

# 轻钢结构工业厂房风灾损伤估计与预测

宋芳芳<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 城市与土木工程学科部, 广东 深圳 518055;

2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 中国是台风频发国家, 在台风登陆前对城市各类结构可能发生的损伤程度进行快速预测, 对于评价城市防灾减灾能力和灾后应急反应工作能够提供重要依据。针对中国东南沿海城市风灾易损结构之一的轻钢结构工业厂房进行了风灾损伤估计的研究。首先对结构风灾受损原因进行了详细的分析, 根据结构破坏特点确定围护构件及连接部位的可靠性为分析重点。台风荷载模型的建立考虑了外风压、风致内压和风致碎片的作用。结合规范给出了构件承载力的计算方法, 详述了损伤估计的整个流程, 划分了厂房结构损伤等级并给出了详细的指标, 最后利用 0601 号台风珍珠实测数据实现了对所建模型损伤估计与预测的全过程。

**关键词:** 台风; 工业厂房; 风灾损伤估计; 预测; 风压

**中图分类号:** TU392.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0071-10

## Wind Damage Estimation and Prediction of Light Steel Industrial Buildings

SONG Fang-fang, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>

(1. Department of Urban & Civil Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** Wind hazard damage estimation was addressed for light steel industrial buildings which were the typical wind vulnerable structures in southeast coastal cities. With parametric analysis of wind damage and the structural failure features, the envelop elements and the connecting elements were determined as the pivots of the damage analysis. Upon the consideration of the co-effect of exterior wind pressure, wind-induced internal pressure and windborne debris damage, a typhoon load model was proposed. And with the calculation method of the element resistance from the regulation, the procedure of the damage estimation was described and the damage classification of industrial buildings was specified with detailed indicators. Finally, the proposed method was approved with the actual data of typhoon CHANCHU (0601).

**Key words:** typhoon; industrial buildings; wind hazard damage estimation; forecasting; pressure

中国是世界上遭受台风灾害最为严重的国家之一, 平均每年(1971—2000年)登陆的台风和热带风暴就有 7 个<sup>[1]</sup>。据统计, 2006 年台风共造成中国浙

江、安徽、福建、江西、湖南、湖北、广东、广西、海南等 9 省(自治区)、7 225.6 万人(次)不同程度受灾, 倒塌房屋 72.3 万间, 损坏房屋 137.8 万间, 因灾直接

收稿日期: 2009-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(90815030); 国家科技支撑计划项目资助(2006BAJ03B04)

作者简介: 宋芳芳(1982-), 女, 博士生, 主要从事城市建筑风灾损伤研究工作, (E-mail) qingtiansong@163.com。

欧进萍(联系人), 男, 教授, 中国工程院院士, 博士生导师, (E-mail) oujinping@dlut.edu.cn。

经济损失 765.3 亿元<sup>[2]</sup>。

根据台风灾害统计数据可以看出,容易在风灾中严重损坏甚至倒塌的建(构)筑物主要有以下几种:老旧民房、户外广告牌、工业厂房、高层建筑的玻璃幕墙等,其中工业厂房的破坏带来的危害和经济损失最有代表性。2004 年第 14 号台风“云娜”在浙江温岭市登陆,造成 272.2 万 m<sup>2</sup> 厂房倒塌,756.2 万 m<sup>2</sup> 厂房遭到严重破坏<sup>[3]</sup>;潘赛军等人(2005)<sup>[4]</sup>也对浙江省台州市工业厂房的受损情况做了调查和统计,仅台州市工业厂房的受损面积就达到 247 万 m<sup>2</sup>。通过对 78 个受损样本工程进行调查,发现其中 32 个工业厂房发生整体倒塌,20 个厂房发生屋盖或外墙全部受损,26 个厂房发生局部倒塌或受损。由于暴雨往往伴随台风而来,因此经济损失不仅包括厂房结构的直接损失,还包括雨水灌入造成生产设备和产品等的间接损失,继而又使工厂减产、停产和造成上下游相关产业的损失是十分巨大的。仅拿其中一个某印刷厂为例,由于其没有按照规范进行设计,属于简易钢结构厂房,因而在台风中发生了整体性倒塌,只是厂房结构就造成业主近 600 万元的经济损失。

因此笔者针对东南沿海城市风灾易损结构中有代表性的工业厂房进行了风灾损伤评估与预测方法的研究,通过分析可以在台风登陆之前就对结构可

能发生的损伤程度进行快速预测,为评价厂房结构的抗风能力提供判别标准,为评估城市防灾减灾能力和灾后应急反应工作提供重要依据。

## 1 台风荷载分析

台风(Typhoon)是发生在西北太平洋和南海海域达到一定强度的热带气旋。成熟的台风其气压、温度和风场分布常常具有对称性,因此可以近似地看作为圆对称的涡旋<sup>[5]</sup>。尽管台风风场本身非常复杂,但将其转化为作用在结构上的风荷载时,有如下特点:首先,风速和风向角随时间变化显著,一次台风过程大致要经历十几到几十个小时,风速时程曲线由结构距离台风中心的相对位置决定而呈“马鞍型”或“波峰型”,如图 1 所示,图中曲线(a)表示台风风眼或近中心附近移动路径经过建筑结构所在位置,因此风速时程曲线呈现先增大、减小、再增大而后衰减的过程,曲线(b)表示台风风眼的移动路径不经过或远离建筑结构所在的位置,因此风速时程曲线是单调的先增大而后减小的过程;台风风向角变化范围从 0°~360°;其次,台风的湍流强度和阵风因子比季候风显著增强;最后,中国规范中采用的风速谱为 Davenport 谱,而经实测台风数据拟合统计发现,Von-Karman 谱能更好地描述台风风速<sup>[6]</sup>。

