

受压区高度对碳纤维加固桥梁的有效性影响

董三升,雷自学,晏兴威

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:采用理论分析及有限元模拟 2 种方法,研究了《公路桥梁加固设计规范》中粘贴碳纤维抗弯承载力公式的连续性及其承载力提高问题,得出了几种情况下的 $\Delta M-h$ 、 $\Delta M-\rho$ 曲线。结果表明:混凝土受压区高度 x 不同的 2 个承载力计算公式,当 x 等于 ξ_{fb} 时仅在梁高小于 500 mm 或配筋率为 1.6% 左右时连续,而其余情况则发生跳跃;当 $\xi_{fb}h$ 大于等于 x 和小于 $\xi_{fb}h_0$ 时,对梁高小于 600 mm 的构件采用粘贴碳纤维提高抗弯承载力效果并不明显,而当梁高及原构件配筋率愈大时加固效果才愈明显;当 x 小于 $\xi_{fb}h$ 时,计算得的加固后截面承载力却小于加固前的承载力,这显然与实际情况并不相符,因而需对此做进一步地深入研究。

关键词:桥梁工程;碳纤维加固;抗弯承载力;受压区高度;梁高;配筋率

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

Influence of depth of compression zone on effectiveness of strengthened bridges with carbon fiber sheets

DONG San-sheng, LEI Zi-xue, YAN Xing-wei

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Theoretical analysis and finite element modeling were adopted to study the continuity of equations for the flexural capacity of structural members by bonding carbon fiber sheets and the strengthening effect of such method in *specifications for strengthening design of highway bridges* (Chinese Code). A family of $\Delta M-h$ and $\Delta M-\rho$ curves were obtained under different conditions. The results indicate that if x is equal to the parameter of ξ_{fb} , only when the height of a flexural member is less than 500 mm or its longitudinal reinforcement ratio is around 1.6%, the equations are continuous, otherwise jumps occur between the equations; if x is not less than the $\xi_{fb}h$ and less than $\xi_{fb}h_0$, when the height of flexural member is less than 600 mm, the bonding carbon fiber sheets have no marked strengthening effect, whereas with the increase in the height of member and its longitudinal reinforcement ratio, the strengthening effect becomes more prominent; if x is less than $\xi_{fb}h$, the flexural capacity calculated with corresponding equations in the Code is even less than that of the original members without strengthening, which is clearly contrary to the fact, and to which further studies is to be conducted. 2 tabs, 12 figs, 13 refs.

Key words: bridge engineering; strengthening with carbon fiber sheet; flexural capacity; depth of compression zone; beam height; reinforcement ratio

0 引言

碳纤维(CFRP)具有质量轻、纤度好、抗拉强度高、耐高温、耐腐蚀、膨胀系数小等优点,自 20 世纪 70 年代末首次在欧洲被应用于土木工程领域以来,至今已广泛应用于混凝土结构的加固中,其不但可以显著提高混凝土构件的抗弯承载力,而且还可以提高构件刚度及抗剪承载力^[1-3],尤其以不中断交通、施工工期短、无需扰动原结构等优点而在桥梁加固工程中应用愈来愈广^[4-6]。国内外诸多文献对其力学性能进行了研究^[7-9],中国《公路桥梁加固设计规范》、《混凝土结构加固设计规范》也对其进行了一些规定,用以指导加固设计实践。研究发现,《公路桥梁加固设计规范》(以下简称《规范》)对碳纤维加固构件的正截面抗弯极限承载力计算公式还存在一些局限及偏差。为了使这种新型材料能更好地应用于工程实践,本文采用理论研究和有限元分析方法,对《规范》中混凝土构件粘贴碳纤维加固的抗弯承载力计算公式进行分析探讨。

1 《规范》公式分析

1.1 公式连续性分析

《规范》对矩形截面或翼板位于受拉边的钢筋混凝土 T 形截面受弯构件,在受拉面粘贴碳纤维加固时,采用了一些基本假定(详见《规范》),其正截面受弯承载力计算公式如下。

