

# FRP 加固钢筋混凝土板的分析与设计

汪 晓 明

(香港奥雅纳公司上海代表处, 上海 200021)

**提 要** 本文分析了用纤维增强复合材料 FRP 加固钢筋混凝土板的特点, 讨论了我国现有规程的一些不足之处, 提出了一种简单可行的设计方法, 并通过例题比较了该方法与上海规程和国家规程的差别。

**关键词** FRP 加固, 钢筋混凝土板, 规程, 设计方法

## Analysis and Design of Structural Strengthening of Concrete Slabs Using FRP Laminates

WANG Xiaoming

(Shanghai Office of Ove Arup & Partners Hong Kong Limited, Shanghai 200021)

**Abstract** In this paper, after analysis of the characteristics of the concrete slabs strengthened using FRP laminates, the shortcomings in current specifications are discussed, a practical approach is presented, and examples are given to compare with the national and local technical specifications.

**Key words** FRP, strengthening of concrete slabs, technical specifications, design method

### 1 引 言

由具有高拉伸强度的纤维(如碳纤维, 聚酰胺纤维和玻璃纤维)和聚合物母体所组成的纤维增强聚合物(简称 FRP)具有一系列的优点, 比如轻质高强, 不生锈, 容易安装以及较短的施工周期等, 它已经被证明可以在建筑物的加固工程中发挥很好的作用。自 20 世纪 70 年代以来, 纤维增强聚合物(FRP)特别是碳纤维(CFRP)在工业与民用建筑上的应用越来越广泛。我国在这方面的研究虽然起步较晚, 但由于市场的迫切需要, 速度和进展是很快的。北京市早在 1997 年就成功地将碳纤维加固技术应用于公路桥加固当中, 上海市于 2002 年 6 月颁布了《纤维增强复合材料加固混凝土结构技

术规程》(DG/TJ08-012-2002), 中国工程建设标准化协会则于 2003 年 5 月推出了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146)。

在大多数情况下, 钢筋混凝土板都表现出很好的耐久性, 能很好地完成设计所设定的功能, 但在其使用过程中, 也会出现一些情况需要对其进行加固。最常见的例子就是结构的功能发生改变或需要提高它的承载力; 还有的时候是需要添加某些新设备, 比如在楼板上开洞以增加自动扶梯、电梯等; 当然也可能因为结构的老化或受环境侵蚀而需要进行加固。

在这些情况下, 目前存在好几种加固方案。比如在楼板底下新安装钢结构梁(如工字钢, 槽钢); 或在板顶部弯矩最大的地方增

加悬挂系统以减少板的跨中弯矩;也可以象加固梁一样,在板底粘钢板,以提高其承载力。但总的说来,这些方法与粘 FRP 材料相比,存在下面这些缺点:材料太重,特别是在那些施工场地狭窄的地方操作非常困难;容易生锈;加固材料有一定的长度限制,而它们的节点处理又很困难;加固工程周期较长。

## 2 FRP 加固钢筋混凝土板的特点

很显然,在实际工程中,不管是由于楼面荷载增加也好,还是结构修改调整也好,需要对楼板进行加固的情况很多,很广泛。遗憾的是,尽管有很多研究材料是针对用 FRP 来进行梁的加固的,但对钢筋混凝土楼板来说,这方面的研究确实少得可怜。

美国的研究人员 Karbhari 认为,将对梁的有关研究成果直接转化应用到板的设计分析中是不可行的<sup>[1]</sup>。首先因为板的受力状态是双向的,而梁的受力状态是单方向的;另外,楼板不像梁一样有抗剪钢筋;再者,FRP 粘贴在楼板底部,有一定的间距,从而使楼板有的被 FRP 覆盖,有的却没有。但是,也有很多研究人员<sup>[2,3]</sup>指出,在目前研究成果缺乏的情况下,应用传统的研究钢筋混凝土梁的方法来分析 FRP 加固的钢筋混凝土板似乎也是合理的,而不论楼板是单向板或双向板,甚至在 Elhassan 的一个设计项目里,还包括了一个无梁楼盖。当然他们也承认,FRP 应用于钢筋混凝土楼板上目前是处于不太成熟的阶段,还有许多的试验和理论分析工作需要完成,以及建立相应的规范规程。

