



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

高校土木工程学科
专业指导委员会规划推荐教材

工程结构荷载与 可靠度设计原理

(第二版)

李国强 黄宏伟 郑步全 编著



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

面向 21 世纪 课程 教材

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

工程结构荷载与 可靠度设计原理

(第二版)

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

李国强 黄宏伟 郑步全 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构荷载与可靠度设计原理/李国强等编著. 2版.
—北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 4

面向 21 世纪课程教材 高校土木工程学科专业指导委员会
规划推荐教材

ISBN 7-112-04627-0

I. 工… II. 李… III. ①工程结构-结构荷载-高等学校-教材②工程结构-结构可靠性-结构设计-高等学校-教材
IV. TU31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 18436 号

荷载是工程结构设计的一个重要方面,也是着手一项工程设计要解决的一个重要问题,而概率可靠度方法已成为各类工程结构(房屋、桥梁、地下建筑、道路等)设计的理论基础。本书全面、系统地介绍了工程结构各类荷载的基本概念及其确定方法,以及结构可靠度分析与设计理论。全书分十章:荷载类型;重力;侧压力;风荷载;地震作用;其它作用;荷载的统计分析;结构抗力的统计分析;结构可靠度分析;结构概率可靠度设计法。

本书是根据国家教育部大学本科新专业目录规定的土木工程专业培养要求编写的,可作为土木工程专业的专业基础教材,也可供从事各类工程结构设计与施工的工程技术人员参考。

责任编辑 朱首明

面向 21 世纪课程教材 高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材 工程结构荷载与可靠度设计原理 (第二版)

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

李国强 黄宏伟 郑步全 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×960毫米 1/16 印张: 12¼ 插页: 2 字数: 238千字

2001年4月第二版 2001年4月第二次印刷

印数: 4001—7000册 定价: 18.00元

ISBN 7-112-04627-0

TU·4144(10077)

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)

第二版 前 言

为适应高校教育教学改革后土木工程专业的教学需要,本教材第一版于1999年底出版,同济大学于2000年开始开设“荷载与结构设计原理”课并使用本教材。由于是第一次开设这门课程,教师以本教材为基础进行了集体备课,讨论了讲课重点,准备了共用的投影胶片,授课效果良好,让学生对工程结构设计需考虑的荷载和设计的一些基本概念有较全面的了解,尽管学生反映课内学时较少,但通过参阅本教材,也能掌握本教材所述主要内容。其他学校教师反映也较好。

承蒙全国高校土木工程学科专业指导委员会的推荐,本教材被教育部批准为“面向21世纪课程教材”,趁出版第二版之机,我们对本教材内容做了少许调整和补充,同时对原版中的一些错误作了更正。由于本教材出版时间还不长,衷心期望读者和使用本教材的教师多给我们提出意见和指出书中不当或错误之处,以便我们今后进一步修订、完善。

李国强

2001年4月

第一版 前 言

1998年,教育部颁布了新的大学本科专业目录,将原来500多个专业合并减少了一半,其中原建筑工程专业、交通土建专业等合并拓展成土木工程专业。这一举措,实际上是我国高等教育改革的一项重要内容,标志着我国高级人才培养模式向专业宽口径转变。为适应这一转变,建设部专门列出了面向21世纪的土木工程专业结构系列课程教学改革研究课题,该课题的研究结论之一,就是建议将工程结构荷载和可靠度设计原理列为土木工程专业学生的专业基础教学内容。

各类工程结构(如建筑、桥梁、输电塔等)的最重要功能,就是承受其生命全过程中可能出现的各种荷载。结构设计时,荷载取值的大小及应考虑哪些荷载,将直接影响结构工作时的安全性。因此,工程结构设计时,需考虑哪些荷载,这些荷载产生的背景,以及各种荷载的计算方法应是一名结构工程师所具备的基本专业知识,因而也是土木工程专业学生需掌握的结构工程基本内容。

