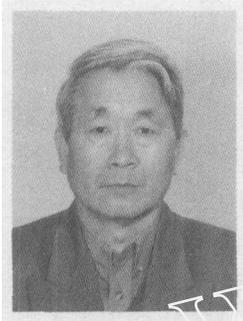


历史文化建筑保护和力学

张双寅

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)



张双寅, 1957 年入北京航空航天大学(原北京航空学院)飞机设计系, 1962 年毕业, 考入中国科学院力学研究所读研究生。1978 年 8 月~1978 年 12 月赴意大利, 参加联合国教科文组织 (UNESCO) 国际力学中心 (CISM) 的“高等数学和力学及实验力学研讨班”。1983 年 11 月~1985 年 3 月在英国曼彻斯特大学理工学院 (UMIST) 访问工作。1990 年任研究员, 1994 年任博士生导师。国务院政府津贴获得者。曾任第 5 届中国空间科学学会常务理事, 空间材料科学专业委员会副主任, 中国复合材料学会理事。《力学进展》常务编委, 《复合材料学报》编委。

摘要 讨论了历史文化建筑维修、保护和力学的关系, 综述了中国历史文化建筑保护中的力学问题, 讨论了木质历史文化建筑结构的建模问题, 介绍了世界各国和中国对文化遗产保护的发展史, 及中国历史文化建筑保护现状与任务; 重点介绍了力学在历史文化建筑保护领域所作的贡献和面临的机遇与挑战。并对历史文化建筑保护措施和研究方向提出建议。

关键词 文化遗产保护的发展史, 力学问题, 历史文化建筑, 木质建筑的力学建模

PROTECTION OF HISTORICAL CULTURAL BUILDINGS AND MECHANICS

ZHANG Shuangyin

(Division of Engineering Sciences Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10080, China)

Abstract The relationship between protection of historical cultural buildings and mechanics, and the problems of mechanics in the protection of ancient relics are reviewed in this paper. A brief introduction to the history of the protection of cultural relics in China and all over the world is followed by a discussion on problems of mechanics modeling. Particularly, the achievements made, and the opportunity and challenge confronted by the researchers are emphasized. Finally, some comments and suggestions for the future research and protection of ancient buildings are proposed.

Key words history of cultural relics protection, mechanics problems, protection of ancient buildings, mechanics modeling of wooden structures

1 从《威尼斯宪章》到世界“文化遗产日”

历史文物遗产保护问题是一个世界性难题, 各文明古国的祖先以其非凡的智慧创建了数量巨大的文化遗产, 特别是大量的古代建筑。这些建筑经历了长年累月的自然侵蚀和战争与人为的破坏, 亟待维

修和保护; 尤其应该提及的是, 这些建筑都面临地震的威胁, 研究其抗地震性能及抗地震保护措施是当代科学家的急迫任务。中国是世界上四大文明古国之一, 有五千年的文明史; 现存数目巨大的历史文化建筑亟待维修与保护, 特别应该强调的是中国古建以木质建筑为主, 建筑结构具有中国特色, 所

2006-08-29 收到第 1 稿, 2006-09-19 收到修改稿。

以针对中国古建特色研究保护方法是中国科学界义不容辞的责任^[1]。

国际社会对历史文化遗产保护问题非常重视,国际文物工作者理事会(ICOM)1964年发布了《威尼斯宪章》,1972年《巴黎公约》,1976年《内罗毕建议》,1987年《华盛顿宪章》。“国际古迹遗址理事会”1982年发布了《佛罗伦萨宪章》,规定了历史文化遗产保护的重要原则,对各国历史文化遗产保护工作起了至关重要的指导作用。2005年10月21日联合国教科文组织(UNESCO)发表了《西安宣言》。

1984年法国开始“遗产日”活动,1991年欧洲有了第一个“欧洲文化遗产日”。1961年中国国务院颁布了《文物保护管理暂行条例》,1982年人大常委会通过了《中华人民共和国文物保护法》,1985年12月中国签署了《世界遗产公约》,成为缔约国;国务院又于2005年12月下发了《关于加强文化遗产保护的通知》,2006年4月重新公布了2003年7月生效的《中华人民共和国文物保护法实施条例》,对历史文化遗产保护的方针方法进行了具体规范,在第5条中写明“要促进文物保护科技成果的应用和推广”,并规定了每年6月份的第2个星期六为“文化遗产日”。2006年6月10日为中国第1个“文化遗产日”,7月5日~7日联合国教科文组织、世界银行和中国国家文物局、建设部在北京召开了中国文化遗产保护与城市发展国际会议,发表了《北京共识》。第1届文化遗产保护会议2000年在北京举行,第2届会议将于2008年5月31日至6月2日在浙江省绍兴市召开。这一系列活动凸显出我国政府对文化遗产保护的重视。