(1) 当混凝土受压区高度 x 大于 $\xi_{fb}h$, 且小于 $\xi_b h_0$ 时(即受拉钢筋屈服、受压区混凝土压碎,而碳纤维未达到其允许拉应变),则有

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + E_f \epsilon_f A_f a_s \quad (1)$$

(2) 当混凝土受压区高度 x 小于等于 $\xi_{fb}h$ 时(即受拉钢筋屈服、碳纤维达到其极限拉应变而拉断,此时受压区混凝土尚未压碎),则有

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - 0.5 \xi_{fb} h) + E_f \epsilon_f A_f h \cdot (1 - 0.5 \xi_{fb}) \quad (2)$$

式中: γ_0 为桥梁结构的重要性系数; M_d 为弯矩组合设计值; f_{cd} 为原构件混凝土抗压强度设计值; b 、 h 分别为受弯构件截面的宽度、高度; x 为混凝土受压区高度; h_0 为原构件截面有效高度; f_{sd} 、 f'_{sd} 分别为构件纵向钢筋抗拉、抗压强度设计值; a'_s 、 a_s 分别为受压区、受拉区普通钢筋合力点到边缘的距离; A_s 、 A'_s 分别为受拉区、受压区钢筋截面面积; E_f 、 ϵ_f 分别

为纤维复合材料的弹性模量和拉应变; A_f 为受拉面粘贴的纤维复合材料的截面面积; ξ_{fb} 为碳纤维达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度; ξ_b 为加固前构件纵向受拉钢筋与受压区混凝土同时达到强度设计值时的受压区高度; ξ_{fb} 、 ξ_b 的计算方法见《规范》及文献[10]。

基于对规范公式的理解,随着 x 的变化,正截面承载力的计算结果应连续变化而不应有较大的跳跃,即当 $x = \xi_{fb}h$ 时,式(1)、式(2) 应给出一致的计算结果。

以矩形截面梁为例,计算粘贴一层 300 g 碳纤维(碳纤维厚度 $t_f = 0.167$ mm) 加固后的抗弯极限承载力。当 x 等于 $\xi_{fb}h$ 时,以 M_1 、 M_2 分别表示式(1)、式(2) 计算的构件抗弯承载力,以 ΔM 表示 M_1 、 M_2 的差值。暂定 ΔM 为梁高 h 和受拉钢筋配筋率 ρ 的函数,构件高宽比 $n = h/b$ 、受压钢筋配筋率 ρ' 与受拉钢筋配筋率 ρ 的比值 $m = \rho'/\rho$ 为定值,则有

$$M_1(h, \rho) = f_{cd} \frac{h}{n} \xi_{fb} h \left[h_0(h) - \frac{\xi_{fb} h}{2} \right] + f'_{sd} \frac{m \rho h^2}{n} [h_0(h) - a'_s] + E_f \epsilon_f A_f(h) a_s \quad (3)$$

$$M_2(h, \rho) = f_{sd} \rho \frac{h^2}{n} [h_0(h) - 0.5 \xi_{fb} h] + E_f \epsilon_f A_f(h) h (1 - 0.5 \xi_{fb}) \quad (4)$$

$$\Delta M(h, \rho) = M_1(h, \rho) - M_2(h, \rho) \quad (5)$$

在式(3) ~ 式(5) 中,参照《规范》的规定及计算方法,令 $f_{cd} = 18.4$ MPa, $f_{sd} = f'_{sd} = 280$ MPa, 混凝土极限压应变 $\epsilon_{cu} = 0.0033$, $E_f = 2.4 \times 10^5$ MPa, $A_f = 0.167b = 0.167h/n$, $n = 3$, $m = 1/3$, $\xi_{fb} = 0.256h$, $a_s = a'_s = 40$ (如未加说明,下文中均取同值)。不考虑碳纤维二次受力的影响,计算并绘制 ΔM 的曲线见图 1 和下页图 2。

