钢筋混凝土柱二阶弹塑性计算方法研究

陈 旭
周东华 著

科学出版社

钢筋混凝土柱二阶弹塑性计算方法研究

陈　旭　周东华　著

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书内容涉及钢筋混凝土截面和构件的承载力计算，在截面层次考虑材料非线性，在构件层次考虑材料和几何的双重非线性。通常此类计算只能借助计算机进行数值迭代计算，而本书则是用解析的方法进行推导，无须迭代便得到一些非常实用的计算结果，如“环形截面配筋计算表”、“圆形截面的计算图表”和考虑二阶效应的钢筋混凝土柱配筋计算的“手算设计的诺模图”等。这些图表均为无量纲形式，利用图表便能解决相关的计算问题，既新颖又实用。书中内容是在混凝土结构设计理论的解析计算方面做出的一些努力和尝试，可为其今后的发展提供一些参考和借鉴。

本书可供从事钢筋混凝土结构设计、施工等工作的工程技术人员使用，也可作为研究人员及高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 CIP 数据

钢筋混凝土柱二阶弹塑性计算方法研究 / 陈旭，周东华著. —北京：科学出版社，2017.3

ISBN 978-7-03-051924-5

Ⅰ.①钢… Ⅱ.①陈… ②周… Ⅲ.①钢筋混凝土柱-二阶-弹塑性-计算方法-研究 Ⅳ.①TU375.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 039876 号

责任编辑：杨向萍 张晓娟 / 责任校对：桂伟利

责任印制：张 伟 / 封面设计：左 讯

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

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本：720×1000 B5

2017 年 3 月第一次印刷 印张：10 1/2

字数：211 000

定价：68.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

随着混凝土结构的高度和高宽比的增加，结构的重量也在增加，而横向刚度则在相对减弱，导致横向变形增大。在横向变形产生的同时，结构上的重力荷载位置随之发生了移动，由此会产生附加内力和附加变形，使结构的内力和变形增大，即产生了二阶效应。二阶效应使结构的内力增大，即导致结构的承载力降低；同时，使结构的变形增大，即导致结构的刚度降低。工程设计中二阶效应多为有限元软件计算，为整体分析，材料为弹性，计算的附加变形偏小。若要考虑材料非线性，如混凝土开裂和受压的非线性本构关系、钢筋的屈服等，计算将极为耗时，常会出现迭代收敛困难，以致难以准确捕捉结构真实的极限承载力。所以，同时考虑双重非线性（二阶的几何非线性和材料非线性），在目前及今后很长一段时间内都难以进入实用阶段。为此，本书尝试以解析的手段来寻求解决此类问题的方法。

20 世纪至今，国内外众多学者对混凝土结构二阶效应展开了大量理论和试验研究，如德国 Quast 教授和重庆大学白绍良教授研究团队。本书对混凝土柱二阶效应计算的解析法和数值法做了一定深度的研究，达到用简单易行的方法和手段来解决柱的强度和稳定承载力计算的目的。全书共 8 章，第 1 章为绪论；第 2～4 章是考虑材料非线性的截面分析，包括截面承载力和反映截面弹塑性关系的轴力、弯矩和曲率分析；第 5～7 章是考虑双重非线性的梁-柱分析；第 8 章为总结。

书中的计算方法采用 Matlab 软件实现，从算法到编程均由作者完成，数据图通过 Origin 软件绘制。计算方法的正确性或可靠性可由计算结果在规律上所反映出的合理性来判断，而且令人惊讶和兴奋的是，本书的计算结果与我国 20 世纪 70 年代以来开展的部分试验结果相当吻合。书中的数据均由计算所得，未作任何修改。2.5 节由周东华教授撰写，其余部分由陈旭撰写，最后由周东华教授统一定稿。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金地区科学基金项目（51668027，51468026，51268022）、昆明学院人才引进计划（YJL16010）的资助，在此表示衷心的感谢！另外，本书在撰写过程中，得到了许多评审专家给出的意见、建议、关心和鼓励，让作者学习、受益和感动，借此表示衷心地感谢！最后，感谢昆明学院城建学院的徐从发书记和莫南明院长等领导给予的殷切关怀和鼓励。

