

文章编号 1000-5013(2001) 02-169-05

粘钢加固 RC 梁的剥离正应力参数分析

欧阳煜 黄奕辉

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 在弹性理论的基础上, 利用钢板剥离正应力计算公式, 对在集中荷载或均布荷载作用下采用粘钢加固的混凝土梁, 分析影响钢板最大剥离正应力的有关因素. 采用本方法可以对钢板端部最大剥离正应力进行验算, 防止混凝土梁出现局部剥离破坏. 研究结果将为进一步完善粘钢法加固设计, 提供重要的参考资料.

关键词 混凝土梁, 钢板, 剥离正应力, 参数分析

中图分类号 TU 375. 102

文献标识码 A

粘钢加固法一般用于结构构件受拉区的加固, 钢板通过粘胶层传递剪应力和正应力, 使钢板和混凝土梁共同工作而达到加固的目的. 因此, 保证钢板在工作中不脱离混凝土面层, 是该加固方法的最重要因素. 在钢板端部由于应力集中而存在较大的剥离正应力. 当剥离正应力超过粘胶层的剥离强度时, 钢板将剥离混凝土梁面而失去加固作用; 而当剥离正应力超过被粘混凝土的抗拉强度时, 梁保护层混凝土将和钢板一起沿梁纵向钢筋方向剥落. 这就是粘钢加固混凝土梁的“局部破坏模式”. 本文利用文 [1] 的计算模型, 对粘钢加固的简支梁在集中荷载或均布荷载作用下, 钢板锚固端的剥离正应力和最大剥离正应力进行参数分析.

1 钢板剥离正应力和最大剥离正应力

图 1(a), (b) 分别为采用粘钢加固的受集中力和均布荷载作用的混凝土梁. 梁截面尺寸为

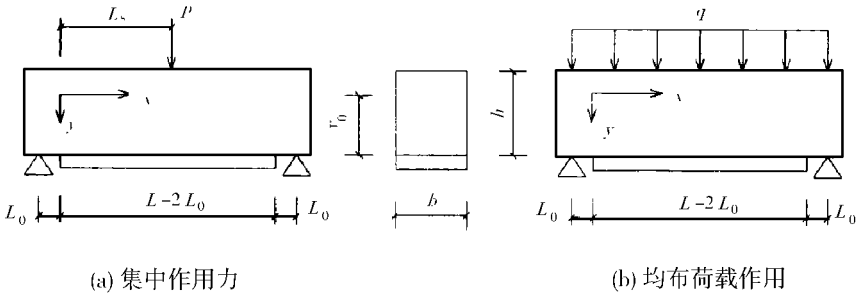


图 1 粘钢加固混凝土梁

$b \times h$, 形心轴高度为 y_0 , 加固钢板厚度为 t_p , 粘胶层厚度 t_a . 简支梁跨度为 L , 钢板左端到左支座距离为 L_0 , 梁剪力为零的点到左支座的距离为 L_s . E_c 和 E_p 为混凝土梁和钢板的弹性模量, I_c 和 I_p 分别为混凝土梁和钢板的截面惯性矩, A_c 和 A_p 为混凝土梁和钢板的截面面积. 当计算钢板左端锚固剪应力时, 水平方向坐标(X 轴)取在通过梁截面形心处, 竖直方向坐标(Y 轴)取在通过钢板端部处. V_0, M_0 分别为钢板端($X=0$)处梁的剪力和弯矩, R_L 为左端支座反力.

当外荷载 $q(x)$ 为线性分布, 即当 $q(x) = b_1 x_0 + b_2$ 时, 混凝土梁剪力 $V(x)$ 可以写成

$$V(x) = a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3.$$

其中 $a_1 = \frac{b_1}{2}, a_2 = -b_2, a_3 = \frac{2b_1 L^2 + 3b_2 L}{6}, x_0 = x + L_0$. 钢板左端最大锚固剪应力的解为^[1]

$$\tau_{\max} = -C_2 \tanh(\beta L_s) - \frac{C_3 L_s^2 + C_4 L_s + C_5}{\cosh(\beta L_s)} + C_5. \quad (1)$$

