

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

荷载与结构设计方法

(第3版)

H Z Y J G S J F F

柳炳康 主编



WUTP

武汉理工大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

中国土木工程学会教育工作委员会 审订

荷载与结构设计方法

(第3版)

主 编 柳炳康
副主编 黄慎江

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

【内 容 简 介】

本教材根据土木工程专业本科(四年)培养规格要求编写,全书分为两个部分:第一部分介绍了工程结构荷载及其确定方法,内容包括荷载与作用分类;土压力及建筑结构和公路桥梁上的重力作用;流水压力、波浪作用力、冰压力、撞击力等水作用力;工程结构风荷载;建筑和桥梁结构地震作用;环境因素等引起的其他作用。第二部分介绍了工程结构可靠度设计原理和方法,内容包括工程结构荷载的统计分析;工程结构抗力的统计分析;结构可靠度基本原理;结构概率可靠度设计方法。

本书可作为高等学校土木工程专业全日制本科生或土建类成人教育的教材,也可供土木工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

荷载与结构设计方法/柳炳康主编. —3版. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5629-5766-9

I. ①荷… II. ①柳… III. ①建筑结构-结构荷载-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 098250 号

【主 编 简 介】

柳炳康,1952年7月生,安徽凤阳人。1982年1月毕业于合肥工业大学工民建专业并留校任教,1988年6月结构工程专业研究生毕业获硕士学位。现任合肥工业大学土木与水利工程学院教授,博士生导师,国家一级注册结构工程师;兼任中国工程建设标准化协会建筑振动委员会委员,住房和城乡建设部绿色建筑评价标识专家委员会专家,安徽省土木建筑学会常务理事,安徽省土木建筑学会结构专业委员会副主任,安徽超限建筑抗震设计审查委员会专家。

主要从事混凝土及预应力混凝土结构设计理论、工程结构抗震与防灾、废弃混凝土再生利用,房屋及桥梁可靠性鉴定与加固方面的研究。近几年主持国家自然科学基金项目、住建部科技项目等项目研究,先后获省部级科学技术奖、教学成果奖多项。近五年在国内外学术期刊发表论文40余篇,主编教材3部。主持建设的“工程结构抗震设计”课程2010年获国家级精品课程,2013年获国家级资源共享课程;主持建设的《建筑物震害分析与防震对策》2014年入选国家级精品视频公开课。

项目负责人:蔡德民 刘永坚 田道全

责任编辑:戴皓华

责任校对:汪浪涛

封面设计:付 群

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路122号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:15.5

字 数:502千字

版 次:2018年6月第3版

印 次:2018年6月第1次印刷

印 数:3000册

定 价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87785758 87381631 87165708(传真)

版权所有,盗版必究。

普通高等学校土木工程专业新编系列教材编审委员会

(第4届)

学术顾问:

吕西林 李杰 罗福午 李少甫 甘绍熺 包世华 毛鹤琴
熊峰 刘立新 李必瑜 彭少民 何铭新 吴培明 胡敏良

主任委员:

李国强 朱宏亮

副主任委员:

刘伟庆 邹超英 白国良 徐礼华 雷宏刚 贾连光 朱彦鹏
张永兴 张俊平 刘殿忠 缪昇 王岚 周学军 赵明华

委员:

邓铁军 王林 王燕 王天稳 王月明 王社良 王泽云
王雪松 王新武 王毅红 白晓红 卢文胜 叶献国 过静珺
刘剑飞 孙俊 孙强 孙家齐 任建喜 陈水生 陈昌富
陈伯望 何培玲 李书进 李怀建 李启令 李碧雄 邵旭东
宋固全 吴能森 吴炎海 吴雪茹 吴辉琴 张立人 张科强
周云 段兵廷 姜玉松 柳炳康 饶云刚 俞晓 赵瑞斌
秦建平 徐伟 袁广林 袁海庆 蒋沧如 曾志兴 窦立军
戴国欣 魏瑞演

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘书长:蔡德民

第3版前言

为了适应土木工程专业拓宽后教学需要,全国高等学校土木工程专业指导委员会2001年制订了土木工程专业本科培养方案。该方案着眼于培养厚基础、宽口径的土木工程人才,将“荷载与结构设计方法”列为土木工程专业平台课程,认为工程结构荷载和可靠度设计方法应作为土木工程专业本科学生必备的基础知识,一个结构工程师应当掌握各类工程结构荷载取值方法、荷载产生的背景、工程结构可靠度原理及设计方法。全国高等学校土木工程专业指导委员会2011年在修订定原培养方案的基础上制订《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,将这部分内容列入“结构基本原理与方法知识领域的核心知识单元和知识点”,认为该部分内容应作为土木工程专业本科学生必备的基础知识,进一步强调了该门课程的重要性。2016年6月中国已成为国际本科工程学位互认协议“华盛顿协议”的正式会员,意味着我国土木工程专业教育需要着眼于培养“厚基础、宽口径、强实践、国际化”的高素质专门人才和拔尖创新人才。随着全国工程教育专业认证的深入开展,土木工程专业评估也要全面对接新的标准,无论从内涵还是形式都将有很大的变化,这也要求专业课程教材需要适应新的培养要求。

