



高等学校“十二五”精品规划教材

高等钢筋混凝土结构学

主 编 宋玉普



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校“十二五”精品规划教材

高等钢筋混凝土结构学

主 编 宋玉普



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共 12 章。主要内容为钢筋混凝土结构的计算理论, 钢筋混凝土结构可靠度设计理论, 混凝土的本构关系和破坏准则, 钢筋混凝土结构有限元分析, 正截面承载力计算, 斜截面受剪承载力计算, 扭曲截面承载力计算, 钢筋混凝土结构的裂缝控制, 预应力混凝土结构, 钢筋混凝土构件的延性与抗震, 混凝土结构的疲劳, 新材料、新结构和新试验技术。

本书为高等学校土木、水利、交通、海洋等学科的硕士研究生、博士研究生的专业技术教材或教学参考书, 同时也可供从事钢筋混凝土结构的科学研究者和设计、施工及管理人员参考应用。

图书在版编目 (C I P) 数据

高等钢筋混凝土结构学 / 宋玉普主编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2013. 1
高等学校“十二五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-0533-9

I. ①高… II. ①宋… III. ①钢筋混凝土结构—高等
学校—教材 IV. ①TU375

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第008830号

书 名	高等学校“十二五”精品规划教材 高等钢筋混凝土结构学
作 者	主编 宋玉普
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 25.5 印张 605 千字
版 次	2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	49.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

高等钢筋混凝土结构学是土木、水利、交通、海洋等学科硕士和博士研究生重要的专业课，是培养研究生掌握本学科坚实宽广的基础理论、系统深入的专业知识的重要课程。

近年来随着科学技术的进步，钢筋混凝土结构在新材料、新结构、新的计算理论和新的试验技术方面均有很大的发展，各国混凝土结构设计规范和规程均在已有科研成果的基础上，并考虑了上述发展，相继进行了修编，以反映这些科研成果和发展的内容。特别我国针对9.11事件和汶川地震开展的防连续倒塌设计和保证地震时框架结构强柱弱梁实现的研究成果及复杂结构二维和三维有限元分析的内容不仅写入了混凝土结构设计规范，更丰富了高等钢筋混凝土结构学的内容。本次编写注意到了上述发展，使内容更加丰富，体系更加完整。

本教材第一版于1999年由中国电力出版社出版，后经修改于2005年由机械工业出版社出版。本次由中国水利水电出版社组织的高等钢筋混凝土结构学的编写，由于本人年纪已大，并因前两版的许多编者已退休，所以本次编写人员变动较大，且由多个有关院校的教师参加，这便于吸取各校的教学经验，这些编者均是高等钢筋混凝土结构学教学第一线的教师，很多同志均参加了混凝土结构设计规范和水工混凝土结构设计规范的编写工作，具有丰富的教学和工程实践经验。主编宋玉普教授一直从事钢筋混凝土结构学的教学和科研工作，主编和协助主编编写了多本钢筋混凝土教材。我深信该教材的出版对我国土木、水利、交通、海洋等有关学科研究生教育和教学质量的提高及人才培养必将产生积极作用。

中国工程院院士

赵国藩

2012年3月

前言

本书是为高等学校土木、水利、交通、海洋等学科方向的硕士研究生、博士研究生编写的专业教材。书稿内容反映了当前国内外高等钢筋混凝土结构学的水平。书中对本科已讲授过的内容尽量不重复，但特别重要的内容除外。另外采用比较的方法将我国规范和收集到的国外规范进行了比较，以便全面掌握各国规范的特点，适于承接国外工程。

