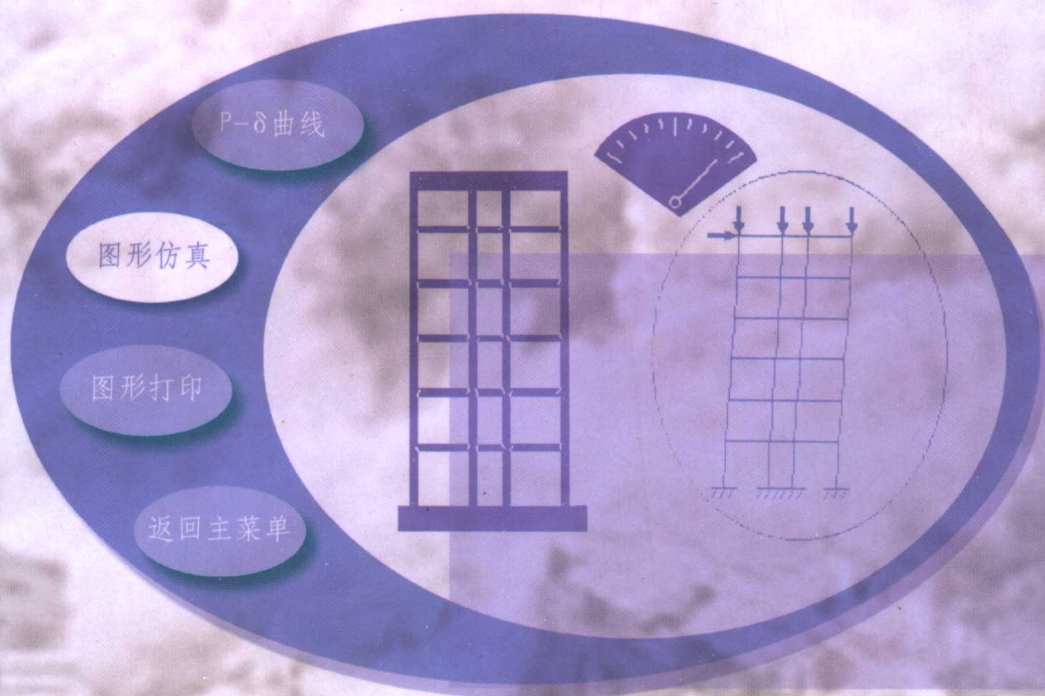


混凝土结构的 计算机仿真

顾祥林 孙飞飞 编著



同济大学出版社

混凝土结构的计算机仿真

顾祥林 孙飞飞 编著

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构的计算机仿真/顾祥林,孙飞飞编著. —上海:同济大学出版社,2002.5

ISBN 7-5608-2413-7

I. 混… II. ①顾… ②孙… III. 钢筋混凝土结构—计算机仿真 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 019465 号

混凝土结构的计算机仿真

作者 顾祥林 孙飞飞 编著

责任编辑 柯克 责任校对 徐栩 装帧设计 陈益平

出版	同济大学出版社
发行	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经销	全国各地新华书店
印刷	崇明晨光印刷厂印刷
开本	787mm×1092mm 1/16
印张	11.75
字数	300 000
印数	1—1500
版次	2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷
书号	ISBN 7-5608-2413-7/TU·438
定价	20.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

计算机在科学技术各个领域的广泛应用,为人类认识世界提供了一个有力的工具。本书第一作者曾连续四届在同济大学工民建、土建专业高年级本科生中开设了“混凝土结构计算机仿真”选修课,详细介绍了混凝土结构基本构件、钢筋混凝土杆系结构动、静力试验的计算机仿真分析方法;旨在帮助同学们通过学习更好地掌握计算机这个有效的工具,为今后的科学研究、工程实践打下良好的基础。该课程受到了学生们的欢迎。为了使读者能深入了解混凝土结构的计算机仿真分析方法,作者在原讲稿的基础上结合近期的科研成果写成本书。

全书遵循由简单到复杂,由构件到结构的渐进原则。首先介绍钢筋混凝土梁、柱、板、墙和预应力混凝土梁等基本构件的计算机仿真分析方法;进而介绍钢筋混凝土杆系结构静、动力试验和钢筋混凝土框架结构倒塌反应的计算机仿真分析方法;最后介绍计算机仿真中结构破坏过程的图形处理技术,形成一套完整的系统。其中,顾祥林负责第三、第四、第五、第六和第九章的写作,孙飞飞负责第七和第十章的写作,第一和第二章由顾祥林和孙飞飞共同写作。

笔者曾分别师从同济大学张誉教授和沈祖炎教授作博士研究生,后又在沈祖炎教授的领导下参加了国家基础性研究重大项目(攀登 B 计划):“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”的子课题——反映高层建筑结构体系施工误差及损伤累积的仿真系统的研究工作。导师的悉心指导和谆谆教诲对笔者的学习和工作起到了巨大的作用,使得笔者能顺利地完成本书的写作。另外,同济大学结构工程专业的多位研究生和本科生也为本书做出了卓越的贡献,他们是姚利民、王立明、李承、周湘赞、马星、黄勤、周钦海、王伟、任晓勇、孟益、宋晓滨和宣纲。在此,表示衷心的感谢!

限于笔者的理论水平,书中肯定有错误和不当之处,恳请广大读者指正!

