

doi: 10.11835/j.issn.1005-2909.2018.04.014

欢迎按以下格式引用:邹翼,王庆,程玉珍,等.竹皮结构设计与制作分析[J].高等建筑教育,2018,27(4):73-81.

竹皮结构设计与制作分析

邹翼,王庆,程玉珍,邹鹏宇,曹文,孙新忠,黄思凝,杨文东

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东青岛 266580)

摘要:为了给全国结构设计大赛中模型的合理设计与快速制作提供建议及参考,以2015年山东省大学生结构设计大赛第一名结构形式为例,通过结构力学求解器、CAD3D建模、ANSYS等软件的联合应用,从结构的选型、结构的分析和结构的实际制作三个方面,探讨计算机辅助设计在结构设计大赛模型设计与制作中的应用。并对模型结构进行了施加预应力的实验,实验表明,施加预应力能显著增加结构相关刚度,减小变形,对提高模型竞争力十分有利。

关键词:结构设计大赛;计算机辅助设计;制作;结构预应力

中图分类号:G642.0;TU2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2018)03-0073-09

2005年全国结构设计大赛举办以来,国内有不少学者对模型结构设计进行了研究。如秦亚丽等^[1]最早对结构设计大赛进行了系统的总结;夏雨等^[2]对纸质结构进行了极限承载力的实验及结构优化;陈庆军等^[3]将国内外大学生结构设计竞赛进行对比,指出中国的优点及不足;沈路等^[4-5]详细阐述第七届全国结构设计大赛的设计过程等。在众多研究中却少有关于计算机辅助模型结构设计与制作方面的技巧分析总结^[6]。本文以2015年山东省大学生结构设计大赛为例,详述计算机对模型结构设计与制作的辅助技巧,以及模型制作过程中的预应力施加方法,为结构设计大赛中模型的快速设计与合理制作提供建议和参考。

一、赛题简介

大赛采用厚度为0.2 mm、0.35 mm和0.5 mm的竹皮作为制作材料,力学性能参数为:弹性模量 $E=1 \times 10^{10}$ Pa,泊松比0.31。模型总高度为625 mm、允许误差为 ± 5 mm的三层双塔结构,其外轮廓范围如图1(a)中所示,且模型必须经过如图1(b)中规定的模型轮廓点。模型的加载如图1(c)分为三部分:第一部分(占20分)要求模型在屋面的连廊区域承受大小为100 N竖向力,且模型的竖向

修回日期:2017-05-24

基金项目:中国石油大学(华东)学术硕士点建设项目(XWS130005);山东省研究生教育创新计划项目(SDYY15140);国家级大学生创新创业训练计划项目(201610425042)

作者简介:邹翼(1994—),男,中国石油大学储运与建筑工程学院本科生,主要从事模型结构设计与制作的研究,(E-mail)492694251@qq.com;通信作者:杨文东(1982—),男,中国石油大学储运与建筑工程学院副教授,博士,主要从事岩石力学与地下工程研究,(E-mail)wendongy@gmail.com。

挠度不能超过 10 mm;第二部分(占 25 分)是保持竖向 100 N 静力荷载不变,在水平力加载点施加额定水平拉力 60 N,记录水平位移测量点 x 向水平位移 U_x ;第三部分(占 30 分)是保持竖向 100 N 静力荷载不变,撤除单向水平加载,通过水平力偶加载点施加额定水平拉力 80 N,记录水平位移测量点 y 向水平位移的均值。在加载过程中,模型位移测量点的位移一旦超过 10 mm,则认为该模型失效。加载模型的最终得分同模型的质量和测量点发生的位移之积成反比。

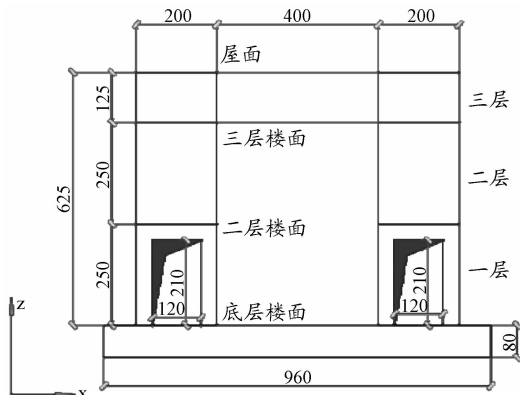


图 1(a) 模型正(背)立面示意图(单位:mm)

