

文章编号: 0451—0712(2005)12—0004—05

中图分类号: U445. 72

文献标识码: A

碳纤维加固钢筋混凝土 T 梁设计研究

赵志刚, 谭云亮

(山东科技大学资源与环境工程学院 青岛市 266510)

摘 要: 使用碳纤维对现有旧桥进行加固是一种高效、经济、安全的方法,本文分析了 T 形梁的 6 种破坏形态,提出了新的临界状态判别依据、碳纤维界限用量和混凝土受压区高度界限系数,提出了换算截面的计算方法,建立了基于现行规范的设计方法,并应用于实际工程,取得了满意效果。

关键词: 碳纤维; 钢筋混凝土 T 梁; 抗弯承载力; 加固

碳纤维增强塑料(CFRP)是一种性能优良的混凝土构件加固材料,它具有强度高、密度小、耐腐蚀、抗疲劳、施工方便等优点。目前,国际上在 CFRP 加固钢筋混凝土结构方面的研究已经达到相当的水平,广泛应用于屋架、桥梁的维修加固,取得了可观的经济效益。在这方面我国起步较晚,1997 年才开始研究和应用。研究主要集中在两个方面:(1)碳纤维加固混凝土梁的破坏特征,开裂承载力和极限承载力;(2)碳纤维加固混凝土梁的承载力计算方法。目前已有的计算方法,其共同的问题在于对于梁正截面承载能力极限状态的界定未达成共识,主要表现在碳纤维参与受力后梁的临界状态不明确,从而

导致所提出的计算方法不尽合理或与工程实际不符。同时,对于构件加固后的裂缝和挠度计算涉及较少。为此,本文在前人研究的基础上,分析和探讨了碳纤维加固钢筋混凝土 T 形梁正截面破坏的临界状态和破坏形式,提出了裂缝计算和变形计算的实用公式。

1 加固后钢筋混凝土梁变形与破坏特征分析

1. 1 基本假定

根据文献[1]和国内外 CFRP 加固混凝土抗弯构件的试验结果,正截面承载能力计算,采用如下基本假定。

收稿日期: 2005—06—06



Research on Influence of Cable Wind Load on Wind Action of Suspension Bridges

ZHANG Xin-jun, ZHANG Dan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: With an increase in span length of suspension bridges, the diameter of cables and the wind load acting on them increase consequently, which may has an unnegligible influence on the static and the dynamic wind action (mainly refers to the aerodynamic stability) of suspension bridges. In this paper, the model of wind load acting on the cables is established. By taking Runyang Bridge over the Yangtze River as example, influence of the cable wind load on the aerostatic effect and the aerodynamic stability of the bridge is analyzed. It is shown that the cable wind load affects remarkably the aerostatics of long-span suspension bridges, but its effect on the aerodynamic stability becomes negligible.

Key words: suspension bridge; cable wind load; aerostatic effect; aerodynamic stability

(1) 平截面假定。

(2) 不考虑混凝土的抗拉强度。

(3) 钢筋为理想弹塑性体, 应力应变关系满足下式关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \epsilon_s E_s, 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ \sigma_s &= \sigma_y, \epsilon_s > \epsilon_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_s 、 ϵ_s 为钢筋的应力、应变; E_s 为钢筋弹性模量; σ_y 、 ϵ_y 为钢筋的设计强度和屈服应变。

(4) 混凝土应力应变关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= f_c \left[\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \sigma_c &= f_c, \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_c 、 ϵ_c 为混凝土应力、应变; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; ϵ_0 为压应变峰值, 文献[1]取 0.002; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变, 文献[1]取 0.003。

(5) 纤维应力应变为线弹性关系。

(6) 碳纤维与混凝土之间始终保持完好粘结状态。

1.2 应变差对梁加固结果的影响

公路桥梁的一个显著特点是自重较大, 加固前在自重作用下, 截面受拉区的拉应力和拉应变较大。加固后, 新增加的 CFRP 片材并不立即参与受力, 而是在车辆荷载作用下, 随受拉区混凝土拉应变的不断增大而逐步参与受力, 即 CFRP 的应变始终与原结构混凝土受拉区边缘应变值保持一个不变的应变差。梁底的初始拉应变对梁的抗弯承载力有明显影响。加固设计时, 忽略 CFRP 的应变差, 将导致计算承载力偏大, 加固设计趋于不安全。因此, 用 CFRP 加固钢筋混凝土桥梁时, 应当考虑应变差的影响。

