

# FRP

## 加固混凝土结构

STRENGTHENED  
RC STRUCTURES



滕锦光

陈建飞

S·T·史密斯

林力

著

李荣 滕锦光 顾磊 译

中国建筑工业出版社

---

# FRP 加固混凝土结构

---

FRP STRENGTHENED RC STRUCTURES

滕锦光  
陈建飞  
S·T·史密斯 著  
林力

李荣 滕锦光 顾磊 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2003-3661 号

图书在版编目 (CIP) 数据

FRP 加固混凝土结构 / 滕锦光等著; 李荣等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07118-6

I. F... II. ①滕... ②李... III. 混凝土结构-加固  
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 003178 号

Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Ltd

All rights reserved.

Translation Copyright @ 2005 China Architecture & Building Press

FRP STRENGTHENED RC STRUCTURES/J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, L. Lam

本书经美国 John Wiley & Sons, Inc. 图书公司授权我社在中国翻译出版中文版

责任编辑: 吉万旺 董苏华

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 刘 梅 赵明霞

**FRP 加固混凝土结构**

滕锦光

陈建飞

S·T·史密斯 著

林力

李荣 滕锦光 顾磊 译

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京中科印刷有限公司印刷

\*

开本: 880 × 1230 毫米 1/32 印张: 8 字数: 230 千字

2005 年 4 月第一版 2005 年 4 月第一次印刷

定价: 26.00 元

ISBN 7-112-07118-6

TU·6349(13072)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书主要介绍了纤维增强复合材料（简称 FRP）在加固技术中的应用，全面、系统地反映了该领域最新的研究成果。本书主要内容包括：用于混凝土结构加固的 FRP 材料、FRP 与混凝土界面的粘结强度、梁的受弯加固、梁的受剪加固、板的受弯加固、轴压和偏压柱的加固、柱的抗震加固等。

本书可供新涉足该领域以及已经具备一定经验的研究人员、规范编制人员、设计和施工技术人员使用，也可作为研究生和高年级本科生教学和参考用书。

滕锦光博士现任香港理工大学土木及结构工程学系结构工程讲座教授，并兼任国际土木工程 FRP 学会（IIFC）主席及国际学术期刊《结构工程进展》主编。主要研究领域包括 FRP 复合材料在土木工程中的应用，钢结构和钢-混凝土组合结构，薄壳和空间结构，以及结构的非线性和屈曲性能，已发表 120 余篇学术期刊论文及 130 余篇学术会议论文。

陈建飞博士现任英国爱丁堡大学讲师，国际土木工程 FRP 学会（IIFC）理事兼秘书长。主要研究领域包括 FRP 复合材料在土木工程中的应用，料仓内散粒体结构力学，以及仓体结构行为，已发表近 100 篇学术论文。

史密斯（Scott T. Smith）博士现任澳大利亚悉尼技术大学讲师，主要研究领域为 FRP 复合材料在土木工程中的应用，已发表 50 余篇学术论文。

林力博士于 2000 年获香港理工大学博士学位，现供职于香港华润集团，主要研究领域为 FRP 复合材料在土木工程中的应用，已发表 60 余篇学术论文。

---

## 中译本序

---

本书的英文版在 2002 年初出版后，便经常有同行询问是否会在适当的时候出中文版。现在本书的中译本终于要和读者见面了，我甚感欣慰。

把英文版翻译成中文版的过程，比我预期的要艰难。这一次的经验使我深刻体会到翻译工作那份特有的艰辛。虽然作为原著者之一参加了本书的翻译工作，我并没有利用这个机会对内容进行改动。除了对当时尚未发表的一些参考文献给出了完整的引文信息和极个别的订正之外，中译本是忠实于原著的完整翻译。

近年来，我国在 FRP 加固技术方面已有许多很有意义的研究和应用，但到目前为止，这一方面尚无一本较为系统的中文著作。希望本书中译本的面世，能起到抛砖引玉的作用。有关 FRP 加固技术的研究，可以说是方兴未艾，本书的内容仅代表作者当时的认识，随着研究的不断深化，一些论点必然有改进和完善的需要。因此，对本书存在的不足之处，敬请读者批评指正。

