



天津市科协资助出版

高强钢筋混凝土 异形柱及节点试验 与设计方法



戎 贤 张健新 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

天津市科协资助出版

高强钢筋混凝土异形柱 及节点试验与设计方法

戎 贤 张健新 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书详细介绍了高强钢筋混凝土异形柱及节点试验与设计方法。全书分2篇,共9章。主要针对异形柱结构节点薄弱问题,提出在异形柱框架节点核心区加入纤维对节点薄弱部位进行增强,并探讨了纤维对异形柱节点薄弱部位的增强效果,给出了纤维增强异形柱框架节点的设计方法,分析了高强钢筋混凝土异形柱的破坏过程,给出了高强钢筋混凝土异形柱抗震性能指标,为异形柱结构进一步推广及应用提供试验与理论研究依据。

本书可供从事结构工程研究工作的科研人员、大专院校的教师、研究生及高年级的本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

高强钢筋混凝土异形柱及节点试验与设计方法 / 戎贤, 张健新著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.8

ISBN 978-7-114-14216-1

I. ①高… II. ①戎… ②张… III. ①高强混凝土—钢筋混凝土—异形柱—节点—试验研究 ②高强混凝土—钢筋混凝土—异形柱—节点—设计 IV. ①TU528.571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 236789 号

Gaoqiang Gangjin Hunningtu Yixingzhu ji Jiedian Shiyan yu Sheji Fangfa

书 名: 高强钢筋混凝土异形柱及节点试验与设计方法

著 者: 戎 贤 张健新

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×980 1/16

印 张: 7.5

字 数: 133 千

版 次: 2017年8月 第1版

印 次: 2017年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14216-1

定 价: 28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

异形柱框架结构具有良好的建筑使用功能等一系列优点,在国内许多地区得到了广泛的工程应用。但由于异形柱结构节点薄弱部位的存在,限制了异形柱框架结构的结构高度与使用范围。本书针对异形柱结构节点薄弱的问题,提出在异形柱框架节点核心区加入纤维对节点薄弱部位进行增强,并探讨了纤维对异形柱节点薄弱部位的增强效果。在我国大力倡导节能环保的背景下,有必要在异形柱框架梁柱节点中应用强度高、综合性能好的钢筋,研究和探讨高强钢筋混凝土异形柱的受力性能以及抗震性能,为异形柱结构进一步推广及应用提供试验与理论研究依据。

本书分2篇。第一篇为高强钢筋混凝土异形柱框架节点试验及设计方法研究,第二篇为高强钢筋混凝土异形柱试验研究。第一篇共5章:第1章为绪论,介绍了高强钢筋混凝土异形柱框架节点的发展历程;第2章论述了纤维增强的异形柱节点抗震性能试验设计;第3、4章分别分析了高强钢筋混凝土异形柱框架节点受力性能及抗震性能试验结果;第5章对高强钢筋混凝土异形柱框架节点受剪承载力设计方法进行了研究。第二篇共4章:第6章为绪论,介绍了高强钢筋混凝土异形柱的发展历程及主要研究内容;第7章论述了高强钢筋混凝土异形柱抗震性能试验设计及加载方案;第8章分析了高强钢筋混凝土异形柱的破坏特征和钢筋应变等受力性能指标;第9章分析了高强钢筋混凝土异形柱的承载能力及延性、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化以及耗能能力等抗震性能试验结果。

本书的读者对象主要为大专院校的教师、研究生以及科研机构的工程技术人员。

尽管作者慎之又慎,但由于水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2017年7月

目 录

第一篇 高强钢筋混凝土异形柱框架节点试验及设计方法研究

1 绪论	3
1.1 研究背景及意义	3
1.2 研究现状	4
2 纤维增强的异形柱节点抗震性能试验	11
2.1 试验目的	11
2.2 试验背景	11
2.3 试验设计	12
2.4 试验方法	15
2.5 模型制作	18
2.6 试验观测与数据采集	18
3 纤维增强的异形柱节点受力性能试验分析	21
3.1 破坏过程及破坏特征	21
3.2 箍筋应变	29
3.3 本章小结	31
4 纤维增强的异形柱节点抗震性能试验分析	32
4.1 承载能力、变形能力和位移延性	32
4.2 滞回曲线	35
4.3 骨架曲线	39
4.4 刚度退化	40
4.5 耗能能力	41
4.6 累积损伤	44
4.7 本章小结	46
5 纤维增强异形柱节点受力机理及设计方法研究	48
5.1 异形柱节点受力机理与设计方法	48
5.2 异形柱节点受力性能分析	53

