柱脚相对周围较高,内、外槽东

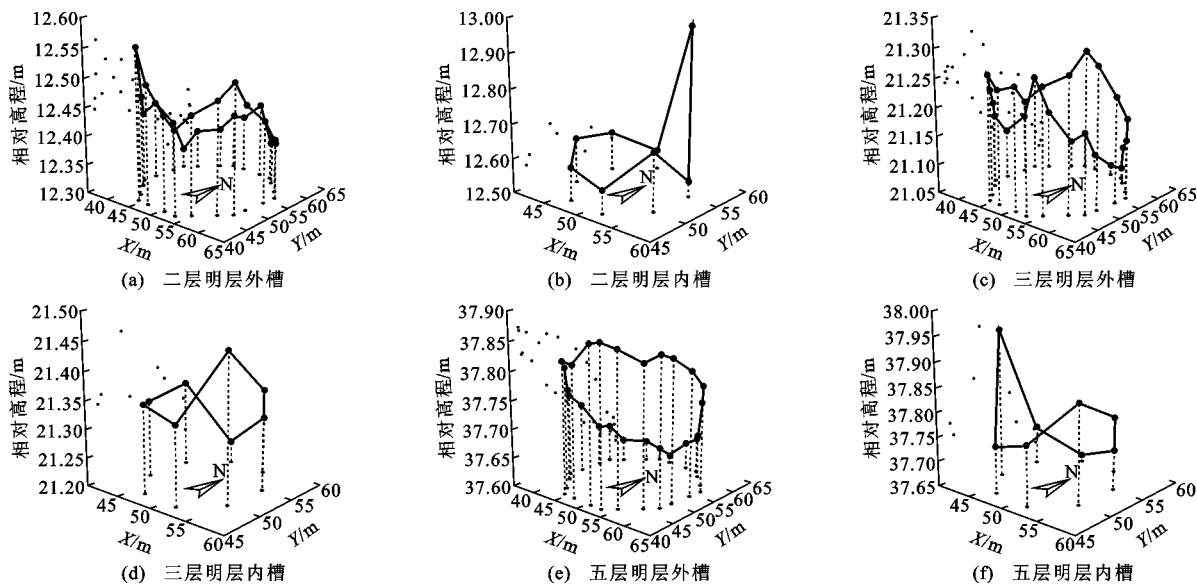


图 6 柱脚相对高程

Fig. 6 Relative Elevations of Column Bases

南侧柱[图 6(d)]圆柱柱脚相对较高,同样呈现南高北低的趋势。

五层明层外槽[图 6(e)]圆柱的柱脚均匀地呈现南高北低的变化规律。内槽[图 6(f)]圆柱柱脚除 N08 相对较高外,其他柱脚高程相差不多。

各层内、外槽柱脚高程的最大高差见表 1。除二层明层内槽外,其他各层内、外槽圆柱最大高差在 300 mm 以内,且最大高程和最小高程的圆柱分布同样符合南高北低的趋势。

表 1 各层最大高差

Tab. 1 Maximum Altitude Difference of Each Floor

楼层	位置	柱脚最大高程		柱脚最小高程		最大高差/ mm
		柱号	高程/m	柱号	高程/m	
二层明层	外槽	W01	12.559	W19	12.335	224
	内槽	N05	12.957	N04	12.546	411
三层明层	外槽	W07	17.502	W14	17.253	249
	内槽	N03	18.200	N05	18.024	176
五层明层	外槽	W04	37.870	W15	37.613	257
	内槽	N08	37.953	N06	37.665	288

总体上,除二层明层内槽高程无明显规律外,各层柱脚均存在南高北低的变化趋势,而木塔总体上向东北倾斜,该趋势与木塔的整体倾斜方向一致。各层外槽圆柱柱脚高程变化趋势明显,内槽圆柱柱脚高程差异相对较大。

