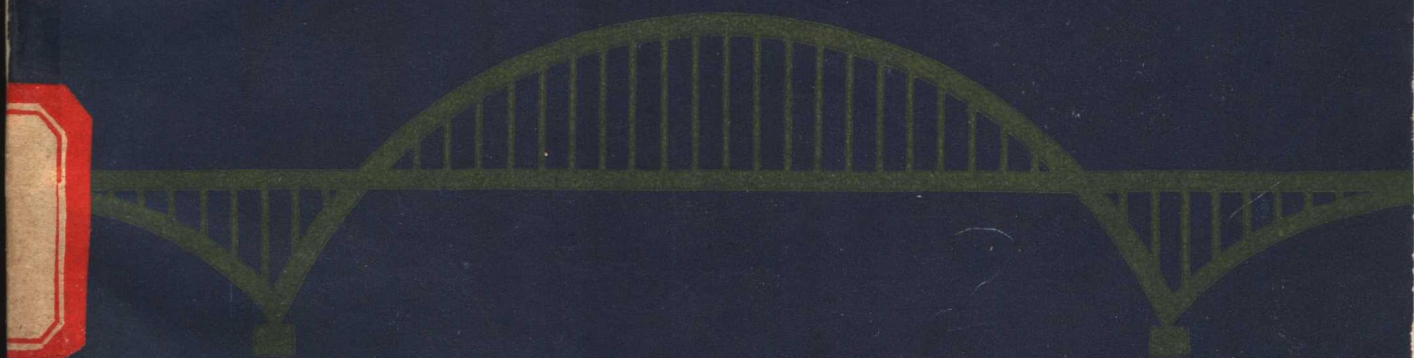


CANGQIAO

10

〔日〕小西一郎 编

钢 桥



中国铁道出版社

钢 桥

第十分册

〔日〕小西一郎 编

张健峰 译

陈英俊 校

中 国 铁 道 出 版 社

1982年·北京

内 容 简 介

本分册包括抗风设计和抗震设计两章。第十一章介绍了风的基本性质、流体力学的基础理论、作用于桥梁上风的作用和现象以及风洞实验法,第十二章介绍了地震特性、桥梁的动力特性、地震响应的基础理论,对各国有关桥梁抗震的规范作了解释,还介绍了长跨桥梁抗震设计的分析实例。

钢 桥

第 十 分 册

〔日〕小西一郎 编

张健峰 译 陈英俊 校

中国铁道出版社出版

责任编辑 王能远

封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1094 毫米 印张: 10.626 字数: 240 千

1982年2月 第1版 1982年2月 第1次印刷

印数: 0001—2,200册 定价: 1.65元

出 版 说 明

本书是一部详细阐述现代桥梁设计理论及设计方法的巨幅著作。原书共四册，分为设计篇及基础篇。前者阐述各式桥梁的设计方法及介绍结构实例，后者着重介绍桥梁设计所用的基础理论及基本资料。

虽然本书是针对钢桥写的，但本书中所述设计原则及力学分析也适用于同样结构型式的钢筋混凝土桥及预应力混凝土桥。我们深信本书的翻译出版，将有助于我国桥梁事业的发展。

为了及早与读者见面，我们将全书分为11个分册陆续出版。

全书主要内容及分册划分见下页。

原 书	内 容	译 本
设计篇 I	第 一 章 桥面系构造	第一分册
	第 二 章 板梁桥	第二分册
	第 三 章 桁架桥	第三分册
设计篇 II	第 四 章 拱 桥	第四分册
	第 五 章 斜拉桥	
	第 六 章 悬索桥	第五分册
	第 七 章 曲线桥、斜桥	第六分册
	第 八 章 纵向联结系、横向联结系、桥门架	
基础篇 I	第 九 章 支 座	第七分册
	第 一 章 绪 论	
	第 二 章 荷 载	
	第 三 章 结构材料	
	第 四 章 安全系数、安全度、可靠度	
	第 五 章 强度设计法	
	第 六 章 构件连接法	第八分册
	第 七 章 平板理论	
	第 八 章 格子梁理论	
基础篇 II	第 九 章 屈曲理论	第九分册
	第 十 章 构件设计	
	第 十 一 章 抗风设计	第十分册
	第 十 二 章 抗震设计	
	第 十 三 章 钢结构的安全性、可靠性的统计方法	第十一分册
	第 十 四 章 电子计算机的应用	
	第 十 五 章 特大桥的架设	

