

引用本文:周甲佳,姚少科,景 川,等. FRP 筋-ECC 梁受弯性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6): 46-54.

ZHOU Jia-jia, YAO Shao-ke, JING Chuan, et al. Flexural Behavior of FRP-reinforced ECC Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 46-54.

DOI:10.19815/j.jace.2020.03069

FRP 筋-ECC 梁受弯性能

周甲佳¹, 姚少科², 景 川³, 赵 军¹, 张丽娟¹

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;
3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:为探究纤维增强复合材料筋增强高延性纤维增强水泥基复合材料梁(FRP 筋-ECC 梁)的受弯性能,对其正截面受弯全过程进行了理论分析和数值计算。首先,基于平截面假定和材料本构模型,获得 FRP 筋增强 ECC 梁受弯全过程截面应力分布,推导各受力阶段正截面受弯承载力计算公式;采用 MATLAB 进行数值计算,对 FRP 筋-ECC 梁受弯全过程进行分析;将计算获得的荷载-挠度曲线与已有试验曲线对比,验证模型的正确性。然后,基于所提出的理论模型进行参数分析,分析 ECC 抗压强度及 FRP 筋配筋率对梁受弯性能的影响。最后,基于所提出的 FRP 筋-ECC 梁延性系数计算公式,分析 FRP 筋配筋率及 ECC 抗压强度对梁延性性能的影响,并指出 FRP 筋-ECC 梁的延性变化与梁的破坏模式有很大相关性。结果表明:ECC 抗压强度和 FRP 筋配筋率的变化均可改变梁的破坏模式,但 FRP 筋配筋率的影响更大;ECC 抗压强度对梁的初裂荷载、极限承载能力有较大影响;配筋率可明显提高梁的短期刚度和极限承载力,但对梁的初裂荷载影响较小。

关键词:FRP 筋-ECC 梁;受弯性能;理论分析;数值计算

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)06-0046-09

Flexural Behavior of FRP-reinforced ECC Beam

ZHOU Jia-jia¹, YAO Shao-ke², JING Chuan³, ZHAO Jun¹, ZHANG Li-juan¹

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: In order to investigate the flexural behavior of fiber reinforced polymer (FRP)-reinforced engineered cementitious composites beam (FRP-reinforced ECC beam), the theoretical analysis and numerical calculation of the whole normal-section bending process were carried out. Firstly, based on the plane section assumption and the constitutive model of materials, the stress distribution of FRP-reinforced ECC beam during the whole bending process was obtained, and the formula for calculating normal-section flexural capacity was derived at each loading stage. The whole bending process of FRP-reinforced ECC beam was analyzed by numerical calculation with MATLAB. The correctness of the model was verified by comparing the calculated load-deflection curves with the existing test results. Then, based on the proposed theoretical model, the

收稿日期:2020-03-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0125600);国家自然科学基金青年科学基金项目(51708510);

河南省科技厅科技攻关(国际合作)项目(182102410045);河南省高等学校重点科研项目(19A560005)

作者简介:周甲佳(1984-),女,河南南阳人,讲师,工学博士,E-mail:zhouaf@zzu.edu.cn.

influence of ECC compressive strength and FRP reinforcement ratio on the flexural performance of the beam was analyzed. Finally, based on the proposed ductility coefficient calculation formula of FRP-reinforced ECC beam, the influence of FRP reinforcement ratio and ECC compressive strength on the ductility of beam was analyzed, and it was pointed out that the ductility change of FRP-reinforced ECC beam was closely related to the failure mode of beams. The results show that the change of ECC compressive strength and FRP reinforcement ratio can change the failure mode of the beam, but the influence of FRP reinforcement ratio is greater. ECC compressive strength has great influence on the initial crack load and ultimate bearing capacity of the beam. The reinforcement ratio can significantly improve the short-term stiffness and ultimate bearing capacity of the beam, but has little effect on the initial crack load of the beam.

Key words: FRP-reinforced ECC beam; flexural behavior; theoretical analysis; numerical calculation

0 引言

钢筋混凝土结构构件在土木工程领域有着广泛的应用,然而,由于混凝土抗拉性能差、易开裂和钢筋耐腐蚀性差的缺点,导致钢筋混凝土结构耐久性差,严重影响钢筋混凝土结构构件的服役寿命。

为了解决钢筋混凝土结构的耐久性问题,学者们研发出了耐腐蚀性强的纤维增强复合材料筋(FRP筋)代替混凝土结构中的钢筋,这是解决混凝土结构耐久性问题的有效方法。与钢筋相比,FRP筋具有轻质、高强、耐疲劳、耐腐蚀性强、防磁性能好、轴向热膨胀系数低等优点^[1],更适用于恶劣的环境中。然而FRP筋单轴拉伸力学性能表现为线弹性,当其与脆性的混凝土结合使用时,相较于钢筋混凝土结构,其延性较低,同时有发生脆性破坏的风险。此外,FRP的弹性模量低,将使FRP混凝土结构构件变形增大,具有较大的裂缝宽度和挠度,影响其正常使用^[2-5]。这些缺点使得FRP筋在混凝土结构中的应用受到限制。

