

土 木 工 程 教 材 精 选

高层建筑结构设计和计算

(下册)

Design and Analysis of
Tall-building Structure

包世华 张铜生 编著

Bao Shihua Zhang Tongsheng



清华大学出版社

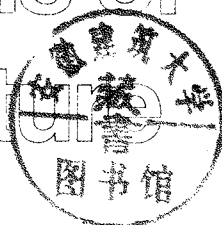


土 木 工 程 教 材 精 选

高层建筑结构设计和计算

(下册)

Design and Analysis of
Tall-building Structure



包世华 张铜生 编著

Bao Shihua Zhang Tongsheng



清华大学出版社

北 京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构设计和计算.下册/包世华,张铜生编著. —北京:清华大学出版社,2007.1

(土木工程教材精选)

ISBN 978-7-302-14105-1

I. 高… II. ①包… ②张… III. ①高层建筑—结构设计 ②高层建筑—建筑结构—计算方法 IV. TU973

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第131769号

责任编辑:徐晓飞 李 嫒

责任校对:焦丽丽

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:203×253 印 张:35.5 字 数:921千字

版 次:2007年1月第1版

印 次:2007年1月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:58.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:
010-62770177 转 3103 产品编号:023765-01



包世华

清华大学土木工程系教授，中国建筑学会高层建筑结构专业委员会委员，中国力学学会《工程力学》编委，北京大学兼职教授。长期从事高层建筑结构、结构力学、弹性力学、有限元、壳体结构和薄壁杆结构等领域的教学和科研工作。所著教材《结构力学》1988年获国家教委全国优秀教材奖，其第二版获1999年国家级科学技术进步奖二等奖和1998年教育部科技进步奖一等奖；《结构力学教程》获1992年国家教委全国优秀教材奖和2002年教育部全国优秀教材一等奖；《高层建筑设计》1987年获建设部优秀教材二等奖。



张铜生

清华大学土木工程系教授，中国力学学会《工程力学》一、二、三届编委。长期从事高层建筑结构、结构力学、弹性力学及有限元等领域的教学和研究工作。编著教材《简明有限元法及其应用》；主持“高层建筑结构空间弹塑性时程分析程序HBTA”研发。

前 言

本书是在作者编著的《高层建筑结构计算》一书的基础上,因建筑结构规范的全面修订及近年来高层建筑结构的新发展而重新编写的,以适应新形势下教学和工程的需要。

全书共 16 章,为了突出基本内容,并贯彻少而精的原则,根据内容和要求的不同分为上、下两册。

上册为基础内容册。全册突出基本概念,注重实用算法,特别是以手算为基础的简便方法,注意不同计算方法之间的差别及内在联系,注意结构受力和变形特性的分析等。上册以最常用的三大结构体系为主,兼及简体,并以混凝土结构为主(对结构体系与布置,各种结构体系的内力和位移计算方法等,所述原则和方法对高层钢结构、钢混结构均适用)。为了突出基本要求,便于初学者掌握,讲解方法力求深入浅出、简明扼要。为了便于教和学,各章增加了例题,并有一个贯彻始终的框-剪结构工程设计实例,各章后附有思考题和习题。供普通高等院校作为教材使用,同时可供初学者作为参考用书。

下册为提高、深入和专题册。围绕底层大空间剪力墙结构的计算,高层建筑结构复杂问题的计算,高层建筑简体结构的计算(续篇),高层建筑结构的有限条分析法,半解析常微分方程求解器方法和有限元线法,高层建筑结构动力特性分析,高层建筑结构地震作用的反应谱分析法,高层建筑结构抗震分析的时程分析法,高层建筑空间弹塑性动力分析程序 HBTA 简介等方面,做了全面、深入的讨论,其中许多是作者近年来的科研成果。可作为大学生、研究生、教师及工程技术人员深入、提高的学习材料及专题参考资料。第 15、16 两章专题性较强,引用文献较多,为了查阅资料方便,单列了参考文献。