本书共 12 章：第 1 章钢筋混凝土结构的计算理论，简要地介绍了混凝土结构的耐久性、混凝土断裂力学、混凝土损伤力学等新理论，介绍了既有结构的鉴定和加固，防连续倒塌设计。第 2 章钢筋混凝土结构可靠度设计理论，介绍了结构分析中的不确定性，结构设计中的变量，结构极限状态和极限状态方程，结构可靠性和可靠度，结构可靠度的计算，极限状态设计。第 3 章混凝土的本构关系和破坏准则，介绍了目前国内外比较成熟的应用较广的静动态混凝土破坏准则和本构关系。这些模型可用于钢筋混凝土结构的非线性设计和分析中。第 4 章钢筋混凝土结构有限元分析，介绍了钢筋混凝土结构的有限元模型，混凝土裂缝的模拟，钢筋和混凝土之间的粘结与滑移，钢筋混凝土结构与时间有关的效应，钢筋混凝土结构非线性有限元分析过程，常用商业有限元软件简介，钢筋混凝土结构有限元分析的工程应用。第 5 章正截面承载力计算，回顾了正截面承载力计算方法的发展，介绍了受弯构件和偏心受压构件正截面承载力的计算方法，最小配筋率和最大配筋率，二阶效应的计算方法，双向偏心受压构件正截面承载力计算方法。第 6 章斜截面受剪承载力计算，介绍了斜截面破坏形态和影响斜截面承载力的因素，斜截面受剪性能分析，有腹筋梁的受剪承载力计算，深受弯构件受剪性能和受剪承载力，双向受剪性能和受剪承载力，双向受剪承载力计算的讨论。第 7 章扭曲截面承载力计算，介绍了平衡扭转与协调扭转，纯扭构件的破坏形态及计算理论，纯扭构件按我国规范的配筋计算方法，弯剪扭构件的破坏类型及计算理论，弯剪扭构件按我国规范的配筋计算方法，最后对受扭承载力和计算方法进行了讨论。第 8 章钢筋混凝土结构的裂缝控制，介绍了裂缝的成因及防治措施，裂缝开展宽度计算理论及计算公式，裂缝控制方法，混凝土温度裂缝的机理及

特点,收缩裂缝的机理及控制。第9章预应力混凝土结构,介绍了无粘结部分预应力混凝土结构,超静定预应力混凝土结构,横张预应力混凝土结构和缓粘结预应力混凝土结构。第10章钢筋混凝土构件的延性与抗震,介绍了抗震设计中的材料性能,构件和结构的延性,低周反复荷载作用下构件的性能。第11章混凝土结构的疲劳,介绍了混凝土受弯构件正截面疲劳承载力验算,混凝土受弯构件斜截面疲劳承载力验算,并给出了计算例题。第12章新材料、新结构和新试验技术,介绍了高性能混凝土、自密实混凝土、纤维混凝土、防辐射重混凝土和补偿混凝土等新材料,高强高性能混凝土结构、钢纤维混凝土结构、钢—混凝土组合结构等新结构,光纤光栅技术、声发射技术、CT层析扫描技术、雷达测缝技术等新试验技术。

本教材第1、3、9、11章由大连理工大学宋玉普编写,第2章由大连理工大学贡金鑫编写,第4、8章由河海大学吴胜兴编写,第5章由武汉大学侯建国编写,第6、7章由天津大学王铁成编写,第10章由大连理工大学车轶编写,第12章由大连理工大学王立成编写。全书由大连理工大学宋玉普主编。

本教材的编写受到本教材的顾问——赵国藩院士的指导,特在此表示衷心的感谢。对于书中存在的缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

2012年9月

目录

序	
前言	
第 1 章 钢筋混凝土结构的计算理论	1
1.1 混凝土结构耐久性	1
1.2 混凝土断裂力学	3
1.3 混凝土损伤力学	6
1.4 既有结构的鉴定与加固	9
1.5 防混凝土结构连续倒塌设计	11
参考文献	12
第 2 章 钢筋混凝土结构可靠度设计理论	15
2.1 结构分析中的不确定性	15
2.2 结构设计中的变量	17
2.3 结构极限状态	18
2.4 极限状态方程	19
2.5 结构可靠性和可靠度	20
2.6 结构可靠度的计算	24
2.7 极限状态设计	35
参考文献	39
第 3 章 混凝土的本构关系和破坏准则	41
3.1 二向应力状态下混凝土的破坏形态和破坏准则	41
3.2 二向应力状态下混凝土的变形和本构关系	44
3.3 三向应力状态下混凝土的破坏形态和破坏准则	49
3.4 三向应力状态下混凝土的变形和本构关系	59
参考文献	81
第 4 章 钢筋混凝土结构有限元分析	84
4.1 概述	84
4.2 钢筋混凝土结构的有限元模型	85
4.3 混凝土裂缝的模拟	90

