



高等院校土木工程

研究生教学用书

钢筋混凝土抗震结构 非线性分析

张新培 编著

02



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校土木工程研究生教学用书

钢筋混凝土抗震结构非线性分析

张新培 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了钢筋混凝土抗震结构非线性地震反应分析的基本理论与方法,以及国内外的最新研究与应用成果。主要内容有:循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料与构件性能,钢筋混凝土结构与构件恢复力模型,钢筋混凝土抗震结构确定性时程分析,钢筋混凝土抗震结构静力弹塑性分析(Push-over 分析),钢筋混凝土抗震结构随机时程分析等。

本书可供土木、工程力学等专业的研究生及本科生以及土木工程领域从事研究、设计等工作的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土抗震结构非线性分析/张新培编著. —北京:科学出版社, 2003

(高等院校土木工程研究生教学用书)

ISBN 7-03-011948-7

I. 钢… II. 张… III. 钢筋混凝土结构:抗震结构-结构分析-高等学校-教材 IV. TU375.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067708 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

西源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年9月第一次印刷 印张:8

印数:1—4 000 字数:146 000

定价:17.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

“小震不坏、中震可修、大震不倒”是国际公认的抗震结构设计准则。要保证结构“中震可修、大震不倒”，须对抗震结构进行非线性地震反应分析。随着基于性能的抗震结构设计理论的发展，钢筋混凝土抗震结构的非线性地震反应分析也日趋必要与重要。考虑到我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001)已将动力时程分析与静力弹塑性分析(Push-over 分析)作为抗震结构非线性地震反应分析的两个主要方法纳入规范，故学习掌握钢筋混凝土抗震结构静、动力非线性分析的理论与方法对广大工程技术人员是十分必要的。为满足广大工程技术人员与高校师生学习掌握钢筋混凝土抗震结构静、动力非线性分析方法的需要，特编著本书。

本书共分五章。第一章介绍循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料与构件性能；第二章介绍钢筋混凝土结构与构件的恢复力模型；第三章介绍钢筋混凝土结构非线性地震响应的确定性时程分析；第四章介绍钢筋混凝土结构非线性地震响应的静力弹塑性分析；第五章介绍钢筋混凝土抗震结构随机时程分析。

本书插图由研究生任志国、李剑群描绘，在此谨向他们致以深切谢意。

限于作者水平，书中难免有错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 循环反复荷载作用下钢筋混凝土材料及构件性能	1
1-1 基本概念	1
1-2 钢筋混凝土材料性能	3
1-2-1 加载速率对钢筋强度、变形的影响	3
1-2-2 钢筋的应力软化-包辛格效应	4
1-2-3 加载速率对混凝土棱柱体单向抗压性能的影响	4
1-2-4 加载速率对混凝土单向抗拉性能的影响	4
1-2-5 加载速率及循环反复荷载对钢筋与混凝土粘结强度的影响	5
1-3 钢筋混凝土构件与结构的延性	6
1-3-1 构件与结构延性的描述	6
1-3-2 钢筋混凝土构件延性比的计算	8
1-3-3 单调侧向荷载作用下钢筋混凝土结构延性比的计算	12
1-4 钢筋混凝土构件单轴滞回性能	13
1-4-1 滞回曲线概念	13
1-4-2 钢筋混凝土梁单轴滞回性能	14
1-4-3 钢筋混凝土柱单轴滞回性能	14
1-4-4 钢筋混凝土受扭构件单轴滞回性能	18
1-4-5 钢筋混凝土梁、柱节点单轴滞回性能	20
1-4-6 钢筋混凝土剪力墙单轴滞回性能	21
1-4-7 钢筋与混凝土的粘结-滑移单轴滞回性能	21
第二章 钢筋混凝土构件与结构的恢复力模型	23
2-1 单轴恢复力曲线模型	23
2-1-1 刚度退化二线型模型	23
2-1-2 刚度退化三线型模型	27
2-1-3 钢筋混凝土构件恢复力曲线模型特征参数	30
2-1-4 钢筋混凝土结构层恢复力曲线模型特征参数	32