前 言

本卷是《基础篇》的后半部分，它归纳汇集了桥梁设计的必要基础理论中的最新研究成果。

在第十一章“抗风设计”中，对风的基本性质和流体力的必要的基础理论展开了讨论，并具体叙述了作用于桥梁结构断面上的风的种种作用和现象，而且还汇集了抗风研究中所不可缺少风洞实验法。

在第十二章“抗震设计”中，将地震的特性、桥梁的动力特性、地震响应作为基础理论进行了叙述，而且对于在实际桥梁设计中很有用的各国标准、规范作了解释，叙述了长跨桥梁抗震设计的分析实例。

对于最近引人注目的钢结构物的安全性和可靠性，继《基础篇》第Ⅰ册第四章“安全度、安全性、可靠性”所述的基本内容之后，本册第十三章“钢结构物安全性、可靠性分析的统计方法”中，总结了它的统计学的思考方法。先介绍了对随机现象进行概率统计的处理，和安全性、可靠性分析的基础理论，并且叙述了抗风、抗震设计中的统计方法。然后，对于进行理论处理还有困难的随机现象的分析，叙述了对它具有重要实用价值的数字模拟方法。

第十四章是桥梁设计的“电子计算机的应用”，首先介绍它的历史及展望，在详细阐述了最优设计、规范的表现和组成方法之后，叙述了数字控制和图形处理。

最后，在第十五章“长跨桥的架设”中，对于作为长跨桥梁架设理论的架设工程及施工方法、形状及应力的调整、临时施工机械设备等进行了说明，并列举了14个架设实例进行了解说。

以上就是本卷《基础篇》第Ⅱ册的内容。

到本卷为止，《钢桥》出版计划就完成了。《基础篇Ⅰ、Ⅱ》与《设计篇Ⅰ、Ⅱ》共四大卷，合起来成了正文长达2648页*的巨著。作为编者来说，内心的喜悦是难以形容的。

这部《钢桥》的完成，是各位执笔者极大的热忱和自始至终坚持不懈努力的结果。本卷的编辑撰写工作，与前一卷一样，山田善一教授付出了辛勤的劳动。而本卷13章得到了香川大学石川浩副教授、其他部分得到了美国哥伦比亚大学篠塚正宣教授的研究室各位的大力协助。

借本书四卷完成的机会，作为本书编者，对各位执笔者表示发自内心的感谢和敬意。而本书的发行如果能在钢桥的技术、研究方面多少有些贡献，那么编者将与各位执笔者一道共享成功的喜悦。

正如本书序言所述，本书的内容，是以前人研究形成的桥梁工程学为基础，并以京都大学桥梁工程学教研室的研究和教育内容为中心，增添了新的研究和技术成果。

这部四大卷的《钢桥》基础篇、设计篇之所以得以问世，是与已故的高桥逸夫先生、近

*此系原书页数。

藤泰夫先生、泽井八洲男先生、石原藤次郎先生等各位老师、以及各位前辈、同行多年来的亲切指导、教诲和鞭策分不开的，借此机会表示深切的谢意。

在出版过程中，多年来承蒙丸善股份有限公司出版部的各位先生多方面的帮助，谨致深切谢意。

编者 小西一郎

一九七七年八月七日

基础篇 II 执笔者

- 11章 抗风设计 小西一郎, 白石成人
松本 勝
- 12章 抗震设计 小西一郎, 山田善一
- 13章 钢结构物的安全性、可靠性分析的统计方法
小西一郎 篠塚正宣
- 14章 电子计算机的应用
山田善一, 高久達将
- 15章 长跨桥的架设
池田哲夫, 大橋昭光

