

高等学校土木工程专业系列选修课教材

建筑结构设计

本系列教材编委会组织编写

孙伟民 李琪 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构设计/孙伟民,李琪主编.

—北京:中国建筑工业出版社,2000.12

高等学校土木工程专业系列选修课教材

ISBN 7-112-04212-7

. 建... . 高... . 建筑结构-结构设计-高等学校-
教材 . TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 55647 号

本书对建筑结构设计的基本理论及基本方法作了简明扼要的介绍,作为工科院校非结构工程的大学本科生教材,全书共分六章,内容包括:建筑结构设计的一般概念,砌体混合结构,钢筋混凝土框架结构,钢筋混凝土高层建筑结构,建筑结构的基础设计,建筑结构设计程序简介等。每章末尾有思考题。本书注重理论与工程实际的结合,注意培养学生解决实际问题的能力。

本书也可供有关土木工程技术人员自学与参考。

高等学校土木工程专业系列选修课教材

建筑结构设计

本系列教材编委会组织编写

孙伟民 李琪 主编

*

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

印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:9 字数:224千字

2000年12月第一版 2000年12月第一次印刷

印数:1—3000册 定价:11.50元

ISBN 7-112-04212-7

TU·3321(9693)

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)

土木工程专业系列选修课教材

编委会名单

主任委员:宰金珉

副主任委员:刘伟庆

委员:(按姓氏笔划为序):

王国体 艾 军 刘 平 孙伟民 刘伟庆

刘 瑞 朱聘儒 陈忠汉 陈国兴 吴胜兴

完海鹰 李 琪 柳炳康 宰金珉 章定国

前 言

本书简明扼要地对建筑设计的基本理论及基本设计方法作了介绍,对已掌握一般钢筋混凝土结构理论的大专院校本科生(非结构工程专业)作为选修课教材或参考书,以适应土木工程大学科、宽口径、知识面广的需要。本书也可供有关土木工程技术人员自学与参考。

全书共分六章,内容包括:建筑设计的一般概念,砌体混合结构,钢筋混凝土框架结构,钢筋混凝土高层建筑结构,结构的基础设计,建筑设计程序简介等。

限于篇幅,本书着重讲清基本概念和基本设计方法,设计中所需用的图表请查阅其他有关设计手册、规范和书籍。

本书由五校合编,具体分工如下:第1章、第2章由黄慎江编写(合肥工业大学);第3章由余培明编写(苏州城建环保学院);第4章由孙伟民,胡朝斌编写(南京建筑工程学院);第5章由李琪编写(扬州大学);第6章由钱文君编写(南京建筑工程学院);成稿后由孙伟民、李琪负责统稿;由章定国主审(河海大学)。

在编写过程中,我们互相磋商,反复推敲,共同定稿,力求深入浅出,通俗易懂。但由于水平有限,时间仓促,书中一定还存在不少错误和缺点,衷心希望读者批评指正。

目 录

第 1 章	建筑结构设计的一般概念	1
1.1	建筑结构上的作用	1
1.2	建筑结构上的地震作用	5
1.3	建筑结构设计方法	8
第 2 章	砌体混合结构	13
2.1	砌体及其受压性能	13
2.2	砌体混合结构房屋的静力计算概述	17
2.3	墙体的布置与构造	22
2.4	墙体的抗震要求与构造	28
2.5	墙体承载力计算和高厚比验算	31
2.6	楼(屋)盖结构设计	39
第 3 章	钢筋混凝土框架结构	45
3.1	钢筋混凝土框架结构	45
3.2	框架结构房屋的结构布置	45
3.3	框架结构梁柱截面尺寸的确定	48
3.4	框架的抗震要求及构造	51
3.5	框架静力计算概述	61
3.6	框架梁柱承载力计算及侧移控制	67
第 4 章	钢筋混凝土高层建筑结构	74
4.1	结构体系	74
4.2	结构布置的一般原则	79
4.3	荷载计算	84
4.4	剪力墙结构计算方法概述	85
4.5	框架-剪力墙结构协同工作计算方法概述	89
4.6	荷载效应组合	100
4.7	结构设计的一般规定	102
4.8	剪力墙、连梁承载力设计及构造	105
第 5 章	建筑结构设计的基础设计	112
5.1	基础设计的一般规定	112
5.2	天然地基上浅基础设计	113
5.3	桩基础设计	124
5.4	地基变形计算简介	130
第 6 章	建筑结构设计程序简介	132
6.1	概述	132
6.2	上部结构设计常用程序介绍	133
6.3	基础设计常用程序	139
参考文献		142

第 1 章 建筑结构设计的一般概念

1.1 建筑结构上的作用

1.1.1 作用的概念及其分类

1. 作用的概念

施加在结构上的集中力或分布力以及引起结构外加变形或约束变形的原因,均称为结构上的作用。

建筑结构上的作用形式多样、性质各异。从总体上说,作用分为直接作用和间接作用两大类。直接作用是指直接施加在结构上的集中力和分布力,习惯上称为荷载,如由各种结构构件或构造作法引起的重力荷载、使用活荷载、雪荷载、风荷载和吊车荷载等;间接作用是指引起结构外加变形或约束变形的各种原因,如地震、温度变化、地基不均匀沉降等。这些作用会导致结构或构件产生内力和变形(统称作用效应),甚至可能造成结构构件破坏或因变形过大而不能继续使用。因此,在进行结构设计时首先应弄清结构上存在哪些作用,它们的性质如何,怎样取值以及在结构设计中如何表达等问题。

