



土木工程专业系列规划教材



Engineering Load and Structural Reliability Design Principles

工程荷载与结构可靠度设计原理

· 平台课课程群 ·

主编 王汝恒 李正良
主审 陈国平



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



高等学校土木工程专业系列规划教材

工程荷载与结构可靠度设计原理

主 编 王汝恒 李正良
副主编 贾 彬 晏致涛 张春涛
 范文亮 刘 潇
主 审 陈国平



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程荷载与结构可靠度设计原理 / 王汝恒, 李正良主编. — 武汉: 武汉大学出版社, 2018. 2

高等学校土木工程专业系列规划教材

ISBN 978-7-307-19827-2

I. 工… II. ①王… ②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—高等学校—教材 IV. TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 276555 号

责任编辑: 刘小娟 李嘉琪

责任校对: 杨赛君

装帧设计: 吴 极

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷: 湖北睿智印务有限公司

开本: 880 × 1230 1/16 印张: 10 字数: 316 千字

版次: 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19827-2 定价: 31.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方志 叶列平 何若全 沙爱民 范峰 周铁军 魏庆朝

委员:王辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉

周云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高波

委员:丁克伟 丁建国 马昆林 王成 王湛 王媛 王薇

王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒

王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方俊

龙广成 申爱国 付钢 付厚利 白晓红 冯鹏 曲成平

吕平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅

刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁皓 许伟 许程洁 许婷华

阮波 杜咏 李波 李斌 李东平 李远富 李炎锋

李耀庄 杨杨 杨志勇 杨淑娟 吴昊 吴明 吴轶

吴涛 何亚伯 何旭辉 余锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全

张红 张纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元

张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰

胡世阳 侯建国 姜清辉 娄平 袁广林 桂国庆 贾连光

夏元友 夏军武 钱晓倩 高飞 高玮 郭东军 唐柏鉴

黄华 黄声享 曹平周 康明 阎奇武 董军 蒋刚

韩峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾珂 雷宏刚

廖莎 廖海黎 蒲小琼 黎冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王睿 白立华 曲生伟 蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导模式转变为建设性、发现性的学习,从被动学习转变为主动学习,由教师传播知识到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,逐步配备基本数字教学资源,主要内容包括:

文本:课程重难点、思考题与习题参考答案、知识拓展等。

图片:课程教学外观图、原理图、设计图等。

视频:课程讲述对象展示视频、模拟动画,课程实验视频,工程实例视频等。

音频:课程讲述对象解说音频、录音材料等。

数字资源获取方法:

- ① 打开微信,点击“扫一扫”。
- ② 将扫描框对准书中所附的二维码。
- ③ 扫描完毕,即可查看文件。

更多数字教学资源共享、图书购买及读者互动敬请关注“开动传媒”微信公众号!



丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

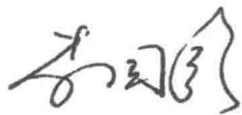
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前 言

工程结构最重要的功能,就是承受其服役期间可能出现的各种荷载。结构设计时,需要考虑有哪些荷载,荷载值大小如何确定,以及各类荷载将如何应用于结构设计计算等,这些都将直接影响结构的安全性。因此,工程结构设计时,考虑荷载的种类、产生的背景和计算方法是一名结构工程从业者需要具备的基本专业知识,也是土木工程专业学生为了更好地学习“钢筋混凝土结构设计原理”“钢结构”“土力学及地基基础”及“工程抗震”等专业课程所必须掌握的基础知识。本书包括荷载、结构抗力和结构设计方法三部分内容。

荷载部分的内容包括工程荷载与作用分类;结构自重引起的重力作用,民用及工业建筑楼面恒荷载与活荷载的计算方法,雪荷载、吊车荷载以及公路桥梁汽车荷载和人群荷载,土自重应力和侧压力的基本计算理论;水作用引起的静水和流水压力、浮托力、波浪压力、冰压力和撞击力;基本风速和风压的概念及计算方法,建筑结构顺风向平均风效应和脉动风效应、横风向风振,桥梁结构风致振动及静风压力;单质点和多质点体系水平地震反应分析,振型分解反应谱法、底部剪力法和时程反应分析等地震作用基本计算方法;环境因素引起的温度应力和冻胀力,以及结构变形产生的作用力,爆炸冲击产生的机理和力学性质,行车动态作用等。

