

# 复合材料在土木工程中的发展与应用

冯 鹏

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)作为土木工程中一类新型结构材料,以其优异的力学及物理、化学特性,逐渐成为土木工程中传统材料的重要补充。本文介绍了土木工程中FRP加固结构、FRP筋索和预应力FRP筋混凝土结构、FRP组合结构以及全FRP结构的应用与发展,并介绍了我国土木工程应用FRP的标准规范体系的建立情况,以期促进FRP复合材料在土木工程中快速、有序的深入发展。

**关键词:** 纤维增强复合材料; 结构加固; 组合结构; 全FRP结构; 标准规范

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2014)09-0099-06

## 1 引言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)是近20年来在土木工程中发展起来的一类新型结构材料,由碳纤维、玻璃纤维、芳纶、玄武岩纤维等高性能纤维与树脂基体混合,经过一定的加工工艺复合而成,并由此形成了一系列的新型结构技术。FRP具有轻质、高强、施工成型方便、耐腐蚀等优点,使其逐渐在土木工程中成为混凝土、钢材等传统结构材料的重要补充,合理地将FRP应用于各类结构中已经成为土木工程发展的一个重要方向<sup>[1~4]</sup>。

上世纪五、六十年代FRP就被尝试用于民用建筑中。1961年,英国Smethwick的一座教堂的尖顶采用了GFRP<sup>[5]</sup>;1970年,英国Liverpool建成了一座GFRP连续梁的人行天桥,跨径10m,宽1.5m<sup>[6]</sup>。它们分别为文献记载中较早将FRP应用于建筑和桥梁结构中的实例,这些结构都是手糊工艺制成。我国1958年就开始探索在混凝土构件中用玻璃纤维束代替钢筋<sup>[6]</sup>,到七、八十年代FRP在结构工程中的应用与研究逐渐增多:1972年在云南建造了一个直径为44m的球形GFRP雷达天线罩<sup>[7]</sup>;1982年在北京密云建成一座跨径20.7m的GFRP蜂窝箱梁公路桥,设计荷载等级为汽-15、挂-80,该桥为世界上第一座FRP公路桥<sup>[7]</sup>。FRP大规模应用与土木工程中始于结构加固:1991年,瑞士联邦实验室的Meier教授对FRP板加固混凝土结构技术进行了系统研究,并在Ibach桥上进行了应用<sup>[8]</sup>;这项技术在

美国北岭地震和日本阪神地震后的加固修复中显示出突出的优势<sup>[1]</sup>,从而被工程界认可,开始广泛应用于各类土木与建筑结构工程中。到本世纪初,世界各国都编制了FRP土木工程应用的技术规范<sup>[9~16]</sup>,从而使其成为一类新的土木工程材料。据估算,近年我国土木工程用复合材料的纤维用量超过2000吨/年,其中碳纤维约为1500吨/年,玻璃纤维约为800吨/年,这一数字还在不断增长中。

本文将介绍当前我国的复合材料在土木工程中发展与应用情况,并对未来的发展趋势进行展望。

## 2 应用与研究现状

目前FRP在土木工程中的应用,按照形式可分为四大类:应用FRP进行工程结构加固补强、应用FRP筋和索替代钢筋和钢索、应用FRP与传统材料组合和直接应用全FRP结构建造工程结构。

### 2.1 工程结构加固补强

将FRP通过各种方式附着在构件表面受力,可以增强原有构件的受力性能。在20世纪80年代,我国的工程实践中就曾尝试过混凝土结构外贴GFRP内夹高强钢丝加固方法,但主要是用于防腐并使钢丝与混凝土共同工作,并没有得到广泛推广。而Meier等人对CFRP板代替钢板加固混凝土结构的技术进行了系统的研究,并在1991年用CFRP板成功地加固了瑞士的Ibach桥<sup>[8]</sup>。此后,FRP加固结构修复技术的研究在欧洲、日本、美国和加拿大等

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 973计划资助项目(2012CB026200); 清华大学基础研究基金资助项目(2011Z02141); 863计划资助项目(2012AA03A204); 国家自然科学基金资助项目(50238030, 50978149)

