

FRP

钢管再生混凝土柱的 性能与分析

梁炯丰 郭立湘 著○

WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

FRP 钢管再生混凝土柱的 性能与分析

梁炯丰 郭立湘 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

FRP 钢管再生混凝土柱的性能与分析/梁炯丰,郭立湘著. —武汉:武汉大学出版社,2014. 12

ISBN 978-7-307-14944-1

I. F… II. ①梁… ②郭… III. 纤维增强混凝土—钢筋混凝土柱—研究 IV. TU375.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 291157 号

责任编辑:邓 瑶

责任校对:刘小娟

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武钢实业印刷总厂

开本:720×1000 1/16 印张:7 字数:200 千字

版次:2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-14944-1 定价:46.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着建筑业的快速发展,在建筑物建造和拆除过程中产生大量的建造垃圾,其中30%~40%为废弃混凝土,由此引起的占地、环境污染等问题已逐渐引起国内外学者的重视。因此,废弃混凝土资源化利用的问题已成为学术界和工程界共同关注的热点问题之一。研究表明,将废弃混凝土制作成再生骨料(Recycled Concrete Aggregate, RCA),并将其作为部分或全部骨料配制成再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)应用于建筑工程中,是发展绿色混凝土,实现建筑资源可持续发展的主要措施之一。

根据钢管再生混凝土和FRP(Fiber Reinforced Plastics, 纤维增强复合塑料)再生混凝土两种结构形式的特点,将FRP再生混凝土与钢管再生混凝土结合使用,可使纤维增强塑料的高强度优势得以充分发挥,以弥补钢管再生混凝土结构和FRP再生混凝土结构上的不足。将FRP结合钢管使用,形成FRP钢管再生混凝土柱,不但可以减小钢管壁厚,减小结构整体的重量,而且可代替高强度钢材,降低钢管混凝土的成本,具有较高的工程应用价值和重要意义。

本书主要内容包括圆FRP钢管再生混凝土短柱和长柱的试验研究、圆FRP钢管再生混凝土柱的轴压承载力计算方法、方FRP钢管再生混凝土短柱和长柱的试验研究、方FRP钢管再生混凝土柱的轴压承载力计算方法及FRP钢管再生混凝土柱的轴压数值模拟分析。

本书的研究工作主要得到江西省高水平学科“地质资源与地质工程”和广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放基金项目(No. 2013ZDK01)的资助,同时得到国家自然科学基金项目(No. 51368001)、江西省自然科学基金项目(No. 20122BAB216005、20142BAB216002)、中国博士后基金项目(No. 2014M562132)、江西省教育厅基金项目(No. GJJ12393、GJJ13455)、江西省新能源工艺与装备工程技术研究中心开放基金项目(No. JXNE-2014-08)及中南大学博士后基金项目的大力支持。

在本书的撰写过程中,研究生王长诚、熊政、谢挺挺及本科生刘卫卫付出了很多心血,在此深表感谢!

由于作者水平有限,书中还有很多不足甚至错误之处,恳请专家和读者批评指正。

梁炯丰

2014年11月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究的目的是和意义	(2)
1.3 再生混凝土的研究现状	(2)
1.4 钢管再生混凝土的特点和力学性能研究	(5)
1.4.1 钢管再生混凝土的特点	(5)
1.4.2 钢管再生混凝土的力学性能研究	(5)
1.5 FRP 加固材料	(6)
1.5.1 CFRP 加固材料的优点	(7)
1.5.2 CFRP 加固材料的应用现状	(7)
1.6 FRP 钢管再生混凝土	(8)
1.6.1 FRP 钢管再生混凝土的概念	(8)
1.6.2 FRP 钢管再生混凝土的优点	(9)
1.7 本书内容	(10)
2 圆 FRP 钢管再生混凝土短柱的试验研究	(11)
2.1 概述	(11)
2.2 试件概况	(11)
2.2.1 试件设计	(11)
2.2.2 试件制作	(13)
2.2.3 加载设备和试验过程	(16)
2.3 材料性能试验	(17)
2.4 试验现象与分析	(18)
2.4.1 试验现象描述	(18)
2.4.2 试件的荷载-位移曲线	(35)
2.4.3 试件的荷载-应变曲线	(41)
3 圆 FRP 钢管再生混凝土长柱的试验研究	(45)
3.1 概述	(45)

