

钢纤维微膨胀钢管混凝土材料性能 与其受拉、受弯力学行为研究

GANGXIANWEI

WEIPENGZHANG GANGGUAN HUNNINGTU CAILIAO XINGNENG
YU QI SHOULA SHOUWAN LIXUE XINGWEI YANJIU

周孝军 牟廷敏 ○ 著



钢纤维微膨胀钢管混凝土材料性能 与其受拉、受弯力学行为研究

周孝军 牟廷敏 著



西南交通大学出版社

• 成都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

钢纤维微膨胀钢管混凝土材料性能与其受拉、受弯力学行为研究 / 周孝军, 牟廷敏著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5643-5621-7

I. ①钢… II. ①周… ②牟… III. ①钢管混凝土结构—结构力学—研究 IV. ①TU37
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 181037 号

钢纤维微膨胀钢管混凝土材料性能 与其受拉、受弯力学行为研究

周孝军 牟廷敏 著

责任编辑	杨 勇
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	13.25
字 数	211 千
版 次	2017 年 8 月第 1 版
印 次	2017 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5621-7
定 价	68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

钢管混凝土桁架梁式结构是一种新型组合结构,其具有承载力高、刚度大、自重轻、跨越能力强,施工方便,节省水泥与混凝土用量等系列优点,技术经济优势明显,应用前景广阔。在该结构体系中,弦杆主要处于压弯与拉弯等复杂应力状态,对核心混凝土力学性能要求较高。钢纤维能显著提高混凝土抗弯拉强度,以钢纤维增强自密实微膨胀混凝土填充其弦杆,能充分发挥结构整体力学性能优势。本书以世界首座全管桁结构连续梁桥——四川省雅西高速公路干海子大桥工程为依托,研究了钢纤维微膨胀钢管混凝土组成、结构与性能及其受拉、受弯力学行为,研究成果依托工程进行了应用。具体研究工作如下:

(1)提出了钢纤维微膨胀钢管混凝土的设计与制备方法,研究了膨胀剂与钢纤维复合对混凝土工作性能与力学性能的影响,探讨了钢管密闭条件下钢纤维微膨胀混凝土的体积变形规律;根据低温施工要求,研究了钢纤维微膨胀钢管混凝土的抗冻设计方法与技术措施,阐述了钢管与钢纤维双重约束对钢纤维微膨胀混凝土抗冻性增强机理,并在工程现场对制备的钢管混凝土抗冻性进行了测试验证。

(2)基于32个钢纤维微膨胀钢管混凝土试件的推出试验,对钢纤维微膨胀钢管混凝土荷载-粘结滑移关系曲线进行了全过程分析,探讨了核心混凝土与管壁的界面粘结力退化模式,研究了含钢率、界面粘结长度与混凝土中钢纤维掺量对其界面粘结强度影响规律,提出了其界面粘结强度计算方法。

(3)进行了22根钢管混凝土与4根空钢管试件轴拉测试,结合数值计算分析,研究了含钢率、核心混凝土中钢纤维掺量等对钢纤维微膨胀钢管混凝土轴拉承载力、变形形态与破坏特征的影响规律,探讨了钢管混凝土轴拉工作机理与影响因素,提出了钢纤维微膨胀钢管混凝土轴拉承载力计算方法。

(4)开展了27个钢管混凝土试件以及9个空钢管试件的抗弯力学性能试验,结合数值计算分析,研究了钢纤维微膨胀钢管混凝土在三点受弯时

的变形特征、应变分布与发展状态、破坏模式等,并探讨了主管截面含钢率、支管内灌与不灌混凝土以及核心混凝土中钢纤维的掺加对钢管混凝土试件抗弯承载力与工作性能的影响,提出了钢纤维微膨胀钢管混凝土抗弯承载力计算方法。

(5)测试了4片桁架梁结构的抗弯性能,研究了桁架弦管是否灌注混凝土、弦杆截面含钢率等对其受弯变形特征、应变分布与发展状态、破坏模式、承载力以及挠度的影响规律。

(6)介绍了钢纤维微膨胀钢管混凝土在四川省雅西高速公路干海子大桥中的工程应用情况与应用效果。

特别感谢武汉理工大学丁庆军教授,在本书的研究过程中作者得到了丁教授的大力支持与悉心指导。同时,也感谢四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院的范碧琨教授级高工,对作者给予的帮助和支持。

