



国家高校网络教育系列教材

(土木工程专业)

砌体结构

高向玲 主编

蔡惠菊 刘 威 编著

中国建筑工业出版社

国家高校网络教育系列教材（土木工程专业）

砌 体 结 构

高向玲 主编
蔡惠菊 刘 威 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

砌体结构/高向玲主编. —北京: 中国建筑工业出版社,
2012. 11

国家高校网络教育系列教材 (土木工程专业)

ISBN 978-7-112-14747-2

I. ①砌… II. ①高… III. ①砌体结构 IV. ①TU36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 233738 号

本书根据最新的《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 相关内容, 结合砌体
结构设计与构造的要求, 突出工程应用, 较系统地介绍了砌体材料及其基本力学
性能, 砌体结构的形式和结构整体的内力分析方法, 砌体结构构件承载力计算,
配筋砌体结构构件承载力计算, 挑梁、过梁、墙梁和圈梁, 砌体结构房屋抗震设
计等。

本书可作为高等院校土建类专业与相近专业砌体结构课程的教材, 也可作为
建筑结构设计、施工、科研及工程技术人员参考用书。

* * *

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖 赵 颖

国家高校网络教育系列教材 (土木工程专业)

砌体结构

高向玲 主编

蔡惠菊 刘 威 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{1}{4}$ 字数: 276 千字

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月第一次印刷

定价: 29.00 元

ISBN 978-7-112-14747-2

(22815)

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)

前 言

本书是为高等学校土木工程专业所编写的教材，其中有关的内容均按国家标准《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 等新规范编写。砌体结构是土木工程专业建筑工程方向的一门专业课程，对土木工程的其他方向亦有重要的选修价值。

砌体结构的发展有着悠久的历史，并且目前我国仍有大量的房屋采用砌体结构的形式，但是与其他结构形式相比，砌体结构的理论研究起步较晚，对有些受力形式的承载机理至今仍未完全清楚，在砌体结构设计中根据长期实践的经验进行。相对于理想化的力学模型和分析而言，凝聚了学者和工程师丰富经验的半经验半理论的分析公式和构造措施是砌体结构设计的必要保证。

砌体结构设计这门课程的特点是密切联系实际，内容实用，信息量大。读者学习本书应注重基本理论学习，同时应注重相关的经验和构造措施，两者相辅相成，互成一体。

本书的三位作者多年来从事地震工程、钢筋混凝土结构和砌体结构的研究、教学和工程实践，深感砌体结构是一门涉及多个学科、理论与实践并重的学科。

本教材由高向玲担任主编并编写第1章～第6章，第7章由蔡惠菊编写，第8章由刘威编写，研究生颜迎迎、马东华进行了部分编写工作，全书由高向玲统一修改定稿。

向本教材所参考的规范以及相关书籍的作者表示感谢。

本教材的出版受到同济大学网络与继续教育学院教材基金的资助，在此一并表示深深的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，欢迎读者批评指正。

联系邮箱：gaoxl@tongji.edu.cn

作 者

2012年8月于同济大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 砌体结构的发展历史	1
1.2 砌体结构的特点	5
1.3 砌体结构的发展趋势	6
思考题	6
第 2 章 砌体结构设计方法的发展历史	7
2.1 概率极限状态设计法的基本概念	7
2.2 砌体结构设计方法的历史回顾	11
2.3 《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 的设计方法	15
思考题	16
第 3 章 砌体材料及其基本力学性能	17
3.1 块材的种类及其强度指标	17
3.2 砂浆的种类及其强度指标	19
3.3 新型墙体材料	20
3.4 砌体的种类	20
3.5 砌体的力学性能	21
3.6 砌体的变形性能	27
3.7 砌体的耐久性要求	30
思考题	32
附录	32
第 4 章 砌体结构的形式和结构整体的内力分析方法	36
4.1 概述	36
4.2 砌体结构房屋的布置方案	37
4.3 砌体结构房屋竖向荷载的传递	39
4.4 砌体结构房屋的静力计算方案	41
4.5 房屋墙柱构造要求	45
4.6 房屋的内力计算	53
4.7 地下室墙的计算	61
4.8 刚性基础计算	63

4.9 砌体结构房屋设计估算例题	64
思考题	72
习题	73
第5章 砌体结构构件承载力计算	75
5.1 墙柱高厚比验算	75
5.2 无筋砌体受压承载力计算	80
5.3 局部受压	90
5.4 轴心受拉、受弯和受剪构件承载力计算	98
思考题	101
习题	101
第6章 配筋砌体结构构件承载力计算	104
6.1 水平网状配筋砌体	104
6.2 钢筋混凝土面层或钢筋砂浆面层和砖砌体的组合砌体构件	107
6.3 砖砌体和钢筋混凝土构造柱组合墙	112
6.4 配筋砌块砌体剪力墙	115
思考题	120
习题	120
第7章 挑梁、过梁、墙梁和圈梁	122
7.1 挑梁	122
7.2 过梁	128
7.3 墙梁	133
7.4 圈梁	149
思考题	150
习题	150
第8章 砌体结构房屋抗震设计	152
8.1 砌体结构房屋的破坏	152
8.2 砌体结构房屋抗震设计的基本规定	154
8.3 房屋结构抗震计算	156
8.4 房屋抗震构造措施	162
8.5 配筋砌块砌体房屋抗震设计	166
思考题	170
参考文献	171

