

基于概率可靠度的输电塔风灾易损性分析*

范存新¹ 葛义娇¹ 谢丽宇²

(1. 苏州科技学院结构工程重点实验室, 江苏苏州 215011;

2. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 以某猫头形高压输电塔为研究对象, 基于概率可靠度的研究方法对其进行风灾易损性分析。通过计算, 绘制输电塔处于不同破坏状态的风灾易损性曲线。通过对该塔两个方向上风灾易损性曲线的分析, 得出结构作用效应和结构抗力的分布形态均服从对数正态分布规律。在强风作用下, 该塔较易发生破坏。

关键词: 风灾易损性; 输电塔; 结构可靠度

DOI: 10.13204/j.gyjz201507018

WIND DISASTER VULNERABILITY ANALYSIS OF THE TRANSMISSION TOWER BASED ON PROBABILITY RELIABILITY

Fan Cunxin¹ Ge Yijiao¹ Xie Liyu²

(1. Key Laboratory of Structure Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, a wind disaster vulnerability analysis of a cat-head-shaped transmission tower based on probability reliability was presented. The diagrams of the wind disaster vulnerability of the transmission tower in different damage state were drawn. Based on the analysis of the wind disaster vulnerability of the transmission tower in two direction, it is clear that the structural response and the structural bearing capacity follow a log normal distribution. And the tower can easily be damaged by the strong wind.

Keywords: wind disaster vulnerability; transmission tower; structural reliability

输电塔作为输电线路的重要组成部分, 其结构形式一般为格构式塔架, 具有塔体结构高、整体结构柔性强的特点, 是一种典型的轻柔高耸结构, 对风荷载的作用十分敏感。在强风作用下, 输电塔塔架倒塌、损毁事故时有发生, 风灾是导致电力系统故障的自然灾害当中最为严重的一种^[1]。架空高压输电线路作为重要的生命线工程结构, 它的破坏会导致电网瘫痪, 直接影响到生产建设与生活秩序, 给社会和人民财产带来严重的损失, 因此对输电塔结构进行抗风研究有重要的意义, 特别是对输电塔结构进行风灾损失评估, 即进行结构风灾易损性分析尤为重要。

近年来, 用结构风灾易损性描述结构破坏程度与风强度的关系方面, 国内外学者已取得了一定的研究成果。其中, Cope 等针对美国某地区的木结构房屋展开了风灾易损性研究, 然后通过计算得到了该类结构的超越易损性曲线^[2]; Henderson 和 Ginger 假定构件的连接强度和风荷载各项系数的概率分布类型均为对数正态分布, 从而计算得到构件的风灾

易损性曲线^[3]; 安水晶通过台风灾后调查结果对两类典型户外广告牌结构的破坏形式进行了分类统计, 通过基于概率可靠度的方法对广告牌在台风下的局部易损性和整体易损性进行了研究^[4]; 赵明伟针对中国典型轻型钢结构建筑, 提出风灾易损性的概率分析方法, 使用蒙特卡洛模拟得到各类构件及建筑整体的超越破坏易损性曲线^[5]。

高压输电塔的结构形式相对复杂, 表现出较强的材料非线性和几何非线性, 对其进行风灾易损性分析具有一定的难度, 目前尚未见到相关研究成果; 因此, 本文以某猫头形高压输电塔为研究对象, 采用基于概率可靠度的研究方法对其进行风灾易损性分析。

* 国家自然科学基金项目(51208377); 教育部留学回国人员科研启动基金(第48批)。

第一作者: 范存新, 男, 1968年出生, 教授, 博士。

电子邮箱: fan@mail.usts.edu.cn

收稿日期: 2014-12-02

1 基于概率可靠度的结构风灾易损性分析流程

土木工程领域中结构风灾易损性的研究,主要是评估台风强度与结构破坏程度之间的关系。基于概率意义上的结构可靠度法已成为目前比较主流的结构风灾易损性评估方法。该方法通过确定结构的破坏模式,然后结合结构的风荷载效应和结构的抗力指标,基于结构可靠度理论,通过数值模拟分析以及对结果数据的统计分析,建立得到风速和结构破坏状态之间的关系。

