

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.003

《营造法式》构造的力学意义研究

周乾^{1,2}, 杨娜³

(1.大同大学 历史与旅游文化学院, 山西 大同 037009; 2.故宫博物院, 北京 100009;
3.北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:为探讨《营造法式》一书对我国古建筑保护的影响,采用理论分析方法,研究了《营造法式》规定的基础、柱、梁、铺作、屋顶等构造的力学意义。着重分析了上述构造几何特征、营造作法对古建筑抗震性能及静力稳定性的有利影响,探讨了古建筑木结构的力学机理。结果表明:《营造法式》规定的基础分层作法及筏基、桩基的采用有利于避免古建整体的不均匀沉降;柱底平摆浮搁可产生滑移减震效果;柱身侧角可提高结构整体稳定性;榫卯节点及铺作各构件间的摩擦和挤压可耗散部分地震能量;梁架低矮,可满足地震作用下的抗滑移及倾覆要求;屋顶厚重,可增强木构架的稳定性,减小结构受到的地震作用。

关键词:营造法式;木结构;古建筑;抗震性能;稳定性

中图分类号: TU503

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0011-08

Mechanical Significance of Ying - Tsao - Fa - Shih

ZHOU Qian^{1,2}, YANG Na³

(1. School of Cultural of History and Tourism, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China;
2. Palace Museum, Beijing 100009, China;
3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Ying - Tsao - Fa - Shih is a book about building codes finished by the government of Song dynasty in China. In this paper the mechanical significance of constitutions ordained in this book is studied by means of theoretical analysis to find out the influence of the book on protection of Chinese ancient buildings. Constitutions such as base, column, beam, puzuo (bracket sets), roof and so on are ordained by the book. Based on geometric features, static and aseismic performances of these constitutions are analyzed to study their mechanical significance. Results show that constitutions of ancient building ordained by the book are helpful for structural safety. Layers of base soil as well as pile foundation of the ancient building are favorable for avoiding uneven sinkage under vertical loads. Relative friction sliding between free-standing column and its stone base can mitigate earthquake damage. Inner incline of eave columns helps enhance stability of the whole structure. Friction between components of tenon-mortise joint as well as puzuo (bracket sets) are helpful for consumption part of earthquake energy. Low height of beam truss meets the demands of slide and oscillation resistance of the structure under earthquakes. Finally, the heavy roof increases the stability of the timber structure and mitigates the earthquake shock.

Keywords: Ying - Tsao - Fa - Shih; timber structure; ancient building; aseismic behavior; stability

《营造法式》由李诫编写,是北宋官方颁布的一部建筑设计、施工的规范书,是我国古代最完整的建筑技术书籍。全书34卷,357篇,3555条,规范了各种建筑做法,详细规定了各种建筑施工设计、用料、

结构、比例等方面的要求,规定了大木作、小木作、石作、瓦作、雕作、旋作、锯作、竹作、彩画作、砖作等13个工种的制度,并说明如何按照建筑物的等级来选用材料,确定各种构件之间的比例、位置、相互关

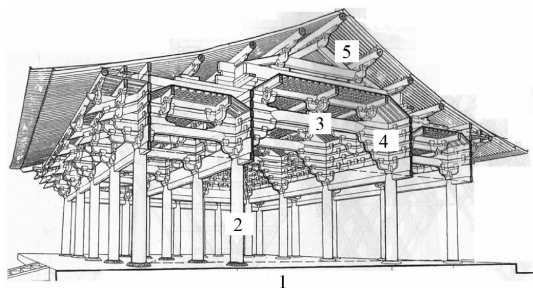
收稿日期:2017-11-21

修稿日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金优秀青年项目(51422801);国家自然科学基金面上项目(51178028);北京自然科学基金重点项目(8151003)

作者简介:周乾(1975—),男,湖南株洲人,博士,研究馆员,主要从事文物建筑抗震加固与振动控制研究。E-mail: qianzhou627@126.com

系^[1]。《营造法式》规定的古建筑木结构主要由基础、柱、梁、铺作、屋顶等部分组成,见图 1,其中梁与柱采用榫卯节点形式连接。



(1 - 基础; 2 - 柱; 3 - 梁; 4 - 铺作; 5 - 屋顶)

