

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.09.009

桥梁预应力碳纤维板加固中的参数取值及损失计算方法研究

黄 侨¹, 万世成¹, 侯 旭²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为确定预应力碳纤维板加固中的某些关键设计指标、计算系数, 基于国内外规范及最新研究成果, 讨论并提出了适用于预应力纤维复合材料加固的参数取值方法; 为确定加固设计中的预应力碳纤维板用量及有效预应力, 结合碳纤维片材锚固体系及施工工艺的特点, 研究并提出了预应力碳纤维板各项预应力损失的计算方法。最后, 以某钢筋混凝土简支梁桥加固工程为例, 检验了所提出的参数取值及损失计算方法的可行性和可靠性。

关键词: 桥梁工程; 预应力碳纤维板; 计算方法; 加固; 侧贴; 松弛

中图分类号: U445.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 09-0052-06

Study on Parameter Determination and Calculation Method of Prestress Loss of Prestressed CFRP Plates in Bridge Reinforcement

HUANG Qiao¹, WAN Shi-cheng¹, HOU Xu²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: In order to determine the key design indexes and calculation coefficients in bridge reinforcement with prestressed CFRP plates, the appropriate parameter determination method for reinforcement of carbon fiber-reinforced composites is discussed and proposed on the basis of Chinese and foreign specifications and the latest research findings. To determine the usage amount and effective prestress of prestressed CFRP plates for reinforcement design, each item of prestress losses is studied and the calculation method is presented in consideration of relevant construction technology and anchorage system of CFRP plates. The feasibility and reliability of the suggested parameter determination and loss calculation method are verified by an example of RC simply supported beam bridge reinforcement project.

Key words: bridge engineering; prestressed (carbon fiber reinforced polymer/plastic) CFRP plate; calculation method; reinforcement; side-bond; relaxation

0 引言

据统计, 截至2014年年底, 我国共有公路桥梁75.71万座, 部分桥梁长时间超负荷服役, 处于风险相对高发期。我国的桥梁建设已进入新建和改造维

修并重的过渡阶段^[1], 桥梁加固技术方兴未艾。

国外自1984年开始研究纤维增强复合材料(Fibre Reinforced Polymer, 简称FRP)加固法^[2], 而国内研究始于1997年^[3]。在不到20年的时间里, FRP加固技术已由建筑结构拓展到桥梁领域, 由碳

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 2014年交通运输部《公路桥梁加固设计规范》修订编制项目

作者简介: 黄侨(1958-), 男, 上海人, 教授, 博士, 博士生导师。(quanghit@126.com)

纤维布发展到碳纤维板和预应力碳纤维板, 并取得了一系列的研究成果。与粘贴纤维复合材料加固法不同, 预应力碳纤维板加固法属于主动加固法, 可以更高效地利用 CFRP 材料的抗拉强度; 与传统体外预应力筋加固法相比, 碳纤维板更易于形成黏结加固, 可以很好地抑制裂缝并提高桥梁结构的极限承载力。

2002 年, ACI 颁布了《外贴 FRP 体系加固混凝土结构设计与施工指南》^[4], 标志着 FRP 加固技术趋于成熟。2014 年, 我国交通运输部计划对原《公路桥梁加固设计规范》进行修编, 拟在“体外预应力加固法”一章中增补预应力纤维复合材料加固内容。本文提出的相关设计指标、计算系数取值及损失计算方法, 可供桥梁加固设计及规范修编参考。

1 若干关键参数取值及计算方法

1.1 碳纤维板强度设计值的取值方法

关于预应力碳纤维板抗拉强度设计值的取值, 主要涉及材料在破坏阶段的强度利用率, 且须避免出现具有脆性特征的剥离破坏。

根据湖南大学^[5]和广西大学^[6]的试验研究成果, 当预应力碳纤维板加固梁发生破坏时, 原梁内钢筋屈服, 上缘混凝土压碎, 在截面屈服破坏和极限破坏时不会出现界面剥离, 碳纤维板的强度利用率可达到 $0.5f_{tk} \sim 0.7f_{tk}$, 甚至更高。

《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)^[7]提出的 FRP 强度设计值计算公式: $f_{fd} = f_{fk} / (\gamma_f \gamma_e)$, 纳入 FRP 材料分项安全系数和环境影响系数, 前者对碳纤维板取 1.25; 后者对一般室外环境取 1.1, 对海洋环境及侵蚀性环境取 1.2。由此可得碳纤维板的强度设计值为 $0.67f_{tk} \sim 0.73f_{tk}$ 。

