

文章编号: 0451—0712(2006)11—0169—05

中图分类号: U414. 18

文献标识码: A

# 完全非金属材料配筋混凝土结构研究

金文成, 简方梁, 张晓飞

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉市 430074)

摘 要: 分析了钢筋混凝土结构的主要缺陷,在此基础上提出了完全非金属材料配筋混凝土结构的概念,并且分析了这种结构在技术上的可行性,指出完全非金属材料配筋混凝土结构是解决目前钢筋锈蚀问题最好的办法,是配筋混凝土结构发展的方向。

关键词: 非金属材料; 配筋; FRP 筋; 混凝土结构

加筋混凝土结构是目前在土木工程领域内应用最为广泛的一种结构类型。常见的有钢筋混凝土和预应力混凝土结构。其结构的最大特点是以钢筋或者钢绞线作为结构的配筋材料,以克服混凝土材料抗拉强度很低的弱点,完成结构的共同受力。钢筋混凝土结构有其自身的优点,如:钢筋的强度较高,延性好,造价相对较低等。然而随着应用的不断深入,这种结构类型也显示出了其致命弱点:钢筋锈蚀问题,锈蚀问题严重地影响了钢筋混凝土及预应力混凝土结构的耐久性。

据有关资料介绍,美国每年因为钢筋锈蚀造成的损失高达700 亿美元,目前美国近60 万座桥梁中,有近10 万座钢筋锈蚀严重。英国建造在海洋及含氯化物介质环境中的钢筋混凝土结构,因为钢筋锈蚀需要重建或者更换钢筋的占三分之一以上。在日本,由于较多地区采用海盐作为混凝土中的细骨料,使钢筋锈蚀成为一个严重问题。对冲绳地区的177 座桥梁和672 栋房屋的调查表明,桥面板和混凝土梁的损坏率达到90%以上,校舍一类的民用建筑的损坏率也在40%以上。我国在1981 年对华南18 座钢筋混凝土码头的调查表明,尽管使用期仅7~15 年,但有16 座码头的钢筋锈蚀严重。1984 年对浙江镇海的22 座中小型海工建筑物的调查表明,967 根构件中由于钢筋锈蚀导致顺筋开裂的有538 根,占构件总数的56%。

由此可见,钢筋锈蚀问题已经成为影响钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构耐久性的重要问题。国内外学者从20 世纪60 年代开始研究对策。而采用化学性能稳定、耐久性强的非金属配筋材料是解决

配筋混凝土结构锈蚀问题的最有效最彻底的办法。

## 1 完全非金属材料配筋混凝土结构

对于普通混凝土结构,采用非金属材料作为其主筋、箍筋以及其他的辅助筋;对于预应力混凝土结构,采用非金属材料作为预应力筋,并且采用非金属的锚固系统;对于缆索承重体系,如斜拉桥和悬索桥,采用非金属的缆索体系。这样的配筋混凝土结构就称为完全非金属材料配筋混凝土结构。

目前可用于混凝土结构配筋的非金属材料主要是连续纤维增强塑料(Continuous Fiber Reinforced Plastics,简称FRP)。FRP 筋是由多股连续纤维(如碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等)通过基底材料(如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等)进行胶合后,经特制的模具挤压并拉拔成型的。常见的FRP 筋按其所采用的原丝材料的不同,可分为碳纤维增强塑料筋(CFRP),芳纶纤维增强塑料筋(AFRP),玻璃纤维增强塑料筋(GFRP)。

FRP 筋与普通钢筋和预应力钢绞线相比,有其自身的特点。

(1)FRP 筋基本的力学性能(见表1 和表2)。

表1 几种常见的连续纤维的力学性能

材料种类	密度 kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 MPa	抗拉强度 MPa	极限拉应变 %
碳纤维	1 800	2.0×10 <sup>5</sup>	3 600	1.6
芳纶纤维	1 440	1.2×10 <sup>5</sup>	3 500	2.8
玻璃纤维	2 580	6.6×10 <sup>4</sup>	2 890	2.4