本书由包世华、张铜生共同编写。其中第 15、16 章由张铜生编写,其他各章由包世华编写。

书中难免存在不妥之处,欢迎读者批评、指正。

编著者

2004 年 8 月

目 录

前言	I
第 9 章 底层大空间剪力墙结构的计算	1
9.1 底层大空间剪力墙结构的计算图和计算方法	1
9.2 底层为框架的双肢剪力墙	2
9.2.1 双肢墙混合法的基本方程	2
9.2.2 双肢墙基本方程的解	4
9.2.3 双肢墙内力计算	7
9.2.4 双肢墙位移计算	7
9.3 底层为框架的多肢剪力墙	9
9.3.1 多肢墙混合法的基本方程	9
9.3.2 多肢墙基本方程的解	11
9.3.3 多肢墙的内力计算	13
9.3.4 多肢墙的位移计算	14
9.3.5 计算步骤和算例	14
9.4 框支剪力墙和落地剪力墙在水平荷载下的共同工作计算	18
9.4.1 混合法的基本方程	18
9.4.2 基本方程的解	21
9.4.3 内力和位移计算公式	23
9.4.4 计算步骤与算例	26
9.5 框支剪力墙、落地剪力墙和壁式框架在水平荷载下的共同工作计算	31
9.5.1 混合法的基本方程式	31
9.5.2 基本方程的解	36
9.5.3 位移计算公式	37
9.5.4 内力计算公式	39
9.5.5 计算步骤与算例	40
9.6 用分区混合有限元法分析框支剪力墙	46
9.6.1 剪力墙中的应力集中问题	46
9.6.2 计算简图和计算方法	47
9.6.3 I 区应力函数的组成	47
9.6.4 分区混合总能量的表达式	49

IV 高层建筑结构设计和计算(下册)

9.6.5	混合法基本方程	53
9.6.6	算例及结果	54
9.7	用分区混合有限元法分析剪力墙角区应力集中	56
9.7.1	计算简图和计算方法	56
9.7.2	弹性平面切口附近自应力分析	56
9.7.3	分区混合总能量的表达式	60
9.7.4	分区混合有限元法的基本方程	62
9.7.5	算例及结果分析	62
9.7.6	分区混合有限元法小结	68
第 10 章	高层建筑结构复杂问题的计算	70
10.1	框架-剪力墙及框架-剪力墙结构平面为斜向布置时的近似计算	70
10.1.1	主轴方向与刚度中心	70
10.1.2	每榀结构所承受的力和层间位移	73
10.1.3	计算步骤小结	74
10.2	框架-剪力墙-薄壁筒斜交结构的弯扭耦连计算	77
10.2.1	框架-剪力墙-薄壁筒结构	77
10.2.2	基本方程的建立	78
10.2.3	基本方程的解	83
10.2.4	三种典型荷载作用下的计算公式和图表	84
10.2.5	计算步骤与算例	89
10.3	高层建筑框架-剪力墙结构考虑楼板变形和地基变形时的计算	101
10.3.1	关于计算模型和计算工具	101
10.3.2	上部结构的平衡微分方程	102
10.3.3	基础和下部结构的力学性质	104
10.3.4	边界条件和连接条件	105
10.3.5	微分方程组的求解和算例	106
10.4	变截面框架-剪力墙-薄壁筒斜交结构考虑楼板变形时的计算	110
10.4.1	基本假设和计算模型	110
10.4.2	基本平衡微分方程	111
10.4.3	边界条件和连接条件	115
10.5	大底盘多塔楼、大底盘大孔口结构和大底盘多塔楼连体结构的静力分析	118
10.5.1	基本假设和计算模型	118
10.5.2	平衡微分方程	119
10.5.3	大底盘多塔楼的边界条件和连接条件	120
10.5.4	大底盘、大孔口结构的边界条件和连接条件	121
10.5.5	大底盘多塔楼连体结构的边界条件和连接条件	122
10.5.6	算例和讨论	123

