

全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集

混凝土异形柱结构 理论及应用

全国混凝土异形柱结构学术研讨会组委会组织编写

主编：王依群

知识产权出版社

全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集

混凝土异形柱结构理论及应用

全国混凝土异形柱结构学术研讨会组委会组织编写

主 编:王依群

知识产权出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土异形柱结构理论及应用:全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集/王依群主编. —北京:知识产权出版社,2006. 10

ISBN 7-80198-660-1

I. 混… II. 王… III. 混凝土结构-柱(结构)—学术会议—文集
IV. TU375. 3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 118268 号

全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集

混凝土异形柱结构理论及应用

主编 王依群

责任编辑:刘 爽 责任出版:杨宝林

封面设计:刘 爽

出版发行:知识产权出版社

社 址:北京市海淀区马甸南村 1 号

网 址:<http://www.cnipr.com>

电 话:010-82000893 82000860 转 8152

编辑邮箱:Liushuang@cnipr.com

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 次:2006 年 10 月第 1 版

字 数:320 千字

ISBN 7-80198-660-1/T · 232

邮 编:100088

邮 箱:bjb@cnipr.com

传 真:010-82000893

经 销:新华书店及相关销售网点

印 张:12.5

印 次:2006 年 10 月第 1 次印刷

定 价:36.00 元

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

2006年8月1日起,国家行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ 149—2006 经建设部批准颁布实施。为了交流近年来混凝土异形柱结构工程领域在科研、设计、施工等方面的成果,进一步促进混凝土异形柱结构的理论研究和工程应用的发展,召开本次学术会议。旨在通过会议充分交流学术观点,活跃学术思想,促进科技发展。

这本论文集的内容,反映了近年来国内设计、施工、科研单位在混凝土异形柱结构领域的辛勤劳动成果,体现了科技理论对工程实践及规程编制的重要价值,必将对我国混凝土异形柱结构深入可持续发展产生重要的影响。

混凝土异形柱结构体系是一个新型的结构体系,使用时间尚不太久,还没有积累足够丰富的工程实践经验,尚缺乏实际震害破坏资料,在这个领域还有不少工作要做,还有待我们进一步深入探索和研究。国家行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》JGJ 149—2006 已经实施,但是规程的内容尚需不断修正、改进和充实,需要我们不断地努力。我们衷心希望广大科技工作者继续为混凝土异形柱结构的深入研究和应用做出更大的贡献,推动混凝土异形柱结构向更高水平发展,为我国建设事业发挥更大的作用。

混凝土异形柱结构是普通混凝土结构家族中的一个新成员,它的成长和发展体现了我国科研人员、工程技术人员在建筑结构领域的自主创新之路。我们真诚地感谢为混凝土异形柱结构发展辛勤劳动的科技工作者,感谢他们的成果和做出的贡献。

全国混凝土异形柱结构学术研讨会组织委员会

2006年10月

目 录

前言

第一篇 理论分析

混凝土异形柱结构的应用发展、科学研究及规程编制基础	《规程》编制组	2
混凝土异形柱结构适用的房屋最大高度分析	李文清 严士超	14
混凝土异形柱结构多方向地震作用计算分析	严士超 李文清	20
混凝土异形柱框架抗震性能理论分析	王铁成 林 海 刘 建 康谷贻 严士超	25
不等肢异形柱延性性能及轴压比限值	许贻懂 赵艳静 陈云霞 王依群	32
钢筋混凝土 T 形截面柱双向轴压比及配筋研究	忻鼎康 邓景纹	42
钢筋混凝土异形柱框架结构不同柱-梁抗弯强度比值的 Pushover 分析 研究	管民生 杜宏彪	49
异形柱斜截面受剪承载力计算	王依群 康谷贻	56
转换梁与底部柱线刚度比合理值的研究	苏光学 熊进刚	61
梁塑性铰移位减少异形柱框架节点剪力初探	甘明华 王依群 康谷贻	66
异形柱空间框架结构静力弹塑性分析	汪 凯 张 晋 周 建 冯 健 吕志涛	70
配筋形式对等肢 T 形截面柱正截面抗弯承载力的影响	申冬建 王铁成 陈云霞 严士超	76

第二篇 试验研究

基于桁架-拱模型的 T 形截面混凝土框架柱受剪承载力分析	王铁成 邵 莉 陈向上	82
钢筋混凝土异形柱-板柱结构体系的抗震性能研究	刘文珽 黄承逵	89
钢筋混凝土异形柱-板柱结构体系的冲切性能研究	刘文珽 黄承逵	95
不等肢异形柱框架节点抗震性能试验研究	曲福来 黄承逵 徐士强 张前国 李庆钢	100
带宽肢的钢筋混凝土异形柱框架抗震性能试验研究	王铁成 张学辉 刘 建 康谷贻	104
钢筋混凝土不等肢异形柱双向偏心受压性能试验 研究	徐士强 黄承逵 曲福来 张毅斌 赵 欣 张敬涛	111
用损伤本构关系分析异形柱受弯截面	焦俊婷 刁 波	117
钢筋混凝土异形柱试验研究	苏益声 梁荣耀 张 斌 杨 坛	122
高烈度区异形柱钢筋混凝土结构的振动台试验研究	刘 建 潘 文	127
考虑重力效应的异形柱框架结构模型振动台试验 研究	冯 健 张 晋 吕志涛 汪 凯 周 建	141