表 2 相应的 FRP 筋的力学性能

材料种类	密度 kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 MPa	抗拉强度 MPa	极限拉应变 %
CFRP 筋	1 500	$1.5 \times 10^5$	2 800	1.1
AFRP 筋	1 250	$5.3 \times 10^4$	1 600	2.8
GFRP 筋	2 100	$5.1 \times 10^4$	1 200	2.4

(2)FRP 材料与钢材力学性能的比较(见图 1)。

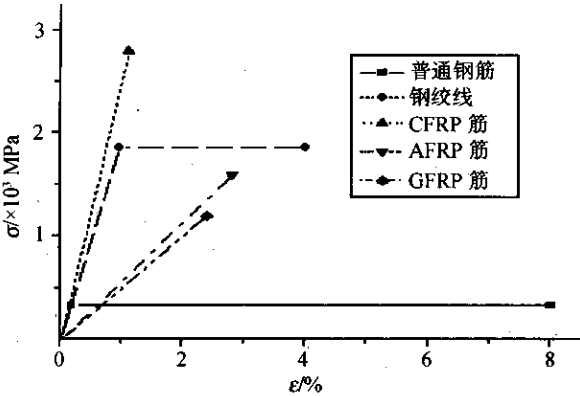


图 1 钢材力学性能的比较

(3)FRP 筋相对于钢筋的特点。

- ①抗拉强度很高。远高于普通钢筋,和高强钢丝不相上下,或者更高于高强钢丝,主要取决于 FRP 筋中纤维的含量以及树脂材料的特点等。
- ②在受拉破坏前,材料的应力应变关系均呈线弹性,不表现出塑性屈服阶段;极限延伸率较低。
- ③弹性模量较钢材要小。碳纤维筋约为钢材的 2/3 左右,其他几种纤维筋更小。
- ④重量轻,碳纤维筋约为普通钢筋的 1/5。
- ⑤抗疲劳性能好。在循环荷载作用下的强度高。
- ⑥抗剪强度和抗挤压强度低,大约只有抗拉强度的 1/10 左右。

2 国内外研究现状

自 20 世纪 80 年代中期以来,欧美及日本等国已陆续开始采用 FRP 类新型人工复合纤维材料,大力开展对 FRP 材料的力学特性、加工工艺和结构性能研究,并将其应用于混凝土结构,在实验研究和工程应用等方面均取得了较好的成果。

在日本,早在 1988 年,日本建设省就成立了连续纤维组合材料研究委员会,并在 1989 年~1992 年修建了一系列的工程,主要是 FRP 预应力混凝土桥梁。在这些工程中,组织者对 FRP 混凝土结构的力

学性能、设计方法以及施工步骤进行了深入系统的研究,并于 1993 年形成了世界上第一本关于 FRP 加筋混凝土及预应力混凝土结构的设计指南(日语版)。日本在 1988 年~1992 年建成的部分 FRP 材料的预应力混凝土桥梁见表 3。

表 3

桥名	纤维类型	预应力筋	普通筋	结构类型	跨度	建成时间
Shinmiya	CFRP	φ12.5	CFRP 棒	先张梁	5.6	1988 年
石智川	CFRP	φ12.5	CFRP 棒	先张梁	8.0	1989 年
Bachigawa minami	CFRP	φ8	粗钢筋	现浇梁	17.55	1989 年
Tulvas	AFRP	φ14	粗钢筋	先张梁	11.98	1990 年
Birdie	AFRP	□4.86× 19.5	CFRP 绞线	现浇梁	46.5	1990 年
Hakui	CFRP	φ12.5	CFRP 绞线	先张 空心板	10.5	1991 年
Takahiko	AFRP	φ14		先张浮箱	54.87	1992 年