结构的风灾易损性通常用易损性曲线来描述。风灾易损性曲线表示在不同强度等级的台风作用下,结构反应超过某种破坏状态所定义的结构承载能力的条件概率^[6],该曲线的横坐标一般为风速,纵坐标为结构各个破坏状态的失效概率。本文采用基于概率可靠度的方法对输电塔进行风灾易损性研究,通过对结构进行抗风性能的概率分析和随机动力时程分析,绘制出输电塔结构的超越破坏易损性曲线,具体的分析步骤如下:

- 1) 建立合理的输电塔结构非线性力学模型;
- 2) 采用自动回归线性滤波法(AR模型)模拟输电塔的脉动风速时程曲线,并通过计算换算为风荷载时程曲线;
- 3) 考虑结构材料性能和构件几何参数的不确定性,通过拉丁超立方抽样(LHS)得到一系列随机“风速-结构”样本;
- 4) 对每一个“风速-结构”样本进行非线性屈曲分析,定义结构的破坏状态并建立相应的结构抗力概率函数;
- 5) 对每一个“风速-结构”样本进行非线性时程反应分析,从而获得一系列结构作用效应数据,并对这些数据进行统计分析;
- 6) 通过对模拟结果数据的回归分析得到风速与结构作用效应的函数关系;
- 7) 计算在不同风速水平下结构作用效应超过某一特定破坏状态所定义的结构承载力的条件概率;
- 8) 绘制输电塔在0°风向角(顺导线方向)和90°风向角(垂直导线方向)下相应于不同破坏状态的风灾易损性曲线。

2 计算模型

2.1 输电塔有限元模型

基于ANSYS软件,建立了某猫头形输电塔的三维有限元模型,模型具体参数见表1。输电塔各杆件均采用Beam 188梁单元进行模拟,杆件截面为角钢,

基于概率可靠度的输电塔风灾易损性分析——范存新 等

主材采用Q345钢,其他辅材均为Q235钢,考虑材料的非线性,采用理想弹塑性假定,材料的屈服强度采用von Mises准则,强化规则采用双线性随动强化模型(BKIN模型)。约束输电塔塔腿底部4个结点的的所有自由度,建立得到的输电塔模型如图1所示。

表1 模型相关参数
Table 1 Model parameters

塔高/ m	呼高/ m	根开/ m	屈服强 度/MPa	泊松 比	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	屈服后 模量/ GPa
41.5	35	6	345/235	0.3	7 850	206	2.06

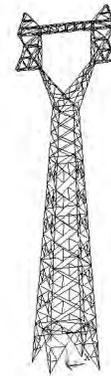


图1 输电塔有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the transmission tower

2.2 破坏状态的定义

采用基于概率可靠度的方法研究输电塔的风灾易损性,在此过程中,需要给出结构处于不同状态下的性能目标,因此,输电塔破坏状态或性能水平的确定是至关重要的。在输电塔结构风灾易损性研究的过程中,确定结构的极限状态方程是最关键同时也是最主要的问题之一,结构的极限状态方程作为性能目标的量化形式,是由结构所要达到的预期性能目标确定的。结构自身及其构件在使用和失效的过程中,内力是连续变化的,而进行性能分析时,只需给出结构在使用状态和失效状态的几处界限点,由此可见,性能目标是结构抗力曲线或性能曲线上的几个离散点。

根据文献[7]的相关研究成果,采用输电塔顶部位移角 θ 为控制指标,即性能目标,确定输电塔的破坏状态,计算式如下:

$$\theta = \frac{u}{H} \quad (1)$$

式中: u 为顶部位移; H 为输电塔高度。

具体破坏状态的划分及相应的量化标准如表2所示,其中 θ_{ms} 为屈服点位移转角,表示严重破坏状态的界限值; θ_{co} 为极限点位移转角,表示倒塌破坏的界限值,二者均可通过非线性屈曲分析得到。

表 2 破坏状态定义

破坏状态	位移角限值 /rad
轻微破坏	$0.5\theta_{ma} \leq \theta < \theta_{ma}$
严重破坏	$\theta_{ma} \leq \theta < \theta_{co}$
倒塌破坏	$\theta \geq \theta_{co}$

3 数值模拟分析

3.1 输电塔抗风性能的概率性分析

首先考虑随机变异性,假定材料的弹性模量、屈服强度、泊松比、密度等均服从正态分布,设定均值为设计值,变异系数为 0.05,截面及与几何尺寸有关的参数,由于其误差范围较小,同时为减轻计算压力,假定其服从均匀分布,上下浮动范围为 1%。然后采用蒙特卡洛模拟法结合非线性屈曲分析方法,基于 ANSYS 的概率设计(PDS)模块对输电塔进行抗风性能的概率分析,对 0°和 90°风向角下输电塔处于三种破坏状态界限值的频度进行统计分析并画出频度直方图,结果分别如图 2—图 4 所示。

