

文章编号: 1674-599X(2022)01-0021-06

碳纤维加固二次受力混凝土梁理论计算方法

钟正强, 陈敬智, 刘卓泽

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究二次受力影响下碳纤维网格-聚合物砂浆复合加固梁的抗弯性能, 完善其抗弯极限承载力和挠度的计算理论, 基于受压区混凝土本构关系, 推导出不同破坏模式下碳纤维加固梁的极限抗弯承载力公式, 并提出识别加固梁破坏模式的计算判据。按刚度解析法, 推导出二次受力下碳纤维加固梁短期刚度计算公式。采用插值拟合法对 $M-x_n$ 、 $M-\beta_1$ 等二元方程进行处理, 应用于不同荷载等级下加固梁的挠度控制验算, 规避参数取值问题带来的求解误差。针对不同预载幅值下4根碳纤维网格加固梁进行了抗弯试验, 将理论计算值与试验值进行对比。研究结果表明: 碳纤维网格加固梁理论计算值和试验值较为吻合, 相关计算方法对指导实际工程设计具有一定参考价值。

关键词: CFRP加固; 钢筋混凝土梁; 二次受力; 抗弯极限承载力; 挠度

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Theoretical calculation method of carbon fiber reinforced concrete beam under secondary loading effects

ZHONG Zheng-qiang, CHEN Jing-zhi, LIU Zhuo-ze

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the flexural performance of the carbon fiber mesh-polymer mortar composite reinforced beam under the secondary loading effects, and improve the calculation theory of its ultimate flexural bearing capacity and deflection. Based on the constitutive relationship of the concrete in compression zone, the ultimate flexural bearing capacity formula of the carbon fiber reinforced beam under different failure modes was derived, and the calculation criterion of identifying the failure mode of the reinforced beam was proposed. According to the stiffness analysis method, the short-term stiffness calculation formula of the carbon fiber reinforced beam under the secondary force was derived. The method of interpolation fitting was used to process binary equations such as $M-x_n$, $M-\beta_1$, which was applied to the deflection control check calculation of the reinforced beam under different load levels, to avoid the solution errors caused by the parameter value problems. The bending test was carried out on 4 carbon fiber mesh reinforced beams under different preload amplitudes, and the theoretical calculation value was compared with the experimental value. The results show that the theoretical calculation value of the carbon fiber mesh reinforced beam is relatively consistent with the experimental value, and the relevant calculation method has a certain reference to guide the design of actual engineering.

Key words: CFRP reinforcement; RC beams; secondary force; ultimate flexural capacity; deflection

钢筋混凝土梁广泛应用于中国民用建筑和中
小型城市桥梁主体结构中。由于车流量增大, 部

分旧桥受损严重^[1], 已经不能满足设计规范的要
求。加固规范^[2]明确指出: 碳纤维材料加固受弯构

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(13JJ3067)

作者简介: 钟正强(1968—), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。

件承载力计算需充分考虑二次受力带来的影响。因此,本研究从抗弯构件的角度出发,通过对比理论计算值和试验结果,研究二次受力对碳纤维网格-聚合物砂浆复合加固梁极限承载力和挠度的影响规律,有效提高了碳纤维加固梁挠度和承载力计算预测的精度。

当前,许多学者在受弯构件理论计算方面开展了大量推导研究。唐浩杰等人^[3]对预应力混凝土箱梁进行受弯破坏试验,采用有限条带法计算了开裂与破坏弯矩,与试验结果较为吻合。潘毅等人^[4]提出了碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固RC梁的抗弯承载力改良计算模型。江世永等人^[2,5]指出现有加固规范缺少对加固梁变形控制验算的有效方法,不能准确判断加固梁在使用阶段内是否满足正常使用极限状态的要求。因此,提出了一种在设计阶段对加固梁进行挠度计算的方法。出于安全考虑,对加固梁承载力和挠度进行折减,能有效提高计算效率。但该方法对不同系数的取值欠缺考究,影响计算的准确性。因此,本研究从混凝土本构模型出发,对加固梁承载力和挠度计算公式进行推导,并考虑了不同参数的取值方法。