1.3 内、外槽高差

木塔内、外槽楼板设置高差的目的是防止雨水倒灌入内槽。本次测量的明层内、外槽高程以圆柱柱脚高程平均值表示,如表 2 所示。

表 2 内、外槽高差

Tab. 2 Altitude Difference Between Inside and Outside Grooves

楼层	外槽柱脚高程/m	内槽柱脚高程/m	高差/mm
二层明层	12.434	12.642	208
三层明层	21.188	21.343	155
四层明层	29.926	29.980	54
五层明层	37.749	37.775	27

各明层内槽柱脚高程高于外槽柱脚高程,木塔各层内、外槽高差从二层明层往上依次减小。二层明层内、外槽高差最大,可能是因为二层平坐层内槽圆柱的倾斜程度较外槽小,使二层明层内槽圆柱的柱脚受下层圆柱倾斜影响小;其次,一层和二层平坐层的铺作层总高度较大,构件大部分为横纹受压,木材横纹刚度较小,竖向位移较大。三层明层有较大的高差,可能是由二层明层的高差传递和二层明层、三层平坐层的圆柱倾斜引起的。

2 阑额、乳栿挠度及分析

阑额和乳栿是应县木塔的水平向主要承重构件,其挠度是判断残损程度的重要指标。参考 Fag-giano 等^[25-26]对那不勒斯王宫的木桁架进行无损检测的方法,采用全站仪测量阑额和乳栿挠度,并对其进行分析。

2.1 阑额、乳栿挠曲程度划分

应县木塔的水平向承重构件主要有副阶、明层和平坐层的阑额和明层的乳栿。副阶有 24 根阑额,明层和平坐层各层有 32 根阑额,明层各层有 24 根

乳枋。根据《木结构设计标准》(GB 50005—2017)^[27], $L/150$ 为极限挠度(L 为阑额和乳枋的计算跨度,一般取支座间净距), $L/250$ 为正常使用极限状态的挠度限值。从而定义挠曲程度为:严重挠曲,阑额和乳枋挠度值大于 $L/150$,需要进行替换;轻微挠曲,挠度值在 $L/250 \sim L/150$ 之间,需要进行加固;正常工作,挠度值小于 $L/250$,不需要维护。

2.2 阑额、乳枋挠曲程度分布

采用上述挠曲程度分类标准,分别统计阑额和乳枋各挠曲程度的构件比例,如图 7 所示。

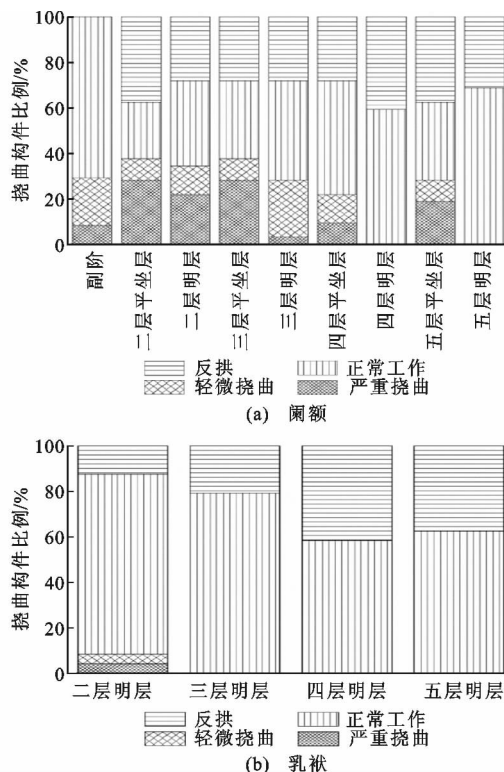


图 7 挠曲程度分布

Fig. 7 Distributions of Deflections

由图 7 可以看出:

(1)严重挠曲,副阶仅有 8.3% 的阑额为严重挠曲。二层平坐层、明层和三层平坐层、明层严重挠曲的阑额和乳枋比例比上部楼层大,同一楼层的平坐层严重挠曲比例比明层大。二层平坐层和三层平坐层严重挠曲的阑额最多,达到该层所有阑额的 28%,即近三分之一的阑额需进行替换。严重挠曲的乳枋比例较小。

