

外贴预应力CFRP片材加固RC梁施工 关键问题分析

蒋鑫¹ 秦想姣²

(1 长沙理工大学土木与建筑学院 湖南长沙 410114)

(2 武汉科技大学城市学院土木系 湖北武汉 430083)

摘要:体外粘贴预应力CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer 以下简称CFRP) 加固钢筋混凝土 (RC) 梁, 施工技术水平对加固效果起到至关重要的作用, 因此, 合理地控制好施工过程具有重要意义。本文针对施工过程中关键问题的已有研究成果进行了总结和理论分析, 为今后的设计和应用提供参考。

关键词: 预应力CFRP片材 加固 RC梁 施工

1 前言

加固RC梁的过程中, 对CFRP片材施加预应力, 可以提高CFRP的强度利用率, 梁的极限承载力以及梁在正常使用阶段的性能。但是, 要实现理想的加固效果, 需要合理控制施工过程。施工工艺, 张拉控制应力, 锚固措施以及预应力损失都是施工中的关键问题, 本文针对这几方面的已有成果进行了总结和分析。

2 预应力施工工艺

CFRP的预应力施工工艺较多, 常见的有如下几种:

(1) 反拱法。先将CFRP片材用粘结树脂粘贴到混凝土受拉面, 在粘结力还很小时, 利用千斤顶在跨中位置将拱向上升起, 或者是在梁底施加均布荷载将梁向上升起, 待其出现允许最大裂缝时停止上升, 待树脂固化后卸载, 在梁自重或上部荷载作用下, CFRP产生间接的预应力。

反拱法适合用于布材的预应力施加, 但是受裂缝宽度的限制使得顶升幅度较小, 获得的预应力水平较低, 且不能反映预应力值, 过程不易控制。

(2) 利用独立于加固梁的张拉设备直接张拉。通过独立于待加固混凝土梁的张拉设备 (设备可固定于梁端的混凝土柱或台座) 张拉CFRP, 在CFRP上涂刷树脂后将其粘贴于梁底, 待树脂固化后卸去张拉设备, 室内加固试验中可以先将梁倒置再粘贴张拉好的CFRP片材。

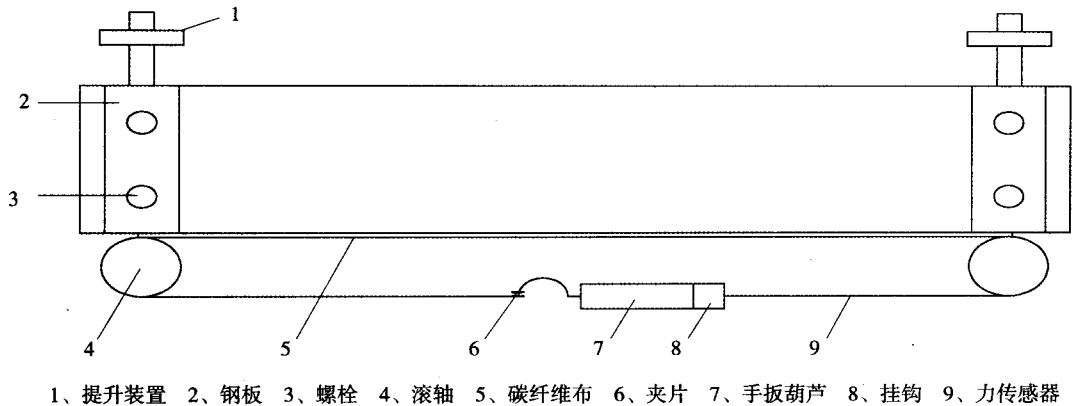
该法可以用于布材和板材, 但是只能限于试验室, 在实际工程中必须将张拉设备置于加固梁以外的反力支座或专设张拉台, 受场地限制难以实现。

(3) 利用固定于梁的张拉设备直接张拉。该法由后勤工程学院率先采用^[1], 它是利用安装于混凝土两端的滚轴将CFRP布做成回路 (如图1), CFRP布的两端分别与手扳葫芦和力传感器相连, 利用手扳葫芦收紧从而给CFRP施加了预应力, 同时使梁起反拱。

该法巧妙利用了加固梁和张拉设备相互作用, 构成了预应力加固系统, 便于现场加工, 并且可以通过传感器反映预应力值, 从而便于控制张拉力的大小。但是该法只适用于布材, 不能用于板材; 并且滚轴下面的多余布材不能充分利用。

