

房屋结构灾害检测与加固

朱伯龙 陆洲导 吴虎南 编著

同济大学出版社

前 言

房屋结构灾害工程学是灾害工程学的一个分支。它是为城市防灾、特别是为综合防灾服务的。

本书(又名“建筑结构灾害工程学”,简称“结构灾害学”)论述了混凝土和砌体结构受灾后的检测方法与加固方法,内容经过两年教学实践,并进行修订后,这次作为工业民用建筑专业的教材正式出版。本书共分五章,即房屋结构灾害材料学,房屋结构灾害检测学,房屋结构灾害修复和加固学,最后一章为工程实例。编写本书的目的在于使工业民用建筑专业的学生更好地了解和能从事结构受灾的检测与加固。

由于本书是房屋结构灾害工程学这门复杂学科的起步,目前涉及的灾害仅为地震、风、火、冰冻以及因施工不当引起的灾害,今后还有待于进一步的补充和发展。

本书包含了同济学历届14位研究生的成果,他们为新学科的发展作出了卓越贡献。这14位研究生是:曹双寅,胡克旭,韩传峰,魏国威,余琼,苏少军,哈密德(也门),韩兵康,黄俊,胡文发,潘瑞龙,肖建庄,贾锋,杨劲松等。

完成本书是本人多年的心愿,今天能交付出版社正式付梓,了却了我的心愿,同时也是对本书作者之一——吴虎南教授的最好纪念(吴虎南教授于1994年10月因病逝世)。由于学科刚处于发展阶段,也由于作者水平有限,书中不当之处,敬请各方面专家多多指正。

朱伯龙

1995年8月于同济大学

内 容 提 要

本书论述了混凝土和砌体结构受灾后的检测方法和加固方法。内容共分五章: 建筑结构灾害材料学; 混凝土及砌体房屋结构灾害检测学; 受灾混凝土与砌体结构的快速修复; 混凝土与砌体房屋结构的灾害加固学; 最后一章是工程实例。本书是房屋结构灾害工程学这门复杂学科的起步, 目前涉及的危害仅为地震、风、火、冰冻以及因施工不当引起的灾害。

本书可供从事建筑工程设计、施工人员了解和熟悉房屋结构受灾的检测与加固, 也可供相关专业的大专院校师生作为教材或课外参考书之用。

责任编辑 方 芳

封面设计 李志云

房 屋 结 构 灾 害 检 测 与 加 固

朱伯龙 陆洲导 吴虎南 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

同 济 大 学 印 刷 厂 印 刷

开本: 787×1092 1/16 印张 9 字数: 230 千字

1995年11月第1版 1995年11月第1次印刷

印数: 1—4000 定价: 12.00元

ISBN 7-5608-1452-2/TU·173

目 录

第一章 建筑结构灾害材料学	1
1.1 绪论	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 材料一般力学性能的讨论	1
1.2 动力荷载对材料的影响	5
1.2.1 混凝土的疲劳	5
1.2.2 钢筋的疲劳	7
1.2.3 冲击荷载对混凝土的作用	7
1.2.4 冲击荷载对钢筋的作用	7
1.2.5 钢筋混凝土大变形低周受力	9
1.3 火灾对材料性能的影响	11
1.3.1 火灾的历程及其影响	11
1.3.2 火灾中混凝土材质的微观变化	11
1.3.3 火灾对钢材的影响	13
1.3.4 火灾对钢筋与混凝土间粘结力的影响	15
1.3.5 混凝土火灾后浇水冷却的影响	16
1.3.6 火灾对砌体的作用	16
1.4 冰冻对材料的影响	18
1.4.1 冰冻对混凝土的影响	18
1.4.2 受冻混凝土的强度	19
1.4.3 早期受冻对砂浆强度的影响	20
1.5 腐蚀对材料性能的影响	20
1.5.1 腐蚀对混凝土的作用	20
1.5.2 腐蚀对钢筋的作用	22
1.5.3 腐蚀对砌体的作用	23
第二章 混凝土及砌体房屋结构灾害检测学	24
2.1 概述	24
2.1.1 混凝土受灾的表观检测法	25
2.1.2 混凝土结构房屋的外观检测	25
2.1.3 砌体房屋的外观检测	28
2.2 房屋结构材料强度的检测	29
2.2.1 混凝土房屋结构材料的检测	29
2.2.2 砌体房屋结构材料的检测	38
2.2.3 房屋地基强度检测	39

2.2.4 受灾结构的残余承载力·····	40
第三章 受灾混凝土与砌体结构的快速修复·····	41
3.1 概论·····	41
3.1.1 修复的界限·····	41
3.1.2 修复的基本方法·····	42
3.2 材料及设备·····	42
3.2.1 树脂类粘结材·····	42
3.2.2 水泥粘结材·····	43
3.2.3 压入设备·····	43
3.2.4 封堵技术·····	43
3.2.5 快速支撑·····	43
第四章 混凝土与砌体房屋结构的灾害加固学·····	44
4.1 概论·····	44
4.1.1 结构的加固与修复·····	44
4.1.2 加固前的鉴定·····	45
4.1.3 结构加固方法的分类·····	47
4.1.4 加固学的现状与发展·····	48
4.2 材料的结合·····	49
4.2.1 混凝土与混凝土的结合·····	49
4.2.2 混凝土与钢的结合·····	51
4.3 混凝土梁加固的试验研究·····	56
4.3.1 概述·····	56
4.3.2 破损混凝土梁局部置换材料后的性能·····	56
4.3.3 受火灾混凝土梁烧损部分材料置换后的性能·····	58
4.3.4 梁增加混凝土截面的加固试验研究·····	59
4.3.5 用绕丝法加固梁的斜截面·····	61
4.3.6 绕丝法加固梁的试验·····	61
4.3.7 用玻璃钢加固混凝土梁的抗剪试验·····	62
4.4 混凝土柱加固的试验研究·····	63
4.4.1 概述·····	63
4.4.2 柱侧增加混凝土截面的加固试验·····	64
4.4.3 柱用绕丝法加固混凝土截面的试验研究·····	64
4.4.4 用置换法加固混凝土截面的试验研究·····	65
4.5 混凝土梁加固设计·····	66
4.5.1 同种材料加固混凝土梁正截面·····	66
4.5.2 同种材料加固钢筋混凝土梁斜截面·····	68
4.5.3 异种材料加固钢筋混凝土梁正截面·····	71