5.3 纤维增强异形柱节点的增强作用	56
5.4 本章小结	57
第一参考文献	58

第二篇 高强钢筋混凝土异形柱试验研究

6 绪论	65
6.1 研究背景及意义	65
6.2 国内钢筋混凝土异形柱的研究现状	67
6.3 国外钢筋混凝土异形柱的研究概况	68
6.4 主要研究内容	68
7 高强钢筋混凝土异形柱试验概况	70
7.1 试件设计与制作	70
7.2 材料性能	72
7.3 试验方案	73
7.4 量测内容与方法	74
8 高强钢筋混凝土异形柱试验受力性能分析	76
8.1 试验现象	76
8.2 钢筋应变分析	93
8.3 本章小结	95
9 高强钢筋混凝土异形柱抗震性能分析	97
9.1 承载力、位移及延性系数	97
9.2 滞回曲线	100
9.3 骨架曲线	103
9.4 刚度退化	104
9.5 耗能性能	105
9.6 本章小结	108
第二篇参考文献	110

第一篇

高强钢筋混凝土异形 柱框架节点试验及设 计方法研究

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

钢筋混凝土异形柱结构体系是我国建筑工程领域内的一项新型结构形式,由天津市轻工业设计院、建材工业设计院等设计单位在探索建筑功能灵活、平面布置合理的住宅体系中率先在国内提出的。异形柱是指截面几何形状为 L 形、T 形和十字形,且截面各肢的肢高肢厚比不大于 4 的柱;异形柱结构是指采用异形柱的框架结构和框架—剪力墙结构^[1]。钢筋混凝土异形柱结构的特点包括灵活的使用功能、简洁美观的建筑结构形式、合理的受力性能等、具有增加建筑室内的有效使用面积、避免矩形柱在室内出现棱角以方便家居布置等优点而受到广大用户的欢迎。20 世纪 70 年代后,异形柱结构体系在工程实践中取得了良好的经济、社会及环境效益,具有良好的发展前景。国务院住房与城乡建设部等相关部门曾下达文件将异形柱结构住宅体系列为住宅建设主要结构体系之一。在国家鼓励异形柱结构住宅体系的发展进程中,异形柱将在未来住宅体系中占据重要位置。因此,研究异形柱结构体系有助于加快我国住宅建设进程。

节点作为梁柱的传力枢纽,在结构中起着重要的作用。但研究及震害资料表明,节点失效导致结构破坏的现象在地震中较为常见^[2]。由于异形柱框架节点自身的特点,受力更加复杂,加之混凝土振捣不密实等施工质量问题的存在,它比矩形截面节点更薄弱。由于异形柱节点薄弱的问题,限制了异形柱结构的结构高度及其使用范围。与普通钢筋混凝土框架结构相比,钢筋混凝土异形柱节点主要存在以下几方面的问题:

(1) 异形柱节点的截面尺寸比较小,梁柱交接处钢筋密集,梁中的纵筋向内弯折后才能穿过节点核心区,施工时核心区混凝土不容易振捣密实,影响异形柱节点浇筑质量,降低了异形柱的强度。因此,异形柱的梁柱节点比矩形截面柱的节点更薄弱,从而限制了异形柱结构的使用高度及其进一步的推广应用。

(2) 异形柱节点腹板比较薄弱,翼缘受剪作用在加载初期较小,因此,在截面积相同的情况下,异形柱框架节点的受剪承载能力低于矩形截面梁柱节点

受剪承载力。当异形柱的轴压比较大时,较为薄弱的异形柱柱肢混凝土会出现局部压溃。

(3)矩形截面钢筋混凝土梁柱节点的延性能力和耗能能力一般比构件的小,并且异形柱节点比矩形柱节点更薄弱,由此可知,异形柱节点的抗震性能较矩形截面梁柱节点的抗震性能差,一般不能满足抗震要求。

异形柱结构节点的腹板部位在地震作用下破坏较为严重,成为异形柱结构的薄弱部位,限制了异形柱结构的应用范围和楼层高度。因此,目前亟待解决的问题是采取有效的增强异形柱节点的方法,改善异形柱节点的破坏形态、受力性能及抗震性能,从而提高异形柱结构的使用范围和楼层高度。

