

## 中国古建筑结构力学研究进展\*

俞茂宏<sup>1,†</sup> ODA Y<sup>1</sup> 方东平<sup>2</sup> 赵均海<sup>3</sup> 张德良<sup>4</sup> 竺润祥<sup>5</sup> 车爱兰<sup>6</sup><sup>1</sup> 西安交通大学, 西安 710049<sup>2</sup> 清华大学, 北京 100084<sup>3</sup> 长安大学, 西安 710061<sup>4</sup> 中国科学院力学研究所, 北京 100080<sup>5</sup> 宁波大学, 宁波 315211<sup>6</sup> 上海交通大学, 上海 200030

**摘要** 中国古代建筑是中国古代文化的宝贵遗产。力学的多样性也反映在古建筑结构力学研究。西安交通大学从1982年开始, 对以西安明代箭楼、城楼和宁波宋代保国寺等国家重点保护文物为代表的木结构建筑, 以唐代大雁塔、小雁塔等国家重点保护文物为代表的古代高层建筑, 和以国家重点保护文物西安古城墙为代表的砖-土结构以及钟楼、鼓楼等中国城市的代表性古建筑的结构力学特性进行了一系列研究。得到关于古建筑结构(如斗拱、结构非线性、榫卯节点的接触力学特性、地宫、古代夯土、古塔基础、古城墙等)力学特性的新认识。本文对此进行小结, 同时也介绍近年来的其它学者的一些研究。

**关键词** 古建筑结构力学, 结构非线性, 结构模型试验, 西安古城墙, 古塔, 木结构, 斗拱

## 1 引言

“力学的语言拓展繁衍, 力学的工具揭示出新的奥秘”。这是美国普林斯顿大学教授锁志刚为清华大学杨卫教授的学术专著《力电失效学》所写序言中的两句话。力学的研究对象从大到小到微、上天到入地、地上地下、水上水下、从古到今、包罗万象。20世纪90年代, 国际上出现了对古建筑结构力学的研究兴趣, 这是因为世界和平和经济发展带来的对文化遗产保护的需求, 以及古建筑的研究以往着重于历史性和艺术性的研究, 而对其科学性的研究甚少。

1991年, 俞茂宏总结了1982年~1989年间关于箭楼、钟楼、古城墙等的古建筑结构力学研究, 完成《西安古城墙研究——建筑结构和抗震》的学术专著<sup>[1]</sup>。1992年得到陕西省优秀科学、文艺著作出版基金资助由西安交通大学出版社出版。这是陕西省优秀科学、文艺著作出版基金资助, 也是古建筑结构力学系统研究的较早著作。1993年在古建筑众多的罗马召开了“建筑遗产的结构保护国际会议”(Symposium on Structural Preservation of the Architectural Heritage)<sup>[2]</sup>。现在已经有几个有关古建筑结构研究

的国际会议, 2001年在土耳其古都伊斯坦布尔召开了第二届国际“古代结构研究大会”(Int. Congress on the Studies in Ancient Structures)<sup>[3]</sup>。古建筑结构力学是大会的主题。意大利, 法国, 土耳其等国学者对各种古建筑结构的力学问题进行了大量的研究<sup>[2,3]</sup>。比萨斜塔是著名的例子(图1, Macchi等<sup>[2]</sup>)。美国虽然没有真正的古建筑, 但近年来, 也对历史建筑进行了很多研究, 并在2000年出版了Rabun的古建筑结构分析的专著<sup>[4]</sup>。图2为自由女神的主体结构的结构力学特性的有限元结构分析图(Cohen等<sup>[1]</sup>)。

世界各国的建筑多种多样, 它们的力学性能也各不相同。中国古建筑由于其独特性有很多尚未被认识的内在力学特性, 古建筑结构力学研究是力学研究的一个空白。

力学的多样性也反映在古建筑结构力学。中国古建筑结构力学的独特研究对象、研究内容和尚难完全预见的研究结果都是令人感兴趣的。力学的工具也能揭示古建筑的一些鲜为人知的奥秘。对这些国家重点保护文物建筑的结构力学特性进行探讨<sup>[1,5~10]</sup>, 具有十分重要的研究价值和历史意义。

收稿日期: 2004-08-16, 修回日期: 2005-07-05

\* 国家自然科学基金(5860211, 50078046)、国家教育部博士点基金(20020698050)及国家人事部博士后科学基金资助项目

† E-mail: mhyu@mail.xjtu.edu.cn

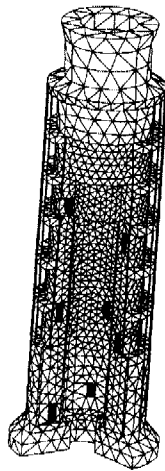


图1 比萨斜塔的数字模拟

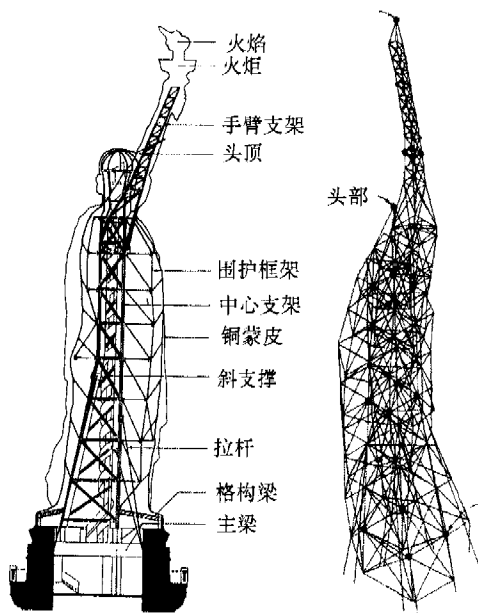


图2 自由女神的结构力学分析

西安交通大学所处的西安存在大量唐代和明代的古建筑。唐长安城东城墙遗址在今西安城外交通大学教学区东围墙附近，著名唐朝诗人白居易居住地的道政坊即在今天西安交通大学教学区内。我国出土的最早天象图（西汉）即在今西安交通大学附属小学内。在20世纪80年代和90年代由于一些国家重点文物建筑出现险情，国务院和国家文物局直接领导进行抢险和维修工程。西安交通大学俞茂宏等在参加这些抢险工作过程中，对西安市以唐大雁塔、唐小雁塔等国家重点保护文物为代表的古代高层建筑，以明箭楼、明城楼和宁波宋保国寺等国家重点保护文物为代表的古代木结构建筑，和以国家重点保护文物西安古城墙为代表的砖-土结构，以及钟楼、鼓楼等中国城市的典型古代建筑结构的结构力学性能在理论上和实验上进行了系统的研究<sup>[1]</sup>。内容包括古建筑的结构非线性、抗震性能、榫卯节点的接触摩擦力学特性、不均匀沉陷引起的险情，斗拱的力学性能、唐

代和明代地基土的三轴力学特性，古建筑大屋顶对结构力学性能的影响、高层古塔的地基承载力、古塔地宫的力学分析、古城墙内深挖洞对城墙塌陷的影响以及古城墙顶部开放的极限承载力等<sup>[1]</sup>。这些是中国古建筑结构力学研究的早期工作，也是世界古建筑结构力学研究的早期工作之一。

1989年，国家文物局在对西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究鉴定会会议纪要中指出：“这项研究采用现代科学方法，对古建筑进行了长期系统的多方面开创性的工作，具有重要意义”<sup>[5]</sup>。1991年俞茂宏等发表了西安北门箭楼静力与动力特性的试验研究论文<sup>[6]</sup>。1992年俞茂宏等发表了西安古城墙稳定性的研究论文<sup>[7]</sup>。此外，宁波大学对宁波保国寺力学性能进行了研究<sup>[8]</sup>。中国科学院力学研究所对苏州虎丘塔和应县木塔的力学性能进行了研究<sup>[9,10]</sup>。本文对这些工作进行小结；同时也介绍近年来的其它学者的一些研究。

## 2 古建筑结构力学研究的意义和特点

中国古代建筑是中国古代文化的宝贵遗产，数千年来，一以贯之，成就辉煌，形成了博大精深的独特体系，成为东方建筑文化的代表，在世界建筑史上占有重要地位，并成为众多国内外专家的研究对象，发表了大量关于它的历史性和艺术性的研究文献，如文献<sup>[11]</sup>。在20世纪20和30年代，以梁思成、林徽因等为代表的营造学社前辈对中国古代建筑的发掘、测量和研究进行了大量开创性的工作，对中国古建筑的研究作出了巨大的贡献。但到50年代，大屋顶受到批判，建筑学被冷落，虽经梁思成、林徽因等大声疾呼，北京一些古建筑和城墙仍然被毁坏，古建筑已无研究可言。梁思成的有关著作在90年代以后才得以发表<sup>[12,13]</sup>。

1982年香港广角出版社在香港出版了李允铎先生的中国古建筑的专著《华夏意匠》，引起各方面的关注和好评，多次再版，1985年由中国建筑工业出版社引进在内地出版<sup>[14]</sup>。李允铎先生在第二版序言中谈到：“那个时候，在书店里是难于找到有关中国传统问题的中文著述的。可是，在香港以及国外，有关人士正在寻求关于中国建筑的知识”。20世纪80年代初，清华大学吴良镛先生委托费慰梅（Wilma Fairbank）女士，收集并编辑出版了梁思成1947年在耶鲁大学的关于中国古建筑的图纸、照片和文稿，于1984年在麻省理工学院出版社出版了梁思成在抗战时期于四川写的《A Pictorial History of Chinese Architecture》这本书<sup>[15]</sup>。它的中文版在1991年由梁从诫翻译出版，这时已是他成书后40多年。1985年清华大学建筑系出版了新的彩色古建筑照片集《Historic Chinese Architecture》<sup>[16]</sup>。1998年文物出版

社将国家文物局古建专家组组长罗哲文教授关于古建筑的论文结集出版<sup>[17]</sup>。1991年,罗哲文指出:古建筑的研究遵循历史性、艺术性和科学性的三性原则。但是,由于历史条件的限制,加之对古建筑的科学性进行研究的难度和工作量都很大,这方面的研究和文献极少<sup>[18]</sup>。

1989年,《古建园林技术》编辑部在庆祝《古建园林技术》创刊5周年致读者信中指出:“若总结过去的研究情况,对于历史搜集和实物调查致力较多,在理论包括政治经济方面的探讨较少,至于对建筑上的科学内容和工艺钻研如凤毛麟角。”<sup>[19]</sup>“今后我们在研究方面,在积累素材的同时,要做理论上的探讨,……将祖国建筑科学内容阐发出来。”<sup>[19]</sup>

有关中国古代桥梁结构力学的研究,钱令希先生1987年用结构极限分析的观点对赵州石拱桥进行了承载能力的分析<sup>[20,21]</sup>。俞茂宏、成卜乾、方东平1986年在美国Washington发表了关于西安钟楼动力特性和抗震性能的论文<sup>[22,23]</sup>;1989年俞茂宏等在新加坡发表了关于西安箭楼动力特性和抗震性能的论文<sup>[24~26]</sup>;1985年~1988年俞茂宏、方东平等发表了一系列关于古代木结构和城墙动力特性和抗震性能的研究报告<sup>[27~36]</sup>,国家科委对此作了总结<sup>[37,38]</sup>;1992年~1993年方东平在日本、意大利、美国、印度尼西亚等地发表了古代木结构的研究论文<sup>[39~45]</sup>;1986年起,西安交通大学发表了一系列关于古建筑结构力学的硕士和博士研究生学位论文<sup>[46~58]</sup>,其中俞茂宏和赵均海等发表了关于古代木结构和东门城墙和斗拱的论文<sup>[59~67]</sup>。这些是中国古建筑结构力学最早的系统研究工作。但这些研究工作处于开始阶段。国际上的研究热点兴起于20世纪90年代中期,中国古建筑结构力学有其完全不同的特点。

古建筑结构力学研究虽然具有重要意义,但关于它的数据资料很少,大多数的古建筑资料有丰富的图片和历史考证,但一般没有具体结构尺寸记录。国家级和省市级重点保护的建筑遗产也不允许进行有关试验。例如,西安的唐代大雁塔高达64m,屹立千年至今,它的地基结构和承载力至今仍是一个谜。而今天40多米的房屋都需要打桩,西安交通大学新图书馆最高点约40m,已耗巨资打下众多长达20多米的钢筋混凝土桩<sup>[27]</sup>。又如,中国木结构古建筑是直接放在石料的柱础之上的,中间没有任何连结,它的抗震机理如何?再如,中国古建筑的斗拱、榫卯、柱础等结构特点都与一般结构不同,使它在力学分析中除了材料非线性和几何非线性之外还存在结构非线性的特点。又如大屋顶、高台基、斗拱、梁榫的连接、古塔的地宫等的力学性能又如何?这些都使古建筑结构力学研究较为困难,进展很慢,有关它的一项