工程结构的设计方法经历了经验定值设计法、半经验半概率定值设计法和概率定值设计法三个阶段,目前国际上关于工程结构设计,普遍采用概率定值设计法。所谓概率定值设计法,是以结构概率可靠度为基础,以确定性荷载和确定性结构抗力为形式的结构设计方法。这种设计方法既便于工程师直观地运用,又具有明确的概率可靠度意义,而为我国各种工程结构设计规范所采用。因此,要理解我国现行工程结构设计方法,就必须掌握工程结构可靠度设计原理。

结构设计包括三部分内容:一是荷载,二是结构抗力,三是结构设计方法。本书涉及荷载和结构设计方法两部分内容,而结构抗力则由有关“钢筋混凝土结构”、“钢结构”等书或教材介绍。本书分两篇,分别介绍了荷载的分类及重力、土压力、水压力、风荷载、地震作用、爆炸作用、温度作用、波浪荷载等重要荷载的概念、原理和计算方法,以及荷载与结构抗力的统计分析、结构可靠度分析、结构概率可靠度设计法等重要内容。本书大纲的拟定和统稿由李国强负责,其中第二章第一、二节、第三章、第六章第一、二、三、四节由黄宏伟执笔,第二章第四节、第六章第五、六、七节由郑步全执笔,其余各章节由李国强执笔。

本书作者感谢建设部土木工程专业结构系列课程教学改革课题组的陈以一、袁勇、朱合华、李国平等教授,他们对本书大纲的确定提出了许多建设性意见。另要特别感谢潘士劼教授、张庆智教授和陈忠延教授,他们仔细阅读了本书的手稿,对本书的内容提出了很多宝贵的意见和建议。我本人还要感谢香港Croucher基金会和香港理工大学土木及结构工程系,他们为我于1999年初在香港短期工作访问提供了很好的工作条件,使我在香港期间完成了本书的修改与定稿工作。最后,我

要感谢我的硕士研究生段颖智同学,她花费了大量时间和精力打印了本书的手稿。

本书作为大学本科关于结构工程的一本专业基础教学参考书还是第一次,由于我们学识有限,书中不当或错误之处,敬望读者批评指正。

李国强

1999年5月



面向21世纪课程教材



上海普通高校“九五”重点教材

目 录

第 1 篇 工程结构荷载

第 1 章 荷载类型	1
§ 1.1 荷载与作用	1
§ 1.2 作用的分类	2
思考题	2
第 2 章 重力	3
§ 2.1 结构自重	3
§ 2.2 土的自重应力	3
§ 2.3 雪荷载	5
§ 2.4 车辆重力	10
§ 2.5 楼面活荷载	13
§ 2.6 人群荷载	14
思考题	15
第 3 章 侧压力	16
§ 3.1 土的侧向压力	16
§ 3.2 水压力及流水压力	21
§ 3.3 波浪荷载	23
§ 3.4 冻胀力	28
§ 3.5 冰压力	32
§ 3.6 撞击力	33
思考题	33
第 4 章 风荷载	35
§ 4.1 风的有关知识	35
§ 4.2 风压	38
§ 4.3 结构抗风计算的几个重要概念	45
§ 4.4 顺风向结构风效应	50
§ 4.5 横风向结构风效应	61
思考题	69
第 5 章 地震作用	70
§ 5.1 地震基本知识	70

