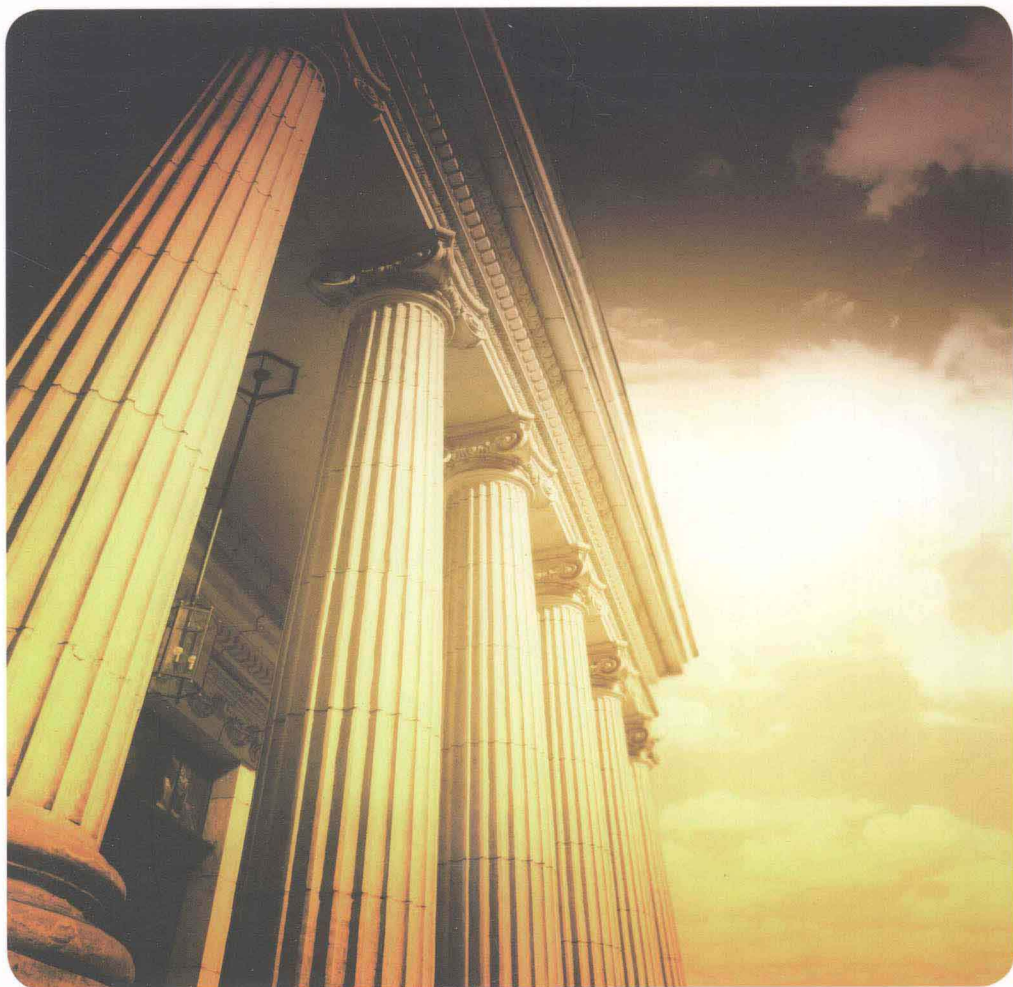




核心高强混凝土柱力学性能

齐 岳◇著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS



核心高强混凝土柱力学性能

齐 岳◇著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

核心高强混凝土柱力学性能 / 齐岳著. -- 哈尔滨 :
黑龙江大学出版社, 2013.10

ISBN 978 - 7 - 81129 - 647 - 1

I. ①核… II. ①齐… III. ①钢筋混凝土柱 - 力学性
质 IV. ①TU375.301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 186657 号

核心高强混凝土柱力学性能

HEXIN GAOQIANG HUNNINGTUZHU LIXUE XINGNENG

齐 岳 著

责任编辑	张永生 高 媛
出版发行	黑龙江大学出版社
地 址	哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷	哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本	720 × 1000 1/16
印 张	12
字 数	161 千
版 次	2013 年 10 月第 1 版
印 次	2013 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 81129 - 647 - 1
定 价	28.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

