

文章编号: 1008-1542(2011)02-0177-06

混凝土受弯构件加固中碳纤维的设计和應用

魏书华¹, 王晓君², 陈雪英³

(1. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北科技大学信息科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 3. 石家庄市第六建筑工程有限公司, 河北石家庄 050000)

摘要:聚丙烯腈基碳纤维是一种用于混凝土构件加固的新型建材, 它的密度只有钢筋的 1/4, 抗拉强度却是钢筋的 10 倍左右, 而且耐腐蚀性、耐久性很好, 应用价值受到业内人士的认可。对聚丙烯腈基碳纤维片材加固混凝土受弯、受剪、混凝土柱抗震加固的设计及施工应用进行了详细介绍和研究, 为更好地在混凝土加固工程中应用提供了参考。

关键词:聚丙烯腈基碳纤维; 混凝土; 加固; 力学性能; 造价

中图分类号: TU375 文献标志码: A

Design and application of carbon fiber in reinforcing concrete flexural member

WEI Shu-hua¹, WANG Xiao-jun², CHEN Xue-ying³

(1. Department of Architecture Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 3. Shijiazhuang the 6th Construction Engineering Company Limited, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: Polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fiber is a new building material used for reinforced concrete. Its density is only one fourth of reinforcing steel bars, while its tensile strength is 10 times of the steel bars, and its properties are better. Its application value is admitted by the industry. The flexural capacity and the shear capacity of PAN-based carbon fiber composite reinforced concrete, and the design and construction application of aseismic reinforced concrete column are detailedly introduced.

Key words: PAN carbon fiber; concrete; reinforcing; mechanics performance; cost

碳纤维根据生产用的原材料及生产方式的不同, 可分为聚丙烯腈基碳纤维和沥青基碳纤维。聚丙烯腈基碳纤维是高强度型碳纤维, 而沥青基碳纤维则是高弹性型碳纤维。混凝土构件加固中常用的碳纤维片材为聚丙烯腈基碳纤维。

碳纤维片材的弹性模量比普通钢筋稍高, 但它的抗拉强度却是普通钢筋的 10 倍左右。另外, 加固混凝土用的碳纤维片材的质量很轻, 其密度只有普通钢材的 1/4, 而且它还有很好的耐腐蚀性、耐久性。碳纤维片材加固修补混凝土结构, 目前正成为国内外土木工程中大力推广的一种新技术^[1]。

1 聚丙烯腈基碳纤维的种类及适用范围

聚丙烯腈基碳纤维在混凝土结构加固中常用的片材有 2 种: 碳纤维板和碳纤维布。碳纤维板的性能指

收稿日期: 2010-09-13; 修回日期: 2011-01-05; 责任编辑: 冯 民

作者简介: 魏书华(1970-), 女, 河北曲周人, 工程师, 硕士, 主要从事土木工程方面的研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

标应按板的截面面积计算,截面面积取实测厚度×宽度,其中板截面含树脂层。碳纤维布的抗拉强度应按纤维的净截面面积计算,净截面面积取碳纤维布的计算厚度×宽度。

碳纤维片材适用于房屋建筑和一般构筑物混凝土结构加固的设计、施工。采用粘贴碳纤维片材对混凝土结构加固时,应使用碳纤维片材、配套树脂类粘结材料和表面防护材料,且加固结构长期使用的环境温度不应高于 60 ℃。

常用碳纤维片材截面面积、理论计算厚度和单位面积的碳纤维质量的关系见表 1。碳纤维片材的主要力学性能指标见表 2^[2]。

表 1 常用碳纤维布的截面面积、计算厚度和单位面积碳纤维质量

Tab.1 Section square, calculation thickness and unit quality of carbon fiber

单位宽度的截面面积/(mm ² ·m ⁻¹)	密度/(g·m ⁻²)	纤维单位面积质量/(g·m ⁻²)	计算厚度/mm
111	1.8×10 ³	200	0.111
167		300	0.167
250		450	0.250
333		600	0.333

2 加固混凝土构件中碳纤维片材的设计

表 2 碳纤维片材的主要力学性能指标

Tab.2 Main mechanical performance of carbon fiber sheet

性能项目	碳纤维板	碳纤维布
抗拉强度标准值 f_{cfk} /MPa	≥2 000	≥3 000
弹性模量 E_{cf} /MPa	≥1.4×10 ⁵	≥2.1×10 ⁵
伸长率/%	≥1.5	≥1.5

