

文章编号:1673-2049(2005)03-0020-05

# 纤维增强塑料加固混凝土结构研究

贺拴海,任 伟

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**纤维片材加固作为一种新兴的结构加固技术,由于其材料优异的力学性能及施工简便等特点,迅速成为各国加固研究领域的热点。中国在纤维加固方面的研究已基本涵盖了其所涉及的所有领域,取得了大量的研究成果,并在一定程度上指导着工程实践。但是由于纤维加固结构的复杂性,目前所取得的研究成果还不能解决结构加固的所有问题。对中国近几年来纤维加固所取得的研究成果进行了总结,同时也指出了在该领域研究中存在的问题及今后的发展方向。

**关键词:**纤维增强塑料;混凝土结构;被动加固法;主动加固法

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

## Research on reinforced concrete structure with FRP

HE Shuan-hai, REN Wei

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** FRP reinforcement, as a new method of strengthening structure, becomes the focus of the strengthening research field both at home and abroad rapidly, because of its outstanding mechanical property and easy construction, etc. The studies in China involve almost all the fields of FRP reinforcement and make a large number of research results which are the guiding project application to a certain extent. But because of complexity of strengthening structure, the research results still can not solve all kinds of problems of strengthening structure. Authors summed up the recent results of the FRP reinforcement in China, and pointed out the existing problems of this field. Finally, the development direction of FRP reinforcement was provided.

**Key words:** FRP; concrete structure; passive reinforcement method; active reinforcement method

## 0 引 言

在结构加固改造与修补技术方面,除了传统的加大截面法、外包钢法、喷射混凝土加固技术、预应力钢筋加固技术、粘钢板加固技术外,一种新兴的结构加固技术——纤维片材加固技术(包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维及芳纶—玻璃纤维)已于 20 世纪末在中国悄然兴起。由于该材料的优异力学性能及施工简便等特点,使其迅速成为加固研究领域的热点。目前中国学者对该材料的研究已取得了大量成

果,但由于结构加固的复杂性和纤维材料的多样性,目前的研究成果还不能解决结构加固的所有问题。

## 1 构件加固

按照加固后纤维材料参与受力的阶段,可将纤维加固方法分为被动加固和主动加固。

### 1.1 被动加固法

#### 1.1.1 梁、板结构加固

在纤维加固混凝土抗弯、剪承载能力研究领域中,主要是以模型试验为立足点,通过分析试验数据

的规律,提出纤维布加固混凝土梁、板结构承载能力计算公式,其中主要讨论了待加固结构的配筋率、配箍率、剪跨比、混凝土强度、截面刚度及加固材料强度、刚度对加固效果的影响;不同纤维数量对破坏形态的影响;通过对各级荷载下裂缝宽度及开展高度的调查、统计,分析粘贴纤维布对裂缝开展的影响等。

分析方法主要有解析法和数值分析法,其中解析法主要是借助已有的数学模型(如抗弯计算中考虑截面退化的全过程分析及抗剪计算中的桁架模型等),将加固结构中纤维材料的受力行为等同于钢筋进行分析;数值分析方法主要是借助已有的商业软件或自行编写的专用程序进行分析,目前已总结了一定的数值模拟经验<sup>[1~3]</sup>。到目前为止取得的主要研究成果有:

(1)通过大量的室内模型试验,已初步掌握了纤维加固混凝土结构的力学行为及破坏形态<sup>[4]</sup>;

(2)初步提出了纤维加固结构抗弯、剪、扭的计算公式;

(3)粘贴纤维布对提高混凝土梁、板结构极限承载能力效果显著;

(4)粘贴纤维布可显著地减小裂缝间距、宽度、高度,抑制裂缝开展,对提高普通钢筋混凝土构件耐久性具有重要意义。

但也存在以下不足之处:

(1)目前各国虽然进行了大量的纤维加固试验及理论研究,但对影响加固效果的各因素之间的相关性研究较少;

(2)对梁的抗弯、剪加固多以矩形梁研究为主,T型梁研究较少,在为数较少的T型梁加固试验及理论分析中,尚未体现出T型梁加固与矩形梁加固的力学性能区别;

(3)在结构抗剪加固的简化分析中,由于受到传统计算模型的制约,进展相对缓慢且误差较大;

(4)在应用有限元程序对加固结构进行分析中,模型的处理还与实际加固结构存在一定差距;

