

基于权重系数的既有结构风灾易损性分析

周静海¹, 闫妍¹, 孟宪宏¹, 李德倩²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省住房和城乡建设厅
建筑节能与建设科技发展中心, 辽宁 沈阳 110001)

摘要 目的 研究一种新型损伤评价方法,对既有建筑在风灾作用下的破坏进行有效预测. 方法 笔者提出了一种基于构件权重系数评估结构在风灾作用下损伤程度的方法,在以往对结构整体易损性进行分析的基础上通过定义权重得到每个构件在整个结构中的权重系数. 该方法用构件位移角和构件权重系数的乘积定义损伤指数,以结构整体损伤指数作为评价结构易损性的参数指标,进而分析结构的易损性. 结果 对于风速在 40 m/s 以下的风灾预测,笔者提出方法与传统方法所得结果一致,严重破坏和倒塌破坏的概率基本为零,轻微破坏和中等破坏的概率也相对较小;当风速超过 40 m/s 时,传统方法对轻微破坏的概率预测已经达到 92%,而考虑权重系数后为 72%. 结论 经与传统方法得出的易损性曲线对比,考虑权重系数的风灾易损性分析方法更贴近于实际.

关键词 权重系数;位移角;整体损伤指数;非线性动力时程;易损性曲线

中图分类号 TU375.4 文献标志码 A

Vulnerability Analysis of Existing Buildings under Wind Disasters Based on Weight Coefficient

ZHOU Jinghai¹, YAN Yan¹, MENG Xianhong¹, LI Deqian²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Building Energy Saving and Construction Science and Technology Development Center of Liaoning Provincial Department of Housing and Urban Rural Construction, Shenyang, China, 110001)

Abstract: This paper studies a new method based on the weight coefficient for damage assessment of structures in winds, and predicts the damage of existing buildings under the effect of storm effectively. A weighting factor is defined for each member to give its importance in the whole structure which is different from the structural analysis of the vulnerability as a whole previously. The method uses member displacement angle multiply member weight define damage index, further analysis the vulnerability of structures. For wind speed under 40 m/s, method this paper put forward and the traditional method have the same result; probabilities of serious damage and collapsed is

收稿日期:2016-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51178275)

作者简介:周静海(1965—),男,教授,博士,主要从事再生混凝土性能分析与应用研究.

zero, and probabilities of slight damage and medium damage is relatively small; When the wind speed is over 40m/s, the probability of slight damage is 92% with traditional method, 72% with the method of considering weighting factor. Compared with traditional method, the disaster vulnerability analysis method considered weight coefficient is more close to the reality.

Key words: weight coefficient; component displacement angle; overall damage index; nonlinear dynamic time history; vulnerability curve

风灾是一种突发性自然灾害,破坏力强、发生频率高.风灾易损性分析是结构灾害损失评估的重要内容,也是灾害预测的基础环节^[1-2].对结构进行风灾易损性分析可以更好地了解结构的抗风能力,找出结构的薄弱环节,进而提出合理的抗风设计方案和构造措施,使结构设计更加合理,从而减少未来可能发生风灾带来的损失,因此对既有结构进行风灾易损性分析显得尤为重要.

国内外学者对于易损性的研究都是从结构的整体进行考虑^[3-6],并且假设每个构件在整体结构中的权重系数是相同的,这与实际情况不符.基于此利用 sap2000 软件建立某酒店钢结构改造部分有限元模型,采用非线性动力时程法对结构的抗风性能进行分析,提出考虑每个构件在整体结构中的权重,明确每个构件在结构抵抗破坏过程中发挥的作用,通过层次分析法确定构件的权重系数,用权重系数和损伤值的乘积定义损伤指数,将损伤指数作为易损性分析的指标,利用软件建立结构模型进行非线性动力时程分析,进而得到结构不同破坏状态的超越概率.

1 易损性分析步骤

通过绘制易损性曲线对高层钢框架结构进行易损性分析,基本步骤如下:

- (1)建立有限元模型;
- (2)输入一个风力时程函数,按特定风速进行调整,对结构进行非线性动力时程分析;
- (3)对模拟所得数据进行回归分析构建结构反应的概率函数,其中以风速为参数;
- (4)计算与给定风速相对应的结构的整

体损伤指数,定义不同的破坏状态对应的损伤指数范围,并建立与每一种破坏状态相对应的破坏概率函数;

(5)以风速为横坐标,以不同破坏状态的超越概率为纵坐标,绘制高层钢框架结构的风灾易损性曲线;

(6)得到高层钢框架结构的风灾易损性曲线后,对其在不同风速指标下的破坏状态进行评估.