第 1 章 绪 论

1.1 砌体结构的发展历史

砌体是指块体（包括黏土砖、空心砖、砌块、石材等）和砂浆通过砌筑而成的建筑材料。由砌体砌筑而成的墙、柱作为建筑物主要受力构件的结构体系就是砌体结构。

砌体结构有不同的分类标准：按结构中是否配有钢筋，砌体可分为无筋砌体和配筋砌体两种；按所用块体材料的种类不同可分为砖砌体、砌块砌体和石砌体等三类。

1.1.1 古代砌体结构的发展简史

砌体结构在我国有着悠久的历史，其中石砌体与砖砌体在我国更是源远流长，构成了我国独特文化体系的一部分。

考古资料表明，我国在原始社会末期就有大型石砌祭坛遗址，在辽宁西部的建平、凌源两县交界处还发现有女神庙遗址和数处积石冢群，以及一处类似于城堡或广场的石砌围墙遗址，这些遗址距今已有 5000 多年的历史。闻名于世的万里长城（图 1-1）始建于公元前 7 世纪春秋时期，明代又对万里长城进行了工程浩大的修筑，使长城蜿蜒起伏总长约 6300 公里，其中部分城墙用精制的大块砖重修。在隋代由李春所建造的河北赵县安济桥，又称赵州桥（图 1-2），距今已有约 1400 年，桥长 50.82m，跨径 37.02m，券高 7.23m，两端宽 9.6m，中间略窄，宽 9m，外形十分美观，是世界上最早建造的单孔圆弧石拱桥。



图 1-1 万里长城

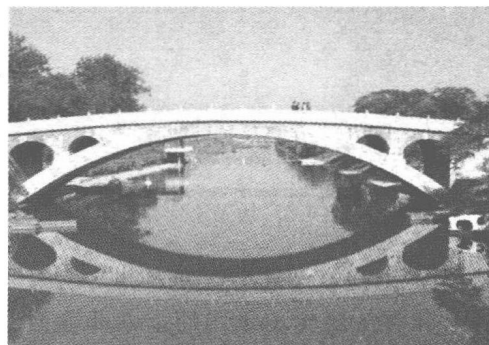


图 1-2 赵县安济桥

我国生产和使用烧结砖的历史有 3000 年以上。西周时期（公元前 1134～前 771 年）已有烧制的黏土瓦，并出现了我国最早的铺地砖。战国时期出现了精制的大型空心砖。西汉时期（公元前 206～公元 8 年）出现了空斗砌筑的墙壁，以及用长砖砌成的角拱券顶、

砖穹隆顶等。北魏时期（公元 386~534 年）出现了完全用砖砌成的塔，如河南登封的嵩岳寺塔、开封的“铁塔”（用异型琉璃砖砌成，呈褐色，俗称“铁塔”，见图 1-3）。公元 1368~1398 年在南京灵谷寺（图 1-4）和苏州开元寺中所建的无梁殿，都是古代应用砖砌筑穹拱结构的例子。

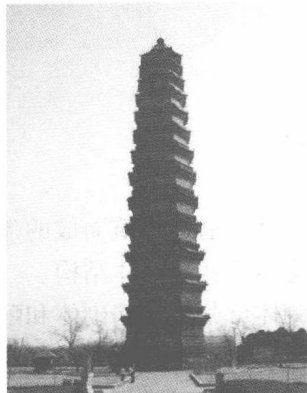


图 1-3 开封铁塔



图 1-4 南京灵谷寺

世界上许多文明古国应用砌体结构的历史也很久远。约公元前 3000 年在埃及建成的三座大金字塔（图 1-5），公元 70~82 年建成的罗马大斗兽场（图 1-6），希腊的雅典卫城和一些公共建筑（运动场、竞技场等），以及罗马的大引水渠、桥梁、神庙和教堂等，至今仍是备受推崇和瞻仰的宝贵遗产。