结构抗力部分的内容包括结构抗力的一般概念和基本原理、结构抗力不确定性的影响因素、结构抗力的统计特征等。

结构设计方法部分详细介绍了现行规范采用的极限状态结构设计方法,即结构荷载和结构抗力两部分内容,在结构概率可靠度基础上,以确定性荷载和确定性结构抗力为形式的结构设计方法。这部分内容主要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工程结构承载能力与正常使用极限状态作用效应组合;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;概率极限状态设计方法的基本原理,结构设计的目标和原则,基于分项系数表示的概率极限状态设计表达式。

本书大纲拟定和统稿由西南科技大学王汝恒负责,校稿由重庆大学李正良负责,其中西南科技大学王汝恒、贾彬、张春涛和刘潇编写第2、3、5、6、7、10章,重庆大学李正良、晏致涛和范文亮编写第1、4、8、9章。本书由西南科技大学陈国平担任主审。

本书可作为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。

鉴于编者水平所限,书中存在不当或错误之处,恳请读者批评、指正。

编 者

2017年10月

目 录

1 荷载与作用	(1)	2.6.1 公路桥梁人群荷载	(19)
1.1 工程荷载与作用	(1)	2.6.2 城市桥梁人群荷载	(20)
1.2 作用的分类	(1)	2.7 土的自重应力及侧压力	(20)
1.3 荷载代表值	(2)	2.7.1 土的自重应力	(20)
1.3.1 荷载标准值	(2)	2.7.2 土的侧压力	(21)
1.3.2 荷载组合值	(2)	本章小结	(22)
1.3.3 荷载准永久值	(3)	思考题	(23)
1.3.4 荷载频遇值	(3)	习题	(23)
本章小结	(3)	3 水作用	(25)
思考题	(3)	3.1 静水压力	(25)
2 重力作用	(4)	3.2 流水压力	(26)
2.1 结构自重	(4)	3.3 波浪作用力	(27)
2.2 楼面及屋面活荷载	(5)	3.3.1 波浪的概念及分类	(27)
2.2.1 民用建筑楼面活荷载	(5)	3.3.2 浪压力的计算	(28)
2.2.2 工业建筑楼面活荷载	(7)	3.4 浮托力	(29)
2.2.3 楼面等效均布活荷载的确定 方法	(7)	3.5 冰压力	(29)
2.2.4 屋面活荷载	(8)	3.5.1 冰压力的概念及分类	(29)
2.2.5 屋面积灰荷载	(9)	3.5.2 冰压力的计算	(30)
2.2.6 施工、检修荷载及栏杆水平 荷载	(11)	3.6 撞击力	(31)
2.3 雪荷载	(11)	3.6.1 船舶撞击力	(31)
2.3.1 基本雪压的确定	(11)	3.6.2 漂流物撞击力	(32)
2.3.2 屋面积雪分布系数	(11)	本章小结	(32)
2.3.3 雪荷载计算方法	(14)	思考题	(33)
2.4 吊车荷载	(14)	习题	(33)
2.4.1 吊车的工作制等级与工作级别	(15)	4 风荷载	(34)
2.4.2 吊车竖向荷载和水平荷载	(15)	4.1 风的基本知识	(34)
2.4.3 多台吊车的组合	(16)	4.1.1 风的形成	(34)
2.4.4 吊车荷载的组合值、频遇值及 准永久值	(17)	4.1.2 三类性质的大风	(34)
2.5 汽车荷载	(17)	4.1.3 我国风气候总况	(35)
2.5.1 公路桥梁汽车荷载	(17)	4.1.4 风级	(35)
2.5.2 城市桥梁汽车荷载	(19)	4.1.5 风的破坏作用	(36)
2.6 人群荷载	(19)	4.2 基本风速和基本风压	(37)
		4.2.1 基本风速	(37)
		4.2.2 基本风压	(39)
		4.2.3 非标准条件下的风速或风压	