2 结构损伤模型定义

2.1 损伤值的定义

20 世纪 60 年代,用延性比定义损伤值,延性比反映了超越弹性阶段后结构的抗震能力,延性比通常可以用转角、曲率和位移来定义:

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_m}{\theta_y}, \mu_{\varphi} = \frac{\varphi_m}{\varphi_y}, \mu_{\delta} = \frac{\delta_m}{\delta_y}. \tag{1}$$

文献[7]对延性比指标作了进一步的改进,认为变形超过弹性极限变形时结构或构件发生破坏,公式表达如下:

$$D = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_f - \delta_y} = \frac{\mu - 1}{\mu_f - 1}. \tag{2}$$

式中: δ_m 为结构构件的最大变形; μ_f 为结构构件在荷载方式为单调加载试验下的极限延性之比值.

文献[8]认为损伤的发展情况取决于一次循环加载中的最大变形和累积损伤与整个损伤的比值,损伤指标如下:

$$D = \frac{e^{k\beta} - 1}{e^k - 1}. \tag{3}$$

在定义损伤值时不仅考虑了构件破坏的结果,也考虑了破坏过程中的损伤积累,提出

一种定义损伤的新方法,即用构件最大位移角定义损伤值,公式表达为

$$D = \left(\frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_i - \delta_y} \right)^2 \tag{4}$$

式中: δ_i 和 δ_y 分别为荷载作用下构件最大位移角和屈服时位移角; δ_m 为荷载作用下构件实际最大位移角。

2.2 权重系数的定义

权重系数通过层次分析法获得,运用 yaahp 软件,构造最底层要素为每个构件,决策层为构件权重,输入判断矩阵,一般认为角柱 > 边柱 > 中柱、下层 > 上层,得到每个要素的权重系数。

2.3 损伤指数的定义

选取损伤指数作为评价结构损伤的指标,从两方面考虑损伤指数的定义:一是结构构件对抵抗结构破坏的贡献率,即权重;另一方面是灾害对结构的破坏作用,即损伤值^[9-12]。用构件损伤值与构件权重系数的乘积定义损伤指数:

$$I_i = D_i \cdot \omega_i, i = 1, 2, \dots, n. \tag{5}$$

式中: D_i 为 i 构件的损伤值; ω_i 为 i 构件的权重系数。

整体损伤指数 I 计算公式为

$$I = \sum_{i=1}^n I_i. \tag{6}$$

3 算例分析

3.1 工程概况

已知某酒店大厅改造部分为钢结构,主要由空间框桁架构成,最大跨度 24.9 m,最大高度 44.2 m,底部共有 9 个柱,其中 7 个柱与原有建筑结构刚性连接,2 个柱与原有建筑结构铰接,顶部与原有建筑结构有 2 个铰接连接处。恒荷载:玻璃幕墙恒载取 1.2 kPa(含玻璃幕墙及设备荷载);钢结构自重由软件自动计算。屋面活荷载取 0.3 kPa,雪荷载取 0.55 kPa,风荷载取基本风压 0.55 kPa。体系系数取值 1.3,抗震设防烈度为 7

度,设计地震分组为第 1 组,Ⅱ类场地土。在 sap2000 结构分析软件中建立分析模型(见图 1)。

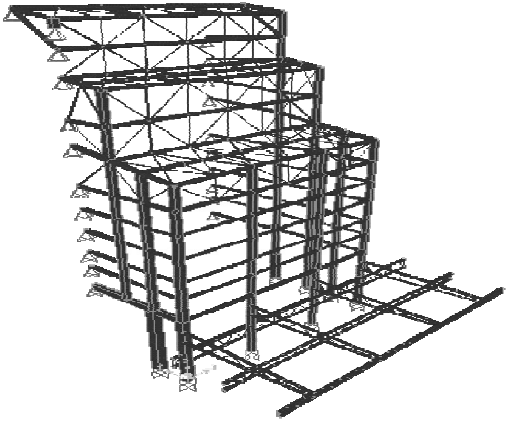


图 1 分析模型 3D 立面图

Fig. 1 3D map of analysis model

3.2 脉动风速时程曲线

模拟脉动风速时程曲线的方法有 3 种:谐波叠加法、线性滤波法和小波分析法^[13-15]。采用目前应用较多的线性滤波法中的脉动风速自回归法(AR 模型)随机风场的脉动风速时程进行模拟。基于线性滤波法模拟脉动风速的原理及过程,结合我国结构荷载规范采用的达文波特风速谱通过 MATLAB 软件编制程序,可以得到该地区标准高度 10 m 处的脉动风速时程曲线如图 2 所示。