本书中译本最终得以与读者见面，有赖于各方面的支持。在此，我代表三位译者感谢中国建筑工业出版社的支持和鼓励，也感谢香港理工大学通过其战略发展领域计划所给予的资助。

滕锦光

2004 年夏

---

## 原著序

---

近年来,纤维增强复合材料(Fibre Reinforced Polymer/Plastic,简称FRP)被广泛应用于混凝土结构及其他结构的加固中。世界各地对基础设施加固、修复和改造的巨大需求,以及FRP材料耐腐蚀、轻质、施工便捷等优点是该项技术得以迅速发展的两个主要原因。当然,FRP材料价格的持续下降也促进了该项技术的推广。

FRP加固技术在10年前还处于发展初期,相关的技术文献为数不多。如今,各类学术期刊和会议论文集中,与FRP加固技术相关的大量文献已使人们应接不暇。研究工作的迅速增长说明该项新技术已经引起广泛的重视。特别是,已有许多FRP加固工程应用实例超前于设计理论的发展,这对于高新技术在土木工程中的应用而言,也许是独一无二的。这一情况也清楚地表明,进一步的研究是非常必要的,只有这样才能将FRP加固技术提高到一个新的水平,包括对FRP加固技术的进一步拓展,以及建立更为合理完善的加固设计方法,从而保证该项新技术的安全性和经济性。

目前,有关FRP加固技术的研究成果大多以FRP加固混凝土结构为主,并多以论文的形式,散布于各类学术期刊与会议论文集中,给后续研究和工程应用带来一定的不便。本书旨在充分反映FRP加固混凝土结构领域目前的技术水平和研究现状,是对现有研究成果的汇总,并侧重于加固后的结构性能和承载力计算方法。本书主要内容包括:粘结性能(第2章)、梁受弯和受剪加固(第3章、第4章)、板受弯加固(第5章)、轴心和偏心受压柱的加固(第6章)及柱的抗震加固(第7章)。在每一章中,首先讨论加固方法,接着描述受力性能和破坏模式,然后提出合理的设计建议,可为今后设计规范的编制提供依据。本书全面、系统地反映了该领域最新的研究成果,作者希望可以吸引广泛的读者群,包括新涉足该领域以及已具备一定经验的研究人员、规范编制人员、设计和施工技术人员,也可作为研究生和高年级本科生教学和参考用书。

本书是近几年来由第一作者主持、香港理工大学资助的几个研究项目成果的结晶,在此特别感谢校方的大力支持。感谢现任建设及地政学院院长、前任土木及结构工程学系系主任高赞明教授和前任建设及地政学院院长

M. Anson 教授对这些研究项目的重视和支持。同时感谢英国伍尔弗汉普顿大学和诺丁汉大学对第二作者和香港理工大学的合作研究工作的支持。

在此还应感谢赞助了试验研究所用 FRP 材料的 I&M 特种建筑有限公司、Fosroc 香港有限公司和 Sika 香港有限公司及其代表王劲松博士、欧达伟先生和樊志明先生。

感谢澳大利亚 Adelaide 大学 D. J. Oehlers 博士对本书有关章节尤其是第三章初稿及美国南加州大学肖炎博士对第七章初稿提出的宝贵意见,使上述章节得到较好的改进,并感谢肖炎博士允许在本书中引用他的一些试验数据。

在本书的出版过程中,作者的各种要求和疑问都得到 John Wiley & Sons 有限公司的 D. Hughes 博士、W. Hunter 夫人、S. Lambert 女士、S. Corney 女士以及编辑 N. Hankins 先生迅速的回应,使本书得以顺利出版,在此对他们的敬业精神、包容和理解表示感谢。