另一方面,有一些基本的结论还是为绝大多数这方面的研究人员所接受:

(1) 根据 FRP 材料性质的不同,以及它们粘贴方式的不同,楼板弯矩承载力的提高程度也不相同,最高可以提高到接近 300%。

(2) 楼板用 FRP 材料进行加固以后,其破坏模式会有很大的变化:普通钢筋混凝土板的破坏模式是有延性的钢筋拉屈破坏,而加固后的楼板破坏模式延性大大减少,主要表现方式是 FRP 材料从板上突然剥落开来,或者 FRP 材料突然断裂。

(3) 他们都建议像普通钢筋混凝土板配筋一样,要适当地配置横向 FRP 条,因为单方向地配置不是最经济有效的。

(4) 就 FRP 片材设置的净距来说,只要该净距保持在 250~300mm 以下,那么楼板破坏时的开裂位置以及破坏模式就与它没有多大关系。这方面需要更多的研究,研究人员 Tann 建议说,最大净距应当取为  $2.5h_0$ ,其中,  $h_0$  为板底钢筋的中心到板顶的距离,或者如果采用象分布钢筋那样的横向 FRP 条,那么净距还可以适当加大,但它们应当被粘贴在最里面<sup>[5]</sup>

(5) 目前没有任何材料能表明外粘的 FRP 材料能增强钢筋混凝土板的抗剪承载力。

## 3 我国现行规程的不足之处

对于我国的相关规程 CECS146 (简称国家规程) 和 DG/TJ08-012-2002 (简称上海规程) 来说,在钢筋混凝土板的加固上,存在这样一些不足之处:

(1) 没有明确在绝大多数情况下,板加固后破坏模式是 FRP 的拉断破坏,其中,上海规程甚至将这种破坏模式排除在设计目标状态之外,不适用于板的加固设计。

(2) 上述规程均要求计算初始弯矩作用下混凝土构件受拉边缘的初始拉应变  $\epsilon_i$ ,而实际上对于板的加固设计来说,该值的求取没有多少意义。

(3) 上述规程给出的公式是笼统针对受弯加固的,对于板的加固设计来说,它们并不严谨,且显得较为繁琐。

正如国家规程条文说明 4.3.2 条所解

释的一样,采用粘贴 CFRP 片材进行受弯加固时,构件的破坏形态有很多种,对于受弯加固,按以下两种破坏形态进行设计计算:破坏形态一,受拉钢筋先达到屈服,然后受压区混凝土压坏,此时碳纤维片材尚未达到其允许拉应变(简称钢筋拉屈破坏);破坏形态二,受拉钢筋先达到屈服,然后碳纤维片材超过其允许拉应变而拉断,此时受压区混凝土尚未压坏(简称 FRP 拉断破坏)。

但是,必须指出的是,配置了 FRP 材料后,板的破坏模式与梁的破坏模式是不同的。在梁的设计中,为了保证其延性,设计要求配置的 FRP 面积有上限和下限,也就是  $A_{f, \min}$  即最小 FRP 配置面积和  $A_{f, \max}$  即最大 FRP 配置面积,以便使梁不产生 FRP 的拉断破坏,所以当梁上配置的 FRP 面积在  $A_{f, \min}$  和  $A_{f, \max}$  之间时,梁的破坏模式就是钢筋的拉屈破坏,从而保证了梁的延性。但是对于板来说,这种限制一般不能适用,因为板的形状特点是厚度薄、宽度宽,而且相对于梁来说,板的配筋率都较低,这两点就决定了加固后板的破坏模式是 FRP 拉断破坏。如果为了保证板的延性而硬要采用 FRP 加固梁时的  $A_{f, \min}$  模式,那么很可能 FRP 的面积太大(参见本文例题 2),加固后弯矩承载力比原来要高很多,这就意味着在实际工程中,荷载增加了很多,那么板的破坏模式将转化成剪力破坏,遗憾的是,目前尚没有方便有效的办法来提高板的抗剪承载力。