2 作用的分类

结构上的作用可以按下列原则分类:

(1)按随时间的变异分类

1)永久作用:在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、预加应力、基础沉降、焊接等。

2)可变作用:在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,安装荷载、楼面活荷载、风荷载、雪荷载、吊车荷载、裹冰荷载、温度变化等。

3)偶然作用:在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、撞击、爆炸、龙卷风、罕遇洪水等。

(2)按随空间位置的变异分类

1)固定作用:在结构空间位置上具有固定的分布。例如,工业与民用建筑楼面上固定设备荷载、结构构件自重等。

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,工业与民用建筑楼面上的人员荷载、吊车荷载等。

(3)按结构的反应分类

1)静态作用:不使结构或结构构件产生加速度,或所产生的加速度可以忽略不计。例如,结构自重、住宅与办公楼的楼面活荷载等。

2)动态作用:使结构或结构构件产生不可忽略的加速度。例如,地震、吊车荷载、设备振动、作用在高耸结构上的风荷载等。

在建筑结构设计中涉及的荷载,通常按随时间的变异分类。且除永久荷载外,一般都是随时间变化的可变荷载。

在建筑结构设计,间接作用的计算有专门规范加以规定。为方便起见,以下均统一以荷载表示作用。

3 荷载的表达及其代表值

由于作用在结构上的荷载与建筑物所在地区、所用材料、使用状态以及时间等多种因素有关,而这些因素又往往都是随机的,所以荷载也都是随机变量。

不同类型的荷载,在结构设计中的表达方式也有所不同,它直接关系到荷载变量的概率模型、荷载的代表值及其效应组合形式的选择。

《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)(以下称《统一标准》)规定,施加在结构上的随时间变化的规律宜采用随机过程概率模型描述,而进行结构设计时应采用不同的荷载代表值。永久荷载采用标准值作为代表值;可变荷载则采用标准值、组合值或准永久值作为代表值。

荷载标准值是结构设计时采用的荷载基本代表值。它代表结构上可能出现的最不利作用值。可变荷载组合值是指结构上同时出现多个可变荷载时所取用的较大作用值,而其准永久值则代表结构上经常出现的可变荷载值。可变荷载的组合值和准永久值均可采用标准值乘以小于1的系数表达。

偶然荷载应根据观测资料和工程经验,经综合分析确定其代表值。有关荷载代表值的确定原则可参见《统一标准》中的具体规定。

一般说来,建筑物上的各种荷载标准值和准永久值系数都可以从《建筑结构荷载规范》(GBJ9—87)(以下称《荷载规范》)上查到。如果作用在结构上的实际荷载超出《荷载规范》的规定,设计时应按实际情况或采用实测、类比等方法确定其标准值。

下面就有关结构上的常遇荷载标准值讨论其确定方法。

1.1.2 永久荷载(恒载)

永久荷载通常是指由建筑物内部各构配件的质量所引起的地心引力,它包括各种结构构件自重、构造层及固定设备等重力荷载。永久荷载习惯上也称为恒载。

设计结构构件时一般先按照工程经验设定构件和构造层的作法,算出其体积或面积,再乘以相应的单位密度或其单位面积重量,即可得到恒载标准值。再通过相应的内力计算公式计算出内力。这是结构设计必不可少的基本内容之一。

常用建筑材料的重度和建筑构造层做法的重量详见《荷载规范》。

1.1.3 楼面活荷载

建筑物楼面活荷载系指人群、家具、办公用具、临时隔墙和机器设备等使用荷载。它是一种随时间和不同使用情况有较大变化的可变自由作用,并且以一系列集中力或局部分布力的形式施加在楼面上。在结构设计中,对于这些实际作用的分散局部荷载,常将其折算成

作用在全楼面的等效均布活荷载,它通常根据在设计控制部位的内力(弯矩、剪力等)等值要求来确定。

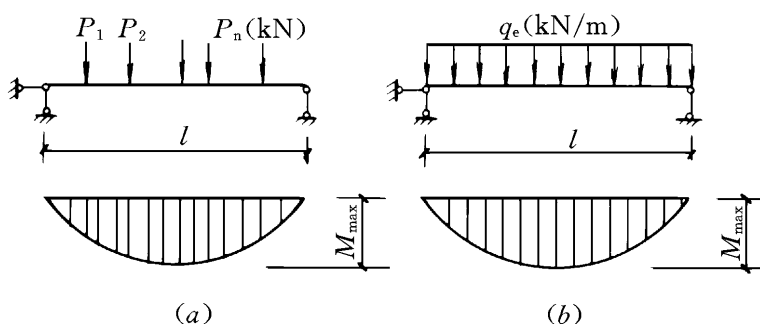


图 1-1 等效均布荷载的概念

图 1-1(a)是一块由楼面取出的简支板计算简图,跨度 l ,假定板上作用有实测得到的若干集中荷载 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$,荷载有效分布宽度 b ,则可求得楼板跨中最大弯矩