4.5.4	构造要求	73
4.5.5	异种材料加固钢筋混凝土梁斜截面	74
4.5.6	例题	76
4.6	钢筋混凝土柱的加固设计	78
4.6.1	同种材料加固钢筋混凝土柱	78
4.6.2	钢筋混凝土柱用异种材料加固	82
4.7	钢筋混凝土桁架的加固	83
4.7.1	钢筋混凝土桁架个别杆件加固	84
4.7.2	钢筋混凝土桁架整体加固	84
4.8	砌体结构的加固	86
第五章	工程实例	87
	工程实例之一(抗震加固):	87
	全国农业展览馆综合馆的抗震鉴定与加固	
	工程实例之二(火灾检测与加固):	93
	上海冰箱厂老大楼结构火灾鉴定及加固	
	工程实例之三(腐蚀检测与加固):	105
	浙江衢化公司电化厂蒸发工段厂房结构检测	
	工程实例之四(工程质量问题):	116
	上海联合汽配厂化油机模车间检测及加固	
	工程实例之五(旧房改造):	123
	上海工艺美术品服务部薄膜大梁改建加固	
附录 1		128
附录 2		129
附录 3a		130
附录 3b		131
附录 3c		132
附录 4a		133
附录 4b		134
附录 5		135

第一章 建筑结构灾害材料学

1.1 绪 论

1.1.1 概 述

近数十年来,房屋结构如何抵抗和减轻自然或人为灾害的影响日益受到人们的重视。在工程结构的抗灾研究中,首要的关注点是材料受灾后的性能变化,即灾害对材料物理力学性能的影响,或者说是材料在灾害作用下的损伤。本书称之为灾害材料学。

关于灾害对材料性能(如强度、弹性模量、本构关系等)的影响,国内外都已做了许多研究工作,定性和定量地得到了一些结论,但系统性尚不够,故在土木工程领域中,灾害材料学尚未形成一个专门学科。而在结构的加固设计、工程鉴定和工程咨询等实践中又必不可少地需要这方面的知识。为此,就近十多年来国内外的研究结果,结合同济大学的系列研究作为本书的主要内容,以期引起有关同行们的注意。

在结构所受的灾害中,在动力方面最常见的有地震、冲击、振动、风暴、爆炸等;其它有火灾、冻灾及化学腐蚀等。它们对材料的作用有物理的影响、也有化学的影响。材料有时只受一种灾害的作用,有时可能受多种灾害的联合作用。

1.1.2 材料一般力学性能的讨论

在讨论灾害对材料力学性能的影响之前,先简要回顾一下材料未遭灾害作用时的性能及其破坏机理,这将有助于我们对灾害引起材料性能变化机理的一些定性及定量的认识与理解。

1.1.2.1 混凝土的内部裂缝和破坏机理

混凝土是一种复合材料,其性能取决于水泥、粗细骨料及它们之间的相互作用。在初凝之后,水泥浆形成水泥胶体并逐渐失水而凝结成水泥石(又称基材),提供了骨料间的粘结力和强度。水泥石支撑和团结骨料共同承受外力,因此水泥石又称水泥骨架。水泥胶体不断失水结硬过程中产生收缩并使骨料受压,由于骨料阻止水泥石的收缩,水泥石反而受拉,这样在水泥和骨料间产生了粘结应力,当粘结应力达到一定水平就会产生粘结裂缝。水泥石与骨料的弹性模量不同,热膨胀系数不同及对含水量变化时所引起的作用的差异,也是粘结裂缝产生的主要原因,这也导致了混凝土的高度非线性性能。因为粘结强度低于水泥石的强度,水泥石强度又低于骨料强度,故水泥石与骨料的界面区是薄弱环节,裂缝将先由此发生。

混凝土的破坏是由于内部微裂缝的产生、发展传播而达到极限的结果。裂缝从发展到极

限一般划分为三个阶段：① 裂缝的产生；② 裂缝的缓慢发展；③ 裂缝快速发展。在应力为极限应力的30%~50%时，以出现粘结裂缝为主，水泥石中只有轻微的开裂，裂缝在低应力下保持稳定，见图1-1；当应力达到极限应力的30%~50%以上时，已有的裂缝开始扩展并延伸至水泥石中，原来孤立的裂缝连接了起来，混凝土的应力应变关系呈现明显的非线性。当应力达到极限值的75%左右之后，水泥石中的裂缝迅速发展延伸并相互连接贯通，即使荷载保持不变，裂缝仍在发展，最后裂缝体系变得不稳定，混凝土发生破坏。