2.1 聚丙烯腈基碳纤维加固构件的受弯计算

2.1.1 碳纤维片材加固混凝土受弯构件的破坏形态

- 1) 少筋破坏 钢筋屈服后碳纤维片材拉断,而受压区混凝土尚未破坏。
- 2) 适筋破坏 受拉钢筋屈服,受压区混凝土同时被压坏,碳纤维片材也达到极限拉应变。
- 3) 超筋破坏 在受拉钢筋达到屈服前,受压混凝土被压坏。
- 4) 粘结破坏 碳纤维片材与混凝土基层之间剥离破坏。

试验中较常出现且很难准确预估何时发生的是粘结破坏。通常用保证施工质量的方法来避免这种粘结破坏的发生。

2.1.2 碳纤维片材加固混凝土受弯构件计算的基本假定

- 1) 混凝土、钢筋的应力-应变关系按现行的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)有关规定选取。
- 2) 截面平均应变平截面的假定。
- 3) 聚丙烯腈基碳纤维片材的拉应力 σ_f 取碳纤维片材的拉应变 ϵ_f 与弹性模量 E_{cf} 的乘积。
- 4) 在受弯承载能力达到极限状态前,混凝土与聚丙烯腈基碳纤维片材之间不会出现粘结剥离破坏。

2.1.3 聚丙烯腈基碳纤维片材加固钢筋混凝土构件正截面受弯承载力应力分析

分析结果见图 1 和图 2。

2.1.4 矩形截面受弯承载力计算公式

- 1) 当 $x \leq \xi_{fb}h$ 时,

$$M \leq f_y A_s (h_0 - \xi_{fb} h / 2) + E_{cf} [\epsilon_f] A_{cf} h (1 - \xi_{fb} / 2). \quad (1)$$

- 2) 当 $\xi_{fb} h < x < \xi_b h_0$ 时,

$$M \leq f_c b x (h_0 - x / 2) + f'_y A'_s (h_0 - a') + E_{cf} \epsilon_f A_{cf} (h - h_0). \quad (2)$$

式中 x 和加固面上聚丙烯腈基碳纤维片材的拉应变 ϵ_f 由下式计算确定:

$$\begin{aligned} f_c b x &= f_y A_s - f'_y A'_s + E_{cf} A_{cf} \\ x &= 0.8 \epsilon_{cu} h / (\epsilon_{cu} + \epsilon_f + \epsilon). \end{aligned} \quad (3)$$

- 3) 当 $x < 2a'$ 时,

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a') + E_{cf} [\epsilon_f] A_{cf} (h - a'), \quad (4)$$

式中: x 为聚丙烯腈基碳纤维片材加固混凝土构件时等效矩形应力图形中的混凝土受压区高度; M 为总弯矩设计值(含初始弯矩); f_y 为加固构件受压钢筋抗压强度设计值; f'_y 为加固构件受拉钢筋抗拉强度设计值;