作者简介: 冯鹏(1977-), 博士, 教授, 主要从事土木工程新型结构及新材料结构技术与理论研究。

注: 本文特为中国玻璃钢/复合材料学术发展回顾与展望交流活动撰写, 部分内容曾在《土木工程学报》上发表。

国得到迅猛发展,并在工程得到较多的实际应用。特别是在美国北岭地震和日本阪神地震后,FRP加固技术的优越性在被损坏工程结构的修复加固中得到了很好的验证。我国大陆于1998年完成第一项CFRP加固工程,随后开展了一系列的研究,使这一技术得到推广,在一些重大工程如人民大会堂、民族文化宫等的加固改造,都应用了FRP加固技术。2000年完成了我国首部碳纤维片材加固设计与施工技术规程<sup>[17]</sup>。经过十多年的发展,FRP加固技术已经成为工程结构领域一项较为成熟的技术手段<sup>[18]</sup>。据不完全统计,2008年土木工程结构加固补强应用FRP总超过500吨,直接产值25亿元人民币以上。汶川地震后,FRP加固技术获得了更加广泛的应用,为震损结构的加固修复和重建建筑的快速建设提供了有力的保障,为抗震救灾、恢复生产生活做出了重大贡献。

从世界领域上看,FRP已经成功应用于各种类型结构加固,包括:混凝土结构、钢结构、砌体结构、木结构等,甚至是土石结构的历史建筑中;应用的领域包括建筑结构、桥梁、隧道、地下结构、水工结构、港工码头、管道等。

FRP粘贴加固混凝土结构是最主要的形式,从1991年至今有很多相关研究开展,主要集中在以下方面。

(1) FRP布缠绕加固混凝土柱,通过约束混凝土提高混凝土强度和变形能力,提高抗震能力,并可提高柱的抗剪能力。这是FRP布加固混凝土最有效的加固形式之一,其加固效果已得到国内外许多试验验证,而且各种FRP布均十分有效。研究表明,FRP布对混凝土柱的约束效果与截面形状有很大关系,对于矩形截面柱一般只能提高变形能力和抗剪能力,而对受压承载力的提高十分有限。但如果将截面形状适当处理成有一定弧度,则可显著提高受压承载力;

(2) 在梁、板受拉面粘贴FRP片材,提高其抗弯承载力,并可使裂缝得到有效控制。这种加固形式在国内应用较多,但从加固效果来看存在以下一些问题:①FRP片材的受拉作用只是在受拉钢筋屈服以后才能得到有效发挥,而此时梁和板的挠度变形一般已很大,因此FRP片材用于受弯加固只能作为一种安全储备。为了提高受弯加固效果,近年来已有研究采用预应力方法;②受弯加固提高程度与原配筋梁有很大关系,且FRP的强度一般不能得到充

分利用;③FRP片材用于受弯加固时易产生剥离破坏,应充分注意采取抗剥离的构造措施;

(3) 对梁、柱构件采用FRP片材包裹或U形箍包裹,提高其抗剪承载力。这种加固形式也较为有效,不过同样需注意其提高程度与构件原配箍率有关,且FRP片材强度的发挥一般只有20%~40%。

除了以上三种主要加固形式外,FRP布也可用于受扭和剪力墙的加固,以及与其他材料组合进行。

FRP片材加固混凝土结构中,FRP-混凝土界面内剪切-滑移本构关系和FRP约束混凝土受压本构关系是建立粘贴FRP受弯加固、FRP受剪加固和缠绕FRP约束加固设计理论的关键科学问题,也是国际上研究最多的热点问题。在此基础上近年来也出现一些新的或改进的加固混凝土结构的形式,如:FRP机械锚固连接加固;FRP嵌入式加固;预应力FRP粘贴加固;不同种类纤维混合加固。

除用于混凝土结构加固外,FRP加固砌体结构、木结构和钢结构都得到了较多的研究。其中FRP加固砌体结构和木结构在实际工程中得到了较多的应用,FRP加固钢结构正在逐渐成为研究的热点。

## 2.2 FRP筋索和预应力FRP筋混凝土结构

FRP筋中纤维含量在60%~65%。FRP筋轻质高强,重量一般为普通钢筋的1/5,强度为普通钢筋的6倍,且具有抗腐蚀、低松弛、非磁性、抗疲劳等优点<sup>[1]</sup>。用FRP代替钢筋主要利用FRP材料良好的耐腐蚀性,避免钢筋锈蚀所带来的结构损害,减少结构长期维护费用。此外,可用于一些要求无铁磁性的特殊工程。在桥梁工程中,FRP索可以用作悬索桥及斜拉桥的缆索,预应力混凝土桥中的预应力筋。

为加强混凝土的粘结,根据不同的加工方法,FRP筋主要分为以下几类:表面进行砂化处理的GFRP筋;与钢绞线相似并在多股之间用环氧粘结的CFRP预应力筋;表面进行压痕或滚花处理的FRP筋;利用FRP材料的柔韧性,把纤维交错编织的FRP筋。