1.3 CFRP 加固混凝土梁正截面破坏的特征

文献[1]以控制最小配筋率避免少筋破坏, 以规定受压区界限高度系数防止超筋破坏。建立了基于适筋梁的正截面强度计算公式, 按此理论设计的梁的破坏特征是: 受拉钢筋首先达到屈服强度, 其应力保持不变而产生显著的塑性伸长, 直到受压区边缘混凝土的应变达到混凝土的极限压应变时, 受压区出现纵向水平裂缝, 随之压碎而破坏。这种梁破坏前, 梁的裂缝急剧开展, 挠度较大, 梁体产生较大的塑性变形, 因而有明显的破坏预兆。使用 CFRP 加固后的构件, 由于 CFRP 有效地参与了受力, 其裂缝和变形将会减小, 其承载力将会提高, 但是由于梁底可能的初始拉应变和碳纤维材质的不同, 最终的破

坏形式将比文献[1]中的情况复杂。设计时, 必须合理确定承载能力极限状态, 仔细分析计算构件的实际状态, 以保证结构具有足够的安全系数, 避免发生突然破坏。由于原有设计已经排除了少筋破坏, 使用碳纤维后应考虑以下 3 种可能的破坏特征: (1) 碳纤维首先断裂, 而后钢筋屈服, 混凝土压碎, 梁体破坏; (2) 钢筋屈服, 混凝土压碎, 梁体破坏; (3) 碳纤维不断裂, 钢筋不屈服, 混凝土压碎, 梁体破坏。最后一种破坏属于脆性破坏, 设计时应当避免。

1.4 碳纤维加固梁的临界破坏状态

根据以上关于碳纤维加固后钢筋混凝土梁破坏形态的分析, 可进一步确定界限破坏形态、混凝土受压区界限高度系数以及界限加固量。由于破坏时碳纤维已经全面参与受力, 此时的截面应变分布情况与普通的钢筋混凝土梁不同, 梁体破坏的临界状态应当是受压区混凝土达到极限压应变时, 梁底拉应变恰好达到碳纤维的极限拉应变, 这一应变数值小于不使用碳纤维加固的梁破坏时的梁底拉应变, 因此加固后的梁的临界受压区高度就会增大, 受压区高度界限系数也会增大, 因此在规定受压区高度界限系数时, 不能只考虑钢筋的强度和弹性模量^[1], 而且要考虑碳纤维的强度和弹性模量。发生临界破坏时, 碳纤维的计算用量即为界限加固量。

2 T 梁正截面强度计算方法

2.1 构件在自重作用下的初始拉应变计算

钢筋混凝土 T 梁在设计时, 自重所产生的内力在总的计算内力中占了较大的比例, 梁在自重作用下, 可认为处于带裂缝工作阶段, 梁底初始拉应变按下式计算:

$$\epsilon_i = \frac{M(h-x_0)}{E_c I_{01}} \quad (3)$$

式中: ϵ_i 为梁底初始拉应变; M 为自重弯矩; E_c 为混凝土弹性模量; I_{01} 为开裂后的换算截面惯性矩; $h-x_0$ 为受拉区边缘至换算截面中性轴的距离。

2.2 正截面强度计算

图 1 所示的第一类 T 形截面有以下 3 种破坏形态 (此时中和轴在受压翼缘内, 基本情况同宽度为 b_f 的矩形截面相同)。

(1) 碳纤维断裂。

碳纤维断裂是因为梁底初始拉应变过大, 钢筋很快达到屈服状态, 应变快速增加, 致使碳纤维达到极限拉应变, 此时受压区混凝土尚未压坏, 受压混

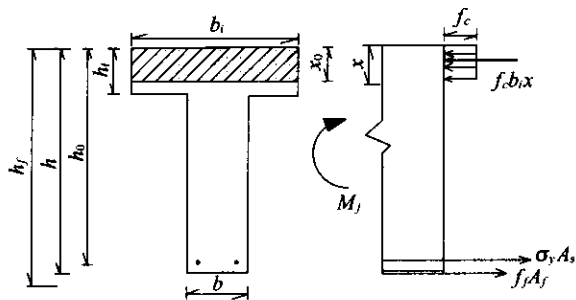


图1 第一类T形截面

土合力为 $f_y A_s + f_{fu} A_f$, A_s 为受拉钢筋面积, A_f 为碳纤维面积, f_y 为受拉钢筋屈服强度, f_{fu} 为碳纤维极限抗拉强度。