本书的研究工作先后得到了交通运输部科技项目(2009 318 000 105)、四川省教育厅项目(15ZA0141、16TD0018)、四川省交通科技项目(2014C-3、2014C-7)、西华大学自然科学基金项目(z1420603)等科研项目的资助,特此致谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏不足之处,敬请读者不吝给予批评指正。

著者

2017年6月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 钢管混凝土特点与研究现状	1
1.2 选题背景与依托工程	12
1.3 研究目的与研究内容	15
第 2 章 钢纤维微膨胀自密实钢管混凝土性能研究	19
2.1 钢管混凝土梁式结构核心混凝土理想结构模型	19
2.2 钢纤维微膨胀自密实钢管混凝土制备与性能研究	24
2.3 钢纤维微膨胀钢管混凝土的抗冻性	41
2.4 本章小结	52
第 3 章 钢纤维微膨胀钢管混凝土截面组合性能研究	54
3.1 引 言	54
3.2 试验概况	55
3.3 结果分析与讨论	60
3.4 本章小结	77
第 4 章 钢纤维微膨胀钢管混凝土轴拉性能研究	79
4.1 引 言	79
4.2 试验概况	80
4.3 结果分析与讨论	83
4.4 基于 ABAQUS 有限元模拟分析	98
4.5 钢纤维微膨胀钢管混凝土轴拉承载力计算方法	104
4.6 本章小结	107

第 5 章	钢纤维微膨胀钢管混凝土抗弯性能研究	109
5.1	引 言	109
5.2	试验概况	109
5.3	试验过程与测试结果	114
5.4	结果分析与讨论	125
5.5	基于 ABAQUS 有限元模拟分析	143
5.6	钢纤维微膨胀钢管混凝土抗弯承载力计算方法	150
5.7	本章小结	153
第 6 章	钢纤维微膨胀钢管混凝土桁架梁抗弯性能研究	154
6.1	引 言	154
6.2	试验概况	154
6.3	试验过程与测试结果	159
6.4	结果分析与讨论	165
6.5	基于 ABAQUS 有限元模拟分析	181
6.6	本章小结	186
第 7 章	工程应用	187
7.1	工程概况	187
7.2	混凝土制备与性能	188
7.3	水平钢管混凝土灌注施工	189
7.4	钢管混凝土低温施工	192
7.5	钢管混凝土密实度	194
参考文献		196

第 1 章 绪 论

1.1 钢管混凝土特点与研究现状

1.1.1 特点与应用概况

混凝土是当今应用最广泛的建筑材料，具有原材料来源广，抗压强度高，耐火性、耐久性、可模性、整体性好等优点^[1]。自 1824 年水泥问世及随之诞生混凝土与钢筋混凝土以来，混凝土至今已有 100 多年的历史。在过去 100 多年中，混凝土材料一直在向着优质、高性、高强的方向发展，优质高强的材料应该具备高强、性优、质轻和良好环境相容性四大主要特征^[2-4]。但随着高层、超高层建筑，大跨度桥梁以及大型公共场馆等急剧发展，高强混凝土高脆低韧、自重大、比强度低等缺陷日显突出，逐渐限制了其在这些大型建筑结构中的应用。钢管混凝土由于其组成钢管与混凝土之间相互作用，有效避免了高强混凝土的天生缺陷，被认为是高强混凝土在高层、超高层建筑与大跨度桥梁中最有效的应用方式^[5]。

钢管混凝土（Concrete Filled Steel Tube，简称“CFST”）是由钢与混凝土复合而成的材料，在受力过程中，由于钢管对核心混凝土的约束，其破坏形式由脆性变为弹塑性，材料性质发生质变，强度显著提高，塑性和韧性性能明显改善；核心混凝土有效阻滞和延缓了钢管过早发生局部屈曲，使钢管的失效模式由稳定控制转化为强度控制，稳定性和延性提高，刚度退化减缓，抗震性增强。可见，钢管混凝土充分发挥了两种材料的力学性能优势，有效弥补了各自的缺陷。在相同承载力情况下，钢管混凝土构件相比普通钢筋混凝土截面尺寸小，可节约混凝土约 50%，结构自重一般减轻 1/3 ~ 1/2，地震作用减小一半，基础处理费用大幅降低，无需模板安装，施工简便，大大缩短工期；相比钢结构可节省钢材 50%，耐火、耐腐蚀性能