1 CFRP加固梁抗弯承载力计算方法

1.1 基本原理

选取碳纤维网格加固梁跨中截面进行分析,受压区混凝土采用规范中混凝土应力-应变曲线^[6],如图1所示。在图1(c)中,对受压区混凝土截面应力积分,可得合力 C ,以及合力到中和轴的距离 y_c 为:

$$C = \begin{cases} f_c b x_n \left[\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ f_c b x_n \left(1 - \varepsilon_0 / 3 \varepsilon_c \right), & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_c = \begin{cases} \frac{\int_0^{x_n} \sigma_c(\varepsilon) b y dy}{C} = \left(1 - \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{12\varepsilon_0 - 4\varepsilon_c} \right) x_n, & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_0^2}{12\varepsilon_c^2 - 4\varepsilon_0\varepsilon_c} x_n, & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 为极限抗压强度; ε_c 为混凝土压应变; ε_0 为达到极限抗压强度时的应变; ε_{cu} 为极限压应变;

σ_c 为混凝土; b 为梁宽; x_n 为中和轴高度。

混凝土受压区采用等效矩形应力法^[7],由合力作用点位置不变,可得等效高度 x 为:

$$x = 2(x_n - y_c) = \beta_1 x_n \quad (3)$$

其中,

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{6\varepsilon_0 - 2\varepsilon_c}, & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ 2 \left(1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_0^2}{12\varepsilon_c^2 - 4\varepsilon_0\varepsilon_c} \right), & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (4)$$

由截面力平衡条件可得:

$$\int_0^{\varepsilon_0 x_n} \sigma_c(\varepsilon) b dy + \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_0 x_n} f_c b dy + \sigma'_s A'_s = \sigma_{s_0} A_{s_0} + \sigma_f A_{f_0} \quad (5)$$

由平截面假定^[8]确定截面几何关系,可将式(5)化归到只含有变量 ε_c 和 x_n 的方程:

$$A x_n^2 + B x_n + C = 0 \quad (6)$$

式中: $A = C/x_n$; $B = \varepsilon_c E_s A'_s + \varepsilon_c E_s A_{s_0} + \varepsilon_c E_f A_{f_0} + \varepsilon_{s_1} E_f A_{f_0}$; $C = -\varepsilon_c [a'_s E_s A'_s + h_1 E_s A_{s_0} + (h_0 + d) E_f A_{f_0}]$;

$$x_n = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} > 0$$

由弯矩平衡条件和截面几何关系,对截面混凝土受压区合力作用点取距,可得:

$$M = M_0 - \varepsilon_{s_1} E_f A_{f_0} \left(h_1 + d - \frac{x}{2} \right) \quad (7)$$

其中,

$$M_0 = \frac{\varepsilon_c}{x_n} \left[\left(x_n - a'_s \right) E_s A'_s \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + \left(h_1 - x_n \right) E_s A_{s_0} \right] + \left[\left(h_1 - \frac{x}{2} \right) + \left(h_0 + d - x_n \right) E_f A_{f_0} \left(h_0 + d - \frac{x}{2} \right) \right] \quad (8)$$

式中: ε_c 为钢筋混凝土梁梁顶压应变; ε_{s_1} 为碳纤维网格带后应变; A_{s_0} 、 A'_s 、 A_{f_0} 为纵向受拉、受压钢筋和CFRP网格的截面有效面积; d 为找平砂浆层厚度; a'_s 为梁顶距受压钢筋的高度; h 为加固梁梁高; h_0 为梁顶距碳纤维网格高度; h_1 为梁顶距受拉钢筋高度; E_s 、 E_f 为钢筋和CFRP网格的弹性模量。

根据式(8)得到 $M-\varepsilon_c$ 关系,推导出 $M-x_n$ 、 $M-\beta_1$ 等关系,用于后续挠度计算。

1.2 计算流程

由加固规范可知,抗弯构件梁二次受力引起的纤维复合材料滞后应变^[2,8]为:

$$\varepsilon_{s_1} = \frac{\alpha_f M_{0_1}}{E_s A_{s_0} h_1} \quad (9)$$

破坏类型一: 钢筋屈服, 受压区混凝土压碎。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (10)$$