本书为《高等学校土木工程本科指导性专业规范》配套系列教材之一,较全面、系统地介绍了工程结构各类荷载与作用的概念、原理和确定方法,以及可靠度原理和设计方法。由于工程结构种类繁多,荷载与作用产生的环境和背景各有差异,其作用方式和大小也不尽相同,考虑到土木工程专业特点,本书主要涉及建筑结构和公路工程结构,给出荷载与作用的确 定方法及可靠度设计原理,帮助读者深入掌握相关理论与方法。

我国建筑工程、公路工程、港口工程等土木相关行业都有着各自的统一标准和设计规范,为反映最新研究成果和工程技术发展需求,这些标准和规范处于不断修订完善之中,为跟进新一轮土木工程相关标准、规范的颁布和实施,本书的内容需作相应调整。较第2版而言,全书总体内容不变,仍分为两个部分9个章节。第一部分介绍了工程结构荷载与作用,内容包括:荷载与作用分类;重力作用引起的土压力、建筑结构恒载与活载、公路桥梁车辆与人群荷载、雪荷载;水作用引起的静水和流水压力、波浪作用力、冰压力、撞击力和浮托力;建筑及桥梁结构顺风向和横风向作用力;建筑结构地震作用确定方法、梁桥水平地震作用和地震动水压力计算方法;环境因素引起的温度应力、冻胀力和变形产生的内力,爆炸产生的机理和力学性质,行车动态作用等。第二部分介绍了工程结构可靠度设计原理与方法,内容包括:工程结构荷载统计的概率模型,荷载代表值的定义和统计特征以及建筑结构和公路工程极限状态作用效应组合;影响结构构件抗力的因素及结构构件抗力的统计特征,结构可靠度的基本概念、结构功能函数、目标可靠度及结构概率可靠度设计的实用表达式。本次修订对第2章的城市桥梁汽车荷载部分、第3章的波浪作用力部分、第4章的桥梁风荷载部分、第9章结构概率可靠度设计法中的实用表达式等内容作了较大幅度的修改。

本书由柳炳康担任主编,黄慎江担任副主编。书中第1、2、3、4、6章由柳炳康编写,第7、8、9章由黄慎江编写,第5章由宋满荣编写。

由于编者水平有限,书中不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2018年3月

第2版前言

为了适应土木工程专业拓宽后教学需要,全国高等学校土木工程专业指导委员会2001年制定了土木工程专业本科培养方案。该方案着眼于培养厚基础、宽口径的土木工程人才,将《荷载与结构设计方法》列为土木工程专业平台课程,认为工程结构荷载和可靠度设计方法应作为土木工程专业本科学生必备的基础知识,一个结构工程师应当掌握各类工程结构荷载取值方法、荷载产生的背景、工程结构可靠度原理及设计方法。高等学校土木工程学科专业指导委员会2011年在修订原培养方案的基础上制定《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,将这部分内容列入“结构基本原理与方法知识领域的核心知识单元和知识点”,进一步强调了该门课程的重要性。

我国建筑工程、公路工程、港口工程等土木相关行业都有着各自的统一标准和设计规范,为反映最新研究成果和工程技术发展需求,这些标准和规范处于不断修订完善之中。我国先后颁布《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《建筑抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)、《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)等一系列新的标准和规范,教材的内容需作相应调整。近年来,随着科学技术的发展,荷载与作用确定的途径和方法不断得到完善,可靠度设计理论有所发展,需要将这些最新趋势反映到教材中。另外,教材使用中一些读者也指出了书中存在的若干印校错误。本书结合2011年《高等学校土木工程本科指导性专业规范》知识体系的要求,反映工程技术最新研究成果,以及针对新一轮土木工程相关规范、标准的修订,对全书进行了修订。较第1版而言,本书总体框架不变,仍分为9章,其中第2章的汽车荷载部分、第4章风荷载、第5章地震作用、第6章其他荷载与作用的内容做了较大充实和修改。

