

张寅	张勇	张震	张传勇	张纯旺	张德洪	张帆一	张福寿	张贵鹏	张家明	张京斌	张凯凯	张康平
张立库	张良尘	张鸣扬	张柠溪	张琪林	张琮宇	张生伟	张思佳	张涛涛	张文杰	张文翔	张小飞	张晓飞
张晓光	张晓朋	张孝杨	张兴华	张雅男	张亚飞	张亚飞	张艳杰	张艳娟	张艳君	张一权	张永超	张元恒
张云翼	张志超	张志亮	张钟毓	章佳雷	赵豪	赵强	赵珊	赵彦	赵阳	赵枫霖	赵纪彦	赵昆鹏
赵利阳	赵孟辉	赵鹏雷	赵诗诗	赵伟炳	赵武超	赵秀珍	赵一轩	赵祎佳	赵雨浓	赵则昂	赵震坤	赵志鹏
赵子晨	郑鹏	郑晨曦	郑崇光	郑兴帅	郑宇柱	郑玉琴	郑志龙	钟昊	钟磊	钟耀	钟炜	钟大宁
钟奇亨	钟腾云	钟彦之	周超	周朝	周柯	周磊	周力	周楠	周鹏	周朕	周洲	周柏林
周冰君	周丙丙	周伯尧	周方跃	周海洋	周鸿屹	周会杰	周凯笛	周思清	周天送	周伟平	周向前	周学进
周亚普	周游佳	周瑜	周仲强	朱迪	朱侗	朱发勇	朱立力	朱墨翟	朱其欢	朱万胜	朱言平	朱钊辰
祝远程	庄福建	邹涛	邹鹏飞	佐雪								

抗泥石流冲击吊脚楼房屋结构竞赛模型设计¹⁾

程远兵²⁾ 陈记豪 尹晓飞 朱武旗 张宏光

(华北水利水电学院土木与交通学院, 郑州 450011)

摘要 介绍了一种抗泥石流冲击吊脚楼房屋结构竞赛模型的设计方案。该方案采用框架结构,在底层空心楼面梁中内置了能量转换梁。能量转换梁上表面在上部子结构柱支承处设置有斜面。能量转换梁在撞击后产生水平位移的同时能够带动上部子结构的升高,将外部撞击的水平动能转换为上部子结构升高所需的势能。给出了这种结构的细部构造设计方案,并进行了力学的概念分析和简化的结构计算。实验表明模型结构的抗撞击性能良好。

关键词 泥石流, 冲击, 吊脚楼房屋, 能量转换, 结构模型设计竞赛

引言

全国大学生结构设计竞赛是培养大学生创新意识、合作精神和工程实践能力的学科性竞赛^[1-3]。这项赛事富含趣味性和竞争性,能有效地培养学生综合运用材料、力学和结构等专业知识主动动手解决问题的能力,同时还能很好地培养学生的团队合作、沟通与交流等能力。竞赛涉及学生在结构的概念和选型、材料的力学特点及选用、结构的力学分析与计算、结构的构造及制作、测试装置制作及实验、科技文献写作、设计理念沟通与表达等方面的知识运用和能力培养,对学生是一次难得的专业综合训练机会。

第六届全国大学生结构设计竞赛于 2012 年 10 月在重庆大学举行,本届竞赛的题目是吊脚楼房屋抵抗泥石流、滑坡等地质灾害的结构模型设计及制作^[4-5]。本文作者(包括指导教师、带队教师、参赛学生)组成的参赛队参加了本次竞赛,参赛模型采用了一种带撞击能量转换装置的框架结构,受到大赛专家委员会的好评,并获得了最佳创意奖^[6]。本文主要介绍该竞赛模型的设计、制作、力学分析及结构计算等

相关内容。

吊脚楼作为传统民居,分布在我国广大的山区地区,多建于山坡地段。传统的吊脚楼房屋主体采用木结构,下部(吊脚层)采用不等高的木柱支撑,上部为单层或多层木框架结构。吊脚楼建筑上部通风、防潮,又能防毒蛇、野兽等,主要用于居住;下部一般为开敞或半开敞空间,主要用于关养家禽家畜或堆放杂物。

吊脚楼呈虎坐形,依山就势,因地制宜,就地取材,具有极强的适应性。这种建筑型式最大限度地减少了土石方开挖,避免了环境破坏,节约了土地,造价较廉,是中华民族悠久历史文化传承的象征,也是先辈们巧夺天工的聪明智慧和经验技能的充分体现。

