

轻型门式刚架房屋灾害破坏及防灾减灾问题分析

王宗让¹, 王振山², 苏明周³, 刘云贺², 高亮²

(1. 陕西师范大学基建处, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 门式刚架轻型房屋在我国低层大开间建筑中应用广泛。近年来, 我国灾害频发, 门式刚架房屋受损较严重, 给国民经济造成巨大损失。分析原因: 一方面作为一种轻钢结构, 抗灾害能力较弱; 另一方面, 人们对门式刚架房屋的防灾减灾意识不强。针对上述情况, 本文系统总结了雪灾、风灾、火灾以及地震对该种结构的破坏形式, 分析了破坏原因, 并提出了具体的设计对策, 针对灾害破坏下门式刚架规范的修订及安全问题进行总结分析。同时, 提出了“门式刚架屋面抗火性能及防护措施”和“门式刚架房屋局部倒塌引起的连续倒塌机制及防连续倒塌设计”两个新安全问题, 希望引起相关人员的重视, 进而推动门式刚架房屋防灾减灾工作的发展。

关键词: 门式刚架; 破坏形式; 安全对策; 防灾减灾

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0868-06

The review on failure modes and disaster prevention and reduction problems of light-weight steel portal frame house

WANG Zongrang¹, WANG Zhenshan², SU Mingzhou³, LIU Yunhe², GAO Liang²

(1. Basic Construction Department, Shanxi Normal University Xi'an 710061, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch & Tech, Xi'an 710055, China)

Abstract: The light-weight portal frame houses were widely used in low layer and large bay building in our country. In recent years, China has suffered many natural disasters, causing more damage to this kind of architectural form. On the one hand, as a kind of light steel structure form, the anti-disaster ability is weak; on the other hand, people didn't have a strong awareness of disaster prevention and reduction on the light-weight portal frame. This paper summarizes the snowstorm, windstorm, fire and earthquake damage to this kind of structure, and analyses the reasons. In view of the above situation, the paper summarizes the snowstorm, windstorm, fire and earthquake failure models to this kind of structure, and analyses the reasons. On this basis, the safety countermeasures of portal frame is reviewed, and the revision of the specification and the key of structure design of portal frame under the disasters is analyzed. Meanwhile, the paper put forward two safe questions: 1. the fire resistance performance and protective measures of the roof of portal frame" and 2. the continuous collapse mechanism caused by the local collapse and design of portal frame in the hope of. causing the attention of people, and promoting the development of portal frame building disaster prevention and reduction.

Key words: portal frame; failure mode; safety countermeasure; disaster prevention and reduction

轻钢结构是相对于普通钢结构而言的, 并没有严格的定义, 通常是指结构自重轻、经济效益好的钢结构建筑^[1]。其中, 门式刚架轻型钢结构房屋凭借着施工方便、造价低廉以及安全可靠等优势, 成为我国发展最快的一种轻钢结构, 在低层、大空间商业、工业建筑中应用广泛。从受力体系上看, 门式刚架结构属于平面受力体系, 其主体受力结构由横向刚架、托梁、支撑、檩条以及墙梁等构成。梁、柱多采用高厚比较大的工形截面, 截面强度设计时, 允许利用屈曲后强度, 可按有效截面特性来验算构件的强度和稳定性^[2], 为了进一步增加经济性, 可采用变截面形式。基于上述特点, 门式刚架为了追求经济性, 构件的截面尺寸大而薄, 这为结构的

安全埋下隐患, 从整体上看, 门式刚架房屋的抗灾害能力较差。

我国是灾害频发的国家, 每年的自然灾害给国民造成巨大损失, 统计数据见图1。随着社会技术水平的提高, 我国抗灾害能力也越来越强, 进入2000年以后, 灾害造成的损失呈逐年递减状态。但在2008年, 东北及西南地区遭受大面积暴雪及冻雨袭击, 大量房屋建筑发生倒塌情况。其中, 结构类型以轻钢结构损失最为严重, 大量门式刚架结构发生不同程度的破坏^[3]。为此对雪灾、风灾、火灾以及地震作用下门式刚架的破坏形式和原因进行了系统分析, 并提出了相关设计建议及安全对策; 以便对提高该结构的抗灾害能力的研究起到积极作用。