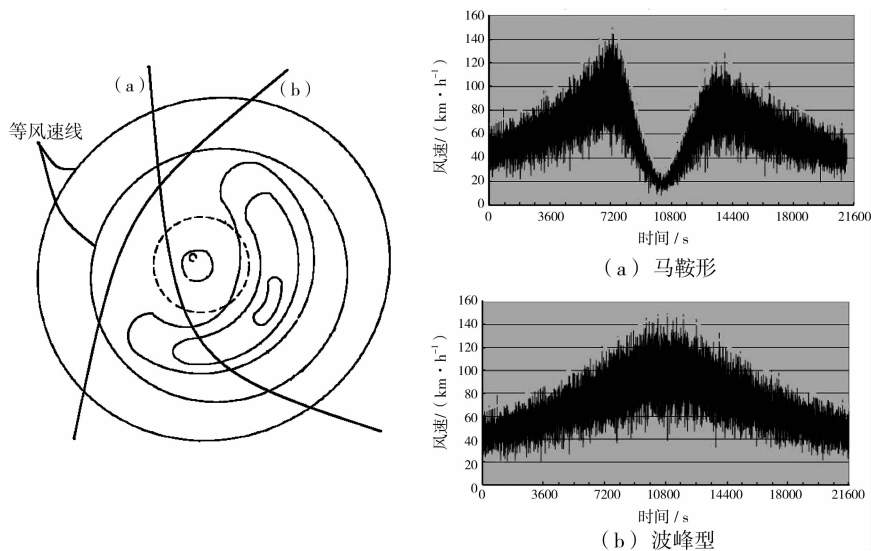


图 1 台风风场移动路径与结构相对位置示意图及不同代表形状的风速时程曲线

### 1.1 台风致结构破坏原因分析

通过对灾后调查统计资料和结构破坏现象特点分析,得出台风对结构造成破坏的主要原因有以下 5 点:1)台风的平均风速超过了结构的设计风速。在进行结构设计时,参照荷载规范给出的某个地区 50 a 或 100 a 一遇基本风压值,但由于近些年来气

候反常,致使有些历史上从未经历过台风的城市或乡镇遭遇了台风,登陆的台风风速超过了设计风速致使实际风荷载超过了设计风荷载;2)台风的瞬时风速超过了设计风速。台风的瞬时脉动风速超出设计值往往是造成围护结构局部破坏的最主要因素,如屋檐、屋脊和屋面转角处等几何形状突变的部分,

这些地方的局部脉动风压过高,造成屋面围护结构首先发生破坏;3)风致碎片引起的破坏。建筑周围的沙石碎片或附近建筑围护构件破坏后散落下来的碎片在强风作用下,克服自身重力、摩擦力等约束力的作用,成为空中随强风一起高速运动的物体。当碎片以一定的速度射向结构时,极易造成像窗这样的脆性围护结构破坏;4)瞬间增大的风致内压导致结构发生破坏。当结构由完全封闭结构变成部分开敞式结构时,在瞬间增大的内压和外压共同作用下,荷载超过规范规定的设计值,导致围护结构发生破坏或屋架塌落、墙体倒塌等;5)没有按照规范设计的结构在台风中容易发生整体性倒塌。在已建各类结构中,没有经过正规抗风设计的占绝大多数,以民房最为突出,多按民间经验搭建,不具备抵抗高等级台风的能力,在台风中轻则屋面大面积破坏,重则结构整体性倒塌。

要估计与预测结构在台风中的损伤程度,准确地计算风荷载是建立整个模型的基础和第一步。而台风荷载本身是非常复杂的,为了工程上应用的需要,必须进行合理的简化,同时简化结果要能最大程度地反映台风荷载特性。该文所分析的钢结构工业厂房在风灾中普遍破坏方式是围护结构发生局部破损或大面积破坏,窗扇被吹飞,按照规范设计的厂房主体结构一般都完好,因此围护结构是该文损伤分析的重点。作用在结构上的风荷载可以分为 3 个部分:外风压、风致内压和风致碎片,下面将对这 3 个部分分别进行详细讨论。

### 1.2 外风压计算

外风压的计算参考中国国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)中的公式,由于其目的是为了结构设计阶段使用,因此需要进行适当的修正,使其适用于台风荷载的计算。修正后的公式见式(1)。

$$\omega_E = \frac{1}{2} C_{pE} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

$$v = \gamma_{gust} \cdot \bar{v} \quad (2)$$

式中:  $\omega_E$  为外风压,  $kN/m^2$ ;  $C_{pE}$  为外风压压力系数;  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ ;  $v$  为结构屋面平均高度处的 3 s 阵风风速,  $m/s$ ;  $\gamma_{gust}$  为 3 s 阵风风速与 10 min 平均风速之间的阵风因子;  $\bar{v}$  为 10 min 平均风速。

根据国内外学者对各种不同时距间平均风速的比值统计结果,瞬时风速与 10 min 平均风速之间的阵风因子约为 1.50<sup>[7]</sup>。计算风压时取图 2 中风速上包络线值,其值为 10 min 平均风速乘以阵风因子。

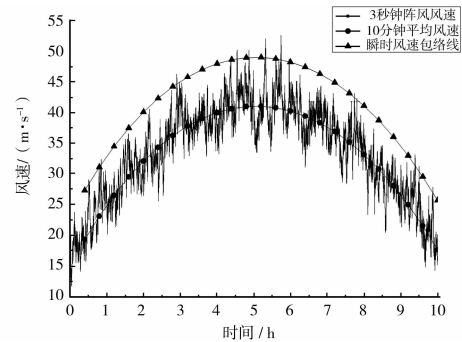


图 2 台风荷载瞬时风速取值

由于台风过程是风向角不断变化的过程,因此需要知道结构在各个风向角下的表面压力分布情况。通过风洞实验数据和数值模拟结果发现,结构在几何外形突变处的局部负压力显著大于整个面上的平均压力,成为局部易损部位,在风灾中破坏往往先从这些部位开始,继而使结构表面出现洞口而变为部分开敞式结构,增大了继续发生更为严重破坏的危险性。因此仅仅知道整个面上的平均压力值是不够精确的,不能刻画局部高危部位,要根据实测及模拟结果确定风压分布规律,并对结构表面进行细致的区域划分。对于该文厂房结构,屋面重新划分为 24 个分区,墙面划分为 12 个分区,示意图见图 3。其中角部和边部的宽度参照美国风荷载规范的建议,宽度取最小水平尺寸的 10% 或 0.4 h (平均屋顶高度) 中的较小值,但不小于最小水平尺寸 4% 或 1m。公式(1)中的外风压压力系数  $C_{pE}$  应根据风洞实验或数值模拟结果得到结构外表面 36 个分区的具体值,参考高度应取结构屋面平均高度处。

