

**编者按:** 碳纤维材料(CFRP)具有极其优异的性能,如轻质、高强、高弹模、耐磨、耐腐蚀、无磁性、抗疲劳性能好、易于裁剪、施工方便等特点,近两年,在我国建筑和桥梁加固领域的应用迅猛发展,专题研究不断深入,学术探讨异常活跃,技术规程和产品标准正在积极编制。相信这一技术的广泛推广和应用,必将取得良好的经济效益和社会效益。

为此,本中心栏目特刊出几篇有关碳纤维材料(CFRP)加固混凝土结构的研究和应用方面的文章,以期推动这项技术不断深入和成熟。

## 外部粘贴碳纤维或钢板加固梁 中粘结界面应力分析

张继文 吕志涛 滕锦光 S.T. Smith

(东南大学 南京 210096) (香港理工大学 香港)

**摘要:** 钢筋混凝土梁可采用外贴碳纤维或钢板条于梁底的方法进行补强加固。但是,在板条与梁底间的粘结界面端部将产生较大的沿粘结面的剪应力和垂直粘结面的正应力,这些应力将有可能造成外贴板条端部锚固失效,从而使梁因板条的材料强度得不到充分发挥而提前破坏。目前,已有的计算界面应力公式都是在弹性理论上假定应力沿胶层厚度为常量,并且,忽略了板条端部的应力奇异现象而得到的。为此,对该类加固梁的胶层应力分布,特别是板条端部的应力,采用 LUSAS 有限元分析程序进行了详细的计算研究,对影响胶层应力分布的主要因素也进行了分析研究。

**关键词:** 碳纤维布 界面应力 钢筋混凝土梁 加固 粘钢

### ANALYSIS OF THE INTERFACIAL STRESSES OF THE STRENGTHENED RC BEAMS EXTERNALLY BONDED WITH CFRP SHEET OR STEEL PLATE

Zhang Jiwen Lü Zhitao Teng Jinguang S.T. Smith

(Southeast University Nanjing 210018) (Hong Kong Polytechnic University Hong Kong)

**Abstract :** The reinforced concrete (RC) beams can be strengthened by externally bonding carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets or steel plates on their tension faces; however much large shear and normal stresses along the adhesive line at the plate end will occur. These stresses may cause the plate debond at its end and the strengthened beams fail prematurely. The available calculation for the interfacial stresses is established on the basis of the elastic theory, assuming the stresses over the depth of the adhesive as constants. In this paper, the finite element analysis software LUSAS was applied to study the stress distribution among the adhesive layer including the interfacial stresses, especially focus on the ultimate stresses at the plate end. Furthermore, the main factors affecting the peak values of the interfacial stresses were also investigated entirely.

**Keywords :** CFRP sheet interfacial stresses RC beams strengthening bonding steel plate

外部粘贴碳纤维或钢板加固钢筋混凝土梁的技术有很多优点:可有效地提高已有构件的强度和刚度,而构件的尺寸和自重几乎不增加,施工也较方便。20世纪80年代和90年代初期,对该类梁,主要是粘钢加固,进行了较为广泛的试验研究,并提出了相应的计算公式。到20世纪90年代开始了对用FRP板的加固进行研究。在已有试验研究中普遍关注的是在外贴板端因外贴板的局部剥离而导致加固梁的突然破坏现象。

但是,现有的界面应力理论计算公式却未能充

分反映外贴板端的应力集中特性。对此,本文采用LUSAS有限元分析软件对板端胶层中的应力分布进行了深入详细的计算分析,并将分析结果与理论计算值进行了比较。

#### 1 界面剪应力和正应力的理论计算

Vilnaly<sup>[1]</sup>, Roberts 和 Haji-Kazemi, Taljsten 和 Malek<sup>[2]</sup>等先后对梁底粘板加固梁(图1)分别推导出有

第一作者:张继文 男 1965年10月出生 博士 副教授

收稿日期:2001-02-10

关公式用以推算粘结界面的剪应力和正应力。这些公式均假定 RC 梁、胶层和粘板为各向同性的弹性材料；RC 梁和粘板连接可靠，共同工作，沿梁截面高度应变呈线性分布。加固梁粘结面剪应力和正应力的典型分布曲线示于图 2。本文在弹性理论的基础上，假定沿胶层厚度粘结应力为常数，并考虑了钢筋混凝土梁剪切变形的影响，给出了相应的应力计算公式。限于篇幅，仅给出计算结果。