在欧洲环地中海12个国家(包括意大利、土耳其、希腊、以色列、斯洛文尼亚、马其顿、葡萄牙、埃及、摩洛哥、罗马尼亚、比利时和阿尔及利亚)正在进行一个“历史建筑地震保护的恢复性混合技术”研究计划(Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies),简称“ProHiTech”,此项目旨在发展可恢复性混合技术(Reversible mixed technologies-RMT)对现存建筑结构,特别是具有历史文物价值的建筑在发生地震时进行保护,减少地震中的经济与文物损失和保护生命安全。RMT技术开发新材料和新设备,不同材料的联合使用可以使抗地震性能得到优化,并可以在必要时拆除。

欧洲古建保护极为迫切,德国古建修复的任务很

重,柏林是欧洲文化名城,在第二次世界大战中变成一片废墟,著名的帝国大厦、勃兰登堡门以及菩提树下大街两侧的建筑都要修复与重建。世界建筑史上的灿烂瑰宝——意大利比萨斜塔,经历了艰巨的拯救倒塌危机的过程。比萨斜塔始建于1173年,经过两度停工,竣工于1370年,历时约197年,由于地基是松软的泥沙土层,建筑过程中已经发现倾斜,建成后倾斜度与日俱增,最大的向南倾斜角达 5.5° ,塔尖中心偏离垂直线4.5m。1990年意大利成立了“比萨斜塔拯救委员会”,采用土壤抽取方法,用41根管子插入20m深的地基,以每日200kg的速度缓慢从斜塔北侧地基抽取土壤;同时用钢索绕斜塔的第2层向北拉住斜塔,以防意外。从1999年2月起历时2年半,缓慢抽取北侧地基内土壤,减小北侧地基硬度,使北侧地基下沉,终于止住了倾斜趋势,并使斜度呈现减小趋势,塔尖中心比以前偏离位移减小43.8cm。比萨斜塔重新对游人开放。现代工程技术的力量,使得时光仿佛在斜塔身上实现了“倒流”(黑体字为科学时报语)。图1是比萨斜塔照片。

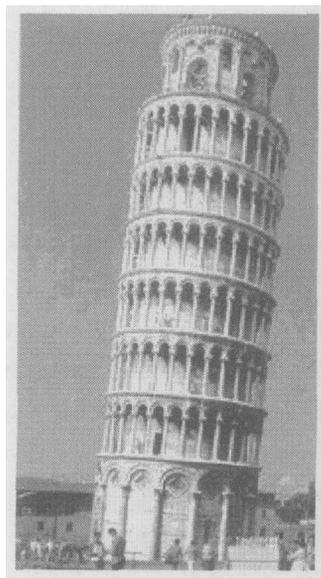


图1 比萨斜塔

2 中国历史文化建筑保护任重道远

2.1 中国历史文化建筑概况

中国历史文化遗产种类很多,包括建筑、绘画、丝织、陶瓷、手工艺品等等,当然还包括非物质文化遗产。本文限于讨论古代建筑(重点是中国古建)的保护现状。中国历史文化建筑大概有如下几类:

(1) 宗教文化遗产:中国宗教种类有佛教、道教、伊斯兰教、天主教和基督教(及其分支景教-Nestori-

anism), 这些教派为了传播其宗教文化, 建筑了寺、庙、观、庵、天主堂、礼拜寺等建筑; 其中以佛教 (又有藏传佛教和汉传佛教之分) 的寺庙为最多; 作为佛教文化遗产的还有佛塔和石窟等。

(2) 历代皇帝的宫殿和陵墓, 首都的城郭和门楼; 达官显贵的官邸、府宅和花园等; 以及具有历史和纪念意义的名人故居和民宅。

(3) 御敌的长城和城堡; 漕运的河道 (如隋朝开的运河), 水利工程 (如公元前 227 年战国的都江堰和公元前 219 年秦朝的灵渠) 及桥梁 (如隋朝建的河北赵州桥) 等。

(4) 古猿人化石及遗址 (例如北京周口店北京猿人遗址)。

(5) 中华民族人文祖先的遗址与陵墓; 如甘肃天水的伏羲氏庙 (伏羲氏距今约 10000~7000 年); 湖南炎陵县的炎帝陵 (炎帝距今约 7000~5200 年); 陕西桥山的黄帝陵 (黄帝距今约 5000 年)。