§ 5.2 单质点体系地震作用	80
§ 5.3 多质点体系地震作用	89
思考题	99
第 6 章 其他作用	101
§ 6.1 温度作用	101
§ 6.2 变形作用	102
§ 6.3 爆炸作用	104
§ 6.4 浮力作用	108
§ 6.5 制动力与冲击力	109
§ 6.6 离心力	110
§ 6.7 预加力	111
思考题	114
第 2 篇 工程结构可靠度设计原理	
第 7 章 荷载的统计分析	115
§ 7.1 荷载的概率模型	115
§ 7.2 荷载的各种代表值	119
§ 7.3 荷载效应及荷载效应组合	121
思考题	124
第 8 章 结构抗力的统计分析	125
§ 8.1 影响结构抗力的不定性	125
§ 8.2 结构构件材料性能的不定性	126
§ 8.3 结构构件几何参数的不定性	128
§ 8.4 结构构件计算模式的不定性	129
§ 8.5 结构构件抗力的统计特征	131
思考题	135
第 9 章 结构可靠度分析	136
§ 9.1 结构可靠度基本概念	136
§ 9.2 结构可靠度分析的实用方法	141
§ 9.3 相关随机向量的结构可靠度计算	151
§ 9.4 结构体系的可靠度	159
思考题	163
第 10 章 结构概率可靠度设计法	164
§ 10.1 结构设计的目标	164
§ 10.2 结构概率可靠度的直接设计法	165
§ 10.3 结构概率可靠度设计的实用表达式	169

思考题	181
附录 常用工程结构材料密度	183
参考文献	186

第 1 篇 工程结构荷载

第 1 章 荷载类型

§ 1.1 荷载与作用

工程结构（如房屋、桥梁、隧道等）最重要的一项功能是承受其使用过程中可能出现的各种环境作用。如房屋结构要承受自重、人群和家具重量以及风和地震作用等，桥梁结构要承受车辆重力、车辆制动力与冲击力、水流压力等，隧道结构要承受水土压力、爆炸作用等。将由各种环境因素产生的直接作用在结构上的各种力称为荷载。由地球引力产生的力为重力，任何结构都将受到重力的作用。由土、水、风等产生的作用在结构上的压力称为土压力、水压力、风压力（习惯称风荷载或风载）。由爆炸、运动物体的冲击、制动或离心作用等产生的作用在结构上的其它物体的惯性力也均称为荷载。

作用在结构上的荷载会使结构产生内力、变形等（称为效应）。结构设计的目标就是确保结构的承载能力足以抵抗内力，而变形控制在结构能正常使用的范围内。工程师发现，进行结构设计时，不仅要考虑上述直接作用在结构上的各种荷载作用，还应考虑引起结构内力、变形等效应的其它非直接作用因素。能够引起结构内力、变形等效应的非直接作用因素，如地震、温度变化、基础不均匀沉降、焊接等，称为间接作用。

为了统一，将能使结构产生效应（结构或构件的内力、应力、位移、应变、裂缝等）的各种因素总称为作用；而将可归结为作用在结构上的力的因素称为直接作用（图 1-1a）；将不是作用力但同样引起结构效应的因素称为间接作用（图 1-1b）。严格意义上，只有直接作用才可称为荷载，但习惯上（特别是工程中）也将间接作用称为荷载，此时荷载可理解为具有广义的意义。狭义的荷载（或严格

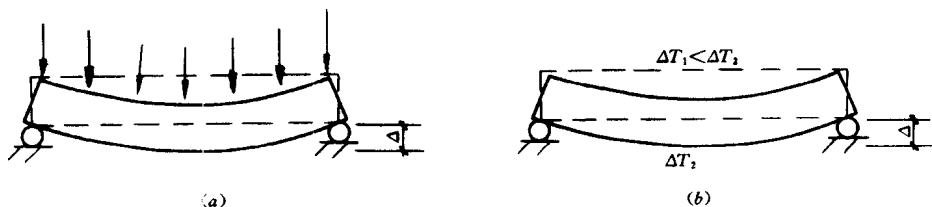


图 1-1 作用与效应

(a) 直接作用（重力）；(b) 间接作用（升温）

意义的荷载)与直接作用等价,而广义的荷载(包括直接作用与间接作用)与作用等价。

§ 1.2 作用的分类

为便于工程结构设计,且利于考虑不同的作用所产生的效应的性质和重要性不同,对结构承受的各种环境作用,可按下列原则分类:

1. 按随时间的变异分类

(1) 永久作用:在结构设计基准期内其值不随时间变化,或其变化与平均值相比可以忽略不计。例如,结构自重、土压力、水压力、预加应力、基础沉降、焊接等。

(2) 可变作用:在结构设计基准期内其值随时间变化,且其变化与平均值相比不可忽略。例如,车辆重力、人员设备重力、风荷载、雪荷载、温度变化等。

(3) 偶然作用:在结构设计基准期内不一定出现,而一旦出现其量值很大且持续时间较短。例如,地震、爆炸等。

由于可变作用的变异性比永久作用的变异性大,可变作用的相对取值(与其平均值之比)应比永久作用的相对取值大。另外,由于偶然作用的出现概率较小,结构抵抗偶然作用的可靠度可比抵抗永久作用和可变作用的可靠度低。

2. 按随空间位置的变异性分类

(1) 固定作用:在结构空间位置上具有固定的分布。例如,结构自重、结构上的固定设备荷载等。

(2) 可动作用:在结构空间位置上的一定范围内可以任意分布。例如,房屋中的人员、家具荷载、桥梁上的车辆荷载等。

由于可动作用可以任意分布,结构设计时应考虑它在结构上引起最不利效应的分布情况。

3. 按结构的反应分类

(1) 静态作用:对结构或结构构件不产生加速度或其加速度可以忽略不计。例如,结构自重、土压力、温度变化等。

(2) 动态作用:对结构或结构构件产生不可忽略的加速度。例如,地震、风、冲击和爆炸等。

对于动态作用,必须考虑结构的动力效应,按动力学方法进行结构分析,或按动态作用转换成等效静态作用,再按静力学方法进行结构分析。

思 考 题

- 1.1 荷载与作用在概念上有何不同?
- 1.2 说明直接作用与间接作用的区别。
- 1.3 作用(或荷载)有哪些类型?

第2章 重 力

§ 2.1 结 构 自 重

结构的自重是由地球引力产生的组成结构的材料重力，一般而言，只要知道结构各部件或构件尺寸及所使用的材料资料，就可根据材料的重度，算出构件的重量：

$$G_b = \gamma V \quad (2-1)$$

式中 G_b ——构件的自重 (kN)；

γ ——构件材料的重度 (kN/m³)；

V ——构件的体积，一般按设计尺寸确定 (m³)。

本书附录列举了工程结构基本材料的质量密度，可予以参考。式 (2-1) 适用于一般建筑结构、桥梁结构以及地下结构等各构件自重计算，但必须注意土木工程中结构各构件的材料重度可能不同，计算结构总自重时可将结构人为地划分为许多容易计算的基本构件，先计算基本构件的重量，然后叠加即得到结构总自重，计算公式为：

$$G = \sum_{i=1}^n \gamma_i V_i \quad (2-2)$$

式中 G ——结构总自重 (kN)；

n ——组成结构的基本构件数；

γ_i ——第 i 个基本构件的重度 (kN/m³)；

V_i ——第 i 个基本构件的体积 (m³)。

在进行建筑设计时，为了工程上应用方便，有时把建筑物看成一个整体，将结构自重转化为平均楼面恒载。作为近似估算，对一般的木结构建筑，其平均楼面恒载可取为 1.98~2.48kN/m²；对钢结构建筑，平均恒载大约为 2.48~3.96kN/m²；对钢筋混凝土结构的建筑，其值在 4.95~7.43kN/m² 之间；而对预应力混凝土建筑，建议可取普通钢筋混凝土建筑恒载的 70%~80%。

在进行道路工程设计时，尤其在高速公路的设计中，应特别重视路堤的重力效应。路堤的自重计算可参照下一节土的自重计算，在此不再赘述。

§ 2.2 土 的 自 重 应 力

土是由土颗粒、水和气所组成的三相非连续介质。若把土体简化为连续体，而

应用连续介质力学（例如弹性力学）来研究土中应力的分布时，应注意到，土中任意截面上都包括有骨架和孔隙的面积在内，所以在地基应力计算时都只考虑土中某单位面积上的平均应力。必须指出，只有通过土粒接触点传递的粒间应力才能使土粒彼此挤紧，从而引起土体的变形，而且粒间应力又是影响土体强度的一个重要因素，所以粒间应力又称为有效应力。因此，土的自重应力即为土自身有效重力在土体中所引起的应力。