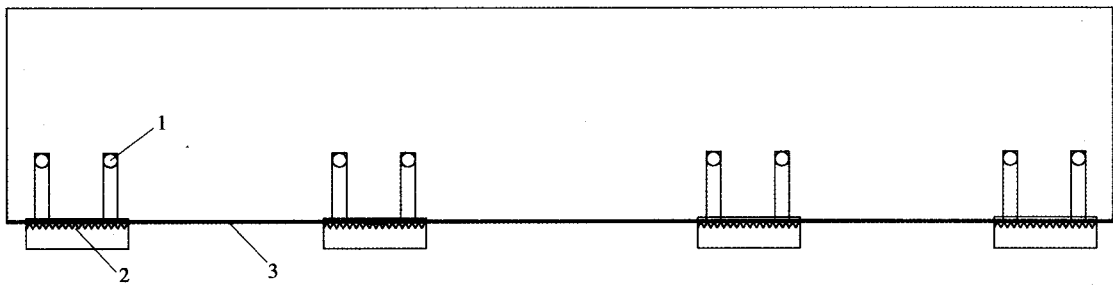
(4) 用波形齿类夹具直接张拉。该法已经进行过试验研究^[2], 加固效果较好。它是先将波形齿类夹具锚的下波形齿板以一定的间距直接安装在被加固的梁上 (如图2), 然后将刚浸渍过树脂的CFRP片材粘贴在被加固的梁表面上, 再先中间后两端地逐步将CFRP片材锚固于被加固的梁表面上固接的波形齿上板上, 两端固定后, 中间锚具锚固的CFRP片材会强迫CFRP几何变形产生伸长, 从而在CFRP上建立预应力。

该法施工工艺简便, 适用于布材。但是在梁



1、提升装置 2、钢板 3、螺栓 4、滚轴 5、碳纤维布 6、夹片 7、手扳葫芦 8、挂钩 9、力传感器

图1 固定于梁的预应力施加装置



1、螺栓 2、波形齿夹具 3、碳纤维布

图2 串联波形齿夹具锚预应力装置

端部弯剪区打孔固定锚具对梁结构本身造成一定损伤,同时施加的预应力不易控制,造成理论分析困难。

(5) 利用CFRP长度随温度变化的特性直接张拉。CFRP有热缩冷胀的特性,可以利用CFRP片材与混凝土之间的较大温度变形差来实现预应力的施加,适当降温,混凝土构件会缩短而CFRP伸长,待伸长至要求长度时将其粘贴到混凝土构件上,恢复正常温度时CFRP会相对缩短,梁相对伸长,从而建立预应力。

该法可用于板材和布材,但是过程难以实现,预应力水平较低。

3 张拉控制应力

张拉控制应力的大小对加固构件的破坏模式和加固效果的影响十分明显。应力过大会导致CFRP片材中的单丝纤维断裂,应力松弛也会随着张拉力的增大而增大,从而发生片材端部粘贴区域剥离失效,锚固端也会因剪力过大而破坏;过小会使加固效果不明显。

国外学者^[3]最早提出在保证预应力体系不发生锚固破坏的条件下得到最大预应力水平的分析模型,并且在后来进行了试验验证^[4],结果比较接近。

国内学者^[5]根据张拉值过大可能产生的三种不同破坏模式考虑,对预应力张拉控制值进行了如下推算:

第一种模式,放张后,CFRP回缩,对梁结构产生预压力,可能导致混凝土结构上部受拉过大产生拉裂缝。在假设RC梁上部不产生微裂缝,并处于弹性阶段,应力应变的分布符合平截面假定的条件下,由力平衡,得到容许张拉应力为:

$$[\sigma_p] = \frac{f_{tu}}{\beta} \left\{ \gamma + \left[\frac{h}{2} (1-\beta) + \frac{\alpha A_s}{b} \left(1 - \frac{1+\beta}{h} a \right) - \frac{\alpha A_s'}{b} \left(\beta - \frac{1+\beta}{h} a \right) \right] / t \right\} \quad (1)$$

其中 f_{tu} 为混凝土的极限抗压强度。 $\beta = \sigma_c' / \sigma_c = h_1' / h_1$, $\alpha = E_s / E_c$, $\gamma = E_{cf} / E_c$, σ_c 和 σ_c' 分别

为混凝土受拉区和受压区的应力； h_1 和 h_1' 分别为混凝土受拉区和受压区的高度； E_s 、 E_c 和 E_{cf} 分别为钢筋、混凝土和CFRP的弹性模量； A_s 和 A_s' 分别为受拉钢筋和受压钢筋的面积； a 和 h 分别为混凝土保护层的厚度和混凝土的高度； b 和 t 分别为CFRP的宽度和厚度。