将式(9)~(10)分别代入式(4)和式(7), 可得 β_1 和 x_n 。再代入式(3), 可计算得出 x , 再将 x 和 x_n 代入式(7)~(8), 得出受压区混凝土压碎破坏状态下加固梁的抗弯极限承载力。

破坏类型二: 加固梁钢筋屈服, CFRP网格布拉断破坏, 有 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$, $\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_{s_1}$ 。

由截面几何关系可得:

$$\varepsilon_c = \frac{x_n}{h_0 + d - x_n} (\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{s_1}) \quad (11)$$

用式(11)代替式(10), 计算流程同破坏类

型一, 即可得出CFRP网格拉断破坏状态下加固梁的抗弯极限承载力。

1.3 破坏现象判断

钢筋混凝土加固梁相对界限受压区高度:

$$\xi_b = \frac{x}{h_1} = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (12)$$

同时发生碳纤维拉断与受压区混凝土压溃时的相对界限受压区高度:

$$\xi'_b = \frac{x}{h_0 + d} = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{s_1}} \quad (13)$$

当 $x < \xi'_b (h_0 + d)$ 时, 加固梁破坏类型为碳纤维网格拉断破坏; 当 $\xi'_b (h_0 + d) < x < \xi_b h_1$ 时, 破坏类型为受压区混凝土压溃破坏; 当 $x > \xi_b h_1$ 时, 受拉钢筋未屈服, 破坏类型为超筋破坏。

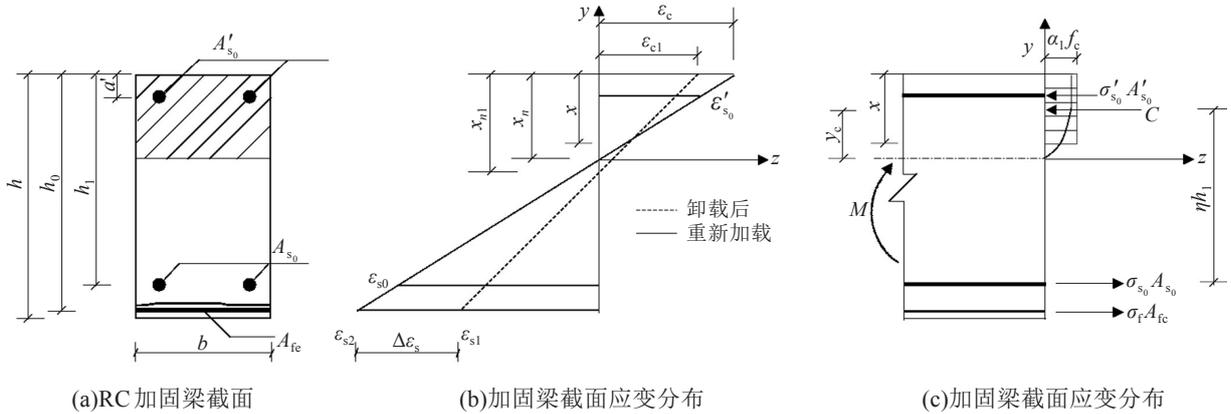


图1 加固后矩形截面梁正截面应力应变

Fig. 1 The stress and strain on the normal section of the reinforced rectangular section beam

2 CFRP加固梁挠度计算方法

钢筋混凝土梁刚度计算方法主要分为有效惯性矩法、刚度解析法和受拉刚化效应修正法^[9]。本研究主要参考刚度解析法^[10]对二次受力下碳纤维网格加固梁的短期刚度进行推导。由弯矩平衡和平截面假定, 可得关于受拉钢筋应变 ε_{s_0} 的弯矩表达式为:

$$M_2 = M_1 - \varepsilon_{s_1} E_f A_{fe} \left(h_0 + d - \frac{x}{2} \right) \quad (14)$$