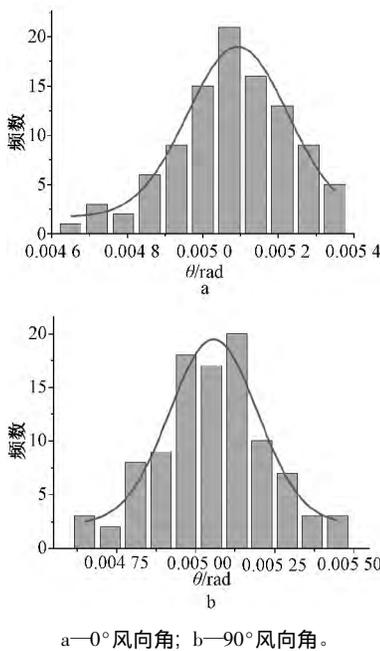


图 2 轻微破坏状态界限值的频度统计

Fig. 2 Frequency statistic of the threshold value in slight damage state

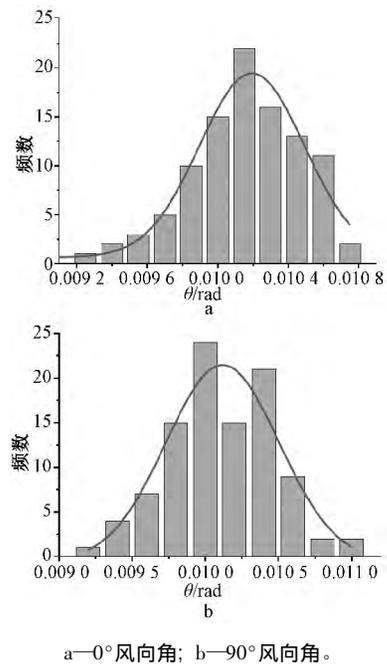


图 3 严重破坏状态界限值的频度统计

Fig. 3 Frequency statistic of the threshold value in serious damage state

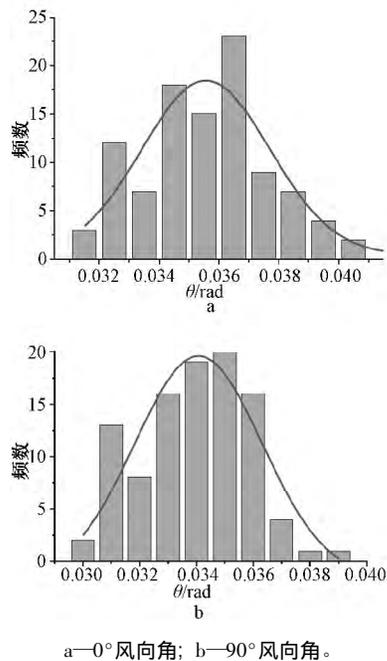


图 4 倒塌状态界限值的频度统计

Fig. 4 Frequency statistic of the threshold value in collapsing state

观察图 2—图 4 可以发现,轻微破坏状态和严重破坏状态的界限值,频度分布形态较好,而倒塌状态的界限值,数据离散程度较大。这说明,在结构处于濒临倒塌状态,抗力达到极限值时,结构的不确定性显著增大,这与实际情况也是吻合的。由本文分析数据可知,输电塔在风荷载作用下处于不同破坏状态的界限值均服从双参数对数正态

分布。

通过对结果数据进行统计分析,得到 0°和 90°风向角下输电塔处于不同破坏状态的顶部位移角的均值和对数标准差如表 3 和表 4 所示。

3.2 输电塔随机动力时程分析

在 0°和 90°风向角下,考虑结构材料性能和构件几何参数的不确定性^[8-10],利用 ANSYS 软件对输电塔进行随机动力时程分析,计算结果绘于图 5

表3 0°风向角下顶部位移角θ的统计参数
Table 3 Statistic parameters of the θ at 0° wind direction angle

破坏状态	顶部位移角均值	顶部位移角对数标准差
轻微破坏	0.005 0	0.031 4
严重破坏	0.010 1	0.031 4
倒塌破坏	0.035 1	0.059 8