(2)轻微挠曲,其比例比严重挠曲的小,副阶和三层明层阑额轻微挠曲的比例较大,超过 20%。除四层和五层明层外,其他楼层的轻微挠曲比例均在 10% 左右。乳枋轻微挠曲的比例较小。

(3)正常工作,四层明层和五层明层的阑额和乳

枋均处于正常工作状态。其他各层正常工作的阑额占 63%~78% (包含反拱),乳枋大部分处于正常工作状态。

(4)除副阶的阑额外,13%~42% 的阑额和乳枋具有反拱,反拱值在 $L/2\ 000 \sim L/150$ 之间。二、三层中具有反拱的阑额和乳枋比例要略小于四、五层,这主要是由于木塔尺寸逐层收缩,下部楼层阑额和乳枋的跨度较大,反拱值在荷载作用下逐渐减小;另外,根据现场调查,二、三层阑额和乳枋的开裂和糟朽情况也较上部楼层严重,有效受力面积减小。

总体上,从副阶到三层明层有约 35% 的阑额需要进行替换或加固,上部楼层有约 25% 的阑额需要进行替换或加固,乳枋挠曲程度较小,这主要是因为下串(位于乳枋上方的梁类构件)以集中力形式作用在乳枋的支座(枋拱)附近,部分竖向力通过枋拱传至圆柱,乳枋承受荷载较小,所以挠度较小;内、外槽阑额跨中有补间铺作或普拍枋,将上部荷载以集中力或均布力形式作用在跨中,所以挠度较大。

3 整体变形及分析

3.1 水平中心偏移值

以木塔各层圆柱柱头和柱脚圆心形成的多边形形心为各层水平中心,其偏移可以反映木塔的整体变形。以本层柱头中心相对于柱脚中心的偏移值为层位移,层位移可以反映木塔的层间变形。现分别以向东和向北为正方向,将各层柱头和柱脚水平中心相对于副阶柱脚水平中心的偏移在相应高度进行投影,并连接各层柱头和柱脚中心的投影点来表示层位移,得到如图 8 所示的各层中心偏移值。由图 8 可以看出,木塔整体上向东北倾斜,但是各层倾斜情况不相同。

(1)部分相邻层下层柱头和上层柱脚的位置存在较大偏差,可能是由于相邻层的柱头和柱脚之间的铺作层发挥耗能减震作用,出现了较大变形。

(2)从总体变形趋势来看,二层明层沿东西向和南北向均发生较大的层位移,三层平坐层在东西向具有较大的层位移,其他各层在 2 个方向的层位移均为 50 mm 左右或更小。从二层平坐层到五层明层,东西向各层中心偏移值先增大后减小,在三层明层外槽柱头处达到峰值 351 mm,各内槽的中心偏移相对外槽小;南北向各层中心偏移值逐层递增,在五层明层外槽柱头处达到峰值 427 mm。从偏移方向来看,木塔整体向北的倾斜程度比向东严重,与各层柱脚高程南高北低的趋势相协调。木塔中心最大

