

文章编号:1004—5716(2004)01—0056—03

中图分类号:TU513.7 文献标识码:B

预应力碳纤维布加固受弯构件的施工工艺

彭 晖,尚守平,王海东,曾令宏

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:探讨了碳纤维增强塑料加固混凝土结构的缺陷与不足,提出可以通过预应力技术克服碳纤维现有加固技术的缺陷。在此基础上研制了用于预应力碳纤维布外贴加固受弯构件的施工机具,并提出了完整的预应力碳纤维布加固受弯构件的施工工艺。

关键词:预应力;碳纤维;加固;受弯构件;施工工艺

随着大量建于 20 世纪 50 ~ 60 年代的建筑达到或超过使用寿命,大量建筑的使用功能发生改变,以及相当数量的新建建筑出现质量问题,对建筑结构进行加固越来越成为建筑领域的一个重要分支。新的加固材料、加固技术不断出现,以满足越来越繁重、复杂的加固需要。由于具有强度高、耐腐蚀性好、加固工艺简单、施工方便及效率高等优点,原先应用于航天航空领域的先进复合材料——碳纤维增强塑料(CFRP)也被引入了建筑结构加固领域并迅速得到了广泛应用。但随着 CFRP 在加固领域发挥重要作用的同时,工程师与研究人员也发现了 CFRP 用于加固的缺陷。

碳纤维增强塑料的强度非常高,一般都达到 3000MPa 以上,而其弹性模量相对来说却低得多,常用的一般只有 230GPa 左右,高弹性模量的也不过 380 ~ 640GPa 左右。要发挥较大的强度,碳纤维增强塑料需要相当的变形,当与钢筋共同工作时,钢筋完全发挥强度时 CFRP 才发挥出不到 20% 的强度,难以抑止结构的变形与裂缝的发展。如果采用大量的 CFRP 来控制结构的变形和裂缝,其高强度的优势及经济效益又不复存在。以往的研究工作也表明,外贴碳纤维增强塑料加固受弯构件,被加固构件的性能提高主要在强度方面,刚度尤其是早期刚度的提高相当小,对于刚度也要求加固的结构来说是相当不适用的。另外,环氧树脂的剪切强度一定,超过极限剪应变后界面即产生界面微裂缝,随着微裂缝的不断扩展,界面最后发生剥离破坏,所以粘贴

CFRP 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 CFRP 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。

上述缺陷在相当程度上限制了碳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,而碳纤维的材性决定了普通的工艺无法进行经济效益较好的刚度加固。即使通过粘贴大量碳纤维增强塑料来提高结构刚度,在降低经济效益的同时,由于环氧树脂的材性以及弯曲与剪切裂缝处的应力集中,容易造成碳纤维增强塑料与混凝土之间的界面剥离而粘结破坏,降低被加固结构的使用可靠性。另外,由于碳纤维的强度很高,现有的碳纤维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。因此,笔者通过对碳纤维增强塑料施加预应力来克服其材性上的缺陷。对碳纤维施加了预应力后,构件在承受荷载之前碳纤维就已经发挥了相当的强度,既有效的利用了碳纤维的高强度,又能抑止构件的变形和裂缝的发展,避免了碳纤维强度模量比值过高的矛盾。经过笔者的努力,研制了对受弯构件进行预应力碳纤维布加固的施工机具并摸索出了一套完整的预应力加固受弯构件的施工工艺,并使用此套施工机具与施工工艺成功地对碳纤维增强塑料施加了 50% ~ 60% 极限强度水平的预应力。试验结果表明,预应力碳纤维布加固的受弯构件在开裂荷载、钢筋屈服荷载、抗弯刚度等性能方面都有相当大的提高,

$$u_0 = u_1 \left\{ 1 + \frac{1}{3} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{u_1}{u_0} \right)^2} \right] \right\} \quad (26)$$

4 结束语

突变现象在自然界中普遍存在,尤其是在岩土工程领域更加常见,基坑开挖面的失稳就是其中一种。由于突变现象都表现为在短时间内系统的急剧变化,对工程的顺利施工危害极大。通过突变理论的尖灭型(Cusp)突变模型讨论了基坑失稳的理论依据,从理论上分析了基坑失稳取决于系统内部的性质,并提出了临界失稳点的位移值。这一位移值对于指导基坑开挖的设计和施工

具有指导性的意义。

参考文献:

- [1] 李磊,姜志强.深基坑支护结构位移的非等步长灰色模型预测[J].勘察科学技术,2001,5.
- [2] 祝龙根,刘利民.地基基础测试技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [3] Benjamin W A, Thom R. Stabilité structurelle et morphogénèse. New York: Benjamin W A, Inc, 1972.