高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)的出现为上述问题的解决提供了可能。ECC是Li^[6]基于微观力学性能对材料进行优化设计得到的。研究表明,当纤维含量(体积分数)在2%时,ECC在拉伸作用下表现出多缝开裂和应变硬化的特性,并具有良好的控制裂缝宽度的能力^[7]。与普通混凝土相比,ECC具有韧性好、耐久性能好、耗能能力高、抗剪能力强等优点,可用于桥梁工程、抗震工程中。因此,其问世以来,便受到学者的广泛关注^[8-12]。

已有研究表明:ECC与FRP筋配合使用可以增大结构的延性,减小结构的裂缝宽度,从而弥补FRP筋混凝土结构构件延性低的缺点。如Li等^[13]

最早对GFRP-ECC梁进行了静力弯曲试验,结果表明:相同配筋率的ECC梁在延性、承载能力、抗剪能力等方面均优于高强混凝土梁;使用ECC替代高强混凝土,可以减少甚至完全不使用抗剪钢筋。Yuan等^[14]对BFRP筋-ECC梁及BFRP筋-ECC/混凝土复合梁进行了静力弯曲试验,发现配筋率相同时,ECC梁的极限承载力和变形力分别为BFRP筋混凝土梁的1.2倍和1.5倍;无腹筋ECC梁的极限承载能力及变形能力与配置箍筋的BFRP混凝土梁基本相同,而且破坏过程呈现出延性的特征;当ECC配置于BFRP筋增强混凝土梁的受拉区时可有效控制裂纹宽度。何估轩^[15]对FRP筋-ECC梁和混凝土/ECC复合梁进行了抗剪试验,发现FRP筋-ECC梁的抗剪承载力为相同配筋率混凝土梁的1.9倍;受拉区采用ECC取代混凝土时,若ECC的厚度为30%梁高,组合构件的受剪承载力可达到全ECC梁的95%。王必元^[16]对FRP筋-ECC/混凝土复合梁受弯性能进行了试验研究,结果表明:随着ECC对混凝土替换率的增加,裂缝宽度明显减小,延性增大。Cai等^[17]用有限元方法对FRP-ECC梁和FRP-混凝土梁进行了模拟,结果表明:FRP-ECC梁比FRP-混凝土梁具有更好的延性、裂缝控制能力。

然而,这些研究仅限于试验研究和数值模拟方面,对于FRP筋-ECC结构构件的相关计算理论方面的研究仍有待加强。为此,本文对FRP筋-ECC梁进行了正截面受力分析,推导了其极限抗弯承载力计算公式,并将计算结果与已有试验结果进行对比。基于本文的理论计算方法,对不同ECC抗压强度和不同配筋率的FRP筋-ECC梁进行了参数分析,可供实际工程应用参考。

1 基本假定

为简化计算,借鉴钢筋混凝土结构设计基本理论^[13],本文对 FRP 筋增强 ECC 梁受弯全过程分析时采用如下基本假定:

(1)平截面假定,即荷载作用下 ECC 梁的截面始终保持平面,ECC 的应变沿截面高度呈线性变化。

(2)不考虑 ECC 与 FRP 筋之间的相对滑移,相同位置的 ECC 和 FRP 筋变形协调。

(3)在梁的整个受弯过程中,跨中的曲率 ϕ 和挠度 f 始终呈正比例关系。

(4)ECC 单轴拉伸状态下应力-应变(σ - ϵ)关系如图 1 所示,其中, σ_{tc} 和 ϵ_{tc} 分别为 ECC 的初裂应力和初裂应变, σ_{tu} 和 ϵ_{tu} 分别为 ECC 的极限抗拉强度和极限拉应变。

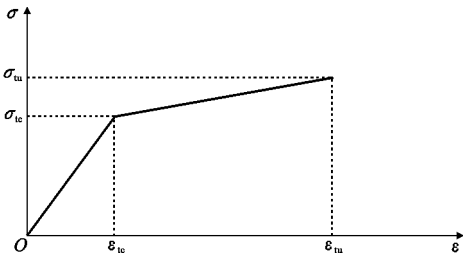


图 1 ECC 单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Uniaxial Tensile Stress-strain Curve of ECC

ECC 单轴拉伸本构关系的数学表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon_t & 0 \leq \epsilon_t < \epsilon_{tc} \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} (\epsilon_t - \epsilon_{tc}) & \epsilon_{tc} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_t 为 ECC 的拉应变; σ_t 为 ECC 的拉应力。

(5)ECC 单轴压缩状态下应力-应变关系如图 2 所示,其中, σ_{c0} 和 ϵ_{c0} 分别为 ECC 的峰值压应力和峰值压应变, $\epsilon_{0.4}$ 为 ECC 压应力 $\sigma_c = 0.4\sigma_{c0}$ 时对应的压应变, ϵ_{cu} 为极限压应变。

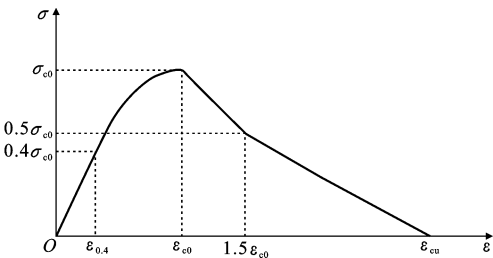


图 2 ECC 单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Uniaxial Compressive Stress-strain Curve of ECC