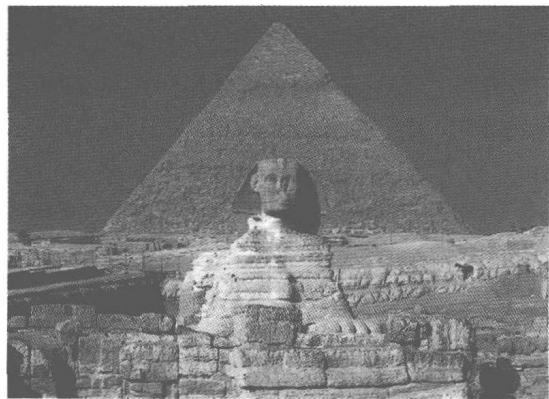


图 1-5 埃及金字塔

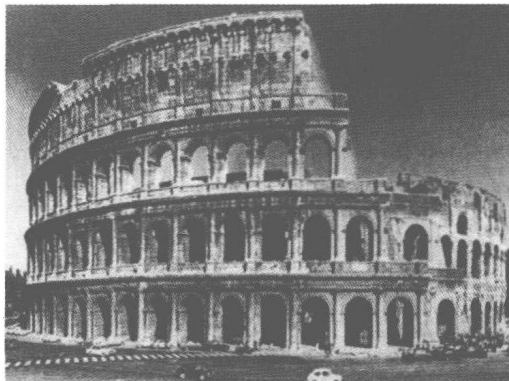


图 1-6 罗马斗兽场

中世纪在欧洲用砖砌筑的拱、券、穹隆和圆顶等结构也得到很大发展。如公元 532~537 年建于君士坦丁堡的圣索菲亚教堂（图 1-7），东西向长 77m，南北向长 71.7m，正中是直径 32.6m、高 15m 的穹顶，全部用砖砌成。法国著名的中世纪哥特式大教堂-巴黎圣母院（图 1-8），1163 年奠基动工，1245 年基本完工。以后 100 年中陆续装修，1345 年正式完工，圣母院整个建筑为石砌，中央尖塔高 90m，正面为立方形，分上、中、下 3 层。



图 1-7 圣索菲亚大教堂

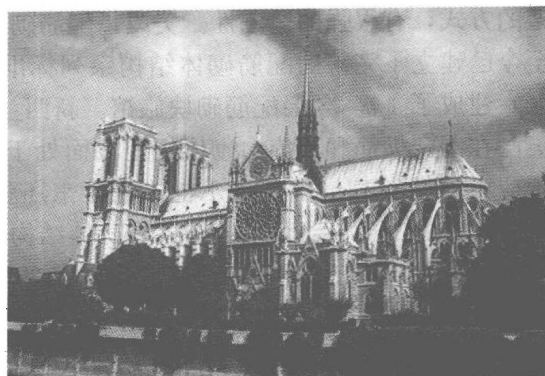


图 1-8 巴黎圣母院

1.1.2 国外近代砌体结构的应用与发展

在国外,前苏联是最早建立较完整的砌体结构理论和设计方法的国家,1939年颁布了《砖石结构设计标准及技术规范》OCT-90038-39。20世纪50年代在对砌体结构进行了一系列试验和研究的基础上,提出了极限状态设计方法。原东欧一些国家如捷克、波兰等国也采用这一方法。自1958年在瑞士苏黎世采用抗压强度为58.8MPa、空心率为28%的空心砖建成一幢19层塔式住宅(墙厚380mm),随后又建成一幢24层塔式住宅以来,欧、美及世界上许多国家加强了对砌体结构的研究。

20世纪50年代以来,国外研究、生产出了许多性能好、质量高的砌体材料,推动了砌体结构的迅速发展。在意大利,5层及5层以下的居住建筑中有55%是采用砖墙承重,砖的抗压强度一般可达30~60MPa,空心砖产量占砖总产量的80%~90%,空心率有的高达60%。瑞士、保加利亚则几乎全部采用空心砖;英国多孔砖的抗压强度为35~70MPa,抗压强度最高的达到140MPa;美国商品砖的抗压强度为17.1~140MPa,最高的达230MPa。目前欧、美及澳大利亚等国砖的抗压强度一般均可达到30~69MPa,且能生产强度高于100MPa的砖;空心砖的重度一般为13kN/m³,轻的则达6kN/m³。国外采用的砌筑砂浆强度也较高,美国材料和试验标准协会ASTM C270规定的M、S和N三类水泥石灰混合砂浆的抗压强度分别为25.5MPa、20MPa和13.8MPa;德国采用的水泥石灰混合砂浆抗压强度为13.7~41MPa;同时还研制出高粘结强度砂浆。由于砖和砂浆材料性能的改善,砌体的抗压强度也大大提高,在西欧以及美国等,20世纪70年代砖砌体的抗压强度已达20MPa以上,接近甚至超过了普通混凝土的强度。国外砌块的发展也相当迅速,一些国家在20世纪70年代砌块的产量就接近普通砖的产量。