顾祥林 孙飞飞

2000 年 12 月于同济大学

目 录

1 绪论	1
1.1 结构仿真的应用与意义	1
1.2 结构仿真技术的发展概况	2
1.3 结构仿真的基本任务	3
1.4 实现仿真的基本方法	3
1.5 本书的主要内容	5
参考文献	5
2 钢筋混凝土梁柱单调受荷试验的计算机仿真	6
2.1 钢筋混凝土梁单调受荷时的破坏特征及仿真分析时的基本假定	7
2.2 钢筋和混凝土的应力-应变关系	7
2.3 梁柱截面弯矩-曲率关系的计算机仿真	14
2.4 荷载-位移关系的计算机仿真	26
2.5 破坏过程的计算机仿真	30
2.6 计算机仿真系统实例	32
参考文献	37
3 钢筋混凝土双向板均匀受荷试验的计算机仿真	39
3.1 均匀受荷双向板的破坏特征及计算分析中存在的问题	39
3.2 仿真分析的基本假定	40
3.3 弯矩-曲率关系	40
3.4 荷载-位移关系的仿真分析	44
3.5 实例验证	47
参考文献	48
4 预应力混凝土梁受弯试验的计算机仿真	49
4.1 仿真分析的基本假定	49
4.2 混凝土和预应力筋的应力-应变关系	49
4.3 有粘结预应力混凝土梁受弯试验的计算机仿真	51
4.4 后张无粘结预应力混凝土梁受弯试验的计算机仿真	55
4.5 实例验证	57
参考文献	59

5 混凝土结构墙体试验的计算机仿真	61
5.1 墙体试验时的破坏特征及仿真分析时的基本假定	61
5.2 墙体开裂前荷载-位移关系的模拟分析	62
5.3 墙体开裂后钢筋混凝土单元的平衡和相容关系	63
5.4 墙体开裂后混凝土斜向受压时的应力-应变关系	65
5.5 混凝土受拉时的应力-应变关系	69
5.6 钢筋的应力-应变关系	70
5.7 墙体开裂后荷载-变形关系的计算机仿真	72
5.8 实例验证	74
参考文献	74
6 钢筋混凝土纯扭构件试验的计算机仿真	76
6.1 纯扭构件试验时的破坏特征	76
6.2 仿真分析的基本假定	76
6.3 混凝土开裂前扭矩-扭转角关系	77
6.4 混凝土开裂后扭矩-扭转角关系	79
6.5 受扭构件扭矩-扭转角关系计算机仿真分析步骤	87
参考文献	89
7 钢筋混凝土杆系结构水平单调加载试验的计算机仿真	90
7.1 钢筋混凝土杆系结构的非线性静力分析	91
7.2 等截面直杆单元的刚度矩阵	92
7.3 带刚域杆单元的刚度矩阵	95
7.4 塑性铰区段截面抗弯刚度	96
7.5 单元几何刚度矩阵	97
7.6 杆系结构破坏准则	98
7.7 框架结构的机构识别算法	98
7.8 结构荷载-位移关系的计算机仿真	101
7.9 破坏过程的计算机仿真	103
7.10 仿真系统实例	104
参考文献	105
8 钢筋混凝土结构模拟地震试验的计算机仿真	107
8.1 结构的计算简图	107
8.2 动力平衡方程的建立和求解	108
8.3 动力分析时的单元模型	114
8.4 动力分析时的恢复力模型	117
8.5 结构地震反应的计算机数值模拟分析	125

8.6	结构破坏过程的计算机仿真	131
8.7	仿真系统实例	133
	参考文献	137
9	钢筋混凝土框架结构倒塌反应的计算机仿真	139
9.1	适合于结构倒塌分析的离散单元模型	139
9.2	基于离散单元法的结构倒塌反应分析	145
9.3	计算机仿真软件的开发	150
9.4	工程实例的验证	153
9.5	考虑单元间碰撞作用对仿真效果的影响	154
	参考文献	155
10	结构计算机仿真的图形技术	157
10.1	数值仿真的可视化技术	157
10.2	计算机动画	163
10.3	图形仿真技术	166
10.4	钢筋混凝土杆件裂缝的图形仿真方法	170
	参考文献	180

1 绪论

1.1 结构仿真的应用与意义

结构试验在“混凝土结构理论”的诞生和发展过程中起着不可估量的作用。目前,世界各国的混凝土结构设计规范都是以大量的试验数据为基础而建立起来的。体型特殊、结构复杂的混凝土结构物往往还要通过整体结构的模型试验来验证设计理论、改进设计方法。但是,结构试验尤其是大型结构的试验往往需要耗费大量的人力和财力,同样的试验很难重复做多次,且缩尺模型试验具有“失真”效应。如能建立一种通过计算分析来“模拟足尺模型试验”的方法,作为辅助的研究手段,则能弥补实体试验的不足,对混凝土结构理论的发展与应用将产生积极的作用。