美国在20世纪60年代初,最早对混凝土梁中用FRP配筋进行应用与研究,其研究重点是用GFRP解决近海和寒冷地区的钢筋混凝土结构遭受盐蚀危害问题。日本现已开发出FRP筋、FRP绞线及配套锚夹具。20世纪80年代,美国的Cornell大学成功进行了预应力FRP筋束小比例梁的试验,并开发出GFRP筋束以及相应的连接锚固技术。到目

前为止,美国设计施工了多项供研究和示范用的工程,包括预应力桥面工程和房屋修缮等,如联邦公路管理局的预应力大梁试验和密歇根州的桥梁工程。1993年,加拿大在 Beddington 公路桥中使用 CFRP 棒材作为预应力筋,经静载和动载试验,效果比较理想。

FRP 筋及预应力 FRP 筋的另外一个应用对象是岩土工程,它已用于加筋土中。在发达国家,GFRP 因其具有价格低廉、方便安装和耐久性强等特点,已被广泛应用于许多工程,包括潮汐变化的干湿交替的挡土墙、地基锚杆及喷射混凝土筋等工程。

我国较早在此方面开展了研究,国家自然科学基金委 1999 年最早资助了“纤维聚合物筋混凝土梁力学性能”项目,开展相关研究。目前我国已有能力生产多种 FRP 筋、索产品,以及配套的锚夹具。

在 FRP 筋混凝土方面,近年来主要的研究问题集中两个方面:

(1) FRP 筋与混凝土之间的界面粘结性能。FRP 筋与混凝土粘结性能相对较差,多种形式的表面处理和筋材形式对粘结性能有较大的影响;

(2) FRP 筋混凝土构件具有特殊力学性能。FRP 筋为弹脆性材料,这就使 FRP 筋混凝土构件的受力性能与传统的钢筋混凝土构件不同,非延性、裂缝集中等特点及其带来的设计计算中的新问题都是研究中的主要议题。

FRP 索替代传统钢索的应用和研究也有一些开展,由于 CFRP 索具有较高的强度密度比和模量密度比,并具有很好耐腐蚀性,因此在大跨度桥梁、空间结构等方面具较好的应用前景,并围绕此议题有较多研究开展。在 FRP 索的应用中锚具是较难解决的关键技术问题,FRP 的弹脆性和各向异性特性使 FRP 索对局部应力集中较为敏感,相关的技术研究开展的较多。2006 年在江苏大学建成了国内首座采用 CFRP 拉索的斜拉桥,总长为 55m,是一座钢筋混凝土独塔双索面斜拉桥。桥梁全宽 6.8m,其中人行道宽 5m,索塔两侧各布置 4 对共 16 根碳纤维材料拉索。在这项实际应用中,CFRP 索的锚固和张拉得到了较好的解决。

### 2.3 FRP 组合结构

FRP 组合结构是将应用不同种类不同形式的 FRP 制品与钢材或混凝土组合应用,实现优势互补,形成新的结构形式甚至是结构体系。FRP 作为一种高性能的新型结构材料,具有很强的可设计性,使得

结构的构成形式更加丰富,出现了多种不同类型 FRP 组合结构,典型的有以下几种。

#### (1) FRP 管混凝土

缠绕成型的 FRP 管中填充混凝土,形成 FRP 管混凝土组合构件是最为合理的一种 FRP-混凝土组合结构构件,且 FRP 管不仅对混凝土有很好的约束作用,还可以充当模板,提高施工速度,并具有很好的耐久性,可作为桩、柱甚至作为梁。世界各国学者对于 FRP 管混凝土的研究较多,对于 FRP 管约束混凝土的基本受力性能(包括压、弯、剪、抗震及其组合)、施工过程中 FRP 管的受力性能、长期工作状态下的 FRP 管混凝土的受力性能及其 FRP 管中纤维种类和缠绕角度都有深入地研究<sup>[19~29]</sup>。还有学者对 FRP 管混凝土构件进行了改进。在 FRP 管内设置 FRP 肋(包括横肋、纵梁和斜肋),从而在加强 FRP 管局部稳定性的同时起到钢筋的作用,增强 FRP 管混凝土的受力性能。还有在 FRP 管中心放置泡沫塑料圆柱,浇注混凝土后形成环形空心截面,减小自重,提高构件抗弯性能。