4.4	钢筋和混凝土之间的粘结与滑移	94
4.5	钢筋混凝土结构与时间有关的效应	96
4.6	钢筋混凝土结构非线性有限元分析过程	100
4.7	常用商业有限元软件简介	106
	参考文献	119
第5章	正截面承载力计算	120
5.1	正截面承载力计算方法的发展	120
5.2	正截面承载力的计算方法	121
5.3	受弯构件正截面受弯承载力计算	132
5.4	偏心受压构件正截面受压承载力计算	139
5.5	双向偏心受压构件正截面受压承载力计算	155
	参考文献	159
第6章	斜截面受剪承载力计算	161
6.1	斜截面破坏和承载力	161
6.2	斜截面受剪性能分析	171
6.3	受剪机理和受力模型分析	174
6.4	有腹筋梁的受剪承载力计算	179
6.5	深受弯构件受剪性能和受剪承载力	181
6.6	双向受剪性能和受剪承载力	188
	参考文献	192
第7章	扭曲截面承载力计算	194
7.1	平衡扭转与协调扭转	194
7.2	纯扭构件的破坏形态及计算理论	195
7.3	纯扭构件按 GB 50010—2010 的配筋计算方法	199
7.4	弯剪扭构件的破坏类型及计算理论	203
7.5	弯剪扭构件按 GB 50010—2010 的配筋计算方法	209
7.6	问题讨论	216
	参考文献	220
第8章	钢筋混凝土结构的裂缝控制	222
8.1	概述	222
8.2	裂缝的成因分析及防治措施	222
8.3	裂缝开展宽度计算理论及计算公式	224
8.4	裂缝控制的方法	228
8.5	混凝土温度裂缝的机理及特点	238
8.6	收缩裂缝的机理及控制	243
	参考文献	247

第 9 章 预应力混凝土结构	248
9.1 概述	248
9.2 无粘结部分预应力混凝土结构	249
9.3 超静定预应力混凝土结构	256
9.4 横张预应力混凝土结构	271
9.5 缓粘结预应力混凝土结构	286
参考文献	293
第 10 章 钢筋混凝土构件的延性与抗震	295
10.1 概述	295
10.2 材料性能	295
10.3 构件和结构的延性	303
10.4 低周反复荷载作用下构件的性能	316
参考文献	331
第 11 章 混凝土结构的疲劳	333
11.1 概述	333
11.2 混凝土受弯构件正截面疲劳承载力验算	334
11.3 混凝土受弯构件斜截面疲劳承载力验算	353
11.4 计算例题	363
参考文献	364
第 12 章 新材料、新结构和新试验技术	366
12.1 混凝土新材料	366
12.2 新型混凝土结构	370
12.3 新试验技术	391
参考文献	396

第 1 章 钢筋混凝土结构的计算理论

近年来钢筋混凝土结构已有长足的发展，突出特点是在新材料、新结构、新的计算理论和新的试验技术等方面均有深入地研究和应用。

在新材料方面，已应用的有高性能混凝土、纤维增强混凝土、轻集料混凝土、碾压混凝土、泵送混凝土、免振混凝土、水下浇注混凝土、压浆混凝土、膨胀混凝土、聚合物混凝土等。

在新结构方面，已应用的有钢—混凝土混合结构、钢—混凝土组合结构、无粘结预应力混凝土结构、体外预应力混凝土结构、横张预应力混凝土结构、缓粘结预应力混凝土结构、预弯型钢预应力梁等。

在新的计算理论方面，已应用的有工程结构可靠度、钢筋混凝土有限元、混凝土结构耐久性、混凝土断裂力学、混凝土损伤力学等。

在新的试验技术方面，已应用的有混凝土雷达、混凝土 TV 测量、混凝土光纤测量、混凝土多轴试验等。

同时各国混凝土结构设计规范随上述的发展也相继修改，一些新的修改内容也充实到高等钢筋混凝土结构学中。以后各章将分别介绍这些内容，本章重点介绍后面章节没有介绍的新的计算理论和既有结构的鉴定和加固及防混凝土结构连续倒塌设计。

1.1 混凝土结构耐久性

1.1.1 混凝土结构耐久性的定义

混凝土结构耐久性可定义为，结构在规定的使用年限内，在设计确定的各种环境条件作用和维修、使用条件下，不需要额外的费用加固处理而保持其安全性和正常使用性的能力^[1]。

“CEB—FIP 模式规范（混凝土结构 1991）”中的耐久性设计原则是“混凝土结构应以这样方式设计、施工和使用，即在预定的环境影响下，混凝土结构在讲明或不讲明的时期内，保持其安全性、正常使用性和可接受的外观，不需要为维护 and 修理花费意想不到的高额费用^[2]”。

