

# 混凝土异形柱 结构设计原理

王依群 主编

中国建筑工业出版社

# 混凝土力学原理

王依群 主编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土异形柱结构设计原理/王依群主编. —北京: 中国建筑工业出版社,  
2014. 12  
ISBN 978-7-112-17240-5

I. ①混… II. ①王… III. ①混凝土结构-异形柱-研究 IV. ①TU375.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 208227 号

本书介绍了钢筋混凝土异形柱结构在罕遇地震下的震害及实例的模拟分析和异形柱结构的新的研究成果。包括: 如何更好地实现强柱弱梁、加强 T 形柱截面腹板凸出肢端配筋、异形柱的最小配筋率, 在国家已淘汰 235MPa 级并更新为 300MPa 级钢筋和 500MPa 级钢筋条件下如何设计, 工程中常遇到的 Z 形截面柱及其梁柱节点的设计, 特别是 Z 形柱双向受剪如何计算, 2010 国家标准背景下的异形柱框架结构房屋最大适用高度的研究、基底隔震设计等。书中还配有算例, 可供从事设计和科学研究人员使用。

\* \* \*

责任编辑: 郭 栋 辛海丽

责任设计: 张 虹

责任校对: 李欣慰 张 颖

## 混凝土异形柱结构设计原理

王依群 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{3}{4}$  字数: 284 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-17240-5

(25998)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

钢筋混凝土异形柱是指截面形状为 L 形、T 形、十字形和 Z 形的用钢筋混凝土制成的框架结构的柱，且截面各肢的肢长与其厚度之比不大于 4 的柱（简称异形柱）。钢筋混凝土异形柱结构（也简称为“混凝土异形柱结构”或“异形柱结构”）是指主要由异形柱（代替普通的矩形柱）组成的框架结构或与异形柱和混凝土剪力墙结合组成的框架—剪力墙结构。这种结构的优点是柱肢的厚度与填充墙的厚度相同，避免了框架柱在室内凸出，属于“隐性框架”，墙面平整美观且为使用带来便利。

国家为了保证异形柱结构健康、顺利地发展，颁发了多项指导性文件，并被列为住房和城乡建设部“十一五”科技攻关重点项目之一。部分省市相关部门投入了大量科研经费、许多科技人员在试验和研究的基础上，编制了不少于 10 个省级地方规程。行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ 149 也于 2006 年颁布实施。

本书介绍我国《混凝土异形柱结构技术规程》2012 年征求意见稿大部分实用内容的研究背景和支撑材料。本书内容主要是作者及其多位硕士研究生的研究成果，部分是他人研究成果，这些他人的成果均是公开的资料，本书均给出了这些资料的原始出处，供喜好研究的读者深入阅读。考虑到已经出版的《混凝土异形柱结构技术规程（JGJ 149—2006）理解与应用》对原规程内容已有详细介绍，本书对这一部分介绍比较简单，只是为了方便让读者顺利地“承前启后”理解规程征求意见稿新增加内容，相关原有内容才有所介绍。

本书共 6 章。第 1 章介绍了汶川地震异形柱结构震害及模拟计算、强震的振动台试验和分析；第 2 章介绍了地震作用下有关异形柱结构整体性能，即强柱弱梁的研究；第 3 章介绍了异形柱构件层次的研究，诸如 T 形柱截面腹板凸出端增强配筋、异形柱纵筋最小配筋率、异形柱截面两肢长相对比例限制、Z 形截面柱正截面和斜截面承载力设计，填补了 Z 形柱斜向受剪设计规定的空白、使用新强度级别钢筋的异形柱延性性能和配筋要求；第 4 章是符合《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 要求的异形柱框架房屋适用高度的研究；第 5 章介绍了基底隔震异形柱房屋的研究；第 6 章介绍了异形柱框架—剪力墙结构的 Z 形柱及其节点计算。本书很多内容对矩形柱结构设计也有指导意义，供设计人员参考。

本书作者及其编写的章节如下：钱李义（第 1 章第 1 节、第 4 章），刘中吉（第 2 章、第 3 章第 1 节），严孝钦（第 3 章第 2 节），赵盼（第 4 章、第 5 章），其余由王依群编写并负责全书统稿。

感谢刘宜丰高工、翁大根博士提供的帮助。感谢众多参考文献的作者。

作者水平有限，书中如有疏漏、不足、甚至错误之处，恳请读者批评指正。



# 目 录

<b>第 1 章 异形柱结构震害、数值模拟和分析</b> .....	1
1.1 异形柱结构震害 .....	1
1.1.1 汶川地震中异形柱结构的表现 .....	1
1.1.2 国家新标准设计规范的要求 .....	7
1.2 数值模拟异形柱结构在地震中的表现 .....	7
1.2.1 房屋简况与震害 .....	7
1.2.2 计算模型与模拟计算 .....	8
1.2.3 弹塑性动力时程分析 .....	15
1.2.4 计算结果分析 .....	17
1.3 8 度区异形柱框架结构的振动台试验 .....	21
1.3.1 试验概况 .....	21
1.3.2 试验现象概述 .....	24
1.3.3 主要试验结果分析 .....	26
1.3.4 小结 .....	26
1.4 异形柱结构抗震性能分析.....	26
本章参考文献 .....	27
<b>第 2 章 异形柱框架强柱弱梁研究</b> .....	28
2.1 汶川地震中异形柱框架结构强梁弱柱分析.....	28
2.2 7 度(0.15g)地震设防异形柱框架结构部分梁纵筋放在梁侧板的分析 .....	28
2.3 7 度 (0.15g) 区 6 层建筑算例 .....	30
2.3.1 计算模型及小震设计 .....	30
2.3.2 弹塑性动力时程分析 .....	33
2.3.3 小结 .....	33
本章参考文献 .....	33
<b>第 3 章 异形柱构件研究新进展</b> .....	35
3.1 T 形截面柱腹板凸出肢端加强配筋.....	35
3.1.1 研究背景.....	35
3.1.2 算例 .....	36
3.1.3 弹塑性动力时程分析方法与输入的地震波.....	40
3.1.4 符合规程要求的框架抗震性能检验 .....	41
3.1.5 柱根及边柱加强的框架抗震性能 .....	43
3.1.6 小结 .....	45
附: NDAS2D 输入数据文件.....	45