(5)在室内模型试验中,模型的选取由真实结构相似而来的较少;

(6)由于受到试验规模及人为主观臆断的制约,目前所取得的研究成果,特别是试验成果带有较大的片面性,还不能系统、真实地反映纤维加固的自然规律;

(7)对纤维加固后结构的动力性能、长期性能研究还不够深入。

### 1.1.2 柱(墩)加固

纤维材料对柱(墩)加固的研究内容主要包括:纤维加固混凝土柱的受压力学性能研究;纤维加固混凝土柱的正截面承载力性能研究;纤维加固混凝土柱的斜截面力学性能研究;纤维加固混凝土柱的抗振性能研究(包括滞回耗能能力、延性性能、弯矩—曲率关系等);纤维加固混凝土柱应力—应变曲线特性;纤维加固混凝土柱的耐久性能研究;构件的截面形状对纤维加固混凝土柱增强效果的影响等<sup>[5]</sup>。

用纤维复合材料缠绕混凝土柱以提高其轴向承载力,主要根据的是约束混凝土原理。混凝土在轴力作用下开裂,激发纤维的环向应变,产生环向应力,使混凝土处于3向受力状态(建立合理的约束混凝土应力—应变关系是进行结构补强设计或加固效果评价的关键),从而改善其抗压力学性能。目前的研究表明:用纤维布加固后,混凝土柱极限承载力与延性有明显增大,增大效果与纤维品种、规格、用量、纤维布粘贴方式,纤维布条带间距等因素有关<sup>[6]</sup>。

中国在纤维加固柱体的试验研究主要集中在两个方面,即对纤维约束短柱的轴压承载力试验以及纤维约束柱体的抗振试验(有拟静力试验、拟动力试验以及振动台试验等),其中加固材料以碳纤维材料为最多,近年来也逐步开始对芳纶纤维加固混凝土柱展开研究<sup>[7]</sup>。

### 1.2 主动加固法

纤维增强塑料是一种高强度的材料,应用于土木工程领域的强度通常都达到3 000 MPa以上(如碳纤维),而其弹性模量相对来说却小得多,常用的一般为230 GPa,高弹性模量也不过380~640 GPa。要发挥较大的强度,碳纤维增强塑料需要相当大的变形,当与钢筋共同工作,钢筋完全发挥强度时碳纤维才发挥出不到20%的强度,难以高效抑制结构的变形与裂缝的扩展。另外,环氧树脂的剪切强度为一定值,超过剪切强度后界面传递的剪应力不再增大,而剪切变形不断增长,呈现软化现象。超过极限剪应变后界面即产生微裂缝,随着微裂缝不断扩展,界面最后发生剥离破坏,所以粘贴碳纤维片材加固有其限度,过量粘贴会导致界面无法传递足够的剪应力而使得碳纤维的强度无法得到充分利用,并且在构件承受较大荷载时容易出现粘结破坏。上述缺陷在很大程度上限制了纤维增强塑料在加固领域中的应用,因为结构往往不仅要求强度加固,还需要刚度加固,而纤维的材料性质与造价决定了

普通的工艺无法进行经济效益较好的刚度加固。另外,由于纤维的强度很高,现有的碳纤维增强塑料加固技术往往不能使其强度得到充分发挥,这也制约着碳纤维增强塑料在加固领域中的进一步应用和发展<sup>[8]</sup>。

应用预应力碳纤维布加固构件是一项非常新颖而且具有潜力的加固技术,它能显著提高被加固构件的开裂荷载与抗弯刚度,有效地对构件进行刚度加固;能在变形不大的情况下充分地利用碳纤维的高强性能;并且能防止粘结破坏,充分发挥碳纤维的强度,降低碳纤维的加固成本。它对扩大碳纤维增强塑料的使用范围,促进碳纤维增强塑料在加固领域的进一步应用与发展,有着至关重要的作用。

近年来,研究者已对纤维材料的预应力加固技术开展了一些研究,并且取得了一定的研究成果,目前湖南大学已研制出一套具有较大实用价值的预应力碳纤维布加固受弯构件的施工工艺。此外,中国研究者也提出了不少有效的加固措施,如图 1 所示。

