

WIND DESIGN OF CIVIL
ENGINEERING STRUCTURES

吴瑾 夏逸鸣 张丽芳 编

土木工程结构抗风设计



科学出版社

www.sciencep.com

10382.2

2

2007

土木工程结构抗风设计

吴瑾 夏逸鸣 张丽芳 编

艾军 审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共分八章,主要内容包括绪论、结构上的静力风、结构上的脉动风、高层建筑结构抗风设计、高耸结构抗风设计、大型屋盖结构抗风设计、桥梁结构抗风设计和结构风振控制等。

本书可作为高等学校土木工程专业本科教材,也可作为土木工程专业研究生参考教材或工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构抗风设计 / 吴瑾,夏逸鸣,张丽芳编. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018161-9

I. 土… I. ①吴…②夏…③张… III. 土木工程-抗风结构-结构设计 IV. TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 123381 号

责任编辑:何舒民 张雪梅 / 责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2007 年 1 月第 一 次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—3 000 字数: 250 000

定价: 18.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137154(HA03)

前 言

有关统计资料表明,在所有自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之首。因此,土木工程结构抗风研究和设计已成为防灾与减灾中的热点问题。土木工程结构抗风研究的重要基础是风工程,而风工程正是南京航空航天大学的优势学科。南京航空航天大学的风洞实验室是我国最早建成的风工程实验室之一,在国内外享有盛誉,完成了大量土木工程风洞实验,在建筑物风场模拟技术、建筑物的动态和静态风载测量技术、大型桥梁的振动及抗风稳定性以及高层建筑的风阻特性方面已形成自己的特色和优势。另外,国防重点学科——流体力学也为土木工程结构抗风研究和教学提供了重要的学科资源。南京航空航天大学土木工程专业把结构抗风设计作为人才培养的特色之一,在本科生中开设“土木工程结构抗风设计”课程,作为专业拓展课,该课程已被评为校级精品课程。为配合精品课程建设,我们编写本书作为该课程教材。

本书在编写过程中,充分吸取了近几年来该课程改革的经验,力求体现研究型大学本科教学的要求。本教材有以下特点:

1. 着重讲清基本概念和基本理论,体现专业拓展课的要求。
2. 与其他相关课程如建筑结构设计、桥梁工程等教学内容相配合和衔接,避免重复。
3. 教材内容、例题和习题的选择及编排,体现以学生为中心、以学习为中心,便于学生开展自主研究型学习,力求体现研究型大学课程建设的要求。

本书主要内容包括绪论、结构上的静力风、结构上的脉动风、高层建筑结构抗风设计、高耸结构抗风设计、大型屋盖结构抗风设计、桥梁结构抗风设计和结构风振控制等。参加本书编写的有吴瑾(第一章、第二章、第六章)、夏逸鸣(第三章、第四章、第五章)、张丽芳(第七章、第八章、附录)。

本书引用了大量国内外文献,在此向相关作者表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有不足之处,殷切希望读者提出批评意见。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 风的特性	1
1.1.1 气象特性	1
1.1.2 风的基本概念	1
1.1.3 风强度的表示方法	3
1.1.4 风速风压关系	6
1.2 土木工程结构风灾	6
1.2.1 台风灾害	6
1.2.2 大风及飓风灾害	6
1.2.3 龙卷风灾害	7
1.2.4 重要结构物风毁典型事例	7
1.3 风对结构的作用及设计要求	9
1.3.1 风对结构的作用	9
1.3.2 抗风设计的两类极限状态	9
1.3.3 抗风设计要求	11
思考题	13
第二章 结构上的静力风	14
2.1 基本风速和基本风压	15
2.2 结构上的静力风荷载	28
思考题	34
第三章 结构上的脉动风荷载	35
3.1 概述	35
3.2 随机振动中的几个基本概念	35
3.2.1 随机过程的概念	35
3.2.2 随机过程的类型	36
3.2.3 相关系数和相关函数	38
3.2.4 谱密度函数	40
3.3 单自由度线性体系的随机振动	41
3.4 多自由度线性体系的随机振动	43
3.5 顺风向风荷载	46
3.5.1 脉动风的概率分布	46
3.5.2 脉动风速功率谱函数	46
3.5.3 脉动风压功率谱函数	47