在美国、加拿大和德国,早在 20 世纪 80 年代,就展开了非金属配筋材料的研究,通过学者专家的努力,均制定了相应的 FRP 筋的设计指南及施工标准,并且都有实际工程的应用。1986 年,德国建造了世界上第一座采用 FRP 后张索公路桥。

中国在这个方面还处于起步阶段。国内从 20 世纪 90 年代后期开始对 FRP 材料及其在土木工程中的应用进行研究,研究的主要材料是单向碳纤维织物和片材,主要应用于旧结构的加固方面,这个方面已经比较成熟,并且制定了相应的技术规程:碳纤维片材加固混凝土结构技术规程。2000 年召开了“首届 FRP 混凝土结构技术交流会”,并成立了相应的研究组织;2001 年召开了“纤维增强塑料(FRP)及工程应用专业委员会会议”;2002 年 7 月召开的第二届土木工程纤维增强复合材料应用技术学术交流会,促进了纤维增强复合材料在土木工程中的研究和应用。在近几年,一些科研院所和大专院校尝试着做 CFRP 筋在预应力混凝土结构中的应用研究。已经有一些文章发表。对于碳纤维预应力筋混凝土结构涉及的几个方面都有涉猎。比如,碳纤维预应力筋锚固系统的研究,湖南大学做过粘结式锚具的静力试验,中国建筑科学院也做过碳纤维锚具的研制以及其力学性能的测试;对于碳纤维筋混凝土结构的疲劳性能、预应力松弛损失、抗弯力学性能等,都有人做过一些研究。但总体说来,各个相关方面还比较零散,没有形成系统化的设计施工检验理论和规程,

但是有了应用于实际工程的基础。

### 3 完全非金属材料配筋混凝土结构的优点

(1)完全非金属材料配筋混凝土结构是解决目前钢筋混凝土结构锈蚀问题最为有效的方法,由于 FRP 筋优良的力学性能和较好的抗环境能力,以及本身的所具有的非金属的特点,完全没有锈蚀问题的产生。

(2)FRP 混凝土结构相对于钢筋混凝土结构,具有更多的优势,如,由于 FRP 筋的自重很小,因而可以减小结构的自重,从而增加结构的承重效率,特别是在全 FRP 结构中;FRP 筋具有更好的耐疲劳性能,因而可以使结构的耐久性能更好;FRP 混凝土梁的裂缝控制可以更大一些;由于 FRP 筋的蠕变和松弛都很小,所以采用 FRP 筋的预应力混凝土结构,比一般预应力混凝土结构的预应力损失更小;FRP 筋具有自感知智能性能,可以通过在 CFRP 筋的生产过程中将光纤传感器埋置于碳纤维和树脂之中,利用光纤传感器的传感原理实现实时监控,或者利用 CFRP 自身的导电性,通过 CFRP 筋受力过程中电阻的变化来获得构件的应力和应变信息。

(3)完全非金属材料配筋混凝土结构是当今土木工程结构,特别是桥梁结构向更大跨度发展的必由之路。东南大学的梅葵花采用解析法分析 CFRP 斜拉索的静力特性,发现 CFRP 拉索相对于钢拉索具有一系列优点:CFRP 拉索在超大跨时采用切线模量计算的误差很小;相同条件下 CFRP 拉索的等效弹性模量比钢拉索的高得多,且拉索愈长,其间差别愈大;CFRP 拉索的极限长度是钢拉索的 5 倍有余,或者说在承载效率一定的情况下,CFRP 拉索的跨度为钢拉索的 5 倍;CFRP 拉索的自重应力较小,在超大跨时其承受外荷载的比重仍很高。有研究表明,要建造跨径超过 5 000 m 的桥梁。缆索材料只能由 CFRP 来承担。对于斜拉桥,主梁也只能由 CFRP 来承担。并且,根据有关专家的分析,当跨径超 4 000 m 时,CFRP 就具有竞争力。根据 1985 年碳纤维材料与钢材的比价,碳纤维材料悬索桥的“无盈亏跨度”(即等于或大于此跨径,碳纤维材料悬索桥的造价将比传统材料悬索桥的造价低)为 4 170 m。实际上,目前碳纤维材料的价格在进一步降低,将来碳纤维悬索桥的“无盈亏跨度”将会进一步减小,如再考虑上部结构自重减轻后施工费用的节省和使用期维修费用的减少,超大跨碳纤维桥的经济效应将会