研究的周期也往往很长。

因此,对中国古建筑的一些共性问题从力学理论,计算机数值模拟和近代实验力学手段等多方面进行系统的研究,具有特别重要的意义。

由于中国古建筑大多没有或缺少科学的数据和图纸,因此,对古建筑结构力学的研究,首先必须从现场实物勘测做起,然后制作比例模型,进行材料试验、理论分析、计算机结构计算、模型试验和现场试验等等,工作量很大。图3是由计算机得出的西

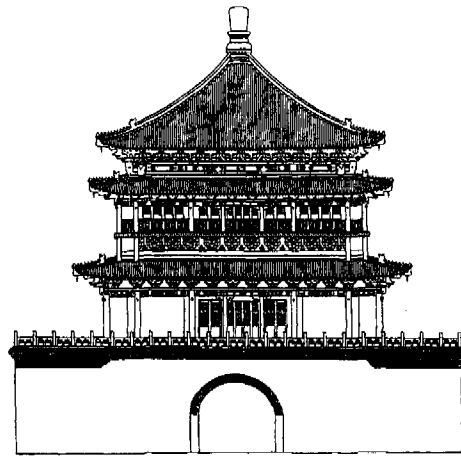


图3 西安标志性建筑明代钟楼的摄影测绘图<sup>[22]</sup>

安标志性建筑明代钟楼的摄影测绘图<sup>[22]</sup>。它的力学分析简图和结构模型制造图均需作一定的简化<sup>[22]</sup>。

### 3 古建筑木结构的力学模型

#### 3.1 木构架力学模型

中国古建筑木结构是木构架的独立系统,墙体一般并不承受载荷。即使像箭楼这样有厚重墙体的结构<sup>[6,23,31,32]</sup>,立柱与墙体之间留有一定空隙,并用瓦片相隔离,两者并不相连。图4为西安北门箭楼南



图4 立柱即将被砌入厚墙内(俞茂宏摄1986)

排立柱即将被砌入厚墙内的照片。图5为北门箭楼的剖面图和力学计算简图。

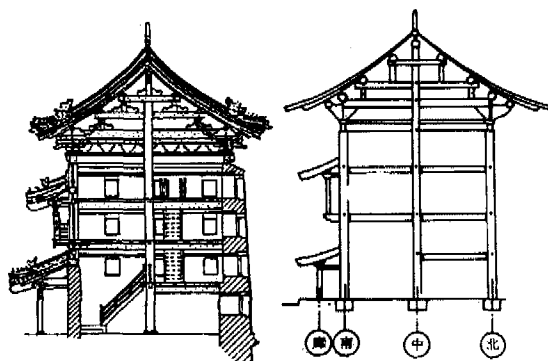


图 5 北门箭楼的剖面图和力学计算简图

### 3.2 榫卯半刚性节点的计算模型

木结构古建筑最显著的特点之一就是梁柱之间采用榫卯连接,如图 6. 这种连接不同于现代的钢结构、钢筋混凝土结构和近代用铁钉、铁匠加固连接的木结构. 梁柱的榫卯连接具有比刚接变形大而比较接变形小的特点,是介于刚接和铰接之间的半刚性连接. 这种连接不仅有一定的承受拉压的能力,而且还具有相当的抗弯、抗扭能力. 方东平和俞茂宏在 1983 年的箭楼基础不均匀沉陷的险情计算和箭楼结构抗震性能的计算分析研究中,首次将古代木结构建筑的斗拱和榫卯连接(图 6),用如图 7 所示的三维可变刚性节点单元(半刚性单元),作为梁柱间的过渡性单元,加在梁单元的两端,来描述在不同方向

的刚度 [28,29,39~45]. 此后,赵均海、俞茂宏在东门结构分析 [56,59~66],丁磊 - 王志骞 - 俞茂宏在鼓楼结构分析 [68] 以及竺润祥等在保国寺力学性能分析中 [8,70],都取得很好的效果. 竺润祥,董益平,任茶仙,俞茂宏,将接触单元引入榫卯连接的古木结构进行力学分析 [70],如图 8 所示. 台湾阎嘉义,金文森等对中国传统木构造榫卯系统之结构行为进行了研究 [69].

这种空间二节点单元有 6 个互不耦合的弹簧组成,两个节点有共同的坐标,没有质量也没有几何尺寸,其单元刚度矩阵如式 (1) 所示. 其中  $K_x, K_y, K_z$  分别为半刚性节点对应于  $x, y, z$  轴向的变形刚度,  $K_{\theta_x}, K_{\theta_y}, K_{\theta_z}$  分别对应于沿  $x, y, z$  轴的弯曲或扭转刚度. 因此在有限元模型中,柱是普通的空间梁单元,而每一根带榫头的梁都将分为 3 个单元,自由度由 12 个变为 36 个.

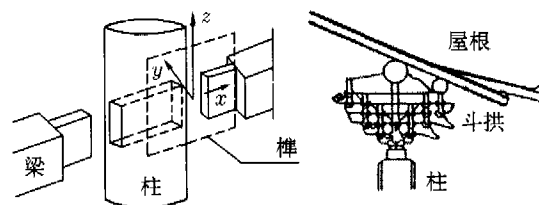


图 6 中国木结构斗拱和榫卯连接

$$[K'^e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (1)$$

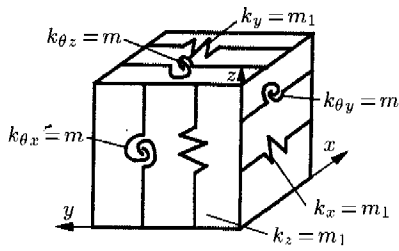


图7 可变刚性节点的力学模型

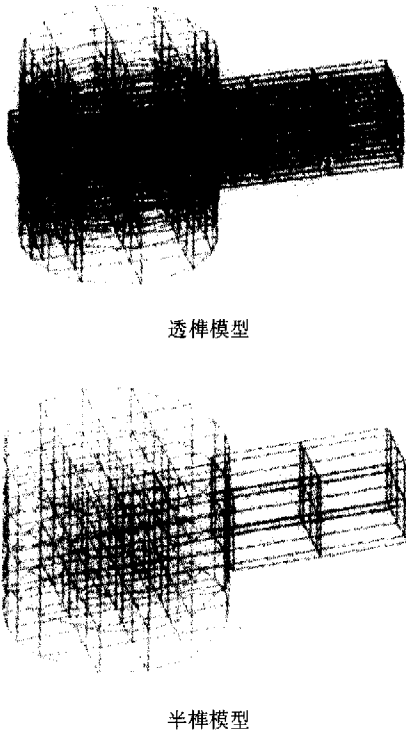


图8 榫卯连接有限元模拟 [70]



图9 木柱与石础的连接 (俞茂宏摄 1985)<sup>[1]</sup>

### 3.3 木柱与石础的连接

木柱与石础的连接为中国古建筑结构的另一特点。图9为俞茂宏在国家重点保护文物西安北门箭楼抢险修缮过程中拍摄的木柱与石础连接处的照片<sup>[1]</sup>。它们之间没有任何连接。由于地基的不均匀沉降，修缮过程中将木柱抬高，显示出木柱与石础的连接。它们是一个滑移系统，但摩擦力较大，一般可作

为铰接结构。在水平地震和垂直地震共同作用下，则可能产生相互滑移。

## 4 斗拱结构力学性能研究

斗拱是中国古代木建筑的又一特殊结构，图10为一种典型的斗拱结构模型。为了更好地认识斗拱的力学性能，1996年，在西安东城门城楼的修缮工程中，俞茂宏研究组在东城门城楼修复小组的帮助下，制作了二种斗拱模型，并进行了静力和动力实验。1999年赵均海 - 俞茂宏发表了斗拱模型静力和动力特性的论文<sup>[60,61]</sup>。图11为斗拱的动力实验示意图。图12和图13为斗拱的静力和动力实验示意图。

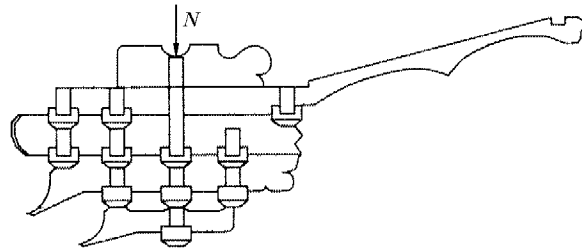


图10 斗拱结构模型

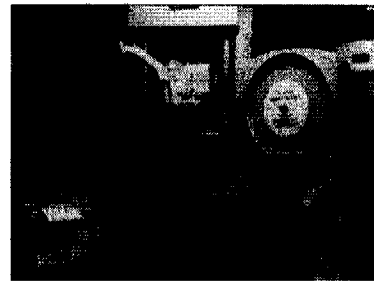


图11 斗拱模型的实验 (俞茂宏摄 1997)

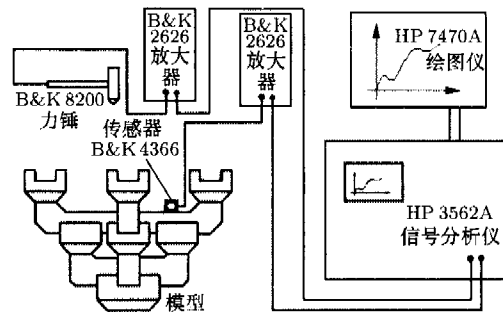


图12 斗拱的动力实验示意图

赵均海，俞茂宏等得出的斗拱模型在长方向(图10的水平方向)和短方向(图13的水平方向)的静力反复荷载位移曲线如图14和图15所示<sup>[60,61]</sup>。反方向的曲线可由对称性得出(如图16)。斗拱模型的滞回曲线表明斗拱具有良好的韧性和抗震性能。这可能是国内外较早进行的斗拱结构的力学性能试验。但中国古代木建筑的斗拱结构复杂，种类繁多，仅山西应

县木塔的斗拱就有 52 种之多。西安交通大学进行的

好的抗震性能。

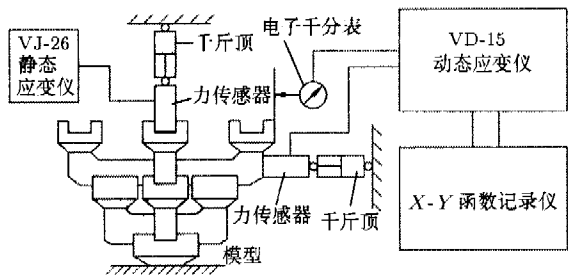


图 13 斗拱的静力实验示意图

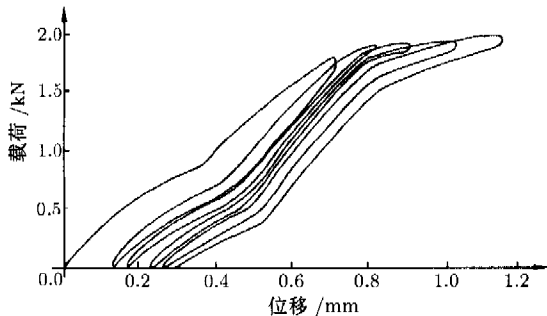


图 14 斗拱模型在长方向反复荷载位移曲线

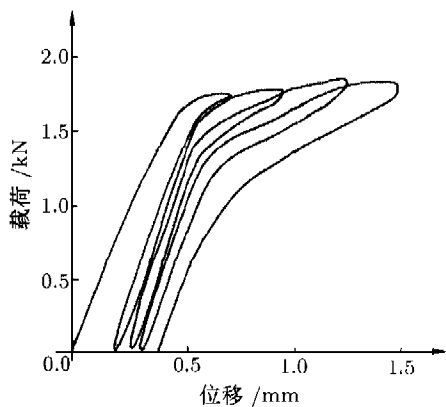


图 15 斗拱模型在短方向的反复荷载位移曲线

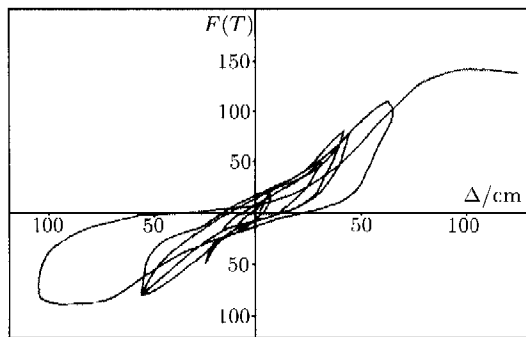


图 16 木结构模型的滞回曲线

斗拱结构的力学性能试验只是一个开始。2003 年，高大峰，赵鸿铁，薛建阳等进行了另一种古代大木作结构斗拱的试验研究 [71]。试验结果表明斗拱具有良

## 5 结构模型静力和动力试验

我们对北门箭楼做了现场脉动力测试，还制作了木结构和有机玻璃结构两种模型。在航天部 211 研究所的支持下，采用法国多点稳态激励系统，分别对钟楼结构有机玻璃模型、箭楼结构有机玻璃模型和木模型进行了多点稳态共振实验，获得了其振动特性 [1,6,23,31,32]。实验装置如图 17。

