

文章编号:1671-6833(2003)01-0001-04

纤维增强塑料筋混凝土梁受弯性能的计算方法

高丹盈¹, 朱海堂¹, 李赳赳²

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 在试验研究的基础上, 结合纤维增强塑料筋混凝土梁的受弯破坏特点, 探讨了纤维增强塑料筋混凝土梁的非线性全过程数值分析方法. 通过对受压区和受拉区混凝土应力—应变关系曲线的简化, 建立了纤维增强塑料筋混凝土梁弯距曲率的计算模式, 提出了纤维增强塑料筋混凝土梁弯距曲率的简化计算公式以及相应的荷载挠度的计算公式. 将该简化方法、非线性全过程数值分析方法与试验数据进行了比较分析, 三者符合较好.

关键词: 纤维增强塑料筋; 混凝土; 受弯性能; 数值分析

中图分类号: TU 528.58 **文献标识码:** A

0 引言

纤维增强塑料筋(Fiber Reinforced Polymer Re-bar, 简称 FRP 筋)混凝土梁是以纤维增强塑料筋代替钢筋增强混凝土的一种新型构件. 由于纤维增强塑料筋具有耐腐蚀、强度高、重量轻、耐电磁等优点, 这种新型构件已在港口、桥梁以及其它腐蚀严重环境下的土木工程中推广应用, 为从根本上解决由钢筋腐蚀所引起的土木工程的耐久性问题提供了一条新的途径.

然而, 由于纤维增强塑料筋具有高抗拉强度、低弹性模量以及破坏之前的线弹性等特征, 当用纤维增强塑料筋增强混凝土梁时, 不仅使混凝土梁的受弯承载力有较大幅度的提高, 同时也引起较大的挠度和裂缝宽度以及破坏的脆性性质. 因此, 使用纤维增强塑料筋代替传统钢筋增强混凝土, 就必须进一步研究纤维增强塑料筋混凝土梁的受弯性能及其设计方法, 以保证足够的安全度, 避免灾害性破坏. 本文在试验研究的基础上, 对纤维增强塑料筋增强混凝土梁的非线性全过程数值分析方法进行了探讨.

1 纤维增强塑料筋混凝土梁受弯破坏的特点

试验研究表明^[1,3], 玻璃纤维增强塑料筋混

凝土梁受弯试验的破坏形式有受压破坏、受拉破坏和平衡破坏三种. 发生受拉破坏和受压破坏的纤维增强塑料筋混凝土试验梁的荷载挠度曲线基本上均能以截面初裂为界限点简化为两个阶段: 正截面开裂前, 荷载挠度曲线基本为线性, 截面刚度较大; 正截面开裂时, 裂缝首先在纯弯段出现, 基本与梁中轴线垂直, 荷载挠度曲线出现转折点; 随着荷载的增加, 纯弯段的垂直裂缝根数增加并且向上延伸, 在纯弯段之外, 由于剪应力成为主要的应力, 促使斜裂缝的产生并向梁的受压区加荷点发展, 截面刚度较截面开裂前进一步减小, 但荷载挠度曲线仍基本为线性直到梁破坏. 对于受拉破坏, 是纤维增强塑料筋先被拉断, 然后混凝土受压破坏引起的; 而受压破坏则是压区混凝土先于纤维增强塑料筋拉断前压碎破坏.

由上可知, 纤维增强混凝土梁的破坏形式分别由纤维增强塑料筋的受拉应变或混凝土受压边缘极限应变所控制. 由于混凝土和纤维增强塑料筋的破坏均呈脆性性质, 因此这些破坏形式也都具有脆性特征. 为保证纤维增强塑料筋混凝土梁的使用性能, 按照混凝土结构的设计原理, 可以通过控制纤维增强塑料筋受拉应变(即引入纤维增强塑料筋名义屈服强度)的方法设计纤维增强塑料筋混凝土梁.

2 数值计算方法

2.1 基本假定

①截面应变呈直线分布;②纤维增强塑料筋和混凝土的应力—应变关系已知;③不考虑混凝土收缩和徐变的影响.

2.2 应力—应变关系

2.2.1 混凝土受压应力—应变关系

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 \left[2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right], & (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0) \\ \sigma = \sigma_0, & (\epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为混凝土峰值应变, $\epsilon_0 = 0.002$; σ_0 为混凝土峰值应力, $\sigma_0 = 1. f_c$; ϵ_u 为混凝土极限应变, 当考虑非均匀受压和混凝土强度影响时, 参照钢筋混凝土结构的处理方法, 混凝土的极限压应变可按式(2)计算. 当计算值大于 0.0033 时, 应取为 0.0033.

$$\epsilon_u = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中 $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值(当采用 MPa 为单位时, 其取值为混凝土强度等级).