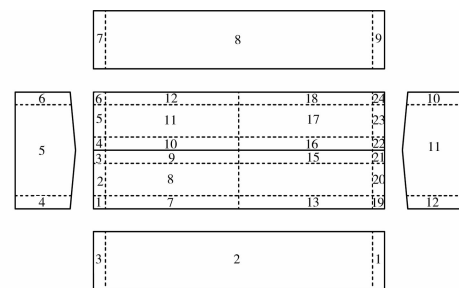


图 3 屋面和墙面风压系数分区示意图

### 1.3 风致内压计算

与外风压相比,封闭结构的内压很小,可以不做考虑,中国的荷载规范中规定结构内表面风荷载体形系数的取值根据外压的取值对应取  $\pm 0.2$ <sup>[8]</sup>。然而在强风中当门、窗突然开敞,或围护结构构件被风致碎片击破而出现洞口时,风致内压会瞬间显著增大,内压系数可达到  $\pm 0.8$ ,这是不容忽视的。决定

风致内压的影响因素包括外风压的分布、洞口的数量、相对位置和尺寸、结构的体积和刚度以及风向角等<sup>[9-12]</sup>, 这些众多的影响因素造成了理论和实验研究上的困难。目前对于风致内压的研究还处于起步阶段, 针对简单的开洞情况进行了初步的研究, 没有形成一套完备系统的理论可以应用到所有情况。而基于工程应用的需要, 必须提出一种计算风致内压的简化方法。根据已有的研究结论, 发现内压在结构内部各表面可以近似认为是均匀分布, 虽然在斜风作用下, 内压分布稍有不均, 但出于工程应用计算方便考虑, 风致内压值没有分区的差异, 为统一值。该文中风致内压参照文献[11, 12]中的简化公式(3)进行计算。

$$C_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{piE}}{n} \quad (3)$$

式中:  $C_{pi}$  为风致内压系数;  $C_{piE}$  为洞口处外风压系数;  $n$  为结构外表面洞口数量。

外风压和风致内压的方向均以指向结构表面为正, 背离结构表面为负, 而内外压分别作用于结构内外表面, 因此内压与外压方向相反。结构一个面上的净压力为外风压与风致内压之差, 见公式(4)和(5)。

$$C_{pN} = C_{pE} - C_{pi} \quad (4)$$

$$\omega_N = \frac{1}{2} C_{pN} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

式中:  $C_{pN}$  为净风压系数;  $\omega_N$  为结构表面净风压。

#### 1.4 风致碎片计算

风致碎片在台风过程中对于结构的破坏非常显著, 建筑周围能够被强风吹起并在空中飞行最后射入到围护结构上的细小物体是需要特殊考虑的因素, 而结构本身破坏后散落下来的构件残片也会成为风致碎片的来源, 威胁到其周围建筑的安全。目前中国对于风致碎片的研究较少, 而国外研究也都还处于初步阶段, 部分学者对碎片飞行轨迹做了有限的实验研究<sup>[13-18]</sup>。针对已有的风灾调查统计数据, 把碎片源环境分为 2 大类, 一类是民用住宅环境, 其碎片种类主要包括木檩条、屋面瓦等木结构房屋屋面破坏后产生的碎片; 另一类是工业建筑环境, 其碎片种类主要是平屋顶、组合结构屋面作覆盖层的砂砾。

1) 当碎片源环境是民用住宅环境时, 围护结构发生风致碎片破坏概率计算公式为

$$P_v(D) = 1 - \exp[-\lambda q(1 - P(\xi < \xi_d))] \quad (6)$$

式中:  $\xi_d$  为发生破坏的临界能量或动量;  $q$  为窗占整

个墙体表面积的分百分数;  $\lambda$  为射入每个建筑上的平均碎片数;  $P(\xi < \xi_d)$  为碎片冲击能量小于窗破坏能量临界值的概率。

为便于计算, 将公式(6)进行简化后得到下式:

$$N_w = a\theta P_1(v) N_2(v) \quad (7)$$

式中:  $N_w$  为射入墙面的碎片数;  $a$  为常数;  $\theta$  为表示 45° 扇面区域内碎片源建筑的数量、密度和尺寸的常数;  $P_1(v)$  为风速  $v$  时射入墙面的碎片百分数;  $N_2(v)$  为每一个时间步内产生的碎片数量。

2) 当碎片源环境是工业建筑环境时, 碎片主要是砂砾, 玻璃窗可能遭受破坏的概率和很多影响因素有关, 包括相对风速、风方向、地貌、源建筑高度、砂砾面积、砾石层厚度和砾石尺寸等, 可按下式进行计算:

$$P_D = 1 - \exp[-A \cdot T \cdot N \cdot (1 - P_m)] \quad (8)$$

式中:  $P_D$  为发生风致碎片破坏的概率;  $A$  为目标建筑物的给定面积;  $T$  为给定的时间间隔;  $N$  为预期在单位时间内射入到单位面积上的碎片数目;  $P_m$  为具有动量  $m$  小于窗抗力  $m_d$  碎片概率。

通过对灾后统计数据曲线的拟合可以确定参数  $N$  和  $P_m$ , 即

$$N = n(V, d) \cdot f(d, h) \quad (9)$$

式中:  $n(V, d)$  为从地面到 30 m 高度处平均超越高度;  $f(d, h)$  为高度系数。

$n(V, d)$  和  $f(d, h)$  分别按下式计算:

$$n(V, d) = 53 \frac{(1 + \tanh \frac{V^{1.11} - 80}{18})}{(e^x - e^{-x})}, x = \frac{d - 15}{0.33V} \quad (10)$$

式中:  $V$  为在很短时间间隔  $T$  内的峰值阵风风速/(m/s);  $d$  为模拟区域内中心距离/m。

$$f(d, h) = \frac{60}{h_0} \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{h}{h_0}\right), h \leq h_0, \\ = 0, h > h_0 \quad h_0 = 30 - \frac{d}{10} \quad (11)$$

式中:  $h$  为目标面源距地面的垂直距离, m。

碎片射入结构的冲击动量与砾石的粒径、最终速度和射入角有关, 而这几个变量又与风速、建筑间距、竖直位置、源建筑和目标建筑的外形等因素相关, 由实际数据统计得到以下经验公式:

$$P_m = CDF\left(\frac{M - 0.025}{2.417 \times 10^{-3} V^2 - 1.379 \times 10^{-3} V + 6.200 \times 10^{-2} - 0.025}\right) \quad (12)$$