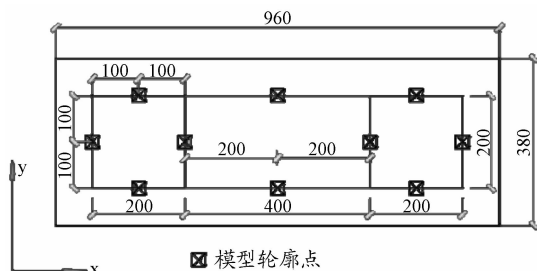


图 1(b) 模型平面示意图(单位:mm)

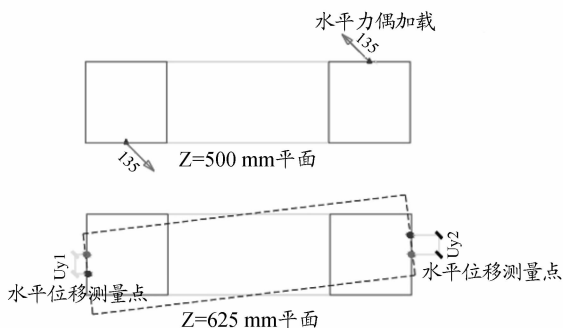
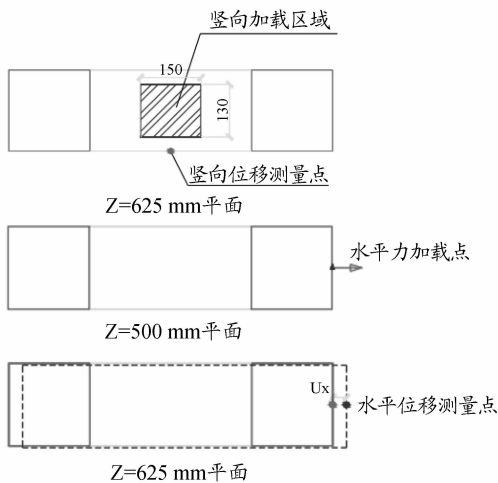


图 1(c) 模型加载示意图(单位:mm)

二、结构的选型

结构采用竹皮为材料,结点粘接较为牢固,且在实际制作中结点可加强处理,因而结点可视为刚结点。赛题要求该结构具有一定竖向承载力的同时还具有较大的抗侧刚度。下面以结构的抗侧力构件为例,阐述结构选型过程中计算机辅助设计的方法。选择满足赛题要求的抗侧力构件如图 2 所示,分别为纯矩形刚架、三角刚架及内部设置斜杆的矩形刚架。

(一) 抗侧力构件的定性分析

纯矩形刚架其侧向位移主要源于竖杆的弯曲变形,其内部无抗侧力杆件,虽然节省材料但抗侧刚度较小。三角刚架其侧向位移主要源于斜杆的拉压变形,能节省材料的同时抗侧刚度较大。内部设置斜杆的矩形刚架其侧向位移来源主要是斜杆的拉压变形及竖杆的弯曲变形,其抗侧

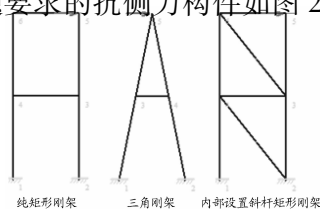


图 2 结构抗侧力构件

刚度同样较大,但所需材料较多。

(二) 抗侧力构件的定量分析

根据杆件实验数据预估杆件截面如图3所示,通过结构力学求解器简要分析满足赛题要求的结构抗侧力构件,分析数据如图4。可通过指定点的位移大小及构件质量(正比于杆件长度总和)进行抗侧力构件合理性的定量判断。

三种抗侧力构件的质量比(构件长度比)为:

$$1\ 400:1\ 120:2\ 040 = 1.25:1:1.82$$

在单位力下顶点的水平位移比值为:

$$74.9:3.28:2.17 = 22.8:1:0.67$$

可以看出,纯矩形刚架虽然质量较小,但由于荷载条件下其水平位移大,抗侧刚度远小于其他两种抗侧力构件,因而首先淘汰。再来定量比较三角刚架和内部设置斜杆的矩形刚架,由于模型加载的最终得分同模型的质量和测量点发生的位移之积成反比,则估算采用三角刚架与采用内部设置斜杆的矩形刚架作为抗侧力构件时模型得分之比为:

$$1.82 \times 0.67:1 \times 1 = 1.22:1$$

因而选择三角刚架作为模型的抗侧力构件时模型的得分可能更高。

求解器所需的截面力学性能参数计算^[7]:

$$EA = 20 \times 10^{-6} \times 10^{10} = 2 \times 10^5 \text{ N}$$

$$I = 10 \times 0.5 \times 2 \times 5^2 + \frac{1}{12} \times 0.5 \times 10^3 \times 2 = 333 \text{ mm}^4$$

$$EI = 333 \times 10^{-12} \times 10^{10} = 3.33 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