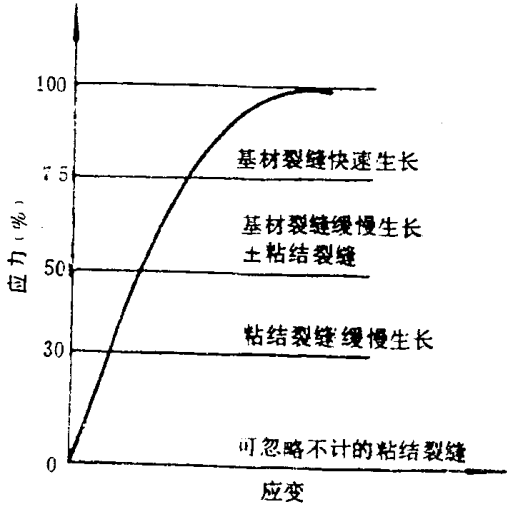


图 1-1 混凝土应力-应变

1.1.2.2 钢筋的内部结构破坏机理

钢筋是一种金属材料，是碳和铁的合金(图1-2)。铁在固态时有两种形式： α 铁与 γ 铁(图1-3)。

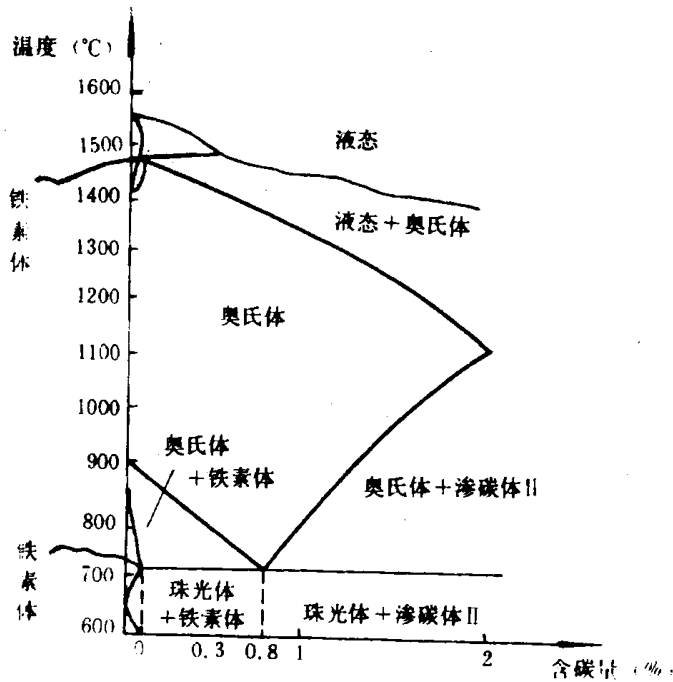


图 1-2 碳和铁的合金

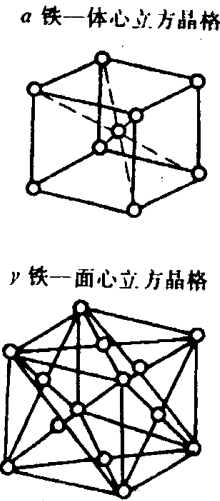


图 1-3 α 铁、 γ 铁

铁素体及奥氏体分别是碳原子熔入 α 铁及 γ 铁晶格中的固溶体。钢材的理想晶格构造并不一定是上述铁心体立方，实际上原子排列可能存在着多种缺陷，如某一个位置上少了一个原子形成点阵空位。或另一种原子(如合金钢的Mn原子等)占据了某个位置发生“畸变”。位错是金属的一种更重要的缺陷，它是晶体滑移部分与未滑移部分的交界线，即位错线。连续几个点空位会形成线缺陷或面缺陷，如图1-4所示为刃形位错与螺形位错。

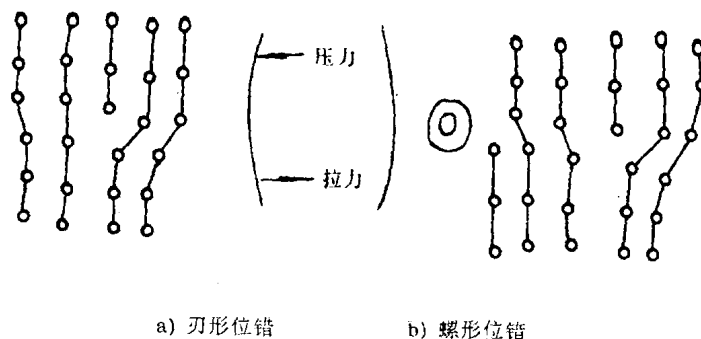


图 1-4 金属位错

钢筋受力变形可以分为三个连续阶段：弹性变形阶段、弹塑性变形阶段及断裂阶段。其原因是当单晶体受拉力 F 时(图1-5a)，在一定的晶面分解为垂直于晶面的正应力 σ_N 和平行于晶面的切应力 τ 。正应力 σ_N 使晶格沿其受力方向拉长，这些晶体的原子离开平衡位置，原子间的吸引力与 σ_N 平衡。当正应力 σ_N 大于原子间的结合力时，晶体断裂称之为脆性断裂。在切应力 τ 作用下，晶体出现相对变形。当切应力 τ 增大到一定数值后，晶体一部分相对另一部分沿着滑移面相对滑移。如继续加大切应力 τ 时，在产生一定形体变形后，晶体也会被切断破坏，称之为韧性断裂。

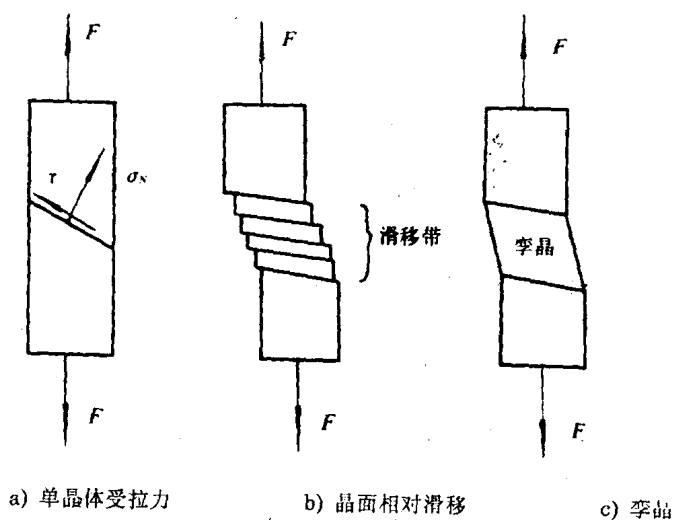


图 1-5 钢筋断裂机理

单晶体的钢筋塑性变形方式主要是滑移。在晶体塑性变形时，出现的切分应力使晶体上下两部分的原子沿着某特定的晶面相对移动，称之为滑移(图1-5b)。

具有体心和面心晶格的钢筋，由于滑移系多而发生滑移的可能性大。

目前一般认为钢材在单轴拉伸时，破坏是由于材料沿滑移面产生滑移的结果。而上述畸变和位错却可以阻止滑移的发展，从而提高了材料的强度，这就是低合金钢比普通碳素钢强度高的原因。