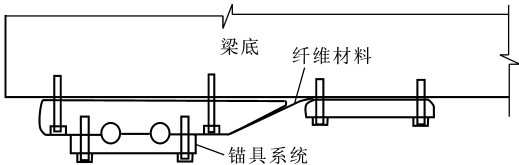


图 1 纤维预应力加固构造

Fig. 1 Reinforcement constitution of fiber prestressing force

虽然预应力加固技术是一项非常新颖的工艺,但其力学原理类似于结构的卸载加固方法。它对结构正常使用阶段的加固效果明显,但是否有利于增大结构的延性及提高承载力还有待进一步研究。另外,在纤维预应力加固中,纤维预加应力达到多大时有利于结构承载力及延性提高目前还无法定论。

2 机理研究

2.1 界面粘贴

与传统材料一样,粘贴片材作为加固结构的一部分,它与混凝土的协同工作对整个结构的力学性能影响很大。采用粘贴片材增强或加固的混凝土结构的整体复合效果主要是通过粘贴片材和混凝土之间良好的粘结来实现。任何引起该粘贴区域破坏的因素都可能导致结构发生破坏而达不到预期加固的效果。即使没有导致最终的界面粘贴破坏,也会因片材与混凝土之间不能协调变形,出现滑移等协调工作问题,而导致混凝土裂缝的产生和扩展,这种现象对加固强度、刚度和变形能力也会产生直接的影

响。因此,对界面粘贴应力的研究有助于更加深入地了解纤维加固混凝土机理。

粘贴层与混凝土之间的传力机理试验研究主要包括:混凝土强度对粘贴效果的影响;粘贴长度对粘贴效果的影响;混凝土表面处理工艺对粘贴效果的影响;粘贴层数对粘贴效果的影响;混凝土保护层厚度对粘贴效果的影响;不同种类粘贴材料对粘贴效果的影响等。

2.1.1 试验方法

为了研究纤维和混凝土界面的应力传递行为、剥离机理,以及确定有效粘贴长度、抗剥离承载力等设计参数,较多采用如图 2 所示的几种界面粘贴机理试验方法,其试验目的主要是测试在轴向荷载作用下界面剪应力的分布规律。

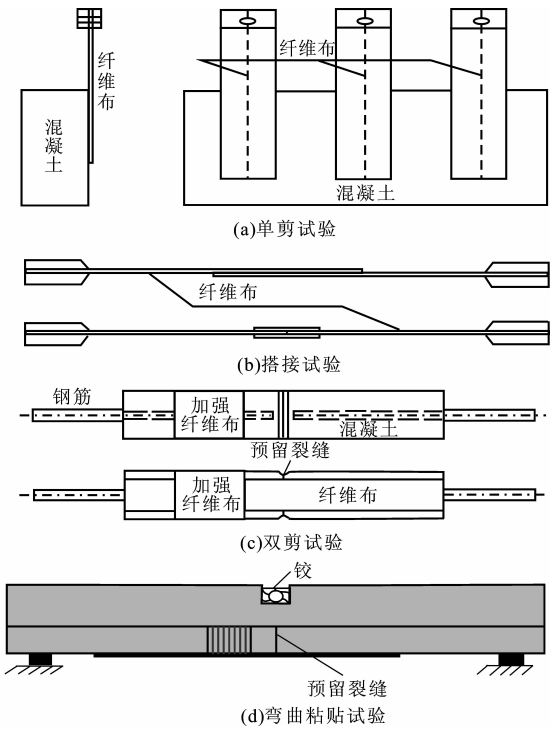


图 2 粘贴机理试验方法

Fig. 2 Experimental method of bond mechanism

通过以上试验分析,研究者们已初步达成共识:粘贴长度对极限荷载无影响,而与有效粘贴长度密切相关;增加纤维的粘贴层数,可以增大粘贴强度,但是与其增长不是成比例的。

2.1.2 分析手段

对界面粘贴应力的分析方法主要有 3 种:  
(1)利用试验结果线性回归得到有效粘贴长度及粘贴抗拉极限强度的公式,如MILLER B提出<sup>[9]</sup>

$$L_e = -0.432tE_f + 94.3 \tag{1}$$

$$P_{max} = L_e w \tau \tag{2}$$

## (2) 解析方法<sup>[10]</sup>

如 BROSENS K 和 GEMERT D V 在 2001 年上海举办的“Repair and Maintenance of Reinforced Concrete Structures”上提出的有效粘贴长度及极限荷载计算方法

$$l_a = \frac{2\lambda + A \tan\{\frac{[\tan h(2)]}{\lambda}\}}{\lambda\omega} \quad (3)$$

$$P(l) = \frac{E_l A_l \lambda \omega S_{l_0} \sin [\lambda \omega (l - x_p)]}{l + m_l \gamma_l} \quad (4)$$