ECC 单轴压缩本构关系的数学表达式为^[18]

$$\sigma_c = \begin{cases} E_0 \epsilon_c & 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_{0.4} \\ E_0 \epsilon_c (1.124 - \frac{a_0 E_0}{\sigma_{c0}} \epsilon_c) & \epsilon_{0.4} \leq \epsilon_c < \epsilon_{c0} \\ \sigma_{c0} - \frac{\sigma_{c0}}{\epsilon_{c0}} (\epsilon_c - \epsilon_{c0}) & \epsilon_{c0} \leq \epsilon_c < 1.5 \epsilon_{c0} \\ \frac{\sigma_{c0}}{2b_0 - 3\epsilon_{c0}} (b_0 - \epsilon_c) & 1.5 \epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ_c 为 ECC 的压应变; E_0 为 ECC 的弹性模量; a_0, b_0 为拟合参数, $a_0 = 0.308, b_0 = 0.124$ 。

(6)不考虑不同抗压强度 ECC 的极限压应变的变化。

(7)FRP 单轴拉伸应力-应变曲线见图 3,其中, f_y, ϵ_y 分别为 FRP 的极限拉应力和极限拉应变。

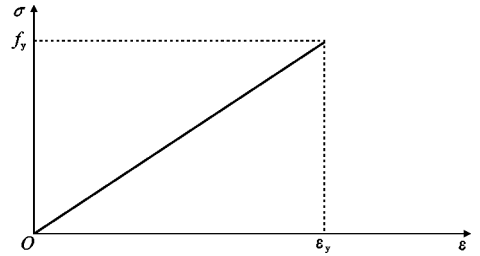


图 3 FRP 筋单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Uniaxial Tensile Stress-strain Curve of FRP Bar

FRP 单轴拉伸本构关系的数学表达式为

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f \quad 0 \leq \epsilon_f \leq \epsilon_y \quad (3)$$

式中: σ_f 为 FRP 的拉应力; ϵ_f 为 FRP 的拉应变; E_f 为 FRP 的弹性模量。

2 FRP 筋增强 ECC 梁受弯全过程理论分析

基于已有试验研究结果^[8]可知,FRP 筋增强 ECC 梁的受弯过程可分为 3 个阶段:弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。

2.1 弹性阶段

外荷载很小时,受拉区边缘 ECC 未达到初裂应变,所有的材料都处于线弹性阶段。此时,截面上的应变和应力均呈线性分布,梁处于弹性阶段,其弯矩-曲率关系是线性的。在此阶段,梁横截面上的应变和应力分布如图 4 所示,其中 h 为截面高度, b 为截面宽度, c 为受压区高度, s 为 FRP 筋到受拉区边缘的距离, A_f 为 FRP 筋面积。

此时截面上任意一点 ECC 的应力表达式为

$$\sigma(y) = \begin{cases} E_0 \epsilon(y) & 0 \leq y < c \\ \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(y) & c \leq y \leq h \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为截面上的点到上边缘的距离。

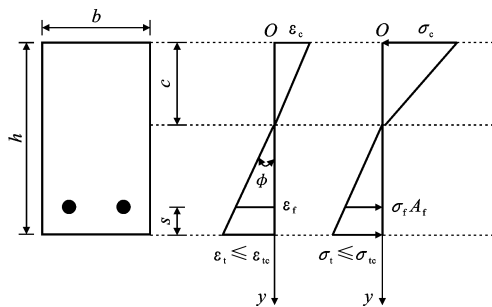


图 4 弹性阶段应变和应力分布

Fig. 4 Strain and Stress Distributions at Elastic Stage

2.2 带裂缝工作阶段

随着外荷载的增加,受拉区边缘的 ECC 会达到初裂应变而开裂,随后,裂缝逐渐向上扩展,受拉区 ECC 的应力开始出现非线性分布,梁进入带裂缝工作阶段。

(1)带裂缝工作阶段前期,受压区边缘 ECC 应变未超过 $\epsilon_{0.4}$,受压区 ECC 的应力仍然处于线弹性阶段,截面上应变和应力分布如图 5 所示。

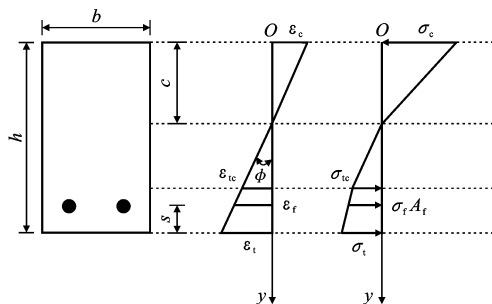


图 5 受压区应力线性分布时应变和应力分布

Fig. 5 Strain and Stress Distributions with Linear Stress Distribution in Compression Zone

此时截面上任意一点 ECC 的应力表达式为

$$\sigma(y) = \begin{cases} E_0 \epsilon(y) & 0 \leq y < c \\ \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(y) & c < y \leq c+a \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} [\epsilon(y) - \epsilon_{tc}] & c+a < y \leq h \end{cases} \quad (5)$$