目前耐久性的设计已逐渐从以往的定性化设计转向量化设计^[3-10]。

1.1.2 影响混凝土结构耐久性的因素

影响混凝土结构耐久性的材料本身内在机理是混凝土材料成分与气体、水化学反应中溶解物有害物质在混凝土孔隙和裂缝中的迁移，迁移过程导致混凝土产生物理和化学方面的劣化和钢筋锈蚀的劣化，其结果将使结构承载力下降、刚度降低、开裂及外观损伤，影响结构的使用效果。混凝土材料本身导致劣化的内在因素有含碱度过低，氯离子含量过

高、有碱活性骨料、盐类结晶等。

影响水、气、溶解物在孔隙中迁移速度、范围和结果的内在条件是混凝土的孔结构和裂缝形态；影响迁移的外部因素是结构设计所选用的结构形式和构造（如保护层厚度、结构缝形式、洞口配筋等）、混凝土和钢筋材料的性质和质量（如水泥品种、骨料级配及质量、外加剂品种和质量）、施工操作质量的优劣（如水灰比过大、单方水泥用量过大、过早拆模、浇捣不密实等）、温湿养护条件（如养护不当等）和使用环境（如气候条件异常、自然环境恶劣、地基土有侵蚀性物质等）。

钢筋锈蚀是造成混凝土结构耐久性劣化的最重要的因素。钢筋的锈蚀是电化学反应过程。正常情况下，由于水泥在水化过程中生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 而使混凝土孔隙水显碱性，pH 值较高。在这种情况下，钢筋表面形成一层很薄的氧化膜，即钝化膜。这层钝化膜对钢筋起到保护作用，防止钢筋锈蚀。钝化膜在下面情况下可能遭到破坏：一是保护层混凝土碳化；二是氯化物渗透到钢筋表面。混凝土碳化是指大气中的二氧化碳，通过孔隙进入混凝土内部与混凝土内的氢氧化钙发生反应，生成弱碱性的碳酸钙，即



化学反应的结果降低了混凝土的碱性，pH 值降低（pH 值小于 9），当碳化层发展到钢筋表面，钝化膜将遭到破坏，钢筋发生电化学腐蚀。混凝土的碳化速度取决于混凝土的质量，混凝土的密实性好，抗渗性好则碳化的速度低。由于 CO_2 不溶于水，所以完全水饱和的混凝土是不易碳化的。混凝土本身的抗碳化能力反映了它对钢筋的保护性能。氯化物中的氯离子是破坏钢筋钝化膜作用最强的，且对钝化膜产生局部性破坏，使钢筋表面产生点状腐蚀。因此对混凝土中氯化物的含量应严格加以限制。

1.1.3 混凝土结构耐久性的应用

混凝土结构耐久性的应用包括：在役结构的耐久性评估和剩余寿命的预测；拟建结构的耐久性设计和提高结构耐久性的技术措施等。

1.1.3.1 在役结构的耐久性评估和剩余寿命的预测

混凝土构件耐久性能的检测，包括外观损伤检测，环境条件的调查及一些物理参数的测定。如对混凝土碳化深度的测定，可以采用 1% 浓度的酒精酚酞化学试剂，根据反应的颜色可以区分 pH 值为 9 的界线，还可以采用酸碱混合指示剂，根据反应的不同颜色判别不同的 pH 值测试出碳化影响的深度。

如检测钢筋的锈蚀，可以采用半电池电位及电阻测量钢筋的锈蚀程度。按“半电池电位测量钢筋”（ASTM 876—83），当钢筋自然电位在 $-200 \sim -300\text{mV}$ 时，将有 50% 腐蚀可能性。也可用测量混凝土电阻率来评判，混凝土电阻率为 $5000 \sim 12000\Omega$ ，则有腐蚀可能。

剩余使用寿命预测的目的，在于确定继续实用的可靠性和决策必要的维修加固方法。为预测剩余寿命需要了解结构体系合理性，混凝土结构损害状况，判断劣化程度及其进一步劣化的趋势、荷载有无超载及未来荷载情况。根据耐久性损伤现状、构件实际剩余的面积和材料的实测强度及其锚固性能退化程度，再进一步对构件实际承载能力进行校验。对整个结构剩余使用寿命的预测，除依据主要承重构件评估外，还要考虑到地基基础及结构构件连接的可靠性对使用寿命的影响。

1.1.3.2 拟建结构的耐久性设计

混凝土结构应根据设计使用年限和环境类别进行耐久性设计。耐久性设计包括下列内容：

- (1) 确定结构所处的环境类别。
- (2) 提出对混凝土材料的耐久性基本要求。
- (3) 确定构件中钢筋的混凝土保护层厚度。
- (4) 不同环境条件下的耐久性技术措施。
- (5) 提出结构使用阶段的检测与维护要求。

