

重庆市教委科学技术研究项目

基于破坏力学原理的桥梁损伤机理
与维护加固技术研究

研究报告

重庆交通学院

二〇〇三年十二月

项目名称:

基于破坏力学原理的桥梁损伤机理与维护加固技术研究

研究人员:

易志坚、周水兴、杨庆国、周 超、彭 凯、巫祖烈
侯 伟、侯钦涛、万铜岭、韩合轩、陈 燕、孟献春
崔志芳、韩广镭、陈开国、王世平、马银华、何小兵
甘贤军、车承志、陈叙亦、李 雪、吕奖国

目 录

第一章 绪论	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 我国公路建设的状况	3
1.1.2 我国桥梁工程的服务现状	3
1.1.3 桥梁损伤破坏的危害	3
1.1.4 桥梁损伤机理与维护加固技术研究的必要性	4
1.2 钢筋混凝土桥梁的损伤和破坏	5
1.2.1 损伤的累积、演变过程和宏观裂纹的出现	5
1.2.2 裂纹发展和钢筋混凝土桥梁结构破坏的关系	5
1.3 破坏力学的研究现状	6
1.3.1 现代破坏力学的产生	6
1.3.2 断裂力学的发展	6
1.3.3 损伤力学的发展	7
第二章 断裂力学和损伤力学的基本原理	8
2.1 断裂力学的基本原理	8
2.1.1 线弹性断裂力学的基本原理	8
2.1.2 弹塑性断裂力学	9
2.1.3 断裂力学的工程运用	10
2.2 损伤力学的基本原理	11
2.2.1 损伤力学产生的背景	11
2.2.2 损伤力学的研究方法	11
2.2.3 损伤力学的工程运用	12
2.3 混凝土桥梁结构的断裂和损伤研究思路	12
2.3.1 混凝土的断裂研究现状	12
2.3.2 混凝土材料损伤研究现状	12
2.3.3 混凝土桥梁结构的损伤和断裂研究的思路	14
第三章 钢筋混凝土桥梁结构破坏过程分析	16
3.1 混凝土的碳化对钢筋混凝土结构的影响	16
3.1.1 混凝土碳化损伤机理	16
3.1.2 混凝土碳化的影响因素	16
3.1.3 混凝土碳化深度模型的建立	17
3.1.4 混凝土碳化深度对钢筋混凝土结构的影响	18
3.1.5 避免混凝土碳化的方法	18
3.2 钢筋—混凝土粘结界面的损伤演化及粘结失效	9
3.2.1 钢筋—混凝土的粘结	9
3.2.2 钢筋—混凝土界面的损伤及演化	10
3.2.3 减小钢筋—混凝土界面损伤演化的方法	20

3.3 混凝土开裂对钢筋混凝土桥梁性能的影响.....	21
第四章 基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固技术.....	24
4.1 基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固原则.....	24
4.1.1 减小环境因素引起的结构损伤.....	24
4.1.2 减小荷载因素引起的结构损伤.....	24
4.2 现有维修、加固技术的评价.....	25
4.2.1 扩大截面法.....	25
4.2.2 预应力加固法.....	25
4.2.3 粘贴加固法.....	26
4.3 一种基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固技术.....	27
4.3.1 粘贴技术的破坏力学阻裂增强机理.....	27
4.3.2 基于破坏力学阻裂增强机理的粘贴加固新技术.....	27
4.3.3 基于破坏力学阻裂增强机理的粘贴新技术技术的试验研究.....	28
第五章 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的设计思想与方法.....	30
5.1 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的设计思想.....	30
5.1.1 断裂力学的阻裂机理.....	30
5.1.2 基于阻裂机理的复合钢筋混凝土新结构.....	32
5.1.3 复合钢筋混凝土新结构的性能的力学分析.....	33
5.1.4 新结构的设计思想.....	40
5.2 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的材料选择与工艺.....	41
5.2.1 外粘贴阻裂材料的选定.....	41
5.2.2 对于粘贴的结构胶的要求.....	43
5.2.3 玻璃钢阻裂结构层的特点和制作工艺.....	44
5.3 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的实验验证.....	47
5.3.1 部分实验介绍.....	49
5.3.2 通过实验得到的结论.....	61
5.3.3 从数值分析中得到的结论.....	61
第六章 其它研究与工程实践.....	63
6.1 石拱桥破坏机理及加固.....	63
6.1.1 石拱桥破坏机理.....	63
6.1.2 加固方法.....	64
6.1.3 工程应用.....	65
6.2 重力式桥台破坏机理与加固.....	67
6.2.1 重力式桥台破坏机理.....	67
6.2.2 加固方法.....	69
6.2.3 工程应用.....	69
主要参考文献.....	75
致谢.....	78