式中: a 为截面上应变 ϵ_{tc} 处所对应的截面高度。

(2)外荷载增大到一定程度时,受压区边缘 ECC 会进入本构关系的第二阶段,受压区 ECC 应力开始出现非线性分布,截面上应变和应力分布如图 6 所示。

此时截面上任意一点 ECC 的应力表达式为

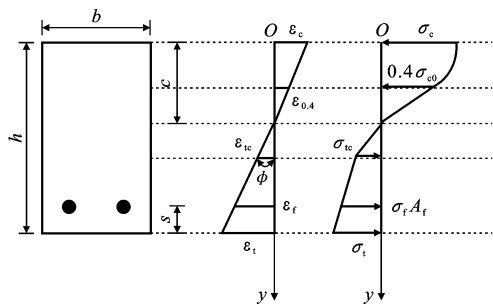


图 6 受压区应力开始非线性分布时应变和应力分布

Fig. 6 Strain and Stress Distributions when Stress of Compression Zone Started to Enter Nonlinear Stage

$$\sigma(y) = \begin{cases} E_0 \epsilon(y) [1.124 - \frac{a_0 E_0}{\sigma_{c0}} \epsilon(y)] & 0 \leq y \leq c - c_1 \\ E_0 \epsilon(y) & c - c_1 < y \leq c \\ \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(y) & c < y \leq c+a \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} [\epsilon(y) - \epsilon_{tc}] & c+a \leq y \leq h \end{cases} \quad (6)$$

式中: c_1 为截面上应变 $\epsilon_{0.4}$ 处所对应的截面高度。

(3)外荷载继续增大,受压区边缘 ECC 进入应力-应变关系的第三阶段,其应力开始随着应变的增大而减小。截面上应变和应力分布如图 7 所示。

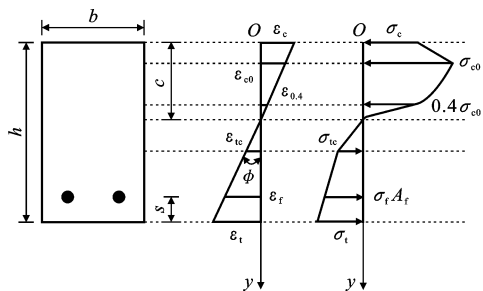


图 7 受压区应力包括三部分时应变和应力分布

Fig. 7 Strain and Stress Distributions when Stress of Compression Zone Contains Three Parts

此时截面上任意一点 ECC 的应力表达式为

$$\sigma(y) = \begin{cases} \sigma_{c0} - \frac{\sigma_{c0}}{\epsilon_{c0}} [\epsilon(y) - \epsilon_{c0}] & 0 \leq y \leq c - c_2 \\ E_0 \epsilon(y) [1.124 - \frac{a_0 E_0}{\sigma_{c0}} \epsilon(y)] & c - c_2 < y \leq c - c_1 \\ E_0 \epsilon(y) & c - c_1 < y \leq c \\ \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(y) & c < y \leq c+a \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} [\epsilon(y) - \epsilon_{tc}] & c+a < y \leq h \end{cases} \quad (7)$$

式中: c_2 为截面上应变 ϵ_{c0} 处所对应的截面高度。

(4) 外荷载继续增大, 受压区边缘的 ECC 进入本构关系第四阶段。截面上应变和应力分布见图 8。

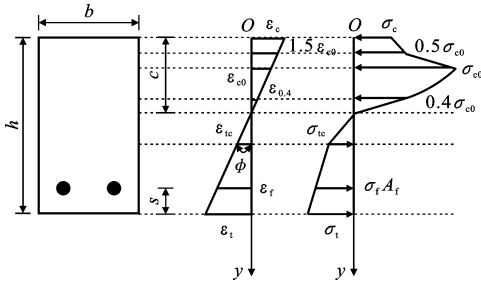


图 8 受压区应力包括四部分时应变和应力分布

Fig. 8 Strain and Stress Distributions when Stress of Compression Zone Contains Four Parts

此时截面上任意一点 ECC 的应力表达式为

$$\sigma(y) = \begin{cases} \frac{\sigma_{c0}}{2b_0 - \epsilon_{c0}} [b_0 - \epsilon(y)] & 0 \leq y \leq c - c_3 \\ \sigma_{c0} - \frac{\sigma_{c0}}{\epsilon_{c0}} [\epsilon(y) - \epsilon_{c0}] & c - c_3 < y \leq c - c_2 \\ E_0 \epsilon(y) [1.124 - \frac{a_0 E_0}{\sigma_{c0}} \epsilon(y)] & c - c_2 < y \leq c - c_1 \\ E_0 \epsilon(y) & c - c_1 < y \leq c \\ \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon(y) & c < y \leq c + a \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} [\epsilon(y) - \epsilon_{tc}] & c + a < y \leq h \end{cases} \quad (8)$$

式中: c_3 为截面上应变 $1.5\epsilon_{c0}$ 处所对应的截面高度。

2.3 破坏阶段

外荷载继续增加, FRP 筋达到极限拉应变或受压区边缘 ECC 达到极限压应变时, 梁将达到极限破坏状态, 发生破坏。

极限破坏状态下, 受压区高度 c 的计算公式为

$$\int_0^c \sigma(y) b dy + \int_c^h \sigma(y) b dy + \sigma_t A_f = 0 \quad (9)$$

将截面破坏类型分为以下 3 类:

(1) FRP 筋达到极限拉应变, 同时受压区边缘 ECC 达到极限压应变, 称为界限破坏。

界限破坏的受压区高度 c_a 为

$$c_a = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} (h - s) \quad (10)$$