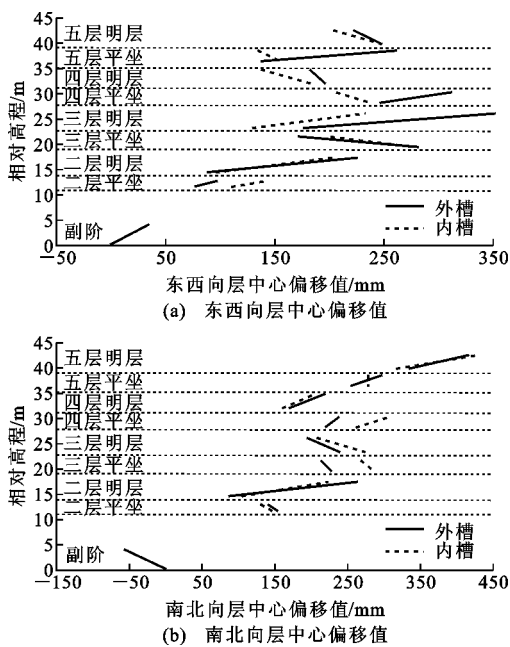


图 8 各层中心偏移值

Fig. 8 Center Deviation Values of Each Floor

偏移值在五层明层外槽柱头,其值为 473 mm。木塔高 65.878 m,整体结构倾斜角已达到 1/139 rad;

(3)沿东西向,副阶、二层平坐层和明层均向东偏移。二层明层的层位移突然增大,这可能是由于木塔的一层和二层平坐层均具有较大刚度,二层明

层的圆柱架残损情况相对严重,刚度发生突变,在风荷载或地震作用下,其层位移大于前两者。三层平坐层和明层沿东西向均有较大的层位移。木塔的变形集中在二层明层到三层明层,其外槽圆柱向东的偏移量占到木塔在该方向整体倾斜偏移量的 75%。四层和五层平坐层内、外槽中心偏移方向不一致,可能是由内、外槽圆柱抗侧刚度的差异导致的。

(4)沿南北向,二层明层和五层明层具有较大的层位移,其他各层中心偏移值均为 50 mm 左右或更小。二层明层外槽圆柱向北的层位移占木塔在该方向整体倾斜偏移量的 42%。

3.2 水平中心偏移方向

各层水平中心的偏移不仅数值不同,偏移方向也存在差异。表 3 列出了各层中心相对于相邻下层中心的坐标方位角,如副阶柱头中心相对于柱脚中心的坐标方位角为 149°。结合图 8 的中心偏移值可以看出:二层平坐层和明层中心大致沿北偏东 50°方向发生 346 mm 的偏移,占到整体偏移的 73%。三层平坐层到五层平坐层的中心偏移主要发生在东西向,在南北向变化较小,且偏移相互抵消,四层明层柱头与二层明层柱头的水平中心相距较小。五层明层主要发生向北的偏移,柱头中心偏移值达到峰值 473 mm。

表 3 各层中心坐标方位角

Tab. 3 Center Azimuth Angles of Each Floor

圆柱位置	副阶中心坐标方位角/(°)	二层中心坐标方位角/(°)		三层中心坐标方位角/(°)		四层中心坐标方位角/(°)		五层中心坐标方位角/(°)	
		平坐层	明层	平坐层	明层	平坐层	明层	平坐层	明层
柱头	149	121	38	263	104	74	343	71	343
柱脚		11	190	123	9	283	239	309	339

从木塔整体变形来看,木塔各层倾斜情况变化不均匀,以二层明层至三层明层倾斜最为严重,需要采取加固维护措施,以防止特殊情况下木塔在这些薄弱层发生破坏。

4 结 语

(1)二层明层和三层明层圆柱的倾斜比平坐层严重,其中部分圆柱失去抗侧能力;四层平坐层和五层平坐层外槽南侧、西南侧和北侧的部分圆柱倾斜水平投影值较大。木塔向东北向的倾斜仍在加剧。

(2)除二层明层内槽圆柱的柱脚高程差异较大外,各层柱脚均存在南高北低的变化规律,与木塔的地基沉降和整体倾斜方向的规律相协调。各层内、外槽高差从二层明层往上依次减小。

(3)四层明层和五层明层的阑额和乳栿均处于正

常工作状态。阑额比乳栿挠曲严重,除上述 2 层外,各层均有 25%~35%的阑额需要进行替换或加固。

(4)从二层平坐层到五层明层,东西向各层中心偏移值先增大后减小,南北向各层中心偏移值逐层递增。二层明层到三层明层外槽圆柱向东的中心偏移量占木塔在该方向整体倾斜偏移量的 75%,二层明层外槽圆柱向北的层位移占木塔在该方向整体倾斜偏移量的 42%。

参考文献:

References:

[1] 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 Wei-dong,WANG Lin-an,YONG Xin-qun. Research on the Protection of Yingxian Wooden Pagoda [M]. Beijing:Cultural Relics Press,2016.