在现代工程结构的发展中,人们不断地利用“组合”的概念来实现结构形式的突破。核心高强混凝土柱正是考虑到高强混凝土强度高、普通混凝土抗火性能和延性好的优点,将二者进行合理组合而形成的构件形式。

核心高强混凝土柱是在横截面内以高强混凝土为核心、在核心区外围设置普通钢筋混凝土的柱,此类柱已获国家发明专利。核心高强混凝土柱从概念上讲应具有相对较高的承载力和相对较好的抗火性能及抗震性能。一定厚度的外围普通混凝土可减少高强混凝土高温爆裂的发生,从而改善柱的抗火性能。外围普通混凝土与核心高强混凝土相比,应力-应变曲线下降段平缓,从概念上讲可使核心高强混凝土柱的抗震性能相对较好。

本书主要介绍核心高强混凝土柱的轴心受压性能、偏心受压性能及抗震性能。全书共分6章:第1章概述;第2章核心高强混凝土柱轴心受压试验研究;第3章核心高强混凝土柱偏心受压试验研究;第4章核心高强混凝土柱抗震性能试验研究;第5章核心高强混凝土柱压弯构件非线性分析;第6章核心高强混凝土柱恢复力模型及界限轴压比。

在本书出版之际,首先感谢我的导师郑文忠教授,恩师严谨求实的态度和锐意进取的精神令学生钦佩,恩师的悉心指导使我获益良多。同时特别感谢黑龙江大学建筑工程学院的各位领导和老师在工作 and 科研上给予我无私的帮助和支持。衷心感谢我的各位师兄、师

姐、师弟、师妹,难忘并怀念我们在一起学习和生活的岁月。真诚地感谢黑龙江大学出版社高媛编辑,在她的帮助下本书得以顺利出版。

由于作者水平有限,书中疏漏及不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

黑龙江大学建筑工程学院 齐岳

2012年4月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 核心高强混凝土柱简介	1
1.2 相关领域的研究概况	4
第 2 章 核心高强混凝土柱轴心受压试验研究	11
2.1 核心高强素混凝土柱轴压试验概况	12
2.2 核心高强素混凝土柱轴压试验结果与分析	15
2.3 配筋核心高强混凝土柱轴压试验概况	35
2.4 配筋核心高强混凝土柱试验结果与分析	40
2.5 本章小结	44
第 3 章 核心高强混凝土柱偏心受压试验研究	45
3.1 试验概况	46
3.2 试验结果与分析	53
3.3 偏心受压承载力实用计算方法	74
3.4 本章小结	81
第 4 章 核心高强混凝土柱抗震性能试验研究	83
4.1 试验概况	83
4.2 试验结果与分析	91
4.3 本章小结	120
第 5 章 核心高强混凝土柱压弯构件非线性分析	121
5.1 核心高强混凝土柱单调荷载 - 位移曲线数值分析	121
5.2 核心高强混凝土柱单调荷载 - 位移曲线参数分析	132

5.3 本章小结	140
第6章 核心高强混凝土柱恢复力模型及界限轴压比	141
6.1 荷载 - 位移恢复力模型骨架曲线	142
6.2 滞回规则	165
6.3 恢复力模型与试验结果的对比	168
6.4 核心高强混凝土柱界限轴压比	171
6.5 本章小结	177
参考文献	179

