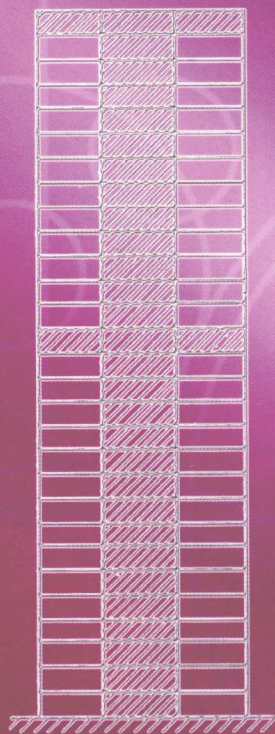




新型高层结构系列

带加强层与错层高层结构 设计与施工

沈蒲生 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新型高层结构系列

带加强层与错层高层 结构设计施工

沈蒲生 编著



机械工业出版社

本书是新型高层结构系列丛书中的一本。

全书除了介绍带加强层与错层高层结构的一般知识外,重点介绍了加强层的最佳位置及刚度,带加强层结构的自由振动分析、振型分解反应谱的抗震分析、推覆分析和弹性时程分析;错层结构受力分析和两种改进的错层结构。书中还介绍了带加强层与错层高层结构的设计实例,并且对它们的设计与施工方法提出了建议。

本书可供从事建筑工程设计、施工人员使用,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

带加强层与错层高层结构设计/沈蒲生编著. —北京:
机械工业出版社, 2009. 5

(新型高层结构系列)

ISBN 978 - 7 - 111 - 27046 - 1

I. 带… II. 沈… III. 高层建筑 - 结构设计
IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 070637 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张 晶 版式设计: 霍永明 责任校对: 程俊巧

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 27.75 印张 · 570 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 27046 - 1

定价: 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

前 言

高层建筑是社会需求与经济繁荣、科技进步的产物。随着对高层建筑使用功能要求的日趋复杂，高层建筑在数量日渐增多、高度不断提升的同时，结构形式也在发生变化。带加强层高层结构和错层高层结构便是顺应这种变化而发展起来的新的结构形式。

为了增强外围结构与核心结构之间的联系，增大结构的整体刚度，减小结构在水平荷载和地震作用下的侧向位移，在高层结构中，特别是在框架-核心筒超高层结构中，沿房屋高度方向的某一层或某几层，设置刚度较大的水平加强构件，形成了带加强层高层结构。为了有效地利用建筑空间，并且使其富有多样性，将同层楼面分成两个或两个以上的区段，并且将它们沿高度方向错动，形成了错层高层结构。

带加强层高层结构和错层高层结构的受力性能比一般高层结构复杂，属于复杂高层结构。最近十多年来，我国学者和工程技术人员对它们进行了许多研究，并且广泛地将它们应用于建筑工程中，积累了许多宝贵的经验。但是，迄今为止，还没有一本专门的，比较系统地介绍这两种结构的书籍。为了使读者对带加强层高层结构和错层高层结构的受力性能、设计施工方法有一些了解，特编写此书。

本书在简要介绍了这两种结构的一般知识之后，重点介绍了加强层的最佳位置及刚度，带加强层结构的自由振动分析，带加强层结构的抗震分析，带加强层结构的推覆分析和弹性时程分析，以及错层结构受力分析和两种改进的错层结构。除此之外，还介绍了一些带加强层高层结构和错层高层结构的设计实例，并且对它们的设计与施工方法提出了建议。书中除了介绍我国工程技术人员和科技工作者部分有代表性的成果之外，还介绍了我和我的研究生陈宇、王义俊等人的部分研究成果。

本书是作者所写新型高层结构系列丛书之一。由于我们的水平所限，错误和不妥之处，欢迎批评指正。

沈蒲生

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 带加强层结构的基本知识	1
1.1.1 加强层的概念	1
1.1.2 加强层的工作机理	3
1.1.3 带加强层结构的优缺点	7
1.1.4 带加强层结构的工程应用情况	13
1.1.5 带加强层结构的发展概况	17
1.2 错层结构的基本知识	21
1.2.1 错层结构的定义	21
1.2.2 错层结构的形式	21
1.2.3 错层结构的受力特点	22
1.2.4 错层结构的研究与应用简况	23
第2章 加强层的最佳位置及刚度	26
2.1 框架-筒体结构中加强层的最佳位置	26
2.1.1 按刚性加强层分析	26
2.1.2 按弹性加强层分析	29
2.2 加强层合理抗弯刚度的选择	53
2.2.1 加强层抗弯刚度与侧移的关系	53
2.2.2 加强层抗弯刚度的选择	54
2.3 考虑普通楼盖影响的分析	55
2.4 楼盖与框架和核心筒连接方式对结构受力的影响	59
2.5 外环梁的作用	61
2.6 加强层对筒中筒结构受力性能的影响	66
第3章 带加强层结构的自由振动分析	71
3.1 带加强层等截面框架-核心筒结构	71
3.1.1 无阻尼自由振动方程	71
3.1.2 计算模型	74
3.1.3 自由振动分析	74
3.2 带加强层变截面框架-核心筒结构	98

