

碳纤维加固钢-混凝土组合梁 承载力极限状态计算

荣学亮¹ 黄 侨^{1,2}

(哈尔滨工业大学交通学院¹, 哈尔滨 150090; 东南大学交通学院², 南京 210096)

摘 要 碳纤维复合材料是进行桥梁维修和加固的理想材料。对采用碳纤维复合材料加固钢-混凝土组合梁桥的设计方法进行了分析。考虑桥梁结构带载加固分阶段受力的特点,与现行桥梁设计规范中承载能力极限状态计算方法相适应。首先基于平截面假设和碳纤维应变滞后的特点,确定承载能力极限状态下碳纤维片材的极限应变值。然后分别建立了碳纤维片材加固钢-混凝土组合梁在正弯矩区和负弯矩区抗弯承载力的计算图式和计算方法,可供桥梁加固工程设计参考。

关键词 钢-混凝土组合梁桥 碳纤维加固 承载能力极限状态 极限应变

中图法分类号 U445.72; **文献标志码** A

碳纤维复合材料(简称 CFRP)质量轻、强度高,而且具有较好的耐腐蚀性和抗疲劳性能,是进行桥梁维修和加固的理想材料。但是国内对 CFRP 的研究应用集中在加固混凝土结构和钢结构上,关于采用 CFRP 加固钢-混凝土组合梁的研究较少。国外桥梁工作者进行过一些关于采用 CFRP 加固钢-混凝土组合梁的试验,也有部分工程实例^[1]。Sen. R 和 Liby L. 于 1992 年进行了 6 片钢-混凝土组合梁(每片梁长均为 6 m,采用 W8 × 18 钢梁,102 mm 厚,711 mm 宽的钢筋混凝土板)的试验,采用 CFRP 对梁进行加固。在每片梁的底板均粘贴上长 3.7 m,厚度为 2 mm 或 5 mm 的 CFRP,然后进行加载试验。试验后发现试验梁的极限强度增加了 11% ~ 50%。M. Tavakkolizadeh 和 H. Saadatmanesh 对出现不同程度损伤后钢-混凝土组合梁桥采用 CFRP 加固进行了试验研究^[2,3],探讨其可以恢复的程度以及黏贴 CFRP 后的抗疲劳性能。AL-Saidy 和

F. W. Klaiber 研究了不同形式的 CFRP 加固钢-混凝土组合梁的加固效果^[4]。上述的研究成果主要集中于碳纤维片材加固钢-混凝土组合梁桥的施工工艺、构造设计和破坏机理,对加固设计方法涉及的不多。尤其缺少一套与我国现行桥梁设计规范相适应的加固计算理论和实用计算方法。为适应桥梁加固技术的发展,结合钢-混凝土组合梁桥的结构特点,建立一套 CFRP 加固钢-混凝土组合梁桥的加固设计方法是十分有必要的。

1 正弯矩区抗弯承载力的计算

为充分发挥后加碳纤维片材的材料特性,加固时应中断交通,即卸除桥梁的活荷载,并尽可能卸除桥梁的部分自重和恒载。如不能够在完全卸载条件下进行加固,应考虑二次受力的影响。加固后钢—混凝土组合梁桥的承载能力极限状态下的结构抗力可按塑性理论计算,荷载效应采用其基本组合,即荷载效应的标准值乘以其分项安全系数的组合^[5]。

1.1 基本假设

计算中建议引入以下基本假设:

1) 钢梁与混凝土桥面板之间、钢材与碳纤维之间具有可靠的连接,能够保证抗弯能力充分发挥。

2011年6月10日收到 交通部规范项目(2006)资助
第一作者简介:荣学亮(1982—),男,河北省邢台人,哈尔滨工业大学交通学院桥梁工程系博士生,研究方向:钢-混组合结构力学性能,桥梁结构耐久性 & 全寿命设计理论。E-mail: rongyihit@126.com。

2) 位于塑性中性轴以下的受拉混凝土已开裂,不考虑其参与工作;当钢筋混凝土桥面板下设有承托时,忽略其对截面抗力影响。

3) 在承载能力极限状态下钢梁及混凝土板的截面变形均符合平截面假设;钢梁下缘粘贴的碳纤维片材的极限应力可根据平截面假设确定,且可以忽略其厚度;