优于钢结构^[5-10]。因此,钟善桐教授^[6-7]指出钢管混凝土是钢与混凝土的最佳组合应用形式,完全符合现代工程结构向轻质、高强、大跨发展的要求。

钢管混凝土发展至今已有 100 多年的历史,最早的工程应用可以追溯到 1879 年英国的赛文(Severn)铁路桥,该桥桥墩采用了钢管混凝土,不过其管内填充混凝土的主要目的是防止钢管内壁锈蚀^[11-12]。19 世纪 90 年代初美国的一些全钢结构建筑出于防火考虑在钢梁和钢柱外包了混凝土,但未考虑混凝土的组合效应。直到 1897 年美国人 John Lally 将圆钢管混凝土应用于房屋建筑承重柱(称为 Lally 柱)才标志着钢管混凝土作为组合受力构件在工程结构中开始应用。到 20 世纪 30 年代,有数座钢管混凝土拱桥在法国和苏联相继建成。钢管混凝土结构优越的力学性能在 1923 年日本关西大地震中得到验证,自此,钢管混凝土在日本的高层建筑中得到了积极推广应用,并且在 1995 年的阪神地震中再一次展现了优越的抗震性。20 世纪 60 年代前后,世界各国应用钢管混凝土的建、构筑物逐渐增多,比利时在修建船坞时采用了钢管混凝土构件作为桁架的压杆和立柱,法国巴黎居民区的第一座摩天大楼采用了钢管混凝土框架结构,苏联、日本以及西欧等工业发达国家在一些高层建筑、工业厂房、输电塔、吊车栈桥中也多采用了钢管混凝土结构。但由于当时管内混凝土的浇筑工艺繁琐,使得钢管混凝土在施工方面的优势没有得到很好体现,一定程度上制约了其应用进程^[11-16]。

到了 20 世纪 80 年后期,混凝土泵送施工技术迅速发展,钢管混凝土核心混凝土的灌注施工问题得到有效解决。同时,高强混凝土的应用越来越广泛,为了避免其脆性缺陷,利用钢管的套箍作用是比较理想的手段。因此钢管混凝土结构在美国、日本、加拿大、澳大利亚等国的高层建筑中又悄然兴起,并被认为是高层建筑营造技术的一次重大突破。

钢管混凝土在 20 世纪 60 年代引进到我国,自 1959 年原中国科学院哈尔滨土建研究所最先开展了钢管混凝土基本力学性能研究,随后原建筑材料研究院、北京地下铁路工程局、哈尔滨建筑工程学院以及中国建筑科学研究院、冶金部冶金科学建筑科学研究院、电力工业部电力研究所等单位先后对钢管混凝土构件的基本力学性能、设计方法、节点构造与施工技术等开展了系统深入研究。

1966 年钢管混凝土结构在北京地铁站台柱中率先成功应用,后来一些工业厂房、大型设备的构架与支架、栈桥柱以及变电电杆塔、桁架的压杆

等都采用了钢管混凝土结构,遍及全国各地的冶金工业、造船工业、机械制造业以及电力工业等。90年代前后,一些高层建筑的核心柱开始采用钢管混凝土柱,如:1990年建成的福建泉州邮电中心局大厦、1994年建成的厦门阜康大厦、1997年建成的天津今晚报大厦,等。2000年后又有一批高层建筑采用钢管混凝土柱在武汉、广州、上海、北京、杭州、天津、四川等众多省市陆续建成。目前,我国采用钢管混凝土柱的高层和超高层建筑已达60幢之多,其中深圳赛格广场大厦是迄今世界上采用钢管混凝土柱的最高建筑。