第1章 概 述

1.1 核心高强混凝土柱简介

近年来,频发的建筑火灾和地震,造成了建筑物严重破坏。因此,具有良好抗火性能和抗震性能的结构或构件将更能适应当前建筑结构发展的需要。

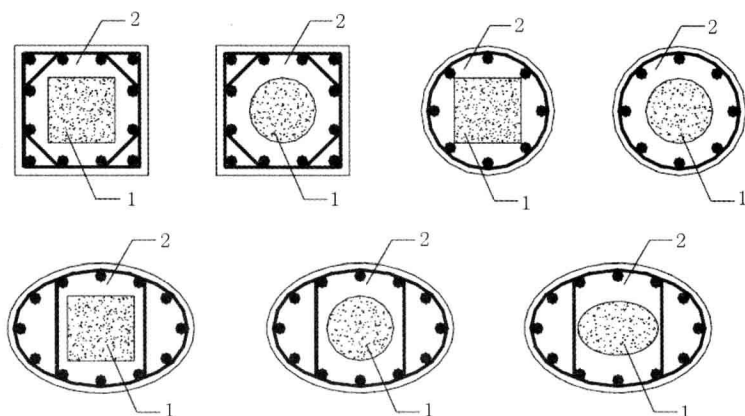
高强混凝土是混凝土技术的一个重要发展方向,已被广泛应用于高层建筑、桥梁、港口海洋工程、地下工程等土木工程领域。^[1]在高层建筑中使用高强混凝土,利用其抗压强度高的特点,能够减轻结构自重、增加使用面积和降低工程造价,从而获得较大的经济效益。一般来说,如果将混凝土强度等级从 C30 提高到 C60,结构体积及相应自重可减少 1/3,从 C40 提高到 C80,构件的承载能力可提高近 1 倍。辽宁省工业技术交流馆(总高 62.4 m,主体 18 层)是国内较早应用现浇高强混凝土的高层建筑,下部 12 层柱子采用 C60 混凝土,与原设计采用普通 C30 混凝土相比,柱子截面面积减少 56%,混凝土总用量节省 21%,相应钢筋总用量节省 19%,节约造价占主体结构总造价的 1.2%,同时还增加了使用面积,美化了建筑效果,综合效益显著。北京新世纪饭店(110 m,36 层)、广州中天广场大厦(321.9 m,80 层)、深圳联合广场(195 m,61 层)均采用了 C60 高强混凝土柱。^[2]

目前,我国众多高层建筑均采用了高强混凝土柱的结构形式,尽管高强混凝土柱有很多优点,但在实际应用中仍存在需要解决的问题。

题。首先,高强混凝土抗火性能较差^[3,4],高温下易发生爆裂现象。这是由于高强混凝土微观结构密实,孔隙率及孔的直径均较小,而且孔隙之间互不贯通。在升温过程中,随着混凝土内部温度的不断升高,其内部的自由水和结合水开始蒸发形成水蒸气,并且水蒸气具有移动的趋势,而高强混凝土高度致密的内部结构和互不贯通的毛细孔恰恰阻止了这些水蒸气的自由移动,导致毛细孔内的压力增大,而一旦压应力在其内部的某一位置达到并超过混凝土自身的抗拉强度,混凝土就会产生爆裂现象。^[5-11]其次,高强混凝土属于脆性材料^[12],且混凝土强度愈高,脆性愈明显,这严重影响了高强混凝土结构或构件的延性。目前采用高强混凝土柱作为抗震结构时,通常采取限制轴压比和增加配箍率的方法来克服高强混凝土的脆性,提高结构延性,但实践经验和研究表明,若对高强混凝土柱的轴压比限制过严,会增大柱截面尺寸,降低经济效益,而且容易形成短柱,造成脆性剪切破坏。增加配箍率虽然对高强混凝土柱的延性有所改善,但达到一定程度后其效果变得不明显,大量的试验结果表明,当柱的轴压比较大时,很难通过加密箍筋的方法使 C80 高强混凝土柱的延性达到 C30 普通混凝土柱的程度^[13],同时箍筋过密将给施工带来困难,不易保证混凝土的浇筑质量。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3—2010 中明确规定:框架柱的混凝土强度等级当抗震设防烈度为 9 度时不宜大于 C60,抗震设防烈度为 8 度时不宜大于 C70。由此可见,抗火性能和抗震性能较差的缺陷严重限制了高强混凝土柱的应用和发展。

为了改善高强混凝土柱的抗火性能和抗震性能,使柱既有较高的承载力,又有良好的抗火性能和抗震性能,提出了核心高强混凝土柱这一新型构件。核心高强混凝土柱是指在横截面内以高强混凝土为核心,在核心区外围设置普通钢筋混凝土的柱。其截面可有不同的组合形式,如图 1-1 所示,此类柱已获得国家发明专利。

核心高强混凝土柱从概念上讲应具有相对较高的承载力和相对较好的抗火性能及抗震性能。大量研究表明,高强混凝土发生爆裂时,构件所处的环境温度一般为 300~800 ℃、爆裂的深度一般不大于



注:1 为核心高强混凝土;2 为外围普通混凝土

图 1-1 核心高强混凝土柱的截面形式

50 mm。以截面尺寸为 500 mm × 500 mm 的柱为例,受火 60 min 后,其表面温度达到 900 ℃,而距表面 50 mm 的内部温度约为 300 ℃。^[14]由此可见,一定厚度的外围普通混凝土可减缓高强混凝土高温爆裂的发生,从而改善柱的抗火性能。另外,外围普通混凝土与核心高强混凝土相比,压应力-应变曲线下降段平缓^[15-19],从概念上讲可使核心高强混凝土柱的抗震性能相对较好。