其中,

$$M_1 = E_s \varepsilon_{s_0} (h_1 - x/2) (A_{s_0} + \bar{A}_s) \quad (15)$$

$$\bar{A}_s = \frac{x_n - a'_s}{h_1 - x_n} A'_{s_0} \frac{x/2 - a'_s}{h_1 - x/2} +$$

$$\frac{E_f}{E_s} \frac{h_0 + d - x_n}{h_1 - x_n} A_{fe} \frac{h_0 + d - x/2}{h_1 - x/2} \quad (16)$$

由式(15)原加固梁截面可转换为单筋矩形截面。参考刚度解析法思路^[11-12], 得到短期刚度:

$$B_s = \frac{E_s (A_{s_0} + \bar{A}_s) h_{0_1}^2}{0.2 + 6\alpha_E \rho + \frac{\psi}{\eta}} \quad (17)$$

式中: $\alpha_E = E_s/E_c$; $\rho = (A_{s_0} + \bar{A}_s)/bh_{0_1}$; \bar{A}_s 为等效受拉钢筋面积, mm^2 ; η 为内力臂系数; ψ 为应变不均匀系数。

$$\eta = 1 - \frac{x}{2h_1} \quad (18)$$

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sq}} \quad (19)$$

$$\sigma_{sq} = \frac{M_1}{(A_{s_0} + \bar{A}_s)(h_1 - x/2)} \quad (20)$$

$$\text{有效配筋率: } \rho_{te} = (A_{s_0} + \bar{A}_s)/0.5bh_{0_1} \quad (21)$$

查阅《建筑结构静力计算手册》可知, 对于两点对称加载的简支梁, 其跨中挠度为:

$$f = \frac{Pl^3}{24B_s} \alpha(3 - 4\alpha^2) = \frac{3l^2 - 4a^2}{24} \cdot \frac{M}{B_s} \quad (22)$$

式中： l 为梁的计算跨度，mm； a 为加载点到支座的最近距离，mm， $\alpha=a/l$ 。

3 理论值与试验值对比分析

3.1 试验方案与设计

为研究二次受力对碳纤维网格加固梁^[13-15]抗弯承载力和跨中挠度的影响，本试验设计了4片钢筋

混凝土矩形梁，每片梁的尺寸和配筋情况均相同。截面尺寸为： $b \times h_0 = 120 \times 240$ mm，梁长 $L = 2\ 600$ mm，计算长度 $L_0 = 2\ 400$ mm，高跨比 $h/L_0 = 240/2\ 400$ ，剪跨比 $\lambda = a/h_1 = 1\ 000/(240 - 30)$ 。纵向受力筋采用HRB335级热轧月牙纹带肋钢筋。其中，架立筋为 $2\Phi 12$ ， $A'_{s_0} = 226$ mm²，受拉主筋为 $2\Phi 18$ ， $A_{s_0} = 509$ mm²。混凝土强度等级为C40，混凝土保护层厚度为30 mm。试验采用四点弯曲加载方式，以5 kN/级的速率进行加载^[16]，加载装置如图2所示。