空隙与间隙原子不是固定不变的。当空位周围的某个原子获得足够振动的能量时，它会脱离原来位置而进入空位，而在原来的位置上形成新的空位，即所谓空位运动。同理，间隙原子也可以从这一间隙跑到另一间隙，这种空位或间隙原子的运动，是化学热处理时原子扩散

的重要方式。

冷拉、冷拔、冷扭钢筋能提高屈服以及极限强度,这是因为材料经过大变形后,使晶体中位错的含量增加所致。例如,在正常情况下,位错为 $10^4 \sim 10^6$ 根/cm²,而冷加工后可达到 10^{12} 根/cm²。

钢筋冷加工后性能的变化如图1-6所示。含碳量0.3%的碳钢未变形时 σ_b 为500N/mm²,变形量为20%时; σ_b 为700N/mm²;而当变形量达60%时,可高达900N/mm²。

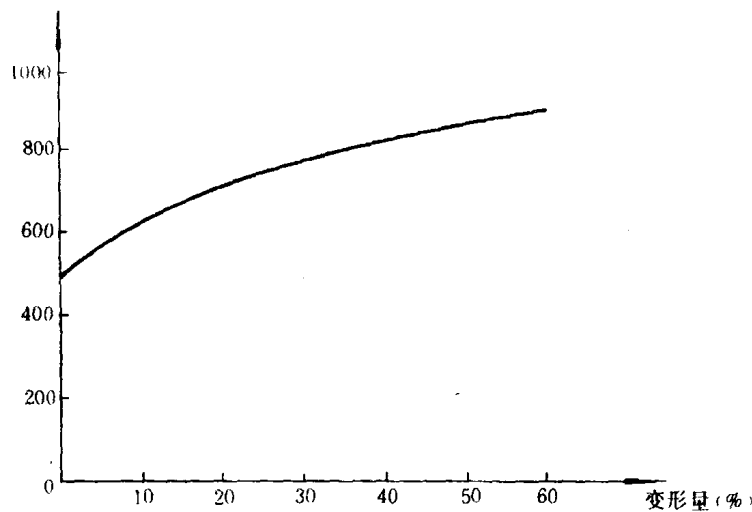
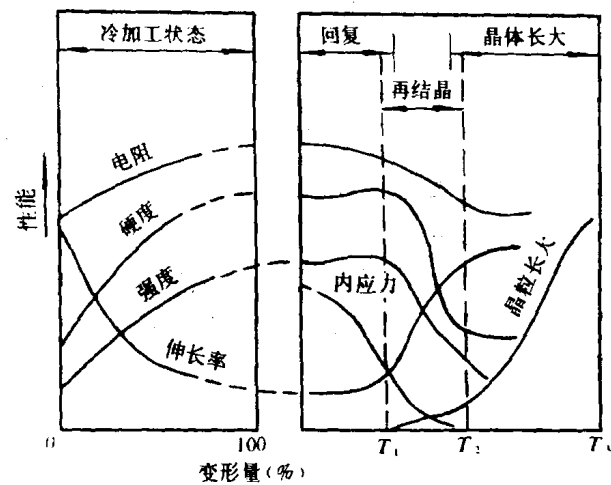


图 1-6 钢筋冷加工后性能

经冷加工后,由于位错密度增高形成亚结构,钢筋内部组织和结构发生很大的变化,晶格内部储存了较高的能量,处于不稳定状态。由此可知,经冷加工的钢筋总有恢复到组织较为稳定状态的倾向。在低温和室温下,由于原子扩散能力不足,这种不稳定状态不会发生显著的变化。但是,如果把它加热到较高温度,使原子扩散能力显著提高,则冷加工钢筋的性能和组织就会出现显著的变化,具体将经历回复,再结晶,晶粒长大的过程,如图1-7所示。



a) 冷加工状态 b) 退火时性能的变化

图 1-7 冷加工钢筋在加热时性能的变化

当温度不高(在 T_1 以下)时,原子扩散能力较低,不可能发生很大位移,故只是使晶格的弹性畸变大为减小,而内应力有明显下降,使显微结构无太大明显的变化,这一阶段称为回复。

经过塑性变形的钢筋,其内部不仅位错密度高,而且存在着许多空位等缺陷,这些缺陷的活动只需要较小的能量。为此,当温度不太高时,缺陷开始活动,空位向晶体表面、晶界或位错处移动,使晶格结点恢复到较规则状态,减小位错密度,从而减少了畸变,降低内应力,利用在 T_1 以下温度加热,进行“消除应力”退火。在这种条件下,其硬度、强度可保持相当高的水平。

当钢筋温度处于 T_1 到 T_2 时,由于原子活动能力增大,显微结构发生很大变化,被拉长或压扁的晶粒变为均匀细小的等轴晶粒,这一阶段称为再结晶。钢筋经再结晶后,其强度、硬度显著下降,而塑性大大提高,所有力学和物理性能恢复到它变形前数值,应力完全消除。

当温度升高或延长加热时间,晶粒就会长大,它是依靠大晶粒吞并小晶格来实现的,这一阶段称为二次再结晶,其结果对强度和塑性都不利。

1.1.2.3 砌体的一般破坏机理

砌体是块材和砂浆的结合体,是一种比混凝土性能更差而且受施工影响更大的复合材料。在砌体强度中,块材固然是主要材料,但把块材结合在一起的砂浆性能至关重要,砂浆的抗灾性能决定了砌体的性能。