更显著。

(4)完全非金属材料配筋混凝土结构是一种新型的配筋混凝土结构体系,使配筋混凝土结构由钢筋混凝土结构向新型材料加筋混凝土过渡,扩大了配筋混凝土结构的概念,是配筋混凝土结构的发展方向,是当今世界土木工程领域研究的热点。

### 4 完全非金属材料配筋混凝土结构的技术可行性

#### 4.1 材料来源

据国内外碳纤维发展的有关介绍,可以得出:碳纤维材料的应用目前已扩展到整个工业民用的多种领域。随着应用研究的不断深入,特别是在民用方面仍将继续拓宽应用领域,扩大使用量。国外预测碳纤维除了在航空航天以及体育用品进一步应用外,近年内包括土木建筑、交通运输、汽车、能源等领域将会大规模采用工业级碳纤维。当前世界碳纤维有如下发展趋势:产品性能趋向于高性能化,价格将大幅度降低;航天航空和文体用品领域用量稳定增加,民用工业用量增幅较大,已超过前两者。特别是随着大丝束碳纤维的大规模生产,其价格将不断降低,民用工业用量将继续保持大幅度增长。“2004 年世界碳纤维前景”大会也具体分析了目前世界碳纤维的需求量以及各个主要碳纤维厂家的生产能力,并且特别分析了我国在今后几年内碳纤维的应用情况,指出了碳纤维应用的几个最有潜力的领域,其中就包括交通土建方面的应用。并且具体介绍几种新的工艺和技术,以用来降低成本,提高产量和品质。国内也在大力研究纤维复合材料的生产,并取得了一定的成效。以下为某生产厂家生产的芳纶纤维复合筋的型号及主要力学性能指标(见表 4),图形见图 2。

这说明制约 FRP 纤维材料在混凝土结构中应用的最大障碍——价格因素将随着纤维增强塑料筋生产工艺的提升以及生产规模的加大而被逐渐克服。纤维复合材料在混凝土结构中的应用将是大势所趋。

#### 4.2 技术基础

要让完全非金属配筋混凝土结构真正走向实际应用,如同普通的钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构一样,必须要有以下几个方面的基础。

(1)加筋材料本身的力学性能。这个在国内外已经做过广泛的试验,如各种纤维塑料筋的力学性能以及本身的物理特性等,已经研究得比较透彻,具备这方面的基础。



表 4 某生产厂家生产的芳纶纤维复合筋的型号及主要力学性能指标

品名	AFT-3	AFT-6	AFT-7	AFT-9	AFT-11	AFT-13	AFT-15	AFT-17	AFT-19
直径/mm	3.0	6.3	7.3	9.0	10.4	12.7	14.7	16.4	18.2
截面积/mm <sup>2</sup>	7	32	42	63	85	127	170	212	255
质量/(g/m)	8	45	60	90	120	180	240	300	360
抗拉能力/kN	7.8	47.0	62.7	94.1	125.4	188.2	250.9	305.8	356.7
弹性模量/GPa	68.6								
延伸率/%	2.0								