钢管混凝土在我国桥梁工程中应用也十分广泛,1991年建成的四川旺苍东河大桥是我国第一座钢管混凝土拱桥,该桥拉开了钢管混凝土在我国公路与城市桥梁中大规模应用的序幕,一大批钢管混凝土桥梁在我国逐渐涌现。据不完全统计我国目前已建或在建的钢管混凝土拱桥已达300多座,其中跨度超过200m的有50余座。2005年建成的重庆巫山长江大桥净跨460m,是目前世界已建最大跨度的钢管混凝土拱桥。建成通车的合江长江一桥,主跨已达530m,是世界在建最大跨钢管混凝土拱桥。钢管混凝土拱桥已经成为我国拥有完全知识产权的研究成果。

同时,钢管混凝土桁架梁式结构在桥梁中也被逐渐应用^[17-23],1996年在广东南海建成了第一座以钢管混凝土桁架梁为主梁的斜拉桥,2000年前后,在湖北秭归以及重庆等地区又相继出现了数座以钢管混凝土桁架为主梁的刚构桥、斜拉桥。2012年,世界第一座全管桁结构连续梁桥——干海子大桥在我国四川建成,该桥主梁采用了钢管混凝土空间组合桁架梁,预示着我国钢管混凝土梁桥技术已达到世界领先水平。

此外,我国一些斜拉桥的塔柱、刚构桥的桥墩也采用了钢管混凝土结构,比较有代表性的有:2003年建成的无锡太湖大桥、2009年建成的安徽淮北长山路斜拉桥的独塔都采用了钢管混凝土结构;2012年建成的亚洲第一高墩——四川省腊八斤大桥高墩(183m)采用了钢管混凝土复合结构桥墩。

可见,钢管混凝土在全世界已有相当广泛的工程应用,钢管混凝土材料已备受科研工作者与工程师们的青睐,钢管混凝土结构已成为继钢筋混凝土结构和钢结构之后的第三大结构体系。

1.1.2 国内外研究现状

钢管混凝土本质上属于套箍混凝土,是在劲性钢筋混凝土与螺旋配筋混凝土的基础上演变和发展起来的,国内外学者对其结构特征、基本力学性能、承载力以及设计计算方法等进行了大量研究,并取得了一系列优秀成果,为其推广应用奠定了坚实的基础。下面将对国内外有关钢管混凝土的研究从其核心混凝土材料性能与结构构件力学性能两方面进行综述总结,以便本书研究工作更好、更有针对性地开展。

1.1.2.1 核心混凝土性能

钢管混凝土具有极高的承载力,优良的抗震性能,在工程结构中应用十分广泛,国内外关于钢管混凝土的研究主要集中于钢管混凝土构件基本力学性能、工作机理、承载力等,而对管内混凝土的性能研究相对较少。钢管混凝土是由钢与混凝土复合而成,其优良的力学性能在于钢管与核心混凝土密贴结合,共同工作。核心混凝土的组成、微观结构、性能特征以及填充密实度对整体构件的工作性能将有很大的影响。

早期钢管混凝土中核心混凝土多为普通混凝土,其收缩特性易导致其与管壁脱粘,从而影响钢管混凝土的组合力学性能。叶跃忠(2001)^[24]研究了核心混凝土与管壁脱粘对构件轴压性能的影响,结果表明脱粘容易导致偏心或失稳,构件承载力降低明显。涂光亚与颜东煌等(2007)^[25]分析了脱粘对钢管混凝土拱桥受力性能影响,认为核心混凝土与管壁脱粘使得钢管内力增大,结构刚度降低,承载力下降。另外,由于混凝土横向变形系数(约为0.173)较钢材横向变形系数(约为0.283)小,在轴压荷载作用下,受荷初期钢管横向变形较核心混凝土大,二者之间产生“负紧箍力”,影响钢管与混凝土的协同作用^[6-9]。因此,为补偿核心混凝土的收缩,同时避免“负紧箍力”的不利影响,研究者们尝试在核心混凝土中掺加膨胀剂或用膨胀水泥制备混凝土^[26],形成微膨胀钢管混凝土,以保证管壁与核心混凝土密贴结合,并在钢管混凝土中建立前期主动紧箍力,提高复合材料整体力学性能。于是,针对微膨胀钢管混凝土的设计制备、体积变形、微观结构以及工作机理、力学性能等开展了系列研究。