在现代工程结构的发展中,人们不断地利用“组合”的概念来实现结构形式的突破。核心高强混凝土柱正是考虑到高强混凝土强度高、普通混凝土抗火性能和延性好的优点,将二者进行合理组合而形成的构件形式。在实际工程中应用核心高强混凝土柱具有如下意义。

(1) 核心高强混凝土柱承载力大,在相同荷载下,可使构件截面尺寸减小,减小截面尺寸意味着节约材料。随着我国国民经济的日益强大,以及建筑业的蓬勃发展,目前我国建筑业每年竣工的各类房屋的总建筑面积居世界前列,高层建筑和超高层建筑更是如雨后春笋般地出现在大城市中。据权威部门预测,到 2020 年我国水泥年需求量将接近 13 亿吨,与之俱来的将是 6 亿吨水和 56 亿吨骨料,这种数量扩张型的建材工业发展模式将使我国能源、资源和环境不堪重负,不利

于社会与经济的可持续发展。由此可见,核心高强混凝土柱的应用在节约能源、保护环境等方面有着重要意义,与国家倡导的构建节约型社会的主旨相符。

(2)采用核心高强混凝土柱可以获得更好的经济效益。对于结构来说,减小截面尺寸还意味着降低结构自重,减轻地基基础的负担;减小截面尺寸对房屋建筑来说,还意味着增大使用面积或有效空间;对地下建筑来说,意味着减少土方开挖量。这些间接的好处可大大降低工程造价,提高经济效益。

(3)核心高强混凝土柱抗火性能和抗震性能相对较好。由于外围普通混凝土的存在,可以使核心高强混凝土柱的抗火性能与普通混凝土柱相近,且优于钢结构柱和高强混凝土柱。在实际工程中使用核心高强混凝土柱,在保证较高承载力的同时,可避免或降低火灾和地震发生所带来的损失,使人们的生命和财产安全受到保护,使社会更加安定和谐。另外,火灾和地震均是不可预测的,目前,很多结构通过涂抹防火涂料等附加措施来提高抗火性能,这大大增加了成本。核心高强混凝土柱是通过自身的性能达到较好的抗火和抗震性能,是以较低的成本来发挥较大的作用。

综上所述,核心高强混凝土柱可减小截面尺寸,节约材料,降低造价,且具有较高的承载力与较好的抗火性能和抗震性能。因此,提出核心高强混凝土柱这一新型构件地开展其力学性能的研究具有实际意义。

1.2 相关领域的研究概况

1.2.1 高强混凝土柱的研究概况

Liu 等^[20-22]通过高强混凝土柱的试验研究发现,高强混凝土柱在轴压荷载作用下会发生混凝土保护层的早期开裂脱落现象。Cuss-

on^[23]进行了27根矩形箍筋约束、大比例高强混凝土轴压柱受力性能的试验研究,结果表明:如果在高强混凝土柱的侧向绑扎足够的箍筋,实测到混凝土保护层开裂脱落后柱的轴压承载力可超出按美国混凝土结构规范 ACI318-89 规范的计算值的150%。Collins 等^[24]认为高强混凝土的低渗透性使混凝土保护层产生干缩,而核心混凝土仍保持一定的相对湿度,这样便在混凝土保护层内产生了拉应力,并且在纵向钢筋与混凝土界面区同时也产生了沿纵筋径向的辐射状开裂,它们导致柱钢筋笼外侧的混凝土保护层早期开裂脱落,承载力降低。但 Razvi 等^[25-27]认为分隔核心混凝土与保护层混凝土的钢筋笼布置过密是导致高强混凝土柱混凝土保护层早期开裂脱落的原因。他们的研究表明,钢筋笼布置过密,会在核心混凝土和保护层混凝土之间产生自然的平面分隔,导致混凝土保护层在较高压应力下产生不稳定的破坏。试验结果也表明,配筋混凝土柱发生混凝土保护层开裂脱落时的应力水平低于相应的素混凝土柱。