3.2	异形柱纵筋最小配筋率	48
3.2.1	纵筋最小配筋率研究的意义	48
3.2.2	纵筋最小配筋率的研究分类	48
3.2.3	各国规范对纵筋最小配筋率的不同规定	49
3.2.4	异形柱规程对异形柱纵筋最小配筋率的规定	52
3.2.5	对异形柱规程提出的几点修改意见	52
3.3	异形柱最小肢长和最大肢长比的规定背景	59
3.4	Z形柱正截面受压弯、斜截面受剪承载力试验和理论研究	62
3.4.1	正截面承载力	62
3.4.2	斜截面承载力	64
3.5	配置新强度级别钢筋的异形柱延性与相应轴压比和配箍特征值要求	70
3.5.1	《规程》修订中轴压比限值的修订需要考虑的内容	71
3.5.2	异形柱延性计算程序原理及与实验结果的对比分析	71
3.5.3	Z形柱延性分析	74
3.5.4	Z形截面柱轴压比限值	79
3.5.5	各抗震等级下异形柱轴压比限值	82
	本章参考文献	86
<b>第4章</b>	<b>异形柱框架结构房屋适用高度研究</b>	<b>89</b>
4.1	6度(0.05g)地震设防区异形柱框架结构适用高度	89
4.1.1	结构及其小震弹性设计结果	89
4.1.2	弹塑性分析所需数据	92
4.1.3	弹塑性时程计算	94
4.1.4	结果分析	97
	附: NDAS2D输入数据文件	97
4.2	7度(0.10g)地震设防区异形柱框架结构适用高度	101
4.2.1	结构及其小震弹性设计结果	101
4.2.2	弹塑性分析所需数据	104
4.2.3	弹塑性时程计算	106
4.2.4	结果分析	109
	附: NDAS2D输入数据文件	109
4.3	7度(0.15g)地震设防区异形柱框架结构适用高度	113
4.3.1	结构及其小震弹性设计结果	113
4.3.2	弹塑性分析所需数据	115
4.3.3	弹塑性时程计算	118
4.3.4	结果分析	120
	附: NDAS2D输入数据文件	121
4.4	8度(0.20g)地震设防区异形柱框架结构适用高度	124
4.4.1	结构及其小震弹性设计结果	124
4.4.2	弹塑性分析所需数据	127

4.4.3	弹塑性时程计算	129
4.4.4	结果分析	131
	附: NDAS2D 输入数据文件	132
4.5	8度(0.30g)地震设防区异形柱框架结构适用高度	134
4.5.1	结构及其小震弹性设计结果	134
4.5.2	弹塑性分析所需数据	137
4.5.3	弹塑性时程计算	138
4.5.4	结果分析	139
	附: NDAS2D 输入数据文件	141
4.6	7度(0.10g)地震设防区乙类异形柱框架结构适用高度	143
4.6.1	乙类建筑设计要求	143
4.6.2	算例结构及其小震弹性设计结果	144
4.6.3	弹塑性分析所需数据	147
4.6.4	弹塑性时程计算	150
4.6.5	结果分析	155
	附: NDAS2D 输入数据文件	155
4.7	小结	158
	本章参考文献	159
<b>第5章</b>	<b>异形柱结构隔震研究</b>	161
5.1	结构数据及计算模型	161
5.2	隔震方案一	162
5.3	隔震方案二	165
5.4	小结	168
	附: NDAS2D 输入数据文件	169
	本章参考文献	173
<b>第6章</b>	<b>异形柱框架-剪力墙结构中Z形柱及其节点计算</b>	174
6.1	Z形截面柱设计注意事项	174
6.2	算例	174
	本章参考文献	181

# 第 1 章 异形柱结构震害、数值模拟和分析

## 1.1 异形柱结构震害

### 1.1.1 汶川地震中异形柱结构的表现

随着国家经济发展,政府关注民生,公民生活水平的提高,住宅产业化的推进,混凝土异形柱结构住宅还有一定的应用市场。特别是经历了 2008 年 5 月 12 日汶川大地震,强震区的几幢异形柱结构房屋表现良好<sup>[1~5]</sup>,弥补了异形柱房屋没经历过实际地震考验的缺憾。

#### 1. 异形柱框架结构震后评估

在中国建筑科学研究院主编《2008 年汶川地震建筑震害图片集》<sup>[1]</sup>第 82 页介绍了都江堰市国堰宾馆副楼,见图 1.1-1、图 1.1-2。



(a)



(b)

图 1.1-1 国堰宾馆副楼

(a) 外观; (b) 侧面外观

坐落在四川省都江堰市的国堰宾馆的 7 层高异形柱框架结构平面如图 1.1-3 所示,2008 年汶川大地震前其设防烈度为 7 度 ( $0.1g$ ), II 类场地,抗震等级为三级,共 7 层,除第一层层高为 4.6m (由基础顶面算起),其余层高均为 3.0m。其中梁和楼板的混凝土等级均为 C30,首层柱的混凝土等级为 C35,其他层柱的混凝土等级为 C30。梁柱纵筋为 HRB335,箍筋和楼板钢筋为 HPB235。梁柱纵筋保护层厚度均为 25mm。屋面和楼板均为现浇板,板厚 110mm。采用加气混凝土砌块填充墙。楼面活荷载为  $2.0\text{kN/m}^2$ ,屋面活荷载为  $0.5\text{kN/m}^2$ 。