- [2] 梁思成. 梁思成全集(第十卷)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
LIANG Si-cheng. The Complete Works of Liang Si-cheng (10th Volumes)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007.
- [3] 陈明达. 应县木塔[M]. 北京:文物出版社,1966.
CHEN Ming-da. Yingxian Wooden Tower[M]. Beijing: Cultural Relics Press,1966.
- [4] 魏德敏,李世温. 应县木塔残损特征的分析研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2002,30(11):119-121.
WEI De-min, LI Shi-wen. An Investigation into the Damage Characteristics of the Wooden Pagoda in Yingxian County[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2002,30(11):119-121.
- [5] 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 Tie-ying, WEI Jian-wei, ZHANG Shan-yuan, et al. Appraisal on the Structure of the Yingxian Wooden Tower[J]. China Civil Engineering Journal,2005,38(2):51-58.
- [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 Tie-ying, WEI Jian-wei, ZHANG Shan-yuan, et al. Experiment and Analysis of Vibration Characteristics of Yingxian Wooden Tower[J]. Engineering Mechanics,2005,22(1):141-146.
- [7] 李铁英,张善元,李世温. 古木塔场地抗震性能评价及地震参数选择[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):660-662.
LI Tie-ying, ZHANG Shan-yuan, LI Shi-wen. Estimation of Aseismatic Property and Selection of Seismic Parameter for Site of an Old Wooden Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(5):660-662.
- [8] 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 Jian-wei, LI Tie-ying, ZHANG Shan-yuan, et al. Engineering-geological Surveying and Analysis of Yingxian Wooden Tower Foundation[J]. Journal of Engineering Geology,2003,11(1):70-78.
- [9] 李铁英,魏剑伟,张善元,等. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价[J]. 建筑结构学报,2004,25(2):91-98.
LI Tie-ying, WEI Jian-wei, ZHANG Shan-yuan, et al. Double-parameter Seismic Damage Criterion on Wooden Structure and Seismic Response Appraisalment on Yingxian Wooden Tower[J]. Journal of Building Structures,2004,25(2):91-98.
- [10] 李铁英,秦慧敏. 应县木塔现状结构残损分析及修缮探讨[J]. 工程力学,2005,22(增):199-212.
LI Tie-ying, QIN Hui-min. Structural Analysis and Repair of Yingxian Wooden Tower[J]. Engineering Mechanics,2005,22(S):199-212.
- [11] 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 Zhi-yong, ZHU En-chun, PAN Jing-long. Lateral Structural Performance of Yingxian Wood Pagoda Based on Refined FE Models[J]. Journal of Building Structures,2013,34(9):150-158.
- [12] 陈志勇,陆文忠,祝恩淳,等. 应县木塔斗拱竖向受力性能精细化有限元模拟[J]. 科学技术与工程,2012,12(4):819-824.
CHEN Zhi-yong, LU Wen-zhong, ZHU En-chun, et al. Structural Performance of Dougong Brackets of Yingxian Wood Pagoda Under Vertical Load — Refined Finite Modelling [J]. Science Technology and Engineering,2012,12(4):819-824.
- [13] 杜雷鸣,李海旺,薛飞,等. 应县木塔抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2010,43(增1):363-370.
DU Lei-ming, LI Hai-wang, XUE Fei, et al. The Study of Seismic Behaviors of Yingxian Wooden Pagoda[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(S1):363-370.
- [14] 陈平,李良君,陈厚飞,等. 应县木塔二层明层有限元分析及纠偏方案探讨[J]. 建筑结构,2011,41(增):1490-1493.
CHEN Ping, LI Liang-jun, CHEN Hou-fei, et al. Finite Element Analysis and Correcting Program of Yingxian Wooden Tower's Second Floor[J]. Building Structure,2011,41(S):1490-1493.
- [15] 常婧雅. 应县木塔有限元模拟[D]. 北京:北京工业大学,2009.
CHANG Jing-ya. Yingxian Wooden Tower Finite Element Analysis [D]. Beijing: Beijing University of Technology,2009.
- [16] 王毅欣. 古建筑木塔结构线弹性有限元分析[D]. 长沙:湖南大学,2013.
WANG Yi-xin. Linear Elastic Finite Element Analysis of Ancient Wooden Pagoda Structure[D]. Changsha: Hunan University,2013.
- [17] 施颖,张晨君,陈喆. 斗拱梁单元模型数值分