2.2 中国历史文化建筑的特点

外形上看“如鸟斯革, 如翬斯飞”^[2] 的翘檐翘角的大屋顶和巧夺天工的斗拱是中国古建的明显特征。结构方面, 与西方古建筑的石料结构不同, 中国古代建筑的最大特点就是采用木材结构体系, 用木材做房屋的构架, 从地面上竖起立柱, 重要房屋的立柱要立在有定位槽的石块上, 这种有定位槽的石块俗称为“柱顶石”。在立柱上架设横向梁与枋, 立柱与梁枋之间有卯榫结构联结, 所有屋顶的重量都由木结构承受, 由梁枋和椽子经柱子传到地面。立柱之间的墙壁, 不论是用砖石还是用土坯筑成, 主要起隔离和美化作用而不承受房屋的重量; 由于木架构件之间的卯榫联结, 可产生较大可变形, 可以称为柔性结构, 具有较好的抗地震性能。1996 年丽江地区在发生大地震时, 正值联合国教科文组织 (UNESCO) 专家到当地考察, 发现地震后不少新建大楼倒塌了, 但是老住宅、老店铺虽然墙壁遭到较明显损毁, 木质房架却依然挺立, 所以被称为“房倒屋不塌”现象^[2]。1997 年丽江被 UNESCO 批准列入“世界文化遗产”名录。

根据文献 [3] 记载, 始建于唐代、重建于辽代 (公元 984 年) 的河北省蓟县独乐寺的观音阁是“不怕地震的木结构建筑”, 观音阁已有 1000 多年的历史, 经过 30 余次地震 (其中 3 次震级达到 8 级) 虽然寺内房屋倒塌了多次, 观音阁却屹立不倒 (只在 2 层灰泥墙上有几条小裂缝)。其原因就是, 观音阁采用了

双层木质柱框结构, 内外两圈柱框构架用枋子联结成一个整体, 再加斜撑, 整个结构就稳固了。

文献 [4] 记载了北京大钟寺永乐大钟木架结构抗地震的优异特性, 写道: “1976 年唐山大地震波及北京, 当时寺内工作人员发现因年代久远而造成的钟架东北角一处稍有分离的卯榫, 竟然随着大地的晃动而‘啪’的一声合上了”。这从另一侧面说明了木架结构的抗地震性能。

中国古建结构另一特点是常采用“收分”形式, 以增大结构的稳定性, 所谓收分即立柱直径上小下大, 城墙上薄下厚, 木架立柱上端向内倾斜; 图 2 是北京钟楼及木架照片, 凸现木架收分。永乐大钟木架立柱上端向内倾斜, 形成收分^[5]。再者, 著名山西应州释迦塔 (俗称应州木塔, 见图 3) 的外檐柱也存在收分, 即“各层柱子都衔接而上, 每层外檐柱

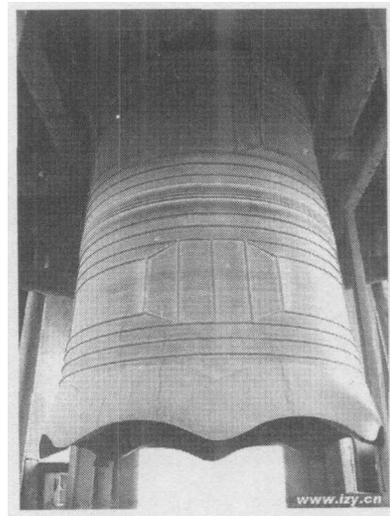


图 2 北京钟楼大钟照片

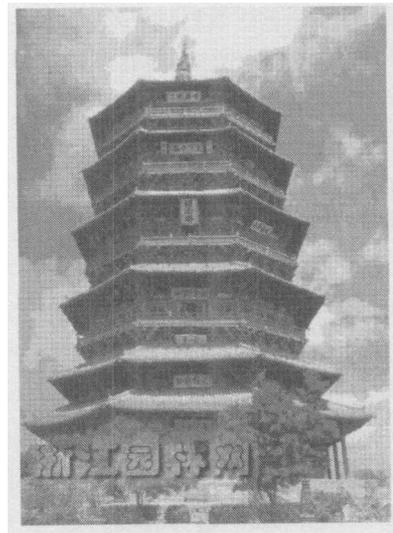


图 3 河北应州释迦塔

都和它下面的平座层柱同一轴线, 而下层的外檐柱向塔心退入约半柱径”(引自浙江园林网). 关于“收分”一词又可称为“收杀”, 文献[6]讲道: “这里有个概念叫‘收杀’, 什么叫‘收杀’? 就是塔的平面直径从底层到顶层层层递减. 由于‘收杀’, 才形成下大上小, 下粗上细……”. 单个立柱的倾角成为“侧角”(又作“侧脚”^[5]), 这样的木架稳定性较好.

2.3 多种原因造成中国古建破坏严重

北京市文物局文物保护处负责人今年7月接受记者采访时称, 北京市7成古建都拖着“病体”. 导致古建患病的原因很多, 主要是:

(1) 地震造成很多文物古建严重损伤. 据《北京青年报》报道^[7] 1976年唐山大地震时, 北京西城区的白塔寺震裂了.

(2) 因地质滑坡造成部分古建损伤. 几年前, 北京戒台寺出现大裂缝, 对这个千年古寺的安全造成极大威胁, 北京启动了6000万元的“救寺”工程, 图4是戒台寺建筑的一处裂缝.



