

文章编号 1000-5013(2000) 03-0282-05

粘钢加固 RC 梁的锚固剪应力参数分析

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, 利用钢板锚固剪应力计算公式, 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, 分析钢板锚固最大剪应力的有关影响因素. 结果表明, 最大锚固剪应力不但和混凝土梁的截面高度、跨度等参数有关, 还和粘胶层厚度、弹性模量、钢板厚度及钢板长度有关. 采用文中方法可以对钢板端部最大锚固剪应力进行验算, 防止混凝土梁出现局部受拉破坏. 研究结果为进一步完善我国粘钢法加固设计提供重要的参考资料.

关键词 混凝土梁, 粘钢加固, 锚固剪应力, 参数分析

中图分类号 TU 375.1

文献标识码 A

粘钢加固法是在结构构件强度不足的部位, 粘贴钢板进行加固的一种方法. 它一般用于混凝土梁受拉区的加固, 是目前混凝土结构加固的一种新型加固方式. 钢板和混凝土梁之间通过粘胶层传递剪应力和正应力, 达到共同工作的目的. 采用粘钢加固的混凝土梁, 一般有整体破坏和局部破坏两种破坏模式. 整体破坏模式是加固后的混凝土梁, 发生正截面抗弯(或斜截面抗剪)的破坏. 局部破坏模式是在钢板端部锚固区内, 由于应力集中而产生较大的锚固剪应力和剥离正应力. 当最大锚固剪应力超过混凝土抗拉强度时, 局部混凝土沿竖向开裂. 当裂缝贯通保护层混凝土到梁底钢筋后, 又在水平方向沿纵筋延伸. 使得保护层混凝土和钢板一起剥离, 从而导致梁截面有效高度降低, 使混凝土梁产生脆性破坏. 这种局部破坏, 由于钢板端部锚固区内的应力情况复杂而难以精确地分析. 它严重影响混凝土梁加固后的安全性, 因而引起了人们的重视. 本文利用文 [1] 的计算模型, 对采用粘钢加固的简支梁在集中荷载和均布荷载作用下, 进行钢板锚固端锚固剪应力和最大锚固剪应力的参数分析.

1 钢板锚固剪应力和最大锚固剪应力

采用粘钢加固的受集中力作用和均布荷载作用的混凝土梁, 如图 1 所示. 图中 b , h 分别为梁截面的宽度和高度, y^0 为形心轴高度, t_p 为加固钢板厚度, t_a 为粘胶层厚度. L 为简支梁跨度, L_0 钢板左端到左支座距离, L_s 为梁剪力为零的点到钢板左端的距离. G_a 为粘胶层的剪切模量, E_c 和 E_p 为混凝土梁和钢板的弹性模量, I_c 和 I_p 为混凝土梁和钢板的截面惯性矩, A_c 和

A_p 分别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 ($x=0$)

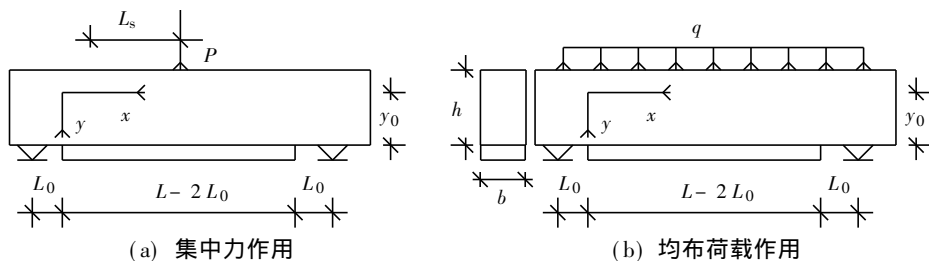


图1 粘钢加固混凝土梁

处梁的剪力和弯矩, R_L 为左端支座反力. 当外荷载 $q(x)$ 为线性分布时, 可写为 $q(x) = b_1x + b_2$. 混凝土梁剪力 $V(x)$ 可以写成二次多项式 $r(x) = a_1x^2 + a_2x + a_3$. 其中, $a_1 = -\frac{b_1}{2}$, $a_2 = -b_2$, $a_3 = \frac{2b_1L^2 + 3b_2L}{6}$, $x_0 = x + L_0$. 钢板左端锚固剪应力的解为

$$\tau(x) = C_1 \cosh(\beta x) + C_2 \sinh(\beta x) + C_3 x^2 + C_4 x + C_5, \quad (1)$$