《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[8]认为碳纤维板材的延性相对较差, 对于重要结构尚需乘以重要性系数 1.4 以确保安全, 其强度利用率大致为 $0.48f_{tk} \sim 0.5f_{tk}$ 。此结果与欧美等国按拉应变设计值 ε_f 与弹性模量设计值 E_f 乘积确定的设计应力值相当。

2006 年, 日本出台《后锚固连续纤维补强设计施工指针》^[9], 对连续纤维片材划分不同品系, 以适应不同的加固需求。参考国产纤维复合材料规格并借鉴现行《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22), 建议对碳纤维板材的强度设计值分级取值: I 级 1 200 MPa, II 级 1 000 MPa, 或统一采用 $0.5f_{tk}$ 。

1.2 梁侧预应力碳纤维板面积折减系数的计算方法

若加固梁为混凝土 T 形截面梁, 由于腹板较窄, 梁底横向空间不足, 往往需要在腹板底面和侧面同时布置预应力碳纤维板。

鉴于碳纤维板内纵向应力沿梁高方向的不均性, 应对梁侧碳纤维板面积进行折减。文献 [7] 采用的折减系数计算式为:

$$\kappa = 1 - 0.5h_f/h, \quad (1)$$

式中, h_f 为侧面粘贴高度, 即从碳纤维板上缘算起至梁受拉边缘的竖向距离; h 为梁全截面高度。

应该注意, 式 (1) 仅适用于粘贴纤维复合材料加固, 前提是梁侧碳纤维板沿梁的下缘布置, 有别于施加预应力的情况: 在预应力碳纤维板加固中, 需为锚固区切槽预留空间, 并保证钢筋保护层厚度, 梁侧碳纤维板通常距下缘有一定高度 (图 1), 尤其是采用钢筋骨架或叠放预应力钢束的肋板式结构。因此, 建议以参数 a_f 替换式 (1) 中的 h_f 。 a_f 的含义为梁侧碳纤维板重心轴至梁受拉边缘的竖向距离。

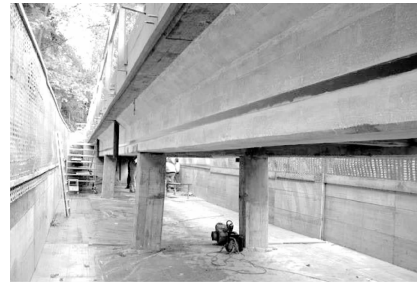


图 1 国外某侧贴预应力碳纤维板加固工程

Fig. 1 A foreign side-bonded prestressed CFRP plates reinforcement project

如图 2 所示, 根据平截面假定, 折减系数 κ 可由以下方法确定:

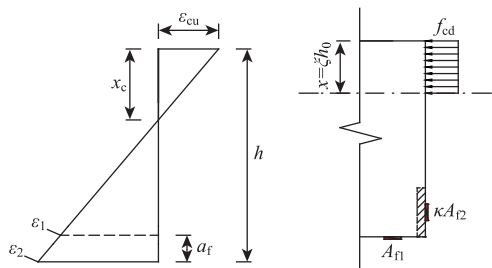
$$\kappa = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 1 - \frac{a_f}{h - x_c} = 1 - \frac{a_f}{h - \xi h_0 / \beta} = 1 - \left(\frac{1}{1 - \xi h_0 / (\beta h)} \right) \cdot \frac{a_f}{h}. \quad (2)$$

旧桥加固工程中, 混凝土强度等级通常低于 C50, 故取 $\beta = 0.8$, 并引入调整系数 η :

$$\kappa = 1 - \eta \cdot \frac{a_f}{h}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{1}{1 - 1.25\xi h_0/h}, \quad (4)$$

式中, κ 为梁侧碳纤维板面积折减系数; η 为梁侧碳纤维板重心调整系数, 与截面几何形状、材料强度及配筋率有关, 应根据实际情况计算, 其适用范围取决于超筋界限和加固效率两个因素。

图2 梁侧碳纤维板面积折减系数 κ 计算图式Fig. 2 Computing diagram of reduction factor κ for side-bonded CFRP plate area