1.2 研究现状

1.2.1 异形柱节点

节点作为框架结构中的传力枢纽,在保证结构整体性中发挥着重要的作用。钢筋混凝土框架结构的节点是抗震中的薄弱部位,而由于异形柱截面的特殊性,节点核心区的受力情况更复杂,柱肢更薄弱,节点核心区的钢筋更密集等特点,使其比矩形柱的节点更薄弱。截至目前,异形柱节点的研究成果主要有以下几方面:

1999年曹祖同等^[3]进行了往复荷载作用下的12个异形柱节点与4个矩形板柱节点试验研究,分析了轴压比对节点破坏机理、受剪承载力等的影响。研究表明:在相同条件及相同截面尺寸的情况下,与矩形梁柱节点的受剪承载力相比,十字形、T形及L形截面柱的节点抗剪承载力分别降低8%、17.5%及33%,而且由于节点核心区钢筋密集、混凝土振捣不密实等原因,异形柱节点的受剪承载力计算公式不能采用混凝土结构设计规范中的公式进行计算,因此,在进行试验及理论分析的基础上提出了异形柱框架节点的受剪承载力计算公式。

2002年黄珏等^[4]总结了异形柱节点受剪承载力的影响因素,主要包括轴压比、混凝土强度、箍筋和荷载作用方式等。

2003年,熊黎黎等^[5-7]进行了低周往复荷载作用下的6个顶层中节点、5个顶层边节点及5个顶层角节点的试验研究,分析了等肢与不等肢柱核心区各主要加载阶段裂缝发展、钢筋应变、刚度退化、延性及耗能能力等抗震性能。此外,还探讨了肢长对其受剪性能的影响。研究表明:随着翼缘长度的增加,不同类型的顶层节点受剪性能提高幅度有所不同。总体来看,无翼缘的节点核心区

发生破坏,有翼缘的节点发生梁端破坏,不等肢异形柱的受剪性能比等肢异形柱的受剪性能低。

2006年,马乐为等^[8]对6个T形柱框架中间层边节点试件进行了低周往复荷载作用下的试验研究,分析了异形柱轴压比、节点水平箍筋体积配箍率及框架梁截面高度等因素对节点区的裂缝发展规律、破坏机理及受力性能等的影响。研究结果表明:T形截面柱节点的受力机理接近斜压杆机构,并提出了翼缘影响的节点抗剪强度的修正计算方法。

2006年,王丹等^[9]进行了10个低周往复荷载作用下的T形柱边节点的抗震性能试验研究,分析了节点破坏特征、承载能力、滞回性能等抗震性能指标,研究了轴压比与配箍率对节点受剪承载力及延性性能等的影响,提出了节点的受剪承载力公式。研究结果表明,增大配箍率能够提高节点受剪承载力,增大轴压比使试件的延性降低。严士超等^[10]指出,需要计算异形柱节点的非抗震及抗震时的受剪承载力,以保证异形柱结构的安全使用。

2011年,戎贤等^[11]对异形柱节点核心区掺入钢纤维、聚丙烯纤维的试件进行了低周往复荷载试验。研究结果表明:在异形柱节点核心区加入钢纤维、聚丙烯纤维能够改善节点的抗震性能。

以上研究成果已经被写入《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)中,但是由于异形柱结构是结构抗震中的薄弱部位,限制了异形柱楼层高度及进一步的推广应用,因此,研究增强异形柱节点薄弱部位的方法,对提高异形柱结构的抗震性能,具有十分重要的意义。

1.2.2 钢纤维混凝土

从建筑材料领域来看,钢纤维混凝土的研究在国内外发展较早,已基本形成完整的理论体系。钢纤维属于高弹性模量纤维,一般弹性模量可以达到基体的10倍以上。因此,钢纤维可以显著提高混凝土的抗拉强度、抗剪强度、弯拉强度,尤其是裂后韧性和抗冲击韧性,对抗压强度也有一定程度改善。