目 录

第十一章 抗风设计	1
11.1 概 述	1
11.2 结构物的抗风响应	2
11.2.1 风的特性	2
11.2.2 风压	3
11.2.3 桥梁结构抗风性的基本特性	5
11.2.4 桥梁结构的动力抗风响应	7
11.3 流体力学的基础理论	8
11.3.1 势流引起的流体力	8
11.3.2 漩涡运动与流体力	12
11.3.3 作用于振动翼体上的流体力 (非定常流体力)	18
11.3.4 流体中的单自由度振动现象	24
11.3.5 流体中的耦合振动现象 (颤振现象)	29
11.3.6 非线性空气力 (G.V.Parkinson的研究)	32
11.3.7 紊流中的结构物的响应 (A.G.Davenport的研究)	35
11.4 桥梁结构断面的空气力学特性	36
11.4.1 概 述	36
11.4.2 空气静力特性	37
11.4.3 结构物的空气弹性动力特性	48
11.4.4 结构物的颤振现象	49
11.4.5 结构物的疾振现象	66
11.4.6 结构物的涡激振动现象	68
11.4.7 结构物的阵风随机响应	76
11.5 桥梁结构的风洞实验法	92
11.5.1 相似理论	92
11.5.2 桥梁结构抗风实验的相似律	93
11.5.3 风洞气流 (紊流边界层的形成方法)	98
11.5.4 风洞及量测装置	102
11.6 抗风结构及结构物抗风性能的几个问题	110
参考文献	112
第十二章 抗震设计	116
12.1 概 述	116
12.2 地震动的特性	117
12.2.1 地震活动性	117

12.2.2	震级和烈度	118
12.2.3	地震动	120
12.3	桥梁的动力特性	124
12.3.1	概 述	124
12.3.2	自振频率和自振振型	124
12.3.3	振动衰减特性	130
12.4	地震响应	134
12.4.1	简单结构物(单自由度线性体系)的地震响应	134
12.4.2	地震反应谱	136
12.4.3	响应算法	140
12.5	抗震设计标准·规范	142
12.6	长跨桥梁的抗震设计	145
12.6.1	概 述	145
12.6.2	世界长跨桥的抗震设计实例	146
12.6.3	长跨桥梁的动力学特性	147
12.6.4	悬索桥上部结构的振动分析	147
12.6.5	作为有限自由度体系的悬索桥上部结构的振动分析	148
12.6.6	悬索桥塔柱、桥墩体系的振动与抗震设计	152
12.6.7	悬臂桁梁桥的抗震分析和设计	156
	参考文献	158

第十一章 抗 风 设 计

11.1 概 述

在进行桥梁结构设计时,研究结构物在自然力作用下,特别是在风力作用下是否足够安全,是很重要的。结构物的规模越大,这种重要性就越是迅速地增长。近年来,结构上完全新型的桥梁正在建造或提出设计方案,在这种情况下,从各个角度把桥梁的抗风特性研究好,是很有必要的。

因此,桥梁结构抗风性的研究,今后也是一个重要课题,这种认识是通过过去技术上的宝贵教训得到的。对于结构物由风造成的破坏事故,让我们作一下历史的回顾,是很有意义的。

记载桥梁结构过去由风造成了哪些破坏事故的文献并不多,但从仅有的一些实例中,也可看出很多特点来。首先最早引起人们重视的,是十九世纪的几座悬索桥的坍塌事故。例如: Dryburgh Abbey悬索桥(1818年), Brighton Chain Pier桥(1836年), Weeling桥(1854年), 然后是1940年的Tacoma Narrows桥等。这些事故有一个共同点,就是它们都引起了反对称的一次扭转振动。另一方面,桥梁由风压引起横向倾覆或破坏的例子,有Tay桥(1879年)、Smith Avenue桥(1904年)、Chester桥(1944年)等。这样的事故并非仅仅造成结构物的破坏,而且还造成了人身伤亡,特别是Tay桥的事故使75人失去了生命。

除了桥梁结构外,一般建筑物、烟囱等,由风造成破坏事故的报告也是相当多的,尤其是架设的事故比较多,这是必须加以注意的。这一点,在1958年加拿大多伦多(Tronto)的碳化物协会大楼(Union Carbide Building)的事故中也可看到。近年来在日本也正在建造超高层建筑物,我们当然应该从这些事故中积极汲取教训。

很早以前,就有人研究结构物在气流中受到什么样的流体力,特别是对土木结构、建筑结构的实验研究, J. Smeaton〔1〕(1759年,英国)、N. V. Duchmin〔2〕(1842年,法国)、J. O. V. Irminger-C. Nokkentved〔3〕(1895年,丹麦)、O. Flachsbart-H. Winter〔4〕(1934年,德国)等人的成果,在这方面起了前驱者的作用。考虑作用在结构物上的风压(Wind pressure)来作一般性处理的,有W. H. Bixby〔5〕(1895年)、H. L. Dryden-G. C. Hill〔6〕(1926年)、R. Fleming〔7〕(1930年)等的研究。随着飞机的发展而深入研究的空气动力弹性力学逐渐引起人们重视,最早指出结构物的振动特性与空气动力学(aerodynamics)之间关系的重要性的,是1934年W. W. Pagon〔8〕的报告。可惜Pagon的警告在当时没有得到应有的评价,一直到几年之后发生Tacoma Narrows桥的事故以前,人们都还未认识到它的重要性。