的换算	(40)	5.6.1 高耸结构和高层建筑	(84)
4.3 风压高度变化系数	(42)	5.6.2 大跨度结构、长悬臂结构	(84)
4.4 风荷载体型系数	(44)	本章小结	(85)
4.5 顺风向风振	(47)	思考题	(85)
4.5.1 平均风与脉动风	(47)	6 其他荷载与作用	(86)
4.5.2 风振系数	(47)	6.1 温度作用	(86)
4.5.3 共振分量因子	(48)	6.1.1 温度作用的基本概念	(86)
4.5.4 结构振型系数	(48)	6.1.2 温度变形的计算	(86)
4.5.5 背景分量因子	(49)	6.2 变形作用	(87)
4.5.6 结构基本周期经验公式	(50)	6.3 冻胀力	(88)
4.5.7 阵风系数	(50)	6.3.1 土的冻胀原理及作用	(88)
4.5.8 顺风向风荷载标准值	(51)	6.3.2 冻胀性类别及冻胀力分类	(88)
4.6 横风向风振	(54)	6.4 爆炸作用	(90)
4.6.1 横风向风振与雷诺数	(54)	6.4.1 爆炸的概念及其类型	(90)
4.6.2 锁定现象和共振区高度	(56)	6.4.2 爆炸的荷载计算	(90)
4.6.3 横风向风振验算	(57)	6.5 行车动态作用	(91)
4.7 桥梁风荷载	(59)	6.5.1 汽车制动力	(91)
4.7.1 桥梁横桥向风荷载计算	(59)	6.5.2 汽车冲击力	(91)
4.7.2 顺桥向风荷载计算	(61)	6.5.3 汽车撞击力	(92)
本章小结	(61)	6.5.4 离心力	(92)
思考题	(62)	本章小结	(92)
5 地震作用	(63)	思考题	(92)
5.1 地震作用基础知识	(63)	7 工程结构荷载的统计分析	(94)
5.1.1 地震的概念	(63)	7.1 荷载的概率模型	(94)
5.1.2 地震的成因与类型	(64)	7.1.1 平稳二项随机过程模型	(94)
5.1.3 地震波	(64)	7.1.2 $F_I(x)$ 与 $F_T(x)$ 统计参数关系	(96)
5.1.4 地震震级与地震烈度	(65)	7.2 荷载的代表值	(97)
5.1.5 地震术语	(66)	7.2.1 荷载标准值	(97)
5.1.6 地震作用的特点	(66)	7.2.2 荷载准永久值	(98)
5.2 单质点体系水平地震反应分析	(67)	7.2.3 荷载频遇值	(99)
5.2.1 单自由度体系的振动	(67)	7.2.4 荷载组合值	(100)
5.2.2 单质点弹性体系水平地震 作用	(69)	7.3 荷载效应组合规则	(100)
5.3 多质点体系水平地震反应分析	(71)	本章小结	(101)
5.3.1 计算简图	(71)	思考题	(101)
5.3.2 运动方程	(72)	8 结构构件抗力的统计分析	(102)
5.3.3 自由振动	(73)	8.1 抗力统计分析的一般概念	(102)
5.4 地震作用计算方法	(76)	8.1.1 概述	(102)
5.4.1 振型分解反应谱法	(76)	8.1.2 基本原理	(102)
5.4.2 底部剪力法	(79)	8.2 影响结构构件抗力的不定性	(104)
5.4.3 时程反应分析法	(81)	8.2.1 结构构件材料性能的不定性	(104)
5.4.4 桥梁结构地震作用的计算	(81)	8.2.2 结构构件几何参数的不定性	(106)
5.5 结构的扭转地震效应	(82)	8.2.3 结构构件计算模式的不定性	(107)
5.6 竖向地震作用	(83)	8.3 结构构件抗力的统计特征	(108)
		8.3.1 抗力的统计参数	(108)