3.5.4	紊流度和脉动系数	48
3.5.5	脉动风的频域空间的相关性	50
3.5.6	结构顺风向的风振响应	50
3.5.7	结构横风向的风振响应	56
3.5.8	风力作用下结构的总响应	61
3.5.9	风力下空气动力失稳	61
3.5.10	横风向弯曲驰振	62
第四章	高层建筑结构的抗风设计	65
4.1	高层建筑的动力特性	65
4.1.1	高层建筑的振型和频率	65
4.1.2	高层建筑自振周期的经验公式	66
4.2	高层建筑的顺风向响应	67
4.2.1	高层建筑的顺风向静力位移计算	67
4.2.2	高层建筑的顺风向动力响应与风振系数	68
4.3	高层建筑的横风向响应	71
4.4	高层建筑的扭转风振响应	71
4.5	高层建筑风载下的舒适度验算	73
4.5.1	顺风向最大加速度计算	74
4.5.2	横风向最大加速度计算	74
4.5.3	扭转加速度响应的计算	74
4.5.4	顺风向、横风向和扭转风向最大加速度的向量叠加	75
4.5.5	人体舒适度限值标准	75
第五章	高耸结构抗风设计	76
5.1	高耸结构的自振周期	76
5.1.1	按无限自由度体系计算自振周期	76
5.1.2	按有限自由度体系计算自振周期	77
5.1.3	自振周期的经验公式	78
5.2	高耸结构顺风向弯曲响应	79
5.2.1	顺风向平均风作用下的弯曲响应	79
5.2.2	顺风向脉动风作用下的弯曲响应	79
5.3	高耸结构的横风向风振响应	84
5.4	高耸结构安全度、适用度与极限风荷载	85
5.4.1	高耸结构的抗风控制条件	85
5.4.2	几种主要结构的抗风控制条件	85
第六章	大跨屋盖结构抗风设计	88
6.1	屋盖结构自振周期	88
6.1.1	解析法	88
6.1.2	能量法	90
6.1.3	其他近似方法	93
6.2	屋盖结构的风振响应	94

6.2.1	水平风力	95
6.2.2	竖向风力	96
6.2.3	水平和竖向风力的总响应	96
	思考题	97
第七章	桥梁结构抗风设计	98
7.1	概述	98
7.2	桥梁结构自振周期	100
7.2.1	按结构动力学计算	100
7.2.2	按经验公式计算	102
7.2.3	桥梁的阻尼	107
7.3	桥梁顺风向(横桥向)风荷载	107
7.4	桥梁风致静力失稳	111
7.4.1	三分力系数	111
7.4.2	风致静力失稳	112
7.5	风对桥梁的动力作用	113
7.5.1	抖振	113
7.5.2	涡振	115
7.5.3	颤振	116
7.5.4	弛振失稳	119
	思考题	121
第八章	结构风振控制	122
8.1	概述	122
8.1.1	结构动态系统	122
8.1.2	结构振动控制类型	123
8.1.3	结构风振控制装置设置位置的选择	124
8.1.4	最优控制理论基础	124
8.2	主动控制	125
8.2.1	实时最优振型控制算法	125
8.2.2	随机最优控制算法	128
8.3	被动控制	131
8.3.1	准最优控制算法	131
8.3.2	传递函数算法	132
8.4	结构风振控制的计算机模拟	134
8.4.1	控制力增量 $\Delta u_j (j=1, \dots, P)$ 的计算	136
8.4.2	广义脉动风荷载增量 ΔF_i 的计算	136
	思考题	136
附录 1	全国各城市 50 年一遇的基本风压标准值	137
附录 2	风荷载体型系数	146
参考文献	158

第一章 绪 论

1.1 风的特性

1.1.1 气象特性

风是相对地面的空气运动,它是由不同的压力驱动的,主要原因是大气压强的差异。这种差异是由于太阳对地表不同区域的照射不同而产生的,其原因是地球自转。太阳辐射在地极和赤道间的差异,产生了温度和压强的差异。这些差异在与地球自转共同作用下,建立了大气大循环系统,这种循环是存在于水平和垂直方向的。这些循环导致了热带和近极地处的主要风向偏向于东,而西风主要存在于温带地区。

强风也有可能由当地的对流效应或山脉中大量空气的抬升而产生。强烈的热带气旋因地区不同分成飓风和台风,都表现为笼罩在部分热带洋面及沿岸地区的特大风,它们主要存在于南北半球纬度在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围内。

对结构安全产生影响的是强风,它通常由大气漩涡剧烈运动产生,可分为热带低压、热带风暴、台风或飓风、雷暴、寒潮风暴、龙卷风等。

所有强风暴都是短期且爆发性的。气流与地平面相互摩擦以及在同高度上空气对流的剪切产生了漩涡,这些漩涡导致了强风的阵风性和爆发性。

1.1.2 风的基本概念

风是空气从气压大的地方向气压小的地方流动而形成的。风在行进中遇到结构,就形成风压力,使结构产生振动和变形。风荷载是各种工程结构的重要设计荷载。对于超高层建筑、大跨度桥梁、高耸结构(如塔、烟囱、桅杆等)、起重机、冷却塔、输电线、屋盖等,风荷载常常起着控制作用。