图 1 古建筑木构架示意图

部分学者对《营造法式》中的构架或构件(节点)开展了力学性能研究。近年来的主要成果有:张凤亮等^[2]按照《营造法式》的构造要求,建立了古建筑木结构屋盖梁架层模型,开展了动力性能分析,获得了屋盖梁架层的结构动力特性和地震响应,并求解出了各梁架层的动力放大系数。孟涛^[3]以《营造法式》中的构造规定,采用仿真分析方法,建立了木构古建直榫、燕尾榫、管脚榫和搭扣榫四类榫卯节点的模型,通过水平低周反复加载方式,进行了上述节点抗震性能和加固方法研究,认为各节点具有较好抗震性能,而采取碳纤维布和扁钢方法有利于提高榫卯节点抗震性能。谢启芳等^[4]对 7 个按《营造法式》制作的燕尾榫节点模型进行了水平低周反复荷载试验,对比分析节点的抗震性能及其随各影响因素的变化规律,认为古建筑燕尾榫节点具有较好的滑移性能和耗能性能。冯凯^[5]以《营造法式》六等材木构架为研究对象,采用仿真分析方法,建立了考虑柱脚、燕尾榫节点残损的古建筑模型,通过模拟水平低周反复加载方式,研究了残损古建筑的抗震性能,认为柱脚残损会削弱结构整体减震隔震能力,但对结构整体的刚度影响不大;燕尾榫残损会直接影响结构整体在地震荷载作用下的刚度变化趋势,削弱结构继续承受荷载的能力。贺俊筱等^[6]参照《营造法式》的相关规定,制作了七等材木柱模型,通过低周反复荷载试验,验证了水平地震、风荷载作用下柱脚抬升判定的条件,认为当柱头位移达到 10 mm 时,柱脚出现一侧抬升一侧受压现象。上述研究成果对于《营造法式》中的木构古建力学性能研究具有一定推动作用。

从研究现状来看,已有成果侧重于《营造法式》规定的柱础、榫卯节点、斗拱、屋顶等构造单体的抗

震性能仿真或试验研究,而对上述构造的力学意义进行归纳汇总,并开展理论分析,探讨其力学机制等相关的成果较少。基于此,本文在已有成果基础上,开展《营造法式》构造的力学意义研究,汇总探讨我国木构古建的静、动力受力机制,结果可有利于我国木构古建的保护与维修。

1 基础

《营造法式》对建筑基础的选址或者开挖有着严格的要求。比如卷三规定:“凡開基址,須相視地脉虚實。其深不過一丈,淺止于五尺或四尺,并用碎磚瓦石札等,每土三分内添碎磚瓦等一分”。“凡開基址,須相視地脉虚實”,这句话说明需要进行一系列的准备工作,如观察场地所处的地质条件是否良好,有无孔洞、虚土、岩石、地下水等不利条件,并把握好土的虚实、含水率、匀实度等因素,确保地基土的承载力。“其深不過一丈,淺止於五尺或四尺”,这句话对基础开挖的深度进行了规定,即基础的深度宜介于 4 尺(大约 1.2 m)至 1 丈(大约 3.1 m)之间。另外,华北地区的冰冻线较浅,约为 0.8 m 左右^[7]。相应的,《营造法式》中规定所开挖的基础应满足冰冻线深度的最低要求。该基础深度对于普通木结构古建筑而言,可以满足正常状态的受力要求,其主要原因在于木结构体系自重较轻,因而下沉不明显。而当地基土土质条件较差时,《营造法式》规定了采用深基础形式。对于各种基础的地基土回填,《营造法式》规定为“并用碎磚瓦石札等,每土三分内添碎磚瓦等一分”。也就是说,采取均匀密实的碎砖层和灰土层交错回填夯实(砖层厚度与土层厚度比约为 1:3)。之所以考虑采用这种碎砖 + 灰土交错回填的形式,其主要原因在于纯灰土回填会使得上部建筑下沉量较大,而加入碎砖层后不仅可减小上部建筑的下沉量,而且可提高基础的强度,有利于上部建筑的稳定^[8-9]。

当建筑选址遇到地下水或者淤泥等不利地质条件时,《营造法式》规定了桩基和筏基的使用。“凡開臨流岸口修築屋基之制,開深一丈八尺,廣隨屋開數之廣。其外分作兩擺手,斜隨馬頭,布柴梢,令厚一丈五尺。每岸長五尺,錠樁一條,梢上用膠土打築令實”。这句话的意思是在河岸建造建筑时,由于该位置土质较松软,因而其基础开挖较深(一丈八尺,约 5.8 m),尔后采用长达一丈五尺(约 4.8 m)的竖桩,桩底插在坚硬的持力层上。竖桩之上为水平桩,水平桩之上为灰土层,灰土层之上再建造房屋。此处

竖桩作为上部建筑的主要支撑构件,而水平桩则犹如承载平台,有利于保持上部建筑的平整。

故宫慈宁花园东遗址基础,根据勘察资料^[7],桩顶深度在地面3.8 m以下,桩径为0.2 m左右,间距为0.4 m左右,采用的是坚硬的柏木。这说明古人已经勘察到建造位置下部有受力薄弱的土层,通过桩基将持力层选择坚硬的土层上,以提高建筑物的稳定性。桩基之上为两层水平放置的圆木,它们的直径都在0.2 m左右。这两层圆木非常类似于现代的筏基,地震作用下,该筏型基础将会因滑动而产生隔震效果;筏基之上,则为厚约3 m的土层,它们采用黏土(厚约0.18 m)与碎石土(厚约0.05 m)分层夯实。该厚重土层相当于桩基础的承台,使整座建筑物能平稳地座落于基础之上,在地震作用下不易产生倾斜或不均匀沉降。