目 录

第一章 绪论	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 我国公路建设的状况	3
1.1.2 我国桥梁工程的服务现状	3
1.1.3 桥梁损伤破坏的危害	3
1.1.4 桥梁损伤机理与维护加固技术研究的必要性	4
1.2 钢筋混凝土桥梁的损伤和破坏	5
1.2.1 损伤的累积、演变过程和宏观裂纹的出现	5
1.2.2 裂纹发展和钢筋混凝土桥梁结构破坏的关系	5
1.3 破坏力学的研究现状	6
1.3.1 现代破坏力学的产生	6
1.3.2 断裂力学的发展	6
1.3.3 损伤力学的发展	7
第二章 断裂力学和损伤力学的基本原理	8
2.1 断裂力学的基本原理	8
2.1.1 线弹性断裂力学的基本原理	8
2.1.2 弹塑性断裂力学	9
2.1.3 断裂力学的工程运用	10
2.2 损伤力学的基本原理	11
2.2.1 损伤力学产生的背景	11
2.2.2 损伤力学的研究方法	11
2.2.3 损伤力学的工程运用	12
2.3 混凝土桥梁结构的断裂和损伤研究思路	12
2.3.1 混凝土的断裂研究现状	12
2.3.2 混凝土材料损伤研究现状	12
2.3.3 混凝土桥梁结构的损伤和断裂研究的思路	14
第三章 钢筋混凝土桥梁结构破坏过程分析	16
3.1 混凝土的碳化对钢筋混凝土结构的影响	16
3.1.1 混凝土碳化损伤机理	16
3.1.2 混凝土碳化的影响因素	16
3.1.3 混凝土碳化深度模型的建立	17
3.1.4 混凝土碳化深度对钢筋混凝土结构的影响	18
3.1.5 避免混凝土碳化的方法	18
3.2 钢筋—混凝土粘结界面的损伤演化及粘结失效	9
3.2.1 钢筋—混凝土的粘结	9
3.2.2 钢筋—混凝土界面的损伤及演化	10
3.2.3 减小钢筋—混凝土界面损伤演化的方法	20

3.3 混凝土开裂对钢筋混凝土桥梁性能的影响.....	21
第四章 基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固技术.....	24
4.1 基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固原则.....	24
4.1.1 减小环境因素引起的结构损伤.....	24
4.1.2 减小荷载因素引起的结构损伤.....	24
4.2 现有维修、加固技术的评价.....	25
4.2.1 扩大截面法.....	25
4.2.2 预应力加固法.....	25
4.2.3 粘贴加固法.....	26
4.3 一种基于破坏力学的钢筋混凝土桥梁维修、加固技术.....	27
4.3.1 粘贴技术的破坏力学阻裂增强机理.....	27
4.3.2 基于破坏力学阻裂增强机理的粘贴加固新技术.....	27
4.3.3 基于破坏力学阻裂增强机理的粘贴新技术技术的试验研究.....	28
第五章 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的设计思想与方法.....	30
5.1 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的设计思想.....	30
5.1.1 断裂力学的阻裂机理.....	30
5.1.2 基于阻裂机理的复合钢筋混凝土新结构.....	32
5.1.3 复合钢筋混凝土新结构的性能的力学分析.....	33
5.1.4 新结构的设计思想.....	40
5.2 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的材料选择与工艺.....	41
5.2.1 外粘贴阻裂材料的选定.....	41
5.2.2 对于粘贴的结构胶的要求.....	43
5.2.3 玻璃钢阻裂结构层的特点和制作工艺.....	44
5.3 基于破坏力学的复合钢筋混凝土梁的实验验证.....	47
5.3.1 部分实验介绍.....	49
5.3.2 通过实验得到的结论.....	61
5.3.3 从数值分析中得到的结论.....	61
第六章 其它研究与工程实践.....	63
6.1 石拱桥破坏机理及加固.....	63
6.1.1 石拱桥破坏机理.....	63
6.1.2 加固方法.....	64
6.1.3 工程应用.....	65
6.2 重力式桥台破坏机理与加固.....	67
6.2.1 重力式桥台破坏机理.....	67
6.2.2 加固方法.....	69
6.2.3 工程应用.....	69
主要参考文献.....	75
致谢.....	78