第 11 章 高层建筑筒体结构的计算(续篇)	128
11.1 框筒结构在水平荷载下的等代角柱法	128
11.1.1 计算简图和计算方法	128
11.1.2 图表的制作和使用	130
11.1.3 翼缘框架梁弯矩和剪力计算	131
11.1.4 计算步骤与算例	134
11.2 筒中筒结构在水平荷载下的连续体-微分方程法	136
11.2.1 计算简图和计算方法	136
11.2.2 微分方程的建立	136
11.2.3 三种典型荷载作用时的解	138
11.2.4 外框筒的内力计算	142
11.2.5 计算步骤与算例	147
11.3 框筒和筒中筒结构在扭转荷载下的微分方程解法	150
11.3.1 框筒结构在扭转荷载下的计算	150
11.3.2 筒中筒结构在扭转荷载下的计算	153
11.4 变截面筒中筒结构在水平荷载下的计算	155
11.4.1 计算简图与计算方法	155
11.4.2 变截面框筒结构的应力分析	156
11.4.3 变截面框筒结构的侧向位移	161
11.4.4 变截面框筒的柔度矩阵	162
11.4.5 外框筒的内力计算	165
11.4.6 外筒翘曲和筒中筒结构的侧向位移计算	166
11.4.7 计算步骤	167
11.5 变截面筒中筒结构在扭转荷载下的计算	167
11.5.1 计算简图与计算方法	167
11.5.2 变截面框筒的扭转应力分析	168
11.5.3 变截面框筒结构的扭转角	170
11.5.4 变截面框筒的扭转柔度矩阵	172
11.5.5 内筒的扭转柔度矩阵	174
11.5.6 外框筒的内力和位移计算	176
11.5.7 内筒的内力和位移计算	177
11.5.8 计算步骤	178
11.6 多边形筒体结构在水平荷载下的计算	178
11.6.1 基本思路	178
11.6.2 按梁理论求应力	179
11.6.3 自应力状态	180
11.6.4 应变余能驻值条件	185

V 高层建筑结构设计和计算(下册)

11.6.5	驻值方程的解法(一)	186
11.6.6	驻值方程的解法(二)	188
11.6.7	多边形截面筒体的计算	190
11.7	多孔束筒结构在水平荷载下的计算	193
11.7.1	计算筒图和计算方法	193
11.7.2	多孔束筒的应力分析	193
11.7.3	多孔束筒的位移计算	198
11.7.4	算例	200

第12章 高层建筑结构的有限条分析法、半解析常微分方程求解器方法和有限元线法 207

12.1	概述	207
12.2	条元模型和等效连续体的弹性常数	208
12.2.1	框筒条	209
12.2.2	内筒虚条	211
12.2.3	楼盖虚条	211
12.3	条元的位移函数	212
12.3.1	基函数	213
12.3.2	形函数	214
12.4	筒体结构的条元分析	215
12.4.1	筒体结构条元(e)的位移函数	215
12.4.2	条元的刚度方程	217
12.5	筒体结构分析	219
12.5.1	结构坐标系中的条元刚度方程	219
12.5.2	结构的整体刚度方程	220
12.5.3	筒体结构应力和内力计算	221
12.6	对称结构的计算和计算实例	222
12.6.1	对称结构的计算	222
12.6.2	计算实例	223
12.7	高层建筑筒体结构的半解析常微分方程求解器方法	225
12.7.1	方法概述	225
12.7.2	阶形变截面筒体的计算	225
12.7.3	筒中筒结构的计算	229
12.7.4	算例	230
12.8	高层建筑筒体结构的有限元线法	232
12.8.1	计算模型、基本假设和计算方法	232
12.8.2	条单元分析	233
12.8.3	整体分析——基本方程、边界条件和连接条件的建立	236
12.8.4	算例	237

第 13 章 高层建筑结构动力特性分析	239
13.1 动力特性分析概述	239
13.1.1 理论分析法	239
13.1.2 实测和经验公式法	240
13.2 框架结构	240
13.2.1 强梁弱柱型框架	241
13.2.2 强柱弱梁型框架	243
13.2.3 剪切杆法	245
13.3 剪力墙结构和框架-剪力墙共同工作体系	249
13.3.1 剪力墙的计算假定和计算图	249
13.3.2 剪力墙的振动基本方程式及其解	250
13.3.3 框架-剪力墙共同工作体系	252
13.4 框支剪力墙和落地剪力墙共同工作体系	253
13.4.1 计算假定和计算简图	253
13.4.2 基本方程式及解法	254
13.4.3 特征方程及自振周期公式	256
13.4.4 算例	261
13.5 框支剪力墙、落地剪力墙和壁式框架共同工作体系	263
13.5.1 计算假定和计算简图	263
13.5.2 基本方程式及解法	264
13.5.3 特征方程式及自振周期公式	267
13.5.4 算例	269
13.6 高层建筑正交结构层模型的弯扭耦连振动	271
13.6.1 计算模型和计算公式	271
13.6.2 算例	273
13.7 框架-剪力墙-薄壁筒斜交结构的弯扭耦连振动	276
13.7.1 基本假设和计算方法	276
13.7.2 弯扭耦连振动方程及其解耦	276
13.7.3 自振频率和振型的计算公式	280
13.7.4 计算步骤和算例	282
13.8 高层建筑结构考虑楼板变形和地基变形时的振动	286
13.8.1 计算模型	286
13.8.2 上部结构的振动微分方程	287
13.8.3 基础的振动方程	289
13.8.4 边界条件和连接条件	290
13.8.5 常微分方程特征值问题及其变换	291
13.8.6 用 COLSYS 求解算例	292