3.2	试验设计与基本参数	(45)
3.3	试验加载方法	(46)
3.4	试验现象与分析	(47)
3.4.1	试验现象描述	(47)
3.4.2	试件的荷载-位移曲线	(53)
3.4.3	试件的荷载-应变曲线	(55)
4	方 FRP 钢管再生混凝土短柱的试验研究	(59)
4.1	概述	(59)
4.2	试件概况	(59)
4.3	试验现象与分析	(61)
4.3.1	试验现象描述	(61)
4.3.2	试件的荷载-位移曲线	(68)
4.3.3	试件的荷载-应变曲线	(71)
4.3.4	承载能力分析	(72)
5	方 FRP 钢管再生混凝土长柱的试验研究	(73)
5.1	概述	(73)
5.2	试件概况	(73)
5.3	试验现象与分析	(75)
5.3.1	试验现象描述	(75)
5.3.2	试件的变形分析	(80)
5.3.3	应变分析	(83)
5.3.4	承载能力分析	(84)
6	FRP 钢管再生混凝土柱轴压承载力的理论分析	(85)
6.1	概述	(85)
6.2	FRP 钢管再生混凝土圆柱的工作原理	(85)
6.3	计算的基本假定	(86)
6.4	公式的推导	(87)
7	FRP 钢管再生混凝土轴压短柱数值模拟分析	(95)
7.1	概述	(95)
7.2	钢管的模拟	(95)
7.2.1	钢管的本构关系	(95)
7.2.2	钢管的有限元模拟	(96)
7.3	混凝土的模拟	(96)
7.3.1	核心再生混凝土的本构关系	(96)

7.3.2 混凝土材料的有限元模拟.....	(97)
7.4 FRP 的模拟	(98)
7.4.1 FRP 的本构关系	(98)
7.4.2 FRP 的有限元模拟	(98)
7.5 数值分析的基本假设.....	(98)
7.6 有限元模型的建立和求解.....	(99)
7.6.1 有限元模型的建立.....	(99)
7.6.2 有限元模型的求解	(100)
7.7 有限元模拟结果分析	(100)
7.8 本章小结	(101)
参考文献.....	(102)

1 绪 论

随着我国经济快速发展和城镇化建设进程的加快,基础建设规模越来越大,每年用于浇筑混凝土而采集的天然骨料消耗达几十亿吨,而拆除旧建筑也产生了大量的建筑垃圾,从而带来了一系列资源枯竭、环境污染、能源消耗等问题。为了缓解这一矛盾,再生骨料及再生混凝土的开发应用研究已成为国内外亟待解决的问题。为此,国内外学者对废弃混凝土在建筑工程中的再生利用进行了广泛的研究。但与普通混凝土相比,再生混凝土的工作性能有所降低。怎样改善再生混凝土的这种缺陷成为首要问题。有学者提出将再生混凝土和钢管结合,使再生混凝土在钢管的约束下工作,这样就可以大大降低再生混凝土的脆性。同时,这种技术不但使钢管与再生混凝土两者的性能得到充分发挥,而且施工简单。但是这种新型组合构件也存在一定的缺陷:钢管在长期使用后,其腐蚀比较严重,即使完好的建筑在地震灾害中构件也容易发生破坏。因此,对这种组合构件的加固迫在眉睫。利用 FRP 增强复合材料对再生混凝土或钢结构进行修复加固,已成为当前国内外土木工程界研究和应用的热点。相比较而言,采用 FRP 材料对钢管再生混凝土构件进行修复加固的研究还极为罕见。事实上,利用 FRP 约束钢管再生混凝土,不仅可以提高钢管再生混凝土的承载力,还可以利用钢管再生混凝土具有较好延性的特点,增强钢管再生混凝土的承载力、刚度,也降低造价。

1.1 研究背景

钢管再生混凝土柱所受荷载增大,构件的截面也随之增大,因此需要增加用钢量,采用厚壁钢管或者高强钢管,这势必提高了工程的造价。FRP 材料较显著的优点是高强度和高刚度/重量比,在拉断前为弹性,热膨胀系数较低,各向异性,轻质、耐腐蚀、无磁,良好的抗疲劳性能及高耐久性等。这些优良的特点使其被广泛用于高层建筑、海岸建筑,以及一些特殊的构件中。FRP 钢管再生混凝土构件利用钢材和 FRP 两种材料的不同性能,取长补短,进一步增强了对混凝土的套箍效