3.2.1 研究背景	98
3.2.2 带一道加强层的框架-变截面核心筒结构	98
3.2.3 带两道加强层的变截面框架-核心筒结构	125
第4章 带加强层结构的抗震分析	147
4.1 分析方法	147
4.2 带加强层钢框架-混凝土核心筒结构	149
4.2.1 概述	149
4.2.2 实例	150
4.3 带加强层钢筋混凝土框架-核心筒结构	211
4.3.1 概述	211
4.3.2 实例	212
4.4 带加强层高层钢结构	227
4.4.1 概述	227
4.4.2 实例	228
第5章 带加强层结构的推覆分析和弹性时程分析	235
5.1 推覆分析	235
5.1.1 概述	235
5.1.2 实例	235
5.2 弹性时程分析	262
5.2.1 概述	262
5.2.2 实例	264
第6章 错层框架结构受力分析	289
6.1 错层框架结构在水平荷载下的受力分析方法	289
6.1.1 概述	289
6.1.2 柱的抗侧刚度	289
6.1.3 分析方法	290
6.1.4 计算例题	293
6.2 错层框架结构抗震性能分析	297
6.2.1 两跨错层框架结构抗震实例	297
6.2.2 三跨错层框架结构抗震实例	302
6.3 错层框架结构的 Pushover 分析	304
6.3.1 概述	304
6.3.2 实例	304
6.3.3 错层框架结构屈服机制的判断	307
第7章 两种改进的错层结构	308

7.1 改善错层结构受力性能的措施	308
7.2 设撑杆的错层框架结构	309
7.2.1 撑杆在结构中的应用情况	309
7.2.2 撑杆的类型	310
7.2.3 水平荷载作用下的受力性能分析	311
7.2.4 地震作用下的受力性能分析	316
7.2.5 Pushover 分析	323
7.3 带剪力墙的错层框架结构	328
7.3.1 剪力墙在错层框架结构中的作用	328
7.3.2 内力与变形的计算方法	328
7.3.3 实例	329
7.4 错层结构的扭转效应及地震反应简化分析方法	331
7.4.1 错层结构的扭转效应分析	331
7.4.2 错层结构地震响应简化分析	332
7.5 错层结构的非线性时程分析	335
第8章 工程实例及设计与施工建议	339
8.1 工程实例	339
8.1.1 大连国贸大厦	339
8.1.2 重宾·保利国际广场	359
8.1.3 杭州市某高层办公楼	379
8.1.4 厦门大西洋海景城	385
8.1.5 深圳福田保税区金融大厦	389
8.1.6 广东东莞台商大厦	398
8.1.7 深圳市某错层高层住宅	407
8.1.8 兰州市交通指挥中心	414
8.1.9 广州市康裕苑	420
8.1.10 上海怡景苑复式住宅楼	423
8.2 设计与施工建议	428
8.2.1 带加强层高层结构	428
8.2.2 错层高层结构	432
参考文献	433

第 1 章 绪 论

1.1 带加强层结构的基本知识

1.1.1 加强层的概念

加强层是指在高层建筑中，为了增强外围结构与核心结构之间的联系，增大结构整体刚度和减小结构在水平荷载和地震作用下的侧向变形，沿房屋高度方向的某一层或某几层，设置了刚度较大水平构件的楼层（图 1-1）。由于设置刚度较大的水平构件以后，使楼层的刚度比其他楼层的刚度大很多，故称为加强层。