M_{max} 。如果将 P_i 换成图 1-1 (b) 所示的均布荷载 q_e ，使得由 q_e 产生的跨中最大弯矩亦等于 M_{max} ，则此均布荷载

$$q_e = \frac{8 M_{max}}{bl^2} \quad (1-1)$$

称为集中荷载 P_i 的“跨中弯矩等效均布荷载”。

在《荷载规范》中，利用等效均布荷载的概念，通过对大量已使用的楼面活荷载进行实测和计算，得到各种楼面等效均布活荷载的数据，经过概率统计分析后，确定了各种类型的民用建筑和某些工业建筑的楼面活荷载标准值，供结构设计时查用。对《荷载规范》中没有作出规定的楼面活荷载标准值可参照表 1-1 选用。

民用建筑楼面活荷载 表 1-1

建筑功能	活荷载标准值 (kN/m ²)
舞厅、展览厅、酒吧间	3.0~4.0
屋顶花园	4.0~5.0
饭店厨房、洗衣房	4.0~5.0
储藏室	5.0~8.0
健身房、娱乐室	3.0~4.5
屋顶直升飞机停机坪	3倍飞机重力 (分布在 2m × 2m 范围)

一般说来，在一根梁或一片墙的受力范围内，每层楼面上都同时作用有全部活荷载标准值的可能性是很小的。而且楼层面积愈大，楼面满载的可能性就愈小；反之亦成立。因此，在设计楼面梁、墙、柱及基础等构件时，应根据不同的使用情况采用相应的折减系数，对楼面活荷载进行折减。具体折减系数见《荷载规范》。

1.1.4 雪荷载、屋面均布活荷载

雪荷载是房屋屋面结构的主要荷载之一。在我国寒冷地区及其他大雪地区，因雪荷载导致屋面结构以致整个建筑结构破坏的事例常有发生。因此，合理荷载²、上海为 0.20 kN/m²、南京为 0.40 kN/m²、哈尔滨为 0.40 kN/m² 等。

屋面积雪分布系数 μ_r 反映了房屋屋面坡度和形状不同对雪荷载的影响。屋面坡度愈大，积雪愈薄，雪压愈小。《荷载规范》列出了不同类型的屋面形式时的屋面积雪分布系数 μ_r ，如屋面坡度 25° 时 $\mu_r = 1.0$ ，屋面坡度为 30° 时 $\mu_r = 0.8$ ，而在高低屋面交接处附近等可能形成雪堆处 $\mu_r > 1$ ，有的可达 2.0。

屋面均布活荷载的大小应按“上人屋面”和“不上人屋面”两种情况考虑。所谓“上人屋面”，指的是允许人群在其上 m²、上海为 0.20 kN/m²、南京为 0.40 kN/m²、哈尔滨为 0.40 kN/m² 等。

屋面积雪分布系数 μ_r 反映了房屋屋面坡度和形状不同对雪荷载的影响。屋面坡度愈大，积雪愈薄，雪压愈小。《荷载规范》列出了不同类型的屋面形式时的屋面积雪分布系数 μ_r ，如屋面坡度 25° 时 $\mu_r = 1.0$ ，屋面坡度为 30° 时 $\mu_r = 0.8$ ，而在高低屋面交接处附近等可能形成雪堆处 $\mu_r > 1$ ，有的可达 2.0。

屋面均布活荷载的大小应按“上人屋面”和“不上人屋面”两种情况考虑。所谓“上人屋面”，指的是允许人群在其上进行某种使用活动的屋面。对于“上人屋面”，均布活荷载标准值一般可取为 1.5 kN/m²，但如兼作其他用途时，则应按相应楼面活荷载采用。所谓“不上人屋面”，则是指不允许人群在其上进行施工、检修以外的其他活动的屋面。对于“不上人屋面”，屋面活荷载即为屋面施工荷载，其标准值与屋面结构类别有关。《荷载规范》规定，石棉瓦、瓦楞铁等轻屋面和瓦屋面取为 0.3 kN/m²，钢丝网水泥及其他水泥制品轻屋面以及由薄钢结构承重的钢筋混凝土屋面取为 0.5 kN/m²，由钢结构或钢筋混凝

土结构承重的钢筋混凝土屋面，包括挑檐和雨篷取为 0.7kN/m^2 。

《荷载规范》还规定，雪荷载和屋面均布活荷载不应同时考虑，设计时取其较大者。

1.1.5 风荷载

空气的流动受到建筑物阻碍，在建筑物表面形成压力或吸力，这些压力或吸力即为建筑物所受到的风荷载。实测资料表明，风荷载在建筑物的表面是不均匀的，它的大小主要取决于所在地区风速、建筑物体型、高度以及地面粗糙程度。风荷载具有静态作用和动态作用双重特点。其静态作用部分为稳定风，动态作用部分为脉动风。脉动风会引起高层建筑和高耸结构的振动，这在高层建筑和高耸结构抗风设计时必须特别加以注意。

垂直作用在建筑物表面的风荷载标准值 w_k (kN/m^2)，可按下式计算：

$$w_k = z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1-3)$$

式中 w_0 ——基本风压 (kN/m^2)；

μ_z ——风压高度变化系数，根据建筑物所在地区和周围环境，按不同的地面粗糙度分为三类，如图 1-2 所示；

μ_s ——风荷载体型系数，指风在建筑物表面引起的实际压力（或吸力）与来流风压的比值。双坡屋面建筑物的 μ_s 值如图 1-3 所示；

z —— z 高度处的风振系数，对高度大于 30m 且高宽比大于 1.5 的建筑物，以及基本自振周期 T_1 大于 0.25s 的塔架、桅杆、烟囱等高耸结构，应采用风振系数来考虑风压脉动的影响。风压脉动系数可按《荷载规范》计算，在其他情况下取 $z = 1$ 。