下文中下标符号 c、p、a 分别指 RC 梁、粘板和胶层。符号  $E$ 、 $I$ 、 $G$  和  $t$  分别为弹性模量、惯性矩、剪切模量和厚度。

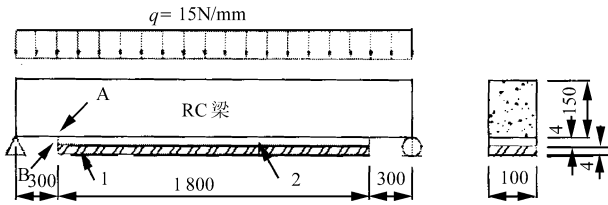


图 1 粘板加固梁

1—CFRP 或钢板；2—粘结胶层

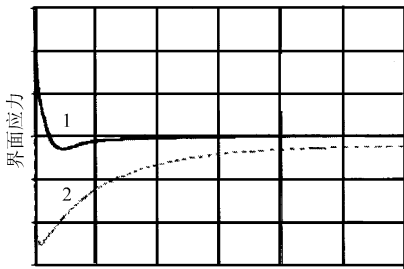


图 2 典型粘结界面应力曲线

1—正应力；2—剪应力

若设水平坐标轴  $x$  的原点位于胶层中平面端点，并记混凝土梁底面的水平位移为  $u_b(x)$ ，外贴板顶面的水平位移为  $u_{pt}(x)$ ，则胶层中的剪应力可表示为：

$$\tau(x) = \frac{G_a}{t_a} [u_{pt}(x) - u_b(x)] \quad (1)$$

胶层中的正应力  $\sigma(x)$  与混凝土梁底面的竖向位移  $w_b$  及外贴板顶面的竖向位移  $w_{pt}$  的关系可表示为：

$$\sigma(x) = \frac{E_a}{t_a} [w_{pt}(x) - w_b(x)] \quad (2)$$

根据外贴板和 RC 梁的微元的平衡条件和几何协调条件，可推导出粘结界面的剪应力  $\tau(x)$  和正应力  $\sigma(x)$  的计算公式，如式(3)或式(5)，详细推导过程从略。

$$\tau(x) = \frac{qG_a}{2t_a\beta} \left[ \frac{s(s+b_1)t_c}{2E_cI_c} + \frac{\alpha_s}{G_c} - \frac{\alpha_{Ec}(t_c+t_p)}{\beta^2E_cI_c} \right] e^{-\beta x} + \frac{\alpha_{Ec}(t_c+t_p)}{\beta^2E_cI_c} \left[ \frac{b_1}{2} - x \right] \quad (3)$$

式中

$$\beta^2 = \frac{G_a}{t_a} \left[ \left( \frac{t_c+t_p}{2} + t_a \right) \left( \frac{t_c+t_p}{2} \right) + \left( \frac{1}{E_cI_c} + \frac{1}{E_pI_p} \right) + \frac{1}{E_cA_c} + \frac{1}{E_pA_p} \right] \quad (4)$$

$$\sigma(x) = e^{-\eta x} \left\{ \frac{E_a}{4\eta^3 t_a} \left[ \frac{s(s+b_1)\eta + b_1}{E_cI_c} q + \frac{2\alpha_s \eta q}{G_c t_c} + \left( \frac{t_p}{E_pI_p} - \frac{t_c}{E_cI_c} \right) \tau(0) \right] \cos(\eta x) - \frac{qE_a}{2\eta^2 t_a} \left[ \frac{s}{2E_cI_c} (s+b_1) + \frac{\alpha_s}{G_c t_c} \right] \sin(\eta x) \right\} + \frac{t_p - r_{pc} t_c}{2(1+r_{pc})} \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{r_{pc}}{1+r_{pc}} q(x) \quad (5)$$

式中

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = -\frac{qG_a}{2t_a} \left\{ \left[ \frac{s(s+b_1)t_c}{2E_cI_c} + \frac{\alpha_s}{G_c} - \frac{\alpha_{Ec}(t_c+t_p)}{\beta^2E_cI_c} \right] e^{-\beta x} + \frac{\alpha_{Ec}(t_c+t_p)}{\beta^2E_cI_c} \right\} \quad (6)$$

$$\tau(0) = \frac{qG_a}{2t_a\beta} \left\{ \left[ \frac{s(s+b_1)t_c}{2E_cI_c} + \frac{\alpha_s}{G_c} - \frac{\alpha_{Ec}(t_c+t_p)}{\beta^2E_cI_c} \right] + \frac{\alpha_{Ec}b_1(t_c+t_p)}{2\beta E_cI_c} \right\} \quad (7)$$