2 柱

2.1 柱底平摆浮搁

《营造法式》对柱础的相关规定为:“造柱礎之制,其方倍柱之徑”,这说明柱础平面要宽于柱径。宋代建筑,在柱础与柱底之间,还有“柱檣”(即柱身与柱顶石之间的过渡木构件),其宽度亦大于柱径。古建筑木柱柱根不落入地下,而是浮搁在表面平整的柱顶石上。这样做的好处不仅避免了柱根糟朽,而且在水平地震作用下柱底与柱顶石之间通过相互摩擦运动产生滑移减震的效果。

当仅仅研究柱底与柱顶石之间的力学关系时,可考虑整个柱顶以上部分为一个刚体。在地震作用下,该刚体的受力简图可用图2表示。设古建筑的进深尺寸为 L ,计算高度为 H ,上部建筑重量为 G ,则水平地震作用下,满足式(1)的条件时,古建筑不产生滑移:

$$F_{ek} < F = \mu(G + F_{vk}) \quad (1)$$

根据《建筑抗震设计规范》^[10](GB 50011—2010)第5.2条、第5.3条规定,单质点水平地震力的计算可按式(2)确定:

$$F_{ek} = \alpha_1 \times G_{eq}, F_{vk} = \alpha_2 \times G_{eq} \quad (2)$$

式中: F_{ek} 为水平地震力; F 为柱底与柱顶石之间的静摩擦力; F_{vk} 为竖向地震力; μ 为柱底与柱顶石之间的滑动摩擦系数,可取值 $\mu = 0.5$ ^[11]; α_1 为水平地震影响系数, $\alpha_1 = 0.16$ (8度常遇地震); α_2 为垂直地震影响系数, $\alpha_2 = 0.10$ (8度常遇地震); G_{eq} 为等效重力荷载, $G_{eq} = G$ 。

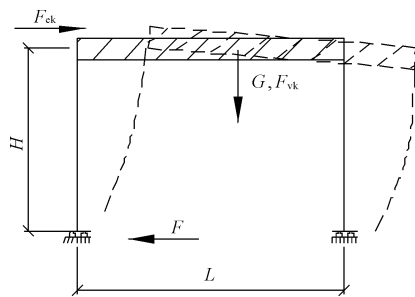


图2 浮放柱底

求解式(1)、式(2),可得式(1)左、右边值分别为 $0.16G$ 、 $0.55G$,即8度常遇水平地震作用下,浮放柱底满足抗滑移要求。事实上,由于柱顶石比柱径宽一定尺寸,即使地震时柱底产生滑移,也能落在柱顶石上,从而保证了结构稳定。

《营造法式》关于柱高规定为:“柱高不越间之广”,即柱高 H 不能超过建筑进深尺寸 L ,下面对其科学性进行分析。

图2中,水平地震作用下,若要防止古建筑产生倾覆,则必须满足式(3)条件:

$$F_{ek} \times H \leq (G + F_{vk}) \times L/2 \quad (3)$$

将式(1)取等号,代入式(3),可得不等式:

$$L/H \geq 2\mu = 1 \quad (4)$$

即 $H \leq L$,恰好满足式(4)要求,故古建筑满足抗倾覆要求。

2.2 侧脚和生起

为提高古建筑整体稳定性,古人将古建筑最外一圈柱子的下脚向外侧移一定尺寸,使外檐柱子的上端略向内倾斜,即谓侧角。《营造法式》卷五规定:“凡立柱,并令柱首微收向内,柱脚微出向外,谓之侧脚”。侧角的尺寸一般为 $0.008 \sim 0.010H$, H 为柱高。

侧脚后,建筑上部的荷载会使柱头间自动向内挤紧,同时在额枋中产生轴向压力,在额枋端部产生集中弯矩,因而额枋端部榫卯节点具备了初始抗张角刚度^[12]。这使得构架整体重心降低,不仅提高了结构的稳定性,而且使结构产生的恢复力总是指向结构的平衡位置(即结构在地震前的静止位置),方向总是和柱架振动侧移方向相反。这使得输入结构的地震波首先必须克服重力沿额枋纵轴倾斜方向分力做功,在地震中将具有一定的减震耗能效果^[8]。另外,柱子侧脚也能分担一部分地震力。水平地震作用下,檐柱侧脚值为 θ 时,地震力 F 沿着柱轴向会产生分力 $F \cos \theta$,因而幅值产生了削减,使得建筑整体受到的地震力减小。