对碳纤维强度的利用程度要远远超出普通碳纤维布加固的受弯构件,具有非常良好的经济效益与社会效益。下面对施工机具及施工工艺作一介绍。

2 施工机具

应用碳纤维布材对受弯构件进行体外预应力加固,工艺较非预应力碳纤维布加固复杂,并且必须设计专门的施工机具以对碳纤维布进行张拉。施工机具必须具有以下性能:可以有效的对碳纤维布材进行张拉;用于锚固碳纤维布的装置应该具有很强的锚固能力以使得可以将碳纤维布张拉至较高的应力水平,且锚固装置乃至机具本身必须具有较大的刚度,以保证在承受较大的外力时不会发生大变形而使得碳纤维布截面应力分布不均匀而过早被拉断;张拉完成后应该便于对受弯构件进行粘贴加固;应该足够轻便以便于运输与安装。

经过反复设计与试验,作者研制出了专门用于预应力碳纤维布加固受弯构件的施工机具,这套机具具有上述所有性能。对受弯试件进行加固的结果证明,作者设计的施工机具可以有效的对受弯构件进行预应力碳纤维布加固,完全满足预应力碳纤维布加固技术的要求。

施工机具由两台张拉机组成,分为主机具与副机具。主机具用于张拉,副机具用于固定。施工时将机具分别用膨胀螺栓固定在柱构件上。将碳纤维布两端安装在两台机具的锚固装置上,固定好副机具的锚固装置,然后主机具的张拉装置带动锚固装置对碳纤维布进行张拉。

机具的锚固装置:机具对碳纤维的锚固是采用摩擦力自锁的原理。锚固装置由两个半圆柱体组成,其中一个固定在机具上,另外一个通过螺栓与其紧密压合在一起。使用时将碳纤维布的端部夹在锚固装置的两个半圆柱体之间,用螺栓将半圆柱体压合,然后转动锚固装置将碳纤维布缠绕在上面,卷至 8 倍锚固装置直径的长度即可提供由自锁产生的足够的摩擦力。锚固装置直径为 6cm,故具有足够大的刚度可以确保在承受 5t 的拉力时不会产生大变形。

机具的张拉装置:将碳纤维两端都固定在两台机具的锚固装置上后,即可转动手柄,带动主机具的螺杆转动。因为主机具的锚固装置是套在螺杆与滑杆上,螺杆转动必须使得锚固装置沿着螺杆与滑杆移动,从而张紧或放松碳纤维布。整个螺杆的行程有 50cm 长,可以满足对 25 长的碳纤维布进行张拉的变形要求,从而对大跨度梁构件也能进行有效的预应力加固。

机具的转向装置:机具施工时固定在柱构件上,由于螺杆的方向是平行柱构件的,使得张拉方向也是平行柱构件而垂直梁构件,必须通过机具顶部的一个滚轴改变碳纤维布的方向使其平行于梁构件。由于滚轴位于机具的最顶部,碳纤维布改变方向后可以毫无阻碍的与梁构件底部紧密接触,从而保证粘贴质量。

3 施工工艺

3.1 工艺原理

预应力碳纤维布加固受弯构件的主要工序如图 1 所示。

利用碳纤维布材施加预应力,与利用钢材施加预应力很大的一点不同就是碳纤维布的材性与钢材相差很大。碳纤维布材是由彼此之间没有粘结的单丝纤维组成,缺乏粘结使得纤维之间应力分布很不均匀,而缺乏延性使得单丝的碳纤维达到极限强度后

