



土木工程施工与管理前沿丛书

纤维增强与 加固钢筋混凝土剪力墙

XIANWEI ZENGQIANG YU
JIAGU GANGJIN HUNNINGTU JIANLIQIANG

赵 军 高丹盈 著

中国建筑工业出版社

● 土木工程施工与管理前沿丛书

纤维增强与加固钢筋混凝土剪力墙

赵 军 高丹盈 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

纤维增强与加固钢筋混凝土剪力墙/赵军, 高丹盈
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 12

(土木工程施工与管理前沿丛书)

ISBN 978-7-112-17648-9

I. ①纤… II. ①赵…②高… III. ①纤维增强混凝土-钢筋混凝土-剪力墙结构 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 003039 号

本书总结了作者近年来在钢筋纤维混凝土剪力墙和纤维片材加固受损钢筋混凝土剪力墙承载能力和抗震性能方面的研究成果, 详细介绍了低周反复荷载下钢筋纤维混凝土剪力墙的破坏过程和破坏形态, 研究了钢筋纤维混凝土剪力墙的抗裂能力、承载能力和抗震性能, 提出了正截面和斜截面承载力的计算方法。另外, 针对钢筋混凝土剪力墙的受损状态, 提出了相应的加固方法, 研究了加固后钢筋混凝土剪力墙在低周反复荷载下的承载能力和抗震性能, 并与原钢筋混凝土剪力墙进行了对比, 探讨了所提出加固方法的加固效果。

本书是关于纤维复合材料增强与加固钢筋混凝土剪力墙的学术专著, 可供从事混凝土结构及其加固技术研究、设计和施工的技术人员, 以及土木工程专业的研究生和本科生参考使用。

* * *

责任编辑: 尹珺祥 赵晓菲

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

土木工程施工与管理前沿丛书
纤维增强与加固钢筋混凝土剪力墙

赵 军 高丹盈 著

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

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: 9 3/4 字数: 208 千字

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-17648-9

(26261)

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

钢筋混凝土剪力墙是现代混凝土结构工程中的主要抗震结构，其承载能力和抗震性能对高层建筑结构的安全可靠至关重要。目前，我国高层建筑结构抗震设计是遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”的原则进行的。结构设计时，要求剪力墙具有良好的变形能力，使结构在地震作用下通过产生足够的变形来提高其抗震能力。由于地震作用及其计算方法具有明显的不确定性以及结构在地震作用下受力状况的复杂性，结构的抗震设计仍然不够完善。而且，由于混凝土自身的缺陷，剪力墙在抗震性能方面的问题日益突出，存在易开裂、延性差、承载能力相对较低等缺点，往往需要配置较多的钢筋（包括竖向分布钢筋和水平分布钢筋）来弥补。但过多的钢筋并不能有效地限制墙体的开裂，也不能显著改善剪力墙的延性性能和耗能能力，反而会使施工条件变差。

三十多年来，纤维复合材料在混凝土结构中的研究和应用非常广泛，对混凝土结构的力学性能和变形能力的改善作用非常明显。纤维复合材料在混凝土结构中主要有两种应用形式：一种是将其掺入混凝土中，形成纤维混凝土高性能复合材料，以改善混凝土的力学性能和混凝土结构的受力性能，提高混凝土结构的刚度和极限承载力，约束裂缝开展。同时，还能在结构接近破坏时吸收大量能量，使其具有塑性破坏性质，并具备良好的延性和变形性能，提高结构的抗震能力。另外一种是将纤维复合材料应用于混凝土结构表面，利用纤维复合材料优异的抗拉性能进行混凝土结构的补强和受损混凝土结构的加固，以提高混凝土结构的承载能力，或恢复受损混凝土结构的受力性能。

纤维增强与加固钢筋混凝土剪力墙是将纤维复合材料应用于钢筋混凝土剪力墙中或剪力墙表面，从而提高钢筋混凝土剪力墙的力学性能，克服普通钢筋混凝土剪力墙的上述缺点，使其具有较好的抗裂、抗剪和抗冲击等性能，尤其具有良好的延性和韧性以及优异的耗能能力。

作者对纤维增强与加固钢筋混凝土剪力墙进行了大量的试验研究和理论分析，研究了钢纤维增强钢筋混凝土剪力墙和纤维片材加固钢筋混凝土剪力墙在低周反复荷载作用下的受力性能。对于钢纤维增强钢筋混凝土剪力墙，主要研究了钢纤维对钢筋混凝土剪力墙的承载能力、抗裂能力、刚度、延性性能以及耗能能力等的影响规律，提出了钢筋钢纤维混凝土剪力墙抗裂和极限承载力的