中国建筑科学研究院主编《2008 年汶川地震建筑震害图片集》<sup>[1]</sup>第 82 页对该工程的震后评价是:“都江堰市国堰宾馆副楼,7 层异形柱框架结构,建于 2008 年,框架轻微受损,围护墙开裂。”

德阳旌湖佳苑住宅区异形柱框架结构,以下全部是《来自汶川大地震亲历者的第一手



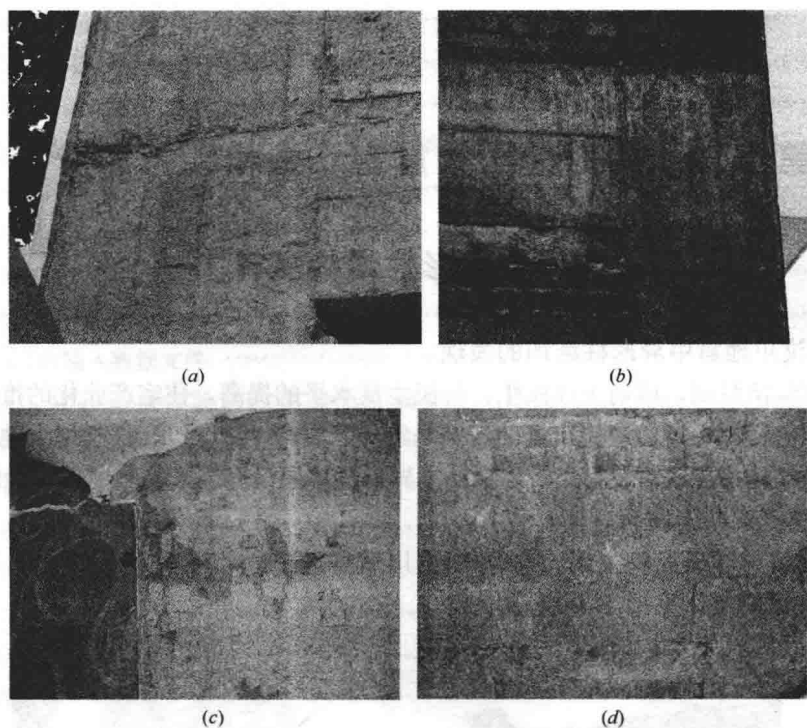


图 1.1-2 国堰宾馆副楼梁端开裂

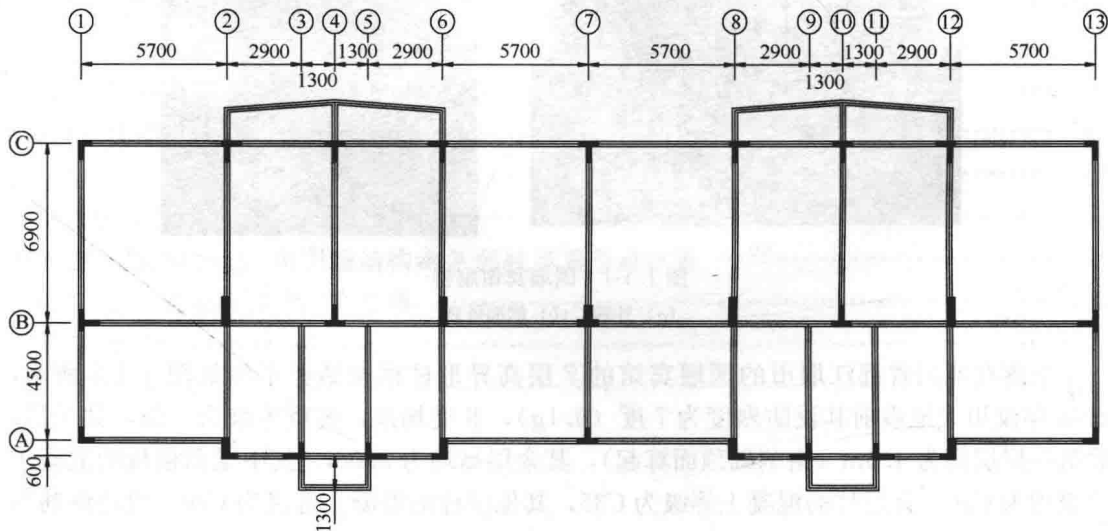


图 1.1-3 国堰宾馆副楼结构平面图

资料——结构工程师的视界与思考》<sup>[2]</sup>的文字，不是本书作者的震灾评价。

“旌湖佳苑二期工程商住楼 2、3、4 栋为 5~7 层的全现浇钢筋混凝土异形柱框架结构，房屋总高度为 20.3m；建筑工程抗震设防类别为丙类，设计抗震设防烈度 6 度，框架抗震等级为三级；1、5~9 栋为 6 层砖混结构，房屋总高度为 18.6m，设计抗震设防烈度 6 度。于 1999 年设计。震害情况：基本完好。”见图 1.1-4。



图 1.1-4 旌湖佳苑二期工程商住楼

都市美丽风景异形柱框架地震表现, 同上书第 300 页, 以下全部是《来自汶川大地震亲历者的第一手资料——结构工程师的视界与思考》<sup>[2]</sup>的文字。

“都江堰都市美丽风景住宅小区工程由 18 栋仿欧风格住宅组成, 总建筑面积约 6 万  $\text{m}^2$ , 设计抗震设防烈度为 7 度, 楼板均为现浇, 采用砖混及异形柱框架结构。于 2005 年设计建造。震害情况: 主体结构完好, 仅少量填充墙损坏, 属轻微损坏。” 见图 1.1-5。