$$\eta^4 = \frac{E_a}{4t_a} \left( \frac{1}{E_cI_c} + \frac{1}{E_pI_p} \right) \quad (8)$$

$$r_{pc} = \frac{E_pI_p}{E_cI_c} \quad (9)$$

其中，抗弯刚度系数  $\alpha_{Ec} = E_cI_c / (E_cI_c + E_pI_p)$ ， $\alpha_{Ep} = E_pI_p / (E_cI_c + E_pI_p)$ ， $\alpha_s$  为剪切系数，对于矩形截面取 1.5， $b_1$  为外贴板的长度， $s$  为梁支座至外贴板端的距离， $q$  为单位梁宽上作用的均布荷载。

令式(3)和式(5)中的  $x=0$ ，可计算出粘板端部最大粘结界面剪应力和正应力。

以上公式计算出了粘板与梁之间界面分布应力的理论值(示于图 6)，却未能详细给出胶层内的正应力与剪应力的具体分布。

## 2 粘结应力的有限元分析计算

### 2.1 粘板加固梁的有限元模型

为得到粘板加固梁粘结界面及胶层中的应力分布，以下采用 LUSAS 有限元商用软件进行详细的分析计算。图 1 为一典型的受均布荷载的粘板加固简支梁，该加固梁的混凝土梁、粘结胶层和外贴板的几何和材料特性参数均列于表 1。对这 3 种材料均采用四结点二维平面应力单元进行模拟，由于粘板端部区

域存在应力奇异,故采用较密的网格,离外贴板端部越远的区域,有限元网格则越稀疏。图3示出了加固梁外贴板端部区域的有限元网格划分大样图。AC 粘结面(胶层—混凝土梁)和SA 粘结面(外贴板—胶层)端点分别记为A和B,它们都是应力奇异点。

表1 不同材料的尺寸和性能

材料名称	宽度/mm	深度/mm	长度/mm	弹性模量/ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	泊桑比
混凝土梁	$b_c=100$	$d_c=150$	$L_c=2400$	$E_c=20\,000$	$\nu_c=0.17$
粘结胶	$b_a=100$	$d_a=4$	$L_a=1800$	$E_a=2\,000$	$\nu_a=0.25$
外贴板	$b_p=100$	$d_p=4$	$L_p=1800$	$E_p=200\,000$	$\nu_p=0.30$

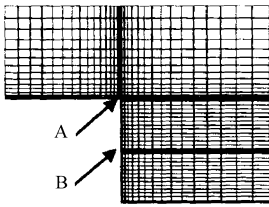


图3 外贴板端部区域有限元网格大样

## 2.2 界面粘结剪应力与正应力的收敛性

为评判界面应力的收敛性,采用4种细密程度不同的有限元网格,它们最小的网格长度分别是0.1、0.2、0.4和0.8 mm。4种有限元计算模型的网格

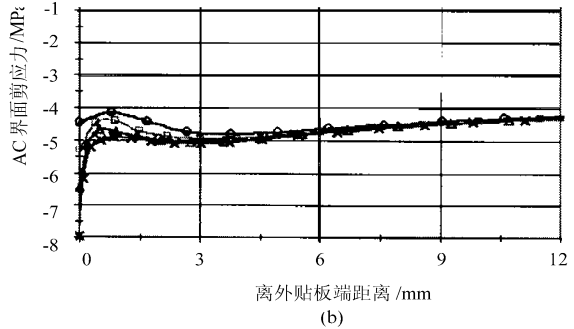
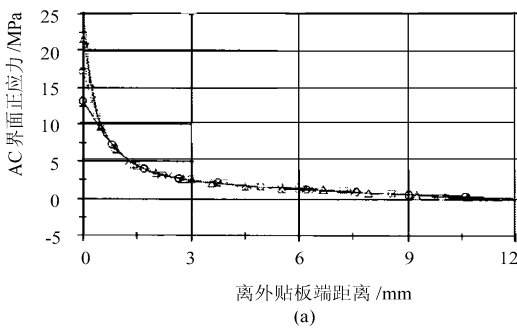