1940年Tacoma Narrows桥的坍塌事故,对当时的结构技术人员形成的巨大冲击是相当闻名的。该桥在风速仅为19米/秒的情况下就坍塌了,这使得建立在以往所谓静力风荷载概念上的安全性已经没有什么保障了,因为象悬索桥这类柔性较大的结构物,它的安全性显然是

受与振动特性有密切关系的空气动力弹性作用直接控制的。这次事故, 由Farquharson做了记录, 事后又以事故调查委员会〔9〕为中心进行了大规模调查研究, 因而使我们对悬索桥结构的特点及其抗风性能有所了解。

日本在战后, 随着若户大桥、关门桥的建造, 也逐渐积累了长跨度悬索桥的经验, 如今已进入了建造本州四国联络桥的时期。另一方面, 作为特大跨度桥梁的桁桥、拱桥和斜拉桥, 也取得了与以往的结构有显著不同的进步, 这也意味着对桥梁结构及其抗风性有更加详细研究的必要。

本章首先在第11.2节中, 以风压 (Wind pressure) 为对象, 主要叙述风的静力作用特性与桥梁结构、高层建筑的关系; 第11.3节中, 对流体力学的基础理论和非定常流体力, 以及最近的非线性理论和与紊流有关的概率论研究进行了说明; 第11.4节以各种桥梁结构抗风性能实验的特性为中心进行阐述; 第11.5节对风洞实验进行了扼要的介绍。

11.2 结构物的抗风响应

11.2.1 风的特性

在评价地面结构物的抗风性时, 当然必须了解自然风特别是强风的特性。强风的物理机制, 它本身就是气象力学的重要组成部分, 对它进行深入研究是困难的。《本州四国联络桥抗风设计指针·解说》〔10〕中, 从评价结构物的抗风性的角度, 试对风的基本特性进行了若干说明, 这对于我们研究结构物的抗风响应, 以及对于结构物的抗风设计都提供了极为宝贵的资料。这里, 对风的各种特性中一些最基本的性质简单介绍一下。

所谓风, 就是空气的运动, 一般用风速和风向来表示它。在以结构物为对象时, 与平常的风亦即风速较低的风相比, 相对来说, 台风等强风在安全性评价上就更为重要。例如在日本, 台风能大到什么程度? 它的最大风速是多少? 它的经过路线如何? 以及预测它将发生几次等, 是最重要的。强风是以很严格的定义表示的物理现象, 从固定于地面的结构物的角度来看, 一次又一次强风相互之间并没有必然的联系, 而是受极偶然的因素支配的, 因而将它们分别作为固有的事件来考虑恐怕要恰当一些。从这个意义上说, 当以某个特定的结构物和地区为对象时, 可以考虑对强风进行概率论处理。但是风所具有的一些物理特性是共同的, 当然必须在掌握这些特性的基础上来研究风的统计学特性。

首先, 在统计时, 若结构物的耐用年数为 e , 再现期 T 年之间不超过数学期望值 V_R 的概率为 q , 则有下式

$$T = \frac{1}{1 - q^{\frac{1}{e}}} \quad \text{或} \quad q = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^e \quad (11.1)$$

另一方面, 根据极值分布的Fisher-Tippet理论〔10〕, 从变量 x 的总体中取出最大样本值 X 的分布函数可用下式表示

$$\left. \begin{aligned} P(X) &= \exp[-\exp\{-A(X-B)\}] \\ A &= \frac{1}{0.7797\sigma} \\ B &= E(X) - 0.450\sigma \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

因此, 在对结构物进行技术性评价的基础上, 由式 (11.1) 求出再现期, 并将观测结果

代入式 (11.2), 则最大值 X (这时为 V_R) 可由下式求出:

$$(1 - 1/T) = \exp[-\exp\{-A(X - B)\}]$$

这里 $E(X)$ 及 σ 为 X 的总体平均值和标准离差。

再则, 当我们用统计方法推测某特定地点的风速时, 由于不一定能在那个地点进行观测, 一般是在不同的条件下进行的, 因而就要采用把地形因素考虑在内的所谓回归分析。这样, 我们能够算出距地表 10 米高度处的 10 分钟平均风速的数学期望值, 来作为一个基准风速。