最后,作者对在本书编写过程中家人所给予的理解和支持,谨致由衷的谢意。

滕锦光

陈建飞

S·T·史密斯

林 力

---

# 符号

---

以下是本书中所用符号的定义，不包括仅用于附录中的符号。当一个符号代表不止一种含义时，在仅适用于一个特定章的定义后注明章号。

$A_{bl}$  = 柱单根纵筋截面面积

$A_c$  = 柱中混凝土的截面面积

$A_e$  = 混凝土有效约束面积（第六章）

= 有效剪切面积（第七章）

$A_{frp}$  = FRP 板截面面积（第三章）

= 双肢 FRP 条带的截面总面积（第四章）

$A_g$  = 倒角后柱截面的总面积

$A_s$  = 梁受拉纵筋截面面积

$A_{sc}$  = 柱纵筋截面面积

$A_{sh}$  = 柱箍筋截面面积

$A_{si}$  = 梁第  $i$  层纵筋截面面积（第三章）

= 柱第  $i$  层纵筋截面面积（第六章）

$a$  = 椭圆截面长轴长度之半

$a_0$  = 式 (2.7f) 定义的参数

$B$  = 支座至最近的集中荷载作用点的距离（剪跨长度）

$b$  = 椭圆截面短轴长度之半

= 矩形柱截面短边边长（第六章）

$b_a$  = 树脂层宽度

$b_c$  = 混凝土构件宽度

= 梁截面宽度（第三章）

$b_f$  = T 形梁翼缘宽度

$b_p$  = 外贴板宽度

$b_w$  = T 形梁腹板宽度

$C$  = 混凝土压应力合力

$c$  = 混凝土保护层厚度

$c_f$  = 式 (2.4c) 中的系数

$D$  = 混凝土受压区边缘至压应力合力作用线的距离 (第三章)

= 等效圆柱的直径 (第六章)

$D'$  = 沿剪力方向箍筋中心线的距离 (图 7.11)

$D_{\text{frp}}$  = FRP 沿剪切裂缝的应力分布系数

$d$  = 梁受压区边缘到受拉纵筋中心的距离

= 圆柱的直径 (第六章)

= 圆柱的直径或矩形柱沿剪力方向的截面高度 (第七章)

$d_{\text{bl}}$  = 柱纵筋直径

$d_{\text{frp}}$  = 梁受压区边缘到 FRP 中心的距离 (第三章)

= 梁受压区边缘到梁侧 FRP 下端的距离 (第四章)

$d_{\text{frp},t}$  = 梁受压区边缘到梁侧 FRP 上端的距离

$d_h$  = 柱箍筋的直径

$d_{si}$  = 梁受压区边缘到第  $i$  层纵筋中心的距离 (第三章)

= 柱受压区边缘到第  $i$  层纵筋中心的距离 (第六章)

$E_a$  = 树脂的弹性模量

$E_c$  = 混凝土的弹性模量

$E_{\text{frp}}$  = FRP 的弹性模量

$E_p$  = 外贴板的弹性模量

$E_s$  = 钢筋的弹性模量

$E_{\text{sec}} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc}$

$E_2$  = 应力 - 应变曲线中第二段直线段的斜率

$e$  = 椭圆的偏心距

$f'_c$  = 混凝土的圆柱体抗压强度

$f'_{cc}$  = 约束混凝土的抗压强度

$f'_{co}$  = 无约束混凝土的抗压强度

$f_{ct}$  = 混凝土的劈拉强度

$f_{ctm}$  = 混凝土的表面抗拉强度

$f_{cu}$  = 混凝土的立方体抗压强度

$f_{\text{frp}}$  = FRP 的抗拉强度

$f_{\text{frp},e}$  = 破坏时 FRP 的平均应力或有效应力

$f_{\text{frp},r}$  = 考虑中部裂缝引起的剥离时的 FRP 折算抗拉强度

$f_h$  = 箍筋提供的约束应力

$f_l$  = 侧向约束应力

$f_l'$  = 有效侧向约束应力

$f_o$  = 应力 - 应变曲线中第二段直线段与应力轴的交点坐标 (图 6.18)