随着时代的发展,现在的吊脚楼已经从传统的木结构发展为钢筋混凝土框架结构或砌体结构。这些吊脚楼的吊脚层采用不等高的钢筋混凝土柱或砖柱,上部结构采用框架结构或砖混结构,虽然沿用了传统吊脚楼的结构型式,但其结构布置更灵活、承载力更高、耐久性更好。

在结构型式和受力方面,吊脚楼结构的下部仅设有为数不多的立柱,上部柱和墙体较多,结构的载荷也多分布在上部,因此吊脚楼属于上下变刚度的不规则结构,头重脚轻。由于山区地区大都存在较高的泥石流、滑坡、滚石和地震等地质灾害风险,地质灾害是这种建筑的天敌。因此,如何提高吊脚楼建筑抵抗这些地质灾害的能力,是具有现实意义的。

第六届全国大学生结构设计竞赛题目紧密结合上述工程实际问题。题目中的吊脚楼模型限定为 4 层,以在滑道内不同下落高度(高差分别为 400 mm、800 mm 和 1 200 mm)滚下的钢球模拟泥石流或山体滑坡作用。钢球撞击固定于一层楼面外的撞击架的前撞击板,撞击部位限定在前撞击板的中

2012-12-03 收到第 1 稿,2013-03-20 收到修改稿。

1) 华北水利水电学院第二届“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛资助项目,华北水利水电学院大学生创新性试验计划项目(2E+05)资助。

2) 程远兵,1965 年生,男,教授,博士,研究方向为结构抗震理论。E-mail: cyb-ny@163.com

间位置, 撞击作用通过撞击架传给模型房屋结构. 在模型房屋的上部楼面放置有规定重量的钢板, 以模拟各层楼面系统承受的实际竖向载荷. 屋面荷重由各参赛队自定. 在撞击架的后固定板中间处固定有加速度传感器. 模型加载成绩以加速度乘以承载自重比计分.

竞赛题目限定的模型主要制作材料为竹皮和 502 胶, 楼层净尺寸不得小于 200 mm, 外包尺寸不得大于 240 mm, 楼面层高为 $220\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, 楼面层净高不小于 200 mm, 吊脚层柱高度为 $340\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$. 在吊脚层柱净高范围内, 不得设置任何侧向约束. 模型内部不得设置任何妨碍建筑功能的构件. 模型底部固定于倾角为 30° 的底座上.

1 本参赛模型的设计思路

泥石流、滑坡、滚石、地震等地质灾害对房屋结构的作用过程, 实际上都是能量在结构中转换、吸收和耗散的过程. 参赛模型设计的目标, 实质上是尽可能做到结构能够耗散、吸收或转化钢球撞击作用传递给结构的能量, 并使结构不会发生破坏或严重破坏.

传统的结构抗震抗撞击设计方法^[7], 大多是采用结构塑性变形来耗能, 通过弹性变形来恢复; 或是采用减震隔震方法, 降低结构的振动作用. 考虑到结构都具有很大的质量, 使这些质量上升, 就能吸收大量的能量, 因此, 基于能量转换原理, 如果能设计出一种能量转换结构模型, 使得在滑道内滚下的钢球传递给结构的能量转换成结构质量的竖向上升, 这样就能实现外部撞击能量在模型结构内的转换和吸收, 模型结构的水平振动和结构破坏也会减轻.

根据全国大学生结构设计竞赛的宗旨, 为锻炼参赛学生的创新能力、鼓励学生放飞思维、创意无限, 本参赛模型没有采用传统的结构抗震抗撞击设计方法, 而主要基于能量转换原理进行设计.

2 本参赛模型采用的能量转换结构

根据竞赛题目的要求及限制条件, 参赛模型的结构型式选为框架结构. 基于上述思路, 将模型结构的柱子在一层楼面 (撞击水平面) 上一定高度处分开, 把整体结构设计为上下两个子结构, 上部结构柱的底端以竖向可动铰支座的形式支承在下部结构上. 为获得良好的承载自重比, 结构梁柱多设计为空心薄壁杆件. 在一层楼面撞击方向的空心框架梁内, 设置可水平滑动的撞击能量转换梁, 转换梁在上部子结构柱下端的支承位置处设计为斜面. 上部子结构柱的下端做成缩小的实心截面, 套在下部结构柱的空心截面内. 转换梁在受到水平撞击后, 水平方向产生位移就可以带动上部结构升高 (图 1).