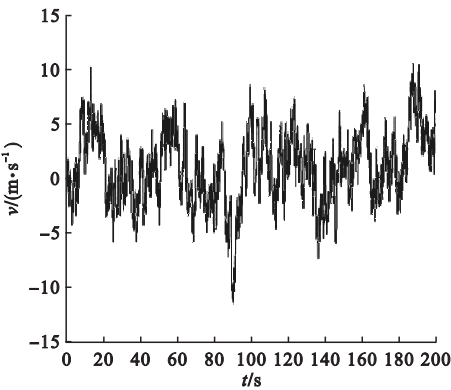


图 2 10 m 高度处脉动风速时程曲线

Fig. 2 Pulsating wind speed time history curve of 10 m height

因为风具有随机性,所以只要模拟脉动

风速的计算功率谱与目标功率谱相吻合就可以判定脉动风速模拟与实际相符.取标准高度 10 m 处的脉动风速作为分析目标,模拟脉动风速的计算功率谱与目标功率谱(达文波特谱)所设定的脉动风速特征进行对比,结果如图 3 所示.可知模拟脉动风速的计算功率谱与目标功率谱吻合,由此说明脉动风速自回归 AR 模型可以有效地模拟脉动风.

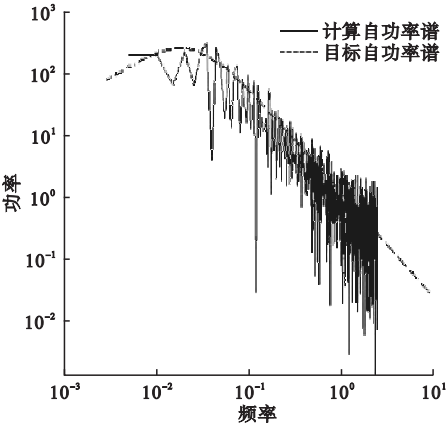


图3 脉动风速功率谱

Fig.3 Power spectral density of fluctuating wind

3.3 易损性分析

考虑 0°和 90°风向角两个方向上的风荷载效应,分析时选用 Davenport 谱,地貌类别取 B 类,地面粗糙度系数取 0.16,AR 模型阶数取 4,时程曲线时间间隔取 0.1 s,风速谱样本总长度取 30 s.模拟风速范围取 20 ~ 70 m/s.风速按照 20 m/s、30 m/s、40 m/s、45 m/s、50 m/s、60 m/s、70 m/s 共 7 个名义风速进行调整,输入结构中进行非线性动力时程分析,得到风灾作用下结构构件的实际最大位移角,通过式(4)求得结构构件的损伤值,再与层次分析法求得构件的权重系数相乘,进而根据式(5)求得结构构件的损伤指数,将所有结构构件的损伤指数加和得到结构的整体损伤指数.

根据以往灾害实例并结合本损伤模型的特点^[16],以结构的整体损伤指数为控制标准,即性能目标,确定结构的破坏状态.不同

破坏状态的划分及相应的量化标准见表 1.

表1 不同破坏等级对应的损伤指数
Table 1 Damage index corresponding to different grades

损伤程度	损伤指数
基本完好	0 ~ 0.20
轻微破坏	0.2 ~ 0.4
中等破坏	0.4 ~ 0.65
严重破坏	0.65 ~ 0.9
倒塌	≥ 0.9

运用分析软件 Origin 对风速 v 和它对应的结构整体损伤指数 I 进行回归分析,可得到损伤值为

$$\ln(I) = -5.289\,54 + 1.000\,36 \ln(v).$$

(7)

由此可知,结构的整体损伤指数随 PGA 的增大而增大,且呈对数线性关系.