在实际使用的公式中, 用幂指数法则来反映风速随高度的变化规律, 若以 V_{10} 表示基准风速, 则距离地表 z 米高度的风速 V_z 可由下式求出

$$V_z = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (11.3)$$

式 (11.3) 中的 α , 随地表自然条件、平均风速而变化, 根据很多研究曾提出过各种 α 值, 在海岸附近等开阔地带, 经常使用 $\alpha = \frac{1}{7} = 0.143$ 。

关于风速随高度的变化规律, Ekman 的研究是很有名的, 据说 Ekman 螺线 (Ekman Spirals) 能很好地说明观测结果 [11]、[12]。可是, 在地形复杂的情况下, 要求得理论风速是困难的, 有必要以观测结果为基础进行推测。

强风一般呈紊流状态, 用物理量阵风系数 (gust factor) 来表示它。所谓阵风系数就是平均风速与观测时间内最大瞬时风速的比值, 大体可按 1.2~1.5 考虑 [13]。可是阵风系数随着高度的增加而减少, 可以认为它也随观测时间、平均风速、地形、地表粗糙状态的不同而变化。

1962 年, 美国 ASCE 风力委员会 [14] 在最后报告书中, 对结构物的抗风性和抗风设计的基准风速、幂指数法则、阵风系数等提出了推荐值。该报告书中, 把重现期为 50 年和 100 年的期望风速标示在美国地图上, 基准风速 (basic wind velocity) 定义为距离地表 30 英尺高度上相对于最长风程的速度 (the velocity of fastest mile-of-wind), 在 1 分钟至 5 分钟的时间内进行测定。

基准风速基本上以 50 年重现期为基础, 特殊情况下对于柔度较大的结构等重要建筑物, 则用 100 年重现期。对于时间短暂的结构, 例如架设期间的桥梁, 则用基本风速的 $\frac{3}{4}$ 。

11.2.2 风 压

作为结构物对强风的响应, 首先要考虑的, 是由力 (风力) 引起的变形或应力。处于气流中的物体受到哪些力的作用呢? 对于如后面所述的二维气流来说, 物体受到升力, 阻力和力矩的作用。即

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 c, \quad D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 c, \quad M = C_M \frac{1}{2} \rho U^2 c^3 \quad (11.4)$$

(可参看式 (11.45))

式中 ρ —— 空气密度

U —— 平均风速

c —— 物体的弦长

C_L —— 升力系数

C_D ——阻力系数

C_M ——力矩系数

升力作用方向与气流方向垂直, 力矩是使物体绕旋转中心转动的矩, 而阻力是在气流方向上的分量, 由作用在物体迎风面和背风面的动压差及表面摩擦力给出。如果从气流的物理机制来看, 它们总是伴随着流线的剥离而出现的, 在表示作用于土木建筑物上的空气力时, 不一定与作用于机翼结构的式 (11.4) 相同。日本的《本州四国连络桥抗风设计指针·解说》^[10] 中, 以 A 为物体单位长度在垂直于气流方向的平面上的投影面积, 则阻力由下式定义:

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (11.5)$$

升力与力矩的表达式与式 (11.4) 同。

将美国的表示方法^[14] 列举如下作为参考:

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 A, \quad D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A, \quad H = C_{CP} h \quad (11.6)$$

升力与阻力的表达式, 与式 (11.4)、式 (11.5) 相同, H 是旋转中心到合力的距离 (moment arm, 力臂) h 是某个代表尺寸。

这样, 风力的表示方法有不同的情况, 但风使结构物所受的力基本上有上述 3 个分量。当然, 在三维问题中, 可以认为力在互相垂直的三个方向上作用, 而且有围绕各轴旋转的 3 个力矩, 但在多数情况下很多结构物都可以通过某种形式得到二维的理想化状态。

由气体所受的力主要是上述的静力, 因此当气流与结构物的非定常响应并不明显时, 通过静力即风压来表示由风引起的结构物的响应是恰当的。所谓非定常响应是指这样一种情况: 除了由于涡流的产生及紊流等的影响外, 还有由结构物变位引起的气流变化, 将使结构物再度受到流体力的作用。