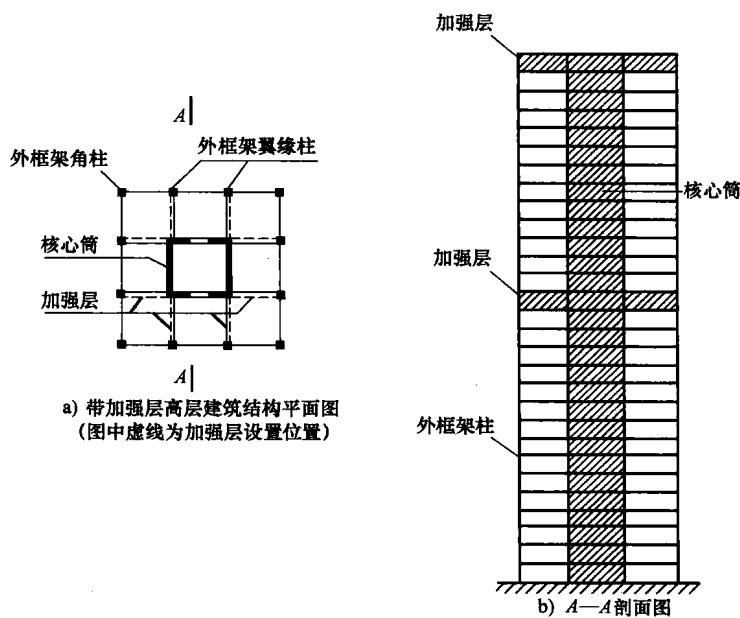


图 1-1 带加强层高层建筑的平面图和剖面图

加强层中，刚度较大水平构件的形式有梁式与桁架式两种类型。梁式加强层的梁可以是实腹梁（图 1-2），也可以是开孔梁（图 1-3）。桁架式加强层的桁架可以是斜腹杆桁架（图 1-4），也可以是空腹式桁架（图 1-5）。

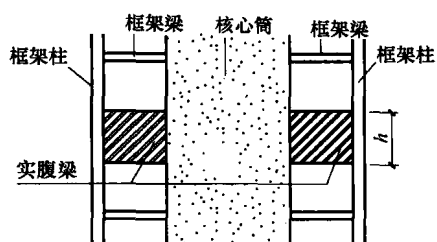


图 1-2 箱形梁

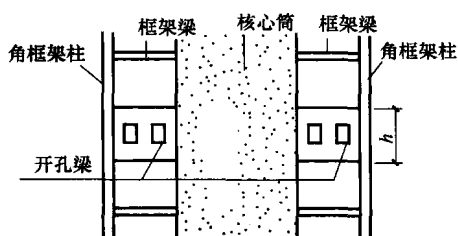


图 1-3 开孔梁

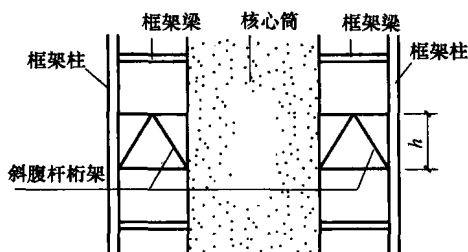


图 1-4 斜腹杆桁架

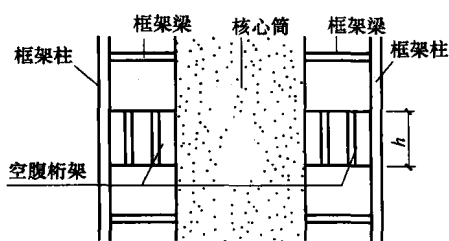


图 1-5 空腹桁架

加强层被广泛用于框架-核心筒结构的高层建筑。这是因为在这类结构中，核心筒一个方向的尺寸只有 10m 左右，外框架一个方向的尺寸为 30 ~ 40m，在超高层建筑中，整个房屋的高宽比，特别是核心筒的高宽比可能很大，例如，上海金茂大厦核心筒的高宽比为 13.7，上海环球金融中心核心筒的高宽比为 13.96，深圳地王大厦核心筒的高宽比为 24。房屋的高宽比和核心筒的高宽比很大时，在水平荷载和地震作用下，不但会产生很大的侧向变形，而且对结构的稳定与抗倾覆也会带来不利的影响。此外，在这类结构中，外框架与核心筒的质量、刚度、自振周期、振型等都各不相同，彼此之间的协同工作也存在着很大的问题。设置加强层后，可以使这些问题得到改善。

每一个加强层的高度可以是一层楼高，也可以是两层或两层以上的楼层层高。水平加强构件有时也称为刚臂或伸臂。

加强层可以设在建筑物的技术层和避难层处，也可以根据结构的需要，设置在对受力有利的位置。

通常在设置加强层的地方，沿着结构的周边设置水平环带，起到沿竖向给结构加“箍”的作用，可进一步改善结构的受力性能。水平环带可采用斜腹杆桁架或空腹桁架，也可以采用实腹梁或开孔梁。环带的高度通常与加强层等高。

高层建筑设置加强层后，属于复杂高层建筑^[1]，其受力性能比一般高层建筑都复杂^[2]。

1.1.2 加强层的工作机理

在水平荷载和地震作用下，框架-筒体结构的内筒承担了绝大部分水平剪力，水平荷载和地震作用产生的倾覆力矩由以下三种力矩与之平衡。

(1) 内筒的弯矩。

(2) 外框架柱的弯矩。

(3) 外框架柱（含外框架翼缘柱和腹板柱）的轴压力和轴拉力形成的力矩。这种力矩是由于建筑物的整体弯曲效应所产生。

设置加强层后，结构的整体性加强，外部框架与核心筒能更好地协同工作，核心筒和框架梁和柱的内力将发生重分布。由伸臂约束的柱将阻止筒体的转动，因而使筒体的水平位移和弯矩，比仅由单独筒体受水平荷载和地震作用时小（图 1-6）。其结果增加了结构作为一个竖向悬臂构件受弯时的截面高度，减小了迎风面柱子的拉力和背风面柱子的压力^[3]。