P. S. Song, S. Hwang等通过试验对钢纤维高强混凝土的力学性能进行了研究。研究结果表明:钢纤维高强混凝土中钢纤维掺量分别为0.5%、1%、1.5%和2%,抗压强度在钢纤维体积含量为1.5%时达到最大,最大提高约15.3%。劈裂抗拉强度和断裂模量均随钢纤维体积分数的增加不断增大,在体积分含量为2%时达到最大,最大增量分别为98.3%和126.6%。韧性指数随钢纤维体积分数增加而不断增大,体积分含量为2%时的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{30} 分别为6.5、11.8和20.6。研究者还建立了用以预测钢纤维高强混凝土的受压以及劈裂抗拉强

度和断裂模量的模型,模型的预测值和试验值吻合较好^[12]。

管仲国、黄承逵等根据试验结果,分析了钢纤维混凝土受压极限强度与钢纤维体积掺率、基体强度等级和纤维形状的关系,建立了双因素、双参数计算模型并通过试验数据的回归分析,提出了可以与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相衔接并适用于各等级基体强度的计算表达式。研究人员还进一步分析了纤维形状对强度的影响,给出了表达式中纤维形状因子的简化取值建议^[13]。

姚武、蔡江宁等通过试验研究了最大集料粒径、混凝土强度等级、钢纤维掺量和纤维长度等因素对钢纤维混凝土的抗弯韧性的影响。试验采用两种最大集料粒径(15mm、25mm),两种纤维体积掺量(0.2%、0.6%)和两种纤维长度(35mm、60mm),混凝土强度等级分别为C30和C50。研究结果表明:混凝土本身因素(如强度、集料粒径)与纤维参数(如体积掺量、纤维长度)对钢纤维混凝土的韧性具有同样重要的影响,纤维混凝土的性能取决于纤维、基材以及两者之间的界面黏结强度,因此必须合理选择纤维参数,研究纤维与基材的匹配关系^[14]。

汤寄予、高丹盈等选用工程中常用的铣削型、切断弓型、剪切波纹型钢纤维,以不超过2.0%的体积分数掺入高强混凝土中,通过两种尺寸小梁试件的弯曲强度和韧性试验,研究了钢纤维类型及掺量对高强混凝土弯曲强度及变形性能的影响。研究结果表明:当3种类型钢纤维分别以2.0%的体积分数掺入高强混凝土中时,可使高强混凝土的抗裂能力分别提高72%、41%和42%,弯曲极限强度分别提高90%、84%和57%。钢纤维对高强混凝土试件的尺寸效应系数影响显著,试验时应考虑试件尺寸对试验结果的影响。钢纤维高强混凝土弯曲刚度指数及承载力变化系数均随钢纤维体积分数的增加而增大,并大于理想弹塑性材料的相应值。不同类型钢纤维对高强混凝土弯曲强度及弯曲韧性的改善效果不同,可通过改进钢纤维的加工工艺、表面形状等来提高钢纤维对于高强混凝土的增强增韧效果^[15]。

彭刚等通过对不同钢纤维含量的C30和C40混凝土进行了常三轴动态压缩试验,不同强度等级混凝土分别采用逐渐增大的围压值,以获得钢纤维混凝土在三轴动态压缩状态下的应力—应变全曲线,并对其进行选择和分析。研究人员还对材料参数和诸因素间的相关性进行了分析,得到以下结论:Ezeldin等提出的钢纤维混凝土静态荷载作用下应力—应变全曲线,经过参数修正后能够很好地描述钢纤维混凝土在动态常三轴压缩作用下的应力—应变全曲线关系^[16]。

刘永胜等利用MTS810和直径为74mm的大尺寸SHPB试验装置开展了钢

纤维混凝土的动静态力学性能试验。试验结果表明:钢纤维混凝土是一种具有非常明显的钢纤维增强、增韧效应的应变率敏感材料。根据试验中应力—应变曲线的基本特征,提出了一种包含纤维增强效应和应变增强效应的钢纤维混凝土的损伤本构模型。模型在考虑钢纤维增强、应变率硬化、损伤软化等因素下,描述了钢纤维混凝土的受力响应特性,具有一定的合理性^[17]。

董毓利等利用 MTS 电液伺服试验系统对混凝土进行了等应变速率加载控制的应力—应变全曲线试验,在此基础上,根据不可逆热力学原理和内变量理论建立具有一般性的损伤本构模型。模型考虑了不可逆变形的影响,并根据统计原理分析了损伤演化规律,模型计算值与试验值吻合良好,可推广至单轴受压的反复加卸载情况^[18]。