现在来讨论一下规程要求计算的初始弯矩作用下混凝土构件受拉边缘的初始拉应变  $\epsilon_i$ 。一般说来,对混凝土板加固以前,可以较好地活荷载和部分恒荷载(如吊顶荷载)进行卸载,所以大部分情况下,初始拉应变  $\epsilon_i$  都较小。另外从国家规程 4.3.2 条第 2 款可以看出,当混凝土受压区高度  $x$  不大于  $\epsilon_{fb} h$ , 规程就近似地将混凝土受压

区高度取为  $\epsilon_{fb} h$ , 而且还近似地将混凝土受压区的合力作用点取在  $0.5 \epsilon_{fb} h$  处, 这里  $\epsilon_{fb}$  是碳纤维片材达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限受压区高度, 取  $\epsilon_{fb} = 0.8 \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{cf} + \epsilon_i)$ 。从上述内容可以看出:  $\epsilon_i$  相对于混凝土极限压应变  $\epsilon_{cu}$  和碳纤维片材的允许拉应变  $\epsilon_{cf}$  来说, 其值较小, 作者经过对若干实际工程的验算, 发现  $\epsilon_i$  的存在与否, 只会影响  $\epsilon_{fb}$  的 6 ~ 10 %; 国家规程 4.3.2 条第 2 款中已经包含了两个“近似”计算, 这就意味着  $\epsilon_i$  求取得再精确, 也会因为这两个“近似”而失去意义; 国家规程 4.3.2 条第 2 款在求取碳纤维片材的拉应力时, 不再采用  $E_{cf} \epsilon_{cf}$ , 而是直接计算  $E_{cf} [\epsilon_{cf}]$ , 其中,  $[\epsilon_{cf}]$  是碳纤维的允许拉应变, 与  $\epsilon_i$  没有关系。综合上述三点可知, 对于板的加固设计来说, 初始拉应变  $\epsilon_i$  的求取没有多少意义。

#### 4 用 FRP 片材加固钢筋混凝土板的设计(一种简易方法)

根据以上的分析, 以及研究材料很缺乏的现实, 还有实际工程中零星的已经完成的项目报告和测试结果 (Elhassan, 2000; Bank 和 Xi, 1993; Ichimasu 等, 2000, Tann 等, 2001), 在这里作者建议不管是单向板还是双向板, 甚至无梁楼盖, 都可以采用普通钢筋混凝土楼板的有关方法数据, 以及灵活运用有关规程关于用 FRP 加固钢筋混凝土梁的有关分析和公式来进行板的设计, 当然采用较高的安全系数和仔细的核算推敲是很重要的。

关于用 FRP 加固梁的基本假设和分析都可以加以运用, 另外用现行规范和方法求得的板中弯矩和剪力也可以应用于设计中。但是, 必须指出的是, 按设计配置了 FRP 材料后, 板的破坏模式与梁的模式是不同的。用 FRP 加固后的板的一般破坏模式是 FRP

拉断破坏,具体一点,就是:首先钢筋屈服,之后 FRP 拉断,紧接着混凝土压碎。在 FRP 加固设计中,除了钢筋拉屈破坏外,这种模式是最容易取得的。Tann 是英国的研究人员,也是英国在 2000 年发布的第一套有关用 FRP 加固钢筋混凝土结构规范的起

草人之一,他指出,FRP 拉断破坏时,构件也会表现出很大的变形,因为混凝土中的钢筋会首先屈服,另外 FRP 材料虽然延性差,但它的破坏也是渐进式的,而且纤维断裂时会发出噼啪的可以被人听得见的声音,可以视作构件最后破坏的预示和警告。