应,使承载能力得以提高,延性得以改善。FRP 钢管再生混凝土构件不仅可以解决大型钢管再生混凝土结构必须采用厚壁钢管或高强钢管的问题,还可降低耗钢量或解决采用高强钢带来的造价过高问题,减小了构件的自重,也可以在一定程度上解决钢管的腐蚀问题。

1.2 研究的目的是和意义

钢管再生混凝土在一定程度上解决了废弃混凝土的处理问题,使其成为绿色产品,但其力学性能与普通钢管混凝土相比有较大的差异。如果其受力较大,则必须增大构件的界面面积,从而使得构件的自重增大。

FRP 具有很高的抗拉强度,如果在再生混凝土的外壁缠绕 FRP 使其成为 FRP 筒混凝土,其作用和钢管再生混凝土有异曲同工之妙。而就 FRP 竖筒再生混凝土结构而言,完全采用 FRP 外筒,毕竟成本较高,还缺乏市场竞争力。再者,FRP 属于脆性材料,韧性不足,断裂变形小,FRP 筒再生混凝土柱破坏的主要原因就是筒体被撑破。

FRP 钢管再生混凝土柱融合了 FRP 钢管混凝土柱承载能力高、抗震性能好、节点连接构造施工简便和再生混凝土节能环保、资源可再生利用的显著优点,不仅可以提高建筑结构的抗震防灾能力,还能充分利用废弃混凝土;既能保护混凝土骨料产地的生态环境,又能解决城市废弃物的堆放占地和环境污染等问题,具有显著的经济效益、社会效益和环境效益,因此具有广阔的应用前景。

1.3 再生混凝土的研究现状

早在 1946 年,前苏联学者 Gluzhge 就对利用废弃混凝土制作骨料的可能性进行了研究。从 20 世纪 70 年代末开始,日本、德国等开展了大量有关再生混凝土的研究,并将取得的成果应用于实际工程中,使再生混凝土的应用发展迅速。研究成果表明,再生混凝土的性能基本能达到普通混凝土的标准,将其运用于实际工程中是可行的。德国作为目前再生混凝土应用技术最为先进的国家之一,其主要科研成果已被该国规范委员会 2002 年 2 月颁布的规范《DIN4226-100:混凝土和砂浆骨料再生骨料》和钢筋混凝土委员会 2004 年 12 月颁布的《再生骨料混凝土应用指

南第一部分》所采用;日本也制定了相关的混凝土应用技术规范。

由于再生粗骨料的性能与天然骨料存在差异,因此再生混凝土的力学性能与普通混凝土相比有所不同。研究表明,混凝土的界面过渡区对混凝土的受压力学性能有重要影响,与普通混凝土相比,再生混凝土中粗骨料的岩石或旧砂浆与水泥石的界面较多且变异性较大,从而使得再生混凝土受压力学性能的变异性增大。

目前,国内外学者已对再生混凝土的抗压强度进行了广泛的研究,但不同研究者的研究成果有所差异。

2002年,柯国军等的再生混凝土试验考虑了再生粗骨料取代率分别为0%、20%、40%、50%、60%、80%、100%的影响。结果表明:与普通混凝土相比,再生混凝土7d和28d强度分别提高3.0%~10.7%和11.8%~24.3%。

2007年,Rahal对立方体抗压强度在20~50MPa范围内的再生混凝土力学性能进行研究,发现与相同配合比的天然骨料混凝土相比,使用再生粗骨料的再生混凝土28d立方体抗压强度为前者的88.4%,且强度受水灰比的影响。

综上可见,对于再生粗骨料对混凝土强度的影响规律,不同学者的试验研究结果不尽相同。与普通混凝土类似,再生混凝土的抗压强度与其界面过渡区的性质有着密切关系,一方面,废弃混凝土块在破碎过程中内部产生大量的微裂纹,与天然骨料相比,再生粗骨料的强度及其表观密度较低,压碎指标和吸水率较高,且表面吸附着较多旧水泥砂浆等杂质,使得界面过渡区的性质较为薄弱,破坏过程中容易产生应力集中的现象,从而造成再生混凝土的抗压强度降低;另一方面,再生粗骨料表面比较粗糙,且表面吸附着的旧水泥砂浆可与新水泥石能较好结合,而再生粗骨料的高吸水率可降低界面的有效水灰比,改善了部分界面的力学特性,从而在一定程度上提高了再生混凝土的抗压强度。这也是再生混凝土与采用天然骨料的普通混凝土强度相比,其结果离散性较大的原因。