本书由柳炳康担任主编,黄慎江担任副主编。书中第1、2、3、4、6章由柳炳康编写,第7、8、9章由黄慎江编写,第5章由宋满荣编写。

由于编者水平有限,书中不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年6月

目 录

1 荷载与作用	(1)
1.1 工程结构荷载与作用	(1)
1.2 作用分类	(1)
1.2.1 按随时间变化分类	(1)
1.2.2 按空间位置变异分类	(2)
1.2.3 按结构反应性质分类	(2)
1.3 荷载代表值	(2)
本章小结	(3)
思考题	(3)
2 重力作用	(4)
2.1 土重及土的侧压力	(4)
2.1.1 土的自重应力	(4)
2.1.2 土的侧向压力	(5)
2.2 结构自重	(12)
2.3 楼面及屋面活荷载	(12)
2.3.1 民用建筑楼面活荷载	(12)
2.3.2 工业建筑楼面活荷载	(15)
2.3.3 屋面活荷载	(18)
2.3.4 屋面积灰荷载	(19)
2.3.5 施工、检修荷载及栏杆水平荷载	(20)
2.4 厂房吊车荷载	(20)
2.4.1 吊车工作制等级与工作级别	(20)
2.4.2 吊车竖向荷载和水平荷载	(21)
2.4.3 多台吊车组合	(22)
2.4.4 吊车荷载的动力系数	(22)
2.4.5 吊车荷载的组合值、频遇值及准永久值	(22)
2.5 汽车荷载	(23)
2.5.1 公路桥梁汽车荷载	(23)
2.5.2 城市桥梁汽车荷载	(25)
2.6 人群荷载	(26)
2.6.1 公路桥梁人群荷载	(26)
2.6.2 城市桥梁人群荷载	(26)
2.7 雪荷载	(27)
2.7.1 基本雪压	(27)
2.7.2 屋面积雪分布系数	(28)
本章小结	(29)
思考题	(30)
3 水作用	(31)
3.1 静水压力	(31)
3.2 流水压力	(31)

3.2.1	流体流动特征	(31)
3.2.2	桥墩流水压力计算	(32)
3.3	波浪作用力	(33)
3.3.1	波浪特性	(33)
3.3.2	波浪作用力的计算	(34)
3.4	冰压力	(40)
3.4.1	冰对桥墩产生的冰压力	(40)
3.4.2	桥墩有倾斜表面冰压力分解	(40)
3.4.3	大面积冰层的静压力	(41)
3.4.4	流冰冲击力	(41)
3.5	撞击力	(42)
3.5.1	撞击力的计算	(42)
3.5.2	漂流物撞击力	(43)
3.6	浮托力	(44)
	本章小结	(44)
	思考题	(45)
4	风荷载	(46)
4.1	基本风速和基本风压	(46)
4.1.1	基本风速	(46)
4.1.2	基本风压	(47)
4.1.3	风速或风压的换算	(47)
4.1.4	山区的基本风压	(48)
4.1.5	远海海面和海岛基本风压	(49)
4.1.6	我国基本风压分布特点	(49)
4.2	风压高度变化系数	(49)
4.3	风荷载体型系数	(52)
4.3.1	单体房屋和构筑物风荷载体型系数	(52)
4.3.2	群体风压体型系数	(54)
4.3.3	局部风压体型系数	(55)
4.4	顺风向风振	(55)
4.4.1	风振系数	(55)
4.4.2	脉动风荷载的共振分量因子	(56)
4.4.3	脉动风荷载的背景分量因子	(56)
4.4.4	脉动风荷载空间相关系数	(57)
4.4.5	结构振型系数	(57)
4.4.6	结构基本周期经验公式	(58)
4.4.7	阵风系数	(58)
4.4.8	顺风向风荷载标准值	(59)
4.5	横风向风振	(61)
4.5.1	涡激共振的产生	(61)
4.5.2	锁定现象及共振区高度	(62)
4.5.3	横风向风振验算	(63)
4.6	桥梁风荷载	(65)
4.6.1	风对桥梁结构的作用	(66)
4.6.2	风致静力失稳	(68)

4.6.3 静力风荷载计算	(68)
本章小结	(74)
思考题	(75)
5 地震作用	(76)
5.1 地震基础知识	(76)
5.1.1 地球构造与地震成因	(76)
5.1.2 地震活动与地震分布	(77)
5.1.3 地震强度度量	(79)
5.2 地震区划与地震作用	(83)
5.2.1 地震烈度区划	(83)
5.2.2 抗震设防准则与方法	(84)
5.2.3 建筑结构的分类与设防标准	(87)
5.3 单质点体系水平地震作用	(87)
5.3.1 地震作用的性质	(87)
5.3.2 地震作用确定方法	(87)
5.3.3 单质点体系计算简图	(88)
5.3.4 单自由度体系在地震作用下的运动方程	(88)
5.3.5 运动方程的解	(89)
5.3.6 水平地震作用基本公式	(91)
5.3.7 地震系数与动力系数	(91)
5.3.8 设计用反应谱	(93)
5.4 多质点体系水平地震作用	(95)
5.4.1 多质点体系计算简图	(95)
5.4.2 多自由度体系在地震作用下的运动方程	(96)
5.4.3 振型分解法	(97)
5.4.4 计算多质点体系水平地震作用的振型分解反应谱法	(100)
5.4.5 计算水平地震作用的底部剪力法	(103)
5.5 结构的扭转地震效应	(105)
5.5.1 刚心与质心	(106)
5.5.2 单层偏心结构的振动	(106)
5.5.3 多层偏心结构的振动	(108)
5.5.4 考虑扭转作用时的振型组合	(108)
5.6 竖向地震作用	(109)
5.6.1 高耸结构及高层建筑的竖向地震作用	(109)
5.6.2 大跨度结构的竖向地震作用	(110)
5.6.3 悬臂结构的竖向地震作用	(111)
5.7 地震作用及计算方法	(111)
5.7.1 地震作用的考虑	(111)
5.7.2 抗震计算方法	(112)
5.7.3 重力荷载代表值	(112)
5.8 公路桥梁地震作用	(112)
5.8.1 公路梁桥组成及受力特征	(113)
5.8.2 公路桥梁抗震设防要求	(113)
5.8.3 桥梁地震作用计算	(116)
5.8.4 桥台水平地震作用	(122)