上式中, $\alpha = \frac{G_a(y_0 + t_a)}{t_a E_c I_c}, \beta^2 = \frac{G_a}{t_a} \left[\frac{b}{E_p A_p} + \frac{b}{E_c A_c} + \frac{b y_0 (y_0 + t_a)}{E_c I_c} \right], C_1 = -C_2 \tanh(\beta L_s) - \frac{C_3 L_s^2 + C_4 L_s + C_5}{\cosh(\beta L_s)}, C_2 = -\frac{C_4 + \alpha M_0}{\beta}, C_3 = \frac{\alpha}{\beta^2} a_1, C_4 = \frac{\alpha}{\beta^2} (2a_1 L_0 + a_2), C_5 = \frac{\alpha}{\beta^2} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3 + \frac{2a_1}{\beta^2}).$

钢板左端剥离正应力的解为^[1]

$$\sigma(x) = e^{-\lambda x} [D_1 \cos(\lambda x) + D_2 \sin(\lambda x)] + \sigma_1(x) + \sigma_2(x), \quad (2)$$

其中 $\lambda^4 = \frac{E_a}{2t_a} \left(\frac{b}{E_p I_p} + \frac{b}{E_c I_c} \right), \gamma = \frac{E_a}{t_a} \left(\frac{b t_p}{2E_p I_p} - \frac{b y_0}{E_c I_c} \right), \sigma_2(x) = -\frac{1}{4\lambda^4} \frac{E_a}{t_a E_c I_c} q(x), \sigma_1(x) = \frac{\gamma}{\beta^4 + 4\lambda^4} \cdot [C_1 \beta \sin(\beta x) + C_2 \beta \cosh(\beta x)] + \frac{\gamma}{4\lambda^4} (2C_3 x + C_4), D_2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left[-\frac{E_a}{t_a E_c I_c} M_0 + \frac{\gamma \beta^3}{\beta^4 + 4\lambda^4} C_2 \right], D_1 = \frac{1}{2\lambda^3} \cdot \left[\frac{E_a}{t_a E_c I_c} V_0 + \frac{E_a \lambda}{t_a E_c I_c} M_0 + \gamma \tau_{\max} - \frac{\gamma \beta^3}{\beta^4 + 4\lambda^4} (\beta C_1 + \lambda C_2) \right].$

最大剥离正应力发生在钢板端部($X=0$)处, 其表达式为

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2\lambda^3} \left[\frac{E_a}{t_a E_c I_c} V_0 + \frac{E_a \lambda}{t_a E_c I_c} M_0 + \gamma \tau_{\max} - \frac{\gamma \beta^3}{\beta^4 + 4\lambda^4} (\beta C_1 + \lambda C_2) \right] + \frac{\gamma \beta}{\beta^4 + 4\lambda^4} C_2 + \frac{\gamma}{4\lambda^4} C_4 - \frac{E_a}{4\lambda^4 t_a E_c I_c} q(0). \quad (3)$$

式(2), (3)可用于外荷载线性分布的梁, 如集中力、均布荷载、三角形荷载和梯形荷载等. 下面以工程中常见的集中力和均布荷载为例, 推导计算剥离正应力和最大剥离正应力的简化计算公式.

2 钢板剥离正应力和最大剥离正应力的简化公式

由于在实际工程中, $\beta L_s \gg 4$, 可近似认为 $\tanh(\beta L_s) \approx 1$, 而 $\cosh(\beta L_s)$ 比其它项大得多, 即可认为 $C_1 = -C_2$. 因此, 以下为由由此假定推导集中力和均布荷载作用下的简化计算公式.

图1(a)为受集中力作用的混凝土简支梁, L_s 为集中力到左端支座的距离. 钢板最大锚固剪应力为 $\tau_{\max} = \alpha R_L = \frac{L_0 \beta + 1}{\beta}$, 剥离正应力 $\sigma(x)$ 和最大剥离正应力 σ_{\max} 分别为

$$\sigma(x) = e^{-\lambda x} [D_1 \cos(\lambda x) + D_2 \sin(\lambda x)] + \sigma_1(x), \quad \sigma_{\max} = D_1 - \frac{\gamma \alpha M_1}{\beta^4 \lambda^4}.$$

其中 $D_2 = -\frac{M_0}{2\lambda^2} [\frac{E_a}{t_a E_c I_c} + \frac{\gamma \beta^2 \alpha}{\beta^4 + 4\lambda^4}]$, $D_1 = \frac{1}{2\lambda^3} [\frac{E_a R_L}{t_a E_c I_c} + \gamma \tau_{\max} - \frac{\gamma \beta^3 \alpha M_0}{\beta^4 + 4\lambda^4}] - D_2$, $\sigma_1(x) = -\frac{\gamma \alpha M_0}{\beta^4 + 4\lambda^4} \cdot e^{-\beta x}$, $\sigma_2(x) = 0$.

