

建筑防灾系列丛书

漫谈建筑与风雪灾

MANTAN JIANZHU YU FENGXUEZAI

建筑防灾系列丛书编委会 主编

中国建筑工程出版社

建筑防灾系列丛书

漫谈建筑与风雪灾

建筑防灾系列丛书编委会 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

漫谈建筑与风雪灾/建筑防灾系列丛书编委会
主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 9
(建筑防灾系列丛书)
ISBN 978-7-112-19678-4

I. ①漫… II. ①建… III. ①建筑物-风灾-防灾-
普及读物 ②建筑物-雪害-防灾-普及读物 IV.
①TU89-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 194946 号

责任编辑: 张幼平

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 李欣慰

建筑防灾系列丛书
漫谈建筑与风雪灾

建筑防灾系列丛书编委会 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 260 千字

2017 年 3 月第一版 2017 年 3 月第一次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-19678-4

(29130)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

建筑防灾系列丛书
Series of Building Disaster Prevention
指导委员会
Steering Committee

主 任：	曾宪新	住房和城乡建设部工程质量安全监管司	副司长	
	王清勤	住房和城乡建设部防灾研究中心	主任	教授级高工
副主任：	张 鹏	住房和城乡建设部工程质量安全监管司抗震处	处长	
	赵基达	中国建筑科学研究院	总工程师	研究员
	贾 抒	住房和城乡建设部工程质量安全监管司技术处	处长	
委 员：	李引擎	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任	研究员
	王翠坤	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任	研究员
	黄世敏	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任	研究员
	高文生	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任	研究员
	金新阳	住房和城乡建设部防灾研究中心专家委员会	副主任	研究员
	宫剑飞	住房和城乡建设部防灾研究中心专家委员会	副主任	研究员
	程志军	中国建筑科学研究院标准处	处长	研究员
	尹 波	中国建筑科学研究院科技处	处长	研究员
	张靖岩	中国建筑科学研究院科技处	副处长	研究员
	王晓锋	中国建筑科学研究院标准处	副处长	研究员

《漫谈建筑与风雪灾》分册编写委员会

主 编：金新阳

副主编：陈 凯 唐 意 许 楠

编 委（以姓氏笔画为序）

严亚林 李宏海 杨立国 何连华 宋张凯 武 林 范 峰 岳煜斐
金 海 钱基宏 符龙彪

随着我国经济的高速发展，城市化进程加快，社会各系统相互依赖程度不断提高，灾害风险以及造成的损失也越来越大，并日益深刻地影响着国家和地区的发展。

我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一。灾害种类多，分布地域广，发生频率高，造成的损失重，总体灾害形势复杂严峻。2016年，我国自然灾害以洪涝、台风、风雹和地质灾害为主，旱灾、地震、低温冷冻、雪灾和森林火灾等灾害也均有不同程度发生。各类自然灾害共造成全国近1.9亿人次受灾，1432人因灾死亡，274人失踪，1608人因灾住院治疗，910.1万人次紧急转移安置，353.8万人次需紧急生活救助；52.1万间房屋倒塌，334万间不同程度损坏；农作物受灾面积2622万公顷，其中绝收290万公顷；直接经济损失5032.9亿元（摘自民政部国家减灾办发布2016年全国自然灾害基本情况）。

我国每年受自然灾害影响的群众多达几亿人次，紧急转移安置和需救助人口数量庞大，从一定意义上说，同自然灾害抗争是我国人类生存发展的永恒课题。正是在这样一种背景之下，人们意识到防灾减灾工作的重要性，国家逐步推进防灾减灾救灾体制机制改革，把防灾减灾救灾作为保障和改善民生、实现经济社会可持续发展的重要举措。

国务院办公厅于2016年12月29日颁布了国家综合防灾减灾规划（2016—2020年），将防灾减灾救灾工作纳入各级国民经济和社会发展规划。规划要求进一步健全防灾减灾救灾体制机制，提升防灾减灾科技和教育水平。中共中央、国务院印发的《关于推进防灾减灾救灾体制机制改革的意见》，对防灾减灾救灾体制机制改革作了全面部署，《意见》明确了防灾减灾救灾体制机制改革的总体要求，提出了健全统筹协调体制、健全属地管理体制、完善社会力量和市场参与机制、全面提升综合减灾能力等改革举措，对推动防灾减灾救灾工作具有里程碑意义。