王湛与钟善桐(1991)^[27],王湛与赵霄龙等(1999)^[28]对微膨胀钢管

混凝土的微观结构特征与宏观力学性能进行了分析。结果表明,膨胀剂的掺加使得核心混凝土内大孔明显减少,无害孔增加,结构更加致密,界面硬度增强,材料弹性模量与构件受压稳定承载力均有所提高。王湛(1993)^[29]还探讨了微膨胀钢管混凝土的工作机理,并对其长期荷载作用下的徐变特性进行了研究。

李悦与丁庆军等(2000)^[30],李悦与胡曙光等(2000)^[31]采用自制的高能膨胀剂制备出了微膨胀钢管混凝土,分析了钢管限制下核心混凝土的膨胀模式,并测试微膨胀钢管混凝土构件的力学性能,结果显示其承载力比普通钢管混凝土短柱提高8%左右。

宋兵(2001)^[32],宋兵和王湛(2007)^[33]以水胶比、掺合料以及钢管尺寸为参数研究了微膨胀钢管混凝土的体积变形规律,测试了短柱试件的力学性能,并考虑核心混凝土的体积变形,采用有限元分析方法对轴压试件的荷载-变形关系进行了研究,试验结果与模拟结果吻合较好。

吕林女等(2003)^[34]应用XRD、SEM、EDXA等测试手段,研究了钢管混凝土中钢管与核心混凝土之间的界面过渡区结构,并对限制条件下钢-膨胀水泥石界面结构的改善进行了讨论。

冯斌(2004)^[35]、韩林海等(2006)^[36]以构件截面尺寸与大小为主要参数,研究了钢管混凝土构件在水泥水化阶段的温度场分布,并测试了核心混凝土收缩性能,基于对ACI209(1992)收缩计算模型进行的修正,提出了核心混凝土收缩变形计算公式。

罗冰等(2005)^[37]采用在钢管外壁粘贴应变片的方法对9个密闭钢管混凝土试件进行了膨胀率测试,根据受力平衡换算出核心混凝土的自应力。

陈梦成等(2010)^[38]以膨胀剂掺量为参数,对5根钢管微膨胀混凝土试件在水化阶段的温度场进行了测试,并研究了核心混凝土在钢管约束下的膨胀特性及其预应力的发展过程和分布特点。

为了改善核心混凝土的力学性能,进一步提高钢管混凝土轴压构件的延性与抗震性能,研究者提出了在核心混凝土中掺加钢纤维,并取得了较好的效果。

Campione等(2002)^[39]在核心混凝土中掺加钢纤维,研究了钢纤维钢管混凝土柱的受压性能,结果表明:用钢纤维混凝土填充钢管相比普通混凝土能改善组合结构的延性性能。

Ramana Gopal 等 (2004, 2006) [40-41] 以试件长径比与管内混凝土类型为参数, 对 12 根圆形钢管混凝土进行偏压试验, 试验表明: 用钢纤维混凝土作为钢管的填充材料对得到的细长组合柱对其强度和结构性能有很大的促进作用。

Serkan Tokgoz 等 (2010) [42] 对共 16 根方钢管普通混凝土柱与钢管钢纤维混凝土进行了轴压和偏压试验, 研究表明: 在核心混凝土中掺加钢纤维对钢管混凝土的性能有显著提高。

T Zhong 与 L H Han (2007、2008) [43-44]、T Zhong 与 Uy (2009) [45] 探讨了改善薄壁方钢管混凝土短柱的结构性能的方法, 包括: 增加加劲肋的高度, 增加加劲肋在钢管各边的数量, 采用锯齿状加劲肋, 在加劲肋上焊接滚边或者锚条, 在核心混凝土中掺加钢纤维。研究表明, 在核心混凝土中掺加钢纤维是提高构件延性能力最有效的方法。

陈娟 (2008、2011) [46-47] 对钢纤维高强钢管混凝土柱的力学性能进行了系列试验研究。结果显示, 钢纤维对钢管混凝土柱的承载力的影响很小, 对其延性和抗震性能有较好的提高。