带 ALC 板材填充墙异形柱框架模型低周反复试验

研究 张 晋 汪 凯 周 建 冯 健 吕志涛 148

第三篇 工程设计与施工

钢筋混凝土异形柱结构抗震概念设计及设计实例 肖 竞 李 昆 156

8 度抗震设防区 8 层异形柱-抗震墙结构试设计分析 何 喜 褚青青 160

《混凝土异形柱结构技术规程》典型工程试设计总结及思考 王剑非 钟 阳 163

异形柱结构抗震若干问题研究及设计建议 曹万林 169

异形柱结构体系在学生公寓设计与施工中注意的问题 戎 贤 白桂南 176

混凝土异形柱建筑施工 张 方 181

第一篇 理论分析

混凝土异形柱结构的应用发展、 科学研究及规程编制基础

《规程》编制组*

【摘 要】 本文对异形柱结构的发展依据、适用范围、工程应用、科学研究及中华人民共和国行业标准《混凝土异形柱结构技术规格》JGJ 149 2006 的编制基础作概要介绍。

【关键词】 异形柱结构;应用发展;科学研究;规程编制基础

一、异形柱结构体系的发展和应用

(1) 异形柱结构是 20 世纪 70 年代中、后期天津市墙体改革促进建筑结构体系变革的产物,

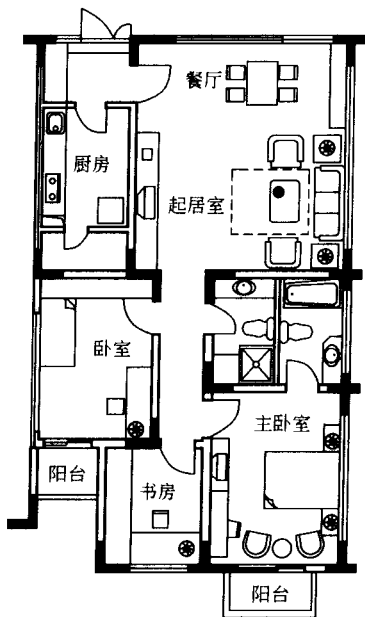


图 1 采用异形柱结构住宅的建筑布置

当时提出的异形柱框轻节能结构体系(即异形柱框架-轻墙结构体系),其构想是:从取代烧制黏土砖进行墙体改革入手,采用以工业废料制作的、具有隔热、保温、节能、节地、环保及减轻自重等综合效益的轻质墙体材料作为框架填充墙;同时又从改善传统矩形柱框架的建筑功能入手,提出采用隐于墙内的柱——即所谓的异形截面柱来取代普通矩形柱,柱肢厚度与墙体厚度取齐,避免了矩形柱在室内凸出的缺点,扩大了建筑有效使用面积,提高了建筑布置的灵活性,改善了室内空间视觉效果(图 1)。异形柱结构就是在这样的理念指导下产生和发展起来的,在实际使用中受到用户的欢迎,且符合当前国家正大力宣传贯彻的积极推行墙体改革、节约能源及科技创新、研究探索新型住宅建筑体系的方针政策。

自从我国宣布在多地陆续禁用烧制黏土实心砖以来,混凝土异形柱结构成为备受关注的住宅建筑结构体系之一,在一些地方逐步得到应用和发展。

(2) 这里列出了 90 年代后期以来国务院、国家发展计划委员会、科学技术部及建设部颁布的有关住宅建筑体系发展的若干文件和资料(仅摘录与异形柱结构有关的部分),是发展异形柱结构的重要依据:

① 国务院办公厅 72 号文件《关于推进住宅产业现代化提高住宅质量若干意见的通知》(1999 年)的“加强新型结构技术的开发研究”专题中,异形柱框轻结构体系被列为住宅建设中

* 本文由《规程》编制组负责人严十超执笔,主要根据规程各有关部分背景资料写成。参加本文工作的有康谷贻、王依群、陈云霞、赵艳静等。

5 种结构体系之一。

② 国家发展计划委员会、科学技术部联合颁发《当前优先发展的新技术产业化重点领域指南》(1999 年)的“新型建筑体系”专题中,隐形框架轻型节能建筑体系被列为近期产业化的重点之一。

③ 建设部发布《关于建筑业进一步推广应用 10 项新技术的通知》(1998 年)中,提出发展框架轻墙建筑体系,积极采用异形柱框架结构。

④ 建设部在发布《一九九九年科技成果重点推广项目》中列出了“大开间住宅钢筋混凝土异形柱框轻结构技术”(项目编号 99010),完成单位:天津大学建筑工程学院土木工程系、天津市新型建材建筑设计研究院。

⑤ 国家“九五”重点科技攻关项目子项成果《小康住宅建筑结构体系成套技术指南》(2001 年)中列入了异形柱结构体系。

(3) 在第一批国家级住宅示范工程中建有用异形柱结构的住宅,例如,天津市华苑碧华里、居华里、绮华里及金厦新都庄园示范小区等。建设部住宅产业化促进中心主编的《国家康居住宅示范工程(方案精选)》第一集列出了国内一些城市住宅示范工程中采用异形柱结构体系的设计方案,包括:江苏昆山、无锡、南京、仪征,浙江杭州、温州、瑞安、平湖、嘉兴、嘉善、台州,广州、深圳、湛江,山东济南,河南郑州,辽宁沈阳、大连,广西南宁,湖北武汉,重庆,上海等地。

(4) 异形柱结构在国内各地建成的总量,目前难以全面掌握准确统计数字,据保守粗估已有 2000 万 m^2 左右,混凝土异形柱结构在国内已经有了相当规模的工程应用。

(5) 随着异形柱结构在各地的应用和发展,迫切需要有指导设计、施工、审查和监理的工程技术标准,促使国内一批省市编制异形柱结构的地方标准或设计暂行规定,如广东、天津、甘肃、江苏、江西、安徽、河北、上海、辽宁、云南等。广东规程(1995 年)推出最早,但只针对异形柱的设计。天津规程(1998 年)则从异形柱构件的截面设计(正截面、斜截面及梁柱节点)和构造到异形柱结构设计施工全面规定,首次初步形成了异形柱结构技术规程的基本体系,填补了这个领域的空白,在国内具有重要影响。2003 年天津市还根据新颁布修订的现行国家标准相应颁布了修订版《钢筋混凝土异形柱结构技术规程》DB 29-16—2003。