在未受灾的砌体中,砂浆在砌体内部一般不易碳化而且表现出某种稳定性,这也是砌体可使用百年以上的重要原因。砂浆使块材受力均匀,减少块材的受弯、受压和受扭的内应力,从而减少了内裂缝。这样,灾害一旦发生,外因对内裂缝的影响也将相对小一些。

在块材中,粘土砖具有较好的稳定性和抗灾能力;混凝土砌块则与混凝土性能相近;灰砂砖、粉煤灰块材由于石灰的存在,在性能上不如粘土砖或混凝土稳定而且历史也较短,在各种灾害下的表现也不多,研究工作更少,为此,本书仍以砖和混凝土为主要研究对象。

1.2 动力荷载对材料的影响

动力荷载按表1-1可分为不同性能的几种类型,这样,材料的受力特征可以归结为疲劳、冲击和大变形受力。

表 1-1

受力特征	振 幅	次 数	工 况	材 料
疲 劳	小	百万	吊车梁、桥梁	未屈服
脉动疲劳	很小	亿	机器上楼、海洋平台	未屈服
低周疲劳	较大	十、千	地 震	可能屈服

1.2.1 混凝土的疲劳

疲劳可定义为:材料在一次加载时还不足以引起破坏的重复荷载下产生破坏的现象。这

意味着,在重复应力作用下,混凝土中产生了某种逐渐积累的内部损伤。由于加载、温度及湿度含量的反复变化,混凝土在许多场合都可能受到疲劳荷载的作用。在压力、拉力、弯曲及扭转荷载作用下都会发生疲劳。

疲劳破坏的基本机理可用应力集中和断裂力学的概念加以解释。混凝土在水化过程中形成了内部缺陷和裂缝,并在干缩期间扩展。混凝土受载后,虽然名义应力(或称平均应力)很低,但在这些裂缝端部的应力很大,超过了粘结强度或者甚至超过水泥石的强度。在重复荷载作用下,这些裂缝将不断扩展并趋于稳定,新的裂缝将不断产生以耗散重复荷载所提供的能量,最后裂缝达到充分的扩展而引起破坏。疲劳荷载下的破坏应变大大超过单纯静载下的破坏应变也说明了这一点。

疲劳强度都低于静载强度,通常用S-N-P图表示,S为应力比,N是加载循环次数,P是给定的破坏概率,如图1-8所示。决定疲劳强度的主要因素有三个: 应力变化幅度、最大应力以及作用次数。

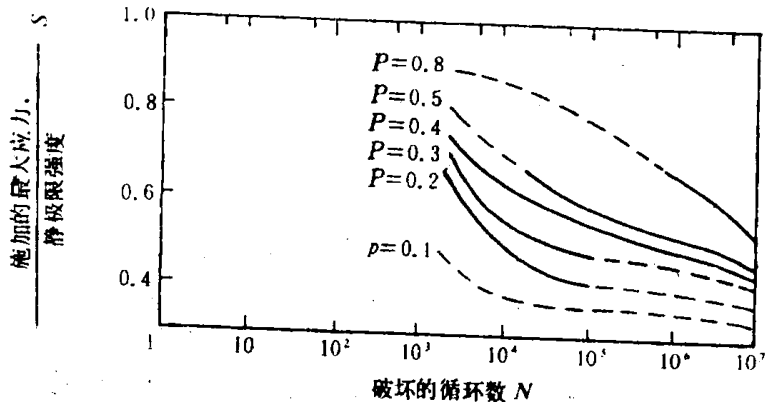


图 1-8 承受反弯曲荷载的素混凝土在各种破坏概率下的一组典型的疲劳曲线

在疲劳试验中,当疲劳试件的 $\sigma-\epsilon$ 曲线一般由凸向 σ 轴转为直线,再由直线转为凸向 ϵ 轴时,标志着材料内裂缝的扩大发展至贯通,即逐渐趋向破坏,如图1-9所示。图1-10所示为古特曼图,即以 σ_{max}/f_c 为纵坐标,以 σ_{min}/f_c 为横坐标,阐明了应力比的关系(冶金建筑研究院资料)。