从结构领域来看,纤维增强结构构件的主要研究对象是矩形柱框架的节点和梁、柱等构件。研究钢纤维在结构或构件的某些区域是否可以代替箍筋发挥抗剪作用和结构或构件延性、抗震性能的增强效果。

高丹盈等完成了 9 个钢纤维高强混凝土框架边节点的抗震试验。通过试验测试钢纤维高强混凝土框架边节点梁端的荷载—变形滞回曲线和梁相关截面的横向变形,研究了钢纤维体积率、掺加范围和轴压比等因素对高强混凝土框架边节点梁截面曲率延性和滞回曲线的影响。研究结果表明:钢纤维能改善高强混凝土框架边节点梁截面延性,显著提高高强混凝土框架节点的抗震延性和耗能能力,对解决节点箍筋密集、改善施工条件具有明显效果^[19]。

李凤兰、黄承逵等通过 26 根钢纤维高强混凝土柱在低周反复荷载作用下的压弯性能试验,研究了轴压比、钢纤维含量特征值、箍筋含量特征值、剪跨比和纵向配筋等因素对钢纤维高强混凝土柱延性性能的影响规律。研究结果表明:钢纤维对改善高强混凝土柱的脆性破坏性质并提高其延性具有明显效果,但钢纤维和箍筋对高强混凝土柱的延性提高作用机理不同,不能采用钢纤维等量(体积率相同)取代箍筋的方法使高强混凝土柱获得等同的延性性能。研究提出了钢纤维高强混凝土柱的位移延性系数计算公式,可供工程设计应用参考^[20]。

姜睿通过试验研究了较高轴压比条件下,钢纤维对超高强混凝土短柱抗震延性的改善作用。短柱试件的剪跨比为 2.0,强度为 103.6 ~ 114.8 MPa,钢纤维的体积含纤率分别为 0.5%、1.0%、1.5%。采用简支梁加载图式进行了低周反复加载。试验结果表明:未掺钢纤维的试件在高轴压作用下发生了脆性特征明显的剪切破坏,延性很差;随着钢纤维含量的增加,试件的破坏形态向具有一定延性特征的弯剪破坏转变;同时延性得到大大改善,位移延性和极限弹塑性位移角分别可最大增加 50.2%、96.1%。研究人员还给出了抗震设计条件下的最小

钢纤维体积含纤率的建议值^[21]。

章文纲等最早进行了 15 个混凝土矩形柱框架节点(13 个边节点和 2 个中节点)的低周反复加载试验,研究钢纤维对节点抗震性能的增强效果^[22]。蒋永生等通过 3 个钢纤维高强混凝土节点和 2 个普通高强混凝土框架中节点的抗震性能试验研究钢纤维增强节点抗震性能、设计方法和构造措施^[23]。郑七振等通过 12 个核心区采用钢纤维混凝土的框架边节点抗震试验研究节点的破坏过程、抗裂强度、抗剪强度及剪切延性等问题^[24,25]。研究结果表明:钢纤维混凝土矩形柱节点抗震性能良好,其抗剪强度提高约 28%,耗能提高约 27%,纤维工程掺量建议取 0.8%~2%。钢纤维高强混凝土节点可以充分发挥高强混凝土及钢纤维的作用,减少箍筋用量,增强梁筋锚固,可以提高节点抗震性能。节点核心区采用钢纤维增强的矩形柱边节点抗裂强度、剪切延性、抗剪强度和延性有所改善,钢纤维混凝土对于解决节点箍筋密集、改善节点的抗剪性能具有显著作用。

综上所述,采用钢纤维混凝土代替普通混凝土对结构构件进行增强是一种行之有效的增强方法。但钢纤维造价较高,在混凝土搅拌过程中,钢纤维掺量过多(超过 2% 体积率)的情况下,纤维容易结团,应注意纤维掺量选取以及施工方案的可性。

1.2.3 聚丙烯纤维混凝土

除钢纤维之外,在实际工程中聚丙烯纤维的应用最广泛。聚丙烯纤维混凝土是 20 世纪 70 年代国际上发展起来的一种新型混凝土,最初用在美国的军事工程中,很快发展到民用工程。聚丙烯纤维是一种新型的合成纤维,被称为混凝土的“次要增强筋”。聚丙烯纤维乳白色、无味、无毒,耐酸碱,表面疏水,分散性好,化学稳定性好,是工程常用的一种混凝土增强材料。其优点是价格低廉,自重较小,具有良好的阻裂性和韧性,同时纤维本身在混凝土碱性条件下性质稳定,具有较好的分散性,能够均匀分散在混凝土中,即易于搅拌,施工简单方便。国内外学者和工程界对聚丙烯纤维混凝土的相关研究也相对比较成熟。具有代表性的研究包括以下几个方面:

孙海燕等根据对聚丙烯纤维混凝土的试验研究,提出聚丙烯纤维对混凝土的抗拉压强度等物理力学性能的影响。研究结果表明:聚丙烯纤维对混凝土力学性能有积极的影响,聚丙烯纤维对混凝土的抗压强度影响较小,在改善混凝土抗拉强度方面比较突出,能够提高混凝土抗裂性能和延性^[26]。试验证明,体积掺量为 0.05% 的美国杜拉纤维混凝土的抗裂能力与普通混凝土相比,提高了将

近 70%。

汪洋等进行的研究表明:聚丙烯纤维可提高混凝土抗渗性,能够改善混凝土耐久性。掺量为 $1.18\text{kg}/\text{m}^3$ 的聚丙烯纤维混凝土比普通混凝土可减少 79% 的渗水。聚丙烯纤维钢筋混凝土在模拟海洋环境下进行的渗透试验表明,纤维掺量为 0.05% 和 0.1% 混凝土中的钢筋比普通混凝土中的钢筋分别迟 9d 和 11d 锈蚀^[27]。

Chen L 等经过试验研究得出聚丙烯纤维能显著增强混凝土的韧性,并分析了纤维增韧的机理^[28]。卢哲安等通过试验分析钢纤维高强混凝土、钢—聚丙烯混杂纤维高强混凝土与素混凝土的韧性对比试验数据,研究纤维的加入对高强混凝土韧性性能的影响。研究结果表明:聚丙烯纤维能够显著提高混凝土的韧性,提高混凝土的变形能力^[29]。

Hughes 等通过研究得出在混凝土中掺入聚丙烯纤维后的增韧效果明显,给出了掺入单丝的和原纤化的聚丙烯纤维混凝土的应力—应变关系曲线^[30]。

Yeol Choi、Robert L. Yuan 通过试验研究了聚丙烯纤维增强混凝土的极限劈裂抗拉强度和抗压强度之间的关系,研究了聚丙烯纤维混凝土 7d、28d 和 90d 抗压强度与极限劈裂抗拉强度。研究结果表明:玻璃纤维和聚丙烯纤维增强后,混凝土的极限劈裂抗拉强度增加了 20% ~ 50%,是相应抗压强度的 9% ~ 13%。研究人员还对相应试验数据进行线性回归分析,得到用于预测玻璃纤维增强混凝土和聚丙烯纤维增强混凝土的极限劈裂抗拉强度和抗压强度之间的关系方程^[31]。

朱江通过分析聚丙烯纤维在混凝土中的作用以及使混凝土高性能化的作用,说明在混凝土中掺入适量的聚丙烯纤维能有效地改善混凝土材料的物理性能,提高混凝土材料的耐久性。同时还讨论了聚丙烯纤维在混凝土及高性能混凝土工程中的应用实例,以及这种材料在混凝土中的应用发展前景^[32]。

综上所述,聚丙烯纤维能提高混凝土的抗拉强度,对改善混凝土的抗裂性和脆性具有显著效果。目前,聚丙烯纤维的主要工程应用范围是大体积混凝土的抗裂和抗渗领域,一般在水利工程中使用较多。聚丙烯纤维在工业与民用建筑中,尤其是上部结构的应用目前尚未得到大范围推广。

1.2.4 纤维的增强机理

从上述研究可以看出,纤维能够显著改善混凝土的受力性能,对混凝土发挥增强效果。纤维的增强机理是纤维混凝土表现出一切物理力学性能的本质。纤

纤维增强混凝土受力机理研究较多,目前较成熟且为众多学者所认同的有复合材料力学理论和纤维间距理论。

复合材料理论是把金属基纤维复合材料和塑料(树脂)基纤维复合材料的基础上发展起来的理论,进一步发展应用于水泥及混凝土基纤维复合材料,复合材料的强度和弹性模量等性能符合复合体内各组分性能的弹性叠加理论。考虑纤维不连续、纤维方向有效系数以及纤维分布不均匀系数等影响,得到的两种材料性能的叠加。纤维间距理论(即纤维阻裂理论)是以线弹性的断裂力学为基础,认为混凝土内部有尺度不同的微裂缝、孔隙和缺陷,在施加外力的作用时,孔、缝隙部位产生较大的应力集中而引起裂缝的扩展。掺入纤维后,可以将纤维看成裂缝的约束体来解释钢纤维的阻裂增强作用。由于纤维间距理论的精度远不如复合力学理论,故通常采用复合力学理论^[33,34]。