(2) FRP 筋达到极限拉应变, 受压区边缘 ECC 没有达到极限压应变, 称为受拉破坏。该破坏类型的表现为 FRP 筋被拉断。此时, 极限弯矩 M_u 为

$$M_u = \int_0^h \sigma(y) b (y - c) dy + f_y A_f (h - s - c) \quad (11)$$

(3) FRP 筋没有达到极限拉应变, 受压区边缘 ECC 达到极限压应变, 称为受压破坏。该破坏类型的表现为受压区边缘 ECC 被压碎。此时, 极限弯矩为

$$M_u = \int_0^h \sigma(y) b (y - c) dy + \sigma_t A_f (h - s - c) \quad (12)$$

为简化极限弯矩的计算, 将受压区 ECC 的应力图形和受拉区 ECC 的应力分别用 2 个等效的矩形应力图形来代替, 如图 9 所示, 其中 x 为有效受压区高度, x_t 为有效受拉区高度, α_1, α_2 为相关参数。

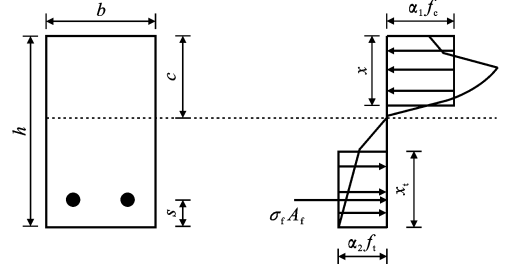


图 9 等效矩形应力图

Fig. 9 Equivalent Rectangular Stress Diagram

等效矩形应力图计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 f_c b x &= \alpha_2 f_t b x_t + \sigma_t A_f \\ M_u &= \alpha_1 f_c b x (c - \frac{x}{2}) + \sigma_t A_f (h - s - c) + \\ &\quad \alpha_2 f_t b x_t (h - c - \frac{x_t}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$x = \beta_1 c, x_t = \beta_2 (h - c)$$

式中: β_1, β_2 为相关参数。

计算公式中的系数可以按下列原则确定: 受压区 ECC 压应力合力的大小和作用点位置不变, 受拉区 ECC 拉应力合力的大小和作用点位置不变。

按照上面的原则进行数值计算, 公式如下

$$\left. \begin{aligned} \int_0^c \sigma(y) b dy &= \alpha_1 f_c b \beta_1 c \\ \int_0^c \sigma(y) y b dy &= \alpha_1 f_c b \beta_1 c^2 (1 - \frac{\beta_1}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \int_c^h \sigma(y) b dy &= \alpha_2 f_t b \beta_2 (h - c) \\ \int_c^h \sigma(y) (y - c) b dy &= \alpha_2 f_t b \beta_2 (h - c)^2 (1 - \frac{\beta_2}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式(14)可推导出参数 β_1, α_1 的计算公式如下

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 2(1 - \frac{\int_0^c \sigma(y) y b dy}{c \int_0^c \sigma(y) b dy}) \\ \alpha_1 &= \frac{\int_0^c \sigma(y) b dy}{f_c \beta_1 b c} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式(15)可推导出参数 β_2, α_2 的计算公式如下

$$\left. \begin{aligned} \beta_2 &= 2 \left(1 - \frac{\int_0^h \sigma(y)(y-c)b dy}{c \int_0^h \sigma(y)b dy} \right) \\ \alpha_2 &= \frac{\int_0^h \sigma(y)b dy}{f_t \beta_2 b (h-c)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

不同抗压强度和配筋率取值下的各参数计算结果如表 1 所示。

表 1 参数计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Parameters

抗压强度/MPa	配筋率/%	α_1	β_1	α_2	β_2
65	1.40	0.62	0.93	0.66	0.87
65	1.80	0.62	0.93	0.63	0.88
65	2.40	0.62	0.93	0.60	0.89
40	1.79	0.62	0.93	0.58	0.90
55	1.79	0.62	0.93	0.61	0.89
75	1.79	0.62	0.93	0.65	0.88

通过对表 1 的数据进行分析,极限状态下对参数取值的建议为: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 分别取 0.62, 0.63, 0.93, 0.88。

3 模型验证

为验证本文提出的 FRP 筋增强 ECC 梁受力全过程计算模型的正确性,采用 MATLAB 对编号为 GRE16 的 GFRP-ECC 试件^[8]进行了数值计算。

3.1 试验简介

承受对称集中荷载 P 作用的 FRP 筋-ECC 梁如图 10 所示。采用的 FRP 筋抗拉强度为 740 MPa,弹性模量为 40 GPa,筋材直径为 12.9 mm。采用的 ECC 抗压强度为 75 MPa,试件的截面尺寸如图 11 所示,其中加载点到支座间的距离为 629 mm。

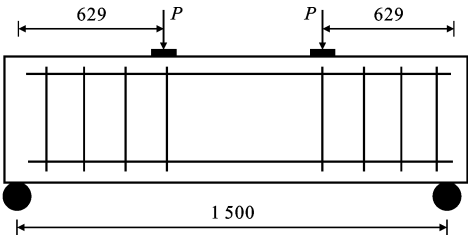


图 10 试验示意图(单位:mm)

Fig. 10 Schematic Diagram of Experiment (Unit:mm)

3.2 试验值与计算值对比

获得的弯矩-挠度计算值与试验值的对比如图 12 所示。由图 12 可以看出,试验值和计算值十分接近,证明了本文提出的理论和计算方法的正确性。

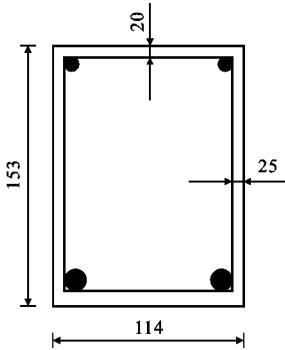


图 11 试件截面(单位:mm)