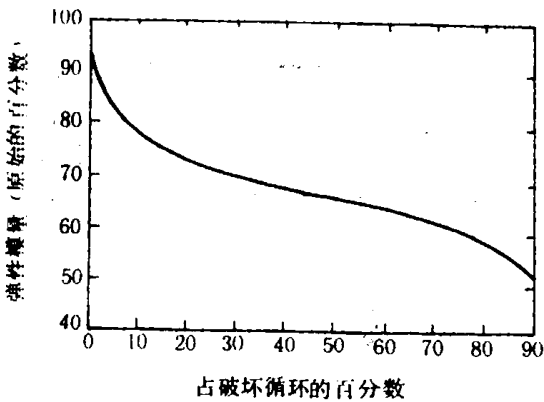


图 1-9 重复加荷引起的割线弹性模量降低

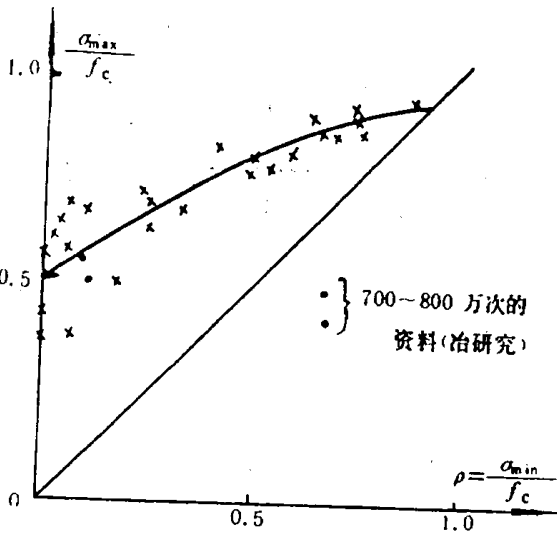


图 1-10 古特曼图

1.2.2 钢筋的疲劳

钢筋在长期交变荷载作用下,通常在工作应力峰值低于弹性极限时会突然破坏,这种破坏现象称为疲劳。交变荷载可以是大小交变、方向交变或大小和方向同时交变。钢筋的疲劳破坏过程,首先是在其薄弱地区,如在应力集中或缺陷(划伤、夹渣、显微裂缝等)处会发生较大的剪力滑移。在反复荷载下,塑性的发展会引起材料的强化,到一定强度后,强化了的材料会发生破裂,产生极细的裂缝,形成所谓“疲劳核心”,一般出现在表面上,形成疲劳扩展区。因此,当循环次数高时,裂缝处有光口。而且,疲劳断裂是突然脆断,没有什么塑性变形,这一点设计中要予以重视。

根据疲劳的特点和总的循环次数,疲劳可分为高周疲劳($N \geq 10^4$)和低周疲劳($N < 10^4$)两类。高周疲劳时,重要的性能是疲劳强度。而低周疲劳时,钢筋的疲劳抗力不仅与其强度有关,而且与其塑性有关,即材料应有良好的强韧性配合。

软钢中螺纹钢筋的表面有凸出部分,会形成应力集中,从而降低了疲劳强度。例如同一根材料,光圆钢的 $\gamma=0.53$,螺纹钢的 $\gamma=0.37$ ($\gamma=f_q/f_t$ ——疲劳强度降低系数)。

焊接的疲劳强度也低,特别是对接的闪光焊,往往断在接头处;如把钢筋接头磨光,则情况就大有好转。

对于冷加工的钢筋,冷加工程度愈高,则疲劳极限愈小(表1-2)。

表 1-2

冷 加 工 情 况	γ
未 加 工	0.58
冷 扭 12.9d *	0.54
9.4d	0.49
4.6d	0.35
2.6d	0.26

* d 表示钢筋直径

1.2.3 冲击荷载对混凝土的作用

加载速度是影响混凝土破坏强度的重要因素之一。一般认为当加载速度大于70N/mm²·s时,抗压强度可比静载强度增高30%~80%。冲击荷载的特点在于作用时间短而能量高。混凝土由于其水泥石的粘滞性及内部微裂缝的惯性抵抗能力,而具有较大的吸收应变能的能力。所以,冲击荷载可能会产生两种结构: 其一是产生一条主要裂缝(或称破坏面),使混凝土发生脆断;其二是使原有裂缝有所扩张,只要不产生整体破坏,并不影响后续抗力。

1.2.4 冲击荷载对钢筋的作用

加载速度对钢筋也同样有类似于混凝土的效应,即加载速度愈快,材料强度也就愈高。图1-11为1938年Brown和Vincent所作的试验。其它物理指标在应变速率影响下也有变

化,见图1-11及图1-12。

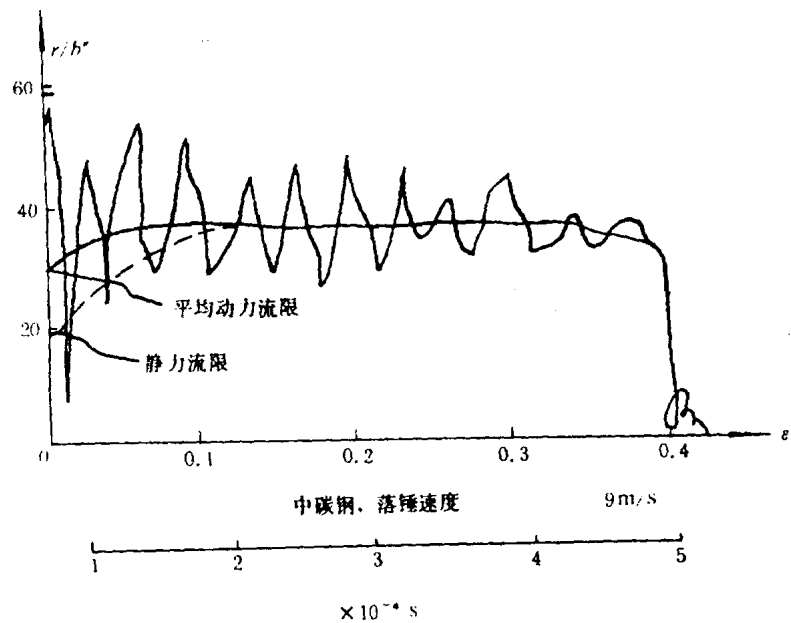


图 1-11 加载速度对钢筋的影响

在静力荷载下,钢材的破坏是沿着内部晶体间的滑移面进行的;在冲击荷载下,这种滑移得不到充分的发展,反映出物理力学指标的提高。但应指出,金属中存在一种临界冲击速度,当超出这个速度时,材料也会突然破坏,残余变形几乎没有。钢材的临界冲击速度为30.4~60.8m/s以上。