本方案中的能量转换梁, 因为不会延长撞击的接触时间, 不会降低撞击作用力, 因而不属于缓冲装置; 转换梁承受了上部结构的总载荷, 并通过吊脚层的楼面结构和梁柱节点传递给下部结构, 因而转换梁的设置符合竞赛规则的要求.

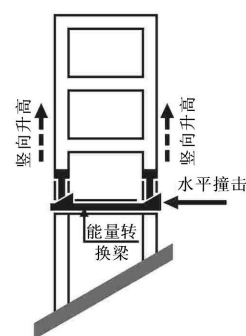


图1 能量转换结构

在上述设计方法中, 转换梁是模型结构的重要构件. 水平方向的撞击动能通过转换梁转换为上部结构升高所需要的势能, 实现能量的转换和吸收. 需要说明的是, 此种主要针对参赛模型的设计思路, 虽然在工程实际应用中具有局限性, 但对工程实践仍具有借鉴作用, 不失为一种创新.

本参赛模型及试验装置的鸟瞰图见图 2. 在前期的实验过程中, 为节省经费, 本参赛队实验装置的底座采用混凝土梁, 滑道采用切开的不锈钢管弯成, 滑道支架采用结构胶固定于底座上的螺纹钢筋制成, 模型底座用 10 mm 厚钢板弯曲成型, 结构胶粘结在混凝土梁上. 参赛模型的鸟瞰图见图 3. 吊脚层柱采用箱形截面, 其余梁柱采用空心截面. 顶层楼板采用实心截面, 二、三层楼板采用开洞截面, 一层不设置楼板. 能量转换梁细部构造见图 4 和图 5. 为保证上部子结构的升高和水平撞击力的传递, 在上部子结构柱的下端设置导向滑槽, 在下部空心柱截面的内侧设置导向滑条, 实验

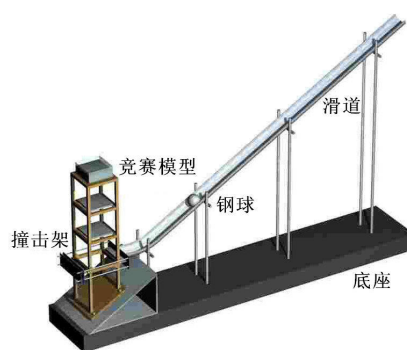


图2 模型及试验装置鸟瞰图



图3 模型鸟瞰图

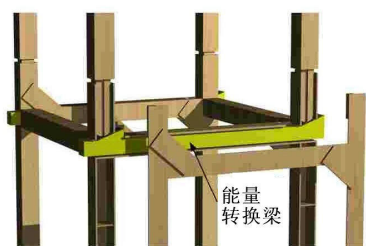


图 4 能量转换梁

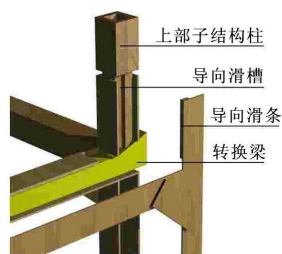


图 5 能量转换梁细部构造

表明, 这些措施能有效地保证结构的传力和上部子结构的升高。

3 参赛作品命名

参赛作品命名为“升”。书法汉字“升”字(图 6)形象而生动地表明了本参赛模型结构的能量转换原理,“升”字上面的“日”字代表吊脚楼的上部结构——居住层,下面的两竖代表吊脚楼的下部结构——吊脚楼的立柱,中间的一横代表能量转换梁,一横向左移动,带动下部的“升”字左上角的一撇前移,顶起上部结构上升,完成能量转换。



图 6 汉字“升”

4 模型制作、细部构造处理

(1) 模型制作材料及特点

结构模型的主要材料为竹皮,其特点是:材料各向异性,顺纹抗拉强度、抗压强度较高。竹材易脆断,多沿横纹方向破坏,顺纹纤维被拔出。同一批竹材尺寸有误差,表面的粗糙程度也不一样。

502 胶凝结速度快,粘结强度高,容易渗进竹材。接触面紧合、平整且施加一定压力时,粘结效果最好。制作时应控制好 502 胶的流出量和均匀程度,以增大接触面积和提高粘结强度。