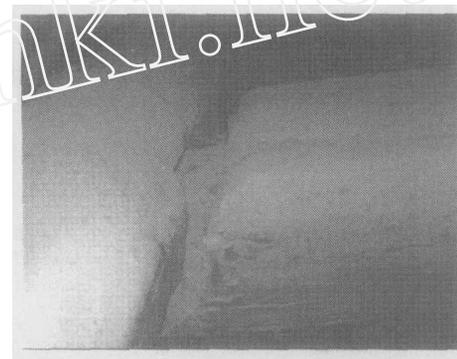
图4 戒台寺古建的一道裂缝

(3) 由于中国古建多为木质结构, 相对于欧洲的石质建筑耐久性较差. 木材腐朽与力学性能衰坏是中国古建结构的最大隐忧. 例如北京紫禁城中许多大殿木质构件都存在不同程度的糟腐现象, 近年来大修中不得不将病害严重的大梁用新木材进行代换. 另外北京市地坛公园的宰生亭的金柱木材糟腐进行过修复与加固^[8,9].

(4) 木结构卯榫松动与变形是木结构的常见损伤. 因年代久远, 不少古建筑的木结构产生变形和卯榫松动, 图5(a)~图5(b)是北京艺术博物馆(万寿寺)的万佛楼明间西侧七架梁南支座处的大梁出现的大裂缝, 以及大梁和檩之间的卯榫联结出现滑动的照片. 再者山西省应州木塔已有上千年的历史, 经历了风雨侵蚀和战乱后依然高耸挺立, 但是已出现局部(第2~3层)较严重的变形和卯榫松脱, 亟待



(a) 万寿寺万佛楼明间西侧七架梁南支座的裂缝



(b) 万寿寺万佛楼明间西侧七架梁南端, 檩和梁之间卯榫滑脱

图5

修缮. 国家文物局非常重视, 几年来, 已召开了数次会议讨论加固方案.

3 力学的机遇和挑战

力学学科在历史文物建筑保护领域是大有作为的, 同时面临严重挑战.

3.1 力学做出的贡献

据报载^[7], 北京市文物局用力学方法阻止戒台寺地质滑坡的发展, 挽救了这一重要历史文物建筑(群). 2004年9月准备复建千佛阁时发现了地基上有一条大裂缝, 总长约500m, 裂缝经过之处墙体都有裂缝, 甚至一些地下管线被拉断. 在千佛阁遗址的石阶上, 裂缝左右两边高低差达20cm, 石头被挤成碎块或拱起, 图4是戒台寺某建筑立柱断裂照片. 2005年3月起“先修山后修寺”的抢救工程. 方法如同治理地质滑坡, 先在下滑的地段打下深60m的防滑桩, 再用540根锚索穿过滑坡体的破碎带将防滑桩锁在稳固的岩体上. 为了及时检测滑坡位移的变化情况, 在滑坡裂缝上安装了5台位移记录仪, 在坡体上安装了18台地表位移检测桩, 安置了7个深孔位移检测仪, 每天对测试数据进行分析. 治理后位移曲线由原来的上升曲线变为一条水

平线, 工程取得明显成果。

北京艺术博物馆(万寿寺)内万佛楼明间西侧七架梁出现了裂缝(见图 5(a)), 整个大梁几乎丧失承载功能, 外观看大屋顶上的瓦楞曲线严重下沉; 另外后檐的大檩和大梁之间的卯榫严重松脱, 已产生数厘米的分离位移(请见图 5(b)), 时刻都有滑脱的危险。从力学分析可知, 为阻止檩条继续向外滑动, 最可靠的方法是将前、后檐两根檩条用钢筋(或钢丝绳)联结, 并用螺丝拧紧, 施加一定预应力。初步估算, 一根直径为 1.8cm 的 40 号钢筋 ($\sigma_b = (55 \sim 70) \times 9.8\text{N/mm}^2$), 可承载约 10t 载荷。为防止檩条侧滑, 2~4 根钢筋足矣。另外, 为挽救大梁的承载功能, 可利用斜支撑(古建筑著作中称为“柱栿”^[10], 今俗称“牛腿”)将屋顶荷载从梁枋通过斜撑传到金柱(主承载力柱, 因有美丽彩绘, 俗称“金柱”), 材料力学计算可以确定加固件的几何尺寸。由于木材质量严重衰化, 不可在梁、檩和金柱上钉铁钉, 以免造成附加损伤(注: 此楼现已改为藏书楼或库房之用, 可采用柱栿)。