2-2 双轴弯曲恢复力模型	36
第三章 钢筋混凝土结构非线性地震响应的确定性时程分析	43
3-1 结构地震动方程的建立	43
3-1-1 结构的离散化方法	43
3-1-2 建立结构动力平衡方程的基本方法	45
3-1-3 结构地震动方程	46
3-2 结构的刚度矩阵、阻尼矩阵与质量矩阵	47
3-2-1 结构的振动模型	47
3-2-2 结构的刚度矩阵	50
3-2-3 结构的质量矩阵与阻尼矩阵	58
3-3 输入地震波的选择	59
3-3-1 选波原则	59
3-3-2 人工地震波合成原理	60
3-4 地震动方程的直接积分方法	62
3-4-1 线性加速度法	62
3-4-2 Wilson- θ 法	65
3-4-3 Newmark- β 法	68
3-5 恢复力曲线模型拐点处理	70
第四章 钢筋混凝土结构非线性地震响应的静力弹塑性分析	73
4-1 单调加载下混凝土、钢筋强度准则与本构关系	73
4-1-1 混凝土单向受压应力-应变关系	73
4-1-2 混凝土单向受拉应力-应变关系	75
4-1-3 双向受力混凝土强度准则	76
4-1-4 混凝土双向受力应力-应变关系	77
4-1-5 钢筋应力-应变关系	81
4-2 钢筋混凝土抗震结构弹塑性变形分析的 Push-over 算法	82
4-2-1 基本原理	82
4-2-2 水平加载模式	83
4-2-3 求解非线性问题的增量法简介	85
4-3 钢筋混凝土平面框架静力非线性分析	87
4-3-1 简化刚度矩阵法	87
4-3-2 负刚度问题的处理	89

4-4 钢筋混凝土剪力墙结构静力非线性分析	91
4-4-1 钢筋混凝土剪力墙有限元模型	91
4-4-2 单元综合物理矩阵 $[D]$	92
4-4-3 混凝土开裂单元的处理	94
4-4-4 钢筋屈服后的处理	98
第五章 钢筋混凝土抗震结构随机时程分析	99
5-1 结构可靠度的基本概念	99
5-1-1 结构的功能要求	99
5-1-2 结构的功能函数	100
5-1-3 结构的极限状态	100
5-1-4 结构的失效	102
5-1-5 结构的可靠度	102
5-1-6 结构的可靠指标	103
5-1-7 结构的设计验算点	105
5-1-8 随机变量的分布变换	105
5-2 结构可靠度分析的虚拟变量算法	106
5-3 钢筋混凝土抗震结构随机时程算法	112
参考文献	116

第一章 循环反复荷载作用下 钢筋混凝土材料与构件性能

1-1 基本概念

钢筋混凝土材料及构件性能受外部荷载作用类型(如静力荷载、动力荷载、移动荷载等)的影响。为研究不同的外部荷载作用下钢筋混凝土材料及构件性能,已提出了三种基本加载方式:单调加载、重复加载与循环反复加载。单调加载主要用来研究钢筋混凝土材料与构件承受静载作用的性能。重复加载主要用来研究钢筋混凝土材料与构件承受车辆等移动荷载作用的抗疲劳性能。循环反复加载则主要用来研究钢筋混凝土材料与构件承受地震作用的抗震性能。

