

轻型门式刚架结构设计教学方法探讨

徐勋倩^a, 周井玲^b, 王亚萍^a, 张晨^a

(南通大学 a. 杏林学院; b. 机械学院, 江苏 南通 226019)

摘要:文章针对轻型门式刚架结构设计课程教学中方案布置、材料选择、荷载取值、门式刚架优化、支撑体系优选和节点设计等几个主要教学环节,对课程内容进行系统化和条理化,紧扣技术规程、规范,结合施工方法、材料供应、市场价格等相关知识,使结构设计从技术上切实可行,在经济效益上达到最优。教学方法的改革,可以帮助学生理解教学内容,建立清晰的结构设计概念,教学效果和教学质量均有较大的提升,学生处理工程问题的能力得到了有效锻炼。

关键词:钢结构;轻型门式刚架结构;课程特点;教学方法

中图分类号:TU391;G642

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2011)06-0068-05

随着社会的发展和生产力水平的提高,钢材品种不断丰富,产量也不断提高。尤其是冷弯薄壁型钢、彩色压型钢板的迅速发展,为轻型门式钢结构房屋的应用奠定了良好的物质基础。轻型门式刚架结构房屋具有造型美观、跨度大、空间大、用钢量少、工业化程度高、施工周期短和综合造价低等优点,在展览厅、工业厂房、仓库和住宅等工业与民用建筑中得到越来越多的应用和发展^[1]。

轻型门式刚架结构设计是研究轻型门式钢结构材料、构件及其节点连接设计理论的一门课程,该课程与材料力学、结构力学知识紧密结合,理论性较强。同时作为对工程钢结构、构件和节点设计方法进行研究的课程,其实践性也很强,课程中许多的简图,直接来源于工程实践^[2]。计算难度大、设计繁复一直以来是学生对轻型门式刚架结构设计的最大感受。因此,理论性强和缺乏实际工程的感性认识,是学生学习这门课的两大障碍^[3]。近年来,笔者一直在尝试用一些方法来增强学生的感性认识和提升课程的教学效果。文章结合轻型门式刚架结构设计中的几个主要教学环节:方案布置、材料选择、荷载取值、门式刚架优化、支撑体系优选和节点设计等,分别提出相应的教学方法,帮助学生理解教学内容,以培养适应当代社会的钢结构应用型专业人才为目标。

一、方案布置

(一)结构形式

轻型门式刚架结构的屋盖一般采用冷弯薄壁型钢檩条和压型钢板屋面板;

收稿日期:2011-09-15

基金项目:南通市科技自然科学基金项目(K2009018);南通大学交通运输专项(10ZJ008)

作者简介:徐勋倩(1973-),女,南通大学杏林学院副教授,博士,主要从事钢(组合)结构设计研究,(E-mail) chendak@163.com。

作为结构主要的承重构件,门式刚架由等截面或变截面实腹焊接工字型或轧制 H 型截面的梁、柱组成;外墙多采用冷弯薄壁型钢的墙梁和彩色压型钢板的墙面板。屋面可采用单坡和多坡,形式有单跨和多跨。轻型门式刚架结构的适用范围是 A1 - A5 工作制的桥式吊车(起重量小于 20 t)^[4]。教案设计时,引入了青岛南车集团和永源体育用品有限公司加工车间(波浪造型压型钢板)两工程案例图片,便于学生对门式刚架轻型房屋钢结构体系有一个感性认识。

(二) 跨度

工业房屋与民用房屋的使用功能有所不同,教学中帮助学生从使用功能和生产工艺流程角度确定刚架跨度,同时还应结合业主的经济性要求,确定经济跨度。当荷载作用、柱高一定时,一般情况下,适当增加跨度,门式刚架的总用钢量不会明显增加,但可节省空间,降低基础造价,综合效益很是可观。因此,在满足使用功能和生产工艺的前提下,应根据房屋的高度确定经济、合理的跨度。一般情况下,轻型门式刚架的经济跨度范围为 18 ~ 30 m,无吊车或吊车吨位较小时,经济跨度为 18 ~ 21 m,吊车吨位较大时,经济跨度为 24 ~ 30m。采用合理的跨度,不仅用钢量可节省 5% ~ 15%,而且总造价能降低 2% ~ 7%。有一点须提醒学生的是,不宜盲目追求大跨度。