据报载^[11], 周口店北京猿人遗址共发现 43 处病害隐患, 包括山顶洞、鸽子堂等 7 处化石点存在 21 患处, 其中 8 处为特别危险地段, 山顶洞顶板及南侧的松散堆积体, 猿人洞西侧标准剖面处均有大块危岩体, 新洞顶板和鸽子堂洞顶都存在塌方危险。这些病患的产生除去自然风化原因外, 人为因素可能也是不可忽视的。附近工厂、采石场、公路与铁路车辆引起的地表振动, 会加速这些损伤的发展。为检测环境振动源对遗址的影响, 中国科学院力学研究所与周口店北京人遗址博物馆合作对鸽子堂及周围环境在火车振动下的振动响应(加速度和应变)进行了测量, 并对鸽子堂洞体建模, 进行了有限元分析, 根据结果对火车运行可能造成的损伤进行了评估^[12]。应该提及, 山西大同的云岗石窟与河南洛阳的龙门石窟也都有类似问题, 中科院力学所的科技人员也曾对洛阳龙门石窟的环境振动进行过测试。

3.2 力学在古建筑保护领域面临严重挑战

首先是对古建筑材料的力学性能参数不清楚, 尤其是古建筑木材, 经过年代长久的变化, 当前仍在服役的木材力学性能(如模量与强度)均不能准确获得, 虽然可用超声波法测量木材的平均模量值^[13]; 但是, 当木材中存在腐朽空洞时, 要弄清空洞的大小与位置以及空洞附近的材料强度和模量的衰减程度就更是一大难题, 虽然国内、外有测量空洞大小和位置的

探针方法, 但由于针刺会造成附加损伤, 对至关重要的文物古建这往往是不被允许的。况且, 木材是各向异性非均匀材料, 很难在位地实测材料的各种材料参数; 切取试样更是被禁止的。惟一可行的(不得已的方法)是查阅材料手册或进行类比试验(从同种木材在大约相同的环境中经过大约相同的时间而被废弃的古建构件上切取样品进行力学性能测试), 所得结果作为参考值。青铜(与钢等金属)材料性能较为稳定, 但是, 数百年前的铸造青铜与现代青铜力学参数差别有多大, 也是值得忧虑的。

木结构的力学建模和现代结构不同, 例如卯榫结构的本构模型是需要研究的, 其抗变形刚度和破坏强度与工艺水平相关, 需要用力学方法进行测定。

卯榫结构的简化力学模型: 木架的横梁和立柱由卯榫连接, 其抗弯刚度大大小于横梁及立柱本身的抗弯刚度, 在弯矩作用下它的弯矩-转角曲线可用图 6 描述。当弯矩较小 ($M \leq M_y$) 时, 弯矩 M 与转角 θ 呈线性关系, OP 直线的斜率是榫头的抗弯刚度常数, 用 K_θ 表示。当 M 达到并超过 M_y 时, 卯榫的卯槽与榫头之间产生松动与摩擦滑动, 随 θ 增大 M 增加缓慢, 甚至不仅不会增大反而会减小。若当弯矩达到 M_q 时, 进行卸载, 曲线将沿 qO_1 减小到弯矩等于零, OO_1 是弯曲转角的残余变形, $OpqO_1$ 包围的面积为一个循环卯榫消耗的能量, 是“房倒屋塌”现象的机理所在。一般而言, M_y 远小于大梁与立柱可承受的极限弯矩, K_θ 远小于立柱与大梁的抗弯刚度, 曲线特征参数 (K_θ, M_y 等) 依赖于木材品种与质量和木工的工艺水平, 应由试验来测定。

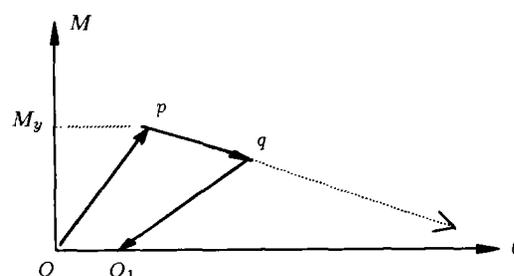


图 6 木架榫头抗弯的弯矩-转角曲线示意图

边界条件与连接条件的确定: 中国古建(宫殿、庙堂、房屋等)的木架立柱均为无联结的放置于有定位槽的石台上, 既非材料力学的简支条件也非固支条件, 一般来说它较接近简支条件。梁椽之间的叠放结构, 环与环及环与梁之间的铰链结构的连接条件较难处理, 有时不得不进行简化。

4 永乐大钟安全评估

根据大钟寺古钟博物馆现存关于永乐大钟的资料^[13~16], 历年来已对永乐大钟及大钟木架进行过如下研究.

中国林业科学院木材所古建筑和木质文物保护课题组于2002年对永乐大钟木架(图7)进行了超声波无损探伤, 并用超声方法测量了木架木材的平均杨氏模量^[13]. 查济璇等利用超声方法测定大钟的壁厚, 以计算大钟的重量^[14]. 北京理工大学^[15]和中国科学院力学研究所^[16]分别用材料力学方法计算了大钟吊挂系统的核心构件青铜销杆的平均剪应力, 与其许用应力相比给出了安全系数的估计值.