此外,刘永胜等认为纤维对混凝土的增强效果主要取决于纤维—混凝土基体的界面黏结性能。利用复合材料的剪滞理论对纤维混凝土基体的界面力学传递进行分析,得出了纤维承受拉应力和剪应力的表达式,并分析了纤维对混凝土的增强效果。研究表明:纤维混凝土是由细集料、粗集料、水泥、水以及乱向分布的纤维组成的一种多相非均质复合材料。为了简化分析,可将纤维混凝土简化为混凝土基体和纤维组成的两相复合材料,从两相复合材料的界面性能入手,分析纤维混凝土基体界面上的应力传递及纤维对混凝土基体的增强机理,作为纤维混凝土的增强机理复合材料界面力学的依据^[35]。

刘新荣、祝云华等也从两相复合材料的界面性能入手,根据剪切滑移模型分析了纤维与混凝土基体之间界面的应力传递,推导纤维与基体间的受拉应力和剪应力的传递模型,研究纤维对基体混凝土的增强机理。研究得出了纤维混凝土应力四周的应力场的分布形态和纤维增强混凝土的力学效果,并通过有限元方法验证了模型的可靠性。研究表明:纤维混凝土是由集料、水泥、水以及乱向分布的纤维组成的一种多相非均质复合材料,基体中纤维的拔出过程可分为3个阶段(完全黏结阶段、黏结滑移阶段和黏结脱离阶段),改善纤维与基体界面的性能和增加纤维表面的粗糙度可增加界面黏结强度^[36]。

由此可见,纤维对混凝土具有显著增强效果,其增强作用除了与纤维种类、弹性模量、纤维掺入量具有直接关系外,其纤维与基体混凝土之间的界面性能对其增强效果也具有重要影响。因此,选用混凝土增强材料时,应尽量选用对纤维弯折、端部弯钩等增强纤维与基体混凝土黏结锚固性能的纤维品种,以增加纤维对基体混凝土的增强效果。

2 纤维增强的异形柱节点抗震性能试验

2.1 试验目的

为了增强混凝土异形柱框架节点的抗震性能,完善异形柱结构体系的性能,提出在异形柱节点核心区加入纤维的措施。通过对纤维增强的异形柱框架节点进行低周往复荷载作用下的试验研究,对比分析纤维增强的异形柱节点与未增强的异形柱节点的抗震性能,揭示其增强机理,完成纤维增强混凝土异形柱框架节点抗震能力增强效果的综合评价;揭示地震情况下纤维增强的混凝土异形柱节点的受力机理和传力机制,完善混凝土异形柱结构设计理论。

2.2 试验背景

2003年,天津大学、昆明建设局、昆明理工大学、同济大学等单位在同济大学结构实验室完成了一榀1/6缩尺的6层异形柱框架结构的模拟地震振动台试验^[37]。研究表明:异形柱框架结构基本满足8度区“小震不坏,大震不倒”的要求,但异形柱结构的底部部分层的节点有混凝土局部压溃剥离现象出现。2005年,天津大学在天津大学结构实验室进行了三榀1/3缩尺的两跨三层异形柱框架的低周往复加载试验,研究表明:建造在8度区的6层18m高的异形柱框架结构,其一、二层节点核心区发生剪切破坏。因此,《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)中规定:“8度区异形柱框架结构高度不应超过12m”。节点作为异形柱结构的薄弱部位,限制了异形柱结构建筑高度与应用范围^[38]。因此,改善异形柱节点薄弱部位受力性能对异形柱结构的推广具有极其重要的意义。

在上述框架研究的基础上,对框架一层节点进行的1/2缩尺的低周往复加载试验,分别采用聚丙烯纤维、钢纤维对节点核心区进行增强,研究聚丙烯纤维、钢纤维对异形柱结构节点薄弱部位的增强效果。