(三) 刚架间距

门式刚架间距的主要影响因素有:屋面荷载、檩条和刚架跨度等。当门式刚架跨度较小时,如选用较大的间距,檩条用钢量将会增大,导致总造价的加大。《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2002)^[4]规定,门式刚架的间距宜为 6 m, 7.5 m, 9 m,最大可选用 12 m。教学中精选了一些工程案例,让学生进行用钢量的统计分析。分析结果表明:(1)随着间距的不断增大,刚架的用钢量不断降低;(2)当间距增大到一定数值后,刚架的用钢量仍呈现下降趋势,但下降的幅度趋于平缓,而其他构件(如吊车梁、墙梁、檩条)的用钢量却会随着间距的增大而增加;(3)随着间距的不断增大,轻型门式刚架结构的总用钢量先是下降而后又上升。工程案例的统计分析让学生认识到,轻型门式刚架有最优间距。

二、荷载取值

轻型门式刚架结构设计的主要依据为《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)^[4]、《钢结构设计规范》(GB 50017 - 2003)^[5]、《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2001)^[6]和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018 - 2002)^[7]。初学阶段,学生很难对规范有深刻的理解和认识,应用规范更是难上加难。教学中结合轻型门式刚架房屋结构荷载计算特点,就屋面活荷载和风荷载的取值进行讲解。

(一) 屋面活荷载

《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2001)^[6]规定,屋面结构活荷载为 0.5 kN/m²,当构件的荷载面积大于 60 m²的可考虑予以折减(折减系数为 0.6)。门式刚架轻型钢结构房屋符合该条件,因此活荷载为不小于 0.3 kN/m²。

(二) 风荷载

与混凝土结构和普通钢结构相比,门式刚架轻型房屋钢结构虽然自重轻,但整体性较差,对风荷载的作用很是敏感,并且各个构件对风荷载作用的敏感性也不尽相同。教师可在课后引导学生查阅《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)^[4]和《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2001)^[6]有关刚架、檩条、墙梁、屋面板、墙板、山墙墙架、屋面挑檐等风荷载体型系数的规定。这一练习让学生熟悉和理解了《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)^[4]中如何将轻型房屋钢结构中的构件分为刚架、檩条和墙梁、屋面板和墙板、山墙墙架、屋面挑檐 5 类,分别给出了不同的风荷载体型系数。这些风荷载体型系数与《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2001)^[6]中给出的体型系数有较大的差别,在设计中应予以充分重视。

三、材料选择

(一) 钢材选用

《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)^[4]规定:门式刚架、焊接的檩条、墙梁以及吊车梁等构件宜选用 Q235 - B 或 Q345 - A 及以上等级的钢材。Q345 - A 和 Q235 - B 牌号的钢材在强度方面有较大的差别,该如何选择?带着这个疑问,利用课后时间组织学生进行市场调研,了解两种型号钢材的市场价格。分析结果发现,两种材料的

市场价格相差不大。那是否意味着在轻型门式刚架结构中采用 Q345 - B 可以获得较好的性价比呢? 此时, 引入优化设计概念, 即当计算所需梁柱截面是由强度控制时, 优先选用强度等级较高的钢材 (Q345 - A)。当构件变形较大 (如大跨度的简支梁) 或者变形要求高的结构中 (如设吊顶的屋面梁), 对构件截面尺寸起控制作用的因素不再是结构的强度, 而是结构的刚度。计算后发现, 当构件的选用 Q345 - B 时, 如以最大应力满足 Q345 要求进行设计, 构件的变形很容易就超限了。调整构件的截面尺寸, 当变形满足要求时, 构件的最大应力往往比 Q235 - A 的容许应力还小。此时, 采用 Q235 - A 将更为经济可行。