1.1.3.3 提高混凝土结构耐久性的技术措施

提高混凝土结构耐久性的技术措施包括：在设计阶段要正确选择水泥品种、骨料种类和规格，控制水灰比，合理采用高效减水剂、引气剂等外加剂，以求制作出有良好的密实性、抗渗性和抗冻性的混凝土，确保有足够的混凝土保护层厚度和合理的结构构造措施，以防建成后的结构物受到不必要的污染和雨淋、渗水、冲刷、磨损，这有利于阻止有害物质的渗入和抵抗钢筋的锈蚀；在施工阶段要严格控制用水量、充分振捣和认真养护，防止过早拆模引起混凝土强度不足的变化和开裂。除此之外，还可采取特殊措施预防混凝土结构的劣化或提高耐久性，如采用预应力工艺，采用环氧涂层钢筋、不锈钢的钢材，在混凝土表面涂防护层保护，在混凝土中掺入钢筋阻锈剂或采用阴极保护法、电化学脱盐法、电化学再碱化法改善混凝土的耐久性。

1.2 混凝土断裂力学

自1920年Griffith提出断裂力学的概念以来^[11]，有关水泥和混凝土断裂的研究报告很多^[12-22]，但是断裂力学原理真正应用于这些材料，仍然存在很多争论。下面仅介绍一些基本原则。

1.2.1 裂纹类型

1. 按裂纹的几何特征分类（图1-1）

(1) 穿透（或贯穿）裂纹。裂纹沿构件整个厚度贯通 [图1-1(a)]，根据裂纹在构件中的位置又分为中间裂纹和边裂纹。

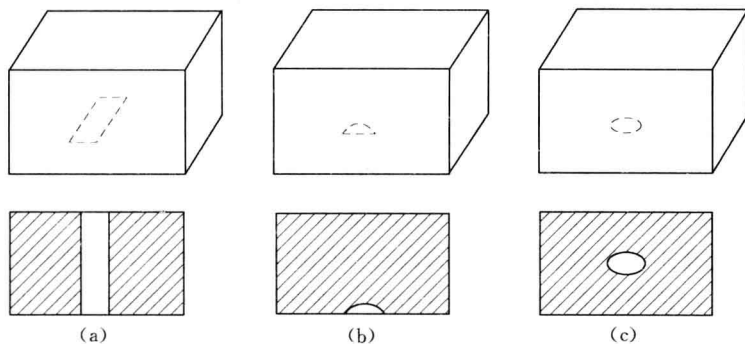


图1-1 裂纹类型——按裂纹的几何特征分类

(2) 表面裂纹 [图 1-1 (b)]。深度和长度皆处于构件表面处的裂纹，常简化为半椭圆形裂纹。

(3) 深埋裂纹 [图 1-1 (c)]。完全处于构件内部的裂纹，常简化为片状圆形或片状椭圆形裂纹。

实际构件中所包含的各种形状的片状裂纹和非片状缺陷，都可酌情简化为上面三种裂纹中的一种。

2. 按裂纹的受力和断裂特征分类 (图 1-2)

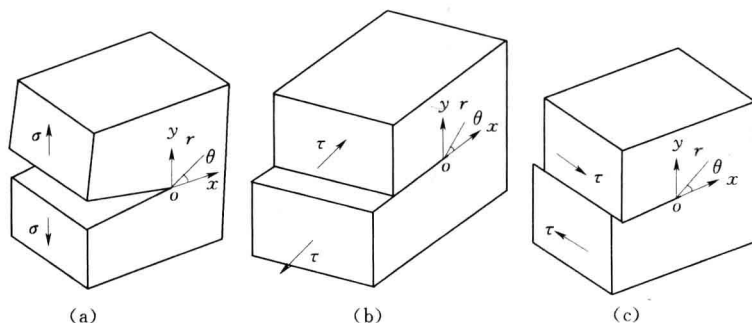


图 1-2 裂纹类型——按裂纹的受力和断裂特征分类

(a) 张开型裂纹；(b) 滑开型裂纹；(c) 撕开型裂纹

(a) 张开型 (I 型) 裂纹——外加拉应力垂直于裂纹面，在外力作用下裂纹张开扩展，裂纹扩展的方向是沿着原裂纹方向 (x 轴方向)。

(b) 滑开型 (II 型) 裂纹——在平行于裂纹方向作用着剪切应力，裂纹滑开扩展，裂纹扩展是在与原裂纹方向 (x 轴方向) 成某一角度的方向上。又称为平面内剪切型裂纹。