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 我国公路建设的状况

改革开放以来,特别是20世纪90年代以来,公路交通基础建设有了很大的发展,取得了显著的成绩,公路总里程达到140万公里,高速公路突破1.6万公里,公路交通的紧张和制约状况得到了缓解。但总的讲来,公路交通基础设施依然薄弱,明显表现为储备能力和应变能力不足。随着我国市场经济的深入发展,产业结构的变化,西部地区大开发和经济、交通的加快发展,全国经济结构进一步调整,人民生活水平和城镇化水平的提高,经济全球化和加入WTO,高新技术的发展和应用,均对交通运输提出了新的更高的要求,为公路交通带来了新的发展机遇和挑战^[1]。

当前,公路交通发展规划和目标已经明确。“十五”期间公路建设重点是“一个系统、三个网络”,即“五纵七横”国道主干线系统、国家重要公路干线网络、县乡公路网络、运输服务网络以及建设西部新规划的八条省际大通道。到2005年新增公路里程20万公里,其中高速公路1万公里。面对未来经济和社会发展总趋势,今后一段时间内,发展仍是公路交通的主要任务^[1]。

1.1.2 我国桥梁工程的服务现状

我国公路桥梁建设在近十年来进入了辉煌发展时期,成就突出,技术进步明显。然而,现有桥梁的服务状况却不容乐观。

据统计,截至2001年底,我国20年以前修建的桥梁为13万座,30年以前修建的桥梁为11.4万座,当时建设的标准都很低,而都又服役二、三十年,特别是大吨位车辆的发展,有很多桥梁已经不适应要求,只能限载通过。虽然已经有一部分旧桥得到了加固补强,但仍有很大一部分仍在使用。由于我国的经济状况和发达国家相比还比较落后,不可能投入更多的资金对旧桥梁进行重建,因此必须通过结构补强的办法对旧桥梁进行改造,使其达到使用要求^[1]。

1.1.3 桥梁损伤破坏的危害

桥梁在长期使用过程中,在内部的或外部的、人为的或者自然因素作用下,随着时间的推移,将发生材料的老化与结构的损伤破坏,这是一个不可逆的过程

[2]~[12]。

长期以来,人们受到混凝土是一种耐久性好的建筑材料这一观念的影响,忽视了钢筋混凝土结构损伤破坏、耐久性的问题,造成了钢筋混凝土结构损伤破坏、耐久性的研究相对滞后,并因此付出了巨大的代价^{[2]~[12]}。

美国标准局(NBS)1975年的调查表明:在美国州际公路网56万座桥梁中,处于严重失效的就有9万座,1969年一年用于修复因钢筋锈蚀而损坏公路桥面板的费用高达26亿美元。美国材料咨询委员会(NMAB)1987年的报告指出,有253000座混凝土桥梁处于不同程度的损伤状态,且以每年35000座的速度增加;1991年用于修复耐久性不足而损坏的桥梁就耗资910亿美元^[2]。

英国英格兰岛中部环形线的快车道上有11座混凝土高架桥,建于1972年,建造费为2800万英镑,建成两年后就发现钢筋锈蚀造成的混凝土顺筋裂纹现象;1974~1989年的15年间,其修补费用已高达4500万英镑,为初始造价的1.6倍。英国每年用于钢筋混凝土结构修复的费用高达200亿英镑^[2]。

日本引以为自豪的新干线使用不到10年,就出现大面积混凝土开裂剥蚀现象^[2]。

我国的桥梁结构中,由于钢筋混凝土结构所占的比例相当大,因此由于钢筋混凝土损伤而造成的破坏也十分严重,由此带来的经济损失也十分巨大。

1.1.4 桥梁损伤机理与维护加固技术研究的必要性

世界上一般国家的基本建设大体上都可分为三个阶段:第一阶段为大规模新建,第二阶段为新建与维修改造并重,第三阶段为重点转向旧建筑物的维修改造。如美国自20世纪70年代开始,建筑业的新建已不再景气,而维修改造越来越兴旺;前苏联“九五”和“十五”维修改造的投资占工业建筑总投资的65%;英国1980年建筑物维修改造工程占英国建筑工程总量的2/3;瑞典1983年用于维修改造的投资占建筑业总投资的50%^{[1]~[12]}。

在我国,虽然近期内公路交通建设仍以新建为主,但是现有桥梁的损失破坏问题已不容忽视。可以预见,不久的将来,随着交通基础设施的进一步完善,维修、加固在我国必然会越来越受到重视。