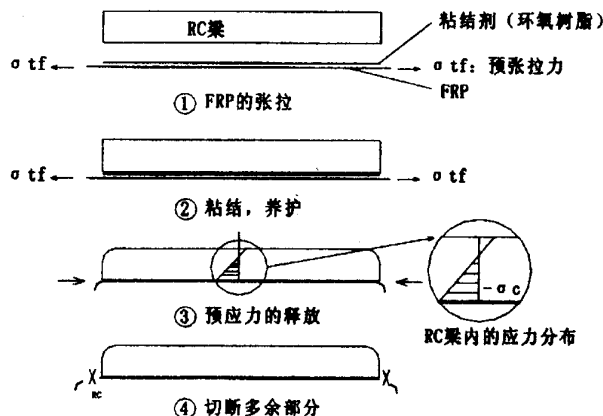


图 1 预应力试件的制作工序

即断裂。因此高应力区域的碳纤维丝会在低应力区域的碳纤维丝完全发挥强度之前断裂,所有的碳纤维丝无法同时发挥强度,材料的整体强度要远远低于单丝纤维,并且对截面应力分布不均匀非常敏感。因此工艺中的一个关键问题就是如何使得碳纤维布截面内力分布尽可能均匀,从而可以将碳纤维张拉至较高的应力水平。经过长时间的试验研究,作者发现通过将碳纤维布制成 CFRP,控制 CFRP 两个锚固端的方向性与平整度,控制适当的张拉速度三个关键步骤的努力,可以将碳纤维布张拉达到较高的预应力水平。工艺中的另外一个关键问题是由于张拉后的碳纤维布非常平直,因此待加固受弯构件的加固表面必须也非常平直,两者之间的粘结质量才能保证,亦即对需加固受弯构件的表面平整度的要求较普通非预应力加固技术更高。具体工序如下:

3.2 制作 CFRP

为了尽可能充分地利用碳纤维的高强度,必须提高碳纤维布材中纤维单丝共同工作的性能,最直接、最简便的方法就是通过湿法将环氧树脂充分浸润到碳纤维布材之中,通过环氧树脂在纤维单丝之间传递剪力来克服纤维单丝之间的应力分布不均匀,提高纤维单丝的共同工作性能。具体工序如下:

(1)在制作台面覆盖聚乙烯塑料等环氧树脂不易浸润粘结的材料。为了避免制备的 CFRP 与制作台发生粘结,制作台面必须不与环氧树脂发生粘结。

(2)将碳纤维布裁剪成需要的尺寸与形状,铺设在制作台表面。通过机械或吊挂重物对碳纤维布材施加几十兆帕的拉力。这样可以使得碳纤维布材中松弛的纤维单丝都被拉直,避免了制成 CFRP 时纤维单丝的平直程度不一致而造成的共同工作性能降低。

(3)将环氧树脂粘贴胶的主剂和固化剂按规定的比例取用并倒入容器内,搅拌以使两组分混合均匀,在搅拌时宜低速、单向以避免产生气泡。

(4)用辊子或刷子将粘贴胶均匀涂抹到碳纤维布材表面,反复涂刷或滚压,使其完全渗透到碳纤维中,并挤出胶中的气泡。注意涂刷时沿一个方向。

(5)当环氧树脂粘贴胶充分浸润到纤维丝中后,在碳纤维表面均匀涂抹一层粘贴胶作保护面层,使碳纤维被环氧树脂基体完全包裹。

(6)在制作好的碳纤维增强塑料片材上覆盖一层塑料薄膜,保护其不受灰尘与水分的影响。当气温为 10 时,环氧树脂粘贴胶达到强度一般要 2 周左右;当气温为 20 时,一般要 1 周左右,必要时可以使用加温设备来缩短环氧树脂的固化时间。

3.3 构件的表面处理

预应力碳纤维布加固的受弯构件的表面处理与普通碳纤维布加固的构件表面处理基本相同,但在打磨构件表面时应非常仔细,以使表面具有较非预应力加固工艺更好的平整度。

3.4 涂刷底胶与找平胶

为了保证构件和碳纤维之间的粘结,在将构件表面处理洁净后,要在构件表面涂刷一层底胶,然后在底胶上涂刷一层找平胶来修补凹凸的部分及坑洞。这部分工艺与普通碳纤维布加固受弯构件也基本相同。

3.5 粘贴预应力 CFRP

(1)将张拉机及蜗杆机构固定在与需加固受弯构件相联系的柱构件上。

(2)将制作好的碳纤维增强塑料安装至张拉机的锚固装置上,仔细调整两个锚固端的平整度。由于缺乏延性,必须通过调制两端平整度来控制截面上的应力分布的均匀程度,从而使 CFRP 能达到更高的预应力水平以及具有更好的使用性能。这一步工序非常重要。