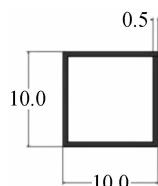


图3 假定杆件截面图
(深色部分为竹皮,单位:mm)

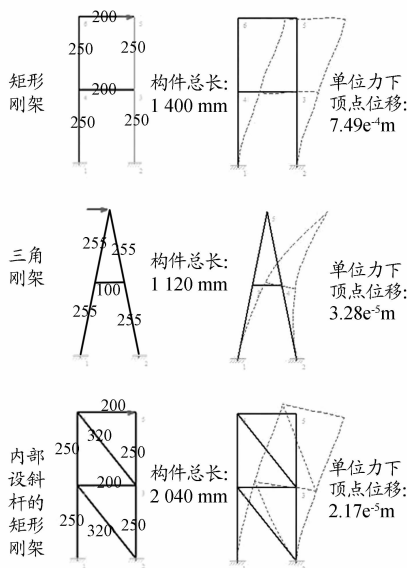


图4 抗侧力构件分析图

三、结构的分析

模型的抗侧力构件确定后进一步进行模型结构的分析,选取图5所示的结构进行比较。

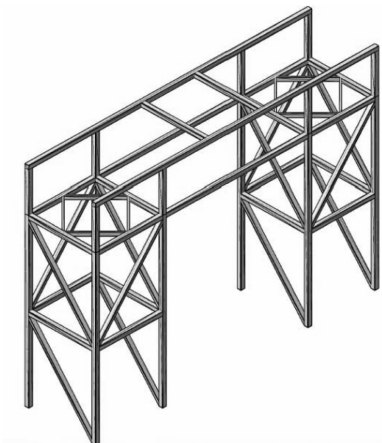


图5(a) 模型结构一示意图



图5(b) 模型结构二示意图

(一) 结构的定性分析

1. 竖向荷载加载分析

结构一竖向承重构件跨度较小,采用连续梁来承受竖向荷载,不仅有效减小了跨中弯矩的大小,还使横梁受力更为均匀。该结构具有一定的竖向抗弯刚度。结构二竖向承重构件跨度较大,采用组合结构来承受竖向荷载,极大地增加了结构的竖向抗弯刚度,且结构受力更为均匀。

2. 水平荷载加载分析

结构一的抗侧力构件为与水平荷载平行的内部设置斜杆的矩形刚架,但由于赛题限制,该结构第一层有一部分不能设置斜杆,因而在该平面内的抗侧刚度显著降低。而结构二的抗侧力构件除了与水平荷载平行的三角刚架外,还有与水平荷载垂直的三角刚架,其抗侧刚度远大于结构一。

另外,结构二抗侧力构件设置的竖杆数量为结构一的两倍,而结构一内部设置较多斜杆,虽然无法定性判断结构一与结构二的质量大小,但根据结构二优越的竖向抗弯刚度和抗侧刚度可认为结构二更为合理。

(二) 结构的定量分析

1. 分析方法

借助 CAD3D 辅助设计快速完成模型单一杆件的创建,并进行抽壳处理,使杆件形式同实际杆件相切合;然后采用布尔运算将模型合成整体后删去多余的线面,形成 sat 文件;再导入 ANSYS 内,在模型上施加符合赛题要求的荷载,采用具有 20 节点的 solid95 单元求解。求解后,通过模型的受力变形可以预测模型的位移,通过模型的体积比可以预测结构的质量比,以此来定量衡量模型的优越。需要注意的是:建模过程中模型结点处应连续无突变,以避免智能划分网格过密,导致求解困难。另外,由于 ANSYS 本身没有单位设置,CAD 导出的模型尺寸默认单位一般为 mm,应注意单位之间的换算。