2.2.2 混凝土受拉应力—应变关系^[3]

$$\begin{cases} \text{上升} & y = 1.2x - 0.2x^6, & (x \leq 1) \\ \text{下降} & y = \frac{x}{0.312f_t^2(x-1)^{1.7} + x}, & (x \geq 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y = \frac{\sigma}{f_t}$; $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$; (ϵ_0, f_t) 为峰点坐标; $\epsilon_0 = f_t^{0.54} \times 65 \times 10^{-6}$; $f_t = 0.26 f_{cu}^{2/3}$.

2.2.3 纤维增强塑料筋应力—应变关系

根据图 1 的试验结果, 纤维增强塑料筋拉伸应力—应变关系如下:

$$\sigma = E_f \epsilon, \quad (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u) \quad (4)$$

式中: E_f 为纤维增强塑料筋的受拉弹性模量; ϵ_u 为纤维增强塑料筋的受拉极限应变.

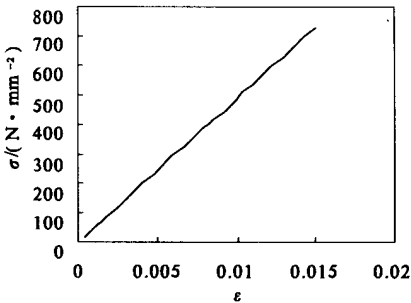


图 1 玻璃纤维聚合物筋应力应变关系曲线

Fig. 1 Stress strain relationship of GFRP bars

2.2.4 受压钢筋应力—应变关系

$$\begin{cases} \sigma = E_s \epsilon, & (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y) \\ \sigma = f_y, & (\epsilon_y \leq \epsilon \leq \epsilon_u) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\epsilon_u = 16 \times \epsilon_y$, 钢筋的受压和受拉弹模相同.

2.3 截面弯距—曲率基本公式

在弯矩 M 作用下, 矩形截面纤维增强塑料筋混凝土梁截面的应变、应力分布见图 2.

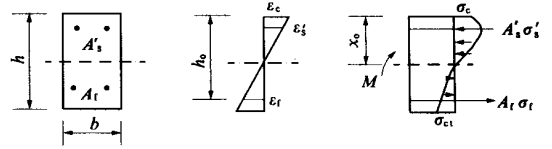


图 2 截面应力和应变分布图

Fig. 2 Stress strain distribution in section

由平截面假定, 截面曲率为

$$\varphi = \frac{\epsilon_c}{x_0} = \frac{\epsilon_c + \epsilon}{h_0} \quad (6)$$

截面上任意点 i 处混凝土和纤维增强塑料筋、钢筋的应变 ϵ_i 为

$$\epsilon_i = \varphi \cdot y_i \quad (7)$$

式中: y_i 为截面上任意点距中和轴的距离(中和轴以上为正, 以下为负).

根据已知的应力—应变关系, 可求得截面上任意一点混凝土、纤维增强塑料筋和钢筋的应力. 这样, 就可根据截面的平衡关系建立方程如下:

$$\int_0^{x_0} \alpha(\epsilon_c) b dy + A_s' \alpha_s' - \int_0^{h-x_0} \alpha(\epsilon_t) b dy - A_f \varphi = 0 \quad (8)$$

$$M = \int_0^{x_0} \alpha(\epsilon_c) b y_i dy + A_s' \alpha_s' (x_0 - y_s') - \int_0^{h-x_0} \alpha(\epsilon_t) b y_i dy - A_f \varphi (h_0 - x_0) = 0 \quad (9)$$

式中: ϵ_c 为截面受压边缘混凝土的应变; x_0 为截面受压区高度; h_0 为截面有效高度; φ 为截面的曲率; $\alpha(\cdot)$, $\alpha_s(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$, $\alpha_s'(\cdot)$ 为相应的应力应变函数.

3 弯矩曲率简化公式

为了简化计算, 在全过程分析中, 受压区混凝土的应力分布按照总压力大小和其作用位置均不变的原则用等效矩形应力分布代替, 见图 3. 等效矩形应力系数 α_1 (矩形应力图的压应力值与理想化应力应变图的峰值应力 f_c 的比值)、受压区高度系数 β_1 (矩形应力图的高度 x 与中和轴高度 x_0 的比值) 主要取决于混凝土受压应力应变关系, 当混凝土受压应力应变关系取为式(1), 则有:

当 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 时:

$$\beta_1 = \frac{2 \left[1 - \frac{\epsilon_c}{4 \epsilon_0} \right]}{1 - \frac{\epsilon_c}{3 \epsilon_0}} \quad (10a)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta_1} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \left[1 - \frac{\epsilon_c}{3\epsilon_0} \right] \tag{10b}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta_1} \left[1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right] \tag{11b}$$

当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_u$ 时:

$$\beta_1 = \frac{1 - \frac{2\epsilon_0}{3\epsilon_c} + \frac{1}{6} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right)^2}{1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c}} \tag{11a}$$

式中: ϵ_c 是混凝土受压边缘的压应变, 在 $0 \sim \epsilon_u$ 之间变化.