在计算土中自重应力时，假设天然地面是一个无限大的水平面，因此在任意竖直面和水平面上均无剪应力存在。如果地面下土质均匀，土层的天然重度为 γ ，则在天然地面下任意深度 z 处 a - a 水平面上的竖直自重应力 σ_{cz} ，可取作用于该水平面上任一单位面积的土柱体自重 $\gamma z \times 1$ 计算，即：

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (2-3)$$

σ_{cz} 沿水平面均匀分布，且与 z 成正比，即随深度按直线规律分布。如图2-1所

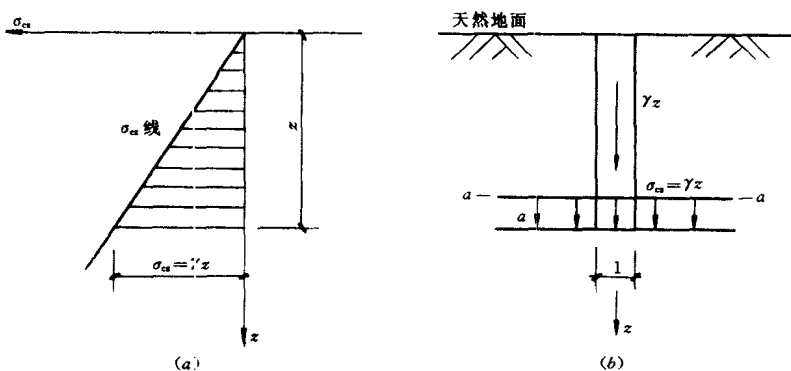


图 2-1 均质土中竖向自重应力

(a) 沿深度的分布；(b) 任意水平面的分布

示。一般情况下，地基土是由不同重度的土层所组成。天然地面下深度 z 范围内各层土的厚度自上而下分别为 h_1 、 h_2 、 \dots 、 h_i 、 \dots 、 h_n ，则成层土深度 z 处的竖直有效自重应力的计算公式为：

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2-4)$$

式中 n ——从天然地面起到深度 z 处的土层数；

h_i ——第 i 层土的厚度（m）；

γ_i ——第 i 层土的天然重度，若土层位于地下水位以下，由于受到水的浮力作用，单位体积中，土颗粒所受的重力扣除浮力后的重度称为土的有效重度 γ'_i ，是土的有效密度与重力加速度的乘积，这时计算土的自重应力应取土的有效重度 γ'_i 代替天然重度 γ_i 。对一般土，常见变化范

围为 $8.0\sim 13.0\text{kN/m}^3$ 。

计算土中竖向自重应力在划分土层时，一般以每层土为原则，但需考虑地下水位，若地下水位位于某一层土体中，则需将该层土划分为二层土。图 2-2 为一典型成层土中竖向自重应力沿深度变化的分布。

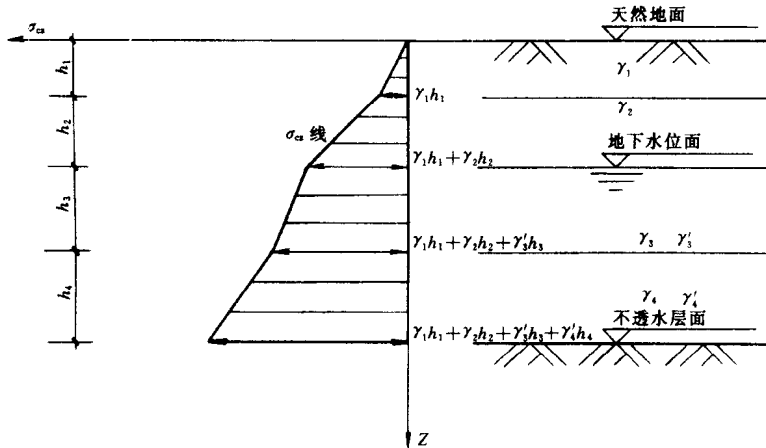


图 2-2 成层土中竖向自重应力沿深度的分布

§ 2.3 雪荷载

雪荷载是房屋屋面的主要荷载之一。在我国寒冷地区及其它大雪地区，因雪荷载导致屋面结构以及整个结构破坏的事例时有发生。尤其是大跨度结构，对雪荷载更为敏感。因此在有雪地区，在结构设计中必须考虑雪荷载。