再生混凝土单轴受压应力-应变关系,反映了再生混凝土的应力、应变变化规律,峰值应变,极限应变,弹性模量及泊松比等性质。

2005年,Xiao等对再生粗骨料取代率分别为0%、30%、50%、70%和100%的再生混凝土棱柱体试块的单轴受压应力-应变关系曲线进行的研究表明,再生粗骨料取代率对曲线有显著影响。随着取代率的增加,再生混凝土的弹性模量降低且峰值应变增加,脆性增大。例如,与再生粗骨料取代率为0的普通混凝土相比,取代率为100%的再生混凝土的弹性模量降低45%而峰值应变增加20%;曲线下降明显较陡,延性较低,极限应变随取代率的增加呈先减小后增大的趋势,且取代率为100%时的极限应变与普通混凝土相同。

2007年,Rahal针对再生混凝土弹性模量和峰值应变进行了试验研究,得出了与Xiao不同的结论:再生粗骨料取代率为100%的再生混凝土圆柱体,当抗压强

度为 25~30MPa 时,其弹性模量相对普通混凝土仅降低 3%,且峰值应变增加约 5.5%,工程应用中可以忽略再生粗骨料对混凝土弹性模量及峰值应变的影响。

再生混凝土弹性模量的试验研究还发现,由于再生粗骨料表面吸附着旧水泥砂浆等杂质,再生混凝土的弹性模量相对普通混凝土有所降低。由于试验的个体差异性,试验测得弹性模量的降低幅度存在一定差异性。

总结目前关于再生混凝土单轴受压应力-应变关系曲线的研究可得出,与普通混凝土相比,再生混凝土的弹性模量降低 15%~20%,峰值应变增加 20%左右;曲线上升段的特点与普通混凝土类似,但下降段的趋势及极限应变的变化规律仍存在一定差异;再生混凝土的泊松比与普通混凝土类似,约为 0.2;此外,再生混凝土的收缩徐变比较大。

Abdelgadir Abbas 和 L. Evangelista 对再生混凝土的耐久性能进行了研究。结果表明,与普通混凝土相比,再生混凝土的碳化速度较快,耐久性较低。经过合理配制的高性能再生混凝土具有良好的耐久性,在极端严重的侵蚀环境作用下使用年限可达 100 年。再生粗骨料的粒形对耐久性有影响,经过颗粒整形的高品质再生骨料,能显著提高再生混凝土的耐久性能。Claudio Javier Zega 对再生混凝土的高温性能进行了研究。结果表明,再生混凝土的高温性能与天然骨料混凝土相当。

Roos、Belen、Masaru 和 Xiao Jianzhuang 分别进行了再生混凝土与钢筋之间的黏结性能,再生混凝土梁的抗弯、抗剪及再生混凝土框架的抗震性能试验研究。结果表明:再生混凝土与钢筋的黏结强度低于普通混凝土;再生混凝土梁的抗弯、抗剪机理与普通混凝土梁相类似,但其承载力有所降低;再生混凝土框架的延性、耗能能力、抗震性能略比普通混凝土框架差,其强度及刚度退化较普通混凝土框架快。

国内,同济大学、西安建筑科技大学、哈尔滨工业大学、北京工业大学、南京航空航天大学、南京工业大学、郑州大学、广西大学、福州大学等高校也对再生混凝土结构、再生混凝土砌体结构、再生混凝土组合结构进行了初步研究和探索。这些研究主要集中在再生混凝土梁抗弯、抗剪性能,再生混凝土柱轴心受压、偏心受压、抗震性能,再生混凝土框架、剪力墙、框架-剪力墙;再生混凝土砖砌体抗压、抗剪、抗震性能;钢管再生混凝土柱轴心受压、偏心受压性能;型钢再生混凝土梁抗剪性能,型钢再生混凝土柱轴心受压、偏心受压性能。结果表明:再生混凝土基本满足普通混凝土性能的要求,其应用于工程结构是可行的。