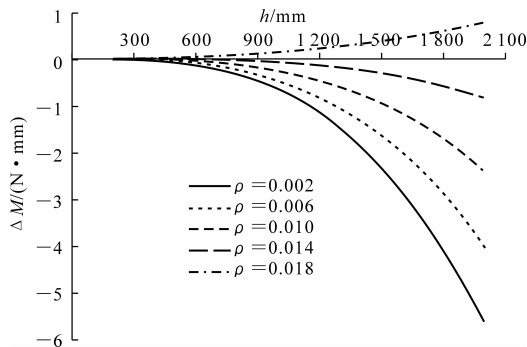
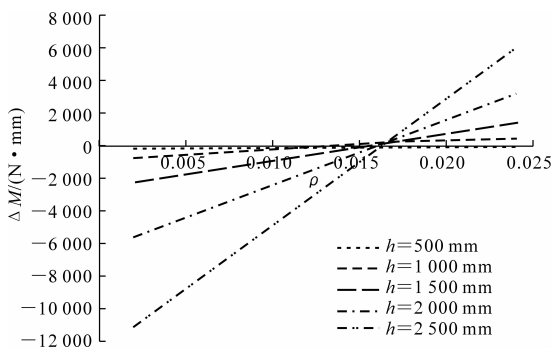


图1 ΔM 与 h 的变化曲线

由图1、图2可知: ΔM 与梁高 h 呈曲线关系,与受拉钢筋配筋率 ρ 呈直线关系;当梁高小于等于 500 mm 时,无论 ρ 多大 ΔM 均趋近于 0,当梁高大于 500

图2 ΔM 与 ρ 的变化曲线

mm 时, ΔM 的值随着梁高的增大而增大;受弯构件配筋率约以 1.6% 为中心增大或缩小时, ΔM - ρ 曲线均逐渐偏离零线,且呈线性关系;梁截面越大, ρ 越小,偏差愈大。

从图 1、图 2 的计算结果可看出, ΔM 在多数情况下不等于 0,且随着 ρ 和 h 取值的不同 ΔM 的变化较大,说明式(1)、式(2)的计算结果不连续,在 $x = \xi_{fb}h$ 时发生跳跃;《规范》中的公式仅在梁高小于 500 mm 或 ρ 为 1.6% 左右时抗弯承载力才连续。

1.2 加固承载力分析

根据文献[10],无预应力钢筋的矩形截面或翼板位于受拉边的钢筋混凝土 T 形截面受弯构件,其正截面抗弯承载力计算公式为

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) \quad (6)$$

在其受拉面粘贴碳纤维后,《规范》规定,根据受压区高度不同分别采用式(1)、式(2)计算其正截面抗弯承载力。用 ΔM_3 、 ΔM_4 分别表示式(1)、式(2)与式(6)计算得构件加固后、加固前抗弯承载力的变化值,则有

$$\Delta M_3 = f_{cd} \left[h_0 (x_2 - x_1) - \frac{1}{2} (x_2^2 - x_1^2) \right] + E_f \epsilon_f A_f a_s \quad (7)$$

$$\Delta M_4 = f_{sd} A_s [h_0 - 0.5 \xi_{fb} h] + E_f \epsilon_f A_f h (1 - 0.5 \xi_{fb}) - f_{cd} b x_1 (h_0 - \frac{x_1}{2}) - f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) \quad (8)$$

式中: x_1 、 x_2 分别为加固前、后的混凝土受压区高度。依据《规范》公式计算得

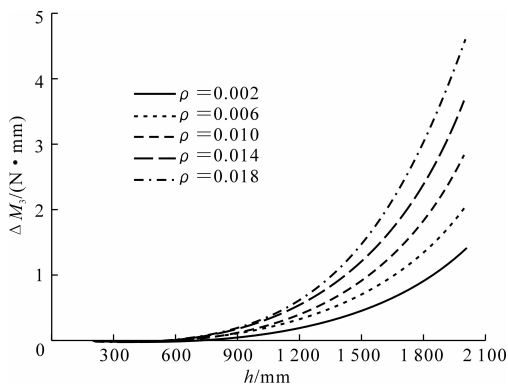
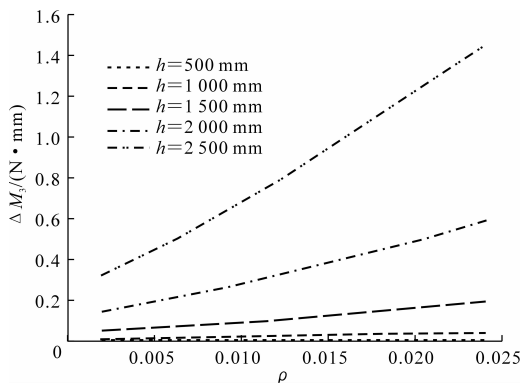
$$x_1 = \frac{f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s}{f_{cd} b} = 10.14 \rho h$$