收稿日期: 2015-07-13; 修改稿日期: 2015-12-04

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究基金资助 (2015JQ5166); 陕西省教育厅专项科学研究计划项目基金资助(15JK1534); 西安市建设科技计划项目基金资助 (SJW2014012、SJW2015011)

作者简介: 王宗让(1970-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为结构工程. E-mail:24058039@qq.com

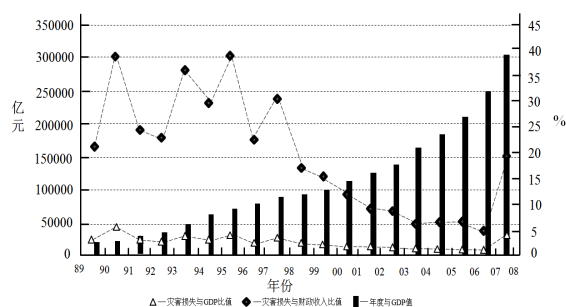


图1 灾害破坏变化趋势

Fig.1 The change trend of disaster damage

1 灾害破坏

1.1 雪灾破坏

2007年我国东北遭受暴风雪袭击,大量门式刚架工业厂房发生了不同程度的损害.轻微破坏:屋面檩条发生弯曲,屋面板变形或内衬板开裂,见图2a;中等破坏:屋面板和檩条发生脱落,但刚架未发生倒塌破坏,见图2b;严重破坏:刚架柱脚发生扭曲或拔出,见图2c,刚架梁、柱、檩条、墙梁等发生严重扭曲而引起结构整体垮塌^[4],见图2d.对发生倒塌的门式刚架房屋进行分析发现,引起结构破坏的原因主要是刚架柱脚发生严重扭曲或整体被拔出,结构丧失抗侧刚度,发生倾覆;另一个是屋面维护结构发生严重变形,进而导致刚架梁发生扭曲破坏,整体结构发生倒塌.

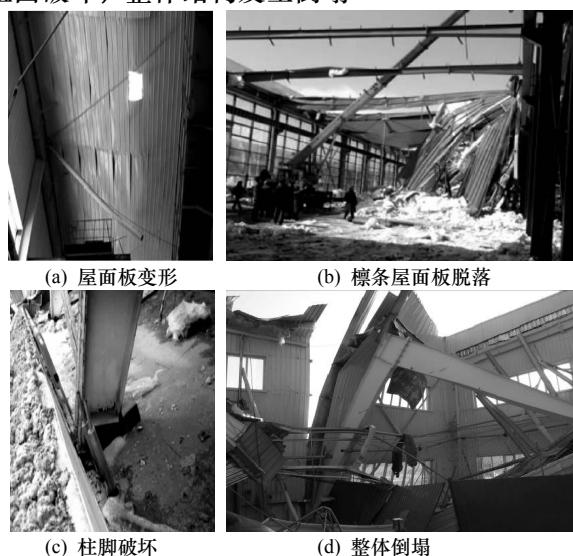


图2 雪灾破坏形式

Fig.2 The damage forms in snowstorm

门式刚架房屋在雪灾中发生破坏情况,总体来说是由于外荷载过大,同时自身抗力不足引起.具体分析原因如下:(1)雪荷载超载:门式刚架雪荷载按照《建筑结构荷载规范》^[5]50年一遇的雪压取值,但雪灾现场的屋面雪荷载值远远超过设计值.(2)建筑外形不合理造成局部积雪:天沟、女儿墙、多跨刚架的低凹屋面处等积雪严重,局部积雪过厚会

造成严重的超载,引起过载破坏.(3)设计缺陷:门式刚架的一些中柱按摇摆柱进行设计,但是实际是连接难以形成完全铰接,这种半刚性连接会导致中柱顶部承受一定弯矩,当荷载较大时,中柱发生弯曲破坏.另外,一些变截面构件的设计不合理,刚度突变太大,在刚度突变处容易产生破坏.刚架梁与柱基本采用端板连接,对于这种半刚性连接,使得刚架梁对柱的约束作用削弱,柱的平面内计算长度与规范的取值相差较大;一旦荷载增大,将对结构安全造成影响^[6].(4)连接问题:雪灾中屋面破坏情况较多,有的是由于檩条等受力构件自身强度不足,有的则是连接出现问题,一些屋面板通过自攻螺钉和檩条进行连接,由于自攻螺钉布置数量较少,很难对檩条转动形成有效约束^[7];当荷载较大时,檩条发生较大变形,屋面破坏.(5)制造及安装:构件制作工艺差,安装不符合相关规定,这些都留下安全隐患.(6)次生灾害:清理屋面积雪措施不当,造成荷载不均匀分布,引起侧翻;屋面排水管发生堵塞,导致排水不畅,引起的超载破坏等.