逐级增加荷载的一次加载称为单调加载。图 1-1 所示为单调加载下单向受压混凝土及单向受拉软钢的力-变形曲线。

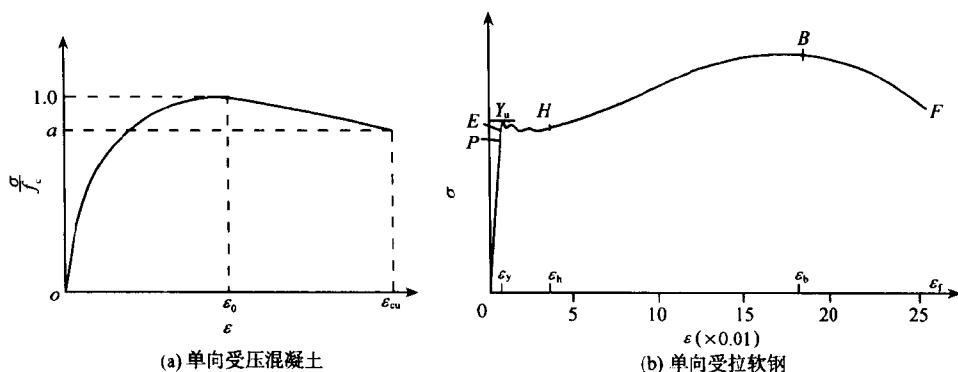


图 1-1 单调加载下混凝土与软钢的力-变形曲线

简单的加载→卸载→再加载称为重复加载。图 1-2 所示为重复加载下单向受压混凝土及单向受拉软钢的力-变形曲线。

遵循正向加载→卸载→反向加载→反向卸载→再正向加载等循环反复路径的加载称为循环反复加载。图 1-3 所示为循环反复加载下单轴受力钢筋混凝土柱的力-变形曲线。

循环反复加载下钢筋混凝土材料及构件存在强度退化、刚度退化、裂面效应等特殊问题。

在循环反复荷载作用下,若保持峰点位移不变,则峰值荷载随循环次数的增加

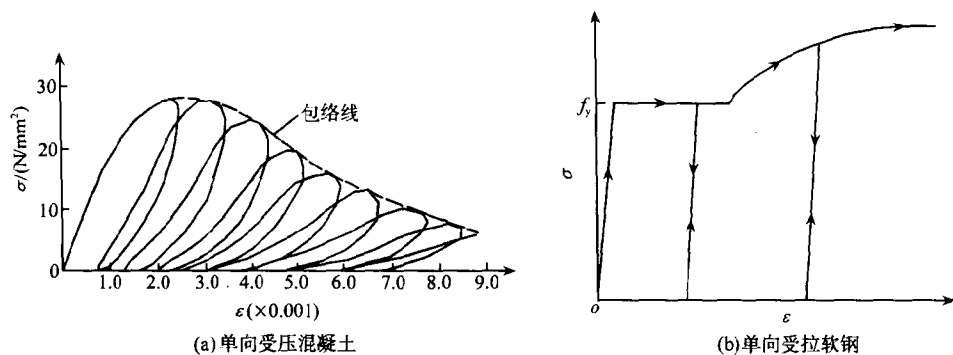


图 1-2 重复加载下混凝土与软钢的力-变形曲线

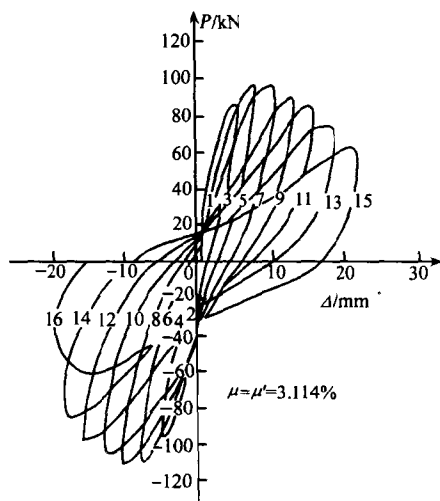


图 1-3 循环反复加载下单轴受力
钢筋混凝土柱的力-变形曲线

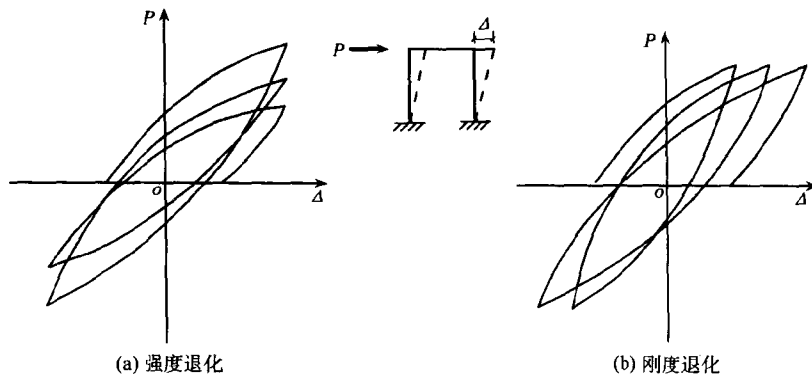


图 1-4 强度与刚度退化

而下降的现象称为强度退化,如图 1-4(a)所示。

在循环反复荷载作用下,若保持峰值荷载不变,则峰点位移随循环次数的增加而增加的现象称为刚度退化,如图 1-4(b)所示。

退化性质源于累积损伤。退化程度随材料及破坏性质而变。一般而言,混凝土的退化情况较钢材严重。脆性破坏时的退化性状较延性破坏时显著。

混凝土开裂面重新受压时,由于骨料咬合作用导致裂缝在完全闭合前就已传递较大压力的现象称为裂面效应。通常裂缝越宽,裂面效应越显著。

1-2 钢筋混凝土材料性能

1-2-1 加载速率对钢筋强度、变形的影响

