

碳纤维布加固混凝土梁的解析分析

张 鹏

(陕西交通职业技术学院, 西安 710021)

摘要 根据弹性理论和部分组合截面假定, 分析碳纤维布加固混凝土梁体系, 建立单位长度粘结界面剪力表达式和碳纤维布轴向拉力微分方程, 从而推导出碳纤维布拉力、混凝土梁正截面弯矩和粘结界面剪应力解析解的一般形式, 满足实际应用. 结合算例指出: 碳纤维布轴向拉力和粘结界面剪应力分布不均匀, 在端部区段应力集中, 可能导致加固失效, 应采取措施加强锚固.

关键词 碳纤维布, 加固, 混凝土梁, 解析解

碳纤维加固修复混凝土结构是近十几年发展的一种混凝土结构外部补强加固新技术^[1]. 试验表明, 用粘结剂在混凝土梁底粘贴碳纤维布作为增加的受力筋, 协助原有梁受力, 能有效地提高梁的抗弯承载能力, 但同时粘结层端部处有应力集中, 可能导致粘结层剥离破坏^[2].

1 基本方程

图 1 为碳纤维布加固梁. 图 2 为梁正截面内力简图, 图中 y_f 为碳纤维布中轴至混凝土梁中性轴间距离, 即 $y_f = h + t_a + t_f/2$. 图 3 为长度为 dx 的碳纤维布微元, s 为碳纤维与混凝土梁间的粘结剪力 (暂不考虑法向力). 碳纤维布抗弯和抗剪能力很小, 故假定碳纤维布仅受拉力.

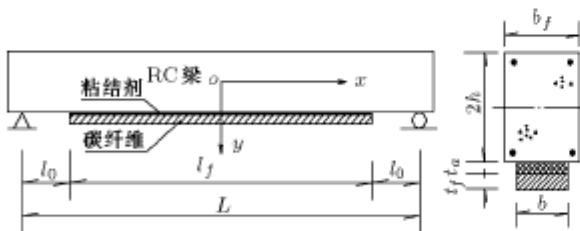


图 1 碳纤维布加固混凝土梁示意图

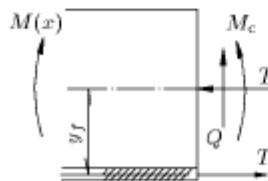


图 2 正截面内力简图

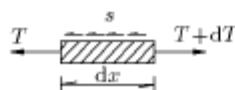


图 3 碳纤维布微元脱离体

由梁正截面内力以及碳纤维布微元平衡得

$$M = M_c + T \cdot y_f \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dx} = s \quad (2)$$

假定粘结层为线弹性体, 剪切模量为 G , 并记混凝土梁底水平位移为 u_1 , 碳纤维布顶面水平位移为 u_2 , 则单位长度粘结剪力 (假设均布) 可表示为

$$s = \frac{Gb}{t_a}(u_2 - u_1) \quad (3)$$

2 解碳纤维布轴向拉力、粘结剪力和剪应力

略去梁剪切和轴向变形影响, 以 $E_c I_c$ 表示混凝土梁抗弯刚度, 假定碳纤维布均匀受拉, 用 $E_f A_f$ 表示其抗拉刚度, 则有

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_2}{dx} &= \frac{1}{E_f A_f} T \\ \frac{du_1}{dx} &= \frac{h}{E_c I_c} M_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式 (1), 式 (2), 式 (3) 代入式 (4) 中, 并整理得到关于碳纤维布轴向拉力 T 的微分方程

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - K^2 T = -\frac{Gb h}{t_a E_c I_c} M \quad (5)$$

式中: $K^2 = \frac{Gb}{t_a} \left(\frac{1}{E_f A_f} + \frac{y_f h}{E_c I_c} \right)$, M 为加固梁正截面弯矩分布函数. 求解 (5) 式相应的通解, 略去高次微分项, 得到碳纤维布轴向拉力 T

$$T = C_1 \cosh Kx + C_2 \sinh Kx + \frac{Gb h}{K^2 t_a E_c I_c} \left(M + \frac{M''}{K^2} \right) \quad (6)$$

式中, M'' 为 M 的二阶导数. C_1, C_2 为积分常数, 可利用边界条件 $x = \pm L_f/2, T = 0$ 求得. 根据式 (2) 关系, 对式 (6) 求导, 并将 $\frac{dM}{dx} = Q$ 代入整理得粘结剪力 s

$$s = C_1 K \sinh Kx + C_2 K \cosh Kx + \frac{Gb h}{K^2 t_a E_c I_c} Q \quad (7)$$

式中 Q 为梁正截面剪力分布函数. 粘结剪应力 $\tau = s/b$.

3 混凝土梁正截面弯矩

由式 (1) 知

$$M_c = M - T \cdot y_f \quad (8)$$

将式 (6) 代入式 (8) 可知加固后混凝土梁正截面弯矩 M_c 的分布规律.