生起是《营造法式》规定的另一种柱子做法。《营造法式》卷五规定：“凡用柱之制，……，至角则随间数生起角柱。关于生起尺寸的规定，《营造法式》规定为：“若十三间殿堂，则角柱比平柱生高一尺二寸……十一间生高一尺；九间生高八寸；七间生高六寸；五间生高四寸；三间生高二寸”。这句话说明不同开间数量的建筑，其生起尺寸各不同。生起的具体做法为：檐柱高度从明间开始，向两端依次增高，形成一个“凹”字形，至角柱位置的檐柱，其高度比明间位置的檐柱高出 2 寸 ~ 12 寸，见图 3。可以看出，屋檐仅明间为直线段，其余全由曲线组成。生起使得古建筑整个结构处于一个凹形面中，降低了结构的重心，增强了结构的稳定性。此外，生起使得建筑檐部各柱顶榫卯节点挤紧，水平地震作用下，榫头与卯口之间挤压和转动作用增强，有利于耗散部分地震能量；榫卯节点提供的水平分力还可抵抗部分地震力作用，因而可产生较好的减震效果。

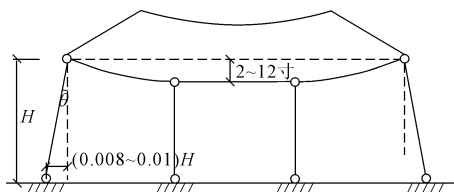


图 3 侧角与生起作法

3 梁

3.1 梁高宽比

《营造法式》卷五规定：“凡梁之大小，各随其广分为三分，以二分作为厚”，这说明梁的高宽比为 3:2。由于方料是由圆料加工而来的，因此方料截面的大小可反映对圆料截面的使用合理程度。下面对图 4 所示梁截面高宽比的合理性进行分析。

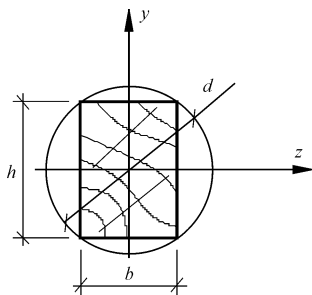


图 4 梁截面加工示意图

设图 4 中 d 为圆木直径， W 为梁弯曲截面系数， b 为梁截面宽度， h 为梁截面高度，则有：

$$W = bh^2/6 \quad (5)$$

$$b^2 + h^2 = d^2 \quad (6)$$

联立式(5)、式(6)得：

$$bd^2 - b^3 = 6W \quad (7)$$

对式(7)求导，得 $b = d/\sqrt{3}$ 时 W 值最大，此时对应于 $h/b = \sqrt{2} \approx 3/2$ 。由此可知，《营造法式》规定的梁截面高宽比可充分利用木材。

3.2 稳定性

《营造法式》卷五规定：“举屋之法，如殿阁楼臺，先量前后檐方心相去远近，分为三分”，这说明对于一般殿堂建筑，其梁架的高宽比限定为 $H/L \leq 1/3$ 。下面对 8 度常遇地震作用下梁架的抗滑移及抗倾覆稳定性进行分析。

考虑古建筑梁架为单自由度体系，地震作用下其计算简图可由图 5 表示，其中各字符代表的含义为： F_{ek} 为水平地震力， F_{vk} 为竖向地震力， F 为梁底与柱顶之间的静摩擦力， F_1 为梁底与柱顶之间的暗销提供的拉接力， G 为屋顶的重量。则有：

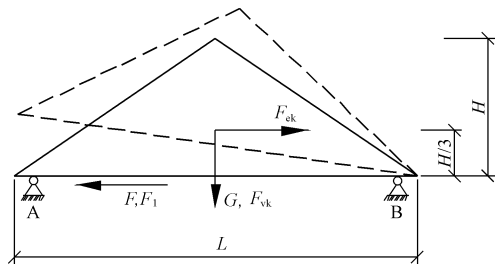


图 5 梁架计算简图

已知条件：

$$H/L = 1/3 \quad (8)$$

梁架不产生倾覆的条件为：

$$(G + F_{vk}) \times L/2 \geq F_{ek} \times H/3 \quad (9)$$

梁架不产生滑移的条件为：

$$F + F_1 \geq F_{ek} \quad (10)$$

又：

$$F_{ek} = \alpha_1 G, F_{vk} = \alpha_2 G, \quad (11)$$

$$F = \mu(G + F_{vk}), F_1 = fA$$

式中： α_1 、 α_2 意义同前， $\alpha_1 = 0.16$ ， $\alpha_2 = 0.10$ ； f 为木材横纹抗剪强度； A 为暗销的截面尺寸； μ 为木梁底与木柱顶的静摩擦系数， $\mu = 0.33$ ^[13]。

将式(8)、式(11)代入式(9)，解不等式左边值为 $0.55 GL$ ，右边值为 $0.02 GL$ ，即满足抗倾覆要求。

将式(8)、式(11)代入式(10)，解不等式左边值为 $0.36G + fA$ ，右边值为 $0.16G$ ，即满足抗滑移要求。

由上述分析可知，《营造法式》规定的我国古建

筑木构的梁架一般满足 8 度常遇地震作用下的抗滑移及抗倾覆要求。

3.3 荷载配置

《营造法式》卷五采用“椽栿”的概念来规定不同尺寸、大小的梁栿,如“造月梁之制,明栿,其广四十二分。如徹上明造,其乳栿、三椽栿各广四十二分;四椽栿广五十分;五椽栿广五十五分;六椽栿以上,其广并至六十分止”。这些椽栿沿构架进深方向叠加,逐层缩短,层间垫短柱,最上层梁立小柱,形成三角形屋架,可称为梁架。

