

# FRP 管混凝土受弯构件弯矩计算方法的研究\*

张敏鸿 薛元德 李文晓 袁 华

(同济大学 上海 200092)

**摘要:** 本文简要介绍了 FRP 管混凝土构件的研究现状, 对 FRP 管混凝土受弯构件的本构关系进行了探讨, 并提出了适用的计算模型。

**关键词:** FRP 混凝土 本构关系

## 1 前言

近年来, 纤维增强聚合物(简称 FRP)材料越来越多地应用于土木工程。其原因主要是由于环境因素和各种外力作用的影响, 土木结构受到极大的损伤, 钢筋也出现锈蚀, 从而大大降低了结构的承载能力。维修费用在日渐增长, 这迫切要求有一种更经济适用的方法来解决; FRP 材料具有耐腐蚀性良好、比强度高、耐疲劳性好等优点。FRP 材料的可设计性使工程建设者能够按照自己的意愿进行有效的设计。这两点原因促成了研究者对 FRP 约束混凝土进行深入的探讨。

目前, FRP 材料在实际工程中的应用尚有限。这是因为 FRP 材料和钢材相比成本较高; 目前针对 FRP 约束混凝土的研究较少, 没有形成相应的设计规范。然而, 随着 FRP 材料的应用范围的扩大, FRP 材料的成本在持续下降。由于 FRP 材料质量轻, 运输和加工的成本费用也较低。再者, 国内外的研究者积极投入到该领域的研究中来, 并取得了大量有效的成果。

在国外, 80 年代期间 Meier 及 Rostasy 等人提出了用 FRP 材料修补和加固钢筋混凝土桥梁柱的构想<sup>[1,2]</sup>。90 年代初, 日本已把 FRP 约束混凝土应用于很多工程实践, 尤其是桥梁柱的加固和修补, 以提高结构的强度<sup>[3]</sup>。Sharif 等人采用玻璃纤维增强树脂板修补由于剪切而开裂的钢筋混凝土。实验结果表明试件的最终破坏根据修补不同分为剪切破坏、弯曲破坏和 FRP 板的剥离破坏 3 种模式<sup>[4,5]</sup>。美国的 Amir Mirmiran 等人在 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 管混凝土构件的研究方面做了大量工作<sup>[6~8]</sup>。早期研究主要集中于探讨 FRP 管混凝土受弯构件的约束模型, 并做了大量的圆截面和矩形截面构件的实验分析。实验发现, (1) FRP 管和混凝土

之间的连接肋是该构件产生良好效果的保证; (2) FRP 管的封闭约束对混凝土的强度有较大的提高; (3) FRP 材料在构件中所占比例较大时能更好地提高构件强度, 但同时其延性降低; (4) 圆截面构件比矩形截面构件的约束效果更好。

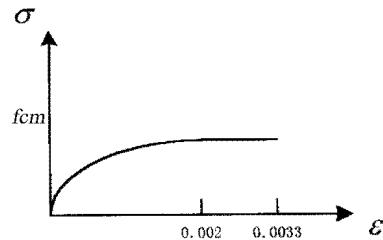
在国内, 朱伯龙、牛春雷等人<sup>[9]</sup>较早开始 FRP 材料加固混凝土的研究工作。薛元德、赵健<sup>[10~12]</sup>于 1997 年也开始研究该领域, 并对 FRP 约束混凝土的部分计算编写了有限单元程序。薛元德、张月弦<sup>[13~15]</sup>研究了 GFRP 管约束混凝土梁的抗剪性能。在实验中采用 ±45° 交叉缠绕的 FRP 管, 并在混凝土中加入一定量的膨胀剂, 结果是大大提高了混凝土的抗剪性能, FRP 管和混凝土之间也有良好的结合。

本文所做的工作是对 FRP 管正方形截面受弯构件进行理论分析, 探讨各种本构关系, 总结出适用于该类构件的计算方法, 并通过计算实例进行进一步阐明。

## 2 混凝土本构关系

### 2.1 受压区混凝土

根据我国现行的设计规范, 抗弯混凝土受压区的本构关系如图 1 所示。



$$\begin{aligned} & \text{1 规范规定混凝土受压 - 曲线} \\ & < < 0.002 \text{ 时}, \\ & = \frac{f_{cm}}{1 - (1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})^2} \quad (1) \\ & 0.002 < < 0.0033 \text{ 时}, \end{aligned}$$