$f_p$  = 外贴 FRP 板的抗拉强度或钢板的屈服强度

$f_y$  = 钢筋的屈服强度

$f_{yh}$  = 柱箍筋的屈服强度

$f_{yl}$  = 柱纵筋的屈服强度

$G_I$  = 单剪试验中的断裂能

$h$  = 梁截面高度

= 矩形柱的长边边长 (第六章)

$h_{fp,e}$  = 梁侧面粘贴 FRP 的有效高度

$I_p$  = 外贴板的惯性矩

$K_n$  = 树脂层的法向刚度

$k$  = 式 (7.8) 中的系数

$k_g$  = 间隔系数

$k_p$  = 式 (2.4d) 定义的单剪试验的几何参数

$k_s$  = 形状系数

$k_1$  = 式 (2.11b) 定义的参数

= 平均应力系数 (第三章)

= 约束有效性系数 (第六章)

$k_2$  = 混凝土受压区边缘至压应力合力作用线的距离与受压区高度之比  
(第三章)

= 应变提高系数 (第六章)

$L$  = 粘结长度 (第二章)

= 柱的高度 (第六章)

= 单曲率弯曲柱的高度或双曲率弯曲柱的高度之半 (剪跨长度) (第七章)

$L_a$  = 锚固长度

$L_{c1}$  = 塑性铰主约束区的长度

$L_{c2}$  = 塑性铰次约束区的长度

$L_e$  = 有效粘结长度

$L_{eff}$  = 有效加固区长度

$L_{max}$  = 最大粘结长度

$L_p$  = 外贴板的总长 (第三章)

= 塑性铰区的长度 (第七章)

$L_s$  = 搭接长度

$L_v^i$  = 塑性铰区内的受剪加固区长度

$L_v^o$  = 塑性铰区外的受剪加固区长度

$l_{\min}$  = 稳定的最小裂缝间距

$M$  = 弯矩

$M_{db}$  = 剥离弯矩计算值

$M_{db, end}$  = 剥离时板端弯矩计算值

$M_{db, f}$  = 切断点位于纯弯段时的板端剥离弯矩计算值

$M_{exp}$  = 剥离弯矩试验值

$M_t$  = 柱理想化计算模型的抗弯强度

$M_u$  = 梁的极限弯矩 (第三章)

= 偏压柱的极限 (第六章)

$M_{uo}$  = 无约束柱的极限弯矩

$m$  = 式 (6.33) 定义的修正约束比

$N$  = 轴力

$N_u$  = 轴压和偏压柱的极限轴力

$N_{uo}$  = 轴压无约束柱的极限轴力

$n$  = 钢筋的层数 (第三章)

= 柱纵筋的根数

$P_u$  = 界面粘结强度

$p$  = 纵筋内圈的内部裂缝总长度

$R$  = FRP 的有效应力 (或应变) 与抗拉强度 (或极限应变) 之比

$R_e$  = 柱倒角半径

$r$  = 式 (6.13) 中的参数

$s$  = 柱箍筋中到中间距

$s_{frp}$  = FRP 条带沿梁纵向的中到中距离 (第四章)

= FRP 条带垂直净间距 (第六章)

$s_{frp, max}$  = FRP 条带沿梁纵向的最大中到中距离

$T_f$  = T 形梁的翼缘厚度

$t_a$  = 树脂层的厚度

$t_c$  = 混凝土构件的厚度

$t_{frp}$  = FRP 的厚度

= FRP 的厚度或纤维丝束/条带间隔包裹时的等效厚度 (第六章)