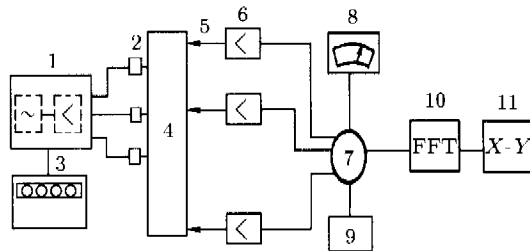


图 17 多点稳态激励实验布置图

- 1——振动分析仪；2——激励器；3——频率显示器；4——箭楼结构有机玻璃模型或木模型；5——加速度传感器；6——电荷放大器；8——测量放大器；9——双踪示波器；10——FFT 分析仪；11——X-Y 记录仪

### 5.1 木结构模型

木模型能真实地反映原型结构的力学性能，为了解北门箭楼的抗震性提供可靠的参考数据。俞茂宏研究组在北城门箭楼抢险领导小组的帮助下，制作了箭楼 10 : 1 的中三跨局部木结构模型。模型按几何相似关系制作，不采用五金和胶水，是纯木结构，并按比例制作了斗拱。模型照片如图 18 所示 [1]。2003 年，高大峰，赵鸿铁等制作了

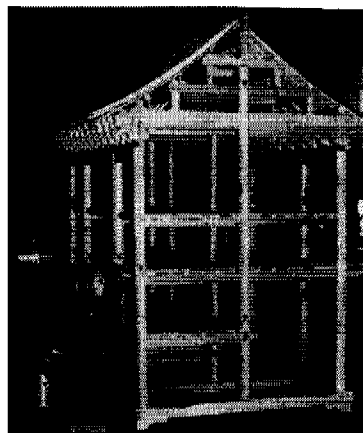


图 18 箭楼木结构模型

单层四柱木结构古建筑模型 (图 19) [72]，并用混凝土板模拟古建筑的大屋顶，进行了模拟地震动的振动台

试验研究. 结果表明, 古建筑因柱根滑移而隔震; 斗拱因弹塑性变形和摩擦滑移消耗掉大量地震能, 减轻

了结构震害. 这与箭楼木结构模型的多点稳态激励试验结果相一致.

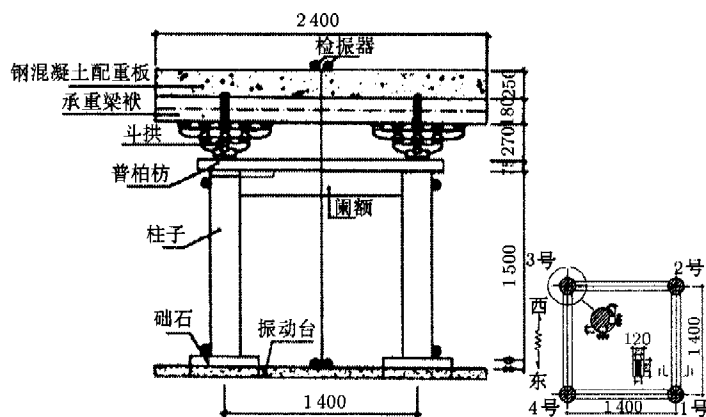


图 19 单层四柱木结构古建筑模型 [72]

### 5.2 有机玻璃模型

有机玻璃模型是按 30 : 1 的比例加工的, 俞茂宏研究组制作了钟楼和箭楼两种有机玻璃结构模型, 见图 20 和图 21. 有机玻璃模型试验的目的是, 比较两种模型实验, 考察这种结构作为古建木结构模型试验研究的可行性. 模型材料性能测定, 木材和有机玻璃的物理力学性能的实验测定结果见 [1, 6, 23, 31, 32].

有机玻璃模型试验, 主要用于测定结构的整体

性能, 但过去的研究大多是作为钢筋混凝土结构的模型. 而对于木结构这种以榫卯为主的联接形式, 有机玻璃模型试验是否有意义, 我们在不考虑原结构屋顶荷载的情况下, 对木模型和有机玻璃模型进行了多点激励试验, 将测试结果换算到原型. 结果表明: 箭楼结构的有机玻璃模型、木模型以及与有限元计算的结果相接近, 如表 1 所示. 有限元计算与有机玻璃模型测试结果 1 阶频率基本一致, 2 阶频率偏小.

表 1 3 种方法结果的比较

	横向振动				扭转振动			
	1 阶		2 阶		1 阶		2 阶	
	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型
木模型	1.46 Hz		8.31 Hz		3.10 Hz		12.78 Hz	
有机玻璃模型	1.79 Hz		8.02 Hz		2.35 Hz		10.11 Hz	
有限元计算	1.71 Hz		7.10 Hz		2.21 Hz		8.03 Hz	

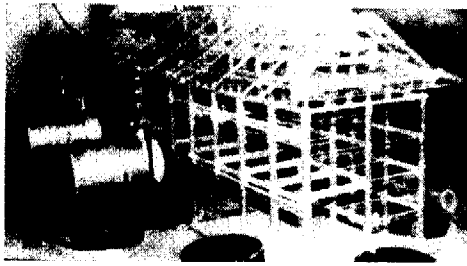


图 20 箭楼结构有机玻璃模型的多点稳态激励实验 (俞茂宏摄 1987)

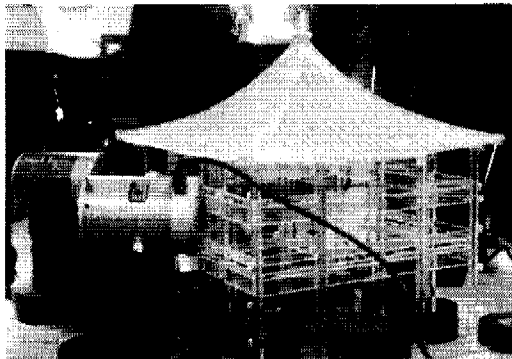


图 21 钟楼结构有机玻璃模型 (俞茂宏摄 1985)

为进一步研究大屋顶对两种模型结构振动特性的影响,我们对有机玻璃局部模型也做了改变屋顶重量的试验.改变屋顶重量的试验结果表明:重量增

大,两种结构的 1 阶频率均有较大影响,而 2 阶频率影响减小.1 阶频率降低达 20% 之多,2 阶频率降低接近 10%.

### 5.3 现场结构脉动和正弦激励试验 [1,6,30]

此外,俞茂宏研究组又在北门箭楼的抢险、加固和复原工程的不同阶段进行了现场试验,得到了北门箭楼在屋顶挂瓦前后的 4 种频率,结果列于表 2 [1,6,30].在北门箭楼的修复过程中,我们共作了两次脉动测试.第 1 次于 1988 年 4 月屋顶挂瓦前,其横向弯曲振动 1 阶、2 阶频率为 1.45 Hz 和 2.9 Hz,扭转振动 1 阶、2 阶频率为 2.175 Hz 和 3.4 Hz.第 2 次测试于 1988 年 6 月屋顶挂瓦后,即箭楼的主要修复工程基本完工时,横向弯曲 1 阶、2 阶频率为 1.1 Hz 和 2.725 Hz,扭转振动 1 阶、2 阶为 1.7 Hz 和 3.10 Hz.两次测试的分析结果列于表 2 中.屋顶挂瓦后,即重量增加,激振频率降低,1 阶频率降低 23% 左右,2 阶频率降低 7% 左右,可见屋顶重量对结构动力特性有明显影响.这一结果反映了大屋顶对古建筑木结构振动特性的影响.由于这些结果一般不可能得到,因此是十分宝贵的.详细结果可见俞茂宏,刘晓东,方东平的论文 [6].此外,对柱础及墙根测点信号的频谱分析表明,基础在 60 Hz 有一峰值,即其卓越周期为 0.017 s,这与建筑物自振周期 0.91 s 相差很大.

表 2 箭楼复原工程的不同阶段的现场试验结果

		横向弯曲		扭转	
		1 阶	2 阶	1 阶	2 阶
挂瓦前	频率	1.45 Hz	2.90 Hz	2.175 Hz	3.40 Hz
挂瓦后	频率	1.10 Hz	2.725 Hz	1.70 Hz	3.10 Hz

振型

### 5.4 结构模型静力试验

为了检验箭楼的抗震性能及破坏机理,了解结构的滞回特性、刚度和延伸性以及木樨和斗拱的工作行为,俞茂宏,刘晓东,方东平在原航天部 211 研究所进一步做了模型的静力试验 [1,6].试验模型为 10 : 1 的西安箭楼中三跨模型,构件的联接方式与实际结构相同.木结构模型的正向加荷和反向加荷实验变形照

片如图 22 所示 [1,6].

由于试验前对木结构受力性能并不了解,也无理论分析作指导,因此试验时采用变力加载做控制值,逐级加至破坏.木结构受力破坏的过程,基本上是节点破坏的过程,材料并未达到塑性,可称之为结构破坏.木结构模型的结构破坏曲线如图 23 和图 16 所示 [1,6].



结构在受极限荷载前, 荷载 - 位移曲线缓缓上升, 没有明显的拐点, 即屈服点不明确. 在受极限荷载后结构仍有很大一段位移, 滞回曲线呈反 S 形, 反映出较大的滑移影响, 因此木结构具有较大韧性和抗震性能<sup>[1]</sup>. 木结构模型试验时的斗拱变形如图 24 所示.



图 22 木结构模型的正向加荷和反向加荷变形照片<sup>[1,6]</sup>

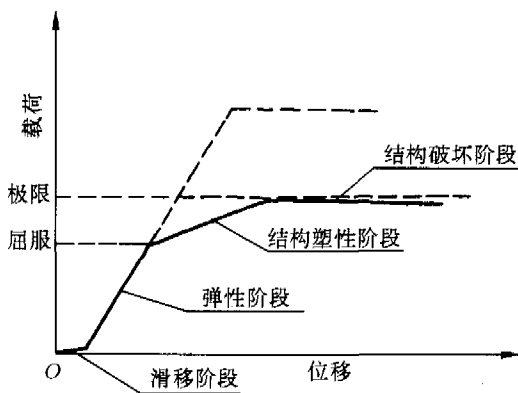


图 23 木结构模型的破坏曲线



图 24 木结构模型试验时的斗拱变形<sup>[1]</sup>

关于榫头和斗拱的工作状态. 木结构在不受水平力时, 下部框架的梁是不受力的, 竖向荷载由 3 排立柱共同承担. 在受水平荷载的最初阶段榫头开始咬紧, 结构表现出少量滑移, 这一阶段榫卯可认为是铰结状态. 继续加荷, 榫头开始受剪力和弯矩作用. 结构强度提高, 直至屈服荷载, 榫头呈刚性联结. 继

续加荷到极限荷载, 边排立柱两端的联接榫头 (即柱底与基石、柱顶与斗拱) 发生拔卯甚至脱卯. 此时梁柱联接榫头虽有错位现象, 但没有脱出, 这一阶段称结构塑性阶段, 之后在极限荷载下, 结构延性充分发展, 直至倒塌, 称之为结构破坏阶段 (但材料不会达到塑性).

因此根据榫头在水平荷载下的工作情况, 将木结构荷载 - 位移曲线分为 4 个阶段, 如图 23. 实验中我们发现, 结构破坏主要是由于边排立柱两端联接较弱, 发生脱卯, 结构整体性削弱引起的. 因此, 只要立柱两端联接加强, 同时采取一定措施, 使梁柱联接榫头在最不利的情况下, 不发生脱卯, 那么结构承载能力能提高. 如图 23 中虚线部分.

因此采取抗震措施的关键是: (1) 使结构具有一定的韧性, 以吸收振动能; (2) 加强各构件之间的联接, 提高结构刚度, 充分发挥材料的力学性能, 使结构最终达到材料破坏.

## 6 古建筑结构弹塑性分析和不均匀沉陷计算

结合 1983 年北门箭楼因地基下沉使上部结构大幅倾斜的险情, 方东平、俞茂宏编制了弹塑性分析程序 FST 对其进行了计算分析. 由于结构的对称性, 取结构的西半部进行计算. 计算结果如表 3<sup>[1,28]</sup>.