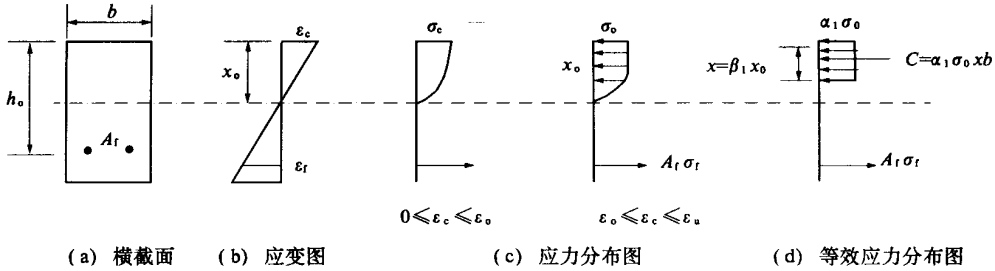


图 3 截面应力和应变分布图

Fig.3 Stress strain distribution in section

由于混凝土的抗拉强度低, 截面开裂后拉应力全部由纤维增强塑料筋承担. 因此, 若忽略受拉区混凝土的作用, 那么纤维增强塑料单筋混凝土矩形截面梁的弯矩曲率关系可以由下方程联合求出.

$$\alpha_1 \sigma_c b x = A_f f_f \tag{12}$$

$$M = A_f f_f (h_0 - x/2) \tag{13}$$

$$x = \beta_1 x_0 \tag{14}$$

$$f_f = E_f \bar{\epsilon} \tag{15}$$

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_c \frac{h_0 - x_0}{x_0} \tag{16}$$

$$\varphi = \epsilon_c / x_0 \tag{17}$$

式中: x_0 是梁的中性轴高度; x 是等效矩形应力区的高度; $\bar{\epsilon}$; f_f 分别是纤维增强塑料筋的应变和应力; ϵ_c 是混凝土受压边缘应变; M 是截面承受的弯矩; φ 是截面的曲率.

将式 (16) 代入式 (15), 得

$$f_f = E_f \epsilon_c \frac{h_0 - x_0}{x_0} \tag{18}$$

将式 (18) 代入式 (12), 得

$$\alpha_1 \sigma_c \beta_1 x_0 b = A_f E_f \epsilon_c \frac{h_0 - x_0}{x_0} \tag{19}$$

解方程 (19) 得 x_0 的表达式为

$$x_0 = \frac{h_0}{2} \left[\sqrt{\lambda(\lambda+4)} - \lambda \right] \tag{20}$$

式中: $\lambda = \frac{Q E_f}{\alpha_1 \beta_1 \sigma_c} \epsilon_c$; $Q = \frac{A_f}{b h_0}$.

对于一给定的混凝土受压边缘应变 ϵ_c , 由式 (20) 可计算出中和轴高度 x_0 , 然后由式 (13)、(17) 可得到相应的弯矩 M 和曲率 φ . 如果是双筋混凝土

土截面梁, 在有关公式中考虑受压纵筋的作用即可.

4 梁的荷载挠度关系

根据结构力学方法, 支座转角 θ 和跨中挠度 f 可通过对截面曲率的积分得到, 即

$$\theta = \int_0^{l/2} \varphi(x) dx \tag{14}$$

$$f = \int_0^{l/2} \varphi(x) dx = \int_0^{l/2} \varphi(x) x dx \tag{15}$$

式中: $\varphi(x)$ 为距支座截面 x 处的截面的曲率.