2. 分析数据

结构的分析数据如图 6。

(1) 强度校核。采用第四强度理论显示应力云图。从中可以看出,结构一在竖向荷载下最大应力较大,高达 55MPa,接近竹皮材料的极限抗拉强度 60MPa,说明其竖向承重构件设置不合理。结构二最大应力均不超过 23MPa,能满足强度要求。

(2) 模型得分比较。结构一与结构二的质量等于其体积比。

质量比为: $268\ 492:285\ 933 = 0.94:1$

假定通过不同加载要求的最轻模型重量一致,通过位移及质量计算模型的得分比:

竖向荷载作用下得分:

结构一 20; 结构二 $20 \times 0.94 = 18.8$

水平力作用下得分:

结构一 25; 结构二 $25 \times 0.94 \times 4.20 / 0.87 = 113.4$

水平扭矩作用下得分:

结构一 30; 结构二 $30 \times 0.94 \times 1.21 / 0.61 = 56.0$

结构一总分: $20 + 25 + 30 = 75$

结构二总分: $18.8 + 113.4 + 56.0 = 188.2$

模型得分比:

结构一:结构二 = 75 :188.2 = 1:2.51

从模型的可能得分上看,结构二明显优于结构一,因此选择结构二作为模型结构的最终形式。

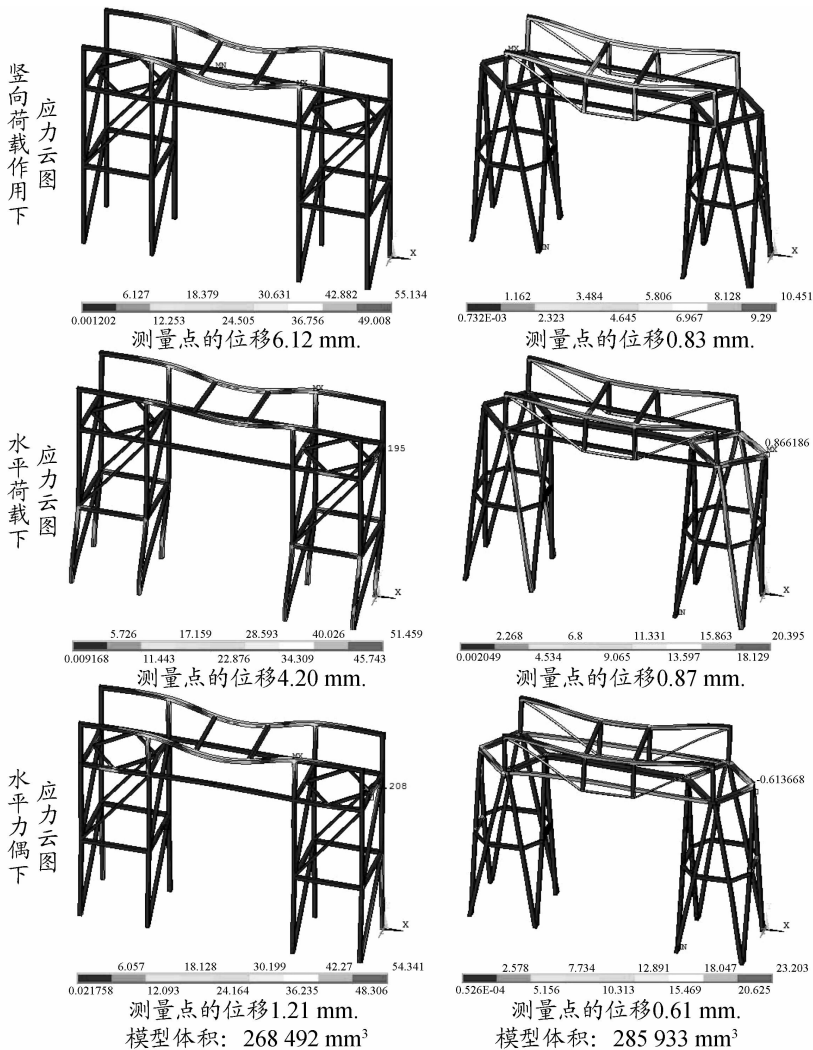


图6 结构分析数据图

四、结构的实际制作

确定模型的结构形式后就可以开始模型的实际制作。如图7所示,通过CAD3D建模导出模型的三视图及轴测图,以对模型的外轮廓产生直观印象。另外,通过单一杆件的放样可提取杆件的外轮廓尺寸,并在平面内进行展开,得到杆件的平面设计图8。图8中总共有12类杆件,各个杆件所处的位置和所需的数量可通过模型轴侧图及杆件平面设计图参照得出。这种通过放样制作杆件的方法保证了杆件制作的精确尺寸,在制作异型结构模型时,解决了模型结构复杂时所需面对的制作工艺繁杂的难题,为优良的结构设计的实际制作提供了保障。另外,制作完成的杆件基本上无需打磨就能完成结构的装配,在避免装配应力产生的同时,极大地加快了模型的制作速度,提高了模型制作的质量,见图9。