5.8.5 支座水平地震作用	(123)
本章小结	(124)
思考题	(126)
6 其他荷载与作用	(128)
6.1 温度作用	(128)
6.1.1 温度应力的产生	(128)
6.1.2 温度应力的计算	(128)
6.1.3 温度变化的考虑	(131)
6.2 变形作用	(132)
6.2.1 地基变形的影响	(132)
6.2.2 混凝土收缩和徐变	(132)
6.3 冻胀力	(134)
6.3.1 土的冻胀原理及作用	(134)
6.3.2 冻胀性类别及冻胀力分类	(134)
6.3.3 冻胀力计算	(135)
6.4 爆炸作用	(137)
6.4.1 爆炸机理及类型	(137)
6.4.2 爆炸力学性质	(137)
6.4.3 爆炸对结构的影响及计算	(138)
6.5 行车动态作用	(139)
6.5.1 汽车冲击力	(139)
6.5.2 离心力	(140)
6.5.3 制动力	(140)
6.6 预加力	(142)
本章小结	(143)
思考题	(144)
7 工程结构荷载的统计分析	(146)
7.1 荷载的概率模型	(146)
7.1.1 平稳二项随机过程	(147)
7.1.2 滤过泊松过程	(149)
7.2 荷载的代表值	(150)
7.2.1 荷载标准值	(150)
7.2.2 荷载频遇值和准永久值	(151)
7.2.3 荷载组合值	(152)
7.3 荷载效应组合	(152)
7.3.1 荷载效应	(152)
7.3.2 荷载效应组合规则	(153)
本章小结	(156)
思考题	(156)
8 结构构件抗力的统计分析	(157)
8.1 抗力统计分析的一般概念	(157)
8.2 影响结构构件抗力的不定性	(157)
8.2.1 结构构件材料性能的不定性	(158)
8.2.2 结构构件几何参数的不定性	(159)
8.2.3 结构构件计算模式的不定性	(161)

8.3 结构构件抗力的统计特征	(162)
8.3.1 结构构件抗力的统计参数	(162)
8.3.2 结构构件抗力的概率分布	(164)
本章小结	(164)
思考题	(165)
9 结构概率可靠度设计法	(166)
9.1 土木工程结构设计方法的历史与变革	(166)
9.1.1 容许应力设计法	(166)
9.1.2 破损阶段设计法	(166)
9.1.3 多系数极限状态设计法	(167)
9.1.4 基于可靠性理论的概率极限状态设计法	(167)
9.2 结构可靠度基本原理	(168)
9.2.1 结构的功能要求	(168)
9.2.2 结构的设计基准期与设计使用年限	(168)
9.2.3 结构的安全等级	(169)
9.2.4 结构的极限状态	(169)
9.2.5 结构可靠性与可靠度	(170)
9.2.6 结构可靠指标	(171)
9.2.7 结构目标可靠指标	(172)
9.3 结构可靠度基本分析方法	(173)
9.3.1 中心点法	(173)
9.3.2 验算点法(JC法)	(175)
9.4 结构概率可靠度直接设计法	(179)
9.5 结构概率可靠度设计的实用表达式	(181)
9.5.1 单一系数设计表达式	(182)
9.5.2 分项系数设计表达式	(183)
9.5.3 现行规范设计表达式	(184)
9.6 结构体系可靠度分析	(188)
9.6.1 结构体系可靠度的基本概念	(188)
9.6.2 体系可靠度的界限估计法	(190)
9.6.3 PENT法(概率网络估计法)	(191)
9.6.4 蒙特卡洛模拟法	(192)
本章小结	(192)
思考题	(193)
附录一 常用材料和构件的自重	(194)
附录二 全国各城市的基本雪压、基本风压和基本气温	(205)
附录三 屋面积雪分布系数	(220)
附录四 风荷载体型系数	(222)
附录五 封闭式矩形平面房屋的局部体型系数	(233)
参考文献	(234)

1 荷载与作用

本章提要

本章叙述了工程结构上的荷载与作用,介绍了结构上的作用按随时间变化、空间位置变异和结构反应性质分类的方法,给出了荷载代表值的定义。

1.1 工程结构荷载与作用

工程结构是指用建筑材料建造的房屋、道路、桥梁、隧道、堤坝、塔架等工程设施。工程结构首先应满足自身功能要求,服务于社会,例如,建造房屋遮风避雨形成人类活动空间,架桥铺路为人群和车辆提供通道。其次,工程结构需要形成一个坚实的骨架承受使用过程中可能出现的各种环境作用,例如,房屋结构要承受自身重量、人群和家具重量、风压力 and 雪重等作用,道路桥梁要承受车辆重量、车辆制动力和冲击力、水压力和土压力等作用,在地震区的工程结构还要承受地震作用。结构在各种环境因素作用下产生效应(应力、位移、应变、裂缝等),工程结构设计的目的就是要保证结构具有足够的承载能力抵抗自然界各种作用力,并将结构变形控制在满足正常使用的范围内。为使结构物在规定的使用年限内具有足够的可靠度,结构设计的第一步就是要确定结构上的作用。