当今世界上经济发达国家的工程建设,从宏观统计和分析,大体上经历了三个阶段。第一个阶段是大规模新建;第二阶段是新建与维修改造并重;第三阶段是除部分新建外,重点转向旧建筑物的维修与改造。英国 1980 年的建筑物维修改造工程占其总建筑工程的 1/3。据 1992 年的估计,全美国公路桥梁的维修费用高达 500 亿美元^[1-1]。我国 1978 年的初步统计资料显示,如果把我国现有建筑物的使用寿命延长一年,就相当于新建上亿 m^2 的房屋,或相当于创造几百亿元的投资^[1-2]。我国现有的建筑物,20 世纪 40 年代及以前建造的已经老化,但为数不多;20 世纪 50 年代、60 年代及 70 年代建造的房屋,由于技术和其它方面的影响,缺陷较多。近年来,随着经济的高速发展,全国建筑业一片兴旺,高楼大厦如雨后春笋般地拔地而起,但由于我国施工人员素质存在差别,势必会给一些结构留下隐患。如何合理地使用、正确地维护这些已有的建筑物,将是目前和今后很长一段时期内建筑工程界的重要任务。要维护和使用好已有的建筑物,必须能对已有建筑或旧建筑在未来各因素作用下的性能作出正确的评价。旧结构与新结构不同,通过实体试验来研究其性能难度更大。而计算机仿真分析则为结构检测、评估人员提供了一个有力的工具,使其能在“虚拟”的空间内模拟旧有足尺结构的性能。

随着大规模的城市建设,不断有在居民和房屋集中区的建筑物需要拆除,以满足城区改造和建设的要求。对钢筋混凝土结构的建筑物,如采用传统的人工开凿方法进行拆除,除劳动强度大、费用高、工期长等缺点外,长时间的噪声会严重影响附近房屋内人们的工作和生活。因此,爆破拆除是一个明智的选择。国内已有很多这方面的工程实例,如 1991 年上海市卢湾区政府办公楼的拆除、1998 年上海市长征医院十六层病房大楼的拆除等。但是,在居民集中区进行工程控制爆破又是一项带有高度危险性的工作,稍有不慎,后果不堪设想。因此,爆破前的方案设计和准备工作非常重要。应用计算机仿真软件来模拟结构爆破拆除时的倒塌全过程,可为爆破拆除方案的确定提供一种辅助手段,丰富工程控制爆破的理论。

近年来,随着计算机软硬件技术、网络通讯技术和多媒体技术的飞速发展,Internet 为

人们提供了一个巨大的数据、信息和知识的共享空间。人们越来越依赖于计算机网络作为彼此之间信息交流、资源共享的主要渠道和支持彼此间共同合作的信息基础;基于网络的远程教学作为现代教育技术的一个重要手段便应运而生,这也使得教育的终身化、全球化和高效化的目标成为可能。若要在土木工程这一实践性极强的学科领域建立基于 Internet 网络的远程教育系统,结构的计算机试验仿真则是其中的一个非常重要的内容。

1.2 结构仿真技术的发展概况

20 世纪 60 年代以来,计算机仿真技术(又称计算机模拟技术)已由最初的数值模拟以及数值模拟结果的图形显示,发展成为今天的与信息论、控制论、模拟论、人工智能、多媒体技术等现代科学技术相关的一门高新技术学科。应用计算机仿真技术可进行试验模拟、灾害预测、事故再现、方案优化、结构性能评估等多项人们难以进行甚至由于当时条件的限制而不可能进行的一些工作。目前,计算机仿真技术已广泛应用于军事、工业、农业、交通运输和医学等各领域。近年来,计算机仿真技术在结构工程中的应用日益普遍。国内外很多学者已在这方面做了大量的工作,如美国康奈尔大学的 Cundall 用离散元技术模拟了岩石边坡的渐近过程^[1-3];日本东京大学的学者用离散单元法对钢筋混凝土框架结构在遭遇强烈地震作用时的倒塌过程进行了计算机仿真分析^[1-4];国内清华大学江见鲸等对混凝土构件的破坏过程进行过模拟^[1-5];笔者曾对混凝土结构基本构件、钢筋混凝土杆系结构在不同外界干扰作用下的破坏过程以及钢筋混凝土框架结构在单调荷载作用下的倒塌反应进行过计算机仿真分析^[1-6~1-8]。

计算机仿真技术的历史不长,混凝土结构计算机仿真技术的历史更短。但随着计算机的不断更新换代、结构工程领域新成果的不断涌现,混凝土结构仿真技术一诞生就显示出勃勃生机,并有很多成果投入工程应用,为人类认识自然提供了一个有力的工具。未来如能在下面一些研究方向上取得突破,计算机仿真技术在结构工程中的应用前景还会更加美好:

(1) 不同环境下(老化、腐蚀、高温、多维荷载作用等)材料的本构关系。目前,已有一些成果,但综合应用还有一定的困难。

(2) 适合于大变形、不连续位移场的结构分析(数值计算)方法。离散单元法在这方面有很好的应用前景^[1-3,1-8],但还需要作更加深入的研究工作。

(3) 结构的倒塌机制。模拟结构在一定环境下是否倒塌会在结构方案比较、事故过程的反演、旧建筑的维修改造以及小区设施的综合防灾规划等方面给决策者提供有力的理论依据。但结构的倒塌过程非常复杂,有很多理论问题需要继续研究,如分离混凝土块体运动轨迹、钢筋断裂释放的能量对分离混凝土块体后续运动的影响、结构倒塌过程中运动块体的阻尼、分离混凝土块体之间以及分离块体和母体结构之间的碰撞等。