(2) 模型构件的制作

结构梁、柱及楼板等根据设计尺寸选用不同厚度的竹皮粘结。

楼板采用实心 and 开洞两种型式。考虑到保证刚度和减轻

结构自重的需要,屋顶板不开洞,二、三层楼面板采用开洞板,一层顶由于不布置钢板,不再设置楼板。实心楼板采用两层竹皮沿竹纹垂直方向粘结,以保证楼板尺寸的稳定性,同时保证楼板的双向同性。考虑到二、三层楼面的荷重钢板较轻,钢板本身具有一定的刚度,为减轻结构自重,将二、三层楼面板开洞。洞之间的板带采用竹皮沿正交方向粘结。

结构梁均采用空心截面,以减轻结构自重,同时可以获得较大的截面承载力和抗弯刚度。上部结构二、三层的楼面梁由于受力较小,采用单层竹皮空心截面。顶层梁由于受力较大,采用双层竹皮空心截面。一层的楼面梁是保证吊脚层刚度的重要构件,同时还要内置能量转换梁,因此采用两层竹皮空心截面。能量转换梁采用两层竹皮空心截面,为传力可靠,上部柱接触的斜面部分及梁的端部采用实心,主要考虑这些部位承受的上部压力、水平撞击力等较大。

上部结构柱由于受力较小,采用两层竹皮空心截面。吊脚层柱的受力较大,同时必须有足够的刚度,以限制结构的上部水平位移,因而采用箱形截面,做法是在空心截面内每隔 60mm 左右设置一道两层竹皮粘结成的隔板。

(3) 节点及细部处理

试验表明,在三级加载后,柱底端很容易发生粘结开裂,因此在柱的底端设置 L 形的竹皮加强,以增大柱底的接触面积。

由于转换梁穿过一层梁柱节点,造成一层楼面梁柱节点连接削弱,通过在节点处设置短斜拉条来补强。由于撞击主要为单向作用,因此主要在一个方向设置斜拉条(图 4)。

5 力学分析及承载力估算

(1) 能量守恒定理的应用

在撞击前,结构的初始能量为撞击球的重力势能,即 $E_{1i} = m_s g h_i$ 。式中: E_{1i} 为第 i 级加载时结构的初始能量, m_s 为撞击球的质量, g 为重力加速度, h_i 为第 i 级加载时钢球的撞击下落高差, i 为加载级数, $i = 1, 2, 3$ 分别对应于 3 个下落高差。

撞击及结构振动、变形完成后,上部结构的升高为 u_i ,上部结构的总质量(含外加钢板等载荷质量)为 m_u ,此时结构的势能增加量为 $E_{2i} = m_u g u_i$ 。

在整个钢球撞击、结构振动及变形过程中,由于钢球与滑道和撞击架的摩擦、转换梁与其他构件的摩擦、上部结构的升高移动摩擦、结构的有阻尼振动、塑性变形及撞击过程中的发热、发声等原因造成初始能量损失,用 γ_i 表示每级加载下上述损失能量占初始能量的比值,根据能量守恒定理,有 $(1 - \gamma_i)E_{1i} = E_{2i}$ 。

进一步整理上述各式,得 $u_i = (1 - \gamma_i) \frac{m_s}{m_u} h_i$ 。式中, γ_i 需根据实验测得。

(2) 能量转换梁的受力分析

转换梁的受力见图 7。图中 F 为撞击力, f_1 为转换梁与一层楼面结构的摩擦力, N_1 为转换梁受到的下部结构的支承力, N_2 为转换梁受到的上部结构传来的压力(可分解为水

平阻力和竖向压力), f_2 为转换梁斜面上的摩擦力, α 为转换梁斜面的倾角. 由于转换梁质量较小, 此处忽略了转换梁的惯性力.

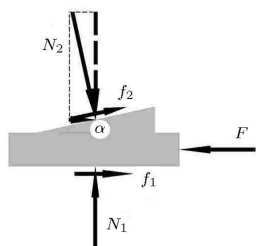


图 7 转换梁的受力图

(3) 结构的内力分析及承载力估算

结构在静载作用下, 能量转换梁与外围空心框架梁共同组成楼面梁. 上部结构柱底由于压力作用, 与下部结构不会脱开, 同时上部结构柱底有一定的嵌入长度, 可以承担一定的弯矩和剪力, 因此结构在静力作用下可以简化为平面框架结构进行分析.

结构在撞击载荷作用下的理论分析比较复杂. 为简化计算, 同时又与实际符合, 根据实测各层质量块的加速度时程曲线, 计算结构的最不利惯性力, 将惯性力施加在结构上进行计算. 计算惯性力时取用的重力载荷代表值为钢板重量及结构自重, 惯性力均集中作用在楼面板中间.