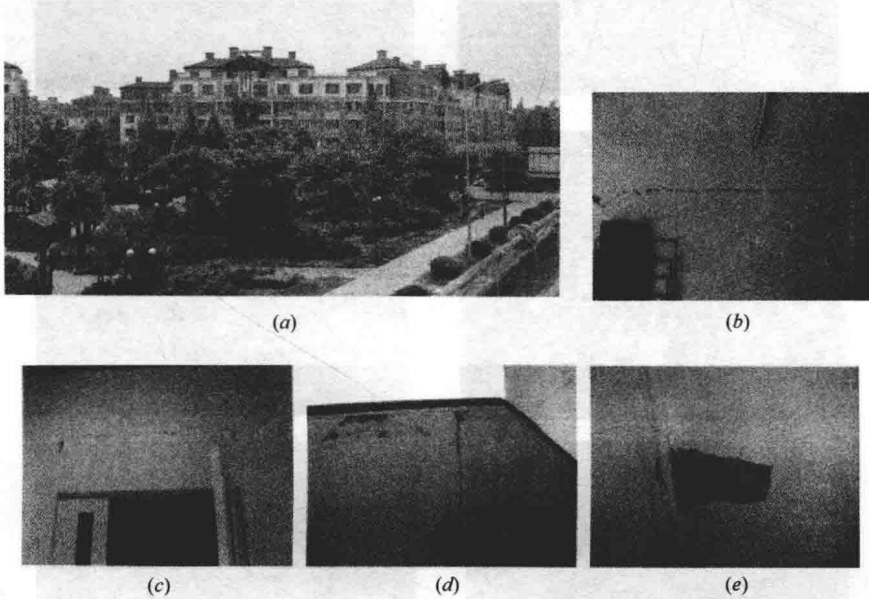


图 1.1-5 都市美丽风景住宅小区工程

(a) 小区远景; (b) 底层填充墙裂缝; (c) 单元门上部填充墙裂缝;  
(d) 楼梯间填充墙裂缝; (e) 楼板间填充墙抹灰脱落

李英民, 刘立平所著《汶川地震建筑震害与思考》<sup>[3]</sup>中介绍的“都江堰市都江之春小区”建筑 4 是矩形柱和异形柱混合承重结构, 进深方向有错层 (从右往左第 4 列柱处为错层位置), 错层高差约 1.5m, 错层处形成短柱。地震后短柱破坏严重, 室内楼梯破坏严重。

本书作者认为: 由于有错层, 使得结构竖向严重不规则, 所以地震时柱破坏严重, 异形柱也是如此。虽然异形柱没设置在错层部位, 但因为整个结构不规则, 造成异形柱也受力复杂, 柱根有所破坏。另外, 该工程施工质量方面也有问题 (图 1.1-6f、h)。希望异形柱结构不得采用错层结构, 即使是矩形柱结构, 也尽量不采用错层结构。

图 1.1-6 (h) 引自文献: 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组: 汶川地震建筑震害分析<sup>[4]</sup>。由图估计是 T 形 (或不等肢 L 形) 截面角柱, 截面尺