\* 上海市重点学科项目

$$= f_{cm} \quad (2)$$

$f_{cm}$  为混凝土抗弯强度;  $\epsilon$  为屈服应变。

考虑到 FRP 管对混凝土的约束作用, 根据薛元德、张月弦<sup>[13,14]</sup>的研究结果, 将混凝土抗弯强度提高 20% (即混凝土受压放大系数为 1.2), 同时其屈服应变也相应提高 20%, 而在本文计算范围内受压区混凝土尚未发生压溃现象, 如图 2 所示。

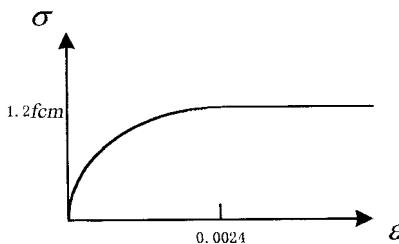


图 2 本文假定混凝土受压 - 曲线

< 0.0024 时,

$$= \frac{f_{cm}}{1 - (1 - \epsilon / \epsilon_0)^2} \quad (3)$$

< 0.0024 时,

$$= f_{cm} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_0$  为混凝土受压放大系数。

## 2.2 受拉区混凝土

根据规范的规定, 受拉区混凝土在开裂后即脱离了工作, 所以混凝土受拉区的承载能力通常忽略不计。但是根据 Amir Mirmiran 等人<sup>[6~8]</sup>及薛元德、张月弦<sup>[13~15]</sup>的研究表明, 在 FRP 管中的受拉区混凝土一直处于工作状态。而加拿大的 Vecchio 和 Collins<sup>[16]</sup>对受拉状态的约束混凝土的研究结果表明, 几条裂纹之间的混凝土仍有较高的应力。即受拉区混凝土产生裂纹后, 其承载能力大大降低, 但取包含几条裂纹的混凝土单元研究平均应变时, 发现受拉区混凝土仍具有一定的承载能力。

根据 Vecchio 和 Collins<sup>[16]</sup>的研究结果, 如图 3 所示, 本文应用的计算模型为:

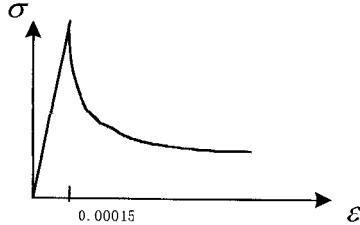


图 3 混凝土受拉 - 曲线

< 0.00015 时,

$$= E_c \times \quad (5)$$

> 0.00015 时

$$= \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200} \times} \quad (6)$$

式中,  $E_c$  为混凝土的弹性模量;  $f_{cr}$  为混凝土开裂应力(规范规定为 0.00015);  $\times$  为混凝土受拉放大系数(取偏于安全的值: 1)。

## 3 FRP 的本构关系

不同缠绕工艺的 FRP 管的弹性模量是不同的。考虑到要充分增强混凝土的抗剪性能, 所以本文采用玻璃纤维 ±45° 交叉缠绕工艺。如图 4 所示, 本构关系由薛元德、张月弦<sup>[13~15]</sup>的研究给出。

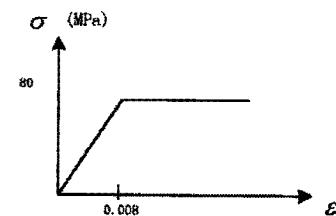


图 4 FRP 管 - 曲线

< < 0.008 时,

$$= E_{fp} \times \quad (7)$$

> 0.008 时

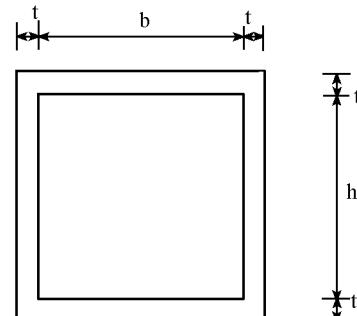
$$= 80 \text{ MPa} \quad (8)$$

式中,  $E_{fp}$  为 FRP 管弹性模量

## 4 计算实例

### 4.1 试件基本情况

如图所示, 套箍为 ±45° 缠绕的 GFRP 管, 核心为标号 25 的素混凝土, 分别对 GFRP 管厚度为 2.5mm 和 3.44mm 的构件进行计算。其他具体尺寸、常数及结构计算简图如图 5、6。