但是，加强层只增加结构的抗弯刚度，不增加结构的抗剪能力。

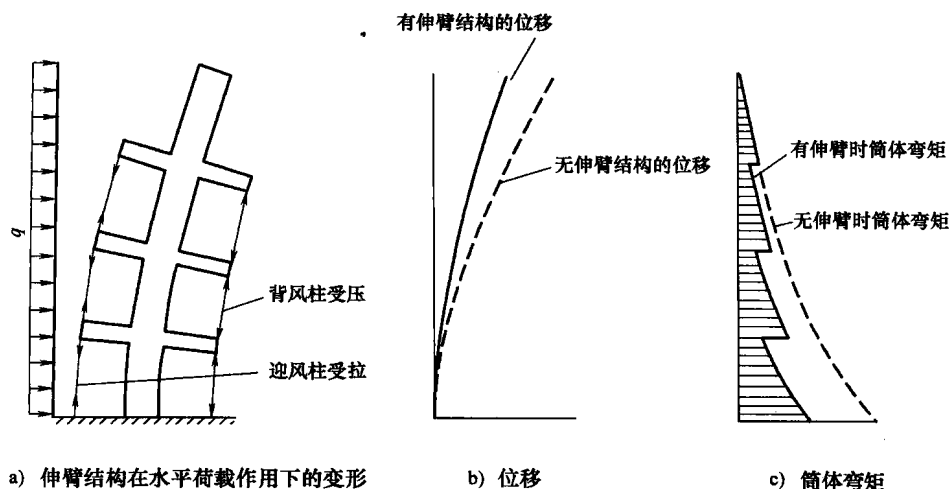


图 1-6 加强层的工作机理

【例 1-1】 文献 [4] 对一个 10 层钢筋混凝土框剪结构（图 1-7）设加强层和不设加强层的情况进行了分析比较。该结构柱截面尺寸为 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，梁截面尺寸为 $300\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，②轴~③轴间为竖向剪力墙，剪力墙厚 $t = 200\text{mm}$ 。水平连通墙（即水平加强层）的高度为一层，高 $h = 4\text{m}$ ，厚度取 $t = 200\text{mm}$ 的实腹梁。混凝土的弹性模量和剪切模量分别为 $E = 2.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ， $G = 1.05 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ，各楼层处的水平外荷载 $P = 200\text{kN}$ 。要求对下面 4 种水平加强层的设置情况进行内力侧移分析：