假设结构的反应概率函数用对数正态分布函数表示,此函数由结构反应均值 \bar{d} 和对数标准值 β_d 来表示:

$$d = \ln(\bar{d}, \beta_d).$$

(8)

同理,结构的能力参数概率函数 c 也可以用对数正态分布的函数来描述,两个参数分别是能力参数均值 \bar{c} 和对数标准差 β_c ,可描述如下式:

$$c = \ln(\bar{c}, \beta_c).$$

(9)

结构易损性曲线描述不同强度风的作用下,结构响应超过结构破坏阶段所定义的结构能力的条件概率,可以通过式(10)进行计算:

$$P_f = P(c \leq d).$$

(10)

结构能力 c 和结构反应 d 服从对数正态分布,所以结构破坏阶段的失效概率 P_f 为

$$P_f(v) = \varphi\left[\frac{\ln \bar{d} - \ln \bar{c}}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right].$$

(11)

将式(7)带入式(11)得:

$$P_f(v) = \varphi \times \left[\frac{-5\,028\,954 + 1.000\,36 \ln(v) - \ln \bar{c}}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right].$$

(12)

式中: β_c 和 β_d 分别为结构承载力的对数标准差和结构反应的对数标准差,对于钢结构 $\sqrt{\beta_c^2+\beta_d^2}$ 取0.4,将其代入式(12),可得0°风

向角下结构不同破坏状态的超越概率见表2.同理求得90°风向角的不同破坏状态超越概率见表3.

表2 0°风向角不同破坏状态超越概率

风速/(m·s ⁻¹)	P_f			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
20	0.043 8	$2.896\ 81\times 10^{-4}$	$1.620\ 96\times 10^{-6}$	2.2703×10^{-8}
30	0.243 78	0.007 61	$1.358\ 76\times 10^{-4}$	4.20652×10^{-6}
40	0.510 08	0.043 85	0.001 74	$9.388\ 37\times 10^{-5}$
50	0.720 16	0.125 17	0.009 06	$7.443\ 68\times 10^{-4}$
60	0.850 67	0.243 97	0.028 24	0.003 26
70	0.922 89	0.379 02	0.064 03	0.009 76

表3 90°风向角不同破坏状态超越概率

风速/(m·s ⁻¹)	P_f			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
20	0.023 5	$2.708\ 73\times 10^{-4}$	$1.098\ 27\times 10^{-6}$	$1.789\ 02\times 10^{-8}$
30	0.203 53	0.003 76	$1.098\ 62\times 10^{-4}$	$3.660\ 98\times 10^{-6}$
40	0.487 12	0.033 65	0.001 35	$9.098\ 93\times 10^{-5}$
50	0.695 03	0.088 72	0.005 64	$7.009\ 7\times 10^{-4}$
60	0.836 9	0.189 87	0.023 09	0.001 22
70	0.902 92	0.287 66	0.058 81	0.005 38

以风速 v 为横坐标,以不同破坏状态的超越概率 P_f 为纵坐标绘制易损性曲线如图4、图5所示.

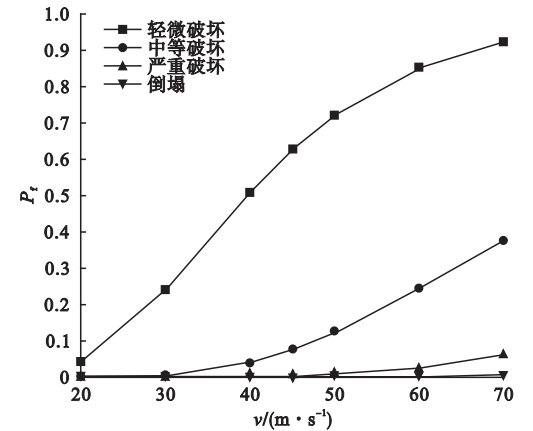


图4 0°风向角风灾易损性曲线

Fig.4 Wind disaster vulnerability curves at 0° wind direction angle

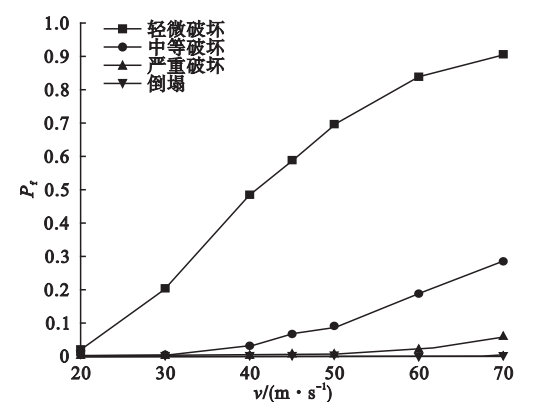


图5 90°风向角风灾易损性曲线

Fig.5 Wind disaster vulnerability curves at 90° wind direction angle

从图4中可以看出,在0°风向角下,当风速达到50 m/s时,结构发生轻微破坏的概率为72%,严重破坏的概率和倒塌的概率都很小,这说明在风灾作用下该结构抗倒塌能力较强,但

随着风速的增大结构发生破坏的概率明显增大,在结构的抗风灾维护中应多予以考虑.