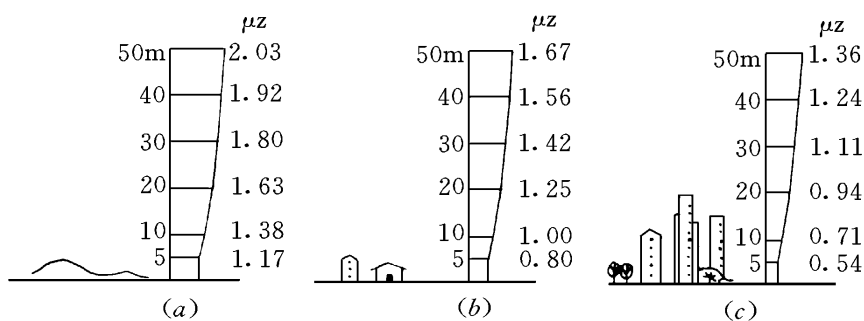


图 1-2 不同地面粗糙度的 μ_z 值

(a) 海岸、湖岸 (A 类); (b) 中小城镇、大城市郊区 (B 类);
(c) 有密集建筑群的大城市市区 (C 类)

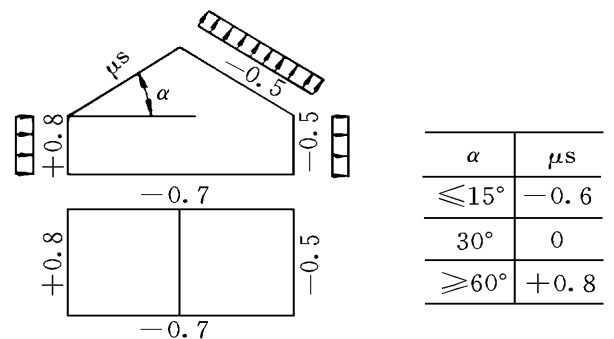


图 1-3 封闭式双坡屋面建筑
物的 μ_s 值

(图表中压力为“+”，吸力为“-”，中间插值)

基本风压 w_0 是以当地比较空旷平坦地面上离地 10m 高处统计所得的 30 年一遇 10min 的平均最大风速为标准，并按一定的换算关系得到的风压值。各地的基本风压 w_0 由《荷载规范》给出，如北京地区为 0.35kN/m^2 ，上海地区为 0.55kN/m^2 ，厦门地区为 0.75kN/m^2 等。对于高度小于 100m 的一般高层建筑，其基本风压 w_0 按《荷载规范》规定的数值乘以系数 1.1 后采用；对于高度大于和等于 100m 的建筑物及特别重要或有特殊要求的高层建筑可乘以 1.2 后采用。

系数 μ_z 、 μ_s 、 z 具体数值可由《荷载规范》得到。

1.2 建筑结构上的地震作用

1.2.1 地震的基本概念

地震是一种自然现象。地壳岩层在构造过程中积累了巨大的应力。当应力超过地壳某处岩层的强度极限时，岩石将遭到破坏产生错动，释放所积累的应变能，引起振动，并以波的形式从振源向四周传播。这种振动传到地面时就形成地震。

地震的大小通常用地震震级表示。震级即地震的级别，用以表示一次地震所释放能量的大小。现在国际上通用的震级是里氏震级，记为 M ，用距震中 100km 处的标准地震仪所记录的以微米 ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) 为单位的最大水平地动位移的对数值表示。

一次地震只有一个震级。一般而言，小于 2 级的地震，人们感觉不到，称为微震；2 ~ 4 级的地震会使人有所感觉，称为有感地震；5 级以上的地震将引起不同程度的破坏，统称为破坏性地震；7 级以上的地震称为强烈地震或大地震；8 级以上的地震称为特大地震。1960 年 5 月发生在智利的 8.5 级地震，是到目前为止记录到的世界最大地震。

地震对建筑物的影响用地震烈度来表示。地震烈度是指某地区的地面和各类建筑物遭受一次地震影响的强弱程度。地震烈度与震级、震源深度、震中距 (图 1-4)、场地土类别、建筑物类型等因素有关。一般来说，距震中愈近，地震影响就愈大，烈度愈高。震中区 (极震区) 的烈度称为震中烈度。

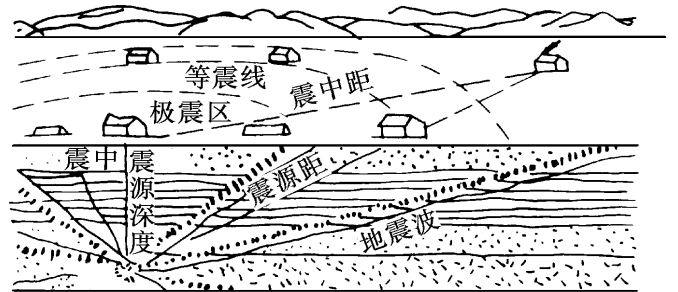


图 1-4 地震术语示意图

地震烈度可以根据地震烈度表确定。我国目前使用的是 12 度地震烈度表。对于某一地区，今后一段长时间内，在一般场地条件下可能遭遇到的最大地震烈度称为该地区的基本烈度。各地区的基本烈度是根据当地的地质地形条件和历史地震情况由国家地震局确定的。国家地震局所给出