从表 3 中可见, 计算结果正确地反映了以榫头为主要连接方式的木结构在地基沉降时的变化情况. 在大部分点上准确或较为准确的. 并与当时箭楼墙体和地面大幅开裂, 基础大量沉陷, 立柱倾斜, 部分榫头拔出, 裂缝逐日扩展增大的险情相符合. 国务院、国家文物局、省市政府及文物保护单位及时组织抢险, 采取果断有力的措施, 投入大量人力、物力, 对箭楼进行了前所未有的大规模修葺, 填堵了防空洞, 夯实基础, 并采用灰砂桩加固提高了城墙基础的承载能力, 更梁换柱, 结构复位, 彻底消除了对箭楼的威胁, 保护了这一珍贵的文物.

由表 3 还可见, 用设节点为铰接的传统方法来计算这个结构, 误差非常大, 由此也可看出榫模型的可变刚性节点单元 (图 7) 的引入, 提高了木结构计算的准确性. 此后, 我们在东门结构分析<sup>[61~67]</sup>以及在鼓楼结构分析<sup>[68]</sup>中, 都取得很好的效果.

此外, 王源、赵均海、俞茂宏等还对东门城墙进行动静力有限元分析<sup>[53,56,60~67]</sup>. 取典型平面, 有 3 排柱子的情况, 将其简化为 3 个集中力, 作用在城墙上 (图 25). 赵均海进行分析计算出各点在至各方向的位移和荷载系数 (荷载系数为  $f$ , 为分步加载的瞬时荷载,  $IV$  为结构荷载,  $P = 412.5\text{ kN}$ ) 关系, 其中 1053 点的位移与荷载系数的关系如图 25 所示. 图中  $b$  为统一强度理论的破坏准则参数. 可以看出, 强度理论的选择对计算结果有很

大影响。统一强度理论<sup>[73~77]</sup>为研究这种影响提供了理论基础。赵均海将其博士学位论文总结为学术专著<sup>[78]</sup>，西安市文物管理局李天顺，胡富民，向德等对

西安长乐门城楼修缮工程进行了总结<sup>[79]</sup>。这是对西安东门城楼结构力学研究的总结，也是继文[1]之后的2本较早的有关古建筑结构力学的著作。

表3 箭楼地基沉陷与不同方案计算结果的比较

	南排								中排							
	倾斜距离/mm				方位角				倾斜距离/mm				方位角			
	实测	计算 I	计算 II	计算 III	实测	计算 I	计算 II	计算 III	实测	计算 I	计算 II	计算 III	实测	计算 I	计算 II	计算 III
1	345	46.6	357.8	569.1	210'	31'	196'	153'	40	320	509	0'	180'	18'		
2	233	169.3	242.9	395.3	204'	0'	243'	134'	526	105.2	311.2	473	194'	0'	180'	180'
3	84	200.4	139.7	224.6	222'	10'	279'	85'	443	113.2	193	291	183'	0'	180'	180'
4	187	171.3	150	246.1	206'	0'	315'	45'	258	7.1	230	139	195'	225'	0'	180'
5	137	110.4	134	239.3	207'	0'	319'	27'	334	5.0	357	35	208'	24'	0'	185'
6	479	8.4	33	54.5	188'	45'	299'	50'	4.8	54	128	27'	355'	0'		

注：计算 I——柱础沉降量取为实际沉降值，节点铰接；计算 II——柱础沉降量取为实际沉降值，引入榫模型；计算 III——柱础沉降量取为沉降量的 1.5 倍，引入榫模型。

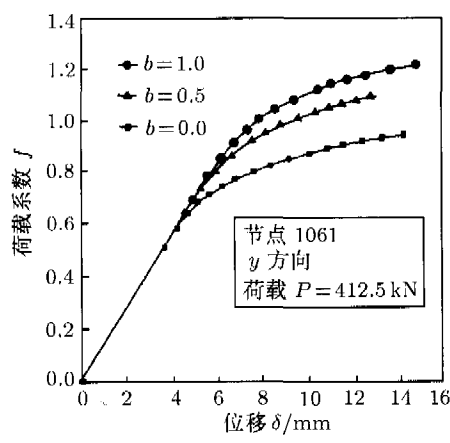
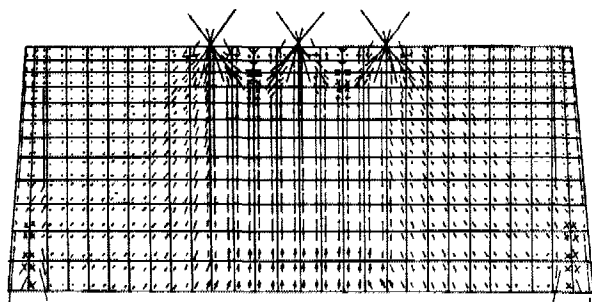


图 25 位移与荷载系数的关系

### 7 钟楼、鼓楼、城楼和宁波保国寺结构力学研究

俞茂宏、成卜乾在 202 所和 211 所的帮助下，对西安钟楼结构进行了钟楼现场实测(图 26)、结构

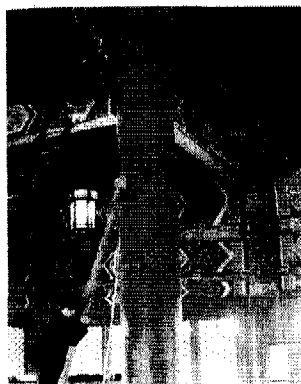


图 26 钟楼现场实测和结构模型(俞茂宏 1985)

模型的多点稳态激励实验(图 27)和有限元计算力学分析等方法，对钟楼结构的抗震性能进行了分析研究，找出了反映其抗震性能的主要阶模态，得到了它

在建筑平面各个方向的动态特性(图 28)，并据此提出保护西安钟楼的建议<sup>[1,23]</sup>。

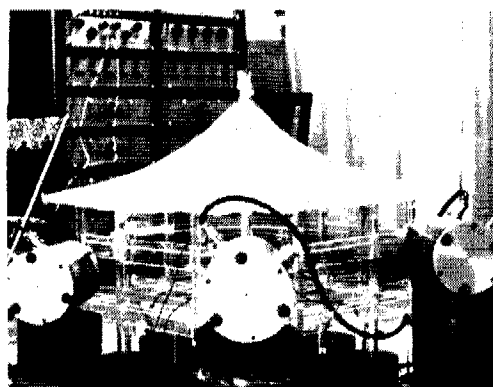


图 27 钟楼的多点稳态激励实验(俞茂宏 1985)

鼓楼的支撑及屋顶均为木结构。由于柱周围填充的砖墙与木结构之间留有间隙，不承担竖向荷载，其侧向刚度也可忽略不计，因此丁磊、王志骞、俞茂宏采用杆件单元和半刚性节点单元建立鼓楼木结构的有限元计算模型<sup>[68]</sup>。这种模型运用于西安北门箭楼有限元分析中，获得的结果与实验和实测十分接近。

鼓楼结构的屋面、楼板和墙体的重量按照面积分配到相邻的杆件上,再作为杆件单元重量的一部分,采用集中质量法建立结构的质量矩阵。

古代木结构大屋顶的重量由为数不多的几根柱子承担,柱子一般都分担承受了很大的荷载,这样,依靠柱脚与柱础之间的摩擦力,一般可以限制柱脚

的水平位移。而柱子与墙之间的空隙使墙体不能限制柱子绕柱础的转动,这样,柱和基础按浮摆式连接处理,简化为固定铰支座的力学模型。计算得出的 2 阶、3 阶、4 阶、5 阶振型,具体可见文 [68]。车爱兰,岩楯敞广,俞茂宏的研究还表明高台基对古建筑结构动力特性有较大影响 [80,81],如图 29。

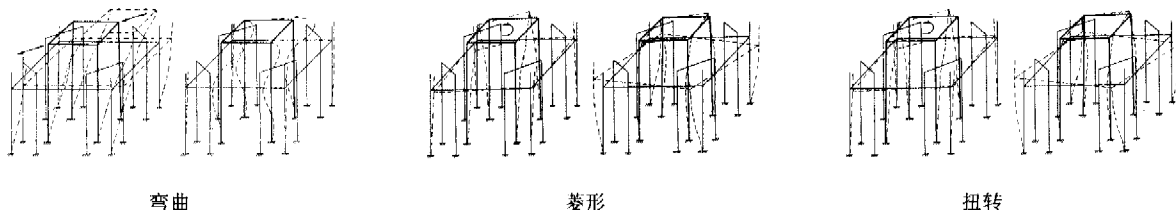


图 28 钟鼓楼结构的对角线弯曲、菱形和扭转振动

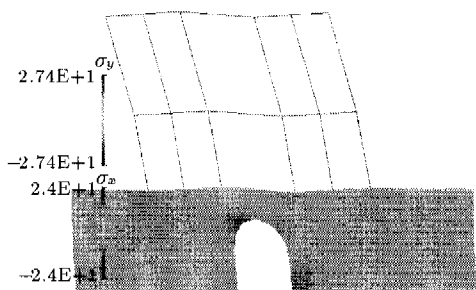


图 29 高台基对古建筑结构动力的影响

宁波保国寺是浙东现存最古老的宋代木结构建筑,是国家重点保护文物。它自清乾隆时期起,大殿结构发生北倾,探讨大殿曾经北倾原因以及经修缮后现今大殿的可靠性无疑是必要的。

古木结构的特点是梁柱的榫卯连接具有半刚性性质。董益平,竺润祥,俞茂宏采用有限单元法对大殿结构进行力学分析时,榫卯连接采用空间二节点虚拟弹簧元进行模拟,单元刚度矩阵中相应的刚度特性系数可由接触有限单元法近似求得。榫卯连接有限元模型如图 7,图 8 所示。

这样,大殿结构可离散为杆、梁、壳、体元和上述虚拟弹簧元等的组合,在屋面荷载、雪荷载和风荷载作用下采用有限元法可求得各节点的位移和相应应力。

通过计算表明 [8,70],不计 4 号柱时产生的向北位移比考虑该柱参加受力时要大得多,可见北倾原因确系 4 号柱年久失效而引起。计算结果也表明,现今大殿结构由受力来看是安全的。同时预示了可能出现的最危险部位。

## 8 古建筑结构材料的力学性质

### 8.1 唐代夯土和明代夯土的力学性质

为了研究古塔地基承载力,我们先研究西安黄

土的强度特性。许多试验结果表明,土的屈服强度介于双剪强度理论与 Mohr-Coulomb 强度理论之间。

图 30 为邢义川,郑颖人院士得到的西安黄土的试验结果 [82]。图中虚线为 Mohr-Coulomb 强度理论,实线为统一强度理论的一个特例,即  $b = 1/2$  的统一强度理论。如图 30 中  $b = 1/2$  的十二边形所示。有关统一强度理论的中文系统论述可见文 [73, 74],英文系统论述可见文 [77]。

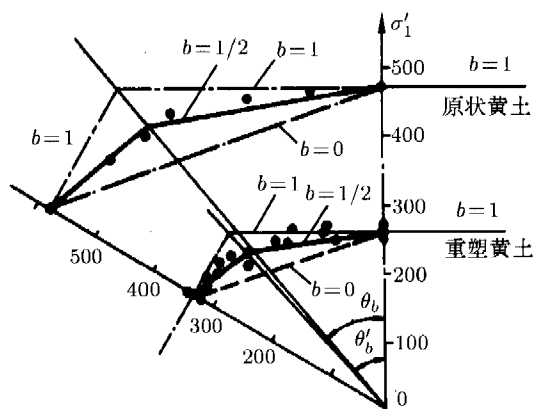


图 30 统一强度理论与实验结果比较

古建筑材料的拉压强度均不相等,因此第 3 和第 4 强度理论均不适用。拉压强度不相等材料的一系列破坏准则可以用统一强度理论表示为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t$$

$$\text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ (广义拉伸应力状态)}$$
(2a)

$$F' = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_c$$

$$\text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ (广义压缩应力状态)}$$
(2b)

$$F'' = \sigma_1 = \sigma_t$$

当  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$  时 (3 向拉伸应力状态) (2c)

取不同的参数  $b$ , 统一强度理论可以表示或逼近现有的各种强度理论. 其中,  $b = 0$  为 Mohr-Coulomb 强度理论;  $b = 1$  为双剪强度理论;  $b = 1/2$  为介于两者之间的十二边形的新强度理论, 它们在偏平面上的极限面如图 31 所示.

由试验结果对比可知, Mohr-Coulomb 强度理论与实验结果差距较大;  $b = 1/2$  的十二边形的统一强度理论既考虑了中间主应力对材料强度的影响, 又较传统的强度理论更符合实验结果, 可以更好地发挥材料的强度潜力. 因此在黄土工程中可以广泛选用.

唐代夯土、明代夯土的试验上样取自古城墙西南含光门断面处, 在断面处可以看到城墙内土是分层夯实的, 唐代土轮廓明显, 且较明代土颗粒细, 土体密实, 含水量高 [1].