由于受压区混凝土未达到极限状态, 这样就不能采用等效矩形应力图来计算。为了计算受压混凝土合力, 就要根据混凝土的本构关系进行积分, 这样十分繁琐, 为此采用文献[3]中的近似方法。利用事先假定的 ϵ_c 查出系数 α_1 、 β_1 , 由 $x_0 = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{fu} + \epsilon_i} h_f$ 进行计算, 与由 $\alpha_1 x = \frac{f_y A_s + f_{fu} A_f}{b f_c}$ 计算的结果比较, 如不相符, 则由新的 ϵ_c 重新计算直至结果满足误差要求。这样可以求出 $x, x_0, \alpha_1, \beta_1$, 由下式确定抗弯承载力:

$$M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{fu} A_f \left(h_f - \frac{x}{2} \right) \quad (4)$$

式中: h_0 为受拉钢筋作用点到梁受压边缘距离; h_f 为碳纤维合力作用点到梁受压边缘距离; x 为受压区高度, 其余符号同前。

(2) 受拉钢筋屈服, 受压混凝土压碎。

此时碳纤维不会破坏, 其应力可由下式计算:

$$f_f = E_f \left[\left(\frac{\beta_1 h_f}{x} - 1 \right) \epsilon_{cu} - \epsilon_i \right] \quad (5)$$

由 $\alpha_1 f_c b_i x = A_s f_y + A_f f_f$ 计算受压区高度, 并由下式计算抗弯承载力:

$$M_u = \alpha_1 f_c b_i x \left(h_f - \frac{x}{2} \right) - f_y A_s (h_f - h_0) \quad (6)$$

式中: f_f 、 E_f 为碳纤维的应力、弹性模量, b_i 为T翼梁缘宽度, 其余符号同前。

(3) 受拉钢筋未屈服, 受压混凝土压碎。

此时钢筋达不到设计强度, 其应力可由下式计算:

$$\sigma_s = E_s \epsilon_{cu} \left(\frac{\beta_1 h_0}{x} - 1 \right) \quad (7)$$

受压区高度由 $\alpha_1 f_c b_i x = \sigma_s A_s + f_f A_f$ 计算, 并由下式计算抗弯承载力:

$$M_u = \alpha_1 f_c b_i x \left(h - \frac{x}{2} \right) + f_f A_f (h_f - h_0) \quad (8)$$

第二类T形截面, 受压区为T形, 可以将其分

解成2个矩形计算混凝土抗压承载力, 破坏形态有以下3种:

(1) 碳纤维断裂。

混凝土达不到极限强度, 此时:

$$\alpha_1 \beta_1 f_c b x_0 + \alpha_1 f_c (b_i - b) h_i = f_y A_s + f_{fu} A_f \quad (9)$$

式中: $x_0, \alpha_1, \beta_1, f_c$ 可以采用近似法计算, b 为T梁肋宽, 极限抗弯承载力可按式计算:

$$M_u = \left[\alpha_1 \beta_1 f_c b x_0 \left(h_f - \frac{\beta_1 x_0}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b_i - b) h_i \left(h_f - \frac{h_i}{2} \right) \right] - f_y A_s (h_f - h_0) \quad (10)$$

(2) 受拉钢筋屈服, 受压混凝土压碎。

由水平方向合力为0得:

$$\alpha_1 f_c b x + \alpha_1 f_c (b_i - b) h_i = A_s f_y + A_f f_f \quad (11)$$

与式(5)联立可求受压区高度 x , 按下式求解极限抗弯承载力:

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \cdot \left(h_f - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c ((b_i - b) h_i \cdot \left(h_f - \frac{h_i}{2} \right) - f_y A_s (h_f - h_0)) \quad (12)$$

(3) 受拉钢筋未屈服, 受压区混凝土压碎。

由水平方向合力为0得:

$$\alpha_1 f_c b x + \alpha_1 f_c (b_i - b) h_i = A_s \sigma_s + A_f f_f \quad (13)$$

其中 f_f, σ_s 可由已给出公式计算, 然后算出受压区高度, 再按下式求解极限抗弯承载力:

$$M_u = \alpha_1 f_c b_i x \cdot \left(h_f - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b_i - b) \cdot h_i \left(h_f - \frac{h_i}{2} \right) - \sigma_s A_s (h_f - h_0) \quad (14)$$