对一般钢筋混凝土及预应力混凝土肋板式桥梁结构,可取 $h = 1.1h_0 \sim 1.2h_0$ ^[10]。为防止脆性破坏,应满足相对受压区高度 $\xi \leq \xi_b$,对不同种类钢筋, $\xi_b = 0.53 \sim 0.62$ 。

研究表明,当未加固梁的相对受压区高度大于 ξ_b 的0.8倍时,受弯承载力提高幅度有限且延性较小^[7]。根据现行《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22),受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$,基于近似算法^[11],采用中点公式,取:

$$\xi h_0 \leq 0.8 \times \left(\frac{0.53 + 0.62}{2} \right) / \left(\frac{1.1 + 1.2}{2} \right) \times h = 0.4h,$$

代入式(4),求得 $\eta_{\max} = 2$,即限制了预应力碳纤维板的最大加固用量,显然, $\eta > 1$ 。综上,调整系数 η 的适用范围为 $1 < \eta \leq 2$ 。

1.3 碳纤维板张拉控制应力取值方法

预应力碳纤维板的张拉控制应力受到锚固能力、应力损失及其强度设计值的制约,取值存在差异性。国内相关加固试验大多采用缩尺试件,故张拉控制应力通常低于1 000 MPa。ACI 440.2R ERTA—2009^[12]采用的控制应力为 $0.55f_{tu}$,相当于我国的 $0.55f_{tk}$ 。日本常用的有效紧张力一般可达到1 400 MPa,约占碳纤维板保证耐力的60%^[13]。

《预应力碳纤维板锚固体系及设计施工应用指南》^[14]对碳纤维板张拉控制应力的建议值为 $0.4f_{tk} \sim 0.65f_{tk}$ 。调研结果显示,工程实践中的常用值为 $0.5f_{tk}$,偶尔用到 $0.55f_{tk}$ 。基于延性设计理念,文献[6]建议预应力碳纤维板的张拉控制应力不宜大于 $0.5f_{tk}$,以保证构件抗弯破坏时碳纤维板具有大于1.5%的伸长率。

预应力碳纤维板加固混凝土梁的加固效果与预应力度及原梁配筋率有关。提高碳纤维板的预应力度,可以提高构件在使用阶段的抗裂性和变形能力,但会降低其延性。现从提高碳纤维板的强度利

用率及现有锚固装置的锚固能力两方面考虑,笔者建议张拉控制应力取 $\sigma_{con,f} = 0.5f_{tk}$ 为宜。

2 预应力碳纤维板预应力损失计算方法

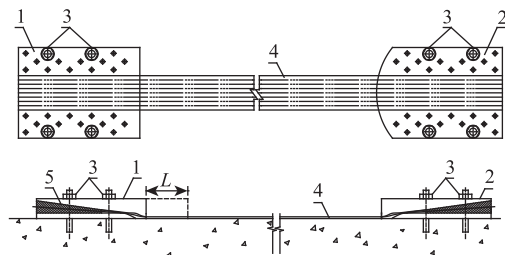
随着张拉、锚固过程和时间推移,碳纤维板中预拉应力会逐渐减少,主要来自锚具变形、碳纤维板与梁体混凝土间的温差、分批张拉引起的混凝土弹性压缩以及长期持荷下的应力松弛。本文预应力碳纤维板损失计算过程的参数编号与现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62)一致。

2.1 碳纤维板锚具变形损失计算方法

当张拉结束并进行锚固时,锚具将承受巨大的压力并使锚具自身及垫板压密而变形,同时预应力碳纤维板向内回缩,进而引起应力损失,按式(5)计算:

$$\sigma_{l2,f} = E_f \frac{\Delta l}{l}, \quad (5)$$

式中, E_f 为碳纤维板的弹性模量; l 为张拉端至锚固端之间的净距离; Δl 为锚具变形和碳纤维板的回缩量,与锚具类型及其可靠性有关,应根据试验数据确定。目前,国内常用的预应力碳纤维板锚固装置主要为夹片式锚具,构造形式见图3,如无实测资料,可取 $\Delta l = 2$ mm。对于其他专门研制的锚头,如Sika-StressHead^[15],损失计算时锚具变形量应按其规定值取用。