2.3.1 基本雪压

所谓雪压是指单位面积地面上积雪的自重，而基本雪压是指当地空旷平坦地面上根据气象记录资料经统计得到的在结构使用期间可能出现的最大雪压值。决定雪压值大小的是雪深和雪重度，即

$$S = \gamma d \quad (2-5)$$

式中 S ——雪压 (N/m^2)；

γ ——雪重度 (N/m^3)；

d ——雪深 (m)。

1. 雪重度

雪重度是一个随时间和空间变化的量，它随积雪厚度、积雪时间的长短即地理气候条件等因素的变化而有较大的差异。

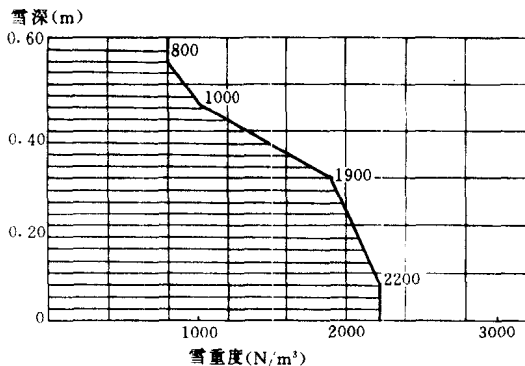


图 2-3 雪重度随雪深的变化

新鲜下落的雪重度较小, 大约为 $500 \sim 1000 \text{ N/m}^3$ 。当积雪达到一定的厚度时, 积存在下层的雪由于受到上层雪的压缩其密度增加。越靠近地面, 雪的重度越大, 雪深越大, 下层的重度越大。图 2-3 是在法国某地实测得到的雪重度随雪深度的变化。

在寒冷地区, 积雪时间一般较长甚至存在整个冬季, 随着时间的延续, 积雪由于受到压缩、融化、蒸发及人为搅动等, 其重度不断增加。从冬初到冬末, 雪重度可差 1 倍。图 2-4 为某地雪重度随时间的变化。

不少国家对雪重度作了统计研究, 得出一些有关雪重度 $\gamma (\text{N/m}^3)$ 的计算公式。例如:

(1) 前苏联建议的公式

$$\gamma = (90 + 130 \sqrt{d})(1.5 + 0.17 \sqrt[3]{T})(10 + \sqrt{v}) \quad (2-6)$$

式中 d ——雪深 (m);

T ——整个积雪期间的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);

v ——整个积雪期间的平均风速 (m/s)。

(2) 瑞典建议的公式

$$\gamma = 1550 + 7t \quad (2-7)$$

式中 t ——11 月份以后的积雪存留天数。

(3) 匈牙利建议的公式

$$\gamma = 1530 + 495R \quad (2-8)$$

式中 R ——降雪次数。

(4) 国际结构安全联合委员会建议的公式

$$\gamma = 3000 - 2000e^{-1.5d} \quad (2-9)$$

式中 d ——雪深 (m)。

可见, 雪重度是随雪深和时间变化的。然而为工程应用方便, 常将雪重度定为常值, 即以某地区的气象记录资料经统计后所得雪重度平均值或某分位值作为该地区的雪重度。例如, 前苏联、罗马尼亚等国家取雪重度为 2.2 kN/m^3 , 加拿大取