试验表明,随加载速率的提高钢筋屈服强度上升,其弹性模量及塑性性能(如屈服台阶长短、极限延伸率等)则变化不大,极限强度有微小提高。屈服强度低的钢筋随加载速率的提高屈服强度增加较显著,而屈服强度高的钢筋随加载速率的提高屈服强度的增加则较前者低。图 1-5 所示为加载速率对钢筋强度与变形的影响。图 1-6 所示为加载速率对不同屈服强度钢筋的影响。图 1-5 中, t_s 表示从开始加载到钢筋屈服的时间。图 1-6 中, K_c 表示不同加载速度时钢筋屈服强度与标准静载下钢筋屈服强度之比。

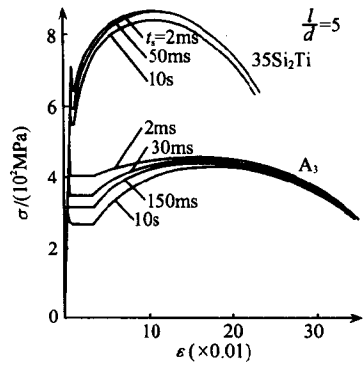


图 1-5 加载速率的影响

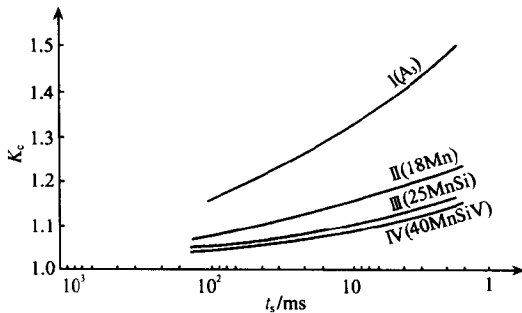


图 1-6 加载速率对不同屈服强度钢筋的影响

1-2-2 钢筋的应力软化-包辛格效应

受循环反复荷载作用的钢材屈服后反向加载时屈服强度明显降低的现象称为包辛格(Bauschinger)效应。图 1-7 所示为单轴反复拉、压荷载作用下钢材应力-应变曲线。由图 1-7 知,若应力超过弹性变形 A 到 B 时卸载,卸载曲线平行于 oA 线。再反向加载时,达 C 点即发生塑性变形。此时的弹性极限较单调加载的弹性极限低,反映了在循环反复荷载作用下钢材出现应力软化现象。

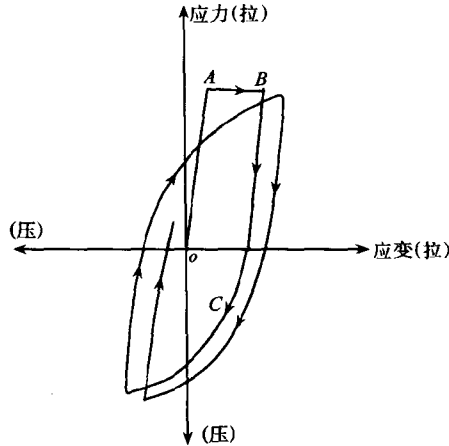


图 1-7 反复拉、压荷载下钢材应力-应变曲线

1-2-3 加载速率对混凝土棱柱体单向抗压性能的影响

试验表明,随加载速率的提高,混凝土棱柱体单向抗压强度、峰值应变及弹性模量均单调上升。加载速率每加大 10 倍,抗压强度约上升 10%,峰值应变增幅则不超过 10%。弹性模量增幅大于峰值应变增幅,但小于抗压强度增幅。图 1-8 所示为不同加载速率混凝土棱柱体受压应力-应变曲线。图 1-8 中, t_c 表示开始受力到达最大应力的加载时间。由图 1-8 知,加载速率对应力-应变曲线形状无明显影响。图 1-9 表示加载速率对 C25~C40 混凝土抗压(拉)强度的影响。图 1-9 中, K_c 表示快速加载下混凝土强度与其静载强度之比, t_m 表示加载速度。