$t_{\text{frp},g}$  = 湿粘法中纤维布与树脂层的总厚度

$t_p$  = 外贴板的厚度

$t_{\text{sheet}}$  = 湿粘法中纤维布的厚度

$U_{cc}$  = 约束混凝土的单位体积极限应变能

$U_{co}$  = 无约束混凝土的单位体积极限应变能

$U_{sc}$  = 纵筋的单位体积极限应变能

$U_{sh}$  = 约束材料的单位体积极限应变能

$V$  = 剪力

$V_c$  = 混凝土对受剪承载力的贡献

$V_{db}$  = 剥离时的剪力计算值

$V_{db,end}$  = 剥离时板端剪力计算值

$V_{db,s}$  = 切断点弯矩为 0 时的板端剥离剪力计算值

$V_{\text{frp}}$  = FRP 对受剪承载力的贡献

$V_N$  = 轴力对受剪承载力的贡献

$V_n$  = 受剪加固梁的受剪承载力

$V_o$  = 柱可能出现塑性铰的截面完全发挥抗弯强度所对应的剪力

$V_s$  = 抗剪钢筋对受剪承载力的贡献 (第四章)

= 柱箍筋对受剪承载力的贡献 (第七章)

$w_{\text{frp}}$  = FRP 条带的宽度 (垂直于纤维方向)

$x$  = 受压区边缘至截面中和轴的距离

= 式 (6.13) 中的参数

$x_{cr}$  = 梁界限破坏时受压区边缘至截面中和轴的距离

$z$  = 以梁剪切裂缝顶端为原点向下的坐标

$z_b$  = 梁侧 FRP 有效区下端的坐标

$z_t$  = 梁侧 FRP 有效区上端的坐标

$\alpha$  = 式 (3.28) 中的系数

= 图 (7.10) 中定义的夹角

$\alpha_T$  = 式 (2.5b) 定义的参数

$\alpha_V$  = 式 (2.6) 定义的参数

$\beta$  = 受剪加固梁的第一纤维方向与水平线的夹角 (对梁的左半跨以顺时针转动为正, 图 4.1)

$\beta_L$  = 式 (2.17b) 定义的粘结长度系数

$\beta_p$  = 式 (2.15) 定义的宽度比系数

$\beta_w$  = 式 (4.17b) 定义的 FRP 条带宽度系数

$\gamma_b$  = FRP 与混凝土间粘结强度的材料分项系数

$\gamma_c$  = 混凝土受弯或轴压的材料分项系数

$\gamma_{frp}$  = FRP 抗拉强度的材料分项系数

$\gamma_s$  = 钢筋的材料分项系数

$\Delta_p$  = 塑性位移

$\Delta_u$  = 极限状态时的位移

$\Delta_y$  = 初始屈服时的位移

$\delta_i$  = 粘结 - 滑移关系曲线中的最大剪应力对应的滑移

$\delta_f$  = 粘结 - 滑移关系曲线中的极限滑移

$\varepsilon_c$  = 混凝土的压应变

$\varepsilon_{cc}$  = 约束混凝土峰值应力对应的压应变

$\varepsilon_{cf}$  = 混凝土受压区边缘的应变

$\varepsilon_{co}$  = 无约束混凝土峰值应力对应的压应变

$\varepsilon_{cu}$  = 混凝土的极限压应变

$\varepsilon_{frp}$  = FRP 的应变

$\varepsilon_{frp,e}$  = 破坏时 FRP 的有效 (平均) 应变

$\varepsilon_{frp,rup}$  = FRP 的极限拉应变

$\varepsilon_{h,rup}$  = 约束混凝土试件的 FRP 环向极限拉应变

$\varepsilon_{ini}$  = 加固前初始荷载在混凝土受拉区边缘产生的初始应变

$\varepsilon_{max}$  = 受剪加固时 FRP 的最大允许应变

$\varepsilon_p$  = 外贴 FRP 板的极限拉应变或钢板的屈服应变

$\varepsilon_{si}$  = 第  $i$  层钢筋的应变

$\varepsilon_{su}$  = 箍筋最大拉应力对应的应变

$\varepsilon_t$  = FRP 约束混凝土应力 - 应变曲线转折点的应变

$\zeta$  = 式 (4.14) 定义的参数

$\eta$  = 式 (3.27) 中的系数

$\theta$  = 主剪切裂缝与纵轴的夹角

$\theta_p$  = 塑性转角

$\lambda$  = 式 (2.14c) 定义的参数

无量纲的最大粘结长度 (第四章)