13.9	变截面框架-剪力墙-薄壁筒斜交结构考虑楼板变形时的振动	297
13.9.1	基本假设和计算模型	297
13.9.2	振动平衡方程	297
13.9.3	常微分方程特征值问题及其变换	299
13.9.4	用 COLSYS 求解步骤与算例	301
13.10	变截面框架-剪力墙-薄壁筒斜交结构考虑竖向荷载作用时的弯扭耦连振动	304
13.10.1	计算模型	304
13.10.2	考虑竖向荷载作用时的弯扭耦连振动方程	305
13.10.3	常微分方程特征值问题	307
13.11	大底盘多塔楼、大底盘大孔口结构和大底盘多塔楼连体结构的振动	310
13.11.1	基本假设和计算模型	310
13.11.2	振动方程、边界条件和连接条件	310
13.11.3	算例和讨论	312
13.12	筒体结构等效连续体的振动	317
13.12.1	计算假定和计算图	317
13.12.2	外框筒的侧移和扭转柔度矩阵	317
13.12.3	内筒的侧移和扭转柔度矩阵	322
13.12.4	结构的动力方程	323
13.12.5	算例和结论	326
13.13	高层建筑筒体结构的半解析常微分方程求解器法振动计算	328
13.13.1	基本假设和计算模型	328
13.13.2	振动方程、边界条件和连接条件	328
13.13.3	常微分方程特征值问题的变换和算例	331
13.14	高层建筑筒体结构有限元线法振动计算	332
13.14.1	计算模型、基本假设和计算方法	332
13.14.2	条单元分析	333
13.14.3	整体分析——基本方程、边界条件和连接条件的建立	336
13.14.4	常微分方程特征值问题的求解	337
13.14.5	算例和讨论	338

第 14 章 高层建筑结构地震作用的反应谱分析法

14.1	结构抗震动力计算概述	341
14.1.1	地震作用理论的发展	341
14.1.2	结构地震振动方程	342
14.1.3	振动方程的分类及分析方法	344
14.2	地震反应谱及按反应谱计算地震作用原理	345
14.2.1	单自由度体系地震作用的计算	345
14.2.2	地震反应谱	347
14.2.3	抗震设计反应谱——地震影响系数	349

14.3	多自由度体系地震作用的近似计算——底部剪力法	350
14.3.1	底部剪力法的计算公式	350
14.3.2	基本周期 T_1 的近似计算公式	351
14.4	多自由度体系的地震反应计算	353
14.4.1	正则坐标和振型参与系数	353
14.4.2	多自由度体系无阻尼时的地震反应计算	355
14.4.3	多自由度体系有阻尼时的地震反应计算	357
14.5	多自由度体系地震作用的计算公式及效应组合	359
14.5.1	多自由度体系地震作用的计算公式	359
14.5.2	效应组合	360
14.6	考虑扭转影响时的地震作用计算公式及效应组合	361
14.6.1	问题的提出	361
14.6.2	地震作用下不对称结构的计算方法	361
14.6.3	地震作用计算公式	364
14.6.4	地震作用效应组合	366
第 15 章	高层建筑结构抗震分析的时程分析法	368
15.1	概述	368
15.2	结构的振动计算模型	370
15.2.1	总体模型	371
15.2.2	层模型	371
15.2.3	杆系模型	373
15.2.4	杆系-层模型	383
15.3	结构的弹塑性本构模型	385
15.3.1	分段直线型恢复力模型	386
15.3.2	分段直线回线形式和规则 ^[1]	388
15.3.3	曲线型恢复力模型 ^[27]	392
15.3.4	构件的多维恢复力模型 ^[19]	393
15.4	结构振动模型的刚度矩阵	396
15.4.1	剪切型层模型的刚度矩阵	396
15.4.2	剪弯型层模型 ^[31]	397
15.4.3	杆系模型的刚度矩阵	398
15.4.4	空间协调杆系-层模型的刚度矩阵	406
15.5	质量矩阵和阻尼矩阵	409
15.5.1	质量矩阵	409
15.5.2	阻尼矩阵	411
15.6	对选用地震波的要求	413
15.7	结构动力平衡方程的求解方法	416