近年来,许多国家在预制砖墙板和配筋砌体的研究和应用方面取得了较大进展,为砌体结构在高层建筑中的应用开辟了新的途径。20世纪60年代,前苏联采用预制砖墙板的房屋面积已超过400万m²;丹麦生产了11种类型的振动砖墙板,年产量达350万m²;美国的预制装配折线形砖墙板和加拿大的预制槽形及半圆筒拱形墙板均已在工程中应用。

为了适应中高层建筑(8~20层)的需要,配筋砌块剪力墙结构体系应运而生,与钢筋混凝土框架剪力墙结构体系相比,采用配筋砌块剪力墙可缩短建筑工期约20%,降低工程总造价10%以上。配筋砌块剪力墙既可采用墙体全部落地的方式,又可采用底层框

架的方式,有很强的适应性。美国是配筋砌块建筑应用最广泛的国家,从20世纪60年代至今已建立了完善的配筋砌体结构系列标准,1990年5月在內华达州拉斯维加斯(7度区)建成了4幢28层配筋砌块旅馆。新西兰等国也采用配筋砌体在地震区建造高层房屋。英国在制定配筋和预应力砌体规范方面处于领先地位,1967年建成一座竖向和环向施加预应力内径为12m的砖砌水池。近年来还将预应力砌体结构用于单层厂房和大型仓库,取得了很好的效果。目前国际上在砌体结构方面的交流与合作日益频繁,进一步推动了砌体结构的发展。

1.1.3 我国近代砌体结构的发展及应用

近半个世纪以来,砌体结构在我国得到了空前的发展。1952年全国统一了黏土砖的规格,使之标准化、模数化。在砌筑施工方面,创造了多种合理、快速的施工方法,既能加快工程进度,又可保证砌筑质量。

20世纪80年代以来,轻质、高强块材新品种的产量逐年增长,应用更趋普遍。从过去单一的烧结普通砖发展到采用承重黏土多孔砖和空心砖、混凝土空心砌块、轻骨料混凝土或加气混凝土砌块、非烧结硅酸盐砖、粉煤灰砌块、灰砂砖以及其他工业废渣、煤矸石等制成的无熟料水泥煤渣混凝土砌块等。同时,还发展了高强度砂浆,制定了各种块体和砂浆的强度等级,形成系列化,以便应用。

随着砌体结构的广泛应用,新型结构形式也有较快的发展,从过去单一的墙砌体承重结构发展为大型墙板、底层框架结构、内浇外砌、挂板等结构形式。20世纪50~60年代曾修建过一大批砖拱楼盖和屋盖,有双曲扁球形砖壳屋盖、双曲砖扁壳楼盖。

在应用新技术方面,我国曾采用过振动砖墙板技术、预应力空心砖楼板技术以及配筋砌体等。配筋砌体结构的试验和研究在我国虽然起步较晚,但进展还是显著的。20世纪60年代开始在一些房屋的部分砖砌体承重墙、柱中采用网状配筋以提高墙、柱的承载力,同时节约了材料。

20世纪70年代,在经历了1975年海城地震和1976年唐山大地震之后,我国对砌体结构继续进行了较大规模的试验与研究,对采用竖向配筋的墙、柱以及带有钢筋混凝土构造柱的砖混结构的研究和实践均取得了相当丰富的成果。在砌体结构的设计方法、房屋空间工作性能、墙梁共同工作、砌块砌体的性能与设计等方面都进行了系统的研究,对于配筋砌体、构造柱对砌体房屋的抗震性能的影响等方面取得了新的进展,并于1988年颁布了《砌体结构设计规范》GBJ 3—88。此外,我国砌体结构抗震的理论与试验研究也取得显著的成绩,在地震作用、抗震设计、变形验算、抗震鉴定与加固等方面都已取得了丰硕的成果,制定了《设置钢筋混凝土构造柱多层砖房抗震技术规程》JGJ/T 13—94。并于2001年颁布了修订的《砌体结构设计规范》GB 50003—2001。一系列计算理论和设计方法的建立以及设计与施工规范的制定,使我国的砌体结构理论和设计方法更趋于完善。针对我国汶川、玉树地震中砌体结构的震害,进行了必要的试验研究及在借鉴了砌体结构领域科研成果的基础上,增补了节能减排、墙体革新的环境下涌现出来的部分新型墙体材料,完善了砌体结构的耐久性和构造要求、配筋砌块砌体构件及砌体结构构件抗震设计等有关内容,于2011年颁布了现行《砌体结构设计规范》GB 50003—2011,显示了我国现阶段砌体结构发展的综合水平。

我国与国际标准组织 (International Organization for Standardization, 简称 ISO) 已建立起工作关系。国际标准化组织砌体结构技术委员会 (ISO/TC179) 于 1981 年成立, 下设无筋砌体 (SC1)、配筋砌体 (SC2) 和试验方法 (SC3) 三个分技术委员会。我国为该技术委员会中配筋砌体分技术委员会 (ISO/TC179/SC2) 的秘书国, 并出任该分技术委员会的常任主席, 使我国在该学科上与国际的交流和合作日益增多, 对推动我国砌体结构的发展有着重大的意义。