(3)将张拉机具沿固定在柱子上的蜗杆机构上升,直至初步拉直的 CFRP 距受弯构件待加固表面 25cm。

(4)以 350~450MPa/h 的速度均匀张拉碳纤维增强塑料;张拉速度非常关键,试验研究发现,条件完全相同的 CFRP 由于张拉速度不同,所能达到的预应力水平相差很大。因此,张拉高预应力水平的 CFRP 时的张拉速度非常重要。现阶段通过研究发现的规律是张拉速度越慢,所能达到的预应力水平越高。本文试验所使用的 CFRP 以 360MPa/h 的速度张拉可以达到 50%~60%极限强度水平的预应力。

(5)当张拉至设计预应力时,开始按配制底胶的方法配制粘贴树脂,要避免灰尘和水分落入树脂中。

(6)用辊子、塑料刮刀和刷子将浸渍树脂均匀涂抹于受弯构件与碳纤维增强塑料的粘贴面,在混凝土的搭接、转角部位要多涂一些。

(7)将张拉机具沿蜗杆微动机构上升,直至受弯构件的粘贴表面与碳纤维的粘贴表面紧密结合在一起,用特制的辊子沿纤维方向滚压以去除碳纤维增强塑料下面的气泡,树脂未充满的空隙用注射器注入环氧树脂;对人工打磨的构件,通常会由于构件表面平整度与 CFRP 不一致而形成较大的空隙,可配制粘稠度较大的粘贴用环氧树脂填入。

(8)由于 CFRP 与混凝土之间容易在粘结界面上发生粘结破坏,必须设置锚固。试件破坏试验的研究证明,在剪弯段设置如图 2 所示的 U 型锚固带,能有效的防止粘结破坏发生。

3.6 养护

为保证加固后构件的正常使用,避免碳纤维加固材料遭受外

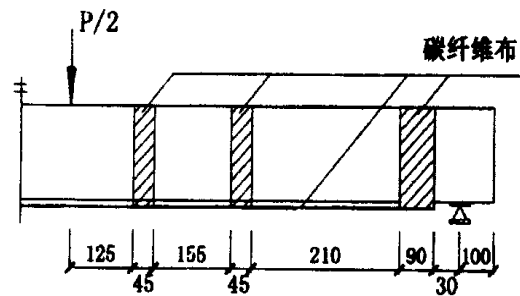


图 2 锚固方式

界损伤,应当在加固层外表面进行密闭防护处理。防护层可以使用掺有防火剂的聚合物水泥砂浆或者其他有利于保证碳纤维材料耐久性能和防火性能的涂料。当采用水泥砂浆作为封闭层时,应当先在加固层外表面涂刷一层界面处理剂以增强其与水泥砂浆之间的粘结,外罩的水泥砂浆层厚度应 20mm。

4 工艺效果

应用本文提出的施工机具与施工工艺,作者制作了 5 根预应力试件与 4 根对比试件,并进行了试件试验,结果见表 1。

表 1 试件试验结果及比较

试件号	预应力水平 (MPa)	开裂荷载 (kN)	比值 (%)	12.3kN 下跨中挠度 (mm)	比值 (%)
对比试件平均值	0	3.5	100	7.50	100
B ₅	1046	加固前已开裂	-	4.01	53.5
B ₆	1046	9	257	3.81	50.8
B ₇	1046	8	229	4.23	56.3
B ₈	588	5	143	4.16	55.4
B ₉	1438	11	314	2.24	29.8

从试验结果可以看出,预应力碳纤维布加固的受弯试件的开裂荷载较非预应力碳纤维布加固的试件要有显著提高,并且提高幅度与预应力水平相对应。在使用荷载范围内的挠曲变形较非预应力试件有非常明显的减小,抗弯刚度得到了极大提高。试验结果表明,本文设计的预应力碳纤维布加固受弯构件的施工机具与施工工艺能够有效的对碳纤维布进行张拉,成功的对受弯构件进行外贴预应力加固。相信本文的工作会对预应力碳纤维布加固混凝土结构技术的实用化起到促进作用。

参考文献:

- [1] 吴淑梅. 结构碳纤维加固技术施工工法[M]. 建筑技术, 2000, 31(6).
- [2] 吴刚, 郭正兴, 张继文. 碳纤维复合材料加固混凝土结构技术及施工要点[J]. 建筑技术, 2000, 31(6).
- [3] 汪长安, 黄勇, 孙哲峰. 单向碳纤维布用于混凝土受弯构件的加固和修复[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(2).