图 1(b) 为受均布荷载作用下的简支梁, $L_s = L/2$. 钢板左端最大锚固剪应力 τ_{\max} 为

$$\tau_{\max} = \alpha q [\frac{L_0(L - L_0)}{2\beta} - \frac{1}{\beta^3} + \frac{(L - 2L_0)}{2\beta^2}].$$

它的剥离正应力 $\sigma(x)$ 和最大剥离正应力 σ_{\max} 分别为

$$\sigma(x) = e^{-\lambda x} [D_1 \cos(\lambda x) + D_2 \sin(\lambda x)] + \sigma_1(x) + \sigma_2(x),$$

$$\sigma_{\max} = D_1 - \frac{\gamma \beta}{\beta^4 + 4\lambda^4} (M_0 - \frac{q}{\beta^2}) - \frac{\gamma \alpha q}{4\lambda^4 \beta^2} - \frac{E_a q}{4\lambda^4 t_a E_c I_c}.$$

其中 $D_2 = \frac{1}{2\lambda^2} [-\frac{E_a M_0}{t_a E_c I_c} + \frac{\gamma \beta^2 \alpha}{\beta^4 + 4\lambda^4} (\frac{q}{\beta^2} - M_0)]$, $\sigma_2(x) = -\frac{E_a q}{4\lambda^4 t_a E_c I_c}$, $D_1 = \frac{1}{2\lambda^3} [\frac{E_a V_0}{t_a E_c I_c} + \gamma \tau_{\max} - \frac{\gamma \beta^3 \alpha}{\beta^4 + 4\lambda^4} (M_0 - \frac{q}{\beta^2})] - D_2$, $\sigma_1(x) = \frac{\gamma \alpha}{\beta^4 + 4\lambda^4} (M_0 - \frac{q}{\beta^2}) (-e^{-\beta x}) - \frac{\gamma \alpha q}{4\lambda^4 \beta^2}$.

3 算例及参数分析

如图 1 所示的混凝土简支梁, 截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 跨度 $L = 2300 \text{ mm}$, 钢板端距支座 $L_0 = 100 \text{ mm}$, 混凝土弹性模量 $E_c = 30 \text{ GPa}$, 钢板弹性模量 $E_p = 200 \text{ GPa}$, 粘胶层弹性模量 $E_a = 6.7 \text{ GPa}$, 剪切模量 $G_a = 30 \text{ GPa}$, 钢板厚度 $t_p = 4 \text{ mm}$, 粘胶层厚度 $t_a = 2 \text{ mm}$. 荷载考虑两种工况, 工况 一是集中荷载 ($P = 100 \text{ kN}$), 作用点在梁跨中位置; 工况 二是均布荷载 ($q = 100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$).

图 2 是在集中荷载和均布荷载作用下, 钢板左端剥离正应力沿梁长度方向 (x) 的分布图. 两种荷载作用下剥离正应力的分布规律基本相同. 从图中可见, 最大剥离正应力都发生在钢板端部. 随着钢板从端部向跨中延伸, 剥离正应力呈非线性分布, 在钢板端部附近急剧降低. 然后, 随着锚固长度的增加, 剥离正应力迅速趋近为零.