15.7.1	线性加速度法	419
15.7.2	威尔逊- θ 法	420
15.7.3	纽马克法	421
15.7.4	龙格-库塔法	422
15.7.5	增量方程积分的拟静力法	423
15.7.6	半增量方程积分的拟静力法	426
15.7.7	算法的精度 ^[33]	428
15.7.8	地震反应的延性	429
15.8	计算结果示例和程序简介	430
15.8.1	计算结果示例 ^[11]	430
15.8.2	程序简介	430
第 16 章	高层建筑空间弹塑性动力分析程序 HBTA 简介	433
16.1	高层建筑结构弹塑性动力分析程序 HBTA 1.0 的程序编制原理	433
16.1.1	HBTA 1.0 功能简介	433
16.1.2	杆件截面多维恢复力模型	434
16.1.3	杆件-层模型的理论分析	445
16.1.4	程序的编制与验证	460
16.1.5	结构的弹塑性计算	466
16.2	隔震结构空间杆系-层模型弹塑性动力分析程序 HBTA 2.0 ^[9]	496
16.2.1	程序 HBTA 2.0 功能简介	496
16.2.2	结构隔震技术的发展及橡胶垫隔震技术	497
16.2.3	叠层橡胶垫隔震房屋的隔震性能	500
16.2.4	国内外其他隔震结构弹塑性动力分析程序介绍	502
16.2.5	隔震装置的弹塑性恢复力模型	504
16.2.6	隔震结构运动方程的数值解法	512
16.2.7	HBTA 2.0 程序编制和验证	523
16.2.8	隔震结构实例计算与分析	531
附录 A	考虑双向弯曲与轴压相互耦合的梁柱单元刚度矩阵	543
参考文献		550

第9章 底层大空间剪力墙结构的计算

9.1 底层大空间剪力墙结构的计算图和计算方法

底层为框架的剪力墙结构是适应底层要求大开间而采用的一种结构型式。标准层(底层以上)采用剪力墙结构,而底层则改用框架结构,即底层的竖向荷载和水平荷载全部由框架的梁柱承受。

这种结构的侧向刚度在底层楼盖处发生突变。震害表明,在地震力冲击下,底层框架常因刚度太弱、侧移过大、延性差以及强度不足而引起破坏,甚至导致整栋建筑物的倒塌。近年来,这种底层为纯框架的剪力墙结构在地震区已经很少采用。

为了改善结构的受力性能,提高建筑物的抗震能力,在结构的平面布置中可以将一部分剪力墙落地,并贯通至基础,称为落地剪力墙;而另一部分剪力墙则在底层改为框架,底层为框架的剪力墙称为框支剪力墙。这样,在水平力作用下,便形成落地剪力墙与框支剪力墙协同工作的体系;借助于框支剪力墙,可以形成较大的空间;依靠落地剪力墙,可以增强和保证结构的抗震能力。图 9-1 为框支剪力墙和落地剪力墙协同工作体系的底层结构平面示意图。

在水平力作用下,由于框支剪力墙底层侧向刚度急剧变小,底层框架承担的水平力亦急剧减小,而落地剪力墙在底层承担的水平力则急剧增加。水平力在底层分配关系的改变,是借助于底层刚性楼盖对内力的传递作用来实现的,因而,通常将底层墙体及底层楼盖特别加强。也就是说,落地剪力墙作为框支剪力墙的弹性支承,通过底层刚性楼盖,给框支剪力墙以水平支承力,此水平支承力与水平外力的方向相反。