2005年, 北京文物局决定对永乐大钟以及悬挂系统进行安全评估; 中国科学院力学研究所应邀做了4个方面的工作.

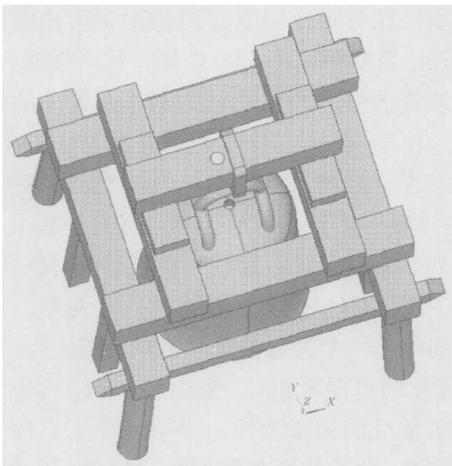


图7 永乐大钟及木架示意图^[15]

4.1 永乐大钟钟架立柱侧脚(或侧角)^[15]及大梁倾斜度的测量

用专业测量仪器测量了木架的4个立柱的侧角和木架整体倾斜度, 结果表明大钟钟架整体上没有观察到倾斜, 否定了数年前某专家关于木架整体有11 mm的向东倾斜的判断^[8,13~16]; 另外对木架各主要大梁的倾斜度进行了测量, 结果表明, 由于4号和2号(主梁东头的垫梁与大梁)的糟腐与空洞造成1号大梁(主梁)东端下沉10 mm.

4.2 对永乐大钟及悬挂系统的动力响应测试

采用加速度传感器测量了木槌撞击大钟时木槌对大钟的动载荷输入(图8)和1号大梁靠近大钟悬挂处的动力响应(图9), 表明钟槌对大钟的冲击载荷峰值为钟槌重量的20倍, 达103.5 kN; 一号大梁的冲击响应很小, 所受的冲击载荷最大值只是大钟

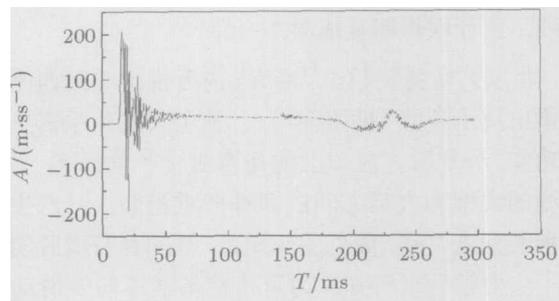


图8 撞钟加速度脉冲曲线^[6]

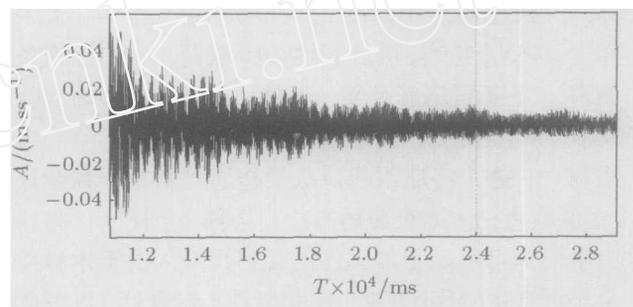


图9 一号大梁响应曲线^[6]

重量的1/1000.

4.3 大钟悬挂及支撑系统中关键部件的强度分析

分析对象包括大钟悬挂系统中上U形环与下U形环之间的青铜销杆, 1号大梁和4号大梁. 分析方法包括材料力学方法和有限元法. 将计算应力与许用应力相比, 给出了安全系数. 所遇最大困难是对木材的现实材料常数(强度和模量值)不能准确获得, 特别是对于4号(和2号)大梁空洞大小和位置无从知晓.

4.4 大钟结构、吊挂结构及支撑结构系统整体有限元分析

用ANSYS商用软件, 对大钟及悬挂支持系统进行了有限元法计算, 获得了静态应力和木槌对大钟撞击时的动态应力, 给出了动态效应引起的强度裕度的减小. 由于系统较复杂, 建模工作十分关键, 除了材料(特别是木材)常数不能准确获得外, 大钟悬挂系统(由钟钮-下U形环-销杆-上U形环-一号大梁组成)都为铰链连接(接触界面), 精确模拟十分困难; 再者立柱与地面的支撑条件, 以及诸大梁之间的叠放形式, 这些在建模时必需进行简化.

经过测试和分析, 笔者认为大钟与钟架不存在近期发生垮塌的可能性, 建议2006年元旦照常撞钟, 并建议对木架的糟腐构件进行加固.

5 古建保护的措施与研究方向

5.1 古建维修和保护的基本原则

根据文献 [16], 古建维修和加固应遵循如下基本原则: 加固处理后应能提高木材的耐久性和尺寸稳定性; 处理后应能具有防腐及防虫效果; 尽量不改变文物外观. 此外, 参照地中海沿岸国家的关于用可恢复混合技术对历史建筑进行地震保护的“Prohitech-Sixth Framework Programme”, 应增加一条, 即应具有可恢复性, 在必要时可将加固措施予以拆除, 恢复原状.