1-2-4 加载速率对混凝土单向抗拉性能的影响

随加载速率提高,混凝土单向抗拉性能变化规律类似于混凝土单向抗压性能变化规律。与抗压强度相比较,抗拉强度提高的幅度更大,如图 1-9 所示。 t_m 由 100ms 提高到 10ms,抗拉 K_c 由 1.2 上升到 1.45。对抗压, t_m 由 400ms 提高到 3ms,其 K_c 仅由 1.1 提高到 1.3。另外,抗拉峰值应变提高的幅度与抗压相近。抗拉弹性模量提高幅度则稍小于抗压。

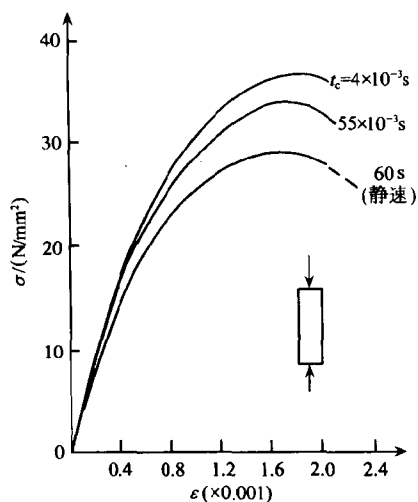


图 1-8 不同加载速率混凝土受压应力-应变曲线

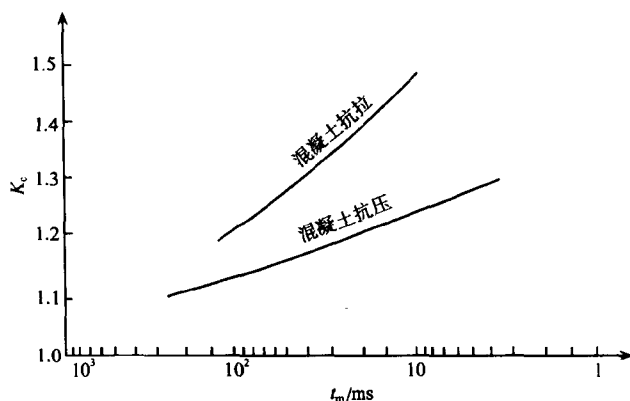


图 1-9 加载速率对 C25~C40 混凝土抗压(拉)强度的影响

1-2-5 加载速率及循环反复荷载对钢筋与混凝土粘结强度的影响

1. 加载速率的影响

试验表明,加载速率对单向受力钢筋与混凝土粘结强度的影响与钢筋外形特征有关。加载速率对光圆钢筋粘结强度影响甚微,可忽略不计。对变形钢筋粘结强度的影响较大且与混凝土强度等级有关。一般而言,随加载速率提高,变形钢筋与混凝土粘结强度上升且其增幅大于钢筋强度增幅。

2. 循环反复荷载影响

试验表明,循环反复荷载作用下单轴受力钢筋与混凝土粘结强度较单调加载单向受力时,钢筋与混凝土粘结强度显著较低。对给定滑动振幅的循环反复加载,粘结强度降低程度与给定的滑动振幅、循环次数等因素有关。给定的滑动振幅越大,循环反复加载的粘结强度较单调加载下降越多。根据文献[6],若给定的滑动振幅分别为 $\pm 0.1\text{mm}$ 及 $\pm 0.5\text{mm}$,则经过10次循环反复加载后,钢筋与混凝土粘结强度分别仅为单调加载粘结强度的55%与35%。且在10次循环反复加载中,粘结强度降低程度呈前高后低特点。在前3个循环中,粘结强度降低显著。在后续循环加载中,粘结强度降低程度渐次减小。