上列这些地方标准的实施为国家行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》的编制提供了重要的基础。

(6) 异形柱结构体系的适用范围:

① 异形柱结构发展早期主要应用于多层住宅建筑;

② 现在异形柱结构已应用到别墅建筑及小高层住宅建筑;

③ 近年来异形柱已从住宅建筑扩展到集体宿舍建筑,天津大学、南开大学及河北工业大学等已建成采用异形柱结构的学生公寓;

④ 发展趋势:有可能扩展到其他较规则的一般民用建筑。

二、《规程》编制所依据的主要科研成果

用异形柱取代一般框架的矩形柱所构成的异形柱结构,与一般框架结构的内力、变形特性及抗震性能方面有不可忽视的差异,其根本原因在于异形截面柱与矩形截面柱之间的几何形状不同,导致异形柱截面在力学特性、承载力特性及抗震性能等方面与矩形柱大不相同,而且各种截面形状(例如 T 形、L 形、+ 形)之间亦有很大差别,即使是同一种截面形状,随截面尺寸

比例的不同,或随荷载(作用)方向的变化,其性能又有很大的差异,不等肢异形柱的情况则更为复杂。所以从建筑结构技术角度来说,异形柱结构非常值得研究,比矩形柱要复杂得多。只有深入研究并掌握异形柱结构的特性规律,才能为《混凝土异形柱结构技术规程》编制提供正确的依据;才能合理使用异形柱结构,确保结构安全。近几年来,异形柱结构在住宅建设中的应用不断发展,使异形柱结构方面的科学研究成为建筑结构领域备受关注的研究课题之一,国内各高等院校、研究机构及设计研究院等纷纷开展异形柱结构的科学研究工作,目前已经积累了不少科学研究成果,成为编制国家行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》(以下简称《规程》)系统扎实的科技基础。现将《规程》编制主要依据的科研成果(以《规程》编制阶段完成的为主)作概要说明。

1. 异形柱正截面承载力计算

异形柱正截面承载力计算和构造的有关条文规定,主要是基于天津大学 32 个 L 形、T 形、+ 形截面柱的试验研究和理论分析研究成果。

(1) 异形柱正截面承载力的计算方法。

大量试验研究表明,在轴向力及弯矩的共同作用下,异形柱正截面的极限破坏也呈现受拉及受压破坏两种状态;从加载至破坏的全过程,截面平均应变基本符合平截面假定;但由于截面形状及配筋的不均匀性,柱截面中和轴一般并不与弯矩作用平面相垂直,也不与截面边缘平行,截面上各位置的纵筋应力水平不同,同一截面在不同的弯矩作用平面,其承载力及界限偏心力的差异很大,因此难于建立一个简单的计算公式。通过深入研究分析,提出了以平截面假定为基础的数值积分方法,即《规程》第 5.1.1~5.1.4 条的内容。据此方法编制了电算程序,对 28 个 L 形、T 形及 + 形截面压弯柱正截面承载力进行计算,结果表明:试验值与计算值之比的平均值为 1.198,变异系数为 0.087,彼此吻合较好。又通过对矩形截面双向偏拉试件承载力及矩形截面偏心受压构件 $M-N$ 相关曲线的核算,均有很好的 consistency。该方法用于天津市异形柱技术规程后,江苏、河北、安徽、江西等地方规程也相继采用,1993 年以来已大量运用于实际工程设计中。

异形柱正截面承载力计算中,附加偏心距 e_a 的取值基本与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 7.3.3 条中 e_a 的取值相协调。

(2) 异形柱偏心距增大系数 η_e 的计算公式。

试验研究及理论分析表明,在截面、混凝土的强度等级以及配筋已定的条件下,柱的长细比 l_0/r_a 相对偏心距 e_0/r_a 和弯矩作用方向角 α 是影响异形截面双向偏心受压柱极限承载力及侧向挠度的主要因素。为此,针对实际工程中常见的等肢 L 形、T 形、+ 形截面柱,以两端铰接的长柱作为计算模型,对各种不同情况的 350 根 L 形、T 形、+ 形截面双向偏心受压长柱(变化 10 种弯矩作用方向角、5 种长细比 $l_0/r_a=17.5\sim90.07$,5 种相对偏心距 $e_0/r_a=0.346\sim2.425$)进行了非线性全过程计算机分析,得到了等肢异形截面柱承载力及侧向挠度的规律。电算分析表明:对于同一截面柱在相同的弯矩作用方向角下,异形截面柱的正截面承载能力及侧向挠度随计算长度 l_0 及偏心距 e_0 的变化而变化;在相同 l_0 及 e_0 情况下,由于各弯矩作用方向角、截面的受力特性及回转半径的差异,承载力及侧向挠度迥然不同。经分析:沿偏心方向的偏心距增大系数 $\eta_e=1+e_0/f_a$ 主要与 l_0/r_a 及 e_0/r_a 有关,根据 350 个数据拟合回归得到偏心距增大系数 η_e 的计算公式列于《规程》(6.1.5-1)、(6.1.5-2)式,其相关系数 $\gamma=0.905$ 。

按《规程》公式(5.1.4-1)~(5.1.4-3)计算的偏心距增大系数 η_e 与 350 个等肢异形柱电算 η'_e 之比,其平均值为 1.013,均方差为 0.045;与 38 个不等肢异形柱电算 η'_e 之比,其平均值为