风有倾斜性、季节性和随机性三个特点。

1. 倾斜性

一般来说,风是有一定倾角的,相对于水平方向,一般风倾角的变化范围为 $-10^{\circ}\sim +10^{\circ}$,因此,结构上作用的风力就有水平和垂直方向两个分量。一般来说,对高层结构,大多是细长形的,竖向风对其作用力是轴向作用力,所以这种情况竖向风力影响可以忽略不计。但对于桥梁结构和大跨度屋盖结构,竖向风压和振动效应就非常显著,在这类结构中要着重考虑。

2. 季节性

同一地点在每年不同的季节和日期,风向也可以不尽相同,结构在不同时期受到的风

的影响也随之不同。一年中强度最大的且对结构影响最大的风向称为主导风向。为了偏于安全地进行结构设计,一般都假定最大风出现在各个方向上的概率相同。

3. 随机性

在风的顺风向时程曲线中,一般包含有平均风和脉动风两部分,如图 1.1 所示。平均风是在给定时间间隔内,风力大小、方向等不随时间而改变的量。脉动风则随时间按随机规律变化,要用随机振动理论来处理。风的模拟主要是针对脉动风而言。作用于结构上任一点坐标为 (x, y, z) 的风速 $V(x, y, z, t)$ 为平均风速 $\bar{v}(z)$ 和脉动风速 $v(x, y, z, t)$ 之和

$$V(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v(x, y, z, t) \quad (1.1)$$

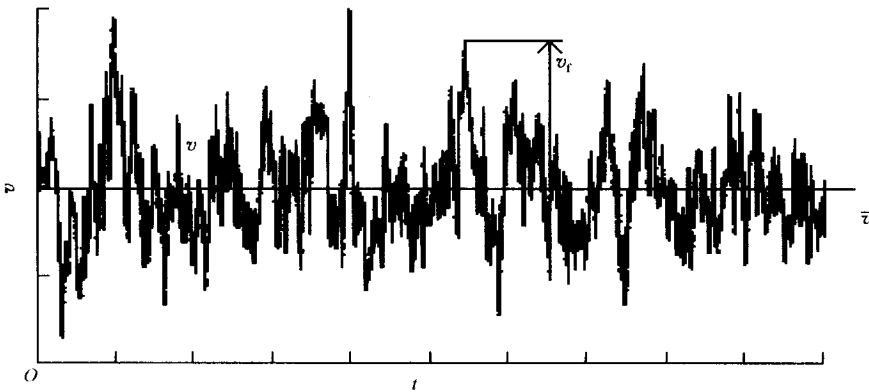


图 1.1 瞬时风速 v 与平均风速 \bar{v} 和脉动风速 v_i

平均风是在约定的时间间隔内,把风对建筑物作用的速度、方向以及其他物理量都看成不随时间而改变的量,考虑到风的长周期远远大于一般结构的自振周期,因而这部分风虽然其本质是动力的,但其作用与静力作用相近,因此可认为其作用性质相当于静力。平均风速沿高度变化的规律可用指数函数式或对数函数式来近似表示,将在第二章介绍。

脉动风是由于风的不规则性引起的,它的强度是随时间按随机规律变化的。由于它周期较短,应按动力来分析,其作用性质完全是动力的。

结构的抗风分析方法主要分为频域法和时域法。对重要的高层建筑,除了进行频域内的分析外,还应进行时域内的分析,以了解结构风振反应的实际情况,从而确定结构在受力过程中的薄弱环节。对结构进行时域内的风振分析,首先要确定结构的风荷载。

由于风力在空间上的分布变化及时间上的强度变化,风对结构的作用显得非常复杂和多样。影响结构上风荷载的因素很多,不同地区各类地面条件的差异、结构本身条件的变化、同一建筑物不同区域内形状、表面粗糙度等的不同都会导致结构上风荷载的改变。在风荷载作用下,结构将产生一定的运动,这种运动反过来又会引起结构表面风压的变化,再加上邻近建筑之间的相互影响,这些都使得确定结构上风荷载的大小变得相当复杂。近年来,随着计算机技术的日益发展,人工模拟结构的随机输入得到了广泛应用。人工模拟风荷载可以考虑场地、风谱特征、建筑物的特点等条件的任意性,使模拟得到的风

荷载尽量接近结构的实际风荷载。目前,随机过程的模拟方法一般分为两类,即谐波叠加法和线性滤波器法。由于谐波叠加法在进行多变量模拟时,需要在每个频率上进行大量运算,因此比较费时,运算效率低,而线性滤波器法则占用内存少,计算快捷。