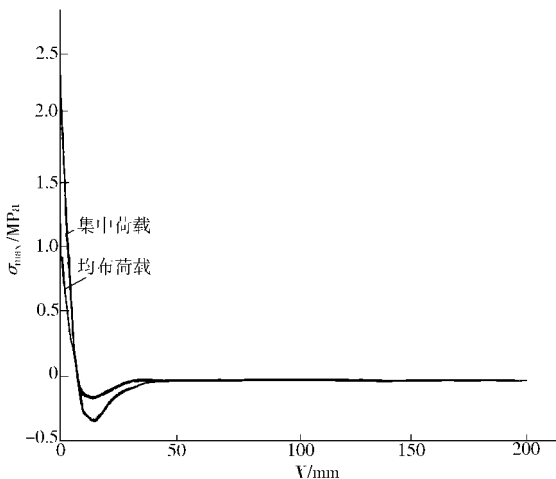


图 2 剥离正应力沿梁长分布图

在《混凝土结构加固技术规范》(以下简称《规范》)^[6]中, 对粘钢加固法

没有提供有关剥离应力的验算公式. 本文将通过下面的讨论说明, 对于采用粘钢加固的混凝土梁, 没有进行剥离应力验算是不合适的, 并可能是偏于不安全的. 图 3~6 分别是在集中荷载和均布荷载作用下, 通过变化各有关参数, 计算得到的最大剥离正应力 (σ_{\max}) 和各参数间的关系图. 从图中可以看见, 集中荷载和均布荷载作用下的各曲线规律基本一致. 下面以集中荷载为

例进行讨论.

从图 3 可见, 粘胶层厚度 t_a 对最大剥离正应力 σ_{\max} 有显著的影响. 当 t_a 小于 1 mm 时, 减少 t_a 将使 σ_{\max} 急剧增大; 而当 t_a 大于 1 mm 时, 可近似认为 σ_{\max} 随 t_a 的增加而线性降低. 《规范》要求在施工中, 粘胶层厚度在 1~3 mm 左右. 在本文算例中, 当 t_a (mm) 分别为 1, 2 和 3 时, σ_{\max} (MPa) 分别为 1.76, 1.14 和 0.90, 三者相差达 35% 和 49%. 这说明在粘钢加固混凝土梁时, 粘胶层厚度将严重影响最大剥离正应力的大小, 不考虑它的影响可能是偏危险的. 因此, 在加固设计中, 应对施工时粘胶层厚度提出具体要求, 以保证加固后结构的安全性.

从图 4 可见, 最大剥离正应力 σ_{\max} 随着钢板厚度 t_p 的减小而近似线性降低. 《规范》建议钢板厚度以 2~6 mm 为宜. 在本文算例中, 当 t_p (mm) 2 和 6 时, σ_{\max} (MPa) 分别为 0.71 和 1.48,