1.014,均方差为 0.025。因此式(5.1.4-1)、(5.1.4-3)也适用于一般不等肢异形柱(指短肢不小于 500mm,长肢不大于 800mm,肢厚小于 300mm 的异形柱)。

当 $l_0/r_a > 17.5$ 时,应考虑侧向挠度的影响。当 $l_0/r_a \leq 17.5$ 时,构件截面中由二阶效应引起的附加弯矩平均不会超过截面一阶弯矩的 4.2%,满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求。但当 $l_0/r_a > 70$ 时,属于细长柱,破坏时接近弹性失稳,本《规程》不适用。

2. 异形柱斜截面受剪承载力计算

为编制广东省 1995 年《钢筋混凝土异形柱设计规程》,华南理工大学首次开展了 L 形柱受剪承载力的试验研究。其后 1997 年天津大学对 T 形、L 形柱在单调和反复荷载作用下的受剪性能进行了较系统的试验,试件总数为 27 根。试验表明:与矩形柱比较,由于翼缘的作用,T 形柱的受剪承载力至少可以提高 15%;L 形柱由于截面不对称产生的附加扭矩的影响,其受剪承载力提高约 10%。试验还得出,与单调荷载作用比较,由于荷载的反复作用,T 形、L 形柱的受剪承载力约降低 6%~11%。在试验研究的基础上,天津市标准《大开间住宅钢筋混凝土异形柱框轻结构技术规程》DB 29-16—98 给出了 T 形和 L 形截面框架柱考虑翼缘有利作用的受剪承载力计算公式。

在《规程》编制期间,辽宁省建筑设计院、大连理工大学为编制 2003 年异形柱结构地方标准进行了总数为 52 个试件的 L 形、T 形及+形柱在单调和低周反复荷载作用的受剪性能试验。试验研究再次证明,剪跨比、轴压比、配箍率和反复荷载作用对异形柱受剪承载力的影响与矩形截面柱相同或相近,且异形柱的受剪承载力均高于矩形截面柱。低周反复荷载作用下 L 形、T 形等肢截面试件双向受剪试验表明,与单向受剪(沿框架主轴方向)试验结果相比,两者延性基本相同。而不同荷载作用方向的双向受剪承载力均高于单向受剪情况。此结论与上述天津大学的试验结果以及为编制 2002 年江苏省地方标准所进行的试验结果也是完全一致的。

众所周知,我国《混凝土结构设计规范》GB 50010 为适应工程应用高强混凝土材料的需要,考虑箍筋抗拉强度设计值提高到 360N/mm^2 的特点,及适当提高斜截面受剪破坏的可靠度,给出了框架柱斜截面受剪承载力设计计算公式。与原《混凝土结构设计规范》GBJ 10—89 比较,该公式除引入了混凝土强度影响系数 β_c 外,最重要的是采用混凝土轴心抗拉强度 f_t 作为设计指标以代替 f_c ,并将箍筋项系数由 1.25 调低到 1.0。

虽然本《规程》规定混凝土强度等级不应高于 C50,考虑到异形柱结构中可能采用高强混凝土的发展需要和箍筋可以采用 HRB400 级钢筋,以及为提高异形截面框架柱受剪破坏的可靠度并为简化计算,《规程》依据前述国内试验研究成果,采用了与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相同的设计计算公式,即不计与剪力作用方向正交的另一柱肢承载剪力的作用而按矩形截面柱计算。

需要说明的是,最近编制的天津市、安徽省、江西省等的异形柱结构地方标准均采用了相同的计算公式。

将《规程》计算公式与 63 根包括高强混凝土和单调、低周反复荷载作用的异形柱的试验结果进行比较后可以认为:本《规程》建议的设计计算方法简便可行,并有较大的安全储备。

3. 梁柱节点核心区受剪承载力

在《规程》编制期间,由于缺乏异形柱框架顶层端节点和顶层中间节点的试验数据,为填补这一空白,天津大学和南昌大学补充进行了 T、L 和+形三种截面共计 16 个试件在低周反复荷载作用下的节点抗震性能试验,重点研究了翼缘对节点抗震性能(受剪承载力和延性)的影

响。在分析和总结国内中间层异形柱节点和补充的顶层节点试验研究成果的基础上,规程编制组提出了《规程》(征求意见稿)节点核心区受剪承载力计算的两个方案,向全国征求意见。对节点核心区受剪承载力的第一、二两个方案,共收到 11 条反馈意见,其中明确表示赞成第一方案的有 7 条,占大多数。赞同第一方案的主要理由是它反映了异形柱的特点,即方案一中具有反映异形柱节点截面受力方向肢及与其垂直肢截面影响的计算公式。另有意见提出:为应用方便和简化,截面尺寸条件式不宜包括体积配箍率项。于是,我们汲取了征求来的宝贵意见,对相关公式进行了完善,提出现在《规程》中的公式。

《规程》式(5.3.3-2)中轴压比影响系数 ζ_N 从对应于轴压比 0.3 时的 1,线性逐步降低至对应于轴压比 0.9 时的 0.84。反映了试验中发现的轴压比超过 0.3 后其对节点受剪承载力的不利影响。式(5.3.3-2)中考虑了轴压比较小(≤ 0.3)时节点受剪承载力随之提高,轴压比较大(> 0.3)时,节点受剪承载力又随之逐渐降低的特性,即公式括号中第一项中 $\zeta_N \left(1 + \frac{0.3N}{f_c A}\right)$ 因子,由轴压比为 0 时的 1,线性增加至轴压比 0.3 时的 1.09;而后随轴压比增加该因子逐渐线性降低,直到轴压比 0.9 时该因子降低至 0.916。以上公式与大连理工大学、沈阳建筑大学、天津大学、南昌大学、重庆大学的 32 个异形柱梁柱节点试验结果(其中有 8 个等肢截面和 24 个不等肢截面异形柱)进行了比较,按以上公式计算结果与试验结果相比,其数据的统计平均值为 0.593,标准差 $\sigma = 0.217$,变异系数 $C_v = 0.366$,效果较好,另外这些试件中有 25 个记录了试件的延性,延性系数平均值为 3.5;可见该公式有足够的安全保障。