式中:  $M$  为围护构件抗冲击能力,  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在进行风致碎片损伤计算时, 要具体问题具体

分析,首先确定结构周围可能成为碎片源的种类,然后对相关参数进行统计分析,最后再应用相应公式计算围护结构的损伤。

## 2 结构和构件承载力分析

### 2.1 轻钢结构工业厂房概述

轻钢结构工业厂房主要由钢柱、屋盖细梁、檩条、墙梁(檩条)、屋盖和柱间支撑、屋面和墙面的彩钢板等组成。钢柱一般为H型钢,通过地脚螺栓与混凝土基础连接,通过高强螺栓和屋盖梁连接,连接形式有直面连接或斜面连接。屋盖梁为I字型截面,根据内力情况可呈变截面,各段由高强螺栓连接。屋面檩条和墙梁多采用高强镀锌彩色钢板辊压成型的C型或Z型檩条。檩条可由高强螺栓直接与屋面梁的翼缘连接。

风灾对结构造成损伤主要来自于围护结构的破坏,因此验算的重点是围护结构构件材料强度及围护构件与主体结构连接强度,其中围护结构包括屋面板、墙板和窗,连接部分包括屋面板与檩条(有檩体系)或屋面板与屋架(无檩体系)的连接、墙板与墙架的连接、窗与墙板的连接、窗与墙架的连接。另外,为了研究屋盖结构整体倒塌的现象,也要验算屋架与柱的连接强度。

目前,普遍使用的屋面和墙面围护构件有金属压型板、金属压型复合保温板及夹心板。压型钢板一般选用热镀锌钢板、热镀锌铝锌钢板和彩色涂层钢板加工制作。屋面板的选用应根据屋面荷载和檩条间距进行计算确定,基板厚度一般选用0.5~0.8mm;墙面板按照墙面荷载及墙梁间距进行结构计算,压型钢板厚度一般为0.5~0.6mm。屋面用压型钢板按照侧边连接形式不同,分为搭接式、扣合式、咬合式3种,墙面用压型钢板一般为搭接式,也有采用扣合式。压型钢板与墙架的连接一般采用勾头螺栓固定或柱铆钉固定,其中柱铆钉包括自攻螺丝和拉铆钉等。屋面压型钢板一般在檩条处搭接,并用带橡胶垫的自攻螺钉固定,压型钢板间用密封条密封。

### 2.2 屋面和墙面连接构件强度计算

在风灾中围护构件连接件主要有如下3种失效模式:1)承受拉力的压型钢板与冷弯型钢等支承构件间的紧固件有可能被从基材中拔出而失效;2)也可能被连接的薄钢板沿连接件头部被剪脱或拉脱而

失效;3)被连接板件被撕裂和连接件被倾斜拔出。对于第1种和第2种破坏方式需要计算连接构件的抗拉承载力;对于第3种破坏方式需要计算连接件的抗剪承载力,其仅与被连板件的厚度和其屈服强度以及连接件的直径有关<sup>[19]</sup>。《冷弯薄壁型钢结构技术规范(GB 50018—2002)》基于欧美等国家对接连接件及冷弯薄壁型钢做过的大量试验,给出了各类连接构件承载力计算方法和公式。

1)当验算被连接薄板被拉脱失效时,考虑了风荷载作用时的疲劳效应,每个自攻螺钉或射钉抗拉承载力计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$N_t^f = 8.5tf \quad (13)$$

式中: $N_t^f$ 为单个自攻螺钉或射钉的抗拉承载力, $N$ ;  $t$ 为紧挨钉头侧的压型钢板厚度,mm;  $f$ 为被连接钢板的抗拉强度标准值, $N/mm^2$ 。

当验算连接件抗拔出承载力时,每个自攻螺钉或射钉抗拉承载力计算公式为:

$$N_t^f = 0.75t_cdf \quad (14)$$

式中: $d$ 为自攻螺钉的直径,mm;  $t_c$ 为钉杆的圆柱状螺纹部分钻入基材中的深度,mm;  $f$ 为基材的抗拉强度标准值, $N/mm^2$ 。

一个自攻螺钉或射钉的抗拉承载力取公式(13)和(14)计算结果的较小值。

2)每个连接件的抗剪承载力按式(15)~(17)计算<sup>[20]</sup>:

$$\text{当 } \frac{t_1}{t} = 1 \text{ 时: } N_v^f = 3.7 \sqrt{t^3 df} \quad (15)$$

$$\text{且 } N_v^f \leq 2.4tdf \quad (16)$$

$$\text{当 } \frac{t_1}{t} \geq 2.5 \text{ 时: } N_v^f = 2.4tdf \quad (17)$$

$$\text{当 } \frac{t_1}{t} \text{ 介于 } 1 \text{ 和 } 2.5 \text{ 之间时, } N_v^f \text{ 可由公式(12)}$$

和(14)插值得。

式中  $N_v^f$  为单个连接件的抗剪承载力,  $N$ ;  $d$  为铆钉或螺钉直径,mm;  $t$  为较薄板(钉头接触侧的钢板)的厚度,mm;  $t_1$  为较厚板(在现场形成钉头一侧的板或钉尖侧的板)的厚度,mm;  $f$  为被连接钢板的抗拉强度标准值, $N/mm^2$ 。

### 2.3 屋面和墙面围护构件强度计算

屋面和墙面压型钢板的失效模式主要有2种:一种是钢板整体挠度过大,致使变形超过了限值;另一种是在支座处发生局部腹板压跛现象,因此需要验算整块板的变形和支座处局部承载力。

压型钢板的强度可取一个波距或整块压型钢板的  
有效截面,其抗弯承载力按下式计算:

$$M_u = W_e f \quad (18)$$

式中:  $W_e$  为钢板截面等效抵抗矩。

压型钢板支座处的腹板其局部受压承载力按下  
式计算:

$$R_w = at^2 \sqrt{fE} (0.5 + \sqrt{\frac{0.02l_c}{t}}) [2.4 + (\frac{\theta}{90})^2] \quad (19)$$