的地震基本烈度是在设计基准期 (即建筑物的设计使用年限，一般取 50 年) 内，在一般场地条件下可能遭遇的地震中，超越概率为 10% 所对应的地震烈度值。

地震概率分布中出现概率最大的地震烈度称为多遇地震烈度，又称众值烈度。多遇地震烈度比基本烈度约低 1.55 度，在设计基准期内，其超越概率为 63.2%。

在设计基准期内，超越概率为 2% ~ 3% 的地震烈度称为罕遇地震烈度，罕遇地震烈度比基本烈度约高一度左右。

相应于多遇地震烈度的地震一般可视作为该地区的“小震”；相应于基本烈度的地震可视作为该地区的“中震”；影响于罕遇地震烈度的地震即为该地区的“大震” (图 1-5)。

1.2.2 建筑结构的抗震设防

我国是一个多地震国家，地震分布范围广、频度高、强度大，目前许多地区仍处在地震活跃期间。因此，设计人员必须重视建筑结构的抗震设防。

抗震设防是指通过对建筑结构进行抗震设计 (包括地震作用计算、抗震承载力验算和

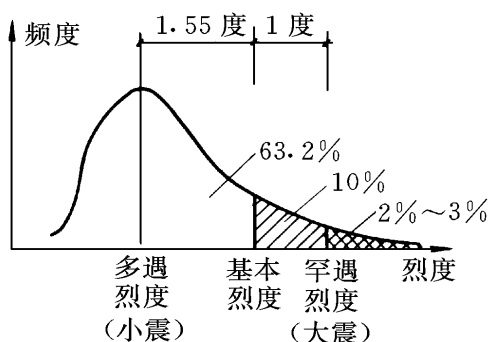


图 1-5 三种烈度关系示意图

采取抗震构造措施等)，以提高建筑物抗御地震的能力，防止或降低地震的破坏性影响。《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89) (以下称《抗震规范》) 将建筑物按其用途和重要性不同，分为甲、乙、丙、丁四类，分别采取不同的抗震设防标准。

设防烈度是某地区抗震设防标准的依据，它是按照国家批准的权限审定的。根据建筑物的重要性，设防烈度是

在基本烈度的基础上按区别对待的原则极限调整确定的。一般情况下采用基本烈度作为抗震设防烈度。现行《抗震规范》规定以6度为抗震设防起点，其中有关条文适用于6~9度范围。

抗震设计的目的是为了减轻建筑物在地震作用下的破坏，避免人员伤亡和减少经济损失。由于地震的发生在时间、空间和强度上随机性都很大，要使所设计的建筑物在遭遇地震时不发生破坏，是不经济的，也是不现实的。为达到安全与经济之间的合理平衡，就应要求建筑物在使用期间内，对不同强度和频度的地震，具有不同的抵抗能力。根据这种抗震设防原则，《抗震规范》提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标。当遭遇低于本地区设防烈度（基本烈度）的多遇地震时，建筑结构仍处于正常使用状态，即弹性工作状态，建筑物一般不应损坏或不需修理仍可继续使用；当遭遇本地区设防烈度的地震时，结构允许进入承载能力极限状态，这时建筑物允许有一定损坏，但经一般修理或不需修理仍可继续使用；当遭遇高于本地区设防烈度的罕遇地震时，允许结构有较大的塑性变形，但应控制其变形的限值，以保证建筑物不致倒塌或发生危及人民生命的严重破坏。

在进行建筑结构抗震设计时，为简便起见，《抗震规范》采用二阶段设计方法，以实现三水准抗震设防目标。第一阶段设计——在小震作用下验算结构的弹性变形和按小震作用效应和其他荷载效应的基本组合验算结构构件的承载力，以满足第一水准“不坏”和第二水准“可修”的要求；第二阶段设计——在大震作用下验算结构的弹塑性变形，以满足第三水准“不倒”的要求。

1.2.3 地震作用的计算

1. 地震作用的概念

地震释放的能量以地震波的形式传到地面，引起地面运动，导致建筑物产生强迫振动。在振动过程中作用于结构上的惯性力就是地震作用。地震作用是一种不同于一般荷载的间接作用，其数值大小不仅取决于地面运动的强弱程度，而且与结构本身的动力特性（如结构自振周期、阻尼等）有着密切的关系。因此，确定地震作用比确定一般荷载要复杂得多。

建筑结构所受到的地震作用分为竖向地震作用和水平地震作用两种，所以建筑物在地震时的反应分别表现为上下颠簸和左右前后摇晃。在一般建筑结构的抗震设计中，仅需考虑水平地震作用，只有对于设防烈度为8度和9度的大跨结构以及9度时的高层建筑，才需考虑竖向地震作用。

目前在我国和其他许多国家的抗震规范中，都广泛采用反应谱理论确定地震作用，其中又以加速度反应谱应用最多。反应谱理论不仅能计算单质点体系的地震作用，而且在一定条件下还能推广应用于多质点体系。我国《抗震规范》规定，对特别不规则的建筑、甲类建筑以及高层建筑等，除采用反应谱计算结构地震作用外，还应采用时程分析法进行补充计算。