受力性能分析、大比例尺构件试验及结构模型振动台模拟地震响应试验及对工程设计的分析表明:框架梁柱节点是异形柱结构的薄弱环节。由此,在本《规程》中规定了抗震设计及非抗震设计的异形柱框架均应进行梁柱节点核心区受剪承载力计算(第 5.3.1 条)。

我们已将该公式编入异形柱结构配筋软件 CRSC。用 CRSC 对 8 度区 6 层异形柱框架结构、10 层框架-剪力墙结构模型进行了计算,结果与《规程》编制期间补充进行的振动台模拟试验结果十分吻合,即 CRSC 计算 6 层框架模型下面 3 层框架多数节点强度不足、10 层框-剪结构节点均满足要求;试验结果为 6 层框架结构下面 3 层多数节点有不同程度损坏,3 层以上和 10 层框-剪结构模型梁柱节点均无损坏(见研究报告《8 度区 6 层异形柱框架结构的振动台试验报告》《8 度区 10 层异形柱框架-剪力墙结构的振动台试验报告》)。该试验结果也在与振动台模型相应的低周往复荷载异形柱平面框架模型试验结果(该试验于 2005 年夏季在天津大学建筑工程学院结构试验室完成)得到验证。

4. 异形柱轴压比限值及加密区箍筋的配置

研究分析表明:对于异形截面柱,其曲率延性比 μ_k 不仅与轴压比 n 、箍筋间距 s 与纵筋直径 d 之比 s/d 、箍筋直径 d_v 有关,而且弯矩作用方向角 α 对其有很重要的影响,因为在相同轴压比及配筋条件下,弯矩作用方向角不同,混凝土受压区图形及高度差异很大,致使截面曲率延性相差甚多。《规程》第 6.2.2 条关于异形柱轴压比限值的规定,是基于对 2320 根 L、T、+ 形双向压弯柱在最不利弯矩作用方向的截面曲率延性比 μ_k 电算数据的研究分析,拟合得到 μ_k 的理论计算公式 $\mu_k = f(n, s/d, d_v)$ 。若对抗震等级 2、3、4 级框架柱的截面曲率延性比 μ_k 分别取 10、8、6,根据不同的 $s/d, d_v$,可由拟合的 μ_k 公式反算出轴压比。轴压比限值取最不利弯矩作用时的最低值,经适当调整后即得到《规程》第 6.2.2 条中表 6.2.2 关于轴压比限值的规定,用以保证此类柱在不同的弯矩作用方向均具有足够的延性。该表使用较为方便、直接,当柱的纵筋及轴压比已知后,便可直接选择到所需的箍筋直径及间距。多年来国内一些地方

的异形柱结构规程均采用此表达形式。

《规程》(征求意见稿)反馈回来关于轴压比限值的意见认为,轴压比限值的规定过细,且第 6.2.2 条与第 6.2.10 条的规定有不协调之处。通过深入研究分析,决定采用与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 及《建筑抗震设计规范》GB 500011 相关规定一致的表达形式,以便于设计中应用。为此,进行了下列工作:

(1) 在改善分析方法(包括调整计算模型及极限曲率的控制条件、归并分析参量等)的基础上,对 12960 根 L、T、+ 形截面柱的截面曲率延性比 μ_f 进行系统的电算分析。计算参数为: 6 种轴压比;常用的 15 种截面尺寸;混凝土强度等级 C30~C50;箍筋(HPB235),直径 d_v 为 6、8、10 mm;箍筋间距 s 为 70~150mm;纵筋(HRB335)直径 d 为 16~25mm,箍筋间距与纵筋直径之比 $s/d=4\sim7$ 。计算得到的 μ_f 值为上列参数组成的柱截面在不同轴压比时最不利弯矩作用方向角域的数值,从而可拟合得到 L、T、+ 形三种截面的 μ_f ,轴压比 n 、箍筋配箍特征值 λ_v 的相关公式 $\mu_f = f(n, \lambda_v)$ 。

(2) 确定各抗震等级时异形截面框架柱应具有曲率延性水平 μ_f 。首先推导出强柱弱梁型(梁铰破坏机制)框架位移延性 μ_Δ 与梁、柱曲率延性 μ_{fb} 、 μ_{fc} 的关系,根据对 3~10 层(9~30m 高度)框架进行计算分析的结果,当结构位移延性比 μ_Δ 取 5~3 时,框架柱所需的曲率延性 μ_{fc} 在 13.5~4.6 范围内变化;参照欧洲规范试行标准[Eurocodes 8(1997)]的相关规定,对高延性、中等延性及低延性框架柱的曲率延性分别取 ≥ 13 、 ≥ 7 、 ≥ 4 。通过综合分析考虑后,对 2、3、4 级抗震等级框架柱的曲率延性比 μ_f 分别取为 9~10、7~8、5~6。

(3) 根据实际工程施工可操作性的要求,确定可能配置的最大体积配箍率及相应的配箍特征值的上限值 λ_{vmax} ,通过计算分析对 L、T、+ 形柱的 λ_{vmax} 可分别取 0.20、0.21 及 0.22。

(4) 根据要求的 μ_{fc} 及可能配置的 λ_{vmax} 通过 μ_{fc} 计算关系式,可计算分析得到最不利弯矩作用方向角域时各抗震等级的最大轴压比限值,由此得到了《规程》第 6.2.2 条表 6.2.2 轴压比限值的规定。继而又可得出不同轴压比时对最小配箍特征值的要求,即第 6.2.9 条表 6.2.9 异形柱箍筋加密区最小配箍特征值 λ_v 的规定。