限于时间，本书的内容还不够完善。书中不足之处，恳请读者批评指正。

陈　旭

2017 年 3 月

主要符号

A_s	钢筋的面积
a	混凝土合力至截面上边缘的距离
a_s	纵向钢筋受力点与截面近边缘之间的距离
b	矩形截面的宽度
C_m	等效弯矩系数
c	截距
$d\delta$	挠度偏差
E	钢材的弹性模量
E_s	钢筋的弹性模量
e	混凝土合力至形心轴的距离
e_0	初始偏心距
e_1	一阶偏心距
e_2	二阶偏心距
e_a	附加偏心距
e_{tot}	总偏心距
f_c	混凝土抗压强度设计值
f_y	钢筋抗拉(压)强度设计值
H_w	工字形钢截面的腹板高度
h	矩形截面的高度
h_w	工字形钢截面的无量纲的腹板高度
I	惯性矩
i	节点编号

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

in	跨中的节点编号
k	斜率
k_a，k_d	确定截面混凝土合力位置时引用的参数
k_x	中性轴的位置系数
k'_x	钢截面的纯弯曲受压区高度系数
k_{x1}	钢截面的受压塑性区高度系数
k_{x2}	钢截面的受拉塑性区高度系数
k_{xy}	弹性极限纯弯曲受压区高度系数
k_{xpl}	单侧塑性极限纯弯曲受压区高度系数
k_{xpc}	双侧塑性极限纯弯曲受压区高度系数
l	柱子的长度
l_0	柱子的计算长度
M	弯矩
M_1	一阶弯矩
M_2	二阶弯矩
M_c	混凝土的弯矩
M_s	钢筋的弯矩
M_{tot}	总弯矩
M_u	极限弯矩
M_y	钢截面在纯弯状态下边缘纤维恰好屈服时的截面弯矩
m	无量纲弯矩$\left(m=\dfrac{M}{bh^2 f_c}\right)$
m_1	无量纲的一阶弯矩
m_2	无量纲的二阶弯矩
m_{cr}	无量纲的开裂弯矩
m_{pl}	钢截面的无量纲的单侧塑性极限弯矩
m_{pc}	钢截面的无量纲的双侧塑形极限弯矩

m_{tot}	无量纲的总弯矩
m_u	无量纲的极限弯矩
m_y	无量纲的屈服弯矩
N	轴力
N_c	混凝土的轴力
N_s	钢筋的轴力
N_E	柱子的弹性屈曲荷载
N_u	极限轴力
N_y	钢截面轴压屈服时的轴力
n	无量纲轴力/轴拉比/轴压比$\left(n=\frac{N}{bhf_c}\right)$
n_y	轴压应变为$-\varepsilon_y$时的无量纲的截面合力
n_c, n_{c1}, n_{c2}	混凝土的无量纲的合力
n_s	钢筋混凝土截面下部钢筋的无量纲的合力
n_{sl}	钢筋混凝土截面上部钢筋的无量纲的合力
R_0	旋转点
r	圆形截面的半径
r_s	圆形截面等效钢环的半径
r_ϕ	曲率半径
T	工字形钢截面的翼缘宽度
T_w	工字形钢截面的腹板宽度
t	工字形钢截面的无量纲的翼缘宽度
t_w	工字形钢截面的无量纲的腹板宽度
U	钢筋混凝土截面的弯矩-曲率关系曲线上的极值点
u	杆件的特征系数
x_c	混凝土受压区高度
$\bar{x}$	局部坐标