3 裂缝和挠度计算

3.1 裂缝计算

文献[1]中规定, 普通钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度按下式计算:

$$\delta_{fmax} = c_1 c_2 c_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{30 + d}{0.28 + 10\mu} \right) \quad (15)$$

式中: c_1, c_2, c_3 为与受力特征、钢筋表面形状和荷载有关的系数; d 为钢筋直径; μ 为配筋率。

由于正常使用过程中裂缝较小, 碳纤维不会断裂, 因此上式仍可使用, 但由于碳纤维与受拉钢筋共同承担了梁底的拉应力, 在荷载作用下钢筋的应力应调整为:

$$\sigma_s = \frac{M}{0.87 (A_s h_0 + A_f \frac{E_f h_f}{E_s})} \quad (16)$$

3.2 挠度计算

文献[1]中规定,挠度的计算公式为:

$$y=f=\alpha \frac{ML^2}{B} \tag{17}$$

抗弯刚度 $B=0.85E_hI_{01}$, I_{01} 为开裂截面的换算截面惯性矩。使用碳纤维加固后,换算截面应调整为受压区混凝土、受拉区钢筋和受拉区的碳纤维 3 部分组成,第一类 T 形截面的 I_{01} 为:

$$\frac{1}{3}b_ix^3+\frac{E_s}{E_c}A_s(h_0-x)^2+\frac{E_f}{E_c}A_f(h_f-x)^2$$

第二类 T 形截面的 I_{01} 为:

$$\frac{1}{3}b_ix^3-\frac{(b_i-b)(x-h_i)^3}{3}+\frac{E_s}{E_c}A_s(h_0-x)^2+\frac{E_f}{E_c}A_f(h_f-x)^2$$

式中符号同前,由于碳纤维的极限拉应变较小,加固后构件脆性增加,竖向挠度允许值应比文献[1]中相应的数值降低。

4 工程实例

山东省有一钢筋混凝土 T 形梁桥,全长 169 m,原设计荷载为汽车—10 级,该桥经过 40 多年的使用,出现了较多的病害,特别是由于交通量的增加,车辆载重的增大,原设计荷载难以满足使用要求,管理部门决定按照汽车—20 级、挂车—100 标准进行加固,加固方案为粘贴碳纤维。

4.1 计算

先对原结构进行类型判断:由原设计图可得该梁为第一类 T 形截面梁。

由式(3)可求得初始梁底拉应变:

$$\epsilon_i=\frac{M(h-x_0)}{E_cI_{01}}=1.459\times10^{-3}$$

根据新的荷载效应和碳纤维的材质,可知碳纤维会先发生断裂。此为第一类 T 形截面的第一种破坏形态。通过试算得到受压区高度。由式(4)得:梁的抗弯承载力大于荷载效应,碳纤维用量 $A_f=88\text{ mm}^2$,即 4 层碳纤维。

按照计算结果,在梁底粘贴了 CFRP,施工前后分别在桥上施加相同的静载,对梁体裂缝、跨中挠度等进行了对比检测。

4.2 加固前后裂缝宽度变化情况

粘贴的 CFRP 能否对梁体已有裂缝的增大产生抑制作用,是检验加固效果的重要标志。加载过程中,用刻度放大镜对 3 条裂缝进行了观测,同时用弓

式应变计检测了控制裂缝处的局部平均应变。从观测结果看,加固后,主梁表面未出现新的可视裂缝,原有裂缝长度无明显增长,最大荷载作用下裂缝最大宽度分别为 0.02 mm,0.06 mm,0.14 mm。由此可见,粘贴 CFRP 可以防止裂缝的增大。

4.3 加固前后梁底应变比较

加固前后分别检测了 4 个控制截面的梁底应变值,结果见表 1。由表 1 可见,加固后,除个别点反常外,其余的应变值均有明显下降,说明粘贴 CFRP 可以减小受拉区拉应变。

表 1 各测点加固前后应变对比 $\times10^{-6}$

| 测点 | | 应 变 | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 加固前 | 52 | 60 | 98 | 125 | 151 | 178 | 204 | 221 |
| | 加固后 | 47 | 54 | 104 | 124 | 136 | 166 | 204 | 212 |
| 2 | 加固前 | 93 | 137 | 161 | 213 | 220 | | | |
| | 加固后 | 43 | 48 | 117 | 136 | 145 | | | |
| 3 | 加固前 | 73 | 89 | 151 | 190 | 232 | 262 | 314 | 318 |
| | 加固后 | 33 | 48 | 96 | 135 | 140 | 153 | 217 | 197 |
| 4 | 加固前 | 116 | 147 | 204 | 272 | 264 | | | |
| | 加固后 | 55 | 89 | 165 | 203 | 187 | | | |