1.2 砌体结构的特点

1.2.1 砌体结构的优缺点

砌体结构之所以在国内外获得广泛的应用, 是与这种建筑材料所具有的优点密不可分的。

砌体结构的主要优点是: ①容易就地取材。砖主要用黏土烧制; 石材的原料是天然石; 砌块可以用工业废料—矿渣制作, 来源方便, 价格低廉。②砖、石或砌块砌体具有良好的耐火性和较好的耐久性。③砌体砌筑时, 不需要模板和特殊的施工设备。在寒冷地区, 冬季可用冻结法砌筑, 不需特殊的保温措施。④砖墙和砌块墙体具有良好的隔声、隔热和保温性能。所以砌体既是较好的承重结构, 也是较好的围护结构。

但是和其他建筑材料相比, 砌体结构也有一些不足之处, 其主要的缺点体现在: ①与钢和混凝土相比, 砌体的强度较低, 因而构件的截面尺寸较大, 材料用量多, 自重较大。②砌体的砌筑基本上是手工方式, 施工劳动量大。③砌体的抗拉强度和抗剪强度都很低, 因而抗震性能较差, 在使用上受到一定限制; 砖、石块材本身的抗压强度也不能充分发挥。④黏土砖需用黏土制造, 在某些地区, 过多占用农田, 影响农业生产。

1.2.2 砌体结构的应用范围

人类自巢居、穴居进化到室居以来, 最早发现的建筑材料就是块材。如石块、土块等, 人类利用这些原始材料垒筑洞穴和房屋, 并在此基础上逐步从土坯发展为烧制砖瓦, 从乱石块加工成块石等。因此砌体材料既是一种最原始又是应用最广泛的传统建筑材料。

砌体结构抗压承载力较高, 因此, 它最适用于作受压构件, 如混合结构房屋中的竖向承重构件墙和柱。目前, 5 层以内的办公楼、教学楼、试验楼, 7 层以内的住宅、旅馆采用砌体作为竖向承重结构已非常普遍。在中小型工业厂房和农村居住建筑中, 也可用砌体作围护或承重结构。时至今日, 全国城乡以砌体材料为主要建筑材料, 用以建造的各类房屋仍占 80% 以上。砌体结构不但大量应用于房屋结构, 而且也可用在工业建筑中的一些特殊结构, 如小型管道支架、料仓、高度在 60m 以内的烟囱、小型水池等; 在交通土建方面, 如拱桥、隧道、地下渠道、涵洞、挡土墙等; 在水利建设方面, 如小型水坝、水闸、堰和渡槽支架等, 也常用砌体结构建造。

砌体结构抗弯、抗拉性能较差, 一般不宜作为受拉或受弯构件。当弯矩、剪力或拉力较小时, 仍可酌情采用, 如跨度较小 (1.5m 以内) 的门窗过梁可采用砌体结构。如采用

配筋砌体或与钢筋混凝土形成组合构件（例如墙梁），则承载力较高，可跨越较大的空间。

在地震设防区建造砌体结构房屋，除进行抗震计算、保证施工质量外，还应采取一定的抗震构造措施，如设置钢筋混凝土构造柱和圈梁等可有效地提高砌体结构房屋的抗震性能。

1.3 砌体结构的发展趋势

随着社会的发展和科学技术的进步，砌体结构也需不断改善才能适应社会的需求。砌体结构的发展方向如下：

1. 使砌体结构适应可持续发展的要求

传统的小块黏土砖以其耗能大、毁田多、运输量大的缺点越来越不适应可持续发展和环境保护的要求。对其进行革新势在必行，这方面的发展趋势是充分利用工业废料和地方性材料，例如用粉煤灰、煤渣、矿渣、炉渣等废料制砖或板材，可变废为宝。用淤泥、河泥或海泥制砖，则可疏通淤积的水道。

2. 发展高强、轻质、高性能的材料

发展高强、轻质的空心块体，不仅能使墙体自重减轻，生产效率提高，而且可提高墙体的保温隔热性能，且受力更加合理，抗震性能也可得到提高。这方面已有很大进展。目前轻骨料混凝土砌块以及火山渣、浮石和陶粒混凝土砌块应用已经逐步普遍。

发展工作性能好、粘结强度较高的砂浆能有效地提高砌体的强度和抗震性能。

3. 采用新技术、新的结构体系和新的设计理论

组合砖墙、配筋砌体有良好的抗震性能，在国外已获得较广泛的应用，可用于建造高达 20 层的房屋，成为很有竞争力的结构形式。我国近年来已注意配筋砌体的应用，并已建造了一些配筋砌体高层建筑，如上海龙吴路 18 层的配筋砌块砌体住宅等。