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

从锚固剪应力解的表达式可以看出, 其大小主要与钢板厚度、粘胶层厚度、混凝土梁截面尺寸、弹性模量、混凝土梁剪力分布, 以及钢板端部弯矩等参数有关. 由钢板端部剪应力平衡可知, 最大锚固剪应力不会发生在钢板端部, 而发生在紧靠端部^[1]. 在本文公式中, 最大锚固剪应力近似为发生钢板端部 ($x=0$), 即

$$\tau_{\max} = \left(\frac{\alpha}{\beta} M_0 + \frac{C_4}{\beta} \right) \tanh(\beta L_s) - \frac{C_3 L_s^2 + C_4 L_s + C_5}{\cosh(\beta L_s)} + C_5. \quad (2)$$

在实际工程中, $\beta L_s \gg 4$, 所以可认为 $\tanh(\beta L_s) \approx 1$, $\cosh(\beta L_s)$ 比其它项大得多, 则认为 $C_1 = -C_2$. 因此, 锚固剪应力和最大锚固剪应力的计算公式可分别简化为

$$\begin{aligned} \tau(x) &= C_1 X_1 e^{-\beta x} + C_3 x^2 + C_4 x + C_5, \\ \tau_{\max} &= \frac{\alpha}{\beta} M_0 + \frac{C_4}{\beta} + C_5. \end{aligned} \quad (3)$$

公式(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. 下面以工程中常用的集中力和均布荷载为例, 计算锚固端剪应力和最大锚固剪应力.

对于受集中力作用的混凝土简支梁, L_s 为集中力作用点钢板左端的到距离. 计算所需系数分别为 $V(x) = R_L = \frac{P(L - L_0 - L_s)}{L}$, $M_0 = R_L L_0$, $a_1 = a_2 = 0$, $a_3 = R_L$, $C_3 = C_4 = 0$, $C_5 = \frac{\alpha}{\beta^2} R_L$, $C_2 = -\frac{\alpha}{\beta} R_L L_0$, $C_1 = -C_2$. 将各系数代入式(3), 即可以求得在集中荷载作用下, 钢板锚固剪应力 $\tau(x)$ 和最大锚固剪应力 τ_{\max} . 即 $\tau(x) = \alpha R_L \left(\frac{L_0}{\beta} e^{-\beta x} - \frac{1}{\beta} \right)$, $\tau_{\max} = \alpha R_L \frac{L_0 \beta + 1}{\beta}$.

对受均布荷载作用的简支梁, $L_s = L/2$. 计算钢板左端锚固剪应力时, 计算所需系数分别为 $V(x) = \frac{qL}{2} - qx_0$, $M_0 = \frac{qLL_0}{2} - \frac{qL_0^2}{2}$, $a_1 = 0$, $a_2 = -q$, $a_3 = \frac{qL}{2}$, $C_1 = -C_2$, $C_2 = \alpha q [\frac{1}{\beta^3} - \frac{L_0(L-L_0)}{2\beta}]$, $C_3 = 0$, $C_4 = -\frac{\alpha q}{\beta}$, $C_5 = \frac{\alpha q(L-2L_0)}{2\beta^2}$.

将各系数代入式(3), 即可求得在均布荷载作用下, 钢板锚固剪应力 $\tau(x)$ 和最大锚固剪应力 $\tau(x)_{\max}$. 即 $\tau(x) = \alpha q \{ [(\frac{L_0(L-L_0)}{2\beta} - \frac{1}{\beta^3})e^{-\beta x} - \frac{x}{\beta^2} + \frac{L-2L_0}{2\beta^2}] \}$, $\tau_{\max} = \alpha q [\frac{L_0(L-L_0)}{2\beta} - \frac{1}{\beta^3} + \frac{L-2L_0}{2\beta^2}]$.

3 算例

混凝土简支梁如图1所示. 截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 跨度 $L = 2\,300 \text{ mm}$, 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1为集中荷载 $P = 100 \text{ kN}$, 作用点在梁跨中位置. 工况2是均布荷载 $q = 100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. 在集中荷载和均布荷载作用下, 钢板和混凝土梁左端锚固剪应力沿梁长度方向的分布, 如图2所示. 由图可见, 最大锚固剪应力都发生在钢板端部, 两种荷载作用下锚固剪应力的分布规律基本相同. 随着钢板从端部向跨中延伸, 锚固剪应力呈非线性分布. 在钢板端部附近急剧降低, 然后随着锚固长度的增加, 锚固剪应力变化趋于平缓.