4 带加强层与错层高层结构设计与施工

(1) 方案 A (图 1-8): 不设水平加强层。

(2) 方案 B (图 1-9): 在顶层设置一个水平加强层。

(3) 方案 C (图 1-10): 在第 6 层 (该层为本例设置一个水平加强层时的最佳位置) 设置一个水平加强层。

(4) 方案 D (图 1-11): 在第 3 层、第 7 层共设置两个水平加强层 (第 3 层、7 层为本例设置两个水平加强层时的最佳位置)。

【解】 有关计算结果见表 1-1。

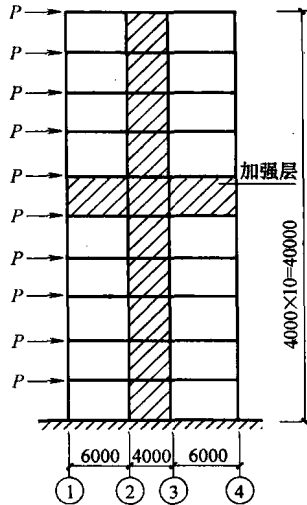


图 1-7 例 1-1 模型

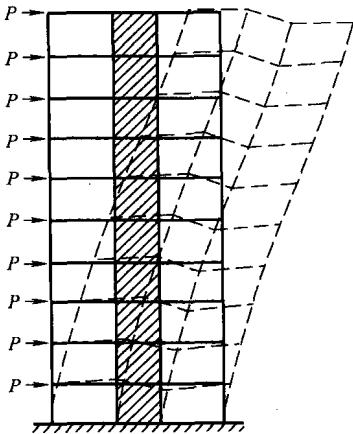


图 1-8 方案 A

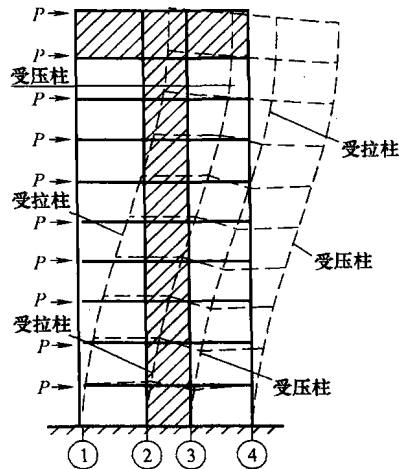


图 1-9 方案 B

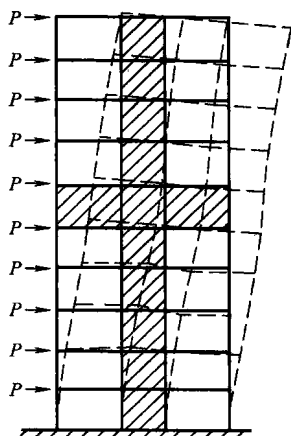


图 1-10 方案 C

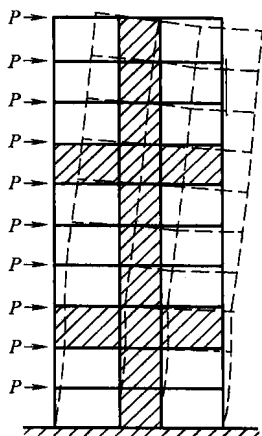


图 1-11 方案 D

表 1-1 顶点侧移 Δ 和底层各构件弯矩、剪力、轴力

方案		方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
顶点侧移 Δ/cm		12.60	8.48	5.96	4.00
总倾覆弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$		44000	44000	44000	44000
总剪力/ kN		2000	2000	2000	2000
剪力墙 (核心筒)	M	11514.2(100)	10697.4(92.9)	9261.8(80)	6971.06(60)
	V	1850.4(100)	1858.1(100.4)	1871.5(101.1)	1896.9(102.5)
	N_1	0	0	0	0
①、④轴柱 (翼缘柱)	M^0 (力偶矩)	17403.2(100)	19807.5(113.8)	24028.8(138)	30789.6(176.9)
	$M \times 2$	219.6(100)	205.5(93.6)	180.8(82)	137.32(62.5)
	$V \times 2$	76.8(100)	72.18(93.9)	64.14(83.5)	48.2(62.8)
	N_2	-1087.7 (+1087.7)	-1237.9 (+1237.9)	-1501.8 (+1501.8)	-1924.35 (+1924.35)
②轴、③轴柱 (腹板柱)	M^0 (力偶矩)	14645.6(100)	13085.6(89.37)	10344.5(70.6)	5955.3(40.7)
	$M \times 2$	214.2(100)	202.1(94.3)	180.2(84.1)	146.0(68.2)
	$V \times 2$	72.6(100)	69.64(95.9)	64.26(88.5)	54.76(75.4)
	N_3	-3611.4 (+3611.4)	-3271.41 (+3271.41)	-2586.12 (+2586.12)	-1488.82 (+1488.82)
轴力形成的 力偶矩	$M^0 = N_2 \times 16$ $+ N_3 \times 4$	31848.80	32892.04	34373.28	36744.88

注：1. M 、 V 栏中数字右面括号内为同一构件的 M 、 V 在不同方案中变化的百分率，其中以无水平加强层方案 A 的 M 、 V 为 100%。弯矩的单位为 $\text{kN} \cdot \text{m}$ ，剪力和轴力的单位为 kN 。
2. N 栏中括号内为③轴、④轴柱的轴力，“-”为拉，“+”为压。

由表 1-1 可见,在最佳位置(第 6 层)设置一道水平加强层(方案 C)后,剪力墙的弯矩比不设水平加强层的方案 A 减小了 20%,其剪力比方案 A 略有增加(增加了 1.1%);外框柱(①轴、④轴柱)的轴向拉压力及其形成的力偶矩 M^0 则比方案 A 增大了 38%,同时所有外框柱的弯矩、剪力均比方案 A 减小(其中①轴、④轴柱弯矩减小了 18%,剪力减小了 16.5%),计算同时表明所有外框梁的弯矩均比方案 A 减小了 15.1%~19.2%。当设置两道水平加强层时(方案 D),上面所描述的内力变化规律更明显,其变化幅度更大,如剪力墙的弯矩比不设水平加强层的方案 A 减小了 40%,①轴、④轴柱的弯矩和剪力分别减小了 37.5%和 37.2%。