- 析——以山西应县木塔为例[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(3): 295-301.
- SHI Ying, ZHANG Chen-jun, CHEN Zhe. Simulation Analysis Based on Dougong Beam Element Model: A Case Analysis of Yingxian's Wood Tower in Shanxi [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2017, 32(3): 295-301.
- [18] 袁建力, 陈 韦, 王 珏, 等. 应县木塔斗拱模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 66-72.
- YUAN Jian-li, CHEN Wei, WANG Jue, et al. Experimental Research on Bracket Set Models of Yingxian Timber Pagoda [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 66-72.
- [19] 方应财, 袁建力, 杨 韵. 应县木塔顶-拉复位工艺模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 124-130.
- FANG Ying-cai, YUAN Jian-li, YANG Yun. Model Experiment Study on Jacking-tensioning Reset Technology for the Yingxian Timber Pagoda [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 124-130.
- [20] 王 珏. 应县木塔扭、倾变形张拉复位的数字化模拟和安全性评价[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- WANG Jue. The Numerical Simulation and Security Appraisal of Tensioning-replacement Method for Torsional and Inclined Deformation of Yingxian Wooden Tower [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [21] 彭胜男. 应县木塔的纠偏方案及结构性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- PENG Sheng-nan. Research on the Offsetting Correction Scheme and Structural Performance of Ying-Xian Timber Pagoda [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [22] 陈庆军, 王永琦, 汪 洋, 等. 基于 Revit 及 Revit API 的应县木塔建模研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2017, 49(3): 369-374, 381.
- CHEN Qing-Jun, WANG Yong-qi, WANG Yang, et al. Research on the Modeling of Yingxian Wooden Tower Based on Revit and Revit API [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2017, 49(3): 369-374, 381.
- [23] 贺俊筱, 王 娟, 杨庆山. 考虑高径比影响的木结构柱抗侧能力试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 27-35.
- HE Jun-xiao, WANG Juan, YANG Qing-shan. Experimental Study on Lateral Resistance Capacity of Column in Traditional Timber Structures Considering Effects of Height-diameter Ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 27-35.
- [24] 王林安, 樊承谋, 潘景龙, 等. 应县木塔结构体系薄弱部位及其加固方法探讨[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2006.
- WANG Lin-an, FAN Cheng-mou, PAN Jing-long, et al. Exploration and Discussion on Vulnerable Parts and Reinforcement Methods of Yingxian Wooden Pagoda Structural System [R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2006.
- [25] FAGGIANO B, GRIPPA M R, MAZZOLANI F M. The Royal Palace of Naples: Diagnosis, Assessment and Structural Restoration of Complex Roofing Timber Structures [J]. Advanced Materials Research, 2013, 778: 831-839.
- [26] FAGGIANO B, ANNA M, MAZZOLAN F M. The Diplomatic Hall of the Royal Palace of Naples: Structural Characterization of the Timber Roof by in Situ ND Investigations [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 1005-1016.
- [27] GB 50005—2017, 木结构设计标准[S].
- GB 50005—2017, Standard for Design of Timber Structures[S].