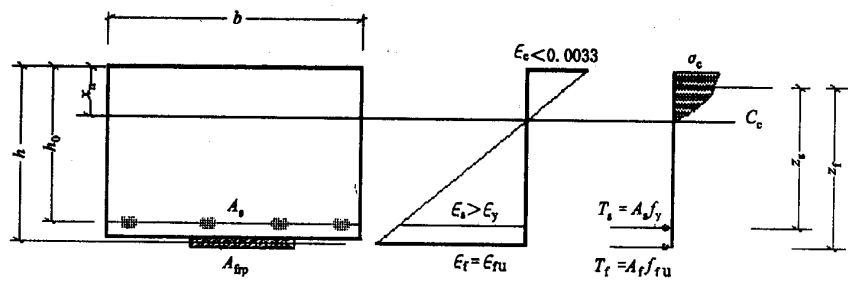


图 1 板设计时假设的应力应变条件

但应当注意,当构件的破坏模式为 FRP 拉断时,常用的混凝土等效矩形应力图就不可以再运用,因为压区边缘混凝土没有达到其进行应变。为了求出混凝土受压区的压力合力,就必须用混凝土的非直线形的应力应变图对混凝土受压区求积分,即使是采用象 Desayi2Krishnan 方程或类似的简化方程,这样一个过程仍然非常繁琐。本文作者通过对一系列已有项目的比较和 Tann 的建议,先对 FRP 的极限抗拉强度  $f_{fu}$  采用一个 1.4 的安全系数,参见图 1,再假设  $Z_s = 0.85 h_0$ ,  $Z_f = 0.9 h_0$ ,这样求截面弯矩时就不要再来求混凝土的压力合力和作用点了,大大地简化了计算。在指定了加固后的弯矩  $M$  的条件下,所要求的 FRP 面积可以按下式求得:

$$\begin{aligned} A_{fp} &= \frac{M - 0.85 h_0 (f_y) A_s}{0.9 h_0 (f_u) / 1.4} \\ &= \frac{[M - 0.85 h_0 (f_y) A_s]}{0.65 h_0 (f_{fu})} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $M$  ——是加固后的弯矩值;  
 $Z_s$  ——是受拉钢筋到混凝土压区和压力作用点的距离;  
 $Z_f$  ——是中心到混凝土压区和压力

作用点的距离。

例题 1

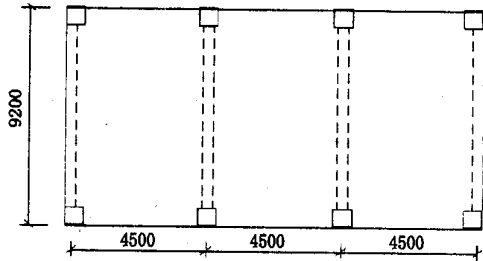


图 2 例题 1 连续板结构平面示意图

考虑一钢筋混凝土连续板,参见图 2,材料性质如下: $f_c = 14.3 \text{MPa}$ ,  $f_y = 300 \text{MPa}$ 并且已经知道:板厚  $h = 170 \text{mm}$ ,有效厚度  $h_0 = 140 \text{mm}$ 。该板在原先的设计活荷载和恒载包括自重作用下,已经知道在第一跨它的弯矩设计值是  $20.8 \text{kN} \cdot \text{m}$ ,配置了钢筋  $A_s = 550 \text{mm}^2 / \text{m}$ 。现在由于使用功能的改变,设计活荷载有所提高,第一跨板的弯矩承载力要求达到  $M = 29.1 \text{kN} \cdot \text{m}$ 。试求用 CFRP 加固时  $A_{fp} = ?$

解 第一步,板的弯矩承载力要求达到的值为: $M = 29.1 \text{kN} \cdot \text{m}$ ,也就是比原来的承载力提高了 40%。假设用碳纤维聚合物,使用的材料数据是:极限抗拉强度  $f_{fu} = 2500 \text{MPa}$ ,弹性模量  $E_f = 235,000 \text{MPa}$ 。