将纤维增强塑料筋混凝土梁破坏前与破坏时曲率沿梁长分布简化为如图 4(b)、(c) 所示, 在某一荷载 P_i 作用下, 梁跨中挠度 f_i 的表达式为

$$\begin{aligned} f_i &= \int_0^{l/2} \varphi_i(x) x dx = \int_0^a \frac{Q_i}{a} x^2 dx + \int_a^{l/2} \varphi_i x dx \\ &= \frac{1}{24} \varphi_i (3l^2 - 4a^3) \end{aligned} \tag{21}$$

因此, 梁破坏时对应于极限弯矩 M_u 的挠度为

$$f_u = \frac{1}{24} \varphi_u (3l^2 - 4a^3) \tag{22}$$

根据上述对弯矩曲率简化公式的推导, 由相应的跨中弯矩 M_i 得到相应的跨中截面曲率 φ_i , 再得到所加荷载 $P_i = 2M_i/a$, 从而得到由简化方法计算的荷载挠度关系. 利用该简化方法对我们所完成的 64 根纤维增强塑料筋混凝土试验梁 (例如: KD2B-1 受拉破坏梁和 KD4B-1 受压破坏梁) 进行荷载—挠度全曲线计算, 并与共轭梁法计算结果和试验结果进行对比, 见图 5 和图 6 所示, 符合较好.

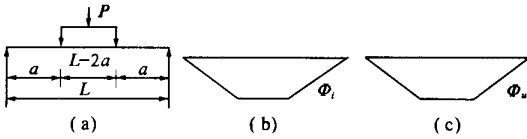


图 4 曲率沿梁长分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of curvature

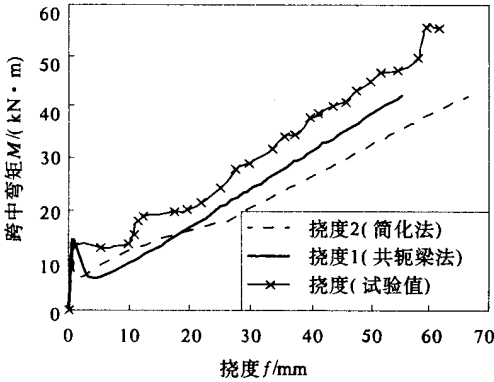


图 5 KD2B-1 梁弯矩—挠度关系曲线

Fig. 5 M-f curve of beam KD2B-1

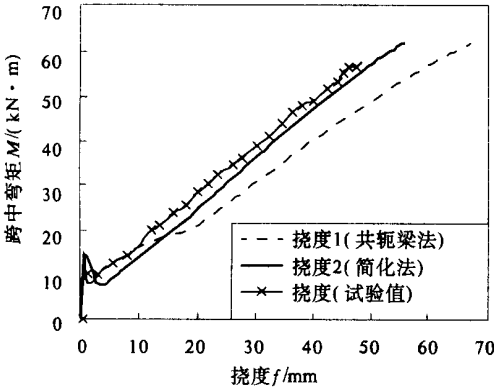


图 6 KD4B-1 梁弯矩—挠度关系曲线

Fig. 6 M-f curve of beam KD4B-1

5 结论

(1) 纤维增强塑料钢筋混凝土梁的荷载挠度曲线以截面初裂点为界分为两个线形阶段. 正截面开裂前, 荷载挠度曲线基本为线性, 梁截面刚度较大; 正截面开裂后, 荷载挠度曲线出现转折点, 随着荷载的增加, 纯弯段正裂缝的发展以及剪跨段斜裂缝的产生并向梁的受压区加荷点扩展, 使梁的刚度较截面开裂前减小.

(2) 建立的全过程数值分析的简化方法适合纤维增强塑料钢筋混凝土梁的特点, 与试验结果和其他数值计算结果有较好的一致性.

参考文献:

- [1] 高丹盈, 赵军, BRAHM B. 玻璃纤维增强塑料钢筋混凝土梁裂缝和挠度的特点及计算方法[J]. 水利学报, 2001, (8): 53~58.
- [2] 高丹盈, BRAHM B. 纤维增强塑料钢筋混凝土梁正截面承载力的计算方法[J]. 水利学报, 2001, (9): 73~80.
- [3] 过镇海. 混凝土应力应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982, (3): 1~11.
- [4] 江见鲸. 混凝土结构工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 高丹盈, 刘建秀. 碳纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [6] 汪胡桢. 现代工程数学手册[M]. 第 II 卷. 武汉: 华中工学院出版社, 1986.
- [7] 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.

The Calculating Method for Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars

GAO Dan-ying¹, ZHU Hai-tang¹, LI Chen-chen²

(1. College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Based on the test results this paper explores the nonlinear numerical analysis method for concrete beams reinforced with fiber reinforced polymer bars. Through the simplification of the stress-strain relationship of both fiber reinforced polymer bars and concrete the simplification formulas for moment-curvature relation and relative load-deflection relation of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymer bars are established. Finally, the computing results by nonlinear numerical analysis method and the simplification method are compared with those from the test.

Key words: fiber reinforced polymer (FRP) bars; concrete; flexural behavior; numerical analysis method
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>