Saatcioglu 等^[28]通过26根箍筋约束高强混凝土方柱的轴压试验,研究了方形约束高强混凝土柱的性能。试验结果表明:通过增加体积配箍率或箍筋强度来约束,可以使高强混凝土柱达到与普通混凝土柱相同的塑性;高强箍筋的约束效果主要取决于箍筋的分布和体积配箍率。

Cusson 等^[29]进行了矩形箍筋约束、大比例高强混凝土偏压柱受力性能的试验研究,结果表明:从试件的破坏过程来看,混凝土保护层的突然剥落将明显降低柱的承载能力和约束钢筋的侧向约束效果,在混凝土保护层完全剥落后,约束良好的高强混凝土柱的刚度、强度和延性等仍会有明显的增加。

Ibrahim 等^[30]对高强与超高强混凝土柱截面受压区的应力分布、柱的抗弯延性等进行了试验研究和理论分析,共进行了20根柱的试验。结果表明:对于高强和超高强混凝土柱截面的受压区应力分布,采用矩形的应力分布形式计算会低估柱的抗弯延性,采用三角形的应力分布形式计算可获得较好的效果。

为研究高强混凝土柱的抗震性能,Xiao 等^[31]进行了 6 根高强混凝土模型柱的抗震试验,试验参数包括混凝土强度、轴压比、配筋率和配箍率等。试验结果发现:当配箍率按照 ACI318-89 的抗震要求设计,纵向钢筋配筋率在 2.48%~3.52% 之间且轴压比不大于 0.2 时,高强混凝土柱的延性系数介于 6.0~8.0 之间;按 ACI318-89 计算所需的柱箍筋数量过于安全,可大幅度减少;按 ACI318-89 计算得到的高强混凝土柱的抗震抗剪强度过高,偏于不安全。

Sheikh^[32]进行了 4 根柱的拟静力试验,试验表明:在常轴压比时,柱截面的配箍量几乎与柱的延性和能量吸收能力成正比,且当含钢率相同时,高强混凝土柱比普通混凝土柱的弯曲延性低。

Ozcebe 等^[33]完成了 10 根高强混凝土柱的抗震试验,研究了配箍率、配箍形式和加载方式等对高强混凝土柱抗震性能的影响,研究表明,加载方式对高强混凝土柱的抗震性能有一定的影响,沿对角加载时,高强混凝土柱的变形能力比沿轴线加载时的小;此外,配箍率对高强混凝土柱的抗震性能影响较大,当配箍率较小时,高强混凝土柱的滞回曲线不稳定,强度退化十分明显,耗能能力和变形能力小;配箍率较大时,高强混凝土柱的滞回曲线稳定,强度退化非常小,耗能能力和变形能力较大;轴压比越大,高强混凝土柱的变形能力越小,下降段越陡。

清华大学的时旭东^[34]对周期反复荷载下高强混凝土压弯构件的受力性能进行了研究。试验采用的混凝土强度为 66.2~83.5 MPa,剪跨比为 5,柱纵向钢筋使用 II 级钢,箍筋采用 I 级钢,形式为普通方箍。试验采用倒 T 字形试件,共 12 个,试验主要参变量为轴压比和体积配箍率,主要研究了轴压比以及不同轴压比下配箍率对构件延性的影响,得出了延性随轴压比的减小而增大等规律。作为后续试验,林昊俊^[35]又采用 14 个倒 T 形试件,混凝土强度为 30.1~72.8 MPa,剪跨比为 4.1,柱纵向钢筋使用 I 级钢,箍筋采用低碳冷拔丝和 10#镀锌钢丝,箍筋为井字形复合箍和鹿岛式螺旋箍两种,重点研究箍筋因素对构件延性的影响。这两个试验得出主要结论如下:大剪跨比的高强混

凝土压弯构件与普通混凝土的破坏形式相似。底梁对柱截面横向变形有明显约束作用。高强混凝土压弯构件的滞回曲线与普通混凝土基本相似,但其骨架线具有较陡的下降段;提高配箍特征值可以改善构件的延性;在轴压比和配箍特征值相同时,高强混凝土的延性较普通混凝土差。

叶列平等^[36]对 13 根 C60 级高强混凝土框架柱在低周反复荷载下的抗震性能进行了研究,试验结果表明:在一定的轴压比和合适的配箍率下,高强混凝土框架柱具有较好的抗震性能;提出了水平荷载-位移滞回曲线的计算方法,并对高强混凝土框架柱的设计提出了有关建议。