4) 位于塑性中性轴以上的受压混凝土采用矩形应力图,应力达到混凝土的抗压强度设计值 f_{cd} ;

5) 钢梁的受压区和受拉区均进入塑性状态,其应力分别达到钢材的塑性强度设计值 f' 和 f ;(该值取为 $f' = f = 0.9f_y/\gamma_s$)

在原桥钢板下翼缘粘贴碳纤维加固的钢-混凝土组合梁的抗弯承载力应按其塑性中性轴位置的不同将其分为两种类型分别计算之。

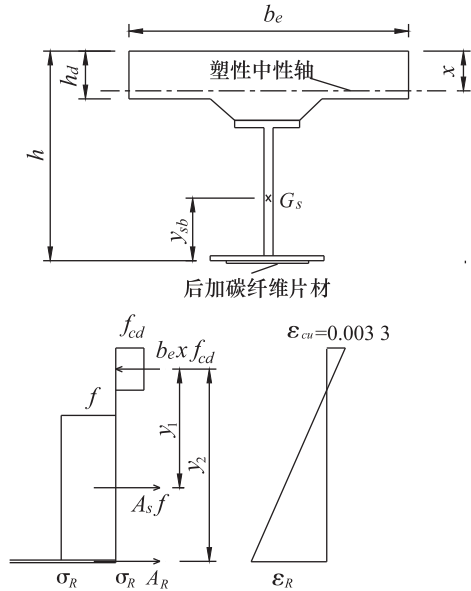


图1 正弯矩区第一种类型截面的抗弯承载力计算图示

1.2 第一种类型截面

第一种类型截面:塑性中性轴位于混凝土翼板内,钢梁全部处于受拉状态,其抗弯承载力的计算图示参见图1。其判断条件为:

$$E_R A_R \epsilon_{cu} \frac{h - h_d}{h_d} + A_s f \leq b_e h_d f_{cd} \quad (1)$$

由内力平衡方程可求得加固构件的塑性中性轴的位置 x 和截面塑性承载力 M_d :

$$A_R \sigma_R + A_s f = b_e x f_{cd} \quad (2)$$

$$\gamma_0 M_d \leq A_s \gamma_1 + A_R \sigma_R \gamma_2 \quad (3)$$

式中 M_d —按设计荷载标准计算的弯矩组合设计值;

f_{cd} —混凝土的抗压强度设计值;

f —塑性设计时采用的钢材的抗拉强度设计值;

A_s —钢梁的截面面积;

b_e, h_d —分别为混凝土翼板的计算宽度和厚度;

γ_1 —钢梁截面应力合力作用点至混凝土受压区应力合力作用点之间的距离,按公式(4)计算,

$$\gamma_1 = h - y_{sb} - \frac{x}{2} \quad (4)$$

y_{sb} —钢梁截面重心至下边缘的距离;

h —组合梁的全高;

γ_2 —加固碳纤维片材截面应力之合力作用点至混凝土受压区应力合力作用点之间的距离,按公式(5)计算;

$$\gamma_2 = h - \frac{x}{2} \quad (5)$$

A_R —加固碳纤维片材的截面面积;

σ_R —极限状态下,后加碳纤维片材的应力;按公式(6)计算:

$$\sigma_R = (\epsilon_R - \epsilon_{R0}) E_R \leq f_{Rd}, \epsilon_R = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} \quad (6)$$

ϵ_R —极限状态下,后加碳纤维片材的应变;

ϵ_{R0} —后加碳纤维片材的应变滞后值,采用卸载加固时取 $\epsilon_{R0} = 0$,采用带载加固时取 ϵ_{R0} 为由二期恒载引起的钢梁下边缘的拉应变;

f_{Rd} —后加碳纤维材料的抗拉强度设计值;