计算方法。对于纤维片材加固钢筋混凝土剪力墙，提出了纤维片材和自密实混凝土联合加固受损钢筋混凝土剪力墙的加固方法，研究了加固后剪力墙在低周反复荷载作用下的承载能力和抗震性能。

本书由赵军、高丹盈、张明、杜兴亮和李趁趁合作撰写，共分12章，具体分工为：赵军、张明撰写了第1、2、3、4章，高丹盈、杜兴亮撰写了第5、6、7章，赵军、高丹盈撰写了第8、9章，赵军、李趁趁撰写了第10、11、12章，全书由赵军统稿。另外，研究生赵子锋和林娇青参加了部分试验研究和理论分析工作。

本书的主要内容将丰富和发展纤维增强与加固混凝土理论，促进纤维复合材料这种高性能复合建筑材料在结构抗震领域的工程应用。

由于作者水平所限，书中可能存在疏漏和不足，敬请同行专家和广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究概述	1
1.2 研究意义	10
第 2 章 钢纤维混凝土剪力墙的试验研究概况	11
2.1 试验目的	11
2.2 试件的设计与制作	11
2.3 试验装置、加载方案和测点布置	16
2.4 材料的材性数据	19
第 3 章 钢纤维混凝土剪力墙的破坏形态和试验现象	21
3.1 高剪力墙的破坏形态和试验现象	21
3.2 低剪力墙的破坏形态和试验现象	28
第 4 章 钢纤维混凝土剪力墙正截面承载力的计算与分析	35
4.1 正截面承载力的主要影响因素	35
4.2 正截面承载力试验结果	36
4.3 钢纤维混凝土剪力墙正截面承载力的计算	37
第 5 章 钢纤维混凝土剪力墙斜截面承载力的计算与分析	44
5.1 斜截面承载力的主要影响因素	44
5.2 钢纤维混凝土剪力墙斜截面承载力的计算公式	45
第 6 章 钢纤维混凝土剪力墙的抗震性能	49
6.1 高剪力墙的抗震性能	49
6.2 低剪力墙的抗震性能	60
第 7 章 剪力墙抗裂验算和裂缝分析	68
7.1 钢纤维混凝土的抗裂机理	68
7.2 钢纤维混凝土的正截面抗裂验算和裂缝分析	69
7.3 钢纤维混凝土剪力墙斜截面裂缝宽度分析	79
第 8 章 碳纤维布加固剪力墙的试验概况	84
8.1 试验目的	84
8.2 试件的设计与制作	84
8.3 试验装置、加载方案和测点布置	89
第 9 章 碳纤维布加固剪力墙的破坏形态和试验现象	93

9.1 高剪力墙的试验现象和破坏形态 93

9.2 低剪力墙的试验现象和破坏形态 100

第 10 章 碳纤维布加固剪力墙承载力计算..... 110

10.1 正截面承载力的分析和计算 110

10.2 斜截面承载力的分析和计算 114

第 11 章 碳纤维布加固剪力墙的抗震性能..... 124

11.1 高剪力墙的延性和耗能能力分析..... 124

11.2 低剪力墙的延性和耗能能力分析..... 131

第 12 章 结论..... 142

12.1 钢筋钢纤维混凝土剪力墙 142

12.2 碳纤维布加固剪力墙 143

参考文献 146

第 1 章 绪 论

1.1 研 究 概 述

1.1.1 剪力墙的研究背景

现代高层建筑是随着社会生产的发展和人民生活水平的提高而逐渐发展起来的,是商业化、工业化和城市化的结果。而科学技术的进步,轻质高强材料的出现以及机械化、电气化、计算机等在建筑工程中的应用,为高层建筑的发展提供了物质和技术的条件。对于高层建筑而言,在我国近代相当长的一段时间,发展比较缓慢。新中国成立前,高层建筑很少,新中国成立后及 20 世纪 60 年代才陆续建成一些,比如 1959 年的北京民族饭店,12 层,高 47.4m,1964 年建成的北京民航大楼,15 层,高 60.8m,1968 年建成的广州宾馆,27 层,高 88m,是 60 年代我国建成的最高建筑。70 年代开始,我国高层建筑有了很大的发展,主要用于住宅、旅馆、办公楼等建筑,由于高层建筑具有占地面积小,节约市政工程费用,节省拆迁资金等优点,所以在一些大城市和中等城市中,高层建筑和底层带商店的建筑结构发展十分迅速,这些建筑大多数都在 20 层左右。有些城市,如深圳、上海等,高层住宅建筑已经达到 30 层左右。随着对外开放,旅馆、高层商用办公楼以及综合型多功能大楼的需要与日俱增,80 年代开始,这类建筑增长的速度很快。1985 年深圳建成了 50 层、高 158.65m 的国际贸易大厦。2 年后,高度为 200m、63 层的广州国际大厦和 208m、57 层的北京京广大厦又相继开工落成。20 世纪 90 年代以后,随着材料科学和计算机科学的进步,高层建筑更是以前所未有的速度发展^[1~3]。