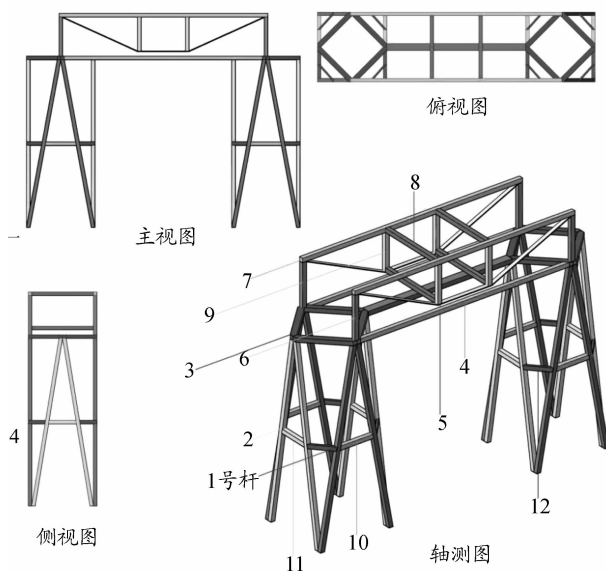


图7 结构三视图及轴测图

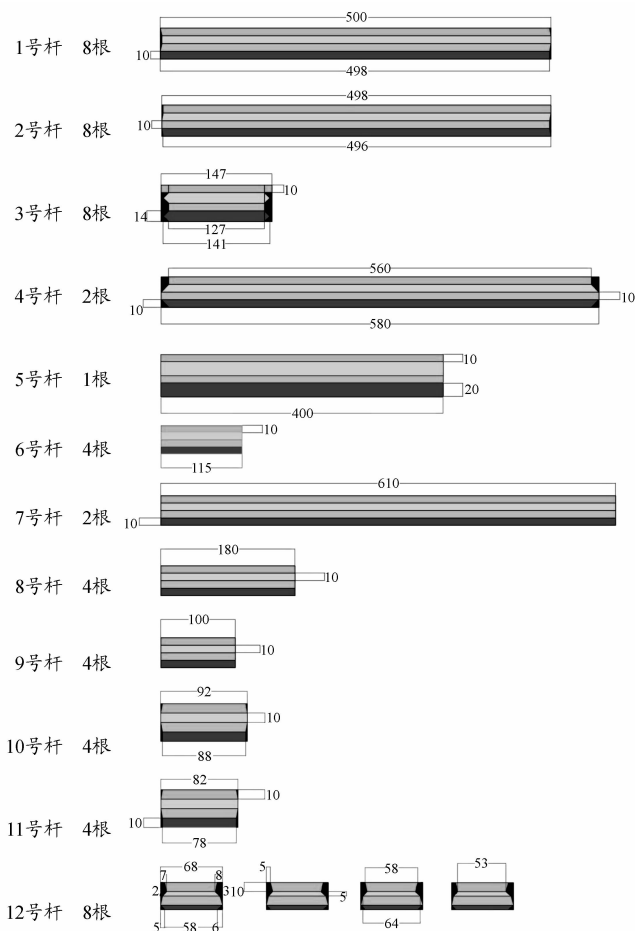


图8 杆件平面设计图

注:平面设置图中浅色部分为杆件的四面竹皮,深色部分为需要裁剪掉的竹皮。另外,为防止加载过程中杆件由于加载处局部压应力过大而损坏,杆件内部进行了局部加肋处理

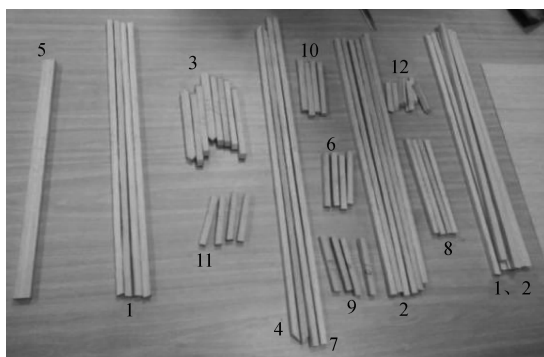


图9 通过放样制作的杆件及拼装的结构

五、结构预应力

施加预应力能显著增大结构的相关刚度,有效减小结构的变形,对提高模型竞争力十分有利。下面将以模型中承受竖向荷载的组合结构设计过程为例,详述预应力的施加技巧。组合结构杆件截面尺寸如图10。在赛题要求的竖向荷载下其计算简图及内力图如图11。

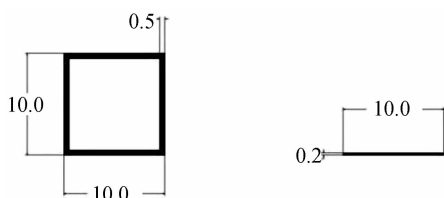


图10 杆件截面设计图

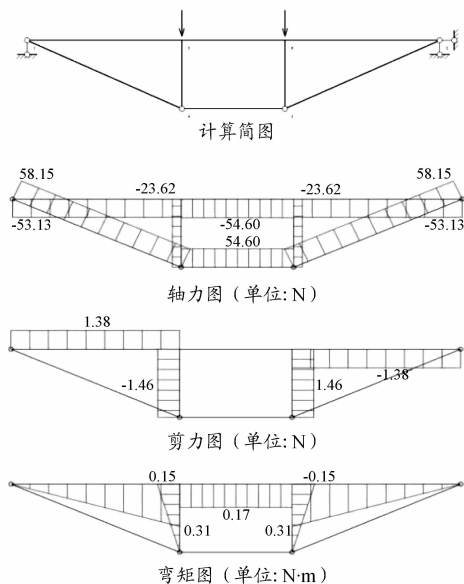


图11 组合结构计算简图及内力图

杆件截面参数在结构的选型中已进行计算,不再赘述。

受拉竹皮截面参数:

$$A = 10 \times 0.2 = 2 \text{ mm}^2$$

$$EA = 1 \times 10^{10} \times 2 \times 10^{-6} = 2 \times 10^4 \text{ N}$$

(一) 强度校核