1—张拉端锚具; 2—固定端锚具; 3—胶锚螺栓;
4—碳纤维板; 5—楔形锚固; L—张拉位移

图3 夹片式锚具平面及纵剖面构造图

Fig. 3 Plan and section views of wedge-type anchor

2.2 碳纤维板温差损失计算方法

混凝土、CFRP两种材料的线膨胀系数相差较大,因此应考虑由季节温差造成的碳纤维板与梁体混凝土间的温差损失 $\sigma_{l3,f}$:

$$\sigma_{l3,f} = \Delta T | \alpha_f - \alpha_c | E_f. \quad (6)$$

线膨胀系数 α_f , α_c 需根据实测值确定,若难以实现,可近似取 $\alpha_f = 1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

当环境升温时,两种材料共同伸长,而混凝土膨胀得更快,由于碳纤维板本身处于受拉状态,反而对保持预张拉力有利,故升温时不计温差损失;反之,当环境降温时,则应计入温差损失。所以, ΔT 为年平均最低温度与预应力碳纤维板张拉、锚固时的温度差。

2.3 碳纤维板分批张拉损失计算方法

加固中常需采用多片预应力碳纤维板,并分批张拉、锚固。由后张拉的碳纤维板所产生的混凝土弹性压缩变形将使先张拉并已锚固的预应力碳纤维板产生应力损失,即分批张拉损失,以 $\sigma_{l4,f}$ 表示。

注意到对于不同批次的碳纤维板,对应的应力增量 $\sigma_{l4,f}$ 可以是不同的。令 m 等于张拉碳纤维板的总批数,则第 i 批碳纤维板的 $\sigma_{l4,f(i)}$ 为:

$$\sigma_{l4,f(i)} = \alpha_{Ef} \sum_{j=1}^m \Delta \sigma_{pc(j)}, 1 \leq i \leq m, \quad (7)$$

式中, α_{Ef} 为碳纤维板弹性模量与混凝土弹性模量的比值; $\Delta \sigma_{pc(i)}$ 为在计算截面上第 i 批碳纤维板重心处,由张拉第 $i+1$ 批碳纤维板所产生的混凝土法向应力,按式(8)计算:

$$\Delta \sigma_{pc(i)} = \frac{\Delta N_{f(i+1)}}{A_0} + \frac{\Delta N_{f(i+1)} e_{f(i+1)}}{I_0} y_i, 1 \leq i \leq m-1, \quad (8)$$

式中, $\Delta N_{f(i+1)}$ 为第 $(i+1)$ 批碳纤维板预加应力(扣除 $\sigma_{l2,f}$)的合力; $e_{f(i+1)}$ 为第 $(i+1)$ 批碳纤维板预加力的作用点至加固梁换算截面重心轴的距离; y_i 为第 i 批碳纤维板重心至加固梁换算截面重心轴的距离。

由上可知,当 $i=1$ 时,弹性压缩损失 $\sigma_{l4,f(i)}$ 最大;当 $i=m$ 时,则无弹性压缩损失, $\sigma_{l4,f(m)}=0$ 。

对矩形截面梁,可采用简化算法。假定各批碳纤维板张拉时,在先批碳纤维板重心处所产生的混凝土应力增量均相等,并以计算截面上全部预应力碳纤维板弹性压缩总损失的平均值作为各批碳纤维板的弹性压缩损失值,有:

$$\sum_{i=1}^m \Delta \sigma_{pc(i)} = m \Delta \sigma_{pc}, \quad (9)$$

$$\sigma_{l4,f} = \frac{\sigma_{l4,f(1)} + \sigma_{l4,f(m)}}{2} = \frac{m-1}{2} \alpha_{Ef} \Delta \sigma_{pc}. \quad (10)$$

式(9)~(10)的优点是可省去繁琐的计算过程,当张拉批次 m 较大时,体现得较为明显,但其仅适用于各批应力增量 $\Delta \sigma_{pc(i)}$ 相差不大的情况。对于T形截面梁,由于腹板较薄,为避免出现旁弯,梁肋两侧的碳纤维板须采用同步、对称张拉工艺,而梁底碳纤维板则通常单片张拉,两者应力增量约

呈2倍关系。这种情况下,不宜沿用上述简化,建议根据式(7)~(8)进行计算。

2.4 碳纤维板松弛损失计算方法

Saadatmanesh 等^[16] 试验证明,预应力 CFRP 筋的松弛损失主要与两个因素有关:时间 t 和初拉应力 $\sigma_{con,f}$ 。El-Hacha 等^[17] 在研究预应力碳纤维布的应力松弛时,认为影响 CFRP 片材的因素与筋材一致。