顺应社会发展需求和国家政策走向，《建筑防灾系列丛书》寻求专业领域的敞开，实现跨领域的成果和科技交流。丛书包括《地震破坏与建筑设计》、《由浅入深认识火灾》、《漫谈建筑与风雪灾》、《城市地质灾害与土地工程利用》。这些分册的内容都紧
此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

扣建筑防灾主题，以介绍防灾减灾科技知识为主，结合与日常应用相关的先进实用技术，以深入浅出的文字和图文并茂的形式，全面解析了当前建筑防灾工作的重点、热点，有利于相关行业的互动参与。

归根到底，《建筑防灾系列丛书》的目的就是要通过技术成果展示的方式，唤起社会各界对防灾减灾工作的高度关注，增强全社会防灾减灾意识，提高各级综合减灾能力，努力实现“从注重灾后救助向注重灾前预防转变，从应对单一灾种向综合减灾转变，从减少灾害损失向减轻灾害风险转变”（引自习近平总书记在唐山抗震救灾和新唐山建设 40 年之际讲话）。

“十三五”时期是我国全面建成小康社会的决胜阶段，也是全面提升防灾减灾救灾能力的关键时期。中国防灾减灾事业是一个涉及国计民生的整体问题，需要社会每一个人的参与，共同建设，共同享有。面临诸多新形势、新任务与新挑战，让我们携手并肩，继续努力，为实现全面建设小康社会，促进和谐社会发展做出更大的贡献！

目 录

第一部分 风灾篇

第1章 风灾概述	3
1.1 历史上两起著名的风毁事故	3
1.2 形形色色的风损事故	6
1.2.1 大跨屋盖结构的风损	6
1.2.2 高层建筑幕墙和保温层的风损	7
1.2.3 输电塔线体系的风损	8
1.2.4 大跨度桥梁的风损	9
第2章 风与大气边界层	11
2.1 大气环流	11
2.2 自由大气的梯度风	13
2.3 描述风特性的几个参数	14
2.4 风暴	16
2.4.1 温带气旋	16
2.4.2 热带气旋风暴	17
2.4.3 小尺度风暴	18
第3章 风对建筑物的作用	21
3.1 风对环境的影响	21
3.1.1 概述	21
3.1.2 建筑风环境的形成机理	22
3.1.3 建筑风环境的评估方法	24
3.1.4 城市风环境的改善	26
3.2 静力风荷载	28
3.2.1 基本风速和基本风压	29
3.2.2 风压高度变化系数	34
3.2.3 风荷载体型系数	40
3.2.4 风荷载局部体型系数与内压系数	44
3.2.5 阵风系数	48
3.3 动力风荷载风振	51
3.3.1 结构顺风向风振计算的基本理论	53

3.3.2	横风向等效风荷载规范计算方法	58
3.3.3	扭转风振等效风荷载计算	60
3.3.4	顺风向、横风向与扭转风荷载的组合	64
3.3.5	大跨屋盖结构的抗风特殊性和规范规定	66
3.3.6	超高层建筑空气动力阻尼	68
第4章	风工程研究方法	71
4.1	近地风特性和结构响应实测	71
4.2	风洞试验	72
4.2.1	风洞试验的基本原理	73
4.2.2	风洞的结构形式和尺寸	76
4.2.3	风洞试验常用设备	77
4.2.4	风洞的动力控制系统与流场指标	78
4.2.5	国内外边界层风洞情况	79
4.2.6	几类风洞试验	84
4.2.7	边界层风洞的重要问题	89
4.3	理论分析	89
4.3.1	时域分析方法	89
4.3.2	频域分析方法	90
4.4	数值模拟	90
4.4.1	行人高度风环境舒适度的评估	93
4.4.2	风致噪声的CFD数值模拟	93
第5章	防风减灾及应急反应	95
5.1	法律法规及工程抗风规范	95
5.1.1	气象法律法规	95
5.1.2	建筑法律法规	100
5.2	城市建筑及构筑物的抗风减灾	102
5.2.1	高层建筑结构抗风	102
5.2.2	大跨屋盖结构抗风	104
5.2.3	围护结构抗风	105
5.2.4	构筑物及广告牌抗风	107
5.3	村镇民居的抗风减灾技术	108
5.3.1	地形及村镇选址	108
5.3.2	民居抗风的基本知识	108
5.3.3	风灾的预报及预警	109
5.3.4	政府风灾应急体系	111
第6章	工程实例	113
6.1	大跨空间结构——武汉站	113