采用工业化生产、机械化施工的板材和大型砌块等可减轻劳动强度、加快工程建设速度。另外对墙体施加预应力可有效改善墙体的受力性能，也是一种有效的方法。

相对其他结构形式而言，砌体结构的设计理论发展得较晚，还有不少问题有待进一步研究。需要更加深入地研究砌体结构的结构布置、受力性能和破坏机理，研究房屋整体受力的机理，研究和推广应用配筋砌体，研究有优良抗震性能的砌体结构，使砌体结构这种古老而有生命力的结构形式更好地造福于人民。

思考题

- [1-1] 砌体结构的优缺点各是什么？
- [1-2] 砌体结构的主要力学特征是什么？
- [1-3] 砌体结构的发展趋势有何特性？
- [1-4] 《砌体结构设计规范》采取哪些措施不断完善砌体结构的抗震性能？

第2章 砌体结构设计方法的发展历史

砌体结构是历史悠久的结构形式，其最初的建造都是基于实践经验的。砌体结构设计方法的发展历史是和人们对于材料力学性能的认识密切相关的，同时也是伴着力学的发展和可靠度计算方法的改进而发展的。其设计方法的历史沿革主要经历了这样几个阶段：容许应力设计法、破坏阶段设计法、极限状态设计法。

为了更好地了解设计方法，首先简单介绍一些概率统计的基本知识。

2.1 概率极限状态设计法的基本概念

2.1.1 确定分项系数的理论基础

1. 设计基准期和设计使用年限

设计基准期是为确定可变作用及与时间有关材料性质等取值而选用的时间参数。现行《建筑结构荷载规范》GB 50009 采用的设计基准期是 50 年。

设计使用年限为设计规定的结构或构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。

2. 结构的功能要求、可靠性与可靠度

砌体结构同其他结构一样，在规定的设计使用年限内应满足一定的功能要求，这些功能要求概括起来有三个方面：

安全性：在正常施工和正常使用的条件下，结构需能承受可能出现的各种作用，在偶然事件（如地震、火灾等）发生时及发生后，结构仍能保持整体稳定，不发生倒塌。

适用性：结构在正常使用期间应具有良好的工作性能。

耐久性：结构在正常维护下应有足够的耐久性。

结构的可靠性是结构的安全性、适用性和耐久性的总称，即结构在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的能力，结构的可靠度是结构可靠性的概率度量，即：结构在规定的时间内、规定的条件下，完成预定功能的概率。

3. 极限状态

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，此特定的状态称为功能的极限状态。

《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 将结构的极限状态分为两类：承载能力极限状态和正常使用极限状态。前者是指结构或结构构件达到最大承载力或不适合继续承载的变形。后者是指结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的限值。

4. 极限状态方程

结构的极限状态方程可描述为：

$$Z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (2-1)$$

式中 $g(\cdot)$ ——结构的功能函数；

$x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ——基本变量，包括结构上的各种作用和材料性能、几何参数等，基本变量按随机变量考虑。

结构按极限状态设计时，应符合下列要求：

$$Z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq 0 \quad (2-2)$$

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

当仅有荷载效应和结构抗力两个基本变量时，结构的极限状态方程 (2-2) 可表示为：

$$Z = g(R, S) = R - S \geq 0 \quad (2-3)$$

由于结构抗力 R 和作用效应 S 都是随机变量，所以结构的功能函数 Z 也是一个随机变量。

把 $Z > 0$ 这一事件出现的概率称为可靠概率（保证率）。

假定 R 和 S 是相对独立的，且均服从正态分布，它们的均值分别为 μ_R 和 μ_S ，标准差分别为 σ_R 和 σ_S ，则结构的功能函数 Z 也服从正态分布。 Z 的平均值和标准差分别为：

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (2-4)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2-5)$$

结构功能函数的概率分布曲线如图 2-1 所示，横坐标表示结构功能函数 Z ，纵坐标表示结构功能函数的频率密度 $f(Z)$ 。纵坐标以左 $Z < 0$ ，因此图 2-1 中阴影面积表示结构的失效概率 p_f ，而纵坐标以右 $Z > 0$ ，因此纵坐标以右曲线与坐标轴围成的面积表示结构的可靠概率 p_0 。因此，既可以用结构的可靠概率 p_0 来度量结构的可靠性，也可以用结构的失效概率 p_f 来度量结构的可靠性，结构的失效概率 p_f 的计算表达式为：

$$p_f = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ = P(Z < 0) \quad (2-6)$$