1.2 风灾破坏

2005年,台州遭受严重风灾,对轻型门式刚架房屋造成巨大损失.从破坏程度上看,轻微破坏主要集中在维护结构方面,屋面板、墙板发生局部破坏;檩条及屋顶的天沟发生一定变形;屋面板、墙板和墙梁上的连接螺栓出现断脱的情况,见图3a.中等破坏程度有,屋架面板发生脱落;刚架梁发生严重扭曲破坏,但结构未倒塌;柱子的焊接底板被拉开或锚栓被拉断,见图3(b)、3(c).严重破坏有,柱脚发生严重破坏或基础被拔出引起的整体倒塌;柱子变截面处刚度不足,导致刚架整体侧向变形过大,引起倒塌,见图3(d).

对台风中门式刚架的破坏情况进行分析,得到破坏原因分析主要集中在以下几个方面:(1)荷载间

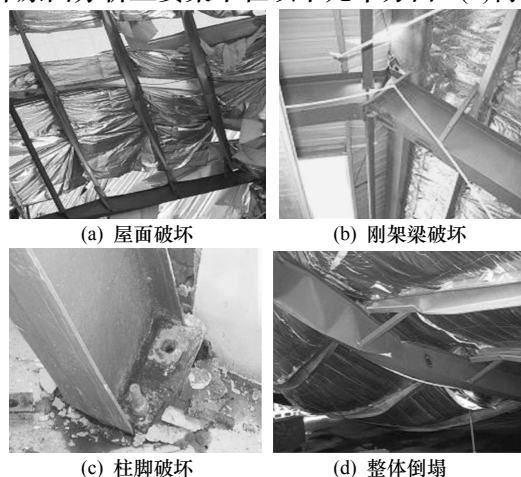


图3 风灾破坏

Fig.3 The damage forms in windstorm

题:台风的平均风速或瞬时风速远远超过了设计限值^[8],导致超载严重。(2)连接问题:屋面板、墙板与主体结构之间的连接强度不足,在风荷载作用下,连接螺栓或螺丝发生剪切破坏,导致维护结构出现破损^[9]。(3)刚度不足:檩条和墙梁内侧受压,缺少加劲肋或隅撑作用,风压作用下发生失稳破坏;变截面刚架柱自身刚度不足,变截面处发生扭曲破坏;柱间支撑强度不足,导致支撑失效,结构整体侧向变形过大,引起倒塌^[10]。(4)基础问题:柱脚构造不合理,强度不足,底板被拉开;基础埋深不够,导致抗拔能力不够而发生整体失稳^[11]。

1.3 火灾破坏

钢结构抗火性能差,门式刚架作为轻钢结构更是如此。火灾引起的门式刚架破坏主要有两种:一是火灾引起的空气升温对屋盖、墙板等维护结构的破坏;二是主体结构倒塌。门式刚架檩条多采用冷弯薄壁型钢,屋面板多采用压型钢板等,火灾作用下,对于这种高大空敞式结构,内部空气升温很快;檩条、屋面板等发生严重变形并偏离原有位置,屋面板发生塌落,见图4a。如果温度继续升高,刚架梁出现较大的变形,刚度迅速降低,很容易造成刚架发生平面外倾覆或弯扭失稳,最终导致了结构坍塌^[12-13],见图4b。

门式刚架结构抗火问题主要分为两个:一是火灾直接作用,二是火灾通过加热空气产生的间接作用。前者通常采用设置防火涂料、防火板等常规安全措施,主要用于梁、柱等主要受力构件;对于屋面系统,荷载比、构件几何尺寸、梁跨度、柱高度以及火源特性等是影响其抗火性能的主要因素。目前,对于门式刚架屋面抗火研究较少,尤其定量分析方面^[14],对其展开研究具有较高工程意义。



