

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

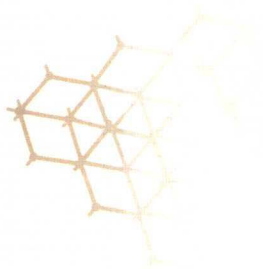
清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

杨俊杰 崔钦淑 编著

简明土木工程系列专辑

结构原理与结构概念设计



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



TU31

8

Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

杨俊杰 崔钦淑 编著

简明土木工程系列专辑

结构原理与结构概念设计

中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

知识产权出版社

www.cnipr.com



内容提要

本书系“简明土木工程系列专辑”中的一本。作者力图与初学者对建筑物的感性认识相协调,用简单的图形、形象的描述和非数学的手段建立起整体意义上的结构概念体系。通过对整体结构基本概念和设计原理的分析,解剖建筑物的荷载路径和结构构架间的相互关系,建立整体结构类型、基本受力分体系、基本受力构件三者之间的联系,着重揭示了整体结构与单一构件在结构原理上的统一性,以及两者在设计时应共同遵循的基本原则。从而使读者能从整体的概念上认识结构体系,使复杂的建筑结构设计过程变得十分清晰。

针对参加“结构设计竞赛”的读者,本书专门介绍了参加竞赛的基本要求,以及结构模型的设计、制作、试验原理和方法。

本书可作为土木工程专业、建筑学专业、工程管理专业学生在学习专业结构类课程前的选修课教材,也可作为“结构设计竞赛”的培训教材和参考书。同时,也可供建筑、结构设计人员和土木工程技术人员作为提高专业素质的学习参考。

选题策划: 阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip. sina. com; z_ baolin@263. net

责任编辑: 阳 森 张宝林

文字编辑: 周 媛

图书在版编目(CIP)数据

结构原理与结构概念设计/杨俊杰, 崔钦淑编著.

北京: 中国水利水电出版社: 知识产权出版社, 2006

(简明土木工程系列专辑/崔京浩主编)

ISBN 7-5084-3666-0

I. 结... II. ①杨... ②崔... III. ①建筑结构—理论—高等学校—教材②建筑结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 023102 号

简明土木工程系列专辑

结构原理与结构概念设计

杨俊杰 崔钦淑 编著

中国水利水电出版社

出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68331835 68357319)
知识产权出版社 北京市海淀区马甸南村 1 号; 传真: 电话: 010-82000893

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32 开 8.125 印张 218 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册

定价: 22.00 元

ISBN 7-5084-3666-0

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub. com. cn)

土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

新颖性——反映新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法

实用性——深入浅出，让人一看就懂，一懂能用，不是手册，胜似手册

科学性——编写内容均有出处

——摘自《简明土木工程系列专辑》总序

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 $1/3$ ；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50% ，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写人员臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中國力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

前 言

结构类课程是土木工程专业中最重要的专业课程，也是学时最多的专业课程群。本书旨在帮助学生在全面学习结构类课程之前，对结构原理与结构设计有一个总体意义上的认识，形成结构的观念体系，使学生面对组成复杂、花样繁多的建筑结构体系时，能建立起一个清晰简明的结构构架模型，使结构设计过程变得脉络清楚。

本书的编著力图与初学者对建筑物的感性认识相协调，从结构的整体性出发，通过对整体结构基本概念和设计原理的分析，解剖建筑物的荷载路径和结构构架间的相互关系，建立整体结构类型、基本受力分体系、基本受力构件三者之间的联系，着重从统一性上来认识建筑结构的基本原理，找出整体结构与单一构件在设计时应共同遵循的基本原则。从而使读者既能从整体的概念上认识结构体系，又能从单个构件的设计中认识其在整体结构中的作用以及所应控制的主要因素。

本书对结构的叙述以概念和感性层面的内容为主，力求以大学低年级的基础理论为依据，回避复杂的理论证明，使不同专业的学生均能从概念上建立起一个建筑结构体系。本书考虑到目前全国不少地区高校开展“结构设计竞赛”之类的学生科技活动，旨在培养土木工程专业学生的结构设计概念，增强结构创新意识。作者考虑到竞赛的宗旨与本书的目的有相似之处，同时这方面的指导性书籍相对缺乏，所以在本书中专门用了一章的篇幅，结合浙江省近几年结构设计竞赛的实际情况，较详细地介绍了如何应用结构概念设计方法来选择结构体系、构件形式和连接方式等，以便参加竞赛的同学作为参考，同时也是结构概念的一个应用实例。