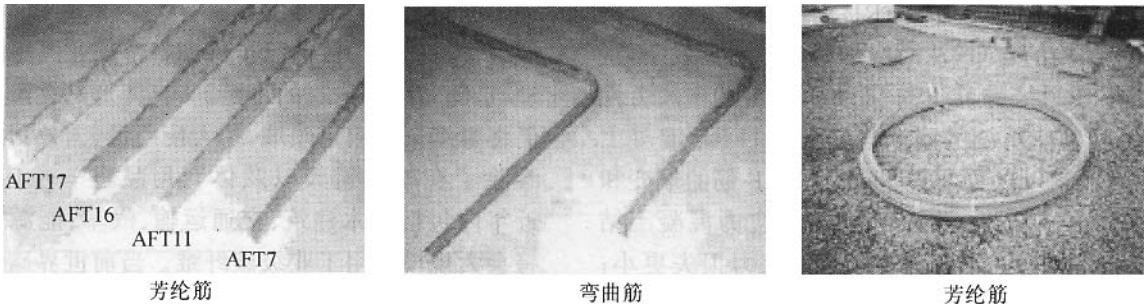


图 2

(2)加筋材料与混凝土的粘结性能,力的传递机理等。这个在国内,同济大学的薛伟辰做过有关实验,得出一些结论,主要有:①FRP 筋发生粘结破坏时的滑移值较小,此时 FRP 筋的表面外缠肋依次与核心处 FRP 剥离,随后 FRP 筋的粘结强度迅速丧失,破坏前没有明显的前兆;②FRP 筋的粘结强度略低于钢筋,并且随着混凝土强度的提高,二者的差别逐渐增大;③FRP 筋与水泥浆之间的粘结强度较高,这可以保证 FRP 筋与水泥浆体之间形成整体,从而为混凝土结构的应用提供依据;④FRP 筋与环氧树脂的粘结强度很高。

(3)FRP 筋普通混凝土梁以及预应力混凝土梁的受力性能,在国外,进行了一些研究,如 Burke 等人提出了配有 FRP 筋预应力混凝土梁的统一抗弯设计方法,给出了抗弯强度的计算公式和强度折减系数。在国内,薛伟辰等人也做过试验研究,得出了一些有益的结论,如:提出了 FRP 筋混凝土梁的受拉和受压破坏模式下的正截面承载能力理论计算公式;有粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的正截面抗烈度以及正截面承载力的设计计算基本可按我国现行设计规范计算,但需要注意截面界限受压区高度的正确取值问题。

(4)对 FRP 预应力混凝土结构,必须设计出简单有效的锚固系统。因为 FRP 材料的抗剪强度和抗

压强度很低,如果采用传统金属夹片式锚具,会导致纤维筋在锚固处的过早破坏。这个在国内外都是研究的热点,并取得了一定的成果。在国内,不少人做过这个方面的试验研究,如湖南大学做过粘结式锚具的静力试验,中国建筑科学院也做过碳纤维锚具的研制及其力学性能的测试。但是总体上来讲,以粘结式锚具为主,并且带有金属外套筒,还是难以免除锈蚀问题,而且锚固效率不是很高。在美国, Mahmoud M. Reda 和 Nigel G. Shrive 研制了出了一种非金属锚具,这种锚具是由一种超高性能混凝土制成的,具有超高的抗压强度,并且通过外缠纤维布来增加其抗拉能力,制成的锚具通过试验效率较好,且价格便宜,完全免锈蚀。图 3 为通常可见的粘结式锚具,图 4 为混凝土锚具。