6.1.1 工程概况	113
6.1.2 风洞测压试验	114
6.1.3 数值风洞	118
6.1.4 风致振动分析	120
6.2 高层结构——大连国贸中心大厦	122
6.2.1 工程概况	122
6.2.2 风洞测压试验	123
6.2.3 风洞测力试验	127
6.2.4 风致振动分析	132
6.3 特种结构——宁东物流园悬索	135
6.3.1 工程概况	135
6.3.2 风洞测压试验	135
6.3.3 风致振动分析	136
参考文献	141

第二部分 雪灾篇

第7章 雪灾概述	147
7.1 雪灾调查	147
7.2 建筑遭受雪灾破坏的原因分析	151
7.3 国内外研究现状和发展趋势	152
第8章 雪荷载规范对比及相关研究	155
8.1 国内外雪荷载规范对比	155
8.1.1 雪荷载的基本计算公式	155
8.1.2 单坡屋面	156
8.1.3 双坡屋面	157
8.1.4 拱形屋面	158
8.1.5 高低屋面	159
8.1.6 对比小结	161
8.2 雪荷载相关研究	162
8.2.1 雪荷载分布的研究方法与相似性	162
8.2.2 大型拖曳式水槽	166
8.2.3 雪荷载分布的风洞和水槽模拟试验研究	169
8.2.4 雪荷载分布的数值模拟研究	179
第9章 工程实例	187
9.1 新疆昌吉体育馆雪荷载分布数值模拟	187

9.1.1	几何模型和网格划分	187
9.1.2	主要边界条件的确定	188
9.1.3	数值模拟结果分析	188
9.1.4	小结	191
9.2	鄂尔多斯温室雪荷载数值模拟	191
9.2.1	控制方程和湍流模型的选取	191
9.2.2	几何模型和网格划分	191
9.2.3	主要边界条件的确定	193
9.2.4	计算工况及主要计算结果	193
9.3	两种方法的对比分析	197
	参考文献	198

第一部分 风灾篇

第 1 章 风灾概述

风在自然界中无时无刻不存在着。人类与风的关系极为密切，对风力、风能的认识和利用为人类社会的发展作出了巨大贡献，但频繁、强烈的风灾也带给人类巨大的灾难。风工程专家 Davenport 教授援引联合国的统计资料指出：“约半数以上的自然灾害与风有关。”表 1-1 列出了 1950～1999 年全球（特大型）重大自然灾害统计数据，可以看到风灾是自然灾害中影响最大的一种，给人类带来了巨大的生命和财产威胁。

全球特大型自然灾害统计数据（1950～1999 年）表 1-1

灾难种类	地震	风灾	洪水	其他	合计
灾难次数(次)	68	89	63	14	234
死亡人数(百万人)	0.66	0.63	0.1	0.01	1.4
经济损失(亿美元)	3360	2688	2880	672	9600
保险损失(亿美元)	254	687	85	84	1110

1.1 历史上两起著名的风毁事故

人们对风的认识是逐步深入的。历史上有两起著名的风毁事故，不但极大地加深了人们对风的认识，还催生了一门新的学科的兴起，即所谓“风工程学”。

第一起事故发生在 1940 年的美国。当时在美国华盛顿州西部建成了一座著名的大桥，连接 Tacoma 到大港（Gig Harbor）。这座桥于 1938 年开工建设，1940 年 7 月 1 日建成通车，全长 1810m。但是在通车后仅仅 4 个多月，11 月 7 日，就在 1h 平均速率为 19m/s（约八级）的大风中坍塌了（图 1-1）。巧的是，在大桥发生明显振动时，当地报社的一名编辑恰好路过，并用摄像机记录下了 Tacoma 桥倒塌的全过程，留下了一段珍贵的视频。