文献[18]对 CFRP 板材的应力松弛做了研究,提出了包含上述两项影响因素的松弛损失计算式:

$$\sigma_{l5,f} = k \sigma_{con,f} + b \lg t, \quad (11)$$

式中系数 k, b 由回归分析解出。但试验采用的最大控制应力为 $0.3f_{fk}$, 历时仅 20 d;若考虑 $\sigma_{con,f} = 0.4f_{fk}$, $t=2400$ h (100 d), 并将 $r = \sigma_{l5,f} / \sigma_{con,f}$ 定义为预应力碳纤维板的松弛系数,代入式(11)后算得 $r=0.03$ 。

文献[8]对松弛系数的建议值为 $r=2.2\%$, 而 OVM 公司的松弛试验结果显示 $r=3.8\%$, 且与施加的预应力水平有关。结合国内外现有研究成果,建议松弛损失按如下公式简化:

$$\sigma_{l5,f} = r \sigma_{con,f}, \quad (12)$$

式中, $\sigma_{con,f}$ 为初拉应力; r 为松弛系数,暂取 3.0% , 将来若有更多的试验数据可再作调整。

与体外预应力加固相类似^[19],旧桥混凝土结构由于通常已使用了一定年限,其收缩、徐变已基本完成;此外,碳纤维板在长期预应力和外界荷载作用下的徐变量很小,对加固效果基本不产生影响^[20],故不再考虑收缩、徐变损失 $\sigma_{l6,f}$ 。

3 某 RC 简支梁桥预应力碳纤维板加固工程计算示例

为检验上述参数取值及预应力损失计算方法的可行性和可靠性,笔者结合某钢筋混凝土简支梁桥加固工程进行试算分析,计算过程及结果如下。

3.1 设计资料及主梁内力

(1) 简支梁跨径:标准跨径 16 m, 计算跨径 15.6 m。

(2) 设计荷载:原桥设计荷载为汽-15 级,挂-80, 结构重要性系数 $\gamma_0=1.0$ 。

(3) 环境:桥址位于野外一般地区, I 类环境条件,年平均相对湿度为 75% 。

(4) 材料:原梁采用 C30 混凝土;架立钢筋为 2 根直径 22 mm 的 HRB335 钢筋, $a'_s=4.5$ cm, 受拉钢筋为 10 根直径 28 mm 的 HRB335 钢筋, $a_s=15.5$ cm, 箍筋为直径 8 mm 的 R235 钢筋, 间距

14 cm, 跨中双肢箍筋, 梁端四肢箍筋。

(5) 设计要求: 采用预应力碳纤维板加固法将原桥的设计荷载提高至公路—I级。

(6) 主梁尺寸: 桥梁全宽 8.4 m, 净宽 7.5 m, 上部结构由 4 片 T 梁组成, 横桥向对称布置, T 梁翼板有效宽度为 2 100 mm, 跨中横截面、支点横截面构造如图 4 所示。

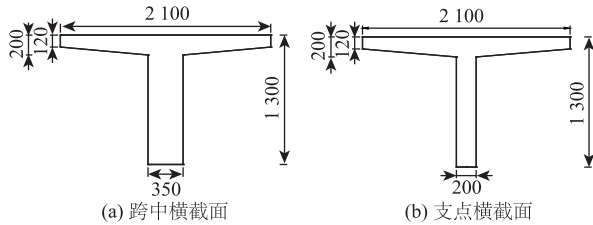


图 4 T 梁跨中横截面及支点横截面构造图 (单位: mm)

Fig. 4 Dimensions of cross-sections at mid-span and endpoint of T-beam (unit: mm)

(7) 主梁内力: 考虑车道荷载对计算主梁的最不利荷载位置, 并通过各主梁间的内力横向分布求得。桥梁冲击系数为 $1 + \mu = 1.34$, 中梁的计算结果参见表 1。

表 1 内力组合结果

Tab. 1 Internal force combination

截面位置	基本组合		短期组合	
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
支点截面	0	605	0	290.9
变截面	1 000	465	361	161
跨中截面	1 919.2	147	967.4	31.3