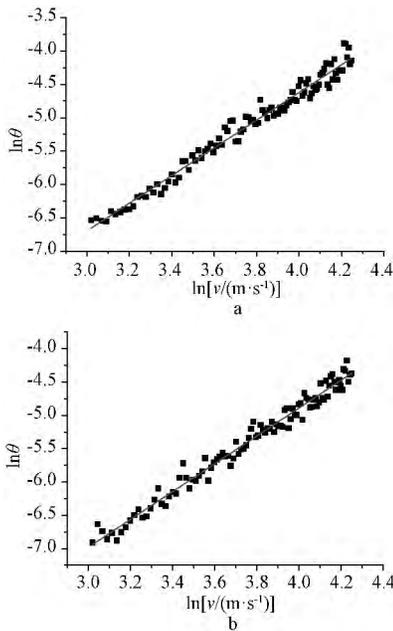
表4 90°风向角下顶部位移角θ的统计参数
Table 4 Statistic parameters of the θ at 90° wind direction angle

破坏状态	顶部位移角均值	顶部位移角对数标准差
轻微破坏	0.005 0	0.042 1
严重破坏	0.010 0	0.042 1
倒塌破坏	0.033 5	0.057 1

中,其中横坐标和纵坐标分别为顶部位移角θ和风速v的对数值。通过对以风速为变量的结构作用效应数据的回归分析,可以得到0°和90°风向角下的结构作用效应分别为式(2)和式(3):

$$\ln\theta = 2.0738 \ln v - 12.9177 \quad (2)$$

$$\ln\theta = 2.0934 \ln v - 13.2640 \quad (3)$$



a—0°风向角; b—90°风向角。
图5 输电塔顶部位移角θ的回归分析
Fig.5 Regression analysis of the θ of the transmission tower

在0°和90°风向角下,对输电塔进行随机动力时程分析后得到顶部位移角θ,通过频度统计分析得到θ的频度分布如图6和图7所示。可以看出,结构作用效应数据分布形态较好地符合对数正态分布,这也与文献[11]的研究结果相吻合。

通过对0°和90°风向角下顶部位移角θ数据的基于概率可靠度的输电塔风灾易损性分析——范存新 等

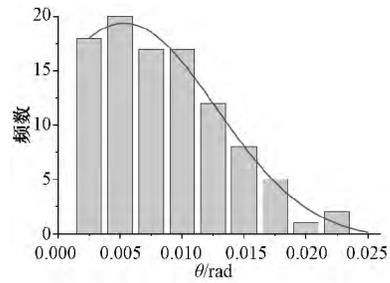


图6 0°风向角下θ频度统计

Fig.6 Frequency statistic of the θ at 0° wind direction angle

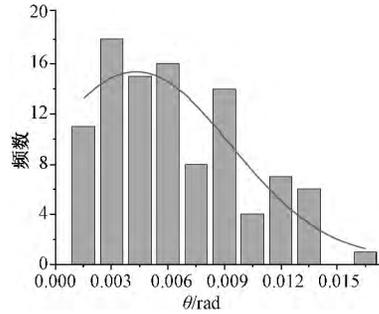


图7 90°风向角下θ频度统计

Fig.7 Frequency statistic of the θ at 90° wind direction angle

统计分析可以得到,结构作用效应的均值和对数标准差见表5。

表5 结构作用效应统计数据

Table 5 Statistic data of the response of the structure

风向角/(°)	结构作用效应均值 θ	结构作用效应对数标准差 β
0	0.007 5	0.729 3
90	0.005 7	0.735 6

4 输电塔风灾易损性曲线

结构的风灾易损性曲线表示在不同强度水平的风荷载作用下结构作用效应超过特定破坏阶段所定义的结构抗力的条件概率。结构作用效应 S_d 超过结构抗力 R_c 的概率可以按照式(4)计算^[12]:

$$P_f = P_r\left(\frac{R_c}{S_d} \leq 1\right) \quad (4)$$

根据本文数值模拟结果的数据统计分析, R_c 和 S_d 都服从对数正态分布,所以特定阶段的失效概率 P_f 可由式(5)确定:

$$P_f = \Phi\left[\frac{-\ln\left(\frac{\bar{R}_c}{\bar{S}_d}\right)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right] \quad (5)$$

式中: \bar{R}_c 为抗力均值; \bar{S}_d 为结构作用效应; β_c 为抗力对数标准差; β_d 为结构作用效应对数标准差; Φ 为标准正态分布函数。