大连理工大学王清湘等^[37]通过 48 根高强混凝土柱和普通混凝土柱(用于对比)在单调荷载和周期反复荷载作用下受力性能的试验研究,分析了混凝土强度、轴压比、配箍率等因素对构件延性的影响。研究表明:构件的延性主要取决于构件的破坏形态;轴压比是影响构件延性的众多因素中较重要的因素;在相同条件下,约束箍筋对高强混凝土柱的约束效果比普通混凝土柱差;周期反复荷载作用下的 $P-\Delta$ 滞回环的骨架曲线,与单调加载时的 $P-\Delta$ 曲线基本相同;当轴压比偏高时,如果配筋率较低,则构件的承载力急剧下降,刚度退化很快,延性较差。

清华大学的谢涛等^[38]通过在周期反复荷载作用下高强混凝土柱的受力性能试验,分析了轴压比、混凝土保护层厚度等因素对柱延性等性能的影响。结果表明:柱的延性随轴压比或保护层厚度的增加而减小,并得出了在不同设计轴压比下的最小配箍特征值。

重庆建筑大学的李立仁等^[39]通过 15 根高强混凝土柱的低周反复加载试验,研究了影响高强混凝土柱延性及抗震能力的因素,分析了轴压比、配箍特征值及不同形式复合箍筋的影响及作用。在试验分析的基础上提出了改善高强混凝土柱的延性和抗震性能的构造方法和措施。

张国军等^[40-42]针对火力发电厂主厂房结构框架柱的特点,对 9

根高轴压比高强混凝土框架柱和 6 根高轴压比普通混凝土框架柱进行了低周反复荷载试验,考虑了构件长细比、轴压比、箍筋形式、配箍率、配筋率、混凝土强度、截面长宽比等因素的变化,分析了高强混凝土框架柱正截面及斜截面承载力的影响因素,提出了高强混凝土框架柱正截面及斜截面承载力计算的建议公式,给出了满足延性要求的 C60 混凝土框架柱的轴压比限值和箍筋加密区的最小体积配箍率;通过对各损伤模型的比较分析,提出了高强混凝土框架柱的损伤模型。另外,张国军等^[43]收集了 108 根高强混凝土框架柱的拟静力试验结果(混凝土立方体强度在 50 ~ 144.75 MPa,箍筋强度在 255 ~ 1 424 MPa,轴压比在 0 ~ 1.47 之间)。通过分析发现,高强混凝土框架柱的屈服位移角、最大位移角、极限位移角及延性系数均随着配箍特征值的增加而增加;随着配筋率的增加,柱的延性系数和极限位移角亦相应增加,但随轴压比的增加而减小,且柱的截面积与核心混凝土面积之比越大,延性越低。并提出了配箍特征值的实用计算公式。

沈阳建筑大学的阎石、肖潇等^[44,45]通过 12 根倒 T 形试件在固定轴向荷载和水平周期反复荷载作用下的拟静力试验,研究了采用 1420 级 PC 钢棒作为箍筋(部分作为纵筋)的 C60 和 C90 两个等级高强混凝土柱的延性性能。试验结果表明,在高强混凝土柱中配置高强度箍筋和部分高强度纵筋,可明显改善高强混凝土柱的延性性能和抗震性能。并根据试验研究,提出了配置 PC 钢棒作为箍筋(部分作为纵筋)的高强混凝土柱的位移延性比与轴压比和配箍特征值关系的经验公式;确定了不同抗震等级的柱在不同设计轴压比下的配箍特征值,并根据试件的有限延性提出了轴压比限值。

大连理工大学的贾金青^[46]进行了大量高强及超高强混凝土柱抗震性能的试验研究,在柱的破坏形态,延性性能,抗剪承载力、轴压比限值及最小配箍率等方面给出了系统的分析,对现行相关规范中的相关规定进行了验证。

1.2.2 高强混凝土叠合柱的研究概况

高强混凝土叠合柱^[47]是由钢管高强混凝土柱或钢管作为核心劲性材料,首先承担结构的施工荷载,待结构主体达到一定高度后(将整个建筑的部分恒荷载提前施加到核心劲性材料上),再在钢管高强混凝土柱或钢管外围绑扎钢筋上浇筑高强或普通混凝土,形成叠合柱,结构剩余的竖向荷载由叠合柱的芯柱和外围混凝土共同承担。