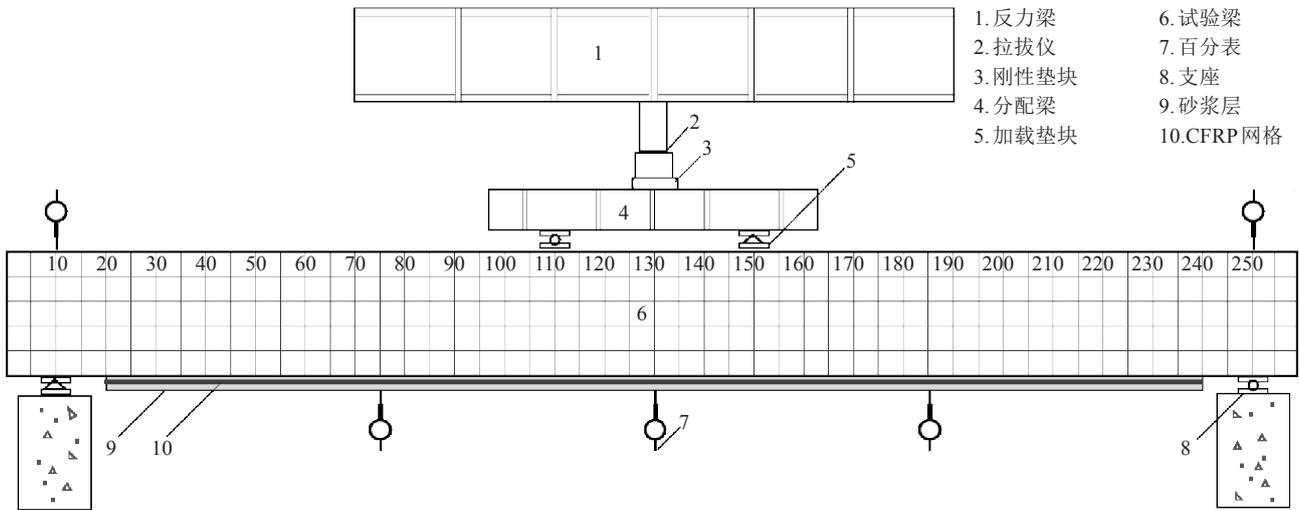


图2 加固梁加载装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the loading apparatus of the reinforced beam

本试验对不同加载历程下碳纤维网格-聚合物砂浆复合加固梁进行了对比试验，以期了解二次受力对加固梁抗弯性能的影响，对照组详情见表1。

表1 试验变量设计

Table 1 Design of experimental variables

试件编号	加载历程	加固方式	备注
CFN	0→Pu	一层CFN	加固参考梁
CFN-04	0→40%Pu→0→Pu	一层CFN	二次受力梁
CFN-06	0→60%Pu→0→Pu	一层CFN	二次受力梁
CFN-08	0→80%Pu→0→Pu	一层CFN	二次受力梁

3.2 抗弯承载力结果对比分析

二次受力下碳纤维加固梁的极限承载力与试验值见表2。由表2可知，施加的预载幅值越大，碳纤维网格的滞后应变越明显，加固梁承载力提高程度随之降低。

3.3 挠度结果对比分析

对荷载-中和轴高度曲线($P-x_n$)和荷载-等效矩形应力系数的二元方程式进行插值拟合，其关

系曲线如图3~4所示。从图3~4中可以看出，刚开始受力时，加固梁受压区混凝土处于弹性变形状态，中和轴高度 x_n 随外加荷载的逐级施加呈抛物线型增长。继续加载，受压钢筋开始受力，受压区混凝土应力发生重分布现象， x_n 发生突变。本研究将 $P-x_n$ 、 $P-\beta_1$ 分为3段，采用分段多项式拟合和中间段线性插值的方法，将该曲线应用于加固梁挠度的计算，有效提高了计算的精度和准确性。

表2 理论值与试验值对比

Table 2 Comparison of theoretical and experimental values

试件编号	试验值/kN	计算值/kN	计算值/试验值
CFN	102.10	116.90	1.144
CFN-04	98.75	113.61	1.150
CFN-06	94.00	107.09	1.139
CFN-08	90.10	102.84	1.141

注：Pu表示抗弯极限荷载；CFN为碳纤维网格简称

在挠度计算公式的推导过程中，因没有考虑到砂浆层对加固梁中和轴高度的影响，会对加固

梁的短期刚度进行了折减, 所以理论计算值相对于实测值有所偏大。从图5~8中可以看出, 通过对比不同预载幅值下的加固梁荷载-挠度曲线可知, 预加荷载值越大, 聚合物砂浆层拉裂受损越严重, 二次受力下砂浆层对加固梁中和轴高度的影响越小, 加固梁挠度计算值越接近实测值。