图中:  $h = b = 50 \text{ mm}$ ;  $E_c = 2.8 \times 10^10 \text{ N/m}^2$

图 5 构件截面

### 4.2 计算假定

(1) 平截面假定。对混凝土的受拉区, 本文取包含几条裂纹的混凝土单元作为研究对象, 这样构件

的应变变化情况可以认为符合平截面假定。

(2) 假定混凝土和 FRP 管之间无滑移。在混凝土中加入一定量的膨胀剂后, 混凝土和 FRP 管的结合情况良好, 可以认为它们之间没有产生滑移。

(3) 假定本文上述混凝土和 FRP 管的本构关系适用于本计算过程。

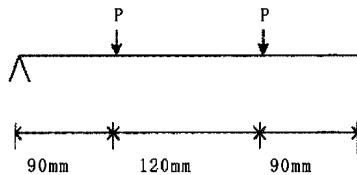
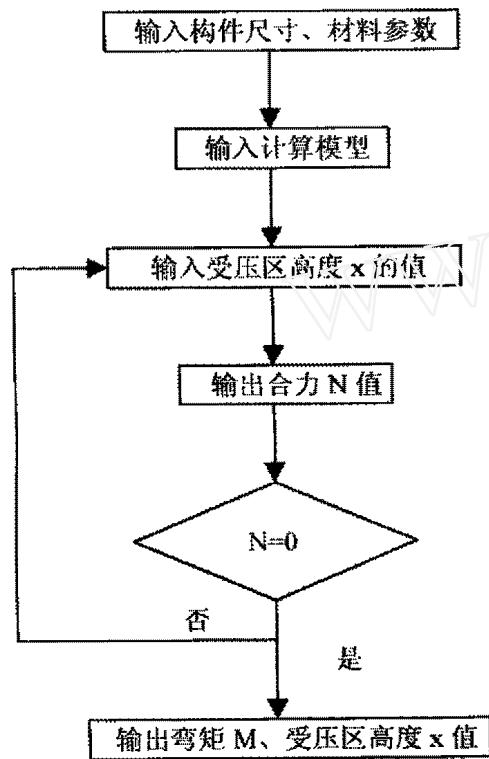


图 6 结构计算

#### 4.3 计算程序框图



#### 4.4 计算结果

以受拉底边的应变值为参考量, 计算出不同应变下构件的弯矩、中性轴和曲率的分布情况, 如图 7、8 所示。

#### 4.5 计算结果分析

从应变 - 中性轴变化图中可以看出, 在应变很小的情况下受拉区混凝土承载能力较强, 因此中性轴低于截面中心线。随着应变的增加, 由于混凝土的开裂, 受拉区混凝土的承载能力逐渐减小, 中性轴

逐渐移向截面中心线上方, 当底边应变达到 0.007 左右, 中性轴位置变化幅度减小, 这个结果和前面假定的计算模型是一致的。

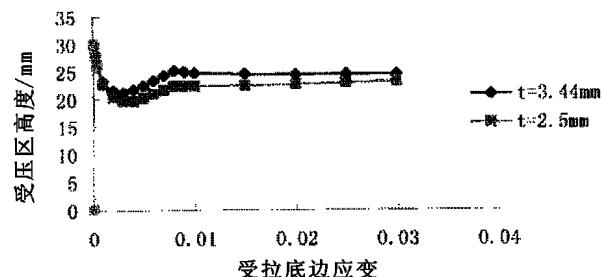


图 7 应变 - 中性轴高度变化

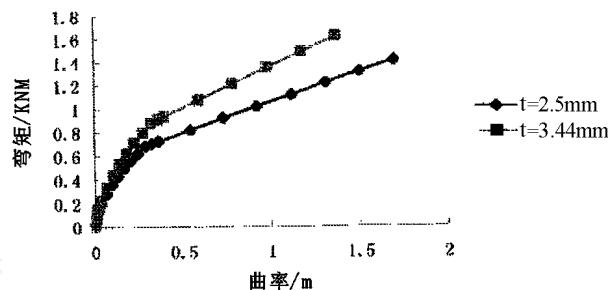


图 8 弯距 - 曲率曲线

在弯矩 - 曲率曲线图中可以看到, 曲率小于 0.4 (1/m) 时, 弯矩 - 曲率图为曲线; 曲率大于 0.4 (1/m) 时为直线。根据计算模型和计算结果, 大致可以将 FRP 管混凝土受弯构件破坏过程分为 4 个阶段:

(1) 受拉底边应变小于混凝土开裂应变阶段。在此阶段, 受拉区混凝土尚未出现裂缝, 处于弹性受力阶段。其承载能力略大于受压区混凝土, 故中性轴位置在截面中心线以下并逐渐向底边延伸。此时 FRP 管也处于弹性工作阶段。

(2) 受拉底边应变大于混凝土开裂应变而受压顶部应变小于混凝土受压屈服应变的阶段。此时受拉区混凝土开始出现裂缝, 承载能力大大降低, 中性轴位置迅速向受压区方向移动, 而 FRP 管仍处于弹性阶段。