(5) 对箍筋间距与纵筋直径之比 s/d 应合理限制其最大值,根据对异形柱截面曲率延性的分析表明,箍筋间距与纵筋直径之比 s/d 是控制截面曲率延性的极重要因素,当纵筋直径之比 s/d 较大时,异形柱纵向钢筋易压曲失稳,并迅速降低承载力,延性降低。当 μ_f 一定, s/d 控制在某一限值时,柱纵向钢筋不压曲,承载力保持缓慢下降,延性提高。因此对具有不同延性水平的各抗震等级的异形柱,加密区箍筋的最大间距和最小直径做了较严的规定,即《规程》第 6.2.10 条。

5. 异形柱结构适用的房屋最大高度

我国现行有关标准中还没有对异形柱结构适用的房屋最大高度做出专门规定,本《规程》为此作了专题研究分析,作为《规程》制订的基本依据。

本《规程》主要针对混凝土异形柱框架及异形柱框架-剪力墙两种结构体系的一批代表性典型工程,考虑实际工程中常遇到的下列不同情况及变化因素:①非抗震设计;②抗震设防烈度为 6 度、7 度(0.10g、0.15g)、8 度(0.2g)的抗震设计;③不同场地类别;④工程常用的不同开间柱网尺寸;⑤结构平均自重(12kN/m² 及 14kN/m²,反映不同墙体材料);⑥根据常用的住宅建筑平面布置特点,归纳成的 3 种代表性建筑平面布置类型。根据本《规程》及国家现行标准的有关规定,利用建研院编制的计算软件 SATWE,及天津大学编制的异形柱结构配筋计算软件 CRSC 进行了大量的异形柱结构弹性计算分析,并重点对 8 度(0.20g)抗震设防情形,

用弹塑性分析进行了罕遇地震作用下的结构抗震变形验算,在上述各种情况和条件下 150 多例结构弹性及弹塑性分析结果的基础上,综合考虑编制组专门组织的 8 度(0.20g)6 层框架结构及 10 层框架-剪力墙结构模型振动台试验,及异形柱框架结构水平往复荷载试验的研究成果;国内异形柱结构振动台及水平往复荷载相关试验研究成果及设计、施工的工程实践经验,归纳总结得到《规程》第 3.1.2 条关于异形柱结构适用的房屋最大高度限制规定,并通过编制组组织进行的典型工程试设计进行校核。

根据异形柱结构的抗震性能特点,并考虑到目前尚缺乏异形柱结构的震害资料,为保证安全、稳妥,本《规程》对异形柱结构适用的房屋最大高度作了严格的限制规定。考虑到通常框架结构抗震性能弱于框架-剪力墙结构的抗震性能,所以本《规程》对异形柱框架结构,尤其是对 8 度(0.20g)抗震设计时异形柱框架结构适用的房屋最大高度做了更为严格的规定。

6. 异形柱结构的结构布置

《规程》条 3.2.1 条对异形柱结构规定“不应采用特别不规则的设计方案”,比现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对一般结构规定的“不应采用严重不规则的设计方案”的要求有所加严,这是根据异形柱结构抗震性能特点及目前缺乏震害资料的情况做出的规定。

在异形柱结构布置中,本《规程》规定:根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关条文规定,对不规则类型(即平面不规则类型——扭转不规则、凹凸不规则、楼板不连续;竖向不规则类型——侧向刚度不规则、竖向抗侧力构件不连续、楼层承载力突变)进行判定,并采取相应的设计计算与构造措施,这是与国家标准协调一致的方面。

此外,对异形柱结构的平面和竖向布置,本《规程》还另外专门作了应遵守的规定,反映了异形柱结构的特点,比如:①异形柱截面肢厚中心线宜与框架梁及剪力墙中心线对齐(3.2.3 条之 2);②对异形柱框架-剪力墙结构中剪力墙最大间距的限值,较一般矩形柱框架-剪力墙结构的稍严(表 3.2.3);③当根据建筑功能需要在底部设置大空间时,可通过框架底部抽柱并设置转换梁,形成底部抽柱带转换层的异形结构(3.3.1 条);④异形柱框架-剪力墙结构体系的剪力墙应上下对齐,连续贯通房位全高(3.2.4 条之 3)。

抗震设计时,对判定为不规则的异形柱结构,本规程规定了其应符合的要求(第 3.2.5 条):

(1) 对于按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定,当扭转位移比 >1.2 时,判为“扭转不规则类型”的异形柱结构,此时,本《规程》规定其扭转位移比不应大于 1.45,较国家标准规定的 1.50 稍严,因为异形柱结构比矩形柱结构抗扭性能相对薄弱,有必要在抗震设计中将其限值适当加严。

(2) 对于按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 判定为竖向不规则中的“楼层承载力突变”类型的异形柱结构,本《规程》规定,对薄弱层地震剪力的增大系数由国家标准的 1.15,增大为 1.20,以适当提高安全性。

(3) 本规程中的底部抽柱带转换层异形柱结构,就是属于现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 中“竖向抗侧力构件不连续”的类型,并规定该构件传递给水平转换构件的地震内力应乘以的增大系数 1.25~1.50,本《规程》仍采用此系数,但根据异形柱结构特点,建议实际设计中按该系数范围的偏大值取用。

7. 异形柱结构的抗震等级

本《规程》第 3.3 节的结构抗震等级条文规定,系针对异形柱抗震性能特点及丙类建筑抗震设计的要求制订的。《规程》的征求意见稿中曾根据部分意见列出方案一和方案二供选择:方案一的指导思想是在确定抗震等级时对框架的梁、柱、节点及剪力墙采取区别对待