从图5中可以看出,90°风向角下的风灾易损性曲线与0°风向角下的相似.当风速达到50 m/s时,结构发生轻微破坏的概率为69%,发生中等破坏的概率为8%,发生严重破坏和倒塌的概率微乎其微.将图4与图5相比较,可得在相同风速等级下,超越不同破坏状态的概率90°风向角比0°风向角略低,这与实际情况相符.

笔者用传统方法分析0°风向角下结构的易损性.根据大量实验和灾害统计资料给出不同破坏状态的层间位移角限值(见表4).

表5 不同破坏状态超越概率
Table 5 Probability of beyond the different damage states

风速/(m·s ⁻¹)	P_f			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
20	0.194 7	$1.547\ 32 \times 10^{-4}$	$7.576\ 56 \times 10^{-6}$	$2.631\ 79 \times 10^{-8}$
30	0.560 84	0.004 75	$4.621\ 23 \times 10^{-4}$	$4.747\ 98 \times 10^{-6}$
40	0.808 51	0.030 46	0.004 75	$1.040\ 3 \times 10^{-4}$
45	0.878 38	0.057 1	0.010 76	$3.194\ 74 \times 10^{-4}$
50	0.923 7	0.094 06	0.020 91	$8.133\ 53 \times 10^{-4}$
60	0.970 37	0.194 82	0.057 11	0.003 52
70	0.988 45	0.317 45	0.116 23	0.010 45

以风速 v 为横坐标,以不同破坏状态超越概率 P_f 为纵坐标绘制易损性曲线如图6所示.

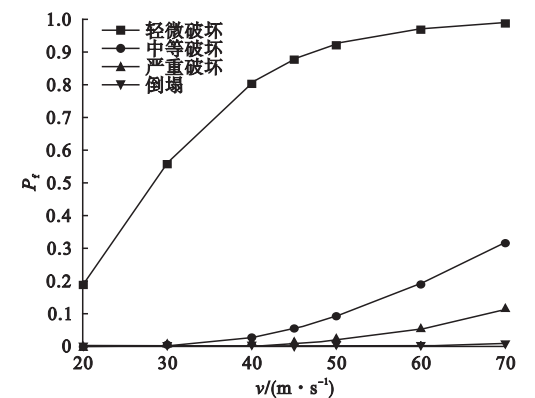


图6 传统方法风灾易损性曲线
Fig. 6 Wind disaster vulnerability curves by traditional methods

将笔者提出的方法与传统方法得出的易损性曲线相比较,并结合结构破坏的一般规律可以得出,风荷载作用初期,结构抵抗破坏的能力持续增加,超过临界应力时,增加幅度

表4 不同破坏等级对应的层间位移角
Table 4 Storey deformation corresponding to different damage grades

损伤程度	层间位移角
基本完好	0~0.4
轻微破坏	0.4~1.2
中等破坏	1.2~1.6
严重破坏	1.6~2.5
倒塌	≥2.5

通过回归分析,可得到损伤指数对数与风速对数的线性关系式如下

$$\ln(I) = -4.256\ 788\ 3 + 1.000\ 16 \times \ln(v). \quad (13)$$

将式(13)带入式(12),计算出结构超越不同破坏状态的概率,列于表5.

呈下降趋势.传统方法对于风灾破坏的预测更保守,笔者提出的方法更贴近于实际.

4 结 论

(1)定义损伤指数时考虑了构件权重系数,计算了各个构件对结构的重要性,弥补了以往研究在结构抵抗破坏过程中将构件的贡献率同一化的不足.

(2)与传统方法相比,笔者通过考虑权重系数,得到的风灾易损性曲线更能表现结构的抗风性能.

(3)通过风灾易损性曲线的分析得出,结构具有较强的抗风能力,但强风作用下也比较容易发生破坏,在抗风设计时应引起足够的重视.