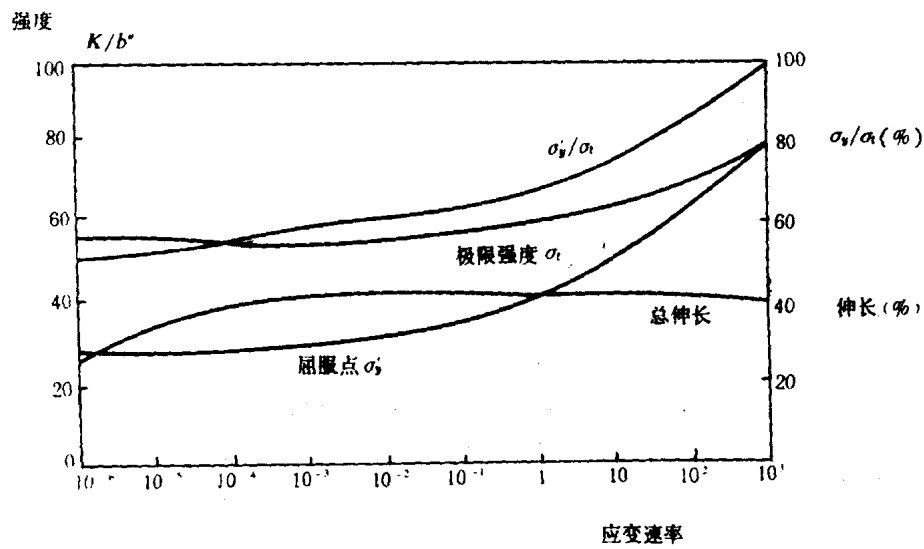


图 1-12 应变速率对强度的影响

在受冲击设计中,这种力学性能的提高可在设计中部分地采用,如抗爆设计等。

1.2.5 钢筋混凝土大变形低周受力

在地震作用下,结构振动的次数并不多,但往往振幅很大,使得材料进入大变形而破坏。因此,从某种意义上讲,地震作用下,材料既受到低周疲劳的影响,也同时受到冲击的影响。

钢筋在反复应力作用下,若应力达到屈服水平,则产生所谓的包兴格(Baushinger)效应,即当钢筋受拉(压)超过弹性范围产生塑性变形后,其反向受压(拉)的弹性极限将显著降低。

混凝土在反复应力使用下,其损伤及破坏作用机理仍表现为内部微裂缝的开展,传播至极限的过程,其破坏形态则与作用的强烈程度及快慢有关。

钢筋混凝土在地震作用下的损伤和破坏与很多因素有关,如地震作用的特性,纵向及横向配筋率,细部构造,高跨比等。在地震的反复作用下,混凝土中的微裂缝反复地张开和闭合,新的裂缝不断开展,钢筋与混凝土间粘结力不断削弱并产生局部滑移。其破坏形态有弯曲、剪切及粘结力破坏。由于以下两方面的原因,使我们难以预测其破坏形态,其一是应变速率对各种破坏形态的影响程度不同;其二是荷载的反复大变形作用使几种破坏形态都同时存在,只是程度不同而已。由于粘结力弱化和剪切裂缝的发展比弯曲强度的降低要来得快(图1-13),所以地震作用下钢筋混凝土材料更容易发生粘结力和剪切破坏。

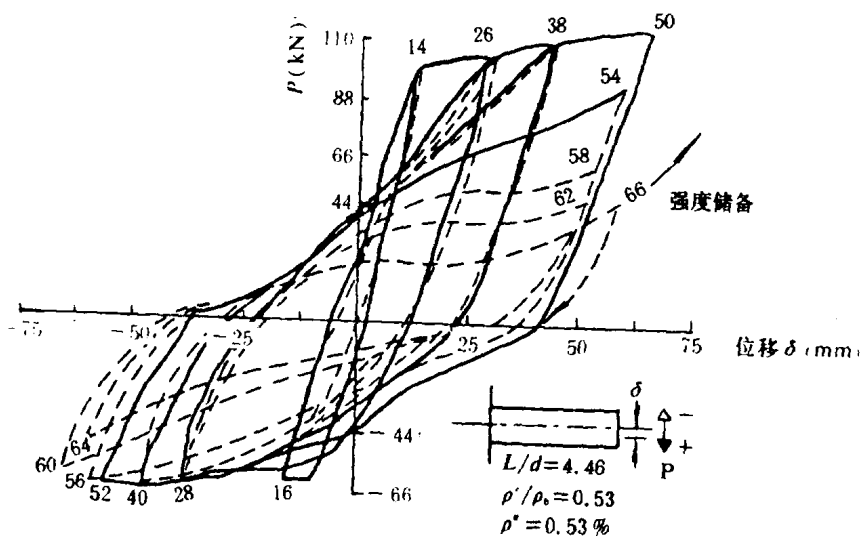


图 1-13 钢筋混凝土构件的滞迴曲线

在每一次荷载循环下,材料都将受到一些不可恢复的损伤,这可从荷载-位移滞迴线中的残余变形上反映出来。损伤一词综合地表达了材料强度、刚度及粘结力的退化。每一循环的损伤逐渐积累,直到材料发生破坏。值得指出的是,钢筋混凝土对受荷历程很敏感,即受过几次小震作用的材料可能承受得了一次大震;但经受一次大震作用的材料未必就再能经受得了几次小震的作用,这说明损伤有个限度,总的损伤达到这个限度材料就会破坏。

为了进一步说明问题,以天津第二毛纺厂的中南楼为例。该楼为三层四跨框架,在1976

年宁河地震中倒塌(图1-14)。输入天津波记录进行非线性地震反应分析,计算出①号及②号柱端截面弯矩-曲率滞回曲线,如图1-15所示,该两柱子的一端损伤积累曲线($D-t$)见图1-15。显然,到第4秒后,②号柱损伤指标 D 首先达到了1.0,意味着破坏开始。计算分析也表明,到记录全部输入后,所有柱子均在2.20s开裂, D 值迅速增大,二、三层大多数柱 D 值接近1.0,底层柱 D 小于1.0,但边柱比中柱损伤严重。实际上,该房框架确实是在二层发生破坏。