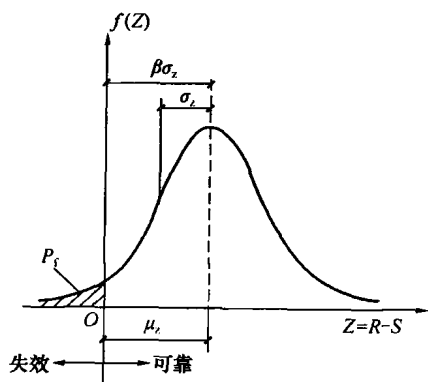


图 2-1 结构功能函数的概率分布曲线 (一)

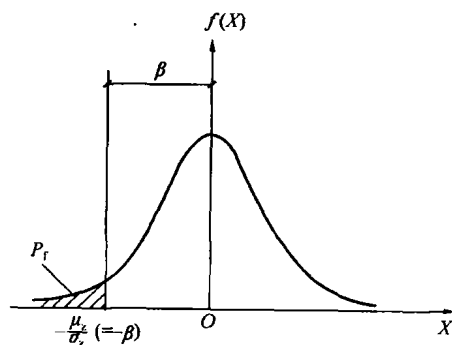


图 2-2 结构功能函数的概率分布曲线 (二)

5. 可靠指标

由于影响结构可靠性的因素十分复杂，目前从理论上计算概率是困难的，因此《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 中规定采用近似概率法。并规定采用平均值 μ_z 、标

准差 σ_z 及可靠指标 β 代替失效概率来近似地度量结构的可靠度, 这三者之间的关系可用公式 (2-7) 表示为:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2-7)$$

公式 (2-6) 采用标准化正态分布可表示为:

$$\begin{aligned} p_f &= P(Z < 0) = P\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z} < \frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \end{aligned} \quad (2-8)$$

从图 2-2 可见, β 值愈大, 失效概率 p_f 的值愈小; 反之, β 值愈小, 失效概率 p_f 的值就愈大。

从公式 (2-8) 可知失效概率 p_f 是和可靠指标 β 一一对应的, 其对应关系如表 2-1 所示。

可靠指标 β 与失效概率 p_f 之间的对应关系

表 2-1

安全等级	延性破坏		脆性破坏	
	$[\beta]$	p_f	$[\beta]$	p_f
一级	3.7	1.1×10^{-4}	4.2	1.3×10^{-5}
二级	3.2	6.9×10^{-4}	3.7	1.1×10^{-4}
三级	2.7	3.5×10^{-3}	3.2	6.9×10^{-4}

砌体结构属脆性结构, 故一般砌体结构构件承载力极限状态的目标可靠指标为 3.7。

为使设计人员正确选择合适的可靠指标进行设计, 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 根据结构破坏可能产生的后果的严重性 (危及生命安全、造成经济损失、产生社会影响等), 将建筑结构划分为三个安全等级, 如表 2-2 所示。

建筑结构安全等级的划分

表 2-2

安全等级	破坏后果	建筑物类型	安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的房屋	三级	不严重	次要的房屋
二级	严重	一般的房屋			

注: 对于特殊的建筑物, 其安全等级可根据具体情况另行确定。对地震区的砌体结构设计, 应按国家现行《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223—2008, 根据建筑物重要性区分建筑物类别。

2.1.2 材料性能分项系数和组合系数的确定

砌体结构设计在理论上应根据失效概率或可靠指标来度量结构的可靠性。但在实际应用时计算过程较复杂, 而且需要掌握足够的实测数据, 包括各种影响因素的统计特征值。就目前来讲, 有许多影响因素的不定性还不能用统计方法确定, 所以此方法还不能普遍用于实际设计工作中。《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 (以下简称《规范》) 只是以可靠度理论作为设计的理论基础, 实际设计时, 引入荷载分项系数、材料分项系数和结构重要性系数等, 并且找出可靠指标与分项系数的对应关系, 从而以分项系数代替可靠指

标,使结构设计方法在形式上传统的力法相似,而且也是按极限状态方法进行设计的。砌体结构应按承载能力极限状态设计,并满足正常使用极限状态的要求。

《规范》在确定荷载和材料强度的标准值时,已经考虑了荷载的不确定性和材料强度的离散性分别如图 2-3 和图 2-4 所示。所确定的荷载标准值相当于设计基准期内最大作用概率分布的某一分位值。所确定的材料强度标准值是指符合规定质量的材料性能概率分布的某一分位值。