由风形成的力即空气力为静力时, 其大小不仅与风速及空气密度有关, 而且还随着结构物的几何形状、它在气流中的位置、边界条件及摩擦效果等发生显著变化。作用于形状最简单的平板上的风压状态及气动力系数如图 11.1 所示, 其数值列于表 11.1 中。这里应该注意的是板的空间尺寸的影响, 这一般用纵横比 (aspect ratio = L/h) λ 表示, $\lambda = \infty$ 是理想化

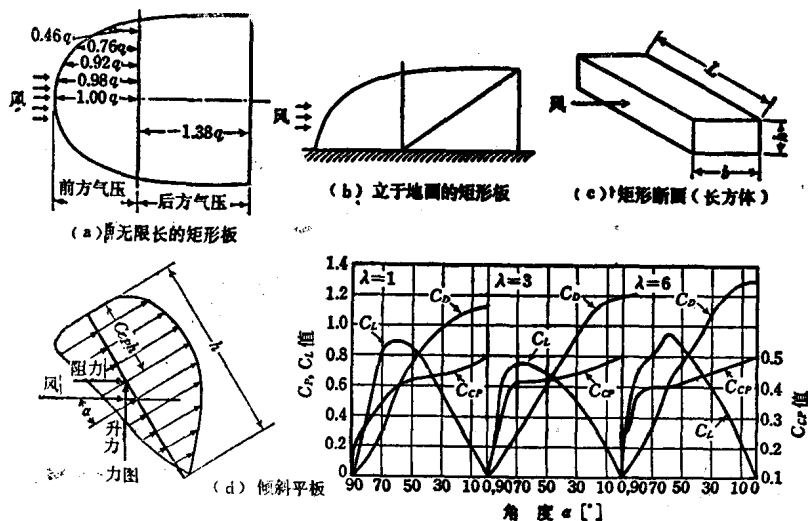


图 11.1 基本断面的风压

的二维气流情况。由表11.1清楚表明,二维状态中,阻力系数 $C_D=1.98$, 作用于板的迎风面的压力为0.60, 而背风面却由于1.38的吸力而产生极为显著的效果。对平板而言, 阻力系数随纵横比的增大而增大, 在矩形断面的情况下, 它有一个最大值, 而随着宽度的增加, C_D 值逐渐减小(可参看图11.36)。

表11.1 阻力系数

	与主气流垂直的板							立在地面上的矩形板			长方体		
	λ (宽/高)							b/h 值					
	1.0	2.0	5.0	10	20	40	∞	1.0	10	∞	0.1	1.0	6.0
正面的压力	0.76						0.60	0.38		0.60			
背面的负压	0.36						1.38	0.72		0.60			
C_D 值	1.12	1.19	1.20	1.23	1.42	1.66	1.98	1.10	1.20	1.20	1.95	2.03	0.90

如图11.1(d)所示, 空气力系数对攻角 (angle of attack) 的变化, 随纵横比的改变而有显著变化。

气流围绕物体流过时, 在物体表面形成边界层, 由于气流与物体的摩擦而引起的摩擦力作用, 阻力系数发生变化。这种摩擦力的影响是由物体的粘性引起的, 这种影响用雷诺 (Reynolds) 数来描述。图11.2表示出几种断面的雷诺数与 C_D 的关系, C_D 随着雷诺数的增加而减少, 特别是在临界雷诺数 (3×10^5) 附近, C_D 值急剧减小。

从图11.2也可以看出, 一般对于具有棱角的断面 (bluff-section) 来说, 雷诺数的影响比较小。

一般建筑结构物中, 对于高层大型建筑物、大型薄壳结构和人字屋顶 (gable roofs) 等形状复杂的结构, 瑞士、丹麦、美国、德国等国在制定建筑设计标准时, 都定出气动力系数或风力系数, 它们不一定都很正确, 都会随着邻近建筑物的影响而发生变化, 对此, 我们有必要加以慎重研究。