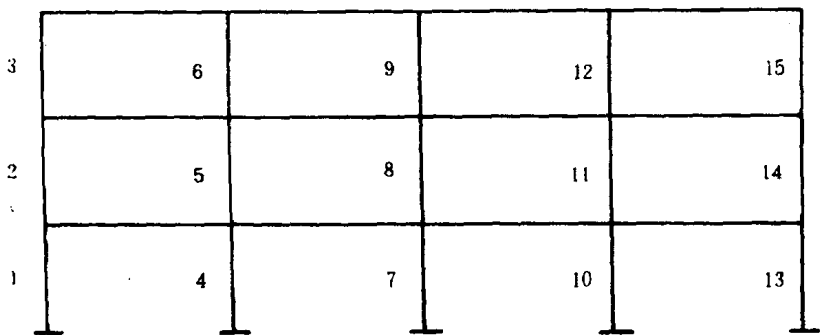


图 1-14 框架柱编号

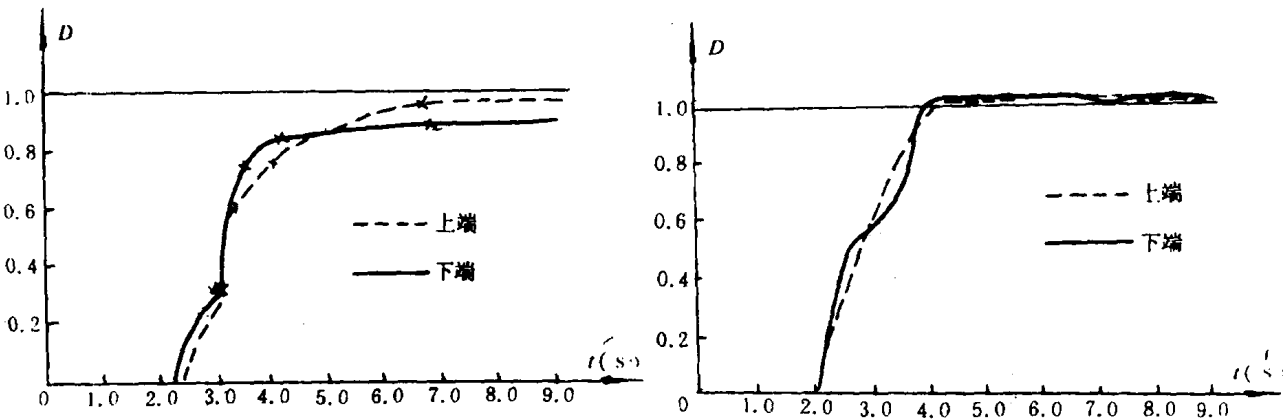
这说明,结构破坏有一个损伤积累过程。损伤指标 D 有很多模型,本例采用的 D 为:

$$D=1-\frac{K}{K_0} \tag{2-1}$$

K/K_0 为刚度比, K 为滞回线卸载割线刚度, K_0 为初始刚度。当 $K=K_0$, 则 $D=0$, 破坏时,

$\frac{K}{K_0} \rightarrow 0$, 则 $D \rightarrow 1.0$ 。

通过以上分析可知,材料与结构是有机联系的,结构运动引起损伤,材料积累损伤引起结构破坏,甚至倒塌。



a) ①柱两端损伤指标 $D-t$ 曲线 b) ②柱两端损伤指标 $D-t$ 曲线

图 1-15 损伤指标 $D-t$ 曲线

1.3 火灾对材料性能的影响

1.3.1 火灾的历程及其影响

1.3.1.1 可燃物的燃烧及火灾历程

任何火灾都将经历下述三个阶段:

(1) 着火 当材料加热达到其燃点时,将会引起燃烧。引发着火过程的火源有:明火、高温表面、冲击火花、电火花、聚焦的日光、自燃以及闪电与雷击等。从着火到形成火灾,通常需要5-15min,但这种燃烧仅限于局部区域,对建筑物的威胁不大。

(2) 旺盛 在局部着火区域内的可燃物持续燃烧,根据可燃物的种类、数量以及供氧情况等而定,这时将对建筑物造成相应的损害。常见的有闪燃,爆燃,持续燃烧,阴燃或闷燃。闪燃是指可燃液体液面上的蒸气与空气混合物发生的一闪即灭的短暂燃烧。由于蒸气来不及补充,故燃烧不会持久,只要不引发其它燃烧,则对建筑物基本无害;爆燃即指炸药类或燃性气体混合物的快速燃烧,有时在瞬间完成。爆燃引起的冲击波,可根据冲击波的程度造成对建筑物的损坏;持续燃烧即指可燃物在供氧充足的条件下充分燃烧,其旺盛程度与可燃物的燃烧热、数量、供氧有关。其火场温度可高达1000℃以上,时间长,燃烧稳定,火区不断蔓延,对建筑物损害主要来自高温灼伤,时间越长,面越宽,火灾损失越严重。当供氧不充足,燃烧物间堆叠紧密,或在一些自燃性可燃物当中发生的火灾,常呈阴燃或闷燃状态。阴燃伴随浓烈烟味、炭黑,浓烟滚滚、毒气重重,扑救困难,造成长时间影响,大面积破坏。阴燃高温引起建筑材料解体。温度越高,时间越长,破坏也越严重。

(3) 衰减,熄灭 由于可燃物烧光或供氧不足,或采取扑救等措施,火势减弱或熄灭,受灾区温度下降。

1.3.1.2 火焰

可燃物的燃烧产生火焰,各种可燃物的火焰温度不同。通常火焰从外到内可分为三层:

- (1) 外焰 即可燃气体与空气接触、混合充分燃烧,温度最高但不明亮,呈淡蓝色。
- (2) 内焰 即可燃气体不完全燃烧,明亮,呈橙黄色,温度略低于外焰。
- (3) 焰心 即可燃烧物蒸发、分解而未燃烧的部分,暗区,温度最低。

1.3.2 火灾中混凝土材质的微观变化

1.3.2.1 混凝土的微观结构

混凝土是以水泥为胶凝材料,加粗骨料(石子)、细骨料(砂)、掺和料、外加剂等用水拌和,硬化而成的人工石,是一种具有复杂结构、复杂物相的系统。混凝土的破坏,实际上是微观结