由内力图可以看出,各杆件剪力极小,因此在强度校核中可忽略不计,只考虑轴力及弯矩对杆件的影响。杆件危险截面位于计算简图中3号节点的左侧,其轴力为 -53.13N ,截面弯矩为 $0.31\text{N} \cdot \text{m}$ 。下部受拉竹皮只受大小为 58.15N 的轴力。

1. 验算杆件的最大正应力

$$\sigma_{\text{杆件}} = \frac{53.15}{20} + \frac{0.31}{333} \times 5 \times 10^3 = 2.66 + 4.65 = 7.31 \text{MPa} < [\sigma_{\text{压}}] = 20 \text{MPa}$$

2. 验算竹皮的抗拉强度

$$\sigma_{\text{竹皮}} = \frac{58.15}{20} = 29.08 \text{MPa} < [\sigma_{\text{拉}}] = 60 \text{MPa}$$

(二) 预应力技巧

1. 具体实施过程

如图 12 所示,上部压弯杆件施加与赛题方向相反的竖向荷载(实际为 2N),使杆件弯曲,然后在该状态下粘贴竹条,待其粘接牢固后撤去作用于杆件上的竖向荷载,此时由于杆件要恢复受弯变形,而竹皮由于受拉限制杆件的变形恢复,因此竹皮绷紧且杆件微微起拱,压弯构件在加载前上表面受拉下表面受压。经实际加载验证,承受竖向荷载的组合结构在施加预应力后结构的竖向变形小于 0.1 mm,远小于山东赛区中 0.55 mm 的竖向平均位移,可见其效果显著。