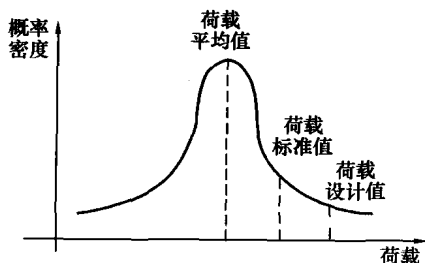


图 2-3 荷载标准值的取值

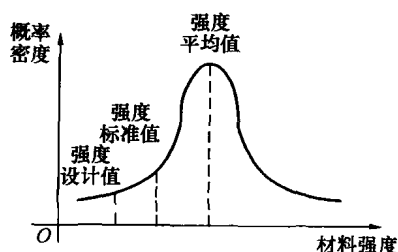


图 2-4 材料强度标准值的取值

虽然采用荷载和材料强度的标准值进行结构承载力极限状态的设计,已具有一定的保证率,但还需要考虑分项系数以确保结构的安全。

为确定分项系数,对于已知统计特性的荷载和材料强度,以及任何一组分项系数,可以计算出以该分项系数的设计公式所反映的可靠度和表 2-1 所示的结构构件承载力极限状态的目标可靠指标的接近度。其中,最接近的一组分项系数就是所要求的规范设计公式中的分项系数。

对多种荷载的统计调查表明,永久荷载的变异性较小,可变荷载的变异性往往较大。根据荷载的统计特性,由目标可靠指标优选的永久荷载的分项系数为 1.2。当永久荷载的效应与可变荷载的效应相比很大时,若仍采用 1.2,则结构的可靠度远不能达到目标值的要求,因此此时永久荷载的分项系数取为 1.35。当永久荷载产生的效应对结构有利时,比如在验算结构整体稳定性或结构的抗滑移验算时,若此时起有利作用的永久荷载的分项系数取值大于 1,则荷载效应会相应地减小,故此时 γ_G 宜取小于 1 的系数。

可变荷载的分项系数 γ_Q 一般取为 1.4,但对标准值大于 4kN/m^2 的楼面活荷载,其变异系数一般较小,此时,从经济上考虑,取 γ_Q 为 1.3。

荷载设计值可通过荷载标准值乘以分项系数得到。

结构在其使用期内,可能承受一种或多种活荷载的同时作用,但各种活荷载同时达到最大值的概率很小。因此,在极限状态设计表达式中,当有两个或两个以上活荷载参与工作时,应考虑荷载组合系数。一般情况下,组合系数取 0.7;对书库、档案馆、储藏室或通风机房、电梯房等,考虑到楼面活荷载经常作用在楼面上且数值较大,取组合系数为 0.9。

2.1.3 材料性能分项系数的确定

材料强度是影响结构抗力的重要因素,材料强度的标准值 f_k 和平均值 f_m 之间的关系按下式确定:

$$f_k = f_m - 1.645\sigma_f = f_m(1 - 1.645\delta_f) \tag{2-9}$$

式中 δ_f 为材料强度的变异系数。对于砌体材料其 δ_f 的取值见表 2-3。

各类砌体强度标准值与平均值的关系以及砌体强度的变异系数 表 2-3

砌体种类	受力性能	f_k	δ_f
毛石砌体	受压	$0.60f_m$	0.24
	受拉、受弯、受剪	$0.57f_m$	0.26
其他各类砌体	受压	$0.72f_m$	0.17
	受拉、受弯、受剪	$0.67f_m$	0.20

在进行承载力极限状态设计时，材料强度应采用设计值，砌体材料强度设计值 f 和标准值 f_k 之间的关系可表示为：

$$f = \frac{f_k}{\gamma_f} \tag{2-10}$$

其中， γ_f 为材料的分项系数。由于砌体材料的强度受施工水平的影响较大，《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 考虑了施工技术和施工管理水平等对结构安全度的影响。按照不同的施工控制水平下结构的安全度不应该降低的原则确定，施工质量等级的划分见表 2-4。当施工质量控制等级为 B 级时， $\gamma_f=1.6$ ；施工质量控制等级为 C 级时， $\gamma_f=1.8$ 。

施工质量等级的划分 表 2-4

项 目	施工质量控制等级		
	A	B	C
现场质量管理	制度健全，并严格执行，非施工方监督人员经常到现场，或现场设有常驻代表；施工方有在岗专业技术管理人员，人员齐全，并持证上岗	制度基本健全，并能执行；非施工方监督人员间断地到现场进行质量控制；施工方有在岗专业技术人员，并持证上岗	有制度；非施工方质量监督人员很少做现场质量控制；施工方有在岗专业技术人员
砂浆、混凝土强度	试块按规定制作，强度满足验收规定，离散性小	试块按规定制作，强度满足验收规定，离散性较小	试块强度满足验收规定，离散性大
砂浆拌合方式	机械拌合；配合比剂量控制严格	机械拌合；配合比剂量控制一般	机械或人工拌合；配合比剂量控制较差
砌筑工人	中级工以上，其中高级工不少于 20%	高、中级工不少于 70%	初级工以上

2.2 砌体结构设计方法的历史回顾

2.2.1 容许应力设计法

将砌体看成是理想的弹性材料，按材料力学的方法计算出构件在外荷载作用下产生的应力 σ ，并要求该应力不大于材料的容许应力 $[\sigma]$ ，即采用线弹性理论的容许应力设计法。以轴心受压短柱为例，其设计表达式为：