《营造法式》规定的上述抬梁式构造,对于屋顶内梁架受力是有积极作用的。从梁的抗弯承载力角度讲,屋顶荷载传递给梁,若梁不做成梁架形式,则所需梁的抗弯截面高度可达 $2\text{ m}^{[14]}$ 。采取梁架构造后,梁的受力方式发生改变,即由单根梁承担屋顶荷载的方式转变为多根梁分别承担屋顶荷载的方式,且各梁在竖向高度层层增加,上下层梁之间通过短柱(瓜柱)传力。这种梁架方式不仅增大了屋顶空间,有利于保温隔热,而且在受力形式上有利于减小所需梁截面尺寸,并增大梁的跨度。如图 6 所示的梁(梁架)受力简图弯矩分布图,为故宫太和殿明间梁架静力抗弯分析结果。其中,图 6(a)表示屋面荷载直接作用在单梁上,图 6(b)表示屋面荷载作用在梁架上。由图 6(a)可知,不考虑梁架形式时,梁承受的弯矩峰值为 $9PL/12$;采取梁架形式后,梁架承受的弯矩峰值降为 $5PL/12$ 。这使得建造屋顶所需木材的截面尺寸无需过大,且扩大了建筑的空间。另从图 6(a)、图 6(b)弯矩分布图可以看出,梁架形式的弯矩分布相对单梁形式不仅峰值降低,而且峰值的位置也发生了改变,这对减小单梁产生的过大变形亦有一定帮助作用^[15]。

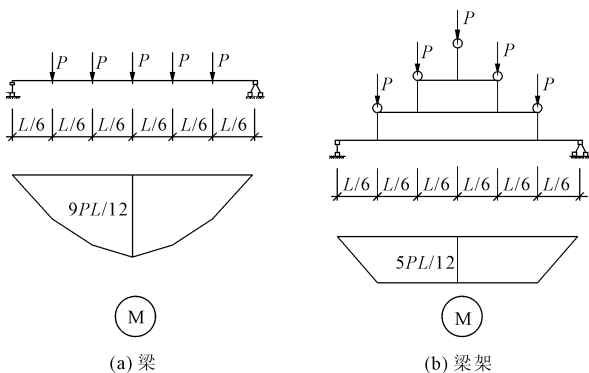


图 6 梁与梁架的抗弯分析

4 榫卯节点

榫卯节点主要用于古建筑梁与柱的连接,即梁

端做成榫头形式,插入柱头预留的卯口中。《营造法式》卷十七规定了梁柱连接的形式有“撮口鼓卯”、“鼓卯”、梁柱对卯“藕批搭掌,萧眼穿串”等,见图 7。

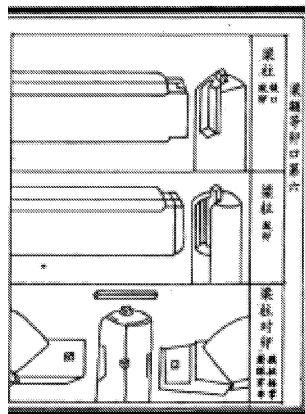


图 7 《营造法式》中的部分榫卯节点示意图

我国古建筑榫卯节点有多种,但形式最常见的为直榫和燕尾榫两种节点形式。直榫节点即榫头与卯口的截面形状、尺寸沿长度方向不发生变化。直榫榫头与卯口的安装方向为水平向,安装后的梁柱构架常用于承担上部构件传来的竖向荷载。直榫节点在地震作用下容易产生拔榫,但由于榫头较长,因而即便拔榫,也很少产生脱榫现象。直榫节点构造见图 8(a)。燕尾榫的榫头前后端截面大小不一致,前端截面尺寸大、后端截面尺寸小;对应的卯口前端截面尺寸小、后端截面尺寸大。燕尾榫节点的榫头与卯口安装方向为竖向安装,安装后的节点常用来拉结水平构件。燕尾榫榫头的长度小,但由于榫卯节点拉结紧密,在地震作用下不易产生拔榫。燕尾榫节点构造见图 8(b)。

理论和试验研究表明^[16-18]:榫卯节点具有良好的耗能能力,在地震反应中可耗散大量的地震能量。榫头与卯口之间的连接为介于刚接与铰接之间的半刚性连接,这种连接方式可传递部分弯矩。地震时,榫头与卯口之间产生相对挤压、转动。一方面,节点提供的抵抗弯矩可减小榫卯节点的过大角度转动;另一方面,榫头与卯口之间的相对挤压、摩擦及转动可耗散部分地震能量,从而使结构整体受到的地震力减小。因此,可以近似认为榫卯节点的减震作用相当于在节点处安装了阻尼器,使得结构的地震响应得到减小。