高层建筑的平面布置和立面造型日趋多样化、复杂化,各种智能建筑的出现又使高层建筑更趋于功能化。高层建筑中各种装修及设备的费用占建筑物总造价的比重越来越高,建筑物在风、地震等灾害下的安全性、可靠性显得更为重要。由于材料、结构设计、造价等多种方面的原因,这些高层建筑主体结构主要以混凝土结构为主,在混凝土结构中又以剪力墙结构为主。因此,对剪力墙结构的承载力、抗震性能及设计方法进行研究具有重要意义。

剪力墙,在我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[4]中也叫抗震墙,新西兰的 T. Paulay^[5]认为剪力墙的含义不确切,除了某些特殊的情况之外,应该防止钢

钢筋混凝土结构在地震作用下出现非线性的剪切变形,因而称之为结构墙。剪力墙在高层混凝土结构中是重要的抗侧力构件,其抗震性能的优越性已成为共识,《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[6]规定的现浇钢筋混凝土类型中,除框架结构外,其余结构体系为剪力墙结构或由剪力墙组合成的结构形式。剪力墙承受风和地震作用引起的侧向荷载、来自结构自重和各楼层活荷载等的垂直荷载。在风力和垂直荷载作用下,剪力墙要满足强度、变形、抗裂性等要求;在地震和垂直荷载作用下,剪力墙要满足强度、变形、延性和控制损坏等要求。剪力墙的设计应遵循强墙弱梁、强剪弱弯的原则,确保剪力墙在地震作用下不发生脆性的剪切破坏。这要求对剪力墙的剪切承载力做比较精确的估计。然而,要做到这一点是相当困难的。在地震工程领域中,对钢筋混凝土构件剪切承载力的计算仍然是研究者所面临的巨大的挑战,其复杂性来源于混凝土和钢筋(横向和纵向)之间的相互作用,弯曲和剪切两种反应及其相应破坏模式之间的相互影响,而剪力墙还包括变幅横向循环荷载和轴向力的共同工作等因素。在过去的一个多世纪里,各国学者对混凝土构件的剪切问题投入了大量的精力,也取得了丰硕的成果,但目前仍未能建立一套公认的理论^[7~36]。这些足以说明剪切问题的重要性和复杂性。

在多层结构中,水平荷载产生的内力和位移很小,通常可以忽略;随着结构高度的增加,水平荷载的效应(内力和位移)逐渐增大,水平荷载和地震作用将成为控制因素。随着结构高度的增大,在水平荷载作用下的水平位移增加很快,超过了弯矩的增加速度。同时,高层建筑结构不仅需要较大的承载能力,而且需要较大的刚度,使水平荷载产生的侧向变形限制在一定范围内。这是因为:

(1) 过大的侧向变形会使人产生心理的不适感,影响人在建筑物内的正常工作和生活,不能保证结构的正常使用性能。

(2) 过大的侧向变形会使填充墙或建筑装修出现裂缝或损坏,也会使电梯轨道变形。变形限制的大小与装修的材料、构造做法有关。在地震作用下,虽然可以比风荷载作用下适当放宽变形限制,但由于这些非结构性的损坏会使维修费用增高,且填充墙等倒塌会威胁人的生命和安全,因此,对地震作用下产生的侧向变形要加以限制。

(3) 过大的侧向变形会使主体结构出现裂缝,甚至破坏。限制侧向变形也就是限制结构的裂缝宽度及破坏程度。

(4) 过大的侧向变形会使结构产生附加内力,甚至引起倒塌。这是因为建筑物上的垂直荷载在侧向变形下将产生附加弯矩。

地震是人类面临的最主要的自然灾害之一,抗震减灾研究是一件关系到国计民生的大事,但现有的抗震分析理论及抗震结构体系还难以满足实际工程的需要。近年来的几次大地震如:2008年汶川地震,2010年的海地地震及智利地震,2011年日本本州东海岸附近海域地震,都表明了现有的抗震理论和分析方法还不够完善,现有的抗震结构体系还不够合理。20世纪60年代开始出现的剪力墙结构^[7],由于其抗侧刚

度大,能有效地减小侧移,且具有较好的抗震性能,随着滑升模板、大模板等新的施工工艺的采用而逐渐成为现代高层建筑中广泛应用的一种结构体系。国外采用剪力墙结构的建筑已达70层,并且可以建造高达100~150层的居住建筑。据统计,在高层建筑中,高层住宅所占比例最大,约占80%,而采用剪力墙结构的高层住宅占高层住宅的90%左右。