Y	挠度
y	无量纲的挠度
Z	长度坐标
z	无量纲的长度坐标
α_c，α_d	确定截面混凝土合力时引用的参数
Δ	加载间隔
ΔZ	分段的间隔
ε	应变
ε_0	轴心抗压极限应变设计值
ε_c	混凝土截面的上边缘应变
ε_{cl}	混凝土截面的下边缘应变
ε_{cu}	混凝土截面极限压应变设计值
ε_r	距离截面下边缘 $\frac{20}{33}h$ 位置的混凝土应变
ε_s	钢筋混凝土截面的下部钢筋应变
ε_{sl}	钢筋混凝土截面的上部钢筋应变
ε_y	钢筋屈服应变设计值
ε_c	钢截面的受压区应变
ε_t	钢截面的受拉区应变
η_{ns}	弯矩扩大系数
θ	转角
λ	长细比
μ	计算长度系数
μ_ϕ	曲率延性系数
ζ_c	曲率修正系数
ρ	配筋率
σ	应力

σ_c	混凝土的应力
σ_s	钢筋混凝土截面的下部钢筋应力
σ_{sl}	钢筋混凝土截面的上部钢筋应力
Φ	曲率
ϕ	无量纲曲率($\phi=h\Phi$)
ϕ_c	柱子跨中截面的无量纲的曲率
ϕ_{cr}	无量纲的开裂曲率
ϕ_{max}	无量纲的曲率最大值
ϕ_{pl}	钢截面的无量纲的单侧塑性极限曲率
ϕ_{pc}	钢截面的无量纲的双侧塑形极限曲率
ϕ_u	无量纲的极限曲率
ϕ_y	无量纲的屈服曲率
φ	稳定系数
ω	截面的强度配筋率$\left(\omega=\dfrac{A_s f_y}{bh f_c}\right)$

目　录

前言
主要符号
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　混凝土结构的二阶分析 …… 1
1.1.1　结构的稳定问题 …… 1
1.1.2　稳定的含义 …… 2
1.1.3　二阶效应的概念 …… 2
1.1.4　二阶效应的分类 …… 3
1.1.5　主要计算方法 …… 4
1.2　混凝土柱的二阶分析 …… 6
1.2.1　柱的稳定问题 …… 7
1.2.2　主要计算方法 …… 12
1.2.3　问题的提出 …… 17
1.3　本研究领域的国内外概况 …… 17
1.3.1　钢压杆二阶分析的历史概要 …… 17
1.3.2　混凝土结构的二阶弹塑性分析 …… 18
1.3.3　小结 …… 20
1.4　本书的主要内容 …… 21
参考文献 …… 24
第 2 章　混凝土截面承载力的逆算方法 …… 28
2.1　概述 …… 28
2.2　计算的依据 …… 29
2.2.1　基本假定 …… 29
2.2.2　本构关系 …… 29
2.2.3　应变之间的换算关系 …… 30
2.2.4　应变和曲率之间的关系 …… 31
2.2.5　中性轴位置与截面的受力状态 …… 32
2.2.6　极限状态可能的应变分布 …… 32
2.3　任意截面轴力-弯矩关系的数值计算 …… 34
2.3.1　计算思路 …… 34

2.3.2 计算过程 …… 35
2.4 矩形截面的数值计算 …… 36
2.4.1 计算简图 …… 36
2.4.2 计算公式 …… 36
2.4.3 算例 …… 37
2.4.4 无量纲的轴力-弯矩相关曲线 …… 38
2.5 圆形和环形纯弯截面的解析计算 …… 39
2.5.1 计算方法和公式 …… 39
2.5.2 算例 …… 51
2.5.3 小结 …… 53
2.6 圆形压弯截面的数值计算 …… 53
2.6.1 计算简图 …… 54
2.6.2 应变-应力的计算公式 …… 55
2.6.3 轴力-弯矩的计算公式 …… 55
2.6.4 算例 …… 56
2.6.5 与规范方法的对比 …… 57
2.6.6 与试验结果的对比 …… 57
2.6.7 计算图表 …… 59
2.7 本章小结 …… 62
参考文献 …… 62
第 3 章 钢截面弯矩-曲率关系的解析法 …… 64
3.1 概述 …… 64
3.2 矩形钢截面的经典解法 …… 65
3.2.1 钢的弹塑性本构关系 …… 65
3.2.2 纯弯受力的矩形钢截面 …… 65
3.2.3 压弯受力的矩形钢截面 …… 66
3.3 矩形钢截面的解析法 …… 67
3.3.1 弹性区的计算 …… 67
3.3.2 单侧塑性区的计算 …… 68
3.3.3 双侧塑性区的计算 …… 69
3.3.4 轴力不变的弯矩-曲率关系 …… 69
3.3.5 极限状态的解析式 …… 70
3.3.6 可能的应变变化区域 …… 71
3.4 工字形钢截面的解析法 …… 72
3.4.1 计算方法 …… 72