《混凝土结构加固技术规范》(简称《规范》)对于在受拉区采用粘钢加固法的钢板, 其锚固长度 L_1 计算公式⁶⁾为

$$L_1 = 2f_{ay}t_a/f_{cv}, \quad (4)$$

f_{ay} 为加固钢板抗拉设计值, t_a 为受拉加固钢板厚度, f_{cv} 为被粘混凝土的抗剪强度设计值. 《规范》对最小锚固长度, 要求“对于受拉区, 不得小于 $200t$ (t 为钢板厚度), 亦不得小于 600 mm ”. 对公式(4), 《规范》解释为“锚固区剪应力近似按三角形分布, 剪应力分布不均匀系数取为2”. 但从图2看, 随着离钢板端部距离(d)的增大, 锚固剪应力迅速减少. 钢板锚固长度只有在一定范围内($0 \sim 50 \text{ mm}$), 可以近似按三角形分布考虑. 因此, 应对适用该公式计算的最大锚固长度做一定限制. 当锚固长度过长时, 对该公式进行修正.

为防止因最大锚固剪应力导致局部混凝土的受拉破坏, 在锚固长度的计算中, 用《规范》以被粘混凝土的抗剪强度设计值 f_{cv} 作为最大锚固剪应力进行考虑, 而没有给出最大锚固剪应力的具体计算公式, 也忽略了其它有关参数对最大锚固剪应力的影响. 本文通过下面的讨论, 说明这样的忽略会导致较大的误差, 且可能是偏于不安全的. 在集中力和均布荷载作用下, 采用本文方法计算得最大锚固剪应力与有关参数的关系, 如图3所示. 图中曲线1, 2分别代表集中荷载和均布荷载. 从图3可见, 在集中荷载和均布荷载作用下, 最大锚固剪应力的变化规律