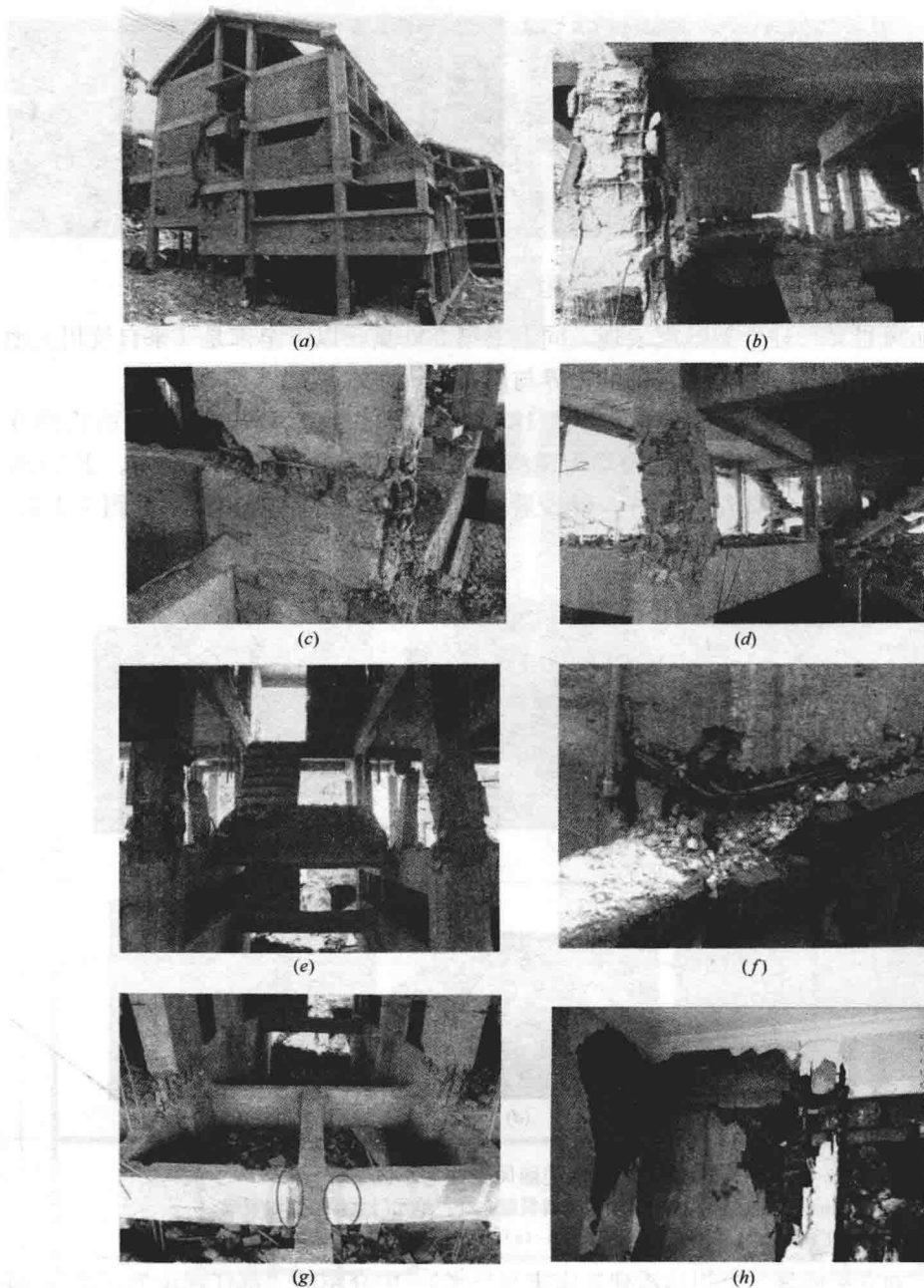


图 1.1-6 都江堰之春小区建筑 4

- (a) 建筑 4 侧面；(b) 端部破坏（左侧柱身破坏，纵筋屈曲，中间楼板折断，右远端柱身掏空）；  
 (c) 异形柱柱底破坏（混凝土剥落，纵筋向外鼓出）；(d) 短柱柱身及节点破坏；  
 (e) 楼梯间两侧短柱柱身及节点破坏；(f) 异形柱破坏（柱纵筋鼓出，原柱箍筋在施工中被压挤到一起）；  
 (g) 异形柱根部破坏，地梁中部竖向裂缝；(h) 异形柱端破坏

寸较大，看不清纵筋和箍筋，从掉落较多混凝土看，怀疑异形柱规程关于肢端纵筋最小配筋率 0.2% 的要求和箍筋加密的要求未执行。

## 2. 都江堰市水都豪庭住宅小区异形柱框架结构

清华大学、西南交通大学、重庆大学、中国建筑西南设计研究院有限公司和北京市建

筑设计研究院联合编写《汶川地震建筑震害分析及设计对策》<sup>[5]</sup>第 164~166 页。

### (1) 工程概况

该钢筋混凝土异形柱框架结构住宅楼位于都江堰市，由 10 余栋 3 层联排多层别墅住宅组成，其约 30000m<sup>2</sup>。隔墙为轻质空心砌块，隔墙与框架间未见锚固连接构造或拉结梁。

### (2) 震害情况

建筑外观破坏情况如图 1.1-7 (a) 所示。填充墙严重破坏：梁下出现水平缝（图 1.1-7b）；柱边出现竖向裂缝（图 1.1-7f）；窗间和窗下出现 X 形裂缝（图 1.1-7d）；门窗洞口附近严重开裂，随抹灰层脱落及局部坍塌（图 1.1-7c）；外墙局部坍塌（图 1.1-7e、f）。混凝土框架的部分构件端部开裂，但破坏并不严重（图 1.1-7g）。



(a)



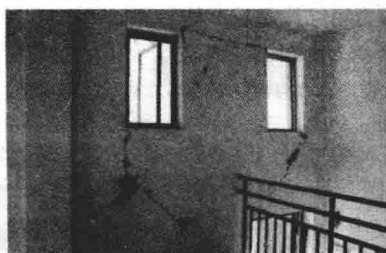
(b)



(c)



(d)



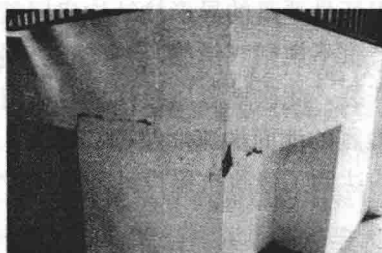
(e)



(f)



(g)



(h)

图 1.1-7 都江堰市水都豪庭住宅小区异形柱框架结构

汶川地震中都江堰的遭遇烈度为8~9度，相当于设防烈度的大震或超过设防烈度大震。该建筑填充墙虽然震害严重，也零星局部坍塌，但不危及生命安全。由于楼层高度不大，主体框架结构震害较轻，实现了“大震不倒”的设计目标。

### 3. 异形柱框架-剪力墙结构震后评估

江油市（2001 建筑抗震设计规范设定防烈度为7度0.1g，2010 抗震规范又改为7度0.15g 设防）异形柱框架-剪力墙结构震害，引自冯远等《来自汶川大地震亲历者的第一手资料——结构工程师的视界与思考》<sup>[2]</sup>第95页。