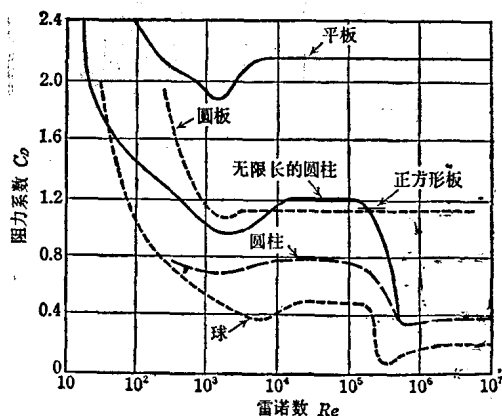


图11.2 雷诺数对各种断面的阻力系数的影响

11.2.3 桥梁结构抗风性的基本特性

桥梁一般是作为在一个方向上实现其功能的结构物来进行设计的, 可大致分为平板、板梁形式、桁梁形式等类。

平板是一个理想断面, 这里我们注意的是板梁及桁梁这两种形式, 下面就对它们的气动力系数进行研究。

桁梁形式与板梁形式不同, 它是由线形杆件构成的, 它的气动力系数随所谓面积比 (Solidity ratio) ϕ 而变化。因而可以认为, 一般情况下与桥梁结构的气动力系数有关的各种因素, 有纵横比、面积比、雷诺数、遮挡作用、攻角及桥面系结构等等。

这些因素中，在很多情况下由于结构物长度较大及外形有棱角，因而纵横比及雷诺数的影响比较小。与此相反，由于面积比与遮挡作用相互间有密切关系，因而呈现出相当复杂的情况[15],[16]。

在一片板梁或桁梁的情况下，没有遮挡作用，最重要的因素是面积比。面积比 ϕ 在0.9以上时几乎没有影响，这时的气动力系数，可以取与垂直于气流方向放置的平板的气动力系数相同。

W.pagon曾提出偏于安全的方案： $\phi \leq 0.6$ 时令 $C_D = 1.8\phi$ ，当 $0.6 < \phi \leq 1.0$ 时， C_D 由纵横比用内插法求出。

两片板梁或桁梁时的实验结果如图11.3(a)~(c)所示。图11.3(a)是实腹板和桁梁的例子，可见迎风面的前一片梁影响到后一片梁，由两片梁组成的结构的效果不一定与两个单片梁效果之和相同，这就是遮挡作用。我们用结构物的间距 s 和它的高度 h 之比 s/h 来表征它。