图 9-2 表示框支剪力墙和落地剪力墙协同工作体系的计算图。框支剪力墙和落地剪力墙通过刚性连杆(楼盖)连接起来共同承受水平力。

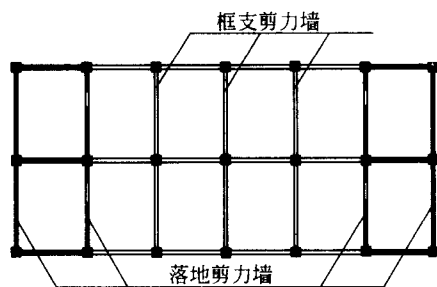


图 9-1 底层大空间剪力墙平面

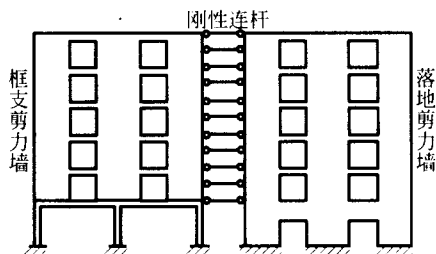


图 9-2 底层大空间剪力墙计算图

底层为框架的剪力墙结构,由于上部墙体与底层框架的不同性质,给计算带来一些困难。底层为框架的剪力墙结构的计算包含两个方面的内容:①底层为框架的剪力墙在水平荷载作用下的内力和位移计

算,以及它们与落地剪力墙协同工作时的内力和位移计算问题;②底层为框架的剪力墙在竖向和水平荷载作用下墙框交接区的应力分布问题。前一方面,可以把上部墙体视为杆件结构,用杆件结构的计算理论来解决;后一方面,涉及两种不同性质的构件(一维的杆件结构和二维的平面问题)的接触问题,必须用弹性力学的理论来解决。

本章 9.1~9.4 节用分区混合法,按杆件结构的计算理论讨论底层为框架的剪力墙结构在水平荷载作用下的内力和位移计算,以及它们与落地剪力墙协同工作时的内力和位移计算问题。上层剪力墙部分,采用普通剪力墙计算中采用的假定,连梁用连续连杆代替,取连续连杆的剪力为基本未知量,对连续连杆切口方向建立变形连续方程(力法方程)。底层框架部分,采用同层各结点水平位移相等、同层各结点转角相同的假定,取底层框架的结点位移为基本未知量,对框架结点的位移方向建立相应的平衡方程(位移法方程),用混合法求解。

应该指出的是,对开有多列竖向大开孔剪力墙的框支剪力墙,也可按壁式框架的方法计算。

本章 9.5 节讨论框支剪力墙、落地剪力墙和壁式框架在水平荷载下共同工作时的内力和位移计算。这是框支剪力墙和落地剪力墙协同工作的推广,包含了目前能够遇到的三种不同结构型式的共同工作。框支剪力墙和落地剪力墙的共同工作,多肢剪力墙和框架的共同工作均为本节方法的特殊情况。

本章 9.6、9.7 节用弹性力学的理论和分区混合有限元法分析框支剪力墙墙框交接区的应力集中和剪力墙角区的应力集中问题。

9.2 底层为框架的双肢剪力墙

9.2.1 双肢墙混合法的基本方程

图 9-3(a)所示底层为框架的双肢剪力墙,计算简图如图 9-3(b)所示。墙肢的连梁视为连续连杆。框架的横梁与墙肢相连部分刚度很大,可视为刚域。连梁与框架横梁均考虑剪切变形的影响。用混合法计算时,基本体系如图 9-3(c)所示。底层框架用位移法计算,基本未知量为结点位移:结点 C 和 D 的水平位移 y_0 (向右为正),结点 C 和结点 D 的竖向位移差 2Δ (左柱向上为正,右柱向下为正),结点 C 和结点 D 的转角 $\theta_c = \theta_D = \theta_0$ (顺时针方向为正)。上部双肢墙用力法计算,基本未知量为连续连杆中点的剪应力 $\tau(x)$ 和正应力 $\sigma(x)$ 。

上部剪力墙连续连杆切口处的变形连续条件为

$$\frac{2\tau(x)a^3h}{3EI_b} + \frac{1}{E} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \int_x^H \int_0^r \tau(\lambda) d\lambda d\lambda + 2c \frac{dy_m}{dx} + (2\Delta - 2l\theta_0) = 0 \quad (a)$$

式中:最后一项为底层框架结点位移对切口处产生的相对位移,说明如下(图 9-4):

设结点 C 的竖向位移为 Δ_1 (向上为正),转角为 $\theta_c = \theta_0$,则左边墙肢底轴线处的竖向位移为 $\Delta_1 - \theta_0(l_1 - c_1)$,转角为 θ_0 。设结点 D 的竖向位移为 Δ_2 (向下为正),转角为 $\theta_D = \theta_0$,则右边墙肢底轴线处的竖向位移为 $\Delta_2 - \theta_0(l_2 - c_2)$,转角为 θ_0 。墙肢底部轴线处的位移使 x 截面连续连杆切口处产生的相对位