本书第1章对结构所受荷载及荷载在结构中传递的路径作了简要介绍。第2章作为本书的重点,介绍了建筑结构整体概念设计的基本原理、整体结构的分解方法和如何将结构分解至基本构件以及基本构件与整体结构在设计原理上的统一性。第3章介绍了结构的安全与破坏的基本概念。第4、5、6章分别介绍了结构水平分体系、竖向分体系和索、拱、壳等特殊形式结构体系的结构原理、概念设计方法及原则。第7章专门介绍了“结构设计竞赛”模型的设计、制作和试验。其中第4、5两章由崔钦淑编著,第1、2、3、6、7章由杨俊杰编著,全书由杨俊杰统稿。

本书可作为土木工程专业、建筑学专业、工程管理专业学生在学习专业结构类课程前的选修课教材,也可作为“结构设计竞赛”的培训教材和参考书。同时,也可供建筑设计、结构设计人员和土木工程技术人員作为提高专业素质的学习参考。

作 者

2005年9月于杭州

目 录

总序

前言

第 1 章 建筑结构所承受的荷载、作用及荷载路径	1
第 1 节 结构上的竖向荷载/ 2	
第 2 节 结构上的水平荷载/3	
第 3 节 荷载的路径/6	
第 2 章 结构体系及其组成	15
第 1 节 总结构体系的概念/15	
第 2 节 以空间结构组成的部件划分结构分体系/39	
第 3 节 以荷载作用方向划分结构分体系/54	
第 4 节 体系的组成单元及单元特性/67	
第 3 章 结构的安全与破坏	91
第 1 节 结构安全的概念/91	
第 2 节 结构破坏的类型/103	
第 4 章 水平分体系的设计	108
第 1 节 现浇钢筋混凝土楼盖体系/109	
第 2 节 空间网架体系/132	
第 5 章 竖向分体系的设计	139
第 1 节 框架体系/139	
第 2 节 墙体系/145	
第 3 节 基础体系/155	
第 6 章 悬索、拱和薄壳结构体系的设计	170
第 1 节 概述/170	
第 2 节 悬索结构体系/171	
第 3 节 拱结构体系/181	

第4节 壳结构体系/188	
第7章 结构模型设计的基本方法	195
第1节 结构设计竞赛模型的基本材料及要求/195	
第2节 结构设计竞赛的主要规则/199	
第3节 结构模型的力学分析和结构型式的确立/207	
第4节 结构构件的设计与制作/221	
主要参考文献	242

第 1 章 建筑结构所承受的荷载、作用及荷载路径

结构是建筑物的骨架，是建筑物赖以存在的基本保证。结构的基本功能是支撑自然的与人为的作用力，以保证建筑功能的正常实现。建筑结构所承受的作用力的种类如图 1.1 所示。

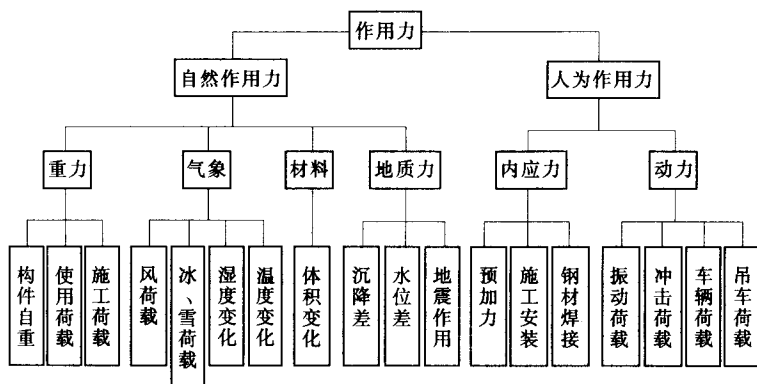


图 1.1 结构所受作用力分类

把直接施加于结构上，且使其产生内力效应的作用力称为荷载，例如自然作用力中的重力、风荷载、冰荷载、雪荷载、地震作用力、水位差引起的压力，以及人为作用的动力荷载等；把由某种使结构产生变形或外加变形，从而在结构中产生效应的原因称为作用，例如温度、湿度的变化和材料体积的变化引起的结构效应、地基不均匀沉降引起的结构效应等。

结构所要承受的荷载及作用种类很多，分类方法也不少，下面就结构受力的方向分别进行讨论。

第 1 节 结构上的竖向荷载

1.1 自重荷载

结构上自重荷载指的是不随时间变化的荷载,故属于恒载。自重荷载是结构恒载的第一来源,它是由组成结构各构件的截面尺寸、重度及构造层的重力总和构成的,可通过逐个构件逐层累加计算而得,也可按每平方米建筑面积上的平均折算荷载进行估算。平均折算荷载的标准值 q 可取为木结构建筑 $q=5\sim7\text{kN/m}^2$, 钢结构建筑 $q=6\sim9\text{kN/m}^2$, 钢筋混凝土及砌体结构建筑 $q=9\sim14\text{kN/m}^2$ 。这些取值只是粗略的估算,可能与实际结构有一些出入,但是在确定建筑和结构主体方案时十分有用。