由表 1-1 同时可见,框架柱轴向拉力与压力形成的力矩,远大于剪力墙的力矩。而且,设置加强层后,这种力矩将随柱轴力的增加而增大。

综上所述,设置水平加强层后使得剪力墙弯矩、外框架所有柱的弯矩、剪力、梁的弯矩都明显减小。所以,使得剪力墙的侧移 Δ_e 明显减小,柱的弯曲和剪切变形引起的侧移 δ_1 和梁的弯曲变形引起的侧移 δ_2 明显减小,即使 $\Delta_f = \delta_1 + \delta_2$ 减小。 Δ_e 和 Δ_f 都明显减小,则结构总的侧移 Δ 就明显减小。另外,在表 1-1 中也可看出,设置水平加强层后使得剪力墙的剪力略微增加(但不超过 2.5%),这并不会引起其侧移 Δ_e 的增大,其原因是剪力增加的量非常小;一般剪力墙的抗剪刚度都非常大,这么小的剪力增量不会引起侧移 Δ_e 的增大。设置水平加强层后外框架柱的轴力增大了,这也不会引起 Δ_f 的增大,原因在于柱的轴向拉力、压力虽然增大,但其所引起的结构侧移增量却非常小。一般这个侧移增量仅占框架总侧移 Δ_f 的 5%~8%,它比由于柱和梁的弯矩与剪力减小所引起的侧移减小的较大幅度来说,几乎可以忽略不计。

几个工程设加强层与不设加强层时结构位移、内力、材料用量和造价对比见表 1-2。

表 1-2 几个工程设加强层与不设加强层位移、内力、材料用量或造价对比

序号	工程名称	RC ST	结构 体系	层数	总高 /m	加强 层数	加强 位置	加强层 类型	位移 控制	内力 控制	其他
1	上海锦江 饭店	ST		44	154	2	23 44	桁架	顶点位移 减小 13%	最大柱拉 力减少 20%	自振周期 降低 8%
2	河南某办 公大楼	RC	框筒	34	117.2	2	4 18	梁式	顶点减 小 28% 层间减 小 25%	外柱承担 弯矩增大 13.2%	与不设加强层 相比省混凝土 690m ³
3	上海金陵 大厦	RC	框筒	37	140	2	20 35	梁式	顶点位移 减小 32mm		与不设加强 层相比节约 50 万元

(续)

序号	工程名称	RC ST	结构 体系	层数	总高 /m	加强 层数	加强 位置	加强层 类型	位移 控制	内力 控制	其他
4	深圳商业 中心	RC	框筒	52	167.2	2	27 49	梁式	顶点位移 减小 30%	外框 42% 内筒 58%	
5	北京国际 大厦	RC	筒中筒	41	153.3	3	13 26 37	梁式	风载: 顶点 减小 14% 地震: 顶点 减小 10%		加强层 高 4.2m
6	广州天河 娱乐广场 主楼	RC	筒中筒	33	125.6	2	21 33	梁式	顶点减 小 32% 层间减 小 35%		加强层高 3.5m
7	侨光广场 大楼	RC	筒中筒	52	177	4	6 19 35 44	梁式	顶点减 小 18% 层间减 小 16%		
8	中山市信 联大厦	RC	筒中筒	33	128	2	顶层 中部	梁式	顶点减 小 16%	内筒弯矩 减小 31%	
9	福州市无 洪城工程 写字楼	RC	筒中筒	36	150	3	6 16 36	梁式	顶点减 小 13% 层间减 小 19%		加强层 0.8m × 2.4m
10	福州市福 星大厦	RC	框剪	30	99.9	1	6	梁式	顶点减小 22%		加强层高 3.7m

注: 加强位置一栏中的数字表示加强层所在的层数。

1.1.3 带加强层结构的优缺点

带加强层结构的优点:

- (1) 改善结构的受力状态, 有效减少结构侧移, 增大结构抗侧移刚度。
- (2) 用设备层或避难层作为水平加强层, 如: 水平支承大梁、空腹桁架、梁式、板式箱形结构布置转换层等, 可较好地解决建筑底部或其他层的需要开高大空间, 造成结构上下层形式不同和结构布置上的矛盾, 从而满足建筑功能需求。
- (3) 从经济的角度来看, 在满足使用功能和规范要求的前提下, 减小剪力墙、筒体和柱等构件中的截面尺寸, 增大了使用面积, 提高净面积、毛面积比, 有利于建筑的使用, 增强了建筑的租售竞争力, 由于减小剪力墙、筒体和柱等构件中的截面尺寸与不设水平加强层的相应结构相比, 可节约混凝土 12% 左右。可见, 设置水平加强层是减小高层建筑结构侧移提高其抗侧移刚度的一种既有效又经济的方法。

带加强层结构的缺点：

设置加强层的主要缺点是：加强层的存在使结构刚度沿竖向发生突变，结构的核心筒和外围框架的变形协调集中在加强层处，这就导致在重力和水平荷载作用下，加强层上下附近几层的内力发生突变，结构地震反应复杂，在地震作用下容易出现薄弱层。所以，加强层不是越刚越好。加强层的刚度要根据建筑物的高度、结构类型及刚度等因素合理选择。