1.1.2 钢纤维混凝土的特点

1824年波特兰水泥诞生,1830年前后出现了混凝土,混凝土作为当时的一种新型建筑材料,广泛地应用于土木和水利工程。19世纪中叶以后,随着钢铁的发展,人们把钢筋和混凝土结合起来,诞生了钢筋混凝土(Reinforced Concrete),这种新型复合建筑材料,大大提高了结构的抗裂性能、刚度、承载能力和耐久性,从而使建筑业经历了一场革命。混凝土的固有优点是高抗压强度,然而它也有固有弱点,如构件的自重较大,易于塑性干缩开裂,抗疲劳能力低,韧性差,抗拉强度低(一般仅为抗压强度的7%~14%),易产生裂纹,抗冲击碎裂性差等,限制了其在工程中的使用范围。这些弱点随着混凝土强度的提高显得尤为突出。因此,长期以来许多专家和学者不断探索改善混凝土性能(主要是提高抗拉性能,增强耐久性)的各种方法和途径,于是,提出了一种以传统素混凝土为基体的新型建筑材料——钢纤维混凝土。钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete,简称SFRC)是在普通混凝土中掺入少量低碳钢、不锈钢或玻璃钢的纤维后形成的一种比较均匀而多向配筋的混凝土^[37~39]。1911年,美国Graham曾把钢纤维掺入普通混凝土中得到了可以提高混凝土强度和稳定性的结果;到20世纪40年代,美、英、法、德、日等国先后作了许多关于用钢纤维来提高混凝土耐磨性和抗裂性、钢纤维混凝土制造工艺、改进钢纤维形状以提高纤维与混凝土基体粘结强度等方面的研究^[38~49];1963年J. P. Romualdi和G. B. Batson发表了关于钢纤维约束混凝土裂缝开展的机理的论文,提出了钢纤维混凝土开裂强度是由对拉伸应力起有效作用的钢纤维平均间距所决定的结论(纤维间距理论),从而开始了这种新型复合材料的实用开发阶段。近年来,钢纤维在国内外得到迅速发展。它克服了混凝土抗拉强度低,极限延伸率小,性脆等缺点,具有优良的抗拉、抗弯、抗剪、阻裂、耐疲劳、高韧性等性能,已在建筑、路桥、水工等工程领域得到广泛应用^[37~39]。

1. 钢纤维的基本性质

(1) 钢纤维的类型及特征参数

钢纤维按材质分,有普通碳钢钢纤维和不锈钢钢纤维,其中以普通碳钢钢纤维用量居多;按外形分,有长直形、压痕形、波浪形、弯钩形、大头形、扭曲形;按截面形状分,有圆形、矩形、月牙形及不规则形;按生产工艺分,有切断型、剪切型、铣削型及熔抽型;按施工用途分,有浇筑用钢纤维和喷射用钢纤维。

为满足钢纤维的增强效果与施工性能,通常采用钢纤维长度为15~60mm,直径

或等效直径为 0.3~1.2mm, 长径比为 30~100, 纤维的体积掺量为 0.5%~2%, 一般不超过 3%, 但现在的规程中也规定最小掺量可以到 0.3%。

(2) 钢纤维的主要性能

钢纤维的主要性能包括抗拉强度与粘结强度。试验表明, 由于普通钢纤维混凝土主要是因钢纤维拔出而破坏, 并不是因钢纤维拉断而破坏, 因此钢纤维的抗拉强度一般能满足使用要求, 其与混凝土基体界面的粘结强度则是影响钢纤维混凝土性能的主要因素。粘结强度除与基体的性能有关外, 还与钢纤维的外形和截面形状有关。

2. 钢纤维混凝土的基本性能

钢纤维混凝土中乱向分布的短纤维主要作用是阻碍混凝土内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发生和发展。在受荷(拉、弯)初期, 水泥基料与纤维共同承受外力, 当混凝土开裂后, 横跨裂缝的纤维成为外力的主要承受者, 因此钢纤维混凝土与普通混凝土相比具有一系列优越的物理和力学性能。

(1) 强度和重量比值增大

这是钢纤维混凝土具有优越经济性的重要标志。

(2) 具有较高的抗拉、抗弯、抗剪和抗扭强度

在混凝土中掺入适量钢纤维, 其抗拉强度提高 40%~80%, 抗弯强度提高 60%~120%, 抗剪强度提高 50%~100%。

(3) 具有卓越的抗冲击性能

材料抵抗冲击或震动荷载作用的性能, 称为冲击韧性, 在通常的纤维掺量下, 冲击抗压韧性可提高 2~7 倍, 冲击抗弯、抗拉等韧性可提高几倍到几十倍。

(4) 收缩性能明显改善

在通常的纤维掺量下, 钢纤维混凝土较普通混凝土的收缩值降低 7%~9%。

(5) 抗疲劳性能显著提高

钢纤维混凝土的抗弯和抗压疲劳性能比普通混凝土都有较大改善。当掺有 1.5% 钢纤维抗弯疲劳寿命为 1×10^6 次时, 应力比为 0.68, 而普通混凝土仅为 0.51; 当掺有 2% 钢纤维混凝土抗压疲劳寿命达 2×10^6 次时, 应力比为 0.92, 而普通混凝土仅为 0.56。