事故发生后，研究人员在风洞中模拟了 Tacoma 桥在风作用下的运动。从试验结果来看，风吹过桥梁断面后，气流从桥梁断面边缘脱落后产生了规则的旋涡（即所谓的卡门旋涡）。在周期性脱落的旋涡作用下，桥梁首先会发生竖向振动，不过竖向振动的幅度不会无限增大，因此仅仅是

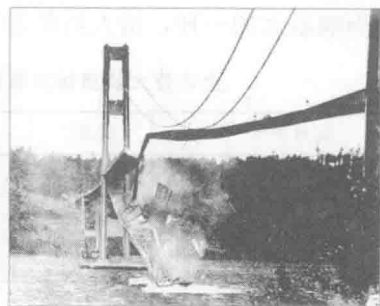
Tacoma 大桥风毁事故的诱因。

真正导致 Tacoma 桥破坏的罪魁祸首是所谓的“颤振”。即风速超过某一数值时，桥面的轻微变形就会导致桥面严重的扭转振动，而且这种振动和风力存在耦合效应，振幅将被不断放大，最终导致气动失稳，造成桥梁破坏倒塌。

颤振的发生与桥梁断面的外形以及桥梁的结构特性有关。除此之外，桥梁还会发生抖振和涡振等特殊的气动现象。桥梁抖振是限幅的强迫振动，任何种类的桥梁都会发生抖振，它不像颤振那样是振幅不断增大的不稳定振动。一般而言，抖振主要影响桥梁行车的安全性以及桥梁的耐久性。而桥梁涡振是气流绕过桥梁断面后产生周期性脱落漩涡，在漩涡频率与结构自振频率一致时所发生的强迫共振现象。Tacoma 大桥就是在涡激竖向振动诱导下，发生扭转颤振而导致破坏的。



a. 剧烈振动



b. 破坏倒塌

图 1-1 TACOMA
大桥风毁
事故

另一起著名的风毁事故则发生在英国的渡桥电厂。渡桥电厂共有 8 座高 108m 的冷却塔。1965 年 11 月 1 日，8 座塔中的 3 座在一次强风中先后倒塌（图 1-2），其他幸存的塔也严重破坏。这次强风的 10min 平均风速仅为 19.9m/s，远低于原先设计的 50 年一遇风速。事后成立了调查委员会对倒塌原因进行调查，研究人员还在英国国家物理实验室（NPL）的可压缩风洞中测量了冷却塔模型表面的平均和脉动风压分布，并据此估算事故发生时各塔的应力分布。后续也有相当多的关于渡桥电厂冷却塔风毁事故的研究工作。造成这起事故的直接起因是塔体迎风面产生了巨大的竖向拉力，把结构“拉”断，造成冷却塔坍塌。而造成这次破坏的因素有很多，其中有三个被认为是最重要的。

首先是风荷载设计取值不合理。事故调查委员会的报告指出，渡桥电厂冷却塔的设计风速明显偏低，而且没有在设计过程使用荷载放大因子（相当于我国规范的风振系数）是事故发生的重要原因。通俗地理解，风是一种随机荷载，具体表现为其值是脉动的，时大时小，应当考虑取其在一定时间段内的最大值进行设计。而渡桥电厂冷却塔是使用风荷载的平均

值进行结构设计，当然就会存在安全隐患。

其次是塔群干扰。众多研究表明，当建筑结构之间距离较近时，会出现明显的干扰效应，往往会造成风荷载增大。渡桥电厂事故发生时的平均风向如图 1-2，倒塌的三个塔正好处于前四个塔的尾流区，其表面的脉动风荷载大大增加，造成其应力远大于上游塔。

最后是塔形因素。现在的冷却塔母线多采用双曲线，其优点是塔体具有较好的刚度，自振频率较高。渡桥电厂的塔形为圆锥形，其一阶频率约为 0.6Hz，而同尺度的双曲型塔一阶频率可以达到 1.1Hz。风对于柔性结构的作用更为显著，因此结构偏柔是冷却塔倒塌的另一个重要因素。

另外，调查委员会从这次事故的调查过程中，认识到冷却塔抗风设计的很多方面尚没有真正解决，因此建议对冷却塔风荷载与风致响应的诸多问题进行深入研究，包括原型塔在大气湍流作用下的荷载、塔群干扰以及壳的动态响应等。