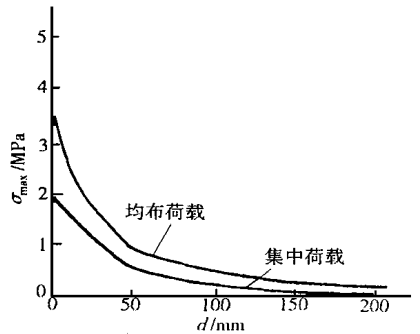


图2 剥离正应力(σ)沿梁长分布图

基本一致。

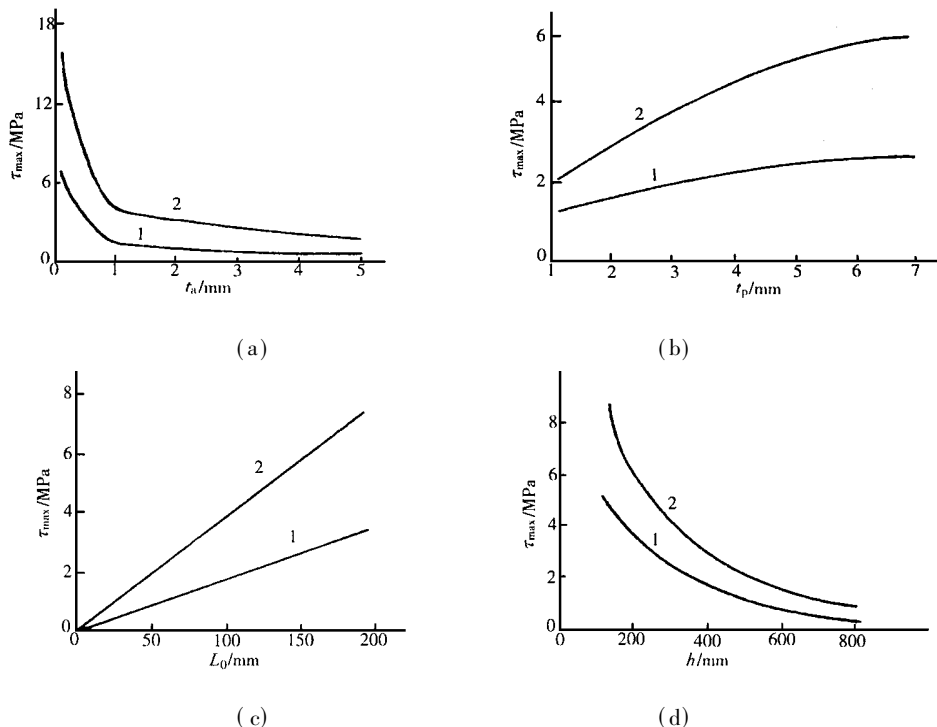


图3 最大锚固剪应力与有关参数的关系

下面以集中荷载为例进行讨论。从图 3(a) 可见, 粘胶层厚度 t_a 对最大锚固剪应力 τ_{\max} 有显著的影响。当 t_a 小于 1 mm 时, 减少 t_a 将使 τ_{\max} 急剧增大; 当 t_a 大于 1 mm 时, 可近似认为 τ_{\max} 随 t_a 的增加而线性降低。《规范》对锚固长度的计算没有考虑粘胶层厚度, 仅在施工中要求粘胶层厚度在 1~3 mm 左右。在本文算例中, 当 t_a (mm) 为 1, 2 和 3 时, τ_{\max} 分别为 2.25 MPa, 1.89 MPa 和 1.61 MPa。三者相差达 25% 和 36%, 说明用粘钢加固混凝土梁时, 粘胶层厚度会严重影响最大锚固剪应力的大小, 不考虑它的影响是偏危险的。在加固设计中, 应对粘胶层厚度提出具体要求, 保证加固结构的安全。从图 3(b) 可见, 最大锚固剪应力 τ_{\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 为 2 mm 和 6 mm 时, τ_{\max} 分别为 1.38 MPa 和 2.31 MPa, 两者相差 38%。在加固设计时, 钢板厚度一般由截面设计要求钢板提供的轴力决定, 没有考虑它对最大锚固剪应力 τ_{\max} 的影响。在工程设计中, 常有设计人员为追求安全性, 在计算完成后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)的角度出发, 这是提高了安全度, 但同时也提高了最大锚固剪应力, 埋下了可能引起混凝土梁局部破坏的隐患。因此在加固设计中, 应按选定的钢板厚度进行最大锚固剪应力验算, 否则可能偏于危险。从图 3(c) 可见, 钢板端部到支座的距离 L_0 和最大锚固剪应力 τ_{\max} 基本成线性关系。 L_0 减少相当于钢板的锚固长度增加, 因而 τ_{\max} 必然减小。在本文算例中, 当 L_0 为 0 mm 和 190 mm 时, τ_{\max} 分别为 0.33 MPa 和 3.29 MPa, 两者相差 90%。这说明将钢板尽量粘贴到支座边(即减小 L_0), 可以显著降低 τ_{\max} , 但较为浪费。因此, 在采用粘钢加固时应按最大锚固剪应力进行验算, 选择合适的 L_0 , 做到既满足安全要求又不至浪费

材料. 从图 3(d) 可见, 混凝土梁截面高度 h 和最大锚固剪应力 τ_{\max} 间是非线性关系. 这主要是因为是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 τ_{\max} 也相应减小.

4 结束语

规范》对最大锚固剪应力没有给出相应的计算公式, 也没有考虑粘胶层厚度、钢板厚度等有关因素对最大锚固剪应力的影响. 仅在锚固长度计算公式中“以被粘混凝土的抗剪强度作为最大锚固剪应力”来防止局部混凝土受拉破坏, 这是不合适的, 有时可能是偏危险的. 从上述分析可以看出, 粘钢加固法的锚固剪应力和最大锚固剪应力不但和粘胶层厚度、钢板厚度、钢板端部到支座的距离, 以及混凝土梁截面高度等参数有关, 而且随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破坏, 应利用最大锚固剪应力的计算公式进行验算.

粘钢加固混凝土梁锚固端混凝土受拉破坏时, 混凝土已进入塑性状态. 本文方法未考虑塑性状态, 仅用弹性理论进行分析. 这从实际工程应用的角度是偏安全的, 但还需从理论分析的角度做进一步的研究. 粘钢加固混凝土梁的理论分析是目前土木工程领域的一个新课题, 尚无可靠的实验资料进行验证. 本文采用的是弹性分析, 用有限元方法进行验证则是完全可行的.

参 考 文 献

- 1 欧阳煜. 粘贴片材加固混凝土梁的粘接剪应力分析[J]. 工程力学, 2000, (6): 921~925
- 2 张双寅. 复合材料结构的力学性能[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. 381~384
- 3 国家建设部编. 混凝土结构加固技术规程 CECS25: 90[M]. 北京: 中国计划出版社, 1992. 103~115

A Parameter Analysis of Anchorage Shear Stress on the RC Beams Braced by Bonding Steel

Ouyang Yu Huang Yihui

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

Abstract Regarding the RC beams subjected to concentrated load or even load and braced by bonding steel, an analysis is made on the relevant factors influencing maximum anchorage shear stress of steel sheet. The analysis is based on elastic theory and makes use of the formula for calculating anchorage shear stress of steel sheet. As indicated by the results, the maximum anchorage shear stress not only relates to such parameters as height of cross section of RC beam and span but also relates to the thickness of adhesive layer, elastic modulus, thickness of steel sheet, and length of steel sheet. The present method will check maximum anchorage shear stress on the end of shear sheet so as to prevent RC beam from local damage. The present results will offer important reference for our country to further perfect bracing design by bonding steel method.

Keywords RC beam, bracing by bonding steel, anchorage shear stress, parameter analysis