高强混凝土叠合柱是由预留压应变柱发展起来的。20世纪80年代末期,朱聘儒首先提出了预留压应变柱。所谓预留压应变柱是指将一根柱子分为两个阶段施工,如图1-2所示。第一阶段,在柱底的某一个高度范围内(仅在中间)做一个芯柱,而芯柱周围先不浇筑混凝土,即预留出一个区域,其实质是让芯柱承受整个结构施工阶段的竖向荷载,如图1-2(a)所示。第二阶段,当结构施工到某一层后,再浇筑预留区域的混凝土,使整个柱子承受该层之上的结构自重如图1-2

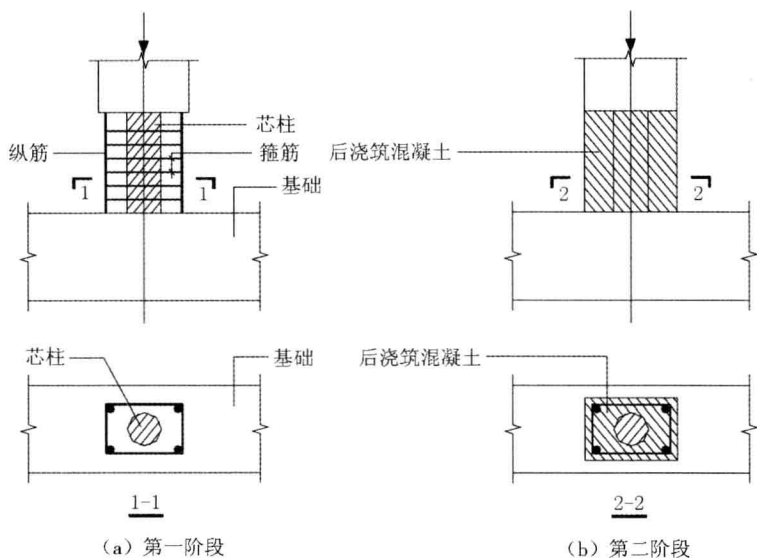


图1-2 预留压应变柱施工程序

(b)所示。由于芯柱承担了绝大部分的轴力,所以后浇的外围混凝土承受的竖向荷载较小,其初始压应变就很小;在水平地震荷载作用下,柱只有承受较大的弯矩或较大的变形才能使其边缘压应变达到混凝土的极限压应变,因此预留压应变柱在地震荷载作用下具有较好的变形能力。

李惠^[48]完成了9根以螺旋箍筋柱为芯柱,混凝土强度等级为C20的预留压应变柱抗震性能的研究。研究表明:预留压应变柱具有良好的变形能力和耗能能力,具有较大的塑性铰长度,具有较好的抗震性能。

1997年,考虑到施工顺序的特点,李惠和辽宁省建筑设计研究院的林立岩将预留压应变柱改称为叠合柱,并将螺旋箍筋混凝土芯柱改为钢管高强混凝土柱,外围混凝土也由与“芯柱混凝土一致”改为“可以一致”,也可以采用强度等级低的高强混凝土甚至是普通混凝土,并开展了钢管高强混凝土叠合柱^[49]抗震性能的试验研究;后来,刘克敏又进一步提出了钢骨高强混凝土叠合柱^[50],对其抗震性能进行了系统的研究,并将它们统称为高强混凝土叠合柱。

对高强混凝土叠合柱而言,通过两个阶段的施工,人为地使芯柱承担了大部分或全部的早期施工荷载,且在组合截面形成并开始共同工作后,剩余的竖向荷载将按组合截面各部分的轴压刚度来分配,这就使芯柱承担了尽量多的轴力,减小了后期外围叠浇混凝土上的轴力,实质上是减小了外围混凝土的轴压比;正是由于轴压比的减小,使得外围混凝土受压区边缘的初始压应变相应减小,达到极限压应变的过程得以延长,因而高强混凝土叠合柱具有良好的变形能力。

高强混凝土叠合柱在多位学者的努力下,已经形成了系统的研究成果,并在近30多栋高层建筑中得到应用。但是,高强混凝土叠合柱的芯柱多采用钢管混凝土或钢骨的形式,这使得梁柱节点处有钢管或钢骨穿过,给节点的施工带来困难。若采用高强混凝土芯柱,则芯柱的面积应足够大才能承担大部分的轴力,所以其优势并不明显。