第二种模式，放张后，可能会因粘贴界面剪应力过大而发生剥离。在上述第一种模式中的三种假设条件下，另外再假定界面层剪应力不随厚度变化，并且不考虑RC梁自重对界面应力的影响。通过运用弹性理论推算得到容许张拉应力为：

$$[\sigma_{cf}] = \tau_f t_a E_{cf} / G \quad (2)$$

τ_f 为粘贴界面层的剪切强度； t_a 为界面层厚度； G 为界面层的剪切模量。

然而在实际结构中，粘贴界面的受力较为复杂。已有不少学者对此进行了深入的研究。日本茨城大学^[6]基于破坏力学概念对界面剪切应力进行了推导，并用有限元方法进行了验证，结果吻合良好。国内学者^[7]以双线性CFRP-混凝土间粘结滑移本构关系为基础，根据弹性理论建立了放张后CFRP片材粘结端部的粘结应力分布模型。为张拉控制应力值的选取提供了参考。关于界面应力还亟待进一步探讨。

第三种模式，预应力过大导致CFRP先于钢筋破坏，这是工程中要特别避免的问题。仍然根据第一种模式所做的假定，可以由力平衡推得：

$$[\sigma_{cf}] = \sigma_{pe} \left\{ 1 + t / \left[\frac{h}{2} (1 - \beta) + \frac{\alpha A_s}{b} \left(1 - \frac{1 + \beta}{h} a \right) - \frac{\alpha A_s'}{b} \left(\beta - \frac{1 + \beta}{h} a \right) \right] \right\} \quad (3)$$

其中 σ_{pe} 为有效应力（会在后面详细说明）。但是该式只能用于加固矩形梁的计算，T型梁的计算还应考虑到截面剪力滞效应，并分第一类T梁和第二类T梁来推导。这些将在以后的研究中讨论。

综合所有已得结论，张拉应力控制值大约为50%~70%CFRP抗拉强度。

4 锚固措施

已有研究表明^[8]，锚固对加固梁的疲劳破坏有抑制作用，并且还影响极限荷载和破坏模式。根据锚固的位置可以分为端部锚固和加固梁梁段锚固，一般加固梁中是两种锚固方式综合使用。

端部锚固中常见的有CFRP布材U型锚固，它能比较有效地防止梁端的粘结破坏。另一种常见的端部锚固是机械夹具锚固，它可以保证CFRP端部对预应力的释放有足够锚固。

梁段锚固中常见的有CFRP布材U型锚固，试验研究表明^[9]，它不仅可以起到锚固作用，还能增强被加固梁的抗剪性能，但是，在荷载达到一定水平后，其内侧会发生剥离，所以U型箍的数量和施加位置还有待进一步研究。另一种常见的梁上锚固是用螺栓和槽钢（或图2中提到的波形齿具夹）锚固。这种方式不会发生内侧剥离，可承受的荷载水平高，但是，在梁上打孔会对梁结构造成损伤，影响结构的承载力。

5 预应力损失

预应力损失是不可避免的，合理计算预应力损失对加固效果的实现有重要意义。预应力损失值与张拉设备、施工工艺，材料属性等因素有关。

根据已有的研究成果^[10]，预应力损失可以分为施工阶段产生的损失和结构使用期内的长期损失。而这些损失又因加固材料的不同而不同。

对于布材，施工阶段的损失包括放张前的损失和放张后的损失，放张前的损失主要为：装置变形和碳纤维与张拉装置之间的摩擦所造成的损失，还有粘贴布材时由于刷子上下震动消耗能量所产生的损失。将此损失记为 σ_{l1} 。试验表明它占初始应力的1%~3%。

在布材涂胶完毕粘贴至加固梁梁底时，提升过程中由于能量损耗会产生预应力损失，记为 σ_{l2} 。试验表明它占初始应力的7%~8%。

σ_{l1} 和 σ_{l2} 的大小与张拉设备，施工工艺有关，它可以通过研制较好的装置，合理控制过程将值减小。放张后的损失为主要损失。

放张固化以后，梁底与碳纤维布粘结在一起，两者会共同变形，混凝土的弹性压缩及碳纤维的收缩造成了预应力的损失。在粘贴多层布材

加固的结构中,下一层布的放张会对上一层的预应力产生影响。记为 σ_{I3} 。根据已有的试验研究结果和简化模型, σ_{I3} 的表达式为:

$$\sigma_{I3} = k \alpha_{E,cf} \frac{b_{cf}}{t_{cf}} \sigma_p \quad (4)$$

式中 k 为锚固影响系数, $\alpha_{E,cf}$ 为CFRP布材与混凝土的弹性模量比值, b_{cf} 为CFRP布材的宽度, t_{cf} 为CFRP布的厚度, σ_p 为张拉设计值 σ_{con} 扣除 σ_{I1} 和 σ_{I2} 后的应力值,即:

$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{I1} - \sigma_{I2} \quad (5)$$

其中 k 因粘贴层数的不同而取不同值。

$$k = \begin{cases} 5.6b_u^{-0.23} \times 10^{-6} & (\text{单层布}) \\ (-0.0001b_u^{-2} + 0.04b_u - 1.93) \times 10^{-6} & (\text{多层布}) \end{cases} \quad (6)$$

b_u 为端布U型锚的宽度。

加固后结构在使用过程中,材料的蠕变,粘结材料的剪切变形,混凝土的收缩和徐变都会引起的长期损失。记为 σ_{I4} 。

对于板材,它的预应力施加一般是采用反拱法或独立于梁的张拉设备张拉,故张拉装置变形产生的预应力损失影响很小,可以忽略。所以板材的预应力损失主要为放张后混凝土弹性压缩和碳纤维收缩产生损失,以及材料属性所引起的长期损失。

值得注意的是,对于预应力CFRP片材加固服役一段时间的RC梁,由于混凝土的收缩徐变大部分基本完毕,所以长期损失中混凝土收缩徐变产生的预应力损失可以不计。

将预应力张拉设计值 σ_{con} 扣除各阶段产生的损失后,材料中还存在的预应力称为有效应力。

即3中所提到的 σ_{pe} 。

则对于布材,施工过程中:

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{I1} - \sigma_{I2} - \sigma_{I3} \quad (7)$$

长期过程中:

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{I1} - \sigma_{I2} - \sigma_{I3} - \sigma_{I4} \quad (8)$$

对于板材,施工过程中:

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{I3} \quad (9)$$

长期过程中:

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{I3} - \sigma_{I4} \quad (10)$$

6 结论

预应力CFRP加固技术目前已经取得了飞速发展,但是还存在一些不足,通过比较分析,提出如下建议供今后研究与设计参考:

1) 加强与其他领域的合作,优化材料性能。CFRP板材是由单丝纤维浸润在基体树脂里再拉挤成型,在试验过程中如果控制不当会很容易发生撕裂,研究出更好的整体性良好板材可以使CFRP应用更加广泛和方便;此外,粘贴树脂一般要2~3d才能固化,对于重要交通干线上的桥梁,封闭交通会造成经济损失;并且界面物质粘结性能直接关系到被加固梁结构的耐久性,所以必须加强合作,研制出优质CFRP板材和界面粘结物。

2) 进一步完善计算理论。根据试验研究结果,结合计算机有限元分析,进一步对预应力损失、界面应力进行推导。

3) 将一些研究成果进行工程应用。目前大多数研究成果都是室内试验研究得出,需要加强实际应用来验证。

参考文献

- [1] 飞渭,江世永,曾祥蓉. 体外预应力FRP片材加固混凝土结构的研究现状及发展[J]. 后勤工程学院学报, 2006(4).
- [2] 卓静,李唐宁. 波形齿夹具在碳纤维片材加固技术及预应力技术中的应用[J]. 公路交通技术, 2005(增刊)
- [3] Triantafillou, Deskovic. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior [J]. Journal of Engineering 1991, 117 (7): 1652 - 1672
- [4] Triantafillou, Deskovic. Strengthening of concrete structure with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. ACI Structural Journal, 1992, 89 (3): 235 - 244
- [5] 郭馨艳,黄培彦,郑小红. 预应力CFRP容许张拉预应力值的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009 37 (6):96-100
- [6] 牛赫东,吴智深. 预应力FRP纤维增强布粘结补强技术中的界面剪切应力传递[J]. 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流论文集[C], 昆明: 岳清瑞, 2002
- [7] 彭晖,尚守平,刘兴彦. 预应力碳纤维片材放张后端部粘结应力分析[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(2): 66-70
- [8] Wright. Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete slabs in fatigue [J]. Advances in Structural Engineering, 2003, 6(3): 175 - 182
- [9] 滕锦光,陈建飞, S.T.史密斯,等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [10] 杨勇新,李庆伟,岳清瑞. 预应力碳纤维布材加固混凝土梁预应力损失试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(4): 5-8,18