江油市11层异形柱框架-剪力墙结构震后外观如图1.1-8(a)所示，房屋内部填充墙沿梁柱边缘开裂，而结构构件未破坏（图1.1-8b）。

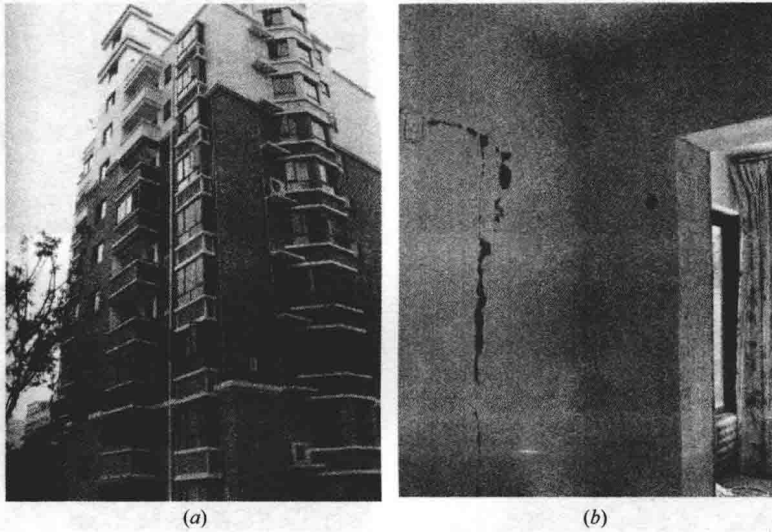


图 1.1-8 异形柱框架-剪力墙结构震后评估  
(a) 江油市11层异形柱框架-剪力墙结构震后外观  
(b) 内部填充墙沿梁柱边缘开裂，而结构构件未破坏

### 4. 小结

由于没见到高烈度区房屋震后状况调查统计报告，无从知道震害灾区共有多少栋异形柱结构房屋，未损坏的和损坏的各占多少。因以上单位或个人调查主要是以找最严重的房屋震害为目的，不是以查找无损坏房屋为目的，可能有未受损的异形柱结构房屋未见报道。但是，损坏最严重的异形柱结构房屋就是上述的几栋。这几栋房屋中，除都江堰市都江小区属于严重不规则（错层），且施工质量较差，震害相对严重些外，其余全为轻微受损或填充墙开裂，此次地震属超强地震（超过设防烈度近1度，如都江堰市设防烈度7度0.1g，这次地震的地面加速度超过220gal，即达到8度强），可见正常设计、正常施工的异形柱结构均达到了建筑抗震设计规范的“大震不倒”的要求，甚至达到了“大震可修”程度。

为什么不被多数人看好的混凝土异形柱房屋在大地震中有出人意料的好表现？这绝不是灵异现象，是有其内在原因的。（1）异形柱结构是明显的梁铰破坏机制结构，民用住宅跨度小，梁截面尺寸和楼板厚度较小，而其竖向构件（异形柱）抗弯刚度比水平构件（梁



板)抗弯刚度大,类似于框架-剪力墙结构,作为竖向构件的剪力墙比梁板的抗弯刚度就大很多,所以其震害就比矩形柱框架结构轻,只是异形柱结构的竖向和水平构件抗弯刚度相差的程度没框架-剪力墙那样显著。现行设计规范对竖向构件与水平构件的强度比有明确要求,而对二者间的刚度比则没有明确的要求,事实上,刚度大的构件才能做到强度大;(2)异形柱结构里面柱的轴压比控制严,异形柱规程规定的柱轴压比限值较小,因为异形柱结构是梁柱节点剪压比控制,使得实际结构中轴压比比异形柱规程规定的柱轴压比限值还小得多,柱不易出现小偏压破坏,柱的延性好;(3)异形柱结构用在住宅建筑中,其层高小,建筑规则性好,没有错层及其他复杂情况,民用住宅跨度小,梁截面尺寸和楼板厚度较小,而房屋自重也不很大。(4)异形柱结构框架节点均经过强度计算。针对框架节点强度是异形柱结构的薄弱环节,2004年异形柱结构配筋软件CRSC就解决了框架节点强度计算问题,并提供该功能免费的版本给各设计单位使用,保证了异形柱结构的抗震安全性。以上特点决定了异形柱结构在适用范围内具有较好的抗震性能。

实践表明,异形柱结构抗震性能满足国家标准要求,社会对异形柱房屋有一定的需求。

### 1.1.2 国家新标准设计规范的要求

中国人口数量巨大,住房需求量巨大,建筑材料用量也巨大,产生了前所未有的自然资源消耗。为了可持续发展,国家适时提出了节能环保的要求。由此,新材料或高强度材料得到应用,新版国家标准混凝土结构设计规范已有体现,与异形柱结构相关的方面有:结构安全度提高,耐久性要求提高,防连续倒塌的要求,高强度钢筋的应用,改进了框架柱二阶效应的计算方法,并筋、钢筋锚固板、叠合楼板等新施工技术的实施。

2008年汶川地震后,建筑抗震设计规范增大了关于强柱弱梁和强节点的内力调整系数,并规定结构设计时应计算梁侧与梁整体现浇楼板及其内部钢筋对框架梁抗弯能力的增强的作用。

为了与国家标准接轨,混凝土异形柱结构技术规程也进行了相应的修订。

## 1.2 数值模拟异形柱结构在地震中的表现

本节通过按7度(0.10g)设计建造,遭遇8度强(超过罕遇烈度)汶川强震作用下异形柱框架结构的表现,进行了分析和计算机仿真计算。

在中国建筑科学研究院主编《2008年汶川地震建筑震害图片集》<sup>[1]</sup>第82页介绍了都江堰市国堰宾馆副楼“7层异形柱框架结构,建于2008年,框架梁轻微受损,围护墙开裂。”见图1.1-1、图1.1-2。该建筑是依据2006年颁布实施《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ 149—2006设计的<sup>[6]</sup>。震前都江堰市设防烈度为7度(0.1g),这次地震都江堰市的地面加速度超过200gal,即达到8度强。可见这座异形柱框架结构达到了“大震不倒”的要求。对于这个少有的“足尺试验”,我们一定要充分利用!经成都同行帮助,我们得到了该建筑的施工图,据此建立计算模型,利用与该地点不远处的地震记录波,计算了该建筑结构弹塑性地震响应。这里列出我们的详细输入数据和计算结果与大家共享,也为读者测试其他软件计算异形柱结构的弹塑性时程响应功能提供帮助。