(a) 屋面及檩条破坏



(b) 整体坍塌

图4 火灾破坏

Fig.4 The damage forms in fire

1.4 地震破坏

由于门式刚架自重较轻,传统观念认为地震对其作用较小;但经过数次强震作用,人们发现门式刚架还是会发生不同程度破坏。地震作用下,门式刚架主要发生局部破坏:屋面板脱落(见图5),檩条发生局部失稳,柱间支撑发生扭曲、节点连接螺栓发生弯曲,柱脚发生明显变形等^[15],上述情况在美国诺斯里奇地震、日本阪神地震以及汶川地震中都发生过。地震作用下,结构整体倒塌的情况并不多见,但在一些特殊条件下,也会发生倒塌事故,其原因多由维护结构掉落造成的拉拽效应引起。

对地震中门式刚架的破坏情况进行分析,得到破坏原因分析主要集中在以下几个方面:(1)侧向支撑:柱间支撑、檩条等发生稳定问题,主要由于其侧向缺少足够的刚度,发生扭转等平面外稳定问题;(2)连接强度:节点及柱脚发生的较大变形主要由连接的螺栓数量较少及强度不足引起;屋面等维护发生的脱落情况,也主要由连接强度不足引起。



图5 地震破坏

Fig.5 The damage forms in earthquake

我国现行规范对门式刚架的抗震设计规定较为笼统,《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》^[16]规定“地震作用应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011的规定计算”,而《建筑抗震设计规范》GB50011^[17]中规定“本节主要适用于钢柱钢屋架或实腹梁承重的单跨和多跨的单层厂房,不适用于单层轻型钢结构厂房”。门式刚架结构较适合工业类建筑,在我国得到越来越广泛的应用,尤其在设防烈度地区。目前的设计规程只是在参考其它结构形式的抗震设计基础上给出了设计原则^[18],这对门式刚架结构的推广应用造成一定影响。

2 安全对策分析

2.1 规范修正

(1) 提高荷载限值

根据雪灾中门式轻型钢结构厂房损坏调查发现,当时的降雪量超过了设计限值;同时由于积雪的作用,使得屋面局部积雪厚度最大达到2 m以上,按雪密度180 kg/m³计算,此处雪荷载达到了360

kg/m^2 ,远远超过了荷载规范限值,造成了结构整体垮塌.风灾对门式刚架的破坏很多情况也是由于外荷载大于设计限值引起.随着世界气候的改变,灾害频发,破坏强度也越来越高,有必要对荷载取值进行修订.

06年山东雪灾、07年辽宁雪灾、05年台州风载都造成了严重的损失,2012版《建筑荷载规范》^[5]对于雪荷载和风荷载进行较大修改,结合近年来灾害情况,制定了新的全国基本雪压和基本风压图,提高了易受风、雪影响城市的基本雪压和风压;也补充了不均匀积雪对建筑的影响,增加了顺风向荷载、横风向荷载及扭转风振荷载的组合工况等.

(2) 灾害联合作用

对众多门式刚架厂房倒塌的原因进行分析发现,结构之所以发生破坏,一方面是荷载过大,另一方面是多种灾害联合作用的效果.以鞍山门式刚架厂房倒塌为例,除了雪荷载较大之外,当时还遭遇了狂风的作用.雪灾伴随风灾事件的概率较大,荷载组合应给予考虑.“门式刚架轻型房屋钢结构技术规范征求意见稿”(以后简称征求意见稿)的荷载组合工况中,增加了雪载和风载的组合工况计算.

$$S = r_G S_{GK} + r_S S_{SK} + \psi_W r_W S_{WK} \quad (1)$$

式中: r_G 、 r_S 、 r_W 分别为永久、屋面雪和风荷载分项系数; ψ_W 为风荷载组合值系数; S_{GK} 、 S_{SK} 、 S_{WK} 分别为永久、屋面雪荷载和风荷载分项系数标准值.

(3) 地震影响

“征求意见稿”对门式刚架的抗震设计作了较为明确的规定,可采用底部剪力法或振型分解反应谱法进行验算,门式刚架厂房中轻型吊车使用较多,有的一些质量较大的生产设备也作为恒荷载悬挂于结构内部;对于这种跨度较大的结构,竖向地震作用影响难以忽略.荷载效应组合考虑了水平地震作用、竖向地震作用以及两者的同时影响,以水平、竖向地震组合作用为例,多遇地震作用时:

$$S = r_G S_{GK} + r_{Eh} S_{EhK} + r_{Ev} S_{EvK} \quad (2)$$

式中: r_{Eh} 、 r_{Ev} 为水平及竖向地震荷载分项系数; S_{EhK} 、 S_{EvK} 为水平及竖向地震荷载标准值.新规范对门式刚架的抗震设计作出了具体规定,对其在高抗震设防区域的应用提供了安全保障.