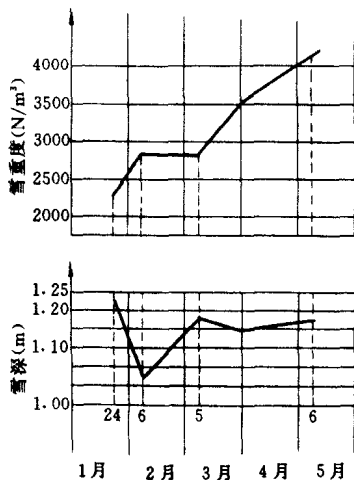


图 2-4 雪重度随时间的变化

2kN/m^3 ，法国取 1.5kN/m^3 。而我国由于幅员辽阔，气候条件差异较大，故对不同地区取不同的雪重度值，东北及新疆北部地区取 1.5kN/m^3 ；华北及西北地区取 1.3kN/m^3 ，其中青海取 1.2kN/m^3 ；淮河、秦岭以南地区一般取 1.5kN/m^3 ，其中江西、浙江取 2.0kN/m^3 。

2. 基本雪压的统计

确定了雪重度以后，只要量测雪深，就可按式 (2-5) 计算雪压。基本雪压一般根据年最大雪压进行统计分析确定。图 2-5 是我国按 30 年一遇重现期确定的基本雪压分布图。

应当指出，最大雪深与最大雪重度两者并不一定同时出现。当年最大雪深出现时，对应的雪重度多数情况下不是本年度的最大值。因此采用平均雪重度来计算雪压有一定的合理性。当然最好的方法是像美国气象部门一样，直接记录地面雪压值，这样可避免最大雪深与最大雪重度不同时出现带来的问题，所以能准确确定真正的年最大雪压值。

3. 海拔高度对基本雪压的影响

一般山上的积雪比附近平原地区的积雪要大，并且随山区地形海拔高度的增加而增大。其中主要原因是由于海拔较高地区的温度较低，从而使降雪的机会增多，且积雪的融化延缓。图 2-6 是欧洲一些国家给出的基本雪压随海拔高度的变化曲线。

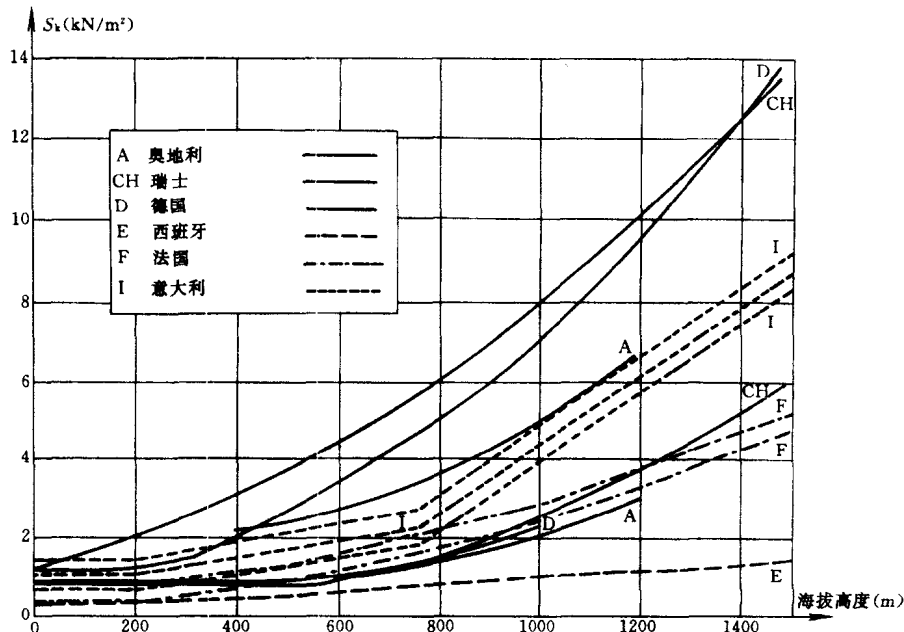


图 2-6 欧洲国家地面雪压随海拔高度的变化