### 1.2.1 房屋简况与震害

坐落在四川省都江堰市的国堰宾馆的7层高异形柱框架结构平面如图1.1-3所示,

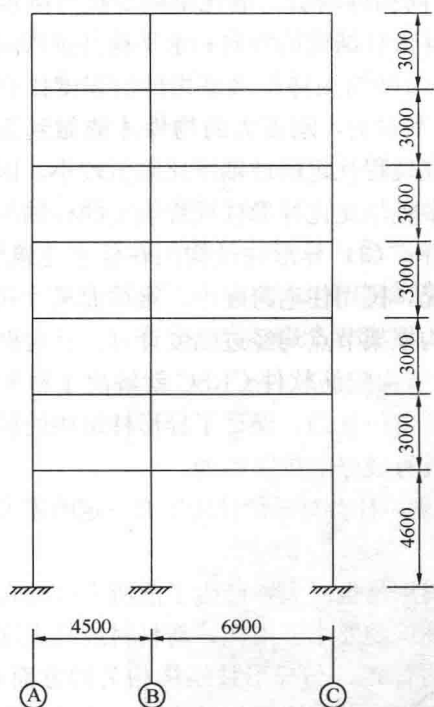


图 1.2-1 异形柱框架计算模型

### 1.2.2 计算模型与模拟计算

从该工程施工图知三种异形柱的配筋见图 1.2-2, 梁、柱受力纵筋见表 1.2-2。首层柱的混凝土弹性模量  $E$  为  $3.15 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ , 二层及以上层柱和全部梁板的弹性模量  $E$  为  $3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 。根据梁和柱的尺寸计算得到的截面积和惯性矩如表 1.2-3 所示。按高规的规定考虑了梁端与柱截面重叠区的刚臂, 具体数值见下面给出的 NDAS2D 软件<sup>[7]</sup>输入数据文件。

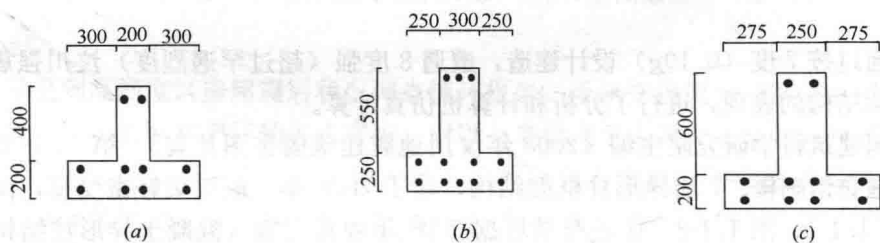


图 1.2-2 异形柱尺寸及配筋形式

(a) 柱 A; (b) 柱 B; (c) 柱 C

框架配筋结果

表 1.2-2

位置	配筋	柱截面配筋率 (%)	柱截面肢端配筋率 (%)
T形柱 A	10 $\Phi$ 20	1.31	0.262
T形柱 B	12 $\Phi$ 20	1.03	0.256
T形柱 C	10 $\Phi$ 20	1.01	0.203

注: 肢端指 T 形柱截面对称轴上凸出的肢端。配筋率均是相对混凝土全截面面积的。

2008 年汶川大地震前其设防烈度为 7 度 ( $0.1g$ ), II 类场地, 抗震等级为二级, 共 7 层, 除第一层层高为 4.6m (由基础顶面算起), 其余层高均为 3.0m。其中梁和楼板的混凝土等级均为 C30, 首层柱的混凝土等级为 C35、其他层柱的混凝土等级为 C30。梁柱纵筋为 HRB335, 箍筋和楼板钢筋为 HPB235。梁柱纵筋保护层厚度均为 25mm。屋面和楼板均为现浇板, 板厚 110mm。采用加气混凝土砌块填充墙。楼面活荷载为  $2.0 \text{ kN/m}^2$ , 屋面活荷载为  $0.5 \text{ kN/m}^2$ 。根据施工图的构造作法计算出该结构重力荷载代表值见表 1.2-1。

各楼层重力荷载代表值  $m_i$  表 1.2-1

楼层	一	二~六	七
$m_i$ ( $\text{t/m}^2$ )	1.164	1.083	1.690

选取轴⑦一榀框架, 简化为平面结构 (图 1.2-1) 进行弹塑性时程计算。图 1.2-1 中 A 轴柱编号为柱 A, B 轴柱编号为柱 B, C 轴柱编号为柱 C。

截面类型	截面尺寸 (mm)	截面面积 (m <sup>2</sup> )	惯性矩 (m <sup>4</sup> )
矩形梁 (左侧)	200×450	0.180	0.00304
矩形梁 (右侧)	200×600	0.240	0.00720
柱 A	见图 1.2-2a	0.240	0.00640
柱 B	见图 1.2-2b	0.365	0.01970
柱 C	见图 1.2-2c	0.310	0.01740

小震设计满足《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ 149—2006 对 7 度 (0.10g) 地震设防的要求。

因楼板与梁是现场整体浇筑而成,平面模型的梁截面面积和惯性矩取为矩形梁肋的两倍,以考虑梁侧楼板刚度的贡献。为了使平面模型基本自振周期与空间结构的基本自振周期相等,又因该结构是按照 2001 年版抗震规范、2002 年版混凝土规范和 2006 年版异形柱规程设计的,我们用 2005 年版 PKPM 软件进行自振周期计算,算得结构的基本自振周期为 0.988s。

图 1.2-1 的计算模型,质量取自轴⑦左右各半跨范围内的质量。即由图 1.2-3 可算出轴⑦框架承担的荷载面积,再用其乘以表 1.2-1 各楼层的每平方米的重力荷载代表值,就得到各平面模型各楼层质量。如第一楼层为:  $m=11.4 \times 5.7 \times 1.164=75.64\text{t}$ ,二~六楼层  $m=11.4 \times 5.7 \times 1.083=70.37\text{t}$ ,第七楼层  $m=11.4 \times 5.7 \times 1.69=109.82\text{t}$ ;按照柱 A、柱 B、柱 C 各承担 20%、50%、30%分到三柱上。并根据平面模型的基本自振周期与三维模型基本自振周期相等,即同为 0.988s 略微调整质量数值。最终取平面框架第一层自左至右各节点的质量分别为 15.1t、37.8t、22.7t。二~六层自左至右各节点的质量分别为 14.1t、35.2t、21.1t。第七层自左至右各节点的质量分别为 22t、54.5t、32.5t。