2 采用反应谱理论计算水平地震作用

某些建筑结构，如单层房屋、水塔等，可将其质量全部集中于顶部，简化为单质点体系。假设 m 为建筑物的总质量， S_a 为地震时该建筑物的最大反应加速度绝对值。由地震作用的概念，该建筑物（质点）所受到的水平地震作用可表达为

$$F = m S_a = m g S_a / g = G \quad (1-4)$$

式中 $G (= mg)$ ——建筑物总重力荷载；

$(= S_a / g)$ ——地震影响系数，应根据设防烈度、震中远近、场地类别和结构自振周期 T ，按图 1-6 所示的地震影响系数曲线（即设计用反应谱曲线）采用。

由公式 (1-4) 可见，实质上是作用于单质点体系上的水平地震作用 F 与结构重量 G 的比值。

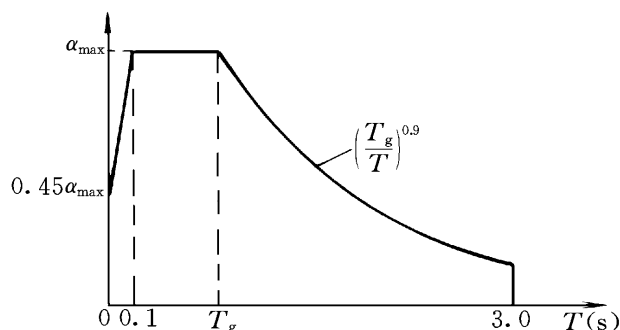


图 1-6 地震影响系数的曲线

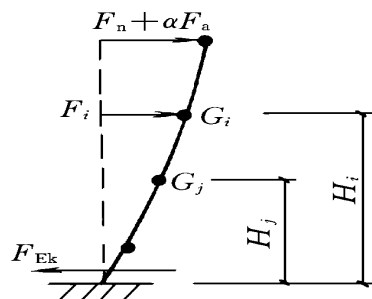


图 1-7 多质点体系底部剪力法计算简图

对于一般多高层房屋，通常可将每层楼盖质量及上下各一半的楼层结构质量集中到楼盖标高处，作为一个质点，形成多质点体系（图 1-7），按振型分解反应谱法计算水平地震作用。但对于高度不超过 40m，以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的建筑物，《抗震规范》规定，可假设沿高度各质点的加速度反应与质点高度成正比，按底部剪力法进行简化计算。这种方法将多质点体系用一个与其基本自振周期相同的单质点体系来等代，先计算出作用于结构的水平地震作用，再按假定分配给各质点。

类似公式 (1-4)，结构总水平地震作用标准值 F_{Ek} （底部剪力）的计算公式为

$$F_{Ek} = \eta_1 G_{eq} \quad (1-5)$$

$$G_{eq} = 0.85 G_e \quad (1-6)$$

第 i 质点的水平地震作用标准值为

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{Ek} (1 - \eta_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-7)$$

考虑到结构高振型的影响，顶部质点需增加一附加水平地震作用：

$$F_n = \eta_n F_{Ek} \quad (1-8)$$

公式 (1-5) ~ (1-8) 中

η_1 ——相应于结构基本自振周期 T_1 的水平地震影响系数，按图 1-6 采用，对于多层砌体房屋、底层框架和多层内框架砖房，取 $\eta_1 = \eta_{max}$ ；

η_{max} ——水平地震影响系数的最大值，当设防烈度为 6 度时， η_{max} 取为 0.04；设防烈度为 7 度时， η_{max} 取为 0.08；设防烈度为 8 度时， η_{max} 取为 0.16；设防烈度为 9 度时， η_{max} 取为 0.32；

G_{eq} ——结构等效总重力荷载代表值，对于多质点体系， $G_{eq} = 0.85 \sum_{i=1}^n G_i$ ；

G_e ——结构总重力荷载代表值，取结构和构件自重标准值（包括构造层自重标准值）

和各竖向可变荷载组合值之和。对于雪荷载和一般楼面活荷载，其组合值系数为 0.5，档案库、藏书库的组合值系数为 0.8；对于屋面活荷载则不予考虑；

G_i 、 G_j ——质点 i 、 j 的重力荷载代表值；

H_i 、 H_j ——质点 i 、 j 的计算高度；

η_n ——顶部附加地震作用系数，按《抗震规范》规定取值。

采用底部剪力法计算多质点体系的水平地震作用时，需要首先确定结构的基本自振周期 T_1 。在实际工程设计中， T_1 通常可根据具体情况由下列经验公式确定：

对钢筋混凝土框架和框架-剪力墙结构的建筑物

$$T_1 = 0.384 + 0.00081 \frac{H^2}{B} \quad (1-9)$$

对剪力墙结构的建筑物

$$T_1 = 0.0455 + 0.0416 \frac{H}{B} \quad (1-10)$$

式中 H 、 B ——建筑物的总高度、总宽度。

对重量和刚度沿高度分布比较均匀的建筑物，也可按顶部位移法用下式近似计算：

$$T_1 = 1.7 \tau_0 \tau \quad (1-11)$$

式中 τ_0 ——考虑非承重砖墙对基本自振周期的折减系数，框架结构取 0.6~0.7，框架-剪力墙结构取 0.7~0.8，剪力墙结构取 1.0；

τ ——假定将集中在各层楼面处的重力荷载代表值 G_i 视为水平荷载，按弹性方法求得的结构顶点位移。

1.3 建筑结构设计方法

随着科学发展和技术进步，建筑结构设计在理论上经历了从弹性理论到极限状态理论的转变，在设计方法上经历了从定值法到概率法的发展。我国现行各种结构设计规范遵照《统一标准》的确定原则，采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数表达的实用设计表达式进行计算。