1-3 钢筋混凝土构件与结构的延性

1-3-1 构件与结构延性的描述

良好的延性有助于减小地震作用,吸收与耗散地震能量,避免结构倒塌。由此引出钢筋混凝土构件与结构的延性问题。

破坏前无明显预兆,力-变形曲线达最大承载力后突然下跌形成明显尖峰的构件(结构)称为脆性构件(结构),如图1-10所示。

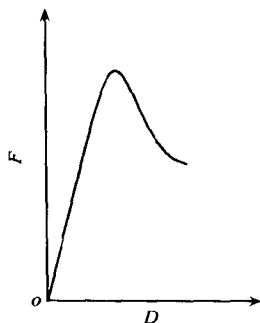


图 1-10 脆性构件(结构)
力-变形曲线

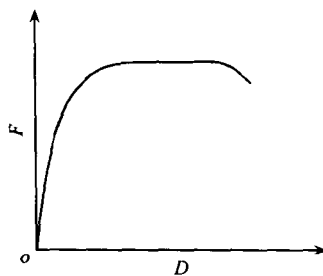


图 1-11 延性构件(结构)
力-变形曲线

破坏前有明显预兆,力-变形曲线在最大承载力附近存在可观的平台,能承受较大变形而承载力无显著降低的构件(结构)称为延性构件(结构),如图1-11所示。

构件与结构的延性通常采用延性比 β_d 来度量, β_d 可表示为

$$\beta_d = \frac{D_u}{D_y} \quad (1-1)$$

式中: D_u ——构件(结构)保持承载力情况下的极限变形;

D_y ——构件(结构)初始屈服变形。

构件(结构)存在多种力-变形曲线。如对梁,其力-变形曲线可为荷载-跨中挠度曲线、荷载-支座转角曲线、截面的弯矩-曲率曲线等。对柱,其力-变形曲线可为轴力-变形曲线(轴压柱)、轴力-中点侧移曲线(偏压柱),截面弯矩-曲率曲线(偏压柱)等。对钢筋混凝土抗震结构,其力-变形曲线可为基底剪力-顶点侧移曲线、层间剪力-层间侧移曲线等。故相对应, β_d 可为构件截面曲率延性比、构件挠度延性比、构件转角延性比、结构的顶点侧移延性比与层间侧移延性比等。

根据式(1-1),要确定 β_d ,须先已知 D_u 、 D_y 。若构件(结构)存在如图 1-12 所示理想的力-变形曲线,则 D_u 、 D_y 的准确确定无任何困难。但事实上,钢筋混凝土构件(结构)不存在如图 1-12 所示有明确的 Y、U 点的理想力-变形曲线。图 1-13 所示为钢筋混凝土受弯构件截面弯矩-曲率($M-\phi$)曲线。如在虚线范围内目估取值确定 D_y 、 D_u ,则所得截面曲率延性比 β_d 将产生较大误差。这即产生 D_y 、 D_u 的确定问题。

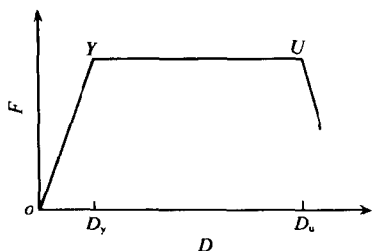


图 1-12 理想 $F-D$ 曲线

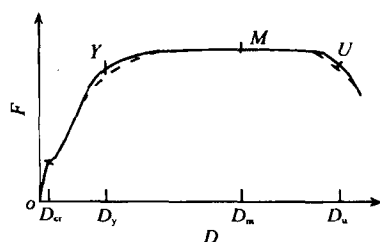


图 1-13 受弯构件截面 $M-\phi$ 曲线

确定 D_y 的常用方法有三种:一是能量等值法;二是几何作图法;三是变形变化率法。能量等值法采用折线 $oY-YU$ 来代替原 $F-D$ 曲线。折线的确定原则为 $oY-YU$ 线所围面积与原 $F-D$ 曲线所围面积相等或面积 oAB 与面积 BYU 相等,如图 1-14 所示。

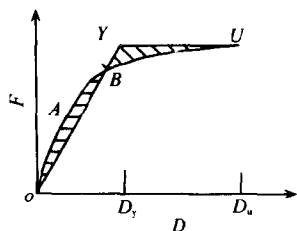


图 1-14 能量等值

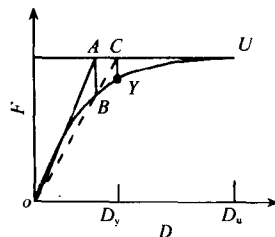


图 1-15 几何作图

几何作图法的具体作法是:作直线 oA 与 $F-D$ 曲线初始段相切;过 U 点作水平线与 oA 线相交于 A ;作垂线 AB 与曲线 $F-D$ 相交于 B 点;作 oB 线与水平线相交于 C 点;由 C 点作垂线与 $F-D$ 曲线的交点即 Y 点,如图 1-15 所示。