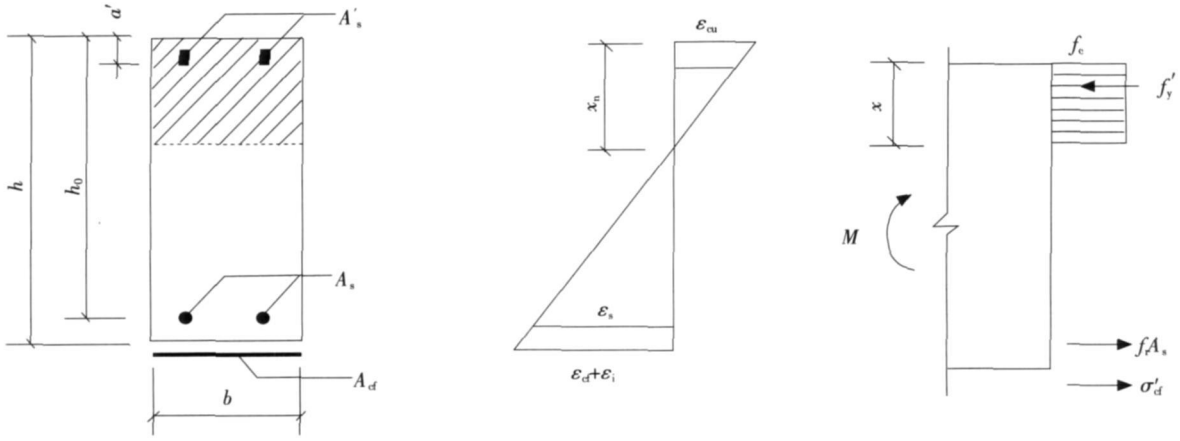


图 1 $x > \xi_{cib}h$ 时的应力图

Fig.1 Stress figure when $x > \xi_{cib}h$

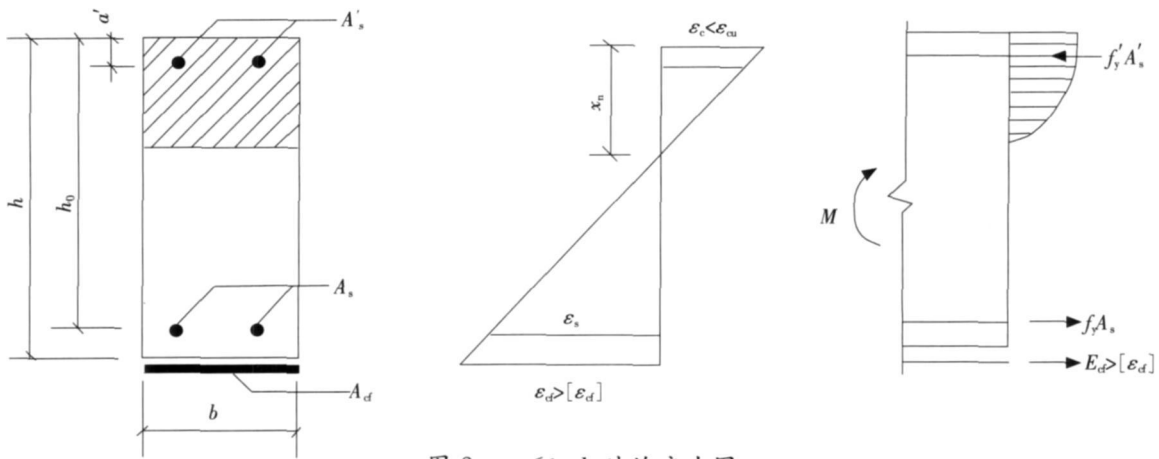


图 2 $x < \xi_{cib}h$ 时的应力图

Fig.2 Stress figure when $x < \xi_{cib}h$

f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; E_d 为聚丙烯腈基碳纤维片材的弹性模量; A'_s 为加固构件中受压钢筋截面面积; A_s 为加固构件中受拉钢筋截面面积; A_d 为构件粘贴的聚丙烯腈基碳纤维片材截面面积; ξ_{cib} 按 $\frac{0.8\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + [\epsilon_{ef}] + \epsilon}$ 计算取值^[2]; ϵ_{cu} 为 0.003 3(混凝土极限压应变); ϵ 为 0(不考虑二次受力时), 若考虑二次受力影响时, 按相关规范规定计算; ϵ_{fu} 为聚丙烯腈基碳纤维的极限拉应变; $[\epsilon_{ef}]$ 为聚丙烯腈基碳纤维的允许拉应变, 按 $k_m \epsilon_{fu}$ 计算, 且小于等于碳纤维片材极限拉应变的 2/3 和 0.01 中的较小值; ϵ_d 为聚丙烯腈基碳纤维拉应变; k_m 为聚丙烯腈基碳纤维片材厚度折减系数, 按 $1 - \frac{n_d E_d t_d}{420000}$ 计算^[2], 其中 n_d 为聚丙烯腈基碳纤维片材粘贴的层数, t_d 为单层聚丙烯腈基碳纤维片材的厚度; h, b 为加固混凝土构件的截面高度、宽度; h_0 为加固混凝土构件截面的有效高度; a' 为加固混凝土构件中混凝土受压区边缘到受压钢筋截面重心的距离。

2.1.5 正截面受弯承载力计算时的其他要求

- 1) 粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材时, 碳纤维片材的纤维方向应沿着加固构件加固处的受拉方向。
- 2) 加固后受弯承载力的提高幅度不宜超过 40%。
- 3) 受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$, 其中 ξ_b 按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 的规定确定。
- 4) 对受弯加固的构件还应验算构件的受剪承载力, 避免受剪破坏先于受弯破坏发生。

2.1.6 受弯计算时粘结延伸长度 l_d 和锚固措施

- 1) 聚丙烯腈基碳纤维片材粘贴宜延伸至支座边缘。集中荷载作用处应设碳纤维片材 U 型箍或横向碳纤维片材压条。碳纤维片材充分利用截面到它的切断位置的距离 \geq 粘结延伸长度 l_d , 而且切断位置应延伸到不需要碳纤维片材截面处再 ≥ 200 mm。粘结延伸长度 l_d 的计算公式为

$$l_d = \frac{E_{cf} \varepsilon_{cf} \cdot A_{cf}}{\tau_{cf} \cdot b_{cf}}, \quad (5)$$