Fig. 11 Cross Section of Specimen (Unit:mm)

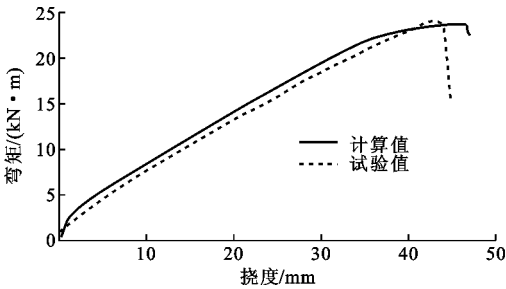


图 12 试件 GRE16 的弯矩-挠度曲线

Fig. 12 Moment-deflection Curve for Specimen GRE16

4 ECC 抗压强度和 FRP 筋配筋率对梁受弯性能影响分析

基于本文提出的模型,采用 MATLAB 对 FRP 筋-ECC 梁进行了参数分析,分析了 ECC 抗压强度和配筋率对梁受弯性能的影响。

4.1 ECC 抗压强度对梁受弯性能影响

本文对配筋率为 0.89%,ECC 抗压强度分别为 40,55,65 MPa 的 FRP 筋-ECC 梁进行了计算分析。基于 MATLAB 分析可知:当 ECC 的抗压强度为 40 MPa 时,梁破坏类型为受压破坏;随着抗压强度的增加,当 ECC 的抗压强度为 55 MPa 和 65 MPa 时,梁的破坏类型变为受拉破坏。这说明配筋率为 0.89%时,随着 ECC 抗压强度的增加,FRP 筋-ECC 梁的破坏模式由 ECC 的受压破坏转变为 FRP 筋的受拉破坏,其弯矩-曲率 ($M-\phi$) 关系曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,在弹性阶段,ECC 抗压强度对 FRP 筋-ECC 梁弯矩-曲率曲线的斜率有一定影响,ECC 抗压强度越大,斜率越大。这说明当 FRP 筋配筋率相同时,ECC 的弹性模量对 FRP 筋-ECC 梁的初始刚度有较为明显的影响。随着 ECC 单轴抗压强度的增加,FRP 筋-ECC 梁的初始刚度逐渐

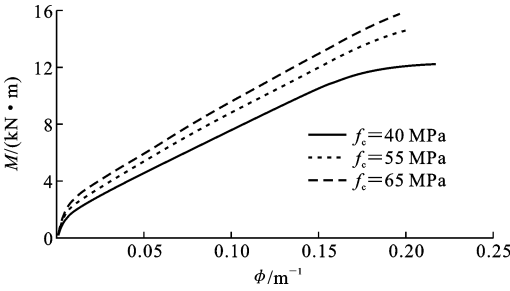


图 13 不同 ECC 抗压强度的梁弯矩-曲率关系
Fig. 13 Moment-curvature Relationship for Beams with Different Compressive Strengths of ECC

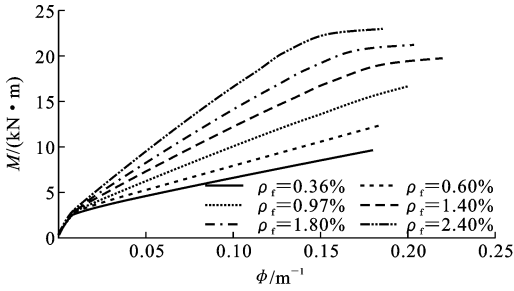
增大。

不同强度 ECC 梁的开裂荷载不同,随着 ECC 抗压强度的增加,开裂荷载逐渐增大。ECC 开裂后,弯矩随着曲率的增大继续增加,但 ECC 抗压强度对梁弯矩-曲率曲线的斜率影响变小。这是由于 ECC 开裂后,梁的刚度由 ECC 抗压强度和 FRP 筋配筋率共同决定,而各试件的 FRP 筋配筋率没有差别。当梁破坏时,FRP 筋-ECC 梁的极限承载力随着 ECC 抗压强度的增加而逐渐增大。

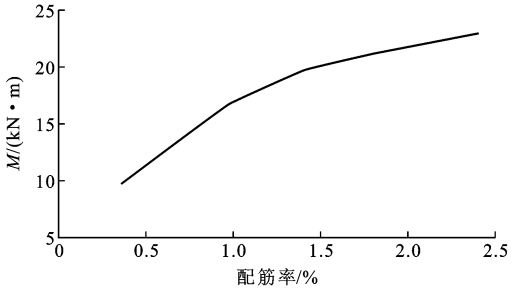
4.2 配筋率对梁受弯性能的影响

为分析配筋率对 FRP 筋-ECC 梁受弯性能的影响,本文对抗压强度为 65 MPa,不同配筋率的 FRP-ECC 梁进行计算分析。基于 MATLAB 分析可知:当配筋率 ρ_f 为 0.36%~0.97%时,梁破坏类型为受拉区 FRP 筋的拉断破坏;随着配筋率的增加,当配筋率为 1.4%~2.4%时,梁的破坏类型变为受压区 ECC 的受压破坏。这说明当 ECC 抗压强度一定时,随着 FRP 筋配筋率的增加,FRP 筋-ECC 梁的破坏模式由 FRP 筋的受拉破坏转变为 ECC 的受压破坏,其弯矩-曲率关系曲线如图 14 所示。