变形变化率法则取变形对荷载的变化率发生突变的点为屈服点。

D_u 的确定方法有两种：一是取最大承载力的 0.85 倍所对应点为 U 点；二是取混凝土达极限压应变值 $\epsilon_u = 3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ 所对应点为 U 点。

1-3-2 钢筋混凝土构件延性比的计算

1. 单调荷载作用下单向受力构件截面曲率延性比计算

单调荷载作用下单向受力构件截面曲率延性比计算的基本作法可表示为：

- 1) 确定构件截面弯矩-曲率关系曲线。
- 2) 按 1-3-1 节所述方法确定 D_y 、 D_u 。
- 3) 采用式(1-1)确定构件截面曲率延性比。

显然,构件截面弯矩-曲率关系曲线的确定是关键。以下介绍其确定方法。

(1) 基本假定

- 1) 已知钢筋与混凝土的单向受力应力-应变关系。
- 2) 截面应变线性分布,变形后截面仍保持平面。不考虑钢筋与混凝土的相对滑移。
- 3) 不考虑拉区混凝土作用和构件剪切变形影响。
- 4) 不考虑混凝土收缩、徐变影响。

(2) 基本原理

由构件中取一带裂缝单元为脱离体,如图 1-16 所示。单元曲率可表示为

$$\phi = \frac{\epsilon_{cm}}{kh_0} = \frac{\epsilon_s}{(1-k)h_0} = \frac{\epsilon_{cm} + \epsilon_s}{h_0} \quad (1-2)$$

式中： h_0 ——截面有效高度；

k ——受压区高度系数；

ϵ_s ——钢筋应变；

ϵ_{cm} ——受压区边缘混凝土应变。

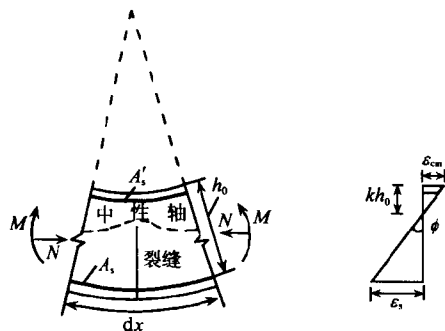


图 1-16 构件单元受力变形简图

取如图 1-17 所示截面计算简图。沿截面将压区混凝土划分成 m 条平行于中性轴的条带。对截面形心轴取矩,根据平衡条件可列出下述平衡方程:

$$N = \sum_{j=1}^m \sigma_{cj} A_{cj} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \quad (1-3a)$$

$$M = \sum_{j=1}^m \sigma_{cj} A_{cj} \left(\frac{h}{2} - h_{cj} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \left(\frac{h}{2} - h_{si} \right) \quad (1-3b)$$

式中: A_{si} ——第 i 层钢筋截面积;

A_{cj} ——受压区第 j 条混凝土条带面积;

h_{cj} ——受压区第 j 条混凝土条带中心至受压区边缘距离;

h_{si} ——第 i 层钢筋至受压区边缘距离;

σ_{si} ——第 i 层钢筋应力;