图4 AC界面应力分布的收敛性

(a)—AC界面正应力;(b)—AC界面剪应力

最小单元宽度:—○—0.8 mm;—□—0.4 mm;—△—0.2 mm;—\*—0.1 mm

## 2.3 粘板端部的界面应力分布

从图4中可见,粘界面应力数值在接近于粘板端部时迅速增加。最大的剪应力和正应力均出现于AC 粘结界面的端点A。为了能更形象地从总体上了解应力分布特征,图5示出了粘板端部胶层区域内剪应力和正应力的三维分布图。此计算结果采用最小网格单元长度是0.1 mm。沿胶层厚度方向,应力分布的最大差异出现于胶层端部,离端部约3倍胶层厚度后,粘结应力沿胶层厚度的分布则趋于

划分和各粘交界面的端点应力均汇总于表2。

表2 AC和SA界面与MA截面端点应力的有限元计算结果

最小网格 边长/mm	AC 粘结面应力/ MPa		MA 截面应力/ MPa		SA 粘结面应力/ MPa	
	$\tau$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$
0.8	-4.48	13.1	-1.91	2.76	-1.49	-9.41
0.4	-5.32	17.0	-0.95	2.63	-1.39	-12.0
0.2	-6.47	21.6	-0.47	2.60	-1.35	-14.3
0.1	-7.97	27.1	-0.24	2.59	-1.42	-16.7

从表2数据可见,由于A、B端点为奇异点,AC界面和SA界面的剪应力和正应力当网格越小时,数值增大,趋于发散,其中正应力的发散程度超过剪应力的发散程度,并且,总体上,AC界面应力的发散程度超过SA界面应力,这是因为A点的奇异强度大于B点;但对于MA截面(胶层的水平中平面)的端点剪应力趋于0,而正应力收敛于2.6MPa,此结果反映出MA截面,即胶层中平面的端点为非奇异点。

另外,还根据这4个模型的计算结果绘出了AC和SA界面及MA截面上沿梁纵向的剪应力和正应力的分布图,以评判粘界面应力的收敛性,限于篇幅,仅示出AC界面的应力分布图(图4)。

相等。

## 2.4 有限元计算结果与解析解的比较

加固梁粘结面应力的有限元计算结果与式(3)、式(5)解析解的比较详见图6。离粘板端两倍胶层厚度后,界面应力的有限元计算结果与解析解的结果吻合良好。只是在粘板端部区域,因A、B奇异点的存在而出现较大的差异。AC界面上剪应力、MA截面和SA界面上的正应力在临近粘板端部有一下降段;MA截面和SA界面上剪应力在粘板端趋于0,