## (3) 数值方法

利用有限元程序进行界面应力的分析也是一种常用的方法,如 ANSYS、LUSAS 程序等。利用程序计算一般均需考虑:胶层厚度;胶层的弹性模量;外贴材料厚度及弹性模量;混凝土弹性模量等。

现有的建模方式除混凝土按常规建模外,胶层一般要划为较密的单元形式,且要从混凝土缓慢过渡到纤维层。分析方法以非线性分析为主,结果一般与试验值吻合较好。

但是目前的分析方法仍然存在问题:计算中需考虑胶层的厚度,且认为胶层的厚度是均匀的。在工程应用中,胶层的厚度很难控制;单元划分要求太高,且难以收敛,要进行大量试算;未反映混凝土表面粗糙程度的影响;模拟粘贴层材料性质取值相当困难,常需要由室内试验配合或试算确定等。

为能全面反映胶层传力的真实情况,建议在工程实际应用中,应以试验研究为基础指导工程实践。

## 2.2 初应力

在纤维加固研究初期,试验研究和理论研究均是对无初始荷载的结构进行加固研究,这与实际结构加固之间存在较大的差异<sup>[11]</sup>。近年来,从事结构加固研究的工作者们已经逐渐认识到这一点,并进行了一定的室内模型试验及理论分析。研究范围主要是模拟实际结构在承受自重及二次恒载作用下,用纤维加固后结构的力学性能,并达成了一定的共识,即初始荷载对结构加固效果是有影响的。

但从目前的研究现状看还远远不足,主要表现在:初始荷载对结构加固的正负效应认识不统一<sup>[11,12]</sup>;初始荷载使结构中各种材料达到一个怎样的应力比值关系时加固效果最佳,这个问题尚无研究者涉及。

## 2.3 耐久性

由于纤维增强塑料这种材料用在混凝土结构补强加固上时间不长,其长期加固性能仍然没有得到有效证实。中国地域辽阔,南北气候差异大,环境因

素对纤维加固混凝土结构的影响不容忽视。因此,耐久性研究对纤维增强塑料加固混凝土结构的影响意义重大。

目前的研究主要集中在纤维加固结构的耐大气腐蚀性、耐化学药品性、耐水性、耐疲劳性、耐高温及抗冻融等方面。大连理工大学的赵国藩院士带领的科研小组在纤维加固混凝土结构抗冻融方面做了大量的工作<sup>[13]</sup>,得出冻融循环对玻璃纤维布加固混凝土梁的受力性能有不利影响,但在正常使用极限状态下,纤维布与混凝土梁粘贴良好,不发生剥离破坏等重要结论。West Virginia University 的 BARGER J D<sup>[14]</sup>研究了碳纤维和玻璃纤维在室温和抗冻融条件下的耐酸碱能力及粘贴层在冻融及自然条件下的老化行为,并给出了适当的修正系数。

## 2.4 构造措施

虽然纤维加固技术已经在结构加固中得到了广泛应用,但是其端点的锚固,仍然是一个值得高度重视的问题。在结构加固中,尤其是当粘贴长度受到限制时(如 T 型梁的抗剪加固),粘贴层的早期破坏(脱胶、剥离),大大地影响了加固效果,纤维抗拉强度大的优点完全没有体现出来。目前,粘贴层的耐久性研究还正处在初级阶段,加固结构在若干年后其粘贴层是否还有效或效果如何还是未知数,所以采取必要的锚固措施还是很有必要的。因此,为更好地利用纤维布的抗拉强度,在各国的加固应用中已总结出了大量的锚固措施,如图 3 所示。

在纤维加固中进行必要的锚固已被广大研究者所重视,但是仅将其作为一种必要的构造措施看待,而更深层次的力学问题却无人涉及,如锚固合理间距及锚固点距结构外沿的最小距离的确定等。