2.2 构造措施

对门式刚架房屋进行设计时,应注意以下几个方面:

(1) 屋面板及檩条

门式刚架轻型房屋的维护结构通常采用冷弯薄壁型钢材料.雪灾和风灾中发现,屋盖结构常会

发生塌落或掀翻事故;在结构整体倒塌事故中,也时常由屋面破坏后,产生拖拽引起,并非刚架自身强度不够.屋面板的失效形式主要为连接螺栓(螺钉)拔出或连接部位的面板撕裂.

螺栓(螺钉)拔出的原因主要由连接数量过少、受力不均匀以及雨水腐蚀等引起,设计过程中,除了保证足够的连接强度外,雨水侵蚀问题应得到重视,长时间的雨水侵蚀会造成螺栓或螺钉的锈蚀,连接时应设置防水密封胶垫,以减少腐蚀作用.由于屋面板通常采用冷弯薄壁型钢,厚度很薄,抗剪强度较低,一旦发生滑移,面板极易发生撕裂情况,连接处还应设置弹性垫片,加强局部的抗滑移能力.檩条的塌落主要由于强度不足引起,在设计时应加强重视,对于荷载组合效应较大区域,檩条应进行加密或加强.

(2) 支撑和隅撑

门式刚架房屋体系由多榀刚架组成,单一刚架的抗侧移刚度较弱,为了增加结构的整体性,通常采用设置支撑来实现,刚架柱与支撑构成了主要的抗侧力体系,支撑对于结构整体稳定性十分重要.在门式刚架破坏的情况中,支撑屈曲破坏并不少见,“征求意见稿”中对支撑系统设计作了明确规定,门式刚架房屋支撑基本分为柱间、屋面以及檩条支撑三类,从局部的抗屈曲能力,到整体的抗侧移刚度采取加强措施,以保证刚架体系的稳定.

文献[19]研究发现,当结构遭受横向荷载作用时,由于刚架梁跨度较大,而截面又采用变截面形式时,荷载传递并不理想,刚架梁受到挤压作用,易发生平面外失稳.当在刚架梁与檩条之间设置隅撑后,隅撑对刚架梁起到了很好的支撑作用,屋盖与梁的连接得到显著加强,结构的整体性更好,水平荷载得到有效传递,刚架梁未再发生稳定问题.隅撑形式简单,安装方便,对结构内力传递以及提高局部稳定性有较好的作用;设计时,可优先考虑.

(3) 柱脚、节点和变截面处

对雪灾和风灾中门式刚架房屋的破坏分析发现,柱脚破坏引起整体倒塌的情况不少,应加强对柱脚的设计要求,增大柱底板厚度,保证底板具有足够的刚度和抗弯能力,在受弯时不至于发生翘曲而失效;另外,基础需具有足够的抗倾覆能力.为了更好地保护柱脚,应用混凝土进行包裹处理.门式刚架梁柱节点破坏情况也较常见,通常为连接螺栓强度不足而发生较大变形,结构设计中应加强节点的连接强度与刚度设计.对于采用多段式变截面构

件,刚度突变不应过大,否则在变截面处容易产生破坏,设计时应作好强度验算。

2.3 次生灾害

门式刚架的倒塌事故中,部分是由人为操作不当引起。以北方雪灾为例,在进行屋面除雪过程中,由于只是进行单侧清理,造成了雪荷载的不对称,偏心作用下引起了结构的整体倒塌。另外,在清理已倒塌的结构部分时,由于未作好防护措施,导致未破坏结构受到较大的拉拽作用,而发生破坏。次生灾害应引起高度重视,清理过程中,应设计好处理方案,以避免人为操作不当引起的损失。

2.4 灾害预警

2007年辽宁雪灾,门式刚架厂房屋盖最大积雪深度达到2 m以上,远远超过了设计荷载值。近年来,极端气候愈发频繁,对于建筑房屋的安全使用,应建立安全预警系统,当外荷载超过一定数值后,应及时采取补救措施。对于雪灾影响,应进行实时监控,一旦荷载超过限制,应马上进行清理,以避免荷载过大。对于风灾影响,应提前对整体建筑进行固定,针对屋盖等薄弱部位采取加固等措施。总之,通过现代化的预测手段,提前作好防护措施以及应急预案,使得灾害的影响降至最低。