(c) 撕开型 (III 型) 裂纹——作用着使上、下裂纹面错开的剪切应力，发生平面位移，裂纹扩展方向是沿着原裂纹方向。又称为出平面剪切型裂纹。

上述三种裂纹类型中，I 型裂纹较 II 型或 III 型更为常见又更为危险。

如果裂纹体上同时作用着拉力和剪切应力或拉应力与裂纹线不垂直，裂纹成为同时存在 I 型和 II 型 (或 III 型)，称为复合型裂纹。

实际裂纹有许多是复合型裂纹，但从安全和方便考虑，有时把复合型裂纹当作 I 型裂纹来处理。

1.2.2 混凝土断裂参数的测试方法

目前测试混凝土断裂韧性 K_{IC} 和断裂能 G 的方法主要有：单边缺口梁 3 点或 4 点弯曲、双边缺口梁 3 点弯曲、紧凑拉伸、楔入劈拉、双悬臂梁、双扭曲、有中心缝的径向压缩、有中心缝的受拉伸板、棱柱体的斜缝受压等。

选定的试件尺寸，与裂缝尖端前面的微开裂区比较必须很大。该裂缝尖端前面微开裂区尺寸可能很宽广，估计值范围从 30~500mm。此外，各种试验已经证明，只有在裂缝从 75mm 扩大到 1000mm 的范围以后，才能测出正确的断裂参数，该裂缝范围取决于研究情况。Walsh 认为：混凝土梁试件的最小高度应为 230mm^[23,24]。Carpinteri 根据他的试

验,认为:可以应用线弹性断裂力学的缺口敏感的混凝土梁,要求最小高度约为650mm^[25]。Bazant提出:梁的最小高度应是微开裂区尺寸的100倍,或者大约是最大骨料粒径的500倍,这样对于20mm的骨料,由此得出梁的最小高度为10m^[26]。由此可见,关于选用多大尺寸试件,各研究者的结论差别很大。

1.2.3 断裂力学的基本理论

断裂力学的基本理论分线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。

线弹性断裂力学的基本理论是能量平衡、转变关系和从应力场分布两个方面建立起来的,前者为Griffith理论(又称能量释放率准则,简称 G 准则),后者为Irwin理论(又称应力强度因子理论,简称 K 准则)。其中 K 准则应用方便,得到更多采用。线弹性断裂准则是脆性断裂准则,只适用于断裂前裂纹尖端几乎没有塑性变形区的理想脆性材料(玻璃、陶瓷等)和仅有很小塑性变形区的所谓小范围屈服材料(混凝土等)。

弹塑性断裂力学的基本理论是 J 为积分、 R 为曲线分析、裂缝张开位移(COD)和“虚”裂缝模型(FCM)。但是 J_c 值的可变性很大,且与裂缝长度无关^[27]; R 为曲线是否真正与试件几何条件和试验条件无关,仍然没有取得一致的结论;后两者比较适于混凝土,特别是“虚”裂缝模型最适于数字计算。

1.2.4 断裂判据

1.2.4.1 K 准则

对于荷载作用下的含裂纹构件,当其应力强度因子 K 达到某一临界值 K_c 时,断裂就会发生,以I型裂纹为例,断裂准则可以表达为

$$K_I = K_{Ic} \quad (1-1)$$

式中 K_I ——应力强度因子,其大小反映了裂纹尖端附近应力场的强度;

K_{Ic} ——材料抵抗宏观裂纹失稳扩展的韧性参数,称为断裂韧度,是材料本身的物理属性,应由实验定出。

对于某种材料来说,该参量是与裂纹几何特征类型、构件形状、荷载类型、裂纹长度等因素无关的参数。

1.2.4.2 G 准则

G 准则即当裂纹扩展所释放出来的变形能等于或大于裂纹扩展所需要的能量时,裂纹将失稳扩展,以I型裂纹为例,断裂准则可以表达为

$$G_I = G_{Ic} \quad (1-2)$$

式中 G_I ——I型裂纹扩展单位长度(厚度为单位厚)所释放出来的能量,称为裂纹扩展能量释放率, N/m;