为了了解带加强层结构的不足之处，我们来看下面的算例。

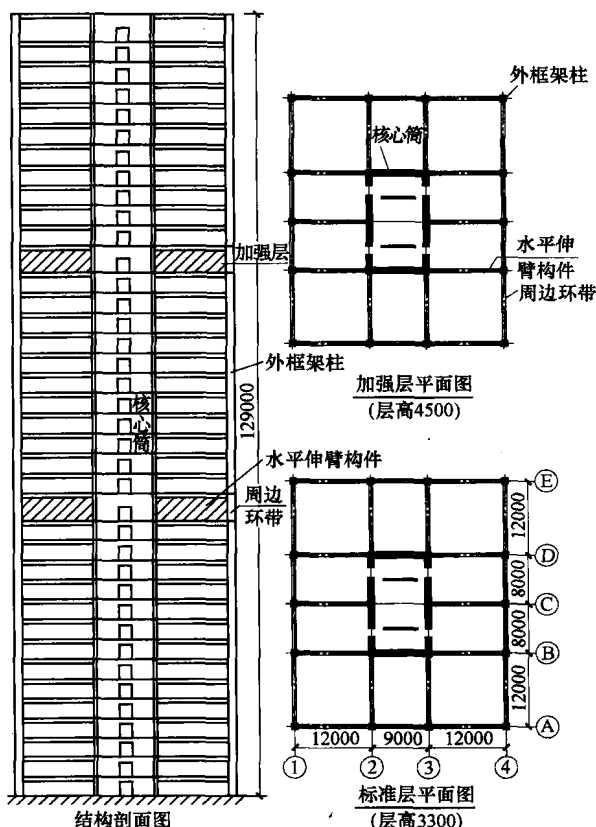


图 1-12 框架-核心筒结构示例

【例 1-2】 文献 [5] 对图 1-12 所示结构进行了分析。该结构在第 15 层和第 27 层设置加强层后，其第 1 和第 2 振型的自振周期比不设加强层时明显减少（表 1-3）。图 1-13 所示为弹性动力分析得出的结构加速度反应包络、速度反应包络和位移反应。输入的地震波为上海波（按上海地区反应谱拟合的人工波），地面加速度峰值为 35Gal。由图可见，设置加强层后加速度和速度反应包络有所降低，位移反应明显减少。需要特别注意的是，位移曲线在第 15 层及第 27 层两道加强层附近发生的变化，第 15 层处突变尤为显著。这种形式的结构竖向刚度突变，不仅使加

强层本层的水平剪切刚度突然增大,更主要的是,加强层处结构整体转动大幅度减少,加强层上、下几层的整体转动也随之减少。两道加强层相当于给整个结构在15层及27层增加了两道“整体转动嵌固约束”,几乎把整个38层结构分成三段,1~14层为第一段,15~26层为第二段,27~38层为第三段。结构整体转动在加强层处突然减少,其主要原因是加强层的水平伸臂构件(或外围框架周边环带)与该层的上、下楼板组成刚度甚大的箱形盘,此箱形盘将核心筒与外围框架连成整体,其整体转动基本上由外围框架柱的轴向变形控制,转动量显然是很小的。由图1-14所示的结构整体变形图,可以看出加强层引起的结构变形突变。这种形式的刚度突变必然伴随着结构内力突变以及整体结构传力途径的改变,从而使结构在地震作用下,其破坏和位移较容易集中在加强层附近,即形成薄弱层。

表 1-3 结构自振周期

自振周期 结构情况	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	T_5/s	T_6/s	T_7/s	T_8/s	T_9/s
不设置 加强层	4.4514	1.0187	0.4411	0.2645	0.1834	0.1395	0.1123	0.0935	0.0801
第15层和第27层 设置加强层	2.9844	0.8681	0.4209	0.2401	0.1738	0.1342	0.1105	0.0897	0.0768