的规定;方案二则是对框架的梁、柱、节点采取统一的框架抗震等级规定。《规程》征求意见稿反馈回来的意见表明,赞成方案二的占大多数。经反复研究论证,《规程》送审稿按方案二确定上报。归纳理由是,方案一虽然在抗震等级的确定中考虑了框架的梁、柱、节点的抗震设计、构造等要求的差别,但在实际工程中框架的梁、柱及节点采用不同抗震等级,增加了设计、施工的复杂性,会带来一些麻烦或不便,可操作性较差,现行国家标准中都未对框架的梁、柱、节点采取不同的抗震等级规定。方案二则是对框架采取统一的抗震等级规定,内容上也反映异形柱结构特点,在抗震等级表达形式上与现行国家标准协调一致,工程实际使用中较为方便。

按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 第 3.3.3 条的规定,对于 7 度(0.15g)时建于Ⅲ、Ⅳ类场地的结构,宜按抗震设防烈度 8 度(0.20g)时各类建筑的要求采取抗震构造措施。根据异形柱结构的特点,本《规程》采取适当加严的规定,改为:应按抗震设防烈度 8 度(0.20g)时各类建筑的要求采取抗震构造措施。

对于异形柱框架-剪力墙结构中剪力墙数量较少时,即框架部分承受的地震倾覆力矩大于结构总地震力矩的 50%时,本《规程》按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的相关规定,其框架部分的抗震等级应按框架结构确定。

8. 异形柱结构的地震作用计算原则与计算方法

异形截面柱与常用的矩形截面柱之间最重要的特性差异是,随地震作用方向的变化,异形截面柱的内力和变形显著不同,抗震性能也有差异,主要对 L 形柱最为敏感。在制订本《规程》中需要搞清楚,这个特性差异是否会影响到地震作用计算?现行国家标准中有关地震作用原则与方法的规定是否都适合异形柱结构?为保证异形柱结构的抗震安全,是否还需要作补充条文规定?基于此目的,《规程》编制组专门组织参编单位针对不同的抗震设防烈度,由实际工程选取适当的典型工程,进行异形柱结构多方向地震作用及双向地震作用计算和比较分析,为《规程》制订关于异形柱结构地震作用计算的条文提供依据。

计算分析的结果表明:

(1) 按 45°方向水平地震作用计算所得的结构底部剪力,与按 0°、90°正交方向水平地震作用计算所得的相比,可能减小,也可能增大,结构中各异形柱的内力 V_x 、 V_y 、 M_x 、 M_y 及 N 出现复杂的变化。这种由于水平地震作用方向变化导致的异形柱内力变化,与结构的平面形状、结构布置、异形柱所在的位置等因素有关。

(2) 即使结构底部地震剪力减小,但某些异形柱却可能出现增大的内力组合结果,对设计不利,必须在设计中引起注意。例如,对某工程进行 45°、135°方向水平地震作用计算时,L 形柱的配筋比 0°、90°方向时可增大 10%~25%左右。这主要是由于沿不同方向异形柱截面刚度和承载力的差异引起的。

(3) 严格地说,异形柱结构中各异形柱最不利的内力和相应配筋,对应于不同的水平地震作用方向,这就提出一个多方向地震作用计算的问题。在实际工程设计中,要精确地确定异形柱结构中各异形柱水平地震作用的最不利方向是一个很复杂的问题。实际上,在计算中对地震作用方向分得越多、越细,各异形柱的内力和配筋的变化差异幅度就越趋于缩小,因此,没有必要进行繁琐的太多方向的水平地震作用计算。

(4) 对于采用等肢异形柱(特别是等肢 L 形柱较多者)等较规则的异形柱结构,一般情况下,当 7 度、8 度抗震设计时,在 0°、90°正交方向以外,再补充 45°、135°方向的水平地震作用计算,便可满足工程精度的要求。

(5) 对于采用不等肢异形柱的结构,或等肢与不等肢异形柱混合应用的较复杂情况,有条件时可适当增加水平地震作用方向,并从计算结果中挑选最不利数据作为异形柱截面设计的依据。重点注意结构底部、角部、负荷较大及结构平面形状有凹凸变化等不利部位的异形柱,从而减少异形柱抗震不利的隐患。

(6) 对于按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 判定为“扭转不规则”类型的异形柱结构,应按双向水平地震作用计算。

9. 异形柱结构的分析模型

异形柱本身的内力和变形有显著的空间作用特征,因此由异形柱构成的结构,显然应采用空间分析模型才符合其实际情况,而不能采用平面结构分析模型,否则将使结构分析结果失真。

本《规程》4.3.2 条规定,异形柱内力和位移分析应采用空间分析模型,仅当规则结构初步设计时,也可采用平面结构空间协同模型估算。

《规程》对通常工程采用的异形柱限定肢高/肢厚 ≤ 4 的范围,不符合薄壁杆件的基本条件,对此限值范围内的异形柱结构按杆件来计算是合理的,试验也证实了这一点。而对剪力墙的计算分析,可采用薄壁杆件模型,也可采用有限元模型。

异形柱与梁相连,与壁式框架有些相似,在梁柱部位有一定的刚域影响,但由于异形柱结构中梁、柱尺度较壁式框架为小,故刚域影响相对较轻。经对一般常用截面尺寸的异形柱大量计算分析和比较,考虑刚域的计算中,设计地震稍有增大,可使结构设计稍偏安全。