#### (2) FRP-钢管-混凝土组合构件

构件中部设置空心钢管,外包 FRP,FRP 与钢管之间填充混凝土,在施工中钢管作为承力骨架,FRP 作为模板,使用中钢管受到了保护可避免锈蚀,混凝土部分受到一定的约束,变形性能和承载力提高,同时构件的自重减轻。

#### (3) FRP-混凝土组合梁

FRP-混凝土组合梁,通过组合作用使上部的混凝土受压,下部 FRP 受拉,其关键问题是保证 FRP 与混凝土协同工作的剪力连接件。经过组合使 FRP 材料的利用更加充分,而且可以将轻质的 FRP 构件作为永久性模板,方便施工。关于 FRP 组合梁和 FRP 组合板的研究在各国都有开展。

#### (4) CFRP-铝合金组合构件

CFRP-铝合金组合构件是将 FRP 按照设计的需要包覆在铝合金管的外表面,充分发挥两种材料共有的轻质、高强、无磁、耐腐蚀的优点,同时避免了 FRP 脆性、不易连接和铝合金弹模较低的不足。CFRP-铝合金组合构件适合在大跨度空间结构中应用。

#### (5) FRP-木组合构件

FRP 与木材有类似的纤维构造形式,都具有各向异性的受力特点,都有防火性能较差的不足,但两者进行合理组合后,FRP 充当构件中的增强部分,木

材充当填充部分,从而实现更为优越的力学性能。FRP-木组合构件在加工中也非常方便,采用成熟的技术就能够实现。

FRP组合结构相对传统结构在耐腐蚀、轻量化等方面具有显著的优势,同时相对全FRP结构在受力方面可避免脆性破坏,且降低了造价,因此具有显著的优势。目前世界各国的研究者都在不断的应用FRP与各种结构材料进行组合以实现新型结构构件,乃至结构体系。

## 2.4 全FRP结构

FRP在力学上具有高的比强度、比模量,同时又具有众多传统结构材料不具备的功能特性,如耐腐蚀、GFRP绝缘性、CFRP的导电性、较好的隔热性能,还具有传统结构材料不具备的加工性和可设计性,因此当工程结构在实现承载要求的同时还需要实现一些功能特性时,全FRP结构具有不可替代的优势。在民用工程中全FRP主要应用在桥梁工程中,而在工业建筑和装备中FRP结构应用的非常广泛。目前土木工程及相关领域中应用较多的全FRP结构有以下几种。

### (1) FRP桥面体系

直接采用FRP型材作为桥梁的面板,可以减轻支撑结构和下部结构内力、能直接抵御环境侵蚀和荷载作用、降低维护费用。FRP桥面板是传统桥面板的 $1/3 \sim 1/4$ 。如果用FRP桥板替换原有的混凝土桥板,使桥面结构自重减轻,动载等级提高,使用寿命延长。这项技术从1996年在美国开始应用至今,已在100多座桥梁中获得了成功应用。它既适合于在新建桥梁中应用,也可以在老旧桥梁翻新中替换原有的混凝土桥面板,提高桥梁的承载能力,还可以在大跨桥梁中组合成封闭的FRP外壳,将原本暴露的主梁围护起来,减少风阻、抵抗侵蚀、美观外表。

### (2) FRP轻质桥梁

轻质FRP桥梁的应用以人行天桥为主,其中主要构件或全部构件采用FRP,从而使得上部结构的重量大大减轻,其景观效果也会成为吸引使用者的关键因素之一。国内外已建成了几十座不同形式的FRP轻质桥梁。从基本构件的形式上看,主要是GFRP拉挤型材、CFRP索以及真空导入制成的GFRP产品。FRP轻质桥梁与传统桥梁具有不同的受力特点。首先,FRP轻质桥梁的承载力高,但刚度较小,设计通常为变形控制。其次,FRP构件的受力特性通常表现为线弹性,承载力随着变形增大而增

大,最终发生破坏前,变形已非常明显,破坏时比较突然。同时,在人行桥中,为满足舒适度的振动特性也是一个重要设计指标。目前,FRP轻质桥梁的设计研究并没有得到太多的开展,在设计指标、连接构造等方面还缺少相应研究。