因为自重荷载是结构荷载的重要组成部分,而且自重荷载是相对确定的,所以,在建筑结构设计中,自重荷载的减轻在降低结构的材料消耗、提高经济效益方面具有十分重要的意义。我们经常采用承载力与自重之比作为结构设计合理性的评价指标。结构自重是荷载的来源,同时又是抵御荷载的基本保证。这就促使人们不断地去寻求高承载能力、高耐久性和轻质的结构材料。

结构的自重荷载也经常表现出它有利的一面。这主要表现在自重的存在对提高结构稳定性起到了至关重要的作用。在努力减轻结构自重的同时,要十分注意自重的省缺对结构稳定性带来的不利影响。

1.2 竖向可变荷载

结构上的可变荷载是指随时间变化的荷载。可变荷载的种类较多,其中竖向作用的可变荷载主要有屋面的雪荷载、车辆和设备的自重、动力荷载、楼面活荷载等。

屋面的雪荷载不仅随地区的变化差别很大,而且还与屋面构造形态相关。作用于结构的雪荷载实质上是屋面上积雪的自重荷载,它是根据不同地区气象部门在空旷平坦场地上测得的积雪厚度和积雪密度求得的单位面积上的雪重,被称之为基本雪压。由

于我国地域辽阔,气象部门给出不同地区在10年、50年和100年重现期内的最大雪压值作为基本雪压值。而实际作用于屋面的雪压力,还与雪在屋面上的分布形式有关。由于屋面形状和风荷载的影响,会使雪在屋面的分布很不均匀,因此,在计算雪荷载时还要考虑基本雪压在屋面的不均匀分布,常以屋面积雪分布系数与基本雪压相乘而得,具体的计算过程可参照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)。

楼面活荷载是建筑物的一个主要可变荷载,实际的楼面活荷载变化很大,它可能是在一块很小的面积上集中作用一个很大的荷载,例如一台设备的移动。在设计时无法预计这样的荷载变化过程,只能根据建筑物的功能,例如,住宅建筑、办公楼、图书馆书库和服装加工厂等来加以判断,并以均布荷载的方式作用于楼面。例如,一般住宅、办公楼和教室的楼面均布活荷载标准值为 2kN/m^2 ,而商店、展览厅、车站和机场大厅等按 3.5kN/m^2 计取。当遇到特殊情况时,则应根据具体的结构设计进行验算。《建筑结构荷载规范》根据不同的建筑物给出了基于统计规律的标准值 q ,供设计时选取。

1.3 竖向的变形荷载

由于各种作用因素也会使结构在竖直方向承受作用力,例如,地基沉降引起的负摩擦力、土层冻结造成的上抬力、不均匀基础沉降引起的竖向剪力和地震造成的竖向作用分力等。这些作用引起的结构效应有时也是很大的,但它们的出现往往是不可预期的,其值大小也就更难以估计,所以在设计阶段很难从结构计算中加以考虑,一般可通过增加构造措施加以解决。

第2节 结构上的水平荷载

2.1 水平方向的恒荷载——水土侧向压力

当建筑物尤其是建筑物的地下部分与土体和地下水相接触时,如图1.2所示,土体和水体会对建筑物的地下室墙体产生土

压力和水压力。特别当建筑物建造在斜面地基上时,这种水土侧向压力甚至会成为对建筑物具有极强破坏作用的一种外荷载,例如发生滑坡和泥石流。一些地下建筑物还要验算地下水压力产生的上浮力对建筑结构的影响,例如大型筏形基础中地下水对筏基的上浮力是十分大的,应在设计时加以注意。

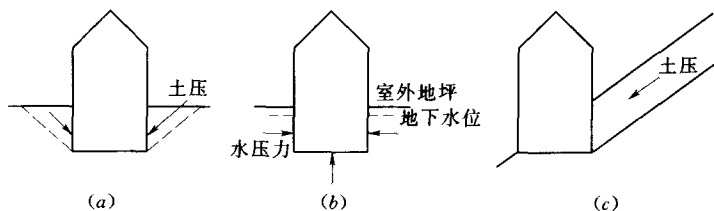


图 1.2 水土侧压力的作用形式

(a) 地下室墙上的土压力; (b) 地下室墙上的水压力;

(c) 斜面地基产生的土压力

土压力与水压力对建筑物的作用力大小是根据土力学和水力学原理确定的。

2.2 风荷载

在非地震地区,风荷载是建筑物承受的主要水平力。风是空气在地球表面的一种流动,当建筑物建造在这样的空气流中,对空气的流动模式产生了干扰,气流就会对建筑物形成作用力,这样的作用力就是建筑物承受的风荷载。在建筑结构的整体分析中,一般只需考虑作用在建筑物上的风荷载合力 H_w ,它是作用在房屋迎风面及背风面 A_w 上风荷载标准值 w_k 的合力,其表达式为

$$H_w = w_k A_w$$

根据《建筑结构荷载规范》可得

$$w_k = \beta_z (\mu_{s1} - \mu_{s2}) \mu_z w_0$$

式中: w_0 为基本风压,它是以当地空旷平坦地面上离地 10m 高处,平均 50 年一遇的基本风速 v_0 ,按 $v_0 = \rho v_0 / 2$ 计算所得 (ρ 为空气密度); μ_z 为风压高度系数,与周围环境有关; μ_{s1} 和 μ_{s2}