地震作用下,榫卯节点耗能在古建筑结构整体耗能中占有一定比例。图 9 为文献[19]提供的西安鼓楼在 1940 年美国加州 El Centro 波作用下的地震能量-时间曲线。易知地震能量分别由结构阻尼、

榫卯连接和动能 3 部分消耗吸收,而榫卯节点吸收的地震能量大约占到总能量的 30%,这种连接方式使古建筑振动得到衰减,因而有利于其震害减轻。

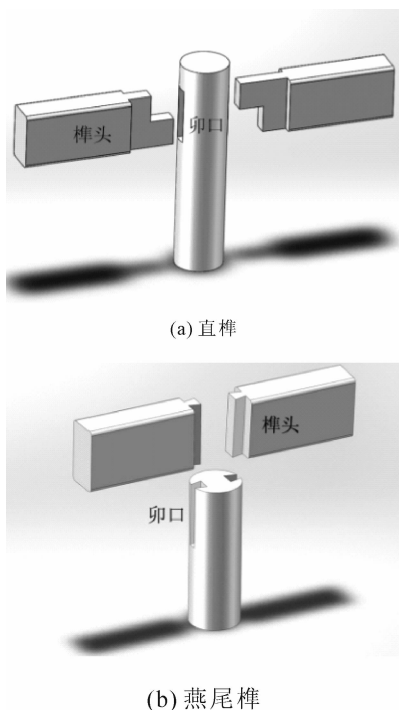
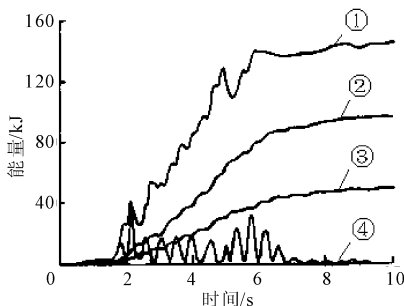


图 8 榫卯节点构造示意图



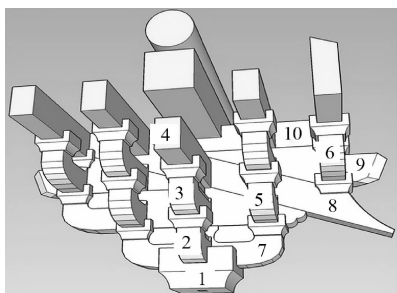
①总能量;②阻尼能量;③榫卯节点能量;④动能

图 9 地震能量-时间曲线

5 铺作

铺作中国木架建筑特有的结构部件,其作用是在柱子上伸出悬臂梁承托出檐部分的重量。这种结构部件层层相叠铺设而成,因此在宋代称“铺作”,在清代称“斗拱”。铺作主要由斗(栌斗、交互斗、散斗、交心斗)、拱(泥道拱、瓜子拱、华拱、令拱、慢拱)、昂、耍头、华头子、昂栓等构件组成,见图 10。《营造法式》规定了不同部件的尺寸。铺作的种类很多,形制复杂。按使用部位分,它可以分为内檐铺作、外檐铺作、平座铺作。在柱头上的铺作称为柱头铺作(清称柱头科),是承托屋檐重量的主体;在两柱之间置

于阑额(清称额枋)上的铺作,称为补间铺作(清称平身科),起辅助支撑作用;在角柱上的铺作称为转角铺作(清称角科),起承托角梁及屋角的作用,也是主要结构部件。室内铺作通常只支撑天花板的重量或作为梁头节点的联系构件,其结构作用不及檐下铺作明显。



1-栌斗;2-泥道拱;3-泥道慢拱;4-柱头枋;5-瓜子拱;6-令拱;7-一跳华拱;8-昂;9-耍头;10-衬枋头

图 10 补间单抄单昂五铺作斗拱剖面

5.1 弹性恢复

在静止状态下,铺作的栌斗通过暗榫安装在普拍枋上,普拍枋也通过暗榫与柱头进行连接,铺作上方传来的荷载 N 通过栌斗中心传给柱头。水平地震作用下,柱头产生倾斜,而栌斗与普拍枋仍保持水平,此时栌斗受力平衡状态发生改变:一方面,上部荷载由 N 变为 N' 并通过普拍枋底一侧端部与柱头接触点 O' 传给柱头;另一方面, N' 以柱底端部 O 为支点产生恢复力矩 $N'D$ 用以抵抗水平倾覆力矩 FH , 这使得柱子立刻恢复到原来平衡状态,保证了柱架的稳定和正常工作,见图 11。

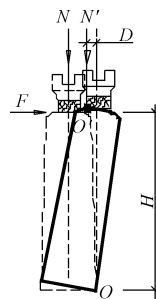


图 11 铺作的弹性恢复作用

5.2 水平减震

铺作的水平减震表现在以下 2 个方面:

(1) 地震作用下,栌斗产生倾斜,并带动泥道拱产生水平移动,泥道慢拱和柱头枋也因与散斗相连产生变形位移,构件之间同时产生挤压、剪切,使得泥道拱和栌斗变形受到了限制,上述构件运动过程即为摩擦耗能过程。

(2) 栌斗产生位移时,要同时带动上面的华拱产生错动,而与栌斗正交的华拱由于搭扣紧密,只与栌斗产生摩擦力,自身产生较小的位移,因而在产生减震作用的同时,自身不会产生破坏。

图 12 为某宋代铺作缩尺模型试验获得的 $P-\Delta$ 滞回曲线^[20]。由曲线可知,荷载作用下,铺作的 $P-\Delta$ 滞回曲线形状为平行四边形,这说明铺作出现水平滑移,即铺作分层构件通过层间剪切变形和摩擦滑移产生减震耗能效果; Δ 增大时,曲线包络的面积较大,反映了铺作具有良好的耗能特性。该铺作的耗能特性同样可在铺作中体现。

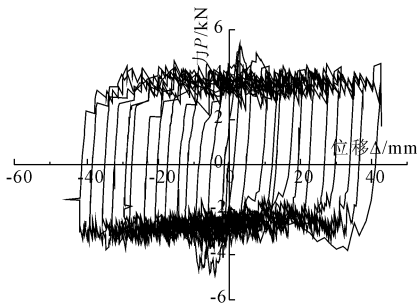


图 12 铺作 $P-\Delta$ 滞回曲线

5.3 竖向隔震

由于铺作在竖向由多层构件叠加而成,而这些木构件弹性模量较小,在竖向犹如一个串联的弹簧。地震作用下,构件间的弹性变形可将部分地震能量转化为重力势能,因而起到了隔震效果。竖向地震作用下,铺作的计算模型见图 13(a),各符号含义为: m 为屋顶质量; k 为铺作竖向刚度; c 为铺作阻尼。对其进行动力分析,可获得其传导比 T_r 满足式(12)^[21]:

$$T_r = \frac{y}{y_0} \frac{\ddot{y}}{\ddot{y}_0} = \sqrt{\frac{1 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (12)$$

式中: T_r 为传导比, T_r 值越小,则铺作的隔震效果越好; y 、 \ddot{y} 为上部质量 m 的竖向位移和竖向加速度; y_0 、 \ddot{y}_0 为铺作下部柱架的竖向位移和竖向加速度; ω 为地震波的圆频率; ω_n 为铺作层的圆频率, $\omega_n = (k/m)^{1/2}$; ξ 为屋顶阻尼比, $\xi = c/(2m\omega_n) = c/2(mk)^{1/2}$ 。式利用式(12)可绘出不同 ω/ω_n 条件下的 T_r 曲线,见图 13(b)。易知,当 $\omega/\omega_n > 2^{1/2}$ 时,此时恒有 $T_r < 1$,即铺作始终可以发挥隔震性能。相应的, ω_n 较小时有利于铺作发挥竖向隔震作用。又 m 值较大、 k 值较小时可满足 ω_n 较小的条件。《营造法式》规定的厚重屋顶和层数较多的铺作,即满足了

上述需求。

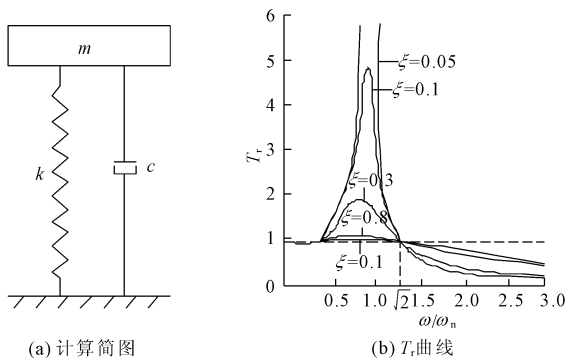


图 13 铺作层的竖向隔震分析

6 屋顶

《营造法式》卷十三“瓦作制度”规定了“用瓦之制”,如“殿阁厅堂等,五间以上,用瓦长一尺四寸、广六寸五分”。“凡瓦下补衬柴栈为上,版栈次之。如用竹笆苇箔,若殿阁七间以上,用竹笆一重,苇箔五重;五间以下,用竹笆一重,苇箔四重;厅堂等五间以上,用竹笆一重,苇箔三重;如三间以下至廊屋,并用竹笆一重,苇箔二重”。“其栈柴之上,先以胶泥偏泥,次以纯石灰施瓦”。此处“柴栈”、“版栈”即望板;“胶泥”即土和捣碎的麦壳按比例用水搅和而成^[22]。以上说明屋顶是由瓦(包括底瓦和盖瓦)、石灰、胶泥、柴栈、竹笆,苇箔等多种材料组成,其自重可达 400 kg/m^2 ^[14]。这使得屋顶的重量远远大于下部的柱架结构。而屋顶的大质量特征有利于降低结构整体重心,增强榫头与卯口之间、斗拱分层构件之间的连接性能,因而有利于结构整体的稳定性。同时,屋顶的大质量增大了结构整体的自振周期,有利于结构整体产生减震作用^[23]。