第二步,考虑一个 1000mm 宽的板带,有效高度为  $h_0 = 140\text{mm}$ ,将有关数据代入公式(1),可得

$$\begin{aligned} A_{\text{frp}} &= \frac{M - 0.85 h_0 f_y A_s}{0.65 h_0 f_{fu}} \\ &= \frac{29100000 - 0.85 \times 300 \times 550 \times 140}{0.65 \times 2500 \times 140} \\ &= 41.6\text{mm}^2 \end{aligned}$$

也就是说,如果 CFRP 材料厚 0.167mm,宽 100mm 的话,粘贴净距可以取  $300\text{mm}: 0.167 \times 100 / (0.10 + 0.30) = 41.75\text{mm}^2/\text{m}$ 。在实际设计中,还应当检查其抗剪承载力。

### 例题 2

条件与例题 1 完全相同,试按上海市工程规范《纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》(DG/TJ08 - 012 - 2002) 来求 CFRP 材料  $A_{\text{frp}} = ?$

解 第一步,根据该上海规程,应首先确定该混凝土板在初始弯矩作用下的混凝土受拉边缘的初始拉应变  $\epsilon_i$ ,由于初始条件的不同,粘贴 CFRP 前卸载程度的不同,初始拉应变是不同的,限于篇幅,在这里我们假设  $\epsilon_i = 0.001$ 。

第二步,按上海规程公式 4.2.2:  $M = f_c b x (h - 0.5x) - A_s f_y (h - h_0)$ ,  $x_n = x/0.8$  来求受压区高度:

$$29100000 = 14.3 \times 1000 \times (170 - 0.5x) - 550 \times 300 \times (170 - 140)$$

从而可得  $x = 14.8\text{mm}$ , 可求得  $x_n = 18.5\text{mm}$

按公式  $\epsilon_f = \epsilon_{cu} (h - x_n) / x_n - \epsilon_i$ , 计算碳纤维的应变:

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= \frac{0.0033 \times (170 - 18.5)}{18.5 - 0.001} \\ &= 0.0293 \end{aligned}$$

根据该规程 4.2.1 条,纤维布的允许拉应变取为  $\epsilon_{cu} = 0.0045$ , 因为  $\epsilon_f > \epsilon_{cu} = 0.0045$ , 碳纤维强度超过设计值,所需要

的碳纤维的面积按该规程中公式 4.2.2 - 7 来计算:

$$A_{f,\min} = \frac{f_c b x_{f,b} + A_s f_s - A_s f_s}{f_{fu}}$$

$$A_{f,b} = \frac{0.8 \epsilon_{cu} h}{\epsilon_{fu} + \epsilon_i}$$

$$\begin{aligned} X_{f,b} &= \frac{0.8 \times 0.0033 \times 170}{0.0033 + 0.0045 + 0.001} \\ &= 51\text{mm} \end{aligned}$$

$$f_{\text{frp}} = 0.0045 \times 235.000 = 1057\text{MPa}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{frp}} &= A_{f,\min} \\ &= \frac{14.3 \times 1000 \times 51 - 550 \times 300}{1057} \\ &= 533.6\text{mm}^2 \end{aligned}$$

与例题 1 进行比较可以看出,应用上海规程可以保证钢筋混凝土板的破坏是延性破坏,但碳纤维远未发挥其抗拉强度,所用碳纤维的量是例题 1 中设计值的 12.8 倍,应当说上海规程将破坏模式二 (FRP 拉断破坏) 排除在设计目标状态之外是不正确的。

### 例题 3

条件与例题 1 完全相同,试按中国工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003) 来求 CFRP 材料  $A_{\text{frp}} = ?$

解 第一步,根据该规程,应首先确定该混凝土板在初始弯矩作用下的混凝土受拉边缘的初始拉应变  $\epsilon_i$ ,由于初始条件的不同,粘贴 CFRP 前卸载程度的不同,初始拉应变是不同的,在这里我们仍然假设  $\epsilon_i = 0.001$ 。

第二步,根据该规程 4.3.2 条,碳纤维片材的允许拉应变不应大于碳纤维片材极限拉应变的  $2/3$  (即  $(2/3) (2500/235000) = 0.007$ ) 和  $0.01$  二者中的较小值。在这里为简化起见,不验算碳纤维片材厚度折减系数,直接取其允许拉应变为  $0.007$ 。