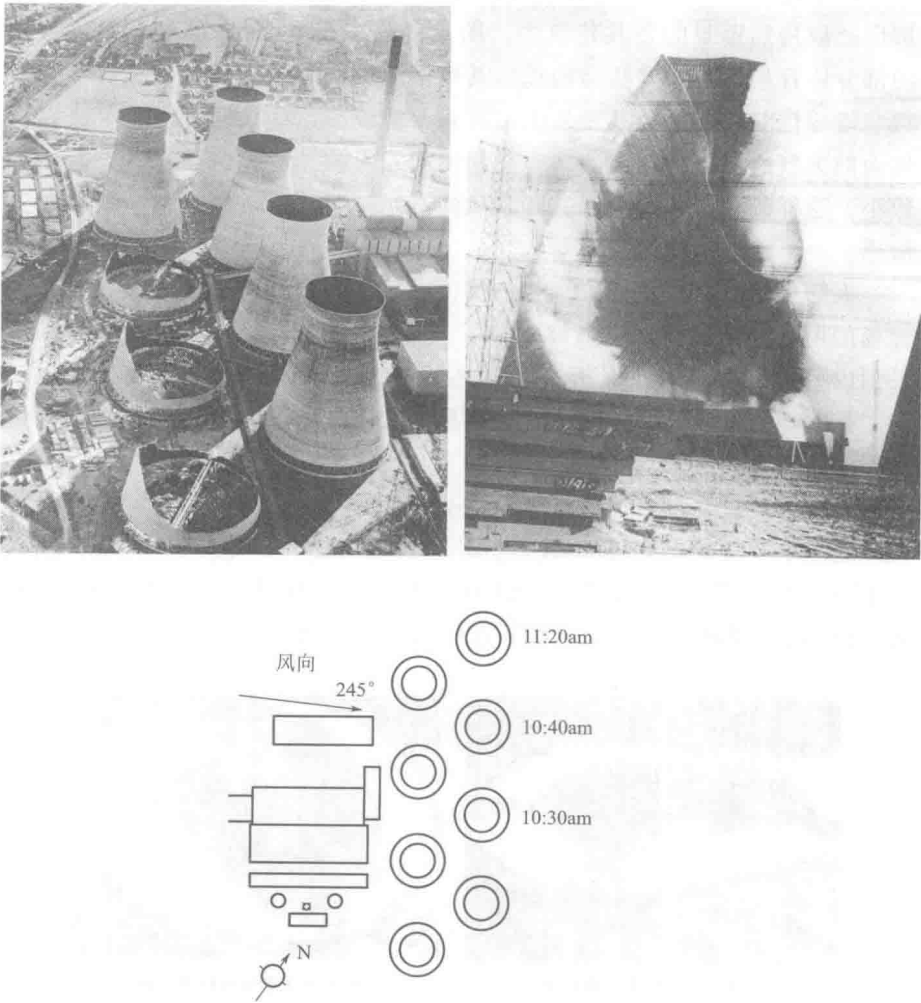


图 1-2 英国渡桥电厂风毁事故

1.2 形形色色的风损事故

几十年过去了,在大量研究者的不懈努力下,人们对风的认识与当初已不可同日而语。尽管风的问题还不能完全解决,但如今的建筑结构抗风设计已日趋科学、合理,大型建筑结构在风作用下彻底破坏的事故也较为罕见。

但是,当今的建筑结构和过去相比也展现出前所未有的复杂性。大跨空间结构为体现个性,造型越来越独特,跨度也越来越大;高层建筑越建越高、越来越柔;新材料、新技术的大量使用也对结构抗风提出了很多新的挑战。在这种背景下,形形色色的风损事故仍是层出不穷,直接影响人类的正常生活,甚至威胁到人类生命。