试验的主要目的是测定土的参数, 分别进行了唐代土及明代土的三轴固结排水剪切试验, 围压分别为 100 kPa, 200 m, 300 kPa 及 400 kPa.

俞茂宏和孟晓明得到的西安古城墙唐代夯土和明代夯土的三轴剪切试验结果如图 32 和图 33 所示 [1,7,35].

此外, 李耀明等对箭楼加固灰砂桩地基的承载力

进行了现场试验. 俞茂宏、孟晓明、谢爽分析了箭楼加固灰砂桩桩间土的应力 - 应变关系; 通过对比三轴压缩试验和三轴伸长试验结果, 表明中主应力对土的结构强度影响较大, 在岩土数值分析中应考虑它的影响. 三轴剪切试验结果如图 34(a), 它有较高的强度, 但当它浸水饱和时, 强度有较大下降, 如图 34(b). 因此, 城墙上的湿陷是城墙发生塌方的主要原因之一 [1,7].

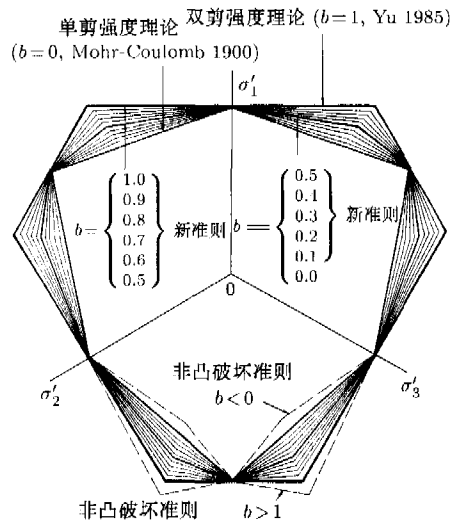


图 31 统一强度理论的极限线 [76]

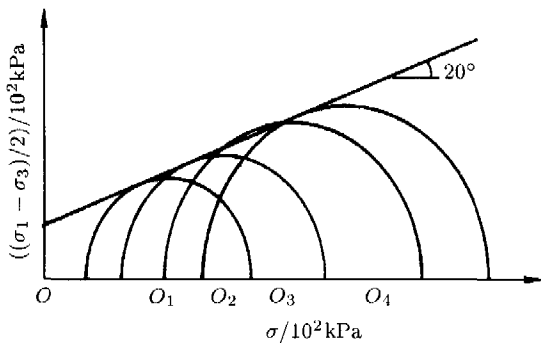


图 32 西安古城墙唐代夯土的三轴剪切试验结果

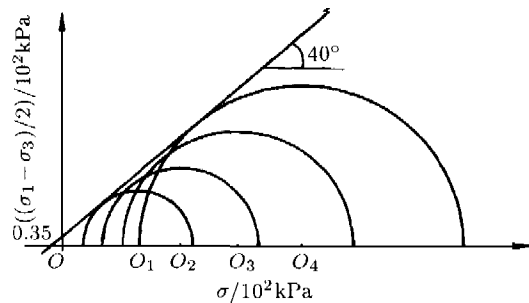
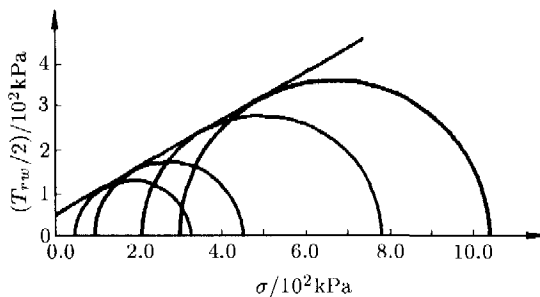
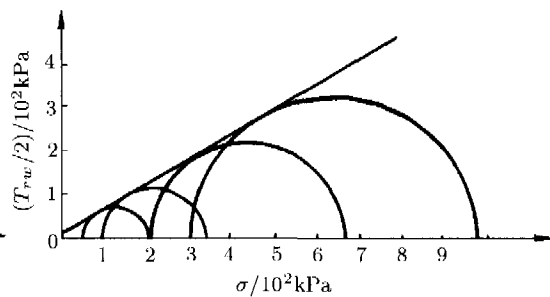


图 33 西安古城墙明代夯土的三轴剪切试验结果



(a) 原状土 ( $\sigma_2 \geq (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ )



(b) 浸水饱和土 ( $\sigma_2 \geq (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ )

图 34 原状土样及浸水饱和土样的强度包线

## 8.2 明代城砖和城楼木材的力学性质

赵均海, 俞茂宏在西安古城墙东门城楼研究中对城墙的新旧砖和新旧木材的力学特性进行了试验, 140 多个试件得出的结果如表 4 所示. 旧木材是原结构中所用的清代木材, 新木材是 1997 年修缮中使用

的木材; 旧砖指原结构中所用的明朝砖, 新砖指 1997 年修缮中使用的砖.

从表 4 可知, 原结构中使用的旧砖和旧木材的性能均比此次修缮中使用的砖和木材的性能好<sup>[78]</sup>.

表 4 城楼结构中所用的新旧木材和新旧砖的力学特性

试验名称	材料类型	标准尺寸 (mm×mm×mm)	试件个数	平均强度 (MPa)
木材弯曲试验	旧木材	20×20×300	10	95.71
	新木材	20×20×300	10	72.95
木材拉伸试验	旧木材	15×4×200	10	85.74
	新木材	15×4×200	10	69.68
木材顺纹剪切	旧木材	20×25×20	10	7.31
	新木材	20×25×20	10	5.53
木材顺纹压缩	旧木材	20×20×20	20	53.29
	新木材	20×20×20	20	40.30
城墙砖压缩	旧砖	100×100×120	10	8.52
	新砖	100×100×120	10	6.81
城墙砖抗折	旧砖	100×100×200	10	2.41
	新砖	100×100×200	10	1.58

## 9 西安古城墙稳定性研究

西安明城是目前全国保存最为完整的, 也是世界著名的历史名城. 它的发展已经历了长达 3000 余年的变迁. 唐长安城东西长 9.5 km, 南北长 8.4 km, 全长约 36 km, 是当时世界上最为宏伟壮丽的都城之一. 现在的西安明城为公元 1374 年~1378 年所修, 是在唐长安城中的皇城的基础上, 将东面和北面向外

扩展 1/4 而成, 东西长 4.1 km, 南北长 2.6 km, 全长 13.74 km, 约为唐长安城墙全长的 1/3.8, 城墙所包含的面积大约为唐长安城的 1/7.

明城墙周长 14 km, 但城墙内和城墙下共有 41 km 的防空洞. 图 35 为其中 2 例. 城墙多次发生塌陷. 为此, 俞茂宏研究组在 20 世纪 80 年代与西安环城建设委员会合作, 对城墙稳定性进行研究. 俞茂宏、曾文兵、马国伟、扬松岩、何丽南、王源、孟晓明等



图 35 周长 14 km 的城墙上下左右挖了 41 km 的防空洞 (俞茂宏摄 1988)

采用统一强度理论以及与其相适应的流动法则, 并将其有限元化, 编制了以这一个新的弹塑性本构模型为基础的有限元计算程序——统一弹塑性有限元程序 UEPP (unified elasto-plastic program)<sup>[75,76]</sup>. 对古城墙的保护和开发进行了研究. 图 36 为西安古城墙加载过程的塑性区扩展图<sup>[1,7]</sup>.

在常规情况下, 西安古城墙具有足够的强度不会发生破坏, 安全系数在 3 以上. 这些为每年一次的西安城墙国际马拉松赛跑的安全性提供了理论依据<sup>[1]</sup>.

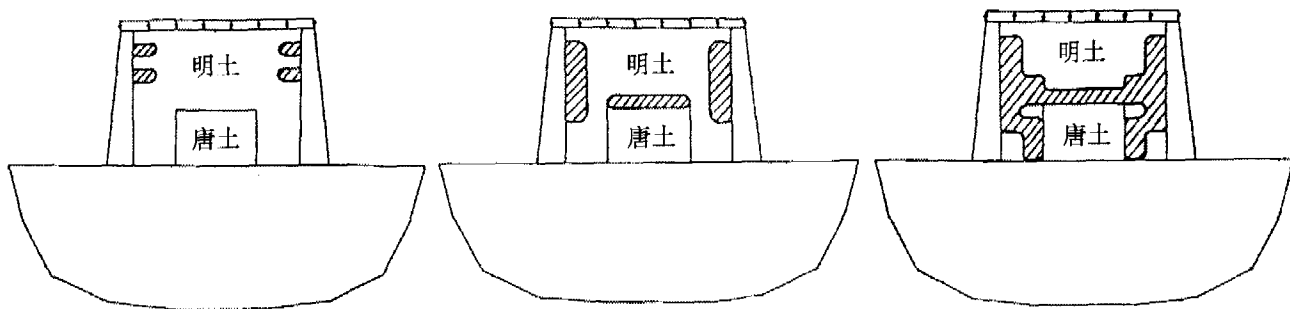


图 36 西安古城墙加载过程的塑性区扩展图

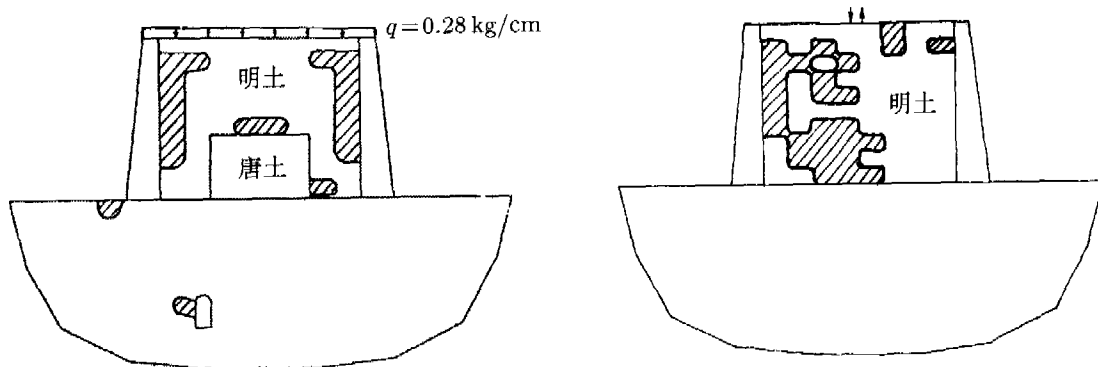


图 37 西安古城墙下防空洞计算简图和防空洞塑性区扩展图

## 10 古塔结构力学特性研究

### 10.1 古塔的地基结构

中国古塔的形式众多, 主要为砖塔和木塔. 西安唐大雁塔现为 7 层砖土结构, 自地面至塔刹高 64.1m, 平面成方形, 建立在一东西长 45.9m, 南北长 48.9m, 高约 4.2m 的基座上. 塔身高 51.63m, 成正方形角锥

状, 底边每边长 25m, 塔身全用青砖砌成. 大雁塔和小雁塔都是国家重点保护文物, 不容许进行任何破坏性试验. 因此, 根据有限结果和西安地区与大雁塔较近年代建造的古塔的史料记载, 俞茂宏将大雁塔的基础形式考虑为 4 种主要形式: 矩形基础形式; 阶梯形基础形式; 倒阶梯形基础形式和有地宫的倒阶梯形基础形式, 如图 38 所示.

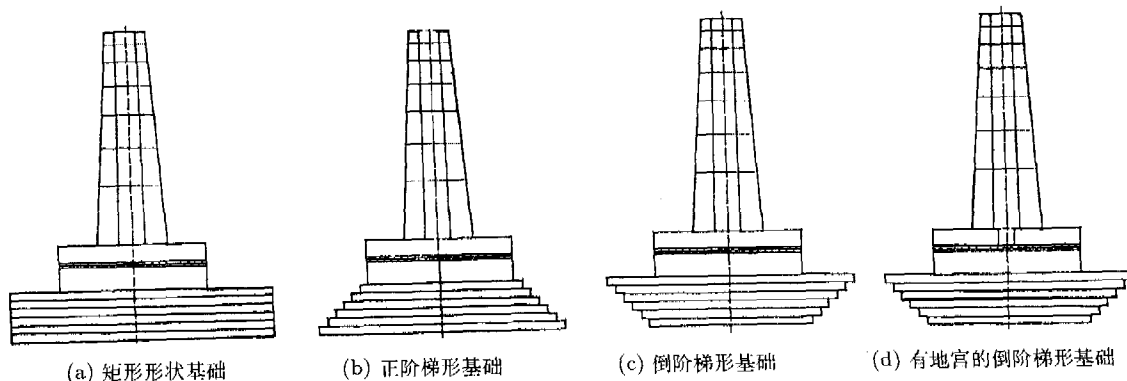


图 38 古塔的 4 种基础形式

在 20 世纪 90 年代初开始, 俞茂宏和研究生鲁宁、谷江、高大峰、尹征南等对西安唐大雁塔和小雁塔的地基结构和强度进行了多次研究<sup>[51,52,57,83,84]</sup>. 得到一系列结果. 图 39 为古塔的矩形基础和倒阶梯形基础和地基(对称, 取一半)的塑性区发展图. 1981 年 8 月 24 日法门寺塔一半塌陷, 图 40 为俞茂宏拍摄的法门寺塔一半塌陷的现场照片.