ϵ_{cu} —在塑性状态下,截面受压边缘混凝土的极限压应变,取为0.0033。

1.3 第二种类型截面

第二种类型截面:塑性中性轴位于钢梁之内(参见图2),钢梁部分受拉,部分受压。其判断条件为:

$$E_R A_R \epsilon_{cu} \frac{h - h_d}{h_d} + A_s f > b_e h_d f_{cd} \quad (7)$$

由内力平衡方程,可求得加固构件的塑性中性轴的位置 x 和截面塑性承载力 M_d :

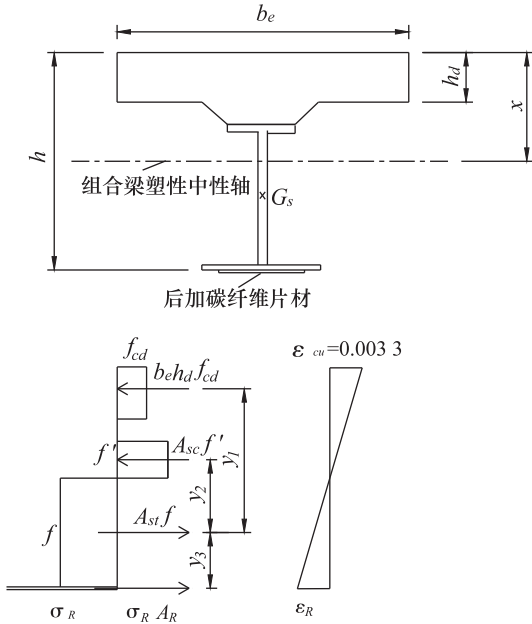


图2 正弯矩区第二种类型截面的抗弯承载力计算图式

$$A_R \sigma_R + A_{st} f = A_{sd} f' + b_e h_d f_{cd} \quad (8)$$

$$\gamma_0 M_d \leq b_e h_d f_{cd} \gamma_1 + A_{sd} f' \gamma_2 - A_R \sigma_R \gamma_3 \quad (9)$$

式中 A_{st} —钢梁受拉塑性区面积;

A_{sc} —钢梁受压塑性区面积, $A_{sc} + A_{st} = A_s$;

y_1 、 y_2 、 y_3 —分别为混凝土翼板应力合力作用点、钢梁受压区应力合力作用点及后加碳纤维截面应力合力作用点至钢梁受拉区应力合力作用点之间的距离, 分别为 $y_1 = h - y_{stb} - h_d/2$, $y_2 = y_{scb} + y_{stu}$, $y_3 = y_{stb}$;

f' —塑性设计时采用的钢材的抗压强度设计值;

x —塑性中性轴至截面上边缘的距离。

上式中 y_{scb} 表示钢梁受压面积 A_{sc} 的重心到其下边缘的距离; y_{stu} 、 y_{stb} 分别表示钢梁受拉面积 A_{st} 的重心到其各自上、下边缘的距离。

其他符号意义同上。

2 负弯矩区抗弯承载力的计算

钢-混凝土连续组合梁中支点将承受负弯矩, 易导致混凝土桥面板开裂。在混凝土板上缘粘贴碳纤维片材将增加钢-混凝土组合梁桥承担负弯矩

的能力及混凝土桥面板的抗裂性。加固后的负弯矩区截面在极限状态下的抗弯承载力计算基于以下假设:

- 1) 混凝土翼板开裂, 完全退出工作。翼板内的纵向钢筋参与工作, 并认为钢筋应力达到其抗拉强度设计值;
- 2) 位于组合截面塑性中性轴以上和以下的钢梁分别受拉屈服和受压屈服, 其应力分别达到钢板的塑性抗拉和抗压强度设计值;
- 3) 后加碳纤维片材的容许极限应力可根据其容许拉应变确定。