3.2 预应力碳纤维板用量估算

碳纤维板抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2\ 400$ MPa, 张拉控制应力取 $\sigma_{con,f} = 0.5f_{tk} = 1\ 200$ MPa。安全起见, 总损失量先按 15% 估计, 则有效预应力估算值为 $\sigma_{pe,f} = 0.85\sigma_{con,f} = 1\ 020$ MPa。

根据文献 [19], 选取预应力度 $\lambda = 0.6$, 跨中截面消压弯矩 $M_0 = \lambda M_s = 580.44$ kN·m, 截面下缘有效预压应力 $\sigma_{pe} = M_0/W_{ob} = 5.08$ MPa, 所需预应力碳纤维板的总预拉力为:

$$N_{pe,f} = \frac{\sigma_{pe} A_0}{1 + e_{pf} A_0 / W_{ob}} = 526.93 \text{ kN}.$$

由此初步算得预应力碳纤维板的总面积: $A_{pf} = N_{pe,f} / \sigma_{pe,f} = 516.6 \text{ mm}^2$, 因此至少需采用 3 片 $100 \times 2 \text{ mm}^2$ 碳纤维板, 现拟在腹板底面腹板两侧各布置一片 $100 \times 2 \text{ mm}^2$ 碳纤维板。梁侧碳纤维板重心高度 $a_f = 180 \text{ mm}$, 锚固点距梁端 2.5 m, 布置形式参见图 5。

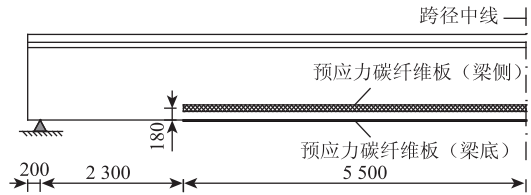


图 5 预应力碳纤维板纵向布置图 (单位: mm)

Fig. 5 Longitudinal layout of prestressed CFRP plates (unit: mm)

计算相对受压区高度时, 偏安全地采用碳纤维板实际截面积: $\xi = \frac{f_{sd} A_s + f_{fd} A_{pf}}{f_{cd} b h_0} = 0.074$ 。

由式 (3) ~ (4), 计算梁侧碳纤维板的两个重要系数:

重心调整系数:

$$\eta = \frac{1}{1 - 1.25 \times 0.074 \times 1\ 145 / 1\ 300} = 1.09;$$

面积折减系数: $\kappa = 1 - 1.09 \times \frac{180}{1\ 300} = 0.849$ 。

折减后的预应力碳纤维板总面积: $A_{pf} = A_{f1} + \kappa A_{f2} = 200 + 0.849 \times 400 = 539.6 \text{ mm}^2$ 。

3.3 预应力碳纤维板预应力损失计算

预应力碳纤维板的预应力损失与施工工艺、材料性能及外界环境等有关, 影响因素复杂, 一般应根据试验数据确定, 如无可靠试验资料, 建议按本文第 2 节的方法计算。

加固设计中, 应考虑 4 项预应力损失: 锚具变形损失 $\sigma_{l2,f}$ 、温差损失 $\sigma_{l3,f}$ 、分批张拉损失 $\sigma_{l4,f}$ 和松弛损失 $\sigma_{l5,f}$ 。

两端锚具和碳纤维板的回缩量取 $\Delta l = 2 \text{ mm}$; 张拉时温度为 14.8°C , 施工地区属寒冷地区, 按 JTG D60—2015 表 4.3.12-2 取 $\Delta T = 24.8^\circ\text{C}$; 张拉批次 $m = 2$, 即先张拉梁底碳纤维板, 再同步、对称张拉梁腹板两侧的碳纤维板; 松弛系数采用 $r = 0.03$ 。按上述 4 项预应力损失计算方法求得的各项损失值见表 2。

表 2 碳纤维板预应力损失计算结果 (单位: MPa)

Tab. 2 Calculation result of prestress losses of CFRP plates (unit: MPa)

位置	锚具变形	季节温差	分批张拉	长期松弛	总计
梁底 (第 1 批)	29.1	35.7	20.8	36.0	121.6
梁侧 (第 2 批)	29.1	35.7	—	36.0	100.8

正常使用阶段, 梁底、梁侧预应力碳纤维板中的永存预应力分别为:

$$\sigma_{pe,f(1)} = 1\ 078.4 \text{ MPa}, \sigma_{pe,f(2)} = 1\ 099.2 \text{ MPa}.$$