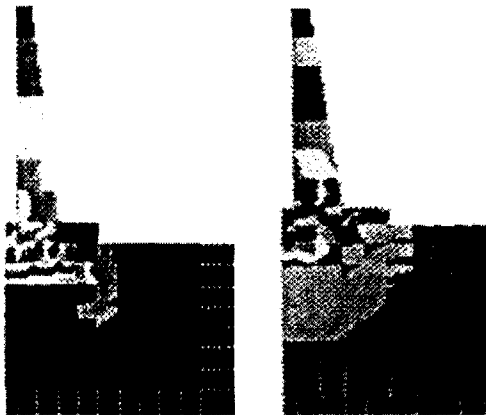


图 39 矩形基础和倒阶梯形基础的塑性区发展

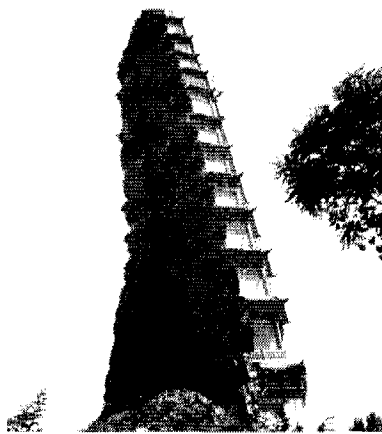


图 40 法门寺塔一半塌陷的现场照片(俞茂宏摄)

## 10.2 古塔的地基承载力分析

研究结果可以看出: (1) 在相同力作用、相同基础形式下, 塑性区的大小随统一强度理论的  $b$  值的增大而减小,  $b = 0$  时塑性区最大,  $b = 1$  时塑性区最小. 这表明考虑中间主应力效应时, 将提高结构的极限荷载, 这一结论与一些岩土工程的实际结果相符合. 因此合理选择  $b$  值对充分利用材料很重要; (2) 不同基础形式下, 通过采用相同屈服准则的比较可知, 正阶梯形基础形式的塑性区大于倒阶梯形基础时的情况, 并且高应力区的范围也有所扩大. (3) 相同基础形式下, 采用不同屈服准则时, 帽子模型的塑

性区大于非帽子模型的塑性区; (4) 2 种单一屈服面帽子模型的计算结果相比无太大的差异; (5) 有无地宫对塑性区的大小影响不显著.

可以说, 有塔就可以有地宫, 而佛塔也需要有地宫. 杭州雷峰塔有地宫, 日本的一些塔也有地宫. 中国的唐塔大多在陕西, 因此古塔的保护也包括对地宫的保护.

根据分析结果, 矩形, 正阶梯形无地宫和倒阶梯形无地宫 3 种形式下的频率相互差别不大, 它们的一阶频率为 1.25 Hz, 与实验结果的 (1.3~1.4) Hz 接近. 高阶频率的实测结果由于信号干涉较多, 不太理想. 此外, 对小雁塔的 2 种不同形状基础的研究也得到类似的结果. 结果显示, 小雁塔地基在强度方面的潜力是相当大的. 但根据俞茂宏、谢爽的古建筑土的三轴试验结果(图 34), 表明黄土有较高的强度, 但当它浸水饱和时, 强度下降较大, 如图 34(b). 法门寺塔的一半塌陷正是当年绵绵淫雨, 地基浸水, 黄土强度下降而引起的.

## 10.3 西安大雁塔和应县木塔的结构类似现代的筒中筒结构, 有很好的抗震性能

大雁塔高 64 m, 塔身高 51.6 m, 底层边长 25 m, 墙厚 9 m. 如塔身全部为砖体, 则塔自重产生的地基平均应力为 0.315 MPa, 而大雁塔周围土的承载力最大为 0.2 MPa. 因此它不可能全部为砖体, 而是内外表面为砖体, 中间为土. 这种结构具有二个优点: (1) 结构上形成筒中筒的结构, 有优良的抗震性能. (2) 减轻了结构自重产生的地基应力. 图 41 为 1990 年大雁塔动力特性现场试验的照片.



图 41 大雁塔动力特性现场试验<sup>[1]</sup>

对于中国古代木结构高层建筑, 山西应县木塔和杭州六和塔也具有内外双层结构, 类似于现代的筒中筒的结构, 也有优良的抗震性能. 大雁塔的结构简单, 应县木塔的结构复杂, 但都构成了内外双层的筒中筒结构, 它们有优良的抗震性能. 从下面的图 42 的应县木塔结构剖面图<sup>[95]</sup> 可以看到, 应县木塔的优良的抗震性能有其科学的基础.

### 10.4 应县木塔结构力学研究

1986年太原理工大学和中国建筑科学研究院抗震研究所参加西安交通大学主持的国家自然科学基金关于古建筑结构研究的项目，对西安和太原的古建筑进行了系统的研究。太原理工大学对应县木塔(图42)结构力学特性进行了长期的研究。中国建筑科学研究院抗震研究所李德虎，何江发表了砖石古塔动力特性的试验研究的论文<sup>[85]</sup>。文献[86~95]对古塔动力特性进行了各种研究。

2000年，根据山西省应县木塔修缮保护工程管委会的要求，中国科学院力学研究所张德良等对应县

木塔进行了现场应力、位移和振动测试，并利用计算机手段对木塔结构动态响应和风载效应进行数值分析工作<sup>[9,10]</sup>

研究工作同时对原型应县木塔和现存残损应县木塔的力学分析展开的。振动测试分别对人工激振、环境脉动和自然地震条件下进行。由于在限定的激振力作用下构件上的信号很小，测试记录难以识别，

根据需要对木塔选定的测点采用锤击法进行测试，以作为补充。测得现存木塔固有频率。同时在确定现存木塔位移、振型、振动阻尼比、木塔的传递函数、节点耗能比和层间刚度值。

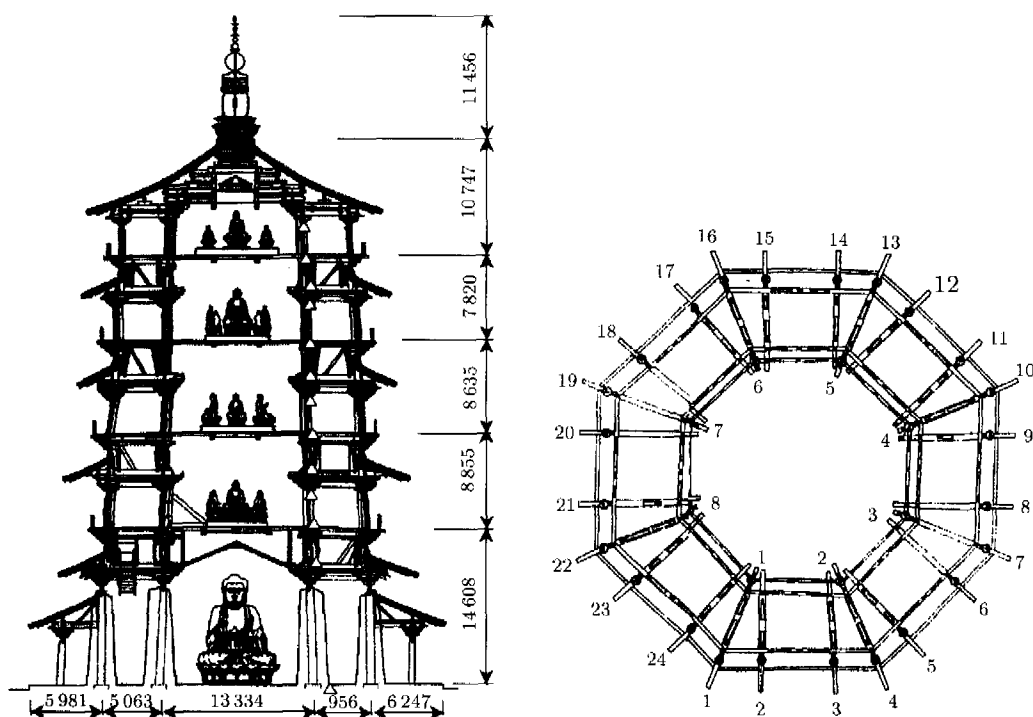


图 42 应县木塔结构剖面图

#### 10.4.1 现存木塔固有频率

利用环境脉动数据，通过谱分析方法，得到现存应县木塔的自振频率。根据功率谱的突出峰值和相应的各个测点位移比的变化，可识别出4阶主频率的频率值，它们是：0.635 Hz, 1.758 Hz, 3.076 Hz 和 3.955 Hz。表5是现存木塔在不同方向上自振频率对照表。

脉动测量测得木塔的第1振型的频率为0.635 Hz，它的周期约为1.57 s。一般说来，木塔的第1振型频率起着主要作用。但是，通过分析可以发现，由于应县木塔的结构特殊，木塔的第2振型频率、第3振型频率，甚至第4振型频率在某些情况下也起相当大的作用。

表 5 脉动法测得的现存应县木塔自振频率比较

	第 1 自振频率 (Hz)		第 2 自振频率 (Hz)	
	东西方向振动	南北方向振动	东西方向振动	南北方向振动
太原理工大学	0.635	0.635	1.758	1.758
地震局强震中心	0.62	0.64	1.75	1.75



#### 10.4.2 现存木塔振型

在确定现存木塔固有频率后,用不同测点在木塔固有频率处响应比就可确定现存木塔振型。

现存木塔振动阻尼比,我们只能借助脉动测试数据确定木塔的传递函数,采用能量法对测试结果进行统计分析。我们提出节点耗能比的概念,将一些难确定的影响因素,进行综合考虑,归入斗拱节点耗能比中。

现存木塔层间刚度识别计算是以振动方程、木塔质量和测得的木塔位移值进行。

在现场测量的基础上采用两种不同的变模量模型对原型和现存应县木塔自重作用下结构静态响应和在 $8^\circ$ 设防烈度地震波作用下的动态响应进行了数值模拟。表6给出了原型和现存应县木塔弯曲和扭转振动频率计算值和现场实测值比较。从表6中可以看出计算和实测是吻合的。

为了研究风场对木塔的影响,利用有限体积法对风载效应进行了数值计算和力学分析。三维非定常守恒型 Navier-Stokes 方程组是以原始变量的速度和压力为求解变量,采用有限体积法对三维非定常守恒型 Navier-Stokes 方程组进行空间离散,求解变量设置在单元中心。在空间离散时方程各项均采用二阶迎风格式,压力和速度的耦合采用应用较为广泛的 SIMPLE 算法求解。

综合分析和比较原始和现存木塔的结构静态响应、地震波作用下结构动态响应的数值计算和现场实测结果,可以得出如下结论:

(1) 无论是原始还是现存木塔动静态响应分析指出,应县木塔各层的内外槽柱顶端斗拱受力都比较大,最大应力值出现在木塔第1层内槽柱顶端斗拱上。斗拱的设计和加固要特别引起注意,特别是1层、2层内槽柱上、下端的斗拱设计。

(2) 无论是原始还是现存木塔动静态响应分析指出,应县木塔的内槽柱受力比外槽柱受力普遍要高,木塔各层内槽柱是主要的受力构件,特别是第2层内槽柱应力值最大,木塔在2层、3层损伤和破坏较严重,特别是第2层损伤和破坏,这一现象的发生决不是偶然的,是和应县木塔结构原有设计有关。

(3) 现存木塔受力状况比原始木塔受力状况要严重的多。因此,现存应县木塔受力状况是十分不利的,它比原始木塔更易受到损坏,如果不对现存木塔进行维修,随着时间的推移,现存木塔受力状况将会越来越恶化,损坏越来越严重。

(4) 无论是原始还是现存木塔动态响应分析指出,木塔的位移从1层到5层是逐步增加的,木塔位移最大值发生在木塔塔顶,最大位移大约在 $2.0 \sim 4.0$  cm 的范围内,由于计算条件的限制,我们只是完成4s内的木塔结构动态响应的数值计算,目前我们得到的木塔位移的最大值是偏小的。关于木塔位移的分布规律,计算和实测结果还有些差异,原因目前尚不清楚,有待进一步研究。