### (3) 快速架设应急FRP桥

应急快速架设桥梁主要是应对人为和自然灾害,如地震、爆炸、火灾、水灾和飓风。面对这些紧急情况,对桥梁的机动性、适应性和标准化的要求更高,需要快速运送和架设,这对于FRP轻量化、预制化、耐腐蚀的特点尤为适合。世界各国都已开始研究快速架设应急FRP桥梁,主要用于军用,美国已经研发出针对空运的第三代全FRP应急桥梁。应急FRP桥梁首要解决的问题是结构体系与构成。目前大量应用的应急桥梁主要是金属结构,其结构体系是针对金属结构特点设计的,而FRP的性能与金属差别较大,因此沿用原有的结构体系、架设方法和检验标准并不恰当,相关的研究还有待进一步开展。应急FRP桥梁中必须采用快速方便的现场连接,且连接的性能对结构承载能力和安全性起决定性的作用。目前,我国针对快速架设应急FRP桥的研究也较为缺乏。

### (4) FRP编织网结构

FRP编织网结构是将FRP板条按一定规律进行编织,然后经过整体张拉后形成的一种柔性结构体系。这种新型结构充分发挥了FRP材料轻质高强的力学特点,适合建造超大跨度的屋盖结构,同时可实现较好的建筑效果,可在体育场等大跨度公共建筑、大型厂房和城市小品中应用。

### (5) FRP杆件空间结构

FRP用在空间结构体系中,可实现FRP网架结构。FRP网架的杆件由CFRP片材以不同的角度层叠粘贴而成,杆端有铝合金的锥头与球节点连接。FRP网架结构重量轻,仅为钢网架的 $1/5 \sim 1/4$ ,施工强度小,周期短,耐腐蚀性好,可避免凝露,维护费用低,线胀系数小,大跨度温度效应小。因此它非常适合在超大跨度的空间结构和环境比较恶劣的大跨结构中应用,如:体育馆、游泳馆、大型温室、展览馆等等。

### (6) 形态多样化的FRP曲面结构物

用传统的材料和结构形式实现非规则的建筑需要很高的成本,而应用FRP能高效、低成本的实现曲面造型,这为多样化建筑形态的实现提供了便利

的技术途径。同时,FRP本身具有很强的可设计性,非常适合于进行结构优化。FRP结构能实现传统材料和结构难以实现的几何外形,更能通过设计优化使其结构受力趋于合理,因此,FRP是建造复杂建筑形态、尤其是非线性建筑的最理想材料。很多建筑师已开始采用FRP建造复杂的结构物,如Zaha的香奈儿展馆、Nio的公共车站等。

#### (7) 耐腐蚀 FRP 结构

随着我国环境保护和节能减排要求的日益提高,脱硫、脱硝、污水处理等工业结构物越来越多,耐腐蚀成为结构所必须的功能,各种耐腐蚀FRP结构因此出现,如电厂的脱硫平台、污水处理厂的作业平台、有色金属提炼车间的平台等。另一方面,随着

我国海洋战略的发展,耐氯盐侵蚀的结构物也成为FRP应用的重要方向。但目前对强腐蚀环境中FRP结构受力性能的研究还非常少。

### 3 标准规范

经过众多科研人员和工程技术人员近十年的努力,当前我国初步建立了较为完整的土木工程应用FRP的标准规范体系,为工程应用提供了重要的指导。体系包括3个方面:复合材料通用的试验方法标准,土木工程专用的复合材料产品标准和土木工程中的复合材料工程应用技术规范,具体如表1所示。这些标准规范从材料、测试、设计、施工验收等各个环节对FRP土木工程应用进行了规定和指导。

表1 我国土木工程应用FRP标准规范体系

Table 1 Chinese codes and standards for FRP applications in civil engineering

标准规范体系	具体标准规范名称
复合材料通用试验方法标准	1. GB/T 1446-2005 纤维增强塑料性能试验方法总则 2. GB/T 1447-2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法 超过50个标准规范
土木工程专用复合材料产品标准	1. GB/T 21490-2008 结构加固修复用碳纤维片材 2. GB/T 21491-2008 结构加固修复用芳纶布 3. GB/T 26743-2011 结构工程用纤维增强复合材料筋 4. GB/T 26744-2011 结构加固修复用玻璃纤维片材 5. GB/T 26745-2011 结构加固修复用玄武岩纤维复合材料 6. GB/T 29552-2013 纤维增强复合材料桥板 7. GB/T 结构用纤维增强复合材料拉挤型材(报批中)
土木工程中复合材料工程应用技术规范	1. CECS 146: 2003 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程(2007版) 2. GB 50367-2013 混凝土结构加固设计规范 3. GB 50608-2010 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范 4. JGJ/T 纤维增强复合材料加固钢结构技术规程(报批中)

### 4 结 语

土木工程与FRP的其他应用领域不同,应用对象的尺度更大、时间更长,所面临的应用条件更为复杂多样。现代混凝土和钢材在土木工程中的大规模应用也不到150年,FRP在土木工程中相对更为年轻,应用形式会越来越多,前景会越来越广阔。

#### 参考文献

[1] 叶列平,冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3): 24-36.  
[2] 冯鹏,叶列平,孟鑫森. FRP加固与增强金属结构的研究进展[C]. 第22届全国结构工程学术会议论文集第I册. 2013.  
[3] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑,2000,30(10): 23-26.