参考文献

[1] HENDERSON D J, GINGER J D. Vulnerabili-

- ty model of an Australian high-set house subjected to cyclonic wind loading[J]. Wind & structures, 2007, 10(3): 269 - 285.
- [2] 宫文壮. 广东沿海地区村镇低矮房屋台风易损性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
(GONG Wenzhuang. Study on typhoon vulnerability for low-rise building in coastal arrears of Guangdong[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2009.)
- [3] 郑山锁, 杨威, 杨丰, 等. 基于多元增量动力分析(MIDA)方法的RC核心筒结构地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 117 - 123.
(ZHENG Shansuo, YANG Wei, YANG Feng, et al. Seismic fragility analysis for RC core walls structure based on MIDA method[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(1): 117 - 123.)
- [4] 周娜, 刘海卿. 框架结构地震损伤演化过程数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 396 - 399.
(ZHOU Na, LIU Haiqing. Damage evolution process of frame structure in earthquake[J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2011, 30(3): 396 - 399.)
- [5] 王毅, 陈艾荣. 基于小波方法的随机脉动风模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 427 - 731.
(WANG Yi, CHEN Airong. Simulation of random fluctuating wind speed based on wavelet method[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2005, 33(4): 427 - 731.)
- [6] 宋芳芳, 欧进萍. 轻钢结构工业厂房风灾损伤估计与预测[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 71 - 80.
(SONG Fangfang, OU Jinping. Wind damage estimation and prediction of light steel industrial buildings[J]. Journal of civil architectural and environmental engineering, 2009, 31(6): 71 - 80.)
- [7] 肖玉凤. 基于数值模拟的东南沿海台风危险性分析及轻钢结构风灾易损性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(XIAO Yufeng. Typhoon wind hazard analysis based on numerical simulation and fragility of light-gauge steel structure in southeast China coastal regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [8] 朱健, 谭平, 卜国雄, 等. 钢筋混凝土土层框架结构易损性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 109 - 116.
(ZHU Jian, TAN Ping, BU Guoxiong, et al. Analyzing seismic fragility of typical low-rise RC frame buildings[J]. Journal of Huazhong university of science and technology (natural science edition), 2010, 38(5): 109 - 116.)
- [9] 李宁, 杨博, 姜绍飞. 基于构件重要性系数的结构易损性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 83 - 86.
(LI Ning, YANG Bo, JIANG Shaofei. Vulnerability analysis method based on important factors of members[J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2010, 29(1): 83 - 86.)
- [10] 赵明伟, 顾明. 轻型钢结构风灾易损性概率分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3609 - 3618.
(ZHAO Mingwei, GU Ming. Probabilistic wind vulnerability analysis of light-weight steel buildings[J]. Journal of central south university (science and technology), 2012, 43(9): 3609 - 3618.)
- [11] 艾晓秋, 秦彤. 城市区域风易损结构风灾损失分析研究[J]. 灾害学, 2010, 25(增刊): 216 - 219.
(AI Xiaochu, QIN Tong. Research on the wind damage loss of wind vulnerable structures in urban Area[J]. Journal of catastrophology, 2010, 25(S): 216 - 219.)
- [12] 李阔, 李国胜. 广东沿海地区风暴潮易损性评估[J]. 热带地理, 2011, 31(2): 153 - 158.
(LI Kuo, LI Guosheng. A storm surge vulnerability assessment for coastal Guangdong[J]. Tropical geography, 2011, 31(2): 153 - 158.)
- [13] 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 等. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展[J]. 灾害学, 2014(4): 129 - 135.
(WU Liyun, HE Dongjin, HONG Wei, et al. Advances of research on natural disaster risk assessment and disaster vulnerability[J]. Journal of catastrophology, 2014(4): 129 - 135.)
- [14] 苏启旺, 许浒, 吴昊, 等. 砖砌体结构层间位移角的探讨[J]. 土木工程学报, 2013(增刊1): 111 - 116.
(SU Qiwang, XU Hu, WU Hao, et al. Research on inter-story displacement angle of brick masonry structures[J]. China civil engineering journal, 2013(S1): 111 - 116.)
- [15] CIMELLARO G P, REINHORN A M, D'AMBRISI A, et al. Fragility analysis and seismic record selection[J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(3): 379 - 390.
- [16] ERBERIK M A. Seismic Fragility Analysis[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2015.