G_{Ic} ——I型裂纹扩展单位长度弹性系统所需消耗的能量,称为临界裂纹扩展能量释放率, N/m。

下面从含裂纹体在裂纹失稳扩展一瞬间前后的能量转化平衡来得到断裂发生时应满足的关系式。

设有一厚度为 B 的裂纹体,其裂纹长度为 a ,若其裂纹长度扩展了 da ,则在此过程中荷载的外力功为 dW ,体系弹性应变能变化了 dU ,形成裂纹新表面需要的表面能增量为 $d\Gamma$ 以及需要消耗的塑性功为 dP (对理想脆性材料 $dP=0$,对金属材料 $dP \gg d\Gamma$, $d\Gamma$

可略去不计), 假设过程为绝热、静载过程, 不考虑热量变化和惯性力, 则根据能量转化守恒定律, 外力功等于体系内能, 有

$$dW = dU + d\Gamma + dP \quad (1-3)$$

或

$$dW - dU = d\Gamma + dP \quad (1-4)$$

上式的右端 $d\Gamma + dP$ 项是裂纹扩展 da 过程中所需消耗的能量, 也即是阻止裂纹扩展的能量, 它的大小是由材料本身的韧性好坏来决定。上式的左端 $dW - dU$ (引入总势能 Π , $\Pi = U - W$ 则 $-d\Pi = dW - dU$) 表示裂纹扩展 da 时系统释放出来的能量, 提供来作为驱动裂纹扩展的主动动力。定义裂纹扩展单位长度 (厚度为单位厚) 所释放出来的能量为裂纹扩展能量释放率 (或称作裂纹扩展力), 记为 G , 则有

$$G = -\frac{\partial \Pi}{B \partial a} = \frac{\partial W}{B \partial a} - \frac{\partial U}{B \partial a} \quad (1-5)$$

而裂纹扩展单位长度弹性系统所需消耗的能量称为临界裂纹扩展能量释放率或裂纹扩展阻力, 记为 G_c 或 R , 则有

$$G_c = \frac{\partial \Gamma}{B \partial a} + \frac{\partial P}{B \partial a} \quad (1-6)$$

从而由式 (1-4) 所表达的裂纹扩展条件可写成

$$G = G_c \quad (1-7)$$

对 I 型裂纹, 可写成

$$G_I = G_{Ic} \quad (1-8)$$

这就是从能量分析出发得到的评定裂纹扩展的准则, 称作 G 准则。 G_{Ic} 同 K_{Ic} 一样, 是材料常数, 与裂纹长度无关, 由试验测定。两者之间存在确定的关系, 如对于 I 型裂纹平面应变状态:

$$G_I = \frac{1 - \nu^2}{E} K_I^2 \quad (1-9)$$

$$G_{Ic} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_{Ic}^2 \quad (1-10)$$

1.3 混凝土损伤力学

断裂力学主要研究裂纹尖端附近的应力场和应变场、能量释放率, 以建立宏观裂纹起裂、裂纹的稳定扩展和失稳扩展的判据。但是断裂力学无法分析宏观裂纹出现以前材料中的微缺陷或微裂纹的形成及其发展对材料力学性能的影响, 而且许多微缺陷的存在并不都能简化为宏观裂纹, 这是断裂力学的局限性。损伤理论旨在建立受损材料的本构关系、解释材料的破坏机理、建立损伤的演变方程、计算构件的损伤程度, 从而达到预估其剩余寿命的目的。损伤力学是经典的固体力学理论的发展^[28-34]。下面仅介绍损伤力学的基本概念。

1.3.1 损伤变量的定义

从热力学的观点看, 损伤变量是一种内部状态变量, 它能反映物质结构的不可逆变化

过程。在不同的情况下, 可将损伤变量定义为标量、矢量或张量。

1.3.1.1 有效应力的概念

一初始无损伤的杆, 假设该杆受 F 力到一定大小后产生均匀的损伤, 若杆的初始横截面面积为 A , 受损后其损伤面积 (包括微裂纹和空隙) 为 A^* , 则杆的净面积或有效面积为 $\tilde{A} = A - A^*$ 。在均匀损伤状态下, 损伤变量取为标量。卡钱诺夫在研究金属的蠕变断裂时, 第一次提出用连续性变量 D 描述材料的损伤状态, 定义 D 为^[28]

$$D = \frac{\tilde{A}}{A} \quad (1-11)$$

拉博诺夫在研究金属蠕变时引入了一个与连续性变量相对应的变量 D , 称为损伤变量^[29]

$$D = \frac{A^*}{A} = \frac{A - \tilde{A}}{A} \quad (1-12)$$

式中 $D=0$, 对应于无损伤状态;