第三步,由于板的特点,可以假设混凝土受压区高度不大于  $x_{fb}$  (这可以通过例题

2 中第二步的计算结果来加以验证), 然后应用该规程中公式 4.3.2 - 4 来进行计算:

$$\begin{aligned} \epsilon_{fb} &= \frac{0.8 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{cf} + \epsilon_i} \\ &= \frac{0.8 \times 0.0033}{0.0033 + 0.007 + 0.001} \\ &= 0.234 \end{aligned}$$

代入公式 4.3.2 - 4:  $M = f_y A_s (h_0 - 0.5 h_{cfb}) + E_{cf} A_{cf} f_h (1 - 0.5 \epsilon_{fb})$  可得

$$\begin{aligned} A_{frp} &= 29100000 - 300 \times 550 \times 140 - \\ &\quad 0.5 \times 170 \times 0.234 / 235000 \times \\ &\quad 0.007 \times 170 \times 1 - 0.5 \times 0.234 \\ &= 37.6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

进行比较可以看出, 例题 1 与例题 2 求得的结果非常接近, 而例题 1 所采用的计算方法却是简便得多了。

## 5 结 束 语

(1) 配置了 FRP 材料后, 板的破坏模式与梁的破坏模式是不同的。在梁的设计中, 为了保证其延性, 设计要求配置的 FRP 面积有上限和下限, 从而可以保证梁的破坏模式是钢筋的拉屈破坏。对于板来说, 这种限制不能完全适用, 因为绝大多数情况下板的破坏模式是 FRP 的拉断破坏。

(2) 上海规程 (DG/TJ08 - 012 - 2002) 将破坏模式二 (FRP 拉断破坏) 排除在设计目标状态之外, 不适合板的加固设计, 需要加以完善。

(3) 在绝大多数情况下, 板加固设计中求取初始弯矩作用下混凝土构件受拉边缘的初始拉应变  $\epsilon_i$ , 是没有多少意义的。

(4) 对于 FRP 加固钢筋混凝土板, 国家规程 (CECS 146:2003) 虽然给出了相关公式, 但在混凝土应力应变模型中, 仍然采用了混凝土的矩形应力图模式来求混凝土压应力的合力作用位置, 故只能看作是一种

粗略近似方法, 而该方法相对于本文给出的近似方法而言, 显得较为繁琐。

## 参考文献

- [1] Karbhari V M, Seible F, Seim W and Vasquez A (1999), 'Post - strengthening of concrete slabs', In: Fourth international symposium - FRP reinforcement for RC structures, Ed. Charles W, ACI International, SP - 188, Michigan, 1999.
- [2] Ichimasu H, Maruyama M, Watanabe H and Hirose T (1993), 'RC slabs strengthened by bonded Carbon FRP plates', In: FRP Reinforcement for concrete structures (international symposium), Ed. Nanni A and Dolan C W, ACI, SP - 138, Michigan, U. S. A, 1993.
- [3] Elhassan R M (2000), 'The retrofit design of concrete columns and slabs with externally applied FRP composite materials', In: Innovative systems for seismic repair & rehabilitation of structures, Ed. Mosallam A S, California State University, U. S. A (2000).
- [4] Bank L C and Xi Z (1993), 'Pultruded FRP grating reinforcement concrete slabs', In: FRP Reinforcement for concrete structures (international symposium), Ed. Nanni A and Dolan C W, ACI, SP - 138, Michigan, U. S. A, 1993.
- [5] Tann D B, Shih J K C, Delpak R and Andreou E (2001), 'Optimum design approach for FRP strengthening of RC elements in Flexure', In: FRP composites in Civil Engineering, ed. J G Teng, Vol. 1, Oxford, Elsevier Science Ltd, 2001.
- [6] 纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程 (DG/TJ08 - 012 - 2002). 上海: 上海市建筑科学研究院, 2002
- [7] 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程 (CECS 146:2003). 北京: 中国计划出版社, 2003