通过分析计算可以得到0°风向角和90°风向角

下的风灾易损性曲线。

4.1 0°风向角下的易损性曲线

根据前面数值模拟的结果,将结构作用效应与风速的关系式(3)以及结构抗力的相关取值(见表3)分别代入式(5),分别得到0°风向角下输电塔轻微破坏的失效概率算式(6)、严重破坏的失效概率算式(7)和倒塌的失效概率算式(8):

$$p_{f1} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{2.4542 \times 10^{-6} v^{2.0738}}{\theta_{mi}} \right)}{\sqrt{\beta_{mi}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (6)$$

$$p_{f2} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{2.4542 \times 10^{-6} v^{2.0738}}{\theta_{ma}} \right)}{\sqrt{\beta_{ma}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (7)$$

$$p_{f3} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{2.4542 \times 10^{-6} v^{2.0738}}{\theta_{co}} \right)}{\sqrt{\beta_{co}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (8)$$

式中: θ_{mi} 为轻微破坏位移角界限值。

将对不同风速水平下,结构处于不同破坏状态的失效概率计算出来,并绘制成易损性曲线,如图8所示。

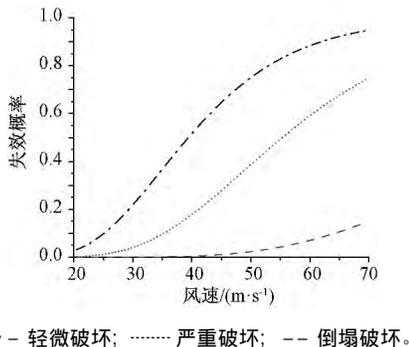


图8 0°风向角下的风灾易损性曲线

Fig. 8 The diagram of the wind disaster vulnerability at 0° wind direction angle

从图8中可以看出,在0°风向角下,当风速达到50 m/s时,该输电塔发生轻微破坏的概率为75%,严重破坏的概率为39%,倒塌的概率不足3%,这说明该输电塔抗倒塌能力较强,但在强风作用下也较易发生破坏,进行抗风设计时应引起足够的重视。

4.2 90°风向角下的易损性曲线

同样根据前面数值模拟的结果,将结构作用效应与风速的关系式(4)以及结构抗力的相关取值(见表4)分别代入式(5),分别得到90°风向角下输电塔轻微破坏的失效概率算式(9)、严重破坏的失效概率算式(10)和倒塌的失效概率算式(11)。

$$p_{f1} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{1.7359 \times 10^{-6} v^{2.0934}}{\theta_{mi}} \right)}{\sqrt{\beta_{mi}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (9)$$

$$p_{f2} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{1.7359 \times 10^{-6} v^{2.0934}}{\theta_{ma}} \right)}{\sqrt{\beta_{ma}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (10)$$

$$p_{f3} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{1.7359 \times 10^{-6} v^{2.0934}}{\theta_{co}} \right)}{\sqrt{\beta_{co}^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (11)$$

将不同风速等级下,结构处于不同破坏状态的失效概率计算出来,并绘制成易损性曲线,如图9所示。

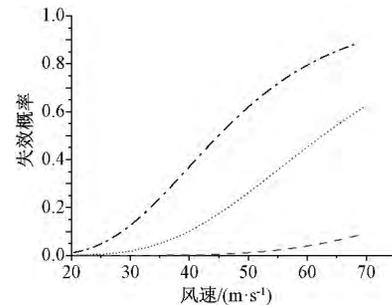


图9 90°风向角下的风灾易损性曲线

Fig. 9 The diagram of the wind disaster vulnerability at 90° wind direction angle

从图9中可以看出,90°风向角下的风灾易损性曲线与0°风向角下的类似。当风速达到50 m/s时,该方向上输电塔发生轻微破坏的概率为62%,严重破坏的概率为26%,倒塌的概率不足2%,在相同的风速等级下,发生特定破坏等级的概率比0°风向角下略低,这与实际情况也是相吻合的。

5 结束语

本文采用基于概率可靠度的研究方法对某猫头形高压输电塔进行了风灾易损性分析。通过对输电塔进行随机动力时程分析和抗风性能的概率分析,分别获得结构作用效应和结构抗力的相关统计参数。对数值模拟结果数据的统计分析表明,结构作用效应和结构抗力的分布形态均服从对数正态分布规律。针对输电塔三种破坏状态,计算了不同风速下结构作用效应超过结构抗力的条件概率,得到输电塔0°和90°风向角下的风灾易损性曲线。通过对两个方向上风灾易损性曲线的分析得出,该输电塔的抗倒塌能力较强,但强风作用下,仍较易发生破坏,在抗风设计时应引起足够的重视。