8.3.2 抗力的概率分布	(109)	习题	(128)
本章小结	(110)	10 概率极限状态设计方法	(129)
思考题	(110)	10.1 土木工程结构设计方法的演变	
习题	(110)	发展	(129)
9 结构可靠度分析与计算	(111)	10.2 结构设计的目标和原则	(129)
9.1 结构可靠度基本概念和原理	(111)	10.2.1 结构的极限状态	(129)
9.1.1 结构的功能要求	(111)	10.2.2 结构的安全等级和设计状况	(130)
9.1.2 结构的功能函数	(111)	10.2.3 结构构件的目标可靠指标	(131)
9.1.3 结构的状态	(111)	10.3 直接概率设计法	(133)
9.1.4 结构的可靠度	(112)	10.3.1 一般概念	(133)
9.1.5 结构的可靠指标	(113)	10.3.2 直接概率法的基本思路	(133)
9.2 结构可靠度分析方法	(114)	10.4 基于分项系数表达的概率极限状态	
9.2.1 一次二阶矩方法	(114)	设计法	(134)
9.2.2 Monte Carlo 法	(122)	10.4.1 单一系数设计表达式	(134)
9.3 结构体系可靠度分析	(124)	10.4.2 分项系数设计表达式	(134)
9.3.1 概述	(124)	10.4.3 规范设计表达式	(135)
9.3.2 体系可靠度分析的基本模型	(124)	本章小结	(138)
9.3.3 主要失效模式的识别	(125)	思考题	(138)
9.3.4 体系可靠度的近似计算方法	(125)	附录 A 常用材料和构件的重度	(139)
本章小结	(127)	附录 B 工业建筑楼面活荷载	(144)
思考题	(128)	参考文献	(147)



数字资源目录

1 荷载与作用

1.1 工程荷载与作用 >>>

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。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称为重力,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(习惯称为风荷载或风载)。由爆炸、运动物体的冲击或离心作用等产生的作用在结构上的其他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,而将结构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、变形等效应的其他非直接作用因素。能够引起结构内力、变形等效应的其他非直接作用因素,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)的各种因素统称为作用;而将可归结为作用在结构上的力的因素称为直接作用;将不是作用力但是同样引起结构效应的因素称为间接作用,如图 1-1 所示。只有直接作用才可称为荷载。



图 1-1 作用与效应
(a)直接作用(重力);(b)间接作用(升温)

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,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,由于偶然作用出现的概率较小,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,或先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。

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作用和直接作用。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的直接作用具有明显变异性,在设计时通常在考虑荷载的统计特征后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,使之能更确切地反映其在设计中的特点。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)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4种代表值,即标准值、组合值、准永久值和频遇值,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。

1.3.1 荷载标准值

荷载标准值是指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。

1.3.2 荷载组合值

荷载组合值是指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时,此时主导荷载(产生最大效应的荷载)取标准值,其他伴随荷载则取小于其标准值的组合值。

1.3.3 荷载准永久值

荷载准永久值是指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用标准值乘以一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。

1.3.4 荷载频遇值

荷载频遇值是指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标准值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,永久荷载采用标准值作为代表值;可变荷载根据设计要求可采用标准值、组合值、准永久值或频遇值作为代表值;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

本章介绍了荷载与作用的基本概念,强调了荷载不一定产生效应,但是作用一定产生效应;按照时间变异、空间变异和结构反应三个方面详细介绍作用的分类,给出了不同类型作用的基本概念和包含的具体作用力;基于有关规范介绍了工程设计中常用的荷载的4种代表值,即标准值、组合值、频遇值和准永久值。

思考题

- 1-1 荷载与作用在概念上有何不同?
- 1-2 简述直接作用与间接作用的区别。
- 1-3 作用(荷载)有哪些类型?
- 1-4 什么是荷载的代表值?它们是如何确定的?



思考题答案

2 重力作用

地球上一定高度范围内的物体均会受到地球引力的作用而产生重力,地球对物体的这种作用称为重力作用。由重力作用导致的荷载叫作重力荷载,主要包括结构自重、楼面及屋面活荷载、雪荷载、车辆重力等。

2.1 结构自重 >>>

结构自重是组成结构的材料自身重量产生的重力,在结构设计中,可按结构设计规定的尺寸和材料或结构构件单位体积的自重(或单位面积、单位长度的自重)确定。结构自重计算见式(2-1)。

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

式中 G_k —— 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。

工程结构中常用的材料和构件重度见附录 A。由于结构构件尺寸多变,材料重度也可能不同,在计算结构自重时,常将结构人为地划分为许多容易计算的基本构件或材料重度不同的若干单元,先分别计算各基本部分的重量,然后叠加得到结构的总自重,见式(2-2)。