3 新安全问题

3.1 屋面防火

门式刚架作为钢结构房屋,跨度和空间高度往往较大;对于结构防火除了考虑火灾的直接作用外,还应考虑室内火灾引起的空气升温影响。《建筑钢结构防火技术规范》[20]规定高大空间建筑(高度大于6 m,独立空间地面积大于500 m²)火灾中应考虑空气升温的影响。

门式刚架建筑屋面多为冷弯薄壁材料,火灾引起的空气升温对其造成很大影响,损害主要受火源功率以及屋顶空间尺寸的影响。为避免火灾引起空气升温造成的破坏,屋面需要进行相应的防火处理。对于门式刚架屋面的防火问题,应明确火灾中空气升温对结构的作用规律,进而制定防护方案。

由于门式刚架房屋跨度、高度均较大,针对屋面系统进行直接防火处理势必大大增加建设成本。屋面防火应从结构设计与排热设计两展开;从结构设计角度出发,将火灾中的空气升温影响降至最低;对于火灾中空气升温影响较大的房屋,应开展排热设计,采用多种手段,将多余热量排出,进而保证结构的安全。目前,针对门式刚架房屋的屋盖防火研究较少,具有较好的工程应用前景。

3.2 连续倒塌

从门式刚架房屋发生大面积的倒塌事故分析发现,建筑物很多情况下,并非发生一次性的整体倒塌,而是由于局部发生的倒塌,拖拽相连结构,进而发生连续倒塌,造成巨大的损失[21]。在极端情况下,门式刚架房屋局部发生了倒塌破坏,其对相邻结构造成了较大的影响;为把事故控制在小范围内,降低损失程度。有必要对门式刚架房屋的连续倒塌问题进行研究。首先,应明确局部倒塌对相邻结构的作用机理和对整体结构受力性能的影响机制,进而开展防倒塌设计;对结构采取一定的构造措施,当局部发生破坏后,防止结构出现连续大面积倒塌情况。目前,关于门式刚架房屋局部倒塌引起的连续倒塌问题研究较少,连续倒塌机制尚不明确,结构的抗连续倒塌设计研究具有较高的理论与工程意义。

4 结论

门式刚架的破坏形式以维护结构损坏和整体倒塌为主;维护结构又以屋面破坏居多,原因主要由面板与檩条连接或檩条自身强度不足引起。整体倒塌主要原因为:柱脚刚度不足,变形过大引起倾覆;结构整体的抗侧移刚度不足;刚度削弱较大截面的扭曲破坏;维护结构脱落,引发的拉拽作用。破坏原因一方面由外荷载过大引起,另一方面是结构设计存在安全隐患。相关规范已对风、雪、地震荷载取值、分布以及组合效应等进行了修正与增加,设计时,应加以注意;同时,应加强屋面板连接、檩条、柱脚、节点、支撑、变截面处等易发生事故部位的安全设计。隅撑形式简单,对结构内力传递以及提高局部的稳定性有较好的作用,设计时可优先考虑。

灾害清理过程中,应注意次生灾害的影响,提前作好方案,避免人为操作不当引起的二次伤害。利用现代技术手段,作好预警工作,将灾害损失降至最低。最后,针对门式刚架房屋的防灾减灾工作,提出了“门式刚架屋面抗火性能及防护措施”和“门式刚架房屋局部倒塌引起的连续倒塌机制及防连续倒塌设计”两个安全问题。本文将对提高轻型门式刚架房屋抗灾害能力起到一定的积极作用。

参考文献 References

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等. 现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J]. 建筑结构学报,2002,23(1):2-8.
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, CHEN Hong, et al. Contemporary lightweight steel structure and its application in China[J]. Journal of Building Structures,