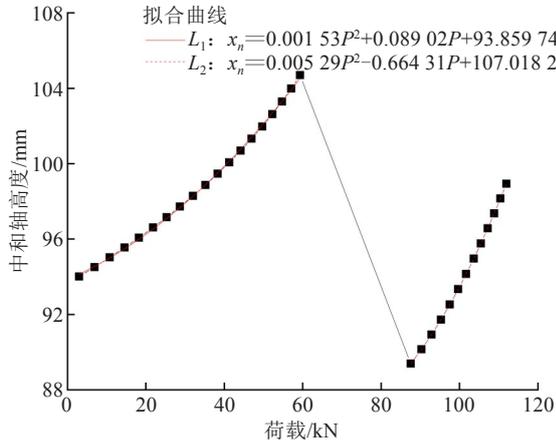


图3 P-x_n曲线
 Fig. 3 P-x_n curve

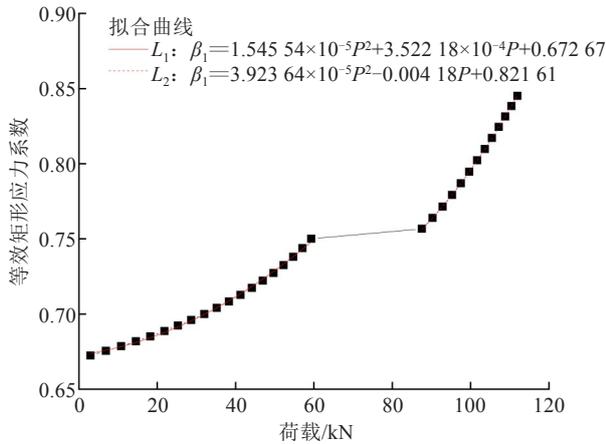


图4 P-β₁曲线
 Fig. 4 Load-stress coefficient curve

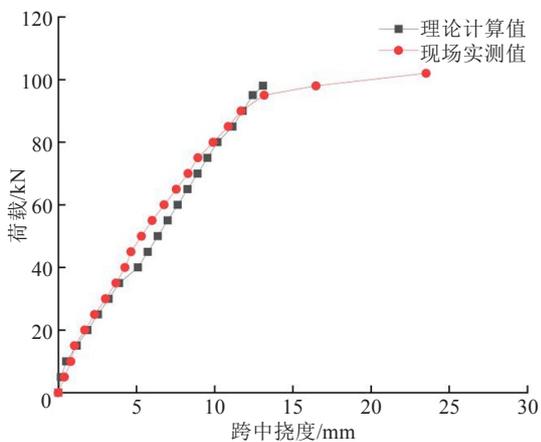


图5 CFN加固参考梁荷载-位移曲线对比
 Fig. 5 Load-displacement curves of CFN reinforced beam

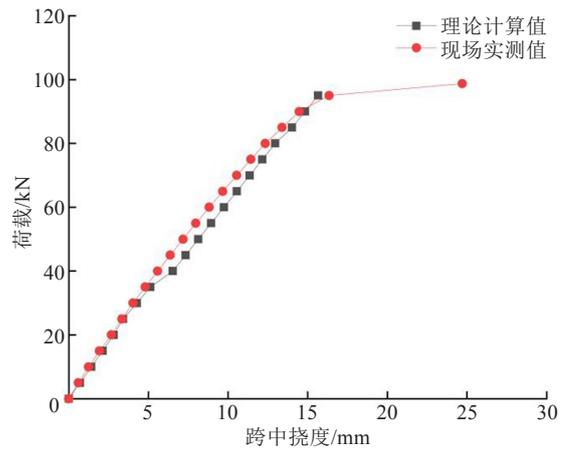


图6 CFN-04加固梁荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Load-displacement curves of CFN-04 reinforced beam

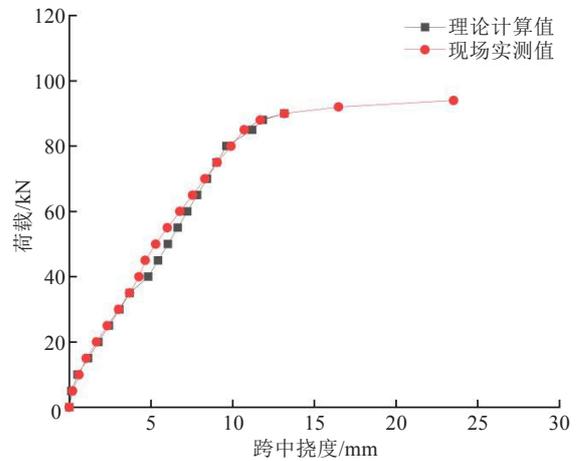


图7 CFN-06加固梁荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Load-displacement curves of CFN-06 reinforced beam