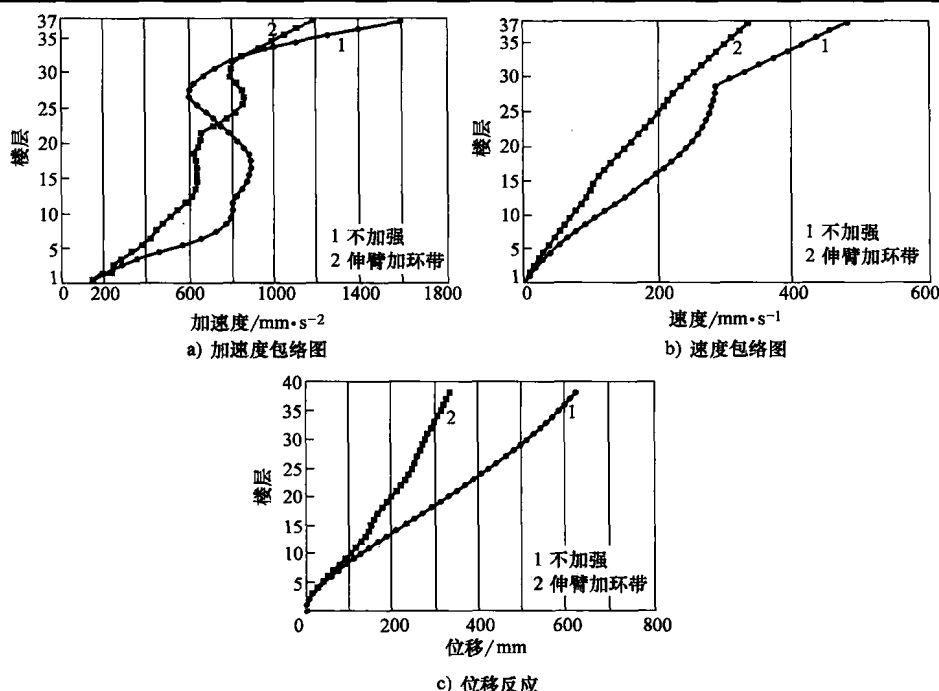


图 1-13 结构设置加强层前后弹性动力反应比较

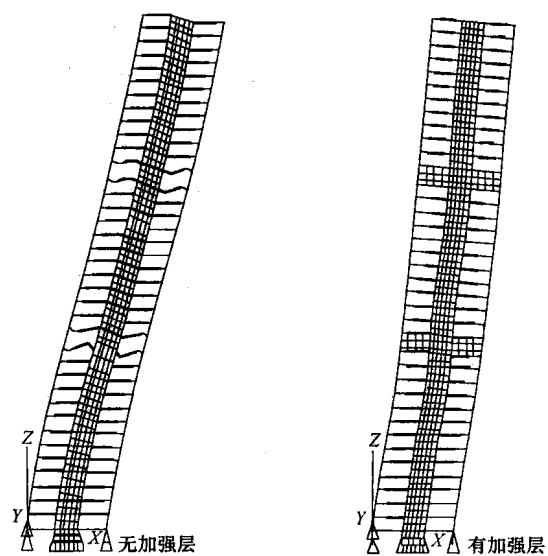


图 1-14 结构整体变形图

为进一步说明上述刚度突变的概念，再来看文献 [6] 中介绍的一个带加强层结构模型振动台试验结果。该模型共 37 层，在第 15 层及第 27 层设置两道加强层，模型的若干典型楼层的平面简图如图 1-15 所示。试验实测的位移包络如图 1-16 所示。实测位移包络表明，第 15 层加强层处结构位移明显突变，在破坏阶段，结构变形集中在第 15 层和第 27 层两道加强层的上层楼面处，整个 37 层结构被两道加强层分成三段。

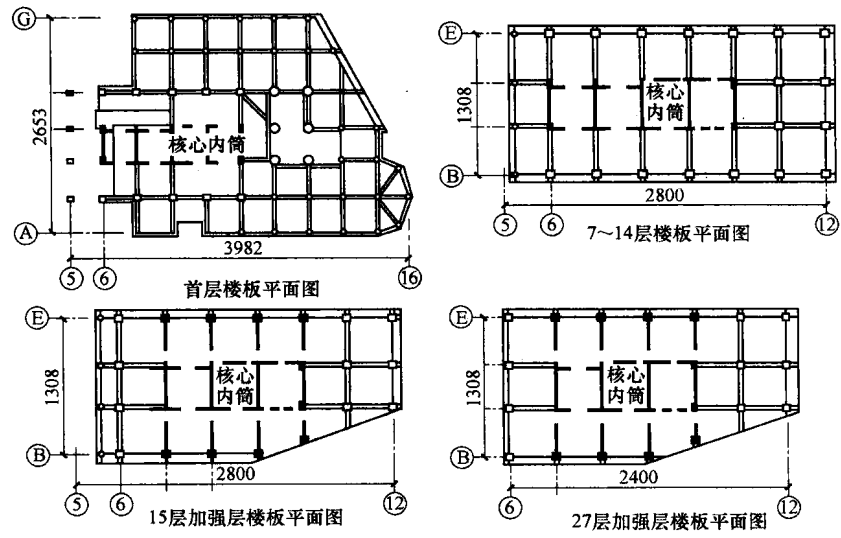


图 1-15 试验模型结构平面图