式中  $a$  为系数,中间支座取  $a = 0.12$ ,端部支座取  
 $a = 0.06$ ;  $t$  为腹板厚度,mm;  $l_c$  为支座处的支承长度,  
 $10 \text{ mm} < l_c \leq 200 \text{ mm}$ ,端部支座可取  $l_c = 10 \text{ mm}$ ;  
 $\theta$  为腹板倾角( $45^\circ < \theta < 90^\circ$ )。

#### 2.4 屋架整体承载力计算

屋盖结构整体承载力取决于屋架与柱的连接强  
度。屋架与柱的连接分为铰接和刚接 2 种,支撑于  
钢筋混凝土柱或砖柱上的屋架一般采用铰接,而支  
撑于钢柱上的屋架通常为刚接。铰接屋架的支承节  
点多采用平板式支座,由支座节点板、支座底板、加  
劲肋和锚栓组成,锚栓预埋在钢筋混凝土柱上以固  
定底板。锚栓直径一般为 20~25 mm,埋入柱内的  
锚固长度为 450~600 mm。屋架与柱的刚接是通过  
垫板用高强螺栓与钢柱相连<sup>[20]</sup>,因此需要验算高强  
螺栓的强度。

1) 单个螺栓的抗拉承载力按下式计算:

$$N_t^b = \frac{1}{4} \pi d_e^2 f_t^b \quad (20)$$

式中:  $d_e$  为螺栓螺纹处的有效直径(螺栓内径,  
mm);  $f_t^b$  为螺栓的抗拉强度标准值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

2) 单个螺栓的受剪承载力由公式(21)和(22)确  
定,并取两者之中的较小值:

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \quad (21)$$

$$N_c^b = d \sum t f_c^b \quad (22)$$

式中:  $n_v$  为每只螺栓受剪面数量,单剪为 1,双剪为  
2,四剪为 4;  $d$  为螺栓杆直径,mm;  $\sum t$  为在同一受  
力方向的承压构件较小的总厚度,mm;  $f_v^b$  为螺栓抗  
剪强度标准值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $f_c^b$  为螺栓抗压强度标准值,  
 $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

需要注意的是,用于损伤估计的承载力应为构  
件实际承载力,因此应该用构件材料强度标准值代  
替规范公式中的强度设计值。

### 3 结构风灾损伤分析

在计算完台风荷载和结构构件及连接件承载力  
之后,就可以进行结构的损伤分析。构件损伤率  
( $dr$ ) 的定义为受损构件面积(或数量)与该类构件  
总面积(总数量)之比。结构风灾损伤预测计算方法  
可以分为如下 7 个步骤:

1) 首先计算  $t_i$  时刻(风速  $v_i$ , 风向角  $\theta_i$ ) 结构表  
面各分区的外风压值及屋盖整体风荷载;已知结构  
各类构件材料、型号、尺寸以及布置方式和间距等数  
据信息,计算结构构件以及连接件的抗拉、抗剪、抗  
弯承载力,屋盖与柱的连接承载力;

2) 通过计算得出的外风压值和结构构件及连接  
件承载力,分析围护结构构件是否已经失效;判断风  
致碎片是否造成围护构件破坏;判断结构表面是否  
有洞口出现;判断屋盖整体是否塌落;

3) 如果围护结构完好,没有开洞,则回到步骤  
1) 计算下一时刻  $t_{i+1}$  (风速  $v_{i+1}$ , 风向角  $\theta_{i+1}$ ) 的外风  
压值;

4) 如果围护结构构件已经失效,有洞口产生,则  
判断并输出洞口位置,得到洞口处外风压值,通过公  
式(3)计算风致内压;结合第一步计算得到的外风压  
值,计算  $t_i$  时刻结构表面各分区的净风压值;计算各  
类构件  $t_i$  时刻的首次损伤率  $dr_{i,1}$ , 在下一步计算构  
件损伤时去除已经失效的构件;

5) 判断在净风压作用下,剩余的围护结构构件  
是否继续失效;判断屋盖整体是否塌落;

6) 计算  $t_i$  时刻的 2 次损伤率  $dr_{i,2}$ ; 把首次损伤  
率  $dr_{i,1}$  与 2 次损伤率  $dr_{i,2}$  相加得到  $t_i$  时刻的总损  
伤率  $dr_i$ , 并输出两次出现洞口的位置信息,用于下  
一循环计算初始风致内压;

7) 返回到步骤 1), 计算下一时刻  $t_{i+1}$  的外风压,  
重复以上所有步骤,直到完成整个台风过程,把各类  
构件每一时刻的损伤率  $dr_i$  累加,分别得到各类构  
件总损伤率  $dr$ , 加权平均得到结构损伤率  $DR$

### 4 结构风灾损伤等级的划分

参照国内震害损伤等级划分方法以及国外风灾  
损伤等级划分标准,根据屋面围护结构、墙面围护结  
构以及窗的损伤程度、风致碎片射入数量、屋架是否  
塌落以及结构是否整体倒塌等条件来判断结构损伤  
的等级,具体划分标准参见表 1。

表 1 钢结构工业厂房风灾破坏等级表

| 等级序号 | 破坏等级名称 | 定性描述                              | 屋面板破坏程度 $drr$          | 墙面板破坏程度 $drrw$          | 窗破坏程度 $drc$             | 射入墙面碎片数目 $wbn$     | 屋架是否坍塌 | 结构是否整体倒塌 |
|------|--------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------|----------|
| 1    | 基本完好   | 没有破坏或仅有屋面或墙面压型钢板发生极少破坏            | $drr \leq 2\%$         | $drrw \leq 2\%$         | 0                       | 0                  | 否      | 否        |
| 2    | 轻微破坏   | 至多有一扇窗破坏;屋面和墙面少量破坏,射入的碎片数不超过 5 块  | $2\% < drr \leq 15\%$  | $2\% < drrw \leq 15\%$  | 1                       | $wbn \leq 5$       | 否      | 否        |
| 3    | 中等破坏   | 屋面和墙面板有部分破坏,不只一扇窗破坏,射入碎片数量少于 10 块 | $15\% < drr \leq 30\%$ | $15\% < drrw \leq 30\%$ | $> 1$ 且 $drc \leq 15\%$ | $5 < wbn \leq 10$  | 否      | 否        |
| 4    | 严重破坏   | 屋面板、墙面板大面积破坏,窗破坏多扇,射入碎片数超过 10 块   | $30\% < drr \leq 50\%$ | $30\% < drrw \leq 50\%$ | $15\% < drc \leq 50\%$  | $10 < wbn \leq 20$ | 否      | 否        |
| 5    | 完全破坏   | 屋面和墙面板几乎完全破坏,或屋架塌落,或结构发生整体倒塌      | $drr > 50\%$           | $drrw > 50\%$           | $drc > 50\%$            | $wbn > 20$         | 是      | 是        |