文献[2]按照《营造法式》的构造要求,建立屋顶有限元模型,模型含梁架层及瓦面层。通过对屋顶进行动力性能分析,并与试验结果进行对比,认为屋顶厚重、平动刚度相对很大,可近似看作刚体;地震作用下,屋顶内梁架层受力不大,其主要原因在于各梁架层之间采取了榫卯节点连接方式。亦即古建筑屋顶质量大、地震响应小。因此,《营造法式》规定的厚重屋顶可增加下部构架的稳定性,减小结构整体受到的地震力。

7 结 论

本文研究了《营造法式》构造的力学意义,得出如下结论:

(1) 《营造法式》对建筑基础的选址、地基土开挖及回填、薄弱地基处理等方面有着严格要求,主要表现在选址合理,地基土分层回填,桩基的灵活运用等。

(2) 柱底平摆浮搁在柱顶石上,有利于减小地震力向上传递;柱高尺寸不超过建筑进深尺寸,有利于提高构架的抗倾覆能力;柱侧脚及生起做法,有利于构架在地震作用下保持稳定。

(3) 梁高宽比为 3:2,有利用充分利用木材截面,梁架的高宽比限定为 $H/L \leq 1/3$,有利于地震作用下梁架具有良好的抗滑移和抗倾覆能力;梁架采用抬梁式构造,有利减小梁的截面尺寸,并增大梁的跨度。

(4) 榫卯连接构造有利于耗散大量地震能量,减小古建结构整体的震害。

(5) 铺作构造可产生水平减震及竖向隔震作用,并有利于柱架在地震作用下恢复到初始平衡状态。

(6) 屋顶厚重构造有利用增强榫卯节点、斗拱构件之间的连接性能,并增加下部构架稳定性,减小结构整体受到的地震力。

参考文献:

- [1] 李 诚.营造法式[M].北京:商务印书馆,1950.
- [2] 张凤亮,赵鸿铁,薛建阳.古建筑木结构屋盖梁架体系动力性能分析[J].工程力学,2012,29(8):184-188.
- [3] 孟 涛.徽州木结构古建筑榫卯节点的破坏机理和加固仿真研究[D].合肥:安徽建筑大学,2013.
- [4] 谢启芳,杜 彬,向 伟,等.古建筑木结构燕尾榫节点抗震性能及尺寸效应试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):112-120.
- [5] 冯 凯.残损古建筑抗震性能研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [6] 贺俊筱,王 娟,杨庆山.摇摆状态下古建筑木结构木柱受力性能分析及试验研究[J].工程力学,2017,34(11):50-58.

- [7] 白丽娟.浅谈故宫古建筑基础[J].故宫博物院院刊,1993(3):26-33.
- [8] 周 乾.故宫神武门防震构造研究[J].工程抗震与加固改造,2007,29(6):91-98.
- [9] 周 乾.故宫古建筑基础构造特征研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(4):55-61.
- [10] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] 张鹏程.中国古代木构建筑结构及其抗震发展研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [12] 李小伟,赵均海,孙姗姗,等.侧脚与斗拱对清代九檩大式殿堂动力性能的影响[J].世界地震工程,2009,25(3):145-149.
- [13] 王其超.滑动摩擦系数的确定[J].教学仪器与实验,1987,3(2):15-16.
- [14] 王 天.古代大木作静力初探[M].北京:文物出版社,1992.
- [15] 周 乾,闫维明,关宏志,等.故宫太和殿静力稳定构造研究[J].山东建筑大学学报,2013,28(3):215-219.
- [16] 周 乾,闫维明.古建筑榫卯节点抗震加固数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(3):23-27.
- [17] 周 乾,闫维明,纪金豹.3种材料加固古建筑木构架榫卯节点的抗震性能[J].建筑材料学报,2013,16(4):649-656.
- [18] 周 乾,杨 娜.故宫古建榫卯节点典型残损问题分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):12-19.
- [19] 丁 磊,王志骞,俞茂宏.西安鼓楼木结构的动力特性及地震反应分析[J].西安交通大学学报,2003,37(9):986-988.
- [20] 隋 龔,薛建阳,赵鸿铁,等.古建木构铺作层侧向刚度的试验研究[J].工程力学,2010,27(3):74-78.
- [21] 刘晶波,杜修力.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [22] 乔迅翔.宋代建筑瓦屋面营造技术[J].古建园林技术,2007(3):3-9.
- [23] 周 乾,闫维明,纪金豹.故宫太和殿抗震构造研究[J].土木工程学报,2013,46(S1):117-122.