$\lambda_1$  = 式 (2.7c) 定义的参数

$\lambda_2$  = 式 (2.7d) 定义的参数

$\mu_\Delta$  = 位移延性系数

$\mu_\Phi$  = 曲率延性系数

$\nu_c$  = 混凝土的泊松比

$\rho_{frp}$  = FRP 的面积或体积配置率

$\rho_{frp,cr}$  = 梁界限破坏时 FRP 的界限配置率

$\rho_s$  = 受拉钢筋配筋率

$\rho_{sc}$  = 柱纵筋配筋率

$\rho_{sh}$  = 体积配箍率

$\rho_{si}$  = 第  $i$  层钢筋的配筋率

$\sigma_c$  = 混凝土的压应力

$\sigma_{db}$  = 外贴板与混凝土界面粘结破坏时外贴板的应力

$\sigma_{dbic}$  = 中部裂缝引起的剥离时外贴板的应力计算值

$\sigma_{exp}$  = 中部裂缝引起的剥离时外贴板的应力试验值

$\sigma_{frp}$  = FRP 的应力

$\sigma_{frp,max}$  = 沿剪切裂缝的 FRP 最大应力

$\sigma_{si}$  = 第  $i$  层钢筋的应力

$\sigma_x$  = 钢筋混凝土梁底面的纵向应力

$\sigma_y$  = 界面正 (剥离) 应力

$\tau$  = 界面剪应力

$\tau_f$  = 粘结 - 滑移关系曲线中的最大剪应力

$\tau_{max}^{debonding}$  = 破坏时的最大粘结剪应力

$\tau_u$  = 破坏时的平均粘结剪应力

$\Phi$  = 曲率

$\Phi_p$  = 塑性曲率

$\Phi_u$  = 极限状态时的曲率

$\Phi_y$  = 初始屈服时的曲率

$\phi$  = 受剪加固梁的第二纤维方向与水平线的夹角 (对梁的左半跨以顺时针转动为正, 图 4.1)