(6) 耐久性能显著提高

钢纤维混凝土除抗渗性能与普通混凝土相比没有明显变化外, 由于钢纤维混凝土抗裂性、整体性好, 因而耐冻融性、耐热性、耐磨性、抗气蚀性和抗腐蚀性均有显著提高。掺有 1.5% 的钢纤维混凝土经 150 次冻融循环, 其抗压和抗弯强度下降约 20%, 而其他条件相同的普通混凝土却下降 60% 以上, 经过 200 次冻融循环, 钢纤维混凝土试件仍保持完好。掺量为 1%、强度等级为 CF35 的钢纤维混凝土耐磨损失比普通混凝土降低 30%。掺有 2% 钢纤维高强混凝土抗气蚀能力较其他条件相同的高强混凝土提高 1.4 倍。钢纤维混凝土在空气、污水和海水中都呈现良好的耐腐蚀性, 暴露在污水

和海水中 5 年后的试件碳化深度小于 5mm, 只有表层的钢纤维产生锈斑, 内部钢纤维未锈蚀, 不像普通钢筋混凝土中钢筋锈蚀后, 锈蚀层体积膨胀而将混凝土胀裂^[47~49]。

1.1.3 混凝土结构加固技术

第二次世界大战之后, 世界上经济发达国家的基本建设大体上都经历了 3 个阶段, 即大规模新建阶段、新建与维修并举阶段、旧建筑改造维修阶段。目前, 各经济发达国家的基本建设已趋完成, 现逐渐把建设重点转移到旧建筑物的维修、加固和改造。自从 20 世纪 80 年代后期开始, 一些发达国家和地区的建筑改造维修的比率不断上升, 有的已达到或超过新建工程的投资。英国 1975~1980 年间新建工程数量和费用减少, 而建筑维修改造的费用逐年增加, 1978 年用于改造的费用是 1965 年的 3.76 倍, 1980 年的建筑物维修改造的工程量占全英国建筑总工程量的 1/3; 瑞典 1983 年用于维修改造的投资占建筑业总投资的 50% 左右; 德国在 20 世纪 80 年代用于厂房改建的投资占建筑总投资的 60%; 丹麦用于维修改造的费用与新建工程的费用之比高达 6:1; 美国自 20 世纪 70 年代起建筑业中新建建筑开始不景气, 而维修改造业日益成为热点, 80 年代, 建筑加固的费用占总建筑行业费用比例的 40% 左右。

目前, 我国建筑业也开始从第一阶段迈向第二阶段, 在用建筑的现代化改造和维修加固已逐渐成为建筑业的热点。我国现有建筑物的老化现象很严重, 据统计, 我国现有建筑面积 70 亿 m^2 , 其中约有 50% 的建筑物需要分期分批进行鉴定加固才能使用。近年来, 我国用于旧建筑物维修、改造和加固的投资比例增长较快, 有关资料表明, “一五”期间, 更新改造资金只相当于同期基本建设投资的 4.2%, “三五”期间已达 27%, “四五”期间为 31.7%, “七五”期间为 54%。我国 20 世纪 50~60 年代兴建的大批工业及民用建筑物陆续进入老年期, 存在较多的缺陷和隐患。因此, 像我国这样的经济发展中国家, 在今后的几十年, 仍会处于建筑物新建与维修并举阶段, 旧建筑物的加固维修与改造仍然是建筑业发展的重要组成部分。

混凝土结构加固的原因主要有以下几点^[56~60]:

(1) 建造年代较久。对于一般性建筑, 结构的设计基准期为 50 年, 如果建筑物建造年代较久, 就会受到使用年限的限制, 其安全度不能得到满足。

(2) 自然灾害的影响。建筑物受到地震、火灾、水灾等影响, 会造成结构使用功能的下降甚至丧失结构使用功能, 导致结构的承载力和耐久性不满足现有抗震设计规范的要求, 从而影响结构的安全和使用性能。

(3) 设计或施工不当。在实际工程中, 很多建筑物由于受到设计不周或差错, 施工不当, 或建筑材料质量不合格等因素的影响, 建筑质量低劣, 达不到设计要求。

(4) 结构使用功能改变。人们为了满足自己生活或产业发展的需要, 需要调整建筑物的使用功能, 这会导致原有结构可靠性的改变。如果使用不当, 会造成结构不能满足正常使用条件下的功能要求。