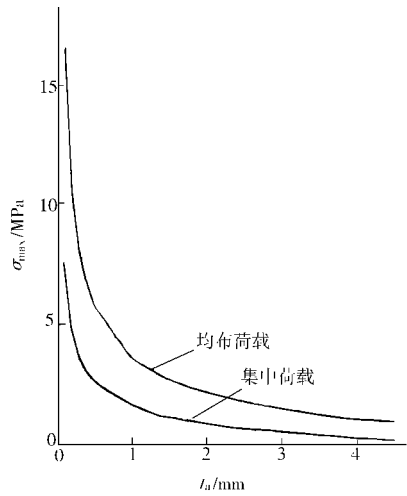


图 3 粘胶层厚度与最大剥离正应力的关系

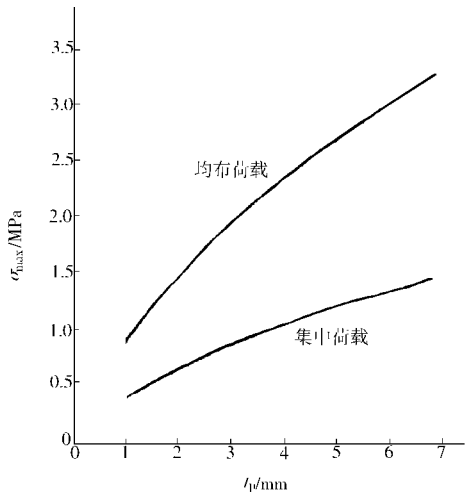


图 4 钢板厚度与最大剥离正应力的关系

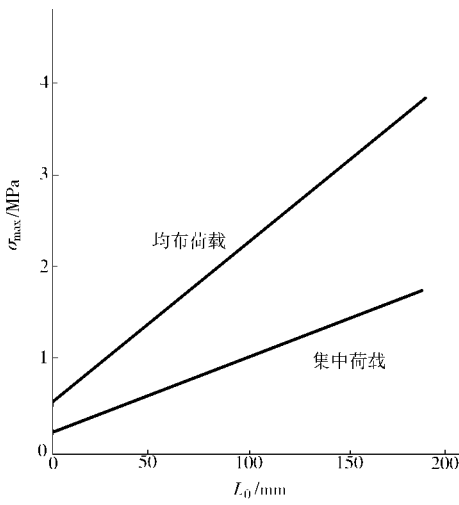


图 5 L_0 与最大剥离正应力的关系

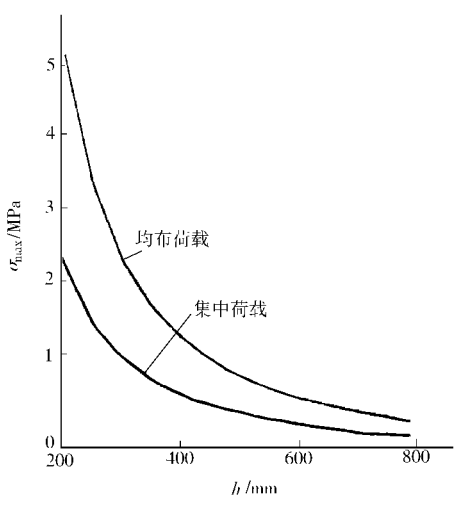


图 6 混凝土梁高度与最大剥离正应力的关系

相差达 52%. 在加固设计时, 钢板厚度一般是由截面设计中要求钢板提供的轴力决定的, 但没有考虑它对最大剥离正应力 σ_{\max} 的影响. 在工程设计中, 常有设计人员为了追求安全, 在计算

完成后还随意加大钢板厚度作为安全储备. 从避免整体破坏(即正截面破坏)角度出发, 这是提高了安全度, 但同时也提高了最大剥离正应力 σ_{\max} , 埋下了可能引起混凝土梁的局部剥离破坏的隐患. 因此在加固设计中, 应按选定的钢板厚度进行最大剥离正应力验算, 否则可能是偏于危险的.

从图 5 可见, 钢板端部到支座的距离 L_0 和最大剥离正应力 σ_{\max} 基本显线性关系. L_0 减少相当于钢板的锚固长度增加, 因而 σ_{\max} 必然减小. 在本文算例中, 当 L_0 (mm) 分别 0 和 190 时, σ_{\max} (MPa) 分别为 0.22 和 1.97, 相差达 88%. 这说明将钢板尽量粘贴到支座边(即减小 L_0), 可以显著地降低 σ_{\max} , 但相应地较为浪费. 因此在采用粘钢加固时, 应对最大剥离正应力进行验算, 以选择合适的 L_0 , 使之既满足安全要求, 又不致浪费材料.

从图 6 可见, 混凝土梁截面高度 h 和最大剥离正应力 σ_{\max} 间呈非线性关系. 这主要是因为, 在一定的荷载作用下, 随着 h 的增加, 钢板承担的轴力减小, 因而 σ_{\max} 也相应减小.

4 结束语

《规范》对剥离正应力没有给出相应的验算公式是不合适的, 有时可能是偏危险的. 从本文的分析可以看出, 粘钢加固法的最大剥离正应力 σ_{\max} 不但和粘胶层厚度 t_a 、钢板厚度 t_p 、钢板端部到支座的距离 L_0 、混凝土梁截面高度 h 等参数有关, 而且随着各个参数的变化有较大的变化. 因此, 为避免粘钢加固的混凝土梁产生局部剥离破坏, 《规范》应规定对最大剥离正应力进行验算, 或进行有关构造处理.

参 考 文 献

- 1 欧阳煜, 黄奕辉. 粘钢加固法的剥离正应力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 22(4): 375 ~ 379
- 2 欧阳煜, 黄奕辉. 粘钢加固 RC 梁的锚固剪应力参数分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 22(3): 282 ~ 286
- 3 四川建筑科学研究院编. CECS25-90 混凝土结构加固技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992. 78 ~ 96

Parametric Analysis of Peeling Stress of the RC Beams Strengthened with Bonding Steel Sheet

Ouyang Yu Huang Yihui

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract With regard to the RC beams strengthened by bonding steel sheet against the action of concentrated and evenly distributed load, an analysis is made on the factors influencing maximal normal stress against peeling of steel sheet. The analysis is based on theory of elasticity and takes advantage of the formula for computing normal stress against peeling of steel sheet. By adopting the method of present work, the maximal normal stress against peeling at the ends of steel sheet can be checked, the occurrence of local peeling destruction of the RC beams can be prevented. The results of the present work will provide important references for further perfecting strengthening design of bonding steel sheet method in our country.

Keywords RC beam, steel sheet, normal stress against peeling, parametric analysis