式中: τ_{cf} 为 0.5 MPa; b_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材的宽度。

如果片材延伸到加固混凝土构件的支座边缘时还不满足上述规定, 则采取如图 3、图 4 所示的锚固措施。

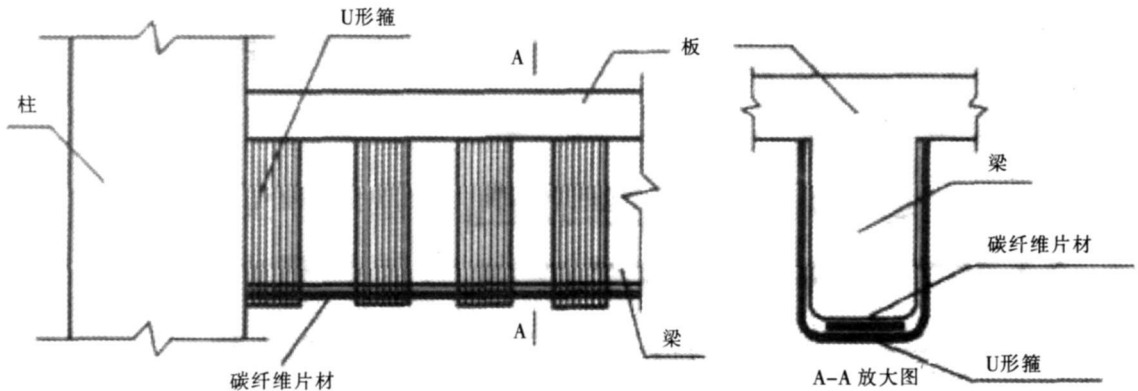


图 3 碳纤维片材 U 型箍锚固

Fig. 3 U-shaped anchor of carbon fiber sheet

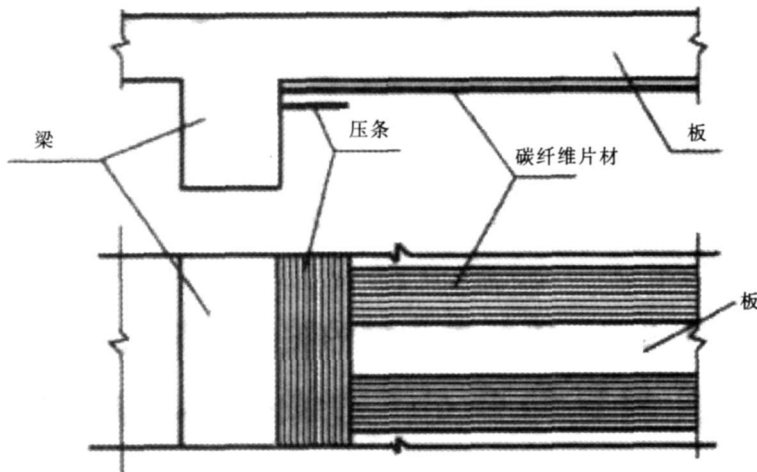


图 4 碳纤维片材压条

Fig. 4 Pressing strip of carbon fiber sheet

另外, 当采用碳纤维板时, 应在其延伸长度端部采取可靠的机械锚固措施。

2) 对梁、板负弯矩区进行受弯加固时, 碳纤维片材的截断位置粘结延伸长度 l_d 同正弯矩区受弯加固公式, 而且对板 $l_d \geq 1/4$ 板跨度, 对梁 $l_d \geq 1/3$ 梁跨度。