研究表明,结构周期、风压、受风面积等参数对脉动风荷载的大小有直接影响。这些参数愈大,影响也愈大,兼之结构上还有平均风作用,因而对于高、柔、大跨等结构,风的影响起着很大甚至决定性的作用。

1.1.3 风强度的表示方法

不同的风有不同的特征,但它的强度常用风速来表达。最常用的有两种。

1. 范围风速

将风的强度划分为不同等级,一般用风速范围来表达。常用的有:

(1) 蒲福风速表

英国人蒲福(F. Beaufort)于1805年拟定了风级,根据风对地面(或海面)物体影响程度而定出的,称为蒲氏风级。蒲氏风级自0至12共分13个等级。自1946年以来,风力等级又作了某些修改,并增加到18个等级,如表1.1所示。风力等级的判断常常根据地方的海面状况、海岸渔船征象、陆地面物征象、距地10m高处相当风速等条件来判断。其中前13个等级就是我们在气象广播中所听到的风的等级。

热带气旋是发生在热带海洋上的大气漩涡,是热带低压、热带风暴、台风或飓风的总称。直径一般几百公里,最大可达1000km。热带气旋区域内的风速,以近中心为最大。

按蒲福划分的风力等级,各类风相对应的等级为:

- 1) 低压区平均最大风力小于8级。
- 2) 热带低压区为热带气旋中心位置能确定,且中心附近的平均最大风力小于8级的风区。
- 3) 热带风暴为热带气旋中心附近的平均最大风力为8~9级。
- 4) 强热带风暴为热带气旋中心附近的平均最大风力为10~11级。
- 5) 热带气旋中心附近的平均最大风力为12级或12级以上的,在东亚称为台风,在西印度群岛和大西洋一带称为飓风。

台风中心称台风眼,半径多为5~30km,气压很低,风小浪高,云层裂开变薄,有时可见日月星光,其四周附近则是高耸的云壁。狂风暴雨均发生在台风眼之外。台风形成后,它一边沿逆时针方向快速旋转,同时又受其他天气系统(如副热带高压等)气流引导或靠本身内力朝某一方向移动,从而形成台风移动的路径或轨迹。通常自东向西或西北方向移动,速度一般为10~20km/h,当进入中纬度的西风带后,即折向东或东北移动,这称为台风转向。袭击我国的台风,常发生在5~10月,以7~9月最为频繁。台风的破坏力很大,它不但可以吹倒或损害陆上各种工程结构,而且还大量损害海上物体。台风袭击的地区常有狂风暴雨,沿海岸则多有高潮、巨浪。

表 1.1 蒲福风力等级表

风力等级	名称	浪高(海面状况) /m		海岸渔船征象	陆地物征象	距地 10m 高处相当风速		
		一般	最高			km/s	mile ^① /h	m/s
0	静风	—	—	静	静,烟直上	<1	<1	0~0.2
1	软风	0.1	0.1	寻常渔船略觉摇动	烟能表示风向,但风向标不能转动	1~5	1~3	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	渔船张帆时,可随风移行每小时 2~3km	人感觉有风,树叶有微响,风向标能转动	6~11	4~6	1.6~3.3
3	微风	0.6	1.0	渔船渐觉摇动,随风移行每小时 5~6km	树叶及微枝摇动不息,旌旗展开	12~19	7~10	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	渔船满帆时倾于一方	能吹起地面灰尘和纸张,树的小枝摇动	20~28	11~16	5.5~7.9
5	清劲风	2.0	2.5	渔船缩帆(即收去帆之一部)	有叶的小树摇摆,内陆的水面有小波	29~38	17~21	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	渔船加倍缩帆,捕鱼需注意风险	大树枝摇动,电线呼呼有声,举伞困难	39~49	22~27	10.8~13.8
7	疾风	4.0	5.5	渔船停息港中,在海上下锚	全树摇动,迎风步行感觉不便	50~61	28~33	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	进港的渔船皆停留不出	微枝折毁,人向前行,感觉阻力甚大	62~74	30~40	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0	汽船航行困难	烟囱顶部及平瓦移动,小屋有损	75~88	41~47	20.8~24.4
10	狂风	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见,见时可使树木拔起或将建筑物吹毁	89~102	48~55	24.5~28.4
11	暴风	11.5	16.0	汽船遇之极危险	陆上很少,有时必有重大损毁	103~117	56~63	28.5~32.6
12	台风(飓风)	14.0	—	海浪滔天	陆上极少,其捣毁力极大	118~133	64~71	32.7~36.9
13	—	—	—	—	—	134~149	72~80	37.0~41.4
14	—	—	—	—	—	150~166	81~89	41.5~46.1
15	—	—	—	—	—	167~183	90~99	46.2~50.9
16	—	—	—	—	—	184~201	100~108	51.0~56.0
17	—	—	—	—	—	202~220	109~118	56.1~61.2