图 12 组合结构预应力施加过程

2. 实验过程

理论计算同实际情况总有出入,实验是检验结构合理性最有效的方法。如图 13 是按照原有设计方案做的承受竖向荷载的组合结构。该结构在加载过程中数次发生脆性破坏,由于破坏具有突然性,仅凭肉眼根本无从识别破坏的起始点,破坏原因只能通过录制破坏过程后,运用视频软件调出每一帧的画面观察发现。破坏的起点在于受拉竹皮的断裂:由于竹皮粘接过程中难免会使竹皮面倾斜,承受荷载时,竹皮截面的拉应力并非均匀,这与理论计算不相符合;而当局部拉应力超过竹皮抗拉强度时,竹皮开始断掉,然后整个组合结构损坏。如图 14 为最终成功的实验方案。采取的解决方法为加厚受拉竹皮的厚度,在原来 0.2 mm 的竹皮上继续粘贴一层 0.35 mm 的竹皮,保证了竹皮的受拉强度。



图 13 组合结构实验破坏展示

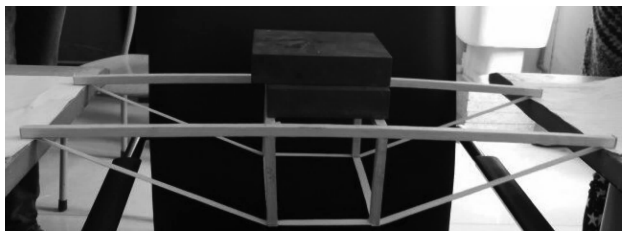


图 14 组合结构成功加载展示

六、结语

本文探讨了计算机辅助设计在结构设计大赛设计与制作中的应用,以及结构预应力对提高模型相关刚度,减小模型位移的有利影响。具体实施过程总结如下。

(1)假定杆件截面尺寸,运用结构力学求解器初步确定结构的选型。

(2)通过 CAD3D 抽壳建模块速完成模型的创建,这样创建的模型结构与实际制作的结构相切合。再导入 ANSYS 软件里进行力学分析,经比较确定最终的结构形式。这套分析方法最终通过模型的实际加载得到了较好验证。

(3)模型结构形式确定后,利用 CAD3D 进行模型杆件平面图的展开,得到杆件的平面设计图,这种放样技巧不仅方便模型的精确制作,还解决了异性结构制作工艺繁杂的难题。

(4)对设计的预应力模型结构进行了试验验证,实验表明预应力能显著增加模型结构相关刚度,有效减小结构变形。试验过程采用视频记录,如果模型破坏,可通过视频研究其破坏机理,并进行改进。

致谢:感谢中国石油大学(华东)土木工程系的杨文东副教授对模型试验提供的和辅助;感谢中国石油大学(华东)黄思凝老师为模型的研究过程提供了宝贵的结构大赛试验数据。

参考文献:

- [1] 秦亚丽,陈志华,贾莉,等.天津市 2005 年大学生结构设计大赛的决赛方案评述及结构体系分析[R].第五届全国现代结构工程学术研讨会文集.
- [2] 夏雨,李靖,周诗博,等.纸质平面及公建结构极限承载力试验及结构优化[J].桂林理工大学学报,2016,36(2):247-252.
- [3] 陈庆军,罗嘉豪,陈思煌,等.国内外大学生结构设计竞赛总结及研究[J].东南大学学报:哲学社会科学版,2009,31(S):10-12.
- [4] 沈路,高潮,王志云.第七届全国大学生结构设计竞赛模型结构设计分析[J].高等建筑教育,2014,23(4):159-163.
- [5] 李显,王晓梦,宋鑫,等.第七届全国大学生结构设计竞赛作品创新特色浅析[J].江苏建筑,2014(4):12-15.
- [6] 周克民.结构的优化设计与分析——大学生结构设计竞赛评述[J].福建建筑,2006(4):28-30.
- [7] 孙训芳,方孝淑,关来泰.材料力学[M].2版.北京:高等教育出版社,2002.

Discussion on bamboo structural design and manufacture

ZOU Yi, WANG Qing, CHENG Yuzhen, ZOU Pengyu, CAO Wen, SUN Xinzhong, HUANG Sining, YANG Wendong
(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, P. R. China)

Abstract: In order to provide the suggestion and reference for the reasonable design and rapid manufacture of the model in the national structural design competition, taking the first prize structure in the structure design competition in 2015 of Shandong Province as an example, through the joint application of structural mechanics solver, CAD3D, ANSYS and other software, based on the structure selection, structure analysis and structural actual manufacturing to discuss on the application of computer aided design in design and manufacture of structure design competition. In addition, the experimental results show that prestressing can significantly increase the stiffness of the structure and reduce the deformation, which is beneficial to improve the model's competitiveness.

Key words: structure design competition; computer aided design; manufacture; structural prestressing