由图 14(a)可知,当 FRP 筋-ECC 梁处于弹性阶段时,各梁构件的弯矩-曲率关系曲线呈线性变化,而且配筋率对 FRP 筋-ECC 梁初始刚度及开裂弯矩的影响很小,几乎可以忽略不计。这是由于弹性阶段,FRP 筋和 ECC 的应变均较小,梁正截面开裂弯矩主要由 ECC 的初裂拉应变决定。当 FRP 筋-ECC 梁进入带裂缝工作阶段后,配筋率对梁弯矩-曲率关系曲线的影响十分明显。随着配筋率的增加,弯矩-曲率关系曲线的斜率逐渐增大,梁的刚度也明显增大。此外,对比不同破坏类型的试件的曲线可以看出,受压破坏的梁配筋率越大,极限曲率越小。由图 14(b)可知,梁的极限承载力随着配筋率的增加而逐渐增大。然而,承载力增大速率随着



(a) 不同配筋率各试件的弯矩-曲率关系



(b) 配筋率-极限弯矩的关系

图 14 配筋率对试件弯矩-曲率关系的影响

Fig. 14 Effects of Reinforcement Ratio on Moment-curvature Relationship for Specimens

配筋率的增加而逐步降低。

5 延性分析

5.1 延性系数的定义

综合考虑梁的承载能力与变形能力,参考文献[15]中 FRP 筋混凝土结构的延性指标,定义 FRP 筋-ECC 梁的延性系数 Z 为

$$Z = \frac{M_u \phi_u}{M_d \phi_d} \tag{18}$$

式中: M_d 为设计状态下的弯矩; ϕ_u 为极限曲率; ϕ_d 为设计状态下的曲率。

对于受拉破坏的梁,当 FRP 筋拉应变达到极限拉应变的 75%时为试件的设计状态。对于受压破坏的梁,设计状态定义为:受压区边缘 ECC 的压应变达到极限压应变的 75%。

5.2 计算结果

基于本文提出的模型,对不同 ECC 抗压强度和不同配筋率的 FRP 筋-ECC 梁的延性系数进行了数值计算。根据计算结果,分析了不同破坏模式下 ECC 抗压强度和配筋率对梁延性的影响。

根据破坏类型不同,将试件分为 A,B 两组。试件编号见表 1,其中,A 表示受拉破坏,B 表示受压破坏,字母后的数字为抗压强度,抗压强度后的数字代表配筋率。各试件的配筋率与延性系数如表 2 及图 15 所示。

表 2 FRP 筋-ECC 梁的延性系数
Tab. 2 Ductility Index of FRP-ECC Beams

试件编号	ECC 抗压强度/MPa	配筋率/%	延性系数	破坏模式
A55-0.89	55	0.89	1.628	FRP 筋受拉破坏
A65-0.89	65	0.89	1.625	FRP 筋受拉破坏
A75-0.89	75	0.89	1.616	FRP 筋受拉破坏
A65-0.36	65	0.36	1.528	FRP 筋受拉破坏
A65-0.60	65	0.60	1.566	FRP 筋受拉破坏
A65-0.97	65	0.97	1.642	FRP 筋受拉破坏
B40-1.79	40	1.79	1.192	ECC 受压破坏
B55-1.79	55	1.79	1.202	ECC 受压破坏
B65-1.79	65	1.79	1.205	ECC 受压破坏
B75-1.79	75	1.79	1.209	ECC 受压破坏
B65-1.40	65	1.40	1.210	ECC 受压破坏

筋率的增大,梁的延性系数逐渐增加。ECC 抗压强度相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 ECC 受压破坏时,随着 FRP 筋配筋率的增大,梁的延性系数略有降低。这是由于梁发生 ECC 受压破坏时,受拉区 FRP 筋仍未达到其极限抗拉强度,随着配筋率的提高,单根 FRP 筋承担的拉力减小,由于 FRP 筋的线弹性特征,单根 FRP 筋的变形减小,从而随着配筋率的增加,梁的延性系数略有降低。

6 结 语

(1)配筋率相同时,随着 ECC 抗压强度增加,FRP 筋-ECC 梁的初裂荷载及极限承载力均增大,梁的破坏模式逐步由 ECC 受压破坏转变为 FRP 筋的受拉破坏。

(2)配筋率相同时,ECC 抗压强度对梁的初始刚度有一定影响,而对开裂后的短期刚度影响较小。

(3)ECC 抗压强度相同时,随着配筋率的增加,梁的极限承载力和开裂后的短期刚度逐渐增大,梁的破坏模式逐渐由 FRP 筋的受拉破坏转变为 ECC 的受压破坏。

(4)ECC 抗压强度相同时,配筋率对初裂荷载及梁的初始刚度影响较小。

(5)配筋率相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 FRP 筋受拉破坏时,随着 ECC 抗压强度的提高,梁的延性系数略有下降。配筋率相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 ECC 受压破坏时,随着 ECC 抗压强度的提高,梁的延性系数有所上升。

(6)ECC 抗压强度相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 FRP 筋受拉破坏时,随着 FRP 筋配筋率的增大,梁的延性系数逐渐增加。ECC 抗压强度相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 ECC 受压破坏时,随着 FRP 筋配筋率的增大,梁的延性系数略有降低。

参考文献:
References:

[1] 刘 翠. FRP 筋力学性能及预应力 FRP 混凝土梁受弯承载力研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
LIU Cui. Study on the Performance of FRP Tendons and Flexural Behavior for Prestressed Concrete Beams with CFRP[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.