因此,有必要对桥梁损伤机理、维修加固方法进行研究,采用科学的决策解决维修加固问题。这也是钢筋混凝土桥梁损伤机理、维修加固方法研究的最主要的工程背景。

1.2 钢筋混凝土桥梁的损伤和破坏

1.2.1 损伤的累积、演变过程和宏观裂纹的出现

钢筋混凝土桥梁的损伤是指钢筋混凝土桥梁的结构性能随时间推移逐渐劣化的现象^{[1]~[21]}。从产生损伤的直接原因来看,钢筋混凝土桥梁的损伤破坏既与混凝土的自身的缺陷相关也与环境、荷载因素相关。

在环境、荷载因素的作用下,损伤的累积和演化导致钢筋混凝土桥梁中的混凝土质量劣化、混凝土开裂、钢筋—混凝土粘结界面失效,最终使钢筋混凝土桥梁的结构性能大幅度下降、甚至破坏^{[1]~[23]}。

宏观裂纹出现以前,损伤演化过程在钢筋混凝土桥梁结构中主要表现为^[2]:

1. 混凝土的碳化:混凝土碳化是混凝土中的碱与 CO_2 发生化学反应生成 CaCO_3 的过程,它使混凝土的碱性降低,从而失去对钢筋的保护作用。衡量混凝土碳化的指标为混凝土碳化深度。

2. 混凝土中钢筋的锈蚀:混凝土碳化后,在适当的条件下,钢筋产生锈蚀。

3. 混凝土冻融破坏:混凝土冻融破坏是寒冷地区混凝土常见的劣化现象。混凝土中孔隙水的冻融导致混凝土的质量下降。

4. 荷载应力作用引起的混凝土损伤:由于混凝土材料本身的特点,在混凝土中不可避免地存在着微裂纹和缺陷(即初始损伤),在荷载应力的作用下,混凝土中的原始损伤将逐渐演化发展。

其中,前三种可以归结为环境因素引起的损伤,后一种为应力(或荷载)引起的损伤。

当钢筋混凝土中的损伤积累到一定程度,随着荷载的作用,钢筋混凝土桥梁结构中将会出现宏观裂纹、钢筋与混凝土界面失效等宏观破坏特征,从而导致钢筋混凝土结构的应力状况劣化和结构性能的劣化。

1.2.2 裂纹发展和钢筋混凝土桥梁结构破坏的关系

钢筋混凝土结构的破坏与混凝土中裂纹的发展存在着因果关系。

当裂纹、特别是宏观裂纹出现后,钢筋混凝土结构从钢筋和混凝土共同工作的整体变成了一个由非整体混凝土借钢筋维系、应力状况十分复杂的结构。裂纹的出现导致结构性能的劣化,裂纹的发展导致结构逐渐地破坏。

混凝土中裂纹的每一次扩展,均对应于结构性能的一次劣化,因此如果能够使结构晚一级荷载开裂,结构的性能就会改善一级,晚开裂的程度越大,结构性能的改善就越显著。

与此同时,如果在混凝土结构开裂荷载提高的同时,在开裂后还能极大地阻

止已有裂纹的进一步扩展,那么这样的结构不仅抗裂性能优良,而且承载力将大幅度提高(在不提高混凝土和钢筋强度等级的情况下,预应力混凝土技术并不提高结构的极限承载力),有更好的工作特性。

因此,钢筋混凝土桥梁的维修、加固技术,必须从延缓开裂、阻止裂纹扩展、避免界面开裂、提高结构延性同时考虑。理论和实验证明:基于现代破坏力学原理不仅可以成功地对旧结构进行维修、加固,而且可以得到一种优良的抗裂新结构。

1.3 破坏力学的研究现状

1.3.1 现代破坏力学的产生^{[2]~[12]}

在自然界和工程界中,破坏现象十分普遍。为了探求破坏的规律,从而避免破坏对人类的影响,人们进行了不懈的探索。由于破坏的含义和破坏问题本身都十分复杂,因此到目前为止,破坏问题还没有得到完全解决。

尽管如此,人们的研究取得丰硕的成果,解决了许多重大的实际工程问题,形成了比较系统的破坏力学理论。其中最为突出的是现代破坏力学研究中产生的两门力学分支:断裂力学和损伤力学。

传统力学处理破坏问题时,认为只要构件的工作应力不大于材料的容许应力,构件就处于安全状态。事实上,当材料内部含有裂纹和缺陷时,构件会在工作应力远远小于材料容许应力的情况下发生断裂破坏。