①mile 为非法定单位,1mile=1.609 344km,下同。

(2) 福基达龙卷风风力等级表

龙卷风是范围小而时间短的强烈旋风。直径约从几米到几百米不等,中心气压很低,风速通常可达每秒几十米到 100m 以上。龙卷风移动速度每小时约数十千米,所经路程,短的只几十米,长的可超过 100km,持续时间可达几分钟到几小时。与热带气旋相比,龙卷风的特征可归纳为范围小、风力大、寿命短,并且直线运动,发生概率远低于热带气旋。美国芝加哥大学福基达(T. T. Fujita)教授曾于 1970 年提出龙卷风按最大风速划分为 7 个等级的公式,其计算公式为

$$v_f = 6.30 \times (F + 2)^{1.5} \quad (1.2)$$

到现在为止,记录到龙卷风级别未到 6 级。根据上式,1 至 6 级范围风速如表 1.2 所示。从表中可以看出,0 级龙卷风实际上就在蒲福风力等级表范围之内,因而是与蒲福风力等级表相呼应的。由于龙卷风作用时间短,因而在同样风速下破坏程度没有一般风严重。

表 1.2 福基达龙卷风风力等级表

等级	名称	征象	距地 10m 高处的风速/(m/s)
F_0	轻龙卷	有中度破坏。屋顶表层被掀起,活动房屋被刮倒,行驶中车辆被刮得偏离道路	<32.2
F_1	中龙卷	考虑 $v=20\sim32.2\text{m/s}$,有轻度破坏。烟囱、标志牌有一定损坏,树枝刮断,根浅树木被刮倒	32.7~50.2
F_2	大龙卷	有相当程度破坏。屋顶被刮飞,活动房屋被摧毁,铁路网罐车被刮翻,大树被连根拔起,产生轻物体的飞掷物	50.4~70.2
F_3	强龙卷	有严重破坏。牢固的屋顶和部分墙壁被刮走,火车被刮翻,森林大部分树木被连根拔起,重型车辆被抛起	70.4~92.4
F_4	毁灭性龙卷	有毁灭性破坏。牢固的房屋被整体刮倒。地基不牢的结构被掀起,汽车被抛起,产生重物飞掷物	92.6~116.4
F_5	非常龙卷	有非常严重程度破坏。牢固的房屋被整体掀起。树木搬家,汽车大小的物体被抛入空中飞行达 100m 之远	116.7~142.3
F_6	极值龙卷	有极为惊人的破坏。目前尚未有这样的最大风速	142.6~169.8

虽然龙卷风破坏力大,但由于范围小、寿命短等特点,风灾损失中最多的还是热带气旋,其中尤以台风最为严重。我们应该把较大的注意力集中在热带气旋所引起的风力上。

上述风的强度由于存在一段范围,不便于工程计算,而常用于气象工作中。

2. 工程风速

进行结构风工程计算需要的不是某一范围的风速,而需要某一确定的风速。在风工程中,不但要保证结构承受过去某一时日或今日的风是安全可靠的,还要保证在某一规定期限内结构安全可靠。然而风的记录又是随机的,不同时、日、月、年都有不同的值和规律,具有明显的非重现性的特征,因而必须根据数理统计方法来求出计算风速。我们将在第二章中具体分析它的计算方法。

1.1.4 风速风压关系

对工程结构设计计算来说,风力作用的大小最好直接以风压来表示。风速愈大,风压也愈大。为此我们需导出风速与风压的关系式,其推导过程见第二章。

1.2 土木工程结构风灾

风灾发生频繁,持续时间长,产生的灾害大。在所有自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之首。例如1999年,全球发生严重自然灾害共造成800亿美元的经济损失,在被保险的损失中,飓风造成的损失占70%。下面主要涉及与结构损坏有关的风灾事例,以进一步引起对结构风灾的防御和结构抗风设计的重视。

1.2.1 台风灾害

1. 2004年14号强台风“云娜”

2004年8月12日,14号强台风“云娜”在浙江省温岭市石塘镇登陆,台风登陆时中心气压为950hPa,台州椒江大陈最大风速达58.7m/s,大大超过12级台风36.9m/s的上限。台州市所有市县区都观测到12级大风,10级风圈达180km,其风速之大、杀伤力之强,为浙江省历史上所罕见。直接经济损失181.28亿元。黄岩江口粮库屋顶、路桥区金清蓬街两镇2.7万亩蔬菜大棚被掀翻,城乡不时可见被掀翻的房屋和倒塌的广告牌。