结构上的作用是指能使结构产生效应的各种原因的总称。引起结构产生作用效应的原因有两种,一种是施加于结构上的集中力和分布力,例如结构自重,作用于楼面的人群、家具、设备,作用于桥面的车辆、人群,施加于结构物上的风压力、水压力、土压力等。它们都是直接施加于结构,使其产生内力发生变形,可用“荷载”一词来表达。另一种是施加于结构上的外加变形和约束变形,例如,基础沉降导致结构外加变形引起的内力效应,材料收缩和徐变或温度变化引起结构约束变形产生的内力效应,由于地震造成地面运动致使结构产生惯性力引起的作用效应等。它们都是间接作用于结构,作用效应常与结构本身特征和所处环境有关。在工程结构中,常见的能使结构产生效应的原因多数可归结为直接作用在结构上的外力,长期以来,习惯上将所有引起结构反应的原因统称为“荷载”。按照国际通行做法和现行国家标准,“作用”泛指使结构产生内力、变形的所有原因,包括直接作用和间接作用;而“荷载”仅等同于施加于结构上的直接作用。

1.2 作用分类

各种作用对结构产生的影响力是不一样的,不同作用的取值方法也存在差异。在工程结构设计中,为便于考虑不同的作用所产生的效应,可将结构上的作用按随时间或空间位置的变异分类,或按结构的反应性质分类。

1.2.1 按随时间变化分类

(1)永久作用 在结构设计基准期内,其值不随时间变化,或者变化的量值相对平均值而言可以忽略不计。例如,结构自重、土的侧压力、静水压力、预加应力、钢材焊接应力等;混凝土收缩和徐变、基础不均匀沉降在若干年内已经基本上完成,它们均随时间单调变化而趋于限值,可列入永久作用。

(2)可变作用 在结构设计基准期内,其值随时间发生变化,变化的量值相对平均值而言不可忽略不计。例如,楼面活荷载、车辆荷载、人群荷载、车辆冲击力和制动力、风荷载和雪荷载、流水压力、波浪荷载、温度变

化等均属可变作用。

(3)偶然作用 在结构设计基准期内不定出现,一旦出现其持续时间较短,量值可能很大。例如,地震作用、爆炸力、船只或漂流物撞击力等均属偶然作用。

作用按随时间变化分类应用较为广泛,是结构作用基本分类。在结构设计中,作用的取值往往与作用出现的持续时间长短有关,它直接关系到作用概率模型的选择。

1.2.2 按空间位置变异分类

(1)固定作用 固定作用的特点是在结构上出现的空间位置固定不变,但其量值可能具有随机性,例如固定设备荷载、屋顶水箱重量等。

(2)自由作用 自由作用的特点是可以结构上的一定空间任意分布,出现的位置和量值都可能是随机的,例如车辆荷载、吊车荷载等。

由于自由作用是可以移动的,结构设计时应考虑其位置变化在结构上引起的最不利效应分布。

1.2.3 按结构反应性质分类

(1)静态作用 这种作用是逐渐地、缓慢地施加在结构上,作用过程中不产生加速度或加速度甚微可以忽略不计,例如楼面上人员荷载、雪荷载、土压力等。

(2)动态作用 施加这类作用时,会使结构产生显著的加速度,例如地震作用、设备振动、阵风脉动、打桩冲击等。

在进行结构分析时,对于动态作用应当考虑其动力效应,运用结构动力学方法考虑其影响;也可采用乘以动力系数的简化方法,将动态作用转换为等效静态作用。

1.3 荷载代表值

在进行工程结构设计时,首先应根据结构的功能要求和环境条件来确定作用在结构上的间接和直接作用。结构由于约束变形和外加变形引起的间接作用,可根据结构约束条件、材料性能、动力特征、外部环境等因素,通过计算确定。例如,混凝土收缩应力可根据构件约束条件、混凝土收缩性能、温度和湿度变化求得。地震作用可根据结构物的质量、刚度、阻尼等动力特征及地面运动规律,由结构动力学方法确定。由于施加在结构上的集中力和分布力引起直接作用具有明显变异性,在设计时为了便于取值,通常是考虑荷载的统计特征赋予一个规定的量值,称为荷载代表值。荷载可以根据不同设计要求规定不同的代表值,以使之能更确切地反映它在设计中的特点。《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)等工程建设国家标准给出了荷载的四种代表值:标准值、组合值、频遇值和准永久值,其中荷载标准值是荷载的基本代表值,是结构设计的主要参数,其他代表值都可在标准值的基础上乘以相应系数得到。