$\phi_F$  = 抗弯强度折减系数

$\phi_{frp}$  = FRP 材料的折减系数

$\phi_v$  = 抗剪强度折减系数

---

# 目录

---

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第1章 用于混凝土结构加固的 FRP 材料</b> ..... | 1  |
| 1.1 引言 .....                       | 1  |
| 1.2 FRP 材料的成型工艺 .....              | 1  |
| 1.3 FRP 材料的力学性能 .....              | 3  |
| 1.4 树脂 .....                       | 4  |
| 1.5 结构加固性能的比较 .....                | 5  |
| 1.6 材料分项系数 .....                   | 5  |
| 1.7 小结 .....                       | 7  |
| 参考文献 .....                         | 8  |
| <b>第2章 FRP 与混凝土界面的粘结强度</b> .....   | 11 |
| 2.1 引言.....                        | 11 |
| 2.2 试验方法、受力性能和破坏模式 .....           | 13 |
| 2.3 现有的粘结强度模型 .....                | 14 |
| 2.3.1 经验模型 .....                   | 14 |
| 2.3.2 基于断裂力学的模型 .....              | 14 |
| 2.3.3 简化设计公式 .....                 | 17 |
| 2.3.4 各种粘结强度模型的比较.....             | 18 |
| 2.4 Chen and Teng 模型 .....         | 20 |
| 2.5 设计建议 .....                     | 25 |
| 2.6 小结.....                        | 26 |
| 参考文献 .....                         | 26 |
| <b>第3章 梁的受弯加固</b> .....            | 31 |
| 3.1 引言.....                        | 31 |
| 3.2 加固方法 .....                     | 32 |
| 3.2.1 概述 .....                     | 32 |
| 3.2.2 非预应力 FRP 板加固 .....           | 32 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.2.3 非预应力 FRP 板的端部锚固 .....   | 33 |
| 3.2.4 预应力 FRP 板加固 .....       | 34 |
| 3.2.5 小结 .....                | 35 |
| 3.3 破坏模式和受力性能 .....           | 35 |
| 3.3.1 破坏模式的分类 .....           | 35 |
| 3.3.2 弯曲破坏 .....              | 36 |
| 3.3.3 剪切破坏 .....              | 38 |
| 3.3.4 FRP 板端部剥离破坏 .....       | 38 |
| 3.3.5 中部裂缝引起的界面剥离 .....       | 42 |
| 3.3.6 其他剥离破坏模式 .....          | 43 |
| 3.3.7 剥离破坏的其他影响因素 .....       | 43 |
| 3.3.8 端部 U 形箍锚固 .....         | 44 |
| 3.4 弯曲破坏的极限承载力 .....          | 45 |
| 3.4.1 概述 .....                | 45 |
| 3.4.2 设计公式 .....              | 46 |
| 3.4.3 二次受力性能 .....            | 50 |
| 3.5 界面应力 .....                | 51 |
| 3.5.1 概述 .....                | 51 |
| 3.5.2 近似解析解 .....             | 51 |
| 3.5.3 有限元分析结果 .....           | 53 |
| 3.5.4 高阶解析解 .....             | 54 |
| 3.5.5 小结 .....                | 55 |
| 3.6 端部剥离强度模型 .....            | 56 |
| 3.6.1 概述 .....                | 56 |
| 3.6.2 剥离强度模型的汇总 .....         | 56 |
| 3.6.3 试验数据 .....              | 59 |
| 3.6.4 剥离强度模型的评价 .....         | 61 |
| 3.6.5 Smith and Teng 模型 ..... | 68 |
| 3.7 中部裂缝引起的界面剥离的强度模型 .....    | 70 |
| 3.7.1 概述 .....                | 70 |
| 3.7.2 中部弯曲裂缝引起的剥离 .....       | 71 |
| 3.7.3 中部弯剪裂缝引起的剥离 .....       | 74 |
| 3.8 设计建议 .....                | 74 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 3.8.1 控制截面和端部锚固 .....   | 74 |
| 3.8.2 强度验算 .....        | 75 |
| 3.8.3 材料分项系数 .....      | 76 |
| 3.8.4 超静定梁的设计步骤 .....   | 76 |
| 3.9 小结 .....            | 77 |
| 3.10 附录 A .....         | 77 |
| 3.11 附录 B .....         | 79 |
| 3.11.1 基于受剪承载力的模型 ..... | 80 |
| 3.11.2 混凝土齿状模型 .....    | 82 |
| 3.11.3 基于界面应力的模型 .....  | 85 |
| 参考文献 .....              | 89 |

## 第4章 梁的受剪加固 .....

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 4.1 引言 .....                   | 100 |
| 4.2 加固方法 .....                 | 101 |
| 4.2.1 加固方案 .....               | 101 |
| 4.2.2 加固方案的选择 .....            | 102 |
| 4.3 破坏模式 .....                 | 105 |
| 4.3.1 概述 .....                 | 105 |
| 4.3.2 FRP 拉断的剪切破坏 .....        | 105 |
| 4.3.3 FRP 未拉断的剪切破坏 .....       | 106 |
| 4.3.4 FRP 剥离引起的剪切破坏 .....      | 106 |
| 4.3.5 机械锚固附近的破坏 .....          | 108 |
| 4.4 已有的受剪加固强度模型 .....          | 108 |
| 4.5 Chen and Teng 抗剪强度模型 ..... | 110 |
| 4.5.1 通用表达式 .....              | 110 |
| 4.5.2 FRP 拉断控制的剪切破坏 .....      | 112 |
| 4.5.3 FRP 剥离控制的剪切破坏 .....      | 114 |
| 4.6 设计建议 .....                 | 116 |
| 4.6.1 通用表达式 .....              | 117 |
| 4.6.2 FRP 拉断控制的剪切破坏 .....      | 118 |
| 4.6.3 FRP 剥离控制的剪切破坏 .....      | 119 |
| 4.6.4 FRP 条带间距的限制 .....        | 120 |