σ_{cj} ——第 j 条混凝土条带应力。

符号规定拉应力为负,压应力为正。

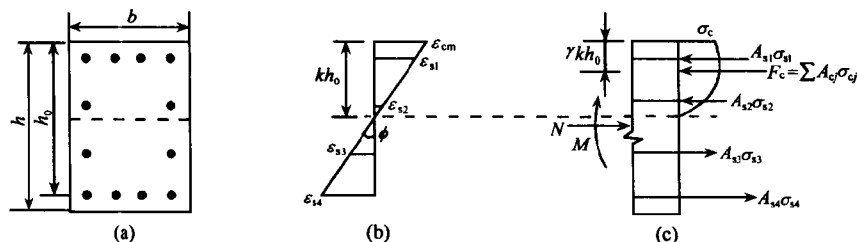


图 1-17 截面计算简图

取钢筋与混凝土单向受力应力-应变曲线如图 1-18 所示。

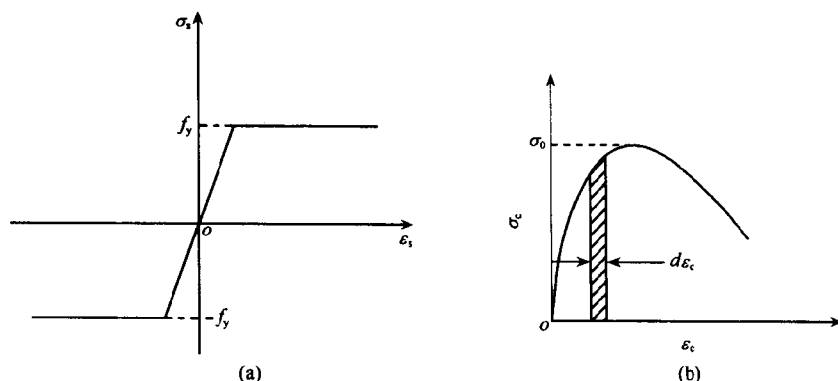


图 1-18 钢筋与混凝土的应力-应变曲线

由图 1-17(b)及图 1-18(b)有

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{cj} &= \frac{\epsilon_{cm}(kh_0 - h_{cj})}{kh_0} \\ \sigma_{cj} &= f(\epsilon_{cj}) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

由图 1-17(b)及图 1-18(a),有

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{si} &= \frac{\epsilon_{cm}(kh_0 - h_{si})}{kh_0} \\ \sigma_{si} &= \begin{cases} E_s \epsilon_{si} & (\epsilon_{si} < \frac{f_y}{E_s}) \\ f_y & (\epsilon_{si} \geq \frac{f_y}{E_s}) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

(3) 计算步骤

- 1) 设定构件截面及所受轴力 N 、几何参数、配筋参数、材料应力-应变曲线。
- 2) 设定 ϵ_{cm} 。由零开始,逐级上升,每次增加一适当的增量值。
- 3) 确定 kh_0 。根据所设定 ϵ_{cm} ,假定中性轴的高度 kh_0 。由式(1-4)和式(1-5)确定各混凝土条带及钢筋的应力。检查是否满足平衡方程式(1-3a)。逐次试算直至找到满足式(1-3a)的 kh_0 值。
- 4) 由平衡方程式(1-3b)确定弯矩 M 。
- 5) 由式(1-2)确定曲率 ϕ 。
- 6) 逐级增加 ϵ_{cm} 值并按步骤 3)~5) 计算相应的 M 、 ϕ 值直至 ϵ_{cm} 达混凝土极限压应变 ϵ_{cu} 。若不考虑箍筋约束作用, ϵ_{cu} 一般可取 $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ 。由此,即可确定一条 N - M - ϕ 关系曲线。
- 7) 改变轴力 N ,采用步骤 1)~6),即可确定出不同的 N - M - ϕ 关系曲线。

2. 单调荷载作用下单向受力构件挠度延性比、转角延性比计算

计算构件挠度延性比、转角延性比的基本作法可表示为:

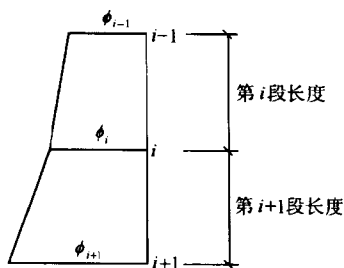


图 1-19 曲率分布

1) 将构件划分成 m 小段。每段长度根据计算精度要求定,一般可取为 $0.5h_0$ 。假定截面曲率沿每段长度线性变化,如图 1-19 所示。

2) 确定构件第 i 截面 ($i=1, \dots, m+1$) 的弯矩-曲率关系曲线。

3) 确定构件在各级荷载作用下的弯矩图。

4) 确定各级荷载作用下构件第 i 截面 ($i=1, \dots, m+1$) 的曲率值。利用各级荷载作用下的弯矩图以及第 i 截面的弯矩-曲率关系曲线即可容易

确定。

5) 确定各级荷载作用下构件的挠度或转角。形成构件的荷载-挠度(转角)关