[2] DENVID L, HOAT J P. Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams[J]. Engineering Structures, 2010, 32(12): 3857-3865.

[3] 欧进萍,王 勃,何 政. CFRP 加筋混凝土梁的力学

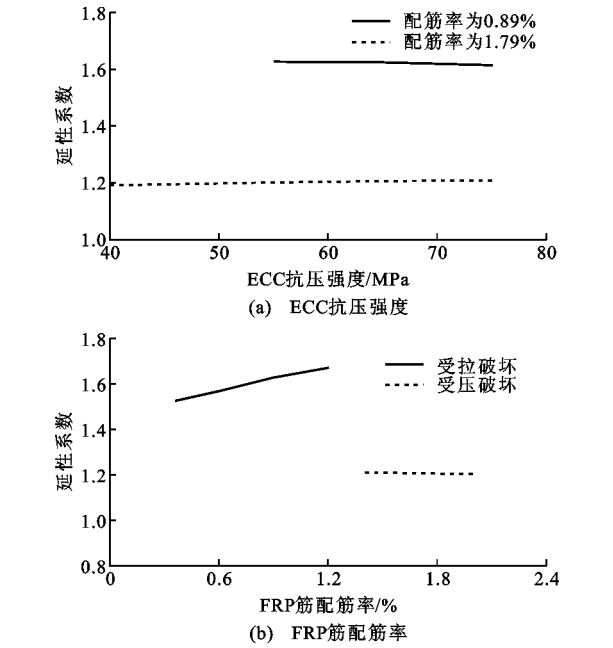


图 15 延性系数影响因素分析
Fig. 15 Analysis on Influence Factors of Ductility Index

由图 15(a)可知,配筋率相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 FRP 筋受拉破坏时(如配筋率 0.89%),随着 ECC 抗压强度的提高,梁的延性系数略有下降。此时,ECC 的强度均未充分发挥,故对其延性影响较小。配筋率相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 ECC 受压破坏(如配筋率 1.79%)时,随着 ECC 抗压强度的提高,梁的延性系数有所上升。这是由于破坏时 FRP 筋未达到极限抗拉强度,梁发生 ECC 受压破坏,梁的延性系数取决于 ECC 的抗压强度,从而随着 ECC 抗压强度的提高,梁的延性系数有所增大。

由图 15(b)可知,ECC 抗压强度相同的 FRP 筋-ECC 梁发生 FRP 筋受拉破坏时,随着 FRP 筋配

- 性能试验与分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 8-12, 31.
- OU Jin-ping, WANG Bo, HE Zheng. Mechanical Behavior of Concrete Beams Reinforced with CFRP Bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 8-12, 31.
- [4] 朱虹, 董志强, 吴刚, 等. FRP 筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 44-53.
- ZHU Hong, DONG Zhi-qiang, WU Gang, et al. Experimental Study and Theoretical Calculation on the Flexural Stiffness of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 44-53.
- [5] ABDALLA H A. Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars[J]. Composite Structures, 2002, 56(1): 63-71.
- [6] LI V C. On Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [7] LI V C, MISHRA D K, WU H C. Matrix Design for Pseudo-strain-hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites[J]. Materials and Structures, 1995, 28: 586-595.
- [8] FISCHER G, LI V C. Deformation Behavior of Fiber-reinforced Polymer Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members Under Reversed Cyclic Loading Conditions[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(1): 25-35.
- [9] HUAN Y J, WEI W J, JIN Y. Experimental Study on FRP-reinforced PP ECC Beams Under Reverse Cyclic Loading[J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(4): 447-456.
- [10] LI V C, WANG S, WU C. Tensile Strain-hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [11] LI H D, XU S L, LEUNG C K Y. Tensile and Flexural Properties of Ultra High Toughness Cementitious Composite[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2009, 24(4): 677-683.
- [12] PAEGLE I, FISCHER G. Phenomenological Interpretation of the Shear Behavior of Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 213-225.
- [13] LI V C, WANG S X. Flexural Behaviors of Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP) Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(1): 11-21.
- [14] YUAN F, PAN J L, LEUNG C K Y. Flexural Behaviors of ECC and Concrete/ECC Composite Beams Reinforced with Basalt Fiber-reinforced Polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(5): 591-602.
- [15] 何佶轩. FRP 增强 ECC 梁及 ECC/混凝土组合梁抗剪性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- HE Ji-xuan. Study on Shear Behaviors of FRP Reinforced ECC Beam and ECC/Concrete Composite Beam[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [16] 王必元. ECC 力学性能及其增强钢筋/FRP 筋-混凝土复合梁受弯性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- WANG Bi-yuan. Study on ECC Mechanical Properties and Bending Performance of Concrete Composite Beams Reinforced with Steel Bars or FRP Bars[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [17] CAI J M, PAN J L, ZHOU X M. Flexural Behavior of Basalt FRP Reinforced ECC and Concrete Beams[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 423-430.
- [18] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical Behavior of Fiber-reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1): 04014111.