结构内力和变形采用结构力学求解器计算^[8].

竞赛题目给出竹材的抗拉强度为 60 MPa. 但根据现场试验, 经 502 粘结后, 竹材的抗拉强度有明显提高, 因此本方案取竹材的抗拉强度实际值为 80 MPa. 在计算中, 认为竹材的抗压强度无限高, 即材料不会出现受压破坏, 这与实验

结果是一致的. 竹材的抗剪强度取为 30 MPa.

6 结 语

在前期的实验和测试过程中, 本参赛模型结构及构件几乎没有破坏, 模型结构具有良好的受力和变形性能, 并顺利地实现了各级撞击载荷下能量的转换. 竞赛现场测试也表明结构具有良好的抗撞击性能, 说明此种结构模型设计方法思路新颖, 原理明了, 有一定的技术优越性和创新性, 对于工程实践具有借鉴作用.

参 考 文 献

- 舒小娟, 黄柱, 周旭光. 纸拱桥结构模型优化建模分析. 力学与实践, 2012, 34(4): 89-92
- 张佳, 吴立香, 彭扬波等. 山东省结构设计竞赛一等奖模型设计分析. 力学与实践, 2011, 33(4): 77-79
- 余世策, 宋翔, 杨丁亮. 结构设计竞赛中风力发电塔模型设计与制作. 力学与实践, 2010, 32(6): 96-99
- 全国大学生结构设计竞赛委员会秘书处. 关于公布 2012 年第六届全国大学生结构设计竞赛赛题的通知 (第二号). <http://www.ccea.zju.edu.cn/structure/>, 2012
- 全国大学生结构设计竞赛委员会秘书处. 2012 年第六届全国大学生结构设计竞赛补充通知 (二). <http://www.ccea.zju.edu.cn/structure/>, 2012
- 全国大学生结构设计竞赛委员会, 第六届全国大学生结构设计竞赛组委会, 第六届全国大学生结构设计竞赛专家委员会. 关于公布 2012 年第六届全国大学生结构设计竞赛获奖名单的通知. <http://www.ccea.zju.edu.cn/structure/>, 2012
- 李爱群, 高振世. 工程结构抗震设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- 龙驭球, 包世华. 结构力学教程 (面向 21 世纪课程教材). 北京: 高等教育出版社, 2001

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 98 页)

史注记和图表等直接取自相关教材或专著, 也有极少量内容或者叙述的思路取之其他教材, 都一一标明了来源. 甚至有些较为特别的例题, 也说明了出处.

该书的例题和习题也有特点. 不仅是常见的计算题, 也包括部分理论公式推导的习题. 例题中有些难度较大的题目, 有些例题给出了多种解法.

该书作者梅凤翔教授是我国分析力学学科带头人. 不仅在分析力学研究方面硕果累累, 在力学教学中也卓有建树. 他曾获全国高校教学名师奖和国家级教学成果二等奖, 是国家级精品课程负责人和国家级教学团队带头人. 并在《力学与实践》上发表了系列教学文章“理论力学札记”和“分析力学札记”. 该书合作者尚玫师从梅凤翔教授获得博士学位, 现任北京理工大学副教授.

参 考 文 献

- 梅凤翔, 尚玫. 理论力学 I——基本教程. 北京: 高等教育出版社, 2012

- 梅凤翔, 尚玫. 理论力学 II——专题教程. 北京: 高等教育出版社, 2012
- 梅凤翔, 史昌荣, 张永发等. 约束力学系统的运动稳定性. 北京: 北京理工大学出版社, 1997
- 梅凤翔. 动力学逆问题. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 梅凤翔. 非完整系统力学基础. 北京: 北京工业学院出版社, 1985
- 梅凤翔, 史昌荣, 张永发等. BIRKHOFF 系统动力学. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- 梅凤翔. 约束力学系统的对称性和守恒量. 北京: 北京理工大学出版社, 2004
- 朱照宣, 周起钊, 殷金生. 理论力学 (上). 北京: 北京大学出版社, 1982
- 李俊峰, 张雄. 理论力学 (第 2 版). 北京: 清华大学出版社, 2010
- 刘延柱, 朱本华, 杨海兴. 理论力学 (第 3 版). 北京: 高等教育出版社, 2009
- 范钦珊, 陈建平. 理论力学 (第 2 版). 北京: 高等教育出版社, 2010

(责任编辑: 胡 漫)