总体来看,国内外对再生混凝土的物理性能、力学性能和耐久性能研究较多,对再生混凝土结构、再生混凝土砌体结构、再生混凝土组合结构的研究相对不多,处于起步阶段。

1.4 钢管再生混凝土的特点和力学性能研究

1.4.1 钢管再生混凝土的特点

由于再生粗骨料与天然骨料相比存在差异,因此再生混凝土的受压等力学性能相对普通混凝土有所降低。目前,有学者通过采取在再生混凝土配制过程中添加外加剂或对骨料进行处理等方式,从材料角度改善再生混凝土的力学性能。再生混凝土灌入钢管形成钢管再生混凝土,利用钢管与核心再生混凝土的相互作用,可使构件具有钢管再生混凝土力学性能上的优点,即核心再生混凝土在钢管约束作用下,在其抗压强度和压缩变形能力得到提高的同时,增强钢管壁的稳定性,改善钢管的抗火性能。此外,由于钢管使核心再生混凝土处于密闭环境,可减小再生混凝土的徐变,解决再生混凝土耐久性能差的问题。由此可见,钢管再生混凝土结构为废弃混凝土的循环利用以及再生混凝土在多高层建筑结构中的运用提供了新的途径,因此有必要对钢管再生混凝土结构的力学性能进行研究。

1.4.2 钢管再生混凝土的力学性能研究

钢管再生混凝土轴心受压力学性能是研究钢管再生混凝土压、弯、剪、扭等基本力学性能的重要基础。目前,关于钢管再生混凝土短、长柱在轴心压力作用下力学性能的研究尚处于起步阶段。

将再生混凝土运用于组合结构中的研究始于1997年,日本学者Konno对钢管约束再生混凝土试件进行了初探研究。研究表明,试件的力学性能与钢管约束普通混凝土类似,但由于核心再生混凝土的强度及弹性模量较普通混凝土略有降低,因此试件的刚度和承载力低于钢管约束普通混凝土对比试件。影响钢管普通混凝土短柱轴心受压力学性能的因素主要有钢材屈服强度以及混凝土抗压强度,而对于钢管再生混凝土,还需在此基础上考虑再生粗骨料取代率这一重要因素。

1.5 FRP 加固材料

目前,常用的 FRP 材料包括碳纤维复合材料(Carbon FRP,CFRP)、玻璃纤维复合材料(Glass FRP,GFRP)、芳纶纤维复合材料(Aramid FRP,AFRP)、玄武岩纤维复合材料(Basalt FRP,BFRP)和混合纤维复合材料(Hybrid FRP,HFRP)等,其主要参数如表 1-1 所示。由表 1-1 可看出,CFRP 的抗拉弹性模量最大、断裂应变(抗拉延伸率)最小、抗拉强度普遍较高;GFRP 的抗拉弹性模量最小、断裂应变最大;AFRP 和 BFRP 则介于前两者之间;AFRP 的热膨胀系数最大,而 GFRP 和 BFRP 最小;GFRP 和 BFRP 的价格最低,而 AFRP 的价格最高。另外,已有研究表明:GFRP 的徐变断裂强度最小,CFRP 的徐变断裂强度最大;AFRP 的抗疲劳性能最好。因此,在选择 FRP 材料时,应根据上述特点按照工程要求并结合经济情况合理选择。

表 1-1

常用 FRP 材料的主要参数

类型	抗拉强度 $f_{\text{FRP}}/\text{MPa}$	抗拉弹性模量 $E_{\text{FRP}}/\text{GPa}$	断裂应变 $\epsilon_{\text{FRP}}/$ ($\times 10^{-2}\text{m/m}$)	热膨胀系数/ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	预算价格/ (元/ m^3)
CFRP(普通型)	2050~3790	200~235	1.2	22~50	300~500
CFRP(高强型)	3790~4825	220~235	1.4		
CFRP(高弹模型)	1725~2100	345~515	0.5		
CFRP(超高强型)	1825~6200	220~325	1.5		
CFRP(超高弹模型)	1375~2400	515~690	0.2		
GFRP(无碱型)	1860~2685	69~72	4.5	19~23	200~400
GFRP(高强型)	3445~4135	86~90	5.4		
AFRP(普通型)	3445~4135	69~83	2.5	60~80	500~800
AFRP(高性能型)	2060	110~124	1.6		
BFRP	3000~3500	79~93	3.2	20~22	200~400

注:从综合因素分析,本书采用 FRP 材料为 CFRP 研究材料。

1.5.1 CFRP 加固材料的优点

CFRP 采用多股碳纤维与基底材料经过特定工艺复合而成。采用 CFRP 增强、加固混凝土结构具有以下优点。

① 高强高效。因为 CFRP 的抗拉强度高、质量小、比重小,所以采用 CFRP 增强钢管再生混凝土结构在几乎不增加结构任何自重的情况下就能达到满意的效果,而且不需改变原来结构的外形特征,特别是对于圆形和方形截面的结构,这是采用其他加固方法所无法替代的。