(4) 结构生命全过程多种因素作用下结构反应的仿真。结构的生命全过程可分为建造、使用和老化三个阶段^[1-9]。进行结构生命全过程多种因素作用下结构反应的仿真,可为结构的全过程设计、结构的动态监护、事故原因分析、改建拆建和加固处理等提供辅助工具。相对于使用阶段,目前,关于结构施工阶段和老化阶段性能的研究较少,因此,阻碍了生命全过程结构反应仿真技术的发展和运用。

(5) 结构的损伤累积。生命全过程多种因素作用下结构反应计算机仿真中的最关键的

理论问题就是结构(构件)的损伤累积。结构损伤累积主要包括两方面的内容:一是不同因素作用下(如强风、地震、冲撞、爆炸、腐蚀、高温等)结构的损伤累积;二是相同因素多次作用下结构的损伤累积(如主震和余震)。另外,对单一因素作用下的结构(或构件)来说,还有按平面分析时的二维损伤累积问题和按空间分析时的多维损伤累积问题。只有弄清结构的损伤机理,才能较准确地模拟结构在各种环境下的反应。

1.3 结构仿真的基本任务

结构计算机仿真的主要任务有两个方面:一方面是构件(或结构)在加荷过程中的荷载-变形关系的仿真分析;另一方面是构件(结构)破坏过程的计算机仿真。

混凝土结构是否可靠,主要取决于该结构是否具有足够大的强度和承受变形的能力来抵御外部环境对其的影响。因此,结构试验的主要目的之一,就在于通过试验来研究结构或构件所能承受的荷载以及在该荷载作用下结构或构件的变形,即结构或构件的荷载-变形关系。这也是计算机仿真的主要内容之一。

混凝土结构(构件)荷载-变形关系的计算机仿真分析方法,按材料性能和变形特征可分为线性分析方法和非线性分析方法。线性分析方法只适用于结构(构件)开裂前且为小变形时的情况;结构(构件)开裂后或为大变形时则应采用非线性的分析方法(这里所说的非线性包括材料非线性和几何非线性)。按加荷方式又可分为静力分析方法和动力分析方法。静力分析方法是在荷载和变形二维空间里进行的,目前,其理论已较成熟,并取得了很多成果;动力分析时增加了时间坐标,且由于动力作用(地震、风振、冲撞、爆炸等)的不确定性,使得仿真分析的难度大大提高。尽管如此,动力分析还是取得了一些有益的成果,并且随着计算机容量的不断扩充、计算速度的不断加快,动力仿真分析将逐渐应用于工程实践。

破坏过程的计算机仿真可以反映结构(构件)的薄弱部位、破坏机理和破坏特征,为结构方案的比较、结构性能的评估、事故原因的分析、结构的修复和加固提供必要的理论依据。结构(构件)破坏过程的计算机仿真一般是通过数值分析和图形动画系统对结构(构件)损伤发展的全过程进行模拟,因而它比荷载-变形关系的计算机仿真要复杂得多。尽管近年来离散单元法已用于破损结构(构件)的数值分析,并已取得了一些应用成果,但是,破坏过程仿真中还存在大量的基础理论问题有待于进一步研究,如结构的倒塌反应、多种因素作用下结构的损伤累积、多维地震作用下构件的恢复力模型等。由于基础理论还不完备,现有条件下借鉴专家系统中的一些方法,利用已有理论、专家经验和回归公式对结构(构件)的破坏过程进行计算机仿真不失为一种有效的方法。本书后面讨论的破坏过程的模拟采用的就是这一方法,并已取得了较好的效果。另外,在破坏过程的计算机仿真中,引入多媒体技术将会给仿真过程塑造一个良好的视听环境,为破坏过程的计算机仿真展示一个美好的前景。

1.4 实现仿真的基本方法

仿真技术实质上就是建立仿真模型和进行仿真实验的技术。计算机仿真的过程一般有三个步骤(图 1-1):第一步,建立仿真模型;第二步,在计算机上开发仿真系统;第三步,应用计算机仿真系统进行仿真实验。从结构仿真的角度看,最后一步只是计算机仿真系统的操

作和应用,不存在技术上或理论上的问题,因而结构仿真的实现主要是前两步工作。

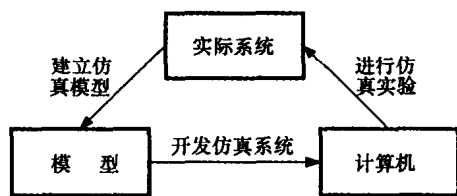


图 1-1 计算机仿真的一般过程

基础。只有仿真模型正确合理,才能准确地模拟结构在各种荷载条件下的复杂反应。

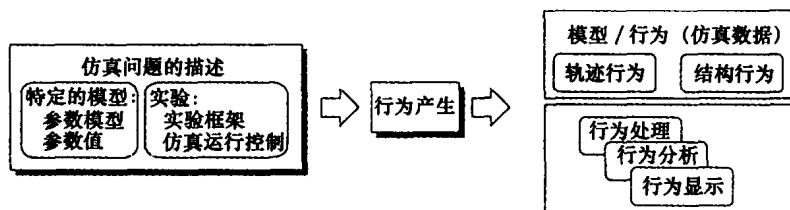


图 1-2 计算机仿真的概念框架

结构仿真的两大任务是揭示机理和描述现象。由于二者的侧重点不同,所采用的仿真手段也不相同。前者可以直接以数值计算的方法进行模拟,称为数值仿真;而后者在前者的基础上还需借助于计算机图形技术进行模拟,称为图形仿真。数值仿真的一大缺陷就是仿真结果很不直观,难以对结构的破坏过程获取全面、感性的认识。图形仿真则恰好弥补了这一缺陷。