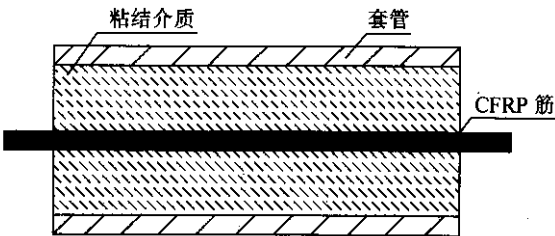


图 3 一般粘结式破坏

(5)相应的设计、施工、检测规程的制定,由于国内还缺乏这个方面的工程实例,相应的资料设计施工规范也还没有建立。

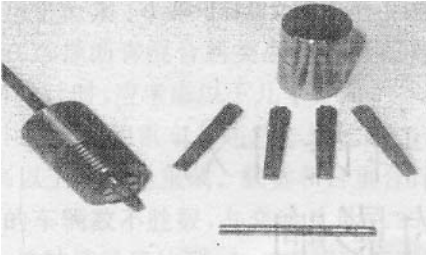


图 4 一种混凝土锚具及夹片

## 5 存在的问题及展望

(1)CFRP 材料的国产化研究。虽然国内目前也已经有了一些 FRP 材料的生产厂家,但是总体而言,产品的质量不高,生产效率低下。特别是作为混凝土结构的配筋材料以及预应力混凝土结构的非金属绞线,其产品的质量更是不能满足工程实际。工程使用中需要进口,这在客观上增加了工程造价,限制了完全非金属配筋混凝土结构的发展。因此需要继续加大关键技术及关键生产工艺的研究。尽快实现高质量材料的国产化。

(2)对 FRP 预应力混凝土构件,预应力损失研究还不足,应加大这个方面的研究。

(3)预应力的锚固系统虽然研究较多,但是仍然难以运用到工程实际,锚固效率不高,而且主要还是金属锚具,这样仍然存在钢筋的锈蚀问题。可以考虑用非金属锚具来代替传统的金属锚具,如可以借鉴国外相关经验,研制混凝土锚具,从而真正实现混凝土结构的完全非金属化。

总之,相信通过努力,FRP 混凝土结构一定能走向实际应用。

## 参考文献:

- [1] 薛伟辰. 纤维塑料筋混凝土研究新进展[M]. 中国科学基金, 2004.
- [2] 钱锐, 茅卫兵. 国外对混凝土结构中新型材料 FRP 筋的研究及应用[J]. 江苏建筑, 2001, (1).
- [3] 张玉成, 徐德新. 新型 FRP 材料在桥梁工程中的应用及前景[J]. 重庆交通学院学报, 2005, (6).
- [4] 张鹏, 唐小林, 蒙文流, 等. 碳纤维增强塑料筋(CFRP)的应用及研究[J]. 广西工学院学报, 2004, (9).
- [5] 张作城, 周建方. CFRP 筋材在土木建筑工程中的应用[J]. 河海大学常州分校学报, 2005, (3).
- [6] 梅葵花, 吕志涛. CFRP 在超大跨悬索桥和斜拉桥中的应用前景[J]. 桥梁建设, 2002, (2).
- [7] 张家杰. 国内外碳纤维生产现状及发展趋势[J]. 化工技术经济, 2005, (4).
- [8] 赵稼祥. 2004 世界碳纤维前景[J]. 高科技纤维与应用, 2004, (12).
- [9] 张强, 朱华民. FRP 材料在日本预应力混凝土桥梁及其他结构中的应用[J]. 国外桥梁, 1996, (3).
- [10] 汪胜义. 碳纤维复合材料(CFRP)在桥梁工程中的应用及前景[J]. 重庆交通学院学报, 2005, (2).
- [11] 吴海军, 陆萍, 周志祥. CFRP 在新建桥梁中的应用与展望[J]. 重庆交通学院学报, 2004, (2).
- [12] Taha M M R, Shrive N G. New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Post-Tensioning Tendons-Part 1: State-of-the-Art Review/Design[J]. ACI Structure Journal, 2003, 100(1).
- [13] Taha M M R, Shrive N G. New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Post-Tensioning Tendons-Part 2: Development/Experimental Investigation [J]. ACI Structure Journal, 2003, 100(2).

# A Study on Concrete Structures Reinforced with Total Nonmetal Materials

JIN Wen-cheng, JIAN Fang-liang, ZHANG Xiao-fei

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The main disadvantages of reinforced concrete structure are analysed in this paper. The concept of concrete structure reinforced with total nonmetal materials is put forward and the feasibility of this structure in technique is analysed. It is pointed out that the concrete structure reinforced with total nonmetal materials is the best way to solving the corrosion of the reinforcement concrete structure and the direction of developing of the reinforcement concrete structure.

**Key words:** nonmetal materials; reinforced; FRP tendon; concrete structure