这些应力分布特征在理论解中却都未能得到详细的

反映。

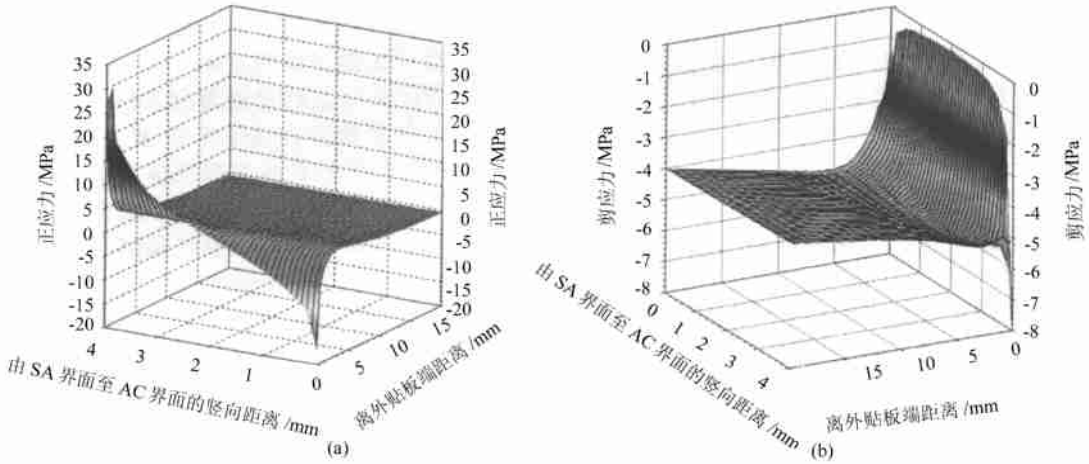


图5 粘板端部胶层内应力分布三维图

(a) — 正应力; (b) — 剪应力

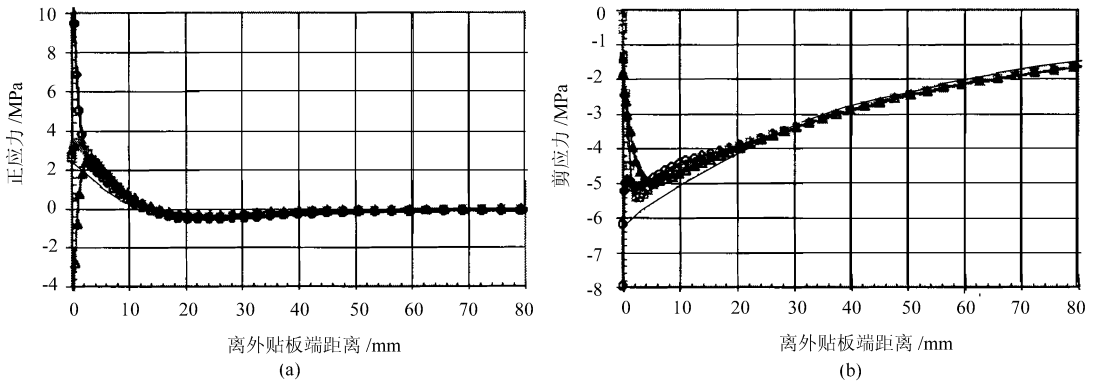


图6 粘界面应力分布理论值与有限元计算结果比较

(a) — 正应力; (b) — 剪应力

—○— AC 粘界面; —□— MA 粘界面; —△— SA 粘界面; — 理论值

### 3 粘板端局部溢胶对界面应力分布的影响

当采用外部粘贴钢、FRP 等薄板加固混凝土构件时, 为确保粘结质量, 通常在粘板外部进行加压固化, 此时, 将会使部分胶从粘板端被挤出, 并形成一定的形状。对此现象本文也进行了有限元计算分析, 结果表明板端溢胶将使外贴板端部区域的界面应力大为降低。

### 4 影响粘结应力分布的主要因素

本文还采用有限元参数分析法对影响外贴板与被加固构件间粘结应力的主要因素: 胶层厚度、胶层弹性模量、外贴板厚度、外贴板弹性模量、外贴板至支座距离等进行了分析计算。

例如, 计算时, 选用了 3 种外贴板材料: 玻璃纤维板 (GFRP)、碳纤维板 (CFRP) 和钢板, 它们的弹性

模量分别取为 35GPa、120GPa 和 200GPa, 其余条件相同。计算结果表明, 粘界面应力分布随粘板弹性模量的改变而变化, 弹性模量越大, 粘界面应力峰值也就越高。

### 5 结论

本文着重研究外贴板加固梁中粘界面应力分布, 采用有限元分析方法计算了胶层与混凝土梁粘界面、粘板与胶层粘界面及胶层水平中平面的剪应力和正应力的分布, 计算结果与理论解较为一致。但应注意, AC 界面临近混凝土开裂已进入塑性阶段, 这与弹性假设条件是有出入的, 所以理论计算值与实际值是有一定差距的。

基于本文的研究结果可得出以下几点结论:

- (1) 在粘板端部胶层及其邻近区域内应力分布

(下转第 33 页)

## 4 构件抗震强度验算

### 4.1 砖混层墙体的受剪承载力验算

砖混层的抗侧力构件由砖砌体墙和构造柱组成。砖混层墙体的极限受剪承载力设计值  $V_u$  可按下列式计算:

$$V_u = \beta \{ (f_v / \zeta) (1 + 0.45 \sigma_0 / f_v) \} \cdot [A_w + (G_c / G_w) \sum \eta_i A_{ci}] + \gamma f_y \sum A_{si} \quad (17)$$

则砖混层墙体的抗震(剪)承载力验算公式可表示如下:

$$V \leq V_u / \gamma_{RE} \quad (18)$$

式中,  $\beta$  为层间墙体受剪承载力折减系数, 对砖混过渡层,  $\beta$  按公式(19)计算确定(也可近似取 0.8), 对其余砖混层,  $\beta$  取 1.0。其余符号见文献[1]。

$$\beta = 1 \{ 1 + 0.45(0.2 - 0.8 h_b / l) \sigma_0 / f_v \} \quad (19)$$

### 4.2 框剪层砖(填充)抗震墙、框架梁柱及混凝土抗震墙的受剪承载力验算

框剪层的抗侧力构件由混凝土抗震墙、砖(填充)抗震墙和框架(梁、柱)组成, 其中, 按协同工作计算时, 混凝土抗震墙常为高宽比为 1.5~2.5 的中高墙。砖填充墙的极限受剪承载力设计值  $V_{uw}$  可按下列式计算:

$$V_{uw} = (1.44 f_v / \zeta) (1 + 0.45 \sigma_0 / f_v) \cdot A_{w0} \quad (20)$$