$D=1$, 对应于完全损伤 (断裂) 状态;

$0 < D < 1$, 对应于不同程度的损伤状态。

令 $\sigma = F/A$ 为横截面上的名义应力; $\tilde{\sigma} = F/\tilde{A}$ 为净截面或有效截面上的应力, 称为净应力或有效应力, 则利用式 (1-12), 并由

$$\sigma A = \tilde{\sigma} \tilde{A} \quad (1-13)$$

得

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (1-14)$$

当材料发生非均匀损伤时, 可在物体内一点处取一体元, 用相似的方法仍可得到式 (1-14)。

1.3.1.2 应变等价原理

在受损材料中, 测定有效面积是比较困难的, 为了能间接地测定损伤, 勒梅特提出了应变等价原理^[30]。这一假设认为, 应力 σ 作用在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变等价。根据这一原理, 受损材料的本构关系通过无损材料中的名义应力得到, 即

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (1-15)$$

或

$$\sigma = E(1-D)\epsilon \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表示一维问题中受损材料的本构关系。

1.3.1.3 有效应力张量

在多轴应力作用下, 如认为损伤是各向同性的, 则可将单轴应力下的有效应力推广表示为张量, 即

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (1-17)$$

式中 $\tilde{\sigma}$ ——考奇应力张量。

损伤理论比较适用于分析混凝土的开裂, 因为: ①混凝土的开裂过程 (即损伤发展过

程)是连续的,并且在很小的应力或应变下即发生裂缝;②裂缝扩展方向几乎和最大主应力方向垂直;③可以将载荷作用以前的缺陷(微裂缝或微空隙)作为初始损伤处理。

1.3.2 损伤的分类

损伤与材料的变形往往是不可分割的,按材料变形的性质和状况,可将损伤分为如下几类。

1. 弹性损伤

弹性材料中由应力的作用而导致的损伤。材料发生损伤后,没有明显的不可逆变形,所以又称为脆弹性损伤。如强度高韧性低的金属和合金、高强度混凝土、陶瓷和岩石等材料中产生的损伤。

2. 弹塑性损伤

弹塑性材料中由应力的作用而引起的损伤。材料损伤时,同时产生残余变形。室温或较高温度下,金属塑性大变形中的损伤就属于这类损伤,故又称为延性塑性损伤。如强度较低但韧性很好的金属材料、中强度的混凝土、复合材料、高分子材料等常用的工程材料中出现的损伤。

3. 蠕变损伤

材料在蠕变过程中产生的损伤,有时也称为粘塑性损伤。在给定的温度(中温或高温)下,这类损伤是时间的函数。如金属材料在高温或较高温度下蠕变中产生的损伤。对于混凝土这类材料,即使在常温下,恒定的应力也会引起蠕变(或称徐变)而产生损伤。

4. 疲劳损伤

这类损伤由应力的重复而引起,并为其循环次数的函数。根据应力水平的不同,又可分为低周疲劳损伤和高周疲劳损伤。因为高周疲劳过程中有不可逆的微塑性应变,故又称为微观塑性损伤。

5. 剥落损伤

由冲击载荷或高速载荷产生的弹性损伤和弹塑性损伤,又称为动力损伤。

此外,还有由腐蚀引起的损伤,蠕变—疲劳损伤以及由中子线、 α 线、核分裂的照射而引起的损伤等。

1.3.3 损伤力学的研究方法

物体内存在的损伤(微缺陷),可以理解为一种连续的场变量,它和应力场、应变场以及温度场的概念类似。所以在分析时首先应在物体内某点处选取“体积元”,并假定该体积元内的应力、应变以及损伤都是均匀分布的。这样就能在连续介质力学的框架内对损伤及其对材料力学性能的影响作系统的处理。其过程一般可分为以下四个阶段:

(1) 选择合适的损伤变量。描述材料中损伤状态的场变量称为损伤变量,它属于本构理论中的内部状态变量。

(2) 建立损伤演变方程。材料内部的损伤是随外界因素(如载荷、温度变化及腐蚀等)作用的变化而变化的。为了描述损伤的发展,需要建立描述损伤发展的方程,即损伤演变方程。

(3) 建立考虑材料损伤的本构关系。这种包含了损伤变量的本构关系,即损伤本构关系或损伤本构方程。