(5) 地基的质量对塔体稳定性起重要作用,尤其对古建筑更为重要,因此为了保证古建筑的安全稳定,对古建筑地基的研究工作必须引起足够重视。

表6 应县木塔弯曲和扭转振动频率实测值和计算值比较

木塔振动频率 (Hz)	第1频率	第2频率	第3频率	第4频率	扭转第1频率
现存木塔实测值	0.64	1.70	3.03	4.0	无
原始木塔计算值	0.64	1.68	2.90	3.51	0.99
现存木塔计算值	0.64	1.69	2.92	3.80	0.99

(6) 为了研究风场对木塔的影响,利用有限体积的 SIMPLE 算法对风载效应进行了数值计算和力学分析。总的说来,风载压力对木塔的影响并不是很大。木塔各层的最大风载压力大约 $750 \sim 890$  Pa (大约为 $0.0075 \sim 0.0089$  kg/cm<sup>2</sup>),相对于其他荷载对木塔的影响来说是比较小的。

(7) 在木塔各层的背风面和塔顶附近的分离区内,都会形成涡旋和回流。在木塔上部各层分离区的涡旋和回流会使各层的飞檐、塔刹和塔顶附近的附属挂件遭到严重破坏。在木塔的地面附近分离区的涡旋

回流又会使地面上的尘土和杂物卷入木塔内部,造成严重污染。

此外,张德良等结合我国高速列车设计工作,开展了高速列车运营状态下虎丘塔的稳定性和安全评估<sup>[8]</sup>。首先采用落锤夯击法在现场测量振动效应,然后进行数值模拟。分别对落锤夯击振动、强冲击振动荷载、苏州地区抗地震烈度荷载进行了计算,并分析了虎丘塔地基对塔体稳定性的作用。综合分析结果表明地基对塔体稳定性起十分重要作用。

近几年来,文献<sup>[89~105]</sup>对不同古建筑结构力

学特性进行了研究. 车爱兰, 岩榭敞广, 俞茂宏等对西安地域的古构造物的地震特性进行了研究<sup>[80,81]</sup>. 李德虎和何江对大雁塔、小雁塔等砖石古塔动力特性进行了试验研究<sup>[85]</sup>. 林建生对泉州古塔进行了研究<sup>[86]</sup>. 陈平, 姚谦峰, 赵冬对大雁塔抗震能力进行了研究<sup>[87]</sup>. 文立华等对陕西法王塔抗震性能进行了研究<sup>[88]</sup>. 高大峰, 赵鸿铁等对古代木构比例模型进行了抗震机理及抗震加固效果的试验研究<sup>[71,72]</sup>. 进入 21 世纪以来, 有更多关于古建筑结构力学的研究. 李铁英、魏剑伟、张善元、李世温等对应县木塔的振动特性进行了分析<sup>[90~92]</sup>等. 浙江省西部龙游县的龙游大型古地下洞室群由 24 个洞室组成, 洞室群开挖于 2000 年前. 龙游石窟作为我国古代文化的组成部分, 展示了古人的聪明才智, 也充满很多待解的疑团<sup>[93~97]</sup>. 孙钧院士, 王思敬院士和李丽慧, 杨志法, 凌建明等从工程力学角度对这一千古之谜进行了研究. 竺润祥、董益平、任茶仙、俞茂宏对古木结构的榫卯连接性能进行了研究<sup>[70]</sup>等等. 今后, 将有更多关于古建筑结构力学的研究<sup>[105]</sup>.

## 11 小结

古建筑结构力学研究牵涉到力学的结构力学、弹塑性力学、振动力学、实验力学、土力学和岩石力学等很多学科. 力学的多样性也反映在古建筑结构力学. 中国古建筑结构力学的独特研究对象、研究内容和尚难完全预见的研究结果都是令人感兴趣的. 力学的工具也能揭示古建筑的一些未为人知的奥秘. 我们关于古建筑结构力学研究大多为国家重点保护文物. 这些工作得到国家文物局、陕西省、山西省、西安市、宁波市、陕西省文物局、西安市文物局等有关领导和专家的欢迎和支持. 很多研究结果已经被采用和实施或参考. 这表明力学在古建筑结构的研究中可以发挥重要的作用. 古建筑结构力学具有十分重要的研究价值和历史意义.

文中对以西安箭楼、城楼和宁波保国寺等国家重点保护文物为代表的木结构建筑, 以大雁塔、小雁塔等国家重点保护文物为代表的古代高层建筑, 和以国家重点保护文物西安古城墙为代表的砖 - 土结构等的结构力学特性进行了一系列研究. 得到关于古建筑结构(如斗拱、结构非线性、地宫、古代夯土、古塔基础、古城墙等)力学特性的新认识. 本文对此进行小结, 同时也介绍近年来的其他学者的一些研究.

我们从 20 世纪 80 年代初开始对中国古建筑的科学性方面作了一些研究. 但与中国众多的古建筑相比, 这只是一个开始. 全国各地还有大量的古建筑没有被研究; 大量的问题没有被解决(虽然有些结构并不是都很合理); 大量的问题需要去研究, 例如应县木塔有 10000 多个构件, 它的复杂性和重要性可与比

萨斜塔相比, 需要进行大量的研究; 又如古城墙内深挖洞对城墙塌陷的影响, 目前只研究了一些典型的区段, 14km 周长的城墙有 41km 长的防空洞, 大部分尚未研究. 以前敦煌在中国, 敦煌学在日本; 甲骨文在中国, 甲骨文研究在日本; “文化革命”在中国, 文革研究在美国; 猕猴桃原产在中国, 但猕猴桃研究和发展的新西兰; 中国近代史发生在中国, 但中国近代史研究在世界等等, 希望有更多的中国古建筑结构力学研究能够进行. 中国存在大量的古代建筑、古代桥梁、古代高塔以及其它古代结构, 这是中国宝贵的文化遗产. 力学工作者可以大有作为. 虽然研究的周期较长, 也没有经济效益. 但古建筑结构力学研究可以发现很多有意义的结果, 可以为国家文化遗产(很多是国宝)的保护、发掘和弘扬光大作出重要的贡献.

**致谢** 20 多年来, 我们在古建筑结构力学的研究中, 得到国家自然科学基金的二次支持, 以及教育部重要科学技术项目和教育部博士点基金研究项目, 国家人事部博士后科学基金研究项目、故宫博物院、陕西省科学技术项目、陕西省优秀科学、文艺著作出版基金, 西安交通大学科技处研究基金以及西安交通大学人事处对博士后 Yoshimine 和 Oda 的研究工作的特别资助等, 特此表示衷心感谢.

作者也对国家文物局、故宫博物院、陕西省文物局、西安市文物局、西安环城建设委员会、西安城墙管理所、大雁塔管理所、小雁塔管理所、钟鼓楼保管所、原航天部 211 研究所、原兵器部 202 研究所、苏州虎丘塔、应县木塔管理所等的大力支持, 表示衷心感谢.

作者对陈肇元、崔京浩、罗哲文、张之平和茹继平等先生提出的很多宝贵意见和大力支持表示衷心感谢. 作者也对龙驭球、董石麟、傅熹年、张锦秋、屈梁生等先生对古建筑结构力学研究的大力支持表示衷心感谢.

作者也对各个时期参加古建筑结构力学的研究的其他研究生李耀明、成卜乾、刘晓东、孟晓明、李丽娟、曾文兵、鲁宁、谷江、王源、咎月稳、张麇、张宇清、谢爽、高大峰、尹征南、丁磊、和博士后薛建阳、郑三锁、刘奉银、吉嶺允俊 (Yoshimine M) 等表示衷心感谢.

## 参 考 文 献

- 1 俞茂宏, 方东平. 西安古城墙研究——建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
- 2 Macchi G. Structural preservation of the architectural heritage. in: International Symposium on Structural Preservation of the Architectural Heritage, Rome, Italy. Rome: IABSE, IABSE Reports-70. 1993
- 3 Arun G, Seckin N. Studies in ancient structures. In: Pro-

- ceedings of the 2nd International Congress, Vol 1 and Vol.2. Istanbul: Yildiz Technical University Publication, 2001
- 4 Rabun J S. Structural Analysis of Historic Building. New York: John Wiley & Sons, 2000
  - 5 国家文物局. 西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究鉴定会议纪要. 见: 俞茂宏, 方东平. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993. 84~8
  - 6 俞茂宏, 刘晓东, 方东平. 西安北城门箭楼静力与动力特性的试验研究. 西安交通大学学报, 1991, 25(3): 55~62.
  - 7 俞茂宏, 孟晓明. 双剪弹塑性模型及其在土工问题中的应用. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 71~75
  - 8 董益平, 竺润祥, 俞茂宏, 余如龙. 宁波保国寺大殿北倾原因. 文物保护与考古科学, 2003, 15(4): 1~5
  - 9 中国科学院力学研究所. 应县木塔管理所等. 应县木塔应力测试和安全评估. 北京: 中国科学院力学研究所研究报告. 2003年10月
  - 10 周家汉, 张德良. 在高速列车运营状态下虎丘塔的稳定性分析. 北京: 中国科学院力学研究所研究报告. 1999年7月
  - 11 苏斌. 日本对中国城市与建筑的研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
  - 12 梁思成. 梁思成全集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
  - 13 梁思成著. 图象中国建筑史. 费慰梅编, 梁从诫译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991; 百花文艺出版社, 2001
  - 14 李允铎. 华夏意匠. 香港: 广角出版社, 1982; 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
  - 15 Liang Ssuch'eng. A Pictorial History of Chinese Architecture. Cambridge: MIT Press, 1984
  - 16 Department of Architecture. Tsinghua University, Historic Chinese Architecture. Beijing: Tsinghua University Press, 1985
  - 17 罗哲文. 罗哲文古建筑论文集. 北京: 文物出版社, 1998
  - 18 罗哲文. 古建筑研究的科学性(1991年). 见: 俞茂宏, 方东平等编. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993. 1~3
  - 19 《古建园林技术》编辑部. 庆祝《古建园林技术》创刊五周年致读者. 古建园林技术, 1989, 1: 5~6
  - 20 钱令希. 赵州桥的承载能力分析. 土木工程学报, 1987, 20(4): 39~46
  - 21 Qian Lingxi. New insight into an ancient stone arch bridge —— The Zhao-Zhou Stone Bridge of 1400 years old. *Int J Mech Sci*, 1987, 29(12): 831~843
  - 22 Yu Maohong, Chen Buqian, Fang Dongping. Advancing Technology and Ancient Architecture (Technique Moderne et Construction Ancienne). In: Proceedings of CIB, Washington, 1986. 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 143~152
  - 23 俞茂宏, 成卜乾, 刘遵祖. 西安钟楼结构特点及其抗震特性分析. 西安交通大学科学技术报告. 1986; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 127~142
  - 24 Yu Maohong, Fang Dongping, Liu Xiaoding. Settlement studies of an ancient wood structure. In: Presented at the International Conference on Case Histories in Structural Failure-CHSF 89, Singapore, 1989; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 153~161
  - 25 Yu Maohong, Liu Xiaodong, Fang Dongping. Test on dynamic characteristics of an ancient architecture. In: Presented at the International Conference on Case Histories in Structural Failure-CHSF 89, Singapore, 1989; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 162~167
  - 26 Fang Dongping, Liu Xiaodong, Yu Maohong. A full scale test and numerical analysis on dynamical characteristics of an ancient wood structure. In: Proceedings of International Conference on Structural Engineering and Computation, Beijing, China, 1990. 4
  - 27 俞茂宏. 《西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震》后记. 见: 俞茂宏, 方东平. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993. 221~227
  - 28 俞茂宏, 方东平, 刘晓东. 箭楼基础不均匀沉降险情分析. 西安交通大学科学技术报告, 1986; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 24~35
  - 29 俞茂宏, 方东平, 刘晓东. 箭楼结构抗震性能计算. 西安交通大学科学技术报告, 1986; 亦见: 俞茂宏等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 36~40
  - 30 俞茂宏, 刘晓东, 方东平. 箭楼现场脉动和正弦激励试验. 西安交通大学科学技术报告, 1986; 亦见: 俞茂宏等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 41~52
  - 31 俞茂宏, 刘晓东, 方东平. 箭楼结构模型的动力特性试验. 西安交通大学科学技术报告, 1987; 亦见: 俞茂宏等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 53~62
  - 32 俞茂宏, 刘晓东, 方东平. 箭楼结构模型静力试验. 西安交通大学科学技术报告, 1987; 亦见: 俞茂宏等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 63~72
  - 33 俞茂宏, 李耀明, 谢爽. 箭楼灰砂桩加固地基土试验. 西安交通大学科学技术报告, 1987; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 73~80
  - 34 俞茂宏. 西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究总结. 见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 81~83
  - 35 俞茂宏, 孟晓明, 谢爽. 西安古城墙的保护和开发研究. 见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 94~126
  - 36 Yu Mao-hong, Men Xiao-ming. Research on the stability of ancient city wall in Xian. 见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究 —— 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