(二) 连接材料选用

钢结构常用的连接形式有焊缝和螺栓连接。将《钢结构基本原理》中钢结构连接的相关内容导入, 让学生回顾不同连接形式的特点, 并提供相关工程实例, 培养学生利用所学理论解决工程实际问题的能力。就焊缝而言, 需根据母材的种类型号匹配相应的焊丝、焊条或焊剂。重要的厚板焊接或直接承受动力荷载的焊接连接宜选用低氢型焊条, 如 E5016, E5015, E4316, E4315 等。就螺栓连接而言, 钢结构主材的连接, 宜采用高强度螺栓连接 (10.9 级或 8.8 级), 地脚螺栓则采用普通型 C 级螺栓。值得注意的是, 作为抗剪连接的主要形式, 高强度螺栓有摩擦型和承压型。设计中优先选用摩擦型高强度连接, 其剪切变形小, 使得门式刚架结构的刚度较大。不过在低烈度区, 当不设吊车或是吊车起重量较小、风荷载不大、变形较小的情况下宜优先选用承压型高强度连接, 不仅减少了螺栓的用量, 而且构件连接处的接触面只需清油污及除锈即可, 便于后期养护。

四、门式刚架优化

基于安全、适用的基础之上, 对门式刚架房屋轻钢结构进行优化设计, 可有效减少结构用钢量, 降低工程造价, 对实现钢结构“安全性”“经济性”和“适用性”三个目标有着重要的现实意义。课前补充优化设计相关理论知识, 就刚架柱和刚架横梁构件, 遵循现行《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)^[4] 和《钢结构设计规范》(GB 50017 - 2003)^[5] 等相关条款, 以用钢量最低为目标函数, 结

合实际工程力学性能建立门式刚架结构全约束优化设计数学模型。

(一) 刚架横梁

横梁优化模型如下:

$$\min G_1 = \rho \sum_{i=1}^N L_i (2b_{fi}t_{fi} + h_{wi}t_{wi}) \quad (1)$$

$$st \quad \sigma = \frac{N_i}{A_{eni}} \pm \frac{M_i}{W_{eni}} \leq f \quad (2)$$

$$\tau = \frac{3V_{maxi}}{2h_{0i}t_i} \leq f_v \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{N_i}{\varphi_{xi}A_i} + \frac{\beta_{mi}M_{xi}}{\left(1 - \frac{N_i}{N_{Exi}}\varphi_{xi}\right)W_{exi}} \leq f \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{N_i}{\varphi_{xi}A_{ei}} + \frac{M_{xi}}{\varphi_{bi}W_{exi}} \leq f \quad (5)$$

$$\frac{b_{fi}}{t_{fi}} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}; \frac{h_{wi}}{t_{wi}} \leq 250 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6)$$

$$v_i < \frac{L_i}{180}; \quad (7)$$

式中, ρ 为钢材密度; $L_i, b_{fi}, t_{fi}, h_{wi}, t_{wi}$ 为第 i 根梁的长度, 翼缘宽度、厚度, 腹板的高度和厚度; $N_i, M_i, V_{maxi}, A_{eni}, W_{eni}, \beta_{mi}, \varphi_{xi}, A_i, W_{exi}$ 为第 i 根梁的轴力, 弯矩, 剪力, 静截面面积, x 方向静抵抗矩, 轴心受压稳定性系数; 毛截面面积, x 方向毛截面抵抗矩, v_i 为第 i 根梁的挠度。

横梁优化模型中 (1) 为目标函数 (用钢量最少), (2-3) 为弯曲强度和剪切强度要求, (4-5) 为平面内、外整体稳定性要求, (6) 为局部稳定性要求, (7) 为正常使用要求。

(二) 刚架柱

刚架柱优化模型如下:

$$\min G_c = \rho \sum_{j=1}^N H_j (2b_{fj}t_{fj} + h_{wj}t_{wj}) \quad (8)$$

$$st \quad \sigma = \frac{N_j}{A_{enj}} \pm \frac{M_j}{W_{enj}} \leq f \quad (9)$$

$$\tau = \frac{3V_{maxj}}{2h_{0j}t_j} \leq f_v \quad (10)$$

$$\frac{N_{0j}}{\varphi_{xyj}A_{e0j}} + \frac{\beta_{mj}M_{lj}}{\left[1 - \left(\frac{N_{0j}}{N'_{Ex0j}}\right)\varphi_{xyj}\right]W_{elj}} \leq f \quad (11)$$

$$N'_{Ex0j} = \frac{\pi^2 EA_{e0j}}{(1.1\lambda_j)^2} \quad (12)$$

$$\frac{N_{0j}}{\varphi_{yj}A_{e0j}} + \frac{\beta_{lj}M_{lj}}{\varphi_{byj}W_{elj}} \leq f \quad (13)$$