[4] 李荣,滕锦光,岳清瑞. FRP材料加固混凝土结构应用的新领域[J]. 工业建筑,2004,34(4).  
[5] Halliwell S. In-service performance of glass reinforced plastic composites in building. Proc. the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings[J]. 2004,157(1): 99-104.  
[6] 蔡国宏. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景. 高新技术专题报道: 中国交通. [http://www.iicc.ac.cn/jiaotongkj/gaoxinjs/t20040210\\_8793.htm](http://www.iicc.ac.cn/jiaotongkj/gaoxinjs/t20040210_8793.htm),2000.  
[7] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社,2000.  
[8] Meier U. Carbon fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering[J]. Structural Engineering International,1992,2(1): 7-12.  
[9] GB 50608-2010,纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S].  
[10] Groenier J S,Eriksson M,Kosmalski S. A guide to fiber-reinforced

- polymer trail bridges [R].
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications [S].
- [12] 土木学会(日本). FRP 歩道橋設計・施工指針(案) [M]. 2011.
- [13] Ayers S R, Van Erp G M. A code of practice for the structural design of fibre composites [J]. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, 2004, 157(1): 3-8.
- [14] Bakht B, Al-Bazi G, Banthia N, et al. Canadian bridge design code provisions for fiber-reinforced structures [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(1): 3-15.
- [15] National Research Council of Italy Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements [S].
- [16] American Composites Manufacturers Association (ACMA). Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures (Final) [S].
- [17] 中国工程建设标准化协会. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程 [S].
- [18] 岳清瑞, 杨勇新. 复合材料在建筑加固, 修复中的应用 [M]. 化学工业出版社, 2006.
- [19] Ozbakkaloglu T, Lim J C. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 55: 607-634.
- [20] Wu Y F, Jiang C. Effect of load eccentricity on the stress-strain relationship of [21] FRP-confined concrete columns [J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 228-241.
- [21] Fam A, Rizkalla S. Large scale testing and analysis of hybrid concrete/composite tubes for circular beam-column applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6): 507-516.
- [22] Mirmiran A, Samaan M, Cabrera S, et al. Design, manufacture and testing of a new hybrid column [J]. *Construction and building materials*, 1998, 12(1): 39-49.
- [23] Fam A Z, Rizkalla S H. Flexural behavior of concrete-filled fiber-reinforced polymer circular tubes [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2): 123-132.
- [24] Burgueno R, Davol A, Zhao L, et al. Flexural behavior of hybrid fiber-reinforced polymer/concrete beam/slab bridge component [J]. *ACI Structural J*, 2004, 101(2): 228-236.
- [25] 袁华, 薛元德. 纤维增强塑料管混凝土性能的研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2000, (6): 34-36.
- [26] Ozbakkaloglu T, Idris Y. Seismic Behavior of FRP-High-Strength Concrete-Steel Double-Skin Tubular Columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(6).
- [27] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6): 471-489.
- [28] Ozbakkaloglu T, Lim J C, Vincent T. FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models [J]. *Eng Struct*, 2013, 49: 1068-1088.
- [29] Teng J G, Yao J. Self-weight buckling of FRP tubes filled with wet concrete [J]. *Thin-walled structures*, 2000, 38(4): 337-353.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COMPOSITE IN CIVIL ENGINEERING

FENG Peng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Fiber reinforced polymer (FRP) materials are a relatively new material in civil and structural engineering, but due to their unique physical, chemical, and mechanical characteristics, they have gradually become an important part of the civil engineering materials toolkit. This paper surveys the use of FRP in structural reinforcement, cable elements, and prestressed concrete reinforcement, and discusses the development of FRP both in composite and pure-FRP structural applications. Furthermore, it highlights the development and present state of the various codes pertaining to the use of FRP in structural engineering in China with an eye towards encouraging better understanding and increased use of the material.

**Key words:** fiber reinforced polymer; structural reinforcement; composite structure; pure-FRP structure; standard specification