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

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。

对于自重变异较大的材料,如现场制作的保温材料、混凝土薄壁构件等,尤其是制作屋面的轻质材料,考虑结构的可靠性,在设计中应根据该荷载对结构有利或不利,分别取其自重的下限值或上限值。

在民用建筑中,结构自重主要指楼面板、梁、柱等构件的自重,可按式(2-2)进行计算,即通过结构构件的设计尺寸和材料重度确定自重。在桥梁工程中,结构自重主要指桥梁结构物及桥面铺装、附属设备等外加物的自重,只要知道结构各部件或构件尺寸和材料重度,即可确定桥梁结构的自重。

在实际计算自重过程中,根据荷载效应的特点,结构自重可表示为面荷载、线荷载和集中荷载等。比如,进行楼板荷载效应计算时,楼板的自重、板面层材料自重,可以通过楼板和板面层材料的厚度分别乘以其单位体积的自重得到,所以楼板、板面层材料自重的单位为 kN/m²;进行梁的荷载效应计算时,将梁的自重表示为线荷载,即将材料的单位体积自重乘以梁截面面积得到,单位为 kN/m;进行柱的荷载效应计算时,柱的自重常将材料单位体积自重乘以柱体体积得到,单位为 kN。

2.2 楼面及屋面活荷载 >>>

2.2.1 民用建筑楼面活荷载

民用建筑楼面活荷载是指建筑物中的人群、家具、设施等产生的重力作用,这些荷载量值随时间发生变化,位置也是可移动的,亦称可变荷载。

(1) 民用建筑楼面均布活荷载的取值

楼面活荷载在时间和空间上具有变异性,为了使工程上应用方便,按楼板内弯矩等效的原则,一般将楼面活荷载处理为楼面等效均布活荷载。《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)在调查和概率统计基础上给出了民用建筑楼面均布活荷载标准值及其组合值系数、频遇值系数和准永久值系数(表 2-1),设计时直接从表中查用。

表 2-1 民用建筑楼面均布活荷载标准值及其组合值系数、频遇值系数和准永久值系数

项次	类别		标准值/ (kN/m ²)	组合值 系数 ψ_c	频遇值 系数 ψ_f	准永久值 系数 ψ_q	
1	(1)住宅、宿舍、旅馆、办公楼、医院病房、托儿所、幼儿园		2.0	0.7	0.5	0.4	
	(2)教室、试验室、阅览室、会议室、医院门诊室		2.0	0.7	0.6	0.5	
2	食堂、餐厅、一般资料档案室		2.5	0.7	0.6	0.5	
3	(1)礼堂、剧场、影院、有固定座位的看台		3.0	0.7	0.5	0.3	
	(2)公共洗衣房		3.0	0.7	0.6	0.5	
4	(1)商店、展览厅、车站、港口、机场大厅及其旅客等候室		3.5	0.7	0.6	0.5	
	(2)无固定座位的看台		3.5	0.7	0.5	0.3	
5	(1)健身房、演出舞台		4.0	0.7	0.6	0.5	
	(2)舞厅		4.0	0.7	0.6	0.3	
6	(1)书库、档案库、贮藏室		5.0	0.9	0.9	0.8	
	(2)密集柜书库		12.0	0.9	0.9	0.8	
7	通风机房、电梯机房		7.0	0.9	0.9	0.8	
8	汽车 通道 及停 车库	(1)单向板楼盖(板跨不小于 2m)和 双向板楼盖(板跨不小于 3m×3m)	客车	4.0	0.7	0.7	0.6
			消防车	35.0	0.7	0.5	0
		(2)双向板楼盖(板跨不小于 6m×6m) 和无梁楼盖(板跨不小于 6m×6m)	客车	2.5	0.7	0.7	0.6
			消防车	20.0	0.7	0.5	0
9	厨房	(1)餐厅	4.0	0.7	0.7	0.7	
		(2)其他	2.0	0.7	0.6	0.5	
10	浴室、厕所、盥洗室		2.5	0.7	0.6	0.5	
11	走廊、 门厅	(1)宿舍、旅馆、医院病房托儿所、幼儿园、住宅	2.0	0.7	0.5	0.4	
		(2)办公楼、餐厅、医院、门诊部	2.5	0.7	0.6	0.5	
		(3)教学楼及其他可能出现人员密集的情况	2.5	0.7	0.5	0.3	