2. 2002年16号台风

2002年9月7日中午12时,平阳县南麂岛出现了56.7m/s的大风,洞头和乐清也分别出现了43m/s和38m/s的当地最大风速。从9月7日凌晨到晚上11时,温州平均降雨量达到137.4mm。苍南县马站镇降雨量超过250mm。金乡镇全镇还有30多间房屋和两间厂房倒塌,初步估算损失超过3000万元。有一座房子屋顶被台风掀翻,坍塌部位在楼梯间,从四楼到一楼露出一个大洞。几乎所有出事房子都是近几年建造的新房,台风中死亡5人。

3. 台风袭击广州

海珠区一间汽车修理厂的屋顶被刮倒,屋内一名正在看电视的年轻男子当场被砸死。一阵狂风从屋外刮进来,将屋顶吹得鼓了起来,接着又迅速压下来,铁屋顶在压回原状的过程中猛地倒塌下来。

1.2.2 大风及飓风灾害

1. 河南省体育馆遭9级风破坏

河南省体育馆东罩棚中间位置最高处铝塑板和固定槽钢被风撕裂并吹落100m,三副30m²的大型采光窗被整体吹落,雨篷吊顶吹坏。大部分破坏都是由负风压所引起的,屋面

板被掀起,主体结构好像没破坏。根据当初的设计要求,河南省体育馆应能抵抗 10 级以下大风。按照当天气象局一观测点的观测,通过观测点的大风最高时速达 24.7m/s。

2. 1989 年 9 月 4 日美国南加利福尼亚遭受 Hugo 飓风

本次风期实地调查结果表明,有 49% 的建筑物屋面受损,但损害的情形各异,有局部的屋面覆盖物或屋面桁架被吹走或破坏,甚至整个屋面结构被吹走。从破坏部位来看,大多数屋面风致破坏发生在屋面转角、边缘和屋脊等部位。

1.2.3 龙卷风灾害

全球遭受龙卷风袭击的次数每年高达 1000 次以上,因此近年来各国对此均有所重视。

上海近郊的龙卷风灾害亦呈上升趋势。据 1951~1990 年间的不完全统计,上海出现了 74 次龙卷风。例如,1986 年 7 月 11 日午后,上海市东郊沿海地带发生了一次强龙卷风,先后出现了 4 次龙卷,袭击了南汇、原川沙、奉贤县 11 个乡、1 个镇,共死亡 25 人,损坏房屋 4800 余间,14 家工厂、11 所中小学及幼儿园、6 个畜牧场严重坍塌,造成直接经济损失 2600 余万元。1987 年 7 月 28 日,上海市嘉定县的龙卷风也造成了严重的损失,这次龙卷风是伴随着 8707 号台风而来的。

龙卷风的影响范围虽有一定的限度,但其毁灭性的破坏力也给人们造成一定的恐惧心理。因此,在龙卷风多发地区作城市规划或小区规划时,应充分考虑龙卷风的影响,以期达到理想的经济效益和社会效益。

1.2.4 重要结构物风毁典型事例

1. 屋盖破坏

图 1.2 所示为英国一座独立主看台悬挑钢屋盖。当大风从开阔的地面吹来时,由于屋盖下部强大的压力和屋盖上部的吸力,屋盖覆面结构(石棉板)在固定点处损坏,从而大片覆面结构被掀掉,而屋盖钢结构基本保持完好。最后调换所有覆面结构,为此花费了 26 000 英镑。