1.2.1 大跨屋盖结构的风损

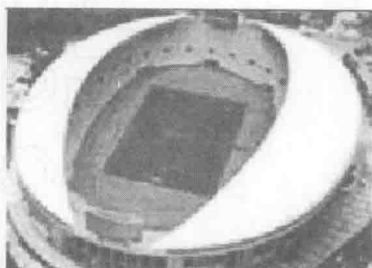
由于建筑美学的提升和能够提供宽大的空间等优势,大跨度屋盖结构被广泛应用到重要的公共建筑中。图 1-3 为 2002 年韩日世界杯足球赛中的部分体育场建筑。这些结构凭借其风格明快的建筑外形、结构轻盈、材料节省等优势在大型公共建筑中占有重要地位。这些大跨度结构处于接近地面的大气边界层的强湍流区,在建筑形式上的独特性又使其较柔且阻尼较小,这样的结构形式由于基频和风的卓越频率接近,因此对风荷载十分敏感。

大跨度屋盖结构受风灾破坏的实例有很多。图 1-4 显示的是国内某体育场的屋面板在大风作用下被掀掉了一大块,局部桁架也被破坏。图 1-5 是国内另一个体育场屋面板被风吹坏的情况。风洞试验表明在特定风向下,被吹坏的区域会产生很强的向上风吸力,这可能是导致屋面板破坏的重要原因。

其他大跨屋盖局部风毁的实例还有很多:1988 年 8 月 8 日“8807”号台风造成杭州笕桥机场航站楼、杭州市体育馆屋顶严重破坏;1994 年 8 月 15 日“9417”号台风在浙江温州登陆,造成温州机场屋盖严重受损;天津机场、首都机场 T3 航站楼等近年也多次被风吹坏。



a. 韩国全州世界杯体育场

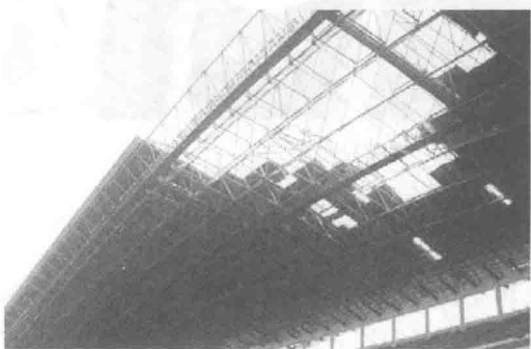


b. 日本大阪世界杯体育场

图 1-3 2002 年韩日世界杯足球赛的部分体育场建筑



图 1-4 某体育场屋盖受风灾破坏情况



风向角：
335°
最大平均风压：
-1.68kN/m²
最大极值风压：
-2.93kN/m²

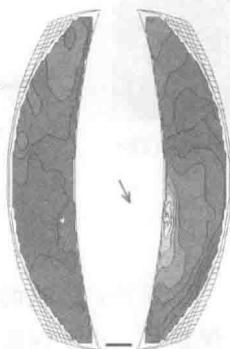


图 1-5 某体育场屋盖受风灾破坏情况及风洞试验

1.2.2 高层建筑幕墙和保温层的风损

围护结构是建筑结构的重要组成部分。最初的围护结构大多是厚重的砌体，随着新型材料的发展以及建筑理念的升华，围护结构的构成也逐步发生了变化，玻璃幕墙应运而生，并且越来越广泛地应用于各类建筑中。1985年，北京长城饭店第一次采用玻璃幕墙。经过二十多年的高速发展，目前我国已经成为世界第一幕墙生产大国和世界第一幕墙使用大国。

随着建筑幕墙的大规模推广和使用，幕墙的安全问题逐渐浮出水面，成为各界人士广泛关注的问题。这主要是因为幕墙的安全问题事关人民的生命和财产安全，因而建筑幕墙在很多时候也被称为“空中的定时炸弹”。

国内外由于幕墙的安全问题而引起的事故中，很大一部分是由风引起的，并造成很大的经济损失。图 1-6a 所示为 2005 年美国新奥尔良“卡特里娜”飓风对建筑幕墙造成的破坏，图 1-6b 为 2005 年在中国东南沿海登陆的“泰利”台风过境造成的幕墙破坏。

此外，风灾中玻璃幕墙的破坏不仅带来直接的经济损失，还可能導致二次破坏，造成更大的间接损失。这是因为幕墙破坏后，会导致风“穿堂入室”，对结构的内部设施造成更大的破坏。因此，当建筑外形复杂或者周边干扰建筑较多时，一般是通过风洞试验确定幕墙的风荷载取值，以保证其安全。