则砖填充墙的受剪承载力验算公式可表示如下:

$$V_{lw} \leq V_{uw} / \gamma_{RE} \quad (21)$$

试验结果表明<sup>[1]</sup>, 底部两层框架—抗震墙砖房框剪层中的框架均系柱端弯曲受压破坏, 破坏时形成柱铰机构, 故可按弱柱型计算如下:

$$V_{uf} = (M_{uf}^u + M_{uf}^l) \quad (22)$$

则框架柱的受剪承载力验算公式可表示如下:

$$V_f \leq V_{uf} / \gamma_{RE} \quad (23)$$

(上接第 4 页)

较为复杂, 由于 AC 界面和 SA 界面端部的 A、B 奇异点的存在致使此区域内胶层中的应力分布变化很大。根据有限元分析计算结果, 胶层端部的粘结界面应力趋于发散, 而向内离开端部很短距离处的第二界面应力峰值却较为稳定, 趋于收敛。

(2) 部分粘结胶从外贴板端部挤出后在一定程度上能有效减缓应力奇异强度。

(3) 在影响粘结界面应力的主要因素中, 一般情况是, 胶层越薄, 胶层弹性模量越高, 粘板端点离支座越远, 粘板越厚, 粘板弹性模量越高, 粘结应力就越大。

当相对受压区高度  $\xi = N / (bh f_c) \leq \xi_b$  时, 柱端偏压正截面承载力设计值  $M_{yc}$  可按下列公式计算:

$$\xi h_0 \geq 2a' \text{ 时, } M_{yc} = A_s f_y (h_0 - a_s') + 0.5 N h [1 - N / (bh f_{cm})] \quad (24)$$

$$\xi h_0 \geq 2a' \text{ 时, } M_{yc} = (A_s f_y + 0.5 N) \cdot (h_0 - a_s') \quad (25)$$

否则, 按公式  $\xi = [(\xi_b - 0.8)N / (f_{cm} b h_0) - \xi_b \rho_f / f_{cm}] / (\xi_b - 0.8 - \rho_f / f_{cm})$  重新计算  $\xi$ , 且  $M_{yc}$  按下式计算:

$$M_{yc} = \xi (1 - 0.5 \xi) f_{cm} b h_0^2 + (f_y A_s + 0.5 N) (h_0 - a_s') \quad (26)$$

当第一、二层框架梁的截面宽度、配箍、高跨比和混凝土强度等级分别不小于 300 mm、 $\phi 8 @ 200$  mm (梁端 1.5 倍梁高范围及洞口处和洞口两侧 500 mm 范围内按  $@ 100$  mm 加密)、1/9 (第一层框架梁可放宽至 1/11) 和 C25, 可不进行框架梁截面受剪承载力验算。

底部两层框架—抗震墙结构中的混凝土抗震墙(包括两个边框柱)一般为高宽比为 1.5~2.5 (剪跨比约为 1.0~2.0) 的中高墙, 该抗震墙(包括两个边框柱)的极限受剪承载力设计值按下式计算:

$$V_{lw} = (0.04 f_c t h_{w0} + 0.1 N A'_{cw} / A_{cw}) / (\lambda - 0.5) + 0.8 f_{yh} A_{sh} h_{w0} / S \quad (27)$$

则中高混凝土抗震墙(包括两个边框柱)的受剪承载力验算公式可表示如下:

$$V_w \leq V_{lw} / \gamma_{RE} \quad (28)$$

以上各式中的符号见文献[1]。

### 参考文献

- 1 郑山锁. 底部框架—抗震墙砖房抗震性能及设计方法的研究: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2000. 6

(4) 在粘板端部, 当很高的复合奇异应力超出胶或混凝土或界面粘结强度时, 便会致外贴板从梁底面剥离下来, 使加固梁因锚固失效而提前发生脆性破坏。这对于锚固长度小的厚板更是如此。故在实际工程中应加强锚固措施, 例如, 采用具有较长锚固长度的薄板等。

### 参考文献

- 1 Vilnay O. The Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. 1988, 10(2): 73~78
- 2 Malek A M, Saadatmanesh H and Ehsani M R. Prediction of Failure Load of RC Beams Strengthened with FRP Plate due to Stress Concentration at the Plate End. ACI Structural Journal. 1998 95(1): 142~152