续表

项次	类别		标准值/ (kN/m ²)	组合值 系数 ψ_c	频遇值 系数 ψ_f	准永久值 系数 ψ_q
12	楼梯	(1)多层住宅	2.0	0.7	0.5	0.4
		(2)其他	3.5	0.7	0.5	0.3
13	阳台	(1)可能出现人员密集的情况	3.5	0.7	0.6	0.5
		(2)其他	2.5	0.7	0.6	0.5

注:1.本表所给各项活荷载适用于一般使用条件,当使用荷载较大或情况特殊时,应按实际情况采用。

2.第6项书库活荷载,当书架高度大于2m时,书库活荷载尚应按每米书架高度不小于2.5kN/m²确定。

3.第8项中,客车活荷载只适用于停放载人数少于9人的客车;消防车活荷载适用于满载总重为300kN的大型车辆;当不符合本表的要求时,应将车轮的局部荷载按结构效应的等效原则,换算为等效均布荷载。

4.第8项消防车活荷载,当双向板楼盖板跨介于3m×3m~6m×6m时,应按跨度线性插值确定。

5.第12项楼梯活荷载,对预制楼梯踏步平板,尚应按1.5kN集中荷载验算。

6.本表各项荷载不包括隔墙自重和二次装修荷载。固定隔墙的自重应按永久荷载考虑,当隔墙位置可灵活自由布置时,非固定隔墙的自重应取不小于1/3的每延米长墙重(kN/m)作为楼面活荷载的附加值(kN/m²)计入,且附加值不应小于1.0kN/m²。

设计中,可能会遇到要求确定某种规范中未规定的楼面活荷载情况,此时可采用以下原则确定其标准值:

①当有足够资料并能对其统计分布做出合理估计时,按概率模型的统计方法确定荷载标准值。

②对不能取得充分资料进行统计的楼面活荷载,可根据已有的工程实践经验,通过分析、判断后确定荷载标准值,即按经验判断、确定荷载标准值。

③对于比较固定、较大的局部荷载可以简化为等效均布荷载。

对于规范中未明确的楼面活荷载频遇值、准永久值,可根据楼面使用性质的类同性,参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中给出的楼面活荷载频遇值系数、准永久值系数经分析比较后确定。

(2)楼面活荷载的折减

民用建筑的楼面均布活荷载标准值是建筑物正常使用期间可能出现的最大值,作用在楼面上的活荷载不可能以标准值的大小同时布满所有的楼面,因此在设计梁、墙、柱和基础时,还要考虑实际荷载沿楼面分布的变异情况,即在确定梁、墙、柱和基础的荷载标准值时,需将楼面活荷载标准值乘以折减系数。

楼面荷载折减系数的确定实际上是比较复杂的,采用简化的概率统计模型来解决这个问题的方法还不够成熟,目前,除美国规范是按结构部位的影响面积来考虑外,其他国家均按传统方法,通过从属面积来考虑折减系数。

《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)在借鉴国际标准的同时,结合我国设计经验做了合理的简化和修正,给出了设计楼面梁、墙、柱及基础时不同情况下楼面活荷载的折减系数,设计时可根据不同情况直接取用。

①设计楼面梁时的折减系数。

a.表2-1中第1(1)项,当楼面从属面积超过25m²时应取0.9;

b.表2-1中第1(2)~7项,当楼面梁从属面积超过50m²时应取0.9;

c.表2-1中第8项,对单向板楼盖的次梁和槽形板的纵肋应取0.8,对单向板楼盖的主梁应取0.6,对双向板楼盖的主梁取0.8;

d.表2-1中第9~13项,应采用与所属房屋类别相同的折减系数。

②设计墙、柱和基础时的折减系数。

a.表2-1中第1(1)项,应按表2-2规定采用;

b.表2-1中第1(2)~7项,应采用与楼面梁相同的折减系数;

c.表2-1中第8项,对单向板楼盖应取0.5,对双向板楼盖和无梁楼盖应取0.8;

d.表2-1中第9~13项,应采用与所属房屋类别相同的折减系数。

注意:楼面梁的从属面积应按梁两侧各延伸 1/2 梁间距的范围的实际面积确定。

表 2-2 活荷载按楼层的折减系数

墙、柱、基础计算截面以上层数	1	2~3	4~5	6~8	9~20	>20
计算截面以上各楼层活荷载总和的折减系数	1.00 (0.90)	0.85	0.70	0.65	0.60	0.55