加固后的负弯矩区截面在承载能力极限状态下的计算图式由图3给出。

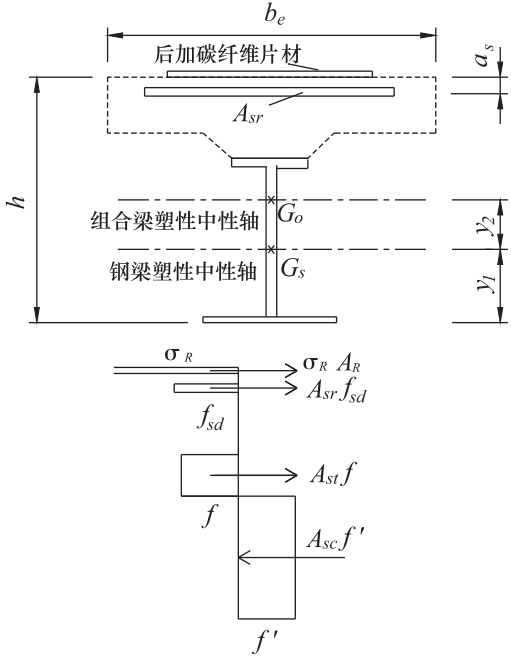


图3 负弯矩区抗弯承载力计算图式

钢-混凝土组合梁的负弯矩区的截面塑性中性轴相对于钢梁塑性中性轴的位置 y_2 和塑性抗弯承载力 M_d 可由下列基本方程确定:

$$\sigma_R A_R + f_{sd} A_{sr} = 2f_t f_j y_2 \quad (10)$$

$$\gamma_0 M_d \leq M_s + \sigma_R A_R \left(h - y_1 - \frac{1}{2} y_2 \right) + f_{sd} A_{sr} \left(h - a_s - y_1 - \frac{1}{2} y_2 \right) \quad (11)$$

式中 A_{sr} —位于混凝土翼板有效宽度内的纵向受

拉钢筋截面面积;

a_s —钢筋面积重心到混凝土翼板上边缘的距离;

f_{sd} —钢筋的抗拉强度设计值;

t_f —钢梁腹板宽度;

y_1 —钢梁塑性中性轴至钢梁底面的距离;

y_2 —加固后组合梁塑性中性轴至钢梁塑性中性轴的距离;

M_s —钢梁绕其重心轴的塑性弯矩,可按式(12)求解:

$$M_s = (S_1 + S_2)f \quad (12)$$

S_1 、 S_2 —分别为钢梁塑性中性轴以上、以下截面对该轴的面积矩;

t' —为钢梁上翼缘的厚度。

式中其他符号意义同上。

3 后加碳纤维片材应变限值的取值

后加碳纤维片材的容许拉应变 $[\varepsilon_R]$ 和容许极限应力 σ_R 的计算方法可参考《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)^[6]。研究表明,后加碳纤维片材由于应变滞后的原因,不可能充分发挥其极限变形和极限拉应力,即材料强度不可能充分发挥。在此情况下采用容许拉应变 $[\varepsilon_R]$ 和容许极限应力 σ_R 作为碳纤维片材的强度控制指标。

在极限状态下,碳纤维片材的容许拉应变 $[\varepsilon_R]$ 和容许极限拉应力 σ_R 可参考如下方法确定:

容许拉应变 $[\varepsilon_R]$ 等于 $k_m \varepsilon_{Ru}$,且不应大于碳纤维片材极限拉应变的 $2/3$ 和 0.01 两者中的较小值,即:

$$[\varepsilon_R] = \min \left(\begin{array}{l} k_m \varepsilon_{Ru} \\ \frac{2f_{Rk}}{3E_R} \\ 0.01 \end{array} \right) \quad (13)$$

式(13)中 $[\varepsilon_R]$ —碳纤维片材的容许拉应变 $[\varepsilon_R]$;

ε_{Ru} —碳纤维片材的极限拉应变,其值应取其抗拉强度标准值 f_{Rk} 除以弹性模量 E_R ;

k_m —碳纤维片材厚度折减系数,取 $k_m =$

$$1 - \frac{n_R E_R t_R}{420\,000};$$

n_R —碳纤维片材的层数,对于粘贴钢板情况,建议只取一层,即 $n_R = 1$;

t_R —单层碳纤维片材的厚度(mm);

f_{Rk} —碳纤维片材的抗拉强度标准值;

E_R —碳纤维片材的弹性模量(MPa)