1.3.1 结构的功能及其极限状态

建筑结构设计的基本目标是要用最经济的手段，设计出安全可靠的结构，使之在预定的使用期间内，满足各种预定功能的要求。建筑结构的性能要求，可概括为下列三方面：

1) 安全性 在正常施工和正常使用的条件下，结构应能承受可能出现的各种作用而不发生破坏；在偶然事件发生时或发生后，结构仍能保持必要的整体稳定，不致倒塌。

2) 适用性 在正常使用条件下，结构应具有良好的工作性能，其变形、裂缝或振动等均不超过规定的限值。

3) 耐久性 在正常维护条件下，结构应能在预计的使用年限内具有足够的耐久性能。如在设计基准期内，混凝土老化、钢筋锈蚀均不应超过一定限度而影响使用功能。

上述安全性、适用性和耐久性统称为结构的可靠性。它反映了结构在规定的时间内（即设计基准期 50 年），在规定的条件下（正常设计、施工、使用和维修），完成预定功能

(如强度、刚度、稳定性、抗裂性、耐久性和动力特性等)的能力。可靠性的概率度量称为结构的可靠度,即结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态,就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态称为该功能的极限状态。《统一标准》将结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

承载能力极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。超过这个状态,意味着结构或构件将发生破坏、失稳、倾覆或形成可变机构,从而丧失结构的安全性功能。

正常使用极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。超过这个状态,意味着结构或构件将发生影响正常使用的变形、裂缝、振动或局部损坏,从而丧失结构的适用性和耐久性功能。

极限状态的概念,目前还在发展。有些学者提出的“破坏-安全极限状态”或“条件极限状态”,是指在偶然事件作用下造成结构局部破坏后,其余部分不至于发生连续倒塌,而仍能保持结构整体稳定的状态。这一极限状态,在我国《统一标准》中已归入承载能力极限状态。

对每一个结构构件来说,都必须进行承载能力极限状态的计算。有些结构构件还应进行正常使用极限状态的验算。

1.3.2 以概率理论为基础的极限状态设计方法

1. 失效概率、可靠指标

设以 S 表示结构的作用效应(或称荷载效应),即各种作用在结构内产生的内力和变形(如轴力、弯矩、剪力、扭矩、挠度、转角和裂缝等); R 表示结构的抗力,即结构或构件承受内力和变形的能力(如承载力、刚度等),则两者之间的关系式可用结构的极限状态功能函数来表达:

$$z = g(S, R) = R - S \quad (1-12)$$

显然,当 $z > 0$ 时,结构处于可靠状态;当 $z < 0$ 时,结构处于失效状态;当 $z = 0$ 时,结构处于极限状态。

作用效应 S 和结构抗力 R 均为随机变量,功能函数 z 是作用效应 S 和结构抗力 R 的函数,所以也是随机变量。因而应该根据概率理论来计算结构可靠性的概率。

结构不能完成预定功能($z < 0$ 或 $R < S$)的概率称为失效概率,以 p_f 表示,可按下列式计算:

$$p_f = P(z = R - S < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz \quad (1-13)$$

式中 $f_z(z)$ ——极限状态功能函数 z 的概率密度函数。

当 R 、 S 均为正态分布,平均值分别为 μ_R 、 μ_S ,标准差分别为 σ_R 、 σ_S 时,功能函数 z 也为正态分布,且其平均值为 $\mu_z = \mu_R - \mu_S$,标准差为 $\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。令

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-14)$$

可以证明

$$p_f = \Phi(-\beta) \text{ 或 } \beta = -\Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (1-15)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数。

公式 (1-15) 表明, β 与 p_f 不仅具有数值上的一一对应关系, 而且在物理意义上也相对应。由图 1-8 可见, β 越大, p_f 就越小 (图中尾部面积越小), 即结构越可靠。因而可以用来代替失效概率 p_f 描述结构的可靠度, 通常称为“可靠指标”。

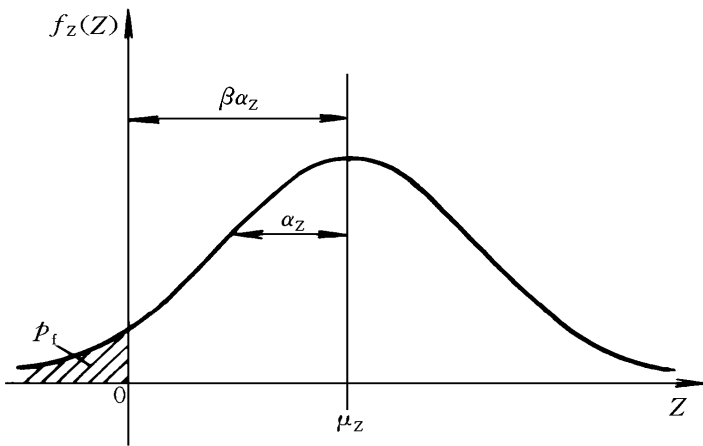


图 1-8 结构构件失效概率与可靠指标的关系

上述可靠指标 β 的计算仅限于两个正态变量的线性极限状态函数。对于多个正态和非正态分布的随机变量表达的非线性极限状态函数, 可采用《统一标准》推荐的 JCSS 法通过迭代计算 β 值。