(5) 设计标准改变。随着社会的发展以及人们对事物认识的不断深化,设计规范需要不断修订,建筑结构设计标准也会逐渐提高,按照现行规范标准设计的结构将不能满足今后设计标准的要求。

基于以上各种原因,我们需要对建筑物进行加固,加固不仅投资少、影响小、见效快,而且还具有可观的经济效益和良好的社会效益。

在混凝土结构的加固修复中,加固方法的选择,应该在可靠性鉴定的基础上,根据结构功能要求、结构所处的具体情况以及经济合理等因素进行综合分析决定。实际工程中,常用的加固方法有加大截面加固法、置换混凝土加固法、外包钢加固法、粘钢加固法、预应力加固法、注浆加固法、外粘纤维增强复合材料加固法等^[57~65]。

(1) 加大截面加固法。

加大截面加固法是一种传统的加固方法,采用与原有构件同类的材料,通过增大构件截面的面积,提高构件的承载能力、刚度和变形能力,达到对原构件进行加固的目的。该方法施工工艺简单,适应性强,广泛地应用于一般梁、板、柱、墙等混凝土结构的加固,但是现场湿作业工作量大,养护时间长,有时还会受到使用上的限制,对生产和生活有一定的影响。

(2) 置换混凝土加固法。

置换混凝土加固法,其优点与加大截面加固法相似,加固后不影响建筑物的净空,但是存在施工的湿作业时间长的缺点,而且构件中的钢筋密集区会增加施工难度,并影响混凝土的浇筑质量及混凝土强度,适用于受压区混凝土强度偏低或有严重缺陷的梁、柱等混凝土承重构件的加固。

(3) 外包钢加固法。

外包钢加固法是在混凝土构件的四周(或两角)包型钢的加固方法,分干式外包钢和湿式外包钢两种形式。它可以在基本不增大结构截面尺寸的情况下较多地提高其承载力,增大延性和刚度。外包钢加固法适用于不允许增大截面尺寸,而又需要大幅度提高承载力的混凝土结构的加固,比如混凝土柱、梁、屋架等。该方法施工工艺简单,现场工作量较小,受力较为可靠,基本上无需养护,缺点是用钢量较大,加固维修费用较高。

(4) 粘钢加固法。

粘钢加固法,即在混凝土构件表面用特制的建筑结构胶粘贴钢板,以提高结构的承载能力的一种加固方法。这种加固方法的优点是施工相对简单、快速,不影响构件的外形和使用空间,施工时对生产和生活影响较小,在国际上也是一种使用面较广的先进加固方法,广泛地应用于房屋建筑和公路桥梁等的加固。

(5) 预应力加固法。

预应力加固法是采用外加预应力钢拉杆或撑杆对结构进行加固的方法。它的特点是通过预应力手段强迫后加部分拉杆或撑杆受力,改变原结构内力分布并降低原结构

应力水平,致使一般加固结构中所特有的应力应变滞后现象得以完全消除,后加部分与原结构能较好地共同工作,结构的总体承载能力可显著提高。

预应力加固法适用于大跨结构加固,以及采用一般方法无法加固或加固效果不理想的较高应力应变状态下的大型结构加固,但不宜用于混凝土收缩徐变大的结构和温度高于 60°C 环境下的混凝土结构。该方法加固效果好且费用低,但是增加了施工预应力的工序和设备,施工技术要求过高,预应力拉杆或压杆与被加固构件的连接(锚固)处理较复杂、难度较大,另外还存在施工时的侧向稳定问题等。

(6) 注浆加固法。

注浆加固法是采用压力把具有较好粘结性能的材料注入被加固构件内部的空隙中,以提高被加固构件的完整性、密实性,提高材料的强度。该方法在混凝土或砌体结构裂缝等内部缺陷的修复加固以及地基加固中应用广泛。

(7) 化学灌浆补强法。

化学灌浆补强法,就是将一定的化学材料配制成浆液,用压送设备将其灌入缝隙内,并使其扩散、胶凝或固化,达到补强的目的。

化学灌浆材料不仅具有较好的可灌性,而且还能按工程需要调节浆液的胶凝时间。按材料分有水玻璃类、木质素类、丙烯酰胺类、环氧树脂、聚氨酯类等。这些材料都有较强的独特性能,有的具有较高的粘结强度,适用于结构补强,有的适于有流动水部位的堵漏防渗,可以根据工程的不同要求,选择有针对性的灌浆材料。用于结构补强的化学灌浆材料主要是环氧树脂和甲基丙烯酸酯类材料,其他都属于防渗堵漏材料。