5.2 灾变理论模型的应用

力学界对灾变理论十分重视, 其成果在这里可以有启发作用, 得到应用. 结构物出现破坏之前通常是有先兆的, 受载平衡状况有明显变化. 其关键构件将由静平衡向动态正 (增加) 变形发展, 变形-时间曲线可用图 10 示意. 特征点的位移由恒值向随时间可增大转变 (图 10 曲线 A) 或由很小的 (可忽略的) 定常变形速率向较大 (或加速) 的变形速率转变 (图 10 曲线 B). 当出现这种情况, 即 $t \geq t_c$ 时, 结构可能发生破坏.

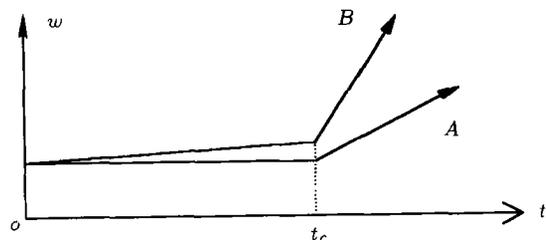


图 10 简化的灾变过程位移-时间曲线示意图

5.3 建立古建保护的常态化检测系统

建立光学测试系统, 以定期测量关键构件 (如大梁) 的倾斜或弯曲变形. 选择 t_c 测试基准点, 用水准仪及标尺测量关键构件 (如大梁) 的位移和斜度; 为扩大灵敏度可采用光学方法, 粘贴小镜片, 用光反射角度变化, 检测大梁的倾角变化.

配合加固措施建立大梁应变测量装置, 如在大梁内嵌入应变片或光导纤维. 这个系统可作为长期 (定期) 观测应变之用, 以预测突发灾变 (如突然垮塌) 的发生.

5.4 采用预应力钢筋加固 (增强) 木质大梁

为了不改变古建外貌, 对确需加固的关键性大梁, 可采用在大梁的靠近下表面处传入钢筋, 并用螺纹机构对钢筋施加预应力, 例如一根 1.8 cm 直径

的 45 号钢筋可承载 10 t 以上.

5.5 进行地震分析

北京地区是地震多发地区, 根据历史记载的北京周边地震事件 (如早年的三河县地震, 20 世纪 60 年代邢台地震以及 20 世纪 70 年代海城与唐山地震) 确定北京地震的烈度为 9 (IX) 级, 是全国地震烈度最高地区之一. 根据国家标准 GB18306—2001^[17], “关于地震基本烈度向地震动参数过渡的说明” 地震基本烈度为 9 级, 对应地震动峰值加速度 $g = 0.3 \sim 0.4$. 今后, 将用地震峰值加速度代替地震烈度. 针对北京地震动峰值加速度与载荷谱进行地震载荷下的安全性分析, 并做出安全评价.

5.6 疲劳分析

针对长期、多次撞击引起的结构物 (如大钟) 多次振动问题, 应重视其疲劳问题. 测量振动响应谱, 用力学方法预测敲钟是否会引发疲劳裂纹, 以及敲钟响度对疲劳寿命的影响.

5.7 控制环境质量

环境 (包括空气的湿度和成分) 质量好对木建结构影响非常大. 潮湿容易引起木材腐朽, 有害气体 (如酸性) 对木材与石材都有坏作用. 例如, 建立永乐大钟周围大气环境的检测系统, 常态化地检测大钟所处环境的大气质量, 尽量将不利因素降到最低, 对延长大钟和木架寿命至关重要.

6 结束语

力学学科与古建保护有密切关系, 力学工作者对古建保护责无旁贷, 是可以大有作为的, 但是任重而道远. 应该指出, 在古建保护领域, 许多现代高科技成果可以并正在发挥不可替代的作用. 例如采用纳米材料薄膜保护石材; 用高级瑞士胶水黏结石材与木材裂缝^[7]; 用先进科学方法杀灭木腐菌与微生物等.

对木材来说, 建立仿古木材加速老化实验室, 以使用几个月 (或几天) 时间获得几百年乃至上千年的木材老化的效果, 来判断其力学性能和承载能力, 对木建保护意义重大. 关于岩石材料已有这样的小型实验室.