10. 自振周期折减系数

为反映填充墙对增大框架抗侧刚度及减小结构自振周期的影响,现行国家标准中采取了自振周期折减系数的办法,其取值是针对实心黏土砖墙情况,并规定:对于其他结构体系或采用其他非承重墙体时,可根据工程情况确定周期折减系数。本《规程》第 3.1.5 条中对异形柱结构规定“填充墙与隔墙应优先采用轻质墙体材料”,并在 4.3.6 条以强制性条件形式提出“计算各振型地震影响系数所采用的结构自振周期,应考虑非承重填充墙体对结构整体刚度的影响予以折减”。考虑目前轻质墙体材料品种繁多,应根据实际工程情况,合理选定自振周期折减系数,故在 4.3.7 条规定了自振周期折减系数的取值范围,提出采用较实心砖墙情形较大的自振周期折减系数,以反映轻质墙体对刚度的影响比实心砖墙相对小的规律,即框架结构 $\phi_T = 0.65 \sim 0.75$, 框架-剪力墙结构 $\phi_T = 0.75 \sim 0.85$, 偏大的折减系数数值对应于更轻质的材料。

11. 底部抽柱带转换层的异形柱结构

为了满足采用异形柱结构的建筑对上部楼层小开间、底部楼层大开间的建筑功能要求,需解决上部楼层小开间向底部楼层大开间的转换问题,为此,采用“底部抽柱,托梁转换”的技术,形成所谓的底部抽柱带转换层的异形柱结构。在一些地方已有工程实例,并积累了一定的设计、施工实践经验,但底部抽柱带转换层的异形柱结构在现行国家标准中尚无规程条文规定,其抗震性能、有关设计参数及构造做法需要通过地震模拟试验来验证。

试验由东南大学土木工程学院于 2002 年在上海同济大学土木工程防灾国家实验室完成。试验结构模型的原型结构为底部抽柱、带转换层的钢筋混凝土异形柱框架结构,坡形屋顶,9 层,按 7 度抗震设计,模型缩尺比为 1/8,在同济大学地震模拟振动台上进行试验,加速度相似系数为 1。

(1) 振动台试验表明,该结构在 7 度罕遇地震作用下的最大层间位移角为 1/144;8 度罕

遇地震作用下最大层间位移角为 $1/88$, 满足现行国家标准对罕遇地震作用下结构层间弹塑性位移限值 ($[\theta_p] = 1/50$) 的要求。

(2) 底层方柱和上层异形柱交接的部位, 试验中未发生破坏; 生根于转换梁上的异形柱和转换梁连接处也未出现问题, 这表明, 异形柱结构在底部抽柱、通过大梁托柱进行转换在结构技术上是可行的。

(3) 底部抽柱带转换层异形柱结构抗震设计的两大关键问题: 一是转换层上部结构与下部结构的侧向刚度比; 二是转换大梁的合理设计 (承载力与刚度) 与构造的《规程》条文规定, 是通过对原型结构设计、试验模型结构设计及振动台试验结果的深入分析为基础制订的。最后又通过《规程》的典型工程试设计的校核, 确认《规程》有关条文规定的合理性与可操作性。

(4) 由于异形柱框架在底部抽柱, 属于“竖向抗侧力构件不连续”的不规则类型, 因此《规程》对其结构布置、结构体系选型、适用的最大高度及底部抽柱数量限制均作出严格的条文规定。又由于高位转换对抗震不利, 《规程》又对地面以上大空间层数作了限制。

12. 异形柱结构的抗震试验

由于异形柱结构是近 20 多年来发展起来的新型结构体系, 且缺乏结构震害资料, 所以通过抗震试验评估异形柱结构的整体抗震性能, 是很有必要的。近年来, 国内关于异形柱结构的振动台试验及拟静力试验成果已有 20 余项, 这些成果的共同点主要是在结论中对合理设计的异形柱结构的抗震性能给予了肯定, 能够满足抗震设防的要求, 但这些试验研究成果均为主要针对 7 度抗震设防条件的。

为配合《规程》编制的需要, 检验异形柱结构体系在 8 度抗震设防区的适用性, 了解异形柱结构的抗震性能及震害破坏规律, 由《规程》主编单位天津大学, 协同昆明市建设局、昆明理工大学完成了 6 层异形柱框架结构模型、10 层异形柱框架-剪力墙结构模型的振动台试验及 3 层异形柱框架结构的水平往复荷载试验。这些试验的工程背景是相同的, 是根据从 8 度抗震设防地区的已建实际工程中经过选择和典型化了的原型结构。

振动台试验是在同济大学土木系防灾实验室完成的, 试件的缩尺比例为 $1/6$, 试验模型的设计考虑重力加速度 g 的影响, 尽量使模型满足“用人工质量模拟的弹塑性模型。”

水平往复荷载试验是在天津大学建工学院结构实验室完成的, 针对背景工程中的一榀中框架, 并取下部 3 层作为试验研究对象, 试件为两跨 3 层的异形柱框架, 试件的缩尺比例为 $1/3$ 。

具体试验资料另详专题论文, 上列试验与现有各单位分别完成的异形柱结构振动台试验及往复荷载试验结果不约而同地得到的具有共性的结论是: 异形柱结构易于满足位移要求; 在大震中呈现梁铰机制的破坏模式; 延性系数可达到 $4.5 \sim 5.0$ 左右, 满足现行国家标准对结构抗震设防的基本要求。试验还发现, 框架节点是异形柱结构体系的薄弱环节, 在设计中应引起足够重视; 异形柱框架-剪力墙结构的抗震能力强于异形柱框架结构, 建议在高烈度地区 (8 度) 的工程应尽量优先采用框架-剪力墙结构体系。

异形柱结构振动台试验和水平往复荷载试验的研究成果为《规程》的编制提供了很有价值的基本依据。

三、《规程》试设计工作

本次试设计的目的是检验《规程》条文规定之合理性, 用于实际工程设计的可实施性和可