假设屋面围护结构总造价为  $P_r$ , 墙面围护结构总造价为  $P_w$ , 窗总造价为  $P_c$ , 围护结构总造价为 3 项之和  $P_T$ , 每种围护结构的权重分别为  $\lambda_r, \lambda_w$  和  $\lambda_c$ , 则结构总的损伤率  $DR$  为 3 种围护构件的加权平均值。

$$P_T = P_r + P_w + P_c,$$

$$\lambda_r = \frac{P_r}{P_T}, \lambda_w = \frac{P_w}{P_T}, \lambda_c = \frac{P_c}{P_T},$$

$$\lambda_r + \lambda_w + \lambda_c = 1 \quad (23)$$

$$DR = drr \cdot \lambda_r + drrw \cdot \lambda_w + drc \cdot \lambda_c \quad (24)$$

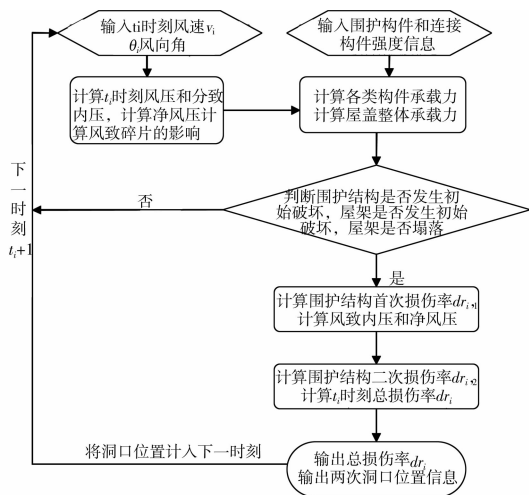


图 4 轻钢结构工业厂房风灾损伤估计算法流程图

### 5 算例

该文以一个单跨门式刚架工业厂房为例, 实现了轻钢结构厂房风灾损伤预测的全过程。结构跨度

为 21 m, 双坡屋面, 屋面坡度为 1/10, 结构总长度 66 m, 柱顶高度 8.1 m。屋面围护结构采用 YX130-300-600(W600)型压型钢板, 板厚 1 mm, 用自攻螺钉与屋面檩条连接, 自攻螺钉间距 300 mm, 墙面围护结构采用 YX15-225-900 型压型钢板, 板厚 0.8 mm, 同样用自攻螺钉与墙架相连, 间距为 225 mm, 自攻螺钉型号为 ST5.5, 压型钢板之间用拉铆钉相连。压型钢板屋面自重取  $0.30 \frac{kN}{m^2}$ 。窗的尺寸为 3 m × 3.6 m, 均匀分布在纵墙上, 每面墙上共计 11 扇窗。山墙上设有卷帘门, 尺寸为 5 m × 6 m。厂房结构、风向以及门窗位置及尺寸见图 5。

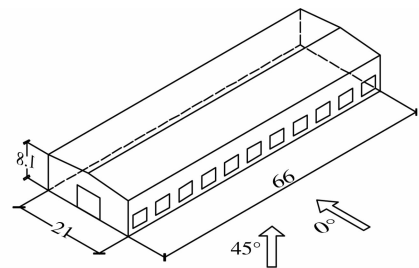


图 5 门窗位置、厂房结构尺寸及风方向示意图

为了计算结构表面各风向角下的外风压值, 该文通过应用计算流体力学软件 Fluent6.3 进行了数值模拟, 得到了屋面和墙面共计 36 个压力分区的压力系数值。由于厂房结构的双轴对称特性, 风向角从  $0^\circ \sim 90^\circ$  的变化就可以表示一周  $360^\circ$  的变化, 因此考察了 7 种风向角的工况。具体各风向角下压力系数数值见表 2 和表 3。

表 2 屋面各分区平均风压系数

| 分区<br>编号 | 风向角/ $^{\circ}$ |       |       |       |       |       |       |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 0               | 15    | 30    | 45    | 60    | 75    | 90    |
| 1        | -1.15           | -1.05 | -0.75 | -0.80 | -0.75 | -1.55 | -1.10 |
| 2        | -0.80           | -0.45 | -0.50 | -1.15 | -1.30 | -1.50 | -0.95 |
| 3        | -0.60           | -0.45 | -0.80 | -1.30 | -1.45 | -1.10 | -0.55 |
| 4        | -0.45           | -0.45 | -0.80 | -1.45 | -1.45 | -0.95 | -0.55 |
| 5        | -0.45           | -0.45 | -0.80 | -1.35 | -1.20 | -0.80 | -0.95 |
| 6        | -0.35           | -0.45 | -0.65 | -0.80 | -0.70 | -0.80 | -1.10 |
| 7        | -1.25           | -1.20 | -1.50 | -0.95 | -0.55 | -0.40 | -0.35 |
| 8        | -0.80           | -0.60 | -0.60 | -0.40 | -0.35 | -0.25 | -0.35 |
| 9        | -0.60           | -0.50 | -0.60 | -0.45 | -0.30 | -0.30 | -0.35 |
| 10       | -0.45           | -0.50 | -0.50 | -0.45 | -0.30 | -0.30 | -0.35 |
| 11       | -0.45           | -0.35 | -0.35 | -0.35 | -0.30 | -0.35 | -0.35 |
| 12       | -0.45           | -0.35 | -0.30 | -0.30 | -0.25 | -0.35 | -0.35 |
| 13       | -1.25           | -0.75 | -1.50 | -0.80 | -0.70 | -0.25 | -0.05 |
| 14       | -0.80           | -0.60 | -0.60 | -0.60 | -0.35 | -0.15 | -0.05 |
| 15       | -0.60           | -0.50 | -0.50 | -0.45 | -0.35 | -0.15 | -0.05 |
| 16       | -0.45           | -0.50 | -0.45 | -0.35 | -0.30 | -0.15 | -0.05 |
| 17       | -0.45           | -0.40 | -0.30 | -0.25 | -0.20 | -0.15 | -0.05 |
| 18       | -0.45           | -0.35 | -0.25 | -0.20 | -0.20 | -0.15 | -0.05 |
| 19       | -1.15           | -0.50 | -0.35 | -0.35 | -0.30 | -0.20 | -0.05 |
| 20       | -0.80           | -0.35 | -0.25 | -0.25 | -0.25 | -0.15 | -0.05 |
| 21       | -0.60           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.25 | -0.15 | -0.05 |
| 22       | -0.45           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.15 | -0.15 | -0.05 |
| 23       | -0.45           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.15 | -0.15 | -0.05 |
| 24       | -0.35           | -0.20 | -0.25 | -0.20 | -0.15 | -0.15 | -0.05 |