为了解决这类问题,现代破坏力学应运而生了。首先出现的是断裂力学,它以含裂纹物体为研究对象,引入了新的判据来解决破坏问题。但是由于分析过程中需要首先预设裂纹,使分析受经验的支配性较大,因此考虑构件中材料的缺陷、损伤的损伤力学产生了,它能够解决宏观裂纹何时、何处出现的问题。

以断裂力学和损伤力学为代表的现代破坏力学在传统力学的基础上,引入了新的概念和新的方法,能够从更深的层次研究材料的破坏,因此能够对破坏问题作出更为科学的描述和分析,因此在工程上得到了广泛的应用,取得了极大的成就。

1.3.2 断裂力学的发展^{[6][7][8][9][10][11][12]}

作为断裂力学中的能量理论思想,早在1920年就由A. A. Griffith提出,但是由于金属材料的低应力破坏事故在当时并不突出,因此,人们对于断裂问题和Griffith的能量理论思想的重要性还缺乏应有的认识。

直到第二次世界大战期间,低应力脆断问题才引起了工程技术界的充分重

视。但是在当时还仅仅把脆断的原因归结为材料的韧性不足，是低温引起的材料韧性急剧降低的这一因素。因此，研究的重点只放在提出一个防脆断的韧性指标上。

与研究转折温度的同时，另有人将着眼点放在材料的初始缺陷上，通过脆断事故的调查得出的结论是：低应力脆断都是由于裂纹或类裂纹的缺陷的传播引起的。由于裂纹的存在，与裂纹直接相联系的局部地区的应力将重新分布。尽管整个截面的平均应力可能很小，但是上述局部地区的应力却可能很大。这种局部地区的应力状态就成为裂纹传播、并最终导致构件断裂的控制因素。于是 Griffith 的能量理论思想又重新引起了人们的重视。

对于金属材料而言，由于塑性的存在，Griffith 提出的公式并不合适，为此 E. Orowan 在 1949 年对其进行了修正，计入了塑性变形的影响。他们的理论构成了断裂力学中能量理论的基础。

脆性断裂理论的重大突破应该归功于 G. R. Irwin，他于 1957 年提出了应力强度因子的概念，随后在此基础上形成了断裂韧性的概念，并建立了测量材料断裂韧性的实验技术。这样断裂力学的最初分支——线弹性断裂力学就建立起来了。

由于线弹性断裂力学是建立在线弹性力学基础上的，对于塑性较好的材料并不适用，必须代之以弹塑性断裂力学。目前弹塑性断裂力学研究尚不成熟，是断裂力学研究中最活跃的分支。即便如此，它仍被广泛地运用于工程分析中。

1.3.3 损伤力学的发展^{[2][3][4][5][6]}

随着断裂力学的迅速发展，人们提出了这样的问题：采用断裂力学研究方法预防事故的发生必须等到裂纹出现，这种先决条件是否意味着已经为时过晚了？这个初始先兆状态问题——即在出现宏观可见裂纹之前，材料内部损伤演变问题很快得到了人们的注意。

最初损伤研究试图运用统计的方法去研究材料内部的“薄弱环节”，然而这一理论在用于研究复杂的部件和结构时遇到了非常难于解决的数学问题。

损伤力学系统理起步是 L. M. Kachanov 于 1958 年通过提出了有关材料损伤的简单模型。然而直到 1968 年 Y. N. Rabotnov 引入有效应力的概念后，损伤力学才得到基本的发展，它的发展至少比断裂力学的迅猛发展晚十年。到了 80 年代，这一理论得以建立在更严格的热力学和微观力学基础上。随着更多学者的介入，损伤力学理论才在工程上得到应用。

目前，对于损伤力学这门新兴学科来说，虽然有许多问题尚有待于解决，对模型的局限性还需要做进一步的研究，但是她已经被广泛地运用于工程实践，并取得了丰硕的成果。

第二章 断裂力学和损伤力学的基本原理

2.1 断裂力学的基本原理

2.1.1 线弹性断裂力学的基本原理^{[6][7][8][9][10][11][12]}

线弹性断裂力学的研究对象是带有裂纹的线弹性体，其基础是线弹性理论。

1. 三种断裂类型

对于复杂的裂纹形式，可以将其分解为三种基本断裂类型的组合。这三种基本的断裂类型为：张开型断裂，即 I 型断裂；滑移型断裂，即 II 型断裂；撕裂型断裂，即 III 型断裂。