聚丙烯腈基碳纤维片材对框架梁负弯矩区加固时, 需有可靠支座连接或锚固措施。当碳纤维片材需绕过柱时, 宜在梁侧 $4h_f$ 范围内粘贴, 见图 5。

2.2 钢筋混凝土加固构件粘贴碳纤维片材的受剪计算

2.2.1 钢筋混凝土梁受剪加固承载力计算

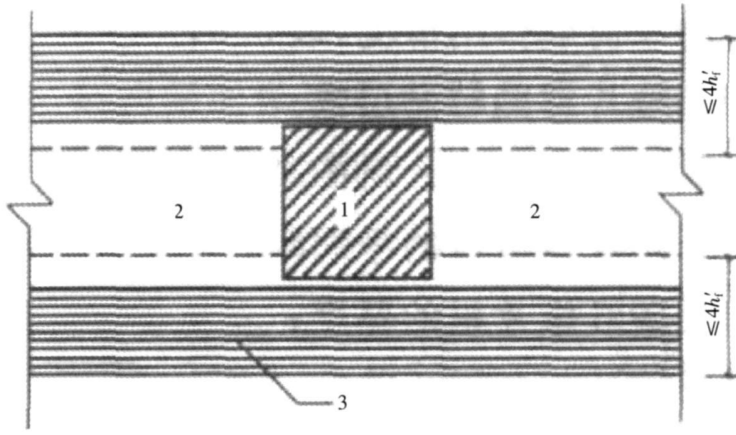
聚丙烯腈基碳纤维片材加固梁的斜截面受剪承载力计算式为

$$V_b \leq V_{bre} + V_{bfc}, \quad (6)$$

$$V_{bfc} = \varphi \frac{2n_{cf} \omega_{cf} l_{cf}}{(s_{cf} + \omega_{cf})} \varepsilon_{cfv} E_{cf} h_{cf}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cfv} = \frac{2}{3} (0.2 + 0.12 \lambda) \varepsilon_{fu}. \quad (8)$$

式(6)一式(8)中: V_{bre} 为原构件混凝土梁的受剪承载力^[3]; V_b 为加固后混凝土梁的剪力设计值; V_{bfc} 为加



1—柱; 2—梁; 3—板顶面碳纤维片材; h_f —板厚

图 5 负弯矩区加固时梁侧有效粘贴范围平面图

Fig. 5 Plan of effective paste range on beam side in negative moment region reinforcing

固后聚丙烯腈基碳纤维片材需追加的剪力; ϵ_{cf} 为受剪极限状态时聚丙烯腈基碳纤维片材的应变; φ 为聚丙烯腈基碳纤维片材受剪加固形式系数(封闭粘贴取 1.0, U 形粘贴取 0.85, 侧面粘贴取 0.70); λ_b 为混凝土受剪构件剪跨比(集中荷载作用时按 a/h_0 计算, 取 $\lambda_b > 3.0$ 时, $\lambda_b = 3.0$; 取 $\lambda_b < 1.5$ 时, $\lambda_b = 1.5$; 均布荷载考虑时, 按 3.0 取值); a 为集中荷载作用点到支座边缘的距离; s_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材间的净间距; t_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维单层片材的厚度; ω_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材的条宽; n_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材的粘贴层数; h_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材侧面粘贴时的高度。

2.2.2 钢筋混凝土柱粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材的受剪加固

聚丙烯腈基碳纤维片材加固柱的受剪承载力计算式为

$$V_c \leq V_{cre} + V_{cf}, \tag{9}$$

$$V_{cf} = \varphi \frac{2n_{cf} \omega_{cf} t_{cf}}{(s_{cf} + \omega_{cf})} \epsilon_{cf} E_{cf} h_{cf}, \tag{10}$$

$$\epsilon_{cf} = \frac{2}{3} (0.2 - 0.3n + 0.12\lambda) \epsilon_{fn}. \tag{11}$$

式(9) - 式(11)中: V_{cre} 为原构件钢筋混凝土柱的受剪承载力^[3]; V_c 为加固后混凝土柱的剪力设计值; V_{cf} 为加固后聚丙烯腈基碳纤维片材需追加的剪力; n 为柱的轴压比, 取 $N/f_c A$ (N 为柱轴向压力设计值, A 为柱截面面积); λ 为柱的剪跨比, 对于框架柱取 $H_n/2h_0$, 当 λ 大于 3.0 时取 3.0, 当 λ 小于 1.0 时取 1.0 (H_n 为框架柱净高度)。