$$\frac{b_{fj}}{t_{fj}} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}; \frac{h_{wj}}{t_{wj}} \leq 250 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (14)$$

$$\Delta_j < \frac{H_j}{500} \quad (15)$$

式中, ρ 为钢材密度; $H_j, b_{fj}, t_{fj}, h_{wj}, t_{wj}$ 为第 j 根柱的长度, 翼缘宽度、厚度, 腹板的高度和厚度; $N_{0j}, N_j, M_{1j}, M_j, V_{maxj}, A_{enj}, W_{enxj}, \beta_{mxj}, \beta_{fj}, \varphi_{xj}, W_{elj} A_{0lj}$ 为第 i 根梁的轴力, 弯矩, 剪力, 静截面面积, x 方向静抵抗矩, 轴心受压稳定性系数; 毛截面面积, x 方向毛截面抵抗矩, Δ_j 为第 j 根柱的顶点侧移。

刚架柱优化模型中(8)为目标函数(用钢量最少), (9-10)为弯曲强度和剪切强度要求, (11-13)为平面内外整体稳定性要求, (14)为局部稳定性要求, (15)为正常使用要求。

课后组织部分学有余力的学生, 进行编程训练, 对某工程实例进行结构优化。计算结果表明, 优化后的钢框架结构与原设计方案相比, 其体积、应力指标均得到改善, 不仅能较大程度地降低工程造价, 又能确保结构经济安全, 避免不必要的材料浪费。更为重要的是, 让学生具有优化设计的意识和理念。

五、支撑体系优选

支撑体系与平面门式刚架一起形成具有一定几何稳定性和空间整体性的轻钢结构, 主要构件有墙梁、檩条、上弦横向水平支撑、柱间支撑、隅撑、刚性系杆、拉条等。支撑体系的相关内容复杂、繁琐, 该部分内容教案设计中主要注重条理化。以轻型门式刚架的檩条构件为例, 笔者尝试从选型、布置、计算和构造四个方面进行讲解。选型方面, 檩条构件可以采用 Z 形带卷边的冷弯薄壁型钢和 C 形带卷边的槽钢。Z 形檩条受力性能相对好, 但制作与安装困难, 一般适用于屋面坡度较大 ($i > 1/3$) 的情况; C 形卷边槽钢, 由于制作与安装方便, 在工程中应用更为普遍, 适用于屋面坡度较小 ($i \leq 1/3$) 的情况。布置方面, 可结合前面所讲的刚架间距内容, 当刚架的跨度小于 20 m 时, 最优间距为 4.5 m, 刚架的跨度大于 20 m 时, 最优间距为 7.5 m。计算方面, 如采用简支梁进行檩条设计, 材料利用率偏低, 如采用连续梁进行檩条设计则较为经济, 推荐采用。构造方面, 在外荷载作用下, 檩条为典型的弯扭构件。支撑和拉条是檩条稳定性的重要保证。常规做法是从檐口的一端设置撑杆和拉条, 依次连接每一根檩条直至另一端。一般情况下, 根据檩条跨度的不同, 在檩条中

央设一道 ($L > 4$ m) 或在檩条中央及四分点处各设一道拉条 ($L > 6$ m)。由于檩条上翼缘受压, 拉条宜设置在檩条上翼缘 1/3 腹板高度的范围内。

梳理完整檩条的内容, 可类比讲解墙梁。值得注意的是, 墙梁设置理论上同屋盖檩条一样, 但由于墙面须开洞, 应在墙面最上端和洞口下方设置压杆和斜拉条, 利用窗框的作用, 也可用它作为传力构件和支撑。