应当指出的是,图形仿真并不是传统意义上的数值计算的图形后处理(或科学计算可视化)。后处理仅仅是把数值计算得到的数据用图形的方式表现出来。而由于在数值仿真中总是在不同程度上作了模型简化,特别是对于大型复杂结构的分析而言,不可能对每一个构件作精细的模拟,因而数值仿真模型简化程度越高,可供现象描述的数据信息也就越少,仅仅依靠这些信息,在大多数情形下都难以满足现象描述的需要。图形仿真必须是很具体的,只有把结构(构件)各局部的变形、破坏过程描述出来,才能得到整体的变形、破坏过程。因此,与数值仿真相比,对于图形仿真而言,建模同样是必须的。由于图形仿真的仿真对象(如构件开裂)大多不确定,且影响因素很多,故而,图形仿真的建模方法更多地应采用专家系统、人工智能和模糊理论的建模方法,并与数值仿真的数学模型紧密结合,充分利用数值仿真的仿真结果。

一般地,仿真系统的实现有两条可选择的途径:其一,运用仿真语言如 MIMIC, CSMP, CSSL 等进行二次开发,实现仿真系统^[1-10];其二,直接运用一般的计算机高级语言如 Fortran, C++ 等开发仿真系统^[1-11]。前者通用性强,仿真实现简便,但处理一些比较复杂的结构问题时,因数学模型的复杂而难度大增;后者的优点是可以自由选择有效的仿真数值分析方法,并引入最新的研究成果,而且可以方便、合理地将数值仿真和图形仿真结合起来。

1.5 本书的主要内容

本书是对笔者以及其他学者近期研究成果的总结,以荷载-变形关系和破坏过程为两条主线,阐述混凝土结构计算机仿真的原理和方法。遵循由简单到复杂、由构件到结构的原则,首先介绍钢筋混凝土梁、板、墙、柱及预应力混凝土梁等基本构件试验的计算机仿真分析方法;进而再介绍钢筋混凝土杆系结构动、静力试验以及钢筋混凝土框架结构倒塌过程的计算机仿真分析方法;最后介绍结构计算机仿真中的图形和动画处理技术,形成一套完整的系统。使读者通过学习能够掌握这一有力的工具,并能将其应用到工程实践中去。

参考文献

- [1-1] Bedard C. Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Construction. *Concrete International*, 1992; 14(1):55~592
- [1-2] 张富春等. 建筑物的鉴定加固与改造. 北京:中国建筑工业出版社,1992
- [1-3] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用. 沈阳:东北大学出版社,1991
- [1-4] Motohiko Hakuno, Kimiro Meguro. Simulation of Concrete-frame Collapse Due to Dynamic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993; 119(9):1709~1723
- [1-5] 江见鲸,贺小岗. 工程结构计算机仿真. 北京:清华大学出版社,1996
- [1-6] 顾祥林,顾惠若,孙飞飞等. 钢筋混凝土简支梁的计算机模拟试验系统. *同济大学学报*, 1994;(增刊):135~142
- [1-7] 顾祥林,孙飞飞. 钢筋混凝土框架单调加载试验的计算机仿真系统. *同济大学学报*, 1996;24(4):363~368
- [1-8] Gu X L, Li C. Computer Simulation for Reinforced Concrete Structures Demolished by Controlled Explosion, *Computing in Civil and Building Engineering*, ASCE, 2000:82~89
- [1-9] 刘西拉. 重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究. 见:那向谦,沈祖炎主编. 结构工程学的研究现状和趋势. 上海:同济大学出版社,1995:32~36
- [1-10] 王正中,屠仁寿等. 现代计算机仿真技术及其应用. 北京:国防工业出版社,1991
- [1-11] 沈祖炎,孙飞飞,顾祥林等. 土木工程与计算机仿真. *计算机仿真*, 1998;15(1):38~41,60

2 钢筋混凝土梁柱单调受荷试验的计算机仿真

钢筋混凝土梁、柱是钢筋混凝土结构中最基本的两类构件。通过梁、柱的不同组合,可以形成各种形式的结构。为了研究梁柱在不同环境下的受力性能和破坏形态,试验室中,常用图 2-1 所示的试验装置来进行基本的梁、柱试验。试验时通过力传感器、位移计和应变计记录的数据可以确定梁、柱的荷载-位移(变形)关系;通过加荷后构件裂缝的发生、发展情况可以确定梁、柱的破坏形态。本章从梁柱的荷载-位移关系和梁柱的破坏过程两个方面,以钢筋和混凝土材料的本构关系为依据,对试验过程和试验结果进行计算机仿真,力图将试验室中所观察到的现象逼真地再现于计算机屏幕上。