② 方便施工。对于使用 CFRP 增强的钢管再生混凝土结构,碳纤维材料成型很方便,能满足加固结构增强后的外形需求,不会增大结构的截面尺寸,还可以根据结构表面形状的不同进行粘贴,也不会因为再生混凝土结构外形而受限制。在施工过程中占地面积小,不需要使用大型的机械,工期很短。因为采用的是环氧树脂 AB 胶粘贴 CFRP 材料,所以一般不会对加固结构产生新的损坏。

③ 抗腐蚀性能很高。CFRP 的抗腐蚀性能较优,不会生锈而且耐高温,还能防磁,耐久性较好,尤其适用于桥梁的桥墩及沿海的一些腐蚀性较大的建筑工程结构构件。

④ 适用范围广。CFRP 材料的应用形式多样化。CFRP 的蠕变很小,与碱性物质不发生化学反应。同时 CFRP 材料的最大应变值足以满足混凝土结构破坏前的形变和断裂,再加上 CFRP 材料易生产加工、施工方便,而且又能适应各种结构表面形状的需求,因此它是目前最主要的 FRP 增强复合材料之一。

1.5.2 CFRP 加固材料的应用现状

CFRP 有着良好的力学性能,故可广泛用于各种结构类型(如建筑物、构筑物、桥梁、隧道、涵洞、烟囱等),各种结构形状(如矩形、圆形、曲面等),各种结构部件(如梁、板、拱、壳、墩等)等的加固修补,而且不改变结构形状,不影响结构外观。尤其重要的是,对于一些大型土木结构,如大型桥梁的桥墩、桥梁及桥面板、隧道、大型筒体及壳体结构等,采用原有的传统加固方法都无法实施,但采用该技术都可以很顺利地解决。

美国对于 CFRP 加固混凝土结构进行了长期系统的研究。从 20 世纪 80 年代开始,美国国家科学基金会和联邦公路管理局的资助加速了该领域的研究与开发。1991 年,美国混凝土协会创建了 440 委员会及纤维增强塑料加固委员会(ACI 440 委员会)。该委员会于 1996 年出版了《纤维增强塑料补强混凝土结构发展水平报

告》。此后,ACI 440 委员会推出了两部标准,2001 年获得了技术活动委员会批准。该标准包括:《纤维筋增强混凝土结构设计施工指南》《外贴纤维增强塑料系统补强混凝土结构设计施工指南》。

20 世纪 90 年代中期起,我国开始着手进行 CFRP 补强加固技术的研究。我国许多科学研究所和大学纷纷开展碳纤维布补强加固混凝土结构、砌体结构的研究,并取得了多项研究成果。在短短的几年时间里,我国制定并颁布了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)。目前,我国主要把碳纤维应用于民用建筑结构的加固中,在桥梁工程中的应用非常少。工程领域中碳纤维应用越来越广泛,估计在未来几十年内还会有很大的需求,其范围也将越来越大,尤其是在桥梁工程和近海岸工程中。土木工程领域中碳纤维应用主要是在对已有建筑结构的加固方面,这叫作事后增强;而事前增强是指 CFRP 结构受载前增强,碳纤维在结构受载前,是以部分或完全代替钢材来达到结构增强的目的的。碳纤维管内壁设有加肋条,碳纤维管混凝土也用于斜拉桥的加劲梁中,从而增强与混凝土的粘接作用。碳纤维筒同时在轴向和径向对混凝土起紧箍作用。这不仅提高了柱的承载力和延性,还提高了耐腐蚀性。只有更全面了解 CFRP 的性能,才能更好地将其运用于实际工程中。

1.6 FRP 钢管再生混凝土

FRP 钢管再生混凝土是一个新颖的思想。其虽然解决了大量的建筑垃圾,使这些废弃混凝土得以回收利用,重新在建筑材料中扮演基石的角色,但其性能大不如前。新的思路就是另辟蹊径地将其与钢管结合,成为钢管再生混凝土,让钢管为其提供一种外箍力,使再生混凝土的抗压强度、徐变、脆性等性能进一步得以增强,同时钢管的延性也得到增强。这可谓两者优势互补,物尽其用。但钢管的耐腐蚀性永远是一个缺陷,如果有一种材料具有耐腐蚀性且性能与钢管有相似之处,那就更好了。FRP 就具有这种特性,故一种新型的结构构件——FRP 钢管再生混凝土应运而生。