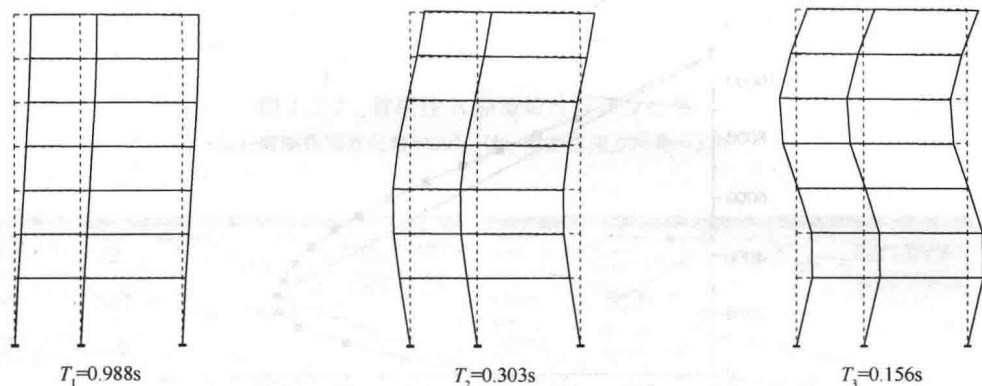


图 1.2-3 平面模型的前三阶自振周期和振型

框架平面模型梁上荷载、柱上荷载取与质量相称的值,以考虑地震作用时梁、柱构件内力与实际情况相同。

取梁上均布荷载 25kN/m,则由此一层总均布荷载为  $11.4\text{m} \times 25\text{kN/m}=285\text{kN}$ ,由此第一层左点集中荷载为  $151\text{kN}-2.25 \times 25 \approx 95\text{kN}$ ,中点  $378-5.7\text{m} \times 25 \approx 235\text{kN}$ ,右点  $227-3.45 \times 25 \approx 140\text{kN}$ 。

相同方法得,第二~六层左点集中荷载为: 85kN、中点 260kN、右点 125kN。

第三层左点集中荷载为：185kN、中点 340kN、右点 280kN。

用 NDAS2D 软件<sup>[7]</sup>计算得到平面模型的前三阶自振周期和振型如图 1.2-3 所示。

柱的  $N-M$  相关曲线用自编的 MyN 软件计算，其中材料强度取平均值，C35、C30 混凝土强度分别取为  $f_c = 32、28\text{N/mm}^2$ ，纵筋强度为  $382\text{N/mm}^2$ 。梁柱单元的屈服面代码为 3 时，NDAS2D 软件采取简化的屈服面  $M-N$  关系曲线如图 1.2-5 所示，相应的特征点数据见表 1.2-4。由于当屈服面代码=3 时，屈服面  $M-N$  关系曲线形状采用的折线形式，与屈服面真实的  $M-N$  关系曲线相比存在相当大的误差，见图 1.2-6。我们修改软件 NDAS2D，纳入三次曲线拟合屈服曲线，约定为屈服面代码=4。屈服面代码=4 时正负屈服弯矩  $M_y$  随压力  $P$  的变化用三次多项式拟合：

$$M_y^+ = a + bP + cP^2 + dP^3; \quad M_y^- = e + fP + gP^2 + hP^3 \quad (1.2-1)$$

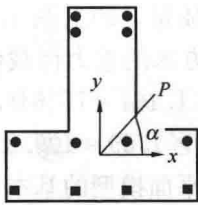


图 1.2-4 弯矩作用方向角

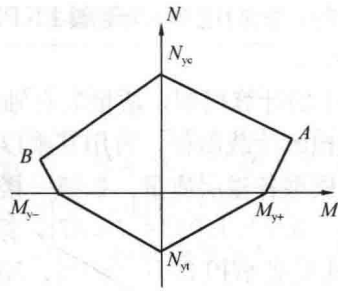


图 1.2-5  $M-N$  相关曲线

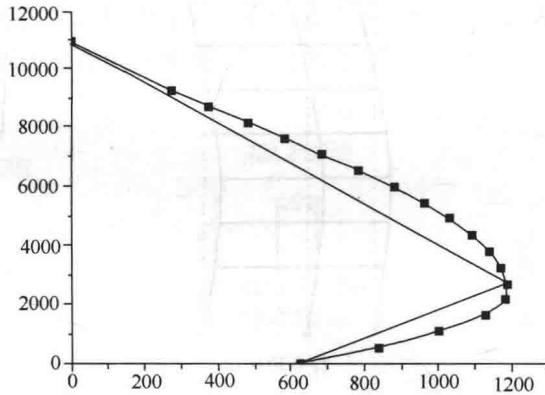


图 1.2-6 屈服面形状采用不同曲线形式比较

这里采用三次曲线拟合屈服曲线进行计算，通过笔者编制的 MyN 软件计算得出的轴压力和弯矩数值，用三次多项式拟合后得到的梁柱单元在屈服面=4 时的特性点及多项式系数见表 1.2-5。偏拉段仍用直线拟合。

式 (1.2-1) 和表 1.2-5 中  $M_y^+$ 、 $M_y^-$  分别是图 1.2-4 中 T 形截面弯矩作用方向角  $\alpha$  分别为  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  时的受弯承载力值。

MyN 软件的计算结果见图 1.2-7~图 1.2-12，其中纵筋保护层厚度取值按《混凝土异