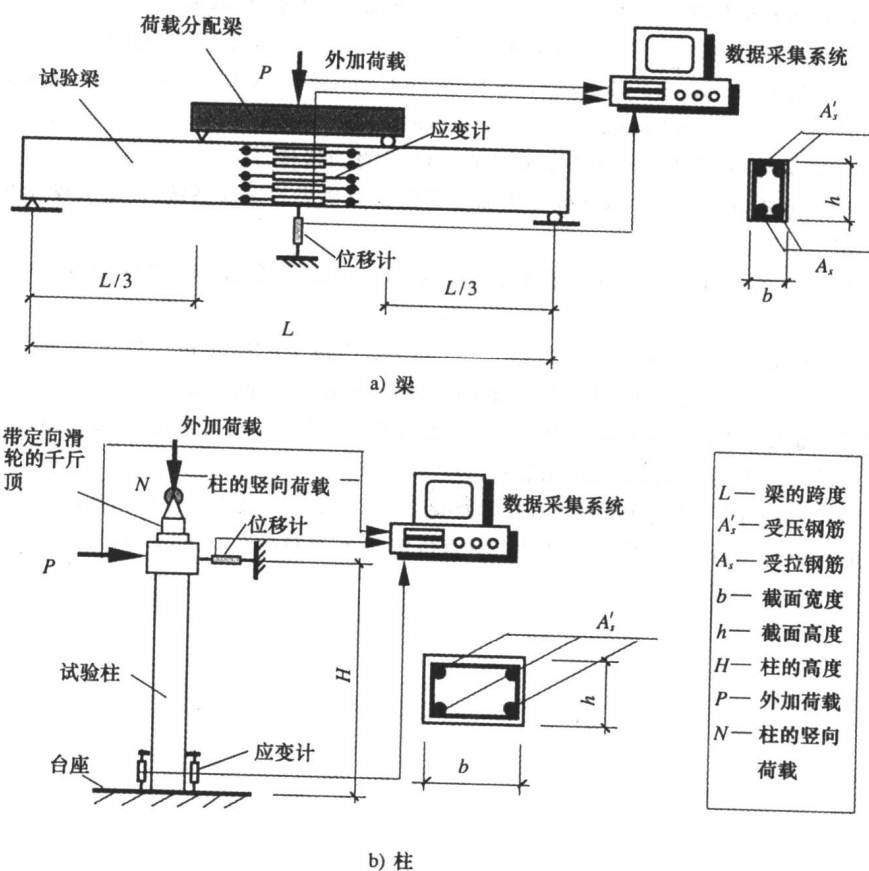


图 2-1 钢筋混凝土梁、柱试验装置简图

2.1 钢筋混凝土梁单调受荷时的破坏特征及仿真分析时的基本假定

钢筋混凝土梁在图 2-1 a) 所示的荷载作用下,跨中部两个加载点间的梁段只有弯矩的作用,支座至加载点间的梁段既有剪力又有弯矩的作用。当梁中的箍筋用量较多时,梁一般发生受弯破坏;根据纵筋的用量不同,梁的受弯破坏又分为:少筋破坏、适筋破坏和超筋破坏三种破坏方式;根据箍筋的用量和梁的剪跨比不同,梁的受剪破坏又分为:斜拉破坏、斜压破坏和剪压破坏等形式。

钢筋混凝土柱在图 2-1 b) 所示的荷载作用下,柱内同时作用有轴力、弯矩和剪力。当柱中配有足够的箍筋时,柱一般发生压弯破坏;当柱上的轴向力 N 较小,纵向钢筋配置较多,箍筋用量较少时,柱可能会出现受剪破坏。根据柱中的轴向力和弯矩的大小不同,柱的压弯破坏又可分为大偏心受压破坏和小偏心受压破坏两种。其中,大偏心受压破坏的特征和适筋梁的受弯破坏相似,小偏心受压破坏的特征和超筋梁的受弯破坏相似。柱的受剪破坏特征和梁相似。

钢筋混凝土梁、柱的轴向尺寸远大于截面尺寸,因此,在梁、柱的整个受荷(图 2-1)变形过程中,剪切变形的贡献很小。

根据钢筋混凝土梁、柱单调受荷时的破坏特征,在本章的仿真分析中作如下的基本假定:

1) 平截面假定,即构件变形后的截面仍保持为平面。钢筋混凝土构件开裂前能近似地满足这一假定,构件开裂后,裂缝处截面一分为二,显然不能满足这个假定。但是,国内外的大量试验表明,若采用跨过裂缝的大标距应变计测得标距范围内的平均应变,则从加载到构件破坏全过程的平均应变值都能很好地满足平截面假定。因此,就平均应变而言,认为钢筋混凝土构件仍能符合平截面假定。根据平截面假定,只要知道截面上任意两点的应变值,便可用线性关系算出其它各点的应变值。

2) 钢筋和混凝土之间粘结可靠,无相对滑移发生。

3) 忽略剪切变形对梁、柱构件变形的影响。

2.2 钢筋和混凝土的应力-应变关系

由材料力学的理论可知,要求解结构构件的荷载-位移关系,必须建立材料的物理方程、构件(或截面)的相容(几何)方程和平衡关系。而对钢筋混凝土构件来说,最基本的物理关系就是钢筋和混凝土的应力-应变关系。本节首先对其作一简要介绍。

2.2.1 钢筋的应力-应变关系

用在混凝土结构中的钢筋主要有两类:一类是有明显屈服点的钢筋(又称为软钢),另一类是无明显屈服点的钢筋(又称为硬钢)。用于普通钢筋混凝土梁柱等基本构件中的钢筋常为软钢,而硬钢则多用于预应力混凝土构件中。