(1)荷载标准值 荷载在结构使用期间可能出现的最大值,由于荷载本身的变异性,使用期间的最大荷载值是随机变量,它可通过对某类荷载长期观察和实际调查,经过数理统计分析,在概率含义上确定;也可根据工程实践经验,经判断后协议给出。

(2)荷载组合值 当有两种或两种以上的可变荷载同时作用于结构上,所有可变荷载同时达到其最大值的概率极小,此时主导荷载(产生最大效应的荷载)取标准值,其他伴随荷载取小于其标准值的组合值。

(3)荷载准永久值 可变荷载在结构使用期间经常达到和超过的值。设计时需要考虑荷载的持久性对结构的影响。可变荷载的准永久值可在标准值上乘以—个准永久值系数得出,准永久值系数由调查统计和工程经验确定。

(4)荷载频遇值 可变荷载在结构上较频繁出现且量值较大的值,主要用于荷载短期效应组合中。可变荷载的频遇值可通过乘以频遇值系数得到,频遇值系数由调查统计结果并结合工程经验综合分析后确定。

在进行工程结构设计时,永久荷载采用其标准值作为代表值;可变荷载根据工程设计要求可采用标准值、组合值、频遇值或准永久值作为代表值;偶然荷载可依据观察资料、试验数据以及工程经验来确定其代表值。

本章小结

(1)引起工程结构产生作用效应的原因有两种,一种是直接施加于结构上的集中力和分布力,另一种是间接施加于结构上的外加变形和约束变形。按照通行做法,“作用”泛指结构产生内力、变形的所有原因,包括直接作用和间接作用,而“荷载”仅指结构上的直接作用。

(2)作用按随时间变化可分为永久作用、可变作用和偶然作用;按空间位置变异可分为固定作用和自由作用;按结构反应性质可分为静态作用和动态作用。

(3)荷载代表值是考虑荷载变异特征所赋予的规定量值,工程建设相关的国家标准给出了荷载四种代表值:标准值、组合值、频遇值和准永久值。荷载可根据不同设计要求规定不同的代表值,其中荷载标准值是荷载的基本代表值,其他代表值都可在标准值的基础上考虑相应的系数得到。

思考题

- 1.1 什么是施加于工程结构上的作用?荷载与作用有什么区别?
- 1.2 工程结构设计中,如何对结构上的作用进行分类?
- 1.3 什么是荷载的代表值?它们是如何确定的?



2 重力作用

本章提要

本章叙述了土的自重应力、土的侧压力及结构自重的计算方法,介绍了民用建筑楼面及屋面活荷载的分布规律,分析了工业厂房吊车荷载的作用特点,给出了桥梁工程车辆荷载及人群荷载的确定途径,最后讨论了雪荷载的确定方法。

2.1 土重及土的侧压力

2.1.1 土的自重应力

2.1.1.1 均匀土自重应力

在计算土中应力时,通常将土体视为均匀连续的弹性介质,假设天然地面是一个无限大的水平面,土体在自重作用下只产生竖向变形,而无侧向变形和剪切变形,因此在任意竖直面和水平面均无剪应力存在。若土层天然重度为 γ ,在深度 z 处水平截面[图 2.1(a)],土体因自身重量产生的竖向应力 σ_{cz} 可取该截面上单位面积的土柱体的重力,即:

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (2.1)$$

可见自重应力 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增加。如图 2.1(b)所示。

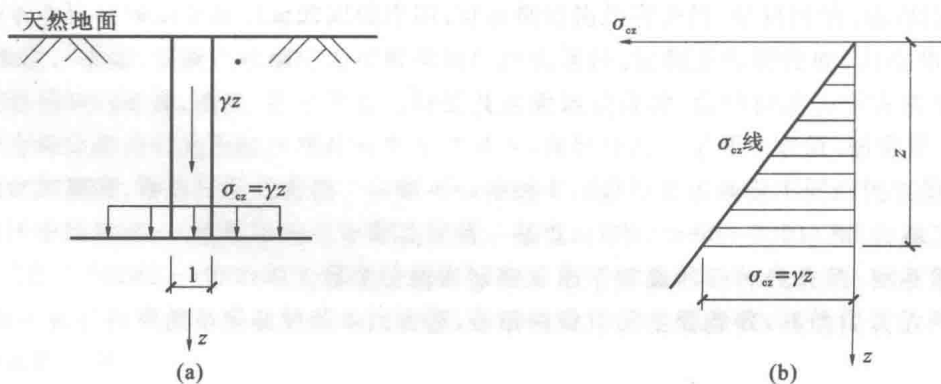


图 2.1 均质土中竖向自重应力

(a)任意水平截面土自重应力;(b)自重应力呈线性增加

土中任意截面都包括土体骨架和孔隙的面积,地基应力计算时只考虑土中某单位面积上的平均应力。实际上,只有通过土颗粒接触点传递的粒间应力才能使土粒彼此挤紧,引起土体变形。因此粒间应力是影响土体强度的重要因素,粒间应力又称为有效应力。如土层处于地下水位以上,按式(2.1)计算的土中的自重应力即为有效自重应力;如土层位于地下水位以下,则应以地下水位面作为分层界面,界面以下土层应扣除浮力影响,才能得到土的有效重力。土的自重应力一般是指土的自身有效重力在土体中引起的应力。