(下转第94页)

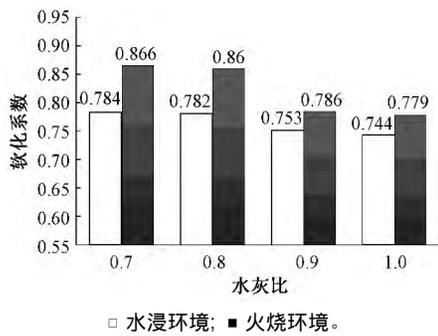


图6 水灰比对水浸、火烧软化影响

Fig. 6 The effect of water-cement ratio on soaking and fire softening

5 结束语

1) 再生墙材抗折试验断面破坏形态与其抗压试验断面破坏形态基本相同,即其断裂模式均为基材破坏和界面脱落。此外,水浸及火烧后的再生墙材试块抗压试验破坏形态与干燥状态下的再生墙材试块抗压破坏形态相同。

2) 影响普通环境下再生墙材的抗压强度因素的主次顺序为:水灰比、骨灰比、石灰掺量、骨料中砖粉掺量、取代率。水灰比是影响抗压强度的最主要因素,骨灰比和石灰掺量次之,而取代率和骨料中砖粉掺量影响曲线呈现波动趋势,故其影响不明显。对水浸、火烧后再生墙材力学强度进行方差和极差分析,得出同样的规律。因此,严格控制水灰比对再生骨料墙材的力学性能有重要的意义。

3) 对水浸、火烧后再生墙材软化系数影响最显著的因素均为骨料中砖粉掺量,对于吸水后的试件其软化系数随着砖粉掺量的降低而提高,但当骨料中砖粉掺量降至0%时,软化系数迅速降低;火烧后

再生墙材的软化系数随着砖粉掺量的降低呈现明显的下降趋势。

参考文献

- [1] Poon C S, Shui Z H, Lam L, et al. Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 31-36.
- [2] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, et al. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 735-742.
- [3] Sasha Achtemichuk, Justin Hubbard. The Utilization of Recycled Concrete Aggregate to Produce Controlled Low-Strength Materials Without Using Portland Cement [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(8): 564-569.
- [4] Amnon Katz. Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(5): 703-711.
- [5] 肖建庄, 杜江涛. 不同再生粗集料单轴受压应力-应变全曲线 [J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 111-115.
- [6] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.
- [7] 寇世聪, 潘智生. 不同强度混凝土制造的再生骨料对高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(1): 7-11.
- [8] 朋改非, 黄艳竹, 张九峰. 骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 80-84.
- [9] 谢丽丽, 杨薇薇, 刘立新. 工业废渣再生混凝土多孔砖配合比的试验研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2007, 28(2): 27-29.
- [10] 王武祥, 廖礼平, 王爱军. 建筑废弃物再生原料生产混凝土砌块的技术研究 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010(4): 4-7.

(上接第88页)

参考文献

- [1] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.
- [2] Cope A D. Predicting the Vulnerability of Typical Residential Buildings to Hurricane Damage [D]. Gainesville: University of Florida, 2004.
- [3] Henderson D J, Ginger J D. Vulnerability Model of an Australian High-Set House Subjected to Cyclonic Wind Loading [J]. Wind & Structures, 2007, 10(3): 269-285.
- [4] 安水晶. 单立柱广告牌结构风灾易损性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [5] 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.
- [6] Unanwa C O. A Model for Probable Maximum Loss in Hurricanes [D]. Lubbock: Texas Tech University, 1997.
- [7] 韩枫. 特高压输电塔线体系的抗风可靠性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [8] Melchers R E. Structural Reliability Analysis and Prediction [M]. John Wiley & Sons, 1999: 34-37.
- [9] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural Reliability Methods [M]. New York: Wiley, 1996.
- [10] Faber M H, Stewart M G. Risk Assessment for Civil Engineering Facilities: Critical Overview and Discussion [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 80(2): 173-184.
- [11] 龙坪. 土木工程结构台风易损性评估研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] 曹秀娟. 高层建筑结构弹塑性分析方法的研究及应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008.