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

3.4.2　分力的计算 …… 74
3.4.3　极限状态的解析式 …… 76
3.5　矩形和工字形截面的算例 …… 77
3.5.1　轴力不变的弯矩-曲率关系 …… 77
3.5.2　轴力-弯矩相关关系 …… 78
3.5.3　曲率不变的轴力-弯矩关系 …… 79
3.5.4　形状系数 …… 80
3.6　本章小结 …… 81
参考文献 …… 81
第4章　混凝土截面弯矩-曲率关系的解析法 …… 83
4.1　概述 …… 83
4.2　可能的应变分布 …… 84
4.3　混凝土抗力的计算系数 …… 85
4.3.1　区域(b)的计算 …… 85
4.3.2　区域(c)的计算 …… 87
4.3.3　与《欧洲规范 2》的结果对比 …… 89
4.4　截面内力计算的解析法 …… 91
4.4.1　区域(a)的计算 …… 91
4.4.2　区域(b)的计算 …… 91
4.4.3　区域(c)的计算 …… 92
4.5　轴力不变的弯矩-曲率关系 …… 92
4.5.1　轴力的取值范围 …… 92
4.5.2　轴心受力状态的应变计算 …… 93
4.5.3　弯矩-曲率关系的计算过程 …… 93
4.6　轴力不变的弯矩-曲率关系 …… 95
4.7　延性系数的计算 …… 96
4.8　曲率不变的轴力-弯矩关系 …… 97
4.9　线性曲率变化的轴力-弯矩关系 …… 99
4.10　本章小结 …… 100
参考文献 …… 101
第5章　混凝土柱二阶弹塑性的改进 Newmark 法 …… 102
5.1　概述 …… 102
5.2　基本微分方程 …… 102
5.3　传统 Newmark 法 …… 104
5.4　数值积分的梯形法 …… 105

5.5　改进 Newmark 法 …… 106
5.5.1　挠度的计算 …… 106
5.5.2　荷载-挠度关系 …… 109
5.5.3　柱的轴力-弯矩相关关系 …… 110
5.6　本章小结 …… 113
参考文献 …… 114
第 6 章　混凝土柱二阶弹塑性的图解分析和计算 …… 115
6.1　概述 …… 115
6.2　弯矩-曲率关系的数值处理 …… 115
6.3　杆件的变形与弯矩 …… 116
6.3.1　柱的一阶弯矩 …… 116
6.3.2　柱的二阶弯矩和总弯矩 …… 116
6.4　图解分析和计算 …… 117
6.4.1　计算思路 …… 117
6.4.2　弯矩-曲率曲线的切线特征 …… 119
6.4.3　荷载-挠度的计算 …… 121
6.4.4　柱的轴力-弯矩相关关系 …… 122
6.5　与试验结果的对比 …… 123
6.6　本章小结 …… 124
参考文献 …… 125
第 7 章　混凝土柱二阶弹塑性的简化计算及手算设计方法 …… 126
7.1　概述 …… 126
7.2　简化计算方法 …… 127
7.2.1　最不利荷载 …… 127
7.2.2　二阶的平衡方程 …… 128
7.3　截面抗力的计算 …… 128
7.4　极限曲率的计算公式 …… 129
7.4.1　两种曲线的定义 …… 129
7.4.2　计算方法 …… 130
7.4.3　曲线Ⅰ和Ⅱ的比较 …… 130
7.4.4　混凝土结构规范的近似模型 …… 131
7.4.5　近似模型 …… 131
7.5　本章简化计算方法与试验结果的对比 …… 132
7.6　三种方法的对比分析 …… 137
7.7　手算设计方法 …… 139