可见, 关于微膨胀钢管混凝土的体积变形模式、微结构特征与力学性能已有较充分的研究。钢纤维的掺加能明显改善普通钢管混凝土延性性能, 但钢纤维对钢管密闭条件下微膨胀混凝土的体积变形规律与力学性能影响尚无研究报道。因此, 针对钢纤维微膨胀钢管混凝土核心混凝土体积变形模式、微观结构特征与组合力学性能等需进行深入系统研究。另外, 钢管混凝土的抗冻性能研究国内外均没有涉及, 为保证低温条件下钢管混凝土的施工, 也亟须研究钢管混凝土的低温工作机理及其抗冻措施。

1.1.2.2 结构构件力学性能

1. 钢管混凝土截面组合性能

高层与超高层建筑中的钢管混凝土梁柱节点处, 柱通常是贯通的, 梁端传递给柱的荷载直接作用在钢管混凝土柱的外壁上, 然后通过钢管与核心混凝土的界面粘结将荷载传递至核心混凝土。可见, 组成钢管混凝土的钢管与核心混凝土之间界面粘结性能将直接影响这种复合材料的截面组合性能, 从而影响整体构件与结构力学行为。因此, 钢管混凝土的界面粘结性能一直深受工程界的关注, 关于钢管混凝土的界面粘结性能与影响因素

也有较多研究报道。

Morishita 等 (1979) [48-49]、Morishita 和 Tomii (1982) [50] 通过推出实验测试了方形、圆形和八角形截面钢管混凝土构件界面粘结强度与滑移之间的关系。研究表明,圆钢管混凝土构件的平均粘结强度在 0.2 到 0.4 N/mm² 之间,方钢管混凝土的平均粘结强度在 0.15 到 0.3 N/mm² 之间,而八边形截面钢管混凝土界面粘结性能介于圆钢管混凝土与方钢管混凝土之间。

Tomii 等 (1980) [51-52] 报道了采用膨胀性核心混凝土与内壁带有螺纹的钢管的办法以提高核心混凝土与钢管壁的界面粘结强度。

Virdi 和 Dowling (1980) [53] 为研究钢管和核心混凝土之间的粘结强度,以钢管内壁粗糙度、长径比、径厚比、混凝土强度与密实度为试验参数,对近 100 个圆钢管混凝土试件进行了实验测试。研究结果表明,钢管内壁粗糙度和核心混凝土密实度对界面粘结强度的影响较大。粗糙的钢管内表壁与密实的核心混凝土可以明显提高界面粘结强度。

薛立红与蔡绍怀 (1996) [54-55] 进行了 32 个钢管混凝土的推出试验,以核心混凝土强度与养护方式、钢管内表面状况、界面粘结长度为参数,研究了核心混凝土与钢管壁的界面粘结性能,分析了影响粘结强度的因素,阐述了核心混凝土与钢管壁粘结强度组成与粘结机理。研究表明,界面粘结强度虽与界面长度无明显关系,但随混凝土强度增加而增加;钢管内表壁越粗糙,界面粘结强度也越高;自然养护的平均粘结强度比密封养护条件下的高。

Roeder C W 等 (1999) [56] 通过推出试验研究钢管混凝土截面组合行为,分析了钢管直径、径厚比以及混凝土收缩对钢管与核心混凝土界面粘结强度影响,探讨了界面粘结强度分布规律,并提出了粘结强度计算公式。

康希良 (2008) [57] 通过推出试验与有限元模拟分析,研究了钢管混凝土短柱界面粘结滑移关系与截面组合性能,分析了钢管混凝土短柱在轴压荷载作用下管壁与核心混凝土的应力分配系数,基于此对钢管混凝土组合轴压刚度与组合弹性模量进行了分析。

刘永健等 (2006, 2010) [58-59] 进行了 15 根圆钢管混凝土和 5 根方钢管混凝土构件的推出试验,研究了钢管与混凝土界面粘结应力分布规律与粘结强度影响因素,提出了平均粘结应力与界面滑移的本构关系。结果表明,圆钢管混凝土界面粘结强度比方钢管混凝土大,界面粘结应力沿长度方向