在这三种断裂形式中，以 I 型断裂最常见、最基本、最危险。

2. 应力强度因子的概念

应力强度因子的概念可以通过下面的实例来理解。如图 2.1，在无限大的平板试样的中心有一个长度为 $2a$ 的穿透裂纹，外加拉应力和裂纹平面垂直。

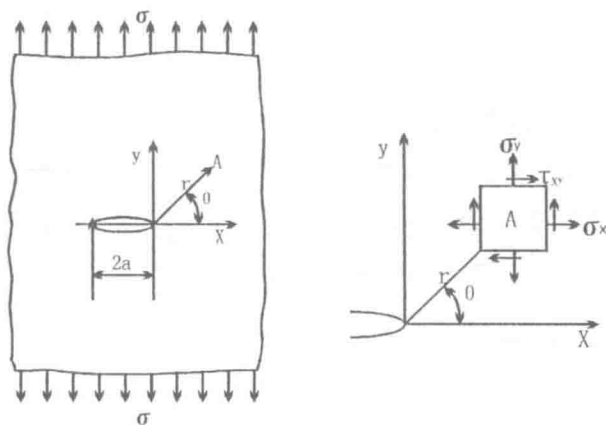


图 2.1 二向均匀受拉下的带中心穿透裂纹的无限板

如果采用图中的坐标系，则可以证明，在裂纹的尖端附近有如下的应力分布：

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

其中， $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ 。 K_I 的单位为 $\text{MPa}\sqrt{m}$ 或者 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。

由上式可以看出，各应力分量中都含有 K_I ，它是与裂纹大小、形状和应力

有关的量，脚注 I 表示在外力作用下裂纹张开，称为张开性或者 I 型裂纹。对于裂纹尖端附近的某一点 A，其坐标 r 是已知的，式中其余各项都是角度 θ 的函数。由此可知，该点的内应力大小完全由 K_I 决定。 K_I 大，裂纹尖端各点的应力就大。 K_I 控制和决定了裂纹尖端附近的应力场，它是应力强度的决定因素，所以断裂力学把它称为应力场的强度因子，简称应力强度因子。裂纹是否会失稳扩展取决于 K 值的大小，故可以用 K 因子建立裂纹发生失稳扩展的判据。

当应力强度因子 K_I 达到一个临界值时，裂纹扩展，构件发生破坏。

3. 断裂韧性

实验证明：临界的应力强度因子既与裂纹体的材料有关，也与其几何尺寸相关。但是，对于同一种材料而言，存在一个最低的临界值，这个值是材料的性能常数，即对于不同的材料具有不同但是确定的数值。

由于此值是反映材料抵抗断裂能力的一个指标，故将其称为材料的断裂韧性，对 I 型裂纹记作 K_{IC} 。各种材料的 K_{IC} 可以通过实验测得。

4. 断裂判据

按照 K 因子建立的断裂判据是：当含裂纹的弹性体在外力的作用下，裂纹尖端实际的 K 因子达到裂纹失稳扩展时材料的临界值时，裂纹就会发生失稳扩展而导致裂纹体的断裂。例如，对于 I 型裂纹，在平面应变条件下，其断裂判据为

$$K_I = K_{IC} \quad (2.2)$$

其中的 I 型裂纹应力强度因子 K_I 与带裂纹构件所承受的荷载、裂纹尺寸、构件几何形状和尺寸等因素有关，可以通过查手册或通过理论计算或其他方法确定，而 K_{IC} 是材料的断裂韧性。建立了断裂判据，就可以解决常规强度理论所不能解决的构件断裂分析问题。

2.1.2 弹塑性断裂力学

对于裂纹的端部已经有一个很大的塑性区的大范围屈服断裂问题和全面屈服断裂问题，线弹性断裂力学已经不再适用，必须采用弹塑性断裂力学进行分析。目前用来研究弹塑性断裂的方法很多，有 COD 法、J 积分法、本文作者提出的线场分析方法等。现简要介绍如下。

1. COD 法

当裂纹受到垂至于裂纹线方向的拉伸时，原来贴合在一起的上下两个裂纹面就将分离，从而使裂纹张开。裂纹面在裂纹顶端处的张开位移量就是所谓的 COD (Crack Opening Displacement)。