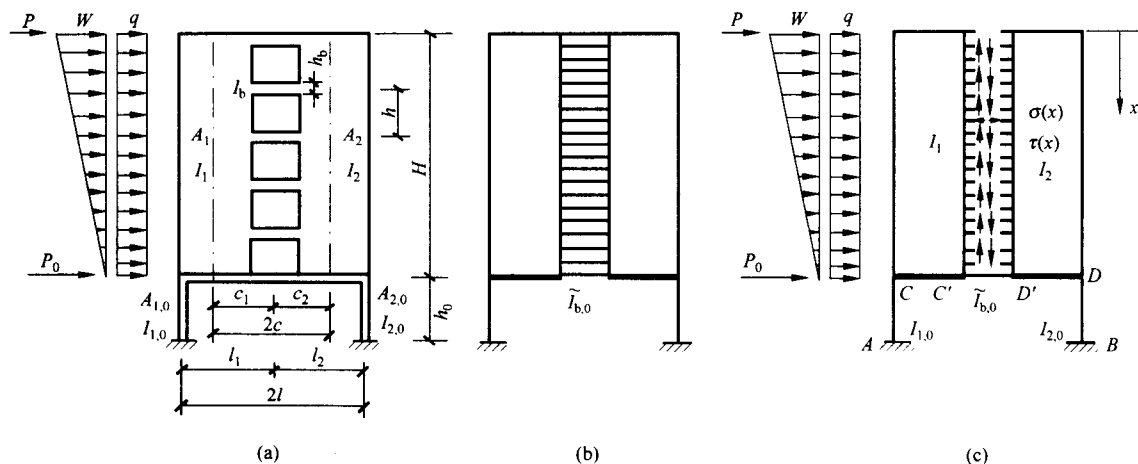


图 9-3 底层为框架的双肢墙

(a) 结构尺寸; (b) 计算简图; (c) 基本体系

移为

$$\delta_4 = \Delta_1 + \Delta_2 - \theta_0(l_1 - c_1 + l_2 - c_2) - 2c\theta_0 = 2\Delta - 2l\theta_0$$

上式中引用了关系式

$$2\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$$

结点位移 y_0 不影响切口处的竖向相对位移。

底层框架部分用位移法计算,用基本未知量 y_0 、 Δ 和 θ_0 表示的杆端弯矩为(凡用位移法的部分,杆端弯矩顺时针方向为正,下同)

$$M_{CA} = 4 \frac{EI_{1,0}}{h_0} \theta_0 - \frac{6EI_{1,0}}{h_0^2} y_0$$

$$M_{AC} = 2 \frac{EI_{1,0}}{h_0} \theta_0 - \frac{6EI_{1,0}}{h_0^2} y_0$$

$$M_{DB} = 4 \frac{EI_{2,0}}{h_0} \theta_0 - \frac{6EI_{2,0}}{h_0^2} y_0$$

$$M_{BD} = 2 \frac{EI_{2,0}}{h_0} \theta_0 - \frac{6EI_{2,0}}{h_0^2} y_0$$

$$M_{CD} = S_{CD} \left[\theta_0(1 + C_{CD}) - (1 + C_{CD}) \frac{2\Delta}{2l} \right] = S_{CD}(1 + C_{CD}) \left(\theta_0 - \frac{\Delta}{l} \right)$$

$$M_{DC} = S_{DC} \left[\theta_0(1 + C_{DC}) - (1 + C_{DC}) \frac{2\Delta}{2l} \right] = S_{DC}(1 + C_{DC}) \left(\theta_0 - \frac{\Delta}{l} \right)$$