2.1.1.2 成层土自重应力

地基土往往是由不同重度的土层组成的层状介质,设天然地面以下各土层的厚度为 h_i ,重度为 γ_i ,则地面以下深度 z 处土的自重应力可通过对各层土的自重应力求和得到,即

$$\sigma_{cz} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2.2)$$

式中 n ——从天然地面起到深度 z 处土的层数；
 h_i ——第 i 层土的厚度(m)；
 γ_i ——第 i 层土的天然重度(kN/m^3)，对地下水位以下的土层，取有效重度 γ'_i 。
 若土层位于地下水位以下，计算土的自重应力时，应以土的有效重度代替天然重度。土的有效重度是扣除水的浮力后单位体积土体所受重力。

地下水位以下，若埋藏有不透水的岩层或不透水的坚硬黏土层，由于不透水层中不存在水的浮力，所以不透水层界面以下的自重应力应按上覆土层的水土总重计算。在上覆层与不透水层界面处自重应力有突变。

图 2.2 为成层土中竖向自重应力沿深度分布示意图。

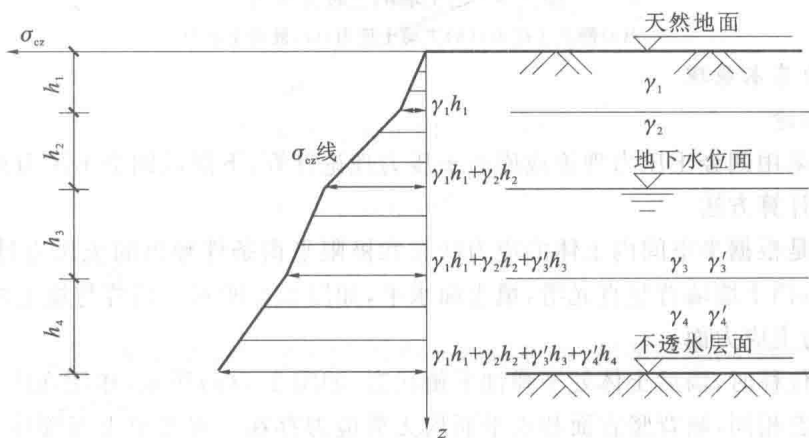


图 2.2 成层土中竖向自重应力沿深度分布

2.1.2 土的侧向压力

2.1.2.1 土的侧向压力分类

挡土墙是防止土体坍塌的构筑物，常用砖石、素混凝土、钢筋混凝土等材料建成，广泛应用于土建工程中。土的侧压力是指挡土墙后的填土因自重或外荷载作用对墙背产生的侧向压力，土压力的大小及分布与墙身的位移、填土的性质、墙体的刚度、地基的土质等因素有关。根据挡土墙的移动情况和墙后土体所处应力状态，土压力可分为静止土压力、主动土压力和被动土压力三类别。

(1) 静止土压力

当挡土墙在土压力作用下，不产生任何位移或转动[图 2.3(a)]，墙后土体处于弹性平衡状态，此时墙背所受的土压力称为静止土压力，一般用 E_0 表示。例如，地下室外墙由于受到内侧楼面支撑可认为没有位移发生，这时作用在墙体外侧的回填土侧压力可按静止土压力计算。

(2) 主动土压力

当挡土墙在土压力的作用下，向离开土体方向移动或转动时[图 2.3(b)]，作用在墙背上的土压力从静止土压力值逐渐减少，直至墙后土体出现滑动面。滑动面以上的土体将沿这一滑动面向下向前滑动，在滑动楔体开始滑动的瞬间，墙背上的土压力减少到最小值，土体内应力处于主动极限平衡状态，此时作用在墙背上的土压力称为主动土压力，一般用 E_a 表示。例如，基础开挖时的围护结构，由于土体开挖，基础内侧失去支承，围护墙体向基坑内产生位移，这时作用在墙体外侧的土压力可按主动土压力计算。

(3) 被动土压力

当挡土墙在外力作用下向土体方向移动或转动时[图 2.3(c)]，墙体挤压墙后土体，作用在墙背上的土压力从静止土压力值逐渐增大，墙后土体也会出现滑动面，滑动面以上土体将沿滑动方向向上向后推出，在滑动楔体开始隆起的瞬间，墙背上的土压力增加到最大值，土体内应力处于被动极限平衡状态。此时作用在墙背上的土压力称为被动土压力，一般用 E_p 表示。例如，拱桥在桥面荷载作用下，拱体将水平推力传至桥台，挤压桥台背后土体，这时作用在桥台背后的侧向土压力可按被动土压力计算。