选用 0601 号台风珍珠(CHANCHU)的数据作为输入的荷载数据。台风珍珠是 2006 年太平洋台风季第一个达速在 35 左右,风力达 12 级以上,是漳州有气象记录以来 60 a 一遇,台风珍珠路径见图 6。

台风数据采集地点为深圳市地王大厦 325 m 高度处,地面粗糙度为 D 类,采样频率为 4 Hz,共采集了 60.65 h 的风速和风向角时程数据。图 7 则为台风观测地点与台风登陆地点的相对位置。首先对原始数据进行适当处理,把 325 m 高度处风速通过风压高度变化系数转化到结构屋面平均高度处风速

(该文结构屋面平均高度为 8.625 m,厂房结构多位于郊区,属于 B 类地面粗糙度),然后取时间间隔为 10 min,计算 10 min 平均风速,再乘以阵风因子 1.50,得到瞬时风速的包络值,风速和风向角时程分别见图 8 和图 9。

表 3 墙面各分区平均风压系数

| 分区<br>编号 | 风向角/ $^{\circ}$ |       |       |       |       |       |       |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 0               | 15    | 30    | 45    | 60    | 75    | 90    |
| 1        | 0.45            | 0.30  | 0.20  | 0.05  | -0.10 | -0.15 | -0.10 |
| 2        | 0.80            | 0.50  | 0.35  | 0.30  | 0.10  | -0.05 | -0.15 |
| 3        | 0.45            | 0.40  | 0.60  | 0.65  | 0.15  | -0.80 | -0.65 |
| 4        | -1.00           | -0.90 | -0.15 | 0.65  | 0.70  | 0.30  | 0.40  |
| 5        | -0.70           | -0.30 | -0.05 | 0.20  | 0.45  | 0.55  | 0.60  |
| 6        | -0.40           | -0.35 | -0.30 | -0.25 | 0.05  | 0.20  | 0.40  |
| 7        | -0.40           | -0.50 | -0.65 | -0.70 | -0.60 | -0.40 | -0.65 |
| 8        | -0.35           | -0.35 | -0.30 | -0.35 | -0.30 | -0.25 | -0.15 |
| 9        | -0.40           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.20 | -0.20 | -0.10 |
| 10       | -0.40           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.30 | -0.25 | -0.10 |
| 11       | -0.70           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.30 | -0.25 | -0.10 |
| 12       | -1.00           | -0.20 | -0.25 | -0.25 | -0.30 | -0.15 | -0.10 |

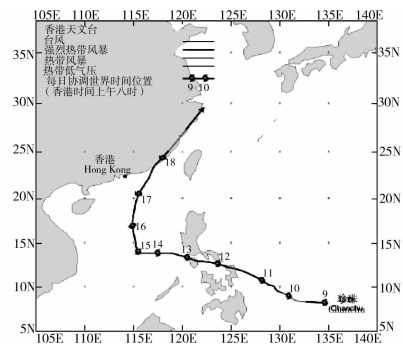


图 6 台风珍珠(0601)5月9日至18日的路径图



图 7 台风珍珠数据观测地点与登陆地点



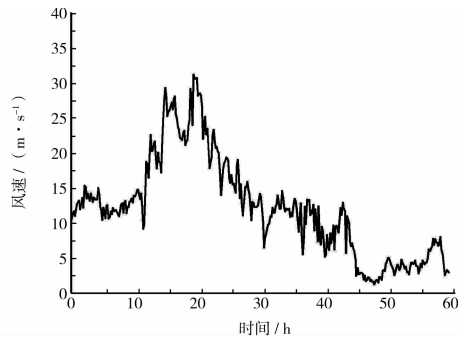


图8 台风珍珠阵风风速时程

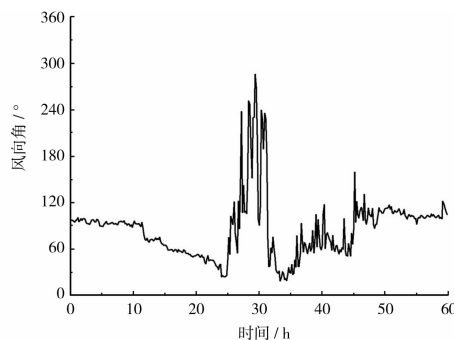


图9 台风珍珠风向角时程

利用数学软件 MATLAB 进行编程,按照该文第3节的步骤计算模型结构的损伤。根据 Fluent 模拟得到的所有风向角情况下的外风压系数和风速、风向角时程数据,由公式(1)计算每个时刻的外风压。由围护结构和连接构件材料、型号、布置方案等强度信息,根据公式(13)~(22)计算各类构件承载力,由于所建模型为门式刚架结构,一榀刚架为一个整体,不存在屋架与柱的连接失效问题,因此不必计算屋架的连接强度。本例中没有考虑风致碎片对窗造成的损伤,是因为需要众多关于碎片源的具体信息,做简单假设所得结果不能十分准确,因此留待对实际结构进行风灾损伤预测时做详细的信息收集之后再进行分析。初始内压设为零,每一个时间步首先计算净风压,然后计算所需验算构件所受的荷载,与构件承载力比较,如果构件失效,则根据失效位置及外风压由公式(3)计算风致内压,同时去除失效的构件并输出每一步的损伤结果。时间步长为 10 min,60 h 共计 360 个时间步,经过 360 次循环计算之后得到最后的结果。