化学灌浆材料主要用来修补因裂缝而影响使用功能的结构,如水池、水塔、水坝等,以及因钢筋锈蚀而导致结构耐久性降低的构件,也可用来对混凝土梁、板、柱等构件进行补强。

(8) 外粘纤维增强复合材料加固法。

纤维增强复合材料(简称FRP)加固修补混凝土结构技术是一项新型的结构加固技术,它是利用树脂类胶结材料将纤维材料粘贴于混凝土表面,使纤维材料与混凝土结构共同受力,有效传递剪力,降低钢筋应力,增大结构的承载能力,从而达到对结构构件补强加固及改善结构受力性能的目的。纤维增强复合材料具有高强高效,施工便捷,施工质量易于保证,耐腐蚀及耐久性能好,加固修补后基本不增加原结构的自重和改变原构件尺寸等优点,可广泛用来加固桥梁、公路、高层建筑、隧道、水塔、水池、涵管及管线、烟囱等各个领域的钢筋混凝土结构。

1.1.4 碳纤维增强复合材料加固技术的特点

普通碳纤维是以聚丙烯腈(PAN)或中间相沥青(MPP)纤维为原材料经高温碳化制成,碳化程度决定着碳纤维材料的弹性模量、密度、导电性等性能。目前,用于

混凝土结构加固的碳纤维材料种类较多，其分类方法也有多种^[62]。

1. 碳纤维材料的分类

按形式分类，碳纤维材料可分为以下几种形式：

(1) 片材（包括布状和板状）。一般通过环氧树脂类胶粘剂粘贴于混凝土受拉区表面，是用于结构加固修复最多的一种材料形式，其中布状材料的使用量最大。

(2) 棒材。通常作为代替传统钢筋（主筋或箍筋）的材料，既可用于已建结构的补强加固，也可用于新建结构中，对棒材进行张拉后，可对混凝土结构进行体内或体外预应力增强式加固。

(3) 型材。包括多种形状，但有应用实例的仅有格状材一种，且用量较少，主要是通过聚合物灰浆将其粘结在已有结构上，或通过适当的锚固方法将其固定在结构上进行加固。

按力学性能分类，碳纤维材料可分为以下几种形式：

(1) 高模量型（Ⅰ型）。其拉伸模量很高，可以达到 380~640GPa，但是伸长率较低，变化范围在 0.3%~0.5%之间。

(2) 高强度（Ⅱ型）。其拉伸强度在 2400~3100MPa 之间，那些加工工艺好的产品，拉伸强度可超过 4000MPa 以上。

(3) 中等模量（Ⅲ型）。其拉伸模量在 274~315GPa 之间，伸长率在 1.5%~2.0%之间。

按原丝种类分类，碳纤维材料可分为以下几种形式：

(1) 聚丙烯腈（PAN）基碳纤维。PAN 基碳纤维片材是目前建筑市场上使用最多的加固修复材料，它除具备高性能纤维片材所共有的优点外，还具有突出的耐高温（1000~3000℃）和抗燃特性，不受酸雨的侵蚀，价格性能比较好，补强效果优良。

(2) 沥青基碳纤维。用于混凝土结构物补强的沥青碳纤维，只能用高性能长丝，特别是高模量碳纤维或石墨化纤维。

2. 碳纤维增强复合材料的基本性能

与传统的加固方法相比，碳纤维增强复合材料具有以下优良性能。

(1) 高强高效

碳纤维增强复合材料的强度高，极限抗拉强度约为钢材的 10 倍（碳纤维增强复合材料的抗拉强度一般在 3500MPa 以上，而钢材是 250~550MPa），弹性模量和钢材相近，而质量约为钢材的 1/5。在加固修复混凝土结构中可以利用其高强度和高弹性模量的特点提高混凝土结构及构件的承载力和延性，达到高效加固的目的。

(2) 耐腐蚀、耐久性好

碳纤维复合材料的化学性质稳定，不与酸、碱、盐等化学物质发生反应，因此采

用粘贴碳纤维增强复合材料加固修复混凝土结构具有良好的耐腐蚀性及耐久性，可以抵抗建筑物经常遇到的各种酸、碱、盐对结构的腐蚀，解决了其他加固方法所遇到的化学腐蚀问题。这种加固方法不像粘钢法需要进行定期的防锈维护，可以节省大笔维修费用，对受盐害和腐蚀物质影响的混凝土结构物有良好的保护效果。

（3）施工简便快速

采用碳纤维增强复合材料加固修复混凝土结构不需要任何的夹具、模板、支撑和大型的机器设备，施工占用场地少。成品的碳纤维材料成卷，现场使用时根据需要用剪刀或刀片将其任意裁剪，不像钢板需要专门的切割工具。该方法便于施工操作，施工既简单又迅速，节约加固时间，加快结构加固修复进程。根据有关资料统计，同为粘贴加固方法，粘贴碳纤维增强复合材料是粘贴钢板施工工效的4~8倍。