均匀分布,其与混凝土强度关系不大,随混凝土龄期增加略有增长,随钢管长径比增大而增大。

Chang X 等(2009)^[60]报道了 17 个自应力钢管混凝土短柱和 3 个普通钢管混凝土短柱的膨胀收缩性能以及界面粘结力的试验结果。研究表明,核心混凝土的自应力是界面粘结强度的主要影响因素,自应力钢管混凝土柱的界面粘结强度比普通钢管混凝土柱界面粘结强度高,提出了预测自应力钢管混凝土界面粘结强度的经验公式。

陈学嘉,袁方(2011)^[61]测试了 4 根钢管微膨胀混凝土短柱和 3 根普通钢管混凝土短柱核心混凝土的体积收缩膨胀性能,在此基础上对各个构件进行了推出试验,分析核心混凝土中预应力对界面粘结强度的影响,论述了界面粘结破坏过程以及钢管外表面应变沿长度的分布规律。

因此,目前的研究主要针对普通钢管混凝土界面粘结强度,关于微膨胀钢管混凝土的界面粘结力组成与粘结强度影响因素研究不够深入,而有关钢筋纤维微膨胀钢管混凝土的界面粘结性能研究未有报道。

2. 钢管混凝土的轴拉性能

钢管混凝土轴压承载力高、抗震性能好,主要作为受压构件在工程结构中广泛应用。因此,关于钢管混凝土的研究也一直集中在其受压性能方面^[62-72]。对钢管混凝土轴拉性能研究在国外尚未报道,国内在这方面的研究也较少。

潘友光与钟善桐(1989,1990)^[73-74]提出了钢管混凝土轴心受拉本构关系,探讨了钢管混凝土轴拉本构关系的影响因素;并进行了 22 根钢管混凝土的轴拉试验,钢管尺寸为 $\phi 55.7 \times 3.5 \times 350$ mm,将钢管中间 150 mm 范围车薄,使壁厚在 0.8 到 2.5 mm 之间,含钢率为 5.78%~18.76%。结果表明:钢管在轴拉作用下的径向收缩受到核心混凝土限制,纵向屈服应力提高约 10%,屈服应力的提高主要与含钢率有关,与混凝土强度等级及钢号关系不大。在此基础上,钟善桐^[6]提出了钢管混凝土轴拉承载力计算公式。

张素梅(1991)^[75]采用有限元法分析了圆钢管混凝土构件在轴拉荷载作用下的力学性能,讨论了钢管与核心混凝土环向应力的变化情况。研究认为:混凝土的拉应力对钢管混凝土构件轴拉性能影响很小,而对钢管提供较好侧向约束作用,使得纵向受拉屈服应力提高,据构件空心率以及钢材的强化应变不同,可以提高 0~15%。

Han Linhai 等 (2011) [76] 进行了 18 根钢管混凝土构件的轴拉试验, 以混凝土类型、截面含钢率以及混凝土与钢管界面粘结状态为实验参数, 并结合有限元模拟计算, 分析了钢管混凝土的轴拉工作机理, 提出了考虑含钢率的钢管混凝土轴拉承载力计算公式。

何珊瑚和牟廷敏 (2011) [77] 介绍了国内外相关规范与研究成果中关于钢管混凝土轴拉构件承载力计算方法, 并利用这些计算方法与已有试验研究数据进行了对比, 分析各种计算值与实验结果的吻合程度。

可见, 关于钢管混凝土在轴拉作用下的力学性能理论分析与试验研究都还不够完善, 尤其是关于钢管混凝土的试验研究数据较少, 尚无统一的钢管混凝土轴拉承载力设计计算方法。

3. 钢管混凝土的抗弯性能

根据钢管混凝土的特点, 最适宜用作轴心受压构件, 如果作受弯构件, 则优点不是十分突出。但是, 钢管混凝土作为受弯构件的情况并不少见。例如: 压弯构件和拉弯构件, 除轴心力外, 都承受弯矩; 多层和高层建筑中的钢管混凝土柱, 在侧向水平风力或地震作用下, 也将承受弯矩作用而成为压弯剪扭等的复杂应力状态; 如果把钢管混凝土结构用作基础桩, 在侧向力作用下, 也承受弯矩作用。可见, 在实际工程中, 钢管混凝土构件受弯还是比较普遍的^[6-7]。关于钢管混凝土的抗弯性能, 国内外研究者也进行了不少研究。