(3) 受压顶部应变大于受压区混凝土屈服应变而小于 FRP 管屈服应变的阶段。此时混凝土受压区承载能力降低, 应变大大增加, 受拉区承载能力继续降低, 而 FRP 管仍然处于弹性工作阶段。

(4) 受拉底边应变大于 FRP 管屈服应变阶段。此时混凝土的抗拉、抗压能力都已明显降低, 中性轴位置趋于稳定, FRP 管成为主要承力因素直至受拉

(下转第 12 页)

钢不破坏,钢/玻璃钢界面不会分层;

(2) 容器在正常工况下,钢/玻璃钢界面不会发生分层或脱壳。

2 徐灏. 疲劳强度. 高教出版社, 1988

3 翁祖祺. 玻璃钢工业大全. 国防工业出版社, 1992

#### 参考文献

1 李宗容, 张大伦. 材料力学. 同济大学出版社, 1989

## STUDY OF MECHANICAL TEST FOR STEEL/GFRP COMPLEX CONTAINER INTERFACE USED IN ANTI-CORROSION LOCOMOTIVES

Sun Chunfang

(Tongji University)

**Abstract:** The bent test, pure bent test and bent fatigue test of locomotive's steel/GFRP complex containers are designed to evaluate the mechanical properties of the interface in this article. The test result shows that the steel/GFRP interface can be safely and suitably used in locomotives. The necessary bent angle which ensures no separation of the interface under outer impact is provided here.

**Keywords:** interface   bent test   bent fatigue test

(上接第9页)

区 FRP 管拉断, 从而造成整个构件的破坏。

#### 参考文献

- 1 Meier U. Bridge Repair with High Performance Composite Material. Material and Technik ,4 ,1987
- 2 Rostasy F S and Budelman E H. Strengthening of RC and PC Structures with Bonded FRP Plates. Proceeding of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures ,1992
- 3 Dr Sam Luke ,Michael Leeming and Andrzej Skwarski ,Mouchel Consulting Ltd. Robust Results For Carbon Fiber ,Concrete Engineering International , March ,1998
- 4 Ghazi j. Al-Sulaimani ,Alfarabi Sharif ,Ister A. Basunbul ,Mohammed H. Balush ,and Bader N. Ghaleb. Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding . ACI Structural Journal ,July - August ,1994
- 5 Alfarabi Sharif ,Ister A. Basunbul ,Mohammed H. Balush ,Ghazi j. Al-Sulaimani . Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates. ACI Structural Journal ,March-April ,1994
- 6 Amir Mirmiran ,Mohsen Shahawy ,and Michael Samaan. Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete Beam Columns. Journal of Structural Engineering ,October ,1999

- 7 Amir Mirmiran ,et al. Large Beam-column Tests on Concrete-Filled Composite Tubes. ACI Structural Journal ,March-April ,2000
- 8 Amir Mirmiran ,Mohsen Shahawy. Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete. Journal of Composites for Construction ,1998 ,(1)
- 9 牛春雷. 玻璃钢加固对提高偏心受压柱抗压强度作用的实验研究. 同济大学硕士学位论文 ,1996
- 10 赵健. 纤维增强塑料约束混凝土研究. 同济大学硕士学位论文 ,1997
- 11 赵健,薛元德. FRP 约束混凝土初探. 第十二届玻璃钢/复合材料学术年会论文集 ,1997
- 12 薛元德,赵健. 纤维增强塑料约束混凝土破坏. 材料与结构之力学测试国际学术会议 ,1998
- 13 张月弦. FRP 管混凝土的性能研究. 同济大学硕士论文 ,2000
- 14 张月弦,薛元德. FRP 约束混凝土的基本性能. 玻璃钢/复合材料 ,1999 ,(6)
- 15 薛元德,张月弦. FRP 管混凝土抗剪性能的研究. 中国首届纤维增强塑料(FRP)混凝土结构学术交流会 ,2000
- 16 Frank J. Vecchio and Michael P. Collins. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. ACI Journal , March-April ,1986

## RESEARCH ON CALCULATION METHODS FOR FLEXURAL MEMBER OF CONCRETE FILLED FRP TUBE

Zhang Minhong Xue Yuande Li Wenxiao Yuan Hua

(Institute of Composite Material ,Tongji University)

**Abstract:** Research work on concrete filled FRP member is reviewed in this paper. The constitutive relations of flexural member for concrete filled FRP tube are discussed and a suitable calculation model is also presented.

**Keywords:** FRP   concrete   constitutive relation

FRP/CM 2002. No. 1