显然，随着荷载的增加，裂纹顶端的张开位移量，即 COD 值也将增大；反之，荷载降低时，COD 值也随之减小。换言之，一定的 COD 值对应于一定的受

载状态，亦即对应于裂纹端部的一定应力、应变场强弱程度。因此可以用 COD 值间接度量裂纹端部的应立场、应变场。

与线弹性断裂情况一样，对于弹塑性断裂，当所加的荷载达到某一定值时，构件就达到断裂的临界状态。此时裂纹端部的张开位移量 δ 也达到某一临界的值 δ_c ，此值就等于材料的断裂韧性。于是用 COD 表示的断裂判据就是：

$$\delta = \delta_c \quad (2.3)$$

2. J 积分法

在固体力学中，为了分析缺陷周围的应力、应变场，常常采用一些与积分途径无关的线积分，其中之一就是 J 积分的定义为：

$$J = \int [W dy - \bar{T} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds] \quad (2.4)$$

式中的 W 是应变能密度或者形变功密度。 $\bar{T}$ 为积分回路上任意弧线元对应的面元上的应力矢量， $\bar{u}$ 为应力 $\bar{T}$ 作用点的位移量； Γ 为由裂纹下自由表面上任一点开始，按照逆时针方向环绕裂纹尖端地区，终止于裂纹上自由表面上一点的任意积分回路。

可以证明，J 积分值同样可以作为裂纹尖端的应力、应变场强弱的度量。与线弹性断裂情况一样，对于弹塑性断裂，当所加的荷载达到某一定值时，构件就达到断裂的临界状态。此时 J 积分也达到某一临界的值 J_c ，此值就等于材料的断裂韧性。于是用 J 积分表示的断裂判据就是：

$$J = J_c \quad (2.5)$$

3. 线场分析方法

线场分析方法为本文作者提出，它是裂纹弹塑性分析的一种新方法，这一方法以分析裂纹线附近的弹塑性场为主并提出相应的判据。

2.1.3 断裂力学的工程运用

虽然断裂力学的理论和方法还不完善，但它在工程结构设计、选材、发展新材料与新工艺、分析断裂事故进行裂纹容限计算、估算裂纹的剩余强度和剩余寿命、以及确定检测周期和制定无损探伤标准方面都在发挥着越来越大的作用。

特别需要指出的是：近年来对混凝土材料的断裂力学研究取得了较大的进展，这为断裂力学在钢筋混凝土结构中的运用奠定了一定的研究基础。

2.2 损伤力学的基本原理^{[2][3][4][5][6]}

2.2.1 损伤力学产生的背景

材料中由于不可避免地存在着缺陷和损伤,在外荷载的作用下,裂纹从萌生、扩展到最后的失稳扩展,这是一个过程。

按照断裂力学的观点:对于典型的脆性断裂,起始扩展意味着失稳扩展;对于宏观的韧性断裂,则存在裂纹稳定扩展的阶段。断裂力学仅研究固体中裂纹缺陷扩展的规律,无法研究分析宏观裂纹形成之前材料中的微缺陷或者微裂纹的形成及其发展对材料的力学性质的影响。

事实上,材料中存在的许多微裂纹并不能简化为宏观裂纹,这样,单纯的断裂分析方法便显现出了局限性。为了研究材料从初始状态到破坏这一漫长过程,损伤力学应运而生了。

损伤力学的产生从某种程度上弥补了断裂力学的不足,它主要是在连续介质力学和热力学的基础上,运用固体力学方法,研究材料宏观力学性能的演化直至破坏的全过程。

2.2.2 损伤力学的研究方法

损伤力学研究方法主要有两大类:

1. 微观(细观)研究方法

这种研究方法是根据材料的微观(或细观)成分,如基体、颗粒、空洞的单独力学行为以及它们的相互作用来建立宏观的对象的损伤本构关系,进而给出损伤力学的处理方法。

对细观方法,一般认为细观模型为损伤变量和损伤演化赋予了真实的几何形象和物理过程,深化了对损伤过程本质的认识。损伤的细观理论是一个采用多重尺度的连续介质理论,其研究方法是两阶段的。

首先,从损伤材料中取出一个材料构元,它从试件或者结构尺度上可视为无穷小,但包含了材料损伤的基本信息,无数构元之和便是损伤体的全部。然后,对承受宏观荷载的特定结构进行力学分析,便可以得到结构应力与构元总体应变的关系及损伤特征量的演化关系。这些关系即对应于特定损伤结构的本构方程,并可用它来分析结构的损伤行为。

2. 宏观的及唯象学的研究方法

这一方法不需要直接从微观机制导出宏观量之间的理论关系式。宏观方法的共同特点是引入损伤变量作为本构关系的内变量。人们以这些弹性损伤的本构模型为基础,并以有限元等数值分析相结合,进行结构的应力及损伤的计算。然而