注:当楼面梁的从属面积超过 25m² 时,应采用括号内的系数。

2.2.2 工业建筑楼面活荷载

工业建筑楼面在生产使用或安装检修时,由设备、管道、运输工具及可能拆移的隔墙产生的局部荷载,均应按实际情况考虑,可采用等效均布活荷载代替。对于设备位置固定的情况,可直接按固定位置对结构进行计算,但应考虑因设备安装和维修过程中的位置变化可能出现的不利效应。工业建筑楼面堆放原料或成品较多、较重的区域,应按实际情况考虑;一般堆放情况可按均布活荷载或等效均布活荷载考虑。

工业建筑楼面活荷载的组合值系数、频遇值系数和准永久值系数,除附录 B 中规定的以外,应按实际情况采用,组合值系数和频遇值系数不应小于 0.7,准永久值系数不应小于 0.6。

(1) 工业建筑楼面均布活荷载的取值

工业建筑楼面等效均布活荷载的取值方法,可按本章 2.2.3 节的规定来确定。

对于一般金工车间、仪器仪表生产车间、半导体器件车间、棉纺织车间、轮胎厂准备车间和粮食加工车间,《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)根据国内 70 多个具有代表性工厂的调研和统计,给出了工业建筑楼面均布活荷载标准值(附表 B-1~附表 B-6),供缺乏资料时设计人员参照采用。

(2) 操作荷载及楼梯荷载

工业建筑楼面(包括工作平台)上无设备区域的操作荷载,包括操作员、一般工具、零星原料和成品的自重,可按均布活荷载 2.0kN/m² 考虑。有的车间,例如仪器仪表车间,在某个时期成品或半成品堆放特别严重,这时可定为 4kN/m²。另外,设备所占区域内可不考虑操作荷载和堆料荷载。

生产车间的楼梯荷载,可按实际情况采用,但不宜小于 3.5kN/m²。生产车间的参观走廊活荷载,可采用 3.5kN/m²。

2.2.3 楼面等效均布活荷载的确定方法

楼面等效均布活荷载包含民用建筑楼面活荷载和工业建筑楼面活荷载。为简化计算,常将楼面受到的集中荷载或各处大小差异太大的荷载等效为均布活荷载。在进行等效时,应注意其设计控制部位,要根据内力、变形及裂缝的等值要求来确定等效荷载。一般情况下,可仅按内力的等值来确定。

值得注意的是,由于生产、检修、安装工艺以及结构布置的不同,当楼面荷载差别较大时,应该划分区域分别确定等效均布荷载。对于连续梁、板的等效均布荷载,可按单跨简支计算,但在计算内力时,仍应按照连续考虑。

单向板上局部荷载的等效均布荷载 q_e ,由式(2-3)计算:

$$q_e = \frac{8M_{\max}}{bl^2} \quad (2-3)$$

式中 l ——板的跨度, m;

b ——板上局部荷载的有效分布宽度, m;

M_{\max} ——简支单向板的绝对最大弯矩,按设备的最不利布置确定。

计算 M_{\max} 时,设备荷载应乘以动力系数,并扣去设备在该板跨内所占面积上由操作荷载引起的弯矩。

除计算板面等效均布荷载外,还要明确放在楼面上的工艺设备局部荷载的实际作用尺寸,作用面一般按矩形考虑,并假定荷载按 45° 扩散线传递,这样可以方便地确定荷载扩散到板中性层处的计算宽度。单向板上局部荷载的有效分布宽度 b ,可按下列规定计算。

①当局部荷载作用面的长边平行于板跨时,简支单向板上荷载的有效分布宽度 b [图 2-1(a)]计算方法如下。