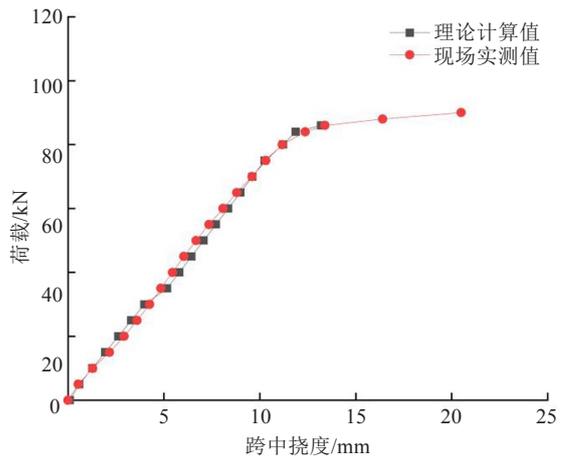


图8 CFN-08加固梁荷载-位移曲线对比

Fig. 8 Load-displacement curves of CFN-08 reinforced beam

4 结论

1) 本研究对二次受力下碳纤维网格加固梁的抗弯承载力计算公式进行了推导, 通过计算其相

对界限高度来判断加固梁的破坏类型, 并采用该类型承载力公式进行求解计算。

2) 基于规范中抗弯构件正截面混凝土应力-应变关系式, 推导出 $P-x_n$ 、 $P-\beta_1$ 关系曲线, 并应用于加固梁加载全过程挠度计算, 计算值与试验结果的契合度较好, 有效提高了计算精度。

3) 本研究提供了一种计算思路, 规避了由等效矩形应力系数 β_1 、内力臂系数 η 等参数取值带来的求解误差。所有公式不仅限于碳纤维网格加固梁的承载力和挠度计算, 对采用碳纤维布、碳纤维板等其他材料的加固梁同样适用。

参考文献(References):

- [1] 杨杰平. 某现浇连续箱梁桥裂缝原因及加固技术分析[J]. 公路与汽运, 2020, 196(1): 118-120. (YANG Jie-ping. Analysis of causes of cracks in a cast-in-situ continuous box girder bridge and reinforcement techniques[J]. Highway & Automotive Applications, 2020, 196(1): 118-120. (in Chinese))
- [2] 四川省建筑科学研究院. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Sichuan Provincial Academy of Building Research. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [3] 唐浩杰, 蒲黔辉, 文亚男, 等. 预应力高强混凝土箱梁极限承载力研究[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 30-36. (TANG Hao-jie, PU Qian-hui, WEN Ya-nan, et al. Study on ultimate bearing capacity for the pre-stressed high strength concrete box girder[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 30-36. (in Chinese))
- [4] 潘毅, 胡文豪, 郭瑞, 等. 碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固RC梁的抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 119-128. (PAN Yi, HU Wen-hao, GUO Rui, et al. Experimental study on flexural performance of RC beams strengthened with CFRP grid-PCM[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 119-128. (in Chinese))
- [5] 江世永, 蔡涛, 姚未来, 等. 一种粘贴FRP加固混凝土梁设计阶段的挠度验算方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(9): 11-16. (JIANG Shi-yong, CAI Tao, YAO Wei-lai, et al. A checking method for deflection of reinforced concrete beams bonded with frp during design stage[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(9): 11-16. (in Chinese))
- [6] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (China Academy of Building. Research Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [7] 方圣恩, 武棒棒. 多破坏模式和二次受力影响下FRP加固RC梁抗弯承载力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 180-188. (FANG Sheng-en, WU Bang-bang. Ultimate load capacity of FRP-strengthened RC beams considering different failure modes and secondary loading effects[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 180-188. (in Chinese))
- [8] 蒋济同, 张琪. 应力滞后对增大截面加固受弯构件抗弯承载力的影响研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 862-869. (JIANG Ji-tong, ZHANG Qi. Study on the stress lagging effect on flexural capacity of flexural members strengthened with enlarged cross-section method[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 862-869. (in Chinese))
- [9] 过镇海. 钢筋混凝土原理: 第3版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 236-242. (GUO Zhen-hai. Principles of Reinforced Concrete: 3th edition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 236-242. (in Chinese))
- [10] 秦丽辉, 李岩, 王宗林, 等. BFRP加固损伤混凝土梁挠度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(6): 17-26. (QIN Li-hui, LI Yan, WANG Zong-lin, et al. Deflection calculating method of damaged concrete beams strengthened with BFRP[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(6): 17-26. (in Chinese))
- [11] 沈蒲生, 梁兴文. 混凝土结构设计原理: 第4版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (SHEN Pu-sheng, LIANG Xing-wen: 4th edition [M]. Principles of Concrete Structure Design, Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 陈绪军. FRP片材加固钢筋混凝土梁挠度计算方法研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(11): 103-107. (CHEN Xu-jun. Study on deflection calculation method for reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(11): 103-107. (in Chinese))
- [13] 邓宗才, 李佳跃, 程传超, 等. CFN加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(6): 73-