如果不考虑连接构件处的应力集中,并且认为台风来临之前所有门窗都完全紧闭,则模型结构完好无损。如果迎风墙面上有窗没有紧闭,则视为有初始的洞口,开始计入风致内压,则屋檐部位(屋面分区 7 和 13)压型钢板由于连接失效而发生破坏,而墙面完好,屋架整体也安全。屋面围护构件损伤率  $drr$

为 9.63%,根据表 1 判断,屋面属于 2 级轻微破坏。

## 6 结 语

该文详述了轻钢结构工业厂房风灾损伤预测的方法,得到以下主要结论:

1)为便于快速计算结构的风灾损伤,台风荷载对结构的作用可以简化成外风压、风致内压和风致碎片等 3 个部分。风荷载的计算要考虑风速和风向角是随时间变化的变量,而不能应用荷载规范中方法只计算单一风向角情况下的荷载。风致内压则根据洞口的数量、位置和洞口处外风压进行计算,也是随时间变化的变量。而风致碎片的计算要结合建筑周围碎片环境和结构自身特点具体问题具体分析。

2)在风灾中围护结构及连接部位是结构破坏的重点,计算损伤时需要着重考虑。针对灾后调查总结出的构件失效模式并结合规范,给出需要验算的承载力计算公式,有别于结构设计阶段承载力的计算,该文公式所采用的构件材料强度均取标准值,去除强度设计值中的安全因子,目的是得到构件实际承载力。

3)详细给出了结构的风灾损伤预测流程和计算步骤,并给出了轻钢结构工业厂房损伤等级划分标准;通过建立一个门式刚架结构模型并采用台风珍珠的观测数据实现了损伤估计的全过程。

### 参考文献:

- [1] 王凌. 近 35 年登陆我国台风的年际变化特征及灾害特点[J]. 科技导报, 2006, 24(11):23-25.  
WANG LING. Review of typhoon and its related natural disasters over the past 35 years in China [J]. Science & Technology Review. 2006, 24(11):23-25.
- [2] 国家减灾中心信息部. 2006 年全国台风灾害情况[J]. 中国减灾, 2007(2): 13-14.
- [3] 李文波, 王赛宁. 从风荷载对门式刚架房屋的破坏看抗风设计[C]//2005 年全国建筑钢结构行业大会论文集. 北海, 2005:195-209.
- [4] 潘赛军, 施月中, 耿晓清, 等. 浙江台州工业厂房 0414 号台风受损的原因剖析与对策探讨[J]. 钢结构, 2005, 20(82):52-57.  
PAN SAI-JUN, SHI YUE-ZHONG, GENG XIAO-QING, et al. Cause analysis of damages to industrial workshops in Taizhou of Zhejiang by typhoon 0414 and exploration of countermeasures [J]. Steel Structure, 2005, 20(82):52-57 (in Chinese).
- [5] 葛耀君, 赵林, 项海帆. 结构风工程中的台风数值模拟研究进展[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集, 三亚, 2003:48-54.

- [6] 肖仪清, 孙建超, 李秋胜. 台风湍流积分尺度与脉动风速谱—基于实测数据的分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5):45-53.  
XIAO YI-QING, SUN JIAN-CHAO, LI QIU-SHENG. Turbulence integral scale and fluctuation wind speed spectrum of typhoon; an analysis based on field measurements [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5):45-53 (in Chinese).
- [7] 张相庭. 结构风工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006:76.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB50009-2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 孙斌. 大跨屋盖建筑开孔风致平均内压的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 6-8.
- [10] 卢旦. 风致内压特性及其对建筑物作用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 26-29.
- [11] HOLMES J D. Mean and fluctuating internal pressures by wind [C]//Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Wind Engineering, Fort Collins, Colorado: Pergamon Press, Oxford, 1997: 435-450.
- [12] VICKERY B J. Internal pressure and interactions with the building envelop [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53:125-144.
- [13] LIN N, HOLMES J D, LETCHFORD C W. Trajectories of wind-borne debris in horizontal winds and applications to impact testing [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, February: 274-282.
- [14] LIN N, VANMARKE E. A windborne debris risk model [C]//ICWE12, Australia: Cairns, 2007: 1967-1974.
- [15] TACHIKAMA M. Trajectories of flat plates in uniform flow with applications to wind-generated missiles [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 14(1/2/3): 443-453.
- [16] HOLMES J D, LETCHFORD C W, LIN N. Investigation of plate-type windborne debris. Part II: Computed trajectories [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94: 21-39.
- [17] LIN N, LETCHFORD C W, HOLMES J D. Investigation of plate-type windborne debris. Part I: Experiments in wind tunnel and full scale [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94: 51-76.
- [18] HOLMES J D. Trajectories of spheres in strong winds with application to wind-borne debris [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 9-22[18].
- [19] 中华人民共和国国家标准. GB 50018-2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [20] 沈祖炎, 陈以一, 陈扬骥. 房屋钢结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:197-200.
- [21] 周绪红. 钢结构设计指导与实例精选[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:156.

(编辑 王秀玲)

(上接第 26 页)

- [12] 付伟庆. 磁流变智能隔震与橡胶垫高层隔震的理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2005.
- [13] 付伟庆, 王焕定. 规则型高层隔震结构实用设计方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10):1541-1544.  
FU WEI-QING, WANG HUAN-DING. Research on practical design method of regular high-rising isolated structure[J]. Journal of Harbin Institute of Tecnology, 2007, 39(10):1541-1544.
- [14] 包世华, 方鄂华. 高层建筑结构设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [15] CECCOLI, MAZZOTTI C, SAVOIAM M. Non-linear seismic analysis of base-isolated RC frame structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 28 (2):633-653.
- [16] 颜学渊, 张永山. 高层结构三维基础隔震抗倾覆试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4):1-8.  
YAN XUE-YUAN, ZHANG YONG-SHAN. Experimental study on high-rise structure with three-dimensional base isolation and overturn resistance devices[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4):1-8.
- [17] WANG T Y, WANG H D, ZHANG Y S. The height-width ratio limited value for rubber bearing isolated structure computed by uniform design method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 14(1): 36-40.
- [18] HIGASHINO M, OKAMOTO S. Response control and seismic isolation of buildings[M]. Great Britain: Taylor & Francis, 2008.
- [19] 中华人民共和国国家标准. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [20] WEI L S, ZHOU F L. Application of three dimensional seismic and vibration isolator to building and site test [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3):121-125.

(编辑 王秀玲)