$$x_2 = \frac{a + (a^2 + 3.2 f_{cd} b E_f A_f \epsilon_{cu} h)^{1/2}}{2 f_{cd} b}$$

其中, $a = f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s - E_f A_f \epsilon_{cu}$ 。

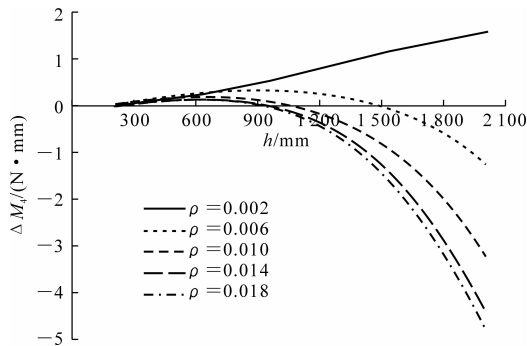
取前边各参数的暂定值,计算并绘制 ΔM_3 、

ΔM_4 的曲线,如图 3 ~ 图 6 所示。

图3 ΔM_3 与 h 的变化曲线图4 ΔM_3 与 ρ 的变化曲线

从图 3、图 4 可知,当配筋率一定时 ΔM_3 随着梁高的增大而呈曲线增大,梁高一定时 ΔM_3 随着配筋率的增大呈直线变化;当梁高小于等于 600 mm 时, ΔM_3 趋于 0,当梁高大于 600 mm 时, ΔM_3 随着配筋率或梁高的增大而越来越大。

图 3、图 4 计算结果表明,对梁高小于 600 mm 的构件采用粘贴碳纤维提高抗弯承载力几乎无效果,梁高愈高、原构件配筋率愈大,加固效果愈明显。

图5 ΔM_4 与 h 的变化曲线

从图 5、图 6 可知,对受弯构件粘贴碳纤维加固后,在碳纤维拉断而受压区混凝土未压碎破坏时,对于原构件配筋率小时抗弯承载力有一定提高,且随梁高的增大效果愈明显;而当配筋率及梁高均较大