有明显屈服点钢筋拉伸时典型的应力-应变曲线如图 2-2 a) 所示^[2-1]。图中的 $0a$ 段为弹性段, $0a$ 范围内钢筋的应力和应变成正比; bf 段为屈服段或屈服平台,屈服段内构件的

应力不增加,但却能继续变形; fd 段为强化段,此段内钢筋的应力随应变的增大而不断提高; de 为下降段,当钢筋中的应力达到其强度极限时(图 2-2 a)中的 d 点),钢筋某个薄弱部位的应变急剧增长,直径迅速变细,出现“颈缩现象”,钢筋的应力逐渐降低直至被拉断。

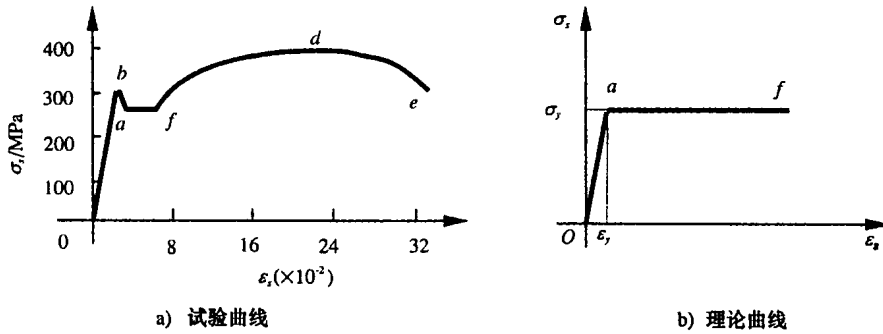


图 2-2 有明显屈服点钢筋拉伸时的应力-应变关系曲线

钢筋应力-应变关系的试验曲线很难直接用于理论分析,还需要进行理想化或模型化,在混凝土结构非线性分析中一般采用如图 2-2 b)所示的理想弹塑性的应力-应变关系。图中, $0a$ 段为弹性段, af 段为屈服段。钢筋混凝土梁柱形成塑性铰后,塑性区段混凝土的极限变形很少超过 0.006,钢筋受拉变形后即使超过屈服平台进入强化段,也只能达到不大的范围。因此,在图 2-2 b)中不考虑强化段。理论曲线的方程为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon_s > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 E_s ——钢筋的弹性模量;

σ_y, ε_y ——钢筋的屈服应力和屈服应变, σ_y 在常温下取钢筋的屈服强度 f_y 。

异常环境下,例如,高温作用下以及高温作用后(火灾时及火灾后),混凝土中钢筋的应力-应变关系仍可用式(2-1)来计算。只需要对钢筋的屈服应力和弹性模量作相应的修正。

杨彦克等对已有的试验资料进行了统计分析,认为高温下钢筋的屈服强度和弹性模量分别为^[2-2]

$$f_y^T = \begin{cases} f_y & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \\ (1.33 - 1.64 \times 10^{-3} T) f_y & 200^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\ 0.182 f_y & T > 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2-2a)$$

$$E_s^T = \begin{cases} (1.0 - 0.486 \times 10^{-3} T) E_s & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 370^\circ\text{C} \\ (1.515 - 1.978 \times 10^{-3} T) E_s & 370^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\ 0.182 E_s & T > 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2-2b)$$

式中, f_y 和 E_s 分别为常温时钢筋的屈服强度和弹性模量。

当受火温度低于 600°C 时,冷却后热轧钢筋的屈服强度和抗拉强度基本不变,只是当受火温度高于 600°C 时,才略有下降,且下降幅度小于原抗拉强度的 10%。故为简便起见,可以近似地认为钢筋混凝土构件中热轧钢筋的抗拉强度在火灾冷却后保持不变。此外,钢筋

的弹性模量在火灾冷却后也基本不变。

有明显屈服点钢筋受压时的应力-应变关系均采用与受拉时相同的应力-应变关系。无明显屈服点钢筋(硬钢)的应力-应变关系将在第4章中讨论。

2.2.2 混凝土单轴受压时的应力-应变关系

钢筋混凝土梁柱受弯分析时,常假设混凝土处于单向受力状态。混凝土单轴受压的应力-应变关系曲线可以用棱柱体或圆柱体试件来测得。图2-3为一典型的混凝土单轴受压时的应力-应变试验曲线^[2-1]。图中,0a段基本为直线,混凝土表现出理想的弹性性能,a点所对应的应力大约为 $0.3\sigma_{c0}$ ($\sigma_{c0}=f_c$ 为混凝土的单轴受压强度);ab段($0.3\sigma_{c0}\leq\sigma_c\leq 0.8\sigma_{c0}$)的应力-应变关系偏离直线,混凝土表现出越来越明显的非弹性性质,此阶段混凝土微裂缝已有所发展,但处于稳定状态;bc段($0.8\sigma_{c0}\leq\sigma_c\leq\sigma_{c0}$)应变增长速度进一步加快,应力-应变曲线的斜率急剧减小,混凝土内部微裂缝进入非稳定的发展阶段,当混凝土的应力达到 σ_{c0} 时发挥它受压时的最大承载力。 σ_{c0} 所对应的应变为 ϵ_{c0} ,其值在0.0015~0.0025之间变动,整个0c段称作应力-应变曲线的上升段。cd段为下降段,试件的承载力随应变的增长逐渐减小,当应变增大到0.004~0.006时,应力下降缓慢,最后趋向稳定的残余应力。