需要指出的是不同的研究者采用的损伤变量不同。

2.2.3 损伤力学的工程运用

损伤力学出现以来,被广泛地运用于各种材料及工程结构的分析之中,取得了一些重要结论:①损伤结构的响应显著不同于无损结构;②损伤结构的性能及响应取决于材料的损伤特性、损伤材料的本构关系。这说明考虑结构中材料的损伤进行结构分析是获得结构真实响应的必要条件,在这个过程中,采用逼近于损伤材料实际的损伤本构关系是十分重要的。

2.3 混凝土桥梁结构的破坏研究思路

2.3.1 混凝土的断裂研究现状^{[6]~[12]}

混凝土的断裂研究中,常有线弹性断裂力学能否适用于混凝土材料的争论,但是由于混凝土的抗拉性能较差,破坏呈现明显的脆性,因此线弹性断裂力学自上世纪60年代起已被用于混凝土的断裂研究。

国内外在各种断裂模式(拉裂模式、剪切模式、撕裂模式)的试验研究和混凝土的断裂韧性测试方面做了大量的工作,积累了大量的测试资料,提出了一系列应力强度因子的计算方法和经验断裂判据。

在此基础上,人们开始研究裂纹的存在对于断裂过程的影响,对于断裂物理现象有了较为清晰的认识。同时,线弹性断裂力学在结构工程及其设计上也有成功的应用。

目前,混凝土断裂的研究主要集中在运用非线性模型结合数值分析的方法来更好地逼近混凝土断裂的实际情况。

2.3.2 混凝土材料损伤研究现状^{[2]~[6]}

混凝土材料在材料的完好性方面存在着先天不足,在成型期,混凝土内部就存在着一些初始裂纹,也即初始损伤。这些初始损伤,从较大的尺寸量级(10cm,粗骨料造成的不均匀性)上看,主要在粗骨料和砂浆之间由于沉降和干缩造成的界面裂缝。从相对小一些的尺寸量级(1cm,细骨料造成的不均匀性)上看,主要是砂浆中由于收缩不均匀造成的裂缝,即砂浆裂缝。

1. 混凝土的损伤机制

在外部条件的作用下（荷载、环境），初始裂缝不断扩展、连结，并伴随着新的裂缝生成。因此混凝土的损伤机制，主要是各种微裂缝的形成和扩展，乃至成为宏观裂缝。

关于混凝土的微裂缝扩展机制，说法不一。但是混凝土中的裂纹扩展一般存在如下4个阶段：

①初始微裂纹阶段

构件形成过程中，由于水泥浆硬化干缩，水分蒸发留下裂隙等原因，使构件中预存初始微裂纹。它们大都是界面裂纹，极少量为砂浆裂纹。

②裂纹起裂阶段

在较低的工作应力（约为材料强度的40~50%）情况下，构件内部的某些位置会由于应力集中，致使相应的初始裂纹延伸或扩展，应力集中随之缓解。如果荷载不再增加，将不会产生新裂纹，卸载时少量裂纹还可以闭合。这一阶段应力—应变关系为线性的。

③裂纹的稳定扩展阶段

当初始裂纹起裂后，如继续加载，并使荷载维持在长期破坏的临界应力水平时（一般为材料强度的70~80%），裂纹将继续扩展。有的伸入砂浆，有的互相结合形成大裂纹，同时有新裂纹生成，如果停止加载，裂纹扩展将趋于停止。这一阶段的应力—应变是非线性的。

④裂纹的不稳定扩展阶段

当荷载超过临界应力时，裂纹将急剧扩展，即使荷载维持不变，裂纹也将失稳扩展，造成破坏。

2. 损伤的观察和测量

混凝土的损伤可以通过声发射法、超声波探测法、电测法、激光散斑法、和切片法等方法进行测量。测得的损伤可以作为混凝土损伤本构模型的依据。

3. 混凝土损伤本构关系的模拟

目前，有许多种混凝土损伤本构关系用于模拟混凝土的损伤。在混凝土损伤模拟时一般均忽略一些次要因素，以使本构关系简化。概况起来，目前对于混凝土损伤的本构模拟有：①弹性损伤模拟；②弹塑性损伤模拟；③黏塑性损伤模拟和④局部损伤、软化模拟等模拟方法。它们从不同的角度对混凝土的损伤进行了描述和模拟，为结构计算奠定了基础。

4. 混凝土结构分析

损伤模型在混凝土结构工程分析中曾经有过成功的先例，得出了与实际比较吻合的结论。

尽管目前关于混凝土损伤的研究很多，但是由于混凝土材料组成的不均匀