（4）施工质量易保证

碳纤维材料的柔性好，可以加固不同表面情况的结构，当构件表面凹凸不平，通过胶粘剂，可以使碳纤维材料和被加固结构完全接触，保证粘贴率，从而有效地提高结构加固后的性能。

（5）耐疲劳性能好

碳纤维增强复合材料加固混凝土经过一定次数的疲劳循环荷载，其强度及延性指标并没有显示出有所降低，而普通混凝土经过同样的疲劳循环荷载后，其强度和延性指标都会有不同程度的降低。

碳纤维增强复合材料的良好疲劳性能具体表现为，当微裂缝形成后，树脂基体的良好塑性变形性能能钝化裂纹尖端，缓和其扩展，使得碳纤维材料疲劳断裂时，裂纹的扩展经历了更为曲折的复杂路径，从而保证了良好的抗疲劳性能。

（6）对结构影响小

碳纤维材料质量轻且厚度薄，粘贴后每平方米重量不到1.0kg（包括树脂重量），粘贴1层碳纤维片材的厚度仅1mm左右，加固修补后基本上不增加结构的自重及构件尺寸，也不影响空间使用面积。

（7）适用面广

碳纤维增强复合材料可广泛用于各种结构类型、各种结构形状、各种结构部位的加固修复，且不改变结构形状及不影响结构外观。在建筑工程中，除了在混凝土结构中应用碳纤维增强复合材料外，目前在钢结构、砌体结构、木结构等常见结构中应用碳纤维增强复合材料加固技术的开发与应用也取得了长足的进步。

此外，碳纤维增强复合材料还有其他一些优良的性能，比如透电磁波、绝缘、隔热、热膨胀系数小等，这使得碳纤维增强复合材料和碳纤维增强复合材料结构在一些特殊场合能够发挥难以取代的作用。在实际的工程应用中，我们还应注意碳纤维增强复合材料的各向异性，较低的横向抗拉强度和层间剪切强度，较低的延伸率等方面的问题。

1.2 研究意义

钢纤维混凝土是在混凝土中掺入适量的短向钢纤维或合成纤维形成的一种高性能的复合材料,它克服了混凝土脆性破坏的特点,具有较好的抗拉、抗裂、抗剪和抗冲击性能,尤其具有很好的延性和韧性及优异的耗能能力。国内外已经将纤维混凝土应用于土木工程的有关结构中来提高结构的刚度和极限承载能力,约束裂缝的发展。纤维混凝土能在结构接近破坏时吸收大量的能量,使其具有塑性破坏的性质,并具有良好的延性和变形性能,提高结构的抗震能力^[37~48]。目前将纤维混凝土应用于结构构件以提高抗裂性能和刚度以及用于改善梁、柱、框架节点等部位的抗震性能和承载能力等方面的研究成果已经被列入我国新修订的《纤维混凝土结构技术规程》(CEC S38:2004)^[49]中。

已有少量研究表明,钢纤维在提高钢筋混凝土剪力墙的承载能力,减弱刚度的退化,提高结构延性和耗能性能等方面具有明显的作用,但关于钢纤维混凝土剪力墙的试验数据还很少,相应的理论分析和应用还不够系统深入,新修订的《纤维混凝土结构技术规程》中也缺少相关的设计理论,这些都严重阻碍了这种具有高承载力、高延性、良好抗震性能的新型剪力墙结构体系的应用和纤维混凝土结构理论的发展和完善。

近年来,碳纤维布加固钢筋混凝土结构技术得到迅速发展和广泛应用,国内外对碳纤维布加固梁柱的力学性能和设计方法作了大量的试验和理论研究^[66~93],但是采用碳纤维布对受剪损坏的剪力墙进行抗剪加固方面的研究甚少。在实际的加固工程中,剪力墙在加固前已出现了不同程度的损伤,剪力墙损伤后,墙身会出现裂缝,部分混凝土将退出工作,钢筋也难免会发生滑移,因此,采用碳纤维布加固损伤剪力墙的受力性能有别于未损伤剪力墙的加固。国外已有的少数试验研究表明,碳纤维布加固剪力墙具有良好的效果,承载能力得到恢复,刚度和耗能能力也能得到弥补,但是目前还没有完善的计算理论和设计方法。传统的墙体加固方法能提高剪力墙的承载力、刚度和耐久性,但是增加了截面的尺寸,使建筑物的使用空间面积变小;而采用碳纤维布加固不影响结构的空間使用面积,施工简便,还具有高强高效、抗腐蚀性强、耐久性好等优点。我国已有的《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)^[94]中有梁柱受剪加固理论,缺少相应的关于剪力墙受剪加固方面的理论,有待于进一步补充。

综上所述,对钢纤维混凝土剪力墙及加固后剪力墙的抗震性能研究有着重要的意义。