2.2.3 受剪加固时碳纤维片材的粘贴方式

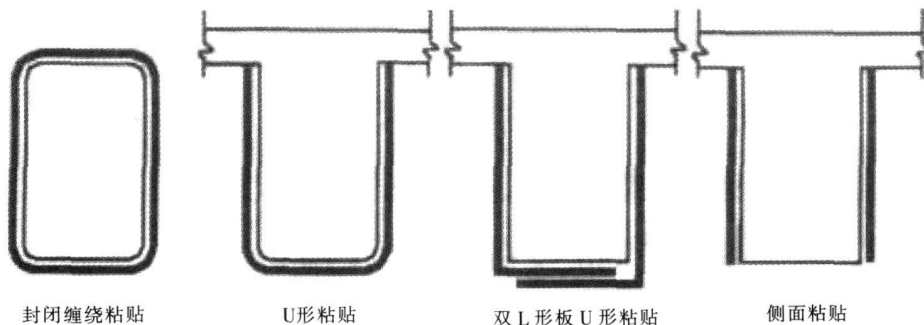


图 6 粘贴方式

Fig. 6 Paste mode

1) 在图 6 所示粘贴方式中, 对碳纤维布应优先采用封闭粘贴形式, 也可采用 U 形粘贴、侧面粘贴。对碳纤维板, 可用双 L 形板 U 形粘贴形式。

当采用 U 形和侧面粘贴时,宜按构件高度粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材。对于 U 形粘贴,宜在上端粘贴纵向碳纤维片材压条;当采用侧面粘贴时,粘贴的聚丙烯腈基碳纤维片材的上下端均应加纵向碳纤维片材压条。

2) 受剪加固时,粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材的纤维方向宜与构件轴向垂直。

2.3 粘贴碳纤维片材对柱的抗震加固计算

2.3.1 钢筋混凝土柱的加固承载力计算

柱端箍筋加密区的总折算体积配箍率应按式(12)计算:

$$\rho_v = \rho_{sv} + v \frac{2n_{cf} \omega_{cf} t_d (b+h) f_{cf}}{(s_{cf} + \omega_{cf}) bh f_{yv}} \quad (12)$$

式中: b , h 为柱的截面宽度、高度; ρ 为总折算体积配箍率; ρ_{sv} 为按箍筋范围内核心截面计算的体积配箍率; v 为碳纤维片材的有效约束系数,取 0.45(轴压比大于 0.50 且加固时未卸载时取 0.36); f_{cf} 为聚丙烯腈基碳纤维片材的抗拉强度设计值,取 $f_{cf} / 1.1$; f_{yv} 为箍筋的抗拉强度设计值^[4]。

ρ 还应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》对柱端箍筋加密区体积配箍率的要求。

2.3.2 柱抗震加固时碳纤维片材的粘贴要求

1) 抗震加固时,聚丙烯腈基碳纤维片材应采用封闭式粘贴方式。

2) 在柱的箍筋加密区,聚丙烯腈基碳纤维片材宜连续布置,各条带搭接位置应相互错开,且片材条带的搭接长度应 ≥ 150 mm。

3 碳纤维片材在施工过程中的应用

1) 按设计要求的尺寸裁剪碳纤维布。

2) 按粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材的施工工艺进行粘贴加固施工:修复混凝土构件表面—滚筒刷底层树脂—顺纤维方向粘贴聚丙烯腈基碳纤维片材—最后一层布的表面均匀涂抹浸渍树脂—养护。

3) 当有特殊的表面防护时,除应符合相关规定外,还应保证该防护材料与聚丙烯腈基碳纤维片材之间可靠的粘结。

4 检验和验收

1) 采用聚丙烯腈基碳纤维片材和配套树脂类粘结材料对混凝土构件加固施工时,质检人员应严格按照相关文件的要求,认真检查每道工序的施工情况。发现问题,要及时进行修正,避免隐蔽工序中存在隐患,保证工程加固质量。

2) 聚丙烯腈基碳纤维片材粘贴加固中,要尽量避免空鼓情况的发生。当不可避免时,空鼓面积要符合相关文件规定的要求。

3) 检查空鼓情况的方法与粘贴瓷砖情况相似:用小锤轻敲粘贴完后的碳纤维片材表面或用手按压检查。当发现空鼓情况不符合要求时,可采用针管注胶方法修补^[5]。

为促进碳纤维片材加固混凝土结构技术的发展,做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量,用粘贴碳纤维片材加固混凝土结构时,应由对该加固方法熟悉的设计人员进行设计,并由专业施工队伍进行施工。

参考文献:

- [1] 岳清瑞. 我国碳纤维加固修复技术研究应用与展望[J]. 工业建筑(Industrial Construction), 2000, 31(10): 23-26.
- [2] CECS 146—2003, 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S].
- [3] 叶列平. 混凝土结构(上册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 林伟. 部分预应力混凝土连续梁桥施工过程中梁体纵向缩短的原因分析[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2010, 31(4): 368-374.
- [5] 魏书华. 新型建材碳纤维及其在加固混凝土结构中的应用[J]. 河北工业科技(Hebei Journal of Industrial Science and Technology), 2005, 22(3): 150-152.