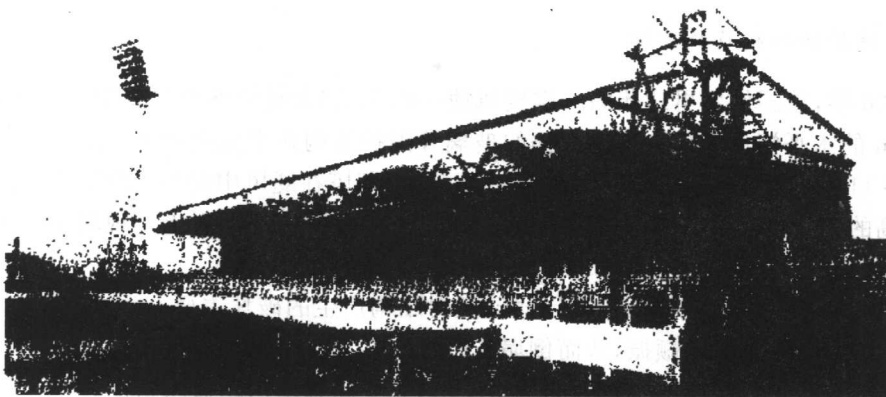


图 1.2 体育场主看台屋盖覆面结构损坏

2003年8月2日下午1时15分左右,雷暴雨中突如其来的旋风居然把上海大剧院的屋顶掀去了一大块。掠过上海大剧院,把剧院东侧顶部中间的一大块钢板屋顶生生卷起,移动约20m左右,又砸在剧院顶部中间的高平台上。屋顶东侧中部已露出了约 250m^2 的一个大“窟窿”。卷起的这一大块钢板屋顶,被旋风撕裂成两段,揉成皱褶不堪的纸团一般,20多名工作人员合力也难以搬动。3cm宽的避雷钢带,已卷成了麻花形。顶楼平台上直径达10cm粗的不锈钢防护栏,也有10多米被旋风扭曲,如图1.3所示。

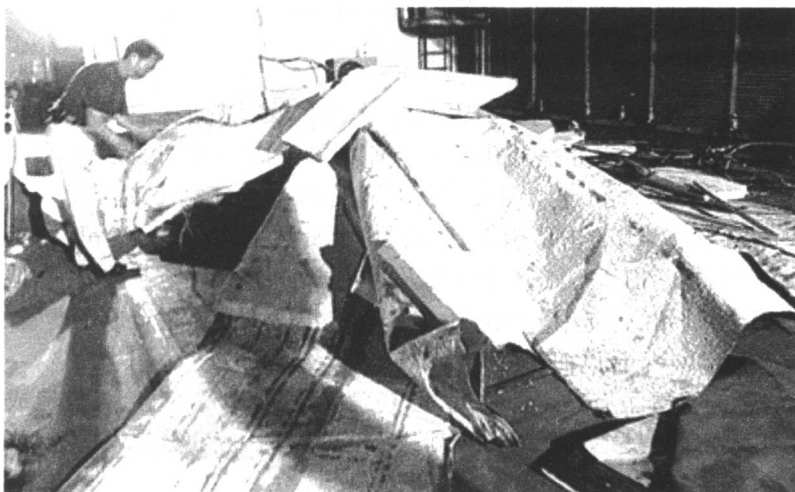


图 1.3 上海大剧院部分屋顶险被揉成“纸团”

2. 桥梁结构破坏

1940年,美国华盛顿州塔科马(Tacoma)海峡建造的塔科马悬索桥,主跨853m,建好不到4个月,就在一场风速不到 20m/s 的灾害下因产生上下和来回扭曲振动而倒塌了。当时有一位新闻电影摄影师正巧在场,他拍下了该桥倒塌的情形。图1.4为塔科马悬索桥的扭转振动。

3. 建筑物和构筑物破坏

1926年,美国佛罗里达州的一次飓风使一座17层大楼的两个横框架分别出现0.6m和0.2m的水平塑性变形。这座大楼的玻璃等围护结构几乎完全破坏,隔墙也严重开裂。1965年11月,英国一电站的三座高为113m的冷却塔在飓风中倒塌。1969年英国约克郡386m高的钢管电视桅杆破坏;捷克的一座高为180m的钢筋混凝土电视塔由于横向风振动位移达1m而开裂。

根据结构遭受风灾破坏的统计分析,风对结构产生的破坏主要有:

- 1) 结构产生抖振和颤振,从而倒塌或严重破坏。
- 2) 结构产生开裂或产生较大的残余变形,有些高耸结构还被风吹倒。
- 3) 结构内墙、外墙、玻璃幕墙等开裂或损坏。
- 4) 风载的频繁作用,使结构构件产生疲劳破坏。

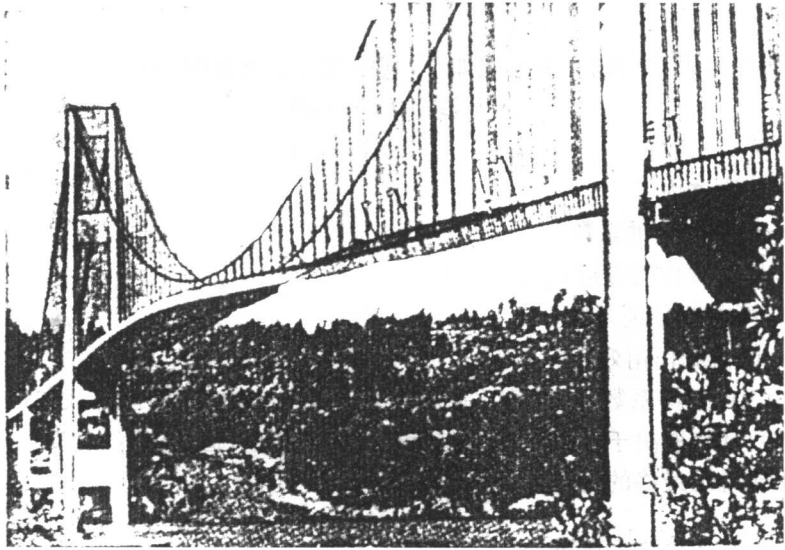


图 1.4 塔科马悬索桥的扭转振动

1.3 风对结构的作用及设计要求

1.3.1 风对结构的作用

风对结构物的作用,使结构物产生振动,其原因主要有以下几个方面:

- 1) 顺风向的风力作用,它包括平均风和脉动风。其中脉动风要引起结构物的顺风向振动,这种形式的振动在一般工程结构中都要考虑。
- 2) 结构物背后的漩涡引起结构物的横风向(与风向垂直)的振动,对烟囱、高层建筑等一些自立式细长柱体结构物,特别是圆形截面结构物,都不可忽视这种形式的振动。
- 3) 风力对结构偏心作用的风力扭矩,以及该扭矩对结构产生的扭转振动。

1.3.2 抗风设计的两类极限状态

结构可靠度理论,即对结构设计过程应用概率方法,它的发展自 20 世纪 70 年代推动了人们在风工程中应用概率方法的进程。风荷载的估计只是结构设计过程中的一个环节,设计中还包括确定其他荷载以及计算结构材料的抗力。结构设计者必须合理设置结构,使其发生倾覆和破坏的概率减至最低,同时也要使结构的挠度、加速度等不超标,满足正常使用的极限状态要求。

1. 极限状态设计法

极限状态设计法是一种合理的结构设计方法,逐渐在世界范围内被人们使用。为了明确设计的最终和正常使用极限状态,这种方法采用了一种更有利于结构安全性的方法,对每种荷载定义各自的荷载分项系数(γ 系数),对各种抗力定义各自的抗力系数(Φ 系数)。

应用极限状态设计法本身并不是概率方法,但是确定荷载系数和抗力系数需要使用概率方法。

一般的最终极限状态设计关系式如下,其中包含了风荷载,即

$$\Phi R \geq \gamma_D D + \gamma_W W \quad (1.3)$$

式中, Φ ——抗力系数;

R ——结构抗力;

γ_D ——恒荷载分项系数;

D ——恒荷载作用效应;

γ_W ——风荷载分项系数;

W ——风荷载作用效应。

在关系式中,分项系数 Φ 、 γ_D 和 γ_W 分别用来表示结构抗力、恒荷载和风荷载的多样性和不确定性,其值取决于选择的抗力或荷载效应特征值。通常,要经过安全性、可靠性指标的评估,才能得出最终的规范建议设计公式。

2. 失效概率和安全性指标

对结构安全性的数值衡量,即安全性指标或可靠性指标,许多国家把它作为当前和未来结构设计方法的评估标准。根据作用荷载效应超过结构设计抗力(不包括人为造成的破坏和其他事故原因)的情况,我们得出了安全性指标与失效概率的一一对应关系。

设计过程包括确定结构荷载效应 S 和与其对应的结构抗力 R 。结构承受极限状态的荷载时,荷载效应可以是作用于构件的轴力,也可以是弯矩或其他应力。在正常使用极限状态的情况下, S 和 R 可以是挠度、加速度或裂缝宽度。

荷载效应 S 和相应结构抗力 R 的概率密度函数为 $f_S(S)$ 和 $f_R(R)$ 。显然, S 和 R 单位相同。 S 和 R 之间存在不确定性。

当结构抗力小于荷载作用效应时,结构发生失效(不能正常使用)。失效概率的确定需要假设 S 和 R 是相互独立的统计变量。

$$\begin{aligned} & \text{荷载效应在 } S \text{ 和 } S + \delta S \text{ 之间发生失效的概率} \\ &= [\text{荷载效应在 } S \text{ 和 } S + \delta S \text{ 之间的概率}] \times [\text{抗力 } R \text{ 小于 } S \text{ 的概率}] \\ &= [f_S(S)\delta S] \times F_R(S) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中, $F_R(S)$ —— R 的概率密度对 R 的积分表示为

$$F_R(S) = \int_{-\infty}^S f_R(R) dR \quad (1.5)$$

对式(1.4)进行整理求和,得到结构完全失效的概率为

$$p_f = \int_{-\infty}^S f_S(S) F_R(S) dS \quad (1.6)$$

将式(1.5)中的 $F_R(S)$ 代入式(1.6)

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^S f_S(S) f_R(R) dR dS = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^S f(S, R) dR dS \quad (1.7)$$

式中, $f(S, R)$ —— S 和 R 的联合概率密度。