Lu 和 Kennedy C (1994) [78] 进行了 12 个方形与矩形钢管混凝土以及 4 个空钢管试件的纯弯力学性能试验, 试件径厚比在 13 到 37.1 之间, 长短边比为 1 ~ 1.67, 混凝土强度为 40.5 ~ 47MPa。结果表明, 构件在受弯过程中钢管和核心混凝土表现出较好协同工作性, 方、矩形空心钢管中灌注混凝土后其抗弯承载力可提高 10% ~ 30%, 试件抗弯刚度有较大提高。

Elchalakani 等 (2001) [79] 测试了 12 个圆形钢管混凝土试件的纯弯力学性能, 试件径厚比 12 ~ 110, 基于试验研究, 提出了圆形钢管混凝土纯弯构件抗弯承载力的计算方法, 并将试验结果与计算结果以及已有相关规程进行对比, 误差较小。

Nakamura P 等 (2004) [80] 研究了超轻砂浆填充钢管试件的抗弯性能, 并用轻集料混凝土和普通混凝土填充钢管试件以及空钢管试件抗弯性能进行了对比。结果表明, 普通钢管混凝土试件的抗弯承载力是空钢管试件的

1.8 倍。当超轻砂浆抗压强度小于 1 MPa 时, 用其填充空钢管对试件抗弯承载力提高不大; 当抗压强度大于 5 MPa 时, 对试件抗弯延性性能有很大改善。且不论钢管采用何种材料填充, 在抗弯过程中其截面变形基本符合平截面假定。

Kang 等 (2007) ^[81]报道了将钢管混凝土构件用作连续梁桥主梁的试验研究以及其工程应用。填充材料分普通混凝土 (轴压强度 27 MPa) 与轻质加气砂浆 (轴压强度 8 MPa), 研究了填充材料强度与钢管混凝土的抗弯性能关系。结果显示, 填充普通混凝土试件的抗弯承载力与延性性能均比填充轻质加气砂浆的试件高, 二者的抗弯承载力相比空钢管构件分别提高了 50% 与 20%。

Deng 和 Tuan (2011) ^[82]分析研究了后张法预应力钢管混凝土的抗弯性能, 并与普通钢管混凝土进行对比。在试验研究基础上结合数值分析方法提出了两类构件的抗弯承载力计算方法, 并采用文献试验结果验证了计算方法的可行性。

黄莎莎等 (1990) ^[83]进行了离心钢管混凝土构件的抗弯试验, 探讨了其抗弯工作性能与工作机理。对试件弯曲变形过程做了全过程分析, 提出了该类构件抗弯破坏荷载取值建议。

钱稼茹、王刚等 (2004) ^[84]以管径与壁厚为参数, 进行了 12 根圆形截面钢管高强混凝土的抗弯试验, 并采用条带法对钢管高强混凝土构件的截面弯矩-曲率全曲线进行了分析。数值分析与试验结果吻合较好, 在此基础上, 提出了钢管高强混凝土构件截面抗弯承载力简化计算公式。

吴颖星和于清 (2005) ^[85]进行了 2 个圆钢管约束混凝土和 2 个方钢管约束混凝土构件纯弯试验, 研究了应变沿截面高度的变化规律, 并将试验测试构件初始抗弯钢管与使用阶段抗弯刚度与相关规范的计算结果进行了对比, 分析各规范计算方法的实用性。

丁发兴、余志武 (2006) ^[86-88]利用数值计算对钢管混凝土构件弯矩曲率进行了全过程分析, 提出钢管混凝土抗弯极限承载力计算式及弯矩与曲率全曲线计算方法。并对 4 根钢管混凝土构件进行了抗弯性能试验, 结果表明, 含钢率提高能显著提高钢管混凝土抗弯承载力, 而混凝土强度对构件承载力影响不明显。

黄宏、张安哥 (2008) ^[89]根据钢管混凝土构件屈服时最不利截面上力