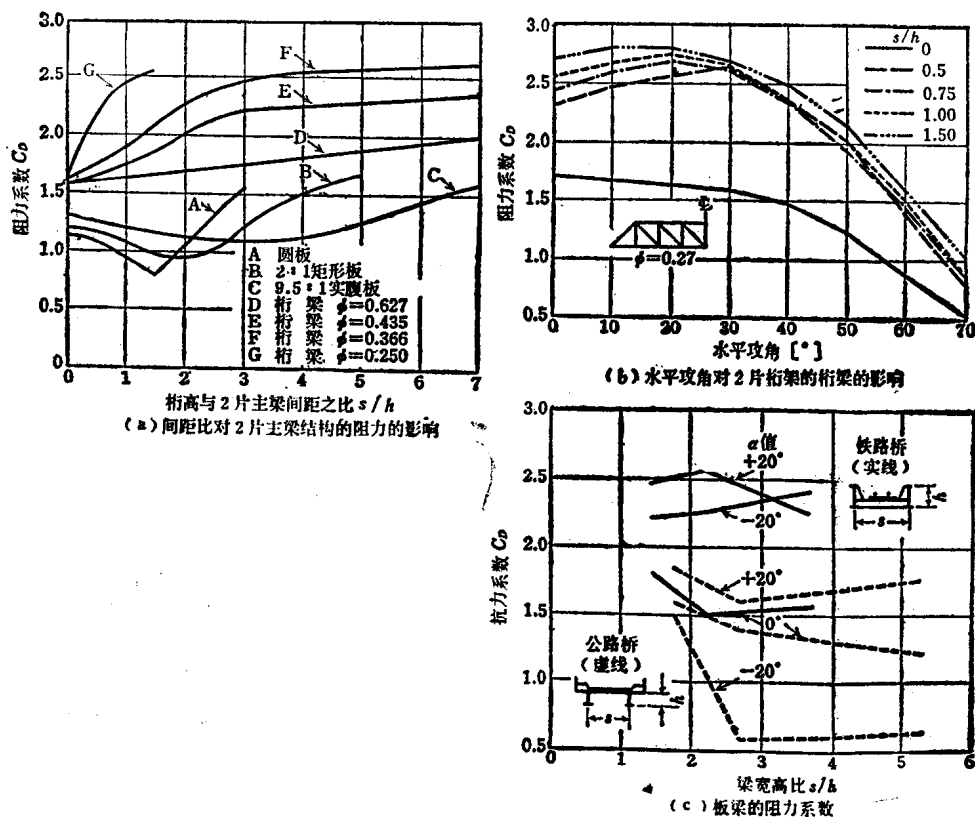


图11.3 阻力系数

Pagon[16]考虑到大部分桁梁结构的 ϕ 都不大于0.4及 s/h 比小于2，对阻力系数给出了下列近似公式

$$C_D = \sqrt{\frac{1.7}{\phi}} + \lg \frac{s}{h} \quad (11.7)$$

当风向在水平面内对结构物有一定偏角时，其实例如图11.3(b)所示。以这个普腊特(Pratt)式桁梁为例， s/h 比的影响也比水平偏角(angle of yaw)的影响大，当水平偏角大于 30° 时，阻力系数随水平偏角的增加而急剧减小。

图11.3(c)是板梁形式的例子,对于上承式板梁和下承式板梁来说,攻角与 s/h 比的效果显著不同。上承式板梁桥在有多片主梁的情况下,一般主梁数目没有多大影响,而桥面系结构却成为重要问题。特别是桥面有长方孔时,会引起流线发生变化,因而有时会使阻力增大。无论如何,对于阻力来说,迎风一侧的结构形式是极为重要的,而对攻角也很有必要详加考虑。为此要用风洞实验来进行研究,图11.4表示出除阻力外的升力及俯仰力矩的特性。

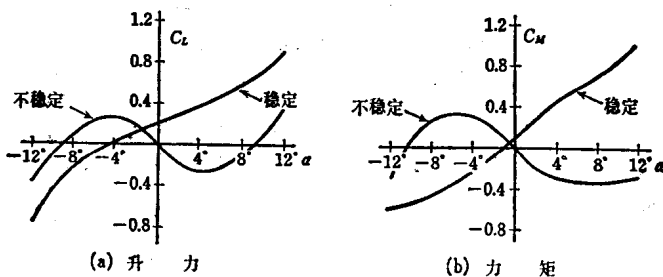


图11.4 静升力力矩曲线

对于塔柱结构,同样也这样考虑,Cohen-Perrin^[17]提出正方形断面塔柱的阻力系数为:

$$C_D = 4 - 5\phi \quad (11.8)$$

而Pagon^[16]提出的近似公式是:

$$C_D = \sqrt{\frac{3}{2\phi}} \quad (11.9)$$

这两个近似公式得出的结果实际上大致相同,当考虑水平偏角时需乘以 $(1.1 + 0.4\phi)$ 的修正值。当使用圆形断面杆件时,其阻力系数大致减少1/3^[14]。

11.2.4 桥梁结构的动力抗风响应

结构物在气流中受到什么样的力,会作出什么样的响应,这将在11.3节中加以说明。在考虑它的抗风响应时,由于结构物的柔性(flexibility)和振动特性,有假定空气力为静力和必须考虑动力特性这两种情况。考虑静力响应时将空气力视为外力即可,这时有平衡问题,也有稳定问题,例如桥梁结构,就必须求出发生扭转屈曲的临界风速。可以说,这个临界风速相当于飞机的发散(divergence)现象,日本的平井^[18]的研究也属于这个范畴。对于悬索桥这类柔度较大而且自振频率较低的结构物来说,在气流引起的空气力作用下,使结构物发生变形,这种变形反过来又引起气体力发生变化,这时气流就不是定常流动了,这就必须求出考虑结构物非定常性(振动特性)的流体力,因此,这问题本身就是稳定问题,有时也成为非线性平衡问题。

桥梁结构这种空气动力弹性响应有各种分类方法,美国风力委员会^[14]作了如下分类:

- (1) 高频响应(由涡流引起的振动)
- (2) 由气动力系数的负梯度引起的振动(galloping, 疾振)
- (3) 耦合颤振、一次颤振(flutter)
- (4) 抖振(buffeting)

而A.G.Davenport^[19]的分类如下:

- (1) 强迫振动:
 1. 由结构物本身的尾流引起的抖振
 2. 由其他结构物的尾流引起的抖振
 3. 由大气紊流引起的抖振