综上, 按本文的参数取值及损失计算方法, 有

效预应力占张拉控制应力的比例分别为 89.9% 和 91.6%, 这一结果与 Kim 等^[21] 建议的 10% 的预应力损失设计值基本相符。

研究报告^[22] 对类似桥梁结构采用体外预应力筋加固, 在加固量和预应力水平相当的前提下, 得到的有效预应力占 88.4% (尚不计分批张拉损失)。不难看出, 采用预应力碳纤维板加固法产生的预应力损失, 相比于体外预应力筋加固法略偏小, 文献 [6] 的试验数据亦证明了这一结论。

4 结论

(1) 建议对桥梁加固用碳纤维板强度设计值分级取值: I 级 1 200 MPa, II 级 1 000 MPa, 或统一采用 $0.5f_{tk}$ 。

(2) 侧贴 CFRP 板加固中的面积折减系数 κ 和重心调整系数 η 概念清晰, 便于计算。

(3) 根据国内现有锚固体系和碳纤维板材, 张拉控制应力建议取 $\sigma_{con,f} = 0.5f_{tk}$ 。

(4) 在钢筋混凝土桥梁加固中, 对预应力碳纤维板应考虑 4 项预应力损失, 即锚具变形损失、温差损失、分批张拉损失、松弛损失。采用体外预应力碳纤维板加固法产生的预应力损失一般在 10% 左右。

(5) 计算实例表明, 本文建议的预应力碳纤维板加固设计的各项参数取值及损失计算方法简便可行, 计算结果合理, 可供钢筋混凝土桥梁加固设计参考。

参考文献:

References:

- [1] 张树仁. 桥梁病害诊断与加固设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
ZHANG Shu-ren. Disease Diagnosis and Reinforcement Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] MEIER U. Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering [J]. Structural Engineering International, 1992, 2 (1): 7-12.
- [3] 岳清瑞, 陈小兵. 碳纤维材料 (CFRP) 加固修补混凝土结构新技术 [J]. 工业建筑, 1998, 28 (11): 1-5.
YUE Qing-rui, CHEN Xiao-bing. New Technology of Carbon Fiber Reinforced Plastics on Strengthening & Repairing Concrete Structures [J]. Industrial Construction, 1998, 28 (11): 1-5.
- [4] ACI 440. 2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures [S].
- [5] 彭晖. 预应力碳纤维片材加固钢筋混凝土受弯构件的

- 性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
PENG Hui. Study of Flexural RC Member Strengthened with Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [6] 邓朗妮. 预应力碳纤维板加固受弯构件试验研究及理论分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2010.
DENG Lang-ni. Experimental Research and Theoretical Analysis of Flexural Members Strengthened with Prestressed CFRP Plates [D]. Nanning: Guangxi University, 2010.
- [7] GB 50608—2010, 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范 [S].
GB 50608—2010, Technical Code for Infrastructure Application of FRP Composites [S].
- [8] GB 50367—2013, 混凝土结构加固设计规范 [S].
GB 50367—2013, Code for Design of Strengthening Concrete Structure [S].
- [9] 国住指第 501 号别添, あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針 [S].
Country Living Finger No. 501 Annex, Post-installed Anchor Continuous Fiber Reinforcement Design and Construction Guidelines [S].
- [10] 叶见曙. 结构设计原理 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2014.
YE Jian-shu. Principle of Structure Design [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [11] FURMAN T T. 工程设计中的近似方法 [M]. 罗命钧, 等译. 北京: 新时代出版社, 1985.
FURMAN T T. Approximate Methods in Engineering Design [M]. LUO Ming-jun, et al. translated. Beijing: New Times Press 1985.
- [12] ACI 440. 2R ERTA—2009, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures [S].
- [13] 濱田讓, 安森浩, 小林朗, 等. 炭素繊維プレート緊張材によるコンクリート構造物の補強 [J]. コンクリート工学, 2005, 43 (8): 17-24.
HAMADA Y, YASUMORI H, KOBAYASHI A, et al. Strengthening Method for Concrete Structures with Tensioned CFRP Plate [J]. Concrete Journal, 2005, 43 (8): 17-24.
- [14] 柳州欧维姆结构检测技术有限公司. 预应力碳纤维板锚固体系及设计施工应用指南 [M]. 柳州: 柳州欧维姆结构检测技术有限公司, 2013.
Liuzhou OVM Structure Inspection Technology Co., Ltd. Application Guide for Design and Construction of Prestressed CFRP Plates Anchorage System [M]. Liuzhou: Liuzhou OVM Structure Inspection Technology Co., Ltd., 2013.