- seismic response of long span continuous girder bridge with small radius curve[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(7):26-29.(in Chinese)
- [11] 郑家杭,张怀杰,殷新锋,等. 悬索管道桥施工阶段人致振动分析[J]. *公路与汽运*, 2020(6):97-100. (ZHENG Jia-hang, ZHANG Huai-jie, YIN Xin-feng, et al. Analysis of Human induced vibration in construction stage of suspension pipeline bridge [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2020(6):97-100.(in Chinese))
- [12] 张品乐,李青宁. 短肢剪力墙抗震性能试验[J]. *建筑结构*, 2010,40(12):98-100. (ZHANG Pin-le, LI Qing-ning. Experimental research on seismic performance of the short pier shear wall[J]. *Building Structure*, 2010,40(12):98-100.(in Chinese))
- [13] 李英民. 建筑结构抗震设计:第3版[M]. 重庆:重庆大学出版社,2015.(LI Ying-ming. Seismic design of building structures: 3rd edition [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.(in Chinese))
- [14] 上海现代建筑设计(集团)有限公司. 工程木结构设计规范[M]. 上海:同济大学出版社,2016. (Shanghai Modern Architectural Design (Group) Co., Ltd.. Design code for engineered wood structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2016.(in Chinese))
- [15] 吴社. 大跨度采光顶钢结构设计[J]. *中国建筑金属结构*, 2021, (2): 128-129. (WU She. Steel structure design of large span daylighting roof[J]. *China Construction Metal Structure*, 2021,(2):128-129.(in Chinese))

(上接第26页)

- 79, 21. (DENG Zong-cai, LI Jia-yue, CHENG Chuan-chao, et al. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFN[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2019, 41(6):73-79,21.(in Chinese))
- [14] 张玉平,高树威,李传习,等. 基于钢纤维混凝土弹塑性损伤模型的钢混结合段吊装分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2020,17(4):32-41.(ZHANG Yu-ping, GAO Shu-wei, LI chuan-xi, et al. Hoisting analysis of steel-concrete joint section based on steel fiber reinforced concrete elastoplastic damage model[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science)*, 2020,17(4):32-41.(in Chinese))
- [15] 张建仁,毛杰,彭建新,等. 使用碳纤维板加固的RC梁桥服役过程可靠度指标分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 14(2): 25-31. (ZHANG Jian-ren, MAO Jie. PENG Jina-xin, et al. Reliability index analysis of the service process of RC beam bridge reinforced by carbon fiber[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science)*, 2014, 14(2): 25-31. (In Chinese))
- [16] 周朝阳,徐伟,贺学军,等. 碳纤维片材抗弯加固高配筋混凝土大梁性能试验及分析[J]. *交通科学与工程*, 2010,26(1):35-43. (ZHOU Chao-yang, XU Wei, HE Xue-jun, et al. Experimental research on heavily reinforced concrete girders flexure-strengthened with externally bonded CFRP laminates[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2010,26(1):35-43.(in Chinese))