底层框架横梁 CD 为两端带刚域的杆,式中 S_{CD} 、 S_{DC} 和 C_{CD} 、 C_{DC} 为杆的转动刚度和传递系数。对两端带刚域的杆,考虑中间杆段剪切变形的影响,当两端有单位转角时,利用本书上册 4.6 节中推导的结果可求

$$S_{CD}(1 + C_{CD}) = \frac{3E\tilde{I}_{b,0}l_1}{a^3}$$

$$S_{DC}(1 + C_{DC}) = \frac{3E\tilde{I}_{b,0}l_2}{a^3}$$

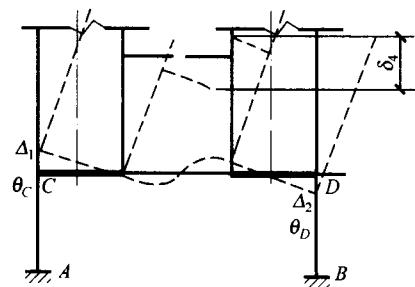


图 9-4 底层框架结点位移对切口位移的影响

式中: $\bar{I}_{b,0} = \frac{I_{b,0}}{1 + \frac{3\mu EI_{b,0}}{GA_{b,0}a^2}}$ ——框架横梁考虑剪切变形影响的折算惯性矩。

下面写出相应于位移基本未知量 y_0 、 Δ 和 θ_0 的平衡方程式。

取框架顶截面以上为隔离体,由水平方向的平衡条件[见图 9-5(a)]有

$$V_{CA} + V_{DB} = V_0 + P_0$$

式中, V_0 ——底层以上水平荷载的总和;

P_0 ——作用于底层顶部的水平力。

将上式用位移基本未知量表示

$$-\frac{6EI_{1,0}}{h_0^2}\theta_0 + \frac{12EI_{1,0}}{h_0^3}y_0 - \frac{6EI_{2,0}}{h_0^2}\theta_0 + \frac{12EI_{2,0}}{h_0^3}y_0 = V_0 + P_0$$

即

$$-\frac{6E}{h_0^2}(I_{1,0} + I_{2,0})\theta_0 + \frac{12E}{h_0^3}(I_{1,0} + I_{2,0})y_0 = V_0 + P_0 \quad (b)$$

取结点 C 和 D 为隔离体,由垂直方向的平衡条件[见图 9-5(b)]有

图 9-5(b)]有

$$\frac{EA_{1,0}}{h_0}\Delta_1 + \left(-\frac{M_{CD} + M_{DC}}{2l}\right) = N_0$$

$$\frac{EA_{2,0}}{h_0}\Delta_2 + \left(-\frac{M_{CD} + M_{DC}}{2l}\right) = N_0$$

以上两式叠加,然后将杆端弯矩 M 用基本未知量表示,并设 $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$,得

$$\frac{E(A_{1,0} + A_{2,0})}{h_0}\Delta + \frac{6E\bar{I}_{b,0}l}{a^3}[\Delta - \theta_0 l] = 2N_0 \quad (c)$$

取结点 C 和 D 为隔离体,由结点的力矩平衡方程[见图 9-5(b)]有

$$M_{CA} + M_{CD} = M_0 - M_\sigma - N_0 c_1 - N_0(l_1 - c_1)$$

$$M_{DB} + M_{DC} = M_\sigma - N_0 c_2 - N_0(l_2 - c_2)$$

等式右端为上部墙肢作用于框架结点的力矩。

将以上两式叠加,然后将杆端弯矩用基本未知量表示,得

$$\frac{2E(I_{1,0} + I_{2,0})}{h_0}\left(2\theta_0 - \frac{3y_0}{h_0}\right) + \frac{6E\bar{I}_{b,0}l}{a^3}(\theta_0 l - \Delta) = M_0 - 2lN_0 \quad (d)$$

式(a)~(d)即为混合法的基本方程,是包含有连续连杆剪应力 $\tau(x)$ 和框架结点位移 y_0 、 Δ 和 θ_0 的混方方程。

9.2.2 双肢墙基本方程的解

由式(b)~(d)可以解出位移 y_0 、 Δ 和 θ_0 。应该指出的是,这时位移公式中的 N_0 是与上部结构中的 $\tau(x)$ 有关的。

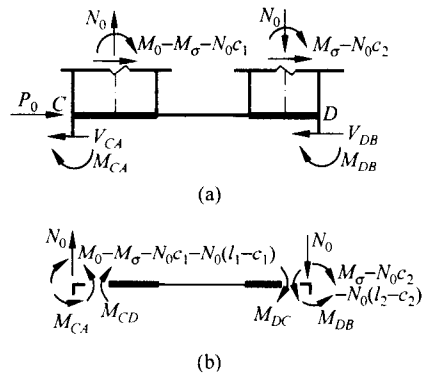


图 9-5 框架顶面隔离体