7.7.1　诺模图的构思 …… 139
7.7.2　诺模图的绘制 …… 141
7.7.3　诺模图的应用和对比 …… 142
7.8　本章小结 …… 144
参考文献 …… 144
第 8 章　总结 …… 146

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构的二阶分析

1.1.1 结构的稳定问题

极限承载力是结构设计中所要考虑的重要的极限状态。按照我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)[1],承载能力极限状态可能是由于下列的结构破坏而达到的,包括:结构因超过材料强度而破坏,或者因过度变形而不适于继续承载;整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡;结构转变为机动体系;结构或结构构件丧失稳定;结构因局部破坏而发生连续倒塌。

在承载能力极限状态,这些众多的破坏情况可以归结为材料强度破坏和失稳破坏两个主要类型[2],强度和稳定验算也一直是国内外各大规范的主要内容。通过合理的设计,材料破坏可以是延性的,可以给人们一个足够的逃亡时间。而混凝土结构的失稳破坏,破坏部位往往发生在竖向承重构件上,结构稳定破坏前的变形可能很小。失稳破坏可能是结构几何形状的突然改变,导致结构完全丧失承载能力而整体塌落,因而结构设计中必须避免失稳破坏的发生。

混凝土结构结合了钢(强度高)和混凝土(抗压强度高、价格低、截面可以做得更大、刚度大、稳定性好)两种材料的优点,其稳定破坏问题不像钢结构那么突出。然而当今高强度材料应用更加广泛,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[3](以下简称《混凝土规范》)与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)[4]间很大的差别在于材料的变化,即混凝土强度等级的逐步提升和钢筋高强-高性能的发展趋势。这样柱子可以做得更加细长,细长的柱子还可以满足建筑的审美要求和提高空间利用率的需求。因此,对混凝土结构,尤其是大跨度和高层结构,由稳定条件控制的极限状态也更为常见。

除了单一由失稳引起的结构破坏,很多钢筋混凝土结构倒塌事故往往是多种因素叠加共同作用的结果。例如,结构在风荷载或地震作用下产生水平位移,水平位移又在重力荷载作用下放大,产生附加位移(二阶效应、稳定问题),最终引起结构的失稳、倒塌。1970年,已建成7年的美国弗吉尼亚州塔克高中体育馆突然倒塌,原因是设计时仅进行了稳定分析,而未考虑混凝土徐变对结构稳定的影响[5]。进行结构分析和研究时应尽可能多地考虑各种复杂工况的共同作用,其前提是对

每一种情况都要分析并理解清楚，因此有必要对混凝土结构的稳定问题进行深入分析和研究。

1.1.2 稳定的含义

力学平衡是结构必须遵循的基本准则，稳定是对平衡状态性质的一种描述[6]。通常可以用“稳定”“不稳定”和“随遇”三个词来描述平衡状态。当稳定平衡时，给小球一个扰动，小球能够回到初始位置，并继续保持平衡[图 1.1(a)]；当不稳定平衡时，给小球一个扰动，小球不能够回到初始位置[图 1.1(b)]；当随遇平衡时，给小球一个扰动，小球不能回到初始位置，但仍然保持平衡[图 1.1(c)]。

(a) 稳定平衡　　(b) 不稳定平衡　　(c) 随遇平衡

图 1.1　平衡状态的特性

人们都期望结构的平衡是稳定的，这就需要找到稳定与不稳定的临界点。当结构的荷载作用于这个临界点之内，那么结构保持稳定平衡。对于某些构件(如细长柱)来说，这个临界点就是极限承载力。