## 2.5 材料性能

在对纤维材料及其配套专用胶力学性能的认识方面,多年来一直停滞在由生产厂家提供的一些力学指标上,然而这些指标在为工程实际服务上还存在一定的差距,如生产厂家提供的纤维材料的指标是纯纤维制品的强度及弹性模量,而在应用中纤维是与专用胶共同存在的,这一差距对纤维材料的粘贴应力分析影响极大。再如对胶的蠕变性能及耐高温性能知之甚少,这严重制约了加固结构的耐久性以及在防灾领域的研究进展。

但从 2004 年开始,赵国藩院士带领的科研小组已经开始着手对纤维材料的力学性能展开研究,如碳纤维片材的徐变性能试验等<sup>[15]</sup>,这预示着中国工程界对纤维加固的研究进入了一个更深的领域。

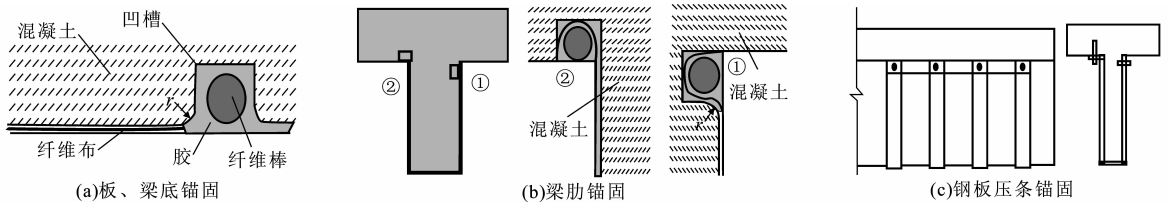


图3 纤维锚固措施

Fig. 3 Fibre anchor measure

### 3 结 语

纤维材料用于结构加固已是国际土木工程界的一个热点,由于其优异的使用性能,应用范围与使用量正以惊人的速度增长。纤维作为一种新型的有发展潜力的工程材料,并不是要取代传统的材料——钢材与混凝土,而是作为对传统建筑材料的一个重要补充。笔者认为,在今后的几年里,还需要继续加强的研究有:纤维加固结构的耐久性研究;大量的粘贴及锚固试验研究;具有初始荷载的结构加固研究,将成为研究领域的一个重要组成部分;圬工结构的加固研究;加固后结构防灾领域的研究;纤维预应力加固研究;出台纤维加固结构行业规范等。

### 参考文献:

- [1] 黄羽立,叶列平. 碳纤维布加固 RC 梁中粘结性能的非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 54—61.
- [2] FIEDLER B, HOJO M, CHIAI S O, SCHULTE K, OCHI M. Finite-element modeling of initial matrix failure in CFRP under static transverse tensile load [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(1): 95—105.
- [3] 任伟,贺拴海,宋一凡. 碳纤维布加固具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪极限承载力[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(4): 40—45.
- [4] 贺拴海,赵小星,宋一凡,袁旭斌. 具有初荷载的钢筋混凝土梁桥粘贴碳纤维布加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 70—76.
- [5] 周长东,黄承逵. 玻璃纤维聚合物加固混凝土柱的抗弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 38—45.

- [6] 赵海东,赵鸣. 碳纤维布加固钢筋混凝土圆柱的轴心受压试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 26—30.
- [7] 倪永军,朱晞,魏庆朝,汤惠工. 纤维增强聚合物抗震加固混凝土柱研究综述[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(4): 21—26.
- [8] 尚守平,彭晖,童桦,韦东辉,曾令宏. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24—30.
- [9] MILLER B, NANNI A. Bond between CFRP sheets and concrete[EB/OL]. <http://campus. umr. edu/utc/pubs/conf/1999/index. htm>, 1999-05-12.
- [10] BROSENS K, GEMERT D V. Strengthening of concrete structures with externally bonded steel plates or CFRP laminates-part1: specific design concepts[A]. Repair and Maintenance of Reinforced Concrete Structures[C]. Shanghai: Tongji University Press, 2001. 195—232.
- [11] 贺拴海,任伟,赵小星. 碳纤维布对具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪加固试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 34—39.
- [12] 王文伟,赵国藩,黄承逵,任海东. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 172—178.
- [13] 任慧韬,胡安妮,赵国藩. 冻融循环对玻璃纤维布加固混凝土梁受力性能影响[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 104—110.
- [14] BARGER J D. Effects of aging on bond between FRP and concrete[D]. Morgantown: West Virginia University, 2000.
- [15] 任慧韬,胡安妮,赵国藩. 碳纤维片材的徐变性能试验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 10—14.