在相同的墙高和填土条件下，主动土压力小于静止土压力，而静止土压力又小于被动土压力，即：

$$E_a < E_0 < E_p \tag{2.3}$$

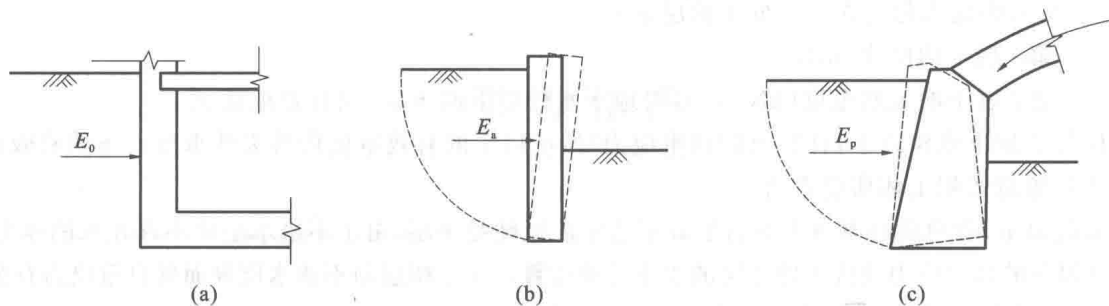


图 2.3 挡土墙的三种土压力

(a) 静止土压力; (b) 主动土压力; (c) 被动土压力

2.1.2.2 土压力基本原理

(1) 朗金土压力理论

土的侧向压力可采用朗金土压力理论或库仑土压力理论计算,下面以朗金土压力理论为例,介绍土体侧向压力的基本原理和计算方法。

朗金土压力理论是根据半空间内土体的应力状态和极限平衡条件导出的土压力计算方法,该理论假定土体为半空间弹性体,挡土墙墙背竖直光滑,填土面水平,如图 2.4 所示。墙背与填土之间无摩擦力产生,故剪应力为零,即墙背为主应力面。

当挡土墙不发生位移时,墙后土体处于弹性平衡状态,如图 2.4(a)所示,作用在墙背上的应力状态与弹性半空间土体应力状态相同,墙背竖直面和水平面均无剪应力存在。在离填土面深度 z 处,取出一单元体,其上作用的竖向应力 σ_z 和水平应力 σ_x 分别为:

$$\sigma_z = \sigma_1 = \gamma z \quad (2.4)$$

$$\sigma_x = \sigma_3 = K_0 \gamma z \quad (2.5)$$

式中 K_0 为静止土压力系数,是土体水平应力与竖向应力的比值。用 σ_1 和 σ_3 作出的摩尔应力圆与土的抗剪强度曲线不相切,如图 2.4(d) 中圆 I 所示。

当挡土墙离开土体向背离墙背方向移动时,墙后土体有伸张趋势,如图 2.4(b)所示,此时单元体上竖向应力 σ_z 不变,水平应力 σ_x 逐渐减小,直到满足土体极限平衡条件。此时水平应力 σ_x 达最低值 σ_a , σ_a 称为主动土压力强度,为小主应力;而 σ_z 较 σ_x 要大,为大主应力,有:

$$\sigma_z = \sigma_1 = \text{常数} \quad (2.6)$$

$$\sigma_x = \sigma_3 = \sigma_a \quad (2.7)$$

此时 σ_3 和 σ_1 的摩尔应力圆与抗剪强度包络线相切,如图 2.4(d) 中的圆 II 所示。土体形成一系列滑裂面,滑裂面上各点都处于极限平衡状态,称为主动朗金状态。滑裂面的方向与大主应力作用的水平面交角 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ (φ 为土的内摩擦角)。

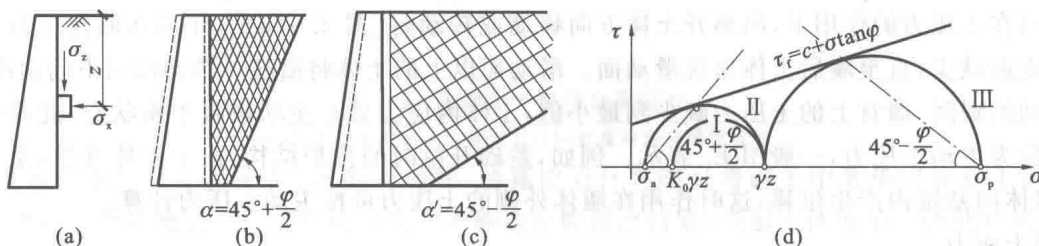


图 2.4 半空间的极限平衡状态

(a) 深度 z 处应力状态; (b) 主动朗金状态; (c) 被动朗金状态; (d) 摩尔应力圆表示的朗金状态

当挡土墙在外力作用下沿水平方向挤压土体时,如图 2.4(c)所示, σ_z 仍不发生变化, σ_x 随着墙体位移增加而逐渐增大,直到墙后土体达到极限平衡状态。此时水平应力 σ_x 超过竖向应力 σ_z 达最大值 σ_p , σ_p 称为被动土压力强度,为大主应力;而 σ_z 较 σ_x 要小,为小主应力,有:

$$\sigma_z = \sigma_3 = \text{常数} \quad (2.8)$$

$$\sigma_x = \sigma_1 = \sigma_p \quad (2.9)$$