后加碳纤维片材的容许极限拉应力,应根据其容许拉应变 $[\varepsilon_R]$ 按式(14)计算:

$$\sigma_R = [\varepsilon_R] E_R \leq f_{Rd} \quad (14)$$

式(14)中 f_{Rd} —后加碳纤维片材的抗拉强度设计值

4 结语

对粘贴碳纤维片材加固钢-混凝土组合梁桥的方法进行了探讨,与我国现行桥梁设计规范相适应,建立了粘贴碳纤维片材加固钢-混凝土组合梁桥的极限承载力的计算模型。考虑桥梁加固分阶段受力和碳纤维应变滞后的特点,分别给出了粘贴碳纤维片材加固钢-混凝土组合梁桥承载能力极限状态抗弯强度在正弯矩区和负弯矩区的计算图式和计算方法,可供桥梁加固设计人员参考。

参 考 文 献

- 1 Albrecht P, Lenwari A. Fatigue strength of repaired prestressed composite beams. *Journal of Structural Safety*, 2008;13(4):409—417
- 2 Tavakkolizadeh M, Sadatmanesh H. Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets. *Journal of Structural Engineering*, 2003;129(1):30—40
- 3 Sadatmanesh H, Tavakkolizadeh M. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. *Journal of Structural Engineering*, 2003;129(2):186—196
- 4 Saidy A L, Klaiber F W, Wipf T J. Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates. *Journal of Composites for Construction*, 2004;129(2):162—172
- 5 黄 侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理. 北京:人民交通出版社, 2004
- 6 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心. CECS 146:2003. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程. 北京:中国计划出版社, 2002

(下转第 6771 页)

6 杜鹤民,余隋怀,初建杰,等. 基于 FuzzyAHP 的 CBT 飞机维护系统评价. 航空制造技术,2009;18:96—99

7 陈胜男,潘 荣. 工业设计评价标准的指数型量化研究. 浙江理工大学学报,2006;23(4):0461—0465

8 朱永梅,王明强,芦新春. 面向稳健设计的产品分阶段评价体系研究. 机械设计与制造,2007;11:212—214

Research on Evaluation of Oil Tank Design Based on Fuzzy Theory

GENG Li¹, YANG Yan-pu^{2*}, DU Wei²

(Dongguan Yongqiang Vehicles Manufacturing Co. , Ltd¹. , Dongguan 523000 , P. R. China ;
Institute of industrial design , Northwestern Polytechnical University² , Xi ' an 710072 , P. R. China)

[Abstract] By comparing the pros and cons of common methods of design evaluation , combined with the characteristics of oil tank design , the conversion of subjective factors to quantitative index is realized by using Fuzzy theory , which is a method of mathematical analysis . On the basis of oil tank design index having been defined , an evaluation model is established to overcome the subjectivity of judges and achieve the scientific evaluation for oil tank design . The result shows that this fuzzy evaluation method is scientific , effective and reasonable .

[Key words] oil tank design fuzzy theory design evaluation

(上接第 6759 页)

Analysis of Ultimate Load-carrying Capacity of Strengthening Steel-concrete Composite Beam Using Carbon Fiber

RONG Xue-liang¹, HUANG Qiao^{1,2}

(School of Transportation Science and Engineering , Harbin Institute of Technology¹ , Harbin 150090 ,
P. R. China ; Institute of Bridge Engineering , Southeast University² , Nanjing 210096 , P. R. China)

[Abstract] Carbon fiber is a kind of optimal materials for bridge maintenance and reinforcement . Design method of strengthening steel-concrete composite bridges using carbon fiber was studied . Characteristic of bridge reinforcement under load and phasing of stress features were considered , and calculation method of ultimate limit state was suitable for existing bridge design code . Ultimate strain of carbon fiber in ultimate limit state is firstly established based on plane-section assumption and strain-lag of carbon fiber . Then computational scheme and calculation method of flexural capacity in positive moment area and negative moment area for strengthening steel-concrete composite beam using carbon fiber are established respectively , which is reference for design of bridge strengthening .

[Key words] steel-concrete composite bridges carbon fiber strengthening ultimate limit state ultimate strain