(下转第 83 页)

- 维布加固桥梁抗弯性能试验 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (7): 106-112.
- JIANG Xiang-lin, YI Han-bin, ZENG Guo-liang. Experiment on Flexural Behavior of Bridge Structure Strengthened with BFRP Sheet Based on Scale Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (7): 106-112.
- [10] 李贺东, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及韧性评价方法 [J]. 土木工程学报, 2010, 43 (3): 32-39.
- LI He-dong, XU Shi-lang. Research on Flexural Properties and Flexural Toughness Evaluation Method of Ultra High Toughness Cementitious Composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (3): 32-39.
- [11] 岳学军, 黄晓明, 李文龙, 等. 测力延度试验以及韧性比评价指标的研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 33-36.
- YUE Xue-jun, HUANG Xiao-ming, LI Wen-long, et al. Research of Force-ductility Test and Toughness Ratio Index [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 33-36.
- [12] 李雪连, 陈宇亮, 周志刚, 等. 正交异性钢桥面水泥基铺装过渡层的研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (4): 16-21.
- LI Xue-lian, CHEN Yu-liang, ZHOU Zhi-gang, et al. Cement-based Transition Layer for Orthotropic Steel Bridge Deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (4): 16-21.
- [13] 仰建岗, 刘伟, 王秉纲. 钢纤维混凝土弯曲疲劳性能研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (2): 35-37.
- YANG Jian-gang, LIU Wei, WANG Bing-gang. Research on Bending Fatigue Performance for Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (2): 35-37.
- [14] 陈世鸣, 刘欣. 冷拔型钢纤维混凝土板韧性试验研究 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (1): 21-24.
- CHEN Shi-ming, LIU Xin. Experimental Study on Toughness of Cold-drawn Steel-fiber Reinforced Concrete Plate [J]. China Civil Engineer Journal, 2002, 35 (1): 21-24.
- [15] 丁一宁, 董香军, 王岳华. 钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8 (6): 660-664.
- DING Yi-ning, DONG Xiang-jun, WANG Yue-hua. Testing Methods and Evaluating Standards of Flexural Toughness for Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8 (6): 660-664.
- [16] GB/T 50081, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- GB/T 50081, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete [S].
- +++++
- (上接第57页)
- [15] BASLER M, CLÁININ R, LIMIN W. Bridge Strengthening with Prestressed CFRP Plate Systems [C] // Metropolitan Habitats and Infrastructure. Shanghai: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004: 7-12.
- [16] SAADATMANESH H, TANNOUS F E. Relaxation, Creep, and Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96 (2): 143-153.
- [17] EL-HACHA R, WIGHT R G, GREEN M F. Innovative System for Prestressing Fiber-reinforced Polymer Sheets [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100 (3): 305-313.
- [18] 黄金林, 黄培彦, 郑小红. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁预应力损失试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (1): 85-91.
- HUANG Jin-lin, HUANG Pei-yan, ZHENG Xiao-hong. Experimental Study of Prestress Losses of RC Beams Strengthened with Prestress FRP [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (1): 85-91.
- [19] 黄侨. 公路钢筋混凝土简支梁桥的体外预应力加固技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- HUANG Qiao. External Prestress Strengthening Technology for Highway Reinforced Concrete Simply Supported Beam Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [20] 尚守平, 张宝静, 吕新飞. 预应力碳纤维板加固梁桥长期徐变性能的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5): 68-74.
- SHANG Shou-ping, ZHANG Bao-jing, LÜ Xin-fei. Experimental Study on Long-term Creep Behavior of Beam Bridge Strengthened with Prestressed CFRP Plate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (5): 68-74.
- [21] KIM Y J, GREEN M F, WIGHT R G. Bond and Short-term Prestress Losses of Prestressed Composites for Strengthening PC Beams with Integrated Anchorage [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009, 29 (9): 1277-1294.
- [22] 黄侨. 公路桥梁体外预应力加固设计方法专题研究报告 [R]. 南京: 东南大学, 2008.
- HUANG Qiao. Research Report on Design Method of External Prestress Strengthening for Highway Bridges [R]. Nanjing: Southeast University, 2008.