为风荷载体型系数，一般取迎风面的风荷载为压力（取正值），背风面的风荷载为吸力（取负值），如图 1.4 所示； β_z 为 z 高度处的风振系数，考虑了高耸结构风压脉动的影响。

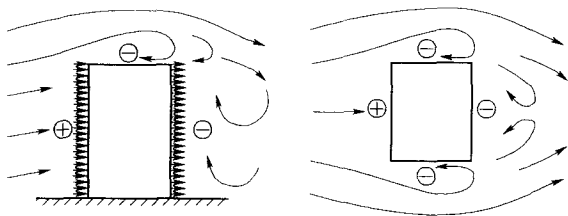


图 1.3 风荷载作用方向示意图

从图 1.3 可见，除了正面作用风荷载能引起房屋倾覆外，局部的吸力也同样能造成房屋的破坏，尤其是对大面积坡屋面。

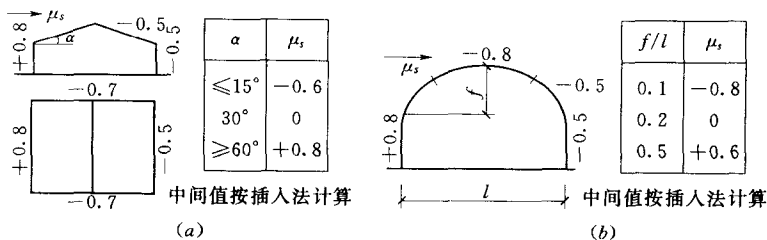


图 1.4 风荷载体型系数

(a) 封闭式双坡屋面；(b) 封闭式拱形屋面

根据《建筑结构荷载规范》有关风荷载体型系数的规定，当屋面坡度 $\alpha=30^\circ$ 时，风荷载近似为 0；当 $\alpha>30^\circ$ 时，风荷载为压力；当 $\alpha<30^\circ$ 时，风荷载为吸力，如图 1.4 所示。对于常见的坡屋面，一般 $\alpha<30^\circ$ ，可见屋面在风荷载下通常承受吸力。有一个典型的工程实例，原设计为平屋面，因屋面防水没有做好，后在原屋面上用木梁加白铁皮改为 $\alpha<30^\circ$ 的坡屋面，当一次大风后，整个坡屋面被完整地搬到了马路上。原因很简单，后加的屋面自重过轻，又没有与周围墙体拉结好，在风吸力作用下被掀起。通

常情况下,屋面自重较大,且与下部结构连成一个整体,风的吸力不足以将屋面吸起,但目前较多采用轻屋面结构,当屋面跨越面积较大时,对风吸力的破坏作用要特别给予重视。

2.3 地震力

地震力 F_{eq} 是指地震发生时地面运动加速度引起的房屋质量的惯性力。设计中,可近似地认为建筑物的质量都集中在各层楼面标高处,地震力的大小与地震本身特征、场地状况及建筑物自身等诸多因素有关,是一个十分复杂的问题。要想事先预测某个地震引起的地震力的大小和方向,在目前尚是一件不可能事件。通常,地震时既有水平震动又有竖向震动,但水平震动是引起结构破坏的主要原因,设计中主要考虑水平震动引起的惯性力的影响。由于地震力是由地层的水平震动作用引起的一种变形荷载,所以对于一般具有相当刚度的建筑物,当基础跟随地层产生水平震动时,其顶部的线速度最大,顶部质量获得的惯性力也最大,向下逐渐减小,地面及地面以下可近似为零,如图 1.5 所示。在方案设计阶段的总体分析时,一般只考虑房屋地震力合力的作用效应,其表达式为

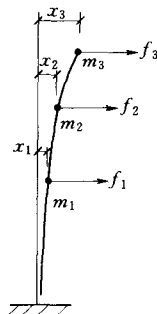


图 1.5 多层建筑地震作用力示意图

$$F_{eq} = \alpha G$$

式中: G 为房屋总重; α 为与地震烈度、结构自振周期和场地土类别有关的地震影响系数,由《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)规定。

第 3 节 荷载的路径

前面分析了建筑物可能受到的荷载类型和产生机理,它们作为一种外力作用到建筑物结构体上,根据牛顿第三定理可知,结构必然会产生相应的反作用力,结构的反作用力与外力是一对大