总之, 支撑体系的设计不能生搬硬套规范、规程的条文, 而需根据具体的情况进行分析, 既满足安全性要求, 又能实现经济节约的目的。

六、节点设计

门式刚架节点内容多而繁杂, 初学阶段学生往往是无所适从。在教案设计中, 教师应大量引入工程案例的图片资料, 就柱脚和梁柱节点主要节点部位进行深入剖析。

(一) 柱脚

根据抵抗弯矩的情况, 柱脚分为铰接柱脚或刚接柱脚。实际工程中, 理想的刚接或铰接都是不可能的, 严格地说应该是一种介于铰接与刚接之间的状态。铰接和刚接柱脚关键在于锚栓布置, 铰接柱脚常常采用两个锚栓, 刚接柱脚则至少采用四个或四个以上锚栓。柱脚形式的选用取决于对水平侧移的控制, 当门式刚架结构对水平侧移控制要求较高时, 建议选用刚接柱脚。例如: 当设有吊车时, 柱脚的设计应采用刚接形式。其余情况下, 柱脚的设计宜铰接形式。由于柱底剪力主要通过混凝土基础顶面和底板间的摩擦力来传递的, 若不满足要求, 还须增设抗剪键。

(二) 梁柱节点

目前端板连接是门式刚架实际工程中应用最多的梁柱节点连接类型, 一般适用于无吊车结构, 主要形式有平板式、外伸式等。由于端板形式的不同, 螺栓的拉力分布状态明显发生变化。由于外伸式端板所连接的受拉翼缘两侧螺栓受力均匀, 节点的抗弯能力得到了有效的提高, 因而螺栓数量和端板厚度明显减少了。引入相关案例, 进行梁柱节点形式的对比, 分析表明应优先选用外伸式的节点形式。

根据端板放置方式的不同, 梁与边柱的连接节点形式有端板平放、斜放或竖放等。条件允许的情况下应优先选用端板平放, 该做法不仅减小了节点

的设计剪力,还能让柱在安装时起到临时支座的作用。当梁柱节点的弯矩比较大时,宜采用端板竖放或斜放,以增大力臂。但端板斜放形式对加工精度要求较高,同时还须预留安装空间。梁与中柱的连接可采用铰接形式进行处理,俗称“摇摆柱”。但在设计中,如跨中弯矩很大或需控制水平侧移时,梁与中柱的连接可设计成刚接。通常做法是将端板平放与梁下翼缘连接,既能受力合理,又便于加工与安装。

案例分析表明,在门式刚架节点的设计中应经过充分比较分析后再确定合适的连接形式。

七、结语

笔者通过几年的教学实践,有以下几点体会:

(1)对授课内容进行系统化和条理化,授课过程中有意识地帮助学生抓主要矛盾并及时进行总结,帮助学生了解轻型门式刚架结构设计的相关内容进行理解与记忆,教学效果和教学质量均有较大的提升。

(2)紧扣技术规程、规范等,让学生不仅熟悉规程、规范的相关条文,还切实理解条文及其应用条件,帮助学生建立清晰的结构设计概念,学生处理工程中常见问题的能力得到了有效的锻炼。

(3)了解施工方法、材料供应、市场价格等各种相关知识,使结构设计不仅从技术上切实可行,还应争取在经济效益上达到最优,为学生的创新设计奠定良好的基础。

参考文献:

- [1]卢林枫,董刘方,李坤.冷弯薄壁型钢门式刚架结构研究现状与展望[J].四川建筑科学研究,2008,34(1):14-17.
- [2]陈绍蕃,等.钢结构(上、下册)[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3]徐勋倩.钢结构稳定教学的探索与研究[J].高等建筑教育,2008,17(4):75-78.
- [4]中华人民共和国建设部.CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5]中华人民共和国建设部.GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [6]中华人民共和国建设部.GB 50009-2001 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7]中华人民共和国建设部.GB 50018-2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

Teaching method of the design of light-weight gabled frame

XU Xun-qian^a, ZHOU Jing-ling^b, WANG Ya-ping^a, ZHANG Chen^a

(a. School of Architecture Engineering, Nantong University, Nantong 226007, Jiangsu, P. R. China;

b. School of Xinglin, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: With the main teaching links of light-weight gabled frame course, such as arrangement of structure, materials selection, loads valuing, gabled frame optimization, optimal mechanism of brace structure and joint connecting design, the paper proposed to systematize and sort teaching content, followed technical specification and code, combine construction methods, material supply, market price and etc. That made structure design feasible on the point of technique and optimized on the point of cost. The teaching reform can help the students understand teaching content and form clear concept of structure design. The teaching result and quality are improved. The students' ability is cultivated to deal with the problems in the project.

Keywords: steel structure; light-weight gabled frame; curricular characteristics; teaching method

(编辑 詹燕平)