- 2002, 23(1):2-8.
- [2] 陈婷,童根树. 楔形变截面压杆的弹塑性稳定[J]. 工业建筑, 2004, 34(10):62-66.
CHEN Ting, TONG Genshu. Elastoplastic stability of tapered compressed members[J]. Industrial Construction, 2004, 34(10):62-66.
- [3] 王伟. 冰雪、地震灾历后典型结构分析及减灾措施研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
WANG Wei. Analysis of engineering structures after the snow disaster and earthquake and studies of disaster mitigation measure[D]. Xi'an: Xi'an Univ of Arch & Tech, 2010.
- [4] 胡宗文,王元清,石永久,等. 暴雪后门式刚架轻型房屋钢结构厂房的事故分析与处理[J]. 工业建筑, 2009, 39(7):120-123.
HU Zongwen, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Analysis and treatment of accident in mill buildings of light-weight steel structure with portal frame after snowstorm[J]. Industrial Construction, 2009, 39(7):120-123.
- [5] GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
GB50009-2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2012.
- [6] 王元清,胡宗文,石永久,等. 门式刚架轻型房屋钢结构雪灾事故分析与反思[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3):65-70.
WANG Yuanqing, HU Zongwen, SHI Yongjiu, et al. Analysis and reflection on snow disaster accidents of steel structures of light-weight buildings with portal frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3):65-70.
- [7] 胡习兵. 某轻钢门式刚架结构事故分析与加固处理[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(2):117-121.
HU Xibing. Accident analysis and treatment method of a light steel portal frame structure[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2011, 33 (2):117-121.
- [8] 龚盈. 轻钢门式刚架抗风性能和极限承载力分析[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
GONG Ying. Analysis of wind resistant behavior and ultimate load carrying capacity of light-weight steel structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] 王士奇,刘仲波. 轻型门式刚架风灾破坏形式及其工程措施[J]. 钢结构, 2006, 21(05):25-28.
WANG Shiqi, LIU Zhongbo. The destructional form of disaster of light-weight gabled frames caused by wind and its structural measure[J]. Steel Construction, 2006, 21(05):25-28.
- [10] 梁德志,宋小娟. 水平风振对门式刚架轻钢厂房的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊1):89-92.
LIANG Dezhi, SONG Xiaojuan. A study on effect of plant level wind shaking light-weight buildings with portal frames[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30 (S1): 89-92.
- [11] 霍静思,胡聪聆,杜运兴等. 某门式刚架轻钢结构厂房倒塌事故调查与分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(5):146-150.
HUO Jingsi, HU Congling, DU Yunxing, et al. Collapse analysis of a lightweight portal framed structure[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(5):146-150.
- [12] 白音,石永久,王元清. 门式刚架钢结构火灾下整体力学性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(5):537-541.
BAI Yin, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis on Global Mechanical Properties of Portal Frame Steel Structures[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(5):537-541.
- [13] 柳峰,郭兵,杜刚. 某轻钢厂房火灾事故分析及加固处理[J]. 钢结构, 2003, 18(2):16-18.
LIU Feng, GUO Bing, DU Gang. Analysis and strengthening of fire accident to a light steel mill building[J]. Steel Construction, 2003, 18(2):16-18.
- [14] 陈素娜. 大空间单跨门式刚架抗火性能影响因素的权重研究及应用[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
CHEN Suna. Study on weight and application of fire resistance factors of large-space single-span steel portal frame buildings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [15] 肖兵波. 既有门式刚架轻型房屋钢结构抗震鉴定方法研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
XIAO Bingbo. Seismic evaluation of existed steel structure of light-weight buildings with gabled frames[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [16] CECS102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
CECS102:2002 Technical specification for steel structure of light-weight building with gabled frames [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [17] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2010.
- [18] 王乾. 单层单跨门式刚架轻型钢结构房屋抗震性能振动台试验[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
WANG Qian. Shaking table test on steel structure of light-weight buildings with gabled frame[D]. Xi'an: Xi'an Univ of Arch & Tech, 2008.
- [19] 王振山,苏明周,李启才,等. 单层单跨变截面轻型门式刚架拟静力试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(07):24-30.
WANG Zhenshan, SU Mingzhou, LI Qicai, et al. Pseudo-static experimental research on a single-story single-bay light-weight portal frame with tapered members[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(07):24-30.
- [20] CECS 200:2006 建筑钢结构防火技术规范 [S]. 北京:中国计划出版社, 2006.
CECS 200:2006 Code for Fire safety of Steel Building Structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [21] 叶飞. 大跨度门式刚架结构抗连续倒塌的空间非线性分析[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2012.
YE Fei. Space Nonlinear analysis on progressive collapse of the large span portal frame[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2012.

(编辑 沈波)