参 考 文 献

- 1 李少林主编. 中国建筑史. 呼和浩特: 内蒙古出版社, 2006, 4
- 2 楼庆西. 中国古建筑二十讲. 生活·读书·新知三联书店, 2001, 9

- 3 胡森森, 蒋祝平编著. 中国建筑地图. 北京: 光明日报出版社, 2005, 3
- 4 大钟寺古钟博物馆编. 古刹梵钟. 北京: 中国农业科技出版社, 1998, 7
- 5 李诚(宋)撰. 营造法式. (一). 商务印书馆, 1933
- 6 包泉万著. 古塔的故事. 山东画报出版社, 2005
- 7 北京青年报. 历史文化遗产保护在北京. 2006-06-04, (A8); 2006-06-12, (A8); 2006-06-14, (A9)
- 8 张双寅, 徐永君, 申仲翰等. 永乐大钟测量、分析及整体保护方案. 中国科学院力学研究所, 2005,12
- 9 陈允适, 李武编著. 古建河木质文物维修指南. 木结构防腐及化学加固. 北京: 中国林业出版社, 1995
- 10 乐嘉藻著. 中国建筑史. 团结出版社, 2005, 1
- 11 北京青年报. 周口店遗址保护规划. 2006, 6, 11, (A4)
- 12 徐永君, 申仲翰, 战颂等. 周口店遗址受火车运行影响的损伤评估. 中国科学院力学研究所, 周口店北京人遗址博物馆, 2005, 10
- 13 中国林科院木材研究所古建筑与木质文物保护课题组. 永乐大钟钟架超声波无损检测结果和大钟的安全状况. 中国林业科学院木材研究所, 2002, 7
- 14 查济璇, 郎蕴琪. 利用超声方法测定北京大钟寺永乐古钟的壁厚. 声学学报, 1981(5): 284~290(Zha Jixuan, Lang Yunqi. Measuring the thickness of the famous ancient "Great Bell" in Beijing with ultrasonic method. *Acta Acustica*, 1981(5): 284~290(in Chinese))
- 15 夏明明, 冯长根, 杜志明等. 永乐大钟悬挂结构力学问题初探. 文物, 1990(7): 72~73.1
- 16 郭康民. 永乐大钟的力学浅谈. 中国科学院力学研究所, 1981
- 17 中华人民共和国国家标准, GB18306—2001. 中国地震动参数区划图. 国家质量技术监督局, 2001, 2, 2

(上接第57页)

表3 统一硬化模型在不同体系下相关量对比

分类	项目	统一硬化模型
岩土工程常用理论	屈服函数	$F = p + \frac{q^2}{pM^2} - p_x = 0$ 或 $F = p + \frac{q^2}{pM^2} - p_0 \exp\left(\frac{\epsilon_v^p}{c_p}\right)$
	流动法则	相关联
	硬化参数	$H = \int dH$
	塑性因子	$\Lambda = \frac{c_p}{\Theta} \left(dp + \frac{2pq}{p^2M^2 - q^2} dq \right)$
	塑性应变增量	$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$
经典塑性理论	屈服条件	$f = p + \frac{q^2}{pM^2} - C = 0$ $\frac{I_1}{3} + \frac{9J_2}{I_1M^2} - C = 0$
	加载条件	$f^* = \frac{I_1}{3} + \frac{9J_2}{I_1M^2} - \frac{I_{10}}{3}$ $\exp\left(\frac{\epsilon_{ij}^p}{3c_p}\right) = 0$ 或 $f^* = \frac{I_1}{3} + \frac{9J_2}{I_1M^2} - \frac{I_{10}}{3}$ $\exp\left(\int \frac{dH}{c_p\Theta}\right) = 0$
	流动法则	相关联
	强化函数	$h = \frac{c_p}{\Theta} \frac{I_1^2 M^2}{I_1^2 M^2 + 27J_2} \frac{I_1^2 M^2}{I_1^2 M^2 - 27J_2}$
	塑性应变增量	$d\epsilon_{ij}^p = h \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl}$

6 结论

(1) 岩土塑性力学, 作为弹塑性力学的一个分支, 应该纳入到经典弹塑性力学的整体框架内。

(2) 在经典弹塑性力学体系下, 重新推导得到的剑桥模型 (original cam-clay model), 修正剑桥模型 (modified cam-clay model) 和统一硬化模型 (unified hardening model) 具有更为严谨的表达形式, 使其更为规范化和统一化。

参考文献

- 1 Roscoe KH, Schofield AN, Thurairajah A. Yielding of clay in states wetter than critical. *Geotechnique*, 1963, 13 (3): 211~240
- 2 Roscoe KH, Burland JB. On the generalized stress-stain behavior of 'wet' clay. *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, 1968, 535~609
- 3 Yao YP, Luo T, Sun DA, et al. A simple 3-D constitutive model for both clay and sand. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 240~246
- 4 王仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础. 北京: 科学出版社, 1982. 153~161 (Wang Ren, Xiong Zhuhua, Huang Wenbin. *Foundation of Plasticity*. Beijing: Science Press, 1982. 153~161 (in Chinese))
- 5 Martin JB 著. 塑性力学: 基础及其一般结果. 余同希等译. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 18~48 (Martin JB. *Plasticity: Fundamentals and General Results*. Yu Tangxi, et al. trans. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 18~48 (in Chinese))