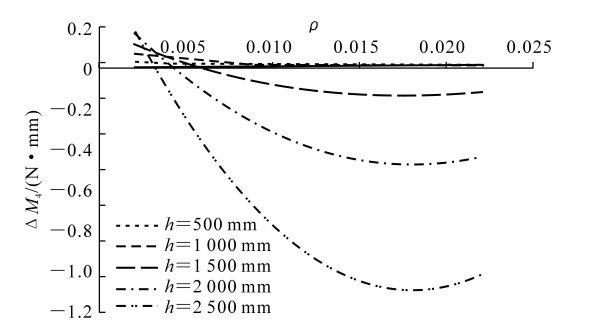


图6 ΔM_i 与 ρ 的变化曲线

时,竟出现了加固后构件的抗弯承载力小于加固前构件承载力的情况,且随着梁高及配筋率的增大而下降愈多的现象。

2 算 例

2.1 实例概况

本文以预应力 T 形截面梁为例,对其进行粘贴碳纤维加固后的正截面抗弯承载力计算,截面尺寸及配筋情况如图 7、表 1、表 2 所示。

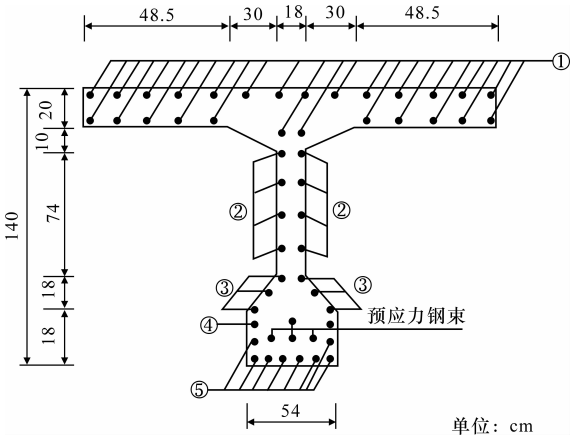


图7 截面形式及配筋

表 1 普通钢筋数量

钢筋号	级别	根数/根	屈服强度/MPa	直径/mm
①	Ⅱ	26	300	12
②	Ⅱ	8	300	12
③	Ⅱ	6	300	12
④	Ⅱ	2	300	12
⑤	Ⅱ	8	300	12

表 2 预应力钢束

钢束组成	数量/束	屈服强度/MPa
5Φ 15.24	4	1 320

2.2 计算结果

考虑 T 形梁中预应力筋及主筋受力情况,参照文献[10]的公式,计算出 T 形梁的抗弯极限承载力为 4 696 kN·m。

采用在该预应力混凝土 T 形截面梁下表面粘

贴碳纤维片材的方式进行加固(不考虑二次受力的影响),单片碳纤维的厚度为 0.167 mm,弹性模量为 2.4×10^5 MPa,泊松比为 0.21,取其极限抗拉强度设计值为 3 000 MPa。粘贴一层碳纤维时,根据《规范》公式算得混凝土受压区高度为 111.57 mm,其值小于 $\xi_b h$ (407.3 mm),故采用式(2)计算其加固后的抗弯承载力。算得结果为 4 111 kN·m < 4 696 kN·m。所以得出结论:T 形梁加固后截面的抗弯承载力小于加固前的抗弯承载力,这有悖于加固理论的初衷,说明《规范》对加固后的承载力计算公式在某些情况下存在缺陷。

若采用文献[11]中公式 9.2.3-1 和 9.2.3-2,则计算得加固后 T 形梁的承载力为 4 974.7 kN·m,比加固前承载力提高约 6%。

2.3 有限元建模分析结果

为检验该计算结果,参照文献[12-13],采用有限元分析软件 ANSYS,对上述预应力 T 形截面梁加固前、后分别进行建模,计算其抗弯承载力。假定 T 形梁跨径为 20 m,两端简支,根据材料特性选用 SOLID65 单元模拟混凝土,并以配筋率的形式将普通钢筋弥散至混凝土中,选用 LINK8 单元模拟预应力钢束,选用 SHELL41 单元模拟碳纤维片材^[8],建模过程如图 8~图 12 所示。

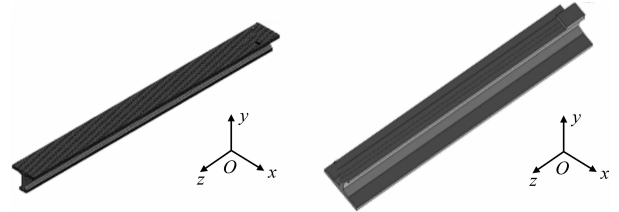


图8 整体模型

图9 碳纤维布置

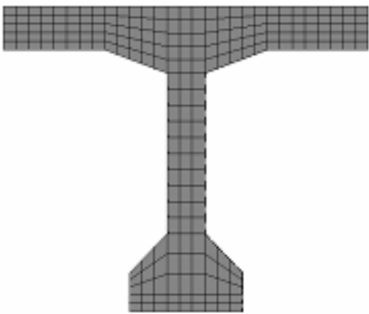


图10 模型截面

根据 ANSYS 的计算结果,T 形截面梁加固前的正截面承载力为 4 624 kN·m,与理论值相差 1.5%,吻合较好;加固后的正截面承载力为 4 994 kN·m,比加固前提高了约 8%,与文献[11]计算所得结论较吻合,但与《规范》公式计算结果相差较大。