1.6.1 FRP 钢管再生混凝土的概念

FRP 钢管再生混凝土就是将废弃混凝土经人工破碎后形成粒径为 2~4cm 的混凝土粗骨料,将其与砂、水、水泥按照一定的配合比搅拌成的再生混凝土。将此

种混凝土灌入壁厚为 2~3mm 的圆钢管内并加以捣实,使其处于三向受压状态,提高了再生混凝土的承载力。除此之外,在钢管的外围缠绕比钢管抗拉强度更高的 FRP 材料,使得钢管内的再生混凝土处于双重受压状态,进一步提升了再生混凝土的承载力。这种新型的复合构件不仅解决了再生混凝土承载力低、徐变能力强、剪切强度低、结构的刚度低、裂缝和变形的问题,也解决了 FRP 材料的脆性强使得结构延性低的问题。FRP 钢管再生混凝土是一种受力比较合理的科学构件。

1.6.2 FRP 钢管再生混凝土的优点

(1) 承载能力高

核心再生混凝土可以减缓薄壁钢管过早发生局部屈曲。将再生混凝土填入钢管后,钢管对再生混凝土起着约束作用,可减小核心再生混凝土受压时的纵向开裂程度;再加上钢管外粘贴了 FRP 材料(因为 FRP 具有很高的抗拉强度值,当钢管受到核心再生混凝土的径向力发生径向变形时,FRP 可以通过对钢管的环向紧箍作用来抑制钢管的径向变形),最终达到增大核心再生混凝土轴压承载力的目的,大大提高了核心再生混凝土的承载力。三种不同材料相互弥补了彼此的缺点,可以很好发挥各自的优点,从而使 FRP 钢管再生混凝土柱具有很高的承载力。

(2) 经济效果好

FRP 属于耐腐蚀材料,可以降低钢管防腐维护费用。另外,FRP 材料强度很高,不仅可以降低钢管的壁厚,还可以相对减小钢管再生混凝土柱的直径,同时也可以替代高强钢材。

(3) 塑性好

将再生混凝土填入钢管中形成钢管再生混凝土结构,核心再生混凝土在钢管紧箍下,不仅能改善它的弹性性能,还能增大其在破坏时的塑性形变。因为钢管再生混凝土结构具有优良的塑性和韧性,所以其可以运用在高层建筑和抗震要求高的建筑中。又因为 FRP 属于脆性纤维材料,极限拉应变很小,但钢管可以弥补 FRP 筒脆性不足的问题,所以 FRP 钢管再生混凝土具有很好的塑性和韧性。

(4) 方便施工

与钢结构对比,钢管再生混凝土结构通常更为简单,因为焊缝很少,所以其便于加工和施工。与钢筋混凝土结构相比,使用钢管再生混凝土结构时无须绑扎钢筋、支模板和拆模板等工序,施工更方便。FRP 属于纤维材料,不用受建筑结构外形的制约,对施工人员的技术要求相对较低,还可以现场在建筑结构表面进行粘贴,施工相对简单。因此,FRP 钢管再生混凝土结构的制作和施工都很方便。

1.7 本书内容

FRP 钢管再生混凝土柱作为一种新型结构形式,目前相关的研究工作还不够深入。为了促进该新型结构构件的研究和应用,本书做了一些探索,主要内容如下:

① 绪论,主要介绍了研究背景和意义。

② 试验研究,进行了圆 FRP 钢管再生混凝土短柱和长柱的轴压试验研究、方 FRP 钢管再生混凝土短柱和长柱的轴压试验研究。主要阐述了试件制作过程和方法、试验设备及加载方法,描述了试验现象及试件破坏形态,比较了荷载-位移曲线的特点,测试了荷载作用下每个试件的极限荷载及其相应荷载下的应变,并分析了相关影响参数对试件承载能力及变形等性能的影响。

③ 基于 Tresca 原理推导了 FRP 钢管再生混凝土柱的轴压承载力计算公式,并和试验结果进行了对比,吻合程度较好。

④ 利用有限元软件,建立了有限元模型,对 FRP 钢管再生混凝土柱进行了有限元分析。