4 算 例

简支梁承受均布荷载 $q = 15 \text{ N/mm}$ 作用, 主要计算参数如下

$$L = 2400 \text{ mm}, L_f = 1800 \text{ mm}, L_0 = 300 \text{ mm}$$

$$b_1 = 100 \text{ mm}, 2h = 150 \text{ mm}, E_c = 20\,000 \text{ MPa},$$

$$I_c = 28\,125\,000 \text{ MPa}$$

$$b = 80 \text{ mm}, t_f = 4 \text{ mm}, E_f = 200\,000 \text{ MPa}, A_f = 320 \text{ mm}^2$$

$$t_a = 2 \text{ mm}, G = 1\,500 \text{ MPa}$$

$$M(x) = q(L^2 - 4x^2)/8, Q(x) = -qx, M''(x) = -q$$

得到碳纤维布轴向拉力、粘结剪力及梁正截面弯矩如图 4~图 6 所示。

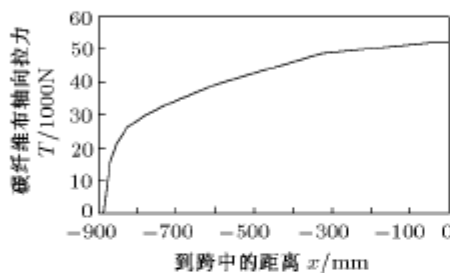


图 4 碳纤维布轴向拉力分布图

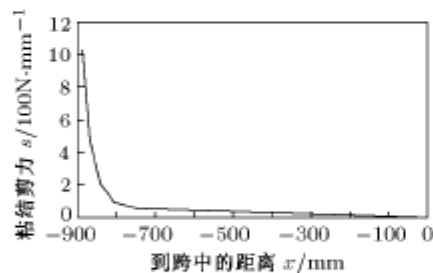


图 5 粘结剪力分布图

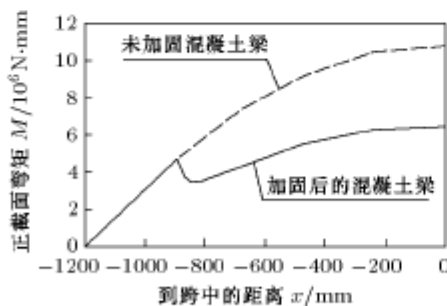


图 6 正截面弯矩分布图

5 结 论

通过解析分析和算例可以看出, 碳纤维布轴向拉力和粘结剪力沿梁跨径方向分布不均匀, 在端部区段内粘结剪力急剧增加, 在碳纤维布截断点达到极值, 此处应力的集中可能

使粘结胶层或混凝土保护层剥离破坏, 导致加固失效, 因此在工程应用当中应加强碳纤维布端部锚固, 如增加锚固长度或增设附加锚固措施等. 本文与文献 [3,4] 结论一致, 利于实际应用。

参 考 文 献

- 1 赵彤, 谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术. 天津: 天津大学出版社, 2001(Zhao Tong, Xie Jian. New Technology of Concrete Structure Strengthened with CFRP Sheets. Tianjin: Tianjin University Press, 2001(in Chinese))
- 2 杨勇新, 胡云昌, 岳清瑞. 碳纤维布加固混凝土受弯构件的剥离破坏及其防治. 工业建筑, 2001, 31(6): 13~16 (Yang Yongxin, Hu Yunchang, Yue Qingrui. Debonded failure of RC flexural members strengthened with carbon fiber sheet (CFSS) and its prevention. *Industrial Construction*, 2001, 31(6): 13~16 (in Chinese))
- 3 张继文, 吕志涛等. 外部粘贴碳纤维或钢板加固梁中粘结界面应力分析. 工业建筑, 2001, 31(6): 1~4 (Zhang Jiwen, Lu Zhitao, et al. Analysis of the interfacial stresses of the strengthened RC beams externally bonded with CFRP sheet or steel plate. *Industrial Construction*, 2001, 31(6): 1~4 (in Chinese))
- 4 Ye JQ. Interfacial shear transfer of RC beams strengthened by bonded composite plates. *Cement & Concrete Composites*, 2001, 23: 411~417

ANALYTICAL SOLUTIONS FOR RC BEAMS STRENGTHENED BY CFRPS

ZHANG Peng

(Shanxi College of Communication Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract Based on the elastic theory and some assumptions of composite section, the reinforced concrete (RC) beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets (CFRPs) is analyzed, and the expression of unit-length adhesive interfacial shears and the differential calculus of axial force in the CFRPs are established. Then, the analytical solutions of the axial force in the CFRPs, the interfacial shear stress in the adhesive layer and the bending moment on the cross-section of RC beam are presented as general forms. A case study shows that the stress concentration at the end of beam may cause bending failure, which can be prevented by the measures proposed in this paper.

Key words CFRPs, strengthening, RC beam, analytical solution