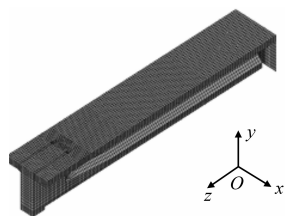


图11 计算模型

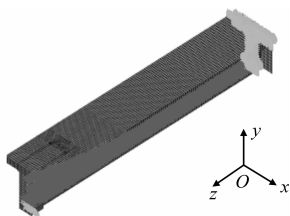


图12 约束情况

3 结 语

(1) 当 $x = \xi_{fb}h$ 时,《规范》关于 $x > \xi_{fb}h$ 和 $x < \xi_{fb}h$ 这2种情况下的抗弯承载力计算公式仅在梁高小于 500 mm 或配筋率在 1.6% 时连续,而其余情况则发生跳跃,并且公式的计算差值随梁高的增大或配筋率远离 1.6% 而变大。

(2) 当混凝土受压区高度 x 大于 $\xi_{fb}h$ 且小于 $\xi_{fb}h_0$ 时,对梁高小于 600 mm 的构件采用粘贴碳纤维提高抗弯承载力效果并不明显,而当梁高愈高、原构件配筋率愈大时加固效果才愈明显。

(3) 当 $x \leq \xi_{fb}h$ 且受拉钢筋配筋率和梁高取在某一范围内时,利用《规范》公式计算的加固后截面承载力小于加固前的承载力,即采用碳纤维加固后非但没有提高构件的抗弯承载力,反而降低了,这显然与实际情况不相符。

(4) 《规范》中的粘贴碳纤维抗弯承载力计算公式存在一些缺陷,不便于更好地实际应用,建议需做进一步的研究改进。

参考文献:

References:

[1] 王文伟,赵国藩,黄承逵,等.碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J].工程力学,2004,21(4):172-178.
WANG Wen-wei, ZHAO Guo-fan, HUANG Cheng-kui, et al. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 172-178.

[2] 黄平明,邹兰林,王 达.碳纤维板加固 RC 梁试验[J].建筑科学与工程学报,2007,24(4):70-73.
HUANG Ping-ming, ZOU Lan-lin, WANG Da. Experiment of RC beam strengthened with CFRP plates[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 70-73.

[3] Mohammadizadeh M R, Fadaee M J. Torsional behaviour of high-strength concrete beams strengthened using CFRP sheets: an experimental and analytical

study[J]. Scientia Iranica, 2009, 16(4A): 321-330.

[4] 钟 龙,郑山锁,王 斌,等.采用碳纤维布加固预应力混凝土吊车梁的设计方法[J].建筑科学与工程学报,2007,24(2):54-58.
ZHONG Long, ZHENG Shan-suo, WANG Bin, et al. Design method of strengthening prestressed concrete crane girder using CFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 54-58.

[5] 周朝阳,黄 林,贺学军.粘贴预应力碳纤维布钢梁的放张效应[J].建筑科学与工程学报,2010,27(4):14-18.
ZHOU Chao-yang, HUANG Lin, HE Xue-jun. Effect of releasing pretension for steel beams bonded with prestressed carbon fiber sheet[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 14-18.

[6] Grace N F, Singh S B, Shinouda M M, et al. Flexural response of CFRP prestressed concrete box beams for highway bridges[J]. PCI Journal, 2004, 49(1): 92-104.

[7] 张伟平,王晓刚,顾祥林.碳纤维布加固锈蚀钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J].土木工程学报,2010,43(6):34-41.
ZHANG Wei-ping, WANG Xiao-gang, GU Xiang-lin. Flexural behavior of corrosion infomed concrete beams strengthened with carbon fiber composite sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 34-41.

[8] 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):45-51.
DENG Zong-cai. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 45-51.

[9] Ng S C, Lee S. A study of flexural behavior of reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(10): 919-938.

[10] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[11] GB 50367—2006,混凝土结构设计规范[S].

[12] 赵志平,常建立,杨晓光.利用 ANSYS 对碳纤维布加固 RC 梁的非线性有限元分析[J].四川建筑科学研究,2006,32(1):79-83.
ZHAO Zhi-ping, CHANG Jian-li, YANG Xiao-guang. Analyzing the anti-bending function of RC beams strengthened with bottom bonded CFRP[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(1): 79-83.

[13] 李绍俊.基于 ANSYS 的碳纤维布加固的钢筋混凝土梁的有限元分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.