1.1.3 二阶效应的概念

通常的强度问题是按照未变形的结构位置建立变形协调方程和平衡方程，也称为一阶分析。稳定分析[7]是按照变形后的结构位置建立变形协调和平衡方程，也称为二阶分析。

对于轴力较小的构件(如梁)或杆长较短的构件(如长细比较小的柱)，其横向挠曲变形对于结构内力的影响可以忽略不计，即以结构未变形的状态来建立平衡方程，由此得到的内力为一阶内力。

在结构变形后的状态基础上建立平衡关系，由此得到的内力为二阶内力，即含有挠曲变形引起的附加内力(附加弯矩和剪力)。短柱的挠曲变形小，由变形引起的附加内力也小，可以忽略不计，但细长柱的挠曲变形大，由变形产生的附加内力不能忽略。由于附加弯矩为挠曲变形和与之相应的轴力之积，而挠曲变形是非线性的，所以附加弯矩也是非线性的，也就是说，荷载与二阶内力呈非线性关系，即常说的二阶效应(second order effects)。

效应是指在荷载、温度等作用下结构的反应，如内力、位移，那么二阶效应指的是按照变形后的体系分析得到的附加反应，如二阶挠度、二阶弯矩。

计算二阶内力的关键是计算二阶挠度，只有少数静定结构在简单荷载作用下才能得到二阶挠度的解析解，通常情况需逐步计算附加挠度的系列增量，将其叠加

后再与一阶挠度相加便得到二阶挠度。二阶挠度(弹性)的计算常常是费时和困难的。若再考虑材料可能出现的非线性而导致结构刚度的改变,二阶挠度的求解就更为困难。

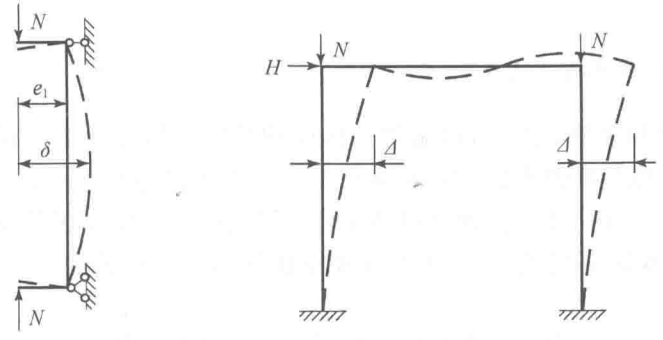
1.1.4 二阶效应的分类

1. *P-δ* 效应

P-δ 效应是竖向荷载对结构产生的额外的局部弯曲变形,也称为挠曲二阶效应。以等偏心受力的两端铰支柱为例,如图 1.2(a)所示。柱在初始弯矩 Ne_1 作用下将产生初始变形,轴力的存在使得变形进一步加大,只要柱的内部抵抗弯矩(抗弯刚度与曲率的乘积)小于弯矩作用,柱的弯曲将不断加大。弯曲的增加会带来两个结果:一是曲率的增加;二是抗弯刚度的减小。两者相乘使得内部抗力增加①。当内部抵抗弯矩等于弯矩作用时,柱处于稳定平衡状态。此时,柱中间截面的总弯矩作用为 $N\delta$,二阶弯矩为 $N\delta - Ne_1$,二阶挠度为 $\delta - e_1$。

2. *P-Δ* 效应

P-Δ 效应是竖向荷载对楼层结构相对侧移产生的附加变形,也称为重力二阶效应,《欧洲混凝土结构设计规范》(EN1992-1-1)(以下简称为《欧洲规范 2》)[8,9]也称为整体二阶效应(global second order effects)。以单层刚架为例[图 1.2(b)],刚架变形的过程与 *P-δ* 效应相似,也是一个位移逐步递增直至最后平衡的过程。但两者存在本质上的差别:*P-δ* 效应仅与轴力 N 有关,而 *P-Δ* 效应是在轴力 N 和水平力 H(风荷载或地震作用)共同作用下产生的。



(a) *P-δ*效应 (b) *P-Δ*效应

图 1.2 两种二阶效应

① 在极限荷载的范围内,增加的曲率和减小的抗弯刚度相乘后得到的内部抗力仍然是增加的。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com