- 168~174
- 37 国家科委成果管理办公室. 西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究. 中国技术成果大全, 1992, 6(86): 328~329
- 38 国家科学技术委员会. 西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究. 科学技术研究成果公报, 1992, 8(136): 62
- 39 Fang Dong-bing, Miyamoto Y, Iwasaki S, Deto H, et al. Dynamic characteristics of a chinese architectural heritage. In: Presented at the International Symposium on Structural Preservation of the Architectural Heritage, Rome, Italy, 1993; 亦见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究——建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993. 175~193
- 40 方东平, 宫本裕, 岩崎正二, 出声秀明, 俞茂宏. 中国古代木结构造物的动力和耐震特性. 见: 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究——建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 194~218
- 41 方东平等. 実測と数值解析による中国古代木造建築物の動的特性について. 见: 日本土木学会第46回年次学術講演会, Tokyo, Japan, 1991. 9
- 42 Fang Dongping Y, Miyamoto S, Iwasaki H, Deto H, Hikosaka and Yu Maohong. 3-D nonlinear analysis of a base settled ancient wooden structure by using joggle modeling. In: 2nd International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Buildings & Structures, Indonesia, 1992. 77~84
- 43 Fang Dongping, Yutaka Miyamoto, Shoji Iwasaki, Hediaki Deto. Studies on dynamic and aseismic characteristics of an ancient chinese timber structure. *Journal of Structural Engineering, JSCE*, 1992, 38A(3): 951~961
- 44 Fang Dongping Y, Miyamoto S, Iwasaki, et al. Survey and 3 dimensional nonlinear analysis of a chinese ancient wooden structure with base settlement. *Journal of Structural Engineering, JSCE*, 1993, 39A(3): 1101~1112
- 45 Fang Dongping Y, Miyamoto S, Iwasaki H I, Deto H, et al. Three-dimensional nonlinear analysis of a wood structure with base subsidence. In: Proceedings of 5th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering/ASCE, California, USA, 1993. 6
- 46 成卜乾. 钟楼结构特点及其抗震特性分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1986
- 47 方东平. 木结构的静力、动力及抗震性能研究: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1988
- 48 刘晓东. 西安北门箭楼的静力和动力特性的试验研究. (航天部211所学位论文), 西安: 211研究所, 1989
- 49 孟晓明. 一个新的弹塑性模型及其在西安古城墙强度分析中的应用: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1990.
- 50 李丽娟. 大雁塔抗震性能及其可靠度分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1990
- 51 谷江. 西安大雁塔地基的弹塑性分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1993
- 52 高大峰. 小雁塔塔体抗震、抗风性能及其地基的极限承载力探讨学: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1995
- 53 王源. 西安东门城楼(国家重点保护文物)结构力学分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1996
- 54 张廉. 多层砖混隔震结构弹塑性有限元时程分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1997
- 55 张宇清. 西安东门城楼动力特性及其地震响应分析: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1997
- 56 赵均海. 中国古代木结构的结构特性研究: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 1998
- 57 尹征南. 新型帽子模型的数值模拟及其工程应用: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 2000
- 58 丁磊. 西安鼓楼动力特性和抗震性能研究: [硕士论文]. 西安: 西安交通大学, 2003
- 59 俞茂宏, 赵均海, 王源等. 西安东门城楼及城墙研究. 西安交通大学, 西安文物局研究报告, 1998
- 60 Zhao Junhai, Yu Maohong, Sun Jia-Ju, Song Tiechuang. The testing of dynamic behavior of a wooden structure "Dougong". In: 3rd International Symposium on Test and measurement (ISTM/99), June-2-4, 1999. 784~787
- 61 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩等. 中国古建筑木结构斗拱的动力实验研究. *实验力学*, 1999, 14(1): 106~112
- 62 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩, 孙家驹. 中国古代木结构有限元动力分析. *土木工程学报*, 2000, 33(1): 41~45
- 63 赵均海, 杨松岩, 俞茂宏, 孙家驹. 西安东门城楼的弹塑性有限元分析. *西北建筑工程学院学报*, 1998, (3): 1~7
- 64 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩等. 西安东门城楼有限元动力分析. *西北建筑工程学院学报*, 1999, 16(4): 1~5
- 65 Zhao J H, Zheng Yang, Song-yan Yang. An Analysis of the elasto-plasticity of City Wall in Xi'an under the unified strength theory. In: Yu M H, Fan S C, eds. *Strength Theory: Application, Developments & Prospects for the 21th Century*, 1998. 9~11
- 66 俞茂宏, 赵均海, 刘宝民. 城楼的动力分析. 见: 李天顺, 胡富民, 向德, 刘寅民编. 西安长乐门城楼修缮工程报告. 北京: 文物出版社, 2001. 134~146
- 67 俞茂宏, 孟晓明, 谢爽. 西安古城墙的保护和开发. 见: 李天顺, 胡富民, 向德, 刘寅民编. 西安长乐门城楼修缮工程报告, 北京: 文物出版社, 2001. 92~114
- 68 丁磊, 王志寿, 俞茂宏. 西安鼓楼动力特性和抗震性能研究. *西安交通大学学报*, 2003, 37(9): 986~988
- 69 阎嘉义, 金文森等. 中国传统木构造榫卯系统之结构行为. *中国土木水利学刊(台湾)*, 1995, 7(2): 151~161
- 70 竺润祥, 董益平, 任茶仙, 俞茂宏. 榫卯连接的古木结构静力分析. *工程力学*, 2003, 20(增): 435~438
- 71 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 张鹏程. 中国古代大木作结构斗拱承载力的试验研究. *世界地震工程*, 2003, 19(3): 56~61
- 72 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 张鹏程. 中国古代木构建筑抗震机理及抗震加固效果的试验研究. *世界地震工程*, 2003, 19(2): 1~10
- 73 俞茂宏. 强度理论新体系. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 74 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论. *岩土工程学报*, 1994, (2), 1~10

- 75 俞茂宏, 曾文兵, 鲁宁. 工程结构分析新理论及其应用. 工程力学, 1994, 11(1): 9~20
- 76 俞茂宏. 双剪理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1998
- 77 Yu Mao-Hong. Unified Strength Theory and Its Applications. Berlin: Springer, 2004
- 78 赵均海. 中国古代建筑结构特性研究. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1999
- 79 李天顺, 胡富民, 向德等. 西安长乐门城楼修缮工程报告. 北京: 文物出版社, 2001
- 80 车爱兰, 岩楯敞广, 俞茂宏, 徐栓强. 西安地域の地盤・構造物の地震時応答特性. 日本第 37 回地盤工学研究発表会, 2002
- 81 车爱兰, 岩楯敞广, 俞茂宏, 吉嶺充俊. 西安地域の古建築物の動的応答特. 日本土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003
- 82 邢义川, 刘祖典, 郑颖人. 黄土的破坏条件. 水利学报, 1992, (1): 12~19
- 83 俞茂宏, 龚晓南, 曾国熙. 岩土力学和基础工程基本理论中的若干新概念. 见: 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- 84 俞茂宏, 鲁宁, 杨松岩, 高大峰. 条形基础结构和承载力的研究. 见: 第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 309~312
- 85 李德虎, 何江. 砖石古塔动力特性的试验研究. 工程抗震, 1990, 3(44): 34~36
- 86 林建生. 泉州古塔的抗震分析. 工程抗震, 1990, 3(44): 37~42
- 87 陈平, 姚谦峰, 赵冬. 西安大雁塔抗震能力研究. 建筑结构学报, 1999, 20(1): 46~49
- 88 文立华. 古塔抗震性能研究. 工程抗震, 1996, (1): 21~23
- 89 薛建阳, 俞茂宏. 中国古建筑木结构的抗震机理分析. 见: 中国博士后学术大会论文集, 2000. 1~4
- 90 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 古木塔场地抗震性能评价及地震参数选择. 岩土工程学报, 2002, 23(5): 660~662
- 91 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价. 建筑结构学报, 2004, 2: 91~98
- 92 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 应县木塔实体结构的动态特性实验与分析. 工程力学, 2005, 21(1): 141~146
- 93 孙钧. 从工程科学角度看龙游石窟. 岩石力学与工程动态, 2001, 53: 3~7
- 94 王思敬. 巧夺天工的龙游石窟. 岩石力学与工程动态, 2001, 53: 8~9
- 95 李丽慧, 杨志法, 张路青等. 关于龙游石窟斜顶“设计”中工程科学问题的探讨. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 336~343
- 96 杨志法, 王思敬, 许兵等. 龙游石窟工程地质条件分析及保护对策初步研究. 工程地质学报, 2000, 8(3): 292~295
- 97 孙钧, 凌建明, 贾岗等. 从工程科学角度看浙西大地的龙游石窟. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 131~133
- 98 方东平, 俞茂宏. 木结构古建筑的结构与保护研究 (第 9 届全国结构工程学术会议大会特邀报告). 工程力学, 2000, 17(增): 1~17
- 99 方东平, 俞茂宏. 木结构古建筑结构特性的实验研究. 工程力学, 2000, 17(2): 75~83
- 100 方东平, 俞茂宏. 木结构古建筑结构特性的计算研究. 工程力学, 2001, 18(1): 137~144
- 101 Yu M H, Liu F Y. Researches on the stability of ancient city wall in xi'an. In: Studies in Ancient Structures (Proceedings of the 2nd International Congress). Yildiz Technical University Publication, 2001. 365~370
- 102 Yu M H, Zheng S, Xue J, et al. Experiment and analysis on the aseismic behavior of Xi'an bell tower. In: Studies in Ancient Structures. In: Studies in Ancient Structures (Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress). Yildiz Technical University Publication, 2001. 457~464
- 103 Fang D P, Iwasaki M, Yu M H. Ancient chinese timer architecture, a: experimental study. *J of Structural Engineering* (ASCE), 2001, 127(11): 1348~1357
- 104 Fang D P, Iwasaki M, Yu M H. Ancient chinese timer architecture, B: dynamic characteristics. *J of Structural Engineering* (ASCE), 2001, 127(11): 1358~1364
- 105 俞茂宏. 古建筑结构研究的历史性、艺术性和科学性. 工程力学, 2003, 20(增): 435~438

# ADVANCES IN STRUCTURAL MECHANICS OF CHINESE ANCIENT ARCHITECTURES\*

YU Maohong<sup>1,†</sup> ODA Yoshiya<sup>1</sup> FANG Dongping<sup>2</sup> ZHAO Junhai<sup>3</sup> ZHANG Deliang<sup>4</sup>  
ZHU Runxiang<sup>5</sup> CHE Ailan<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

<sup>2</sup>Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>3</sup>Changan University, Xi'an 710061, China

<sup>4</sup>Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

<sup>5</sup>Ningbo University, Ningbo 315211, China

<sup>6</sup>Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China

**Abstract** Chinese ancient architectures are valuable heritage of ancient culture of China. Many historical buildings have been preserved up to now. The researches on the structural mechanics of ancient architectures show the different aspects of mechanics. Systematical studies have been carried out in Xi'an Jiaotong University since 1982. It is related with the need of repair of some national preservation relics in Xi'an. These studies include: 1, Ancient wooden structures including three national preservation relics: Arrow Tower at North City Gate, City Tower at East City Gate in Xi'an and Baogao Temple at Ningbao. 2, Ancient tall masonry building, the Big Goose Pagoda and Small Goose Pagoda in Xi'an. 3, Mechanical characteristics of ancient soil under foundation and city wall; the influence of caves in and under the ancient city wall on the stability of the wall; 4, The typical Chinese ancient building at the center of the city: the Bell Tower and Drum Tower. These researches also concern the behavior of "Dougong" and Joggle joint of wooden structures, foundation of pagoda; differential settlements of Arrow Tower and the resistance to earthquake of these historical architecture heritages. Some other studies are also introduced. This paper gives a summary of these researches.

Preservation and research are nowadays an essential requirement for the famous monuments, buildings, towers and others. Our society is more and more conscious of this necessity, which involves increasing activities of restoration, and then sometimes also of repair, mechanical strengthening and seismic retrofitting. Many historical buildings have in fact problems of structural strength and stability; the need for further studies on structural mechanics and materials is definitely growing.

**Keywords** structural mechanics of ancient architecture, non-linear of structure, wooden structure, "Dougong", city wall of Xi'an, big goose Pagoda in Xi'an

---

\* The project is supported by National Natural Science Foundation of China (5860211, 50078046), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20020698050), and Specialized Research Fund for Post-doctor of National Ministry of Organizational Affiliation and Xi'an Jiaotong University

† E-mail: mhyu@mail.xjtu.edu.cn