4.4 主梁挠度变化比较

加固前后,T 梁跨中平均挠度曲线如图 2 所示。由图 2 可见,在加载级别较小时,主梁受力较小,受拉区应变不大,粘贴的碳纤维片尚未发挥有效作用,此时加固前后跨中挠度变化不大;随着加载等级的提高,梁底拉应变增加,CFRP 有效地参与了受力,抑制了原有裂缝开裂和新裂缝的产生,刚度较加固前有明显提高,跨中平均最大挠度由加固前的 10.98 mm 下降为加固后的 9.59 mm,这说明粘贴碳纤维片可以显著提高主梁的刚度,减小正常使用情况下的跨中变形。

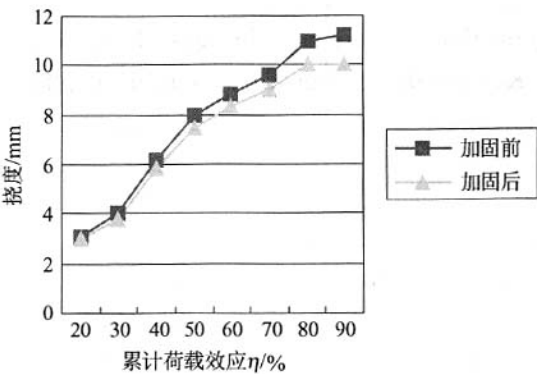


图 2 累计的荷载效应与跨中平均挠度的关系

5 主要认识

(1)本文分析是针对简支梁进行的,对于悬臂梁、连续梁等可能出现梁底负弯矩的情况不适用。

(2)碳纤维加固后的T梁在加载过程中,碳纤维表面和梁肋没有出现开裂,梁底混凝土拉应变明显降低,由此可以提高结构的耐久性。加固后的构件实测挠度下降明显,说明可以提高T梁的抗弯刚度。

(3)碳纤维加固后的T梁是由受压混凝土、受拉钢筋和受拉的碳纤维片组成的复合材料,但这三者的初始受力时间不同,碳纤维参与受力时,钢筋和混凝土中已有应力存在,此应力越大加固效果越明显。

(4)在碳纤维加固梁的设计中,正确地界定实际梁的正截面承载能力极限状态是前提,确定最终的破坏形态是关键,选择适宜的加固材料以避免梁发生脆性破坏是核心。

参考文献:

- [1] JTJ 023—85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] 曹双寅,邱洪兴,王恒华. 结构可靠性鉴定与加固技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

- [3] 王文伟. 纤维复合材料加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D]. 大连理工大学,2003.
- [4] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
- [5] 赵彤,谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津:天津大学出版社,2001.
- [6] Marco Arduini. Antoni Nanni Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement[J]. ACI Structural Journal,1997,94(5).
- [7] 叶列平,赵树红,等. 碳纤维布加固混凝土柱的斜截面受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报,2000,21(2).
- [8] 胡孔国,岳清瑞. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算方法[J]. 冶金工业部建筑研究总院院刊,2000,(1).
- [9] 邓宗才. 碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯力学性能研究[J]. 中国公路学报,2001,14(2).
- [10] 李松辉,王松根,刘立刚. CFRP加固钢筋混凝土梁正截面强度计算方法研究[J]. 公路交通科技,2002,(19).
- [11] 赵彤,谢剑,戴自强. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2000,30(7).
- [12] 熊光晶,姜浩,黄翼卓. 混杂纤维布加固混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报,2001,34(4).

Research on Desig of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded CFRP

ZHAO Zhi-gang, TAN Yun-liang

(Institute of Resource and Environment,Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: To reinforce old-bridges by CFRP is a high-efficiency, economical and safety method. The six destructive forms of T-beams are discussed in the paper, and a new distinguish basis of critical state, critical dosage of CFRP, critical height coefficient of concrete compressive region and compute method of conversion section are put forward. The design method is established according to the existing specifications for highway bridges. It has received satisfactory effects by applying to actual engineering.

Key words: carbon fiber reinforced plastics (CFRP); reinforced concrete T-beam; bearing capacity; reinforcement