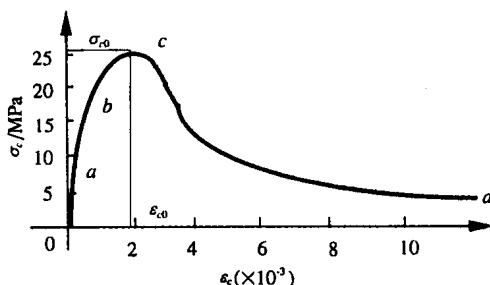


图 2-3 混凝土单轴受压时的应力-应变关系试验曲线

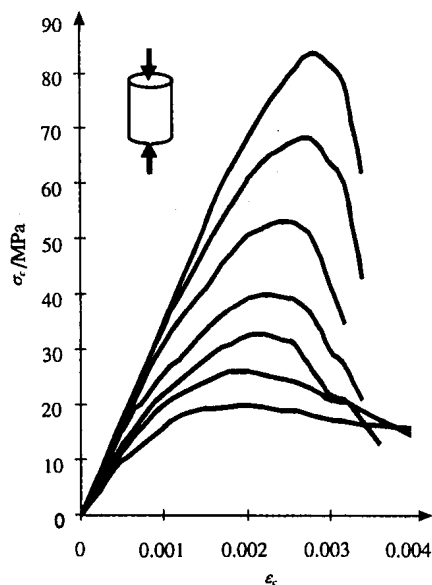


图 2-4 不同强度混凝土单轴受压时应力-应变关系的试验曲线

随着混凝土强度的不断提高,混凝土的初始刚度以及应力-应变关系的线性范围亦会加大,但延性不断降低。图2-4给出了不同强度的混凝土单轴受力应力-应变关系的试验曲线^[2-3]。

根据混凝土单轴受压时应力-应变曲线的上述特征,国内外学者提出了很多理论模型及其表达式^[2-4~2-7]。如 Hognestad 模型给出曲线的上升段为一条二次抛物线,下降段为一条斜直线^[2-5]。其表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma_{c0} \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c0} \\ \sigma_c = \sigma_{c0} \left[1 - 0.15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{c0}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{c0}} \right) \right] & \epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中 $\epsilon_{c0} = 1.8\sigma_{c0}/E_c$;

$\epsilon_{cu} = 0.0038$;

E_c 为混凝土的弹性模量,可按 ACI318-95 第

8.5.1节所提出的公式计算^[2-8]：

$$E_c = w_c^{1.5} 0.0043 \sqrt{f_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2-4)$$

式中 f_c ——混凝土的单轴抗压强度；

w_c ——混凝土的密度(kg/m^3)。

对于常用的混凝土，可按下列更简单的公式来计算 E_c ：

$$E_c = 4730 \sqrt{f_c} \quad (2-5)$$

朱伯龙等给出混凝土应力-应变关系的计算公式为^[2-4]

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma_{c0} \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{c0} + \epsilon_c} \right) & (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c0}) \\ \sigma_c = \sigma_{c0} - \sigma_{c0} [200(\epsilon_c - \epsilon_{c0})]^2 & (\epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (2-6)$$

式中， $\epsilon_{c0} = 0.002$ ， $\epsilon_{cu} = 0.003 \sim 0.004$ 。

我国《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)给出的应力-应变关系式为：

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma_{c0} \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] & (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c0}) \\ \sigma_c = \sigma_{c0} & (\epsilon_{c0} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (2-7)$$

式中， $\epsilon_{c0} = 0.002$ ， $\epsilon_{cu} = 0.0033$ 。

式(2-3)或式(2-6)、式(2-7)应用起来比较简单，但当混凝土的抗压强度超过 40MPa 时，上述关系式和试验结果却有相当大的差距(图 2-4)。对强度超过 40MPa 的混凝土，宜对上述应力-应变关系进行修正^[2-6,2-7]。具体见第 4 章中的相关内容。

2.2.3 侧向约束混凝土单轴受压时的应力-应变关系

钢筋混凝土方柱或圆柱当配置密排的螺旋箍筋或圆箍筋时，在柱的受力过程中，箍筋会对核心区的混凝土提供一个均匀的约束力场。由于箍筋的约束作用，当混凝土中的压力接近非约束混凝土的单轴受压强度时，混凝土的应力-应变特性将会得到很大的改善(图2-5)。Mander 等在 Popovics 提出的公式的基础上，根据试验资料提出了如下的应力-应变关系^[2-10~2-12]：

$$\begin{cases} \sigma_c = \frac{f_{cc} x \gamma_E}{\gamma_E - 1 + x \gamma_E} \\ x = \epsilon_c / \epsilon_{cc} \\ \gamma_E = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \end{cases} \quad (2-8)$$

式中， f_{cc} 为约束混凝土的抗压强度，按下式计算：

$$\begin{cases} f_{cc} = f_c (2.254 \sqrt{1 + 7.94 f_c' / f_c} - 2.0 f_c' / f_c - 1.254) \\ f_c' = \frac{2 A_{sv} f_{yv}}{s d_{avr}} \end{cases} \quad (2-9)$$