2 极限状态设计表达式

对于一般结构构件, 直接采用可靠指标进行结构设计, 工作量很大且过于繁琐。考虑到实用上的简便和设计习惯, 《统一标准》仍采用广为工程设计人员熟悉的以基本变量标准

值和分项系数表达的实用设计表达式。

(1) 承载能力极限状态设计表达式

对于承载能力极限整体, 结构构件应采用荷载效应的基本组合和偶然组合进行设计。

1) 基本组合

对于基本组合, 应采用下列极限状态设计表达式:

$$S \leq R \quad (1-16)$$

$$S = \gamma_G C_{Gk} G_k + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} \psi_{ci} Q_{ik} \quad (1-17)$$

$$R = R(f_k, f, a_k, \dots) \quad (1-18)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数。《统一标准》根据结构破坏后果的严重程度, 将构件分为三个安全等级, 对一级 (重要的)、二级 (一般的)、三级 (次要的) 结构构件, γ_0 分别取 1.1、1.0、0.9;

S ——结构构件的内力设计值;

R 、 $R(\cdot)$ ——结构构件的承载力设计值及承载力函数式;

γ_G ——永久荷载分项系数, 一般取 1.2, 当其效应对构件有利时取 1.0;

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第一个 (主要的) 可变荷载和其他第 i 个可变荷载分项系数, 一般取 1.4, 当楼面活荷载标准值不小于 4kN/m^2 时, 取 1.3;

G_k 、 Q_{1k} 、 Q_{ik} ——永久荷载、第一个可变荷载和其他第 i 个可变荷载的标准值;

C_G 、 C_{Q1} 、 C_{Qi} ——对应于 G_k 、 Q_{1k} 、 Q_{ik} 的荷载效应系数, 它与结构形式、荷载种类和分布以及支承条件有关;

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数, 当风荷载与其他可变荷载组合时均采用 0.6, 无风荷载参与组合时均采用 1.0;

- f ——材料性能分项系数，其值应符合各类材料的结构设计规范的规定；
- f_k ——材料强度标准值；
- a_k ——几何参数标准值。

对于一般排架、框架结构，公式 (1-16) 可简化为

$$S = \gamma_G C_G G_k + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{ik} \quad (n \geq 2) \quad (1-19)$$

式中 γ ——简化后的荷载组合系数，当风荷载与其他可变荷载组合时，取 0.85。

2) 偶然组合

对于偶然组合，极限状态设计表达式宜按下列原则确定：偶然作用的代表值不乘分项系数；与偶然作用同时出现的可变荷载，可根据观测资料和工程经验采用适当的代表值。具体的设计表达式及各种系数值，应符合专门规范的规定。

(2) 正常使用极限状态的计算要求

对于正常使用极限状态，结构根据应分别采用荷载的短期效应组合和长期效应组合进行设计，并使变形、裂缝等计算值不超过相应的规定限值。

1) 荷载短期效应组合值

$$S_s = C_G G_k + G_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n c_i C_{Qi} Q_{ik} \quad (1-20)$$

2) 荷载长期效应组合值

$$S_l = C_G G_k + \sum_{i=1}^n q_i C_{Qi} Q_{ik} \quad (1-21)$$

式中 $q_i Q_{ik}$ ——第 i 个可变荷载的准永久值；其余符号意义同前。

需要指出，对于砌体结构，由于自身结构的特点，其正常使用极限状态的要求，一般情况下可由相应的构造措施保证，而不必按上述规定验算。

在承载力极限状态设计表达式中，将荷载标准值 G_k 、 Q_k 乘以荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q ，即可得到荷载设计值；将材料强度标准值 f_k 除以材料分项系数 γ_f ，即可得到材料强度设计值。这种表达形式是为了保证所设计的结构构件在不同情况下能够满足《统一标准》规定的可靠度要求。显然，各分项系数隐含了设计结构构件时的可靠度要求（称为目标可靠指标 $[\beta]$ ），它们是根据基本变量的统计特性，以对结构可靠度的概率分析为基础、采用校正法确定的。对于正常使用极限状态，由于达到此极限状态产生的后果不如承载力极限状态严重，所以目标可靠指标 $[\beta]$ 可适当降低，故在其设计表达式中不再考虑荷载分项系数。

有关目标可靠指标 $[\beta]$ 、分项系数、荷载效应系数以及荷载组合值系数的确定原则详见《统一标准》。

思 考 题

1. 什么是建筑结构上的作用？作用分为哪几类？
2. 在工程设计中，对作用在楼面上的局部活荷载如何考虑？
3. 作用在建筑物表面的风荷载如何计算？它与哪些因素有关？
4. 什么是地震烈度和设防烈度？它们之间有什么联系？

5. 《抗震规范》的三水准抗震设防目标是什么？什么是二阶段设计？
6. 建筑结构采用底部剪力法计算水平地震作用的条件是什么？
7. 结构的功能要求有哪些？什么是结构功能的极限状态？我国《统一标准》将极限状态分为哪几类？
8. 结构的设计基准期是多少年？超过这个年限的结构是否不能再使用？
9. 试说明可靠指标与失效概率之间的关系。
10. 在极限状态设计表达式中，是如何体现结构可靠度要求的？